

電子加速器と放射線計測



豊川弘之

とよかわひろゆき
h.toyokawa@aist.go.jp
産業技術総合研究所
計量標準総合センター
分析計測標準研究部門
放射線イメージング計測研究
グループ
研究グループ長

プロフィール

名古屋大学大学院工学研究科
博士課程後期課程修了
1997年 博士(工)
同年 電子技術総合研究所入
所
2010年 計測フロンティア研
究部門
2015年より現職

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門 放射線イメージング計測研究グループでは、電子加速器と放射線計測およびイメージング計測をコア技術とした研究を行っている。本稿ではそのうち幾つかの研究を紹介する。具体的にはレーザーコンプトン散乱ガンマ線ビームを用いた非破壊検査や原子核物理学に関する研究、電子銃のカソード材料開発に関する研究、電子加速器を用いて発生する高強度テラヘルツ波の研究、ガンマ線の光渦に関する研究などについて簡潔に述べる。

1. はじめに

電子加速器を用いた量子ビーム生成、および量子ビーム・放射光を用いた放射線計測に関する研究を紹介する。最先端の計測技術開発には最先端の光源が必要である。そこで当グループでは全国の加速器施設：高エネルギー加速器研究機構のフォトンファクトリー、茨城県東海村の J-PARC、千葉県千葉市にある量研の HIMAC、愛知県岡崎市にある自然科学研究機構 分子科学研究所の UVSOR-III、兵庫県佐用郡にある SPring-8 および X 線自由電子レーザー施設 SACLA、量研関西研の超短パルス高強度レーザー J-KAREN、佐賀県鳥栖市にある SAGA-LS などを利用している。また、京都大学エネルギー理工学研究所、京都大学複合原子力科学研究所、日本大学等、大学の加速器施設も良く利用している。

2. 電子加速器の応用研究

古い話だが、当グループの母体は通信省電気試験所に遡る。電気試験所の一部が 1970 年ころに通産省電子技術総合研究所（電総研）となり、1980 年前後に東京都田無市（現在の西東京市）から筑波へ移転した。移転に合わせて、直線電子加速器と放射光リングから成る電子加速器施設を導入することになり、電子加速器ハードウェアを研究する者と加速器利用・放射光ユーザーから成る研究ユニットを立ち上げた。

電子加速器ハードウェアを研究する者は所内の装置を使った研究や装置の改良を行い、放射光ユーザーは所内の放射光リングや、国内外の放射光施設を利用した基礎物理学研究、放射線計測技術、および標準光源の研究などを行いつつ、互いに連携して研究ユニットを支えていた。

電総研の小型放射光リングでは可視から軟 X 線領域の放射光が利用できたので [1]、紫外線や軟 X 線領域の検出器校正 [2] や、気体の電離に関する研究 [3] 等が行われていた。当時は、現在の NMIJ 分析計測標

準研究部門の放射線 4 グループと物理計測標準研究部門の光放射標準研究の一部の研究者が在籍していた。

電総研小型放射光リングでは、ガラス窓を通して放射光リング内の電子ビームにレーザーを照射し、超高真空中を周回する電子群にレーザーの電磁場を介して摂動を与え、ガンマ線領域の高輝度光子（レーザーコンプトンガンマ線）ビームを発生する“レーザーコンプトン散乱”（図 1）に関する研究が行われていた [4]。研究初期は、ガンマ線ビーム発生手法に係る理論の検証とガンマ線の実測、および原子核物理学研究への応用が行われた [5]。その後、レーザーコンプトンガンマ線を用いたラジオグラフィやコンピュータド・トモグラフィ（CT）撮影技術に関する研究が行われ [6]、輸送機器やエネルギー産業で利用する大型構造物や鋳物製品内部の可視化による非破壊検査技術の開発などが行われた。

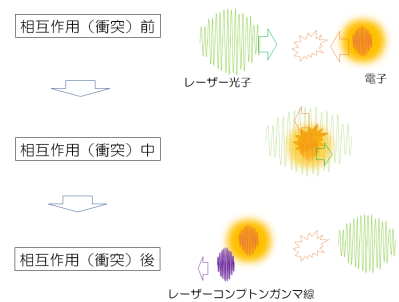


図 1 レーザーコンプトン散乱の模式図

高エネルギー光子ビームを物質に照射すると、原子あるいは原子核と光子が様々な相互作用をする。本稿では、電子・陽電子対生成反応を材料のその場分析に応用した研究、および原子核反応を非破壊検査に応用した研究を紹介する。

前者は光子誘起陽電子分析法と我々が呼んでいる方法であり [7, 8]、実材料中の原子空孔を非破壊非接触且つその場で測

定できることから、産業によく用いられる材料の物性を動作環境に近い状態で分析する手法への応用が期待される。上手く測定系を組むと軌道電子の結合状態等も測定できるため、ナノメートルサイズの析出物やイオン濃度変化に関する情報も得られる。更に、中性子ビームによる分析も併用して特殊環境下にある材料物性をその場で分析する手法の実現を目指している[9]。

原子核反応を利用した非破壊検査にかかる研究では、原子核から発生するガンマ線を用いる。高エネルギー光子を物質に照射すると、ある確率で原子内部の原子核が励起される。励起された原子核が安定状態に戻る過程の一つに原子核共鳴蛍光 (NRF) がある。この蛍光は NRF ガンマ線と呼ばれ、原子核固有のエネルギーを持つため同位体を識別する手掛かりとなる。エネルギーが数 MeV 以上のガンマ線は様々な物質を良く透過するため、数 MeV の NRF ガンマ線を用いて、容器内部に封入された金属等の物質を、同位体識別しつつ可視化できる可能性があり、その手法について京都大学らと共同で研究を行っている [10]。本手法を核不拡散や核セキュリティ技術へ応用する試みも JAEA や量研を中心に行われている[11, 12]。

その他にも、レーザーコンプトン散乱 X 線を用いて小動物等の骨を高いコントラストで撮影する位相コントラスト X 線撮像法 [13]や、高強度の円偏光レーザーによるレーザーコンプトン散乱を用いたガンマ線領域の光渦 (ガンマ線渦) の発生に関する研究を行っている[14]。ガンマ線渦ビームは、その進行方向に対して垂直な面内において軌道角運動量を運ぶ性質があり、原子核内の陽子やクォークと複雑な相互作用をすると考えられる。まだその発生を確認した例は世界でも報告されていないが、将来は同位体識別や非破壊検査や暗号技術等への応用も期待される最先端の研究である。

本稿で紹介した研究は建物に据え付けた加速器を用いたが、現場に加速器を持ち出すことも試みている。社会インフラの健全性を診断するために、後方散乱 X 線イメージングを用いたコンクリート内部可視化に関する研究を行った[15]。本研究では電子加速器技術を応用して、テーブルトップサイズの高強度 X 線発生装置を開発した。この装置は自家用車に積んで野外に持ち出すことができ、最大 X 線エネルギーは 900 keV であり非常に透過力の高い X 線を発生する。後方散乱イメージングに特化した大面積 X 線検出器を新たに開発し、橋脚や道路床版等の非破壊イメージング検査への応用を目指している。

3. 電子加速器の要素技術及び挿入光源

電子加速器のビーム物理や、電子銃、加速管、レーザーといった装置要素技術開発、アンジュレータ等の挿入光源開発、短パルスコヒーレント放射発生技術等も重要な研究である。学術的価値を意識しつつ、将来の産業技術応用をしっかりと見据えて研究を進めている。

例えば、電子銃とは電子加速器の最上流部にある、加速するための電子を供給する装置である。電子加速器のビームは、加速する前に電子が持っているエネルギー広がりや角度分散等が、加速後もそのまま保存されてしまうので、加速前の電子ビームの品質を高く保つことが非常に重要である。また、多量の電子を高密度で安定して数年単位で発生し続けること、且つメンテナンス頻度が低いことが実用上重要である。そこで電子銃カソードに用いる電子源の

物性が重要となる。当グループでは電子源に用いる材料に関する研究を行っており、良い電子源を作る技術を持っている [16]。

挿入光源に関する研究では、時間・空間的に高密度な光であるコヒーレント放射光に関する研究を、大学等が有する電子加速器を利用して行っている。これらの加速器で加速できる電子エネルギーは数 10 MeV なので、赤外からテラヘルツ帯域の輻射発生に適している。遷移輻射、回折輻射、チェレンコフ輻射等を用いたコヒーレント放射光発生手法の実証、スペクトルや強度計測技術開発などに関する研究を行っている[17]。開発した光を医療や半導体産業へ応用することを目指している。

4. おわりに

産総研は 2020 年度から第 5 期が始まる。大きな視点で広く社会を捉え、社会の課題を研究者の立場で理解し、その解決に対してどのような貢献ができるかを深く真剣に考えるところから、我々の研究活動が始まる。

分析計測標準研究部門の放射線関連の 4 グループ (放射線イメージング計測研究グループ、X 線・陽電子計測研究グループ、放射線標準研究グループ、放射能中性子標準研究グループ) では、放射線計測が共通するコア技術であり、また物理計測標準研究部門でも、放射線計測に関する研究を多く行っている。

本稿を最後まで読まれた方であれば、放射線計測や量子ビーム応用に関する知見や興味をある程度はお持ちであろうかと思う。我々の研究成果や経験等が何かのお役に立てるならば幸いである。

参考文献

- [1] T. Tomimasu, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, 3133-3135 (1983).
- [2] T. Zama and I. Saito, J. Electron Spectrosc. and Relat. Phenom., 144-147, 1087-1091 (2005).
- [3] I. H. Suzuki and N. Saito, Radiat. Phys. and Chem., 73(1), 1-6 (2005).
- [4] R. H. Milburn, Phys. Rev. Lett., 10(3), 75-77 (1963).
- [5] H. Ohgaki et al., Nucl. Phys. A, 649, 73c-76c (1999).
- [6] H. Toyokawa et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 55(6), 3571-3578 (2008).
- [7] Y. Taira et al., Rev. Sci. Instrum., 84(5), 053305-1-5 (2013).
- [8] T. Ishibashi et al., Mater. Trans., 54(9), 1562-1569 (2013).
- [9] K. Kino et al., Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A, 927, 407-418 (2019).
- [10] H. Zen et al., AIP Advances, 9, 035101-1-9 (2019).
- [11] R. Hajima et al., Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A, 608(1), S57-S61 (2009).
- [12] T. Shizuma et al., Rev. Sci. Instrum., 83, 015103-1-4 (2012).
- [13] H. Ikeura-Sekiguchi et al., Appl. Phys. Lett., 92(13), 131107-1-3 (2008).
- [14] Y. Taira et al., Sci. Rep., 7: 5018, 1-9 (2017).
- [15] 豊川 他, 非破壊検査, 64(5), 216-220 (2015).
- [16] D. Satoh et al., Jpn. J. Appl. Phys., 58, SIIB10-1-5 (2019).
- [17] N. Sei and T. Takahashi, Sci. Rep. 7: 17440, 1-7 (2017).