

宇宙ステーション補給機 (HTV) の安全設計

Safety Design of H-II Transfer Vehicle (HTV)



JAXA/NASA提供

柴田 克司*¹ 松山 行一*²
Katsushi Shibata Koichi Matsuyama

増田 和三*³ 三木 陽一郎*¹
Kazumi Masuda Yoichiro Miki

山口 秀行*⁴ 佐々木 宏*⁵
Hideyuki Yamaguchi Hiroshi Sasaki

HTV は、H-IIB ロケットにより打上げられ宇宙ステーション (ISS) に船内物資と宇宙空間に曝露される船外物資を補給及び ISS 内の不要物資を廃棄する軌道間輸送機である。このミッション達成のためのシステム要求及び HTV 運用の各場面における安全要求 (射場安全, ISS 安全, 再突入安全) がなされている。本稿では開発当初より体系的に実施してきた安全に係るシステム設計の結果である HTV のシステム構成を信頼性と安全性の観点から紹介する。

1. はじめに

HTV は、10 年以上の開発期間を経て平成 21 年 9 月 11 日 HTV1 (初号機) が、平成 23 年 2 月 22 日 HTV2 が H-IIB ロケットにより打上げられ、当初の計画通りに物資の補給及び廃棄を行い、ミッションの連続成功を達成した。HTV は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の下、当社がシステム設計及び機体開発のとりまとめを行い開発された。HTV2 以降の運用号機は、当社が補給キャリア与圧部/補給キャリア非与圧部/電気モジュール/推進モジュールで構成する HTV の機体製造を担当し、年 1 機ずつ合計 6 機の打上げを計画している。

2. HTV の概要

HTV の概要を図 1 に示す。

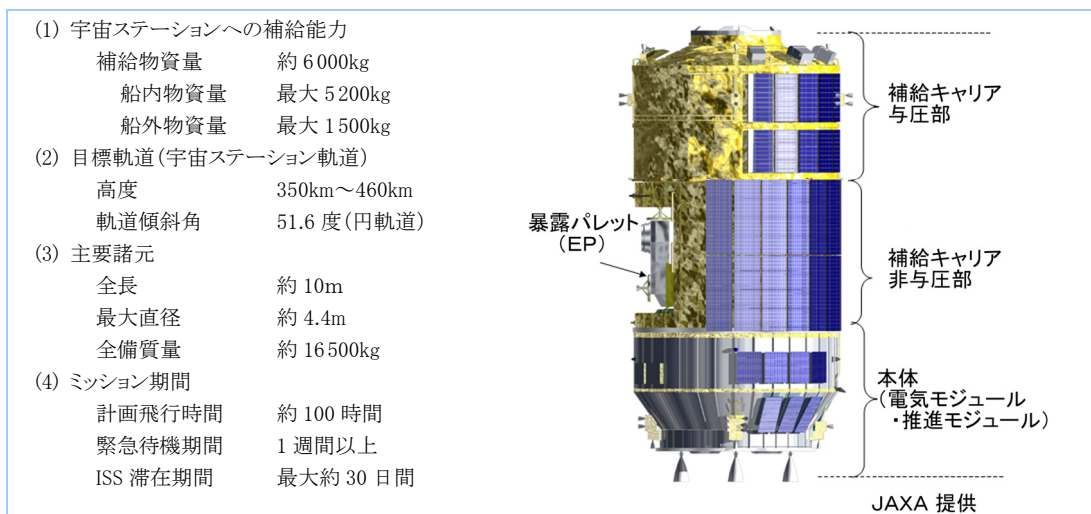


図1 HTV の概要

*1 航空宇宙事業本部誘導・エンジン事業部電子システム技術部主席技師

*2 航空宇宙事業本部誘導・エンジン事業部電子システム技術部主幹プロジェクト統括

*3 航空宇宙事業本部誘導・エンジン事業部電子システム技術部次長

*4 航空宇宙事業本部宇宙事業部宇宙システム技術部主席チーム統括

*5 宇宙航空研究開発機構主幹

HTV は大きく分けて4つのモジュールから構成されており、船内物資を輸送する補給キャリアと圧部、船外物資を輸送する補給キャリア非圧部、アビオニクス機能を持つ電気モジュール、推進系を持つ推進モジュールからなる。電気モジュールと推進モジュールを組合せた形態は本体と呼び、衛星のバス部に相当し HTV の基本的な機能である誘導制御系、推進系、通信系、データ処理系、電源系のサブシステムを集約している。圧部は ISS のモジュールと共通のハッチ及び結合機構 (CBM) を有することで大型船内物資の搭載が可能であり、日本実験棟 (JEM) と同様に内部で有人活動ができるモジュールである。非圧部は曝露パレット (EP) を引き出し・挿入するための大きな開口部及び EP を固定する機構系を有し、EP を介して船外物資を搭載するモジュールである。

次に、図2に HTV の運用概要を示す。HTV は H-IIB ロケットにより打上げられた後、米国のデータ中継衛星経由データの送受信と GPS により自分の位置把握を行い自力で飛行する。高度調整をしつつ約 90 分で地球周回を重ねることで、ISS の位相 (軌道周回上の位置) や高度に合わせる。ISS の近傍域では直接 ISS と通信を行い ISS 下方 10m で停止する。その後、ISS マニピュレータで把持され ISS に結合される。船内物資は圧部ハッチから ISS 搭乗員により移送され、船外物資は EP を ISS マニピュレータにより引き出した後 EP から移送される。帰還時は ISS で不要となった機材や廃棄物を積み込み、ISS から分離した後大気圏に再突入を行い大気との摩擦熱により燃焼廃棄する。

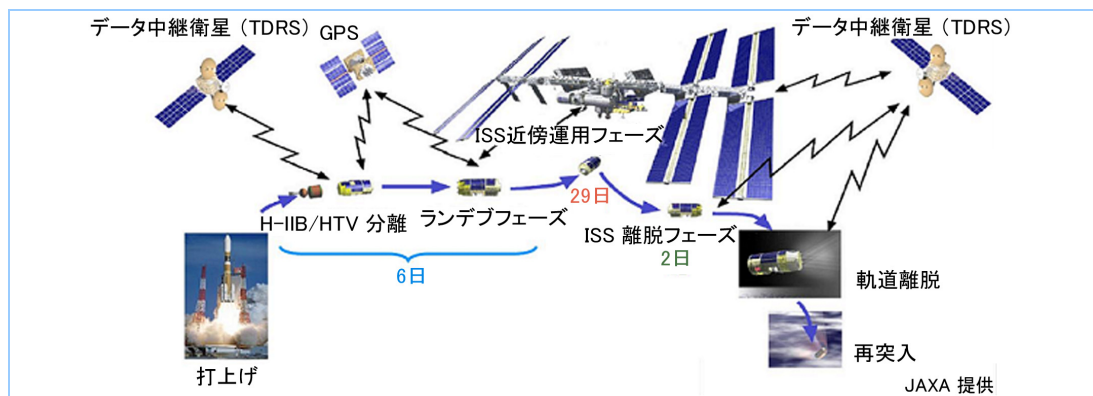


図2 HTV 飛行運用

3. 安全に係るシステム設計

3.1 全般

HTV のミッションは ISS へ6トンの補給物資及び ISS の廃棄物資を輸送することである。このミッション達成のためのシステム要求は信頼度要求のほか、“故障や誤操作が1つ起きてもミッションが継続できること”(1FO: 1 Fail Operative)が要求されている。一方、HTV 運用の各場面で以下の安全に対する要求が課されている。

(1) 射場安全要求

従来衛星と同様に射場作業及び打上げに対しての安全確保について要求されている。作業員の死傷やロケット打上げの安全に関わるものは、ISS 安全と同様に高い安全要求が課されている。

(2) ISS 安全要求

有人システムである ISS に接近及び結合し ISS 搭乗員が圧部内で作業するため、従来衛星にはない有人安全要求が課されている。ISS 安全要求の基本は以下である。

- ・ 故障や誤操作が2つ起きても ISS 搭乗員の死傷や ISS の喪失 (カタストロフィック・ハザード) に至らないこと。(2FS: 2Fail Safe)
- ・ 故障や誤操作が1つ起きても、ISS 搭乗員の傷害や ISS の損傷 (クリティカル・ハザード) に至らないこと。

(3) 再突入安全要求

HTV は ISS から分離した後、軌道離脱マヌーバを実施し大気圏に再突入、南太平洋上で燃焼廃棄する。その際の機体落下に関する安全確保について要求されている。最終マヌーバのモニタ要求や何らかの原因で最終マヌーバが停止し地上落下した場合の安全評価がある。

以上のシステム要求及び安全要求を踏まえシステム構成及びリソース配分を決めている。システム構成の評価には、信頼度解析や故障モード及び影響解析 (FMEA; Failure Mode Effect Analysis) を実施し、リスクの所在を確認しつつ設計を進めた。FMEA では、発生しうる故障モードを調べ上げ、故障の波及や単一故障点の有無の評価を予め実施し、その影響の重大さに応じて“ISS 及び搭乗員の喪失”、“HTV 及び ISS ミッション支援機能の喪失”、“性能の劣化”のカテゴリ分けを行い評価した。なお、本カテゴリは、部品選定時の品質グレードの設定にも利用している。

システム設計の結果については、各設計フェーズにおいて設計審査と並行して各安全審査を受審し、各段階に応じた確認を行った。特に ISS 安全審査は JAXA だけではなく NASA による審査も受審した。

3.2 システム構成

ミッションに対し1FO 及び ISS 安全に関して 2FS が要求されていることから、基本的に構造や機構のように冗長構成をとれないもの以外は2冗長以上の構成とした。ISS 安全に関わる機能で3系目を使用して安全化を図るもの及び2故障目の異常検知に3系目を使用するものが3冗長構成となっている。構造や機構のように冗長構成をとれないものは十分な設計マージンや安全係数のような安全に関わる物性値及び特性値による設計(ミニマムリスク設計)を適用し、特にリスクが高いと評価された構造・圧力容器に関しては破壊管理計画に基づいた製造管理を行っている。以下に各サブシステムの構成について述べる。

(1) 誘導制御系

誘導制御系には、多数決による自己診断のための3つのCPUと2つIOコントローラを持つ誘導制御用コンピュータ1台とISSからの退避専用コントローラ1台を有し、表1に示す誘導制御系センサを用い誘導制御を行う。ISS に接近時にあらゆる組合せの2故障が発生した場合でも、3冗長目の機器を利用しISS から安全に退避を図ることが可能である。後述する近傍通信装置を使いISS との相対距離及び相対速度を計測し、ISS に接近する際の安全評価に用いている。また、再突入時の最終マヌーバ時に故障が発生した場合でもシステムを切替えてマヌーバを継続し所定の落下域への再突入が可能である。

表1 誘導制御用センサ

誘導制御系センサ	冗長構成	備考
加速度センサ(X/Y/Z)	3	
ジャイロ(ピッチ/ヨー/ロール)	3	
GSP レシーバ	2	GPS 衛星を利用し位置・速度検出。 また、ISS 設置の GPS レシーバのデータを利用し相対位置・速度を検出
地球センサ	2	地球中心を基準に機体姿勢を検出
ランデブセンサ	2	レーザをISS 搭載のリフレクタに照射し、ISS からの相対位置・速度を検出

(2) 推進系

(a) 推力発生

推進系は大きな軌道変換やISS からの退避に用いるメインスラスタ4基及び並進/回転制御に用いるRCS スラスタ28基(主系14基/従系14基)及から構成され、1FO/2FS となるように遮断弁/調圧弁が配置され、最大約2.4トンの推薬(MON3/MMH)を搭載可能である。ISS に接近する際には、RCS スラスタ主/従系により1FO を満たし、両系とも故障した場合にはメインスラスタの作動にてISS から退避し2FS を満たす。再突入時のマヌーバではメインスラスタ2基作動とし、故障発生時には残りの2基に切替えてマヌーバを継続することが可能である。

(b) 推薬漏洩

HTV の推薬は人体に有害であるが、漏洩した推薬の一部が船外活動中の宇宙服に付着すると、有害な物質が船内に持ち込まれる可能性がある。そのため船外活動が想定される前方スラストはバルブを3重に設置し大量漏洩を避けるとともに、船外活動中は2故障発生しても不意にスラストが作動しないように制御している。射場作業時この制御により射場作業員の安全確保を行っている。

(c) 爆発

推薬供給システムが過加圧状態に至った場合には最悪爆発し、ISS の構造破壊及びISS 搭乗員の死傷に至るため、過加圧を防ぐため調圧弁を直列冗長とし、その上流に遮断弁を配置する構成としている。さらに破裂板を設置し、万一過加圧状態になった場合でも破裂板が破裂し機器に過加圧を防いでいる。また、ISS に係留後に何らかの理由によりISS から分離不能となった事態に備え、推進系の安全化のための推薬投棄機能を設けた。

(3) データ処理系

データ処理系は、パケットコマンド/テレメトリのデータ処理を行い、衛星間通信、近傍通信、ISS 係留中にISS との通信に使用する 1553B バスによる通信及び射場作業中に使用するアンビカルケーブルによる通信を介してコマンド/テレメトリの送受信を行う。また、誘導制御以外の故障検知・復帰機能を有し、故障があった場合の異常通知や機器の切替処理を行う。

データ処理系は主/従系及びISS からの退避に必要な最低限の機能を持つ非常用1系から構成され、2故障発生時にもISS から安全に退避を図ることが可能である。

(4) 通信系

静止衛星上のデータ中継衛星を介して地上設備と通信を行うための衛星間通信装置2系と、JEM 内に設置した通信装置を介して通信を行う近傍通信装置2系より構成され、それぞれ独立したシステムとなっている。ISS に接近する際には近傍通信装置を使用するが、ISS/HTV 間でハートビート信号の通信を行い、異常発生時の切替処理を行う。2故障発生し通信リンクが確保できない場合はISS への接近を中断し、自動的にISS から退避する軌道に投入することで安全化を図る。また、ISS との結合時は2系の 1553B を介してISS と通信を行っているが、2故障後のバックアップとして近傍通信装置を使用し2FS を満たした。

(5) 電力系

50V 系と 120V 系の電力系を有し、1FO/2FS を満たす機器構成で表2に示す各モードで電力供給を行う。当初、50V 系のバスバーは構造扱いとし1バスとしていたが、NASA との調整の結果、独立した2つのバスバーを持つ構成とし、1バス喪失時はISS から退避するものとした。太陽電池は展開機構の故障リスクを避け、ボディマウントとした。

表2 電力系モード

電力系モード	内容	備考
2次電池モード	太陽電池の発生電力あるいは2次電池の放電による電力供給。太陽電池発生電力の余剰分は2次電池に充電される。	
1次電池モード	1次電池から電力供給。	2次電池モードの供給電力が消費電力を下回る場合
ISS モード	係留中ISS より供給される 120V 系電力を 50V に電圧制御し、電力供給。	120V 機器にも電力分配を行う。
アンビカルモード	打上げ前は、地上支援装置の外部電源により電力供給。	

(6) 熱制御系

熱制御系は HTV に搭載する機器及び補給物資が許容温度範囲内となるように熱制御を実施する。ヒータ制御系は、ヒータ制御喪失自身が推薬の過熱や凍結を引き起こしハザードとならない、ヒータ制御喪失で熱制御対象である冗長構成機器が全喪失をしない冗長構成とした。

(7) 構造系

HTV 構造系は、地上作業、打上げ、単独飛行及びISS 結合時の荷重に対しミニマムリスク設計により強度/剛性を確保している。また、HTV はISS に結合中はISS の一部になるため、軌道上の宇宙塵(デブリ)の衝突からHTV を防御するためのデブリバンパーを搭載した。

(8) キャリア機能—与圧部

与圧部機能として、キャビン圧力のリリース制御、キャビン温度制御、空調及び照明がある。1FO/2FS を満たす機器構成としているが、バックアップ機能の一部はISS 機能及びISS 搭乗員によって行うことを前提とし、HTV 機能の最小化を図っている。

与圧部内はISS 搭乗員が活動するエリアであるため、シャープエッジ挟み込み、感電、熱及び騒音に対する対策を行っている。また、与圧部内の火災を防ぐため 煙検知器の搭載及び難燃性材料の採用を行い、火災の要因となる電力分配器を外部搭載とした。

(9) キャリア機能—非与圧部

非与圧部機能として、搭載しているEP を分離するための機能、EP を再固定するための機能及びEP への電力分配機能がある。また、HTV をISS のマニピュレータで把持する際の非常手段としてHTV をマニピュレータから強制分離させるための機能を持つ。コントローラは2冗長構成とし1FO を満たし、2故障発生した場合でも不意のEP 放出やマニピュレータからの強制分離が発生しない設計とし2FS を満たした。

機構系の作動不良が発生した場合にはISS 搭乗員による船外活動によるバックアップも考慮されており、HTV 外部表面に船外活動用のエリアの設定と船外活動用の支援具を設置している。EP は機の引き出しのように非与圧部のガイドレールにガイドされ引き出し/挿入されるが、EP 側にホイールの設置(転がり)及びガイドレールとホイールに固体潤滑被膜の塗布(滑り)を行い、ひっかかりのリスクを低減した。

(10) リソース

(a) 搭載推薬量

搭載推薬量は、ISS 軌道高度、ISS に接近する軌道、運用時間、スラスト運用、機体質量及び外乱により算出される。また、1FO/2FS の要求を満足するため、ISS への接近の再試行分やISS から退避する推薬を余分に搭載する。なお、実運用では補給物資搭載後の打上げ質量に余裕がある場合は運用のフレキシビリティを高めるために余剰推薬を搭載する。

(b) 一次電池搭載数

一次電池は太陽電池により発生される電力のみでは不足するフェーズの電力供給に使用される。太陽電池の発電量はHTV 機体姿勢と太陽方向、消費電力は搭載機器の消費電力とヒータ電力により決まるため、標準的な飛行計画(ISS への接近の再試行分やISS から退避分含む)を策定し、最悪の環境条件(太陽方向と温度環境)での電力不足分及び電力系機器故障の影響を評価し必要台数を算出し、1FO/2FS の要求を満足する最小限の台数とした(HTV1 はデモフライト分を含め11 台、HTV2 以降では7台)。設計上の最悪条件での成立性を図っているため、実運用時には一次電池の電力量があまるという状況となっている。

4. まとめ

HTV はロケットでも衛星でもない日本で初めての大型の宇宙機であり、JAXA と共にNASA と調整を行いつつ開発が行われた。有人安全の要求を満足させるための試行錯誤の開発より複雑な構成になった。HTV は有人仕様であるため今後、無人/有人回収カプセルやISS 以外への軌道間輸送などのHTV 発展型に取り組み、HTV 開発で得た知見を活かしていきたい。

参考文献

- (1) 三木陽一郎ほか、宇宙ステーション補給機(HTV)の開発、三菱重工技報 Vol.47 No.1 (2010) p.70~76