



資料62-2

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第62回) 2021.09.27

1段再使用飛行実験(CALLISTO*) プロジェクト移行審査の結果について

令和3(2021)年9月27日

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

理事 張替 正敏

CALLISTO プロジェクトマネージャ 石本 真二

*)CALLISTO: Cooperative Action Leading to Launcher Innovation for Stage Tossback Operation

令和3年9月27日第62回宇宙開発利用部会

本資料の位置づけ

- 宇宙開発利用部会におけるプロジェクト事前評価について

JAXA自らが実施した研究開発プロジェクトの評価結果について、目的、目標、開発方針、開発計画、成果等についての調査審議を行う。

※JAXAは、プロジェクトの企画立案と実施に責任を有する立場から、JAXA自らが評価実施主体となって評価を行うことを基本とする。

「宇宙開発利用部会における研究開発課題等の評価の進め方について」
(令和3年6月28日宇宙開発利用部会決定)

- 当報告は、上記調査審議において、実施フェーズ移行に際して実施する「事前評価」に資するものである。評価対象プロジェクトは開発費の規模又は重要性で判断されることとなっており、本プロジェクトは開発費は評価対象規模以下であるが、革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップにも関連するため、重要案件として調査審議の対象となった。
- JAXAが実施した、1段再使用飛行実験(CALLISTO)に係るプロジェクト移行審査(令和3(2021)年3月23日)について、審査における主たる審査項目を以下に示す。
 - ① プロジェクト目標・成功基準の妥当性
 - ② 実施体制、資金計画、スケジュールの妥当性
 - ③ リスク識別とその対応策の妥当性
- 本資料では、これらの審査項目の内容について1～3章に、JAXAのプロジェクト移行審査の判定について4章に示す。



目次

1. プロジェクト目標の設定
 - 1.1 CALLISTOの位置づけ
 - 1.2 プロジェクト目的・目標
 - 1.3 サクセスクライテリア

2. CALLISTOの概要
 - 2.1 開発方針
 - 2.2 システム仕様

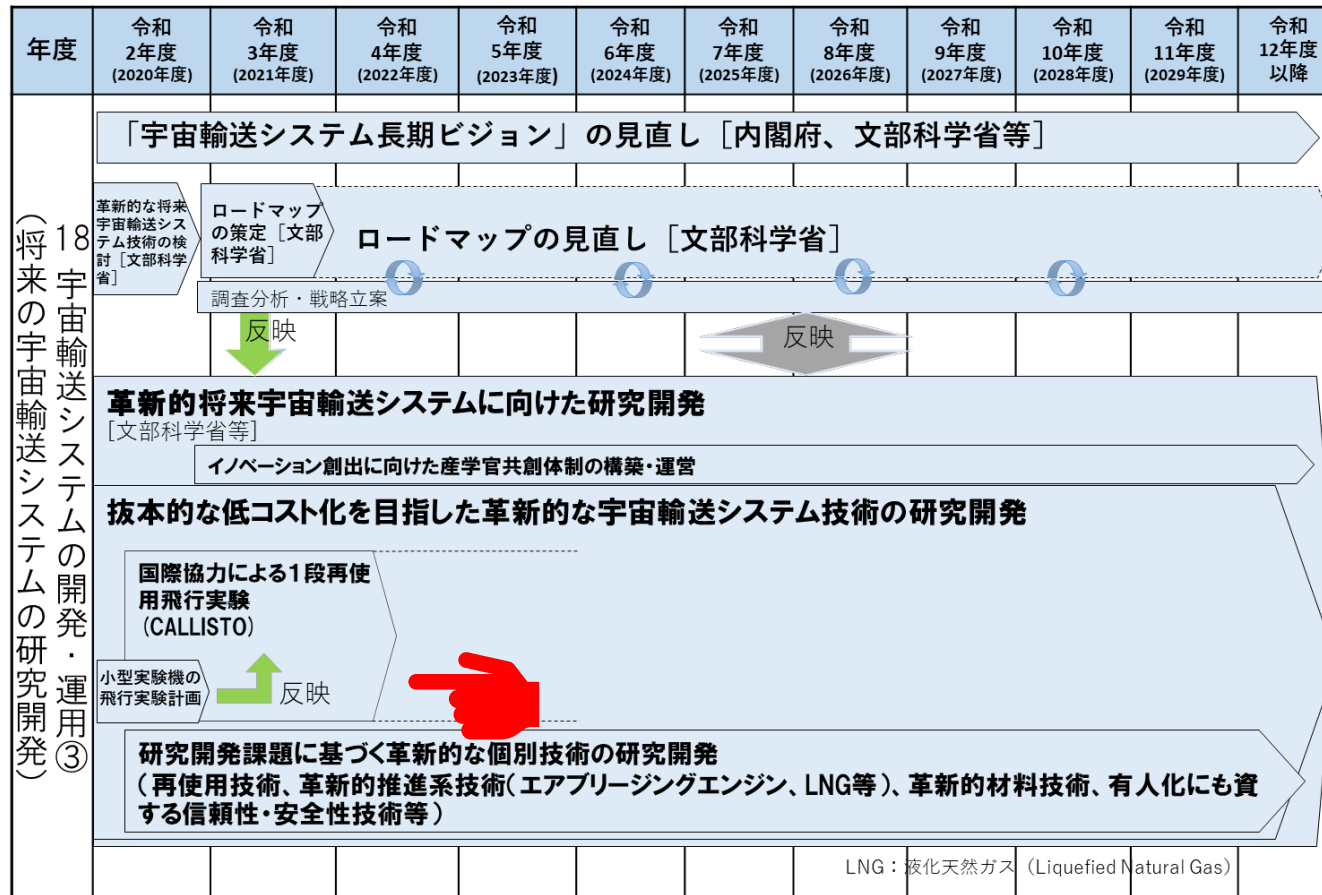
3. 開発計画
 - 3.1 3機関による開発体制
 - 3.2 国内体制
 - 3.3 資金計画及びスケジュール
 - 3.4 リスク識別・対処方策

4. プロジェクト移行審査まとめ

1.1 CALLISTOの位置づけ

- 令和2年12月3日宇宙政策委員会 宇宙基本計画工程表(令和2年度改訂)において、抜本的な低コスト化を目指した革新的な宇宙輸送システム技術の研究開発の取組みとして、「**国際協力による1段再使用飛行実験(CALLISTO)**」が示されている。

(5) 産業・科学技術基盤を始めとする宇宙活動を支える総合的な基盤の強化



1.1 CALLISTOの位置づけ

- JAXA研究開発部門では、システム形態や推進システムに依らず再使用型輸送システムに共通的に必要となる技術の研究を進めてきている。
- その中でも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、2段階の小型実験機による飛行実験により、データ蓄積と技術成熟度の向上を目指すとともに、再使用による経済的な効果の評価に必要なデータを蓄積している。
- CALLISTOの技術的リスク低減のために、その先行としてRV-X(補足1)を実施し、設計に反映している。
- 本プロジェクトは、2段階目のCALLISTOが対象となる

RV-X(飛行実験フェーズ1)

計画概要

- 2021年度に飛行試験を予定
- 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



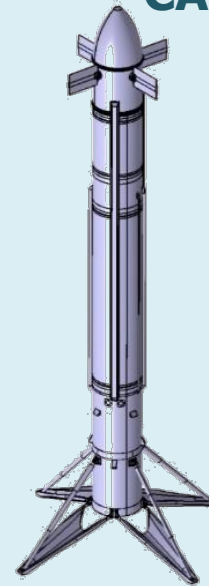
CALLISTO(飛行実験フェーズ2)

計画概要

- 2024年度に飛行試験開始
- 南米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: Cooperative Action Leading to Launcher Innovation for Stage Toss-back Operation

1.2 プロジェクト目的・目標

プロジェクト目的・目標

- 再使用型輸送システムに共通的に必要となる基盤技術のうち、日本に強みがあるシステムレベルのキー技術を実証するプロジェクトとして、以下の通り目的および目標を設定する。

目的: 基幹ロケット再使用1段も含め再使用型輸送システムに共通的に必要となる技術を獲得することを大目的とする。

目標: その実現のために、本ミッションではシステムレベルのキーとなる技術に関して、小型実験機による飛行実験により、技術成熟度の向上のためのデータ取得を行うこと、および再使用による経済的な効果の評価に必要なデータを蓄積することを目標とする。

技術区分とJAXA分担

- 目的に合わせ、以下のように、5つのシステムレベルのキー技術*が見える形に獲得技術の区分を設定した。
- キー技術の獲得を行うために、JAXA分担を調整・設定した

*) システムレベルのキー技術: システムとして飛行させる、あるいは、地上運用を行うことによって、技術の検証やデータの取得・蓄積できる技術

技術区分		対応する主なJAXA分担
帰還技術	誘導制御技術	誘導制御アルゴリズム(使い切りとは異なる特有部分があるため)
	推進薬マネジメント技術	推進系システム(LOXタンク)(液体推進薬保持技術の検証を行うため)
再使用設計技術		後部胴体構造(再使用による機体のストレスの予測技術を獲得するため)
再整備技術	再使用運用技術	機体インテグレーション・ステージ燃焼試験(効率的な地上運用に関する知見を積み重ねるため)
	ヘルスマネジメント技術	エンジン・ジンバルアクチュエータ(複雑であり再整備期間を左右するため)

1.2 プロジェクト目的・目標

- キー技術の検討状況

帰還技術	誘導制御技術	<p>風耐性のある誘導制御アルゴリズム(右図)を実証予定 異なるシステム形態でも適用できるシミュレーションモデルや風モデルなどのモデル化技術も検討中</p>	<p>JAXA開発の着陸誘導の検討結果(ギアナ宇宙センターの2月の実測風548ケース)</p>
	推進薬マネジメント技術	<p>大姿勢変更でも優れた液保持性能を発揮する軽量のメッシュ型デバイス(右図)を実証予定 タンク圧力予測精度向上に必要なデータを取得し、世界水準にある推進薬挙動ツールの精度をさらに向上させる計画</p>	
再使用設計技術		<p>飛行による損傷等が予測される部位・機器等に対して、荷重や加熱等を予測する脚挙動解析ツール、エンジン排気加熱予測ツール等を整備中</p>	
再整備技術	再使用運用技術	<p>横置き整備用治具や地上・機体間の接続装置など、地上での運用性を向上させる工夫や再使用運用計画を検討中</p>	
	ヘルスマネジメント技術	<p>エンジン燃焼器の非破壊検査装置や物理モデル(デジタルツイン)等にもとづく故障診断・予知アルゴリズムを飛行後点検の一環として適用予定</p>	<p>正常&異常モデル ↔ Digital Twin ↔ モデルから正常&異常データの生成 → 故障診断・予知 観測データ(事後データ)</p> <p>ジンバルアクチュエータ故障模擬(レゾルバ故障)試験データ</p>

1.3 サクセスクライテリア

- 3機関共通のミッション目標を達成することをミニマムサクセスとし、それに加えてJAXA独自のミッション目標を達成することをフルサクセスとして定義する(次ページ参照)。
- JAXA独自のフルサクセスについては、**基盤技術としてプロジェクト後に残すツール・モデル・データベース等が重要であると考え、これらをアウトプット目標として位置付け、それに反映するためにプロジェクトにおいて取得・蓄積するデータを明確化した。**
- 将来のシステム開発において、システム設計のプロセスを素早く繰り返し、短時間で新規システムの構築や改良を図れるようにするために、RV-XやCALLISTO等のデータを段階的に反映し、高精度なモデル(デジタルツイン)の整備を目指す。

- 実機の試作を繰り返して大規模・複雑なシステムを開発するには時間と莫大な資金が必要
- 仮想空間内でのモデル(デジタルツイン)で大規模・複雑なシステムを開発できる能力を持つことでこれで効率的に実施可能
- RV-XおよびCALLISTOは、物理空間から情報を得る絶好の機会であり、地上試験・飛行試験データを利用して、現実に近い物理的なシミュレーションを行えるようにする

革新的将来輸送システムの検討に活用(補足2)

1.3 サクセスクライテリア

- サクセスクライテリア

獲得技術	ミニマムサクセス(3機関共通)	フルサクセス(JAXA独自)
帰還技術	<p>以下から構成される再使用1段の実飛行を模擬した飛行を行うことで、帰還技術獲得に向けたデータ蓄積と技術成熟度の向上を行うこと</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 推力を用いて速度を射点方向に反転させる。 ② 低重力環境において20秒間で20度の姿勢角変更、推進薬静定までの一連のシーケンスを行う。 ③ 空力減速時に遷音速域を通過する。 ④ 目標点から半径10m以内の精度で垂直に着陸する。 ⑤ 機軸方向の加速度を1.3G以上に保った状態でエンジンカットオフ・着陸する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 再使用1段の実飛行を模擬した飛行を2回以上行い、そのうち1回はJAXAが開発した誘導制御ソフトウェアによる飛行を行うこと (誘導制御技術) • 風耐性の向上に必要なデータを取得すること、および、モデル化技術を習得すること (推進薬マネジメント技術) • タンク加圧ガス量及びタンク圧力予測精度向上に必要なデータ、液面保持デバイスの効果を確認するために必要なデータを取得すること、および、モデル化技術を習得すること
再使用設計技術	<p>再使用1段の実飛行を模擬した飛行を2回以上行い、機体の損傷に関するデータを取得し、事前の予測と比較・評価することで、再使用設計技術獲得に向けたデータ蓄積と技術成熟度の向上を行うこと</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 飛行環境の予測精度の向上に必要なデータを取得すること、および、モデル化技術を習得すること
再整備技術	<p>リスク低減のための飛行を含めて3回以上の飛行を行い、機体を再飛行できる状態にするための、検査・再整備・補修に係る運用リソース(人員と期間)を記録し、経済性評価のためのデータとするとともに、予測モデルと比較評価することで、再整備技術獲得に向けたデータ蓄積と技術成熟度の向上を行うこと</p>	<ul style="list-style-type: none"> (再使用運用技術) • 取り入れた運用性向上のための設計の有効性を確認し、改善事項を洗い出すこと (ヘルスマネジメント技術) • エンジンシステムの余寿命推定、健全性評価の効率化に必要なデータを取得・蓄積すること、および、モデル化技術を習得すること

1.3 サクセスクライテリア

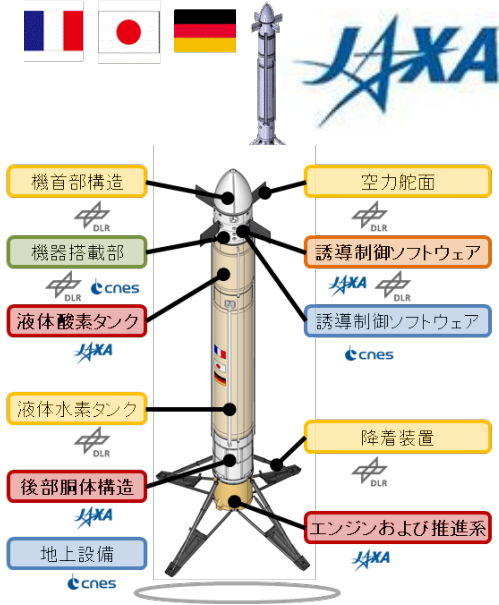
- 取得するデータの定義とアウトカム目標の対応例

アウトプット目標			アウトカム目標
サクセスクライテリア	データの定義	整備するツール・モデル等	
(誘導制御技術) 風耐性の向上に必要なデータを取得すること、および、モデル化技術を習得すること	風耐性向上の方策の効果を確認するとともに、右記ツール等に反映するために必要な以下のデータを複数回の飛行で取得すること。なお、目標達成に有用なデータがあれば、これらに限定されない。 <ul style="list-style-type: none"> • 実験場の風データ • 基準軌道 • 航法データ(位置・速度・加速度・姿勢・角速度) • 空力舵面・ガスジェット装置・推力方向制御システム(ジンバルアクチュエータ)の作動状態 • エンジン推力 	[2022年度] それまでの地上試験等の結果を反映し、以下のツール等を技術文書、プログラムとして整備すること。 <ul style="list-style-type: none"> • 基準軌道設定ツール • 風変動予測モデル* • 誘導制御アルゴリズム • シミュレーションモデル(6自由度*、線形モデル等) 	プロジェクト終了後10年以内に <ul style="list-style-type: none"> • 左記成果物が、基幹ロケット再使用化に向けた研究開発とその後の運用機の開発・運用、革新的な輸送システムに向けた研究開発などに活用されること • 左記成果物が、サブオービタル機などを開発する民間企業に移転されること
		[プロジェクト終了時点] 取得したデータによって上記のツール等の有効性を確認するとともにデータを反映し、技術文書、プログラムを更新すること	

*) デジタル化(デジタルツイン構築)による設計プロセスの効率化に向けて寄与があるツール・モデル等

2. CALLISTOの概要

2.1 開発方針

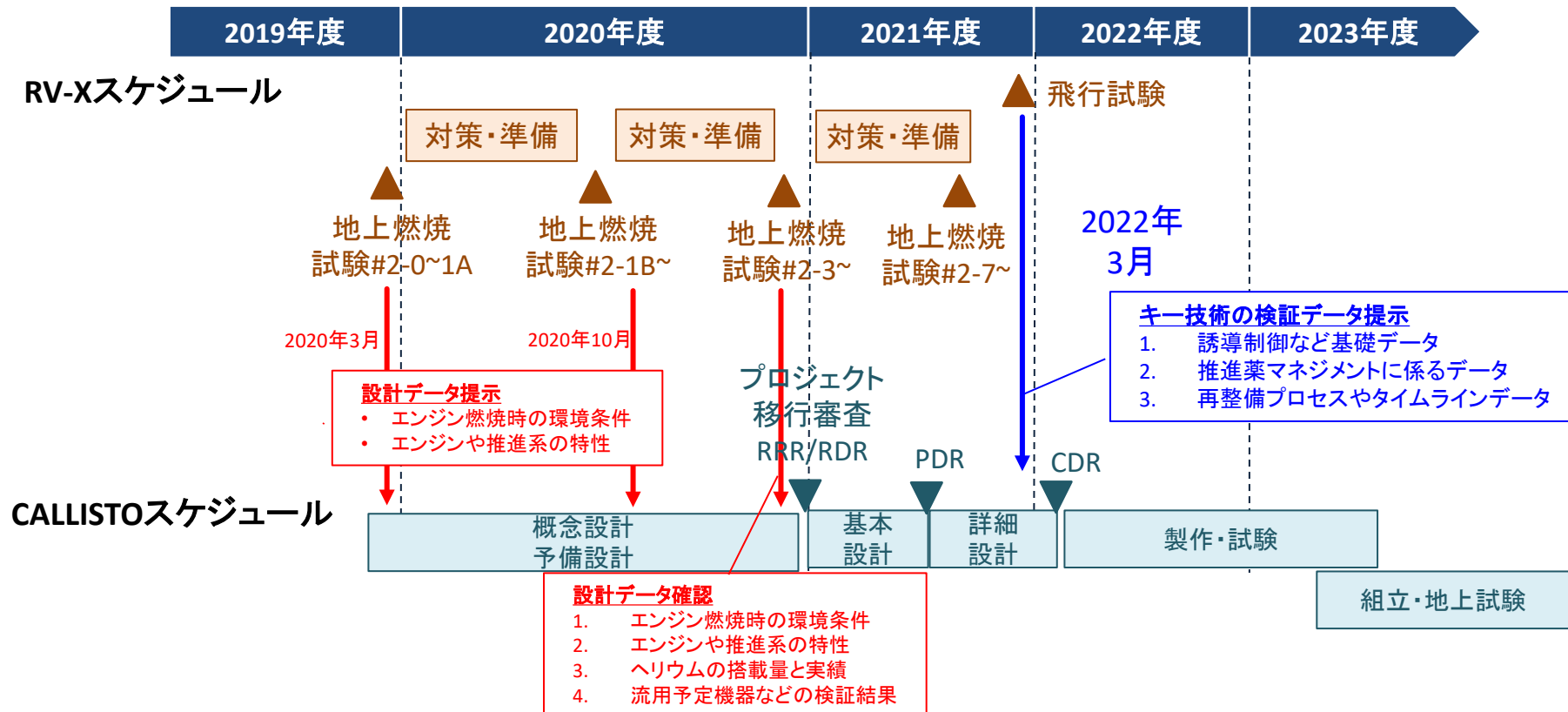


- 3機関による共同開発・実験として進める
 - 各機関が応分の負担(右図参照)をするが、機関間で費用の授受はなし。
 - 設計や試験は共同で行い、地上設備/機体のサブシステム開発は各機関で分担する。
 - エンジンは既存品のあるJAXA、実験場は広大なCNESが管理するギアナ宇宙センター(クールー)とする。
- メリット/デメリット
 - JAXA単独で行う場合と得失を比較し、資金面だけでなく、技術的・飛行試験場・人材育成・欧州の戦略把握、などの多くのメリットも考えられることから、3機関による共同開発・実験は意義が高い。

実施方法	必要資金	メリット	デメリット
JAXA単独	~190億円	<ul style="list-style-type: none"> 日本側が優位な技術(再使用エンジン/推進系)を保護できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 仮に資金が確保できてもJAXAも企業もマンパワー不足の可能性 安全に飛行試験ができる実験場の確保に課題
CNES/DLRと共同	48億円	<ul style="list-style-type: none"> 日欧で多くの研究者が取り組むことにより、SpaceX社等よりも優れた技術(誘導制御、推進薬管理等)を獲得できる可能性 CNESが管理する広大なギアナ宇宙センター(クールー)で意義の高い飛行試験が可能 国際協力に必要な人材育成にも貢献 欧州の戦略・方向性を把握することができる 	<ul style="list-style-type: none"> インターフェースが複雑になり、スケジュール・資金が超過するリスクがある。 →対応策:モジュール毎に責任機関を設けシンプル化。加えて、全ての機関間I/Fを文書で明確化し、管理する。資金は予備費を設定した。 日本側が優位な技術(再使用エンジン/推進系)が流出する恐れがある。 →対応策:特許を取得する、またJAXA単独成果として識別し管理する

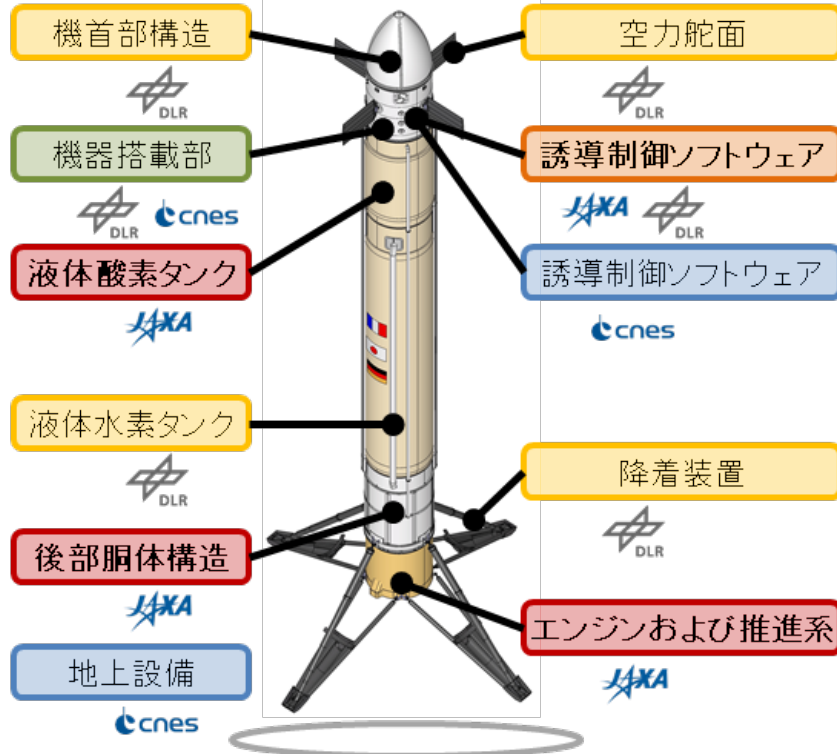
2.1 開発方針

- RV-Xによる要素技術の先行実証
 - 国内の体制により、着陸段階に飛行範囲を限定し、早期にCALLISTOのキーとなる要素技術の部分的な検証・基礎データの取得を能代試験場で行う。
 - CALLISTOに必要な設計データ取得(地上燃焼試験で取得)やキー技術の部分的な検証(飛行試験で取得)を行うフロントローディング活動である
 - RV-Xでの企業との共同研究成果を活用する



2.2 システム仕様

- CALLISTOの機体システム構成と主要機能を以下に示す。
 帰還/着陸に必要な機能(RECOVER)と同一機体再使用のための機能(REUSE)を有す。

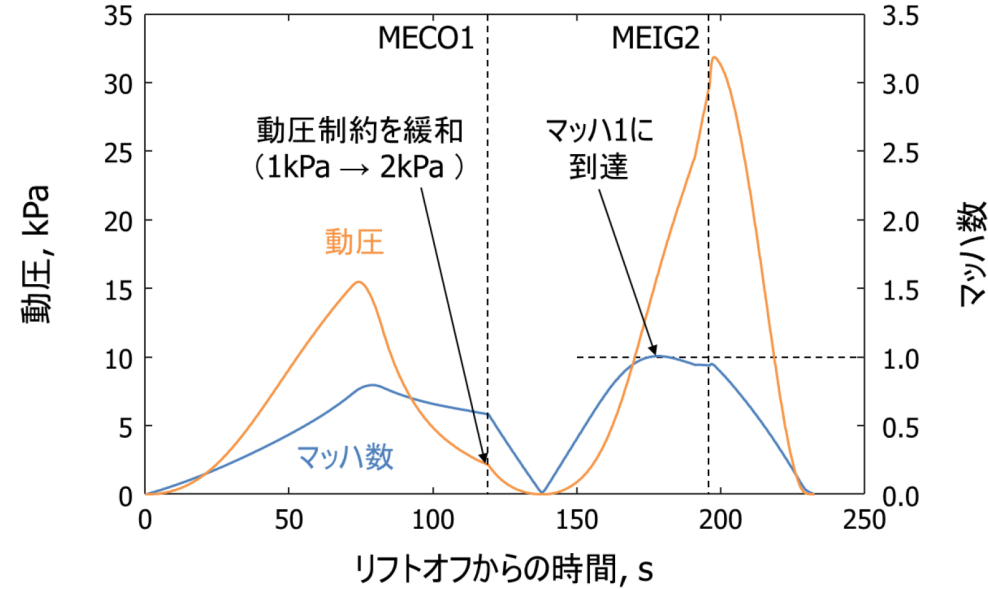
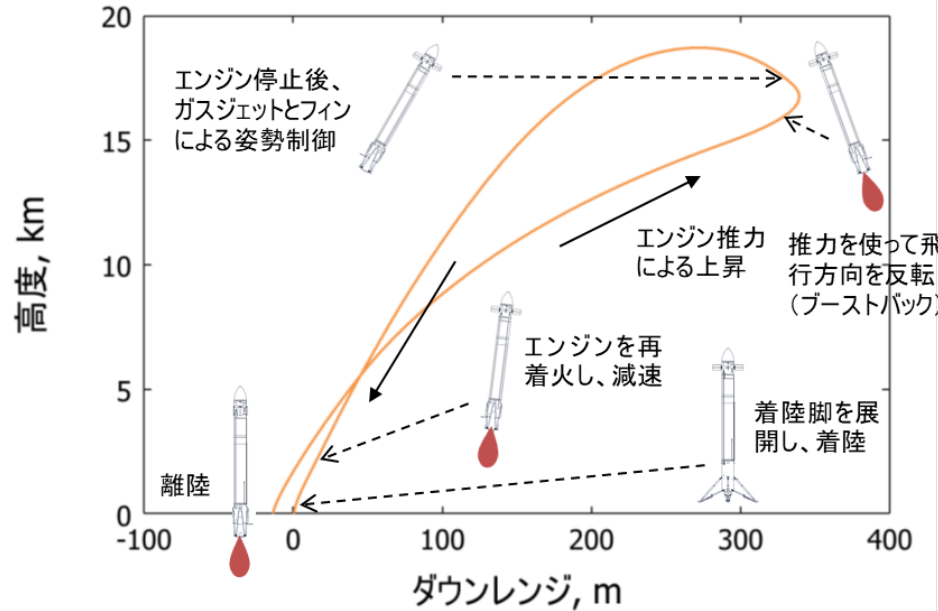


直径	1.1m
高さ	13m
全備質量	3,650kg
L/O時T/W	1.25

基本特性	
海面上推力: 16~46kN連続可変	RECOVER
4つの飛行制御システム ・空力舵面(フィン) ・ガスジェット装置 ・推力変更 ・推力方向変更(エンジンジンバル)	RECOVER
4つの展開式降着装置	RECOVER
揚抗比L/D=0.6	RECOVER
既存品搭載機器の多用	REUSE
検査性 & コンポーネントの取り外し	REUSE

2.2 システム仕様

○飛行プロファイル例



○試験計画

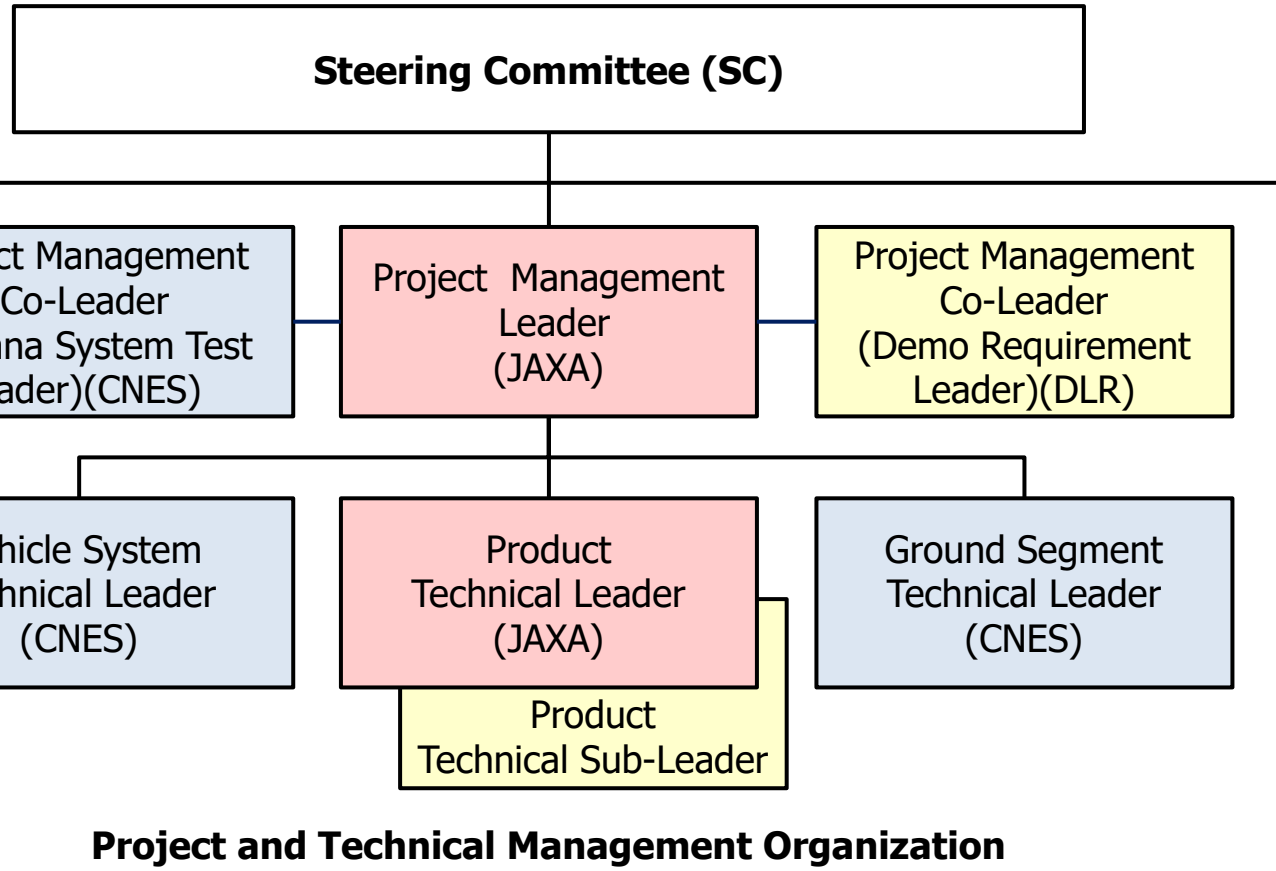
能代でのステージ燃焼試験を経て、ギアナ宇宙センターにおいてCNESとJAXA/DLRの誘導制御ソフトウェアをそれぞれ使用し、低空の飛行試験 (Test Flight A/B) と高高度の飛行試験 (Test Flight C/D, Demo Flight) で合計10回の飛行試験が計画されている。

主な目的 (概要)	
Test Flight A	低高度での離着陸機能の検証等
Test Flight B	繰返し飛行機能の実証、フィン制御
Test Flight C	Demo Flightと同じ離着陸形態、脚展開・再着火
Test Flight D	高高度での飛行機能検証、遷音速以下
Demo Flight	ミッション要求の飛行実

3. 開発計画

3.1 3機関による開発体制

- 3機関共同チームのマネジメント体制
 - 担当理事を含め各機関から2人の責任者で構成
 - フェーズの完了の判断、協力の中止や延期の判断、各機関にまたがる課題の調整等を行う。
 - 実行計画(IP)を含めて協定の付属文書の変更を承認

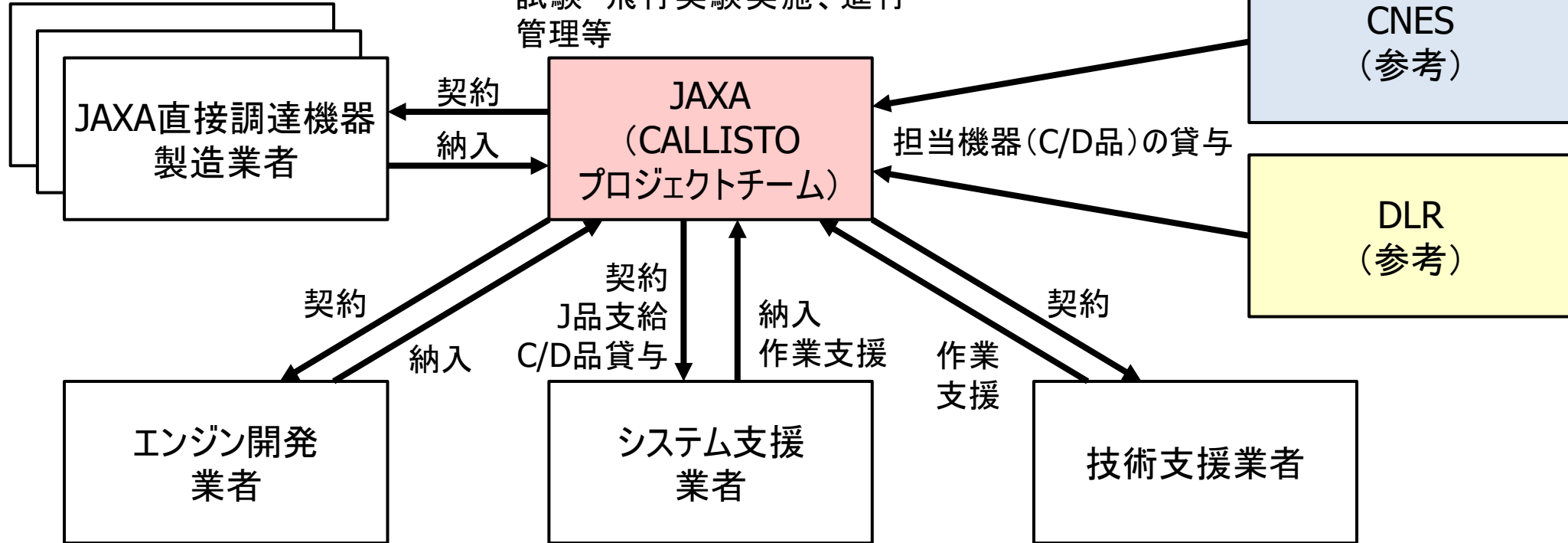


- リーダ(**JAXA**)は、プロジェクト全体の執行をマネジメントする。
- 共同チームレベルの課題については、チームからの技術提案に基づいて、リーダが意志決定する。
- コ・リーダ(**CNES、DLR**)はリーダを補佐し、特定業務のリーダを兼務する。
- リーダ、コ・リーダは、所属する機関が担当する作業をマネジメントする。

3.2 国内体制

電源系、推進系コントローラ、ジンバルアクチュエータ、気蓄器等(J品)の製造

仕様設定、インタフェース調整、機体インテグレーション・地上試験・飛行実験実施、進行管理等



エンジン設計・製造・試験支援

推進系システム・液体酸素タンク・後部胴体構造・ケーブルダクトの設計・製造、機体インテグレーション・地上試験・飛行実験支援、誘導制御ソフトウェア仕様設定・検証支援

機体インテグレーション・地上試験・飛行実験支援

3.3 資金計画及びスケジュール

JAXA内の審査会を経て、資金計画およびスケジュールの妥当性を確認した。

- 資金計画
 - JAXA担当分の総開発費は、48億円(プロジェクト準備段階含む)である。
- スケジュール
 - 2024年度の飛行試験開始を予定している

プロジェクト移行審査(2021年3月)設定

年度	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
3機関 マイルストーン	▼3機関協定締結 (フェーズA/B)(2018.6)	▼3機関LOI締結 (2018.12)	▼3機関システムPDR (2019.12~2020.4)	▽3機関協定締結 (フェーズC/D/E/F)	▽CDR (システム整合性)			▽FWR (飛行試験実施可否)
審査 /主なピアレ ビュー	MDR ▼(2018.01)			△MDR/RRR/RDR(2021.2)	▽PDR	▽CDR	▽MR (研究開発中間レビュー)	▽PSR ▽DRR ROR
		概念設計		予備設計	基本設計	詳細設計	製造・組立・試験	最終組立 飛行試験

プロジェクト移行に際し、日独仏でプロジェクト期間を再検討したところ初飛行は2024年となるが(要因には、再使用に対応するためのシステム要求の再検討や新型コロナウイルスの影響による開発試験の遅れなどを含む)、以下の理由により意義・価値は維持されている。

1. 世界動向分析に基づく差別化と優位性を目指した取り組み
 - SpaceX以外の再使用型ロケットのデビューは遅延している状況であり、SpaceX社の動向を分析すると、再使用における技術課題(風データの不確実性が大きい海上着陸の難しさなど)がより明確になってきており、CALLSITOで得る成果は、その課題に対応できるものとなっている。
2. 革新的将来宇宙輸送システムロードマップにおける獲得する技術の重要性
 - **CALLISTO**から革新的将来宇宙輸送システム(以下、革新システム)へのフィードバックが**2024年に遅れると、CALLISTOのアウトプットが革新システムの検討に十分に活かしきれない可能性があるため、2022年度までにデジタルツイン構築に向けて整備したツール・モデル等を一度とりまとめ(研究開発中間レビュー)、革新システムの検討に使える形で提供することとする(補足2)。**

3.4 リスク識別・対処方策

方針

- リスク管理計画書 兼 識別書に基づき、リスクの識別・評価・低減策を進めた
- 3機関で管理すべきリスクは、共通の文書を維持し、定期的な会議で更新を行っている

リスクの評価

Risk rating	Impact			
	Insignificant	Minor	Major	Severe
Likely	Negligible	Low	Medium	High
Possible	Negligible	Negligible	Low	Medium
Unlikely	Negligible	Negligible	Negligible	Low

■ 発生の影響度

Impact	Technical	Project cost overrun	Schedule delay
Severe	Inability to meet mission or system requirements	10% or more	12 months or more
Major	Inability to meet performance requirements	5-10%	6-12 months
Minor	Loss of design margins	1-5%	3-6 months
Insignificant	Small impact	1% or less	3 months or less

■ 発生の可能性

Probability	Occurrence in previous development	Theoretical chance of occurrence
Likely	Has occurred more than once.	30% or more
Possible	Has occurred.	5-30%
Unlikely	Has not occurred.	5% or less

主要なリスクと対応方針(抜粋)

No.	リスク件名	リスク内容	Probability	Impact	Rating	リスク低減策
1	質量超過に伴うミッション要求成立性	CNESが設定した質量要求(割り当て値)に対し、質量見込み値が大きく超過し、ミッション要求のうち特に遷音速域通過の達成が厳しくなる	Possible	Severe	Medium	<ul style="list-style-type: none"> 現段階で、搭載品削減等の質量軽減検討の他、エンジン推力向上や飛行方式見直し等による質量要求緩和を図り、目標とする遷音速域通過が可能な見通し 今後、設定したサブシステム要求質量を開発仕様書に盛り込み、最重要の技術的パフォーマンス指標として、質量マージンの増減を管理する。

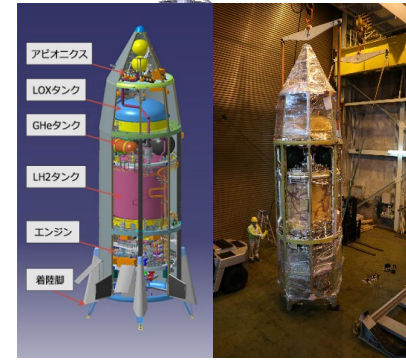
4. プロジェクト移行審査まとめ

- 審査項目
 1. プロジェクト目標・成功基準、範囲の妥当性
 2. 実施体制及び人員計画の妥当性
 3. 資金計画の妥当性
 4. 研究開発スケジュールの妥当性
 5. 調達マネジメント計画の妥当性
 6. システムズエンジニアリングマネジメント計画の妥当性
 7. 技術の先進性・先端性・優位性の妥当性
 8. プロジェクトのリスク識別・対処方策の妥当性
 9. 教訓・知見の妥当性
- 審査結果
 - 上記の審査項目に沿って審査した結果、要処置事項を処置することを条件に、プロジェクト実行フェーズへの移行は妥当と判断した。ただし、以下の点には特に留意しプロジェクトを遂行すること。
 - 成果最大化の観点から、CALLISTOプロジェクトの成果が基盤技術として、デジタルツイン技術獲得や今後制定される技術ロードマップ上の各段階、更には他の関連活動へ適切な成果展開ができる道筋を明確にすること。
 - スケジュールキープの観点から、3機関全体をマネジメントする立場からも緻密に全体スケジュール・リスク管理すること。

(補足1) RV-Xの状況

【進捗】

- 2020年3月～2021年4月にかけて、地上燃焼試験#2を3期(その1～その3)に分けて実施し、エンジン推力や推力方向制御機能等の基礎特性データを取得。併せて、燃焼中の振動や温度環境データの取得や、地上設備の機能確認等を実施。
 - RV-X/CALLISTOチームが連携し、CALLISTOの設計に必要となる地上燃焼試験データを全て取得。



RV-X

【今後の予定】

- 8月下旬～9月中旬に、飛行試験に向け、実際の飛行を模擬したシーケンスでの燃焼や推力方向制御を行いデータを取得する目的等で、地上燃焼試験#2(その4)を実施予定。
- 地上燃焼試験#2(その4)後に、飛行試験に向けた機体改修とシステム試験を実施し、**2022年3月に飛行試験を実施する予定。**



取得したデータは、CALLISTOの飛行計画や運用計画に反映
CALLISTOで取り組んでいるモデル化技術の検証にも活用

- 飛行試験が遅延しないようにCALLISTOチームも可能な限り支援する。仮にRV-X成果が反映できない場合には、CALLISTOの飛行回数を増やすことなどで対応する。

令和3年9月27日第62回宇宙開発利用部会



2021年4月8日、能代ロケット実験場で行われた地上燃焼試験(#2-5)の100%推力時の様子

