

「はやぶさ2」化学推進系の追加対策について

2011年11月22日

宇宙航空研究開発機構

月・惑星探査プログラムグループ(JSPEC)

はやぶさ2プロジェクトチーム

吉川 真

目次



-
1. はじめに
 2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、
化学推進系の追加対策
 3. 追加対策に伴うスケジュール、コスト評価
 4. まとめ

1. はじめに



- 金星探査機「あかつき」は2010年5月21日にH-II Aロケット17号機で打ち上げられ、同年12月7日に金星周回軌道への軌道投入マヌーバを実施した。その際、軌道制御用エンジンの燃焼開始約152秒後の大きな姿勢変動の後、約158秒後に燃焼を停止し(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た。
- JAXAは原因究明の調査・試験等を実施するとともに、宇宙開発委員会調査部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報告し、調査審議が行われ、「あかつき」軌道投入失敗の直接原因は燃料側高圧ガス供給逆止弁の動作不良によるものと判断した。
- 一方、宇宙開発委員会推進部会において開発移行の事前評価を行っている「はやぶさ2」では、化学推進系の調圧系構成は「あかつき」と概ね同じである。
- このため、「あかつき」軌道投入失敗の原因究明・対策の現状を踏まえて、「はやぶさ2」の化学推進系に対して追加対策を実施することとしたいので、追加対策の検討経緯・必要性、対策内容及びコスト・スケジュールへの影響について報告する。

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(1/9)



2.1 「はやぶさ2」の化学推進系の機能・性能

軌道及び姿勢制御を行うために、システム機器からの駆動信号により、バルブの開閉を行い、スラスタ内の燃焼室に燃料及び酸化剤を噴射する。燃料と酸化剤が燃焼室内で高温ガスに分解され、スラスタのノズルから噴射されることにより推力を得る。

【機能ベースライン】

- (ア) マッピング運用時、タッチダウン運用時(小惑星タッチダウン時の減速及びタッチダウン後の離陸)、衝突運用時(衝突装置分離後の退避)の位置制御 : パルス噴射(10ms)及び連続噴射(60s以上)
- (イ) 打上げ後の姿勢確立 : パルス噴射
- (ウ) 姿勢角制御ホイールのアンローディング : パルス噴射
- (エ) ミッドコースマヌーバ時の軌道制御 : パルス噴射
- (オ) セーフホールド : パルス噴射

【性能ベースライン】

- (ア) 形式 : 調圧方式二液式推進系
- (イ) 構成
 - (1) スラスタ : 20Nスラスタ×12基
 - (2) 比推力 : 連続噴射時 : 290s
パルス噴射時 : 130s
 - (3) 推薬 : 燃料(ヒドラジン)／酸化剤
 - (4) 推薬搭載量 : 35kg(ノミナル)、45kg(Max搭載要求)
 - (5) 加圧ガス : He

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(2/9)

2.2 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明経緯と「はやぶさ2」での検討状況

「あかつき」軌道投入失敗原因調査

- 2010年12月7日:「あかつき」金星周回軌道への軌道投入失敗。
- 2010年12月8日:宇宙開発委員会において原因究明・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。
- 2010年12月17日:調査部会において、FTAの手法により、逆止弁の閉塞、燃焼状態異常などの複数の原因候補が抽出された。
- 2010年12月27日:調査部会において、軌道投入失敗の原因が**燃料系逆止弁閉塞**に帰結。逆止弁閉塞の原因究明・検証のための試験計画立案。
- 2011年4月:原因究明試験において、燃料・酸化剤反応で生成される塩(硝酸アンモニウム)により、逆止弁の閉塞が観測された。
- 2011年6月30日:調査部会において、逆止弁閉塞の原因として、①酸化剤蒸気が上流へ透過、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、が報告された。(次ページ 図2.1参照)

「はやぶさ2」での「あかつき」不具合対応

- 2010年度開発研究フェーズ:「はやぶさ」化学推進系(図2.2構成図参照)に対して、はやぶさLLなどを取り込み、(1)酸化剤タンクの金属ダイヤフラムタンクから表面張力タンクへの変更、(2)高圧ラッチングバルブの数や燃料及び酸化剤の注排弁の口径・配置等の見直し、(3)主系/従系の配管ルーティングの空間配置を分離、の変更を行い、「はやぶさ2」化学推進系構成案を検討。(図2.3構成図参照) →「はやぶさ」化学推進系からの変更理由をP15に示す。
- 2011年3月:「はやぶさ2」システム定義審査(SDR)においては、「あかつき」の不具合調査情報に基づき、調圧部に**逆止弁を使用しない**構成案を提示。(図2.4構成図参照)
- 2011年6月~8月:「あかつき」の酸化剤透過と塩生成の影響を考慮して、**燃料・酸化剤の調圧系を完全分離**する設計変更を検討、また、設計変更に伴うコスト、スケジュールへの影響を評価。(図2.5構成図参照)

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(3/9)

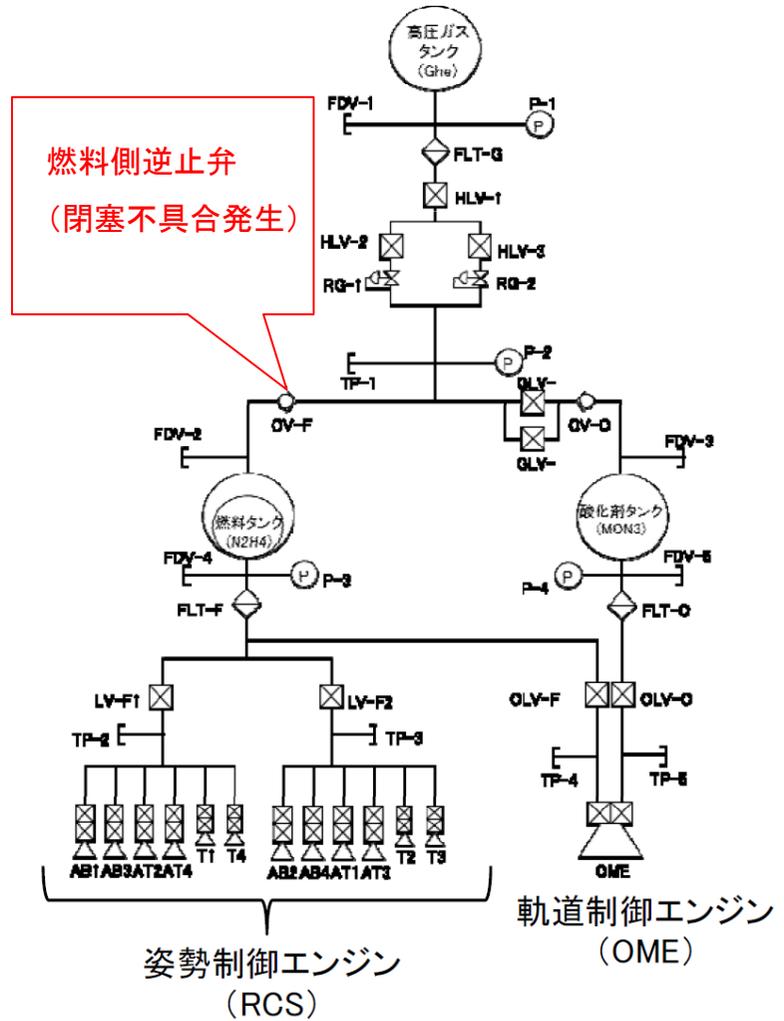
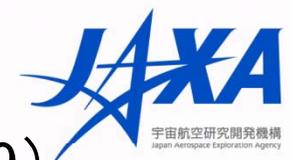


図2.1 参考「あかつき」推進系構成図
(2011年6月30日 宇宙開発委員会 調査部会資料より抜粋)

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(4/9)



2.3 「はやぶさ2」化学推進系調圧系構成の設計推移(1/3)

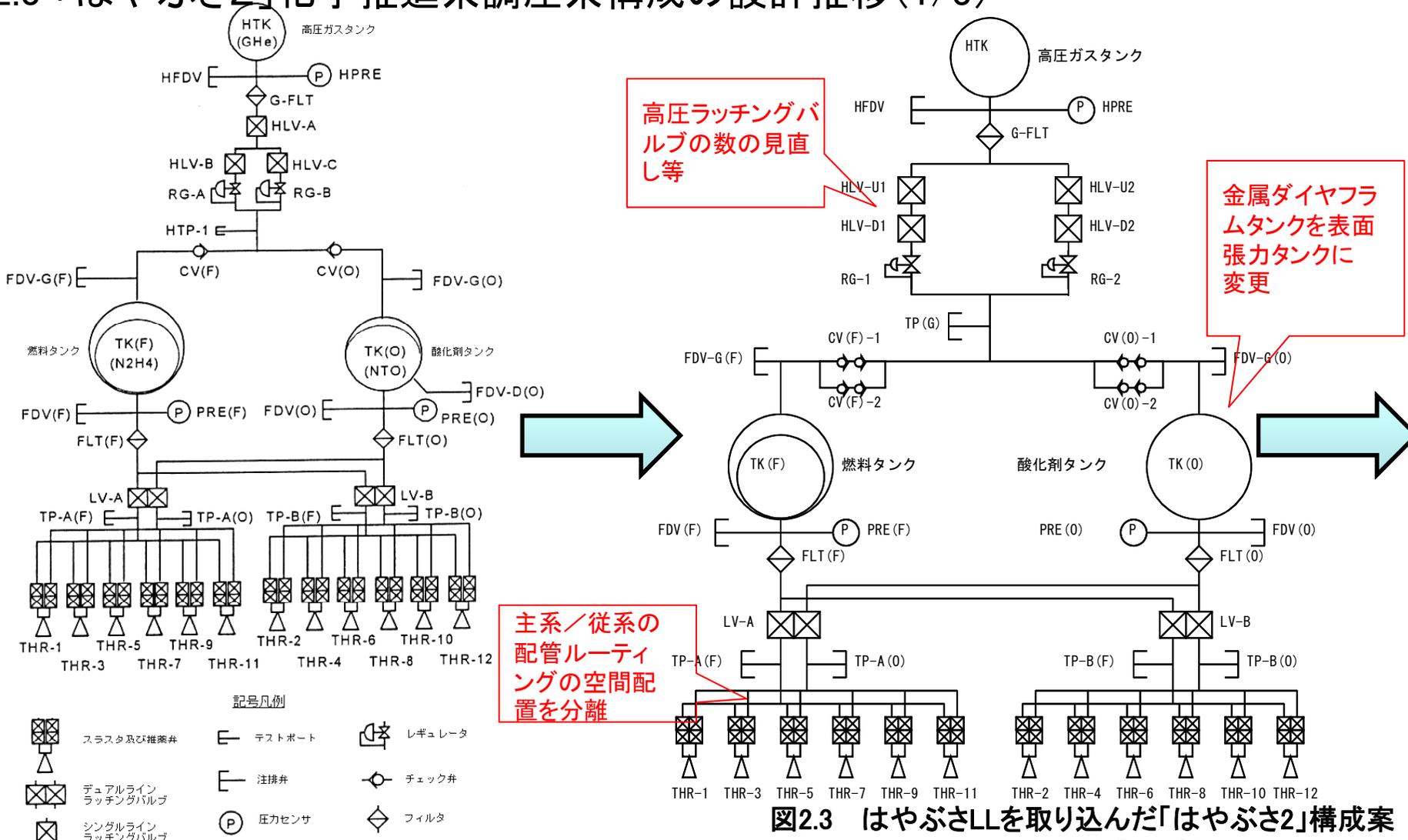
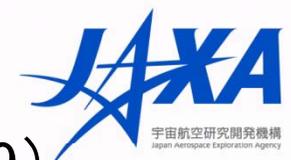


図2.2 「はやぶさ」化学推進系構成図

(2010年度開発研究)

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(5/9)



2.3 「はやぶさ2」化学推進系調圧系構成の設計推移(2/3)

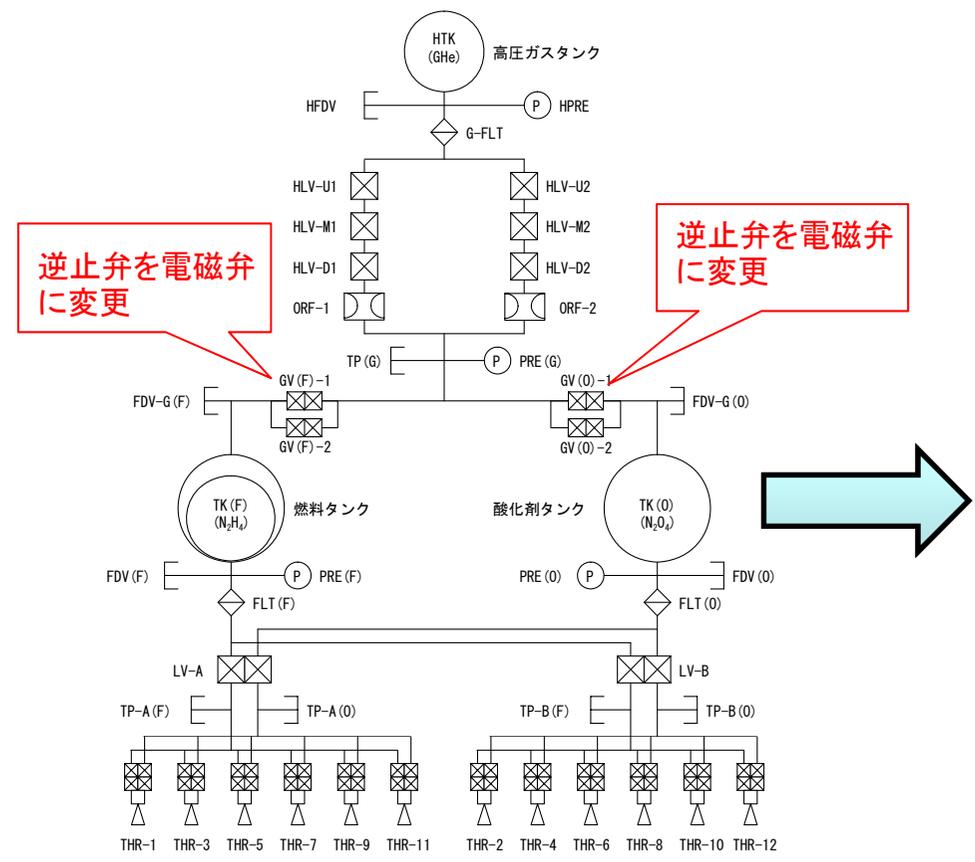
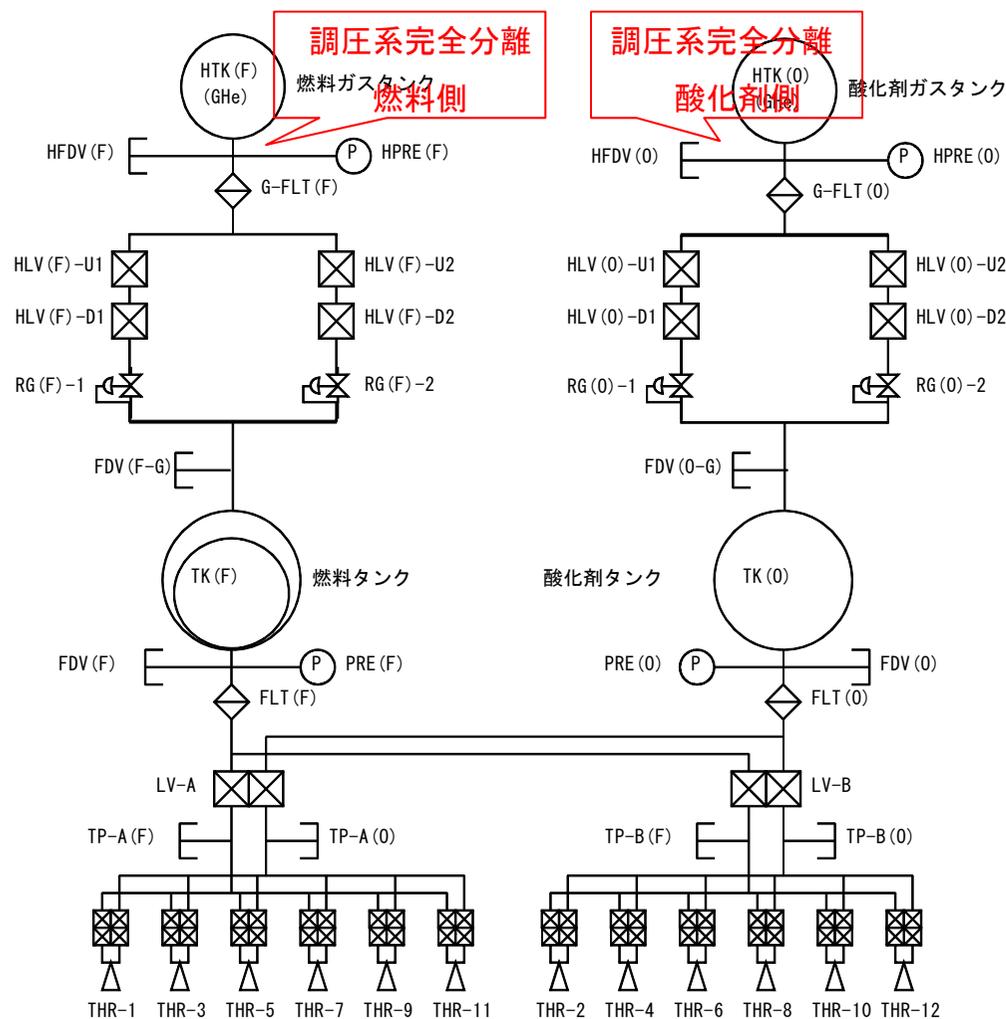


図2.4 逆止弁を使用しない構成案(2011年3月)
(SAC開発移行審査開始時)

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(6/9)

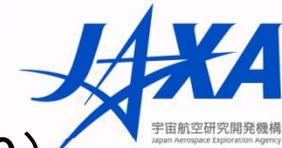
2.3 「はやぶさ2」化学推進系調圧系構成の設計推移(3/3)



- ✓ はやぶさ2従前案(図2.4構成図)の調圧系は「あかつき」と同等であり、「あかつき」不具合からは、燃料・酸化剤の蒸気が逆止弁・遮断弁を透過することを考慮した設計としなければならないことが教訓として得られた。
- ✓ ただし、はやぶさ2の設計期間中に透過率を確定させられないこと、及びミッション期間が長い(約7年間)ことから、燃料、酸化剤の蒸気混合のリスクがある従前案を断念。
- ✓ 代替案として、一液／二液方式、高压ガス調圧／気液平衡／ブローダウン方式など9種類の構成案を検討。
- ✓ 運用上のリスク、性能要求、DRY質量／WET質量、開発リスク、コストなどをトレードオフした。(P9, 10にトレードオフの一例を示す。)
- ✓ トレードオフの結果、運用リスク、開発リスクは小さく、性能要求を満足する、燃料・酸化剤の調圧系を完全分離した構成案(左図)を選択。(将来ミッションにおいては、逆止弁・遮断弁の透過率の見極め、透過防止が実現されたうえ、ミッション期間やシステムリソースなどによっては、常に分離案が妥当とは限らない。)

図2.5 燃料・酸化剤調圧系分離構成図 (2011年8月)(今回)

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(7/9)



2.4 設計変更トレードオフ(抜粋)(1/2)

検討項目	【従前案】 燃料・酸化剤分離方式	【案1】 燃料・酸化剤分離方式	【案2】 二液・ブローダウン	【案3】 一液・ブローダウン
配管系統図	図 2.4	図 2.5	図 2.6	図 2.7
形式	二液式・調圧方式	二液式・調圧方式	二液式・ブローダウン	一液式・ブローダウン
【運用リスク・性能要求】				
燃料・酸化剤の混合	酸化剤透過による混合リスクあり ×	ガス系分離によりリスクなし ○	ガス系分離によりリスクなし ○	ガス系分離によりリスクなし ○
調圧系の故障	遮断弁(HLV)開時間指定 ○	レギュレータ (RG)上流側 HLV 開時間指定 ○	調圧系なし ○	調圧系なし ○
ドライバー(DRV)の故障	DRV 復旧の時間余裕あり ○	DRV 復旧の時間余裕あり ○	調圧系無により、DRV 復旧の時間余裕あり ○	調圧系無により、DRV 復旧の時間余裕あり ○
推力の変化	推力の変化小 ○	推力の変化小 ○	推力の変化あり △	推力の変化あり △
スラスト最大噴射時間 60s	○	○	性能低下あり △	性能低下あり △
スラスト最小作動時間 10ms	○	○	○	実績なし △
最大 45kg 搭載要求	○WET 質量 93.2kg	○WET 質量 93.7kg	× 不能(要加圧)	△WET 質量 97.9kg
【DRY 質量/WET 質量】	48.2kg/83.2kg ○	48.7kg/83.0kg ○	43.6kg/82.6kg ○	42.3kg/81.3kg ○
【開発上のリスク】	設計・開発リスク小 ○	設計・開発リスク小 ○ 小容量高圧タンク開発(実績あり、コスト増)	設計・開発リスク小 ○	設計・開発リスク小 ○
【開発コスト】	△	△	○	○
評価	×	○	×	△

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(8/9)

2.4 設計変更トレードオフ(抜粋) (2/2)

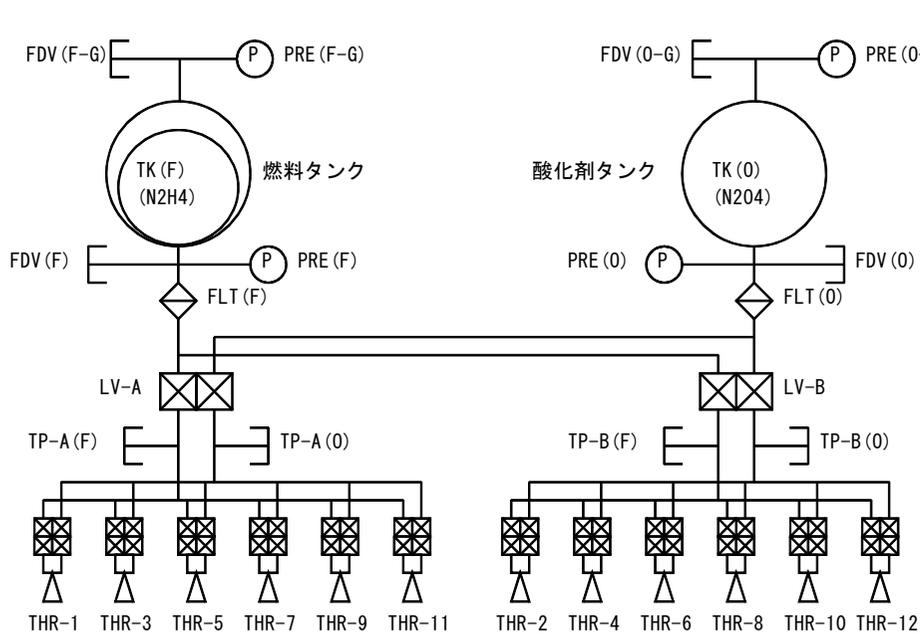


図2.6 二液・ブローダウン方式 (参考)

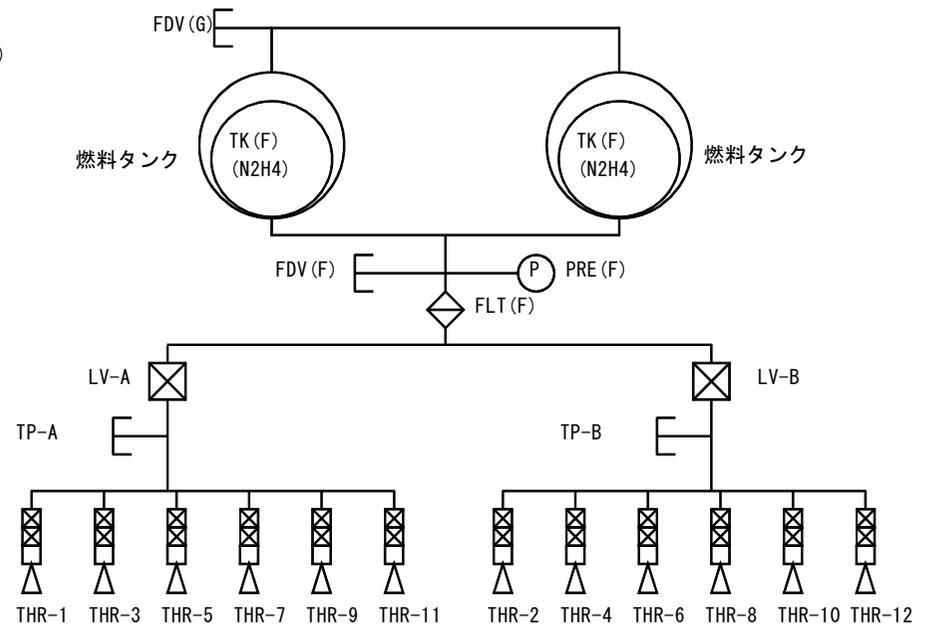
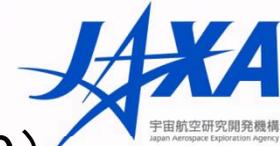


図2.7 一液・ブローダウン (参考)

2. 「あかつき」軌道投入失敗の原因究明結果に基づく、 化学推進系の追加対策(9/9)



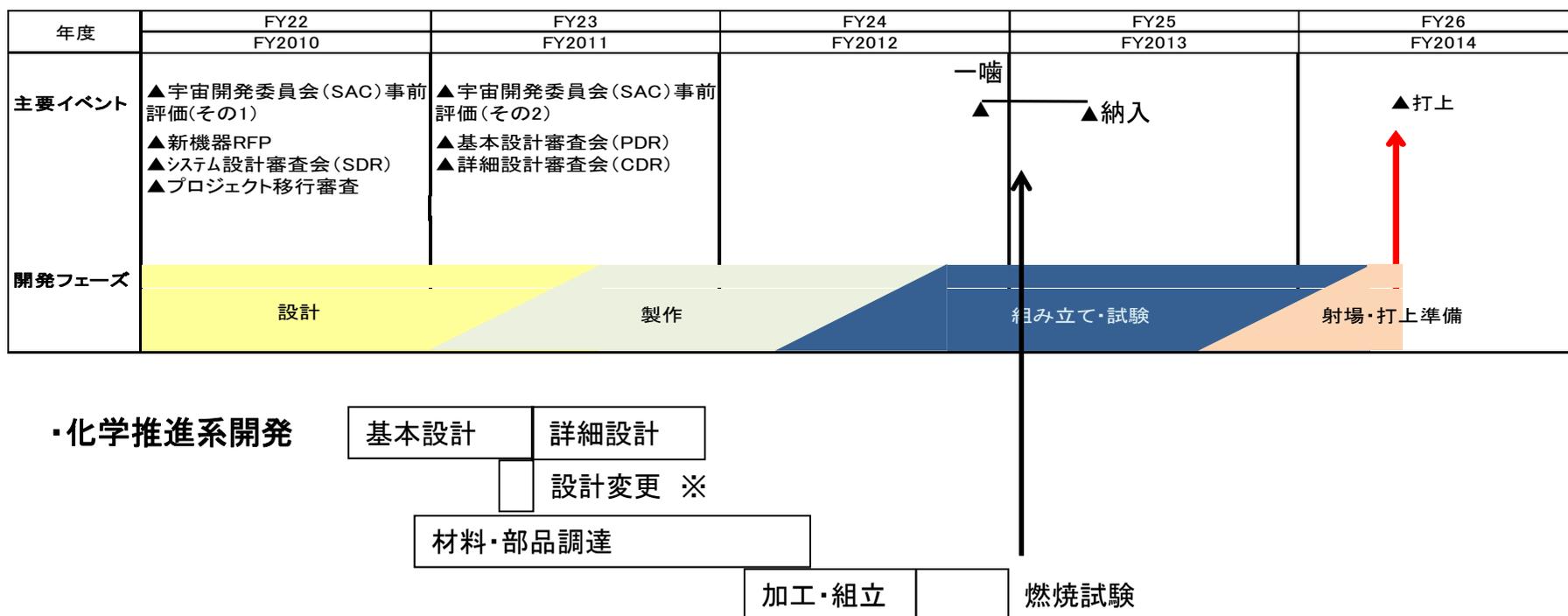
2.5 設計変更後構成(燃料・酸化剤調圧系分離構成)の技術特性

- 逆止弁を使用しないため、生成物嚙込、しゅう動部粘着、バネ脱落等による逆止弁閉塞のリスクは原理的にない。(従前案(図2.4構成図)も同様)
- 「はやぶさ2」の長期ミッション期間約7年間での、酸化剤透過の影響を懸念し、燃料・酸化剤の調圧系を完全分離したため、酸化剤透過による燃料・酸化剤の混合・反応(塩の生成)のリスクは原理的にない。
- 調圧系統が2系統に増加し、加圧用ヘリウムガスのリークに対するリスクが増加する。調圧系リーク対策については、リスク低減策をスケジュール制約をみながら検討中である。
- 今回の設計変更による質量への影響は、約0.5kg増(従前案との比較)であり、許容可能である。

3. 追加対策に伴うスケジュール、コスト評価(1/2)

3.1 スケジュール評価

化学推進系の追加対策を反映した開発スケジュールを以下に示す。
ノミナル2014年打上げに対してスケジュールインパクトはない。



※ 設計変更が基本設計期間内で実施できたため、詳細設計以降のスケジュールは従来通り。

3. 追加対策に伴うスケジュール、コスト評価(2/2)



3.2 コスト評価

本追加対策に伴うコスト増は、以下の通り。

- 化学推進系追加対策 : 3.0億円のコスト増(衛星開発費)

4. まとめ

- 「あかつき」金星周回軌道投入失敗に係る原因究明の水平展開として、「はやぶさ2」の化学推進系設計の再検討を行った。
- その結果、約7年間の長期ミッション期間においても酸化剤透過による燃料・酸化剤の混合・反応(塩の生成)のリスクが原理的にない燃料・酸化剤調圧系分離構成への設計変更が適当と判断した。
- 本追加対策を行うことで、衛星開発費としては3.0億円のコスト増となる。また、スケジュールについては、ノミナル2014年打上げに対して影響はない。
- 「はやぶさ2」の開発・ミッションをより確実に進めるため、本対策を採用することとしたい。

「はやぶさ」化学推進系からの変更箇所と変更理由(2010年度開発研究)

- 2010年度の開発研究における、「はやぶさ」化学推進系からの変更箇所と変更理由を以下に示す。

(1)酸化剤タンクを金属ダイヤフラムタンクから表面張力タンクに変更

【変更理由】「はやぶさ」では、タッチダウン時の運用条件が不明な状態でも確実に推薬を供給するために金属ダイヤフラムタンクとしていたため、結果として、配管内での酸化剤蒸気の移動を遮断できていた。「はやぶさ」の軌道上データなどの運用実績より、表面張力タンクでもタッチダウン時に十分に燃料を供給できると判断できたため、「はやぶさ2」では宇宙機用として多数の実績があり、質量も低減(1.1kg減)できる表面張力タンクを採用した。塩の生成に関しては、リスクが高くなるが、今回の追加対策(調圧系分離)によりリスク回避される。

(2)高圧ラッチングバルブの数や燃料及び酸化剤の注排弁の口径・配置等の見直し

【変更理由】JMR-002B(ロケットペイロード安全標準)に準拠し、カタストロフィック事象を回避するため、弁の直列配置への変更や燃料及び酸化剤の注排弁は、誤接続防止のため、口径を異なるものとし、さらに配置を離れた位置にする。

(3)主系／従系の配管ルーティングの空間配置の分離

【変更理由】「はやぶさ」のタッチダウンにおける燃料漏洩のLL反映として、「はやぶさ2」では主系配管と従系配管のそれぞれの経路を空間的に離し、熱的に独立させることで、万が一、どちらかの系で燃料漏洩が発生した場合にも、もう一方の系に影響を及ぼさないようにし、化学推進系の冗長性を高める。