

イプシロンロケット6号機 打上げ失敗原因調査状況について

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7回にわたって調査・安全小委員会及び宇宙開発利用に係る調査・安全有識者会合へご報告してきた。

本日は、これまでの原因究明のまとめとして、4月18日の宇宙開発利用に係る調査・安全有識者会合の資料にてご報告する。

令和5(2023)年4月28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5(2023)年4月18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(再掲)

2. 原因究明結果

- 2-1. ダイアフラムによる閉塞の詳細FTA
- 2-2. 追加検証試験
- 2-3. ダイアフラムによる閉塞

3. 不具合要因への対策

- 3-1. イプシロンSへの是正処置
- 3-2. 背後要因分析・対策の方向性

4. まとめ

(参考1)ダイアフラムタンクの製造・検査データ確認

(参考2)水平展開

- 1. 衛星への水平展開
- 2. XRISMの評価概要
- 3. SLIMの評価概要

0. 本日の報告内容

前回までの範囲

打上げ失敗(事象の発生)

フライトデータに基づく事象の把握

フライトデータに基づく原因究明

製造・検査データに基づく原因究明

要因の更なる絞り込みを実施

追加検証結果等を踏まえた原因の特定

今回の資料の範囲

原因の特定

是正処置と背後要因の検討

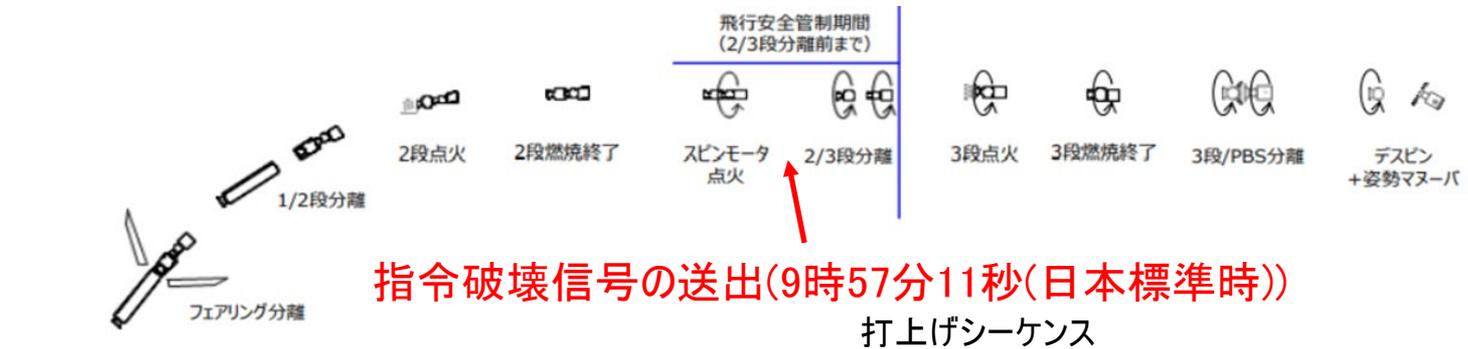
類似機器を搭載した衛星への
水平展開結果を追加

是正対策/水平展開

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
	時	分	秒	経過秒
(1) リフトオフ	00	00	0	0
(2) 第1段 燃烧終了	01	49	109	108
(3) 衛星フェアリング分離	02	31	151	151
(4) 第1段・第2段分離	02	41	161	161
(5) 第2段 燃烧開始	02	45	165	165
(6) 第2段 燃烧終了	04	53	293	294
(7) スピンモータ燃烧開始	06	09	369	370
(8) スピンモータ燃烧終了	06	14	374	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。



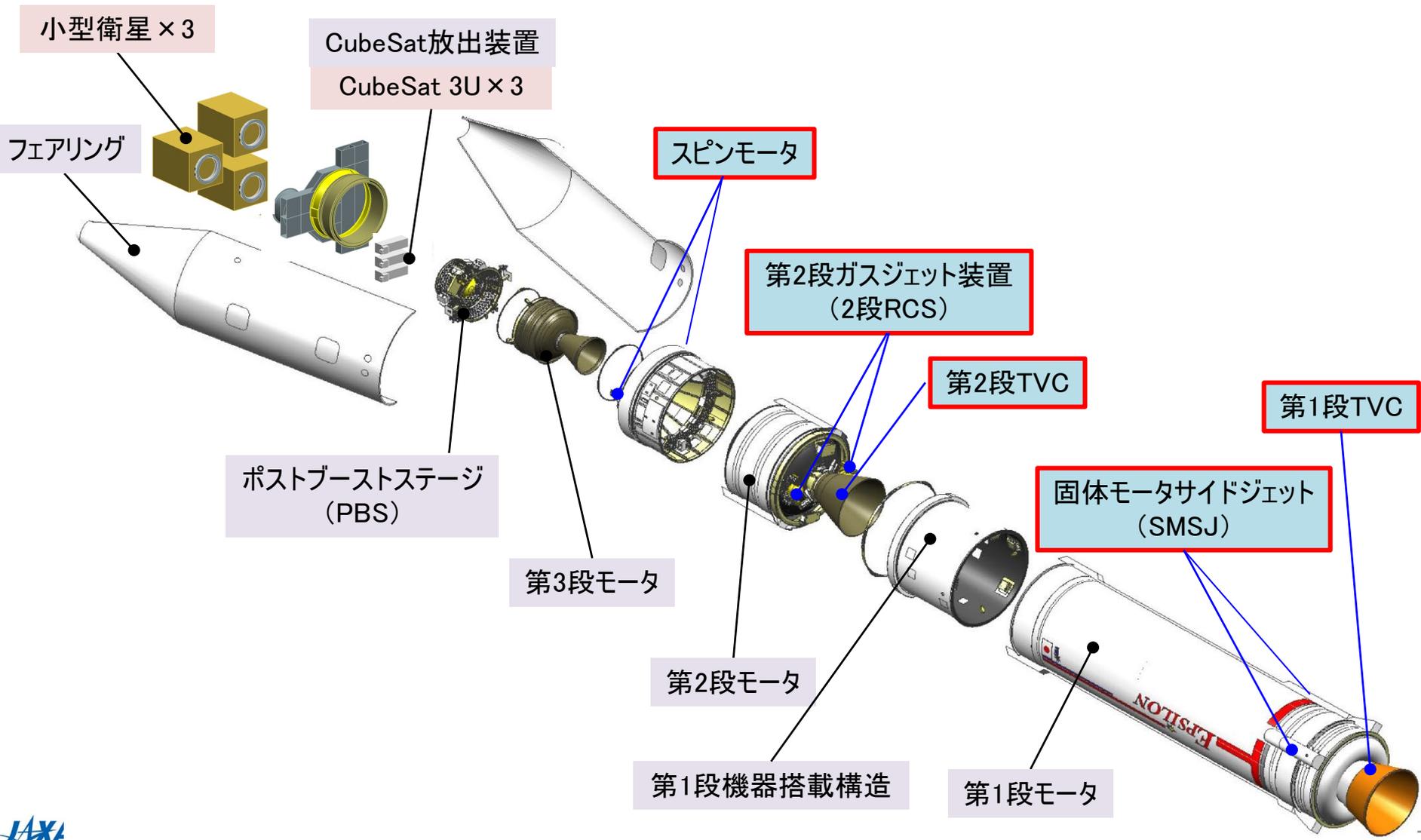
項目		機体諸元
全長		26m
直径		最大径:φ2.6
全備質量		96ton
段構成		固体3段式 + PBS
衛星分離		小型実証衛星3号機: Lightband*1、受託衛星: Lightband*2、キューブサット: E-SSOD*3
衛星搭載		複数衛星搭載構造Ⅲ型(IA新規開発)
フェアリング		投棄部: 9187mm、非投棄部: 450mm
PBS	推進薬タンク	φ650 x1基(1液ヒドラジン)
	姿勢制御	PBSスラスタ(3軸)
第3段	モータ	KM-V2c (ノズル非伸展)
	推進薬	ポリブタジエン系コンポジット
	姿勢制御	スピン安定
第2段	モータ	M-35 (φ2.6m)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

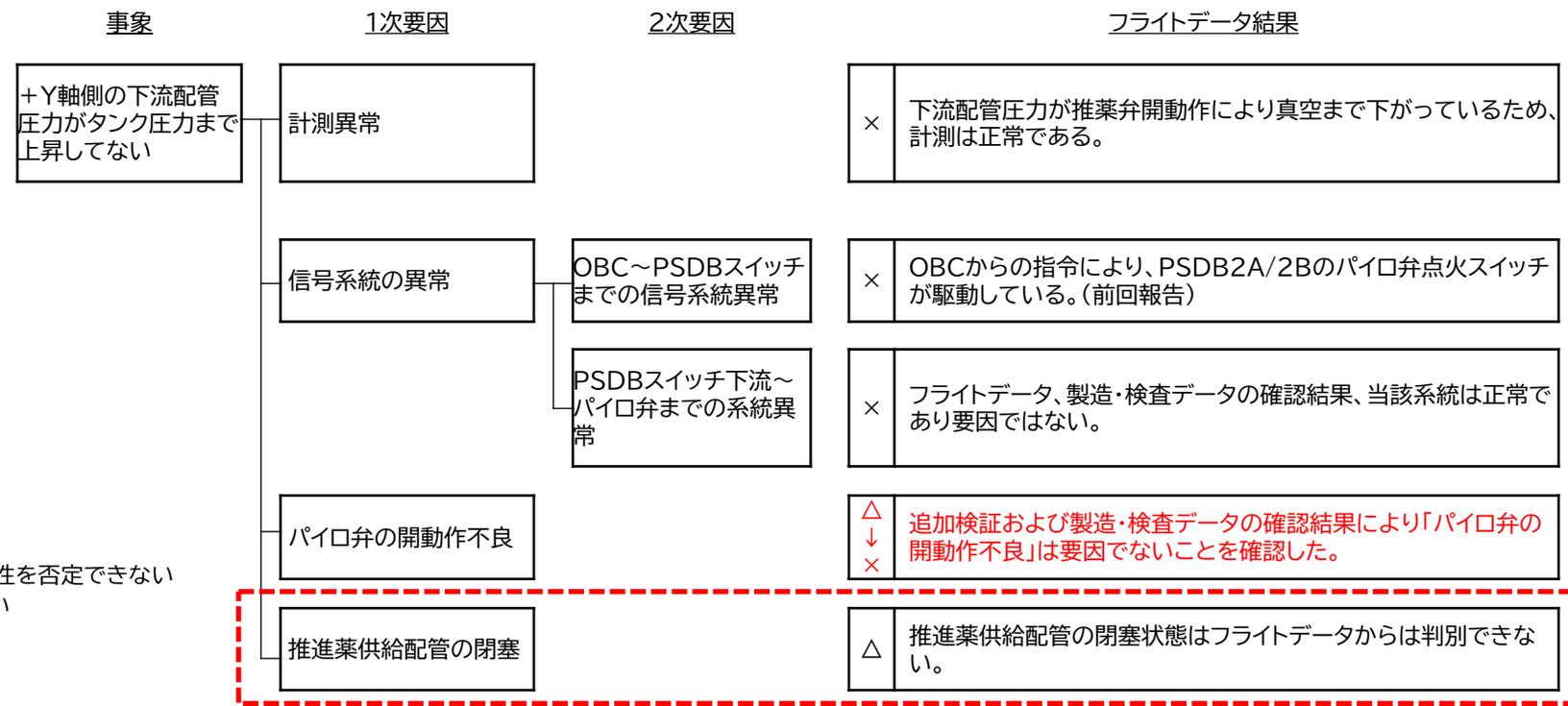
イプシロンロケットの1段および2段に搭載されている姿勢制御装置を以下の図の赤枠に示す。



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推定要因のうち、「推進薬供給配管の閉塞」まで絞り込みを行った。**
- **残った推定要因について、発生可能性を詳細要因としてFTAを展開し、絞り込みを実施して、故障シナリオ検討した。**

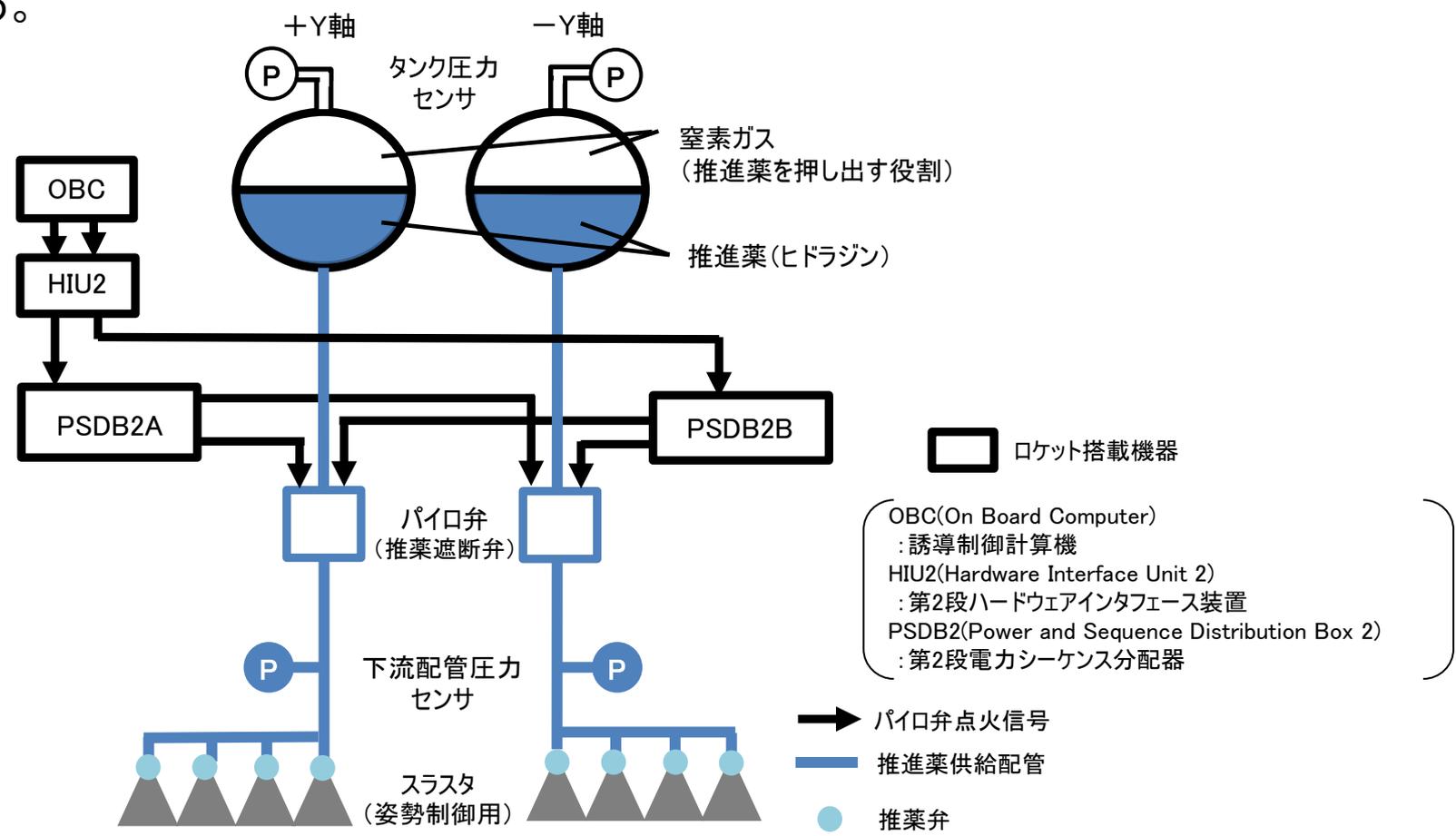


(凡例)
 ○:原因である
 △:原因の可能性を否定できない
 ×:原因ではない

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。

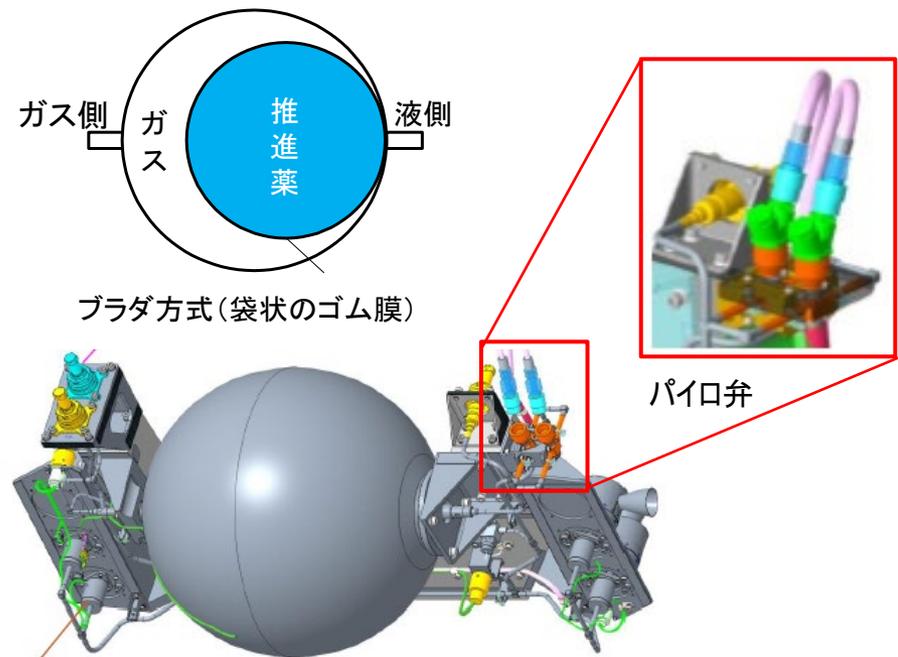


1. イプシロンロケット6号機概要

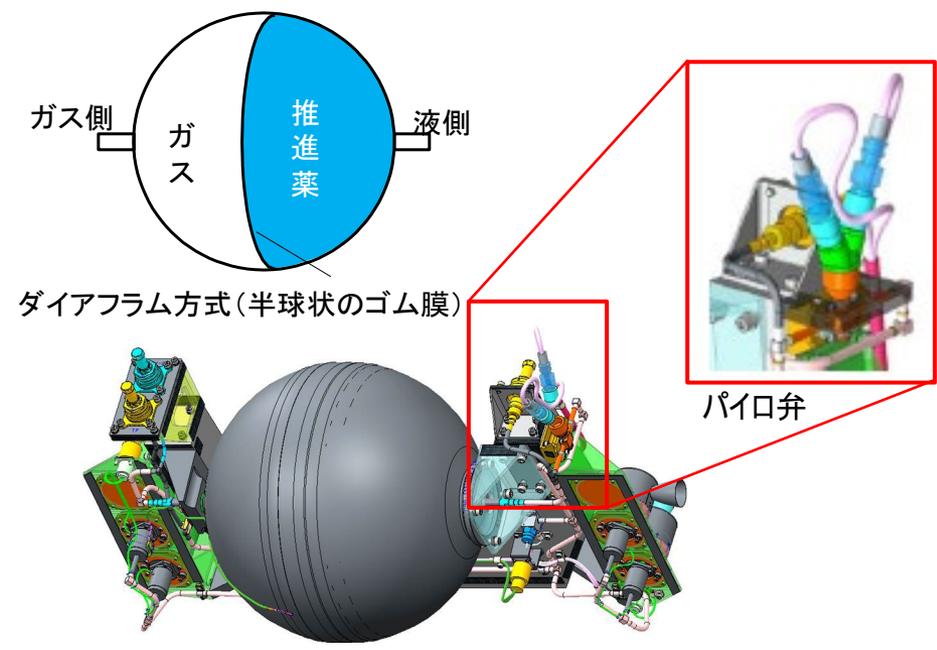
1-4. (b) 2段RCS開発経緯(再掲)

■ 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 ブラダ式 タンク×2式 ※ 推進薬充填・加圧@工場	Φ362mm ダイアフラム式 タンク×2式 ※ 推進薬充填・加圧@工場
パイロ弁	4基 (2基(イニシエータ1式)×2式)	2基 (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

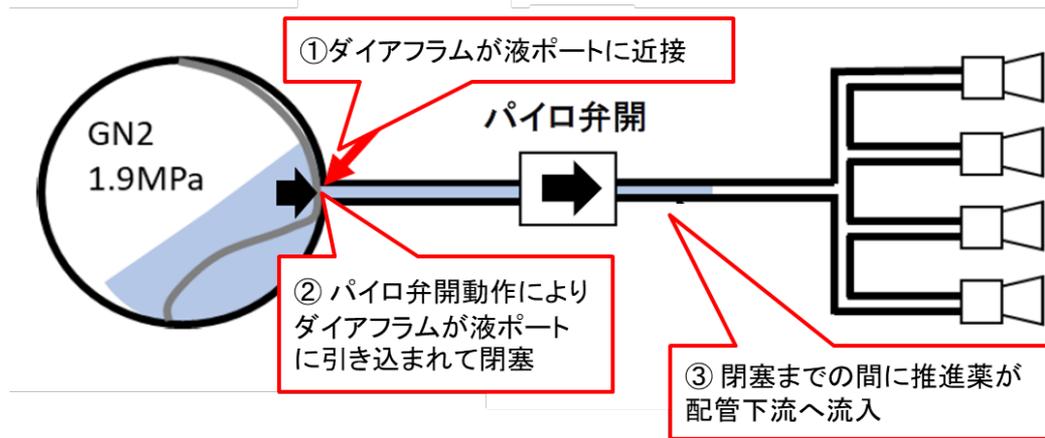


強化型(2号機～6号機)

2. 原因究明結果

- 「推進薬供給配管の閉塞」に関し、追加検証により、+Y軸側パイロ弁下流配管圧力（フライトデータ）の挙動再現を確認し、要因として「ダイアフラムによる閉塞」に絞り込んだ。

要因	故障シナリオ
ダイアフラムによる閉塞	ダイアフラムが液ポートに近接し、パイロ弁開動作時にダイア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。



- 前回報告時点で絞り込んだ「ダイアフラムによる閉塞」に対して、詳細FTAを展開して追加検証試験等を行い、要因の特定を行った。

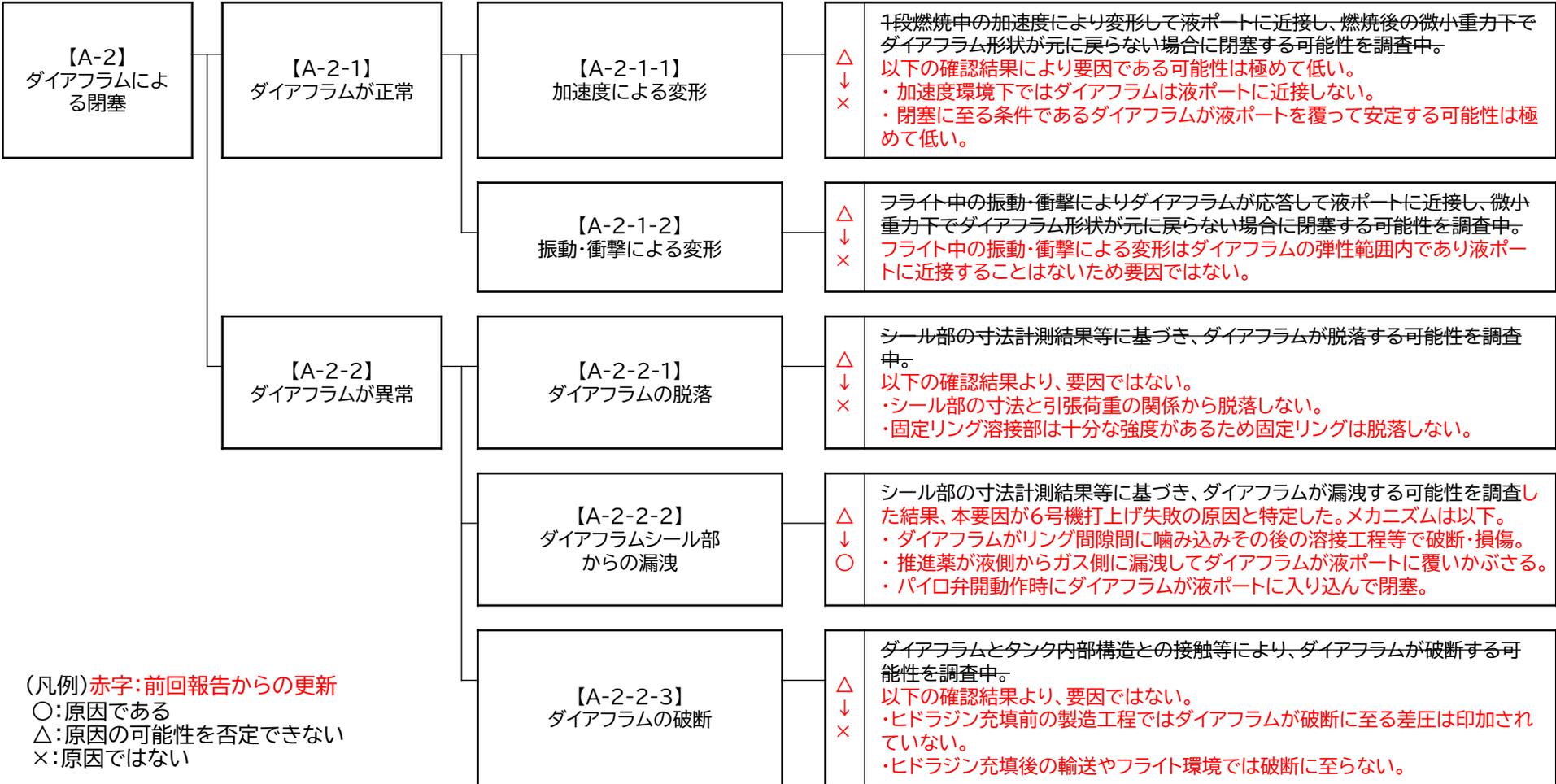
- ダイアフラムによる閉塞の詳細FTA(2-1項)
- 追加検証試験(2-2項)
- ダイアフラムによる閉塞(2-3項)

2. 原因究明結果

2-1. ダイアフラムによる閉塞の詳細FTA

「【A-2】ダイアフラムによる閉塞」について、詳細FTAを展開して追加検証等を実施し、ダイアフラムシール部からの漏洩が原因であると特定した。

評価結果



(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. 原因究明結果

2-2. 追加検証試験

■ 「ダイアフラムによる閉塞」に関して実施した追加検証試験結果を下表に示す(赤字:更新箇所)。

項目	結果
(a)閉塞確認試験	<ul style="list-style-type: none"> ①ダイアフラムが液ポートに近接している場合、模擬パイロ弁開後に閉塞が発生する。 ②その際に配管から採取した水は3～11cc程度。 ③差圧約1.9MPa印加で肉厚が最も薄いダイアフラムが破断したケースを除き、破断はない。
(b)漏洩模擬試験	<ul style="list-style-type: none"> ①漏洩した水は液側からガス側へ移動し、ダイアフラムが液側球殻に張り付く。
(c)開発供試体による追加検証 ・QTタンク※ ・△QTタンク※	<ul style="list-style-type: none"> ①ダイアフラムの組込み・溶接は正常で漏洩はない。 ②過去の試験でフライト環境の1.4倍の振動を印加したQTタンクのダイアフラムは健全である。 ③ヒドラジン未浸漬の差圧等を印可したダイアフラムは全て部分的に塑性変形している。 ④破壊圧まで印可されて健全であったQTタンクの溶接幅はバラつきが大きく最小溶接幅が小さい。 ⑤水充填タンクの工場～射場を往復輸送後のダイアフラムは健全である(破断はない)。
(d)組込溶接検証試験	<ul style="list-style-type: none"> ①ダイアフラムの組込み・溶接は正常で漏洩はない。 ②ダイアフラムに傷・バリ跡等があってもダイアフラムの組込み・溶接が正常であれば漏洩はない。 ③ダイアフラムの組込み・溶接が正常であれば溶接時の入熱によるダイアフラムへの影響はない。 ④テストピース溶接とタンク溶接の溶接幅は同等であり、テストピースによる工程保証は適切である。 ⑤漏洩試験においてダイアフラムが固定リング等に密着しシール部以外で気密を保持し得る。
(e)輸送模擬試験	<ul style="list-style-type: none"> ①ヒドラジン未浸漬のダイアフラムでは輸送中に発生する振動・衝撃による変形は弾性範囲である。

※ QT: Qualification Test(認定試験)

※ △QT: Delta Qualification Test(追加認定試験)

2. 原因究明結果

2-2. 追加検証試験

■ (続き)(赤字:更新箇所)

項目	結果
(f)シール性確認試験	<ul style="list-style-type: none"> ①ダイアフラムのシール部に傷等がなくダイアフラムの組込みが正常であればシール部の潰し量が小さくても漏洩はない。 ②ダイアフラムシール部に傷がありシール部の潰し量が小さければ漏洩する。 ③ダイアフラムのシール部全周のうち7/8程度が赤道リングと固定リングの間に噛み込んだ状態でもダイアフラムの破損等がなければシール部の潰し量が小さくても漏洩はない。
(g)ヒドラジン浸漬試験	<ul style="list-style-type: none"> ①ヒドラジン浸漬による圧縮永久歪は設計条件よりも大きい。 ②ヒドラジン浸漬による膨潤と引張荷重(クリープ)によりダイアフラムは伸びる。
(h)旋回腕試験	<p>ヒドラジン浸漬/未浸漬のダイアフラムにより以下を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ①フライト中の最大加速度相当を印可してもダイアフラムは液ポートに近接しない。 ②最大加速度から1Gまで除荷するとダイアフラムは液ポートから離れる側に移動し形状は大きく変わらない。 ③初期状態(水(約9L)の上下方向・ダイアフラムの形状)は上記結果に影響ない。
(i)ダイアフラム形状確認試験	<ul style="list-style-type: none"> ①充填推進薬量(約9L)と同容積のガスを充填し、ヒドラジン未浸漬のダイアフラムを人為的に(手で)変形させて液ポートに近づけると最小5mm程度まで近づくが、接するまでには至らない。 ②人為的に(手で)変形させてもダイアフラムは液ポートの直上からずれることが多い。 ③自然に(人為的に近づけた以外に)上記①のような形状になったことはない。
(j)ダイアフラム近接状態での閉塞確認試験	<ul style="list-style-type: none"> ①水約9L充填してダイアフラムを人為的に(手で)変形させ液ポートに近接するように状態で模擬パイロ弁を開いても閉塞しない。 ②水充填量を約6.5L、3L、1Lと変えてダイアフラムを液ポートに近接させて模擬パイロ弁を開いても閉塞しない。 ③水充填量を約0.3Lにしてダイアフラムが液ポートを覆いかぶさる状態にして模擬パイロ弁を開けると閉塞が発生する(フライトデータを再現)。

2. 原因究明結果

2-2. 追加検証試験

■ (続き)(赤字:更新箇所)

項目	結果
(k)組込検証試験	<p>①ダイヤフラムの組込みが正常であれば赤道リングと固定リングに隙間があっても組み込む過程で赤道リングと固定リングの隙間に偏りはなくなり、最終的にリング間隙間とシール部幅は均一になる。</p> <p>②赤道リングと固定リングの隙間にダイヤフラムシール部が噛み込むと噛み込んだ位相のリング間隙間とシール部幅は大きくなる。</p> <p>③ダイヤフラム組込み用治具を取り外すと固定リングが少し押し戻される。</p>
(l)噛み込みによる損傷確認試験	<p>①シール部を切り出したダイヤフラムのテストピースを実機の固定リングと赤道リングを模擬した平板金属で挟み込んで溶接するとシール部の大部分が破断する。</p>
(m)噛み込み損傷模擬漏洩検証試験	<p>①シール部噛み込みによる破断を模擬して意図的に以下欠損(破断)させたダイヤフラムではシール部から漏洩する。ダイヤフラムを手で押して形状を変えると漏洩が発生する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 欠損部深さ: 噛み込みによる損傷確認試験結果を反映 ・ 欠損部長さ: 6号機+Y軸側の製造・検査データを反映 <p>②上記①において加圧圧力が上がると漏洩しにくくなり、0.01MPaGでは漏洩しない。</p>

2. 原因究明結果

2-3. ダイアフラムによる閉塞

2-3-1. ダイアフラムが正常【A-2-1】に関する検討

「ダイアフラムが正常」について、これまでに確認された事項と**結論**を以下に示す。

(赤字:更新箇所)

■ 確認された事項

- ① ヒドラジン未浸漬のダイアフラムを装着したタンクに水を約9L充填した場合、1G環境下ではダイアフラムは液ポートから離れている【漏洩模擬試験】
- ② ヒドラジン未浸漬のダイアフラムでは輸送中に発生する振動・衝撃による変形は弾性範囲である【輸送模擬試験】
- ③ ヒドラジン未浸漬の差圧等を印可したダイアフラムでは全て部分的に塑性変形している【開発供試体による追加検証、組込溶接検証試験】
- ④ ヒドラジン浸漬/未浸漬によらずダイアフラムにフライト中の最大加速度相当を印可してもダイアフラムは液ポートに近接しない【旋回腕試験】
- ⑤ 最大加速度から1Gまで除荷するとダイアフラムは液ポートから離れる側に移動し形状は大きく変わらない【旋回腕試験】
- ⑥ ダイアフラムが閉塞する条件はダイアフラムが液ポートを覆いかぶさることである【ダイアフラム近接状態での閉塞確認試験】
- ⑦ ダイアフラムが閉塞に至る条件である液ポートを覆いかぶさって安定する可能性は極めて低い【ダイアフラム形状確認試験】

2. 原因究明結果

2-3. ダイアフラムによる閉塞

2-3-1. ダイアフラムが正常【A-2-1】に関する検討

■ 結論

フライト中の加速度環境下ではダイアフラムは液ポートに近接することはない。また、ダイアフラムが正常な場合はダイアフラムが液ポートに覆いかぶさって安定する可能性は極めて低いため、ダイアフラム閉塞発生要因とは考えにくい。

2. 原因究明結果

2-3. ダイアフラムによる閉塞

2-3-2. ダイアフラムの脱落【A-2-2-1】に関する検討

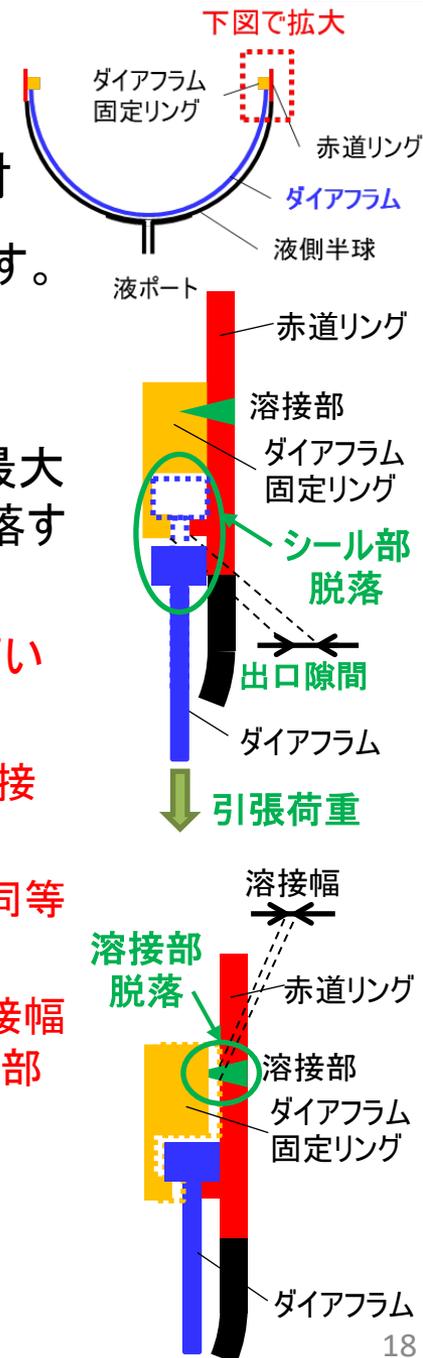
「ダイアフラムの脱落」について、これまでに確認された事項と**結論**を以下に示す。
(赤字: 更新箇所)

■ 確認された事項

- ① 赤道リングと固定リングに組み込まれたダイアフラムは、最大出口隙間と最大引張荷重においても脱落限界以下であるためダイアフラムシール部が脱落することはない
- ② 以下により、固定リング溶接部(テストピースによる工程保証)は脱落していないと判断した【開発供試体による追加検証、組込溶接検証試験】
 - ✓ 6号機+Y軸側タンクのテストピース溶接の溶接幅は同一溶接条件の組込溶接検証試験供試体のテストピース溶接の溶接幅と同等以上
 - ✓ 組込溶接検証試験供試体のテストピース溶接と固定リング溶接の溶接幅は同等(テストピースによる工程保証は適切)
 - ✓ 組込溶接検証試験の固定リングの溶接幅はQTタンクの固定リング溶接の溶接幅よりバラつきが小さく最小値が大きい(組込溶接検証試験供試体の当該溶接部強度は厳しい環境を印可したQTタンクと同等以上)
 - ✓ したがって、6号機+Y軸側タンクの固定リング溶接部は十分な強度を有する

■ 結論

「ダイアフラムの脱落」は要因ではない。



2. 原因究明結果

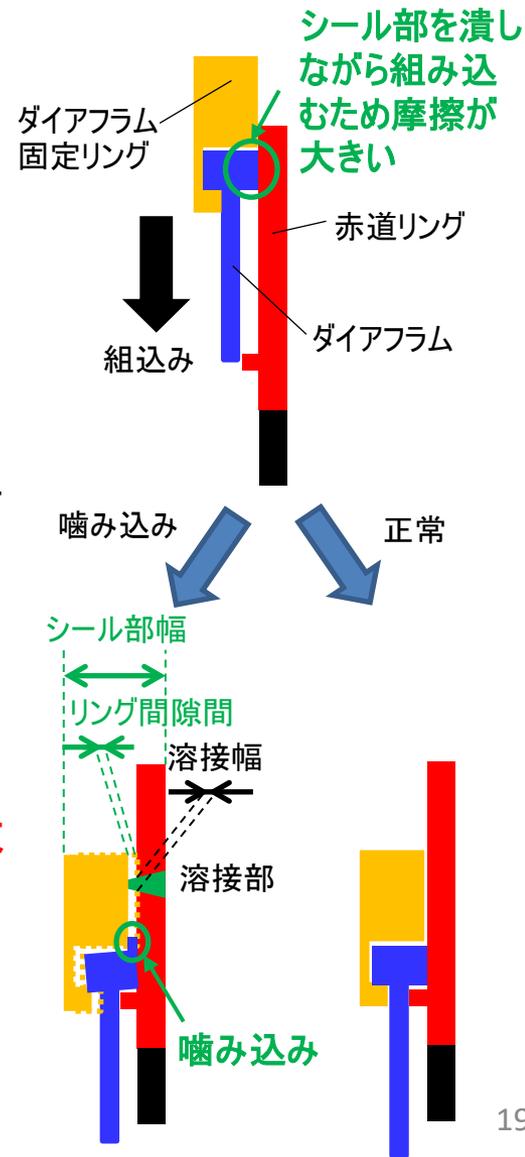
2-3. ダイアフラムによる閉塞

2-3-3. ダイアフラムシール部からの漏洩【A-2-2-2】に関する検討

「ダイアフラムシール部からの漏洩」について、これまでに確認された事項と結論を以下に示す。(赤字:更新箇所)

■ 確認された事項

- ① 開発供試体(QTタンク、△QTタンク)、組込溶接検証試験供試体はダイアフラムの組込み・溶接が正常で漏洩はない【開発供試体による追加検証、組込溶接検証試験】
- ② ダイアフラムの組込み・溶接が正常な場合、工程前後のシール部寸法変化は小さい【開発供試体による追加検証、組込溶接検証試験】
- ③ ダイアフラムに傷・バリ跡等があってもダイアフラムの組込み・溶接が正常であれば漏洩はない【開発供試体による追加検証、組込溶接検証試験】
- ④ **ダイアフラム組込み時に赤道リングと固定リングの隙間にシール部が噛み込むと組込み後の当該位相のリング間隙間とシール部幅は大きくなる【組込検証試験】**
- ⑤ **6号機+Y軸側のリング間隙間とシール部幅は大きい部分がある【製造・検査データ】**



2. 原因究明結果

2-3. ダイアフラムによる閉塞

2-3-3. ダイアフラムシール部からの漏洩【A-2-2-2】に関する検討

■ 確認された事項(続き)

- ⑥ ダイアフラムシール部を噛み込ませて溶接するとシール部噛み込み端部が部分的に破断・損傷する。【噛み込みによる損傷確認試験】
- ⑦ 6号機+Y軸側の製造・検査データをもとにダイアフラム欠損(破断)を模擬したダイアフラムではシール部から漏洩する。【噛み込み損傷模擬漏洩検証試験】
- ⑧ 以下により、製造時の検査で漏洩を検出できない可能性がある。
 - ✓ 上記⑦ではダイアフラムを変形させないと漏洩せず、加圧圧力が上がると漏洩しにくくなり、半殻状態でのダイアフラム漏洩試験圧力(0.01MPaG)では漏洩しない【噛み込み損傷模擬漏洩検証試験】
 - ✓ シール特性上、シール性がよいため当該シール部以外でシールしている可能性がある【組込溶接検証試験】
 - ✓ ヒドラジンを充填して加圧すると潰し量が小さくなるため、検査時は潰し量が大きく漏洩しにくい【ヒドラジン浸漬試験】
 - ✓ 輸送時の振動や射場作業の取扱いでダイアフラムの状態やシール性が変わる

■ 結論

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その噛み込んだ部分が破断・損傷すると推進薬が液側からガス側に漏洩する。その場合、ダイアフラムが液ポートに覆いかぶさり、パイロ弁開動作時にダイアフラムにより閉塞する。したがって、6号機打上げ失敗の原因は「ダイアフラムシール部からの漏洩」と特定した。

2. 原因究明結果

2-3. ダイアフラムによる閉塞

2-3-4. ダイアフラムの破断【A-2-2-3】に関する検討

「ダイアフラムの破断」について、これまでに確認された事項と**結論**を以下に示す。

(赤字: 更新箇所)

■ 確認された事項

- ① 製造中にダイアフラムに印加される差圧に対して以下の理由により破断していない。
 - ✓ 出口ポート近傍に関しては、差圧が約1.9MPa程度が破断限界であると推定される(閉塞確認試験において、差圧約1.9MPa印加で肉厚が薄いダイアフラムのケースでのみ破断し、他ケースでは破断はなかった)【閉塞確認試験】
 - ✓ 液側から差圧0.8MPa、気側から差圧0.4MPaを印加したQTタンクのダイアフラムは破断していない【開発供試体による追加検証】
 - ✓ 6号機+Y軸側タンクは、製造中に印加した最大差圧は約0.2MPaであるため破断に至る圧力は印加されていない
- ② QTおよび△QTタンクのダイアフラムは過去にヒドラジン未浸漬でフライト振動の1.4倍を印加したが、破断していない。【開発供試体による追加検証】
- ③ **ダイアフラムとタンク構造の接触状態が6号機+Y軸側タンクと同等の△QTタンクに9Lの水を充填して工場～射場の往復輸送(実運用の2倍)を実施したダイアフラムは破断していなかった。【開発供試体による追加検証】**

■ 結論

「ダイアフラムの破断」は要因ではない。

3. 不具合要因への対策

3-1. イプシロンSへの是正処置

- 原因を「ダイアフラムシール部からの漏洩」に特定したことを踏まえて、現在開発中のイプシロンSロケットに対する開発リスクを抑えつつ信頼性を確保するため、大幅な設計変更なく適用可能な国産の推進薬タンクを適用する方針として、下表に示す2案の対策を検討してトレードオフを実施し、イプシロンSロケットの設計に反映する。

	現タンク設計変更案	H-IIAタンク活用案(※1)
タンク方式	ダイアフラム式	ダイアフラム式
タンクサイズ	容量24L/直径約360mm	容量37L/直径約420mm
開発内容	6号機原因究明踏まえたタンク再開発 ・シール部の設計・製造・検査改善(※2) ・ダイアフラム閉塞防止対策反映(※3)	タンク置換えに伴う設計変更 ・タンク大型化に伴う機体システム設計 ・充填推進薬量検討

(※1)ダイアフラム組込時にシール部の噛み込みが発生しない設計・製造工程となっており、タンク液ポートに閉塞防止用の機構を有する。

(※2)ダイアフラム組込時にシール部の噛み込みが発生しない設計・製造工程、シール部からの漏洩を確実に検知する方法等を検討する。

(※3)RCSタンクはブローダウン方式(タンク内加圧ガスにより推進薬を排出)のため、推進薬消費に伴うガス圧低下の影響を抑える観点から充填推進薬量に対して所要のガス容積を確保したタンク容量を確保しつつ、今回の原因究明を受け、以下を含めた閉塞リスクを排除する対策を検討する。

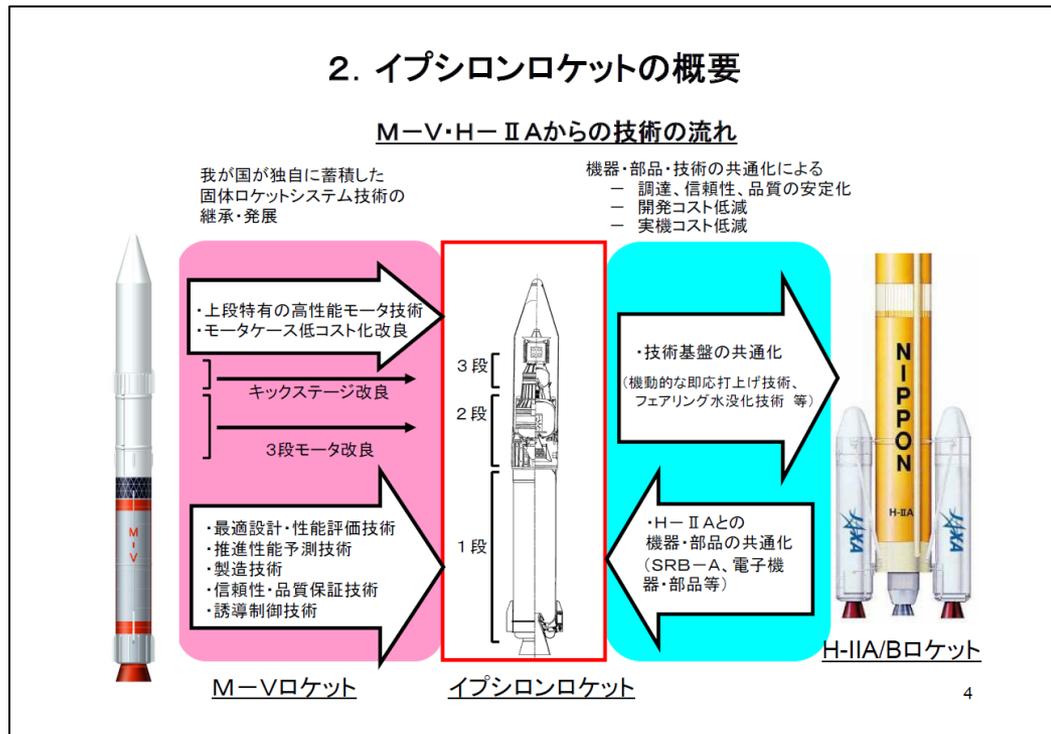
- ・ダイアフラムの変形を考慮した充填推進薬量増加
- ・タンク液ポートへの閉塞防止用の機構追加

3. 不具合要因への対策

3-2. 背後要因分析・対策の方向性

- イプシロンロケットは、M-VとH-IIAで培った技術を最大限活用する方針としつつ、一部は機体仕様に応じて新規開発やフライト実績品を適用した開発を実施した。

項目	適用技術
フェアリング	✓ 新規開発(一部H-IIA技術活用)
PBS(*1)	✓ H-IIA技術
2段RCS	✓ フライト実績品
アピオニクス	<ul style="list-style-type: none"> ✓ H-IIA技術(誘導制御計算機、計測通信系) ✓ M-V技術(フライトソフトウェア) ✓ 新規開発(電力電装系、搭載点検系)
構造	<ul style="list-style-type: none"> ✓ M-V技術(段間構造、機器搭載構造) ✓ 新規開発(衛星分離部、等)
SMSJ(*2)	✓ 新規開発(一部M-V技術活用)
3段モータ	✓ M-V技術
2段モータ	✓ M-V技術
1段モータ	✓ H-IIA技術(SRB-A)



科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会宇宙開発利用部会(第9回)
H25.4.4 資料9-5「イプシロンロケットの開発及び打上げ準備状況」より抜粋

(*1) Post Boost Stage(小型液体推進系)

(*2) Solid Motor Side Jet(姿勢制御用補助推進系)

3. 不具合要因への対策

3-2. 背後要因分析・対策の方向性

- 「ダイアフラムシール部からの漏洩」に対してなぜなぜ分析を実施した結果、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。
 - ✓ M-VとH-IIA技術を活用した範囲は、ロケットシステムにおいて実績のある技術をベースとして、イプシロンの仕様に合わせた適用開発を行っており、開発段階では新規開発品と同様、約20年来の基幹ロケットの信頼性向上の取組を踏まえた設計・製造工程・品質保証方法の確認を実施している。
 - ✓ 2段RCSのダイアフラム式タンクは元々宇宙機で使用するために開発されたものであり、適用開発時には使用条件の違いを考慮した機械環境試験や耐圧試験等のタンク構造としての確認は実施していたものの、ダイアフラムシール部等のタンク内部についてはフライト実績を重視し、使用条件の違いを含め設計の考え方・作動原理等を十分理解した上での確認が不足していた。

3. 不具合要因への対策

3-2. 背後要因分析・対策の方向性

事象	なぜ#1	なぜ#2	なぜ#3	背後要因
<p>ダイヤフラム組込み時のシール部の噛み込みおよび溶接時のシール部の破断・損傷により、ダイヤフラムシール部からの漏洩が発生</p>	<p>シール部の噛み込みとその後溶接によるダイヤフラムシール部の破断・漏洩という故障モードを予測できていなかった。</p>	<p>ダイヤフラムシール部の設計やメカニズムに関する基礎データ（潰し率と漏洩の関係、ヒドラジン浸漬の影響等）を把握できていなかった。</p>	<p>フライト実績を重視し、実際に想定される使用条件でのダイヤフラムシール部の設計の確認が不足していた。</p>	<p>フライト実績品に対する確認不足 （使用条件が想定と異なる場合はもちろん、信頼性向上に係る開発の目が入っていないもの）</p>
	<p>ダイヤフラム組込み工程や検査が不十分であり、不具合発生リスクを排除できていなかった。</p>	<p>ダイヤフラム組込み時にシール部噛み込みリスクを排除できない工程となっていた。</p>	<p>フライト実績を重視し、ダイヤフラム組込み工程は過去開発時に確立しているものと考え、確認が不足していた。</p>	
		<p>シール部噛み込み発生時の寸法変化を把握できておらず、寸法検査規格が不十分であったために、寸法特異性を検出できなかった。</p>	<p>フライト実績を重視し、ダイヤフラム噛み込みの検出方法は過去開発時に確立しているものと考え、確認が不足していた</p>	
		<p>シール部漏洩検査で漏洩があっても検出できない可能性があることがメカニズム含めて把握できておらず、漏洩を検出できなかった。</p>	<p>フライト実績を重視し、漏洩検出方法は過去開発時に確立しているものと考え、確認が不足していた。</p>	

3. 不具合要因への対策

3-2. 背後要因分析・対策の方向性

- 背後要因に係る以下の対策をイプシロンSロケット及び水平展開先(今後精査)に反映し、信頼性を向上させる。

●フライト実績品に対する十分な確認

- ✓ フライト実績品を使用すること自体は問題ではないが、当該品の使用条件が想定と異なる場合はもちろん、20年来の信頼性向上に係る開発の目が入っていない場合は、開発当時の設計の考え方や使用条件の根拠、製造工程・品質保証方法に立ち返って確認を実施する。
- ✓ 過去の設計等に立ち返る場合には、2003年のH-IIA6号機打上げ失敗以降、基幹ロケットとして取り組んできた信頼性向上の観点(以下)を十分に考慮して、抜けのないように確認を実施する。
 - ①不具合事象への対応、②メカニズム・動作余裕の確認、
 - ③製造・検査・整備作業の改善、④連鎖事象への対応、⑤安全に係る対応

【イプシロン6号機の原因究明結果】

- ✓ 6号機失敗の原因を「ダイアフラムシール部からの漏洩」と特定した。
 - 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
 - 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
 - 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

【直接要因の水平展開】

- ✓ 上記の要因となったダイアフラムタンクの水平展開を行っており、ダイアフラム方式を採用している一部の衛星について対象を特定・評価を実施済み(参考2参照)。

【今後の予定】

- ✓ 直接原因の是正として、現タンクの設計変更案とH-IIAタンク活用案を検討してトレードオフを実施して処置を決定する。
- ✓ 背後要因(間接的原因)の分析結果等をイプシロンSロケットの開発に反映して信頼性を向上させる。

EPSILON (参考1) ダイアフラムタンクの製造・検査データ確認 (1/5)

- 2022年12月16日の第5回調査・安全小委員会において確認中としていた項目の確認結果を以下に示す。(黒字部再掲 赤字部更新)

製造工程	確認項目	確認結果	
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	良好	検査記録、試験データ
	ダイアフラム組付部寸法(溶接②前後)	検査規格に適合しているが、リング間隙間とシール部幅に大きい部分がある	
	ダイアフラム漏洩試験(機能試験前)	検査規格に適合しているが、シール部以外でシールされ、漏洩を検出できない可能性がある。※1	
	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)	検査規格に適合しているが、シール部以外でシールされ、漏洩を検出できない可能性がある。※1	
	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)	検査規格に適合しているが、シール部以外でシールされ、漏洩を検出できない可能性がある。※2	

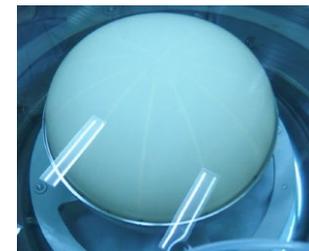
※1 P.28に検査結果を示す。

※2 P.30に検査結果(溶接③後)を示す。

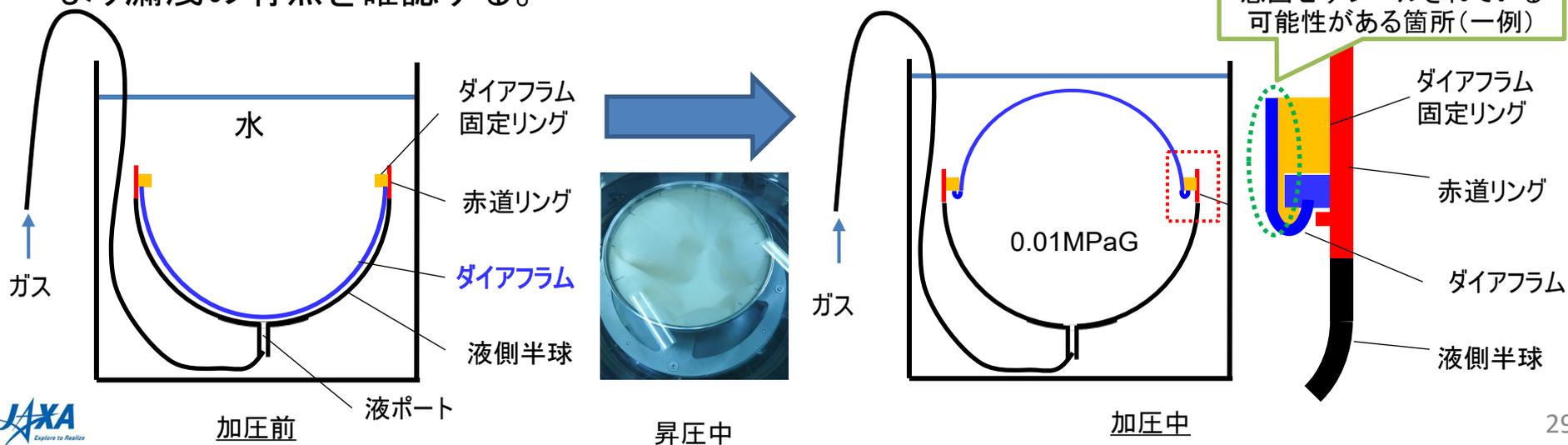
EPSILON (参考1) ダイアフラムタンクの製造・検査データ確認 (2/5)

■ 半殻状態でのダイアフラム漏洩試験結果

工程	評価項目	条件・規格	6号機+Y軸側 検査記録・結果
ダイアフラム漏洩試験 (機能試験前)	印加圧力	液側0.01 [MPaG]程度	0.0065 [MPaG]
	検査結果	気泡がないこと	良
機能試験 (作動確認)	繰り返し回数	10回	10回
	印加圧力	0.01 [MPaG]程度	0.006 [MPaG]
ダイアフラム漏洩試験 (機能試験後)	印加圧力	液側0.01 [MPaG]程度	0.0064 [MPaG]
	検査結果	気泡がないこと	良



■ ガス側半球無し状態のタンクを水槽に沈め、液ポートからのガス加压により漏洩の有無を確認する。



EPSILON (参考1)ダイアフラムタンクの製造・検査データ確認 (3/5)

(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)	検査規格に適合しているが、シール部以外でシールされ、漏洩を検出できない可能性がある。※1	
	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)	検査規格に適合しているが、シール部以外でシールされ、漏洩を検出できない可能性がある。※2	

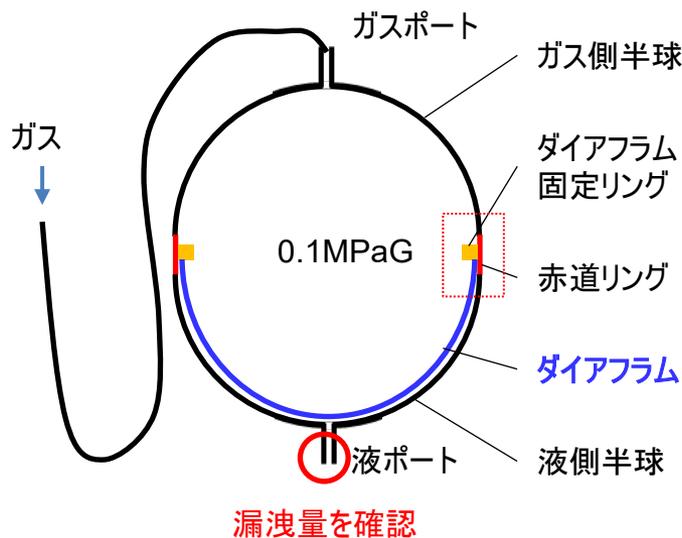
※1 P.30に検査結果(環境試験前)を示す。

※2 P.30に検査結果(環境試験後)を示す。

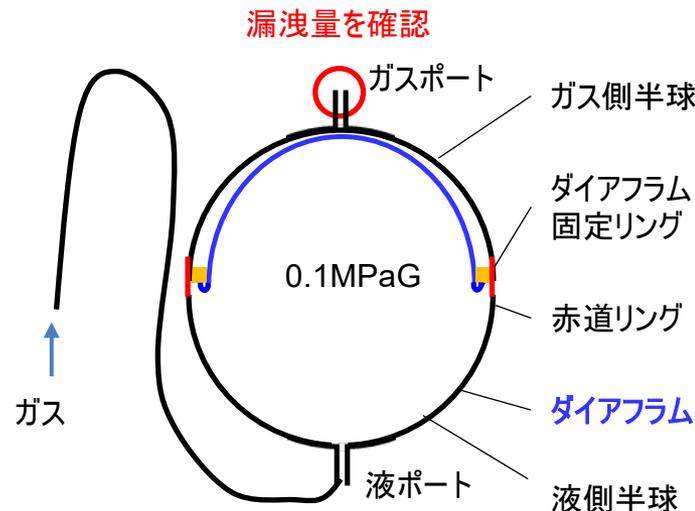
EPSILON (参考1) ダイアフラムタンクの製造・検査データ確認 (4/5)

- 全殻状態でのダイアフラム漏洩試験
 ガス側、液側それぞれガス圧をかけて、反対側のポートからの漏洩量を確認する。

工程	評価項目	条件・規格	6号機+Y軸側 検査記録・結果	
ダイアフラム漏洩試験 (溶接③後、 機械環境試験前・後)	印加圧力	0.10 +0/-0.01 [MPaG]	溶接③後	0.096 [MPaG] (ガス側)・0.098 [MPaG] (液側)
			環境試験前	0.10 [MPaG] (ガス側)・0.10 [MPaG] (液側)
			環境試験後	0.10 [MPaG] (ガス側)・0.10 [MPaG] (液側)
	保持時間	1000 [sec] (ガス側・液側共通)	3試験共通	1000 [sec] (ガス側・液側共通)
漏洩量	2.5E-03 [cm ³ /sec]以下	3試験共通	1.0E-04 [cm ³ /sec] (ガス側・液側共通)	



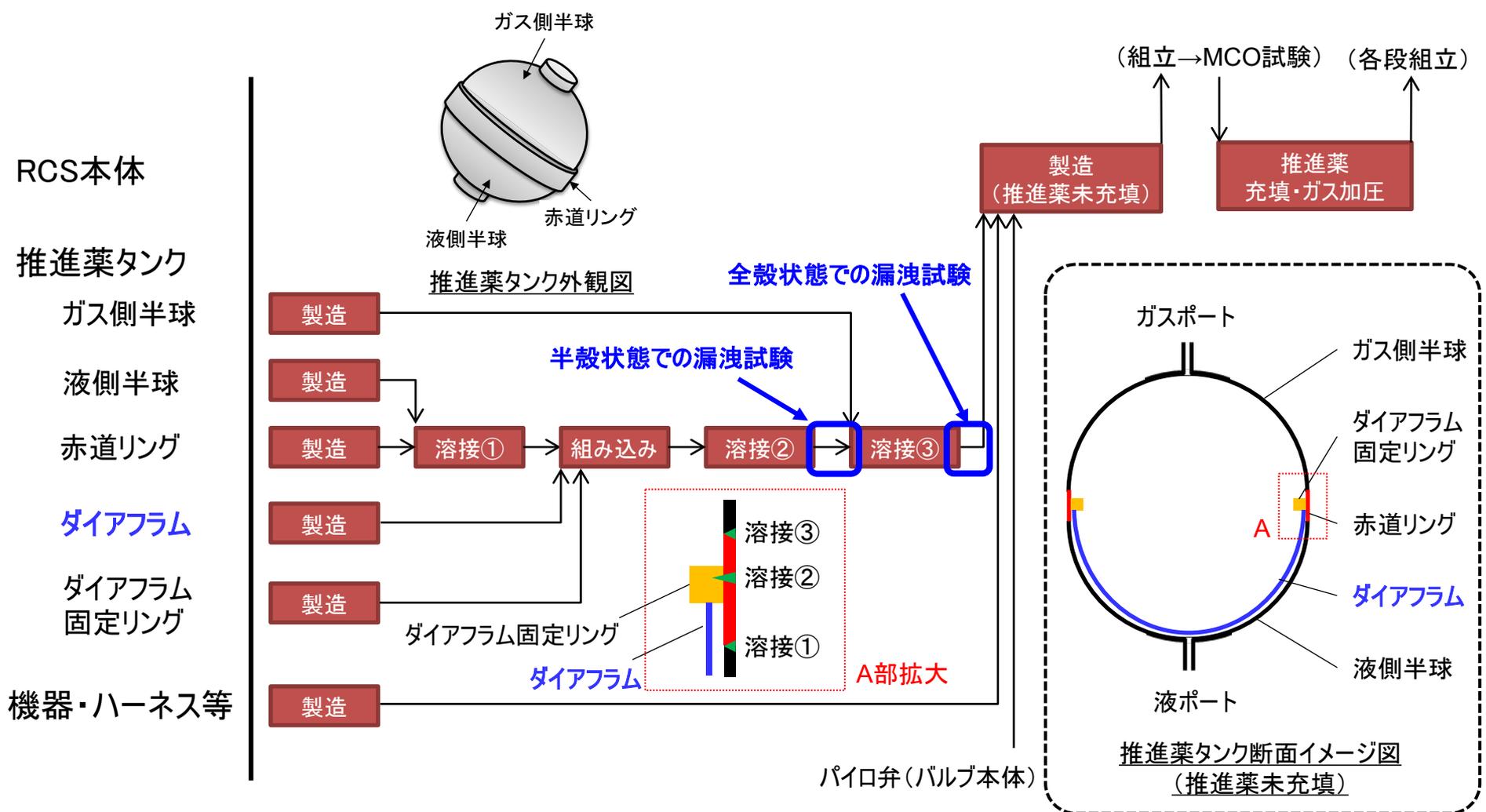
ガス側加圧



液側加圧

EPSILON (参考1) ダイアフラムタンクの製造・検査データ確認 (5/5)

■ RCS製造プロセスにおける半殻・全殻状態での漏洩試験実施タイミングを以下に示す。



(参考2) 水平展開

1. 衛星への水平展開

(a) 前提条件

- ダイアフラム方式のタンクを採用している一部のJAXA衛星について、イプシロン6号機と類似設計である以下について水平展開を行った。技術的評価については、各衛星プロジェクトが開発審査の中で評価を実施済み。
 - ① X線分光撮像衛星 (XRISM)
 - ② 小型月着陸実証機 (SLIM)

- 上記衛星について、水平展開時点の原因究明ステータスに基づき、可能性が否定できない以下の詳細要因について影響評価を行った。
 - 「ダイアフラムが正常」ケースで、ヒドラジン浸漬後のダイアフラムが加速度等により液ポートに近接する可能性があるか
 - 「ダイアフラムが異常」ケースで、ダイアフラムシール部が赤道リングと固定リングの隙間に局部的に噛み込んでいる場合にその後の状態変化等で漏洩が発生するか

(参考2) 水平展開

1. 衛星への水平展開

(b) 影響評価の対象

- XRISMおよびSLIMの推進システムについて、イプシロン6号機の原因究明の絞り込み状況を踏まえ、構成の共通性、相違点について、以下の概略を示す。
- XRISMのタンク・ダイアフラムはイプシロンと同一のものであり、SLIMについてはサイズは異なるが、ダイアフラムの素材やタンクとダイアフラムのシール部の設計は類似。

	イプシロン RCS	XRISM	SLIM
推進薬+加圧ガス	ヒドラジン+窒素	ヒドラジン+窒素	ヒドラジン+ヘリウム
タンク・ダイアフラム仕様	ダイアフラム式タンク	ダイアフラム式タンク (イプシロンと同設計)	ダイアフラム式タンク (イプシロンと設計類似)
	タンクサイズ: 直径362mm	タンクサイズ: 直径362mm	タンクサイズ: 直径約840mm
	タンク容量: 24L	タンク容量: 24L	タンク容量: 約490L
	充填量: 9L 充填率: 約38%	充填量: 15.6L 充填率: 約65%	充填量: 約297L 充填率: 約58%
充填から打上げ期間	134日	約1ヵ月(予定)	約2.5ヵ月(予定)
ダイアフラム素材	EPR(エチレンプロピレンゴム)	EPR(エチレンプロピレンゴム)	EPR(エチレンプロピレンゴム)

(参考2) 水平展開

2. XRISM評価結果概要

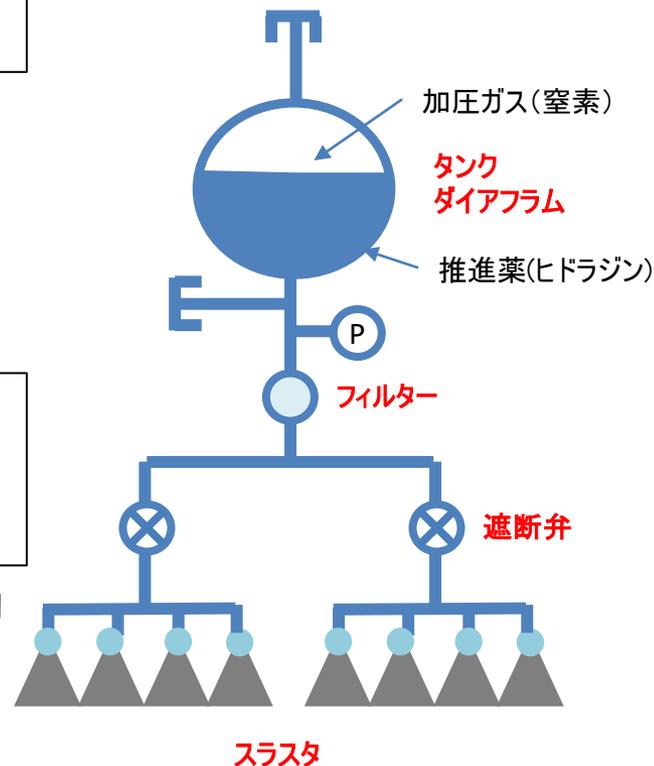
- XRISMの推進システムに搭載しているタンク・ダイヤフラムはイプシロン6号機に搭載しているものと同一のものであるが、詳細要因についてそれぞれ技術評価を行い、問題ないことを確認済。

「ダイヤフラムが正常」ケースで、ヒドラジン浸漬後のダイヤフラムが加速度等により液ポートに近接する可能性

- ✓ 打上げ時点での推進薬充填量が多いため、運用初期の遮断弁「開」時に閉塞は起こりえない
- ✓ 運用中の推進薬減少時においてもタンクからの排液にかかる動圧では閉塞しないことを実機を模擬した試験で確認

「ダイヤフラムが異常」ケースで、ダイヤフラムシール部が赤道リングと固定リングの隙間に局所的に噛み込んでいる場合にその後の状態変化等で漏洩が発生

- ✓ 実機に疑似推薬(水)を入れてフライトより厳しい環境条件で振動試験を実施後、水の漏洩がないことを確認
- ✓ 仮に噛み込みがあった場合でも上記試験以上の負荷は打上げ以後に印加されないため噛み込み部が後から破損する可能性はないと評価



XRISM推進システム 略図

(参考2) 水平展開

3. SLIM評価結果概要

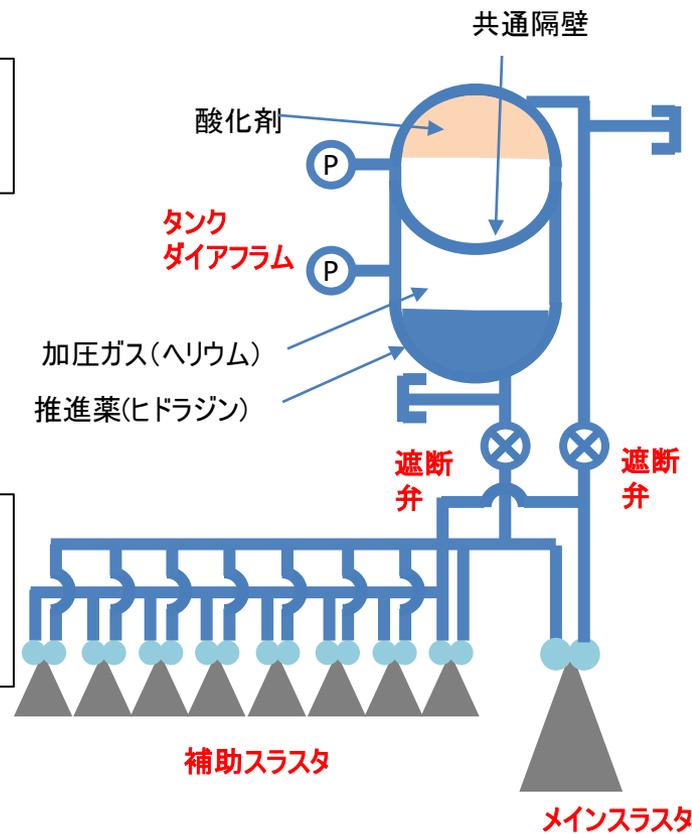
- SLIMの推進システムに搭載しているタンク・ダイアフラムはイプシロン6号機に搭載しているものとサイズ、形状が異なるが、シール部やダイアフラム材料等の一部の設計が類似しているが、詳細要因についてそれぞれ技術評価を行い、問題ないことを確認済。

「ダイアフラムが正常」ケースで、ヒドラジン浸漬後のダイアフラムが加速度等により液ポートに近接する可能性

- ✓ 打上げ時点での推進薬充填量が多いため、運用初期の遮断弁「開」時に閉塞は起こりえない
- ✓ 運用中の推進薬減少時においてもタンクからの排液にかかる動圧では閉塞しないことを実機を模擬した試験で確認

「ダイアフラムが異常」ケースで、ダイアフラムシール部が赤道リングと固定リングの隙間に局所的に噛み込んでいる場合にその後の状態変化等で漏洩が発生

- ✓ 実機のダイアフラム組込み後にリーク試験を行っており漏洩がないことを確認
- ✓ シール部において噛み込みといった特異事象がないことを、実機の製造検査データから確認



SLIM推進システム 略図