

## 量子マテリアルの研究開発を支えるイオンビーム技術

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

量子技術基盤研究部門研究企画部 農学博士 松橋信平

(高崎量子応用研究所勤務)

前号で紹介した量子機能創製は、たかさき研が30年にわたり培ってきたイオンビームの発生や制御を中心とするイオンビーム技術に支えられています。今回は、イオンビームを「観る(調べる)」ことや「創る」ことに応用した研究と、このために開発してきた高精度な照射技術、そして、イオンビーム技術のこれからの展開について紹介します。

## 宇宙環境材料の耐放射線性試験

宇宙空間で起きる電子部品の損傷

たかさき研が進めるダイヤモンドNVセンター型量子ビット<sup>※</sup>生成(「創る」)の研究は、宇宙用の半導体や太陽電池といった電子部品の耐放射線性試験(「観る(調べる)」)が起源で、研究の過程で開発してきたイオンビーム照射技術や結晶損傷生成の知見が基盤になっています。

宇宙空間には、星が発した様々な放射線が飛び交っています。高速で飛ぶイオンはエネルギーが高く、人工衛星に使われている電子部品に衝突すると、局所的な過電流が発生し、誤作動や損傷の原因となります。

イオンが当たる回数が増えるにつれ、電子部品の性能は徐々に低下し、人工衛星は制御や計測ができなくなります。つまり、電子部品が宇宙空間でイオンに曝されながらどれくらいの間機能を維持できるかが、人工衛星の寿命を決めているのです。宇宙空間で電子部品を正常に使用できる期間を正確に予測することは、人工衛星の打ち上げや運用の計画を

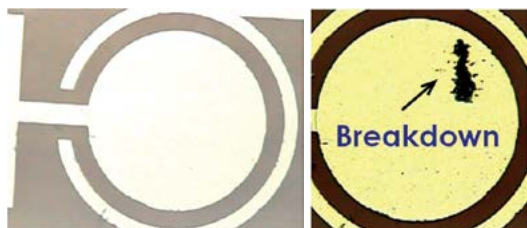


図1：半導体のイオン照射損傷試験。試験用SiC(炭化ケイ素)蓄電デバイス(左)にイオンを照射して生じた損傷絶縁破壊(右)。

立てる上でとても重要な情報です。

この宇宙空間で起きる電子部品の劣化を地上で再現して評価する研究が宇宙環境材料の耐放射線性試験です。

シングルイオンヒット技術  
イオン1個を狙った位置に当てる

図1で示した試験は、シングルイオンヒット誘起過渡電流(TIBIC)を評価するために構築したシステムで行ったものです。

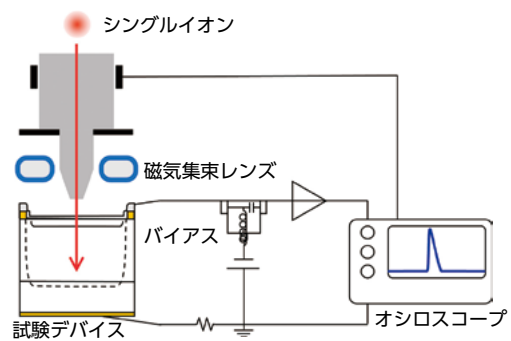


図2：TIBIC評価システムの概略図

耐放射線性試験のカギを握るのは、宇宙空間を飛ぶイオンと同じ高エネルギーイオンの生成と照準技術で、光の速さの数%まで加速した1個のイオンを、1/1,000ミリメートルの精度で試験用デバイスの狙った位置に照準照射する技術が必要です。

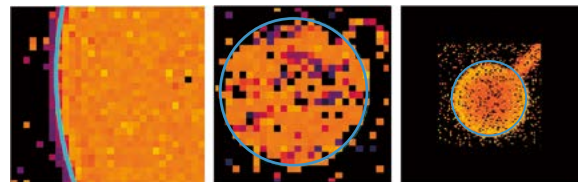


図3：シングルイオンの照準照射技術の進歩。

照準照射の高精度化により、半導体に発生する電荷が集中して分布する範囲(水色円で囲ったオレンジ色)を0.17ミリメートルまで狭めることに成功(右)。技術開発当初の(左)は2ミリメートル、開発途中の(中)は0.42ミリメートル。いずれの図も1辺は0.5ミリメートル。

## 耐放射線性試験から量子技術へ シングルイオン照射技術の展開

高速イオンによる電子部品の照射損傷過程を「観る(調べる)」ために開発されたのが、1/1,000ミリメートルの精度を持つシングルイオン照射技術です。たかさき研では、この技術を、炭素原子だけでできたダイヤモンドに窒素(N)イオンを照射して、窒素(N)とその隣にできた空孔(Vacancy)から成るNVセンターを「創る」技術へ応用を広げ、さらに、NVセンターを一定間隔の狙った位置に並べて生成させる技術へと進化させました。

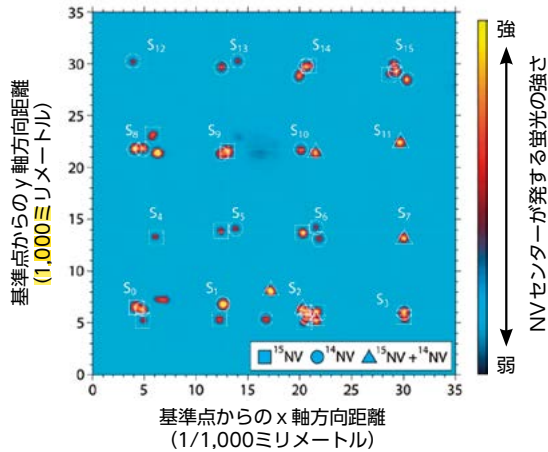


図4：NVセンターの規則配置生成試験。縦・横8/1,000ミリメートル間隔の交点に照準を合わせて照射し、NVセンター生成時のみに発生する特定波長の蛍光強度を測定。

ダイヤモンドNVセンター型量子ビットを量子計算に応用する場合、多数のNVセンターが相互に影響し合う距離に存在しなければなりません。これを実現する1/10万ミリメートルオーダーでの超精密照射技術の開発が目標ですが、1/1万ミリメートルを切る精度での精密照射技術がそのための第1段階としての開発目標です。

イオンビームの照射精度にはイオンビームの形が大きく影響します。現在、イオンビームをきれいな形に整えるために、豊富な経験を持つオペレータが、相互に影響する数十の数値や条件を調整しています。この作業は、AIを使ってビーム光学計算により最適なパラメータ(変数)の組み合わせを導き出し、短時間に最小のビーム径を自動で形成して、目標の達成へとつなげることを狙っています。

## 超精密イオン注入技術 1/10万ミリメートルスケールの実現

たかさき研では、さらに高い精度での超精密イオン注入技術の開発も狙っています。その精度は1/10万ミリメートル。現在の1/1,000ミリメートルから1/10万ミリメートルへ。2桁の精度の違いは、的の大きさが直径1メートルから直径1センチメートルになるようなものです。想像していただくと、技術的な難しさがおわかりいただけると思います。

実現には、いくつかの新しい技術の開発が必要です。ダイヤモンドに注入する窒素イオンのエネルギーや位置にばらつきがない状態で、加速・照射する必要があります。そのために、前号に出てきたイオントラップ\*という装置を使ってカルシウムイオンをレーザーで冷却し、そこに窒素イオンを入れることで、間接的に窒素イオンを冷却して静止させてから1個ずつ取り出します。この方法を使えば、軌道の径を1/10万ミリメートルまで集束できることがシミュレーションで分かっています。

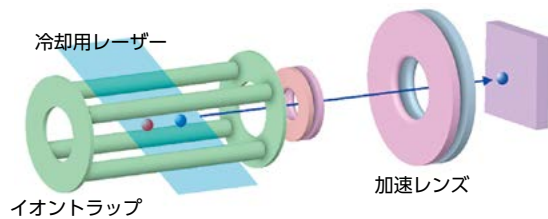


図5：イオントラップを使った超精密イオン注入技術のイメージ。窒素イオン(●)をレーザー冷却したカルシウムイオン(●)で冷却して静止させ、位置精度を高めてから取り出して加速する。

理論的に可能でも、実現には従来技術の壁のブレークスルーが必要です。必要となる新たな要素技術は、イオンビームの位置とイオンを注入する試験材料の位置を1/100万ミリメートルのレベルで制御する技術、窒素イオンの冷却、取り出し、加速、位置制御、試験材料への注入を短時間で連続的に行う技術です。

今回は、量子機能創製を支えるイオンビーム技術を紹介しました。イオンビーム技術はこれ以外の研究でも「観る(調べる)」や「創る」ことに幅広く応用され、たかさき研が進める多くの研究を支えています。

\*量子ビット、NVセンター、イオントラップ：詳細は本誌10月号参照。