もう一つの月世界へ: 火星衛星探査計画MMX その15 ～IREMの旅，地磁気圏を超えた高エネルギー粒子の海を臨む～

相田 真里[1], MMX IREMチーム

（要旨） 火星衛星探査計画(Martian Moons eXploration) に搭載されたIREMは，300 MeVまでの高エネルギー粒子（水素からケイ素）を観測する放射線環境モニタである．地磁気というバリアのない深宇宙は，数百MeVからGeV領域の高エネルギー粒子の海とも言える．しかし，火星や近傍の実測例は100 MeV程度の粒子がほとんどである．IREMはその数倍の高エネルギー粒子を，地球と火星衛星を往復する5年にわたって観測し続けるため，そこで得られるデータは，国際的にも貴重な観測データになり得るはずだ．本稿では，宇宙放射線の基礎知識や測定方法の基本を含めながら，IREMの仕様や地上試験について紹介する．

1. はじめに

宇宙放射線を観測する目的は，研究者によって様々であるが，JAXAでは大きく2つに分類できると考える．一つは，純粋なサイエンスとして，宇宙の成り立ちあるいは宇宙環境を知りたいという目的である．もう一つは，宇宙機の探査期間や宇宙飛行の滞在期間のうちに，どの程度の被ばくが生じるかを精度よく試算することである．今回の火星衛星探査計画(Martian Moons eXploration: MMX)に搭載される惑星空間放射線環境モニタ(Interplanetary Radiation Environment Monitor: IREM)の開発目的は，後者の背景が強く，将来の宇宙飛行士の被ばく管理にとても貴重なデータにつながると考えられる．ここで勘が鋭い人は，2000年から運用が始まった国際宇宙ステーション(ISS)で，25年以上にわたり宇宙飛行士が滞在しているのだから，今さら被ばく管理なんて・・・と思う方もいるかもしれない．アルテミス計画をはじめ，これからの国際探査では，月や火星における長期間の有人探査が本格化する予定だが，課題も多い．では，何が問題なのか？宇宙放射線の観点で言えば，宇宙飛行士のみならず宇宙機にとっても1つの境界となるのが地磁気だ．地磁気圏内の地上で生活する私たちが，宇宙放射線の影響をほとんど考えることはないだろう．夏は暑ければ薄着をし，防護服などを身に着けなくてもお風呂に入れる．多くの人が気にするのは外出時の紫外線くらいだろうか？これは地磁気そして大気が大量に降り注ぐ宇宙放射線をある程度カットしてくれているおかげだ．ISSも地磁気の恩恵をいくらか受けている．ただし，いくら地磁気圏内にいたとしても，高度が大きくなるにつれ，人体に影響するリスクは高くなる．地上の私たちが年間に浴びる放射線量は約2.1 mSvと言われている[1]．これは病院でCT検査を受けた場合，1度で浴びる放射線量に等しく，高度400 kmのISSにいる宇宙飛行士が2-3日で浴びる量に等しい．そして，月や火星など地磁気圏外での放射線量はどうだろうか？まだ未知数なところもあるが，ISSで浴びる線量の2倍以上だと言われている[2]．このように，地磁気圏外で人類が生活することがいかに大変で，常に宇宙放射線の脅威と戦わなければならないかがわかるだろう．地磁気圏内および周辺環境で起こる現象については，これまで多くの研究者たちが放射線モニタで観

1.宇宙航空研究開発機構
aida.mari@jaxa.jp

測し，論文などで報告されているので，ぜひ閲覧していただきたい．次の章では，月や火星の環境をはじめとした地磁気圏外で起こり得る放射線環境について説明する．

2. 地磁気圏外の放射線環境

前述したとおり，地磁気圏外ではいわゆるバリア的存在がないことから，様々な種類やエネルギーの強さの放射線の影響を考慮する必要がある．この章では，特に人体に影響するとされる太陽フレアと銀河宇宙線 (GCR)について述べる．宇宙環境では，地球で例えると晴れた穏やかな日もあれば，台風のような大荒れの日など様々である．このことを，「宇宙天気」と表現することもある．一般的には，太陽活動の周期に依存し，図1のように11年周期で変動する．太陽活動の極大期では，太陽の黒点が増加し，太陽フレアと呼ばれる爆発的な現象が発生する傾向にある[3]．太陽フレアが起こると，90-95%がプロトンで構成される太陽高エネルギー粒子(SEP)が発生し，宇宙飛行士の被ばくや宇宙機の損傷が懸念される．他にも，通信状態やGPSなどのインフラにも影響し，しばしばニュースで報じられることから，私たちにも馴染みのあるワードではなかろうか．宇宙天気では太陽フレアがトリガとなり磁気嵐と呼ばれる現象も起こることから，台風のような大荒れの様子を想像していただきたい．一方で，太陽活動極小期には，GCRが極大期を迎える．GCRもSEP同様，約85%の大部分がプロトンである．その他，約12%がヘリウム，電子･陽電子を除く残りの1-2%が重イオンで構成されている[4]．GCRが極大期であっても，この時期は大荒れの太陽活動極大期と比較して落ち着いた状況であるため，「平穏期」と呼ばれる．ではここで本題に戻るが，このような宇宙環境で宇宙飛行士が長期滞在を実現するには，どのような対策を講じればよいのだろうか．結論から言えば，基本は遮蔽をすることで身を守ることしかできない．ただし，遮蔽方法には放射線の種類によって工夫が必要となる．前述のとおり，SEPもGCRのほとんどがプロトンで占める．ただし，両者ではエネルギーと量の観点から全く別物という見方もできる．SEP由来のプロトンは，エネルギーが数MeV-数百MeV，速さも光速の数%-数十%である．一方，GCR由来のプロトンは，数百MeV-数GeV，速さは光速と同程度である．こ

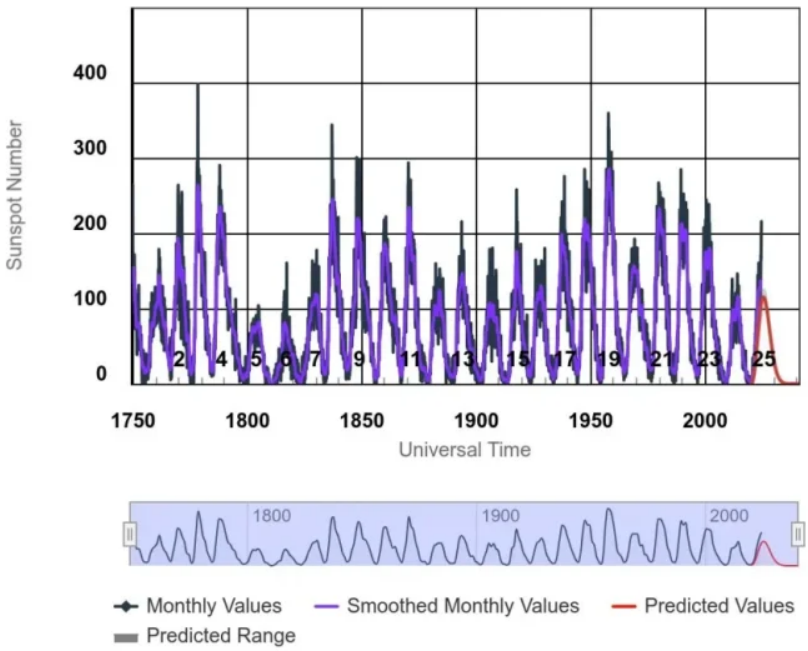


図1. 11年周期で変動する太陽活動 (Space Weather Prediction Centerより).

の場合，SEPによるプロトンは数mm-数cmの金属板などを置くことで，遮蔽可能と言われている．月の長期滞在をする場合，もし太陽フレアが発生した場合には，月面に存在する縦穴などの岩陰に避難するという計画もある[5]．一方で，GCRによるプロトンはある程度の厚みがなければ突き抜けてしまう．ただし遮蔽の厚みが大きいと，今度は二次放射線を発生させてしまうこともあり，扱いが困難となるが，ここで詳細は割愛する．両者の違いを一言で説明すると，SEPはエネルギーが低いが量は多く，GCRはその逆である．つまり，SEPは数が多い分，当たる確率も高くなるが，GCRは数が少ないが，1発でも当たると致命傷となる，そんなイメージである．では，このように遮蔽材を簡単に突き抜ける高エネルギー粒子を，どのように測定すればよいのだろうか．次の章では，測定方法の基本原理を説明する．

3. 高エネルギー粒子は止めて測るが鉄則?!

この章では，SEPやGCRをはじめとした放射線粒子の一般的な測定原理について述べる．

粒子測定をするといえども，単に観測器のセンサに入り込んだ粒子の数をカウントする方法や，粒子の種類やそのエネルギーをセットで同定する方法などがある．イメージが湧かない人のために，簡単な例を挙げる．野球選手である投手Aと投手Bがキャッチャーに向かって異なる速さでボールを投げるとする．仮にキャッチャーが目を閉じたまま，AとBが投げたボールを受ける場合，ミットに何個ボールが当たったかはわかるが，どの投手が投げたかまでは判別がつかないであろう．ミットを検出器として考えた場合，放射線のカウント数は検出できるが，どの粒子がどれくらいの速さ (エネルギー)なのかを同定することは困難である．そして，エネルギーを測定するためには，必ず粒子をキャッチしなければならない．

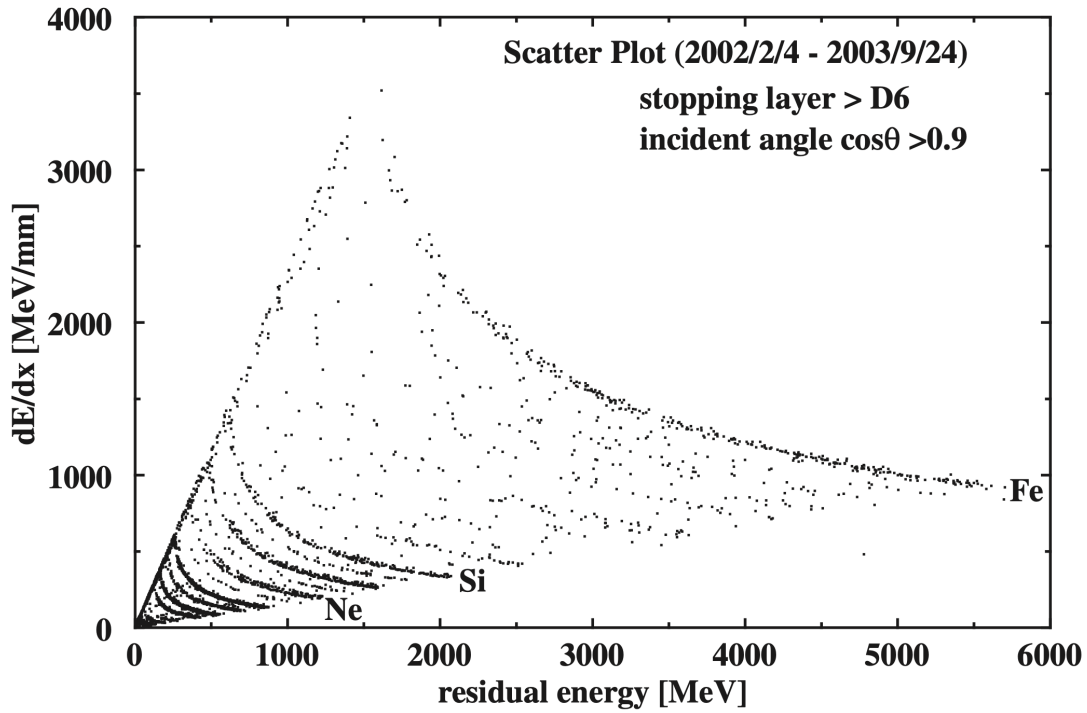


図2. ⊿E-Eプロットの概念図[7].

粒子が検出器をかすめて飛び続けてしまえば，飛んできた粒子の一部のエネルギーしかわからないことになる．そして高エネルギー粒子であれば検出器を突き抜けてしまうため，さらに測定が困難となる．高エネルギー粒子を確実に止めて検出するためには，通常は検出器の前に減速材を置くことが多い．なんとなく測定のイメージをわかっていただけただろうか．この測定原理は，⊿E-E法と呼ばれる古典的な方法に基づく[6]．2組のセンサを用いて，1枚目のセンサをすり抜けた粒子を2枚目のセンサで確実に止める．センサにはシリコン半導体が用いられ，1枚目のセンサでわずかに落としたエネルギーを⊿Eとし，2枚目のセンサで落とすエネルギーをEとする．荷電粒子が物質中を進むとき，単位あたり長さの損失エネルギーは，ベーテ・ブロッホの式という物理法則に従い，粒子の電荷の自乗と質量の積に比例し，全エネルギーに反比例する．そのため，⊿Eを縦軸に，Eを横軸にプロットすることで，反比例のカーブが描かれる．これは荷電粒子と質量の積が，粒子の種類ごとに異なることを利用するため，原理的に重なることはない(図2)．2枚目のセンサで確実に粒子を止めるためには，センサ同士の間に減速材を設置しなければならない．そのため，エネルギーが高い粒子ほど，減速材の厚みも増える．つまり宇宙で高エネルギー粒子を測定するには，必然的に観測器の質量が大きくなるということだ．このことは，多くの場面で宇宙機の質量に制限をかけられるので，機器開発者の頭を悩ませる課題の一つである．一方で，1枚目のセンサを素通りできないほどエネルギーが小さい場合には，この原理は適用されないことにも注意いただきたい．

4. IREMの開発

4.1 放射線モニタの観測例

これまでに深宇宙の放射線環境および高エネルギー粒子の測定原理について概要を説明した．この章ではIREMの開発の意義と仕様について述べる．JAXA研究開発部門の環境領域では，これまでにTEDA，SEDAなどの放射線モニタを開発してきた[8]．これらは，地球周回衛星に搭載されており，特にプロトンのエネルギーの測定レンジは数MeV-160 MeV程度である．今後，月や火星をはじめとした地磁気圏外での探査計画が加速することから，より高エネルギーな放射線モニタの開発が求められている．ここでIREMとの比較のため，海外機器の例を挙げる．火星およびその付近の観測モニタの例として，2011年にNASAが打ち上げたMSL搭載のRADがあげられ，火星表面において，100 MeV以下のプロトンを計測するとされている[9]．また2013年に打ち上げたMAVEN搭載のSEPでは，火星の上層大気を測定対象としていることもあるが，数十keV-数十MeVとされる[10]．これらの放射線モニタと比較すると，300 MeVまで観測できるIREMは，今後，国際的にも貴重な実測データの一つになると期待される．

4.2 IREMの装置構成

次に，IREMの仕様を表1に示し，IREMとセンサ断面図を図3に示す．IREMは，15 MeV/nから300 MeV/nまでのプロトンおよび重粒子を計測するが，質量に制限があることから，ΔE-E法と飛程を利用したΔE-Range法を組み合わせることで高エネルギーの放射線観測を実現した．センサ部の視野開口部には，センサ外部からの入射粒子のトリガ誤検知を避けるため，40 MeV程度の入射陽子が遮蔽できるタンタル素材のコリメータを設置した．粒子の入射方向を知るために位置検出用のSiセンサ(Position Sensitive Detector：PSD)2枚，15-300 MeVまでの損失エネルギーを計測するSiPINフォトダイオード(以下SSDと表記)17枚，減速材(Cu)6枚から構成されている．積層部分のSSDは，後段のSSDと区別するためML-SSDと表記する．ML-SSD1およびML-SSD2とML-SSD3の組み合わせは，主に低エネルギー粒子を検出するために使用され，3章で述べたΔE-E法により処理される．一方，高エネルギー粒子については，ML-SSD1とSSD1-SSD6の信号の有無でΔE-Rangeの関係から処理を行い，各粒子とエネルギーチャネルを決定する．IREM同様，放射線モニタの多くがシリコン半導体センサを検出器として採用しているが，19枚ものセンサ数を搭載した放射線モニタは非常に珍しい．過去のJAXAの放射線モニタの例としては，ISSに設置されたSEDA-APのHITが18枚のシリコン半導体検出器を有す

表1. IREMの仕様.

サイズ	筐体	270 mm × 230 mm × 140 mm以内
質量	筐体	最大 6.0 ± 0.6 kg（公差10%）
視野開口部(視野角)	–	66度（±33度）以下（四角錐）
G-factor	–	0.4 cm²sr以上（Proton、300 MeV以上）
消費電力	–	20 W以下
観測対象	太陽フレア	H: 15–300 MeV >300 MeV（カウントのみ）
	銀河宇宙線	HからSiまでの粒子 H: 15–300 MeV >300 MeV（カウントのみ）
線エネルギー付与(LET)	–	下限: 1 keV/um以上（H相当以上） 上限: 600 keV/um（O相当、目標）

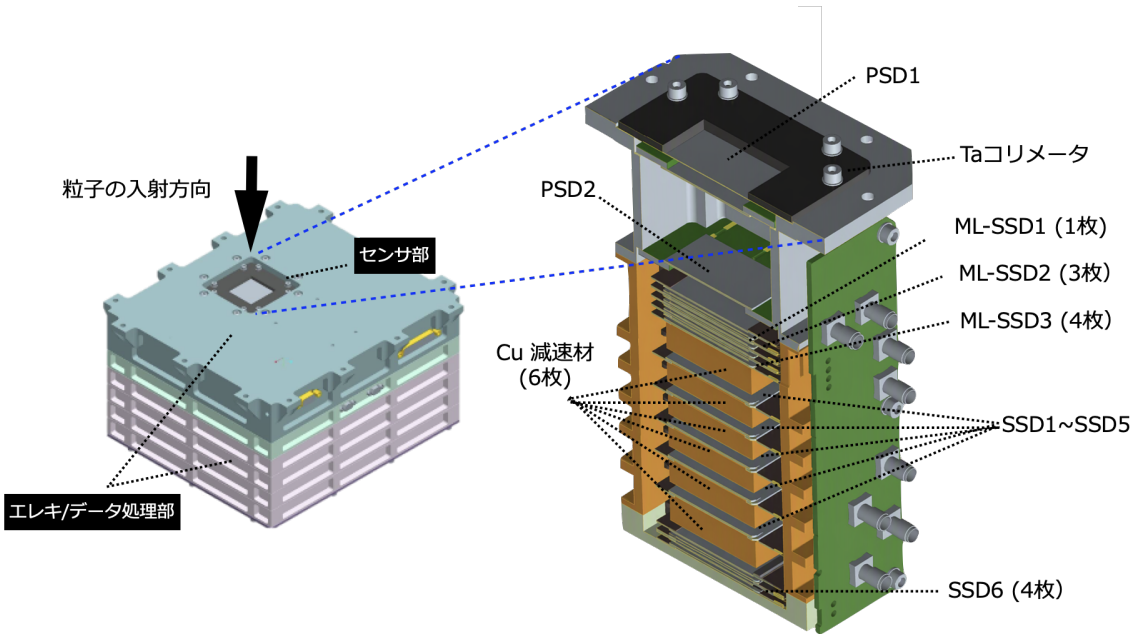


図3. IREMとセンサ断面の概念図.

るくらいだ．ただし，重粒子の測定に特化しており，ISSの軌道が地磁気圏内にあるため，最もエネルギーが高い粒子でも，約150 MeVの鉄 (Fe)が上限となる[11]．その意味でも，IREMは単体の観測器で，高エネルギーのプロトンと重粒子の両方を計測できるハイブリッド型な検出器であるため，今後の深宇宙探査の様々な場面で応用できるはずだ．

4.3 IREMの運用

IREMは図4のようにMMX衛星の復路モジュールに搭載されており，地球圏から火星衛星到着，火星離脱から地球帰還までを観測する．約5年の運用期間(クリティカル運用等を除く)において常時観測を行う．MMXの運用時期は，当初2024年打上げの予定が2年の延期により2026年に変更となったものの，太陽活動極大期の最中である．1章でも述べたとおり，この時期は太陽フレアの発生頻度が高まり，SEP等の検出が期待される．IREMは，常時観測および太陽フレア発生時の判定を行う．図5に示すように，10秒に1回のカウントデータを出力，その他の時間では各検出器の波高値等の情報が得られるリストデータを出力する．また，ミッションデータとは別に毎秒HKデータを出力する．但し，データのダウンリンクができる容量に制約があるため，火星軌道におけるクリティカル運用では，間引き運用を実施する．間引かれたデータは，地球に帰還するカプセルに格納されるハードディスク(RDR)に記録される予定である．カウントデータについては，粒子弁別及びエネルギー弁別がオンボードで行われる．HからSiまでの14核種に対して，エネルギーチャネルに弁別されて，カウント値が積算される．これをLook-up Table(LUT)と呼ぶ．このLUTは，プロトン，重粒子，またIREMセンサーで突き抜けた粒子について，あらかじめ放射線輸送シミュレーションコードGeant4を用いることで事前に作成した．

5. 地上試験

IREMは放射線モニタであるため，地上では加速器を有する大学や病院などの限られた施設で照射

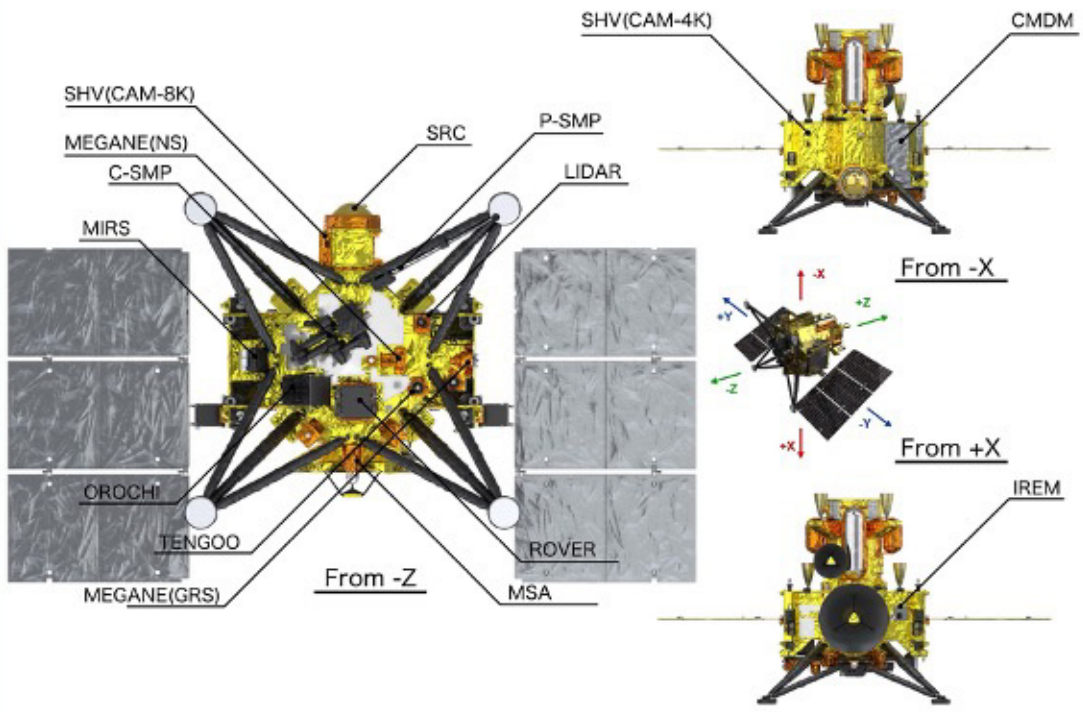


図4. MMXとIREMの搭載位置 (JAXA/ISAS).

時間	フォーマット	
n+1 秒	HKデータ	カウントデータ
n+2 秒	HKデータ	リストデータ
n+3 秒	HKデータ	リストデータ
n+4 秒	HKデータ	リストデータ
n+5 秒	HKデータ	リストデータ
n+6 秒	HKデータ	リストデータ
n+7 秒	HKデータ	リストデータ
n+8 秒	HKデータ	リストデータ
n+9秒	HKデータ	リストデータ
n+10 秒	HKデータ	リストデータ
n+11 秒	HKデータ	カウントデータ

図5. 観測データの処理.

試験が行われ，性能が評価される．またIREMの観測要求は300 MeVという高エネルギーであるため，これだけの高エネルギー粒子を出力できる施設は，国内でも数えるほど少ない．そのため，プロトンのみならず，HeからSiまでの各重粒子を照射して検証することは現実的ではない．このようにIREMのみならず，放射線モニタの性能検証には制約も大きいため，特定の粒子を照射し，その結果をシミュレーションの値と比較することで校正を行うことが一般的である．最終的には，観測対象である全ての粒子に対して，入射角度やエネルギーを変化させて計算を行う．したがって，照射試験の限られた実測値データとシミュレーションによる事前評価が重要となる．IREMの地上試験としては，東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(Cyclotron and Radioisotope Center: CYRIC)において最大80 MeV/n程度のプロトン照射をおこなった．そして，山形大学(医学部 東日本重粒子センター)にて，最大430 MeV/n程度の炭素イオン (12C)を用いた重粒子の照射試験を行った．実測値とシミュレーション評価の一例として，667 MeVの12Cを照射した場合，ML-SSD1～3に与えたエネルギーのピーク値を図6に示す．これより，MLSSD1とMLSSD2で吸収されたエネルギーは，Geant4の結果とピークの位置も同程度であり良好な結果と言えることがわかった．

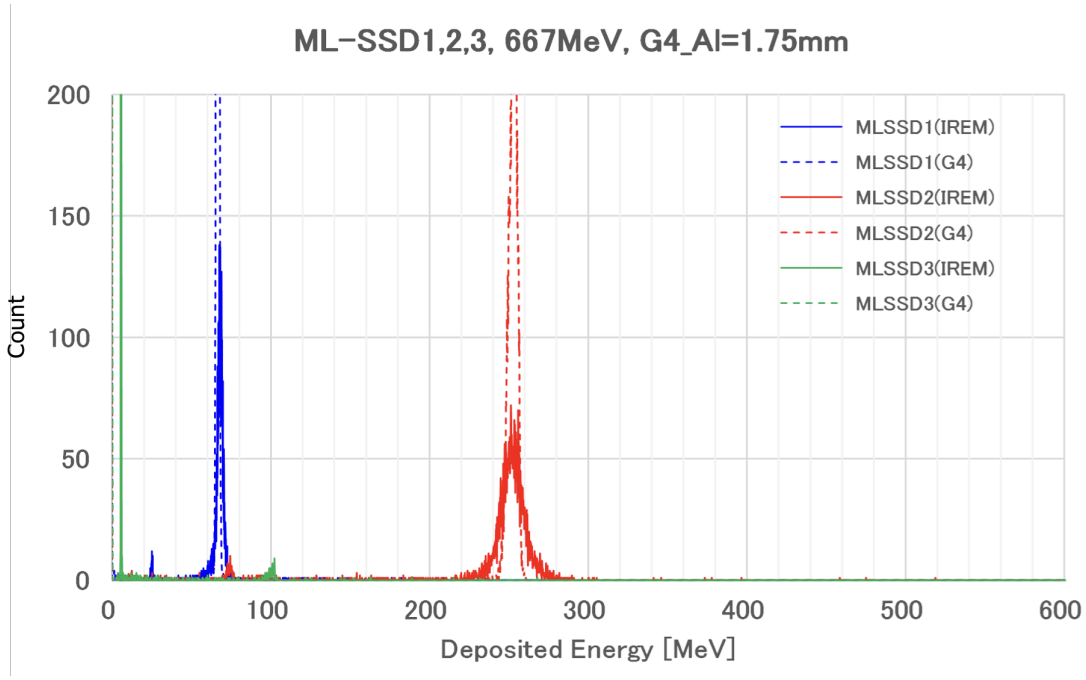


図6. 667 MeVの12Cを照射した結果.

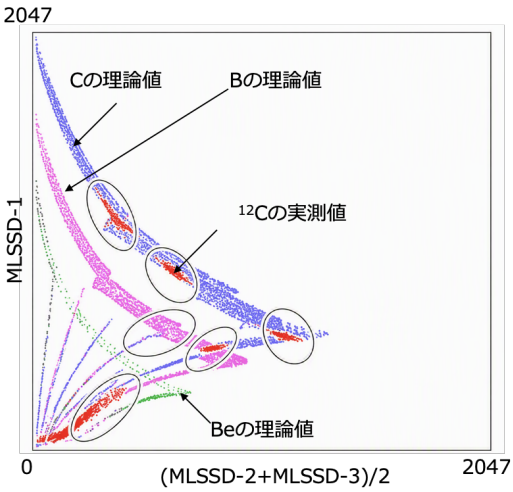


図7. 実測値とGeant4による理論値の比較(ΔE-E).

MLSSD3においては，本条件での入射エネルギーでは，到達しない範囲であるため，図6には示されていない．

次に，ΔE-E特性に関して，Geant4の結果と一部実測値を合成したものを図7に示す．横軸にML-SSD2とML-SSD3が吸収したエネルギーの合計の半値を，縦軸にはML-SSD1が吸収したエネルギーを用いて，2次元プロットしたものである．さらに，別の核種においても，同様なシミュレーション計算を行うことで，図8のように核種ごとに弁別したプロットを得ることができる．IREMの運用中に，これらのプロットを参照することで，リストデータを用いた詳細解析をする前に放射線の核種とエネルギーレベルがある程度視覚的に把握できる．このようにIREMは300 MeV程度までのエネルギースペクトルを取得し，仕様要求を満たせることがわかった．しかし人体被ばくへの影響評価を行う上では，300 MeV以上のエネルギー，目標としては数GeVレベルの情報が有用である．そのため，IREMが約5年の運用で得られた放射線の実測値をシミュレーション計算とうまく融合させることで，運用後はより高エネルギーのスペクトルを予測しようと考えている．

6. おわりに

IREMは地球から火星周辺を通過し，地球に帰還するまでの約5年間のフライトを行う．観測要求として300 MeVという高エネルギースペクトルを検出するにもかかわらず，搭載質量に制限があるため，装置構造に工夫が必要であった．過去の放射線モニタにはなかった，19枚のシリコン半導体センサと6枚の銅の減速材を組み合わせることで，高エネルギー

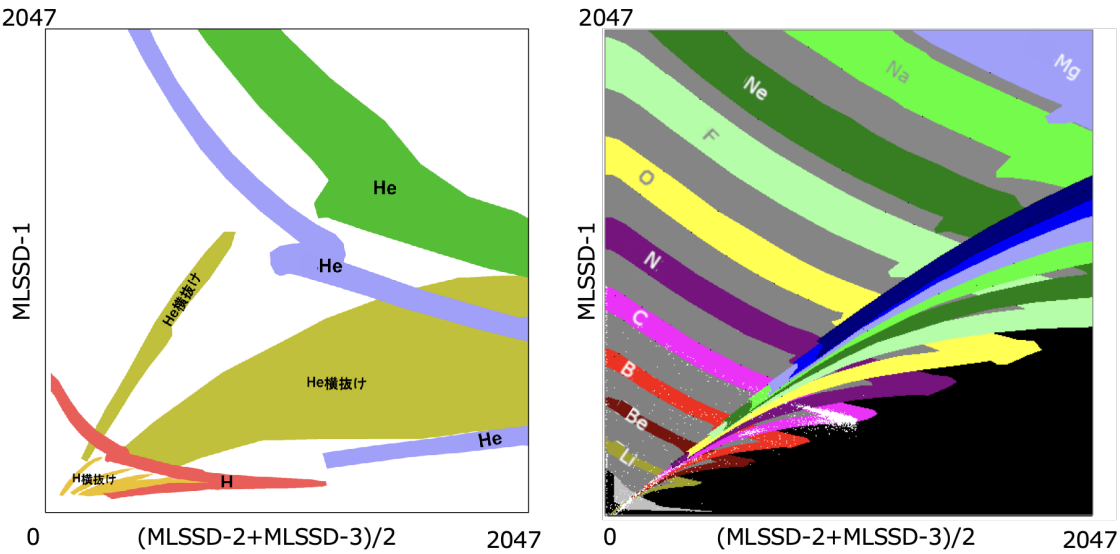


図8. Geant4によるH-Siを入射した場合の⊿E-E特性.

のプロトンとSiまでの重粒子両方の地上観測を実現した．NASAなどの海外機器が数十keV-100 MeV程度のエネルギー測定レベルであることを考慮すると，国際的にも貴重な観測データになると期待される．また，MMXは13のミッション機器が搭載されており，特に火星周辺では様々なフェーズを経てアクロバティックな運用が設定されている．5年間で得られたデータは，月や火星の有人探査における被ばく予測のために利用される予定である．一方で，IREMは復路モジュールに搭載され，長期間にわたって常時観測を行うため，別の観測機器で得られた珍しい現象や不可解なトラブルが生じたとしても，IREMのデータがサイエンスや原因究明の一助になることを信じている．

[1] 市川龍資ほか，2013, RADIOISOTOPES, 62, 927.
[2] Sato, T. et al., 2017, Radiation Protection Dosimetry, 180, 146.
[3] International Commission on Radiological Protection, 2013, Annals of the ICRP, 42.
[4] Matthiä, D. et al., 2013, Advances in Space Research, 51, 329.
[5] Haruyama, J. et al., 2009, Geophysical Research Letters, 36, L21206.
[6] Knoll, G. F., 2013, 放射線計測ハンドブック第4版（オーム社）.
[7] Matsumoto, H. et al., 2005, Japanese Journal of Applied Physics 44, 6870.
[8] Matsumoto, H. et al., 2012, IEEE Transactions on Nuclear Science, 59, 1054.
[9] Hassler, D. M. et al., 2012, Space Science Reviews 170, 503.
[10] Jakosky, B. M. et al., 2015, Space Science Reviews 195, 3.
[11] Ueno, H., et al., 2015, IEEE, 62, 2825.

著者紹介



相田 真里

2018年4月，宇宙航空研究開発機構(JAXA)に入社．東京工業大学 総合理工学研究科 創造エネルギー専攻 博士課程修了．博士(工学)．在学中に日本学術振興会 特別研究員(DC1)に採択．現職では，研究開発員として，主に月面の水資源探査用分析装置の開発やシミュレーションを用いた宇宙放射線による有人被ばく線量を計算している。プロジェクトはMMX搭載IREMの開発責任者を務めるほか，OMOTENASHIや進行中のLUPEXを経験．