

再使用型宇宙輸送システムの検討状況

2019年5月30日
国立研究開発法人
宇宙航空研究開発機構

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)



- 長期ビジョンの基本的な考え方(「おわりに」より引用)
 - 2040年から2050年頃には、将来宇宙輸送システムが社会インフラとして整備され、広く日常的に宇宙輸送を利用できるような社会になる
 - 鍵となるのは低軌道領域への再使用型宇宙輸送システムであり、これは静止軌道や月周辺以遠における新たな宇宙利用の実現にも資する
- 将来宇宙輸送システムの開発プロセス(「4章」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。
 - 実験機に続いて、2020年代以降には実証機の開発にも着手し、2030年代には将来型宇宙輸送システムの実用化を見据えた試験機を開発する
 - 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。

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 iii) 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。

再使用型システムに向けた取組みについて

- JAXAでは、システム形態や推進システムの種類に依らず共通的に必要となる推進系技術、超軽量化・熱構造技術、故障許容・ヘルスマネジメント技術を中心的課題と設定し、要素技術研究を進めている。
- 誘導制御技術等、日本に強みがあるシステムレベルのキー技術は、小型実験機CALLISTO※による飛行実験でデータ蓄積と技術成熟度の向上を目指す。
- さらに、CALLISTOの成果によって再使用による低コスト化の効果を見定める。

長期ビジョンに示された「再使用型宇宙輸送システムの構築に係る中心的課題」
 (下線部: 小型実験機による飛行実験にて技術実証やデータ蓄積を目指す項目)

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

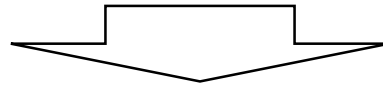
D. ヘルスマネジメント技術

- ① エンジンヘルスマonitoring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

日本の強みとCALLISTO飛行実験の意義

日本に強みがあるキー技術

- 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



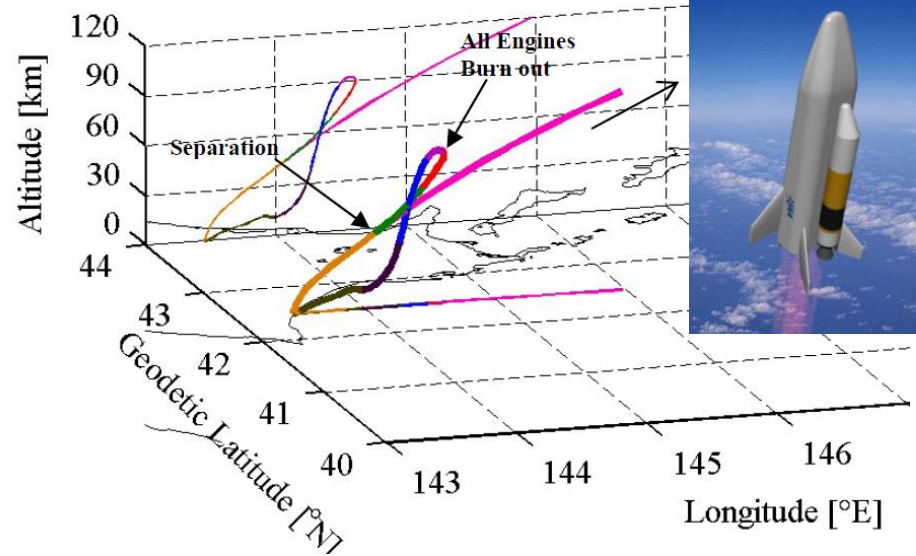
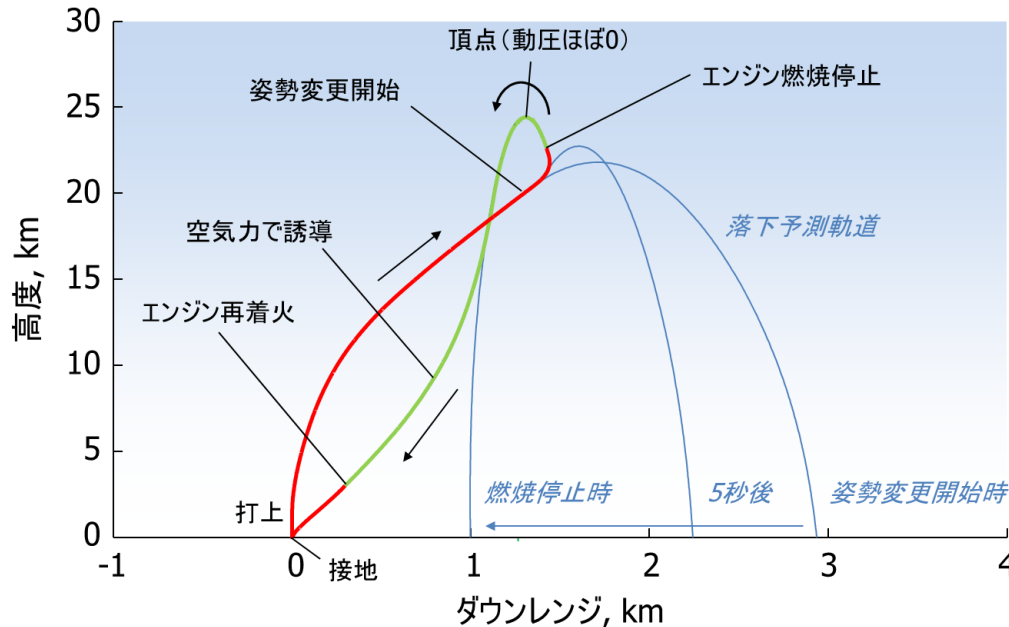
再使用型宇宙輸送システムの構築に係る中心的課題のうち、システム技術の成熟度が向上する。また、再使用による輸送コストの低減効果が評価できるようになる。

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、多様な輸送システムへの適用・応用が可能である。

①誘導制御技術の強み

- CALLISTOでは、エンジン噴射中に大きく飛行方向を変える機能を持たせ、Falcon9等の垂直着陸型とは異なる有翼型の再使用システムでも帰還軌道に誘導制御できる技術を実証する。
- CALLISTOで採用予定の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誘導ロジックでは飛行中に着陸目標点を大きく変更することが可能であり、将来的には打上時のアボート飛行※などへ応用できる。

※ アボート飛行: ミッション継続が困難な故障が起きた場合に行う緊急帰還飛行のこと



PTO飛行の有翼ブースタへの応用例

有翼でも飛行方向を変えるには推力を利用する方が効率的であり打上能力が増える。また、着火回数はエンジンの寿命に影響するが、PTOを使うとエンジン再着火することなく射点付近に帰還でき、再使用回数を増やせる (Falcon9では1回の飛行で最大4回着火する)。

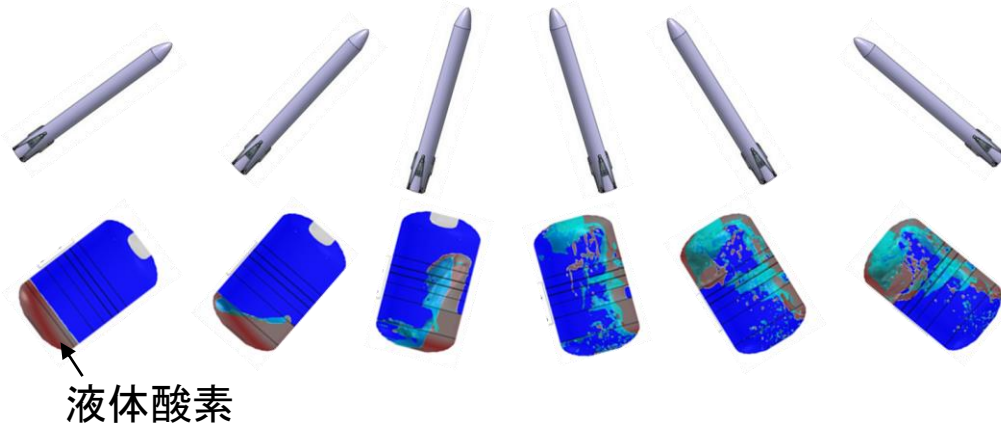
CALLISTOで実証するPTO (Powered Tilt-Over) 飛行
 エンジン噴射中にジンバルで推力方向を制御し、姿勢や飛行方向を変更する。弾道飛行後は、空気力による軌道変更を行い、射点近傍に着陸する。

②推進薬マネジメント技術の強み

- CALLISTOは、**Falcon9第1段と比べて短時間で姿勢を変更しエンジン燃焼を完了させる必要がある**。その結果、より高度な推進薬マネジメントが求められる。
- 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となるが、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**である。
- 再使用システムでは、この液面保持デバイスを用いた素早い姿勢変更により、軌道変更に必要な推進薬を減らすことができる。

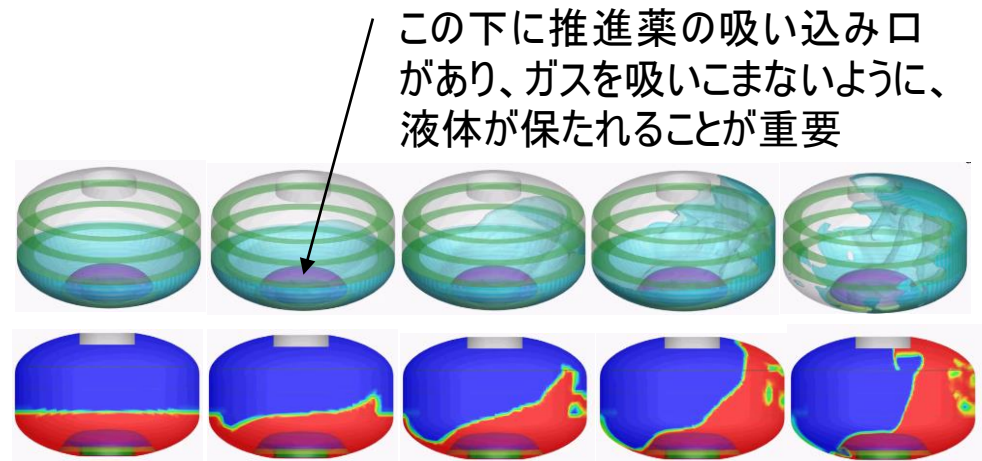
高空での軌道変更(ブーストバック)の比較

機体	姿勢変更開始から燃焼終了までの時間	最大角速度
CALLISTO	10~20秒程度	20~30度/秒程度
Falcon9第1段	1分前後 (射点帰還の場合)	10~15度/秒程度



タンク内部デバイスなしで姿勢変更を行ったときのシミュレーション結果。激しい揺動が発生し、エンジンへの推進薬供給が困難となる。

メッシュを用いた液面保持デバイス

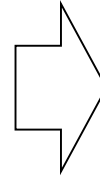


実機スケールの液体酸素タンクを用いた内部デバイスの評価例。**メッシュの表面張力により、推進薬がタンク底面に保持される。**

③ヘルスマネジメント技術の強み

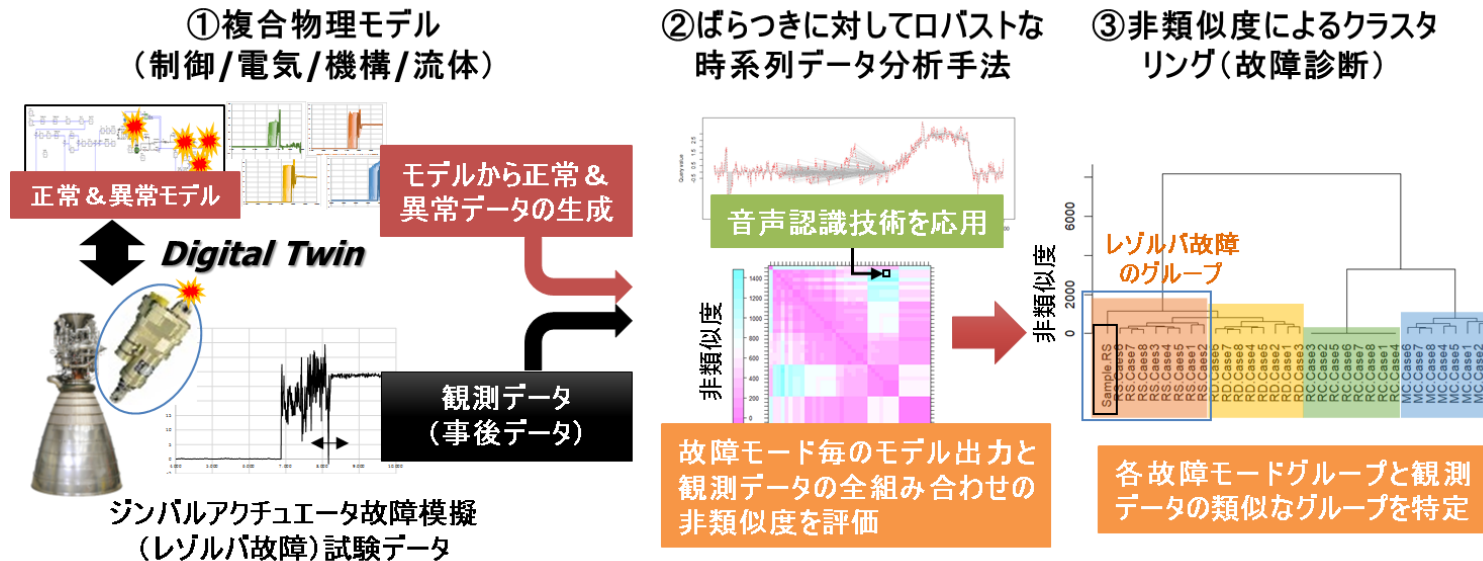
日本の強み

- 100回以上使えるエンジン(*)の設計技術を持つ
- エンジンの故障モードに関する深い知見を持ち、複合領域物理モデリングなどの故障予知・診断に使える
- LE-9向けに研究してきた非破壊検査技術の蓄積がある



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、**Falcon9**で行われてきたエンジン取り外し/分解を行わずに、次回飛行の信頼性を保証する。

* RV-X(後述)搭載エンジンは、角田宇宙センターで142回の燃焼試験を実施しており、これをCALLISTOに使用する。



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ティング時間の短縮に役立つ目途を得た(JAXAで特許申請済み)。

キー技術の主な応用先と効果

- 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ポロ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スタンド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。

飛行実験の概要

- 2段階目のCALLISTOでは、技術成熟度を向上させる上で十分な飛行範囲を確保するために、ギアナ宇宙センターにおいて、CNES/DLRと協働で早期かつ効率的な技術獲得を図る。
- CALLISTOのリスク低減のために、その先行として1段階目のRV-Xを実施する。能代ロケット実験場で着陸周辺に飛行範囲を限定して基礎データを取得し、CALLISTOの設計へ反映する。

RV-X(飛行実験フェーズ1)

飛行実験

- 2019年度後期～
- 高度100mまで
- JAXA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などを行う。



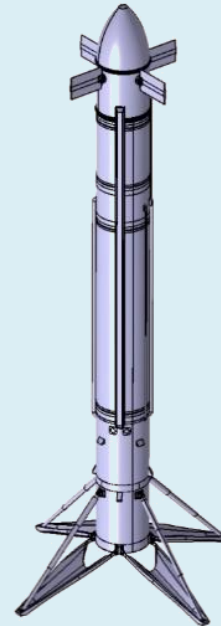
CALLISTO(飛行実験フェーズ2)

飛行実験

- 2022年度(想定)～
- 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、早期かつ確実な技術獲得を図る。

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する。



RV-Xの進捗状況

- 進捗状況
 - 昨年9月～10月にかけて、計6回の地上燃焼試験#1を実施し、着陸時に必要となる推力調整機能を含む性能データを取得した。
 - また、短時間での再使用運用に向け、通常よりも大幅に短縮して試験を行うことにより、効率的な運用手法の確立に向けた知見を獲得するとともに運用上の課題を抽出した。
 - 得られたデータに基づき、飛行試験形態での地上試験#2に向けた準備を進めている。
- 今後の計画
 - 地上燃焼試験#2を行った後に、今年度内に高度100m程度までの飛行試験#1を実施する予定



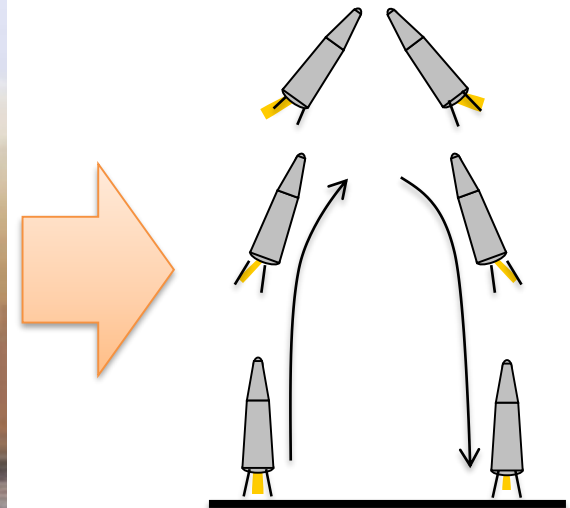
地上試験#1形態



飛行試験形態



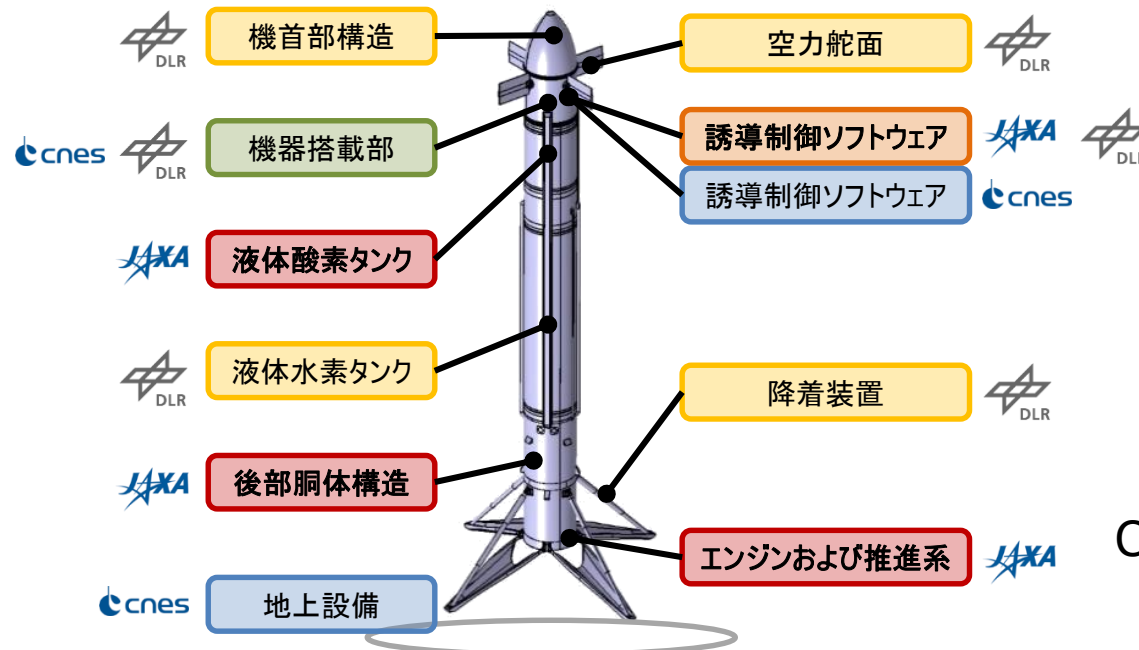
地上燃焼試験#2



飛行試験#1

CALLISTOの進捗状況

- 進捗状況
 - 2017年6月以降、3機関共同で概念設計を進めており、主な分担の調整やシステムトレードオフを完了し、システム設計図や飛行プロファイルを設定した。
 - システム仕様書および開発計画を確定させたのち、各機関で分担分のサブシステムの仕様決定と設計を開始する。
- 今後の計画
 - 2022年度の飛行実験を想定しており、そのため2019年度中のプロジェクト移行を目指している。
 - CNESは、欧州における1段再使用技術の有効性の見極めをThemis実証機(参考に示す)を用いて2025年ごろに行う予定である。そのため、その前段階となるCALLISTOは2022年の飛行試験実施が必達目標と表明している。



CALLISTO開発における
各機関の主な分担

(参考) 米国における再使用型システムの動向 (1/2)



- Falcon9/Heavy(運用中)
 - SpaceX社は、2015年12月以来、1段を着陸させることに多数回成功し、最近は安定感が増している。
 - Falcon9の最終バージョンでは、ドローン船に着陸させる場合でも、GTO5.5トンの打上能力を持つ。
 - 1段を3本束ねて打上能力を各段に向上させたFalcon Heavyも2回連続打上成功
 - これまでの再使用回数は最大で3回。今のところ1段再使用の場合でも大幅な値下げは行っていない模様
- Starship(2段)/Super Heavy(1段)(開発中)
 - SpaceX社は完全再使用の2段式ロケット(旧BFR: Big Falcon Rocket)を2020年の初打上げに向けて開発中
 - LEO100~150トンの打上能力
 - 用途は、地球周回軌道投入、月・火星等への航行、地球上2地点間輸送にも使用する計画
- New Glenn(開発中)
 - Blue Origin社が開発している1段再使用の大型ロケット。2021年に初飛行を計画
 - 2段式と3段式があるが、2段式ではGTO13トン以上(1段再使用時)の打上能力
 - 1段の推進薬はメタン/液体酸素、2/3段は液体水素/酸素



Falcon Heavy2号機のブースタ着陸とフェアリング回収の様子



StarshipとSuper Heavyのイメージ

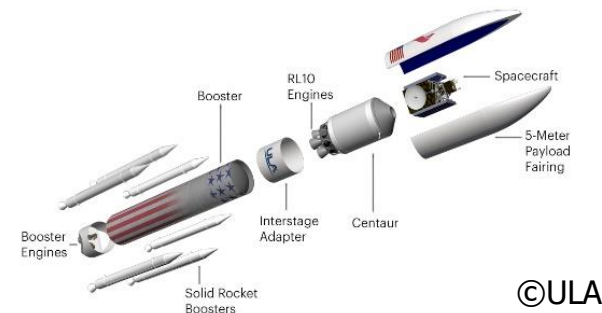


New Glennのイメージ

(参考) 米国における再使用型システムの動向 (2/2)



- Vulcan (開発中)
 - ULA社がAtlas5やDelta4の後継機として開発中の大型ロケット。2021年の初飛行を目指す。
 - 1段エンジンは、Blue Origin社のBE-4(メタン)
 - 1段のエンジン部を空中回収・再使用する技術を研究中
- Experimental Spaceplane (Phantom Express) (開発中)
 - DARPA(アメリカ国防高等研究計画局)が進める有翼型の再使用1段の実験計画
 - 2020年までに以下の技術目標を達成する計画。10日連続で10回の飛行、ペイロードなしでマッハ5~10まで加速、900~3000lbのペイロードを低軌道に打上げ
 - 2017年5月に担当企業としてBoeing社を選定
 - スペースシャトルエンジンの残存部品を使ったAR-22を使用
- Dream Chaser (開発中)
 - Sierra Nevada社が開発を進めている無人往還機。15回以上再使用可能
 - 2021年からISSへの商業補給サービスに用いる計画
 - 当初、有人機として計画されたが、NASAの商業乗員輸送機開発から外れたため、無人機として開発が進められている。
 - 打上げにはAtlas5が用いられる予定だが、他のロケットでも打上げ可能。フィンを折りたたみフェアリング内に搭載される。



©ULA

Vulcanのイメージ



©Boeing

Phantom Expressのイメージ



©Sierra Nevada Corporation

Dream Chaserの試験機

(参考) 欧州における再使用型システムの動向

- Prometheus(プロメテウス)エンジン(開発中)
 - ESAプログラムとして、仏CNESが中心となって開発している実証エンジン。再使用可能で、燃料はメタン
 - 製造技術の革新等により1M€/台の製品費を目指す。
 - 開発担当企業はArianeGroup。独DLRで2020年からの燃焼試験を予定
- Themis(テミス)実証機(研究中)
 - CNESとArianeGroupがCALLISTOの次段階として検討しているPrometheusを用いたフルスケール実証機(～2025年)
 - Themisの検討を加速するため、CNESとArianeGroupは、ArianeWorksというスタートアップ組織を設立
 - 2025年頃に、CALLISTOとThemisの成果に基づいて、使い切りロケットのままで行くか、あるいは再使用ロケットを新たに開発するかを判断する計画
- Space Rider(開発中)
 - 2015年2月に実験機IXV(Intermediate eXperimental Vehicle)の再突入実験に成功
 - ESAプログラムとして、イタリアが中心となってIXVを発展させたSpace Riderを開発中。2ヶ月以上軌道上に滞在し、微小重力実験や技術実証などを行った後、地球に帰還
 - Vega-Cロケットにより2020年の打上げを目指す。



©ArianeGroup

Prometheusのイメージ



©ESA

Space Riderのイメージ