

# チタン及びモリブデン表面からの電界放出暗電流の測定

古田 史生<sup>1,A)</sup>、奥見 正治<sup>A)</sup>、中西 彊<sup>A)</sup>、五藤 俊明<sup>A)</sup>、西谷 智博<sup>A)</sup>、山本 将博<sup>A)</sup>、宮本 延春<sup>A)</sup>、  
桑原 真人<sup>A)</sup>、山本 尚人<sup>A)</sup>、浪花 健一<sup>A)</sup>、松本 浩<sup>B)</sup>、吉岡 正和<sup>B)</sup>、渡川 和晃<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 名古屋大学大学院 理学研究科SP研究室  
〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

<sup>B)</sup> 高エネルギー加速器研究機構  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

<sup>C)</sup> 理化学研究所・播磨研究所  
〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

## 概要

我々はKEKにおいて直流高電界試験装置を製作しステンレス鋼、銅表面からの暗電流放出メカニズムの解明を目指した研究を実施してきた。最近の実験では、チタン及びモリブデン電極に対し電極間距離を0.5mmにして電極表面に100MV/m以上の直流高電界を印加したときの暗電流を1nA以下に抑えることができた。このとき電界増倍係数は $\beta \sim 40$ であった。

これらのデータから、暗電流の大きさは表面処理方法に強く依存すること、電極材料の二次電子放出係数やイオンパッタ率が暗電流メカニズムに深く関わっていることを確認できた。

## 1. はじめに

高エネルギー実験に用いられる電子銃やクライストロン、加速管、RF空洞等の高電界デバイスにとって信頼度の高い運転や高電界性能の向上を目指す上で、金属表面からの電界放出暗電流の削減は非常に重要である。暗電流の増加は初期放電や真空悪化、時には真の放電をもたらすなど機器の性能を著しく低下させる原因となりうるからである。

暗電流は金属の表面状態に強く依存すると言われ、金属表面の微小突起や付着不純物の存在、金属内不純物の表面析出などが暗電流を増大させる原因と考えられている[1]。

我々は暗電流と金属表面状態の関係を明らかにするためKEKに小型の直流高電界試験装置を設置して、ステンレス鋼(SUS)や異なる表面処理により作成した4種の銅(Cu)表面からの暗電流測定を行い、暗電流の大きさが電極の材料選択や表面処理工程に依存することを明らかにし、また金属の持つ二次電子放出係数やイオンパッタ率等が暗電流の増幅過程に影響することも示唆してきた[2,3]。

今回我々は暗電流増幅の抑制に有効とみなせる電極材質として、二次電子放出係数やイオンパッタ率がSUS、Cuより小さいチタン(Ti)に注目し暗電流測定試験を行った。また一般的に電界特性が良いと言われる高融点材料にも着目し、モリブデン(Mo)の高電界試験も行った。このMoは現在

SPRING-8で開発中の自己増幅型自由電子レーザー用加速器に使用される熱電子銃のカソードウェネルト材料と同じ材質である[4]。Ti、Moを含めこれまでの高電界試験結果について報告する。

## 2. 試験装置

高電界試験装置の概要を図1に示す。この装置は直流高電界下( $\sim 100\text{MV/m}$ )での電界放出暗電流の基礎研究用に開発された。チェンバー材質には標準のSUS316L鋼から不純物成分を減らした超清浄ステンレス材(NK-CleanZ)を用い、全ての洗浄処理と組み立てをクラス1クリーンルーム内で行う等、徹底した装置の清浄化がなされている。250 × 1週間のベーキング後、 $6 \times 10^{-12}\text{Torr}$ の真空度を得ている。

表面電界強度は電極間距離(gap:0.5~20mm)と印加電圧(0~-100kV)によって調節できる。最大電界印加面積はカソードの表面中心部およそ7mm<sup>2</sup>で、アノード登頂部に $\phi 2\text{mm}$ の平坦部を持たせたことにより、これはgap0.5~3.0mmでほぼ一定である。

カソードからアノードに流れた暗電流は微小電流計(分解能:1pA)によって測定される。

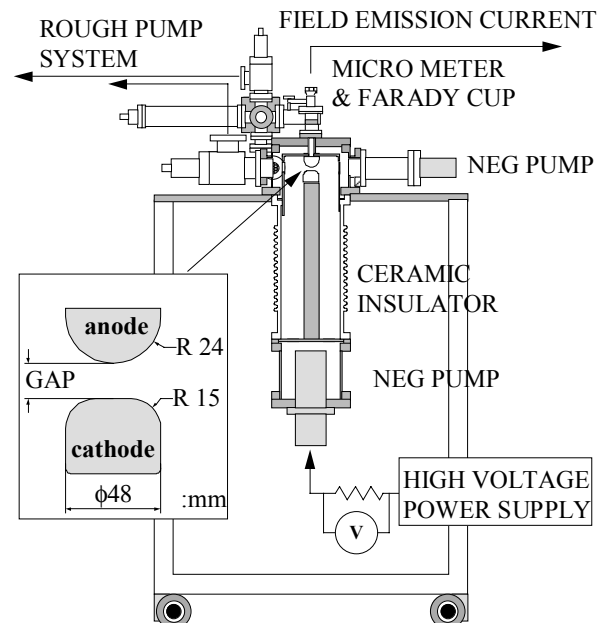


図1: 直流高電界試験装置

<sup>1</sup> E-mail: furuta@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

### 3. 電極の加工と表面処理

#### 3.1 ステンレス鋼 (NK-CleanZ)

SUS電極にはNK-CleanZを使用し、機械加工の後に電解複合研磨を施した。表面粗さ(Ra)は0.1 $\mu$ m以下でピットは確認されなかった。最終表面処理は温超純水洗浄(80M $\Omega$ ·cm、70 )がクラス1のクリーンルーム内で行われた。表1に標準SUS316L鋼とNK-CleanZの成分比較を示す。

表1: クリーンZとSUS316Lの成分組成 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
NK-CleanZ	0.00	0.12	0.27	0.00	0.00	14.9	16.8	2.36
JIS-SUS316L	<0.03	<1.0	<2.0	<0.04	<0.03	12~16	16~18	2~3

#### 3.2 銅 (Cu)

Cu電極には全てクラス1の無酸素銅(純度99.996%)にHIP(Hot Isostatic Pressing)処理を施したものをを用いた。ダイヤモンドバイトによる超精密旋盤加工(エタノール切削)で表面粗度Ra=0.05 $\mu$ mを達成し、その後に表面研磨と洗浄処理を組み合わせる異なる4種類の電極を作成した。最も優れた結果を示したものはダイヤモンドバイト加工後に超純水洗浄したもので、電解研磨やオゾン添加超純水洗浄処理を施したものは逆に性能を悪くする結果となった。今回、銅はベストデータを示すに留める。銅に関する実験の詳細は文献[2]にまとめられている。

#### 3.3 チタン (pure-Ti)

Ti電極はJISグレード2の純チタンから作成された。表面バフ研磨の後、クラス100クリーンルーム内で最終処理として高圧超純水洗浄(80kg/cm<sup>2</sup>、5分)を施した。表2に使用した純チタンの成分を示す。

表2: JISグレード2 純チタンの成分組成 (%)

	C	H	O	N	Fe
JIS grade-2 pure-Ti	—	0.015	0.20	0.05	0.25

#### 3.4 モリブデン (Mo)

Mo電極には単結晶高純度モリブデン(純度5N)を使用した。超硬合金バイト切削(Ra=0.8 $\mu$ m)の後ダイヤモンドペーストによる表面研磨を行った。最終洗浄には高圧超純水洗浄を採用している。

### 4. 実験結果と考察

#### 4.1 暗電流測定

放電による表面破損等为了避免するため数日~2週間のカレントコンディショニング後に暗電流測定を行った。SUS、Cu、Ti、Moに対する測定結果を図2に示す。横軸に電界強度、縦軸に暗電流値を取り、そ

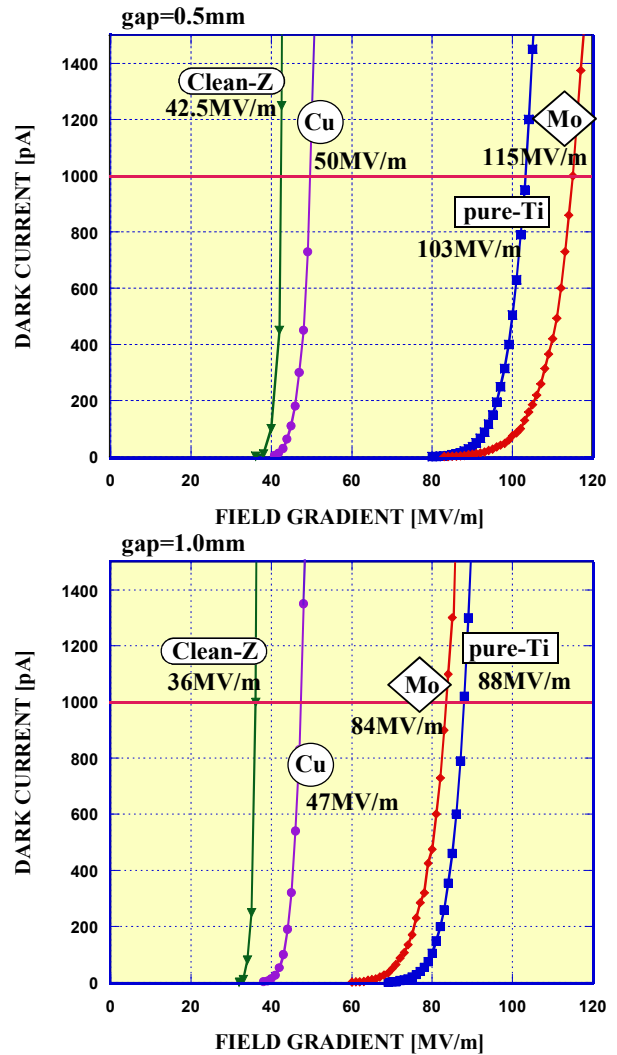


図2: 暗電流測定 (上: gap=0.5mm, 下: gap=1.0mm)

それぞれgap0.5mm、1.0mmにおける各電極からの暗電流の立ち上がりを表している。

gap0.5mmで、SUSに対し暗電流は36MV/mまで1pA以下に抑えられ、42.5MV/mで1nAレベルに達した。Cuでは40MV/mに始まり、50MV/mでSUSに近いレベルに達した。これらは我々の知る限り、他グループの類似実験と比較しても最高の結果である。

TiとMoは同条件下のSUSやCuに比べはるかに高い電界特性を示した。Ti、Mo共に80MV/m以上まで暗電流を1pA以下に抑え、暗電流1nAレベルで比較するとTiは103MV/m、Moは115MV/mまで達した。

図2の結果を比較すると到達電界のgapに対する依存性が見られる。Fowler-Nordheim (FN) 則によれば電界放出電流の大きさは金属表面の電界強度のみで決まる。しかし実際の実験では電界強度以外に暗電流を増幅させる様々な効果があり、それがgap依存性として現われていると考えられる。

我々は暗電流増幅の機構として電界放出電流が誘発するイオンパatteringや二次電子放出等の二次電流の影響を示唆してきた。すなわちgapを広げた場合印加電圧は高くなり、加速された電子やイオンが電極に衝突する際のエネルギーも増大する。そ

の結果、生成される二次粒子が増えて全暗電流値の増幅が起こると考えられる。

表3に各素材の二次電子放出係数とイオンスパッタ率を示す。図2に見られるTiとMoのgap依存性の違いにはこの二次粒子生成率の違いが効いており、暗電流として二次電流が支配的であると考えられる。

一方Cu、SUSでは二次粒子生成率が高いにもかかわらずgap依存性が小さい結果となった事から、暗電流として電界放出電流が支配的であると考えられる。ただし、Ti、Moに比べ印加電圧が半分以下な為、二次電流の影響が小さい可能性も考えられる。

gap依存性の有無と電界特性の優劣に直接の関係が見られなかったことから二次粒子の生成率は暗電流の増幅機構には影響を与えるが、電界放出を低く抑える主要因になるとは限らないことが解った。

したがってTi、MoがCu、SUSに比べ高い電界特性を示した理由は暗電流の源となる電界放出電流自身が少なかった為と考えられ、それを次の電界増倍係数 $\beta$ の観点から考察する。

表3:二次電子放出係数(上)と600eVのArイオン入射に対するスパッタ率(下)

	SUS	Cu	Ti	Mo
Secondary electron yield	1.3 @400eV	1.3 @600eV	0.9 @280eV	1.25 @375eV
Sputtering rate (atoms/ion)	1.3 ~ 1.4	2.3	0.58	0.93

## 4.2 電界増倍係数 $\beta$

直流高電界下での金属表面からの電界放出特性は電界増倍係数 $\beta$ によっても表される。FN則によると金属表面は実験室で印加された電界 $E_{exp}$ が $\beta$ 倍された電界 $E_{FN}$ を感じており、それは次式で表される。

$$E_{FN} = \beta \times E_{exp} \quad \dots (1)$$

この $\beta$ はFowler-Nordheim(FN)プロット<sup>2</sup>のデータを直線フィットすることで得られる。図3に今回の結果から求めたFNプロット及び $\beta$ 値を示す。

gap0.5mmではTi、Moが $\beta=27 \sim 36$ に対し、SUS、Cuは $\beta=44 \sim 56$ とやや高い。これは表面に同じ電界強度を与えてもSUS、CuはTi、Moに比べ電界増倍を強く受け電界放出電流値が大きくなることを意味する。すなわち電界放出暗電流の差は金属表面での電界増倍の違いによることが主要因であると推測できる。

$\beta$ は電極形状や表面処理で変わると言われているが総合的な理解にはまだ到達していない。今後の研究で金属表面における電界増倍のメカニズムを解明していきたい。

現在の $\beta$ 導出に際し、二次電流の効果は考慮していないが実際のデータには二次電流の影響が含まれている為、図3に示す $\beta$ にもgap依存性が現われる。より正確な $\beta$ 導出に向け電界増倍と二次電流の影響を区別した解析が必要と言える。

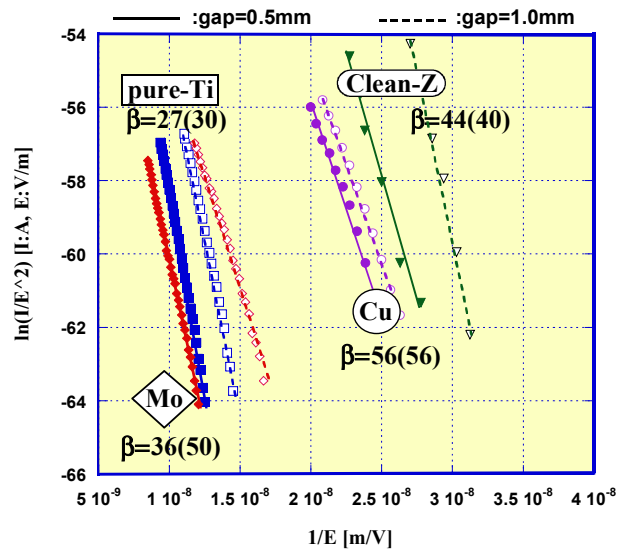


図3: Fowler-Nordheim プロット  
はgap0.5mmでの値、( )内は1.0mmの値を示す。

## 5. まとめ

Ti、Mo電極に対し高電界試験を行い、表4の結果を得た<sup>3</sup>。

暗電流は電界増倍効果の影響を受ける「電界放出電流」とそれが誘発する二次電子放出やイオンスパッタ等による「二次電流」の和であると考えられ、それぞれの度合いは電界増倍係数 $\beta$ やgap依存性の大きさを指標として確認することが出来る。

二次電流抑制に有効な材質の探索や表面処理等のさらなる研究と、電界放出機構を支配する電界増倍メカニズムをより詳しく解明する事が今後の課題である。

表4: Ti、Moの高電界試験結果  
\*電界強度は暗電流1nAレベルでの値

Gap [mm]	0.5		1.0	
pure-Ti	103MV/m	$\beta=27$	88MV/m	$\beta=30$
Mo	115MV/m	$\beta=36$	84MV/m	$\beta=50$

## 参考文献

- [1] R.V.Latham, High Voltage Vacuum Insulation: BASIC CONCEPTS AND TECHNOLOGICAL PRACTICE, Academic Press London, 1995 Chap.3
- [2] C.Suzuki et al, Nucl. Instr. and Meth. A 462 (2001) 337
- [3] H.Matsumoto, Proceedings of International Linac Conference 96 (LC96), Geneva, 1996, p.626
- [4] <http://www-xfel.spring8.or.jp>
- [5] R.V.Latham, High Voltage Vacuum Insulation: The Physical Basis, Academic Press London, 1981, Chap.2.
- [6] C.K.Sinclair et al, Presented at PAC 2001, Chicago, IL, June 18-22, 2001

<sup>2</sup> FNプロットとは暗電流測定値(I)と電界強度(E)を用いた $\ln(I/E^2)$ と $1/E$ の2次元プロットである。理想的な金属表面では $\beta=1.0$ となる[5]。

<sup>3</sup> 我々と実験条件は異なるが合金チタンからの暗電流測定がTJNAFにおいて行われている[6]