

-有人宇宙輸送システム実現に向けたワークショップ-

機能要求例及び基本 requirements 例

2025 年 4 月 21 日 (月)

宇宙航空研究開発機構

※本資料は、『有人宇宙輸送システム実現に向けたワークショップ』向けにJAXA担当部署がまとめた現状整理資料です。

はじめに

「人を乗せて宇宙に行く」ことはとても夢のある事です、リスクは大きく、考えなければならないことは多数あります。

「国内の事業として有人宇宙輸送に踏む込む」ことは、日本として「どうすれば人を乗せられるか？に対し、解を持つこと」になると思います。

誰かが答えを導き出してくれるわけではないので、

- 国内で知恵を出し合い、人智を尽くす。
- この「有人宇宙輸送」という難しいテーマに対し、第一歩を踏み出す。

そんな機会に今回の基金テーマがなることに大きく期待し、JAXAは伴走支援したいと考えています。

日本にとって確実な一歩となる様に、2点に焦点をあててみました。

- ✓ 「人を乗せられる環境に宇宙輸送機を昇華させる」際に、コアとなる技術から実現性を確認していく。
- ✓ 3～5年後に試作機設計に向けて国内関係者が集まれる様に、抑えるべきポイントを認識して進む。

国内体制に関するご議論の支援になればと考え、本日は有人宇宙輸送に関する考え方や海外事例などを紹介し、意見を出し合いながら一丸となって考えていく会にしていきたいと思っています。

第二期宇宙戦略基金テーマ「有人宇宙輸送システムにおける安全確保の基盤技術」の実施方針の推進として、基本的な機能・要件(例)を参考情報として提示する。

国内の将来宇宙市場における有人宇宙輸送の実現に向け、当該テーマは基盤かつ技術難度の高い技術を要素からの研究及び実証に取り組むことを考え、**要素での技術実証の過程で必須となり得る要求を必須要求**として本資料はまとめた。**技術実証を終えた後にシステムの作り込みとして付加される要求は推奨要求**として識別した。

今回は素案の提示であり、広く企業の方からご意見をいただき、公募要領作成時の検討材料とさせていただく。

<技術開発実施内容>

(A)ロケットの往還飛行用の与圧キャビンシステムに必要な生命維持・環境制御機能と与圧機能を実現する基盤技術開発を行う。

(B)ロケット打上げ時の異常発生時に、搭乗員の安全を確保するロケット 搭載用安全システムに必要な①異常検知機能、②離脱機能を実現するための基盤技術の検証を行う。

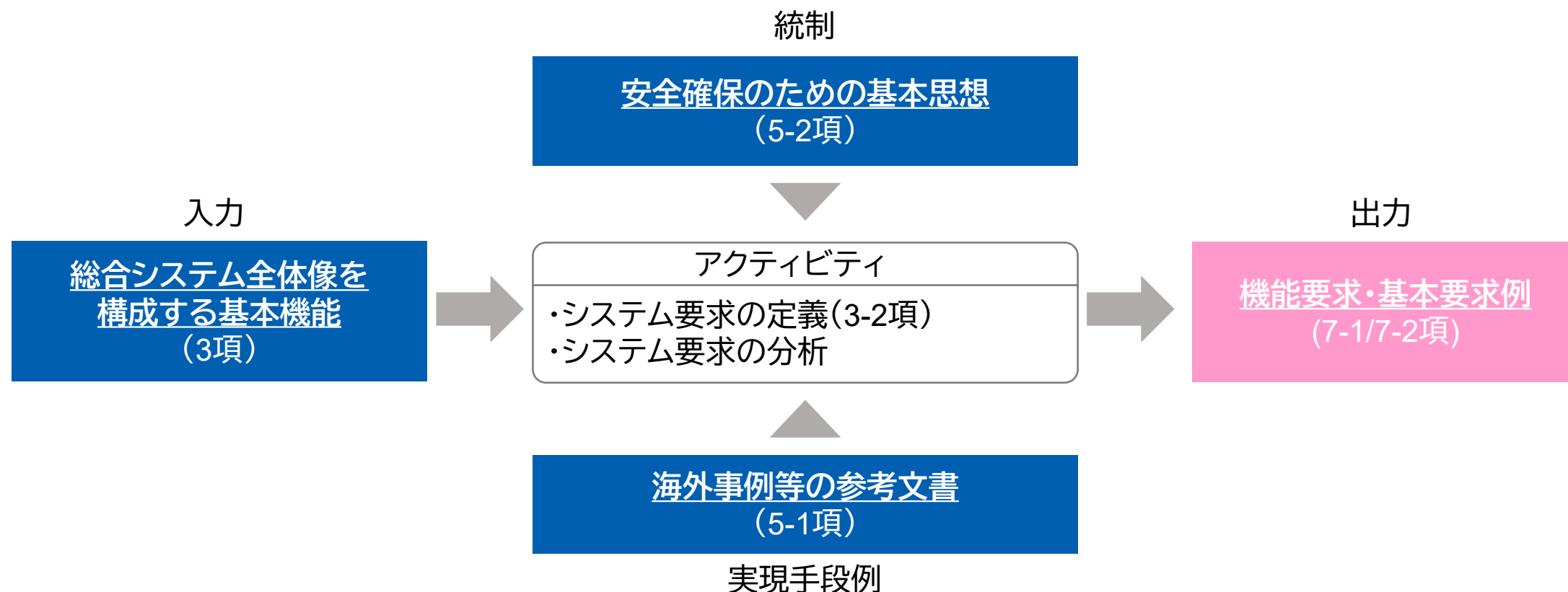
① 異常検知機能:エンジン等の推進系の異常や通信系のトラブルなど に対して、ロケット搭載のままでは搭乗部の安全確保が困難であることを検知し、ロケットから搭乗部を離脱させる指示を出すまでの一連の機能。

② 離脱機能:異常検知機能からの指示を受け、人が耐えられる衝撃や 加速度の範囲内で、安全域へ搭乗部を離脱させる機能。

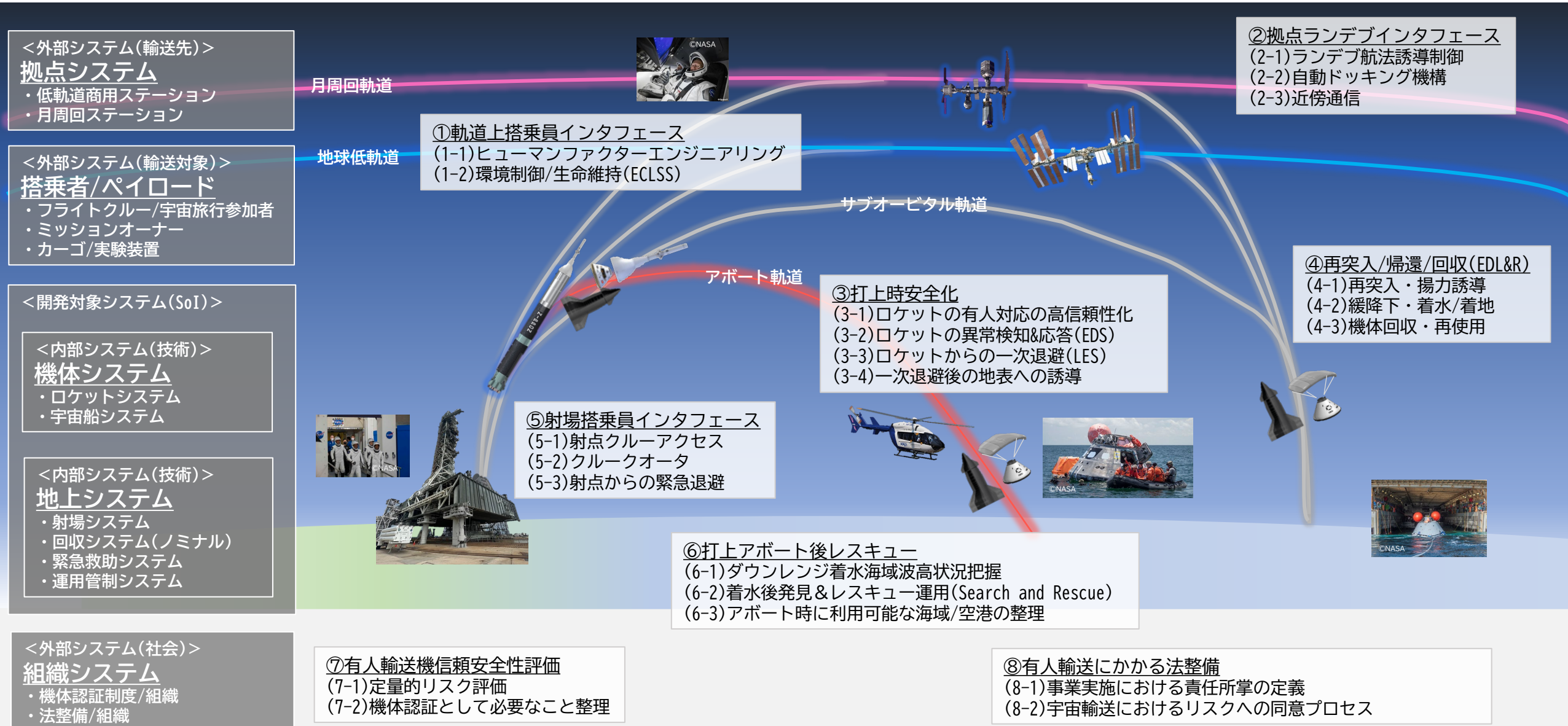
2. 機能要求・基本 requirement 例作成にあたるプロセス

将来市場に向けて第二期基金テーマの要素研究がその後のシステム開発に繋がる様に、要素研究を取り巻く前提の整理方法を紹介する。

本資料では「総合システムを構成する基本機能」・「安全確保のための基本思想」・「海外事例」の3つの視点からシステム要求を定義・分析し、研究提案の際に必要な機能要求・基本 requirement を参考として紹介する。

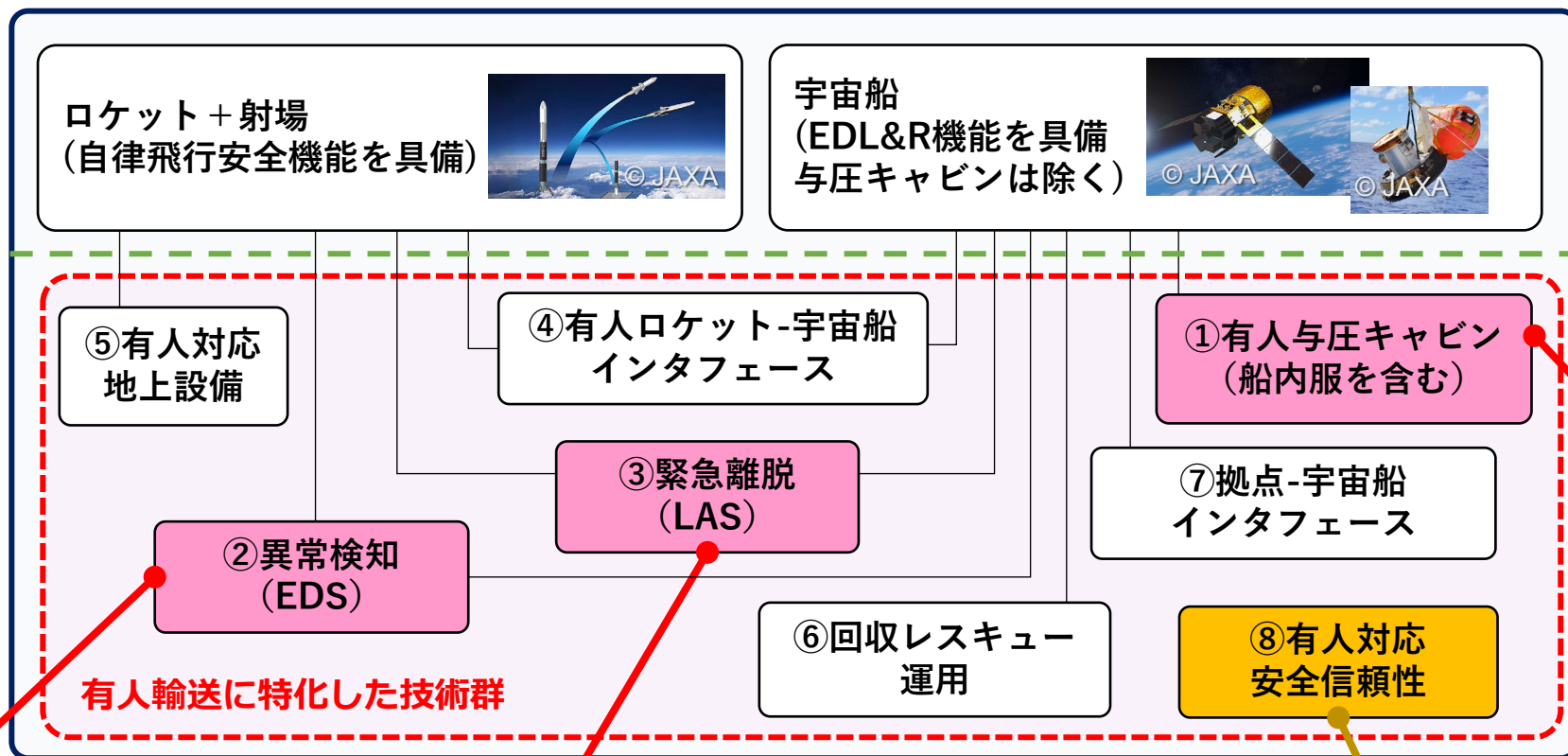


3. 要求を抽出する際に前提とした「総合システム全体像」



3. 要求を抽出する際に前提とした「システム構成」

有人宇宙輸送総合システム



無人ベースの技術▲

有人輸送に必要な技術▼

(A) 与圧キャビン技術:
搭乗員に対して必要な生命
維持・環境制御機能と与圧
機能を提供する技術



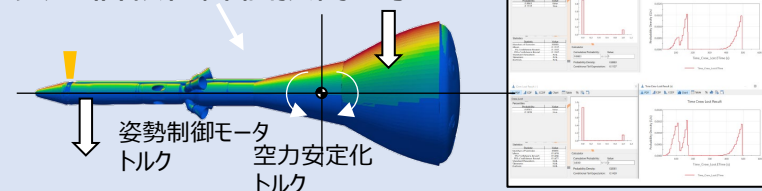
(B)①異常検知機能:
ロケット搭載のままでは
搭乗部の安全確保が困
難であることを検知し、
ロケットから搭乗部を離
脱させる指示を出すま
での一連の機能



(B)②離脱機能:
異常検知機能からの指
示を受け、人が耐えら
れる衝撃や加速度の範
囲内で、安全域へ搭乗
部を離脱させる機能



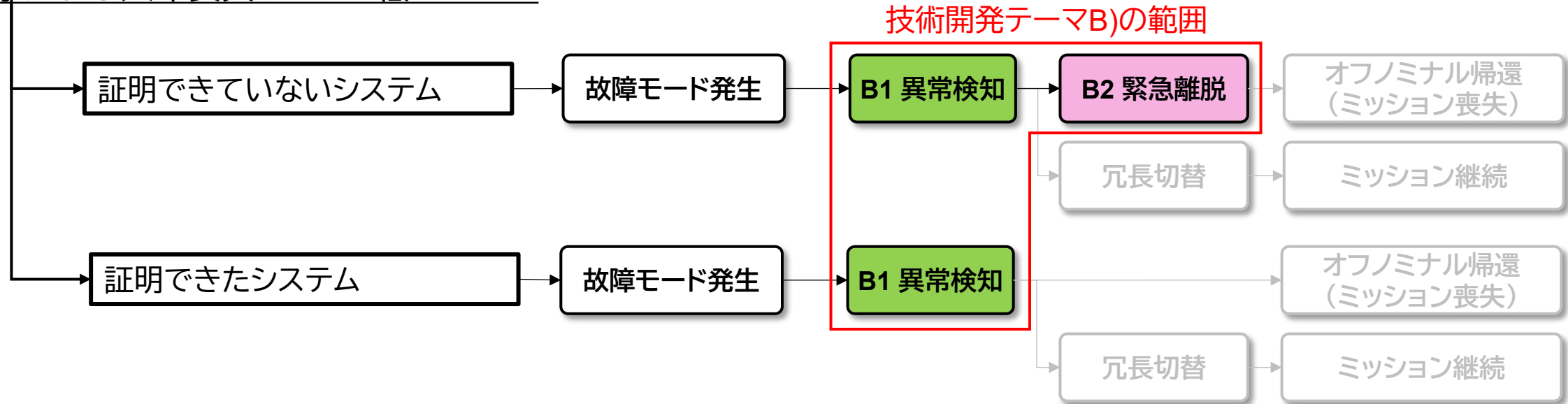
(参考)安全性・信頼性評価技術:
定量的・定性的な安全成立性確認のための
安全信頼性評価技術 等



4-1. 搭乗員の安全性確保についての基本的な考え方

- ▶ 最も難しい課題は「システムとして破局的事象による人命喪失リスクが低いことを証明すること」
- ▶ この最終課題に答えを出す過程の「技術の実証」や「事業利用」で、乗員の搭乗を想定するか否かでシステム設計は大きく変わる。
- ▶ このワークショップでは、破局的事象による人命喪失リスクの証明状況によって下図のようにシステム動作（または機能）が変化すると考え、要件の具体化を進めていく。

破局的事象による人命喪失リスクが低いことを



4- 2. 搭乗員の安全性確保のための上位機能

- ▶ 安全評価における保護すなわちリスク評価対象は下記の2つである。
 - ▶ 搭乗員の喪失
 - ▶ 地上への被害
- ▶ この2つの観点を考慮し、システムの運用シナリオ、及び機能を識別することとなる。
- ▶ 「乗員搭乗を可能とする」ためには、「A 生命維持、環境制御、与圧機能」「B1 異常検知」「B2 緊急離脱」は常に機能していて欲しい項目と整理する。

海外事例



Blue Origin New Shepard
実験ミッションアボート
→実験機器の喪失はせず
(2022/9/12)

異常による破壊/指令破壊
→爆発
(爆風圧/破片飛散/火球等)

搭乗員や地上に対する
ハザードに繋がる異常を検知

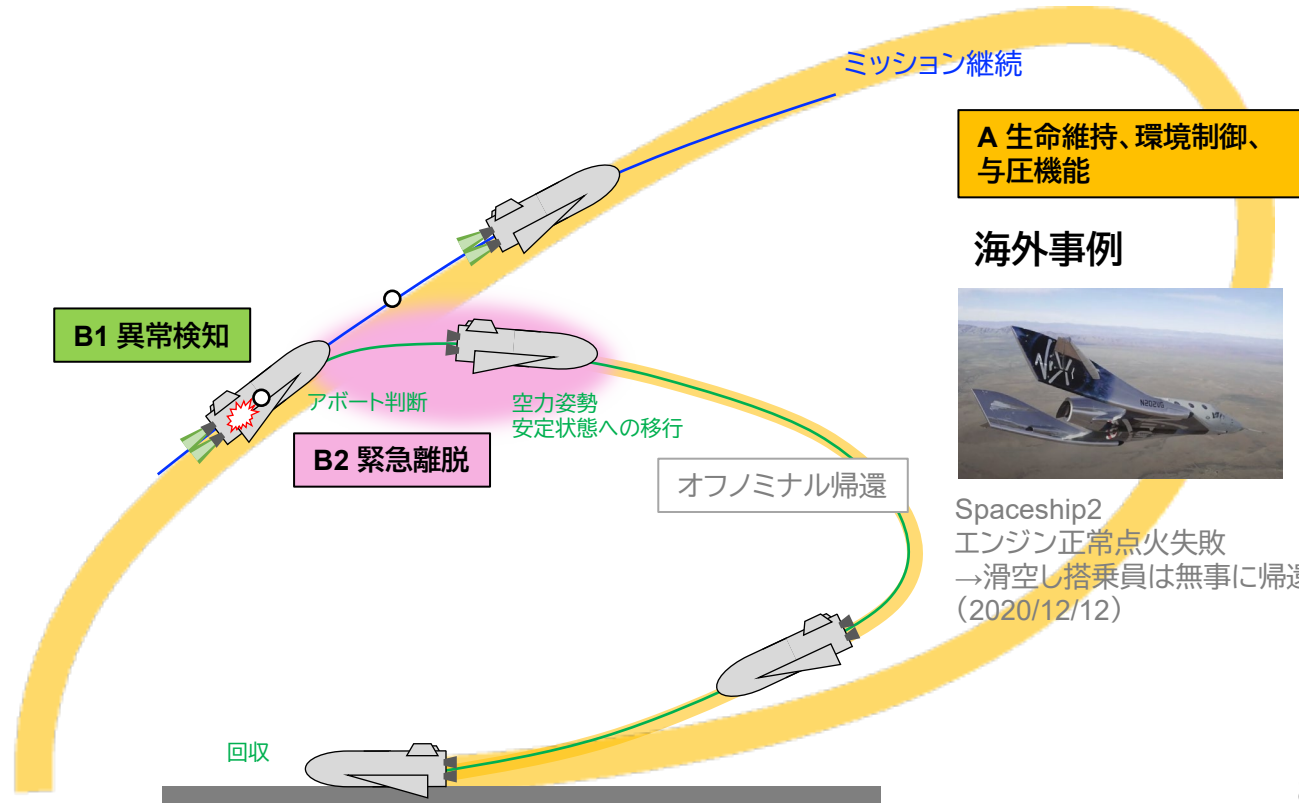


※アボート: ミッション中断

海外事例

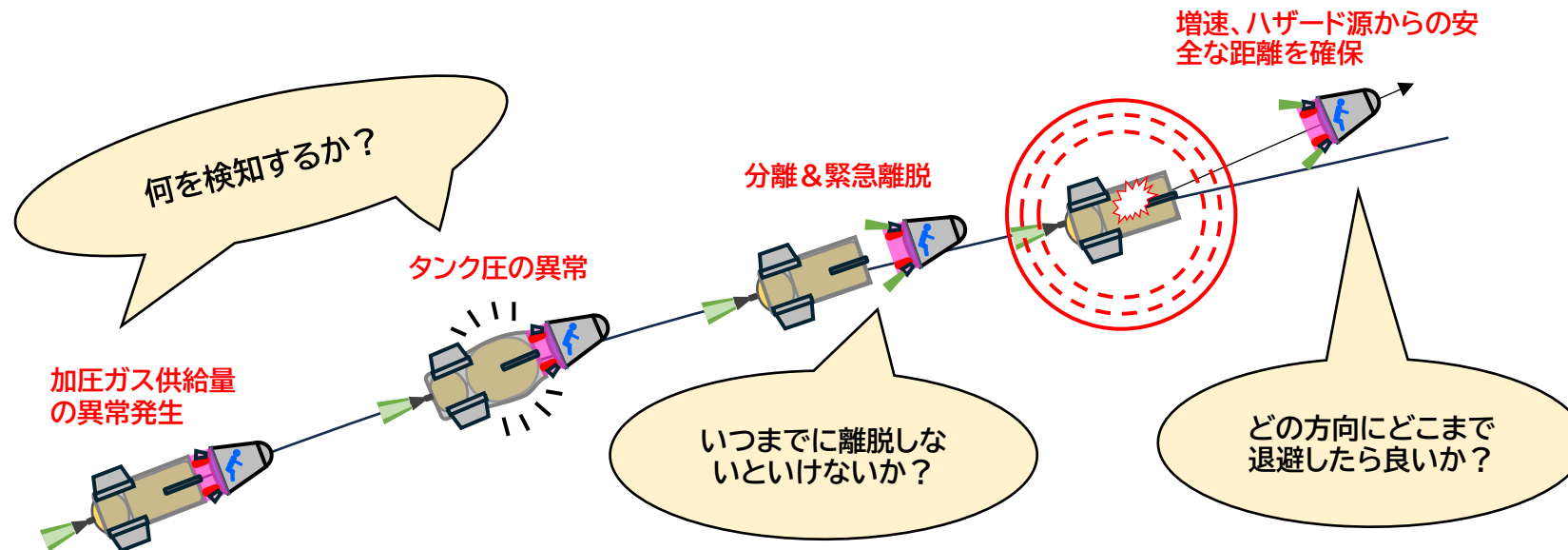
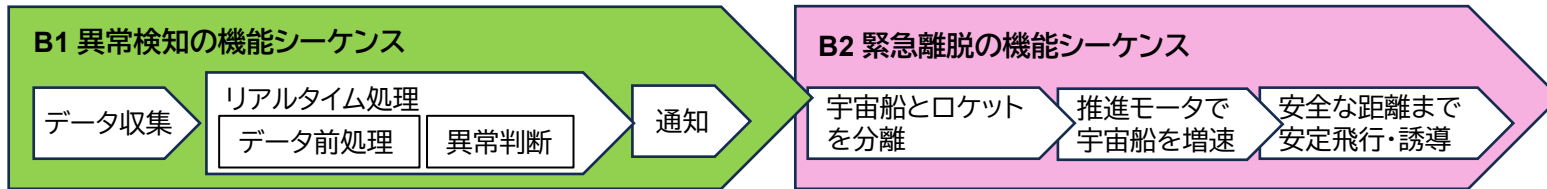
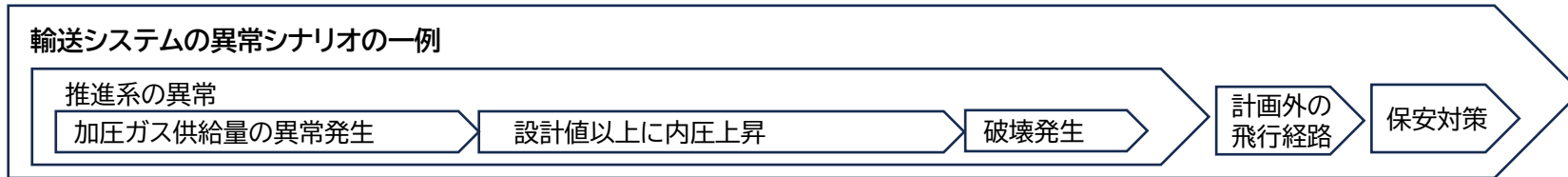


Spaceship2
エンジン正常点火失敗
→滑空し搭乗員は無事に帰還
(2020/12/12)



4-3. 機能展開と構成要素の考え方の例

- ▶ 輸送システム設計及び運用、故障モード発生タイミングに応じた異常シナリオを識別する。
- ▶ 異常検知及び緊急離脱の基本的な機能のシーケンスを識別する。
- ▶ 参考として、システムの主な構成要素、主な課題を示す。



B1 異常検知

主な構成要素	構成要素の主な課題
データ収集モジュール	異常検知を必要最低限のセンサ配置で確立
データ前処理	欠損値補完やノイズ除去等のデータ前処理の高度化
異常検知アルゴリズム	異常の有無を正しく判断するアルゴリズムの確立
リアルタイム処理	異常検知アルゴリズムを高速にリアルタイム処理
ログ	
通知	

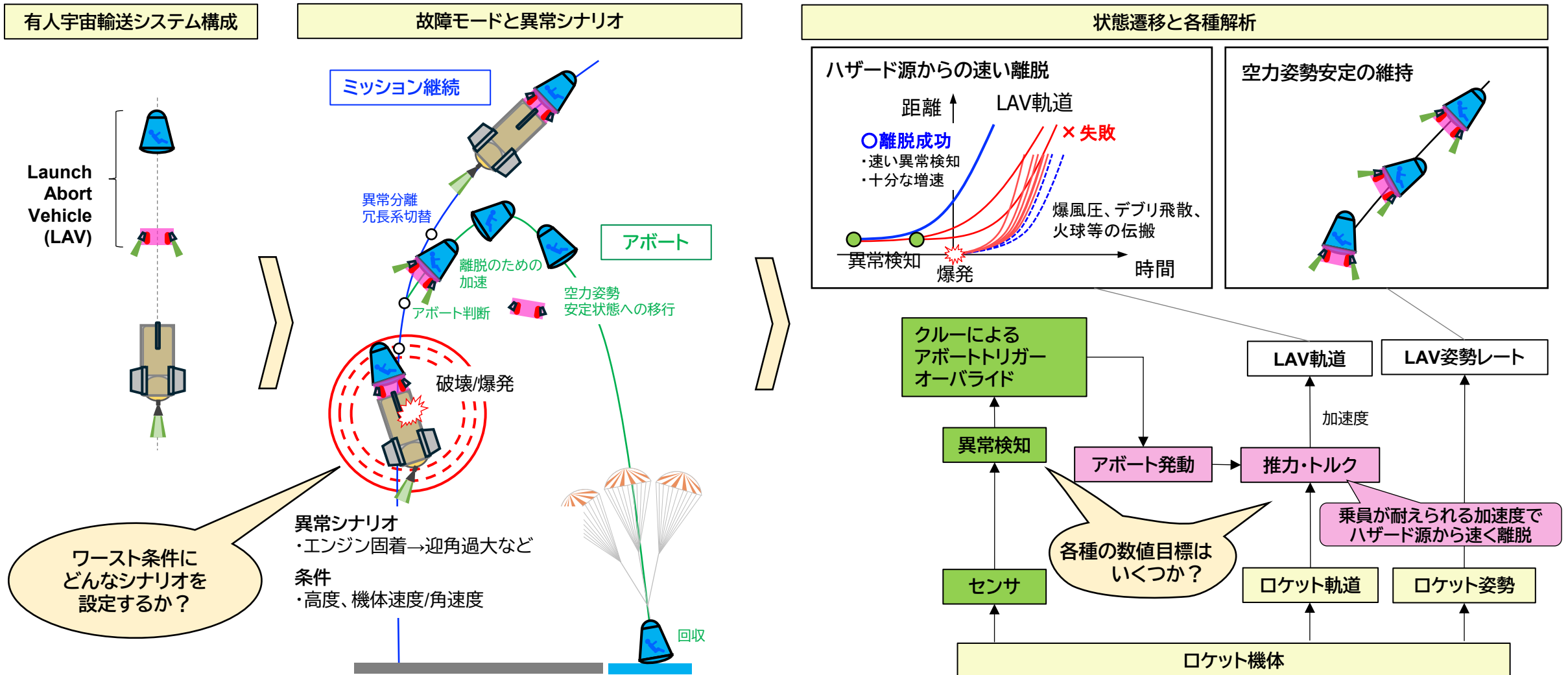
B2 緊急離脱

主な構成要素	構成要素の主な課題
宇宙船とロケットを分離する機構	宇宙船にダメージを与えずに確実に分離する機構の確立
宇宙船がロケットから緊急退避するための推進モータ	信頼性が高く大推力の推進モータの確立
緊急退避の際に安定飛行・誘導するための機構	緊急退避飛行時の安定を得る機体形状や制御システムの確立

4-4. 数値目標設定の流れの例

▶ ハザード源からの離脱、空力姿勢安定の維持等の観点で、総合システム設計・運用を考慮し、

1. ワーストケース(異常シナリオや条件)を設定する。
2. ワースト条件に基づき、構成要素の性能(アボートモータ推力・燃焼時間や異常検知時間など)の数値目標を設定する。



4-5. 総合システムとサブシステム連携の重要性

- ▶ より実際に近い故障モードや環境条件で安全確保についての検証を早期に行えることが理想です。
複雑な事象やシステム挙動を把握し、段階的に安全性を検証できなければ有人宇宙輸送事業を進める事ができません。
- ▶ 今後のサブシステムから総合システムへの検証が効率的に進むように、また把握できている事を積み上げながら総合システムへと駒を進められるように、総合システムとサブシステムでの連携をとった体制構築を期待します。
- ▶ また、要素としてどこまで冗長性を持たせ、機能の検証を行うかも鍵となるので、様々な運用のモードやシナリオ(ノミナルとオフノミナル)を検討し、検証項目を設定することが重要と考えます。

総合システムレベル

サブシステム構成の検討

- 故障モード・異常シナリオの設定
- システムに対する制約に従属
- 設計に向けた物理現象把握の容易化
- 不具合伝播防止設計

ギャップ減らす為に
インターフェースを適宜更新

基本とする
機能・構成・要求

サブシステムレベル

要素の構成及び性能の検討

- 要素毎の性能設計
- 安全に対する冗長系設計
- 現実的な期間・コストの検証計画

要素の研究開発

Unknown

実際の
故障モード/環境条件

想定
故障モード/相当環境

リフトオフ後の検証

- フライトデータでの検証

リフトオフ前の検証

- サブシステム単体での検証
- フライト形態のドライランで検証
- 打上げオペレーションでの検証

総合システムとしての安全性

- 組み合わせ事象を対象とした検証
- 複数の飛行で実証数を蓄積する
- 異常のデータ収集

総合システム化

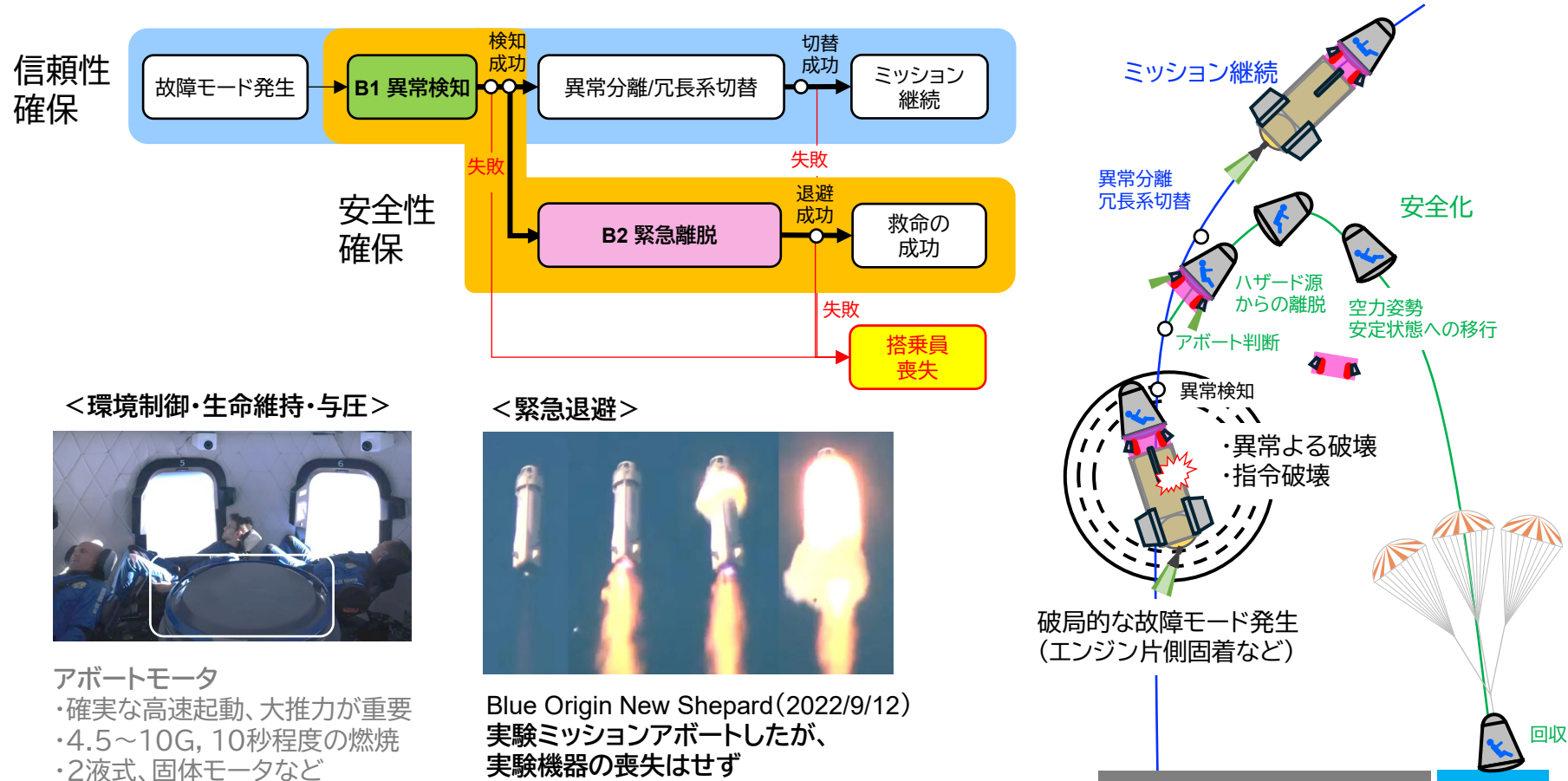
サブシステム/要素規模での検証

- 要素毎の事象を対象に検証

今回のテーマの範囲

4-6. 安全確保のための異常検知・緊急退避の重要性(海外事例)

- ▶ 輸送システムの高い信頼性を、数多くのカーゴ輸送や実験ミッションをとおして効率的に証明。
- ▶ 冗長系切替によるミッション継続、緊急離脱等による搭乗員救命を確実に起こすためには、様々な故障モードに対応できる高信頼で高速な異常検知が必要である。
- ▶ 冗長化によるシステム信頼性の確保、緊急離脱等の安全化機能による搭乗員安全性の確保を前提とした設計をしている。
- ▶ 数多くのフライトの繰り返しのなかで実際に不具合に対応できることを実証し、信頼性・安全性を向上させ続けている。



＜冗長化＞



SpaceX Falcon9(2020/3/18)
エンジンに不具合が生じたが、
カーゴ輸送ミッション成功



SpaceShip2(2020/12/12)
エンジンの正常点火に失敗したが、
滑空しクルーは無事に帰還

5-1. 海外事例等の参考文献

現状は国際基準・ガイドラインは定まっていないが、先行する米国では、指標となり得る要求基準・ガイドラインが存在するので紹介する。

下記項目の適合は必須ではなく、適宜テーラリングすることは可能である。

一方で、他国への飛行も想定する有人宇宙輸送事業においては、世界標準に沿った研究開発が求められる。

日本での社会実装においては、海外とのベンチマークや人命リスクに対する十分な配慮が求められる可能性がある。

<参考文献>

① CCT-REQ-1130 ISS Crew Transportation and Services Requirements Document (公開)

[概要] NASAが策定したCommercial Crew Program(CCP)における要求仕様書



② Recommended Practices for Human Space Flight Occupant Safety Version 2.0 (公開)

[概要] FAAが策定した有人輸送に関するベストプラクティス集



③ CFR(Code of Federal Regulations) Title 14 Chapter III Subchapter C PART 460 (公開)

[概要] FAAが発出する商業宇宙飛行における乗組員や旅行者の安全確保に関する規則やガイドライン

④ 米国業界標準 (公開/有料)

[概要] ASTM Committee F47 on Commercial Spaceflightが策定した商用宇宙輸送に関連する安全性・品質に関して推奨する実践方法の業界標準案



1. F3568-23: サブオービタル宇宙旅行者の医療適格性
2. F3658-23: 有人サブオービタル宇宙機の設計指針
3. F3668/F3668M-23: 有人オービタル宇宙機の乗員生存性
4. F3479-20: 有人サブオービタル宇宙機の故障許容性
5. F3520-21: 安全クリティカルな宇宙運用要員の訓練と資格

5-2.「安全確保」のための基本思想

人智を尽くした安全確保の第一歩として、3つの基本思想を紹介する。
この3つの基本思想のもとで適切なリスク回避策の検討、システムへの具備、実証が本基金テーマの骨格と考える。

○リスク・インフォームド・アプローチ:

- ・体系的な安全評価を通じ、各ハザードを識別し、乗員の安全へのリスクを評価、ハザード排除および緩和策を適用して、リスクが許容レベルまで低減されていることを検証すること。
- ・故障によって破局的ハザードが生じる場合には、少なくとも単一故障耐性を有することに加え、リスクに基づいたアプローチを使用して、単一故障耐性を超える耐性が適切であるかどうかを決定する。

<F3479-20 Standard Specification for Failure Tolerance for Occupant Safety of Suborbital Vehicles 4.1/4.2項等>

○サバイビリティの向上:

- ・すべての故障耐性が尽きた場合における乗員の生存性を高めるための手段を提供すること。

< F3668F3668M-23 Standard Guide for Occupant Survivability in Orbital Vehicles 1.2項、4.1項等>

○デモンストレーション:

- ・宇宙飛行参加者(Spaceflight participant)を乗せての飛行に先立ち、システムのハードウェア、ソフトウェア、運用手順の統合は、試験飛行の成功をもって実証されるべきである。

<F3658-23 Standard Guide for Crewed Suborbital Space Vehicle Design 7.5.2項等>

6. 基本要求・機能要求例

第二期宇宙戦略基金テーマ「有人宇宙輸送システムにおける安全確保の基盤技術」に関する基本要求・機能要求の例を示す。
ここでは、以下のカテゴリに要求を分けて記述をしている。今回は素案の提示であり、広く企業等の方からご意見をいただき、公募要領作成時の検討材料とさせていただく。
要すれば、機体形態等に基づき根拠とともに、必須要求・推奨要求いずれにおいても変更提案をいただきたい。

基本要求:

[必須要求] 開発を通じて、システムへの統合を想定して共通的に考慮すべき基本的な開発・実証の要求を示す。

機能要求:

[必須要求] 機体形態に依らず重要度の高い要求を示し、本開発を通じて獲得が期待される要求を示す。

[推奨要求] 実施事業者やシステムによって適宜テーラリングや代替え手段の提案が想定される要求を示し、技術実証を終えた後にシステムの作り込みとして付加されることを想定する。

次ページより、開発対象の基本要求・機能要求例を示す。

- ・与圧キャビン(7-1項)
- ・アボートシステム要素(7-2項)

7-1. 与圧キャビン基本要件・機能要求例 (1/3)

● 与圧キャビン基本要件例

#以下は、考慮が**必須**と考えられる基本事項をまとめたものである。

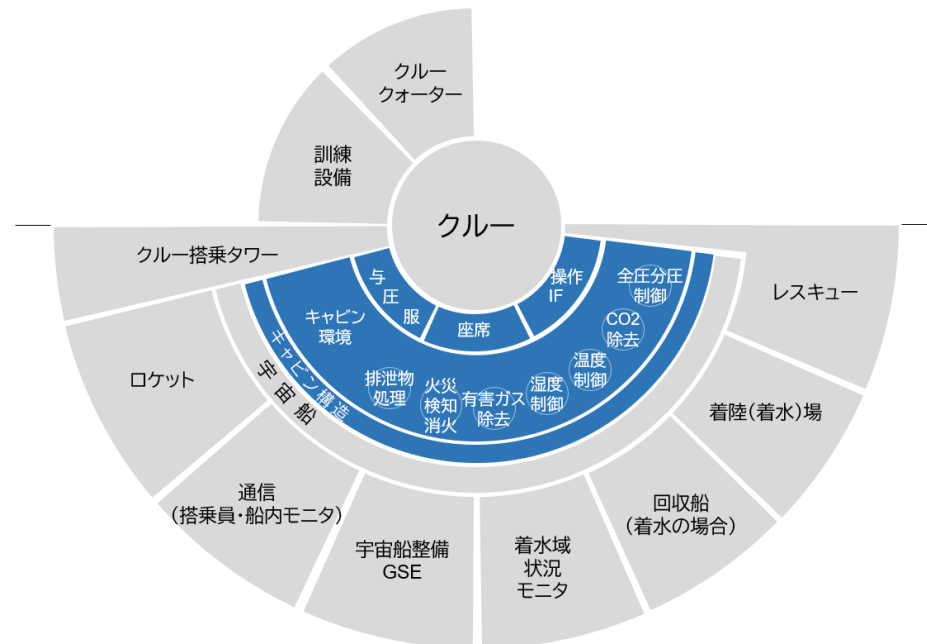
1. 与圧キャビン技術の開発を行う事業者は、リファレンスとするロケット・宇宙船(与圧キャビンを除く部分)と運用シナリオ(ノミナル・オフノミナルを含む)を設定し、それに基づき開発及び実証を行うこと。

*搭乗するクルーの人体特性・制約については、CCT-REQ-1130 3.0項およびAppendixを参照のこと。

2. 本実証で想定するスコープはブレッド・ボード・モデル(BBM)以上であるところ、実運用に相当する環境条件・シナリオに基づき、地上試験・デモンストレーション等で実証すること。

- 検証計画には、火災等、緊急時の対応についても含めること。
- 段階的に高度な有人宇宙船を開発する事業計画である場合、将来的な発展性を考慮した検討を行うこと。

*サブオービタル機からオービタル機への発展化を想定する場合、長期の宇宙滞在による人体・システムへの放射線の影響評価やデブリ耐性向上のための改修、打上げ機変更による加速度環境の変化等を念頭においた検討を行うこと。



◀ 与圧キャビン開発でカバーされる範囲のイメージ図(青色)
与圧キャビンの構成要素およびインタフェース先(地上設備やロケット、宇宙船の他システム)は事業者の設定によるため、本図に従う必要はない。

● 与圧キャビン機能要求例

#以下は、考慮が**必須**と考えられる機能をまとめたものである。

1. 与圧キャビンは、クルーに対し、生命と意識レベルを保つために十分な空気環境を提供すること。空気環境については、地上またはクルーから以下の情報をモニタでき、制御できるようにすること。

- 空気の組成(酸素および二酸化炭素)およびその再生の状況
- 圧力、温度、湿度
- 飛散している微粒子、汚染物質(有害ガス等)の状況
- 換気/空気循環の状況

*船内環境維持については、想定されるミッション期間や搭乗人数に応じて最適な手法を選択する。

*CCT-REQ-1130では、全圧96.5～102.7kPa、酸素分圧19.4～22.7kPa、二酸化炭素濃度4.0mmHg以下、空気温度18.3～26.7℃、湿度25～75%が要求されている。

2. 与圧キャビンは、クルーに対する酸素供給については、十分な予備または、二次的な供給系(バックアップ系)を備えること。

3. 与圧キャビンは、キャビンの不意の減圧を防ぐ冗長の手段を講ずること。または、減圧が生じた場合に、クルーのいずれかが機体操作が不能な状態になることを防止すること。

*海外の有人宇宙船では、減圧に備えた与圧服を備えることが一般的である。

4. 与圧キャビンは、煙を検知し、火災を鎮火する機能を有すること。

*キャビン内の空気が通過する箇所に煙検知器を搭載し、検知した場合には空気循環を止めるアプローチが一般的である。消火器を搭載する場合、水ミスト噴霧・二酸化炭素吹付・消火剤吹付などから、システムとの適合性を踏まえ選定する(F3668/F3668M-23 5.3.4.1)。

5. 与圧キャビンは、地上での緊急時にクルーが退避するための経路を確保し、迅速に退避可能であること。

*地上で想定される姿勢で、ハッチ外に退避する経路を確保する必要がある。ハッチについては、船内/船外の両方から開けることが可能であり、船内からは1名のクルーで工具を使わずに開けられることが推奨されている(F3658-23 7.4.16.2項)。

*CCT-REQ-1130 E 3.10.14.2項では、ハッチについて、船内外からの状況把握のため、窓を備えることが要求されている。

6. 与圧キャビンは、運用シナリオ中に想定される荷重に耐えられること。

*打上げ、帰還、着陸・着水時の荷重に限らず、アボート発生時やクルーが船内を浮遊する際に発生する荷重(キックロード)も考慮のこと。

● 与圧キャビン機能要求例(続き)

#以下は、考慮することが推奨される機能をまとめたものである。以下に識別した事項以外にも、具体的なシステムの検討を通じて抽出される項目は、各システムで定義を追加することを想定。

1. クルー同士、クルーと地上管制との間のボイスループを提供可能なこと。
2. クルーによるマニュアルの緊急アボート、スラスト操作ができる操作インタフェースを有すること。
3. キャビン内の騒音は、クルーの健康、ボイスループにおけるコミュニケーションに支障のないレベルとすること。
(F3658 7.2.4項、CCT-REQ-1130 E Q1.2～1.5項)
4. キャビン内空間の照度の下限は108luxとすること。操作インタフェース部の照度の下限は215luxとすること。
(CCT-REQ-1130 E Table Q1.8-1)
5. 電離放射線の実効線量は、1mSv/年以下となるように遮蔽すること。

● アボートシステム要素に対する基本要求

#以下は、考慮が**必須**と考えられる基本事項をまとめたものである。

1. アボートシステム(EDS/LAS)の要素開発を行う事業者は、リファレンスとするロケット・宇宙船と運用シナリオ(ノミナル・オフノミナルを含む)を設定、それに基づき開発及び実証を行うこと。

**リファレンスとするロケット・宇宙船と運用シナリオ設定を通じ、上位システムへの搭載を考慮した要求抽出を実施することが重要である。*

2. 本実証で想定するスコープはブレッド・ボード・モデル(BBM) 以上であるところ、実フライトにて必要となる信頼度を設定、またそこに至るための検証計画を示すこと。

**例として、EDS検知からLASによる退避までを含め、アボートに関するハードウェア/ソフトウェアを合わせた信頼度として0.995以上を達成することがCCPでは求められている。(CCT-REQ-1130 3.3.1.5/4.3.3.1.5 Ascent Abort Reliability)*

3. シミュレーション等を通じて、設定したリファレンスとするロケット・宇宙船と運用シナリオに対して、退避運用や検知の網羅性があることを示し、そのうち設計評価となるシナリオについて、技術実証を行うこと。

4. 設計/検証試験では、最大予想運用環境を超える条件で機能的に実証すること。選定された環境試験レベルは、設計が十分にストレスをかけられ、加えて、設計許容範囲、製造のばらつき、環境の不確実性によって、システム性能が低下しないことを評価のこと。(ASTM F3658-23 7.5.1等)

● EDS技術における機能要求例

#以下は、考慮が**必須**と考えられる機能をまとめたものである。

1. EDSは、ロケットのノミナル飛行から外れ、搭乗員の安全を阻害するイベントを検知した場合、搭乗員を含む宇宙船にそれを通知し、退避の開始を指令可能のこと。(ASTM F3668F3668M-23 5.2.2等)
2. EDSは、飛行フェーズや機体の状態に従い、ロケットや宇宙船がアボートモードを適切に選択するために必要な情報を自動で通知可能なこと。(CCT-REQ-1130 3.3.1.2/4.3.3.1.2等)

*ロケットの飛行運用フェーズによって、ロケットや宇宙船が実施するアボート運用は動的に変化するため、その適切な選定が地上や搭乗員に頼らずに自動で実行可能なよう支援が必要である。

EDSに関して、**推奨**要求は明示しないが、具体的なシステムの検討を通じて抽出される項目は、各システムで定義を追加することを想定。

*技術実証を終えた後にシステムの作り込みとして付加される機能機能としては、以下のような事項が一例として想定される。

- 飛行安全系を具備する場合は、フライトターミネーション前にLASが起動し、退避が開始されることで、乗組員の生存の可能性を最大限に高める。(CCT-REQ-1130 3.3.1.9 Abort on Flight Termination System Command等)
- 打上システムの特徴に合わせて、EDSとしてコンポーネントを定義するか、打上システムまたは宇宙船のメインコンピュータに組み込むかといったトレードオフが必要。

● LAS技術における機能要求例

#以下は、考慮が**必須**と考えられる機能をまとめたものである。

1. LASは、搭載ロケットの特性(質量特性、飛行経路、異常モード)およびTime-to-effectの観点(ロケットの爆発、エンジン停止不可、破片の散乱、姿勢異常などを想定)での即応性を評価の上、必要な退避能力(例:推力、推力立ち上がり特性 等)を見積もり、射点または上昇中のロケットから退避可能なこと。(ASTM F3658-23 7.2.10等)

*加速された宇宙船の一部が退避することで乗員を安全化させる例として、アボートシステム(例:射出座席、トラクター(牽引式) / プッシャー(押し上げ式)アボートシステム)を使用することが歴史的には一般的である。(ASTM F3668F3668M-23 5.2.1)

2. LASは、異常発生時の対処イベントにおいて、十分に有意な成功率をもってアボートを成功させられる性能を持つこと。

*例として、低軌道への有人輸送の場合には、次のような要求がある。

破局的ハザードに関するイベントを検知した場合、Pad/Ascentそれぞれ95%のアボート退避運用の成功率(90%信頼区間)を確保のこと。
(CCT-REQ-1130 3.3.1.3/4.3.3.1.3 Pad Abort/ 3.3.1.4/4.3.3.1.4 Ascent Abort)

アボートの成功には、アボート開始時に搭乗員に印加される加速度環境を規定値以下に抑えられることも考慮されるべきである。(CCT-REQ-1130 3.10.3 Dynamic Flight Occupant Protection等)

LASに関して、**推奨**要求は明示しないが、具体的なシステムの検討を通じて抽出される項目は、各システムで定義を追加することを想定。

*技術実証を終えた後にシステムの作り込みとして付加される機能機能としては、以下のような事項が一例として想定される。

- LASによる緊急的な一次退避後、着陸/着水までを含めた運用シナリオ、レスキュー観点で着陸/着水から排除すべき危険領域(DAEZ)への到達回避策との整合性の評価が必要。(CCT-REQ-1130 3.3.1.7 Aborts outside DAEZ等)
- アボート開始時の推進系噴射プルームは、ロケット構造物等の相互干渉(LAS性能低下や安全性リスク)を緩和するような排気経路を考慮する必要。