

第5回Tansaxセミナー

国際宇宙探査に向けたJAXAの宇宙放射線研究



2023年6月9日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）
研究開発部門 研究戦略部/宇宙探査イノベーションハブ
永松 愛子



国際宇宙探査に向けた宇宙放射線計測・ 遮蔽防護研究



永松愛子 研究者・エンジニア

1999年 宇宙開発事業団（現：宇宙航空研究開発機構）

有人宇宙技術部門→広報部→研究開発部門 第一研究U／研究戦略部

→探査イノベーションハブ

研究領域主幹・専門技術リーダー(宇宙放射線計測)

博士（工学）：宇宙放射線物理、遺伝子工学

環境把握（衛星用、モデル検証） エネルギー分光ロメータ

- 火星衛星探査計画MMX用搭載用 IREM EM
- Gateway搭載用 Lunar-RICHeS 超小型ダイナミックレンジ
スペクトロメータ

環境モニタ・個人被ばく線量計（線量・LET分布） （ISS・Gateway-Artemis計画・MMX火星衛星探査計画）

- PADLES 受動積算型線量計
- D-Space 超小型リアルタイム線量計
- PS-TEPC 位置有感生体等価比例係数箱

PHITS SIM、放射線生物影響研究、遮蔽防護材研究



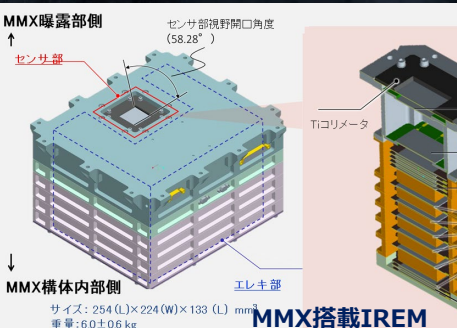
Interplanetary Radiation Environment Monitor
(IREM) Martian Moons eXploration (MMX)



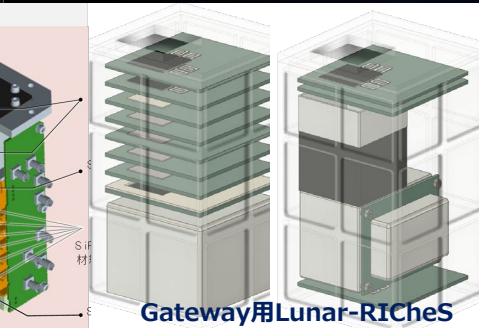
Gateway-Artemis計画



ISS/Gateway用被ばく線量計
PS-TEPC



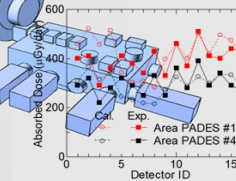
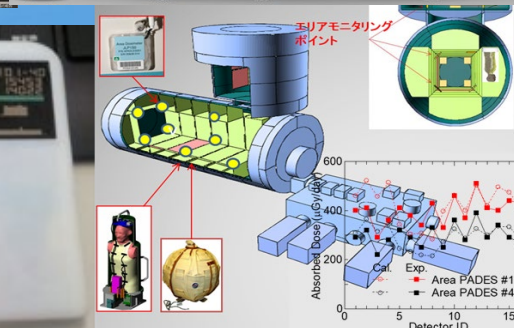
MMX搭載IREM



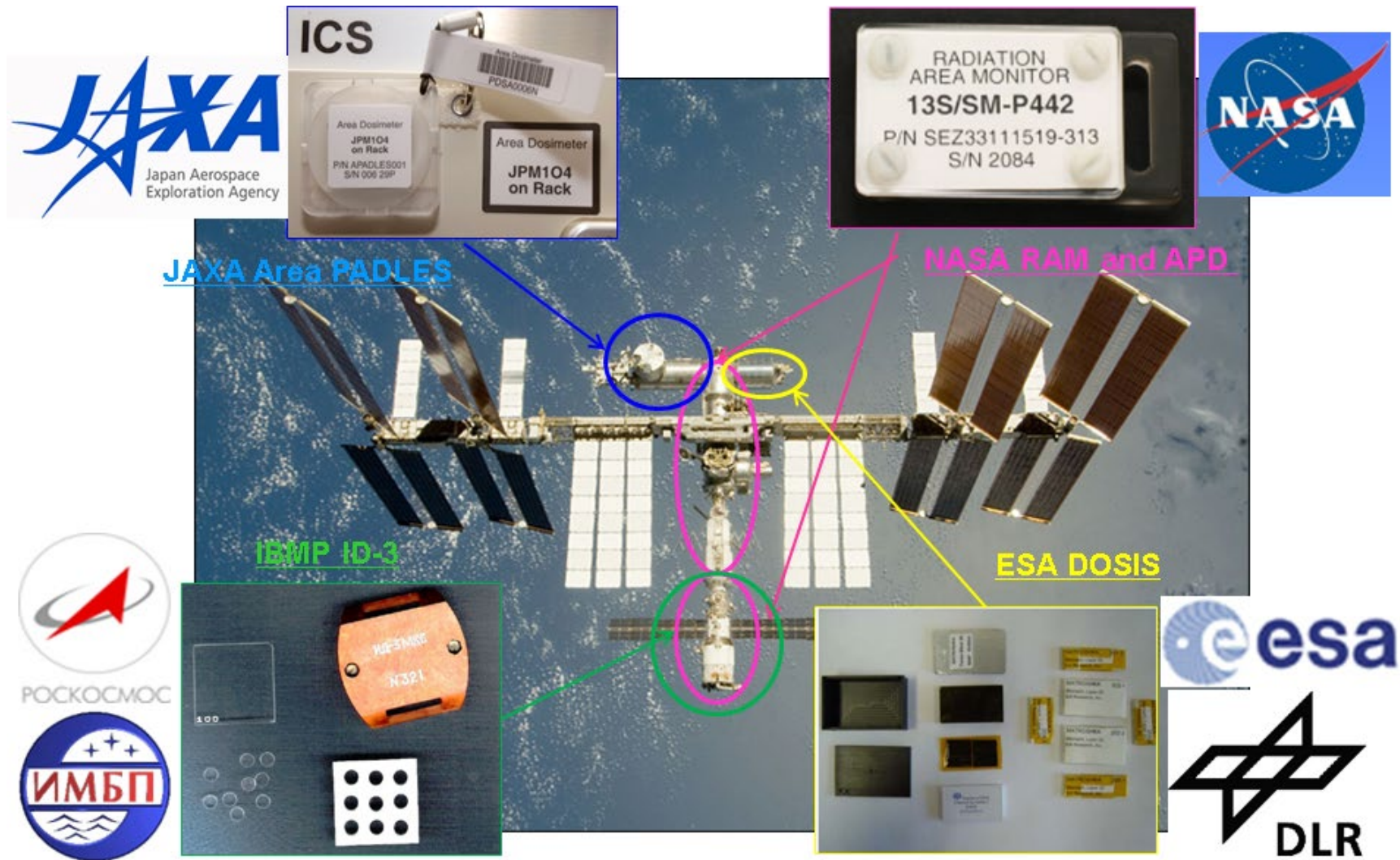
Gateway用Lunar-RICHeS



ISS/Gateway用被ばく線量計
PADLES・D-Space



1. 国際宇宙ステーション(ISS)の宇宙放射線研究



低地球軌道の宇宙放射線環境 (地上から300~500km)

3種類の**一次宇宙線源**があり、これらが船壁や搭載物質を通過して船内へ入射する。

太陽粒子線

陽子・電子 90%
He原子核 数%
重荷電粒子 (>He)



銀河宇宙線


陽子・電子 90%
He原子核 10%弱
Li~Fe原子核
 γ , X線等の電磁波

捕捉粒子線

バンアレン帯

内帯 = 主に陽子
外帯 = 主に電子



 : 国際宇宙ステーション・スペースシャトルの軌道
高度300~500km(低地球軌道)

ISSが飛行する低地球軌道環境での宇宙放射線の挙動 (船外・船内)

3種類の**一次宇宙線源**があり、これらが船壁や搭載物質を通過して船内へ入射する。

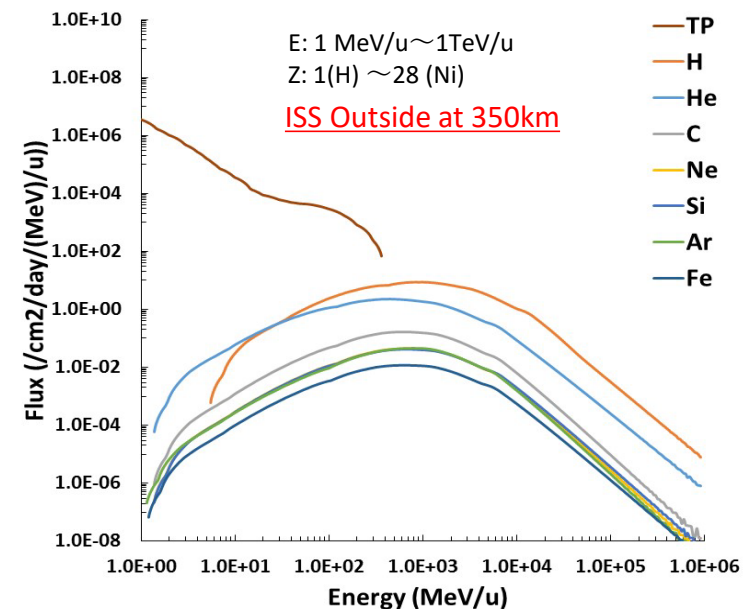
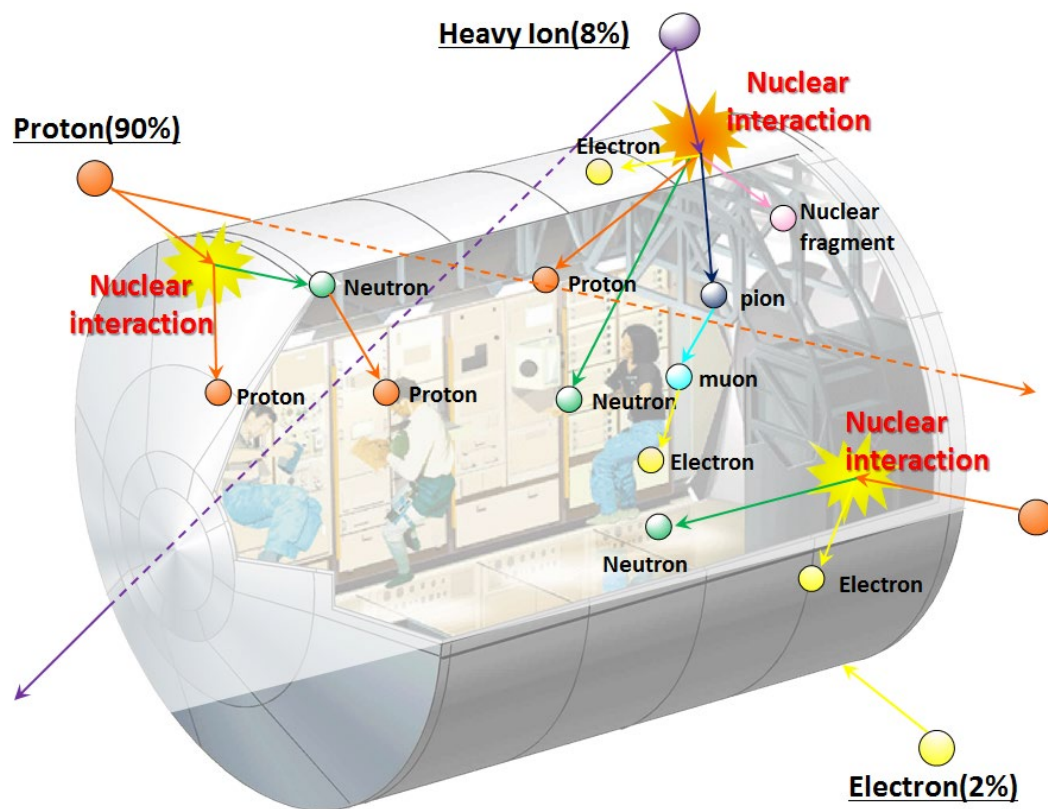
一太陽粒子線

(陽子・電子>90%, He原子核 数%, 重荷電粒子>He)

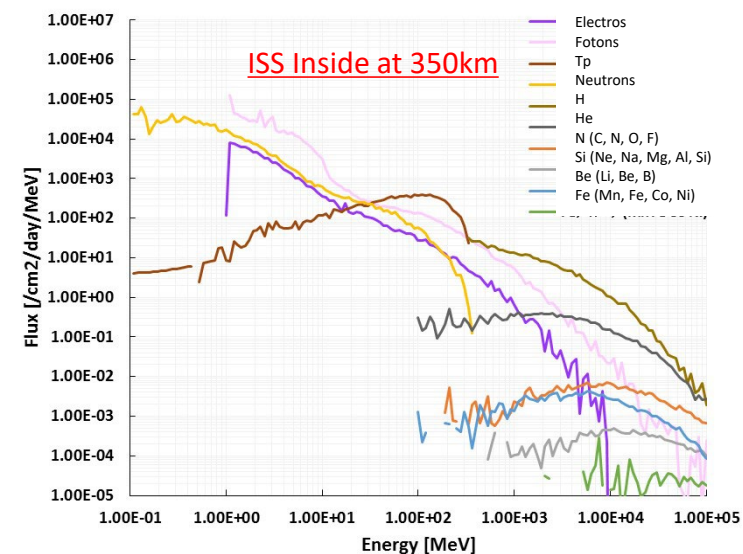
一銀河宇宙線

(陽子・電子 90%, He 10%弱, Li~Fe原子核, 電磁波
(γ , X線等))

一捕捉粒子線 (内帯 陽子、外帯 電子)



Simulated Energy Spectrum outside of the ISS



Simulated Energy Spectrum inside of the ISS

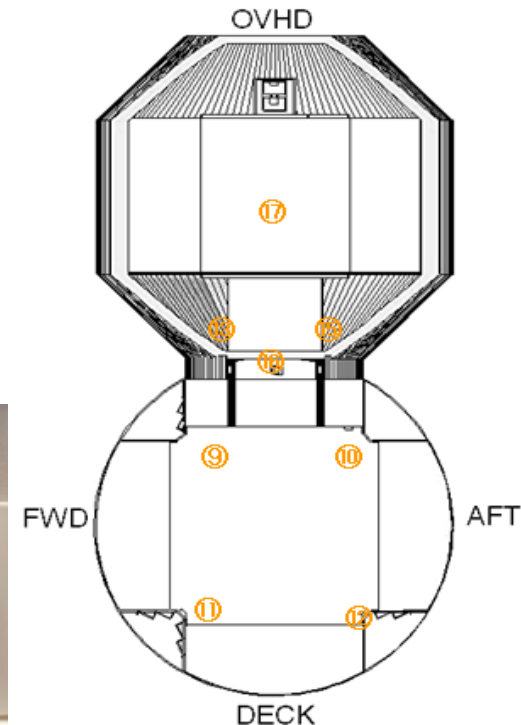
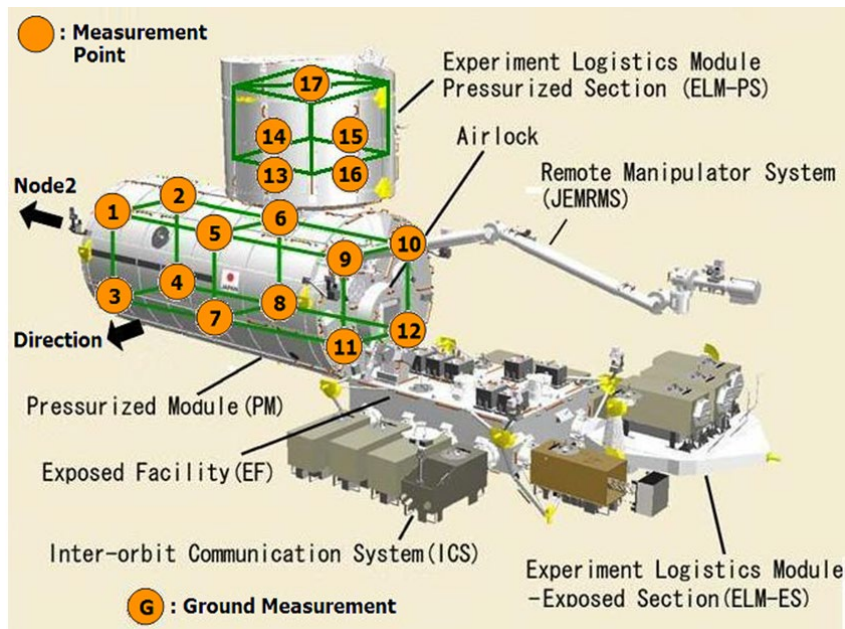
Area PADLES 「きぼう」船内における宇宙放射線環境の定点モニタリング

日本の実験棟モジュール「きぼう」船内の定点に**17個**のArea PADLES線量計を設置。
約6～8ヶ月毎(年1～2回)に線量計の回収および交換。「きぼう」運用期間中、継続的に実施。

- 継続的な定点モニタリングの実施は、有人技術開発に有効活用。
- 宇宙実験テーマ提案者へ実験計画立案に必要な放射線環境情報を提供
- 宇宙飛行士の長期滞在における宇宙放射線のリスク評価を行う
- 宇宙放射線解析モデルの改良・精度向上



- **2008年5月 STS-124 (1J)**ではじめて搭載され、定点モニタリングが開始。
計測結果は、常時JAXAの宇宙環境利用センター HPに公開
「ISS宇宙放射線環境計測データベース (PADLES database)」



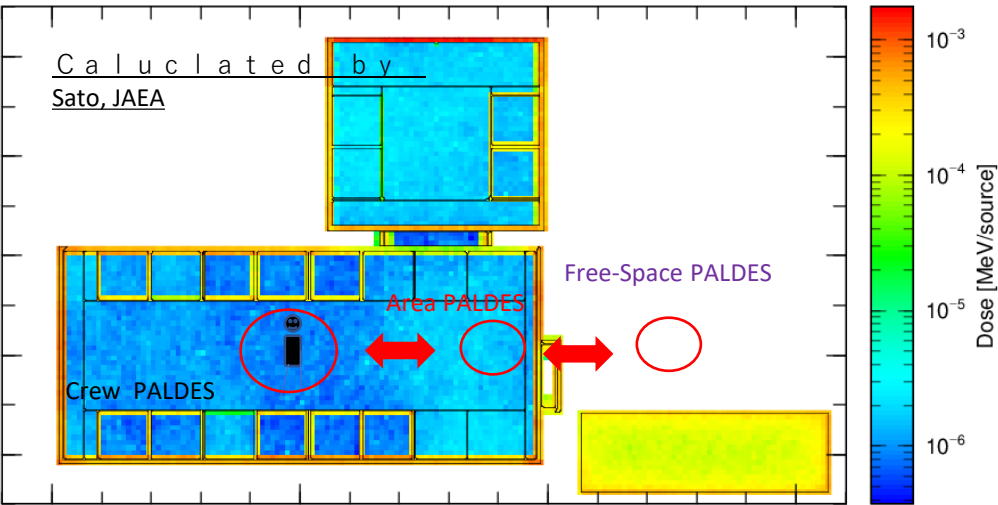
Cross Sectional view of ISS KIBO

2015年:Free-Space PADLES「きぼう」船外の宇宙放射線環境モニタリング

曝露部環境の被ばく線量計測のための技術実証を行い、計測手法の妥当性検討を行った。

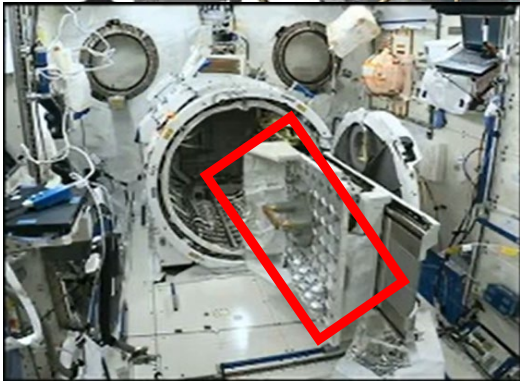
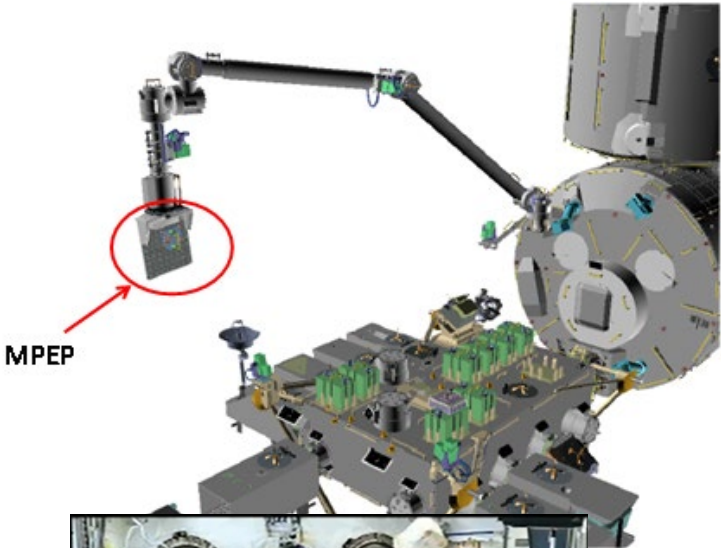
- ①取得したデータを用いて、きぼう船壁の遮蔽効果を評価し、将来有人惑星探査のための遮蔽材料や厚さを評価するソフトウェア「宇宙放射線被ばく線量シミュレーション」の為にベンチマークデータとして活用中。
- ② 遮蔽厚の異なるケースに線量計を設置することにより、「きぼう」船壁よりも薄い遮蔽厚に対する線量減衰データを取得済。

Launch : April 10, 2015 (Spx-6)
Return:Dec. 2015 (43S)



シミュレーションによる「きぼう」船内の線量分布

ISS宇宙放射線環境計測 (PADLES) データベース
<https://humans-in-space.jaxa.jp/spacerad/index.html>



PADLES



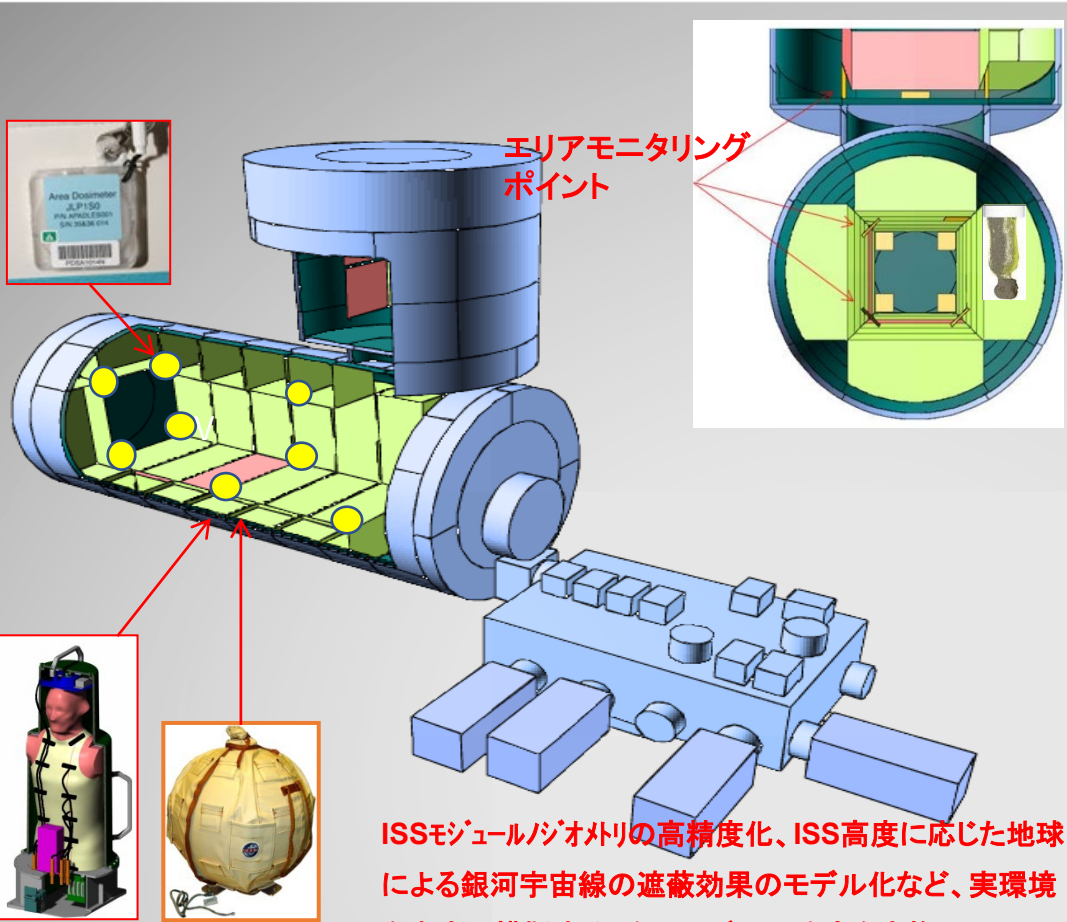
Shielding case with varying thickness (0.3 – 4mm, Al)



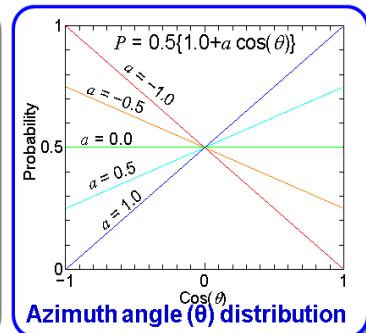
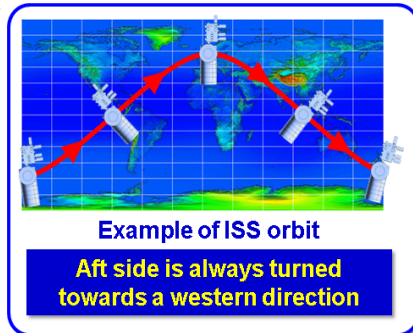
Thermal sensor

宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデルの構築

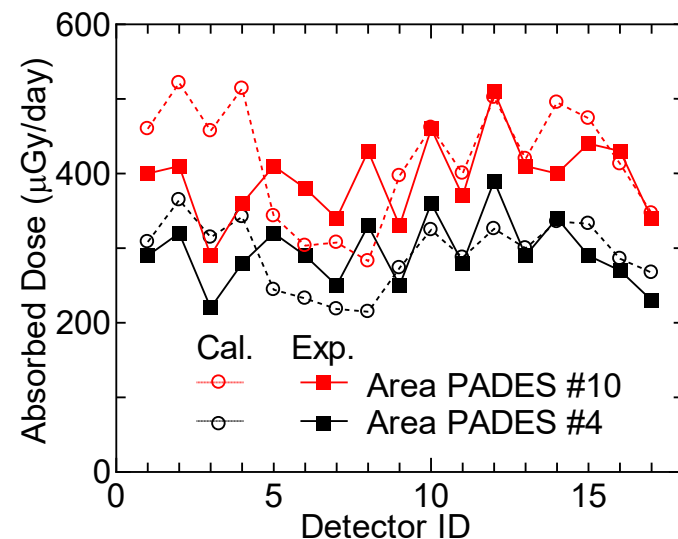
JAXA が取得したISS/「きぼう」でのPADLESによる実測値を用いて、日本原子力研究開発機構との共同研究により「宇宙放射線被ばく線量のシミュレーションモデル」の開発と高精度化を実施。放射線挙動計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)を用い、将来の有人月・惑星探査のためのシミュレーションとして応用。



ISSモジュールジオメトリの高精度化、ISS高度に応じた地球による銀河宇宙線の遮蔽効果のモデル化など、実環境を忠実に模擬するようにモデルの改良を実施。



補足陽子の東西効果



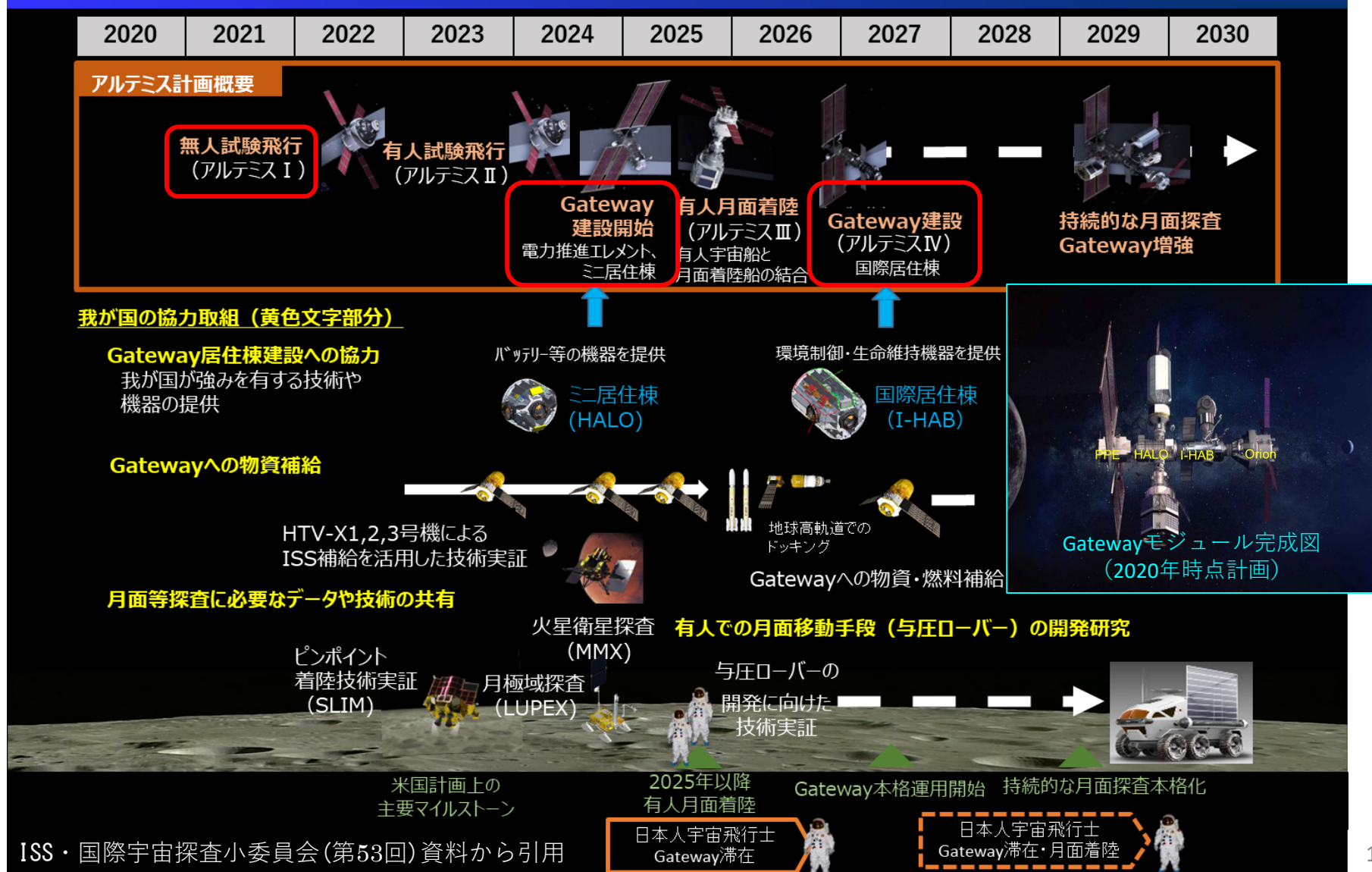
「きぼう」船内定点モニタリングの実測値とシミュレーションによる被ばく線量の比較、10%以内で両者が一致。

	地上	宇宙環境 (ISS)
線源	天然放射性同位元素 二次宇宙線	一次宇宙線 (太陽粒子線、銀河宇宙線、地磁気捕捉陽子線) 二次宇宙線 (陽子線、重荷電粒子線、中性子線など)
粒子	γ線、ミュオン、中性子線など (γ線のエネルギーはMeV程度)	・ 電子、陽子から鉄核までの重荷電粒子、中性子 ・ エネルギー範囲の上限は~10GeV/nを超える ・ 被ばく線量に寄与するLET分布は、0.2keV/μm~数百keV/μmの広範囲にわたる
線質係数	γ線:1 中性子線:5~20	1~30
線量率	地上のバックグラウンド線量 1.5μGy/day	過去ISS「きぼう」モジュール内(太陽活動第23~24期)の JAXA Area PADLES 船内測定結果より 220~542μGy/day

1. 宇宙放射線は、生物影響が高い高LET放射線を多く含む。
(宇宙環境専用の線量計・シミュレーション・遮蔽防護が必要)
2. 360度あらゆる方向からに入射する(検出器開発への課題)
3. 地上に比べて線量率が数百倍大きい
(宇宙飛行士の線量限度の設定と被ばく管理が必要)

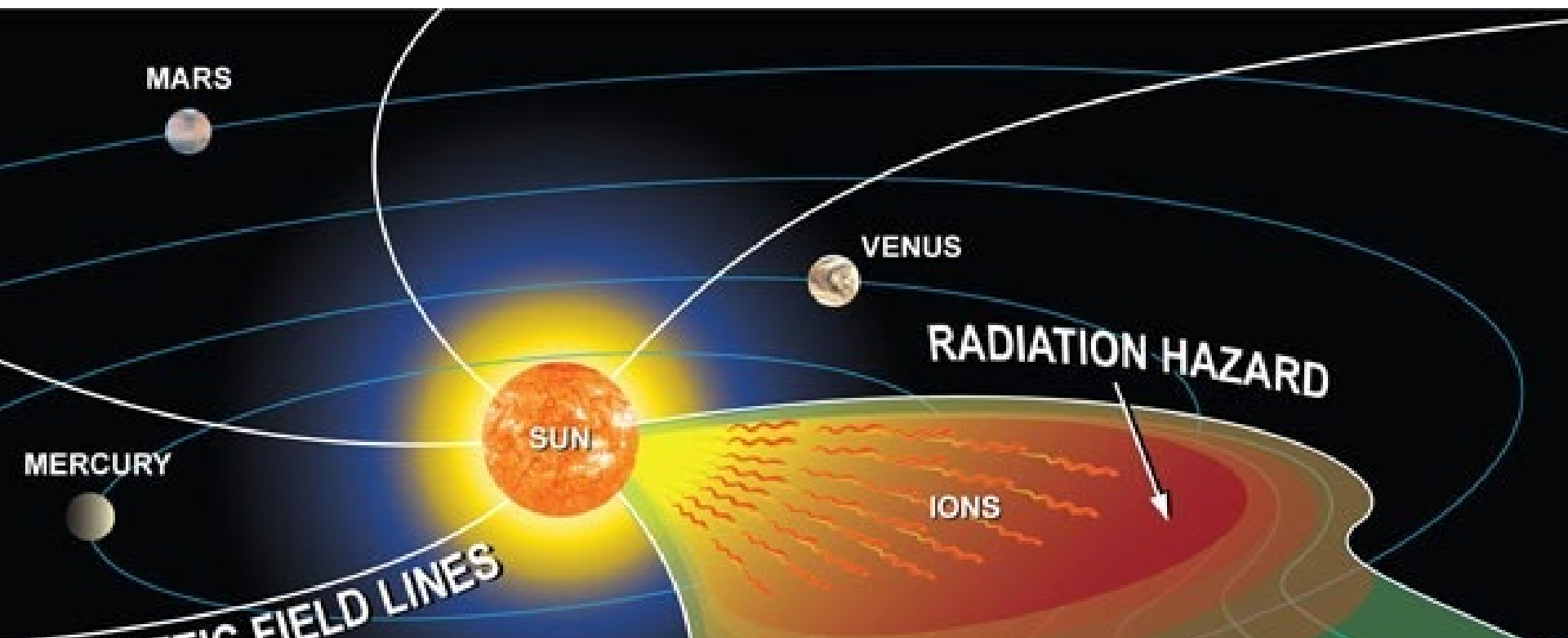
2. Gatewayに向けた宇宙放射線研究

(参考) 国際宇宙探査「アルテミス計画」関連の我が国の協力取組



月(地球から38万km)・火星(火星 7834万km(近地点))の宇宙放射線環境

太陽粒子線と銀河宇宙線の1次線源があり、これらが船壁や搭載物質を通過して船内へ入射する。さらに、**太陽フレアに伴う高エネルギー粒子 (SEP: Solar Energetic Particles)**のスペクトルの形状や強度により、宇宙飛行士への被ばく線量が大きく変化する。



月面：地磁気がない。

1. 月面に直接降り注ぐ銀河宇宙線(GCR)と太陽粒子線(SEP)
2. 太陽活動や**太陽フレア**の影響を直接受ける。
3. 月表層物質(レゴリス)と宇宙線との相互作用により、月面に発生する二次中性子やガンマ線

国際宇宙探査における宇宙放射線計測（計画検討案含む）

地磁気圏外での放射線管理は、目的や測定対象の異なる3種類の放射線検出器のデータを用いて、任意地点の線量評価・予測を行う協調システムを構築する。検出器開発では、部分的な要素技術実証も必要のため、プリカーサー実証機会を活用し、搭載化およびシミュレーション評価とあわせた評価システムの検討を行う。

D-Space/PALDES: 船内・船外の線量

PS-TEPC: 船内・船外定点のLETおよび線量変動

RICheS: 入射粒子のスペクトル評価

NASA SLS1 OMOTENASHI衛星で技術実証した線量計 ↓

① D-Space/PADLES: PDS（多地点線量の変動評価）

- ・超小型（～50g）、ボタン電池駆動のため、多地点同時期のデータ取得の差異・変動を評価するために利用。
- ・実験試料の近傍に常時設置
- ・搭乗中常に携帯（船内、船外活動でも利用）
- ・Bluetooth等で同時データの集約が可能



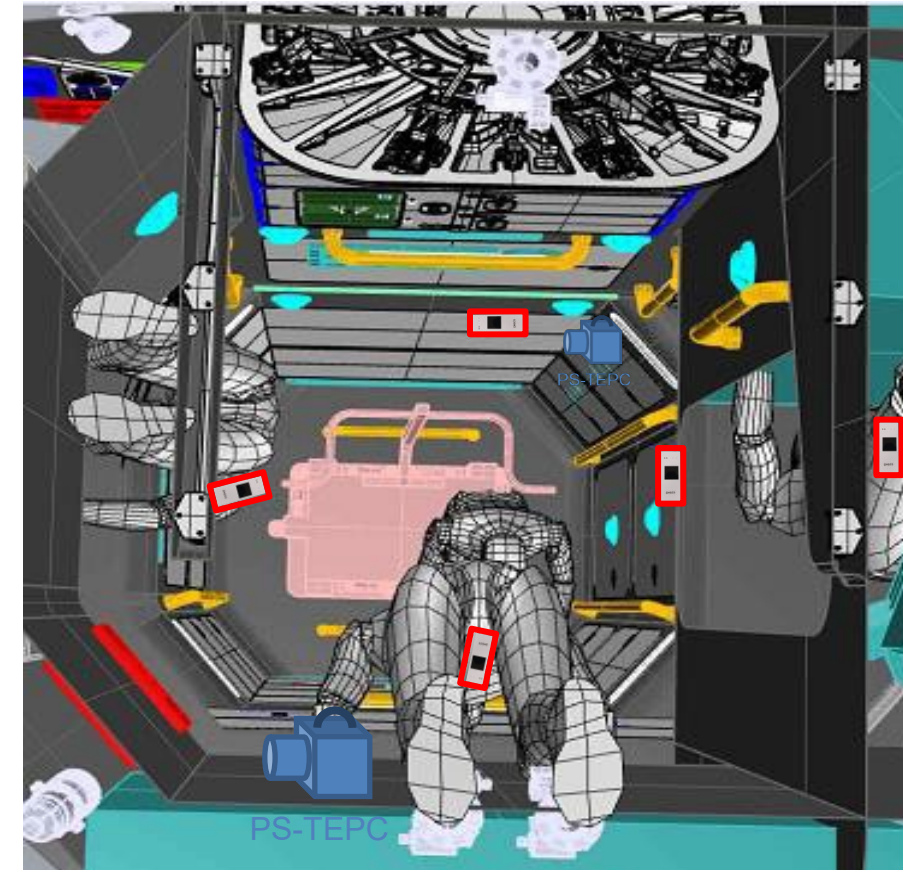
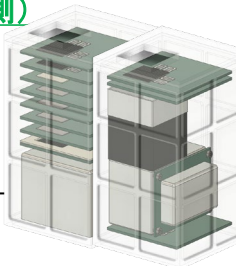
② PS-TEPC（LET・線量の詳細計測）

- ・船内の定点に設置
 - ・電力・DLリソースが必要
 - ・バッテリー駆動により携帯（船内、船外活動）も可能
- 定点の詳細なデータ取得に利用。取得したLET分布により、多地点に設置するD-Spaceのデータと相補的に使用。



③ RICHeS（入射粒子の一次エネルギースペクトル計測）

- ・船外や月面拠点定点に設置
- ・電力・DLリソースが必要
- ・計算上の任意の線量評価に使用するが、D-Space/PADLESおよびPS-TEPCとの協調運用。



Altamis計画Gateway月近傍拠点モジュール内でのイメージ例

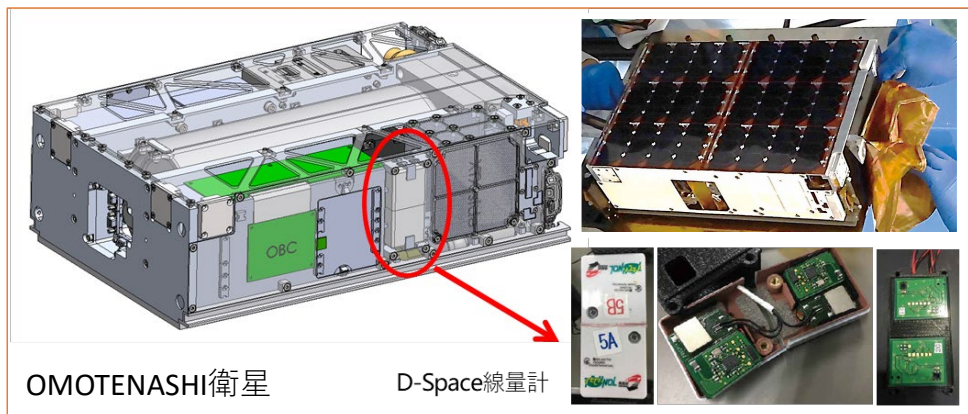


月面での活動のイメージ例（月面とクルーの縮尺はあっていません）¹²

OMOTENASHI NASA SLS (Space Launch System) EM-1 搭載ミッション



ピギーバック衛星OMOTENASHIは、2022年11月打ち上げ予定のJAXA開発CubeSat（質量14kg、サイズ）により、約1週間の周回飛行後に月面着陸を目指すミッション。**JAXAと産総研との共同研究によるD-Space線量計**を使って月周回軌道の吸収線量（ $\mu\text{Gy}/\text{min}$ ）を測定。将来有人探査において、宇宙飛行士のミッションプロファイル（月遷移軌道及び月面）における宇宙放射線量の実測データを集積し、宇宙放射線防護研究に役立てる。

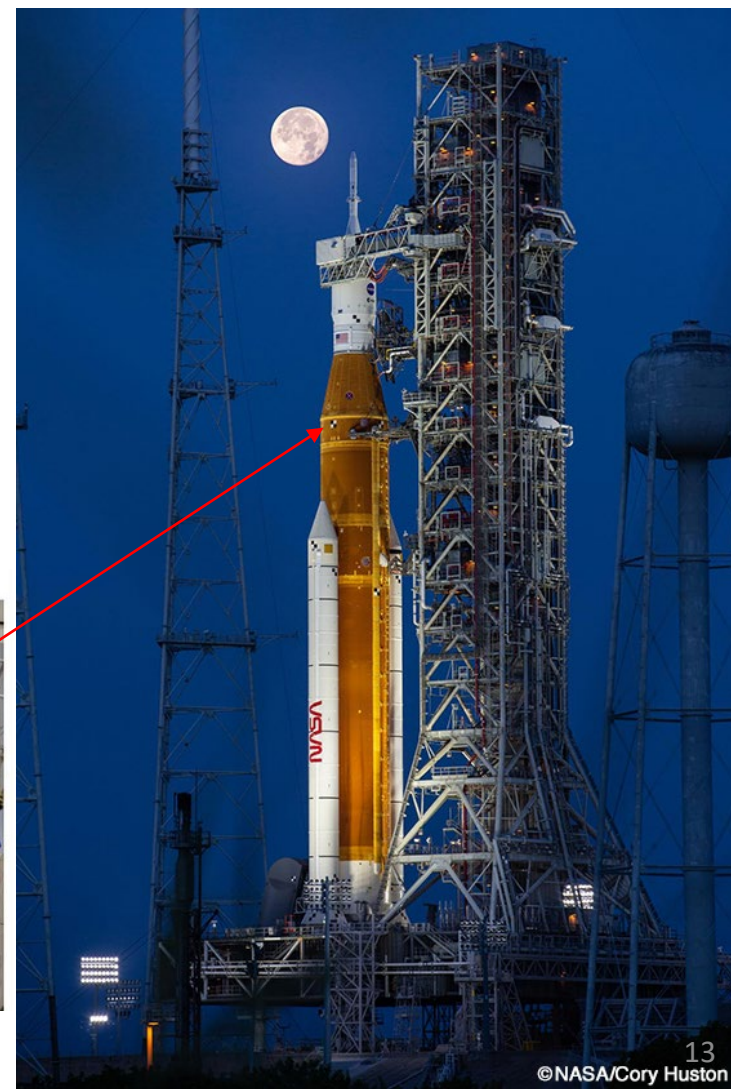
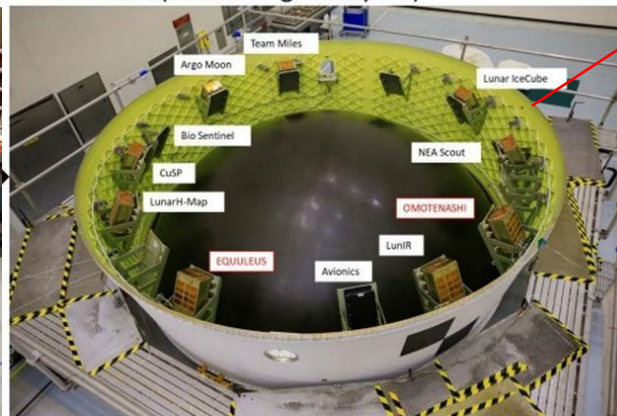


OMOTENASHI衛星

D-Space線量計

D-Space線量計の陽子および荷電粒子計測のための閾値電圧を設定。バイナリデータフォーマットのカスタマイズ化および光モジュール改修およびケーシングをOMOTENASHI用に作成し、1分ごとの2種類の線量計のカウント値をテレメトリデータとしてダウンリンクする。

OSA (Orion Stage Adapter)



Dispenserと呼ばれる探査機放出装置に設置され、OSAに取付。

第70回応用物理学会春季学術講演会 2023.03.16 JAXA永松、AIST鈴木、ISAS橋本他

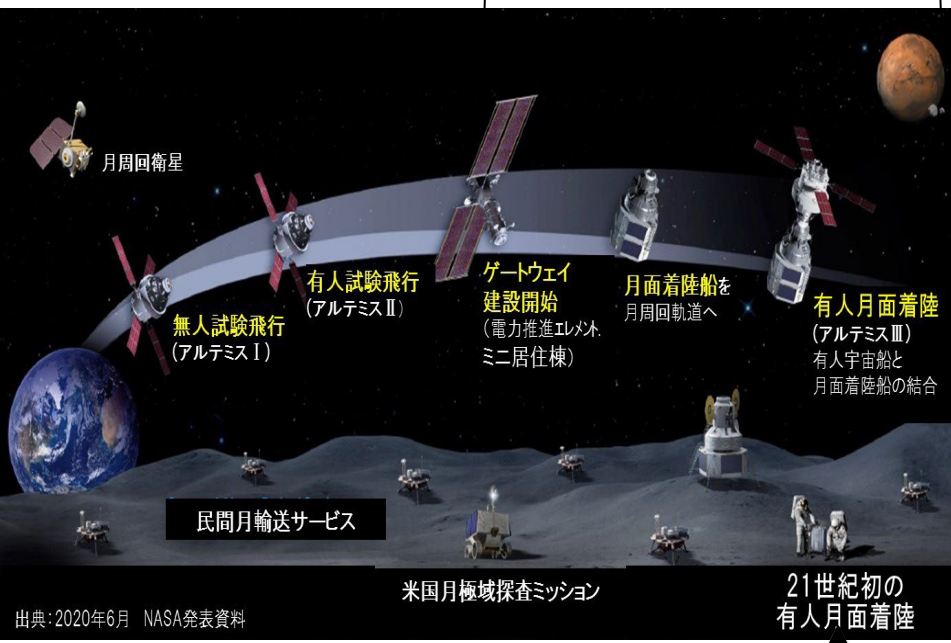
2025年以降月面着陸計画Altamis月近傍拠点Gateway建設開始



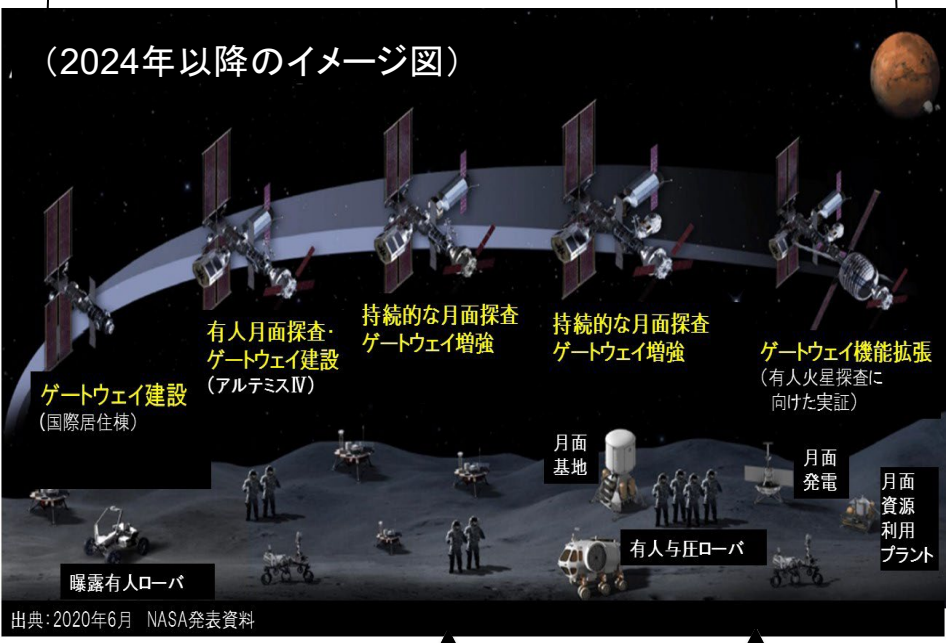
①初期段階 HALOとPPEのみの**最小限の構成**。
開発要素の少ない、限られた機器を搭載し 利用する。



②本格運用段階 I-HAB建設、及び船外ロボットの
装備の後、Gateway利用が本格化する。



2025年

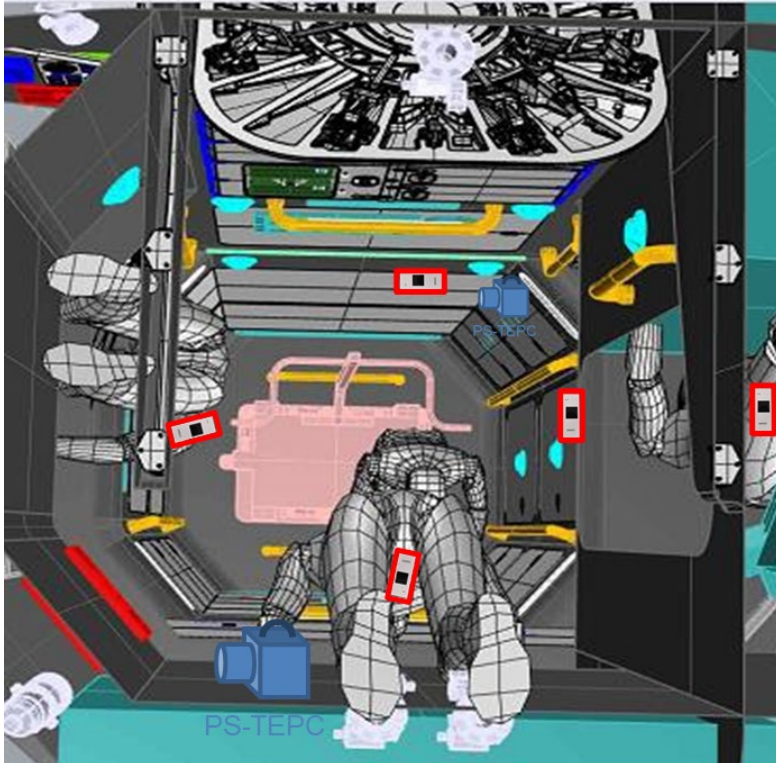


2020年代中頃
ゲートウェイ本格運用開始

2020年代後半
持続的な月面探査本格化

月近傍拠点Artemis計画・月周回有人拠点Gateway(2025年以降に開始)

- ・月面及び火星に向けた中継基地として、米国を中心に2028年の完成を目指し、開発が進行中。
- ・日本は居住棟(HALO)への機器提供、物資補給などで貢献予定。
- ・JAXAとして初のGateway利用機器となる超小型宇宙放射線線量計D-Spaceを搭載。参加宇宙機関とともに**宇宙放射線計測共同ミッション (Internal Dosimeter Array: IDA)**を実施予定。



Artemis計画Gateway月近傍拠点モジュール内でのイメージ例



Gatewayモジュール完成図 (2020年時点計画)

	国際宇宙ステーション (ISS)	Gateway
大きさ	約108.5m×72.8m (サッカー場)	下図参照
質量	約420トン	約70トン
組立フライト回数	43回	7回
宇宙飛行士滞在日数 (年間)	365日 (常時)	10~30日
滞在宇宙飛行士人数	6人	4人
食料、消耗品 (年間)	2,190人日分	40~120人日分

文部科学省,国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会中間まとめ (その2)より抜粋

月近傍拠点ゲートウェイ HALO船内放射線環境計測共同ミッションIDA

■ Gateway Phase 1: Internal Dosimeter Array (IDA) Payloadへの搭載決定 (2021年)

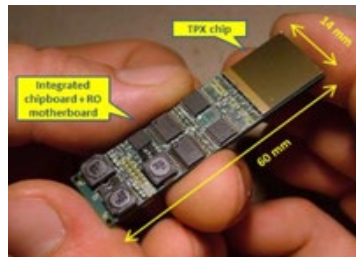
3つのGateway Radiation Splinter Discipline Working Groups (DWG)にて国際調整の結果、Gatewayでの線量評価およびサイエンスおよび宇宙飛行士の被ばく管理に必要な線量計測評価をサポートする要求仕様に十分合致した線量計として、サイエンスおよびプログラムとして評価され、JAXA D-Space/PADELs線量計ののGateway Phase 1: Internal Dosimeter Array (IDA) Payload 搭載が決定。



EAD



TRITEL DU



MediPix

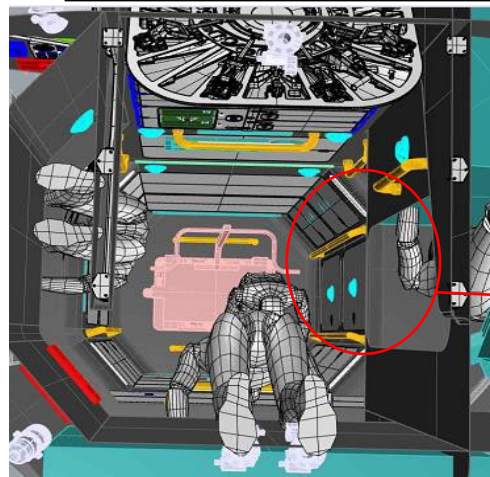


PADLES + D-SPACE

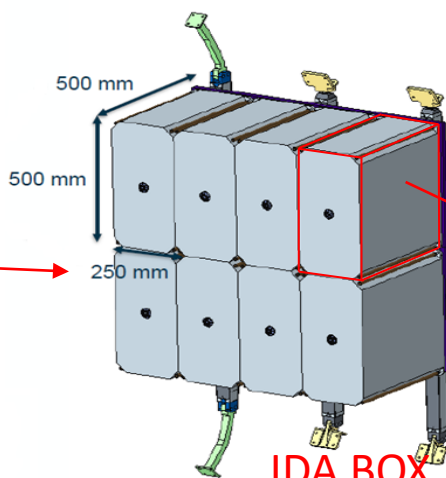


CEU

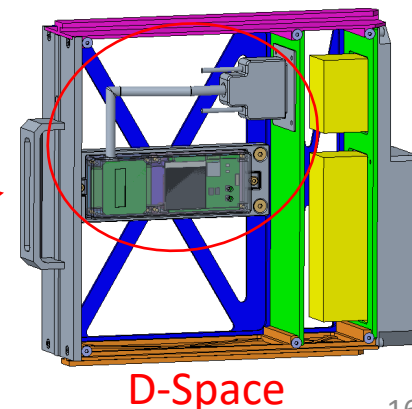
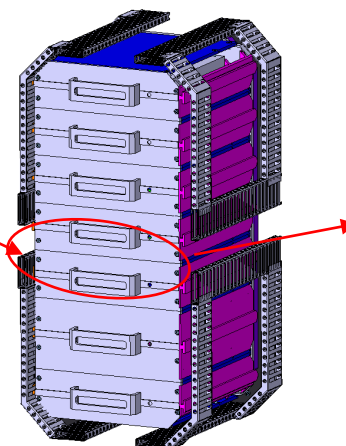
- 1x EAD (active) (ESA, also on ERSA)
- 1x TRITEL Detector Unit (DU) (active) (ESA)
- 1x MediPix (active) (ESA, also on ERSA)
- 1x PADLES (passive) + D-Space dosimeters (active) (JAXA)
- 1x Central electronic unit (ESA) providing structural, power & data interfaces between instruments and Gateway



Gateway HALOモジュール内



IDA BOX



D-Space

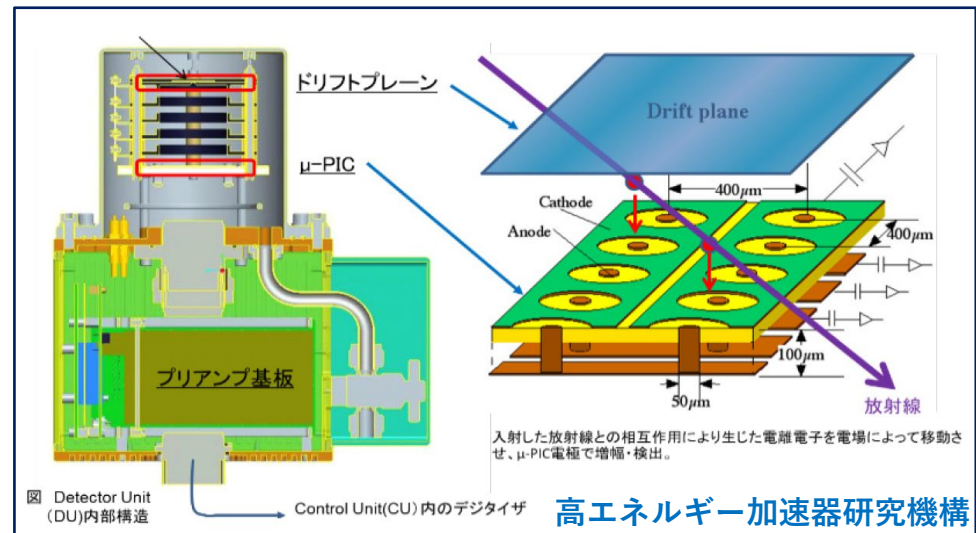
アルテミス計画フェーズ4に向けた日本の宇宙放射線計測 1/2

今後Gatewayの被ばく管理は船内線量計測機器で実施される方針。Gatewayから月面着陸探査および与圧ローバーでの被ばく管理に向け、リアルタイムLET検出器 PS-TEPCや $\sim 2\text{GeV}$ が測定できるエネルギースペクトルメータLunar RICHESの開発・搭載調整検討を進める。

位置有感生体等価比例係数箱 PS-TEPC LET・被ばく線量計 (Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber)

■ $\sim 1000\text{KeV}/\mu\text{m}$ の荷電粒子のイベントバイイベントのLET測定から線量算定ができる、Gatewayおよびルナクルーザーへの環境計測モニタリング機器としての搭載化を目指した省電力・小型化を目指す。

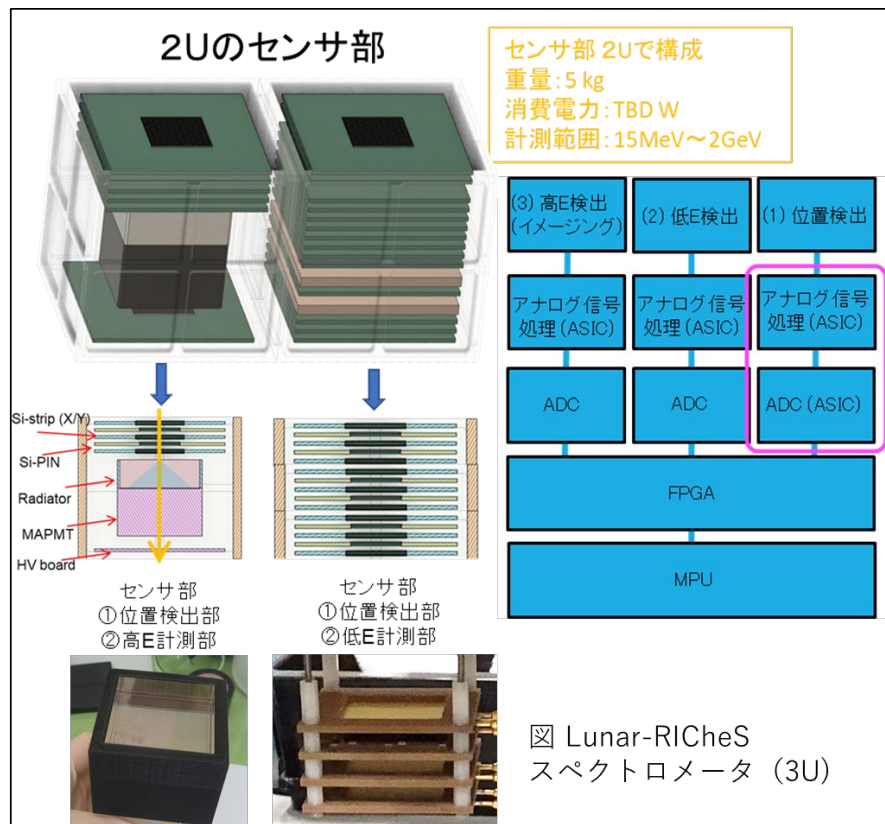
■すでにISS「きぼう」での搭載実績があり、荷電粒子及び二次中性子起源の入射粒子の飛跡とエネルギーを同時に測定し、そのLET分布を直接的に実測することができる。計測原理の軌道上実証はすでにISSでなされているため、省電力・小型化のキー技術となるリアルタイムデータ処理部の読み出しをASICに置き換え、小型モバイル化および消費電力の削減を目指し、全体で5kg程度の検出器開発を目指す。



ISS「きぼう」におけるPS-TEPC搭載実績

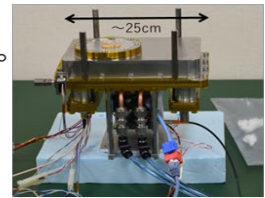
月探査機搭載用リシェンコフ検出器Lunar-RICHeS (Imaging Cherenkov Spectrometer) エネルギースペクトル計測器

- 搭乗員や搭載実験の放射線影響評価の線量評価必須な、10MeV～2GeVの太陽粒子線（フレアを含む、銀河宇宙線）の入射エネルギーの弁別。
- ΔE -E法とチェレンコフ検出部を組み合わせた超小型でのダイナミックレンジのエネルギースペクトル測定ができる、小型・軽量なリングイメージチェレンコフ検出器を開発する。
- 被ばく線量に寄与する高エネルギー荷電粒子の軌道上計測は日本として経験がなく、また、チェレンコフ検出器の読み出し技術実証は、世界初の試み。



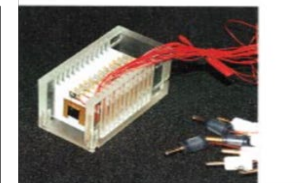
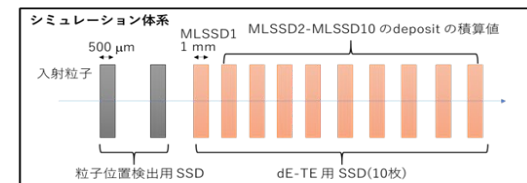
センサ部① Si-Stripセンサによる位置検出部：東京理科大

DSSD2層とASICを組み合わせた回路を検討。
センサ部の選定と製造スケジュールの詳細
確認中。DSSD+ASICのデモ機による動作検証。



センサ部② 低エネルギー計測部（15～250 MeV、LET）：JAXA

MMX-IREMで技術開発を行ったSi積層と ΔE -TE法で
測定するためのセンサの選抜と組み合わせのSIM検討



センサ部③ 高エネルギー計測部

(250MeV～2GeV)：理研

チェレンコフ放射体とマルチアノードPMT
の信号読み出し回路の位置分解能の向上お
よびイメージングソフトの検討。



宇宙放射線への対策として、計測、材料評価、遮蔽、滞在場所管理を考慮した宇宙飛行士の被ばく評価を行い、様々な技術を組み合わせた、宇宙放射線影響の低減が必要。

装置開発（センサ開発、回路設計、**FPGA**、**ASIC**、放射線輸送コード評価）
宇宙環境を模擬した加速器利用（荷電粒子、中性子）
被ばく管理（軌道上リアルタイムモニタリング技術、滞在場所・時間計測）
環境影響評価（国内外の生物影響評価、宇宙実験特有の実験系確立）
放射線防護（適切な遮蔽環境と評価・滞在時間、物理的・生物学的防護）

