

機関番号：22604

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560306

研究課題名 (和文) 高エネルギー電子線と高分子材料の相互作用に関する研究

研究課題名 (英文) Study on the interaction between high energy electron beam and high polymer materials

研究代表者

鈴木 敬久 (SUZUKI YUKIHISA)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：30336515

研究成果の概要 (和文)：本研究課題では高分子材料への高エネルギー電子線照射を実験と数値計算で検討を行った。新しい手法として感温液晶マイクロカプセル法を電子線照射実験に適用し、試料内の温度分布の可視化と定量化を行った。また一方ではこの実験の理論解析モデルを構築し、モンテカルロ法に基づいたシミュレーションコードを開発した。これらの実験結果とシミュレーション結果を比較することが行え、それらの結果が比較的良い一致を示すことがわかった。

研究成果の概要 (英文)：In this study, high-energy electron beam injection into the high molecular material is investigated by the experiment and the numerical simulation. The new temperature measurement method with micro-encapsulated thermo-chromic liquid crystal is applied to the electron beam injection experiment. On the other hand the theoretical model of this experiment is examined. The simulation code based on that theoretical model with Monte-Carlo method is developed. Results obtained by the experiment and the simulation are compared. In conclusion, results obtained by numerical simulation fairly agree with those obtained by experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2008 年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2009 年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2010 年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：粒子線物理, プラズマ工学, 生体電磁気学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：高エネルギー粒子, 誘電体物性, 感温液晶マイクロカプセル

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間において、宇宙機などに使用されている構成材料は高エネルギー粒子線やプラズマに曝されている。高エネルギー粒子線が材料内部において運動エネルギーを失う場合、様々な衝突過程を経て熱エネルギーに変換される。このときに高分子絶縁材料の構成分子と荷電粒子の相互作用により、分子結

合の切断などが起こり材料自身の性質に影響を与え、劣化が促進されることが予想される。また絶縁材料が荷電粒子線に曝された場合、材料内部に空間電荷が蓄積し、内部に高電界が誘導されることにより、絶縁破壊に至ることが懸念されている。このような背景から絶縁材料内に入射した荷電粒子の材料へのエネルギーの付与の物理過程を理解し、そ

の振る舞いを明らかにすることは、宇宙環境において材料の劣化仮定のメカニズムを知る上で重要である。

絶縁材料内に入射した荷電粒子の振る舞いを知るための手法として、PEA 法のような材料内部における電荷の蓄積の空間分布を測定する手法がある。この手法は材料内の空間電荷の蓄積及び散逸を測定する方法として有用である。しかしこの手法だけでは、材料に入射した高エネルギー荷電粒子が空間電荷として蓄積されるまでの物理的な過程やメカニズムを直接的に知ることが出来ない。高エネルギー粒子の絶縁材料内における運動エネルギーの減衰を温度上昇として測定することは入射粒子の高分子絶縁材料内での相互作用メカニズムを知る方法の1つとして有効であると考えられる。

また最近では計算機の能力が飛躍的に向上していることから、計算機シミュレーションにより実験結果を補完し、高エネルギー粒子線が高分子材料に及ぼす影響に関するメカニズムについて検討することが重要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は材料内のエネルギー吸収の空間分布を定量的にとらえるために、感温液晶マイクロカプセル (MTLC; Micro encapsulated Thermo chromic Liquid Crystal) を用いて材料内部の三次元温度分布を非接触、非侵襲で測定する新しい手法を開発することである。また実験データだけでは物理過程のメカニズムの詳細について議論することが難しいので、我々は相対論的効果を考慮して、材料内に電子が打ち込まれた時の数値モデルを構築し、そのモデルに基づいたシミュレーションコードを開発することである。さらに MTLC 法、PEA 法による実験結果とシミュレーションの結果を比較し、高分子材料内に高エネルギーの電子線が照射されたときの物理作用メカニズムについて考察を行った。

3. 研究の方法

(1) 本研究では図1に示すような構造を持つ MTLC を微小な温度プローブとして用いる。図に示すように MTLC は感温液晶 (コレステリ

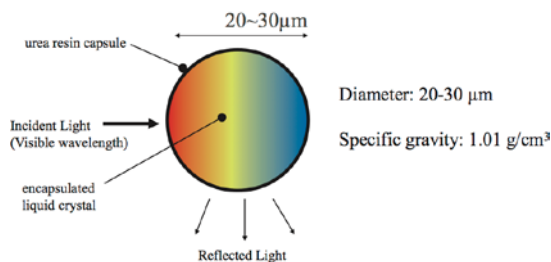


図1 感温液晶マイクロカプセルの構造

ック液晶) をゼラチン又は尿素樹脂によりマイクロカプセル化したものである。このように液晶をマイクロカプセル化することにより、外部の物質と化学反応などの相互作用をなくすることができるのが MTLC の利点である。また 20-30 μm のサイズなので温度変化に対する応答性が高く、適切な濃度で測定対象物に分散させることにより、高空間分解能が得られる。MTLC は温度分布可視化の対象とする透明度の高い媒質、すなわち液体、ゲル、固体中に、均一に分散させて用いる。温度分布を可視化するための測定装置の基本構成を図2に示す。図のように可視光源をスリット光にして MTLC を含む透明媒質に入射する。そうするとスリット光上の MTLC により光が反射され、スリット光断面内の温度分布が可視化される。さらにスリット光を空間的に掃引することにより、媒質内部の三次元の温度分布を観測することが可能である。この原理による温度と散乱光の色の対応関係の例を図3に示す。この対応関係は 35-45 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で呈色する MTLC を水に分散させた時に得られた物である。散乱光は CCD カメラによって入射光に対して 135 度の角度で観測した。図のように温度が上昇するにともない、反射光の色が赤から緑を経て紫に変化していることが分かる。

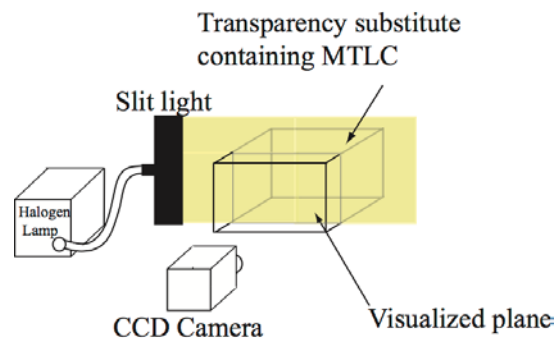


図2 MTLC による温度分布可視化装置

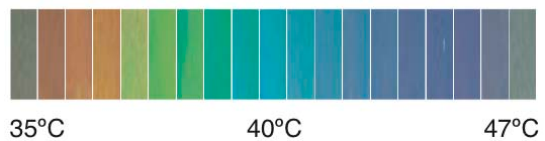


図3 温度-散乱光の対応関係

(2) 本研究では実験を数値的に再現するため図4に示すようなシミュレーションモデルを構築しシミュレーションコードを開発した。このモデルでは材料への入射直後における図中の高速領域の高エネルギー電子に対して相対論的補正を加えている。具体的には弾性 Mott 散乱, Fermi の密度効果等である。エネルギー減衰領域においては、衝突電離, 原子励起等の非弾性散乱, および制動放射に

よるエネルギー損失を考慮している。このシミュレーションモデルでは100eV以下の電子はほぼ静止していると考え、100eV以下になった場所に蓄積され、運動エネルギーは熱エネルギーに変換されるものと仮定する。またシミュレーションでは熱エネルギーを評価するために、入射した1次粒子により生成されるすべての反跳電子の挙動を考慮する。上述したモデルにおいて粒子の軌道の計算を行う際、各相互作用について与えられた散乱断面積から粒子の挙動を決定するモンテカルロ法を採用している。本研究におけるシミュレーションコードのフローチャートを図5に示す。このフローチャートは1つの入射電子に対する試行であり、シミュレーションではこの試行を複数回行う。またシミュレーションコードでは加速エネルギーの上限値を5MeVに制限している。図中の N_L は計算回数の上限、 N_{pb} は軌道計算前の粒子数、 N_{pa} は軌道計算後の粒子数、 E_j はj番目の粒子の運動エネルギーを示す。モデル構築の際仮定したように、100eVまで運動エネルギーが減衰した粒子については計算を終了するようなコードとなっている。

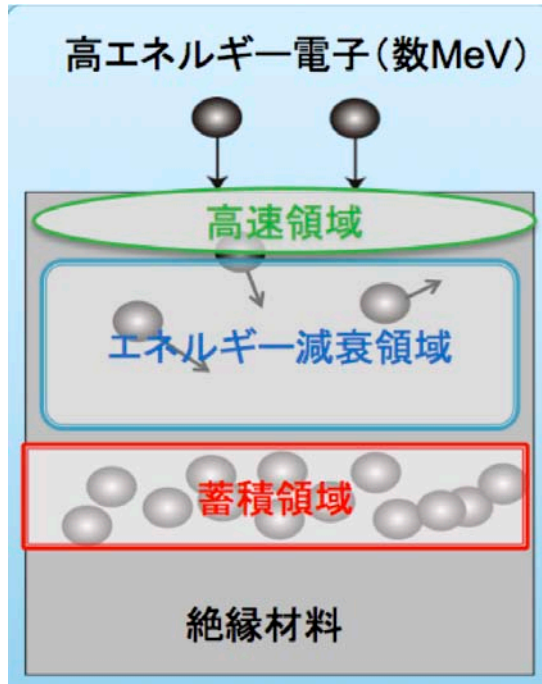


図4 高エネルギー電子線照射のモデル

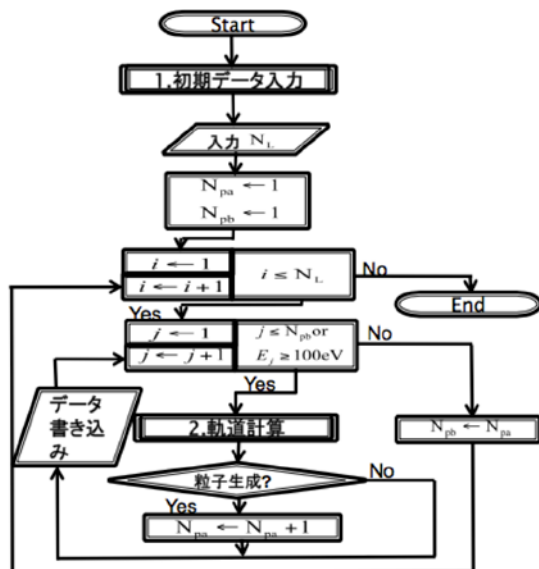


図5 粒子線シミュレーションコードのフローチャート

ューレーションコードのフローチャートを図5に示す。このフローチャートは1つの入射電子に対する試行であり、シミュレーションではこの試行を複数回行う。またシミュレーションコードでは加速エネルギーの上限値を5MeVに制限している。図中の N_L は計算回数の上限、 N_{pb} は軌道計算前の粒子数、 N_{pa} は軌道計算後の粒子数、 E_j はj番目の粒子の運動エネルギーを示す。モデル構築の際仮定したように、100eVまで運動エネルギーが減衰した粒子については計算を終了するようなコードとなっている。

4. 研究成果

(1) エポキシ樹脂に入射する高エネルギー電子の振る舞いを絶縁体へのエネルギー吸収分布の観点から理解するために、MTLCを分散させたエポキシ樹脂の試料を用いて電子ビーム照射実験を行い、温度上昇分布の可視化を試みた。図6は実験配置の概略図である。図に示すように高エネルギー電子線ビームをz軸正の方向から照射し、可視光をy軸にそった方向から入射することにより、電子線からのエネルギー吸収による温度上昇分布を可視化する。照射実験において使用した試料のサイズは30x30x10mmであり、MTLCは30°C(赤)から40°C(紫)までの呈色範囲を持つものを試料中へ0.01wt%分散させた。電子線源は日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の1号加速器(コッククロフト・ウォルトン型電子加速器)を用いた。照射する電子線の加速エネルギーは1.0MeV, 1.5MeV, 2.0MeVの3条件とした。温度

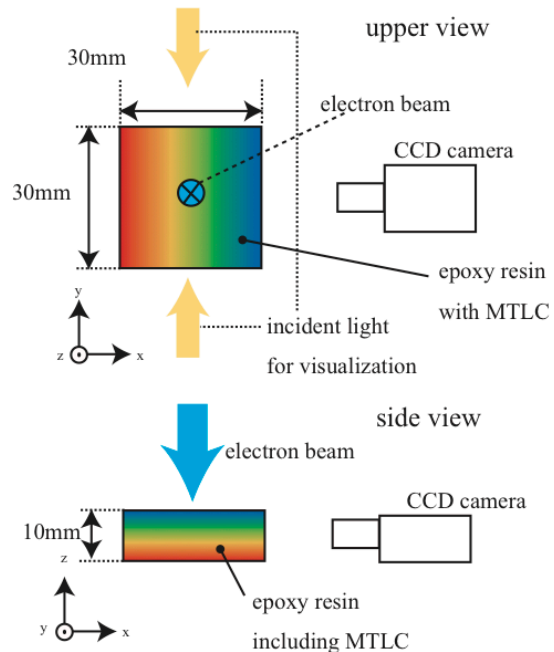


図6 高エネルギー電子線照射実験におけるエポキシ試料内の温度分布可視化のための実験配置

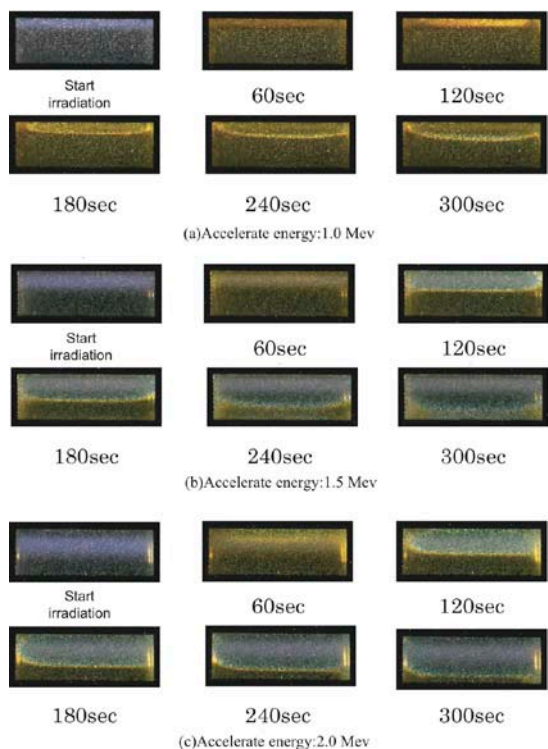


図7 高エネルギー電子線照射時の試料内温度分布可視化：(a)1.0MeV, (b)1.5MeV, (c)2.0MeV

分布の時間変化は可視化された2次元色分布として CCD カメラで測定し、非圧縮形式 (BMP 形式) の時系列画像データとして記録した。試料に電子線を照射した結果を図7に示す。これらの図は CCD カメラによりリアルタイムに得られた画像を各加速エネルギーの条件に対して照射開始より 60s 間隔で示したものである。全ての加速条件において、電子線の照射開始後に試料上部が青く呈色している。本実験における 1-2MeV の加速エネルギーの条件では、電子は相対論的な速度に達する。またエポキシ樹脂の屈折率はおおよそ 1.5-1.6 であり上記の加速エネルギー領域の電子がエポキシ樹脂中に入射したとき、媒質 (エポキシ樹脂) における光速を超える条件になっているのでチェレンコフ放射の条件を満たす。この青い呈色はチェレンコフ放射による電磁エネルギーの放出であると考えられる。図より MTLC の呈色が試料の上部付近から起こっていることがわかる。これらの結果より MTLC を用いた計測法により電子線の照射に起因する試料へのエネルギー吸収が温度上昇として可視化されたことがわかる。試料内の温度は試料上部から上昇し、試料下部方向に向かって熱が伝播している。加速エネルギーの違いによる試料の呈色の違いに注目した場合、例えば電子線照射後 120s の画像を比較すると、加速エネルギーが高くなるに従って MTLC による呈色範囲

が試料下部へ広がっていることがわかる。以上の結果は、加速エネルギーの増大による電子の試料への侵入深さの増加とそれに伴う熱源の深部への移動を示唆している。また同一照射時間内に照射される電子線エネルギーの総和が増加することによって試料に吸収される全熱エネルギーも増加する。この実験ではそのような効果も可視化の結果に反映されていると考えられる。

(2) 高エネルギー電子線照射実験の実験条件をモデル化し、シミュレーションを行った結果について述べる。シミュレーションの条件は以下の通りである。本シミュレーションではエポキシ樹脂としてビスフェノール A 型を仮定し、その寸法は電子線照射の実験と同じにした。入射電子数は 1000 個とし、加速エネルギーは実験と同様に、1.0MeV, 1.5MeV, 2.0MeV の 3 条件とした。図8に計算結果として入射電子のみの蓄積分布を示す。この図には反跳電子の蓄積分布は含まれていない。図において入射エネルギー1.0MeV の場合、蓄積位置の平均値 $\mu=0.32\text{cm}$ 、標準偏差 $\sigma=0.040\text{cm}$ である。入射エネルギー2.0MeV の場合、蓄積位置の平均値 $\mu=0.56\text{cm}$ 、標準偏差 $\sigma=0.13\text{cm}$ である。この図から入射電子は入射エネルギーに応じたある一定の深さを中心に蓄積されている。蓄積位置はエネルギーが大きいほど深くなっている。また、エネルギーが大きいほど標準偏差の σ の値が大きくなっており、蓄積位置の広がりエネルギーに依存して広がる傾向がある。図9に反跳電子のみの蓄積分布を示す。この結果は加速エネルギー

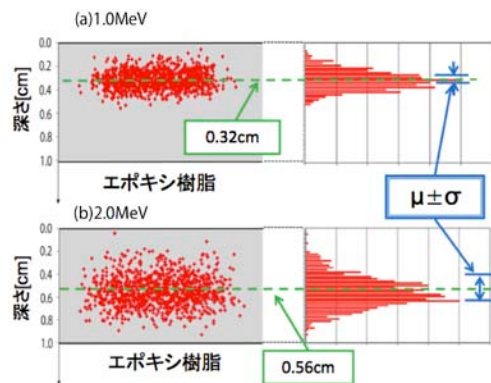


図8 入射電子の蓄積分布：(a)1.0MeV, (b)2.0MeV

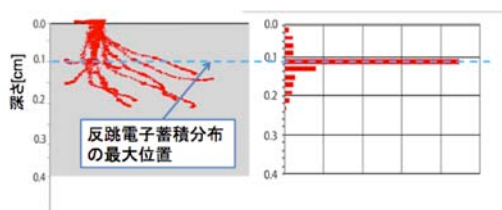


図9 反跳電子の蓄積分布(1.0MeV)

1MeV, 入射粒子数を 5 個で行った結果である。図を見ると材料の表面付近に反跳電子が集中しているが、これは後方散乱により、材料の外に出ていく電子である。反跳電子の蓄積分布の最大位置は深さが 0.1cm 程度の所であり。図 8 (a) の入射電子の最大蓄積位置と比較すると表面から浅い位置にある。ここで、100eV 以下に減衰した電子の運動エネルギーが格子振動のエネルギーに移行すると仮定すると、反跳電子が多く分布する部分に熱源が集中すると考えられる。

(3) 本研究では最終的に実験とシミュレーションを比較した。その結果を図 10 示す。実験結果において電荷蓄積位置は PEA 法により得られた空間電荷の最大位置であり、温度上昇最大位置は MTLIC 法に得られた結果である。この図からシミュレーションにおける入射電子の蓄積分布の最大を与える位置は、実験から得られた空間電荷分布の最大位置とほぼ一致していることがわかる。またシミュレーションから得られた反跳電子の蓄積分布の最大値を与える位置は実験で得られた温度上昇が最大になる位置とほぼ一致している。これらの比較結果から、電荷蓄積分布は 1 次入射電子の蓄積によるものが支配的であり、温度上昇分布は反跳電子の蓄積によるものが支配的であると推測できる。

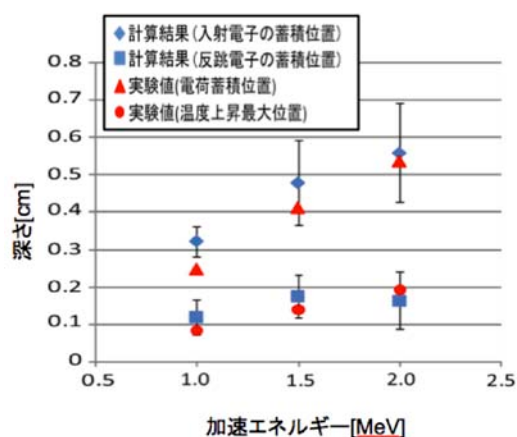


図 10 実験結果とシミュレーション結果の比較

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)

- ① 田口貴幸, 鈴木敬久, 小島正美, 酒井泰, 山代陽子, 小池 梓, 渡辺聡一, 多氣昌生, 佐々木 洋, 「感温液晶マイクロカプセルを用いたミリ波曝露による対流現象の解析」, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, EMCJ2009-125, 2010, pp. 157-162

- ② 鈴木敬久, 篠原広樹, 三宅弘晃, 渡邊力夫, 田中康寛, 「高分子材料への高エネルギー電子線入射によるエネルギー吸収の可視化及びシミュレーションの検討」, 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料, 査読無, DEI-10-079, 2010

- ③ 鈴木敬久, 小池 梓, 佐々木謙介, 多氣昌生, 小島正美, 酒井泰二, 和氣加奈子, 渡辺聡一, 山代陽子, 佐々木 洋, 佐々木一之, 「ミリ波と流体の相互作用を考慮したドシメトリに関する検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, EMCJ2010-72, 2010, pp. 9-14

[学会発表] (計 6 件)

- ① 長田憲司朗, 鈴木敬久, 「高分子材料への高エネルギー電子線照射実験のためのシミュレーションコード開発」, 応用物理学会, 2009年3月, 筑波大学

- ② 田口貴幸, 齊藤博史, 鈴木敬久, 「感温液晶マイクロカプセルを用いたミリ波曝露における温度分布の可視化」, 電子情報通信学会, 2009年3月, 愛媛大学

- ③ T. Taguchi, H. Saito, S. Kurogi, Y. Suzuki, M. Kojima, T. Sakai, S. Watanabe, H. Sasaki, M. Taki, “Visualization of Temperature Distribution Change Due to Millimeter-Wave Exposure with Micro-encapsulated Thermo-chromic Liquid Crystal”, BIOEM 2009, 2009年6月, ダボス (スイス)

- ④ S. Kurogi, H. Saito, T. Taguchi, Y. Suzuki, M. Taki, “Development and Dosimetry of a Free-Space Type in vitro Exposure Apparatus for Millimeter-Waves”, EMC'09, 2009年7月, 京都

- ⑤ Yukihisa Suzuki, Masami Kojima, Taiji Sakai, Yoko Yamashiro, Takayuki Taguchi, Azusa Koike, Soichi Watanabe, Masao Taki, Kazuyuki Sasaki, Hiroshi Sasaki, “EXPERIMENTAL ANALYSIS ON THE THERMAL CONVECTION OF AQUEOUS HUMOR IN ANTERIOR CHAMBER DRIVEN BY THE MILLIMETER-WAVE EXPOSURE AT 77GHZ”, 32nd Annual Meeting the Bioelectromagnetics Society, 2010年6月, ソウル (韓国)

- ⑥ A. Koike, Y. Suzuki, T. Taguchi, M. Kojima, Y. Yamashiro, T. Sakai, S. Watanabe, M. Taki, K. Sasaki, H. Sasaki, “VELOCIMETRY ON THERMAL CONVECTION FLOW OF AQUEOUS HUMOR IN ANTERIOR CHAMBER CAUSED BY MILLIMETER-WAVE EXPOSURE”, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010年9月, 富山

[その他]

ホームページ等

電子線照射下の高分子材料内部における3次元温度分布のイメージングと定量化

<http://www.rada.or.jp/database/home4/normal/ht-docs/member/synopsis/010307.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 敬久 (SUZUKI YUKIHISA)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：30336515

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者