

SSPS の環境・安全性評価

長山 博幸[†] 吉田 裕之[‡] 齊藤 由佳[‡] 森 雅裕[‡]

[†]三菱総合研究所 〒100-8141 東京都千代田区大手町 2-3-6

[‡]宇宙航空研究開発機構 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

E-mail: [†] nagayama@mri.co.jp [‡] { hiroyuki.yoshida, saitoh.yuka , mori.masahiro }@jaxa.jp

あらまし 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、2030 年頃に他のエネルギー源と競争し得る低コストで商用 SSPS を実現させることを目指して、1GW 級マイクロ波方式 SSPS (M-SSPS) 及びレーザー方式 SSPS (L-SSPS) の研究開発を実施している。環境・安全性に関する検討としては、SSPS が他に及ぼす影響、及び SSPS が他から受ける影響に関してその原因、頻度、及び程度に関して検討を行っている。本稿では、SSPS に関する環境・安全性評価の結果の概要を説明する。

キーワード 環境影響評価、安全性、宇宙太陽光利用システム、ハザード解析、リスク分析

Environmental & safety evaluation of JAXA SSPS

Hiroyuki NAGAYAMA[†] Hiroyuki YOSHIDA[‡] Yuka SAITO[‡] and Masahiro MORI[‡]

[†] Mitsubishi Research Institute, Inc. 2-3-6 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8141 Japan

[‡] Japan Aerospace Exploration Agency 7-44-1 Jindaiji Higashimachi, Chofu-City, Tokyo, 182-8522 Japan

E-mail: [†] nagayama@mri.co.jp [‡] { hiroyuki.yoshida, saitoh.yuka , mori.masahiro }@jaxa.jp

Abstract Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has been studying on Space Solar Power Systems (SSPS) since FY1998. Our final object is to operate a commercial plant which generated power is the same as current power cost. In this study, SSPS has been evaluated from environmental and safety aspects. This paper shows a summary of studies on these evaluations.

Keyword Environment assessment, safety, SSPS, hazard analysis, risk analysis

1. はじめに

宇宙太陽光利用システム (SSPS: Space Solar Power Systems) は宇宙空間で太陽光を収集し、マイクロ波、またはレーザーの形で地上に輸送し、地上で電力や水素を製造するエネルギーシステムである。太陽光を利用するため、原理的に CO₂ の発生がないこと、宇宙で太陽光を収集するため地上と異なり変動が少ないことが特徴となっている。しかしながら、地球外のエネルギーを人工的に地上に取り入れること、エネルギー輸送にマイクロ波やレーザーを利用すること、その規模が従来の発電システムに比べ大規模になること、宇宙空間で大規模な人工物を構築することなど未知の要素が多く含んでいる。そのため、SSPS を実現するためには、安全面、及び環境への影響を事前に評価することが重要である。JAXA ではこのような考えに基づき、検討当初から SSPS の環境・安全性を評価するワーキンググループを設置し、検討を行ってきた。

本稿では、M-SSPS、及び L-SSPS に関して環境・安全性の面でこれまで明らかになった点、さらに検討が必要な点についての概要を示す。

2. 評価方法

SSPS の環境・安全性評価として、図 1 に示す分類に分け検討を行った。M-SSPS、及び L-SSPS に共通する事象に関しては、M-SSPS を代表として検討を行った。

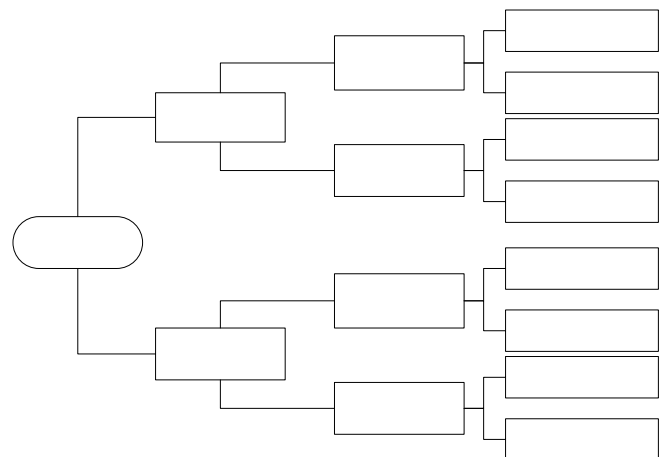


図 1 SSPS の環境・安全性評価の分類

尚、運用終了後の処置については重要な問題であるとの認識はあるものの、まだ結論が出ておらず今後の課題とする。

3. M-SSPS の環境・安全性評価

3.1. 構築フェーズ

構築フェーズでは構築中の SSPS が他に及ぼす影響だけでなく、SSPS を構築するためのインフラによる影響が含まれる。

3.1.1. M-SSPS が及ぼす影響

(1) RLV 打ち上げ・帰還の失敗

JAXA 輸送系 WG で検討している RLV の機体損失確率は 10^{-4} 以下を想定している。

(2) RLV 排ガスの大気・電離層への影響

輸送系 WG で検討を行っている RLV は液酸液水燃料を想定しているため、排出される多量の水、及び水素により電離層に穴が開く可能性があり、通信への影響が懸念される。

(3) OTV による輸送中の機体喪失

OTV の機体喪失確率に関してはまだ設定されていない。

(4) OTV 推進剤の影響

NASA リファレンスシステムの検討では、イオンプラズマから放出される多量のプラズマが磁気圏に捕捉され擾乱を引き起こすと予測している。この結果バンアレン帯に高エネルギーのプロトン粒子が多量に捕捉されることで、放射線量が数倍増加することが予測されている。

(5) SSPS 構築によるデブリの発生

SSPS の構築方法について詳細な検討がまだ行われていないため、どの程度のデブリが発生するか予測することができないが、設計要求としてデブリ発生を抑えることが重要である。

(6) レクテナ構築の環境への影響

レクテナ建設には大規模な工事が伴うため、設置する場所に寄らず環境アセスメントを実施する必要があり、その結果により環境保全のための方策を採らなければならない。

3.1.2. M-SSPS が受ける影響

(1) デブリの衝突

GEO でのデブリ密度は 10cm サイズで $3 \times 10^{-10}/\text{km}^3$ 、1cm サイズで $10^{-9}/\text{km}^3$ 、1mm サイズで $5 \times 10^{-6}/\text{km}^3$ 程度である。微小なデブリとの衝突は避けられないと考えられ、その対処方法を検討する必要がある。

3.2. 運用フェーズ

3.2.1. M-SSPS が及ぼす影響

(1) 宇宙セグメントの宇宙環境に与える影響

宇宙セグメントは軌道位置、及び姿勢を保持するため

にイオンエンジン等を搭載している。放出されるイオンの宇宙環境、及び宇宙セグメント自体に及ぼす影響について検討する必要がある。

(2) 宇宙セグメントの他宇宙機に与える影響

宇宙セグメントは静止軌道に設置される。このため通信放送衛星、及び気象衛星などに対してどのような影響を与えるか検討する必要がある。

(3) 宇宙セグメントからのデブリ発生

宇宙セグメントは軌道上メンテナンスを基本としているため、デブリ発生の危険性がある。設計要求としてデブリ発生のないようにしなければならない。

(4) マイクロ波ビームを通過する他宇宙機に与える影響

現在想定しているマイクロ波ビームの中心部の強度は $100\text{mW}/\text{cm}^2$ で、電界強度で表すと約 $600\text{V}/\text{m}$ となる。一方宇宙機の搭載機器に対する電界・放射感受性限界規格(MIL-STD-461C)によると $5\text{V}/\text{m}$ となっている。宇宙機がビーム内を通過する確率は少ないもののゼロではなく、かつ能動的にビームを避けることは困難であることから何らかの対策を施す必要がある。

(5) マイクロ波の電波天文への影響

送電周波数として 2.45GHz 帯と 5.8GHz 帯の高調波と電波天文バンドとの関係を調べた結果、2.45GHz 帯では第 2, 9, 13, 18 次高調波が影響を与える可能性があるが、5.8GHz 対の場合、第 15 次高調波(86~92GHz)までは干渉がない。

(6) マイクロ波の電離層への影響

NASA リファレンスシステムでは電離層へ影響を与えないよう電力密度を $23\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下に設定された。JAXA モデルでは $100\text{mW}/\text{cm}^2$ であり、この影響について検討を要する。

(7) マイクロ波を通過する航空機への影響

航空機(固定翼)に対しては FAA の notice N8110.67 が 1998 年 4 月に発行され、1999 年 4 月にキャンセルされた。2006 年 1 月に新しい規則が提案されている。それによると 2-4GHz 帯でピーク $4,500\text{V}/\text{m}$ 、平均 $490\text{V}/\text{m}$ 、4-6GHz 帯でピーク $7,200\text{V}/\text{m}$ 、平均 $300\text{V}/\text{m}$ としている。航空機がビームを通過する時間はわずかであることからピーク値で比較するとこの提案の規則は満たしているといえる。

(8) マイクロ波ビーム中を飛来する生物への影響

NASA リファレンスシステムではミツバチや鳥に対してマイクロ波を照射する実験が行われ、重大な効果が見られなかったと報告されている。今後研究を進めていく必要があるが、飛来する生物は自由にビーム外に出ることが可能なため、なんらかの異常に気が付けばビーム外に退避することはできることから影響は少ないと考えられる。

(9) マイクロ波の人体への影響

レクテナの周辺は立ち入り禁止区域を定めて一般人の立ち入りは禁止される。レクテナ端でのマイクロ波は $1\text{mW}/\text{cm}^2$ と設定されているため、立ち入り禁止区域外のマイクロ波は防護指針より低い値となる。

(10) マイクロ波の生物への影響

マイクロ波の安全性評価は熱作用を目安としており、動物実験よりその限界値が評価されている。しかしながらこの値は主としてラットを中心に研究が行われているため、変温動物、昆虫などの影響については未知の部分が多い。

(11) マイクロ波の通信機器への影響

JAXA 周波数干渉問題検討委員会での検討結果では、マイクロ波ビームの高調波に関してはフィルタや位相器の工夫、あるいは運用によりマイクロ波中継システム、レーダ、宇宙-地上間通信等と共存は可能であると結論付けている。しかしながらフィルタの挿入できない基本波の干渉を考慮した場合、現在よりもサイドローブを低減させる必要があると指摘している。

(12) マイクロ波の医療機器への影響

医療機器の電気的安全性については IEC-60601-1-2 で要求される試験レベルでは、生命維持機器で $10\text{V}/\text{m}$ 、非生命維持機器で $3\text{V}/\text{m}$ である。レクテナの周辺では約 $6\text{V}/\text{m}$ であるが、レクテナの設置場所を考慮すると病院等の医療機器には影響はないと考えられる。

(13) レクテナからの再放射マイクロ波の影響

受電アンテナから入力した電波はダイオードで整流されるが一部高調波が発生し、アンテナなどから再放射される可能性がある。しかしながらその測定方法は高電力の送信波の下で行う必要があり、かなり困難と考えられ、検討を要する。

(14) レクテナからの排熱の影響

レクテナの効率を考慮すると 1GW の SSPS の場合、約 400MW のエネルギーが放出される。この値は大きい、エネルギー密度は日射より小さいため問題はないと考えられる。

(15) レクテナの環境への影響

レクテナは大型構造物であるため、構造によっては日射をさえぎることで環境に悪影響を及ぼす可能性がある。また、海上に設置した場合は潮流を変化させる可能性もある。ただこれらの影響は事前にシミュレーションにより評価することは可能である。

3.2.2. M-SSPS が受ける影響

(1) 宇宙セグメントへのデブリ衝突

M-SSPS は展開すると数 km 規模の構造体になるためデブリとの衝突は避けられない。重要部分は防御する手段を取り、そのほかの部分は定期メンテナンスで対

応するよう設計する。

(2) 宇宙環境が宇宙セグメントに与える影響

太陽電池に対する宇宙環境の影響は他の事例より影響が推定可能であるが、それ以外はどのような部材を利用するか検討中であるため明確になっていない。

(3) 電離層によるマイクロ波ビームの歪み

マイクロ波が電離層に影響を及ぼし、ビームを歪めることが指摘されているが、今後検討を要する。

(4) マイクロ波ビーム中を飛行する航空機の影響

マイクロ波ビーム中を航空機が通過すると機体とマイクロ波ビームが干渉しビームを歪めるとの指摘があるが、今後検討を要する。

(5) 雨の影響

マイクロ波送電に使う周波数帯は降雨に対する減衰は少ないものの時間 $50\text{mm} \sim 100\text{mm}$ を超える豪雨の場合、無視することが出来ないと指摘されている。この点は検討を要する。

(6) 通信機器からの影響

レクテナからのパイロット信号によりマイクロ波は制御されている。パイロット信号が他の通信機器により妨害されないよう対策を講じる必要がある。

(7) 自然現象のレクテナへの影響

台風、地震、落雷、塩害等の自然現象のレクテナへの影響を考慮し、設計する必要がある。

(8) 生物によるレクテナへの影響

レクテナが発する熱に誘引され鳥の営巣、昆虫の繁殖、土壌中の微生物のライフサイクルの変化などの影響が考えられるが、今後検討を要する。

(9) テロによる影響

テロ活動によって M-SSPS を暴走させ、レクテナ以外の場所に電力を集中することは原理的に出来ないが、フォーメーションフライトをしている主ミラーの制御を乱し、宇宙セグメントを破壊される可能性は否定できない。その対策を設計に反映しておく必要がある。

4. L-SSPS の環境・安全性評価

4.1. 構築フェーズ

L-SSPS の構築は、M-SSPS のように軌道間輸送時に劣化する部材が少ないと考えられることより、M-SSPS の輸送シナリオとは若干異なると思われるが、L-SSPS としての詳細な検討がまだ行われていないため、M-SSPS と同様とする。

4.2. 運用フェーズ

4.2.1. L-SSPS が及ぼす影響

(1) 宇宙セグメントの宇宙環境に与える影響

M-SSPS と同様と考えられる。

(2) 宇宙セグメントの他宇宙機に与える影響

M-SSPS と同様と考えられる。

(3) 宇宙セグメントからのデブリ発生

M-SSPS 同様、設計要求としてデブリを発生しないようにすることが重要である。

(4) レーザービームを通過する他宇宙機に与える影響

ビーム内を通過する確率は低いだがゼロではない。ビーム内のエネルギー密度は太陽光の約 1.5 倍であり、ビームを通過する時間は 0.01 秒程度であることから宇宙器の構造体には問題はないと考えられる。ただし、更に確率は低い光学センサに入射した場合の影響については考慮する必要がある。

(5) レーザーの天文への影響

未検討事項

(6) レーザーの大気への影響

大気の揺らぎによるビーム間の位相の影響などについては不明な点が多い。

(7) レーザービームを通過する航空機への影響

ビーム内のエネルギー密度は太陽光の 1.3 倍程度であり、ビームを横切る時間は 0.4 秒程度であることから、航空機の構造体に対する影響はないと考えられる。

(8) レーザービーム中を飛来する生物への影響

未検討事項

(9) レーザーの人体への影響

レーザーの安全管理基準については旧労働省からの通達、JIS C6802 があり、この基準より安全なレベルにある最大許容露光量は波長 1.062 μm で 12.74W/m² である。これは想定しているレーザー光 1.3kW/m² と比較すると 1/100 である。よって安全区域を設定し直接目に入らないようにするとともに、散乱光に関しても配慮する必要がある。

(10) レーザーの生物への影響

未検討事項

(11) レーザーの反射光の影響

未検討項目

(12) 受光施設からの排熱の影響

未検討項目

(13) 受光施設の影響

大きさにもよるが、M-SSPS のレクテナに準じる。

4.2.2. L-SSPS が受ける影響

(1) 宇宙セグメントへのデブリ衝突

デブリの密度に関しては M-SSPS で示した値と同様である。M-SSPS と比較すると宇宙セグメントの変換効率が高く送電アンテナが不要なため、M-SSPS よりデブリとの衝突確率は小さくなる。

(2) 宇宙環境が宇宙セグメントに与える影響

ミラーの反射率、波長選択膜、及びレーザー媒質の耐久性などが考えられるが、詳細は検討が必要である。

(3) 大気によるレーザービームへの影響

未検討事項。JAXA 角田宇宙センターにて実験を行う予定。

(4) レーザービーム中を飛行する航空機の影響

受光面が直径 100m 程度のため、航空機により一時的にレーザーが遮断される可能性がある。その際の水素製造工場の対応策を検討する必要がある。

(5) 雲・雨の影響

未検討事項。

(6) 自然現象の受光施設への影響

これについてはレクテナと同様、台風、地震、落雷、塩害等の影響を考慮し、設計する必要がある。

(7) 生物による受光施設への影響

未検討項目

(8) テロによる影響

M-SSPS と同様、L-SSPS も設計された強度以上のレーザーを出力することも、決められた受光面以外に照射することは原理的に出来ない。

5. まとめ

SSPS の構築、及び運用時に他に影響を及ぼす事象、逆に SSPS が影響を受ける事象についてどの程度分かっているかを示した。本作業は SSPS の設計が進むにつれ、より詳細に検討を行う必要があり、終わりのない作業といえよう。今回明確になった不明点、及びいまだに不明な点など今後調査を進める必要がある。

謝 辞

本稿は JAXA_SSPS 検討委員会に所属している「環境・安全性評価 WG」の活動の中で行われた検討成果の一部をまとめたものである。検討に当たっては、同 WG メンバーの方に協力をいただいた。ここに謝意を表す。

文 献

- [1] 平成 18 宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書「宇宙エネルギー利用システム総合研究」、株式会社三菱総合研究所
- [2] 平成 17 宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書「宇宙エネルギー利用システム総合研究」、株式会社三菱総合研究所
- [3] 平成 16 宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書「宇宙エネルギー利用システム総合研究」、株式会社三菱総合研究所
- [4] High-Intensity Radiated Fields (HIRF) Protection for Aircraft Electrical and Electronic Systems; Proposed Rule, Department of Transportation, Feb. 1, 2006
- [5] 電波の医用機器等への影響に関する調査研究報告書、社団法人電波産業会、平成 14 年 3 月