

宇宙探査イノベーションハブ

～太陽系フロンティア開拓による人類の生存圏・活動領域拡大に向けたオープンイノベーションハブ～

「自動・自律型」探査技術：拠点建設

発表者：若林 幸子

JAXA 宇宙探査イノベーションハブ



テーマ：無人で有人拠点を建設する

◆宇宙探査へのチャレンジ

- 「全指令型」から「自動・自律型」に変革し、情報でつながるが独立性の高い自立した宇宙探査を目指す。

◆必要な技術

- 軽薄短小志向の宇宙技術と重厚長大な建設技術をICT技術や材料技術をキーワードとして融合し、イノベーションを生み出すことを目指す。

◆地上展開へのチャレンジ

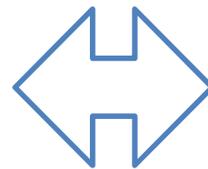
- 既存の事業への応用に加え、新たな応用先を模索。



情報化施工
(日立建機ホームページより)



雲仙普賢岳無人
化施工 (NPO法
人 土砂災害防止
広報センター)



宇宙だけでなく、地上の建設作業、
超遠隔地や海底・地下などでの利
用につなげていく。

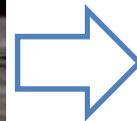
宇宙における「建設」の変遷

- ◆ 人類の生存圏・動領域拡大には、他天体を開拓し常駐を進めることが次のステップとなる。
- ◆ 地上で安全・効率の観点で進められてきた世界トップクラスの無人化・自動化技術を初期段階から取り込み、地球からの全指令型から脱却し、自立探査を目指す。



アポロ
建設：なし

宇宙飛行士は着陸船に滞在。滞在に必要な機材等は全て地球から運搬。



宇宙ステーション
建設：宇宙飛行士

モジュールを順次打上げ結合する方式。建設と整備・保守は、地上と連携して宇宙飛行士が実施。



今後の探査
建設：無人化・自動化

初期段階から無人化（遠隔化）・自動化を導入し、自立的で効率的な建設を実施。（送る指令は最少に、受け取る情報は最大に。）

常駐拠点のイメージ

- 長期滞在には、活動を支えるインフラの整備が必要
- 宇宙技術の延長というより地上技術の延長
⇒地上との共通技術が数多く見つかりと期待



技術で月と地球を地続きに！

拠点建設シナリオ（仮定）

<20◇◇年頃～>

- ① 月の周回軌道に有人拠点（月軌道ステーション）を構築
常時滞在し、定期的に交代する。通信機能を持ち月面と地上の常時接続が確立する。
- ② 有人月面ミッションに先立ち、無人（貨物）ミッションの実施
月面に、短期滞在のための電源供給システム、通信システム、及び移動手段である曝露車が前もって輸送される。地盤調査や測定の基準点の設定等が行われ、拠点建設の準備が整う。
- ③ 有人による短期滞在ミッションの実施
②で送られた荷物を活用しながら着陸船兼用のモジュールで短期滞在を行い、最低限の居住環境を構築する。これをもって20◇◇年頃拠点建設が始まる。

<20◇◇年頃～>

- ④ 年1回程度の有人短期滞在の繰り返し（数年）
並行して無人ミッションにより、年1～2回、作業機械等を地球から送り込み、無人による拠点建設が進む。地上からの遠隔施工が主体で、年に1回有人が現地で作業を行う。作業機械は、6か月程度は稼働することを想定する。

- ⑤ 有人滞在期間が延長（6か月程度の滞在）

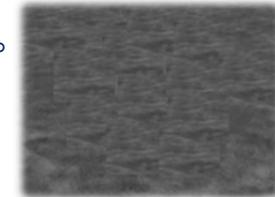
<20◇◇年頃～>

- ⑥ 6か月程度の長期滞在可能な拠点を建設
少数の人が常時滞在することを前提とし、将来の拡張を視野に入れた建設作業が可能となる。

<20◇◇年頃～>

- ⑦ 拠点の拡張、一般人の月面滞在を開始

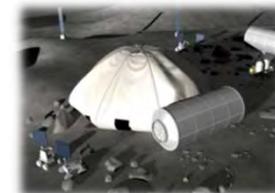
（イメージ）



地盤調査
・整地



掘削・
設置



維持・
拡張



*本シナリオは、あくまで
現時点での仮定である。

「拠点建設」関連の共同研究

課題の選定方法

- 最終的に一つの施工システムに統合する前提でキー技術を抽出。
- 課題解決型（大型研究）は環境に依存しにくい課題からスタート。
- 環境に依存する基礎知識はアイデア型（小規模研究）で検討。

	研究課題	前頁シナリオ①～⑦との対照
建設作業	アースオーガ掘削情報による地盤推定のシステム化検討	②：地盤の事前調査システム
	拠点建設を実現する遠隔施工システム	②～：時間遅れを克服可能な建設作業の全体システム
	軽量化建機	②～：上記施工に用いる建設機械の検討
	遠隔・自動施工可能な軽量建機システム	
	革新的移動機構を備えた共通台車の設計	
	構造物の無人による建築技術	③～：構造物とその自動組立・設置システム
拠点構造物の建築・拡張・維持の省力化	④～：構造物の維持・拡張	
基礎知識	地盤推定手法の確立	建設作業の事前調査手法の検討
	自重に依存しない締固め手法の研究	整地等の根拠になる基礎知識
	自動掘削シミュレーション	掘削作業の自動化・効率化

地盤調査（FY27選定課題、FY29フェーズアップ課題）

アースオーガによる地盤掘削時の 施工情報を利用した地盤定数推定法

目的：特別な機器を使用せず、アースオーガの掘削情報から地盤特性を逆推定する手法を確立。

研究内容：スクリーオーガがボアホールを作成する際（掘削時）には、月面地盤より掘削抵抗を受ける。このスクリーオーガと月面地盤との掘削抵抗情報を利用して、間接的に地盤強度を推定。

地上展開：スクリーオーガを使用している杭施工現場などへの適用

宇宙利用：水氷探査等での地盤定数の逆推定、月面基地の開発に向けた地盤強度の調査

立命館大学、日特建設株式会社



月面探査ローバ搭載のアースオーガを用いた調査手法の確立



杭基礎工事例 ©日特建設

地盤調査（FY27選定課題）

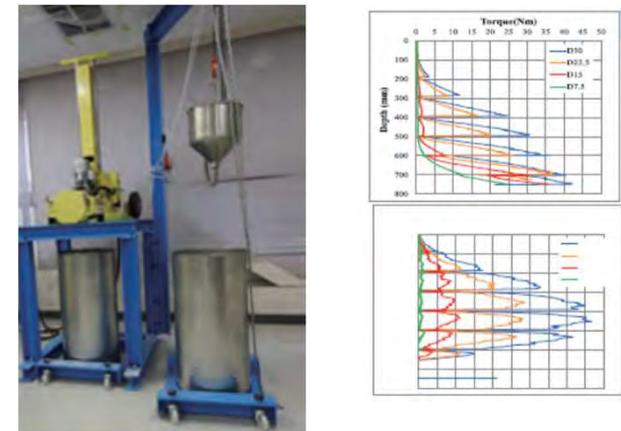
スクレードライビングサウンディング(SDS)による 月面でも利用可能な地盤調査技術の確立

東京都市大学、ジャパンホームシールド株式会社、
日東精工株式会社、東急建設株式会社

- 目的：特別な機器を使用せず、アースオーガの掘削情報から地盤特性を逆推定する手法を確立する。
- 研究内容：アースオーガの掘削情報に対して、スクレードライビングサウンディング（SDS）と呼ばれる現行の地盤調査方法の定数推定アルゴリズムを援用して、月面の地盤定数を推定する方法を提案した。
- 地上展開：杭打ち施工管理方法の提案につなげる。
- 宇宙利用：水氷探査等での地盤定数の逆推定、月面基地の開発に向けた地盤強度の調査



SWS試験とSDS試験が可能な地盤調査機
©日東精工株式会社



現行SDSの理論と試験方法を基に、
アースオーガ特性を把握

遠隔施工（FY27選定課題）

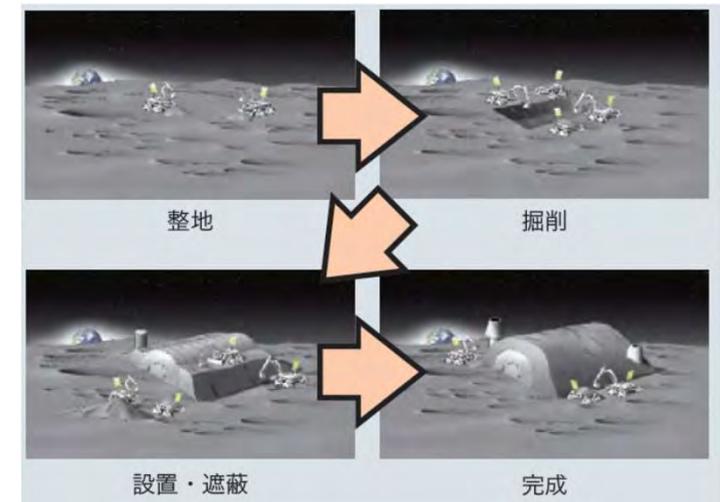
遠隔操作と自動制御の協調による 遠隔施工システムの実現

鹿島建設株式会社、芝浦工業大学、
京都大学、電気通信大学

- 目的：地上の建設作業で実績のある無人化・自動化技術に時間遅れを考慮した施工技術の実現
- 研究内容：通信時間遅れがある環境でのスムーズな遠隔操作や、建設機械が障害物や他の機械を自律判断で避けながら行う自動作業、さらには建設機械同士が自動で協調作業を行う技術の研究
- 地上展開：熟練者不足や現場作業者の減少、危険環境での作業者の安全確保、及び生産性の向上などを目指し建設現場に導入
- 宇宙利用：月や火星の有人拠点建設作業



地上と宇宙の遠隔施工イメージ



建設機械（FY27、29選定課題）

- 超軽量建機アタッチメントおよびブーム等の開発および実地検証
- 遠隔操作およびアタッチメントの自動脱着可能な軽量建機システムの開発と実地検証

株式会社タグチ工業、東京農工大学

目的：建機の超軽量化・遠隔化・自動化の実現

研究内容：アタッチメントやブームを始めとした大幅軽量化、及び遠隔化・自動化機能の付加による遠隔・自動脱着可能な軽量建機システムの実現。

地上展開：軽量化・遠隔化・自動化によりビル内などの都市型建設現場において、運搬性・作業性・燃費等の優位性を発揮。

宇宙利用：月や火星の有人拠点建設作業



軽量金属製アーム

CFRP製アーム

建設機械（FY27選定課題）

多目的全方向移動クローラー共通台車の設計

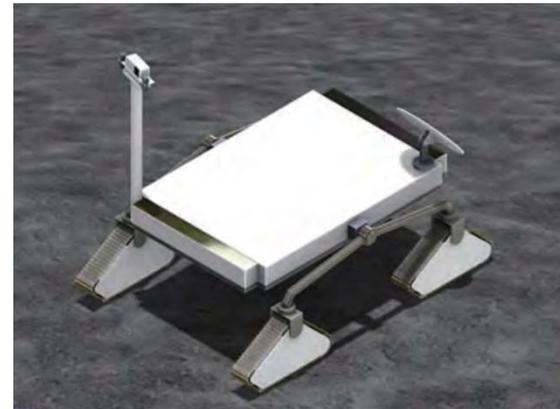
トピー工業株式会社、福井大学、有人宇宙システム株式会社、東北大学

目的：目的に合わせた異なる作業部分を取付可能な、走破性・機動性が高い共通台車の実現

研究内容：上載質量が大幅に変化した場合にも走行性能を維持可能で、登坂能力や全方位移動可能での位置決め精度が高い、革新的移動機構を備えた共通台車を検討。

地上展開：人が立ち入れない極限環境（海洋、原発など）を想定し、多目的な移動機構が必要。

宇宙利用：地上のように多種多様の車両を持ち込むことは現実的でないため、共通化が必要。



共通台車のイメージ
共通機能（移動、通信など）を受け持つベースとなり、多目的に使う。



全方向クローラの試験風景 ©トピー工業

整地の基礎知識（FY27選定課題）

締固め困難材料に対する振動等を用いた効果的な締固め方法と走行安定性の検証

酒井重工業株式会社

目的：軽量の機材で地盤を締め固める手法を研究し、地上でもより効果的な手法として応用する。

研究内容：月面を想定し、極力自重に依存しない締固め手法を検討する。さらに、その手法の実現方法を検討し、地上で実績のある手法と比較を行う。

地上展開：使用材料選択の幅を広げると共に、工期短縮や経費低減につなげる。

宇宙利用：月や火星の拠点建設作業



地上の転圧作業で使われる振動ローラ



大型室内試験場を使用した締固め試験

掘削の基礎知識（FY29選定課題）

バケットに作用する掘削抵抗力を用いた 地盤強度推定モデルの開発

東北大学、清水建設株式会社

目的：掘削作業をリアルタイムで計測・予測する実用的なシミュレーション技術の研究。

研究内容：掘削時のバケットに作用する抵抗力から地盤強度や物性値を推定した上で、掘削溝を自動で効率的に掘る手順を導き出し、実機で実証する。

地上展開：計測値と簡略化したシミュレーションを融合した実用的な手法を適用し省力化やコストダウンにつなげる。

宇宙利用：月や火星の拠点建設作業の効率化



月面掘削作業



地上掘削作業

構造物（FY28選定課題）

建築分野の無人化施工に関するシステム検討

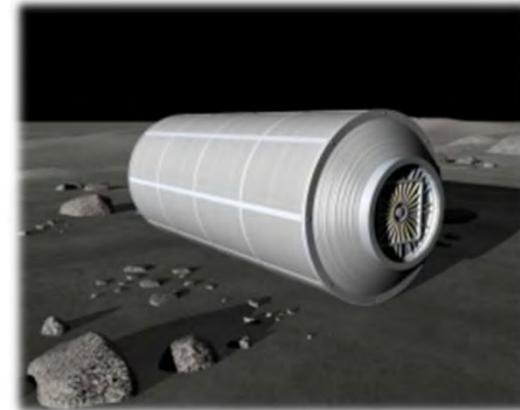
清水建設株式会社

目的：月・火星を想定した居住用構造物の概念、及びその自動組立・設置を行う汎用的なシステムの研究。

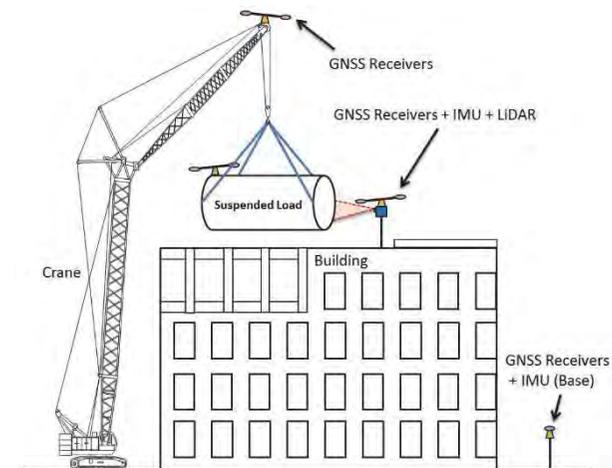
研究内容：建築作業の自動化に必要な自己や揚重物の位置姿勢の計測を高精度に行い、揚重作業の無人化を検討。

地上展開：構造物の位置決めやクレーンの揚重計画等の大幅な省人化、さらに設計や施工管理や建物管理との情報連携の円滑化。

宇宙利用：人が行く前に無人によりモジュール等の設置を実施。



月面でのモジュール設置



地上建築作業の無人化

構造物（FY29選定課題）

持続可能な新たな住宅システムの構築

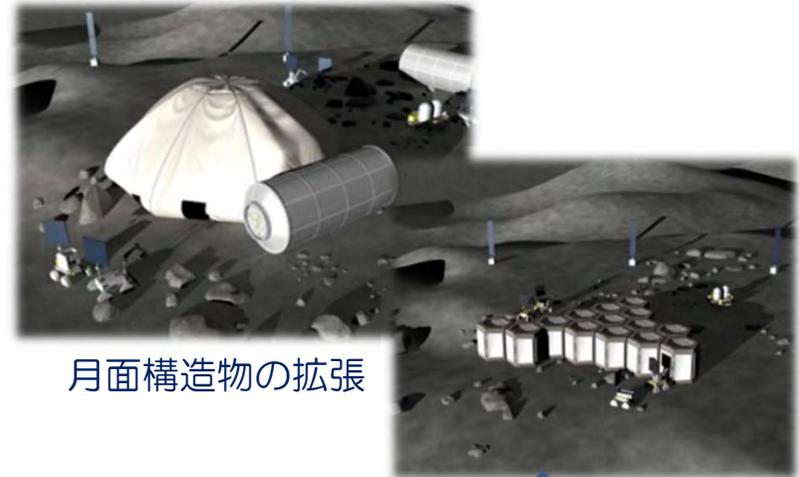
ミサワホーム株式会社、株式会社ミサワホーム総合研究所

目的：長期間の居住に適した構造物の建築・拡張・維持の省力化。

研究内容：構造物の柔軟な拡張・減築が可能となる工法技術、及び専門性を有さない作業者が簡単に施工・維持管理できる、持続可能な新たな住宅システムを検討。

地上展開：熟練作業者の減少などに対処するための、建物の建築、拡張、維持管理の省力化。

宇宙利用：月や火星の拠点構造物の、専門外の作業者による拡張、建築・維持管理。



月面構造物の拡張



南極の構造物
(©ミサワホーム)

研究課題例

青字：着手済み課題

橙字：今後の課題候補

<システム>

- 施工システム
 - 遠隔化（無人化）・自動化システム
 - 施工管理・施工支援(高度情報化)システム
 - CIM・BIM、施工・設置後の評価
 - 構造物の設置システム
 - 運用システム
 - 人との連携、作業シミュレーション、定型作業の自動化
- 保守・整備
 - 簡略化、規格化
- 標準化

<基礎知識>

- 機械と土壌の相互作用
 - 地上で確立した締固め方式等の適用性
 - 拳動の予測
 - 地形変化のリアルタイムシミュレーション
- 新しい技術の導入
 - 材料（超軽量・高剛性など）
 - 通信方式
 - GPSに代わる位置情報取得

<要素>

- 作業機械・作業ツール
 - 大型軽量化、電動化、遠隔操作
 - 協調作業、作業対象の自動認識
 - 共通化・モジュール化
- 測量、地図作成
 - 地形情報の取得、施工・設置後の評価
- 位置情報取得
 - 相対位置関係の取得、相互認識
- 構造物
 - 方式選定（展開方式、組立・プレハブ方式、等）
 - 大型軽量化
 - 設置方法
 - 資材
 - 保護・防御
- 操作系
 - 目視・映像（直接、中継）、指令方式・操作支援、通信遅れ補償

「自動・自律：拠点建設」に関するご意見

自動・自律技術分野における

「地上展開と宇宙利用の共通課題」

について議論を実施

「平成29年度 課題設定ワークショップ
自動自律・地産地消合同分科会」

日時：2017.11.30

場所：TKP八重洲カンファレンスセンター 8C

共催：JAXA宇宙探査イノベーションハブ
土木学会建設用ロボット委員会

- ◆ 自動・自律（拠点建設）と地産・地消（建材）の合同開催
- ◆ 土木学会 共催による3回目の議論の場
- ◆ 内容：研究課題の紹介、課題設定の方針、今後の研究課題

「自動・自律：拠点建設」に関するご意見

WSでは以下のご意見をいただいた。

＜実施課題の観点＞

- 自動化とシステム化が必要だが、後者の補強が必要。
- 事前検証手段ともなる、リアリティのある統合シミュレーションが必要。
- 建設分野の流れ（ICT）やAIの活用。
- 宇宙と海中/海底に共通課題が見つかるのでは。

⇒システム、統合の観点。

＜方針・その他＞

- 全体システムとしてどう構築するか。
- 検討を深めるには、工法の決定など一段深い判断が必要。
- 地上技術の不要部分（手順・作業）を先にそぎ落とす。機能の読み替えも必要。
- 宇宙にフォーカスして検討すると地上がもっと変わるのでは。

⇒もう1段深めた検討へ。

研究課題例

青字：着手済み課題

橙字：今後の課題候補

<システム>

- 施工システム
 - 遠隔化（無人化）・自動化システム
 - 施工管理・施工支援(高度情報化)システム
 - CIM・BIM、施工・設置後の評価
 - 構造物の設置システム
 - 運用システム
 - 人との連携、作業シミュレーション、定型作業の自動化
- 保守・整備
 - 簡略化、規格化
- 標準化

<基礎知識>

- 機械と土壌の相互作用
 - 地上で確立した締固め方式等の適用性
 - 拳動の予測
 - 地形変化のリアルタイムシミュレーション
- 新しい技術の導入
 - 材料（超軽量・高剛性など）
 - 通信方式
 - GPSに代わる位置情報取得

<要素>

- 作業機械・作業ツール
 - 大型軽量化、電動化、遠隔操作
 - 協調作業、作業対象の自動認識
 - 共通化・モジュール化
- 測量、地図作成
 - 地形情報の取得、施工・設置後の評価
- 位置情報取得
 - 相対位置関係の取得、相互認識
- 構造物
 - 方式選定（展開方式、組立・プレハブ方式、等）
 - 大型軽量化
 - 設置方法
 - 資材
 - 保護・防御
- 操作系
 - 目視・映像（直接、中継）、指令方式・操作支援、通信遅れ補償

ぜひ広く技術情報をお寄せください。

(参考) 探査シナリオについて

米国の状況（掲載記事より）

トランプ大統領 月に再び宇宙飛行士を 新たな宇宙政策について

アメリカのトランプ大統領は新たな宇宙政策として、アメリカの宇宙飛行士を月に再び送り、火星への有人探査に向けた拠点を築くよう指示しました。

トランプ大統領は11日、ホワイトハウスでアメリカの新たな宇宙政策に関する文書に署名しました。それによりますと、NASA＝アメリカ航空宇宙局に対して、アメリカの宇宙飛行士を月に送り、火星への有人探査に向けた拠点を築くよう指示するとしています。

<http://www3.nhk.or.jp/news/html/20171212/k10011255411000.html>

トランプ氏「人類再び月へ」 新たな宇宙計画を発表

トランプ米大統領は11日、人類を再び月へ送ると明記した新たな宇宙計画を発表した。ホワイトハウスで開いた署名式で「米国人宇宙飛行士を再び月へ送る重要な一歩だ」と述べ、「最終的に火星やその先の世界へ向かう基盤をつくる」と宣言した。月の周回軌道への宇宙基地建設を目指していた現行計画を修正するもので、月への着陸は1972年以来となる。

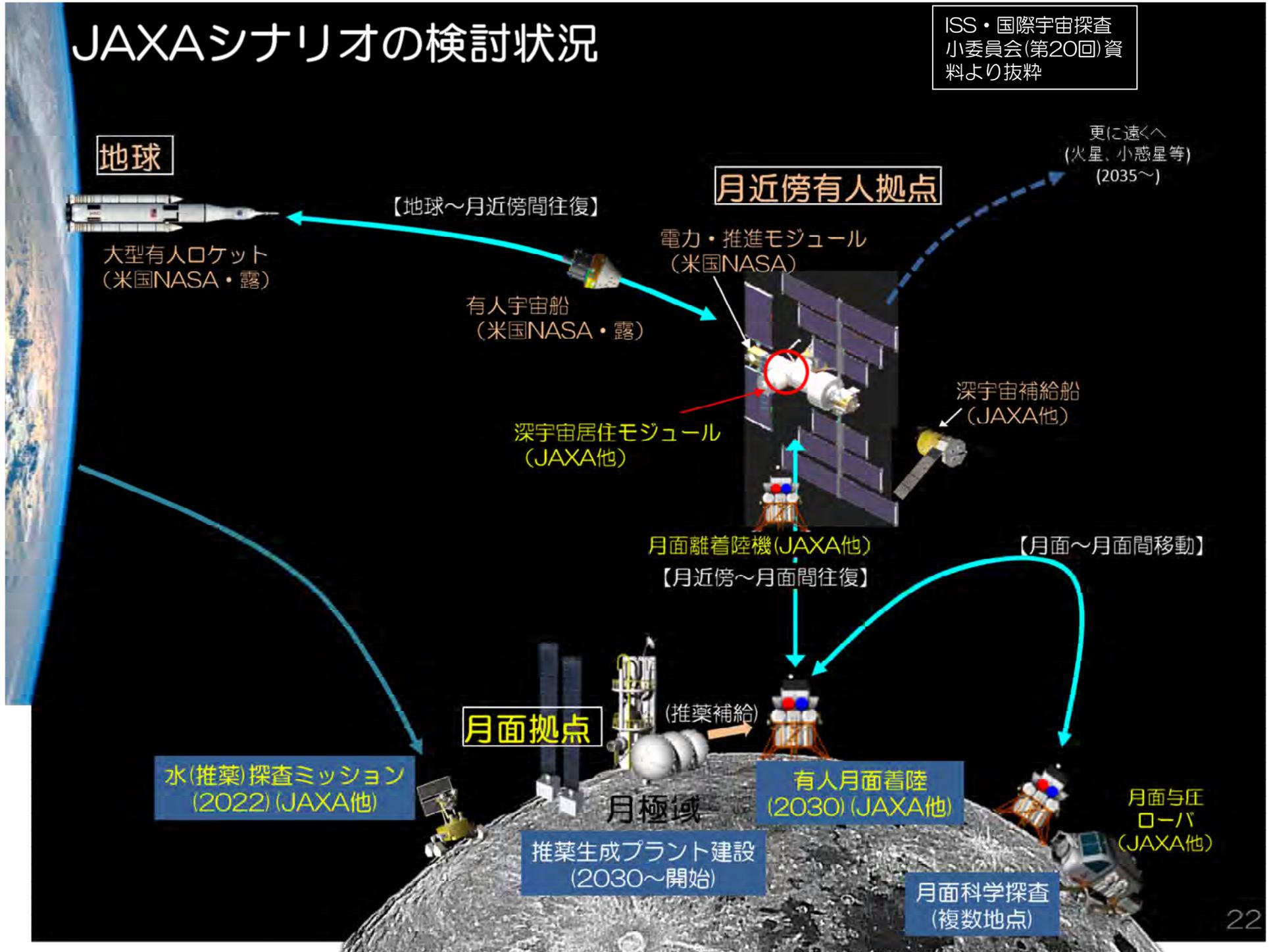
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO24519070S7A211C1000000/>



宇宙計画に署名した
トランプ大統領
(11日、ワシントン)

JAXAシナリオの検討状況

ISS・国際宇宙探査
小委員会(第20回)資料より抜粋



ご清聴ありがとうございました。