

資料2-1

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
ISS・国際宇宙探査小委員会
(第2回)H26. 5. 16

ISS計画への参加から得られた成果 (要約版)

平成26年5月16日(金)

(独)宇宙航空研究開発機構

ISS計画への参加から得られた成果

1. 有人・無人宇宙技術の習得
2. 産業の振興
3. 宇宙実験からの成果の蓄積
4. 国際協力による外交上のプレゼンス向上への貢献
5. 青少年の育成

1. 有人・無人宇宙技術の習得(1/2)

【成果】

- 当時有人技術を持っていなかった日本は、スペースシャトルを用いた微小重力実験で有人活動を開始。20年余を経て、自国の実験棟「きぼう」を建設し、補給機「こうのとり」を開発するなかで、有人輸送を除き、自律的に有人宇宙活動を行うための重要な技術を習得。軌道上飛行士および米国(NASA)との統合運用の経験を蓄積。
 - 2008年3月から2009年7月までに3回に分けて打上げた要素を軌道上で組立て、日本初の恒久的有人宇宙施設「きぼう」を完成。不具合は米国実験棟の半分以下。
 - 日本人飛行士の宇宙滞在累積日数は、米・露に続き世界第3位。
 - これまでに11人の宇宙飛行士を養成し、8人が計16回の宇宙飛行を行い、うち4回は長期滞在を経験するなど、実績とノウハウを蓄積。また、若田飛行士は、NASA宇宙飛行士グループの管理職を務めた実績を有すると共に日本人初のISS船長にも就任し、着実に有人宇宙活動の中核的部分の経験も蓄積。
 - 有人宇宙活動に携わる地上管制官の経験を蓄積。
- 「きぼう」は、ロケット・衛星のみならず、船舶・鉄道・原子力等の民生分野の技術力を結集して開発され、高度な安全技術・大型システムの統合技術を習得した。「こうのとり」のISSへの接近・ドッキングでは、世界で5極(米、露、欧、日、中)のみが保有する機微な技術である人工衛星等の自動接近技術の中でも最も高いレベルの安全性を実現した。
- 国際協力の枠組みに加わることで、独力で実施する場合に比べ、大幅に効率的に有人宇宙施設を獲得。ISS運用開始までに日本が有人宇宙開発に投じた資金は、米国の約1/100。また、ISS計画への投資額は米国の約1/10であり効率的にその便益を獲得。
- 開発・運用を通じて、安全性評価の能力を向上。搭載実験装置の安全審査権限をNASAから委譲。

打上げから48カ月後の不具合件数比較

	不具合件数
きぼう 2008年3月打上げ	75件 2011年3月まで
米国実験棟 2001年2月打上げ	175件 2005年2月まで

【今後の課題】

- これまで様々な有人宇宙技術の機能的な実現は達成してきたものの、将来の低軌道以遠の国際宇宙探査を見据えると、これまでに習得できていない居住に不可欠な空気・水再生技術や衛生技術の実証・高度化はもとより、有人宇宙施設の継続的・安定的運用に関わる技術やノウハウ等を、ISSの今後の運用・利用により習得していく必要がある。

1. 有人・無人宇宙技術の習得(2/2)

■ 習得・実証しつつある有人技術・ノウハウ

有人輸送技術を除き、自律的に有人宇宙活動を行うための技術・ノウハウの多くを習得。無人補給技術は米国にも採用されるなど、世界をリード。将来の国際宇宙探査を見据えると、継続的・安定的な運用や今後の技術実証で引き続き技術蓄積が必要。

宇宙滞在・活動技術

○システム維持機能技術
有人システム構築に必要な基盤的技術
・構造、電力、通信、熱制御など

○生命維持技術
搭乗員の生命を維持するための技術
・船内の温湿度制御、空気循環技術、気水分離技術(「きぼう」に設置済み)
・宇宙放射線計測技術(積算型)

・空気再生技術
・水再生技術
・宇宙放射線リアルタイム計測、予測、防護技術

○衛生技術
・トイレ、シャワー、廃棄物処理、汚物処理、臭気・菌・細菌除去技術、衛生管理など

○活動支援技術
宇宙空間で搭乗員の活動を支援する技術
・ロボット技術(「きぼう」ロボットアーム)
・宇宙服技術
・他天体での活動技術(作業ロボット、移動車等)

有人運用関連技術

○実時間運用管制技術
有人システムを、長期間安全に運用・利用する技術
・地上と搭乗員の連携
・異常事態対応のノウハウ

・宇宙探査での通信遅れと狭通信帯域への対応

○運用支援技術
長期間にわたって有人宇宙施設の機能を維持する技術
・点検、交換、予防保全の技術
・予備品や実験機器等の補給・回収を行う技術

・機器性能・環境の長期トレンドデータ取得
・機器換装による最新地上技術の導入

○管制員の訓練・認定技術
運用管制員の運用技量を高めるための技術

搭乗員関連技術

○搭乗員の選抜・訓練技術
・搭乗員の選抜ノウハウ
・搭乗員の活動能力を高める技術

○搭乗員の宇宙活動技術
・宇宙船搭乗、船外活動、危機回避等のノウハウ
・搭乗員管理・指揮(船長)のノウハウ

○健康管理技術・宇宙医学
搭乗員の健康を維持する技術
・トレーニングで骨・筋肉を維持する技術
・宇宙放射線被ばく量管理技術
・フライト中の「遠隔」健康診断技術
(1年を超える長期滞在向け)
・「自律」健康診断
・骨・筋肉減少、免疫低下の効果的な抑制

輸送技術

○有人ロケット技術
有人宇宙船を宇宙に輸送する技術(無人より高い信頼性が必要)

○有人宇宙船技術
軌道上で搭乗員が活動、地上に帰還させる技術

○有人施設への無人補給技術
・自立飛行、ランデブー、制御された再突入等の技術
・有人施設に結合できる高い安全性と信頼性

○有人宇宙施設からの無人回収技術
・有人施設からの分離、自立飛行、再突入・回収技術

○他天体への離着陸技術
月・惑星等の他天体への着陸及び離陸技術

○ISS計画への参加を通じ、習得・実証した技術
(青字は、運用中に新たに習得、またはノウハウ蓄積が進んだもの)

○引き続き、ISSで習得・実証していく技術

○将来習得していくべき技術

基盤技術

●開発管理技術
大規模・複雑なシステムを開発するためのマネジメント技術

●大型システム統合技術
大規模・複雑なシステムを開発するための統合技術

●安全評価・管理技術
設計から運用まで、安全性をより厳密に管理・評価する技術

●信頼性管理技術
宇宙機の信頼性をより厳密に管理する技術(部品・工程管理、検証方法など)

2. 産業の振興(1/2)

【成果】

- 「きぼう」の開発・運用には約650社、「こうのとり」の開発・運用には約400社の日本企業が参画。ISS計画への参画がもたらす産業振興効果は“ものづくり”大国ニッポンを支える中小企業にまで浸透。その結果、高い安全性と信頼性を要求される大規模システムの設計・解析・統合技術など、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り、宇宙産業基盤の向上・維持・成熟に貢献。
- 特に、「こうのとり」は、打上げ手段であるH-IIBロケットとともに、年間約1回の打上げにより日本の宇宙産業のアンカーテナンシーとなっている。
- 参画企業は、世界レベルの技術力をアピールして企業ブランドを向上させると共に、習得した技術やノウハウ等をベースに、関連事業への展開、同技術の海外への輸出など新たなビジネスを拡大。
 - 「こうのとり」で開発したISSへの接近技術は、米国の民間輸送機にも採用され、「こうのとり」の近傍通信システムの製作を請け負った日本企業は、米国輸送機「シグナス」の開発企業から約60億円で受注するとともに(次ページ①。以下同)に、JAXAはシグナス運用の訓練やオペレーション支援を受託(②)。
 - その他、アポジエンジン(③)やISS用リチウムイオン電池(④)などで日本企業の海外受注につながっている。
 - ソフトウェアの安全評価手法は、自動車業界、航空機業界等の非宇宙産業へも適用されている(⑤)。

【今後の課題】

- 将来においても我が国宇宙産業が有人宇宙分野における国際的な競争力を持ち続けるためには、2020年以降のISSやそれに続くプログラム等により、日本の有人宇宙技術基盤の維持・向上、技術の継承、人材の継続的な育成が必要。
- 今後多くの国の参画が予想される国際宇宙探査において我が国宇宙産業が中核的な位置付けを獲得するためには、唯一の軌道上実験施設である「きぼう」をテストベッドとして活用し、宇宙探査に向けた新たな技術を産業界とともに実証・習得していく必要がある。

2. 産業の振興(2/2)

ISS計画で習得した技術が海外受注につながった例

① 「こうのとりの」の近傍接近システム（通信装置）

- 三菱電機が「こうのとりの」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年から2014年にかけて9機分を順次納入する予定。



米国民間補給機のISS接近イメージ

② 米国民間輸送機（シグナス）のランデブー運用支援

- 「こうのとりの」技術実証機（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」のドッキング方式として、「こうのとりの」のランデブー・キャプチャー技術が採用され、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ている。

③ 「こうのとりの」のアポジエンジン

- IHIエアロスペースは、HTV3号機以降に搭載する500Nスラスト（HBT-5）と120N RCSスラスト（HBT-1）を開発。世界初のモノメチルヒドラジン燃料とするスラストで、従来の輸入スラストと比較して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とのスラスト開発をもとに開発した静止軌道投入用の500Nの推力を有するアポジエンジンは、世界最高性能の燃費を誇り、54台の輸出実績と33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。

④ 国際宇宙ステーション用リチウムイオン電池

- 株式会社GS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。2016年以降、順次軌道上の現行品と換装される予定。
- 同電池は、H-IIIBロケットや人工衛星・HTV等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「こうのとりの」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

⑤ ソフトウェアの安全評価技術が航空機や自動車開発に活用 ～安心・信頼性向上への貢献～

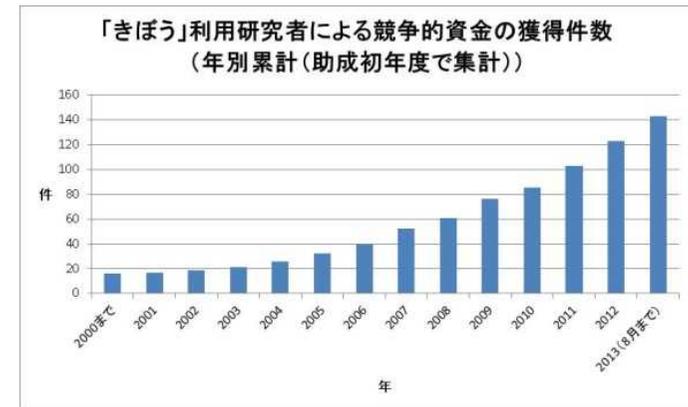
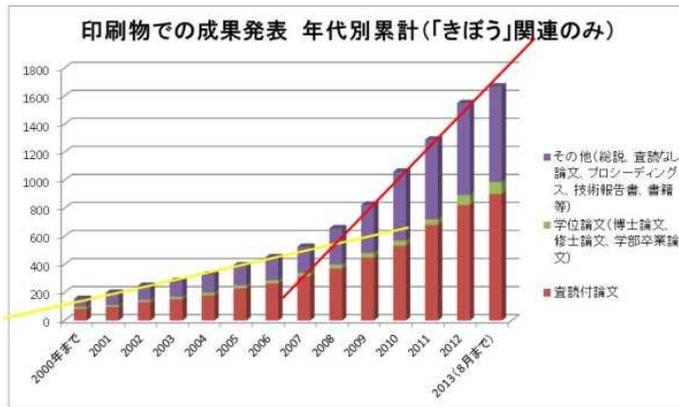
- **宇宙産業：**
JAXAは、独立検証評価技術（IV&V技術）をH-IIA/H-IIIB/イプシロンのロケット及び衛星のソフトウェアにも適用し、開発手戻りの低減、運用段階での高い信頼性・安全性の確保を実現した。
- **地上産業：**
宇宙分野で培ったIV&V技術が、航空機業界や自動車業界に展開され活用されている。また、JAXAのIV&V技術解説書は、ガイドブック及びハンドブックとして産業界に配付され、多くの業界で使用されている。更に、経済産業省の「製品・システムにおけるソフトウェアの信頼性・安全性等に関する品質説明力強化のための制度構築ガイドライン」に繋がり、産業界における高信頼ソフトウェアの検証・評価のルール作りに貢献。



3. 宇宙実験からの成果の蓄積(1/3)

【成果】

- 長時間の微小重力など、宇宙環境を利用することにより、各研究分野に新たな視点やアプローチ等を提供。我が国の科学や技術の発展に貢献。
 - 2008年より船内の実験装置や船外の観測装置を順次打ち上げ、実験環境を充実化。
〔細胞培養、植物培養、水棲生物飼育、金属・半導体結晶成長、タンパク質結晶成長、流体物理計測、X線天文観測、大気観測、地球観測 などが可能な他、無菌環境のクリーンベンチ、位相差顕微鏡、蛍光顕微鏡などの実験機器を搭載〕
 - これまでに「きぼう」船内を利用した生命科学実験や物質・物理科学実験、船外を利用した天文観測、地球観測など、2013年までの約5年間で約80件の「きぼう」利用ミッションを実施。
〔1件の実験機会に複数の実験試料の搭載を行うなどの場合もあり、実験目的毎の集計では、「きぼう」打上前も含め、ISSでこれまでに実施した日本の実験は約450件に上る。そのうち、高品質タンパク質結晶生成実験は331件〕
- ISS計画の学術的成果は、船外のX線天文観測における科学誌NatureやScienceへの掲載をはじめ、約900件に上る査読付き論文として発表されている。特に「きぼう」の利用が開始された2008年以降、急増。また、関連する外部資金獲得件数も伸びている。



(次ページへ続く)

3. 宇宙実験からの成果の蓄積(2/3)

【成果】(つづき)

- 様々な分野において、多様な利用成果を挙げている。
 - 対流のない微小重力下で、地上よりも高品質なタンパク質の結晶ができることを利用し、宇宙で作った結晶を地上に持ち帰って解析し、得られる結晶構造から薬剤や産業用酵素などの開発に貢献(タンパク実験にはロシアも参画)
 - 重力がかからないために骨や筋肉が地上よりも顕著に減少することを利用した生命科学実験で、新たな骨粗しょう症治療薬候補の効果確認や、筋萎縮原因酵素の一つの特定など、健康長寿社会の実現に向けた貢献
 - 対流のない環境で理想的な流体現象や結晶成長現象が実現できることを利用し、地上で観測できない物理現象の原理の解明や、地上で実用化を目指す次世代半導体の作製に関わる知見の蓄積によりナノテク・材料産業に貢献
 - 船外からのX線天文観測により、X線新星の発見等で最新X線天文学へ貢献
 - 船外からの地球観測により、オゾン層破壊などの地球環境問題への貢献や、大規模災害時の状況把握などに貢献
- 特に近年、学術的成果の積み重ねにより、民間企業の参入が始まりつつある。
 - タンパク質結晶生成実験に大手製薬企業が参入。
 - 免疫研究に関して大手食品メーカーとJAXAで共同研究を開始。

【今後の課題】

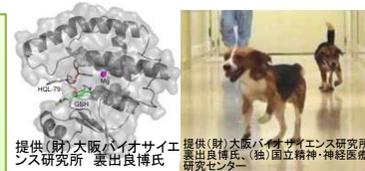
- 物理学や生命科学の分野で宇宙環境利用が有用な研究領域が見えてきた中で、今後は、体系的な成果創出や出口を見据えた成果創出が見込めるインパクトのある研究課題に重点化し、戦略的に進めていく必要がある。
- 地上の厳しい研究競争に対し、宇宙環境がブレイクスルーとなる付加価値を与えうるような研究を中心に据え、それに合致する国の科学技術政策や外部資金制度等と連携してイノベーション創出を目指していくことが必要。
- タンパク質実験では、これまでの実績の積み重ねにより、ようやく大手製薬企業等が本格的な利用に乗り出したところ。その他、材料実験や小型衛星放出等、民間利用が有望なサービスを増やしていくこととしており、民間企業の投資価値や需要にかなう十分な実験機会を継続的に提供していく必要がある。

3. 宇宙実験からの成果の蓄積(3/3)

多様な利用成果の例

タンパク質の結晶取得により、創薬研究へ橋渡し

- 対流のない宇宙でタンパク質の高品質結晶を生成し、その立体構造情報を取得。現在は条件を整えば約7割以上の確率で地上よりも高品質結晶が生成可能。
- 癌関連タンパク質の構造や、筋ジストロフィー治療薬候補化合物と病原タンパク質との結合状態が、詳細に分かる精密構造データを取得。
- ロシア等との間で本実験に係る相互協力を実施。平成26年から大手製薬企業などが製品化を目指して利用を開始



筋ジストロフィー進行関連タンパク質の構造(左)とビーグル犬による動物実験(右)

微小重力を、老化の加速環境として利用し、骨代謝の解析と薬候補の効果を検証

- 地上よりも約10倍の速さで骨量が減少する「きぼう」の微小重力の特徴を使い、地上では実験が難しい、骨量減少メカニズムの解明研究と、対策研究を実施。
- 薬の候補化合物が、骨密度低下防止・骨粗しょう症治療薬として有効であることが確認され、研究者と民間企業により実用化を目指した取り組みが進められている。



筋肉に関する疾病の予防・回復、老化抑制などの「機能性食品」の開発へ

- 微小重力では地上の約2倍の速さで筋量が減るが、細胞内で筋萎縮の原因となる酵素(Cbl-b)が地上の約10倍に増えていることが原因と判明(1998年のスペースシャトル実験)。
- この筋萎縮の原因酵素(Cbl-b)が増加するISSの微小重力状態で、同酵素の働きを抑える薬の効果を確認。現在、研究者と民間企業が筋萎縮予防食の研究開発を進行中。



次世代高性能半導体結晶の製造

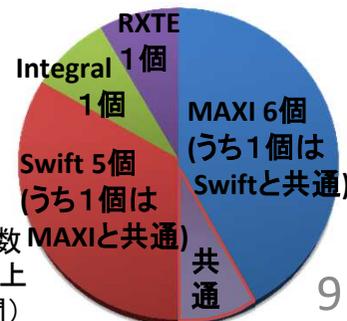
- 新しい結晶成長方法(TLZ法: JAXA特許)を宇宙実験に用い、地上でも宇宙でも実現できなかった次世代の高性能半導体結晶である $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ の大型結晶の製造に世界で初めて成功
- 地上での応用に向け、次世代高性能半導体の実用化の基礎となるデータを、対流による擾乱のない理想的な実験環境で取得

1回目の宇宙実験で育成したSiGe結晶の外観

X線天文学の最先端の学術的成果

- 巨大ブラックホールが星を吸い込む現場を世界で初めて観測 (Nature誌、2011年)
- ガンマ線バースト(宇宙最大規模の爆発)の観測に成功 (Science誌、2014年)
- ブラックホール発見競争で首位

ブラックホール発見数
12個の内訳(MAXI打上から現在までの期間)



4. 国際協力による外交上のプレゼンス向上への貢献

【成果】

- 「きぼう」、「こうのとり」の着実な開発・運用で存在感を発揮し、国際パートナーからの信頼を得てきており、宇宙常任理事国としての地位を確立。
 - 国際協働による宇宙探査計画の技術検討を進める国際宇宙探査協働グループ(ISECG)(14宇宙機関が参加)において議長国を務めた(～2013年4月)。
 - 宇宙探査の政策的議論を行う国際宇宙探査フォーラム(ISEF)を、初回米国に続き、日本で開催することが決定。
 - NASAから米国民間輸送機「シグナス」の運用訓練や運用支援を受託。
 - ロシアとタンパク質実験、メダカ実験、放射線計測の協力を実施。
 - NASAは、「きぼう」の特徴を活かした衛星放出機構を積極的に活用。
- アジアのISS非参加国の多く(マレーシア・ベトナム等)は、「きぼう」利用を通じた日本との協力関係の発展を強く希望しており、日本の国際的プレゼンスが向上。
 - マレーシアとのタンパク質結晶生成実験をこれまでに6回実施。
 - 「きぼう」の特徴を活かした衛星放出機構を用いて、ベトナム宇宙機関／東大連携の超小型衛星に利用機会を提供。
- アジア・太平洋地域宇宙機関会議(APRSAF)を通じて、植物種子の成長観察実験や航空機による微小重力教育実験などの共同イベントを実施。
 - 植物種子の成長観察実験:2013年は7カ国で1,300名以上参加し、うちマレーシア宇宙局は独自のコンテストを開催(39,500名参加)。



PicoDragon

(東京大学/ベトナム国家衛星センター/(株)JHIエアロスペース)



植物種子の成長観察実験



航空機による微小重力教育実験

【今後の課題】

- 今後の継続的な運用や技術実証により、国際宇宙探査等で日本の地位を確固たるものにしていく必要。

5. 青少年の育成

【成果】

- 日本人宇宙飛行士が活躍するISS計画、すなわち最先端の有人宇宙活動への参画により、青少年の科学技術への興味や関心を高め、科学技術教育、ひいては将来の我が国を支える科学技術人材の育成に貢献。
 - 日本人宇宙飛行士のISS長期滞在機会を捉え、子供達との交信イベントの実施、微小重力を使った教育実験の実施、地球帰還後の帰国報告会や講演活動などを実施。
 - JAXAが保有する有人宇宙関連の写真・映像等は、教科書・図鑑・テレビ情報番組・プラネタリウム等、多方面で利用されている。
 - － 写真・映像： 4,171件（JAXAへの全申請件数の約40%）（そのうち、宇宙飛行士関連が1,862件）（平成25年度実績）
 - － 教科書への掲載： 小中学校理科の教科書その他、平成23年度には小学6年生国語の教科書にも掲載
 - － 報道等： JAXA関連報道（TV：約1,000件、新聞：約2,700件）のうち、約50%は有人宇宙関連。中でも宇宙飛行士関連の報道は、有人宇宙関連の約8割を占める。（平成25年度実績）



【今後の課題】

- 我が国が将来にわたって科学技術立国、宇宙先進国であり続けるためには、国際的な有人宇宙活動で中核的な役割を果たすなど、青少年が科学技術に夢や誇りを持てるような活動を継続していくことが必要。

ISS計画への参加から得られた成果まとめ

1. 有人・無人宇宙技術の習得

有人技術を持っていなかった日本が、20年余を経て、自国の実験棟「きぼう」を建設し、補給機「こうのとり」を開発するなかで、有人輸送を除き、自律的に有人宇宙活動を行うための重要な技術を習得。軌道上飛行士および米国(NASA)との統合運用の経験を蓄積。

2. 産業の振興

「きぼう」及び「こうのとり」の開発・運用により、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り、宇宙産業基盤の向上・維持・成熟に貢献。(「きぼう」に650社、「こうのとり」に400社の企業が参加)

参画企業は、世界レベルの技術力をアピールして企業ブランドを向上させると共に、習得した技術やノウハウ等を関連事業や海外への輸出などに展開し、新たなビジネスを拡大。(「こうのとり」の接近技術が米国民間輸送機に採用など)

3. 宇宙実験からの成果の蓄積

実験環境を充実化することで、各研究分野に新たな視点やアプローチ等を提供。科学誌NatureやScienceへの掲載をはじめ、約900件に上る査読付き論文として発表されるなど、我が国の科学や技術の発展に貢献。その結果、民間企業の参入が始まりつつある。

4. 国際協力による外交上のプレゼンス向上への貢献

「きぼう」、「こうのとり」の着実な開発・運用で存在感を発揮し、国際パートナーからの信頼を得てきており、宇宙常任理事国としての地位を確立。

アジアのISS非参加国の多く(マレーシア・ベトナム等)は、「きぼう」利用を通じた日本との協力関係の発展を強く希望しており、この分野の日本の国際的プレゼンスが向上。

5. 青少年の育成

日本人宇宙飛行士が活躍するISS計画、すなわち最先端の有人宇宙活動への参画により、青少年の科学技術への興味や関心を高め、科学技術教育、ひいては将来の我が国を支える科学技術人材の育成に貢献。