

XGモバイル推進フォーラム (XGMF)
中間報告会



StarNet Earth

月面データセンターの実現可能性評価

～宇宙×通信×エネルギー～

StarNet Earth
プロジェクトリーダー 高橋 円

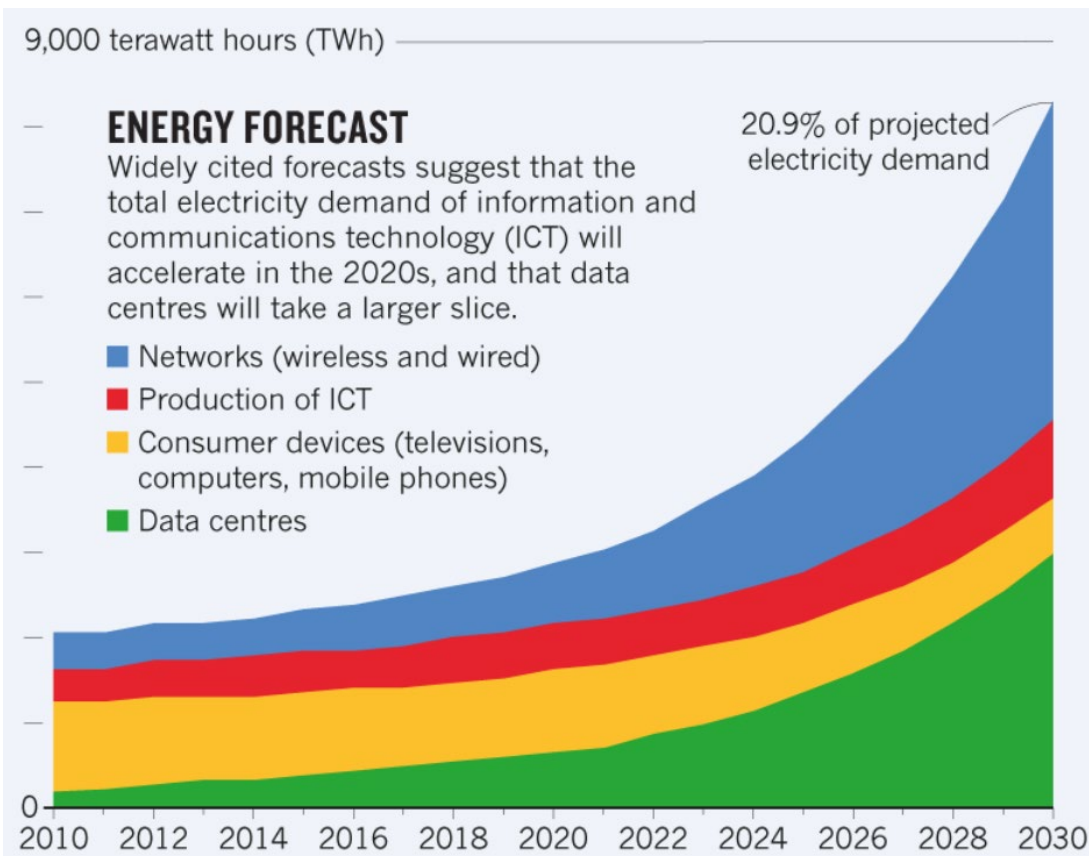
- 背景・問題提起
 - データセンターの電力消費量の増加
 - データセンターの環境への影響
 - データセンターの持続可能性への取り組み
- 月面データセンターの提案
 - メリット
 - デイメリットとソリューション案
- データセンター事業者へのヒアリング結果
- 今後の予定

背景・問題提起 ～データセンターの電力消費量～



- データセンターのエネルギー消費量は他のICTセクターと比較し、急速に増加
- 背景として、インターネットの普及、クラウドサービスの拡大、AIの高度化、デジタル化の進行などが影響している

データセンターのエネルギー消費予測



- ✓ ネットワーク、ICT製造、消費者デバイス（テレビ、コンピュータ、モバイルなど）といったICT全体の電力需要も増加し、**2030年までには全世界の電力需要の約20.9%を占めると予測**
- ✓ データセンターのエネルギー消費量は、**2020年代から急速に増加し、他のICTセクターに比べて大きな割合を占める**
- ✓ IEAによると、データセンター全体の電力消費量は、世界で**2022年は約460TWh**であり、**世界全体の電力消費量の約1.3%を占める**
- ✓ 2026年には、**1000TWhを超える**予測があり、日本のエネルギー消費量とほぼ同等
- ✓ **2030年には世界全体の電力消費量の3.1%になると予想**。このスピードは指数関数的

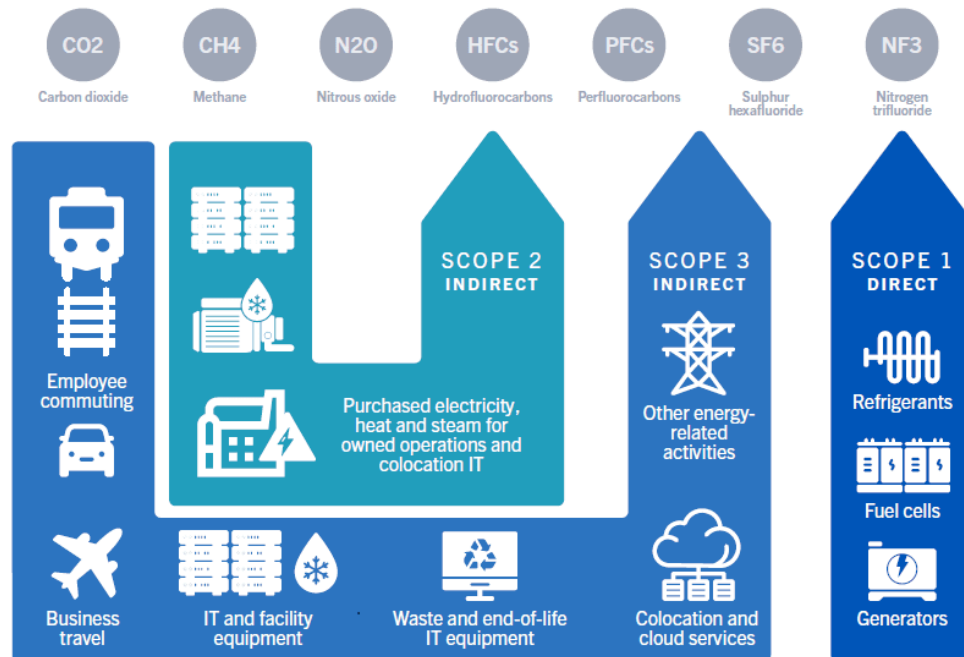
背景・問題提起 ～データセンターの環境への影響～



- データセンターはScope1の直接的な排出だけでなく、Scope2,3の購入するエネルギーや他のサービスに依存する排出も大きな影響を与えるため、サプライチェーン全体での排出削減が重要。
- データセンター全体の電力消費量に伴うCO2排出量は、約330Mt (0.33Gt) に相当し、全世界のエネルギー関連CO2排出量の約0.9%を占める

データセンターのサプライチェーンにおけるGHG排出

Data center emission categories



Note: Downstream Scope 3 activities not applicable to data center operations

UPSTREAM ACTIVITIES

REPORTING COMPANY

Scope 1

データセンター内の直接排出

- ✓ 冷媒より、温暖化効果が非常に高いハイドロフルオロカーボン (HFCs)、ジェネレータから直接的にCO2が排出

Scope 2

購入した電力や熱、蒸気の使用に伴う間接排出

- ✓ 電力を供給するエネルギー源が化石燃料である場合、間接的にCO2や他の温室効果ガス (GHG) が排出

Scope 3

その他の間接排出

- ✓ データセンターの運営に関連する間接的な排出
- ✓ サプライチェーンや製品の使用・廃棄に関連する排出
 - ・ クラウドサービス、コロケーションITサービス、廃棄されたIT機器の管理に関連する排出、従業員の通勤や出張

背景・問題提起 ～データセンターの持続可能性への取り組み～



- データセンター業界も持続可能性の重要性を認識しており、再エネへの転換やエネルギー効率の改善に取り組んでいる。
- 特に、データセンターの総電力消費量の約40%を占める冷却を効率化させる取り組みが盛んである

再エネの活用



- ✓ 2030年までに全データセンターで**24時間365日カーボンフリーエネルギー**を使用することを目指す
- ✓ 自然ベースのカーボンリムーバルプロジェクトにも投資し、他のテクノロジー企業と協力して**20万トンの二酸化炭素削減**に貢献する計画

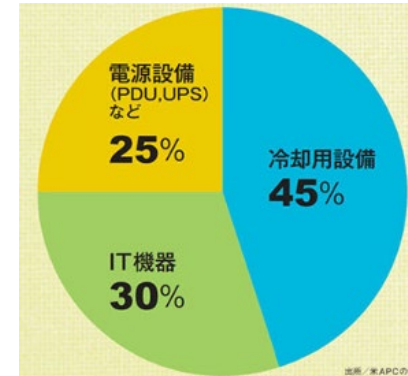


- ✓ **2021年にネットゼロ残留排出量を達成**し、再生可能エネルギーを100%利用
- ✓ 2030年までに**全排出量 (Scope 1, 2, 3) を50%削減**し、2040年までには限りなくゼロに近づける
- ✓ データセンター、エネルギー効率の高い建物、低炭素輸送における持続可能性に重点



- ✓ 2030年までに**カーボンネガティブ**達成目標を設定
- ✓ 炭素除去技術に投資し、**2025年までに100%再エネを使用をコミット**

効率的な冷却技術の開発



- ✓ データセンターの総電力消費量の約40%が冷却に使用

- ✓ 寒冷地にデータセンターを設置することで、外気を使って冷却する「外気冷却」技術が利用
- ✓ スウェーデンやフィンランドでは、寒冷な気候を活用して、データセンターの冷却コストと電力消費を削減

- 背景・問題提起
 - データセンターの電力消費量の増加
 - データセンターの環境への影響
 - データセンターの持続可能性への取り組み
- 月面データセンターの提案
 - メリット
 - デイメリットとソリューション案
- データセンター事業者へのヒアリング結果
- 今後の予定

月面データセンターの提案 ~メリット~



- 主なメリットは、①メンテナンスコスト削減、②エネルギー消費削減、③電力の安定供給、④宇宙探査のインフラ支援、⑤地球環境への負荷軽減

メリット	主要因	内容
メンテナンスコスト削減	低重力環境	地球1/6の重力下で、 機器の摩擦や摩耗が低減される ため、 ハードウェアの寿命を延ばす 可能性がある。 サーバーやストレージ装置の物理的損傷が減少し、 メンテナンスコストが削減 できる。
エネルギー消費削減	低温環境・真空環境	月面の夜間の温度は-173℃であるため、 冷却装置の負担を軽減 する。 エネルギー消費を大幅に削減 できる。
電力の安定供給	太陽光の利用	月の極地の PEL （Peak of eternal light, 24時間近く太陽光が当たり続ける場所）で太陽光発電を安定的に利用できるため、データセンターへの 電力の安定供給 ができる。
宇宙探査のインフラ支援	月からのデータ処理	月面データセンターは、 将来の宇宙探査や火星へのミッションの中継基地としても機能 する可能性がある。 月からのデータ処理 は、地球上よりも宇宙探査のリアルタイム処理を迅速に行えるため、NASAや他の宇宙機関にとって、 中継基地として戦略的な価値 となる。
地球環境への負荷軽減	地球外	データセンターは膨大なエネルギーを消費し、GHG排出の原因である。地球のエネルギー負荷を軽減し、 GHGの削減 に寄与する。

月面データセンターの提案 ～ディメリットとソリューション案～



- 主なディメリットは、①設置・維持コストの高さ、②過酷な環境条件（放射線とマイクロメテオロイドのリスク、エネルギー供給）③通信遅延・安定化、④メンテナンスと修理の困難さが挙げられる。

ディメリット	ソリューション案
設置・維持コストの高さ	<ul style="list-style-type: none">• 月産月消（ISRU）による自動建設（自律型ロボットや3DP技術）• 輸送コストの低減
過酷な環境条件 （温度、マイクロメテオロイド、放射線、エネルギー供給）	<ul style="list-style-type: none">• 永久影クレータの利用• PEL(Peak of eternal light)の利用• レゴリスによる遮蔽材• レーザーエネルギー伝送、小型核融合炉の開発
通信遅延・安定化	<ul style="list-style-type: none">• エッジコンピューティング• 中継衛星ネットワーク（ex. Lunar Gateway）• レーザー通信• 遅延耐性ネットワーク（Delay-Tolerant Networking, DTN）• AIによる通信最適化
メンテナンスと修理の困難さ	<ul style="list-style-type: none">• 自律型ロボットと遠隔操作技術• 冗長性を持ったシステム設計• モジュール型の設計• AIによる予測保守• 耐久性のある素材と技術

月面データセンターの提案 ~ディメリットとソリューション案~



- 主なディメリットは、①設置・維持コストの高さ、②過酷な環境条件（放射線とマイクロメテオロイドのリスク、エネルギー供給）③通信遅延・安定化、④メンテナンスと修理の困難さが挙げられる。

ディメリット
2

過酷な環境条件

(温度、マイクロメテオロイド、放射線、エネルギー供給)

ソリューション

- 永久影クレータの利用
- PEL(Peak of eternal light)の利用
- レゴリスによる遮蔽材
- レーザーエネルギー伝送、小型核融合炉の開発

- ✓ 永久影クレータは、 -180°C 程度の低温環境を保つ。そのため、月の通常の見られるような極端な温度変化（昼夜の温度差）は大幅に緩和される。
- ✓ 月の南極には、80%以上の時間照らされている4つの山頂が特定されている（PEL）
- ✓ 2~3mのレゴリス層を建物や居住区の上に覆うことで放射線を安全レベルまで低減

レーザーエネルギー伝送

レーザーエネルギー伝送

PEL

PELは、シャクルトンクレータなどの永久影のあるクレータから数km以内に位置していることが知られている

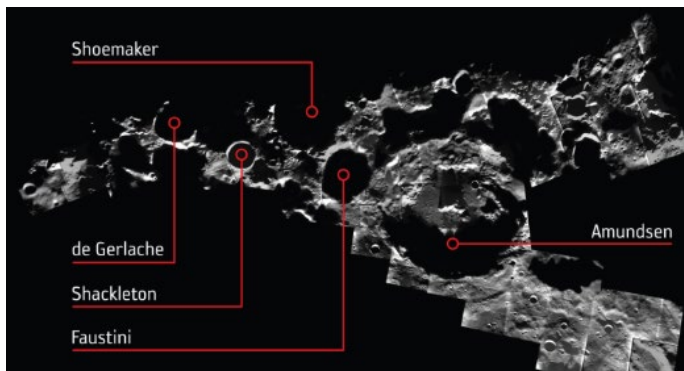
- ✓ PELからのレーザーエネルギー伝送
- ✓ He3による小型核融合発電

2-3mのレゴリスによる遮蔽材

小型核融合

Data Center

永久影クレータ (ex.シャクルトンクレータ)



- 背景・問題提起
 - データセンターの電力消費量の増加
 - データセンターの環境への影響
 - データセンターの持続可能性への取り組み
- 月面データセンターの提案
 - メリット
 - デイメリットとソリューション案
- データセンター事業者へのヒアリング結果
- 今後の予定

データセンター事業者へのヒアリング結果



- 北海道美幌市に2014年ホワイトデータセンターを立ち上げ、雪冷房を用いたデータセンターを設立。
- データセンターの隣に雪山を作り、木くず・おがくずで雪を覆うことで断熱効果を高め、溶解を遅らせて年間使用する。

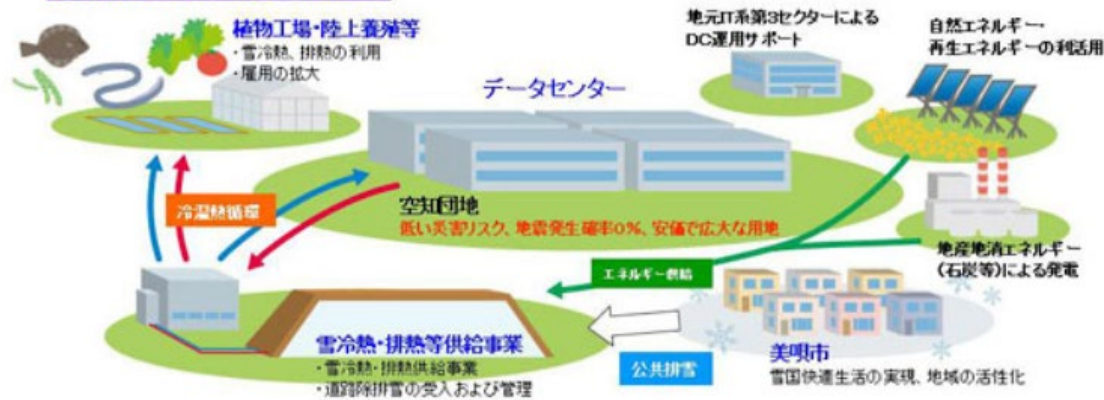
株式会社 雪屋媚山商店 代表取締役 本間弘達様



ホワイトデータセンター (WDC)

- コンセプト① 広大な北海道の特性を生かした、再生エネルギーを積極活用したエネルギー自給自足型DC
- コンセプト② 6次化(熱を核とした3次産業誘致→1次産業と2次産業の創出)
- コンセプト③ データセンターの冷熱利用が、美幌市の雪国快適生活を実現

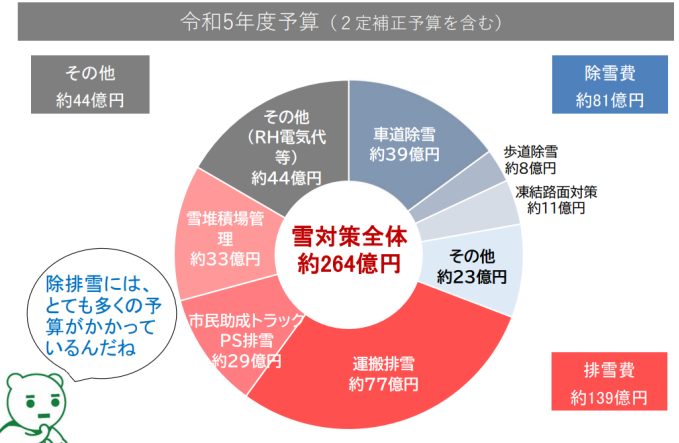
美幌WDCビレッジ運用イメージ



WDC PROJECT コンソーシアム

ホワイトデータセンター構想の実現に向け、具体的に事業検討を行う協働組織です。

株式会社雪屋媚山商店(幹事企業)、株式会社共同通信デジタル、株式会社美幌未来開発センター、伊藤組土建、三機工業、美幌自然エネルギー研究会



- ✓ 北海道では厄介者の雪**20万トン/年**を利用してデータセンターを冷却
- ✓ データセンターの隣に雪山を作り、木くず・おがくずで雪を覆うことで断熱効果を高め、溶解を遅らせる。
- ✓ 札幌市では、除雪費作業に約250億円かかり、約80箇所の雪堆積場を運営し、除雪された雪を受け入れている (札幌市の**雪堆積場の維持管理費は約33億円**)
- ✓ 北海道には**約43台のデータセンター**があるため、すべて雪冷房にし、雪堆積場がなくなれば、**維持管理費が削減**できる。
- ✓ 本間氏は、データセンターからの排熱を利用したハウス栽培や養殖事業も実施している

<http://www.snowshop-kobiyama.co.jp/wdc.html>

https://www.city.sapporo.jp/somu/koho/hodo/202311/documents/20231106yukitaisakujigyou_01.pdf

- 背景・問題提起
 - データセンターの電力消費量の増加
 - データセンターの環境への影響
 - データセンターの持続可能性への取り組み
- 月面データセンターの提案
 - メリット
 - デイメリットとソリューション案
- データセンター事業者へのヒアリング結果
- 今後の予定

- ✓ レーザーエネルギー伝送の定量的な実現可能性評価
データセンタ必要電力量とエネルギー伝送効率（発振-送電-受電）との定量評価
- ✓ 月-地球間通信とデータ転送について
データ転送のための通信インフラ（光通信、レーザー通信、衛星リレーなど）
NASA の月面レーザー通信実証 (LLCD)
NASA の長期間の実証実験レーザー通信リレー実証 (LCRD)

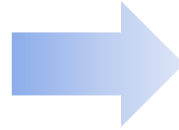
月面データセンターの提案 ~ディメリットとソリューション案~



- 主なディメリットは、①設置・維持コストの高さ、②過酷な環境条件（放射線とマイクロメテオロイドのリスク、エネルギー供給）③通信遅延・安定化、④メンテナンスと修理の困難さが挙げられる。

ディメリット
1

設置および維持コストの高さ



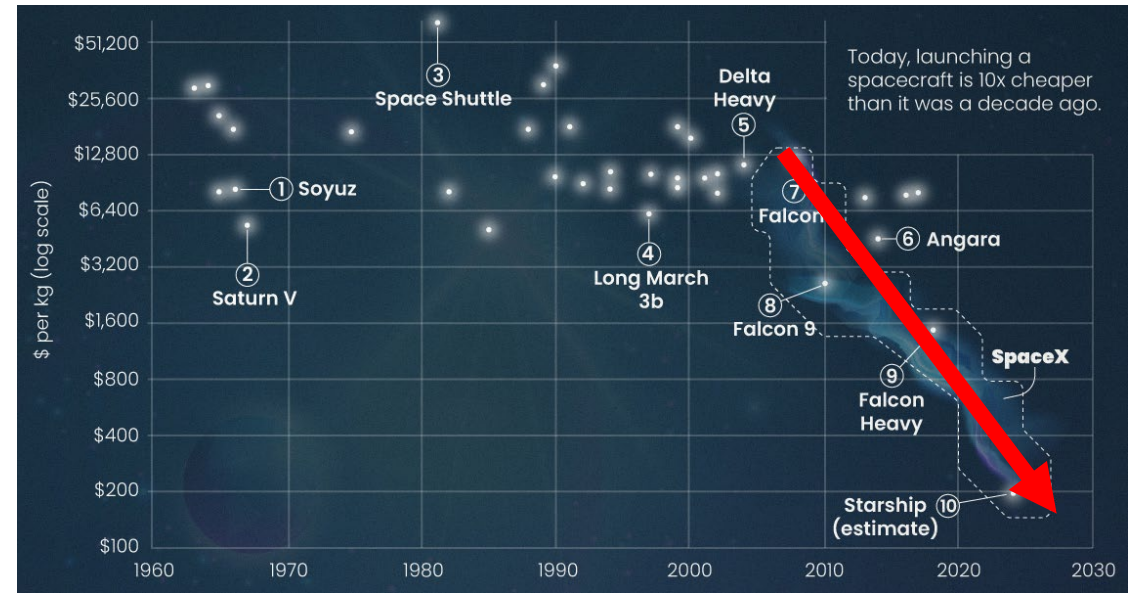
ソリューション

- 月産月消 (ISRU) による自動建設 (自律型ロボットや3DP技術)
- 輸送コストの低減

ICON社は、NASAと契約 (572億ドル) して、レゴリスによる月面構造物の3Dプリンティング技術を開発中



SpaceXによる輸送コストの低減 (LEO、\$200/kg以下)



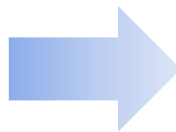
月面データセンターの提案 ~ディメリットとソリューション案~



- 主なディメリットは、①設置・維持コストの高さ、②過酷な環境条件（放射線とマイクロメテオロイドのリスク、エネルギー供給）③通信遅延・安定化、④メンテナンスと修理の困難さが挙げられる。

ディメリット
3

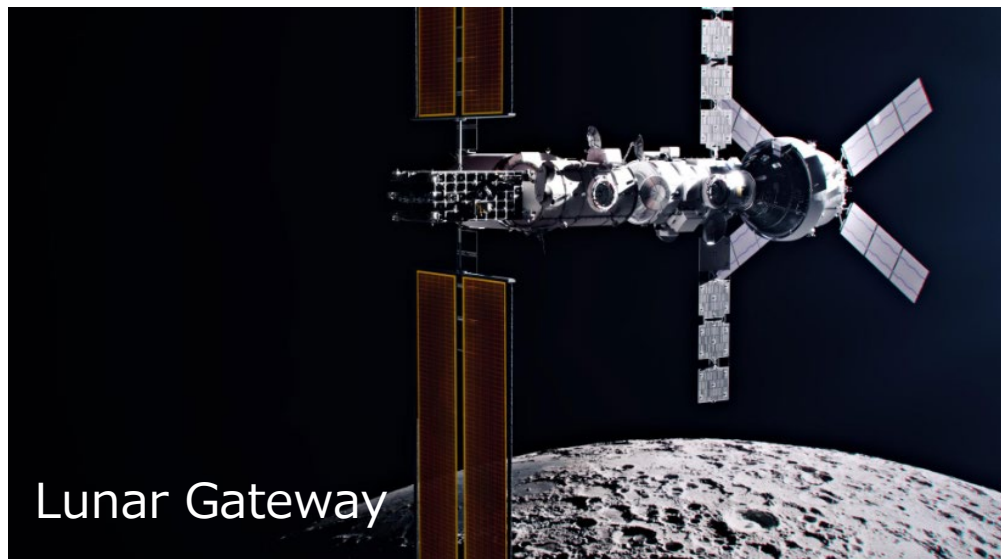
通信遅延・安定化



ソリューション

- ✓ 地球から月までの距離が約38万キロメートルあるため、**光速度**で通信しても片道約**1.28秒**の遅延が発生

- エッジコンピューティング
- 中継衛星ネットワーク (ex. Lunar Gateway)
- レーザー通信
- 遅延耐性ネットワーク (Delay-Tolerant Networking, DTN)
- AIによる通信最適化



Lunar Gateway

ソリューション	概要
エッジコンピューティング	月面で発生するデータの処理を、できる限り月面データセンターで行い、重要なデータのみを地球に送信する。
中継衛星ネットワーク	月と地球の間に複数の中継衛星を配置し、データの送受信を最適化する。通信の安定性と効率が向上
レーザー通信	電波通信に比べ、レーザー通信は高帯域でのデータ送信が可能で、遅延を改善する。NASAはすでにレーザー通信の実験を行い、月と地球間的高速データ通信を実証（622Mbps）
DTN	DTNは、遅延が大きい環境でも安定したデータ通信を実現する
AIによる通信最適化	AIを用いて通信データの優先度を管理し、重要なデータを優先して地球に送信する

https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_Laser_Communication_Demonstration

<https://www.nasa.gov/news-release/nasa-laser-communication-system-sets-record-with-data-transmissions-to-and-from-moon/>

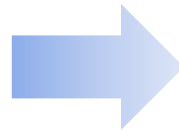
月面データセンターの提案 ～ディメリットとソリューション案～



- 主なディメリットは、①設置・維持コストの高さ、②過酷な環境条件（放射線とマイクロメテオロイドのリスク、エネルギー供給）③通信遅延・安定化、④メンテナンスと修理の困難さが挙げられる。

ディメリット
4

メンテナンスと修理



ソリューション

- 自律型ロボットと遠隔操作技術
- 冗長性を持ったシステム設計
- モジュール型の設計
- AIによる予測保守
- 耐久性のある素材と技術

ソリューション	概要
自律型ロボットと遠隔操作技術	メンテナンスや修理の主な負担を軽減するため、地球から遠隔操作できるロボットや、自律的に問題を検出・修理できるAIを搭載したロボットの利用。
冗長性を持ったシステム設計	重要な部品やシステムを冗長化し、万が一障害が発生してもバックアップがすぐに実行できるように設計にする。
モジュール化された設計	データセンター全体と各装置をモジュール化することで、部分的な障害が発生した場合に、そのモジュールのみを交換・修理可能とする。
耐久性のある素材と技術	月の限界な環境に耐えることができる新素材や技術の導入。メンテナンスの頻度を減らす
AIによる予測保守	センサー技術やAIを活用して、機器の状態を継続的に監視し、故障の予兆を捉えて予防的なメンテナンスを行う。故障が発生する前に交換や修理を行うことで、ダウンタイムを極力抑える。