

「あかつき」の金星周回軌道投入失敗 に係る原因究明と対策について(その3)

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

2011年6月30日

概要

第2回の調査部会までの議論で、あかつきの金星軌道投入失敗は、

- 燃料側逆止弁が閉塞したことが原因であり、
- 逆止弁閉塞によってVOI-1中の軌道制御用エンジン(OME)の燃焼状態が設計条件を逸脱しOMEに何らかの異常が発生した

ことによる、と推定された。

これを受けて、本資料では第2回調査部会後に行った調査検討、解析および各種検証実験などの結果から、

- 逆止弁閉塞の原因究明の状況報告
- OMEが現在どういう状況にあるかの推定、
- 再度金星周回軌道への投入を試みるための準備の状況

の主として3点について、検討の現状と得られた結果を、第3回部会への報告としてまとめたものである。

目次

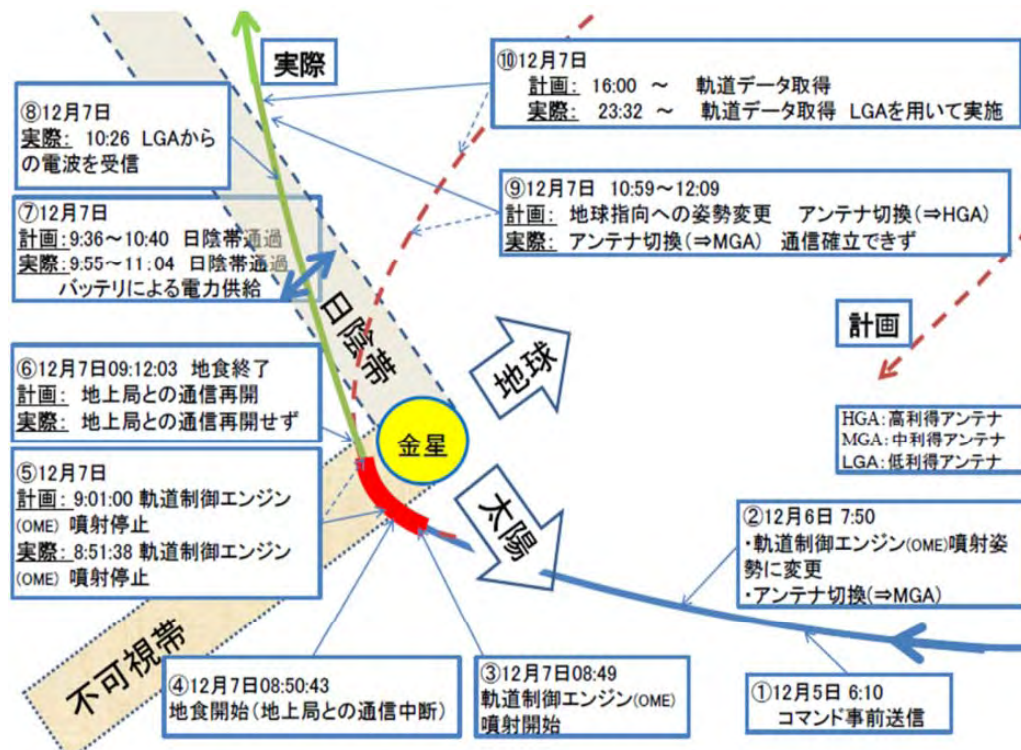
1. 経緯及びあかつきの現状
 - 1.1 第2回部会までの不具合原因推定シナリオ及び第3回部会報告内容サマリ
 - 1.2 逆止弁及び軌道制御エンジン(OME)概要
2. 逆止弁閉塞原因調査
 - 2.1 逆止弁閉塞原因候補について
 - 2.2 「燃料・酸化剤反応生成物による弁の動作不良」の検討
 - 2.2.1 弁上下流間の推薬移動速度の推定
 - 2.2.2 あかつき推進系での推薬移動量の推定
 - 2.2.3 弁体付近の塩生成可能性評価
 - 2.2.4 塩生成による逆止弁閉塞の可能性評価
 - 2.2.5 酸化剤移動に対するあかつきの設計時の考え方と現在の知見に基づく理解
 - 2.2.6 他衛星の状況
 - 2.2.7 将来ミッションでの対策案
 - 2.3 コンタミ噛み込みの可能性検討
 - 2.4 逆止弁不具合の検証結果(まとめ)
3. 逆止弁閉塞に起因してOMEの受けた影響について
 - 3.1 OMEの受けた影響候補について
 - 3.2 インジェクタ噴射状態確認試験結果
 - 3.3 VOI-1を再現した地上燃焼試験
 - 3.3.1 燃焼試験(その1)
 - 3.3.2 燃焼試験(その2)
 - 3.4 OMEの受けた影響の検証試験結果(まとめ)
4. 金星軌道再投入に向けた検討
 - 4.1 金星軌道再投入に向けた軌道計画
 - 4.2 金星軌道再投入運用のトレードオフ
 - 4.3 金星軌道再投入運用に向けた検討
 - 4.4 近日点近傍での高温環境への対応について
 - 4.5 次回近日点マヌーバに向けた今後のスケジュール
5. 第3回調査部会報告のまとめ

補足資料集

1. 経緯及びあかつきの現状

- 金星探査機「あかつき」は平成22年5月21日にH-IIAロケット17号機で打ち上げられ、平成22年12月7日金星周回軌道への軌道投入マヌーバ(VOI-1)を実施。燃焼開始後約152秒後の大きな姿勢変動の後、約158秒後に燃焼を停止(予定では約720秒後に燃焼停止)。金星周回軌道投入に失敗し太陽周回軌道を飛行中(下図参照)
- 平成22年12月8日の宇宙開発委員会において原因究明並びにそれらの対策等に必要な技術的事項について調査部会において調査審議することを決定。

軌道投入マヌーバ(VOI-1)の運用計画・実際



1. 経緯及びあかつきの現状(つづき)

3. 平成22年12月17日, 27日の2回の調査部会において, 事実確認, FTAを用いた推定原因の洗い出し及び絞り込みを以下のように実施.
 - ① 故障の木解析(FTA)の結果, 不具合の根本原因は, ガス系配管の逆止弁CV-Fの閉塞と推定
 - ② 逆止弁CV-F閉塞の結果として, 軌道制御エンジン(OME)の燃焼状態が影響を受けたと推定
 - ③ OMEが探査機に外乱トルクを与え, 自律制御により燃焼停止に至ったと推定
4. 不具合発生メカニズム推定の詳細化のため, 試験・検証を実施. ただし, 供試体数に制約があるため, 最大限有益な検証が行えるよう各試験検証を慎重に実施した. 試験の進行は, 異常な状況の再現における試行錯誤および大幅に設計条件を逸脱した試験が必要なための設備や試験実施上の安全制約などのため, 2回調査部会で提示したスケジュールよりも多少の遅れが生じた.
5. 平成23年4月13日の宇宙開発委員会において, その時点のあかつきの状況を報告. 4月17日の近日点に向けた運用方針について説明した.
6. あかつきは太陽周回軌道を現在正常に飛行中. 探査機の搭載機器は正常に動作している.

1.1 第2回部会までの不具合原因推定シナリオ及び 第3回部会報告内容サマリ

第1,2回調査部会にて以下の不具合原因シナリオを推定

①燃料側逆止弁(CV-F)の閉塞

燃料供給圧の低下により燃焼室への燃料流量が低下。
OMEの酸化剤/燃料混合比が設計条件を逸脱

②OMEが影響を受け、スラスタノズルの破損あるいは燃焼異常等、設計条件を逸脱した燃焼状態に起因する事象が発生

探査機姿勢に異常が発生し、自律制御によるOME燃焼停止

第3回調査部会においては、上記推定シナリオを踏まえ、

①燃料側逆止弁閉塞の原因究明

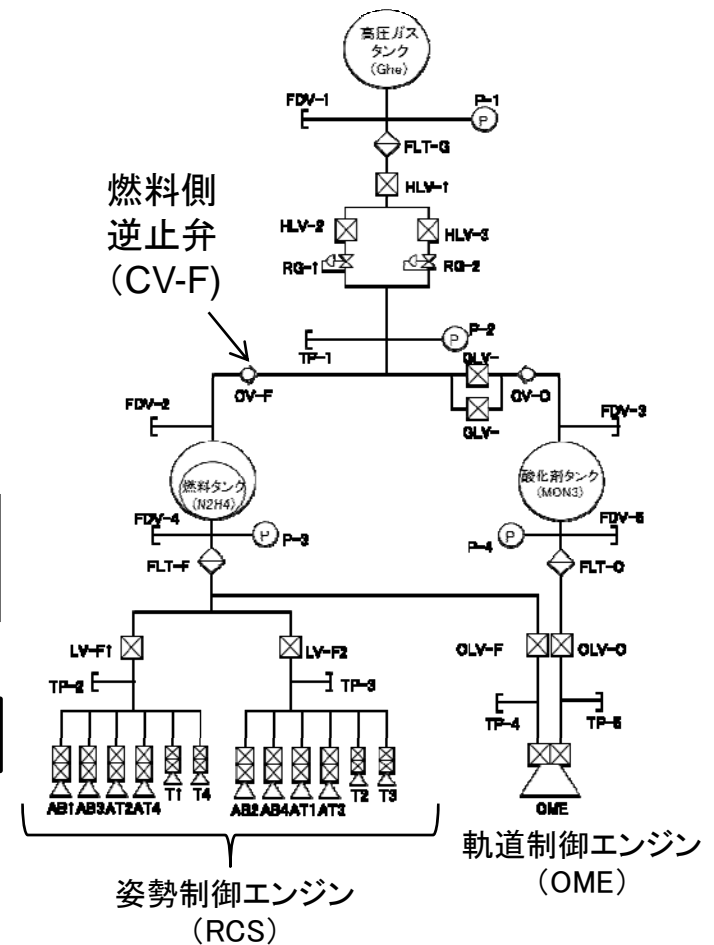
並びに、逆止弁閉塞により

②軌道制御エンジン(OME)が受けた影響検討

について、結果を報告する。また、あかつきの現状を考慮しつつ、

③金星軌道への再投入の可能性検討

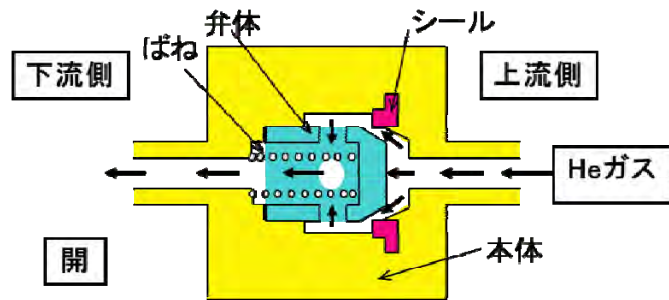
を進めているが、その現状についても報告する。



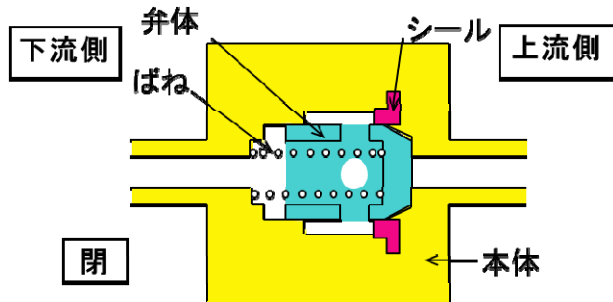
あかつき推進系系統図

1.2 逆止弁及び軌道制御エンジン(OME)概要

逆止弁の概要を下図に示す



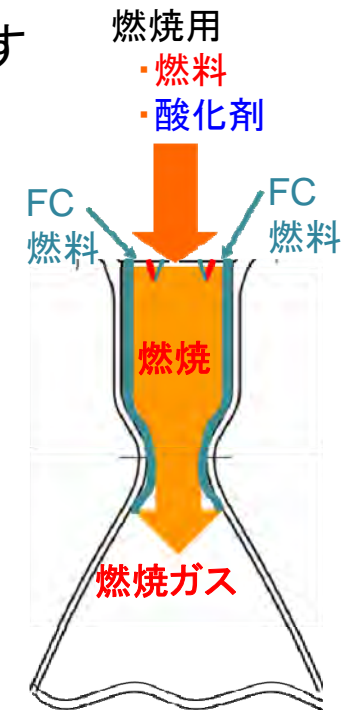
差圧(上流側圧力 - 下流側圧力)が規定圧力(クラッキング圧)以上になると, 逆止弁の弁体が下流側に動き, 上下流の流路が開く。



差圧(上流側圧力 - 下流側圧力)が規定圧力(リシート圧)以下になると, 弁体がばね力により上流側に動いて, 上下流の流路は閉じる

- VOI-1において, 酸化剤系逆止弁(CV-O)は正常に作動したが, 燃料系逆止弁(CV-F)が正常に開かなかった
- 燃料系・酸化剤系では同一の逆止弁を使用している。

OMEの概要を下図に示す



- あかつきに1基搭載
 - 推力500N級
 - 燃料(ヒドラジン), 酸化剤(NTO)を使用した2液推進系
 - ヘリウムガスを調圧して加圧する調圧式推進系
 - 燃焼器に1体構造の窒化珪素系モノリシックセラミックスを使用
 - 噴射器(インジェクタ)はチタン合金製
 - 燃焼器内面を燃料で冷却(フィルムクーリング・FC)
 - 噴射器から押し出された燃料・酸化剤を衝突・混合させて燃焼
- VOI-1において, OME噴射中に探査機に過大な姿勢擾乱が発生したため, 自律制御により燃焼を停止した

2. 逆止弁閉塞原因調査

2.1 逆止弁閉塞原因候補について

あかつき不具合の原因とされた燃料側逆止弁閉塞について、逆止弁閉塞に至った原因として第1, 2回調査部会でFTAにより以下16項目を抽出(§ A.2d). その後, 対応する項目について以下のような検討方針で確認.

第1, 2回調査部会で抽出された 逆止弁閉塞原因候補 (16項目)

検討方針

- E-1) シール部の異材使用による材料適合不良
- E-4) しゅう動部の異材使用による材料適合不良
- E-5) 固定方法不良によるクリアランス悪化
- 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
- E-10) しゅう動部製造不良

①逆止弁の設計・製造が関係する原因候補の検討

- 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

②弁体の動的な挙動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

③弁体の過挿入が関係する原因候補の検討

- 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
- E-11) 推薬環境下での生成物の嚙込

④摩耗が関係する原因候補の検討

- E-13) 燃料・酸化剤反応生成物(塩)による弁動作の阻害

⑤燃料・酸化剤反応生成物(塩)が関係する原因候補の検討

- E-16) コンタミの嚙込

⑥コンタミが関係する原因候補の検討

2.1 逆止弁閉塞原因候補について (つづき)

— 逆止弁閉塞原因候補検討状況サマリー —

① 逆止弁の設計・製造が関係する原因候補の検討

バルブメーカーの設計・製造情報の確認およびそれをもとにした解析結果から、原因候補にはなりえないと判断した(§ B.1)

② 弁体の動的な挙動が関係する原因候補の検討

弁体の動的な挙動の解析および試験の結果より、原因候補にはなりえないと判断した(§ B.2)

③ 弁体の過挿入が関係する原因候補の検討

長期逆圧印加試験の結果より、原因候補にはなりえないと判断した(§ B.3)

④ 摩耗が関係する原因候補の検討

推薬雰囲気でのしゅう動特性取得試験の結果より、原因候補にはなりえないと判断した(§ B.4)

⑤ 燃料・酸化剤反応生成物(塩)が関係する原因候補の検討

酸化剤の弁上下流移動測定により原因候補である可能性を確認した(§ 2.2)

⑥ コンタミが関係する原因候補の検討

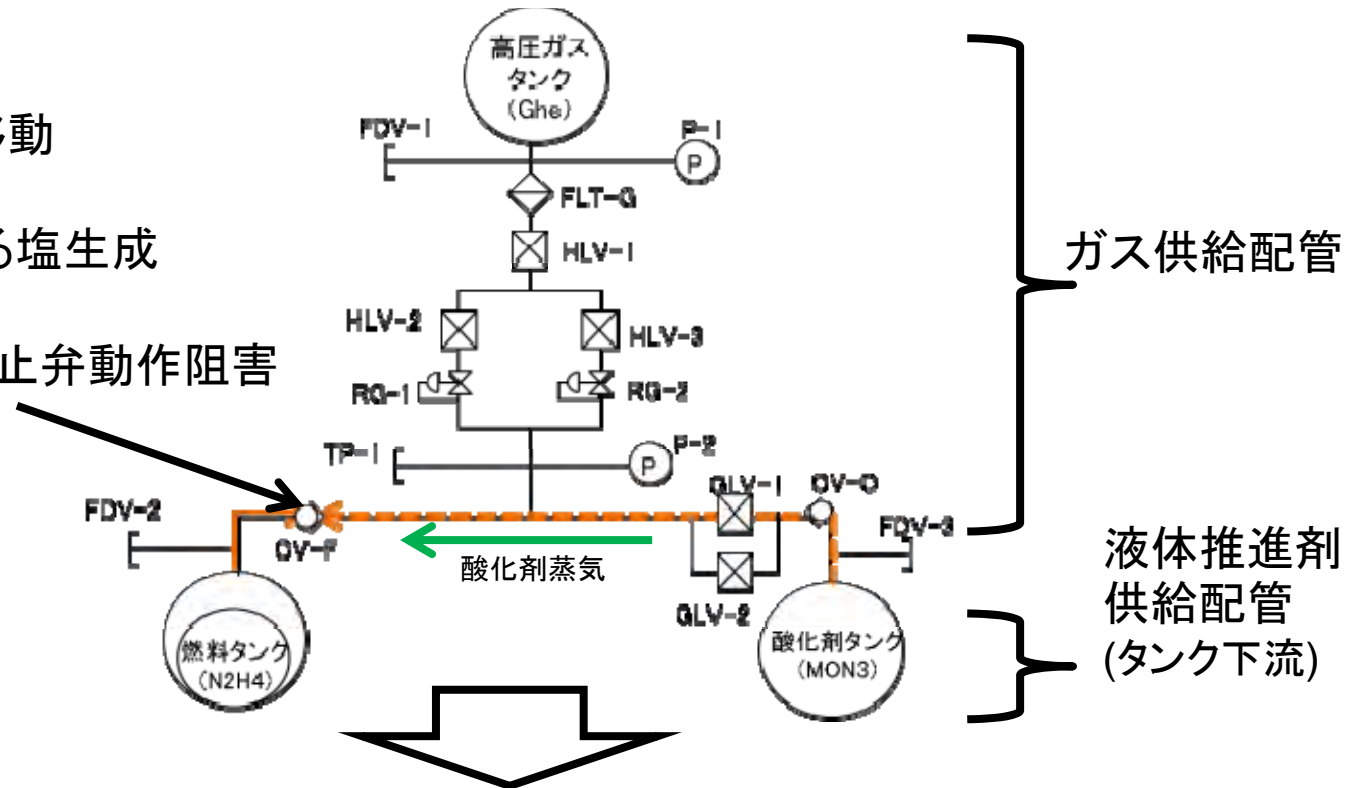
組立および試験の作業手順・検査記録より、原因候補である可能性は低いですが、完全には排除できない。(§ 2.3)

2.2 「燃料・酸化剤反応生成物による弁の動作不良」の検討

§ 2.1⑤項に対応した検討として、燃料酸化剤のガス供給配管内の移動量を見直し、配管内各部での存在量を推定、両者の反応生成物による影響を調べ、逆止弁閉塞との関係を調べる。

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阻害



- ①実推薬を用いて弁を通過する推薬蒸気の移動速度を測定 (§ 2.2.1)
- ②推薬移動速度に係る実験値を用いてあかつき推進系配管での推薬移動量を推定 (§ 2.2.2)
- ③燃料・酸化剤反応による塩生成を確認 (§ 2.2.3)
- ④逆止弁閉塞の可能性について実験的検証を実施 (§ 2.2.4)

2.2.1 弁上下流間の推薬移動速度の推定(設計時の手法)

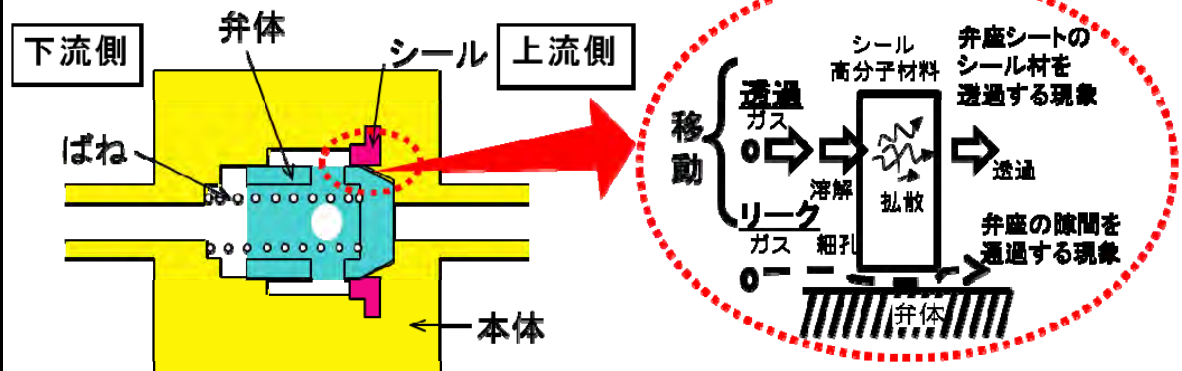
設計時には推薬蒸気の移動は、弁体内の隙間を通過する量と考え(リークモデル)、ヘリウムの移動量でこれを管理し、推進剤蒸気などへ換算することによって予測していた。

①弁上下流の推薬(酸化剤・燃料)蒸気の移動速度を測定しやすい基準気体を用い、フライトを想定した常温環境で評価することとした

②実際に弁上下流に差圧を立てて基準気体(ヘリウム)移動速度を測定。孔を仮定し、基準気体の移動速度からその孔を通過する等価な孔径(等価オリフィス径)を計算
⇒ リークモデル(詳細は § B.5を参照)

③ヘリウムによる計測に基づく等価オリフィス径を用いて推薬のリーク速度を計算。
設計時には、これを推薬移動速度と想定していた。

供試体	③ 設計時に想定した推薬移動速度 (mg/s)	
	酸化剤	燃料
遮断弁	1×10^{-08}	1×10^{-10}
逆止弁	2×10^{-08}	2×10^{-10}



※ § B.5を参照

2.2.1 弁上下流間の推薬移動速度の推定(再解析)

不具合を受け弁上下流間の移動速度を実推薬を用いて実測し、以下の知見を得た。

逆止弁について、実測した推薬移動速度は、そこを通過する推薬量をすべてリーク量とした(リークモデル)場合よりも大きいものであった(下表AとCの比較)。

(遮断弁については、両者は同程度であった)

⇒ 逆止弁の透過による推薬移動速度が想定以上である可能性が示唆され、推薬移動が全て透過のみによる(透過モデル)として透過量を評価(下表のB)

推薬移動速度のモデル値と実測値の比較

逆止弁	A) 設計 (リークモデル※1)	B) 再解析 (透過モデル※1)	C) 実測
酸化剤 @飽和蒸気圧	2×10^{-8} mg/s	3×10^{-5} mg/s	0.8×10^{-5} mg/s
燃料 @飽和蒸気圧	2×10^{-10} mg/s	1×10^{-10} mg/s	7×10^{-8} mg/s ※2



※1: 各モデルによる算出法は、§ B.5を参照
※2: 燃料移動速度は供試体数の制限により、類似弁にて実測した。

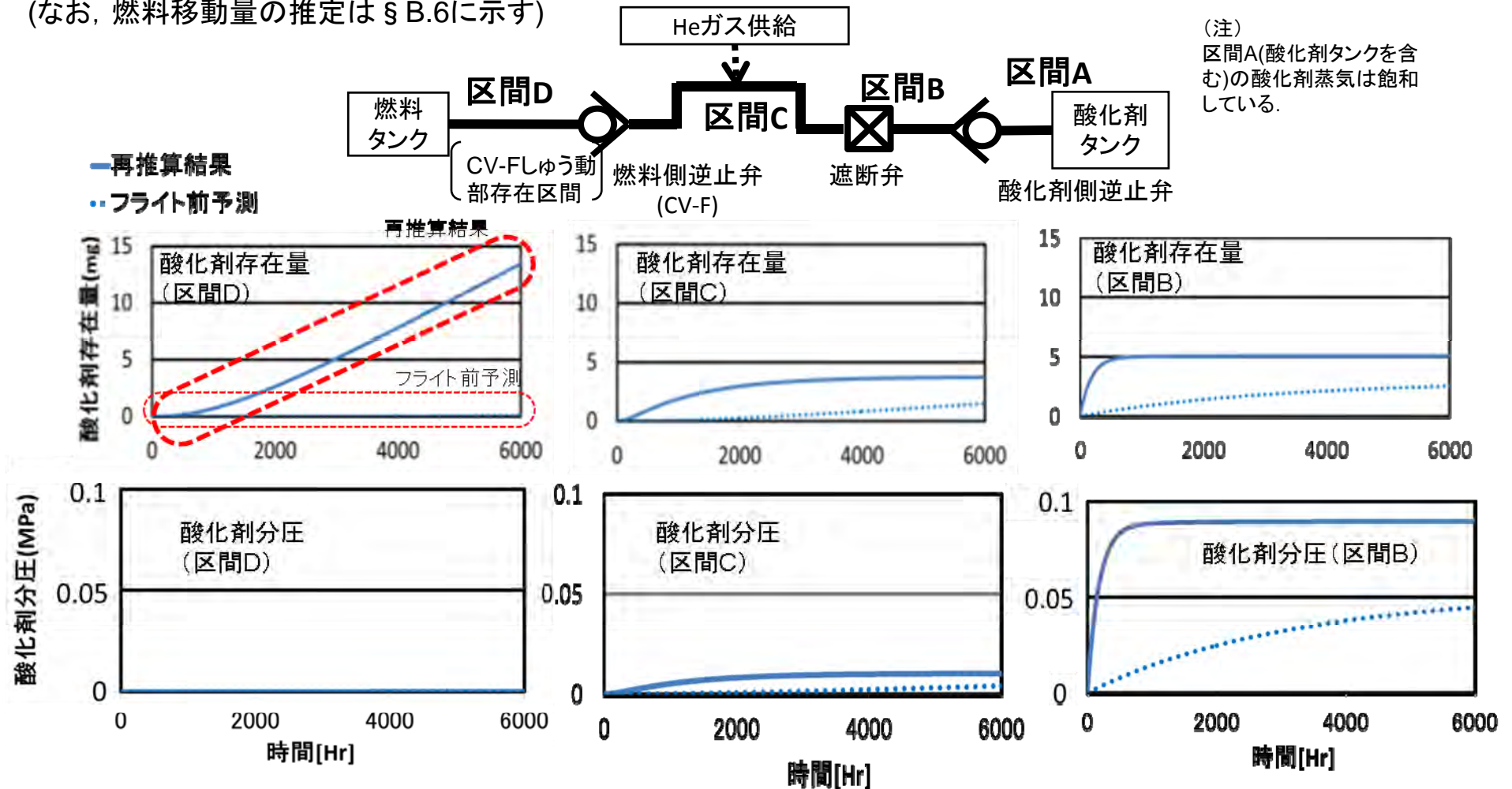
酸化剤について、実測された移動速度(C)は、設計時使用モデルによる推定値(A)よりも大きく、透過モデルによる再解析結果(B)と同じオーダーであった。

燃料については、(A)も(B)も同じオーダーであり、類似弁にて計測した(C)よりも1ケタ小さい値である。ただし、燃料移動量の推定は、(C)の値を使っても十分小さい(§ B.6)。

このことより、今回のケースでは、酸化剤については透過の効果が支配的であることが明らかとなった。

2.2.2 あかつき推進系での推薬移動量の推定

実測した逆止弁・遮断弁の酸化剤移動速度を使って、あかつき推進系のガス供給配管を移動する推薬蒸気の量を算出した。区間D(燃料側逆止弁下流)に6,000時間(推薬充填後, VOI-1までの時間)で移動する酸化剤は、フライト前の予想よりも2桁多い値であった。(なお、燃料移動量の推定は § B.6に示す)

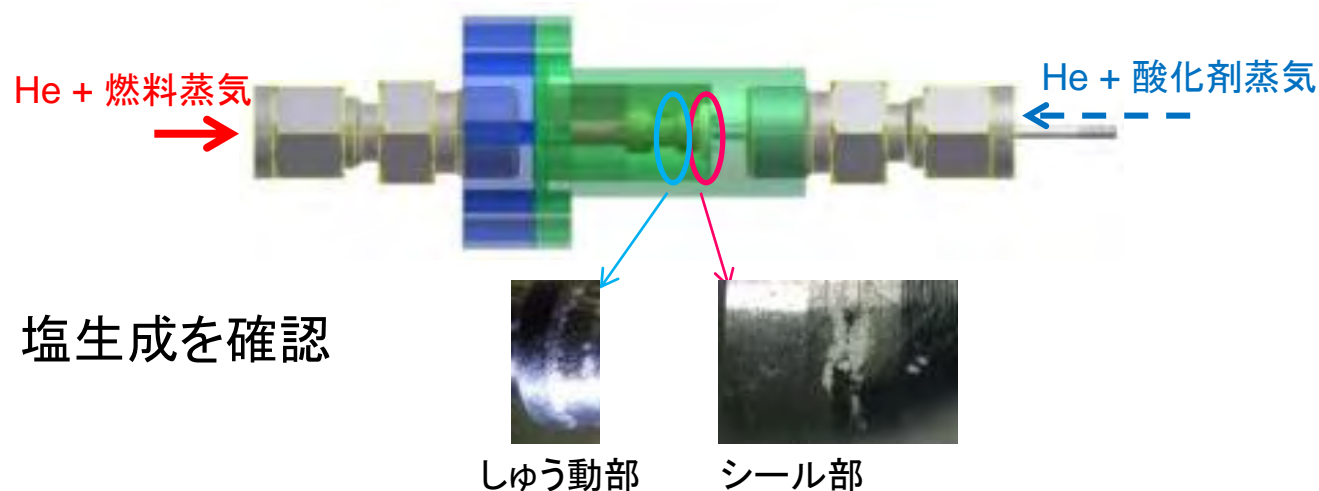


区間Dには燃料タンクの空所容積も含まれ、その容積は他の区間より3桁大きいことから、分圧の差が保たれて、燃料側逆止弁での酸化剤移動が継続して起きる、と理解される。

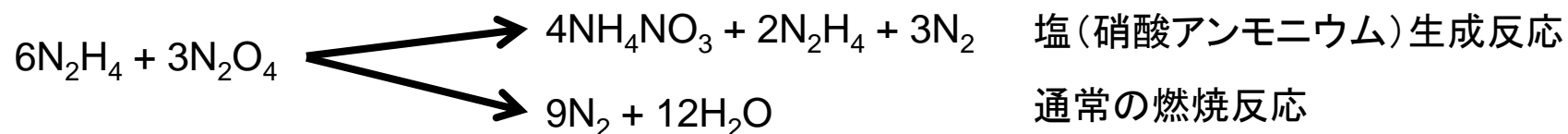
2.2.3 弁体付近の塩生成可能性評価

§ 2.2.1及び § 2.2.2の考察によりあかつき不具合発生時に、燃料側逆止弁の弁体付近 (§ 2.2.2の区間D:しゅう動部を含む逆止弁下流)で酸化剤・燃料蒸気が混合する可能性がある。

逆止弁内部で酸化剤と燃料の蒸気が混合した場合に、反応生成物として固体の塩の生成可能性を、実機と類似形状の透明な逆止弁モデルを試作して観察。

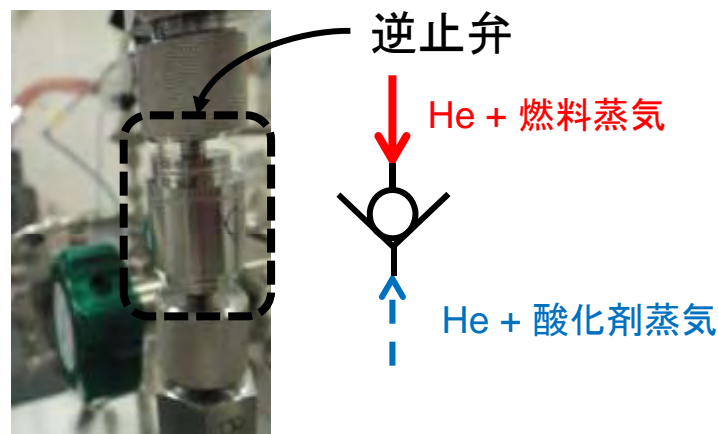


シール部付近およびしゅう動部近傍に、固体の塩生成を確認
なお、塩の生成は以下の反応による。



2.2.4 塩生成による逆止弁閉塞の可能性の観察

§ 2.2.3において、逆止弁での塩生成が確認されたため、閉じた弁の上下流から、それぞれヘリウムガス+酸化剤蒸気・燃料蒸気を供給することで、逆止弁内部に塩を生成させ、一定時間経過後、弁を作動させ動作不良や閉塞する可能性を検証するための実験を行った。



逆止弁閉塞再現試験の様子

弁作動試験を § 2.2.3の透明逆止弁モデルを使用して実施した。

軌道上経過時間を模擬(酸化剤移動量を合わせる)した状態で、塩が生成していることを目視で確認した後、直接弁体を押し込んで弁動作を確認した。

塩生成前に必要な押し込み力(クラッキング圧力に相当)が160gf程度であるのに対して、塩生成後は10回中3回、その2.5倍までの力を加えても弁は動作せず、閉塞状態が観察された。

塩生成	弁の閉→開に必要な押し込み力 (gf)									
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
前	160	160	160	160	160	157	158	156	160	162
後	400以上※	160	400以上※	160	400以上※	170	160	170	160	180

※弁体に400gfまでの荷重を掛けたが動作せず

2.2.5 酸化剤移動に対するあかつき設計時の考え方と現在の知見に基づく理解

設計時の考え方

1. 配管内での推薬蒸気混合による「爆発的圧力上昇」を抑止する事を条件とする
2. 推薬蒸気の弁上下流移動量の推定は、基準気体(ヘリウム)移動の実測値から求められる等価オリフィスを酸化剤蒸気が通過する「リーク」というメカニズムを仮定して推定

今回の検討によって得られた知見

1. 弁を通過してガスが漏れるメカニズムは、大きく分けて以下の2種類があり、弁の構造によっては、後者の影響が支配的になる場合がある
 - 微小な隙間からガスが流れ出す(「リーク」)
 - 弁シール部の高分子材料の内部をガスが透過する(「透過」)
2. 特に酸化剤の場合は、等価オリフィスを用いたリーク速度の検討だけではなく、透過を考慮する必要があった。
3. 酸化剤蒸気・燃料蒸気の混合により塩が生成する可能性がある。
4. 塩の生成によりバルブの動作不良・閉塞の可能性がある。

* 酸化剤移動に関する過去の不具合の調査結果の例を § B.7に示す。

2.2.6 他衛星の状況

あかつきを含めて日本の各衛星は、2.2.5節で記した考え方で設計されてきた。

今回得られた知見を基に、2液推進系を搭載したJAXAの各衛星で、2液推進系使用期間中に塩生成による弁閉塞が起こりえたかを、改めて定量的に概算した。その結果、下記の理由により、その他の衛星では不具合が生じる可能性がなかったことが確認された。（のぞみについては後述）

今回の知見に基づく理解：

- 2液推進系の使用期間が短い衛星（地球周回衛星など）では、酸化剤の移動が弁等に影響する前に使用期間が終了している。
- 上記以外の衛星では、弁の個数・配置・配管構成上、燃料・酸化剤の混合の影響が十分小さいことが分かった。

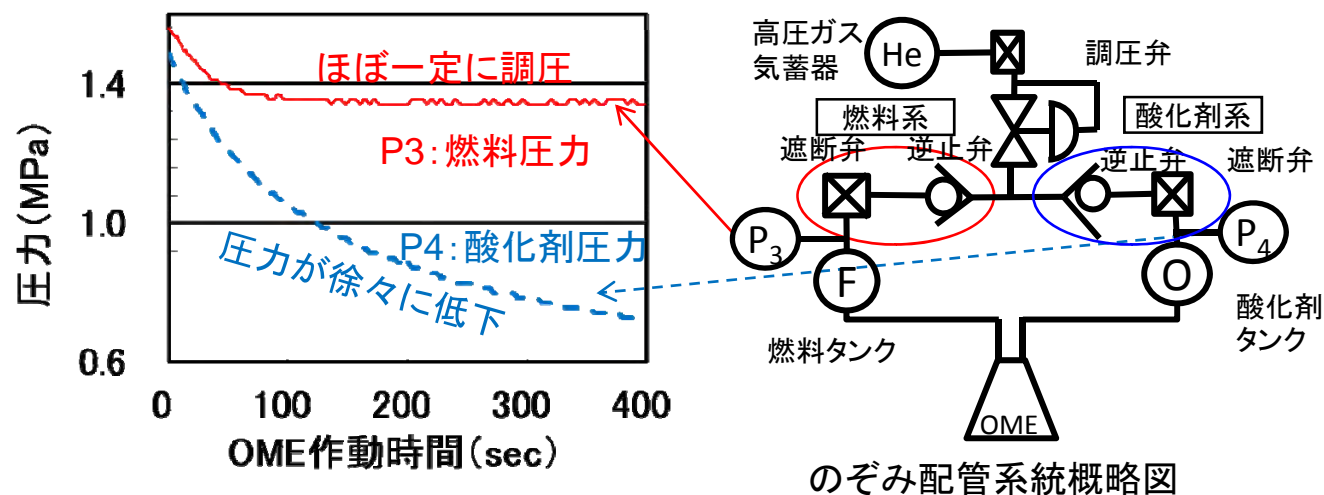
§ B.8に、2液推進系の使用期間が長いJAXA衛星のガス供給配管例を示す。
また、参考までに海外衛星の例も示す。

2.2.6 他衛星の状況(つづき) 「のぞみ」不具合の概要

のぞみの不具合原因

のぞみはあかつき同様、調圧式の推薬供給系であり、OME噴射中、燃料タンク圧力(P3)、酸化剤タンク圧力(P4)はともに1.4MPa程度を保持する仕様であった。

不具合発生時、OME噴射中のP3は保持されたものの、P4は保持できず下降を続けた。そのため、推力・加速度が想定以上に低下し、増速不足となった。その原因として、ガス供給配管の酸化剤側遮断弁で閉塞が起こったと結論した(下図参照)。



のぞみ推進系の設計思想

逆止弁・遮断弁を燃料・酸化剤タンクの上流に配置することで燃料・酸化剤の蒸気混合を防ぎ、「爆発的圧力上昇」を防止する設計。

2.2.6 他衛星の状況(つづき)

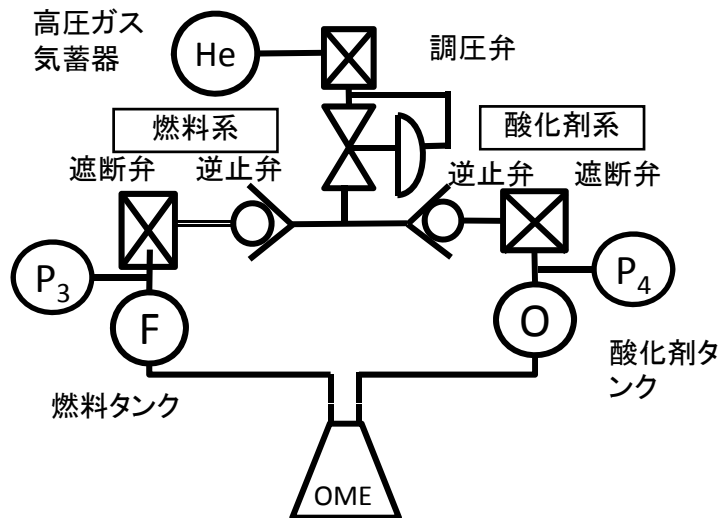
「あかつき」逆止弁不具合と「のぞみ」不具合との関係

のぞみの不具合が塩生成による閉塞であった可能性について

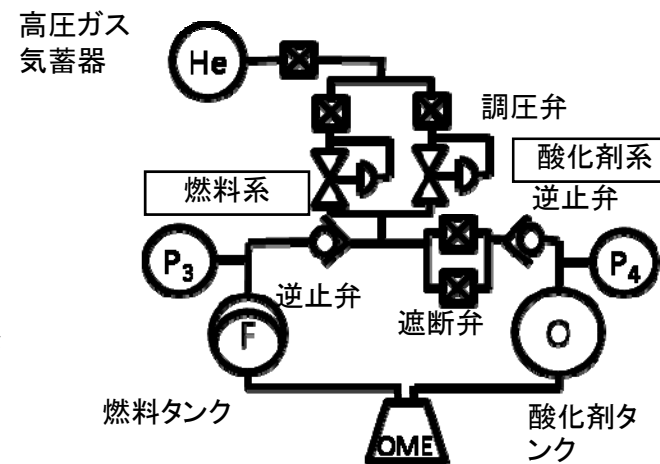
今回の知見から、のぞみ配管内部にも塩が生成していたと考えられる。しかし、塩が生成するのは燃料側の弁であるため、塩生成は、のぞみの不具合とは直接の関係はない。

あかつきに反映したのぞみ不具合からの教訓

- 単純な直列冗長系統(=流路が開かなくなる可能性が高まる)を極力排除する。これに従い、酸化剤側では遮断弁を並列に配置。また、燃料側は燃料タンク内に気液分離膜を配置したことから、遮断弁を廃止。
- 遮断弁の型式変更。
- 遮断弁の位置を逆止弁の上流側に配置変更。(酸化剤蒸気の影響が少なくなるように配慮)
- その他、あかつきでは、調圧弁を冗長化するなど、のぞみ当時と比べて信頼性向上を意図した設計変更を実施。



のぞみ配管系統概略図



あかつき配管系統概略図(参考)

2.2.7 今後のミッションにおける推進系設計での対策案

2液推進系を搭載する今後のミッションでは、ガス供給配管で、酸化剤蒸気と燃料蒸気が混合・反応することを防止するための設計を行う必要がある。

燃料/酸化剤蒸気混合による不具合発生防止策(案)

- 推薬蒸気移動については、リークと透過の両方の効果を考慮する。
- 特に酸化剤蒸気の移動については実液、実バルブなどによる実測に基づいた定量化が必須である。
- 塩生成により弁動作不具合を引き起こす可能性があることを考慮して、採用する弁の特性・個数・配置・配管構成などを運用期間に対して適切に設計する。

2.3 コンタミ噛み込みの可能性検討

§ 2.1で示した6項目の検討のうち、「⑥コンタミが関係する原因候補の検討」は、以下のように行った。

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。

2.4 逆止弁不具合の検証結果(まとめ)

逆止弁を閉塞させる原因候補として抽出された16項目について検討を加え、塩の生成とコンタミの噛込みの2項目が原因の可能性として残った。またこれらの原因究明を通して以下の理解が得られた。

- 弁の上下流を移動する酸化剤蒸気の量は、設計時に想定していたような、基準気体が等価オリフィスを移動する、というリークモデルによる推算手法では不十分であり、弁シール材の透過を考慮する必要があることが分かった。
- 酸化剤蒸気・燃料蒸気がガス供給配管内で混合すると塩が発生し、弁が閉塞または弁の動作を阻害する可能性があることが分かった。
- これらの知見に基づいて、他の衛星における推進系の推薬移動量の評価、今後の同種の衛星推進系の設計に際しての対応策の抽出などを行った。
- コンタミの混入と噛込みは、完全に排除できる性質のものではないことから、今後も可能性低減に継続的に取り組むこととする。

3. 逆止弁閉塞に起因してOMEの受けた影響について

3.1 OMEの受けた影響候補について

VOI-1では、逆止弁閉塞により燃料・酸化剤混合比が設計条件を逸脱し、FTA解析によりOMEが以下の状況となったと推定した(§ A.2a).

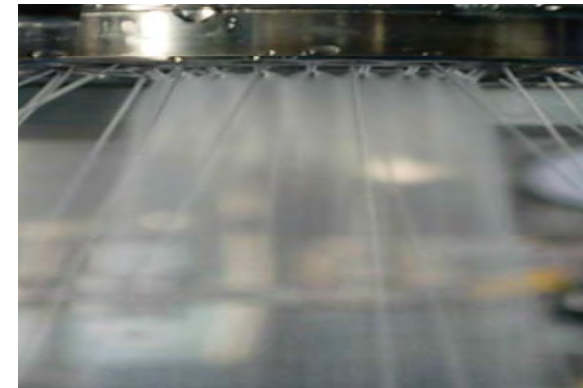
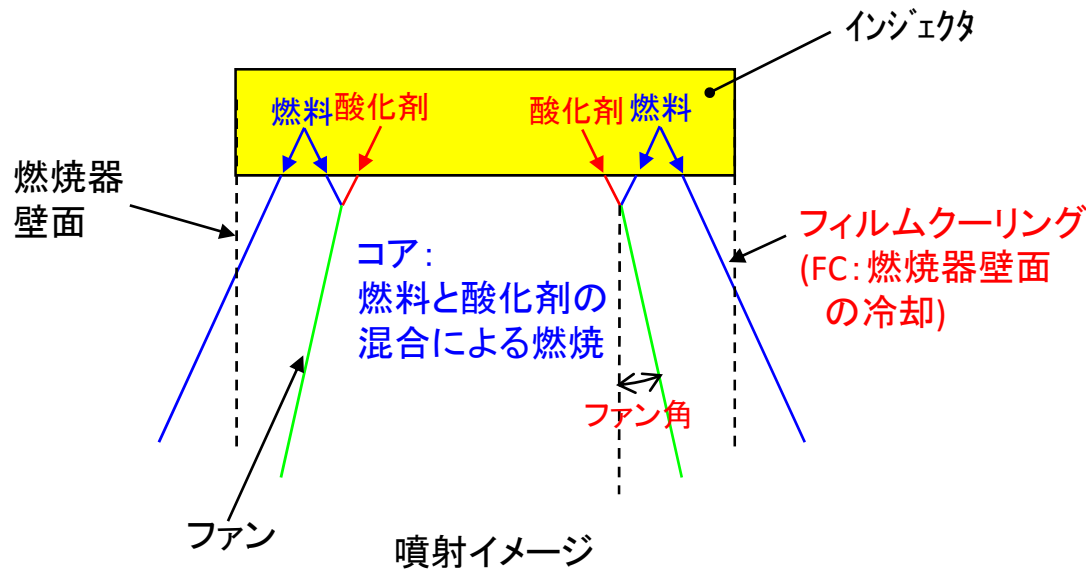
- D-1) 熱流束過大によるスラストノズルの破損
- D-2) フィルムクーリング噴射方向異常によるスラストノズルの破損
- D-3) スロート後方後燃え
- D-4) 不安定燃焼
- D-5) インジェクタ噴射方向異常

更なる絞り込みのため以下の実験的検証を中心に実施した.

1. インジェクタ噴射状態確認試験による推薬の噴射方向に起因する異常(D-2, 5)の検証(§ 3.2)
2. 燃焼試験による、設計範囲を超えた燃焼状態での挙動(D-1,3,4)の検証(§ 3.3)

3.2 インジェクタ噴射状態確認試験結果

VOI-1時には弁閉塞により燃料供給圧力が設計圧力と比較して大幅に低下した。この結果、インジェクタからの噴射状態の変化が燃焼の異常や冷却の不良を来す可能性がある。特に、低燃料供給圧下での、フィルムクーリング噴射及びインジェクタ噴射方向異常の可能性が否定できないため、検証試験を実施した(影響候補:D-2, D-5に対応)



噴射状態確認試験の様子
(イメージ図)

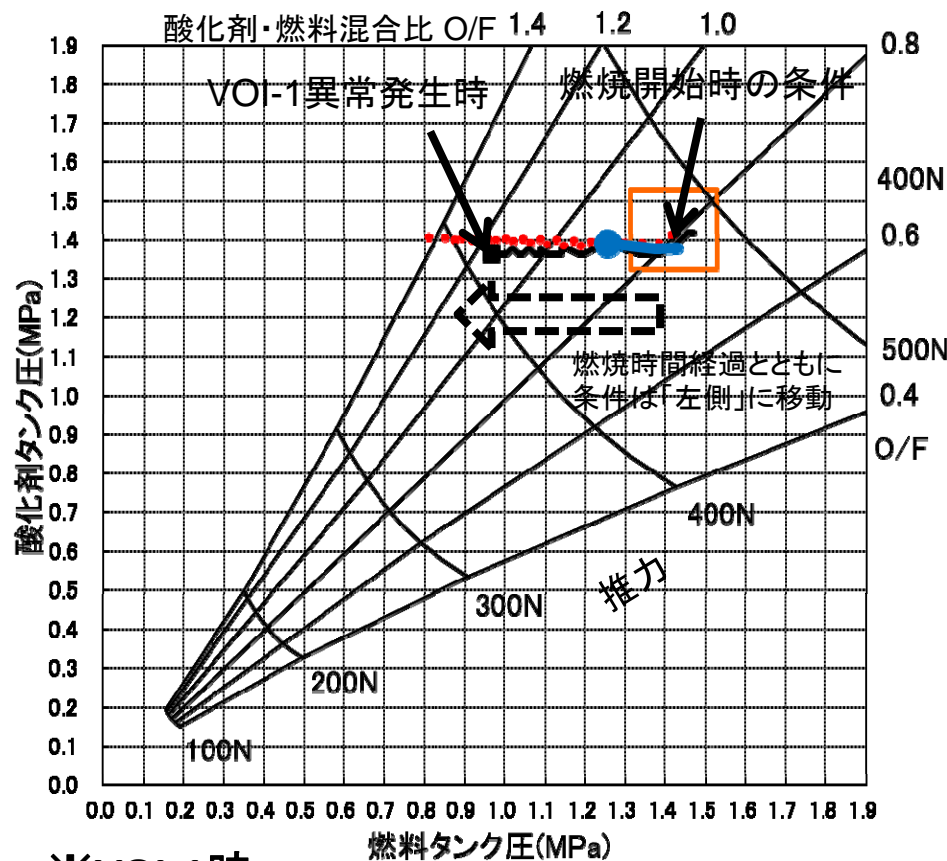
VOI-1の作動点においてもフィルムクーリング噴射方向角, コア推薬(燃料・酸化剤)噴射方向角, コア推薬が衝突した後のファン角に対して異常は認められずほぼ設計値通りであった。

以上より以下2項目は原因候補として可能性が低いと判断できる。

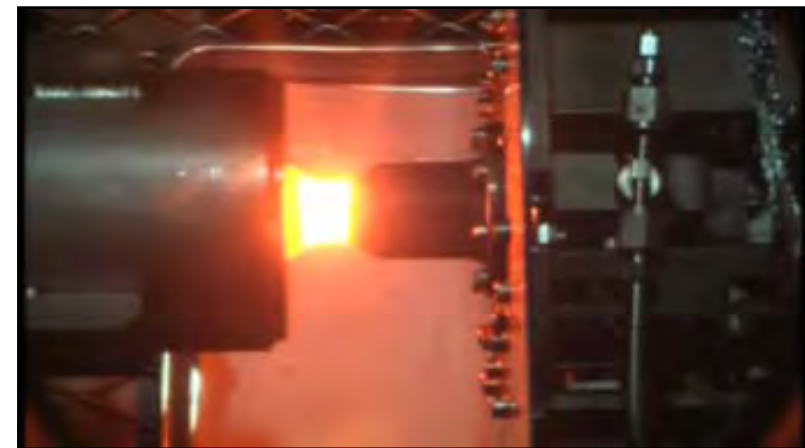
- D-2) フィルムクーリング噴射方向異常によるスラストノズルの破損
- D-5) インジェクタ噴射方向異常

3.3 VOI-1を再現した燃焼試験

D-1, D-3, D-4の原因候補の検証のため、金星投入時(VOI-1)の推薬(燃料・酸化剤)供給系の状態を再現して、地上燃焼試験を実施した。



- VOI-1における軌道上燃焼
- VOI-1再現の燃焼試験(その1)
- ⋯ VOI-1再現の燃焼試験(その2)
- フライト計画作動範囲(設計点)
- 燃焼試験(その1)での燃焼器破損時の条件



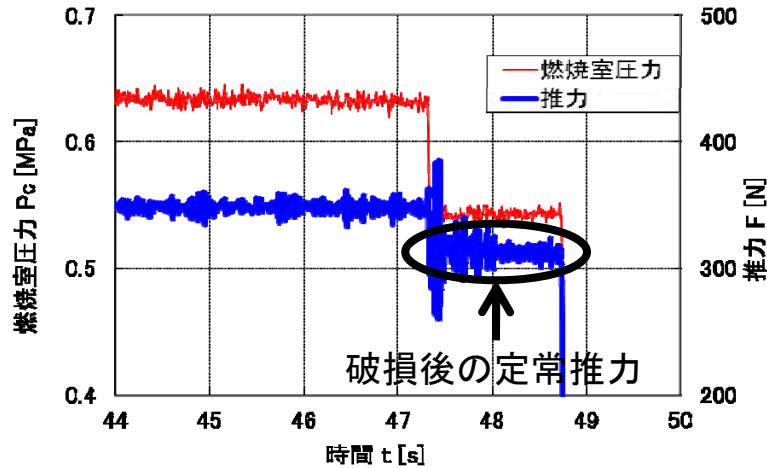
燃焼試験の様子

※VOI-1時:

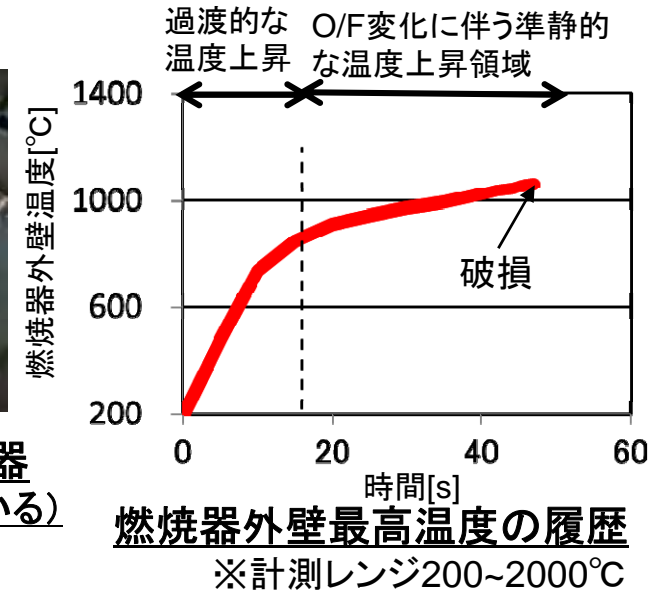
- 酸化剤供給圧力はほぼ一定圧力に調圧
- 燃料供給圧力は逆止弁閉塞の影響により燃焼時間の経過とともに徐々に低下
→ 酸化剤・燃料混合比(O/F)は燃焼開始より時間の経過とともに上昇

3.3.1 燃焼試験(その1): 燃焼器が破損したケース

OMEが受けた影響候補のうち, D-1, D-3, D-4を検証するため, 不具合が発生したVOI-1を再現した地上燃焼試験を実施した



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)



燃焼器破損前後の推力・燃焼圧の履歴

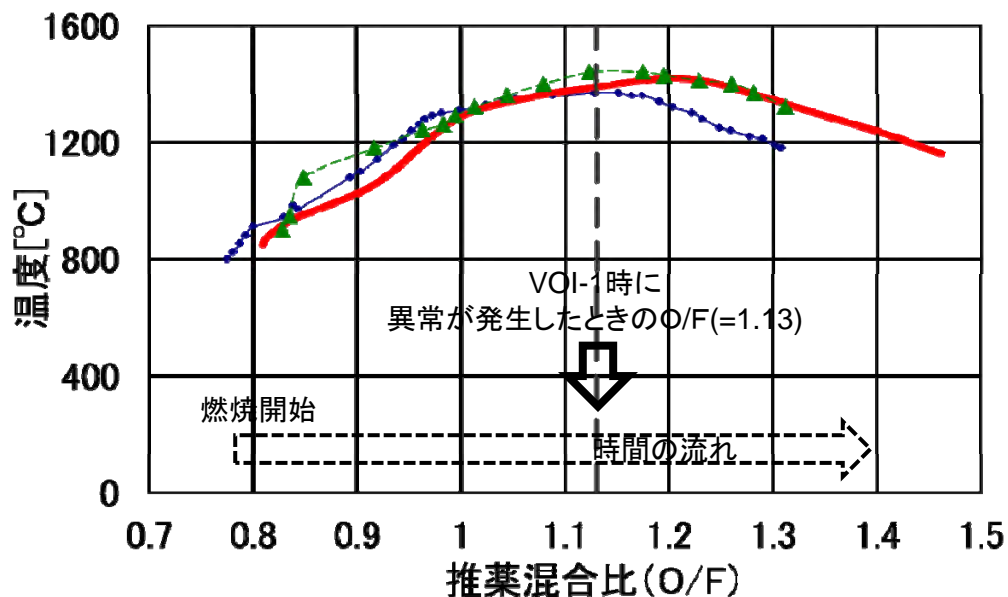
設計条件を逸脱した燃焼条件で燃焼器が破損した

- 燃焼器が破損したときは, 着火直後の急激な温度上昇が終わり, 燃料供給減少によるO/F変化に伴い準静的に温度が上昇していく過程であった.
- 燃焼試験後の破面観察で破壊の起点が確認され, 起点近傍で明確な材料欠陥は観察されなかった. すなわち, この破損は単純な製造不良では無いと言える(§ C.2)

この結果により燃焼条件の逸脱による熱負荷の増大により燃焼器の破損が起こりうる事が示された.

3.3.2 燃焼試験(その2): 燃焼器が破損しなかったケース

燃焼試験(その1)とは異なる燃焼器を使って、燃焼試験(その2)を実施した。



燃焼試験(その2)での燃焼器外壁最高温度の履歴

燃焼試験(その1)と(その2)の差異の考察

- 2つの燃焼器で燃焼試験を実施し、そのうちの片方でスラストノズルが破損。
- 設計範囲をどの程度超えると破損するかについては、燃焼器の個体差による。
- 燃焼試験その1とその2で破損する・しないの差異が生じたのは、この個体差に起因すると推定される。
- なお、フライト品は計画作動範囲でのAT試験で燃焼器の健全性を確認した後、フライトに供した。

試験の結果、軌道上で不具合が発生した条件(O/F=1.13)を超えても、以下のように各候補事象は再現しなかった

- 燃焼器の破損はなかった(D-1, 2)
- 燃焼効率の低下は認められずスロート後方での後燃えはなかった(D-3)
- 燃焼状態(温度分布・燃焼圧)は安定しており、燃焼器内での異常な燃焼は無かった(D-4, 5)

これらの結果、D-3, D-4が原因候補となる可能性は十分低いと判断される。

3.4 OMEの受けた影響のFTA検証結果(まとめ)

インジェクタ噴射状態確認試験, 燃焼試験(その1), 燃焼試験(その2)を総合して以下の結論を得ることができる

	D-1 熱流束過大によるスラストノズルの破損	D-2 フィルムクーリング噴射方向異常によるスラストノズルの破損	D-3 スロート後方後燃え	D-4 不安定燃焼	D-5 インジェクタ噴射方向異常
噴射状態確認試験	N/A	×	N/A	N/A	×
燃焼試験(その1)	○	○	N/A	N/A	N/A
燃焼試験(その2)	×注1	×注1	×	×	×
総合判定	◎	—	—	—	—

×:発生せず
○:発生の可能性あり
N/A:判定材料なし
◎:可能性大
—:可能性低

注1:燃焼器の個体差により破損しなかった可能性がある

燃焼試験(その1), (その2)から, D-1, D-2が候補になりうる. D-2は可視化ができる噴射状態確認試験により, 起きる可能性は小さいと判断される.

また, 燃焼試験(その1)でD-1の事象が起きた後の推力変動の時間履歴は, 金星投入時に観察された推力履歴と似た変化をしている.(想定される破損の様子と金星投入時に得られたデータとの整合は § C.3, C.4に示した)

これらを総合して, OMEが受けた影響は”熱流束過大によるスラストノズルの破損”(D-1)である可能性が高いと結論する.

以上より軌道再投入に向けては破損した燃焼器の再点火の必要があり, この可否について次節に詳述する.

4. 金星軌道再投入に向けた検討

金星投入失敗後の推進系のデータおよび § 2 の考察から、推進系のガス供給配管では、逆止弁は閉塞しているが、微小なガス供給量は維持されていると考えられる。この前提で、以下に述べる金星軌道再投入に向けた運用方法を検討している(なお現在も § 2 で述べた燃料・酸化剤の混合が続いている可能性により閉塞の状況が変わっていることもあり得る)。

- ・ 現在のあかつきの状況を考慮した新たな軌道計画の検討(§ 4.1)
- ・ あかつきのOMEはスラストノズル部で破損したと想定されるが、以下の2つの可能性について検討(§ 4.2)
 - ①破損したOMEを用いた再噴射による軌道変換
 - ②OMEを使用せず、姿勢制御エンジン(RCS)による金星周回軌道投入
- ・ ①②の両者について推進系および探査機の運用方法を検討。(§ 4.3)
- ・ 現在のあかつきの軌道は、近日点側が0.6AUで、設計条件を超えた熱環境に晒されることに対する対応を検討(§ 4.4)

地上試験・解析などの検討を行った上で、本年9月に軌道上でのOMEのテスト噴射を実施し、11月の近日点において金星会合に向けた軌道変更を行うことを計画。

4.1 金星軌道再投入に向けた軌道計画

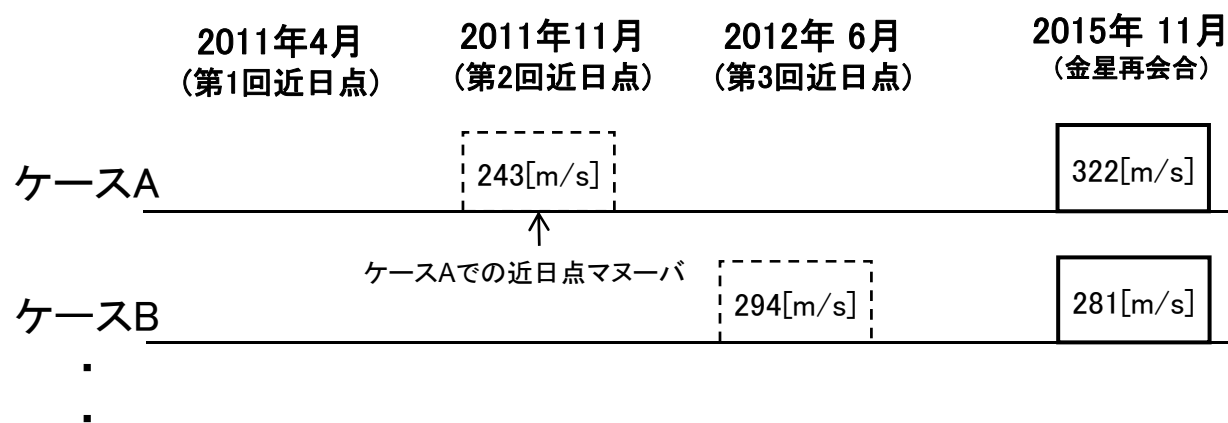
金星軌道再投入に向けた軌道変更計画の検討状況を以下に示す。

今後、実際の軌道変更計画の立案に向けて、

- ・ 軌道上テスト噴射結果等をふまえた ΔV 計画
- ・ マヌーバ実施時の姿勢制約(熱制約等)

等を考慮しながら、運用計画を詳細化していく予定。

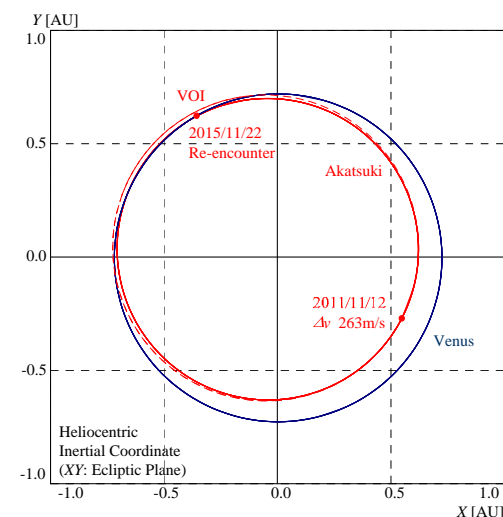
合計 ΔV を抑制する観点から、第2~3回の近日点通過周辺で軌道調整を実施し、2015年11月に金星に再会合させることを計画中。



(注1) ΔV はインパルス換算。多体解析結果より。

(注2) 金星再会合の欄には、4日周期軌道への投入に必要な ΔV を記載している。

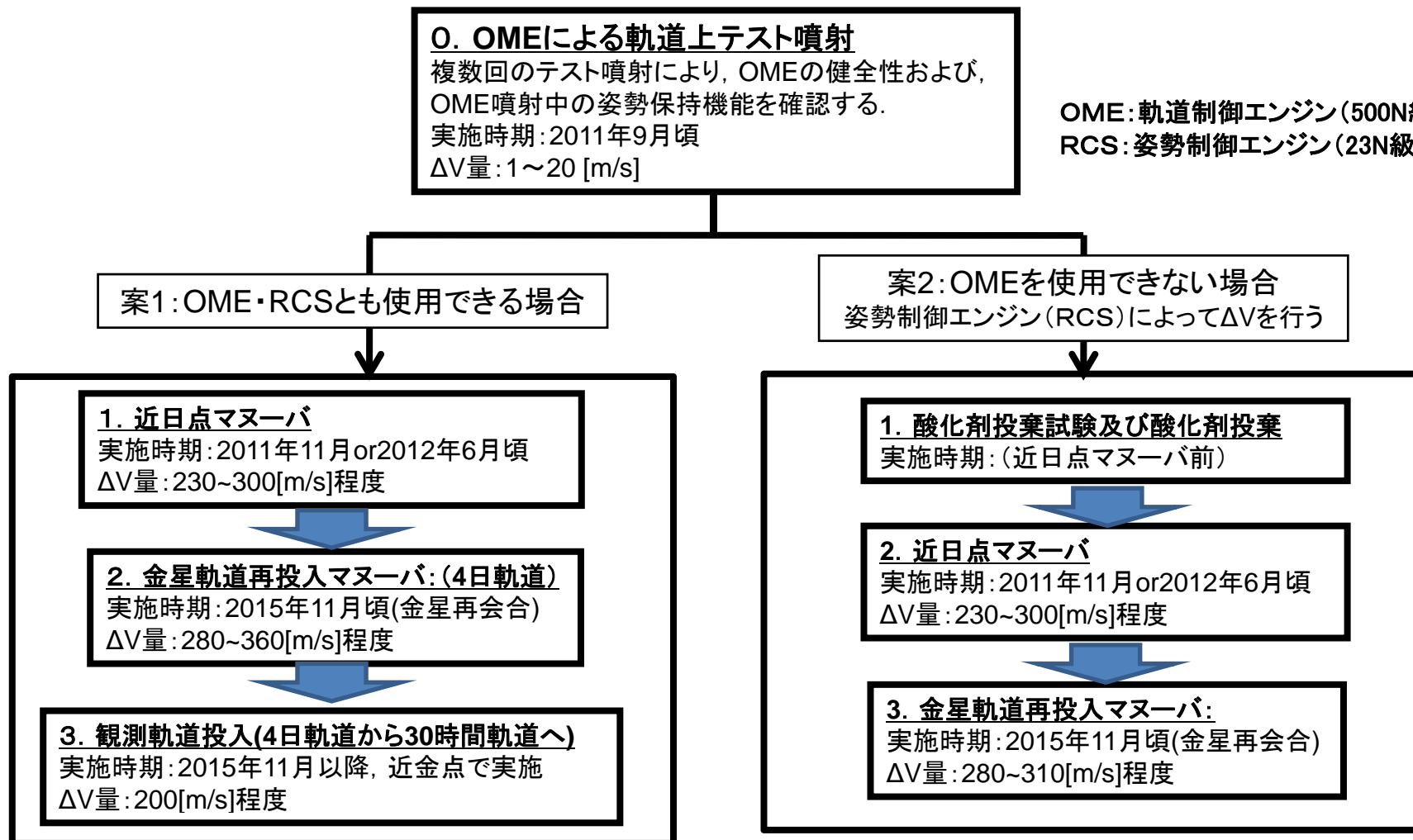
(注3) 試験噴射は記載していない。



ケースAの軌道計画例

4.2 金星軌道再投入運用のトレードオフ

OMEの現在の状態を軌道上テスト噴射により確認する。テスト噴射の結果から、OMEが再噴射可能な場合と不可能な場合の両ケースについて以下の二つの軌道変更方法を検討中。



当初計画の観測軌道に投入可能

案2の方法により達成できる ΔV 量では、当初予定の観測軌道までは到達できない。

4.3 金星軌道再投入運用に向けた検討

§ 4.1, 4.2で述べた再投入運用を行うために以下の実験によってエンジン運転のための情報を取得中.

a) 着火衝撃緩和の検討(§ C.5)

スラストノズルが破損した破損燃焼器を用い, 再着火試験を実施した結果, 破損が進行したケースが発生し, 場合によっては再着火の衝撃に耐えられない可能性があることがわかった. 燃料・酸化剤の噴射タイミングを調整するなどにより, 着火衝撃を緩和する可能性を検討中.

なお, 再着火によりOME破損が進行した場合に探査機に与える影響も検討中.

b) ブローダウンによるOME噴射の検討(§ C.6)

VOI-1では逆止弁閉塞により酸化剤・燃料混合比が設計条件を逸脱したと考えられる. そのため, 逆止弁閉塞下でも設計混合比を維持する手法(燃料・酸化剤タンクのブローダウン運用)を確立するための実験を実施中.

c) 酸化剤投棄手法の検討(§ C.7)

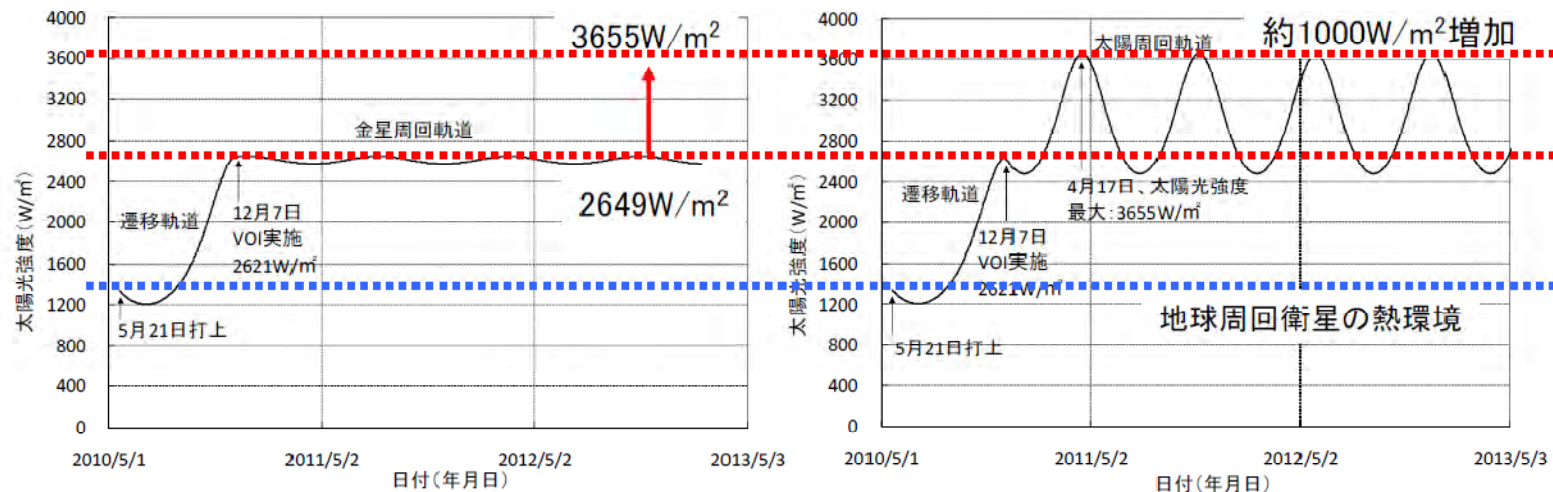
OME噴射が不可能になった場合, RCSによる金星周回軌道投入を考慮することになる. RCSは1液式推進系のため性能が低く, かつ酸化剤が必要ないため, 酸化剤を投棄し衛星重量の軽量化を図る必要がある. 酸化剤の排出手法の確立のための実験を実施中.

4.4 近日点近傍での高温環境への対応について

あかつきは、金星軌道投入失敗により当初想定していない軌道を航行することになったため、近日点近傍で機器が高温になる恐れがある(下図を参照)。そのため、想定外の高温に晒される表面熱制御材が劣化し、探査機内部の温度が上昇する懸念がある。

なお、近日点近傍では機器温度を許容値以下に保つために、探査機姿勢に制約を受けることになり以下を実施。

- 4月17日の近日点では、探査機の+Z面を太陽指向とすることで、許容温度範囲に維持した。
- 近日点マヌーバは、噴射姿勢を維持できる許容時間を考慮して計画する。



金星周回軌道に投入した場合の熱環境

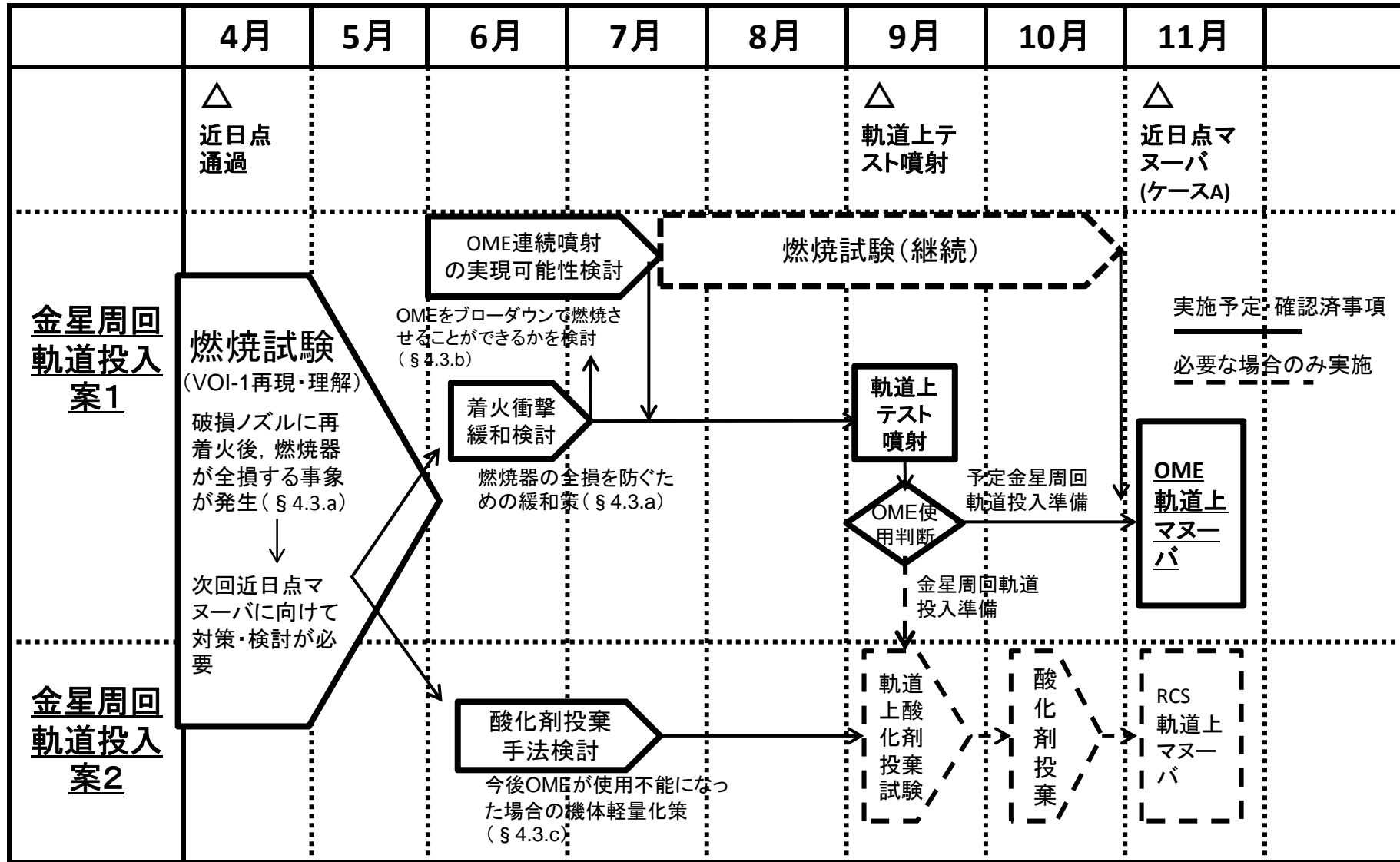
実際の熱環境(近日点0.6AU)

注: 近日点マヌーバを実施しない場合の軌道上環境予測

上図は近日点マヌーバを実施しない場合の熱環境の時間履歴を示している。近日点マヌーバは、近日点高度を変えず、遠日点高度を下げるものである。したがって、近日点マヌーバを実施しても、それ以降の高温側の熱環境は大きく変化しない。

なお、熱制御材劣化について、今後の近日点通過を考慮した寿命の検証試験を実施中。

4.5 次回近日点マヌーバに向けた今後のスケジュール



軌道上テスト噴射の実施時期の制約条件:

- ・ 軌道面変更マヌーバを兼ねるため、昇降点付近で実施する
- ・ 近日点マヌーバまでの十分な準備期間を確保する
- ・ 軌道上温度環境が穏やかである

5. 第3回調査部会報告のまとめ

1. 逆止弁を閉塞させる原因を検証した結果、以下の結論を得た。
 - 酸化剤の弁シールの透過を考慮することが必要であること。
 - 逆止弁は燃料・酸化剤反応で生成される塩により、動作が阻害される可能性があること。
2. 弁閉塞によりOMEが受けた影響を検討し、金星投入に向け以下の結論を得た。
 - VOI-1時にスラストノズルが破損した可能性が高いこと。
 - 破損したスラストノズルを再着火させる事の可否を地上試験および搭載エンジンの試験噴射により見極め、結果に応じて金星軌道再投入操作の実施に向け準備する。
3. 金星軌道再投入の実現に向けた軌道変更のための運用計画
 - 軌道制御エンジン(OME)テスト噴射 → 本年9月上旬
 - 試験噴射結果などを受け噴射方法を決定し近日点での軌道変換 → 本年11月