

L-band electron Linac



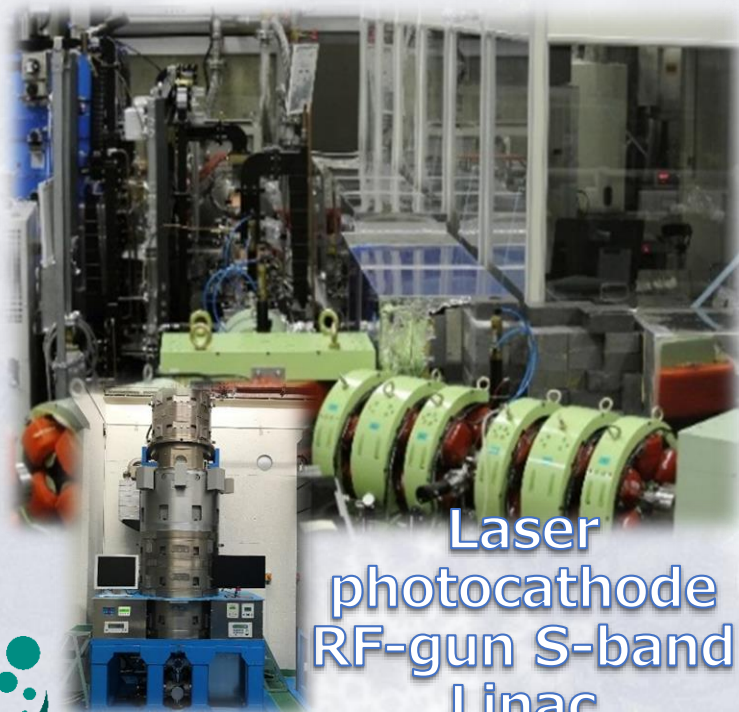
大阪大学産業科学研究所
附属量子ビーム科学研究施設

2023 (R5) 年度報告書

2023 Annual Reports
Research Laboratory for Quantum Beam Science
Institute of Scientific and Industrial Research
Osaka University



Co-60 y-
irradiation
facility



Laser
photocathode
RF-gun S-band
Linac

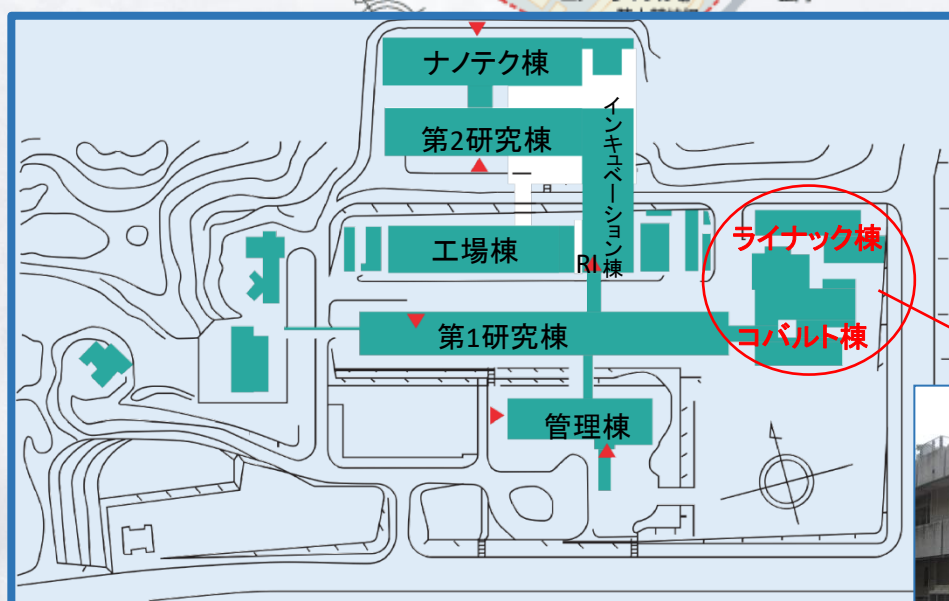


SANKEN
大阪大学 産業科学研究所

大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設



産業科学研究所建物配置図



量子ビーム科学研究施設



大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設
〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1
TEL : 06-6879-8511 FAX : 06-6875-4346
URL: <https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/rl/>
Mail: info_rl@sanken.osaka-u.ac.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 量子ビーム科学研究施設の現状	
2-1 強力極超短時間パルス放射線発生装置 (L バンド電子ライナック)	2
2-2 フォトカソード RF 電子銃 S バンドライナック	4
2-3 コバルト 60 照射設備.....	5
2-4 共同利用採択テーマ一覧.....	6
3. 研究成果報告.....	9
4. 年間行事報告	
4-1 研究会報告	36
4-2 委員会報告	36
4-3 見学者リスト	38
4-4 学生実験報告	38
5. 放射線安全管理報告	
5-1 放射線安全管理報告	39
6. 研究成果リスト.....	41
7. 量子ビーム科学研究施設員名簿.....	46

1. はじめに

量子ビーム科学研究施設の 2023 年度の活動と研究成果をお届けいたします。新型コロナウイルスの感染拡大は 5 月には収束に向かい、当ビーム研究施設の利用は新型コロナウイルス禍以前とほぼ同様に、恒例の施設研究会やセミナーも対面形式で開催することができました。さらに、2023 年度より立ち上げた産研主催の量子ビーム国際会議（Q-BASIS-2023）も参加者 100 人規模の対面形式で開催し、学内・学外のユーザーはもとより海外の研究者の方々にもたくさん参加いただくことができました。

当ビーム研究施設は世界最大強度の電子ビームやテラヘルツ波および世界最短時間幅の電子ビームの利用が可能であり、また、今となっては数少ないコバルト 60 ガンマ線照射装置を有したユニークな研究施設です。産研所内・学内・学外に量子ビーム利用のための貴重な基盤的環境を長きに渡り提供してきた一方で、現在のビーム施設は設備・装置の老朽化、維持費の増大、人員不足等の課題から、改革を求める答申を産研所内の将来構想ワーキングから受けている厳しい状況にあります。

このような状況のため、これまで私どもは建屋改修整備費の獲得に奔走しておりましたが、本年度、念願叶いライナック棟建屋の全面改修工事が令和 6 年度の概算要求で採択されました。現在のビーム施設の主要装置は、L バンド電子ライナックと、S バンド R F 電子銃ライナック、コバルト 60 ガンマ線照射装置です。2024 年度 7 月の工事開始に向けた準備のため L バンド電子ライナックの共同利用を停止したライナック棟では、12 月末以降は老朽化した設備・不用備品等の廃棄と同時に、工事完了後に大型外部資金で導入する新型加速器（C バンド電子ライナック）の受け入れ準備を進めています。

L バンド電子ライナックでは自由電子レーザーによる高輝度コヒーレントテラヘルツ波の発生とナノ秒～サブピコ秒領域でのパルスラジオリシス法による化学反応と物質・材料科学での利用を、S バンド R F 電子銃ライナックではフェムト秒領域の短時間パルス電子ビームの発生に関する利用をこれまで通り実施しました（L バンド電子ライナックのみ 12 月末までの利用）。さらに、今年度からはこれらに加え、新たに、動物実験を含むビーム創薬研究への利用と生物試料への高線量率照射に関する基礎研究での利用を医学部と連携して開始しました。コバルト 60 では、これまで通りの物質、材料、放射線育種等の生物試料に対するガンマ線の照射実験の利用に加え、新たに、企業からの利用を大きく増加させることができました。今後も当ビーム研究施設関係者スタッフ一同はユーザーの皆様へのサービス提供を可能な限り継続し、活発な研究施設利用を維持すると同時に、当ビーム研究施設の新規展開に向けた努力を続けていく所存です。これからも当研究施設ユーザーのみならずと関連研究者コミュニティからの厚いご支援を賜りますようお願い申し上げます。

大阪大学産業科学研究所 量子ビーム研究施設
施設長 細貝知直

2. 量子ビーム科学研究施設の現状

2-1 強力極超短時間パルス放射線発生装置(Lバンドライナック)

2-1-1 Lバンドライナックの運転状況

図1は、令和5年度におけるLバンドライナックの運転日数を、月別、モード別に表したものである。今年度のLバンドライナック共同利用では、11件の量子ビーム科学研究施設 共同利用研究課題と9件の物質・デバイス領域共同研究拠点 施設・設備利用課題が採択された。前期は保守作業の22シフトを含む121シフトが配分され、後期(10月-12月)は保守作業の8シフトを含む58シフトが配分された。保守運転を含む運転日数は149日、運転時間実績は1,684時間であった。

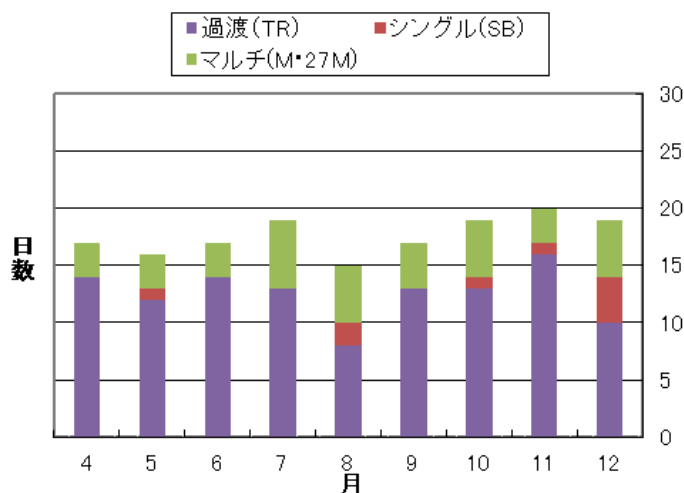


図1 令和5年度Lバンド運転日数

2-1-2 保守および故障の状況

Lバンドライナックはライナック棟の改修工事の準備のため、12月末で全ての運転を停止した。半導体スイッチはノイズ対策でグラウンド線を銅板に交換するとともに、異常時に緊急停止するための基板改造とPLCプログラムの修正を行い、5月にクライストロンモジュレータに設置した。改造した基板の一部に不具合が発生したものの、12月末までの全ての運転を半導体スイッチで行った。また4月には故障した冷却装置用のインバータポンプを納期の関係から非インバータ式のポンプに更新し、動作に問題ないことを確認した。また使用していたイオンポンプ電源の多くが1990年頃までのもので、内部のオイルコンデンサに微量PCBの混入の可能性が否定できなかったため、Lバンドの運転停止後にコンデンサの取り外しとPCB分析を行い、電源の廃棄を行った。他には計測用オシロスコープの修理や、フラッシュランプ付属機器の修理、電子銃遠隔制御用ステッピングモータの故障対応等を行った。

現在は改修工事の準備を進めている。工事中の現場作業員に対する放射線管理の負担を軽減するため、RI規制法施行規則第22条の3を適用し、ライナック棟のほぼ全域を管理区域から一時的に解除することを想定している。ただしLバンドライナックは軽微に放射化した部分があり、また本体を解体すると復旧が困難となることから、加速器本体と近接した機器を十分な耐荷重の木枠で覆い、内部を放射線管理区域として残すことにした。

改修工事ではライナック棟全室の内装と設備のほとんどを更新するため、棟内機器の大部分を撤去・移設する必要がある。Lバンドでは本体とモジュレータの筐体、冷却装置本体のみ棟内に残置することにした。制御系や電源に関しては機器側の配線は全て取り外し、Lバンド側の配線は可能な限り接続したまま木枠内に収めることで、解線作業を簡略化することにした。また冷却装置から木枠までの配管も取り外して別途保管することにした。

150MeV の S バンドライナックは廃止とし、解体した本体や付属機器を収納するために放射化物保管庫を増設することにした。これらの変更は原子力規制庁への申請手続きを行い、既に承認されている。

改修工事後は 2 階の放射線管理区域を一般区域にして、産学連携スペースとして開放することを予定している。また建屋設備の全体的な見直し・更新を実施し、今後導入が予定されている C バンドライナックと 50TW 級高強度レーザーの環境整備のために、電源設備の拡充や高精度空調・クリーンルームの導入等を行う予定である。

2-2 フォトカソード RF 電子銃 S バンドライナック

2-2-1 運転状況と主な研究成果

今年度、「RF 電子銃ライナック装置」では、超短パルス電子ビームの発生および計測に関する研究の他に、「量子ビーム創薬」のために極短パルス電子ビーム照射によるがん治療薬の開発に関する新たな応用研究を展開してきた。「MeV 電子顕微鏡」では、電子ビームの低エミッタンス化、AI による TEM 像のノイズ除去等に関する研究を行った。また、「小型短パルス電子線発生装置」では、新しい THz 発生方法の探索と原理実証に関する研究を行った。これらの研究内容と得られた主な研究成果については、各グループや利用者の報告書を参考していただきたい。

2-2-2 保守および故障の状況

RF 電子銃、加速器本体およびクライストロン周りの大きな故障は無かった。同期系において、昨年度にレーザーを同期するための 79.3 MHz の RF を発生する 1/36 分周器が経年劣化により故障したが、今年度に新たに 1/36 分周器を更新し、電子ビーム発生用の Nd:YLF ピコ秒レーザーと計測用 Ti:Sapphire フェムト秒レーザー共に順調に稼働している。

今までの RF 電子銃ライナック装置では、無酸素銅カソードを利用して短パルス電子ビームの発生と利用研究を行ってきたが、無酸素銅の量子効率が 10^{-6} 程度であり、大電荷量の電子線パルスの発生に支障が生じる。来年度にライナック棟の改修工事や L バンドライナックの停止を伴い、RF 電子銃ライナック装置の利用実験が大幅に増えることを想定できる。そのために、RF 電子銃ライナック装置の電子ビームの高強度化を考え、12 月~1 月に早稲田大学に使われた高い量子効率を有する CsTe カソード蒸着装置とカソードの交換とロードロック真空チェンバーを量子ビーム科学施設に移設した。来年度に、その CsTe カソード蒸着装置を起動し、ロードロック真空チェンバーを改良し、活用して、CsTe カソード RF 電子銃ライナックを改装する。これによって、L バンドライナックの停止を伴う実行できない利用研究を、RF 電子銃ライナック装置を用いて展開する予定である。

冷却水装置について、冷却塔、二次系の冷却水循環装置、SMC 社製等のチラーは順調に稼働している。

2-3 コバルト60照射設備

2-3-1 概要

コバルト 60 ガンマ線密封 RI 線源 3 本を保有し、各線源での γ 線照射の利用が可能となっている。

2-3-2 利用状況

令和 5 年度のコバルト 60 照射施設の利用課題数は 20 件であった。利用状況を表 1 にまとめた。引き続きコバルト 60 線源が広く利用されている。

表 1 令和 5 年度コバルト 60 照射施設利用状況

部局	利用課題件数	総利用時間(hrs)
産業科学研究所	4	76
理学研究科	2	27
レーザー科学研究所	1	48
工学研究科	4	801
拠点利用	4	365
他大学等	5	1072
合計	20	2389

2-3-3 装置の維持管理

コバルト照射施設マニピレータの整備を令和 5 年 12 月に行った。

コバルト照射施設および運転制御システムの総合点検、保守整備を令和 6 年 3 月に行なった。

2-4 令和5年度 共同利用採択テーマ一覧

2-4-1 共同利用テーマ一覧

採択番号	研究課題	所属	申込者氏名	利用装置
R5-C-1	ナノ秒領域での量子ビーム誘起化学反応基礎課程	産研	楊金峰	Lバンド
R5-C-2	放射線化学反応中間体	産研	藤乗幸子	Lバンド/コバルト
R5-C-3	凝縮相中の量子ビーム誘起スパー反応研究	産研	室屋裕佐	Lバンド/コバルト/RF
R5-C-4	フェムト秒・アト秒パルスラジオリシスの研究	産研	楊金峰	RF
R5-C-5	フェムト秒時間分解電子顕微鏡に関する研究	産研	楊金峰	RF
R5-C-6	フォトカソード RF 電子銃における高輝度電子ビーム発生に関する研究	産研	楊金峰	RF
R5-C-7	量子ビーム誘起によるナノ構造形成機構に関する研究	産研	岡本一将	Lバンド/コバルト
R5-C-8	量子ビーム照射による生体内での新規分子変換反応の開発と応用	産研	山下泰信	Lバンド/RF
R5-C-9	自発光植物種子の変異誘発	産研	長部謙二	Lバンド/コバルト
R5-C-10	電子ビーム照射によるプロドラッグの活性化とその薬理学的評価	産研	山下泰信	Lバンド/RF
R5-D-1	超短パルス電子ビーム発生と THz 計測	産研/三重大学	楊金峰/松井龍之介	RF
R5-D-2	加速器を用いた材料改質と新規機能性材料創製に関する研究	産研/阪大ダイキン協働研究所	神戸正雄/大島明博	施設利用
R5-D-3	コバルトからの γ 線を用いた新規機能性材料創製に関する研究	産研/阪大ダイキン協働研究所	神戸正雄/大島明博	コバルト
R5-D-4	パルスラジオリシス、 γ 線照射を用いた放射線化学反応	産研/青山学院大	小阪田泰子/田邊一仁	Lバンド/コバルト

採択番号	研究課題	所属	申込者氏名	利用装置
R5-D-5	放射性廃棄物からのエネルギー生産に関する放射線化学研究	産研/中部大学	室屋裕佐/ 堤内要	コバルト
R5-B-1	放射線反応場を利用したナノ粒子材料の合成	工学研究科	清野智史	コバルト
R5-B-2	高分子の放射線照射効果の検討	工学研究科 環境・エネルギー工学専攻	秋山庸子	コバルト/ 施設利用
R5-B-3	宇宙機用記機材の放射線試験・石英・ガラス アパタイト試料の放射線被ばく量の決定	理学研究科	山中千博	コバルト
R5-B-4	3D プリンターによるプラスチック構造体の作製と放射線照射効果の検討	工学研究科 環境・エネルギー工学専攻	秋山庸子	コバルト/ 施設利用
R5-B-5	生体に対する高線量率電子線照射効果の研究	医学系研究科	西尾禎治	L バンド /RF
R5-B-6	多孔性有機塩のポストシンセシスによる空間修飾	工学研究科	藤内謙光	コバルト
R5-B-7	高強度赤外光照射による新規物質創成と新規物性発現	基礎工学研究科	永井正也	L バンド
R5-B-8	テラヘルツ FEL をもちいた非線形光学応答の研究	レーザー科学研究所	中嶋誠	L バンド
R5-B-9	希土類イオン添加フッ素リン酸塩ガラスシンチレーターの放射線耐性	レーザー科学研究所	山ノ井航平	コバルト
R5-B-10	COMET Phase-I 用の Slow Control System で用いるバッファの放射性耐性評価	理学研究科	上野一樹	コバルト

2-4-2 物質・デバイス領域共同研究拠点申込テーマ一覧

採択番号	研究課題	所属	申込者氏名	利用装置
R5-J-1	高強度赤外光照射による新規物質創成と新規物性発現	大阪大学 基礎工学研究科 未来物質領域	永井正也	L バンド
R5-J-2	テラヘルツ FEL をもちいた非線形光学応答の研究	大阪大学 レーザー科学研究所	中嶋誠	L バンド
R5-J-3	シンチレーションの前駆励起状態のパルスラジオリシスによる観測	静岡大学 電子工学研究所	越水正典	L バンド
R5-J-4	高分子系飛跡検出器内の放射線損傷形成機構	神戸大学大学院 海事科学研究科	山内知也	コバルト
R5-J-5	フォトクロミズム分子のラジカルイオンの反応性の研究	群馬大学大学院 理工学府	山路稔	L バンド/コバルト
R5-J-6	パルスラジオリシス法を用いた非均質反応場等での過渡現象に関する研究	日本原子力研究開発機構	永石隆二	L バンド
R5-J-7	溶液中の放射線誘起化学反応に対する磁場効果	埼玉大学	若狭雅信	L バンド /RF
R5-J-8	ガンマ線エネルギーの化学エネルギーへの変換 ～金属共存下における二酸化炭素・水の分解反応促進～	近畿大学	大塚哲平	コバルト
R5-J-9	電子スピン共鳴(ESR)法によるγ線照射効果の研究	神戸大学・人間発達環境学研究科	谷篤史	コバルト
R5-J-10	テラヘルツ自由電子レーザーを用いた短パルスレーザー励起半導体表面キャリアダイナミクスの研究	量子科学技術研究開発機構	川瀬啓悟	L バンド
R5-J-11	放射線に誘発される化学種への照射後 sub-ナノ秒に見える磁場効果	医学系研究科・保健学専攻	坂田洞察	L バンド/施設利用
R5-J-12	遠赤外・テラヘルツ自由電子レーザーを用いた新機能物質材料の創成	立命館大学 SR センター	入澤明典	L バンド

ペンタノール中の溶媒和電子のスペクトルの研究

産研ナノ極限ファブ리케이션研究分野^a

神戸正雄^{a*}、田牧諒哉^a、楊金峰^{a*}

Investigation of the solvated electron in 1-pentanol

Dept. of Advanced Nanofabrication^a

Masao Gohdo^{a*}, Ryoya Tamaki^a, Jinfeng Yang^{a*}

A pulse radiolysis study on the absorption spectra of the solvated electron and the pre-solvated electron in 1-pentanol was conducted to understand the nature of photo-absorption of solvated electron. It is still under discussion whether the photo-absorption assigned to the intramolecular excitation in the solvated electron's molecular orbital or assigned to the electronic transition to the solvent conduction band. The experimental results of the photo-excitation experiments on the solvated electron indicated that the photo-absorption of the solvated electron should be assigned to the electronic transition to the solvent conduction band.

アト秒パルスラジオリシスの適用対象の1つとして、極性溶媒のイオン化で必ず生じる溶媒和電子、および溶媒和前電子の生成過程が実測できることが期待される。そこで本研究では、溶媒和電子・溶媒和前電子の吸収スペクトルを詳細に検討し、溶媒和電子・溶媒和前電子の光吸収がどのような遷移に基づく過程であるかを実験的に明らかにすることを目的とした。

溶媒和電子やその前駆体である溶媒和前電子のその存在自体は水をはじめ、各種アルコールやテトラヒドロフラン等の様々な溶媒中でよく知られている。溶媒和電子の生成条件は単純化すると、電子と反応してアニオンラジカルにならず、溶媒分子に永久双極子があること、と考えることができる。報告されている溶媒和電子の吸収スペクトルにはブロードな吸収帯であることや、スペクトルの幅と極大吸収波長が大きな温度依存性を示す、また、吸収スペクトルの形状が横軸をエネルギーとしてプロットしたときにガウス分布とらず、極大に対して非対称な形状を示す等の共通の特徴を持つことが知られている。一方で、溶

媒和電子の吸収スペクトルの解釈、すなわち、光吸収がどのような遷移に基づくものかについては、定説が定まっていない。これは、溶媒和前電子についても同様である。量子化学計算に代表される理論計算も十分に発展しているが、おそらくは溶媒和電子が比較的弱いクーロン相互作用により形成された分子種であるためか、理論計算によるアプローチも報告され続けており、定説となる報告には至っていないように考えられる。

本研究では溶媒和電子・溶媒和前電子の吸収スペクトルを実験的に明らかにするために、パルス放射線で生成させた溶媒和電子を光励起する実験を行った。これは、溶媒和前電子が溶媒和電子の励起状態である、とする1つの解釈を積極的な実験的証明を試みる実験である。換言すれば、溶媒和電子の光励起により溶媒和前電子が直ちに生成するのであれば、その光吸収は溶媒和電子の分子内遷移によるものと結論することができる。また、溶媒和電子の生成が、装置関数よりも遅い特定の時定数をもって立ち上がる様子が観測できるのであれば、光励起された電子は溶媒のつく

る伝導帯への遷移であることを示し、従って、伝導帯準位から溶媒和前電子、または溶媒和電子の生成が起こることとなると期待される。これは、放射線によるイオン化後、熱化過程を経て溶媒和前電子・溶媒和電子が生成する過程と同じ過程である。従って、観測される溶媒和電子の生成時定数は、パルス放射線照射で観測される溶媒和電子の生成時定数と一致することが予想される。

本研究では、直鎖アルコールである1-ペンタノール中の溶媒和電子を研究対象とした。また、大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設に設置されたLバンド電子線ライナックを用いたナノ秒パルスラジオリシス測定を行い、溶媒電子・溶媒和前電子の過渡吸収を観測した。用いたパルス電子線は25 MeV、8 ns(FWHM)で、吸収線量は10mmの水に対して~60 Gy/pulseとした。溶媒和電子の生成過程や、溶媒和前電子を直接観測するには、低温とした方が有利であるため、測定は-60℃で行った。溶媒和電子の励起には、ナノ秒Nd:YAGレーザーの第2高調波(532 nm; 7 ns FWHM)を用いた。

Fig.1に測定された1-ペンタノール中の溶媒和電子・溶媒和前電子の吸収スペクトルを示す。電子ビーム照射直後は2つの吸収帯が同時に観測され、Fig.1のとおり、スペクトル分離することができた。また、532 nm (2.33 eV)励起では溶媒和電子のみが励起されることもわかる。Fig.2のように、800 nm (1.55 eV)では溶媒和前電子の急峻な減衰と、比較的緩やかな溶媒和電子の減衰が観測された。図示しないが、より短波長側では溶媒和電子の立ち上がりが観測でき、これは、長波長側で観測される溶媒和前電子の減衰に対応することがわかった。Fig.2に示すとおり、溶媒和電子を光励起すると、溶媒和電子の吸収の減少、すなわちブリーチが観測されるのみで、溶媒和前電子の生成は観測できなかった。また、ブリーチはレーザー光パルス幅の7 ns FWHMで起こっており、溶媒和電子の生成過程は寄与していないことがわかる。

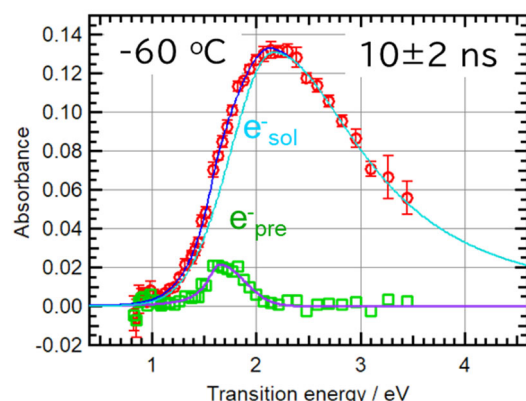


Fig.1 1-ペンタノール中の溶媒和電子・溶媒和前電子の吸収スペクトル(-60℃)

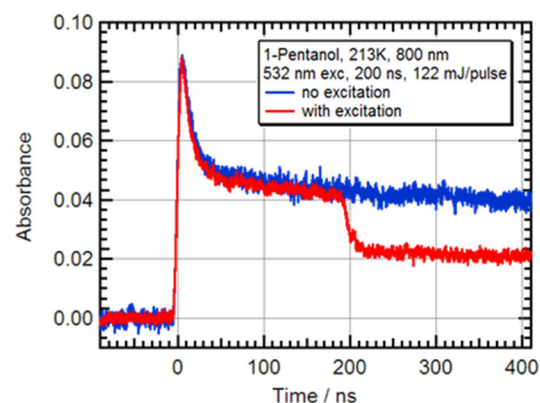


Fig.2 1-ペンタノール中の溶媒和電子の過渡吸収の時間変化(青線:光励起なし; 赤線: 532 nm 励起 電子ビーム照射後約 200 ns で光励起)

これらの実験結果から、観測された溶媒和前電子は、溶媒和電子の励起では生成しない、つまり、溶媒和電子の励起状態ではないことがわかった。また、溶媒和電子の光吸収は分子内遷移ではなく、伝導帯への遷移と帰属することが妥当と考えられる。ただし、観測された溶媒和前電子を捕捉電子 (trapped electron)と考えた場合についても検討が必要である。また、同様のコンセプトの実験を報告した Barbara らの実験結果と、本研究の実験結果に相違があるため、これらを矛盾なく説明することも必要である。

最後に、L バンドライナックを用いた実験にあたり、量子ビーム科学研究施設の古川様、福井様には運転にご協力いただきました。感謝申し上げます。

相対論的フェムト秒電子線パルスを用いた THz放射に関する研究

産研ナノ極限ファブリケーション研究分野^a、レーザー研^b

楊 金峰^{a*}、王有為^b、楊子湔^b、張家銘^b、加藤康作^b、中嶋誠^b

Study on THz radiation generation using relativistic femtosecond electron pulses

Dept. of Advanced Nanofabrication, Sanken, Osaka University^a, Institute of Laser Engineering, Osaka University^b

Jinfeng Yang^{a*}, Youwei Wang^b, Zihao Yang^b, Jiaming Zhang^b, Kosaku Kato^b, Makoto Nakajima^b

Sub-terahertz waves in the 0.1~0.3 THz range are expected to be utilized for the communication beyond 5G/6G. This study reported a new approach of sub-THz wave generation using relativistic femtosecond electron pulses. We designed a metallic slit array radiator on a silicon dielectric substrate and succeeded to observe a THz wave with a peak frequency of 0.17 THz and a width of 0.13 THz in FWHM. The obtained THz spectrum is in a good agreement with the theoretical estimation.

1. はじめに

Beyond 5G/6Gでは、1THz以下のサブTHz波を利用した超高速・大容量通信の実現が期待されている。本研究では、新しい通信機器の開発とテストのために、小型で高強度のサブTHz波を発生可能とする相対論的フェムト秒電子線を用いた新しいTHz波の発生方法を探索し、それを用いて実証実験を行った。

2. 実験方法と結果

図1にTHz波の発生と測定装置を示す。THz放射体には、シリコン誘電体上に製作した金属性Slit arrayを用いた。RF電子銃から発生したフェムト秒電子線パルスをSlit arrayの表面に通過させると、電子線パルスから発生した電磁場がSlit arrayと相互作用し、THz波が放出される。発生したTHz波は真空窓を通過し、マイケルソン干渉計に入射する。干渉計に設置した可変ミラーを移動しながらボロメーターを用いて時間干渉波形を測定し、フーリエ変換によりTHz波のスペクトルを得た。

図2にエネルギーが3.1MeVのフェムト秒電子線パルスを、周期長が0.2 mm、周期数が40のSlit array

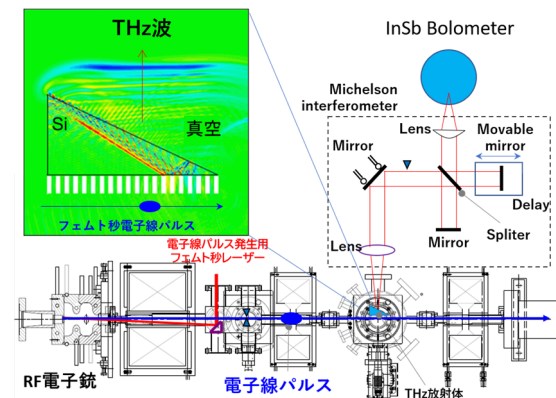


図1 THz波の発生と測定装置

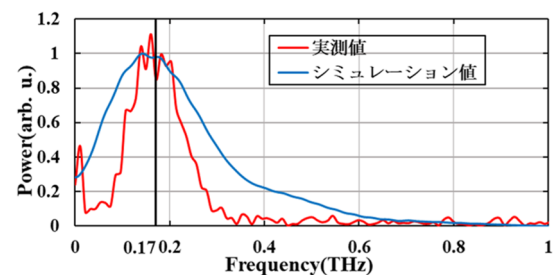


図2 本研究で得た THz 波スペクトル

の表面に通過させたとき、測定したTHz波スペクトルを示す。このとき、ピーク周波数が0.17THz、

* J. Yang, 06-6879-4285, yang@sanken.osaka-u.ac.jp

半値全幅が0.13THzのサブTHz波の発生に成功した。また、シミュレーションの値と一致することから、このSlit arrayによるTHz波放射の理論予測が正しいことを実証した。

3. 結論

相対論的フェムト秒電子線パルスと金属性Slit arrayの相互作用により新たなコヒーレント放射によるTHz波の発生方法を開発した。エネルギーが3.1MeVのフェムト秒電子線パルスを用いて、0.1~0.3 THzのサブテラヘルツ波の発生に成功した。また、シミュレーションでは、発生したTHz波の強度が従来のSmith-Purcell法を比べて、数百倍強くなることが分かった。今後、電子ビームや放射体の最適化により、このTHz波光源はBeyond 5G/6Gにおける新しい通信機器の開発に貢献できると考えている。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(A) 22246127(H22~24), 26246026(H26~28), 17H01060(H29-31), 21H04654(R3-6)と萌芽研究16K13687(H28~29))の支援を受けて行われた。

ポリヒドロキシスチレン系レジストポリマーのラジカルカチオンのダイナミクス

産研量子ビーム物質科学分野

岡本一将^{*}、室屋 裕佐、古澤孝弘

Dynamics of radical cation of polyhydroxystyrene-type resist polymers

Dept. of beam materials science, SANKEN

Kazumasa Okamoto^{*}, Yusa Muroya, Takahiro Kozawa

The dynamics of radical cations of resist polymers formed by radiation chemical processes is important for the development of new resist materials in extreme ultraviolet (EUV) and electron beam lithography. Using pulse radiolysis methods and quantum chemical calculations, we have studied the cation dynamics of polyhydroxystyrene-type polymers.

EUV リソグラフィ技術は、現在最先端の半導体デバイス製造で用いられており、今後国内における導入も予定されている。次世代の EUV 技術に対応した半導体の微細・高精細化のためには、レジスト材料の新規開発が重要な課題である。その解決のために、EUV や電子線露光により誘起されるレジストのイオン化に伴う放射線化学反応機構や分子ダイナミクスの詳細の解明が必要である。そこで本研究では、電子線パルスラジオリシス法と量子化学計算を用いて、ポリヒドロキシスチレンの保護率を変えたポリマーのイオン化で生成するラジカルカチオン種の知見について明らかにした。

阪大産研量子ビーム科学研究施設 26 MeV L-バンドライナックからの電子線でサンプルを照射し、Xe フラッシュランプ光を同時に照射することでナノ秒パルスラジオリシス実験を行った。サンプルには、Ar 飽和したポリマー[ポリヒドロキシスチレン(PHS)、ポリ[(*t*-ブトキシカルボニル)(*t*-BOC)オキシ]スチレン(PTBOCS)および *t*-BOC の保護率を変えた PHS]のシクロヘキサン溶液を用いた。

図1にパルスラジオリシス法で得られた100%*t*-BOC保護された PTBOCS 溶液の過渡吸収スペクトルを

示す。波長 1100 nm をピークに持つ吸収バンドは複数のスチレンユニットに正電荷が非局在化した分子内ダイマーラジカルカチオン種の電荷共鳴(CR)バンドに帰属される。また、可視波長域の吸収は電子捕捉剤により減衰が早くなったため、アニオン種と考えられる。ポリマーの *t*-BOC 保護率が減少すると、新たにフェノキシラジカルの吸収が観察され、CR バンドの減衰が早くなり、ヒドロキシル基からの脱プロトン反応がラジカルカチオンの寿命に大きく影響することが明らかとなった。

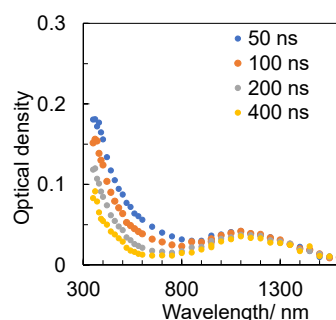


図 1. PTBOCS(100 mM unit) /シクロヘキサン溶液で、パルスラジオリシスにより得られた過渡吸収スペクトル(電子線照射後 50~400 ns 後).

^{*}K. Okamoto, 06-6879-8502, kazu@sanken.osaka-u.ac.jp

相対論的電子ビームによる抗がん剤プロドラッグの活性化研究

大阪大学産業科学研究所 ^a、理化学研究所 SPring-8^b、大阪大学大学院医学系研究科 ^c

○山下泰信 ^{a,b*}、室屋裕佐 ^{a,b}、水田好雄 ^{a,b}、中野和美 ^a、皆已和賢 ^{a,c}、Alexei Zhidkov^a、譽田義英 ^a、
楊 金峰 ^a、小泉雅彦 ^{a,c}、鈴木孝禎 ^a、細貝知直 ^{a,b}

Activation of prodrugs by relativistic electron beam irradiation

SANKEN, Osaka University, Japan^a, RIKEN, Spring-8 center, Japan^b
Graduate School of Medicine, Osaka University, Japan^c

Yasuonbu Yamashita^{a,b*}, Yusa Muroya^{a,b}, Yoshio Mizuta^{a,b}, Kazumi Nakano^a, Kazumasa Minami^{a,c}, Alexei Zhidkov^a, Yoshihide Honda^b, Jinfeng Yang^a, Masahiko Koizumi^c, Takayoshi Suzuki^a, Tomonao Hosokai^{a,b}

Cancer tissue-selective control of the activity of anticancer drugs can reduce side effects in chemotherapy. Prodrugs can be converted to active drugs by exogenous or endogenous stimuli to control the activity of the drug in the lesion. In this study, we used relativistic electron beams to activate prodrugs and to evaluate their pharmacological effects.

がん化学療法は、放射線療法、手術療法と並ぶ、がん治療の柱である。しかし、正常組織への毒性から生じる副作用が課題である。したがって、抗がん剤の活性をがん組織選択的に制御できれば、副作用の軽減につながる。抗がん剤をがん組織選択的に作用させる戦略の一つとしてプロドラッグ化が挙げられる。プロドラッグは、外因性または内因性の刺激によって活性な薬物に変換され、病巣における薬物の活性を制御できる。最近、X線を用いて、有機化学反応を制御し、抗がん剤プロドラッグを活性化する方法が報告されたことから、X線は時空間制御可能なプロドラッグ活性化トリガーとして注目されている¹⁾。ただし、X線は組織透過性が不十分で、体内深部でのプロドラッグを活性化するのは困難である。したがって我々は、体内深部に到達可能な放射線が、X線を補完する方法として有用と考え、組織透過性の高い、相対論的電子ビーム（10–200 MeV、ナノ秒電子パルス）に着目した。本研究では、高周波型線形電子加速器およびレーザー駆動型電子加速器²⁾にて発生させた電子ビームによるプロドラッグの活性化とその有用性を検証した。

まず、電子ビーム照射における化学反応性を検討

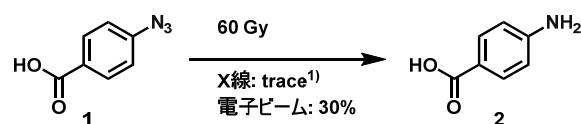


図 1. X 線と電子ビーム照射の化学反応性

した。先行研究において、X線照射にて、アジド基がアミノ基に還元できることが報告されていた¹⁾。そこで、電子ビームにて同様の反応が進行するかを検討した(図1)。その結果、電子ビームは、X線よりもアジド還元反応における化学反応性が高いことがわかった。続いて、抗がん剤であるドキソルビシンを基に、アジド基を有するプロドラッグを合成し、電子ビーム照射による活性化を検討した(図2)。まず、プロドラッグのリン酸緩衝溶液に電子ビームを照射したところ、ドキソルビシンが生成することを確認した。さらに、プロドラッグを処理した子宮頸がん細胞HeLaおよび異種移植モデルマウスに対して電子ビームを照射したところ、細胞増殖および腫瘍増殖を有意に抑制することがわかった。

Reference

- 1) Geng J., Zhang Y., Gao Q., Neumann K., Dong H., Porter H., Potter M., Ren H., Argyle D., Bradley M., *Nat. Chem.*, **13**, 805-810 (2021).
- 2) Jin Z., Nakamura H., Pathak N., Sakai Y., Zhidkov A., Sueda K., Kodama R., Hosokai T., *Sci. Rep.*, **9**, 20045 (2019).

加速器を用いた材料改質と新規機能性材料創製に関する研究

産研ナノ極限ファブ리케이션研究分野^a、阪大院工ダイキン協働研究所^b

神戸正雄^a、大島明博^{ab}、楊金峰^{a**}、佐藤数行^b、足達健二^b

Material modification using low energy electron beam

Dept. of Advanced Nanofabrication^a, Daikin Industries Joint Research Laboratory^b,

Masao Godo^{a*}, Akihiro Oshima^{ab}, Jinfeng Yang^{a**}, Kazuyuki Sato^b, Kenji Adachi^b

For modification of various polymeric materials, a high dose radiation by using a low energy electron beam accelerator was used at ISIR, Osaka University. Chemical agents A and B, which have different chemical structures and were applied to the surface of the silicon-based inorganic film used in this study, showed different abrasion resistance when irradiated with electron beams. When chemical agent A was applied, the abrasion resistance improved with irradiation of MGy or more. On the other hand, when chemical agent B was applied, a slight improvement in abrasion resistance was observed in the sample irradiated with several tens of Gy, and the abrasion resistance decreased at higher doses. The above suggests that the molecular structure of the agent contributes to the change in the chemical structure within the molecule (modification/crosslinking) and the improvement of adhesion.

熱・触媒プロセスに変わるグリーン／ブループロセスとして、電子線(EB)照射によるキュアリングや各種高分子フィルム／繊維の改質や機能性付与等の工業プロセスが広く実用化されている。有機材料に放射線照射を行うと、中間活性種たるラジカルが誘起され、近傍の分子鎖ラジカルと化学反応することで架橋／分解反応が起きる。あるいは、誘起されたラジカルにモノマーをグラフト反応させることにより、機能性を付加できる。

本研究では、岩崎電気製の低エネルギー電子加速器(EC250/15/180L定格：250kV, 10mA)からのEBを用いて、各種有機・無機材料にEB照射を行い、各種モノマー等をグラフト反応させることによ

る親水あるいは撥水性等の機能付与の検討および架橋による素材改質に関する研究を行った。昨年度に引き続き、シリコン系無機物表面に各種薬剤を塗布し、塗布膜の架橋ならびに、界面でのグラフトによる接着性の改善を検討した。

シリコン系無機物を酸素濃度 100ppm 未満に調整した窒素雰囲気において EB 照射を 250keV, 3mA, 10m/min, 50kGy/pass の条件で 4MGy まで行った。照射後、大気中に取り出し、熱処理を行った。

本研究に用いた塗布膜材 A に関しては、MGy 以上の照射で耐摩耗性が向上した。一方、塗布膜材 B に関しては、数十 Gy で照射した試料は、わずかではあるが耐摩耗性の改善が観察され、それ以上では、耐摩耗性は落ちてしまった。以上より、薬剤の分子構造が、分子内の化学構造の変化(改質／架橋)と接着性の改善に寄与することが示唆された。

最後に、本 EB 照射装置は、四国経済産業局から大阪大学産業科学研究所への無償貸付物品であり、有機材料への放射線グラフト重合や改質などのために使用している。この場で関係各位に感謝を申し上げ



Fig.1 Functionalization of polymer materials by low energy and high dose electron beam

げます。

コバルトからの γ 線を用いた新規機能性材料創製に関する研究

産研ナノ極限ファブリケーション研究分野^a、阪大工学研究科ダイキン協働研究所^b

神戸正雄^a、大島明博^{ab}、楊金峰^{a**}、佐藤数行^b、足達健二^b

Development of functional materials using γ -rays irradiation

Dept. of Advanced Nanofabrication^a, Daikin Industries Joint Research Laboratory^b,

Masao Godo^{a*}, Akihiro Oshima^{ab}, Jinfeng Yang^{a**}, Kazuyuki Sato^b, Kenji Adachi^b

A radiation-induced graft-polymerization was studied for the purpose of improving the formability of the fluorine-based film. The grafting reactions with trapped radicals using various fluorine-based gas monomers (tetrafluoroethylene: TFE, vinylidene fluoride: VDF) were carried out under oxygen-free. In the results of last year's experiment, a sea-island structure was observed after molding when a liquid-phase monomer was grafted onto pellets. However, in this year, it was found that by selecting a gas-phase monomer, the monomer penetrates into the inside of the pellet, enabling uniform molding.

本研究では、フッ素系フィルム成形性を改善することを目的として、機能性モノマーのグラフトの検討を行った。昨年度までは、機能性モノマーとして液体のフッ素系モノマーを用いたが、成形後のSEM観察により、グラフトしたポリマーによる凝集物が観察されたため、試料内部へのモノマー拡散性の向上を目的として、本年度は気相のガスモノマーであるVDFおよびTFEモノマーを用いた。

SUS製の圧力容器にフッ素系共重合体ペレットを入れ、酸素フリーの窒素微加圧状態で γ 線を照射した後、容器をガスラインに接続しVDFあるいはTFEのモノマーを窒素雰囲気中で充填した。充填後、各温度で反応させることでグラフトを行った。反応後、試料を取り出し、シート状に成形し各種試験に供した。

Fig.1に成形後のSEM観察写真を示す。未処理(グラフト処理・照射なし)のペレットをフィルム化した表面のSEM観察から、針状結晶の様な形態が観察された。一方、VDFモノマーをグラフトさせたペレットを成形しフィルム化した試料では、

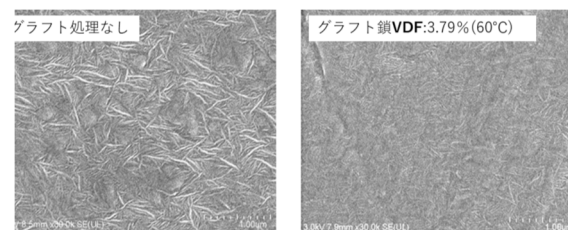


Fig.1 VDF グラフト後に成形した試料表面のSEM写真

未処理の場合に観察された針状結晶形態が見えにくくなっており、グラフトによりモルフォロジーの変化が確認できる。TFE/VDFモノマーのどちらのグラフト試料にしても昨年度、液体モノマーのグラフト試料で観察された海島構造は観察できておらず、成形性が改善したことがわかる。

また、成形後のフィルムの張試験の結果から、VDFモノマーをグラフト反応させた場合、破断点応力が増加したことから、グラフトにより強度特性を改善することができた。

最後に、 γ 線照射実験にあたり、施設の福井様、古川様はご協力いただきました。感謝申し上げます。

熱活性化遅延蛍光に基づくポリマードットからの青色ラジオルミネッセンス

産研励起材料化学研究分野^a、産研量子ビーム科学研究施設^b、高等共創研究院^c

浅沼大輝^a、藤乗幸子^b、小阪田泰子^{a,c*}、藤塚守^{a*}

Blue-radioluminescence from polymer dots based on thermally activated delayed fluorescence

SANKEN Molecular Excitation Chemistry^a, Research Laboratory for Quantum Beam Science^b, IACS^c

Daiki Asanuma^a, Sachiko Tojo^b, Yasuko Osakada^{a,c*}, Mamoru Fujitsuka^{a*}

We demonstrate that polymer dots doped with thermally activated delayed fluorescence (TADF) molecules clearly exhibit blue radio-luminescence upon hard X-ray and electron beam irradiation, which is a new design for nano-sized scintillators.

熱活性化遅延蛍光 (TADF)分子は、有機発光ダイオード (OLED)やオプトエレクトロニクスデバイスなどの発光材料の応用で注目されている研究分野である。TADF分子は、最低三重項励起状態から最低一重項励起状態への熱励起による逆項間交差によって蛍光を発現する。したがって、TADF分子は、重原子を使用せずに長いフォトルミネッセンス寿命と高い量子収率を達成する能力を特徴としている。これにより、OLED応用に加えて、明るさを活かしたバイオイメージングなどの応用も検討され始めている。

最近、TADF分子は固体状態での放射線シンチレ

線シンチレーションおよび放射線検出において重要な要因となる。しかし、これらのシンチレーション現象は固体状態でのみ報告されており、イメージングナノプローブの開発にはナノプローブでのシンチレーションに関するさらなる検討が必要であった。以前、我々は水溶液中のポリマードット (Pドット)やナノクラスターなどのナノ材料をイメージングプローブとして使用した硬X線励起発光について検討した。 μ sオーダーの長寿命のフォトルミネッセンスは効率的なシンチレーションの重要な要件であると考察したが、そのような発光は金やイリジウムなどの重原子を含むナノ材

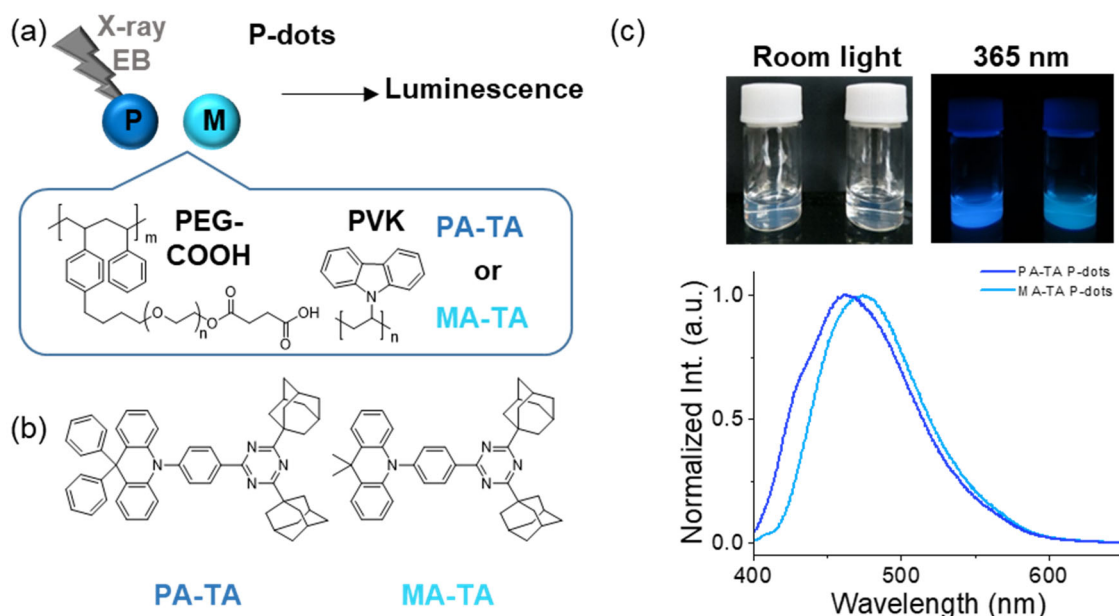


Figure 1. (a) Schematic of hard X-ray- and electron beam- excitable P-dots doped with TADF molecules. (b) Chemical structures of PA-TA and MA-TA. (c) PL spectra and photographs of P-dots solutions under room light and 365-nm ultra violet light.

ーションやイメージングにも使用されている。三重項励起子の長い寿命は、固体状態での効率的な放射

料に限定されていました。そこで、TADF分子を含むナノプローブがナノ材料中での放射線 (硬X線や電

子ビームを含む)のシンチレーターとしても機能するだろうと仮定しました。本研究では、TADF分子をドーピングしたPドットを合成し、硬X線および阪大産研LINACからの電子ビーム励起発光を含む発光特性を評価した。

青色フォトルミネッセンスを示す TADF 分子である PA-TA および MA-TA をドーピング用分子として選択した (Fig. 1ab)。これらの TADF 分子、ポリ(*n*-ビニルカルバゾール) (PVK) および両親媒性 PEG ポリマーをテトラヒドロフランに溶解し、超音波処理下で水に分散させることで、P-dots を合成した。合成した P-dots の光化学的特性を調べたところ、アルゴン雰囲気下での発光寿命は、84 μ s (PA-TA)、37 μ s (MA-TA) であった。

203 倍と 290 倍でした。また、これらの P-dots をフィルム状に加工し、硬 X 線照射下で青色発光を観察しました。さらに、阪大産研量子ビーム施設内に設置された LINAC からの電子ビーム励起による発光も調べたところ、PA-TA と MA-TA P-dots の発光ピークはそれぞれ 456nm と 473nm であった。¹ Ir(dfppy)₃ P-dots との比較も行い、大幅な発光強度の向上と、青色発光を確認した。²

References

- 1) D. Asamuna: *Nanoscale Adv.* **5** (2023) 3424.
- 2) Z. LIU: *Photochem. Photobiol. Sci. Nature* **23** (2024) 329.

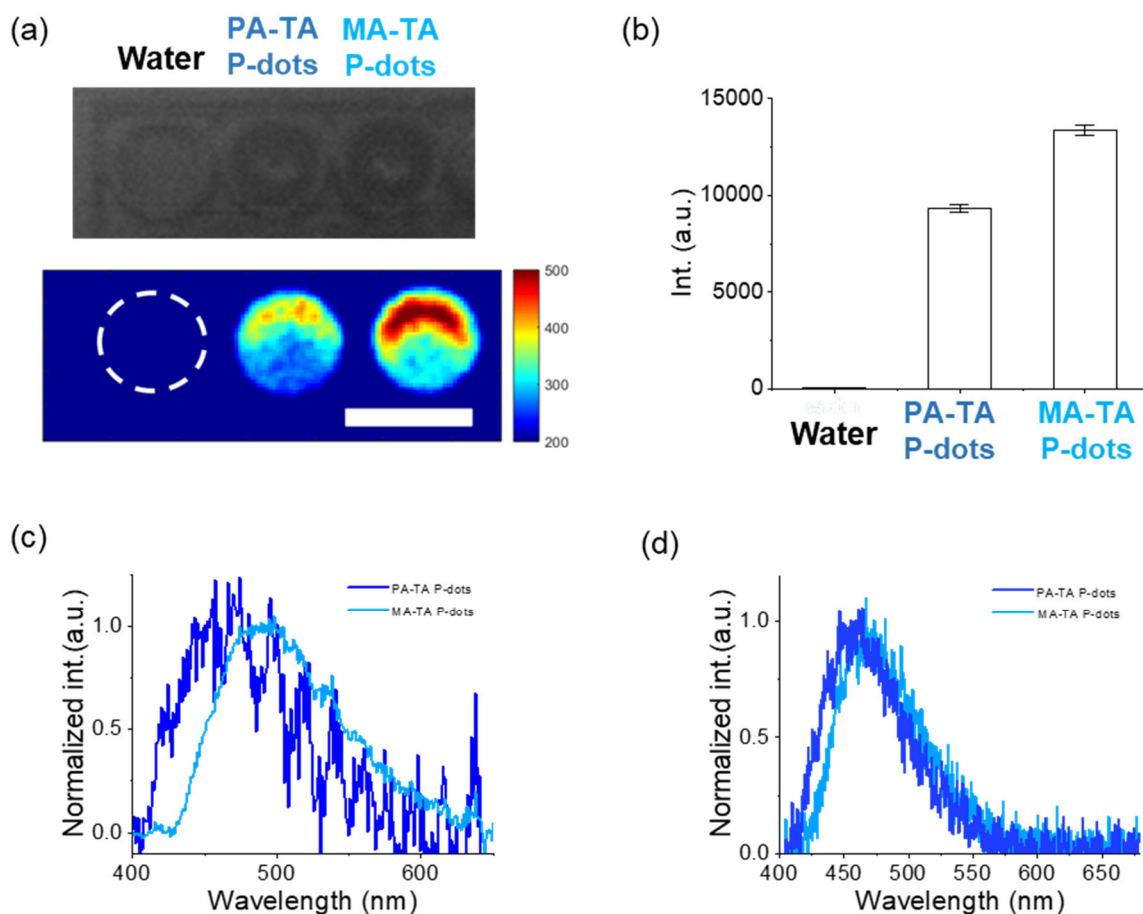


Figure 2. (a) Hard X-ray excited luminescence imaging of P-dots in aqueous solution. Scale bar is 7 mm. (b) Intensity quantification for hard X-ray excited luminescence. (c) Hard X-ray excited luminescence spectra of P-dots. (d) Electron beam excited luminescence spectra for PA-TA and MA-TA P-dots.

続いて、これらの硬 X 線および電子線励起での発光を調べた。合成した PA-TA と MA-TA P-dots において、硬 X 線照射による発光強度は、それぞれ水の

核融合炉用超電導磁石絶縁材料の照射効果に関する研究 —製造法による機械的強度の違い—

工学研究科 環境・エネルギー工学専攻^a

秋山庸子^{a*}

Irradiation Effect of Insulating Materials for Fusion Superconducting Magnet
– Difference in Mechanical Strength by Manufacturing Method –

Division of Sustainable Energy and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering^a

Yoko Akiyama^{a*}

Insulating materials used in superconducting magnets for fusion reactors are exposed to radiation at the cryogenic temperature of liquid helium temperature (LHeT). In ITER, an experimental nuclear fusion reactor, uses glass fiber reinforced plastic (GFRP), which is a 3:2 mixture of epoxy resin (EP) and cyanate ester (CE) with excellent radiation resistance, as an insulating material that can maintain mechanical strength and insulation performance under such an environment. However, this composition was determined through strength tests at room temperature (RT) and liquid nitrogen temperature (LNT). In this study, the interlaminar shear strength (ILSS) of GFRPs manufactured by different methods was measured at RT, LNT, and LHeT before and after γ -ray irradiation. The results suggest that differences in manufacturing methods do not have a significant effect on ILSS, but the molecular structure of the hardener has a significant effect on ILSS.

1. はじめに

核融合炉用超電導磁石に使用される絶縁材料は、液体ヘリウム温度 (LHeT) の極低温下で放射線に曝される。そのため、核融合実験炉ITERでは、このような環境下でも機械的強度や絶縁性能を維持できる絶縁材料として、エポキシ樹脂 (EP) と耐放射線性に優れたシアネートエステル (CE) を3:2で混合した樹脂をマトリックスとして採用している。しかし、この組成比は実環境である液体ヘリウム温度ではなく、室温や液体窒素温度での強度試験を通して決定された値であり、液体ヘリウム温度での強度の検証が必要である。

これまでの研究で、CE:EPの樹脂組成の異なるガラス繊維強化樹脂 (GFRP) を作製し、 γ 線照射・未照射試料を、室温、液体窒素温度、液体ヘリウム温度で層間せん断強度 (ILSS) を測定した。その結果、室温照射後のGFRPのILSSの温度依存性は、CEを含むものと含まないもので明らかに異なること、CE含有

量によってその温度依存性が変化することが明らかになった。今年度は、GFRPの製造方法がILSSに与える影響を調べるため、ITERで用いられる真空含侵法と、一般のGFRPの製造に広く用いられているプリプレグ法で製造した樹脂の比較を行った。

2. 実験方法

真空含侵法のサンプルについては、EP (ビスフェノールA型エポキシ樹脂, JER828, 三菱ケミカル株式会社) とCE (Primaset® LeCy, Lonza) の混合樹脂を、CEが0, 40 wt%となるように調製し、積層したガラスクロスに真空含浸させ、加熱・硬化させることによりGFRPを作製した。なお、EPのみの樹脂については、硬化剤としてポリエーテルアミンを使用した。一方、

* Y. Akiyama, 06-6879-7897, yoko-ak@see.eng.osaka-u.ac.jp

プリプレグ法のサンプルについては、昌立工業㈱と利昌工業㈱によって作製された試験片を用いた。この際、真空含侵法と全く同じ原料では粘性率が低く成形が難しかったため、成形が難しかったため、EPとCEの各樹脂としては同じものを用いたが、CEとEPの混合樹脂(CEEP)には硬化促進剤としてオクタン酸亜鉛、EPのみの樹脂についてはトリメリット酸無水物を硬化剤として用いた。これらの2つの異なる製造方法で作製したGFRPを目違い切り欠き試験片に加工し、 ^{60}Co 線源を用いて室温、空気中で γ 線を照射した後、室温、液体窒素温度、液体ヘリウム温度でILSS試験を実施した。

3. 結果と考察

まずCEEPの結果をFig.1(a)(b)に示す。真空含侵法で作製したCEEPについては、照射の有無にかかわらず、ILSSが液体窒素温度で極大値を取る傾向が確認されていたが、プリプレグ法でも同様の傾向が確認された。また、10 MGyで極低温におけるILSSの増加が見られる傾向も一致していた。

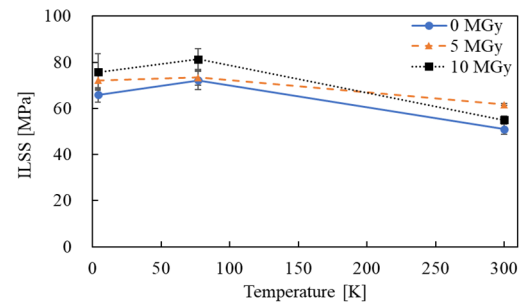
一方、真空含侵法で作製したEPと硬化剤のみの樹脂について、実験結果をFig.2(a)(b)に示す。真空含侵法で作製したサンプルは、照射前はILSSが液体窒素温度で極大値を取り、照射後は液体ヘリウム温度で最大値を取ることが確認されていたが、プリプレグ法で作製したサンプルは、照射の有無にかかわらず、ILSSが液体窒素温度で極大値を取るという、CEEPに近い傾向を示した。これは、主剤の化学構造のみならず、硬化剤の化学構造が直鎖状であるか、あるいは芳香環等の環状構造を持つものであるかということも、照射によるILSSの温度依存性に影響する可能性を示している。

4. まとめ

照射前後のCEEPのILSSの温度依存性の傾向は、製造法に依存せず再現性が確認された。一方でエポキシ樹脂のみの場合は、主剤の構造のみならず、硬化剤の構造が照射前後のILSSの温度依存性に大

きな影響を与えることが示唆された。

(a)



(b)

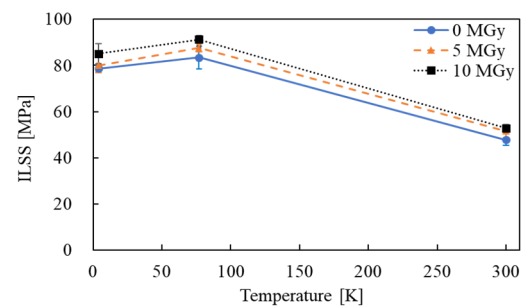
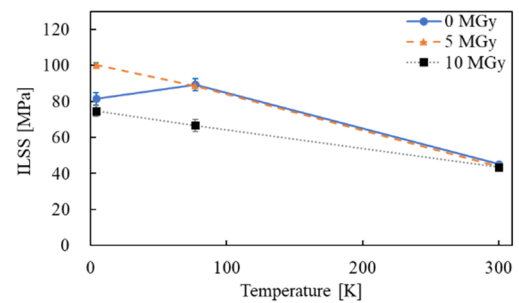


Fig.1 CEEP のガンマ線照射前後の ILSS, (a) 真空含侵法, (b)プリプレグ法

(a)



(b)

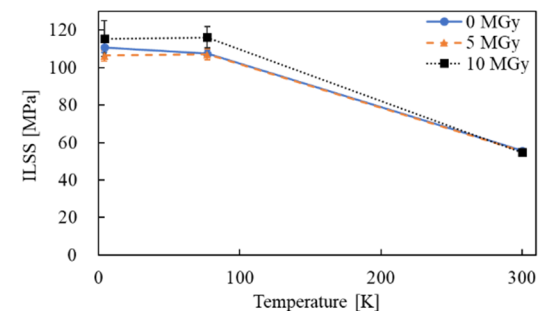


Fig.2 EP と硬化剤のみの樹脂のガンマ線照射前後の ILSS, (a)真空含侵法, (b)プリプレグ法

Lバンドライナックを用いた超高線量率電子線照射の殺細胞効果

大阪大学大学院医学系研究科 保健学専攻^a、重粒子線治療学寄附講座^b、産業科学研究所^c

皆巳 和賢^{a*}、八木 雅史^b、清水 伸一^b、水田 好雄^c、山下 泰信^c、中野 和美^c、室屋 裕佐^c、
誉田 義英^c、細貝 知直^c

Cell-killing effect of ultra-high dose rate electron irradiation using L-band linac.

Osaka university graduate school of medicine division health sciences^a, Dept. of heavy particle therapy^b,
SANKEN^c

Kazumasa Minami^{a*}, Masashi Yagi^b, Shinichi Shimizu^b, Yoshio Mizuta^c, Yasunobu Yamashita^c, Kazumi
Nakano^c, Yusa Muroya^c, Yooshihide Honda^c, Tomonao Hosokai^c

The behavior of cells irradiated at ultra-high dose rates has attracted much attention. In particular, the phenomenon called “sparing effect,” in which the cytotoxic effect of radiation on cells is attenuated, has the potential to be a new radiotherapeutic strategy due to the difference in the response of cancer and normal cells to radiation. However, the sparing effect itself is not easily observed in cell experiments, and the mechanism of the phenomenon is often unclear. We have established the world's first ultra-high dose rate irradiation system using the same irradiation system for three different types of radiation (electron, proton, and carbon beam). We have already succeeded in observing the sparing effect with carbon and proton beams. In this project, we started experiments to compare the cellular response after ultra-high dose rate irradiation with that after electron beam irradiation. The achievement of this study was the establishment of a cell experiment system with an ultra-high dose rate with electron beams, and the drawing of a cell survival curves.

非常に高い線量率で照射された細胞の挙動が注目されている。特にsparing effectと呼ばれる、細胞における放射線の殺細胞効果が減弱する現象は、がん細胞と正常細胞の放射線に対する応答の違いにより、新たな放射線治療戦略となり得る可能性を秘めている。しかしながら、sparing effect自体の観察が細胞実験で容易でなく、現象メカニズムも不明なことが多い為、研究が進まない側面もある。我々は、世界で初めて同一照射系を用いた超高線量率照射システムを異なる3線質（電子線、陽子線、炭素線）それぞれで確立した。既に、炭素線と陽子線ではsparing effectを観察することに成功した。本課題では、これまで得られた超高線量率照射後の細胞応答を電子線照射と比較検討することを目的として実験を開始した。

本実験の細胞は、HSGc-C5（ヒト唾液腺がん細胞株）、Nuli-1（ヒト細気管支上皮細胞株）、HDF（ヒト皮膚線維芽細胞株）の3種に対して、25MV電子線を超高線量率(>10⁸ Gy/s)で照射した。照射線量は、1, 2,

4, 8, 10, 14 Gyとし、照射後colony formation assayにて細胞生残率を評価した。その結果は、図1の通りになる。

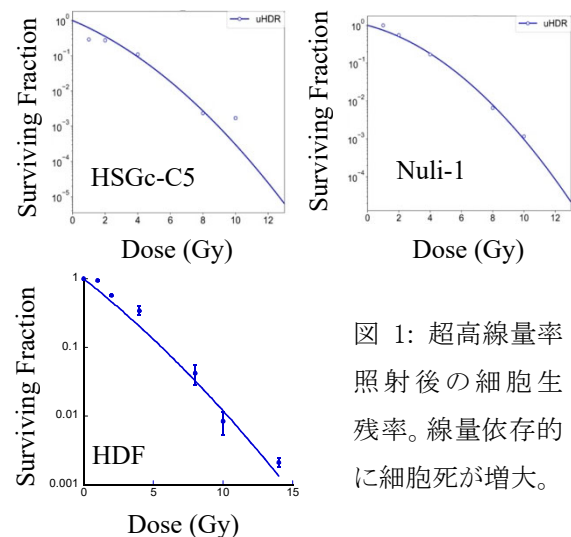


図 1: 超高線量率照射後の細胞生残率。線量依存的に細胞死が増大。

本研究課題では、これから通常線量率で照射された細胞の生残率曲線と本結果を比較することで、超高線量率電子線照射の効果を検証していく。

Lバンドライナックを用いた FLASH 効果探索のための超高線量率電子線照射場の構築

大阪大学大学院医学系研究科重粒子線治療学^a、大阪大学産業科学研究所^b、大阪大学大学院医学系研究科保健学専攻^c、大阪大学大学院医学系研究科放射線治療学^d

八木雅史^{a*}、水田好雄^b、菅田義英^b、室屋裕佐^b、皆巳和賢^c、細貝知直^c、清水伸一^a、小川和彦^d

Ultra-high dose-rate electron irradiation field for searching FLASH effect using L-band linac

Dept. of Carbon Ion Radiotherapy, Osaka University Graduate School of Medicine^a, Sanken, Osaka University^b, Division of Health Sciences, Osaka University Graduate School of Medicine^c, Dept. of Radiation Oncology, Osaka University Graduate School of Medicine^d

Masashi Yagi^{a*}, Mizuta Yoshio^b, Yoshihide Honda^b, Yusa Muroya^b, Kazumasa Minami^c, Tomonao Hosokai^b, Shinichi Shimizu^a, Kazuhiko Ogawa^d

The FLASH effect has been attracting attention in recent years. However, the mechanism of the FLASH effect is currently unknown. In Japan, there are few facilities that can perform ultra-high dose rate irradiation experiments, and various experiments to elucidate the FLASH effect have not yet been performed. The purpose of this study is to construct an irradiation system for biological experiments using L-band linac in order to investigate the effect of beam structure on the FLASH effect. We found that the physical characteristics of the constructed irradiation system could be used for biological experiments.

放射線治療は手術、薬物療法と並ぶがんの3大治療法の1つである。がん放射線治療は、臓器の機能と形態の温存を可能とする。X線、電子線、陽子線、重粒子線などが使用される。放射線の電離作用により細胞内のDNAを切断してがん細胞に損傷を与える。

近年FLASH効果が注目されている(1)。FLASH効果とはFLASH効果はある閾線量率及び投与線量以上にて生じる抗腫瘍効果を維持し、正常組織への損傷を減らす効果をいう。複数の線質及び生物でFLASH効果が確認されており、FLASH効果により投与線量の増加や副作用の低減が見込まれている。放射線治療はがんと正常臓器の放射線に対する損傷の差を利用しているため、FLASH効果の利用による放射線治療の治療効果の向上が期待されている。

現時点でFLASH効果の機序は分かっていない。本邦では超高線量率照射実験が可能な装置がほとんどなく(2)、FLASH効果解明のための様々な実験

ができていないのが実情である。本研究ではFLASH効果におけるビーム構造の影響を調べるために、Lバンドライナックを用いた生物実験用照射システムを構築することを目的とした。

本研究は①電子線ビームサイズの測定、②平坦分布を得るためのモンテカルロシミュレーション、③生物実験用照射系での線量測定(図1)の3ステップで行った。電子線ビームサイズの測定にはGafChromic Film (EBT3)を使用し、EPSON GTX830でスキャンしたフィルムをImageJを用いて解析した。モンテカルロシミュレーションにはPHITSを使用した。絶対線量の測定にはKSCN水溶液を用いたパルスラジオリシス計測系を使用した。

フィルムで得られた画像に対してガウス分布でフィッティングを行い、電子線ビームサイズを半値幅16 mmとしてモンテカルロシミュレーションの入力値とした(図2a)。モンテカルロシミュレーションにより照射野領域±8 mmは平坦度±3%以内と推定された(図2b)。

* M. Yagi, 06-6879-3482, m.yagi@radonc.med.osaka-u.ac.jp

細胞照射位置での線量プロファイルを示す(図2c)。ビームの平坦度は細胞照射領域内で $\pm 12.5\%$ 程度となった。

1パルスあたりの線量率がFLASH効果に関与している可能性が考えられている。本研究で利用した超高線量率電子線の1パルスあたりの線量率は 6.20×10^8 Gy/sであり、これは他の研究で使用されている電子線照射システムと比べても類をみない高さの線量率である。 10^6 Gy/sを超えたあたりからFLASH効果の観測が報告されているため、構築した照射系を利用した生物実験の結果が待たれる。

またFLASH効果を起こすには大線量(10 Gy以上)が必要とされており、大線量を短時間で照射できるのかも重要となっている。構築した照射系では3.95 Gyを超えると複数パルスを用いた照射が必要となる。繰り返し周波数が3 Hzであるため総照射時間が長くなる。1パルスあたりの線量率の高さか大線量を短時間に照射するかのどちらかがFLASH効果に関係しているかが、構築した照射系から判明する可能性がある。

構築した生物実験用電子線照射システムを用いて生物実験を実施した。結果は同報告書に掲載されている(阪大・皆巳ら)ため、そちらを参照されたい。今後Sバンドライナックにおいても生物実験用照射システムを構築し、ビームのパルス幅の違いがFLASH効果に及ぼす影響を評価する予定である。

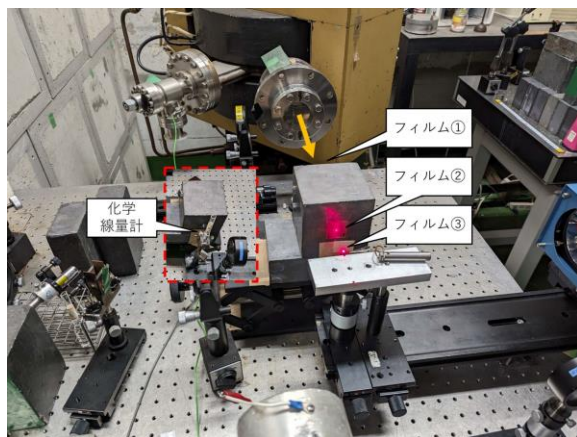


図1 測定系。フィルム③の位置が細胞照射位置。

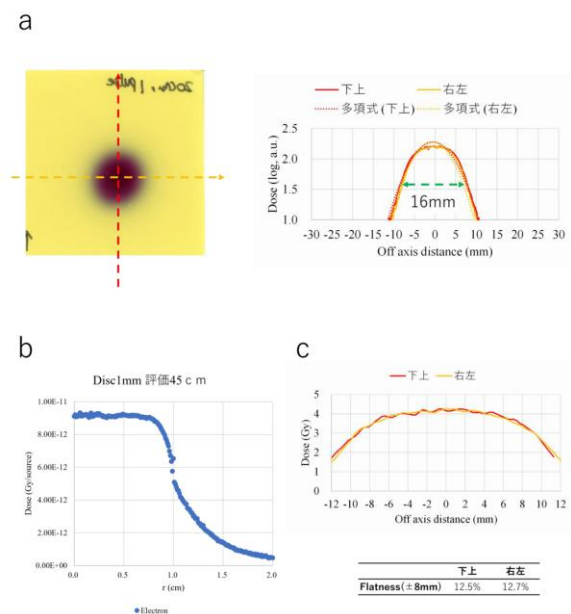


図2 a) 電子線ビームサイズ。b) モンテカルロシミュレーションによる照射野領域の推定。c) 細胞照射位置での線量プロファイル。

Reference

- 1) V. Favaudon: *Sci. Transl. Med.* **6** (2014) 245ra93.
- 2) M. Yagi: *Anticancer Res.* **43** (2023) 581.

COMET Phase-I 用の Slow Control System で用いるバッファの放射性耐性評価

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻青木研究室^a

蔭山裕士^{a*}、吉田学立^a、上野一樹^a

Evaluation of the radiation hardness of a buffer module for the Slow-Control system in COMET Phase-I

Graduate School of Science, Dept. of Physics^a

Yuto Kageyama^{a*}, Hisataka Yoshida^a, Kazuki Ueno^a

COMET Phase-I is an elementary particle physics experiment designed to search for the very rare decay process, μ -e conversion, which is strongly suppressed in the Standard Model. The preparation of the detector and electronics for COMET Phase-I is currently ongoing. To operate all instruments, including the detector and electronics, stably, the Slow-Control System (SCS), which monitors environmental information such as atmospheric pressure, is very important. Some sensors for the SCS are located several tens of meters away from the detector to avoid radiation damage. A buffer that raises the sensor signal voltage, which decreases with the distance, is being considered, and its gamma-ray tolerance was evaluated.

素粒子物理における物理現象は標準模型によって概ね矛盾なく説明が可能であるが、一方でまだよくわかっていない現象も多く、新しい物理法則が存在すると考えられている。そうした謎に迫る実験の1つとして我々はCOMET Phase-I実験を推進している。この実験は、素粒子ミューオンが非常に稀に電子に化けるような反応(μ -e転換過程)を探索するものであり、非常に稀であるが故、世界最大級強度のミューオンを利用する。現在、この実験の準備を進めているところであり、検出器や信号処理のための電子回路基板の開発、評価、実機建設等を行っている。こうした装置を実験期間中安定に動作させるためには、気圧や温度等の環境情報を常に監視する必要があり、そのようなシステム(Slow-Control System(SCS))の構築も並行して進めている。しかし上記の通り最大級強度のビームを用いるため、検出器周りで発生するガンマ線等の放射線量は非常に高くなることが予想されており、SCS用センサーは放射線耐性が必須であり、さらにセンサーのデータ取得、処理用PC等は放射線の影響が少なくなるよう数10mセンサーから離れたところに設置する必要がある。一方、このように距離を

離すと、センサー信号は減衰してしまうという問題が生じる。そこで、我々は信号用バッファモジュールをセンサー付近に設置し、この問題の解決を図っている。当然ながら、このバッファモジュールも放射線耐性を有する必要があるため、本研究ではその耐性の評価を行った。既に耐性を評価済である温度・湿度・気圧センサー(Bosch BME280)と選定したバッファ(Texas Instruments P82B715)を接続し、外部PCからアクセスすることでデータ取得を行った。図1のように、1 kGyの照射に達しても問題なくデータを取得することができた。今後はこのバッファを用いた実機SCSモジュールの開発を進める予定である。

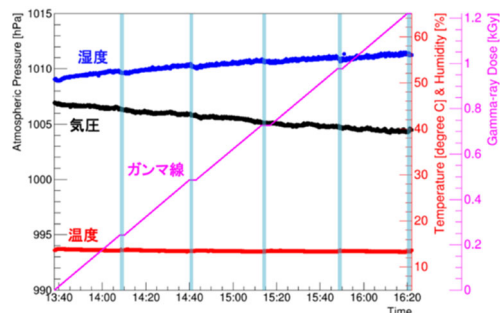


図1 照射結果。センサーデータ(温度:青、気圧:黒、湿度:赤)がガンマ線量(桃)と関係なく取得できていることがわかる。

* Y. Kageyama, 06-6850-6739, y-kageyama@epp.phys.sci.osaka-u.ac.jp

高強度赤外光照射による物質創成と新規物性発現

永井正也^a, 誉田義英^b,

^a大阪大学基礎工学研究科, ^b, ^c大阪大学産業科学研究所

我々はイットリア部分安定化ジルコニアに 4 THz のフォノンに共鳴した THz 光を照射することで、単斜晶へのマルテンサイト変態を起こすことを初めて明確にした。また Si 基板上に作成した VO₂ 薄膜においては、金属絶縁体相転移温度近傍でメタマテリアルのふるまい、電場増強に由来する信号を観測した。

【研究目的】

電子メタデバイスは、電磁波のサブ波長操作を利用しており、これにより従来の材料では不可能だった機能を示すことができる。例えば、ダイオードやトランジスタの高出力高速動作化に貢献することが期待される。現在までさまざまな手法でメタ構造が作製されているが、簡便な手法として材料の自己組織化的な挙動を用いればいいのではないかと考えた。そのため、金属-絶縁体相転移 (MIT) を示す強相関電子系材料である VO₂ に注目した。VO₂ では、熱や光、電場などの僅かな外部刺激によって金属絶縁体転移が起こる。この臨界温度近傍では、絶縁体相と金属相との相分離が起こり、自己組織化された金属構造が形成される。したがって VO₂ 金属相を不均一にナノスケールで空間分布させることで、Si デバイスに組み込むことができる。本研究では高強度 THz パルス光を照射することで Si のアバランシェ効果と VO₂ 金属ナノ不均一構造のギャップアンテナ構造が相互作用し、非線形な電場増強が生じることを検証する。

【実施内容】

Si 基板(n-type, P doped、抵抗値: 1-10 Ω·cm)上に VO₂ 薄膜を作製し、大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設 L バンド電子ライナックをベースにした THz-FEL を用い、高強度 THz 波に照射による非線形応答性を系統的に評価した。THz 照射後に現れる電流変化を伝導度の増加として検出した。この信号は温度とともに徐々に大きくなり、50~60°C での VO₂ の相転移付近で信号強度が最大となる。これは相転移温度近傍で生じた VO₂ 金属相の不均一空間分布に起因すると考えられる。

【代表的な研究成果】

M. Nagai, Y. Higashitani, M. Ashida, K. Kusakabe, H. Niioka, A. N. Hattori, H. Tanaka, G. Isoyama, and N. Ozaki, Terahertz-induced martensitic transformation in partially stabilized zirconia, Communications Physics, 6 88 (2023).

テラヘルツ FEL をもちいた非線形光学応答の研究

中嶋誠^a, 王 有為^a, 加藤康作^a, 菅田義英^b, 磯山悟朗^b

^a大阪大学レーザー科学研究所, ^b大阪大学産業科学研究所

テラヘルツ自由電子レーザー(THz-FEL)照射による非線形光学応答の探索を行い、本研究では、半導体をはじめとする固体試料において、テラヘルツ自由電子レーザーを照射することによって生じるアブレーションや微細周期構造生成の観測に成功した。テラヘルツ波を螺旋位相差版によりボルテックスビームに変換し、そのパルスによってアブレーションを生じさせることで渦巻き状の構造が得られることが分かった。

【研究目的】

これまでに我々はテラヘルツ自由電子レーザー励起によって、光記録材料に用いられる GST 試料に照射することによって、テラヘルツ波によるアブレーションが生じることを世界に先駆けて報告した。その際に、偏光方向に依存した微細周期表面構造 (LIPSS) が生じることも報告しており、従来のガウシアンパルスによるものから、ボルテックスビームに変換することによって、LIPSS が現れる様子がどのように変化するかを調べた。

【実施内容】

テラヘルツ自由電子レーザーの出射口に、螺旋位相差版を設置することにより、ボルテックスビームに変換した。ビームパターンの確認により中心部に特異点が見えており、ボルテックスビームに変換されていることが確認された。GST 試料に照射することにより、アブレーションが生じることも確認した。ボルテックスビームによって誘起されるトルクによって、アブレーションのパターンが螺旋状に変化することが確認された。ボルテックスビームの螺旋の向きを逆向きにするにより、パターンも逆向きになることが確認された。世界的にみても、テラヘルツ自由電子レーザーにて、ボルテックスビームに変換し、アブレーション実験を実施した初めての成果となる。

【代表的な研究成果】

(優秀発表賞を受賞) 2023 年度レーザー学会 関西支部、中国・四国支部連合 若手学術交流研究会, “テラヘルツ自由電子レーザー誘起による 2 タイプ表面微細周期構造の生成”, 王有為, 楊 子溟, 加藤康作, Verdad C. Agulto, 牧野孝太郎, 磯山悟朗, 中嶋誠.

シンチレーションの前駆励起状態のパルスラジオリシスによる観測

越水正典^a, 室屋裕佐^b

^a 静岡大学電子工学研究所, ^b 大阪大学産業科学研究所

液体シンチレータにおけるエネルギー移動過程において、電荷再結合は溶媒のみで生じ、溶質となる蛍光体分子への逐次電荷移動による再結合は生じないとするのが定説である。本研究では、アニオンやカチオン補足剤を添加した液体シンチレータにおいて、溶質分子のカチオンラジカルに帰属される過渡吸収帯を発見し、電荷移動過程も同様に生じることを明らかにした。

【研究目的】

シンチレータにおける低いシンチレーション収率は、多くの場合、ホスト（溶媒）から発光中心（蛍光分子）への低いエネルギー移動効率に起因する。有機溶媒に対して DPO や POPOP などの第一・第二溶質を添加した一般的な液体シンチレータにおいて、シンチレーション収率を限定するのは第一溶質へのエネルギー移動効率である。従来、このエネルギー移動過程は、トルエンの電離・再結合後の共鳴エネルギー移動だとされてきた。一方で、ポリスチレンをベースとしたプラスチックシンチレータにおいては、ホストポリマーから第一溶質へのエネルギー移動過程として、逐次電荷移動の寄与を指摘する研究報告も存在する。そこで、電子構造の類似した液体シンチレータにおいても同様の過程が生じているのか、カチオン捕捉剤としてトリエチルアミン（TEA）を添加した液体シンチレータについて、パルスラジオリシスにより中間化学種の分析を行った。

【実施内容】

DPO のシクロヘキサン溶液を試料とし、TEA の添加の有無での過渡吸収スペクトルを測定した。測定には、大阪大学産業科学研究所の測定系を用いた。時間分解過渡吸収スペクトルを図 1 に示す。700 nm 付近の吸収帯が TEA 無添加の試料で観測されたが、TEA 添加試料ではこの吸収帯は観測されなかった。このことから、この吸収帯は DPO のカチオンラジカルに帰属され、DPO への電荷移動過程が存在することが明らかとなった。

【代表的な研究成果】

越水正典, 室屋裕佐, 「パルスラジオリシスによる液体シンチレータにおける電荷移動過程の解析」、第 66 回放射線化学討論会、2023 年 9 月 28～29 日、名古屋大学東山キャンパス、名古屋

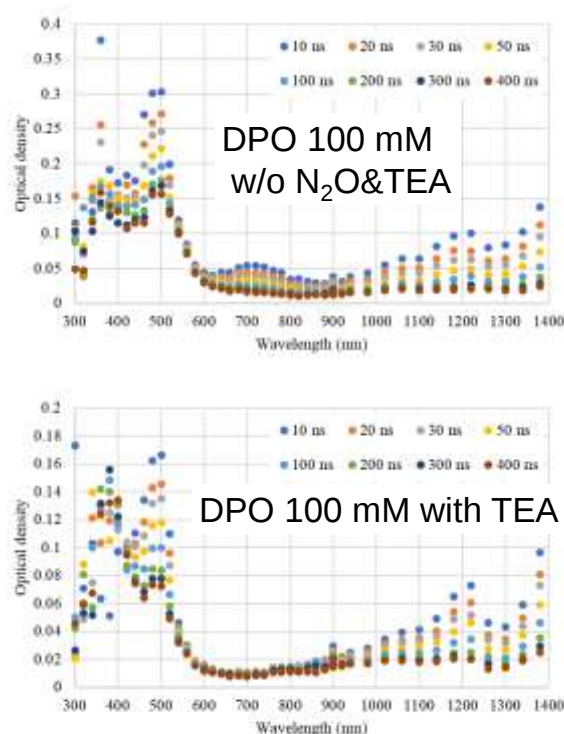


図 1 TEA 無添加および添加した DPO のシクロヘキサン溶液の時間分解過渡吸収スペクトル

パルスラジオリシス法を用いた非均質反応場等での過渡現象に関する研究 ～水の分解ラジカルの反応の塩効果の解明と評価～

永石隆二^a, 桑野涼^a, 伊藤辰也^a, 神戸正雄^b, 楊金峰^b

^a 日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター, ^b 大阪大学 産業科学研究所

福島第 1 原発事故では冷却水に使われた海水中のハロゲン化物が水の放射線分解に影響を及ぼすため、汚染水中の生成物や溶存種の挙動を従来の均一反応計算で解析することは極めて困難である。従って、分解生成物の収量 (G 値) や放射線誘起反応の塩濃度依存性 (塩効果) の評価・解明が急務である。そこで本研究では、電子線パルスによる照射 (パルスラジオリシス法) を行い、近年照射容器等に使われている耐放射線性樹脂 (Kapton, PEEK) が水の放射線分解に及ぼす影響を調べた。

【研究目的】

福島第 1 原発事故では冷却水に「海水」が使われ、その塩分が放射線分解による水素発生や腐食に重大な影響を及ぼすため、分解生成物 (ラジカル・分子) の収量や反応の塩濃度依存性 (塩効果) を解明し、科学的に合理性を有した解析・評価を実現することが急務である。その一環として本課題では、放射線誘起の反応速度の塩濃度 (イオン強度) 補正を実現するために、線形加速器 (LINAC) の電子線を用いたパルスラジオリシス法による過渡反応データ取得を行っているが、今年度は、近年照射容器等に使われている耐放射線性樹脂 (Kapton, PEEK) が水の放射線分解に及ぼす影響を調べた。

【実施内容】

これまで、海水に異なる濃度で溶存する 2 つのハロゲン化物イオン (X^- : Cl^- , Br^-) が水の分解生成物の水酸化ラジカル ($\cdot OH$) と 2 段階で反応することを実証し、海水中の水の分解収量等を評価した。一方、Co-60 ガンマ線等によって定常照射後の生成物分析で分子生成物の塩効果を評価してきたが、照射容器の一部／全部に Kapton や PEEK の耐放射線性樹脂を用いると、水溶液試料に接する樹脂が $\cdot OH$ と相互作用する可能性が見出された。近年これらの樹脂が照射容器等として、水等の液体試料に接触して使われることがあるため、これを明らかにすることは実験化学的に極めて重要である。

パルスラジオリシス法で上記相互作用について調べた結果として、水溶液を入れる空間と樹脂フィルムを交互に積み重ねた試料の過渡吸収を観測した例を図 1 に示す。空間に水があると、水和電子 (e_{aq}^-) の吸収が観測されたが、それを除いて、水の有無によらず、図 1 の樹脂の活性状態と考えられる吸収が観測された。この活性状態は二つあり、上記の樹脂と $\cdot OH$ の相互作用が図中の水色の範囲と推定されることから、この相互作用の際の樹脂は、非照射下と異なり、放射線照射下特有の状態であることが分かった。

【代表的な研究成果】

耐放射線性樹脂の水の放射線分解に及ぼす影響

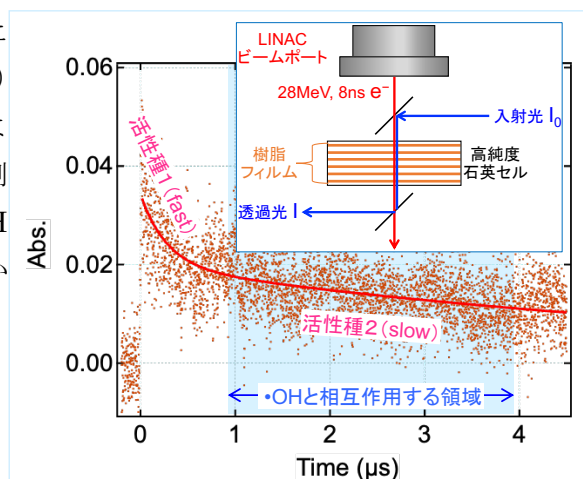


図 1 放射線環境下の Kapton の活性状態の過渡吸収例 (石英セル内に樹脂フィルムを積層, 720nm, 室温)

溶液中の放射線誘起化学反応に対する磁場効果

若狭雅信 ^a, 楊金峰 ^b, 神戸正雄 ^b

^a 埼玉大学理工学研究科, ^b 産業科学研究所

溶液に対し放射線照射するとイオン化が起こり、過剰電子とラジカルカチオンが生じる。これらはそれぞれラジカルである。このジェミネートペアの反応ダイナミクスに対する外部磁場による変化、つまり、磁場効果を測定することで、これまであまり検討がされてこなかったイオン化におけるラジカル対のスピン相関に関する基礎研究を行った。

【研究目的】

放射線誘起化学反応ではイオン化に始まる化学反応が特徴的で顕著な化学反応である。比較的誘電率の小さな溶液中では、イオン化で生じたカチオンラジカルと過剰電子のペア、すなわちジェミネートペアの再結合により相当量のイオンラジカルが消失する。ここで、このジェミネートイオン再結合反応の生成物、特に励起状態の生成が顕著となるがイオン対のスピン相関がどの程度保たれているか、という情報は十分に明らかとなっていない。放射線化学初期過程の解明には、ラジカル対のスピン相関時間や、再結合過程におけるスピン状態の理解が重要である。そこで、外部磁場の印加により、このジェミネートイオン再結合過程に摂動を与え、中間体のダイナミクスや量、あるいは、生成物の量に対する磁場効果 (MFEs) を観測し、放射線化学初期過程におけるスピンダイナミクスを解明する。

【実施内容】

無極性溶媒の飽和炭化水素である *n*-ドデカン、デカリン (*cis-trans* 混合物)、スクワランについてそれぞれ磁場を印加し、または、無磁場においてナノ秒パルスラジオリシス測定を行った。それぞれの溶媒中で生じる、励起状態、ラジカルカチオン、および、過剰電子を観測し、MFE の大きさを相対収量 ($R(B)$) として評価した。ここで、 B テスラ (T) の磁場下においては、 $R(B) = R(BT) / R(0T)$ である。また、パルスラジオリシス測定は吸光度 (*Abs.*) が得られるため、評価対象の過渡種が観測できる波長を選択することで、 $R(B) = Abs.(BT) / Abs.(0T)$ とできる。

【代表的な研究成果】

特になし。

ガンマ線エネルギーの化学エネルギーへの変換 ～金属共存下における二酸化炭素・水の分解反応促進～

大塚哲平^a, 藤乗幸子^b, 臼井利明^a

^a近畿大学理工学部・エネルギー物質学科, ^b大阪大学産業科学研究所

炭酸水に Ni 棒を共存させた状態で γ 線を照射することで、炭酸水の放射線分解による CH_4 の生成促進を確認した。

【研究目的】

放射性廃棄物から発生する放射線エネルギーを化学エネルギーに変換し、生成物質を利活用できれば、放射性廃棄物の社会受容性向上に貢献できるのではないかと考えられる。本研究では、水 (H_2O) に高压で CO_2 を溶解させた炭酸水に γ 線を照射することによる、 H_2O と CO_2 の放射線分解と再結合に伴う CH_4 生成（メタネーション）を実証することを目的とした。ただ、 γ 線は透過力が大きいので、炭酸水との相互作用は起こりにくい。そこで、 γ 線と金属の相互作用で生じた低エネルギー二次電子[1]や触媒効果が炭酸水の放射線分解に伴う CH_4 生成挙動に及ぼす影響を調べた。

【実施内容】

図 1 に γ 線照射の概念図を示す。ステンレス容器（内径 32 mm × 150 mm）に石英ガラス製試験管（内径 28 mm × 135 mm）を挿入し、Ni 棒（ $\phi 1 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ）を密に配置した。水を 50 mL 注水し、脱気処理を 5 分間行った後、 CO_2 を 0.6 MPa で 30 分間加圧し炭酸水を作製した。また比較として、Ni 棒を配置せずに、炭酸水（80 mL）のみの試験体も作製した。

阪大産研量子ビーム科学研究施設にて ^{60}Co 線源（64.55 TBq）を用いて、照射距離 10 cm、照射時間 6 時間として γ 線照射実験を行った。照射線量は 11.8 kGy となった。

照射後、容器内のガス成分をガスクロマトグラフィにより定量した。

図 2 に Ni 棒を共存させた炭酸水に γ 線照射した後のガス成分のクロマトグラムを示す。CO および CH_4 のピークが新たに確認された。これらは、炭酸水中の CO_2 の放射線分解と、 H_2O と CO_2 の放射線分解に伴う化学反応により生じたものと考えられる。炭酸水のみ γ 線照射した場合に比べると、Ni 棒を共存させた炭酸水の単位体積あたりの CH_4 生成量は 7%増加した。

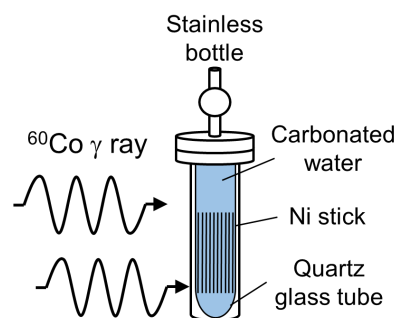


図 1 γ 線照射の実験概念図

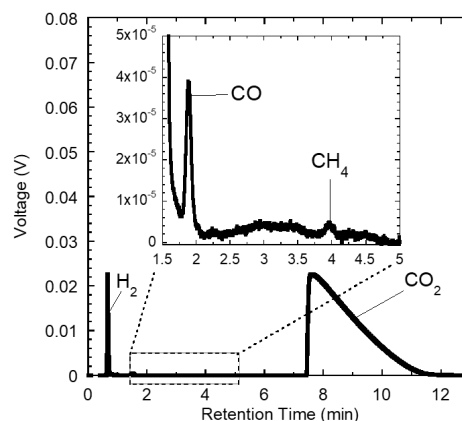


図 2 γ 線照射後のガス成分のピーク

【代表的な研究成果】

日本原子力学会 2023 年秋の大会, 1B02, 名古屋大学, 2023 年 9 月 6 日

日本原子力学会 2024 年春の年会, 3E05, 近畿大学, 2024 年 3 月 28 日

電子スピン共鳴(ESR)法による γ 線照射効果の研究

谷篤史^a, 藤乗幸子^b, 磯谷舟佑^a, 梶田侑弥^c

^a 神戸大学人間発達環境学研究科, ^b 産業科学研究所, ^c 京都大学理学研究科

ケイ酸をホスト分子とするかご構造にゲスト分子としてイソプロピルアミンを包接したシリカクラスレートを合成し、それに 77 K で γ 線を照射し、電子スピン共鳴 (ESR) 法を用いて測定したところ、主に水素原子と $(\text{CH}_3)_2\dot{\text{C}}\cdot(\text{NH}_2)$ ラジカルが観測された。230 K 付近で温度を保持して観測したところ、水素原子の減少量と $(\text{CH}_3)_2\dot{\text{C}}\cdot(\text{NH}_2)$ ラジカルの増加量が同程度であったため、イソプロピルアミンシリカクラスレート内で水素原子がイソプロピルアミンから水素を引き抜く反応が示唆された。

【研究目的】

千葉石とは、ケイ酸 (SiO_2) をホスト分子とするかご構造に炭化水素などのガス分子をゲスト分子として包接した化合物であるシリカクラスレートの一種である。千葉石内の有機ラジカルを用いて、千葉石の ESR 年代測定が可能かについて検討を行ったところ、有機ラジカル種とゲスト分子の間で水素引抜反応が起こることが示唆された。ESR 年代測定に必要な総被曝線量の評価には千葉石構造におけるラジカル種の挙動を調べる必要があり、そのためにはゲスト分子の組成を制御したシリカクラスレートが必要となる。

本研究では、イソプロピルアミンを包接した千葉石と同様の結晶構造を持つシリカクラスレートを合成し、 γ 線照射をすることによりラジカルを生成し、シリカクラスレート内での温度変化によるラジカル種の挙動を調べた。

【実施内容】

オルトケイ酸テトラエチル (TEOS) と水を混合し、加水分解させてオルトケイ酸溶液を作製した。これにイソプロピルアミン水溶液を混ぜ、テフロン内筒耐圧容器に入れて 180 °C で約 1.5 か月静置した。合成された試料を 77 K で γ 線照射し、120 K と 360 K で ESR 測定をしたところ、主に水素原子と $(\text{CH}_3)_2\dot{\text{C}}\cdot(\text{NH}_2)$ ラジカルが観察された。

さらに、水素原子に対して 225-240 K で等温アニーリング実験を行ったところ、水素原子は一次反応での減少を示し (図 1)、その活性化エネルギーは $65 \pm 4 \text{ kJ/mol}$ であった。また、アニーリング実験における水素原子の減少量と $(\text{CH}_3)_2\dot{\text{C}}\cdot(\text{NH}_2)$ ラジカルの増加量が同程度であったため、シリカクラスレート内で水素原子がイソプロピルアミンから水素原子を引き抜き、水素分子と $(\text{CH}_3)_2\dot{\text{C}}\cdot(\text{NH}_2)$ ラジカルが生成している可能性が示唆された。

【代表的な研究成果】

Tamai, N., Isogai, S., Yokoyama, Y., Tani, A. (2024) Hydrogen atom in γ -irradiated synthetic isopropylamine silica clathrate. *Radiat. Phys. Chem.* in press.

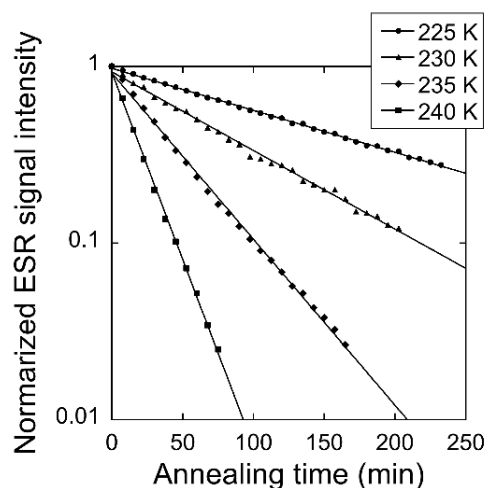


図1 225-240 K での等温アニーリング実験における水素原子量の変化

テラヘルツ自由電子レーザーを用いた短パルスレーザー励起半導体 表面キャリアダイナミクスの研究

川瀬啓悟^a, 誉田義英^b

^a 量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門, ^b 大阪大学産業科学研究所

テラヘルツ自由電子レーザーとフェムト秒レーザーとを組み合わせることで、光励起半導体キャリアダイナミクスをマイクロ秒オーダーにわたって計測する。フェムト秒レーザーで半導体ウェハ上に高密度キャリアを励起し、テラヘルツ自由電子レーザーのパルス列によりそのダイナミクスをプローブする。本研究課題においては特に、不純物を含まない GaAs と Si, Ge の三種類の半導体試料に対して、光励起高密度キャリアによるテラヘルツパルスの反射応答とその時間発展を計測した。

【研究目的】

不純物を含まない半導体の多くは中赤外からテラヘルツ領域の電磁波に対して、よい透過特性を示す。一方、それらの半導体は、可視から近赤外領域の光でバンドギャップを超えることが可能で、高強度パルスを照射することにより、テラヘルツ領域の電磁波に対する高反射特性を付与できる。そこで本研究では、テラヘルツ自由電子レーザー(THzFEL)とフェムト秒レーザーとを組み合わせることによる光励起半導体キャリアダイナミクスのマイクロ秒オーダーにわたる計測研究を目的としている。

【実施内容】

大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設の L バンド電子線形加速器による高強度の THzFEL とフェムト秒チタンサファイアレーザーを用いて、不純物を含まない GaAs ウェハ（厚さ 0.5 mm）による THz パルス列からの単一パルスの取り出しの研究を実施し、高エネルギー単一 THz パルスの取り出しを確認した。

また、Ge、Si ウェハ（ともに厚さ 0.5 mm）と合わせて、半導体表面に光励起した高密度キャリアの時間発展を THz パルスの反射と透過特性を計測することによる、キャリアダイナミクスの研究を実施した。直接遷移型半導体である GaAs は間接遷移型半導体である Ge、Si と比べて 1 桁以上速い励起キャリアの緩和時間を示している。その詳細を調査・研究することが今後の課題である。

【代表的な研究成果】

本研究は、Keigo Kawase and Goro Isoyama, “High-intensity single-pulse extraction using a laser-activated GaAs reflective switch for a terahertz free-electron laser”, Nucl. Instrum. And Meth. in Phys. Res. A 1056, 168618 (2023)として学術雑誌上に発表されている。

坂田洞察^a、大和田明歩^a、室屋裕佐^b、沼川愉里加^a、酒井剛^a、中尾純^a

山口光^a、水田好雄^b、細貝知直^b、西尾禎治^a

^a大阪大学医学系研究科、^b大阪大学産業科学研究所

本研究は放射線照射時に入射方向に対し平行な磁場を印加した際に発生する細胞の放射線増感作用のメカニズム解明の為に、放射線の水分解を介し生成される OH ラジカルの受ける磁場効果を実験的に明らかにする取り組みである。本研究の成果により、電子線照射中に磁場を印加する事で、DNA 損傷の原因となる OH ラジカルの収量が増加することを世界で初めて見出した。

【研究目的】

2019 年、平行磁場印加による放射線感受性の増感という新しい現象が発見された。有望な仮説の一つとして、放射線分解によって誘発された化学種が平行磁場の効果によって細胞殺傷能力の増強を促している事が考えられる。OH ラジカルペアは結合し過酸化水素が合成されるが、磁場中では OH ラジカルペアがスピンの偏極を受け三重項を取ることからこの結合が阻害される。

本研究では、パルスラジオリシスの手法を用い、電子線照射中の磁場印加によって OH ラジカルの収量が増加するかを確認する。

【実施内容】

産業科学研究所の L バンドライナックを用い、パルスラジオリシス実験を行なった。ナノ秒パルスシングルスショットモードで約 28 MeV に加速した電子を、KSCN 主体の水溶液に照射した。照射軸上に 600 mT の平行磁場を発生させられる永久磁石を設置し、照射ビーム軸上に白色解析光を照射する。OH ラジカルを前駆体とする (SCN)²⁻ラジカルの吸収波長 472 nm の光の吸収を測定する事で、OH ラジカルの量を推定した。本研究では、KSCN 溶液の濃度依存性、S バンドライナックを用いたピコ秒パルスラジオリシスも実施した。

【代表的な研究成果】

昨年度、本研究を通し、磁場を印加する事で、放射線に誘発される OH ラジカルの収量が増加する事を見出した。本年度は磁場強度依存性を調べた。また、OH ラジカル収量の時間特性を調べる為、試料の濃度を変化させ OH ラジカルと試料の反応速度をコントロールした。図 1 に磁場印加前後の OH ラジカルの増加率を示す。増加率は磁場強度に従って増加する。試料の濃度依存性に関しては、系統的な変化が見取れず、さらなる検証が必要と考える。本研究の成果は国際学会[1]と修士論文[2]として発表した。

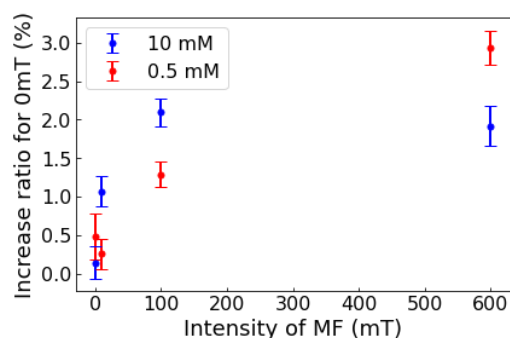


図 1：OH ラジカルの増加率

[1] A. Owada, D. Sakata, Y. Muroya et al. “Investigation of longitudinal magnetic field effects on OH radical” 2nd International Congress on Radiological Physics and Technology, April, 13-16, 2023, Yokohama, Japan

[2] 令和 5 年度 大阪大学大学院医学系研究科保健学専攻 修士論文 「高線量率電子線における外部静磁場下ヒドロキシルラジカル反応の検証」 大和田明歩

遠赤外・テラヘルツ自由電子レーザーを用いた新機能物質材料の創成

入澤明典^a，田中慎一郎^b

^a立命館大学 SR センター，^b受入研究所名大阪大学産業科学研究所

THz-FEL を用いて半導体表面処理を行い、誘起される周期構造の発現機構解明と新機能の開発を行った。プログラム制御によりレーザーパルスを様々な条件で照射し、大面積の試料作製と放射光を用いた分光測定により物性の解明を試みた。

【研究目的】

遠赤外光・テラヘルツ波はちょうど光と電波の中間に位置し、基礎から応用まで広い範囲で利用される電磁波領域である。物質科学の分野では分光法に用いられ、分子の回転・振動や固体の格子振動、フェルミ準位付近の自由電子励起など、プローブ光源として活用される。一方で、特に高輝度の自由電子レーザー（THz-FEL）では、分子振動励起や固体の電子励起を伴うポンプ光源としても利用するため、世界的に注目されている。本研究では、THz-FEL を用いて非線形応答領域での不可逆的固体励起現象による物性変化をテラヘルツ領域で発現し、その機構解明と新機能材料の開発を目的とする。

【実施内容】

半導体固体試料に THz-FEL を照射し、物質改変をおこなった。THz-FEL を外部からプログラム制御する制御系統を用い、ビームタイミングと同期した FEL 照射および計測をおこなった。試料は半導体 Si、イタリアとのプロジェクトで共同研究中である表面処理した金属などであるが、これらは THz 波長領域の FEL による特有の照射効果が知られている物質である。これらの FEL 照射実験を行った試料は立命館大学 SR セン

ターで赤外顕微分光、XAFS、光電子分光などの手法を用いて現在物性評価を行っている。

【代表的な研究成果】

入澤明典：「大阪大学 遠赤外・テラヘルツ自由電子レーザーを用いた利用研究」，放射光，日本放射光学会，34(3)，(2021)，pp. 163-174.

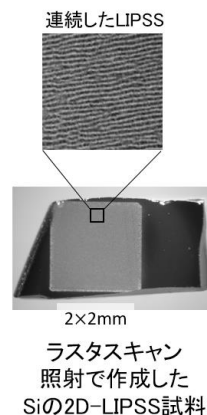


図1 Si ウエハに作成した THz-FEL による周期構造

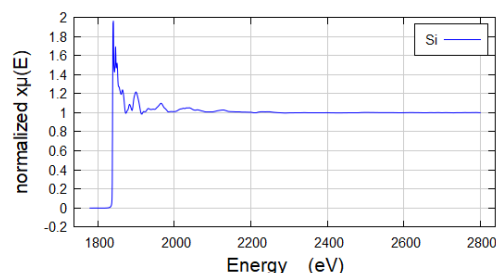


図2 Si ウエハの XAFS スペクトル

4. 年間行事報告

4-1 研究会報告

主催：令和5年度量子ビーム科学研究施設研究会

開催なし

協力：Q-BASIS2023

日時：令和5年4月24日—27日

場所：産業科学研究所

会議 URL：<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/QBASIS2023/>

4-2 委員会報告

4-2-1 量子ビーム科学研究施設共同利用専門委員会

開催なし

4-2-2 量子ビーム科学研究施設運営委員会

第44回 メール開催

メール審議期間：令和5年1月25日～令和5年1月26日

1) 令和5年度兼任Aについて

第45回 メール開催

メール審議期間：令和5年2月28日～令和5年3月1日

1) 令和5年度量子ビーム科学研究施設予算要求について

2) 令和5年度量子ビーム科学研究施設兼任教員Bについて

第46回 量子ビーム科学研究施設運営委員会

日時：令和6年2月6日（金） 10:00-10:30

場所：管理棟中会議室

1) 次期施設長について

2) 令和6年度兼任教員A,B候補者について

3) 令和6年度予算案について

4) 令和6年度の共同利用について

5) 概算要求結果について（ライナック棟改修工事）

6) その他

4-2-3 量子ビーム科学研究施設専門委員会

第 173 回量子ビーム科学研究施設専門委員会

日時：令和 5 年 4 月 19 日（水）13：00 - 13：50

- 1) テーマ採択 1 件（コバルト企業利用）
- 2) 令和 5 年度施設の体制について
- 3) コバルトの利用時間定義について

第 174 回量子ビーム科学研究施設専門委員会

日時：令和 5 年 5 月 17 日（水）13：30 - 13：50

- 1) コバルト棟受付の機能分担と部屋の活用について
- 2) 長部先生の退職による担当者（申し込み者）の変更について
- 3) 拠点を含む共同利用状況の調査対象について

第 175 回量子ビーム科学研究施設専門委員会

日時：令和 5 年 6 月 15 日（木）13：30 - 14：20

- 1) 後期共同利用について
- 2) ライナック棟改修工事にむけて
- 3) RF 電子銃ライナックの今後の整備方針について
- 4) マニピュレーターメンテナンスについて
- 5) 量子ビーム科学研究施設研究会の開催について
- 6) 共同利用専門委員会の開催について

第 176 回量子ビーム科学研究施設専門委員会

日時：令和 5 年 7 月 20 日（木）13：30 - 14：10

- 1) RF 電子銃ライナックの今後の利用について
- 2) 後期募集について
- 3) 後期マシンタイム案について
- 4) ESR 装置の今後の取扱いについて

第 177 回量子ビーム科学研究施設専門委員会

日時：令和 5 年 9 月 21 日（木）13：30 - 14：17

- 1) 量子ビーム科学研究施設及び関連設備利用規則について
- 2) 2023 年度後期募集について
- 3) L バンドライナックの土日における共同利用について
- 4) 後期マシンタイムについて
- 5) 概算要求の進捗状況について

第 178 回量子ビーム科学研究施設専門委員会

日時：令和 5 年 10 月 19 日（木）14：00 - 14：38

- 1) 放射線安全管理室員の確認
- 2) 今年度の研究会・成果報告会について
- 3) 後期の事務補佐員について
- 4) 共同利用専門委員会、運営委員会の開催スケジュールについて

第 179 回量子ビーム科学研究施設専門委員会

日時：令和 5 年 11 月 16 日（木）13：30 - 14：10

- 1) ナノ極限ファブリケーション分野の今年度の L バンドライナック利用料について
- 2) 令和 6 年度兼任教員(A・B) について
- 3) 来年度の非常勤職員について
- 4) 来年度の募集要項のスケジュールについて
- 5) 後期募集新規 1 件（コバルト）について
- 6) コバルト A ケーブの投光器の更新について

第 180 回量子ビーム科学研究施設専門委員会

日時：令和 5 年 12 月 21 日（木）13：30 - 13：58

- 1) 来年度の非常勤職員について
- 2) 令和 6 年度前期の募集について
- 3) 令和 6 年度兼任 A について

第 181 回量子ビーム科学研究施設専門委員会
日時：令和 6 年 1 月 18 日（木）13：30-14：40

- 1) 令和 6 年度特任研究員（非常勤）の契約更新について
- 2) 令和 6 年度兼任教員 B について
- 3) 量子ビーム科学研究施設長の推薦について
- 4) RF 電子銃の利用方法について
- 5) 令和 5 年度成果報告会について
- 6) 運営委員会について

第 182 回量子ビーム科学研究施設専門委員会
日時：令和 6 年 2 月 19 日（木）13：34-14：36

- 1) 令和 6 年度共同利用（前期）課題の採択について
- 2) いちょう祭の出展について
- 3) 成果報告会の日程について
- 4) 量子ビーム科学研究施設准教授について

第 183 回量子ビーム科学研究施設専門委員会
日時：令和 6 年 3 月 15 日（月）13：00-13：32

- 1) 令和 6 年度共同利用（前期）課題の採択について（追加・継続 1 件）
- 2) 施設の准教授公募について
- 3) 概算要求（設備）について

4-3 見学者リスト（団体）

日付	団体名（人数）
令和 5 年 6 月 5 日（月）	マチカネゼミ(7 名)
令和 5 年 8 月 3 日（木）	華中科技大学(化学与化工学院)(19 名)
令和 5 年 10 月 26 日（木）	和歌山県立向陽高校(18 名)
令和 5 年 11 月 14 日（火）	和歌山県立向陽高校(19 名)
令和 5 年 12 月 6 日（水）	愛媛県立松山南高校(38 名)

4-4 学生実験報告

3Dプリンターによるプラスチック構造体の作製と放射線照射効果の検討
（工学研究科 環境エネルギー工学専攻・秋山准教授）

2023 年度は全て対面での実験を実施した。

まず 3D CAD での作図指導を行い、学生がそれぞれ作図した

1 センチ角、体積分率 50%として自由に設計した図面をもとに

3D プリンターでポリ乳酸（PLA）製の成型体を作成し、0.5, 1, 2MGy のガンマ線照射を行った。

その他、ガンマ線照射以外の処理方法（化学処理や熱処理など）を学生に考えてもらい、

ガンマ線照射の影響との比較を行った。

処理前後のサンプルについて、成型体の圧縮試験と FT-IR 測定を行い、その解析を行った。

それらの結果から、放射線照射とその他の処理の違いを考察させた。

5. 放射線安全管理報告

5-1. 放射線安全管理報告

1. 令和5年度放射線業務従事者の登録と教育訓練

産研放射線施設業務従事者に対する教育訓練を下記のとおり行なった。

新規・継続・X線装置使用者（112名）Web等により実施した。

放射線業務従事者（継続）：RIセンター主催教育訓練大阪大学授業支援システムCLEで受講

放射線業務従事者（所内RI業務従事者新規登録者および学外量子ビーム科学研究施設利用者）：

第一回開催

日時：2023年5月12日（金）10：00－12：00

場所：WEBINAR形式

内容：概要と管理状況報告(30分)、放射線の人体に与える影響(30分)、放射性同位元素等の規制に関する法律（RI規制法）と産研の放射線障害予防規程（30分）、量子ビーム科学研究施設の利用の仕方(30分)

参加者：所内RI業務従事者新規登録者、学外量子ビーム科学研究施設利用者44名

第二回開催

日時：2023年11月14日（月）13：00－15：00

場所：WEBINAR形式

内容：概要と管理状況報告(30分)、放射線の人体に与える影響(30分)、放射性同位元素等の規制に関する法律（RI規制法）と産研の放射線障害予防規程（30分）、量子ビーム科学研究施設の利用の仕方(30分)

参加者：学外量子ビーム科学研究施設利用者2名

第三回開催

日時：2023年11月24日（金）10：00－12：00

場所：WEBINAR形式

内容：概要と管理状況報告(30分)、放射線の人体に与える影響(30分)、放射性同位元素等の規制に関する法律（RI規制法）と産研の放射線障害予防規程（30分）、量子ビーム科学研究施設の利用の仕方(30分)

参加者：学外量子ビーム科学研究施設利用者2名

2. 放射線施設の検査・点検、補修等及び線量測定

- ライナック、コバルト棟
 - ✧ 点検を令和 5 年 5 月 25～31 日、11 月 16～30 日の 2 回実施した。
 - ✧ 空間線量測定（45 箇所）：毎月行いすべて線量限度以下であった。
 - 第 2 研究棟 S114 号室
 - ✧ 点検を令和 5 年 5 月 10 日、11 月 17 日の 2 回実施し、問題はなかった。
 - ✧ 空間線量測定（8 箇所）：施設点検実施日に併せて行い、すべて線量限度以下であった。
 - 事業所境界
 - 空間線量測定（8 箇所）：毎月行いすべて線量限度以下であった。
3. その他
- 承認使用に関する軽微な変更に係る変更(令和 5 年 8 月 8 日)
 - 産業科学研究所予防規程の変更（令和 5 年 10 月 1 日）

6. 研究成果リスト

原著論文

No	論文タイトル	著者氏名	論文掲載誌名，発行情報
1	Recombination Dynamics of Electron–Hole Pairs in TlBr Crystals Probed by Transient Absorption Spectroscopy Using Pulsed Electron Beams	Masanori Koshimizu, Yusa Muroya, Mitsuhiro Nogami, and Keitaro Hitomi	Sensors and Materials 36 261-267(2024 1)
2	Extreme Ultraviolet Lithographic Performance and Reaction Mechanism of Polymeric Resist—Utilizing Radical- and Acid-Amplified Cross-Linking	Bilal A. Naqvi, Satoshi Enomoto, Kohei Machida, Yui Takata, Takahiro Kozawa, Yusa Muroya, Stefan De Gendt, and Danilo De Simone	Chem. Mater. 36 1459–1471(2024 2)
3	Dissolution dynamics of poly(4-hydroxystyrene-co-methacrylic acid) in tetraalkylammonium hydroxide aqueous solutions	Yutaro Iwashige, Kyoko Watanabe, Yuko Tsutsui Ito, Takahiro Kozawa, Kazuo Sakamoto, and Makoto Muramatsu	Jpn. J. Appl. Phys. 63 026504(2024 2)
4	Relationship between poly(4-hydroxystyrene) (PHS) and tetramethylammonium hydroxide (TMAH) concentrations during the development of PHS films in TMAH aqueous solution studied by a quartz crystal microbalance (QCM) method	Yuko Tsutsui Ito, Kyoko Watanabe, Yuqing Jin, Takahiro Kozawa, Kazuo Sakamoto and Makoto Muramatsu	Jpn. J. Appl. Phys. 63 018002(2024 1)
5	Shielding effect of underlayer against secondary electrons generated in substrate in extreme ultraviolet lithography	Takahiro Kozawa	Jpn. J. Appl. Phys. 63 016503(2023 12)
6	Design of High-Sensitive EUV Resist Materials based on Polyacetals	Hiroyuki Maekawa, Yutaro Iwashige, Hiroki Yamamoto, Kazumasa Okamoto, Takahiro	Journal of Photopolymer Science and Technology 36

No	論文タイトル	著者氏名	論文掲載誌名，発行情報
		Kozawa ,and Hiroto Kudo	31-39(2023 6)
7	Recovery of platinum group metal resources from high-level radioactive liquid wastes by non-contact photoreduction	Hanqin Weng, Yi Wang, Fuhai Li e, Yusa Muroya, Shinichi Yamashita, Sheng Cheng	Journal of Hazardous Materials 458 131852(2023 9)
8	Sensitization of polymethacrylate resist with adding acid-generating promoters upon exposure to EUV light	Kazumasa Okamoto, Akihiro Konda, Yuki Ishimaru, Takahiro Kozawa, Yasunobu Nakagawa and Masamichi Nishimura	Jpn.J.Appl.Phys. 62 116503(2023 11)
9	Analysis of resist images with pattern defects by Hough transform	Yuqing Jin, Takahiro Kozawa, Kota Aoki, Tomoya Nakamura, Yasushi Makihara, & Yasushi Yagi	Jpn.J.Appl.Phys. 62 086502(2023 8)
10	Reaction mechanisms of Sn-complex-side-chain polymer used for extreme ultraviolet lithography, studied by electron pulse radiolysis and γ -radiolysis	Yui Takata, Yusa Muroya, Takahiro Kozawa, Kohei Machida, Satoshi Enomoto, Bilal Naqvi, & Danilo De Simone	Jpn.J.Appl.Phys. 62 076502(2023 7)
11	Defect risks at interfaces of chemically amplified resists in extreme ultraviolet lithography process	Takahiro Kozawa	Jpn.J.Appl.Phys. 62 076501(2023 7)
12	Towards precise diagnosis time profile of ultrafast electron bunch trains using orthogonal terahertz streak camera	Xu Yang、 Song Yifang、 Tsai Cheng-Ying、 Wang Jian、 Liu Zhengzheng、 Qi Hong、 Fan Kuanjun、 Yang Jinfeng、 Meshkov O. I.	#REF!
13	MeV electron bunch compression and timing jitter suppression using a THz-driven	Song Yifang、 Tsai Cheng-Ying、 Fan Kuanjun、 Yang Jinfeng、	Nucl. Instrum. Methods A 31 167774(2023)

No	論文タイトル	著者氏名	論文掲載誌名, 発行情報
	resonator	Qi Hong	
14	Design and performance study of a dielectric-filled cavity beam current monitor for HUST-PTF	Li Ji-Qing, Fan Kuan-Jun, Liu Zheng-Zheng, Wang Jian, Chen Qu-Shan, Yang Jinfeng	Nuclear Science and Techniques 34 129(2023)
15	Propagation and focusing dependency of a laser beam with its aberration distribution: understanding of the halo induced disturbance	Alexandre Rondepierre, Driss Oumbarek Espinos, Alexei Zhidkov, Tomonao Hosokai	Optics Continuum 2 6 1351-1367(2023 5)
16	Focusing and reduction of correlated energy spread of a chirped electron beams in passive plasma lens	N. Pathak, A. Zhidkov, D. Oumbarek Espinos and T. Hosokai	Physics of Plasmas 30 63103 1-11(2023 6)
17	Supersonic gas jet stabilization in laser-plasma acceleration	Zhen Zhe Lei, Yan Jun Gu, Zhan Jin, Shingo Sato, Alexei Zhidkov, Alexandre Rondepierre, Kai Huang, Nobuhiko Nakanii, Izuru Daito, Masakai Kando, Tomonao Hosokai	High Power Laser Science and Engineering 11 e91 1-8(2023 10)
18	Notable improvements on LWFA through precise laser wavefront tuning	Driss Oumbarek Espinos, Alexandre Rondepierre, Alexei Zhidkov, Naveen Pathak, Zhan Jin, Kai Huang, Nobuhiko Nakanii, Izuru Daito, Masaki Kando, Tomonao Hosokai	Scientific Reports 13 18466 1-10(2023 12)
19	Modular supersonic nozzle for the stable laser-driven electron acceleration	Zhenzhe Lei, Zhan Jin, Yan-Jun Gu, Shingo Sato, Alexei Zhidkov, Alexandre	Review of Scientific Instruments 95 15111 1-7(2024 1)

No	論文タイトル	著者氏名	論文掲載誌名, 発行情報
		Rondepierre,Kai Huang,Nobuhiko Nakanii,Izuru Daito,Masaki Kando,Tomonao Hosokai	
20	Red, green, and blue radio-luminescent polymer dots doped with heteroleptic tris-cyclometalated iridium complexes	Zouyue Liu, Hieu Thi Minh Nguyen, Daiki Asanuma, Sachiko Tojo, Minoru Yamaji, Kiyohiko Kawai, Guillem Pratx, Mamoru Fujitsuka, and Yasuko Osakada	RSC Advances 13 22 15126-15131(2023 5)
21	Radioluminescence from polymer dots based on thermally activated delayed fluorescence	Daiki Asanuma, Hieu Thi Minh Nguyen, Zuoyue Liu, Sachiko Tojo, Hajime Shigemitsu, Minoru Yamaji, Kiyohiko Kawai, Tadashi Mori, Toshiyuki Kida, Guillem Pratx, Mamoru Fujitsuka, and Yasuko Osakad	Nanoscale Advances 5 13 3424–3427(2023 5)
22	Direct investigation of excited C60 dianion and its intramolecular electron transfer behaviors	Chao Lu, Masakazu Kobayashi, and Mamoru Fujitsuka	The Journal of Physical Chemistry A 127 40 8330–8337(2023 9)
23	Electron beam-induced white emission from iridium complexes-doped polymer dots	Zuoyue Liu, Zheming Su, Daiki Asanuma, Sachiko Tojo, Minoru Yamaji, Mamoru Fujitsuka, and Yasuko Osakada	Photochemical & Photobiological Sciences 23 2 329–338(2024 2)
24	Single-pulse extraction using a laser-activating GaAs reflective switch for a terahertz free-electron laser	Keigo Kawase, Goro Isoyama	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sectin A: Acclerators, Spectrometers, Detectors and

No	論文タイトル	著者氏名	論文掲載誌名，発行情報
			Associated Equipment 1056 168618(2023 11)
25	Terahertz-induced martensitic transformation in partially stabilized zirconia	M. Nagai, Y. Higashitani, M. Ashida, K. Kusakabe, H. Niioka, A. N. Hattori, H. Tanaka, G. Isoyama, and N. Ozaki	Communications Physics 6 88(2023 4)
26	Recombination Dynamics of Electron–Hole Pairs in TlBr Crystals Probed by Transient Absorption Spectroscopy Using Pulsed Electron Beams	Masanori Koshimizu, Yusa Muroya, Mitsuhiro Nogami, Keitaro Hitomi	Sensors and Materials 36 261-267(2024 1)
27	Investigation of the provenance of Okinose sand using ESR signals of quartz in granite and granodiorite around Osaka Bay	Ryo Kobayashi, Hibiki Kojima, Atsushi Tani	Radiation Protection Dosimetry 119 14 1639–1645(2023 9)
28	Hydrogen transfer reactions via organic radicals in gamma-irradiated chibaite	Yuka Yokoyama, Shusuke Isogai, Kenta Kusuki, Atsushi Tani, Hirotugu Nishido	Radiation Protection Dosimetry 119 14 1646–1652(2023 9)

Reviews

No	タイトル	著者氏名	掲載誌名，発行情報
29	Martensite transformation triggered with intense THz pulses	M. Nagai, Y. Higashitani, M. Ashida, K. Kusakabe, H. Niioka, A. N. Hattori, H. Tanaka, G. Isoyama, and N. Ozaki	The 2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2023) (2023 9)

7. 量子ビーム科学研究施設員名簿

施設長(兼)	細貝 知直	教授	量子ビーム物理研究分野
専任	藤乗 幸子 徳地 明	助教 特任研究員	
	古川 和弥 福井 宥平	技術職員 技術職員	技術室 技術室
兼任	楊 金峰 神戸 正雄	准教授 助教	ナノ極限ファブ리케이션研究分野 ナノ極限ファブ리케이션研究分野
	細貝 知直 金 展	教授 准教授	量子ビーム物理研究分野 量子ビーム物理研究分野
	藤塚 守 小阪田 泰子 LU CHAO	教授 准教授 助教	励起材料化学研究分野 励起材料化学研究分野 励起材料化学研究分野
	古澤 孝弘 室屋 裕佐 岡本 一将	教授 准教授 助教	量子ビーム物質科学研究分野 量子ビーム物質科学研究分野 量子ビーム物質科学研究分野
	山下 泰信	助教	複合分子化学研究分野
本務としての従事者	菅田 義英 水田 好雄	准教授 特任助教	量子ビーム物理研究分野 量子ビーム物理研究分野

(R6 年 3 月現在)