

宇宙機器の放射線耐性研究に活用される 若狭湾エネルギー研究センターのイオン加速器施設

2021年7月

本年5月、学術雑誌 *Quantum Beam Science* に、宇宙機器の放射線耐性を調べる研究に活用される若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)の加速器施設と、その最近の成果を紹介した英文論文が掲載されました。ここでは、この論文の日本語による概要を示します。

なお、英文論文は、オープンアクセスのため、以下のサイトから、どなたでも無料で読むことができます。

[QuBS | Free Full-Text | Ion Accelerator Facility of the Wakasa Wan Energy Research Center for the Study of Irradiation Effects on Space Electronics \(mdpi.com\)](https://www.mdpi.com/QuBS/Free-Full-Text/Ion-Accelerator-Facility-of-the-Wakasa-Wan-Energy-Research-Center-for-the-Study-of-Irradiation-Effects-on-Space-Electronics)

1 はじめに

2000年に利用が開始されたエネ研の加速器施設は、シンクロトロン、タンデム加速器、イオン注入器の3台のイオン加速器から成り、全国有数の施設と言えます。

これまでに、がん治療のための臨床陽子線照射研究、イオンビーム照射により誘発される突然変異を利用した品種改良、イオンビーム照射による材料特性改質、イオンビーム分析等、様々な分野で活用されてきました。特に近年では、宇宙産業の発展や福井県の人工衛星開発への参入などの動きに伴い、宇宙空間で利用される材料や電子機器等の放射線耐性試験に、エネ研の加速器の利活用が盛んになってきました。

太陽等からは、エネルギーの高い電子やイオン等の放射線が放出されています。大気や地磁気存在によってこれらの放射線の強度が大きく減衰する地上に比べて、宇宙空間では、放射線による影響ははるかに大きくなります。従って、宇宙機器には、放射線によって壊れたり誤動作したりしないこと、すなわち、高い放射線耐性が求められます。

そこで、宇宙で利用される機器は、事前にどの程度の放射線耐性があるか、地上において試験し、想定運用年数に耐えられるものを選定します。この過程で、宇宙空間の放射線を模擬するためイオン加速器が利用されます。

2 エネ研加速器の概要

エネ研の3台のイオン加速器のレイアウトとビームラインの全体像を図1に示します。水素やヘリウムなどの気体元素のイオンを発生させる荷電変換型イオン源、または炭素やニッケル等の固体ターゲットからイオンを発生させるプラズマスパッタ型イオン源によりイオンを生成し、タンデム加速器で加速します。加速されたイオンは照射室1および照射室2の各ビームラインに送られ、ここで各種試料に照射することができます。またタンデム加速器はシンクロトロンの入射器としても用いられ、タンデム加速器で得られた高エネルギーイオンは、シンクロトロンによりさらに加速されます。シンクロトロンからのビームは照射室3および照射室4で利用することができます。さらに、タンデム加速器やシンクロトロンの

系統とは別に、照射室 1 にはイオン注入器が設置されており、大電流の各種イオンビーム照射が可能です。

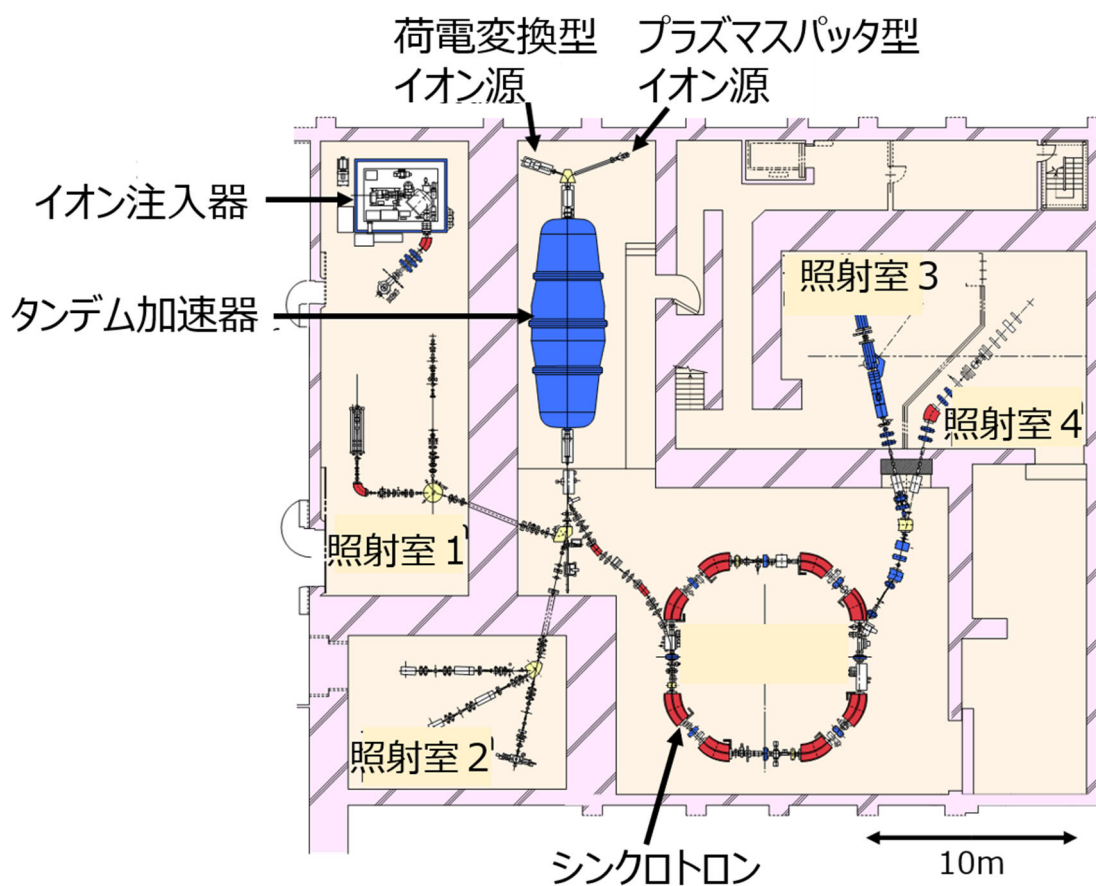


図 1 イオン加速器施設の全体像

2.1 タンデム加速器

タンデム加速器は高電圧整流型の加速器で、最大 500 万ボルト(5 メガボルト : 5 MV)¹の電圧を発生させることができます。この電位差(電圧)を利用して、まずマイナスイオンを加速し、加速器内の高圧ターミナルでイオンの電荷をプラスに変換した後、さらに加速し、高エネルギーイオンを得ることができます。2 段階に分けて加速することから、この加速器は「タンデム」と呼ばれます²。陽子(水素原子核)については最大 10 メガ電子ボルト(MeV)³、ヘリウムイオンについては最大 15 MeV まで加速することができます。図 2 にタンデム加速器の写真を示します。加速管や高圧ターミナルなどの主要な部品は、全長 10.4 m の巨大な円筒型絶縁タンクの中に収められています。

¹ 乾電池が 1.5 V なので、約 380 万本の乾電池を直列にした電圧と同じです。

² タンデム加速器の仕組みについてはエネ研 HP を参照。

<http://www.werc.or.jp/outline/shisetsu/gaiyo/tandem.html>

³ 1 V の電位差で加速した 1 価のイオンが得るエネルギーを 1 電子ボルト(eV)と定義します。



図 2 タンデム加速器

2.2 シンクロトロン

シンクロトロンはタンデム加速器で加速されたイオンをさらに高エネルギーにする加速器です。図 3 にシンクロトロンの写真を示します。高周波空洞によるイオンビームの加速と電磁石による磁場の変化を同期(シンクロ)させることにより、周長 33 m の円周上に軌道を保ったまま、イオンの加速を行います。陽子を最大 200 MeV、ヘリウムイオンを最大 220 MeV、炭素イオンを最大 660 MeV まで加速することができます⁴。



図 3 シンクロトロン

⁴ シンクロトロンの仕組みについてはエネ研 HP を参照。
<http://www.werc.or.jp/outline/shisetsu/gaiyo/sinkurotoron.html>

2.3 イオン注入器

イオン注入器から得られるイオンは、タンデム加速器やシンクロトロンからのイオンよりも低いエネルギーですが、大電流の照射が可能な加速器です。最大 200 キロボルト(200 kV)の電位差で加速することができます。イオン注入器の全体像を図 4 に示します。イオン源では、マイクロ波により、水素やヘリウム等のガスをプラズマ状態⁵にさせることでイオンを発生させています。ほかにも、炭素、窒素、酸素、ネオン、アルゴン等、様々なイオンを最大 200 keV まで加速することができます。

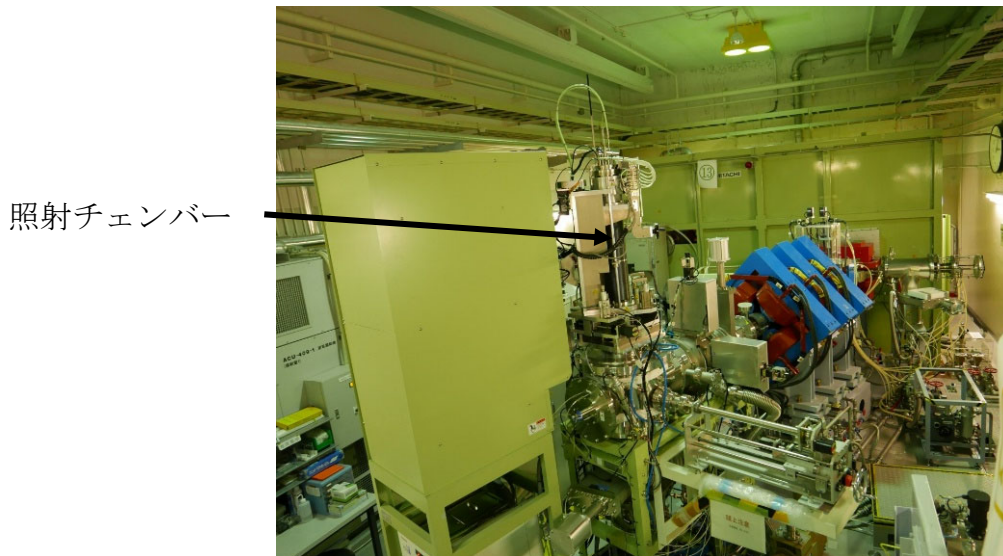


図 4 イオン注入器

3 ビームライン

図 1 で示したように、各加速器からのビームは照射室 1～4 へ振り分けられたビームラインに導入されます。特に照射室 3 では、2009 年まで陽子線照射によるがん治療臨床研究が行われていました。エネ研で培われた陽子線がん治療の技術は、現在、福井県立病院・陽子線がん治療センターに移転され、日々、活用されています。

ここでは、主に宇宙機器への照射という視点から、各照射室に設置されたビームラインと照射装置について説明します。

3.1 照射室 4 のビームライン

照射室 4 のビームラインは、イオンビーム育種や宇宙機器の放射線耐性評価のために利用されています。ビームは 10 センチメートル(cm)四方程の大きさに広げることができ、そのときの電流は 3 ナノアンペア(nA : 10 億分の 1 アンペア)以下です。宇宙機器の放射線耐性試験では、主に 50–200 MeV の高エネルギー陽子(H⁺)ビームを用いて宇宙で放射線を浴

⁵ プラズマ状とは、原子における電子を分離し電氣的に正または負の状態にあること。

びたときと同じ条件を作り、1個のイオンの電離作用により過渡的に生ずる電荷がもたらす誤動作(シングルイベント効果)の発生が起こるかどうかの試験をします。そのためには、非常に小さな電流のイオンビームでの実験や、広い範囲での一様な照射が必要となります。エネ研では、より正確な宇宙機器放射線耐性試験のための照射環境の整備を進めています。

3.2 照射室2のビームライン

照射室2には、タンデム加速器により加速された中エネルギーイオン照射用のビームラインがあります。このビームラインに設置された照射チェンバー内には、冷却および加熱のできる試料台が備えられ、マイナス100℃からプラス700℃まで試料温度を変えることができます。宇宙では、太陽光に直接さらされるとときとその陰になるときで、高温から低温まで大きく温度環境が変化します。従って、照射中の試料温度を幅広い温度範囲で変更できる実験は大変重要です。ビームサイズを1cm四方程度以下から5cm四方程度の範囲まで変化させて照射することができます。典型的なビーム電流は1マイクロアンペア(μA) (100万分の1アンペア)以下です。このビームラインでは、宇宙機器に電荷が蓄積することによって生ずる劣化現象(トータルドーズ効果)や、宇宙機器材料中の原子をイオンが直接弾き出すことによる劣化現象(弾き出し損傷効果)を試験しています。

3.3 イオン注入器(照射室1)のビームライン

イオン注入器にはイオン注入やイオン照射専用のビームラインと照射チェンバーが設置され、チェンバー内には最大で一度に5つの試料を取り付けて照射することができます。このうち、最高1000℃まで加熱することができる試料台が3つ、室温で照射できる試料台が2つあります。ビームサイズは最大10cm四方程度まで広げることができ、典型的なビーム電流密度は $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (1平方センチメートル当たりの電流)です。このビームラインは、いろいろな種類の太陽電池の特性が、弾き出し損傷効果によってどのように劣化していくかという研究に用いられます。

4 宇宙機器の放射線耐性評価

最後に、公的研究機関や大学などとの共同研究で行われた宇宙機器の放射線耐性の最近の研究についていくつか紹介します。

エネ研の加速器施設では、これまでに、X線・ガンマ線測定用のCMOSイメージセンサー、MPPC(シリコン光電子増倍管)、ASIC(特定用途向けの集積回路)、電子基板、高電子移動度トランジスタ(HEMT)、シンチレータ、CCDイメージセンサー、太陽電池といった宇宙用電子機器の放射線耐性を評価してきました。また、「はやぶさ」で話題となった太陽系の衛星で水が生成される現象を模擬する実験も行い、宇宙空間での水分子の生成メカニズムについての論文も発表しています。

これらの研究について説明していきます。なお詳細は、Quantum Beam Science掲載の英文論文やその引用文献から調べることができます。

4.1 CMOS イメージセンサーの放射線耐性評価

X 線/ガンマ線天文学という天文学の分野があります。特に宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バーストの中でもその波長が大きく低波長に偏移(赤方偏移)したもの、すなわち、宇宙初期に発生したガンマ線バーストを手がかりとして元素合成や星の成り立ちの歴史を調べようとする試みがあります。

宇宙 X 線検出に CMOS イメージセンサーを用いる試みが行われています。CMOS イメージセンサーは、CCD(Charge-Coupled Device)イメージセンサーのような電荷移動(電流)を伴わず高電圧電源などのアナログデバイスが不要であり、さらに、CMOS を利用した集積回路製造プロセスを流用できるため、製造コストを抑えることができるなど、宇宙機器搭載用イメージセンサーとして優れた点を有します。

CMOS の MOS は MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)のことです。ゲート電極は酸化シリコン層により電荷の通り道(チャンネル)から絶縁されています。しかし、この絶縁層はどうしても不純物を含んでしまいます。その不純物の作る電界がプラスの電荷を引きつけてしまいます。陽子などの宇宙放射線が入射しチャンネルを電離し生じるプラス電荷が蓄積しトランジスタの特性をそこなっていくます。

そこで、金沢大学との共同研究により CMOS イメージセンサーの放射線照射に対する性能劣化に関して調べました。その結果、衛星の軌道上、6年間で浴びる放射線量と同等の陽子ビーム照射で、特性劣化が暗電流の増加として観測されました。

4.2 MPPC(シリコン光電子増倍管)の放射線耐性評価

ガンマ線バースト検出には、従来より用いられてきたシンチレーター(放射線により光を発する物質)、たとえば、ヨウ化セシウム (CsI(Tl))などを用いることもあります。シンチレーターで発生した光を電気信号に変換する素子に光半導体素子 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)が使われます。この素子は、よく用いられる光電子増倍管よりも低い電圧で用いることもでき、エネルギー分解能も優れています。MPPC は、陽子線照射により一時的な劣化を示しますが、照射後数か月間における劣化の回復(アニーリング)による性能の復活が認められることが、広島大学との共同研究により確かめられました。

4.3 ASIC(特定用途向けの集積回路)の放射線耐性評価

放射線検出器の信号を処理する電子回路の放射線耐性についても調べなければなりません。宇宙機に搭載する電子回路は、放射線検出や宇宙機の運航に必要な最低限の機能に限った電子回路が用いられます。宇宙放射線による誤動作への対応のため、冗長性をもたせなければならぬので、機能をスリムアップするのです。

東京工業大グループは、光半導体の一種である光センサーAPD(Avalanche Photodiode)の信号を処理するための集積回路 ASIC(Application-Specific Integrated Circuit)を開発しました。アナログ信号を増幅しデジタル信号に変換する回路(ADC)、イベント(事象)を検出す

るロジック回路⁶、信号を冗長化し、誤信号を検出する回路などから形成されています。

この処理回路で用いられる素子が CMOS です。4.1 の CMOS イメージセンサーのところでも述べましたが、電荷の移動をほとんど伴わないので、真空の宇宙空間において除熱の心配が軽減されます。さらに電源もスリム化できます。

4.1 では MOS 構造に起因する CMOS イメージセンサーにおける放射線損傷の蓄積効果について説明しましたが、CMOS を用いた集積回路ではさらに、たった一つの放射線入射が引き起こす影響も考えなければなりません。そこで、陽子ビーム入射が引き起こす電離により発生する信号(シングルイベントアップセット SEU)を検出する回路を用いて、照射線量に対する誤動作発生確率を調べました。

CMOS の C は Complementary(相補的)の頭文字で、P、N チャネル MOS-FET を相補的に用いることを表します。素子は、N 型半導体基板上に、P 型半導体でソース、ドレイン電極を形成した P-MOS、その隣に P 型半導体ウェルを埋め込み、N 型半導体でソース、ドレイン電極を形成した N-MOS が存在します。ここに、PNPN 接合が寄生します。これはサイリスタ(3 端子半導体素子)であり、放射線照射により P-ウェルに電荷が発生して、サイリスタのゲートが開かれ電流が流れ続ける、いわゆるシングルイベントラッチアップ(SEL)という致命的な誤動作が起こる可能性があります。この SEL の発生確率も調べられました。

さらに、九州工業大学との共同研究では、マイコンにおけるシングルイベント発生確率を照射陽子線のエネルギーとの関係で調べました。

4.4 放射線検出器の放射線に対する応答や放射化による劣化評価

青山学院大学のグループとは、X 線検出器として用いられるシンチレータ-LaBr₃(Ce)が宇宙線環境で放射化し、自身が発出するバックグラウンド信号に対する研究を行いました。さらに、名古屋大学のグループとは、実際の宇宙線環境までシンクロトロンビームの出力を下げ、検出器の動作確認の実験を行うとともに、さらには、検出器のエネルギー校正の可能性を探求しています。

4.5 HEMT(高電子移動度トランジスタ)の放射線耐性評価

GaN(窒化ガリウム)、GaAs(ガリウムヒ素)、InP(インジウムリン)などの化合物は、シリコンだけで作製された半導体素子と比較して、高速、高効率、低雑音といった優れた性能を持つトランジスタの作製に使われています。その中でも、GaN は高エネルギー粒子の入射による損傷を受けにくいと考えられるため、宇宙用電子機器での利用に適していると期待されています。エネ研では三菱電機との共同研究において、シンクロトロンで発生した陽子ビームを AlGaN/GaN HEMT(High-Electron Mobility Transistor)に照射し、破壊電圧が変化

⁶ イベント(事象): ここでは具体的には APD に X 線が入射し、あるレベル以上の電圧信号(アナログ信号)が発生するにいたったことを指します。この事象の発生をロジック回路が検出しロジック信号を出力します。このロジック信号は ADC の処理開始の引き金(トリガー)や事象の発生回数を記録するスケーラーへの入力などに使われます。

ちなみに、たった 1 個の粒子の入射という事象、すなわちシングルイベントにより数々の現象が引き起こされうることをシングルイベント効果といいます。

しないという結果が得られています。また、タンデム加速器で発生した 2 MeV の陽子ビームを照射し出力電力の変化などを測定した結果、地球の静止軌道上での使用に関しては、十分な放射線耐性を持っていることが分かりました。

4.6 火星の衛星探査機に搭載予定の CCD イメージセンサーの放射線耐性評価

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、火星の 2 つの衛星(ダイモス、フォボス)の探査のため、2020 年代半ばに探査機を打ち上げる予定です。地球と異なり、火星は磁気を有していないため、探査機に搭載される各種電子デバイスは広いエネルギー範囲の高強度陽子線にさらされます。そこで、JAXA との共同研究のもと、探査機に搭載される CCD イメージセンサーの放射線耐性を、タンデム加速器からの 8 MeV 陽子ビームを用いて調べています。

4.7 太陽電池の放射線耐性評価

ペロブスカイト太陽電池は、厚みを薄くかつ安価に製造できるといった特徴を持ち、次世代の電池候補の一つです。宇宙機ではロケット積載量の限界があるため、薄くて軽いペロブスカイト太陽電池は有力視されています。エネ研では JAXA と共同で、イオン注入器を用いたペロブスカイト太陽電池の放射線耐性を評価してきました。イオン照射前後の太陽電池試料に対して、結晶構造や光の吸収・放出特性を測定した結果、ペロブスカイト太陽電池には高い放射線耐性があることが分かりました。

ペロブスカイト太陽電池の他、3 接合型の太陽電池(InGaP/InGaAs/Ge)に対しても、JAXA と共同で放射線耐性を評価してきました。この研究では、照射方法の基準を策定するため、様々なビームエネルギーでの照射や、異なる照射条件における放射線耐性試験を行いました。具体的には、小さく絞ったビームを上下左右にスキャンする照射による結果と、広い範囲に均一なビームを照射したときの結果を比較しています。

4.8 太陽系における水生成過程の研究

地球に生命が誕生したのは、大量の水が存在したためだと考えられています。しかし、どのように太陽系で水が生成されたのかは、まだ解明されていません。この研究では、JAXA と共同で、太陽風(主に水素イオン)の影響により、水が生成された過程をイオン注入実験から実証しました。小惑星などの大気をまとわない惑星・衛星は、太陽風を直に受けます。惑星・衛星の岩石を模擬した試料に対して、イオン注入器により太陽風を模擬したイオン照射を実施した結果、表面に水分子が生成されることを示しました。

5 まとめ

エネ研の加速器施設は、太陽電池や放射線検出器、イメージセンサー、集積回路などの宇宙機器の放射線による劣化挙動や誤動作を地上で模擬するために活用されてきました。今後も、各研究機関や大学、企業などとの連携を通じて、エネ研のイオン加速器施設は、福井県や我が国の宇宙開発・宇宙産業に大いに貢献することが期待されます。