

StarRoad 計画：地上から宇宙へ至る超重量級電磁打上げ回廊

目次

ナビゲーション：先頭 | [目次](#) | [末尾](#)

[1. 概要、主要な特徴、能力、理念](#)

[1.1. 計画の基本理念](#)

[1.2. 能力](#)

[2. 技術・経済・地理・戦略上の利点と根拠](#)

[2.1. 技術面](#)

[2.2. 経済面](#)

[2.3. 地理面](#)

[2.4. 戦略面](#)

[3. 産業・技術基盤](#)

[3.1. 磁気浮上と電磁加速（マグレブ）](#)

[3.2. 超電導技術と分散アーキテクチャ](#)

[3.3. パルス電力](#)

[3.4. 真空技術](#)

[3.5. 極超音速空気力学と熱防護](#)

[3.6. 原子力システム](#)

[3.7. トンネル建設](#)

[3.8. 自律型地熱熱エネルギーシステム](#)

[3.9. 超音速燃焼](#)

[3.10. ポータルの閉鎖型燃料サイクル](#)

[3.11. 技術検証戦略](#)

[4. StarRoad の要素と技術の段階別詳細説明](#)

[4.1. 加速トンネルと関連インフラ](#)

[4.2. 大気ゲートウェイ（高地ターミナル）](#)

[4.3. シャトル（AstroLiner）](#)

[5. 打上げ準備から着水後整備までの運用サイクル](#)

[5.1. 準備と打上げ](#)

[5.2. トンネル内加速](#)

[5.3. 大気ゲートウェイからの射出](#)

[5.4. 大気圏通過](#)

[5.5. 宇宙空間への進入と軌道運用](#)

[5.6. 軌道離脱と帰還](#)

[5.7. 海上着水](#)

[5.8. 曳航と整備](#)

6. 実施、工程、要件、産業拠点

6.1. 計画の段階

6.2. 産業拠点

6.3. 全体工程

7. 解決する問題と課題

7.1. 地球規模の過熱

7.2. 経済上の課題

7.3. 戦略目標

7.4. 技術革新の触媒

7.5. エネルギーと熱環境の自立

7.6. カーボンフットプリント

7.7. 水熱幹線運河の社会・環境面の可能性

7.8. エネルギーネットワーク

7.9. 経済動脈としての StarRoad

7.10. 重要インフラの安全性

7.11. 立地選定と拡張性

7.12. 大陸横断計画の政治・法的調整

7.13. 貨物流の段階的拡大

8. 市場と軌道物流

8.1. 超重量級打上げの需要問題

8.2. 初期市場：宇宙太陽光発電と軌道データセンター

8.3. 宇宙太陽光発電の気候・産業上の意義

8.4. 軌道上の配置先：GEO と EML4/5

8.5. 初期段階：AstroLiner-S の直行飛行

8.6. 成熟段階：マイクロ波中継網とサービスインフラ

8.7. 運用環境による輸送機能の分離

8.8. 成熟した物流における AstroLiner の役割

8.9. 軌道間輸送船とタグ

8.10. 地球および他の惑星への降下

8.11. 標準化モジュール

8.12. 軌道インフラの階層

8.13. 軌道造船所

8.14. 軌道・月面居住地

8.15. 物流の比喻：海上輸送網としての宇宙

8.16. 貨物流の経済性

8.17. 市場と物流の発展段階

8.18. 発展の展望：StarRoad の後継システム

8.19. 惑星工学の可能性：一つの資源系としての太陽系

[8.20. 戦略的結論](#)

[9. 計画の経済モデル](#)

[9.1. 算定方法と主要前提](#)

[9.2. アフリカ条件下の掘削費](#)

[9.3. 内製トンネル掘削機の機団](#)

[9.4. 自律型地熱熱エネルギーシステム](#)

[9.5. エネルギー貯蔵システム](#)

[9.6. 産業拠点と物流](#)

[9.7. 研究開発・試作ーフェーズ0](#)

[9.8. CAPEX 最終集計](#)

[9.9. フェーズ別配分（十億 USD）](#)

[9.10. 投資回収と輸送原価の推移](#)

[9.11. 他方式との比較](#)

[9.12. 経済性の結論](#)

[10. 安全性と緊急運用モード](#)

[10.1. 安全思想：単一故障を致命的な事態にしない](#)

[10.2. 主要なリスクと保護策](#)

[10.3. 緊急時プロトコルの階層](#)

[10.4. 生存性を確保する構造対策](#)

[10.5. 音響・衝撃波の影響](#)

[11. 文化的・心理的影響](#)

[11.1. 現象としての光景](#)

[11.2. 心理的・象徴的な共鳴](#)

[11.3. 社会経済的な影響](#)

[12. 結論](#)

1. 概要、主要な特徴、能力、理念

StarRoad は、全長 2,050 km を超える真空磁気浮上加速器を中核とする、地上から宇宙へ至る長距離幹線輸送システムである。機体に反動式の打上げ用推進剤を積まず、最大 15,000 トンの自律型・再使用型超重量シャトルを宇宙へ送り出すために設計される。

1.1. 計画の基本理念

宇宙打上げパラダイムの転換：

- **大気圏の慣性通過。**StarRoad は推力と空力性能で大気を克服する代わりに、真空中で約 11 km/s の極超音速まで加速したシャトルの質量に蓄えられた運動エネルギーを用いる。大気圏は 50～60 秒で、全行程を慣性によって通過する。
- **利点としての質量。**数千トンの大質量は敵ではなくなり、莫大な運動エネルギーの担い手となる。同時に、構造と熱防護に超高強度・耐火材料を使えるようになる。

- **機能分離。**エネルギーインフラ、加速、精密制御は地上施設が担い、固定式の工学システムとなる。シャトルは貨物輸送、軌道上機動、帰還に最適化された専用輸送モジュールとなる。
- **拡張可能な産業化。**システムは単一施設ではなく、宇宙「鉄道」の最初の路線として構想される。並行・冗長・追加トンネルを建設でき、輸送能力の指数関数的増大と費用低減が可能になる。

1.2. 能力

- **静止軌道（GEO）以遠への直接輸送。**約 11 km/s の初速に、地球の赤道自転による約 0.465 km/s が加わるため、シャトルは地球-太陽系または地球-月系の L1/L2 ラグランジュ点などの高エネルギー目的地へ、最小限の修正でほぼ直接到達できる。これにより低地球軌道での曳航と燃料補給を省ける。
- **ペイロード能力。**1 回の飛行で数千トンを送送できる。ギガワット級軌道発電所、宇宙居住地、資源採掘・処理・組立・製造施設、惑星防衛システム、惑星間宇宙船の建設が経済的に成立する。
- **費用。**フル稼働時には、高軌道への輸送費を 1 kg 当たり 1～10 ドルまで下げられるとの試算で、既存および将来のロケットシステムを数桁下回る。

2. 技術・経済・地理・戦略上の利点と根拠

2.1. 技術面

代替的な軌道打上げ構想の多くは、原理的に建設できるかではなく、常時運転、能動的な動的支持、非現実的に高い信頼性、故障時の壊滅的結果といった運用要件に制約される。能動的な運動メカストラクチャは、稼働状態を維持するため無停電電力と連続的な動的安定化を必要とし、電力または制御を失えば支持を失い、壊滅的な故障状態に陥り得る。長大な外部真空管システムも、密閉、区画隔離、熱安定性に極めて厳しい要件を課す。StarRoad は、重要インフラが地下にあり、パルス運転が可能で、事故を局所化し、受動的に安定している点で異なる。このため地球外へ貨物を運ぶ幹線システムとして、実現可能性を備える最小限の形態となる。真空輸送、極超音速空気力学、パルス電力、超電導体といった実在技術を StarRoad の規模に合わせて用いることも、構想の現実性を高める。

2.2. 経済面

主な費用は建設投資とエネルギーである。使い捨て段がなく、打上げ時の作動流体消費もごくわずかなため、運用費を大幅に削減できる。計画は地域開発、新たなエネルギーシステム、先端技術集積も促進する。

StarRoad の経済的実現性を評価するには、世界の輸送・エネルギーインフラの規模を考える必要がある。年間の世界貨物流に照らせば数百万トンのごくわずかな比率であり、数千億ドル規模の資本投資は地球規模インフラでは珍しくない。したがって StarRoad は既存の輸送システムと競合せず、世界の総貨物流への影響を比較的小さく保ちながら新たな能力を加える高エネルギー回廊という領域を担う。

2.3. 地理面

ガボンのニャンガ川河口からコンゴ民主共和国のモヒ山と南部高原へ至る経路は、ほぼ理想的である。

- **赤道。**地球自転による速度増分を最大化し、軌道傾斜角の修正を最小化する。
- **見通し線。**人口の少ない中央アフリカ地域を比較的直線的に通る。

- **ゲートウェイ高度。**標高 3,400 m では出口の大気密度が 30%低下し、熱荷重と衝撃荷重が緩和される。
 - **地震安定性。**この地域では東アフリカ大地溝帯の活動が最小限である。
 - **物流。**経路は製造とシャトル回収に適した海から始まり、高地で終わる。
- **最適な経路と立地は、ガボンのニャンガ川河口からコンゴ民主共和国のモヒ山までの約 2,050 km** である。ガボン沿岸からの打上げは約 3°というほぼ理想的な赤道軌道傾斜角を与え、静止軌道とラグランジュ点へ直接到達でき、惑星間遷移の費用を最小化する。ゲートウェイ施設は標高約 3,400 m のモヒ山に置かれ、広い南部高原は拡張用に確保される。この場所は、高地、平坦な地形、集落から 20 km 以上の距離、タンガニーカ湖とキブ湖への近さという優れた条件を備える。
- **代替立地。**コンゴ民主共和国のキトンプ港からモヒ山への予備経路は約 1,850 km で、一国内に収まるため物流と法的調整が容易になる。しかし軌道傾斜角は約 13°となり、貨物を傾斜角 0°の静止軌道またはラグランジュ点へ送るには約 200~300 m/s の追加デルタ V が必要となる。これは毎回の打上げでペイロード質量の約 2~4%を失うことに相当する。したがって、より複雑でも傾斜角約 3°の国際赤道経路を選ぶことは、回廊の全供用期間を通じた最大の経済効率と、軌道インフラの全重要拠点への直接アクセスを狙う戦略的判断である。

2.4. 戦略面

全天候・24 時間運用の宇宙輸送回廊を構築する。長期的には、こうした路線網が世界的インフラとなり、大規模避難の可能性を備えた文明の安全策となる。また、エネルギー集約型・発熱型産業を地球外へ移す本格的な宇宙産業化の基盤となる。

ロケットシステムが公称する極めて低いペイロード輸送費を実現しても、ロケット打上げは輸送能力の限られた個別事象であり続ける。この意味で、1 kg 当たりの価格にかかわらず、ロケットシステムは本質的に遠征型物流である。StarRoad は個々の打上げ費用を最小化するだけでなく、安定した連続貨物流を確立するためのインフラ回廊である。

3. 産業・技術基盤

StarRoad は新たな物理法則の発見を必要とせず、既存技術と新興技術を工学的に統合する到達点である。

3.1. 磁気浮上と電磁加速（マグレブ）

中国、日本、ドイツの経験を活用する。中国の磁気浮上試験で達成された記録的加速、すなわち 1 トンを 2 秒で 0 から 700 km/h へ加速した実績は、大質量物体を急速に加速できることを原理的に示す。

3.2. 超電導技術と分散アーキテクチャ

StarRoad は反転構成を採用する。主要な浮上・安定化磁場を生成する超電導磁石はシャトルに搭載され、機上の極低温システムで冷却される。トンネルには、受動ガイドとパルス加速エネルギー伝送用二次回路を兼ねる、比較的単純で安価な銅またはアルミニウム製「レール」巻線を置く。これによりトンネルの費用と複雑さは桁違いに下がり、主要な技術的複雑さは集中整備できる再使用型シャトルへ移る。

3.3. パルス電力

経路沿いに分散配置されたスーパーキャパシタと蓄電池のステーションは地熱自律熱エネルギーシステム網から充電され、必要な加速器区間へギガワット級のパルスを提供する。

3.4. 真空技術

CERN の大型ハドロン衝突型加速器、SpinLaunch、Hyperloop 真空管で得られた経験。

3.5. 極超音速空気力学と熱防護

宇宙機、機動可能な再突入機、SpaceX Starship などの計画から得られた知見。能動冷却と相変化蓄熱器。

3.6. 原子力システム

軌道上でシャトルへ電力を供給するための、放射性同位体熱電発電機の次世代に当たる小型機上原子炉、または Helion Energy のシステムなど将来の核融合モジュール。

3.7. トンネル建設

年間数十キロメートル掘進できる現代のトンネル掘削機を用い、複数のトンネルを並行して掘削する。

3.8. 自律型地熱熱エネルギーシステム

本計画は、改良型地熱システム（Enhanced Geothermal Systems, EGS）を応用した独自のギガワット級統合エネルギー・気候基盤を含む。作動流体には直接空気回収（Direct Air Capture, DAC）で大気から得る超臨界二酸化炭素（ sCO_2 ）を使う。3 つの重要機能を統合する。1) 加速トンネルの熱安定を確保する地熱場の能動制御、2) ベースロード発電、3) 大気中 CO_2 の長期隔離。

3.9. 超音速燃焼

ゲートウェイのガス力学障壁は、空気-水素混合気で作動する環状超音速ジェットエンジンを用いる。超音速燃焼によって、トンネル軸に沿って外向きに流れる安定した円錐状ガス流を形成する。この流れが大気を押し戻し、シャトル通過時に加速器の真空を守る圧力勾配を作る。

3.10. ポータルの閉鎖型燃料サイクル

ガスダイナミック障壁には、クリーンで再生可能な燃料を使います。水を電気分解して水素を製造し、エンジンは大気を酸化剤として使います。障壁の作動後、主な燃焼生成物は過熱水蒸気です。遠隔の山岳施設へ大量の化学燃料を輸送・貯蔵する必要がなくなり、信頼性が上がり、運用費が下がります。

3.11. 技術検証戦略

計画開発は、数理モデル化と重要機器の実規模試験という二つの並行経路で進める。これにより、主計画のリスクを抑えながら、構想の実現性を早期に確認し、正確な工学データを得る。

4. StarRoad の要素と技術の段階別詳細説明

4.1. 加速トンネルと関連インフラ

- **全長**：約 2,050 km。
- **断面**。シャトルの空力形状と安定した磁気浮上に最適化した楕円形（約 17.5 × 12.5 m）。
- **トンネルの深さ**：約 8 km まで。地質・温度条件が許せば、さらに深く設置することも可能である。加速トンネルの許容深度を正確に決めるには、路線沿いのボーリング、温度プロファイルの作成、岩盤応力、亀裂、地下水条件の評価を含む詳細な地質調査が不可欠である。深部地層の温度と熱流束が低いほど（目安として約 200～250℃ まで）、工学的に実現できる深度の幅と、曲率半径や遷移区間など線形を最適化する自由度が大きくなる。その結果、目標速度を保ちながらトンネル内のピーク過荷重と動的荷重を抑えられる。
- **構造**：複合式。最初の約 330 km は地下の緩い直線区間で、加速を単純化するためゲートウェイ方向へ直線的に下降する。主要部は熱的安定、真空隔離、安全のため深部または地下に設ける。
- **線形**：約 330 km 以降は S 字状の曲線。
 - **下降曲線**：半径約 6,300 km。必要な角度を得るためトンネルを緩やかに深部へ導く。
 - **上昇曲線**：半径 2,500～3,500 km。水平線に対して約 5～6°でトンネルをゲートウェイへ導く。極超音速時の向心加速度が 4g を超えないよう半径を設定する。
- **真空系**：区画式。約 50 km の各区画は独立し、専用の真空ポンプ、センサー、非常弁を備える。

4.1.1. 加速システム

シャトルの加速と安定化は、機上の超電導磁石と、トンネル内に分散配置したリニア電磁駆動装置（コイル）との相互作用で行う。駆動装置は銅やアルミニウムなど通常導体の分割された受動コイルで、極低温冷却を必要としない。

- **トンネル前半（0～330 km）**。**駆動装置は主に軌道床下にあります**、浮上と 4g での初期加速に必要な磁場を作るとともに、重力を能動的に補償する。
- **中間部（330～2,000 km）**、**特に S 字曲線では**、駆動装置がトンネル全周を囲み、精密加速、極超音速時の中心保持、カーブでの進路安定を担う。半径方向加速度が大きい終端部の床面には、構造上冗長で強化されたコイル材を使う。330～2,000 km では加速度を区間冒頭の 4g から末端の 0g へ曲線的に低下させ、経路末端で最終速度約 11 km/s に達する。
- **終端部（2,000～2,050 km）**。最後の 50 km は大気圏ゲートウェイから出る前の安定化と芯出しに使い、この区間では加速しない。

自律型地熱熱エネルギーシステムの変電所からのパルス電力を、シャトル位置と厳密に同期して特定のコイル区画へ供給する。これにより進行磁場が生まれ、機上磁石の磁場と相互作用してシャトルを加速する。この構成はトンネルを単純化して保守性を高め、高度な機器を再使用型シャトル側へ集約する。

4.1.2. 自律型地熱熱エネルギーシステム

熱安定、エネルギー自立、長寿命を確保するため、各加速トンネルに小径のサービス坑 7 本を併設し、統合自律地熱システムを構成する。

- **集熱・発電幹線坑 6 本（直径 2 m）。** 加速トンネル床面から 30 m 下、中心間隔 7 m で均等配置する。2 本一組の可逆運転で強く過冷却した+5℃の超臨界 CO₂を循環させる。加速器断面全体の下に厚さ 15 m 超の連続冷却スラブを形成し、熱橋を完全に排除する。
- **技術サービス坑 1 本（直径 3 m）。** 加速トンネルと同じ高さで側方 3 m に置き、運行を止めずに常時診断・修理できる。地熱坑は最大 25 MPa の内圧、岩圧、動的荷重の複合作用に耐える。**7 本すべてを完全ロボット化した小型トンネル掘削機（TBM）群で掘進する。** 自律地熱システムがエネルギー基盤を輸送系から物理・機能面で分離し、比類ない信頼性と保守性を実現する。

4.1.3. 自律地熱システム冷却システム

- **深部冷却回路。** 加速トンネル下の集熱・発電坑で、CO₂系作動流体を高密度・高圧または超臨界状態で循環させる。深部集熱坑へ入る前の通常低温運転では、低温流の目標は約+5～+15℃。地熱を回収して深部を通った後は、深さ、岩盤熱流束、発電モードにより+100℃を超えることがある。回路は地熱を取り除き、主トンネル下に冷却域を作り、約 5～8 km の深部敷設を安全にする。
- **水熱幹線水路。** StarRoad 沿いにサービス道路、送電線、通信線と並行して建設し、各ターミナルを統一した分散型地表排熱系に結ぶ。

幅約 5～8 m、深さ 2～3 m の水路で、底部に複数の独立した高圧蛇管を敷き、隣接ターミナル間で CO₂を送る。水は熱バッファ兼中間熱媒体となる。

タービン、熱交換、圧縮設備を出た CO₂は約+50～+80℃で蛇管へ入り、約 50 km のターミナル間区間で水へ放熱して、季節、湿度、豪雨、夜間放射冷却、運転状態に応じ約+22～+35℃まで冷える。

通常、水温は約+22～+32℃、温区画では局所的に+35～+45℃。高温流入口付近で短時間+50～+80℃に達し、生物活動を一部抑えることはあるが、浄化なしに飲料水にはならない。

水路上部を、日射を反射し赤外域で放熱できる軽量選択板で覆う。

- **ターミナル冷却。** 各所に冷却塔、熱交換器、ポンプ、ブースター圧縮機、ターボ膨張機、予備チラーを置く。通常は低品位熱の大半を水路から受動放熱する。

冷却塔と熱交換器で、水路後の CO₂を約+22～+35℃から+15～+25℃へ下げる。必要時は予備チラーで深部集熱坑へ送る前に-5～+5℃とする。チラーは常用主系ではなく、ピーク、非常、季節用予備である。

- **ブースター圧縮とターボ膨張機。** CO₂は次のターミナルへ低温・高圧で届く。膨張機で圧縮エネルギーの一部を回収し、圧力、流量、必要相に応じて膨張で約-10～+5℃までさらに冷却できる。

その後、必要な温度、圧力、相で集熱坑へ送る。この循環は無償エネルギーではない。圧縮機は仕事を加え、水路は圧縮熱を捨て、膨張機は投入分の一部だけを戻す。利点は能動冷凍設備の負担を抑えて低温流を得ること。

- **冗長性と双方向性。** 蛇管は二重・双方向。1 回路が損傷すれば予備管または隣接ターミナルへ流れを再配分し、熱負荷、非常状態、各区間の状況により CO₂ の方向を変える。
- **保守性。** 水路を約 1 km ごとにゲートで区画する。損傷時は区画を隔離し、ポンプで水位を技術上の最低値まで下げるか一部排水する。減圧後、作業班やロボットが全線停止なしに蛇管へアクセスする。修理中は予備回路、逆流、隣接ターミナルの強化熱交換、チラーの一時運転で冷却を維持する。
- **限定的な水管理機能。** 東から西への一定勾配により、緩やかな自然流下、区画洗浄、余剰水の制御放流が可能。

夜間の赤道豪雨を集水、沈殿槽、フィルター、越流設備で補給に使える。水は CO₂ と直接接触しないため、局所浄化後は限定的な灌漑、ターミナル用水、消防備蓄、緑地保護帯に利用できる。

この機能は副次的で、水の取水は CO₂ 冷却と自律地熱システムの熱安定という主目的を損なわない範囲に限る。

- **StarRoad にとっての意義。** 深部集熱坑、水熱幹線水路、ターミナル冷却器、冷却塔、ブースター圧縮機、ターボ膨張機、予備チラーが一体の分散熱管理系を構成する。局所冷凍機への依存を減らし、耐故障性とターミナル間の熱再配分能力を高め、深部加速トンネルを現実的にする。

地表冷却系は経済的価値も高め、路線沿いにターミナル、サービス道路、電力拠点、水路、工業用地、灌漑農地の線状帯を形成する。

4.1.4. 自律地熱システムの戦略的重要性

電力供給と熱安定化に加え、主な役割は加速トンネルを 5～8 km 以上の超深部へ安全かつ経済的に敷設可能にすること。熱場の能動制御と地熱流の除去により、通常ならこの深さを妨げる温度制約を解消する。これにより大曲率半径の最適 S 字線形を実現し、2,050 km で貨物・乗員の過荷重を約 4g 以内に保ちながら緩やかに上昇し、水平から約 5～6°で送り出せる。自律型地熱熱エネルギーシステムは発電だけでなく StarRoad 全体の弾道最適化の技術基盤である。全施設をロボット化した小型 TBM 群で掘る。

4.1.5. 直交側方技術トンネル群

建設、換気、補修、避難を支援するため、経路に沿って 50 km 間隔で 40 本の傾斜輸送トンネルを建設する。各トンネルは傾斜 30°、断面約 17.5 × 12.5 m の楕円形である。主トンネルと同じ掘削機で掘り、地表と深さ最大 8 km の幹線回廊を結ぶ。

- **物流。** 非常停止 (Alarm-2) 時に作業員・乗員の独立避難路となる。垂直立坑と異なり、自走車両で一度に数十人を退避できる。
- **安全。** 非常停止 (Alarm-2) 時に作業員・乗員の第二の独立避難路を確保する。
- **拡張性。** 斜坑は将来の並列 StarRoad 線を接続する基盤となる。そこから新しい加速トンネルへ水平枝坑を掘り、アクセス網を成長し続ける輸送骨格にできる。
- **自律地熱システムとの統合。** 各斜坑のさらに 10～20 m 下に集熱坑を掘り、建設時に岩盤を事前凍結・安定化し、その後は発電する。

- **地上ターミナル施設。** 各斜坑は多目的地上ターミナルに終端する。40 ターミナルはそれぞれ独立拠点で、次を備える。
 - **トンネル空気環境**を維持し排気を除去する換気・ガス浄化設備。
 - **モジュール**、掘削土、建材の保管、積替え、一時置場を持つ建設基地。
 - **交代要員用の管理**・生活棟（管制室、休憩室、工房、倉庫）。
 - **深部集熱坑の熱媒体を使用**・管理し、共通自律地熱網に統合した地熱発電所と冷却設備。
 - **CO₂回収・処理所（DAC）**。大気から CO₂を直接回収し、液化・精製して熱媒体として深部集熱坑へ送り、閉回路を成立させる。
 - **外部電力網・通信への接続点**（予備電源、広帯域回線）。
 - **地域交通網**へつなぐアクセス道路または鉄道支線。
 - **救急医療所**とヘリポートを備えた地上避難地点。
- **法的・環境的な柔軟性。** 傾斜した保守トンネルを使えば、StarRoad 本線が国立公園、保護区、集水域の深部を通過する場合でも、地上ターミナルを保護地域の外に置けます。公園境界内に施設を置かず保全地域の地下ヘルートを通す際の主要な法的障壁を解消します。各ターミナルは最寄りの非保護地に建設し、傾斜坑で接続するため、許認可が容易になり、環境負荷を抑え、保護生態系への直接影響をなくせます。

4.1.6. 電力供給・蓄電システム

StarRoad 加速器の電力網は 3 層構成で、次を実現する。

- 確実な冗長性：単一要素の故障で運転を停止しない。
 - 適応的な放電速度：発進時の秒から終端のマイクロ秒まで。
 - 電力ケーブルの最短化：損失とインダクタンスを低減。
- **トポロジー階層**
 - **レベル 0：一次蓄電設備（ターミナル）**
 - 40 ターミナルに、重力蓄電、揚水蓄電（水路の小水力）、リチウムイオン電池（BESS）を配置する。
 - ターミナル当たり総容量：約 5～9 GWh、全線約 360 GWh。
 - 出力：技術トンネル内の幹線ケーブルを通じた最大 100 kV の高圧直流。

レベル 1：区間制御装置（50 km 区間）

- 全線を 50 km ずつ 41 区間に分ける。最後もゲートウェイまで 50 km。
- 各区間の主配電制御装置は隣接する 2 ターミナルから電力を受け、相互冗長とする。
- 区間制御装置が 1 km ずつの電力ブロックへ配電し、動作を同期する。

レベル 2：1 km 単位の電力ブロック。各ブロックには、次の処理を行うローカル制御装置がある。

- 区間制御装置から電力を受け、

- 主トンネル壁下のバッファ用リチウムイオン電池を制御し、
- 壁後方の専用区画にあるフライホイールとイオニスター（スーパーキャパシター）を介して、切替式コイル群を制御する。

区間制御装置から各ブロックへの 2 本の独立系統が冗長性を確保する。

○ ケーブル経路の構成

- **幹線ケーブル（レベル 0→1）**：主トンネルから 3 m 離れて並走する直径 3 m の技術サービス坑に敷く。
- **路線配電**：各ターミナルから両方向へ 50 km、合計 100 km 延ばして隣接ターミナルの範囲と重なる。各区間は少なくとも隣接 2 ターミナルから給電され、100%冗長となる。
- **主トンネルへの引込み**：1 km ごとに気密貫通部から技術トンネルのケーブルを主トンネルへ出し、ブロック制御装置へ接続する。
- **ブロック内配電**：制御装置の後で 2 本の並列経路に分ける。

経路 A：秒単位のピークを平滑化する、ブロック当たり約 0.5～1 GWh のバッファ用リチウムイオン電池。

経路 B：壁後方のフライホイール（慣性蓄電）とイオニスター（スーパーキャパシター）を介した切替式コイル群。

- **放電速度の 3 区域適応**。シャトルの加速プロファイルは、超短パルスが必要としない序盤で巻線群当たりのピーク電力が最大となり、経路終端に向けて低下するよう最適化する。これにより 3 区域で異なる蓄電・開閉技術を使用できる。

ゾーン	路線区間	放電特性	蓄電／スイッチ方式	理由
ゾーンⅠ (低速)	0～200 km	秒～ミリ秒	リチウムイオン電池＋標準 IGBT インバーター	シャトルが遅く、1 km 通過に 0.1 秒超かかる。バッファなしの BESS 運転が可能。
ゾーンⅡ (中速)	200～1,000 km	ミリ秒～マイクロ秒	バッファ用リチウムイオン＋慣性フライホイール＋SiC インバーター	速度が上がり、より速い切替が必要だが、機械式フライホイールはまだ使用できる。
ゾーンⅢ (高速)	1,000～2,000 km	マイクロ秒パルス	イオニスター（スーパーキャパシター）＋高速サイリスタスイッチ（GTO/IGCT）	1 km 通過時間は 0.09 秒まで短くなる。ナノ秒応答のスーパーキャパシターとイオニスターだけがパルスを安定化できる。

重要：ゾーンⅢは加速度が下がるため 1 km 当たりの必要エネルギーがゾーンⅠより少ない。放電速度への要求は厳しいが、機器負荷は低い。

○ 冗長性と非常時耐性

- **制御装置の二重化**：各区間・各 km 制御装置に、独立給電の同一基板 2 枚によるホットスタンバイを設ける。
- **相互給電**：各 km ブロックは自区間だけでなく、技術トンネル内の予備ケーブルを通じ隣接区間制御装置からも受電できる。
- **局所コイル冗長**：各 km ブロックに交互切替式の独立コイル群を 3 組置く。1 組が損傷しても残り 2 組が効率を下げつつ停止せず加速を続ける。

- **非常遮断：** 短絡または過熱を検出すると、km 制御装置が当該ブロックを停電し、区画間ゲートで隔離する。隣接ブロックには影響しない。

。物理構成とまとめ

要素	設置場所	機能
一次蓄電設備	地上（ターミナル）	長期蓄電（360 GWh）。
幹線ケーブル	技術トンネル（3 m）	冗長性を持たせてターミナルから区間へ送電。
区間制御装置	主トンネル内の専用区画（50 km ごと）	10 個の 1 km ブロックへ配電し同期。
バッファ用リチウムイオン電池	主トンネル壁下	ゾーン I～II の秒単位ピークを平滑化。
フライホイール	トンネル壁後方（ゾーン II）	ミリ秒パルスのバッファ。
イオニスター（スーパーキャパシター）	トンネル壁後方（ゾーン III）	マイクロ秒安定化と瞬低補償。
ローカル km 制御装置	1 km ごとの専用区画	コイル切替、状態監視、バッファ管理。
加速器コイル	トンネル内面	シャトル加速用の進行磁場を生成。

。電力供給構成の利点

- **滑らかな負荷配分。** トンネル全長で同時にピーク電力は不要。初期は遅いパルス、終盤は短いが低出力のパルスとなる。
- **全階層の冗長性。** ターミナル、制御装置、さらには 50 km 区間全体が故障しても停止せず、隣接系統が不足分を補う。
- **拡張の柔軟性。** 並列 StarRoad 線を追加しても電力系の再建は不要で、既存技術トンネルに幹線ケーブルを追加すればよい。
- **費用最適化。** 高価なイオニスターとフライホイールは本当に必要な終端区間だけに使い、初期区間では安価なリチウムイオン電池を使う。

4.2. 大気ゲートウェイ（高地ターミナル）

「ラストマイル」問題を解消する。

4.2.1. 位置と構造

ゲートウェイ施設はコンゴ民主共和国モヒ山頂の高原（約 3,400 m）に置く。将来の拡張用として 16 km 南の広大な南部高原を確保し、数十本の並列ゲートウェイを収容できる。施設は主機械遮断扉とガス力学バリア生成系を備えた巨大構造物である。実質的には、空へ斜めに向けた三重環状ノズルを持つ地上固定式ジェットエンジンだが、物体を加速するのではなく、大気を排除し、シャトルが大気へ進入する際の緩衝域を作る。

4.2.2. ガス力学バリア

主作動要素。シャトル接近の数秒前から、トンネル軸に沿って外向きに流れる円すい状の超音速ガス流を生成する。

○ **発生源と構造。** ゲートウェイ開口部を囲む 3 基の独立した同心環状ジェットエンジン（ベルト）、または同じ三重ベルト構成の極超音速ラムジェットでバリアを作る。燃料は空気・水素混合物で、水素は現地の電気分解で製造する。三重冗長により、どの 2 ベルトでも作動すれば有効なバリアとなり、1 基が故障しても機能を保つ。各ベルトは独立した燃料供給、制御、点火系を持つ。ベルトはゲートウェイ外周に、小径から大径へ後退する階段状に重ね、機械扉はその列の後方、ゲートウェイ内部に置く。このため機械扉を先に開けずにベルトを始動できる。

○ **主な機能。**

1) **シャトル通過中、トンネルの真空を守る外向き圧力を作る。**

2) **ゲートウェイ前方の出口域で大気を事前に排除・加熱し、トンネル真空と大気の境界に勾配を作って両媒体間を段階的に移行させる。**

ガス力学バリアはシャトルの空力防護ではなく、大気を遮蔽するものでもない。役割は媒体間の遷移を時間的に引き延ばすことにある。冷たい静止空気に触れるほぼ瞬間的なマイクロ秒級衝撃荷重を、加熱され同方向に流れる気流と接触する分散したミリ秒級荷重へ変える。総空気力は減らないが、ジャークと高周波荷重が大幅に減り、局所破壊と構造の熱衝撃リスクを抑える。

○ **流れの形：**トンネルとシャトルの断面に合う楕円断面の円すい。長さは数十～数百 m で、大気圏ゲートウェイのジェットベルトにある 3 列の環状ノズルから外へ伸びる。

大気圏ゲートウェイのガス力学バリアは、幾何学的に完全、定常、または厳密に軸対称な円すいを必要としない。作動状態は本質的に動的で、形状、密度、流速の時間・空間変動を許容する。

ゲートウェイが機能するための唯一の厳格かつ決定的な条件は、シャトルの全退出中、圧力と運動量の正の外向き勾配を維持して大気のトンネル侵入を完全に防ぐこと、そして出口域の大気を事前にガス力学的・熱的に整えることである。これにより信頼性と実現性が大きく高まる。

したがって流れの形は目標値ではなく適応パラメータであり、固定した幾何形状ではなく、圧力、質量流量、運動量という積分特性に基づきリアルタイムで最適化する。

○ **拡張性と試験。** 数千 km の加速器と異なり、ゲートウェイはモジュール式で拡張しやすい。安定した超音速ガス力学円すいの形成、同期、ジェットベルト運転などの主要技術は、1:5 または 1:10 の実機能試験設備で完全に検証できる。これにより本線の実寸建設前に主要な技術リスクを解消できる。

4.2.3. 安全システム

水素の使用には高度な防爆・防火対策が必要である。ゲートウェイ基盤には、二重化した水素漏洩検知、窒素による配管の不活性パージ、防爆機器、電解設備・貯蔵設備・エンジンベルトの物理的分離、想定放出を作業員や重要設備から離れた大気へ安全に導く指向性換気路を設ける。

4.3. シャトル（AstroLiner）

4.3.1. 寸法と打ち上げ質量

全長約 150 m、楕円断面約 10 × 15 m。大気を貫通するときの抵抗と熱負荷を最小化した極超音速ウェッジ形状。

- 。最適打ち上げ質量：約 15,000 トン。

15,000 トンという質量は、物理的制約と実現可能性の「中庸」に位置する工学・経済上の最適点である。

評価項目	下限（8,000～10,000 トン未満）	最適（15,000 トン）	上限（20,000～25,000 トン超）
空力と過荷重	大気が支配的。抗力 $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ が大きな過荷重 $a = F_d/m$ を生み、複雑な能動安定化とピーク熱負荷を招く。	慣性が支配的。大気抵抗による初期の短時間（最大 5 秒）の過荷重は約 3～6g で、より簡素な衝撃緩和と熱防護を利用できる。	過荷重はわずかに下がるだけで、他の要因が利点を相殺する。
熱特性	熱容量が小さい。小さな質量 m では温度 $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ が急上昇し、極端な能動冷却が必要になる。	熱慣性が大い。大質量構造が短時間の空気貫通によるピーク熱を吸収・分散し、受動・能動熱防護を併用できる。	熱容量は増すが、大構造からの排熱が別の問題になる。
打ち上げエネルギー	必要エネルギー $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ は許容範囲だが、欠点を補えない。	妥当な均衡。11 km/s までの加速には約 9×10^{14} J（約 252 GWh）が必要で、分散型自律地熱システムと蓄電設備の能力に対応する。	エネルギー消費は線形に増え、電力と蓄電容量を不釣り合いに拡大する必要があるため経済性が悪い。
構造と物流	実現はできるが「慣性ラム」の核心的利点がない。	既存技術と両立する。寸法と質量は現代の造船ドック、溶接、輸送能力の範囲内。	構造剛性を失い、固有振動、組立、打ち上げ地点への輸送に問題が生じる。費用は線形以上に増える。
StarRoad の考え方	大気に弱い「軽量機」の枠内に留まる。	「慣性ラム」の考え方を実現する。大気は障壁ではなく、質量と強度で越える短時間の擾乱となる。	産業が負えない課題となり、規模の経済を打ち消す。

- 物理的には、慣性が空力作用を上回り始める約 10,000 トンの閾値より上にある。
- エネルギー面では基盤要件を指数的に増やさない。
- 技術面では造船・重機械など拡張可能な産業慣行の範囲に留まる。
- 経済面では規模による輸送単価低減と資本費の制限を均衡させる。

よって、この値は StarRoad を物理的に実現可能かつ経済的に合理的にする計算上の最適点である。

4.3.2. 配置とシステム

内部全体は、機体高さごとに機能を分けた多層の縦方向構造として設計する。

- 。機体下部と後部は、機上原子炉、熱交換器、能動冷却回路、電力変換器、蓄電設備、冷媒配管、海上推進装置などエネルギー・動力系に充てる。重心を下げ、極超音速飛行、滑空、着水時の安定性を高めるとともに、上部区画の熱・放射線防護を簡素化する。
- 。超電導浮上・安定化系を機体側面沿いと底部の一部に組み込む。モジュールは外皮と熱防護層の直後に固定し、磁場とトンネルの受動コイルの間隔を最小化する。磁石は次の位置に置く。
 - 上部スライド扉の線までの上・中部を含む、機体両側の全長。
 - 底部の中・後部。
 - 主翼の展開部と機械収納部を除く。

この配置が均一な磁場、極超音速時の高い安定性、局所損傷時の耐故障性をもたらす。

- **機体中央部**は折り畳み翼の収納部と支持フレームに充てる。主翼は機体内へ格納され、エネルギー区画と貨物区画から隔離される。機首中央の前部には、遷移状態で経路修正と安定化を行う小型展開式操縦翼を置く。
- **機体上部**には汎用交換式ペイロードモジュールを搭載する。寸法、固定点、質量、許容重心位置を標準化し、貨物、タンカー、旅客、複合用途に構成できる。打ち上げ前にドックで着脱し、上部扉を開けば軌道上でも扱える。貨物室には油圧または電動機械式リフトとガイドを内蔵し、微小重力下で乗員なしにモジュールを自動で引き出せる。
- **上部スライド扉**は荷重構造ではなく、空力フェアリングと軌道上アクセスを担う。折り畳み式の熱制御ラジエーターパネルを扉に内蔵する。扉を完全に開いて固定するとパネルが自動展開し、冷媒を流して余熱を真空へ放射する。
- **機首は多層**の機能配置を採る。
 - 上部：ブリッジ、制御、航法、通信。
 - 中部：小型展開翼と操縦面の機構。
 - 下部：極低温燃料・冷媒タンク。流体抵抗を抑え、大気貫通時に機首の能動冷却へ最短で冷媒を届ける。

この配置は熱・流体系を短くし、機首の熱慣性を抑え、最も厳しい飛行区間で熱防護の信頼性を高める。全体は極超音速での打ち上げ、軌道作業、自律航海、機体の大分解を伴わない反復運用に最適化された、構造化・拡張可能・モジュール式的设计である。

4.3.3. 機体の熱防護

機首と底部には、極超音速飛行とその後の着水に伴う極端な熱・動的荷重に対応する多層複合材・金属熱防護を備える。受動・能動要素は次のとおり。

- 数千度の短時間温度と強い放射加熱に耐える外部耐熱層。
- 機械・振動荷重を受け持つ金属支持層。
- 特に機首と底部前縁から熱を除く能動冷却回路。
- 局所的な臨界部に置き、主構造を傷めず制御して摩耗する交換式アブレーション部材。

熱防護は、海上着水時に高温機体が水へ触れる熱衝撃、急な温度勾配、周期熱応力も考慮する。高負荷部品は区画化し、定期整備でモジュール交換できるため、修理性と反復寿命が向上する。

4.3.4. 翼

安定化、滑空、着水のため 2 対の展開翼を備え、希薄大気層へ出てから開く。

- **前翼は経路修正**、ピッチ・ロール安定化、動的擾乱の減衰を担い、滑空のため希薄層で展開する。

前翼 1 枚の諸元：

- 長さ（付け根から）：約 35 m。

- 付け根／翼端幅：約 14／7 m。
- 面積：約 360～400 m²。

○ **後翼はシャトルの主空力面である。**

後翼 1 枚の諸元：

- 長さ（付け根から）：約 100 m。
- 付け根／翼端幅：約 14／7 m。
- 面積：約 1,000～1,100 m²。

翼の総面積は約 2,800～2,900 m²。揚力胴体も寄与し、有効空力面積を約 20～30%増やす。

亜音速では $L/D \approx 9 \sim 13$ となり、安定滑空と着水点の制御選択が可能。一般的な滑空・着水速度は 90～120 m/s（約 320～430 km/h）。この速度で安全性を決めるのは絶対的な水平速度ではなく、接水時の鉛直速度、迎角、進入経路である。

4.3.5. パラシュートシステム

着水衝撃を下げ、許容着水範囲を広げるため、通常利用可能な軟着水系として再使用型パラシュート・パラfoilを備える。

○ **構成と位置。** パラfoilは 2 か所。

- 上部**後方**に 1 か所。
- 機首先端直後の上部前方に 1 か所。

各位置は N+1 方式で、主・予備パラfoilに独立した収納と抽出索を持つ。1 点ではなく支持フレームへの横方向の取付線で機体に結び、局所ピーク荷重を減らしてピッチ・ロール安定を高める。傘体は縦軸上で離し、相互干渉と絡まりを防ぐ。

○ **面積と作動。** 全重量を支えるのではなく、終盤の鉛直速度を減衰し、滑らかな接水段階を作る。目安は次のとおり。

- 主パラfoil 1 枚：約 4,500～6, 000 m²。
- 2 枚作動時の総有効面積：約 9,000～12, 000 m²。

接触時の目標鉛直速度は $-V_z \approx 1 \text{ m/s}$ 。

○ **作動基準。** 必要な場合だけ使う。**着水アルゴリズムは空力、慣性、水力のベクトル和である総過荷重を考慮する。**

- 予測総過荷重が 4g 以下なら、パラfoilを使わず翼で着水する。
- 4g 超過の**おそれ**があれば作動し、鉛直速度を目標まで下げて軟らかな滑空着水へ移る。

○ **再使用性。** パラfoil、索、取付部は、点検、乾燥、消耗部品交換という定期整備で、機体支持構造を分解せず繰り返し使える。

4.3.6. 自律電源・推進装置

シャトルは、軌道上の機動から数か月の自律航海まで任務全体を担う完全自律の電源・推進系を持つ。

○ 基本電源：機上原子炉。

- **形式：**次世代の小型高速溶融塩炉または高温ガス炉。将来は Helion Energy のような磁場圧縮方式の小型核融合モジュールも想定する。
- **出力：**電気 10～20 MW、熱 50～100 MW。
- **用途：**全機上系、磁気浮上用超電導機器、電磁プラズマエンジン、**能動冷却**、自律航海推進器への給電。原子炉はシャトルの耐用期間 5～10 年を燃料交換なしで運転する。

○ 機上超電導浮上・安定化系。高温超電導磁石を収めた極低温モジュールを機体沿いに配置し、機上の液体窒素または水素で冷却する。浮上と能動安定化の強い主磁場を作り、外部電力が完全に失われても受動「レール」コイルとの誘導相互作用、すなわち「磁気鏡」効果で浮上を維持する。

安定化制御は階層式。

- 1) **受動ループ**（マイクロ秒）：超電導体とトンネルコイルの誘導結合が、変位時に電子制御なしで復元力を自動生成する。
- 2) **ハードウェアループ**（マイクロ秒～ミリ秒）：専用 FPGA・ASIC 回路が不均衡を検出し、固定アルゴリズムで区画を切り替える。
- 3) **ソフトウェアループ**（ミリ秒～数十ミリ秒）：限定的な AI 支援を持つ機上計算機が超電導区画間の電流を再配分し、遅いドリフトと局所不均衡を補償する。ナノ秒応答は不要。

この構成は擾乱にミリ秒で応答し、極超音速の 15,000 トンシャトルに必要な安定性を桁違いに上回る。

○ 主エンジン：高推力電磁プラズマエンジン。

- **原理：**機上原子炉で駆動する磁気プラズマ力学（MPD）エンジン、または可変比推力磁気プラズマロケット（VASIMR）。
- **推力：**パルス運転で 50～100 kN（5～10 トン重）。軌道修正、離脱、軌道間遷移に十分。
- **推進剤：**液体キセノン、アルゴン、または冷却にも使う水素。
- **自律性：**機上 AI がエンジンを制御し、軌道ステーションへのドッキング、荷下ろし、帰還の機動を自ら計算・実行する。

○ 熱制御系。

- **展開式ラジエーター。**宇宙空間で展開し、液体回路により原子炉と機器の余熱を真空へ放射する。
- **相変化蓄熱器。**機首と重要部に置く中核要素で、打ち上げ時・再突入時の大気貫通に伴うメガジュール級のピーク熱を吸収し、構造の過熱を防ぐ。宇宙または海上でラジエーターや周囲へ徐々に放熱する。
- **能動冷却。**飛行中に熱シールドと重要機器を緊急冷却する液体ヘリウム／水素の閉回路。

○ 冗長性と安全：二重原子炉制御、独立冷却回路、非常用放熱手段。海への落下を含むあらゆる事態で安全を確保する。

4.3.7. 自律着水・航海システム

大西洋の指定海域に着水すると、シャトルは完全自律の船舶モードへ移る。装備は次のとおり。

- **推進装置。** 低速で高い操船性を与える 2 基の展開式アジマススラスタまたはウォータージェット。
- **航海用電力。** 通常の機上原子炉／ **核融合炉を最小出力で運転し、** 推進器と機上系へ給電する。炉心は数か月の自律航海に足りる。
- **航法・通信。** GPS/GLONASS 衛星航法と慣性航法、海面状況を把握するレーダー・ライダー、静止衛星経由の安定通信。
- **最終減速。** 接水直前に残る **100～150 km/h** を、小型ドラッグシュートによる安定化・ **初期減速と、** 主プラズマエンジンの短い噴射による鉛直速度の精密低減で落とす。 **着水後にパラシュートを切り離す。**

この構成により、着水後すぐ援助を受けずに母港または曳船との合流点へ自航できる。荒天の海でも自律状態を保ち、長距離を航海し、予定どおり整備ドックへ入ることで、宇宙機からロボット船へ変わる。

4.3.8. AstroLiner-S：初期／簡略型

StarRoad の初期段階、および技術的に簡素で運用上より保守的な基本構成として、AstroLiner-S (Simplified / Start) を採用する。

機能は完全だがエネルギー・システムを簡略化した AstroLiner で、本線の初期運用、初期貨物・有人打ち上げ、技術・運用・規制リスクの段階的低減を目的とする。

- **AstroLiner - S の核心。** 主型と同じ打ち上げ時の寸法・質量を保ちながら、 **機上原子力・核融合電源なしで、慣性による大気貫通という StarRoad の基本原理を実現する。**

加速、浮上、トンネル内安定化という極大エネルギー作業はすべて地上基盤へ移す。

AstroLiner-S は、

- 自律輸送機であり、
 - 完全再使用型で、
 - 自力で軌道投入、離脱、帰還ができるが、
 - トンネル外では化学推進だけを使い、
 - 高出力の電離放射線源を搭載しない。
- **エネルギーと超電導系。** AstroLiner-S から完全に除くもの：

浮上、安定化、軌道との相互作用を担う超電導機器は、

- 打ち上げ前に通電励磁し、
- 永久電流モードへ移し、

- 相互に絶縁して機上システムで制御する。

機上電子機器、制御、防護は、時間余裕を含めトンネル加速全体を賄う電池と慣性蓄電装置（フライホイール）から給電する。

加速中の超電導回路の能動制御は小さな補正電流と非常時に限られ、機上の連続大出力電源を不要とする。

軌道上では折り畳み式太陽電池パネルを能動電源にする。

○ トンネル外推進

AstroLiner-S の全軌道作業は化学推進で行う。

搭載装備：

- LOX/LH₂または LOX/LCH₄級の中推力主化学エンジン。
- 二重化した姿勢・非常制御系（RCS）。

推進系が担うもの：

- 大気圏離脱後の目標軌道までの追加投入。
- 軌道要素の修正。
- 軌道離脱。
- 制御再突入と帰還。

この型で電気推進・磁気プラズマエンジンを使わないのは機上大出力電源がないためで、システム全体の構造的制約ではない。

○ 帰還と再使用

AstroLiner-S は、

- 自律軌道離脱、
- 浅い角度での制御再突入、
- 空力滑空、
- 翼とパラシュート・パラフォイルによる海上着水が可能。

原子炉がないことで大幅に簡素化されるもの：

- 海上運用。
- 定期整備。
- 異常着水後の機体回収。

○ StarRoad 開発における AstroLiner -S の役割

AstroLiner-S は、

- 最初の量産型 StarRoad シャトル、

- 打ち上げ・故障統計を蓄積する基盤、
- システムの早期供用手段、
- 初期軌道基盤の基本輸送機と位置づける。

計画が進み、小型大出力電源が実用化し、運用経験が蓄積すれば、高出力機上電源と電磁プラズマエンジンを備えた完全型 AstroLiner で段階的に補完または置換できる。

したがって AstroLiner-S は妥協ではなく、本線の基本構造を変えず、より早く、安全に、低いシステムリスクで StarRoad を始動する合理的な初期段階である。

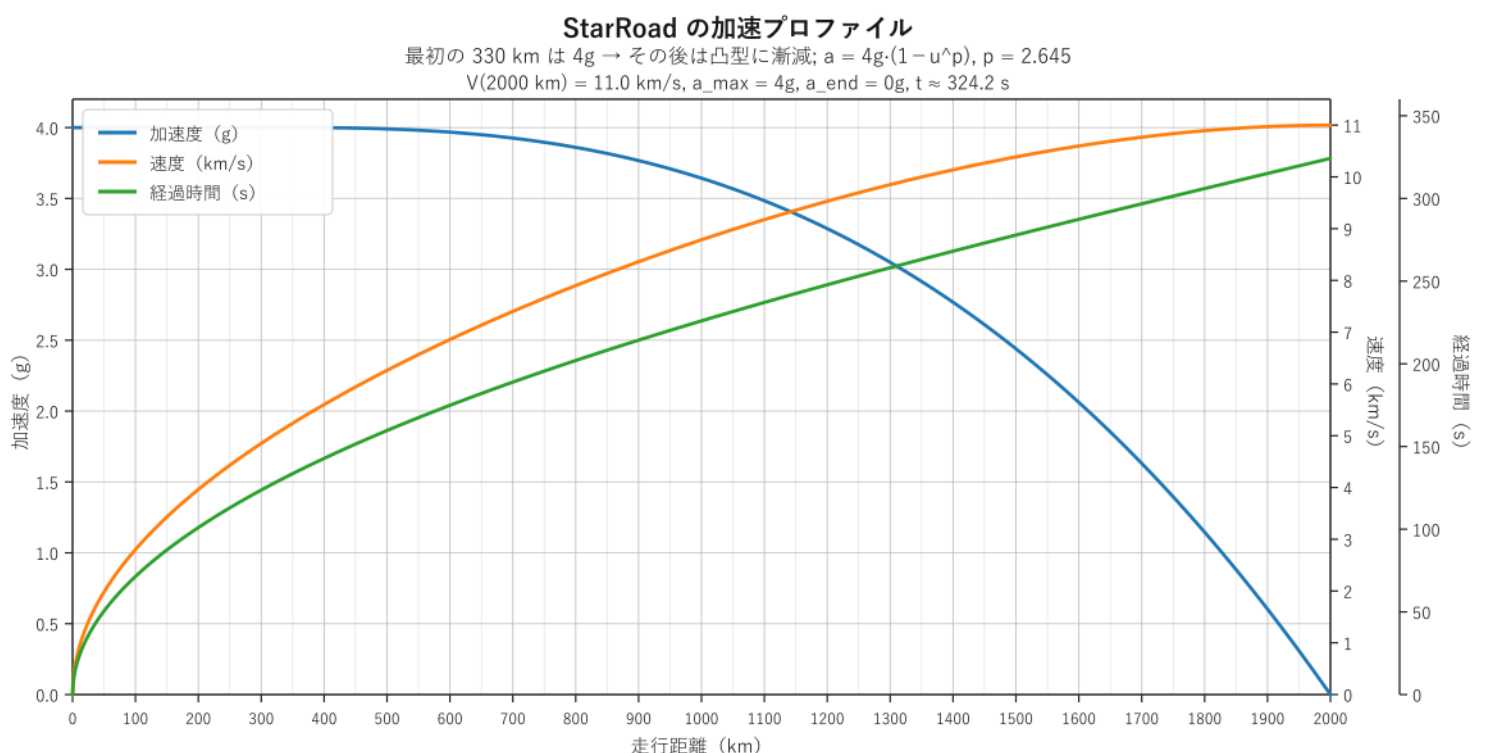
5. 打上げ準備から着水後整備までの運用サイクル

5.1. 準備と打上げ

貨物を積んだシャトルを Batanga 近郊の打ち上げ室に据え付ける。まずシャトルの機上システム、次に加速器システムを試験する。続いてガスダイナミック・ゲートウェイの打ち上げ前試験を行う。機上超電導体に電流を励磁し、磁気浮上を起動して確認する。トンネルはあらかじめ真空にしてある。指令と同時に、加速器の先頭区間へパルス電力の供給を開始する。

5.2. トンネル内加速

- **0-330 km**。初期の長手方向加速度は $\sim 4g$ 。エネルギーのかなりの部分を浮上と重力への対抗に使う。
- **330- $\sim 1,800$ km、S 字曲線の下降区間**。長手方向加速度を初期の $4g$ から滑らかにゼロまで下げる。シャトルは地下の曲線を通り、最大 $\sim 4g$ の荷重を受ける。周囲の電磁要素が軌道を安定させる。
- **$\sim 1,800-2,050$ km、S 字曲線の上昇区間**。ゲートウェイに近づくにつれて加速度はゼロになる。最後の 50 km を、シャトルは ~ 11 km/s で慣性走行する。



5.3. 大気ゲートウェイからの射出

- 。打ち上げ地点が高所にあるため、シャトルは大気圏ゲートウェイから約 30 km 進んだだけで海拔 10 km を超え、地上への衝撃波の影響を最小限に抑えられる。シャトル打ち上げの 1 分前、機械式ゲートウェイを開かずにガスダイナミック・ゲートウェイのリングを試験作動させる。シャトルがトンネル路線の 45% を通過すると、真空形成時に最終区間のポンプが蓄えた圧縮空気を、リングから超音速流として噴出する。シャトル通過の約 10 秒前に水素を供給し、ガスダイナミック・バリアを主燃焼モードで作動させ、熱く部分電離したガスによる安定した円錐形の超音速流を形成する。リングの作動と高温のバリア勾配円錐の形成に成功した 3 秒後、機械式ゲートウェイを開く。
- 。バリアはトンネル内の真空喪失も防ぎ、初期の熱衝撃を緩和する。シャトルは、あらかじめ希薄化・加熱したガス領域を数ミリ秒で通過する。この重要技術は、媒体が切り替わる際の極端に短い衝撃波面を取り除き、初期空力作用の時間分布を変える。
- 。ガスダイナミック・バリアは空気力の総量を減らさない。衝撃荷重をマイクロ秒域からミリ秒域へ引き延ばし、シャトル構造の局所応力、振動、熱衝撃を決定的に低減する。
- 。シャトル通過直後に機械式扉を開き、その後ジェットリングを直ちに停止する。

5.4. 大気圏通過

シャトルは弾道軌道を飛び、自らの慣性質量と堅牢な構造を使って大気の高密度層を通過する。熱荷重と動荷重は最初の 10-20 秒で最大になる。

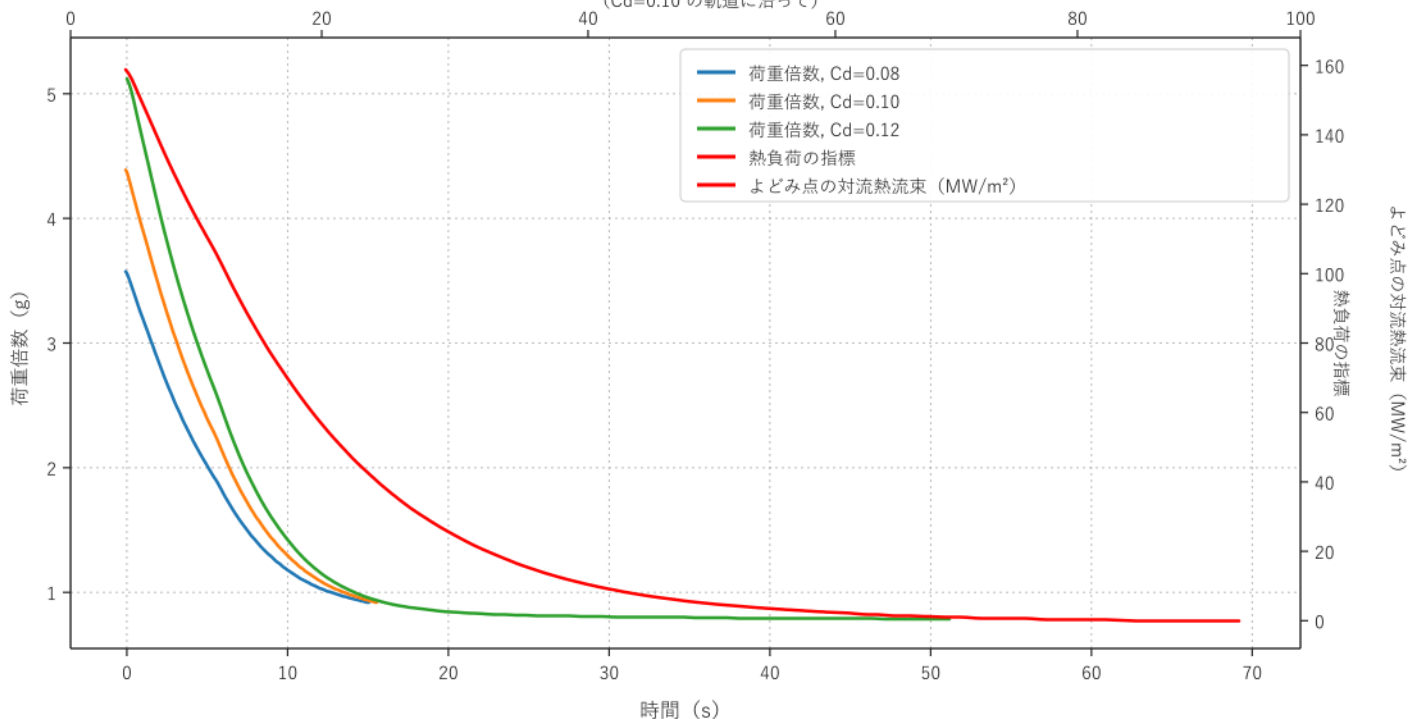
- 。重要な明確化。ガスダイナミック・バリア領域を出た直後から、シャトルは所定高度約 3,400 m の通常大気と全面的に相互作用する。軌道、熱流束、荷重の計算はすべて、大気との完全な空力相互作用を前提とする。「ガスシールド」「通路」、あるいはシャトルに伴走する希薄領域の存在は仮定しない。

StarRoad：時間・高度に対する機械荷重と熱荷重

$C_d = 0.08, 0.10, 0.12$ (C_d は空力抗力係数)

海拔高度 (km)

($C_d=0.10$ の軌道に沿って)



5.5. 宇宙空間への進入と軌道運用

大気圏を出ると、放熱のためラジエーターを展開する。次に機上の電磁プラズマエンジンを作動させ、軌道を微修正して目標軌道へ入る。多くの場合、静止軌道の外側または Lagrange 点へ直接向かう。その後、ペイロードを展開する。AstroLiner-S 構成では、最終的な軌道投入と軌道修正を化学推進系で行う。

5.6. 軌道離脱と帰還

完全機能型 AstroLiner は、電磁プラズマエンジンを使って軌道を離脱する。AstroLiner-S 構成では、軌道離脱のための減速、修正、最終機動を化学推進系が担う。

5.7. 海上着水

Gabon 近海の大西洋上で減速用パラシュートを展開する。シャトルは小さな迎角を保ち、高温の表面が冷水に接触しても耐えられる堅牢な機体下面を使って着水する。着水後はプロペラまたはウォータージェットを展開する。

5.8. 曳航と整備

機上炉から給電する自力航行用エンジン、またはシャトルシステムの故障時に待機する曳船が、機体を港湾施設へ運ぶ。そこで点検、整備、熱防護の補修、次便の準備を行う。AstroLiner-S 構成では、バッテリー、補助動力装置、または待機曳船によって港へ戻る。

6. 実施、工程、要件、産業拠点

6.1. 計画の段階

StarRoad は、技術的に連続し、経済的にも根拠のある段階を順に進めて実現します。各段階に明確な目標と成功基準を設け、次の段階に必要なインフラを構築することで、技術面と資金面のリスクを抑えます。

6.1.1. フェーズ 0：構想と試験（2～5 年）

- **目標：** 物理原理を検証し、重要技術を実験室で開発して、後続設計の工学的基盤を整えます。
- **主な作業**
 1. 加速、ポータル作動、空力衝撃を含む全過程について、詳細な数理解析と CFD 解析を行います。
 2. 国際コンソーシアムを組織し、政治・法制度上の予備合意を形成します。
 3. ルート全線で地質・環境調査を行います。
 4. 主要立地外での研究試験施設の設置：

超伝導浮上モジュールとパルス電源システムのベンチ試験。

安定した勾配障壁を形成できることを確認するため、1:10 スケールのガスダイナミック・ポータル試作機を建設して試験。

真空システム、軽量試験体の電磁加速、安全システムの統合を検証するため、全長 1～2 km の短い真空実証トンネルを掘削する。

- **成功基準：**ゲートウェイ、浮上、安定化という主要解決策の実現性を実験データで確認し、フェーズ 1 の詳細工学設計を開始できる状態にする。

6.1.2. フェーズ 1：インフラとエネルギー基盤（5～7 年）

- **目標：**計画の「エネルギー背骨」を築き、実地条件でロボット施工を確立します。
- **主な作業**
 1. 直径 2 m の標準化されたロボット式トンネル掘削システムを少量量産する。
 2. 初期熱安定化回路を構築するため、地熱自律熱エネルギーシステムの幹線集熱トンネル第 1 対を全経路（約 2,050 km）にわたり並行して掘削する。
 3. 大気直接回収（DAC）で得た超臨界 CO₂を使う最初の地熱発電所を、ルート上の主要地点に建設します。
 4. 集熱トンネルの上方に、小断面の試験用原型トンネル—D=2 m、L=2,050 km—を掘削し、基本的な真空、通信、保守設備を設置します。
- **成功基準：**自律型地熱熱エネルギーシステムの最小構成が完全稼働し、エネルギー自立を達成します。高速ロボット掘削を実証し、後の拡張基盤を整えます。

6.1.3. フェーズ 2：小規模検証（「科学・計測複合施設」段階）（4～6 年）

- **目標：**現実的な速度域で各システムの同期と安全性を検証し、固有の実験データを取得します。
- **主な作業**
 1. 小型試験トンネルで、数トンまでの不活性試験体を 1～11 km/s まで加速・制動します。
 2. 1:5 ガス力学ゲートウェイ試作機に小型実験シャトルを通過させる実規模試験。
 3. 構造と熱防護が異なる試験質量を加速して送り出し、加速度荷重と熱流束を計測することで「慣性衝角」仮説を実験検証します。
 4. 超電導磁石と蓄熱器を含む、実機大シャトルの主要システムの詳細設計と試作を開始する。
- **成功基準：**すべての同期システムが安定かつ安全に作動し、ガスダイナミック・ポータルの有効性を確認します。質量が増えるほど単位質量当たりの負荷が下がることを実験で示し、シャトルの基本設計を完了します。

6.1.4. フェーズ 3：完全機能区間とシャトル試作機（4～7 年）

- **目標：**最終仕様のシステムを十分な長さの区間で統合・試験し、飛行試作機を製作します。
- **主な作業**
 1. 最終断面 17.5 × 12.5 m で、全巻線、蓄電設備、保守トンネルを備えた主加速トンネルの 50～200 km 完全機能区間を建設する。
 2. この区間の下にある地熱システムを、7 本のトンネルからなる完全構成へ拡張します。

3. 推進装置を持たない実機大シャトル試作機を製作し、低温系、構造強度、熱防護を地上で総合試験します。
4. 統合トンネル試験：シャトル相当質量を最大 8g、最大約 4 km/s で加速・制動する。全緊急プロトコル（警報 1〜3）を検証する。
5. 完全機能型 AstroLiner 向けの小型搭載原子炉を開発し、地上試験と認証を行います。

- **成功基準：** 重大な損傷を生じさせず、加速と緊急停止を繰り返し成功させます。エネルギー回生の有効性を確認し、飛行用シャトルと原子炉を最終統合可能な状態にします。

6.1.5. フェーズ 4：延伸と運用開始（10〜15 年）

- **目標：** 第 1 線を完成させ、シャトルを統合して運用速度へ到達します。
- **主な作業**
 1. 多数のトンネル掘削機を並行稼働させ、加速トンネルを設計全長 2,050 km まで段階的に延長します。
 2. 地熱システムのインフラとパルス蓄電設備を全線へ拡張します。
 3. モヒ山に最終仕様の高高度大気圏ポータル複合施設を建設します。
 4. シャトル搭載系を統合し、地上試験とトンネル内の低速試験を行います。
 5. 速度と質量を段階的に増やし、設計値 15,000 t、約 11 km/s に到達するまで段階的な打上げを行う。
- **成功基準：** シャトルの初の極超音速打ち上げに成功し、ペイロードを目標軌道へ投入します。月 1〜2 回の設計打ち上げ頻度を達成します。

6.1.6. フェーズ 5：拡張と産業運用（継続）

- **目標：** StarRoad を継続的に拡大する世界規模のインフラへ発展させます。
- **主な作業**
 1. 第 1 線を運用し、積載、保守、帰還からなる物流サイクルを改善します。
 2. 貨物輸送量を増やすため、第 2 線以降の並行線を着工します。
 3. 計画の産業拠点を基盤に、軌道上造船所と処理施設を展開します。
 4. 人員と特殊貨物向けの短い加速器からなる「支線」網を整備します。
- **成功基準：** 軌道までの輸送費を 10 米ドル/kg 未満に下げ、毎日打ち上げを行います。次の幹線について承認済み計画があり、建設が始まっています。

6.2. 産業拠点

- **沿岸複合施設（ガボン、ニャンガ川河口）：** シャトル建造、トンネル初期区間用モジュールの製造、シャトル整備の主要母港。

- 。 **高地複合施設（コンゴ民主共和国、モヒ山と南部高原）**：高速区間および最終 S 字曲線用モジュールの製造、ゲートウェイ機構の組立・整備。敷地には 3 系統の水素電解・貯蔵システムを置き、緊急時でも各系統単独でゲートウェイのガス力学障壁にある 3 基すべてのエンジンリングへ燃料を供給できる。電解電力は、計画電力網に統合された地熱自律熱エネルギーシステム、水力、太陽光、原子力などの地域電源から供給する。

6.3. 全体工程

本計画は、現在実現可能な多数の先端技術と工学的解決策、多数のトンネル掘削機の並行稼働、インフラ整備、二つの製造拠点を必要とする。このため、フェーズ 0 開始からフェーズ 4 の初商用打上げまでの最初のトンネルの実現には約 25～40 年を要する。これは ITER や LIGO など他の巨大科学計画の所要期間に匹敵する。この条件下では、進展は根本的な技術実現性よりも、資金と外交・法的調整に左右される。課題は野心的だが、世界的な共同事業体なら実現できる可能性がある。

7. 解決する問題と課題

7.1. 地球規模の過熱

熱汚染と地球生物圏への圧力を減らすため、エネルギー集約型産業を宇宙へ移します。

7.2. 経済上の課題

宇宙へのアクセス費用を劇的に下げ、太陽エネルギー、小惑星、月資源、そして最終的には惑星資源を経済的に利用可能にする。

7.3. 戦略目標

軌道産業化と惑星防衛の双方を支えられる、強靱で天候に左右されない輸送システムを構築する。

7.4. 技術革新の触媒

本計画は、パルス電力、超伝導、極超音速技術、原子力推進、ロボット掘削の進歩を促す。

7.5. エネルギーと熱環境の自立

自律型地熱熱エネルギーシステム（自律地熱システム）は、二つの要件を同時に満たします。最大約 15 GW の連続電力を生み、加速器の需要をすべて賄って商用余剰も確保する一方、主トンネル周辺を予測可能な低温環境に保ちます。これにより、深部の地熱活動がある岩盤でも建設・運用でき、脆弱な外部電源や不安定な天候への依存を解消します。

7.6. カーボンフットプリント

StarRoad は能動的な環境貢献モデルを採る。世界最大の固定式大気 CO₂ 利用施設であり、超臨界 CO₂ を閉じた自律地熱システムの恒久作動流体とする。数百万トンの二酸化炭素を大気循環から取り除き、技術回路に数世紀閉じ込める。StarRoad は産業部門全体の排出を相殺できる強力な気候工学手段となる。

7.7. 水熱幹線運河の社会・環境面の可能性

水熱幹線水路は冷却要素にとどまらず、地域に利益をもたらす大陸横断の二目的基盤である。

- **灌漑。** 分水ゲートから路線沿いの農地へ水を送り、乾燥地をアフリカの「緑の帯」へ変える。
- **自然補給。** 頻繁な赤道豪雨で自動的に補給される。
- **温水処理。地熱熱交換器**で+60℃ まで昇温すると水は実質的に低温殺菌され、安全な灌漑・産業用途に使えます。ろ過後は生活用水や飲料水にも利用できます。
- **自然流下。** 東の 3,400 m から西の 0 m へ下る地形により、ポンプなしで流れ、無動力循環を実現する。
- **小水力。** 標高差を利用した発電所列が、地域網と自給用の追加再生可能電力を生む。

したがって StarRoad は輸送だけでなく、地域の持続可能な発展へ統合された農業・エネルギー基盤となる。

7.8. エネルギーネットワーク

自律地熱システムと発電所網は加速器だけでなく、周辺都市、工場、農場にも余剰「グリーン」電力を供給する。

7.9. 経済動脈としての StarRoad

経済動脈としての StarRoad。一方で StarRoad は太陽系開発のための惑星規模の貨物ゲートウェイとなり、他方でアフリカの主要な経済動脈として、工業化、エネルギー自立、食料安全保障を促す。路線は、地下を通過してどこにもつながらない孤立した土木施設ではない。地上インフラである 40 のターミナル、ガボンとコンゴ民主共和国の二つの工業中心地、水熱幹線水路、道路網が、中央アフリカを西から東へ横断する線状の持続可能な開発クラスターを形成する。全長 2,050 km の沿線には、生態・技術・農業が交互に連なる独自の景観が生まれる。この線状クラスターは、次の機能を備えた自給的経済圏となる。

- 地熱、小水力、太陽光による発電。
- 灌漑農業による食料生産。
- シャトル部品、トンネルモジュール、設備などの工業製品の製造。
- 道路と鉄道による貨物輸送。
- 打上げ施設と大気圏ゲートウェイからなる宇宙港の運用。
- 直接空気回収施設による大気中 CO₂の除去。

7.10. 重要インフラの安全性

大量の水素、極超音速、ギガワット級のエネルギーを安全に扱う対策を、計画当初から組み込みます。受動的な防護と能動監視・自動応答を組み合わせ、大規模エネルギー施設と水素システムの新たな安全基準を確立します。

7.11. 立地選定と拡張性

ポータルの立地は、高度、物流、安全性、拡張性、法制度など、相反する数十の要件を満たさなければなりません。モヒ山と隣接高原なら、小規模な高地拠点から始め、移転せずに世界最大の宇宙港へ拡張できます。

7.12. 大陸横断計画の政治・法的調整

路線が三か国を通過する問題には、CERN や ITER のような巨大科学計画を手本とする国際コンソーシアムで対応する。地下インフラと自律型地熱熱エネルギーシステムのエネルギー資産には特別な法的地位を与え、利益を参加者の間で明確に配分する。この計画は政治的安定を前提とする重荷ではない。相互依存に加え、未来と建設中に生まれる技術への優先的アクセスを通じて、安定を生み維持するための、それ自体に価値のある手段となる。

7.13. 貨物流の段階的拡大

打上げ頻度は軌道産業と歩調を合わせて増える。月 1 回の先駆段階で軌道造船所をつくり、週 1～3 回の産業段階で資産を増設し、毎日打ち上げる成熟段階で宇宙経済の指数関数的成長を支える。

8. 市場と軌道物流

本節では、StarRoad の経済性を左右する中心的な問い、すなわち超重量級打上げ回廊を十分に活用できる量の何を運ぶのかに答える。StarRoad は、まれな単発任務のためのシステムではない。地球と高軌道の間に、大量で定常的かつ産業化された貨物流を築くことが目標である。

StarRoad の主要な初期市場は、低軌道衛星コンステレーションや単独の科学探査機ではなく、大規模な軌道エネルギー、計算基盤、軌道間物流、軌道居住地、宇宙造船所、そしてそれに続く地球外産業である。

8.1. 超重量級打上げの需要問題

従来型ロケットの経済性を制約するのは 1 kg 当たりの費用だけではなく、打上げそのものの性質でもある。ロケットは貨物を小分けにして運び、補助質量の割合が大きく、軌道上組立てが複雑で、個別作業も多い。そのため打上げ価格が下がっても、ロケット輸送は遠征型物流にとどまる。

StarRoad が生み出すのは別種の市場である。現在のペイロードを安く打ち上げるだけでなく、ロケット物流では決して採算が取れないペイロードを実現する。

具体的には次のような貨物である。

- 完成品またはほぼ完成品のギガワット級宇宙太陽光発電所。
- 大規模な軌道データセンター。
- マイクロ波送電モジュール。
- 大型トラス、ラジエーター、反射鏡、パネル。
- 軌道造船所と自動組立てライン。
- EML4/5 向けの居住・産業モジュール。
- 軌道間タグと輸送船。

- 。推進剤、電力、サービス用モジュール。
- 。将来の小惑星・惑星間インフラの構成要素。

したがって StarRoad は、現在の宇宙打上げ市場に依存しない。鉄道、コンテナ海運、電力網が既存需要を満たすだけでなく、その周囲に新たな経済を生んだのと同様に、StarRoad も新市場そのものを創出する。

8.2. 初期市場：宇宙太陽光発電と軌道データセンター

第一段階で StarRoad の主要な商業・戦略貨物となるべきものは、ギガワット級宇宙太陽光発電所である。自己展開式または部分自己展開式の大型エネルギープラットフォームを、AstroLiner-S が目標軌道または運用地点へ直接運ぶ。

宇宙太陽光発電所は複数の需要を同時に満たす。

- 。超重量級打上げに大規模で反復可能な需要を生む。
- 。昼夜周期と大半の天候に左右されないエネルギー市場をつくる。
- 。新規発電能力の相当部分を地表外に配置できる。
- 。軌道産業に電力を供給する基盤となる。
- 。軌道物流、造船所、サービス居住地を整備する経済的理由を生む。

地球軌道における太陽定数は約 1,361.6 W/m²である。したがって入射太陽光 1 GW は、完全に正対した集光面約 0.74 km²に相当する。太陽電池効率 25～35%、変換・伝送損失、構造上の隙間、ラジエーター、パワーエレクトロニクス、冗長性、劣化を考慮すると、実用電力 1 GW に必要な実集光面積は数 km²に達する。従来の宇宙機の尺度では巨大だが、質量、面積、構造寸法が主な制約ではなくなる StarRoad にとっては自然な規模である。

8.2.1. ギガワット級宇宙太陽光発電所の質量比較

ギガワット級発電所は小型衛星ではない。現在の楽観的な構想でも、2 GW 発電所の質量は数千トンとされる。CASSIOPeIA のような最軽量案は約 2,000 t、より保守的な NASA 研究では同等の 2 GW システムを 5,900～10,000 t と見積もる。

計画 / 研究	出力	質量	StarRoad との関係
CASSIOPeIA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	系統供給最大 2 GW	約 2,000 t	StarRoad に最も適した参照例。GEO/GSO、発電率 99.7%、衛星 1 基に対して整流アンテナ（レクテナ）1 基の構成で、最良の場合は比出力が約 1 MW/t に近づく。
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	系統供給 2 GW	約 5,900 t	より保守的な推定。NASA は系統供給 2 GW に条件をそろえており、RD1 の太陽電池パネル面積は約 11.5 km ² である。
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	複数システムで系統供給 2 GW	約 10,000 t	NASA は質量約 1,000 万 kg、太陽電池パネル面積約 19 km ² としている。RD2 は発電時間が短いため、RD1 1 基とほぼ同じエネルギーを供給するには RD2 が 5 基必要である。
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	平均 0.75 GW / 最大 1.2 GW	1 システム当たり約 20,000 t	重量級の参照例。平均出力 2 GW へ単純換算すると約 50,000 t 以上となり、1 回の打上げではなく、複数回の飛行と軌道上組立てが必要になる。

計画 / 研究	出力	質量	StarRoad との関係
Caltech SSPP / 軽量モジュールタイプ	完全な 2 GW 発電所ではなく、技術単位	地上供給 2 GW に対し、能動層だけで理論上約 1,700～3,400 t	160 g/m ² 、端から端までの効率 7～14%という条件で、この推定が含むのは能動層だけである。完全な発電所には、構造、送電、姿勢制御、ラジエーター、配線、電子機器、保守設備、予備も必要になる。

表から得られる中心的な結論は明確である。質量 2,000～10,000 t の 2 GW 宇宙太陽光発電所は、AstroLiner の用途にはほぼ完全に一致する。StarRoad なら超重量級打上げ 1 回、または最小限の軌道上組立てを伴う少数回の飛行で済む。ロケット物流では、超重量級ロケットを数十回から数百回打ち上げ、燃料補給網、軌道上組立て、GEO または EML までの曳航を行う必要があり、運用は急激に複雑化する。

8.2.2. 2 GW 宇宙太陽光発電所 1 基のエネルギー生産量

次の基準条件を用いる。

- 系統供給出力：2 GW。
- 稼働率 / 発電率：99.7%。
- 設計寿命：30 年。

1 基当たりの生産量は次のとおりである。

- 年間約 17.47 TWh。
- 30 年間で約 524 TWh。

これにより 1 kg 当たりの輸送費が根本的に重要になる。ロケット物流では打上げが最大の障壁であり続ける。StarRoad では輸送分が急速に下がり、将来の電力価格のごく一部になる。

8.2.3. 宇宙太陽光発電費に占める輸送分

以下の計算は、均等化発電原価のうち輸送分だけを扱う。発電所質量の輸送費を、30 年間の総発電量で割る。発電所の製造、レクテナ、保守、保険、モジュール交換、地上インフラ、事業者利益は含まない。

式：

LCOE の輸送分 = 発電所質量 × 輸送単価 / 生涯発電量

出力 2 GW、稼働率 99.7%、寿命 30 年の発電所では、生涯発電量は約 5,240 億 kWh となる。

段階 / 輸送システム	輸送単価	CASSIOPeiA 型発電所、 2,000 t、¢/kWh	NASA RD1、5,900 t 、¢/kWh	NASA RD2、10,000 t 、¢/kWh
現在のロケット物流、GTO までの 低位基準	3,600～5,600 ドル/kg	1,37～2,14	4,05～6,31	6,87～10,69
StarRoad、1～2 年目	80～120 ドル /kg	0,0305～0,0458	0,0901～0,1351	0,1527～0,2290
StarRoad、3～5 年目	30～50 ドル/kg	0,0114～0,0191	0,0338～0,0563	0,0572～0,0954
StarRoad、6～10 年目	10～20 ドル/kg	0,0038～0,0076	0,0113～0,0225	0,0191～0,0382
StarRoad、11～15 年目	3～8 ドル/kg	0,0011～0,0031	0,0034～0,0090	0,0057～0,0153
StarRoad、16～25 年目	0.8～3 ドル/kg	0,0003～0,0011	0,0009～0,0034	0,0015～0,0057

段階 / 輸送システム	輸送単価	CASSIOPeiA 型発電所、 2,000 t、¢/kWh	NASA RD1、5,900 t 、¢/kWh	NASA RD2、10,000 t 、¢/kWh
StarRoad、26 年目以降	0.3～1 ドル/kg	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

比較すると、現代の新設地上発電の LCOE は 1 kWh 当たり数セントである。陸上風力は約 3～4 ¢/kWh、大規模太陽光は 4～5 ¢/kWh、水力は 5～6 ¢/kWh。NASA が推定する 2050 年の地上代替電源は約 2～5 ¢/kWh である。

重要な結論が得られる。試験運用期でさえ、StarRoad による宇宙太陽光発電の輸送分は地上発電の LCOE より 1 桁低く、成熟段階では主要な価格要因としてほぼ消える。これは宇宙太陽光発電の総費用が 1 セントの数千分の 1 になるという意味ではない。発電所とレクテナの製造、保守、電子機器、ラジエーター、モジュール交換、保険、事業利益は残る。StarRoad が取り除くのは、ロケット物流の下で宇宙太陽光発電を経済的に重くしている固有の障壁である。

現在のロケット案では、実態は 3,600～5,600 ドル/kg という単純な数字よりさらに悪い。大型発電所は軌道投入するだけでなく、運用地点まで運び、組み立て、保守しなければならない。タグへの燃料補給とインフラ維持も必要である。そのため NASA は、基準 LCOE を RD1 で約 61 ¢/kWh、RD2 で約 159 ¢/kWh と見積もっており、地上代替電源を大きく上回る。StarRoad は打上げ費を下げるだけではない。数千回のロケット作業を 1 回または数回の超重量級インフラ飛行に置き換え、問題の種類そのものを変える。

8.2.4. 第二の初期市場としての軌道データセンター

軌道データセンターは第二の初期市場になり得る。人工知能、クラウド計算、デジタル基盤の成長により、データセンターは世界のエネルギー需要の大きな要素になっている。IEA は、すでに年間数百 TWh を消費し、今後 10 年で年間約 1,000 TWh に近づく可能性があるから見積もる。

計算基盤の一部を宇宙太陽光発電所の近くに置く利点は多い。

- 連続する軌道上発電を直接利用できる。
- 地上電力網への需要を減らせる。
- 真空中に大型ラジエーター群を建設できる。
- 土地、水、系統容量という地域制約への依存を減らせる。
- 太陽光発電所とエネルギー、通信、保守インフラを共有できる。

初期段階では、軌道発電所とデータセンターを別々のプラットフォームとして打ち上げてよいし、太陽光発電所、パワーエレクトロニクス、ラジエーター、計算モジュール、通信アンテナ、マイクロ波送電回路を備えたエネルギー・計算複合施設としてもよい。

8.3. 宇宙太陽光発電の気候・産業上の意義

宇宙太陽光発電所を単なる「グリーン技術」と表現するべきではありません。役割はもっと広く、快適性を下げたり消費制限を課したりするのではなく、より強力なエネルギーシステムを構築することで炭素系発電を置き換えられます。

従来の気候政策は、排出削減のために社会へ快適性の犠牲を求めるものと受け取られがちです。StarRoad は別の道を示します。文明の能力を縮小する代わりに、新規発電の大半を宇宙に配置し、電力部門の炭素排出を増やさず利用可能なエネルギーを拡大します。

このモデルでは、産業資源としての炭化水素を消滅させる必要はありません。大量の電力・熱供給からは段階的に外しながら、化学品、材料、炭素複合材、合成製品、そして炭素が燃料ではなく原料となる生産工程へ振り向けられます。

現在の炭素系エネルギー産業にとって、これは脅威だけでなく移行経路でもあります。石油、ガス、石炭インフラに関わる企業、国家、基金に、宇宙太陽光発電、軌道上エネルギー、炭化水素化学、炭素材料への優先的な投資機会を与えられます。StarRoad は既存エネルギー産業の単なる競争相手ではなく、計画的転換の仕組みになります。

8.3.1. エネルギー代替の規模

1 ギガワットの連続電力は年間約 8.76 TWh を生みます。稼働率 99.7%の 2 GW 宇宙太陽光発電所は年間約 17.47 TWh を生みます。

したがって：

- 軌道上発電 100 GW は年間約 876 TWh、
- 軌道上発電 1 TW は年間約 8,760 TWh、
- 軌道上発電 3 TW は年間約 26,280 TWh で、現在の世界年間電力消費に匹敵します。

2024 年の世界発電量は約 30.8 千 TWh で、そのうち化石燃料発電は約 18.2 千 TWh でした。規模は明白です。炭素系発電を一部置き換えるだけでも、数十ではなく数百～数千ギガワットの新たな安定電源が必要です。

8.3.2. StarRoad の打ち上げで宇宙太陽光発電所を運ぶ場合の代替可能速度

表は技術上限の試算です。StarRoad の打ち上げの相当部分で、毎回 1 基の系統接続済み 2 GW 発電所を運んだ場合を示します。予測でも約束でもありません。量産、地上受電アンテナと系統接続の完成、政治的・法的な受容、資金、保守、出力を吸収できる電力市場という追加条件が満たされた場合に限る、可能速度の試算です。

StarRoad の運用期間	経済モデル上の年間打ち上げ回数	年間に追加される宇宙太陽光発電容量	配備後に追加される年間発電量	2024 年の化石燃料発電量、約 18.2 千 TWh/年	2024 年の世界総発電量、約 30.8 千 TWh/年
1～2 年目	12-24	24～48 GW/年	210～419 TWh/年	1,2-2,3%	0,7-1,4%
3～5 年目	50-100	100～200 GW/年	873～1,747 TWh/年	4,8-9,6%	2,8-5,7%
6～10 年目	200-300	400～600 GW/年	3,493～5,240 TWh/年	19-29%	11-17%
11～15 年目	500-700	1,000～1,400 GW/年	8,734～12,227 TWh/年	48-67%	28-40%
16～25 年目	1000+	2,000+ GW/年	17,467+ TWh/年	96%+	57%+
26 年目以降	1500+	3,000+ GW/年	26,201+ TWh/年	144%+	85%+

この表は、宇宙太陽光発電が StarRoad にとって自然な主要市場である理由を示します。1 回の打ち上げで 2 GW 発電所を 1 基運べば、運用初期から有意なエネルギー供給が生まれ、成熟期には地球規模の手段になります。

この表を、脱炭素化を保証する工程表として読むではありません。実際の代替は **StarRoad** の打ち上げ能力だけでなく、次の条件にも制約されます。

- 宇宙太陽光発電所の製造速度、
- 電力電子機器、ラジエーター、トラス、マイクロ波送信機、制御システムの製造、
- 地上受電アンテナの建設、
- 電力網の容量、
- マイクロ波送電に対する政治的承認、
- 利益とリスクの国際配分、
- 軌道上エネルギーの保険と規制、
- 発電所の保守、修理、寿命終了時の廃棄、
- 地上太陽光、風力、原子力、水力、地熱発電との競争。

したがって正確な主張は次のとおりです。**StarRoad は世界の化石燃料発電規模に匹敵する代替速度を技術的に可能にしますが、実際の移行速度を決めるのは発電所製造、電力網、受電アンテナ、政策、市場です。**

8.3.3. 炭素系エネルギー産業の転換

発電所の製造が **StarRoad** の打ち上げに追従できれば、10～20 年でテラワット級の軌道上電源を構築できます。地上エネルギーをなくすのではなく、その役割を変えます。地上電力網、原子力、水力、再生可能エネルギー、地熱、蓄電がハイブリッドシステムを構成し、軌道上発電がベースロード、産業、輸出の各層を担います。

このシナリオでは、炭素系エネルギー産業は単に「負ける」のではなく、転換経路を得ます。

- 石炭・ガス火力はベースロード発電から段階的に退く。
- ガスインフラの一部は予備電源、化学、合成品の役割へ移る。
- 石油・ガス企業は宇宙太陽光発電、受電アンテナ、炭化水素化学、炭素材料へ投資する。
- 石炭産業は炭素複合材、還元剤、化学原料、材料へ転換できる。
- 既存のエネルギー企業の一部は軌道上発電、受電アンテナ、電力網配電の運営者になる。

政治・経済上の要点は、強力な産業に直ちに自己消滅を求めるのではなく、移行経路を提示することです。炭素系エネルギー部門が宇宙太陽光発電と化学生産で利益率を維持または改善できれば、移行への抵抗は大きく抑えられます。

8.3.4. 従来の「グリーン・アジェンダ」との違い

StarRoad が提案するのはエネルギーの拡大であり、エネルギー緊縮ではありません。気候面の論理は文明の能力を削ることではなく、その能力をより持続可能なインフラへ移すことです。

これは「気候のために暮らしを悪化させる」よう求めるものと受け取られる手法とは異なります。宇宙太陽光発電と **StarRoad** の組み合わせは、別の将来像を支えます。

- 少ないエネルギーではなく、より多くのエネルギー。

- 産業の縮小ではなく、排出の削減。
- デジタル経済の制限ではなく、利用可能な計算能力の拡大。
- 輸送、生産、日常生活のさらなる電化。
- 発展途上地域により多くの機会。
- 炭素を産業原料として残しながら、燃料としての化石資源への依存を低減。

この考え方は **StarRoad** の文明的な論理によりよく合います。人類に縮小を求めるのではなく、従来のカーボンフットプリントを伴わず成長できるインフラをつくれます。

8.3.5. 結論：主要市場としての宇宙太陽光発電

ギガワット級の宇宙太陽光発電所は **StarRoad** の副次的用途ではなく、経済的に必要とされる中心的理由の一つです。

両者を組み合わせることで：

- 超重量級打ち上げへの大量需要を生み、
- 電力販売による明確な事業収益を確保し、
- 将来の軌道上産業基盤へ電力を供給し、
- 地上受電アンテナ、中継機、軌道間タグボート、造船所、サービス居住区の需要を生み、
- 炭素系エネルギー産業へ新たな投資分野を与え、
- 地球規模の気候対策を実行する現実的な仕組みを提供します。

ロケット物流では、宇宙太陽光発電所は重すぎ、高価すぎ、運用も複雑なままです。**StarRoad** 物流では、例外的なミッションではなく、大規模インフラ産業が量産する自然なエネルギー貨物になります。

8.4. 軌道上の配置先：GEO と EML4/5

宇宙太陽光発電所と関連インフラの主な配置先は、静止軌道と地球・月系ラグランジュ点 **EML4/5** である。

静止軌道は、地球上の固定地域へ送電するのに適している。**GEO** の衛星またはエネルギープラットフォームは地表に対してほぼ同じ位置を保つため、マイクロ波ビームの指向、地上レクテナの配置、地域電力網との接続が容易になる。静止軌道の高度は赤道上空約 **35,800 km** である。

EML4 と **EML5** は、大規模居住地、造船所、産業拠点、エネルギークラスターに適している。地球・月系の正三角形の頂点にあり、一直線上の **L1/L2** 点より長期安定性が高い。この性質は大規模産業に重要である。大型発電所、倉庫、造船所、組立てトラス、居住施設を、位置維持に大量の推進剤を使い続けることなく設置できる。

GEO と **EML4/5** を利用すれば、低軌道との競合も減らせる。太陽光発電所などの大型プラットフォームは、光害、衝突危険、希薄大気の抵抗、天文学への干渉を引き起こす巨大アレイを **LEO** に置く必要がない。低軌道は、帰還カプセルの降下、中間作業、点検、特定の低軌道任務を担うサービス域として残る。

8.5. 初期段階：AstroLiner-S の直行飛行

初期段階では、初期型で簡素化され、危険性を抑えたシャトル AstroLiner-S を用いる。原子力または核融合の電源を搭載せず、最終軌道投入、修正、離脱、帰還には化学推進を使う。

初期段階の主目的は、全軌道インフラの成熟を待たずに最初の貨物流をつくることである。そのため AstroLiner-S は大型モジュールを次の場所へ直接運べなければならない。

- 太陽光発電所とエネルギー中継施設を設置する静止軌道。
- EML4/5 のエネルギークラスター。
- 太陽光発電所とデータセンターを配置する高エネルギー軌道。

この段階の貨物は、主として完成品またはほぼ完成した構造物である。

- 自己展開式宇宙太陽光発電所。
- 送電モジュール。
- 大型ラジエーターパネル。
- データセンター計算ブロック。
- トラス構造。
- 組立てロボット。
- 初期サービスステーション。
- 推進剤と作動流体の予備。
- 通信、航法、交通管制モジュール。

LEO に対する EML4/5 と GEO の利点：

- 低軌道衛星による光害の問題がない。
- 規則的な昼夜周期がなく、太陽光発電所がほぼ連続して受光できる。
- 地球と月に対して位置が安定している。

この段階の主要数値：

- 打上げ頻度：月 1～2 回、年 12～24 回。
- 1 飛行当たりのペイロード：10,000 t。
- 年間貨物流：120,000～240,000 t。
- 輸送費：80～120 ドル/kg。
- 目標軌道：EML4/5 および GEO。

この方式なら、収益を得る前に宇宙インフラをすべて整備しなければならないという罫を避けられる。最初の商用ペイロードそのものが、将来のインフラを構成する部品となる。

8.6. 成熟段階：マイクロ波中継網とサービスインフラ

発電所、データセンター、大型プラットフォームが軌道網を常時稼働させるのに十分な数へ達すると、成熟段階が始まる。課題は新規施設の打上げだけでなく、すでに配備された施設の保守へと広がる。

成熟段階の主要要素：

- GEO のマイクロ波中継網。
- 主要エネルギークラスター付近の常設サービス拠点。
- 修理・点検船。
- 貯蔵ステーション。
- 軌道タグ。
- EML4/5 の最初の恒久居住地と交代勤務要員。
- 自動・半自動造船所。
- EML1 輸送ハブ。

マイクロ波中継網により、地球上の地域間でエネルギーをより柔軟に配分し、発電所とレクテナを直接結ぶ幾何学的条件への依存を減らし、孤立した軌道発電所の集合ではなくエネルギーネットワークを構築できる。地上側には、受電レクテナ、変換変電所、蓄電設備、地域電力網への接続設備が必要となる。

常設の保守体制は宇宙太陽光発電所の寿命を延ばす。これは根本的に重要である。保守ができなければ、経済性は個々のモジュールの寿命に縛られる。パネル、送信機、ラジエーター、電子機器、トラスを軌道上で交換できれば、発電所は使い捨て衛星ではなく、維持管理可能なエネルギー施設になる。

8.7. 運用環境による輸送機能の分離

成熟した StarRoad の物流は、万能宇宙船を一隻つくるのではなく、運用環境ごとに輸送機能を分けることで成立する。

AstroLiner は地球から軌道へ、また軌道から地球への輸送を担う。軌道への重量物輸送機であり、帰還用滑空機であり、大型コンテナ輸送機でもあるが、万能の惑星間宇宙船にはならない。

軌道間輸送船は宇宙空間だけで運用される。大気圏へ入らないため、着陸用耐熱シールド、翼、洋上着水設備、着水に耐える強化船体を必要としない。軌道拠点間の移動に最適化できるので、乾燥質量が小さく、寿命も長い。

専用カプセルが惑星へ降下し、人や貨物を地表へ届ける。これを AstroLiner の主船体の一部にすべきではない。少人数や少量の貨物を届けるためだけに数千トンを経由するのは非合理的である。

輸送体系は次のようになる。

環境	主な輸送機	機能
地球→軌道	AstroLiner / AstroLiner-S	貨物・モジュールの超重量級輸送
高軌道とラグランジュ点	軌道間輸送船とタグ	LEO、GEO、EML1/2/4/5 間の輸送
軌道→地表	有人・貨物カプセル	人員と貨物の降下

環境	主な輸送機	機能
軌道拠点	ステーション、倉庫、造船所	保管、組立て、修理、積替え

この分業により各輸送機の乾燥質量が下がり、設計上の妥協が減る。宇宙物流は、コンテナ船、タグ、港、倉庫、造船所、専用船からなる海上輸送に近づく。

8.8. 成熟した物流における AstroLiner の役割

AstroLiner は万能宇宙船ではない。主な役割は、繰り返し運航する超重量級軌道輸送機と再使用可能な帰還輸送機である。

上り便で運ぶもの：

- 貨物コンテナ。
- 有人モジュール。
- 推進剤モジュール。
- 建設部材。
- パネル、トラス、ケーブル、ラジエーター。
- 完成品または分割された軌道間タグ。
- 降下カプセル。
- 軌道ステーション用モジュール。
- 発電所とデータセンターの構成部品。

帰還便は原則として空荷で、積載する場合も限定的である。

- 乗員。
- 試料。
- 高価で修理可能な機器。
- 退役した電子機器。
- 故障または撤去された部品。

帰還時の構成は可能な限り軽くする必要がある。安全な滑空、大気圏再突入、洋上着水には残存質量を最小限に抑える必要があるため、任務を終えた AstroLiner の帰還質量は打上げ時より大幅に小さくしなければならない。数千トンのペイロードを地球へ戻すことは通常任務ではなく、専用カプセルまたは独立した帰還モジュールが担う。

AstroLiner が少量の自己完結したデルタ V 能力を保持する理由は四つある。

1. 未整備のインフラからの独立性。
2. 代替経路を利用する能力。
3. 緊急事態への対応。

4. 初期運用における柔軟性。

ただし成熟したシステムでは、軌道間のデルタ V の大部分を専用タグと輸送船が担う。これにより **AstroLiner** への要求が軽減され、船体寿命が延び、打上げ・荷下ろし・帰還・整備・再打上げのサイクルが短縮される。

8.9. 軌道間輸送船とタグ

軌道間輸送船は **StarRoad** の常設宇宙船隊である。大気圏へ入らず、地球へ帰還することなく、LEO、GEO、EML1、EML2、EML4/5 その他の拠点間を運航する。

主な任務：

- **AstroLiner** の荷下ろし地点から目標軌道へのモジュール輸送。
- 宇宙太陽光発電所、データセンター、大型トラスの曳航。
- 推進剤と作動流体の輸送。
- 有人モジュールの輸送。
- 発電所部品の保守と交換。
- 降下カプセルの運用軌道への輸送。
- 空のタグの **EML1** または **EML4/5** への回送。
- 軌道造船所の支援。

これらの船は、電気、磁気プラズマ力学、原子力電気、太陽電気、またはハイブリッド推進を利用できる。大気圏へ入る必要がないため、大型ラジエーター、軽量トラス、大容量の作動流体タンク、交換可能な推進装置、軌道造船所での整備性など、用途に徹底して特化できる。

成熟した構成では、軌道間輸送こそが **StarRoad** を打上げシステムから宇宙輸送ネットワークへ変える。

8.10. 地球および他の惑星への降下

降下は専用カプセルが担うため、**AstroLiner** をあらゆる任務に使う万能再突入機にする必要はない。

主な種類：

有人カプセル (PC) — 人を運ぶカプセル。安全な再突入、緊急時対応、自律着陸、有人モジュールとの接続を前提に設計される。

貨物カプセル (CCap) — 高価な貨物、試料、機器、生物材料、電子機器、地表へ戻す必要がある部品を運ぶカプセル。

産業用帰還カプセル (IRC) — 将来その市場が成立した場合に、材料を大量に帰還させるための強化型貨物カプセル。

AstroLiner がカプセルを軌道へ運ぶ。軌道間タグ、または初期段階では **AstroLiner** 自身が、カプセルを降下用の運用軌道へ移す。分離後、各カプセルは単独で再突入し着陸する。

月、火星、金星、小惑星では、それぞれの環境に合わせた別個の着陸システムを使う。大気、重力、熱流束、塵の条件、離陸要件があまりに異なるため、単一の万能降下機で太陽系のすべての天体に対応することはできない。

8.11. 標準化モジュール

標準化は **StarRoad** 物流の基盤である。海上コンテナ輸送が世界貿易を変えたように、標準化された軌道モジュールが宇宙経済を変える。

基本モジュールの種類：

有人モジュール（PM） — AstroLiner、軌道間輸送船、軌道ステーション、有人カプセルで共用できる与圧モジュール。生命維持装置、座席または船室、非常用備蓄、ドッキング接続部、標準固定点を備える。

貨物コンテナ（CC） — パネル、トラス、ラジエーター、ケーブル、機器、ロボットシステム、予備部品、消耗品を運ぶ与圧または非与圧コンテナ。

推進剤モジュール（PrM） — タグやステーション向けに、推進剤、作動流体、水、酸素、水素、アルゴン、キセノンその他の消耗媒体を貯蔵するモジュール。

設備モジュール（UM） — 電力、放熱、通信、制御を担うモジュール。太陽電池パネル、蓄電池、ラジエーター、アンテナ、変換器、熱交換器、制御電子機器などを搭載できる。

建設モジュール（CM） — トラス、梁、フレーム部材、組立てロボット、固定装置、テザー、配線路、展開構造物を収めた建設用モジュール。

送電モジュール（PTM） — マイクロ波アンテナ、フェーズドアレイ、電力電子機器、ビーム指向・制御装置を収めた送電用モジュール。

すべてのモジュールで標準化すべき項目：

- 寸法区分。
- 構造接続部。
- ロボット把持点。
- ドッキング接続部。
- 電気・熱接続部。
- デジタル識別情報と整備記録。
- 許容質量と重心位置の範囲。
- 緊急時の固定・分離方式。

これにより、ステーション、宇宙船、発電所、産業複合体を一品物の機体としてではなく、標準ブロックの組合せとして構築できる。

8.12. 軌道インフラの階層

StarRoad の軌道物流は、拠点の階層として構成される。

地球／StarRoad

。製造、組立て、打上げ、AstroLiner の修理、モジュール生産、推進剤の調製、エネルギー供給、貨物流の管制を担う。

L

EO。降下カプセル、点検、緊急対応、一時作業、再突入前のカプセル分離に用いるサービス域。成熟したシステムでは、LEO を主要倉庫にも過密な産業帯にもしない。

GEO

。マイクロ波中継、エネルギープラットフォーム、通信、地球上の固定地域への送電を担う領域。軌道エネルギーと地上電力網の統合に適している。

EM

L1。地球・月系の主要輸送ハブ。ペイロードを最終目的地へ直接送る必要がない場合、AstroLiner はここへ直行してモジュールを荷下ろしできる。倉庫、タグ、交通管制、修理拠点、月面エレベーターの積替えステーションを配置する。

EML1 は高度に自動化すべきである。大規模な常住要員は不要で、人員は放射線防護に優れた月の溶岩洞、EML4/5、または大型ステーションに滞在し、必要なときだけ EML1 へ移動できる。

EM

L2。月の裏側とその周辺に、電波の静穏性を要する観測所、深宇宙望遠鏡、試験ステーション、深宇宙通信設備、科学施設を置く科学・観測領域。

EML4／

EML5。成熟した軌道文明の主要中心地。造船所、居住地、産業ステーション、大型発電所、惑星間宇宙船の組立て、倉庫、修理基地、さらなる拡張を指揮する管制センターを置く。

8.13. 軌道造船所

軌道造船所は主に EML4/5 に建設される。StarRoad を使っても完成状態では打ち上げられない、または打ち上げるべきでない構造物を組み立てるためである。

AstroLiner は材料や構造部材を平積み貨物として運ぶ。

- パネル。
- トラス。
- 構造形材。
- ケーブル。
- ラジエーター。
- 鏡。
- 膜材。
- タンク。
- 耐荷重組立品。

- 。ロボット組立てシステム。

組立てはロボットと遠隔操作機が担う。人は保守、監督、複雑な修理、例外的な判断を担当するが、危険な組立て作業の大部分を手作業で行うべきではない。

造船所で建造するもの：

- 。新しい宇宙太陽光発電所。
- 。大規模ラジエーター群。
- 。軌道間輸送船。
- 。惑星間宇宙船。
- 。居住ステーション。
- 。小惑星資源処理施設。
- 。将来のメガストラクチャーの構成部品。

この段階で **StarRoad** は、地球から物を打ち上げるだけのシステムではなくなる。地球が複雑な部品を供給し、宇宙側が組立て、保守、製造の一部を徐々に担う生産連鎖の下流入口となる。

8.14. 軌道・月面居住地

恒久居住地は、それ自体を目的としてではなく、大規模インフラを保守する必要から生まれる。発電所、造船所、タグ、中継施設、月面生産拠点、産業プラットフォームが増えると、完全な遠隔保守だけでは足りなくなる。

大規模軌道居住地の中心形態は、スタンフォード・トラスやその派生型のような人工重力を持つ回転式ステーションである。主に **EML4/5** など長期開発に適した安定地点に置かれ、軌道産業の居住、保守、医療、修理、管理の中心となる。

月面基地と産業居住地の常勤要員は、月面そのものではなく、**EML4/5** の人工重力ステーションに居住するのが望ましい。これにより月の低重力による長期的な健康影響を抑えながら、月面インフラの近くに人員を配置できる。月面は主に、交代勤務で運営する産業作業地となる。

EML1 は月系の中央積替え・物流ハブとなる。地球、月、**EML4/5**、その他の軌道領域を結ぶ流れのために、倉庫、ドック、タグ、燃料補給モジュール、修理施設、交通管制を集約する。人員を月の近くに置けば、毎回地球から送る場合に比べ、勤務交代、緊急対応、修理、月面生産の管理が容易になる。

月面と **EML1** 領域を結ぶ月面エレベーターは、この構成の主要要素である。レゴリス、酸素、金属、建材、産業モジュールを上へ、機器、消耗品、交代要員を下へ運び、地表からロケットを繰り返し打ち上げることなく、月産業を軌道造船所、居住地、軌道間物流へ恒久的に接続する。

月の重力は小さいため、月面居住地は主として交代勤務で運営される防護型産業基地となる。採掘、精製、エネルギー、建設の各施設、自動設備、酸素生産、レゴリス処理、月面エレベーター部品の組立て、**EML1** 向け貨物の準備を支える。

軌道・月面居住地の放射線防護は複数の層で構成する。

- 水、ポリエチレン、月レゴリス、燃料、技術備蓄を使う受動遮蔽。
- 最も防護された区画を中心部・内部へ配置。
- 荷電粒子束を減らす能動磁気防護。
- 太陽陽子現象に備えた緊急退避室。

水、水素、ポリエチレン、燃料、月レゴリスは、有用な備蓄であると同時に放射線遮蔽質量にもなる。ステーション、月面基地、月面エレベーター、EML1 拠点の運用サイクルへ組み込めば、防護材を単なる死重にする必要はない。

8.15. 物流の比喻：海上輸送網としての宇宙

成熟した StarRoad システムは、打上げ計画よりも海上物流に近い。

この比喻では：

- **AstroLiner** は地球と軌道を結ぶ超重量級コンテナ船。
- **軌道間タグ**は港内作業船と外洋タグ。
- **軌道間輸送船**は長距離航路船。
- **EML1** は中継港兼配送ハブ。
- **GEO** はエネルギーと通信の沖待ち区域。
- **EML4/5** は産業港、造船所、都市。
- **カプセル**は専用の着陸艇。
- **PM、CC、PrM、UM、CM、PTM** はコンテナ兼機能ブロック。

この方式は宇宙飛行の文化そのものを変える。一回限りの特別任務に代わり、運航表、コンテナ循環、修理、保険、規格、倉庫、港湾交通管制、産業貨物取扱量が中心になる。

8.16. 貨物流の経済性

StarRoad は宇宙経済の中心原則を逆転させる。ロケット物流では 1 kg ごとの費用が高いため、質量を削るほうが安い。StarRoad 物流では、標準化し、大量生産し、大ロットで打ち上げるほうが安い。

これにより設計上の選択も変わる。

- 構造物をより頑丈で修理しやすくなる。
- 機器により大きな余裕を持たせられる。
- ステーションを使い捨て衛星ではなく、整備可能な施設として設計できる。
- ラジエーター、遮蔽材、フレームの質量が絶対的制約ではなくなる。
- 寿命の短い小型機を多数使うより、大型プラットフォームのほうが経済的になる。

重要な経済効果は、StarRoad が単なる打上げ市場ではなく、軌道施設の市場をつくることにある。収益源は貨物輸送に限らず、発電所、データセンター、中継施設、タグ、造船所、エネルギーネットワークの製造、所有、運営への参画にも広がる。

想定される事業モデル：

- 外部顧客への打上げ販売。
- エネルギーインフラの長期契約。
- 宇宙太陽光発電所の保有・運営。
- エネルギー企業との合併事業。
- 軌道データセンター容量の賃貸。
- 地上レクテナを通じた電力販売。
- 軌道施設の保守契約。
- 軌道間輸送の物流運賃。
- ステーションの保険、修理、寿命延長。

この方式は単一市場への依存を減らす。外部からの打上げ需要が不足しても、StarRoad はエネルギー計画と軌道産業計画を通じて自ら貨物流を生み出す。

8.17. 市場と物流の発展段階

需要と軌道物流は四つの段階で発展する。

I. 基盤段階（10～20 年）－ エネルギー貨物流。

AstroLiner-S は、完成またはほぼ完成した宇宙太陽光発電所、データセンター、中継器、サービスモジュール、初期のタグを打ち上げる。主目的は、定期打上げを実証し、最初の商用エネルギー施設を設置し、軌道発電市場を創出することにある。

II. 成熟段階（20～50 年）－ 軌道サービス網。

GEO 中継器、EML1 ハブ、サービスステーション、修理機、タグ、EML4/5 の最初の恒久居住地と造船所が整備される。AstroLiner は、各目的地への直行便から、ネットワーク拠点で荷下ろしする重量輸送システムへ徐々に役割を移す。

III. 産業段階（50～100 年）－

地球外生産。惑星間宇宙船、小惑星処理施設、大型軌道居住施設の本格建設が始まる。地球外材料の使用が増え、地球から大量の原料を送る依存度が下がる。

IV. 発展・将来段階（100 年以上）－ 太陽系インフラ。E

ML4/5 は太陽系全域への拡大、メガストラクチャ、太陽光スウォーム、オニール円筒、深宇宙望遠鏡、恒星間ミッションの出発点となる。

この順序は重要である。StarRoad は当初から完成した宇宙文明を必要としない。エネルギーと計算という明確な需要源から始まり、その後、完全な宇宙経済へ拡大する。

8.18. 発展の展望：StarRoad の後継システム

StarRoad が惑星輸送インフラの最終形である必要はない。ロケット時代から、成熟した宇宙工学メガストラクチャーの時代へ移るための、過渡的だが不可欠な段階と位置づけられる。

よく知られた仮想システムである宇宙エレベーター、ローンチ・ループ、StarTram、軌道リング、宇宙塔のうち、最終的に StarRoad の輸送能力を上回り得るのは高度な軌道リングだけである。しかし、その建設には、確立された強力な軌道産業、莫大な資材、造船所、エネルギー、ロボット組立て、メガストラクチャー運用の経験が必要となる。

StarRoad の後継候補は、連結された二つのリングからなるシステムである。

- 。地球を一周し、最下点で地表に接する輸送リング。
- 。GEO 高度の静止軌道港リング兼宇宙ドック。
- 。輸送リングの密閉シャフト内を走る複数の移動ケーブルローター。
- 。軌道の最高点で輸送リングと静止軌道港リングを接続する区間。

ローンチ・ループと同様に、輸送リングでは密閉流路内をローターが高速移動するが、より安全にできる可能性がある。ループと異なり、移動ケーブルローターは急旋回せず、半径方向荷重がはるかに小さい。非常時に破断しても構造全体を破壊せず、惑星から離れる方向へ移動するよう設計できる。輸送リングは地表から静止軌道港リングまで伸びる、動的に支持された環状宇宙塔となる。

このシステムは最初の StarRoad に代わるものではなく、将来の後継候補である。StarRoad または同等の幹線システムがなければ、軌道リングに必要な資材、設備、造船所、エネルギー能力を十分安価に軌道へ運べない。

8.19. 惑星工学の可能性：一つの資源系としての太陽系

StarRoad は将来、大規模な宇宙工学やテラフォーミングなど、現在は想像しにくい可能性を開くかもしれない。これは、地球からの安価な大量輸送、宇宙太陽光発電、EML4/5 の軌道造船所、小惑星採掘、惑星間輸送船、タンカー船団、深宇宙任務向け自律電源といった成熟した太陽系インフラが整った後にのみ成立する、文明後期のシナリオである。

要点は、金星と火星を二つの独立した計画ではなく、一つの資源系として扱うことにある。火星には窒素、水素、濃い大気、磁気防護が不足している。金星は膨大な CO₂ と窒素を蓄え、質量と重力は地球に近いが、それらは約 460°C、約 92 気圧の CO₂ 大気、硫酸雲、磁場の欠如、極端に遅い逆行自転という過酷な環境に閉じ込められている。

8.19.1. 準備段階：太陽系インフラ

惑星のテラフォーミングを始める前に、次のものが必要となる。

- 。地球から物質を低コストで運び上げる StarRoad。
- 。エネルギー源となる宇宙太陽光発電所と太陽光スウォーム。
- 。EML4/5 の軌道造船所。
- 。金属、水、揮発性物質を得る高度な小惑星採掘。

- 数十から数百の高度で自給的な宇宙居住地と、それを支えるエネルギー拠点。
- 水素、水、窒素、CO₂を運ぶタンカー船団。
- 長距離航行用の原子力電気または核融合輸送システム。

この種の計画を開始できるのは、StarRoad の運用開始から少なくとも 100 年以上後が妥当である。ただし宇宙インフラが指数関数的に成長すれば、前倒しされる可能性がある。

8.19.2. 金星：テラフォーミングの段階

大規模で長期的な居住には、火星より金星のほうが適する可能性がある。重力は約 0.9g、質量は地球に近く、太陽エネルギーも豊富である。中心的な問題は、初期障壁が極端に高いことだ。

1. 冷却と CO₂の析出。

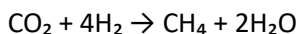
金星・太陽 L1 点に巨大な日よけを置き、流入エネルギーを減らす。徹底した冷却により CO₂の相当部分が液体または固体となって地表へ沈着する。圧力は急低下し、惑星は地獄のような環境から、工学作業と建設が可能な環境へ変わる。

2. 準同期リングと軌道港。冷却後

、将来の 24 時間同期軌道に相当する地表上空約 33,400 km に、動的支持リングを建設する。周長は約 248,000 km、現地重力は約 0.021g、自由円軌道速度は約 2.87 km/s である。金星の自転がまだ遅い間は能動ローターでリングを支え、軌道港、エネルギー拠点、タンカー受入地点として使う。

3. 大気処理と水素の輸入。

沈着した CO₂を処理施設へ持ち上げる。水素は外太陽系、氷天体、小惑星資源から運ぶ。CO₂を固定する基本反応は次のとおりである。



水は海洋と酸素に、メタンは燃料と化学原料に使う。炭素は材料と長期貯蔵物に固定し、硫黄化合物は鉱物形態へ変換する。余剰の窒素と一部の CO₂は火星へ輸送できる。

4. 居住可能な金星

。海洋、窒素・酸素大気、制御された気候、磁気または磁気圏防護、初期生物圏が形成されれば、主要なテラフォーミングは完了したとみなせる。自転周期が約 120 時間の中間段階でも金星は居住可能になり得る。約 60 時間続く夜は、海洋、雲、1.3～1.6 bar の大気、熱輸送、鏡と日よけのシステムによって緩和される。

5. 軌道からの自転補正と 24 時間周期。

金星を 24 時間周期にすることは居住可能性の前提ではなく、長期にわたる工学的仕上げである。現在の逆行自転から順行 24 時間周期へ移すには、約 $4.3 \times 10^{33} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ の角運動量増加が必要となる。作動流体の噴出速度が約 100 km/s なら、必要な作動流体は約 $1.1 \times 10^{21} \text{ kg}$ 。理想噴流エネルギー約 $5 \times 10^{30} \text{ J}$ の場合、300 EW なら約 500～600 年を要する。工学的損失を考慮してエネルギーを $10^{31} \sim 3 \times 10^{31} \text{ J}$ とすれば、300 EW で約 1,000～3,000 年、100～200 EW では数千年に延びる。惑星と準同期リングの双方で対向する二地点へ対称に接続した二本の輸送リングが、リングから地表へ自転角運動量を伝える。地球や火星の構成で使う一本ではなく二本とすることで、運動量伝達中の動的安定性も高まる。24 時間周期に達すると、リングは完全な金星同期ドックとなる。

8.19.3. 火星：テラフォーミングの段階

火星は初期基地を設けやすい一方、惑星全体の環境へ変えるのは難しい。重力は約 **0.38g**、大気は薄く、窒素が少なく、利用しやすい揮発性物質が乏しく、磁気防護も弱い。そのため火星には現地工学だけでなく、金星、小惑星、外太陽系からの物質輸入が必要となる。

1. 人工磁気圏。

長期的なテラフォーミングの第一条件は磁気防護である。地球の同期リングと輸送リングに似た軌道リング、エネルギー・反射鏡プラットフォーム、同期リングへ統合した磁気システムを用いる。これがなければ、新しい大気は太陽風による漸減にさらされ続ける。金星の準同期リングと同様、火星の同期リングは輸送、軌道、エネルギー、磁気圏の機能を統合する。内蔵した太陽電池パネルと蓄電設備が、人工磁場を維持する磁気圏回路、電力電子機器、制御インフラへ電力を供給する。

2. 大気と水の輸入

。窒素と CO_2 の一部を金星から、水を小惑星、氷天体、外太陽系から運ぶ。火星は単独でテラフォーミングされるのではなく、共有資源ネットワークが不足する揮発性物質を供給する。金星大気を輸入すれば、火星固有の資源だけで大気をつくり暖めるより早く、穏やかで安定した気候を得られる。

3. 大気の増強と気候の温暖化。

磁気防護が整った後、 CO_2 、窒素、水蒸気、追加の温室効果物質によって大気を徐々に厚くする。濃い大気は火星の低温を部分的に補い、熱輸送と気圧を高め、液体の水が存在できる地域を広げる。

4. 水、土壌、生物圏

。貯水域をつくり、レゴリスを処理し、土壌毒性を下げ、微生物と植物の生態系を導入する。開発は、保護された局地生物圏、地域気候帯、そして最終的な全球環境の安定化という段階を踏む。

5. 惑星規模で利用可能な環境

。窒素、 CO_2 、水を十分輸入できれば、火星は制御された濃い大気、人工磁気防護、水資源、生物活動域、大規模産業インフラを備え得る。重力が **0.38g** であるため、地球に似た大規模・長期居住にはおそらく金星ほど適さないが、低重力には、安価な離着陸、容易な軌道物流、巨大構造物の建設、低重力製造、内太陽系と小惑星帯を結ぶ産業・科学・中継拠点という利点がある。

8.19.4. 統合シナリオの利点

金星・火星・外太陽系を統合したシナリオは、個別に進めるどちらの方式よりも強力である。火星だけのテラフォーミングは窒素、水、エネルギー、磁気防護の不足に制約される。金星だけでは、余剰物質の利用先がないまま膨大な CO_2 大気を処理しなければならない。共有モデルなら、一方の惑星の問題が他方の資源になる。金星の窒素と CO_2 は火星を支え、外太陽系の水素と水は金星を支え、小惑星産業が金属と建設用物質を供給する。

この構図で **StarRoad** はテラフォーミングの直接手段ではなく、因果連鎖の最初の一環である。**StarRoad** が安価な大量輸送を、宇宙太陽光発電所がエネルギーを、**EML4/5** が造船所を可能にする。小惑星採掘が原料を供給し、タンカー船団が惑星間で物質を交換し、その後に初めて惑星工学が実現可能になる。

8.20. 戦略的結論

StarRoad と **AstroLiner** がつくるのは打上げ計画ではなく、恒久的な宇宙経済である。

初期市場は宇宙太陽光発電、軌道データセンター、エネルギーインフラである。成熟市場は保守、修理、電力中継、軌道間物流、造船所、居住地へ広がる。産業段階では小惑星・惑星間経済が生まれ、発展段階ではメガストラクチャー、遠距離任務、文明の長期的拡大への道が開く。

本節の中心的な考えは、StarRoad が従来の宇宙飛行モデルの中で市場を探すのではないという点にある。大量貨物流、軌道エネルギー、計算インフラ、宇宙産業が一つの物流システムを成す新市場を、StarRoad 自身がつくる。

9. 計画の経済モデル

9.1. 算定方法と主要前提

経済モデルは次の原則に基づきます。

- **量産と内製化：規模の効果により**、トンネル掘削機、発電設備、蓄電設備のコストを 30～50％削減します。
- **現地化：アフリカの資源・労働力・資材を活用し**、Spon's African Construction Cost Handbook で補正します。
- **現行の市場価格：BESS と地熱発電所については 2025～2026 年のデータを使用します。**
- **参考為替：1 USD ≈ 100 RUB / 0.90 EUR**。全計算はインフレを除いた 2025 年固定米ドルです。±30％の不確実性は予備的実現可能性調査の標準的な範囲です。

9.2. アフリカ条件下の掘削費

Spon's African Construction Cost Handbook はアフリカ 13 か国の労務費と資材費を詳しく示しています。条件差が大きいため超大断面トンネルの直接単価はありませんが、推計値の補正に利用できます。

工種	規模	1 km 当たり平均費用	総費用（十億 USD）	算定根拠
本線トンネル（17.5 × 12.5 m）	2,050 km	1,200 万～1,800 万米ドル	\$24.6–36.9	世界の大断面施工データをアフリカ条件に補正して外挿。
集水トンネル（6 × 2,050 km、ø2 m）	12,300 km	300 万～500 万米ドル	\$36.9–61.5	アフリカの実鉱山工事にに基づく小断面の実績値：3,500 米ドル/m。
保守トンネル（ø3 m）	2,050 km	400 万～600 万米ドル	\$8.2–12.3	集水トンネルを基準に、断面拡大分を補正。
傾斜トンネル（40 × 16 km、17.5 × 12.5 m）	640 km	1,200 万～2,200 万米ドル	\$7.7–14.1	本線トンネルを基準に、30°勾配分を加算。
総掘削延長	17,040 km		\$77.4–124.8	

9.3. 内製トンネル掘削機の機団

本線用 40 台、集水用 240 台、保守用 40 台を量産し、ガボンとコンゴ民主共和国に組立ラインを置くことで、コストを 30～50％削減します。

シールド種別	直径	台数	量産・内製時の単価	合計（十億 USD）
本線用トンネル掘削機（SR-Main）	約 18 m	40 台	3,500 万～6,000 万米ドル	\$1.4–2.4

シールド種別	直径	台数	量産・内製時の単価	合計（十億 USD）
集水用トンネル掘削機（SR-Collector）	2 m	240 台	80 万～150 万米ドル	\$0.19～0.36
保守用トンネル掘削機（SR-Service）	3 m	40 台	120 万～200 万米ドル	\$0.05～0.08
組立工場（2 か所）	—	—	10 億～20 億米ドル	\$1～2
掘削機合計				\$2.64～4.84

9.4. 自律型地熱熱エネルギーシステム

ケニアで実際に建設された 35 MW のメネンガイ地熱発電所は、掘削と蒸気井を含め約 3,500 万～4,000 万米ドル、すなわち 1,000～1,250 米ドル/kW でした。40 基を量産し現地生産すれば、単価は 800～1,200 米ドル/kW と見積もれます。

- 2.5 GW 発電所 1 基：20～30 億ドル。
- 40 基：800～1,200 億ドル。

この推計は、イトゥルップのデータによるロシア地熱発電の下限約 650 ドル/kW と、複雑な案件の上限 1,500 ドル/kW に裏付けられる。

計算は自律地熱システム総出力 100 GW の上限推計に基づく。実出力は地質調査後にしか分からず、数 GW まで大幅に下がる可能性がある。その場合、余剰資金を代替電源の建設へ回す。

9.5. エネルギー貯蔵システム

蓄電設備は 3 段階で構成されます。

9.5.1. 一次系：ターミナルの長時間蓄電

40 か所のターミナルに設置し、1 回の打ち上げに必要な 360 GWh を余裕をもって蓄えます。現行価格で有力な方式は次のとおりです。

蓄電方式	単価	根拠
重力蓄電	50～100 米ドル /kWh	Energy Vault の実績：25 MW/100 MWh が 770 万米ドル、すなわち 77 米ドル/kWh。効率 75～85％、寿命 30～40 年。
水熱幹線運河を利用した揚水発電と小水力発電	80～150 米ドル /kWh	沿線の自然な高低差を利用します。
リチウムイオン BESS	設備一式で 125 米ドル/kWh	Ember（2025 年）によれば、中国製機器 75 米ドル/kWh に設置費 50 米ドル/kWh を加えます。215 GWh 規模では 100 米ドル/kWh まで低下する可能性があります。

一次系の総容量は、加速 1 サイクル分の 360 GWh です。重力・揚水蓄電 70％、BESS 30％の場合の費用は次のとおりです。

構成	容量	単価	費用
重力蓄電＋揚水発電	250 GWh	60 米ドル/kWh	150 億米ドル
BESS	110 GWh	125 米ドル/kWh	137.5 億米ドル
一次系合計	360 GWh		287.5 億米ドル

不確実性を含む範囲：220 億～350 億米ドル。

9.5.2. 二次系：コイル付近とトンネル内のバッファ

コイル付近のフライホイールが過渡変動を平滑化します。単価は 50 万～100 万米ドル/MWh、1～5 GWh のバッファは 5 億～50 億米ドルです。

9.5.3. パルス系：マイクロ秒単位の安定化

スーパーキャパシタは数マイクロ秒のパルスだけを補償し、急激な負荷変動時の電圧を安定させます。総容量は打ち上げエネルギーの 1%未満、1～3 GWh です。300～500 米ドル/kWh なら 3 億～15 億米ドルです。

9.5.4. 蓄電設備の総費用

段階	方式	容量	費用（十億 USD）
一次	重力＋揚水＋BESS	360 GWh	\$22–35
バッファ	フライホイール	1～5 GWh	\$0.5–5
パルス	スーパーキャパシタ	1～3 GWh	\$0.3–1.5
蓄電合計			\$22.8–41.5

9.6. 産業拠点と物流

費目	費用（十億 USD）	算定根拠
ガボン産業拠点：シャトルと打ち上げ用モジュールの製造	\$3–6	造船ドック、工場、クレーン
コンゴ民主共和国産業拠点：高高度大気圏ポータルと高速モジュール	\$2–4	山岳産業拠点と電解システム
ガボンとタンガニーカ湖の港湾整備	\$1–3	埠頭、クレーン、倉庫
2,050 km 沿線の送電線と道路	\$4–8	220 kV 送電線、道路、橋梁
水熱幹線運河	\$2–5	土工、ライニング、閘門
合計	\$12–26	

9.7. 研究開発・試作 — フェーズ 0

費目	範囲（十億 USD）	算定根拠
数理モデリングと CFD	\$0.01–0.03	参考：ハイパーloop用デジタルツイン開発、450 万 CHF。
2,050 km ルートの地質調査	\$0.015–0.025	アクセス困難地域の詳細調査は 7,000～12,000 米ドル/km。
BIM 設計・文書化	\$0.02–0.05	要求仕様、基本設計、実施設計。
ポータルと超電導体の試験施設	\$0.01–0.03	試作ポータルチャンバーと浮上モジュールの試験台。
コンソーシアム設立と法的合意	\$0.005–0.015	国際交渉、登記、保険。
フェーズ 0 合計	\$0.06–0.15	

研究開発費 600 万～1,500 万米ドルは固定値ではありません。詳細調査、実物大ポータル試作機、大型試験台により 5 億～30 億米ドルまで増える可能性があります。そのため CAPEX 集計では 1 億～30 億米ドル、中央値 15 億米ドルを採用します。

9.8. CAPEX 最終集計

費目	範囲（十億 USD）	中央値（十億 USD）	CAPEX 比率（％）
トンネル掘削	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
掘削機の機団と製造	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%
自律型地熱システム：2.5 GW 級 40 基	\$80–120	\$100	40%
3 段階蓄電	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
産業拠点と物流	\$12–26	\$19	8%
研究開発、許認可、管理	\$0,1–3	\$1.5	0.6%
予備費（15％）	\$31–49	\$40	16%
CAPEX 合計	\$225–365	\$295	100%

要点：StarRoad の推定費用中央値は約 3,000 億米ドルです。

9.9. フェーズ別配分（十億 USD）

費目	フェーズ 0	フェーズ 1	フェーズ 2	フェーズ 3	フェーズ 4	フェーズ 5
トンネル掘削	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
トンネル掘削機	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
自律型地熱熱エネルギーシステム	—	\$60	\$20	\$20	—	—
蓄電設備	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1
産業拠点 + 物流	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
研究開発・許認可	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
予備費（15％）	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
フェーズ合計	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
累計	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. 投資回収と輸送原価の推移

本項の数値はすべて純粋な理論値です。

9.10.1. 打ち上げ頻度と 1 kg 当たり費用の推移

StarRoad は直ちにフル稼働するわけではありません。新路線の稼働、シャトル機団の拡大、軌道インフラの展開に伴って、打ち上げ頻度と輸送原価が変化します。

静止軌道以上への輸送費モデル（米ドル/kg）：

期間	路線	年間打ち上げ回数	頻度	輸送費（\$ /kg）	説明
1～2 年目、実証段階	1	12–24	月 1～2 回	\$80–120	初の商業打ち上げ。運用習熟中で、間接費が高く、生産数も少ない段階。
3～5 年目	1	50–100	週 1～2 回	\$30–50	量産運用を開始。機団を 3～5 機へ増やし、規模の効果で費用を削減します。
6～10 年目	1	200–300	約 1 回/日	\$10–20	第 1 路線が設計能力に達し、整備が完全自動化されます。
11～15 年目	2	500–700	約 2 回/日	\$3–8	第 2 路線を稼働し、固定費を 2 基の加速器で分担します。

期間	路線	年間打ち上げ回数	頻度	輸送費（\$/kg）	説明
16～25 年目	3-4	1000+	3～5 回/日	\$0.8-3	並列 3～4 路線へ拡張。1 GW 超の宇宙太陽光発電所が、操船と貨物処理のための軌道上電力を供給します。
26 年目以降	5+	1500+	5～10 回/日	\$0.3-1	成熟したインフラ。宇宙発電所が加速器と軌道工場を給電し、エネルギーの限界費用はほぼゼロになります。

9.10.2. 1 回の打ち上げ原価（\$/kg）

各期間の式：Ckg = （C エネルギー + C 整備 + C 償却 + C 運用） / M 貨物。ここで、

- C エネルギーは冷却・補助系を含む電力費です。
- C 整備はシャトルとインフラの保守費です。
- C 償却は 3,000 億米ドルの CAPEX を 50 年で償却する費用です。
- C 運用は人員、物流、保険などの運用費です。
- M 貨物は 1 回当たりの積載量 1 万トンです。

期間別の最終値：

期間	打ち上げ回数/年	エネルギー（\$/kg）	整備（\$/kg）	償却（\$/kg）	運用（\$/kg）	総原価（\$/kg）
1～2 年目	12	1.8	6.63	50	3.57	62
3～5 年目	50	1	1.25	12	0.67	14.92
6～10 年目	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
11～15 年目、2 路線	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
16～25 年目、3～4 路線	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
26 年目以降、5 路線以上 + 宇宙太陽光発電	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. 打ち上げ費用の絶対額構成

各期間の平均的な 1 年、積載量 1 万トンの場合：

期間	打ち上げ回数	1 回当たりエネルギー（百万 USD）	整備（百万 USD）	償却（百万 USD）	運用費（百万 USD）	1 回当たり合計（百万 USD）
1～2 年目	12	18	66.3	500	35.7	620
3～5 年目	50	10	12.5	120	6.7	149.2
6～10 年目	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
11～15 年目	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
16～25 年目	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
26 年目以降	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. 計算の主要前提

1. エネルギー：当初は 0.05 米ドル/kWh。26 年目以降は宇宙太陽光発電と自社地熱電源により 0.005 米ドル/kWh へ低下します。

2. **整備：実証期**は修理、調整、過剰人員により高額です。10 年目までに自動化された流れ作業へ移行します。
3. **償却**：3,000 億米ドルを 50 年で償却すると年 60 億米ドルです。年間 250 回なら 1 回 2,400 万米ドル。これは他収入を相殺しない保守的な推計です。別案として、毎年回収する 60 億米ドルを StarRoad 新路線への拡大投資とみなせます。
4. **宇宙太陽光発電所**：16 年目以降、軌道工場と加速器の一部へ給電し、エネルギー費を下げ、売電収入を桁違いに増やします。

9.10.5. 統合収支の推移

期間	打ち上げ回数/年	平均市場価格（\$/kg）	打ち上げ収入（十億 USD/年）	原価（十億 USD/年）	粗利益（十億 USD/年）
1～2 年目	12	\$100	12	7.44	4.56
3～5 年目	50	\$39	19.5	7.45	12.04
6～10 年目	250	\$9.6	24	7.8	16.2
11～15 年目	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
16～25 年目	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76
26 年目以降	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

注：地熱エネルギー販売による年 350 億～440 億米ドルは表に含みません。インフラの償却費と運用費を賄う別の収入源です。

9.10.6. 費用推移の結論

StarRoad は静止軌道以上へ 80～120 米ドル/kg から始まります。低軌道へ 1,400 米ドル/kg の Falcon Heavy よりすでに 10～15 倍安く、Starship の目標 200 米ドル/kg に匹敵します。10 年目に 10、25 年目に 1、30 年目ごろには 5 路線以上と宇宙太陽光発電により 0.5 米ドル/kg 未満になります。太陽エネルギーや小惑星金属が地上産業にとって経済的に利用可能になります。

要点：StarRoad は実証期でも競争力があります。規模拡大と宇宙太陽光発電との相乗効果により、30 年間で価格を 2 桁分引き下げます。

9.11. 他方式との比較

プロジェクト	種類	投資（CAPEX / 研究開発）	回収期間	原価 / LCOE	備考
StarRoad エネルギー部門：地熱システム+蓄電	エネルギー	1,000 億～1,500 億米ドル	売電により 5～7 年	0.05 米ドル/kWh	地熱発電と蓄電のみ。独立した発電事業として投資を回収します。
StarRoad 輸送部門：トンネル、ポータル、シャトル	輸送	1,500 億～2,000 億米ドル	貨物収入を含め 8～12 年	1～10 米ドル/kg	加速器、ポータル、シャトル。貨物輸送で回収し、エネルギー部門の電力を利用します。
StarRoad 全システム	エネルギー+輸送	約 3,000 億米ドル	合算収入で 8～12 年	0.05 米ドル/kWh、1～10 米ドル/kg	エネルギーと貨物の双方から収入を得る統合事業。

プロジェクト	種類	投資（CAPEX / 研究開発）	回収期間	原価 / LCOE	備考
Falcon Heavy、開発	輸送	研究開発約 50 億米ドル	商業頻度なら約 10～15 年	約 1,400 米ドル/kg	既存のロケット。ここでの CAPEX はインフラでなく開発費です。
Starship、開発	輸送	研究開発約 100 億米ドル	目標市場が成立すれば約 10～15 年	目標 200 米ドル/kg、将来 50～100 米ドル/kg	開発中。投資先は恒久インフラでなく研究開発です。
グランド・インガ水力発電所（コンゴ民主共和国）	エネルギー	800 億～1,000 億米ドル	15～25 年	0.03～0.05 米ドル/kWh	大規模水力発電所。エネルギーのみ。
大型原子力発電所、2 基・約 2.4 GW	エネルギー	150 億～200 億米ドル	20～30 年	0.05～0.08 米ドル/kWh	一般的な原子力発電所。エネルギーのみ。

9.12. 経済性の結論

このモデルは、中央値約 3,000 億米ドルの CAPEX で StarRoad が実現可能であることを示します。主な要因は次のとおりです。

1. 800 億～1,200 億米ドルの地熱システムが最も高価ですが、独立したエネルギー事業として 5～7 年で回収できます。
2. 770 億～1,250 億米ドルのトンネル掘削は、量産掘削機と内製化により技術的に実行可能です。
3. 230 億～420 億米ドルの蓄電は、125 米ドル/kWh へ下落した BESS 価格と世界の優良事例に基づく重力方式を前提とします。
4. 1 億～30 億米ドルの研究開発費は、実規模建設ではなく現実的な試作費です。

経済的魅力：0.05 米ドル/kWh なら、StarRoad はエネルギー販売だけで年 350 億～440 億米ドルを生みます。大規模な宇宙打ち上げの開始前から、運用費を賄い、エネルギー輸出で資本回収を進められます。

10. 安全性と緊急運用モード

StarRoad は、単一の構成要素、しばしば複数の構成要素が故障しても破局に至らない、極めて高い耐故障運用思想に基づいて設計される。安全性は、物理的冗長性、機能分離、準備から飛行まで全サイクルを覆う多層プロトコルによって確保する。

10.1. 安全思想：単一故障を致命的な事態にしない

- 重要システムの冗長化。シャトル搭載原子炉、加速器区間の電源、高高度大気圏ポータルのジェットリングなど、主要要素には三重または四重の独立した予備系を設けます。
- 区間分割と隔離。トンネルを 50～200 km の自律区間に分け、区間ごとに独立した電源と真空設備を持たせ、区間境界には機械式の緊急隔壁扉を設置します。隣接区間で真空が失われた場合、シャトルが存在しないときに限って隔壁を閉じるため、連鎖的な障害を防げます。
- 能動・受動の磁気浮上制御。姿勢安定と不均衡補償の主系統はシャトルに搭載します。大型の超伝導ループと搭載電源がマイクロ秒単位でエネルギーを再配分し、地上設備の局所的な故障を打ち消します。極超音速の曲線区間では、シャトルの楕円形断面と遠心力も案内面に対する安定性を高めます。
- シャトルと乗員を最優先。打ち上げ中に緊急事態が起きた場合、トンネル設備の一部が損傷しても、プロトコルはシャトルの救命を優先します。

10.2. 主要なリスクと保護策

リスク	原因	保護策とプロトコル
極超音速時の浮上喪失または磁場の非対称	電力区間の故障または巻線の損傷。	1. ナノ秒応答の搭載安定化装置。2. 誘導制動：極超音速でシャトルがトンネルの受動巻線に電流を誘起し、安定化作用を生みます。3. 区間分割により衝突と損傷を一つの区間内に限定します。
ポータルのガスダイナミック障壁の故障	一つまたは複数のジェットリングの故障。	1. 各リングを耐爆構造で囲んだ三重冗長システム。2. 打ち上げ 60 秒前の試験では主シャッターを開けずにガスコーンを形成し、不良リングを隔離します。3. いずれかの異常があれば Alarm-1 が打ち上げを中止します。
トンネル真空の喪失	事故または損傷による圧力上昇。	1. トンネル全線の圧力センサーネットワーク。2. 障害を封じ込める区間間の緊急隔壁扉。3. シャトル前方で圧力上昇を検出した場合の自動緊急停止プロトコル（Alarm-1 または Alarm-2）。
停止不能になった後で故障を検出	加速ルートの後半 60～100% で重大な異常を検出。	Alarm-3：最大 8g の最大制動で速度を落とします。ポータルを失う場合でも、シャトルを弾道飛行軌道へ乗せることを優先します。その後、安全に海上着水できるよう機体を軽くするため、ペイロードを分離します。

10.3. 緊急時プロトコルの階層

- Alarm-1、打ち上げ前の緊急事態。シャトル始動前に真空喪失、磁場異常、ポータルのいずれかのリングの故障、またはガスコーン形成の異常を検出した場合に作動します。対応：打ち上げを直ちに中止し、故障したトンネル区間を隔壁扉で隔離して、診断・修理します。
- Alarm-2、ルート前半または中盤の緊急事態、0～60%。出発後、進行方向に異常を検出した場合に作動します。対応：緊急制動を行いトンネル内で停止します。故障箇所が前方ならシャトルは自力で始点へ戻ります。それ以外の場合、停止後に現在の区間を隔壁扉で隔離し、区間内に空気を入れ、乗員と乗客を保守トンネルおよび地上へ通じる立坑から避難させます。
- Alarm-3、ルート終盤の緊急事態、60～100%。トンネル内で停止できず、ポータルまたは終端区間の故障が見込まれる場合に作動します。対応：
 - 1) 速度を落とすため、最大 8g の最大緊急制動を行う。
 - 2) シャトルの構造健全性を最優先し、ポータルは開いたままにする。
 - 3) 緊急の弾道飛行軌道へ入り、機体を軽くするため最高点で貨物を分離する。
 - 4) すべての主系統と予備系統を使い、インド洋または太平洋の指定海域に着水する。シャトル構造は過大荷重とポータルの部分破壊に耐えられるよう設計します。

10.4. 生存性を確保する構造対策

- シャトル。将来の長胴型では独立した搭載原子炉を二基装備。分散型超伝導浮上システムと、極端な荷重および熱衝撃に耐える強化船体を採用します。

- **高高度大気圏ポータル**。耐爆ハウジング内に独立した環状ジェットエンジンを三基設置します。機械式シャッターはガス障壁が部分的に崩れた際の衝撃波に耐えます。ポータル内壁の漏斗状開口部が圧力を瞬時に逃がし、ガスを受動的に予備真空室へ排出します。これによりトンネルとポータルへの大気流入を最小化し、ポータルシステムが全面故障しても損傷を限定し、極超音速シャトルの圧力パルスによる構造破壊を防ぎます。
- **トンネル**。区間分割、緊急隔壁扉、二重化電源、緊急避難と修理に使う技術保守トンネルを備えます。

10.5. 音響・衝撃波の影響

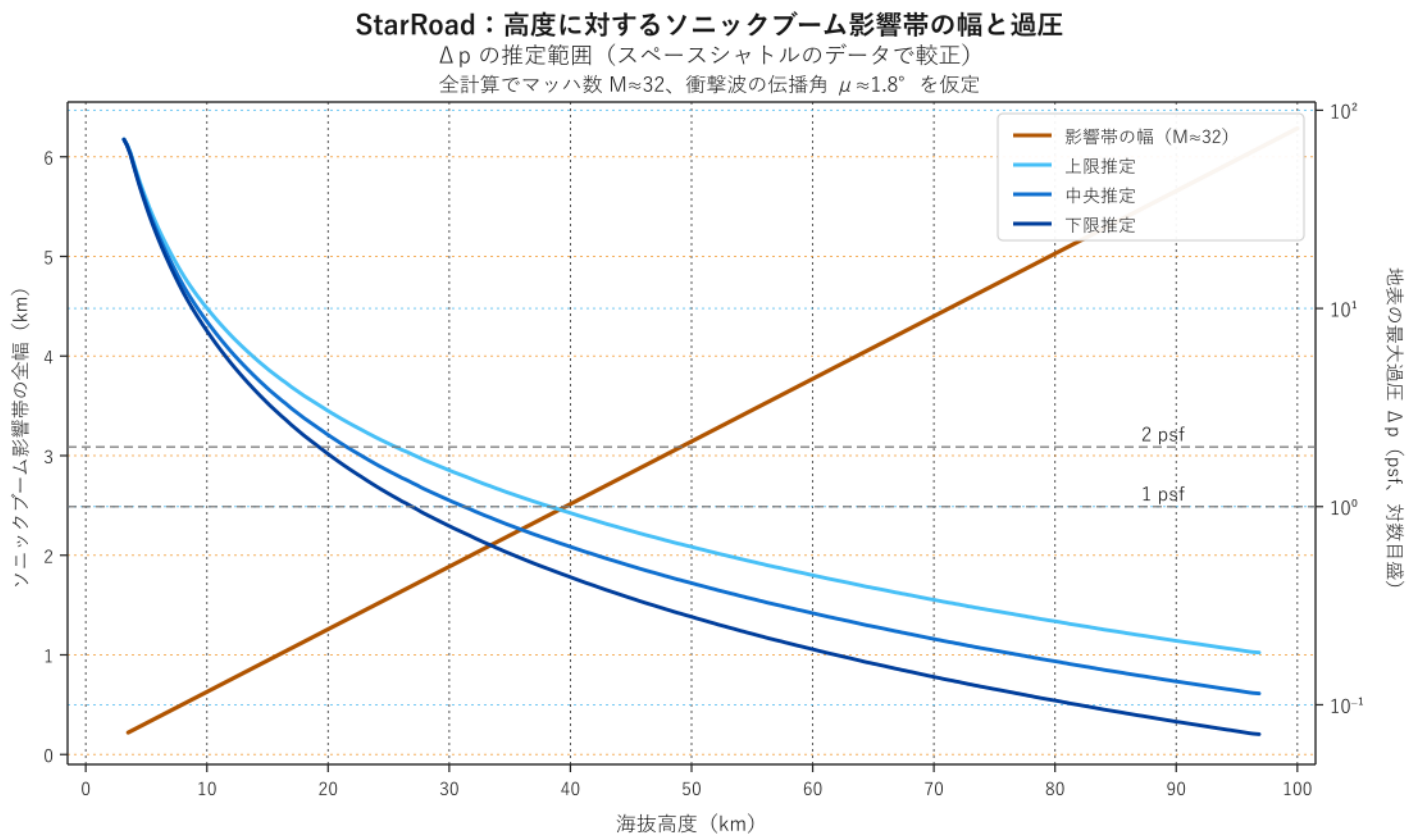
極超音速で出るシャトルは、強力な N 波形のソニックブームを発生させます。波動エネルギーの大部分は飛行経路沿いの狭い帯域を進むため、ポータル付近の地上インフラへの影響は低減されます。それでも周囲には立入禁止の衛生保護区域を設け、モデル解析で半径を定め、実規模試験で確認します。

地表で許容する影響は、ピーク過圧 Δp の二つのしきい値で定めます。

$\Delta p \leq 2 \text{ psf}$ (約 96 Pa) : 建物や窓ガラスが損傷する可能性は低いとみなします。

$\Delta p \leq 1 \text{ psf}$ (約 48 Pa) : 居住地域の目標値。苦情の可能性を最小化し、損傷を生じさせない水準です。

経路設計と運用制限—立入禁止回廊、気象条件を満たす時間帯、高度制限—は、これらのしきい値を確実に守れる余裕を持って設定します。



結論 : StarRoad の安全性は「故障は起こらない」という信念に依存しません。あらゆる故障形態を起こり得るものとして扱い、あらかじめ自動対応を定めます。これにより、構想上の経路を、意図して設計された信頼性の高い、何より信頼される工学システムへ変えます。

11. 文化的・心理的影響

StarRoad は技術的・経済的効果を超えて、文化と人類の集合意識にも深い影響を及ぼす。すべての打上げは単なる技術作業ではなく、巨大な公共的、**ほとんど儀式的な出来事へ変わる。**

11.1. 現象としての光景

シャトルの極超音速離脱は、人が生み出す独自の天文現象「太陽の矢」をつくる。安全区域から見ると、地平線で一瞬の閃光が生じ、続いて眩しいプラズマの軌跡が空へ一直線に急上昇する。数十秒後、聞き慣れたエンジンの轟音ではなく、破壊的な二重のソニックブームが到達する。それは単なる機械ではなく、飛ぶ都市全体が音と熱の障壁を越えたことを身体で感じさせる。夜間打上げは移動する彗星のように景観を照らし、人為的で異質なオーロラのように見える。

11.2. 心理的・象徴的な共鳴

- 。 **実感できる規模。** 抽象的な宇宙計画が数百 km 先からも見える日常的または毎週の光景となり、宇宙進出は図表の中の話から、生活の中で**実感できる事実へ変わる。**
- 。 **新たな原型。** 地球が宇宙へ放つ巨大な光の矢は、進歩、意志、希求を表す力強い原型となる。大衆文化では古い垂直ロケットのイメージに代わり、宇宙輸送回廊の時代**への移行を象徴する。**
- 。 **結束と誇り。** **かつてソユーズとアポロの打上げが世界中の人々をテレビの前に集めたように、StarRoadの定期便は、巨大な目標へ向けて人類が協力する力を示す世界的なメディア行事となる。**

11.3. 社会経済的な影響

- 。 **観光。** **立入禁止区域の安全境界に専用の見学施設を設け、新しい宇宙観光の中心とする。打上げ見学は、古代世界の七不思議を訪れることに匹敵する魅力を持ち得る。**
- 。 **教育への刺激。** この光景は比類のない進路意欲の源となり、何百万人もの子どもに物理学、工学、宇宙航行学を学ぶきっかけを与える。
- 。 **宇宙の脱神秘化。** 定期的で予測可能な産業運用としての打上げは、宇宙飛行から例外性と死の危険という印象を取り除き、それを巨大**ではあっても通常の物流業務として示す。**

したがって StarRoad は、宇宙へ到達する物理インフラだけでなく、人類が**揺りかごの外で未来を能動的に築く文明**という新たな役割を受け入れるための、文化的物語と感情的基盤も生み出す。「太陽の矢」が定期的に現れるたび、星への道は開かれているだけでなく、すでに使われていることを日々思い起こさせる。

12. 結論

StarRoad は工学的メガプロジェクトにとどまらない。産業型宇宙文明への移行戦略である。「ロケット」パラダイムから「回廊」パラダイムへ移ることで、ペイロード輸送費と低い輸送能力という二つの主要障壁を克服する道を示す。

極超音速回廊は、エネルギー、農業、産業、物流、宇宙技術を結ぶ基幹軸となる。アフリカも、単に原料を輸出するのではなく、地理と資源を生かして宇宙への道を築くことで、産業・技術の飛躍を実現する機会を得る。

StarRoad は実証済み技術を統合・大規模化し、太陽系資源を地球の課題解決に利用できる経済の基盤を築く。インフラ自体も人類の未来に対する保険であり、飛躍台となる。実現には前例のない国際協力、長期投資、工学上の強い意志が必要だが、その見返りは、真の宇宙時代への鍵、事実上無尽蔵の地球外資源、豊富なエネルギーである。