

令和 2 年 6 月 27 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05385

研究課題名(和文) 超高電圧デバイス実現のための超高真空真空ギャップ絶縁の基礎研究

研究課題名(英文) Basic research on vacuum gap insulation for ultra-high voltage devices

研究代表者

山本 将博 (YAMAMOTO, Masahiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：00377962

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：真空放電現象の一つの要因として、陽極側で発生する電子刺激脱離による放出ガスが一定の割合でイオンとして放出される現象が深く関わっている可能性を提唱し、加速器用電子銃を用いた高電圧試験において実験的にそのモデルに矛盾がないことを示した。電子刺激脱離で放出されるガスとイオンの比を定量的に測定するための装置を電界シミュレーションおよび荷電粒子トラッキングシミュレーションを用いて設計し、電子刺激脱離で発生する100eV以下相当のイオンを9割相当検出できる電極、検出器配置を決定した。また、電子刺激脱離をコーティングによって抑制する試みとして試験電極コーティング装置を製作し、次の放電抑制実験の準備を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真空ギャップの放電電圧について、放電が消弧する最低電圧が存在し、その電圧以下では放電が一切発生しないことを実験で明らかにした。これは、電子顕微鏡の電子源部分など実際の真空ギャップを用いる高電圧機器において、放電が起こる電圧を実験的に明確に知ることができることを示し、これまでの経験的で不明確であった放電発生電圧の閾値の存在を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：As one of the causes of the vacuum discharge phenomenon, a phenomenon in which gas released by electron-stimulated desorption generated on the anode side is released as ions at a constant rate is deeply involved, and in a high voltage test using an electron gun for an accelerator, it was experimentally shown that the model was consistent. An apparatus for quantitatively measuring the gas-ion ratio released by electron-stimulated desorption was designed using electric field simulation and charged particle tracking simulation. Then, I decided the electrode and detector arrangement that can detect 90% of the ions corresponding to 100 eV or less generated by the electron-stimulated desorption. In addition, a test electrode coating device was manufactured as an attempt to suppress electron-stimulated desorption by coating, and preparations were made for the next discharge suppression experiment.

研究分野：電子源、真空、高電圧

キーワード：真空放電 電子刺激脱離 電子源 超高真空

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高真空による高電圧絶縁は加速器や電子顕微鏡など荷電粒子ビームの発生や加速、静電レンズなどビームを制御する機器で広く利用されており、その絶縁性能の向上は機器の小型化や高性能化に直結する。具体的に放射光源加速器では電子源の高電圧および高電界加速による電子ビームの高輝度化によって真空紫外～軟・硬 X 線領域の放射光輝度を従来の 10~1000 倍以上と飛躍的に向上させる計画が世界各地で進められており、その要となる高電圧の直流電子源は、Cornell 大学、Jefferson 研究所、Brookhaven 研究所、Daresbury 研究所、Mainz 大学などで開発が進行している状況であった。日本でも次世代放射光源用電子源として JAEA、KEK が中心となり 500kV 直流電子銃の開発を進めてきた。

#### (1) 真空放電電圧と電極間距離の経験則から外れる事象

この直流電子源の設計の要となる真空絶縁距離は、経験的に知られている放電電圧上限  $V$  (kV) と電極間距離  $d$  (mm) の経験式  $V = 123 \times d^{0.34}$  に基づいて検討されてきたが、KEK で開発を行った電子源では、アノード-カソードの電極間距離は 70 mm の状況下で放電電圧 550 kV までのコンディショニングを行った結果、さらに高い放電電圧の改善が見込め、上記経験式を超える状況であった。

#### (2) 従来までの仮説では自然に説明ができない放電現象

一般的に超高真空中に設置された陰極と陽極間で起きる真空放電を議論する際、電極表面上の微小突起物などにより局所的に電界が増倍され発生する電界放出現象を中心に議論されることが多いが、放電電圧は放電を繰り返す度に連続的に徐々に上昇する傾向を電極上の微小突起やダスト付着等による電界放出現象だけで説明することは、微小突起やダストの先端箇所が放電の度に徐々に改質し、電界増倍係数が連続的に減少していくような不自然な描像(放電によってナノスケールの微小突起消失が容易に発生しない)が必要となる。

これらの状況から、超高電圧、高電界環境で発生する真空放電の要因について未だ十分に把握できていない状況といえる状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、従来の微小突起やダスト付着などに起因する真空放電とは異なる放電現象があると想定し、そのモデルを立て、これまでの実験結果および実験により検証することを目的とする。

#### (1) 実験事実を説明できる真空放電のモデル

初期過程として、高エネルギー宇宙線等の刺激や微小な電界放出によって陰極で発生した電子が陽極側へ加速・衝突し、その刺激により陽極表面に吸着しているガスが放出される(電子刺激脱離)。

陽極側で電子刺激脱離によって発生したガスはある一定の割合で正イオンとして陰極側へ逆加速され陰極を衝撃して 2 次電子が放出される。

「陽極上で発生する電子刺激による脱離イオン」と「陰極上で発生するイオン刺激による電子放出」の発生する確率の積が 1 を超える時、雪崩的に発生するイオン・電子が増えていくことで真空放電が起こる。

上記の 3 つの過程において、陽極側で発生する正イオンの生成量は、電子刺激脱離によるガス放出量と相関があると考えerことは自然であり、そのガス表出量は、照射電子の積算量および電子の衝撃エネルギーに依存し、衝撃エネルギーの増加に従い、ガス放出量も増加するが、照射電子の積算量が増加するに従いガス放出量は減少していくことが実験結果として Malyshev 氏らによって報告されている(Oleg B. Malyshev et al., J. Vac. Sci. Technol. A 31 (2013) 031601.)。これに基づけば、放電が発生する度に陽極側の電子刺激脱離によるガス放出量(イオン生成量)および陰極側のイオン刺激による 2 次電子放出量が減少するため、放電電圧が徐々に上昇する現象を自然に説明することができ、また放電電圧の上限値も 2 次的荷電粒子(脱離イオンおよび 2 次電子)の放出量の減少具合で決まると考えられる。

#### (2) 電子刺激によるイオン脱離の定量的評価

上記の放電モデルの鍵となる電子刺激によるイオン脱離量の定量的な評価ができるようならば、脱離イオン量を低く抑えられる電極材料および表面処理方法を調査することが可能となり、放電モデルが正しければ脱離イオンを抑制できる陽極を用いることで高電圧コンディショニング時間の大幅な短縮化や放電電圧の向上が期待できる。典型的な電極材料に対する定量的な評価を行い、電子刺激脱離とイオン脱離の間の相関ならびにそれらの結果と実際の電極間放電の関係を調査する必要があると考えている。そこで、電子刺激によるイオン脱離量を定量的に測定するための装置を立ち上げる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験結果からのモデルの検証

モデルの検証として、「陽極上で発生する電子刺激による脱離イオン」と「陰極上で発生するイオン刺激による電子放出」の発生する確率の積が1となる条件(印可電圧)が存在した場合、その閾電圧以下では放電は発生しないことになる。実際の電子銃装置の高電圧コンディショニング結果などからこれを検証する。

#### (2) イオン脱離量の評価装置の設計、製作

陽極上で発生する電子刺激によるガス放出およびそれに伴うイオン脱離を定量的に調査するための装置を開発する。10keV程度の電子線照射を仮定し、真空中に陽極電極サンプル、イオン引出し電極、イオン補足電極およびイオン検出器を効率的にイオンが収集できるように設計する。設計にはイオンの軌道シミュレーションを活用して行い、イオンの収集効率を推定し、その結果から電子照射量に対するイオン脱離量の割合を推定する。電子刺激脱離量の定量的な計測のため、標準コンダクタンスエレメントを使用し、装置へ導入したガス量(主に水素ガス)に対して真空計の上昇値を記録、校正することによって実際に電極サンプル上で電子刺激脱離によって発生したガス(主に水素)の発生量を推定する。

### 4. 研究成果

#### (1) 実験結果からのモデルの検証

KEKのcompact-ERL加速器の500kV直流型高輝度電子銃の高電圧コンディショニングの結果(図1)から、下記4点が明らかになった。

放電が停止する電圧(放電停止電圧)が存在する。

コンディショニングによって放電停止電圧は連続的に上昇する。

放電停止電圧以下の状態では放電が長期的に発生しない。

放電開始電圧と放電停止電圧の差と、放電によるガス放出量には比例関係がある。(図2)

この事実は、電子刺激脱離が放電と密接に関係するモデルとすべて矛盾なく合致する。その結果をまとめ、Appl. Phys. Lett. 109, 014103 (2016)にて論文発表を行った。

その後の500kV電子銃運転から、長期間にわたり無放電で500kV状態を保持し、累計1000時間を超える間に電子銃単体の放電現象の発生は無く、高電圧コンディショニングにおいて観測される最低の放電停止電圧以下の条件として電子銃の運転電圧を設定することによって、長期間無放電で運転が可能であることを実例として示している。また、放電無く安定に電子銃を運転している期間においても、放電に至らないpAレベルの微小な暗電流によってゆっくりとコンディショニングが進行していると推測される結果も追加の高電圧コンディショニング結果の分析で初めて明らかとなった(図3)。この現象もまた、微小な暗電流により陽極側の電子刺激脱離およびそれに伴う脱離イオンの発生が累積的に漸減し、その結果放電電圧も少しずつ向上する描像がこの放電モデルで説明可能であり、正しさを示す一つの根拠になっている。電子銃運転による長期的な高電圧保持への寄与については、2018年の時点において加速器学会で報告(PASJ2018 FROM03)、およびPhys. Rev. Accel. Beams 22, 053402 (2019)で論文発表を行っている。

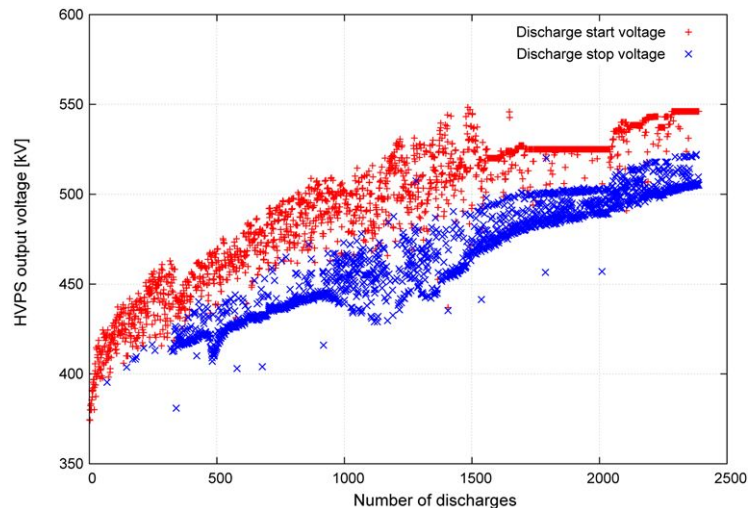


図1: cERL 500kV電子銃の高電圧コンディショニング結果

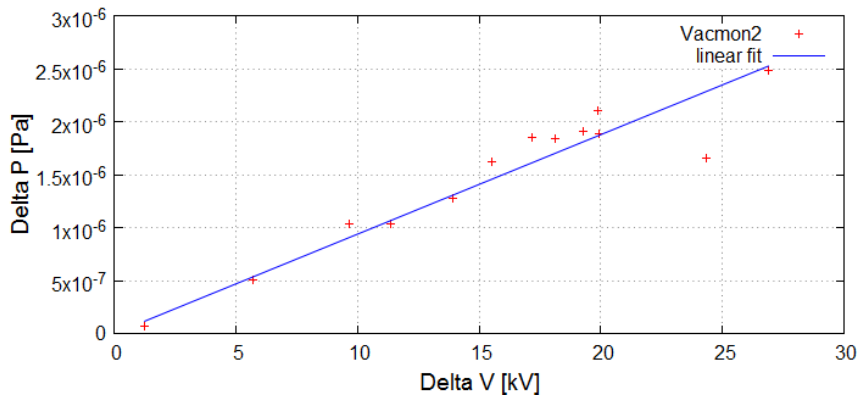


図 2：放電電位差（電荷量）と電子刺激脱離による圧力上昇（ガス放出量）の関係

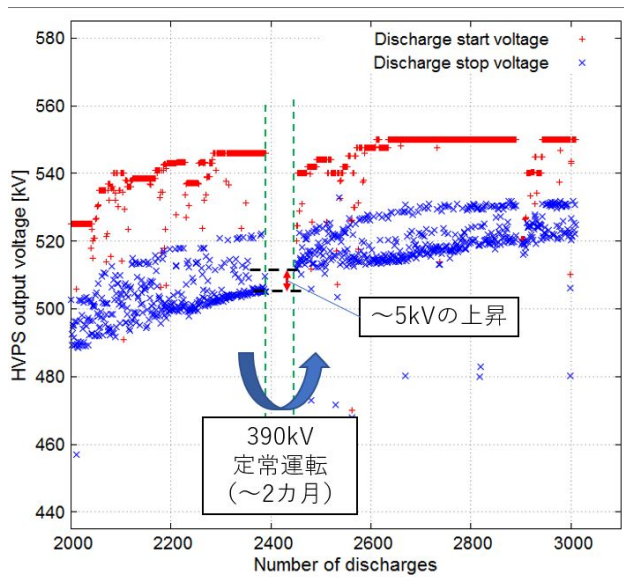


図 3：cERL 500kV 電子銃運転に伴う放電停止電圧の上昇

## (2) イオン脱離量の評価装置の設計、製作

装置の基本設計において、当初はイオン検出部にはメッシュ状の球形電極および微小電荷検出回路の組合せを想定していたが、より微量なイオンを検出できるようマイクロチャンネルプレート（MCP）を採用することを決め、その検出器サイズを基本に詳細設計を進めた。周囲の電極サイズおよびそれらの配置については、イオンの軌道シミュレーションに基づいて決定した。具体的には、電子刺激脱離の主要ガスが水素であるため、発生するイオンとしてプロトンを想定し、電子刺激の主要要素となる2次電子のエネルギーは数十 eV 程度であることから、それらと脱離ガスの衝突で発生するイオンのエネルギーは高々数 100eV で主には 100eV 程度であると想定し、予測されるイオンエネルギー（0～50eV）に対して検出器へイオンが入射する効率を最大化する各種電極の電位の決定、その電位を与えるための電源の選択および検出器となる MCP の配置を決定した。最適化後の設計では、イオン収集効率はイオンエネルギー0～50eV の範囲で約 90%得られており、さらにイオン収集効率を多少犠牲にするが各電極の電位を調整することで電子刺激によって発生したイオンのエネルギーを 1eV 以下の分解能で分析できる計算結果を得た。(図 4) 試験電極へ電子照射を行うための電子線発生、制御装置の部分は整備できない状況で残っているものの、検出器周りの準備ができた。

また、電子刺激脱離の抑制は放電電圧の向上に寄与する可能性が高いため、放電用試験電極（特に陽極）表面に電子刺激脱離抑制に効果的なコーティングを行うための装置を製作し、今後の実験準備を進めた。

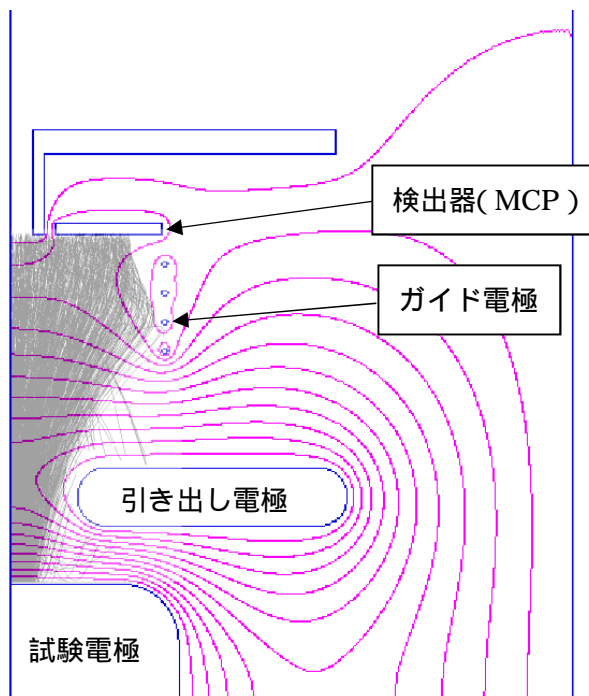


図4：電子刺激に伴うイオン脱離の定量的調査のための装置設計、イオン収集シミュレーション。試験電極（GND）、引き出し電極（負電位）、試験電極からMCPへ向けて走るイオンの起動は薄い黒線で表している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nobuyuki Nishimori, Ryoji Nagai, Ryoichi Hajima, Masahiro Yamamoto, Yosuke Honda, Tsukasa Miyajima, and Takashi Uchiyama	4. 巻 22
2. 論文標題 Operational experience of a 500 kV photoemission gun	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS	6. 最初と最後の頁 53402-1, -10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.053402">https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.053402</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 山本将博、西森信行、宮島司、本田洋介、羽島良一	4. 巻 -
2. 論文標題 compact-ERL DC電子銃の500 kV長期安定運転	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of PASJ2018	6. 最初と最後の頁 189, 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masahiro Yamamoto, Nobuyuki Nishimori	4. 巻 109
2. 論文標題 High voltage threshold for stable operation in a dc electron gun	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 014103-1, -4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4955180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masahiro Yamamoto, Nobuyuki Nishimori	4. 巻 1
2. 論文標題 超高真空における電子刺激脱離と直流放電現象の関係	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 第13回日本加速器学会年会プロシーディングス	6. 最初と最後の頁 47-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山本将博、西森信行、宮島司、本田洋介、羽島良一
2. 発表標題 compact-ERL DC電子銃の500 kV長期安定運転
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Nishimori, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, T. Uchiyama, Xiuguang Jin, Takashi Obina, M. Mori, R. Nagai, R. Hajima, M. Kuriki
2. 発表標題 Commission results of the compact ERL High voltage DC gun
3. 学会等名 59th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本将博、西森信行
2. 発表標題 超高真空における直流高電圧放電と電子刺激脱離の関係性
3. 学会等名 2017年真空・表面科学合同講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Yamamoto, Nobuyuki Nishimori
2. 発表標題 超高真空における電子刺激脱離と直流放電現象の関係
3. 学会等名 第13回日本加速器学会年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masahiro Yamamoto, Nobuyuki Nishimori
2. 発表標題 Relation between electron stimulated desorption and dc high voltage discharge under ultra-high vacuum
3. 学会等名 International Vacuum Congress (IVC-20) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>超伝導加速器利用推進チーム publications  <a href="http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/publications.html">http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/publications.html</a>          コンパクトERL評価専門委員会：電子銃開発  <a href="http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/hyouka_2017.html">http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/hyouka_2017.html</a>          コンパクトERL成果報告書  <a href="http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/suishin/hyoka/cERL_report_ver2.pdf">http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/suishin/hyoka/cERL_report_ver2.pdf</a>          ERL評価専門委員会報告  <a href="http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/suishin/hyoka/hyouka_report_2017.pdf">http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/suishin/hyoka/hyouka_report_2017.pdf</a></p>
---

6. 研究組織		
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)
		備考