

## カーボンナノチューブ電界放出カソードの電極損耗

○田中善信, 村田文彦 (静大工・院), 島田温子 (静大工・学)  
大川恭志 (JAXA), 山極芳樹, 松井信 (静大工)

Keyword : Field Emission Cathode, Carbon Nanotube

### 1. 目的および背景

現在 JAXA にてカーボンナノチューブ (CNT) を使用した電界放出型カソード (FEC) について研究・開発が行われている。

FEC は、電子を空間へ放出する電子放出装置の一つである。他の電子放出装置に比べ、作動ガスが不要で小型化が容易であることなどから、イオンエンジンにおける中和器など電気推進器での利用が検討されている。

JAXA で研究されている FEC の適用先として、エレクトロダイナミックテザー (EDT) システムが挙げられる。このシステムは、テザーに電流を流すことで地球磁場との間に発生するローレンツ力を利用し、推力を得るシステムである。推進剤不要で推力を得られることから、安価に大型のデブリを軌道外へと排除するためのシステムとして期待されている。

しかし、EDT システムでは、地球磁場という微弱な磁力を用いて推力を得るため、大型のデブリを地球周回軌道から遷移させるためには、時間がかかってしまう。そのため、JAXA で FEC の長時間動作実験が行われた。

本研究では、長時間動作試験の結果生じた FEC の電極損耗における問題点を明らかにすることを目的に、研究を行った。

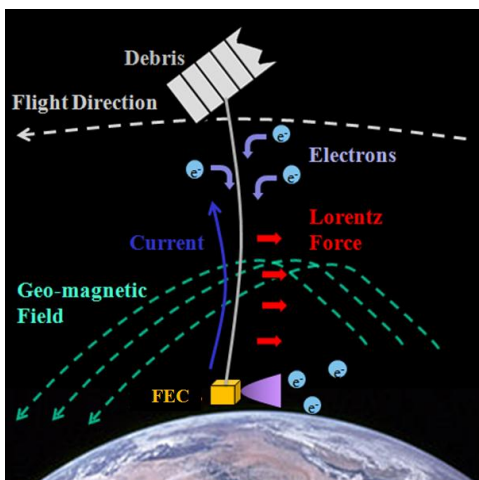


図1 EDT 概略図

### 2. 電界放出型カソード (FEC)

電界放出とはゲート電極、エミッタ電極の2枚の電極間に強電界を印加することでエミッタ電極から電子を引き出す電子放出方法である。本来、電子を真空中に放出するには、電位障壁を超えるようなエネルギーを電子に与えなければならないが、電界放出では固体表面に強電界を印加することで、電子に対する電位障壁が非常に薄くなることを利用している。これによって、電子は自身の持つ波動性から、薄くなった電位障壁を透過する (トンネル効果という) ことで固体中から放出される。エミッタ電極に尖鋭性の良い CNT を用いることによって、表面電界を強めることができ、より低い印加電圧でも大きな電流を得ることができるため<sup>1)</sup>、JAXA では CNT-FEC を用いて研究を行っている。図2に本研究で使用する FEC の電界放出の原理図を示す。

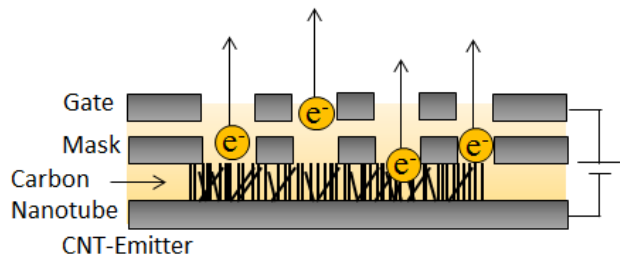


図2 電界放出原理

電界放出により得られる電流密度  $j$  [A/m<sup>2</sup>] は電界  $E$  [V/m] , エミッタの仕事関数  $\phi$  [eV] , プランク定数  $h$  , 素電荷  $e$  , 電子質量  $m_e$  を用いて、以下の Fowler-Nordheim (F-N) の式によって与えられる。

$$j = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \phi} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m_e}}{3heE} \phi^{\frac{3}{2}}\right) \quad (1)$$

ここで、電界  $E$  , エミッタの仕事関数  $\phi$  以外は定数であるので、

電界放出電流は、 $E$  および  $\phi$  に依存する。さらに電界  $E$  はゲート - エミッタ電極間の電位差  $V[V]$  に比例しゲート - エミッタ電極間距離  $d[m]$  に反比例するため、電極間隔が一定の場合、電圧を制御することで電界放出電流を制御することが出来る。

### 3. 長時間動作実験の概要

JAXA で行われた長時間動作実験は、以下図3のようなBBMを用いて、LEOでのEDTシステム運用を想定し、3mAの出力で1500時間の定電流動作実験を行ったものである<sup>2)</sup>。8つのエミッタ電極はそれぞれ異なる調整抵抗を介して電源に接続され、電界放出電流量を調整してある。実験に使用したFECの構成は以下図4のとおりである。

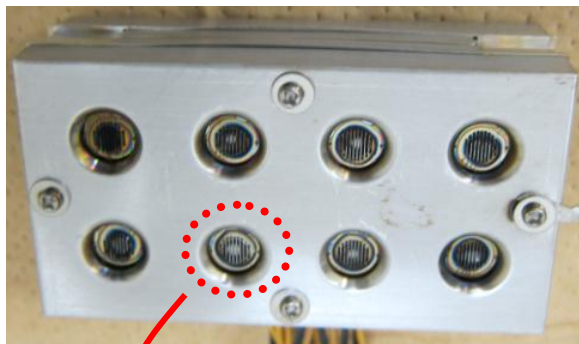


図3 FEC-BBM 俯瞰図

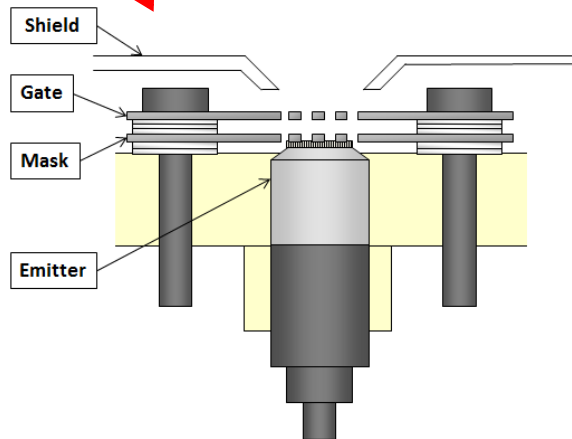


図4 FEC 構成図

実験時のチャンバ圧は  $5 \times 10^{-5} [Pa]$  で、チャンバ内には各部品からのアウトガス等のポンプで排気しきれない残留ガスが残っていたと考えられる。実験中、No.8のエミッタ電極で絶縁破壊による損傷及び電流・電圧の急激な変動が確認された(図5)が、他の7つのエミッタでは絶縁破壊は観測されなかった。

長時間動作の結果、エミッタの電子放出性能は徐々に劣化(3mAの電子放出に必要な電圧が上昇)していき、1500時間で動作電圧が1000Vに到達し、実験は終了した。長時間動作実験後

のエミッタを観察したところ、No.3,4,5,6のエミッタに、同様の形状の損耗が見られた(図6)。

今回の実験での電子放出性能劣化は、この電極損耗による電子放出面積の減少が原因である可能性がある。また、損耗形状に一定のパターンが得られたことから、損耗原因を特定・対策をすることで、電子放出面積の減少を食い止め、FECの耐久性を向上させることが出来ると考えられる。

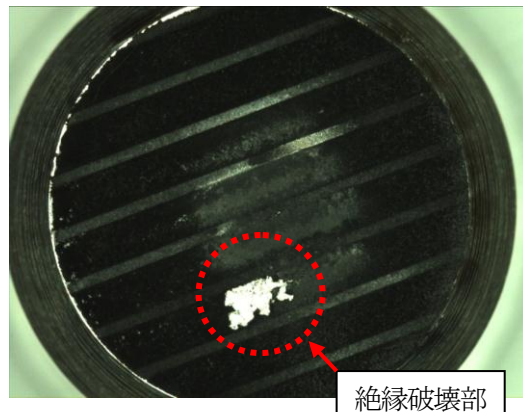


図5 絶縁破壊したエミッタ写真(No.8)

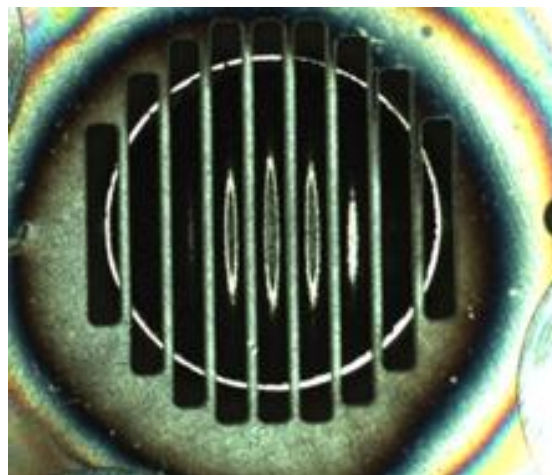


図6 Gate電極真上からの俯瞰図(No.4)

### 4. 損耗面の観察

電極の損耗原因を特定するため、損耗面の観察を行った。図6の電極損耗状態から、次のことが言える。

1. 電極の損耗はマスク・ゲート電極のスリット間のみ現れている。この部分はエミッタ表面の電場が最も強くなっている部分であることから、電子放出によるCNTの抵抗加熱、電場による引っ張り、イオン化した残留ガスによるイオン衝撃などが考えられる。
2. 電極の損耗形状は、絶縁破壊によるものとは異なることが、図5・6からわかる。このことから、定期的に何らかの力が加わ

ることで、徐々に損耗したのではないかと予想される。

3. エミッタ電極中央部にのみ損耗が集中している。本実験で  
使用した FEC のシールドは丸形をしており、損耗はシールド形状  
の影響を受けているのではないかと考えられる。

次に, SEM(JXA-8530F を使用)によって損耗電極を観察し  
た(図7)。また, EDX でエミッタ表面元素の C, In, Fe について  
の元素分析結果をマッピングしたところ, 以下図 8 のようにな  
った。C は CNT の主成分, In は CNT を基板に固定するための  
接着層の主成分, Fe は基板部の主成分である。

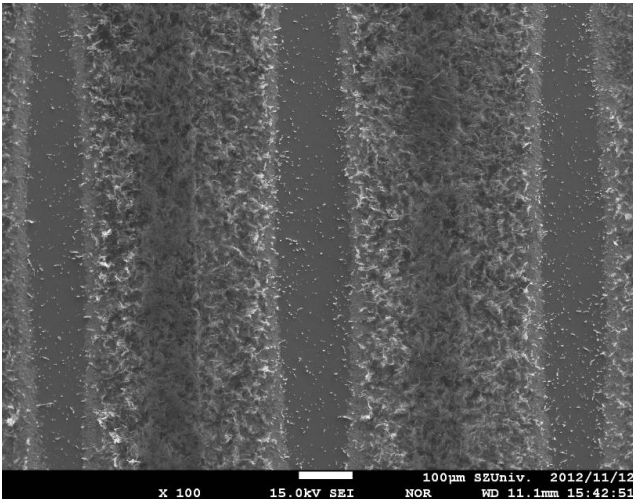


図7 SEM 画像(100倍)

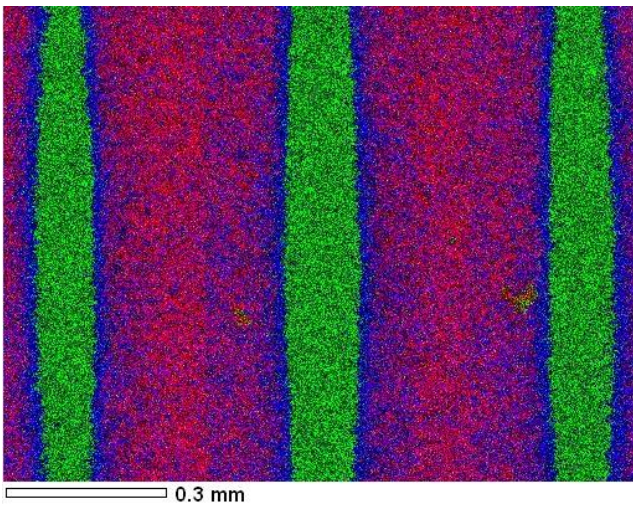


図8 EDX による元素マップ(100倍)

(■C : CNT 部, ■In : 接着部, ■Fe : 基部)

CNT の残り具合や元素マップから, スリット中央から電極リ  
ブ部に向かってダメージを受けていることが分かる。また, 以  
下図 9 のようにエミッタ上部から段階的に電極が損耗してい  
ることが分かる。

このことから, 電子放出したことによる損耗である場合, 電  
子放出をしない In 層がこれ以上損耗して行くのは不自然である  
こと, そして絶縁破壊のように突発的な損耗ではなく, 徐々に  
損耗していると考えられることから, 電子放出による損耗では  
ないと考えられる。よって, イオン化した残留ガスによるイオ  
ン衝撃によってエミッタ電極が損耗したのではないかと推測し,  
次章以降でイオン衝撃についての解析と実験の結果を述べる。

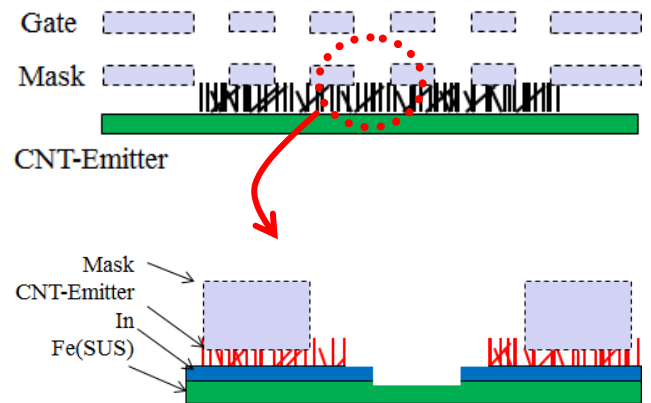


図9 エミッタ表面損耗イメージ図

## 5. イオン軌道解析

イオン衝撃が損耗の原因である可能性を示すため, 長時間動  
作実験時の電極電位条件における正イオンの粒子軌道を解析し  
た。実験時に発生したと考えられるイオンは極少量であるため,  
イオン粒子間の相互作用は考慮せず, FEC 電極が作る静電場中  
でのイオン軌道のみを 2 次元直交座標系で求めた。解析手法お  
よび解析条件は以下のとおりである。

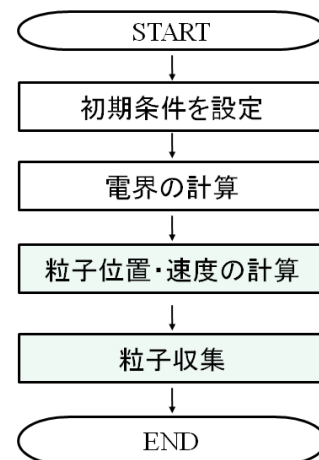


図10 解析フローチャート



表1 解析条件

格子間隔[ $\mu\text{m}$ ]	25
Mask・Gate 電極厚さ[ $\mu\text{m}$ ]	50
計算領域[mm]	$8.5 \times 10$
時間ステップ[s]	$1.0 \times 10^{-11}$
想定するイオン	$\text{Ar}^+$
イオンの初期速度[m/s]	0
Shield 電位[V]	0
Gate 電位[V]	0
Mask 電位[V]	-1000
Emitter 電位[V]	-1000

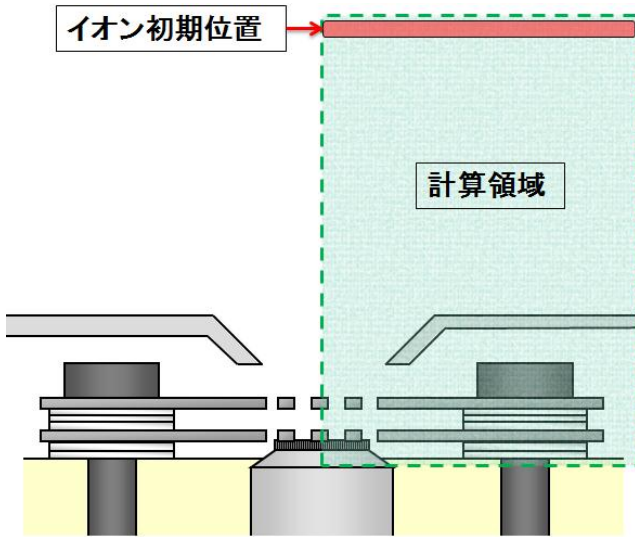


図11 計算領域

次の図12, 13は、本解析で得られたイオン軌道と、エミッタ電極上のイオン衝突予測位置の結果である。この結果から、マスク・ゲート電極のスリット中央部が最もイオン衝突回数が多くなり、またエミッタ電極中央部の衝突が最も多くなるってことがわかる。この結果は図6で示した長時間動作実験で生じた損耗の位置とよく似ており、損耗の主原因がイオン衝撃であった可能性を示唆する。図13左端(エミッタ電極中央)から2番目以降のスリット部分のイオン衝突回数がほぼ同程度で横ばいになってしまっているのは、初期イオン配置と計算領域の影響であると考えられる。図12からわかるように右上に配置したイオンは計算途中で計算領域外に出てしまっているのがわかる。今後イオンの発生位置も含めて、イオン配置・計算領域の修正が必要である。

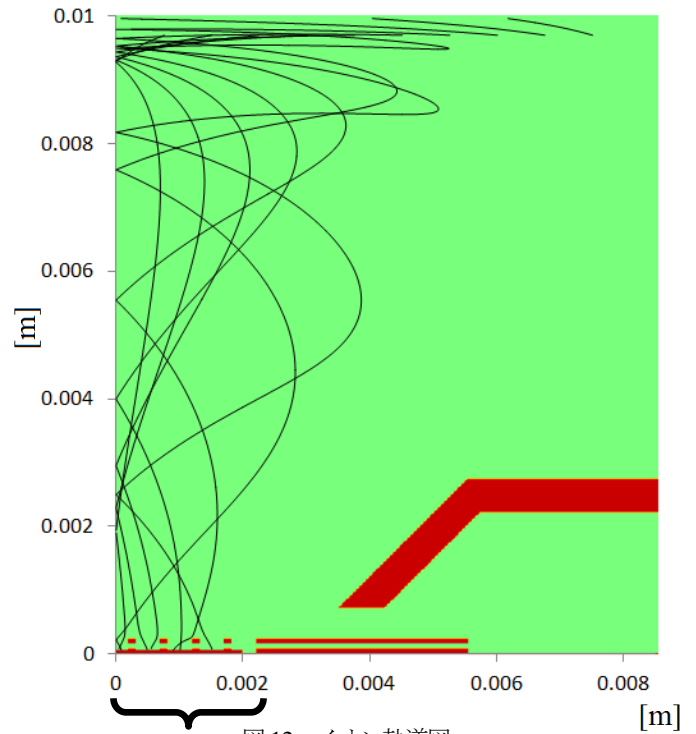


図12 イオン軌道図

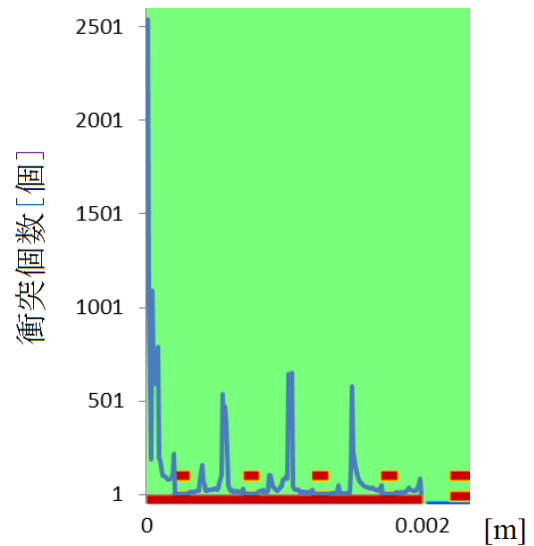


図13 イオン衝突位置分布図(粒子数 30000 個)

## 6. プラズマ中での実験

本実験では、電極損耗の主要因がイオン衝撃になりうることを確かめるため、プラズマ中でFECに電圧を印加し、エミッタ電極にイオンを入射した。この実験では、絶縁破壊による損耗とスパッタによる損耗の区別を付けるため、ゲート電極を除いた状態で実験を行ったため、電子放出は行われない。このときの実験条件を以下表2に示す。なお、プラズマパラメータはガードリングプローブを用いて今回と同じ実験条件のもとで計測した参考値である。

表2 実験条件

作動ガス	Ar
チャンバ圧[Pa]	$2.7 \times 10^{-3}$
加速電圧[V]	150
電子密度[m <sup>-3</sup> ]	$3.8 \times 10^{14}$
Emitter イオン電流[μA]	0.5
動作時間[hour]	3
プラズマ電位[V]	27
Shield 電位[V]	0
Mask 電位[V]	-1000
Emitter 電位[V]	-1000

実験の結果、エミッタ電極にはイオン衝撃による損耗がみられた。その様子を図14, 15に示す。実験前のエミッタ電極左上に見られるのは、本実験の前に行った実験でできた絶縁破壊痕である。実験後には、これとはまったく異なる損傷がエミッタ電極中央付近に見られる。この損耗部位を光学顕微鏡で観察したところ、長時間動作実験で生じた損傷と同様に、中央から段階的に損耗しているのが確認できた。このことから、長時間動作実験での損耗がイオン衝撃によるものである可能性が示唆される。

しかし、長時間動作実験と比較すると、損耗が中央に集中しているのがわかる。これは、今回の実験では節煙破壊防止のためにゲート電極を除いて実験を行っていることに起因する。そのことを説明するため、5章で行ったものと同様の数値解析を今回の実験条件で行い、以下図16で示す。ゲート電極がないことでプラズマ電位に対し、大きく負バイアスのかかったマスク・エミッタ電極が露出しているため、イオン粒子が軌道を曲げることなく衝突していることが分かる。そのため、エミッタ電極中央にイオン衝撃が集中したのではないかと考えられる。



図14 エミッタ電極俯瞰図(実験前)

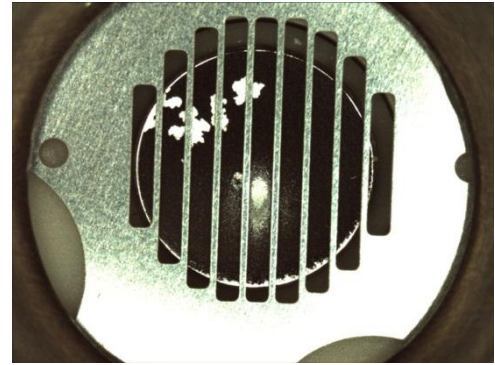


図15 エミッタ電極俯瞰図(実験後)

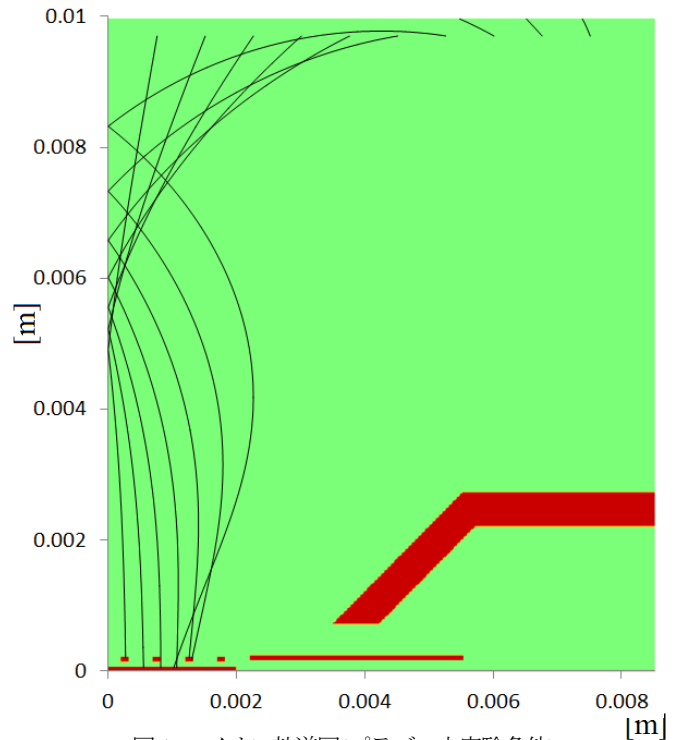


図16 イオン軌道図(プラズマ中実験条件)

## 8. まとめ

導電性テザーでの使用を想定した電界放出カソードの長時間動作試験の結果生じたエミッタ電極損耗についての考察を行い、損耗はイオン衝撃によるものである可能性を示した。今後、各種電極電位条件でのイオン衝撃の影響評価や、イオン衝撃による損耗を抑えるための電極形状最適化などを行っていく。

## 参考文献

- 1) Yahachi Saito. “Carbon Nanotube and Related Field Emitters”
- 2) Yasushi Ohkawa, “A Carbon Nanotube Field Emission Cathode for Electrodynamic Tether Systems”, IEPC, 2011