

V. 2040 年の宇宙利用

2040 年に期待される宇宙産業の変化

- ・微小重力下での最先端研究開発の活発化
- ・地球外での鉱物資源開発の開始
- ・宇宙における食料、資機材の地産地消の進展
- ・民間ロケットの往来は小惑星などにも拡大
- ・衛星測位の精度の更なる高精度化
- ・衛星データ通信も安価に
- ・民間商用ロケットでの衛星軌道への輸送がさらに安価に
- ・「地上での利用」から「宇宙での利用」へ

さらに 20 年後まで目を向けると、様々な宇宙開発が世界中で進んでいく。北海道の射場のさらなる拡張が進めば、世界中で行われる宇宙開発への入り口として活用されることが期待され、有人宇宙飛行も含め、北海道が「宇宙版シリコンバレー」へと発展していることが期待される。

ここでは 20 年後までに実用化が期待される、もしくはそれまでに計画がスタートすることが期待される技術を列挙し、その時に北海道に起こる変化、恩恵、ビジョンを考察する。

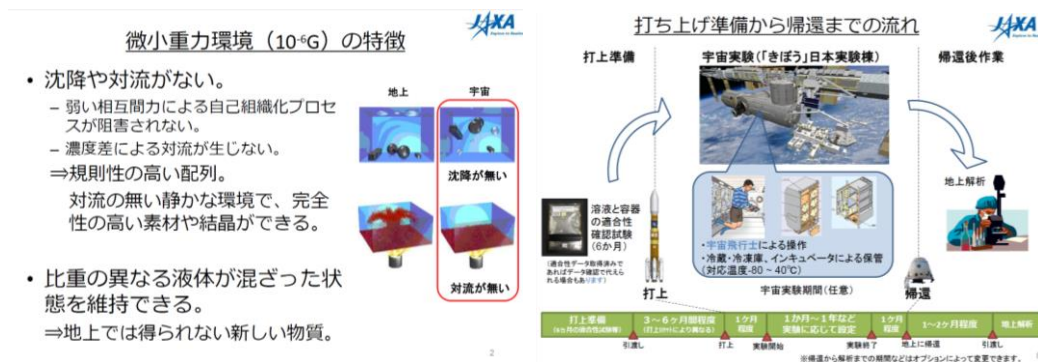
1. 宇宙開発の進展

○微小重力下での最先端研究開発の活発化

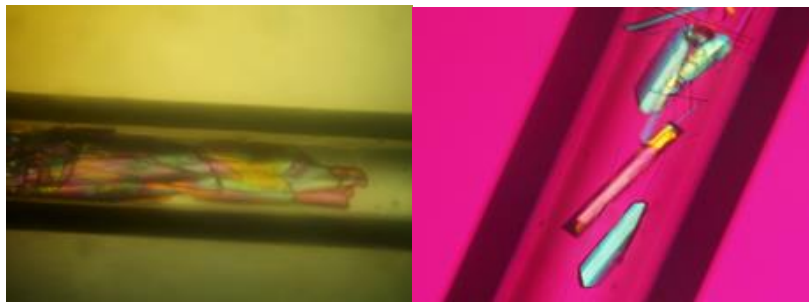
現在も落下実験塔や国際宇宙ステーション(ISS)で微小重力での研究開発が行われているが、コストや実験の頻度、継続時間など制約が非常に大きい。

先にあげたサブオービタル飛行が安価に頻度よく活用できるようになれば ISS まで実験材料、機材を送らなくても簡易な実験は数多くできるようになる。さらに、後述する低軌道プラットフォームや軌道エレベーター、宇宙ホテルが実現すれば研究者の自由度が向上し、微小重力下での最先端研究開発の活発化が期待される。

これまでも ISS において数多くの微小重力環境を活用した実験が行われてきた。新薬研究の観点で、微小重力下で高品質なタンパク質結晶の析出が期待され、これまで地上では作りえなかった難病に対する創薬などが期待される。



図V-1 ISS日本実験棟「きぼう」での実験(出典：JAXA)



図V-2 左：地上で生成されたたんぱく質の結晶
右：宇宙で生成されたたんぱく質の結晶(©JAXA)

微小重力下ではきれいな結晶が生成される。新薬の開発が期待される。

これまで宇宙での実験試料の回収は、米国スペース X の「ドラゴン」補給船と、ロシアの「ソユーズ」宇宙船しかなかったが、2018年11月11日、日本近海へ着水し

た「こうのとりの7号機」に搭載された小型回収カプセルにより、初めて日本独自の手段でISSから試料を持ち帰ることに成功した。小型回収カプセルは大気圏に再突入する際の約2,000°Cの高熱から中身を護り数十°Cに維持するアブレーター、その状態で気密を保つペイロード収納容器、さらにその内部の真空二重断熱容器と保冷材等により構成されている。これらの技術により試料は4°Cに保たれ続けたことが確認されている。また低加速度で機体を揚力飛行させ目標範囲に誘導する技術も今回の帰還において実証され、将来日本が有人帰還機を開発する場合に必要な基礎技術となることが期待される。



図V-3 HTV 搭載小型回収カプセルの運用概念図 (出典：JAXA)

また、北海道では豊かな食資源を背景に、北海道経済産業局が「北海道バイオイノベーション戦略」を掲げ、世界に通用するバイオ技術が蓄積された一大バイオクラスターを作り上げてきた。

経済産業省では、高度に機能がデザインされ、機能の発現が制御された生物細胞(スマートセル)を用いた産業群(スマートセルインダストリー)の構築を戦略的に進めている。食品や創薬などのこれまでの取り組みに加え、化学合成ではないバイオによる素材開発が急速に拡大しており、さらなる進化として微小重力下でバイオ技術による素材作成が期待される。バイオ産業の集積している北海道における新産業創出に期待が持てる。

バイオ×デジタルの融合による技術革新が導くバイオエコノミー

- バイオとデジタルの融合による生命現象理解と生物機能活用を通じ、①健康・未病社会、②炭素循環社会、③革新的新素材による成長社会を実現。地球規模の課題解決に貢献。

<p>①健康・未病社会 食品の健康増進・疾病予防機能を解析、「未病社会」や生活様式の悪い「健康・快活社会」を実現できる可能性</p> <p>産経研アレルゲンフリー粉</p> <p>バイオ×食品 アレルゲン物質を産出する遺伝子を除去。アレルギ―低減剤を実現</p> <p>腸内マイクロバイオーム(微生物相)の制御に向けた創薬(武田など)</p> <p>マイクロバイオームが様々な疾患や体質に関与。その制御に向けた創薬が進展中。</p> <p>バイオ×腸内環境制御</p>	<p>②炭素循環社会 (Circular Economy) 生物の物質生産機能を解析・強化、化石資源に頼らない「炭素循環型社会」を実現できる可能性</p> <p>バイオ×素材 カネカ「PHBH」(バイオプラスチック)。生分解性バイオプラスチックスマートセル生産。</p> <p>三葉ケミカル「DURABIO」(バイオ素材)。車体外装部品等に使用。光沢や発色、低変色などに優位性。</p> <p>バイオ×自動車</p>	<p>③革新的新素材による成長社会 生物材料の持つ機能を利用した新素材の開発による「革新的新素材による成長社会」を実現できる可能性</p> <p>スバイバー社人工肌の糸</p> <p>バイオ×材料 蜘蛛の340倍の強度。フィロンを上回る伸縮性。THE NORTH FACEのパーカーに使用・販売予定。</p> <p>バイオ×情報保存 マイクロソフト社DNAストレージ DNA配列にデータを埋め込み長期保存用ストレージとして活用。1mmに1 exabyte (10^18 byte)。フロッピーディスクの1000万倍以上。500年以上の長期保存が可能。3年以内に実用化予定。</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

図V-4 経済産業省「スマートセルインダストリーの実現に向けた取組」

北海道大学や道内企業の産学連携体は、糖質などを原料とし、高効率に繊維直径 20nm の「発酵ナノセルロース (Nano-fibrillated Bacterial Cellulose : NFBC)」の製造技術を確立。食品由来の原料と果実から分離した菌株を使って製造するため、生体適合性が高く、従来の工業製品以外に、医療や食品分野への用途展開も期待されている。

宇宙への進出が進むことに比例して、宇宙における事故、災害の危険性も増していく。例えば宇宙ステーションにスペースデブリが衝突し火災などが起きた場合、地上とは違う火の燃え広がりが起きる。鎮火の為の設備も当然変えなければならぬ。北海道大学宇宙環境応用工学研究室ではそのための基礎研究を ISS で行っており、この分野では世界的にもリードするノウハウを持っている。

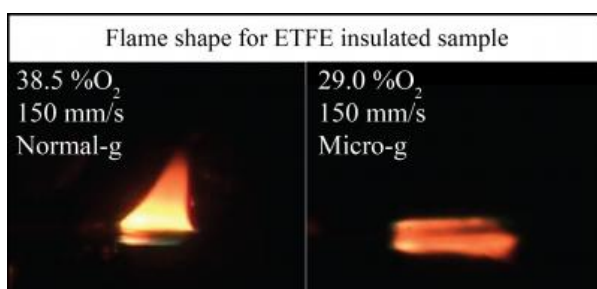


図 V - 5 電線上火炎燃え広がりに与える重力条件の影響
(出典：北海道大学 宇宙環境応用工学研究室)

○国際宇宙ステーション(ISS)から低軌道プラットフォームへ

国際宇宙ステーションに関して、2024 年までの運営は各国で合意されており、米連邦政府も毎年 15 億ドルほどの予算を投下している。しかしながら 2018 年の予算教書で 25 年に連邦政府予算の直接支出を終結させる方針が示された。併せて、予算教書では将来的に民間企業と NASA が利用可能な新たな低軌道プラットフォームの開発促進をしていくために 1.5 億ドルの予算が新規に割り当てられた。Bigelow Aerospace(米)や Axiom Space(米)などが商業宇宙ステーションや商業宇宙ホテルの構想を掲げて様々な実証実験を行なっているが、今後こうした活動が加速する可能性がある。



図 V - 6 ISS 日本実験棟「きぼう」(©JAXA/NASA)

○月、火星の開発

2018年2月12日にアメリカ合衆国の予算教書が発表され、その中でNASAに有人月探査およびその先の火星探査につながるミッションに注力する105億ドルの費用が割り振られた。米国は2022年にも月基地の建設を開始する。ここを拠点に、30年代に有人火星飛行を目指す。民間企業も月や火星への関心を持っている。例えば、SpaceXはStarshipとStar Heavyという巨大ロケットで、22年には火星に向けて2機の無人飛行を、24年には搭乗員を乗せた有人飛行を行う計画で、究極の目標は人類の火星移住にある。



図V-7 SpaceXのStarshipとSuper Heavyイメージ図 (©Space X)

また、2019年1月3日に中国の月面探査機「嫦娥(じょうが)4号」が世界で初めて月の裏側への着陸に成功した。月の裏側からは直接地球との通信ができないため、あらかじめ別の通信衛星「鵲橋(じゃっきょう)」を打ち上げている。探査車「玉兔(ぎょくと)2号」の発進にも成功した。

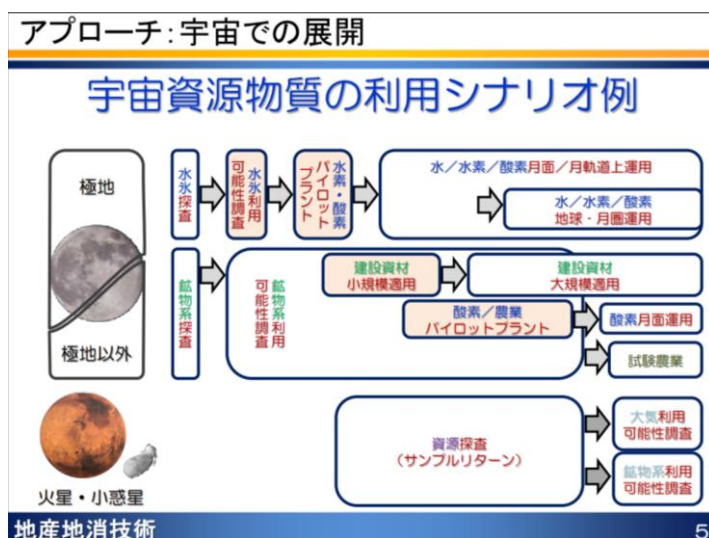


図V-8 「嫦娥4号」が撮影した月の裏側の画像(©中国国家航天局)

○宇宙における地産地消

月や惑星の開発、基地建設には現地で使用する資材、生活物資が必要となる。しかしながらそのために都度地球から運搬しては輸送コストが膨大になるうえ、地球環境への影響も懸念される。

宇宙において資源の採取、利用、加工をすることでこれらの課題を解決すべく、様々な研究、実証実験等の取り組みが行われている。ひいてはこれらの研究成果が、地球上でも応用されることが期待される。



図V-9 宇宙資源物質利用シナリオ例(出典：JAXA 宇宙探査イノベーションハブ)

すでに国際宇宙ステーション(ISS)では微小重力下で 3D プリンターを用いて工具を製作する実験が行われている。また植物の栽培実験も継続的に行われている。農業大国である北海道から種苗の供給や宇宙環境に強い品種の開発などの貢献が期待される。



図V-10 月面での野菜栽培イメージ(©NASA)

2. 農業利用

○農業ロボットの普及

従来の大型化したトラクターの問題点の一つとして畑を踏圧してしまうことがある。測位衛星の精度が上がり、AI 技術が向上することで、複数の小型農業ロボットによる協調制御でのロボット農業が可能になる。これにより、農業従事者はロボットへの作業指示が主な仕事になり、重労働から解放され、経営側の仕事に対して傾注することが可能になる。

少子高齢化が進み後継者不足が深刻な北海道において、基幹産業である農業を維持拡大していくためには欠かせない技術である。世界の一大食糧庫として北海道が成長しているであろう。

ビークルロボットの国際展開

先進国・新興国では食糧需要と労働力不足から将来農業ロボットが必要とされている。また欧米では農機の過度な大型化の反省から複数の小型ロボットによる営農システムに注目。小型農機&ロボット技術に強みがあるわが国はビークルロボットの国際市場を席卷できる可能性が高い。

世界の食料事情

○ 世界の食糧生産は2030年までに現在の50%増を必要とする。(潘 基文 国連事務総長, 世界食糧サミット2008.6)

○ 欧米・新興国では農業従事者が減少。特に技術を有した人材が不足。

↓

欧米などの先進国や新興国では農業のロボット化は不可欠!

北海道大学

図 V - 1 1 未来の農業ロボット(出典：北海道大学 野口教授)

3. エンターテイメント・レジャー利用

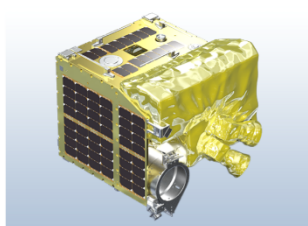
○宇宙利用のエンターテイメント

国内の宇宙ベンチャーの一つである ALE は、人工流れ星を地球上の任意の位置・時間に作り出す事業を計画している。2019 年 1 月 18 日に 1 号機を打ち上げており、2020 年春に瀬戸内海で実験を行う計画となっている。

事業の性格上、任意の時期と位置に衛星を運ぶことの出来る小型ロケットを必要とする当該事業は、民間小型ロケットが商用打上げを安価に行っている状況となっている。2040 年には事業化されている可能性が高い。

昨今人気の高い野外ロックフェスティバルなどのイベントをさらに盛り上げることが期待できる。花火のような轟音を立てるわけではないので、クラシックやジャズのような野外イベントにおいても、パフォーマンスを遮ることなく視覚的な演出を行えることが期待できる。北海道ではライジングサンロックフェスティバルやパシフィックミュージックフェスティバルといった大イベントで活用されるであろう。

テーマ名「流星源と放出装置を用いた人工流れ星の実現可能性と市場性の検証」(株式会社ALE)



ミッション概要	(1) 人工流れ星の素となる流星源を衛星軌道上から指定の時刻・角度・速度で放出して大気圏に突入させ、地上から人工流れ星を観測 (2) 人工流れ星の発生を、地上におけるイベント等に合わせて実施し、演出要素等として利用可能かどうかを検証 (3) 理工学の活性化・発展と、宇宙を利用した新しいビジネスの開拓を同時に実現
サイズ	60×60×80cm
重量	60kg
実施責任者	岡島 礼奈 代表取締役社長
共同実施者	東北大学、首都大学東京、日本大学



図 V - 1 2 人工流れ星(出典：ALE)

○サブオービタル宇宙旅行・輸送

国内ベンチャー・PD エアロスペースによるサブオービタル宇宙飛行（高度 100km への放物飛行）が計画されている。航空機のような機体で、空港（宇宙港）から水平に離陸／着陸する。ジェット燃焼エンジンとロケット燃焼エンジンを 1 つのエンジンで切り替えて機能させる独自技術を開発中である。

商用運航が開始されれば、米国ヴァージン・ギャラクティックが計画する金額（1 人あたり 25 万ドル）よりも安価な宇宙旅行を提供することが可能になる（1,700 万円予定）。

◆PD エアロスペース社の開発スケジュール（同社事業内容説明より）

無人による高度 100km 到達	～2019 年 12 月
有人による高度 100km 到達	～2023 年 3 月
商用運航開始	～2024 年 5 月



図 V - 1 3 有人宇宙機イメージ

(©PD AeroSpace, LTD. / KOIKE TERUMASA DESIGN AND AEROSPACE)

また、同じく国内ベンチャーの SPACE WALKER は JAXA、IHI、IHI エアロスペース、川崎重工業、九州工業大学と連携し、有翼機の開発を進めている。

◆SPACE WALKER 社の開発スケジュール(同社ホームページより)

サブオービタルプレーン(科学実験)	～2023 年
サブオービタルプレーン(小型衛星投入)	～2025 年
スペースプレーン(宇宙旅行)	～2027 年



図 V - 1 4 有人宇宙機イメージ(©SPACE WALKER)

国内ベンチャーによるサブオービタル宇宙飛行（高度 100km）が商用運行を開始すれば、宇宙旅行だけでなく、無重力実験などの宇宙実験も安価に可能となる。また、サブオービタル飛行による高速移動での長距離航路定期運航の検討や衛星軌道への飛行が可能になるような機体の研究も始まる。

また、有人宇宙飛行を日本で実現するためにはそれに対応するスペースポートの整備も欠かせない。世界から立ち遅れる日本の現状を打破すべく、山崎直子宇宙飛行士が代表理事として、スペースポートジャパンを 2018 年 7 月に立ち上げた。日本にスペースポート（宇宙港）を開港することをもって、広く日本の宇宙関連産業を振興することを主目的とし、以下の活動を進めていくこととしている。

1. ビジネス機会の創出
2. 内外の関連企業および団体との情報交換および連携
3. 情報発信、勉強会やイベントの開催



図 V - 1 5 Space Port Japan ホームページより

日本におけるスペースポート候補地は、沖縄県の下地島がかねてより既存空港の有効活用として整備を試みている。また、大樹町多目的航空公園には現在 1 km の滑走路があるが、これらのサブオービタル有翼機の離着陸には 3 km 以上の滑走路が必要である。ロケット打上げのみならず、総合的なスペースポートとして発展するためには将来構想として 3 km 超滑走路の早期整備が必要である。

2040 年までにはサブオービタル機による旅行、輸送が一般的なものとなり、普通の社会インフラのひとつとなっているであろう。日本におけるその中核として北海道大樹町が発展している未来が期待できる。

4. 宇宙インフラの建設

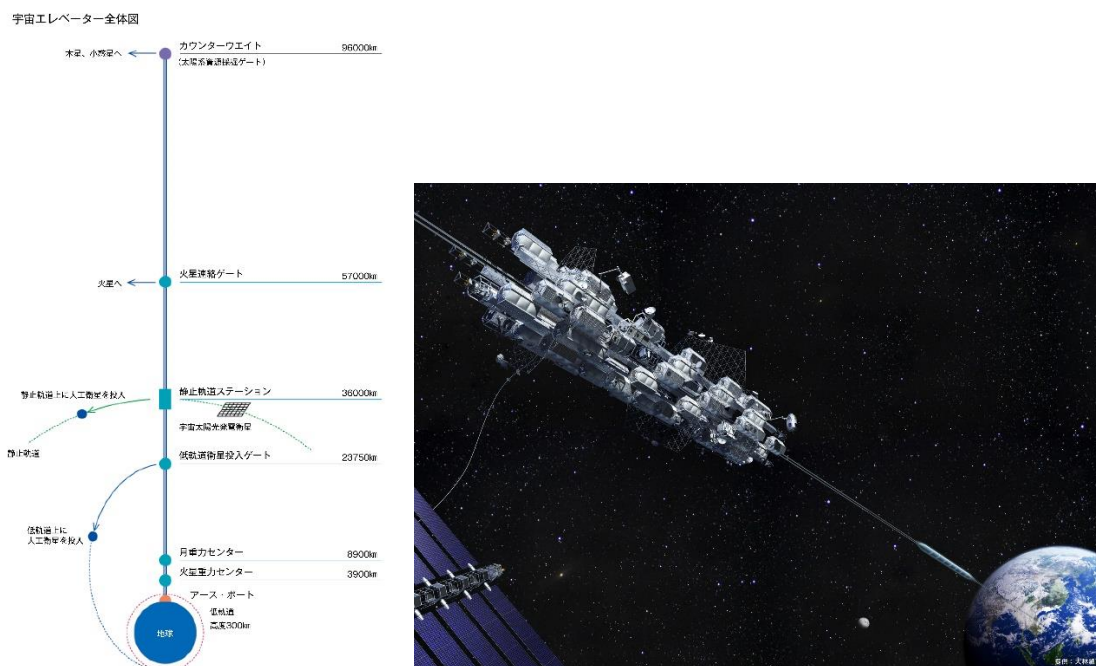
宇宙環境活用がさらに進んでいくと、軌道エレベーター(宇宙エレベーター)、宇宙太陽発電システム(SSPS)といった宇宙開発のインフラ整備が進んだり、宇宙ホテルといった宇宙環境利用施設が増えていくことが予想される。国際宇宙ステーションの傾斜角は51.6度であるが、有人宇宙インフラは地球の見える範囲のカバーの関係で傾斜角40度~50度あたりがベスト傾斜角で、今後建設される Bigelow Aerospace(米)や Axiom Space(米)、Orion Span(米)などの商業宇宙ステーションもこの範囲で検討されている。この傾斜角を考慮すると、赤道寄りの射場よりも北海道大樹町のような緯度の射場から打ち上げるほうが望ましい。また、有人宇宙インフラの建設や有人打上げとともに、貨物便の需要も見込まれる。設備建設における資材は膨大な量になるが、そのようなものを打ち上げるための保管、準備のための施設を考えると、広大な敷地を有する北海道大樹町には大きな優位性がある。

○軌道エレベーターの検討

資材運搬の費用削減の一つと言えるのが「軌道エレベーター」の建設であり、これについては、大林組が2050年の完成を想定した構想を発表している。

現在のロケット技術では、衛星軌道に上げるために必要なコストは、重量1kgあたり100万円と言われているが、軌道エレベーターはこれを数万円単位にまで引き下げる。

大林組の試算ではリニア中央新幹線に匹敵する建設費用が必要(約10兆円)。また、ケーブルの素材として期待されている軽量かつ強靱なカーボンナノチューブの長大化技術も必要になる。



図V-16 宇宙エレベーター(出典：大林組)

○宇宙太陽発電システム (SSPS)

軌道エレベーターが実現することで、静止衛星軌道上への資材の運搬費用が大幅に下がると、宇宙にある資源エネルギーを地球上へ送るシステム建設への適用も考えられる。

宇宙空間に浮かべた太陽光発電パネルで発電した電気をマイクロ波として地上に送電する技術の研究が三菱電機や京都大学などで行われている。この技術については、宇宙基本計画工程表（平成 30 年 12 月改訂）においても明記されており、必要となる基盤技術の開発が続けられている。

平成 19 年度の太陽光発電利用促進技術調査では、原子力発電所 1 基分に相当する 100 万キロワットの発電能力を持つ SSPS を、2030 年頃を目標に設置した場合の建設コストは約 1.3 兆円と試算している（静止衛星軌道上への資材運搬費が現状の 1/100 になること等が条件）。

宇宙空間においては太陽光発電が 24 時間行われる上に大気を通過しない太陽光を受けるため、最大で地球上の 10 倍の太陽光利用効率がある。

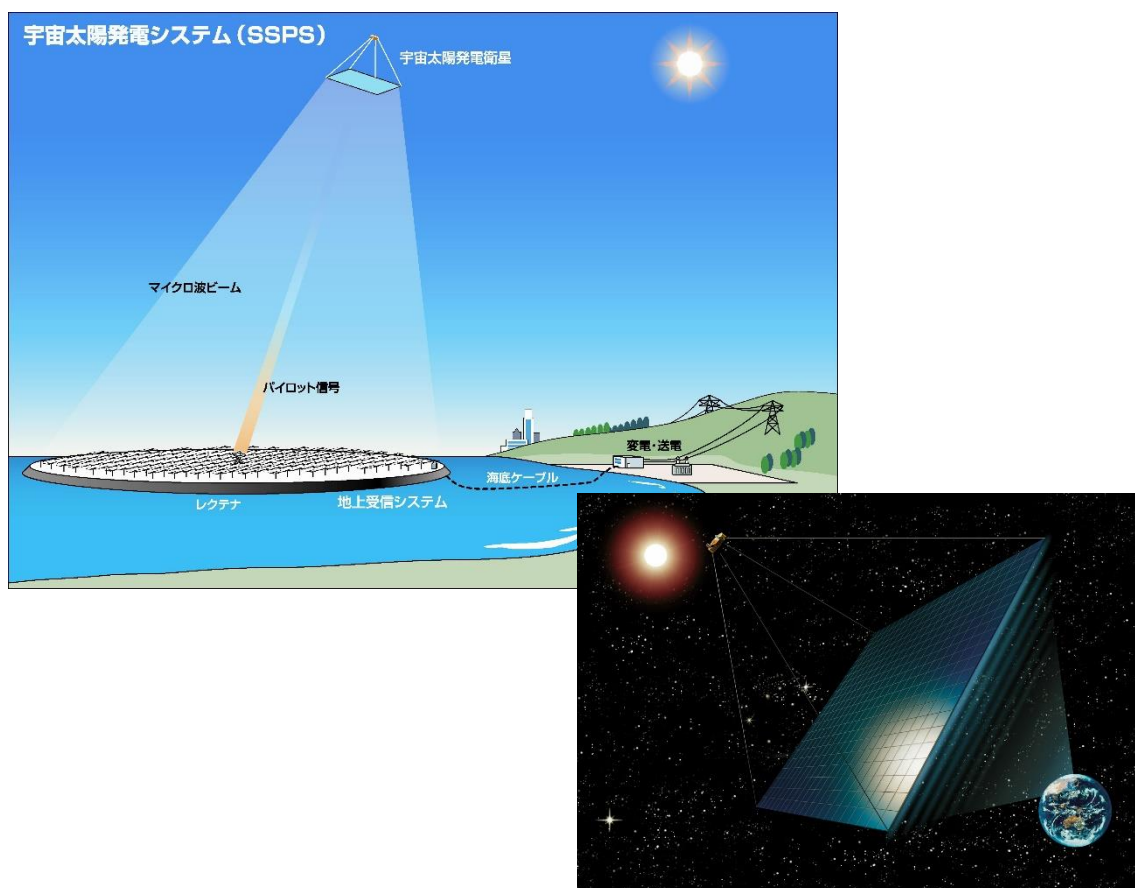


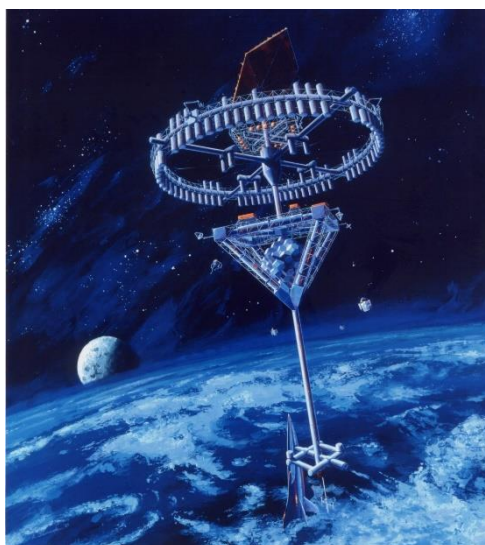
図 V - 1 7 将来実用化宇宙太陽発電システム(SSPS)の構想図

(出典：一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構)

○宇宙ホテルの建設

宇宙空間への旅行が一般の人の手に届くような金額になり、かつ資材の運搬も可能になると、宇宙ホテルの建設も検討されるようになる。既に清水建設が計画を検討している。

軌道周回している宇宙ホテルへのアクセスは赤道寄りの射場よりも、北寄りに位置する射場から向かうほうが効率よく、コストパフォーマンスが高いので、大樹町に優位性がある。



図V-18 宇宙ホテル構想(©清水建設)

○宇宙探査マップ(©宙畑)

前掲(P21)の宙畑にてまとめた宇宙探査マップにさらなる宇宙開発の関連性がわかりやすくまとめられているので下記に転載する。

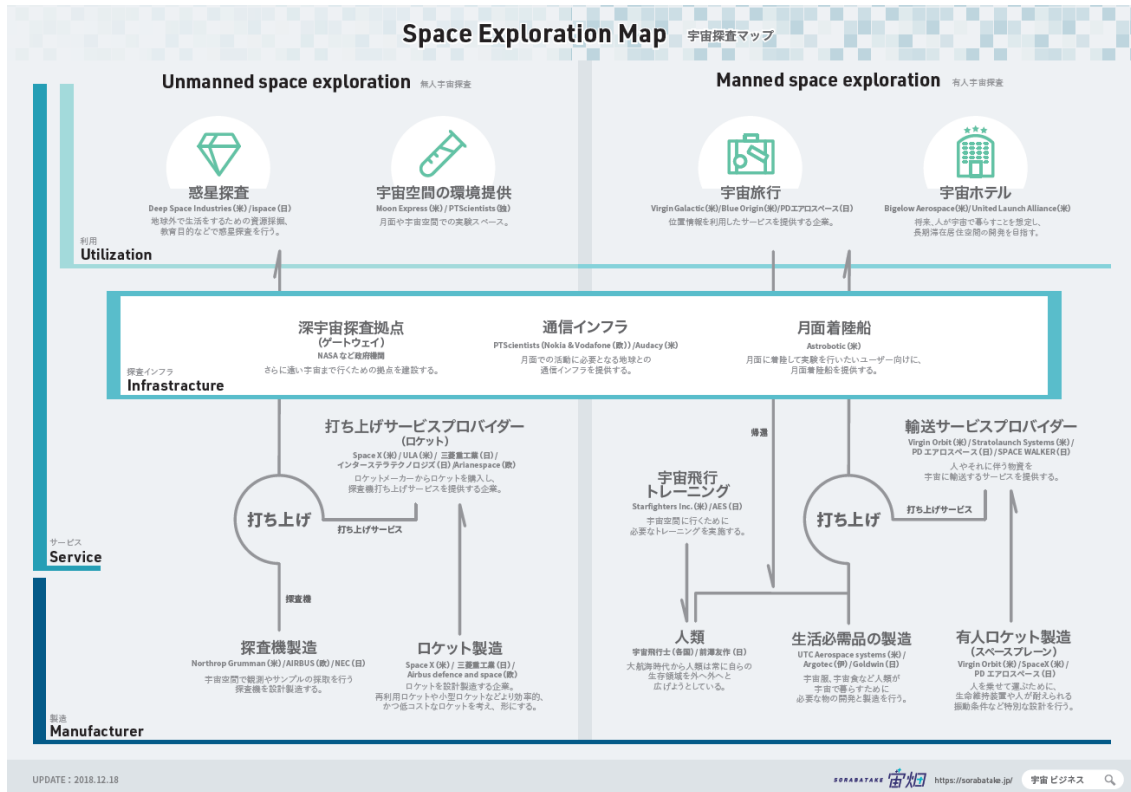
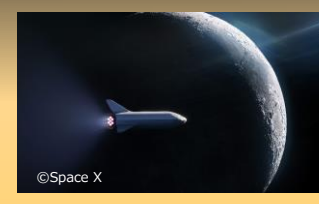


図 V - 1 9 宇宙探査マップ(©宙畑)

2040年の北海道における宇宙利用




©Space X

アメリカ、中国をはじめ世界中で月面開発の計画が進行中。月面基地が建設され、研究開発が行われる。また、火星やさらに外側への探査への中継点にもなる。



©NASA

宇宙における地産地消が進む。月で生活する人は月で自給自足をできるようになる。



©ALE

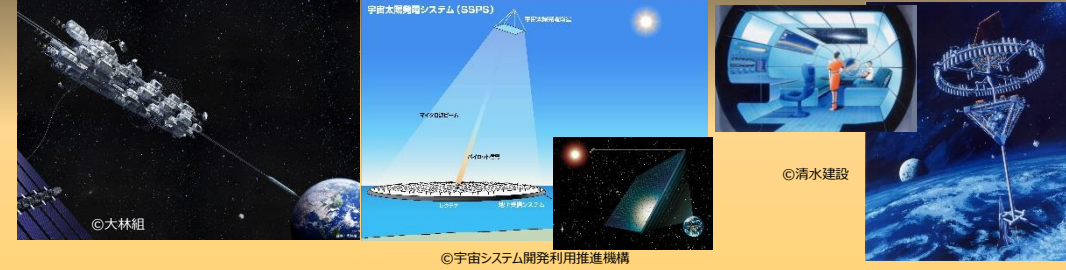
人口流れ星が実用化され、様々なイベントで演出を盛り上げる。そのため衛星打ち上げは大樹町から!



©PD AeroSpace, LTD. / KOIKE TERUMASA DESIGN AND AEROSPACE

©SPACE WALKER

有人宇宙飛行、旅行が一般的になる。サブオービタル機で世界中から宇宙旅行に旅立つ人が集まり、大樹町が宇宙旅行への出発点であり、帰着点となる。道内観光への波及効果も高い。

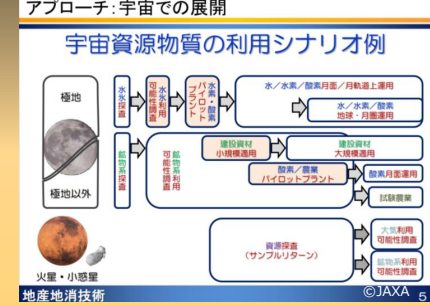


©大林組

宇宙システム開発利用推進機構

©清水建設

軌道(宇宙)エレベーターが実現すると、軌道上への衛星投入コストの大幅低減が実現する。月や火星、そのほか惑星探査のための地上からの有人打上げではなく、軌道エレベーターから旅立つことで、省エネルギーで探査に出発することができる。また、宇宙太陽発電設備や宇宙ホテルの資材運搬が容易になるなど、軌道上の開発コストの低減にもつながる。宇宙ホテルに様々な実験施設を併設し、微小重力実験などに役立つことも可能となる。



アプローチ:宇宙での展開

宇宙資源物質の利用シナリオ例

① 地球資源(水、酸素)の輸送
② 地球資源(水、酸素)の輸送
③ 地球資源(水、酸素)の輸送
④ 地球資源(水、酸素)の輸送
⑤ 地球資源(水、酸素)の輸送
⑥ 地球資源(水、酸素)の輸送
⑦ 地球資源(水、酸素)の輸送
⑧ 地球資源(水、酸素)の輸送
⑨ 地球資源(水、酸素)の輸送
⑩ 地球資源(水、酸素)の輸送

火星・小惑星
地産地消技術


©JAXA

火星や小惑星での資源探査が進む。地球上では入手の困難なレアアースの採取が期待される。また、宇宙で使う資材、水、酸素などの生成、採集も進む



宇宙へのアクセスは大樹町から!

©北海道スペースポート研究会




©JAXA

©JAXA/NASA

©北海道大学

国際宇宙ステーション(ISS)の後継低軌道プラットフォームや月軌道プラットフォームが建設され、その中で微小重力や真空環境を活用した、最新の研究開発が行われる。



©ESA

深刻化する宇宙デブリの問題解決は日本が率先して行う。デブリの回収、大気圏再突入などによる処理の衛星打ち上げは大樹町から!