

第6章 国際宇宙ステーション（ISS）・セントリフュージ計画

宇宙航空研究開発機構 ISS 科学プロジェクト室

中野 完

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2 - 1 - 1 筑波宇宙センター

E-mail : nakano.tamotsu@jaxa.jp

1. はじめに

地上より約 400km 上空の低地球軌道上で 1985 年から各国共同で建造が進められてきた国際宇宙ステーション(International Space Station: ISS)は、1984 年に当時の米国レーガン大統領が西側自由主義陣営の宇宙開発における結束を象徴する、その名もフリーダム (Freedom) と名づけられる宇宙ステーションを軌道上に建設するための国際協力プロジェクトを各国に提唱したことから始まった。日本は米国との緊密な関係を背景に当時の中曽根政府により ISS 計画に参加することが決定され、以降パートナーとして欧州やカナダなどと共に開発に重要な役割を果たしてきた。1993 年、冷戦期には米国に対峙する共産主義陣営のもう一方の雄であったロシアが ISS 計画における最大のパートナーとして迎え入れられることとなったが、この背景には本プロジェクトのイニシアチブをとり貫して参加各国を主導してきた米国において、ロシアのミールを用いた宇宙ステーション運用の知識と経験を合わせ、かつ経費の削減も図る、さらにはロシアから大量破壊兵器ならびに弾道ミサイル技術の他国への拡散を防ぐと言う安全保障上の判断も働いたと言われる。現在、米国、日本の他、欧州、カナダ、ロシアなど、中国、インドの一部の国を除くほぼすべての宇宙開発を進める主要な国、地域による参加を網羅した国際宇宙プロジェクトに変貌を遂げた。その一方、ロシアの契約不履行や開発の経費増、さらにはスペースシャトルの事故などの影響を受けて、計画は再三にわたって見直しや中断が余儀なくされ、開発の遅れから依然として軌道上施設の完成はまだ道半ばとなっている。

ロシアの参加した当初は、新たに生じた課題によって開発の遅れなどももたらされたものの、コロンビア事故以降は ISS へのすべての輸送はロシアに依存し、それからの ISS の施設維持、運用を実際支えたのもまたロシアの参加によるものである。これは、建造手段がスペースシャトルにほぼ全面的に依存していた計画の弱点を露呈した結果であると共に、国際協力の一つの実を上げたものとされる。

2002 年には、米航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration: NASA) の大幅な予算超過が明らかとなり ISS 計画の規模の縮小を目的とした見直しが検討された。直後、2003 年 2 月にスペースシャトル「コロンビア号」の事故が発生し、以後スペースシャトルの運行の安全が確認されるまで無期限に飛行が停止されたため、ISS の軌道上建設は中断した状態が続き、スペースシャトルの再開第 1 号の飛行は以降 2 年半ほどたった 2005 年 7 月まで待つこととなった (STS-114 ミッション)。再開されたスペースシャトル「ディスカバリー号」も飛行中に燃料タンク断熱材のトラブルが発生し、それに対する安全対策の検討作業の進捗状況などから、再開

第2号のフライト実施は現在2006年5月の見通しになっている(1)。

一方この間、中国はコロンビア事故から8か月後、神舟5号で米露に続く世界3番目の有人宇宙飛行を初めて成功させ(2)、また月探査を一つの長期目標として掲げるところとなった(3, 4)。中国の有人ミッション成功から数ヶ月を経た2004年1月、米国においてはブッシュ大統領によって新宇宙政策が発表され、2010年を目処にスペースシャトルの打ち上げ・運用を終了させる一方、新たに設定された月・火星ミッション計画へ取り組む構想が打ち出された(5)。

それ以前と比べ計画縮小が格段と進められた2001年のISS組み立てシーケンスG改訂の時点でも、28回のスペースシャトル飛行がISS完成のため予定されていたが(6, 7)、スペースシャトルの引退時期が明瞭に規定されて以来、かつての計画で見られたほどの多くの打ち上げ回数を達成するのは現実的には厳しくなってきた模様である。2006年2月現在、米国はスペースシャトルの打ち上げ回数を17回までは確保すべく、2007年度NASA予算の検討を進めているとの報道もあるものの(1)、状況はなお推移する可能性のあることも否定できない。実際すでに、スペースシャトル打ち上げ削減の見込みによる計画見直しの結果、2005年10月、2.5m-セントロフュージ装置を中核としたセントロフュージ開発計画の中止、セントロフュージ搭載モジュール(Centrifuge Accommodation Module: CAM)の打ち上げ中止などがNASAにおいて正式に決定され、参加各国へ連絡された。

日本のISS計画の経緯を遡ると、1985年5月、わが国の科学技術庁とNASAとの間で宇宙ステーション計画予備設計了解覚書が署名され、正式な参加が決定された。以来ISSの主要構成モジュールとなる日本実験棟(Japanese Experiment Module: JEM, Kibo)の開発を推し進め、後れて、国産のHIIAロケット(能力増強型)によるISSへの物資の補給手段を開発することも企画提案し、宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle: HTV)と呼ばれるシステムの開発も進められてきた。さらに1997年9月、参加各国は金銭の授受を最低限に留めつつ技術・労力の提供を相互に行うという基本方針を元に日米間の調整が行われ、日本がNASAに対してスペースシャトルによるJEM打ち上げ費用を払う代りに、その見返りとして日本側がセントロフュージ施設(Centrifuge Facility: CF)を構成する主要な3施設を開発し、NASAに提供することが取り決められた。これを受けて、直径が2.5mのセントロフュージローター(Centrifuge Rotor: CR)、ライフサイエンスグローブボックス(Life Sciences Glovebox: LSG)、ならびにCAMの開発を日本が担当するところとなり、以来完成に向けて開発が進められてきた。

直径が2.5mに及ぶ大型セントロフュージ装置を中核としたセントロフュージ施設は1980年代のISS計画の初期段階から、主に重力因子が生物に及ぼす影響を科学的な厳密さを持って解き明かすことを可能とするため、ISSにおける宇宙生物学研究施設の中核を成すエレメントと位置づけられ計画されてきたものである。

ISS計画は見直し、縮小、開発の遅延に度々見舞われてきたが、見直しの中でセントロフュージ施設の開発にかかる費用の大きさから、削減対象の候補としての検討もくり返し行われてきた。一方、2001年、国際宇宙ステーション計画のコストと管理に対する独立外部評価委員会(International Space Station Management and Cost Evaluation Task Force: IMCE)(8)

や 2002年のISSでの研究に関わる優先順位を勧告するための独立評価組織 (Research Maximization and Prioritization Task Force: REMAP) (9) などによる検討も重ねて行われた。科学的価値、有用性の見地に立って、セントルフィュージ施設はISSにおいて開発すべき優先度の高い施設である旨、NASAから独立した第三者組織から高い評価を受け続けてきた。削減された全体の予算配分においても、本施設に対しては特に十分な予算措置を講じることが推奨されてきた結果、度重なる削減対象からその都度辛うじて免れてきたと言える。

にもかかわらず、2005年10月、最終的にはセントルフィュージ施設の開発の中止が決定されることとなったのは先に述べた通りである。ブッシュ大統領による新宇宙政策が発表されて以来、新たなプロジェクトに資金を充足させるため、宇宙生物学研究に代表されるISSの科学予算に圧縮の加わることがしばしば懸念され、そのような動きに対して色々な団体、方面から再考を求める活動がくり返し続けられてきた(10~14)。ブッシュ大統領による新宇宙政策の発表直後、すでに2004年3月には、米国宇宙開発黎明期の国民的英雄であるジョン・グレン元上院議員はジョー・ケリー上院議員と共に、「進行中、準備中のプロジェクトを中止しても予算削減効果は少なく、これまでNASAに信頼をおいてきた科学者達やNASA内の数十年にわたって彼らの人生をNASAへ捧げてきた科学者たち、その活動は数百万ドルにも及ぶ経費を掛けてきたものであるが、そんな彼らの足元をすくうことになる。月への有人探査には賛成だが、火星への足がかりとしての費用対効果は薄い。今回の案に従うなら月に資金を投入し、かえって有人による火星への到達を遅らせることになりかねない。火星へ行くなら直接行くべきである。」と反論を展開している。(10)。

現実とはそれからほぼ1年半後、セントルフィュージ施設の開発中止が発表された期をほぼ同じくして、NASAは自身のエイムス研究センター (Ames Research Center: ARC) において宇宙基礎生物学分野に携わってきた科学者を400人ほど、解雇する発表も行った(14)。今回は以前には見られたような専門家の第三者による評価、判定を受けることもなく政策の決定が行われ、本分野からNASAがかくも大きな規模でよしんば一時的でも撤退したことも過去に例がないなど、米国においてNASAへ供出しうる限られた財政の中、新宇宙政策の推進へかける米国現政権の並々ならぬ決意、強い意志の存在が垣間見れる。これまでISS計画、宇宙開発の分野で重要視されてきた宇宙基礎生物学の継続、発展の流れに対して大きく影響する今回の政策決定、そこに至るまでの過程で、米国内を始め国際的に宇宙生物学に携わってきた研究者、研究者コミュニティから計画の継続を求める陳情がくり返し行われてきたが(15~18)、NASAにおいては規模の縮小のレベルに留まらなかったと言う現実を向かえるところとなった。今後ISSにおいて、米国研究者コミュニティを含む当分野の研究、開発がどのように着実に進められていくこととなるのか、ISS計画初期の頃の青写真と比較して、今後乗り越えるべき課題、ハードルは格段に上がったと言わざるをえない。にもかかわらず、当分野の研究・開発の推進は人が火星へ実際に向かうなど長期有人宇宙ミッションを実現するためには必要不可欠からざる知識、対策の方針を与えるものでもあり、有人による太陽系進出という観点から、それらの研究・開発を実施する重要性、必要性が唐突に色あせたものに変貌したということでないことは確かである(19~21)。

スベ - スシャトルの飛行回数の削減、2010年の引退の計画の発表を受けて、現在NASA、欧

州宇宙機関 (European Space Agency: ESA)、ロシア宇宙機関 (Russian Space Agency: RSA)、JAXAにおいては、ISSへの人員や物資の補給手段を確保するための新たな動きを見せつつある。RSAは2004年2月から計画を掲げたクリッパーという新たな往還機の開発(22)に対する資金提供を含む共同開発の提案を米国を始め、日本、欧州へくり返し打診し、それに対して日本は2005年10月(23)、欧州宇宙機関は2005年6月(24)、7月(25)、8月(26)、12月(27, 28)、ロシアの提案に対して関心を示した旨、報道が見られた。ここ最近数ヶ月は、NASAから民間企業へその目的を達成できるロケット開発、計画参加の呼びかけを行っている状況が見られ(29~33)、年が明けて2006年に入り、ESAからは改めて、ISSと地上との乗員や物資の輸送に複数種の往還機が存在を必要とすることを説いた発言がみられた(34)。一方、ロシアからは彼らの新たな往還機による、低地球軌道へ人や物資の輸送を開始できる時期の見通しが発表された(35, 36)。

今後のISS開発計画にも実際影響を及ぼす可能性のある周辺状況として、各国の宇宙政策、共同開発に関する調整などの動きに広く目を転じれば、特に昨年後半より中国とロシアが将来の月ミッションに協力し合う方向の調整が頻繁に見られるようになりつつあり(37~42)、一方米国内からは今後の中国の宇宙活動の進展に注目する向きや、中国との新たな宇宙における協力体制の構築を検討すべきとの意見も散見されるようになってきている(43~45)。

2. セントリフュージ施設 (CF) の概要

現在知られているすべての生物は地球の1Gという一定の重力環境下で進化発展してきたものであるが、一方、生物が定常状態では決して受け続けることのなかった微小重力という未知なる因子による影響を、地球周回軌道、あるいは惑星間飛行軌道上では常に受容して行くこととなる。軌道上環境の主要な因子である微小重力と宇宙放射線は、特に滞在期間が半年から数年と長期間に及ぶ場合、搭乗員の健康に重大なリスクをもたらすと考えられている。そのため、この効果に関する科学的理解を深め、最終的にはそれらに対する十分な対応策を確立していかなければならない。21世紀を迎え、人類が宇宙へ活動の場を拡大することが想定される今日、火星旅行、月での定住や宇宙ステーションでの生活を安全に営む技術を蓄積して行くためには、事前に様々な重力レベルで生命活動を維持する方法を学んでおく必要がある。直径2.5mの遠心機ローターを持つ本セントリフュージ施設は、多様な生物種に対する重力変化の影響を一様に観測することを史上初めて可能とする軌道上施設として設計された。すなわち、本セントリフュージ施設は宇宙生物学研究の中核的な軌道上施設として稼動する予定のものであった。

セントリフュージ施設は、セントリフュージ搭載モジュール(CAM)内において、直径2.5mのセントリフュージローター(CR)を基本コンセプトに構想された低地球軌道上の宇宙生物学研究施設である。その構成要素として、ライフサイエンスグローブボックス(Life Sciences Glovebox: LSG)、各種生物飼育箱(Habitat: ハビタット)、ハビタット収納装置(Habitat Holding Racks: HHRs)、保管装置(Stowage Racks)、顕微鏡、冷凍冷蔵庫等が含まれる(図—1)。

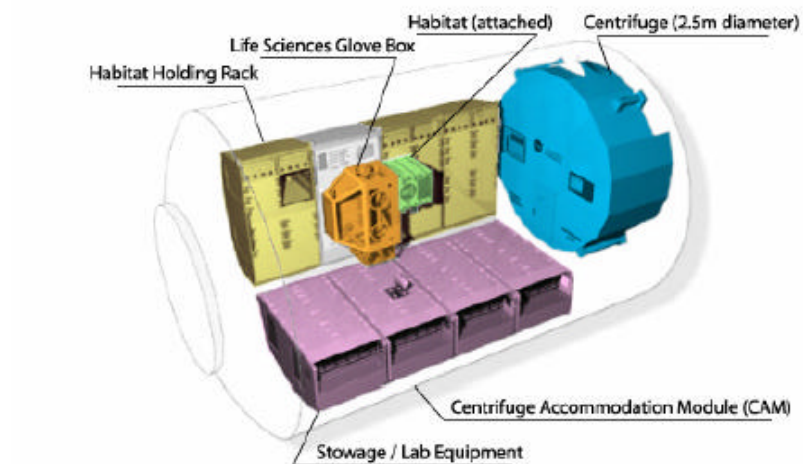


図 - 1 セントリフュージ搭載モジュール (CAM) 内の主要装置 (NASA 提供)

生物試料や実験器具、試薬などがスペースシャトルなどの往還機によって地上からISSへ運搬され、CAMにもたらされると、一旦保管する予定の試薬、器具類は保管庫や冷凍冷蔵庫に収納される。一方、生物試料は輸送用の生命維持装置からライフサイエンスグローブボックス (LSG) の内に移される。そこで必要とされる処置などが行われた後、実験計画に従って大きく2つのグループに分類されることとなる。すなわち、一つは軌道上の微小重力環境下で以後、飼育、培養、栽培などの行われるグループ (群)、もう一つはCRによって軌道上で人工重力を負荷されるグループ (群)である。それぞれの群とも生物試料の種類ごとに対応する特定のハピタットに移され、前者はHHRへ、後者はCRへ搭載されることとなる。すなわち、前者は微小重力環境にて維持される群、後者は人工重力を負荷される群となる。以降、実験計画に従い、試料の処置などが必要な際、またLSG内に試料を移動し、必要な試薬、器具も合わせ使って搭乗員が実験実技を行う。それら処置の終了後はまたそれぞれの群は同様に微小重力、あるいは人工重力環境下で維持される。実験の終了時には試料を再びLSGに移して、化学固定や解剖、試料の小分けなどの様々な処置を済ませ、最終的な保存のできる状態に加工し、地上へ下ろすまでの間、保管庫、冷凍冷蔵庫などの装置にて保存される (図-2)。

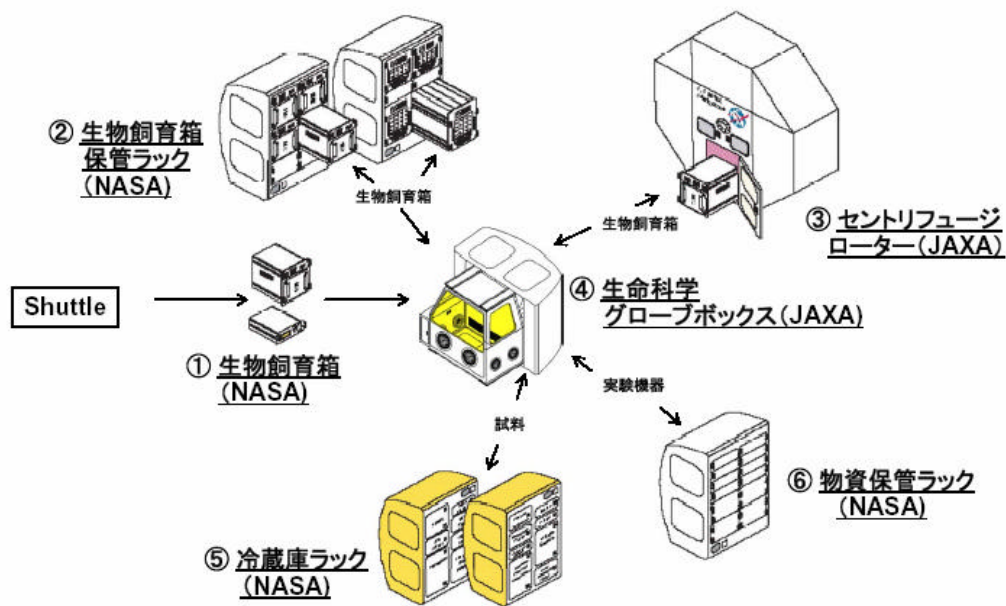


図 - 2 CAM 内における生物学実験操作の流れ [() 内は開発担当の宇宙機関を示す]

LSG は以上述べたごとく、生物試料を隔離された作業環境にて取り扱うことを可能とする装置である。内部に顕微鏡を搭載することも可能で、生物試料の各種実験操作(動物の解剖、細胞の播種、薬物処理、植物種子等の収穫、顕微鏡観察用試料の作製ならびに顕微鏡観察)などが行える。すなわち、CAM 内で生物学実験の作業を行う環境を提供するために設計された専用のグローブボックス、さらに平易に述べるならば実験者がグローブを手に装着した上で外部から操作して内部の生物試料等に対する実験作業を行うための箱状装置である。作業環境と人など外部環境とを隔てる必要性として、ISS 内部の宇宙飛行士の活動や健康に対して生物試料や試薬に起因する悪影響が及ぶことを防ぎ、かつ生物試料等に対して ISS 内部の空気や飛行士等に由来する成分からの不必要な影響が及ぶことを防ぐ目的による。船内与圧部から隔離された環境が提供されるのみならず、一度に 2 つのハビタットをセットした状態で 2 人の宇宙飛行士が同時に共同して生物試料に対する各種実験操作が行える仕様とされ、そのためもあり LSG の確保する隔離空間の容積は 450 リットルという ISS 中最大の規模となっていた (図 - 3)。

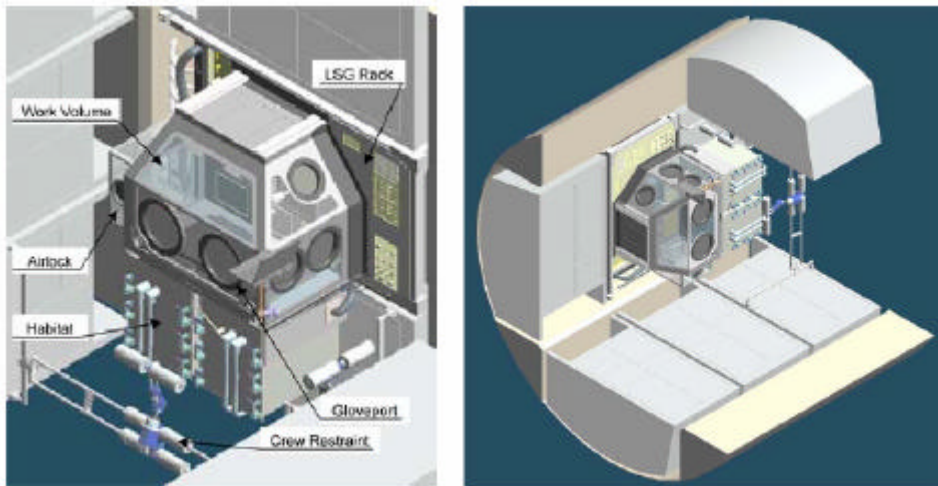


図 - 3 ライフサイエンスグローブボックス (LSG) (JAXA 提供)

ハビタットは各種生物種に対応して異なるタイプの開発が進められた (図 - 4)。哺乳類小動物用の Advanced Animal Habitat (AAH)、鳥類卵孵化用の Avian Development Facility (ADF)、水棲生物用の Aquatic Habitat (AQH)、高等植物用の Plant Research Unit (PRU)、高等無脊椎動物・昆虫用の Insect Habitat (IH)、細胞培養用の Cell Culture Unit (CCU)、細胞や小型生物試料用の Incubator (インキュベーター) がある。

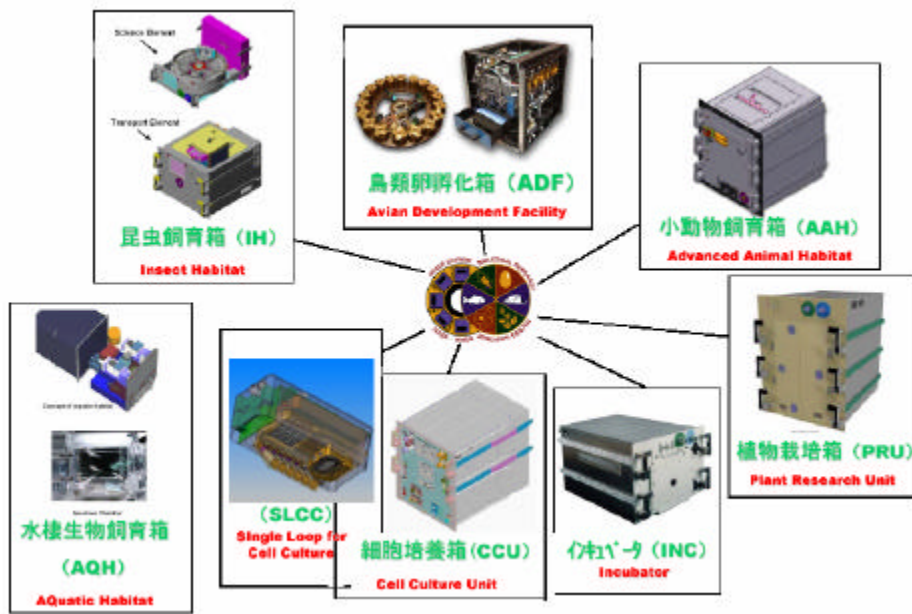


図 - 4 各種ハビタット (NASA、JAXA 提供)

特に、哺乳類の実験小動物、ラット・マウスを軌道上で微小重力ならびに人工重力の環境下で飼育できる機能を持つものがこれまでの宇宙実験装置には存在せず、このセントリフュージ施設が宇宙開発史上初になる予定であった。他の生物試料である植物個体、細胞や微生物、水棲生物、昆虫を用いて、軌道上で重力を負荷した実験も合わせて実施するのは他の ISS 搭載に予定された数種の生物装置で可能であるものの、これらと比較して群を抜いて大きい試料サイズのラット・マウスを対象に、同様の実験を可能とするのは本施設で初めて可能という仕様になっていた。そのために他の ISS 搭載セントリフュージ装置と比べ、著しくその回転半径に桁違いの大きさが要求されたものである。

CR (図 - 5)は各種ハビタットを搭載することにより、宇宙ステーション上の生物試料に対して選択可能な人工重力を提供するものである。軌道上で各種生物をそれぞれ専用のハビタットに収容した後、軌道上 1G 対照実験や重力閾値を求める低重力実験、あるいは 1G よりも大きな重力など、それぞれの実験目的に応じた人工重力を生物試料に負荷する用途に用いられる。定常的に回転するユニットである直径 2.5m の CR は、0.01 から 2G までの人工重力をつくることができる。重力の大きさは選択可能であるため、研究者は生物に異なった重力レベルがどのように影響するか比較し研究することが可能である。この特徴から、重力の効果を他の影響因子から差し引いて調べることができる。CR は ISS において最も大きな遠心機であり、最大 4つのハビタットを搭載した質量 1.2 トンのローターを最速 42rpm の回転数で連続回転し、軌道上で最長 90 日間、特定の人工重力環境に各種生物試料を曝露することが可能な仕様とされた。また、ISS 搭載の他の小型な遠心機と区別すべく、CR は 2.5m セントリフュージともしばしば表記された。

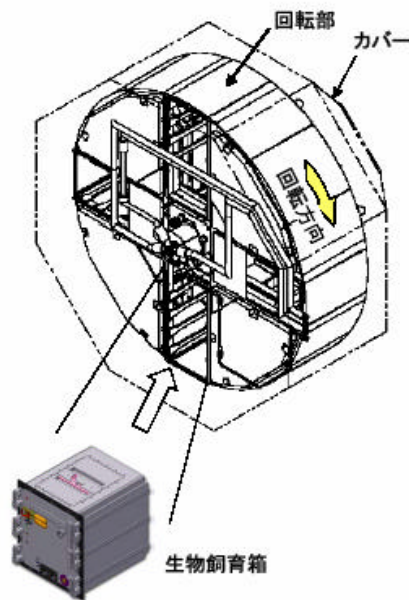


図 - 5 セントリフュージローター (CR) (JAXA 提供)

上で述べたように、各種ハビタットをCAM 内の CR 以外の部位に収納し、微小重力環境にて生物試料の飼育、培養あるいは栽培を可能とする装置がハビタット収納装置(HHR)である。

試薬、生物試料の保存や生物学実験に用いる器具類等の保管を目的とした冷凍冷蔵庫や保管庫もCAM 内に搭載されるものとされた。

CAM (図 - 6)は上記の諸装置を載せて、日本の Kibo や ESA のコロバス モジュール (Columbus Orbital Facility :欧州実験棟)等と共に ISS を構成する一要素、直径 4.4m、長さ 9.5m の寸法、約 10 トンの質量を持ったモジュールとして設計された。

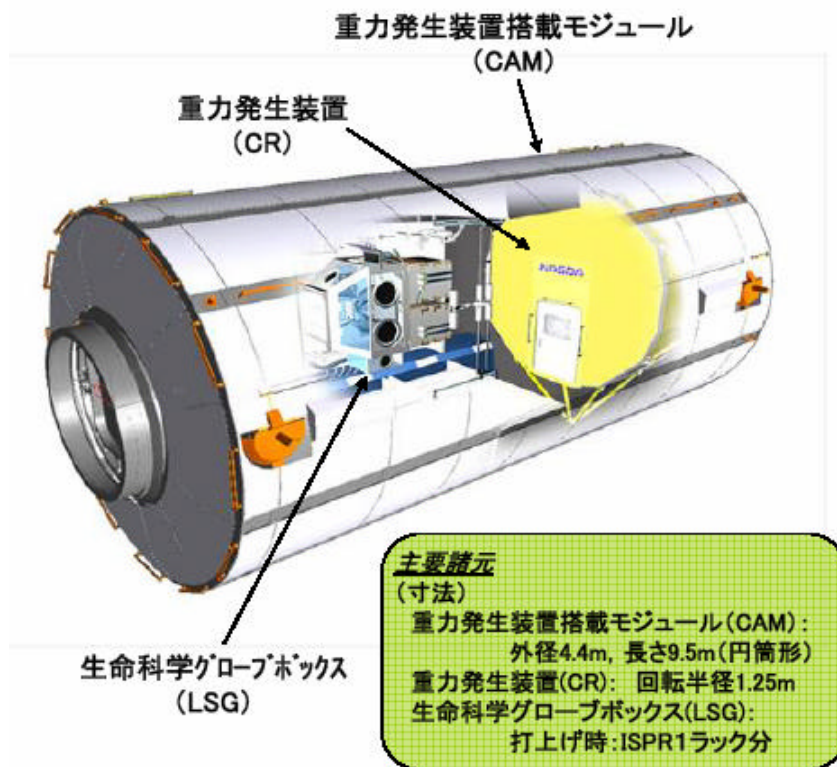


図 - 6 セントリフュージ搭載モジュール (CAM) (JAXA 提供)

3. セントリフュージ施設 (CF) の開発

3.1. JAXA による開発

NASA は ISS 計画初期段階の 1986 年当時から、セントリフュージ施設の開発構想を ARC を中心に進めてきた。その一方、予算の問題から開発段階へ速やかに移れずにきた経緯があった。そうした状況下、1997 年 9 月日本と NASA が協議し、日本がセントリフュージ施設の主要な 3 つの要素を開発し NASA に提供するという原則合意に達した。CAM は Kibo 船内実験室 (長さ 11.2m) とほぼ同じ寸法の大きさを持ち、NASDA の日本実験モジュール開発で培った経験や技

術を土台にし、さらにその上に積み上げる技術の進歩・蓄積が図れることも日本側が開発を担う大きな理由とされた。セントリフュージ施設の開発に係る要求仕様については、NASA/NASAで継続的に調整の上、詳細につめてゆくこととした。

年を明けた 1998 年から CR、LSG、CAM の具体的な開発が日本側で始められ、数多くの難度の高い要求、技術課題を克服してきた。しかしながら 2005 年 10 月、正式に NASA から開発の中止のレターを受け取り、開発未了の段階ながらプロジェクトを終了させた。JAXA の担当したセントリフュージ施設の開発計画スケジュール (2005 年 11 月現在) を図 - 7 に示す (図 - 7)。

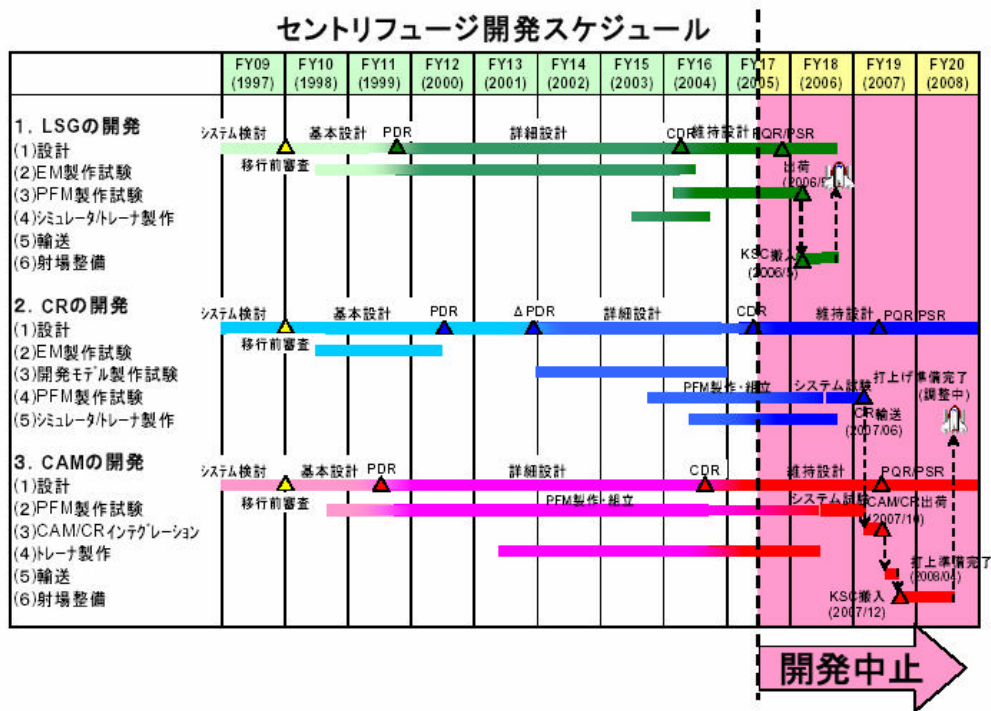


図 - 7 JAXA・セントリフュージ施設の開発スケジュール (2005 年 11 月時点)

3.1.1. CR の開発

CR の開発に特徴的で、高い難度の要求技術として以下のものがあつた。大きな質量を持つ (約 1.2 トン) 大型回転体を微小重力環境の有人モジュール内で安全に回し、安全にエネルギーを吸収して止めるための技術。回転機構を介して、環境制御に必要な冷却水を供給し、またデータ信号・ビデオ信号・電力を伝送する技術。微小重力環境を乱さないための振動絶縁技術および質量バランス制御技術。微小重力下、狭い与圧空間、限られたツールという制約のもとで大型ペイロートを修理・維持するために必要な人間工学設計技術などである。

2000年10月に行われた基本設計審査(Preliminary Design Review: PDR) の後、リソース(重量、電力、排熱、艙装スペース等)に係る技術要求の見直し統合が行われた結果、ハビタット数

の削減(8個から4個)などの設計変更や制約条件が見直され、ほぼ最終的な要求仕様に固まった。2002年3月にはデルタPDRが行われ、詳細設計に移行した。

CR は ISS エレメントの中で破格の大きな回転エネルギーを持つため、ISS 全体の安全に影響を与えないことを配慮して開発が進められた。具体的には、ローターが急停止した場合にローターや CAM/ISS 側に有害な荷重が発生し、構造を破壊することが想定されるため、確認された原因すべてに対して対策が施され、急停止に対する安全設計技術を獲得した。2002 年 6 月から 7 月に、CR の安全設計に関する国内の学識経験者による外部評価が行われ、2002 年 9 月の NASA の安全審査においてその技術が承認された。

2004年11月、構造の詳細設計審査(Critical Design Review: CDR)により、主構造のフライト品(Flight Model: FM)の製作試験に移行した。ハビタット支持構体等の製作が完了し、総合組立に入る前に中止するところとなった。

3.1.2. LSG の開発

LSG は、宇宙環境利用において最大 (450 リッター) のグローブボックスであり、二人の搭乗員が同時に操作可能な隔離作業空間を備えることが大きな開発要素であり、ラット・マウスなどの小動物や高等植物個体といった、宇宙実験では比較的大きな生物試料を対象として、解剖・播種・収穫などの処置の行えることが基本的な技術要求であった。

具体的に克服すべき課題として掲げられたのは、搭乗員の生活環境と生物試料の実験環境が互いに影響し合わないようするための隔離技術。隔離空間内の環境 (温度、風量、光度等) を正確に制御する技術。微小重力環境下における操作性・メンテナンス性を向上させる人間工学技術。スライド機構を利用した大型作業空間と支援機器の収納・艙装技術などであった。

1999年12月、基本設計審査を完了し、以後詳細設計に進んだ。2001年4月に開発モデル (EM)を用いて、NASAと共同による搭乗員審査(Crew Review)が行われ、人間工学的見地から操作性等に関する審査を経て、その結果を詳細設計に反映した。2004年8月にLSGに関する詳細設計審査が実施され、結果を受けてフライト品の製作試験に移行した。フライト品製作は完了し、一部の不具合処置を残すのみであり、システム試験の 6 - 7割完了時点で中止するところとなった。

3.1.3. CAM の開発

CAMの開発においては、日本のKiboの開発を通じて蓄積したインテグレーション技術を元に、たくさんの種類の大型の生物学実験装置と宇宙ステーション共通品とを構成品としたシステムインテグレーションを実施した。

CAM の開発当初は、基本的に JEM と同じ構造で全長だけを変更する設計であったため新規開発要素はないものとされ、1999 年 9 月に基本設計審査の後、詳細設計に移行した。しかしその後、当初の計画であった Bottle Ship 方式の CR 組込みが困難なことが判明したため、天頂部分を広口瓶構造に変更し、そこから CR を組込むこととした。これにより、予め組み立て試験され

たCRをそのままCAM内に組み込むことができるようになったが、この設計変更部分は新規開発となった。結果、ドーム変形時のシール性への影響等の調査、並びにドーム構造の工作性の確認が必要となり、それぞれシール開発試験とドーム工作試験が行われることとなった。2002年8月にはボルト結合ドームの基本設計審査、さらにボルト結合ドームの試作試験等を行い、2004年12月の詳細設計審査を経た後、ドームフライト品の製作試験に移行した。ボルト締めエンドドーム技術はシール実機試験を行って実証し、主構造製作はほぼ完了で、主構造試験及び艀装に入る前に中止するところとなった。

3.2. NASAによる他のCF構成要素の開発

改良型の哺乳類小動物飼育装置(AAH)(図-8)は2005年12月に詳細設計審査を経て、フライト品の製作試験に移行したが、2005年9月、開発の中止が決定された。別のハビタットである、高等植物の個体試料の栽培を目的とした植物研究ユニット(Plant Research Unit: PRU)もまた同月、開発の中止が決められた。

- ・ **モデル動物**
 - － ラット (最多6匹 / ハビタット)
- ・ **性能**
 - － 温度: $23^{\circ} - 31^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$
 - － 照明調節レベル 0-40ルクス
 - － 間歇的な日照サイクル
 - － NH_3 と CO_2 レベルのモニターと調節
 - － 2週間連続遠心可能
 - － 餌、水、糞の処理
 - － 動物のビデオによる観察
- ・ 2002年に科学検証ユニットを用いて成体雄ラットを対象に90日に及ぶ生物適合性試験を実施し、検証。



図 - 8 ISS 搭載用ラット飼育装置 (AAH) (NASA 提供)

4. ISS/CAM を用いた宇宙生物学実験

4.1. 生物試料

ISS/CAM で実験に供する生物試料として、哺乳類小動物個体 (高等哺乳類実験動物としてラット、マウスなどの齧歯類)、植物個体 (高等植物実験試料としてアラビドプシス、小麦、稲など宇宙実験用植物の中では比較的大型な植物個体)、ニワトリあるいはウズラの受精卵、水棲生物個体 (メダカ、ゼブラフィッシュなどの魚類や両生類、クラゲなどの水棲無脊椎動物個体、あるいは

各種水棲植物個体)、昆虫個体(高等無脊椎動物としてショウジョウバエ、コオロギ、蚕等の昆虫個体)、培養細胞や微生物等(多種多様な細胞試料)が計画されてきた。

4.2. 生物試料の地上・ISS 往還輸送シナリオ

生物試料の ISS への輸送は生命維持が比較的容易で、かつ打ち上げ重量を低く抑えられる状態で実施することが基本とされた。

植物は種子もしくは芽生えの状態で ISS へ搬入し、軌道上で発芽・栽培など生育実験を経て、地上に回収後研究実施に必要とされる結実種子試料の採取や器官、組織部位の調製、小分け、封入、化学固定などの試料確保の準備を行い、室温もしくは冷蔵冷凍保存して地上へ回収する。

水棲動物(魚類、両生類等)、昆虫は受精卵もしくは発生直後の状態で ISS へ搬入し、軌道上で発生・孵化・発育など飼育実験を経て、地上に回収後研究実施に必要とされる次世代受精卵試料の採取や、器官、組織部位の調製、小分け、封入、化学固定などの試料確保の準備を行い、室温もしくは冷蔵冷凍保存して地上へ回収する。

細胞、微生物は凍結保存もしくは生命維持要求の比較的少ない低温保存などの状態で ISS へ搬入し、軌道上で洗浄、播種、植え継ぎなど培養・継代実験を経て、地上に回収後研究実施に必要とされる試料の調製、小分け、封入、化学固定などの試料確保の準備を行い、室温もしくは冷蔵冷凍保存して地上へ回収する。

ニワトリあるいはウズラの受精卵は要求される温度条件などを確保した状態で ISS へ搬入し、軌道上で一定期間発育実験を経て、地上に回収後研究実施に必要とされる受精卵試料、あるいは器官、組織部位の調製、小分け、封入、化学固定などの試料確保の準備を行い、室温もしくは冷蔵冷凍保存して地上へ回収する。

上記の生物試料の地上から ISS への輸送時のリソース要求は比較的低いレベルで抑えられると考えられる。

一方、ラット・マウスを実験試料とした場合は搬入時にリソースの確保が要求されるという点で、上記の実験試料の場合とはシナリオが異なってくる。この場合は動物個体を Animal Enclosure Module (AEM) (図 - 9)等の電力供給が要求される小動物飼育装置に収容した状態で ISS へ搬入する必要がある。ISS へ移した後は AAH を用いた発育、交尾、妊娠、出産など飼育実験を経て、地上に回収後研究実施に必要とされる個体試料の解剖、器官、組織部位の調製、小分け、封入、化学固定などの試料確保の準備を行い、室温もしくは冷蔵冷凍保存して地上へ回収する。

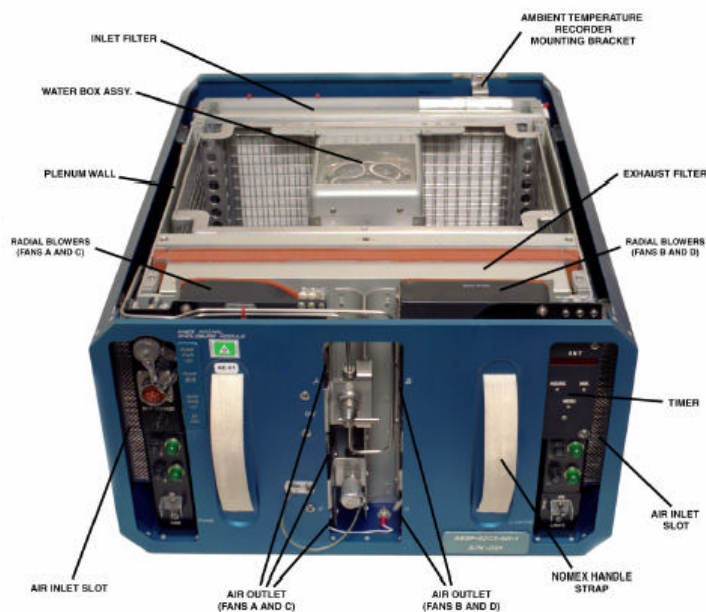


図 - 9 NASA スペースシャトル搭載用ラット飼育装置 (AEM)(NASA 提供)

また ISS/CAM/AAH の利用が開始するまでの期間においては、スペースシャトルのミッドデッキロッカー施設を利用して、微小重力実験のみの実験という条件付きの小動物実験ならば実施することが可能である。当施設は電力供給能力などを装備するため、ISS/CAM/AAH と比較すると実験期間も数週間程度とはるかに短くなるが、実際最大 12 匹のラットもしくは 24 匹のマウスの軌道上飼育実験を実施できる。

2004 年 9 月時点で NASA は、ISS/CAM/AAH 利用開始後の許容される試料回収重量は最大 5kg は確保できると見積っていた。さらに、ISS/CAM/AAH のラット等小動物を用いた研究プログラムは、たとえスペースシャトルが退役した後も、代わりとなる宇宙機が電力供給能を持つミッドデッキロッカー装置を備えるか、もしくは ESA/NASA で研究中のそれ自体で電力供給能のある動物輸送ユニットの開発・利用がされるならば実施可能であると述べていた。

4.3. ISS/CAM/AAH における哺乳類小動物実験の必要性

特定の因子がヒトの寿命に及ぼした効果を事実確認するには、注目する特定因子の負荷が開始されてからそのヒトの寿命が尽きるまで待たねばならない。その場合、調査研究の成果を上げるまでの期間は概ね数十年は要し、かつ死亡をもたらした原因を特定するため疫学的アプローチをとる場合、三桁四桁に及ぶ数の試料数の確保が必要となる。一方、論理は別として、実際人道上、医学の福祉的目的の観点から、健康を損ね寿命を短くするような処置を被験者に及ぼすことは改めて述べるまでもなく、現実にはまったく許されない。

宇宙開発の現場においては、宇宙環境が宇宙飛行士に及ぼす寿命への効果(発ガンリスクの

増大や老化促進)を実際のデータとして取得するには、その人の残された寿命を経た後のおそらく数十年にもわたる期間を要することとなるが、一方、寿命のはるかに短い小動物をモデルとして扱えるならば、比較的短期間でその過程を科学的検証することが可能となる。

結果を得るのに要する期間の長短のみならず要求される試料数の点から言っても、上記の方法論は科学的結論をできるだけ迅速にかつ確実に得ることを目的とした場合、最善のアプローチとは言いがたい。哺乳類は進化の結果、非常に多様化し現在地球上での繁栄を極めた生物種となったため、それぞれ一見姿形が大きく異なったものになっているが、哺乳類間での DNA 上の距離は他の動植物と比較すれば圧倒的に相互に近く、ほぼ同類と言えるほど多くの生理学的特徴を共通して持っている。一方、本川達雄著による『ゾウの時間 ネズミの時間』において紹介されているように、同じ哺乳類でも種別の大きさの違いに従って寿命の長さはまた大きく異なっている。小動物ラットやマウスが実験動物として久しく用いられてきたのはヒトと同様の生理学的特徴を持ちつつ、かつはるかに寿命の短いこともその理由として上げられる。それに加えて、実験動物として極めて個体差の小さい試料群が得やすいこと、さらに影響の有無、影響効果の程度を正確に判別することが科学実験において必須であるが、その手法である統計学的処理に十分なほどの数の試料数も容易に確保できることがその上トランスジェニックマウスやノックアウトマウスなど、特定の遺伝子の導入や欠損した実験動物が作製され、各種病態や重要な生化学的機序の解明に多用されている点も有利性を示す要因として上げられる。特に遺伝子組換え動物の利用は、宇宙医学研究の進歩の確実性を高めるために欠かすことのできない実験手法を提供するものと言える。また、ヒトを実際のな実験対象として扱えず他に代案がない場合、医学発展のために動物実験ならば実施するのモ許容されるところとなり、そのおかげで取得されたデータからヒトを対象とする医学研究に根本的な方向性を与えることが可能となる。実際それは地上のこれまでの長い歴史を持つ生物学研究、基礎医学研究において営々として行われてきたものであり、実際これに替わる研究手法はないと言える。

宇宙環境利用においても、数年に渡る有人火星ミッションの事前検証を行ってそれを実際に達成するために必要な科学的データを取得するには、低地球軌道環境における哺乳類小動物を用いた本手法の実験実施を欠かすことができないものである。さらに軌道上で動物の解剖を行うことにより、地上とは様相が異なることが判明している微小重力下における飛行士への外科的処置、その技術を高めることに繋がるとも考えられる。低地球軌道上の生物学実験施設を用意し、そこで始めて利用可能となる微小重力あるいは人工環境下での哺乳類動物実験、その実施の必要性ゆえ、世界中の宇宙生物学研究者はこれまでくいかえし ISS/CAM/AAH の利用を強く要望し、2004 年 1 月の新宇宙政策が掲げられるまでは、NASA においても特にそれらセントリフュージ施設が予算を振り分けても開発が進められてきた訳である。

4.4. ISS/CAM 利用軌道上実験

4.4.1. 軌道上 1G 未満・低重力実験 (主に重力閾値実験)

地上では 1G より小さな範囲の重力環境を、数ヶ月におよぶ長期間、安定的に作り出すことは

現実的に不可能である。一方、CR は他の ISS 搭載遠心機同様、長期間にわたって特別な重力環境を生物学研究に提供することを可能とするが、これが認められてきた大きな価値の一つである。

21 世紀の幕が開け、ガガーリン以来宇宙へ人が旅立つようになってすでに 40 有余年経過したが、微小重力の作用によって人に起こる生理学的反応とそのメカニズムについて科学的に証明されていない点が依然として数多く残っている。今世紀には達成されると期待される有人火星ミッション計画を現実のものとして実際に軌道に乗せるためには、宇宙飛行デコンディショニング (spaceflight deconditioning) と呼ばれる宇宙環境の状態下で搭乗員に生じる、様々な生理学的諸問題 (宇宙酔い、骨や筋肉の減少、心循環器系動態の変化、免疫力の低下など) を事前に解決する手段を見つけ出しておかなければならない。その達成される見込みが立って初めて、有人火星ミッション計画が具体化に向かって動き出すこととなる。本目的の実現のためにも利用できるものとして企画されたものこそ、ISS における生物学研究の中核施設と位置づけられたセントリフュージ施設と言える。AAH を搭載して、ヒトの個体モデルとした哺乳類実験動物を、微小重力、低重力のそれぞれの環境で長期間飼育し、微小重力環境長期被曝に伴って生じる骨や筋肉等の萎縮の進行を抑制する人工重力の必要最低限な大きさや作用頻度、作用時間など、基礎データが取得される予定となっていた。それらのデータが揃って初めて、有人火星宇宙船に要求される人工重力の作用条件の具体的検討を開始できるからである (図 - 10)。

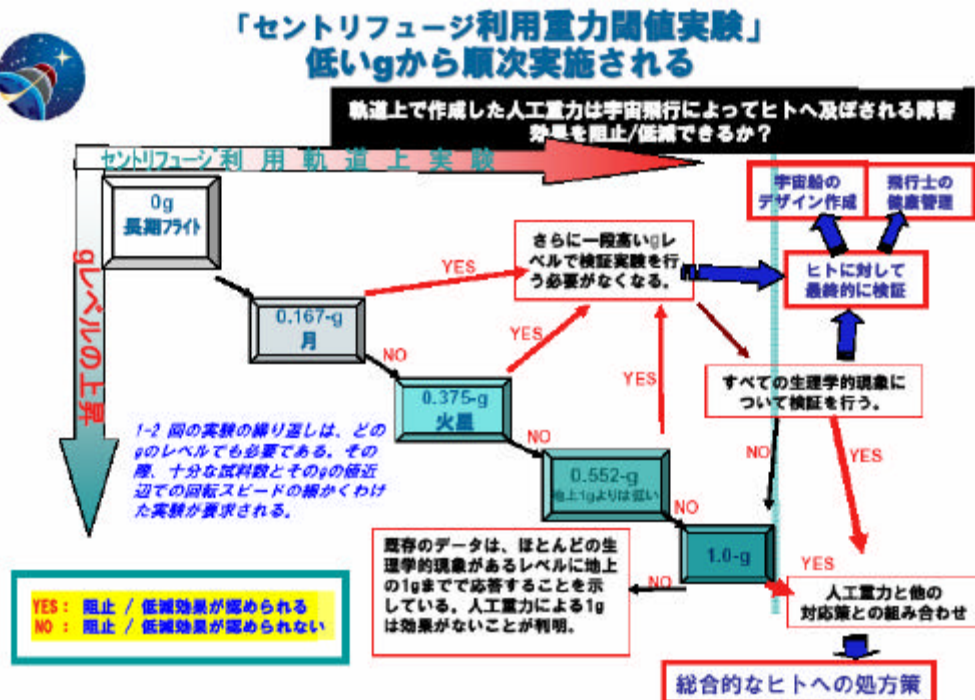


図 - 10 セントリフュージ施設の重力閾値実験の流れ

人工的に作成する遠心力 (重力) の大きさは半径の長さ、回転数の二乗に比例する。過去の研究結果、ヒトのヒューマンファクターや生理学的効果の見地から、回転数を 4rpm 以上にあげることは不適切とされ、結果として 4rpm を最も高い回転数として維持した上で求める G 環境に対応して回転半径を変える方法が推奨されている (46, 47)。1G を 4rpm で人工的に作成する場合、回転半径は ~ 56m で、それは当然、宇宙船全体の長さに影響を及ぼし、全長は ~ 130m もしくはそれ以上となる。一方、3/8G(火星の重力) を 4rpm で人工的に作成する場合、回転半径は ~ 22m、全長は ~ 64m で足りる。人工重力の要求されるレベルが大きくなるほど、トラスは大きな構造重量となり、それを支えるための強度もまたより強く、電気ケーブルの重量も増え、居住区モジュールの重量もその高い G を支えるために増大し、結果、機体や燃料の重量もかさみ、すなわち莫大な開発予算がさらに天文学的な数字にまで増大することとなる。このように、有人火星飛行用に開発される宇宙機の基本的な設計情報を提供することが可能となる等、長期有人宇宙ミッション立案の基礎データをもたらすため、生物学的見地に立って多様な重力閾値を明らかにできる理由から、ISS/CAM/AAH で哺乳類小動物実験が優先度高く実施されると考えられてきた (9, 20)。

さらに微細に補足すれば、宇宙飛行デコンディショニングの対策を講ずるための基礎データ取得には、動物実験のみならず細胞実験等によって分子レベルでの検索も合わせて行うことが要求される。その状況を確保するため、人工重力を負荷する試料群と微小重力群と合わせて行う細胞実験も、先に 2. で述べたように ISS/CAM/CCU の施設を用いて実施される予定で進められてきた。

同様に上記課題に伴って、数年に及ぶ有人火星ミッションの期間中の食料源の植物や魚類の栽培・飼育を想定して、惑星間飛行中にそれら試料に人工重力をどの程度のレベル、頻度、時間間隔で与えれば、十分量の収穫や繁殖が可能となるか、それもまた明らかにする研究も ISS/CAM/PRU、ISS/CAM/AQH 運用の中で実施することが可能であった。

さらに月や火星など、地球上よりも小さい重力環境に生物が長期間曝された場合、発生の段階から成長、分化、加齢、老化、個体の生殖、妊娠、発生をくり返して世代から次の世代へと経るに従い、生物がどのようにそれら従来と異なる重力環境に応答し、地球上では見られなかった新たな形質を獲得してゆくのか、適応の過程について実験検証が可能になっていたと言える。ちなみに、宇宙生物学分野では近年、重力が生物を形作るという概念を、"Gravity shapes life" としばしば表現されるようになっている。上記目的の実験例として、動物個体や心臓や骨、脳等の器官培養を月や火星と同等の重力環境にて行う研究もあげられ、先に述べたヒトの各組織への重力閾値の解明に続き、実験要望の出されることが想定された。すなわち、将来、ヒトを中心とした地球の生物圏の活動範囲を地球から太陽系の他の衛星や惑星へ拡大するには予めこれらデータを蓄積しておくことが必須、大前提であり、ISS/CAM の開発・運用はこれら重要な本格的宇宙生物学研究の前哨点確保と位置づけられるものであった。

4.4.2.軌道上 1G 対照実験 *

対照実験* (control) : 特定の実験系において、注目する変数や因子、操作等の変化に伴い生じる効果を明らかにする場合、対象とする変数や因子、操作以外の条件については本実験と同様な実験を行う 比較の基準作りが一般的に必要である。生物学実験では対象とする試料が生物など複雑系を扱う場合が一般的であるために、特に対照実験の存在が実験実施の前提、その存在が必ず何らかの形で必須のものとされてきた。基準作りのための実験を対照実験、または単に対照 (コントロール) と呼ぶ。注目する因子の変化を含む、条件を完全に包含した群を実験群(experimental group)、対照テストを施した群を対照群(control group)とそれぞれ呼称する。生物学の分野では、“対照なくして実験なし”の言葉もあるように、対照実験がどれほど適切、精密に行われたか、そのレベルによって実験の持つ科学的価値が定まると言えるほど、すなわち実験成果を左右するのは対照実験の質に大きく依存するものである。

軌道上環境の生物に及ぼす影響因子には大きく分けて二つあり、一つが微小重力、もう一つが宇宙放射線である。ISS において、CR を軌道上 1G 対照実験の目的に用いることにより HHR に搭載された試料の受けた影響の中で、地上に置かれた試料と比べた際の微小重力のみによる生物試料への影響を科学的厳密性をもって正確に見積もることが可能となる。また地上 1G 対照実験と CR での軌道上 1G 対照実験の両者から得られた結果を比較することにより、微小重力以外の軌道上環境因子、すなわちその主要な要素となる宇宙放射線 (厳密にはそれに加えて、宇宙実験に特徴的な付帯環境[地上での運搬、打ち上げ、保存、回収など]、地球周辺変動磁場環境を合わせた軌道上環境因子などを合わせたもの)が生物試料に与えた影響を差し引き見積もることが可能となる。

ISS には CR に加え、ESA の Biolab や JAXA の Cell Biology Experiment Facility(CBEF) 等、生物実験装置自体に遠心機を装備し、培養細胞や小型植物個体試料等を軌道上 1G 対照実験に供する機能を持つ ISS ライフサイエンス実験装置もまた存在するが、遠心機の半径長の大きな違いから、CR を用いればより質の高いコントロール実験が実施できる。また ISS/CAM の他にはない唯一の特徴として、それら小さな生物試料の他、上記に述べたように哺乳類個体や、比較的大きな高等植物個体、水棲生物など多種多様な生物試料に対して、全く同一の条件による軌道上 1G 対照実験の実現を可能とした点があげられる。生物学研究では生物の個体まるごとを用いる in vivo 実験と、細胞等生命体の一つの構成要素を実験対象とする in vitro 実験の両者から得られる知見を重ね合わせ、それによって初めて分子から個体レベルまでの現象を包含したトータルの生命現象の解明に向かえることとなる。ISS/CAM は、この実験手法双方に対して同一な実験環境を提供可能としたことも特記されるものであった。

4.4.3. 軌道上 2G 以下過重実験

1G より大きい加速度環境ならば地上でも遠心機を利用して当然作成可能であるが、2G までなら CR において設定できる仕様になっていた。例えば 2 G など、地上と軌道上共に遠心機による同一の加速度環境に生物試料を置いて、それぞれの生物試料がこの範囲の特定の重力環境

に曝露されて生じた応答を比較することにより、軌道上環境のうち微小重力を除く環境因子（主に宇宙放射線）の生物に与える影響を、地上 1G と軌道上 1G の両者を比較する場合よりもさらにもっと正確・厳密に見積もれることになる。それは地上 1 G実験と軌道上 1G 実験について、共に 1G という同一の名称を冠するものの、実際は前者が地上で静置されているのに対し、後者は遠心機の中で回転し続ける環境にあるという大きな違いを含むためである。両者の実験環境はコリオリの力や振動、騒音の有無等、物理的実験環境に実際はまだ隔たりを持つものである。つまり、2 Gで共に回すなど、1 G同士の場合と比べて、両者の条件をより揃えることができれば、得られた実験結果はさらに厳密に正しいデータを提供するものとなる。

宇宙滞在期間が半年から数年と長期になればなるほど、宇宙飛行士に与える生物学影響として宇宙放射線による作用がより大きな割合を占めてゆく。宇宙放射線生物学分野の観点からは ISS/CAM の活用により、宇宙放射線と微小重力が共に生物に加えられた場合、細胞レベルから個体レベルの各階層にわたって両者の作用に相乗効果が見られるのか否か、依然として未解決のこの問題を精査可能とする厳密な実験条件も選択可能となっていた。人類が近い将来に宇宙ステーション長期滞在や火星への有人ミッション等、長期間宇宙環境に曝された場合、放射線発ガンが地上において被曝する場合よりも促進されるのか否か、あるいは脳など中枢組織へ重篤な影響を及ぼすことが見積もられている宇宙放射線、特に重粒子線による影響調査を行うため、さらにはそれらに対する対策を講じるために、欠くことのできない軌道上研究施設として活用されるものと期待されていた。

5. 日本宇宙生物学コミュニティによる 2.5m-セントリフュージ施設計画に対する活動

・セントリフュージ計画の継続要望とセントリフュージシンポジウムの継続的開催・

日本宇宙生物科学会 (JSBSS) や米国宇宙生物学研究者、米国宇宙生物学サイエンスコミュニティによる要望書提出は、NASDA(JAXA) セントリフュージプロジェクトチーム科学担当と JSBSS 事務局との調整、一致協力の下、企画立案・草案作成を行い、JSBSS 事務局からコミュニティ内の賛同の取得、あるいは米国研究者、米国サイエンスコミュニティへの要請作業によって実現されたものである。

日本宇宙生物科学会大会・セントリフュージシンポジウムの開催は、NASDA(JAXA) セントリフュージプロジェクトチーム科学担当と JSBSS 事務局との調整、一致協力の下、企画の立案・ゲストスピーカーの招聘を行い、さらに年会を主催した大会長の承認・賛同を得て、開催・運営されたものである。

2001 年 9 月 29 日、第 15 回日本宇宙生物科学会大会において、「国際宇宙ステーション大型セントリフュージ実験計画要望シンポジウム」が開催された。これは同年 3 月以来、セントリフュージ計画の縮小変更および完成の遅れが見込まれること、ならびに NASA の ISS での研究活動の大幅な縮小へ向けた計画見直しの可能性を示す報道 (48) がなされてきたことに起因し、NASDA セントリフュージプロジェクトチームはそれを深く憂慮し、JSBSS 及び米国の研究者、米国サイエンスコミュニティに働きかけて、JSBSS から 6 月に NASA プログラムマネージャー Tommy

W. Holoway 氏へ、8 月に宇宙開発事業団 (NASDA) 理事長へ計画の再度見直しを要望する趣旨の陳情書を送付した。加えて米国研究者、科学コミュニティからの要望書の提出も依頼し、それぞれから要望書の送付が実施された。この流れから、NASDA の開発担当部局から開発計画の現状、今後の予定などに関する最新の情報提供を行い、セントリフュージ施設の宇宙生物学における重要性を改めて国内研究者コミュニティの外へ訴えることを目的に急遽、日本宇宙生物学会大会の緊急シンポジウムとして開催される運びとなった。しかしながら、予定した内容の豊富さに比べ、確保できた時間の短さから、実際は NASDA からの報告のみでシンポジウムは終了を余儀なくされ、よって時間の関係で登壇できなかった人を含むスピーカー予定者すべての者から、それら内容を執筆記事として改めて寄稿することで会の総括とした。その『ISS・セントリフュージの特集』が『宇宙生物科学』Vol.15 No.3 (November, 2001)に掲載されている。

2002 年 11 月 8 日、第 16 回日本宇宙生物学会大会において、セントリフュージ施設利用宇宙実験に関するシンポジウム(国際宇宙ステーションを利用する生物科学実験の現状と将来 ? Complex Organisms Biology を中心として? STS-107 Deputy Mission Scientist 向井千秋宇宙飛行士に学ぶ)を開催した。これは 2001 年 11 月 21 日に JSBSS から NASA 諮問評議会 (NAC) へセントリフュージ施設開発を要望する書簡を送付し、2002 年 7 月 10 日の REMAP 勧告の発表、JSBSS から文部科学省、NAC へセントリフュージ施設開発を要望する書簡を送付した流れを受け、さらに向井千秋宇宙飛行士の本シンポジウム開催の趣旨に対する賛同・参加協力を経て開催できたものである。

2003 年は、NASA の独立評価組織である REMAP (ISS 科学優先検討委員会) の委員の一人、生理学・医学ノーベル賞受賞研究者 Richard J. Roberts 博士を日本へ NASDA による渡航資金提供の下に招聘し、JSBSS-NASDA 共同開催のサテライトシンポジウムとして、一般公開形式の形でより幅広い国民層を対象にセントリフュージ施設の重要性を訴え、開発の順調な継続を要望する方向で準備が進められた。JSBSS 事務局及び JSBSS 企画担当との調整・了承を経て、米国からスピーカーを招聘する用意が整い、最終合意を得る直前に開催準備作業が中断された。

2004 年、NASA ARC より NASA 側のサイエンス担当者を JAXA からの資金供与なしで JSBSS 大会におけるセントリフュージシンポジウムのスピーカーとして訪日されることを望む旨、NASA ARC へ非公式に依頼したところ幸いにも快諾を受け、NASA からのスピーカーを迎えたセントリフュージシンポジウム開催の目安が立てられることとなった。実際、NASA 側に要望した Kenneth A. Souza 氏 (NASA, ARC, Life Science Division) をスピーカーとして迎えられることが実現し、同年 9 月 30 日、第 18 回日本宇宙生物学会大会において、セントリフュージ施設開発の現状と今後の展望に関して、NASA ARC サイエンス担当部局と日本国内ユーザーコミュニティとの情報共有、意見交換を目的にしたシンポジウム『宇宙ステーションセントリフュージの現状とゴール』の開催が実現できた。

2005 年 4 月 7 日付けで、JSBSS から NASA 次期長官 Griffin 氏宛に、セントリフュージ施設継続の要望書を送付した。これは同年 3 月頃より、頻繁に国際宇宙ステーションの縮小計画が NASA において検討中で、特にセントリフュージ施設が建設中止の有力な候補である趣旨の報

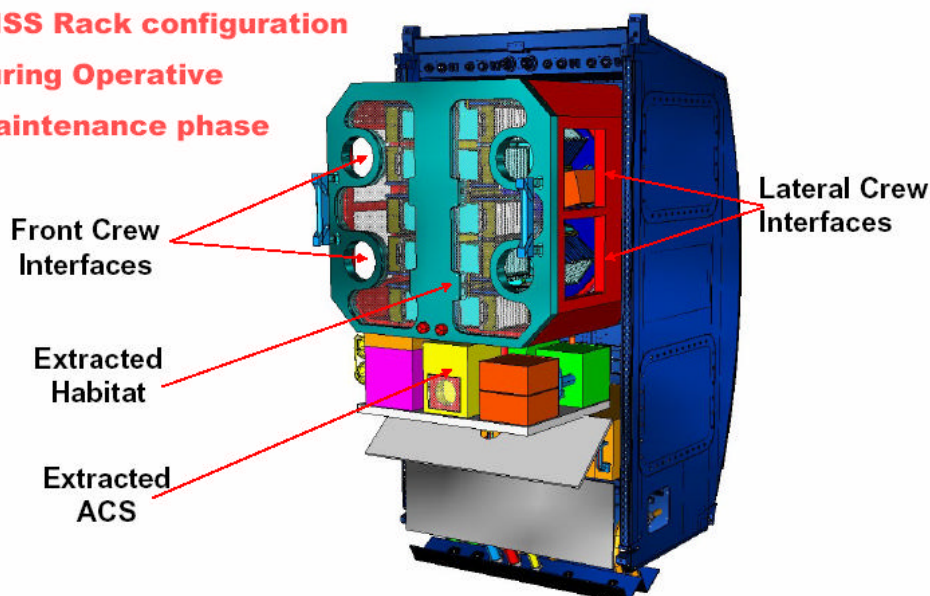
道がなされてきたためであり、3 月には米国重力生物学会 (ASGSB) がその進展を危惧する声明、記事が発表された (10) ことを受けて、ASGSB による働きかけを支持するために行われた。

2005 年 9 月 6 日付けで、JSBSS は日本宇宙航空環境医学会および米国 Exploration Life and Medical Sciences (ELMS) Coalition と共同して NASA 長官 Griffin 氏宛に要請文を改めて送付した (21)。これは ISS に設置が計画されてきた大型セントリフュージに搭載する小動物実験装置 (AAH) について、同年 8 月 12 日に米国での開発の停止が報道されたことを受けたものであった (49)。

6. CAM/AAH 後継施設の開発動向ならびにそれへ向けた日本宇宙生物学研究者コミュニティの活動

ESA は 2005 年 7 月、他の ISS 国際パートナーである NASA、RSA、JAXA に対して、ISS/CAM/AAH (ラット用) の機能をほぼ継承した ISS 搭載用マウス実験装置、「Mice on International Space Station: MISS (図 - 11, 12)」の開発構想を持ち、基本的な設計までの検討を済ませつつあることを明らかにした (50)。ESA は欧州の宇宙生物学科学者から提出された、その種の装置利用による実験計画の高い質・量に裏打ちされて、それに応えるべく検討を進めてきたものであった。MISS は微小重力、1G までの人工重力 (直径 80cm のローターを搭載) を複数のマウスに負荷できる ISS 搭載用・長期飼育装置であるが、国際間の調整を経た後、今後 ISS への物資等の補給がどれくらいの規模、間隔で実際に確保できるかといった点の不透明さなどから、当面その開発は一旦棚上げする方向へシフトしてきている。

MISS Rack configuration during Operative maintenance phase



図—1 1 MISS 概観 (ESA 提供)

Habitat

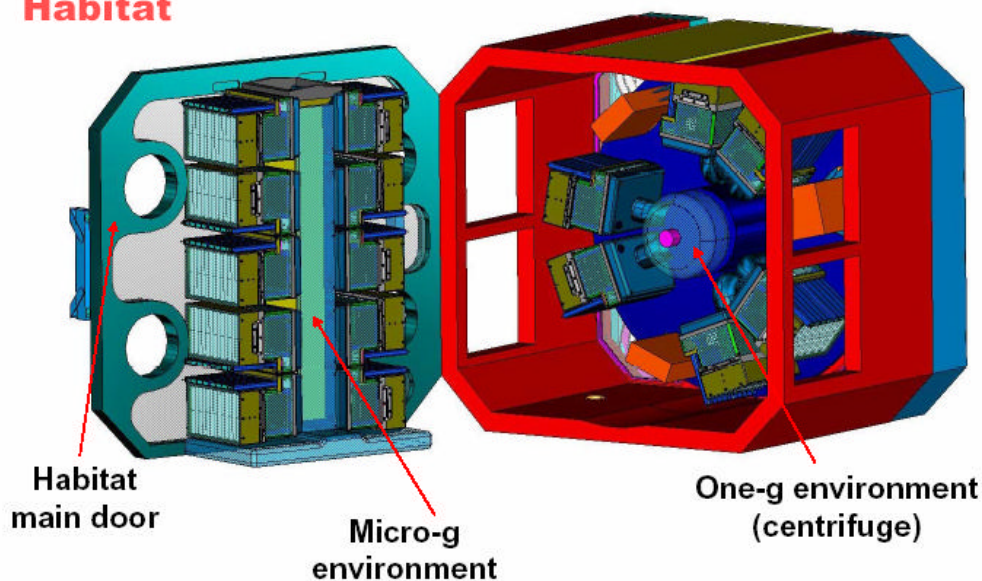


図 - 1 2 MISS ハビタット部分 (ESA 提供)

2005 年 8 月、わが国の ISS セントリフュージ施設を用いた哺乳類小動物実験研究を希求してきた研究者たちがまず結集し、ISS/CAM/AAH を用いた場合を想定した世界に冠たる独創的な研究計画を日本内から作成、発信してゆくことをもって 2.5m-セントリフュージ施設と同等な ISS 施設（上記、MISS に相当）の開発・利用の促進を国内外に働きかけてゆくためのコアとなるべく、具体的な活動を開始した。2005 年、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部による 2005 年度宇宙環境利用科学委員会研究班ワーキンググループ（WG）に応募、採択された「哺乳類小動物を用いた宇宙生物学実験研究班 WG」がそれである。その今後の動向、提出される研究計画、研究班 W/G の活動進展が注目される。

7. おわりに

ISS/CAM は、すべての ISS 国際パートナーに開かれた低地球軌道生物学研究所として、哺乳類動物や細胞等を試料として用いた、低重力等の人工重力ならびに微小重力下での革新的な研究環境を提供し、得られた成果は火星等を目指す有人宇宙開発、及び地上における人々の健康の維持や増進、医学の発展に寄与するものと期待されていた。

CAM は昨年 10 月に開発中止が決定されたが、世界中の宇宙生物科学者は今後とも同様の実験研究を可能とする施設の開発、利用を求めてゆく活動、それに向けた意欲は普遍であり、実際すでに ESA の同等の機能を持つ新規装置の開発構想や日本の研究者らの新たな活動において、具体的な形を見せつつある。それを支え、研究と開発を一体化した推進は今後とも世界の

宇宙開発に携わる者たちが担わなければならない大きな責務であり、使命である。なぜなら、いつの日か人を火星に送り、小さな赤い惑星を第二の地球に変えつつ新たな人間社会を構築して行きたいという尽きせぬ衝動は、生息域の拡大を機会あるごとに求める生物というものの本態、基本システムに根ざしたものであり、さらにはその基盤の上に築かれた他の生物種にはない特別な好奇心と、さらなる地平、フロンティアを切り開く資質を私たちホモサピエンスが持ち続ける限り、明日もまた人々はその彼方を望み、大航海の果てを夢見てゆくことを止めないからである。

実際、21世紀の幕が開けて数年、宇宙への大航海時代はようやくその端緒についたばかりである。

8. 参考資料

- (1) 02/06/05
NASA budget supports up to 17 shuttle flights; agency still hopeful about May launch
<http://www.cbsnews.com/network/news/space/current.html>
- (2) 15 October 2003
China Launches Its First Piloted Spaceflight
http://www.space.com/missionlaunches/shenzhou5_launch_031014.html
- (3) 2003-11-05
中国、3年以内に月探査活動実現へ
http://www.spaceref.co.jp/news/3Wed/2003_11_05moon.htm
- (4) Feb 14, 2004
China plans to go to the moon on a shoestring
<http://www.spacedaily.com/2004/040214013031.484qrnh8.html>
- (5) January 14, 2004
President Bush Delivers Remarks On U.S. Space Policy
http://www.nasa.gov/pdf/54868main_bush_trans.pdf
- (6) 2001
Readiness Issues Related to Research in the Biological and Physical Sciences on the International Space Station
<http://www7.nationalacademies.org/ssb/tgriss01report.pdf>
- (7) Wed, 7 Sep 2005
NASA Exploration Systems Architecture Study: 28 Flight (Rev. G) ISS Assembly Sequence vs. 16 Flight Assembly Sequence
<http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=17990>
- (8) November 1, 2001
Report by the International Space Station (ISS) Management and Cost Evaluation (IMCE) Task Force
<http://history.nasa.gov/youngrep.pdf>
- (9) July 2002
Report by the NASA Biological and Physical Research Research Maximization And Prioritization (REMAP) Task Force to the NASA Advisory Council
Executive Summary
<http://www.eisenhowerinstitute.org/programs/globalpartnerships/fos/usrussianspace/remapreport.pdf>

- (10) March 4, 2004
Former astronaut Glenn criticizes Bush space plan
<http://edition.cnn.com/2004/TECH/space/03/04/glenn.space.reut/index.html>
- (11) June 23, 2005
Report Warns of Challenges to U.S. Leadership in Space
<http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=17213>
- (12) Tue, 12 Jul 2005
American Astronomical Society Issues a Statement on the Role of Science in the Vision for Space Exploration
<http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=17398>
- (13) Tue, 20 Sep 2005
NASA Revives Apollo - While Starving Space Life Science
<http://www.spaceref.com/news/viewnews.html?id=1066>
- (14) Wed, Sep. 28, 2005
NASA/Ames ending contracts with 400 scientists
<http://www.siliconvalley.com/mld/siliconvalley/12763469.htm>
- (15) March 16, 2005
ASGSB Governing Board Visits Capitol Hill in March to Share the ASGSB Message
<http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=16406>
- (16) Spring 2005
Newsletter of the ASGSB Volume 21, Number 2
http://asgsb.indstate.edu/newsletter/v21_2/v21n2-spring05.pdf
- (17) 15 June 2005
Life Science Community Organizes to Fight Cuts
<http://images.spaceref.com/news/2005/Shank.ELMS.pdf>
- (18) Fri, 9 Sep 2005
Space Life Science Community Organizes to Halt Cuts
<http://www.elmscoalition.org/>
- (19) March 09, 2005
Going To Mars In Earth Orbit
<http://www.spacedaily.com/news/mars-future-05e.html>
- (20) April 12-16, 2004
Meeting Report: Animal Research in Support of Human Space Exploration
<http://www.mbl.edu/CASSLS/arshe.pdf>
- (21) Fri, 9 Sep 2005
Support the joint letter from Japanese space life sciences community and ELMS to NASA Administrator
http://www.elmscoalition.org/issues/action_griffin.php
- (22) 17 February 2004
New Spaceship Planned, Russian Space Chief Says
http://www.space.com/missionlaunches/russia-soyuz_040217.html
- (23) Oct 14, 2005
Tokyo Shortly To Decide On Participation In Russian Kliper Project
<http://www.spacedaily.com/news/spacetravel-05zzzu.html>
- (24) 10 June 2005
ESA Director Genereal Jean-Jacques Dordain met with Anatoly Perminov, Head of the Federal Space Agency
http://www.esa.int/SPECIALS/ESA_Permanent_Mission_in_Russia/SEM8MF1DU8E_0.html

- (25) 6 Jul 2005
Europe envisages cooperation on new Russian space plane
<http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=17336>
- (26) 24 Aug 2005
Russian Clipper Ship Draws European Interest
http://www.space.com/news/050824_clipper.html
- (27) Dec. 9, 2005
Europe to help finance new Russian spaceship
Space Agency chief confident he can win support for reusable craft
<http://msnbc.msn.com/id/10395639/?from=RS.2>
- (28) 11 Dec 2005
Europe Keen To Join Russia In New Spaceship Project: Officials
<http://www.spacedaily.com/news/spacetravel-05zzzzl.html>
- (29) 16 Dec 2005
NASA Commercial Orbital Transportation Services (COTS) Demonstrations -Draft
Announcement Briefing Charts 5 Dec 2005
<http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=18995>
- (30) Mon, 9 Jan 2006
NASA Special Announcement For Commercial Orbital Transportation Services
<http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=19204>
- (31) 20 Jan 2006
NASA Seeks Proposals For Crew And Cargo Transportation To Orbit
http://www.spacedaily.com/reports/NASA_Seeks_Proposals_For_Crew_And_Cargo_Transportation_To_Orbit.html
- (32) Jan 23, 2006
Spacehab Enters Race For Commercial Space Station Supply Work
http://www.space-travel.com/reports/Spacehab_Enters_Race_For_Commercial_Space_Station_Supply_Work.html
- (33) January 24, 2006
NASA Looking To Break New Ground With Crew And Cargo Transport Request
http://www.spacedaily.com/reports/NASA_Looking_To_Break_New_Ground_With_Crew_And_Cargo_Transport_Request.html
- (34) 16 Jan 2006
Space Station Problems Show Need For More Launchers: ESA
http://www.spacedaily.com/news/Space_Station_Problems_Show_Need_For_More_Launchers_ESA.html
- (35) 25 Jan 2006
Russia's Kliper Shuttle To Be Launched In 2015
http://www.spacedaily.com/reports/Russias_Kliper_Shuttle_To_Be_Launched_In_2015.html
- (36) 31 Jan 2006
Russia Hopes To Launch Reusable Spacecraft In 2012
http://www.spacedaily.com/reports/Russia_Hopes_To_Launch_Reusable_Spacecraft_In_2012.html
- (37) 23 Aug 2005
Russia Invites China's 1st Spaceman To Moon Flight
<http://www.spacedaily.com/news/china-05zzzzzzf.html>

- (38)2004 年 8 月 26 日
海外宇宙航空速報 **「ロシアと中国、政府間協議の準備のため宇宙協力分科会を開催」**
http://srad2.m.tksc.in-jaxa/sradscript/in2ap.php?url=http://srad2.m.tksc.in-jaxa/sraddata/UK/200408_0162.xml
- (39)31 Oct 2005
Russia, China Propose Joint Missions To Explore Mars & The Moon
<http://www.spacedaily.com/news/spacetravel-05zzzz.html>
- (40)2005-11-02
中露宇宙開発 :首相会談 '有人月面着陸協力' 議題に
http://www.spaceref.co.jp/news/3Wed/2005_11_02moon.html
- (41)6 Nov 2005
Russia To Boost Oil Shipments To China, Collaborate On Space Exploration
<http://www.spacedaily.com/news/china-05zzzzzzzzzy.html>
- (42)8 Nov 2005
Russia To Assist China's Lunar Research Program
<http://www.spacedaily.com/news/lunar-05zzq.html>
- (43)5 Oct 2005
U.S. Experts Fear Russia-China Axis
<http://www.spacewar.com/news/superpowers-05o.html>
- (44)Dec. 8, 2005
China as an ISS Partner?
Hutchison: U.S. should attempt to finish building space station, Houston Chronicle
<http://www.chron.com/disp/story.mpl/space/3510547.html>
- (45)2006/1/23
FujiSankei Business i. **「中国 / 胡主席の4月訪米の議題 宇宙分野の協力構築か」**
<http://www.business-i.jp/news/china-page/news/200601230014a.nwc>
- (46)
Ashton Graybiel, et al. Aerospace Medicine. November 1964; (35): 1071-82.
- (47)
Ashton Graybiel, et al. Aerospace Medicine. August 1965; (36): 733-54.
- (48)05 March 2001
Space Station Changes Stun Partners
http://www.space.com/news/spacestation/global_iss_reax_010305.html
- (49)12 Aug 2005
NASA Office of Legislative Affairs Memo: NASA Plans for Plant and Animal Research
<http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=17716>
- (50)2005 年 7 月
ESA の動物実験装置 (MISS) 概念
http://surc.isas.ac.jp/space_life_science/