

図5.1-5 CV-Fが閉塞している場合の燃料の供給圧力の推定結果

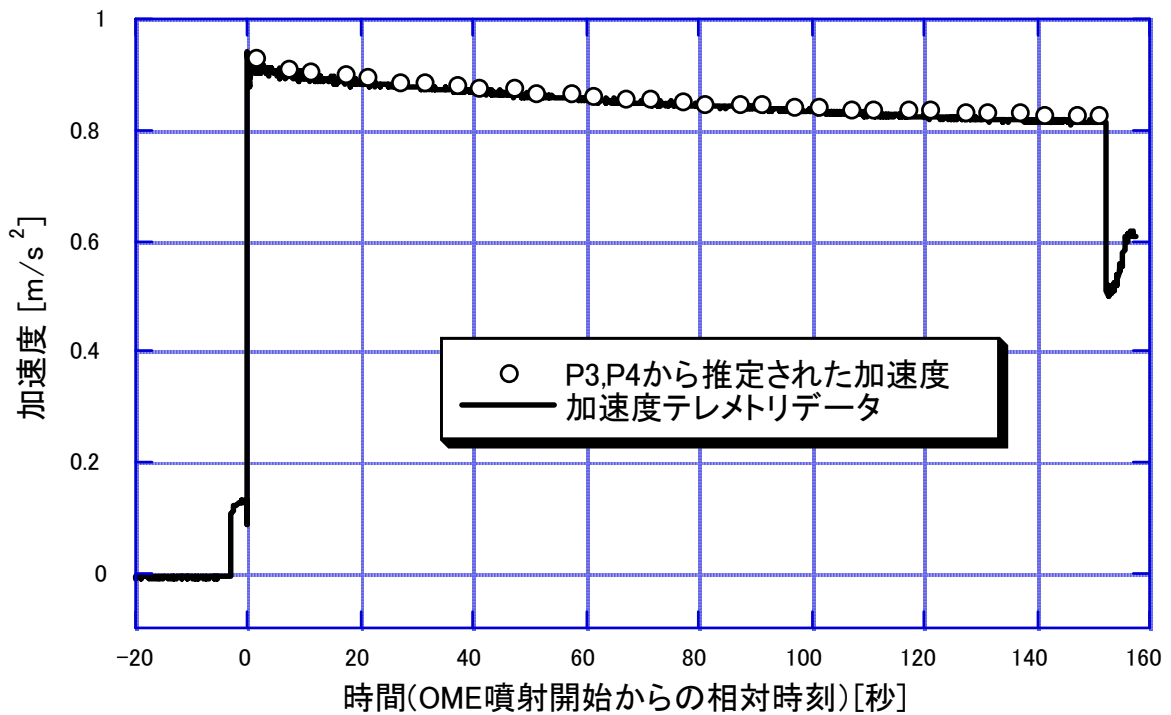


図5.1-6 燃料の供給圧力が低下している場合の加速度の推定結果

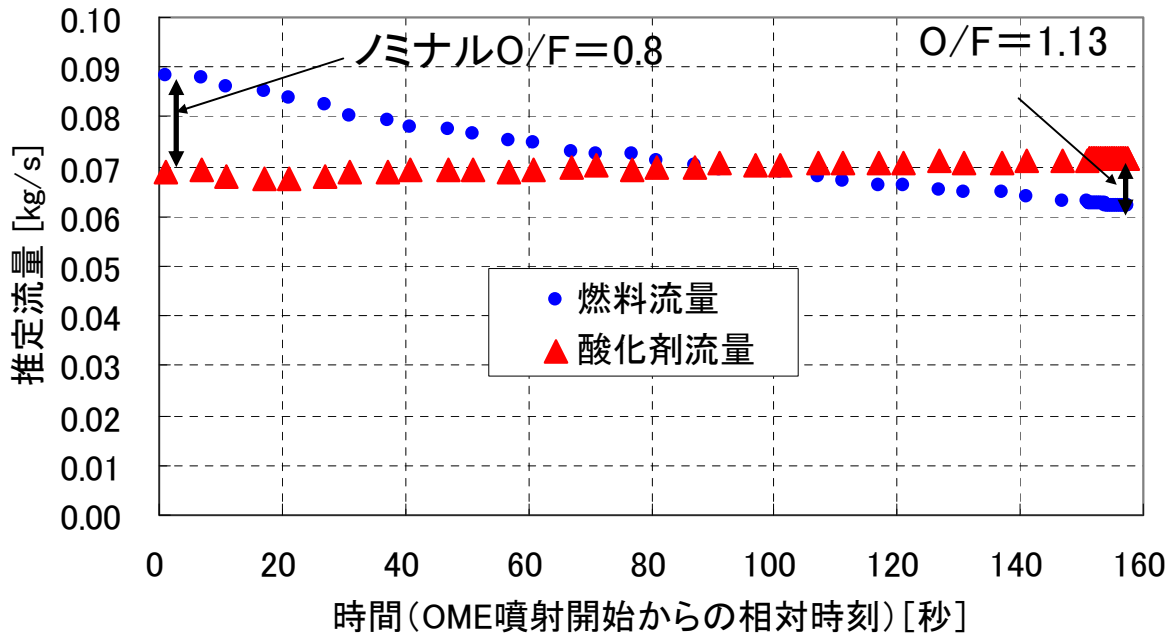


図5.1-7 燃料と酸化剤の供給量の推定結果

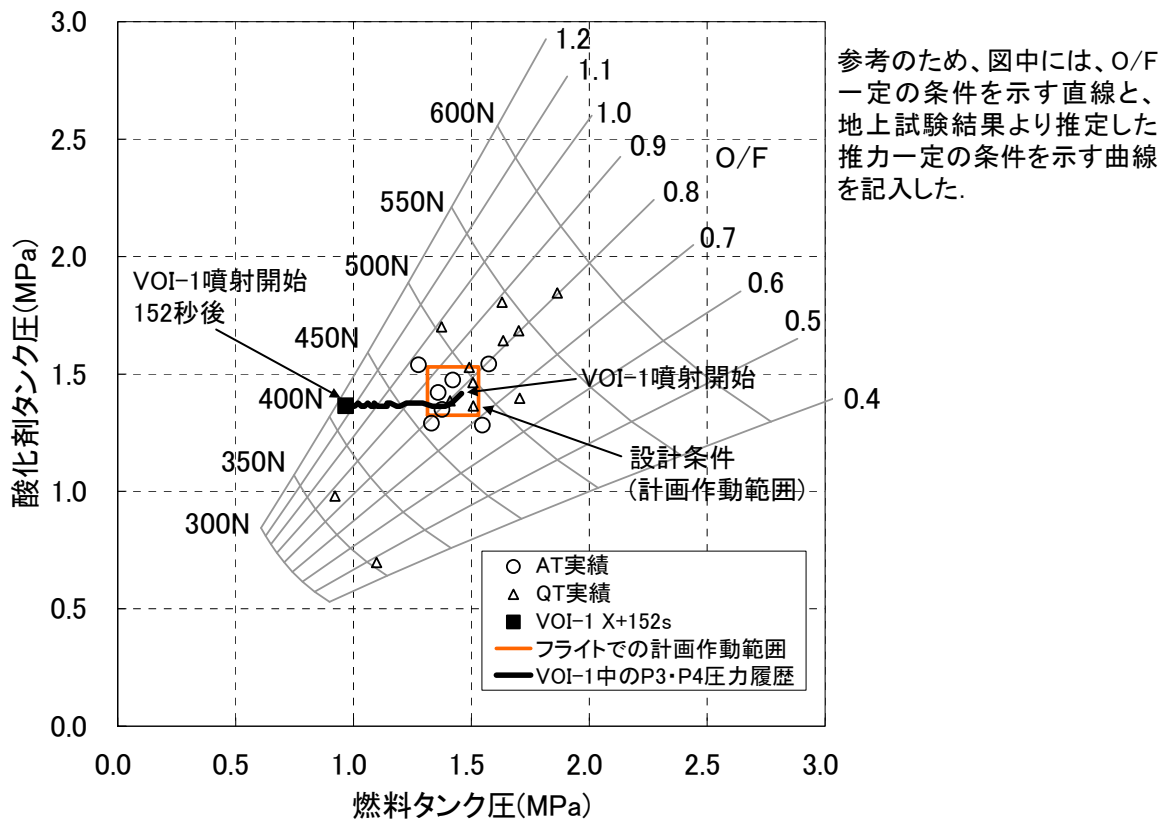
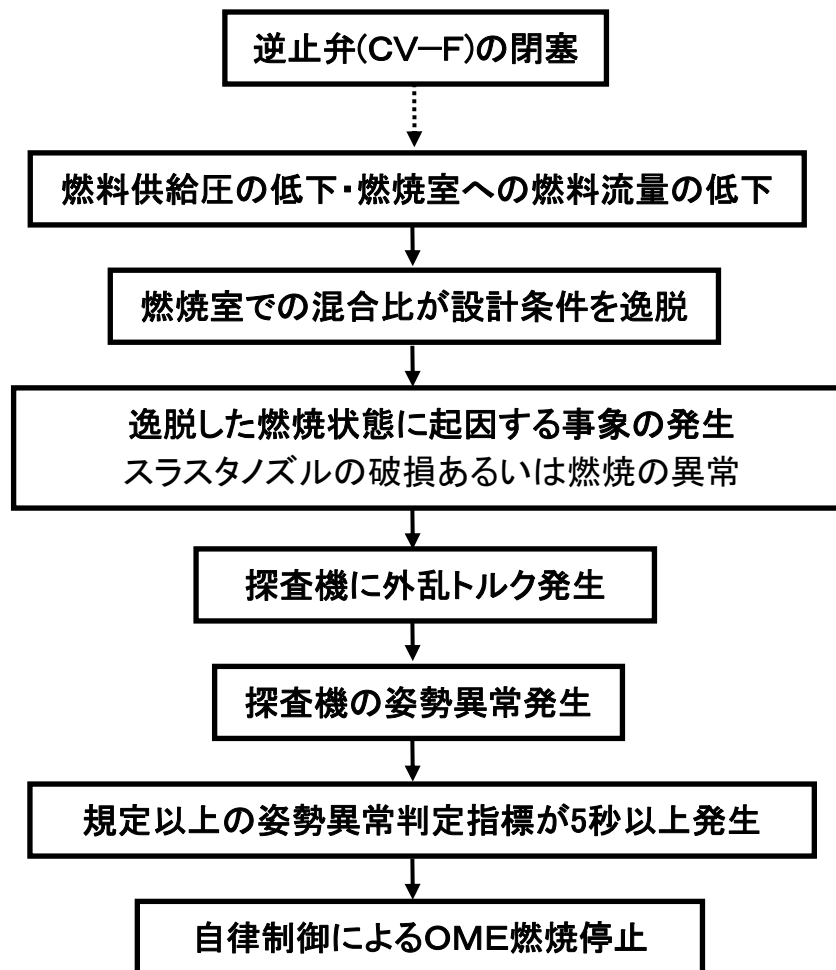


図5.1-8 VOI-1噴射中のOMEの作動履歴

0秒
(OME噴射開始)

152秒

158秒



異常を示す計測結果

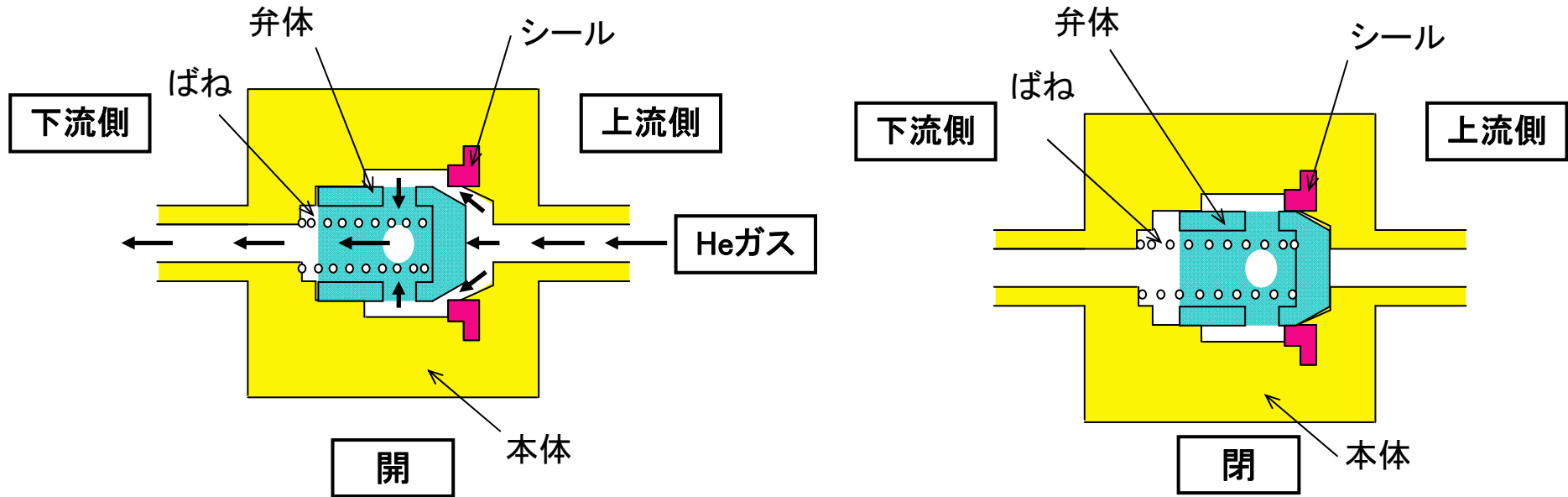
燃料タンク圧力(P3)の低下
機体加速度の緩やかな低下

機体加速度の急激な変化
機体姿勢運動の異常

停止操作に対応した推進系圧力の応答
姿勢維持モードへの遷移
セーフホールドモードへの遷移
推進系圧力の戻り

図5.1-9 CV-Fの閉塞からOME燃焼停止に至るシナリオ

逆止弁とは、流体の逆流を防止するために受動的に動作する弁であり、下図のように動作する。なお、通常は閉状態である。



閉まっている逆止弁の上下流で差圧が発生し、上流側の圧力の方が一定圧力以上（クラッキング圧：0.117MPa以下[仕様値]）になると、逆止弁の弁体が左側に動き、上下流の流路が開く。

開いている逆止弁で、上下流の差圧が小さくなり、上流側と下流側の圧力差が一定圧力以下（リシート圧：0.014MPa以下[仕様値]）になると、弁体がばね力により右側に動いて、上下流の流路は閉じる。

図5.2-1 逆止弁の動作原理

日時	イベント	燃料タンク運用形態	バルブステータス	燃料タンク圧力 P3[MPa]	酸化剤タンク圧力 P4[MPa]
5/21	打上げ前	-	HLV-1以外 close	0.265	0.292
	打上げ後衛星分離/初期運用	調圧	HLV-2.3 close → open → close LV-F1.2 close → open → close	1.458	0.265
ホイールアンローディング(リアクションホイールモメンタム低減化のためのRCS噴射 1回当たり数ccの燃料を使用) 4回 ブローダウン運用					
6/24	酸化剤タンク加圧 (24日から25日にかけてHLV-1.2, GLV-1.2をopenにして圧力静定待ち)	調圧	HLV-2.3 close → open GLV-1.2 close → open	1.472 → 1.472	0.251 → 1.362
6/25			HLV-2.3 open → close GLV-1.2 open → close		
6/28	テストマヌーバ	調圧	HLV-2.3 close → open → close GLV-1.2 close → open → close OLV-O.F close → open → close *通常closeのLVをopenにしてテストマヌーバを実施し、終了後closeにした	1.472 → 1.376	1.348 → 1.389
ホイール アンローディング:25回 ブローダウン運用 圧力変化から、ホイールアンローディングに伴う燃料消費で生じた圧力差により、逆止弁が作動したと考えている					
9/8, 9/21	燃料タンク補加圧	-	HLV-2.3 close → open → close	1.362 → 1.431	1.431 → 1.431
ホイールアンローディング:5回 ブローダウン運用					
11/8	TRM-1 ΔV	調圧	HLV-2.3 close → open → close	1.431 → 1.389	1.444 → 1.417
ホイールアンローディング:3回 ブローダウン運用					
11/22	TRM-2 ΔV	調圧	HLV-2.3 close → open → close	1.403 → 1.444	1.431 → 1.431
ホイールアンローディング:1回 ブローダウン運用					
12/1	TRM-3 ΔV	調圧	HLV-2.3 close → open → close	1.472 → 1.472	1.431 → 1.431
ホイールアンローディング:2回 ブローダウン運用					
12/6	VOI-1準備	調圧	HLV-2.3 close → open GLV-1.2 close → open OLV-O.F close → open → close *VOI-1前日にLVopenを確認し、OME系逆止弁のみ再度closeにした	1.472 → 1.472	1.431 → 1.431
12/7 ~ 12/8	VOI-1	調圧	HLV-2.3 open → close → open → close *VOI-1後に自動でcloseしたが、セーフホールド時に自動でopenした。その後closeにした GLV-1.2 open → close *VOI-1噴射後自動でcloseにした OLV-O.F close → open → close *VOI-1噴射前openにし、噴射後自動でcloseにした	1.472 → 1.334	1.417 → 1.417

図5.2-2 推進系の軌道上運用の履歴

- 5/21: 打上げ直後のタンク加圧における挙動は想定通りで逆止弁は正常に機能した
- 6/28(テストマヌーバ): 使用推薬量が少なかったため、逆止弁は作動せず、正常/異常の判断不可
- 9/21, 11/22: 逆止弁上下流の差圧が小さいため、正常/異常の判断不可
- 9/8, 10/21: 判断に必要な高頻度のテレメトリデータなし
- 12/7(VOI-1): § 2.4で解析結果を示すが、閉塞状態にあったと判断

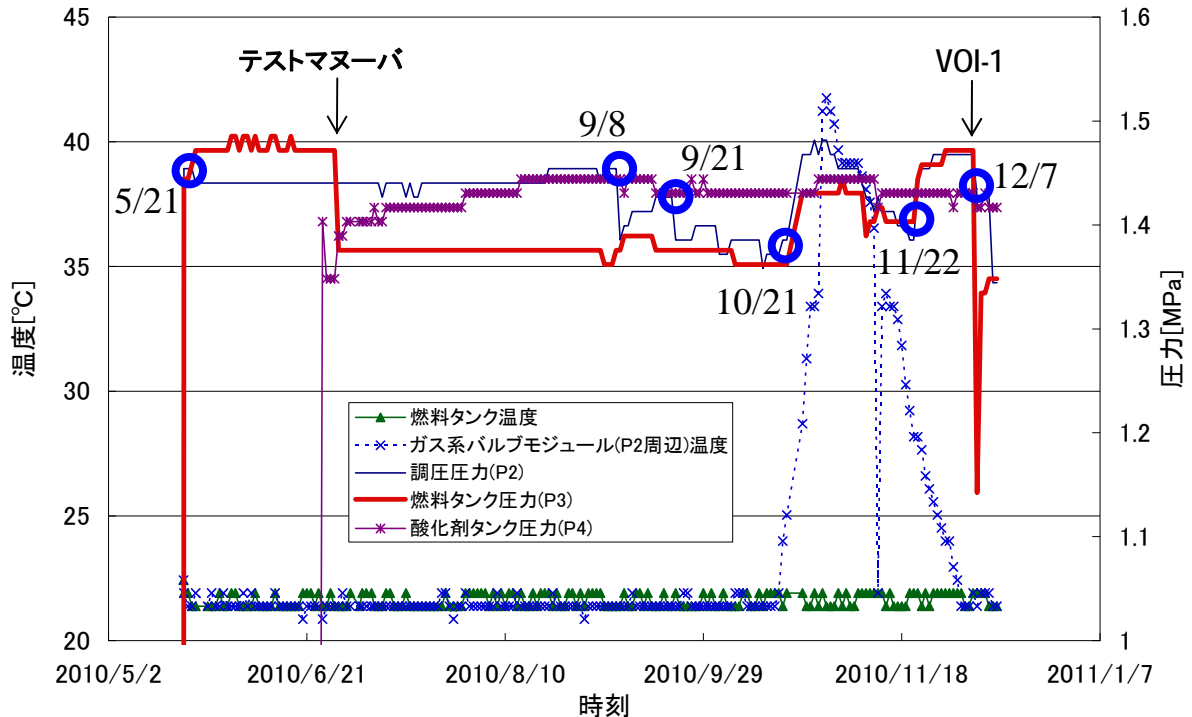
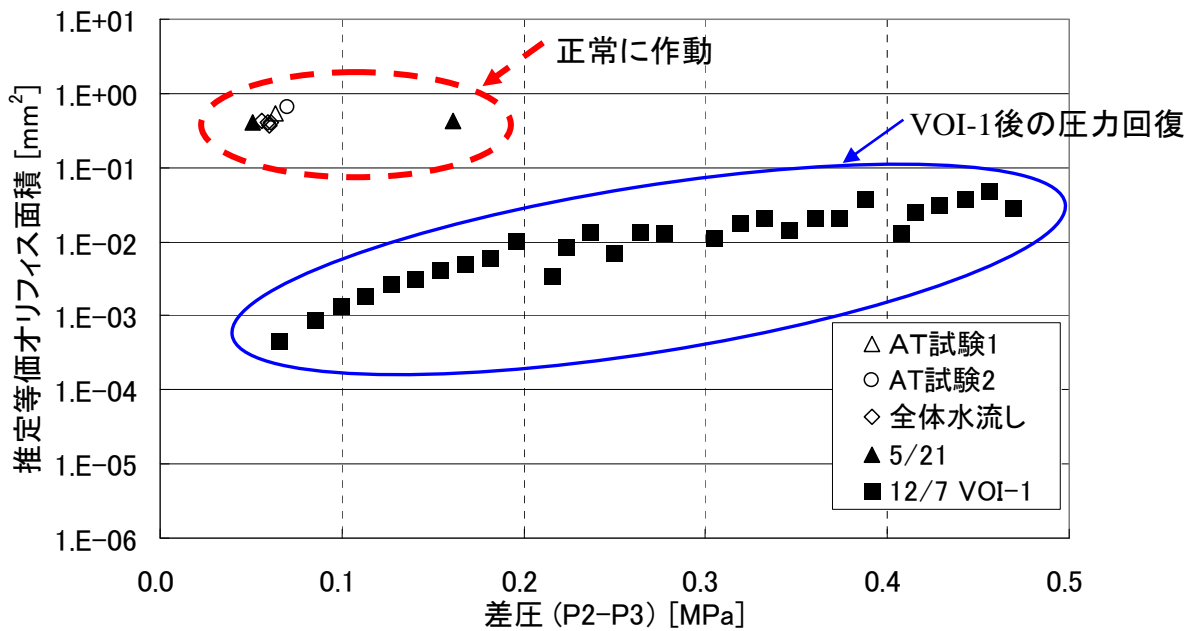


図5.2-3 軌道上運用においてCV-Fに負荷された圧力と温度の履歴



軌道上および地上試験時のP3圧力回復状況から、逆止弁等価オリフィス面積を推定した。
 推定材料1) VOI-1直後の燃料タンク空所容積の推定値
 推定材料2) 探査機上で計測された調圧圧力(P2)と燃料タンク圧力(P3)の差圧
 これらから、燃料タンクに流入するガス流量を評価した。
 単体AT時からの換算値： 0.54 mm²
 VOI-1後の圧力回復時： ~0.05 mm²

図5.2-4 CV-Fの閉塞量の推定

発生事象			判定	判定根拠	事象番号	
逆止弁(CV-F)の閉塞	シール部不良	異材使用による材料適合不良	△	試験・検査の詳細な記録についてはまだ確認できてない。	E-1	
		温度によるシール材特性変化	×	受入検査後、打上後VOI-1に至るまで仕様範囲内の温度であったことから可能性は極めて低い。		
		経年による材料劣化	×	MSFC-HDBK-527記載のランクA材料を用いていることから、劣化する可能性は極めて低い。		
		粘性変形による弁体過挿入	△	要求仕様には入れてないため、現段階では可能性を否定できない。	E-2	
		長期逆圧印加による弁体過挿入	△	要求仕様には入れてないため、現段階では可能性を否定できない。	E-3	
		過大逆圧による弁体過挿入	×	受入試験でMEOP(2.08MPa)印加後の正常作動を確認した。軌道上での最大逆圧はテレメトリデータから0.045MPaDであったことが確認されており、過大逆圧による弁体過挿入の可能性は極めて低い。		
	しゅう動抵抗増大	異材使用による材料適合不良	△	試験・検査の詳細な記録についてはまだ確認できてない。	E-4	
		弁体と本体のクリアランス不良	温度によるクリアランス悪化	×	打上後VOI-1に至るまで仕様範囲内の温度であったことから可能性は極めて低い。	
			バルブモジュールへの固定方法不良によるクリアランス悪化	△	現段階では可能性を否定できない。	E-5
			設計・製造不良	△	認定試験結果、受入試験結果は正常であったが、個体差に起因する可能性は否定できない。フライト品の詳細な検査記録についてはまだ確認できてない。	E-6
		弁体と本体のアライメント不良	△	認定試験結果、受入試験結果は正常であったが、個体差に起因する可能性は否定できない。フライト品の詳細な検査記録についてはまだ確認できてない。	E-7	
		弁体・本体の表面不良	しゅう動による摩耗・表面荒れ	△	実使用雰囲気下におけるしゅう動特性については未確認であることから、現段階では可能性を否定できない。	E-8
			材料適合不良 面腐食	△	実使用雰囲気下におけるしゅう動特性については未確認であることから、現段階では可能性を否定できない。	E-9
製造不良	△		受入試験結果は正常であったため、可能性は低いですが、完全には否定できない。試験・検査の詳細な記録についてはまだ確認できてない。	E-10		
コンタミの噛み込み	△	清浄度検査結果を確認しているので、可能性は極めて低いものの、偶発的な発生の可能性は否定できない。	E-16			
しゅう動生成物噛み込み	推葉環境下での生成物生成	△	燃料蒸気雰囲気下におけるしゅう動部での生成物については未確認であることから、可能性を否定できない。	E-11		
	想定外の作動回数	△	実使用条件においてチャタリング等により意図しない作動状況となっていないかについては未確認であることから、可能性を否定できない。	E-12		
燃料・酸化剤の生成物による弁作動の阻害	△	燃料・酸化剤蒸気が混合することにより硝酸塩が発生し、しゅう動抵抗を増大させた可能性を否定できない。	E-13			

①

図5.2-5 (1/2) 燃料側逆止弁の閉塞に関するFTA

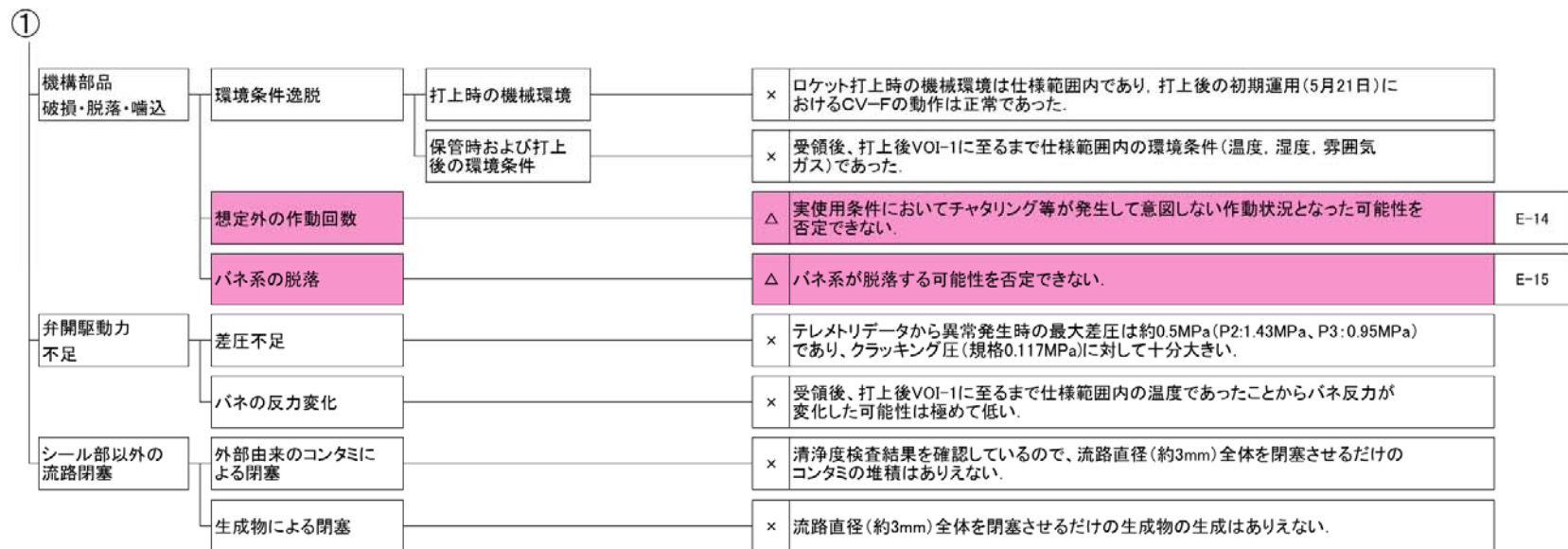


図5.2-5 (2/2) 燃料側逆止弁の閉塞に関するFTA

分類	対応事象番号	試験名	供試体	検証作業内容
情報確認・解析	E-1, 4, 6, 7, 10	設計・製造情報確認 解析	なし	製造メーカーにおける逆止弁の設計・製造情報を確認, 評価 →フォースバランス, シール, 機構設計, 各部の共振周波数, しゅう動部クリアランスなどを確認する. →外部荷重等の影響について解析を行う. →情報開示の度合いによって, 必要な追加の検証試験を検討する. →製造メーカーとは, 試験結果・検討の情報交換を協力して継続する.
要素試験	E-8, 9, 11	燃料雰囲気 摩擦試験	等価材料	燃料蒸気が摩擦・しゅう動特性に与える影響の評価 →燃料雰囲気中でピンオンディスク試験(注)を実施する. その後, しゅう動面の観察, 生成物捕集・分析を実施する. →まず1ヶ月程度の試験を実施する. 引き続き, 必要により更に半年程度を継続する(実機経過時間再現試験). 注: 回転するディスク試験体上にピン試験体押し付けてしゅう動状況を模擬する試験
	E-13	塩生成状況 確認試験	なし	燃料, 酸化剤蒸気の逆止弁・遮断弁上流への拡散と塩生成の影響の評価 →推進薬蒸気の逆止弁・遮断弁上流への拡散量を解析・評価する. →推進薬飽和蒸気を透明なカラム内で反応させ, 生成物(硝酸塩)の発生状況を確認する. このとき, 両系統の逆止弁が正常・開故障の場合を模擬した流量にて行う. →生成物の発生状況を確認後, 実バルブを使用した作動試験の可否を検討する.
実バルブ 使用試験	E-5,12,14,15	作動試験	逆止弁 (フライト予備品 および同等品)	逆止弁の実作動条件での作動状況の確認 →逆止弁単体および必要なサブシステム状態で, 上下流圧, 流量等実機の軌道上作動条件相当で作動状況を確認する. チャタリング等想定しない作動状況の有無を, 加速度計等の非破壊的手法でモニタする.
	E-2, 3	長期逆圧 印加試験	逆止弁 (フライト予備品 および同等品)	逆止弁に長期間逆圧が負荷されたことによるシール部の劣化の確認 →実機環境模擬(温度, 圧力)で長期逆圧印加後, 供試体の作動試験(クラッキング/リシート圧計測試験等)を行い, 作動状況の評価する. →まず1ヶ月程度の試験を実施する. 引き続き, 必要により更に半年程度を継続する(実機経過時間再現試験).
	E-11,13	推進薬雰囲気 作動試験	逆止弁 (フライト予備品 および同等品)	推進薬雰囲気の逆止弁作動への影響の確認 →本試験は, 燃料雰囲気摩擦試験および, 塩生成状況確認試験の結果により試験可否を判断する. →逆止弁上流側から酸化剤蒸気, 下流側から燃料蒸気を供給する. 可能であれば, ポート部から内部観察し, 塩の生成状況を確認する. 雰囲気中および塩生成後, 作動試験(クラッキング/リシート圧計測試験等)を行い, 作動状況の評価する. →まず1ヶ月程度の試験を実施する. 引き続き, 必要により更に半年程度を継続する(実機経過時間再現試験).

図5.2-6 CV-F閉塞の原因究明のための検証計画

①逆止弁の設計・製造が関係する原因候補の検討

設計・製造・使用材料等に起因する不具合を検証する。バルブメーカーとの協議や工場内の調査を通じて以下の項目について情報が得られた。

E-1) シール部の異材使用による材料適合不良

製造・検査記録を確認した結果、シール部は、設計図面指示通り、推奨適合性のある材料で製造されていることが確認された。

E-4) しゅう動部の異材使用による材料適合不良

E-10) しゅう動部製造不良

製造・検査記録(材料証明や表面処理記録など)から推奨への適合性が確認された。

E-6) しゅう動部クリアランスの設計・製造不良

E-7) 弁体と本体のアライメント不良

検査記録を確認した結果、規格内で製造されていることがわかった。

E-5) 固定方法不良によるクリアランス悪化

バンド締め付けによるバルブボディの変形量を検討し、その変形量が十分小さいことを確認した。

以上の調査などから、逆止弁の設計・製造情報を確認し、上記が閉塞原因となる可能性は十分に低いと判断する。

②弁体の動的な挙動が関係する原因候補の検討

1. レギュレータ・配管系の共振により、弁体が振動的にしゅう動する可能性の検証 〔E-12)想定外の作動回数によるしゅう動生成物嚙込〕

燃料タンク加圧を想定した動特性シミュレーションおよび試験を実施した。

その結果、レギュレータ同士及びレギュレータと逆止弁の連成振動、コンポーネント単体の振動とも発生しないことが確認された

2. 特定の作動域で逆止弁自体が励振して機構部品が破損・脱落・嚙込む可能性の検証

〔E-12)想定外の作動回数によるしゅう動生成物嚙込〕
〔E-14) 想定外の作動回数による機構部品の破損・脱落・嚙込〕
〔E-15) バネ系の脱落〕

フライト履歴の圧力状態を網羅するように逆止弁の上流圧・下流圧を変化させる試験及び解析を実施した。その結果、逆止弁の閉塞やチャタリング、フレットイング、想定外の振動などは検出されなかった

3. 軌道上でのタンク昇圧時の過渡的な応答による励振が機構部品へ与える影響の検証

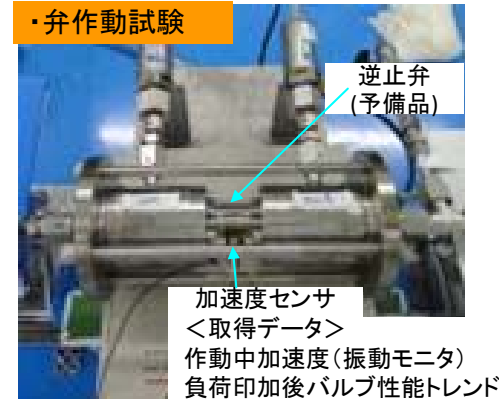
〔E-14) 想定外の作動回数による機構部品の破損・脱落・嚙込〕
〔E-15) バネ系の脱落〕

軌道上での急激なタンク昇圧時のテレメトリデータに基づいて、逆止弁上流圧をコントロールし、下流については配管径・配管長さ、ボリュームを同等にした試験を行った。

試験の結果、クラッキング圧、リシート圧の分散が0.002MPaD

以内であり、閉塞に至らないことが確認された。

・弁作動試験



弁体の動的な挙動の解析・試験結果から、上記可能性は閉塞原因となる可能性は十分低いと判断した。

③弁体の過挿入が関係する原因候補の検討

E-2) シール部の粘性変形による弁体過挿入

E-3) 長期逆圧印加による弁体過挿入

軌道上で35日間続いた逆圧状態を、軌道上データの1.5倍の圧力で21日間で模擬した。

試験前後において、クラッキング圧(逆止弁が閉→開になる圧力)、リシート圧(逆止弁が開→閉になる圧力)は下図の結果となった。(注:逆止弁の動作については、図5.2-1を参照のこと)

試験結果より、弁体の過挿入(弁体が正規の位置以上に閉側に入り込み、シールを過剰に押し込んだ状態)は観測されず、上記可能性は閉塞原因とならないと判断した。

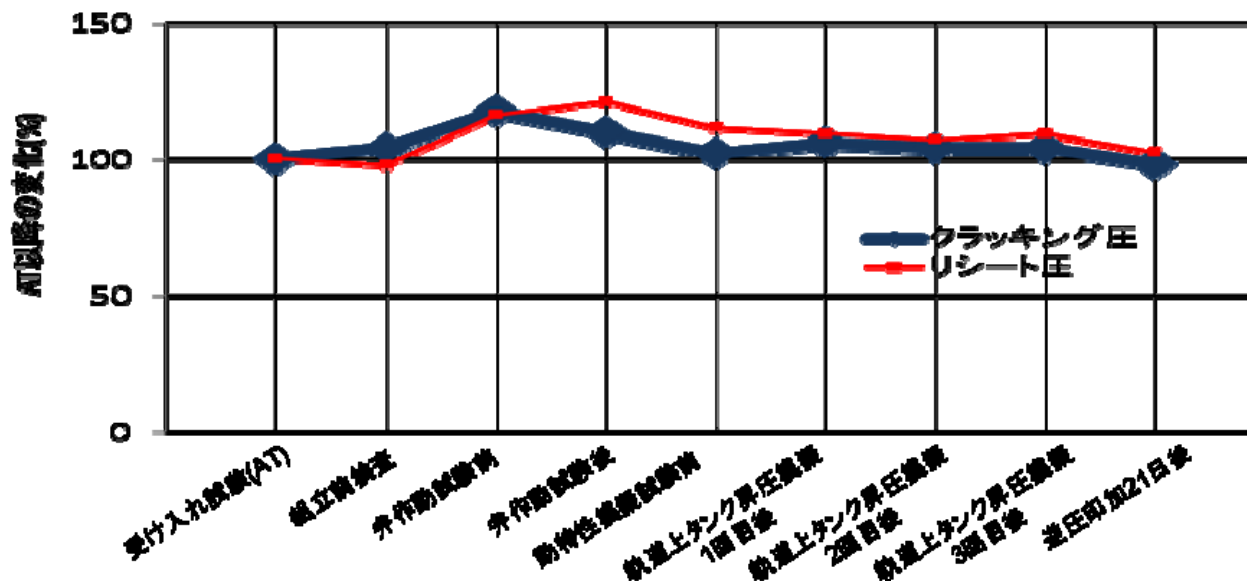


図5.2-7 (3/5) CV-F閉塞の原因候補に対する調査・検討・試験結果

④摩耗が関係する原因候補の検討

バルブの健全性を確認するための地上試験の多くは、ヘリウムガス雰囲気で行われた。しかしながら、実際の動作時には推薬蒸気などが混入した雰囲気となる。この差異(推薬蒸気の混入により摩耗・摩擦が増加するか)の影響を検証した。

E-8) しゅう動による摩耗・表面荒れ

E-9) しゅう動部材料適合不良による面腐食

燃料雰囲気摩擦試験により確認した。本試験は、ピンオンディスク試験装置を用い、ヘリウムガス環境下あるいは推薬蒸気環境へ浸漬させた供試体をしゅう動させ、静止/動摩擦係数、摩耗量、摩耗粉を観察した。

その結果、むしろヘリウムガス環境下での試験の方が顕著に大きくなる結果が得られており、推薬雰囲気による悪化は観測されなかった。

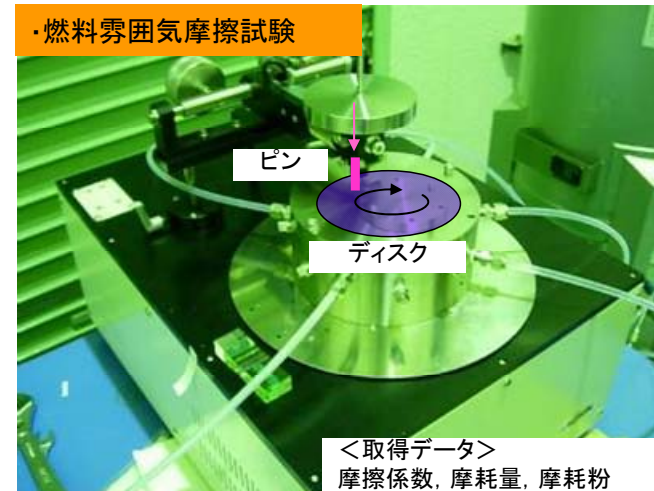
E-11) 推薬環境下での生成物の嚙込

ディスク摩耗量計測

供試体ディスクのしゅう動痕溝深さはヘリウム環境下では5~10 μ mであった。一方、燃料雰囲気下では最大でも4 μ mであり、燃料雰囲気では悪化することはなかった。

推薬環境下での生成物

しゅう動試験の結果、金属同士がこすれあって発生する金属粒子が計測されたものの、燃料もしくはその他の化合物生成物は見られなかった。



推薬環境が摩耗に対して悪影響を与える事象は観察されず、これらの可能性は閉塞原因としないと判断した。

⑤コンタミ噛み込みの可能性検討

コンタミ源として考えられるものと、その評価は次のとおりであり、コンタミ噛込の可能性は低いと評価する

- (1) 製造時から存在したコンタミについて
清浄度検査の結果は、逆止弁を閉塞させるようなものではない。
- (2) 地上整備中に混入したコンタミについて
探査機に流体アクセスする場合、フィルタを通す手順となっているため、逆止弁を閉塞させるコンタミは混入しない
- (3) 他バルブ作動時に発生したコンタミについて
逆止弁上流にある可動機器として、調圧弁があるが、調圧弁出口にはフィルタが装着されているため、逆止弁を閉塞させるコンタミは発生しない。

ただし、コンタミの噛込は、完全に排除できる性質のものではなく、偶発的に発生する可能性を否定できない。そのため、今後の開発では、たとえば、設計段階でフィルタ配置をより慎重に検討する、配管洗浄方法の更なる改善の可能性を検討するなど、コンタミ噛み込みの可能性低減に継続的に取り組むこととする。

想定事象

- ①酸化剤蒸気が上流へ移動
- ↓
- ②燃料・酸化剤反応による塩生成
- ↓
- ③塩生成による燃料側逆止弁動作障害

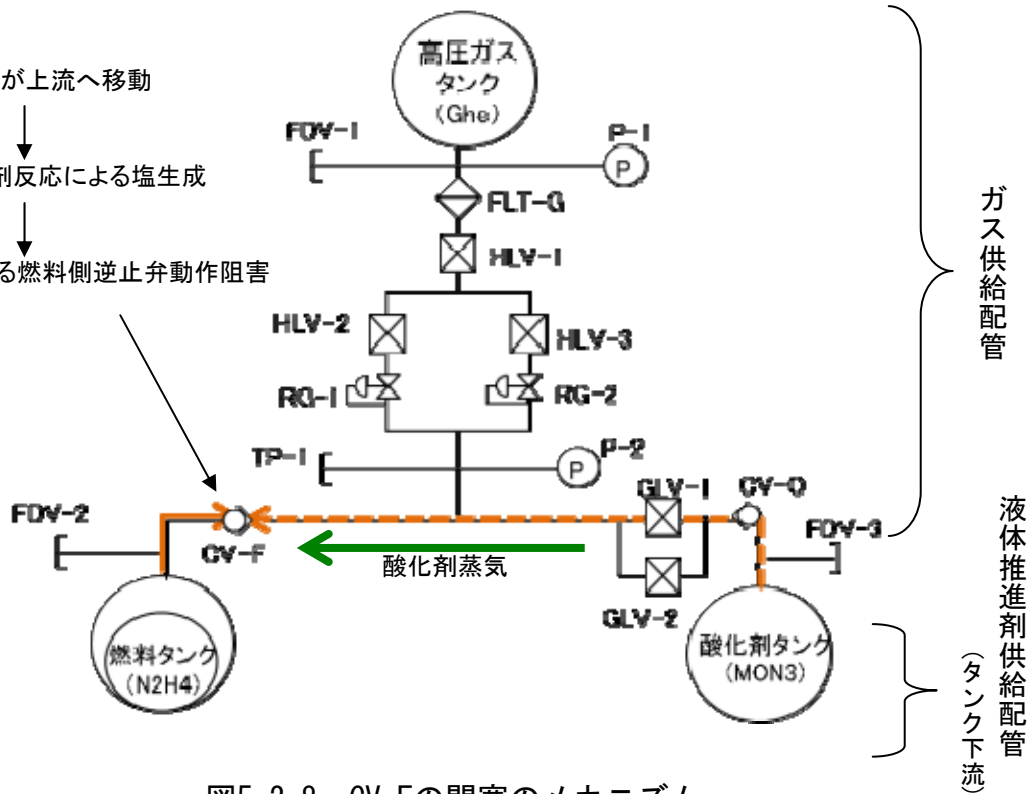


図5.2-8 CV-Fの閉塞のメカニズム

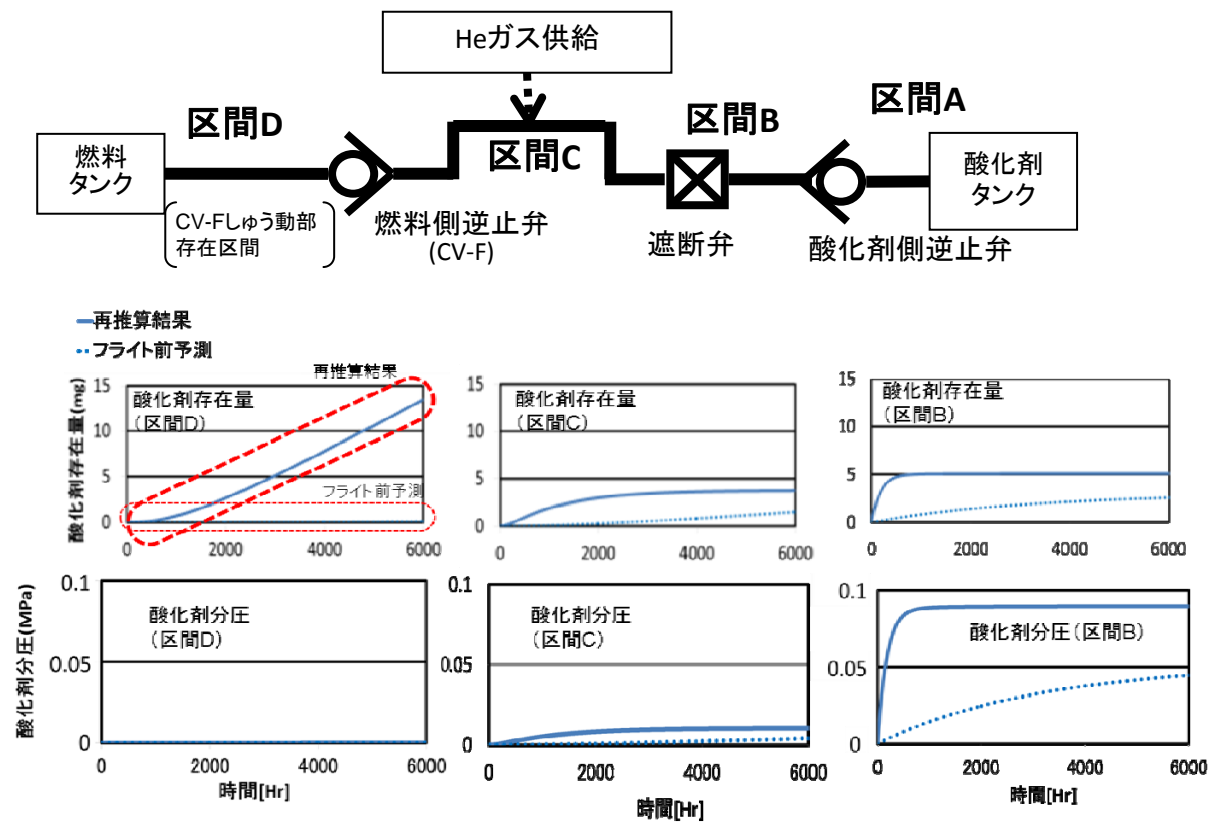


図5.2-9 加圧ガス供給配管を移動する酸化剤蒸気量

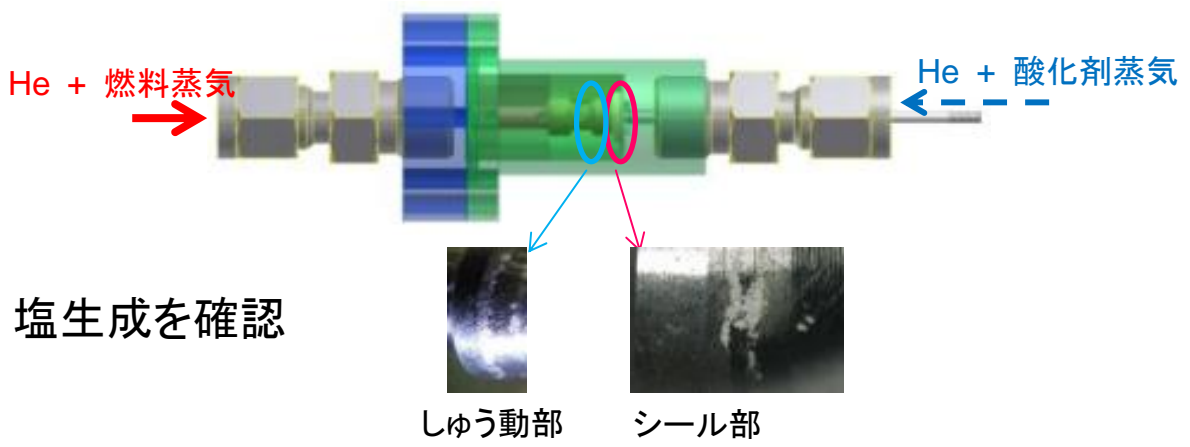


図5.2-10 弁体付近での塩生成

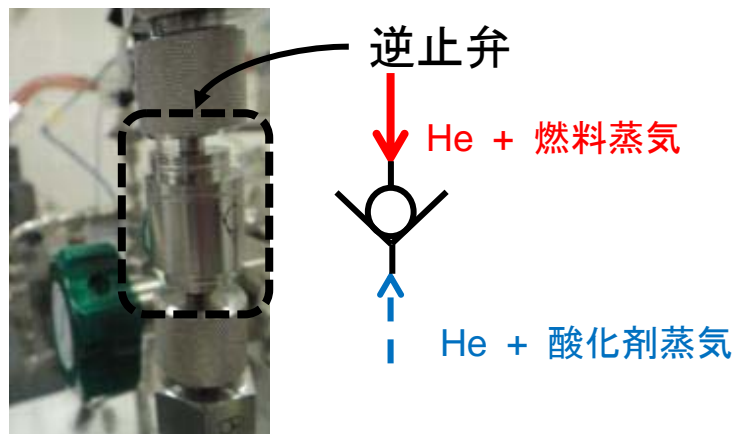


図5.2-11 逆止弁閉塞再現試験の様子

分類	対応事象番号	試験名	供試体	検証作業内容
インジェクタ 水流し試験	D2 D5	インジェクタ 水流し試験	同一設計 インジェクタ (新規製作)	低燃料供給圧条件でのインジェクタ水流し試験を行う ・燃料側単独の噴射状態を確認 →フィルムクーリング噴射方向変化の可能性評価 ・燃料／酸化剤の衝突状態を確認 →インジェクタ噴射方向変化の可能性評価
地上燃焼 試験		スラスタ作動特性 取得試験	同一設計 インジェクタ (新規製作) ＋ セラミックスラスタ (予備品および 新規製作)	燃料／酸化剤供給圧を幅広く振ったOME燃焼試験を行う ・設計条件を逸脱した状態での燃焼挙動、性能特性の取得 →以下の試験の準備および安定した燃焼を示す範囲の確認
	D1 D3 D4 (D2) (D5)	異常事象 再現確認 試験		VOI-1末期の燃料供給圧条件でのOME燃焼試験を行う VOI時-1の異常が発生するかを確認する ・スロート後方後燃え：燃焼圧・推力プロファイルで確認 ・不安定燃焼：燃焼圧・推力プロファイルで確認 ・ノズル・スロート部破損：監視カメラで確認 →スラスタ破損が確認された場合、次の破損後性能評価と 破壊確率評価を実施する
	D1	破損後 性能評価試験		異常現象再現確認試験でスラスタが破損した場合 破損したスラスタにおけるスラスタ性能を取得する →VOI-1開始後156～158秒における推定推力との比較評価
燃焼解析	D1 D2 D3 D4 D5	スラスタ燃焼の 数値流体解析		燃料／酸化剤供給圧を幅広く振った条件で、 スラスタ燃焼状態の数値流体解析コードを整備して解析を実行する
破壊解析	D1	スラスタの 破壊確率評価		異常現象再現確認試験でスラスタが破損した場合 スラスタ温度分布より、熱応力解析、強度評価解析を行う 同時に破損位置の確認を実施する

図5.3-1 OMEに発生した事象を特定するための検証計画

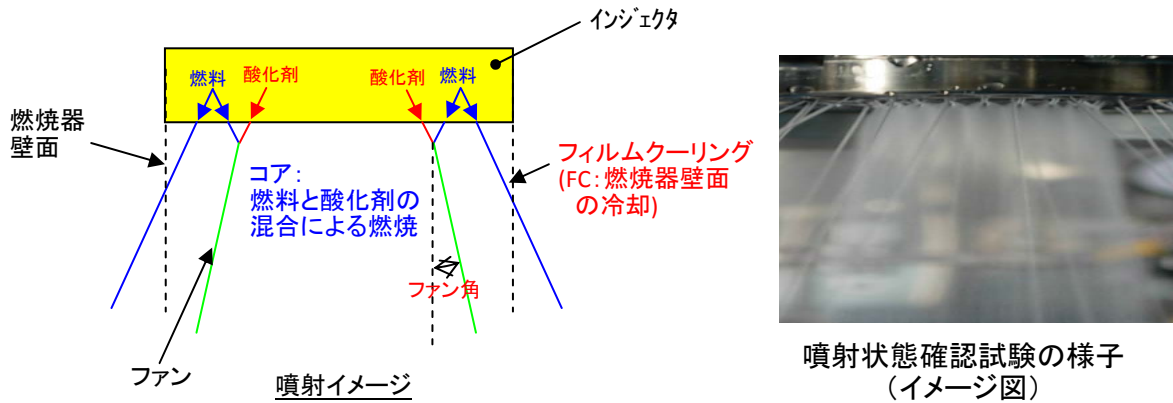


図5.3-2 インジェクタから噴射される推薬の状態 (イメージ)

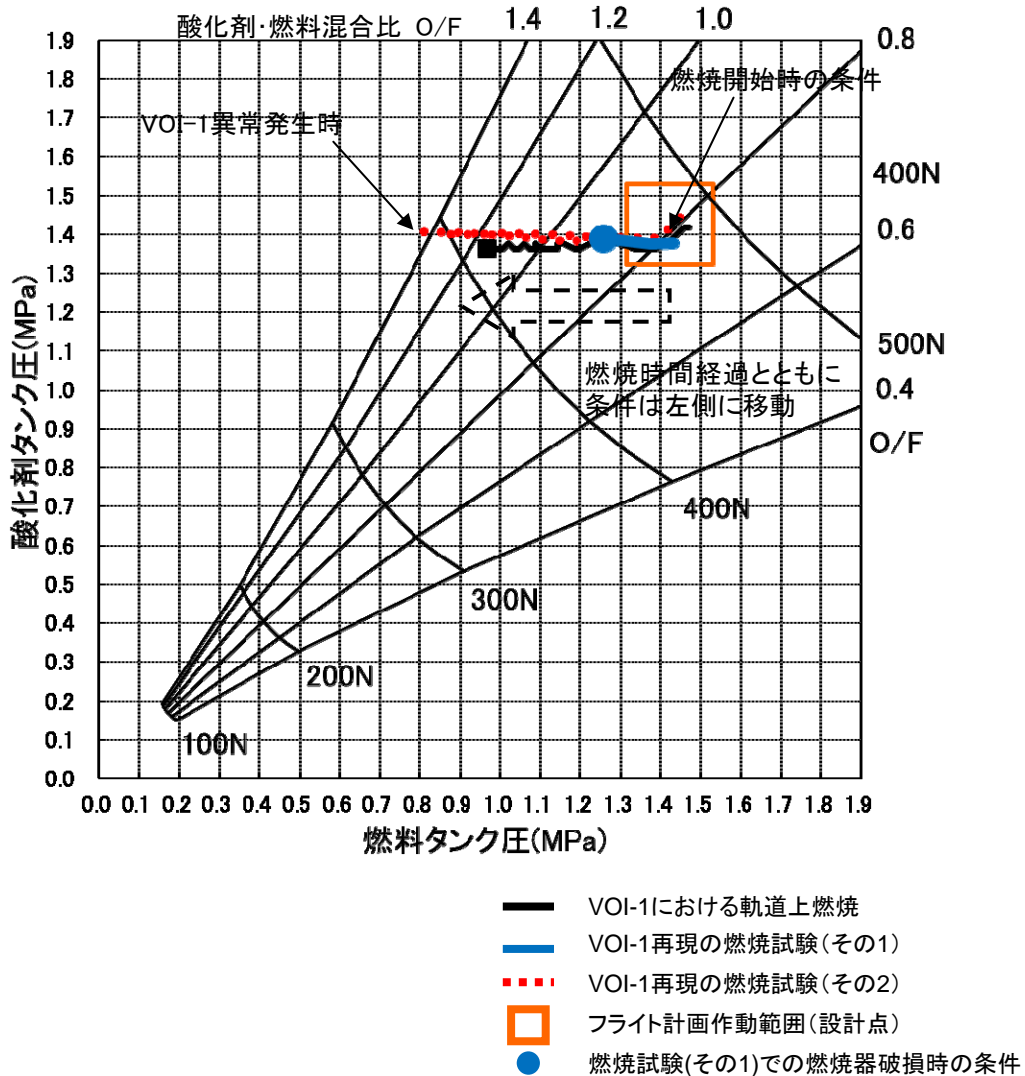


図5.3-3 VOI-1時の推薬の供給状態を再現した地上燃焼試験の試験条件



地上燃焼試験後の燃焼器
(スラストノズル部で破損している)

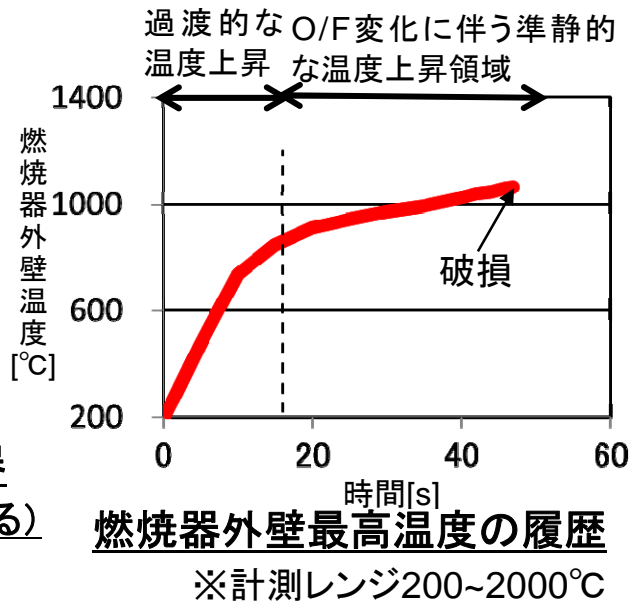


図5.3-4 燃焼試験 (その1) の結果

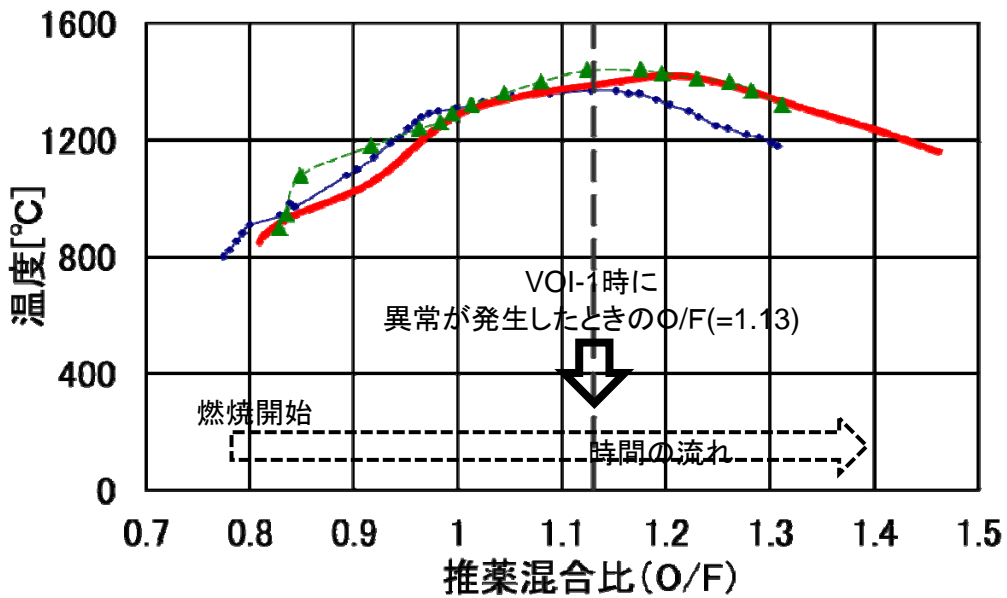


図5.3-5 燃焼試験 (その2) の結果 (燃焼器外壁の最高温度の履歴)