

การผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากโรงไฟฟ้าสถานีอวกาศ (Space-based Solar Power Station: SSPS)

โดย นาย อากร สร้อยแก้ว

นักวิทยาศาสตร์ปฏิบัติการ กลุ่มวิชาการ กองพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์



(รูปภาพ: The American Society of Mechanical Engineers) <https://www.asme.org/topics-resources/content/space-based-solar-power-offers-out-of-this-world-challenges>

1. แนวคิดและความเป็นมา

จากความผันผวนของสถานการณ์พลังงานโลก ความต้องการใช้พลังงานที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกปีในแต่ละภูมิภาคของโลก รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้ในปัจจุบัน หลายประเทศได้ส่งเสริมการพัฒนาและประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนอย่างจริงจัง ในเป้าหมายที่จะลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอน และการก้าวไปสู่การมีส่วนร่วมในสังคมสีเขียว ซึ่งคาดการณ์ว่าความต้องการใช้พลังงานทั่วโลกน่าจะเพิ่มขึ้นอย่างน้อยสองเท่าภายในระยะเวลา 30 ปี ควบคู่ไปกับปัญหาการขาดแคลนที่ดินใช้ประโยชน์ อาหารและทรัพยากรในบางพื้นที่

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นหนึ่งในผู้เล่นสำคัญของตลาดด้านพลังงานทดแทน ได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างก้าวกระโดด ทั้งทางด้านเทคโนโลยีที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจาก 15% มาอยู่ที่ 19-22% และด้านราคา โดย LCOE ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยได้ปรับตัวลดลงจาก \$0.38 USD/kWh เหลือ \$0.07 USD/kWh นอกจากนี้ การแข่งขันในตลาดพลังงาน รวมถึงการมีส่วนร่วมจากทุกภาคส่วน ก็ยังช่วยผลักดันอุตสาหกรรมระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีราคาที่ลดต่ำลงไม่แตกต่างจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของพลังงานแสงอาทิตย์โลกได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เท่าในปี ค.ศ. 2021 (950 GW) เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2010 (41.4 GW)

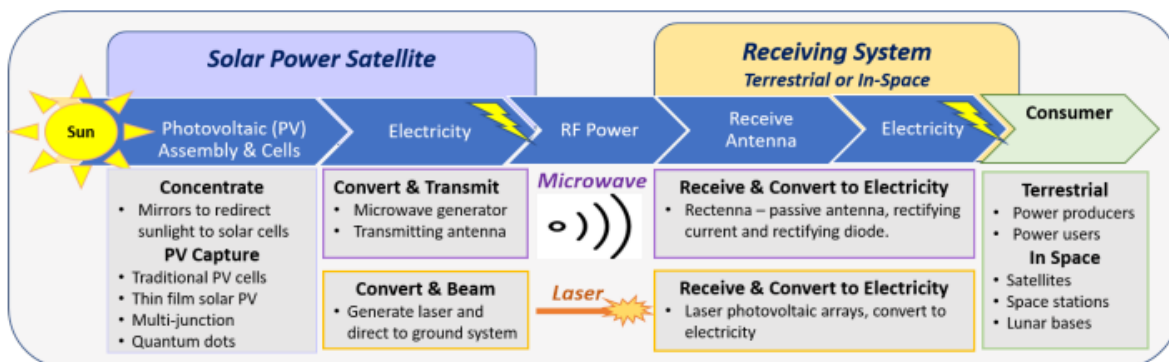
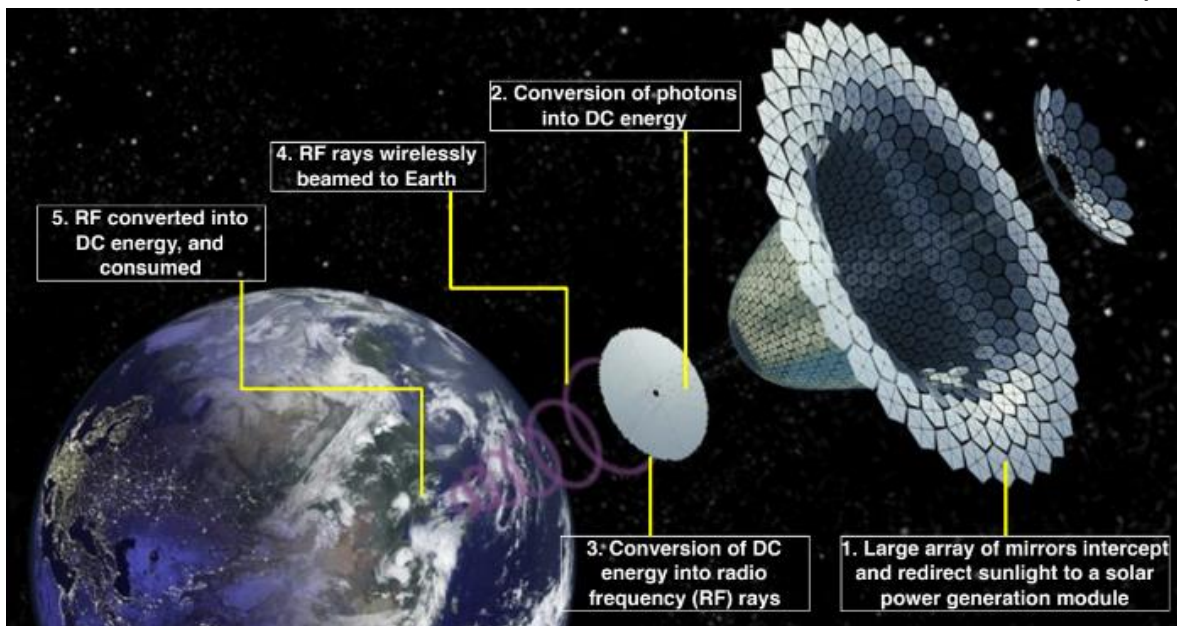
อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น ความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศโลกที่ส่งผลต่อปริมาณแสงอาทิตย์และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ปัญหาการใช้ประโยชน์เชิงพื้นที่ในบริเวณที่มีพื้นที่ผิวดินจำกัด ความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามการเติบโตของประชากรโลก รวมถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในเชิงภูมิรัฐศาสตร์ (Geopolitics) จากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งในด้านของการผลิตไฟฟ้าสำหรับภูมิภาคและสายส่งไฟฟ้า อาจเป็นอุปสรรคที่ส่งผลต่อปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในอนาคต ซึ่งการใช้พลังงานทดแทนที่มีอยู่ในรูปแบบปัจจุบัน อาจไม่สามารถตอบโจทย์ได้ทั้งหมด

แนวคิดการพัฒนา ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากสถานีอวกาศ (Space-based Solar Power Station: SSPS) จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจจากหลายประเทศในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยมีการคาดหวังถึงการเข้ามามีบทบาทของการผลิตไฟฟ้าเพื่ออนาคต ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากสถานีอวกาศถูกเสนอแนวคิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1968 (หนึ่งปีก่อนที่ภารกิจจรวด 11 จะสามารถลงจอดบนพื้นผิวดวงจันทร์) โดย ดร. Peter Glaser นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรด้านอวกาศชาวสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้เสนอแนวคิดการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากดาวเทียมในวงโคจรและส่งพลังงานที่ผลิตได้กลับมายังพื้นผิวโลก โดยระบบ SSPS จะแปลงพลังงานแสงอาทิตย์จากอวกาศ จากดาวเทียมหรือสถานีอวกาศที่อยู่ในวงโคจรพ้องคาบโลก (Geosynchronous orbit: GSO) หรือวงโคจรประจำที่/วงโคจรค้างฟ้า (Geostationary orbit: GEO) มาเป็นพลังงานไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปเปิดระบบรังสีไมโครเวฟหรือเครื่องยิงเลเซอร์เพื่อส่งพลังงานกลับมายังสถานีรับพลังงานภาคพื้นโลก (Rectifying antenna: Rectenna) ซึ่งจะเชื่อมต่อกับระบบแปลงสัญญาณพลังงานและระบบสายส่งไฟฟ้าต่อไป

ปัจจุบันหลายประเทศได้เริ่มให้ความสนใจและความสำคัญต่อการพัฒนา SSPS อย่างจริงจัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศจีนที่ประกาศจะเริ่มดำเนินการติดตั้งระบบ SSPS ขนาด 1 MW ที่ระดับความสูง 400

กม. ในระยะวงโคจรระดับต่ำ ระยะแรกในปี ค.ศ. 2028 ซึ่งเร็วกว่ากำหนดเดิมสองปี รวมถึงสหราชอาณาจักรที่กำลังพิจารณาข้อเสนองบประมาณจำนวน 16,000 ล้านปอนด์ ในการก่อสร้างระบบ SSPS ขนาด 2 GW ในปี ค.ศ. 2040 ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ SSPS ประมาณ 1.7 กม. และสถานีรับสัญญาณแบบ off-shore ขนาด 6.7 x 13 กม. โดยจะดำเนินโครงการต้นแบบและโครงการนำร่องก่อนหลายโครงการก่อนที่จะมีการสร้างสถานี SSPS นี้ นอกจากนี้ สหรัฐอเมริกาก็ได้วิจัยและพัฒนาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเบาประสิทธิภาพสูงแบบ Sandwich เพื่อใช้สำหรับภารกิจก่อสร้าง SSPS โดยเฉพาะ รวมไปถึงการทดสอบระบบเสาส่งสัญญาณบนเครื่องบิน X37B และองค์การ NASA รวมถึงกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา ได้เริ่มให้ความสนใจอย่างจริงจังในหลักการและความเป็นไปได้ของระบบ SSPS ในขณะที่ประเทศญี่ปุ่นได้กำหนดแผนการก่อสร้าง SSPS เป็นเป้าหมายระดับประเทศและได้ดำเนินการออกแบบระบบนำร่องของ SSPS ไว้แล้ว

2. รายละเอียดและส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากสถานีอวกาศ (SSPS)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากสถานีอวกาศ (SSPS) (ที่มา Proctor *et al.* 2016 และ Vedda and Jones, 2020)

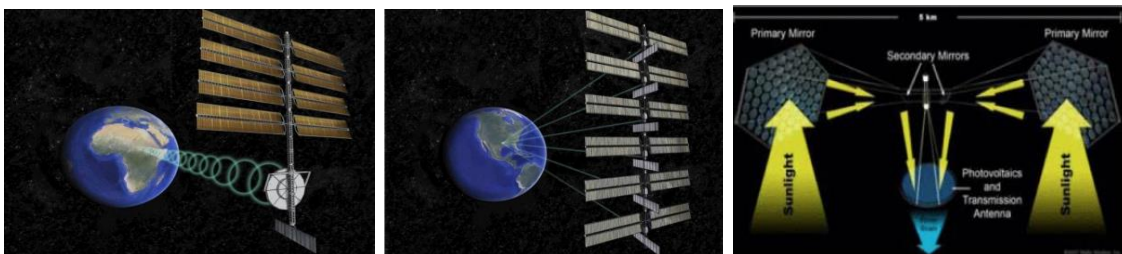
ระบบ SSPS โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนรับแสงที่ทำหน้าที่เก็บรวบรวมพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่ว่าจะ เป็นในรูปแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar PV) โดยตรง หรือแผ่นกระจกสะท้อนรวมแสงอาทิตย์ (Mirrors/reflectors) เพื่อสะท้อนลำแสงไปยังส่วนรวบรวมแสงอาทิตย์ (Collector) เพื่อส่งต่อและเปลี่ยนแปลง พลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และถูกส่งเข้าไปยังส่วน Transmitter เพื่อสร้างรังสีไมโครเวฟหรือ แสงเลเซอร์ในการส่งพลังงานกลับมายังผิวโลกที่ความถี่จำเพาะหนึ่งๆ ทั้งนี้ สัญญาณรังสีไมโครเวฟหรือแสงเลเซอร์ ที่ถูกส่งกลับมาผิวโลกจะถูกจับสัญญาณด้วยแผงรับสัญญาณ (Rectifying antenna: Rectenna) ซึ่งเป็นแผงรับ สัญญาณขนาดใหญ่ อาจมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-3 กิโลเมตร ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Power conversion and conditioning unit) และเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของโครงข่ายไฟฟ้าต่อไป (รูปที่ 1)

สถาบันการศึกษาด้านอวกาศระดับนานาชาติ (International Academy of Astronautics: IAA) ได้แบ่งประเภทของระบบ SSPS ไว้ 3 ประเภทตามลักษณะสถาปัตยกรรมของระบบ ซึ่งประกอบด้วย Type I Type II และ Type III (รูปที่ 2)

Type I SSPS ประกอบด้วยแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ที่หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ ส่วนส่ง สัญญาณกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Transmission: WPT) ที่หันหน้าเข้าหาผิวโลก และส่วนรับ สัญญาณภาคพื้นโลก (Rectenna) (รูปที่ 2 ซ้าย)

Type II SSPS ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่นเดียวกับ Type I แต่ระบบส่งสัญญาณ กำลังไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นการใช้แสงเลเซอร์ ไม่ว่าจะ เป็นระบบแสงเลเซอร์แบบปกติหรือเลเซอร์แบบ Solar-pumped เพื่อส่งสัญญาณเลเซอร์กลับสู่ผิวโลกที่มีแผงตรวจจับสัญญาณ (รูปที่ 2 กลาง)

Type III SSPS หรือเป็นที่รู้จักในชื่อ Sandwich SSPS เป็นแนวคิดหลักการรวมแสงสะท้อนจาก กระจกสะท้อนที่วางแบบสมมาตรเพื่อสะท้อนแสงอาทิตย์เข้ามาที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าต่อไป (รูป ที่ 2 ขวา) โดยการใช้ Type III นี้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าศักย์สูง (High voltage) และลดขนาด ของระบบให้มีขนาดเล็กกว่าระบบ Type I และ Type II



รูปที่ 2 ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในอวกาศ (ซ้าย) ประเภทที่ I Microwave Classic Design (กลาง) ประเภทที่ II Modular Electric Laser Design และ (ขวา) ประเภทที่ III Modular Sandwich Model (ที่มา Tandle 2019)

การส่งระบบ SSPS ขึ้นไปอยู่ในอวกาศ จำเป็นต้องพิจารณาถึงวงโคจรที่เหมาะสมในการวาง ตำแหน่งของระบบ SSPS เทียบกับพื้นผิวโลกโดยมีวงโคจรที่สามารถส่งระบบ SSPS ขึ้นไปได้ดังนี้

1. **วงโคจรระดับต่ำ (Lower Earth Orbit: LEO)** มีความสูงระหว่าง 200 ถึง 2,000 กม. จาก พื้นผิวโลก โดยในระดับ LEO นี้ดาวเทียมที่โคจรจะมีอัตราเร็วในวงโคจร (Orbital speed) ที่ค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบ

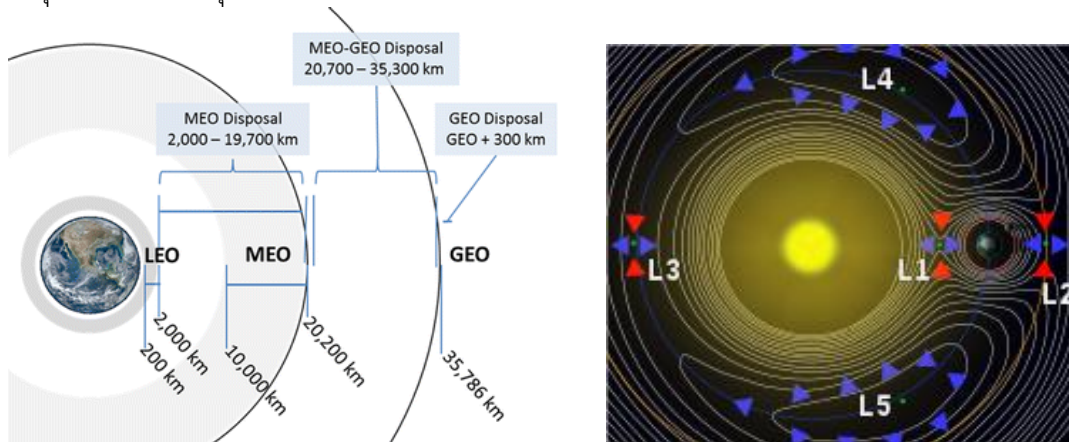
กับความสูงอื่น ทำให้การส่ง SSPS ไปที่ LEO จำเป็นจะต้องใช้กลุ่มสถานีอวกาศ/ดาวเทียมหลายชุดที่เรียกว่ากลุ่มดาวเทียม/สถานีอวกาศ (Constellations) เพื่อที่จะสามารถส่งพลังงานไฟฟ้ากลับมาที่สถานีรับสัญญาณหนึ่งบนผิวโลกได้อย่างต่อเนื่อง (หมายเหตุ สถานีอวกาศนานาชาติ (International Space Station: ISS) โคจรอยู่ใน LEO นี้ที่ระดับความสูงประมาณ 400 กม. เหนือพื้นโลก) นอกจากนี้ ผลของแรงโน้มถ่วงโลกส่งผลให้ดาวเทียมหรือสถานีอวกาศใน LEO จำเป็นต้องมีการใช้ระบบขับเคลื่อน (Thrust) จากไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิงเพื่อรักษาระดับความสูงให้คงที่

2. วงโคจรระดับกลาง (Medium Earth Orbit: MEO) มีความสูงประมาณ 2,000 ถึง 20,000 กม. อยู่ระหว่างวงโคจรระดับต่ำและวงโคจรพ้องคาบโลกหรือวงโคจรประจำที่ ซึ่งในระดับ MEO ดาวเทียม/สถานีอวกาศจะมีอัตราเร็วในวงโคจรไม่สูงเท่ากับ LEO แต่ยังไม่ถึงกับหยุดนิ่งเหมือนดาวเทียมในวงโคจรพ้องคาบโลกหรือวงโคจรประจำที่ ทำให้การพิจารณาวาง SSPS ใน MEO ไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนกลุ่มดาวเทียม/สถานีอวกาศในปริมาณมากเท่า LEO โดยที่ดาวเทียม/สถานีอวกาศใน MEO ยังต้องมีระบบขับเคลื่อนเพื่อรักษาความสูงเช่นเดียวกับ LEO แต่อาจใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า

3. วงโคจรพ้องคาบโลก (Geosynchronous Orbit: GSO) และวงโคจรค้างฟ้า/วงโคจรประจำที่ (Geostationary Orbit: GEO) มีความสูง 35,786 กม. จากพื้นผิวโลก ซึ่งเป็นความสูงที่ดาวเทียม/สถานีอวกาศจะโคจรรอบโลกในอัตราพร้อมกับการหมุนรอบตัวเองของโลก ทำให้ผู้สังเกตการณ์บนพื้นดินจะเห็นดาวเทียม/สถานีอวกาศในระดับ GEO/GSO ในตำแหน่งเดิมตลอดทั้งวัน อย่างไรก็ตาม GSO จะแตกต่างจาก GEO ตรงที่ GSO จะมีมุมเอียง (Inclination) เล็กน้อยในขณะที่ GEO จะโคจรผ่านเส้นศูนย์สูตร (Equator) ของโลก ดังนั้น การส่ง SSPS เข้าไปที่ความสูง GEO/GSO จะทำให้ขนาดของระบบ SSPS ที่จำเป็นในการผลิตไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องสามารถลดจำนวนเหลือเพียงชุดเดียวต่อหนึ่งสถานีรับสัญญาณบนผิวโลก สามารถรับแสงอาทิตย์ได้ในปริมาณมากกว่าวงโคจรที่ต่ำกว่า และทำให้การใช้ระบบขับเคลื่อนเพื่อรักษาระยะความสูงมีความต้องการลดน้อยลงเนื่องจากผลกระทบที่น้อยกว่าของแรงโน้มถ่วงโลกในระดับ GEO/GSO ทำให้ความสูงในระดับนี้เป็นเป้าหมายที่อาจพิจารณาให้ SSPS โคจรเพื่อประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด อย่างไรก็ตาม การส่งดาวเทียม/สถานีอวกาศเข้าไปที่ความสูง GEO/GSO มีค่าใช้จ่ายในการปล่อยสูงกว่า LEO และ MEO ซึ่งในปัจจุบันมีจำนวนดาวเทียมประมาณ 560 ดวง ซึ่งโคจรอยู่ในความสูงระดับ GEO และ GSO แล้ว

4. ตำแหน่ง L1 จาก Lagrange points เป็นหนึ่งในห้าจุดที่สมดุลของแรงโน้มถ่วงระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ออกแรงกระทำต่อวัตถุหนึ่งๆ ที่วางไว้ในตำแหน่งนั้นในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ดาวเทียม/สถานีอวกาศสามารถ 'จอด' เพื่อโคจรรอบดวงอาทิตย์ด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับโลกพอดี ทำให้ระยะห่างของดาวเทียม/สถานีอวกาศกับโลกและดวงอาทิตย์อยู่ในระยะเท่ากันตลอดเวลาคาบวงโคจร เป็นผลให้ความต้องการปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขับเคลื่อนอยู่ในระดับที่ต่ำมาก โดยจุด L1 อยู่ระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก โดยมีระยะห่างประมาณ 1.5 ล้าน กม. จากผิวโลก ซึ่งเป็นระยะความสูงที่สามารถหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ได้ตลอดเวลาโดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ ซึ่งอาจเป็นจุดที่น่าสนใจหนึ่งในการพิจารณาวางระบบ SSPS เพื่อผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ (รูปที่ 3 ขวา) (หมายเหตุ: กล้องโทรทรรศน์อวกาศ James Webb โคจรอยู่ในตำแหน่ง L2) อย่างไรก็ตาม วงโคจร L1 L2 และ L3 เป็นวงโคจรที่ไม่เสถียร โดยหากมีแรงกระทำต่อวัตถุเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอจะทำให้วัตถุนั้นหลุดออกจากวงโคจรได้อย่างง่ายดาย จึงจำเป็นต้องมีระบบขับเคลื่อน (Propulsion system) ที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพในการพิจารณาส่ง SSPS ไปที่ตำแหน่ง L1 นี้ อีกทั้งตำแหน่ง L1 ยังเป็น

ตำแหน่งที่ไม่ถูกป้องกันด้วยแถบแม่เหล็กโลก ทำให้มีโอกาสที่การปลดปล่อยมวลจากดวงอาทิตย์ (Coronal mass ejection) หรือพายุสุริยะ อาจทำอันตรายต่อระบบ SSPS ได้ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาถึงการติดตั้งระบบเกราะป้องกันความร้อนและรังสี (Heat and radiation shield) ต่อไป ทั้งนี้ หากปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไข ตำแหน่ง L1 จะเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดในการวางระบบ SSPS เพื่อผลิตไฟฟ้าในอวกาศในอนาคต

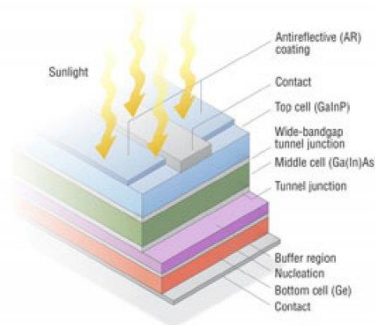


รูปที่ 3 (ซ้าย) วงโคจรระดับต่างๆ ของโลก (ที่มา: Gheorghe และ Yuchnovicz 2015) และ (ขวา) ตำแหน่ง Lagrange point ระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ โดยตำแหน่ง L1 อาจเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง SSPS ในอนาคต (ที่มา Gheorghe and Yuchnovicz, 2015 และ <https://www.sciencefocus.com/space/lagrange-points/>)

โดยทั่วไปแล้ว ระบบ SSPS มีส่วนประกอบหลักของระบบ ดังนี้

2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Space-based solar panel)

ในอดีตตั้งแต่มีการบุกเบิกการสำรวจอวกาศ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้มักผลิตจาก Gallium arsenide เนื่องจากความทนทานต่อสภาพแวดล้อมในอวกาศและประสิทธิภาพของการไหลของอิเล็กตรอนที่ดีกว่าเซลล์ซิลิกอน โดยเซลล์แบบ GaAs single junction สามารถมีประสิทธิภาพได้ถึง 28-30% และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเซลล์แบบ multi-junction ซึ่งประกอบด้วยชั้นของสารจำพวก Indium gallium phosphide, germanium และ gallium arsenide จำนวนหลายชั้น โดยสามารถมีประสิทธิภาพได้ถึง 39-47% ซึ่งจะเป็นเทคโนโลยีที่น่าจะแพร่หลายต่อไปในอนาคตทั้งในวงการอวกาศและการใช้งานเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้ ปัจจัยที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับแรกคือขนาดและน้ำหนักของแผงเซลล์และอุปกรณ์ประกอบระบบ ซึ่งงานวิจัย SSPS จะมุ่งเน้นในการพัฒนาวัสดุน้ำหนักเบาเป็นพิเศษ (Ultra-light materials) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการส่งขึ้นสู่วงโคจร

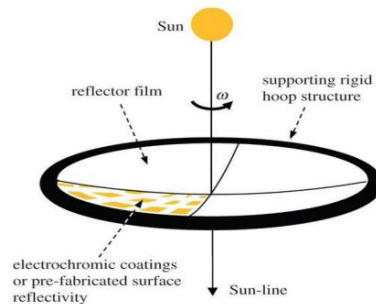


รูปที่ 4 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ multi-junction (GaInP-GaAs-Ge)

(ที่มา <https://www.energy.gov/eere/solar/multijunction-iii-v-photovoltaics-research>)

2.2 กระจกหรือแผงสะท้อนแสง (Reflectors/mirrors)

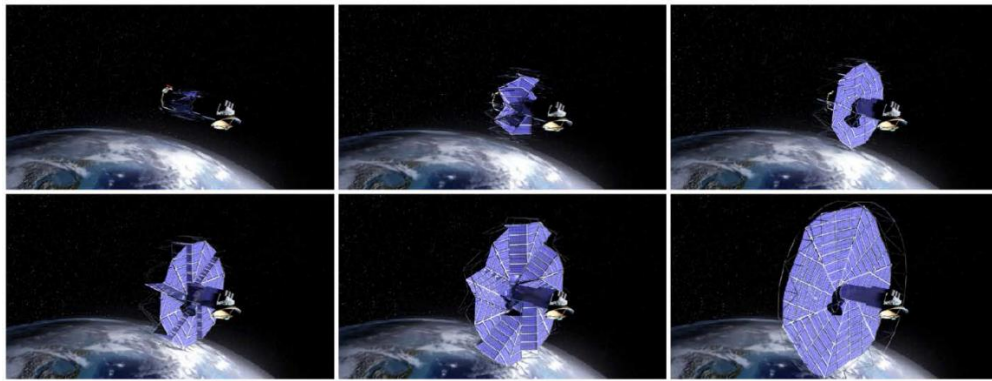
ในระบบที่ต้องมีการใช้กระจกหรือแผงสะท้อนแสง เช่น Type III SSPS จำเป็นต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพและน้ำหนักของกระจกหรือแผงสะท้อน ซึ่งมักเป็นแผ่นโค้งทรงพาราโบลาเพื่อใช้ในการรวมแสงอาทิตย์เข้ามาที่ระบบ Transmission เพื่อผลิตสัญญาณไมโครเวฟหรือเลเซอร์ส่งกลับผิวโลก โดยน้ำหนักของกระจกหรือแผงสะท้อนแสงก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการส่งขึ้นวงโคจรเช่นกัน โดยอาจออกแบบในลักษณะของห่วงที่สามารถเติมลมได้โดยอาศัย Solar radiation pressure ซึ่งมีแผ่นฟิล์มสะท้อนแสงเคลือบสะท้อนผิวในการสะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังส่วนส่งสัญญาณต่อไป (รูปที่ 5)



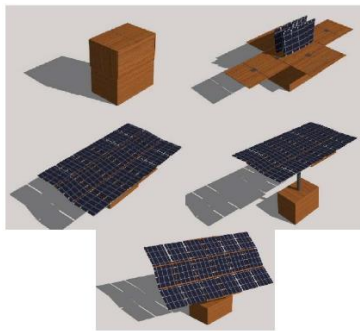
รูปที่ 5 กระจกหรือแผงสะท้อนแสง (ที่มา Tandle 2019)

2.3 ระบบกลไก (Mechanisms)

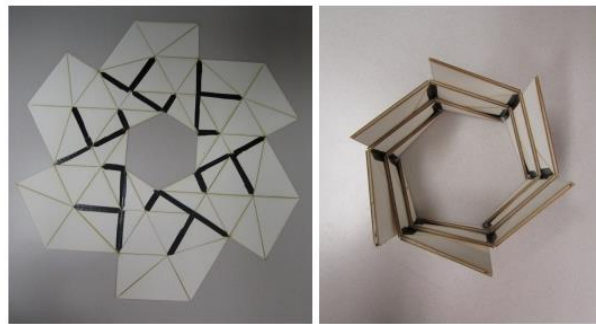
เนื่องจากข้อจำกัดด้านการขนส่งวัสดุอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการยิง SSPS ขึ้นสู่วงโคจร อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ SSPS ซึ่งเป็นระบบโครงสร้างขนาดใหญ่ ไม่สามารถถูกส่งขึ้นเป็นชิ้นส่วนระบบขนาดใหญ่ได้ จำเป็นต้องมีการบรรจุลงในพื้นที่ที่จำกัดเพื่อความสะดวกต่อการขนส่ง มีขนาดกะทัดรัดและมีน้ำหนักเบา รวมถึงต้องมีกลไกการจัดวางอุปกรณ์ (Deploy mechanism) เมื่ออุปกรณ์อยู่ในวงโคจรแล้ว เช่น การพับแบบ Origami และการพับแบบ 6-sided flasher (รูปที่ 6) ซึ่งเมื่อมีการใช้แรงกระทำในการเปิดเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอในการจัดวางอุปกรณ์ให้พร้อมใช้งานได้ ทั้งนี้ในปัจจุบัน งานวิจัยหลายงานกำลังค้นคว้ากลไกและวิธีใหม่ๆ ในการนำอุปกรณ์แผงเซลล์และอุปกรณ์ประกอบระบบมาใช้สำหรับ SSPS ในอนาคต โดยมุ่งเน้นการค้นหากลไกการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบาและมีความทนทาน



(A)



(B)



(C)

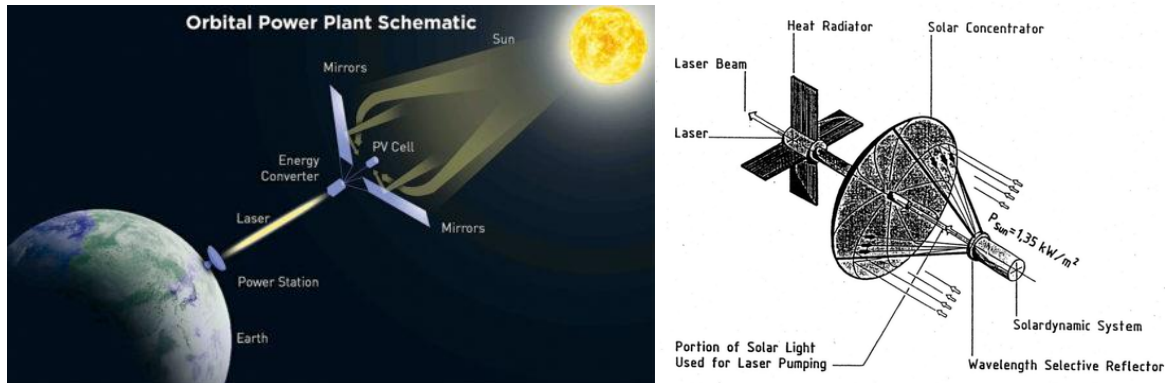
รูปที่ 6 ตัวอย่างกลไกการจัดวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบ SSPS (A) และ (B) การพับม้วนและการจัดวางแบบ Origami และ (C) การพับม้วนและการจัดวางแบบ 6-sided flasher ซึ่งสามารถม้วนเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมขนาดเล็กและแผ่ขยายออกเป็นแผ่นได้ (ที่มา: <https://naturalorigami.wordpress.com/2016/07/18/the-miura-ori-fold/> และ Zirbel *et al.* 2013)

2.4 ระบบส่งสัญญาณ (Power transmission)

ระบบส่งสัญญาณทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของรังสีไมโครเวฟ แสงเลเซอร์ หรือแบบผสมผสาน เพื่อส่งต่อไปยังผิวโลกในการถ่ายทอดพลังงานที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในอวกาศ

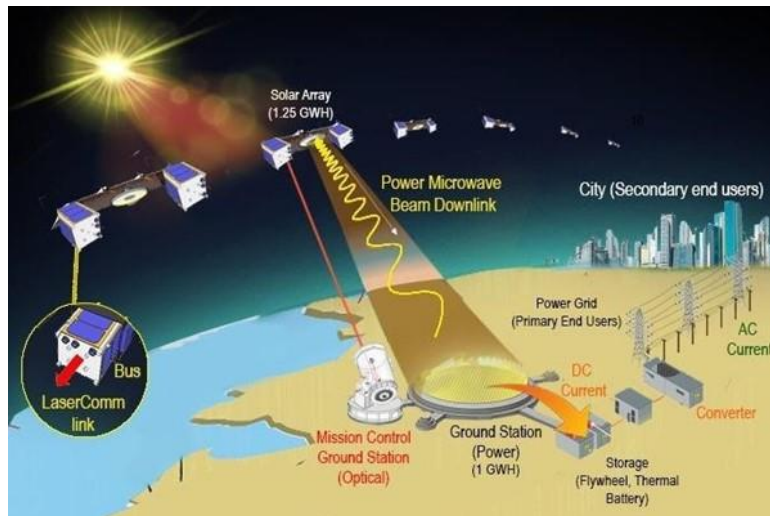
โดยในระบบส่งสัญญาณแบบเลเซอร์ พลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่รวบรวมได้ด้วย Solar concentrator จะถูกส่งไปยัง Solid state laser medium ในการสร้างแสงเลเซอร์สีเดียว (Monochromatic) เพื่อส่งสัญญาณกลับไปยังพื้นโลกที่สถานีรับสัญญาณ (รูปที่ 7) ทั้งนี้ NASA เคยศึกษาแนวทางการใช้แสงเลเซอร์สำหรับการสำรวจอวกาศ และ Space to space power beaming มาแล้วในอดีตช่วงปี ค.ศ. 1989-1993 ก่อนจะหยุดดำเนินการเนื่องจากปัญหาด้านงบประมาณ โดยในปัจจุบันหลายประเทศกำลังให้ความสนใจในการใช้แนวคิดการส่งสัญญาณกำลังไฟฟ้าด้วยแสงเลเซอร์แบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งไฟฟ้า ซึ่งข้อดีของระบบ SSPS แบบเลเซอร์คือการทำงานของระบบมีขนาดเล็กและมีต้นทุนที่ต่ำกว่าระบบ SSPS แบบไมโครเวฟ สามารถทำการติดตั้งในอวกาศได้อย่างรวดเร็วด้วยตัวเอง (Self-assembly) ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดด้านต้นทุนและความเสี่ยงในการก่อสร้างและดำเนินการได้ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดหนึ่งของการใช้แสงเลเซอร์คือการถูกกีดขวางด้วยสภาพ

บรรยากาศหรือก้อนเมฆ ซึ่งจะลดประสิทธิภาพของแสงเลเซอร์ลง ซึ่งอาจแก้ปัญหาได้ด้วยการส่งสัญญาณเลเซอร์ไปยังสถานีรับสัญญาณใกล้เคียง หรือ SSPS อื่นในกลุ่ม (Constellation) แทน และในกรณีที่เลวร้ายที่สุดระบบนี้อาจนำไปสู่การพัฒนาความแม่นยำและความเข้มของแสงเลเซอร์ซึ่งอาจกลายเป็นอาวุธและปฏิบัติการทางทหารได้



รูปที่ 7 (ซ้าย) แผนภาพระบบ SSPS ที่มีระบบส่งสัญญาณกำลังไฟฟ้าแบบเลเซอร์ (ขวา) ตัวอย่างระบบ solid state laser medium ในการสร้างแสงเลเซอร์จากพลังงานแสงอาทิตย์ (ที่มา: <https://www.electronicsforu.com/market-verticals/resurgence-space-based-solar-power> และ Abdel-Hadi 2020)

ในขณะที่ระบบส่งสัญญาณแบบไมโครเวฟ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาใช้สร้างพลังงานในรูปแบบสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (Radio-frequency: RF) ในอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (Transmitter) ซึ่งอาจเป็นโครงสร้างที่ใช้แมกนีตรอน (Magnetron) หรือหลอดสุญญากาศสร้างลำแสงเชิงเส้นหรือคลิสตรอน (Klystron) เพื่อสร้างคลื่นไมโครเวฟในช่วงความถี่ 2.45 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ที่ถูกเสนอว่ามีความเหมาะสมในการทะลุทะลวงชั้นบรรยากาศได้ดี สามารถส่งสัญญาณผ่านสภาวะภูมิอากาศ พายุฝนหรือก้อนเมฆได้ ซึ่งงานวิจัยพบว่าคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงผ่านชั้นบรรยากาศของโลกได้มีประสิทธิภาพมากกว่าแสงเลเซอร์ (ตารางที่ 1) โดยคลื่นความถี่ไมโครเวฟต่ำจะสามารถทะลุทะลวงชั้นบรรยากาศได้ดี แต่หากใช้คลื่นความถี่ไมโครเวฟที่สูงจะสามารถลดขนาดของเสาสัญญาณได้ นอกจากนี้ ระบบไมโครเวฟยังสามารถส่งพลังงานกลับสู่โลกได้เป็นปริมาณมากจากขนาดของระบบที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเป็นระบบ SSPS ขนาด GW ซึ่งระบบหนึ่งสามารถให้พลังงานไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการของเมืองใหญ่ได้เลยทีเดียว



รูปที่ 8 แผนภาพตัวอย่างระบบ SSPS ที่มีระบบส่งสัญญาณกำลังไฟฟ้าแบบไมโครเวฟ (ที่มา: <https://sciathon.org/project/dual-use-of-space-based-solar-power-for-earth-and-moon/>)

	Microwave	Laser
Frequency	5.8 GHz	1.6 μm
Atmospheric Transmission (efficiency)	97%	80%
DC to RF/ laser (efficiency)	80%	60%
RF/ laser to DC (efficiency)	80%	60%

ตารางที่ 1 ความแตกต่างของระบบส่งสัญญาณกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Power Transmission) ระหว่างคลื่นไมโครเวฟและแสงเลเซอร์ (ที่มา: Tandle 2019)

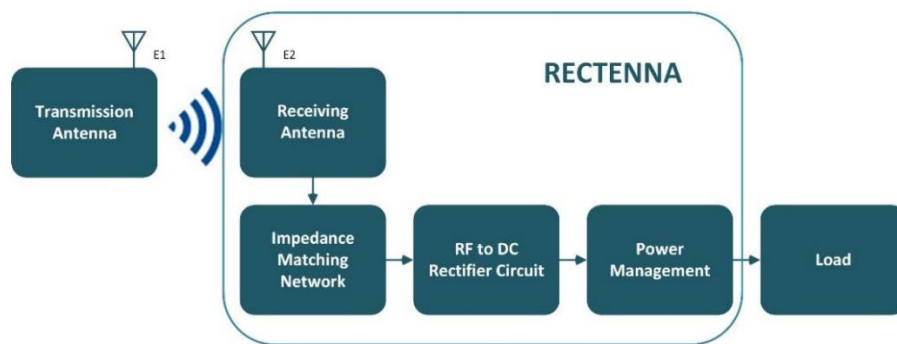
อย่างไรก็ตาม SSPS ที่ใช้ระบบส่งสัญญาณแบบไมโครเวฟจำเป็นต้องพึ่งพาการประกอบในอวกาศ (Space-assembly) เป็นหลัก เนื่องจากเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ และจำเป็นต้องมีการขนส่งและยิงอุปกรณ์ชิ้นวงโคจรเพื่อประกอบชิ้นส่วนหลายสิบหรือหลายร้อยครั้ง ทำให้ต้นทุนในส่วนของขนส่งมักสูงกว่าระบบ SSPS แบบเลเซอร์ นอกจากนี้ สถานีรับสัญญาณบนพื้นโลกก็จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่โดยอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับกิโลเมตร เพื่อรองรับสัญญาณที่ถูกส่งมาจากระบบ SSPS ในการจ่ายไฟฟ้าปริมาณมากเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่อไป ทั้งนี้ ระบบ SSPS แบบไมโครเวฟ อาจถูกพิจารณาให้โคจรอยู่ในระดับความสูง GSO/GEO ซึ่งทำให้การบำรุงรักษาและซ่อมแซมอุปกรณ์ส่วนที่เสียหายอาจดำเนินการได้ยากเนื่องจากตำแหน่งวงโคจรที่อยู่ไกลกว่า LEO หรือ MEO ทำให้ค่าใช้จ่ายในการส่งอุปกรณ์บำรุงรักษาในแต่ละครั้ง รวมถึงการส่งบุคลากรในกรณีจำเป็น จะมีราคาสูง

นอกจากนี้ องค์การพัฒนาอวกาศระดับชาติของญี่ปุ่น (NASDA) ได้มีแนวคิดการใช้ระบบผสมผสาน (Hybrid) ระหว่างระบบแบบไมโครเวฟและเลเซอร์ โดยให้ระบบสถานีอวกาศ/ดาวเทียมระบบหนึ่งอยู่

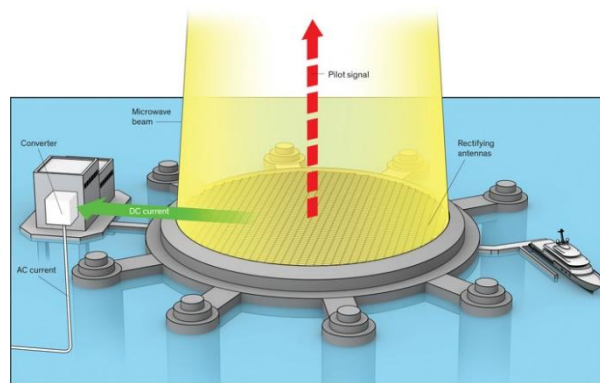
ในวงโคจร GSO/GEO ซึ่งจะส่งสัญญาณเลเซอร์ลงมาที่สถานีอวกาศ/ดาวเทียมอีกระบบหนึ่งที่อยู่ในวงโคจรที่ต่ำกว่า ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และถูกละเปลี่ยนเป็นสัญญาณไมโครเวฟอีกทอดหนึ่งเพื่อส่งไปที่สถานีรับสัญญาณ (Rectenna) บนพื้นโลก ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ SSPS โดยคลื่นไมโครเวฟจะสามารถส่งสัญญาณไปยังพื้นโลกได้มีประสิทธิภาพมากกว่าแสงเลเซอร์โดยไม่มีข้อจำกัดด้านสภาพภูมิอากาศ แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนราคาที่สูงและการดูแลรักษาที่ค่อนข้างยุ่งยาก

2.5 สถานีรับสัญญาณบนพื้นผิวโลก (Rectenna)

สถานีรับสัญญาณ (Rectifying antenna: Rectenna) เป็นระบบที่ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส (Rectifier) และเสารับสัญญาณ (Antenna) ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งจาก SSPS ไม่ว่าจะในรูปแบบคลื่นไมโครเวฟหรือแสงเลเซอร์ ให้กลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยต่างๆ ได้แก่ 1) เสารับสัญญาณ (Receiving antenna) 2) ระบบกรองสัญญาณฮาร์โมนิค (Harmonic rejection filter) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของสัญญาณพลังงานกลับสู่บรรยากาศซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ใกล้เคียง ระบบวงจร Impedance matching เพื่อช่วยในการปรับค่าความต้านทาน (Impedance) ของเสารับสัญญาณให้เหมาะสมกับสัญญาณที่ส่งจาก Transmitter เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายทอดพลังงานและลดการสะท้อนกลับของสัญญาณ 3) วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณคลื่นวิทยุให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และมี DC bypass filter ในการกรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสที่เป็นช่วงคลื่นไม่สม่ำเสมอ (Pulsating DC current) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่คงที่ 4) ระบบจัดการพลังงาน (Power management system) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์จัดการพลังงานและแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (AC) เพื่อเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่อไป (รูปที่ 9A)



A



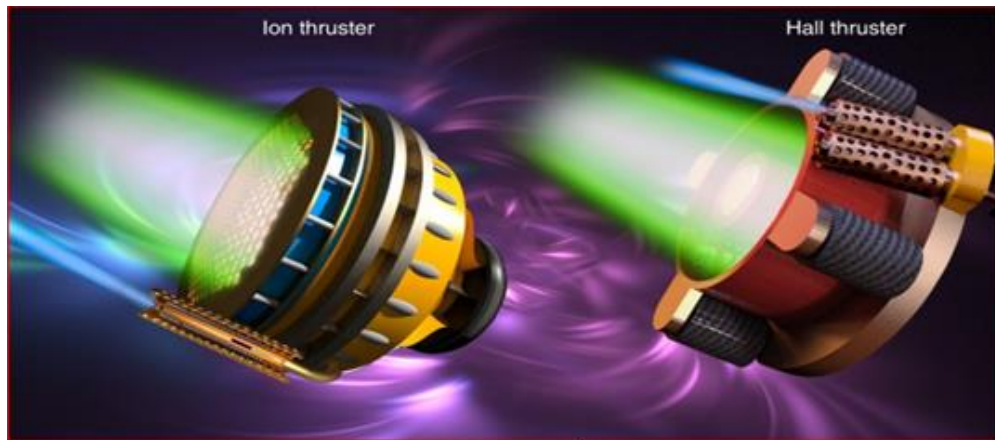
B

รูปที่ 9 (A) แผนผังแสดงการทำงานทั่วไปของ Rectenna และ (B) แผนภาพแสดงตัวอย่างระบบ Rectenna โดยมีระบบ pilot beam เพื่อทวนสอบสัญญาณ (ที่มา: Bougas *et al* 2020)

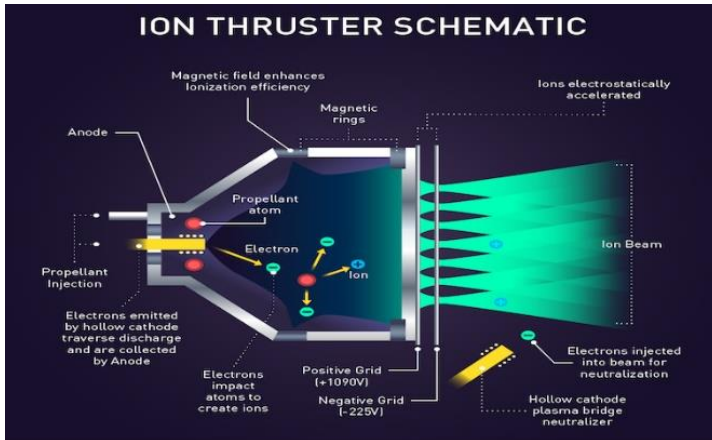
นอกจากนี้ ระบบ Rectenna ยังมีระบบส่งลำแสงสัญญาณเข้ารหัสนำร่อง (Encrypted pilot beam) เพื่อยิงลำแสงนำร่องจาก Rectenna ภาคพื้นดิน ไปยังระบบ SSPS ที่อยู่ในวงโคจร เพื่อเป็นการเพิ่มความแม่นยำในการยืนยันตำแหน่งการส่งสัญญาณ WPT จาก Transmitter ของ SSPS กลับมายัง Rectenna ด้วย (รูปที่ 9B)

2.6 ระบบขับเคลื่อน (Propulsion system)

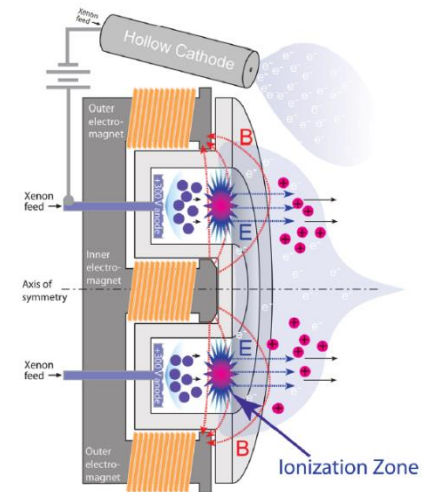
ระบบขับเคลื่อน SSPS เป็นสิ่งจำเป็นในการปรับตำแหน่งและองศาของระบบและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าให้สูงที่สุด โดยระบบขับเคลื่อนด้วยพลังไฟฟ้า (Electric propulsion) เป็นระบบขับเคลื่อนประเภทที่อาจนำมาประยุกต์ใช้กับระบบ SSPS ได้ โดยสามารถเป็นได้ทั้งแบบ Ion thruster (Ion drive) หรือ Hall thruster (Plasma thruster) (รูปที่ 10A) ซึ่งทั้งสองระบบใช้ก๊าซซีนอน (Xenon) เป็นก๊าซขับเคลื่อน (Propellant) โดย Ion thruster จะใช้หลักการสร้างแรงขับเคลื่อนโดยการเร่งความเร็วของซีนอนโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า ให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน เพื่อสร้างแรงขับเคลื่อนจากการปล่อยลำแสงซีนอนที่เป็นประจุบวกออกมา (รูปที่ 10B) โดย Ion thrust สามารถสร้างความเร็วได้ประมาณ 20-50 กม./วินาที และมีประสิทธิภาพประมาณ 60-80% ในขณะที่ Hall thruster จะใช้ความต่างศักย์จากการสร้างสนามไฟฟ้าในการควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อที่จะระดมยิงใส่ก๊าซขับเคลื่อน เพื่อสร้างแรงขับเคลื่อน โดย Hall thruster สามารถสร้างความเร็วได้ประมาณ 10-80 กม./วินาที และมีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ประมาณ 35-60% (รูปที่ 10C) แต่ต้องการระบบที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า Ion thruster



A



B



C

รูปที่ 10 ระบบขับเคลื่อนของ SSPS (A) ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าแบบ Ion thruster และ Hall thruster (B) แผนภาพแสดงหลักการการทำงานของ Ion thruster (C) แผนภาพแสดงหลักการการทำงานของ Hall thruster (ที่มา: OSR 2019 และ Mcdonald 2012)

ในปัจจุบัน วงการวิจัยได้ให้ความสำคัญถึงปัจจัยด้านประสิทธิภาพและความเร็วของก๊าซขับเคลื่อนที่ใช้ขับเคลื่อน รวมไปถึงประสิทธิภาพการดลจำเพาะ (Specific impulse) ของระบบขับเคลื่อน เพื่อค้นหาขับเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบ SSPS

2.7 ระบบระบายความร้อนและเกราะป้องกันรังสี (Radiator and heat shield)

สภาพสุญญากาศในอวกาศทำให้การนำพาความร้อน (Convection และ conduction) ไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบ SSPS จำเป็นต้องมีการติดตั้งระบบระบายความร้อน (Radiator) เพื่อดึงความร้อนที่สะสมออกจากระบบ เพื่อป้องกันความเสียหายจากความร้อนจากการทำงานของ SSPS นอกจากนี้ ในส่วนด้านแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่หันเข้าหาดวงอาทิตย์ตลอดเวลาอาจเกิดความร้อนสะสมได้ถึงระดับ 1,000 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบป้องกันความร้อน (Thermal protection system) ซึ่งอาจ

ทำมาจากแผ่นคาร์บอนคอมโพสิตที่วางอยู่ระหว่างแผ่นคาร์บอนสองแผ่นเคลือบด้วยเซรามิก ซึ่งสามารถป้องกันความร้อนได้ถึง 1,400 องศาเซลเซียส (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 Thermal protection system ที่ถูกพัฒนาโดยมหาวิทยาลัย Johns Hopkins University (ที่มา: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/features/taking-on-the-sun/>)

ทั้งนี้ การประกอบระบบ SSPS ขนาดใหญ่ระดับ GW ในอวกาศ สามารถดำเนินการได้ทั้งโดยการยิงดาวเทียมหรือจรวดจากพื้นดินเพื่อส่งอุปกรณ์ขึ้นไปประกอบในอวกาศ ไม่ว่าจะเป็นการใช้แรงคนหรือใช้เครื่องจักร โดยจะต้องมีการเสียค่าใช้จ่ายในการยิงขึ้นสู่อวกาศจำนวนมาก แต่ระบบที่ได้จะมีขนาดใหญ่ ผลิตไฟฟ้าได้ในปริมาณมาก หรือดำเนินการได้ในรูปแบบที่เป็นโครงข่ายกลุ่มดาวเทียม (Constellation) ขนาดเล็กจำนวนหลายสิบหรือหลายร้อยดวง ทำงานประสานกันในการส่งสัญญาณ WPT กลับมายังสถานีรับสัญญาณ Rectenna บนพื้นโลก ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรในการติดตั้งระบบมากโดยอาจเป็นระบบที่เป็นรูปแบบพับและขยายออกได้ และสามารถดูแลรักษาได้ง่ายโดยใช้ระบบหุ่นยนต์หรือ probe ตรวจสอบ

3. ข้อดีของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากสถานีอวกาศ (SSPS)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากสถานีอวกาศ (SSPS) มีข้อดีและประโยชน์หลายประการ ได้แก่

3.1 สร้างเสถียรภาพด้านการผลิตไฟฟ้า

ในขณะที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นผิวโลก สามารถรับแสงอาทิตย์ได้เฉลี่ยประมาณ 25-30% ต่อวัน ระบบ SSPS สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาและตลอดทั้งปี โดยไม่ขึ้นกับเวลาและสภาพภูมิอากาศของโลก โดยอาจมีช่วงเวลาที่อยู่ในเงาโลกเพียงช่วงเวลาสั้นๆ ในแต่ละวัน ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จึงมีปริมาณสูงและคงที่กว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นผิวโลก เนื่องจาก SSPS จะอยู่ในสภาพ สามารถสร้างความมั่นคงด้านพลังงานได้มากกว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นผิวโลก นอกจากนี้การก่อสร้างระบบ SSPS ในอวกาศขนาดใหญ่ระดับ GW ยังสามารถดำเนินการได้โดยไม่มีปัญหาด้านข้อจำกัดเชิงพื้นที่ที่สามารถพบในบางภูมิภาคของประเทศของพื้นผิวโลกที่ใช้ประโยชน์

จากพื้นดินเป็นทรัพยากรที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ซึ่งไม่เหมาะกับการนำพื้นที่ขนาดใหญ่มาสร้างเป็นโซลาร์ฟาร์ม นอกจากนี้ ไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบ SSPS จะมีความผันผวนต่ำและสามารถพยากรณ์ปริมาณไฟฟ้าล่วงหน้าได้ ซึ่งทำให้สามารถวางแผนการจัดการด้านอุปสงค์ของพลังงานไฟฟ้าระยะยาวในอนาคตได้

3.2 การเลือกส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังพื้นที่เป้าหมาย

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก SSPS สามารถส่งไปยังตำแหน่งสถานี Rectenna เป้าหมายได้หลายที่ตามทิศทางการหันของระบบส่งสัญญาณของ SSPS และตำแหน่งของสถานี Rectenna บนพื้นผิวโลก ทำให้ปัญหาที่อาจเกิดจากระบบสายส่งไฟฟ้าในบางบริเวณ เช่น การก่อสร้างระบบสายส่งไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลหรือพื้นที่เขตอุทยานแห่งชาติที่ไม่สามารถก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคด้านพลังงาน หรือบริเวณที่สายส่งไฟฟ้าถูกใช้งานในปริมาณสูง สามารถถูกทดแทนด้วยการจ่ายไฟฟ้าจากระบบ SSPS ได้

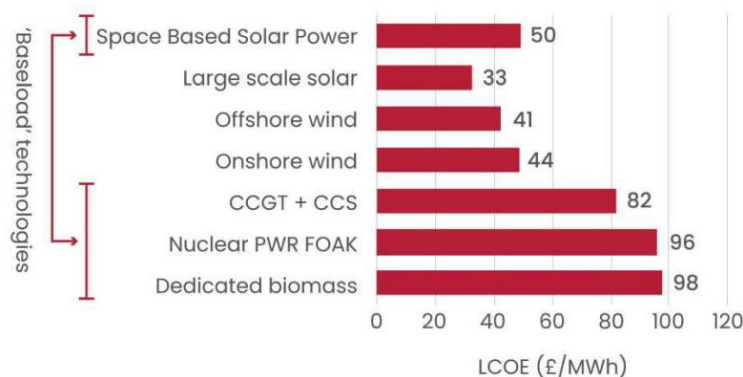
3.3 ส่งเสริมกิจการซื้อขายไฟฟ้าระหว่างประเทศ

เนื่องจากระบบ SSPS สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องในปริมาณมาก ทำให้ประเทศเจ้าของระบบ SSPS อาจมีปริมาณไฟฟ้าเหลือ และสามารถพิจารณาทำสัญญาขายไฟฟ้าให้กับประเทศเพื่อนบ้านหรือในภูมิภาคได้ อันเป็นการสร้างรายได้และผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศนั้น และเพิ่มเสถียรภาพด้านพลังงานให้กับภูมิภาค

3.4 ราคา LCOE ของระบบ SSPS ไม่สูงมาก

เมื่อพิจารณาถึงมูลค่าของไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบ SSPS พบว่ามีมูลค่าที่ไม่สูงมาก โดยงานวิจัยของสหราชอาณาจักรพบว่า หากสหราชอาณาจักรสามารถสร้างระบบ constellation SSPS ขนาด 2 GW จำนวนห้าระบบในปี ค.ศ. 2040 ได้ เมื่อพิจารณาถึงค่า Levelized Cost of Energy (LCOE) จะพบว่าค่า LCOE ของไฟฟ้าจากระบบ SSPS จะอยู่ที่ 50 ปอนด์/MWh โดยใช้สมมติฐานค่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ยอมรับได้ (Investment hurdle rate) ที่ 20% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเนื่องจาก SSPS ยังเป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่ได้รับการพัฒนาอย่างเต็มรูปแบบ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับมูลค่า LCOE จากพลังงานทดแทนประเภทอื่น การศึกษาวิจัยพบว่า LCOE ของการผลิตไฟฟ้าจาก SSPS มีมูลค่าน้อยกว่าพลังงานชีวภาพและนิวเคลียร์ และมีค่าไม่แตกต่างกับพลังงานแสงอาทิตย์จากโซลาร์ฟาร์มและพลังงานลม ทั้งนี้ เมื่อเทคโนโลยีของ SSPS ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อาจสามารถลดราคา LCOE ของ SSPS ลงได้อีก

Low Carbon Generation LCOE Comparison



รูปที่ 12 การคาดการณ์การเปรียบเทียบ LCOE ของการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าในปี ค.ศ. 2040 จากพลังงานทดแทนประเภทต่างๆ ของสหราชอาณาจักร (ที่มา: Frazer-Nash consultancy, 2021)

3.5 ส่งเสริมการขับเคลื่อนนโยบายการปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์

ณ ปัจจุบัน ในหลายประเทศได้มีการกำหนดเป้าหมายการเป็นกลางทางคาร์บอนและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ซึ่งการประชุม COP26 ที่ผ่านมาก็ได้มีการลงนามความร่วมมือระหว่างประเทศต่างๆ ในการมุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การลดการใช้ถ่านหิน และการสนับสนุนการมีส่วนร่วมในการลงทุนด้านพลังงานทดแทน ซึ่งงานวิจัยเบื้องต้นด้านการประเมินวัฏจักรชีวิตของระบบ SSPS พบว่ามีค่า Carbon footprint อยู่ที่ประมาณ 24 gCO₂/kWh หรือคิดเป็นราวๆ ครึ่งหนึ่งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นดิน การผลิตไฟฟ้าจาก SSPS จึงสามารถมีส่วนของแผนการขับเคลื่อนการเป็นกลางทางคาร์บอนในประเทศต่างๆ ได้

3.6 ส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมทางอ้อม (Indirect benefits)

การพัฒนาระบบที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ เช่น เรดาร์ การพัฒนาอุตสาหกรรมเคมีคอนดักเตอร์ และอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับการทำงานในอวกาศ การส่งเสริมอุตสาหกรรมพัฒนาด้านหุ่นยนต์ และส่งเสริมการแข่งขันด้านธุรกิจขนส่งในอวกาศ หรือการประจุไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สถานีชาร์จและยานยนต์ไฟฟ้า อาจเป็นผลพลอยได้จากการพัฒนาระบบส่งกำลังแบบไร้สาย (WPT) อันเป็นผลประโยชน์ทางอ้อมจากการพัฒนาระบบ SSPS ในอนาคตได้

4. การใช้ประโยชน์ของระบบ SSPS

จากข้อดีและประโยชน์ต่างๆ ของระบบ SSPS ในข้อ 3 สามารถส่งเสริมให้เกิดประโยชน์จากการใช้งานระบบ SSPS ในด้านต่างๆ ดังนี้

4.1 ส่งเสริมตลาดการผลิตไฟฟ้าบนพื้นโลก

สำหรับประเทศหนึ่งๆ การพัฒนาระบบ SSPS สามารถช่วยให้เกิดการส่งเสริมการพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าให้มีความทันสมัย เพื่อที่จะสามารถรองรับปริมาณไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าในระบบได้จำนวนมาก อันเป็นการสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงาน รวมถึงเปิดโอกาสให้มีการจำหน่ายไฟฟ้าส่วนเหลือให้กับภูมิภาคหรือประเทศใกล้เคียง สร้างงานสร้างรายได้ให้กับประเทศได้ไม่มากนัก

4.2 การผลิตไฟฟ้าในบางกรณีพิเศษบนพื้นผิวโลก

นอกเหนือไปจากการกิจการผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายเข้าโครงข่ายไฟฟ้าตามปกติแล้ว ระบบ SSPS ยังสามารถประยุกต์ใช้ในกรณีพิเศษอื่นๆ เช่น การสำรวจเหมืองในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีโครงข่ายไฟฟ้าเข้าถึงได้ ซึ่งมักเป็นพื้นที่ทุรกันดารหรือตัดขาดจากโครงข่ายไฟฟ้าพื้นฐาน หรือในพื้นที่แนวสงครามที่การขนส่งน้ำมันและทรัพยากรที่จำเป็นต้องใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้าไม่สามารถทำได้อย่างปลอดภัย ระบบ SSPS ก็สามารถส่งไฟฟ้ามาได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ขึ้นกับความห่างไกลของสถานที่เป้าหมาย และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจซึ่งอาจพบว่ามีค่าความสำคัญน้อยกว่าทรัพยากรบุคคลหรือประสิทธิภาพการรบ หรือการใช้งานไฟฟ้าจาก SSPS ในระบบบางประเภท เช่น ระบบรถไฟฟ้าในเส้นทางไกล โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ หรือโรงงานแยกไฟฟ้าจากน้ำทะเลที่มีความต้องการใช้พลังงานสูง

นอกจากนี้ ระบบ SSPS ยังสามารถใช้ประโยชน์ในภารกิจด้านมนุษยธรรมและภารกิจกู้ภัยจากวิทยาศาสตร์ต่างๆ เช่น น้ำท่วม แผ่นดินไหว หรือสึนามิ ที่ทำให้พื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งขาดการติดต่อกับโลกภายนอกและถูกตัดขาดจากสาธารณูปโภคพื้นฐาน โดยเฉพาะในด้านพลังงาน โดย SSPS จะสามารถผลิตไฟฟ้าให้กับพื้นที่เหล่านั้นได้ตามข้อตกลงของประเทศหรือหน่วยงานเจ้าของระบบ

4.3 การประยุกต์ใช้ในวงการสำรวจอวกาศ

ในปัจจุบัน วงการสำรวจอวกาศมีแนวคิดที่จะใช้พลังงานไฟฟ้าจาก SSPS มาประยุกต์ใช้ใน Space to space applications เช่น การให้พลังงานดาวเทียมหรือยานสำรวจที่ปฏิบัติการในระยะไกล หรือการส่งพลังงานให้กับฐานปฏิบัติการภาคพื้นผิวดาวในการสำรวจดวงจันทร์หรือดาวเคราะห์ต่างๆ โดยเฉพาะระบบที่จะประจำการในช่วงระหว่างโลกและดวงจันทร์ (Cislunar system) ซึ่งในปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนสถานีอวกาศนานาชาติ ISS มีกำลังการผลิตเพียง 100 kW เมื่อเทียบกับขนาดของ ISS ที่มีน้ำหนักถึง 400 ตัน ดังนั้นการจะสร้างระบบ SSPS ให้มีขนาดเพียงพอกับดาวเทียมหรือฐานปฏิบัติการเหล่านี้จำเป็นต้องมีการติดตั้งระบบ SSPS ในขนาดหลายร้อย MW หรือ GW ซึ่งอยู่ระหว่างการวิจัยและพัฒนาจากหลายภาคส่วนในปัจจุบัน

5. ความท้าทาย

5.1 ต้นทุนและราคาของระบบ SSPS

ปัญหาหลักที่ยิ่งใหญ่ของระบบ SSPS ในปัจจุบัน เป็นเรื่องของราคาของระบบ โดยเฉพาะค่าใช้จ่ายในการยิงดาวเทียมและอุปกรณ์ต่างๆ ขึ้นสู่อวกาศ ซึ่งยังไม่มีราคาคู่แข่งในปัจจุบัน โดยปัจจัยหลักของค่าใช้จ่ายเป็นผลมาจากน้ำหนักของระบบ ซึ่งระบบ SSPS ขนาดใหญ่อาจมีน้ำหนักหลายพันกิโลกรัม ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการยิงขึ้นสู่อวกาศ รายงานของ NASA ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการส่งระบบ SSPS ขนาด 18 MW น้ำหนัก 1,044 ตัน โดยใช้จรวดขับเคลื่อนประเภทต่างๆ เช่น Falcon Heavy และ Big Falcon Rocket ของ Space X ที่อยู่ระหว่างศึกษาความคุ้มค่าของการนำจรวดขับเคลื่อนที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจมาใช้ ซึ่งผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าสามารถลดราคาของค่าใช้จ่ายในการปล่อยขึ้นสู่อวกาศระดับ GEO ได้จาก 3,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ (3,000 เหรียญสหรัฐ/กิโลกรัม) เหลือ 640 ล้านดอลลาร์สหรัฐ (617 เหรียญสหรัฐ/กิโลกรัม) เมื่อใช้จรวด Big Falcon Rocket แบบนำกลับมาใช้ซ้ำ

อย่างไรก็ดี จากรายงานฉบับนี้ของ NASA พบว่า การที่การส่งระบบ SSPS จะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จำเป็นจะต้องลดต้นทุนการปล่อยระบบเหลือไม่เกิน 190 เหรียญสหรัฐ/กิโลกรัม หรือลดค่าใช้จ่ายลงจากในปัจจุบันอีก 94% หรืออีกแนวทางหนึ่งคือการลดน้ำหนักรวมของระบบ SSPS ลงจาก 1,044 ตัน เหลือไม่เกิน 65 ตัน

5.2 การหาวัตถุดิบน้ำหนักเบาพิเศษ

นอกเหนือไปจากการพัฒนาจรวดขับเคลื่อนที่ใช้ในการส่งระบบ SSPS ขึ้นสู่อวกาศให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสามารถแข่งขันได้ในเชิงพาณิชย์ ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่ง ซึ่งสามารถส่งเสริมให้การพัฒนา SSPS เป็นจริงได้ในเร็ววันขึ้นคือการค้นหาและพัฒนาวัสดุอุปกรณ์ให้มีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษ แต่ยังคงความทนทานแข็งแรงเอาไว้ได้ ไม่ว่าจะเป็นทั้งในด้านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอาจพัฒนาในรูปแบบแผ่นฟิล์มบางประสิทธิภาพสูง แผงเซลล์แบบ Multijunction เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Perovskite หรือแม้แต่เซลล์แสงอาทิตย์

แบบ Quantum dot นอกจากนี้ อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่น โครงสร้างรองรับแผงเซลล์ แผ่นกระจกสะท้อน หรือ ส่วนเกราะป้องกันความร้อน ซึ่งงานวิจัยในปัจจุบันก็ได้เน้นย้ำถึงการพัฒนานวัตกรรมน้ำหนักรวบรวมสำหรับการใช้งานใน SSPS เช่นกัน โดยอาจใช้งานร่วมกับการสร้างชิ้นส่วนแบบ 3D printed เพื่อลดต้นทุนและน้ำหนักของชิ้นส่วน

5.3 การติดตั้งและการประกอบระบบ

การติดตั้งและการประกอบระบบ ก็เป็นอีกความท้าทายหนึ่งในการพัฒนาระบบ SSPS เนื่องจากการติดตั้งเป็นระบบขนาดใหญ่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายร้อยเมตร จำเป็นต้องมีการคิดค้นนวัตกรรมและวิธีการในการพับเพื่อขนส่งและสามารถกางขยายออกได้เมื่อถึงระดับความสูงเป้าหมาย เช่นแนวคิดการพับแผงเซลล์เป็นทรงกระบอกหกเหลี่ยม การพับแบบ Origami-style หรือการใช้ Fold-membrane ทั้งนี้ การออกแบบการติดตั้งที่ทำให้การจัดการระบบต่างๆ สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น แนวคิดการใช้การเชื่อมต่อแบบ Multi-rotary joint ของประเทศจีนในระบบ MR-SPS (รูปที่ 13) ซึ่งเป็นโครงเหล็กถักต่อกันเป็นโครงสร้างหลัก (Main structure) และแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ระหว่างโครงสร้างหลักที่มีข้อต่อที่หมุนได้ (Rotary joint) ทำให้สามารถประกอบได้ง่ายและสามารถปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สอดคล้องกับตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้

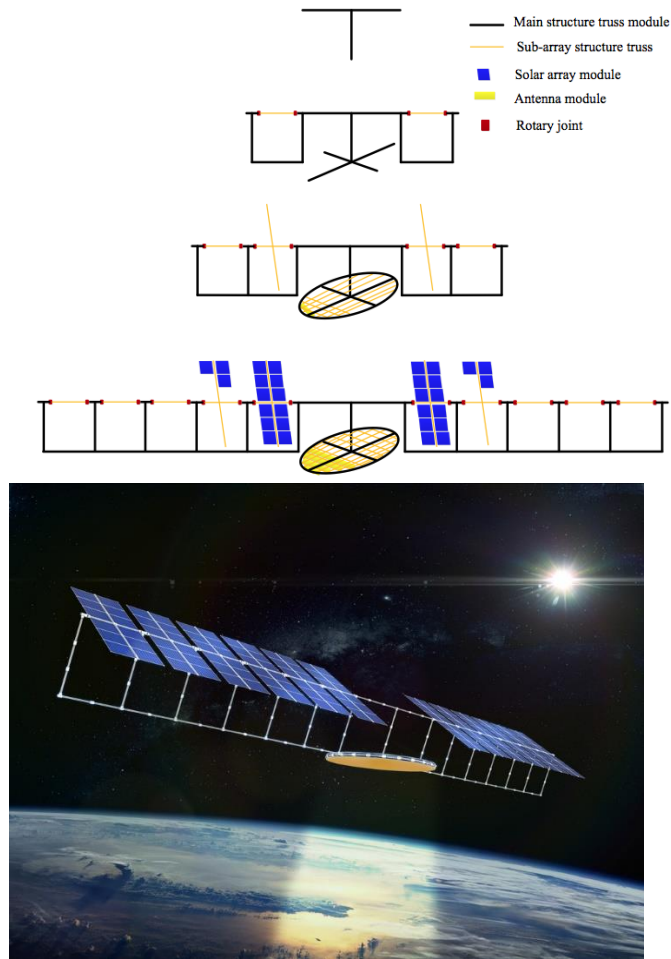
5.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากระบบ WPT

เนื่องจากระบบ SSPS จำเป็นต้องมีการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือคลื่นวิทยุ กลับมายังสถานี Rectenna บนพื้นผิวโลก ความปลอดภัยจากการอาศัยระบบส่งสัญญาณ WPT พลังงานสูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของประชาชน ระบบการเดินทางทางอากาศ รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จำเป็นต้องได้รับการศึกษาอย่างละเอียด โดยในปัจจุบัน บางประเทศได้มีข้อกำหนดของความเข้มของกำลังคลื่นไมโครเวฟที่ 10 W/ตร.ม. เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อสุขภาพของประชากร รวมถึงพืชและสัตว์ในบริเวณสถานีรับสัญญาณ

นอกจากนี้ ยังอาจต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดจากขยะอวกาศ (Space debris) เมื่อต้องมีการซ่อมบำรุงอุปกรณ์หรือถึงเวลาปลดประจำการอุปกรณ์หรือสถานี SSPS ซึ่งอาจต้องมีแผนปฏิบัติการรองรับในอนาคตต่อไป

5.5 ผลกระทบอื่นๆ

ระบบ SSPS อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านอื่นๆ ที่อาจตามมาได้ เช่น ปัญหาด้านข้อกำหนดและกฎหมายระหว่างประเทศ การกำหนดขอบข่ายของสเปกตรัมและคลื่นความถี่สำหรับ WPT รวมถึงการจัดหาตำแหน่งของ SSPS ที่เป็นไปได้ในกรณีมีการใช้งานจำนวนมากในอนาคต



รูปที่ 13 ระบบ MR-SPS ของประเทศจีนที่ใช้การติดตั้งแบบโครงเหล็กถักและแผงเซลล์ระหว่างข้อต่อที่หมุนได้ (ที่มา: <https://spacejournal.ohio.edu/app/generic.html>)

6. บทสรุป

เนื่องจากการคาดการณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่จะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต จากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร รวมถึงการปฏิบัติตามแนวทางการเข้าสู่การเป็นกลางทางคาร์บอนของหลายประเทศ การวิจัยและพัฒนาาระบบผลิตไฟฟ้าแบบใหม่ๆ เพื่อรองรับปริมาณความต้องการไฟฟ้าจำนวนมาก จึงเป็นสิ่งที่หลายประเทศให้ความสนใจ โดยระบบ SSPS เป็นหนึ่งในทางเลือกเพื่ออนาคตของนวัตกรรมการผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและมีการปลดปล่อยคาร์บอนน้อยมาก สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอตลอดเวลาโดยไม่ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ และมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นผิวโลก แต่แนวคิด SSPS ยังคงเป็นเทคโนโลยีที่เพิ่งเริ่มต้น และยังมีปัญหาอุปสรรค และความท้าทายมากมายให้ก้าวข้ามและแก้ไข ทั้งปัญหาในด้านเทคนิคและงบประมาณในการลงทุน แต่หากระบบ SSPS ได้รับการพัฒนาจนสามารถแข่งขันได้ในเชิงพาณิชย์แล้ว จะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านการผลิตพลังงาน การสร้างรายได้ หรือการสร้าง ความมั่นคงด้านพลังงาน

สำหรับในปัจจุบันและอนาคต การดำเนินการขับเคลื่อน SSPS ยังคงต้องดำเนินต่อไป โดยเฉพาะ การวิจัยและพัฒนาาระบบผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงและน้ำหนักเบา การค้นคว้าเทคโนโลยีจรวดขับเคลื่อน ที่มีราคาถูกในความหวังที่การเดินทางไปอวกาศจะสามารถกระทำได้ในเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้ในระยะสั้นและเป็นเรื่อง ที่ควรดำเนินการก่อน การเพิ่มการตระหนักรู้ของภาครัฐและเอกชนต่อระบบ SSPS โดยเฉพาะในระดับผู้ที่สามารถ ตัดสินใจเชิงนโยบายได้ การทดสอบระบบนำร่องและระบบตัวอย่างของ SSPS เพื่อศึกษาและยืนยันความเป็นไปได้ เชิงปฏิบัติทั้งในด้านเทคนิคการเงิน และประสิทธิภาพของระบบ และดำเนินโครงการในลักษณะที่เป็น bankable ทั้งภาครัฐและเอกชน จะเป็นสิ่งที่ทั่วโลกให้ความสนใจ ในความหวังที่จะทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบ SSPS ที่เคยเป็นแค่ความฝันในอดีตเป็นแนวคิดที่เป็นไปได้จริงในอนาคตอันใกล้

7. เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Hadi Y.A., 2020, *Space-based solar laser system simulation to transfer power onto the earth*, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, Vol. 9 (1): 558-562
- Bougas I.D., Papadopoulou M.S., Boursianis A.D., Kokkinidis K. and Goudos S.K., 2021, *State-of-the-Art Techniques in RF Energy Harvesting Circuits*, Telecom, 2: 369-389
- Crawford M., 2021, *Space-Based Solar Power Offers Out-of-This World Challenges*, <https://www.asme.org/topics-resources/content/space-based-solar-power-offers-out-of-this-world-challenges>, visited 11 กันยายน 2565
- Frazer-Nash Consultancy, 2021, *Space Based Solar Power – De-risking the pathway to Net Zero*, FNC 004456-52265R Issue 1B, 26 pp.
- Gheorghe A.V. and Yuchnovicz D.E., 2015, *The Space Infrastructure Vulnerability Cadastre: Orbital Debris Critical Loads*, International Journal of Disaster Risk Science, Vol. 6: 359–371
- Goebel D.M. and Katz I., 2008, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, JPL SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY SERIES, 493 pp.
- Gosavi S.S., Mane H.G., Pendhari A.S., Magdum A.P., Deshpande S., Baraskar A., Jadhav M. and Husainy A., 2021, *A Review on Space Based Solar Power*, Journal of Thermal Energy System, Vol. 6 Issue 1: 16-24
- Lo M.W., Llanos P.J. and Hintz G.R., 2010, *AN L5 MISSION TO OBSERVE THE SUN AND SPACE WEATHER, PART I*, Conference paper: AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting, DOI:10.13140/2.1.5166.0162
- Mcdonald M.S., 2012, *Electron Transport in Hall Thruster*, Dissertation – University of Michigan, http://websites.umich.edu/~peplweb/pdf/2012_McDonald_Thesis.pdf
- Oberhaus D., 2021, *Space Solar Power: An Extraterrestrial Energy Resource for the U.S.*, innovation frontier project, <https://innovationfrontier.org/space-solar-power-an-extraterrestrial-energy-resource-for-the-u-s/> visited 9 กันยายน 2565
- OSR, 2019, *Ion Thrusters Powering Spacecraft*, <https://osr.org/blog/astronomy/ion-thrusters-powering-spacecraft/> visited 11 กันยายน 2565
- Proctor N., Eggert R., Lange I., Madrid A.A., and Maniloff P., *21st Century Trends in Space-Based Solar Power Generation and Storage*, NASA Research NNA15ZBP0001N-B1, Economic Research for Space Development, 30 pp.
- Solar Energy Technologies Office, *Multijunction III-V Photovoltaics Research*, <https://www.energy.gov/eere/solar/multijunction-iii-v-photovoltaics-research>, visited 11 กันยายน 2565

- Spanner H., 2022, *What are Lagrange points?*, <https://www.sciencefocus.com/space/lagrange-points>, visited 11 กันยายน 2565
- Tandle S., 2019, *Space-based solar power station*, Research proposal at ResearchGate, DOI: 10.13140/RG.2.2.14525.49123
- Vedda J.A. and Jones K.L., 2020, *Space-based solar power: a near-term investment decision*, <https://csp.aerospace.org/papers/space-based-solar-power-near-term-investment-decision>, visited 11 กันยายน 2565
- Wang Li, 2022, *Overview on Space Solar Power Station*, *Advances in Astronautics Science and Technology*, 5: 1-2
- Xinbin H., Meng L., Lili N., Lu Z., Ying C., Zhengai C. and Haipeng J., *Multi-Rotary Joints SPS*, <https://spacejournal.ohio.edu/app/generic.html>, visited 11 กันยายน 2565
- Zirbel S.A., Lang R.J., Thomson M.W., Sigel D.A., Walkemeyer P.E., Trease B.P., Magleby S.P. and Howell L.L., 2013, *Accommodating Thickness in Origami-Based Deployable Arrays*, *Journal of Mechanical Design* Vol. 135 (11)