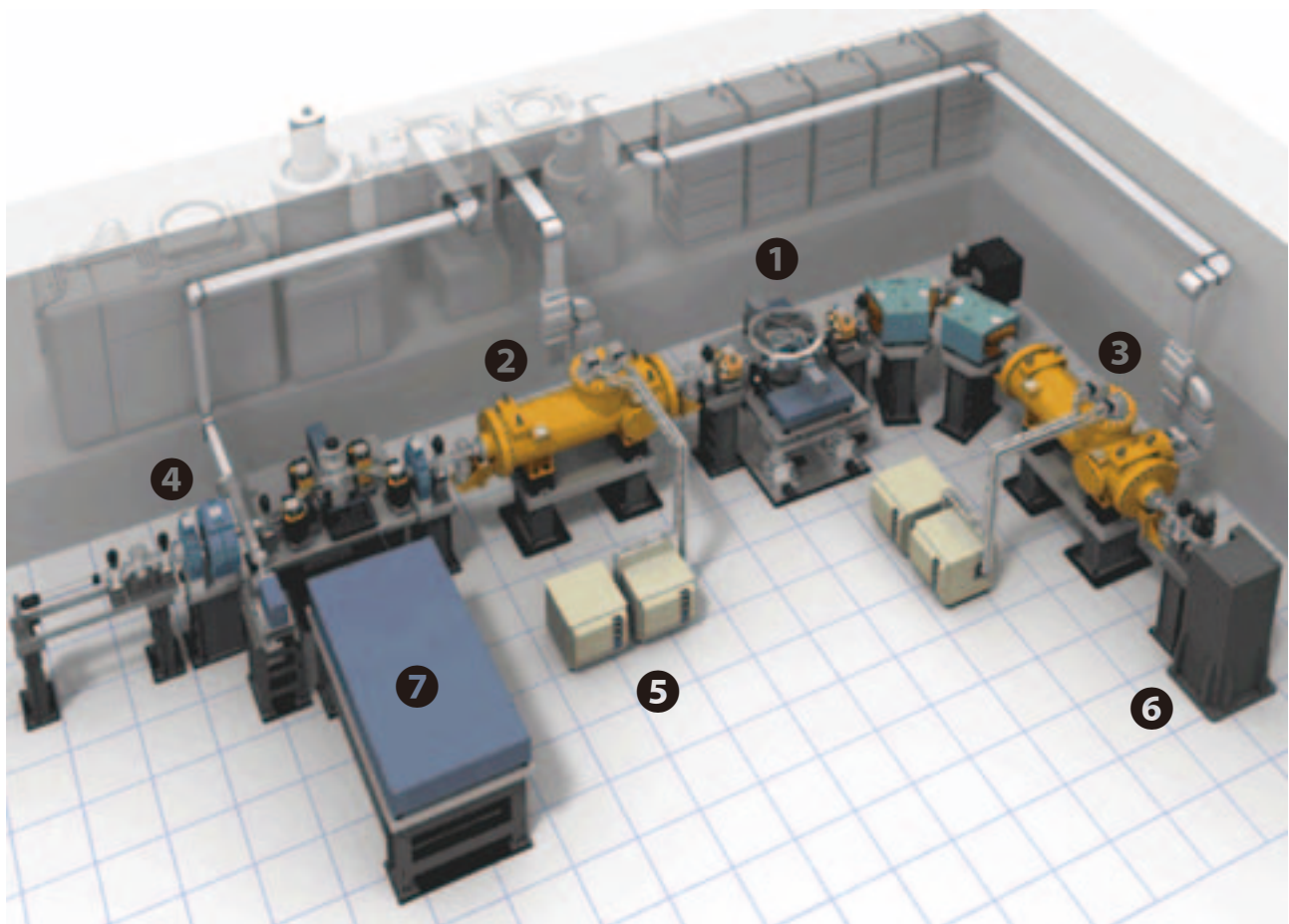


July 2009

高輝度光子ビーム源開発室 ニュース

Quantum Beam Project supported by MEXT

Vol. 1



@ Rey-Hori

- ① Laser Super Cavity
- ② 9-cell Accelerating Cavity
- ③ 9-cell Decelerating Cavity
- ④ L-band RF Gun
- ⑤ 2k He Refrigerator
- ⑥ Beam Dump
- ⑦ Laser System for Multi-bunch Beam Generation

本研究開発プログラムが文部科学省からの委託事業として昨年度8月末に始まり一年が過ぎようとしています。多くの方々の協力により順調に先端基盤技術開発が進んでいます。既に、本プログラムのWeb. Site (<http://kocbeam.kek.jp/index.html>) が一般に公開され、活動報告や新技術開発成果等を今後掲載しますので、このクォーター一同様に加速器先端技術開発の情報源としてご関心をお持ち頂ければ幸いです。

このクォーターでは次世代ビーム技術開発課題で目指します表紙の図に示された理想的な光子ビーム発生装置に関係します新技術または利用の記事と本プログラム主催下で行われた技術検討会報告を掲載します。Quarterly 1 の内容として、高圧直流電子源開発責任者の羽島さんに放射性廃

棄物処理応用に関する記事と光カソード開発責任者の栗木さんに電子源技術検討会報告を書いて頂きました。

■逆コンプトン散乱で生成するガンマ線の放射性廃棄物の処理処分への利用 羽島良一（原子力研究開発機構）

■広島大学高輝度電子源検討会報告 栗木雅夫（広島大学）

Quarterly 2 の記事は新しいレーザー安定増幅法に関する記事をお田洋介さんをお願いします。また、6月に行われました小型高輝度光子源のためのレーザー蓄積共振器開発キックオフミーティング報告を広島大学高橋徹さんをお願いします。ご期待下さい。

■逆コンプトン散乱で生成するガンマ線の放射性廃棄物の処理処分への利用

レーザーと高エネルギー電子の逆コンプトン散乱による光子ビームの発生はX線のみにとどまらず、さらに高いエネルギー（MeV 領域）の光子、すなわち、ガンマ線まで可能である。例えば、エネルギー 400 MeV の電子ビームと波長 $1 \mu\text{m}$ のレーザーの正面衝突の逆コンプトン散乱では、2.9 MeV のガンマ線ビームが得られる。このようなガンマ線の利用として期待されているのが、原子力エネルギーの核燃料サイクル、および関連の研究から排出される廃棄物に含まれる放射性核種の非破壊分析である。廃棄物の処理処分において安全性と経済性を両立するためには、廃棄物中の放射性核種の濃度を精度良く分析定量し、核種の濃度に応じた適切な処分（深地層処分、ピット処分など）を行わなければならない。日本原子力研究

開発機構では、ガンマ線を使った核種の非破壊分析法を提案し、その基礎研究を行っている。

図1に示すように、原子核は、その陽子と中性子の数に応じて、固有の電磁気的な振動モード（励起準位）を持っている。基底準位と励起準位の差に等しいエネルギーを持ったガンマ線が原子核に吸収されると、原子核は励起される。この励起した原子核は、通常極めて短い時間（フェムト秒オーダー）でガンマ線を放出して基底準位に戻る。放出されるガンマ線は入射ガンマ線と同じエネルギーを持っているために、あたかも、入射ガンマ線が散乱されたように見えるので、この現象を原子核共鳴蛍光散乱（nuclear resonance fluorescence, NRF）とよぶ。特定の核種（例えばウラン 238）を励起するエネルギーを持ったガン

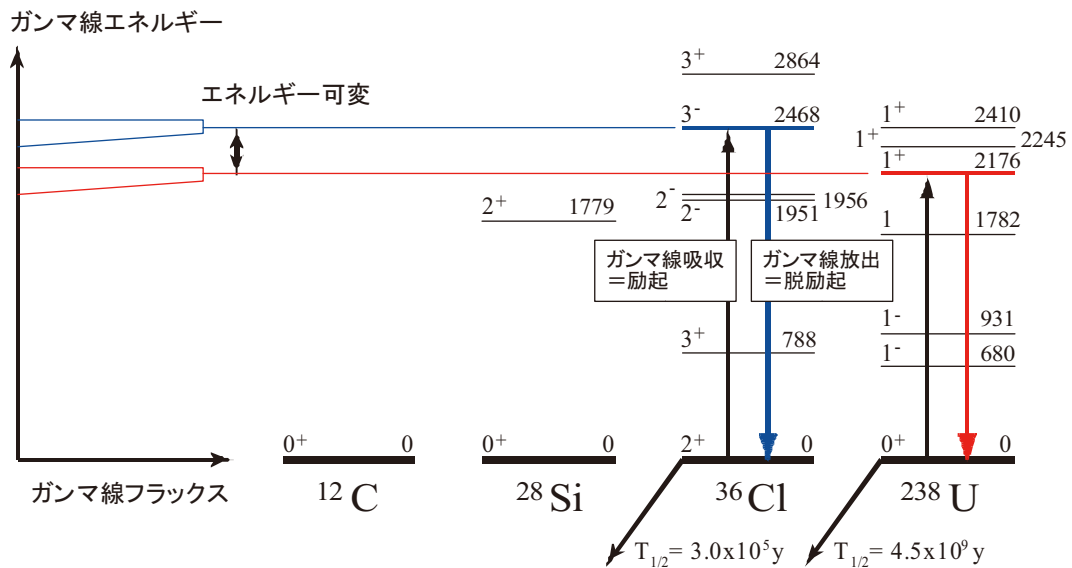


図1：ガンマ線による核種の非破壊分析の原理。それぞれの核種（同位体）の原子核には、固有の励起状態が存在しており励起エネルギーはそれぞれ異なる。測定したい核種（例えばウラン 238）に固有の励起エネルギー（2176 keV）と等しいガンマ線を照射すると、原子核が励起・脱励起する過程で励起エネルギーに等しいエネルギーのガンマ線が放出される。この放出ガンマ線を検出することで核種の存在を知ることができる。

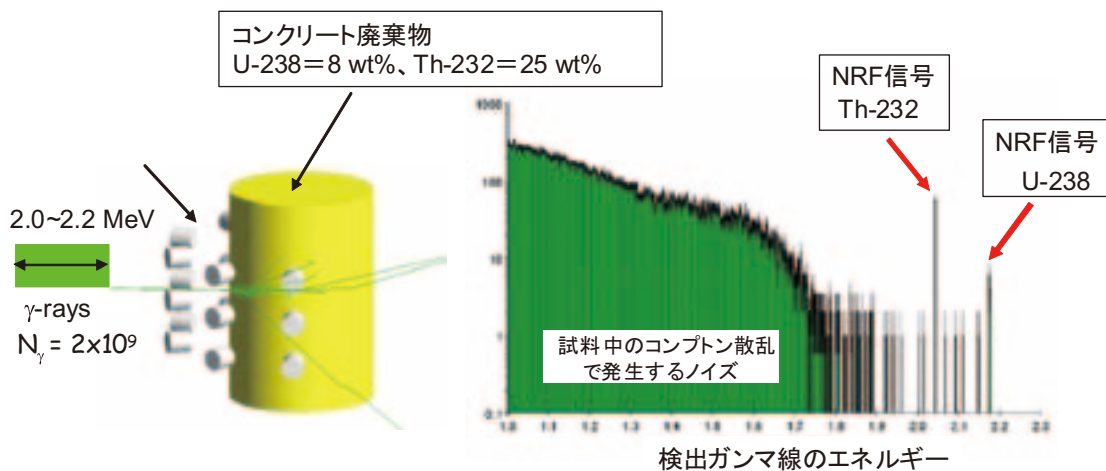


図2：コンクリート廃棄物に含まれる二つの核種、ウラン 238 とトリウム 232 を逆コンプトンガンマ線で分析する様子をモンテカルロシミュレーションで計算した結果。

マ線を外部から照射し、散乱ガンマ線を計測することで核種の非破壊分析（検知と定量）が可能になる。このような分析法の利点は、(1) ほぼ全ての放射性核種、安定核種の分析が可能であること、(2) 厚い遮蔽を通した分析が可能であること、(3)

準単色ガンマ線を用いることで良好な S/N が得られることである。

NRF は原子核物理の分野では古くから知られている現象であるが、この原理に基づく核種の非破壊分析は、エネルギー可変、準単色、高強度のガ

ンマ線が必要なために、これまで実用化されていない。逆コンプトン散乱は、このような利用に最適のガンマ線源であり、高輝度コンプトン光源の技術が完成すれば、核種の非破壊分析が実用化されると期待される。図2は、ウラン238とトリウム232を含んだコンクリート廃棄物（200リットラドラム缶）に、逆コンプトン散乱で発生したガンマ線を照射した時のNRFガンマ線を検出す

る様子をモンテカルロシミュレーションで計算したものである。二つの核種に対応したNRFガンマ線がはっきりと見えており、バックグラウンドノイズとNRFガンマ線信号の分離も良好であることがわかる。

最近、NRFによる同位体の非破壊イメージングの原理実証実験が、日本原子力研究開発機構、産業技術総合研究所、京都大学の共同チームによ

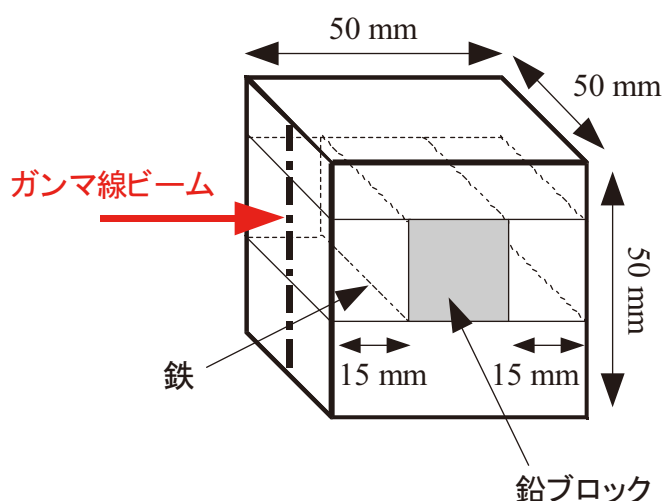


図3： 同位体イメージングの実証実験で用いた試料。試料は20 mm 角の鉛ブロック（鉛208を52%含む）を15 mmの鉄板で囲ったものである。この試料にガンマ線ビームを照射し、試料中の鉛208によるNRFで発生するガンマ線を測定した。

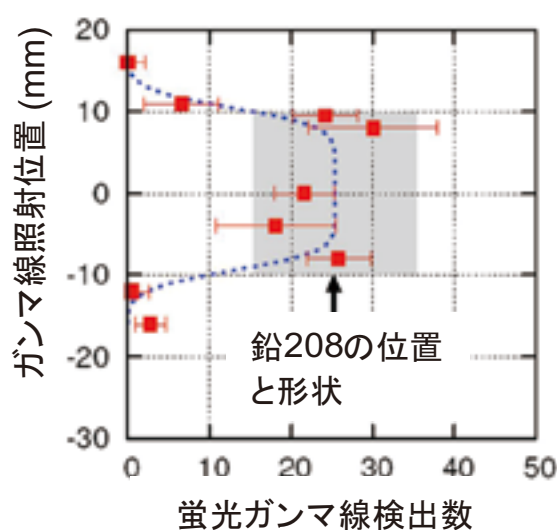


図4： 取得された鉛ブロックの位置と形状。縦軸はガンマ線の照射位置、横軸は鉛208からのNRFガンマ線の検出量である。15 mmの鉄板を通して、鉛ブロックの位置と形状が測定できた。

り行われた。図3に示すように、厚さ15 mmの鉄板に囲まれた鉛ブロック（鉛208を52%含む）に、鉛208の励起エネルギー（5512 keV）に同調したガンマ線ビームを照射し、鉛208から散乱されるNRFガンマ線を測定したところ、図4に示すように、鉛ブロックの形状を認識することに成功した。実験は産総研の電子蓄積リングTERASで行った。同位体を特定したイメージングとしては世界最初の実験である。（Applied Physics Express, 2, (2009) 036502）

TERASで得られるガンマ線フラックスは毎秒 10^6 程度であり、今回の実験はデータ取得に1日かかった。「量子ビーム基盤技術開発プログラム」で実施している次世代高輝度光子ビーム源の技術

が完成し、これに基づく高輝度ガンマ線が利用できるになると、どうなるだろうか？電子加速器として350 MeV、10 mAのエネルギー回収型リニアック（ERL）、レーザーとして蓄積パワー700kWのスーパーキャビティを仮定すると、コンプトン散乱で発生するガンマ線の光子数は毎秒 10^{13} のオーダーとなり、TERASで1日かかった同位体イメージングが瞬時に完了できることになる。

このような核種の非破壊分析技術は、放射性廃棄物の処理処分だけでなく、港湾や空港における貨物中の爆発物の検出や、核テロの抑止などにも適用可能である。安全安心社会の実現に大きく貢献するだろう。



■広島大学高輝度電子源検討会報告

2009年1月22（木）、23（金）の両日にわたり、広島大学高輝度電子源検討会が、広島大学の東広島キャンパスで開催された。広島大学の量子ビーム開発センター（先端物質科学研究科）はJAEA（原子力機構）、KEK（高エネルギー加速器研究機構）、名古屋大学などのグループと共同で、コンパクトERLのための電子銃開発を念頭に、高輝度DC電子銃開発の研究を2008年度より開始した。本研究会の目的は、その検討状況と最新の研究成果について情報を共有するとともに、問題点や今後の研究の方向性について議論することにあった。参加者は外国人を含む20名弱であった。

22日（木）の13時30分からの検討会の開催にあたり、主催者である量子ビーム開発センターを代表して、広島大学の栗木雅夫よりこの会の趣旨の説明があった。続いて高エネルギー加速器研究機構、ERL推進室長である河田洋氏より、「ERL放射光源計画概要とその進捗状況」と題した講演

がおこなわれた。高輝度、コヒーレント、短パルス性を兼ね備え、多くのビームラインを設置できる次世代放射光源として5GeVクラスのERL（Energy Recovery Linac）が有力であることが示された。またその実現には多方面の協力が不可欠であり、とくに電子銃においては電子銃本体、カソード、レーザーが三位一体となり高性能を発揮できるように開発がすすむことへの期待が示された。ERL実証機であるコンパクトERLは2008年3月にCDR（Conceptual Design Report）が出版され、その実現に向けて具体的検討が進みつつある。

原子力機構の羽島良一氏からは「ERL入射器に求められる性能とその達成へのシナリオ」と題した講演があった。大学での開催ということで、教育的配慮から光源の歴史からひもとき、その延長

1 羽島良一 他編、コンパクトERLの設計研究、KEK Report 2007, JAEA-Research 2008-32 (2008)

に ERL が位置していることが述べられた。回折限界光を得るためには $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ という極小エミッタンスビームを電子銃で発生させ、その増大を抑制しつつ加速する必要があること、そのためにはカソード材料のバンド構造とレーザー波長の合わせ込み、エミッタンス増大と波形整形など、多様な物理的プロセスを理解し、制御する必要があることが述べられた。最新の研究がわかりやすく説明され、学生の興味をひく発表であった。

原子力機構の飯島北斗氏からは、250 kV 電子銃の現状が報告された。GaAs カソードの活性化に成功し、レーザー導入系、エミッタンスやバンチ長測定などの計測系の整備を終え、ビーム試験に入るとのことであった。GaAs カソードはレーザーへの応答性が悪いとの可能性が指摘されており、バンチ長測定はエミッタンス保存のための波形整形という ERL の根幹に関わる部分であることから、その結果が注目される。

広島大学の正中智慧と久保大輔からは各々「GaAs 陰極の寿命の温度依存性」「NEA 活性化時における光電閾値」と題した講演があった。ERL では 100mA のビーム発生時には 16W ものレーザーがカソードに照射されることになり、温度上昇とそれによるカソードのパフォーマンスの低下が危惧される。今回の実験の結果、80 度 C を超

えると量子効率が急激に減少する傾向がみられた。また閾値の観測では Cs 終端よりも酸素終端の場合のほうが閾値がより長波長であり、かつ長寿命であることが示された。

22 日（木）のセッション終了後、大学近くの料理屋において懇親会が行われた。ビールでの乾杯で始まった宴は、日本三大酒処のひとつ、賀茂西条の地酒が酌みかわされるころには会話が弾み、日頃の研究の苦労や、将来への希望など、幅広い話題が飛び交った。

23 日（金）は朝 9 時よりセッションが開始された。本セッションでは RF 電子銃についての講演が二つ行われた。一つ目は Abhay Deshpande 氏による「Mode Separated Photo-cathode RF Gun Work at LUCX」である。Deshpande 氏はインドから来日し、KEK の総合研究大学院大学の学生として研究を続けている。RF 電子銃における二つの定在波モード（0 モードと π モード）のセパレーションを大きくすることで、パフォーマンスの向上を意図したものである。続いて早稲田大学の坂上和之氏よりパルスレーザー光共振器と電子ビームのコンプトン散乱による X 線生成について、最新の研究成果の報告があった。光共振器長をナノメーターを下回る精度で制御して、900 程度の Finesse で、レーザーをバーストモードで運転し、



X線の輝度で $2.75\text{E}+5$ /sec/mm²/mrad²/0.1%bw を得たとのことであった。

原子力機構の西森信行氏より「500kV 電子銃の光陰極準備容器・高電圧容器の設計」と題した発表があった。コンパクト ERL のための電子銃について、中心メンバーはこの間ビデオ会議やメールを通じて濃密な議論を続けており、本発表で示された設計案は現状で考えうる技術の粋を集めたものといえる。500 kV 電子銃という未踏の領域を目指す意気込みを感じるものであった。

続いて同機構の永井良治氏より、500 kV - 10 mA 電源の製作状況について報告があった。Cockcroft-Walton 型を採用し、LC フィルタ、サージアブソーバなどにより高安定かつ高耐久が実現されるとのことであった。250 KV 電源での実証を経て、将来の 500 kV - 100 mA 電源もこの方針で実現可能との言葉が印象的だった。

昼食をはさみ、午後のセッションの始めは、広島大学の栗木雅夫氏より「セラミックサンプルの昇温脱離測定」という講演であった。GaAs 陰極では極高真空が重要であるが、絶縁用に用いられるセラミックについてはデータが乏しいため、昇温脱離法により測定を行ったものである。それによると、今回 500 kV 絶縁管に使用した A99P という材料のガス放出係数は極めて小さい可能性が指

摘された。

続いて KEK の本田洋介氏より、KEK における電子銃テストエリア (ILCTA, Injector Line Commissioning Test Area) の計画と現状について説明があった。AR 南実験室を整備し、名古屋大学の 200 kV 電子銃を移設するとともに、コンパクト ERL のための電子銃を含む入射部の試験を行うとのことであった。2009 年度内には電子銃の基本テストを終え、その後ビームライン、ビーム診断系の実装を行うよていとのことであり、今後急速な進展をみせるものと期待される。

最後に、原子力機構の西森信行氏をまとめ役として、今後の DC 電子銃開発計画について議論が行われた。500 kV 電子銃の高電圧印加テストとそれに続くビームテスト、また各大学および研究所における計画、そして将来的に 100 mA ビーム引きだしに向けた具体的な検討がなされ、目標に向けたマイルストーンと各研究機関の役割が非常に明確化された。

最後に、2009 年夏に加速器学会が東海村で行われる際に、インフォーマルミーティングの形で会合をもつことが提案された。以上のように会合は小規模ながらも密度の濃い議論がなされ、非常に有意義なものであったことを述べ、筆を置くことにする。



Acknowledgments

This Quarterly is supported by Quantum Beam Technology Program of the Ministry of Education, Science, Sports, Culture and Technology of Japan (MEXT).

量子ビーム基盤技術開発プログラム (2008-2012 年度)

Quantum Beam Project supported by MEXT

次世代ビーム技術開発課題「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」(拠点責任者：浦川順治)
Development for Next Generation Compact High Brightness X-ray Source using Super Conducting RF Acceleration Technique



大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

High Energy Accelerator Research Organization

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1 TEL 029(879)6248