

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：57701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04459

研究課題名(和文) 損傷原子炉想定環境下にあるケーブル絶縁体の劣化メカニズム探索研究

研究課題名(英文) Exploration research of the deterioration mechanism on cable insulator under the supposed environment of damaged reactor

研究代表者

榎根 健史 (Kashine, Kenji)

鹿児島工業高等専門学校・電気電子工学科・教授

研究者番号：60332110

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)：パルス電子ビーム照射により発生する放射線の空間分布について、デジタルカメラを利用する新たな計測手法による計測・分析、および数値シミュレーションによる評価を行い、良好な相関が得られるとともに、発生する放射線の線種を同定することができた。損傷原子炉内の温度・湿度環境を再現するための実験環境を構築し、この環境下においてエナメル絶縁体の劣化状況を調査した。この結果、高温・高湿度の環境において、部分放電開始電圧の低下がみられ、絶縁体の劣化に影響を及ぼすことが示唆された。また、試料への線照射による絶縁体の劣化状況について調査し、放射線の照射が絶縁体の劣化に大きく影響することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、損傷した福島第一原子力発電所の炉心内部を想定した高温・高湿度および放射線環境において、ケーブル絶縁体がどのような影響を受けるかを調査・探求するものである。この研究成果は、損傷原子炉に投入される廃炉ロボット開発に寄与すると共に、将来に向けた放射線発生デバイス開発や放射線防護材料の創生など、多くの波及効果をもたらすものである。また、福島原発の廃炉作業の一助となり、福島の早期復興に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we measured and analyzed a spatial distribution of radiation that generated by irradiation of pulsed electron beam using digital camera. Comparing the obtained results with numerical simulations, we found a good relationship between them, and were able to identify the type of radiation.

The experimental environment that supposed the inner condition of damaged reactor was established. The deterioration mechanism of enamel insulator was investigated. From this result, it was found that the partial discharge inception voltage of the insulator decreased as the ambient temperature and humidity increased. The state of deterioration of insulators irradiated with beta rays was investigated. We have confirmed that radiation exposure affects the deterioration of insulators.

研究分野：エネルギー変換工学

キーワード：放射線計測 部分放電

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の廃炉作業が進み、不断の努力により、格納容器内に存在する燃料デブリへのロボットアームによる接触調査までこぎつけた。これまでの調査において、損傷した格納容器内部では毎時数十シーベルトもの高線量の放射線が存在するとされていた。原子炉の廃炉作業のためには、デブリの切断、採取、運搬、処分のための多くの機器の開発・製作が急務とされているが、想定を超える線量に耐えうるケーブル等の機器材料そのものの開発が進んでおらず、難航を極めていた。

通常運用の原子力発電所に用いられる安全系ケーブルについては、放射線によるケーブル絶縁体の劣化特性が種々研究されていた。しかし、これらは通常の使用環境において想定される線量の放射線を対象としており、損傷原子炉内特有の高湿潤環境、および、デブリから放出される高線量かつ高空間密度の放射線によるケーブル絶縁体の劣化特性やそのメカニズムについては、明確な究明はなされていなかった。

研究代表者らは、これまでの研究において、この検証実験を可能にする広域・高線量率の放射線発生環境を実現した。この特異稀な実験環境を活用し、高湿潤環境かつ、放射線照射におけるケーブル絶縁体の劣化メカニズムを解明することができるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

福島第一原子力発電所の廃炉作業を加速すべく、損傷原子炉内を想定した環境内でのケーブル絶縁体の材料劣化特性を評価し、そのメカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)高強度放射線の発生と利用法検討

これまでの研究において、高強度の放射線を発生させるデバイスを開発している。この放射線は、大強度パルス電子ビームを金属材料へ照射することにより発生させるものであり、発生時間は数 μ sと短いものの、高線量率の放射線を広域に照射可能である。この高強度放射線を本研究課題に利用するため、発生放射線の空間分布および数値解析による発生放射線の検証を行った。

(2)計測環境構築

高湿潤環境下にあるエナメル電線間で発生する部分放電現象を観測・評価するための実験系を構築した。部分放電とは、電極に挟まれた絶縁体間で発生する局所的な微弱放電現象であり、この部分放電の発生頻度を計測することにより、絶縁体の劣化状況を推定できる。高湿潤環境の構築においては、将来的に高強度放射線を照射することを考慮し、可搬型のものを設計・製作した。

(3)高湿潤環境下におけるエナメル電線の劣化状況調査

構築した実験環境を用いて、エナメル電線間で発生する部分放電の発生状況を計測・評価した。

4. 研究成果

(1)高強度放射線の発生と利用法検討

(引用文献 1、2)

高強度放射線発生に必要な電子ビームの生成には、長岡技術科学大学設置の大強度パルス発生装置を用いた(図1参照)。使用した電子ビームダイオードの電圧・電流はピーク時において-0.9MV、70kAであり、そのパルス幅は半値幅100nsである。電子ビームを照射し、放射線を発生させるためのターゲットには、厚さ3mmのアルミニウム板を用いた。このパルス電子ビームの収束点におけるビーム径は直径約20mmである。

図2に実験配置図を示す。本研究においてパルス電子ビームをターゲット材料へ照射した際に発生する放射線は、加速電子による制動X線やターゲット材料に起因する特性X線が主であると考えられる。この発生放射線のエネルギー同定には高時間分解能をもつ分光器等を用いた光学計測を行う必要があるが、本研究において利用する電子ビームが単パルスかつ大強度であり、これにより発生する放射線も短時間かつ多量に放出されることから、その計測は極めて困難である。そのため、発生放射線のエネルギー



図1 大強度パルス発生装置 ETIGO-II

同定については、後述の数値シミュレーションを利用することとし、発生放射線の空間分布について、イメージセンサを用いた独自の手法により計測した。

市販のデジタルカメラ等に使われている CMOS イメージセンサに放射線が照射されると、その内部にある半導体において大量の電荷が発生し、取得画像上には白傷となって表示されることが知られている。図 3 に、本研究に利用する大強度パルス発生装置の負荷端付近に設置したデジタルカメラにおいて、電子ビーム照射時を動画撮影した際に取得した動画の 1 フレーム画像を示す。なお、この撮影の際は、被写体色を限定し、放射線の影響による白点と区別しやすくするため、カメラレンズ前面に偏光フィルタを設置し撮影を行っている。図 3 中において、発生した放射線による影響を受けた画素部分が白点として表示されていることを確認できる。この影響は損傷原子炉内を撮影する際の大きな支障となるが、本研究ではこの影響を利用し、発生するパルス放射線の空間分布を調査した。発生放射線の空間分布計測実験では市販のデジタルカメラを使用し、これを電子ビームダイオードが設置されている真空チャンバーの正面延長上、距離 2 m、3 m、4 m の地点に設置した。また、撮影時のカメラ設定は、画素数 1280 × 720 pixels とし、動画撮影時のフレームレートは 25 fps とした。空間分布計測に使用する画像は、電子ビームを照射した時点における動画のフレーム画像 1 コマを抽出し利用した。なお、実験中は実験室内を暗くし、取得画像に白点以外の余計な画像が映り込まないように配慮した。各距離で撮影・取得される画像上の白点の個数から、発生放射線の空間分布を検討した。

図 4 に、各距離における取得画像から画像内の白点をカウントした結果を示す。この結果から、白点の数は放射線の発生源からの距離に反比例し、その割合もほぼ距離の 2 乗で減少する傾向がみられた。

以上の実験結果を検証するため、モンテカルロ放射線挙動計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) ver.3.20 を用いて、ETIGO-II からの電子線照射を模擬した計算を行った。計算体系を領域番号および組成、座標軸とともに図 5 に示す。-30 cm z 30 cm の領域については拡大した図も示している。ペンシルビームにて電子線を 3 mm の Al 板へ照射する計算条件である。領域番号 201~203 (void、真空)、101 (Al)、102 (void、真空)、103 (PMMA) は、ETIGO-II の真空チャンバー内を模擬している。領域 103 の PMMA が大気と真空を分けるアクリル窓にあたる。領域番号 104~108 は大気として設定した。今回の計算条件では、-15 cm x および $x > 15$ cm は計算領域外としており、天井や床からの放射線の反射や回り込みは考慮していない。

図 6 に電子線の入射エネルギーを 0.9 MeV とした場合の計算結果を示す。ここでは、図 5 に示した計算領域における各場所での各種 (電子、光子、中性子、陽子) の放射線のフルエンスを示している。入射した電子は Al 板と相互作用し運動エネルギーを失い、光子 (X 線) を発生させる一方で、中性子と陽子は生じないことが確認できる。電子は窓材 (PMMA) で止まり大気中には出て

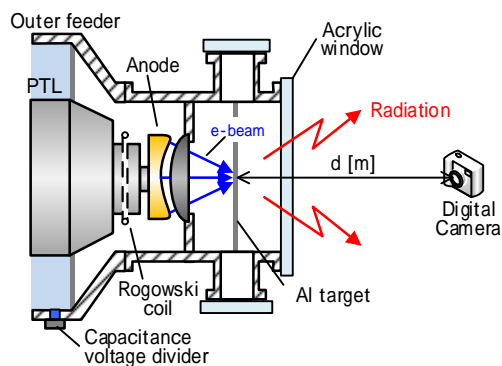


図 2 電子ビームによる放射線発生

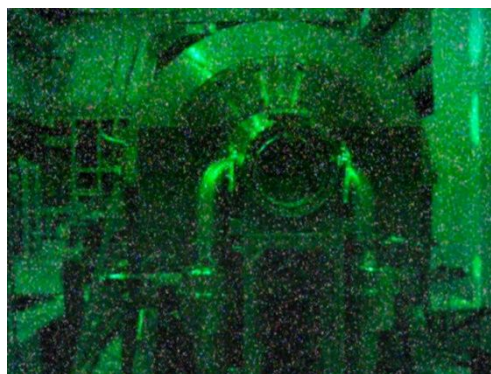


図 3 放射線発生時におけるデジタルカメラ取得画像

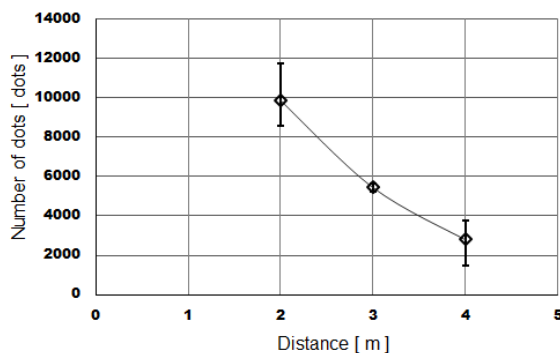


図 4 各距離における取得画像中の白点数

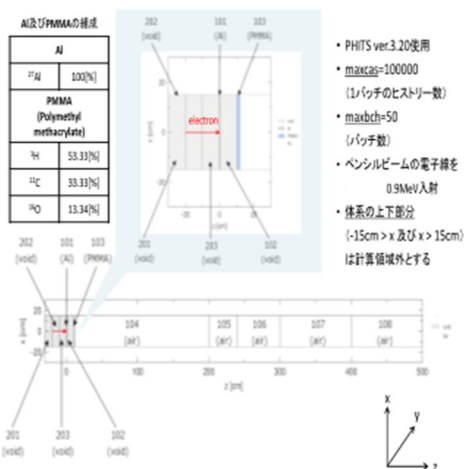


図 5 計算条件

来ず、光子 (X 線) だけが大気中へ放射されることがわかる。光子のフルエンスは Al 板や窓材で大きく減少することはないが、大気中を通過する際は空気との相互作用によって実験結果と同様に、よく知られた距離の 2 乗則に従って減衰する様子が確認できている。

計算結果であるフルエンスのエネルギー分布から、0.9 MeV の電子線入射に対して 0.9 MeV から 10 keV 程度までの幅広いエネルギー領域にわたって光子 (X 線) が発生していることが予想される。

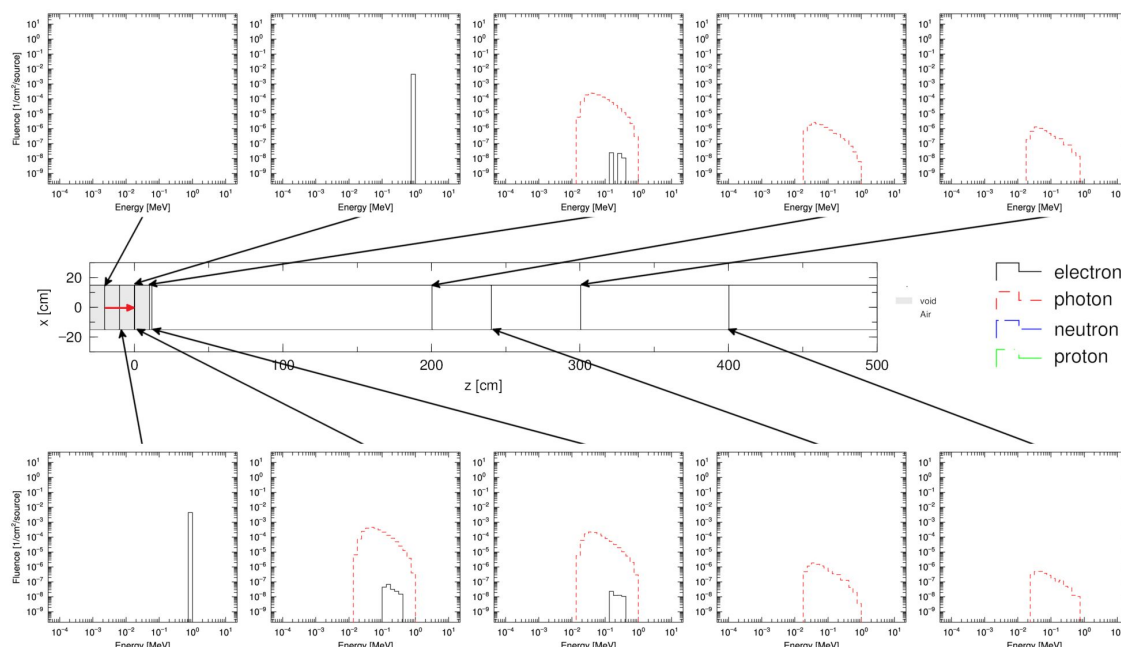


図 6 0.9 MeV 電子入射時の各種フルエンス分布

(2) 計測環境構築

本研究では、絶縁体の劣化状況評価に用いられるエナメル電線を試料とし、試料への電圧印加により発生する部分放電 (以降、PD) を観測し、劣化状況を調査した。試料となるエナメル線には、導体直径 0.8 mm、導体長さ 200 mm のポリアミドイミド銅線 1 種を用いた。なお、試料用のエナメル電線は、あらかじめ R85 mm で湾曲させている。図 7 に本研究で利用するエナメル電線固定具の外観を示す。この固定具により、エナメル電線同士を適度に密着させ、この密着させた部分近傍で発生する PD を測定した。PD の検出には、電圧印加回路内に検出用抵抗を設け、PD 発生時に回路内に流れる微弱電流を検出用抵抗で検出した。

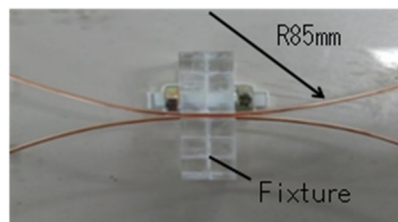


図 7 エナメル電線試料

本研究では、上記のエナメル電線試料を、水蒸気および放射線環境下におく必要があった。このとき、市販の恒温恒湿器では、撮影機材および試料への放射線照射が困難であったため、透明アクリル樹脂製の専用容器を作製し利用した (図 8 参照)。なお、この専用容器は内部の気体圧力を調整可能であり、容器内の温度・湿度を任意に設定できる。

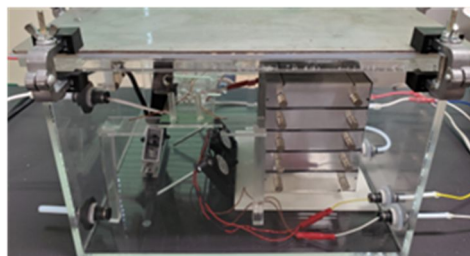


図 8 恒温恒湿容器

(3) 高湿潤環境下におけるエナメル電線の劣化状況調査

エナメル電線試料の周辺に存在する気体の温度、湿度 (相対湿度) による PD 発生への影響を確認する実験を行った。

実験では、各温度・湿度の条件において、PD 発生時の印加電圧値 (PDIV) の測定を行った。この PDIV 測定では、60Hz の交流電圧を 20 V/s で昇圧しつつ、エナメル電線に印加し行った。なお、PDIV 測定前に予備課電として、500Hz、500Vrms の電圧を 5 秒間印加した。この PDIV 測定

は、1対の試料につき12回行い、この中から最大値と最小値を取り除いた10回分の値の平均値を評価した。

図9に周辺温度を変化させた場合、図10に相対湿度を変化させた場合のPDIVの測定結果を示す。これらの結果から、周辺の温度・湿度の上昇によりPDIVが減少する傾向が確認された。特に、湿度の上昇によるPDIVの減少が顕著にみられ、これは、高湿度環境において、絶縁体の劣化が進行しやすくなっていることを示唆している。

エナメル電線への高強度放射線照射実験については、COVID-19による移動制限等により、研究期間内に実施することが困難であった。その代替として、密閉容器内に固体線源を設置し、放射線がPDIVに与える影響を確認する実験を行った。線源にはストロンチウム90(線)を用い、これを試料となるエナメル電線に近接させ設置した。比較のため、利用した線源と同形状の亚克力板を同様に設置し、放射線の有無によるPDIVの変化を観測した。なお、容器内の温度を30、相対湿度を20%に設定した。図11に実験結果を示す。この結果より、エナメル電線試料に線照射することでPDIV値に影響を与えることが示唆された。この理由として、PDの開始電圧、発生頻度と強度には、初期電子の存在確率が影響すると考えられており、線がエナメル電線試料表面に照射され、これにより放電に必要な初期電子が生成され、試料表面でのPD発生が促されたため、PDIV値が低下したと考えている。

(4)研究総括と今後の展望

本研究では、パルス電子ビーム照射により発生する放射線の空間分布について、デジタルカメラを利用する新たな計測手法を用い、計測・分析を行った。また、この計測結果の妥当性を評価するための数値シミュレーションを行い、良好な相関が得られるとともに、発生する放射線の線種を同定することができた。

損傷原子炉内の温度・湿度環境を再現するための実験環境を構築し、この環境下においてエナメル絶縁体の劣化状況を調査した。この結果、高温・高湿度の環境において、部分放電開始電圧の低下がみられ、絶縁体の劣化に影響を及ぼすことが示唆された。また、試料への線照射による絶縁体の劣化状況について調査し、放射線の照射が絶縁体の劣化に多く影響することが示唆された。

本研究期間において以上のような知見が得られたものの、本研究の最終目標であるケーブル絶縁体の材料劣化特性の評価およびそのメカニズム解明には至らなかった。今後は、これまでの研究で構築された電子ビーム照射による高強度かつ高面積密度の放射線を、高温・高湿度環境下にあるエナメル絶縁体に照射する実験を早急に行い知見を得るとともに、試料を塩水等で汚染されたケーブル絶縁体に変更し、同様の計測を行い、かつ、数値シミュレーションの高度化を図ることで、ケーブル絶縁体の材料劣化特性の評価およびそのメカニズム解明が可能であると考えている。

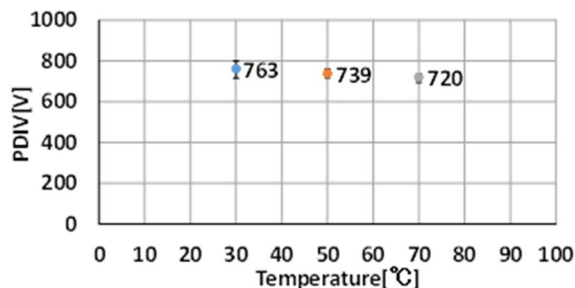


図9 PDIVの周辺温度特性

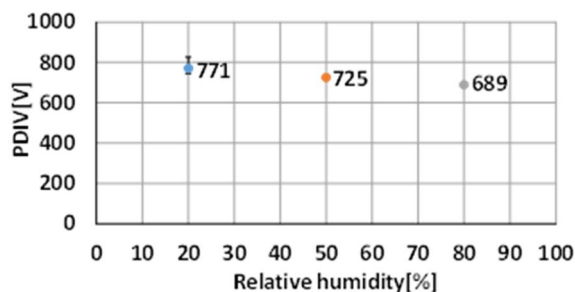


図10 PDIVの周辺湿度特性

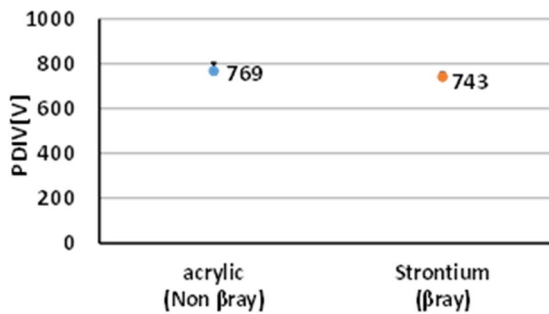


図11 PDIVの放射線照射による影響

<引用文献>

1. 櫻根健史, 菊池崇志 "福島原発の疑似炉内環境構築に向けた新たな取り組み" 電気加工学会誌, Vol.55, No.140 (2021) pp.124-129

2. 藤田 鈴香, 櫻根 健史, 天造 秀樹, 高橋 一匡, 佐々木 徹, 菊池 崇志 "Numerical Simulation for Pulsed Radiation Source Generated by Electron Beam Irradiation Using Intense Pulsed Power Generator" 日本シミュレーション学会論文誌, 2021年13巻2号 pp.66-72

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Suzuka Fujita, Kenji Kashine, Hideki Tenzo, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi	4. 巻 13
2. 論文標題 Numerical Simulation for Pulsed Radiation Source Generated by Electron Beam Irradiation Using Intense Pulsed Power Generator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transaction of the Japan Society for Simulation Technology	6. 最初と最後の頁 66-72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11308/tjsst.13.66	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 榎根健史, 菊池崇志	4. 巻 55
2. 論文標題 福島原発の疑似炉内環境構築に向けた新たな取り組み	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気加工学会誌	6. 最初と最後の頁 124-129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中野竜也, 菊池崇志, 佐々木徹, 高橋一匡, 今田剛
2. 発表標題 パルス大強度相対論的電子ビームの発散角計測系の構築
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木千尋, 菊池崇志, 佐々木徹, 高橋一匡, 本田匠, 松田朝陽, 山内涼太, 今田剛
2. 発表標題 パルス大強度相対論的電子ビーム照射の線量と動物プランクトンの不活化の関係
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松下琢海, 樫根健史
2. 発表標題 水蒸気環境が電気モータ巻線の部分放電発生に与える影響評価
3. 学会等名 電気学会九州支部高専研究講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮本泰成, 鶴山博也, 田村文裕, 菊池崇志, 佐々木徹, 高橋一匡, 樫根健史, 江偉華, 徳地明
2. 発表標題 大強度パルスパワー発生装置を用いた通電加熱によって生成したWarm Dense Matterの実験と数値解析を組み合わせた温度計測の検討
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴山博也, 宮本泰成, 菊池崇志, 佐々木徹, 高橋一匡, 田村文裕, 樫根健史
2. 発表標題 大強度パルスパワー発生装置を用いた通電加熱型Warm Dense Matter生成実験のための放射・熱伝導数値解析による放射スペクトルの検討
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 服部司真, 田村文裕, 樫根健史, 高橋一匡, 佐々木徹, 菊池崇志, 徳地明, 江偉華, 藤岡慎介, 佐野孝好
2. 発表標題 高速点火慣性核融合用材料のWarm Dense Matter物性評価のためのサーマルガンへの投入エネルギー密度取得に向けた容量分圧型電圧測定器の検討
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮本泰成, 鷓山博也, 田村文裕, 菊池崇志, 佐々木徹, 高橋 一匡, 櫻根健史
2. 発表標題 パルス通電加熱によって生成したWarm Dense Matterの数値解析を用いた到達温度の推定
3. 学会等名 第30回電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taisei MIYAMOTO, Hiroya UYAMA, Takashi KIKUCHI, Toru SASAKI, Kazumasa TAKAHASHI, Fumihiro TAMURA, Kenji KASHINE, Weihua JIANG, Akira TOKUCHI
2. 発表標題 Study on temperature measurement by numerical simulation with experimental observation in warm dense matter generation with discharge heating by intense pulsed power generator
3. 学会等名 The 5th International Conference on “ Science of Technology Innovation ” 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究 分担者	田村 文裕 (Tamura Fumihiro) (10804693)	長岡工業高等専門学校・電気電子システム工学科・助教 (53101)	
研究 分担者	菊池 崇志 (Kikuchi Takashi) (30375521)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	

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
---------	---------