

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18062

研究課題名(和文) 低環境負荷技術構築のための超臨界流体中アーク放電に関する基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study of pulsed arc discharge in supercritical fluid for constructing an environment-friendly technology

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超臨界二酸化炭素中にパルスパワー技術により発生させたパルスアーク放電の基礎特性を解明し、超臨界流体応用技術の利用拡大を目指している。研究期間内に、絶縁破壊時の電気的特性、プラズマ基礎特性、放電後の流体力学的特性を明らかにするために、電圧電流波形の解析、破壊電圧の統計的解析、発光分光スペクトルの解析、レーザシャドウグラフ法を用いた観測を実施した。上記の様々な解析によって、超臨界流体中ではガス中と比較して特異な特性を示すことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、化学工学の分野で抽出、分解などの環境にやさしい溶媒として実績のある超臨界流体の応用分野を広げることを目標として、超臨界二酸化炭素中のパルスアーク放電の基礎特性について研究を行った。超臨界流体の特徴が一番大きく表れる臨界点近傍の条件でプラズマ温度が減少するなどの特異な特性を見出すことができた。このことは放電工学の観点から非常に重要な知見であると考えられる。また、放電プラズマから強力な衝撃波の伝搬の様子が観測され、材料合成や抽出などの応用を考えた際にも重要な現象になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The basic characteristics of pulsed arc discharge plasma generated in supercritical carbon dioxide were studied aiming the growing utilization of supercritical fluid application technology. The analyses of pulsed voltage/current waveforms, spectroscopic measurements, statistical characteristics of breakdown voltage, and laser-shadowgraph images were performed to elucidate the pulsed discharge phenomena in supercritical carbon dioxide. The unique discharge behavior appears in supercritical phase in comparison with gas phase through a series of experiments.

研究分野：高電圧パルスパワー工学

キーワード：超臨界流体 パルスパワー アーク放電

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超臨界流体は物質の圧力と温度を上昇させる事で転移する高密度流体であり、気体並みの高拡散性、液体並みの高溶解性を兼ね備えている。一般的に、二酸化炭素と水は自然界に普遍的に存在するため環境調和性が高い超臨界流体といえる。近年、温暖化係数が高く問題となっている SF₆(六フッ化硫黄)に替わる消弧媒体として超臨界流体が注目され、瞬間的大電力を得るためのパルスパワースイッチや遮断器としての応用が期待されている。しかし、詳細な消弧メカニズムの理解には至っておらず、放電抵抗特性、プラズマ基礎特性、熱による密度擾乱の解明が必要となる。一方で、化学分野では、超臨界二酸化炭素を溶剤として、天然物質から化粧品・医薬品・香料などの有用物質の抽出の研究開発が行われている。この分野では実証実験を経て超臨界流体プラントを提供する企業も多数存在するため、経済的観点から超臨界化学プラントが実用レベルで運用可能なことが実証されている。このような背景を踏まえ、パルスパワー技術を、既存の超臨界流体化学プロセスに組み、反応性の高い放電プラズマの効果を重畳することで、化学応用の範囲を広げる可能性があると考えている。しかし、超臨界流体中における放電プラズマによる効果として、衝撃波やイオン・ラジカルなどの特性は未だ明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、電力・化学分野の双方で重要となる超臨界二酸化炭素中の放電現象の解明に向け、(1)絶縁破壊時の電気的特性、(2)プラズマ基礎特性、(3)放電後の流体力学的特性を解明することを目的としている。

3. 研究の方法

図1は電圧電流計測および発光分光計測を同時に行う実験装置である。高電圧発生源には磁気パルス圧縮方式のパルス電源を用いた。電圧計測には高電圧プローブ(EP100K)、電流計測にはカレントモニターを用いた。なお、電圧電流波形はテクトロニクス製のオシロスコープで計測した。超臨界リアクターは針対平板電極が備えられており、高電圧部とステンレス製の容器は PEEK 樹脂で絶縁されている。また、超臨界リアクターはサファイア窓が備えられており、その窓から分光やレーザー計測などの観測を行う。発光分光計測にはマルチチャンネル型の分光器を用いた。

シャドウグラフ法は、放電の過熱によって密度が低下した箇所(放電チャンネル)や放電による瞬間的加熱によって発生した衝撃波などを観測することが可能である。図2はパルスレーザーを用いたシャドウグラフ法による観測を行うための実験系である。磁気パルス圧縮回路と Nd:YAG レーザをディレイジェネレータで制御することで放電の発生のタイミングとレーザーの発生の同期をとっている。放電写真はデジタル CMOS カメラを用いて撮影した。

4. 研究成果

【(1)絶縁破壊時の電気的特性】

図3は超臨界流体中の典型的な絶縁破壊時の電圧電流波形である。

絶縁破壊までのプロセスは絶縁破壊前駆現象として正極性ストリーマ放電が針電極先端から発生し、平板電極に向かって成長する。ストリーマ放電が平板電極まで到達すると短絡し絶縁破壊される。この絶縁破壊に伴って、パルス電圧が崩落すると同時に大電流が流れること

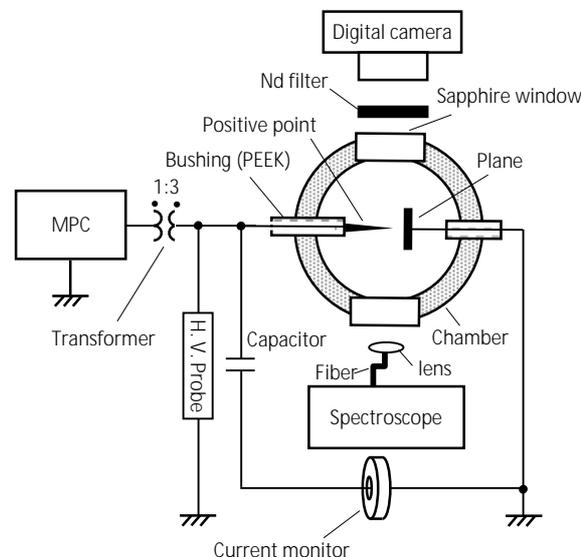


図1. 電圧電流・発光分光計測の実験系(発表)

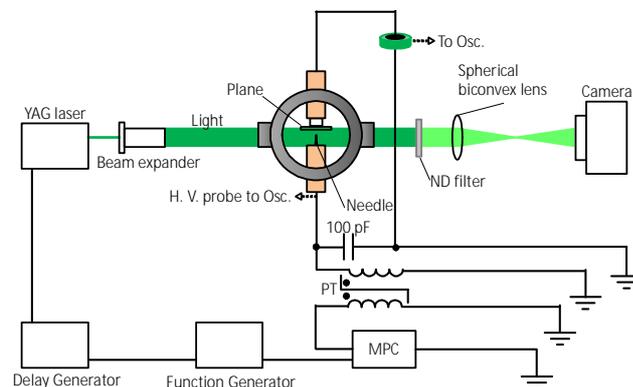


図2. シャドウグラフ法による密度変化の観測(発表)

が分かる．絶縁破壊後は減衰振動波形となった．図4は超臨界領域におけるラウエプロットである．電圧の立ち上がりは約0.75 kV/nsである．大気圧下で用いられる指数近似やポアソン過程に基づくラウエプロットの近似を試みたが，高密度の超臨界流体下ではいずれも適用することができなかった．これは，密度揺らぎに起因する自由行程の大きなばらつきが形成遅れに影響を与えていることが原因と考えられる．

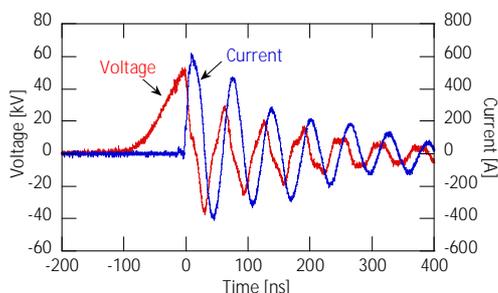


図3．典型的な電圧電流波形(発表)

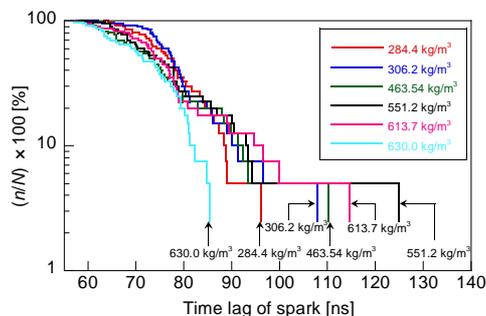


図4．超臨界中のラウエプロット(論文)

【(2)プラズマ基礎特性】

図5は分光器で計測した典型的な超臨界流体中パルスアーク放電の発光分光波形である．線スペクトルとしてはOI(777, 845 nm)が特徴的である．また，黒体放射に起因する連続スペクトルも観測された．プラズマ温度は局所熱平衡を仮定し，プランクの放射則の理論スペクトルを実験結果に適用することで評価した．図6は高圧ガス～超臨界相まで密度を変化させたときのプラズマ温度と電圧電流波形から評価した放電の消費エネルギーの結果である．ガス相では温度・消費エネルギーともに線形的に上昇していることが分かる．一方，超臨界相においてはプラズマで消費されるエネルギーはおよそ一定であるにもかかわらず，プラズマ温度は臨界密度(密度466.1 kg/m³)近傍で極小値をもった．これは，臨界異常の一つであるCO₂の定積比熱が臨界密度近傍で極大値をもつためであると考えられる．

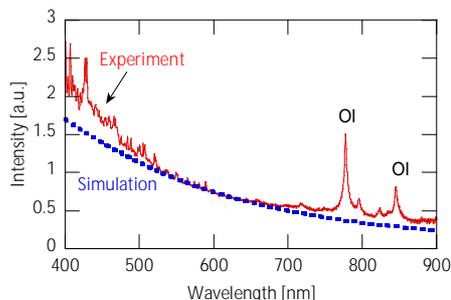


図5．典型的な発光分光波形(発表)

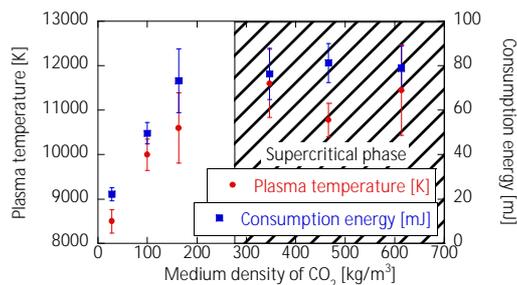


図6．プラズマ温度・消費エネルギー特性(発表)

【(3)放電後の流体力学的特性】

図7はレーザシャドウグラフ法の観測結果である．針-平板間に密度変化が起こっていることが分かる．放電の発光が非常に大きく，観測する際の妨げになったが，レーザ強度を大きくし，Nd フィルターを介することで放電過熱に伴う密度擾乱を可視化することができた．一方，その密度擾乱の周りにくっきりとした影が存在しているが，これは放電に伴って発生した衝撃波である．この衝撃波のマッハ数は1.4程度であり，ガス中の衝撃波のマッハ数(～1.1)より大きくなった．この衝撃波の圧力など今後詳細に調べていく予定である．

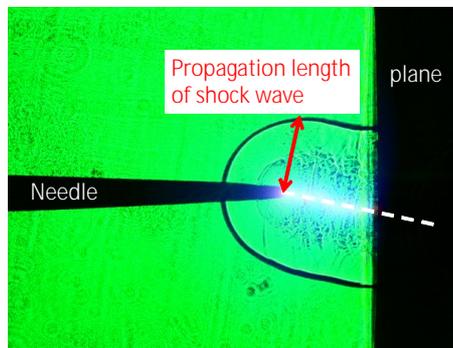


図7．シャドウグラフ法による衝撃波観測(発表)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

T. Furusato, N. Ashizuka, T. Kamagahara, Y. Matsuda, T. Yamashita, M. Sasaki, T. Kiyan, Y. Inada, “Anomalous Plasma Temperature at Supercritical Phase of Pressurized CO₂ after Pulsed Breakdown Followed by Large Short-circuiting Current”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25 , No. 5 , pp. 1807-1813, (2018) 査読有り

T. Furusato, N. Ashizuka, T. Kamagahara, T. Fujishima, T. Yamashita, M. Sasaki, and T. Kiyan, “Spectroscopic Characteristics of Pulsed Arc Discharge in High-Pressure CO₂ up to Supercritical Phase”, Proceedings of 19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, pp. 1-4, (2017), 査読有り

T. Kamagahara, N. Ashizuka, T. Furusato, T. Fujishima, T. Yamashita, M. Sasaki, and T. Kiyan, “Investigation of Pulsed Breakdown Characteristics in High-Pressure CO₂ including Supercritical Phase under Non-uniform Electric Field”, Proceedings of 19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, pp. 1-4, (2017) 査読有り

T. Furusato, T. Kamagahara, H. Koreeda, T. Fujishima and T. Yamashita, “Energy consumption characteristics of pulsed arc discharge in high pressure carbon dioxide up to supercritical phase”, Proceedings of IEEE Power Modulator and High Voltage Conference, pp. 1-4, (2017) 査読有り

T. Furusato, M. Ota, T. Fujishima, T. Yamashita, T. Sakugawa, S. Katsuki, and H. Akiyama, “Effect of Voltage Rise Rate on Streamer Branching and Shock Wave Characteristics in Supercritical Carbon Dioxide”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 44, No. 12, pp. 3189-3165, (2016) 査読有り

〔学会発表〕(計11件)

芦塚直和, 古里友宏, 後藤宏輔, 喜屋武毅, 佐々木満, 山下敬彦, 超臨界相を含む高圧二酸化炭素中ナノ秒パルスアーク放電プラズマの過渡的加熱プロセスの解析, 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会, DEI-19-039・EPP-19-024・HV-19-059, 2019年

後藤宏輔, 古里友宏, 芦塚直和, 喜屋武毅, 佐々木満, 山下敬彦, 超臨界二酸化炭素中パルスアーク放電プラズマのスペクトル拡がりの解析, 平成30年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2018年

芦塚直和, 古里友宏, 後藤宏輔, 喜屋武毅, 佐々木満, 山下敬彦, 超臨界相を含む高圧二酸化炭素中におけるナノ秒パルスアーク放電の電子密度の解析, 静電気学会全国大会, 静電気学会, 2018年

T. Furusato, N. Ashizuka, K. Goto, T. Yamashita, T. Honma, M. Sasaki, Generation of pulsed arc discharge plasma in supercritical carbon dioxide, 8th international symposium on Molecular Thermodynamics and Molecular Simulation, pp. 1-7 (2018) (口頭発表)

N. Ashizuka, T. Furusato, K. Goto, T. Kiyan, M. Sasaki, T. Yamashita, Dependence of plasma temperature and breakdown voltage on ambient medium temperature in high pressure CO₂ including supercritical phase, ESCAMPIG XXIV, 2018. (ポスター)

蒲ヶ原健, 古里友宏, 芦塚直和, 佐々木満, 喜屋武毅, 山下敬彦, “超臨界相を含む加圧二酸化炭素中の正極性ナノ秒パルス絶縁破壊電圧と火花遅れ”, 放電 誘電・絶縁材料 高電圧研究会, ED-18-017 DEI-18-046 HV-18-057, 2018年

芦塚直和, 古里友宏, 蒲ヶ原健, 喜屋武毅, 佐々木満, 山下敬彦, “超臨界二酸化炭素中パルスアーク放電プラズマの消費エネルギーの評価”, 平成29年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017年

芦塚直和, 古里友宏, 蒲ヶ原健, 喜屋武毅, 佐々木満, 山下敬彦, “超臨界二酸化炭素中パルスアーク放電のプラズマ温度評価”, 平成29年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, 2017年

芦塚直和, 古里友宏, 蒲ヶ原健, 喜屋武毅, 佐々木満, 山下敬彦, “超臨界二酸化炭素中におけるパルスアーク放電の発光スペクトルの解析”, 静電気学会全国大会, 2017年

芦塚直和, 蒲ヶ原健, 古里友宏, 是枝弘行, 藤島友之, 山下敬彦, “超臨界二酸化炭素中におけるパルスアーク放電の発光分光計測及びプラズマチャネルの観測”, プラズマ・パルスパワー・放電合同研究会, PST-17-010, 2017年

蒲ヶ原健, 古里友宏, 是枝弘行, 藤島友之, 山下敬彦, 佐々木満, “超臨界二酸化炭素中のプラズマの基礎特性”, 平成28年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, 6-E-a2-1, 2016年

6 . 研究組織

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。