

国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理



込山 立人

Komiyama Tatsuto

((国研) 宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門 宇宙飛行士・運用管制ユニット宇宙飛行士健康管理グループ)

1 ISS 搭乗宇宙飛行士の健康管理

2018年3月22日現在、地球周回軌道高度約400 kmに常時有人の宇宙基地がある。国際宇宙ステーション (ISS) だ。ここには、現在日本人の金井宇宙飛行士を含む3名の宇宙飛行士がおり、間もなく(予定では24日未明)には、更に3名の飛行士が到着し、6名滞在となる予定だ。宇宙飛行士はISSに4~6か月滞在するが、この間、無重力(厳密には完全に重力が無くなるわけではないので「微小重力」という言い方をする)、閉鎖空間、放射線といった地上とは異なる環境に身を置くことになる。

このような環境に曝される日本人宇宙飛行士を対象として、JAXAでは健康管理を実施している。宇宙飛行士の健康管理に係る作業は、いろいろな観点から分類することが可能だが、ここでは、職場の産業医の活動になぞらえて次の3つに分類して説明してみたい。

①作業環境管理

ISS船内の空気・水・微生物・騒音・放射線といった環境をモニタし、異常があれば必要な措置をとれるようにしている。これらは地上における作業環境管理でも同様だが、モニタのルールと基準を定め、基準を逸脱した場合の対処方法を設定する、という方法がとられている。

②作業管理

ISS内にいる飛行士はかなり細かく作業が計画さ

れそれによって作業を実施している。当該作業計画に無理が無いか確認することは健康管理の重要な事項である。また、飛行士がISS滞在時以外にも地上において様々な訓練や医学実験への参加等を実施するが、当該訓練・実験等により危険が無いことを確認したり、実際に問題が起こった際に対処することも宇宙飛行士の健康管理である。

③健康管理(医学検査・診療)

宇宙飛行士に実際に身体的・精神的な影響が出ていないか検査等により確認し、その結果に応じて必要な処置を実施する。また、実際に起こることが予想される影響についてはあらかじめ対処を実施しており、例えば、宇宙滞在による筋骨への影響をできる限り低減するため、1日約2時間程度の運動メニューを作成し飛行士に課している。他には閉鎖空間や異文化交流といった精神心理的なストレスを軽減するため週1回家族とのTV会議による会話を計画したり、地上から物品やニュース等の映像コンテンツを送ったりもしている。

これらの宇宙飛行士の健康管理は、フライトサーजन (Flight Surgeon: FS) と呼ばれる航空宇宙医学について専門の知識と技能を身につけた医師を中心として、運動、精神心理、栄養、放射線といった各専門分野のスタッフがお互いに連携しながら実施している。また、これらの活動は国内だけでは完結せず、NASAやロシア等の他国の医学運用チームと

の協働も欠かせない。このため、日常的に連携をとりながら運用を行っている。

上記では、宇宙飛行中の健康管理を主に取りあげて説明を行ったが、宇宙飛行士の健康管理は、宇宙飛行士を選ぶ段階から始まっていることも特徴である。現在は、健全な成人が宇宙に行くという前提でISS内のすべての事柄が決まっている。このため、選抜段階で医学検査を実施すると共に、選抜された後も、1年に1回、医学検査（年次医学検査）を実施し認定する、ということを繰り返しており、その意味では、ISS搭乗宇宙飛行士の健康管理は、宇宙飛行士のライフタイム全体に関与する、ということが言える。

2 ISS 搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理

さて、ここからは、宇宙飛行士の健康管理の一環である放射線被ばく管理について説明したい。

ISS搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理の対象となる放射線は、宇宙飛行士としての職業被ばく、すなわち宇宙飛行士であるがゆえの放射線被ばくはすべて対象にするという基本的な考え方にに基づき、現在、次の放射線被ばくを対象としている。

- a) 宇宙飛行中の宇宙放射線被ばく
- b) 宇宙飛行士特有の医学検査による被ばく
- c) 宇宙飛行士訓練中の放射線被ばく（航空機による高高度飛行訓練中の宇宙放射線被ばくや、洞窟内でのチーム行動能力向上訓練中のラドン被ばく等）

これらの放射線被ばくのうち、最も被ばく線量が多いのはa)で、ISS船内においては通常1日に0.4～1 mSv程度の被ばくをする。ISS搭乗宇宙飛行士の受ける宇宙放射線は、その起源から主に、太陽系外から飛来する銀河宇宙線、太陽からくる太陽粒子線、地球の磁場に捉えられている捕捉放射線の3つに分けることができる。これらの強度は一定ではなく、11年周期で変化する太陽活動に応じて変化する。銀河宇宙線は太陽系外から飛来する粒子線だが、太陽系への流入が太陽磁場によって抑制されていること、地球磁気圏への流入を抑制している地球磁場の密度に太陽風が影響を及ぼしていることから、ISS軌道においては太陽活動の活発な時期（「極大期」という）に極小化することが知られている。ま

た、捕捉放射線については、太陽活動極大期には地球磁場が太陽からの圧力に押されるため、ISS軌道では放射線帯内帯に多く捕らえられている陽子の強度が減り、外帯に多く捕らわれている電子の強度が増える。太陽粒子線は、太陽活動が活発な時期に多く発生する太陽フレアと呼ばれる太陽表面の爆発現象に伴って放出される陽子等の粒子であるが、これによる被ばくは、太陽フレアの規模等により、数日間で数十 mSvに達することもある。

これらの放射線被ばくに対応するISS搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理のルールは、国内法令が自然放射線を規制の対象外としていることから、JAXA独自に定めている。その全体像を図1に示す。

ISS搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理を大きく分けると次の4つに分類することができる。

- A) 被ばく線量管理
- B) リスク説明
- C) 監視・計測
- D) 健康診断

健康診断については、1項に述べた宇宙飛行士認定のための年次医学検査として実施しているため、ここでは、A)～C)について述べる。

A) 被ばく線量管理

被ばく線量管理は、飛行士の被ばく線量を適切なレベルに抑えるために行うもので、JAXAでは線量制限値と前述した各被ばくの線量を算定する方法を定めている。ISS搭乗宇宙飛行士の線量制限値を表1及び表2に示す。線量制限値は、実効線量制限値と組織等価線量制限値に分けることができる。実効線量制限値は、放射線の影響で発現するがんで死亡するリスクを制限するために設けており、生涯線量を制限する。放射線によるがんの発現は閾線量の無い確率的影響であるとされていることから、線量制限値は、放射線の寄与によるがん死亡の確率が地上における一般の放射線業務従事者が毎年年間線量限度いっぱい生涯にわたって被ばくし続けた場合と同程度（3%程度）となるように定めている。一方、組織等価線量制限値は、実効線量制限値のみでは防ぐことのできない組織反応（閾線量のある確定的影響）を回避するために設けており、その値は、閾線量を適用している。なお、組織等価線量制限値のう

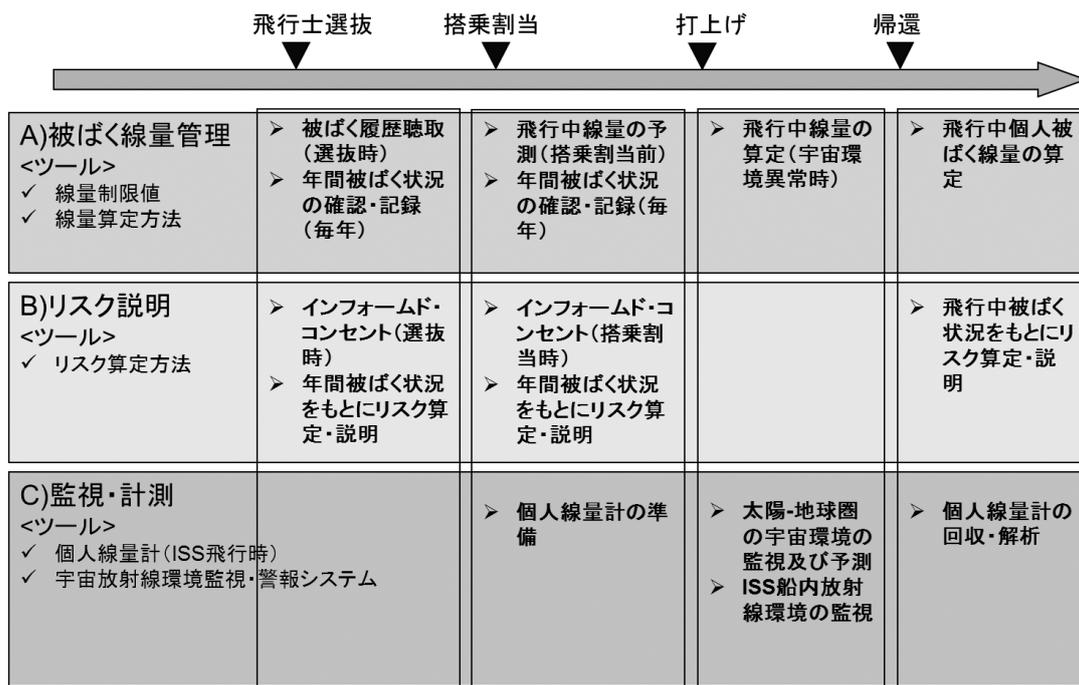


図1 JAXAによるISS搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理の全体概要

ち1週間及び1年間のものについては、ISS滞在中の飛行中止・緊急帰還の判断と直結するため、ISS計画においては、NASA、ロシア等の他機関と調整し、この値の内側で必要な対処がとれるようにしている。

線量の算定方法についても独自の方法をとっている。特に宇宙放射線被ばくは、電子からFe粒子までと種類が多くエネルギー範囲も数十keV～数十GeVと非常に広範囲で、しかも宇宙環境の状況や飛行士のISS内での滞在位置によってその組成や強度が異なることから、測定器の読み値を一律に管理量である実効線量や組織等価線量に変換する係数は無い。このため、宇宙放射線環境モデル及びISS船壁厚モデル等を用いてISS軌道及び飛行士のISS船内での滞在位置情報をインプットとして実効線量、組織等価線量等の管理量を推定し、これらを個人線量計や環境モニタの測定結果で補正することによって実効線量等を求めている。

B) リスク説明

リスク説明は、宇宙飛行士に一定のリスクがある中で宇宙飛行を行わせることになるため、随時飛行士の理解と同意を得るために実施している。具体的には、まず飛行士の選抜時に宇宙飛行に伴う放射線被ばくによるリスクを説明し宇宙飛行士になる意思

を確認する。その後は、年間の被ばく状況をもとにがん死亡率や組織反応のリスクを説明する。宇宙飛行士をある特定のミッションへ搭乗割当てする際には、当該ミッションによって受ける被ばく線量の予測値をもとにがん死亡率や組織反応のリスクを算定・説明し、搭乗割当てを受ける意思の確認を実施する。また、帰還後は、飛行中の被ばく状況をもとにリスクを算定し説明する。なお、これまではそのようなケースはないのだが、線量制限値を超えるような被ばくをした飛行士に対して、どのような情報をどのようなタイミングで提供すべきかについては、これまで国内外に決まった方法がなく、現在、検討を行っている。

C) 監視・計測

監視・計測は、宇宙飛行中の放射線被ばくについて実施しているが、主に2つの観点から実施している。1点目は、防護の最適化の観点である。ISSでは、As Low As Reasonably Achievable (ALARA) という言葉で守られている考え方である。前述のとおり、ISSの宇宙放射線環境は常に一定ではないため、太陽-地球圏の宇宙環境を絶えずモニタし、それに適して適切な対応を行うことによってのみ、被ばくを可能な限り低く抑えることができる。実際に、ISS

表1 ISS 搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値

初めて宇宙飛行を行った年齢	男性 (mSv)	女性 (mSv)
27~30	600	500
31~35	700	600
36~40	800	650
41~45	950	750
46 以上	1,000	800

表2 ISS 搭乗宇宙飛行士の組織等価線量制限値

組織・臓器	骨髄	水晶体	皮膚	精巣
1 週間 (mSv)	—	500	2,000	—
1 年間 (mSv)	500	2,000	7,000	1,000
生涯 (mSv)	—	5,000	20,000	—

の放射線被ばく管理においては、米国の気象観測衛星である GOES で計測される太陽の観測結果（太陽から放出される陽子強度）や地上の地磁気計測の結果を指標として用いており、これらによって太陽-地球圏の宇宙環境の擾乱を察知し、必要に応じて飛行士を ISS 船内の船壁の厚いところに避難させるといった運用を行う。JAXA では、これらの指標が一定レベルを超えると自動で担当者にメール送信する仕組みを作って対応している。

2 点目は、線量算定に必要な計測結果を与えるための計測である。ISS では、飛行中の線量は 2 つの方法によって計測している。1 つは ISS 船内に設置されている能動型のエリアモニタである。現在は、NASA が提供している TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter: 組織等価比例計数管) を主に用いており、これは 1 分ごとの線量の値を確認することができる。この読み値 (吸収線量) を常時監視すると共に、実際に宇宙環境に擾乱が起これば、宇宙飛行士の放射線被ばくが線量制限値を超える恐れがあるような事態が起こった場合、この計測結果を用いて線量を算定する。このようにして算定された線量は、宇宙飛行士の ISS からの緊急帰還を含め、運用

計画変更を判断するための材料として使用される。もう 1 つは、個人線量計である。日本人宇宙飛行士には、CR-39 プラスチック飛跡検出器と熱蛍光線量計 TLD-MSO を組み合わせた JAXA 独自の個人線量計 (JaCPD/Crew-PADLES) を提供している。これは受動型の線量計のため、帰還後に線量を読み取る。ISS において宇宙飛行士はこの個人線量を常時携帯しているため、ISS 船内の船壁の違いを含めて宇宙飛行中の線量を最も正確に計測できているものと考えられることから、宇宙飛行士の被ばく履歴にはこの計測結果を用いて算定した線量を記録することになっている。

3 今後の主な課題

ISS 搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理については、現在、次の検討に取り組んでいる。

- ・洞窟訓練時の Rn 被ばくの線量算定方法の検討
- ・線量制限値を超えるような被ばくをした場合の対処方法の検討
- ・国際放射線防護委員会 (ICRP) による水晶体のしきい線量の見直しへの対処検討

特に水晶体閾線量の見直しへの対処については、見直す場合、JAXA 内のルール変更に限らず、ISS 運用ルールの変更となるため、米国等、国際的な動向を見ながら検討している。

しかしながら、ISS 搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理については、ルールに基づき一通りの運用を行うということができており、今後の最も重要な課題は、これらをいかに効率的に実施できるようにするか、という点にあると考えている。これらを効率的に実施する手法は放射線被ばく管理運用の自動化・自律化に繋がり、その技術は、ISS 計画に続く有人宇宙活動にも活かされると考える。