真空放電の制御と応用

正員 山本 修* 正員 齊藤 芳男**
 正員 大久保 仁*** 正員 堀田 栄喜****
 正員 山内 邦仁**** 正員 鶴田 浩一*⁵

Control and Application of Discharges in Vacuum

Osamu Yamamoto*, Member, Yoshio Saito**, Member, Hitoshi Okubo***, Member, Eiki Hotta****, Member,
 Kunihito Yamauchi****, Member, Kouichi Tsuruta*⁵, Member

Vacuums have been attractive media for researchers and industry to obtain useful plasma, energized particles and current switching effects. These applications require sophisticated control of high voltages or high electric fields, plasma parameters such as density and temperature of charged particles, potential distribution, etc. This article reports current topics on the electrical insulation and plasma application in vacuum.

キーワード：真空中の絶縁，プラズマ応用，二次電子放出，高電圧真空遮断器，中性子源，陽子源，パルスX線源

Keywords：Insulation, plasma application, SEY, high voltage vacuum interrupter, neutron and proton sources, pulse X-ray source

1. はじめに

真空中の放電に関する研究を概観すると様々な切り口が見えてくるが、一言で表すならば放電を如何に制御するか、となるであろう。制御対象の一つは真空中での高電圧ないし高電界，すなわち電気絶縁であり，真空遮断器，パルスパワー機器を含む各種の荷電粒子加速器・発生器，人工衛星搭載の太陽電池パネル，電子源を用いる次世代薄型ディスプレイなど電力，高粒子エネルギー，真空マイクロエレクトロニクスその他の幅広い真空を応用する機器の開発と関連している。もう一つの対象は真空中でのプラズマであり，密度や温度，イオンの価数，電位分布さらには汚損物

質（金属ドロップレット）の除去なども含まれ，その新しい応用には表面改質やナノ物質の生成，中性子発生源やパルスX線源の開発などがある。

電気学会放電技術委員会では過去に3回の真空中の放電に関する調査専門委員会が組織され，上述した制御と応用に関する調査報告書^{(1)~(3)}が刊行されている。また，現在は放電を有効に制御するために電極や固体絶縁材料の表面特性，プラズマパラメータなどを含む基礎特性の計測とシミュレーション技術の調査をおこなう「真空中における放電制御のための高度計測・シミュレーション技術」調査専門委員会が活動しており，本特集号はその一環として企画されたものである。この解説記事では絶縁の観点から（1）真空中の沿面絶縁に重要な固体絶縁体材料の二次電子放出と帯電現象の基礎，（2）環境負荷が小さい電力用遮断器として注目されている高電圧真空遮断器の開発における技術的課題をとりあげた。また，真空中プラズマの応用の観点から（3）地雷探査や医療診断への適用が考えられている簡易型中性子／陽子源開発の技術課題，および（4）各種の分析・診断を可能とする可搬型パルス軟X線源の開発をとりあげ，それぞれについて専門の立場から紹介する。

2. 絶縁体材料の二次電子放出と沿面放電

真空中に置かれた絶縁体材料の主として沿面での絶縁破壊（フラッシュオーバー）の電界強度は，経験的にはおよそ1 kV/mm程度と言われており，実際に，機器設計に際してはこれを目安とすることが多い。しかしながら，近年，機器

* 京都大学大学院工学研究科
 〒615-8510 京都市西京区京都大学桂
 Kyoto University

** 高エネルギー加速器研究機構
 〒305-0801 つくば市大穂 1-1
 KEK-High Energy Accelerator Research Organization
 1-1, Oho, Tsukuba 305-0801

*** 名古屋大学エコトピア科学研究所
 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
 EcoTopia Science Institute, Nagoya University
 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

**** 東京工業大学大学院総合理工学研究科
 〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259
 Tokyo Institute of Technology
 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502

*⁵ 茨城大学工学部
 〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1
 Ibaraki University
 4-12-1, Nakanarusawa-cho, Hitachi 316-8511

のダウンサイジングや高電圧化が要求され、さらに高い電界強度に対して安定な絶縁特性を持つ材料や表面処理の開発が望まれている。絶縁体、真空、金属電極の界面であるトリブルジャンクションに外部電界が印加された場合については、そこからの電子の電界放出、絶縁体表面への電子の入射、および二次電子放出および帯電という放電前駆機構が古くから指摘されている。実際には、外部電界が無い場合でも、X線や電子、イオンの照射による二次電子放出と帯電が放電あるいは材料の劣化などの誘因となることもある。二次電子放出と帯電の2つの現象は、このように絶縁材料表面での放電の前駆過程を支配するものであり、詳しく研究を進める必要がある。

〈2・1〉 二次電子放出 絶縁材料からの二次電子放出係数は金属材料での値（1から2程度）に比べ数倍大きい。一般に二次電子放出特性は、以下のように、入射一次粒子のエネルギー散逸過程と、生成された二次電子の材料内での散乱過程との2つの非弾性散乱現象の総和と考えることができる。

入射粒子のバルク内でのエネルギー損失とそれによる二次電子の生成個数 n との関係は、入射エネルギーを E 、二次電子生成に必要なエネルギーを β とすれば、深さ方向の座標を z とし、

$$n(z) = -\frac{1}{\beta} \frac{dE(z)}{dz} \quad (1)$$

で表される。一次粒子のエネルギー散逸過程を示す右辺 dE/dz として、例えば、Betheの式などが想定される。

$$-\frac{dE(z)}{ds} = \left(\frac{N_A e^4}{8\pi\epsilon_0^2} \right) \left(\frac{Z\rho}{A} \right) \frac{1}{E} \ln \frac{2E}{J} \quad (2)$$

ここで、 s は一次粒子の飛程（線形飛程）であり、侵入深さ（投影飛程）に換算して(1)式と結びつける必要がある。なお、 N_A はアボガドロ数、 e は素電荷、 ϵ_0 は真空の誘電率、 Z は原子番号、 A は原子量、 ρ は密度、 J は平均のイオン化エネルギーである。(2)式は、エネルギーが高い場合は、およそ $1/E^a$ で減少していく関数とみなせる。

生成された二次電子は、固体内部で、フォノン、プラズモン（金属の場合）、あるいは不純物や欠陥などの散乱中心により散乱される。固体の外部に脱出できる二次電子の数は、原理的にはこうした散乱過程を組み入れて計算されるが、電子の実効的な平均自由行程 λ を用いることにより、

$$g(z) = B \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right) \quad (3)$$

と表すことが可能である。ここで、 B は表面での脱出確率であり、仕事関数や表面の汚れ、あるいは帯電など材料の表面状態に依存した量である。

二次電子放出係数（SEY：secondary electron yield, 1個の一次粒子が入射した時に放出される二次電子の個数） δ は、したがって、(1)、(3)式から、

$$\delta = \int_0^R n(z)g(z)dz = B \int_0^R -\frac{1}{\beta} \frac{dE(z)}{dz} \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right) dz \quad (4)$$

図1 二次電子放出係数の測定例

Fig. 1. An example of secondary electron yield measurement (primary electron beam current is 100 pA).

と表すことができる。 R は一次粒子の投影飛程であり、入射エネルギーの増加とともに増加する。(4)式は準経験的に得られたものであり、各種材料について二次電子放出特性を説明する際に用いられている。一次粒子の入射エネルギーが低く R が λ と同程度が小さい場合、生成された二次電子はほとんどが放出される。したがって生成個数が入射エネルギーに比例すると考えれば、 δ も入射エネルギーにほぼ比例して増加する。これに対して、入射エネルギーが高い場合は深さ λ より浅い場所で生成された二次電子だけが脱出でき、 δ は(2)式からおおよそ $1/E^a$ で減少する。

金属と絶縁物とで δ の値が大きく異なる最大の理由は、(4)式における平均自由行程 λ の違いである。金属では自由電子によるプラズモンの散乱の影響が大きく、 λ は 0.4 から 1 nm と小さい。これに対して絶縁物では λ は 50 から 100 nm となり、このため $g(z)$ の値そのものが大きく δ も数倍の大きさとなる。絶縁体材料においては、 λ を支配する要因はフォノン散乱（材料温度）および散乱中心となる材料の表面付近における微細構造であり、例えばアルミナセラミックスでは粒界焼結助剤の結晶性や研磨による欠陥などが強く影響を及ぼす。

〈2・2〉 帯電現象 絶縁体に特有なもう一つの現象である帯電は、電子の付着（束縛、トラップ）あるいは電子の欠落により表面近傍に局所的な高電界が発生する現象である。これが誘因となる絶縁破壊過程は、一般には、なだれ的なもの（付着電荷が帯電電界により加速され結晶格子を破壊する）と、熱的なもの（外部電界中での電荷の運動による抵抗損失発熱が原因の材料劣化）とがあると言われている。帯電が存在する場合は局所的に静電エネルギーが材料中に存在することになるが、これは微視的には結晶格子の歪みによる力学的エネルギーとして蓄えられ放電の際に放出される。なお、材料表面での絶縁破壊が起きる帯電電荷密度は、経験的に、数十 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 程度と言われているが、これは表面の原子密度のおおよそ $1/10000$ から同程度に相当する。絶縁耐力の高い絶縁体材料を開発するためには、電

子の束縛準位を調べるのが重要であり、さらに、帯電分布（深さ方向も含めた）の時間的変化を分析することが必要となる。

絶縁体材料における電子の束縛位置やエネルギー（束縛準位）については、未だ明確になっていない点が多い。結晶の格子欠陥や結晶粒界、さらに不純物などが想定されている。アルミナセラミックスでは、表面研磨や熱処理などにより、アルミナ結晶の酸素欠陥での電子準位間の遷移と同時に表面の帯電状態も変化する。このことから、酸素欠陥が帯電に直接関連していると推察されている⁽⁴⁾。

一次粒子を照射した際の帯電の時間変化については、例えば、二次電子の放出の様子を観察することでも可能である。図1は、パルス状電子ビームをアルミナセラミックスに入射した際に観察される放出二次電子（電流）であるが、入射直後から帯電の影響により二次電子放出電流が減少していく事が分かる。これは、電子を放出することによって表面が正に帯電し、入射電子の入射エネルギーが相対的に増加したためである。電子を照射した場合、先に述べたように固体内部での飛程まで一次電子は侵入し二次電子を生成しているので、それらが放出されないより深い領域では、一次と二次を含めた電子の密度は分布を持つ（均一ではなく広義には帯電）。深さ方向の電荷分布は熱刺激パルス法等で測定されることがあるが、数千nm（飛程）の表面近傍での精度や位置分解能を得ることは難しい。現在のところは、散逸過程と散乱過程とを仮定したシミュレーションによる電荷分布の推定が行われている⁽⁵⁾。

3. 高電圧真空遮断器開発の技術的課題

〈3・1〉 技術的背景と課題 真空遮断器（VCB）は構造が単純で環境調和、メンテナンスフリーなどのメリットがあるため、84 kV 級までの汎用遮断器として電力システム・配電システムに多用されている。最近ではSF₆ガスの地球温暖化問題から、将来の電力送変電用遮断器として高電圧化の技術開発が開始されている。真空バルブ（VI）が84 kV 級以上の高電圧条件で使用されるためには、高電圧電気絶縁技術の開発はもとより、真空バルブの通電電流性能向上、冷却性能向上、短絡容量向上などを達成し、単一バルブの大幅なコンパクト化を実現する技術開発が求められる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。以下では、真空バルブの110 kV～168 kV 級への高電圧化に関する電気絶縁技術の課題についてまとめる。

〈3・2〉 真空バルブの電気絶縁設計技術 真空バルブ（VI）の電気絶縁設計に関する部位とそれに関する電気絶縁部位を分類すると図2のようになる。この中でVIを高電圧化する上で特に重要となるのが、メインコンタクト間、アルミナセラミックスの沿面電気絶縁など(1)～(4)で示した部分である。高電圧化するためには準平等電界分布における絶縁特性に加えて不平等電界分布における絶縁特性への配慮が重要になってくる。

メインコンタクトやシールド間などの電極間では電極材料特性の改良のほか、フラッシュオーバー特性の電極面積効果、

図2 真空バルブ(VI)の電気絶縁部位の分類

Fig. 2. Classification of electrical insulation part of vacuum interrupter.

(a) Electrode material characteristics

(b) Electrode pre-treatment effect

図3 絶縁破壊電圧のコンディショニング効果

Fig. 3. Conditioning effect of breakdown voltage.

電極コンディショニング特性の把握が必要であり、沿面絶縁についてはアルミナセラミックスの帯電特性や沿面フラッシュオーバー特性の体系化が求められている⁽⁶⁾。最近では、電荷重畳法（CSM）を応用した電界最適化法や電気絶縁最適化法を用いて、目標とする電界分布や目標耐電圧条件を満たす電極形状の逆求解手法が適用されている⁽⁸⁾。

図4 真空中長ギャップ絶縁破壊電界特性

Fig. 4. Breakdown field characteristics of long gap electrodes.

このように、電極材料開発、電極コンディショニング特性の定量化、沿面帯電の低減施策、それに各種最適化手法を駆使して、長ギャップ不平等電界特性の把握や従来の限界を打破し、VIの高電圧化電気絶縁技術開発が行われている。145 kV, 2000 A, 40 kA 級 VCB / VI の開発結果が報告されている⁽⁹⁾。

〈3・3〉 不平等・長ギャップ電極コンディショニング特性 従来より真空中の電極ギャップは電圧の印加や電界の印加、電流通電などにより絶縁破壊電圧を上昇させる⁽¹⁰⁾。このコンディショニング特性を定量化し効率よく適用することがVIの高電圧化に繋がる。図3に代表的な電極コンディショニング特性の例を示す⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。同図(a)から材料による違いが明らかであり、また同図(b)から電極表面処理すなわち、電界研磨と超純水による表面洗浄が耐電圧向上に効果的であることがわかる⁽¹³⁾。

図4には不平等電界電極による40 mmまでの長ギャップ絶縁破壊特性を示す。10 mm以上の長ギャップ条件下では最大破壊電界はほぼ一定となっている⁽¹⁴⁾。このように、電極材料とその処理、表面粗さなどによるコンディショニング特性が不平等電界下で定量化され、不平等電界下における面積効果の体系化が進められている。このほかに、VIの高電圧化に対して、メインコンタクトの複数ギャップ化による効率向上の研究などがおこなわれている⁽¹⁵⁾。

〈3・4〉 真空中固体絶縁物の帯電と沿面フラッシュオーバー特性 真空中固体絶縁物表面の電気絶縁、すなわち沿面絶縁特性がVI高電圧化のための重要技術となっている。シールド電極やトリプルジャンクションからの電界電子放出により固体絶縁物表面が帯電し沿面放電発生に至る可能性が指摘されている。図5にPMMA製の円筒および円柱型試料の表面粗さに対する帯電特性を精密に測定した事例を示す⁽¹⁶⁾。また図6には、アルミナセラミックス表面粗さと電界分布を同時に変化させ、電気力線のセラミックス表面入射角度を制御し、表面の帯電特性の違いを定量化している。これらの知見により、図7に示すようにアルミナセラミックス表面粗さと電界分布を変化させることにより、アルミ

図5 PMMA表面粗さと帯電強度の関係

Fig. 5. Relationship between PMMA surface roughness and charging intensity.

図6 真空中帯電の二次電子放出とアルミナセラミック表面粗さの影響

Fig. 6. Influence of secondary electron emission and surface roughness on surface charging in vacuum.

図7 真空中アルミナセラミックス帯電の制御特性
Fig. 7. Charging control of ceramics charging in vacuum.

ナセラミックス表面の帯電特性を制御できることが明らかになっている⁽¹⁷⁾。さらに、低電圧 VI ではあるが、中間シールドを除去した VI の開発の試みもなされている⁽¹⁸⁾。

4. 簡易型核融合中性子／陽子源の開発における諸問題

ITER（国際熱核融合実験炉）に代表されるように、核融合というエネルギー源としての応用を目指した非常に大がかりな装置が一般的である。しかしながら、核融合反応を得ること自体はそれほど難しいものではなく、例えば重水素を含む気体中で高電圧の放電を起こすだけで簡単に核融合は起きてしまう。そこで、図 8 に示す装置を使って、核融合をエネルギー源としてではなく簡便な中性子源あるいは陽子源として利用する研究が進められている⁽¹⁹⁾。この装置は、陽極となる球形もしくは円筒形の真空容器内に同心・同形のグリッド陰極を設置しただけの非常に簡単な構造で、大きさも直径 20 cm 程度から実現可能である。陰極に開口率の高いグリッドが使われていることが大きな特徴で、電極間に数十 kV の高電圧を印加して放電すると、放電によって生成されたイオンが電界によって中心に向かって加速され、収束したイオンビーム同士が衝突して核融合反応が起こる。この電極構造では、イオンが衝突することなく陰極の反対側に通って抜けたとしても、逆方向の電界によって再度中心に向かって加速されるため、衝突が起こるまでイオンは装置内を運動し続け、効率よく核融合反応が得られる。

〈4・1〉 原理的課題 この核融合装置の構造や動作原理は簡単であるが、中性子／陽子生成率を大きくすることは容易ではない。その主な原因の 1 つが、加速されたイオンビームの多くが核融合反応を起こす前に荷電交換反応で中性粒子化してしまうことにある。一旦中性粒子化してしまうと、他の粒子と衝突が起こらなかった場合はそのまま真空容器壁に衝突し、損失となるため、装置本来の構造による利点が活かされない。これは、バックグラウンドの圧力の高さに起因しているが、放電との依存関係があるため、

圧力だけを単純に下げることにはできない。また、本来の動作原理からすると放電電流の 2 乗に比例するビームービーム衝突反応が支配的となつてよいはずであるが、実際には図 9 に示されるように放電電流の 1 乗に比例するビームーバックグラウンド衝突反応が支配的となっているのも、同様にバックグラウンド圧力の高さに起因している。そのため、さまざまなイオン源を用いて動作圧力を下げる試みがなされているが、イオン源自体の動作もまた圧力に依存するため、中性子／陽子生成率が向上するかわりに動作安定性が悪くなるなど、著しい効果を得るまでには至っていない^{(20)~(22)}。

こうした中性子／陽子生成率の課題は依然として残されているものの、一方では非常に簡便な中性子／陽子源が得られるということで、以下の具体的応用を見据えた研究もなされている。

〈4・2〉 地雷探知用可搬型中性子源の開発 現在、この核融合装置を地雷探知用の可搬型中性子源として応用する研究が進められている⁽²³⁾。火薬中の窒素に中性子があたると、特定のエネルギーを持った捕獲ガンマ線が放出される性質を利用するもので、金属探知器に反応しないプラスチック製の対人地雷も探知できる。

対象が危険物であることから探知精度の高さが第 1 に優先されるが、その上で実用的な時間内に探知が行われるためには、毎秒 10^7 個以上の高い中性子生成率が必要となる。しかしながら、そのためには高電圧・大電流での運転が必要であり、可搬性の高い小型の装置でそのような高出力を実現するためには、装置の過熱を防ぐために十分な冷却が不可欠となる。

なお、この技術は現在のところもっぱら地雷探知に主眼が置かれて研究開発が行われているが、空港等でのセキュリティチェックにもほぼそのまま適用できるため、多方面から高い期待が寄せられている。

〈4・3〉 短寿命放射性同位体生成用陽子源の開発 近年、国民病とまで言われるがんの先進的な検診法として陽

図 8 簡易型核融合中性子／陽子源の装置概略

Fig. 8. Schematic of discharge-type fusion neutron/proton source.

図 9 中性子生成率と陰極電流の関係

Fig. 9. Neutron production rate vs. cathode current at constant voltages.

電子放射断層撮影（PET）診断が注目されている。PET 診断では、陽電子放出を行う放射性同位体を製剤として体内に注入する必要があるが、同位体生成には高エネルギーの陽子が必要だけでなく、短寿命であるが故に検査現場近くでの生成が不可欠である。現在のところ、この同位体生成には高価なサイクロトロン加速器が用いられているが、設置スペースや初期コストの問題で普及が遅れている。そこで、この放電型核融合装置をサイクロトロンにかわる安価で小型の陽子源として応用する研究が進められている。

PET 診断に用いられる同位体は短寿命であるため、その生成には非常に高い陽子線量が要求される。そのため、絶対的な陽子生成量を稼ぐことが最も大きな課題ではあるが、透過力の非常に高い中性子と異なり陽子は引き出せる量がかなり制限されるため、いかにして生成した陽子を標的に多く照射できるようにするかが重要な課題となる。また、D-D 反応では生成される陽子のエネルギーが十分ではないため、より高エネルギーの陽子を生成する D-³He 反応が同位体生成には有効であるが、ヘリウム 3 が高価で調達が難しいという問題もある。

5. 放電電流の制御による軟 X 線源の開発

真空アーク放電では、放電開始直後より電極から高密度のプラズマが発生する。導電性のプラズマは回路電流の経路となるので、プラズマの進展と回路の応答とは密接に影響し合っている。このため、真空アークの応用ではアークプラズマの過渡現象に応じた回路電流の制御が必要になる場合がある。ここでは、真空アークを利用した高輝度軟 X 線源を実現するために、二つの共振回路を用いて二周波数成分からなるアーク電流を発生させる試みを紹介する。

近年、低原子番号の原子との相互作用を起こし易い 1 keV 領域の軟 X 線が注目されている。真空放電を利用した高強度の X 線源として、真空スパーク X 線源がよく知られている⁽²⁴⁾。一般に X 線発生効率を高めるために高い印加電圧を用いると、利用したい軟 X 線以外に高エネルギーの X 線が混入する。軟 X 線のみを高輝度で発生させるためには、低い加速電圧で大電流密度の電子流を発生させる必要がある。

この目的のために開発した繰り返し真空アーク軟 X 線源を図 10 に示す。この装置は真空ギャップにおいて短時間のアーク放電と高電圧の印加を交互に繰り返すことにより、アーク消弧後の高温の陰極表面から熱電子を発生させ、同時にイオンシース中で加速し、陽極で制動放射を得るものである⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。真空ギャップと電源との間に二つの共振器（同軸キャパシタ）および抵抗を接続することで、ギャップのブレークダウン時に高周波と低周波が重畳したアーク放電電流を励振させ、これを弛緩発振により繰り返す。

図 11(a)にブレークダウン時の電極間電圧および電流波形を示す。抵抗と二つの同軸キャパシタの静電容量によって決定される時定数で回路が充電されてゆき、10 kV 程度に達した時に真空ギャップのブレークダウンが起こる。すると

図 10 繰り返し真空アーク軟 X 線源の構成

Fig. 10. Repetitive vacuum arc soft X-ray source.

(a) Voltage and current measured at the connection of two resonators
(High frequency component of the current is attenuated by 0.03)

(b) Photographs of the plasma

図 11 高周波および低周波電流によるアークプラズマの生成と進展

Fig. 11. Time evolution of plasma generated with high and low frequency currents.

放電初期に高周波電流をとまなうプラズマが発生する。プラズマの時間進展をシュリーレン法により撮影したのが同図(b)で、初期プラズマが電極間を接続していることがわかる（6～48 ns）。この時間帯では半径方向の電子密度勾配を示す黒い部分（左）と白い部分（右）とが区別できる。この時間帯では、プラズマの直径は 1 mm 以下である。その後、低周波成分の電流の反転によって、第二のプラズマ層が生成されるが、新しいプラズマの膨張は外側のプラズマ層によって妨げられている。75 ns では直径 1.5 mm のプラズマの中に直径 0.4 mm のプラズマ層が見られる。次第にプラズマ柱の膨張および拡散が起こり、100 ns では電流が継続しているものの、新しいプラズマの発生は認められない。両電極

軟X線の出力はシンチレータと光電子増倍管の組み合わせにより時間積分している

図 12 繰り返し動作時の電極間電圧、電流および軟X線放射

Fig. 12. Waveforms of electrode voltage, current, and time-integrated intensity of soft X-ray emission.

の表面は広い範囲でプラズマと接触しているため電流密度は低下し、新たな陰極点が発生しにくいと考えられる。450 ns では、低周波電流により加熱された電極からの蒸気が陽極表面に広がり停滞していると考えられる。

このように、各共振器に蓄積されたエネルギーが異なる時間的割合で真空ギャップへ伝達され、それぞれの作用により高密度プラズマが生成され、電極が加熱されていることがわかる。ギャップ間を電氣的に接続していたプラズマが消滅すると同軸キャパシタは再び充電され、以上のプロセスが約 1 μs の時間間隔で繰り返される (図 12)。

アーク消弧後に負電圧が陰極に印加される期間には陰極の周辺にイオンシースが形成される。このとき、陰極の温度が低下する前に軟 X 線放射に必要な電圧が印加されるように回路定数を選択すれば、陰極から発生した熱電子をイオンシース中で加速し、陽極への衝突によって制動放射を得ることが出来る。実験の結果、X 線放射の起こる点状領域のプラズマの直径は 170 μm 程度であり、電流密度は、 10^7 A/m²であった。これはマイクロフォーカス X 線源の電流密度に匹敵あるいは上回る値である。本方式では高真空を必要とせず、ウォーミングアップも不要であるため、電池を電源とした可搬式の分析機器への応用が考えられる。

6. おわりに

真空環境を利用する機器には電力機器、電子機器、高エネルギー物理学関連機器、医療・医学関連機器さらに宇宙関連機器などがあり、それぞれの立場から放電を制御ないし利用するための研究も多様である。この解説記事でその一端を理解して頂ければ幸いである。最後に、本年 (2006 年) 9 月には当調査専門委員会が中核となって企画した第 22 回真空中の放電と絶縁に関する国際会議 (XXIInd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum) が松江にて開催されることを記して本稿を終える。

(平成 18 年 5 月 30 日受付)

文 献

- (1) 「真空中での放電の利用とその制御」, 電気学会技術報告, No.586 (1996)
- (2) 「真空中での荷電粒子の発生と放電の制御」, 電気学会技術報告, No.757 (1999)
- (3) 「高エネルギー密度化に係わる真空中の放電制御技術」, 電気学会技術報告, No.1001 (2005)
- (4) S. Michizono, Y. Saito, and A. Inagaki : "Annealing Effects on Breakdown Threshold of Radio-frequency Windows", *J. Vac. Soc. Jpn.*, Vol.40, pp.436-441 (1997)
- (5) C. Attard, G. Damamme, J-P. Ganachaud, R. Renoud, and E. Vicario : "Monte Carlo simulation of the building up of a charge distribution in an insulating target and of its relaxation in an electrostatic mirror experiment", Proc. 3rd International Conf. Electrical Charge in Solid Insulators, pp.215-223, Tours, France (1998-7)
- (6) H. Okubo : "Technical Trend of Environmental-friendly High Voltage Vacuum Circuit Breaker (VCB)", *IEEEJ Trans. FM*, Vol.123-B, No.2, pp.129-132 (2003-2) (in Japanese)
大久保仁 : 「解説一環境低負荷の真空遮断器(VCB)高電圧化技術動向」, 電学論 B, 123, 2, pp.129-132 (2003-2)
- (7) H. Okubo and S. Yanabu : "Feasibility Study on Application of High Voltage and High Power Vacuum Circuit Breaker", 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.275-278 (2002)
- (8) K. Kato, S. Okabe, S. Kaneko, and H. Okubo : "Optimization Technique Taking Area Effect into Account for Computer-aided Insulation Design of Vacuum Circuit Breakers", 21th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.610-613 (2004)
- (9) H. Saitoh, H. Ichikawa, A. Nishijima, Y. Matsui, M. Sakaki, A. Honma, and H. Okubo : "Research and Development on 145 kV/40 kA One Break Vacuum Circuit Breaker", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Vol.2, pp.1465-1468 (2002)
- (10) Y. Ito, Y. Yamano, S. Kobayashi, and Y. Saito : "Vacuum Electrical Breakdown Characteristics and Surface Chemical Compositions of Titanium Electrodes with Oxidation Conditions", 21th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.80-83 (2004)
- (11) F. Miyazaki, Y. Inagawa, K. Kato, M. Sakaki, H. Ichikawa, and H. Okubo : "Electrode Conditioning Characteristics in Vacuum under Impulse Voltage Application in Non-uniform Electric Field", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation*, Vol.12, pp.17-23, No.1 (2005)
- (12) H. Okubo, F. Miyazaki, Y. Inagawa, K. Kato, M. Sakaki, and H. Ichikawa : "Electrode Area of Breakdown Depending on Conditioning Mechanism under Non-uniform Electric Field in Vacuum", 21th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.76-79 (2004)
- (13) K. Kato, Y. Fukuoka, Y. Inagawa, H. Saitoh, M. Sakaki, and H. Okubo : "Breakdown Conditioning Characteristics of Precision-surface-treatment", *IEEEJ Trans. FM*, Vol.126, No.8, pp.763-768 (2006-8) (in Japanese)
加藤克巳・福岡裕志・稲川諭季彦・斉藤 仁・榊 正幸・大久保仁 : 「真空中精密表面処理電極のコンディショニング特性」, 電学論 A, 126, 8, pp.763-768 (2006-8)
- (14) Y. Fukuoka, K. Kato, H. Saitoh, M. Sakaki, and H. Okubo : "Conditioning Characteristics of Large Gap Electrode under Non-uniform Electric Field in Vacuum", The Papers of Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan, ED-05-162 (2005) (in Japanese)
福岡裕志・加藤克巳・斉藤 仁・榊 正幸・大久保仁 : 「真空中不平等電界下長ギャップ領域における電極コンディショニング特性」, 電気学会放電研資, ED-05-162 (2005)
- (15) S. Gier, H. C. Karner, and H. Knobloch : "Dielectric Strength of Double and Single-Break Vacuum Interrupters", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation*, Vol.8, No.1, pp.43-47 (2001)
- (16) Y. Hayashi, T. Satoh, S. Hamada, O. Yamamoto, T. Kobayashi, H. Omura, and H. Morii : "Charging Characteristics of a Hollow Insulator in Vacuum", 2006 National Convention Record, IEE of Japan, No.1, p.46 (2006) (in Japanese)
林 泰隆・佐藤剛洋・濱田昌司・山本 修・小林哲夫・小村広司・森井 浩 : 「真空中円筒型固体絶縁物の帯電特性」, 平成 18 年電気学

会全国大会, No.1, p.46 (2006)

- (17) T. Hosono, K. Kato, A. Morita, and H. Okubo : “Experimental Investigation on the Charging Control for Electric Filed Distribution on Alumina Insulator in Vacuum”, The Papers of Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan, ED-05-144 (2005) (in Japanese)
細野喬文・加藤克巳・森田 歩・大久保仁 : 「電界分布と表面粗さによる真空中アルミナ絶縁物上帯電制御に関する実験的検討」, 電気学会放電研資, ED-05-144 (2005)
- (18) L. T. Falkingham : “Fifty years of Vacuum Interrupter Development in the UK”, 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.1-8 (2002)
- (19) G. H. Miley, J. Javedani, Y. Yamamoto, R. Nebel, J. Nadler, Y. Gu, A. Satsangi, and P. Heck : “Inertial-Electrostatic Confinement Neutron/Proton Source”, Proc. of 3rd Int. Conf. on Dense Z-pinches, pp.675-688, AIP Press, New York (1994)
- (20) K. Masuda, K. Taruya, T. Koyama, H. Hashimoto, K. Yoshikawa, H. Toku, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, H. Horiike, and N. Inoue : “Performance Characteristics of an Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device with a Triple-Grid System”, *Fusion Technol.*, Vol.39, No.3, pp.1202-1210 (2001)
- (21) T. Takamatsu, K. Masuda, T. Kyunai, H. Toku, and K. Yoshikawa : “Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device with an Ion Source Using a Magnetron Discharge”, *Nucl. Fusion*, Vol.46, No.1, pp.142-148 (2006)
- (22) K. Yamauchi, S. Ohura, A. Tashiro, M. Watanabe, A. Okino, T. Kohno, E. Hotta, and M. Yuura : “Improvement of Proton Source based on Cylindrical Inertial Electrostatic Confinement Fusion with Ion Source”, Workshop on New Aspects of High Energy Density Plasma, NIFS-PROC-61, pp.99-104 (2005)
- (23) K. Yoshikawa, K. Masuda, H. Toku, K. Nagasaki, T. Mizutani, T. Takamatsu, M. Imoto, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, H. Osawa, E. Hotta, T. Kohno, A. Okino, M. Watanabe, K. Yamauchi, M. Yuura, S. Shiroya, T. Misawa, and T. Mori : “Research and Development of Landmine Detection System by a Compact Fusion Neutron Source”, *Fusion Sci. Technol.*, Vol.47, No.4, pp.1224-1228 (2005)
- (24) R. Germer : “X-ray flash techniques”, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol.12, pp.336-350 (1979)
- (25) T. Yanagidaira, D. Nose, H. Abiko, H. Miura, and K. Tsuruta : “Soft X-ray Generation after Arc Extinction of a Short Vacuum Gap Operated with Low-Current, Repetitive Discharge”, *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol.13, pp.116-120 (2004)
- (26) T. Yanagidaira, W. Kotake, H. Miura, and K. Tsuruta : “Temporal Evolution of Micro-Plasma in a Low-Current, Repetitive Vacuum Spark Soft X-Ray Source”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 33, No. 5, pp.1668-1671 (2005)

山 本 修

(正員) 1948年2月22日生。1970年3月立命館大学理工学部数学物理学科卒業。京都大学工学研究科助手。工学博士。SF₆ガスおよび混合ガス絶縁, 鉄塔雷サージ特性, 混合ガスの分離回収法, 真空中の沿面絶縁などの研究に従事。IEEE 会員, 放電学会会員。

齊 藤 芳 男

(正員) 1951年6月10日生。1979年3月東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。同年同大学工学部計数工学科助手。1980年高エネルギー物理学研究所助手。2003年高エネルギー加速器研究機構教授。加速器の真空システムの開発研究に従事。工学博士。IEEE, AVS, 日本真空協会, 応用物理学会会員。

大久保 仁

(正員) 1948年10月29日生。1973年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月東芝入社。高電圧技術開発に従事。1976年7月～1978年2月ドイツ・アーヘン工科大学高電圧研究所およびミュンヘン工科大学高電圧研究所客員研究員。1989年7月名古屋大学工学部電気学科助教授, 1991年4月同教授, 2004年4月名古屋大学エコトピア科学研究所教授, 現在に至る。工学博士。IEEE, VDE, CIGRE 会員。

堀 田 栄 喜

(正員) 1951年2月8日生。1978年3月東京工業大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程満期退学, 同年4月同大学工学部電気・電子工学科助手, 助教授を経て, 1995年同大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻教授, 現在に至る。工学博士。現在, パルスパワー技術およびプラズマ応用の研究に従事。プラズマ・核融合学会, IEEE, 応用物理学会会員。

山 内 邦 仁

(正員) 1975年10月29日生。2003年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻修了。同年4月より, (独) 科学技術振興機構研究員として超小型放電型中性子源による地雷探知技術の開発に従事。プラズマ・核融合学会会員。博士 (工学)。

鶴 田 浩 一

(正員) 1944年6月生。1967年3月茨城大学工学部電気工学科卒業。1971年4月同大学工学部助手。現在, 同電気電子工学科教授。工学博士。真空及びガス中の絶縁破壊とアーク現象に関する研究に従事。1987年3月から1年間, ブリティッシュコロンビア大学客員研究員, 応用物理学会会員, 真空協会会員。