

イプシロンSロケットの開発状況について

令和5(2023)年12月12日
宇宙航空研究開発機構

理事 布野 泰広
イプシロンロケットプロジェクトチーム プロジェクトマネージャ 井元 隆行

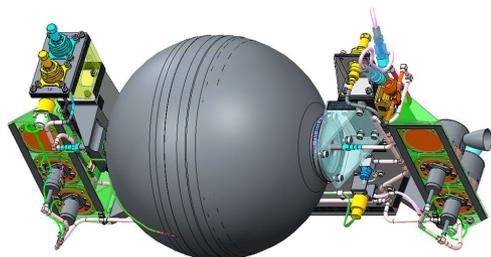
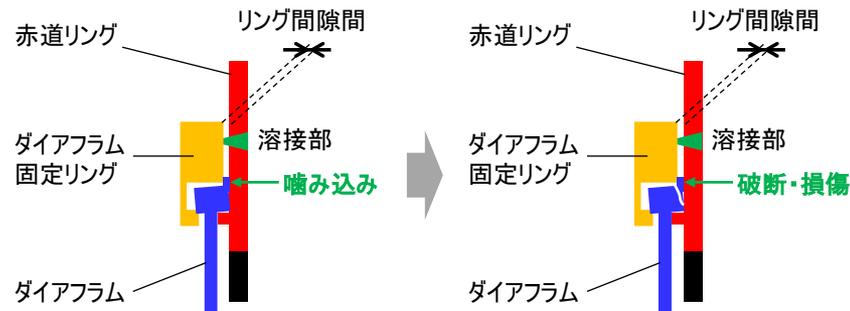
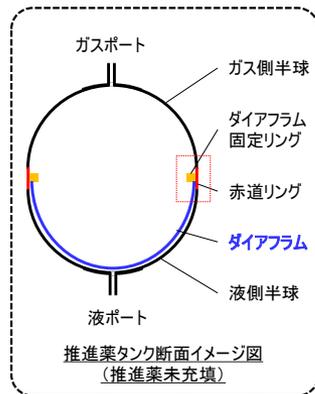
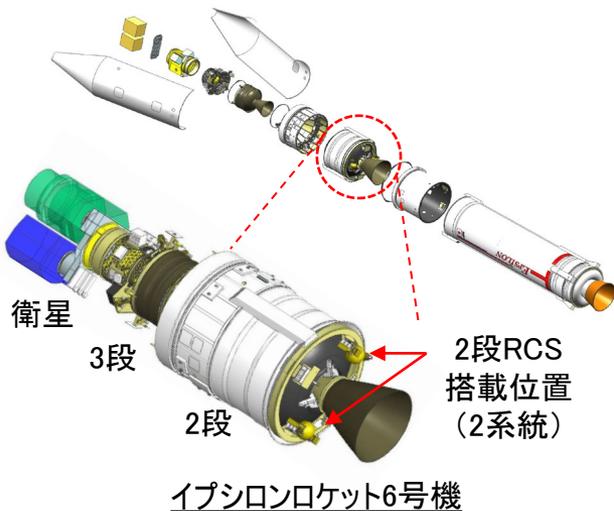
- 令和2(2020)年5月、第56回宇宙開発利用部会において、イプシロンSロケットのプロジェクト移行についてご報告した。
- 令和5(2023)年5月、第75回宇宙開発利用部会において、「イプシロンロケット6号機打上げ失敗の原因究明に係る調査・安全小委員会 報告書」が審議・決定され、イプシロンSロケットに対する直接要因対策、背後要因対策等が取りまとめられた。
- 令和5(2023)年10月、第52回調査・安全小委員会において、2023年7月に2段モータ地上燃焼試験で発生した異常燃焼に係る調査状況についてご報告した。
- 本日は、上記以降の開発状況について、以下の通りご報告する。
 1. イプシロンロケット6号機打上げ失敗対応
 2. 2段モータ地上燃焼試験異常燃焼対応
 3. まとめ

(1) 経緯

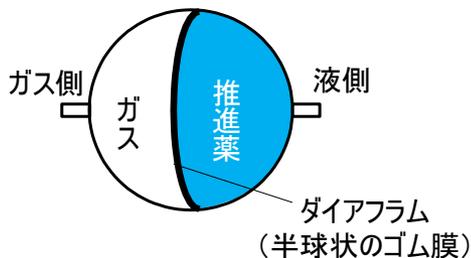
- 2022年10月12日9時50分43秒(日本標準時)にイプシロンロケット6号機を打ち上げたが、2/3段分離可否判断の時点で目標姿勢からずれ、地球を周回する軌道に投入できないと判断し、9時57分11秒にロケットに指令破壊信号を送出し、打上げに失敗。
- 原因究明の結果、イプシロン6号機打上げ失敗の直接要因は、2段RCS※のダイアフラム式タンクにおける、「ダイアフラムシール部からの漏洩」と特定した。次頁に不具合メカニズムを示す。
※ガスジェット装置、Reaction Control Systemの略
- また、イプシロン6号機打上げ失敗の背後要因は「フライト実績品に対する確認不足」と識別した。

1. イプシロンロケット6号機打上げ失敗対応

A) 2段RCS2系統のうち、1系統のタンク内でダイアフラムがリング間隙間に噛み込み、その後の溶接工程等で破断・損傷

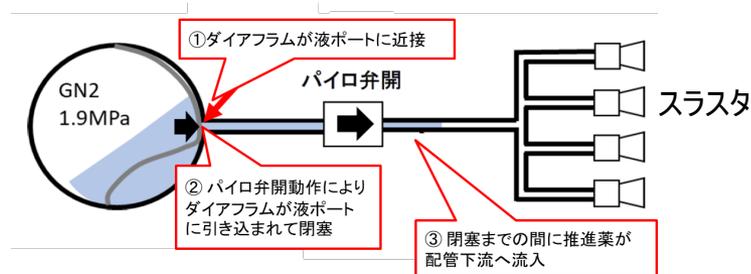


B) 推進薬充填後、ヒドラジンの影響によりシール潰し量が低下し、推進薬が液側からガス側に漏洩してダイアフラムが液ポートに覆いかぶさる



2段RCSタンク内部

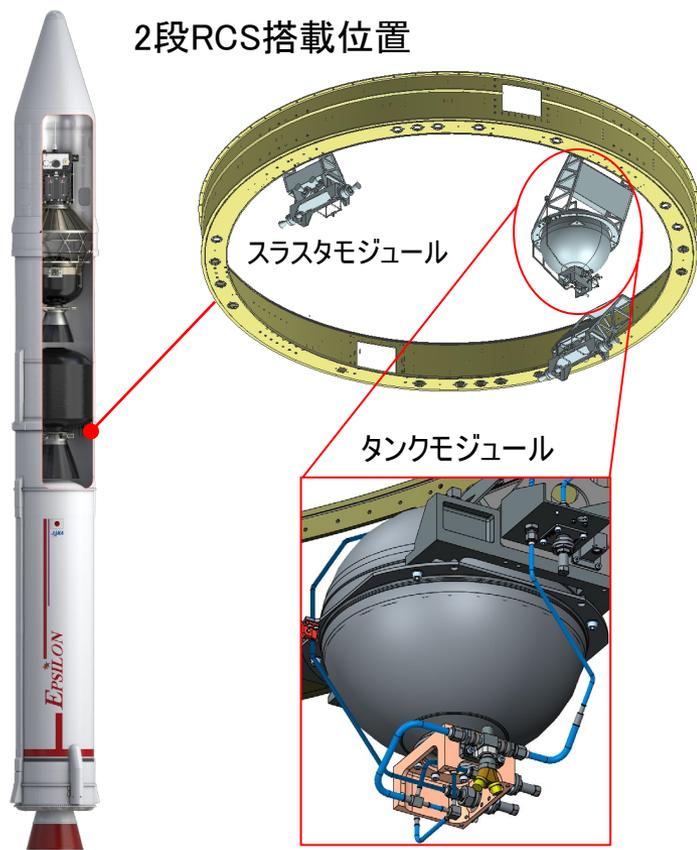
C) フライト中のパイロ弁開動作時にダイアフラムが液ポートに入り込んで閉塞、RCS機能喪失



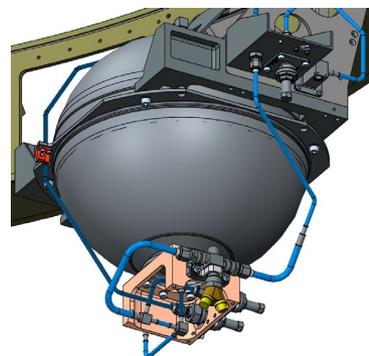
不具合メカニズム

(2) 2段RCSタンク直接対策

- 6号機原因究明結果を踏まえて、イプシロンSロケットの2段RCSに対して、**現タンク設計変更案**と**H-IIAタンク活用案**のトレードオフを行い、打上げ能力への影響や射場運用性等の観点から**現タンク設計変更案**を選定した。



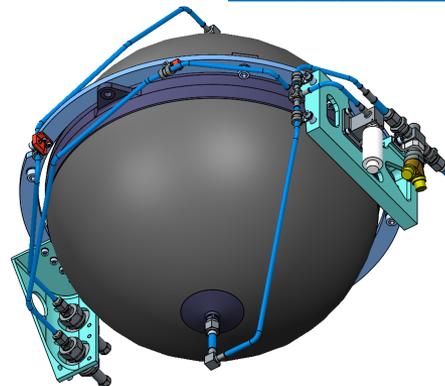
現タンク設計変更案 (タンク直径: 約360mm)



対策

- ① シール部設計変更
- ② 検査工程強化
- ③ 漏洩に対する保証方法設定
- ④ 閉塞防止機構追加

H-IIAタンク活用案 (タンク直径: 約420mm)



対策

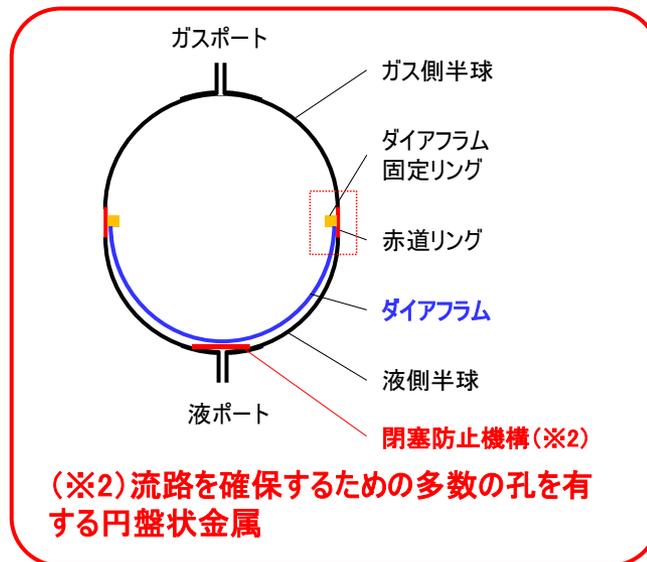
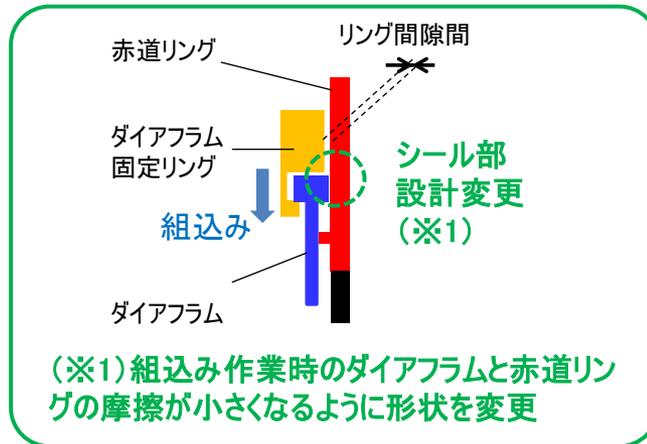
- ① タンク艙装設計変更
- ② タンク大型化に伴う機体構造設計変更 (タンク取付構造等)
- ③ 射場運用計画変更

- 強化型の2段RCSは2系統を有する構成 (前頁参照)
- イプシロンSの2段RCSはタンクモジュール1系統 (推薬消費量適正化) / スラスタモジュール2系統の構成

(2) 2段RCSタンク直接対策(現タンク設計変更案の対策)

- 6号機原因究明で得られた知見を最大限活用して抽出した全課題に対し、**設計・製造・検査工程の対策を設定。また、検証試験により対策有効性を確認した。**

6号機原因究明で抽出された課題	対策
ダイアフラム組込み時に噛み込みが発生しやすい設計であったこと	①シール部設計変更 ✓ ダイアフラム組込み作業時の噛み込み発生リスクを排除するためにシール部を設計変更
ダイアフラム噛み込みを検出できる検査工程となっていなかったこと	②検査工程強化 ✓ X線CTの追加(噛み込み有無の直接確認) ✓ 組込み時の寸法計測の検査規格化
製造時の検査で漏洩を検出できなかったこと	③漏洩に対する保証方法を設定 ✓ X線CTおよび組込み時の寸法検査でダイアフラムが正常であれば、ヒドラジン浸漬の影響を考慮しても必要な潰し率を確保可能であり漏洩しないことを評価 ✓ 低圧加圧しダイアフラムを押しつけて漏洩有無を検査(意図しない箇所でのシール防止)
ダイアフラムが液ポートに近接した状態でパイロ弁開動作すると閉塞する可能性があること	④閉塞防止機構追加 ✓ 液ポートに閉塞防止機構を追加



(3) 背後要因対策

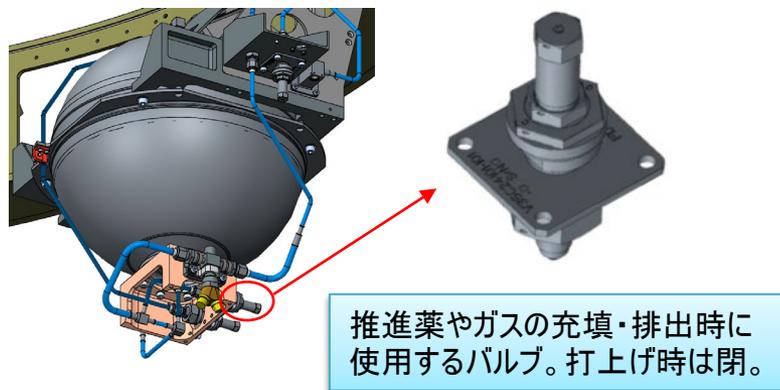
- 6号機打上げ失敗の背後要因「フライト実績品に対する確認不足」を踏まえたイプシロンSロケットの取り組みとして以下を実施。

① フライト実績品の確認

イプシロンSロケットに搭載される基幹ロケット開発対象外のコンポーネント(宇宙機フライト実績品、カタログ品等)について品質・信頼性確保に必要な情報有無を改めて確認し、追加試験が必要な事項を識別して開発計画に反映した。

【追加試験の例】

- 2段RCS注排弁追加認定試験(温度サイクル試験、作動寿命試験、破壊圧試験等)



2段RCS注排弁

(3) 背後要因対策

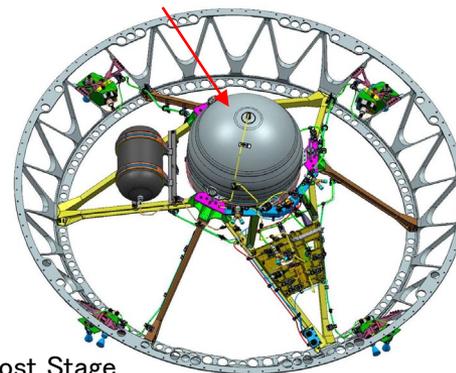
② 信頼性向上のための追加検証試験

基礎データ取得や限界把握、設計に対する検証確度向上のための追加検証試験を識別して開発計画に反映した。

【追加試験の例】

- PBSタンクダイアフラム破断限界データ取得試験
- 第2段機器搭載構造複合材物性データ取得試験
(強度データ、耐候性データ、等)
- 段間分離機構作動特性データ取得試験
(駆動電流、バンド張力、分離デバイス保管時間等の条件を変えたときの作動特性・分離衝撃データ、等)

タンク(ダイアフラム式)



PBS: Post Boost Stage
(小型液体推進系)

PBS外観



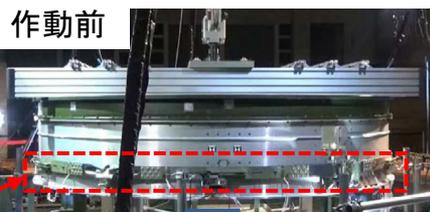
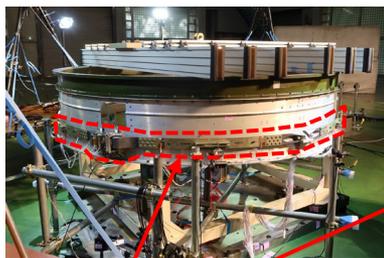
PBS

第2段機器
搭載構造

1/2段
分離部



第2段機器搭載構造
(写真は試験用供試体)



段間分離機構

- バンドによる締結を結合解除機構により解放する方式
- 1/2段分離部、2/3段分離部、3段PBS分離部に適用

段間分離機構(写真は要素試験時)

(1) 事象

能代ロケット実験場の真空燃焼試験棟において2023年7月14日(金)09:00に2段モータを点火して地上燃焼試験を開始。点火後約20秒から燃焼圧力が予測圧力から乖離し、同約57秒において燃焼圧力約7.5MPaでモータが爆発(燃焼圧力は最大使用圧力(8.0MPa)及び耐圧試験の圧力(10.0MPa)以下)。(既報)

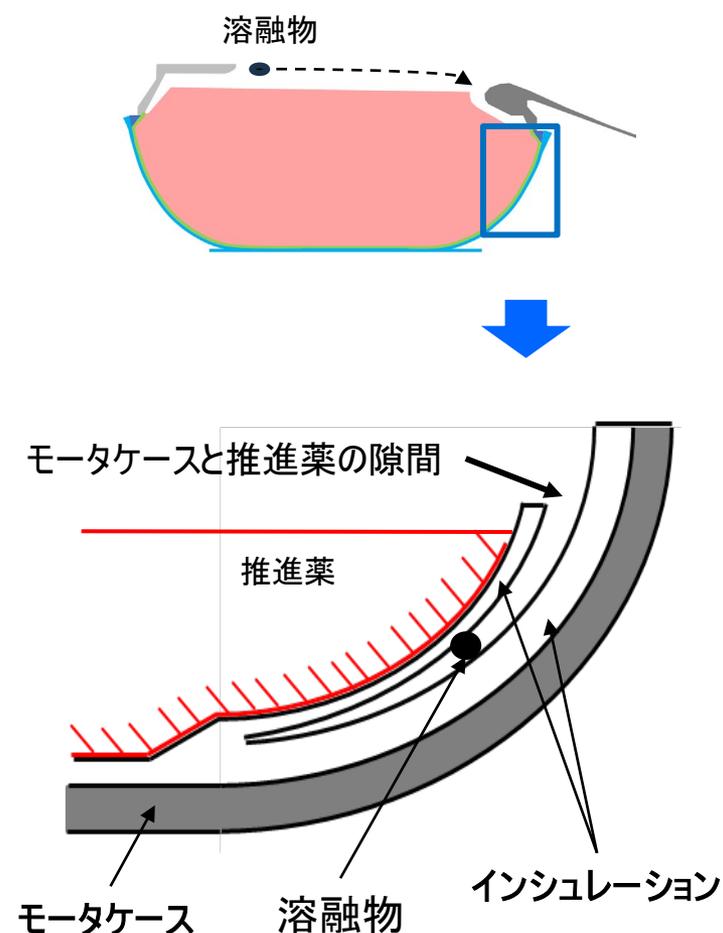
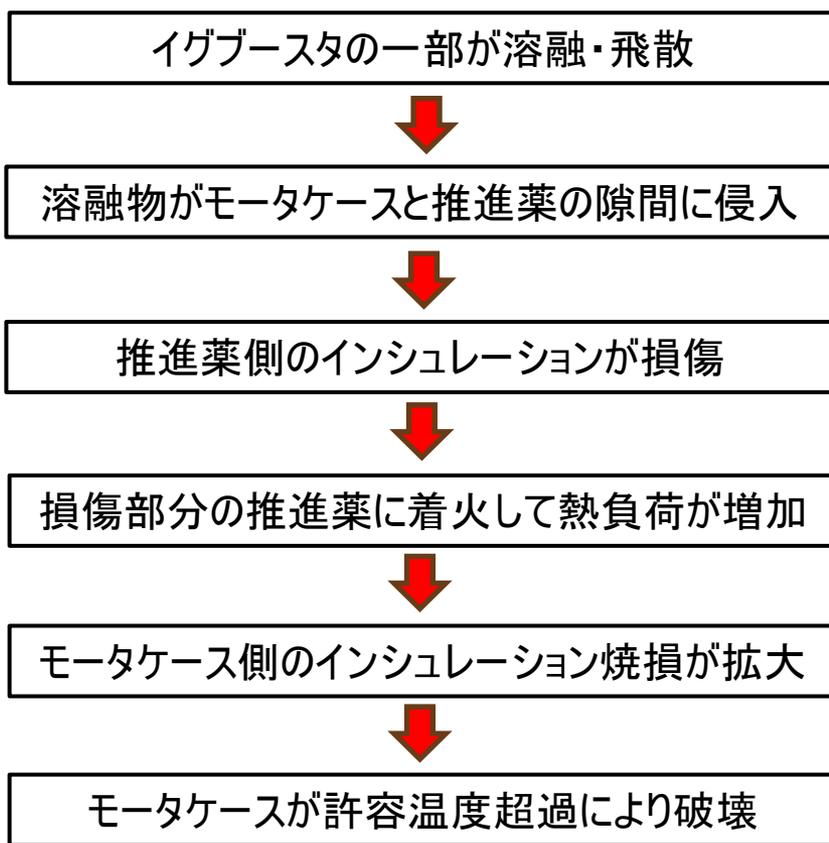
(2) 原因

- ✓ 「2段モータ爆発」についてFTAを展開し、「モータケース破壊」と「ノズル破壊・脱落」の2要因に分解し、製造・検査データ、試験データに基づき詳細な分析を実施。(既報)
- ✓ モータケースに熱的に過大な負荷がかかり、構造部材が強度を維持するための許容温度を超えたことで破壊に至ったと推定。その要因として、「推進薬燃焼異常」「インシュレーション断熱不良」を識別。(既報)
- ✓ これらの原因として「モータ輸送時(縦置・ノズル下側)に接触して損傷」と「イグブースタの一部が溶融・飛散して損傷」の2つに絞り込んだ。(既報)

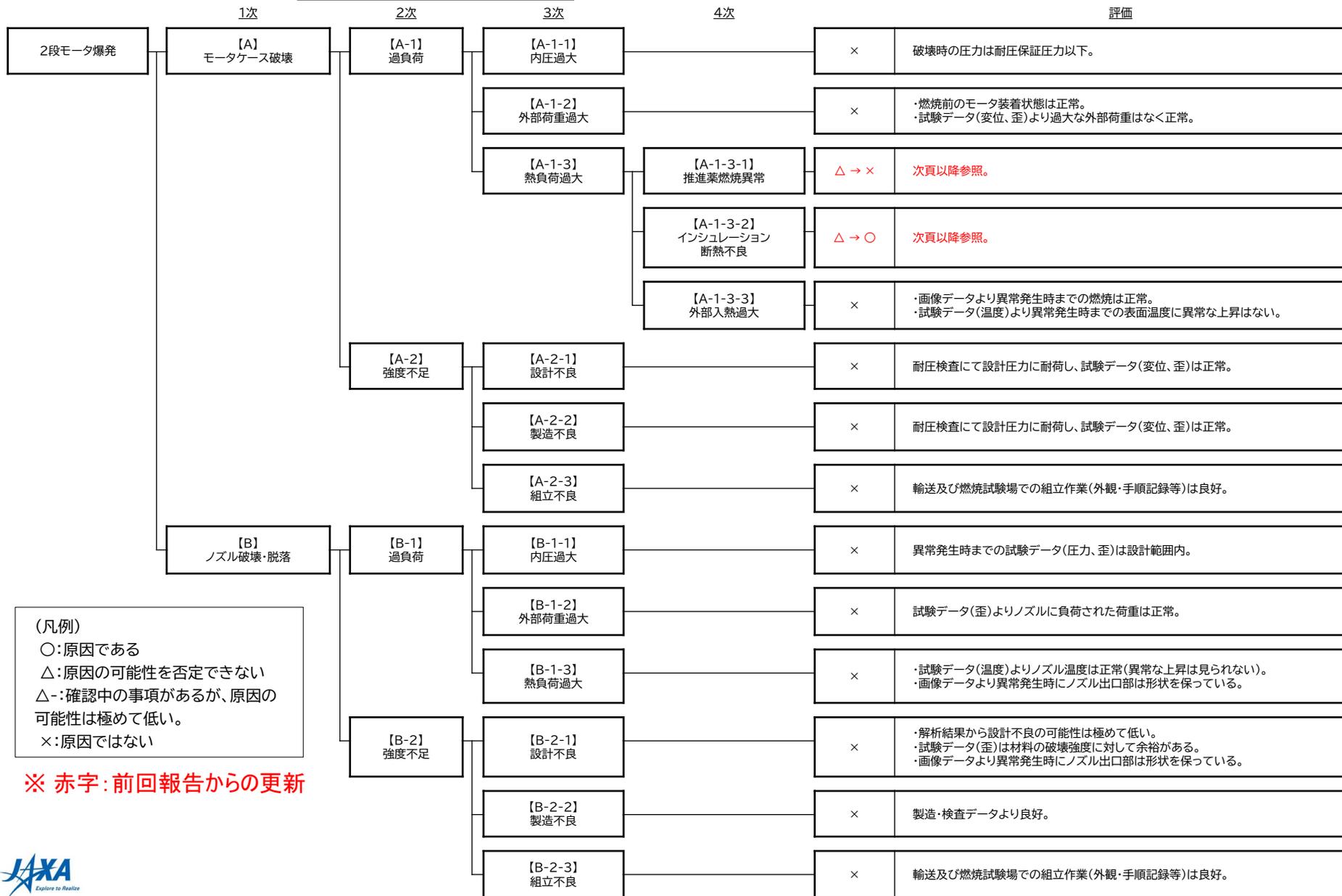


(2) 原因(つづき)

絞り込んだ2つの原因に対して追加検証を実施し、「イグブースタの一部が溶融・飛散してインシュレーションが損傷」が原因であると特定した。破壊シナリオを以下に示す。



(2) 原因(つづき) 2段モータ爆発FTA

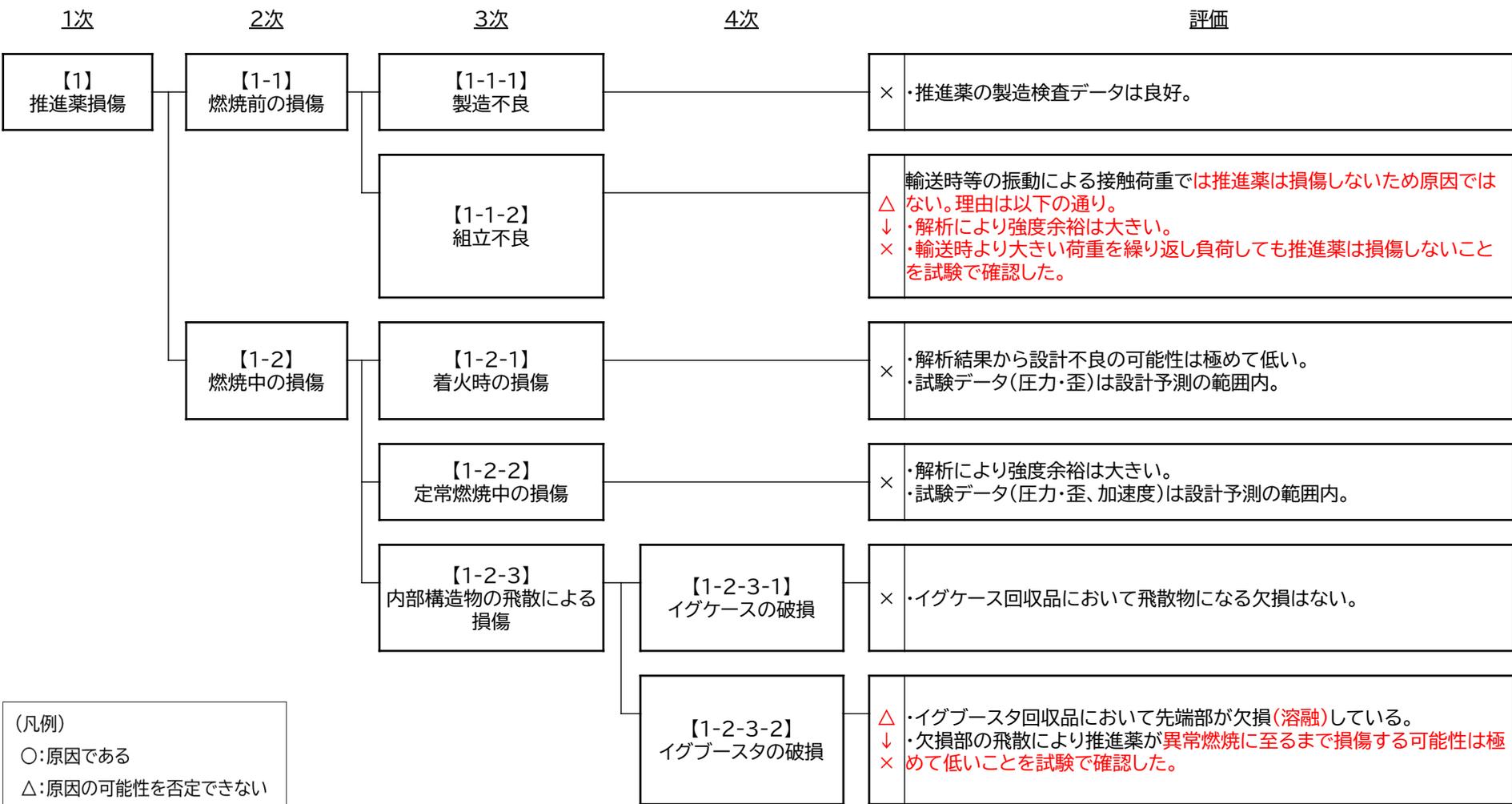


(凡例)
 ○:原因である
 △:原因の可能性を否定できない
 △-:確認中の事項があるが、原因の可能性は極めて低い。
 ×:原因ではない

※ 赤字: 前回報告からの更新

(2) 原因(つづき)

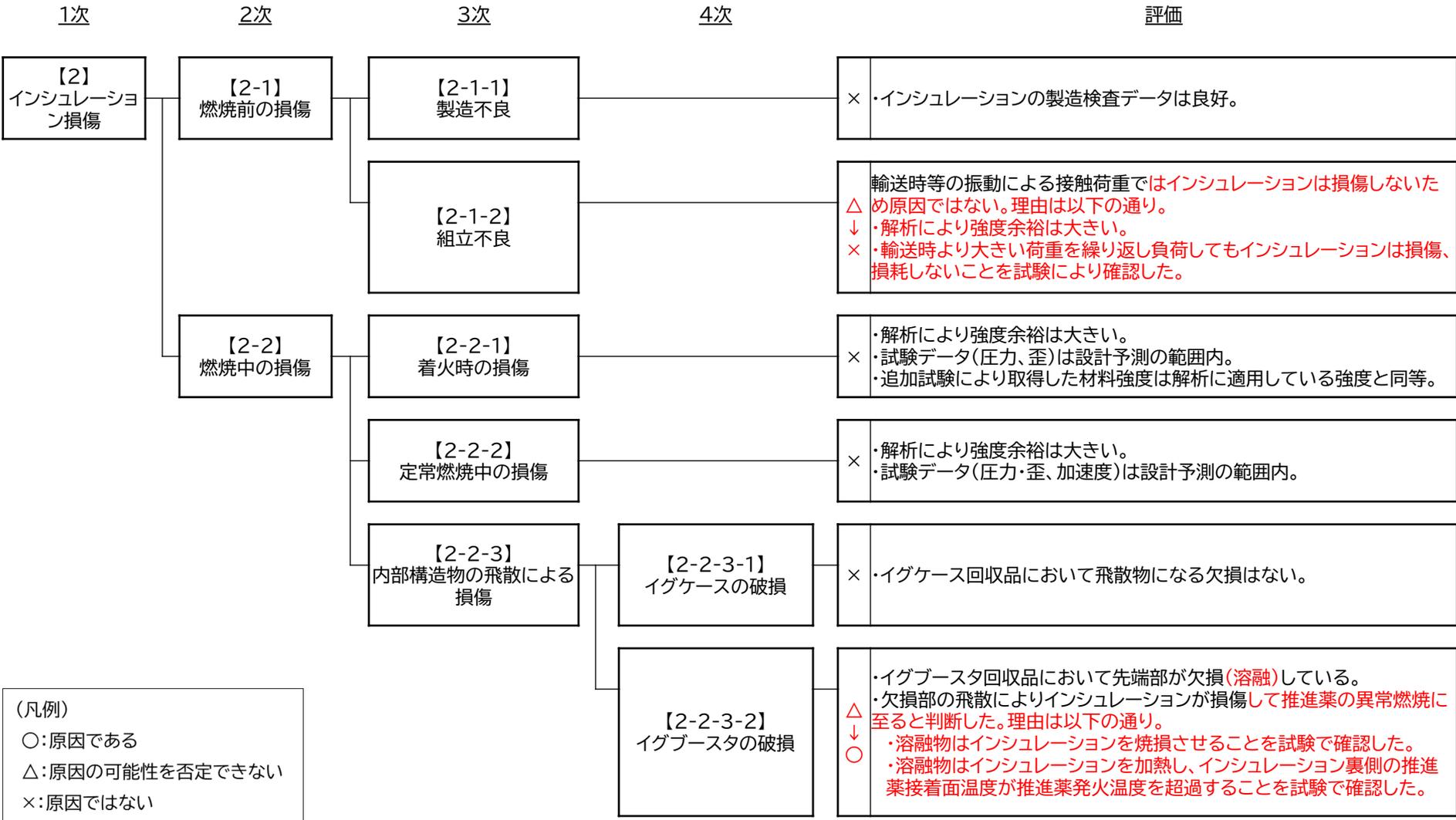
推進薬損傷FTA



(凡例)
 ○:原因である
 △:原因の可能性を否定できない
 ×:原因ではない

(2) 原因(つづき)

インシュレーション損傷FTA



(凡例)
 ○:原因である
 △:原因の可能性を否定できない
 ×:原因ではない

※ 赤字: 前回報告からの更新

(2) 原因(つづき)

(A)「モータ輸送時(縦置・ノズル下側)に接触して損傷」のケース
(推進薬損傷FTA 1-1-2、インシュレーション損傷FTA 2-1-2)

輸送時の加速度データ:

- ✓ 工場から能代までの輸送時に約20回の加速度応答を計測
- ✓ 最大加速度は2.0Gp-p

2段モータ

加速度計設置場所(モータ設置面に搭載)



接触可能性部位

(2) 原因(つづき)

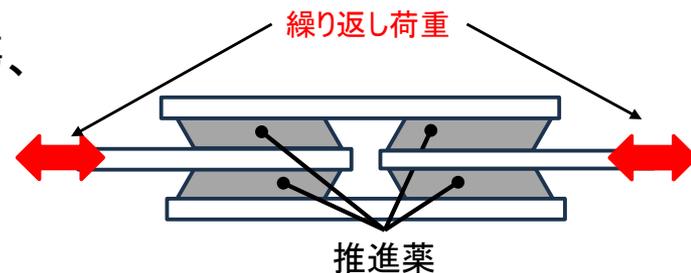
(A)「モータ輸送時(縦置・ノズル下側)に接触して損傷」のケース(つづき)

■ 追加検証結果

輸送時の振動による推進薬損傷やインシュレーション損傷、摩耗有無を追加検証し、以下結果を得た。

(A-1) 推進薬繰返し荷重試験

- ✓ 輸送時最大加速度の約8倍に相当する荷重を1,000回(約50倍)負荷しても疲労による推進薬の損傷や強度低下なし。



(A-1) 推進薬繰返し荷重試験

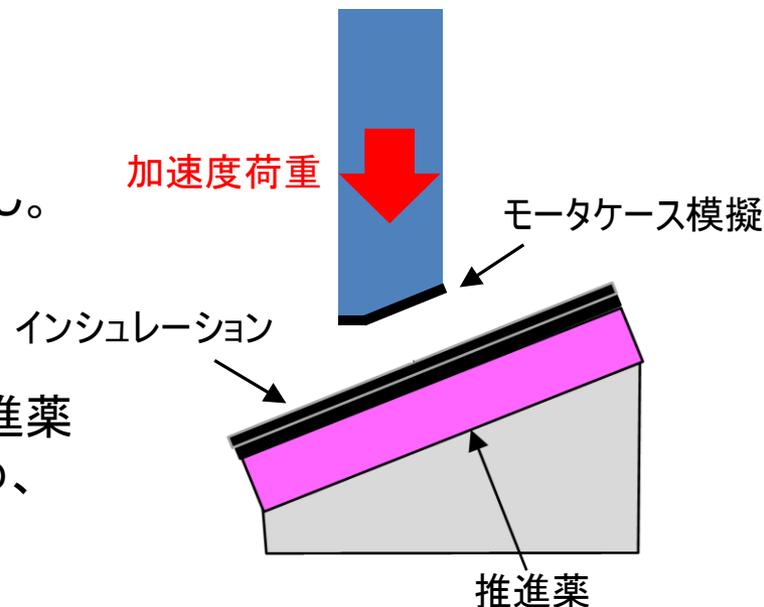
(A-2) モータケース・推進薬接触試験

- ✓ 輸送時最大加速度の約9倍に相当する荷重を100回(約5倍)負荷してもインシュレーションに損傷、摩耗なし。



■ 結論

輸送時にモータケースと推進薬が接触していても、推進薬損傷やインシュレーションの損傷、摩耗は生じないため、「モータ輸送時(縦置・ノズル下側)に接触して損傷」は原因ではない。



(A-2) モータケース・推進薬接触試験

(2) 原因(つづき)

(B) 「イグブースタの一部が溶融・飛散して損傷」のケース

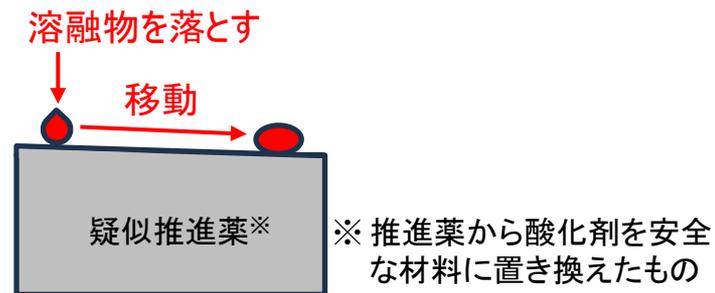
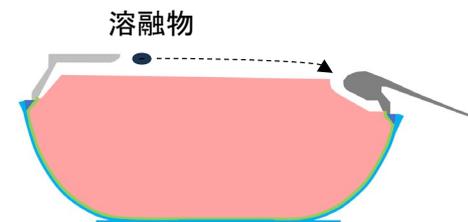
(推進薬損傷FTA 1-2-3-2、インシュレーション損傷FTA 2-2-3-2)

■ 追加検証結果

イグブースタの溶融物が推進薬かインシュレーションを損傷させて推進薬の異常燃焼に至るかを追加検証し、以下の結果を得た。

(B-1) 溶融物の推進薬上挙動確認試験

- ✓ 溶融物は推進薬上で表面に付着せず移動する。
- ✓ 溶融物は推進薬をほとんど損傷させない。



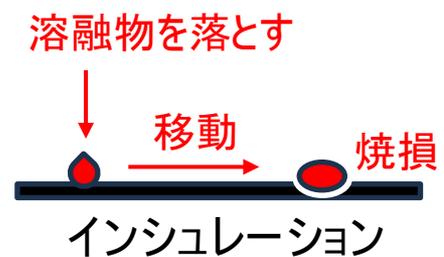
(B-1) 溶融物の推進薬上挙動確認試験

(2) 原因(つづき)

(B)「イグブースタの一部が溶融・飛散して損傷」のケース(つづき)

(B-2) 溶融物のインシュレーション上挙動確認試験

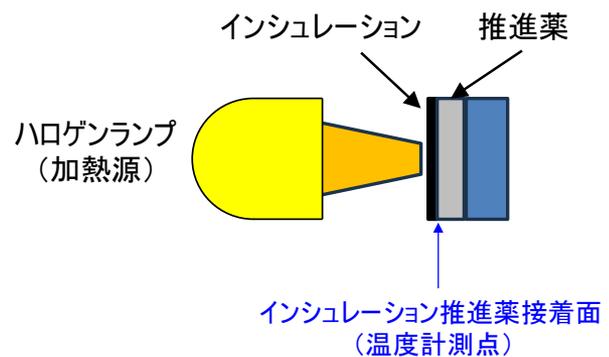
- ✓ 溶融物はインシュレーション上で表面に付着せず移動する。
- ✓ 溶融物がインシュレーション上に留まるとインシュレーションが焼損して球状の穴が生じる。



インシュレーション
(B-2) 溶融物のインシュレーション上
挙動確認試験

(B-3) 推進薬発火確認試験

- ✓ インシュレーションを貼り付けた推進薬をインシュレーション側から加熱すると、推進薬が発火したあと火炎はインシュレーションから噴き出す。



(B-3) 推進薬発火確認試験

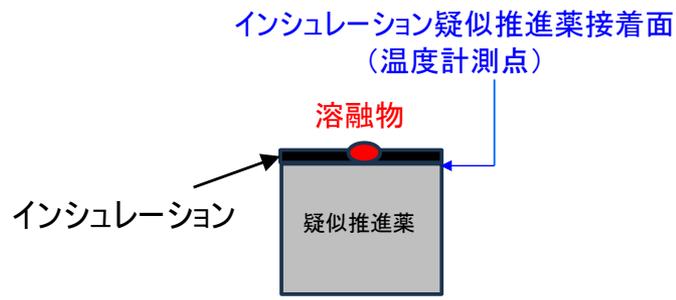
(B-4) 溶融物によるインシュレーション加熱試験

- ✓ 溶融物によりインシュレーション裏側の推進薬接着面温度は推進薬発火温度を超過する。



■ 結論

イグブースタ溶融物がモータケースと推進薬の隙間に侵入すると、推進薬側のインシュレーションが損傷し異常燃焼が発生し得るため、「イグブースタの一部が溶融・飛散してインシュレーションが損傷」が原因と特定した。



(B-4) 溶融物によるインシュレーション
加熱試験

(3) 是正対策・水平展開

① 2段モータ・3段モータ

- ✓ 根本原因を排除するため、イグブースタの溶融を防ぐこと(インシュレーション施工)を是正対策とする。本試験で得られた知見をもとに条件を適正化して設計解析を実施し、イグブースタを溶融させない板厚のインシュレーションを施工する。
- ✓ 3段モータも地上燃焼試験でイグブースタが溶融していたため、同様の対策を適用する。

※ SRB-A、SRB-3は地上燃焼試験(SRB-A:14回、SRB-3:3回)でイグブースタの溶損／欠損は発生せず耐熱性に問題がないことを検証済みであり、対策は不要と判断している。(既報)

② 検証試験

設計変更の妥当性確認のため、以下を実施する。

- A) イグブースタ燃焼試験
- B) イグナイタ燃焼試験(2段用、3段用)
- C) イグブースタ温度データ取得試験
- D) 2段モータ再地上燃焼試験

なお、イグブースタの入熱量に影響を及ぼすイグナイタの推薬量の関係から、3段用イグブースタ入熱量は2段よりも小さく、2段モータの対策を行うことで3段モータの再地燃は不要と判断している。

(4) 今後の計画

以下を実施する。

- A) 背後要因分析を実施し、その対策を設定する。
- B) 2段モータ再地上燃焼試験を含めた全体開発計画を設定する。

- イプシロンロケット6号機打上げ失敗対応として、イプシロンSロケットに適用する2段RCSタンクを選定した。また、背後要因対策としてフライト実績品の確認等を実施した。
- 2段モータの地上燃焼試験異常燃焼に係る原因を「イグブースタの一部が溶損・飛散してインシュレーションが損傷」に特定し、イプシロンSロケットの2段モータ/3段モータに対する是正対策を検討した。今後、再地上燃焼試験を含めた検証計画を設定する。
- 上記についてイプシロンSロケットに設計反映を行い、システム設計を完了させる。