資料59-2
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59回)R2.11.17

宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV)の成果について

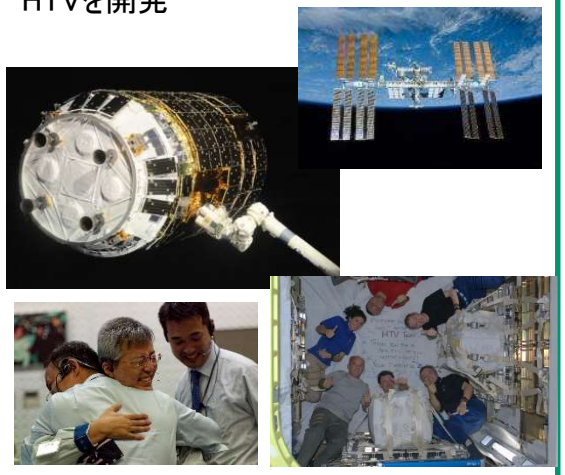
令和2年11月17日

宇宙航空研究開発機構
理事　佐々木宏
HTV技術センター長　植松洋彦

□ はじめに

- 宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV)は、国際宇宙ステーション(ISS)共通運用経費の我が国負担義務に相応する物資の補給、および今後の宇宙開発活動の展開に重要な軌道間輸送機や有人システムに関する基盤技術の習得を目的として開発、運用が行われてきた。
- 平成21(2009)年の技術実証機(初号機)の成功以降、継続的に国際宇宙ステーション(ISS)への物資輸送を実施し、本年8月20日に最終号機である9号機の大気圏への再突入を完了をもって「こうのとり」全号機の運用を終了した。
- 今回、11年間、9機にわたる運用を通じて得た成果を報告する。

ISS計画に参加するにあたり、我が国が継続的にISSへ物資輸送を行うことで、ISS運用にて発生する共通的な運用経費に関する分担責任を果たすこととなり、HTVを開発



2009年初号機ミッション成功

2009年～2020年の11年間で全9機の物資輸送ミッションを全て成功。
HTVの運用を全機確実に成功させることで、確実に物資を輸送を行い、宇宙分野における我が国のプレゼンス向上に大きく貢献した。
さらに、今後の宇宙開発活動の展開に重要な軌道間輸送機や有人システムに関する基盤技術を獲得した。

□ 物資輸送としての成果

- 全9機で国際約束を満足する物資輸送能力を提供し、確実にISSへ輸送した。これにより、ISS運用にかかる共通的な経費に係る我が国の分担責任を果たすとともに、ISSの安定的な運用に貢献した。
- 「こうのとり」の特長を最大限活用した物資輸送を行うことで、「きぼう」利用の成果最大化、国際プレゼンスの維持・向上の取り組みに貢献した。
  - ISSの運用継続に不可欠な交換用新型バッテリ、各国の国際標準実験ラック等、「こうのとり」のみが輸送可能な大型物資を継続的に輸送し、ISSの安定運用や利用成果の創出を牽引した。
  - 国内実験ユーザの試料、装置を日本からISSへ輸送することで、煩雑な輸出手続きや海外輸送なしに、より利用者の立場に立った「きぼう」利用の機会提供の促進に貢献した。
  - アジア、アフリカ諸国の「きぼう」放出用の超小型衛星を輸送し、発展途上国や宇宙新興国による超小型衛星を通じた宇宙利用への参画に貢献した。
  - 他輸送機の打上げ失敗時、物資補給計画を見直しての緊急輸送、運用計画変更に柔軟に対応した。
  - 長期滞在クルーにとって極めて貴重な生鮮食品を輸送した。

物資輸送　　**全ミッション成功によりISSの安定的運用への貢献するとともに、「きぼう」利用の成果最大化にも寄与**

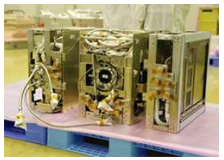
「こうのとり」のみが可能な大型物資の輸送

国際標準実験ラック

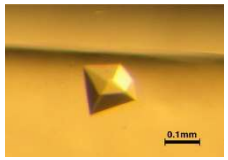
ISSバッテリ

「きぼう」での成果創出に必要な装置・試料などを輸送

小動物飼育装置



静電浮遊炉



タンパク質試料

超小型衛星

生鮮食品

米国宇宙船失敗
⇒緊急物資輸送対応

ソユーズ失敗⇒計画変更
（曝露パレット残置）

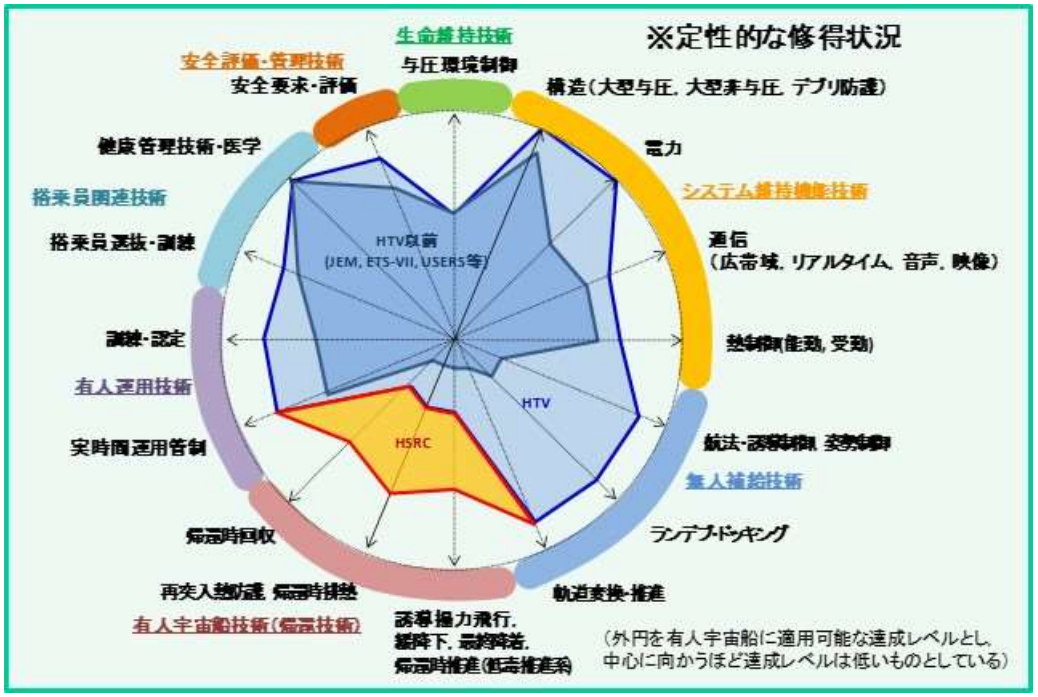
2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
初号機		2号機	3号機	4号機		5号機	6号機		7号機	8号機	9号機

□ 技術獲得としての成果

■ 「こうのとり」は、人工衛星、ロケット、宇宙ステーション実験棟「きぼう」の技術を統合した、我が国初の有人施設対応の輸送機（宇宙船）。「きぼう」の開発・運用で得た範囲を超える有人宇宙システム技術を獲得し、その技術は将来の国際宇宙探査に繋がるHTV-Xに継承されている。

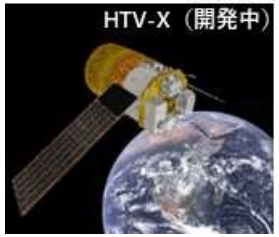
- 我が国で初めて、有人安全要求を満足し自立飛行機能を有する宇宙輸送システム技術を獲得した。
- 軌道上拠点への接近・結合方式として、ドッキング方式より安全なキャプチャ・バーシング方式を世界で初めて採用し、実現した。本技術はスペースX社のドラゴン補給船等、米国の物資輸送機にも適用され、我が国の高い技術力を示すとともに、日本のプレゼンスの維持、向上に大きく貢献した。
- 軌道上の拠点への物資輸送技術および小型回収カプセルにより拠点からの物資回収技術を修得した。
- 非常事態の対応（※）も含めた有人宇宙システムの統合的な運用に関するノウハウを蓄積し、有人拠点への輸送機に関する運用管制技術を獲得した。

（※）（例）HTV3号機では、ISSからの分離時にロボットアームより意図しない初速が与えられたために安全化処置が自動実行され、「こうのとり」は計画と異なる軌道へ退避したが、NASAとも連携し速やかに復帰計画を立案し実行し、予定通り翌日に再突入した。



有人施設への無人補給技術

ISSへランデブーし、物資補給をする技術を確立
(2009年から9機全機成功)



輸送効率(搭載効率等)を
向上させたHTV-Xを開発中

□ 技術獲得としての成果（続き）

■ 「こうのとり」では、運用号機の飛行機会を活用して将来の宇宙利用の発展につながる先駆的技術の飛行実証を行ってきた。

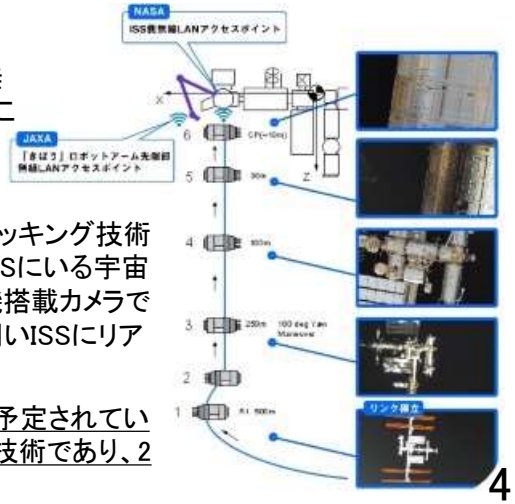
- 再突入データ収集装置（i-Ball）を開発、搭載し、再突入する宇宙機の落下予測精度向上、大気・加熱率等の再突入機の設計に役立てるためのデータ取得を実施した。（3，4号機）
- JAXA研究開発部門にて開発した新型観測センサ、薄膜太陽電池フィルム、およびデブリ除去技術等の新規技術を搭載し、各種データ取得や飛行実証を実施した。（4，5，6号機）
- HTV搭載小型回収カプセルを開発、搭載し、我が国で初めてISSから物資回収を実施した。また将来の有人機につながる揚力誘導制御技術と世界水準の軽量熱防護技術を獲得した（左下図）。（7号機）
- 国際宇宙探査への活用が期待される新型宇宙ステーション補給機“HTV-X”に適用予定の恒星センサ等の航法誘導制御システム、新型与圧物資搭載ラックを先行して実適用した。（8，9号機）
- 今後の宇宙探査に不可欠な自動ドッキング技術の獲得に向けて、HTVに搭載したカメラの映像を無線LANを用いてISSへの伝送を実施し、成功した（右下図）。（9号機）

HTV搭載小型回収カプセル

- 2018年9月にHTV7により打ち上げられ、同年11月に実験サンプルを搭載し大気圏再突入した。
- 南鳥島周辺海域に着水したカプセルは無事回収でき、我が国として初めてISSからの物資回収に成功。我が国独自のISSからのサンプル回収手段を獲得した。
- また、将来の有人輸送機に繋がる、機体を世界水準の低加速度で揚力飛行させて目標範囲に誘導する「揚力誘導制御技術」、ならびに世界最高水準の国産低密度アブレータを使用して大気圏再突入時の高温環境から機体を防護する「軽量熱防護技術」を獲得した。

ドッキングモニタ映像のWLAN伝送軌道上実証ミッション(WLD*)

- 2020年5月、HTV9がキャプチャに向けてISS下方よりISSに接近するフェーズにおいて、HTV9に搭載したカメラの映像を、WLAN(無線LAN)を用いてISSに伝送することに成功。宇宙機間での無線LANでの伝送の成功は世界初。
- この実証実験は、将来の自動ドッキング技術獲得に向け、宇宙機の状況をISSにいる宇宙飛行士が把握するため、宇宙機搭載カメラでISSを動画撮影し、無線LANを用いISSにリアルタイムで伝送するもの。
- 本システムは、HTV-X 2号機で予定されている自動ドッキング実験に必要な技術であり、2号機に先駆けて実証に成功。



*Wireless LAN Demonstration:WLD

□ 人材育成、産業振興としての成果

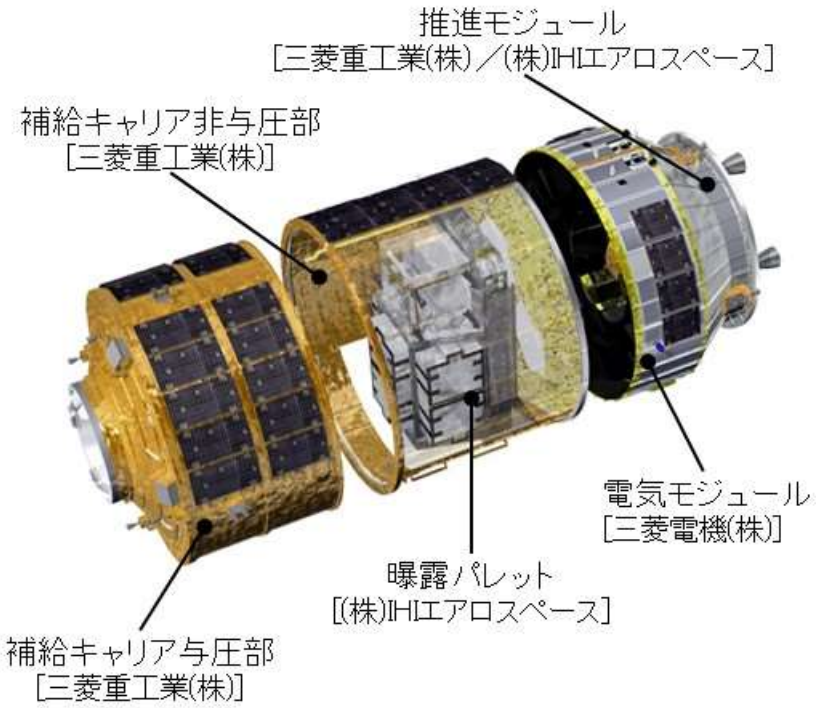
■ 多数のJAXA及び各企業の技術者が有人施設対応輸送機に必要な各種技術を習得し、国際宇宙探査にのための軌道上拠点、有人輸送機の開発など、今後の宇宙開発活動の発展に向けて大きな人的資産を形成した。

- 我が国においてロケット、衛星、「きぼう」の開発・運用を通じて得た技術をもとに、極めて高い信頼性を要する宇宙船を実現するための各種要素技術、システム技術を習得した。また複数機の運用を通じ設計解析等の専門能力の向上を図った。
- 他国の技術者との設計、運用に関する議論を通して、国際的な交渉スキルと技術を有し今後の宇宙探査を初めとした国際共同プロジェクトや海外展開を主体的に引き受けられる人材を多数輩出した。開発、運用初期において中心的な役割を担った担当者は、現在、有人・探査分野のみならず、衛星開発プロジェクト、基盤研究部署等、多方面でリーダとして活躍している。
- 約230人の運用管制員を育成した。「こうのとり」とISSとの統合運用をNASAをはじめとする関係各極と連携しながら実施した結果として、将来の国際宇宙探査等でも必要となる非常事態の対応も含めた有人宇宙システムの統合的な運用に関するノウハウを蓄積した。

□ 人材育成、産業振興としての成果（続き）

■ 国内宇宙企業の先端技術を結集し、国家基幹技術として開発され、運用を継続したことで、高度かつ裾野の広い有人宇宙技術の習得に繋がり、宇宙産業基盤の向上・維持・成熟に貢献した。

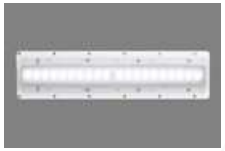
- 「こうのとり」の開発・運用には約400社の日本企業が参画した。高い安全性と信頼性が要求される大規模システムの設計・解析・統合技術等、企業における高度かつ裾野の広い有人宇宙技術の習得に繋がった。また民生技術の採用により新たな企業の宇宙分野への参入を促進した。
- 「こうのとり」の開発・運用にて獲得した技術をもとに海外への輸出などに展開し、新たなビジネスを拡大した（次ページ）。
- １１年間で9機の「こうのとり」およびH－IIBロケットの継続的な打上げ・運用は、アンカーテナンシーとして、我が国の宇宙産業基盤の維持・成熟に貢献した。



「こうのとり」開発・製造担当メーカ

「こうのとり」で採用した民生技術の例

- **与圧部内照明装置**
  - パナソニック電工(株)（当時）と白色LED（発光ダイオード）式の一般照明器具をもとに宇宙用LED照明装置を共同開発。
  - HTV2～8号機にて補給キャリア与圧部内の照明装置に採用した。
  - 宇宙船内の照明にLED照明が採用されるのは世界初めてであった。



- **真空二重断熱容器**
  - HTV 搭載小型回収カプセルでは、実験試料をISSから地上に持ち帰る際の保冷容器として、民生品の魔法瓶技術を応用した断熱容器をタイガー魔法瓶(株)と共同開発した。
  - HTV7号機での飛行実証の結果、本容器と保冷剤を用いることで、ISSでの実験試料格納から、地上での取り出しまでの５日半の間、電力供給を受けずに所定の温度(約4°C)に維持することができた。

□ 人材育成、産業振興としての成果（続き）

「こうのとり」で習得した技術が海外受注につながった例

● 米国民間輸送機（シグナス）のランデブー運用支援

- HTVで開発したランデブ・キャプチャー技術は、ISSに併進しながら徐々に接近し、距離10mの真下からゆっくりと上昇し、ISSのロボットアームによって捕獲する技術。従来の方式と比べてISSへの衝突の危険性が低く、安全性が高い。
- 「こうのとり」1号機の成果を受け、米国の民間ISS補給機「シグナス」や「ドラゴン」のドッキング方式に採用され、JAXAはシグナス運用の訓練やオペレーション支援を受託。
  また、安全評価の支援作業を行った（2017年で完了）

ISS下方に接近したシグナス補給船運用1号機
(出典: JAXA/NASA)

● 国際宇宙ステーション用リチウムイオン電池

- (株)ユアサの100%出資会社GSユアサリチウムパワー社は国際宇宙ステーション用のリチウムイオン電池を受注した。
- 同電池は、H-IIBロケットや人工衛星、HTVで開発された宇宙用リチウムイオン電池の同等品で、現在ISSに使用されているニッケル水素電池と比べ質量・体積ともに約3倍の高エネルギー密度を実現している。
- 高い信頼性とISSの厳しい安全要求を満たした大容量(200Ah)リチウムイオン電池の「こうのとり」での実証実績は、本電池を受注することにつながった。

宇宙用リチウムイオン電池
(出典: (株)GSユアサ)

● 近傍接近システム（通信装置）

- 三菱電機(株)が「こうのとり」用に開発した安全にISSにドッキングさせるための近傍通信システムが、米オービタルサイエンス（現ノースロップ・グラマン・イノベーション・システムズ）社の宇宙貨物輸送機「シグナス」に採用。
- 受注総額は約60億円（6,600万米国ドル）で、2010～2017年に9機分を順次納入した。

近傍通信システム（トランスポンダ）
（出典:三菱電機(株)）

● スラスタ

- (株)IHIエアロスペースは、HTV3号機以降に搭載する500Nスラスタ(HBT-5)と120N RCSスラスタ(HBT-1)を開発。国産初のモノメチルヒドラジンを燃料とするスラスタで、従来の輸入スラスタと比較し幅広い作動範囲で熱安定性を達成するなど、運用性を向上させた。
- JAXAとのスラスタ開発をもとに開発した静止軌道投入用の500Nの推力を有するスラスタは、世界最高性能の燃費を誇り、80台の輸出実績と72台の打上げ実績を持つ。海外顧客からも高い評価を得ている。

500Nスラスタ
(出典: (株)IHIエアロスペース)

□ 国際的プレゼンスの維持・向上への貢献

■ 各極より高い評価を受け、日本のプレゼンスの維持、向上に大きく貢献した。野口飛行士がスペースX社の運用機に初の国際パートナ搭乗員として選ばれたことや、月周回有人拠点「ゲートウェイ」(Gateway)を含む月探査計画への我が国の参画にもつながっている。

- ISS運用延長に必要不可欠な大型バッテリ24個の輸送を全て成功（6～9号機）
- 他国輸送機の失敗時にも確実に「こうのとり」の運用を実施し、ISS維持に貢献
  - 米露による物資補給失敗が相次ぐ中、直前の輸送物資の変更・追加に対応し、かつオンタイムでの補給に成功（5号機）
  - 露ソユーズの打上げに失敗により交代要員がISSに到着できない緊急事態時、ISS運用継続計画に柔軟性を高めるため、係留中の「こうのとり」を曝露パレット非搭載形態でISS離脱、再突入を実施し、成功。（7号機）
- 米国の物資輸送機「ドラゴン」、「シグナス」が、ISSへの接近・結合方式として日本が世界で初めて実現したキャプチャ・バーシング方式を採用
- 「シグナス」がISS近傍での通信システムとして、日本が開発した近傍通信システム「PROX」を採用
  JAXAは運用支援等を通じて「シグナス」のミッション成功に貢献

NASA所有機にて種子島に直送された緊急輸送物資(HTV5)
(出典: JAXA)

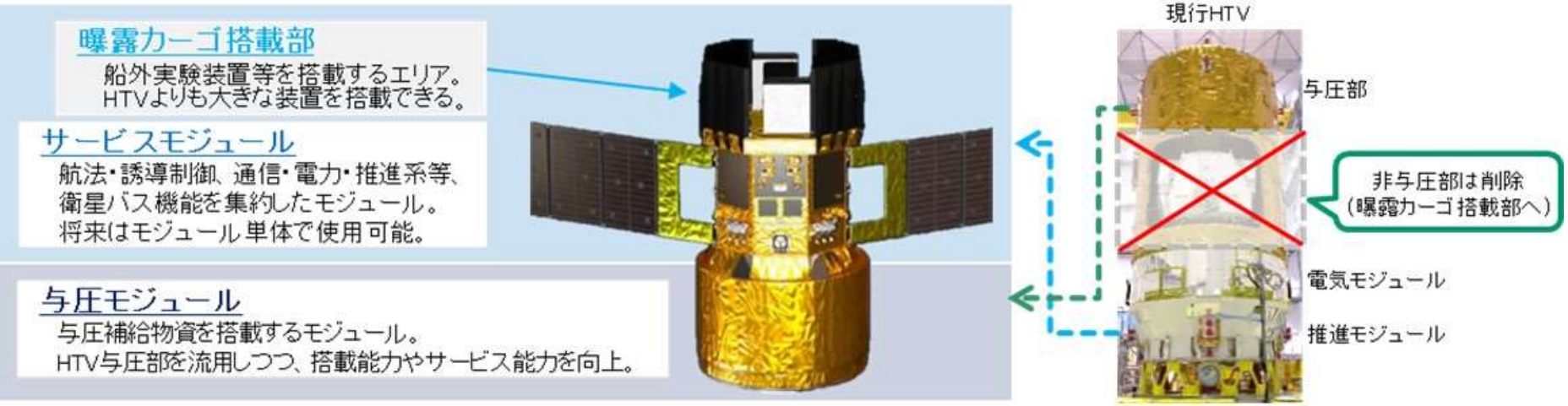
曝露パレットを搭載せずISSから離脱するHTV7
(出典: NASA/JAXA)

「シグナス」運用支援終了記念セレモニーでの記念撮影
(出典: JAXA)

□ 将来の展望

■ 「こうのとり」の開発・運用を通じて獲得した技術は、ISSへの効率的な物資輸送を可能とし、かつ、国際宇宙探査への貢献・発展に繋がる新型宇宙ステーション補給機（HTV-X）に継承される。

■ HTV-Xは、ISSへの物資輸送を担うことに加えて、先進的な技術の実証プラットフォームとしての利用や、今後獲得する自動ドッキング技術等を付加することで、月周回有人拠点「ゲートウェイ」への補給も目指し、現在開発を進めている。



○ISSへの輸送能力・運用性を向上し、運用コストを低減

■ 輸送能力の増強
- 貨物質量： 4トン⇒5.82トン（1.45倍）
- 容積： 49m³⇒78m³（1.6倍）

■ サービスの向上・改善
- 「きぼう」利用ユーザへのサービス向上
  （カーゴへの電源供給、レイトアクセス（打上げ間近の荷物搭載）など）
- 現行HTVの運用経験に基づく改善
  （カーゴ搭載時期の柔軟性向上など）

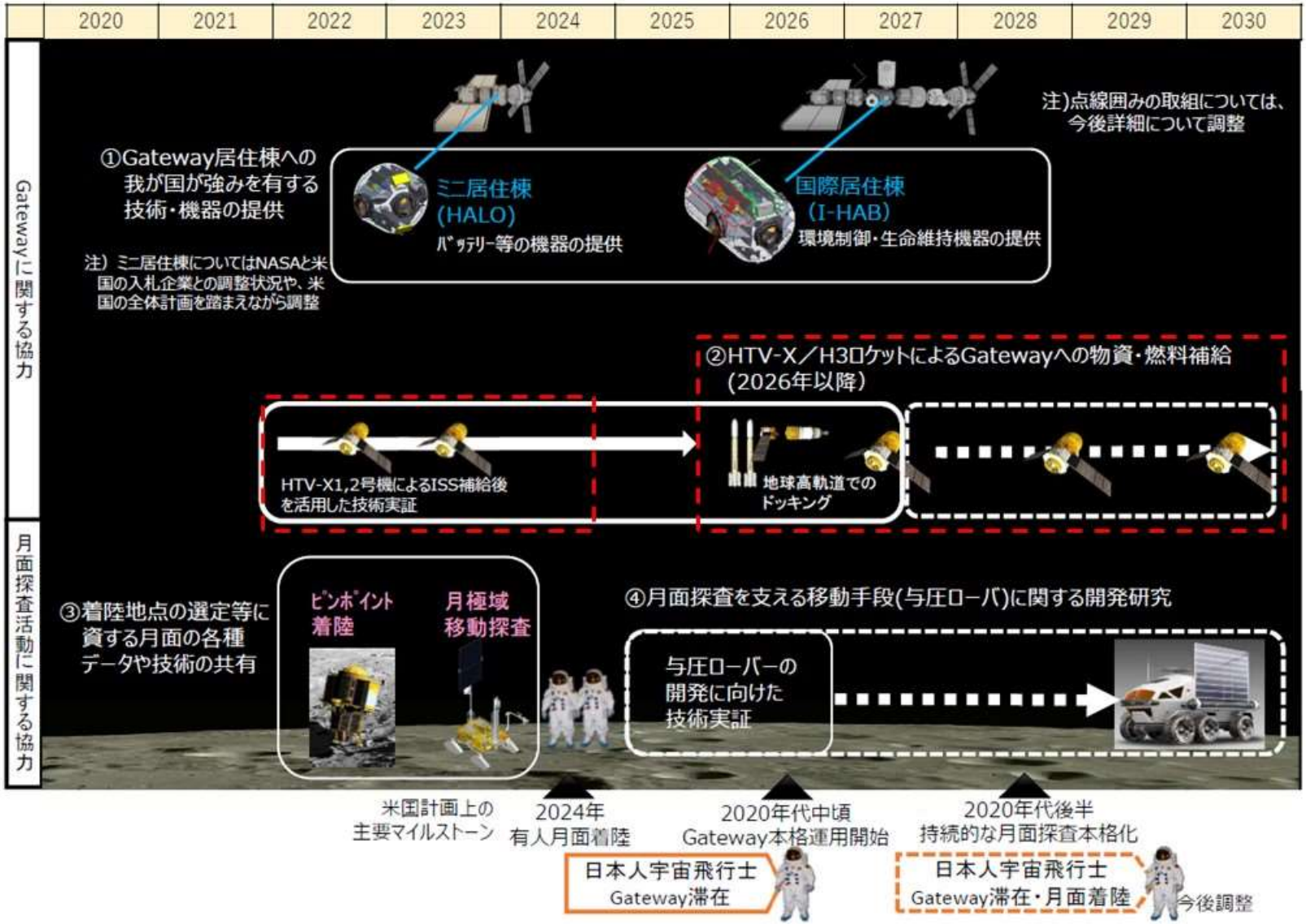
○将来の宇宙技術・宇宙システムへの波及性・発展性を確保

■ ISSへの物資輸送機会を活用した技術実証
例：宇宙機器の搭載・実証、超小型衛星放出実証、
自動ドッキング技術実証

■ 国際宇宙探査（Gatewayへの物資補給）にも対応
例：サービスモジュール単独使用に発展可能な設計仕様、
居住モジュールに繋がる技術獲得、
月周回有人拠点（Gateway）への物資補給等

Gatewayへの物資補給の
イメージ図

□ 将来の展望（続き）



2020年9月17日　宇宙開発利用部会（第58回）　参考資料1 「国際宇宙探査の取り組みについて」（文部科学省殿）より抜粋
（HTV-X関連事項について赤破線枠を追加）

□（参考）「こうのとり」運用結果概要

物資輸送

全ミッション成功によりISSの安定的運用への貢献するとともに、「きぼう」利用の成果最大化にも寄与

「こうのとり」のみが可能な大型物資の輸送

国際標準実験ラック

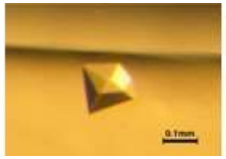
ISSバッテリ

緊急物資輸送

「きぼう」での成果創出に必要な装置・試料などを輸送

生鮮食品

超小型衛星



タンパク質試料

小動物飼育装置

静電浮遊炉

米国宇宙船失敗
⇒緊急物資輸送対応

ソユーズ失敗⇒計画変更
（曝露パレット残置）

2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
初号機		2号機	3号機	4号機		5号機	6号機		7号機	8号機	9号機

技術獲得

将来の国際宇宙探査、有人宇宙活動につながるシステム技術、基盤技術を獲得

初号機

我が国初の宇宙船

- 有人宇宙ステーションへのランデブ飛行技術・安全化技術・管制技術
- 多重化した機器構成
- 有人対応設計

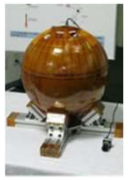
機体システム,運用管制の改良・簡素化

- コンポーネントの国産化（スラスタ、トランスポンダ等）
- 与圧物資輸送能力の向上
- システムの簡素化、高機能化（バッテリ,SAP削減等）
- 運用管制体制の効率化（係留中の「きぼう」との統合化等）

HTV-X技術の先行実証

スタートラッカ
WLAN実証

「こうのとり」の飛行機会を活用した技術実証



小型回収カプセル

帰還技術の習得

「こうのとり」の技術の海外への展開

- 米国宇宙船「シグナス」「ドラゴン」がランデブ・キャプチャ方式を採用
- 「シグナス」のランデブー運用支援 ⇒NASA受託業務（JAXA初）
- 国産コンポーネントの輸出（スラスタ、通信機器、Li-ionバッテリ）

□（参考）「こうのとり」ミッション実績概要

※日本標準時

	1号機 技術実証機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機	8号機	9号機
打上げ日	2009/9/11	2011/1/22	2012/7/21	2013/8/4	2015/8/19	2016/12/9	2018/9/23	2019/9/25	20205/21
再突入日	2009/11/2	2011/3/30	2012/9/14	2013/9/7	2015/9/30	2017/2/6	2018/11/11	2019/11/3	2020/8/20
ISSへの補給量	約4.5トン	約5.3トン	約4.6トン	約5.4トン	約5.5トン	約5.9トン	約6.2トン	約5.3トン	約6.2トン
船内物資	約3.6トン	約4トン	約3.5トン	約3.9トン	約4.5トン	約3.9トン	約4.3トン	約3.4トン	約4.3トン
船外物資	約0.9トン	約1.3トン	約1.1トン	約1.5トン	約1.0トン	約1.9トン	約1.9トン	約1.9トン	約1.9トン
ミッション日数	53日間	67日間	56日間	35日間	42日間	59日間	50日間	40日間	92日間
往路	8日間	6日間	7日間	6日間	5日間	4日間	5日間	4日間	5日間
ISS係留	43日間	61日間	48日間	27日間	36日間	46日間	42日間	35日間	86日間
復路	3日間	2日間	2日間	3日間	2日間	9日間	4日間	2日間	2日間

（備考）

(1)ミッション日数における区分は以下の通り

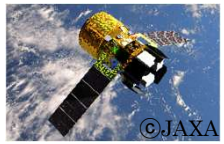
往路　　：打上げ～ISSのロボットアームによる把持

ISS係留　：ISSのロボットアームによる把持～ ISSのロボットアームとの分離

復路　　：ISSのロボットアームとの分離～再突入完了

(2)日数は24時間を“1日間”とし端数は切り上げとした。このため各区分の合計とミッション日数は一致しない。

□（参考）ISS物資補給機の比較（2020年11月現在）

補給機	「こうのとり」HTV（日本）	HTV-X（日本）	Cygnus（米国 Northrop Grumman Innovation Systems社）	Dragon/Dragon2（米国 SpaceX社）	Dream Chaser（米国 Sierra Nevada Corporation社）	Progress-M/MS（ロシア）
	©JAXA/NASA	 ©JAXA	©JAXA/NASA	©NASA	©SNC社	©NASA
運用期間	2009年～2020年	2022年度～（予定）	2013年～	Dragon:2012年～2020年 Dragon2:2020年～（予定）	2021年～（予定）	1978年～
ISSへの補給実績	9回成功/9回	（開発中）	13回成功/14回	19回成功/20回	（開発中）	73回成功/76回
ISSへの物資補給能力[1]（船内＋船外）	4.7トン[2] （物資搭載構造を含む場合：6.0トン）	約5.8トン[3]	約3.8トン	約3.3トン	5.5トン	約2.4トン
船内物資【ハッチサイズ】	ISPR[4]等、複数の大型物資輸送可 【1.3m x 1.3m】		M01バッグ[5]程度まで輸送可 【0.9m x 0.9m】	ISPR[4]搭載不可 【1.3m x 1.3m】	ISPR[4]搭載不可 【直径1.2m】	トリプルサイズ[6]CTB[7]程度まで輸送可 【直径0.8m】
船外物資	○（1.9トン）	○（1.9トン）	×	○（0.8トン）	○（1.5トン）	×
	ISSバッテリや「きぼう」船外実験装置等の大型物資輸送可					
ISSからの物資回収能力	小型回収カプセルにて対応可能（約20kg）		×	約2.5トン	1.75トン	○
ISSの軌道変更 ISSへの燃料補給	×		△/×（実証実験段階） OA-9より軌道変更能力追加	×	×	○
備考（将来計画等）	運用終了	月周回有人拠点（Gateway）への物資輸送への適用も検討中	GatewayのHALO[8]はCygnus与圧部がベースとなる予定	Dragonは運用終了 今後はクルードラゴンを改修したDragon2にて物資輸送を実施予定	―	―

*1)輸送物資を搭載するための構造を含まず、 *2)当初は4トンであったが段階的に改善に取り組み4.7トンまで能力向上した、 *3)技術実証ミッション（0.25トン）を含まない、
*4)国際標準実験ラック（International Standard Payload Rack）約2m x約1m x約1m、 *5) 749mm x 897mm x 508mm 、*6) 749mm x 425mm x 502mm 、
*7) Cargo Transfer Bag、*8) 居住棟（Habitation and Logistics Outpost）