

再使用型宇宙輸送システムの検討状況

令和元(2019)年11月5日

宇宙航空研究開発機構(JAXA)
研究開発部門

再使用型システムに向けた取組みについて

- JAXAでは、「宇宙輸送システム長期ビジョン」(平成26年4月宇宙政策委員会)(補足1)に基づいて、システム形態や推進システムに依らず共通的に必要となる技術の研究を進めている(工程表における位置づけは補足2)。
- 日本に強みがあるシステムレベルのキー技術である、①誘導制御技術、②推進薬マネジメント技術、③ヘルスマネジメント技術については、小型実験機CALLISTO*により、データ蓄積と技術成熟度の向上を目指すとともに、再使用による低コスト化の効果を見定める。
 - 補足3にキー技術の検討状況を示す。
- CALLISTOのリスク低減のために、その先行としてRV-Xを実施し、CALLISTOの設計へ反映する。RV-Xは、地上系の準備でやや遅れがあるが、CALLISTOへの影響はない(補足4)。

RV-X(飛行実験フェーズ1)

計画概要

- 2020年度前半に飛行試験を予定(2019年度末から変更)
- 高度100mまで上昇し垂直着陸
- 日本単独の研究として、能代ロケット実験場で実施

目的

- 再使用エンジン技術(液体酸素/液体水素)の熟成や着陸段階での誘導制御技術に関する基礎データの取得等



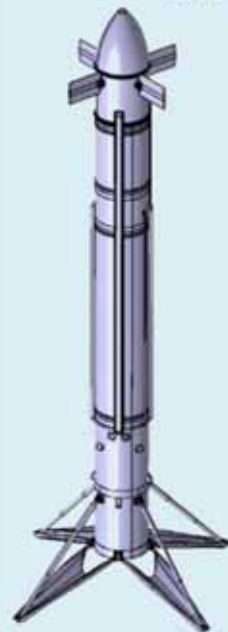
CALLISTO(飛行実験フェーズ2)

計画概要

- 2022年度に飛行試験
- 高度約40kmまで
- ギアナ宇宙センターで実施
- 仏CNES、独DLRの3機関共同で実施し、早期かつ効率的に技術獲得
- RV-Xと同型のエンジン1基を搭載

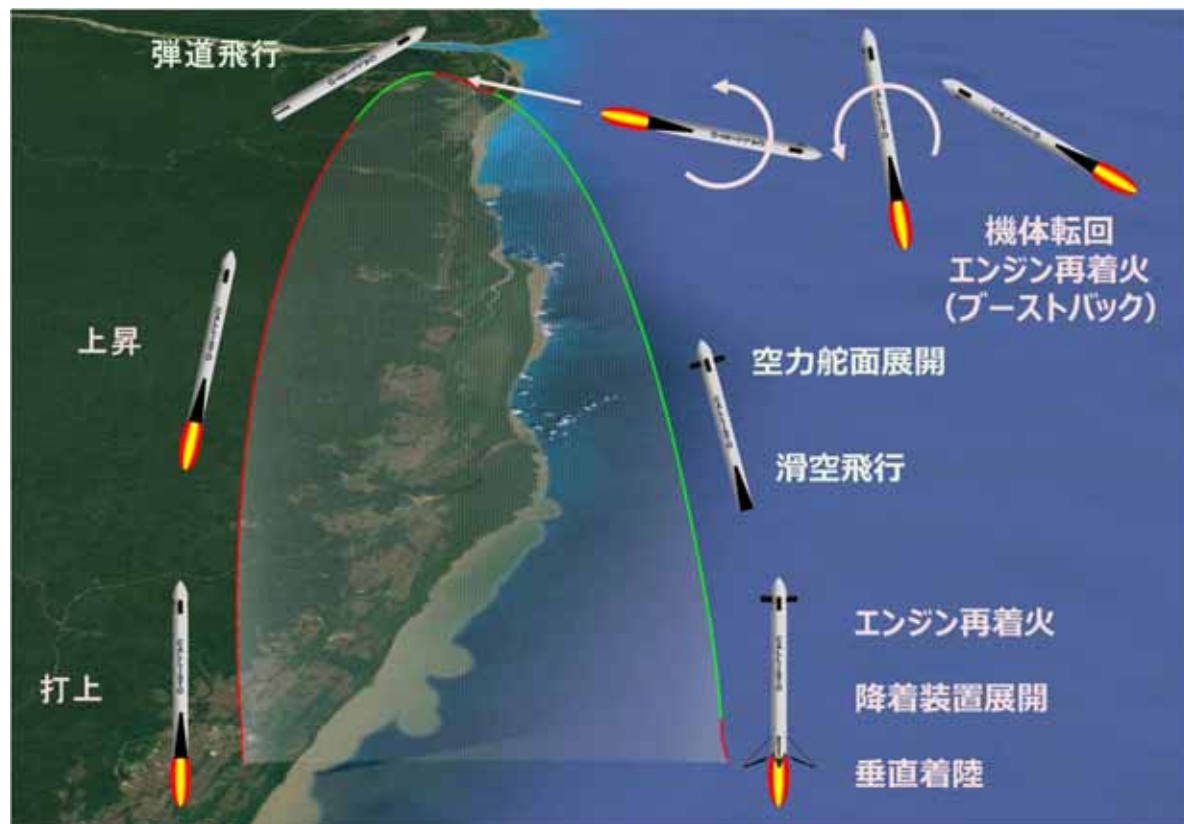
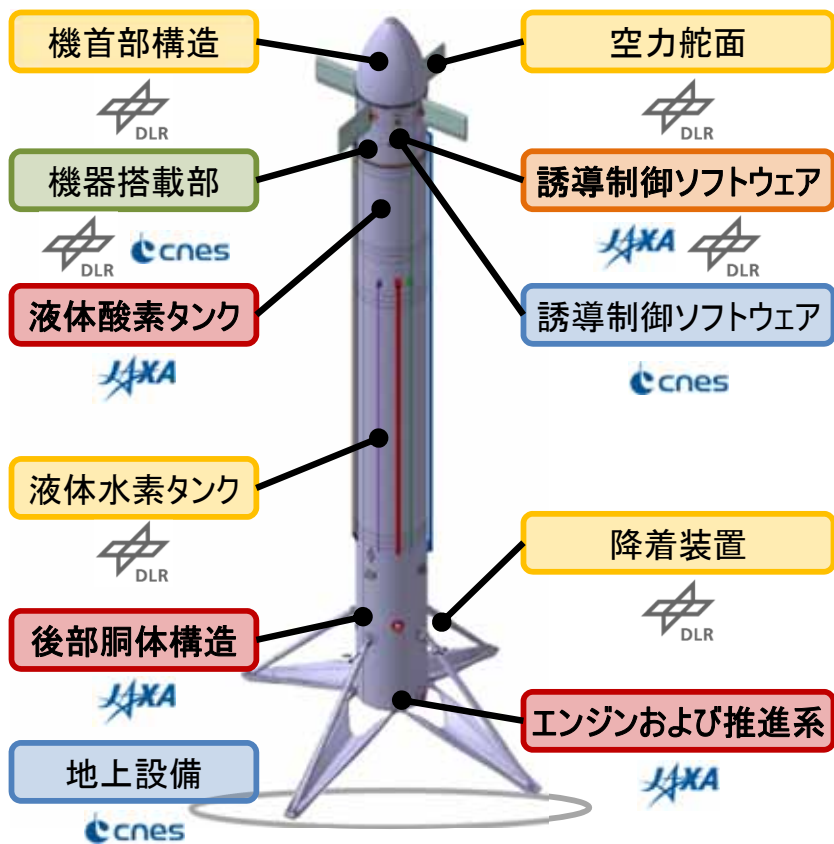
目的

- 大気上層・超音速域まで飛行範囲を広げ、キー技術の実証および再使用化の経済性に関するデータを蓄積



CALLISTOの進捗状況

- 2017年6月に、プロジェクト計画検討のための3機関協定を締結し、概念設計を実施中
- 2018年3月に、前半作業であるミッション・システム実現性の検討や主な分担の調整等を完了
- その後、2019年度末に向けて、システム仕様(主要諸元、機能・性能など)、各機関で分担するサブシステムに対する要求、開発スケジュール等を確定させる作業を進めている。

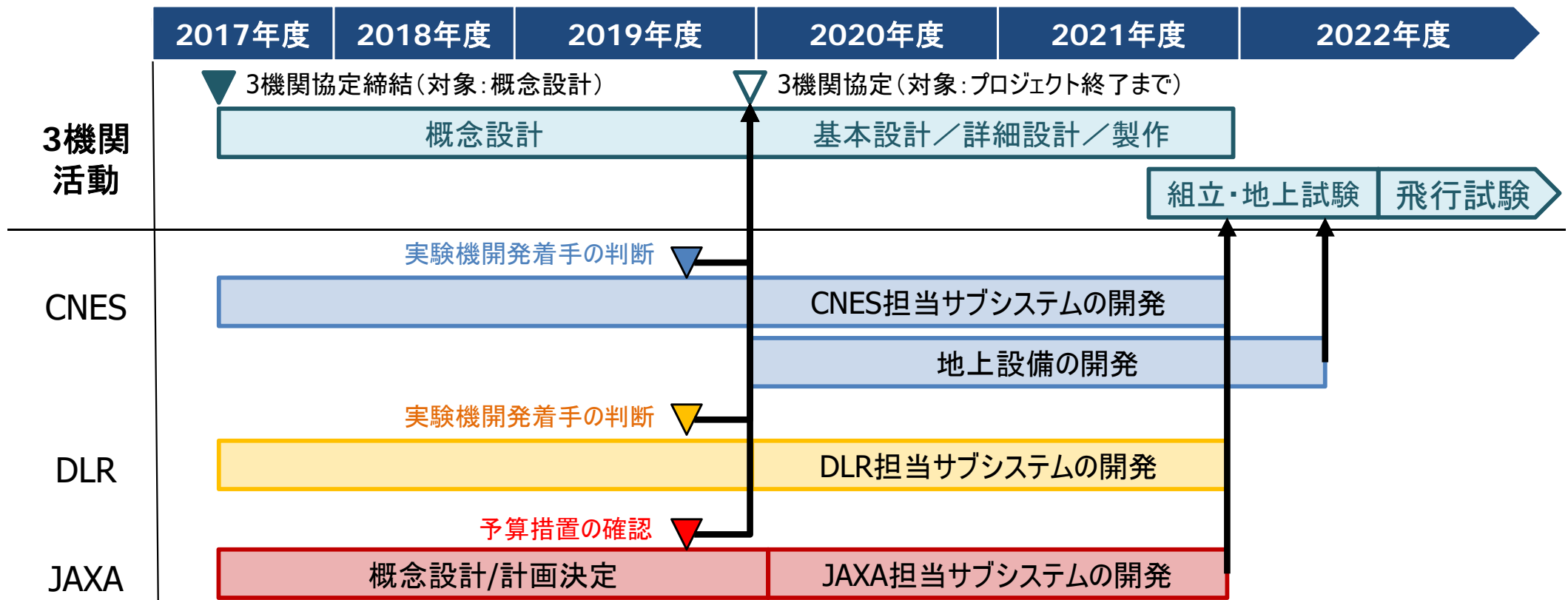


艙装検討用に作成したデジタルモックアップ(機体直径1.1m、全長13.5m)と各機関の主な分担

海上(台船)に着陸する飛行プロファイルの検討例(最高高度約36km、最高マッハ数1.6)。射点に戻るプロファイル(P9左図)など複数回の飛行を計画

CALLISTOの今後の計画

- 2019年度末:プロジェクト終了までを対象とした3機関協定締結を予定
- 2020年度:実験機の開発に着手
- 2022年度:飛行実験(ギアナ宇宙センター)を実施
 - 欧州では、CALLISTOに続く実機スケールの実証機(補足5)の成果を用いて、2025年頃に1段再使用化の有効性を見極める予定である。そのため、CALLISTOについては、2022年の飛行試験実施が必達目標であるとCNESが表明している。



CALLISTOで得た技術の適用先について

- これまで培ってきた強みのある技術を途絶えさせず、次世代の多様な輸送システムに広く応用できるように技術レベルを高めるには、CALLISTOは有効な取組み

キー技術	CALLISTOで達成すること	CALLISTOで得た技術・知見でできるようになること	
①誘導制御技術	再使用1段模擬飛行等による誘導制御アルゴリズムの実証	1段再使用システム サブオービタルシステム	定数は異なるが、同じ構造の誘導制御アルゴリズムを直接応用できる。
		将来の再使用システム	将来期待される打上時アボート飛行に向けた知見が得られる。
②推進薬マネジメント技術	加圧と揺動を制御し極低温推進薬を確実に供給できることの実証 タンク内圧力履歴予測のさらなる高精度化を可能にする飛行データの取得	再使用システム全般	タンク内圧力等の高精度事前評価ができ、加圧ガス等のマージンを減らせる。
		1段再使用システム	速い姿勢変更によって推進薬を削減できる可能性がある。
		軌道間輸送システム	探査ミッションにおける極低温推進薬の長期貯蔵の実現に役立つ。
③ヘルスマネジメント技術	非破壊検査技術を用いたオンサイトでのエンジン再整備の実証 故障予知・診断技術の有効性の評価	再使用システム全般	エンジン再整備費用と期間を大幅に削減できる。
		1段再使用システム	再整備費用を考慮した1段再使用による経済的効果を評価できるようになる。
		使い切りロケット	地上試験効率化が可能となる。

(補足1) 宇宙輸送システム長期ビジョン

- 再使用型宇宙輸送システムの構築に係る中心的課題(4-2項、4-3項をもとに作成)

A. システム技術

- ① 高頻度繰り返し運航のシステム技術(機体を帰還させるための誘導制御、推進薬マネジメント技術含む)
- ② 故障許容安全設計技術
- ③ 超軽量化, 推進系の高性能化によるシステム構築
- ④ 耐空性, 有人化など安全基準の確立

B. 超軽量化技術と極低温・超高温構造の一体設計技術

- ① ナノマテリアル技術
- ② 複合材構造設計の高度化技術
- ③ 再生冷却構造等の冷・熱構造の一体設計技術
- ④ 高温強度の高い複合材技術
- ⑤ 耐熱素材技術を用いた熱構造の革新技術

C. 推進系

- ① ロケットエンジン
 - # 寿命管理設計, フェールセーフなシステム技術
 - # 性能向上, 軽量化, 高度補償ノズルなどの新技術
- ② エアブリージングエンジン
 - # 超音速燃焼, 熱交換器, インテーク技術
 - # 機体統合サーマルマネジメント

D. ヘルスマネジメント技術

- ① エンジンヘルスマニタリング技術
- ② 構造・統合機体ヘルスマネジメント技術
- ③ 自律的飛行管制・飛行運用技術
- ④ 飛行間点検・整備・運航におけるヘルスマネジメント技術

(下線部: 小型実験機による飛行実験にて技術成熟度向上やデータ蓄積を目指す項目)

- 将来宇宙輸送システムの開発プロセス(4-6項より引用)
 - 再使用型宇宙輸送システムの実用化を目指すためには、要素技術だけではなく、それらを統合するシステムインテグレーション技術を獲得する必要があり、国際優位性の観点からも重要。
 - 実験機の開発と運用を通じて、得られる各種の成果を再び研究フェーズにフィードバックするというサイクルを確立し、研究開発を進めていく必要がある。
 - 各国の機関と我が国の実施機関において、密接な連携を推進し、効率的に研究開発を進めることが望ましい。

(補足2)宇宙基本計画および工程表での位置づけ

- 宇宙基本計画(平成28年4月1日閣議決定)
 - 「4.(2)②)将来の宇宙利用の拡大を見据えた取組」において「新型基幹ロケット等の次の宇宙輸送技術の確立を目指し、再使用型宇宙輸送システムの研究開発を推進する。」と記載されている。
- 宇宙基本計画工程表(平成30年12月11日 宇宙開発戦略本部決定)

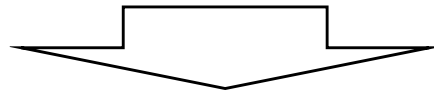
「34 再使用型宇宙輸送システム」において以下の記載がある。

 - H3ロケット等の次の宇宙輸送技術構築に向けて国際競争力を有する将来輸送系のシステムについての検討を進めるとともに、国際協力による一段再使用飛行実験の計画を念頭に、2019年度に再使用型宇宙輸送システムの小型実験機の飛行実験を実施し、誘導制御技術や推進薬マネジメント技術等の実証を行う。
 - エアブリージングエンジン搭載システムについて、関係機関との連携も含め、主要技術の効率的な獲得を目指す。
 - 上記の成果を念頭に、宇宙輸送システムの長期ビジョンの見直しも視野に入れつつ、2019年度から我が国の再使用型宇宙輸送システムを実現するにあたっての課題(技術・コスト等)の検討を進める。

(補足3)キー技術の検討状況(1/3)

日本に強みがあるキー技術とCALLISTOの意義

- ① 航空分野や有翼往還機の研究で蓄積してきた機体を安全に帰還させるための**誘導制御技術**
- ② 基幹ロケット実機データや国際共同研究を通して蓄積してきた推進薬挙動に関する高精度数値シミュレーション技術(**推進薬マネジメント技術**)
- ③ LE-9等の開発を通して蓄積してきたロケットエンジンシステムの故障モードに関する深い知見と、それらに対応した**ヘルスマネジメント技術**



CALLISTO飛行実験はこれらの強みをさらに高め、応用先を拡大できる機会となる



基幹ロケットに限らず、我が国の宇宙輸送システムの共通的な基盤技術の発展に資するものであり、多様なシステムへの適用・応用が可能

(補足3) キー技術の検討状況 (2/3)

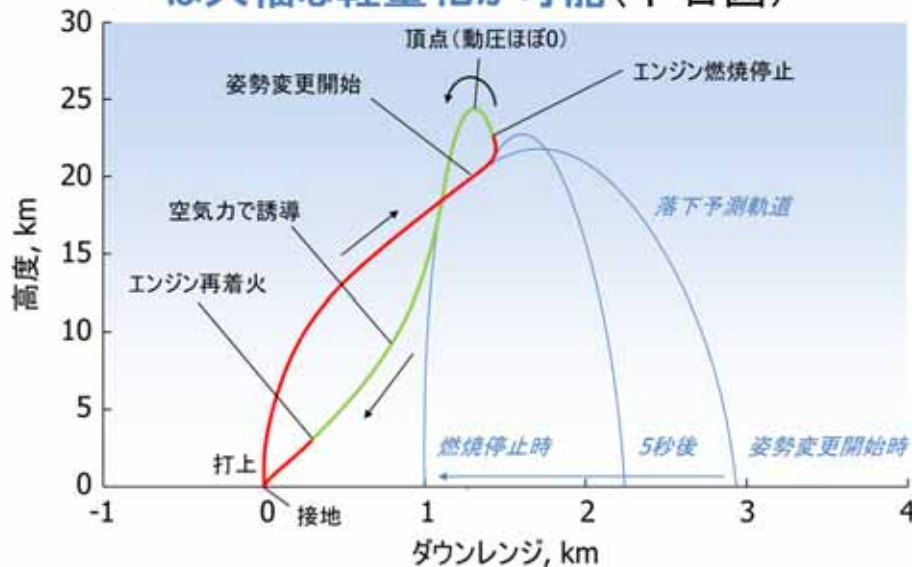
キー技術の検討状況

① 誘導制御技術

- 実時間で予測した落下点に基づいてエンジン停止タイミングを決定する機能や、エンジン噴射中に大きく飛行方向を変える機能等、Falcon9とは異なる形態のシステムにも適用できる機能を検討中 (下左図)

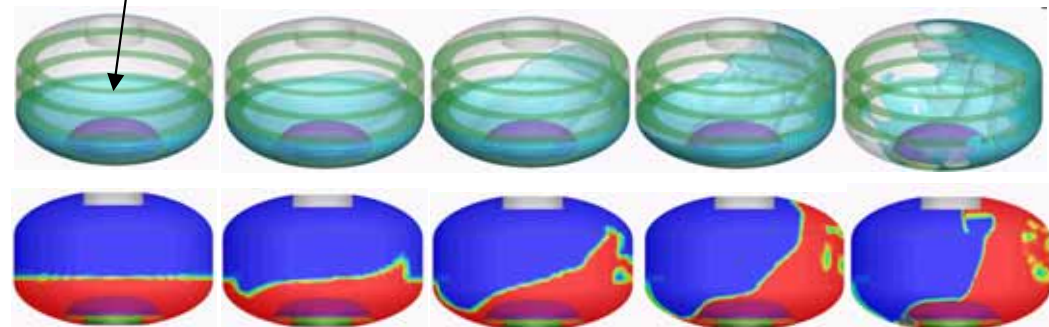
② 推進薬マネジメント技術

- 再使用型ロケットでは使い切りロケットに比べて大きな姿勢変更を行うが、確実に推進薬をエンジンに供給するには、タンク内部デバイスが必要
- 従来のタンク全体を塞ぐようなデバイスに比べて、JAXAが開発したメッシュを用いる液面保持デバイスは大幅な軽量化が可能 (下右図)



メッシュを用いた液面保持デバイス

この下に推進薬の吸い込み口があり、ガスを吸いこまないように、内部に液体が保つ



CALLISTOで実証するPTO (Powered Tilt-Over) 飛行エンジン噴射中にジンバルで推力方向を制御し、姿勢や飛行方向を変更する。

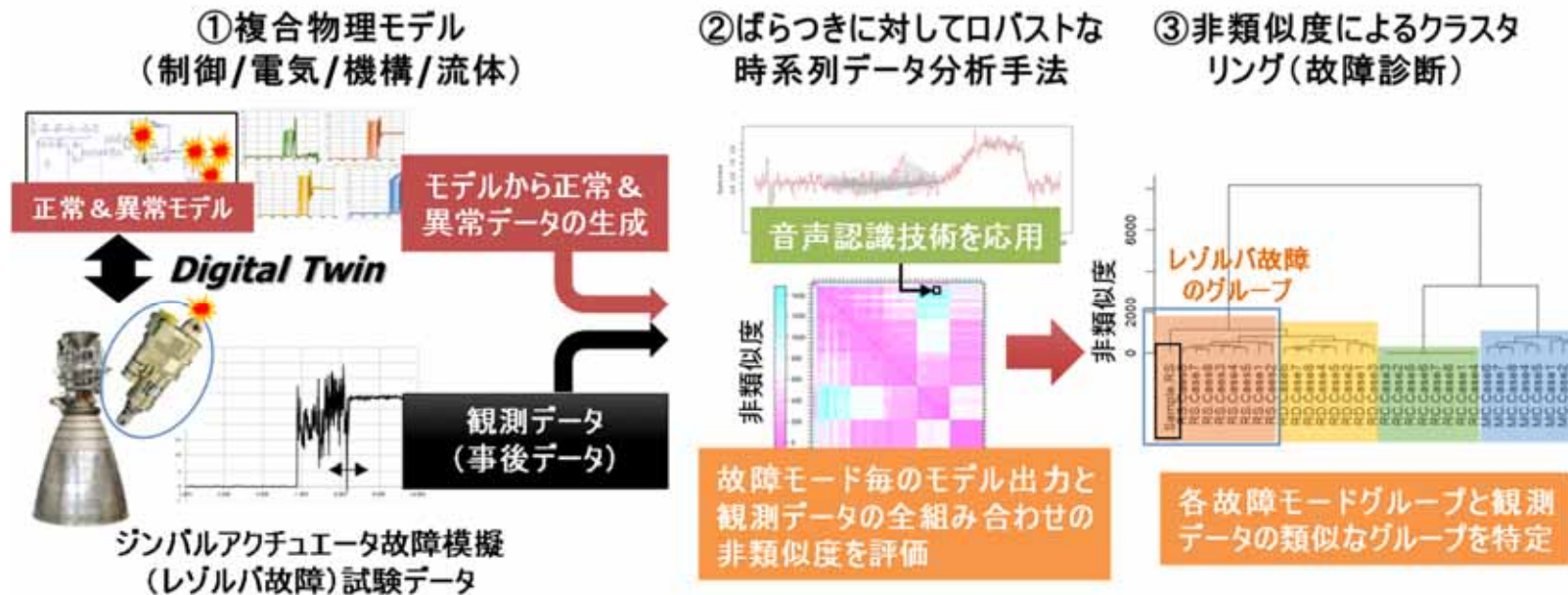
実機スケールの液体酸素タンクを用いた内部デバイスの評価例。メッシュの表面張力により、推進薬がタンク底面に保持される。

(補足3) キー技術の検討状況 (3/3)

キー技術の検討状況 (前ページからのつづき)

③ ヘルスマネジメント技術

- 日本の強みは、100回以上使えるエンジン(*)の設計技術を持つこと、LE-9向けに研究してきた非破壊検査技術の蓄積があること、複合領域物理モデリングなどの故障予知・診断に使えること
 - * RV-X搭載エンジンは、角田宇宙センター等で149回の燃焼試験を実施しており、同型のエンジンを新たに製作してCALLISTOに使用する。
- 故障モードごとに適切な非破壊検査、故障予知・診断(モデルベースおよびデータ駆動)を適用し、**従来行われてきたエンジン取外し/分解を行わずに、次回飛行の信頼性を保証**

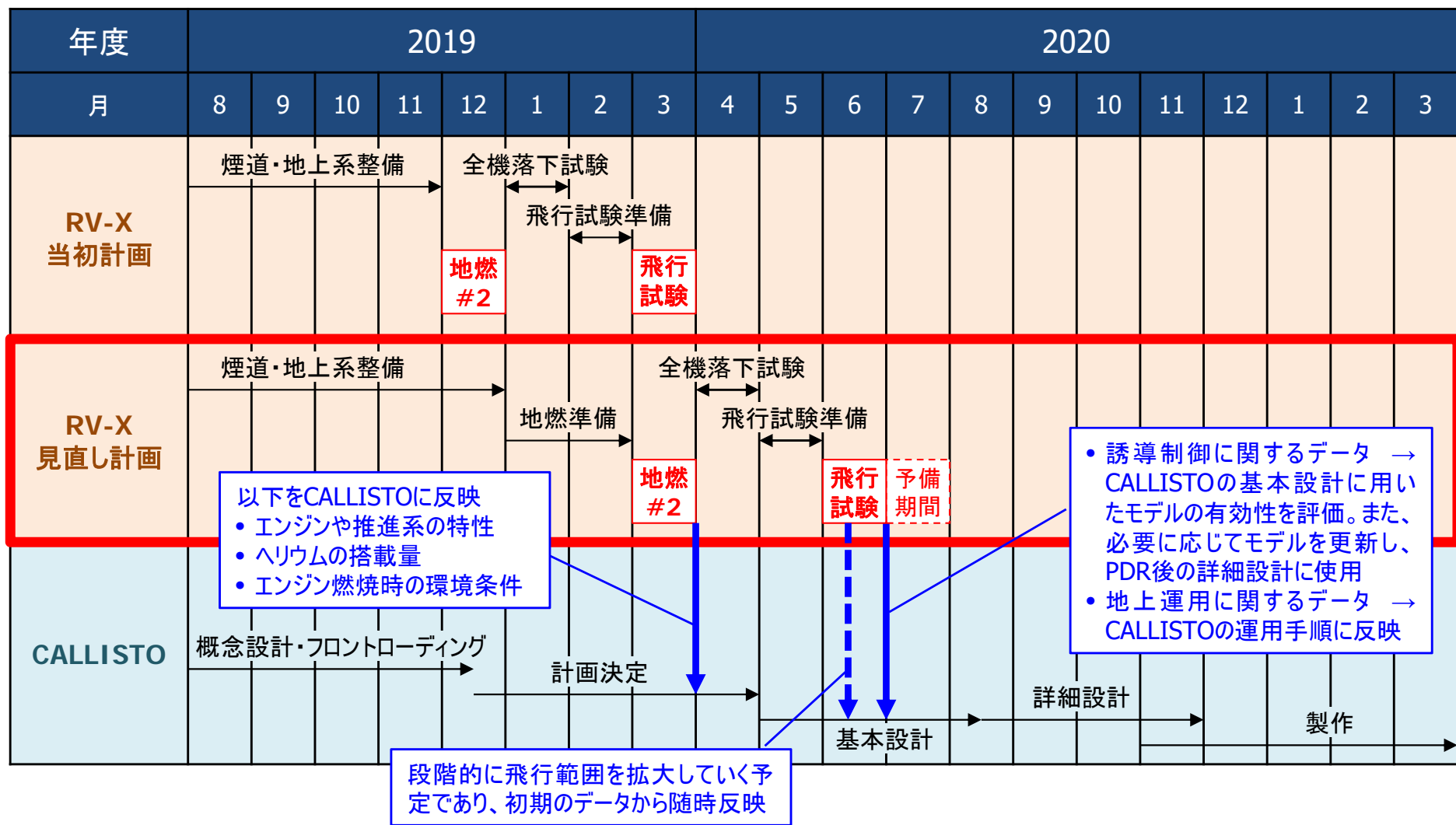


JAXAのモデルベース故障診断技術の試行結果

模擬故障を正しく診断でき、エンジン再整備での意思決定やトラブルシュート時間の短縮に役立つ目途を得た(JAXAで特許申請済み)。

(補足4)RV-Xの計画変更とCALLISTOへの影響

- CALLISTOでは、3月の地上燃焼試験で得たデータをシステム仕様の確定に、6月末までに得た飛行試験のデータを基本・詳細設計に反映することができ、2022年度の飛行実験に向けた影響はないと考えている。



(補足5)再使用型ロケットの海外動向

- 再使用型ロケットで先行する米SpaceX社のFalcon9/Falcon heavy(図1)は、2010年の初打上げ以降、着実に商業打上げを進め、2015年頃から打上を急増させ、今ではトップランナーになっている。
- 同じく米国のBlue Origin社なども再使用型ロケットの開発を進めており(図2)、2025年頃には安定した打上げ・運用ができるようになると考えられ、本格的な再使用型ロケットの時代が到来する可能性がある。
- 一方、欧州は、米国の動向に強い危機感をいだいており、1段再使用化を含めた官民共通の計画を作成。それに基づき、CALLISTOに続く実証研究を加速している(図3)。



図1: Falcon Heavy2号機のブースタ着陸とフェアリング回収の様子



図2: 開発中の再使用型ロケット

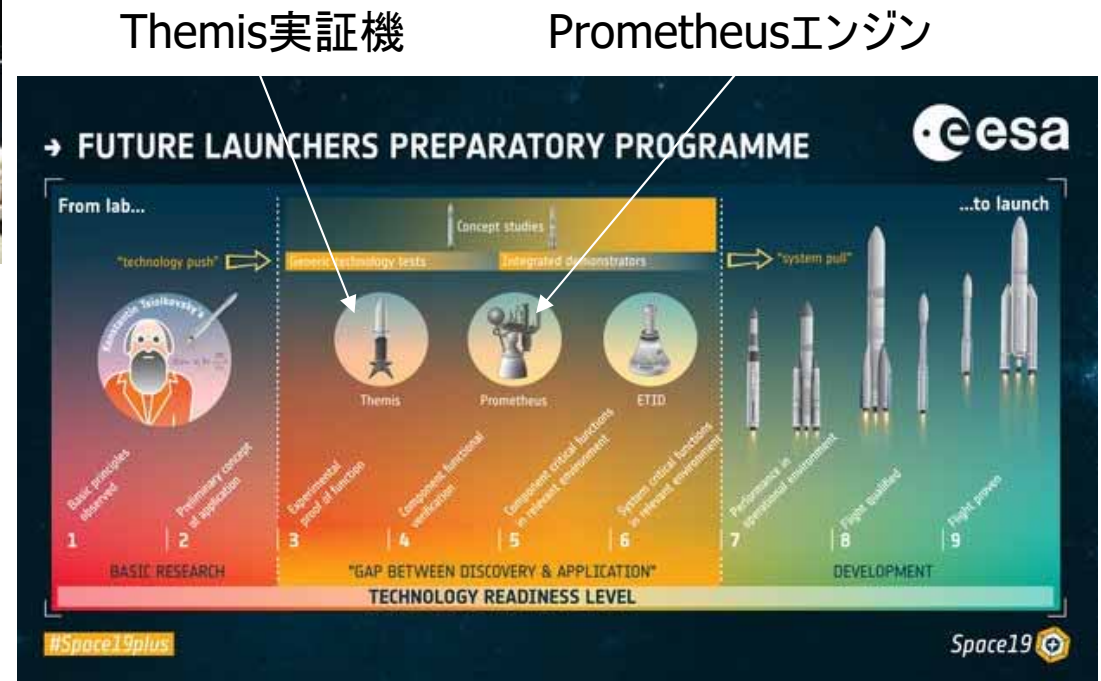


図3: ESAの将来輸送系研究プログラム