

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：フォトンクスと放射線科学の融合分野の進展

■ 2023年9月23日(土) 13:30 ~ 16:25 | 会 A304 (熊本城ホール)

[23p-A304-1~7] フォトンクスと放射線科学の融合分野の進展

小西 邦昭(東大)、 富田 英生(名大)

13:30 ~ 13:45

[23p-A304-1] シンポジウム フォトンクスと放射線科学の融合分野の進展：趣旨説明

○富田 英生¹、小西 邦昭² (1.名大院工、2.東大院理)

13:45 ~ 14:15

[23p-A304-2] フォトンクスが支えるPETの進化～症状が出る前に病気を見つけるには？

○山谷 泰賀¹ (1.QST量医研)

14:15 ~ 14:45

[23p-A304-3] 光を用いた生体深部の観察・制御

○小川 美香子¹ (1.北大院薬)

14:50 ~ 15:20

[23p-A304-4] 誘導ラマン散乱による分子イメージングの展開

○小関 泰之¹ (1.東京大学)

15:20 ~ 15:50

[23p-A304-5] ナノフォトンクス技術を用いた光検出器の時間分解能改善に向けた取り組み

○上野山 聡¹、大田 良亮¹ (1.浜ホト中研)

15:50 ~ 16:20

[23p-A304-6] 福島第一原子力発電所廃炉作業に向けた光による遠隔分析へのチャレンジ

○若井田 育夫¹、大場 弘則^{1,2}、赤岡 克昭¹、狩野 貴宏¹、中西 隆造²、平等 拓範³、坂本 寛⁴、池田 裕二⁵ (1.原子力機構CLADS、2.量研機構、3.分子研、4.日本核燃料開発、5.アイラボ)

16:20 ~ 16:25

[23p-A304-7] クローニング

○小西 邦昭¹ (1.東大院理)

シンポジウム フォトニクスと放射線科学の融合分野の進展：趣旨説明

Introduction to symposium on recent advances in photonics and radiation science

名大院工¹, 東大院理² °富田 英生¹, 小西 邦昭²

Grad. School of Eng., Nagoya Univ.¹, Grad. School of Science, The Univ. of Tokyo²

°Hideki Tomita¹, Kuniaki Konishi,²

E-mail: h-tomita@energy.nagoya-u.ac.jp

フォトニクス分野（光・レーザー）と放射線科学分野（放射線・放射性核種）は、共通する概念・手法をもとにした研究開発や、両者を融合した新しい応用の開発が進んでおり、双方の研究者が交流することで、さらなる研究分野の創生や人材交流などによる相乗効果が期待できる。放射線分科会とフォトニクス分科会が合同で開催する本シンポジウムでは、光検出・医用イメージング・分光分析などの最新情報を両分野で共有し、今後のさらなる展開とつなげることを目的としている。招待講演に先立ち、世話人より本シンポジウムの背景と趣旨の説明を行う。

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：フォトンクスと放射線科学の融合分野の進展

2023年9月23日(土) 13:30 ~ 16:25 | A304 (熊本城ホール)

[23p-A304-1~7] フォトンクスと放射線科学の融合分野の進展

小西 邦昭(東大)、 富田 英生(名大)

13:45 ~ 14:15

[23p-A304-2] フォトンクスが支えるPETの進化～症状が出る前に病気を見つけるには？

○山谷 泰賀¹ (1.QST量医研)

光を用いた生体深部の観察・制御

Observation and control of deep tissue using light

小川美香子¹

Hokkaido Univ.¹, Mikako Ogawa¹

E-mail: mogawa@pharm.hokudai.ac.jp

光はライフサイエンスの基礎研究においてイメージングや化合物の活性化による機能解析などライフサイエンス研究に汎用されている。しかし、簡便性に優れる一方で、光は生体物質による吸収・散乱を受けるため、生体深部での利用には制限がある。

近年、光の生体透過性の問題を解決する手法として、励起は光で行うが観察は超音波で行う光音響イメージングが注目されている。音響波は光よりも生体組織に吸収・散乱されにくい。また、音響波の発生効率は光を吸収する分子の吸光係数に依存するため、蛍光イメージングと同様に、分子の吸収スペクトル変化を反映したイメージングを行うことができる。我々はこれまでに pH に応答して光音響シグナルが変化する色素を開発しており、この色素を抗体と組み合わせることで、細胞内でリソソームの酸性 pH に応答して光音響シグナルが変化するを明らかにしてきた。

また、光により神経伝達物質や生理活性物質を放出することができるケージド化合物は、細胞やマウスを用いた生体機能解析に汎用されており、様々な化合物が開発されている。これまでに我々は近赤外光による化合物の化学構造変化を利用したがん治療法 (Photoimmunotherapy, PIT) の開発を行ってきた。光免疫療法では、がん細胞の膜抗原に結合する抗体に、Si フタロシアニン誘導体 (IR700) を結合させた抗体-IR700 複合体を光反応性薬剤として用いる。IR700 は、フタロシアニン環の中心に Si を配し、そこから上下に水溶性の軸配位子を伸ばした化学構造を持つ。光化学反応によりこの軸配位子が切断されることが重要な治療メカニズムである。すなわち、この軸配位子に薬剤を結合しておけば、ケージド化合物のような利用法も可能となる。最近、我々は、近赤外光よりも生体透過性が高い硬 X 線によってもこの軸配位子を切断することが可能であることを見出した。さらに、この反応はラジカル連鎖反応であることも突き止めた。

現在、アゾ化合物等を用いた X 線応答性ケージド化合物の開発も進めている。これまでに、ヒドロキシ基を芳香環に複数有するアゾ化合物はヒドロキシルラジカルとの反応性が高いことを見出している。また、分子内に正電荷を有し、広い π 共役系を持つアゾ化合物は X 線照射によって生じる水和電子と反応し、効率的にアゾ結合が開裂する可能性も見出している。本講演では、我々が開発を進めている X 線応答性分子についても、光化学反応と比較しながら紹介する。

誘導ラマン散乱による分子イメージングの展開

Recent advances in molecular vibrational imaging with stimulated Raman scattering

東大先端研 小関泰之

Univ. of Tokyo, Yasuyuki Ozeki

E-mail: ozeki@ee.t.u-tokyo.ac.jp

生体は多様な細胞から構成され、細胞の中で様々な細胞小器官が動き回りながら複雑に相互作用することで生命活動を維持すると考えられている。これらを明らかにする上で、生きた細胞内の複数種の分子を高い時間・空間分解能で観察することは重要である。蛍光イメージングは生細胞中の特定分子の可視化法として広く使われているが、色数が5-6色程度に制限される、糖やアミノ酸などの小さな生体分子の標識が困難、などの課題を有している。

これらの課題を打破する手法として、光で分子振動を検出するラマン顕微法が注目されている。さまざまなラマン顕微法の中でも、誘導ラマン散乱(SRS)顕微法は、2色のパルスレーザーを用いて試料の分子振動を高感度に検出し画像化を行うイメージング手法である[1]。従来、SRS顕微法の応用としては蛍光染色せずに試料を観察する無標識イメージングが注目されていたが、近年、ラマンイメージングのための染色剤(ラマンプローブ)を用いた超多重イメージング法(図1)や、重水素標識分子を用いた小さな分子の代謝イメージング法が登場し、これらの生体イメージング応用が進められている。

本講演では、SRS顕微法の原理について述べたのち、我々が開発した蛍光・SRS統合イメージングシステムについて解説するとともに、ラマンプローブを用いた超多重イメージング、重水素標識による代謝イメージングについて紹介する。加えて、がん選択的な放射線治療法として注目される中性子捕捉療法(boron neutron capture therapy, BNCT)のためのホウ素薬剤として期待されるホウ素クラスター化合物の可視化への応用(図2)についても紹介し、今後の展開を議論したい。

参考文献

- 1) J. -X. Cheng *et al.*, 'Stimulated Raman scattering microscopy -Techniques and applications-, 'Elsevier, 2021.
- 2) J. Shou *et al.*, *iScience* **24**, 102832 (2021).
- 3) T. Asai *et al.*, *Appl. Phys. Express* **12**, 112004 (2019).

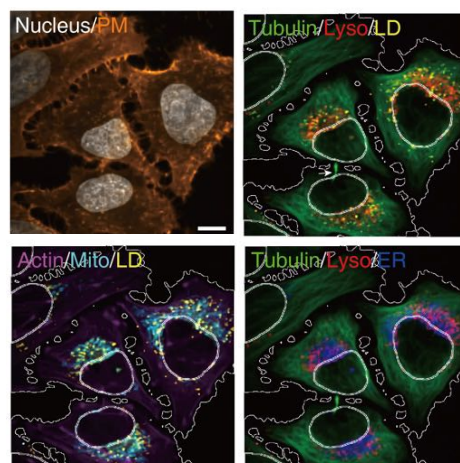


図1. ラマンプローブ4色・蛍光4色による8多重イメージング。

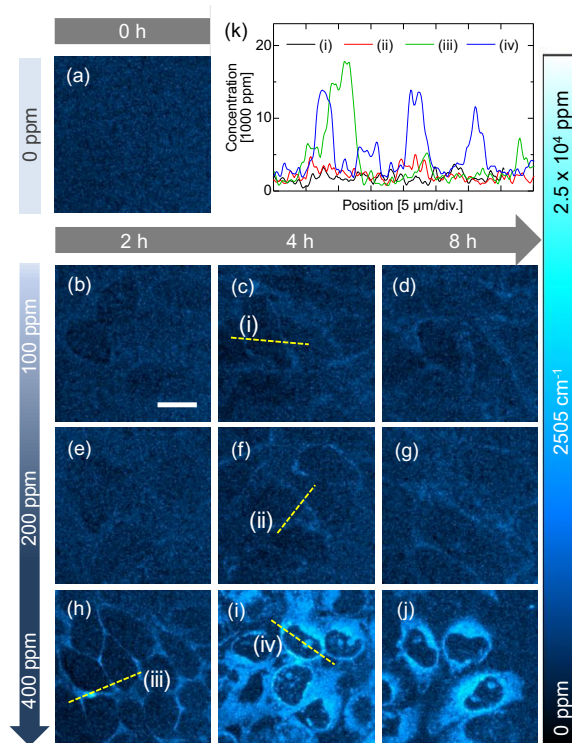


図2. (a)-(j) HeLa細胞に投与したホウ素クラスター化合物のSRS像。(h) クロスセクション。

ナノフォトニクス技術を用いた光検出器の時間分解能改善に向けた取り組み

Nanophotonics for fast-timing applications

浜ホト中研 ○上野山 聡, 大田 良亮

Hamamatsu Photonics K.K.

E-mail: so.uenoyama@hpk.co.jp

シンチレーション検出器で用いられる放射線検出器は一般的に「シンチレータ」と「光検出器」で構成される。我々はFig.1で示すよう「シンチレータ」と「光検出器」のそれぞれにナノフォトニクス技術を適用することで放射線検出器の時間分解能改善を目指した。発表中では当社が実施する以下の二つの取り組みについて報告する。

① シンチレータとナノフォトニクス（プラズモニックフィルタ技術）の取り組み紹介

BaF₂(Barium fluoride)結晶は、短い蛍光寿命と長い蛍光寿命が異なる波長で混在する結晶である。我々は長い蛍光寿命の波長を選択的に反射し、短い蛍光寿命の波長のみを通過するプラズモニックフィルタを開発し、高い時間分解能の実現を目指した。所望の光学機能を実現するプラズモニックフィルタを設計・作製し、光学評価を行った結果、プラズモニックフィルタが波長310 nm帯域の寿命の長い蛍光成分の透過率を選択的に低減し、波長220 nm帯域付近の短い寿命の蛍光成分を透過することを実証した[1]。

② 光検出器とナノフォトニクス（メタレンズ）の取り組み紹介

MPPCはSingle Photon Avalanche Diode(SPAD)がアレイ状に配列された微弱光検出器であり画素間に設置されるトレンチ領域は光感度が弱い領域として知られる。我々は薄膜の微細構造で構成されるメタレンズ技術を各SPAD上に配置してトレンチ領域に侵入する光子を有効領域に導くことで光検出器の感度や時間分解能の向上を実証した[2]。

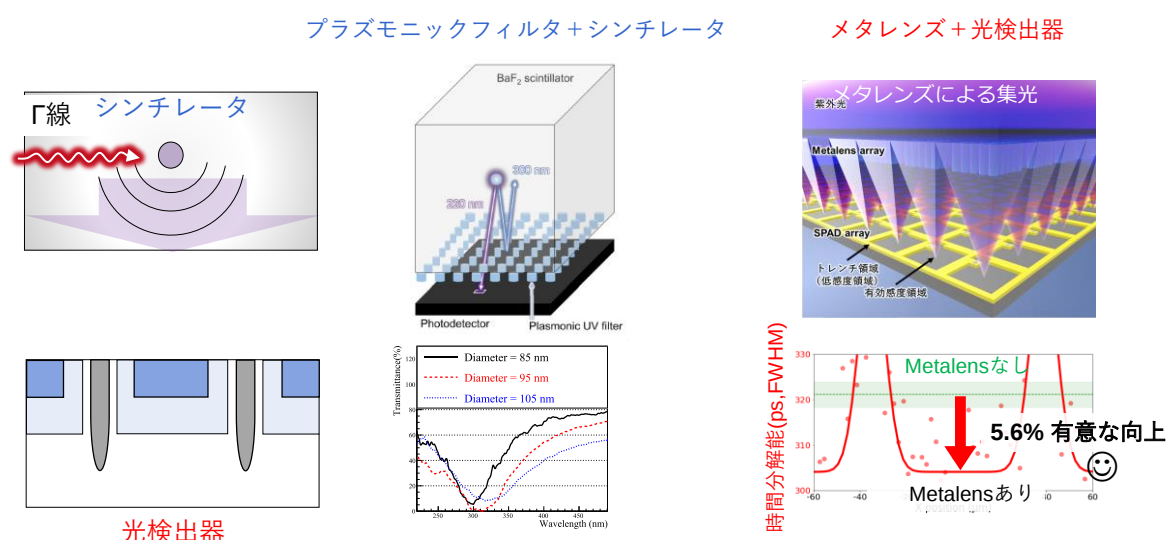


Fig.1 Concept of nanophotonics integrated with photo detector for fast timing application.

[1] S. Uenoyama and R. Ota, *ACS Photonics*, **8** (6), 1548-1555 (2021)

[2] R. Ota and S. Uenoyama, *Nanophotonics*, **12** (4), 743-752 (2023)

福島第一原子力発電所廃炉作業に向けた光による遠隔分析へのチャレンジ

Challenge of In-situ, On-site Laser Remote Analysis

for Decommissioning of “Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”

原子力機構 CLADS¹, 量研機構², 分子研³, 日本核燃料開発⁴, アイラボ⁵

○若井田育夫¹, 大場弘則^{1,2}, 赤岡克昭¹, 狩野貴宏¹, 中西隆造², 平等拓範³, 坂本寛⁴, 池田裕二⁵

CLADS/JAEA¹, QST², IMS³, NFD⁴, i-Lab⁵

Ikuo Wakaida¹, Hironori Ohba^{1,2}, Katsuaki Akaoka¹, Takahiro Karino¹,

Ryuzo Nakanishi², Takunori Taira³, Kan Sakamoto⁴, Yuji Ikeda⁵

E-mail: wakaida.ikuo@jaea.go.jp

【はじめに】

炉心溶融事故を起こした福島第一原子力発電所（1F）の廃炉では、溶け落ちた燃料棒と構造物が溶融一体化した燃料デブリの取り出しが必須となっており、狭隘で極めて高い放射線環境において燃料デブリや大量の放射性廃棄物の迅速な分析手段が求められている。レーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）は、非接触・その場・迅速分析が可能な手法の一つであり、光ファイバーによる伝送を組み合わせることで（図1）、遠隔その場分析を可能とする技術として耐放射線性等を含む基礎的な性能実証を重ねてきた。本報告では、1Fへの適用を目指した技術開発の現状と、1F現場での試験的活用例（図3）について紹介する。

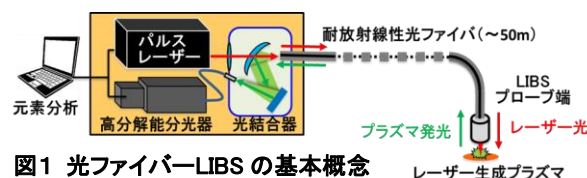


図1 光ファイバーLIBSの基本概念

【取り組み例】

高線量率環境での利用を前提に、耐放射線性光ファイバーを利用した可搬型 LIBS 装置を開発し^[1] 光ファイバー長さ 50 m、線量率 10 kG/h、積算線量数 MG y の耐放射線性を有すること、線量率 0 ～ 10 kGy/h の環境でも検量線に変化がなく、原理的に LIBS 法自体が放射線の影響を受けにくいことを実証した^[2]。LIBS プローブのみをホットセルに導入することにより（図2）、高い線量率を有する使用済み燃料を対象とした試験においても、組成分析が可能であることも実証している。

また、より長尺化を図るため、超小型レーザーであるマイクロチップレーザーをプローブ先端に配したマイクロチップレーザーLIBSを導入し、Nd:YAG 結晶を用いた場合に耐放射線性が保持できること、100 m の光ファイバーでも分析特性に影響がないことを確かめた。超遠隔分析を実現する現実的な手法の一つであると考えられる。さらに、レーザー生成プラズマにマイクロ波（2.45 GHz）を重畳すること



図2 使用済み燃料での試験

で、寿命の短いレーザー誘起プラズマを一定時間維持することを可能とし、時間積分スペクトル強度を数十倍に倍増できる可能性があることを示した。S/N 改善はもとより、超高分解能分光器と組み合わせることで、ウラン同位体比の遠隔その場確認の手段としての応用も期待される。



図3 1F現場での試験的適用の様子

[1] Morihisa Saeki, et.al, J. Nucl. Sci. Technol. 2014, 51, 930–938

[2] Ryuzo Nakanishi, et. al., Appl. Sci. 2020, 10, 8985

本報告には、経済産業省資源エネルギー庁「令和3年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの分析精度の向上、熱挙動の推定及び簡易分析のための技術開発）」および文部科学省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 JPJA20P20337946 の成果の一部が含まれます。

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：フォトンクスと放射線科学の融合分野の進展

2023年9月23日(土) 13:30 ~ 16:25 | A304 (熊本城ホール)

[23p-A304-1~7] フォトンクスと放射線科学の融合分野の進展

小西 邦昭(東大)、 富田 英生(名大)

16:20 ~ 16:25

[23p-A304-7] クロージング

○小西 邦昭¹ (1.東大院理)

キーワード：フォトンクス、放射線科学
