

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03997

研究課題名（和文）高温絶縁特性取得のための電気絶縁ガスの安定的な高温プラズマ生成手法の開発

研究課題名（英文）Development of Stable High-Temperature Insulation Gas Generation Method for Insulation Gas Properties under High Temperatures

研究代表者

中野 裕介（Nakano, Yusuke）

金沢大学・電子情報通信学系・助教

研究者番号：60840668

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：ガス遮断器において、電流遮断直後に電極間に残留するアークプラズマは、3000 K以上の高温で高い導電性を有し、電流遮断直後に印加される過渡回復電圧によって再び放電が生じやすい状態である。本研究課題では、数千Kの高温場における絶縁破壊現象を再現するため、誘導熱プラズマ装置により絶縁ガスを安定的に高温化し、再現性よく高温ガスの電気絶縁特性を評価する手法の開発を目的とした。構築した装置では、4000 - 6500 K程度の絶縁ガス温度を実現できた。また、高温化した絶縁ガスの温度制御は、下段コイル電力、導入する絶縁ガス流量などのパラメータにより制御可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究手法は、ガス遮断器内の高温環境における絶縁破壊現象を再現するものである。電力系統における事故波及を防ぐために、ガス遮断器は事故による大電流を遮断する責務を担っている。電流遮断直後の遮断器の接点間に残留する高温ガスは、続けて印加される過渡回復電圧に耐えなければならない。このような高温環境を誘導熱プラズマ装置の適用によって、温度を適切に制御し、かつあらゆるガス種に対して再現できる装置を構築した。構築した装置・手法は、従来手法で課題となっていた温度限界、時間制御性を改善し、高温ガスの電気絶縁特性を実験的かつ再現性よく取得できるようになった。

研究成果の概要（英文）：In a gas circuit breaker, the arc plasma that remains between the electrodes immediately after current interruption has high conductivity at a high temperature of over 3000 K. In this research project, the purpose was to develop a method to stably heat the insulation gas to a high temperature of several thousand K using an inductively coupled thermal plasma (ICTP) system and to evaluate the electrical insulation properties with high reproducibility. The constructed system was able to achieve an insulating gas temperature of approximately 4000 - 6500 K. The temperature of the heated insulating gas can be controlled by parameters such as the lower coil power and the flow rate of the insulating gas introduced.

研究分野：電気工学

キーワード：ガス遮断器 高温絶縁ガス 電気絶縁 誘導熱プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

電力分野では、154 kV 以上の高電圧送電システムにおける遮断器のほとんどに、排出規制対象である SF<sub>6</sub> (地球温暖化係数が CO<sub>2</sub> の 22,800 倍) ガスが使用されている。SF<sub>6</sub> ガス電力機器が築いた電力システムの安全性・堅牢性を保ちつつ低炭素社会を実現するため、温室効果ガスの SF<sub>6</sub> ガスを用いない高電圧遮断器の開発が急務である。遮断器は、系統で地絡などの故障が発生したとき、大電流を遮断するために電極を開極する。このとき、電極間には高温高圧のアーク放電が発生する。電流遮断後、電極間に残留するアークプラズマは、3,000 K 以上の高温で高い導電性を有し、電流遮断直後に印加される過渡回復電圧によって再び放電が生じやすい状態である。SF<sub>6</sub> 代替ガスの候補には自然由来ガス (空気, CO<sub>2</sub> ガス, 混合ガス) が提案されているが、いずれのガスにおいても 3000 K 以上の高温環境下における放電現象がどのように起こるのか、そのメカニズムや原因および放電特性は明らかとなっていない。以上より、高温に晒された絶縁ガスの電気絶縁特性を定量的に精緻に明らかにする必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では電気絶縁・電力分野に誘導熱プラズマ分野の技術を組み込み、世界に先駆けて、高次に制御した誘導熱プラズマにより生成した高温場における絶縁ガスの極めて信頼性の高い電気絶縁特性の評価手法の開発を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、絶縁ガスの高温化に誘導結合型熱プラズマを適用した。誘導結合型熱プラズマは、熱プラズマ溶射、廃棄物処理、ナノ粒子生成、ダイヤモンド薄膜生成、材料表面改質などへの応用がなされているが、電力分野への適用例はこれまでにない。図 1 に設計・構築した誘導熱プラズマ装置を示す。特徴は、誘導熱プラズマ装置の適用によって「安定的かつ高い時空間制御性をもった高温場」が実現可能である。誘導熱プラズマを用いる利点は、温度 10000 K 以上の高温場が長時間生成可能、無電極放電のためクリーンな空間が可能、コイル電流の制御 (入力電力、波形変調) による温度場の高次時空間制御が可能、さらに任意に異物やコンタミネーションの混入が可能である。また、トーチ中央部の水冷管を通して絶縁ガスを導入するため、種類によらずあらゆるガスの高温化が可能である。プラズマトーチ部で加熱された絶縁ガスは下流チャンバに設けた電極空間に輸送される。電極間に放電を生成するための電圧印加系は、誘導熱プラズマ生成系とは独立であるため、同期制御を必要とせず、電圧の種類にも依存しない。この特徴により、高温絶縁ガスの電気絶縁特性について、温度依存性に加えて周波数や印加時間などのさまざまな電圧条件での基礎データを取得可能である。

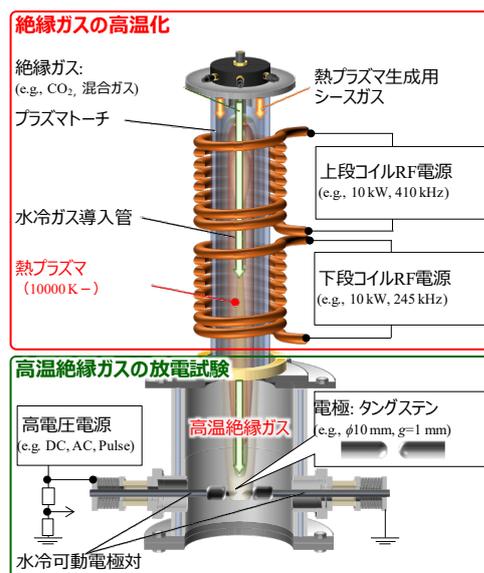


図 1 誘導熱プラズマを用いた絶縁ガスの高温化法と高温絶縁ガスの電気絶縁特性の評価法

#### 4. 研究成果

導入する絶縁ガスは、元々放電が起こりにくく、プラズマを消す能力が高いため、絶縁ガスの導入により熱プラズマが消失する可能性があった。そこで、2つのコイルをプラズマトーチに対して直列に配置することで、この問題を解決した。それぞれ上段コイルはプラズマを生成・安定的に維持する役割を担い、下段コイルは絶縁ガスの加熱を制御し、必要な温度条件を調整する役割を担う。結果として、構築した装置では、4000 - 6500 K 程度の絶縁ガス温度を実現できた。高温化した絶縁ガスの温度制御は、下段コイル電力、導入する絶縁ガス流量などのパラメータにより制御可能であることが示された。本研究課題では、誘導熱プラズマ装置の設計・導入、プラズマ安定化条件の同定までを内容としたが、誘導熱プラズマ装置の一部構成において予算を削減し、また期間を短縮することができた。その結果、電圧印加系の導入に加えて絶縁破壊試験検証まで達成することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakano Yusuke, Ishinokoshi Koya, Okano Rio, Tanaka Yasunori, Ishijima Tatsuo	4. 巻 31
2. 論文標題 Evaluation of Electrical Insulation Properties of High Temperature Gas Heated by Inductively Coupled Thermal Plasma	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	6. 最初と最後の頁 879 ~ 888
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TDEI.2023.3327946	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中野裕介, 石之腰昂弥, 長瀬有理奈, 岡野里桜, 田中康規, 石島達夫
2. 発表標題 高温ガス絶縁特性取得のための誘導熱プラズマを用いたガス高温化手法の開発
3. 学会等名 第53回電気電子絶縁材料システムシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野裕介, 石之腰昂弥, 長瀬有理奈, 岡野里桜, 田中康規, 石島達夫
2. 発表標題 誘導熱プラズマを用いた絶縁ガスの高温化法の開発と絶縁破壊電圧測定
3. 学会等名 令和4年度電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石之腰昂弥, 長瀬有理奈, 岡野里桜, 中野裕介, 田中康規, 石島達夫
2. 発表標題 高温ガス電気絶縁特性計測用の誘導熱プラズマによる高温CO2ガス温度のArシースガス流量依存性
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Ishinokoshi, Y. Nakano, Y. Tanaka and T. Ishijima
2. 発表標題 Numerical Estimation of Insulation Gas Temperature Heated by Inductively Coupled Thermal Plasma under Atmospheric Pressure
3. 学会等名 16th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 17th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関