

共同利用研究ハイライト

UVSOR BL3Bなどを用いた赤色・近赤外発光シンチレータの開発

黒澤 俊介 東北大学 特任准教授、大阪大学 招へい教授

シンチレータは放射線を「可視化」する素子であり、keV程度以上のエネルギーを持つ放射線のエネルギーを一般的には数eV程度の複数光子に分配させて発光させる機能性発光材料である。汎用されるほとんどの既存材料の発光波長は350 - 550 nm (約2 - 4 eV) であり、発光光子を検出するために必要な光検出器の十分な感度を有する波長帯と関連する。なお、特に2010年代以降は特に半導体をベースとした光検出器や赤色などの長波長に有感な光電子増倍管の高感度化が取り組まれている。

シンチレータの特性を表す指標としては、既出の発光波長に加えて、発光量、エネルギー分解能、蛍光寿命、放射線の阻止能などがあげられる。これらの指標すべてについて優れた材料というものは残念ながら未開発であり、場合によっては相反する特性通しどうしもある。そのため、用途に応じた特性を見て材料を選択している。ただし、総じていずれの応用でも発光量については値が大きい方が好まれる傾向にある。

発光量は、1個のガンマ線光子（典型値1 MeV）がシンチレータに入射して、全吸収したときに発光する光子の数で表すことが多い。発光量は放射線入射時に1個の電子とホールの生成にかかるエネルギーに反比例し、バンドを構成する材料について簡略化すれば、バンドギャップと発光量はおおよそ反比例の関係にあると言える。そのため、より狭いバンドを持つ材料では発光量を向上させることが期待できる。一般

的なシンチレータのバンドギャップは5-7 eV程度であるが、これよりも狭い材料の場合には、バンド内に発光中心を収めることができず、例えば発光中心の励起準位が伝導帯と被り、発光が生じないことが多くなる（図1）。

従来の発光中心には Ce^{3+} による5d-4f遷移といった不純物（発光賦活剤）が主に利用されたが、われわれはより狭いギャップの母材を使えるようにするために、新しい発光中心を探索した。言い換えると、これまでにほとんど利用がされていなかった600 - 800 nm程度に発光波長を持つような「赤色・近赤外発光シンチレータ」材料を探索した。既知の当該波長域での発光中心をもつ賦活剤としては Cr^{3+} のd-d発光などが、白色LEDの演色性を高める研究やレーザー材料の探索でよく知られて

いるが、これらの遷移は一部禁制遷移を含むなどして発光効率が低いことが懸念された。

そこでわれわれは母材自体が発光可能な、自己束縛励起子や電荷遷移などによる発光に着眼した。これらの発光を有する材料で、かつ、バンド幅が5 eV程度かそれ未満の材料として、ヨウ化物を中心に焦点をあてた。そして、ブリッジマン法により候補材料の単結晶育成を行い、その特性をUVSORのBL3Bなどの放射光施設を含む実験設備で評価した。

BL3Bを重宝する理由として、(i)真空紫外線から可視光までちょうどシンチレータの発光過程を解き明かすのに必要な波長域をカバーしている点、(ii)シングルバンチ運転の利用においてそれらの時間特性を調査可能である点、

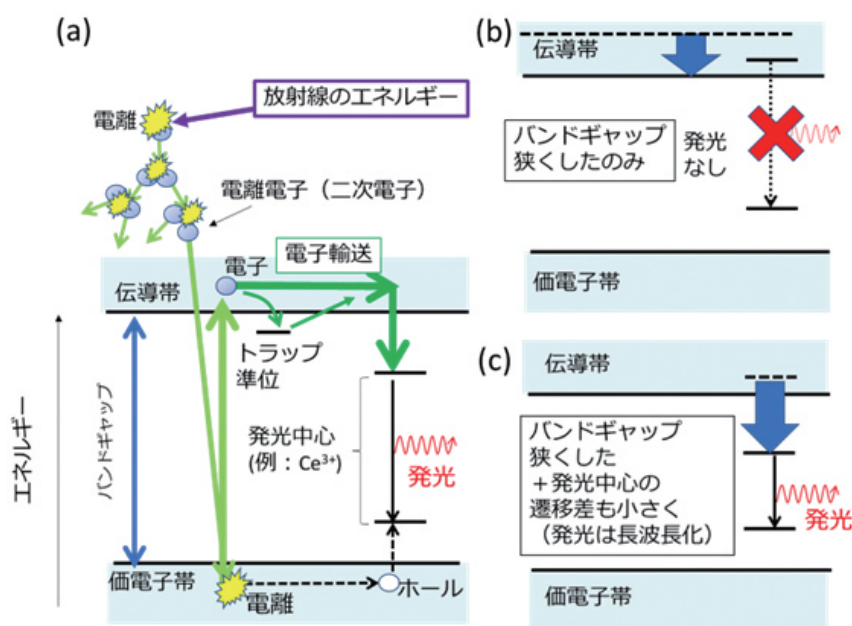


図1 (a)バンド構造を有するシンチレータの発光過程、(b)バンド幅を狭くした時の消光の概念図、(c)バンド構造と発光中心を狭くして消光を回避したときの概念図

(iii)所有する光学装置などを設置できるなど比較的に柔軟な拡張性がある点、そして(iv)評価系の構成が明解で手作りも可能なことから教育的な効果がある点など、枚挙に暇がない。赤色・近赤外発光シンチレータ材料の探索に真空紫外線まで必要なのかと思われるかもしれないが、放射線によって生み出された二次電子が発光中心に輸送される過程において、消光を誘発する準位の存在などを確認するためには真空紫外線による価電子帯の調査も必要である。

本調査の結果については紙面の都合上多くを割愛せざるを得ないが、例えばCs₂HfI₆シンチレータは、0次元のペロブスカイト型に属した構造をしており、発光波長は700 nm、発光量は現在70,000光子/MeVを超えることが分かった。またその蛍光寿命も2μs以下と赤色・近赤外発光体の典型的な蛍光

寿命(～100 μs以上)と比べて非常に短く、発光効率の優れた発光体を開発することができた^[1]。そしてUVSORでの調査から、高い発光量を有する理由について、効率的な(二次)電子の発光中心への輸送、トラップ準位といった発光を抑制するような要因の少なさ、などが示唆されている。

これらの赤色・近赤外発光シンチレータは、光ファイバーの伝送効率が良い波長域(概ね600 – 1300 nm)に位置し、光ファイバー自体の放射線に誘起される発光の発光帯(概ね600 nm以下)を避けられる。特に、高線量率場ではわれわれの開発したシンチレータは大きな威力を持つことから、ファイバーを介したシンチレータの読み出し装置を開発した^[2]。実際にUVSORでの調査を行った材料が、東京電力ホールディングスの福島第一原子力発電所の廃炉に関する調査へ

適用されており^[3]、UVSOR関係者の皆様には厚く御礼申し上げる。なお今後の調査については、サブkeV領域(50 – 1000 eV程度)の高強度ビームの利用を検討している。



くろさわ・しゅんすけ
2011年 京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 博士後期課程修了。同年博士(理学)取得。
2011年 日本学術振興会 特別研究員(東北大学金属材料研究所)、2012年 同研究所 助教を経て、2015年 東北大学 未来科学技術共同研究センター 准教授(現職、呼称変更あり)。この間、山形大学 助教、卓越研究員、大阪大学 招へい教授(現職)を兼務(クロスアポイントメントを含む)。趣味は国土交通省所管関連。

参考文献

- [1] S. Kodama, S. Kurosawa, *et al.*, Rad. Mes. vol. **124** pp.54 - 58 (2019)
- [2] S. Kodama, S. Kurosawa, *et al.*, APEX vol. **13**, p.47002, (2020)
- [3] 原子力規制委員会内のページ <https://www.nra.go.jp/data/000358693.pdf>

施設だより

電子回路開発と機械CADの連携、成果、そして未来

装置開発ユニット主任技師 豊田 朋範

電子回路開発は回路とプリント基板設計、製造、部品実装で完結するのではなく、ほとんどの場合、ケースへの組付けを伴います。近年は機器の小型化の要請が高まり、限られたスペースにプリント基板やボタン、コネクタや配線がひしめき合うことが増えました。そのため、コネクタを止めるナットが蓋のねじ止めを阻害する、ケースにコネクタをはめるとプリント基板をケースに入れられないといったトラブルが

発生する恐れが高まっていました。

装置開発室エレクトロニクスセクションでは、回路CADであるAltium Designer (Altium社)と、機械CADであるSolidworks (Dassault Systèmes Solidworks社)の連携を7年前から導入しています。回路の構成部品やプリント基板全体をSolidworksに取り込んで3Dモデルを構成することで、ボタンの穴位置やコネクタの位置関係、プリント基板のサイズなどを視覚的に分かり

やすく把握できます。これにより、ケースの加工ミスや部品の干渉トラブルがなくなりました。また、Solidworksで把握・確認したケースの設計情報から工作機械用のNCデータや加工図面を出力できるので、Altium Designerでサイズや形状を修正したプリント基板を製作すると同時に、ケースを複数加工するといった並行処理が可能になり、作業効率が大幅に向上しました。

図1は、C棟クリーンルームで稼働