

## 우주 기반 태양광 발전의 미래 기술 동향 및 전망

### 1. 서론

전 세계적으로 에너지 수요가 증가하고 기후 변화에 대한 우려가 커지면서 지속 가능하고 깨끗한 에너지원에 대한 필요성이 절실해지고 있습니다. 이러한 맥락에서 우주 기반 태양광 발전(Space-Based Solar Power, SBSP)은 우주 공간에서 풍부한 태양 에너지를 수집하여 지구로 무선 전송하는 혁신적인 기술로 주목받고 있습니다. 본 보고서는 SBSP 기술의 현재 개발 현황, 실현에 필요한 핵심 기술, 미래 발전 가능성, 그리고 이 기술이 우리의 삶에 가져올 변화에 대해 심층적으로 분석하고자 합니다.

### 2. 우주 기반 태양광 발전 이니셔티브의 현재 상황

#### 2.1 정부 주도 이니셔티브

- NASA: 미국 항공우주국(NASA)은 SBSP에 대한 오랜 관심을 가지고 있으며, 최근 기술 정책 전략실(Office of Technology, Policy, and Strategy, OTPS) 보고서를 통해 2050년까지 SBSP의 실현 가능성을 평가하고 NASA의 잠재적 역할을 탐색했습니다.<sup>1</sup> 이 보고서는 혁신적인 헬리오스타트 스웜(Innovative Heliostat Swarm, RD1)과 성숙한 평면 배열(Mature Planar Array, RD2)이라는 두 가지 대표적인 SBSP 시스템 설계를 분석했습니다.<sup>1</sup> RD1은 자율적으로 반사경을 제어하여 연중 99%의 시간 동안 전력을 생산하는 반면, RD2는 지구를 향하지 않는 태양 전지 패널과 지구를 향하는 마이크로파 방출기를 사용하여 연중 60%의 시간 동안 전력을 생산합니다.<sup>1</sup> 두 설계 모두 현재의 대규모 지상 태양광 발전소와 유사한 2기가와트(GW)의 전력을 생산하는 것을 목표로 합니다.<sup>1</sup> NASA 보고서는 현재 SBSP 시스템의 비용이 매우 높지만, 장기적인 전략적 관점에서 이 기술에 대한 지속적인 관심을 시사합니다. RD1과 RD2 설계에 대한 상세한 분석은 미래 설계 및 비용 예측의 기준을 제공합니다.
- ESA: 유럽우주국(European Space Agency, ESA)은 2023년에 SBSP 기술 개발 및 실현 가능성 분석을 목표로 하는 SOLARIS 프로젝트를 시작했습니다.<sup>3</sup> SOLARIS 프로젝트는 2050년까지 탄소 중립을 달성하려는 유럽의 목표에 기여하는 것을 목표로 하며, 2030년까지 1메가와트(MW) 규모의 발전소를 궤도에 발사하는 것을 주요 목표 중 하나로 설정했습니다.<sup>3</sup> ESA의 적극적인 참여는 SBSP를 미래 에너지 솔루션으로 진지하게 고려하고 있으며, 단계적 접근 방식을 통해 기술 검증 및 상용화를 추진하고 있음을 보여줍니다.
- JAXA: 일본 우주항공연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)는 1980년대부터 우주 태양광 발전 시스템(Space Solar Power Systems, SSPS)에 대한 연구를 꾸준히 진행해 왔습니다.<sup>5</sup> 1990년대에는 10,000kW급 SPS2000 개념을 제안했으며, 2000년대에는 경제산업성(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI)과 협력하여 백만 kW급 SSPS 개념을 연구했습니다.<sup>13</sup> JAXA는 2015년에 무선 마이크로파 전력 전송 시연에 성공했으며, 가까운 미래에 우주 기반 시험을 계획하고 있습니다.<sup>9</sup> JAXA의 오랜 연구와 실질적인 시연은 SBSP 분야에서 일본의 지속적인 관심과 기술 전문성을 강조합니다.
- 기타 국가: 중국은 2021년부터 2025년 사이에 소형 및 중형 우주 발전소를 발사할 계획을 보고했으며, 2035년까지 MW급 전력을 지구로 전송할 수 있는 200톤 규모의 SBSP 기지를 건설할 계획을 발표했습니다.<sup>9</sup> 인도 우주연구기구(Indian Space Research Organisation, ISRO) 또한 친환경 에너지 이니셔티브의 일환으로 무선 에너지 전송 및 태양광 위성 기술을 탐색하고 있습니다.<sup>12</sup> 여러 국가의 관심은 SBSP의 잠재력에 대한 국제적인 인식을 보여주며, 미래 개발에 있어 협력 또는 경쟁적 구도를 형성할 수 있습니다.

## 2.2 민간 부문 참여

민간 기업들의 SBSP에 대한 관심과 투자가 증가하고 있으며, 벤처 캐피탈 활동 또한 활발해지고 있습니다.<sup>5</sup>

- Space Solar: 영국의 Space Solar는 2030년까지 아이슬란드에 우주 기반 태양광 발전을 공급하기 위해 아이슬란드 에너지 회사 Reykjavik Energy 및 지속 가능성 이니셔티브 Transition Labs와 파트너십을 맺었습니다.<sup>19</sup> Space Solar는 CASSIOPEIA라는 킬로미터 규모의 위성을 개발하여 태양광 패널과 거울 시스템을 통해 태양 에너지를 수집하고, 고주파 무선 전파를 통해 지구의 수신 안테나로 전력을 전송할 계획입니다.<sup>26</sup> 이 회사는 최근 360도 전력 전송 시스템을 지상에서 시연하는 데 성공했습니다.<sup>19</sup>
- Caltech Space Solar Power Project (SSPP): 칼텍의 SSPP는 우주에서 무선으로 전력을 전송하고 지구로 탐지 가능한 전력을 처음으로 전송하는 데 성공한 SSPD-1 Demonstrator를 개발했습니다.<sup>5</sup> SSPP는 초경량, 저비용, 유연한 에너지 전송 시스템을 개발하여 우주에서 태양광을 수집하고 마이크로파로 변환하여 지구로 전송하는 것을 목표로 합니다.<sup>32</sup>
- Aetherflux: Robinhood 공동 창업자 Baiju Bhatt가 설립한 Aetherflux는 저궤도(Low Earth Orbit, LEO)에 100개의 위성으로 구성된 군집을 구축하여 레이저 링크를 통해 외딴 지역에 전력을 공급할 계획입니다.<sup>9</sup> 이 회사는 2025년 또는 2026년에 데모 임무를 계획하고 있습니다.<sup>22</sup>
- Reflect Orbital: Reflect Orbital은 Aetherflux와는 다른 접근 방식을 취하여 대형 우주 기반 거울을 사용하여 입사하는 햇빛을 지구로 직접 반사시키는 방안을 연구하고 있습니다.<sup>22</sup> 이 회사의 주요 목표는 일출 후 지구의 태양광 발전소에 햇빛을 비추어 가동 시간을 연장하는 것입니다.<sup>22</sup>
- Virtus Solis: Virtus Solis는 모든 형태의 에너지와 직접 경쟁할 수 있는 세계 최초의 우주 기반 태양광 발전 시스템을 설계했습니다.<sup>19</sup> 이 회사는 저장 없이 햇빛이 비추는 우주에서 날씨와 밤을 통해 지구상의 어느 곳으로든 에너지를 전송하는 기술을 개발하고 있습니다.<sup>41</sup>

이러한 민간 기업들의 다양한 접근 방식과 활발한 투자는 SBSP 기술의 상업적 잠재력에 대한 기대감을 높이고 있으며, 미래 에너지 시장의 중요한 변화를 예고하고 있습니다.

## 2.3 주요 시연 임무 및 결과

- Caltech SSPD-1: 칼텍의 SSPD-1 임무는 2023년 1월에 발사되어 우주에서 무선 전력 전송을 성공적으로 시연하고 지구로 탐지 가능한 전력을 전송했습니다.<sup>5</sup> MAPLE 실험은 우주에서 거리를 두고 무선으로 전력을 전송하고, 빔을 지구로 향하게 할 수 있음을 입증했습니다.<sup>32</sup> 이 임무는 SBSP의 핵심 개념, 특히 상당한 거리에서의 무선 전력 전송 가능성을 검증하는 중요한 이정표가 되었습니다. SSPD-1 임무를 통해 얻은 교훈은 미래 시스템 설계에 귀중한 피드백을 제공할 것입니다.<sup>34</sup>
- Space Solar 지상 시연: Space Solar는 360도 무선 전력 전송 시스템 HARRIER를 개발하여 지상에서 성공적으로 시연했습니다.<sup>19</sup> 이 시연은 움직이는 부품 없이 모든 방향으로 전력을 전송할 수 있는 혁신적인 접근 방식을 보여주었습니다.<sup>30</sup> 이는 궤도를 도는 동안 태양과 지구를 모두 향해야 하는 태양광 발전 위성의 핵심 기술을 입증한 것입니다.

이러한 성공적인 시연은 SBSP 기술의 실현 가능성에 대한 중요한 진전을 나타내며, 미래 대규모 시스템 개발에 대한 기대감을 높이고 있습니다.

### 3. 우주 기반 태양광 발전을 가능하게 하는 핵심 기술

#### 3.1 우주에서의 태양 에너지 수집

- 고효율 및 방사선 경화 태양 전지: 우주 환경은 지상과 달리 방사선에 심하게 노출되므로, 우주 기반 태양광 발전 시스템에는 높은 효율과 방사선에 대한 강한 내성을 갖춘 태양 전지가 필수적입니다.<sup>42</sup> 기존의 실리콘 태양 전지는 우주 방사선에 취약하고 효율성에도 한계가 있어 다중 접합 태양 전지(예: GaInP/GaAs/Ge)가 우주 응용 분야의 주류로 자리 잡았습니다.<sup>3</sup> 다중 접합 태양 전지는 30% 이상의 높은 효율을 제공하며 방사선에 대한 내성도 우수합니다.<sup>3</sup> 현재 40% 효율 달성을 목표로 하는 연구가 진행 중입니다.<sup>3</sup>
  - 시사점: 다중 접합 태양 전지에 대한 의존도는 넓은 스펙트럼의 태양광을 효율적으로 전기로 변환하고 혹독한 우주 환경을 견딜 수 있는 재료의 중요성을 강조합니다. 40% 효율 추구는 SBSP 시스템의 전체 크기와 비용을 줄이기 위해 에너지 포획을 극대화해야 할 필요성을 강조합니다.
  - 사고 과정: 우주 등급 전지는 지상 전지보다 비용이 많이 들지만 효율성 면에서 우수합니다. 재료 과학 및 제조 공정의 발전은 대규모 SBSP 배치를 위해 고효율, 방사선 경화 전지를 더 저렴하게 만드는 데 중요합니다. 우주 응용 분야를 위한 새로운 태양 전지 기술로는 유연하고 가벼우며 자가 치유 및 우수한 방사선 내성을 갖춘 유기 태양 전지(Organic Photovoltaics, OPVs)<sup>47</sup>와 넓은 스펙트럼 흡수 및 높은 효율과 방사선 내성을 잠재적으로 제공하는 양자점 태양 전지<sup>58</sup> 등이 있습니다.
  - 시사점: OPV 및 양자점 전지의 연구는 미래에 더 가볍고 유연하며 잠재적으로 비용 효율적인 우주 태양 에너지 수집 솔루션을 향한 추세를 시사합니다. 일부 OPV의 자가 치유 능력은 SBSP 시스템의 수명을 크게 연장하고 유지 보수 요구 사항을 줄일 수 있습니다.
  - 사고 과정: 이러한 기술은 유망하지만 다중 접합 전지에 비해 기술 준비 수준이 낮으며 SBSP 응용 분야에 대한 장기적인 신뢰성과 확장성을 입증하기 위해 추가 연구 개발이 필요합니다.
- 태양광 집광기: 반사경이나 평창식 거울을 사용하여 태양광을 태양 전지에 집광하면 단위 면적당 전력 출력을 높이고 태양광 어레이의 전체 질량을 줄일 수 있습니다.<sup>9</sup>
  - 시사점: 집광기는 기가와트급 전력 생산에 필요한 방대한 규모의 태양광 패널을 줄이는 핵심 전략이 될 수 있으며, 이는 우주 조립 및 발사 비용과 관련된 일부 문제를 완화합니다.
  - 사고 과정: 우주에서 태양광 집광기의 효율성은 반사면의 정확성, 태양 전지에 의한 집광된 빛의 변환 효율성, 전체 시스템 무게 및 복잡성과 같은 요인에 따라 달라집니다.

#### 3.2 우주에서 지구로의 무선 전력 전송

- 마이크로파 전력 전송: 마이크로파 전력 전송은 태양 에너지를 전기로 변환한 다음 마이크로파로 변환하여 지구로 전송하고, 지구에서는 렉테나(rectenna)를 통해 다시 전기로 변환하는 방식입니다.<sup>1</sup> 일반적인 주파수는 2.45GHz이며, 달성된 효율은 전체적으로 약 50%입니다(더 높아질 가능성 있음).<sup>9</sup> 마이크로파의 장점으로는 저주파수에서 구름과 비를 뚫고 전송될 수 있다는 점이 있습니다.<sup>64</sup>
  - 시사점: 마이크로파 전송은 무선 전력 전송에 대한 검증된 기능을 갖춘 비교적 성숙한 기술입니다. 현재 연구는 효율성을 개선하고 전력 수준을 높이며 대규모 SBSP 응용 분야에 대한 안전성을 보장하는 데 중점을 두고 있습니다.
  - 사고 과정: 주파수와 대기 투과율 사이의 균형은 SBSP 시스템 설계 시 신중하게 고려해야 합니다. 저주파수는 더 안전하지만 더 큰 안테나가 필요할 수 있으며, 고주파수는 더 나은 빔 집속을 제공하지만 대기 손실에 더 취약할 수

있습니다. 마이크로파 노출과 관련된 안전 문제는 이미 확립된 안전 기준 내에서 관리될 수 있습니다.<sup>28</sup> 정확한 빔 조준을 위한 파일럿 신호 및 역추적 시스템과 안전 조치가 사용됩니다.<sup>64</sup>

- 시사점: 대중의 인식과 규제 승인은 우주에서 오는 마이크로파 전력 전송의 안전성을 입증하는 데 달려 있습니다. 강력한 안전 프로토콜과 투명한 커뮤니케이션은 대중의 신뢰를 얻는 데 필수적입니다.
- 사고 과정: SBSP와 관련된 전력 밀도는 일반적으로 전자기파의 전력 밀도보다 낮으며 국제 안전 기준을 따릅니다. 그러나 장기적인 영향과 대중의 우려는 지속적인 연구 및 위험 평가를 통해 철저히 해결해야 합니다.
- 레이저 전력 전송: 레이저 전력 전송은 대안적인 방법으로, 태양 에너지를 레이저 광으로 변환하여 지구의 광전지 수신기로 전송하는 방식입니다.<sup>9</sup> 레이저의 장점으로는 빔 발산이 적고 시스템 크기를 줄일 수 있다는 점이 있지만, 구름과 강우에 취약하고 엄격한 안전 요구 사항이 필요하다는 단점도 있습니다.<sup>75</sup>
  - 시사점: 레이저 전력 전송은 더 집중된 에너지 전송 방식을 제공하므로 특정 응용 분야나 소규모 배치에 유리할 수 있습니다. 그러나 대기 제한 및 안전 문제는 대규모 지상 전력 공급에 상당한 어려움을 초래합니다.
  - 사고 과정: 주요 전송 방법으로 마이크로파와 레이저 중에서 선택하는 것은 효율성, 안전성, 비용, 다양한 환경 조건 및 응용 분야에 대한 적합성 측면에서 각 방법의 장단점을 신중하게 평가한 후에 결정됩니다.

### 3.3 대규모 우주 구조물 건설 및 조립

- GEO에서의 조립 문제: 제안된 SBSP 구조물은 킬로미터 규모로 매우 거대하며, 이러한 대규모 시스템을 정지 궤도(Geostationary Earth Orbit, GEO)로 운송하고 조립하는 것은 엄청난 과제입니다.<sup>1</sup> 로켓 페어링의 부피 제한으로 인해 여러 번의 발사와 복잡한 궤도상 조립 작업이 필요합니다.<sup>1</sup>
  - 시사점: SBSP 시스템의 엄청난 규모는 우주 건설 기술 및 물류 분야에서 상당한 발전을 필요로 합니다. 현재 발사 능력의 한계를 극복하고 혹독한 우주 환경에서 효율적인 조립 방법을 개발하는 것이 중요한 과제입니다.
  - 사고 과정: 기존의 위성 설계에서 벗어나 우주에서 조립되는 모듈형 구조로의 전환은 우주 공학의 패러다임 변화를 의미합니다. 이는 설계, 제조, 운송 및 궤도상 운영에 대한 새로운 접근 방식을 요구합니다.
- 로봇 및 자율 시스템의 역할: 로봇은 비용이 많이 들고 위험한 인간의 우주 유영 활동(Extravehicular Activities, EVAs)에 대한 의존도를 줄이기 위해 SBSP 인프라의 자율 조립, 검사, 유지 보수 및 수리에 중요한 역할을 수행할 것입니다.<sup>4</sup> 대형 구조물에서의 로봇 조작, 이동, 자율 작업 실행에 대한 연구가 진행 중입니다.<sup>92</sup>
  - 시사점: 자율 로봇은 대규모 SBSP 시스템의 경제적이고 안전한 배치 및 운영에 필수적입니다. AI 및 로봇 기술의 발전은 복잡한 우주 건설 및 유지 보수 작업을 가능하게 하는 데 핵심이 될 것입니다.
  - 사고 과정: 미세 중력 및 진공 상태의 우주에서 자율적으로 작동하고, 크고 섬세한 구조물을 다루며, 복잡한 조립 및 수리 작업을 수행할 수 있는 로봇을 개발하려면 컴퓨터 비전, 센서 기술 및 제어 시스템 분야에서 상당한 발전이 필요합니다.
- 경량 및 내구성 있는 재료: 발사 질량을 최소화하고 혹독한 우주 환경(방사선, 열 순환, 미소 운석 충돌)에서 SBSP 시스템의 장기적인 구조적 무결성을 보장하기 위해서는 탄소 섬유, 탄소 나노튜브와 같은 첨단 복합 재료와 박막 태양광 발전과 같은 극도로 가볍고 내구성이 뛰어난 재료 개발이 중요합니다.<sup>3</sup>
  - 시사점: SBSP 시스템의 질량은 발사 비용 및 전체 경제적 생존 가능성에 영향을 미치는 중요한 요소입니다. 높은 강도와 탄력성을 갖춘 첨단 경량 재료의 개발 및 활용은 SBSP를 실현 가능하게 만드는 데 중요합니다.
  - 사고 과정: SBSP 구조물의 재료 요구 사항은 매우 까다로우며, 극심한 온도, 방사선 및 우주 쓰레기의 잠재적 충격을 견디는 동시에 발사 비용을 최소화할 수 있을 만큼 가벼워야 합니다. 새로운 복합 재료 및 제조 공정에 대한 지속적인 연구가 필수적입니다.

## 4. 우주 기반 태양광 발전의 경제적 및 환경적 영향

### 4.1 경제 분석

- SBSP 개발, 제조 및 발사와 관련된 높은 초기 비용은 현재 이 기술을 지상 에너지원보다 훨씬 비싸게 만듭니다.<sup>1</sup>
- 재사용 가능한 로켓(예: SpaceX의 Starship)을 통한 발사 비용 절감, 태양 전지 효율성 향상 및 대량 생산, SBSP 시스템의 장기적인 작동 수명과 같은 요인들은 SBSP의 경제적 경쟁력을 향상시킬 수 있습니다.<sup>1</sup>
  - 시사점: SBSP의 경제적 생존 가능성은 개발 및 배치 전 단계에 걸쳐 상당한 비용 절감에 달려 있습니다. 기술 혁신과 규모의 경제가 SBSP를 경쟁력 있는 에너지 옵션으로 만드는 데 중요할 것입니다.
  - 사고 과정: SBSP의 초기 투자는 높지만, 지속적인 기본 부하 전력 생산의 잠재력과 연료 비용 절감은 특히 전체 수명 주기 비용과 에너지 독립 가능성을 고려할 때 일부 지상 대안에 비해 장기적인 비용 절감으로 이어질 수 있습니다.
- 미래의 SBSP에 대한 균등화 발전 비용(Levelized Cost of Energy, LCOE) 예측은 다양하며, 주요 가정에 따라 크게 달라집니다.<sup>1</sup> 그러나 미래 비용 예측에 따르면 SBSP는 21세기 중반까지 지상 재생 에너지 및 심지어 화석 연료와 경제적으로 경쟁력이 있을 수 있습니다.
  - 시사점: 미래 비용 예측에 따르면 SBSP는 21세기 중반까지 지상 재생 에너지 및 심지어 화석 연료와 경제적으로 경쟁력이 있을 수 있지만, 이러한 예측은 상당한 기술적 및 경제적 발전에 달려 있습니다.
  - 사고 과정: LCOE 추정치의 변동성은 주요 구성 요소 및 공정, 특히 발사 비용과 우주 기반 하드웨어의 효율성 및 수명과 관련된 불확실성을 반영합니다.

표 1: 대표적인 SBSP 시스템 설계 비교 (RD1 및 RD2)<sup>1</sup>

| 특징        | 혁신적인 헬리오스타트 스위프 (RD1) | 성숙한 평면 배열 (RD2)    |
|-----------|-----------------------|--------------------|
| 태양광 패널 면적 | 11.5 km <sup>2</sup>  | 19 km <sup>2</sup> |
| 질량        | 5.9 백만 kg             | 10 백만 kg           |
| 연간 전력 생산량 | 연중 99%                | 연중 60%             |
| 목표 전력 생산량 | 2 GW                  | 2 GW               |

표 2: 균등화 발전 비용 (LCOE) 비교 (현재 및 예측)<sup>1</sup>

| 에너지원       | 현재 LCOE (USD/kWh) | 낙관적 시나리오 예측 LCOE (USD/kWh) |
|------------|-------------------|----------------------------|
| RD1 (NASA) | 0.61              | 0.03                       |
| RD2 (NASA) | 1.59              | 0.08                       |

|                             |           |                                |
|-----------------------------|-----------|--------------------------------|
| 지상 태양광 (저장 포함)              | 0.02-0.05 | -                              |
| 풍력 (저장 없음)                  | 0.02-0.05 | -                              |
| 원자력                         | -         | 0.106 EUR/MWh (약 0.11 USD/kWh) |
| SBSP (Space Solar 예측, 2040) | -         | 0.034 USD/kWh                  |
| SBSP (런던 이코노믹스 예측)          | -         | 0.069 EUR/MWh (약 0.74 USD/kWh) |

\*주: 환율은 2025 년 5 월 10 일 기준 EUR/USD = 1.07 로 적용.

## 4.2 환경 영향

- SBSP 는 화석 연료를 대체하고 기후 변화 완화 노력에 기여할 수 있는 깨끗하고 탄소 배출이 없는 에너지원으로서 잠재적인 환경적 이점을 제공합니다.<sup>1</sup> 우주에서는 지속적인 에너지 공급과 더 강한 태양 복사 에너지를 활용할 수 있습니다.<sup>10</sup>
  - 시사점: SBSP 는 대규모의 지속적인 청정 에너지 공급을 제공하여 지상 태양광 및 풍력 발전의 간헐성 문제를 해결할 수 있는 중요한 이점을 제공합니다.
  - 사고 과정: 우주에서 직접 태양 에너지를 활용함으로써 SBSP 는 대규모 지상 재생 에너지 배치와 관련된 토지 사용 영향 및 일부 재료 자원 요구 사항을 피할 수 있습니다.
- 대규모 SBSP 구조물에서 발생하는 우주 쓰레기 위험과 마이크로파 또는 레이저 전력 전송이 야생 동물 및 인간 건강에 미칠 수 있는 잠재적 영향과 같은 환경적 우려 사항도 존재하지만, 현재 연구에 따르면 마이크로파 전력 밀도는 안전 기준 내에 있을 것으로 예상됩니다.<sup>1</sup>
  - 시사점: SBSP 는 청정 에너지 솔루션을 제공하지만, 배치 및 운영의 잠재적인 환경적 영향, 특히 우주 쓰레기 및 무선 전력 전송의 안전성에 대한 신중한 고려가 필요합니다.
  - 사고 과정: SBSP 의 장기적인 지속 가능성은 우주선 폐기에 대한 책임 있는 관행을 시행하고 에너지 전송 프로세스와 관련된 잠재적인 생태적 또는 건강상의 위험을 완화하는 데 달려 있습니다. SBSP 구성 요소의 제조 및 발사의 환경적 영향을 포함한 전 과정 평가가 중요합니다.<sup>1</sup>

## 5. 미래 발전 경로 및 사회적 영향

### 5.1 잠재적 개발 시나리오

- SBSP 개발은 정부 지원 시범 프로젝트부터 민간 투자 주도의 대규모 상업적 배치에 이르기까지 다양한 잠재적 경로를 따라 진행될 수 있습니다.<sup>1</sup>
- NASA 의 SSPIDR<sup>4</sup> 및 ESA 의 SOLARIS<sup>3</sup>와 같은 프로젝트에서 볼 수 있듯이, 점진적인 시연 및 기술 성숙 노력이 중요한 역할을 할 것입니다.
  - 시사점: SBSP 개발은 대규모 상업적 실현 가능성이 달성되기 전에 여러 단계의 연구, 기술 시연 및 시범 프로젝트를

포함하는 점진적인 프로세스가 될 가능성이 높습니다.

- 사고 과정: 정부 지원 및 민간 파트너십은 SBSP 개발의 초기 단계를 위험 완화하고 필요한 기술 발전을 촉진하는 데 중요한 역할을 할 것입니다.

## 5.2 국제 협력의 역할

- 국가 간(예: 미국과 중국) 및 조직 간의 국제 협력은 SBSP 연구 및 구현을 가속화하고, 지식과 자원을 공유하며, SBSP와 관련된 우주 거버넌스를 위한 국제적 프레임워크를 구축하는 데 잠재적으로 큰 도움이 될 수 있습니다.<sup>6</sup>
  - 시사점: 에너지 문제의 전 지구적 특성과 SBSP 프로젝트의 규모를 고려할 때, 국제 협력은 이 기술을 발전시키고 공정한 배치를 보장하는 데 매우 유익할 수 있습니다.
  - 사고 과정: 협력을 통해 재정 자원을 모으고, 기술 전문 지식을 공유하며, 우주 기반 에너지 인프라와 관련된 잠재적인 지정학적 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있습니다.

## 5.3 혁신적인 사회적 영향

- SBSP는 신뢰할 수 있고 지속적이며 지리적으로 독립적인 에너지원을 제공함으로써 전 세계 에너지 안보에 혁명을 일으키고, 화석 연료에 대한 의존도를 줄이며, 국가의 에너지 독립성을 향상시킬 잠재력이 있습니다.<sup>10</sup>
- 전 세계 외딴 지역 및 소외된 지역에 깨끗하고 저렴한 에너지를 제공하여 전력 접근성을 민주화할 수 있습니다.<sup>5</sup>
- 미래 우주 거주지에 전력을 공급하고 추가적인 우주 탐사를 가능하게 하는 등 광범위한 사회적 변화와 기회를 가져올 수 있습니다.<sup>9</sup>
  - 시사점: SBSP의 성공적인 구현은 전 세계 에너지 시스템, 국제 관계 및 우주에서의 인류 미래에 심오하고 광범위한 영향을 미칠 수 있습니다.
  - 사고 과정: 우주에서 풍부하고 깨끗한 에너지를 이용할 수 있게 되면 다양한 분야에서 혁신을 주도하고, 전 세계적으로 생활 수준을 향상시키며, 에너지 자원과 관련된 잠재적인 지정학적 갈등을 완화할 수 있습니다.

## 6. 결론

우주 기반 태양광 발전은 미래 에너지 기술로서 엄청난 잠재력을 지니고 있으며, 연구 개발 분야에서 상당한 진전이 이루어지고 있습니다. 그러나 이 기술이 실현되기 위해서는 태양 전지 효율성 향상, 무선 전력 전송, 우주 건설, 경량 재료 개발 등 해결해야 할 핵심 기술적 과제들이 남아 있습니다. 또한 경제적 경쟁력을 확보하기 위해서는 상당한 비용 절감이 이루어져야 합니다. SBSP는 환경적으로 깨끗한 에너지원이 될 수 있지만, 우주 쓰레기 및 전력 전송 안전과 관련된 잠재적인 우려 사항도 신중하게 고려해야 합니다. 장기적으로 SBSP는 지구와 우주 모두에서 인류의 지속 가능하고 번영하는 미래에 기여할 수 있는 혁신적인 기술이 될 잠재력을 가지고 있습니다.

## 참고 자료

1. Space-Based Solar Power - NASA, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/01/otps-sbsp-report-final-tagged-approved-1-8-24-tagged-v2.pdf>
2. New Study Updates NASA on Space-Based Solar Power, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.nasa.gov/organizations/otps/space-based-solar-power-report/>
3. Space, the new frontier of photovoltaics - Enel Green Power, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.enelgreenpower.com/media/news/2024/05/photovoltaic-energy-space>
4. ESA - Space-Based Solar Power overview - European Space Agency, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/SOLARIS/Space-Based\\_Solar\\_Power\\_overview](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/SOLARIS/Space-Based_Solar_Power_overview)
5. NASA lays out the path to space-based solar power - Freethink, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.freethink.com/energy/space-based-solar-power-solar-energy>
6. Why the EU, UK, US, and Japan are Exploring Space-Based Solar Power - Wellspring, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.wellspring.com/blog/exploring-space-based-solar-power>
7. Are space-based solar farms the future of clean energy? - HSBC Global Private Banking, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.privatebanking.hsbc.com/individual-investors/frontiers-series/are-space-based-solar-farms-the-future-of-clean-energy/>
8. ESA accelerates the race towards clean energy from space, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/United\\_Kingdom/ESA\\_accelerates\\_the\\_race\\_towards\\_clean\\_energy\\_from\\_space](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/United_Kingdom/ESA_accelerates_the_race_towards_clean_energy_from_space)
9. Space-based solar power - Wikipedia, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://en.wikipedia.org/wiki/Space-based\\_solar\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Space-based_solar_power)
10. Is Space-Based Solar Power Our Future? (May 2025) - GreenMatch, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2020/02/space-based-solar-power>
11. Top 10 Companies in Space-Based Solar Power Market in 2024 - Emergen Research, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.emergenresearch.com/blog/top-10-companies-in-space-based-solar-power-market>
12. Space-Based Solar Power Stations: Harnessing the Sun from Space - UPPCS MAGAZINE, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://uppcsmagazine.com/space-based-solar-power-stations-harnessing-the-sun-from-space/>
13. About the SSPS | JAXA | Research and Development Directorate, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/ssps-ssps.html>
14. Space-based solar power: Generating electricity above Earth - Ynetnews, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.ynetnews.com/health\\_science/article/hj4qg0nzke](https://www.ynetnews.com/health_science/article/hj4qg0nzke)
15. Solar Power in Space: How Viable Is Space-Based Energy Harvesting? (Tech & Market Stats) | PatentPC, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://patentpc.com/blog/solar-power-in-space-how-viable-is-space-based-energy-harvesting-tech-market-stats>
16. Space tech: Experts name the 12 transformative technologies reshaping our cosmic future, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.weforum.org/stories/2025/02/space-12-transformative-technologies/>
17. Beam us down, Scotty: space solar power straight to Earth - Nesta, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.nesta.org.uk/feature/future-signals-2024/space-solar-power-straight-to-earth/>

18. Space based solar power : r/space - Reddit, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.reddit.com/r/space/comments/179w9hu/space\\_based\\_solar\\_power/](https://www.reddit.com/r/space/comments/179w9hu/space_based_solar_power/)
19. Breakthrough coming? Iceland could get solar power from space in 2030, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.space.com/iceland-space-based-solar-power>
20. Space-Based Solar Power, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.factoriesinspace.com/space-solar-power>
21. Top Companies List of Space-Based Solar Power Industry - MarketsandMarkets, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.marketsandmarkets.com/ResearchInsight/space-based-solar-power-companies.asp>
22. Startups Race to Make Space-Based Power a Reality - Payload, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://payloadspace.com/four-startups-race-to-make-space-based-power-a-reality/>
23. Space Solar and Thales Alenia Space in the UK working together to deliver Space-Based Solar Power, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.thalesaleniaspace.com/en/press-releases/space-solar-and-thales-alenia-space-uk-working-together-deliver-space-based-solar>
24. Space Solar, developing and commercialise Space-Based Solar ..., 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.spacesolar.co.uk/>
25. A 30-Megawatt Space Solar Power Plant Is Scheduled For 2030 - CleanTechnica, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://cleantechnica.com/2024/11/09/a-30-megawatt-space-solar-power-plant-is-scheduled-for-2030/>
26. How CASSIOPEIA's Innovative Technology Can Help Us Reach Net Zero - Space Solar, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.spacesolar.co.uk/how-cassiopeias-innovative-technology-can-help-us-reach-net-zero/>
27. Our Technology - Space Solar, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.spacesolar.co.uk/our-technology/>
28. Solar farms in space move one step closer | Air Force Tech Connect, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://spaceforcetechconnect.org/news/solar-farms-space-move-one-step-closer>
29. Space Solar and Transition Labs to deliver space-based solar power to Iceland by 2030, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.spacesolar.co.uk/space-solar-and-transition-labs-to-deliver-space-based-solar-power-to-iceland-by-2030/>
30. Space Solar Demonstrates World's First 360° Wireless Power Transmission - Harwell Campus, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.harwellcampus.com/space-solar-wireless-power-transmission/>
31. Beaming solar power to Earth from space a step closer after new breakthrough | Recharge, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.rechargenews.com/energy-transition/beaming-solar-power-to-earth-from-space-a-step-closer-after-new-breakthrough/2-1-1621880>
32. In a First, Caltech's Space Solar Power Demonstrator Wirelessly Transmits Power in Space, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.caltech.edu/about/news/in-a-first-caltechs-space-solar-power-demonstrator-wirelessly-transmits-power-in-space>
33. Space Solar Power Project, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.spacesolar.caltech.edu/>
34. Space Solar Power Project Ends First In-Space Mission with Successes and Lessons - www.caltech.edu, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.caltech.edu/about/news/space-solar-power-project-ends-first-in-space-mission-with-successes-and-lessons>
35. Caltech Team Demonstrates Wireless Power Transfer in Space, Beams Power Down to Earth - SpaceRef, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://spaceref.com/newspace-and-tech/caltech->

- [demonstrates-wireless-power-transfer-space-beams-earth/](#)
36. Scientists beam solar power to Earth from space for 1st time ever, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.space.com/space-solar-power-satellite-beams-energy-1st-time>
  37. Scientists demonstrate wireless power transmission from space to Earth for first time - Reddit, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.reddit.com/r/space/comments/144bjiz/scientists\\_demonstrate\\_wireless\\_power/](https://www.reddit.com/r/space/comments/144bjiz/scientists_demonstrate_wireless_power/)
  38. Space-Based Solar Project Completes its Mission - Payload, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://payloadspace.com/space-based-solar-project-completes-its-mission/>
  39. Space Solar Power Project Will Harness the Sun to Power the Planet from 300 Miles Above - Caltech Magazine, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://magazine.caltech.edu/post/sspp-space-solar-power-project>
  40. Space Solar Power, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.aetherflux.com/>
  41. Virtus Solis, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://virtussolis.space/>
  42. A Brief Review of High Efficiency III-V Solar Cells for Space Application - Frontiers, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2020.631925/full>
  43. Most Efficient Solar Panels for 2025: US Customers Still Waiting on Record-Setting Panel, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.cnet.com/home/energy-and-utilities/most-efficient-solar-panels/>
  44. Photovoltaic panels in space: a possible revolution in solar energy - Enel, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.enel.com/company/stories/articles/2024/05/solar-panels-in-space>
  45. Solar power in space? : r/nasa - Reddit, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.reddit.com/r/nasa/comments/16n1vcf/solar\\_power\\_in\\_space/](https://www.reddit.com/r/nasa/comments/16n1vcf/solar_power_in_space/)
  46. Sunny superpower: solar cells close in on 50% efficiency - Physics World, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://physicsworld.com/a/sunny-superpower-solar-cells-close-in-on-50-efficiency/>
  47. Light, flexible and radiation-resistant: Organic solar cells for space | University of Michigan News, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://news.umich.edu/light-flexible-and-radiation-resistant-organic-solar-cells-for-space/>
  48. Organic solar cells for space demonstrate radiation resistance, self-healing - PV Magazine, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.pv-magazine.com/2025/01/13/organic-solar-cells-for-space-demonstrate-radiation-resistance-self-healing/>
  49. Light flexible and radiation resistant organic solar cells for space - Solar Daily, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.solardaily.com/reports/Light\\_flexible\\_and\\_radiation\\_resistant\\_organic\\_solar\\_cells\\_for\\_space\\_999.html](https://www.solardaily.com/reports/Light_flexible_and_radiation_resistant_organic_solar_cells_for_space_999.html)
  50. Ultra-thin, radiation-resistant solar cells for new space applications - PV Magazine, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.pv-magazine.com/2022/11/11/ultra-thin-radiation-resistant-solar-cells-for-new-space-applications/>
  51. Radiation-resistant solar cells for space use - ResearchGate, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.researchgate.net/publication/222172060\\_Radiation-resistant\\_solar\\_cells\\_for\\_space\\_use](https://www.researchgate.net/publication/222172060_Radiation-resistant_solar_cells_for_space_use)
  52. Solar Dynamic Technology - National Space Society, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://nss.org/settlement/nasa/spaceresvol2/technologies.html>
  53. Space Solar Cells/CICs - Rocket Lab, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.rocketlabusa.com/space-systems/solar/space-solar-cellscics/>

54. 3U Solar Panel - High-Efficiency Solar Power for CubeSats - EnduroSat, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.endurosat.com/products/3u-solar-panel/>
55. SPACE Solar Cells, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-space/space-solar-cells>
56. space-solar-power-2024, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://interactive.epri.com/space-solar-power-2024>
57. Light, flexible and radiation-resistant: Organic solar cells for space - ScienceDaily, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.sciencedaily.com/releases/2025/01/250110143701.htm>
58. Revolutionizing Solar Energy with Quantum Dot Solar Cells (2025) | 8MSolar, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://8msolar.com/revolutionizing-solar-energy-with-quantum-dot-solar-cells/>
59. A Space-Based Energy Addition To Move The World To Net Zero - Oliver Wyman, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2023/mar/a-space-based-energy-addition-to-move-the-world-to-net-zero.html>
60. Space Based Solar Power is VERY Promising : r/energy - Reddit, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.reddit.com/r/energy/comments/1dbebdw/space\\_based\\_solar\\_power\\_is\\_very\\_promising/](https://www.reddit.com/r/energy/comments/1dbebdw/space_based_solar_power_is_very_promising/)
61. Wireless Power Transmission Options for Space Solar Power, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20080036588/downloads/20080036588.pdf>
62. High-Efficiency Microwave Wireless Power Transmission via Reflective Phase Gradient Metasurfaces and Surface Wave Aggregation | ACS Applied Materials & Interfaces, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.4c11720>
63. Microwave Power Transmission - A Next Generation Power Transmission System - ResearchGate, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.researchgate.net/publication/314382931\\_Microwave\\_Power\\_Transmission\\_-\\_A\\_Next\\_Generation\\_Power\\_Transmission\\_System](https://www.researchgate.net/publication/314382931_Microwave_Power_Transmission_-_A_Next_Generation_Power_Transmission_System)
64. Project etc. Research on the Space Solar Power Systems (SSPS) Research on Microwave Wireless Power Transmission Technology, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/ssps-mssps.html>
65. NRL Conducts Successful Terrestrial Microwave Power Beaming Demonstration, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/3004608/nrl-conducts-successful-terrestrial-microwave-power-beaming-demonstration/>
66. Radiated microwave power transmission system efficiency measurements - NASA Technical Reports Server (NTRS), 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750018422>
67. Wireless Power Transmission Using Microwaves - International Journal of Engineering Innovation and Research, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://ijeir.org/administrator/components/com\\_jresearch/files/publications/IJEIR\\_43\\_Final.pdf](https://ijeir.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJEIR_43_Final.pdf)
68. (PDF) Wireless power transmission using microwaves and its human safety evaluation, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.researchgate.net/publication/380153298\\_Wireless\\_power\\_transmission\\_using\\_microwaves\\_and\\_its\\_human\\_safety\\_evaluation](https://www.researchgate.net/publication/380153298_Wireless_power_transmission_using_microwaves_and_its_human_safety_evaluation)
69. Microwave Transmission of Space-Based Solar Power: The Focus of New Attention, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.gravel2gavel.com/microwave-transmission-space-solar-power/>
70. MICROWAVE POWER TRANSMISSION SYSTEM STUDIES - NASA Technical Reports Server, 5 월

- 14, 2025 에 액세스, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19760008509/downloads/19760008509.pdf>
71. Generating electricity in space to power our future generations - SIA Partners, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.sia-partners.com/en/insights/publications/generating-electricity-space-power-our-future-generations>
72. METHOD OF SPACE BASED SOLAR POWER EXTRACTION USING MICROWAVES | Request PDF - ResearchGate, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.researchgate.net/publication/372077494\\_METHOD\\_OF\\_SPACE\\_BASED\\_SOLAR\\_POWER\\_EXTRACTION\\_USING\\_MICROWAVES](https://www.researchgate.net/publication/372077494_METHOD_OF_SPACE_BASED_SOLAR_POWER_EXTRACTION_USING_MICROWAVES)
73. How to get solar power from space - Cipher News, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.ciphernews.com/articles/how-to-get-solar-power-from-space/>
74. Appendix H - National Space Society, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://nss.org/settlement/nasa/75SummerStudy/6appendH.html>
75. Long-distance Laser-energy Transmission for Space Solar Power Systems and Their Application on Earth | NTT R&D Website, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.rd.ntt/e/research/JN202401\\_24534.html](https://www.rd.ntt/e/research/JN202401_24534.html)
76. Space solar power system | NTT Space Environment and Energy Laboratories | NTT R&D Website, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.rd.ntt/e/se/technology/space\\_solar\\_power.html](https://www.rd.ntt/e/se/technology/space_solar_power.html)
77. Nature-inspired solar lasers could sustainably power space missions | Heriot-Watt University, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.hw.ac.uk/news/2024/nature-inspired-solar-lasers-could-sustainably-power-space-missions>
78. Full article: Space-based solar laser system simulation to transfer power onto the earth, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20909977.2020.1815497>
79. Project etc. Research on the Space Solar Power Systems (SSPS) Research on Laser Wireless Power Transmission Technology, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/ssps-ssps.html>
80. Space Laser Power Transmission System Studies - NASA Technical Reports Server, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19820010704/downloads/19820010704.pdf>
81. In-Space Manufacturing: Technologies, Challenges, and Future Horizons - MDPI, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.mdpi.com/2504-4494/9/3/84>
82. On-Orbit Manufacturing and Assembly of Spacecraft - IDA, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/o/on/on-orbit-manufacturing-and-assembly-of-spacecraft/on-orbit-manufacturing-and-assembly-of-spacecraft.ashx>
83. Technology Challenges and Opportunities for Very Large In-Space Structural Systems, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090034149/downloads/20090034149.pdf>
84. Paper Session III-C - Considerations for Large-Scale Construction in Orbit - Scholarly Commons, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1197&context=space-congress-proceedings>
85. Large Space Structures, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.factoriesinspace.com/large-space-structures>
86. In-Space Structural Assembly: Applications and Technology - NASA Technical Reports Server, 5 월 14, 2025 에 액세스,

- <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160007719/downloads/20160007719.pdf>
87. IN-SPACE SERVICING, ASSEMBLY, AND MANUFACTURING FOR THE NEW SPACE ECONOMY, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://csps.aerospace.org/sites/default/files/2022-07/Cavaciuti-Davis-Heying\\_ISAM\\_20220715.pdf](https://csps.aerospace.org/sites/default/files/2022-07/Cavaciuti-Davis-Heying_ISAM_20220715.pdf)
  88. Current Challenges and Opportunities for Space Technologies - Frontiers, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.frontiersin.org/journals/space-technologies/articles/10.3389/frspt.2020.00001/full>
  89. The Development of In-Space Servicing, Assembly, and Manufacturing Technology: Drivers, Challenges, and Policy Implications - RAND, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/rgs\\_dissertations/RGSDA2600/RGSDA2693-1/RAND\\_RGSDA2693-1.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/rgs_dissertations/RGSDA2600/RGSDA2693-1/RAND_RGSDA2693-1.pdf)
  90. SECURITY IN SPACE - Defense Intelligence Agency, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.dia.mil/Portals/110/Documents/News/Military\\_Power\\_Publications/Challenges\\_Security\\_Space\\_2022.pdf](https://www.dia.mil/Portals/110/Documents/News/Military_Power_Publications/Challenges_Security_Space_2022.pdf)
  91. In-Space Construction - ThinkOrbital, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://thinkorbital.com/in-space-construction/>
  92. Robotics & Support - Maxar Technologies, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.maxar.com/maxar-space-systems/products/robotics-and-support>
  93. In-Space Servicing, Assembly, and Manufacturing (ISAM) - NASA, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.nasa.gov/nexis/isam/>
  94. Editorial: Robotic in-space servicing, assembly and manufacturing - PMC, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11341295/>
  95. SwRI demonstrating robotics for in-space manufacturing at Space Symposium, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.swri.org/newsroom/press-releases/swri-demonstrating-robotics-space-manufacturing-space-symposium>
  96. In Space Robotic Assembly and Maintenance - JPL Robotics - NASA, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www-robotics.jpl.nasa.gov/what-we-do/research-tasks/in-space-robotic-assembly-and-maintenance/>
  97. Skyworker: Robotics for Space Assembly, Inspection and Maintenance, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://nss.org/wp-content/uploads/2017/07/Space-Manufacturing-conference-13-104-Skyworker-Robotics.pdf>
  98. Groundbreaking method for robotic space assembly inspired by human arm dynamics, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.spacedaily.com/reports/Groundbreaking\\_method\\_for\\_robotic\\_space\\_assembly\\_inspired\\_by\\_human\\_arm\\_dynamics\\_999.html](https://www.spacedaily.com/reports/Groundbreaking_method_for_robotic_space_assembly_inspired_by_human_arm_dynamics_999.html)
  99. Robotics for Assembly, Inspection, and Maintenance of Space Macrofacilities, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub2/whittaker\\_william\\_red\\_I\\_2000\\_1/whittaker\\_william\\_red\\_I\\_2000\\_1.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub2/whittaker_william_red_I_2000_1/whittaker_william_red_I_2000_1.pdf)
  100. Robotics for in-space servicing, assembly and manufacturing is key for sustainable space infrastructure - Aerospace America, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/robotics-for-in-space-servicing-assembly-and-manufacturing-is-key-for-sustainable-space-infrastructure/>

101. Editorial: Robotic in-space servicing, assembly and manufacturing - Frontiers, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2024.1421697/full>
102. News: The role of AI and robotics in advancing space exploration and satellite deployment, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.automate.org/news/-68>
103. AWIMR: Autonomous Walking Inspection and Maintenance Robot - JPL Robotics - NASA, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www-robotics.jpl.nasa.gov/what-we-do/research-tasks/awimr-autonomous-walking-inspection-and-maintenance-robot/>
104. Autonomous grasping robots will help future astronauts maintain space habitats, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://engineering.purdue.edu/ME/News/2024/autonomous-grasping-robots-will-help-future-astronauts-maintain-space-habitats>
105. Skyworker: Robotics for Space Assembly, Inspection and Maintenance, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub2/skaff\\_sarjoun\\_2001\\_1/skaff\\_sarjoun\\_2001\\_1.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub2/skaff_sarjoun_2001_1/skaff_sarjoun_2001_1.pdf)
106. Knowledge-Driven Robot Could Handle Maintenance on Space Missions | GTRI, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.gtri.gatech.edu/newsroom/knowledge-driven-robot-could-handle-maintenance-space-missions>
107. Autonomous Robot Swarms for Lunar Orbit Servicing and Space Asset Assembly - NASA TechPort - Project, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://techport.nasa.gov/projects/106703>
108. A comprehensive survey of space robotic manipulators for on-orbit servicing - Frontiers, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2024.1470950/full>
109. NASA tests autonomous space robots for off-world construction - Freethink, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.freethink.com/space/space-robots-armadas>
110. The Future of Space Robotics: Pioneering Autonomous Construction, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://spacevoyageventures.com/the-future-of-space-robotics-from-assistants-to-autonomous-builders/>
111. Advanced Space Composites: Pioneering the Future of Space Exploration with Lightweight Materials - ResearchAndMarkets.com - Business Wire, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.businesswire.com/news/home/20250502313328/en/Advanced-Space-Composites-Pioneering-the-Future-of-Space-Exploration-with-Lightweight-Materials---ResearchAndMarkets.com>
112. Superlightweight Aerospace Composites (SAC) - NASA, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.nasa.gov/superlightweight-aerospace-composites-sac/>
113. Revolutionary 20-Gram Boom Redefines Lightweight Space Structures - SciTechDaily, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://scitechdaily.com/revolutionary-20-gram-boom-redefines-lightweight-space-structures/>
114. Composites Applications for Space - SAMPE, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.nasampe.org/page/CompositesApplicationsforSpace>
115. Lightweight Materials and Structures (LMS) - NASA, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/lightweight-materials-and-structures-lms/>
116. Composites: The future lies in space - FACC AG, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.facc.com/en/BEyond-Blog/Composites-The-future-lies-in-space>
117. Lightweight Materials & Structures - YouTube, 5 월 14, 2025 에 액세스,

- <https://www.youtube.com/watch?v=y6x6KWiAZT0>
118. Developing design tools for outer space structures - News - Purdue University, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.purdue.edu/newsroom/2022/Q1/developing-design-tools-for-outer-space-structures>
  119. Materials for space structures - Issuu, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://issuu.com/university\\_of\\_southampton/docs/space\\_at\\_southampton\\_2022\\_final/s/17481634](https://issuu.com/university_of_southampton/docs/space_at_southampton_2022_final/s/17481634)
  120. The lightweight future of space design and material selection - Keronite Blog, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://blog.keronite.com/the-lightweight-future-of-space-design-and-material-selection>
  121. Analyzing the Economics of Space Based Solar Power : r/spacex - Reddit, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.reddit.com/r/spacex/comments/8j254y/analyzing\\_the\\_economics\\_of\\_space\\_based\\_solar\\_power/](https://www.reddit.com/r/spacex/comments/8j254y/analyzing_the_economics_of_space_based_solar_power/)
  122. The Case for Solar Power From Space - NSS, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://nss.org/the-case-for-solar-power-from-space/>
  123. Economic analysis of space-based solar power systems - NASA Technical Reports Server (NTRS), 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770008553>
  124. Space-based solar power: 'We have nothing to lose and everything to gain' - Physics World, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://physicsworld.com/a/space-based-solar-power-we-have-nothing-to-lose-and-everything-to-gain/>
  125. Space-based Solar Energy Market Report 2024-35 - Juniper Research, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.juniperresearch.com/research/iot-emerging-technology/space-technology/space-based-solar-energy-research-report/>
  126. London Economics study shows space-based solar power could bring billions in benefit to Europe, and address energy vulnerability, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://londoneconomics.co.uk/blog/press-event/space-based-solar-power/>
  127. Space-based Solar Power: Contributing to achieving Net Zero by 2050 [Aug/2022], 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://space-economy.esa.int/article/170/space-based-solar-power-contributing-to-achieving-net-zero-by-2050>
  128. The Pros and Cons of Space-Based Solar Power - Renewable Energy Magazine, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://www.renewableenergymagazine.com/jane-marsh/the-pros-and-cons-of-spacebased-solar-20241203>
  129. How Does Space-Based Solar Power Compare to Other Renewable Energy Sources in the Context of Environmental Impact?, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://newspaceconomy.ca/2024/04/16/how-does-space-based-solar-power-compare-to-other-renewable-energy-sources-in-the-context-of-environmental-impact/>
  130. Environmental impact of high power density microwave beams on different atmospheric layers - European Space Agency, 5 월 14, 2025 에 액세스, [https://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ARI/ARI%20Study%20Report/ACT-RPT-NRG-ARI-04-9102-Environmental\\_impacts\\_of%20microwave\\_beams-Report.pdf](https://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ARI/ARI%20Study%20Report/ACT-RPT-NRG-ARI-04-9102-Environmental_impacts_of%20microwave_beams-Report.pdf)
  131. Preliminary Environmental Assessment for the Satellite Power System (SPS) - NASA Technical Reports Server, 5 월 14, 2025 에 액세스, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19790016265/downloads/19790016265.pdf>

132. SPACE POWER BEAMING - Air Force Research Laboratory, 5 월 14, 2025 에 액세스,  
<https://afresearchlab.com/technology/space-power-beaming/>
133. US Space Solar Startup Aims For Mass Production In 2025 - CleanTechnica, 5 월 14, 2025 에  
액세스, <https://cleantechnica.com/2024/11/01/us-space-solar-startup-readies-radiation-hardened-solar-cells-for-mass-production/>
134. The Giants Collaboration: China- US Partnership to Capture Solar Power from Space!, 5 월 14,  
2025 에 액세스, <https://m.youtube.com/watch?v=z9sIIcGjMKA>
135. US and China could collaborate on space-based solar power, 5 월 14, 2025 에 액세스,  
[https://www.spacedaily.com/reports/US\\_and\\_China\\_Could\\_Collaborate\\_on\\_Space\\_Based\\_Solar\\_Power\\_to\\_Combat\\_Climate\\_Change\\_999.html](https://www.spacedaily.com/reports/US_and_China_Could_Collaborate_on_Space_Based_Solar_Power_to_Combat_Climate_Change_999.html)
136. Harnessing Solar Power and Battery Storage in Space, 5 월 14, 2025 에 액세스,  
<https://essolar.com/blogs/es-solar/harnessing-solar-power-and-battery-storage-in-space>
137. Solar Power in Space and Interplanetary Exploration (2025) | 8MSolar, 5 월 14, 2025 에 액세스,  
<https://8msolar.com/solar-power-in-space-and-interplanetary-exploration/>