

StarRoad 계획: 지상에서 우주로 이어지는 초중량급 전자기 발사 회랑

목차

탐색: [처음](#) | [목차](#) | [끝](#)

[1. 개요, 핵심 특징, 역량, 철학](#)

[1.1. 계획의 핵심 철학](#)

[1.2. 역량](#)

[2. 기술·경제·지리·전략적 장점과 근거](#)

[2.1. 기술](#)

[2.2. 경제](#)

[2.3. 지리](#)

[2.4. 전략](#)

[3. 산업·기술 기반](#)

[3.1. 자기부상과 전자기 가속\(마그레브\)](#)

[3.2. 초전도 기술과 분산형 아키텍처](#)

[3.3. 펄스전력](#)

[3.4. 진공기술](#)

[3.5. 극초음속 공기역학과 열 보호](#)

[3.6. 원자력 시스템](#)

[3.7. 터널건설](#)

[3.8. 자율형 지열 열에너지 시스템](#)

[3.9. 초음속 연소](#)

[3.10. 포털의 폐쇄형 연료 순환](#)

[3.11. 기술 검증 전략](#)

[4. StarRoad 구성 요소와 기술의 단계별 상세 설명](#)

[4.1. 가속 터널과 관련 기반시설](#)

[4.2. 대기 게이트웨이\(고지대 터미널\)](#)

[4.3. 셔틀\(AstroLiner\)](#)

[5. 발사 준비부터 착수 후 정비까지의 운용 주기](#)

[5.1. 준비와 발사](#)

[5.2. 터널 내 가속](#)

[5.3. 대기 게이트웨이를 통한 출구](#)

[5.4. 대기권 통과](#)

[5.5. 우주 진입과 궤도 운용](#)

[5.6. 궤도 이탈과 귀환](#)

[5.7. 해상 착수](#)

5.8. 예인과 정비

6. 추진, 일정, 요구사항, 산업 거점

6.1. 계획 단계

6.2. 산업 거점

6.3. 전체 일정

7. 해결하는 문제와 과제

7.1. 지구적 과열

7.2. 경제적 과제

7.3. 전략 목표

7.4. 기술 촉매

7.5. 에너지·열 자립

7.6. 탄소 발자국

7.7. 수열 간선 운하의 사회·환경적 잠재력

7.8. 에너지망

7.9. 경제 동맥으로서의 StarRoad

7.10. 핵심 기반시설 안전

7.11. 입지 선정과 확장성

7.12. 대륙횡단 프로젝트의 정치·법적 조율

7.13. 화물 흐름의 단계적 확대

8. 시장과 궤도 물류

8.1. 초중량급 발사의 수요 문제

8.2. 초기 시장: 우주 태양광발전과 궤도 데이터센터

8.3. 우주 태양광 발전의 기후·산업적 근거

8.4. 궤도 배치 지점: GEO 와 EML4/5

8.5. 초기 단계: AstroLiner-S 직항 비행

8.6. 성숙 단계: 마이크로파 중계망과 서비스 인프라

8.7. 운용 환경에 따른 수송 기능 분리

8.8. 성숙 물류에서 AstroLiner 의 역할

8.9. 궤도 간 수송선과 예인선

8.10. 지구와 다른 행성으로의 강하

8.11. 표준화 모듈

8.12. 궤도 인프라의 계층

8.13. 궤도 조선소

8.14. 궤도·달 정착지

8.15. 물류 비유: 해상망으로서의 우주

8.16. 화물 흐름의 경제성

8.17. 시장과 물류의 발전 단계

[8.18. 진화 전망: StarRoad 의 후속 체계](#)

[8.19. 행성공학의 잠재력: 하나의 자원 체계로서의 태양계](#)

[8.20. 전략적 결론](#)

[9. 계획의 경제 모델](#)

[9.1. 방법론과 주요 가정](#)

[9.2. 아프리카 조건의 굴착 비용](#)

[9.3. 자체 제작 터널 굴착기 선단](#)

[9.4. 자율형 지열 열에너지 시스템](#)

[9.5. 에너지 저장 시스템](#)

[9.6. 산업 거점과 물류](#)

[9.7. 연구개발과 시제품 – 0 단계](#)

[9.8. 최종 CAPEX 종합](#)

[9.9. 단계별 배분\(십억 USD\)](#)

[9.10. 투자 회수와 운송 원가의 변화](#)

[9.11. 대안과의 비교](#)

[9.12. 경제성 결론](#)

[10. 안전과 비상 운용 모드](#)

[10.1. 안전 철학: 단일 고장이 치명적 결과로 이어져서는 안 된다](#)

[10.2. 주요 위험과 보호 대책](#)

[10.3. 비상 절차의 단계](#)

[10.4. 생존성을 위한 구조 대책](#)

[10.5. 음향 및 충격파 영향](#)

[11. 문화·심리적 영향](#)

[11.1. 현상으로서의 장관](#)

[11.2. 심리적·상징적 울림](#)

[11.3. 사회경제적 영향](#)

[12. 결론](#)

1. 개요, 핵심 특징, 역량, 철학

StarRoad 는 길이 2,050 km 가 넘는 진공 자기부상 가속기를 중심으로 구축되는 지상-우주 장거리 간선 수송 단지다. 기체에 반작용식 발사용 추진제를 사용하지 않고 최대 15,000 톤의 자율형·재사용형 초중량 셔틀을 우주로 보내도록 설계된다.

1.1. 계획의 핵심 철학

우주 발사 패러다임의 전환:

- **관성 대기권 통과.** StarRoad 는 추력과 공기역학적 성능으로 대기를 극복하는 대신, 진공에서 약 11 km/s 의 극초음속으로 가속한 셔틀의 질량에 저장된 운동에너지를 이용한다. 대기권은 50~60 초 동안 전 구간을 관성으로 통과한다.
- **장점으로서의 질량.** 수천 톤의 큰 질량은 더 이상 적지 아니라 막대한 운동에너지의 운반체가 되며, 구조와 열 보호에 초고강도 내화 재료를 사용할 수 있게 한다.
- **기능 분리.** 에너지 기반시설, 가속, 정밀 제어는 지상 단지가 담당하여 고정형 공학 시스템이 된다. 셔틀은 화물 운송, 궤도 기동, 귀환에 최적화된 전용 수송 모듈이 된다.
- **확장 가능한 산업화.** 시스템은 단일 시설이 아니라 우주 ‘철도’의 첫 노선으로 구상된다. 병렬·예비·추가 터널을 건설할 수 있어 처리량은 기하급수적으로 늘고 비용은 낮아진다.

1.2. 역량

- **정지궤도(GEO) 너머로 직접 수송.** 약 11 km/s 의 초기 속도에 지구 적도 자전에서 얻는 약 0.465 km/s 가 더해지면, 셔틀은 지구-태양계 또는 지구-달계 L1/L2 라그랑주점과 같은 고에너지 목적지에 최소한의 보정으로 거의 직접 도달할 수 있다. 이에 따라 저지구궤도에서의 예인과 재급유를 없앨 수 있다.
- **탑재 능력.** 한 번의 비행으로 수천 톤을 운송할 수 있다. 기가와트급 궤도 발전소, 우주 정착지, 자원 채굴·처리·조립·생산 시설, 행성 방어 체계, 행성 간 우주선 건설이 경제적으로 가능해진다.
- **비용.** 완전 가동 시 고궤도 운송비는 kg 당 1~10 달러까지 낮아질 수 있으며, 이는 현재 및 미래 로켓 시스템보다 몇 자릿수 낮다.

2. 기술·경제·지리·전략적 장점과 근거

2.1. 기술

대안적 궤도 발사 구상의 대부분은 원리상 건설 가능한지가 아니라 연속 운용, 능동 동적 지지, 비현실적으로 높은 신뢰도, 고장의 파국적 결과 같은 운용 요건에 제약된다. 능동 운동 메가구조는 운용 상태를 유지하기 위해 무정전 전력과 지속적인 동적 안정화가 필요하며, 전력이나 제어를 잃으면 지지를 상실하고 잠재적으로 파국적인 고장 상태에 들어간다. 장대한 외부 진공관 시스템도 밀봉, 구간 격리, 열 안정성에 매우 엄격한 요건을 부과한다. StarRoad 는 핵심 기반시설이 지하에 있고, 펄스 운용이 가능하며, 사고를 국소화하고, 수동적으로 안정하다는 점에서 다르다. 이 때문에 지구 밖으로 화물을 운송하는 간선 시스템 가운데 최소한의 실현 가능성을 갖춘 형태가 된다. 진공 수송, 극초음속 공기역학, 펄스 전력, 초전도체 같은 실제 기술을 StarRoad 규모에 맞게 적용한다는 점도 구상의 현실성을 높인다.

2.2. 경제

주요 비용은 건설 자본과 에너지다. 소모성 단이 없고 발사 때 작동 유체 소비가 거의 없으므로 운용비가 획기적으로 줄어든다. 이 계획은 지역 개발, 새로운 에너지 체계, 첨단기술 집적지도 촉진한다.

StarRoad 의 경제성을 평가하려면 세계 수송·에너지 기반시설의 규모를 고려해야 한다. 연간 세계 화물 흐름에서 수백만 톤은 미미한 비중이며, 수천억 달러의 자본 투자는 행성 규모 기반시설에서 통상적이다. 따라서 StarRoad 는

기존 수송 체계와 경쟁하지 않는다. 세계 총화물 흐름에는 비교적 작은 영향을 주면서 새로운 역량을 더하는 고에너지 회랑이라는 영역을 담당한다.

2.3. 지리

가봉 니앙가강 하구에서 콩고민주공화국 모히산과 남부 고원으로 이어지는 노선은 이상적인 조건에 가깝다.

- **적도.** 지구 자전에서 얻는 속도 증가를 극대화하고 궤도 경사각 보정을 최소화한다.
 - **직선 시야.** 중앙아프리카의 인구 희박 지역을 비교적 곧게 지난다.
 - **게이트웨이 고도.** 해발 3,400 m 에서는 출구의 대기 밀도가 30% 낮아져 열 하중과 충격 하중이 완화된다.
 - **지진 안정성.** 이 지역에서는 동아프리카 열곡대의 활동이 매우 낮다.
 - **물류.** 노선은 생산과 셔틀 회수에 유리한 바다에서 시작해 고지대에서 끝난다.
- **최적 노선과 부지는 가봉 니앙가강 하구에서 콩고민주공화국 모히산까지 약 2,050 km** 구간이다. 가봉 해안에서 발사하면 **약 3°의 거의 이상적인 적도 궤도 경사각**을 얻어 정지궤도와 라그랑주점에 직접 접근하고 행성 간 전이 비용을 최소화할 수 있다. 게이트웨이 단지는 해발 약 3,400 m **의 모히산에 두며**, 넓은 남부 고원은 확장용으로 확보한다. 이 부지는 높은 고도, 평탄한 지형, 정착지에서 20 km 이상 떨어진 거리, 탕가니카호와 키부호에 가까운 위치라는 뛰어난 조건을 갖춘다.
- **대안 부지.** 콩고민주공화국 키톰브항에서 모히산으로 이어지는 **예비 노선은 약 1,850 km**이며 한 나라 안에 완전히 들어가 물류와 법적 조정이 쉬워진다. 그러나 약 13°의 궤도 경사각이 **생기므로**, 화물을 경사각 0°의 **정지궤도나 라그랑주점으로** 보내려면 약 200~300 m/s의 추가 델타-v가 필요하다. 이는 **매 발사 때 탑재** 질량 약 2~4%를 잃는 것과 같다. 따라서 더 복잡하더라도 경사각 약 3°의 **국제 적도 노선**을 선택하는 것은 회랑의 전 수명 동안 경제 효율을 극대화하고 궤도 기반시설의 모든 핵심 거점에 직접 접근하기 위한 전략적 결정이다.

2.4. 전략

전천후·24 시간 우주 수송 회랑을 구축한다. 장기적으로 이러한 노선망은 세계적 기반시설이자 대규모 대피 잠재력을 지닌 문명 안전장치가 되며, 에너지 집약적이고 열을 많이 내는 산업을 지구 밖으로 옮기는 전면적 우주 산업화의 기반이 된다.

로켓 시스템이 주장하는 초저가 탑재물 운송비를 달성하더라도 로켓 발사는 처리량이 제한된 개별 사건으로 남는다. 이런 의미에서 kg 당 가격과 무관하게 로켓 시스템은 본질적으로 원정형 물류다. StarRoad는 개별 발사비를 최소화하는 데 그치지 않고 안정적이고 지속적인 화물 흐름을 구축하기 위한 기반시설 회랑이다.

3. 산업·기술 기반

StarRoad는 새로운 물리 법칙의 발견을 요구하지 않으며, 기존 기술과 신흥 기술을 공학적으로 통합한 정점이다.

3.1. 자기부상과 전자기 가속(마그레브)

중국, 일본, 독일의 경험을 활용한다. 중국의 자기부상 시험에서 1톤을 2초 만에 0에서 700 km/h로 가속한 기록은 대질량 물체를 빠르게 가속하는 것이 원리적으로 가능함을 보여 준다.

3.2. 초전도 기술과 분산형 아키텍처

StarRoad 는 역전된 구조를 쓴다. 주 부상·안정화 자기장을 만드는 초전도 자석은 셔틀에 탑재하고 기내 극저온 시스템으로 냉각한다. 터널에는 수동 안내 장치이자 펄스 가속 에너지를 전달하는 2 차 회로 역할을 하는 비교적 단순하고 저렴한 구리 또는 알루미늄 ‘레일’ 권선을 둔다. 이로써 터널 비용과 복잡성은 몇 자릿수 낮아지고, 핵심 기술적 복잡성은 중앙에서 정비할 수 있는 재사용 셔틀로 옮겨간다.

3.3. 펄스전력

노선을 따라 분산 배치한 슈퍼커패시터와 배터리 기지는 지열 자윈 열에너지 시스템망에서 충전되어 필요한 가속기 구간에 기가와트급 펄스를 공급한다.

3.4. 진공기술

CERN 대형 강입자 충돌기, SpinLaunch, Hyperloop 진공관에서 얻은 경험.

3.5. 극초음속 공기역학과 열 보호

우주선, 기동형 재진입체, SpaceX Starship 같은 사업에서 얻은 지식. 능동 냉각과 상변화 축열기.

3.6. 원자력 시스템

궤도에서 셔틀에 전력을 공급하기 위한, 방사성동위원소 열전 발전기의 다음 세대에 해당하는 소형 기내 원자로 또는 Helion Energy 시스템 같은 미래형 핵융합 모듈.

3.7. 터널건설

연간 수십 킬로미터를 전진할 수 있는 현대식 터널 굴착기로 여러 터널을 병행 굴착한다.

3.8. 자윈형 지열 열에너지 시스템

이 계획은 개량 지열시스템(Enhanced Geothermal Systems, EGS)을 적용한 독자적 기가와트급 통합 에너지·기후 기반시설을 포함한다. 작동유체는 직접공기포집(Direct Air Capture, DAC)으로 대기에서 얻는 초임계 이산화탄소(sCO_2)다. 세 기능을 통합한다. 1) 가속터널 열안정을 위한 지열장 능동제어, 2) 기저부하 발전, 3) 대기 CO_2 의 장기격리.

3.9. 초음속 연소

게이트웨이의 기체역학 장벽은 공기-수소 혼합물로 작동하는 환형 초음속 제트 엔진을 이용한다. 초음속 연소로 터널 축을 따라 바깥쪽을 향하는 안정된 원뿔형 기체 흐름을 만든다. 이 흐름이 대기를 밀어내고 셔틀 통과 때 가속기 진공을 보호하는 압력 구배를 형성한다.

3.10. 포털의 폐쇄형 연료 순환

가스역학 장벽은 청정 재생 연료를 사용합니다. 물을 전기분해해 수소를 만들고 엔진은 대기를 산화제로 씁니다. 장벽을 가동한 뒤 주된 연소 생성물은 과열 수증기입니다. 외판 산악 시설로 대량의 화학 연료를 운송·저장할 필요가 없어 신뢰성이 높아지고 운영비가 줄어듭니다.

3.11. 기술 검증 전략

계획 개발은 수학적 모델링과 핵심 조립체의 실규모 시험이라는 두 경로로 병행한다. 이를 통해 주 사업의 위험을 최소화하면서 구상의 실현 가능성을 조기에 확인하고 정확한 공학 데이터를 얻는다.

4. StarRoad 구성 요소와 기술의 단계별 상세 설명

4.1. 가속 터널과 관련 기반시설

- **길이:** 약 2,050 km.
- **단면.** 셔틀의 공력 형상과 안정적인 자기부상에 최적화한 타원형(약 17.5×12.5 m).
- **터널 깊이:** 약 8 km 까지. 지질과 온도 조건이 허용하면 더 깊게 설치할 수 있다. 가속 터널의 허용 깊이는 노선 시추, 온도 분포 작성, 암반 응력·균열·수리지질 평가를 포함한 정밀 지질조사 뒤에만 정확히 정할 수 있다. 심부 지층의 온도와 열유속이 낮을수록, 대략 $200 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 까지를 기준으로, 공학적으로 가능한 깊이 범위가 넓어지고 곡률반경과 전이 구간 등 선형을 최적화할 자유도도 커진다. 따라서 목표 속도를 유지하면서 터널 안의 최대 과부하와 동적 하중을 낮출 수 있다.
- **구조: 복합형.** 처음 약 330 km 는 가속을 단순화하기 위해 게이트웨이 쪽으로 곧게 내려가는 지하 환경사 직선 구간이다. 본 구간은 열 안정성, 진공 격리, 안전을 위해 심부 또는 지하에 둔다.
- **선형:** 약 330 km 이후 S 자 곡선.
 - **하강 곡선:** 반경 약 6,300 km. 필요한 각도를 만들도록 터널을 완만하게 심부로 이끈다.
 - **상승 곡선:** 반경 2,500~3,500 km. 수평선에 대해 약 $5 \sim 6^{\circ}$ 로 터널을 게이트웨이에 연결한다. 극초음속에서 구심가속도가 4g 를 넘지 않도록 반경을 정한다.
- **진공 시스템:** 구획형. 약 50 km 의 각 구획은 자체 진공펌프, 센서, 비상밸브를 갖춘 독립 계통이다.

4.1.1. 가속 시스템

셔틀의 가속과 안정화는 기내 초전도 자석과 터널에 분산 배치된 선형 전자기 구동장치, 즉 코일의 상호작용으로 이루어진다. 구동장치는 구리·알루미늄 같은 일반 도체로 만든 분할형 수동 코일이며 극저온 냉각이 필요 없다.

- **터널 초기부(0~330 km).** 구동장치는 주로 **궤도 바닥** 아래에 있어 부상과 4g 초기 가속을 위한 자기장을 만들고 중력을 능동적으로 보상한다.
- **중간부(330~2, 000 km),** 특히 **S 곡선에서는 구동장치가** 터널 둘레 전체를 감싼다. 정밀 가속, 극초음속에서 셔틀을 중심에 강제로 유지하는 기능, 곡선부 자세 안정화를 맡는다. 반경방향 가속도가 큰 종단부 바닥에는 구조적으로 중복되고 보강된 코일 재료를 쓴다. 330~2,000 km 에서 가속도는 구간 시작 4g 에서 끝 0g 까지 곡선적으로 낮아지고, 경로 끝에서 최종 속도 약 11 km/s 에 도달한다.
- **종단부(2, 000~2,050 km).** 마지막 50 km 는 대기권 게이트웨이로 나오기 전 안정화와 중심 정렬에 쓰며 가속하지 않는다.

자율형 지열 열에너지 시스템의 변전소에서 나오는 펄스 전력을 셔틀 위치와 정확히 동기화해 **특정 코일 구간**에 공급한다. 생성된 진행 자기장이 기내 자석과 상호작용해 셔틀을 가속한다. 이 구조는 터널을 단순화해 정비성을 높이고 첨단 부품을 재사용 셔틀에 집중한다.

4.1.2. 자율형 지열 열에너지 시스템

열안정, 에너지자립, 장수명을 위해 각 가속터널에 소구경 서비스터널 7 개를 병설해 통합 자율 지열 시스템을 만든다.

- **집열·발전 간선터널 6 개(직경 2 m).** 가속터널 바닥 30 m 아래, 중심간격 7 m 로 균등 배치한다. 2 개씩 가역운전하며 강하게 과냉각한 +5°C 초임계 CO₂를 순환시킨다. 가속기 단면 전체 아래에 두께 15 m 이상의 연속 냉각슬래브를 만들어 열교를 완전히 없앤다.
- **기술서비스터널 1 개(직경 3 m).** 가속터널과 같은 높이에서 옆으로 3 m 떨어져 운행을 멈추지 않고 상시 진단·수리할 수 있다. 지열터널은 최대 25 MPa 내압, 암압, 동적하중의 복합작용을 견딘다. **7 개 전부를 완전로봇화 소형 터널굴착기(TBM) 군으로 굴착한다. 자율 지열 시스템이 에너지기반을 운송계통에서 물리·기능적으로 분리해 탁월한 신뢰성과 정비성을 준다.**

4.1.3. 자율 지열 시스템 냉각 시스템

- **심부냉각회로.** 가속터널 아래 집열·발전터널에서 CO₂계 유체를 고밀도·고압 또는 초임계상태로 순환한다. 심부 집열터널에 들어가기 전 정상 저온운전의 저온류 목표는 약 +5~+15°C. 지열을 회수하고 심부를 지난 뒤에는 깊이, 암반열유속, 발전모드에 따라 +100°C 를 넘을 수 있다. 회로가 지열을 제거하고 주터널 아래 냉각영역을 만들어 약 5~8 km 심부시공을 안전하게 한다.
- **수열 간선 수로 . StarRoad 를 따라 서비스도로, 송전선, 통신선과 나란히 건설해 터미널들을 통합 분산형 지표방열계로 잇는다.**

폭 약 5~8 m, 깊이 2~3 m. 바닥의 여러 독립 고압 사행관이 인접 터미널 사이로 CO₂를 보내며 물은 열완충재이자 중간열매체다.

터빈, 열교환, 압축설비를 나온 CO₂는 약 +50~+80°C 로 사행관에 들어가 약 50 km 구간에서 물에 열을 주고 계절, 습도, 폭우, 야간복사냉각, 운전상태에 따라 약 +22~+35°C 로 식는다.

정상 수온은 약 +22~+32°C, 고온구간은 국부적으로 +35~+45°C. 고온류 입구에서 잠시 +50~+80°C 가 되어 생물활동을 일부 줄일 수 있으나 정화 없이는 식수가 아니다.

수로 위를 일사를 반사하고 적외선 방열을 허용하는 경량 선택판으로 덮는다.

- **터미널냉각.** 각 터미널에 냉각탑, 열교환기, 펌프, 부스터압축기, 터보팽창기, 예비칠러를 둔다. 정상운전에서는 저급열 대부분을 수로에서 수동 방출한다.

냉각탑과 열교환기가 수로 뒤 CO₂를 약 +22~+35°C 에서 +15~+25°C 로 낮춘다. 필요하면 예비칠러가 심부집열터널 투입 전 -5~+5°C 로 낮춘다. 칠러는 상시 주계통이 아니라 첨두·비상·계절 예비다.

- **부스터압축과 터보팽창기.** CO₂는 다음 터미널에 저온·고압으로 도착한다. 팽창기가 압축에너지 일부를 회수하고 압력, 유량, 필요한 상에 따라 팽창으로 약 -10~+5°C 까지 더 냉각한다.

그 뒤 필요한 온도, 압력, 상으로 집열터널에 보낸다. 이는 공짜에너지가 아니다. 압축기가 일을 더하고 수로가 압축열을 버리며 팽창기는 투입분 일부만 돌려준다. 이점은 능동냉동설비 부담을 낮추면서 더 차가운 흐름을 얻는 것이다.

- **중복성과 양방향성.** 사행관은 이중·양방향이다. 한 회로가 손상되면 예비관이나 인접터미널로 흐름을 재분배하고 열부하, 비상상태, 구간상태에 따라 CO₂ 방향을 바꾼다.
- **정비성.** 수로를 약 1 km 마다 게이트로 구획한다. 손상구간을 격리하고 펌프로 수위를 기술상 최소까지 내리거나 일부 배수한다. 감압 뒤 작업팀이나 로봇이 전구간을 멈추지 않고 사행관에 접근한다. 수리 중 예비회로, 역류, 인접터미널 열교환 강화, 칠러 임시가동으로 냉각을 유지한다.
- **제한적 물관리.** 동쪽에서 서쪽으로 일정한 경사가 있으면 느린 자연유하, 구간세척, 잉여수 제어방류가 가능하다.

야간 적도폭우를 집수, 침전조, 필터, 월류설비로 보충에 쓸 수 있다. 물은 CO₂와 직접 닿지 않아 국부정화 뒤 제한적 관개, 터미널 용수, 소방비축, 녹지보호대에 이용할 수 있다.

이 기능은 부차적이며 취수는 CO₂ 냉각과 자율 지열 시스템의 열안정이라는 주목적을 해치지 않는 범위로 제한한다.

- **StarRoad 에서의 의미.** 심부집열터널, 수열간선수로, 터미널냉각기, 냉각탑, 부스터압축기, 터보팽창기, 예비칠러가 하나의 분산열관리계를 이룬다. 국부냉동기에 대한 의존을 줄이고 내고장성과 터미널간 열재분배능력을 높이며 심부가속터널을 현실화한다.

지표냉각계는 경제적 가치도 높여 노선에 터미널, 서비스도로, 전력거점, 수로, 산업부지, 관개농지의 선형지대를 만든다.

4.1.4. 자율 지열 시스템의 전략적 중요성

전력공급과 열안정화 외의 핵심 역할은 가속터널을 5~8 km 이상의 초심부에 안전하고 경제적으로 시공하게 하는 것이다. 열장의 능동제어와 지열류 제거가 원래 이런 깊이를 막을 온도제약을 없앤다. 이에 따라 큰 곡률반경의 최적 S자 선형을 구현해 2,050 km 에서 화물·승무원 과부하를 약 4g 이내로 유지하며 완만히 상승하고 수평선에서 약 5~6°로 방출한다. 자율형 지열 열에너지 시스템은 발전뿐 아니라 StarRoad 전체 탄도최적화의 기술기반이다. 전 시설을 로봇화 소형 TBM 군으로 굴착한다.

4.1.5. 직교 측면 기술터널 체계

건설, 환기, 보수, 대피를 지원하기 위해 노선을 따라 50 km 간격으로 경사 수송 터널 40 개를 건설한다. 각 터널은 경사 30°, 단면 약 17.5 × 12.5 m 의 타원형이다. 주 터널과 같은 굴착기로 파며 지표와 최대 8 km 깊이의 간선 회랑을 연결한다.

- **물류.** 비상정지(Alarm-2) 때 작업자·승무원의 독립 대피로다. 수직갱과 달리 자주차량으로 한 번에 수십 명을 대피시킨다.
- **안전.** 비상정지(Alarm-2) 때 작업자·승무원의 두 번째 독립 대피로를 확보한다.

- **확장성.** 경사터널은 미래 병렬 StarRoad 선의 연결기반이다. 여기서 새 가속터널로 수평지선을 뚫어 계속 성장하는 운송골격을 만들 수 있다.
- **자율 지열 시스템 통합.** 각 경사터널보다 10~20 m 더 아래에 집열터널을 뚫어 건설 때 암반을 사전동결·안정화하고 이후 발전한다.
- **지상터미널 단지.** 각 경사터널은 다목적 지상터미널에서 끝난다. 40 개 터미널은 각각 독립거점이며 다음을 갖춘다.
 - **터널 공기환경을** 유지하고 배기를 제거하는 환기·가스정화설비.
 - **모듈, 굴착토, 건축자재의 보관·환적·임시적치** 공간을 갖춘 건설기지.
 - **교대인력용 관리·생활동(관제실, 휴게실, 작업장, 창고).**
 - **심부집열터널 열매체를 사용·** 관리하고 공동 자율지열망에 통합된 지열발전소와 냉각설비.
 - **CO₂ 포집·처리소(DAC).** 대기에서 CO₂를 직접 포집해 액화·정제하고 열매체로 심부집열터널에 보내 폐회로를 완성한다.
 - **외부 전력망·통신 접속점(예비전원, 광대역 회선).**
 - **지역교통망에** 연결하는 진입도로 또는 철도지선.
 - **응급의료소와 헬리패드**를 갖춘 지상대피점.
- **법적·환경적 유연성.** 경사진 서비스 터널을 사용하면 StarRoad 가 국립공원, 보호구역, 집수지의 깊은 지하를 지나더라도 지상 터미널을 보호 토지 밖에 둘 수 있습니다. 공원 경계 안에 시설을 짓지 않고 보전지역 아래로 노선을 통과시킬 때의 주된 법적 장애가 사라집니다. 각 터미널은 가장 가까운 비보호 부지에 건설하고 경사 수직구로 연결하므로 허가가 단순해지고 환경 압력이 줄며 보호 생태계에 대한 직접 영향이 없어집니다.

4.1.6. 전력공급·에너지저장 시스템

StarRoad 가속기의 전력망은 3 계층으로 다음을 제공한다.

- **확실한 중복성:** 단일요소 고장으로 운전을 멈추지 않는다.
- **적응형 방전속도:** 출발부의 초 단위부터 종단의 마이크로초까지.
- **전력케이블 최소화:** 손실과 인덕턴스를 줄인다.
- **토폴로지 계층**
 - 레벨 0: 1 차 저장설비(터미널)**
 - 40 개 터미널에 중력저장, 양수저장(수로 소수력), 리튬이온배터리(BESS)를 둔다.
 - 터미널당 총용량: 약 5~9 GWh, 전구간 약 360 GWh.
 - 출력: 기술터널 간선케이블을 통한 최대 100 kV 고전압 직류.
 - 레벨 1: 구간제어기(50 km 구간)**
 - 전구간을 50 km 씩 41 개 구간으로 나눈다. 마지막도 게이트웨이까지 50 km 다.

- 각 구간의 주배전제어기는 인접 2 개 터미널에서 전력을 받아 상호중복을 이룬다.
- 구간제어기가 1 km 씩의 에너지블록에 배전하고 동작을 동기화한다.

2 단계: 1 km 단위 전력 블록. 각 블록에는 다음 기능을 수행하는 지역 제어기가 있다.

- 구간제어기에서 전력을 받고,
- 주터널 벽 아래의 버퍼용 리튬이온배터리를 제어하며,
- 벽 뒤 전용공간의 플라이휠과 이오니스터, 즉 슈퍼커패시터를 거쳐 전환식 코일군을 제어한다.

구간제어기에서 각 블록으로 가는 2 개 독립계통이 중복성을 보장한다.

○ 케이블 경로 구성

- **간선케이블(레벨 0→1):** 주터널에서 3 m 떨어져 나란히 가는 직경 3 m 기술서비스터널에 설치한다.
- **노선배전:** 각 터미널에서 양방향 50 km, 합계 100 km 연장해 인접터미널 영역과 겹친다. 각 구간은 최소 2 개 인접터미널에서 급전받아 100% 중복된다.
- **주터널 인입:** 1 km 마다 기밀관통부를 통해 기술터널 케이블을 주터널로 빼내 블록제어기에 연결한다.
- **블록내 배전:** 제어기 뒤에서 2 개 병렬경로로 나눈다.

경로 A: 초 단위 피크를 평활화하는 블록당 약 0.5~1 GWh 버퍼용 리튬이온배터리.

경로 B: 벽 뒤 플라이휠(관성저장)과 이오니스터(슈퍼커패시터)를 거치는 전환식 코일군.

- **방전 속도의 3 구역 적용.** 셔틀 가속 프로파일은 초단 펄스가 필요 없는 초반에 권선 세트당 최대 전력이 가장 높고, 노선 종점으로 갈수록 낮아지도록 최적화한다. 이에 따라 세 구역에서 서로 다른 저장·스위칭 기술을 사용할 수 있다.

구역	노선구간	방전특성	저장/스위칭 방식	이유
구역 I(저속)	0~200 km	초~밀리초	리튬이온배터리 + 표준 IGBT 인버터	셔틀이 느려 1 km 통과에 0.1 초 넘게 걸린다. 버퍼 없는 BESS 운전이 가능하다.
구역 II(중속)	200~1,000 km	밀리초~마이크로초	버퍼 리튬이온 + 관성 플라이휠 + SiC 인버터	속도가 올라 더 빠른 스위칭이 필요하지만 기계식 플라이휠은 아직 사용할 수 있다.
구역 III(고속)	1,000~2,000 km	마이크로초 펄스	이오니스터(슈퍼커패시터) + 고속 사이리스터 스위치(GTO/IGCT)	1 km 통과시간이 0.09 초까지 짧아진다. 나노초 응답 슈퍼커패시터와 이오니스터만 펄스를 안정화할 수 있다.

중요: 구역 III 는 가속도가 낮아져 km 당 필요에너지가 구역 I 보다 적다. 방전속도 요구는 엄격하지만 장비부하는 낮다.

○ 중복성과 비상내성

- **제어기 이중화:** 각 구간·km 제어기에 독립급전 동일기판 2 장의 핫스탠바이를 둔다.
- **상호급전:** 각 km 블록은 자기 구간뿐 아니라 기술터널 예비케이블을 통해 인접 구간제어기에서도 전력을 받을 수 있다.
- **국부코일 중복:** 각 km 블록에 교대전환하는 독립코일군 3 개를 둔다. 하나가 손상돼도 나머지 둘이 효율을 낮추되 멈추지 않고 가속한다.

- **비상차단:** 단락이나 과열을 감지하면 km 제어기가 해당블록 급전을 끊고 구간간 게이트로 격리한다. 인접블록은 영향받지 않는다.

○ 물리구성과 결론

요소	설치장소	기능
1 차 저장설비	지상(터미널)	장기 에너지저장(360 GWh).
간선케이블	기술터널(3 m)	중복성을 갖춰 터미널에서 구간으로 송전.
구간제어기	주터널 전용공간(50 km 마다)	10 개의 1 km 블록에 배전·동기화.
버퍼 리튬이온배터리	주터널 벽 아래	구역Ⅰ~Ⅱ의 초 단위 피크 평활화.
플라이휠	터널 벽 뒤(구역Ⅲ)	밀리초 펄스 버퍼.
이오니스터(슈퍼커패시터)	터널 벽 뒤(구역Ⅲ)	마이크로초 안정화와 전압강하 보상.
로컬 km 제어기	1 km 마다 전용공간	코일전환, 상태감시, 버퍼관리.
가속기코일	터널 내면	서틀가속용 진행자기장 생성.

○ 전력공급 구성의 이점

- **부드러운 부하분산.** 터널 전구간에서 동시에 최대전력이 필요하지 않다. 초기에는 느린 펄스, 종단에서는 짧지만 저출력 펄스다.
- **전계층 중복성.** 터미널, 제어기, 심지어 50 km 구간 전체가 고장 나도 멈추지 않고 인접계통이 부족분을 메운다.
- **확장 유연성.** 병렬 StarRoad 선을 추가해도 전력계를 다시 만들 필요 없이 기존 기술터널에 간선케이블만 더 설치하면 된다.
- **비용최적화.** 비싼 이오니스터와 플라이휠은 실제 필요한 종단구간에만 쓰고 초기구간에는 저렴한 리튬이온배터리를 쓴다.

4.2. 대기 게이트웨이(고지대 터미널)

‘마지막 구간’ 문제를 없앤다.

4.2.1. 위치와 구조

게이트웨이 단지는 콩고민주공화국 모히산 정상 고원, 약 3,400 m 에 둔다. 미래 확장을 위해 남쪽 16 km 의 넓은 고원을 확보해 수십 개의 병렬 게이트웨이를 수용한다. 주 기계식 차단문과 기체역학 장벽 생성계를 갖춘 거대 시설이다. 사실상 하늘을 향해 비스듬히 놓인 삼중 환형 노즐의 지상 고정식 제트엔진이지만, 물체를 가속하는 것이 아니라 대기를 밀어내고 서틀이 대기로 진입할 때 완충영역을 만드는 데 쓴다.

4.2.2. 기체역학 장벽

주 작동 요소. 서틀이 접근하기 수초 전에 터널 축을 따라 바깥으로 향하는 원뿔형 초음속 기체 흐름을 만든다.

- **발생원과 구조.** 게이트웨이 개구부 둘레에 설치한 3 개의 독립 동심 환형 제트엔진, 즉 벨트, 또는 같은 3 중 벨트 구성의 극초음속 램제트로 장벽을 만든다. 공기-수소 혼합연료를 쓰며 수소는 현장에서 전기분해로 생산한다. 3 중 중복성 덕분에 어느 2 개 벨트만 작동해도 유효한 장벽이 되므로 1 개가 고장 나도 기능을 유지한다. 각 벨트에는 독립 연료공급·제어·점화계가 있다. 벨트는 게이트웨이 외곽에 작은 것에서 큰 것으로 뒤로 물러나는 계단식으로 겹치고, 기계식 차단문은 벨트 열 뒤쪽의 게이트웨이 내부에 둔다. 따라서 기계문을 먼저 열지 않고 벨트를 기동할 수 있다.

- **핵심 기능.**

1) **셔틀이 통과하는 동안** 터널 진공을 지키는 바깥 방향 압력을 만든다.

2) **게이트웨이 앞 출구영역의** 대기를 미리 밀어내고 가열해 터널 진공과 대기의 경계에 구배를 만들고 두 매질 사이를 단계적으로 전환한다.

기체역학 장벽은 셔틀의 공력 방호막이 아니며 대기를 차폐하지도 않는다. 역할은 매질 사이의 전환을 시간적으로 늘리는 것이다. 차갑고 정지한 공기와 접촉할 때 거의 순간적으로 발생하는 마이크로초 충격하중을, 가열되어 같은 방향으로 흐르는 기류와 접촉하는 분산된 밀리초 하중으로 바꾼다. 전체 공기력은 줄지 않지만 저크와 고주파 하중이 크게 감소해 국부 파손과 구조 열충격 위험이 낮아진다.

- **흐름 형상:** 터널과 셔틀 단면에 맞는 타원 단면 원뿔. 길이는 수십~수백 m 이며 대기권 게이트웨이 제트벨트의 3 열 환형 노즐에서 바깥으로 뿜는다.

대기권 게이트웨이의 기체역학 장벽에는 기하학적으로 완벽하거나 정상상태이거나 엄밀한 축대칭 원뿔이 필요 없다. 작동은 본질적으로 동적이며 흐름 형상, 밀도, 속도의 시간·공간 변동을 허용한다.

게이트웨이 작동의 유일한 엄격하고 결정적인 조건은 셔틀이 빠져나오는 내내 압력과 운동량의 양의 외향 구배를 유지해 대기가 터널로 들어오는 것을 완전히 막고, 출구영역의 대기를 사전에 기체역학적·열적으로 준비하는 것이다. 이는 신뢰성과 실현 가능성을 크게 높인다.

따라서 흐름 형상은 목표값이 아니라 적응 변수이며, 고정 기하가 아니라 압력, 질량유량, 운동량 같은 적분 특성을 기준으로 실시간 최적화한다.

- **확장성과 시험.** 수천 km 가속기와 달리 게이트웨이는 모듈식이며 쉽게 확장할 수 있다. 안정적인 초음속 기체역학 원뿔 형성, 동기화, 제트벨트 운전 같은 핵심기술을 1:5 또는 1:10 완전기능 실물 시험설비에서 모두 검증해 본선의 실규모 건설 전에 주요 기술위험을 없앨 수 있다.

4.2.3. 안전 시스템

수소 사용에는 높은 방폭·방화 기준이 필요하다. 게이트웨이 기반시설에는 이중 수소 누출 감지, 질소를 이용한 배관 불활성 퍼지, 방폭 장비, 전해설비·저장소·엔진벨트의 물리적 분리, 예상 방출물을 작업자와 핵심시설에서 멀리 떨어진 대기로 안전하게 유도하는 방향성 환기통로를 둔다.

4.3. 셔틀(AstroLiner)

4.3.1. 크기와 발사질량

길이 약 150 m, 타원 단면 약 10 × 15 m. 대기 관통 때 항력과 열부하를 최소화한 극초음속 썰기 형상이다.

○ **최적 발사질량: 약 15,000 톤.**

15,000 톤은 물리적 한계와 실현 능력 사이 ‘최적 중간점’에 놓인 공학·경제 최적값이다.

기준	하한(< 8,000~10,000 톤)	최적(15,000 톤)	상한(> 20,000~25,000 톤)
공기역학과 과부하	대기가 지배한다. 항력 $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ 가 큰 과부하 $a = F_d/m$ 을 만들어 복잡한 능동안정화와 최고 열부하를 요구한다.	관성 이 지배한다. 초기의 짧은 시간, 최대 5 초 동안 대기저항이 약 3~6g 를 만들므로 더 단순한 충격완화와 열방호를 쓸 수 있다.	과부하는 조금만 줄고 다른 요인이 이점을 상쇄한다.
열 특성	낮은 열용량. 작은 질량 m 에서는 온도 $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ 가 빠르게 올라 극단적인 능동냉각이 필요하다.	높은 열관성. 대형 구조가 짧은 대기 관통의 최고 열을 흡수·분산해 수동·능동 열방호를 함께 쓸 수 있다.	열용량은 늘지만 대형 구조의 방열이 별도 문제가 된다.
발사 에너지	필요 에너지 $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ 는 감당할 수 있지만 단점을 상쇄하지 못한다.	합리적 균형. 11 km/s 까지 가속하는 데 약 9×10^{14} J, 즉 약 252 GWh 가 들며 분산형 자율 지열 시스템과 저장설비의 능력에 맞는다.	에너지 비용은 선형으로 늘지만 전력과 저장용량을 불균형하게 키워야 해 경제성이 낮다.
구조와 물류	실현 가능하지만 ‘관성 램’의 핵심 이점이 없다.	현존 기술과 양립한다. 크기와 질량은 현대 조선소 도크, 용접, 운송 능력의 범위다.	구조 강성이 떨어지고 고유진동, 조립, 발사지 운송 문제가 생긴다. 비용은 선형 이상으로 증가한다.
StarRoad 의 철학	대기에 취약한 ‘경량 비행체’ 관점에 머문다.	‘관성 램’을 실현한다. 대기는 장벽이 아니라 질량과 강도로 넘는 짧은 교란이 된다.	산업이 감당하지 못할 과제가 되어 규모의 경제를 잃는다.

- **물리적으로** 관성이 공력작용을 지배하기 시작하는 약 10,000 톤의 문턱보다 위다.
- **에너지** 면에서 기반시설 요구를 지속적으로 늘리지 않는다.
- **기술** 면에서 조선·중공업 같은 확장 가능한 산업관행 안에 머문다.
- **경제** 면에서 규모에 따른 발사비 절감과 자본비 제한을 균형시킨다.

따라서 이 값은 **StarRoad** 를 물리적으로 실현 가능하고 경제적으로 타당하게 만드는 **계산상 최적점**이다.

4.3.2. 배치와 시스템

내부 전체는 동체 높이에 따라 기능을 나눈 다층 종방향 구조로 설계한다.

- **동체 하부와** 후부는 기내 원자로, 열교환기, 능동냉각회로, 전력변환기, 에너지저장장치, 냉매배관, 해상추진장치 등 에너지·동력계통에 전용한다. 무게중심을 낮춰 극초음속 비행, 활공, 착수 때 안정성을 높이고 상부 구획의 열·방사선 방호를 단순화한다.
- **초전도 부상·안정화계를** 양 측면과 바닥 일부에 통합한다. 모듈은 외피와 열방호층 바로 뒤에 고정해 자기장과 터널 수동코일 사이 간격을 최소화한다. 자석 위치는 다음과 같다.
 - 상부 슬라이딩 도어 선까지의 상·중부를 포함해 동체 양쪽 전체 길이.
 - 바닥의 중·후부.
 - 주익 전개부와 기계식 수납부는 제외.

이 배치가 균일 자기장, 극초음속에서 높은 안정성, 국부 손상 때 내고장성을 제공한다.

- **동체 중앙**은 접이식 날개의 수납공간과 지지프레임에 쓴다. 주익은 동체 안에 접히고 에너지·화물구획과 격리된다. 기수 중앙 앞쪽에는 전이상태에서 경로수정과 안정화를 하는 소형 전개식 조종익을 둔다.
- **동체 상부**에는 범용 교체식 탑재모듈을 둔다. 치수, 고정점, 질량, 허용 무게중심을 표준화해 화물, 탱커, 승객, 혼합형으로 구성할 수 있다. 발사 전 도크에서 장착·제거하고, 상부도어를 열면 궤도에서도 취급한다. 화물실의 유압 또는 전기기계식 리프트와 가이드가 미세중력에서 승무원 없이 모듈을 자동 인출한다.
- **상부 슬라이딩** 도어는 하중구조가 아니라 공력 페어링과 궤도 접근구다. 접이식 열제어 라디에이터 패널을 도어에 통합한다. 완전히 열고 고정하면 패널이 자동 전개되고 냉매가 흘러 여열을 진공으로 방출한다.
- **기수**는 다층 기능배치다.
 - 상부: 브리지, 제어, 항법, 통신.
 - 중부: 소형 전개익과 조종면 기구.
 - 하부: 극저온 연료·냉매탱크. 유체저항을 줄이고 대기 관통 때 기수 능동냉각계로 냉매를 가장 빨리 공급한다.

이 배치는 열·유체회로를 짧게 하고 기수 열관성을 줄여 가장 가혹한 비행구간에서 열방호 신뢰성을 높인다. 전체는 극초음속 발사, 궤도작업, 자율항해, 동체 대분해 없는 반복운용에 최적화된 구조적·확장형·모듈식 설계다.

4.3.3. 동체 열방호

기수와 바닥에는 극초음속 비행과 이어지는 착수의 극한 열·동적하중을 견디는 다층 복합재·금속 열방호가 있다. 수동·능동 요소는 다음과 같다.

- 수천 도의 단시간 온도와 강한 복사열을 견디는 외부 내열층.
- 기계·진동하중을 받는 금속 지지층.
- 특히 기수와 바닥 앞전에서 열을 제거하는 능동냉각회로.
- 국부 임계부에서 주구조를 손상하지 않고 제어된 마모를 하는 교체식 삭마부품.

열방호는 고온 동체가 해상 착수 때 물과 만나 생기는 급격한 온도구배, 반복 열응력을 포함한 열충격도 고려한다. 고부하 부품은 구획화해 정기정비 때 모듈식으로 교체하므로 수리성과 반복수명이 높아진다.

4.3.4. 날개

안정화, 활공, 착수를 위한 전개익 2 쌍이 있으며 희박 대기층으로 나온 뒤 펼친다.

- **전방익**은 경로수정, 피치·롤 안정화, 동적교란 감쇠를 맡으며 활공을 위해 희박층에서 전개한다.

전방익 1 장의 제원:

- 길이(뿌리부터): 약 35 m.
- 뿌리/끝 폭: 약 14/7 m.

- 면적: 약 360~400 m².

○ **후방익**은 셔틀의 주 공력면이다.

후방익 1 장의 제원:

- 길이(뿌리부터): 약 100 m.
- 뿌리/끝 폭: 약 14/7 m.
- 면적: 약 1,000~1,100 m².

총 날개면적은 약 2,800~2,900 m². 양력형 동체도 기여해 유효 공력면적을 약 20~30% 늘린다.

아음속에서 $L/D \approx 9 \sim 13$ 이므로 안정 활공과 착수점의 제어 선택이 가능하다. 일반 활공·착수 속도는 90~120 m/s(약 320~430 km/h). 이때 안전을 결정하는 것은 절대 수평속도가 아니라 접수 순간 수직속도, 받음각, 진입경로다.

4.3.5. 낙하산 시스템

착수 충격을 줄이고 허용 착수범위를 넓히기 위해 통상 사용 가능한 연착수 계통으로 재사용 낙하산·패러포일을 둔다.

○ **구성과 위치**. 패러포일은 2 곳이다.

- 상부 **후방** 1 곳.
- 기수 **바로 뒤** 상부 전방 1 곳.

각 위치는 N+1, 즉 독립 수납·인출선을 가진 주·예비 패러포일이다. 한 점이 아니라 지지프레임의 **횡방향 결합선**으로 동체에 연결해 국부 최대하중을 줄이고 피치·롤 안정성을 높인다. 캐노피는 종축에서 떨어뜨려 상호간섭과 얽힘을 막는다.

○ **면적과 작동**. 기체 전중량을 지지하기보다 마지막 구간의 수직속도를 감쇠하고 부드러운 접수단계를 만드는 장치다. 기준값은 다음과 같다.

- 주 패러포일 1 장: 약 4,500~6,000 m².
- 2 장 작동 때 총 유효면적: 약 9,000~12,000 m².

접촉 시 목표 수직 속도는 $-V_z \approx 1 \text{ m/s}$.

○ **작동 기준**. 필요할 때만 사용하며 착수 알고리즘은 공력·관성·유체력 성분의 벡터합인 총 과부하를 고려한다.

- 예측 총 과부하가 4g 이하라면 패러포일 없이 날개로 착수한다.
- 4g 초과 위험이 있으면 작동해 수직속도를 목표까지 줄이고 부드러운 활공착수로 전환한다.

○ **재사용성**. 패러포일, 줄, 결합부는 점검, 건조, 소모부품 교체의 정기정비로 동체 지지구조를 분해하지 않고 반복 사용한다.

4.3.6. 자율 전원·추진장치

셔틀은 궤도기동부터 수개월 자율항해까지 임무 전체를 맡는 완전자율 전원·추진계를 갖춘다.

○ **기본 전원: 기내 원자로.**

- **형식:** 차세대 소형 고속 용융염로 또는 고온가스로. 미래에는 Helion Energy 같은 자기장 압축 방식의 소형 핵융합 모듈도 고려한다.
- **출력:** 전기 10~20 MW, 열 50~100 MW.
- **용도:** 모든 기내계통, 자기부상 초전도장치, 전자기 플라스마엔진, **능동냉각, 자율항해** 추진기에 전력을 공급한다. 원자로를 셔틀 수명 5~10 년 동안 연료 재장전 없이 운전한다.

○ **기내 초전도 부상·안정화계.** 고온초전도 자석을 넣은 극저온 모듈을 동체를 따라 설치하고 기내 액체질소나 수소로 냉각한다. 부상과 능동안정화의 강한 주자기장을 만들며, 터널 외부전력이 완전히 끊겨도 수동 ‘레일’ 코일과의 유도작용, 즉 ‘자기거울’ 효과로 부상을 유지한다.

안정화 제어는 계층형이다.

- 1) **수동루프(마이크로초):** 초전도체와 터널코일의 유도결합이 변위 때 전자제어 없이 복원력을 자동 생성한다.
- 2) **하드웨어루프(마이크로초~밀리초):** 전용 FPGA·ASIC 가 불균형을 감지하고 고정 알고리즘으로 구획을 전환한다.
- 3) **소프트웨어루프(밀리초~수십 밀리초):** 제한적 AI 지원 기내컴퓨터가 초전도 구획 사이 전류를 재분배해 느린 드리프트와 국부 불균형을 보상한다. 나노초 응답은 필요 없다.

이 구조는 교란에 밀리초로 반응해 극초음속 15,000 톤 셔틀의 안정성 요구를 몇 차수나 앞선다.

○ **주 엔진: 고추력 전자기 플라스마엔진.**

- **원리:** 원자로로 구동하는 자기플라스마동역학(MPD) 엔진 또는 가변비추력 자기플라스마로켓(VASIMR).
- **추력:** 펄스운전에서 50~100 kN(5~10 톤힘). 궤도수정, 이탈, 궤도간 전이에 충분하다.
- **추진제:** 액체 제논, 아르곤 또는 냉각에도 쓰는 수소.
- **자율성:** 기내 AI 가 엔진을 제어하고 궤도정거장 도킹, 하역, 귀환기동을 스스로 계산·실행한다.

○ **열제어계 .**

- **전개식 라디에이터.** 우주에서 펼쳐 액체회로로 원자로와 장비의 여열을 진공에 방출한다.
- **상변화 축열기.** 기수와 핵심부에 놓아 발사·재진입 대기관통의 메가줄급 최대열을 흡수하고 구조 과열을 막는다. 우주나 해상에서 라디에이터 또는 주변으로 천천히 방열한다.
- **능동냉각.** 비행 중 열차폐와 핵심장비를 비상 냉각하는 액체헬륨/수소 폐회로.

○ **중복성과 안전:** 이중 원자로제어, 독립 냉각회로, 비상 방열수단. 해상추락을 포함한 모든 상황에서 안전을 확보한다.

4.3.7. 자율 착수·항해 시스템

대서양 지정해역에 착수하면 셔틀은 완전자율 선박 모드로 전환한다. 장비는 다음과 같다.

- **추진장치.** 저속에서 높은 조종성을 주는 2 기의 전개식 방위각 추진기 또는 워터제트.
- **항해전력.** 표준 기내 원자로/핵융합로를 최소출력으로 **운전해 추진기와** 기내계통에 전력을 공급한다. 노심은 수개월 자율항해에 충분하다.
- **항법·통신.** GPS/GLONASS 위성항법과 관성항법, 해상상황 인식용 레이더·라이다, 정지궤도위성 통신.
- **최종 감속.** 착수 직전 남은 100~150 km/h 를 소형 드래그슈트의 **안정화·초기감속과** 주 플라스마엔진의 짧은 펄스에 의한 정밀 수직속도 저감으로 없앤다. 착수 뒤 **낙하산을 분리한다.**

이 구성으로 착수 직후 지원 없이 모항이나 예인선 합류점까지 자력항해한다. 거친 바다에서도 자율상태를 유지하고 장거리항해 뒤 예정 정비도크에 들어가 우주선에서 로봇선박으로 전환한다.

4.3.8. AstroLiner-S: 초기/간소형

StarRoad 초기단계와 기술적으로 단순하고 운용상 보수적인 기본구성으로 AstroLiner-S(Simplified / Start)를 사용한다.

완전한 기능을 가지되 에너지·시스템을 간소화한 AstroLiner 로, 본선 초기운용, 초기 화물·유인발사, 기술·운용·규제 위험의 단계적 저감을 위한 형식이다.

- **AstroLiner - S** 의 핵심 . 주형과 같은 발사치수·질량을 유지하면서 **기내 원자력 ·핵융합 전원 없이 관성으로 대기를 관통**한다는 StarRoad 의 기본원리를 구현한다.

가속, 부상, 터널내 안정화라는 초대형 에너지 작업은 모두 지상기반시설로 옮긴다.

AstroLiner-S 는

- 자율운송체이며,
- 완전재사용형이고,
- 자력으로 궤도진입, 이탈, 귀환할 수 있지만,
- 터널 밖에서는 화학추진만 쓰고,
- 고출력 전리방사선원을 탑재하지 않는다.
- **에너지와 초전도계통.** AstroLiner-S 에서 완전히 제외하는 것:
 - 원자력·핵융합 발전장치.
 - 이에 따르는 방사선·열·사고 위험.
 - 터널과 게이트웨이 구간의 비가역 오염 시나리오.

부상, 안정화, 선로 상호작용용 초전도장치는

- 발사 전에 전류로 여자하고,
- 영구전류 모드로 옮기며,
- 서로 격리해 기내시스템으로 제어한다.

기내 전자장비, 제어, 방호는 시간여유를 포함해 터널가속 전체를 감당하는 배터리와 관성저장장치, 즉 플라이휠에서 전력을 받는다.

가속 중 초전도회로의 능동제어는 작은 보정전류와 비상상태에 한정돼 기내 연속 대출력 전원이 필요 없다.

궤도에서는 접이식 태양전지판을 능동전원으로 쓴다.

○ 터널 밖 추진

AstroLiner-S 의 모든 궤도작업은 화학추진으로 한다.

탑재장비:

- LOX/LH₂ 또는 LOX/LCH₄급 중추력 주 화학엔진.
- 이중화한 자세·비상제어계(RCS).

추진계 기능:

- 대기권 이탈 후 목표궤도까지 추가투입.
- 궤도요소 수정.
- 궤도이탈.
- 제어 재진입과 귀환.

이 형식에서 전기추진·자기플라스마엔진을 쓰지 않는 것은 기내 대출력 전원이 없기 때문이며 전체 시스템의 구조적 한계가 아니다.

○ 귀환과 재사용

AstroLiner-S 는

- 자율 궤도이탈,
- 얇은 각도의 제어 재진입,
- 공력활공,
- 날개와 낙하산·패러포일을 이용한 해상착수가 가능하다.

원자료가 없어 크게 단순해지는 것:

- 해상운용.
- 정기정비.
- 비정상착수 뒤 기체회수.

○ StarRoad 개발에서 AstroLiner -S 의 역할

AstroLiner-S 는

- 첫 양산형 StarRoad 셔틀,
- 발사·고장통계 추적 플랫폼,

- 시스템 조기운용 수단,
- 초기 궤도기반시설의 기본 운송체다.

계획이 진전되고 소형 대출력 전원이 등장하며 운용경험이 쌓이면, 고출력 기내전원과 전자기 플라스마엔진을 갖춘 완전형 AstroLiner 로 단계적으로 보완하거나 대체할 수 있다.

따라서 AstroLiner-S 는 타협안이 아니라 본선 기본구조를 바꾸지 않고 StarRoad 를 더 일찍, 안전하게, 낮은 시스템위험으로 시작하게 하는 합리적 초기단계다.

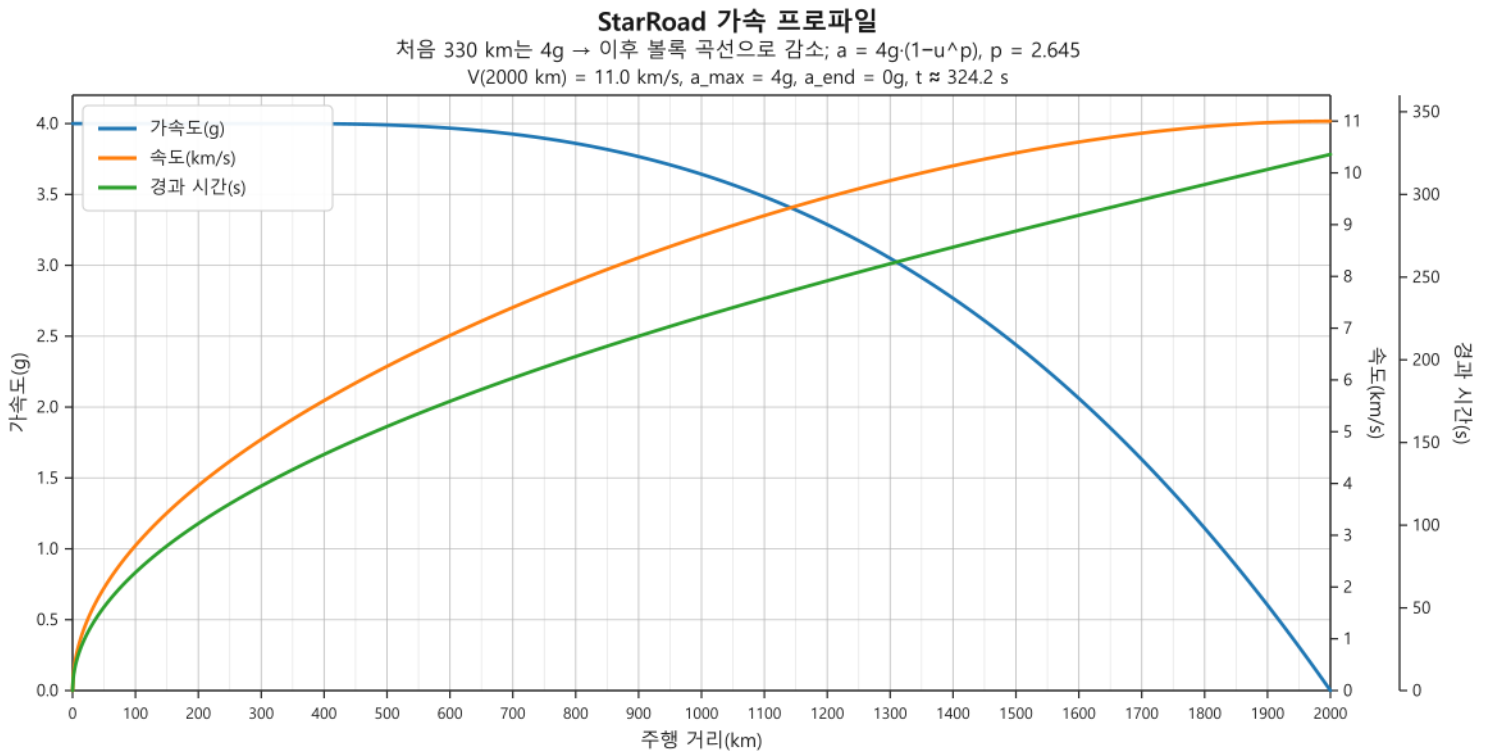
5. 발사 준비부터 착수 후 정비까지의 운용 주기

5.1. 준비와 발사

화물을 실은 셔틀을 Batanga 인근 발사실에 설치한다. 먼저 셔틀의 기내계통을, 이어 가속기계통을 시험한다. 다음으로 가스역학 게이트웨이의 발사 전 시험을 수행한다. 기내 초전도체를 여자하고 자기부상을 가동해 확인한다. 터널은 미리 진공으로 만든다. 명령이 내려오면 가속기 앞쪽 구간에 펄스전력 공급을 시작한다.

5.2. 터널 내 가속

- **0-330 km.** 초기 종방향 가속도는 $\sim 4g$ 다. 에너지의 상당 부분을 부상과 중력 극복에 쓴다.
- **330-~1,800 km, S 자 곡선** 하강구간. 종방향 가속도를 초기 $4g$ 에서 0 까지 부드럽게 낮춘다. 셔틀은 지하 곡선을 통과하며 최대 $\sim 4g$ 의 하중을 받는다. 주변 전자기요소가 궤적을 안정시킨다.
- **~1,800-2,050 km, S 자 곡선** 상승구간. 게이트웨이에 가까워지면서 가속도는 0 이 된다. 마지막 50 km 는 셔틀이 $\sim 11 \text{ km/s}$ 로 관성주행한다.



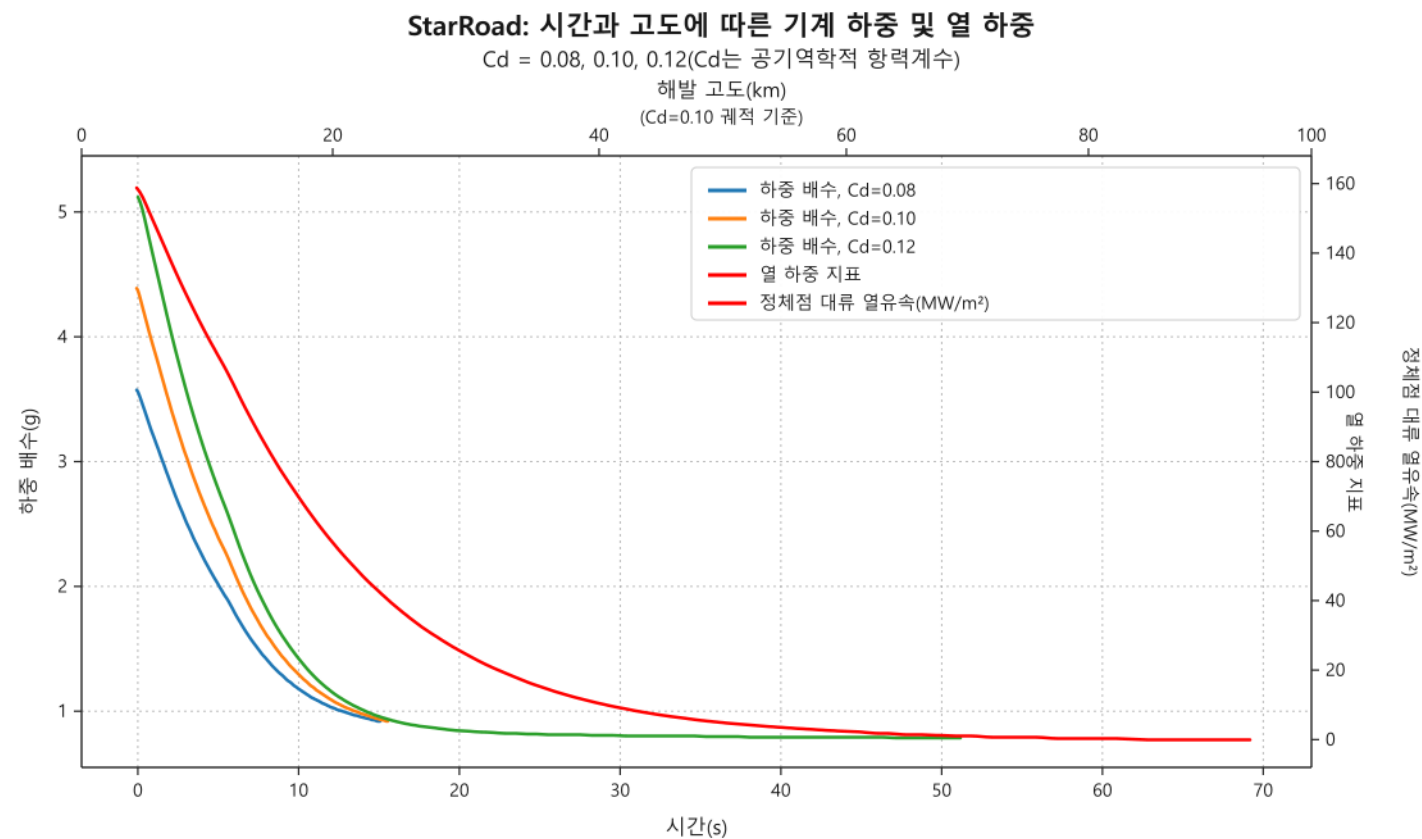
5.3. 대기 게이트웨이를 통한 출구

- 발사지점이 높은 곳에 있어 셔틀은 대기권 게이트웨이에서 약 30 km 만 나아가도 해발 10 km 를 넘는다. 이로써 지상에 미치는 충격파 영향을 최소화한다. 셔틀 발사 1 분 전, 기계식 게이트웨이를 열지 않은 채 가스역학 게이트웨이의 링을 시험 가동한다. 셔틀이 터널노선의 45%를 지나면, 진공을 만들 때 마지막 터널구간의 펌프가 저장한 압축공기를 링을 통해 초음속으로 분사한다. 셔틀 통과 약 10 초 전에 수소를 공급하고 가스역학 장벽을 주연소모드로 가동해, 뜨겁고 일부 이온화된 가스의 안정적인 원뿔형 초음속 흐름을 만든다. 링이 정상 작동하고 뜨거운 장벽구배 원뿔이 형성된 지 3 초 뒤 기계식 게이트웨이를 연다.
- 장벽은 터널 진공이 깨지는 것을 막고 초기 열충격도 완화한다. 셔틀은 미리 희박화하고 가열한 가스구역을 수 밀리초 만에 통과한다. 이 핵심기술은 매질이 바뀔 때 생기는 극히 짧은 충격파면을 없애 초기 공기역학적 작용의 시간분포를 바꾼다.
- 가스역학 장벽은 전체 공기력을 줄이지 않는다. 충격하중을 마이크로초 영역에서 밀리초 영역으로 늘려 셔틀구조의 국부응력, 진동, 열충격을 결정적으로 낮춘다.
- 셔틀이 통과한 직후 기계식 문을 열고, 이어 제트 링을 즉시 정지한다.

5.4. 대기권 통과

셔틀은 탄도궤적을 따라 비행하며 자체 관성질량과 견고한 구조로 대기의 고밀도층을 통과한다. 열하중과 동하중은 첫 10~20 초에 최대가 된다.

- 중요한 설명.** 가스역학 장벽구역을 벗어난 즉시 셔틀은 지정고도 약 3,400 m 의 정상 대기과 전면적으로 상호작용한다. 궤적, 열유속, 하중 계산은 모두 대기와의 완전한 공기역학적 상호작용을 전제로 하며, ‘가스방패’, ‘통로’, 또는 셔틀과 함께 움직이는 희박영역은 가정하지 않는다.



5.5. 우주 진입과 궤도 운용

대기권을 벗어나면 열을 방출하도록 라디에이터를 펼친다. 이어 기내 전자기 플라스마 엔진을 가동해 궤적을 정밀수정하고 목표궤도에 진입한다. 흔히 정지궤도 너머나 Lagrange 점으로 직접 향한다. 그 뒤 탑재물을 전개한다. AstroLiner-S 구성에서는 최종 궤도투입과 궤도수정을 화학추진계통으로 수행한다.

5.6. 궤도 이탈과 귀환

완전기능형 AstroLiner 는 전자기 플라스마 엔진으로 궤도를 이탈한다. AstroLiner-S 구성에서는 궤도이탈 감속, 수정, 최종기동을 화학추진계통이 수행한다.

5.7. 해상 착수

Gabon 인근 대서양 상공에서 제동낙하산계통을 펼쳐 속도를 줄인다. 셔틀은 가열된 표면과 찬물이 접촉하도록 설계된 견고한 하부동체를 이용해 작은 받음각으로 착수한다. 착수 뒤 프로펠러나 워터제트를 전개한다.

5.8. 예인과 정비

기내 원자로의 전력을 쓰는 자체 추진기, 또는 셔틀계통 고장 시 대기 중인 예인선이 기체를 항만시설로 옮긴다. 그곳에서 점검, 정비, 열보호계통 수리, 다음 비행 준비를 한다. AstroLiner-S 구성에서는 배터리, 보조동력장치, 또는 대기 예인선으로 항만에 돌아온다.

6. 추진, 일정, 요구사항, 산업 거점

6.1. 계획 단계

StarRoad 는 기술적으로 서로 연결되고 경제적 근거를 갖춘 단계들을 순서대로 진행해 실현합니다. 각 단계에는 분명한 목표와 성공 기준이 있으며, 다음 단계에 필요한 기반시설을 구축함으로써 기술·재무 위험을 줄입니다.

6.1.1. 0 단계: 구상과 시험(2~5 년)

- **목표:** 물리 원리를 검증하고 핵심 기술을 실험실에서 개발하며 후속 설계를 위한 공학 기반을 마련합니다.
- **주요 작업**
 1. 가속, 포털 작동, 공기역학적 충격을 포함한 모든 과정에 대해 상세한 수학·CFD 모델링을 수행합니다.
 2. 국제 컨소시엄을 구성하고 정치·법률상의 예비 합의를 마련합니다.
 3. 노선 전체에서 지질·환경 조사를 수행합니다.
 4. 주 부지 외부에 연구 시험장을 조성한다.

초전도 부상 모듈과 펄스 전력공급 시스템의 시험대 시험;

안정적인 구배 장벽을 만들 수 있음을 확인하기 위한 1:10 축척 가스역학 포털 시제품의 건설과 시험;

진공 시스템, 경량 시험체의 전자기 가속, 안전 시스템의 통합을 검증하기 위해 길이 1~2 km 의 짧은 진공 실증 터널을 굴착한다.

- **성공 기준:** 게이트웨이, 부상, 안정화라는 핵심 해법의 실현 가능성을 실험 자료로 확인하고 1 단계 상세 공학 설계를 시작할 준비를 갖춘다.

6.1.2. 1 단계: 기반시설과 에너지 기반(5~7 년)

- **목표:** 프로젝트의 ‘에너지 척추’를 구축하고 실제 현장 조건에서 로봇 시공을 확립합니다.
- **주요 작업**
 1. 직경 2 m 의 표준화된 로봇식 터널 굴착 시스템을 소량 양산한다.
 2. 초기 열 안정화 회로를 구축하기 위해 지열 자율 열에너지 시스템의 간선 집열 터널 첫 한 쌍을 전 노선(약 2,050 km)에 걸쳐 병행 굴착한다.
 3. 대기 직접 포집(DAC)으로 얻은 초임계 CO₂를 사용하는 최초의 지열발전소를 노선의 주요 지점에 건설합니다.
 4. 집열 터널 위에 소구경 시험 원형 터널—D=2 m, L=2,050 km—을 굴착하고 기본 진공·통신·정비 시스템을 설치합니다.
- **성공 기준:** 자율형 지열 열에너지 시스템의 최소 구성이 완전 가동되고 에너지 자립을 달성합니다. 고속 로봇 굴착을 입증해 후속 확장의 기반을 마련합니다.

6.1.3. 2 단계: 소규모 검증(‘과학·계측 복합시설’ 단계)(4~6 년)

- **목표:** 실제에 가까운 속도에서 시스템 동기화와 안전성을 검증하고 고유한 실험 데이터를 확보합니다.
- **주요 작업**
 1. 소형 시험 터널에서 수 톤까지의 불활성 시험체를 1~11 km/s 까지 가속하고 제동합니다.
 2. 1:5 기체역학 게이트웨이 시제품에 소형 실험 셔틀을 통과시키는 실규모 시험.
 3. 구조와 열보호가 다른 시험 질량을 가속해 내보내고 가속도 하중과 열유속을 측정함으로써 ‘관성 충격’ 가설을 실험적으로 검증합니다.
 4. 초전도 자석과 축열기를 포함한 실물 크기 셔틀의 핵심 시스템에 대해 상세 설계와 시제품 제작을 시작한다.
- **성공 기준:** 모든 동기화 시스템이 안정적이고 안전하게 작동하며 가스역학 포털의 효율을 확인합니다. 질량이 증가할수록 단위 질량당 하중이 감소함을 실험으로 입증하고 셔틀 기본설계를 완성합니다.

6.1.4. 3 단계: 완전 기능 구간과 셔틀 시제품(4~7 년)

- **목표:** 충분한 길이의 구간에서 최종 사양 시스템을 통합·시험하고 비행 시제품을 제작합니다.
- **주요 작업**
 1. 최종 단면 17.5 × 12.5 m, 모든 권선·에너지 저장 장치·정비 터널을 포함한 주 가속 터널의 50~200 km 완전 기능 구간을 건설한다.
 2. 이 구간 아래의 지열 시스템을 7 개 터널로 이루어진 완전 구성까지 확장합니다.

3. 추진장치가 없는 실물 크기 셔틀 시제품을 제작하고 극저온 시스템, 구조 강도, 열보호를 지상에서 종합 시험합니다.
 4. 통합 터널 시험: 셔틀을 대표하는 질량을 최대 8g 하중, 최대 약 4 km/s 속도로 가속·제동한다. 모든 비상 절차(경보 1~3)를 검증한다.
 5. 완전 기능형 AstroLiner 에 탑재할 소형 원자로를 개발하고 지상시험과 인증을 수행합니다.
- **성공 기준:** 중대한 손상 없이 가속과 비상 정지 주기를 반복 수행하고 에너지 회수 효율을 입증합니다. 비행 셔틀과 원자로가 최종 통합 준비를 마칩니다.

6.1.5. 4 단계: 연장과 가동(10~15 년)

- **목표:** 첫 번째 노선을 완성하고 셔틀을 통합해 운용 속도에 도달합니다.
- **주요 작업**
 1. 다수의 터널 굴착기를 병렬 운용해 가속 터널을 설계 길이 2,050 km 까지 단계적으로 연장합니다.
 2. 지열 시스템 기반시설과 펄스 에너지 저장장치를 노선 전체로 확장합니다.
 3. 모히산에 최종 고고도 대기권 포털 복합시설을 건설합니다.
 4. 셔틀 탑재 시스템을 통합하고 지상시험과 터널 내 저속시험을 수행합니다.
 5. 설계값 15,000 t 와 약 11 km/s 에 도달할 때까지 속도와 질량을 점차 높이는 단계별 발사를 실시한다.
- **성공 기준:** 셔틀의 첫 극초음속 발사에 성공해 탑재물을 목표 궤도에 투입하고, 월 1-2 회의 설계 발사 빈도를 달성합니다.

6.1.6. 5 단계: 확대와 산업 운용(계속)

- **목표:** StarRoad 를 계속 성장하는 세계적 기반시설로 발전시킵니다.
- **주요 작업**
 1. 첫 번째 노선을 운용하고 적재, 정비, 귀환으로 이루어진 물류 주기를 개선합니다.
 2. 화물 처리량을 늘리기 위해 두 번째 노선과 후속 병렬 노선의 건설을 시작합니다.
 3. 프로젝트 산업 중심지를 바탕으로 궤도 조선소와 가공시설을 배치합니다.
 4. 사람과 특수 화물을 위한 더 짧은 가속기로 구성된 '지선'망을 개발합니다.
- **성공 기준:** 궤도 운송비를 10 달러/kg 미만으로 낮추고 매일 발사합니다. 후속 간선의 승인된 계획이 있으며 건설이 시작되어 있습니다.

6.2. 산업 거점

- **해안 복합시설(가봉 니앙가강 하구):** 셔틀 건조, 터널 초기 구간용 모듈 생산, 셔틀 정비의 주 모항.
- **고지대 복합시설(콩고민주공화국 모히산과 남부 고원):** 고속 구간과 최종 s 자 곡선용 모듈 생산, 게이트웨이 기구 조립·정비. 부지에는 3 계통 수소 전기분해·저장 시스템을 두며, 비상시에도 각 계통 하나만으로

게이트웨이 기체역학 장벽의 엔진 링 세 개 모두에 연료를 공급할 수 있다. 전기분해용 전력은 계획 전력망에 통합된 지열 자율 열에너지 시스템, 수력, 태양광, 원자력 등 지역 전원에서 공급한다.

6.3. 전체 일정

이 계획은 현재 실현 가능한 수많은 첨단 기술과 공학 해법, 다수의 터널 굴착기의 병행 작업, 기반시설 구축, 두 생산 거점을 요구한다. 따라서 0 단계 시작부터 4 단계 첫 상업 발사까지 첫 터널을 완성하는 데 약 25~40 년이 걸린다. 이는 ITER 와 LIGO 같은 다른 거대과학 사업의 소요 기간과 비슷하다. 이 조건에서는 근본적인 기술 실현 가능성보다 자금과 외교·법적 조정이 진척을 좌우한다. 과제는 야심 차지만 세계적 컨소시엄이라면 달성할 가능성이 있다.

7. 해결하는 문제와 과제

7.1. 지구적 과열

열오염과 지구 생물권의 부담을 줄이기 위해 에너지 집약 산업을 우주로 옮깁니다.

7.2. 경제적 과제

우주 접근 비용을 획기적으로 낮춰 태양에너지, 소행성, 달 자원, 궁극적으로 행성 자원의 경제적 이용을 가능하게 한다.

7.3. 전략 목표

궤도 산업화와 행성 방어를 모두 지원할 수 있는, 복원력 높고 날씨에 좌우되지 않는 운송 체계를 구축한다.

7.4. 기술 촉매

이 프로젝트는 펄스전력, 초전도, 극초음속 기술, 원자력 추진, 로봇 터널 굴착의 발전을 촉진한다.

7.5. 에너지·열 자립

자율형 지열 열에너지 시스템(자율 지열 시스템)은 두 요구를 동시에 해결합니다. 최대 약 15 GW 의 연속 전력을 생산해 가속기 수요를 모두 충당하고 상업용 잉여 전력도 만들며, 동시에 주 터널 주변을 예측 가능한 저온 환경으로 유지합니다. 따라서 깊고 지열 활동이 있는 암반에서도 건설·운영할 수 있고, 취약한 외부 발전과 불확실한 날씨에 대한 의존을 없앨 수 있습니다.

7.6. 탄소 발자국

StarRoad 는 능동 환경기여 모델을 채택한다. 세계 최대 고정식 대기 CO₂ 이용시설로서 초임계 CO₂를 폐쇄형 자율지열회로의 영구 작동유체로 쓴다. 수백만 톤의 CO₂를 대기순환에서 빼내 수세기 동안 기술회로에 가둔다. StarRoad 는 산업부문 전체의 배출을 상쇄할 강력한 기후공학수단이 된다.

7.7. 수열 간선 운하의 사회·환경적 잠재력

수열간선수로는 냉각요소만이 아니라 지역에 이익을 주는 대륙횡단 이중목적 기반시설이다.

- **관개.** 분수게이트에서 노선 농지로 물을 보내 건조지대를 아프리카의 ‘녹색벨트’로 바꾼다.
- **자연보충.** 잦은 적도폭우가 자동으로 채운다.

- **온수 처리.** 지열 열교환기가 물을 +60°C 까지 높이면 사실상 저온살균되어 안전한 관개와 산업용으로 쓸 수 있으며, 여과 후에는 생활용수와 식수로도 사용할 수 있습니다.
- **자연유하.** 동쪽 3,400 m 에서 서쪽 0 m 로 내려가는 지형 덕분에 펌프 없이 흘러 무동력순환을 제공한다.
- **소수력.** 표고차를 활용한 발전소열이 지역망과 자급용 추가 재생전력을 생산한다.

따라서 StarRoad 는 운송뿐 아니라 지역의 지속가능한 발전에 통합된 농업·에너지 기반이 된다.

7.8. 에너지망

자율 지열 시스템과 발전망은 가속기뿐 아니라 주변도시, 공장, 농장에도 잉여 ‘그린’ 전력을 공급한다.

7.9. 경제 동맥으로서의 StarRoad

경제 동맥으로서의 StarRoad. 한편으로 StarRoad 는 태양계 개발을 위한 행성 규모 화물 게이트웨이가 되고, 다른 한편으로 아프리카의 주요 경제 동맥이자 산업화·에너지 자립·식량안보의 촉매가 된다. 이 노선은 지하에서 아무 데도 이어지지 않는 고립된 토목 시설이 아니다. 지상 인프라인 40 개 터미널, 가봉과 콩고민주공화국의 두 산업 중심지, 수열 간선수로와 도로망이 중앙아프리카를 서쪽에서 동쪽으로 가로지르는 선형 지속가능발전 클러스터를 이룬다. 2,050km 전 구간에 생태·기술·농업 경관이 교대로 펼쳐진다. 선형 클러스터는 다음 기능을 갖춘 자립 경제권이 된다.

- 지열·소수력·태양광 발전.
- 관개농업을 통한 식량 생산.
- 셔틀 부품, 터널 모듈, 장비를 포함한 공산품 제조.
- 도로와 철도를 통한 화물 운송.
- 발사 단지와 대기권 게이트웨이로 구성된 우주항 운영.
- 직접공기포집 시설에서 대기 중 CO₂ 제거.

7.10. 핵심 기반시설 안전

프로젝트는 처음부터 대량의 수소, 극초음속, 기가와트급 에너지를 안전하게 다루는 대책을 포함합니다. 수동 보호와 능동 감시·자동 대응을 결합해 대형 에너지 시설과 수소 시스템의 새로운 안전 기준을 세웁니다.

7.11. 입지 선정과 확장성

포털 부지는 고도, 물류, 안전, 확장성, 법률 등 서로 충돌하는 수십 가지 요건을 충족해야 합니다. 모히산과 인접 고원은 StarRoad 가 작은 고지대 부지에서 시작해 이전하지 않고 세계 최대 우주항으로 성장할 수 있게 합니다.

7.12. 대륙횡단 프로젝트의 정치·법적 조율

노선이 세 나라를 지나는 문제는 CERN 과 ITER 같은 대형 프로젝트를 본뜬 국제 컨소시엄으로 해결한다. 자율형 지열 열에너지 시스템의 지하 인프라와 에너지 자산에는 특별한 법적 지위를 부여하고 참여자 간 편익을 명확히 나눈다. 이 프로젝트는 정치적 안정을 전제로 하는 부담이 아니다. 상호의존과 미래 및 건설 과정에서 개발한 기술에 대한 우선 접근을 통해 안정 자체를 만들고 유지하는 고유한 가치의 수단이 된다.

7.13. 화물 흐름의 단계적 확대

발사 빈도는 궤도 산업과 함께 증가한다. 월 1 회의 개척 단계가 궤도 조선소를 만들고, 주 1~3 회의 산업 단계가 자산을 건설하며, 매일 발사하는 성숙 단계가 우주 경제의 지수적 성장을 지탱한다.

8. 시장과 궤도 물류

이 절은 StarRoad의 경제성을 가르는 핵심 질문, 즉 초중량급 발사 회량을 충분히 활용할 만큼 무엇을 대량으로 발사할 것인가에 답한다. StarRoad를 드물게 이루어지는 일회성 임무용 시스템으로 보아서는 안 된다. 목표는 지구와 고궤도 사이에 대규모·정기적·산업적인 화물 흐름을 만드는 것이다.

StarRoad의 주된 초기 시장은 저궤도 위성군이나 개별 과학우주선이 아니라 대규모 궤도 에너지, 컴퓨팅 인프라, 궤도 간 물류, 궤도 정착지, 조선소, 그리고 뒤이어 생길 지구 밖 산업이다.

8.1. 초중량급 발사의 수요 문제

기존 로켓 경제의 한계는 kg 당 비용뿐 아니라 발사 방식 자체에서 비롯된다. 로켓은 지원 장비의 질량 비중이 높고 궤도 조립이 복잡하며 개별 작업이 많이 필요한 상태로 화물을 작은 묶음씩 나누어 운반한다. 따라서 발사 가격이 내려가도 로켓 운송은 원정형 물류에 머문다.

StarRoad는 다른 종류의 시장을 만든다. 목적은 오늘날의 탑재화물을 더 싸게 발사하는 데 그치지 않고, 로켓 물류에서는 경제성이 성립하지 않는 탑재화물을 가능하게 하는 것이다.

그러한 탑재화물은 다음과 같다.

- 완제품 또는 거의 완성된 기가와트급 우주 태양광발전소.
- 대형 궤도 데이터센터.
- 마이크로파 전력 전송 모듈.
- 대형 트러스, 방열기, 반사경, 패널.
- 궤도 조선소와 자동 조립 라인.
- EML4/5 용 주거·산업 모듈.
- 궤도 간 예인선과 수송선.
- 추진제, 전력, 서비스 모듈.
- 미래의 소행성·행성 간 인프라 구성품.

따라서 StarRoad는 현재의 우주 발사 시장에 의존하지 않는다. 철도, 컨테이너 해운, 전력망이 기존 수요를 충족하는 데 그치지 않고 주변에 새로운 경제를 만들어 냈듯, StarRoad도 새 시장을 창출한다.

8.2. 초기 시장: 우주 태양광발전과 궤도 데이터센터

첫 단계에서 StarRoad의 주된 상업·전략 화물은 기가와트급 우주 태양광발전소여야 한다. 이는 AstroLiner-S가 목표 궤도나 운용 지점으로 직접 운반하는 대형 자가 전개식 또는 부분 자가 전개식 에너지 플랫폼이다.

우주 태양광발전소는 여러 요구를 동시에 충족한다.

- 초중량급 발사에 대한 대량의 반복 수요를 만든다.
- 주야 주기와 대부분의 기상 조건에서 독립된 에너지 시장을 형성한다.
- 신규 발전 설비의 상당 부분을 지표 밖에 설치할 수 있게 한다.
- 궤도 산업에 전력을 공급할 기반을 마련한다.
- 궤도 물류, 조선소, 서비스 정착지를 건설할 경제적 이유를 만든다.

지구 궤도에서 태양상수는 약 **1,361.6W/m²**다. 따라서 입사 태양광 1GW 를 얻으려면 완벽하게 정렬된 집광 면적이 약 0.74km² 필요하다. 광전 변환 효율 25~35%, 변환·송전 손실, 구조물 사이의 틈, 방열기, 전력전자, 예비 용량, 성능 저하를 고려하면 유효 전력 1GW 를 내는 실제 집광 면적은 수 km²에 이른다. 기존 우주선 기준으로는 크지만, 질량과 면적, 구조 치수가 더 이상 주된 제약이 아닌 StarRoad 에는 자연스러운 규모다.

8.2.1. 기가와트급 우주 태양광발전소의 질량 기준

기가와트급 발전소는 작은 위성이 아니다. 낙관적인 최신 구상에서도 2GW 발전소의 질량은 수천 톤이다. CASSIOPeiA 같은 가장 가벼운 구상은 약 2,000t 으로 추정되며, 더 보수적인 NASA 연구는 동급 2GW 시스템을 5,900~10,000t 으로 본다.

프로젝트 / 연구	출력	질량	StarRoad 와의 관련성
CASSIOPeiA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	전력망 공급 기준 최대 2GW	약 2,000t	StarRoad 에 가장 가까운 참고안이다. GEO/GSO, 발전률 99.7%, 위성 1 기당 정류 안테나(렉테나) 1 기 구조이며, 최상의 경우 비출력이 약 1MW/t 에 근접한다.
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	전력망 공급 기준 2GW	약 5,900t	더 보수적인 추정치다. NASA 는 전력망 공급 2GW 를 기준으로 체계를 정규화했으며, RD1 의 태양전지 패널 면적은 약 11.5km ² 다.
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	여러 시스템을 통해 전력망에 2GW 공급	약 10,000t	NASA 가 제시한 질량은 약 1,000 만 kg, 태양전지 패널 면적은 약 19km ² 다. RD2 는 발전 시간이 더 짧으므로 RD1 한 기와 거의 같은 에너지를 내려면 RD2 다섯 기가 필요하다.
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	평균 0.75GW / 최대 1.2GW	시스템당 약 20,000t	무거운 참고안이다. 평균 출력 2GW 로 단순 환산하면 약 50,000t 이상이므로, 한 번의 발사가 아니라 여러 차례 운송해 궤도에서 조립해야 한다.
Caltech SSPP / 경량 모듈식 타일	완전한 2GW 발전소가 아니라 기술 단위	활성층만 이론상 지상 공급 2GW 기준 약 1,700~ 3,400t	면밀도 160g/m ² 와 종단 간 효율 7~14%를 적용한 이 추정치는 활성층만 포함한다. 완전한 발전소에는 구조물, 전력 전송, 자세 제어, 방열기, 배선, 전자기기, 유지보수 설비와 예비 용량도 필요하다.

표가 보여 주는 핵심 결론은 명확하다. 질량 **2,000~10,000t 의 2GW 우주 태양광발전소는 AstroLiner 의 용도에 거의 정확히 들어맞는다.** StarRoad 라면 초중량급 발사 한 번 또는 최소한의 궤도 조립을 수반한 소수의 비행으로 충분하다. 로켓 물류라면 초중량급 로켓을 수십 번 또는 수백 번 발사하고, 재급유망을 운영하며, 궤도에서 조립하고, GEO 나 EML 까지 예인해야 하므로 운용 복잡성이 급격히 커진다.

8.2.2. 2GW 우주 태양광발전소 한 기의 에너지 생산량

기준 가정은 다음과 같다.

- 전력망 공급 출력: **2GW**.
- 가동률 / 발전률: **99.7%**.
- 설계 수명: **30 년**.

발전소 한 기의 생산량:

- **연간 약 17.47TWh**.
- **30 년 동안 약 524TWh**.

이 때문에 kg 당 운송비가 결정적으로 중요하다. 로켓 물류에서는 발사가 여전히 지배적인 장벽이지만, StarRoad 를 쓰면 운송비는 미래 전력 가격에서 차지하는 비중이 빠르게 작아진다.

8.2.3. 우주 태양광 전력 비용 중 운송비 부분

아래 계산은 **균등화 발전비용 가운데** 운송비만 다룬다. 발전소 운송비를 30 년간의 총발전량으로 나눈 값이다. 발전소 제조, 랙테나, 정비, 보험, 모듈 교체, 지상 인프라, 운영자 이익은 포함하지 않는다.

계산식:

LCOE 의 운송비 부분 = 발전소 질량 × 운송 단가 / 수명 전체 발전량

가동률 99.7%, 수명 30 년인 2GW 발전소의 수명 전체 발전량은 약 **5,240 억 kWh** 다.

단계 / 운송 체계	운송 단가	CASSIOPeiA 형 발전소, 2,000t, ¢/kWh	NASA RD1, 5,900t, ¢/kWh	NASA RD2, 10,000t, ¢/kWh
현행 로켓 물류, GTO 기준 낮은 추정치	\$3,600– 5,600/kg	1,37–2,14	4,05–6,31	6,87–10,69
StarRoad, 1–2 년차	\$80–120/kg	0,0305–0,0458	0,0901–0,1351	0,1527–0,2290
StarRoad, 3–5 년차	\$30–50/kg	0,0114–0,0191	0,0338–0,0563	0,0572–0,0954
StarRoad, 6–10 년차	\$10–20/kg	0,0038–0,0076	0,0113–0,0225	0,0191–0,0382
StarRoad, 11–15 년차	\$3–8/kg	0,0011–0,0031	0,0034–0,0090	0,0057–0,0153
StarRoad, 16–25 년차	\$0.8–3/kg	0,0003–0,0011	0,0009–0,0034	0,0015–0,0057
StarRoad, 26 년차 이후	\$0.3–1/kg	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

비교하면, 오늘날 새로 건설하는 지상 발전원의 LCOE 는 kWh 당 수 센트다. 육상풍력 약 3–4¢/kWh, 대규모 태양광 약 4–5¢/kWh, 수력 약 5–6¢/kWh 다. NASA 가 추정한 2050 년 지상 대안은 약 2–5¢/kWh 다.

여기서 중요한 결론이 나온다. 시범 운용기에도 StarRoad 의 우주 태양광 운송비 부분은 지상 발전 LCOE 보다 한 자릿수 이상 낮으며, 성숙 단계에는 주요 가격 요인에서 사실상 사라진다. 그렇다고 우주 태양광의 총비용이 1 센트의 천분의 일 수준이 된다는 뜻은 아니다. 발전소와 랙테나 제조, 정비, 전자기기, 방열기, 모듈 교체, 보험, 운영 이익은 남는다. StarRoad 는 로켓 물류에서 우주 태양광발전을 경제적으로 무겁게 만드는 특정 장벽을 제거한다.

오늘날의 로켓 시나리오는 단순한 \$3,600–5,600/kg 수치보다 실제 상황이 더 나쁘다. 대형 발전소를 궤도에 올리는 데 그치지 않고 운용 지점까지 운반해 조립·정비해야 하며, 예인선에는 재급유하고 인프라도 유지해야 한다. 따라서 NASA 가 추정한 기준 LCOE 는 RD1 **약 61¢/kWh**, RD2 **약 159¢/kWh** 로 지상 대안보다 훨씬 높다. StarRoad 는 발사

비용만 줄이는 것이 아니다. 수천 번의 로켓 작업을 한 번 또는 몇 번의 초중량급 인프라 비행으로 대체해 문제의 종류 자체를 바꾼다.

8.2.4. 두 번째 초기 시장: 궤도 데이터센터

궤도 데이터센터는 두 번째 초기 시장이 될 수 있다. 인공지능, 클라우드 컴퓨팅, 디지털 인프라의 성장으로 데이터센터는 세계 에너지 수요의 중요한 부분이 되고 있다. IEA 는 데이터센터가 이미 연간 수백 TWh 를 소비하며, 향후 10 년 안에 연간 약 1,000TWh 에 이를 수 있다고 추산한다.

컴퓨팅 인프라 일부를 우주 태양광발전소 가까이에 두면 여러 이점이 있다.

- 연속적인 궤도 발전 전력에 직접 접근한다.
- 지상 전력망의 부담을 줄인다.
- 진공에서 대형 방열기 군을 만들 수 있다.
- 토지, 물, 전력망 용량 같은 지역 제약에 덜 의존한다.
- 태양광발전소와 에너지·통신·서비스 인프라를 공유한다.

초기 단계에는 궤도 발전소와 데이터센터를 별도 플랫폼으로 발사하거나, 태양광발전소, 전력전자, 방열기, 컴퓨팅 모듈, 통신 안테나, 마이크로파 송전 회로로 이루어진 통합 에너지·컴퓨팅 단지로 발사할 수 있다.

8.3. 우주 태양광 발전의 기후·산업적 근거

우주 태양광 발전소를 단순한 ‘친환경’ 기술이라고 표현해서는 안 됩니다. 역할은 훨씬 넓습니다. 편의를 줄이고 소비를 제한하는 대신 더 강력한 에너지 시스템을 구축해 탄소 기반 발전을 대체할 수 있습니다.

전통적인 기후정책은 배출량을 줄이기 위해 사회에 편의를 희생하라고 요구하는 것으로 받아들여지곤 합니다. StarRoad 는 다른 길을 제시합니다. 문명의 역량을 줄이는 대신 신규 발전의 대부분을 우주에 배치하고, 전력 부문의 탄소 배출을 늘리지 않으면서 가용 에너지를 확대합니다.

이 모델은 산업 자원으로서 탄화수소가 사라질 것을 요구하지 않습니다. 대규모 전력·열 생산에서는 단계적으로 줄이되, 화학제품, 소재, 탄소 복합재, 합성제품, 그리고 탄소가 연료가 아니라 원료인 생산 사슬로 전환해 계속 활용할 수 있습니다.

오늘날 탄소 에너지 산업에 이것은 위협만이 아니라 전환 경로이기도 합니다. 석유·가스·석탄 기반시설과 연계된 기업, 국가, 기금에 우주 태양광 발전, 궤도 에너지, 탄화수소 화학, 탄소 소재에 대한 우선 투자 기회를 제공할 수 있습니다. 그러면 StarRoad 는 기존 에너지 산업의 단순한 경쟁자가 아니라 계획된 전환을 위한 장치가 됩니다.

8.3.1. 에너지 대체 규모

1 기가와트의 연속 전력은 연간 약 8.76 TWh 를 생산합니다. 가동률 99.7%인 2 GW 우주 태양광 발전소는 연간 약 17.47 TWh 를 생산합니다.

따라서:

- 궤도 발전 100 GW 는 연간 약 876 TWh,
- 궤도 발전 1 TW 는 연간 약 8,760 TWh,

- 궤도 발전 3 TW 는 연간 약 26,280 TWh 를 생산하며, 이는 현재 세계 연간 전력 소비량과 비슷합니다.

2024 년 세계 전력 생산량은 약 30.8 천 TWh 였고, 그중 화석연료 발전은 약 18.2 천 TWh 였습니다. 규모는 분명합니다. 탄소 발전의 일부만 대체하더라도 수십이 아니라 수백 또는 수천 기가와트의 신규 안정 전원이 필요합니다.

8.3.2. StarRoad 발사로 우주 태양광 발전소를 운송할 때 가능한 대체 속도

표는 기술적 상한 추정치를 제시합니다. StarRoad 발사의 상당 부분이 매년 전력망에 연결되는 2 GW 발전소 1 기를 운송한다면 어떤 결과가 가능한지 보여 줍니다. 이는 전망도 약속도 아닙니다. 양산, 완성된 지상 수신 안테나와 전력망 연결, 정치·법적 수용, 자금조달, 유지보수, 출력을 받아들일 수 있는 에너지 시장이라는 추가 조건이 충족될 때만 가능한 속도를 계산한 것입니다.

StarRoad 운영 기간	경제 모델의 연간 발사 횟수	연간 신규 우주 태양광 발전 용량	배치 후 추가되는 연간 발전량	2024 년 화석연료 발전량, 연간 약 18.2 천 TWh	2024 년 세계 총발전량, 연간 약 30.8 천 TWh
1~2 년차	12~24	24~48 GW/년	210~419 TWh/년	1,2~2,3%	0,7~1,4%
3~5 년차	50~100	100~200 GW/년	873~1,747 TWh/년	4,8~9,6%	2,8~5,7%
6~10 년차	200~300	400~600 GW/년	3,493~5,240 TWh/년	19~29%	11~17%
11~15 년차	500~700	1,000~1,400 GW/년	8,734~12,227 TWh/년	48~67%	28~40%
16~25 년차	1000+	2,000+ GW/년	17,467+ TWh/년	96%+	57%+
26 년차 이후	1500+	3,000+ GW/년	26,201+ TWh/년	144%+	85%+

이 표는 우주 태양광 발전이 왜 StarRoad 의 자연스러운 주력 시장인지 보여 줍니다. 발사 1 회당 2 GW 발전소 1 기를 운송하면 초기 운영에서도 의미 있는 에너지 흐름이 생기고, 성숙한 운영은 행성 규모의 수단이 됩니다.

이 표를 보장된 탈탄소 일정표로 읽어서는 안 됩니다. 실제 대체 속도는 StarRoad 의 발사 능력뿐 아니라 다음 요인에도 제한됩니다.

- 우주 태양광 발전소의 제조 속도,
- 전력전자, 라디에이터, 트러스, 마이크로파 송신기, 제어 시스템의 생산,
- 지상 수신 안테나 건설,
- 전력망 용량,
- 마이크로파 전력 전송에 대한 정치적 승인,
- 편익과 위험의 국제적 배분,
- 궤도 에너지의 보험과 규제,
- 발전소의 유지보수, 수리, 수명 종료 후 폐기,
- 지상 태양광, 풍력, 원자력, 수력, 지열 발전과의 경쟁.

따라서 정확한 주장은 이렇습니다. StarRoad 는 세계 화석연료 전력 규모에 맞먹는 대체 속도를 기술적으로 가능하게 하지만, 실제 전환 속도는 발전소 제조, 전력망, 수신 안테나, 정책, 시장이 결정합니다.

8.3.3. 탄소 기반 에너지 산업의 전환

발전소 생산이 StarRoad 발사 속도를 따라가면 10~20 년 안에 테라와트급 궤도 전력을 구축할 수 있습니다. 이는 지상 에너지를 없애는 것이 아니라 역할을 바꿉니다. 지상 전력망, 원자력, 수력, 재생에너지, 지열 발전, 저장장치가 혼합 시스템을 이루고 궤도 발전이 기저부하·산업·수출 계층에 전력을 공급합니다.

이 시나리오에서 탄소 기반 에너지는 단순히 ‘패배’하지 않습니다. 전환 경로를 얻습니다.

- 석탄·가스 발전소는 기저부하 발전에서 단계적으로 물러납니다.
- 가스 기반시설 일부는 예비 전력, 화학, 합성제품 역할로 전환합니다.
- 석유·가스 기업은 우주 태양광 발전, 지상 수신 안테나, 탄화수소 화학, 탄소 소재에 투자합니다.
- 석탄 산업은 탄소 복합재, 환원제, 화학 원료와 소재로 전환할 수 있습니다.
- 일부 기존 에너지 기업은 궤도 발전, 지상 수신 안테나, 전력망 배전의 운영사가 됩니다.

핵심 정치·경제 논점은 강력한 산업에 즉시 스스로를 없애라고 요구하는 것이 아니라 전환 경로를 제공하는 것입니다. 탄소 에너지 부문이 우주 태양광 발전과 화학 생산을 통해 수익성을 유지하거나 높일 수 있다면 전환에 대한 저항을 크게 줄일 수 있습니다.

8.3.4. 전통적인 ‘녹색 의제’와의 차이

StarRoad 는 에너지 긴축이 아니라 에너지 확대를 제안합니다. 기후 논리는 문명의 역량을 줄이는 것이 아니라 그 역량을 더 지속 가능한 기반시설로 옮기는 데 있습니다.

이는 사람들에게 ‘기후를 위해 더 나쁘게 살라’고 요구하는 것으로 인식되는 접근과 다릅니다. 우주 태양광 발전과 StarRoad 의 결합은 다른 미래상을 뒷받침합니다.

- 더 적은 에너지가 아니라 더 많은 에너지,
- 더 적은 산업이 아니라 더 적은 배출,
- 디지털 경제의 제한이 아니라 더 많은 가용 연산 능력,
- 교통·생산·일상생활의 더 폭넓은 전기화,
- 개발도상 지역에 더 많은 기회,
- 탄소는 산업 원료로 유지하면서 연료로서 화석자원에 대한 의존은 축소.

이 접근은 StarRoad 의 문명적 논리와 더 잘 맞습니다. 프로젝트는 인류에게 축소를 요구하지 않고, 과거와 같은 탄소 발자국 없이 성장할 수 있는 기반시설을 만듭니다.

8.3.5. 결론: 주력 시장으로서 우주 태양광 발전

기가와트급 우주 태양광 발전소는 StarRoad 의 부차적 용도가 아니라 경제적 필요성을 뒷받침하는 핵심 이유 중 하나입니다.

두 시스템을 결합하면:

- 초중량급 발사에 대한 대규모 수요를 만들고,

- 전력 판매로 명확한 상업 수익을 제공하며,
- 미래 궤도 산업 기반에 전력을 공급하고,
- 지상 수신 안테나, 중계기, 궤도 간 예인선, 조선소, 서비스 거주지의 수요를 만들며,
- 탄소 기반 에너지 산업에 새로운 투자 분야를 제공하고,
- 행성 규모 기후 행동을 위한 실질적 수단을 제공합니다.

로켓 물류에서는 우주 태양광 발전소가 지나치게 무겁고 비싸며 운영도 복잡합니다. StarRoad 물류에서는 예외적인 임무가 아니라 대규모 기반시설 산업이 양산하는 자연스러운 에너지 화물이 됩니다.

8.4. 궤도 배치 지점: GEO 와 EML4/5

우주 태양광발전소와 관련 인프라의 주된 배치 지점은 정지궤도와 지구-달 라그랑주점 EML4/5 다.

정지궤도는 지구의 고정 지역으로 전력을 보내기에 적합하다. GEO 의 위성이나 에너지 플랫폼은 지표에 대해 거의 같은 위치를 유지하므로 마이크로파 빔 조준, 지상 렉테나 부지 선정, 지역 전력망 연계가 쉬워진다. 정지궤도 고도는 적도 상공 약 35,800km 다.

EML4 와 EML5 는 대형 정착지, 조선소, 산업 거점, 에너지 클러스터에 적합하다. 지구-달 계에서 정삼각형의 꼭짓점에 있으며 일직선상 L1/L2 점보다 장기 안정성이 높다. 이는 대규모 산업에 중요하다. 대형 발전소, 창고, 조선소, 조립 트러스, 주거 단지를 위치 유지에 막대한 추진제를 계속 쓰지 않고 설치할 수 있기 때문이다.

GEO 와 EML4/5 를 활용하면 저궤도와와의 충돌도 줄어든다. 태양광발전소 같은 대형 플랫폼은 광공해, 충돌 위험, 희박 대기 저항, 천문 관측 방해로 일으킬 거대 배열을 LEO 에 둘 필요가 없다. 저궤도는 캡슐 강하, 중간 작업, 점검, 특정 저궤도 임무를 위한 서비스 구역으로 남는다.

8.5. 초기 단계: AstroLiner-S 직항 비행

초기 단계에서는 최초의 단순화-저위험 셔틀형인 AstroLiner-S 를 쓴다. 핵분열 또는 핵융합 전원을 신지 않으며, 최종 궤도 진입, 보정, 이탈, 귀환에는 화학추진을 사용한다.

초기 단계의 주된 목표는 모든 궤도 인프라가 성숙할 때까지 기다리지 않고 첫 화물 흐름을 만드는 것이다. 따라서 AstroLiner-S 는 대형 모듈을 다음 위치로 직접 운반할 수 있어야 한다.

- 태양광발전소와 에너지 중계기를 설치할 정지궤도.
- EML4/5 에너지 클러스터.
- 태양광발전소와 데이터센터를 배치할 고에너지 궤도.

이 단계의 화물은 주로 완제품 또는 거의 완성된 구조물이다.

- 자가 전개식 우주 태양광발전소.
- 전력 전송 모듈.
- 대형 방열기 패널.
- 데이터센터 컴퓨팅 블록.

- 트러스 구조물.
- 로봇 조립기.
- 초기 서비스 스테이션.
- 추진제와 작동 유체 비축분.
- 통신·항법·교통관제 모듈.

LEO 대비 EML4/5 와 GEO 의 이점:

- 저궤도 위성으로 인한 광공해 문제가 없다.
- 규칙적인 주야 주기 없이 태양광발전소가 거의 연속으로 빛을 받는다.
- 지구와 달에 대해 안정된 위치를 유지한다.

이 단계의 핵심 수치:

- 발사 빈도: 월 1~2 회, 연 12~24 회.
- 비행당 탑재화물: 10,000t.
- 연간 화물 흐름: 120,000~240,000t.
- 운송 단가: \$80~120/kg.
- 목표 궤도: EML4/5 와 GEO.

이 방식은 수익을 내기 전에 우주 인프라 전체부터 건설해야 하는 함정을 피한다. 최초의 상업 탑재화물 자체가 미래 인프라의 구성품이다.

8.6. 성숙 단계: 마이크로파 중계망과 서비스 인프라

발전소, 데이터센터, 대형 플랫폼의 수가 궤도망을 상시 가동할 만큼 늘어나면 성숙 단계가 시작된다. 과제는 새 시설을 발사하는 데서 이미 배치된 시설을 정비하는 일로 확대된다.

성숙 단계의 주요 요소:

- GEO 마이크로파 중계망.
- 주요 에너지 클러스터 인근의 상설 서비스 거점.
- 수리·검사선.
- 저장 스테이션.
- 궤도 예인선.
- EML4/5 의 최초 상설 정착지와 교대 근무 인력.
- 자동·반자동 조선소.
- EML1 수송 허브.

마이크로파 중계망은 지구 각 지역에 에너지를 더 유연하게 배분하고 발전소와 렉테나를 직접 잇는 기하학적 조건에 대한 의존을 줄여, 고립된 궤도 발전소의 집합이 아닌 에너지망을 구축하게 한다. 지상에는 수전 렉테나, 변환 변전소, 완충 저장장치, 지역 전력망 연결부가 필요하다.

상설 정비는 태양광발전소의 수명을 늘린다. 이는 근본적으로 중요하다. 정비할 수 없으면 경제성이 개별 모듈의 수명에 묶인다. 패널, 송신기, 방열기, 전자기기, 트러스를 궤도에서 교체할 수 있다면 발전소는 일회용 위성이 아니라 유지보수 가능한 에너지 시설이 된다.

8.7. 운용 환경에 따른 수송 기능 분리

성숙한 StarRoad 물류는 하나의 만능 우주선이 아니라 운용 환경에 따라 수송 기능을 나누어 구축한다.

AstroLiner 는 지구-궤도와 궤도-지구 수송을 맡는다. 궤도 중량물 운반선이자 귀환 활공기이며 대형 컨테이너 운반선이지만, 만능 행성 간 우주선이 되어서는 안 된다.

궤도 간 수송선은 우주에서만 운항한다. 대기권에 들어가지 않으므로 착륙용 열차폐체, 날개, 해상 설비, 착수용 강화 선체가 필요 없다. 궤도 거점 사이 이동에 최적화되어 건조질량은 작고 수명은 길다.

전용 캡슐이 행성으로 내려가 사람이나 화물을 지표로 돌려보낸다. 이를 AstroLiner 의 주 선체에 포함해서는 안 된다. 소수의 사람이나 소량의 화물을 전달하려고 수천 톤을 내려보내는 것은 비합리적이다.

수송 체계는 다음과 같다.

환경	주요 운송수단	기능
지구 → 궤도	AstroLiner / AstroLiner-S	화물과 모듈의 초중량급 수송
고궤도와 라그랑주점	궤도 간 수송선과 예인선	LEO, GEO, EML1/2/4/5 사이 수송
궤도 → 지표	유인·화물 캡슐	사람과 화물의 강하
궤도 거점	스테이션, 창고, 조선소	보관, 조립, 수리, 환적

이 분업은 각 운송수단의 건조질량을 낮추고 설계 타협을 줄이며, 우주 물류를 컨테이너선, 예인선, 항구, 창고, 조선소, 특수선으로 이루어진 해상 운송에 가깝게 만든다.

8.8. 성숙 물류에서 AstroLiner 의 역할

AstroLiner 는 만능 우주선이 아니다. 주된 역할은 반복 운항하는 초중량급 궤도 운반선이자 재사용 귀환 수송선이다.

상행편에 실는 화물:

- 화물 컨테이너.
- 유인 모듈.
- 추진제 모듈.
- 건설 부품.
- 패널, 트러스, 케이블, 방열기.
- 완성품 또는 부품 상태의 궤도 간 예인선.

- 강하 캡슐.
- 궤도정거장 모듈.
- 발전소와 데이터센터 구성품.

귀환편은 주로 빈 상태이며 화물을 싣더라도 제한적이다.

- 승무원.
- 시료.
- 고가의 수리 가능한 조립품.
- 퇴역 전자기기.
- 고장 나거나 철거된 부품.

귀환 구성은 가능한 한 가벼워야 한다. 안전한 활공, 대기권 진입, 해상 착수에는 잔여 질량을 최소화해야 하므로 임무를 마친 AstroLiner 의 귀환 질량은 발사 질량보다 훨씬 작아야 한다. 수천 톤의 탑재화물을 지구로 돌려보내는 일은 통상 임무가 아니며, 전용 캡슐이나 별도 귀환 모듈이 맡는다.

AstroLiner 가 자체 델타 v 능력을 일부 유지하는 데는 네 가지 이유가 있다.

1. 아직 완전히 배치되지 않은 인프라로부터의 독립성.
2. 대체 경로를 이용할 능력.
3. 비상 상황 대응.
4. 초기 운용의 유연성.

그러나 성숙한 체계에서는 전용 예인선과 수송선이 궤도 간 델타 v 대부분을 제공한다. 이로써 AstroLiner 의 부담이 줄고 선체 수명이 늘며 발사-하역-귀환-정비-재발사 주기가 짧아진다.

8.9. 궤도 간 수송선과 예인선

궤도 간 수송선은 StarRoad 의 상설 우주 함대다. 대기권에 들어가거나 지구로 귀환하지 않고 LEO, GEO, EML1, EML2, EML4/5 와 기타 거점 사이를 운항한다.

주요 임무:

- AstroLiner 하역 지점에서 목표 궤도로 모듈 운송.
- 태양광발전소, 데이터센터, 대형 트러스 예인.
- 추진제와 작동 유체 운송.
- 유인 모듈 운송.
- 발전소 부품 정비와 교체.
- 강하 캡슐을 강하 운용 궤도로 운반.
- 빈 예인선을 EML1 또는 EML4/5 로 회송.
- 궤도 조선소 지원.

이 우주선들은 전기, 자기플라스마동역학, 원자력전기, 태양전기 또는 하이브리드 추진을 쓸 수 있다. 대기권에 들어갈 필요가 없어 대형 방열기, 경량 트러스, 대용량 작동유체 탱크, 교체식 추진장치, 궤도 조선소 정비성 등 용도에 고도로 특화할 수 있다.

성숙한 구조에서는 궤도 간 수송이 StarRoad 를 발사 시스템에서 우주 수송망으로 바꾼다.

8.10. 지구와 다른 행성으로의 강하

강하는 전용 캡슐이 많으므로 AstroLiner 가 모든 임무를 위한 만능 재진입선일 필요는 없다.

주요 종류:

유인 캡슐(PC) — 사람을 운반하며 안전한 진입, 비상 상황, 자율 착륙, 유인 모듈 연계를 고려해 설계된 캡슐.

화물 캡슐(CCap) — 귀환해야 하는 고가 화물, 시료, 장비, 생물학적 물질, 전자기기와 부품용 캡슐.

산업 귀환 캡슐(IRC) — 장래에 그러한 시장이 생기면 자재를 대량 귀환시키는 강화형 화물 캡슐.

AstroLiner 가 캡슐을 궤도에 올린다. 궤도 간 예인선 또는 초기에는 AstroLiner 자체가 캡슐을 강하 운용 궤도로 옮긴다. 분리 후 각 캡슐은 독립적으로 진입하고 착륙한다.

달, 화성, 금성, 소행성에는 각 환경에 맞는 서로 다른 착륙 체계를 쓴다. 대기, 중력, 열유속, 먼지 조건, 이륙 요건이 너무 달라 하나의 만능 강하선으로 태양계의 모든 천체를 지원할 수 없다.

8.11. 표준화 모듈

표준화는 StarRoad 물류의 토대다. 해상 컨테이너화가 세계 무역을 바꿨듯 표준 궤도 모듈은 우주 경제를 바꾼다.

기본 모듈 종류:

유인 모듈(PM) — AstroLiner, 궤도 간 수송선, 궤도정거장, 유인 캡슐에서 사용할 수 있는 가압 모듈. 생명유지장치, 좌석 또는 선실, 비상 비축품, 도킹 인터페이스, 표준 고정점을 갖춘다.

화물 컨테이너(cc) — 패널, 트러스, 방열기, 케이블, 장비, 로봇 체계, 예비부품, 소모품을 위한 가압 또는 비가압 컨테이너.

추진제 모듈(PrM) — 예인선과 정거장용 추진제, 작동 유체, 물, 산소, 수소, 아르곤, 제논과 기타 소모 매질을 저장하는 모듈.

설비 모듈(UM) — 태양전지 패널, 배터리, 방열기, 안테나, 변환기, 열교환기, 제어 전자기기를 포함할 수 있는 전력·방열·통신·제어 모듈.

건설 모듈(CM) — 트러스, 보, 프레임 부재, 로봇 조립기, 체결 장치, 테더, 케이블 경로, 전개 구조물을 담은 건설 모듈.

전력 전송 모듈(PTM) — 마이크로파 안테나, 위상배열, 전력전자, 빔 조준·제어 장치를 담은 모듈.

모든 모듈에서 표준화할 항목:

- 치수 등급.
- 구조 인터페이스.

- 로봇 파지점.
- 도킹 인터페이스.
- 전기·열 인터페이스.
- 디지털 식별 정보와 정비 기록.
- 허용 질량과 무게중심 범위.
- 비상 고정·분리 방식.

이로써 정거장, 우주선, 발전소, 산업 단지를 일회성 전용 기체가 아니라 표준 블록의 조합으로 조립할 수 있다.

8.12. 궤도 인프라의 계층

StarRoad 의 궤도 물류는 거점의 계층으로 구성된다.

지구 / StarRoad

. 제조, 조립, 발사, AstroLiner 수리, 모듈 생산, 추진제 준비, 에너지 공급, 화물 흐름 관제를 맡는다.

LEO

. 강하 캡슐, 검사, 비상 상황, 임시 작업, 진입 전 캡슐 분리를 위한 서비스 구역이다. 성숙한 체계에서 LEO 는 주 창고도 과밀 산업대도 아니다.

GEO

. 마이크로파 중계, 에너지 플랫폼, 통신, 지구의 고정 지역으로 보내는 전력 전송 구역이다. 궤도 에너지와 지상 전력망을 통합하기에 적합하다.

EML1.

지구-달 계의 주요 수송 허브다. 탑재화물이 최종 목적지까지 직항할 필요가 없으면 AstroLiner 가 이곳에 직접 도착해 모듈을 내린다. 창고, 예인선, 교통관제, 수리 거점, 달 엘리베이터 환적 정거장이 위치한다.

EML1 은 고도로 자동화해야 한다. 대규모 상주 인력은 필요 없다. 사람은 방호가 더 좋은 달 용암동굴, EML4/5 또는 대형 정거장에 머물다가 필요할 때 EML1 로 이동할 수 있다.

EML2.

달 뒷면과 인근의 전파정숙 관측소, 심우주 망원경, 시험 정거장, 심우주 통신, 과학 시설을 위한 과학·관측 구역이다.

EML4

/EML5. 성숙한 궤도 문명의 주요 중심지로, 조선소, 정착지, 산업 정거장, 대형 발전소, 행성 간 우주선 조립시설, 창고, 수리기지, 추가 확장 관제센터가 들어선다.

8.13. 궤도 조선소

궤도 조선소는 주로 EML4/5 에 세운다. StarRoad 로도 완성된 채 발사할 수 없거나 그렇게 해서는 안 되는 구조물을 조립하기 위해서다.

AstroLiner 는 재료와 구조물을 평판 포장 화물로 운반한다.

- 패널.
- 트러스.

- 구조 형재.
- 케이블.
- 방열기.
- 반사경.
- 막재.
- 탱크.
- 하중 지지 조립품.
- 로봇 조립 체계.

조립은 로봇과 원격조작 장치가 수행한다. 사람은 정비, 감독, 복잡한 수리, 예외적 판단을 맡되 위험한 조립 작업 대부분을 수작업으로 해서는 안 된다.

조선소에서 건조하는 것:

- 새 우주 태양광발전소.
- 대형 방열기 군.
- 궤도 간 수송선.
- 행성 간 우주선.
- 주거 정거장.
- 소행성 처리 단지.
- 미래 거대구조물의 구성품.

이 단계에서 StarRoad 는 지구 발사 시스템에 머물지 않는다. 지구가 복잡한 부품을 공급하고 우주가 점차 조립, 정비, 제조 일부를 맡는 생산사슬의 하단 연결부가 된다.

8.14. 궤도·달 정착지

상설 정착지는 그 자체가 목적이 아니라 대규모 인프라를 정비할 필요에서 생긴다. 발전소, 조선소, 예인선, 중계기, 달 생산 거점, 산업 플랫폼이 늘면 완전 원격 정비만으로는 부족하다.

대형 궤도 정착지의 기본 형태는 스탠퍼드 토러스나 파생형 같은 인공중력 회전 정거장이다. 주로 EML4/5 처럼 장기 개발에 적합한 안정 지점에 두고 궤도 산업의 주거·서비스·의료·수리·행정 중심으로 삼는다.

달 기지와 산업 정착지의 상주 인력은 달 표면이 아니라 EML4/5 의 인공중력 정거장에서 사는 편이 좋다. 달의 저중력이 장기 건강에 미치는 영향을 줄이면서 인력을 달 인프라 가까이에 둘 수 있다. 달 표면은 교대조가 일하는 산업 현장이 주 역할이 된다.

EML1 은 달 체계의 중앙 환적·물류 허브가 된다. 지구, 달, EML4/5 와 다른 궤도 영역을 잇는 화물 흐름을 위해 창고, 도크, 예인선, 재급유 모듈, 수리시설, 교통관제를 집중한다. 인력을 달 가까이에 두면 매번 지구에서 보내는 것보다 교대, 비상 대응, 수리, 달 생산 관리가 쉬워진다.

달 표면과 EML1 영역을 잇는 달 엘리베이터는 이 구조의 핵심 요소다. 표토, 산소, 금속, 건축자재, 산업 모듈은 위로, 장비, 소모품, 교대 인력은 아래로 정기 운송한다. 지표에서 로켓을 계속 발사하지 않고도 달 산업을 궤도 조선소, 정착지, 궤도 간 물류와 영구적으로 연결한다.

달의 중력이 낮으므로 달 정착지는 주로 교대조가 운영하는 방호형 산업기지가 된다. 채굴·처리·에너지·건설 단지, 자동 장비, 산소 생산, 표토 처리, 달 엘리베이터 부품 조립, EML1 행 화물 준비를 지원한다.

궤도·달 정착지의 방사선 방호는 여러 층으로 구성한다.

- 물, 폴리에틸렌, 달 표토, 연료, 기술 비축품을 이용한 수동 차폐.
- 가장 잘 보호된 구역을 중앙과 내부에 배치.
- 하전입자 흐름을 줄이는 능동 자기 방호.
- 태양 양성자 사태에 대비한 비상 대피실.

물, 수소, 폴리에틸렌, 연료, 달 표토는 유용한 비축품인 동시에 방사선 차폐 질량이다. 정거장, 달 기지, 달 엘리베이터, EML1 거점의 운용 주기에 편입하면 방호재가 사중이 될 필요가 없다.

8.15. 물류 비유: 해상망으로서의 우주

성숙한 StarRoad 체계는 발사 프로그램보다 해상 물류와 닮았다.

이 비유에서:

- **AstroLiner** 는 지구와 궤도를 잇는 초중량급 컨테이너선이다.
- **궤도 간 예인선**은 항만 작업선과 대양 예인선이다.
- **궤도 간 수송선**은 장거리 항로 선박이다.
- **EML1** 은 환적항이자 분배 허브다.
- **GEO** 는 에너지·통신 정박지다.
- **EML4/5** 는 산업항, 조선소, 도시다.
- **캡슐**은 특수 착륙선이다.
- **PM, CC, PrM, UM, CM, PTM** 모듈은 컨테이너이자 기능 블록이다.

이 방식은 우주비행 문화 자체를 바꾼다. 일회성 특수 임무 대신 운항표, 컨테이너 순환, 수리, 보험, 표준, 창고, 항만 교통관제, 산업 화물 물동량이 중심이 된다.

8.16. 화물 흐름의 경제성

StarRoad 는 우주 경제의 중심 원칙을 뒤집는다. 로켓 물류에서는 모든 kg 이 비싸므로 질량을 줄이는 편이 싸다. StarRoad 물류에서는 표준화하고 대량 생산해 큰 묶음으로 발사하는 편이 싸다.

이에 따라 공학적 선택도 바뀐다.

- 구조물을 더 튼튼하고 수리하기 쉽게 만들 수 있다.

- 장비에 더 큰 설계 여유를 둘 수 있다.
- 정거장을 일회용 위성이 아니라 정비 가능한 시설로 설계할 수 있다.
- 방열기, 차폐재, 프레임 질량이 절대 제약에서 벗어난다.
- 수명이 짧은 소형 기체 다수보다 대형 플랫폼이 경제적이 된다.

핵심 경제 효과는 StarRoad 가 단순한 발사 시장이 아니라 궤도 시설 시장을 만든다는 점이다. 수익은 화물 운송뿐 아니라 발전소, 데이터센터, 중계기, 예인선, 조선소, 에너지망의 제조·소유·운영 참여에서도 나온다.

가능한 사업 모델:

- 외부 고객 대상 발사 판매.
- 에너지 인프라 장기 계약.
- 우주 태양광발전소 소유·운영.
- 에너지 기업과의 합작사업.
- 궤도 데이터센터 용량 임대.
- 지상 렉테나를 통한 전력 판매.
- 궤도 시설 서비스 계약.
- 궤도 간 수송 물류 요금.
- 정거장 보험, 수리, 수명 연장.

이 방식은 단일 시장 의존을 줄인다. 외부 발사 수요가 부족해도 StarRoad 는 에너지와 궤도 산업 프로그램을 통해 자체 화물 흐름을 만든다.

8.17. 시장과 물류의 발전 단계

수요와 궤도 물류는 네 단계로 발전한다.

I. 기반 단계(10~20 년) — 에너지 화물 흐름.

AstroLiner-S 는 완성되었거나 거의 완성된 우주 태양광 발전소, 데이터 센터, 중계기, 서비스 모듈, 초기 예인선을 발사한다. 주된 목표는 정기 발사를 입증하고 최초의 상업 에너지 시설을 세우며 궤도 발전 시장을 만드는 것이다.

II. 성숙 단계(20~50 년) — 궤도 서비스망.

GEO 중계기, EML1 허브, 서비스 기지, 수리선, 예인선, EML4/5 의 최초 영구 정착지와 조선소가 등장한다. AstroLiner 는 각 목적지로 직접 비행하는 방식에서 네트워크 거점에 하역하는 중량 수송 체계의 역할로 점차 전환한다.

III. 산업 단계(50~100 년) — 지구

밖 생산. 행성 간 우주선, 소행성 처리 시설, 대형 궤도 거주 시설을 본격적으로 건설한다. 지구 밖 재료 사용이 늘어 지구에서 대량 원료를 보내야 하는 의존도가 줄어든다.

IV. 진화·잠재 단계(100 년 이후) — 태양계 기반시설.

EML4/5 는 태양계 전역으로의 확장, 메가구조물, 태양광 군집, 오닐 원통, 심우주 망원경, 성간 임무의 출발점이 된다.

이 순서가 중요하다. StarRoad 는 처음부터 완전히 발전한 우주 문명을 요구하지 않는다. 에너지와 컴퓨팅이라는 명확한 수요원에서 시작해 이후 완전한 우주 경제로 확대된다.

8.18. 진화 전망: StarRoad 의 후속 체계

StarRoad 가 행성 수송 인프라의 최종 형태일 필요는 없다. 로켓 시대에서 성숙한 우주공학 거대구조물 시대로 넘어가는 과도기적이지만 필수적인 단계로 볼 수 있다.

잘 알려진 가상 체계인 우주 엘리베이터, 발사 루프, StarTram, 궤도 링, 우주탑 가운데 장치 StarRoad 의 화물 용량을 넘어설 수 있는 것은 고도화된 궤도 링뿐이다. 그러나 그러한 구조물에는 확립된 강력한 궤도 산업, 막대한 자재, 조선소, 에너지, 로봇 조립, 거대구조물 운용 경험이 필요하다.

StarRoad 의 가능한 후속 체계는 서로 연결된 두 개의 링으로 구성된다.

- 지구를 둘러싸며 최저점에서 지표와 만나는 수송 링.
- GEO 고도의 정지궤도 항만 링과 우주 도크.
- 수송 링의 밀폐 샤프트 안에서 움직이는 여러 케이블 로터.
- 궤적 최고점에서 수송 링과 정지궤도 항만 링을 잇는 연결부.

발사 루프처럼 수송 링도 밀폐 통로 안에 고속 로터를 두지만 더 안전할 수 있다. 루프와 달리 이동 케이블 로터는 급회전하지 않아 반경 방향 하중이 훨씬 작으며, 비상 파단 때 구조물 전체를 파괴하지 않고 행성 바깥쪽으로 이동하도록 설계할 수 있다. 수송 링은 지표에서 정지궤도 항만 링까지 뻗는 동적 환형 우주탑이 된다.

이 체계는 첫 StarRoad 의 대안이 아니라 가능한 후속 체계다. StarRoad 또는 동급 간선 체계가 없으면 궤도 링에 필요한 질량, 장비, 조선소, 에너지 능력을 충분히 싸게 올릴 수 없다.

8.19. 행성공학의 잠재력: 하나의 자원 체계로서의 태양계

StarRoad 는 언젠가 대규모 우주공학과 테라포밍처럼 지금은 상상하기 어려운 가능성을 열 수 있다. 이는 지구의 저비용 대량 운송, 우주 태양광발전, EML4/5 궤도 조선소, 소행성 채굴, 행성 간 수송선, 유조선단, 심우주 임무용 자율 에너지원 등 성숙한 태양계 인프라가 존재한 뒤에야 가능한 후기 문명 시나리오다.

핵심은 금성과 화성을 별도 프로그램이 아니라 하나의 자원 체계로 보는 것이다. 화성에는 질소, 수소, 짙은 대기, 자기 방호가 부족하다. 금성에는 막대한 CO₂와 질소가 있고 질량과 중력도 지구와 비슷하지만 약 460°C, 약 92 기압, CO₂ 대기, 황산 구름, 자기장 부재, 극도로 느린 역행 자전이라는 극한 환경에 갇혀 있다.

8.19.1. 준비 단계: 태양계 인프라

행성 테라포밍을 시작하기 전에 다음이 갖춰져야 한다.

- 지구에서 질량을 저비용으로 올리는 StarRoad.
- 에너지원인 우주 태양광발전소와 태양광 군집.
- EML4/5 의 궤도 조선소.
- 금속, 물, 휘발성 물질을 얻는 첨단 소행성 채굴.

- 수십 또는 수백 곳의 첨단 자급형 우주 정착지와 이를 지원하는 에너지 거점.
- 수소, 물, 질소, CO₂를 운반하는 유조선단.
- 장거리용 원자력전기 또는 핵융합 수송 체계.

이런 프로그램의 합리적인 시작 시점은 StarRoad 운용 개시 후 적어도 100 년이 지난 뒤다. 우주 인프라가 지속적으로 성장하면 앞당겨질 수 있다.

8.19.2. 금성: 테라포밍 단계

금성은 대규모 장기 정착에 화성보다 더 적합할 수 있다. 중력은 약 0.9g, 질량은 지구와 비슷하고 태양에너지는 풍부하다. 핵심 문제는 극도로 높은 초기 장벽이다.

1. 냉각과 CO₂ 석출.

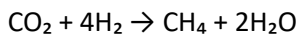
금성-태양 L1 점에 대형 차광막을 두어 유입 에너지를 줄인다. 깊이 냉각하면 CO₂의 상당 부분이 액체나 고체가 되어 지표에 가라앉는다. 압력이 급격히 떨어져 지옥 같은 환경이 공학과 건설이 가능한 환경으로 바뀐다.

2. 준동기 링과 궤도향. 냉각 뒤

미래의 24 시간 동기궤도 고도인 지표 상공 약 33,400km 에 동적 지지 링을 건설한다. 둘레는 약 248,000km, 현지 중력은 약 0.021g, 자유 원궤도 속도는 약 2.87km/s 다. 금성 자전이 아직 너무 느린 동안 능동 로터가 링을 지지하며, 링은 궤도향·에너지 거점·유조선 접안점 역할을 한다.

3. 대기 처리와 수소 수입. 석출된

CO₂를 처리 단지로 끌어올린다. 수소는 외태양계, 얼음 천체, 소행성 자원에서 온다. CO₂를 결합하는 기본 반응은 다음과 같다.



물은 해양과 산소에, 메탄은 연료와 화학 원료에 쓴다. 탄소는 재료와 장기 저장물에 고정하고 황 화합물은 광물 형태로 바꾼다. 남은 질소와 CO₂ 일부는 화성으로 보낼 수 있다.

4. 거주 가능한

금성. 해양, 질소-산소 대기, 통제된 기후, 자기 또는 자기권 방호, 초기 생물권이 형성되면 주요 테라포밍은 완료된 것으로 볼 수 있다. 약 120 시간의 중간 자전주기에도 금성은 거주 가능할 수 있다. 약 60 시간의 밤은 해양, 구름, 1.3–1.6bar 대기, 열 수송, 반사경·차광막 체계가 완화한다.

5. 궤도 자전 보정과 24 시간 주기. 금성을 24 시간

주기로 만드는 것은 거주 가능성의 전제조건이 아니라 장기간의 공학적 개선이다. 현재 역행 자전에서 순행 24 시간 주기로 바꾸려면 각운동량을 약 $4.3 \times 10^{33} \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ 늘려야 한다. 작동유체 분사속도가 약 100km/s 라면 약 $1.1 \times 10^{21} \text{kg}$ 이 필요하다. 이상적 제트 에너지가 약 $5 \times 10^{30} \text{J}$ 일 때 300EW 로 약 500–600 년이 걸린다. 공학 손실과 10^{31} – $3 \times 10^{31} \text{J}$ 를 고려하면 300EW 에서 약 1,000–3,000 년, 100–200EW 에서는 수천 년으로 늘어난다. 행성과 준동기 링 양쪽의 마주 보는 지점에 대칭 연결한 두 수송 링이 자전 운동량을 링에서 지표로 전달한다. 지구와 화성 구성의 단일 링과 달리 두 링은 운동량 전달 중 추가 동적 안정성을 제공한다. 24 시간 주기에 도달하면 링은 완전한 금성 동기 도크가 된다.

8.19.3. 화성: 테라포밍 단계

화성은 초기 기지를 세우기 쉽지만 완전한 행성 환경으로 바꾸기는 더 어렵다. 중력은 약 0.38g 이고 대기가 얇으며 질소와 접근 가능한 휘발성 물질이 부족하고 자기 방호도 약하다. 따라서 현지 공학뿐 아니라 금성, 소행성, 외태양계에서 물질을 들여와야 한다.

1. 인공 자기권.

자기 방호는 장기 테라포밍의 첫 조건이다. 지구의 동기 링·수송 링과 유사한 궤도 링, 에너지·반사경 플랫폼, 동기 링에 통합된 자기 체계를 사용한다. 이것이 없으면 새 대기는 태양풍과 점진적 유실에 계속 노출된다. 금성 준동기 링처럼 화성 동기 링도 수송·궤도·에너지·자기권 기능을 결합한다. 통합 태양전지와 저장장치가 행성 인공 자기장을 유지하는 자기권 회로, 전력전자, 제어 인프라에 전력을 공급한다.

2. 대기와 물 수입.

질소와 CO₂ 일부는 금성에서, 물은 소행성·얼음 천체·외태양계에서 가져온다. 화성을 고립된 채 테라포밍하는 것이 아니라 공유 자원망이 부족한 휘발성 물질을 공급한다. 금성 대기를 들여오면 화성 자체 자원만으로 대기를 만들고 덥히는 것보다 온화하고 안정된 기후를 더 빨리 얻는다.

3. 대기 증대와 기후 온난화. 자기

방호를 갖춘 뒤 CO₂, 질소, 수증기와 추가 온실물질로 대기를 점차 두껍게 한다. 짙은 대기는 화성의 저온을 일부 상쇄하고 열 수송과 기압을 높이며 액체 물이 존재할 수 있는 지역을 넓힌다.

4. 물, 토양,

생물권. 저수지를 만들고 표토를 처리하며 토양 독성을 낮춘 뒤 미생물·식물 생태계를 도입한다. 보호된 국지 생물권, 지역 기후대, 마지막으로 전지구 환경 안정화의 순서로 진행한다.

5. 행성 규모의 이용

가능한 환경. 질소, CO₂, 물을 충분히 들여오면 화성은 밀도 높고 조절 가능한 대기, 인공 자기 방호, 수자원, 생물활동 지역, 대규모 산업 인프라를 갖추 수 있다. 0.38g 에서는 지구형 대규모 장기 거주에 금성보다 덜 적합하겠지만, 저중력은 저렴한 이착륙, 편리한 궤도 물류, 거대 구조물 건설, 저중력 제조, 내태양계와 소행성대를 잇는 산업·과학·중계 허브라는 이점도 준다.

8.19.4. 통합 시나리오의 이점

금성-화성-외태양계 통합 시나리오는 어느 한쪽만의 접근보다 강하다. 화성만 테라포밍하면 질소, 물, 에너지, 자기 방호 부족에 막힌다. 금성만 테라포밍하면 잉여물을 쓸 외부 수요처 없이 막대한 CO₂ 대기를 처리해야 한다. 공유 모델에서는 한 행성의 문제가 다른 행성의 자원이 된다. 금성의 질소와 CO₂는 화성을, 외태양계의 수소와 물은 금성을 지원하고, 소행성 산업은 금속과 건설 질량을 공급한다.

이 논리에서 StarRoad는 직접적인 테라포밍 도구가 아니라 인과사슬의 첫 고리다. StarRoad가 저렴한 대량 운송을, 우주 태양광발전소가 에너지를, EML4/5가 조선소를 가능하게 한다. 소행성 채굴이 원료를 공급하고 유조선단이 행성 사이에서 물질을 교환한 뒤에야 행성공학이 가능해진다.

8.20. 전략적 결론

StarRoad와 AstroLiner가 만드는 것은 발사 프로그램이 아니라 영구적인 우주 경제다.

초기 시장은 우주 태양광발전, 궤도 데이터센터, 에너지 인프라다. 성숙 시장은 정비, 수리, 전력 중계, 궤도 간 물류, 조선소, 정착지다. 산업 단계는 소행성·행성 간 경제를 만들고, 진화 단계는 거대구조물, 원거리 임무, 문명의 장기 확장으로 가는 길을 연다.

이 절의 핵심은 StarRoad 가 기존 우주비행 모델 안에서 시장을 찾는 것이 아니라는 점이다. 대량 화물 흐름, 궤도 에너지, 컴퓨팅 인프라, 우주 산업이 하나의 물류 체계를 이루는 새 시장을 만든다.

9. 계획의 경제 모델

9.1. 방법론과 주요 가정

경제 모델은 다음 원칙을 따릅니다.

- **양산과 자체 제작:** 규모의 경제로 터널 굴착기, 발전 설비, 저장 설비의 비용을 30~50% 낮춥니다.
- **현지화:** 아프리카의 자원·인력·자재를 활용하고 Spon's African Construction Cost Handbook 으로 보정합니다.
- **현재 시장 가격:** BESS 와 지열 발전소에는 2025~2026 년 자료를 사용합니다.
- **참고 환율:** 1 USD ≈ 100 RUB / 0.90 EUR. 모든 계산은 물가 상승을 제외한 2025 년 불변 달러 기준입니다. ±30%의 불확실성은 예비 타당성 조사에서 통상적인 범위입니다.

9.2. 아프리카 조건의 굴착 비용

Spon's African Construction Cost Handbook 은 아프리카 13 개국의 인건비와 자재비를 상세히 제시합니다. 조건 편차가 커서 초대형 단면 터널의 직접 단가는 없지만 추정치를 보정하는 데 활용할 수 있습니다.

공사 종류	규모	km 당 평균 비용	총비용(십억 USD)	산정 근거
본선 터널(17.5 × 12.5 m)	2,050 km	1,200 만~1,800 만 달러	\$24.6~36.9	세계의 대단면 자료를 아프리카 조건에 맞게 보정해 외삽했습니다.
집열 터널(6 × 2,050 km, ø2 m)	12,300 km	300 만~500 만 달러	\$36.9~61.5	아프리카 광산의 실제 공사비에 근거: 소단면은 m 당 3,500 달러.
정비 터널(ø3 m)	2,050 km	400 만~600 만 달러	\$8.2~12.3	집열 터널을 기준으로 더 큰 단면을 보정했습니다.
경사 터널(40 × 16 km, 17.5 × 12.5 m)	640 km	1,200 만~2,200 만 달러	\$7.7~14.1	본선 터널을 기준으로 30° 경사 비용을 더했습니다.
총 굴착 연장	17,040 km		\$77.4~124.8	

9.3. 자체 제작 터널 굴착기 선단

본선용 40 대, 집열용 240 대, 정비용 40 대를 양산하고 가봉과 콩고민주공화국에 조립 라인을 두면 비용을 30~50% 낮출 수 있습니다.

실드 종류	직경	수량	양산·자체 제작 단가	합계(십억 USD)
본선 터널 굴착기(SR-Main)	약 18 m	40 대	3,500 만~6,000 만 달러	\$1.4~2.4
집열 터널 굴착기(SR-Collector)	2 m	240 대	80 만~150 만 달러	\$0.19~0.36
정비 터널 굴착기(SR-Service)	3 m	40 대	120 만~200 만 달러	\$0.05~0.08
조립 공장(2 곳)	—	—	10 억~20 억 달러	\$1~2

실드 종류	직경	수량	양산·자체 제작 단가	합계(십억 USD)
굴착기 합계				\$2.64~4.84

9.4. 자율형 지열 열에너지 시스템

케냐에서 실제로 건설된 35 MW 메벵가이 지열 발전소는 시추와 증기정을 포함해 약 3,500 만~4,000 만 달러, 즉 kW 당 1,000~1,250 달러가 들었습니다. 40 기를 양산하고 현지화하면 단가는 kW 당 800~1,200 달러로 추정할 수 있습니다.

- 2.5 GW 발전소 1 기: 20~30 억 달러.
- 40 기: 800~1,200 억 달러.

이 추산은 이투루프 자료에 따른 러시아 지열발전 하한 약 650 달러/kW 와 복잡한 사업의 상한 1,500 달러/kW 가 뒷받침한다.

계산은 자율 지열 시스템 총출력 100 GW 의 상한추산을 쓴다. 실제출력은 지질조사 뒤에만 알 수 있고 수 GW 까지 크게 낮아질 수 있다. 이때 남는 자금은 대체발전원 건설에 쓴다.

9.5. 에너지 저장 시스템

저장 설비는 세 단계로 구성됩니다.

9.5.1. 1 차 단계: 터미널 장주기 저장

40 개 터미널에 설치해 한 번의 발사에 필요한 360 GWh 를 여유 있게 저장합니다. 현재 가격에서 유력한 기술은 다음과 같습니다.

저장 기술	단가	근거
중력 에너지 저장	50~100 달러/kWh	Energy Vault 실적: 25 MW/100 MWh 가 770 만 달러, 즉 77 달러/kWh. 효율 75~85%, 수명 30~40 년.
수열 간선 운하를 이용한 양수 발전과 소수력	80~150 달러/kWh	노선을 따라 형성된 자연 고도차를 이용합니다.
리튬 이온 BESS	완전 설치 기준 125 달러/kWh	Ember(2025)에 따르면 중국산 장비 75 달러/kWh 에 설치비 50 달러/kWh 가 추가됩니다. 215 GWh 규모에서는 100 달러/kWh 까지 낮아질 수 있습니다.

1 차 저장 총용량은 한 번의 완전한 가속 주기에 해당하는 360 GWh 입니다. 중력·양수 저장 70%, BESS 30%로 구성하면 비용은 다음과 같습니다.

구성 요소	용량	단가	비용
중력 + 양수 저장	250 GWh	60 달러/kWh	150 억 달러
BESS	110 GWh	125 달러/kWh	137.5 억 달러
1 차 단계 합계	360 GWh		287.5 억 달러

불확실성을 포함한 범위: 220 억~350 억 달러.

9.5.2. 2 차 단계: 코일 주변과 터널 내부의 완충 저장

코일 주변의 플라이휠이 과도 현상을 완화합니다. 단가는 MWh 당 50 만~100 만 달러이며, 1~5 GWh 완충 용량은 5 억~50 억 달러입니다.

9.5.3. 펄스 단계: 마이크로초 단위 안정화

슈퍼커패시터는 수 마이크로초의 펄스만 보상하고 급격한 부하 변화 때 전압을 안정시킵니다. 총용량은 발사 에너지의 1% 미만인 1~3 GWh 입니다. 300~500 달러/kWh 기준 비용은 3 억~15 억 달러입니다.

9.5.4. 저장 설비 총비용

단계	기술	용량	비용(십억 USD)
1 차	중력 + 양수 + BESS	360 GWh	\$22–35
완충	플라이휠	1~5 GWh	\$0.5–5
펄스	슈퍼커패시터	1~3 GWh	\$0.3–1.5
저장 합계			\$22.8–41.5

9.6. 산업 거점과 물류

비용 항목	비용(십억 USD)	산정 근거
가봉 산업 거점: 서들과 발사 모듈 제작	\$3–6	조선 도크, 공장, 크레인
콩고민주공화국 산업 거점: 고고도 대기권 포털과 고속 모듈	\$2–4	산악 산업 거점과 전기분해 시스템
가봉과 탕가니카호 항만 개발	\$1–3	부두, 크레인, 창고
2,050 km 노선의 송전선과 도로	\$4–8	220 kV 송전선, 도로, 교량
수열 간선 운하	\$2–5	토공, 라이닝, 갑문
합계	\$12–26	

9.7. 연구개발과 시제품 — 0 단계

비용 항목	범위(십억 USD)	산정 근거
수학적 모델링과 CFD	\$0.01–0.03	참고: 하이퍼루프 디지털 트윈 개발비 450 만 CHF.
2,050 km 노선 지질 조사	\$0.015–0.025	접근이 어려운 지역의 정밀 조사비는 km 당 7,000~12,000 달러.
BIM 설계와 문서화	\$0.02–0.05	요구 사양, 기본 설계, 실시 설계.
포털·초전도체 시험 시설	\$0.01–0.03	시제품 포털 챔버와 부상 모듈 시험대.
컨소시엄 설립과 법적 합의	\$0.005–0.015	국제 협상, 등록, 보험.
0 단계 합계	\$0.06–0.15	

연구개발 예산 600 만~1,500 만 달러는 고정값이 아닙니다. 심층 연구, 실물 크기 포털 시제품, 대형 시험대에 따라 5 억~30 억 달러까지 늘 수 있습니다. 따라서 CAPEX 종합에는 1 억~30 억 달러, 중간값 15 억 달러를 반영합니다.

9.8. 최종 CAPEX 종합

비용 항목	범위(십억 USD)	중간값(십억 USD)	CAPEX 비중(%)
터널 굴착	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
굴착기 선단과 제작	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%
자율형 지열 시스템: 2.5 GW 급 40 기	\$80–120	\$100	40%
3 단계 저장 설비	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
산업 거점과 물류	\$12–26	\$19	8%
연구개발, 인허가, 관리	\$0,1–3	\$1.5	0.6%
예비비(15%)	\$31–49	\$40	16%
총 CAPEX	\$225–365	\$295	100%

핵심 결론: StarRoad 의 추정 비용 중간값은 약 3,000 억 달러입니다.

9.9. 단계별 배분(십억 USD)

비용 항목	0 단계	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계	5 단계
터널 굴착	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
터널 굴착기	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
자율형 지열 열에너지 시스템	—	\$60	\$20	\$20	—	—
저장 설비	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1
산업 거점 + 물류	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
연구개발·인허가	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
예비비(15%)	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
단계별 합계	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
누적 합계	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. 투자 회수와 운송 원가의 변화

이 절의 모든 수치는 순수한 이론값입니다.

9.10.1. 발사 빈도와 kg 당 비용의 변화

StarRoad 는 즉시 최대 용량에 도달하지 않습니다. 새 노선의 가동, 셔틀 선단 확대, 궤도 인프라 배치에 따라 발사 빈도와 운송 원가가 변합니다.

정지궤도 이상 운송비 모델, 달러/kg:

기간	노선	연간 발사 횟수	빈도	운송비(\$/kg)	설명
1~2 년차, 실증 단계	1	12–24	월 1~2 회	\$80–120	첫 상업 발사. 운송을 다듬는 단계로 간접비가 높고 생산 수량이 적습니다.
3~5 년차	1	50–100	주 1~2 회	\$30–50	양산 운송을 시작합니다. 선단을 3~5 대로 늘리고 규모의 경제로 비용을 낮춥니다.

기간	노선	연간 발사 횟수	빈도	운송비(\$/kg)	설명
6~10 년차	1	200~300	하루 약 1 회	\$10~20	첫 노선이 설계 용량에 도달하고 정비가 완전 자동화됩니다.
11~15 년차	2	500~700	하루 약 2 회	\$3~8	두 번째 노선을 가동해 고정비를 두 가속기에 나눕니다.
16~25 년차	3~4	1000+	하루 3~5 회	\$0.8~3	3~4 개 병렬 노선으로 확장합니다. 1 GW 가 넘는 우주 태양광 발전소가 기동과 화물 처리를 위한 궤도 전력을 공급합니다.
26 년차 이후	5+	1500+	하루 5~10 회	\$0.3~1	성숙한 인프라. 우주 발전소가 가속기와 궤도 공장에 전력을 공급해 에너지 한계비용이 거의 0 이 됩니다.

9.10.2. 발사 1 회 원가 계산(\$/kg)

기간별 식: Ckg = (C 에너지 + C 정비 + C 감가상각 + C 운영) / M 화물. 여기서:

- C 에너지는 냉각과 보조 시스템을 포함한 전력비입니다.
- C 정비는 셔틀과 인프라의 유지보수비입니다.
- C 감가상각은 3,000 억 달러 CAPEX 를 50 년에 걸쳐 상각한 비용입니다.
- C 운영은 인력, 물류, 보험 등 기타 운영비입니다.
- M 화물은 발사당 10,000 t 의 탑재량입니다.

기간별 최종 값:

기간	발사/년	에너지(\$/kg)	정비(\$/kg)	감가상각(\$/kg)	운영(\$/kg)	총원가(\$/kg)
1~2 년차	12	1.8	6.63	50	3.57	62
3~5 년차	50	1	1.25	12	0.67	14.92
6~10 년차	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
11~15 년차, 2 개 노선	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
16~25 년차, 3~4 개 노선	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
26 년차 이후, 5 개 이상 노선 + 우주 태양광	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. 발사 비용의 절대액 구성

각 기간의 평균 연도와 10,000 t 탑재량 기준:

기간	발사 횟수	발사당 에너지(백만 USD)	정비(백만 USD)	감가상각(백만 USD)	운영비(백만 USD)	발사당 합계(백만 USD)
1~2 년차	12	18	66.3	500	35.7	620
3~5 년차	50	10	12.5	120	6.7	149.2
6~10 년차	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
11~15 년차	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
16~25 년차	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
26 년차 이후	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. 계산의 주요 가정

- 1. **에너지:** 초기 0.05 달러/kWh 에서 26 년차 이후 우주 태양광과 자체 지열 전원 덕분에 0.005 달러/kWh 로 낮아집니다.
- 2. **정비:** 실증기에는 수리, 조정, 과잉 인력 때문에 높지만 10 년차에는 자동화된 일괄 정비로 전환됩니다.
- 3. **감가상각:** 3,000 억 달러 CAPEX 를 50 년으로 나누면 연 60 억 달러입니다. 연 250 회 발사 시 회당 2,400 만 달러입니다. 다른 수입을 상계하지 않은 보수적 추정입니다. 또는 매년 회수되는 60 억 달러를 StarRoad 새 지선에 대한 확대 투자로 볼 수 있습니다.
- 4. **우주 태양광 발전소: 16 년차부터** 궤도 공장과 가속기 일부에 전력을 공급해 에너지비를 줄이고 전력 판매 수입을 몇 자릿수 높입니다.

9.10.5. 통합 추이: 수입과 원가

기간	발사/년	평균 시장 가격(\$/kg)	발사 수입(십억 USD/년)	원가(십억 USD/년)	매출총이익(십억 USD/년)
1~2 년차	12	\$100	12	7.44	4.56
3~5 년차	50	\$39	19.5	7.45	12.04
6~10 년차	250	\$9.6	24	7.8	16.2
11~15 년차	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
16~25 년차	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76
26 년차 이후	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

주: 지열 에너지 판매로 얻는 연 350 억~440 억 달러는 표에 포함하지 않았습니다. 인프라의 감가상각과 운영비를 충당하는 별도 수입원입니다.

9.10.6. 비용 변화의 결론

StarRoad 는 정지궤도 이상에 80~120 달러/kg 으로 시작합니다. 저궤도에 1,400 달러/kg 인 Falcon Heavy 보다 이미 10~15 배 저렴하고 Starship 의 목표 200 달러/kg 과 비슷합니다. 10 년차에는 10 달러/kg, 25 년차에는 1 달러/kg, 30 년 무렵에는 5 개 이상 노선과 우주 태양광으로 0.5 달러/kg 미만이 됩니다. 태양 에너지와 소행성 금속이 지상 산업에 경제적으로 이용 가능해집니다.

핵심 결론: StarRoad 는 실증기에도 경쟁력이 있습니다. 규모 확대와 우주 태양광의 시너지로 30 년 동안 가격이 두 자릿수 규모로 낮아집니다.

9.11. 대안과의 비교

프로젝트	유형	투자(CAPEX / 연구개발)	회수 기간	원가 / LCOE	비고
StarRoad 에너지 부문: 지열 시스템 + 저장	에너지	1,000 억~1,500 억 달러	에너지 판매로 5~7 년	0.05 달러/kWh	지열 발전과 저장만 포함합니다. 독립 에너지 사업으로 투자금을 회수합니다.
StarRoad 운송 부문: 터널, 포털, 셔틀	운송	1,500 억~2,000 억 달러	화물 수입을 포함해 8~12 년	1~10 달러/kg	가속기, 포털, 셔틀. 화물 운송으로 회수하며 에너지 부문의 전력을 사용합니다.

프로젝트	유형	투자(CAPEX / 연구개발)	회수 기간	원가 / LCOE	비고
StarRoad 전체 시스템	에너지 + 운송	약 3,000 억 달러	통합 수입으로 8~12 년	0.05 달러/kWh 및 1~10 달러/kg	에너지와 화물에서 수익을 얻는 통합 사업입니다.
Falcon Heavy, 개발	운송	연구개발 약 50 억 달러	상업 빈도일 때 약 10~15 년	약 1,400 달러/kg	기존 로켓. 여기서 CAPEX 는 인프라가 아니라 개발비입니다.
Starship, 개발	운송	연구개발 약 100 억 달러	목표 시장이 형성되면 약 10~15 년	목표 200 달러/kg, 장래 50~100 달러/kg	개발 중입니다. 투자는 영구 인프라가 아니라 연구개발에 쓰입니다.
그랜드 잉가 수력발전소, 콩고민주공화국	에너지	800 억~1,000 억 달러	15~25 년	0.03~0.05 달러/kWh	대형 수력발전소, 에너지만 생산합니다.
대형 원자력발전소, 2 기·약 2.4 GW	에너지	150 억~200 억 달러	20~30 년	0.05~0.08 달러/kWh	일반적인 원전, 에너지만 생산합니다.

9.12. 경제성 결론

이 모델은 중간값 약 3,000 억 달러의 CAPEX 로 StarRoad 를 실현할 수 있음을 보여 줍니다. 주요 요인은 다음과 같습니다.

1. 800 억~1,200 억 달러의 지열 시스템이 가장 비싸지만 독립 에너지 사업으로 5~7 년 안에 회수됩니다.
2. 770 억~1,250 억 달러의 터널 굴착은 양산 굴착기와 자체 제작으로 기술적으로 수행할 수 있습니다.
3. 230 억~420 억 달러의 저장 설비는 125 달러/kWh 로 하락한 BESS 와 세계 모범 사례를 반영한 중력 시스템에 기반합니다.
4. 1 억~30 억 달러의 연구개발비는 전체 규모 건설이 아니라 실제 시제품 비용입니다.

경제적 매력: 0.05 달러/kWh 라면 StarRoad 는 에너지 판매만으로 연 350 억~440 억 달러를 벌어 운영비를 충당하고, 대규모 우주 발사가 시작되기 전부터 에너지 수출로 자본을 회수할 수 있습니다.

10. 안전과 비상 운용 모드

StarRoad 는 단일 구성품, 흔히 여러 구성품이 고장 나도 재난으로 이어지지 않는 극도의 고장 허용 운용 원칙에 따라 설계된다. 안전은 물리적 다중화, 기능 분리, 준비부터 비행까지 전 주기를 포괄하는 다층 절차로 확보한다.

10.1. 안전 철학: 단일 고장이 치명적 결과로 이어져서는 안 된다

- **핵심 시스템의 다중화.** 셔틀 탑재 원자로, 가속기 구간 전원, 포털의 제트 링 같은 주요 요소에는 3 중 또는 4 중의 독립 예비 계통을 둡니다.
- **구간 분할과 격리.** 터널을 50~200 km 길이의 자율 구간으로 나누고 각 구간에 독립 전원과 진공 설비를 두며, 구간 사이에는 기계식 비상 격벽문을 설치합니다. 인접 구간에서 진공이 상실되면 셔틀이 없을 때에만 격벽문을 닫으므로 연쇄 고장을 막을 수 있습니다.
- **능동·수동 자기부상 제어.** 자세 안정과 불균형 보상의 주 시스템은 셔틀에 탑재됩니다. 대형 초전도 루프와 탑재 전원 장치가 마이크로초 안에 에너지를 재분배해 지상 설비의 국부 고장을 상쇄합니다. 극초음속 곡선 구간에서는 셔틀의 타원형 단면과 원심력이 안내면에 대한 안정성을 더 높입니다.
- **셔틀과 승무원이 최우선입니다.** 발사 중 비상사태가 발생하면 터널 기반시설 일부가 손상되더라도 셔틀을 살리는 것을 우선하도록 절차를 설계합니다.

10.2. 주요 위험과 보호 대책

위험	원인	보호 대책과 절차
극초음속에서 부상력 상실 또는 자기장 비대칭	전력 구간 고장 또는 권선 손상.	1. 나노초 응답의 탐재 안정화 장치. 2. 유도 제동: 극초음속에서 셔틀이 터널의 수동 권선에 전류를 유도해 안정화 효과를 만듭니다. 3. 구간 분할로 충돌과 손상을 한 구간 안에 제한합니다.
포털의 가스역학 장벽 고장	하나 이상의 제트 링 고장.	1. 각 링을 내폭 구조로 보호한 3 중 다중화 시스템. 2. 발사 60 초 전 시험에서 주 셔터를 열지 않고 가스 원뿔을 형성하며, 결함 링은 격리합니다. 3. 어떤 이상이라도 발견되면 Alarm-1 이 발사를 취소합니다.
터널 진공 상실	사고 또는 손상으로 인한 압력 상승.	1. 터널 전 구간의 압력 센서망. 2. 이상을 가두는 구간 간 비상 격벽문. 3. 셔틀 전방에서 압력 상승을 감지하면 작동하는 자동 비상 정지 절차—Alarm-1 또는 Alarm-2.
정지가 불가능해진 뒤 고장을 발견	가속 경로의 마지막 60~100% 구간에서 중대한 이상을 감지.	Alarm-3: 최대 8g 의 최고 제동으로 속도를 낮춥니다. 포털을 잃더라도 셔틀을 준궤도 비행 경로에 올리는 것이 우선입니다. 이후 안전한 해상 착수를 위해 기체를 가볍게 하도록 탐재물을 분리합니다.

10.3. 비상 절차의 단계

- **Alarm-1, 발사 전 비상사태.** 셔틀이 움직이기 전에 진공 상실, 자기장 이상, 포털 링 하나의 고장 또는 비정상적인 가스 원뿔 형성을 감지하면 작동합니다. 조치: 발사를 즉시 취소하고, 고장 난 터널 구간을 격벽문으로 격리한 뒤 진단·수리합니다.
- **Alarm-2, 경로 초반 또는 중반 비상사태, 0~60%.** 출발 후 전방 경로에서 이상을 감지하면 작동합니다. 조치: 비상 제동 후 터널 안에서 정지합니다. 고장이 앞에 있으면 셔틀이 자체 동력으로 출발점에 돌아갑니다. 그렇지 않으면 정지 후 현재 구간을 격벽문으로 격리하고 공기를 채운 다음, 승무원과 승객이 서비스 터널과 지상 연결 수직구로 대피합니다.
- **Alarm-3, 경로 후반 비상사태, 60~100%.** 터널 안에서 멈출 수 없고 포털 또는 최종 구간의 고장이 예상될 때 작동합니다. 조치는 다음과 같습니다.
 - 1) 속도를 낮추기 위해 최대 8g 로 비상 제동합니다.
 - 2) 셔틀의 구조 건전성을 최우선으로 하며 포털은 열린 상태로 둡니다.
 - 3) 비상 준궤도 비행 경로에 진입하고, 기체를 가볍게 하기 위해 최고점에서 화물을 분리합니다.
 - 4) 모든 주 계통과 예비 계통을 사용해 인도양 또는 태평양의 지정 해역에 착수합니다. 셔틀 구조는 과하중과 포털의 부분 파괴를 견디도록 설계합니다.

10.4. 생존성을 위한 구조 대책

- **셔틀.** 향후 장형 모델에는 독립 탑재 원자로 2 기, 분산형 초전도 부상 시스템, 극한 하중과 열충격을 견디는 강화 동체를 적용합니다.
- **고고도 대기권 포털.** 내폭 하우징 안에 독립된 환형 제트 엔진 3 기를 둡니다. 기계식 셔터는 가스 장벽이 부분적으로 무너졌을 때의 충격파를 견딜 수 있습니다. 포털 내벽의 깔때기형 개구부가 즉시 압력을 낮추고 가스를 수동적으로 예비 진공실에 배출합니다. 이 구조는 터널과 포털로 들어오는 대기를 최소화하고, 포털 시스템 전체가 고장 나도 손상을 제한하며, 극초음속 셔틀의 압력 펄스로 구조물이 파열되는 것을 막습니다.
- **터널.** 구간 분할, 비상 격벽문, 이중 전원 시스템, 비상 대피와 수리를 위한 기술 서비스 터널을 갖춥니다.

10.5. 음향 및 충격파 영향

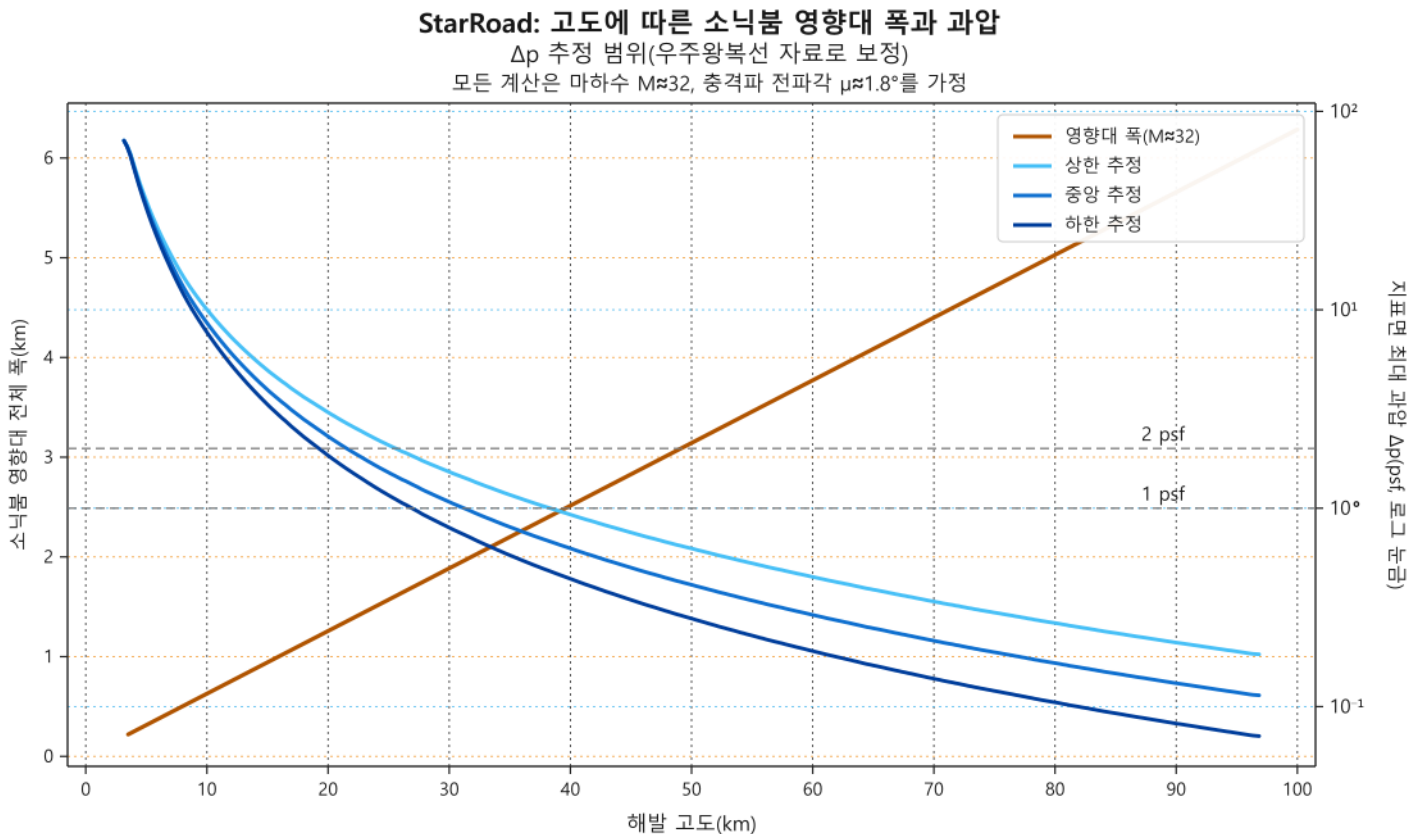
극초음속으로 나오는 셔틀은 강력한 N 파형 소닉붐을 만듭니다. 파동 에너지 대부분이 비행 경로를 따라 좁은 띠로 진행하므로 포털 인근 지상 기반시설에 미치는 영향은 줄어듭니다. 그럼에도 주변에는 폐쇄형 보건 보호구역을 설정하며, 모델링으로 반경을 정하고 실규모 시험으로 확인합니다.

지표면에서 허용할 노출은 최대 과압 Δp 의 두 임계값으로 정합니다.

$\Delta p \leq 2 \text{ psf}$, 약 96 Pa: 건물과 유리의 손상 가능성이 낮다고 봅니다.

$\Delta p \leq 1 \text{ psf}$, 약 48 Pa: 주거지역의 목표값으로, 민원 위험을 최소화하고 손상을 일으키지 않는 수준입니다.

노선 설계와 운영 제한—통제 회랑, 기상 조건을 만족하는 시간대, 고도 제한—은 이 임계값을 확실히 지킬 수 있도록 충분한 여유를 두고 정합니다.



결론: StarRoad 의 안전은 ‘고장은 일어나지 않는다’는 믿음에 **의존하지 않습니다**. 모든 고장 형태가 일어날 수 있다고 보고 각각에 미리 정한 자동 대응을 둡니다. 이로써 개념상의 경로가 의도적으로 설계된, 신뢰성 높고 무엇보다 신뢰할 수 있는 공학 시스템으로 바뀝니다.

11. 문화·심리적 영향

StarRoad 는 기술·경제적 효과를 넘어 문화와 인류의 집단의식에도 깊은 영향을 준다. 발사 하나하나가 기술 작업을 넘어 거대한 공공 행사이자 **거의 성스러운 의식**으로 바뀐다.

11.1. 현상으로서의 장관

셔틀의 극초음속 출구 비행은 인간이 만든 독특한 천문 현상인 ‘태양의 화살’을 만들어 낸다. 안전 지역의 관찰자에게는 지평선에서 순간 섬광이 보인 뒤 눈부신 플라스마 궤적이 하늘에 직선을 그리며 빠르게 솟구치는 모습으로 나타난다. 수십 초 뒤 익숙한 엔진 굉음 대신 파괴적인 이중 음속폭음이 도달한다. 단순한 기계가 아니라 날아가는 도시 전체가 음속과 열의 장벽을 넘는 물리적 감각이다. 야간 발사는 움직이는 혜성처럼 풍경을 밝히며 부자연스러운 기술 오로라처럼 보인다.

11.2. 심리적·상징적 울림

- **체감 가능한 규모.** 추상적인 우주 프로그램이 수백 km 밖에서도 보이는 일상 또는 주간 장관이 되어, 우주 확장을 도표 속 개념에서 삶의 **물리적 사실**로 바꾼다.
- **새로운 원형.** 지구가 우주로 쏘아 올린 거대한 빛의 화살은 진보, 의지, 열망의 강력한 원형이 된다. 대중문화에서 낡은 수직 로켓 이미지를 대신하며 우주 수송회랑 **시대의 전환**을 상징한다.
- **연대와 자부심.** 과거 소유스와 아폴로 발사가 전 세계 사람을 텔레비전 앞으로 모았듯, 정기 StarRoad 비행은 거대한 목표를 위해 협력하는 인류의 능력을 보여 주는 세계적 미디어 행사가 된다.

11.3. 사회경제적 영향

- **관광.** 출입금지구역의 안전 경계에 전용 전망 단지를 세워 새로운 우주관광의 중심으로 삼는다. 발사 관람은 고대 세계 불가사의 방문에 맞먹는 매력을 가질 수 있다.
- **교육 자극.** 이 장관은 진로에 영감을 주는 비할 데 없는 수단이 되어 수백만 어린이가 물리학, 공학, 우주항행학을 공부하도록 이끈다.
- **우주의 탈신비화.** 정기적이고 예측 가능하며 산업적인 발사는 우주비행에서 예외성과 치명적 위험의 후광을 걷어 내고, 거대하지만 **일상적인 물류 작업**으로 보여 준다.

따라서 StarRoad 는 우주에 이르는 물리적 인프라뿐 아니라 인류가 요람 **밖에서 미래를 능동적으로 건설하는 문명**이라는 새 역할을 받아들이는 데 필요한 문화적 서사와 정서적 토대도 만든다. ‘태양의 화살’이 정기적으로 나타날 때마다 별로 향하는 길은 열려 있을 뿐 아니라 실제로 사용 중임을 일깨운다.

12. 결론

StarRoad 는 공학 메가프로젝트 이상이다. 산업형 우주 문명으로 전환하기 위한 전략이다. ‘로켓’ 패러다임에서 ‘회랑’ 패러다임으로 옮겨 가며 탑재물 운송비와 낮은 처리량이라는 두 가지 핵심 장벽을 넘는 길을 제시한다.

극초음속 회랑은 에너지, 농업, 산업, 물류, 우주 기술을 잇는 중추가 된다. 아프리카도 원료를 수출하는 데 그치지 않고 지리와 자원을 활용해 우주로 가는 길을 건설함으로써 산업·기술적 도약을 이룰 기회를 얻는다.

StarRoad 는 검증된 기술을 통합하고 규모를 확대하여 태양계 자원을 지구의 문제 해결에 활용할 수 있는 경제의 기반을 놓는다. 기반시설 자체도 인류의 미래를 위한 보험이자 도약대가 된다. 실현에는 전례 없는 국제 협력, 장기 투자, 공학적 의지가 필요하지만, 그 보상은 진정한 우주 시대의 열쇠, 사실상 무한한 지구 밖 자원, 풍부한 에너지다.