

報告番号	※ 甲 第 11069号
------	--------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 真空中におけるインパルス沿面放電進展過程に関する研究

氏 名 中野 裕介

## 論 文 内 容 の 要 旨

今日の高機能化した産業社会において、電気エネルギーの果たす役割は極めて大きい。この背景には、電気の持つエネルギー伝送・変換の利便性があり、電気エネルギーは他のエネルギー形態への変換を高効率かつ容易に実現できることから、電力消費量は増加の一途を辿ってきた。安定した電力供給のために、発電機、変圧器、開閉器などの電力機器は高電圧化、大容量化、高信頼度化がなされてきた。

高真空を絶縁・消弧媒体とする真空遮断器は、84 kV 以下の電圧クラスで主流の遮断器となっている。高電圧化への取り組みの中で、課電導体の支持に用いられる固体絶縁物上の沿面絶縁の問題が挙げられ、沿面放電に関する研究がなされている。従来検討されてきたのは、電界平行型電極構成における陰極三重点からの電子放出および絶縁物上の2次電子なだれである。しかしながら、実際の真空バルブ内部における様々な電界分布を考慮する上で、電界垂直型電極における真空中沿面放電メカニズムの解明が必要となる。

以上の観点から、本研究では電界垂直型電極を構築し、インパルス電圧印加時の真空中沿面放電の開始および進展過程における電荷挙動を明らかにするとともに、提案したメカニズムに則った放電抑制手法の提案を行った。

本論文は、全7章により構成されている。以下に本論文の各章の概要を示し、学術的および工学的意義について述べ、最後に今後の展望を示す。

### 第2章 真空中インパルス沿面放電進展過程の分類と前駆放電現象

本章では、電界垂直型電極を構築し、インパルス電圧印加時の沿面放電における放電進展過程における電荷挙動を明らかにした。ここで、光学測定系の測定感度の向上により、沿面フラッシュオーバーの前駆現象の存在を明らかにした。沿面フラッシュオーバー前駆現象において、負極性インパルス電圧の印加時、陰極からの電子放出によって生じ、絶縁物上に電子衝突に伴う発光を観測できた。前駆放電では、印加電圧の増加とともに、陰極上における電子放出箇所および放出電荷量が増加する。また、絶縁物上の発光輝点は、陰極上の電子

放出箇所に対し電気力線に沿って一意に決まる。

### 第3章 沿面フラッショーバ開始時の突発的電子放出特性

本章では、インパルス沿面放電進展過程において、前駆放電がフラッショーバ進展へと転移するメカニズムについて検討を行った。前駆放電からフラッショーバ進展への転移メカニズムとして、陰極からの電子放出の突発的電子放出（EEE）への転移が挙げられる。EEEの放出電流密度は陰極表面電界および陰極材料の仕事関数に依存することを明らかにした。この時EEEによって、絶縁物上には過渡的に帯電が形成される。陰極—アルミナ絶縁物間のギャップ長が短い場合、絶縁物上の過渡帯電による電界緩和効果が現れやすく、フラッショーバの起点となる陰極からの放出電流が抑制されると考えられる。

### 第4章 沿面フラッショーバ進展過程における絶縁物上過渡帯電

本章では、フラッショーバ進展過程において、突発的電子放出（EEE）によって形成される過渡帯電について検討を行い、真空中インパルス沿面フラッショーバ進展のモデルを構築した。絶縁物上の過渡帯電分布は、陰極上のEEE発生点に依存する。絶縁物上過渡帯電の効果は、陰極近傍における電界緩和効果と絶縁物上における電界変歪効果に大別できる。陰極からのEEE電流は、自身の電子放出によって形成する絶縁物上過渡帯電の陰極近傍における電界緩和効果により抑制される。フラッショーバは過渡帯電の絶縁物上電界変歪効果によって、電界を垂直から平行方向へと変化することで進展が可能となる。

### 第5章 沿面フラッショーバの制御および抑制

本章では、提案した電界垂直型電極における真空中インパルス沿面放電進展メカニズムに基づき、フラッショーバ進展過程における陰極からの突発的電子放出電流の抑制および絶縁物上2次電子なだれ進展の抑制を図った。絶縁物上過渡帯電の電界緩和効果により、陰極からの放出電流を抑制することが可能である。電界緩和効果を決定づける要因に電極を構成する固体絶縁物の静電容量があり、静電容量が小さいほど電界緩和効果によるEEE電流抑制率が高い。また、陰極先端曲率半径を変更した時、初期の電界分布が不平等であるほど、少ない過渡帯電電荷量で電界緩和効果が発現し、EEE電流が抑制される。2次電子なだれ進展は、陰極側に背後電極を設けることで抑制される。陰極背後電極により高い垂直電界が得られ、沿面フラッショーバ進展の抑制を実現した。

### 第6章 沿面フラッショーバの抑制条件と実効的2次電子放出係数

本章では、フラッショーバに至った場合、および抑制された場合における過渡帯電を考慮した電界解析により、2次電子なだれ進展時の実効的な2次電子放出係数の時間推移を導出した。背後電極を設けた電極構成において2次電子なだれが進展しフラッショーバに至る条件は、絶縁物上過渡帯電領域の端部における過渡帯電による2次電子放出係数の増加であることを明らかにした。また、帯電分布の勾配の大きい部分において2次電子放出係数が大きく、2次電子なだれが進展しやすい。さらに、帯電が存在する箇所では、帯電量の増加が抑制されることから、実効的2次電子放出係数の増加の可能性を示唆した。

## 第7章 総括

本章では、本研究の総括を行った。

### 本研究の学術的および工学的意義

本研究では、真空遮断器の高電圧化の技術課題の一つである沿面放電の抑制のために真空中沿面放電メカニズムの解明を目的とした。従来、研究が行われてきた絶縁物に対する電界が平行な電界平行型電極に対して、電界が垂直な電界垂直型電極を構築し、インパルス電圧印加時の真空中沿面放電の開始および進展過程における基礎的な電荷挙動を明らかにした。真空中沿面放電進展メカニズム解明のため、当該研究分野における測定技術としては新たな試みと言える電気的・光学的超高速同期測定を駆使した。これらにより、真空中沿面放電進展過程における絶縁物上電荷挙動を超高速測定することが可能となり、電荷挙動に伴う過渡的な帯電現象の存在を明らかにするに至った。さらに、提案したメカニズムに立脚した放電抑制手法の提案を行い、実験結果に基づいて真空中沿面放電の抑制を実現した。

本研究で得られた成果は、真空中沿面放電メカニズムの学術的解明と放電抑制手法の理論的提案、およびその実験的検証である。これらの研究成果は、真空遮断器の高電圧化や小型化に向けた絶縁設計に資する有効な指針を与えるとともに、粒子加速器や宇宙機器などの真空環境下で用いる各種電力機器の高性能化、高信頼度化に寄与するものと考えられる。

### 今後の展望

実器の真空遮断器の交流運転下において、真空中部分放電と称する絶縁物上の帯電現象が確認されている。このことから、サーヒなどのインパルス電圧が侵入する場合は、交流電圧下の初期帯電が存在する場合の沿面放電について考慮する必要がある。本論文では、沿面フラッシュオーバ進展過程において絶縁物上に過渡的に形成される帯電および2次電子なだれの進展について言及を行ったが、絶縁物上に初期帯電が存在する場合のインパルス沿面フラッシュオーバの開始および進展特性は異なる様相を示すと考えられ、初期帯電を考慮した真空中沿面放電特性とそのメカニズムの解明が必要であると考えられる。

また、本研究では、陰極背後電極を設け、絶縁物沿面上の垂直電界を向上させることにより、2次電子なだれの進展を抑制することで沿面放電の抑制を実現した。この結果を発展させ、実器の絶縁構成において、より高い垂直電界、あるいはより大きな垂直電界領域を有する電極を構成することで、より高い沿面放電の開始電圧およびフラッシュオーバ電圧を得ることができると考えられる。このように、真空中沿面放電現象に関する本論文の基礎的研究を実器・実用的レベルへ発展させることが重要である。