

# イプシロンロケット6号機 打上げ失敗原因究明の状況について

2022年10月12日のイプシロンロケット6号機の打上げ失敗後、その原因究明状況について、これまで5回にわたって調査・安全小委員会へご報告してきました。本日は、これまでの原因究明のまとめとして、12月16日に小委員会にご報告した最新の資料でご報告するものです。

令和4(2022)年12月20日

宇宙航空研究開発機構

宇宙輸送技術部門 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

# イプシロンロケット6号機 打上げ失敗原因調査状況

令和4(2022)年12月16日  
宇宙航空研究開発機構

宇宙輸送技術部門 事業推進部 部長 佐藤 寿晃  
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

## 0. 本日の報告内容

### 1. イプシロンロケット6号機打上げ概要

- 1-1. 打上げ結果(再掲)
- 1-2. 機体諸元(再掲)
- 1-3. 姿勢制御概要(再掲)
- 1-4. 前回までの発生事象の整理

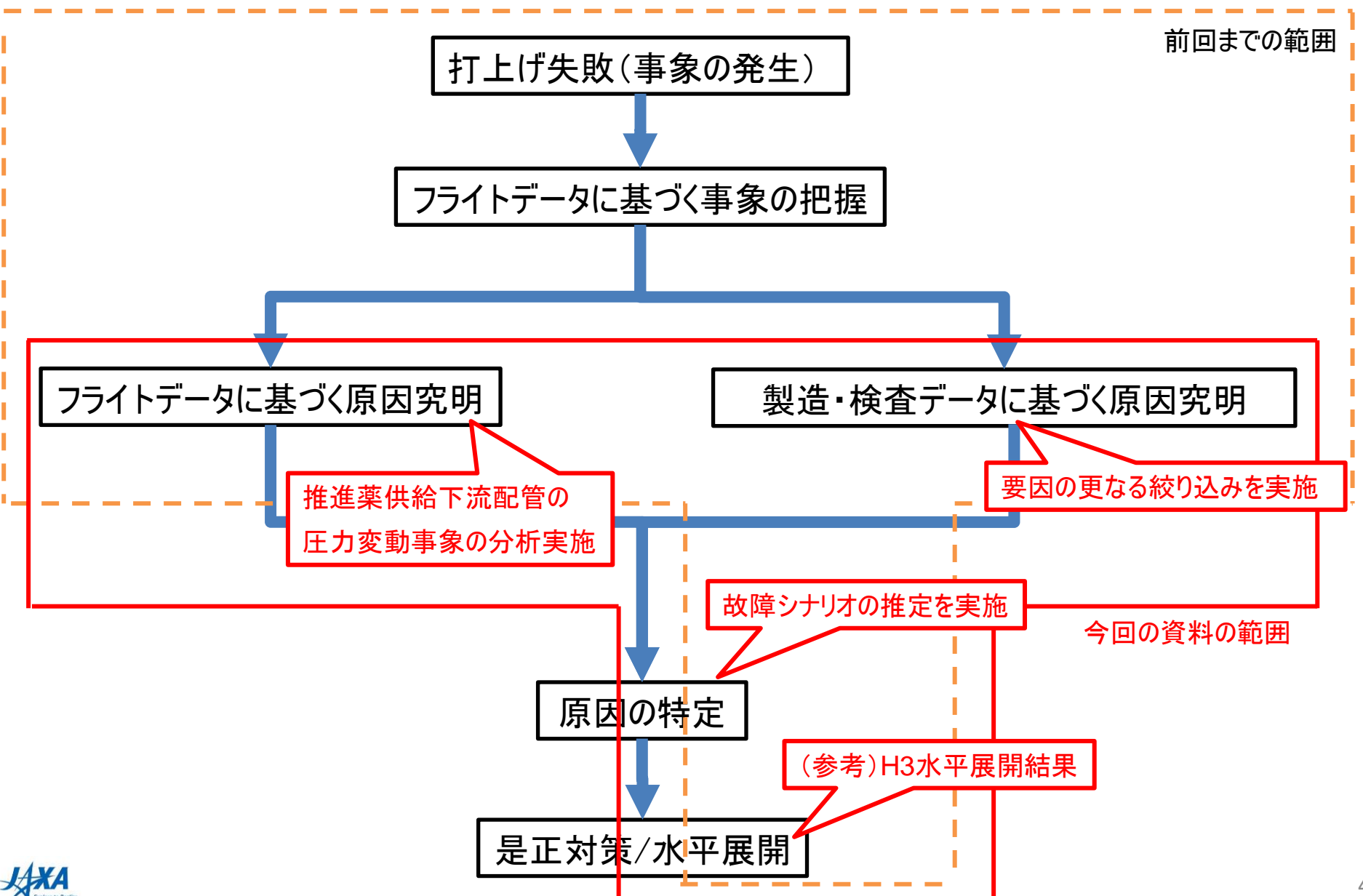
### 2. 原因究明状況

- 2-1. パイロ弁の開動作不良
- 2-2. 推進薬供給配管の閉塞
- 2-3. +Y軸側下流配管圧力の変動
- 2-4. 故障シナリオ検討

### 3. 今後の進め方

参考. H3ロケット水平展開結果

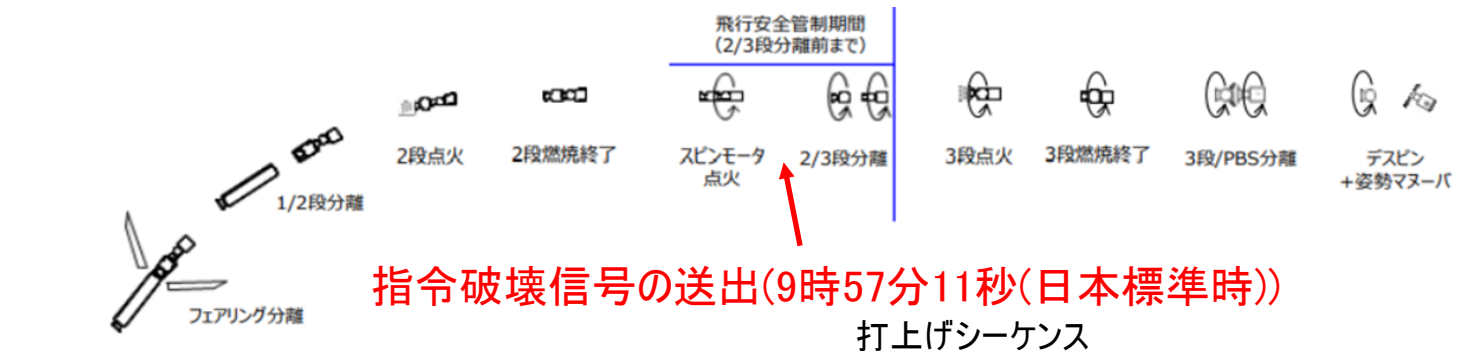
# 0. 本日の報告内容



# 1. イプシロンロケット6号機概要

## 1-1. 打上げ結果(再掲)

- 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号機打上げ。
- 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。
- 現在、山川理事長を長とする対策本部を設置し、原因究明を進めている。



打上げ時刻  
(9時50分43秒(日本標準時))

事象	打上後経過時間				計画値 経過秒
	時	分	秒	経過秒	
(1) リフトオフ	00	00	0	0	0
(2) 第1段 燃焼終了	01	49	109	108	108
(3) 衛星フェアリング分離	02	31	151	151	151
(4) 第1段・第2段分離	02	41	161	161	161
(5) 第2段 燃焼開始	02	45	165	165	165
(6) 第2段 燃焼終了	04	53	293	294	294
(7) スピンモータ燃焼開始	06	09	369	370	370
(8) スピンモータ燃焼終了	06	14	374	375	375
(9) 指令破壊	06	28	388		

経過秒は小数点第1位を四捨五入

# 1. イプシロンロケット6号機概要

## 1-2. 機体諸元(再掲)

- 6号機はオプション形態(小型液体推進系(PBS)付)。複数衛星搭載に対応。



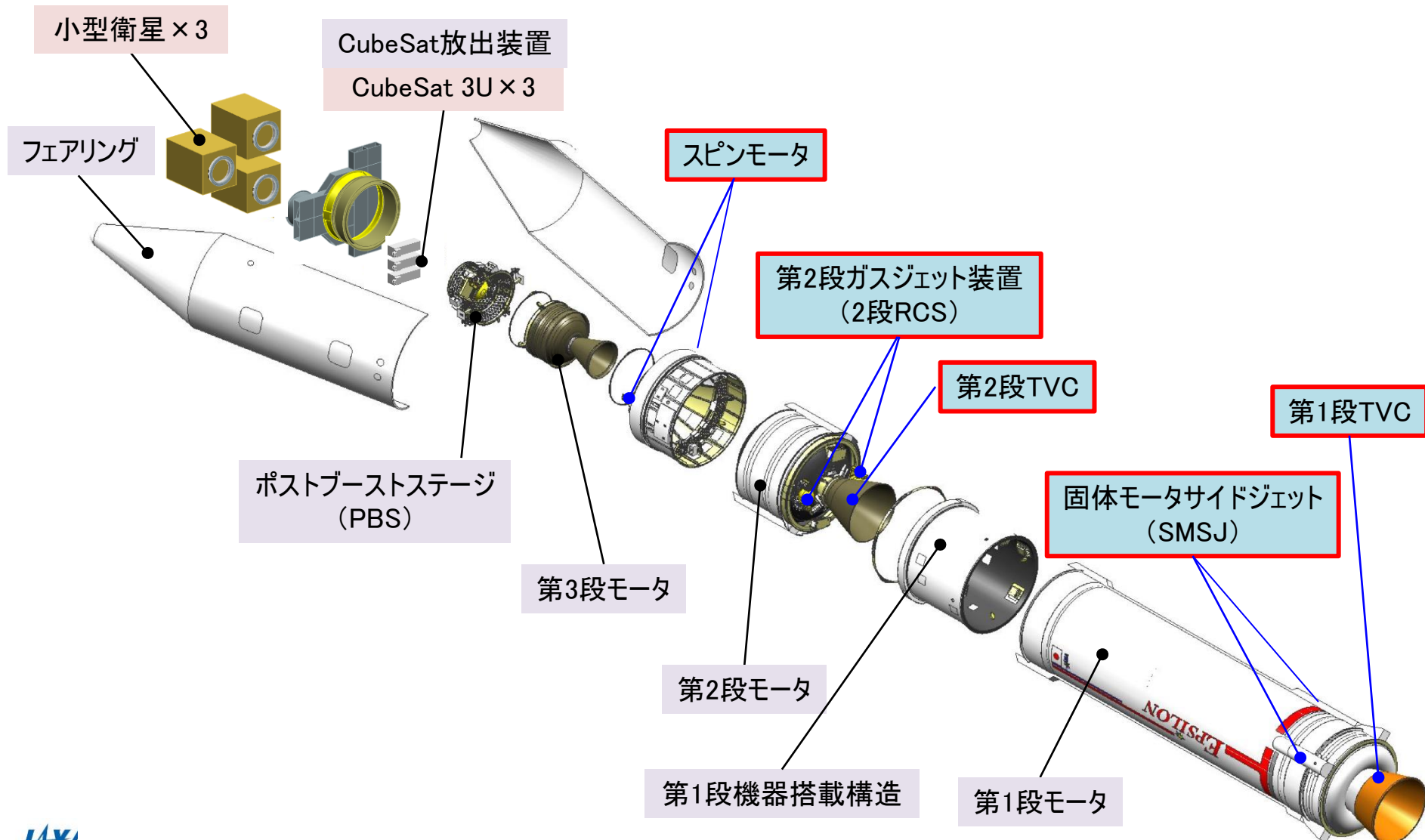
項目		機体諸元
全長		26m
直径		最大径:φ2.6
全備質量		96ton
段構成		固体3段式 + PBS
衛星分離		小型実証衛星3号機: Lightband*1、受託衛星: Lightband*2、キューブサット: E-SSOD*3
衛星搭載		複数衛星搭載構造Ⅲ型(IA新規開発)
フェアリング		投棄部: 9187mm、非投棄部: 450mm
PBS	推進薬タンク	φ650 x1基(1液ヒドラジン)
	姿勢制御	PBSスラスタ(3軸)
第3段	モータ	KM-V2c (ノズル非伸展)
	推進薬	ポリブタジエン系コンポジット
	姿勢制御	スピン安定
第2段	モータ	M-35 (φ2.6m) (ノズル非伸展)
	推進薬	ポリブタジエン系コンポジット
	姿勢制御	TVC+RCS
第1段	モータ	SRB-A
	推進薬	ポリブタジエン系コンポジット
	姿勢制御	TVC + SMSJ

\*1) Planetary Systems Corporation社製Lightband® 18.25 inchタイプ、\* 2) Planetary Systems Corporation社製Lightband® 15 inchタイプ、\*3) キューブサット放出装置(E-SSOD:Epsilon Small Satellite Orbital Deployer)、

# 1. イプシロンロケット6号機概要

## 1-3. 姿勢制御概要(再掲)

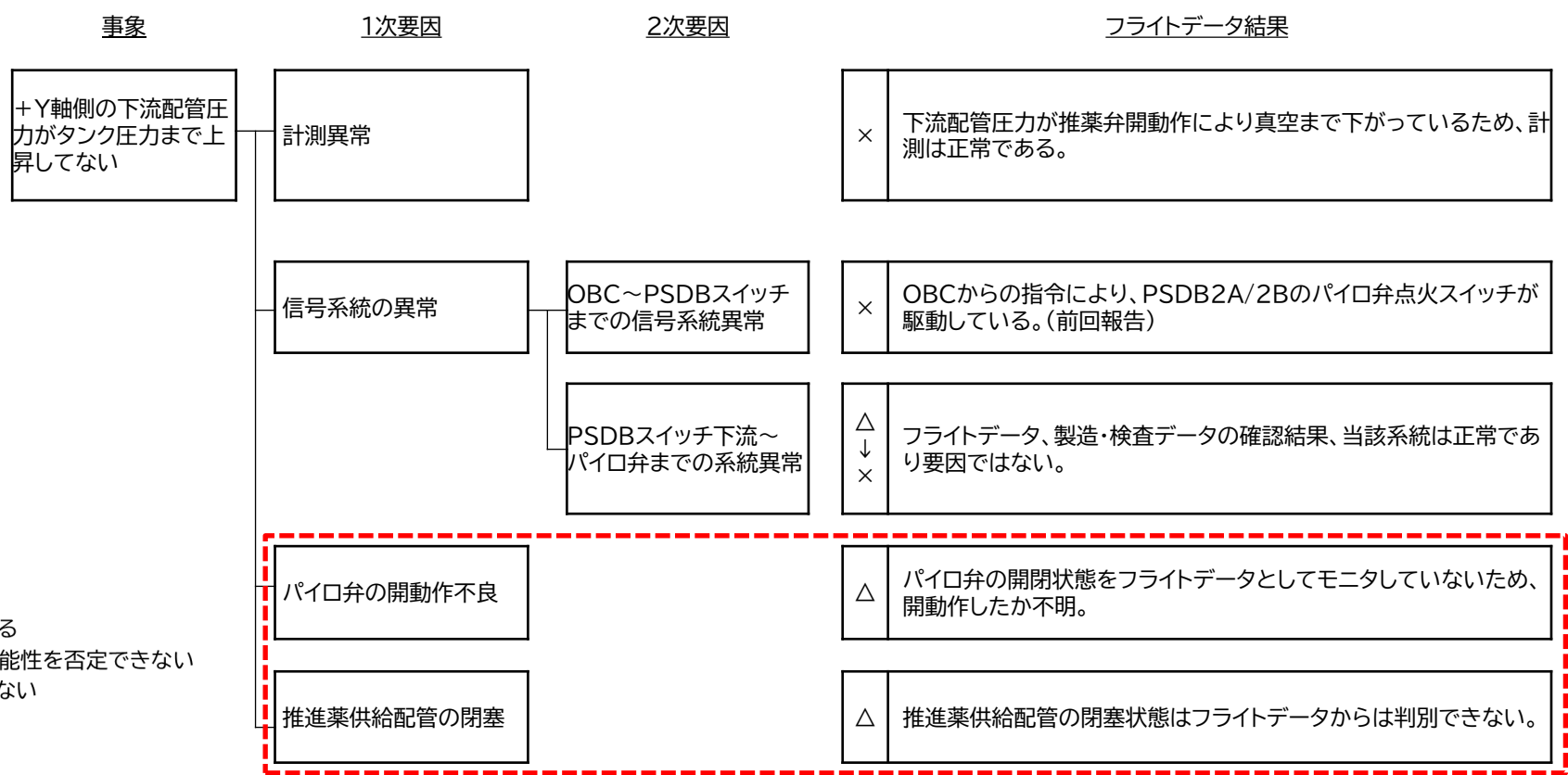
イプシロンロケットの1段および2段に搭載されている姿勢制御装置を以下の図の赤枠に示す。



# 1. イプシロンロケット6号機概要

## 1-4. 前回までの発生事象の整理(再掲)

- 1段モータ燃焼中のTVC制御およびSMSJによる姿勢制御は正常に行われ、2段モータ燃焼中のTVC制御も正常。その後RCSによる制御のみになった際に3軸全ての姿勢角誤差がRCS制御終了まで拡大し続けた(2段燃焼終了後姿勢異常)。
- 2系統のRCSのうち1系統(+Y軸側)のパイロ弁の下流配管圧力の値が、パイロ弁に点火信号を送出した後にタンク圧力まで上昇しなかった。結果、RCSとして機能しなかった。
- 以下のFTA(Fault Tree Analysis)に示す原因の可能性が否定できなかった3つの推定要因のうち、「PSDBスイッチ下流～パイロ弁までの系統異常」は要因ではないと識別した。



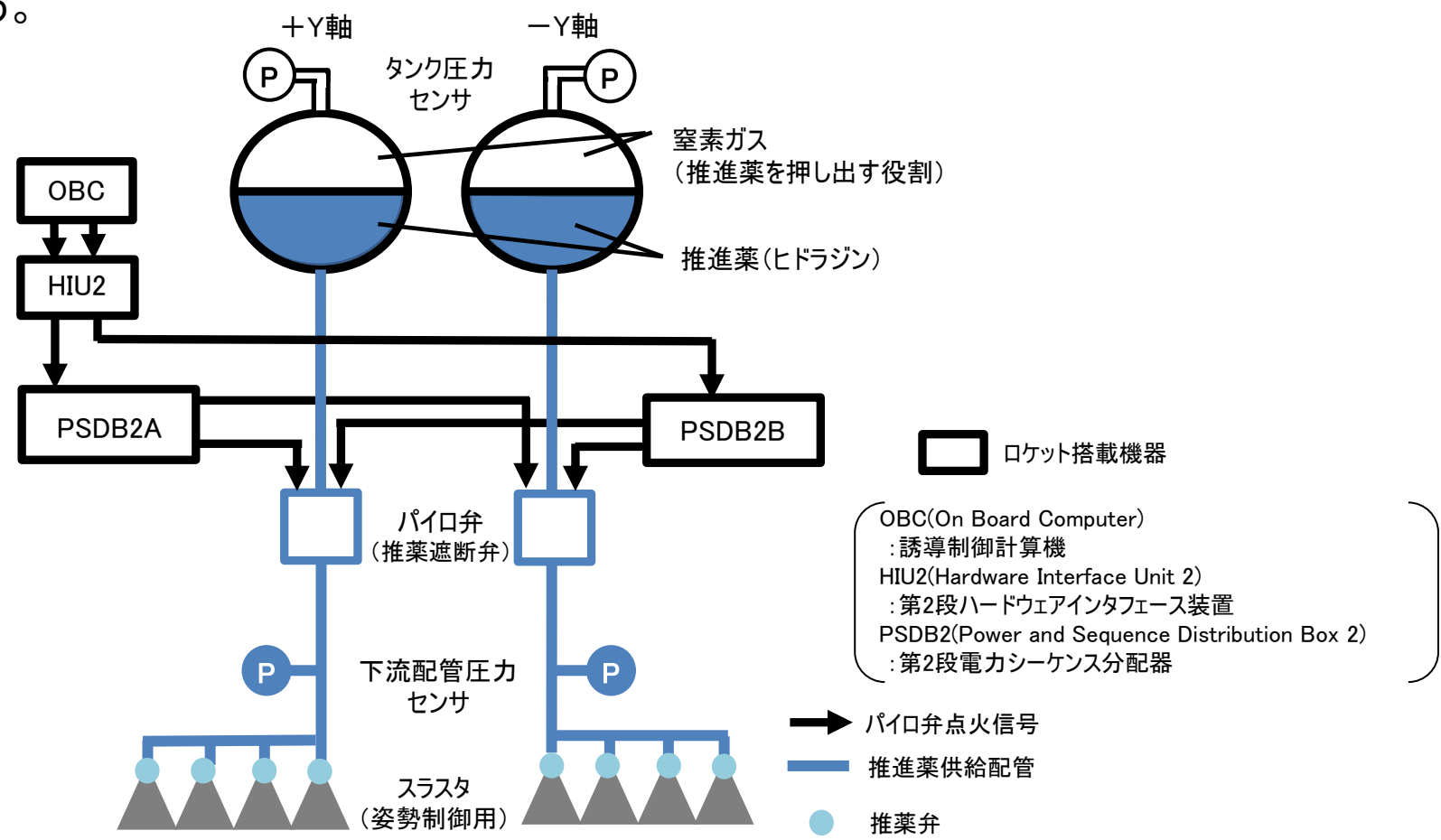
(凡例)  
 ○:原因である  
 △:原因の可能性を否定できない  
 ×:原因ではない



# 1. イプシロンロケット6号機概要

## 1-4. (a) 2段RCS概要(再掲)

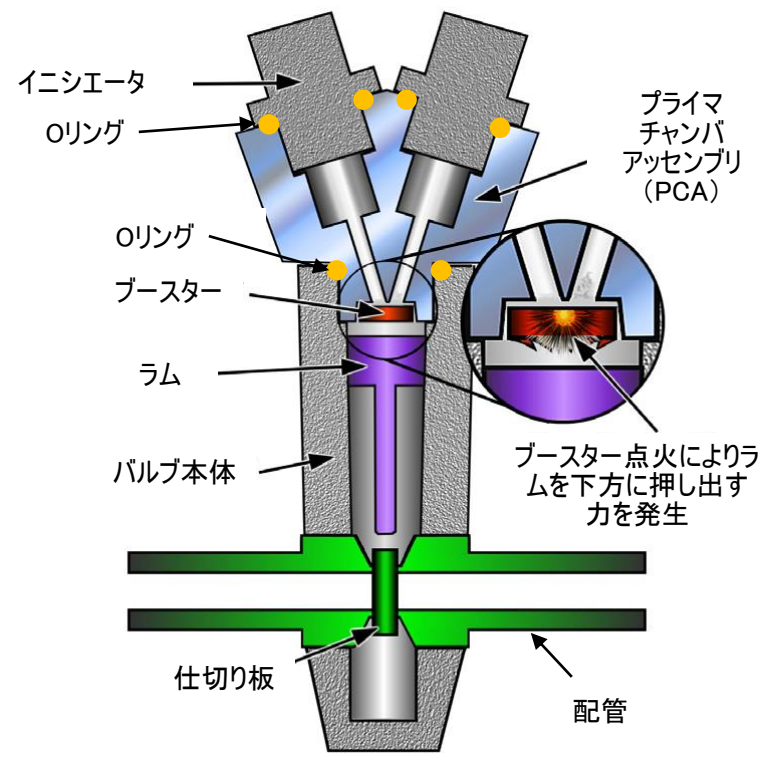
- 射場では安全のために推進薬をパイロ弁(推薬遮断弁)で遮断しており、飛行中に誘導制御計算機(OBC)からの信号(点火信号系統は冗長構成)でパイロ弁を開にしてスラスト直近まで推進薬を送る。
- 誘導制御計算機からの信号により推薬弁を開閉させ、触媒反応による燃焼により推力を発生させる。



# 1. イプシロンロケット6号機概要

## 1-4. (b) パイロ弁の概要(再掲)

- パイロ弁は、飛行前は推進薬を遮断し、飛行中に火工品（イニシエータ、ブースター）の点火により流路を開通させるバルブ。
- イニシエータは冗長構成であり、2つのうち1つが正常に点火すればブースターが点火し、以下の動作原理により流路は開通する。



### 【動作原理】

- ① イニシエータに点火
- ② ブースターに点火
- ③ ラムを下方へ押し出す
- ④ 配管の仕切り板をラムが打ちぬく
- ⑤ 流路が開通する

パイロ弁の構成・動作イメージ図

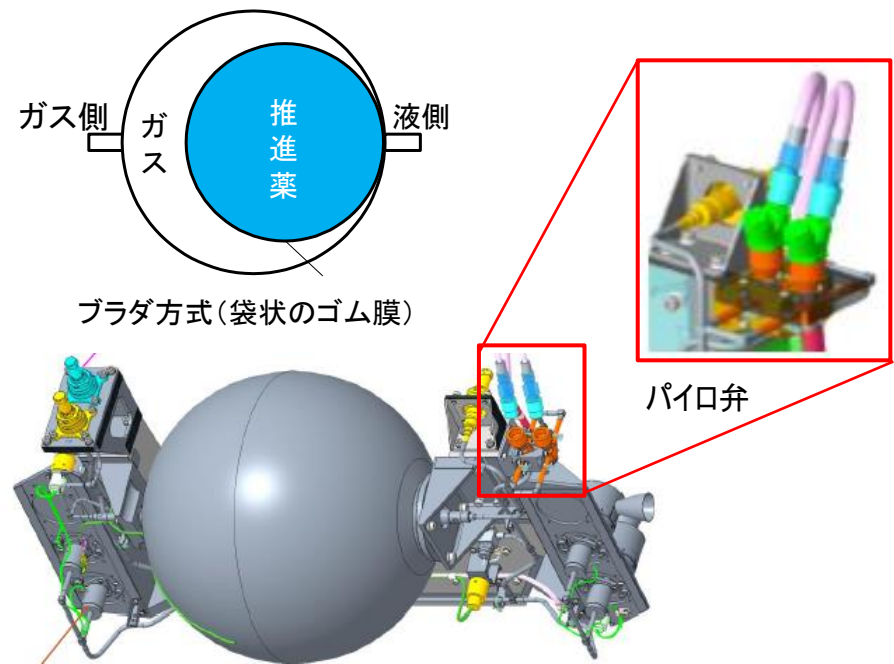
『NASA Engineering and Safety Center Technical Bulletin No. 10-02』より抜粋

# 1. イプシロンロケット6号機概要

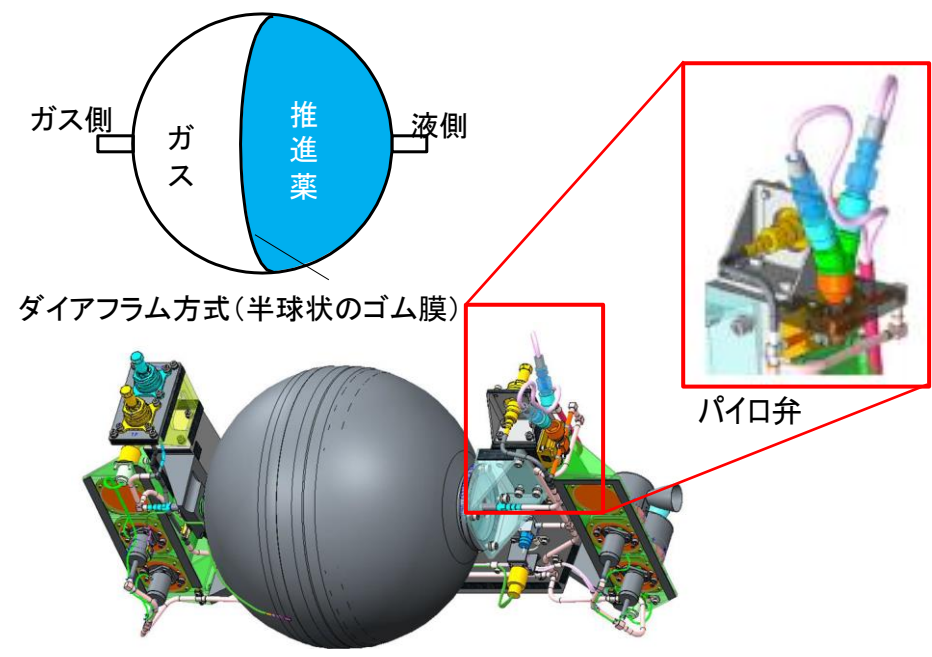
## 1-4. (c) 2段RCS開発経緯(再掲)

■ イプシロンの2段RCSの試験機と強化型(2号機～6号機)の仕様を下表に示す。

項目	試験機	強化型(2号機～6号機)
システム	スラスタ4基・タンクのモジュールを180° 対向2式	試験機から変更なし
推進タンク	Φ362mm <b>ブラダ式</b> タンク×2式 ※ 推進薬充填・加圧@工場	Φ362mm <b>ダイアフラム式</b> タンク×2式 ※ 推進薬充填・加圧@工場
パイロ弁	<b>4基</b> (2基(イニシエータ1式)×2式)	<b>2基</b> (1基(イニシエータ2式)×2式)
スラスタ	8基(4基×2式)	試験機から変更なし



試験機



強化型(2号機～6号機)

## 2. 原因究明状況

- 前回報告時点で可能性が否定できない2つの要因に対して、以下に示す製造・検査データの確認、追加検証、及びフライトデータ評価により、詳細分析を進めている。
  - パイロ弁の開動作不良(2-1項)
  - 推進薬供給配管の閉塞(2-2項)
  - +Y軸側下流配管圧力の変動(2-3項)
  - 故障シナリオ検討(2-4項)

### 【確認している製造・検査データ】

- ・図面
- ・製品仕様
- ・製造工程
- ・製造記録
- ・検査記録
- ・試験データ
- ・写真記録
- ・作業員、検査員ヒアリング
- ・不具合情報
- 等

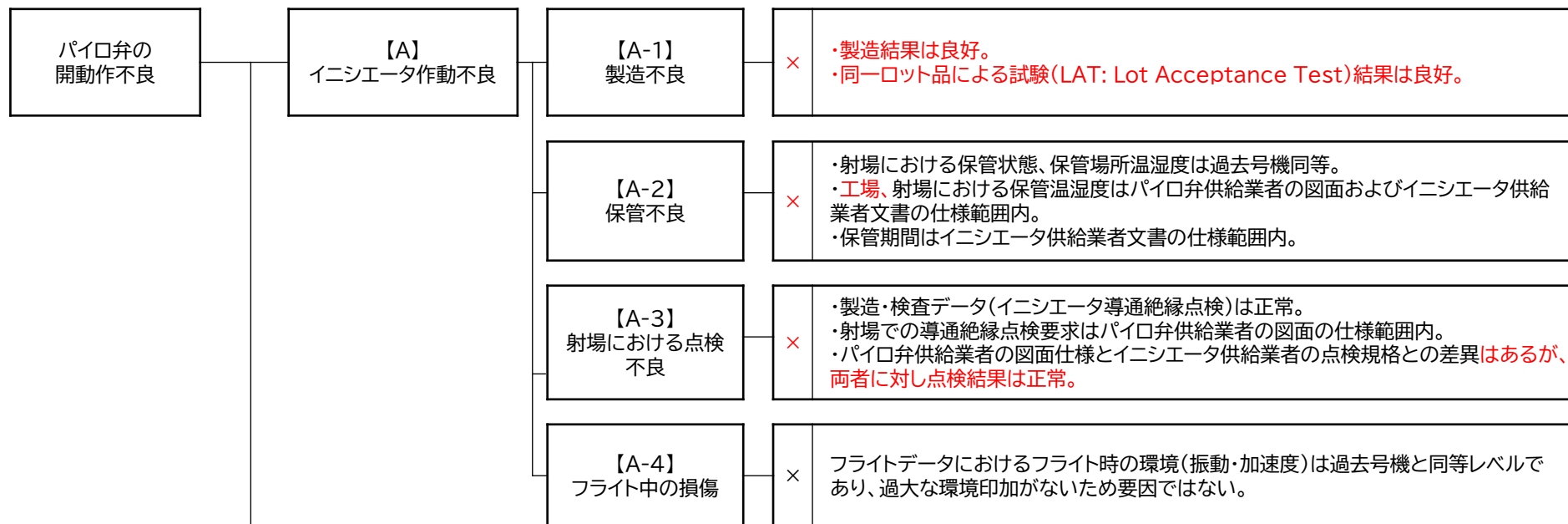
## 2. 原因究明状況

### 2-1. パイロ弁の開動作不良

#### (a) FTA(1/2)

「パイロ弁の開動作不良」について、詳細FTAを展開して製造・検査データに基づき絞り込みを実施し、イニシエータおよびPCAの作動不良は要因ではないことを確認した。

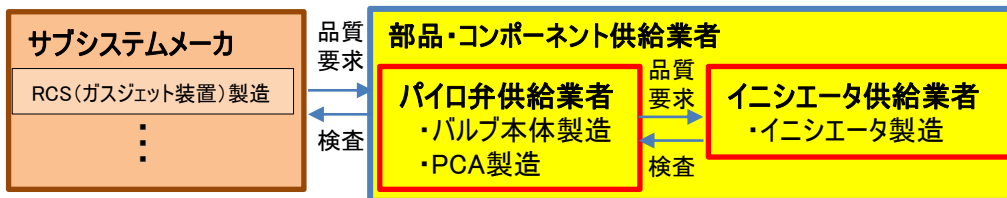
評価結果



(参考) - Y軸側イニシエータ2式のうち1式は射場点検要求に適合しない事象が発生したため、別ロット品に交換。

①

(参考) 品質保証体制におけるパイロ弁・イニシエータ供給業者の位置づけ



(凡例) 赤字: 前回報告からの更新

○: 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. 原因究明状況

### 2-1. パイロ弁の開動作不良

#### (a) FTA(2/2)

①



(凡例)

赤字: 前回報告からの更新

○: 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. 原因究明状況

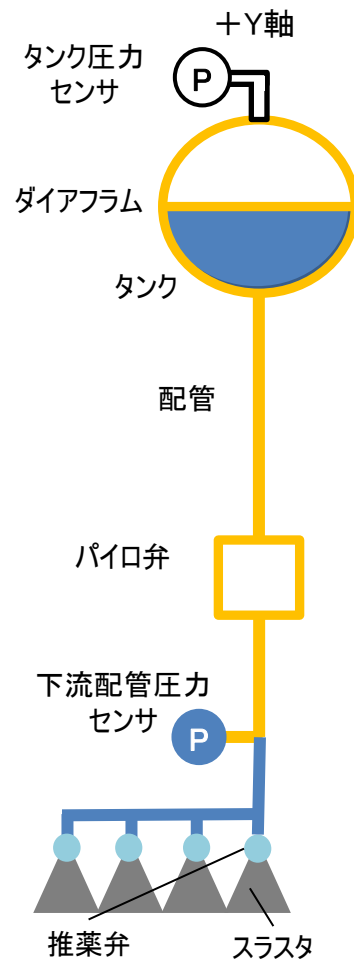
### 2-2. 推進薬供給配管の閉塞

#### (a) FTA

「推進薬供給配管の閉塞」について、詳細FTAを展開して製造・検査データに基づき絞り込みを実施し、パイロ弁内の推進薬配管の閉塞は要因ではないことを確認した。

評価結果

推進薬供給配管の閉塞	【A】 タンク出口ポートの閉塞	【A-1】 タンク内の異物混入	× 製造・検査データ(タンク内部構造、清浄度検査)の確認結果により、要因ではない。
		【A-2】 ダイアフラムによる閉塞	△ダイアフラムの変形による閉塞の有無を確認中。
	【B】 配管の閉塞	【B-1】 配管内の製造不良(形状異常)	× 製造・検査データ(溶接部のX線検査等)の確認結果により、要因ではない。
		【B-2】 配管内の異物混入	× 製造・検査データ(清浄度検査)の確認結果により、要因ではない。
		【B-3】 配管の発錆	× 配管はSUSであり、閉塞に至るような錆の成長の可能性はない。
		【B-4】 配管の氷結・推進薬の凍結	× 外気温度(最低温度14℃)、建屋温度(最低温度17℃)、フライトデータ中の温度データから、氷結・凍結の可能性はない。
		【B-5】 配管の変形	× 以下の確認結果より、要因ではない。 ・製造・検査データ(輸送中の加速度等)は良好。 ・フライトデータにおけるフライト時の環境(振動・加速度)は過去号機と同等レベルであり、過大な環境印加がない。
	【C】 パイロ弁内の推進薬配管の閉塞	× 図面(パイロ弁内部構造)と製造・検査データ(清浄度検査、非破壊検査)より、要因ではない。	



(凡例)赤字: 前回報告からの更新

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



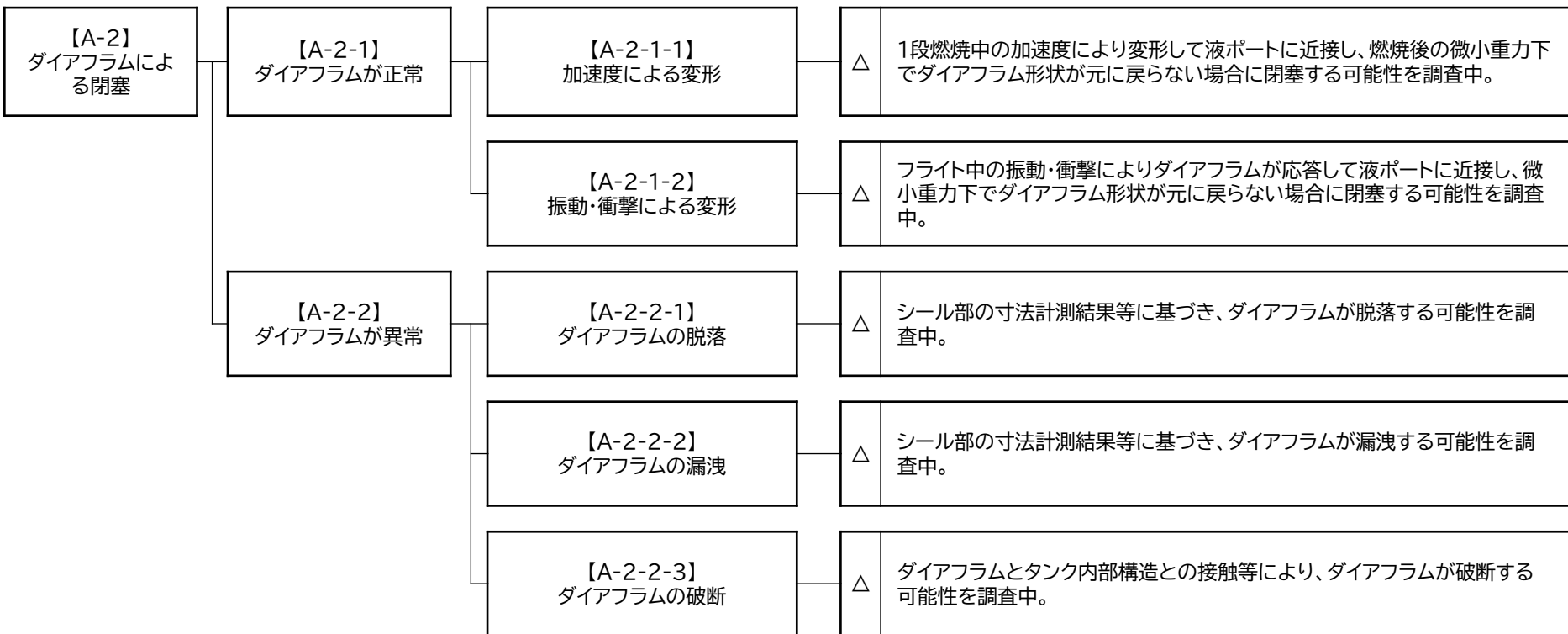
## 2. 原因究明状況

### 2-2. 推進薬供給配管の閉塞

#### (b)ダイアフラムによる閉塞 詳細FTA

「【A-2】ダイアフラムによる閉塞」について、詳細FTAを展開して製造・検査データに基づき絞り込みを実施し、追加検証による詳細分析を進めている。

評価結果



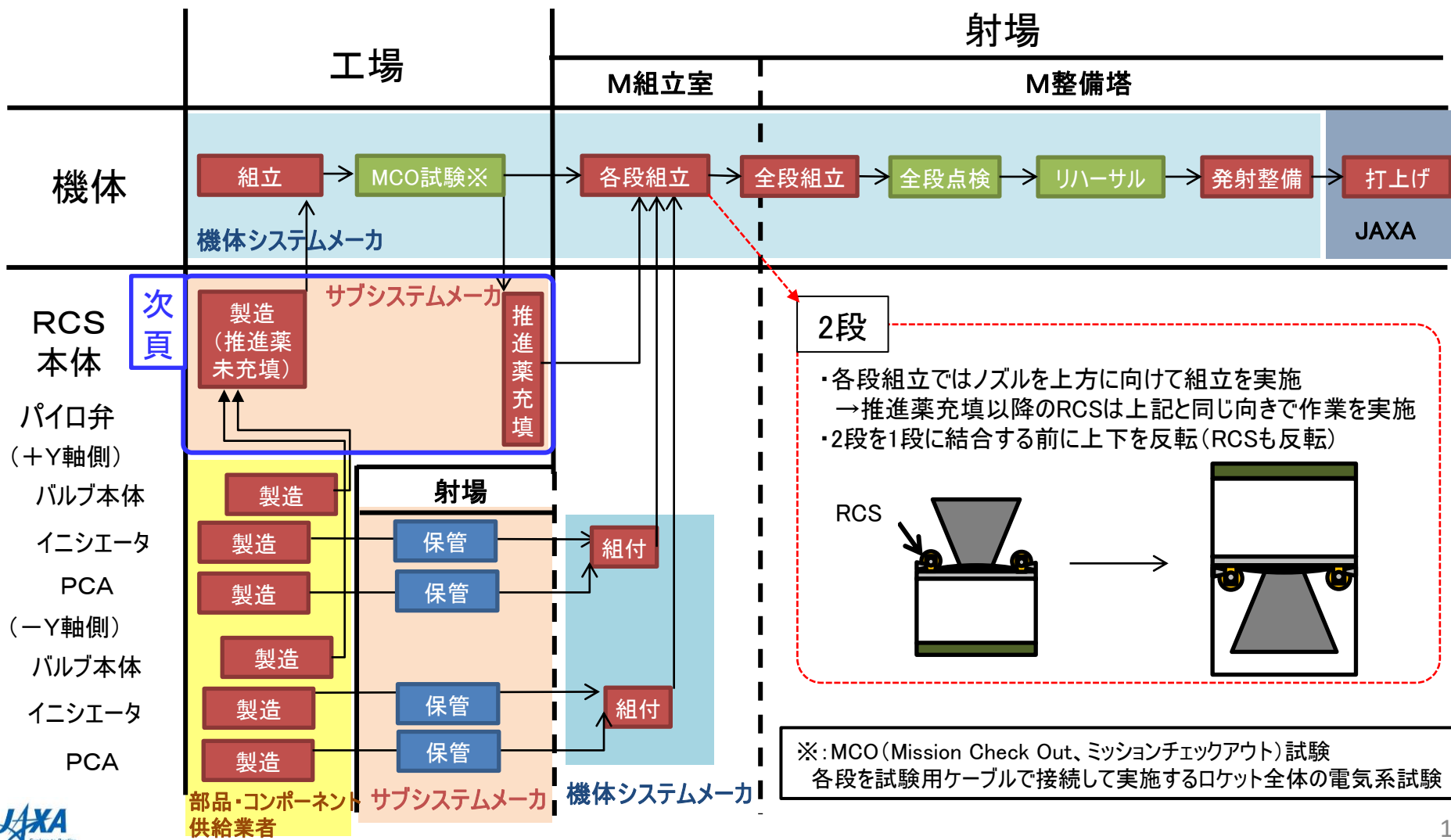


## 2. 原因究明状況

### 2-2. 推進薬供給配管の閉塞

#### (c) 製造・検査データ確認【A-2-2】

■ イプシロンロケット6号機で計画していた製造・組立プロセスのフロー図を以下に示す。(再掲)



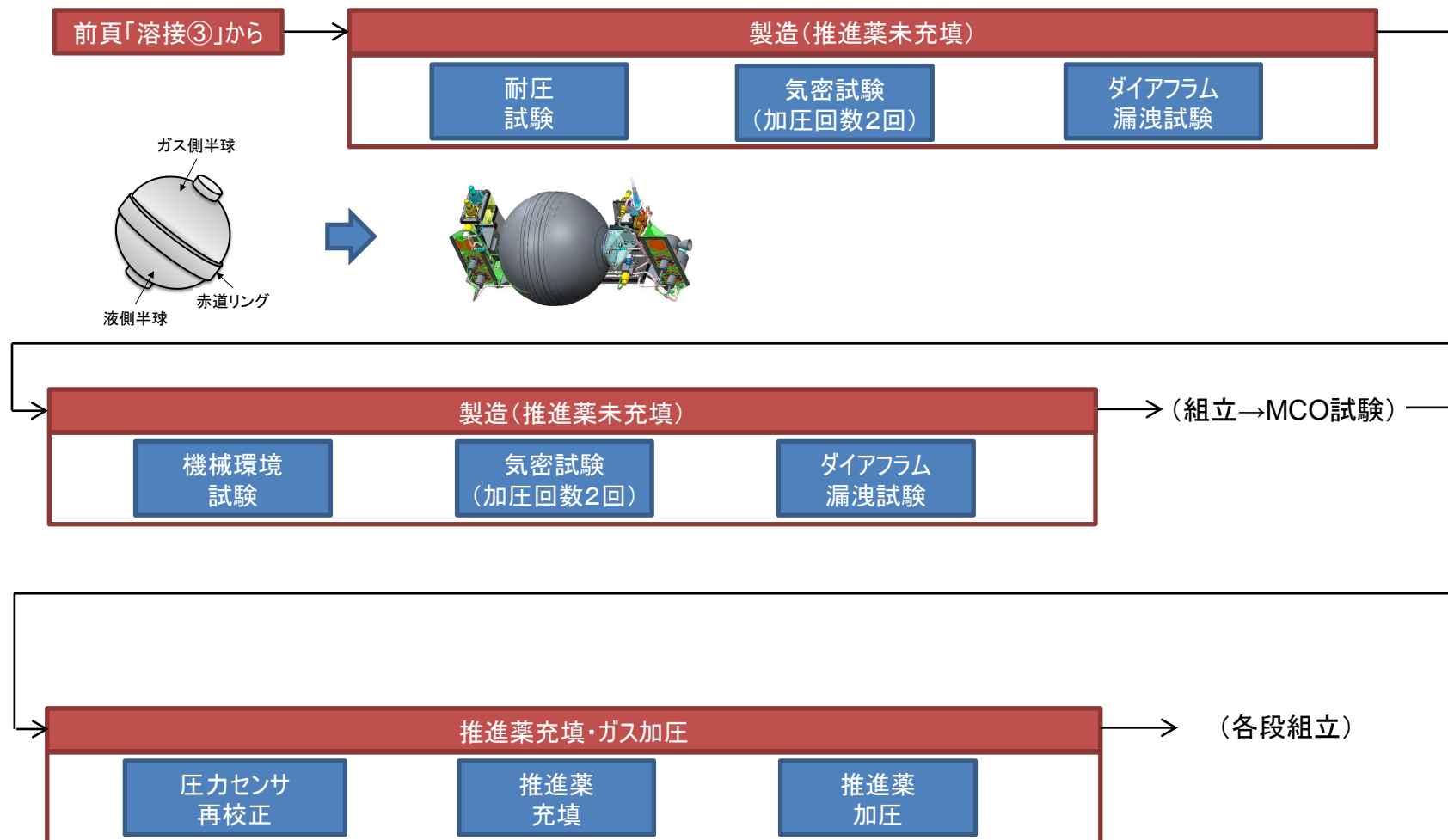


## 2. 原因究明状況

### 2-2. 推進薬供給配管の閉塞

#### (c) 製造・検査データ確認【A-2-2】

- RCSのダイアフラムに関連する製造プロセスのフロー図（詳細）を以下に示す。



## 2. 原因究明状況

### 2-2. 推進薬供給配管の閉塞

#### (c) 製造・検査データ確認【A-2-2】

- 「【A-2-2】ダイアフラムが異常」について、製造・検査データを詳細確認中。確認状況を以下に示す。(再掲)

製造工程	確認項目	確認状況	
ダイアフラム製造(単体)	材料特性試験(試験片、ロット試験)	良好	試験データ
	耐久性試験・気密試験(ロット試験)	良好	試験方法、試験データ
	物性確認試験(試験片※、ロット試験)	良好	試験方法、試験データ
	ダイアフラム成型後外観検査	良好	検査結果
	寸法・質量検査	良好	検査記録
	気密試験	良好	試験データ
	最終外観検査	良好	検査結果

※: 耐久性試験・気密試験(ロット試験)のダイアフラムから切り出した試験片

## 2. 原因究明状況

### 2-2. 推進薬供給配管の閉塞

#### (c) 製造・検査データ確認【A-2-2】

(黒字部再掲 赤字部更新)

製造工程	確認項目	確認状況	
推進薬タンク製造※ (ダイアフラム組付関連)	ダイアフラム固定リング溶接部(溶接②)健全性	溶接に関する検査記録の妥当性を確認中	
	ダイアフラム組付部寸法(溶接②前後)	検査記録の妥当性を確認中	
	ダイアフラム漏洩試験(機能試験前)	良好	検査記録、試験データ
	機能試験(ダイアフラム作動試験)	良好	検査記録、試験データ
	ダイアフラム漏洩試験(機能試験後)	良好	検査記録、試験データ
	耐圧試験(溶接③後)	良好	試験データ
	気密試験(溶接③後)	良好	試験データ
	ダイアフラム漏洩試験(溶接③後)	検査記録の妥当性を確認中	

※: フロー図(P.17)における【組み込み～溶接②～溶接③】で実施する工程

## 2. 原因究明状況

### 2-2. 推進薬供給配管の閉塞

#### (c) 製造・検査データ確認【A-2-2】

(赤字部更新)

製造工程	確認項目	確認状況	
製造 (推進薬未充填)	耐圧試験	良好	試験データ
	気密試験	良好	試験データ
	ダイアフラム漏洩試験(機械環境試験前)	手順、検査記録の妥当性を確認中	
	機械環境試験	良好	試験データ
	気密試験	良好	試験データ
	ダイアフラム漏洩試験(機械環境試験後)	手順、検査記録の妥当性を確認中	

## 2. 原因究明状況

### 2-2. 推進薬供給配管の閉塞

#### (c) 製造・検査データ確認【A-2-2】

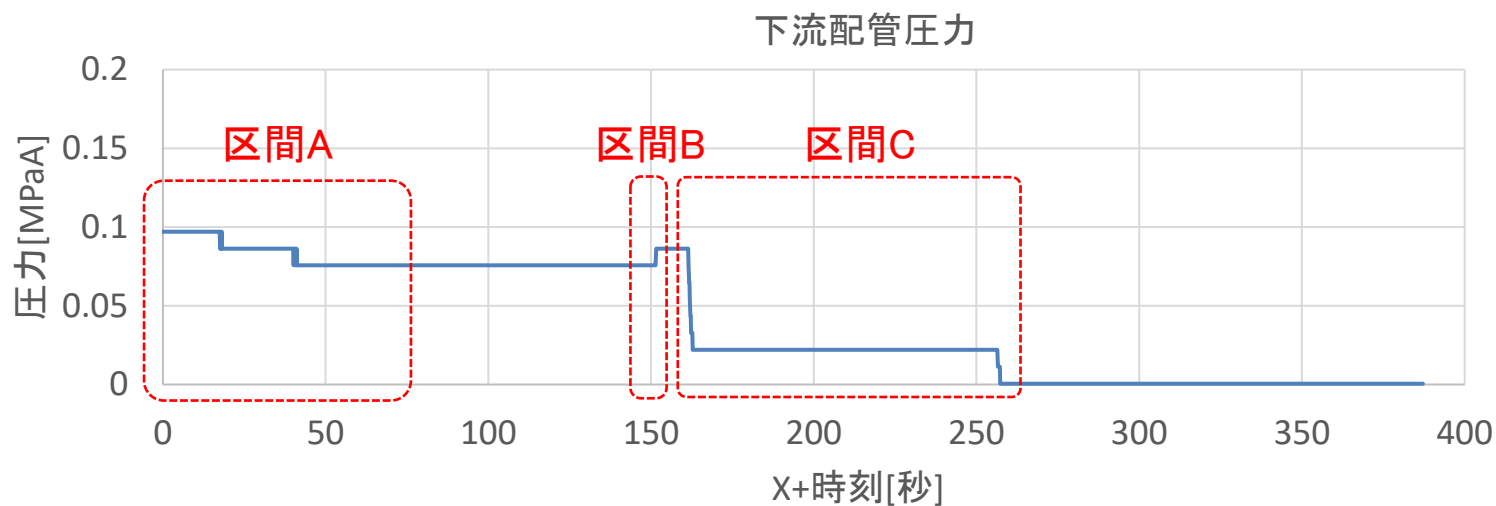
(黒字部再掲 赤字部更新)

製造工程		確認項目	確認状況	
圧力センサ再校正			良好	試験データ
推進薬充填・ガス加圧	推進薬充填		良好	充填手順、充填量データ
	ガス加圧		良好	加圧手順、圧力データ
輸送	輸送環境		良好	加速度データ、温度データ
推進薬タンク圧力データ			良好	圧力データ

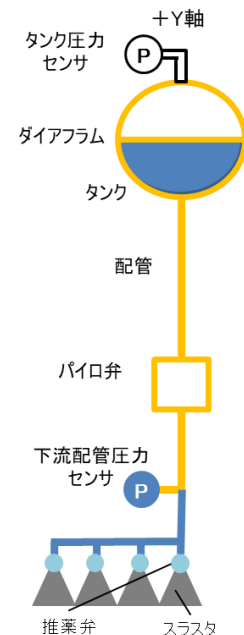
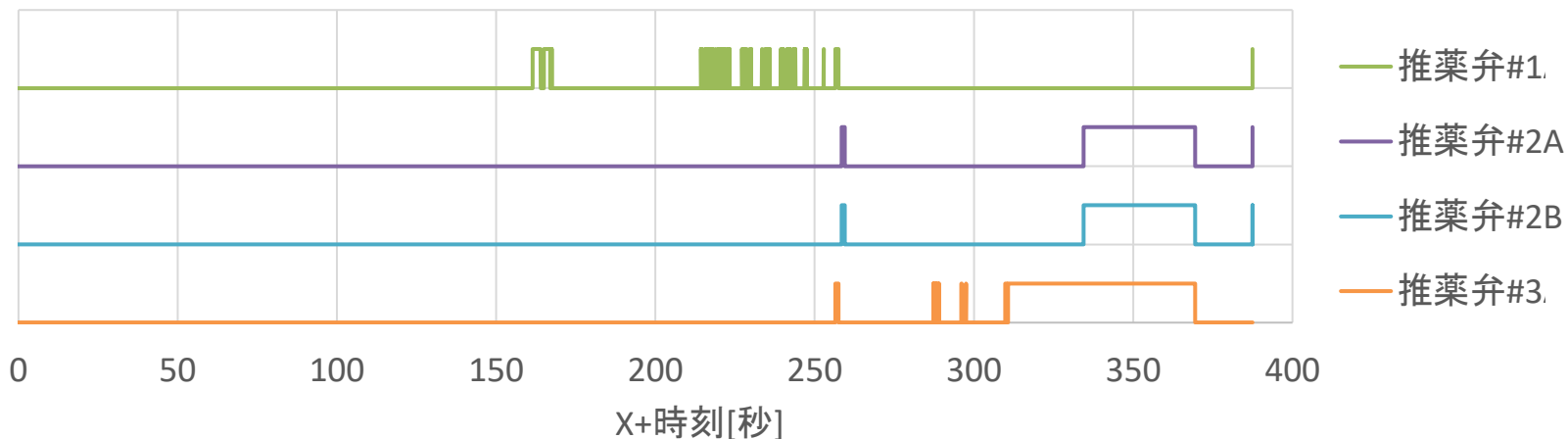
## 2. 原因究明状況

### 2-3. +Y軸側下流配管圧力の変動

■ +Y軸側RCSの下流配管圧力の変動に対する評価を実施した。



推薬弁動作コマンド



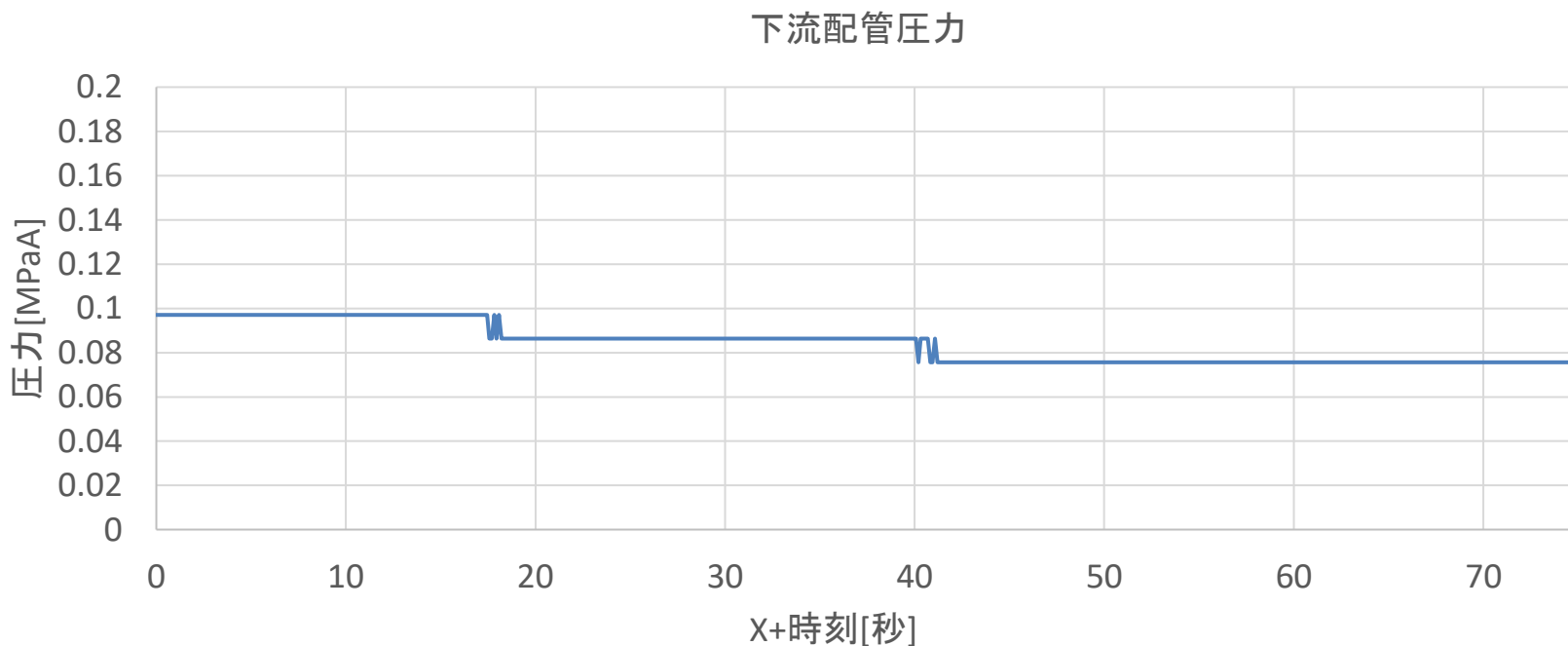
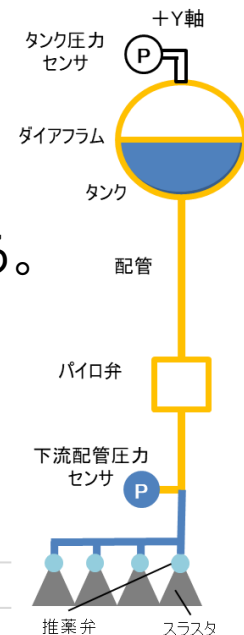


## 2. 原因究明状況

### 2-3. +Y軸側下流配管圧力の変動

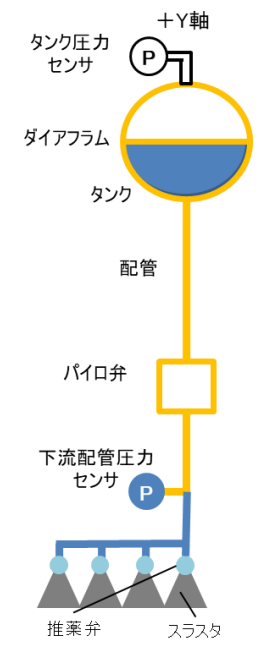
#### 【区間A】

■ リフトオフ以降、外気圧力の低下と飛行中の振動により圧力が徐々に低下している。



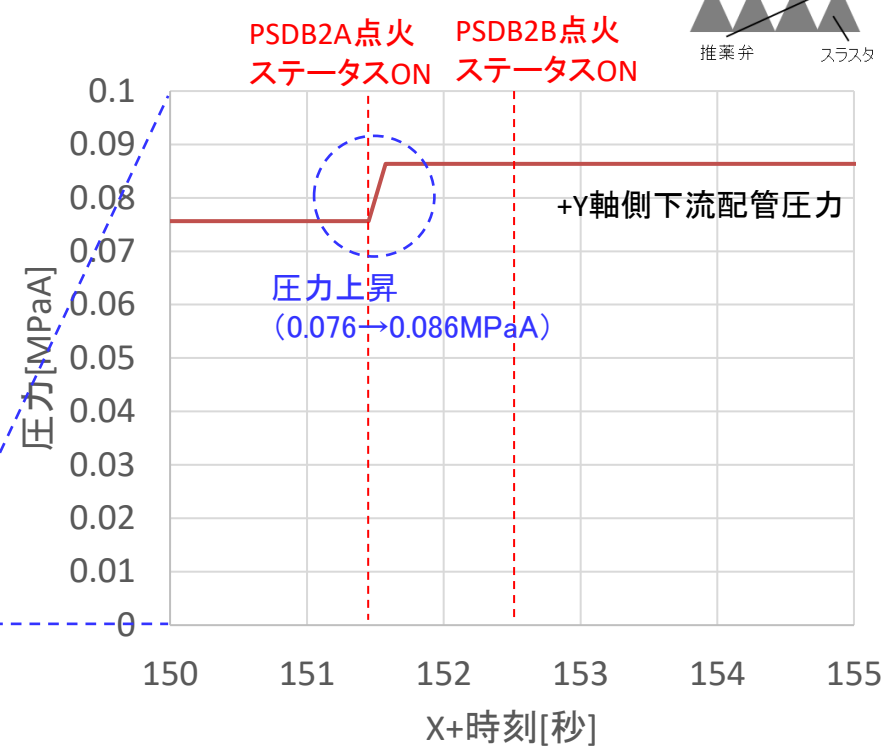
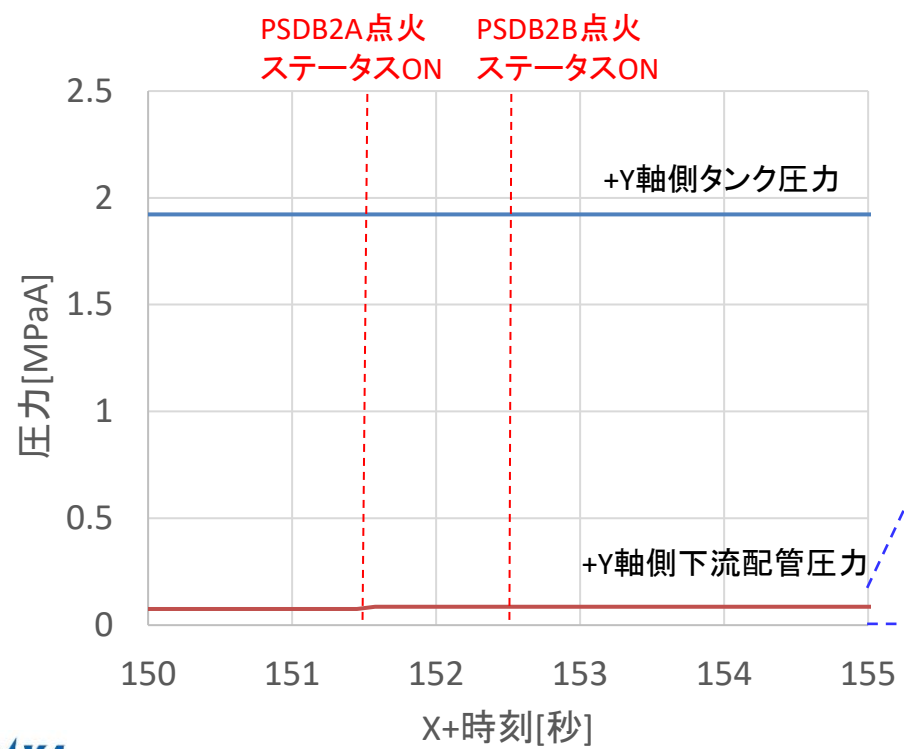
## 2. 原因究明状況

### 2-3. +Y軸側下流配管圧力の変動



【区間B】

■ パイロ弁点火信号送出時の圧力が1分解能分上昇している。

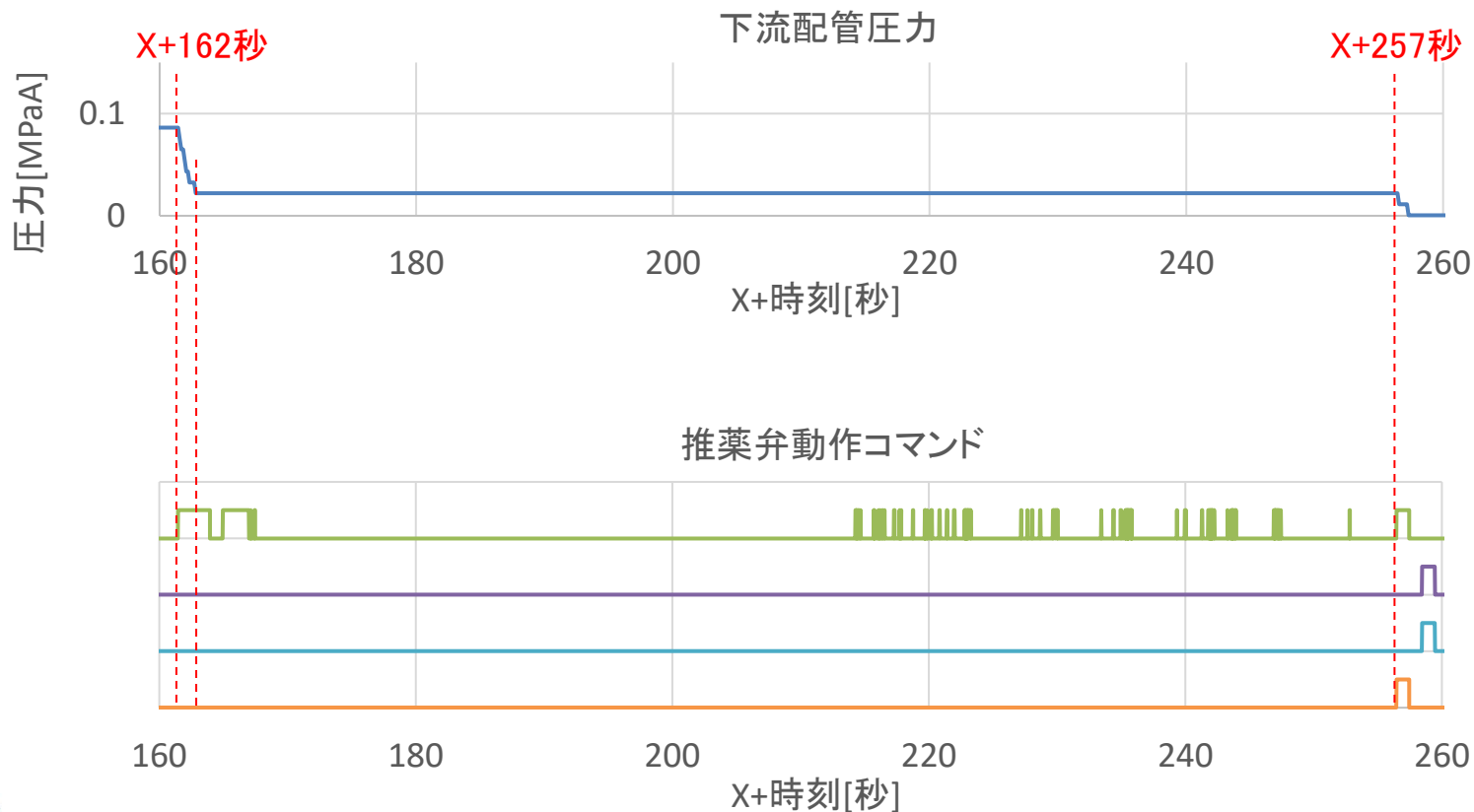


## 2. 原因究明状況

### 2-3. +Y軸側下流配管圧力の変動

#### 【区間C】

- X+162秒に推薬弁#1が開動作した後、圧力が0.086MPaAから0.022MPaAに低下。
- X+257秒に推薬弁#1および#3が開動作した後、圧力が0.022MPaAから0MPaAに低下。
- X+257秒までの推薬弁#1開動作中に圧力が保持されている状況について調査中。



- 推薬弁#1
- 推薬弁#2A
- 推薬弁#2B
- 推薬弁#3

## 2. 原因究明状況

### 2-3. +Y軸側下流配管圧力の変動

- パイロ弁点火信号送出時の+Y軸側下流配管圧力の1分解能分上昇は、以下に示す理由により実事象と判断した。
  - 区間Aの圧力降下および区間Cの推進薬弁開タイミングでの圧力降下は実事象を示しており、圧力センサは正常に動作している。
  - 実事象でない場合は電氣的に以下の要因に絞られるが、いずれも本事象とは整合しない。
    - ①ノイズによる計測値のシフト  
パイロ弁点火信号送出時の電流の影響を受けて計測値がシフトする可能性はあるが、この場合は点火電流がなくなれば元に戻る一過性のものであるため本事象とは異なる。
    - ②GNDの変動による計測値のシフト  
GNDが変動することで計測値がシフトする可能性はあるが、本事象発生時にはGNDとしている機体との接続状態に変化はないこと、及び電氣的にGNDが変動することはないため本事象とは異なる。
    - ③デジタル変換閾値近傍での計測値のシフト  
センサ信号(アナログ電圧)がデジタル変換閾値を少しでも超えればデジタル値は1分解能上昇するため、センサ信号が閾値付近であれば計測値(デジタル値)が1分解能シフトする可能性がある。本事象発生前の圧力データから本事象発生時点の圧力信号は閾値付近ではないと判断されるため本事象とは異なる。

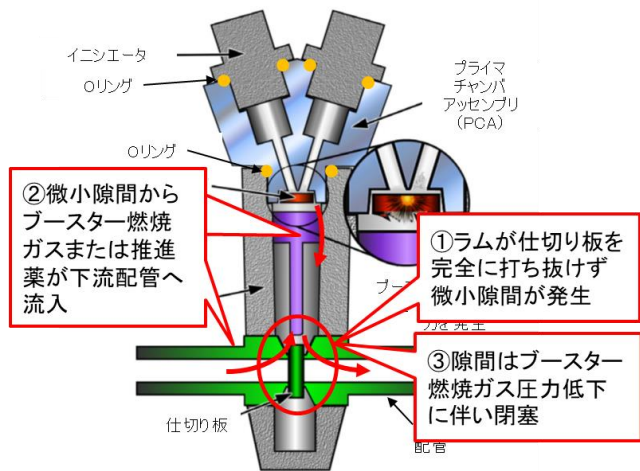
〔 GND(Ground) : 基準となる電位 〕

## 2. 原因究明状況

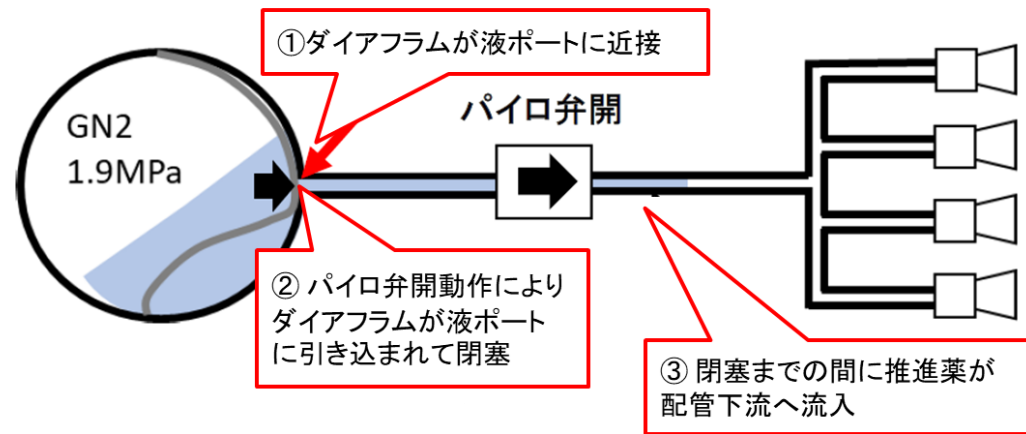
### 2-4. 故障シナリオ検討

- パイロ弁点火信号送出時の+Y軸側下流配管圧力の1分解能分上昇が実事象(圧力上昇)であることに基づいた故障シナリオは下表の通り。
- これらの故障シナリオの可能性を検討中。

要因	故障シナリオ
パイロ弁の開動作不良	PCA作動後にラムが仕切り板を完全に打ち抜けず、仕切り板に微小な隙間が発生してブースター燃焼ガスまたは推進薬がわずかにパイロ弁下流に入り込んだ。
推進薬供給配管の閉塞	ダイヤフラムが液ポートに近接し、パイロ弁開動作時にダイヤフラムが液ポートに引き込まれて閉塞した。閉塞までの間に推進薬がわずかにパイロ弁下流に入り込んだ。



パイロ弁の開動作不良による故障シナリオ



推進薬供給配管の閉塞による故障シナリオ

### 3. 今後の進め方

#### 【イプシロン6号機の原因究明について】

- ✓ 製造・検査データ等を用いて絞り込みを実施した結果、以下を確認した。
  - 「パイロ弁の開動作不良」のイニシエータ、PCA作動不良は要因でない
  - 「推進薬供給配管の閉塞」のパイロ弁内の推進薬配管の閉塞は要因でない
- ✓ 「パイロ弁バルブ本体の作動不良」もしくは「ダイヤフラムによる閉塞」に絞り込んだ。
- ✓ フライトデータの+Y軸側下流配管圧力の1分解能分上昇は実事象と判断した。
- ✓ 上記を基に2つの故障シナリオを推定した。

#### 【今後の予定】

- ✓ 故障シナリオの発生可能性を見極めるための解析・試験を実施し、シナリオの確度を向上させ、後継ロケット等への対策を反映する。
- ✓ 打上げ失敗の背後要因(間接的原因)の分析を行い、同様の事象が発生しないよう対策を講じる。

# 参考. 水平展開状況

## H3ロケットへの水平展開結果

- 前回の調査安全小委員会にて、H-IIAロケットのパイロ弁と交換する方針を報告した。
- 前回報告時に「一部技術評価を継続および最終的な試験（機械的環境への耐性）による確認を行う予定」としていた。
- 残る技術評価としてフライト中の熱環境に関する評価を行い11月16日に設計確認会で確認した。また、最終的な試験として、タンクモジュールEM(Engineering Model)を使った音響試験により、交換したパイロ弁を含む設計変更による機械的環境への耐性を確認した。これらの総合評価により、設計変更によるRCSサブシステム、及びロケットシステム全体への影響がないことを確認した。
- H3試験機1号機用タンクモジュールFM(Flight Model)のH-IIAロケットパイロ弁への交換作業を完了した。
- 今後、以下の作業を進める。
  - ① タンクモジュールの推進薬充填(工場)
  - ② タンクモジュールの機体への組付け(射場)

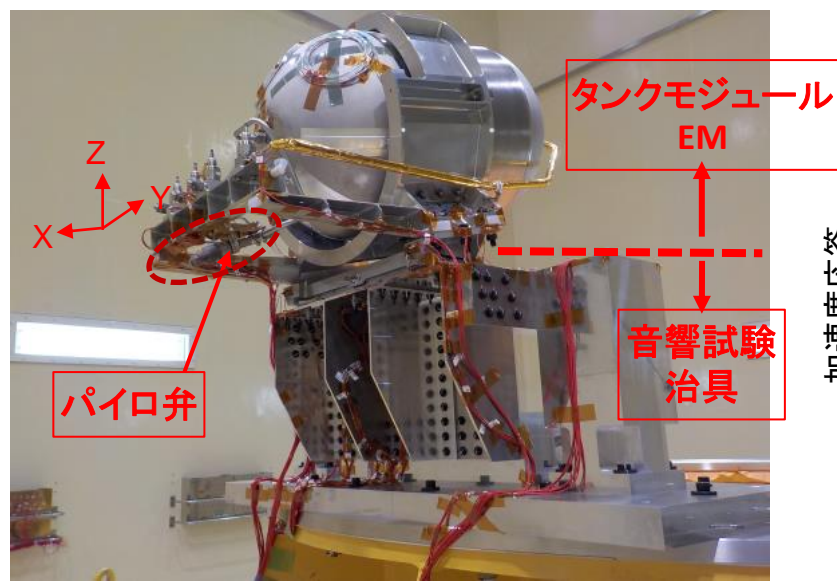


図: 音響試験セットアップ

※タンクモジュールEM(タンク, タンク保持構造, パイロ弁等がフライト品と同等)

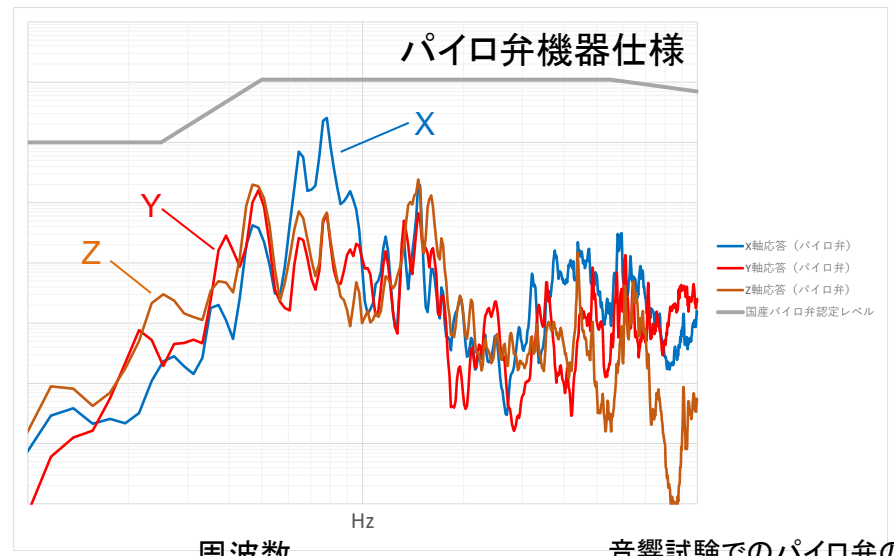


図: 音響試験取得データ

パイロ弁の振動レベルが機器仕様  
に収まることを確認