

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：17301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889048

研究課題名(和文)パルスパワー生成による超臨界二酸化炭素中のアーク放電現象の解明

研究課題名(英文)Elucidation of pulsed arc discharge phenomena in supercritical carbon dioxide

研究代表者

古里 友宏 (FURUSATO, Tomohiro)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号：70734002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、環境保護の観点から、SF₆の代替絶縁媒体として超臨界二酸化炭素に注目した。二酸化炭素の超臨界相における絶縁破壊電圧の回復率は、液体二酸化炭素に比べて優れている結果が明らかになった。電圧の回復率の違いを解明するために、超臨界相と液相における絶縁回復の過程をシャドウグラフ法によって可視化した。

研究成果の概要(英文)：This study has focused on discharges in supercritical carbon dioxide as an alternative medium of SF₆ from the environmental viewpoint. The breakdown voltage recovery ratio under supercritical phase was greater than that of liquid carbon dioxide. Furthermore, the recovery processes at supercritical and liquid phases were visualized by a shadowgraph method to elucidate the difference of voltage recovery ratio at both phases.

研究分野：工学

キーワード：超臨界二酸化炭素 アーク放電 パルスパワー スイッチ

1. 研究開始当初の背景

本研究では、これまでにない新しい超臨界利用技術を開拓するために、超臨界流体の高拡散性・低粘性という物理的特徴に着目し、パルスパワースイッチや遮断器等の電力機器分野に用いられる環境負荷の高いSF₆の代替絶縁媒体に超臨界流体を適用するための技術開発を目指す。二酸化炭素は自然界に普遍的に存在するため環境調和性が高く、化学分野では環境負荷の高い有機溶剤の代替となりうる超臨界流体として期待されている。本課題では、大気圧下においても絶縁ガスとして優れている二酸化炭素を採用した。しかし、SF₆の代替ガスとしての利用可能性に迫り、本質的な放電機構の解明を行うには超臨界下の絶縁破壊現象(アーク放電)の研究が必要である。

2. 研究の目的

超臨界流体の新しい工学応用として、電力機器分野での開拓を目指し、超臨界流体中アーク放電に関する基礎研究を行う。超臨界二酸化炭素中のアーク放電現象を、分光計測によって発光スペクトルを計測し、レーザー観測による放電に伴う低密度領域や衝撃波を可視化することで、放電の発生から消弧までのメカニズムの解明に寄与する。

3. 研究の方法

研究経費で購入した高圧送液ポンプを用いて、リアクター内に二酸化炭素の気相、液相、超臨界相のそれぞれの条件を設定し(1~80気圧)、絶縁破壊の実験を行った。超臨界リアクター内の電極は、針対平板電極の構造とし、絶縁破壊試験用の電源には、磁気パルス圧縮方式の高電圧パルス電源を用いた。大きく分けて、以下の4種の実験を行った。

- (1) マルチチャンネル型の分光器を用いたアーク放電の発光スペクトルの計測。
- (2) 絶縁破壊時のアークチャネルの観測：アーク放電の発光が強力なため、光を減衰するフィルターを介して、デジタルCCDカメラで撮影する。
- (3) パルス絶縁破壊電圧の回復率に関する試験。
- (4) シャドウグラフ法を用いたアーク放電に伴う密度揺らぎの観測。

4. 研究成果

- (1) 超臨界二酸化炭素中のアーク放電の発光スペクトル

図1に絶縁破壊時の電圧電流波形を示す。針対平板電極間が放電によって短絡した瞬間、電圧が急激に低下し、大電流が流れた。電極間が短絡されると、アークチャネルの導電率が高いため、短絡後に電圧電流波形が減衰振動をしていることが分かる。その特徴は、図2のように発光スペクトルにも表れ、黒体放射に伴う連続スペクトルが計測された。加えて、酸素原子スペクトルOI(777, 845nm)

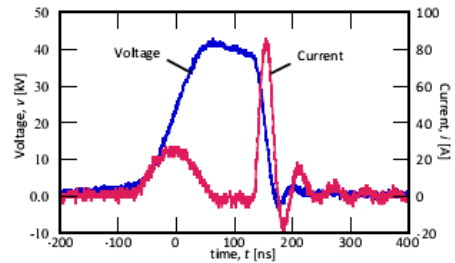


図1. 絶縁破壊時の電圧電流波形

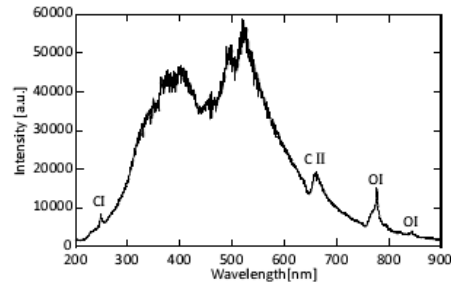
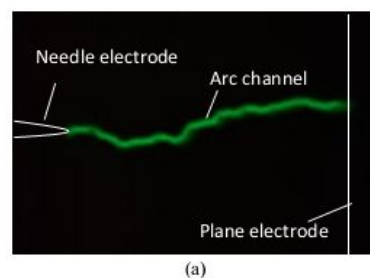


図2. 超臨界二酸化炭素中アーク放電の発光スペクトル(超臨界条件: 308 K, 8.0 MPa)

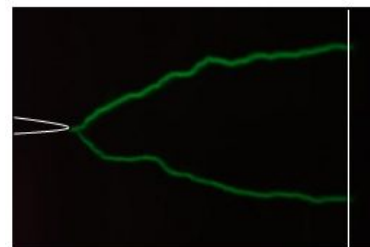
も計測されていることから、二酸化炭素分子が解離しており、アーク放電が局所的熱平衡状態であると推測される。

(2) アークチャネルの観測

アーク放電の短絡時の様子を観測するために、カメラの前に減衰フィルターを設置した。図3は、超臨界二酸化炭素中のアークチャネルの写真であり、シングルチャンネル(a)とダブルチャンネル(b)の2パターン観測された。ダブルチャンネルが形成される確率を超臨界相と液相と比較したところ(それぞれ100回観測)、超臨界相が15%、液相が6%であ



(a)



(b)

図3. 超臨界二酸化炭素中のアークチャネルの観測結果(a)シングルチャンネル, (b)ダブルチャンネル(雑誌論文)

ることが分かった．アークのプランチングに関しては，絶縁破壊前駆過程のストリーマ放電のプランチングが関係していると考えられる．

(3) 絶縁破壊回復率

電圧の絶縁回復率を調査するために，2 台の磁気パルス圧縮回路を用いて，1 発目の高電圧パルス電圧の印加から時間差を置いて 2 発目のパルス電圧を印加する試験を行った．1 発目の絶縁破壊電圧のピーク値を v_1 ，2 発目のそれを v_2 とし，電圧回復率は v_2/v_1 で定義した．図 4 に，超臨界相 (Condition A) と液相 (Condition B) の絶縁回復率の特性を示す．横軸の時間は， v_1 と v_2 の電圧印加の時間差を示す．すなわち，時間差が小さく，かつ絶縁回復率が 1 に近ければ，絶縁媒体として優秀な特性と言える．超臨界相と液相の特性を比較すると，時間差が短い領域において，超臨界相の方が良い絶縁回復特性を示すことが分かった．

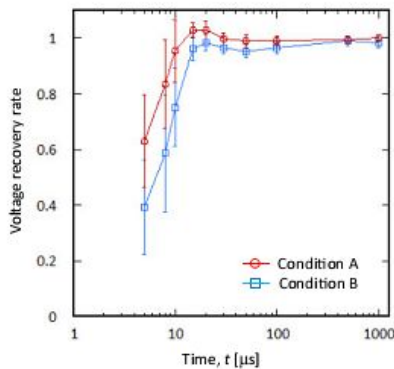
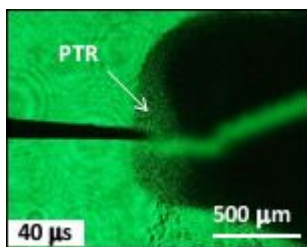
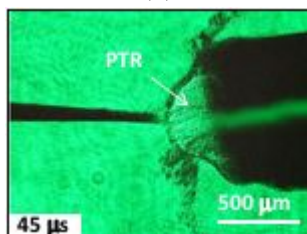


図 4．超臨界相と液相の電圧回復率の比較，Condition: A 超臨界相，Condition B: 液相 (雑誌論文)



(a)



(b)

図 5．絶縁破壊後のシャドウグラフ画像(a) 超臨界相，(b)液相 (雑誌論文)

(4) 絶縁回復過程の観測

絶縁破壊後の回復過程を調査するために，Nd : YAG レーザーを用いたシャドウグラフ法によって，1 発目の絶縁破壊後の現象の可視化を試みた．図 5 の(a)は超臨界相，(b)は液相における電圧印加から約 40 μ s におけるシャドウグラフ画像である．画像の左側の細長い陰は針電極であり，右半分を占める黒い影は，アーク放電によって過熱され膨張した領域である．図 5(a)(b)を比較すると，針先端付近で絶縁回復が始まっている領域 (図中の PTR : Partially-Thinned Region) に違いがあることが分かる．超臨界相(図 5(a))では，陰が薄まった様子が観測された．液相の場合 (図 5(b))には不連続な相変化(液体中のバブルのような状態)を伴っている可能性が高い．図 4 の絶縁回復特性と照らし合わせると，図 5 の観測結果の違いが絶縁回復に関係していると考えられる．

以上のように，超臨界二酸化炭素中アーク放電の発光分光特性，アークチャンネルのプランチング，絶縁回復特性が明らかになった．本課題により絶縁破壊・回復現象を俯瞰する結果が得られたため，今後は，プラズマ温度・電子密度の評価やアーク抵抗の詳細な解析を行う予定である．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

T. Furusato, H. Tanoue, M. Ota, T. Imamichi, H. Akiyama, Y. Matsuda, T. Fujishima, and T. Yamashita, "Characteristics of Positive Pulse Arc Discharge in Supercritical Carbon Dioxide", Proceedings of IEEE Pulsed Power Conference, PPC-0-2-5, pp. 1-4, Jun. 2015. (査読有り)
DOI: 10.1109/PPC.2015.7296788

H. Tanoue, T. Furusato, T. Imamichi, M. Ota, S. Katsuki and H. Akiyama, "Dielectric recovery mechanism of pressurized carbon dioxide at liquid and supercritical phases", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 54, no. 9, pp. 096102-1 - 096102-8, Oct. 2015. (査読有り)
DOI: <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.096102>

H. Tanoue, T. Furusato, K. Takahashi, S. H. R. Hosseini, S. Katsuki and H. Akiyama, "Characteristics of Shock Waves Generated by a Negative Pulsed Discharge in Supercritical Carbon

Dioxide”, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 10, pp. 3258 - 3263, Oct. 2014.(査読有り)
DOI: 10.1109/TPS.2014.2345435

〔学会発表〕(計7件)
(国際会議)

T. Kamagahara, T. Furusato, H. Koreeda, T. Fujishima, and T. Yamashita, “Spectroscopic Measurement of a Pulsed Arc Discharge in Supercritical Carbon Dioxide”, ATSP-9/SPSM-28, P2-61, Dec. 13, 2015, Nagasaki University (Nagasaki・Japan).

M. Ota, T. Furusato, T. Imamichi, T. Sakugawa, S. Katsuki, and H. Akiyama, “Observation of Ultra-Short Positive Pulsed Discharge in Supercritical Carbon Dioxide”, ATSP-9/SPSM-28, P1-14, Dec. 12, 2015, Nagasaki University (Nagasaki・Japan).

T. Furusato, H. Tanoue, T. Imamichi, M. Ota, H. Akiyama, M. Sasaki, M. Matsuda, T. Fujishima, and T. Yamashita, “Pressure Dependency of Plasma Temperature of Pulse Arc Discharge in Pressurized CO₂ up to Supercritical Phase”, 5th Euro-Asian Pulsed Power Conference, OB3-5, Sep. 10, 2014, Kumamoto University (Kumamoto・Japan).

T. Imamichi, T. Furusato, H. Tanoue, M. Ota, S. H. R. Hosseini, S. Katsuki, and H. Akiyama, “Visualization of Pulsed Breakdown and Recovery Processes in Liquid and Supercritical Carbon Dioxide”, 5th Euro-Asian Pulsed Power Conference, P2-13, Sep. 10, 2014, Kumamoto University (Kumamoto・Japan).

(国内会議)

大田美由紀, 古里友宏, 今道貴大, 佐久川貴志, 勝木淳, 秋山秀典, “超臨界二酸化炭素中の極短パルス放電現象の観測” 静電気学会全国大会, 24aA-4, pp. 15-18, 2015年9月24日発表, 首都大学東京(東京都・八王子市)

古里友宏, 藤島友之, 松田良信, 山下敬彦, 田上裕之, 大田美由紀, 今道貴大, 秋山秀典, “超臨界相を含む高圧二酸化炭素中におけるパルス絶縁破壊現象に関する研究”, 電気学会全国大会, p. 207, 2015年3月26日発表, 東京都市大学(東京都・世田谷区)

田上裕之, 古里友宏, 今道貴大, 大田美由紀, S. H. R. Hosseini, 勝木淳, 秋山秀典, “液体および超臨界二酸化炭素

内における絶縁回復過程調査”, 電気・情報関係学会九州支部第67回連合大会, 10pA-10, 2014年9月18日発表, 鹿児島大学(鹿児島県・鹿児島市)

〔その他〕
(受賞)

宍戸賞(静電気学会), 2016年3月8日: M. Ota, T. Furusato, T. Imamichi, T. Sakugawa, S. Katsuki, and H. Akiyama, “Observation of Ultra-Short Positive Pulsed Discharge in Supercritical Carbon Dioxide”, APSPT-9/SPSM-28, 2015年12月12日, Nagasaki University (Nagasaki・Japan).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古里 友宏 (FURUSATO, Tomohiro)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号: 70734002