

# 「宇宙分野における安全」

2025年10月8日  
有人宇宙システム株式会社

1

© JAMSS All Rights Reserved.

## 目次

### I 宇宙分野における安全の歴史 (事故の歴史)

1. はじめに
2. 宇宙開発における事故
3. 宇宙機の事故例

### II 宇宙分野における安全確保 (過去・未来)

1. スペースシャトルでのPRA
2. わが国の宇宙開発計画
3. 月探査ミッション
4. 今後の宇宙開発にむけて

### III 宇宙機システムの安全確保

1. 国際宇宙ステーション
2. 新型宇宙ステーション補給機
3. さいごに

2

© JAMSS All Rights Reserved.



# I 宇宙分野における 安全の歴史（事故の歴史）

3

**JAMSS**  
ひとと宇宙を結ぶインテグレート

## I-1. はじめに



# 有人宇宙システム株式会社

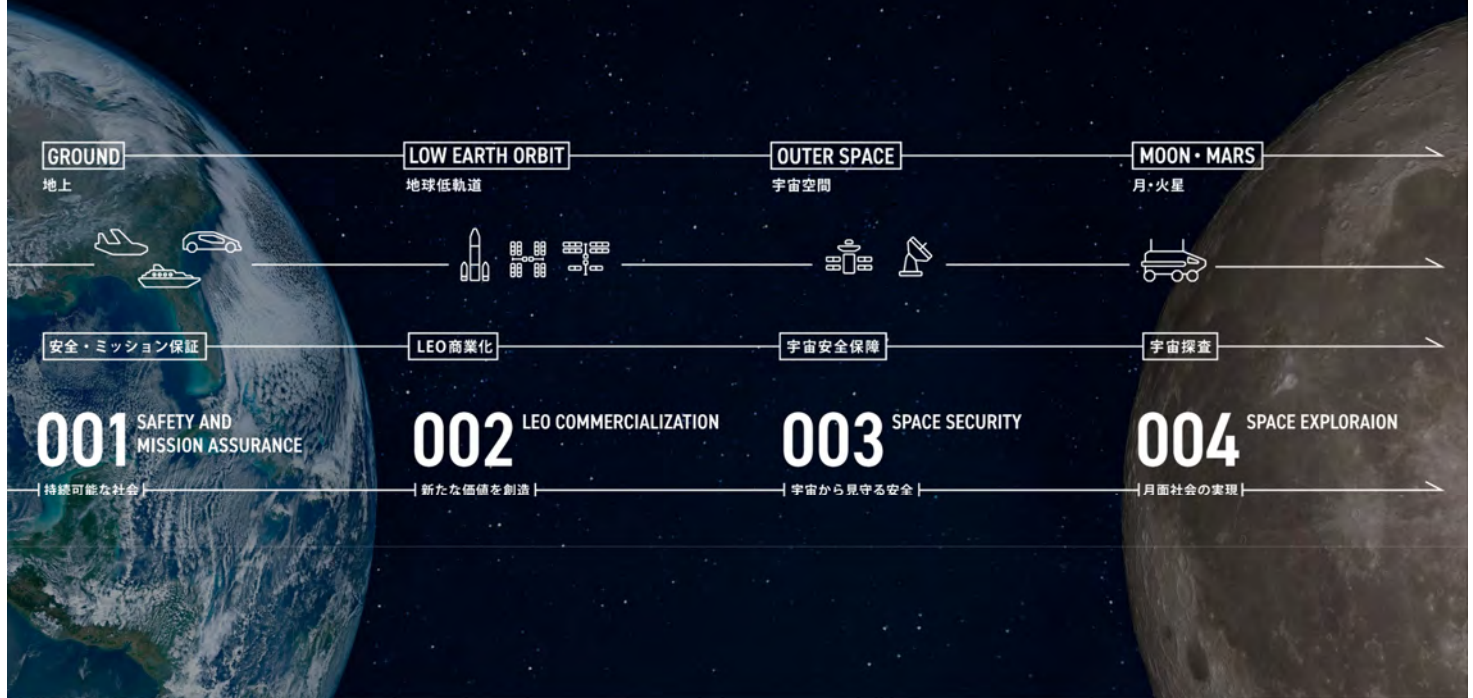
## CAMPANY PROFILE

## 会社概要

社名	有人宇宙システム株式会社（略称 JAMSS ジャムス）
設立	1990年5月
代表	有賀 輝
社員数	257名（2025年4月1日現在）
資本金	4億4千500万円（授權資本16億円）
本社	東京都千代田区大手町1-6-1 大手町ビル

# CAMPANY PROFILE

# 事業領域



## 001 SAFETY & MISSION ASSURANCE

### 安全・ミッション保証

地上では軽微ですむ事故も、国際宇宙ステーション(ISS)という特殊な閉鎖環境では、重大な事故につながる可能性があります。「3大ハザード」と呼ばれる 火災・減圧・空気汚染対策はもちろん、ISSに持ち込む機器を詳細にチェックし、安全要求の順守、ハザード解析を実施して人の安全を守るとともに、確実に所期の目的を達成させることが「安全・ミッション保証」です。

私たち JAMSSは宇宙空間に持ち込まれる機器の安全性・信頼性の評価を材料・部品等について、NASAやJAXAの厳しい基準を満たす品質が確保されているかどうかを解析し、お客様の開発を支援しています。こうした知識やノウハウを厳格な安全基準が求められる航空機や自動車等の分野にもサービスを提供することで、宇宙機開発で生まれた安全・安心のための技術を私たちの身近なシステムにも活かしています。

### 01 安全

宇宙機器・ソフトウェア・宇宙飛行士および地上運用者の作業の安全を、NASAやJAXAの宇宙基準で厳しくチェックします。



©NASA

### 02 信頼性・保水性

過酷な宇宙環境での機器・材料・電子部品の耐久性と故障時の影響評価(信頼性)、宇宙飛行士の作業時間を最小化するためのメンテナンス性の評価(保水性)を行います。



### 03 品質保証

機器やソフトウェアがその機能・性能を発揮できる品質を確保していることを、製造過程や試験過程も含めて評価します。



JAMSSは宇宙利用の促進・拡大に向け、「安全かつ確実なミッション達成」を目的として「技術」「管理」の両側面から宇宙開発に関与する全てのステークホルダーに安全・安心を提供していきます。



**「新しいシステム」への対応**

月・火星進出、次世代宇宙輸送機等、発展する新しい宇宙機システムの開発・運用に、安全・信頼性確保の観点から貢献します。

**「新たな脅威」への対応**

宇宙ゴミ（デブリ）回収や月面での資源開発等、従来なかった宇宙活動における新たな脅威に対応可能な解析・評価を活用し、リスク低減を実現します。

**「最先端の解析技術」の駆使**

AI(人工知能)等を活用した新しい宇宙機システムにも対応可能な、最先端の安全・信頼性解析・評価技術の獲得を進め、システムの安全性・信頼性向上に貢献します。

# 002 JAMSS, LINKING HUMANS AND SPACE

## ひとと宇宙をつなぐ

私たち JAMSS は 24 時間 365 日、地上から国際宇宙ステーション (ISS) / 日本実験棟「きぼう」を見守っています。「宇宙」という極限かつユニークな環境において必要とされる運用技術およびインテグレーション技術を駆使し、さまざまな宇宙ミッションの成功に寄与してきました。今までもこれからもひとと宇宙をつないでいきます。



### 「きぼう」運用業務

**計画管理**

多国間での年～日々単位でのスケジュール調整を行います

**技術支援**

「きぼう」全体の技術評価およびモジュール・装置間のインタフェース評価・調整を行います

**システム運用**

筑波宇宙センターの運用管制室から、「きぼう」システムの運用管制を 24 時間体制で行います

**実験運用**

「きぼう」で行われる宇宙実験の運用管制を行います

**訓練**

宇宙環境での宇宙飛行士活動に対し、国内外の宇宙飛行士や運用管制官に訓練を提供します

**健康管理**

日本人宇宙飛行士の健康管理運用を支援します

**ユーザ支援**

「きぼう」で行われる宇宙実験をはじめとする多種多様な「宇宙利用」の実現を支援します

**安全・ミッション保証**

搭載されるハードウェアおよびソフトウェアの安全性・信頼性・保全本性に關する評価を行います

## 002 SPACE ECONOMY FRONTIER

### 宇宙の新たな経済圏

各国の宇宙機関が牽引してきた「国際宇宙ステーション」の時代から民間が主体的に運営する「商業宇宙ステーション」の時代へ。人間の経済圏は、地球軌道圏まで拡張していきます。宇宙利用の形も、「宇宙実験」「技術検証」から「宇宙旅行」「宇宙工場」へ新たな価値の創出へと広がりを見せます。

#### 宇宙旅行ブーム到来

旅行にすぎず、サブオービタル(低軌道)飛行から宇宙ステーション(高軌道 orbit) 滞在まで、宇宙旅行の形態が多岐にわたる。この多岐にわたる宇宙旅行の形態は、宇宙旅行のニーズを多岐にわたる。旅行にプラスの価値を付与し、宇宙でのエンターテインメントや宇宙滞在(例: 30k, Disney orbit) による価値創出に期待がもたれます。



#### 商業宇宙ステーションの建設

民間を中心に商業宇宙ステーションの建設計画が進んでいます。建設費を抑え、長期滞在を可能にする。また、地球軌道圏まで拡張していきます。また、地球軌道圏まで拡張していきます。また、地球軌道圏まで拡張していきます。



#### 宇宙利用の多様化

「国際宇宙ステーション」を中心とした国際宇宙ステーションの時代から、民間が主体的に運営する「商業宇宙ステーション」の時代へ。人間の経済圏は、地球軌道圏まで拡張していきます。また、地球軌道圏まで拡張していきます。また、地球軌道圏まで拡張していきます。



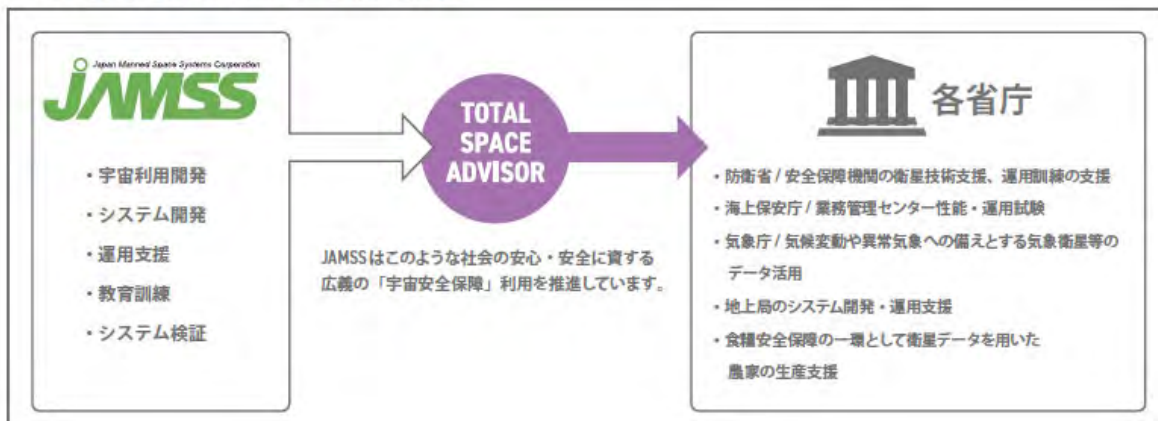
## 003 SPACE SECURITY

### 宇宙安全保障

JAMSSは「きぼう」「こうのとりのこ」で培った運用・利用・訓練・開発の技術に応用し、衛星利用を支えています。宇宙空間での安全確保のみならず、衛星利用を通じた地上社会の安心・安全の実現にも貢献しています。



### JAMSSが関わる宇宙安全保障業務



# 004 THE MOON TO MARS

## 宇宙探査

人類の有人宇宙活動の次のステージとして、月・火星を目指したさまざまな取組みが、世界各国の宇宙機関や民間企業で進められています。人類の活動領域を広げていく、この科学的・技術的な探求に対し、JAMSSは「きぼう」を通じて獲得した有人宇宙技術を活用し、月面有人与圧ローバ、月周回有人拠点（Gateway）、火星衛星探査計画（MMX）等、国際宇宙探査における日本の取組みに広く貢献しています。



13

© JAMSS All Rights Reserved.



© JAXA/TOYOTA

## 01 月面有人与圧ローバ

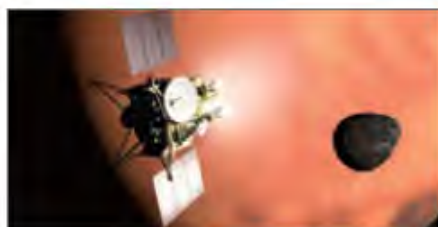
月に存在すると考えられる水資源の探査や月の起源に迫る探査等を目指し、研究開発が進められている有人与圧ローバ。その構想段階から、JAMSSは、ローバの安全性や運用シナリオ、搭載する宇宙飛行士の身の回りの機器についての概念検討に従事。以来、月で宇宙服を脱いで快適に生活できる与圧空間の在り方の検討を進めています。「きぼう」で獲得した有人宇宙システムの開発・運用技術を活かし、安全かつ確実な、そして、健康かつ快適な、月面でのミッション達成に向け、あらゆる面で貢献していきます。



© NASA

## 02 月周回有人拠点（Gateway）

月面・火星等に向けた中継拠点として、米国を中心に日本、ヨーロッパ、カナダで開発が進められているGateway。その中で日本は、国際居住モジュールの環境制御・生命維持システムや物資補給等において協力していく予定です。有人宇宙システムにおいて、クルーの生命維持は最優先です。JAMSSは「きぼう」の開発や運用、安全ミッション保証で培った技術・知見を駆使し、クルーの生命維持に不可欠な居住空間の環境制御・生命維持システムのインテグレーションおよびシステム安全・ミッション保証支援に従事。また、海外との共同プログラムを円滑に進めるための国際調整支援も実施しています。



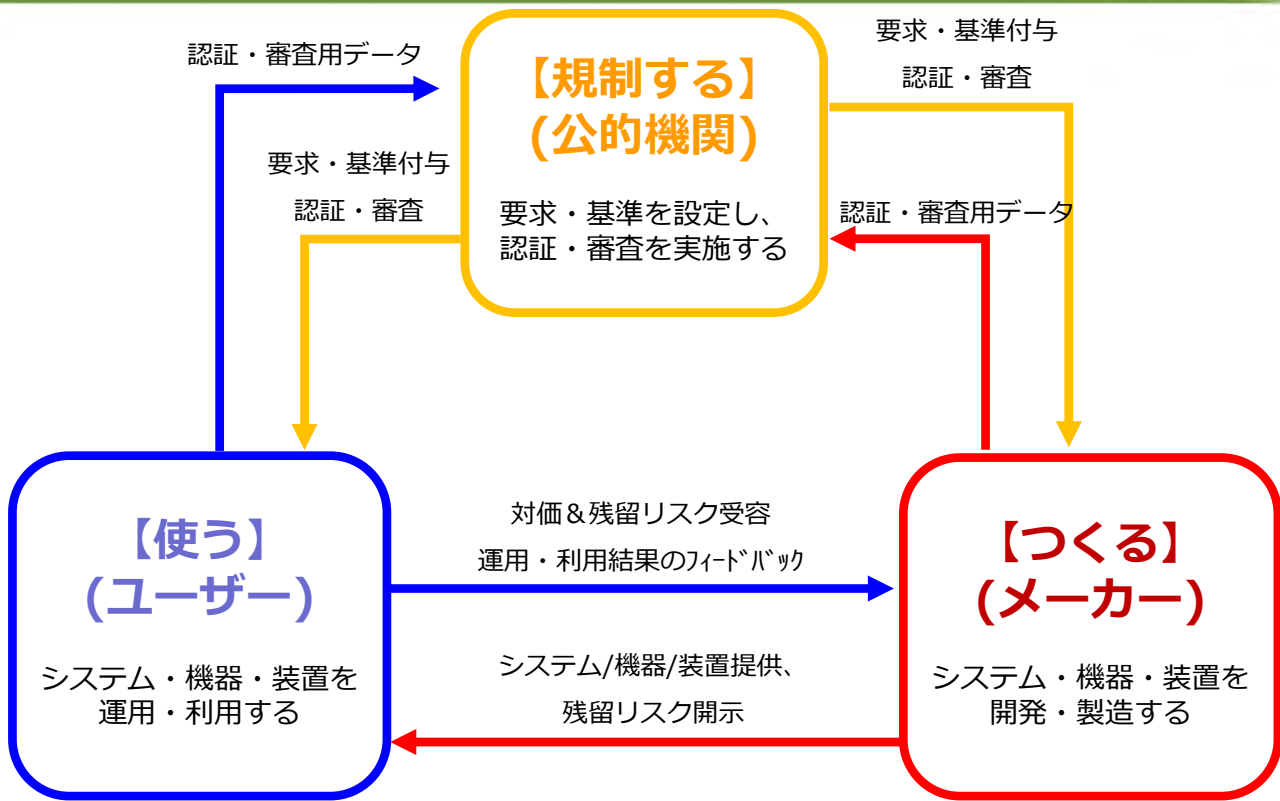
© JAXA

## 03 火星衛星探査計画（MMX）

火星の月の一つ、フォボスから、火星圏からとしては世界初のサンプルリターンを目指すMMX。火星圏への有人探査に向けても、大きな一歩となるこのプロジェクトにおいて、JAMSSは、安全かつ確実なミッション達成のための運用設計や管制官の訓練等を担う運用準備業務に従事。これまでの無人探査で得られた技術・知見と、JAMSSの有人ミッションにおける技術・知見を融合し、MMXミッション達成に向けて貢献するとともに、以降の探査ミッションにおいても活躍の場を広げていきます。

14





© JAMSS All Rights Reserved.



**JAMSSは、どの分野にも対応する、唯一無二の組織**

## I-2. 宇宙開発における事故



	1950年 ～1970年代	1980年 ～1990年	2000年代	2010年 ～現在
海外	▲1957 スプートニク ▲1958 NASA  ▲1969 アポロ11号 	▲1981 スペースシャトル ▲1998 ISS運用開始		 ▲2011 スペースシャトル終了 ▲2020 民間メガコンステ
日本	▲1955 初回ロケット打ち上げ試験 	▲1970 日本初の衛星「おおすみ」 (世界で4番目) 	▲1986 H-I ロケット ▲1994 H-II ロケット	▲2008 宇宙基本法 ▲2016 ・宇宙活動法 ・衛星リセナ法 ▲2021 宇宙資源法 ▲2024 SLIM月面着陸 ▲2024 H3 ロケット成功

## ふりかえり

	原子力	JAMSS	宇宙開発
1955	原子力基本法		
1957	日本初の研究炉「JRR-1」、日本原子力研究所発足		
1958			【米国】NASA(アメリカ航空宇宙局)設立
1964	(東京オリンピック、東海道新幹線開通)		
1966	商業用原子力発電所「東海発電所」運転開始		
1969			宇宙開発事業団(NASDA)設立 【米国】アポロ11号 月面着陸
1972			【米国】アポロ17号 月面着陸
1974	「高浜原発1号機」運転開始		
1979	スリーマイル島原子力発電所事故		
1981			【米国】スペースシャトル 宇宙への初飛行
1986	チェルノブイリ原子力発電所事故		【米国】スペースシャトル チャレンジャー号事故
1988			
1994		JAMSS 設立 大賀 JAMSS 入社	
1998			【米国】ISS 組立開始
1999	東海村JCO臨界事故		
2001			H-IIA 1号機
2002			【米国】スペースX社 設立
2003			宇宙航空研究開発機構(JAXA) 設立 【米国】スペースシャトル コロンビア号事故
2008			ISS「きぼう」軌道上組立開始
2009			ISS「きぼう」完成
2011	東日本大震災、福島第一原発事故		【米国】スペースシャトル 最終飛行、ISS完成
2020		JAMSS 設立30周年	
2022	(東京オリンピック)		
2023			H3 試験機1号機
2025	本セミナー		H-IIA 50号機
2026			
2030			ISS運用終了?



## 飛行中の死亡事故

### ソユーズ1号 (1967年4月24日)

ソビエトの宇宙飛行士ウラジーミル・コマロフが、ソユーズ1号に搭乗中に死亡。  
ソユーズは、打ち上げ以前に多数の設計上の欠陥が指摘され、無人試験飛行にも成功しなかったにもかかわらず、改修せずに有人飛行を強行。飛行中には重大なトラブルが立て続けに発生し、最終的には大気圏再突入時にカプセルのパラシュートが適切に開かず、カプセルは地面に激突して炎上。



## 飛行中の死亡事故

### X-15・3号機 (1967年11月15日)

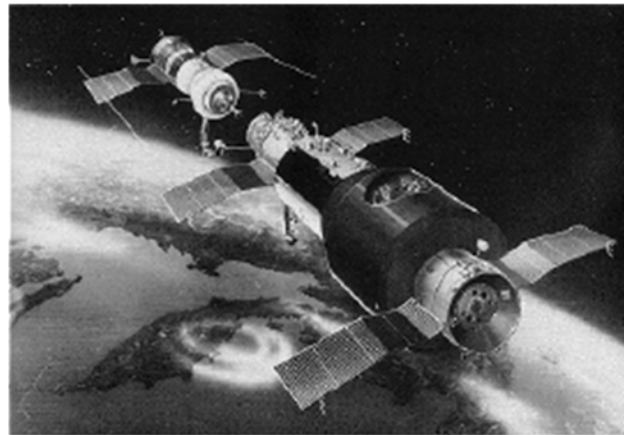
米国空軍パイロットマイケル・J・アダムスが、ロケットプレーンX-15 3号機で弾道飛行中に死亡  
アダムスはNASA/USAFのX-15プログラムに従事。  
7回目の飛行であるX-15 3-65-97便としての飛行中、機体が最高点に達したときに制御異常。最高高度266,000フィート (81.1km) からの再突入時に、X-15はコントロールを失って横方向に進路をそれ、マッハ5のスピードでスピンを始め回復不可、およそ65,000フィート (19.8km) の高度で、過度の加速度によってX-15は分解。



## 飛行中の死亡事故

### ソユーズ11号 (1971年6月30日)

ソビエトの宇宙飛行士のゲオルギー・ドブロボルスキー、ビクトル・パツァーエフ、ウラディ斯拉フ・ボルコフが、ソユーズ11号に搭乗中に死亡。  
宇宙ステーションサリュート1号に3週間滞在し、分離した後、逆噴射を行って再突入に備えてモジュールを分離した時に、宇宙船の換気用の弁が開くという不慮の事態が発生して空気が宇宙空間に漏れた。カプセル自体は通常通り再突入し、着地したが、回収チームがカプセルを開いたときには彼らは窒息死。宇宙空間（高度100km以上）で起こった唯一の死亡事故。



An artist's impression of a Soyuz approaching Salyut-1

## 飛行中の死亡事故

### スペースシャトル・チャレンジャー号 (1986年1月28日)

ミッションSTS-51-L スペースシャトル・チャレンジャーは打ち上げ73秒後に空中分解し、乗員7名が死亡。事故原因は、打ち上げ準備中に到来した寒波のために固体燃料補助ロケットの部品に劣化が生じ、飛行中に高温のガスが漏出。  
NASAは事故の可能性を事前に警告されていたが、打ち上げを強行した。



## 飛行中の死亡事故

### スペースシャトル・コロンビア号 (2003年2月1日)

ミッションSTS-107 スペースシャトル・コロンビアは、大気圏再突入時に空中分解し、乗員7名が死亡した。事故原因は、打ち上げ時に翼前縁の耐熱システムが損傷。NASAは事故の可能性を事前に警告されていたが、再突入まで何ら対応しなかった。



## 飛行中の死亡事故

### スペースシップツー・1号機 (2014年10月31日)

宇宙旅行会社ヴァージン・ギャラクティックの弾道飛行スペースプレーン・スペースシップツー1号機が墜落し、乗員2名が死傷。事故原因は可変翼に関するパイロットの操作ミスと、ヒューマンエラーを防ぐ仕組みの欠如が指摘。



## 訓練中の死亡事故

### アポロ1号 (1967年1月27日)

米国の宇宙飛行士ガス・グリソム、エドワード・ホワイト、ロジャー・チャフィーがアポロ1号の司令船で訓練中、火災に見舞われ死亡。

船内が高圧の純粋酸素で満たされていたことが、事故原因の一つ。



25

© JAMSS All Rights Reserved.

# 宇宙開発での事故

## その他の事故

### ソビエト連邦・ロシア連邦

1960年10月24日 - ニエジェーリンの大惨事

大陸間弾道ミサイルR-16が打ち上げ直前に突然爆発。90~150人死亡。

1973年6月26日 - コスモス3Mロケット打ち上げ失敗

9人死亡。

1975年4月5日 - ソユーズ18a号打ち上げ失敗

打ち上げ後にロケットが異常を。高度145kmでカプセルが緊急分離され宇宙飛行士2人は生還。

1980年3月18日 - ポストーク2Mロケット爆発

地上で過酸化水素を充填中のポストーク2Mロケットが爆発。48人死亡。

1983年9月26日 - ソユーズT-10-1火災事故

打ち上げ直前にロケットが炎上・爆発。爆発2秒前に打ち上げ脱出システムが作動し、

宇宙飛行士2人は生還。

1997年2月23日 - 宇宙ステーション・ミール火災

ミールの「クバント1」モジュールで火災が発生し、船内に有毒ガスが充満。宇宙飛行士は無事。

1997年6月25日 - ミール減圧

ミールの「スペクトル」モジュールに無人輸送船プログレスM-34が衝突し、減圧が発生。

宇宙飛行士は無事。

2002年10月15日 - ソユーズ-Uロケット打ち上げ失敗

ソユーズロケット（フォトンM1を搭載）が打ち上げ29秒後に墜落。1人死亡、8人負傷。

2018年10月11日 - ソユーズMS-10打ち上げ失敗

打ち上げ後にロケットが異常。打ち上げ脱出システムが作動し、宇宙飛行士2人は生還。

26

© JAMSS All Rights Reserved.

## その他の事故

### アメリカ合衆国

1964年4月14日 - デルタロケット暴発事故

デルタロケット3段目が地上で暴発。3人死亡、8人負傷。

1966年3月16日 - ジェミニ8号

衛星軌道上で宇宙船の姿勢制御ロケットが暴発し、船体が異常な速度で回転。飛行中止。宇宙飛行士2人生還。

1970年4月13日 - アポロ13号爆発事故

月への途上で機械船の液体酸素タンクが爆発。宇宙飛行士3人は生還。

### 中華人民共和国

1996年2月15日 - 長征3Bロケットの打ち上げ失敗

長征3Bロケット1号機が打ち上げ直後に制御不能に陥り、近隣の村に墜落。中国政府の公式確認では死者56名、西側メディアの推測では死者は数百名。

### ブラジル

2003年8月22日 - ブラジルロケット爆発事故

VLS-1ロケット1段目が地上で暴発。21人死亡。



## その他の事故

### 日本

1962年5月24日 - K-8-10ロケット爆発事故

秋田ロケット実験場でK-8-10ロケット10号機が打ち上げ直後に爆発。周囲を巻き込んで火災。死傷者はなかったが、実験場が閉鎖



1991年8月8日 - LE-7ロケットエンジン破裂事故

愛知県小牧市の三菱重工の工場で、試験中のLE-7ロケットエンジンが破裂。1人死亡。

2023年7月14日 - イプシロンSロケットエンジン爆発事故

能代ロケット実験場でイプシロンSの2段目のロケットエンジンの燃焼試験中に爆発事故が発生。死傷者はなし。



2024年11月26日 - イプシロンSロケットエンジン爆発事故

種子島宇宙センターでイプシロンSの2段目ロケットエンジンの燃焼試験中に爆発事故。死傷者はなし。



# I-3. 宇宙機の事故例



## 事故例から



事故を防ぐ方法はあるのか？

1967年1月27日



31

© JAMSS All Rights Reserved.

## Apollo 1号の火災事故

### 【事故内容】

アポロ1号は、アポロ計画における宇宙船AS-204のこと。

1967年1月27日、訓練中の事故で炎上し、船内にいた3名の宇宙飛行士が死亡した。

### 【事故の直接原因】

火災の原因は、全長50kmに及ぶ電気配線のどこかで火花が生じ、加圧された酸素で満たされていた室内の空気によって急速に燃え広がったためだと考えられている。

アポロ204事故調査委員会は、司令船パイロットの座席近くにあった環境制御ユニットに繋がっていた銀メッキされた銅線が、ユニットの扉の開閉が繰り返されたために絶縁材が磨耗して剥がれていたことを突き止めた。

これと同じ電線の問題がエチレングリコールと水が流れる冷却ラインの接合部分近くでも起きていた。この部分では冷却液の液漏れが起きていた。

電線の銀製の陰極側に付着したエチレングリコールが電気分解され、激しい発熱反応が起きてエチレングリコールの混合液が発火し、これが加圧された純粋酸素の空気の中で次々に燃え広がっていったと考えられている。

32

© JAMSS All Rights Reserved.



1986年1月28日



## Challenger号の爆発事故

### 【事故内容】

TS-51Lは1986年1月28日の打ち上げであった。STS-51Lは打ち上げから73秒後に突如爆発、シャトルの各部は爆発による空気応力で空中分解した後に大西洋に落下し、クルー7名の全員が死亡した。

### 【事故の直接原因】

打ち上げ当日は気温が低く、固体ロケットブースタ内部に使用されるOリングと呼ばれるパーツが凍結しており、これが事故を引き起こしたと見られている（この事は現場レベルでの指摘があったが結果的に無視されていた）。

打ち上げ直後、そこから高温のガスが漏れ出し、その熱で外部燃料タンクとの接続部分が焼き切れ、シャトル右側の固体ロケットブースタが外部燃料タンク上部を直撃し、漏れた液体燃料に引火したのが爆発の原因とされている。



1996年6月4日



## Ariane 5の爆発事故

### 【事故内容】

Ariane5第1号機は1996年6月4日に、南米仏領ギアナのギアナ宇宙センターから打ち上げられた。ロケットはESAの科学衛星クラスターを4機を搭載していた。打ち上げ直後に爆発した。

### 【事故の直接原因】

ロケットの飛行制御システム (Flight Control System)に採用されていたInertial Reference System(慣性照合装置) に指令を与えるコンピュータ・ソフトウェア(以降、ソフトウェア)に欠陥があり、システム内でオペランド・エラー (Operand Error) が発生したことが原因であった。Inertial Reference Systemのソフトウェアは同ロケットが発射台上にある状態で慣性等の調整を取るためのものであり、その発射後も40秒間動作させられていた。



2003年2月1日



# Columbia号の空中分解事故

## 【事故内容】

2003年2月1日、帰還のため大気圏に突入したコロンビア号が、テキサス上空で空中分解し、乗員7名全員が死亡した。

## 【事故の直接原因】

打ち上げ時に外部燃料タンクから落下した断熱材によって左主翼前縁の強化カーボンカーボン(RCC)パネルが損傷した。

その結果、大気圏再突入時に、その損傷箇所から高温のガスが翼内に流入し、翼が構造破壊を起こしたことで飛行制御不能となり、音速を超える速度での強烈な空力的圧力及び加熱により結果的に機体の空中分解に至った。

事故は、「システム安全」を考えない人の設計で起っている。

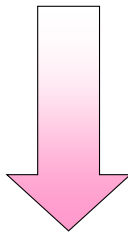
- 本当の安心を与えるのはシステム安全である。
- 不安を危険と見なして、賭けをするな。  
安全が確認できないときは、確認できるまで根気よく待て
- 安全確認は人にやらせず、設計者は安全設計に責任を持って

システム安全知らずして、勝手に安心するな  
システム安全で本物の安心を!

## 安全に対する考え方の変化

- ◆ 過去においては、運用や事故の直接原因に焦点があてられていた
- ◆ 事後処置が中心

**Fly-Fix-Fly**



### 状況の変化

- システム自体
  - ◆ 大型化かつ複雑化
  - ◆ 人間の関与は減少
  - ◆ 事故が起こってからのコスト（「シマッタ」にかかるコスト）が上昇
- 社会
  - ◆ 人命尊重、負傷防止がより一層重要に
  - ◆ 長期的な影響を配慮
  - ◆ 法的問題
  - ◆ メディアや政治の注目

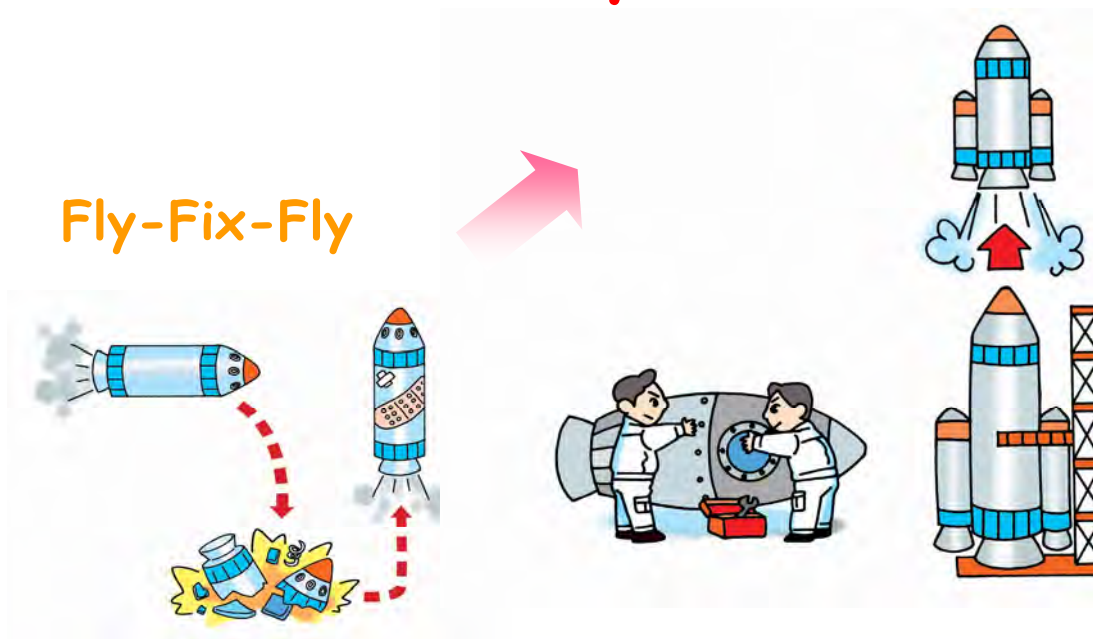
- ◆ 事故防止にかかるコスト < 事故により発生するコスト
- ◆ 安全は作業現場だけでは保証できない  
（事故の直接原因は設計に起因するものが多い）
- ◆ 「ゆりかごから墓場まで」を対象
- ◆ 事前に想定できるリスクを評価し、適切なアクションをとるべき

**Analyze-Fix-Fly**

ハザードを事前に見つけて 対策し 初めての事故を防ぐ

## Analyze - Fix - Fly

Fly-Fix-Fly



## 宇宙機システムでの事故、不具合事例から

以下の欠如が原因

- 安全設計、信頼性設計の配慮不足
- 運用、環境を考慮した設計検討不足
- 技術情報/動向の考慮不足
- コンポーネント、部品/材料の調達、使用法の情報不足
- 製造管理確認不足
- コンフィギュレーション管理不徹底
- 試験・検査での評価・確認不足
- 運用時も継続した活動の確認不足
- 組織としての活動不足 (コミュニケーション)
- 安全・信頼性向上に対するマインド不足
- . . . . .などが考えられる

要素	概要
リスクコミュニケーション	リスクの共通認識、問題点を確実に伝達する能力
ハードウェア設計	ハードウェアの開発、設計能力、技術力、製造力
ソフトウェア設計	ソフトウェアの開発、設計能力、技術力、製造力
ハザード解析 (リスクアセスメント)	システムに潜むハザードを識別する能力、リスクを評価する能力
プロジェクトマネジメント	目標を達成するために、人材・資金・設備・物資・スケジュールなどをバランスよく調整し、全体の進捗状況を管理する力
安全文化/風土	安全に関する問題に最優先で臨み、その重要性に応じ注意、気配りを払う組織や構成員の態度
審査	要求適合性を審査する力
試験/評価	対象システムを評価・検証する能力
教育・訓練	人材育成
統合マネジメント	安全性向上、品質向上、システム機能向上、生産性向上等のための活動 (PDCAスパイラル)

米国論文「Repeated Failure: What Haven't Learned About Complex System」をもとに再整理したもの

	Apollo 1	Challenger	Ariane 5	Columbia
リスク コミュニケーション		✓		✓
ハードウェア設計	✓	✓		✓
ソフトウェア設計			✓	
ハザード解析 (リスクアセスメント)		✓		✓
プロジェクト マネジメント	✓	✓	✓	✓
安全文化/風土		✓		✓
審査			✓	
試験/評価	✓		✓	
教育・訓練				✓
統合マネジメント	✓			

# Columbia号の空中分解事故 概要

**日時**：2003年2月1日（土） 米国東部時間8:59（通信途絶）

**場所**：米国テキサス州・ダラス上空

**被害**：死者7名（搭乗員全員死亡）

宇宙から帰還するスペースシャトル・コロンビア号が、**大気圏への再突入中に空中分解**、搭乗していた宇宙飛行士ら7名全員が死亡した。

## 要因：

空中分解の直接原因は、1月17日の**打上げの際**に、液体燃料の入った**外部燃料タンク**から**断熱材（発泡ポリウレタン樹脂）**が落下、コロンビアの左翼前縁部に衝突して破損していたことである。外部燃料タンクとコロンビアを接合する「バイポッド」と呼ばれる部品付近から、断熱材が大きな破片となって落下したため、**左翼前縁部の強化炭素複合材（C-C コンポジット）耐熱タイル**が**損傷**。その部分が大気圏再突入時に最も過酷な高温にさらされる場所であったことから、機体が空中分解に至った。

45

# Columbia号の空中分解事故 概要

【断熱材衝突への対応がとられなかった要因】

**断熱材が落下し左翼に衝突したことは、打上げ直後から把握されていた**。にもかかわらず、その対応がとられなかった経緯は、以下のとおりである。

- ◆ 衝突部分を撮影するのに最も適した位置になるカメラはピンボケで、適切な画像を得ることができなかった（NASAでは、長年の予算・スタッフ削減により、打上げ時のシャトル追跡能力が低下していた）。
- ◆ 打上げ3日目から週末・祝日の三連休に入ったが、撮影ワーキンググループなど現場技術者が左翼の状態を把握するために行動を起こしたものの、**NASA および製造メーカー（ボーイング社）の幹部の認識は「大して深刻な問題ではない」というものだった**。
- ◆ コロンビア号から乗員の撮影した打上げ時の映像が送信され、当該部分は映っていなかったものの前後関係から未送信の部分があることが推測されたにもかかわらず、担当者が未送信フィルムの有無を問い合わせることを失念した。
- ◆ **空軍に依頼して行う計画だった写真撮影**は、通常の指揮命令系統を通すと手間がかかりすぎるという理由で、非公式ルートを通じて空軍へ写真撮影を依頼したが、非公式ルートを通すことへの反発が強かったこと、写真撮影のためには機体を旋回することが必要で、シャトル内で行われている宇宙実験を中断しなければならないため、**飛行スケジュールを遅らせる懸念があったことから取りやめられた**。
- ◆ 当該部分の映像を得られなかった断熱材評価チームは、飛行9日目（1月24日）に開催された報告会で「今回の衝突は安全上問題なし」と報告、断熱材衝突問題は片付いたものとされた。

46

# Columbia号の空中分解事故 概要

【断熱材衝突への対応がとられなかった要因】

このような判断に至った背景には、以下のような状況があったとされる。

- ◆当初は「機体に深刻な影響を与える脅威」とされていた打上げ時の剥脱物が、徐々によくある不具合（In-flight anomaly）として扱われるようになっていた。
- ◆シャトルの基礎設計要求には「射点上では外部燃料タンクの重要部分から剥脱物が生じてはならない、上昇時にはいかなる剥脱物も出してはならない」と定められていたが、実際には第1回打上げから断熱材または氷の脱落が生じており、この要求は守られていなかった。（次ページも参照）
- ◆ほとんどの打上げで剥脱物による軽微な機体損傷が認められたものの、毎回の着陸成功により、NASAの飛行管理者・技術者は、断熱材の脱落は避けられない事項だが安全を脅かすものではなく許容範囲であるとみなすようになった。
- ◆国際宇宙ステーション建設のため、今回のフライトに次いで行われる次のフライトを予定どおりに進めることが必要であり、そのためには今回のフライトもスケジュールを守る必要があった。

47

# Columbia号の空中分解事故 概要

【NASAの組織的要因】

- ◆シャトル計画全体が、当初予定していた計画に比較して頻度が非常に低く1回あたりのコストも膨大なものとなっていたことから、スケジュール維持に対する強い要求があり、部品やシステムの性能が規定に満たない場合でも「それまでのフライトで支障がなかった」ことを理由に問題なしとする雰囲気広まった。
- ◆1986年のチャレンジャー事故に関する事故調査報告書で、「Can Do（なせば成る）」文化という組織文化的問題点が指摘されていたが、その対応は不十分で組織文化は改善されなかった。このため「できない、間に合わない」と主張することが難しかった。
- ◆1990年代に入り、NASAでは大幅な予算削減が行われ、シャトル計画についても運用が民営化（プライム契約公募入札による）された。この運用契約による責任の移行が、複雑な計画をより複雑化し、効率的な情報伝達を阻害した。

48

# Columbia号の空中分解事故 概要

## 【プログラムにおける影響】

- 2年4ヶ月のスケジュール遅れ

2003年3月1日打上げ予定→2005年7月26日打上げ実施  
シャトル打上げ停止によりISSプログラムはロシアに依存

- 膨大な対策コスト

FY03          \$42M

FY04          \$496M

FY05          \$602M

NASA's Implementation Plan for Space Shuttle Return to Flight and Beyond 10<sup>th</sup> Edition

49

## 事故はなぜ起きる？



「Columbia号の空中分解事故」  
から学ぶ

50



## CAIB事故調査報告書 目次

<b>第I分冊</b>	
	追悼
	委員会声明
	概要
	報告書の構成概要
第1部	事故
第1章	スペースシャトルプログラムの発展
第2章	コロンビア号の最後の飛行
第3章	事故分析
第4章	考慮すべき他の要因
第2部	なぜ事故は起きたのか
第5章	チャレンジャー号からコロンビア号へ
第6章	NASAでの意志決定
第7章	事故の組織的原因
第8章	歴史的原因：コロンビア号とチャレンジャー号
第3部	将来に向けて
第9章	有人宇宙飛行の将来に向けた意味合い
第10章	他の重要な意見
第11章	勧告
第4部	付録
	付録A 調査
	付録B 委員会メンバーの経歴
	付録C 委員会スタッフ
<b>第II分冊</b>	
	付録D 報告書で引用されたCAIB技術文書
<b>第III分冊</b>	
	付録E 報告書で引用された他の技術文書
<b>第IV分冊</b>	
	付録F 他の技術文書
<b>第V分冊</b>	
	付録G 他の重要な文書
<b>第VI分冊</b>	
	付録H 委員会公聴会の写し

51

## CAIB事故調査報告書

2003年2月1日、スペースシャトル「コロンビア号」(STS-107)は、米国航空宇宙局(NASA)のケネディ宇宙センターへの帰還時、大気圏突入後空中分解し、7名の搭乗員が失われた。事故発生後NASAは、原因究明のための独立調査委員会としてコロンビア事故調査委員会(Columbia Accident Investigation Board : CAIB)を設置した。

CAIBは、ハロルド・ゲーマン(Harold W. Gehman Jr.) 退役海軍大将を委員長とする13名のメンバーから成り、委員長以外のメンバーは、1) 技術資料管理・取扱、2) 訓練・運用・飛行性能、3) 工学技術・技術解析、4) 組織・政策の4つのグループに分かれて事故調査を行なった。2003年8月、半年を超える調査結果及び勧告が「CAIB事故調査報告書」として発行された。

52

# CAIB事故調査報告書

## 第1分冊

「事故」、「なぜ事故は起きたのか」、「将来に向けて」、「付録」の4部構成となっている。この事故の背景を知るために、第1部及び第2部は、歴史から始まり、事故の記述、分析、更には所見と勧告へと続いている。第3部では、我々の宇宙飛行の安全性を改善するために何が必要なのかという委員会の見解を述べている。第4部は参考資料である。

## 第1部 事故

### 第1章 スペースシャトルプログラムの発展

チャレンジャー号事故以前のスペースシャトル計画の歴史に関連したものである。

### 第2章 コロンビア号の最後の飛行

コロンビア号の最後の飛行を記したものである。事故の率直な記録として、ここには所見も勧告も含まれていない。コロンビア号とその搭乗員の喪失に至る事象を詳細に再現し、更に詳細な事項については、付録に記述する。

### 第3章 事故分析

委員会は入手可能な全ての情報を分析し、コロンビア号とその搭乗員の喪失に至る一連の事象を誘発した直接的な物理現象は、上昇中に起こった断熱材の衝突であったと結論づけている。

### 第4章 考慮すべき他の要因

事故発生に寄与した可能性のある他の技術的(physical)要因の調査について述べている。スペースシャトルの運行をより安全にするための所見や勧告が含まれる。

# CAIB事故調査報告書

## 第2部 なぜ事故は起きたのか

NASAの組織的、歴史的、文化的な要因とともに、これらの要因がどのように事故に寄与したかを検討する。第1部と同様に、第2部も歴史から始まる。

### 第5章 チャレンジャー号からコロンビア号へ

チャレンジャー号後のNASAの歴史と有人宇宙飛行プログラムについて検討する。

### 第6章 NASAでの意志決定

後の章で分析される事柄を明確にするために、コロンビア号に関わる管理能力について記述する。NASAの一部エンジニア達が、断熱材の衝突が機体に損傷を与えたかどうかを判断するために、コロンビア号の画像撮影を行おうとした努力と、管理者がその努力にどう対処したかについて、詳細に述べる。

### 第7章 事故の組織的原因

委員会は、断熱材と同様にNASAの組織的文化がこの事故に大きく関わったとの見方を示す。組織的文化に対する是正の勧告を述べている。

### 第8章 歴史的原因：コロンビア号とチャレンジャー号

歴史、予算、文化、組織、安全の実践に関し述べた前章から結論を引き出し、これら全ての要因がいかにしてこの事故に寄与したかを分析している。

# CAIB事故調査報告書

## 第3部 将来に向けて

宇宙への旅を再開するために何が必要かを要約し、また、事故に関係無いが記録しておくべき委員会による重要な観察・意見(observation)を列記し、更に、委員会の勧告を示している。

### 第9章 有人宇宙飛行の将来に向けた意味合い

短期的な(short-term)勧告を述べている。スペースシャトルを中期的に安全に運用するために委員会が必要であるとする管理システムの変更について、その大要を述べている。

### 第10章 他の重要な意見

委員会が広範囲の調査から明らかにした、今回の事故に直接の関係はないが、NASAに有益となるはずの、所見、観察・意見、勧告が記されている。

### 第11章 勧告

以上の章の勧告を全てまとめたものである。

## 第4部 付録

- 付録A 調査
- 付録B 委員会メンバーの経歴
- 付録C 委員会スタッフ

# CAIB事故調査報告書(事故の経緯)

## <第2章>

- ◆ 「コロンビア号」は、2003年1月16日午前10時39分(米国東部時間、以下同じ)にNASAのケネディ宇宙センターから打上られた。
- ◆ 打上後、固体ロケットブースタ(SRB)と外部燃料タンク(ET)が切り離され、「コロンビア号」は予定の軌道に到達した。
- ◆ その後、打上時のシャトル監視画像の解析結果により、打上(リフトオフ)の約82秒後に外部燃料タンク(ET)から剥離した物体がオービタ左翼に衝突しているのが確認された。<2.3項、p34>
- ◆ スペースシャトル運用中の不具合に対する判断責任を有しているミッション管理チーム(Mission Management Team: MMT)は、この物体の衝突を、軌道上で緊急に対処すべき飛行安全上の問題ではなく、帰還後の機体整備の問題と判断し、外部機関への軌道上の機体の画像データ取得依頼を取り下げるなど適切な対応を取らなかった。<2.5項>
- ◆ 同年2月1日午前8時44分、「コロンビア号」は、ケネディ宇宙センター帰還のため、太平洋上で大気圏に再突入した。<2.6項>
- ◆ 同日午前8時59分、クルーからの最後の通信が途切れ、午前9時00分、地上から、機体の分解が目撃された。<p 42 コラム「管制室の通信」>

## CAIB事故調査報告書(事故の技術的原因)

### <第3章>

コロンビア号事故の技術的原因は、左翼前縁の熱防護システム(TPS)にできた裂け目(breach)にあった。これは、打上げの81.7秒後に外部燃料タンクのバイポッド部から分離した断熱材が、左翼前縁の強化炭素複合材(RCC)パネル8番の下部付近に衝突したことにより生じたものである。

再突入時、熱防護システムの裂け目から超高温の空気が前縁の断熱材を突き抜け、左翼のアルミニウム構造部分を徐々に溶解させた。その結果、構造強度が弱まるとともに、増大した空気力学的な力により制御不能となり、翼の脱落、オービタの破壊という事態に至った。

破壊が起きた飛行状況において、オービタの現在の設計では、乗員の生存の可能性はなかった。

**要因：ハードウェア設計**

57

## CAIB事故調査報告書(事故の技術的原因)

【シャトル設計要求に関連する問題(6.1項)】

初期検討において、外部燃料タンク等からの剥離物を禁止することが要求として設定された。

**3.2.1.2.14 Debris Prevention:** *The Space Shuttle System, including the ground systems, shall be designed to preclude the shedding of ice and/or other debris from the Shuttle elements during prelaunch and flight operations that would jeopardize the flight crew, vehicle, mission success, or would adversely impact turnaround operations.*

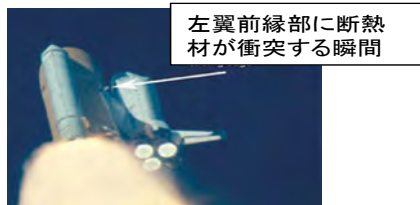
**3.2.1.1.17 External Tank Debris Limits:** *No debris shall emanate from the critical zone of the External Tank on the launch pad or during ascent except for such material which may result from normal thermal protection system recession due to ascent heating.*

上記要求のもと、オービタには小さなデブリしか衝突しないと仮定され、翼の熱防護システムに対する強度要求は低レベルの内容となった。

このため、オービタはバードストライク/氷/打上げデブリ/剥離した断熱材に対し、脆弱なシステムとなってしまった。

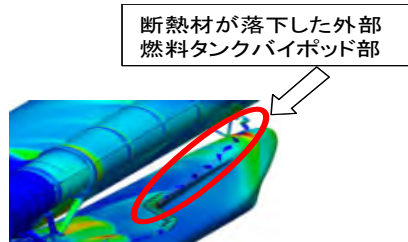
*Thermal Protection System (the tiles and Reinforced Carbon-Carbon, or RCC, panels) would be built to withstand impacts with a kinetic energy less than 0.006 foot-pounds.*

58



左翼前縁部に断熱材が衝突する瞬間

打上げ時の断熱材落下時の画像



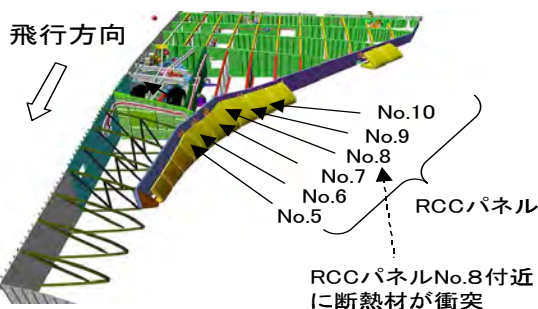
断熱材が落下した外部燃料タンクバイボッド部

コンピュータグラフィックス(CG)シミュレーションによる断熱材落下の軌跡(楕円内)

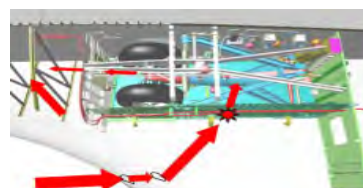
<3.2項及び6.1項:断熱材剥離は過去にも発生していた>

<3.3項:翼前縁部(RCC)強度が理解されていなかった>

スペースシャトル左翼構造図



左翼内での高温ガスの流れの解析結果



注:赤い矢印は高温ガスの流入経路を示す。

出典:CAIB/NAIT Working Scenario

## CAIB事故調査報告書(事故の組織的原因)

### <第7章>

この事故の組織的な原因は、スペースシャトル計画の歴史と文化に根ざしている。

具体的には、シャトル計画の承認を得るために求められた妥協、次に続く何年もの資源の制約、揺れ動く優先順位、スケジュール確保の圧力、シャトルは開発から運用に移行したと早くから定義した誤り、有人宇宙飛行に関する国家合意の欠如などが挙げられる。

(さらに、NASAにおいては)安全確保を損なう文化的特質と組織的慣習が広がることとなった。

具体的には、過去の成功に頼り「要求通りにシステムが稼動しない原因を解明する試験」のような適切な技術的作業を省略していること、重要な安全情報に関する有効な意思疎通を妨げたり専門的意見の相違を抑圧したりするような組織的な障壁があること、計画を横通しで統合して管理していないこと、命令の非公式な流れや組織の規則に則らない意思決定プロセスが発生していることが挙げられる。

## CAIB事故調査報告書(事故の組織的原因の一端)

- ◆ コロンビア事故直前のNASAの組織文化はチャレンジジャー  
事故当時に戻っていた。すなわち、計画からの逸脱を重要視  
せず、安全部門からの発言がなく、スケジュールを重視する  
ようになっていた。 <5.2項> **要因：安全文化**
- ◆ デブリ評価チーム、MMTなどに安全部門の代表者がいたが、  
積極的な発言はなかった。 <6.3項> **要因：安全文化**
- ◆ 国際宇宙ステーション(ISS)の米国の最後の主要モジュールで  
あるNODE2の打上げスケジュールをキープするため、16ヶ月  
で10フライトの打上げを行なうことが至上命題のようになって  
いた。 <6.2項> **要因：プロジェクトマネジメント**
- ◆ フライト中毎日開催されるべきMMTが16日のミッション期間  
中に5回しか開催されなかった。 <6.3項>  
**要因：プロジェクトマネジメント、教育・訓練**

61

## CAIB事故調査報告書(事故の組織的原因の一端)

- ◆ エンジニアの懸念がマネジメントに適切に伝達されなかった。  
マネジメントも非公式なコミュニケーションルートに依存して  
いた。画像取得依頼を出したのは「誰か」が問題とされ、本質  
が議論されなかった。 <6.3項> **要因：リスクコミュニケーション**
- ◆ マネージャ達は、断熱材がオービタに衝突したこと知った後も、  
身近にいた専門家が過去の経験から（初期の情報だけで解析も  
実施せずに下した）「問題にならない」という判断を信じて  
いた。この結論に疑問を呈するマネージャは誰もいなかった。  
<6.3項> **要因：リスクコミュニケーション、教育・訓練**

62

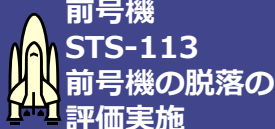
## CAIB事故調査報告書(事故の組織的原因の一端)

- ◆ シャトルプログラムのマネージャ達は、デブリ衝突が「飛行安全上の問題」を発生させたことを証明するようエンジニアに求めた。すなわち、エンジニアは「システムが安全であることを証明するのではなく、安全でないことを証明する」証拠を出すことを求められた。<6.3項> **要因：リスクアセスメント、安全文化**
- ◆ プログラム初期は安全上重要な懸念事項であった断熱材剥離が、成功体験が続くにつれ、「よくある問題 (in-family) 」或いは「飛行安全上の問題ではない (no safety-of-flight) 」とされ受入可能なリスクと考えられるようになっていた。<6.3項> **要因：リスクアセスメント**
- ◆ 2001年より、統合システムとしてのハザード解析は実施されていなかった。5,396件のハザードレポートに対し、3,233件のWaiverが起草されていたが、その36%は10年以上見直しされていなかった。<6.3項> **要因：リスクアセスメント**

63

## CAIB事故調査報告書

(STS-112外部燃料タンクバイポッドランプ部からの断熱材脱落の評価)



- ✓ STS-112において、外部燃料タンクバイポッドランプ部から断熱材の脱落が発生し、SRBのフォーム材に幅4インチ、深さ3インチの損傷が発生した。
- ✓ シャトル撮影チームはIn-Flight Anomaly(評価を要する異常事象)とすべきと主張したが、マネジメントチームはnot a safety of flight issue(安全に影響しない事象)と判断した。
- ✓ このため、本事象の原因究明と対策検討は、打上げに対する制約とせず、オフライン対応するアクションとなった。  
(アクションの処置期限はSTS-107以降にセットされた)
- ✓ マネジメントチームが上記判断をしたのは、組織の主要達成目標として、シャトルによるNode2(ステーションの主要モジュール)の期日までの 打上げ実施が挙げられていたことが影響した可能性がある。

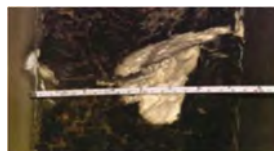


図 フォーム材の損傷

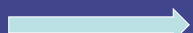
64

# CAIB事故調査報告書

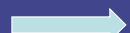
(STS-112外部燃料タンクバイポッドランプ部からの断熱材脱落の評価)



前々号機  
STS-112  
脱落発生



前号機  
STS-113  
STS-112の  
脱落の評価実施



STS-107  
事故発生

- ✓ 打上げ準備確認会において、STS-112の断熱材脱落事象に対する評価が報告された。
  - 本報告に含まれる打上げ可とする根拠は、不十分で問題のある内容であったが、承認され打上げにGoがかけられた。(次ページ参照)
  - ➡もし、本事象を重要事項として扱い、事故リスクの増大としてとらえていれば、STS-107の対応が変わった可能性はあった。

STS-112の事象は、事故発生に係る強いシグナルであったが、無視された。

- 外部燃料タンクのコンフィギュレーションは変更されなかった
- バイポッドランプ部からの脱落防止やオービタの防護の強化の動きは取られなかった。
- ハザード解析(Integrated Hazard Report37)もアップデートされなかった。  
(前号機の不具合のハザードレポートに対する影響評価を実施するプロセスが規定されていなかった)

# CAIB事故調査報告書


(STS-112外部燃料タンクバイポッドランプ部からの断熱材脱落の評価)

打上げ準備確認会：STS-112断熱材脱落事象を飛行可能とする根拠	CAIB事故調査報告書での評価
現状のバイポッドランプクローズアウト部はSTS-54(ET-51)以降変更されていない。	誤り(ET-76で変更有)
オービターは、過去の112フライト(3フライトでのバイポッドランプ部からの断熱材脱落を含む)において、“Safety of Flight”となる損傷が発生したことはない。	事実だが、十分な根拠ではない
設計/工程/機器は、過去60フライトにおいて変更されたことはない。	誤り(ET-76で変更有)
全てのランプクローズアウト作業は、経験を有する技術者により実施されている。	STS-112より断熱材の脱落の可能性を低下させることにはならない
ランプ部の断熱材は検証されたプロセスが適用されるため、十分な仕上がりとなる (Craftmanship)	
検査/プロセスコントロール/施工後のハンドリング方法についても変更はない。	
ランプ部のTPSの喪失の発生確率は、過去のフライトよりも高くも低くもならない。	「過去と同程度、高い確率で落下する」を意味している
外部燃料タンクにおいて、新しい懸案はなく、安全に飛行が可能である。(リスクの増大なし)	技術評価も無く、過去の成功により、将来のフライトの正当化を図っている


# CAIB事故調査報告書

(STS-112外部燃料タンクバイポッドランプ部からの断熱材脱落の評価)

打上げ準備確認会資料(抜粋)



**SPACE SHUTTLE PROGRAM**  
Space Shuttle Projects Office (MSFC)  
NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama



**STS-112/ET-115 Bipod Ramp Foam Loss**

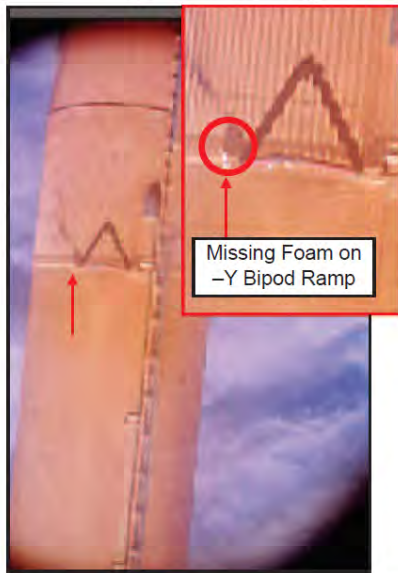
Presenter Jerry Smelser, NASA/MP31
Date October 31, 2002
Page 3

**• Issue**

- Foam was lost on the STS-112/ET-115 -Y bipod ramp (≈4" X 5" X 12") exposing the bipod housing SLA closeout

**• Background**

- ET TPS Foam loss over the life of the Shuttle Program has never been a "Safety of Flight" issue
- More than 100 External Tanks have flown with only 3 documented instances of significant foam loss on a bipod ramp




Missing Foam on -Y Bipod Ramp


# CAIB事故調査報告書

(STS-112外部燃料タンクバイポッドランプ部からの断熱材脱落の評価)

打上げ準備確認会資料(抜粋)



**SPACE SHUTTLE PROGRAM**  
Space Shuttle Projects Office (MSFC)  
NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama

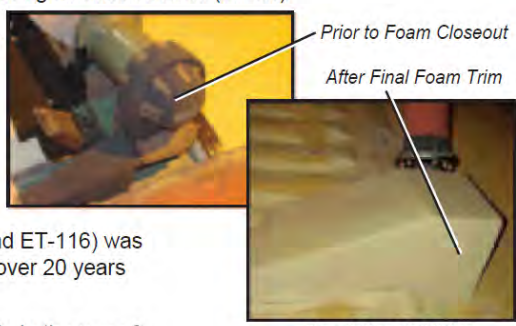


**STS-112/ET-115 Bipod Ramp Foam Loss**

Presenter Jerry Smelser, NASA/MP31
Date October 31, 2002
Page 4

**• Rationale for Flight**

- Current bipod ramp closeout has not been changed since STS-54 (ET-51)
- The Orbiter has not yet experienced "Safety of Flight" damage from loss of foam in 112 flights (including 3 known flights with bipod ramp foam loss)
- There have been no design / process / equipment changes over the last 60 ETs (flights)
- All ramp closeout work (including ET-115 and ET-116) was performed by experienced practitioners (all over 20 years experience each)
- Ramp foam application involves craftsmanship in the use of validated application processes
- No change in Inspection / Process control / Post application handling, etc
- Probability of loss of ramp TPS is no higher/no lower than previous flights
- The ET is safe to fly with no new concerns (and no added risk)**



**Bipod Attach Fitting**

## CAIB事故調査報告書(事故調査委員会からの指摘)

### Finding 6.1-2

プログラム初期は安全上重要な懸念事項であった断熱材剥離が、成功体験が続くにつれ、「よくある問題 (in-family) 」或いは「飛行安全上の問題ではない (no safety-of-flight) 」とされ受入可能なリスクと考えられるようになっていた。

### Finding 6.3-22

シャトルプログラムのマネージャ達は、デブリ衝突が「飛行安全上の問題」を発生させたことを証明するようエンジニアに求めた。すなわち、エンジニアは「システムが安全であることを証明するのではなく、安全でないことを証明する」証拠を出すことを求められた。

### Finding 6.3-18

マネージャ達は、断熱材がオービタに衝突したことを知った後も、身近にいた専門家が過去の経験から（初期の情報だけで解析も実施せずに下した）「問題にならない」という判断を信じていた。この結論に疑問を呈するマネージャは誰もいなかった。

## CAIB事故調査報告書(事故調査委員会からの指摘)

### Finding 7.1-1

NASA は一貫して、予算を含めた各種制約の中で、適切な安全プログラムを確立することに努めてきた。しかし、独立審査では、NASA の安全システムは不十分であると指摘されている。

### Finding 7.4-4

NASAのシステム安全は、・・・システムの設計変更を実現せずに足る活動となっていない…

## Ⅱ 宇宙分野における安全確保



71

**JAMSS**  
ひもとび用金網フインテグレート

### Ⅱ-1. スペースシャトルでの PRA



スペースシャトルの初飛行は1981年、2回目の飛行は1982年で、2011年7月の135回目の飛行を最後に退役。

宇宙には行っていないテスト用の1号機エンタープライズ号のほかに、実用機のアトランティス号、チャレンジャー号、コロンビア号、ディスカバリー号、エンデバー号と名前の付けられた5機。

135回の打ち上げの中でこの5機のうち2機が事故を起こし、14人の宇宙飛行士が亡くなっている。

これは、機体事故率40%、打ち上げ失敗率1.5%となり、歴史上最も危険な有人宇宙船(?)。

NASAは当初、事故は打ち上げ10万回に1回の確率であると計算していたが、スペースシャトルが引退した最終的な結果は、当初の想定より1500倍も悪い68回に1回の確率。

## NASAにおける初期のPRA適用

- ◆ 宇宙分野での定量的リスク評価の基礎は、NASA誕生時、アポロ計画の始まり時に構築
- ◆ アポロミッションには、定量的な数値目標を持つべきであるとの結論
- ◆ ミッション遂行に対しては1/100のリスクを許容し、搭乗員安全については1/1000リスクを許容することを決定
- ◆ 故障の目標を設定するだけでは不十分であり、むしろ「潜在的故障とそれらのリスクの識別が成功する設計、つまりミッションの成功に本質的である」
- ◆ NASAでは「リスクが決定測定の基礎的な共通分母である」
- ◆ 1960年代には、アポロ司令船/サービスモジュール、ルナモジュール、サターンVロケットについてモデル化を実施
  
- ◆ プログラムの進行につれて、定量的に扱うことを疎んじ、以下についての意思決定に変更
  - ① 最後の設計審査の後に組み込まれたすべての重要な装置回収、及びすべての未承認事項に対し予想される修正内容の審査
  - ② それ自体の故障が生命の損失やロケットの失敗につながるいかなるシステム要素(単一故障点)の認定状況の識別及び決定
  - ③ すべてのロケット及び特別システム試験結果の審査
  - ④ すべての重要な故障及びその後の修正措置の審査
  - ⑤ 未解決問題、修正措置の計画、及び完了予定日の審査

### FMEA/CIL

各構成要素が潜在的にどのような故障モードを持っており、その故障の結果がどのサブシステムに影響し、それがどのシステム、ロケット、ミッション、乗組員にどのように影響するか

- ◆ アポロ計画開始当初、その大きな困難さとリスクは明白。成功確率は30分の3、あるいは5%と数値的に見積り
- ◆ アポロ計画の期間中、NASAは「人類を月に着陸させ、安全に地球に帰還させる」ことの成功確率を評価するため、完全な確率論的リスク評価を実施
- ◆ PRAでは成功確率が「5%未満」
- ◆ NASA長官は、結果が公表されれば「その数値は取り返しのつかない損害をもたらす可能性がある」と懸念
- ◆ PRAの取り組みは中止され、結果としてNASAは数値的なリスク評価から距離
- ◆ こうしたリスク認識から、ミッションシナリオとシステム全体のアーキテクチャは極めて保守的に定義
- ◆ 予想される高いリスクを公に報告することは、政治的に実現不可能。アポロの信頼性と安全性の責任者は、「統計は無意味だ」と断言し、「設計における配慮」によってリスクは軽減されとの考え
- ◆ 確率数値の使用を軽視するこの設計重視の考え方は、アポロ計画からスペースシャトルへと引き継ぎ
- ◆ アポロ計画の当初予想外の大成功は、失敗の確率を計算して報告することを避け、良い設計がリスクを軽減すると仮定するという、リスクに対する最終的なアポロ計画のアプローチを正当化

アポロ計画の成功は、高いリスクを当初から確率的に認識し、保守的なミッションとアーキテクチャの計画を導き出したこと、設計への綿密な配慮、そして慎重なミッション運用

## スペースシャトルのPRA適用

- ◆ スペースシャトルは、アポロ計画に続くNASAの主要な有人宇宙飛行計画
- ◆ 1981年から2011年まで、貨物と乗組員を軌道上に輸送
- ◆ 133回の成功したミッションと2回の悲劇的な失敗
- ◆ シャトル計画は、迅速なターンアラウンド、頻繁なフライト、そして打ち上げコストの削減を約束したが、それは誤ったもの
- ◆ シャトル計画における最大の過ちは、シャトルが安全だと信じ込んだこと

スペースシャトルの安全性に関する要件は単純  
サブシステムは

「最も重要なコンポーネントの故障後にフェイルオペレーショナル状態になる」

「最も重要な2つのコンポーネントの故障時には乗組員の生存のためにフェイルセーフ状態になる」

こと

- ◆ チャレンジャー号の壊滅的な損失は、抜本的な再評価を実施、リスク分析が復活
  - ◆ 事故発生率は当初主張されていた10万分の1ではなく、実際の100分の1
  - ◆ チャレンジャー号の調査では、打ち上げの緊急性から、事故の原因となったロケットブースターのOリングの破損に関する懸念が無視されたチャレンジャー号の打ち上げ決定に問題が指摘
  - ◆ その後のスペースシャトルのミッションは、主に宇宙ステーションの建設に限定
  - ◆ コロンビア号の事故は、チャレンジャー号の事故を彷彿
  - ◆ ここでも故障の兆候と警告が無視
- 
- ◆ スペースシャトルは、宇宙ステーションの完成後、その高いリスクを理由に中止
  - ◆ NASAの最新のアポロ型設計は、スペースシャトルのリスクの高い選択を覆すもの
    - ✓ 耐熱シールドを備えた有人カプセルがロケットの上に配置され、打ち上げ中止システムを配備



SPACE SHUTTLE PROGRAM  
Space Shuttle Safety and Mission Assurance Office  
NASA Johnson Space Center, Houston, Texas



## SHUTTLE RISK PROGRESSION BY FLIGHT

Teri Hamlin – JSC NASA

Joe Kahn – JSC-SAIC

Eric Thigpen – JSC-SAIC

Tony Zhu – JSC - SAIC

Yohon Lo – MSFC-BTI

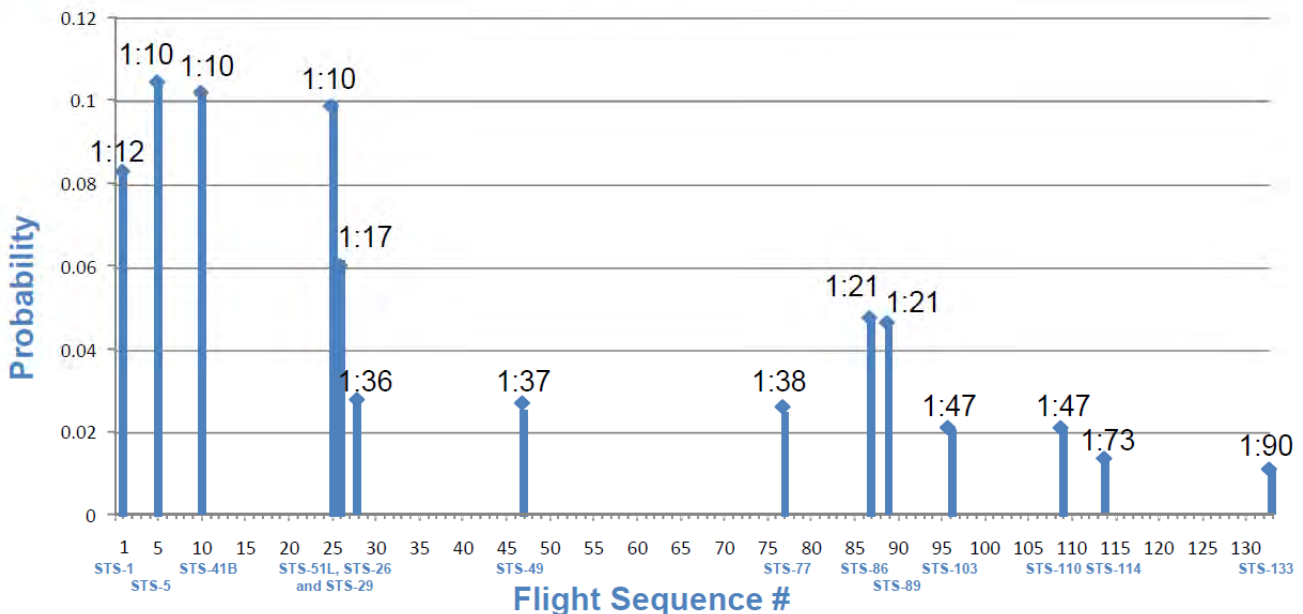
## SCOPE

- Estimating the Shuttle Risk for each flight is not feasible in the timeframe available, nor is it necessary because there may not be a noticeable difference between every flight
  - The following flights have been analyzed with the plan to fill in additional flights as necessary and as time permits
    - STS-1 – First Flight
    - STS-5 – Ejection Seats Disabled
    - STS-41B – Flight following STS-9 Auxiliary Power Unit (APU) fire
    - STS-51L – *Challenger*
    - STS-26 – Return to Flight after *Challenger*
    - STS-29 – Post STS-27 Solid Rocket Booster (SRB) nose cap Thermal Protection System (TPS) loss
    - STS-49 – Drag Chute introduced, Endeavour enters service
    - STS-77 – Block I and IA engines, New High Pressure Oxidizer Turbopump (HPOTP)
    - STS-86 – First flight of new External Tank (ET) foam application process
    - STS-89 – Earliest to combine Block IIA engines, New Large Throat Main Combustion Chamger (LTMCC)
    - STS-103 – First flight of ET foam venting
    - STS-110 – First full Block II cluster, New High Pressure Fuel Turbopump (HPFTP)
    - STS-114 – Return to Flight after *Columbia*
    - STS-133 – Current Mission Risk

6/24/2011

3

## RESULTS SUMMARY

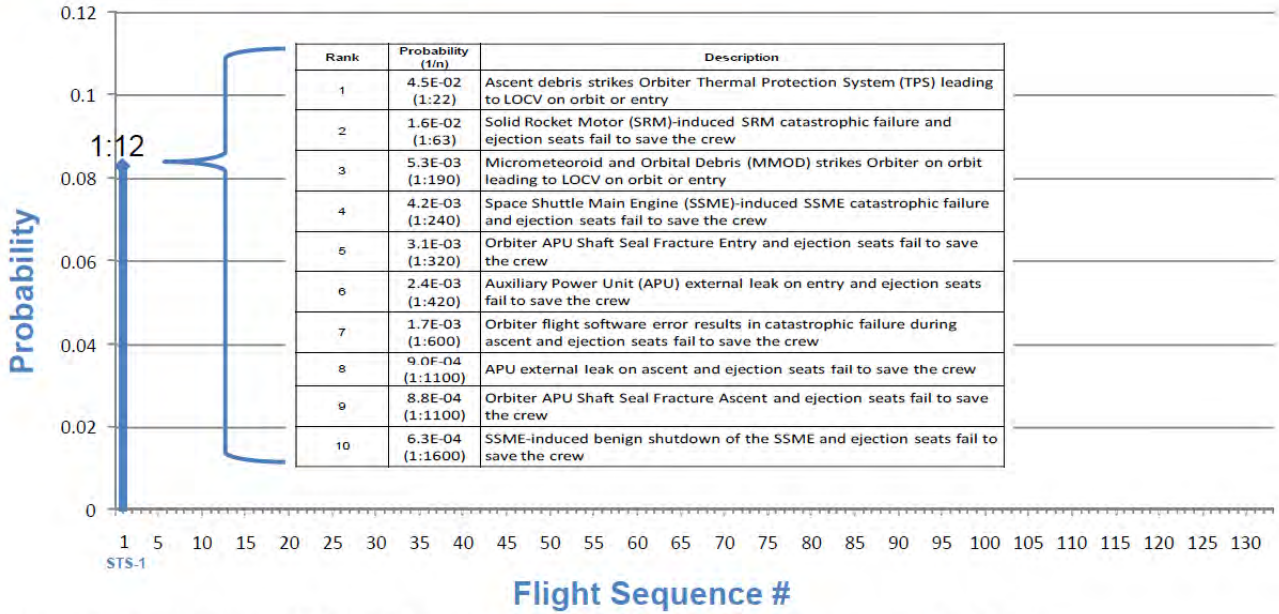


- STS-1 estimate includes crew escape with ejection seats (Risk is 1:9 without ejection seats)
- STS-1 risk may have been higher due to unquantified risks
  - Underestimation of the SRB ignition overpressure which deformed FRCS oxidizer tank aft Z strut
  - Orbiter flight software risk is higher than estimated due to use of OI-1 estimate
  - TPS risk may be underestimated because ascent debris risk is based upon damages from STS-6 through STS-27 and on STS-1 there were numerous upper surface tile debonds
- Around STS-114 the Shuttle Program started actively using the Shuttle PRA in program decisions

6/24/2011

8

## RESULTS SUMMARY (STS-1)

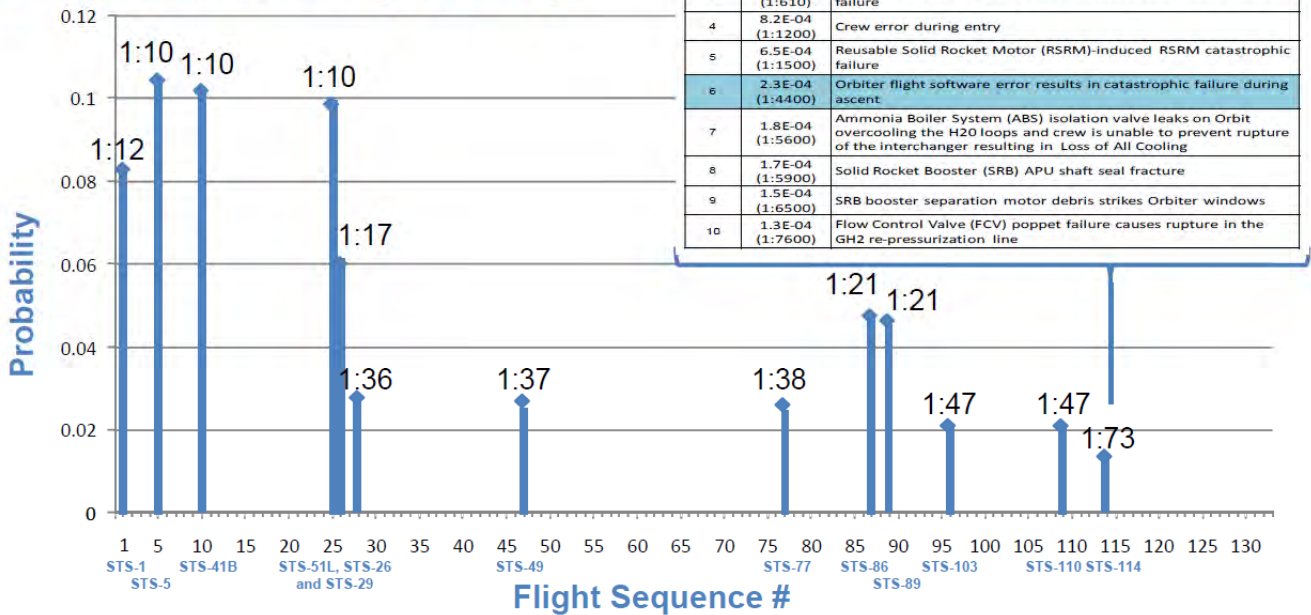


- As stated previously STS-1 risk may have been higher due to unquantified risks
- As quantified STS-1 risk is dominated by Ascent debris and SRM risk

6/24/2011

9

## RESULTS SUMMARY (STS-114)



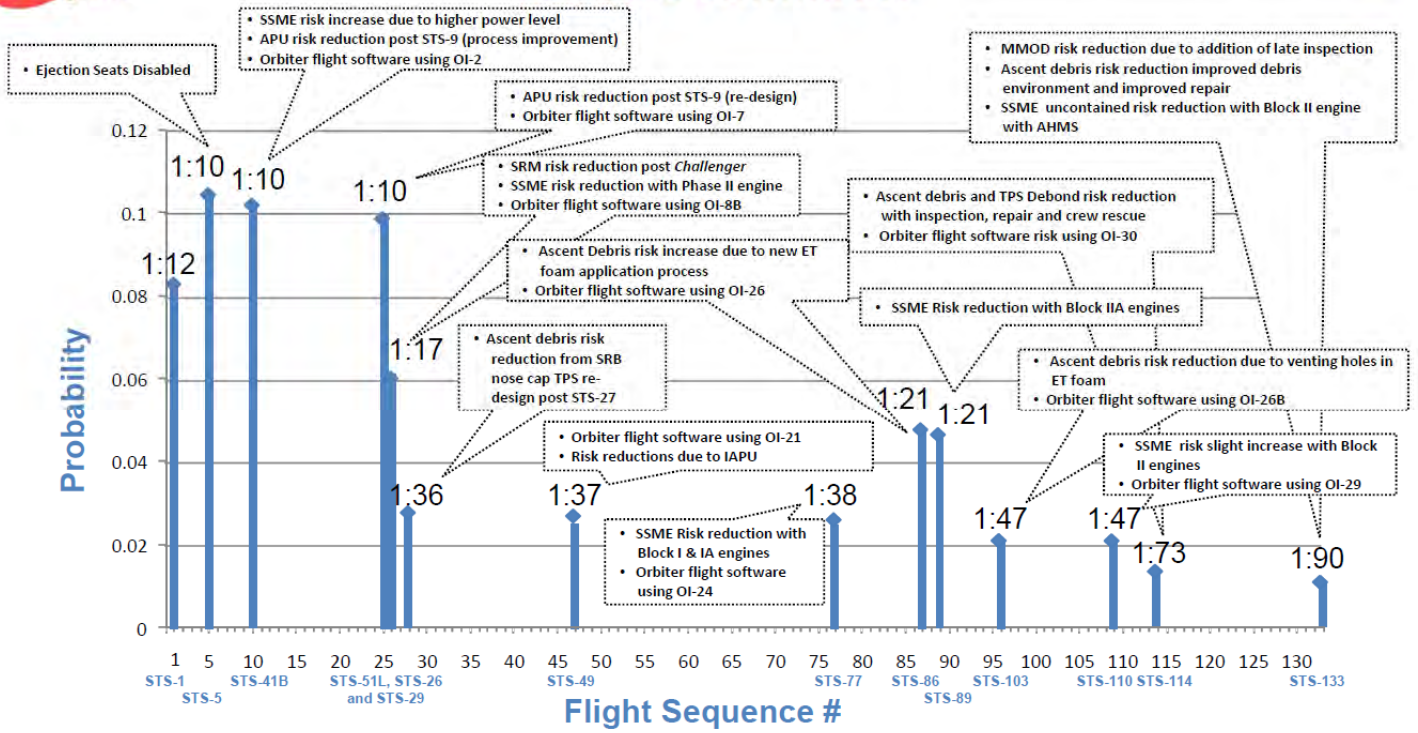
- MMOD risk decreases due to FD2 inspection with repair and crew rescue (no late inspection)
- Ascent debris risk decreases due to FD2 inspection with repair and crew rescue
- Orbiter flight software risk reduction due to use of OI-30 vs. OI-29
- TPS debond risk drops from top 10 due to FD2 inspection with repair and crew rescue
- OMS fuel supply risk drops from top 10 due to crew rescue capability

Blue highlight indicates risk has changed

6/24/2011

21

## RESULTS SUMMARY

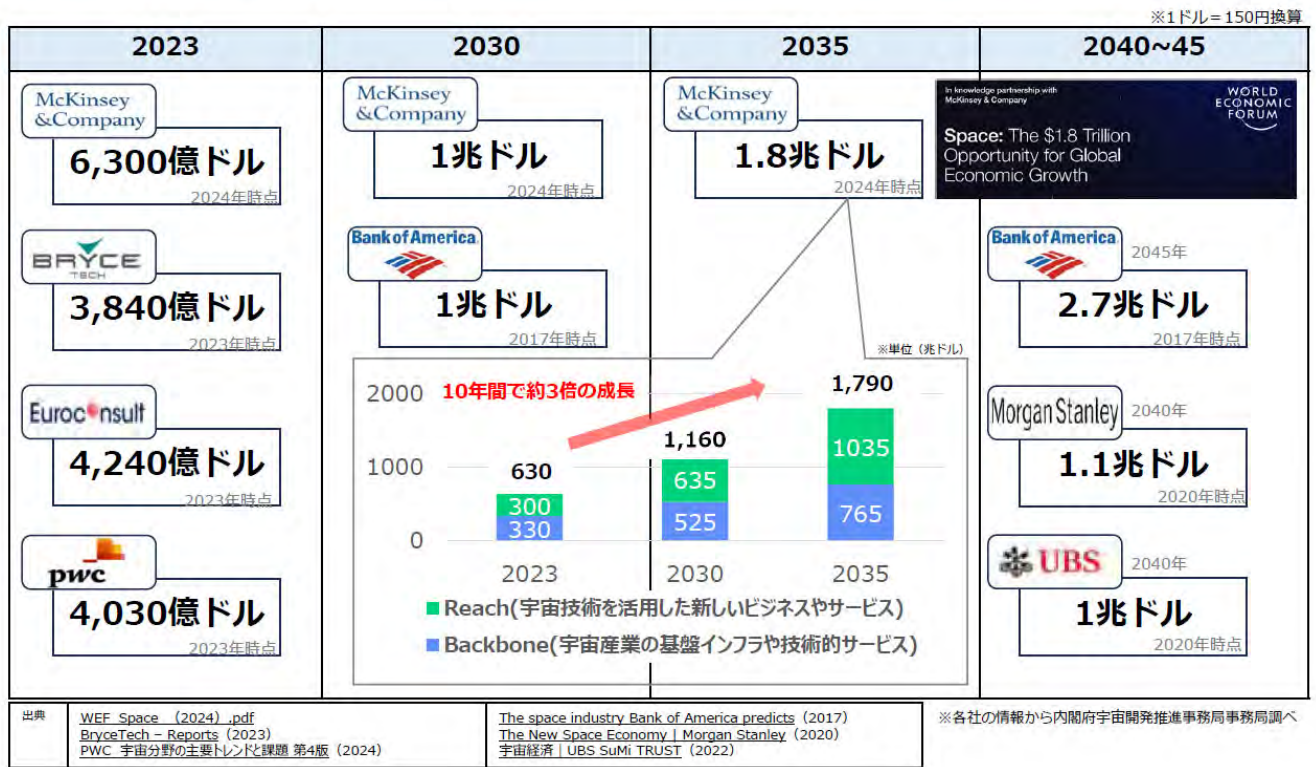


- There was an 8% likelihood of making it to flight 25 without LOCV and a 8% likelihood of making it from flight 26 to flight 113 without LOCV using the values on this chart
  - We were lucky, there were a number of close calls (e.g. STS-9 APU fire, STS-27 Ascent Debris, STS-95 drag chute door)



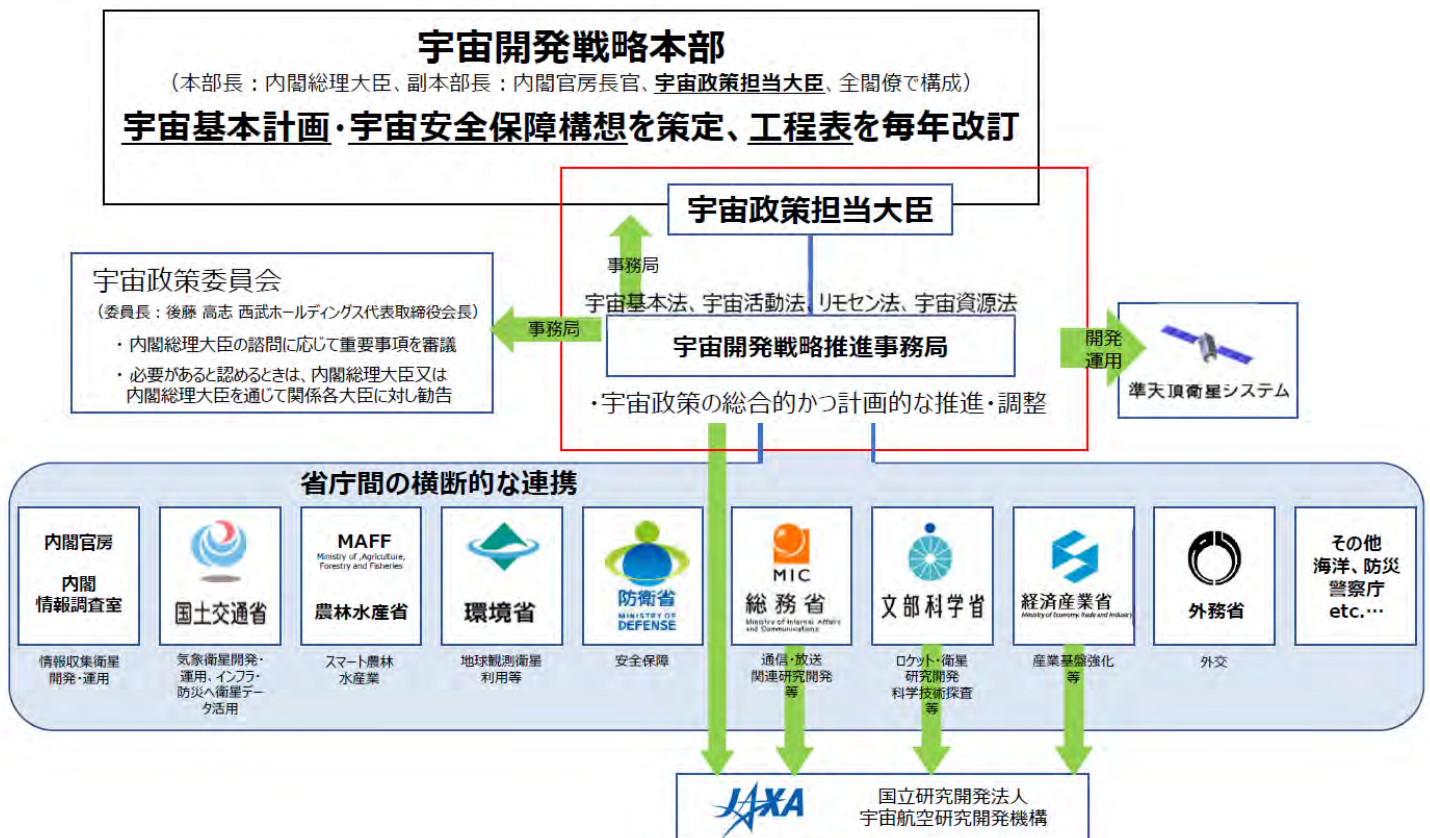
# II-2. わが国の宇宙開発計画

- 各社が、宇宙の市場規模は2030~40年に約1兆ドル（約150兆円）になると予測。



内閣府資料より

## 宇宙政策に関する政府の体制

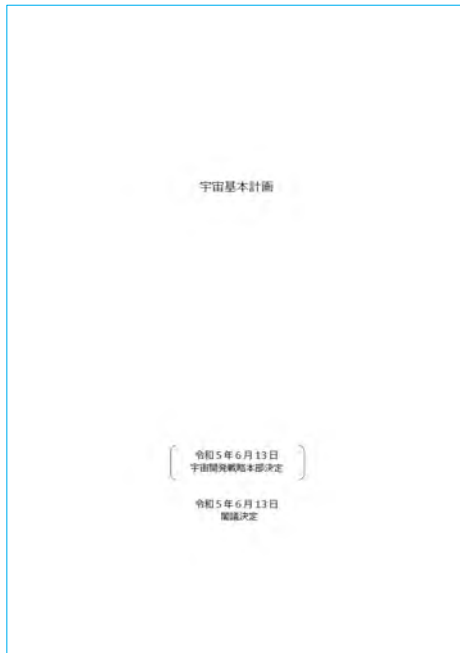


内閣府資料より

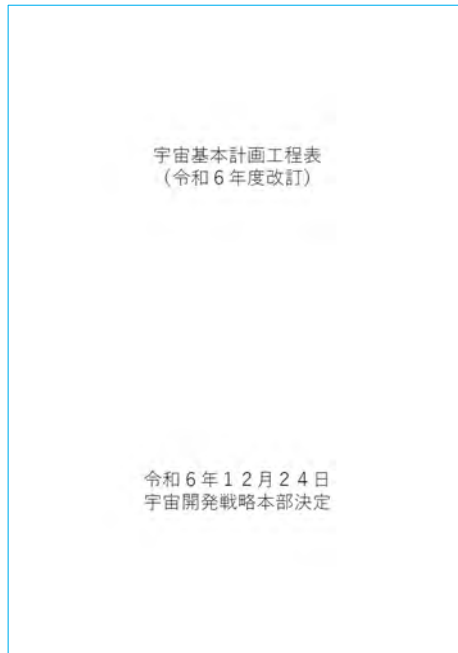
## 宇宙基本計画

## 宇宙基本計画工程表

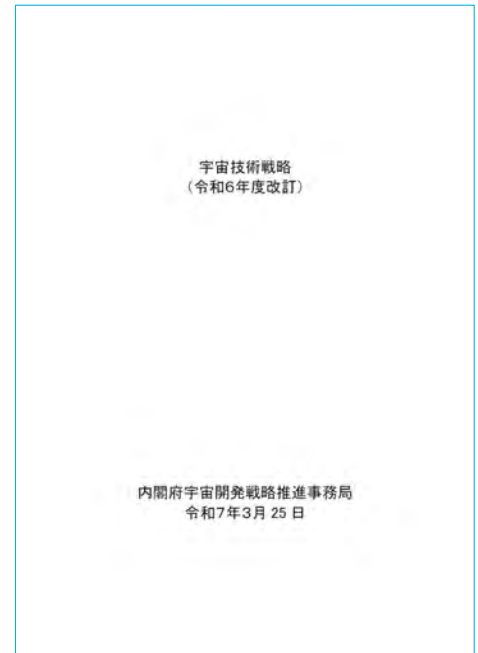
## 宇宙技術戦略



**宇宙基本計画**は、宇宙の平和利用や産業振興、安全保障を目指し、国の成長戦略として重要な役割



**宇宙基本計画工程表**は毎年、政策項目ごとの進捗状況を宇宙政策委員会で検証し、宇宙開発戦略本部において改訂



**宇宙技術戦略**は、宇宙産業の成長を促進し、国際的な競争力を高めるための政策と技術開発の方向性を示す

## 宇宙基本計画

**宇宙基本計画は、日本の宇宙政策の基盤を成す計画であり、宇宙の平和利用や産業振興を目指して策定**

### 概要

宇宙基本計画は、宇宙基本法に基づいて政府の宇宙開発戦略本部が作成したもので、宇宙開発利用に関する施策を総合的かつ計画的に推進するための基本方針を示している。最初の計画は2009年に発表され、以降、定期的に見直し。

### 特徴

- ◆ **宇宙産業の成長:** 2020年時点で約4兆円だった市場規模を2030年代初頭までに8兆円に倍増させる
- ◆ **重点分野:** 宇宙産業の構造変革を進め、政府主導から民間投資や宇宙スタートアップによる柔軟なモデルへの転換を図る。
- ◆ **技術革新:** AIやクラウドと衛星データを融合させ、農業やインフラ、防災などの地上の課題解決に向けた活用。

- ・ 人類の活動領域が本格的に宇宙空間に拡大するとともに、宇宙システムが地上システムと一体となり、地球上の様々な課題の解決に貢献し、より豊かな経済・社会活動を実現。また、安全保障環境が複雑で厳しいものになる中、宇宙空間の利用が加速。
- ・ こうした宇宙空間というフロンティアにおける活動を通じてもたらされる経済・社会の変革（スペース・トランスフォーメーション）が世界的なうねりとなっている中、我が国の宇宙活動の自立性を維持・強化し、世界をリードしていくことが必要。この実現のため、宇宙基本計画を改定。
- ・ 関係省庁間・官民の連携を図りつつ、予算を含む資源を十分に確保し、これを効果的かつ効率的に活用して、政府を挙げて宇宙政策を強化。

目標と将来像

- (1) 宇宙安全保障の確保
    - ・ 宇宙からの安全保障：情報収集衛星や衛星コンステレーションによる情報収集等
    - ・ 宇宙における安全保障：宇宙領域把握（SDA）体制の構築等
    - ・ 宇宙安全保障と宇宙産業の発展の好循環
  - (2) 国土強靱化・地球規模課題への対応とイノベーションの実現
    - ・ 通信：陸海空と宇宙がシームレスに繋がる
    - ・ リモートセンシング：発災後、早期の被災状況確認による迅速な災害対応等を実現等
    - ・ 衛星測位：準天頂衛星のm軌道測位による自動化・無人化で労働力不足解決に貢献
  - (3) 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造
    - ・ 生命の可能性等の人類共通の知を創出し、月以遠の深宇宙に人類の活動領域を拡大
    - ・ 月面探査・地球低軌道活動における産業振興を通じて、段階的に民間商業活動を発展
    - ・ 次世代人材育成と国際プレゼンス向上
  - (4) 宇宙活動を支える総合的基盤の強化
    - ・ 他国に依存することなく宇宙へのアクセスを確保し、自立的な宇宙活動を実現
    - ・ 衛星運用状況等の情報共有が進展し、スペースデブリの数が一定程度まで管理される
    - ・ 技術・産業・人材基盤の確立
- 宇宙産業を日本経済における成長産業とするため、その市場規模を、2020年に4.0兆円から2030年代中期に2倍の8.0兆円に。

基本的なスタンス

- (1) 安全保障や宇宙科学・探査等のミッションへの実装や商業化を見据えた政策
- (2) 宇宙技術戦略に基づく技術開発の強化
  - ✓ 安保・民生分野横断的に検討、サプライチェーンも強化
- (3) 同盟国・同志国との国際連携の強化
  - ✓ 国際的規範・ルール作り、我が国強み活かした協力等
  - (4) 国際競争力を持つ企業の戦略的育成・支援
    - ✓ 国際市場で勝ち残る意志と技術等がある企業を重点支援
- (5) 宇宙開発の中核機関たるJAXAの役割・機能の強化
  - ✓ JAXAの戦略的かつ弾力的な資金供給機能を活用、産学官の結節点に
  - (6) 人材・資金等の資源の効率的・効果的な活用
    - ✓ 工程表、宇宙技術戦略で資源を効果的・効率的に活用

具体的なアプローチ

- (1) 宇宙安全保障の確保
  - (a) 宇宙安全保障のための宇宙システム利用の抜本的拡大
    - ・ 衛星コンステレーションの構築や情報収集衛星の機能強化、民間衛星、同盟国・同志国との連携強化等で隙のない情報収集体制を構築
    - ・ 情報収集衛星の機能強化(10機体制が目指す能力早期達成)
    - ・ 安全保障用通信衛星の多層化(耐傷受性・耐妨害性のある防衛用通信衛星の確保等)
    - ・ 衛星コンステレーションに必要な共通技術の確立
    - ・ 衛星測位機能の強化
    - ・ ミサイル防衛用宇宙システムに必要な技術の確立(HGVの対処能力の向上のための技術実証等)
    - ・ 海洋状況把握等
  - (b) 宇宙空間の安全かつ安定的な利用の確保
    - ・ 宇宙システム全体の機能保証強化
    - ・ 宇宙領域把握(SDA)体制の構築
    - ・ 軌道上サービスを活用した衛星のライフサイクル管理
  - (c) 安全保障と宇宙産業の発展の好循環の実現
    - ・ 政府の研究開発、実装能力の向上
- (2) 国土強靱化・地球規模課題への対応とイノベーションの実現
  - (a) 次世代通信サービス
    - ・ Beyond5G等次世代通信技術開発・実証
    - ・ フルデジタル化通信衛星実装へ開発・実証(2025年度ETS-9打上げ)
    - ・ 衛星量子暗号通信の早期実現へ開発・実証
  - (b) リモートセンシング
    - ・ 防災・減災、国土強靱化・地球規模課題への衛星開発・運用とデータ活用促進(2029年度(ひまわり)10号運用開始、2024年度GOSAT-GW打上げ、ALOS-3喪失に対して再開発の要否を含め検討、降水レーダ(衛星開発等)等)
    - ・ 衛星関連先端技術の開発、実証支援(2025年SAR衛星コンステ構築へ実証等)
  - (c) 準天頂衛星システム
    - ・ 7機体制の着実な構築と11機体制に向けた検討・開発着手(準天頂衛星システムの開発・整備・運用、利活用推進)
  - (d) 衛星開発・利用基盤の拡充
    - ・ 衛星データ利用拡大とサービス調達推進
    - ・ 衛星開発・実証プラットフォームにおけるプロジェクトの戦略的推進
    - ・ 宇宙機器・ソリューション海外展開強化
    - ・ 異業種や中小・スタートアップ企業の参入促進
    - ・ 衛星データ及び地理空間データプラットフォームの充実・強化
    - ・ 宇宙天気予報の高度化・利用拡大(ひまわり10号への宇宙環境計測センサ搭載)
    - ・ 宇宙太陽光発電の研究開発
- (3) 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造
  - (a) 宇宙科学・探査
    - ・ 大型の海外計画参画と独創的・先鋭的技術によるユニークなミッションの創出(2024年度MMX打上げ)
    - ・ 火星本星・小天体探査計画の検討と「月面における科学」の具体化
    - ・ 獲得すべき重要技術の特定と強みである技術の高度化、強みとなる最先端技術の開発・蓄積、フロントローディングの推進
  - (b) 月面における持続的な有人活動
    - ・ アルテミス計画の下、2020年代後半の日本人の月面着陸、持続的な月面活動の推進(環境制御、生命維持技術、補給機、有人与圧ロープ、測位通信技術、月輸送技術等)
    - ・ 月面開発工程の具体化に向けた構想策定と官民プラットフォームの構築
    - ・ 将来市場形成に向けた規範、ルールの形成
  - (c) 地球低軌道活動
    - 【ISS長期期間】
      - ・ ISSの利用促進、ニーズ拡大策の推進
      - ・ アルテミス計画等に必要となる技術の実証
    - 【ポストISSを見据えた取組】
      - ・ ポストISSの在り方の検討と、その在り方に89応じた必要技術の研究開発
      - ・ 国際的・国内的な法的枠組みの検討
- (4) 宇宙活動を支える総合的基盤の強化
  - (a) 宇宙輸送
    - ・ 基幹ロケットの継続的な運用と打上げの高頻度化などによる強化
    - ・ 民間ロケットの開発・事業支援
    - ・ 新たな宇宙輸送システムの構築
    - ・ 宇宙輸送に関する制度環境の整備
  - (b) 宇宙交通管理及びスペースデブリ対策
    - ・ 商業デブリ除去技術の実証
    - ・ 軌道上サービス技術の開発・支援
    - ・ 国際的な規範・ルール形成への参画
  - (c) 技術・産業・人材基盤の強化
    - ・ 宇宙技術戦略の策定・ローリング
    - ・ 先端・基盤技術開発の強化(JAXA能力強化、資金供給機能強化)
    - ・ 商業化に向けた支援の強化(定期的宇宙実証、放射線試験機会提供、開発プロセスのDX支援等)
    - ・ 異業種や中小・スタートアップ企業の宇宙産業への参入促進及び事業化支援(JAXA出資・資金供給機能、SBIR制度等)
    - ・ 契約制度の見直し(官民の開発リスク分担の必要な見直し、進捗に応じた支払手法の検討、物価・為替変動対応、民間の適正利益確保の施策等)
    - ・ JAXAの人的資源の拡充・強化
    - ・ 人材基盤の強化
    - ・ 国際宇宙協力の強化
    - ・ 国際的な規範・ルール作りの推進
    - ・ 国民理解の増進

宇宙基本計画工程表(令和6年度改訂)のポイント

<最近の情勢>

<工程表改訂のポイント>

- 宇宙安全保障の確保
  - ・ ロシアによるウクライナ侵略等において、高い情報収集・情報通信能力を持つ宇宙システムの重要性が明らかになり
  - ・ 「宇宙安全保障構想」に基づき、我が国の安全保障上、必要な宇宙アーキテクチャの構築が急務
  - ・ 民間宇宙技術等も積極的に活用し、防衛力の強化と、国内宇宙産業の発展の好循環の実現が重要
  - ・ スタンド・オフ防衛能力の実効性確保等の観点から、2027年度までに目標の探知・追尾能力の獲得を目的とした衛星コンステレーションを構築する。
  - ・ 情報収集衛星について、ユーザー・ニーズを踏まえつつ、10機体制が目指す情報収集能力の向上を着実に実施する。
  - ・ 耐傷受性や耐妨害性を備えた次期防衛通信衛星の整備を進める。これに合わせ、次世代の衛星に必要となる技術(熱制御技術等)を実証する。
  - ・ 準天頂衛星システムについて、7機体制を整備し、11機体制に向けた開発を進める。
  - ・ 極超音速滑空兵器(HGV)探知・追尾等の能力向上に向けて、新型宇宙ステーション補給機(HTV-X)で計画している宇宙実証プラットフォームを活用し、赤外線センサ等の宇宙実証を実施するとともに、センサの能力向上を図る。また、日米首脳共同声明において発表された衛星コンステレーションに関する協力について検討を進める。
  - ・ 2027年度の「航空宇宙宇宙自衛隊」の改称も見据え、2025年度に宇宙空間の監視や対処任務を目的とする宇宙作戦(仮称)を新たに編成するとともに、2026年度の宇宙領域把握(SDA)衛星の打上げに向けた取組を進める。また、多国間枠組みである連合宇宙作戦イニシアチブ(CSpO)への継続的参加をはじめ、各種の国際的取組に積極的に関与する。
  - ・ 宇宙に関する不測の事態において官民が連携した対応を取れるよう「宇宙システムの安定性強化に関する官民協議会」の活動を継続強化する。
- 国土強靱化・地球規模課題への対応とイノベーションの実現
  - ・ 通信衛星コンステレーションや観測衛星コンステレーション等、商業衛星コンステレーション構築の早期実現に向けた民間企業による技術開発を推進する。
  - ・ 民間主体による高頻度な3次元観測を可能とする小型光学衛星による観測システム技術の高度化や、革新的なライダー衛星の実現に向けた技術開発等を推進する。
  - ・ 「衛星データ利用に関する今後の取組方針」に基づき、令和6年度から3年間の「民間衛星の活用拡大期間」において、アーカイブ画像取得などの国や自治体・民間等による衛星データの利用を促進する。
  - ・ 災害状況把握等への寄与が期待される先進レーダ衛星(ALOS-4)について、定常観測運用を開始し、データ提供を開始する。また、データ・サービス事業者から一般ユーザーへのデータ提供に着手し、新たなユーザーニーズの発掘や利用拡大に向けた施策を実施する。
  - ・ 線状降水帯や台風等の予測精度を本格的に向上させる大気の大気3次元観測機能、太陽フレア等による我が国上空の宇宙環境の変動を観測するセンサなど最新技術を導入したひまわり10号について、2029年度の運用開始に向けて、着実に整備を進める。
  - ・ 温室効果ガス・水循環観測技術衛星(GOSAT-GW)の2025年度前半の打上げに向け、開発を着実に進めると同時に、世界に先駆けて開発した温室効果ガス排出量推計技術の中央アジア、インド等への普及の取組を推進することにより、国際標準化を目指していく。
- 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造
  - ・ 各国で月や火星などの探査計画が活発化
  - ・ アルテミス計画において日本の有人と圧ロープ提供に伴い、日本人宇宙飛行士の2回の月面着陸機会を確保することについて日米間で確認
  - ・ 2030年以降の商用宇宙ステーション構築に向けて2026年にNASAが調達先となる民間企業を選定予定
  - ・ アルテミス計画に主体的に参画し、我が国が提供・運用する有人と圧ロープの開発等を推進し、米国人以外で初となる日本人宇宙飛行士による月面着陸を含む2回の月面着陸の実現を目指す。また、小型月陸機(SLM)で実証したポイント着陆技術を開発させ、極域対応等を含む月面着陸技術の要素技術に関する研究開発を実施する。さらに、インド等との国際協力の下、月極域探査機(LUPEX)の開発を進める。
  - ・ 2031年度人類初の火星周回からのサンプルリターン実現に向け、火星探査計画(MMX)の探査機を、2026年度に打ち上げるべく開発を進める。また、2029年に小惑星アポフィスに地球に最近接近することを踏まえ、国際的なブラスター・イフエンスの活動として、国際協力の枠組みへの参画を検討する。
  - ・ 日本実験機「きぼう」の運用、利用拡大と成果最大化に向けた必要施策を検討・実施する。また、2025年度以降のHTV-X1～5号機打上げに向けた開発および運用を行い、ISSへ安定的に物資補給を行うとともに、2025年以降のISS運用延長長期に係る共通システム運用についてISS関係各機関との協議等を進める。
  - ・ 宇宙ステーションの運営主体が民間になることに伴い必要となる枠組み等の検討や、NASA等の国際パートナーとの議論を進めるとともに、自律飛行型モジュールシステムなど民間企業主体の技術開発を支援する。
- 宇宙活動を支える総合的基盤の強化
  - ・ 2030年代前半までに官民による打上げ能力の年間30件程度確保を目指す。基幹ロケットについては、国際市場に対応する打上げ能力の獲得を目指した高度化と打上げ高頻度化を推進するとともに、次期基幹ロケットの検討に着手する。また、民間事業者によるロケット開発、コンポーネント、地上系設備に係る研究開発を推進する。
  - ・ 新たな宇宙輸送形態を可能とするため、宇宙活動法の改正を視野に、2024年度内に制度の見直しの考え方をまとめる。
  - ・ 民間企業等による世界的な宇宙利用の拡大に対応した円滑な審査が可能となるよう、内閣府宇宙開発戦略推進事務局の体制整備を図る。
  - ・ 商業デブリ除去実証(CRD2)のこれまでの成果等も踏まえ、スペースデブリの低減・改善に資する技術開発に取り組みるとともに、「軌道利用のルール作りに関する中長期的な取組方針」に沿って、宇宙交通管理に資する実果的取組を推進し、国際的な規範・ルール作りを率先して取り組む。
  - ・ 宇宙技術戦略を参照しつつ、SBIRや経済安全保障重要技術育成プログラム、宇宙戦略基金等を活用し、スタートアップを含めた民間企業や大学などを支援する。
  - ・ 宇宙戦略基金について、速やかに総額1兆円規模の支援を行うことを目指すとともに、宇宙分野への新規参入促進や新規事業の創出、事業化へのコミットの拡大等の観点からスタートアップを含む民間企業や大学等の技術開発への支援を強化・加速する。
  - ・ 併せて、政府によるアンカーテナンシーを確保し、国際競争力ある民間企業の事業展開の好循環を実現する。
  - ・ 「EXPO2025 大阪・関西万博」の機会も捉え、宇宙開発利用の意義及び成果の価値と重要性について、情報発信を行う。

年度	令和5年度 (2023年度)	令和6年度 (2024年度)	令和7年度 (2025年度)	令和8年度 (2026年度)	令和9年度 (2027年度)	令和10年度 (2028年度)	令和11年度 (2029年度)	令和12年度 (2030年度)	令和13年度 (2031年度)	令和14年度 (2032年度)	令和15年度以降
9 月面における持続的な有人活動①	【国際パートナーや民間事業者と連携した持続的な月面活動】										
	米国提案の国際宇宙探査計画(アルテミス計画)への参画[内閣府、文部科学省等]										
	ゲートウェイ居住棟への我が国が強みを有する技術・機器の提供						ゲートウェイの運用・利用				
	HTV-XによるISSへの物資補給機会を活用した技術実証						ゲートウェイ補給機によるゲートウェイへの物資輸送				
	月面探査を支える移動手段(有人と圧ローバ)に関する開発研究									運用	
	車輪や走行系等の要素技術の開発研究・技術実証										
	着陸地点の選定等に資する月面の各種データや技術の共有										
	月極域探査機(LUPEX)の開発						運用 打上げ				
	持続的な活動に不可欠なインフラ(測位通信、資源探査・探掘利用・電力供給、無人建設、食料生産)の研究開発[内閣府、国土交通省、総務省、文部科学省、経済産業省、農林水産省等]										
	宇宙開発利用加速化戦略プログラム(スターダストプログラム)による基盤技術開発 [内閣府、国土交通省、総務省、文部科学省、経済産業省、農林水産省等]										
宇宙戦略基金による技術開発支援(再掲) [内閣府、総務省、文部科学省]						91					

## 宇宙技術戦略



「宇宙基本計画」(令和5年6月13日閣議決定)に基づき、世界の技術開発トレンドやユーザーニーズの継続的で確かな調査分析を踏まえ、安全保障・民生分野において横断的に、我が国の勝ち筋を見据えながら、我が国が開発を進めるべき技術を見極め、その開発のタイムラインを示した技術ロードマップを含んだ「宇宙技術戦略」を策定。

関係省庁における技術開発予算や10年間で総額1兆円規模の支援を行うことを目指す「宇宙戦略基金」を含め、関係省庁・機関が今後の予算要求、執行において参照していくとともに、毎年度最新の状況を踏まえ、ローリングを行っていく。

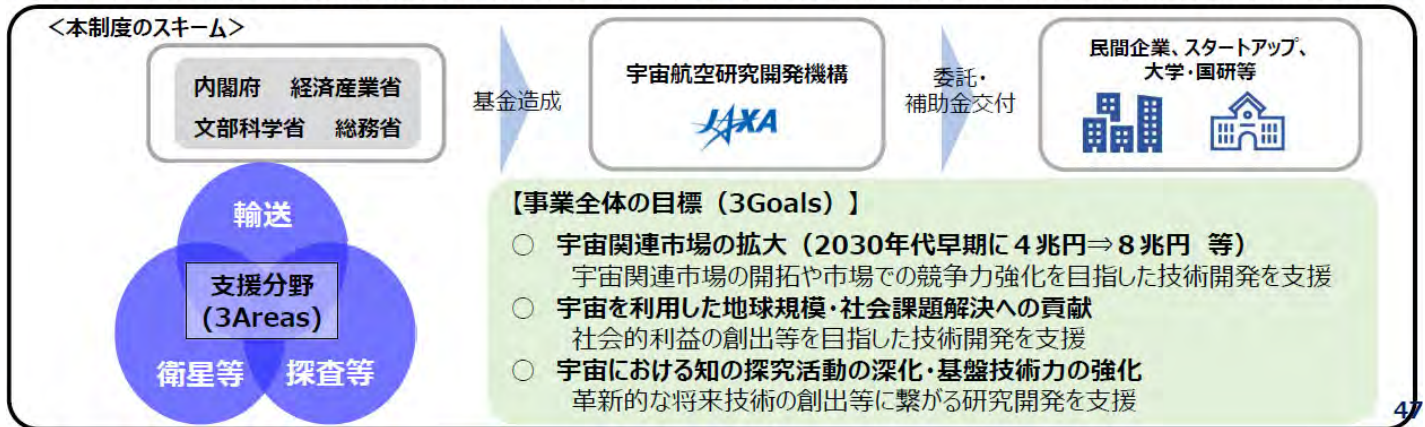
必要な宇宙活動を自前で行うことができる能力を保持(「自立性」の確保)するため、技術開発を推進。

- ① 我が国の技術的優位性の強化
- ② サプライチェーンの自律性の確保等

衛星	宇宙科学・探査	宇宙輸送
<p>防災・減災、国土強靱化や気候変動を含めた地球規模問題の解決と、民間市場分野でのイノベーション創出、SDGs達成、Society5.0実現をけん引：</p> <p>① 通信 ② 衛星測位システム ③ リモートセンシング ④ 軌道上サービス ⑤ 衛星基盤技術</p>  <p>【出典】TESAT 大容量のリアルタイム伝送を可能にする光通信</p>	<p>宇宙の起源や生命の可能性等の人類共通の知を創出し、月以遠の深宇宙に人類の活動領域を拡大するとともに、月面探査・地球低軌道活動における産業振興を図る：</p> <p>① 宇宙物理 ② 太陽系科学・探査 ③ 月面探査・開発等 ④ 地球低軌道・国際宇宙探査共通</p>  <p>【出典】TOYOTA JAXA/TOYOTAが研究開発中の有人圧ローバ(イメージ)</p>	<p>宇宙輸送能力の強化、安価な宇宙輸送価格の実現、打上げの高頻度化、多様な宇宙輸送ニーズへの対応を実現：</p> <p>① システム技術 ② 構造系技術 ③ 推進系技術 ④ その他の基盤技術 ⑤ 輸送サービス技術 ⑥ 射場・宇宙港技術</p>  <p>【出典】JAXA CALLISTO(カリスト)プロジェクト；日・仏・独の宇宙機関共同で、2026年度にロケット1段目の再使用を実施予定</p>
分野共通技術		
<p>上記の衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送分野共通となる技術について、継続的に開発に取り組むことが、サプライチェーンの自律性確保、国際競争力強化の観点から不可欠：</p> <p>① 機能性能の高度化と柔軟性を支えるハードウェア技術(デジタルデバイス等) ② 小型軽量化とミッション高度化を支える機械系基盤技術(3Dプリンティング等) ③ ミッションの高度化と柔軟性を支えるソフトウェア基盤技術(AI、機械学習等) ④ 開発サイクルの高速化や量産化に資する開発・製造プロセス・サプライチェーンの変革 ⑤ 複数宇宙機の高精度協調運用技術</p>		
 <p>【出典】JAXA 宇宙用高性能デジタルデバイスマイクロプロセッサ</p>  <p>【出典】OneWeb 製造試験ラインを自動化しているOneWeb衛星</p>  <p>【出典】理化学研究所 COTS品の活用により重要となる耐放射線試験等の環境試験</p>		

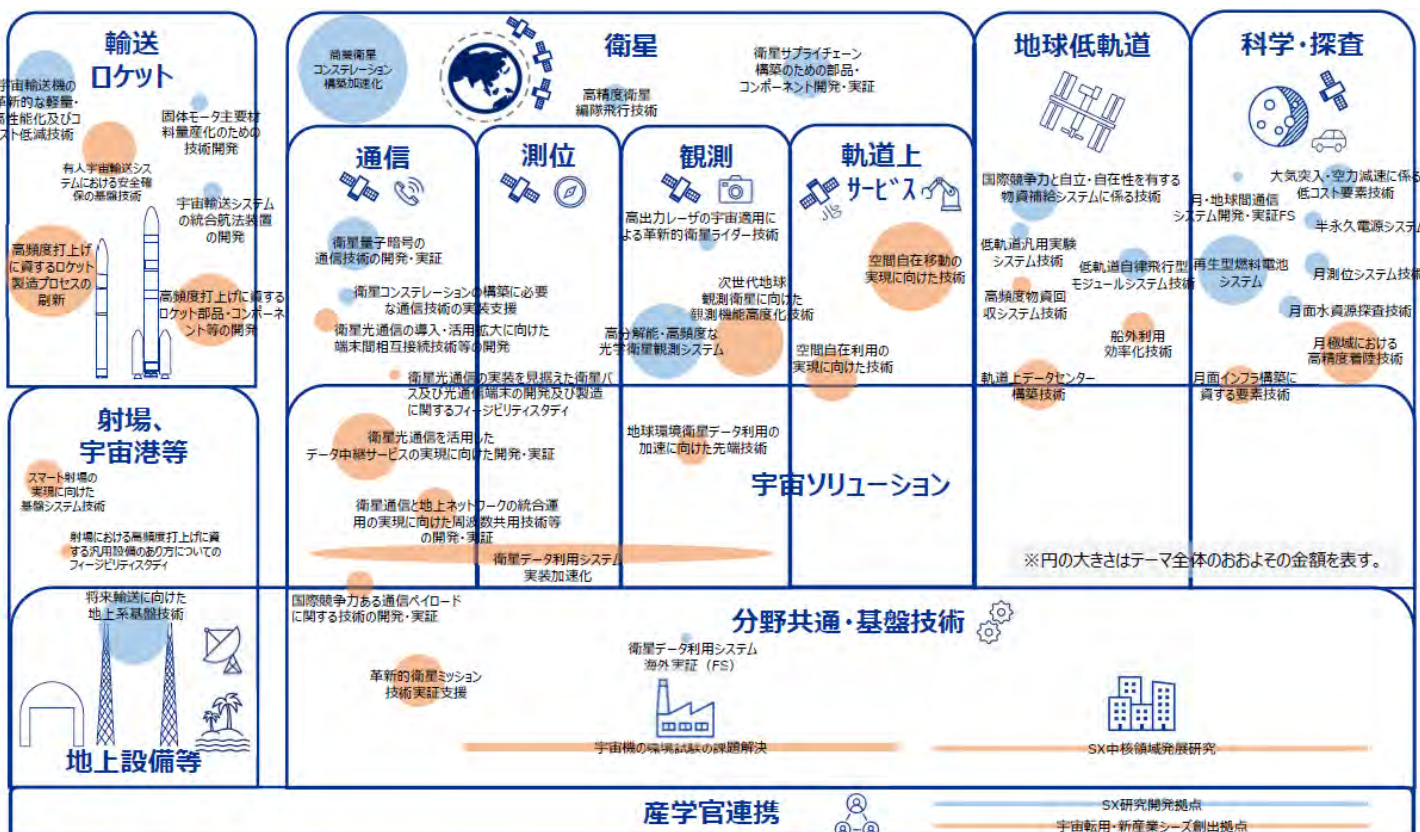
- 我が国として民間企業・大学等が複数年度にわたって大胆に研究開発に取り組めるよう、新たな基金を創設し、民間企業・大学等による先端技術開発、技術実証、商業化を強力に支援。
- 速やかに総額 1 兆円規模の支援を行うことを目指すとともに、非宇宙のプレーヤの宇宙分野への参入促進や、新たな宇宙産業・利用ビジネスの創出、事業化へのコミットの拡大等の観点からスタートアップを含む民間企業や大学等の技術開発への支援を強化・加速する。
- 加えて、政府によるアンカーテナンシーを確保し、民間企業の事業展開の好循環を実現。

『国民の安心・安全と持続的な成長に向けた総合経済対策』（令和 6 年 11 月 22 日 閣議決定）  
 宇宙分野においては、スタートアップ、民間企業、大学等が複数年度にわたって行う技術開発や実証、商業化への支援を加速・強化するため、「宇宙戦略基金」について、速やかに総額 1 兆円規模の支援を目指す。その際、防衛省等の取組と連携し、政府全体として適切な支援とする。



内閣府資料より

## 宇宙戦略基金の全体イメージ



内閣府資料より

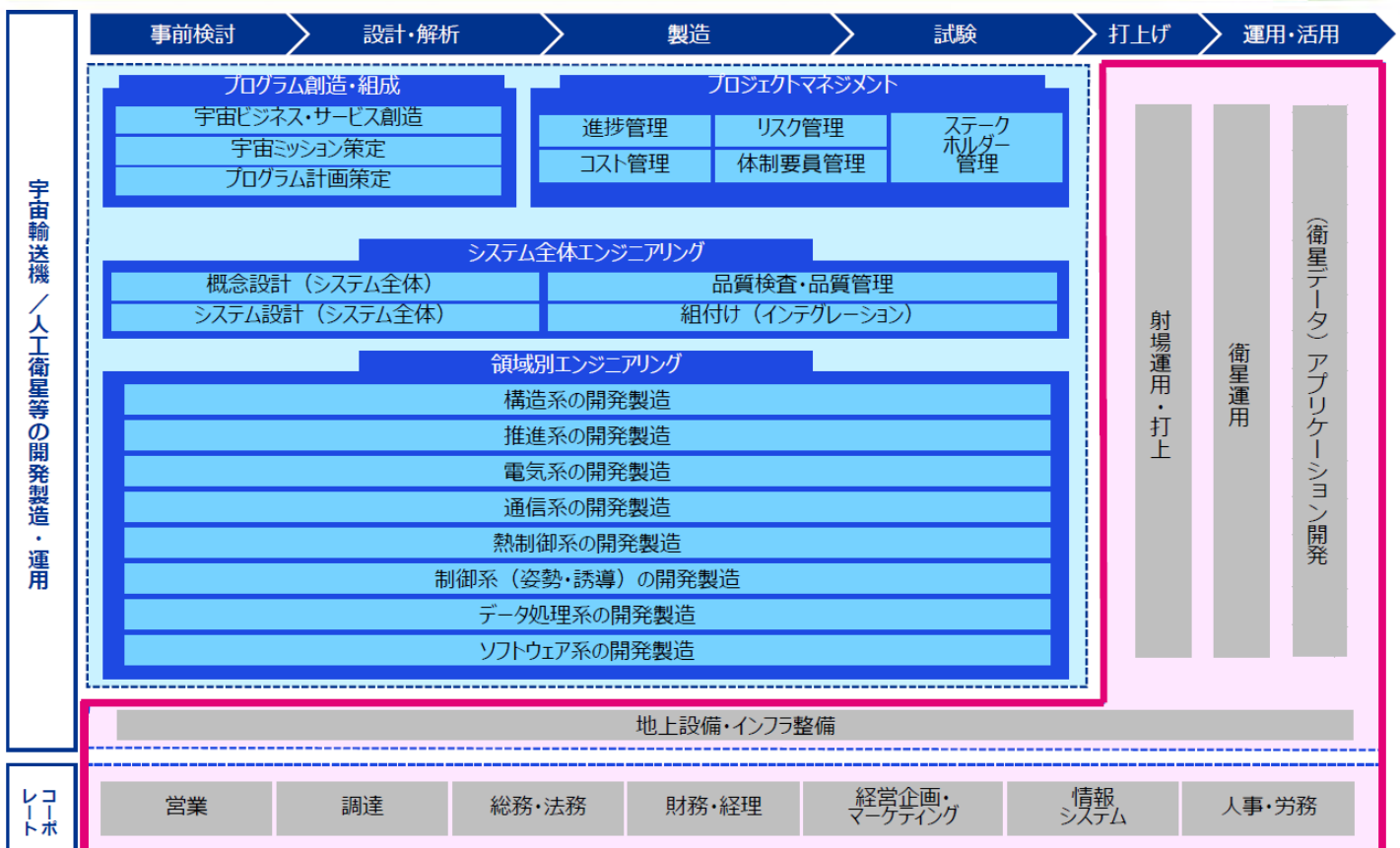
世界的な宇宙空間の利用の高まりを背景に、人工衛星の打上げの需要拡大と宇宙輸送サービスの技術革新が進む一方、宇宙産業全体でロケットや人工衛星に関わる人材が不足。

人材を確保し、宇宙輸送サービス分野や人工衛星の設計・開発・運用分野の人的基盤の強化を図るため、ロケットや人工衛星の研究・設計・開発・製造・打上げ・運用・デザイン・提供等の従事者が身につけるべきスキルを「宇宙スキル標準」として定義し、試作版を作成。

宇宙スキル標準は、日本の宇宙産業における標準的な指針として、企業や自治体、教育機関等、宇宙に関わる様々な業界で活用されることを想定。

業界標準的なスキルが整理されることで、個人、企業、教育機関、自治体等の活用者が自己研鑽、採用、育成などの場面において、それぞれの活動を標準化・高度化することが可能。

## 宇宙スキル標準(試作版)の整理範囲





## 就職活動

宇宙事業を営む組織における業務、求められるスキルを理解する。

## 自己研鑽

宇宙業界で獲得すべきスキル、学習すべき学問、資格体系を理解する。

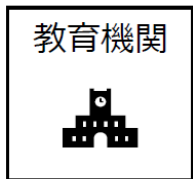


## 採用

人材の採用を検討するにあたって、求めるスキルを定義する。

## 育成

スキルレベルを設定し、人材育成に必要な育成プログラムの検討を行う。



## 教育

教育カリキュラム・プログラムを策定するにあたって、企業が求める人材像のレベルを認識する。

## 就職支援

企業が求める人材像のレベルを認識し、効果的な就職支援を行う。



## 採用

施策の検討・推進を担う人材に必要なスキルを定義する。

## 評価

施策を推進する人材のスキルの水準を定義し、体系的な評価を行う。

## II-3. 月探査ミッション



## 3. LUPEX探査機概要と国際分担

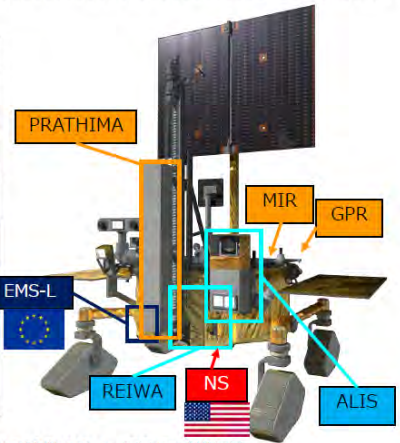


### LUPEXの意義価値

- ✓ インド (ISRO) 等との国際協力ミッション
- ✓ 月南極域における水資源の存在量・存在分布と資源としての利用可能性調査
- ✓ 重力天体表面探査技術の獲得 (越夜・移動・掘削)

打上ロケット	H3-24L
投入軌道	月遷移軌道 (遠地点高度 14万km) 調整中
ペイロード質量	約 6.5 ton
ローバ質量とサイズ	350kg (観測機器含む) L2.0m × W1.8m × H3.3m (SAP展開時)
ローバミッション期間	着陸後3.5か月間 (Nominal) 着陸後1年間 (Extra)
着陸地点	月南極域

観測機器一覧
REIWA (水資源分析計) - ISAP (ISRO試料分析器含む)
ALIS (近赤外画像分光装置)
NS (中性子分光計)
GPR (地中レーダ)
EMS-L (表層分圧計)
MIR (中間赤外画像分光装置)
PRATHIMA (誘電率・熱物性計測装置)



ローバ搭載観測機器と開発機関  
青:JAXA 橙:ISRO 紺:ESA 赤:NASA

4

## LUPEXと他国の水探査機

### 補足 4. LUPEXと他国の水探査機との特徴比較

他国と比べて優位性を有する項目

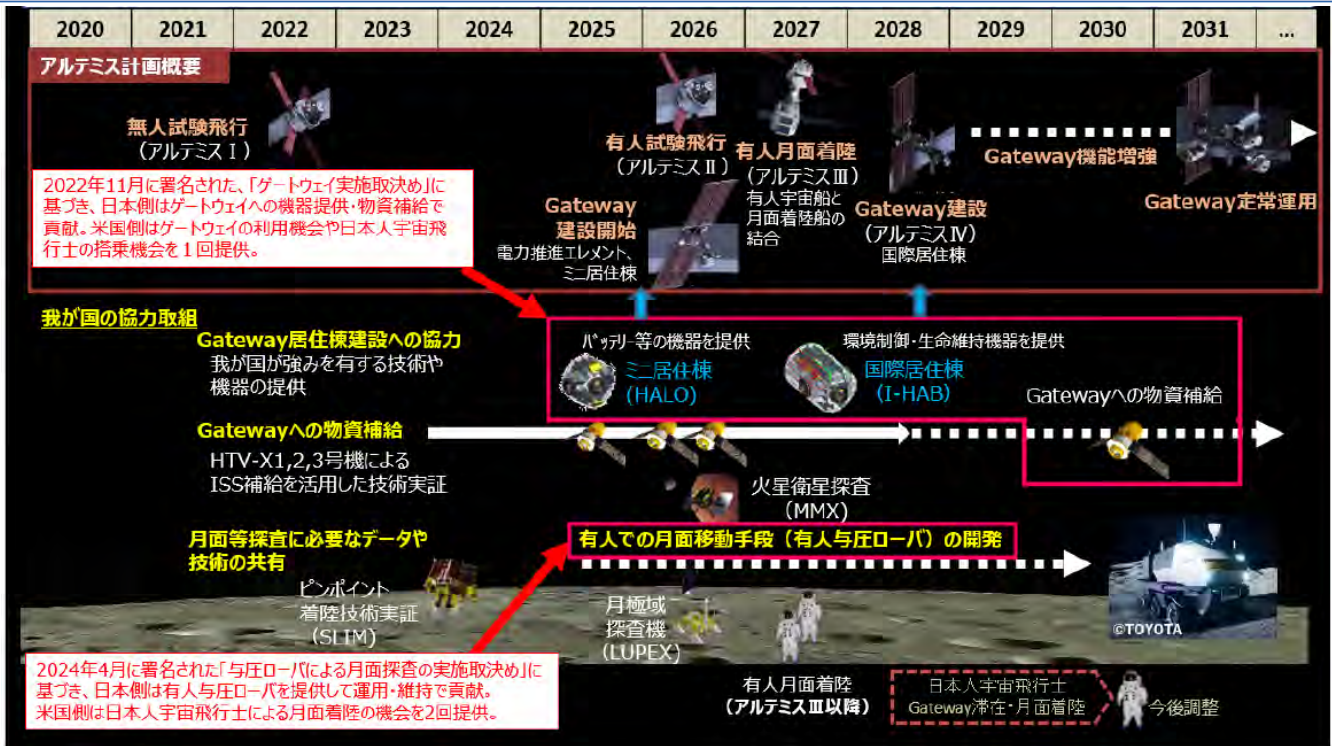
	中国 (CNSA)	日本/インド (ISRO)	欧州 (ESA)	UAE (MBRSC)	米国 (NASA)
打上げ年 (*1)	2026	FY2026 (調整中)	2027	2028	TBD by CLPS
主要開発国 (*2)	中国	日本/インド	欧州	UAE	米国
ミッション名称	Chang' E 7	LUPEX	PROSPECT (*3)	Rashid-3	VIPER (*4)
搭載箇所	ローバ、ホッピング機	ローバ	ランダ	ローバ	ローバ
重量濃度	間接的な推定のみ (質量分析計)	直接測定 (0.1wt%精度)	間接的な推定のみ (精密な重量測定なし)	推定無し (or 間接的な推定)	間接的な推定のみ
分析環境	開放系での表層測定	閉鎖系での定量分析 (高精度な収率計算が可能)	閉鎖系での分析 (精密な重量測定なし)	開放系での表層測定	開放系での表層測定
ガス抽出方法	表層の揮発ガス分析	封止した上での500Kまでの能動的加熱	封止した上での1273Kまでの能動的加熱	(ガス分析せず)	太陽光加熱によるガス蒸発 (表層のみ)
永久影内	探査予定 (ホッピング機)	探査予定	予定なし (着陸地点のみ)	予定なし	探査予定
垂直分解能	(採取なし)	垂直分解能 3cm未満	不明 (採取量45mm <sup>3</sup> )	(採取なし)	掘削時の揚土が混ざる
同位体計測	質量分析のみ	3つの独立した手法で計測実施	質量分析のみ	(分析せず)	質量分析のみ
ローバ活動期間	不明	ノミナル: 着陸後3.5か月 エクストラ: 着陸後1年	越夜予定なし	不明	100日

(\*1) 公開情報に基づく (\*2) この他、ロシアのLuna 27、カナダのLunar Utility Vehicle (LUV) による水探査などがある。

(\*3) PROSPECT: Package for Resource Observation and in-Situ Prospecting for Exploration, Commercial exploration and Transportation (\*4) VIPER: Volatiles Investigating Polar Exploration Rover

12

- 「アルテミス計画」は、月面での持続的な探査の実現と、その活動を通じて、火星有人探査に向けて必要となる技術や能力を実証・獲得することを目指す米国提案の計画であり、商業パートナーや国際パートナーとの協力も重要と位置づけている。
- 我が国は、アルテミス計画が外交・安全保障、国際競争力・国際プレゼンス、非宇宙産業を含む広範な産業の拡大、火星など更なる深宇宙探査の意義を有することに鑑み、2019年10月に宇宙開発戦略本部において参画方針を決定した。



## 有人圧ローバ



## (参考2) 有人と圧ローバーの概要

- 米国が主導する「アルテミス計画」のキー要素として、月面上の広い範囲を長期間にわたり移動可能なモビリティ。
- 有人月面着陸機(HLS)で到着した飛行士に、月面上での「居住空間」と「移動手段」を提供。
  - 船外宇宙服を着た状態で乗降
  - シャツスリーブで居住
  - 飛行士の操作、遠隔操作及び自律運転で移動
- 年1回の有人ミッション期間以外は、無人探査ローバとしての探査機能を提供。



ミッション コンセプト	クルー人数	2名
	探査領域	南極域
	有人ミッション頻度	1回/年
システム 要求 (NASAと 調整中)	有人ミッション期間	28日 (+異常時対応3日)
	越夜能力	有人: 36h, 無人: 192h
	移動距離	18km/日 (総走行距離: 10,000km)
	搭載量	最大3,000kg

南極域を離れて中緯度側に行くためには、越夜能力の増強が必要  
(越夜能力14日以上)  
↓  
RFCタンク(=蓄電量)を追加できる  
よう拡張性を持たせる予定

15

(参考) 有人と圧ローバーの月面輸送に関連するNASA側開発要素の動向

- 「与圧ローバによる月面探査の実施取決め」に基づき、有人と圧ローバーの月面への輸送はNASAが提供する。
- NASAは、有人月面ランダ (Space-X社もしくはBlue Origin社) を大型貨物輸送用に改変したものを、有人と圧ローバの輸送に使用する計画。



## (参考3) 有人と圧ローバーの想定ミッションプロファイル

### 有人と圧ローバーの運用概要 (1年サイクル)



[Day 1: Parking /Recharge]	[Day 2: Traversing & Robotic Exploration]	[Day 3: Recharging]	[Day 4-15]	[Day 16 - 23: Parking]	[Day 24 - 332]	Next Human Exploration Point
Crew Return	Traversing Total: 8 hrs	Recharging	Repeat Day 2 & 3 Operations	Uncrewed PED	Repeat Day 1 thru Day 23 operation	Standby /Recharging
Standby /Recharging	Parking / Recharging: Total 16 hrs			Standby		
Lunar day			Lunar night			

無人期間中(11か月)の運用⇒

# Ⅱ-4. 今後の宇宙開発に向けて



## 宇宙政策を巡る環境

### (1) 変化する安全保障環境下における宇宙空間の利用の加速

- ✓ 高い情報収集・情報通信能力を有する宇宙システムの重要性が急速に高まっている。
- 2027年度までに、衛星コンステレーションを構築し、情報収集能力を抜本的に強化する必要がある。

### (2) 経済・社会の宇宙システムへの依存度の高まり

- ✓ 各国が測位衛星の整備を進め、その利活用を推進している。
- ✓ 能登半島地震では、大型SAR衛星「だいち2号」が撮像したデータが、被災地の状況把握に活用された。
- 準天頂衛星の7機体制から11機体制に向け、検討・開発を進める必要がある。
- 国内スタートアップ等が提供する衛星データを、関係府省で積極調達・利用する方針。

### (3) 宇宙産業の構造変革

- ✓ 2040年の世界の宇宙市場は1兆ドル超の市場規模に成長するとの予測も。世界的に宇宙産業の成長が見込まれる。
- 「宇宙戦略基金」により、速やかに総額1兆円規模の支援を目指し、民間企業による技術開発への支援を強化・加速する必要がある。

### (4) 月以遠の深宇宙を含めた宇宙探査活動の活発化

- ✓ 世界の潮流として、宇宙科学・探査ミッションは大規模化。民間事業者も参画し、国際競争が激化。
- 有人と圧ローバの開発などの取組を加速し、アルテミス計画に貢献し、2020年代後半の日本人宇宙飛行士の月面着陸を目指す。
- 2030年以降のポストISSに向け、技術開発への支援や、関係国等との調整を加速する必要がある。

### (5) 宇宙へのアクセスの必要性の増大

- ✓ 安全保障や経済・社会活動における宇宙システムの重要性が高まる中、宇宙へのアクセスの必要性が増大。
- H3ロケットをはじめ、基幹ロケットによる打上げ能力の高度化や、民間企業によるロケット開発支援を加速し、2030年代前半までに、官民で年間30件程度の打上げ能力の確保を目指す。
- 技術革新に伴い登場した新たな宇宙輸送形態を実現するべく、宇宙活動法の改正を視野に制度の見直しが必要。審査体制も強化。

### (6) 宇宙の安全で持続的な利用を妨げるリスク・脅威の増大

- ✓ 軌道上の混雑化や対衛星破壊実験など、宇宙空間における安全かつ持続的な利用を妨げるリスク・脅威が深刻化。
- 国際的なルール形成や、宇宙デブリ対策の技術開発を進める必要がある。

# 日本のスタートアップ従業員数 2024年の増加率1位は「宇宙産業」

- 日本では近年、約100社の宇宙スタートアップが設立されている。政府による法整備や産業強化政策もふまえ、働く人材は増大傾向にある。宇宙スタートアップの従業員の増加率は全産業の中で第1位。

## 宇宙スタートアップ 従業員数増加率（2024年）

- 宇宙産業のスタートアップ企業の従業員増加率は全産業の中で第1位。

セクター別 従業員数の増加率（上位）



2024年従業員増加率ランキング

企業	カテゴリー	増加数
1 将来宇宙輸送システム株式会社	その他宇宙	+50人
2 株式会社岩谷技研	その他宇宙	+42人
3 株式会社SPACE WALKER	ロケット	+37人
4 インターステラテック/ロジス株式会社	ロケット	+33人
5 Space BD 株式会社	衛星	+24人
6 株式会社 Synspecive	衛星	+23人
7 株式会社アークエッジ・スペース	衛星	+20人
8 株式会社天地人	衛星	+18人
9 Letara 株式会社	衛星	+14人
10 株式会社アクセススペース	衛星	+12人

## 宇宙スタートアップ 設立企業数推移

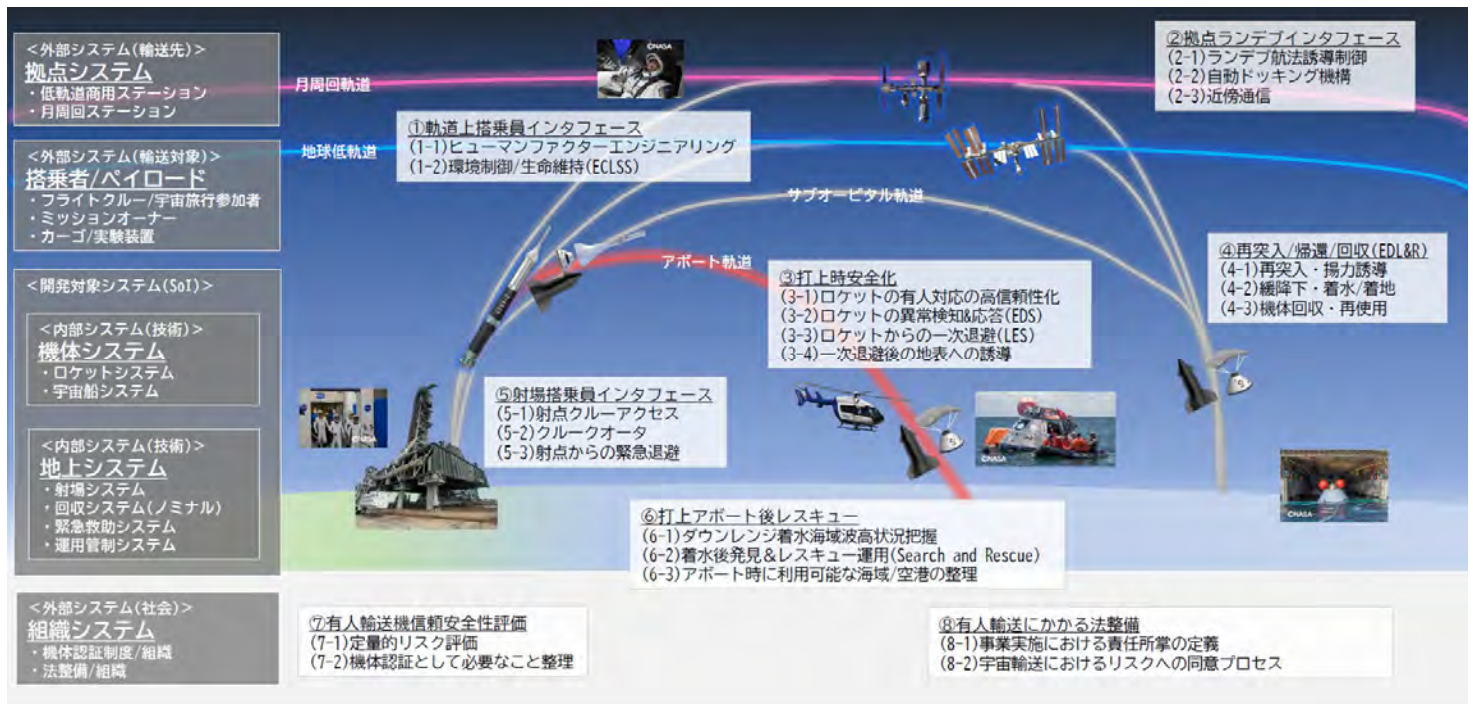
- 2016年の宇宙二法（宇宙活動法と衛星リモセン法）成立以降、宇宙ビジネスに関連する環境が整備されたことにより、スタートアップの参入が進んだ。
- 継続した宇宙産業の競争力強化のため、宇宙戦略基金等の活用が期待されている。

設立年数別企業数



【出典】日本のスタートアップ従業員数、2024年の増加率1位は「宇宙産業」 - UchuBiz (株式会社ケッセル)

# 有人宇宙輸送機



## 1. 法律の目的等

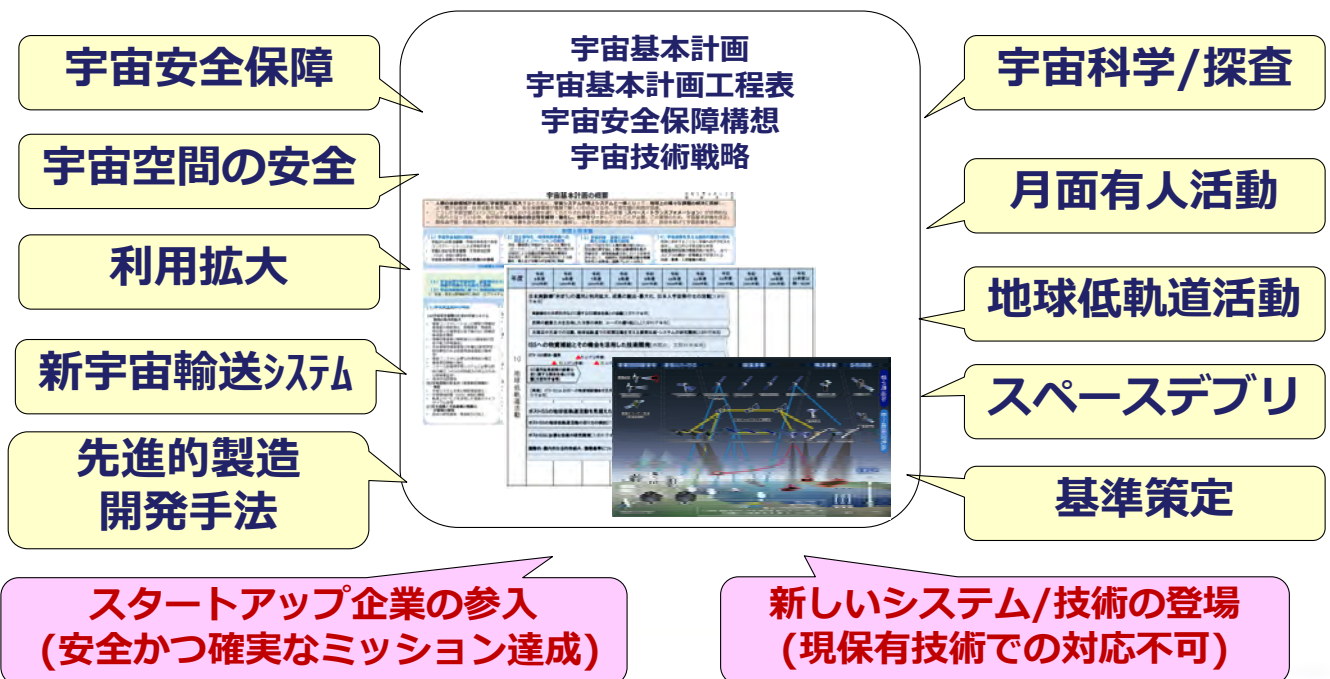
- 宇宙の開発及び利用に関する諸条約の的確かつ円滑な実施（第1条）
  - ・ 宇宙条約、宇宙救助返還協定、宇宙損害責任条約、宇宙物体登録条約の担保法
  - ・ 宇宙条約上、自国の宇宙活動に対する国の許可及び継続的監督が必要（宇宙条約第6条）
- 公共の安全の確保、ロケットや人工衛星の落下損害の被害者の保護（第1条）
  - ・ 打上げ用ロケットや人工衛星の落下、衝突又は爆発による損害発生防止
  - ・ 人の生命、身体又は財産に生じた損害の被害者の保護
- 法律の施行に当たっての配慮（第3条）
  - ・ 国は、法律の施行に当たっては、我が国の関連産業の技術力及び国際競争力の強化を図るよう適切な配慮を行う。

## 2. 法律の概要

人工衛星等の打上げに係る許可制度 (人工衛星を搭載したロケット打上げに係る制度)	人工衛星の管理に係る許可制度 (人工衛星の管理行為に係る制度)	第三者損害賠償制度 (生命・身体・財産に生じた損害の被害者保護)
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国内に所在し、又は日本国籍を有する船舶若しくは航空機に搭載された打上げ施設を用いて人工衛星等の打上げを行う行為を許可制とし、飛行経路周辺の安全確保、宇宙諸条約の的確かつ円滑な実施等について事前審査</li> <li>● 人工衛星の打上げ用ロケットの型式（設計）に関する事前認定</li> <li>● 打上げ施設の安全基準への適合性に関する事前認定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国内等の人工衛星管理設備を用いて人工衛星の管理を行う行為を許可制とし、宇宙諸条約の実施、宇宙空間の有害な汚染の防止、終了措置における着地点周辺の安全確保等について事前審査</li> <li>● 管理計画の遵守、事故時の措置、管理終了の措置について義務</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 人工衛星等の打上げを行う者に対し、ロケット落下等損害に係る「無過失責任」及び「責任集中」を導入</li> <li>● 打上げ実施者は、許可を受けた打上げの前に損害賠償担保措置を講じる義務（ロケット落下等損害賠償責任保険契約及びロケット落下等損害賠償補償契約（特定ロケット落下等損害に係るものに限る。）の締結若しくは供託を行う。）</li> <li>● 政府は、打上げ実施者を相手方として、政府補償に係る契約を締結することができる（＝民間の損害賠償責任保険でカバーできない損害について、3,500億円を上限額として政府が補償）</li> <li>● 人工衛星の管理を行う者に対し、人工衛星落下等損害に係る「無過失責任」を導入</li> </ul>

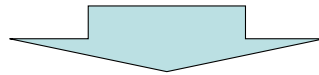
## 私たちを取り巻く環境

私たちの経験・保有技術は、  
スペース・トランスフォーメーションに貢献できるのか？



## 「システム安全」

システムのライフサイクルにおける全段階(フェーズ)を通じて、  
運用の効果、時間及び費用の制約の下で、  
安全に関するすべての面を最適化するために、  
エンジニアリング及びマネジメントの原理、基準及び手法を用いること



安全かつ確実なミッション達成  
に必要なスキル標準

安全・信頼性基準の設定

安全・信頼性確保の  
相談窓口

システムズエンジニアリング  
プロジェクトマネジメント

新たなリスク(ハザード)  
への対応

QCD最適化手法

QCD最適化手法

AI技術活用  
シミュレーション技術

TRLの適切活用

## 宇宙活動法の見直し

### 1. 多様な宇宙活動への対応

- 多様な宇宙輸送形態への対応
  - ✓ 再使用を想定したロケットの打上げ、気球からのロケットの打上げや実証段階のロケットの打上げ等、多様な打上げ形態に対応できる制度の整備
  - ✓ サブオービタル飛行(一定の高度以上に上昇後、地球を周回するに至らず地球上に帰還するような飛行)に対応できる制度の整備\*
  - ✓ 宇宙空間に打ち上げた機器\*の地上帰還(再突入)に対応できる制度の整備 \*創薬や半導体・先端物質製造等に関する微小重力環境実験のサンプルを格納。
  - ✓ 人を乗せたロケットの打上げ等(有人宇宙飛行)に対応できる制度の整備\*
- 人工衛星の多様化への対応
  - ✓ 探査機、月面輸送機、ダミーパイロード等に即した人工衛星管理許可による規制範囲を明確化

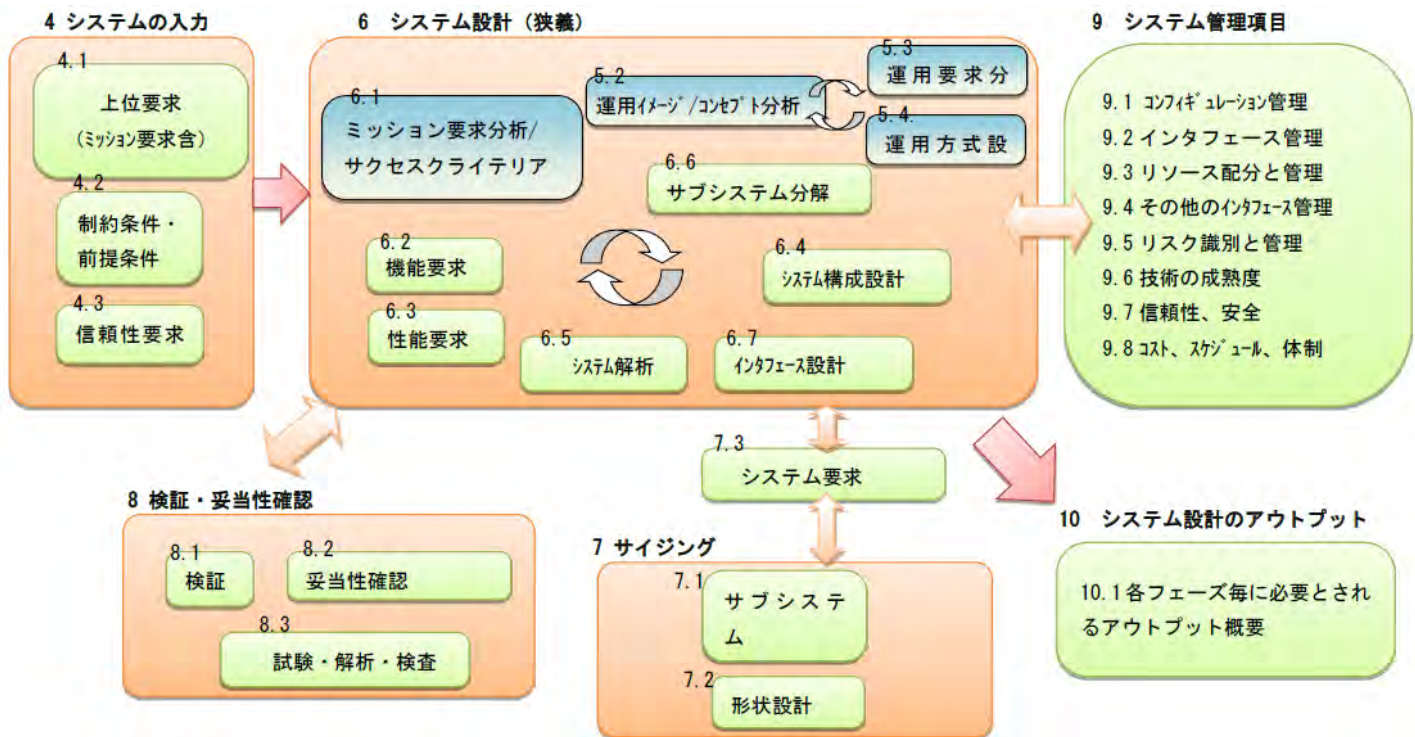
### 2. 宇宙産業の国際競争力強化

- 日本人・日本法人が日本領域外で行う打上げ等の活動に対応できる制度の整備\*
- 複数回の打上げ等の活動を対象とする包括的な許可制度の整備

### 3. 宇宙活動の安全性・信頼性確保

- 宇宙輸送形態の多様化や難燃性の低軌道大型衛星に対応する政府補償制度対象拡大\*
- 第三者損害等の事故等報告制度の整備\*

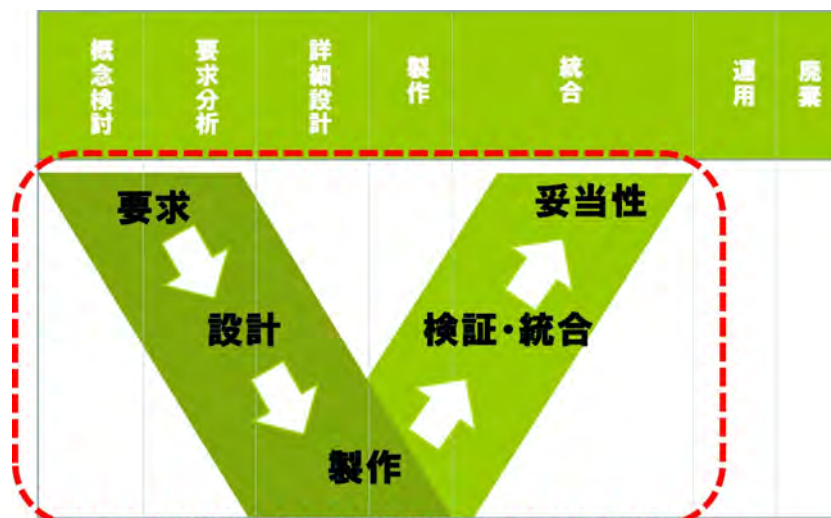
## 特にスタートが重要



## JAXA 「システム設計標準」

## システムデザインのキー

- ◆ ミッションの目的と運用の概念を正しく理解して定義  
これにより、ステークホルダーの期待を正しく捉えることができ、プロジェクトのライフサイクル全体にわたる品質管理と効率的な運用につながる
- ◆ 要求の検証を成功させるために、完全で徹底的な要求のトレーサビリティを確保
- ◆ システム全体を開発する際、変更を加えるときの誤解を避けるために、明確で曖昧さのない要求を構築
- ◆ 設計コンセプトの開発中に行われたすべての決定を技術データとして文書化



TRLは多くの最新技術を統合したプロジェクトを成功させるべく、NASAで生まれた指標

- TRL 1: 基本原理 (コンセプト)
- TRL 2: 技術的原理の確認
- TRL 3: 概念実証 (PoC)
- TRL 4: 実験室レベルの技術検証
- TRL 5: 類似環境における技術検証
- TRL 6: 類似環境における技術の実証
- TRL 7: 運用環境におけるシステムプロトタイプの実証
- TRL 8: システム完成
- TRL 9: 運用環境におけるシステム実証

## 死の谷とは

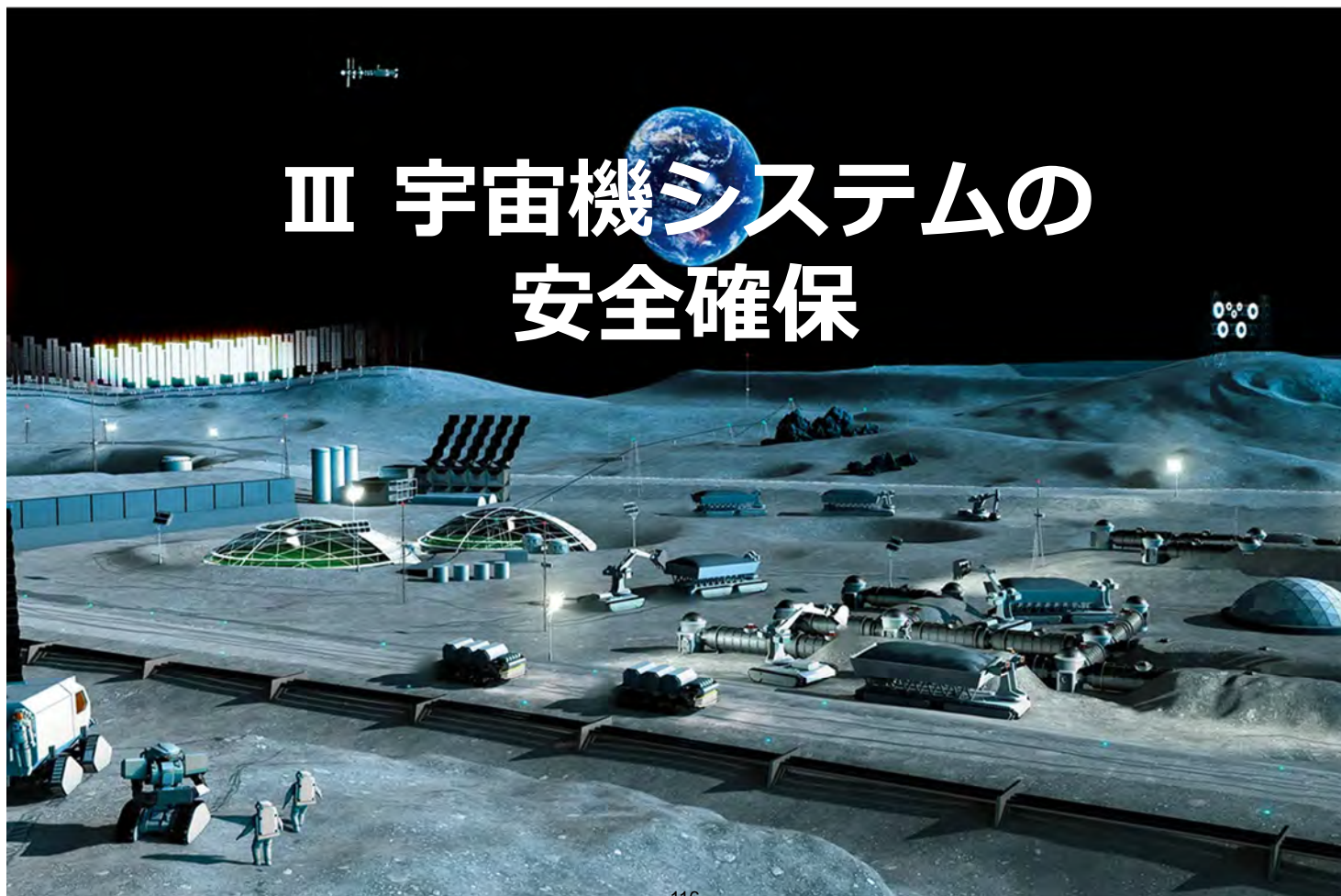
研究という起点から見ていくと、実験室で上手くいったものが、なかなか次のステージに進めず、予算も途絶えてしまうケースが多い！

このTRL4からTRL6が「死の谷」と呼ばれるのも、急に問題の性質が変わるから。

宇宙分野では、特に「類似環境」というのがネック。宇宙機システムのおかれる環境が想定できており、その環境を再現出来る必要がある。

技術の初期「ユースケース」や「用途」を見つけることが重要。

## Ⅲ 宇宙機システムの安全確保



# II-1. 宇宙機システムの 安全確保

## 「国際宇宙ステーション」

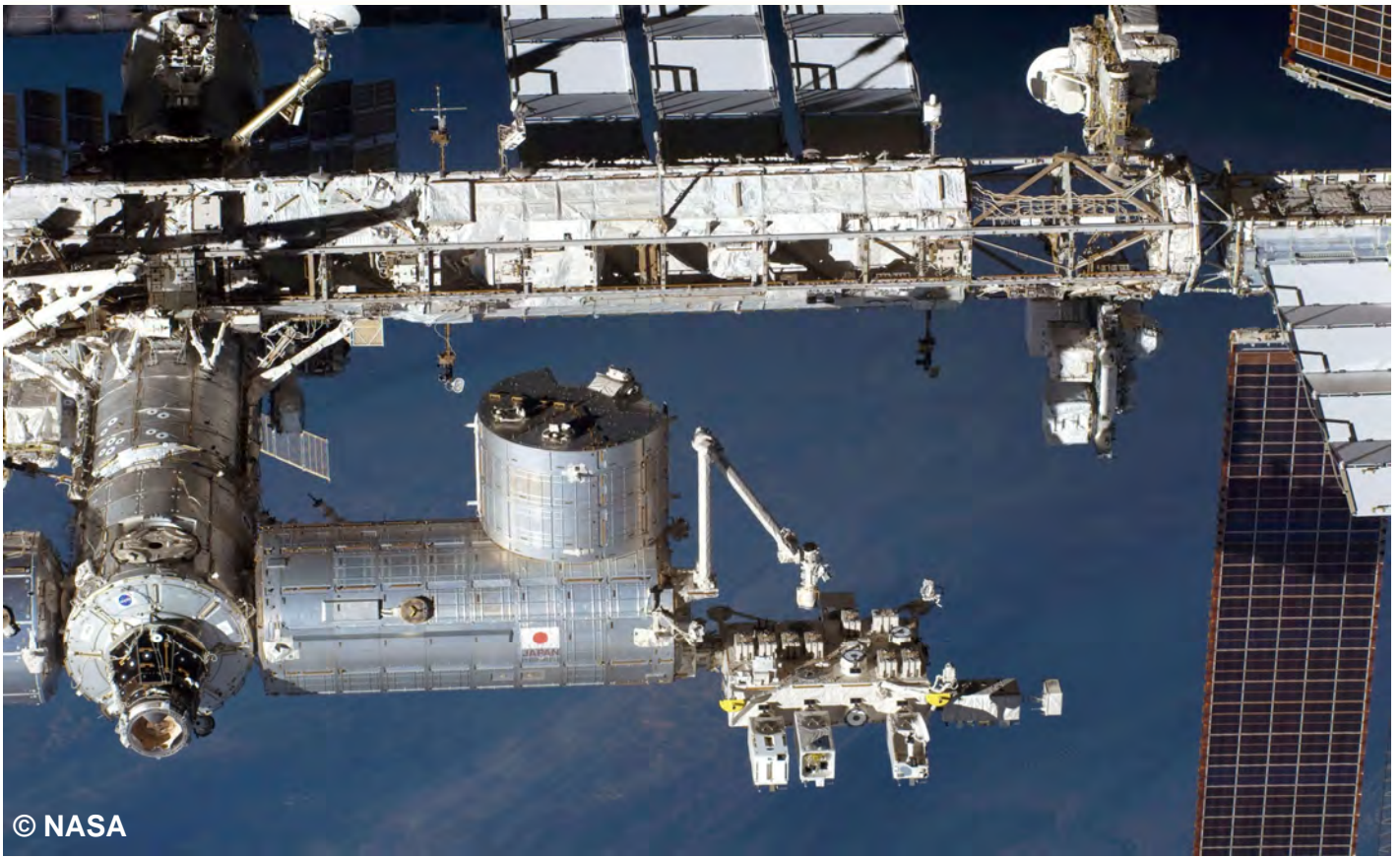


### ISS (International Space Station)



© NASA

# きぼう (Japanese Experiment Module)



© NASA

119

© JAMSS All Rights Reserved.

# EVA (Extravehicular Activity)



© NASA

S127E009372

120

© JAMSS All Rights Reserved.



© JAXA

121

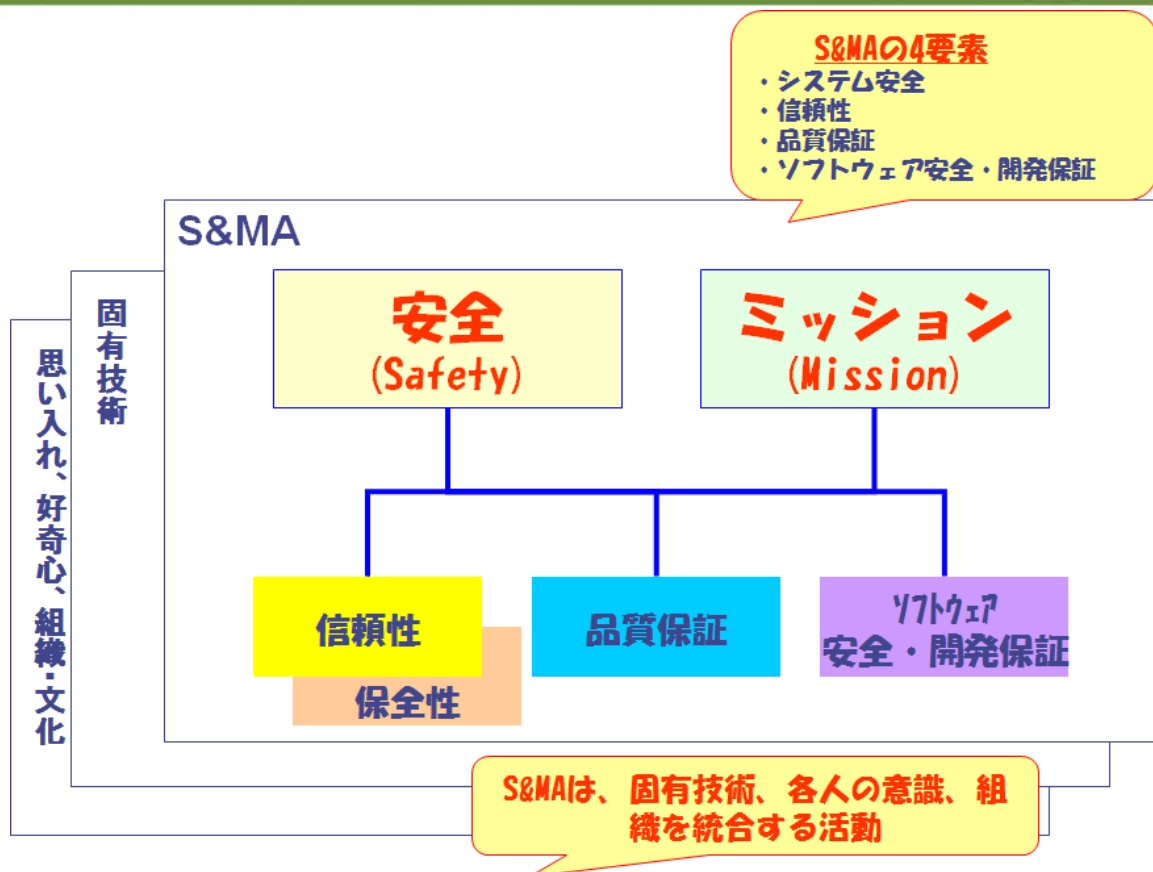
© JAMSS All Rights Reserved.

## 宇宙機システムの事故/不具合の未然防止

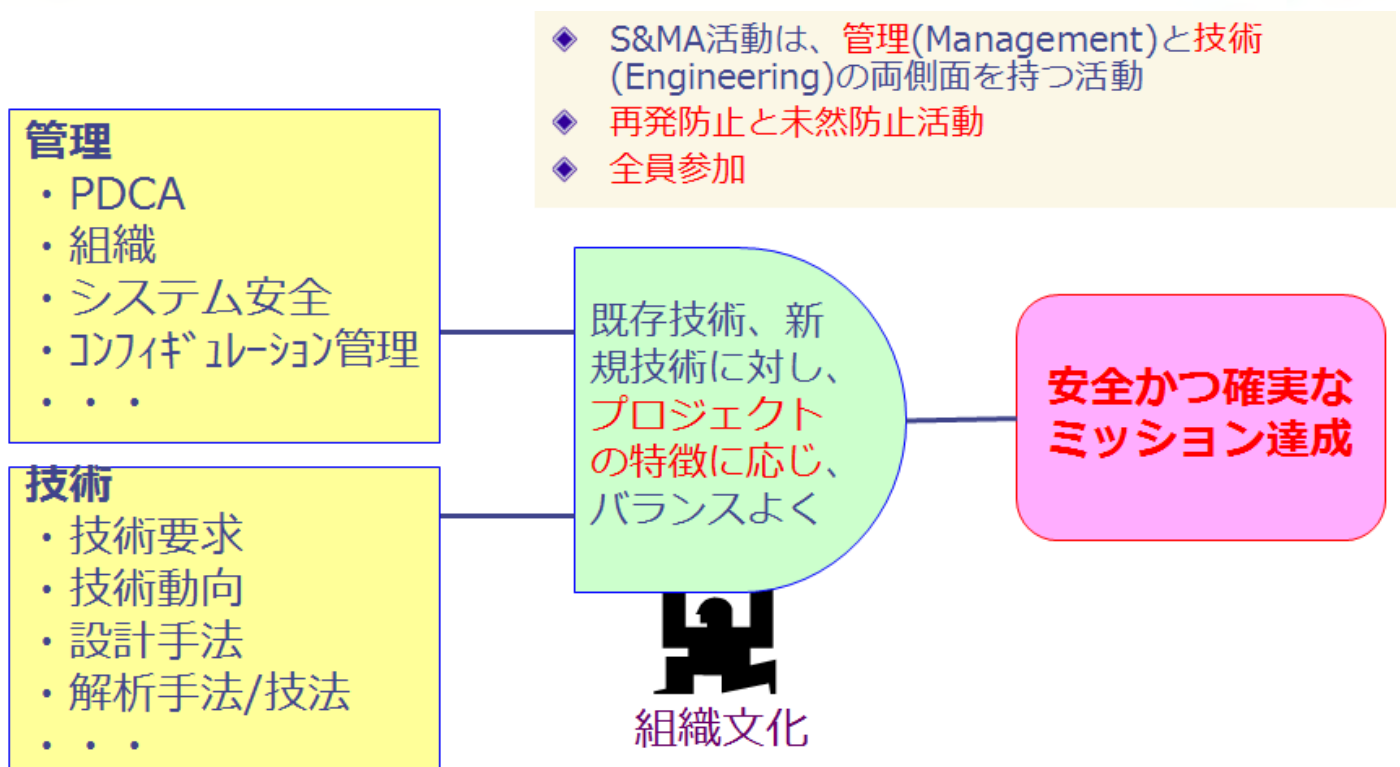
### S&MA : Safety and Mission Assurance 「安全及びミッション保証」

- ◆ プログラム或いはプロジェクトの所期の目的を安全に達成させるための、計画、開発、運用、利用、廃棄までのライフサイクル全段階を通じた活動
  - ◆ 安全、信頼性、品質が密接に関連した活動
- ◆ S&MA活動は、プログラム或いはプロジェクトに何らかの形で関与する者全員が実施
  - ◆ 既存の知恵(専門技術等)を速やかに網羅的に取り込む技術とマネジメント
  - ◆ システム設計の初期段階から対応(上流管理)

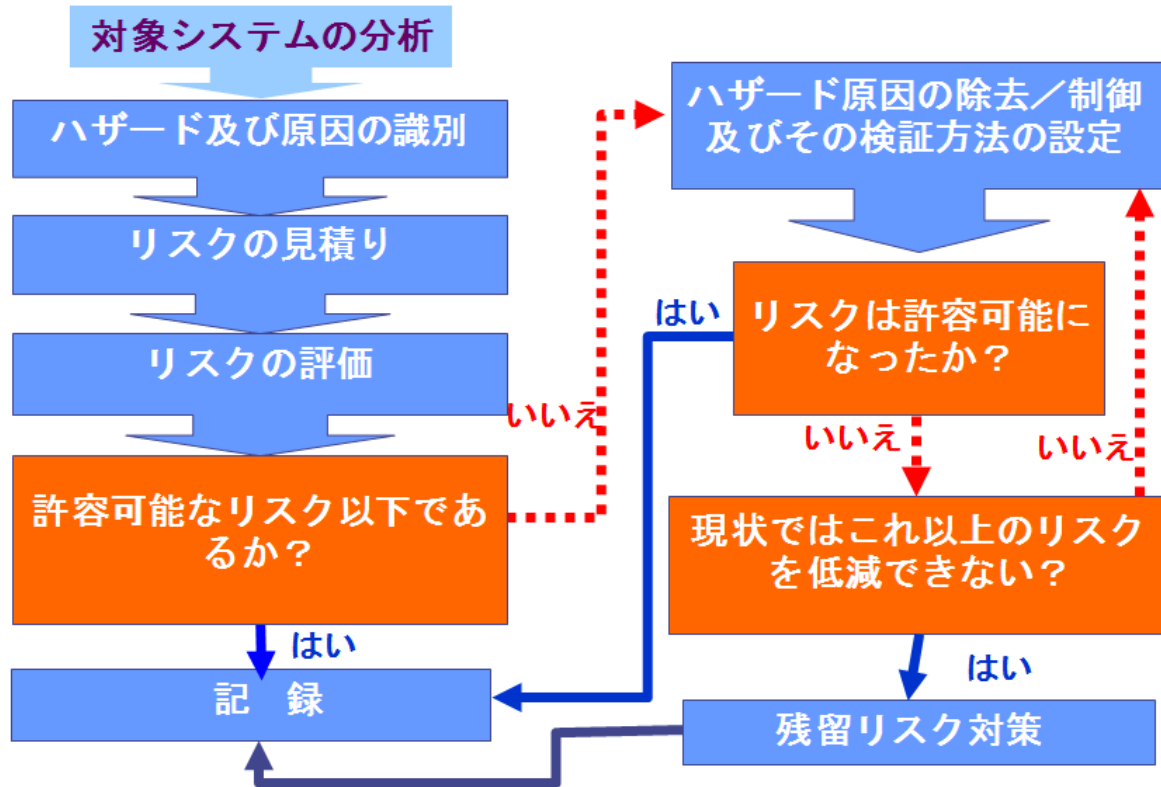
設計/製造の後戻りを防ぐ(フロントローディング)  
事故/不具合の未然防止  
安全かつ確実なミッションの達成



## S&MA活動は管理と技術の両側面を持つ



### ③ 強固なPDCAサイクルの構築



## System Safety (システム安全) 【概要】

### MIL-STD-882E SYSTEM SAFETY PROGRAM REQUIREMENTS

**System Safety:** The application of *engineering* and *management* principles, criteria, and techniques to achieve acceptable risk within the constraints of operational effectiveness and suitability, time, and cost throughout all phases of the system life-cycle.

### ISO 14620-1 Space Systems –Safety requirements Part 1

**System Safety:** the application of *engineering* and *management* principles, criteria, and techniques to optimize all aspects of safety within the constraints of operational effectiveness, time, and cost throughout all phases of the system life cycle

**「システム安全」**：システムのライフサイクルにおける全段階(フェーズ)を通じて、運用の効果、時間及び費用の制約の下で、安全に関するすべての面を最適化するために、エンジニアリング及びマネジメントの原理、基準及び手法を用いること。

「システムの安全」ではなくシステムティックな安全管理の手法を指す固有名詞

- ◆ システム安全活動を実施するための効果的なシステム安全プログラム計画書を作成すること
- ◆ 的確に機能するシステム安全管理組織を確立すること
- ◆ システムのハザードを、全ライフサイクルを通じて識別、管理し、リスクを最小化するとともに許容レベルにあることを開発の各段階で確認すること
- ◆ ハザードを制御するため安全要求を設定するとともに、各ハザードに対して、その原因を把握し、各原因毎に対応策を講じること
- ◆ 安全設計を試験等により検証すること
- ◆ 作業手順書等に必要な安全手順が確実に盛り込まれていること、及び作業がこれらの手順書等に基づいて完全に実施されていることの確認を行うこと
- ◆ システム安全プログラム活動の成果を文書化すること
- ◆ 安全データを維持/管理すること

**Management**  
システム安全プログラム管理

+

**Engineering**  
システム安全工学

有人宇宙システムである「きぼう」の安全確保のため、

- 安全対象を明確にし
- 合理的、システムチェックな手法を採用し
- 審査を独立に実施すること

により、搭乗員の死傷を未然防止する安全対策を講じ、リスクを可能な限り小さくする。

### 1. ハザード管理

搭乗員の死傷を未然に防止するために、直接搭乗員に被害を与えるハザード及び安全にかかわるシステムに被害を与えることにより間接的に搭乗員に被害を与えるハザードを設計の早い段階から識別し、常に管理下に置き、設計活動の中でコントロールすることにより安全なシステムの開発をはかる。

### 2. 安全解析の方法

ハザードレポートによる手法を用いて、直接間接搭乗員に被害を与えるハザードを識別し、ハザードの制御、残存ハザードのリスク評価をフェーズ安全審査により行う。

- ① ハザードとその要因の識別
- ② ハザードの除去・制御
- ③ 制御方法の検証
- ④ 残存ハザードのリスク評価

### 3. 独立審査体制

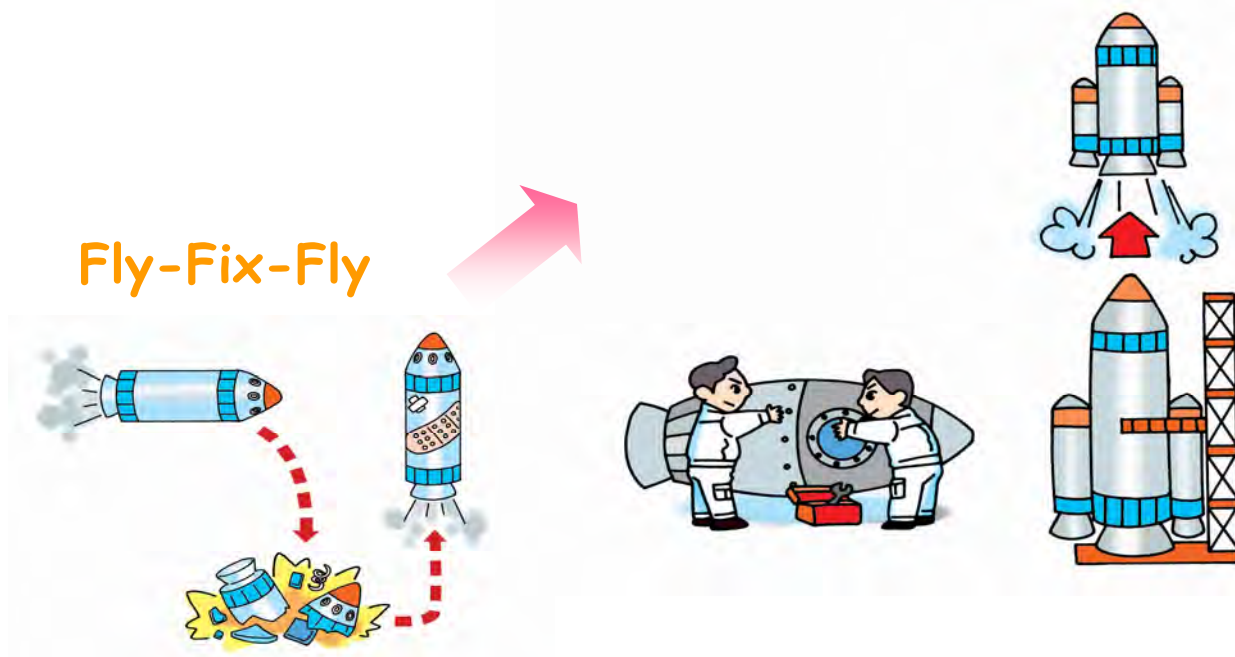
システムを開発する組織から独立した組織 (審査パネル/評価組織) による審査

安全要求への適合

ハザード解析  
(リスクアセスメント)の実施



Analyze - Fix - Fly




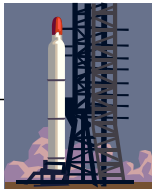
## PPP : Phased Project Planning

宇宙機は、類似なものが地上にない高度なシステムであるとともに、常に新規性が求められる。また、一般に単品生産のため開発コストが高く、軌道上に上がれば修理は不可能である。さらに、開発では、スケジュール、打上十段、地上設備とのインタフェース条件等、厳しい制約条件がある。

このような大規模なシステムを高い品質を保ちながら、確実に効率よく開発するための手法として段階的プロジェクト管理(PPP)が用いられる。

PPPは、開発全体をいくつかの段階(フェーズ)に区分し、各フェーズで実施すべき作業内容を明確に定義し、各フェーズごとにその成果を評価し、次フェーズへの移行可否を判断しながら進める。

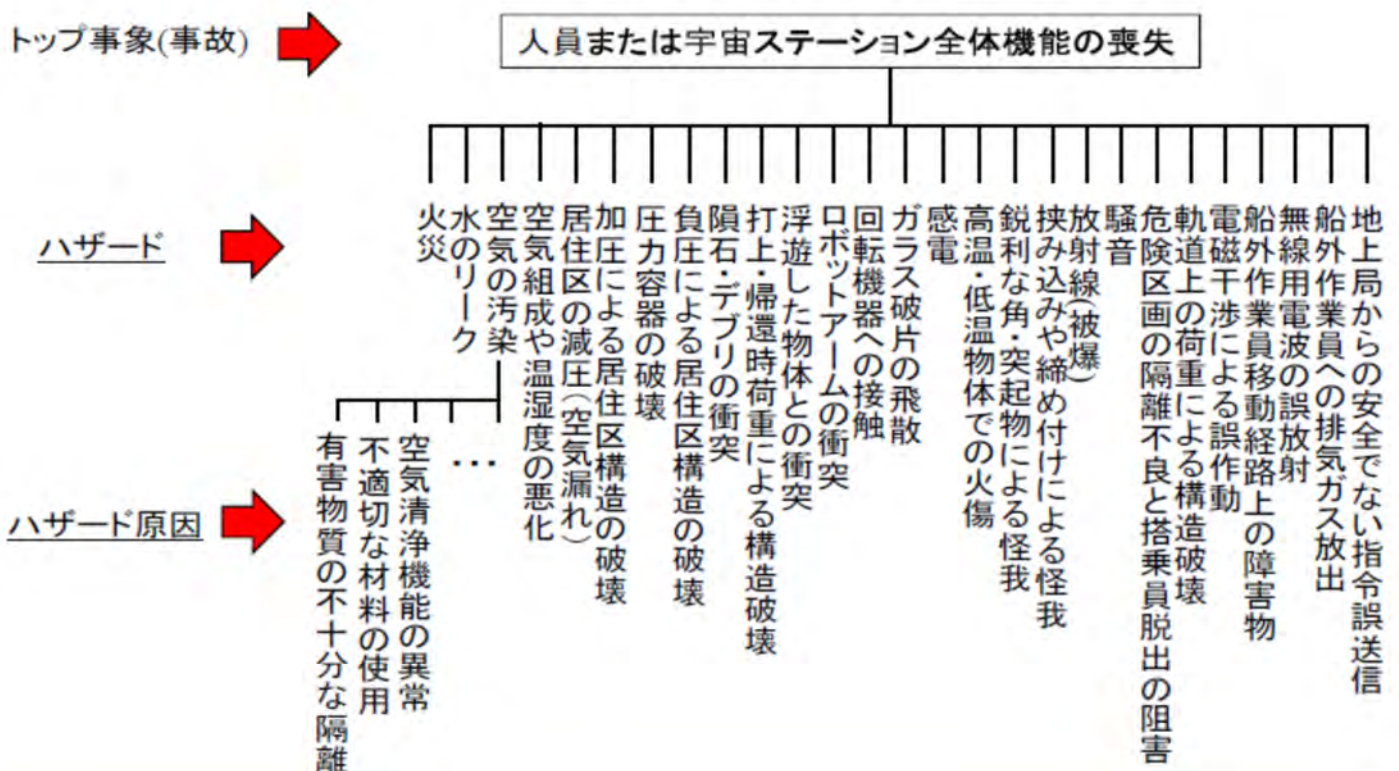
- PPPは、NASAがアポロ計画を予定の期間内に、かつ安全・確実にミッションを達成させるために開発。JAXAでの宇宙開発も同様の手法
- 開発を段階に区分し、徹底的に確認を採りながら進める
- すべてを文書にし、業務が見えるようにする
- 第三者の評価を必須とする

段階	概念/予備設計	基本設計	詳細設計	製造・試験	運用
設計審査	▽ 概念/ 予備設計審査	▽ 基本設計審査	▽ 詳細設計審査	▽ 認定試験後審査/ 開発完了審査	
<b>安全審査</b>	▽ フェーズ0 安全審査	▽ フェーズI 安全審査	▽ フェーズII 安全審査	▽ フェーズIII 安全審査	
審査主目的	ハザード及びハザード原因の確認 適用する安全要求の確認	ハザード及びハザード原因の確認 ハザード制御方法の確認 検証方法の確認 必要に応じて詳細化された安全要求の確認	ハザード制御方法が設計上実現されていることの確認 検証方法の詳細が設定されていることの確認	検証が完了していることの確認 アクションアイテムがすべてクローズしていることの確認	
主な安全活動	フェーズ0ハザード解析として、ハザードの識別、その原因の識別及びその対応策 安全要求の初期設定及び安全要求設定	フェーズ0ハザード解析結果を見直し、必要に応じて安全要求を詳細化 フェーズIハザード解析として、ハザードの識別、ハザード原因の識別、ハザード制御方法の検討、検証方法の検討 上記解析結果に基づき詳細な安全要求の見直し	フェーズIIハザード解析結果の見直し フェーズIIハザード解析として、ハザードの制御方法の詳細設計への反映、検証方法の詳細検討、必要に応じハードウェア、ソフトウェアの安全確認試験、運用提案及び詳細な安全要求の見直し、安全検証が製造手順書及び試験手順書等に反映されていることの確認	製造及び試験結果のハザード検証との整合性評価/確認 安全検証が、運用に係る作業手順書等に反映されていることの確認 デビエーション/ウェーバの処理状況の確認	

**安全審査**の目的は、識別されたハザードに応じて設定された安全要求、及びそれに対する適合性を確認するとともに、ハザード及びハザード原因の識別、制御、その検証方法、更には、検証結果の妥当性及び除去しきれないリスク（残存リスク）最小化の内容や許容性を評価することである。

- ◆ 安全審査の本質は、安全設計結果をまとめた安全データパッケージを中心に、専門家集団の眼をけていることで、その分野における人智を極めた、その時点の科学・技術に関する知見によっては事故原因となった欠陥を認識することができなかった、いわゆる“State of the Art”によって人事を尽くしたというものになる。
- ◆ そのため、開発各社、JAXA、NASAのそれぞれの眼で安全を確認する。

## 「きぼう」におけるハザード/ハザード原因



## Safety Assessment Reportの構成例

COVER

DOCUMENT RELEASE RECORD  
ABSTRACT AND KEY WORDS  
TABLE OF CONTENTS

1. INTRODUCTION

- 1.1 Purpose
- 1.2 Background
- 1.3 Review Process
- 1.4 Scope

2. SAFETY ANALYSIS METHODOLOGY

- 2.1 Methodology
- 2.2 Safety Requirements

3. SYSTEM OVERVIEW

4. LAUNCH CONFIGURATION

5. OPERATIONS

- 5.1 Ground Operations
- 5.2 Flight Operations
- 5.3 Assembly Operations
- 5.4 On-orbit Operations

6. HAZARD REPORT SUMMARY

- 6.1 Hazard Report Overview

APPENDIXES

- A. ABBREVIATIONS AND ACRONYMS
- B. FLIGHT LAUNCH CONFIGURATION
- C. OPERATIONS
- D. CRITICAL SERVICE
- E. HAZARD REPORTS**
- F. COMPUTER-BASED CONTROL SYSTEM SAFETY ANALYSIS
- G. ACTION ITEM SUMMARY
- H. NONCOMPLIANCE REPORTS
- I. FAULT TREE ANALYSIS (FTA)
- J. SYSTEMS SUPPORT DATA
- K. OPERATIONAL CONTROL MATRIX
- L. SAFETY-RELATED FAILURES AND ACCIDENTS
- M. SAFETY VERIFICATION TRACKING LOG

## System Safety 【記録：ハザードレポート】

Hazard Report Number

Cause 1

1. HAZARD CAUSE DESCRIPTION:

SEVERITY: LIKELIHOOD:

2. CONTROL(S):

Control 1.

Control 2

Control n

3. METHOD FOR VERIFICATION OF CONTROLS:

Verification for Control 1

Verification for Control 2

Verification for Control n

4. SAFETY REQUIREMENT(S):

Document: Paragraph:

Title:

Document: Paragraph:

Title:

ハザード/ハザード原因タイトル

ハザード/ハザード原因の概要

残留リスク

リスク低減策

検証方法

関連安全技術要求

5. MISSION PHASE(S):

Launch Processing:

Launch:

Rendezvous/Docking:

Deployment:

Orbital Assembly & Checkout:

On-Orbit Operation:

On-Orbit Maintenance:

Return/Decommissioning:

6. PROGRAM STAGE(S):

7. DETECTION AND WARNING METHOD(S):

8. CAUSE REMARKS:

9. CIL REFERENCE:

10. POINT OF CONTACT:

Name: Telephone:

# System Safety

## 【安全(技術)要求 例】

### システムに共通的な安全要求

- 故障許容設計及びリスク最小化設計
- 与圧空間に対する要求
- 人間工学からの要求
- 構造設計
- 機構設計
- その他(隕石・デブリ、流体漏洩、感電)

### 【安全設計要求例】

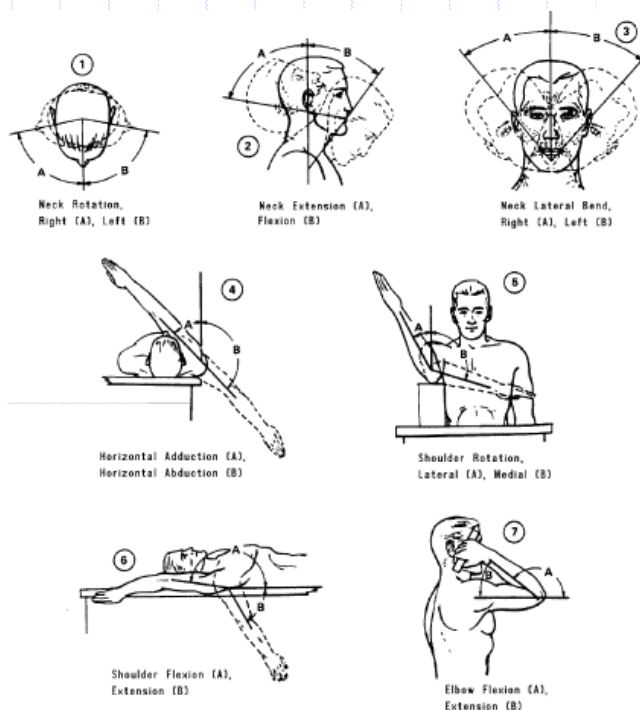
- 構造: 打ち上げ時/軌道上運用時にかかる荷重に対する耐性
- 圧力容器: 破裂に至る前にリークを起こす設計
- 接触温度: -4~+49°C(船内)/-120~+130°C(船外)
- 火災: 自己消化性の材質、発火源の除去
- 危険物質: 冗長性の封入/シール設計
- 電源回路過負荷: 保護回路
- 挟み込み/引っかかりetc...

### 【クルーへの危険通知、避難対策例】

- ハザード検知及び安全化: リアルタイムモニタ
- 警報: 重大なハザード発生時にクルーに警告
- 非常脱出: 3分以内にとりなりのモジュールに非難(火災、減圧等)

# System Safety

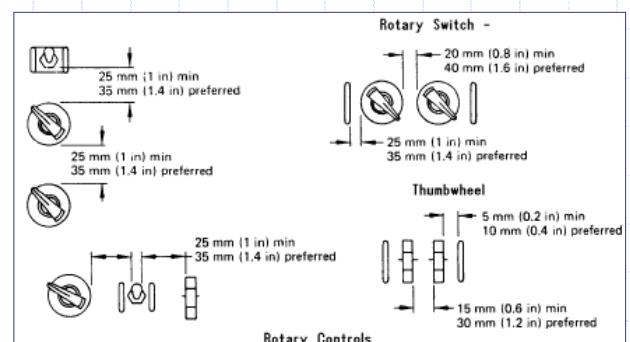
## 【安全(技術)要求 例】



### JOINT MOVEMENT RANGES FOR MALES AND FEMALES

Body Size, Joint Motion, Reach, Posture, Volume, ...

MECHANICAL HAZARD DESIGN



### CONTROL SPACING REQUIREMENTS FOR UNGLOVED OPERATION

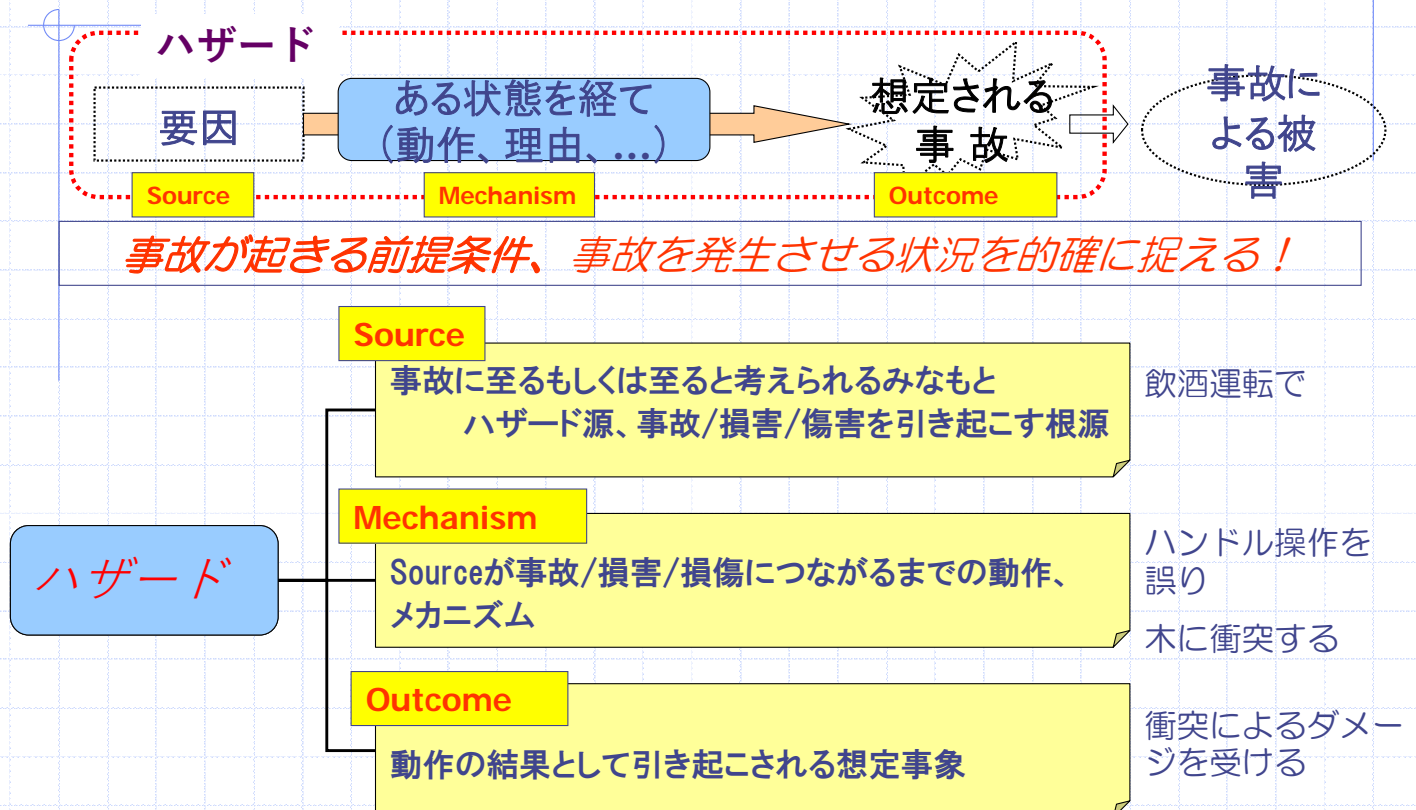
# System Safety

## 【ハザード/ハザード原因識別】

- ◆ ハザードチェックリストを調べる
- ◆ 全てのエネルギー源及びその流れを検討する
- ◆ 他の類似システムの安全検討結果(安全データパッケージ、ハザードレポート…)を調査する
- ◆ 過去の文書/記録をひもとく - 事故記録、ヒヤリハット記録、信頼性解析結果、運用記録など
- ◆ 現在のユーザーや想定するユーザーからのヒアリングを実施する
- ◆ 識別したハザードに対しFTA等の手法を活用し、ハザード及びハザード原因識別結果の網羅性を確認すること
- ◆ チーム活動でのブレインストーミング - 起こりうる問題は何かを検討し、「もし…だったら?」と問いかけることを繰り返す
- ◆ 経験/常識/直感的エンジニアリングセンス

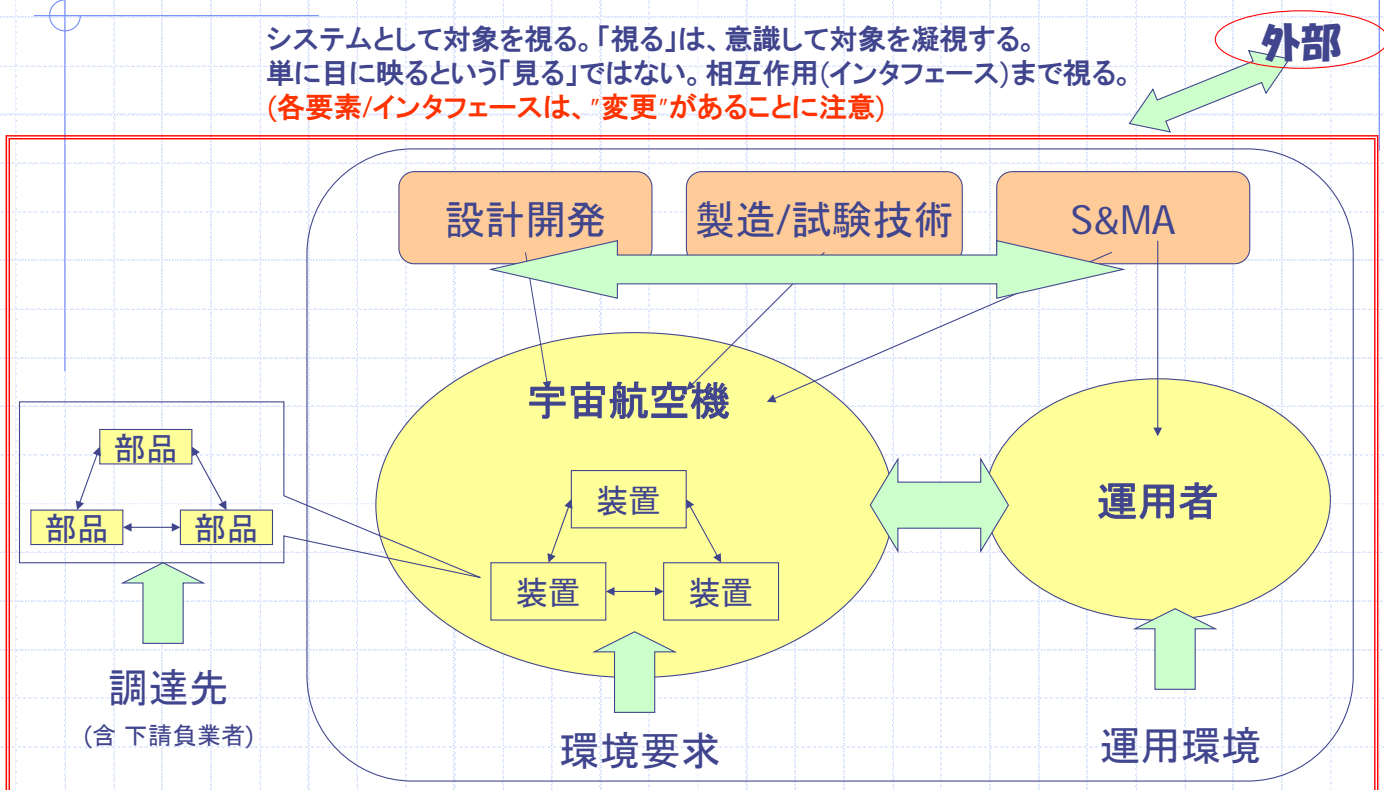
上記の幾つかの組み合わせで実施する

## 解析にあたり 【S-M-O】



# 解析にあたり【システムとして見る】

システムとして対象を視る。「視る」は、意識して対象を凝視する。  
単に目に映るといふ「見る」ではない。相互作用(インタフェース)まで視る。  
(各要素/インタフェースは、「変更」があることに注意)



# System Safety 【リスク評価】

## 「被害の度合い」 分類例

Severity levels

NPG 8715.3 (NASA Safety Manual Chapter 3, System Safety)

- I - **Catastrophic** - death, permanent disabling injury, facility destruction on the ground, loss of crew, major systems, or vehicle during the mission
- II - **Critical** - severe injury/occupational illness, major property damage to facilities, systems, equipment, or flight hardware
- III - **Moderate** - minor injury/occupational illness, minor property damage to facilities, systems, equipment, or flight hardware
- IV - **Negligible** - minor first aid treatment or more than normal wear and tear

# System Safety 【リスク評価】

## 「発生の可能性」 分類例

Probability levels

NPG 8715.3 (NASA Safety Manual Chapter 3, System Safety)

A - Likely to occur immediately ( $X > 10^{-1}$ )

B - Probably will occur in time ( $10^{-1} \geq X > 10^{-2}$ )

C - May occur in time ( $10^{-2} \geq X > 10^{-3}$ )

D - Unlikely to occur ( $10^{-3} \geq X > 10^{-6}$ )

E - Improbable to occur ( $10^{-6} \geq X$ )

# System Safety 【リスク評価】

## リスクマトリクスを使用した評価

Risk Assessment Code (RAC) Matrix

NPG 8715.3 (NASA Safety Manual Chapter 3, System Safety)

		Probability Level				
		A	B	C	D	E
Severity Level	I	1	1	2	3	4
	II	1	2	3	4	5
	III	2	3	4	5	6
	IV	3	4	5	6	7

# System Safety

## 【リスク評価】

NPG 8715.3 (NASA Safety Manual Chapter 3, System Safety)

### Define Required Actions - what should we do with various RACs

- **1 Unacceptable**
- **2-3 Undesirable, Accept only with Program Management approval**
- **4 Acceptable with Review**
- **5-7 Acceptable without Review**

# System Safety

## 【安全設計】

「ハザード原因の除去/制御」の方法は以下の優先順位に従って実施する。

### (1) ハザードの除去

ハザード源又はハザードを伴う運用を除去する。

### (2) ハザードの最小化設計

ハザードの発生を防止するために、被害の大きさ(ハザードのレベル)に応じて、原因となる故障要因に対して以下の制御を行うことが要求される

- ①故障許容設計
- ②リスク最小化設計

### (3) 安全装置

設計上除去できない既知のハザードは、安全装置によりハザードの影響を許容レベルまで低減する。

### (4) 警告警報装置

ハザードの発生をタイムリーに検知して、適切な警告警報を発信する。

### (5) 特別な手順

搭乗員の個人用防護装備の着用等を含む、特別な手順を採用する。

# System Safety 【安全設計】

## ◆ 安全設計の基本的な考え方

- 開発と運用においてハザード(事故をもたらす要因が顕在又は潜在する状態)の制御を行うこと

## ◆ 故障許容設計

- カタストロフィックハザード  
2故障許容 (システム/機器の故障及びクルーの誤操作のいかなる組み合わせによっても搭乗員に対する致命傷を引き起こさない設計)
- クリティカルハザード  
1故障許容 (単一のシステム/機器の故障又は誤操作により搭乗員への傷害を引き起こさない設計)

ある機能の喪失が事故に至る場合: **冗長設計**

ある機能の意図しない動作が事故に至る場合: **インヒビット設計**

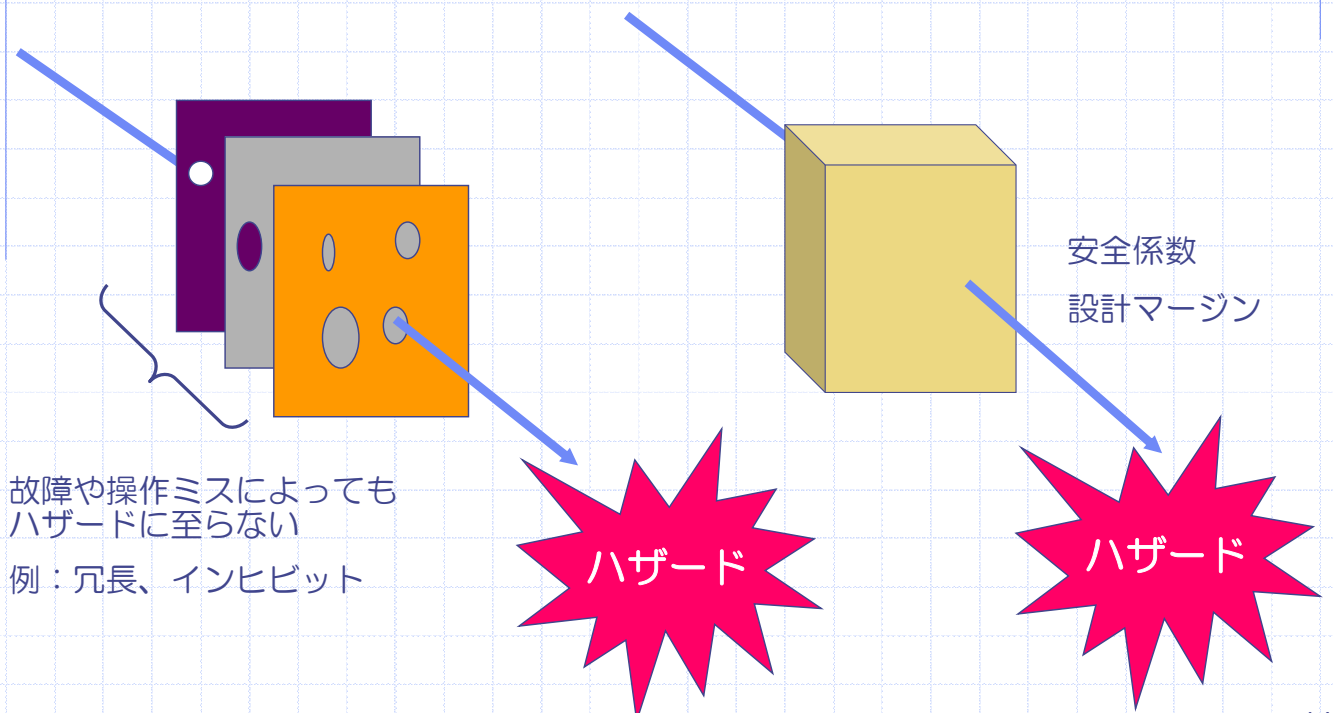
## ◆ リスク最小化設計

- 故障許容設計が適切でない場合 (構造, 圧力容器, 材料等)には、最悪の環境条件を考慮した十分な設計マージン、適切な材料選定により安全を確保

# System Safety 【安全設計】

故障許容

リスク最小化



# System Safety 【安全設計】

**故障許容設計**: 故障や人的過誤があってもハザードが事故に至らない設計

ケース	常に動作しないと事故に至る場合	意図しない時動作すると事故に至る場合
被害の度合い カテゴリー	3重冗長	2故障許容設計
カテゴリー	2重冗長	1故障許容設計

カテゴリー	設計例
カテゴリー	<p>凍結防止ヒータ</p>
カテゴリー	<p>火工品発火装置</p>

# System Safety 【安全設計】

## リスク最小化設計

リスク最小化設計が認められ得る部位の例:

- ✓ 構造
- ✓ 圧力容器・配管

リスク最小化設計を認めるために必要な検証項目(参考例)

- ✓ システム構造解析
- ✓ 構造モデル(NASTRAN等)のフライト品特性との合わせ込み
- ✓ 破壊管理(壊れても大丈夫な設計。壊さない設計。)
- ✓ 設計の妥当性を確認する認定試験やフライト品の妥当性を確認する受入試験の条件と結果

通常、リスク最小化設計のアプローチでは上記のような多くの検証が必要となる。

# System Safety

## 【安全設計の検証】

### ■ 安全設計（ハザード制御）の検証方法

ハザードの制御が、「意図したとおり働く（機能する）」ことを、以下の何れか或いはその組み合わせによって確認する。

- 検査 (Inspection)
  - ◆ 最終品目(フライト品)を静的に一つ一つ確認
- 解析 (Analysis)
  - ◆ 実物と相関性又は等価性(Similarity)のある数式やコンピュータソフトウェアを用いて確認
- 試験 (Test)
  - ◆ 実物を動的に作動させて合否基準に照らして定量的に確認
- デモンストレーション (Demonstration)
  - ◆ 定量的な確認を伴わない確認

# System Safety

## 【ソフトウェア安全】

### ソフトウェアが関係する安全機能

#### 直接原因となる制御系

機能そのものが危険な事象に影響する機能

ケース1)機能不動作が人を殺す、負傷させる

- ・必要なときに動作しない
- ・動作中に不意に止まる
- ・停止時に想定外の止まり方をする。

ケース2)機能動作が人を殺す、負傷させる

- ・動いてはいけない時に動き出す
- ・停止しなければならぬ時に止まらない
- ・動きだす時に想定外の動きをする

#### 安全監視系

危険な事象を監視・検知し、抑制する機能

# System Safety

## 【ソフトウェア安全】

### CBCS (Computer Based Control System)とは

- ◆ コンピュータ(ハードウェア+ソフトウェア)によるハザード制御を行っているシステム。
- ◆ 具体的な対象範囲は、システム毎に決めていくことになる。
- ◆ 国際宇宙ステーション「きぼう」の例では、CBCSの範囲としてセンサーは含まないが、コンピュータ制御されているアクチュエータは含めている。

### CBCS安全要求とは

- ◆ 国際宇宙ステーションを建造するにあたり、NASAが規定した安全要求の1つ。
- ◆ コンピュータによってハザードを制御するシステムを構築するにあたり、どのようなアーキテクチャで実現するのか、安全設計を行うための要求である。
- ◆ 前提条件は、適切なハザード解析が行われていること、となっている。適用対象は、ハザードに関係する1つの部品やソフトウェアに適用するものではなく、ハザードを制御するシステムやサブシステムとなる。

# System Safety

## 【ソフトウェア安全】

### 基本思想(1) ソフトウェアは故障しない

- ソフトウェアは経年劣化による故障は発生しない  
→ハードウェアの「故障」と異なる概念が必要。
- ソフトウェアの設計・製造時に混入された不具合  
→ 条件を整えば必ず再現する決定論的な原因による故障である  
※注:ソフトウェアが仕様通り動作するか(バグがないか)は、安全性ではなく信頼性。

### 基本思想(2) MWFとMNWF

安全解析の対象を二部分岐法を用いて高い網羅性を実現している。

- MWF(Must Work Function: 作動要求機能)  
→ 安全を確保するため、その機能が動作し続けなければならない機能
- MNWF(Must Not Work Function: 不作動要求機能)  
→ 安全を確保するため、その機能が動作してはいけない機能

### 基本思想(3) MWF/MNWFに対するアーキテクチャ要求

- MWFは、同等の機能をなす複数の手段をもつシステムアーキテクチャ。
- MNWFは、簡単に起動しないよう複数のインヒビットを設置するシステムアーキテクチャ。

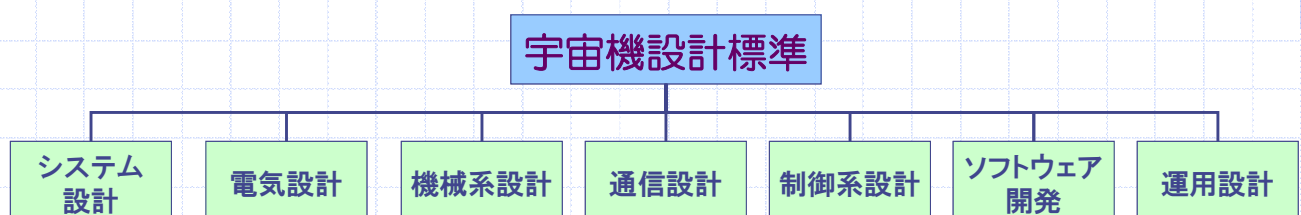
# 「開発」から「運用」への安全情報提供

## 【Operational Control】

- 運用側が、設計・開発段階から設計審査会・安全審査会に参加し、評価・提言活動を実施している
- 「ハザード制御=リスク低減策」において、運用によるリスク低減策を識別し、運用フェーズでの実現性・妥当性の観点から評価を実施している
- ハザードレポート上のハザード制御欄に、【Operational Control】を識別し、リストとしてまとめ、運用に向けての反映先を管理している
  - 運用規則
  - 運用手順書
  - 宇宙飛行士/管制要員の訓練
- 運用規則・運用手順書等は、リスク低減策が適切に反映されたことを、安全担当により評価される
- 運用時の各種変更、不具合対策等については、ハザード解析へのフィードバックを行っている

# 宇宙機（人工衛星・探査機）設計標準

## 先人の経験、有識者の知恵の有効活用



過去の経験や研究成果を基礎にして有識者の知見を結集したもので、類似不具合の発生防止、データ取得の二重投資回避が可能



宇宙機を開発するに当たり、「現時点で最も合理的な技術情報」

### ◆適切な利用

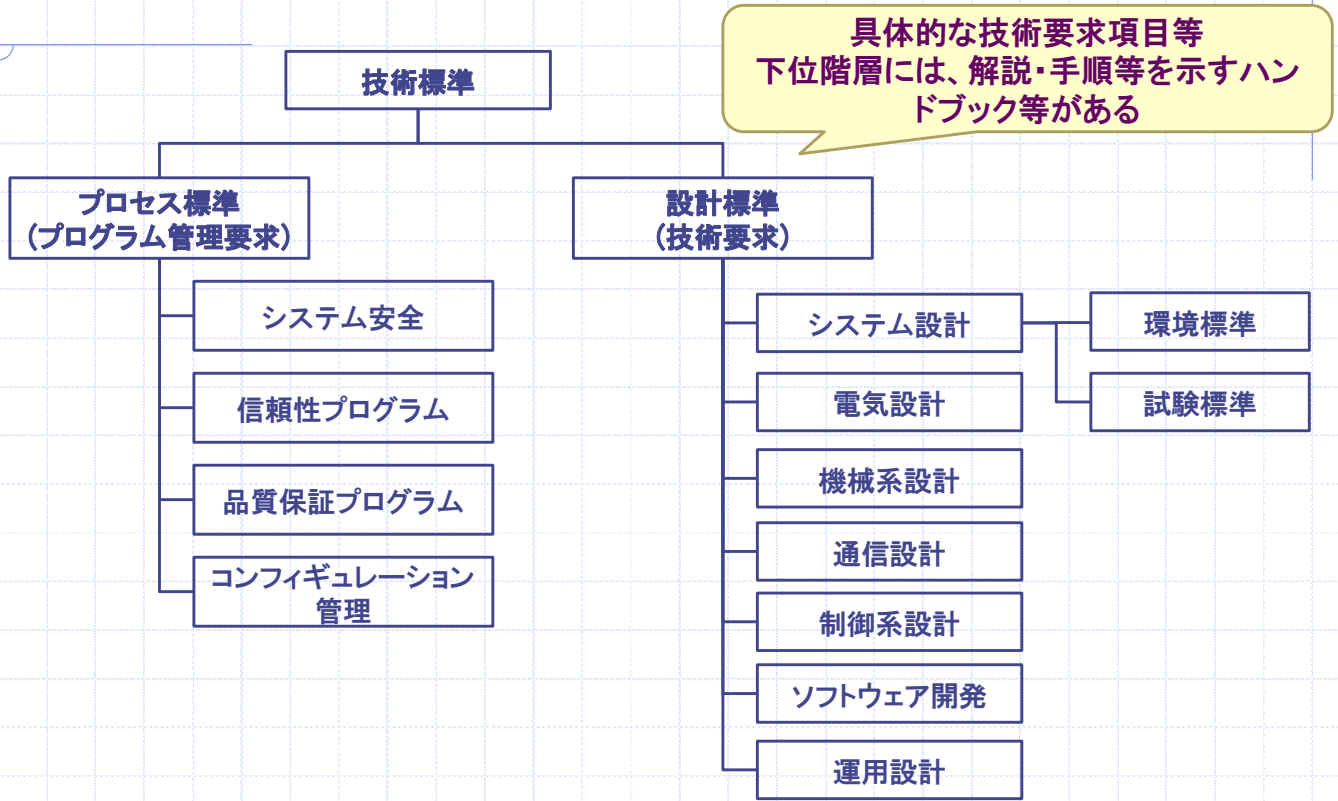
- 背景と限界を含めて把握・理解
- プロジェクト毎の開発条件に合わせ
- 最も適した形で活用

### ◆次のプロジェクトへつなげる

- プロジェクトでの経験、成果は設計標準にフィードバック

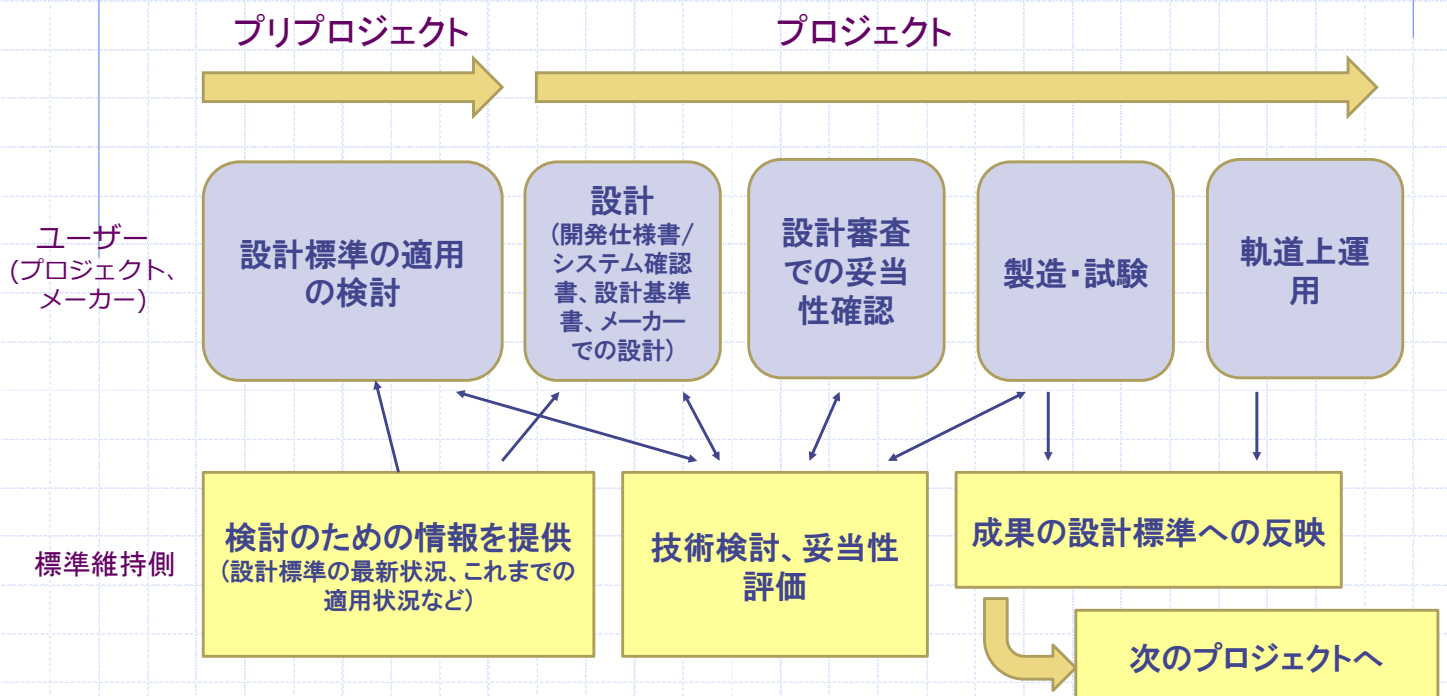
### ◆国際標準との整合・提案

# 宇宙機設計標準の構成



# 宇宙機設計標準の適用

## プロジェクトのライフサイクルにおける設計標準との関わり





# 1. 新型宇宙ステーション補給機 (HTV-X) の概要

## ミッションの概要 (国際宇宙ステーション (ISS) への物資補給)

HTV-Xは、2009～2020年において全9機の物資補給を完了した「このとり」の技術を活かし、輸送能力・運用性を向上させた新たな宇宙船である。

ISSへの輸送能力・運用性を向上し、運用コストを低減

### ■ 輸送能力の増強



### ■ サービスの向上・改善

- ・カーゴ搭載時期の柔軟性向上・カーゴへの電源供給
- ・レイトアクセス (打上げ間近の荷物搭載) の提供等

将来の宇宙技術・宇宙システムへの波及性・発展性を確保

### ■ ISSへの物資補給機会を活用した技術実証

例: 宇宙機器の搭載・実証、自動ドッキング技術実証

### ■ 将来の様々なミッションに活用可能なシステムを獲得

例: 月周回有人拠点 (Gateway) への物資補給等

### 曝露カーゴ搭載部

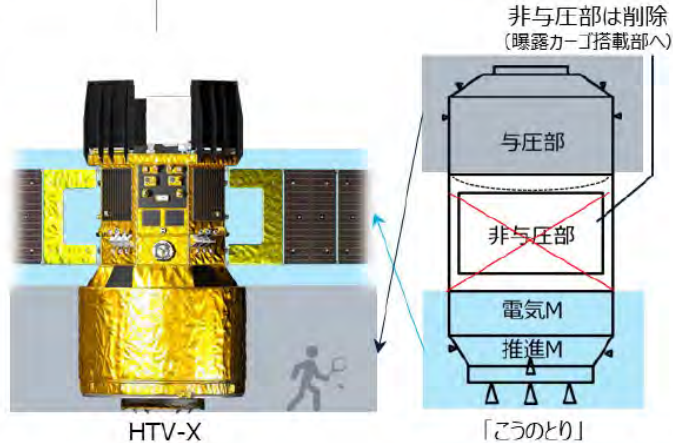
船外実験装置等を搭載するエリア。  
HTVよりも大きな装置を搭載できる。

### サービスモジュール (SM)

航法・誘導制御、通信・電力・推進系等、  
衛星バス機能を集約したモジュール。  
将来はモジュール単体で使用可能。

### 与圧モジュール (PM)

与圧補給物資を搭載するモジュール。  
HTV与圧部を流用しつつ、搭載能力や  
サービスを向上。



宇宙開発利用部会 (第99回) 資料より抜粋

# 1. 新型宇宙ステーション補給機 (HTV-X) の概要

## HTV-Xシステムの主要概要・特徴

通信アンテナ・GPSアンテナ・相対航法センサなど

与圧カーゴ  
生活物資・実験機器など

遮熱壁  
曝露カーゴの熱環境を和らげる

曝露カーゴ  
ISSの船外で使用する実験機器など

太陽電池パドル  
内部機器の駆動に必要な  
電力を発電

スラスタ  
軌道の変更や姿勢制御を行う

共通結合機構  
ISSと結合する

燃料タンク  
スラスタの噴射に使用

### HTV-X地上システム

- ・運用管制システム (HTV-X OCS) と再突入安全監視設備 (ROE) から構成され、HTV-X OCSでは、ISS離脱後の技術実証フェーズで地上局との直接通信を行う。
- ・運用管制室を刷新。

### HTV-X与圧モジュール

- ・HTV与圧部構造設計の流用
- ・環境制御系・電力通信制御系は刷新
- ・カーゴ用給電機能等の追加
- ・ロケット/F用のPAFアダプタ追加

### モジュール間インタフェース

- ・熱、機械、電氣的にシンプルなI/F
- ・SM下部に推進系を集約し、モジュール間を跨ぐ配管や継手を排除
- ・将来、SM/PMを単独で使用・発展可能

### HTV-Xサービスモジュール

- ・HTVや衛星で実績のある技術の活用 (新規搭載の太陽電池パドル、2次電池、計算機、ヒートパイプ等も実績あり)
- ・大型の曝露カーゴや (ISS離脱後の) 実験装置が搭載可能
- ・展開式・キャント型パドル採用 (HTV 2kW → HTV-X 3kW (①周回平均)、β角変化に対応)
- ・把持、ISS係留中に2次電池を充電 (1次電池を不要とする)
- ・(MPU枯渇・置換に伴い) 航法誘導制御系とデータ処理系の計算機統合
- ・メインエンジンを削除し、同一3系の推進系
- ・将来ミッションや技術実証ミッションを考慮して推奨増量

### 射場作業・軌道上運用性の向上

- ・射場での機器等へのアクセス性 (点検や取り外し等) が向上
- ・モジュール搬入後からの射場作業短縮 (HTV 5か月 → HTV-X 2.5か月)
- ・レイトアクセス能力が向上 (HTV 80時間前 → HTV-X 24時間前)
- ・ロケット組立棟から射点への移動後の機体セットアップ作業短縮 (HTVでは14時間 → HTV-Xでは7時間)
- ・太陽指向、地球指向等、自在な飛行能力を持つ
- ・システムを簡略化したことで軌道制御や異常時対応等の運用簡略化
- ・ISS離脱後の技術実証期間では地上局 (JAXA GN局) と通信



### ISS搭載システム

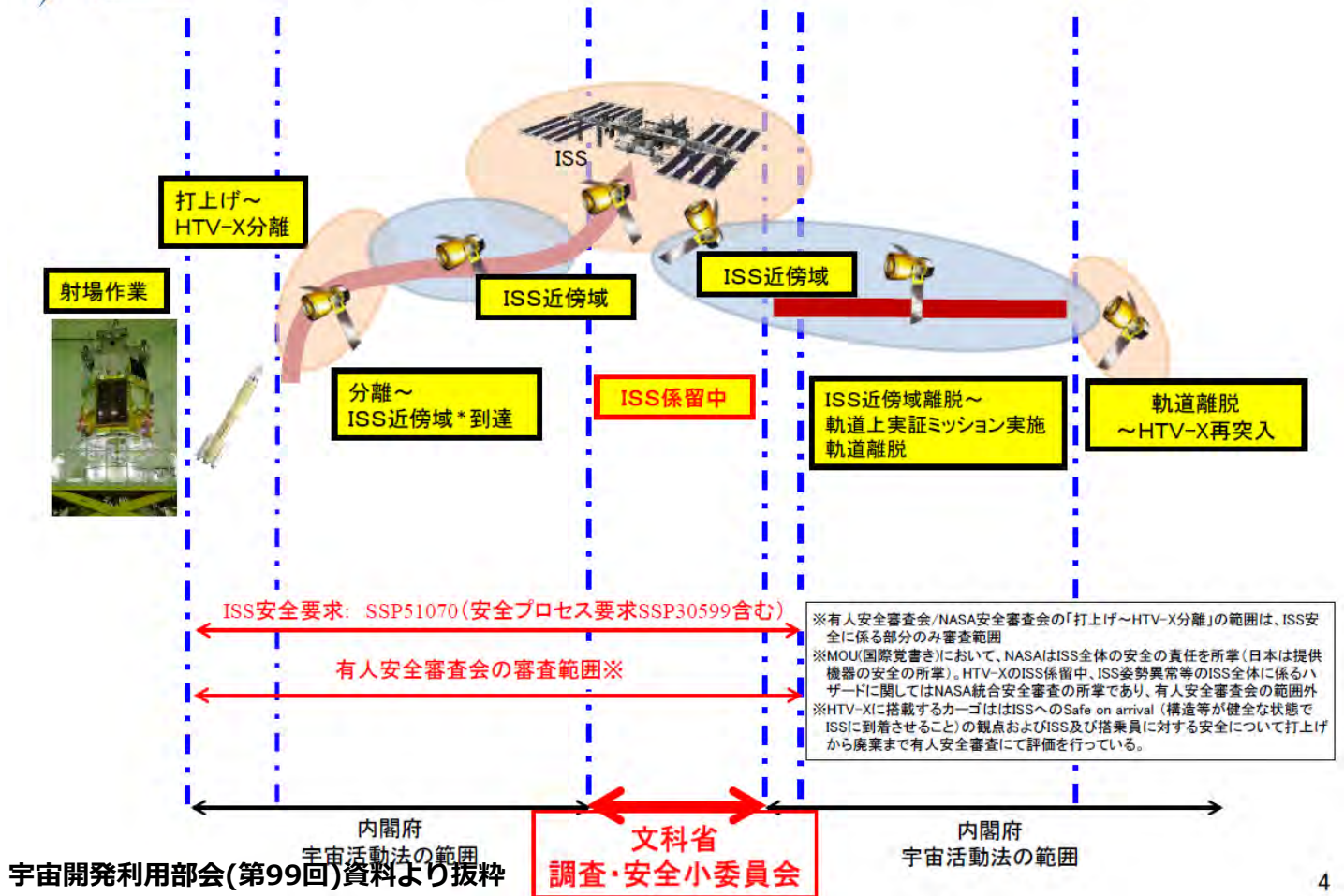
- ・ISS近傍においてHTV-XがISSとの間で通信を行うためのシステム (PROX) 及びISSに設置されているレーザーダリフレクタはHTVの運用で使用されているものを流用

### H3ロケットシステム (HTV-X対応開発)

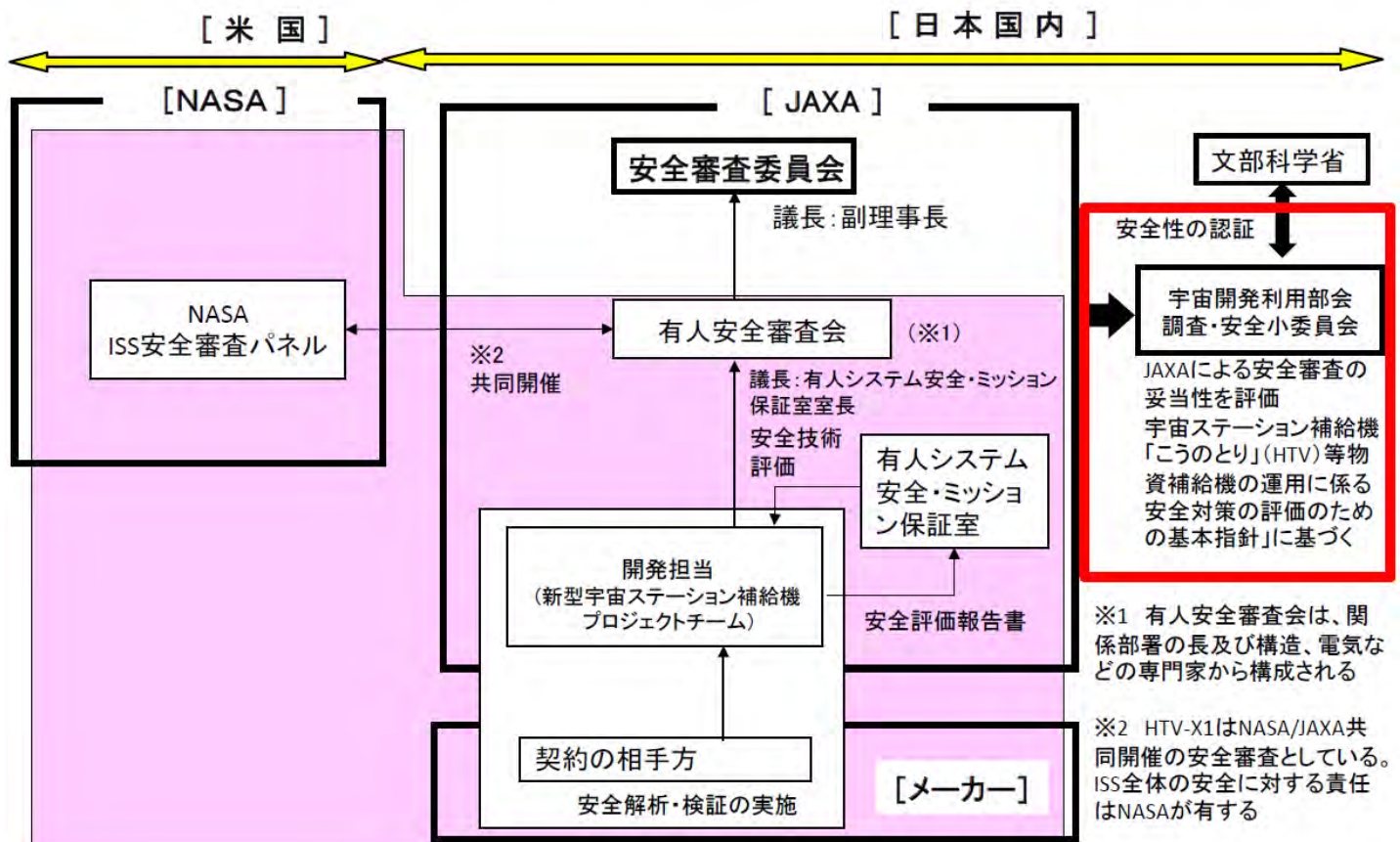
- ・与圧Mと/Fするためのφ4.4m ベイロード結合部 (PAF) を開発
- ・レイトアクセスのためのアクセスドアを有するフェアリングを開発
- ・H3-24W形態により打上げ

宇宙開発利用部会 (第99回) 資料より抜粋

## 1.2 適用指針、審査範囲および審査体制 (2/3)



## 1.2 適用指針、審査範囲および審査体制 (3/3)



#	ハザード(※)	制御方法	検証結果	飛行中	係留中
1	火災 (HTVX-0001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な材料選定</li> <li>適切な熱設計(温度モニタによる電力遮断)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用材料リストの承認</li> <li>解析及び機能試験の実施</li> </ul>	-	○
2	汚染(オフガス等) (HTVX-0002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>適切な材料選定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用材料リストの承認</li> <li>モジュールレベルのオフガス計測の実施</li> </ul>	-	○
	空気循環停止による 空気汚染 (HTVX-0002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>キャビンファンによる適切な空気循環</li> <li>キャビンファン異常時のアラートおよびクルー退避</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>キャビンファンの機能試験の実施</li> <li>キャビンファン回転数異常時のアラート発生に関わる機能試験の実施</li> </ul>	-	○
3	推葉漏洩による汚染 (HTVX-0003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>推葉漏洩に対し3重封入</li> <li>運用中にリークチェックを行う</li> <li>ヒータ制御による推葉凍結防止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3重封入に関し、図面確認及び検査</li> <li>推進系機能試験および漏洩試験の実施</li> <li>推進系バルブ動作及び注排弁・スラスト弁リークチェックを実施</li> <li>リークチェックの手順への反映</li> <li>ヒータの機能試験の実施</li> </ul>	-	○
4	空気漏洩による与圧 モジュールの減圧 (HTVX-0004)	<ul style="list-style-type: none"> <li>リークパスに対して2重封入</li> <li>排気ラインにはシリーズでバルブを設置</li> <li>3つのインヒビットによりバルブ誤動作防止</li> <li>万が一漏洩したとしても、搭乗員が退避する時間を確保できる設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2重封入に関し、図面確認および検査</li> <li>漏洩試験の実施</li> <li>バルブ動作の機能試験</li> <li>クルーが安全に退避できることの解析の実施</li> </ul>	-	○
5	構造破壊 (HTVX-0005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ISS構造設計基準に適合した強度設計</li> <li>適切な材料選定</li> <li>破壊管理実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造解析の実施</li> <li>音響試験、静荷重試験等の実施</li> <li>材料工程リストの承認</li> <li>破壊管理解析の審査、非破壊検査の実施</li> </ul>	○	○

係留中においては、与圧モジュールや太陽電池パネルについて、軌道上荷重や他輸送機の外乱に対する強度評価を実施

(※)カッコ内はハザードレポート番号を示す。  
宇宙開発利用部会(第99回)資料より抜粋

飛行中: 打上げから飛行中に適用されるハザード  
係留中: ISS係留中に適用されるハザード

	ハザード	制御方法	検証結果	飛行中	係留中
6	内圧上昇による構造破壊 (HTVX-0006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>最大設計圧力の設定</li> <li>リリーフ機能によるキャビン圧力制御</li> <li>適切な材料選定</li> <li>破壊管理実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最大設計圧力解析の実施</li> <li>キャビン圧力制御に関わるリリーフ機能試験の実施</li> <li>材料工程リストの承認</li> <li>破壊管理解析の審査、非破壊検査の実施</li> </ul>	○	○
			係留中に熱環境や搭載カーゴであるガスボトルからのリークによる過加圧が発生した場合は、リリーフ機能によって安全化を行う。なお、ハッチが開いている間はISS側に制御を委ねている。		
7	爆発(推進系、バッテリー) (HTVX-0007)	<p>(推進系)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>最大設計圧力の設定および圧力制御デバイス(レギュレータ等)の装備</li> <li>燃料及び酸化剤蒸気の混合防止</li> <li>スラストの強度設計、運用中のリークチェック</li> <li>ヒータ故障検知及び冗長系ヒータへの移行</li> </ul> <p>(バッテリー)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>セル間の空間確保等、熱暴走の防止設計</li> <li>内部短絡、外部短絡、過充電、過放電への対応、適切なヒータ制御</li> </ul>	<p>(推進系)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>最大設計圧力解析の実施、圧力制御デバイスの単体試験、推進系耐圧試験の実施</li> <li>遮断弁・逆止弁の受入試験、推進系機能試験の実施</li> <li>スラスト動作試験、漏洩試験の実施</li> <li>ヒータ制御に関わる機能試験の実施</li> </ul> <p>(バッテリー)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>セル熱暴走試験の実施</li> <li>セルスクリーニング・バッテリー制御系の機能試験の実施</li> </ul>	○	○
			係留中は、燃料及び酸化剤蒸気の混合を防止するための機構を冗長で有し、ガス供給系の遮断弁は常時閉じるようにしている。		
			係留中も、地上から推進系の圧力、バッテリーの電力や温度を常時確認している。		

ハザード	制御方法	検証結果	飛行中	係留中
8 ISSへの衝突 (HTVX-0008) <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-top: 5px;"> <p>(注)HTV-0008は主にISS近傍域での飛行に関するHRであるが、ISSへの接近・離脱は基本指針の適用範囲外</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 計算機は3系統有し、故障時は、自動で冗長系へ移行</li> <li>• 推進系は3系統有し、故障時は、自動で冗長系へ移行</li> <li>• 電源系は2系統有し、十分余裕のあるバッテリー容量を選定。自動で故障判断と故障分離</li> <li>• センサは冗長設計とし、自動で故障判断と該当機器の分離</li> <li>• センサ・ソフトウェアの共通原因故障の発生時は、アポルト実施</li> <li>• 太陽電池パネル(SAP: Solar Array Panel)が展開したことをヒンジステータス、カメラで確認</li> <li>• ISS衝突を防ぐため、2故障発生時はアポルト実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 計算機の故障検知・分離・回復(FDIR: Fault Detection, Isolation and Recovery)に関する機能試験の実施、計算機単体試験、ソフトウェア試験の実施</li> <li>• 推進系のFDIRに関する機能試験の実施、推進系構成機器の単体試験の実施</li> <li>• 電源系 機能試験、FDIR試験、バッテリー容量の解析等の実施</li> <li>• センサの自己診断機能、FDIR機能試験の実施</li> <li>• SAPのモニタ機能の試験の実施</li> <li>• アポルトに関わるモンテカルロ解析の実施</li> </ul>	○	-
9 隕石・スペースデブリ衝突 (HTVX-0009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 与圧モジュールに対し、アルミ製バンパの設置</li> <li>• HTV-X全体の非貫通確率(99.6%、540日間)が要求値内となる設計とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 検査およびバンパの要素試験の実施</li> <li>• 非貫通確率解析の実施</li> </ul>	-	○
10 機器の誤放出による衝突 (HTVX-0010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 適切な構造機構設計</li> <li>• 3つのインヒビットの設置により誤動作防止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 構造解析および環境試験、機能試験の実施</li> <li>• 保持解放機能の機能試験の実施</li> </ul> <p style="color: red; font-weight: bold;">係留中においては、保持解放機能を操作することなく、インヒビットが有効であることを確認している。</p>	○	○
11 回転体(ファン)の飛散 (HTVX-0011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 適切な材料選定</li> <li>• ハウジングによる飛散防止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 使用材料リストの承認</li> <li>• 検査の実施</li> </ul>	-	○
残存粒子の船内への飛散 (HTVX-0011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 清浄度管理の実施</li> <li>• 初入室時には一定時間の換気と、ゴーグルとマスクを装着する手順とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 清浄度管理の実施結果の確認</li> <li>• 初入室時の手順の確認</li> </ul>	-	○

宇宙開発利用部会(第99回)資料より抜粋

10

ハザード	制御方法	検証結果	飛行中	係留中
12 感電 (HTVX-0012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 電源コネクタの着脱前の上流の電源OFF</li> <li>• ISS基準を満足するコネクタ選定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 電源OFF手順の確認</li> <li>• 適切なコネクタが選定されていることの検査</li> </ul>	-	○
電源系機器故障 (HTVX-0012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISS基準を満足するワイヤサイズの選定、と過電流保護機能の設置</li> <li>• ISS基準を満足する電気設計(ボンディング・グラウンディング設計と絶縁処置)の実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ワイヤサイズの解析、過電流保護機能の設置に関する図面確認及び検査の実施</li> <li>• ボンディング、グラウンディングの検査および絶縁検査の実施</li> </ul>	-	○
13 接触温度異常 (HTVX-0013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 接触可能な温度範囲内になるように熱設計の実施</li> <li>• ヒータ温度異常時に接触前の電源遮断及び冷却時間の設定(小動物向けのヒータシステム)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 熱解析の実施</li> <li>• 温度異常の検知に関わる機能試験の実施</li> </ul>	-	○
14 シャープエッジ等 (HTVX-0014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISS基準を満足するようにシャープエッジ等の除去</li> <li>• 基準を満たさないものはカバーを設置</li> <li>• ISSの船外活動領域内に入る機器のうち、要求を満たさないCCU(キャビン制御装置)/インタフェースリング/Mt.Fuji等は、接触禁止エリアを設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 図面確認及び現品検査の実施</li> <li>• 保護カバー施工手順の確認</li> <li>• 接触禁止エリアの設置に関する手順の確認</li> </ul>	-	○
16 退避および隔離(緊急時の退避経路の確保)不能 (HTVX-0016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 船内活動時も含め、搭乗員退避に必要な経路の確保</li> <li>• 緊急時のライトや非常ロサインの設置</li> <li>• 隣接モジュールからの警告・警報音が、HTV-X内でも認識できる設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 適切な経路確保を図面で確認</li> <li>• 解析により退避を妨げる船内活動がないことを確認</li> <li>• ライト、非常ロサインの現品確認</li> <li>• 警告警報音に関する解析の実施</li> </ul>	-	○

宇宙開発利用部会(第99回)資料より抜粋

11

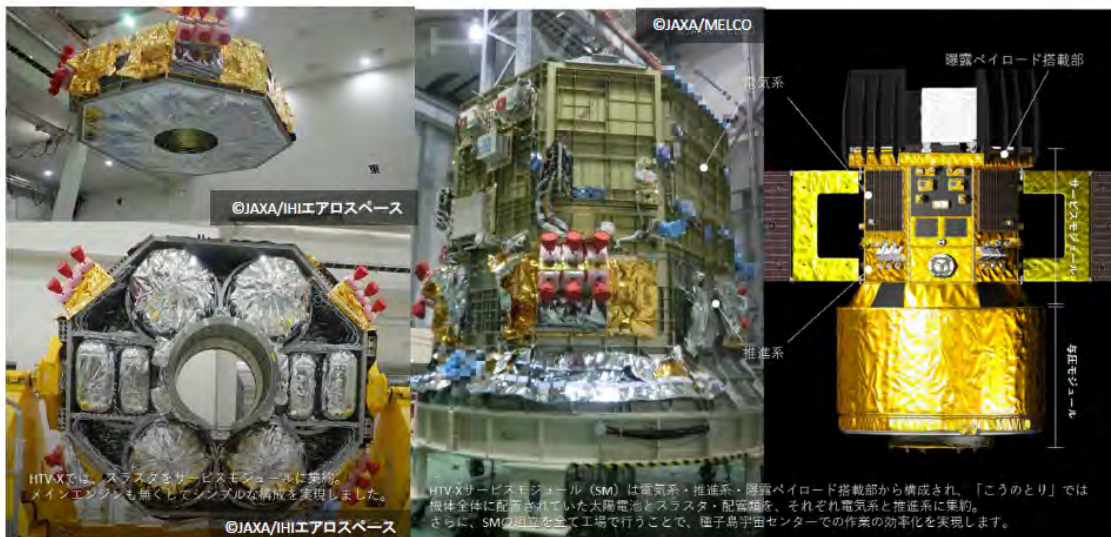
	ハザード	制御方法	検証結果	飛行中	係留中
17	電磁適合性 (HTVX-0017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>感受性の要求に対し、HTV-Xの機器が誤動作しない設計</li> <li>HTV-Xから発生する放射/伝導ノイズが、他の機器を誤動作させないよう要求値内となる設計</li> <li>ISSの船外活動中にアンテナ付近には立ち入らないよう禁止エリアを設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電磁適合性解析及び電磁干渉試験の実施</li> <li>立ち入り禁止エリアの設置に関する手順の確認</li> <li><b>係留中の状態においても、ISSとHTV-Xの双方に電磁干渉を受けないことを試験にて確認している。</b></li> <li><b>係留中は電波放射の元となる送信機の電源を遮断し、船外活動中の宇宙飛行士とアンテナ間は安全な距離を確保する運用計画を設定した。</b></li> </ul>	○	○
18	レーザーによる視覚障害 (HTVX-0018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ANSI標準に適合するレーザー機器 (LIDAR) の選定</li> <li>係留中の3つのインヒビットによる不意のレーザー発光防止</li> <li>HTV-X接近中に船外活動を計画・実施しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LIDARの仕様確認</li> <li>レーザー強度解析の実施</li> <li>インヒビットの機能試験の実施</li> <li>LIDARの電源OFFに関する手順の確認</li> </ul>	-	○

## 2. 審査結果概要 特記事項 1) 推進薬の漏洩

### ハザード概要:

ISS係留中にHTV-Xの推進系からの推進薬の漏洩による船外服への汚染もしくは爆発

- HTV-Xの推進薬(モノメチルヒドラジン:MMH)及び酸化剤(四酸化二窒素:NTO)は人体には有害であるため、船外活動中のクルーに付着し船内に持ち込みにより汚染される可能性がある。
- ISS係留期間中の推進薬遮断弁からの微少な漏洩がスラスタに堆積し推進薬が凍結し、その後離脱時に爆発する可能性がある。



## 2. 審査結果概要 特記事項

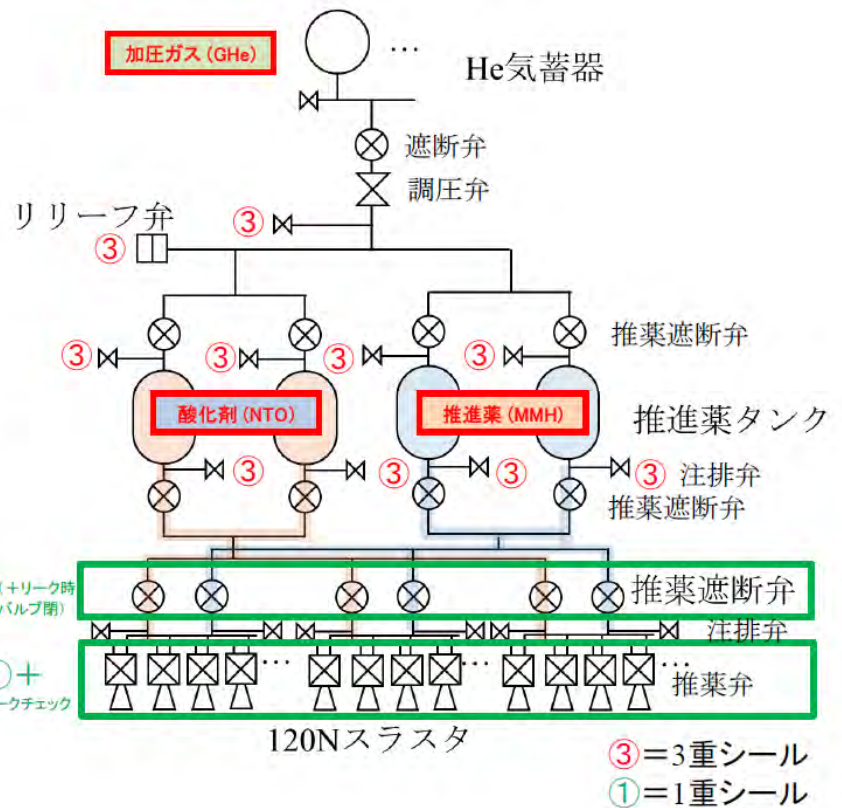
### 1) 推進薬の漏洩

制御方法:(推進薬漏洩防止に対して)

- 推進薬漏洩に対し3重封入
  - 推進弁からの漏洩に対しては、遮断弁および推進弁で3重以上のシールを有する
  - 設計上3重シールが施工できない機器(遮断弁、推進弁等)については、係留前にリークチェックを行う

検証結果:

- 3重封入に関し、図面確認及び検査
- 推進系機能試験および漏洩試験の実施
- 推進系バルブ動作及び注排弁・推進弁(スラストバルブ)リークチェック①(+リーク時は本バルブ閉)を実施
- 飛行中リークチェックの手順への反映①+リークチェック



## 2. 審査結果概要 特記事項

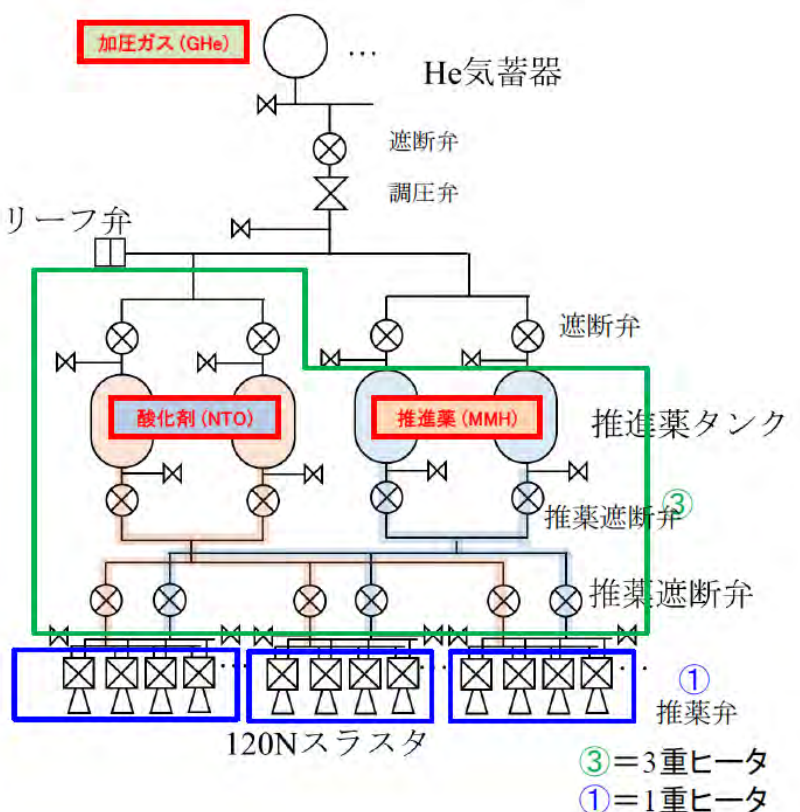
### 1) 推進薬の漏洩

制御方法:(凍結防止に対して)

- 推進薬凍結防止に対し3重のヒータ制御を行う。
  - 設計上1重ヒータとなる推進弁(スラストバルブ)は係留中は閉じており運用しない。
  - 係留中にヒータ故障発生時は地上から冗長ラインに切り替える運用制御を行う。

検証結果:

- 3重ヒータ及びライン冗長設計による2故障許容設計の図面確認及び検査
- ヒータ性能の機能試験の実施
- 冗長ラインに切り替える運用制御の手順への反映

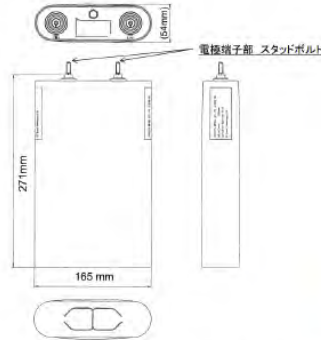


## 2. 審査結果概要 特記事項 2) バッテリーの破裂

### ハザード概要:

HTV-Xの電池が熱暴走を起こし破裂・発火する。バッテリーの熱暴走の原因として以下が想定される。

- セルの内部短絡、外部短絡、過充電によるセルの内部の温度上昇
- 過放電後の再充電によるセルの内部の温度上昇
- 不適切な熱制御によるセルの内部の温度上昇



### 制御方法:

(セル自身の熱暴走に対する制御)

- 内部短絡、外部短絡、過充電、過放電防止設計および適切なヒータ制御

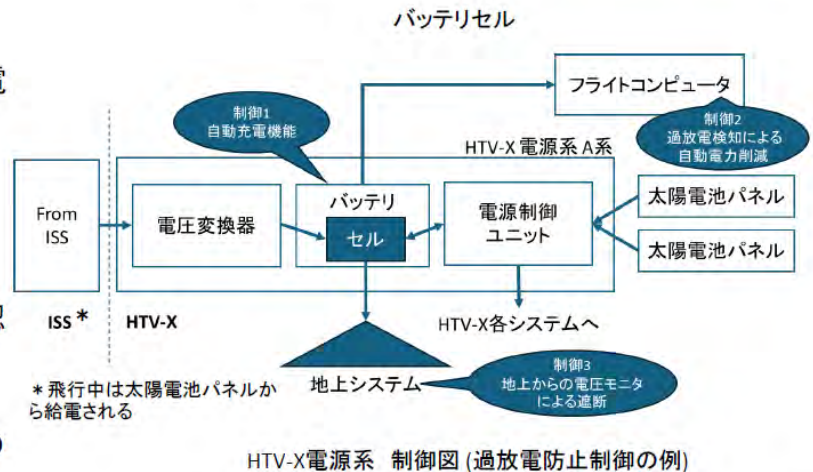
(熱暴走伝搬に対する制御)

- 隣接するセルへの熱伝搬の抑制

### 検証方法:

以下により適切に制御されることを確認した。

- セル熱暴走試験の実施
- セルスクリーニング・バッテリー制御系の機能試験の実施



\* 飛行中は太陽電池パネルから給電される

HTV-X電源系 制御図 (過放電防止制御の例)

宇宙開発利用部会(第99回)資料より抜粋



## Ⅲ-3. さいごに

背景・目的

月では、昼と夜が2週間ごとに訪れ、赤道付近の表面温度は-170℃～110℃の範囲で周期的に変化するため、通常のバッテリーによる長期運用は困難であり、米国及び中国は月面の過酷な環境に耐える半永久電源を開発し、探査機の長期運用に成功している。

アルテミス計画を含め、世界各国の月面開発が急速に伸展していく中、持続的な月面活動を支えるためには、我が国においても、**燃料等の補給やメンテナンスなく、長期間にわたって使用可能な半永久電源の開発が急務**である。

加えて、火星圏以遠の探査においても、太陽電池による持続発電は困難であることから、これまで半永久電源が使用されており、我が国の活動領域を拡大するために本技術は重要である。

また、地上用途としては、例えば重要情報機器の保全、ドローンや電動航空機、災害時における移動式非常用電源、深海・極地等の極限環境での電源など、災害の多い我が国における重要な基盤技術となり得、かつ次世代蓄電池として産業界への波及効果も期待できる。

宇宙用としては、既に米国、中国が、プルトニウムを利用した半永久電源を開発しているが、本テーマでは、地上用としての活用も念頭に地上技術（煙探知機等）としての利用実績もある国内入手可能な**アメリシウム**を利用し、**我が国が保有している世界最高水準の半導体による熱電変換技術を活用した電源開発**を目指す。その上で、本技術による長寿命化の実現を通じて、月探査における我が国の国際プレゼンスを確保するとともに、我が国の火星圏以遠の探査における自在性確保を目指す。

(参考) 宇宙技術戦略での記載

月面拠点、有人圧ローバ、月面における資源探査・利用、月面建設機械等への適用の観点から発電技術の開発が非常に重要である。発電技術は、展開収納型太陽電池タワー、展開型太陽電池タワー、半永久電源などを含む。(3.Ⅲ.(2)③ ii)



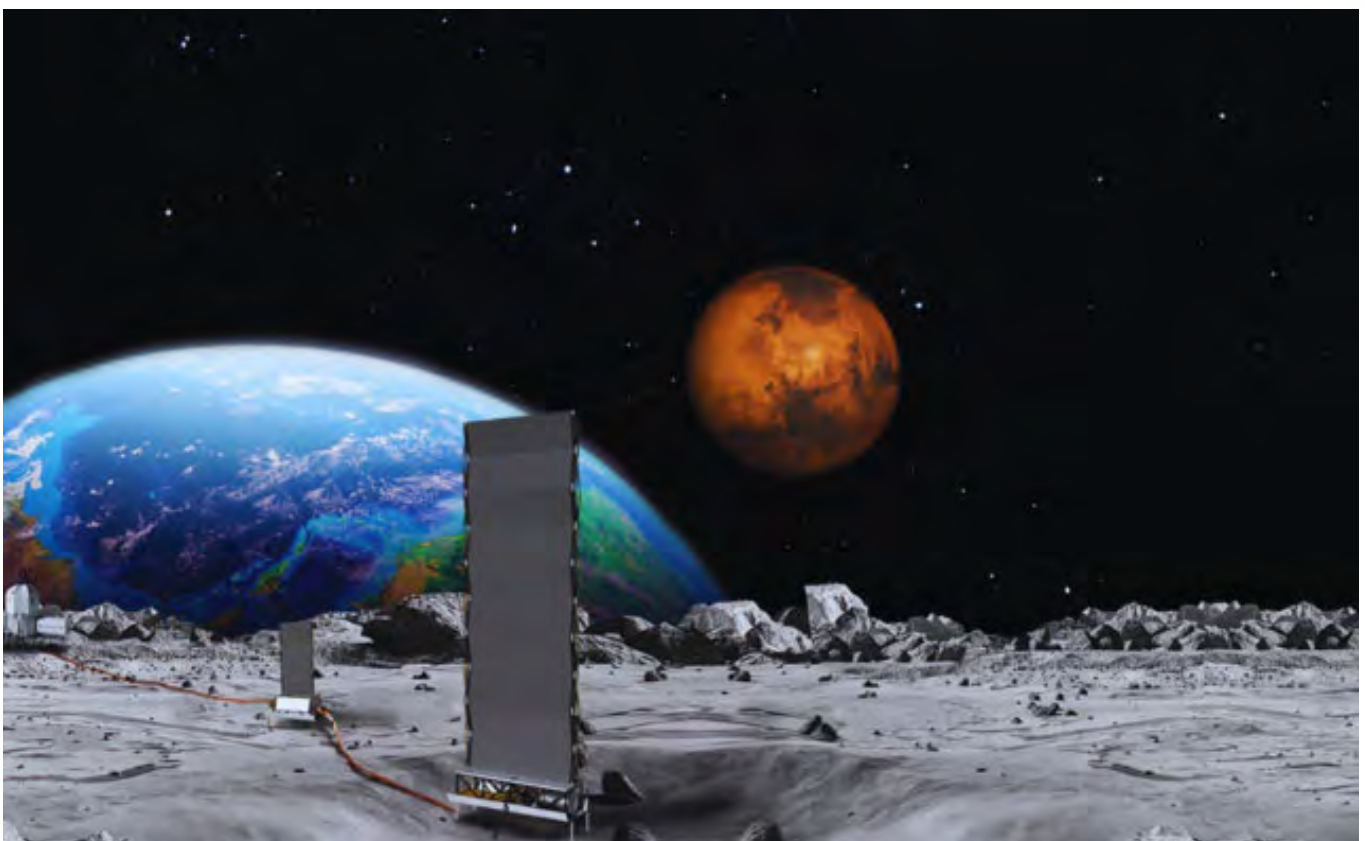
本テーマの目標

基本方針に示されている「月や火星圏以遠への探査や人類の活動範囲の拡大に向けた我が国の国際プレゼンスを確保」すること等のためには、多様な探査ミッション・プロジェクトを可能にする探査機の長寿命化が必要であり、まずは本テーマとして4年間、リスク解析を踏まえた安全性評価も含めアメリシウムの崩壊熱を利用した熱源利用や、連鎖核分裂制御が不要な発電をするための要素技術開発を実施する(TRL4相当の完了)。

技術開発実施内容

10g規模のアメリシウムを利用した半永久電源（熱源利用）のBBM（熱構造モデル相当）及び熱電変換の要素技術を開発する。

NASA 2030年までに月面に原子炉を建設



## 宇宙開発は、人類の夢の実現の場！！

宇宙分野では、夢のない組織に存在価値はないと考えています

**『夢なき者に理想無し  
理想なき者に計画なし  
計画なき者に実行なし  
実行なき者に成功なし  
故に、夢なき者に成功なし』**