

**【本件リリース先】**

3月10日(水) 15:00

(資料配布)

文部科学記者会、科学記者会、  
学研都市記者クラブ、茨城県政記者クラブ、

平成22年3月10日

独立行政法人日本原子力研究開発機構  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構  
国立大学法人広島大学  
国立大学法人名古屋大学

## 次世代光源用の直流電子銃で世界最高の500kVの電圧を達成

独立行政法人日本原子力研究開発機構(理事長・岡崎俊雄)量子ビーム応用研究部門の羽島良一グループリーダーら、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(機構長・鈴木厚人)加速器研究施設の本山将博特別助教ら、国立大学法人広島大学(学長・浅原利正)先端物質科学研究科の栗木雅夫教授および国立大学法人名古屋大学(総長・濱口道成)理学研究科の中西疆教授らの共同研究グループは、次世代光源用の高輝度大電流電子ビームを発生する直流電子銃として、世界最高の500kVの電圧を達成しました。

新型電子加速器であるエネルギー回収型リニアックを用いた次世代光源は、従来光源をはるかに上回る高輝度X線、大強度 $\gamma$ 線の発生が可能な装置として国内外で研究開発が進められています。次世代光源の性能を決定する重要な構成要素である電子源には、高輝度の電子ビームを大電流で生成する役割が課せられています。共同研究グループは、このための電子源として、光陰極を備えた直流電子源の開発を進めてきました。次世代光源の設計仕様である500kVの電圧は、現在運転されている同様の装置(米国ジェファーソン研究所、350kV)を超える電圧であり、高電圧を安定に保持するセラミック管の開発が課題でした。共同研究グループは、電圧が一様に印加できる多段積層型の大口径セラミック管を採用し、さらに、光陰極を支持するためにセラミック中に設置される金属支柱からの電界放出電子がセラミック管に衝突することを防ぐためのガードリングの形状を最適化することで、500kVの高電圧を安定に保持することに世界で初めて成功しました。今回の成果により、次世代光源の実現に大きく近づきました。

本研究の成果は、Review of Scientific Instruments 誌に3月10日号に掲載されます。

**【本件に関する問い合わせ先】**

独立行政法人日本原子力研究開発機構

(研究内容について) 量子ビーム応用研究部門 ERL光量子源開発研究グループ  
グループリーダー 羽島 良一 TEL:029-282-6701

(報道対応) 広報部報道課長 西川 信一 TEL:029-282-9421

大学共同利用法人高エネルギー加速器研究機構

(研究内容について) 加速器研究施設 加速器第7系

特任助教 山本 将博 TEL: 029-864-5200 (音声アナウンス後 4912)

(報道対応) TEL: 029-879-6047 広報室 宇佐美徳子

国立大学法人広島大学

(研究内容について) 先端物質科学研究科

教授 栗木 雅夫 TEL: 082-424-7035

(報道対応) 社会連携・情報政策室 広報グループ 和木光江 TEL: 082-424-6017

国立大学法人名古屋大学

(研究内容について) 理学研究科

教授 中西 疆 TEL: 052-789-2898

(報道対応) 理学研究科 研究員 奥見正治 TEL: 052-789-2896

## 背景

高エネルギー電子加速器を用いた光源として、これまで蓄積リング型X線光源や自由電子レーザーが開発され利用されてきた。これらの光源利用の高度化(測定の精密化、迅速化など)を一層進めるためには、光源性能の向上(輝度、強度の増大)が必要なことから、既存光源を超える次世代放射光源の開発研究が進められている。日本原子力研究開発機構(JAEA)、高エネルギー加速器研究機構(KEK)を中心とした研究グループでは、エネルギー回収型リニアック(ERL)と呼ばれる新型の電子加速器に注目し、これを用いた次世代放射光源の開発を行っている。ERLは、超伝導加速器においてエネルギー回収を行いながら、大電流かつ高品質の電子ビームを連続的に加速できる装置である。

ERLを用いた光源には、大強度赤外自由電子レーザー、高輝度超短パルスX線放射光源、大強度 $\gamma$ 線源などがあるが、これら光源の明るさ(輝度)と強さ(強度)を決める重要な技術が、大電流かつ高輝度の電子ビームを発生する電子銃である。電子ビームの品質である輝度は、電子ビームの発散の大きさを示す「エミッタンス」と呼ばれる量で表される。エミッタンスの小さな電子ビームほど高い輝度をもつ。

## 原理

共同研究グループは、高輝度の(低エミッタンスの)電子ビームを大電流で発生可能な電子銃として、半導体光陰極(フォトカソード)を備えたDC電子銃を採用し、その開発を進めてきた。このタイプの電子銃を採用した理由は次の通りである。(1)フォトカソードはレーザを半導体に照射して光電子を発生するもので、モードロックレーザからピコ秒の電子パルス列を直接生成し超伝導加速器へ入射できる。同時に低エミッタンス電子ビームの生成にも適している。(2)容易にCW運転を行うことができ、またDC電源の容量を大きくすることで大電流にも対応可能である。

図1に開発したフォトカソードDC電子銃の構成を示す。空間電荷効果による電子ビームエミッタンスの増大を抑止するためには、電子を高電界、高電圧で引き出す、すなわち、カソードとアノードの間隔を短くする必要がある。このような理由により、絶縁セラミック管を貫通するサポートロッドを使ってカソードを真空チェンバーの中央に設置している。サポートロッドはフォトカソードDC電子銃に特有の構造であり、一般的なDC加速管(イオン加速器など)には存在しない。

低エミッタンス大電流ビームの発生を目指したフォトカソードDC電子銃は、自由電子レーザー(FEL)やエネルギー回収型リニアック(ERL)を目的として、これまで研究が行われてきたが、350kVの運転実績(米国ジェファーソン研)が最大電圧であった。一方、次世代放射光源が要求する高品質電子ビームを得るには500kVの電子銃電圧が必要とされる。フォトカソード電子銃の高電圧化を阻む最大の障害は、サポートロッドからの電界放出電子がセラミック管を破損する現象である。図2(左)に示すように従来型のセラミック管ではサポートロッドから放出された電子がセラミック管の内表面に直接到達する。この時、局所的に電子が集中すると放電によってセラミックが割れる(クラック)または貫通孔が開く(パンチスルー)事故によりセラミック管が使用不能になってしまうことから、500kVの電圧を印加できなかった。

共同研究グループでは、電界放出電子によるセラミック管の破損が生じないように、ガードリング付きの分割セラミック管を採用し、最適設計を行った。このような構造を用いることにより、サポートロッドからの電界放出電子がセラミック管に到達することがなくなる(図2(右)、図3)。設計では、500kVの電圧を印加した時に、サポートロッドとガードリングの表面電界が10MV/m以下になるように、セラミックの口径、長さ、分割数、ガードリングの形状を決定した。なお、過去に同様の分割セラミック管がJAEAのFEL用熱陰極電子銃(250kV)、名古屋大学の偏極電子源(200kV)に採用され、良好な実績があったことも、本方式を採用した根拠のひとつであった。図4に今回製作した分割セラミック管を示す。

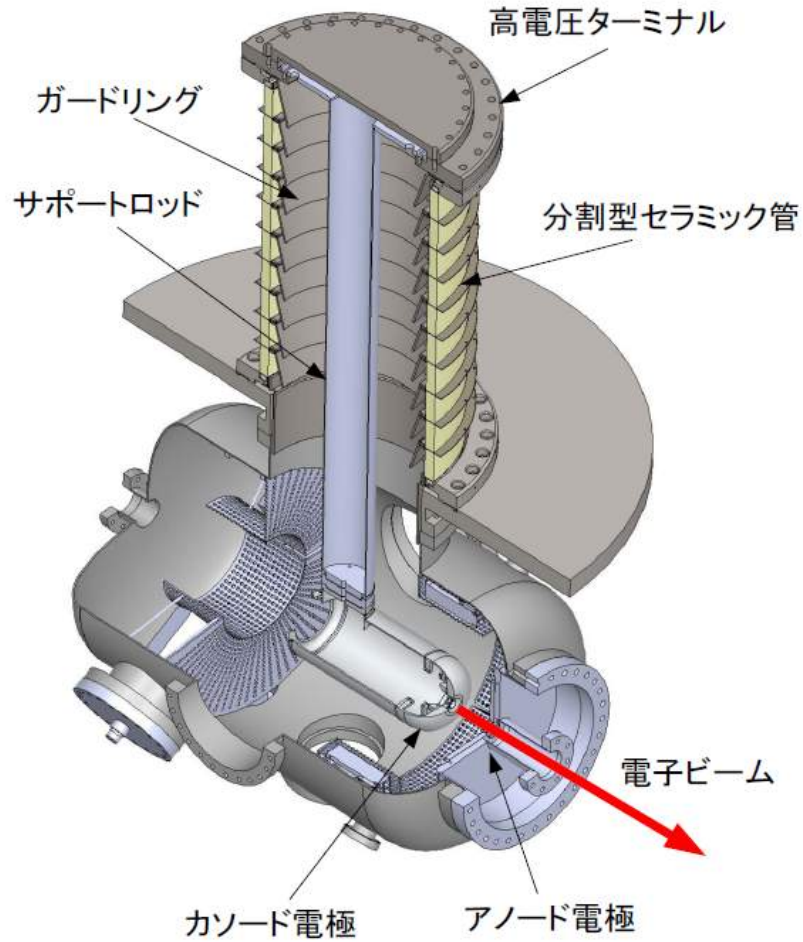


図1: 500 kV フォトカソード電子銃の構成

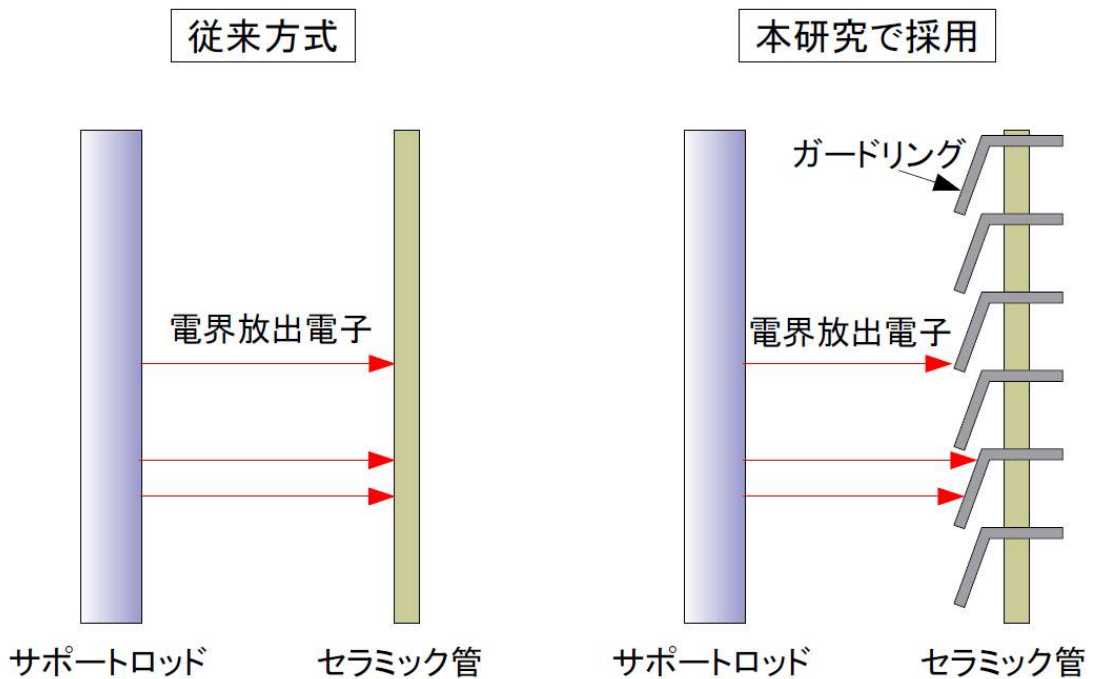


図2: 従来方式では電界放出電子によるセラミック管の破損が問題であった。本研究では、分割型セラミック管とガードリングを採用し、電界放出電子によるセラミックの破損を解決した。

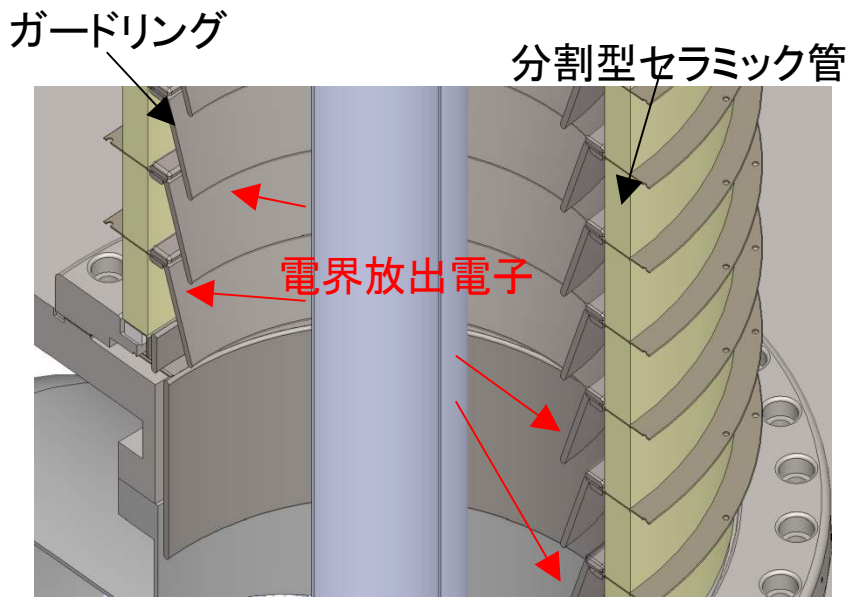


図3: ガードリングにより、電界放出電子がセラミック管に衝突することを防ぐ。

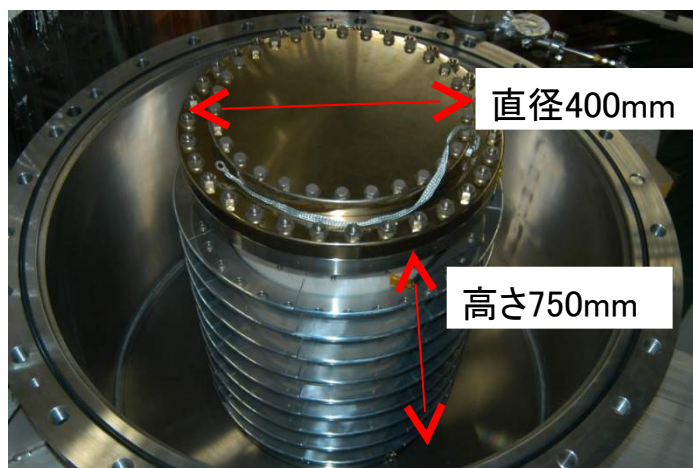


図4: 据えつけられた分割型セラミック管の様子。

## 実験

製作した分割セラミック管にガードリングを装着し、サポートロッドを取り付けた後、高電圧印加試験を行った。累計 110 時間のコンディショニング (電圧を上昇しながら電極表面の微小突起、付着した異物を焼き飛ばす作業)を行った。図5に 550kV までのコンディショニングの履歴を示す。約 110 時間のコンディショニング作業を経て、DC 電源の最大電圧 550kV までの電圧印加を完了した。

引き続いて、光源のユーザー運転を想定した長時間運転試験を行った。長時間試験では、500kV の電圧をセラミック管の両端に印加した状態で、8 時間の保持を行った。図 6 に長時間試験のデータを示す。電圧保持中の放射線発生量は自然放射能のバックグラウンドと同程度であり、また、真空の劣化も見られなかった。このことから、電極からの電界放出による暗電流は極めて小さく、500kV の電圧を安定に印加できることが確認された。

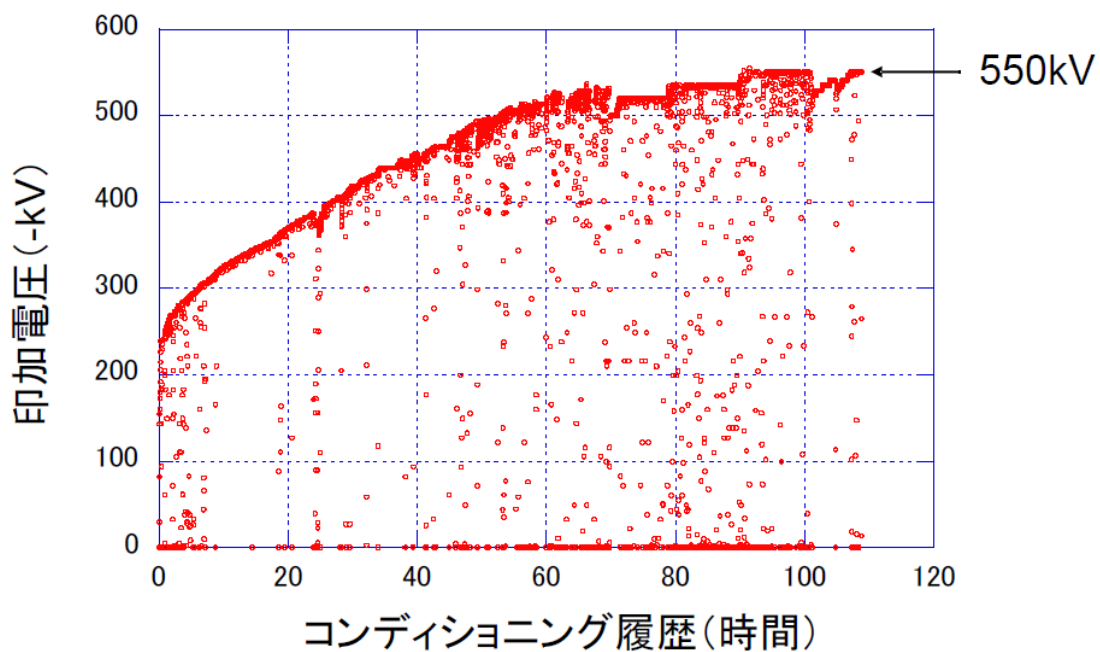


図5: 550 kVまでの高電圧コンディショニングの履歴。累計約 110 時間で 550kV までの電圧印加に成功した。

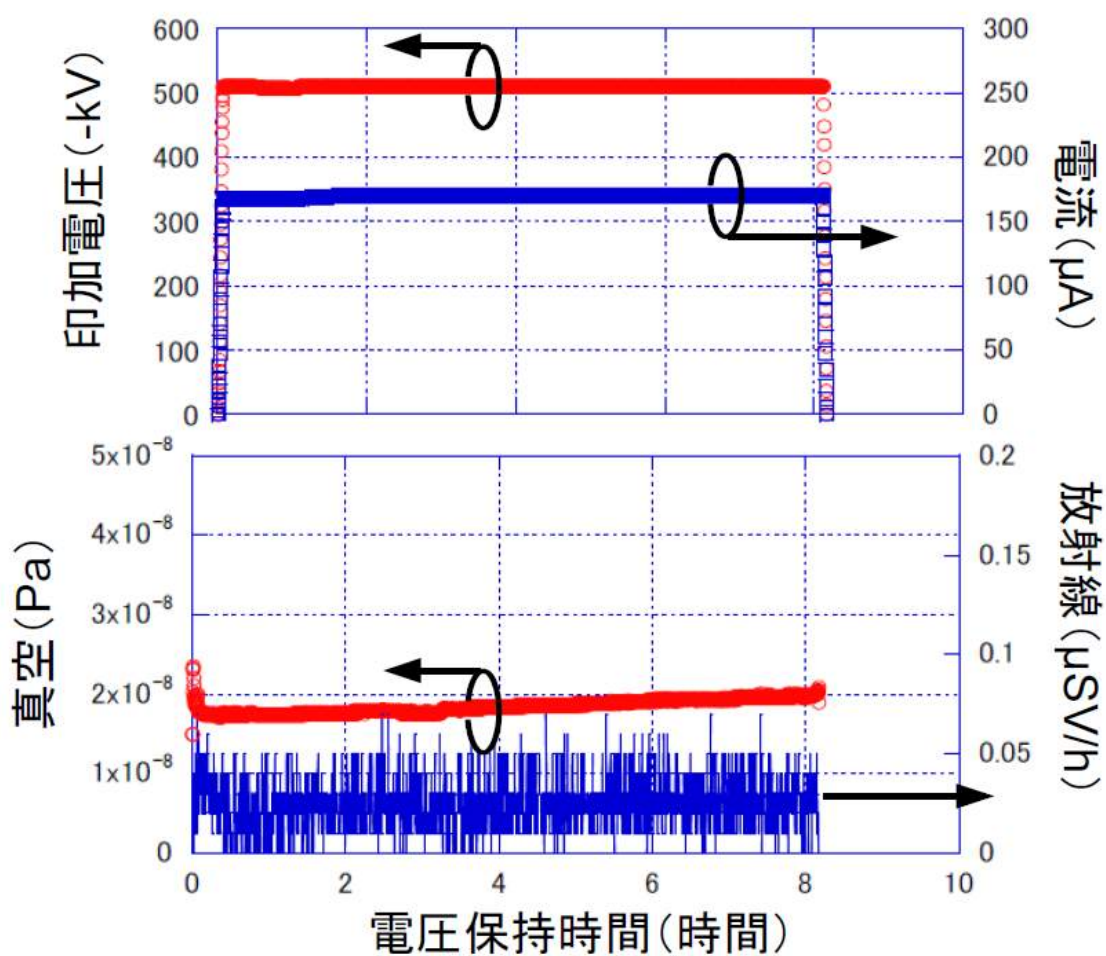


図6: 長時間連続の電圧印加試験。印加電圧を 500kV に保持したまま 8 時間の運転を行った。電流はセラミック管の分割抵抗とフィードバック回路に流れる値である。放射線は環境放射能のバックグラウンドの範囲内であった。

## 意義・展望

エネルギー回収型リニアック(ERL)は、日本の共同研究グループ以外では、米国(ジェファーソン研究所、コーネル大学、ブルックヘブン研究所)、英国(ダレスベリー研究所)、ドイツ(ベルリン・ヘルムホルツ研究所)、中国(北京大学)などで、次世代X線放射光源、自由電子レーザーなどの目的で研究が進められている。日本原子力研究開発機構では放射性廃棄物や使用済原子炉燃料に含まれる放射性核種・核燃料物質を非破壊で測定可能な大強度  $\gamma$  線光源として、ERL 技術の利用を提案している。また、高エネルギー加速器研究機構では、タンパクの構造解析などに有用な ERL 型次世代 X 線放射光源を将来計画として掲げている。これらの光源を実現するには、高品質の電子ビームを大電流で発生可能な 500kV 以上の電圧を持ったフォトカソード DC 電子銃が必須の技術である。

世界の ERL 計画が立ち上がった 2002 年ごろから現在にいたるまで、ERL 放射光源の成否を握る重要な要素として電子銃の研究開発が世界中の研究所で精力的に進められてきた。しかしながら、フォトカソード DC 電子銃で 500kV の電圧を達成するのは容易でなく、これまでさまざまな失敗が繰り返されてきた。今回、共同研究グループが、世界で初めてフォトカソード DC 電子銃において 500kV の安定な電圧印加に成功したことで、ERL 型次世代放射光源の実現に大きく近づいたといえる。

共同研究チームでは、ERL 型次世代放射光源の技術実証を目的とした試験機「コンパクト ERL」の建設を進めている。今回の成功を受けて、2012 年のコンパクト ERL の完成に向けた作業に、さらに力を合わせて取り組んでいく。

## 用語説明

### エネルギー回収型リニアック

高周波を使って電子を加速する超伝導加速器を用いて加速し、高エネルギーとなった電子ビームを光の発生に利用した後、同一の加速器を「減速器」として動作させ、電子のエネルギーを高周波エネルギーとして回収し、後続電子の加速に再利用する技術である。高周波で動作する超伝導加速器では、電子を入射するタイミングを選ぶことで加速、減速のどちらも可能であることを利用している。

### フォトカソード電子銃(光陰極電子銃)

半導体や金属の表面にレーザー光を照射した時に表面から飛び出す電子を電界で引き出す装置。フォトカソード電子銃は、運動量とエネルギーのそろった電子を生成でき、また、電子パルスの時間構造をレーザーパルスで制御できることから、熱電子銃(フィラメントを熱して電子を引き出す)に比べてエミッタンスの小さな電子ビームを生成できる利点がある。ERLのフォトカソード電子銃では、半導体であるGaAs(砒素化ガリウム)を用いる。

### 空間電荷効果

電子ビームには多数の電子が含まれる。マイナスの電荷を持つ電子には互いに反発する力が働く。これを空間電荷効果という。空間電荷効果が強く働くと、ビームの飛行に従って徐々に発散が大きくなる、つまり、ビームのエミッタンスが大きくなる現象が起こる。電子を高いエネルギーに加速することで、空間電荷効果を弱め、エミッタンスの増大を抑止することができる。

### 電界放出電子

物体の表面に強い電界がかかった時に、表面から引き出される電子。表面に微小な凹凸があったり、付着物があったりすると、局所的に多数の電界放出電子が生じる。

### クラック、パンチスルーによるセラミック破損

局所的に多数の電界放出電子がセラミック表面に当たると、セラミックが帯電し強い静電気を持つようになる。この静電気が放電する時にセラミックを破損する場合がある。円筒形のセラミックが軸方向に割れる場合(クラック)と径方向に貫通する場合(パンチスルー)がある。

### コンディショニング

電子銃に印加する電圧を徐々に上げていく作業。小さな放電を繰り返しながら、電極表面の微小な凹凸や付着物を取り去り(焼き飛ばし)、電極の表面を清浄かつ滑らかに整える。いったんコンディショニングを済ませれば、コンディショニングを行った電圧までは容易に繰り返して印加できる。