

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：33811

研究種目：基盤研究 A(一般)

研究期間：平成 21 年度～平成 23 年度

課題番号：21244088

研究課題名（和文）レーザー加速電子によるレーザー光の逆コンプトン散乱エックス線発生と遠隔透視応用

研究課題名（英文）Inverse Compton X-rays from laser-accelerated electron bunches and its industrial application

研究代表者

北川 米喜 (KITAGAWA YONEYOSHI)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・教授

研究者番号：40093405

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、超高強度レーザー加速電子によるレーザー光自身の逆コンプトン散乱X線を開発し、それをを用いて、後方散乱遠隔透視法の実証を行うことである。現有の3TW超高強度レーザーの2段の立体構成による小型化と出力増強(出力1J, パルス幅100 fs)の結果、世界初でレーザー加速準単色電子ビームバンチによる6及び11 keVの逆コンプトンX線発生に成功し、結果はApplied Physics Express 5 (2012) 056401に掲載。米国物理学会、プラズマ核融合学会年会でも報告した。遠隔透視技術の実用化のため調査研究を開始した。

研究成果の概要（英文）：Inverse Compton X-rays from laser-accelerated monoenergetic electrons are observed. A Ti:sapphire laser (pulse energy: 500 mJ; pulse width: 150 fs) beam is divided into two beams to accelerate electrons to energies of 13 and 22 MeV, which inversely scattered the secondary laser beam into 6 and 11 keV X-rays. This demonstrates a novel source of monoenergetic directional ultrashort X-ray pulses (Applied Physics Express 5 (2012) 056401).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	19,700,000	5,910,000	25,610,000
22 年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
23 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
年度			
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：超高強度レーザー、逆コンプトン散乱、遠隔透視、単色電子ビーム、レーザー加速

## 1. 研究開始当初の背景

空港、港湾等の巨大施設の安全対策、爆発物、麻薬、銃器など不審物の非破壊検査で検査員の安全のために遠隔後方探査、また災害現場の埋没者探査などでも遠隔後方探査しか、方法がない。ただ、それに適した線源がなく、その開発が緊急課題となっている。この手法

は、死角の交差点からの車の飛び出し確認にもそのまま応用できる。その適性は、(1)不審物からの危険の及ばない程度離れて検査できること、(2)線源と検出器が同一場所にあることである。

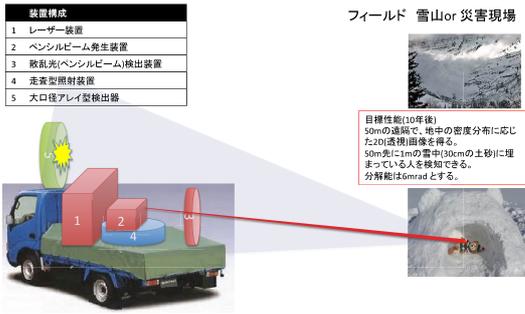


図 1: 冬山遭難時後方散乱 X 線透視イメージ

現在の手荷物検査など非破壊検査装置は、不審物にほぼ接触し、かつ検出器は対向側にしか置けない。先ず(1)の条件を満たすには、たとえば、10m離れると現在の手荷物検査の線源だと、その1000 倍の強度が必要となり、検査物以外への影響があり過ぎて使えない。コンプトン散乱の様に方向性を持った線源のみが残る。(2)の条件を満たすには、不審物からの後方散乱X線を検出することになる。散乱光はまた、入射光の1000分の一程度なので、検出器は背景の宇宙線雑音に隠れて検出が困難となる。これらの理由で今まで実証されていない。其の程度の微弱光でも、ピコ秒以下の超短時間パルスなら、同期計測により検出可能となろう。従って超高強度レーザー加速電子によるレーザー光自身のコンプトン散乱 X 線を用いる後方散乱光が唯一の解と考えられる。

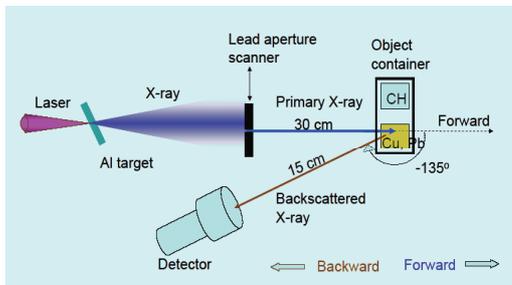


図 2: 後方散乱 X 線透視実証実験

申請者は、これまでに、超高強度超短パルスレーザーで発生した制動X線をアルミニウムケースの中に封じた銅、鉛、アクリルに照射し、自然放射能レベル以下の微弱な乱光を入射X線との同期計測で、その材質、形状の推測ができることを示した。実験配置は図1のようであり、検出器からの距離は15cm。結果を図2に示す：参考文献 [1, 2, 3]。わずか1TWの低強度レーザーではあるが、同期計測により10000 ショット(100秒)連続計測によって、クリアな後方散乱光が取得出来ること

を初めて示した。レーザーターゲットからほぼ全立体角に放出されるX線を、鉛窓で区切って線源とした。

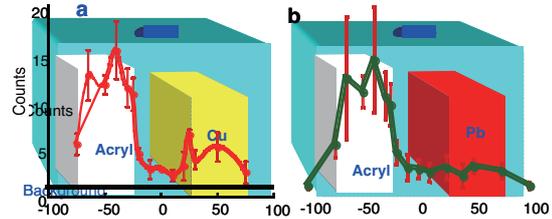


図 2: a:Al ケース内のアクリルと銅の後方透視, b: アクリルと鉛の場合

図2に示すのは、後方散乱X線の強度分布であるが、被散乱物質の材質に依存して、図3のように散乱スペクトルが入射スペクトルから変形されるので、これら強度分布とスペクトルから、物質の特定が可能となることも示した。

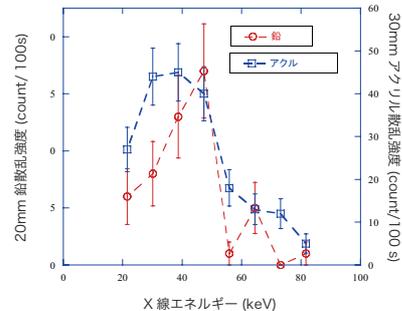


図 3. 特定物質による散乱スペクトルの変化

(2). 学術的特色, 独創性, 予想される結果, 意義:

レーザー光による逆コンプトン散乱光の開発は、電子ビーム源として SPring 8などの大型の加速器 を用いて試みられている。しかしレーザーが小型化しても電子線源が小型化しない限り、コンプトン光 の応用はその場所に限られる。そこでテーブルトップレーザーの粒子加速法高速電子により、そのレーザー光自身の逆コンプトン散乱光を作りだせば、コンパクトな理想的線源が可能となる。最近、レーザー粒子加速が実証段階から応用段階に入りつつあり、かなり安定な電子ビーム源と看做なせる所に来た。コンプトン散乱ではないが、英国では、単色 64 MeV レーザー電子ビームをウィグラー磁場に通して、波長 740 nm のシンクロトロン放射光を得た [4]。レーザー加速粒子が放射光源としての可能性を示したことは、申請者らの遠隔透視の結果とともに画期的なことである。

レーザー加速電子による逆コンプトン X 線は、ドイツから文献5にあるように、全光学系と称して本研究と同じく1ビームの超

高強度レーザーを対向2ビームに分けて、一方で発生した電子ビームで他方向からのレーザー光をトムソン散乱させて、逆コンプトン光を得ている。本研究の成果とともに、レーザー加速粒子の産業応用に更に接近すると思われる。

参考文献

[1] H. KUWABARA, Y. MORI, Y. KITAGAWA, "Coincident Measurement of a Weakly Back-scattered X-ray with a CPA Laser-Produced X-ray Pulse", Plasma and Fusion Research: Rapid Communications **3**, 003-004 (2008).  
 [2] 北川米喜, "レーザー粒子加速, その原理と展望" 光学 **37**, No. 11 (2008). [3] Y. Kitagawa et al., "Ultra-intense Laser Applications to the Industries at GPI", Proc. 2008 AAC Workshop, AIP Conference Proceedings, 2008 to be published.  
 [4] H. P. Schlenvoigt et al, "A compact synchrotron radiation source driven by a laser-plasma wakefield accelerator", nature physics, Nat. Phys. **4** (2008) 130.  
 [5] H. Schworer, B. Liesfeld, H.-P. Schlenvoigt, K.-U. Amthor, and R. Sauerbrey: Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 014802.

2. 研究の目的

本研究の目的は、超高強度レーザー加速電子による、レーザー光自身の逆コンプトン散乱 X 線を開発し、それをを用いて、後方散乱遠隔透視法の実証を行うことである。

特に産業応用として有用な、レーザー加速で生成される単色電子ビームによる逆コンプトン散乱 X 線を開発することを一つの目的とする。

前節で述べたように、世界的にレーザー加速電子ビームの応用が考え始められているが、レーザー加速ビームの特色は、スポット光源、短パルスの特徴、そして単色電子ビームである。それらを有効に使う事はどこでも行われていない。ここではその応用を目指す。

3. 研究の方法

目標値を表 1 に掲げる。本研究の初年度から次年度にかけては、現有の 3TW 超高強度レーザー光を増強し 2 本にわけ、対向 180°乃至 150°照射配位とした。一方のレーザー光は 30 度傾けた固体平板ターゲットに照射し、高速電子をターゲット後方法線方向に放出

表 1: 最終目標@10 m

発散角	0.25 mrad
総 X 線光子数	$1 \times 10^6$ /pulse
X 線エネルギー	100keV
繰り返し	10Hz

させる。他方のレーザー光をこの電子ビームと逆方向に照射し、逆コンプトン散乱により、

電子ビームによる後方散乱光(X 線)を発生させ、その集光性能を評価する。次年度から 3 年度には、現有発振器(80f パルス幅, 2 台)の 1 台を 30 fs パルス発振器とし、単色電子ビーム(完全なモノエネルギーではないが、ほぼ単色に近いスペクトルを持った電子ビーム)によるコンプトン光の強度を増強を図り、遠隔透視の実証を行った。

最終年度で、1m 程度離れた距離での実証を試みる。従って、表 1 より光子数は、1/100 として、65 MeV 電子による 100keV X 線の  $10^4$  光子/pulse の発生を試みた。

テーブルトップのチタンサファイヤレーザーレーザーを元にして、光学的パラメトリックチャープ増幅方式により 4TW のピートレーザー(エネルギー 500 mJ, パルス半値全幅 150 fs, 波長 815nm)を構築した。それを超音速スリットノズルから吹き出したガス密度

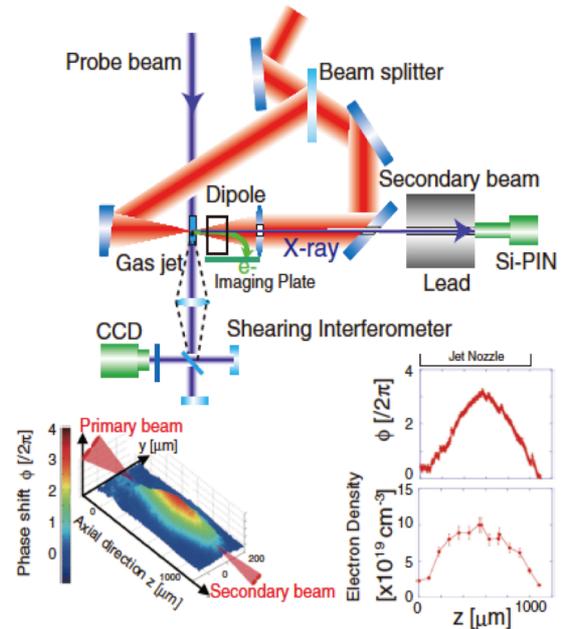


図 4. (上)のレーザー光による逆コンプトン散乱実験配位. (左下)プローブ光干渉法による密度分布. (右下)レーザー軸方向の位相分布とそれを密度分布になおしたもの. Z はレーザー軸方向に沿った距離である。

$9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ のヘリウムガスに照射した。

図 4 中のビームスプリッターで 460 mJ の反射ビーム(1 次ビーム)と 30 mJ の透過ビーム(2 次ビーム)に分け、反射ビームで航跡場を励起し、電子ビームを加速する。このビームは焦点距離 108 mm (f/2.2), 口径 30 mm の軸外し放物面鏡で、ガスジェットの一方の端にノズルの下方 2mm の位置で集光する。ジェットノズルスリットは長さ 4mm 幅 1.2 mm の長方形の開口を持ち、長手方向をレーザー軸と平行とする。その位置関係を図 5 に示す。下図

は集光点付近の拡大図である。

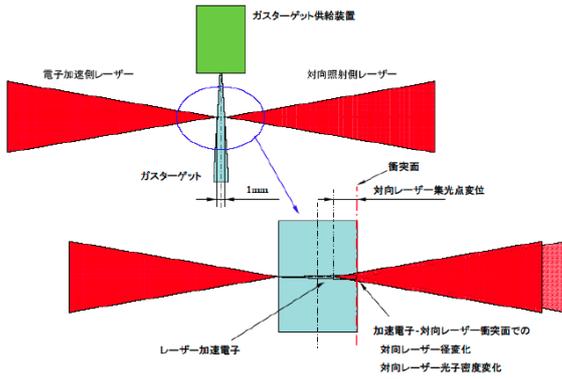


図5. ガスジェット形状とレーザー集光位置関係.

集光強度は $1.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ である. もう一方のビームは焦点距離150 mm ( $f/3.8$ ), 口径かんしよ150 mmの凸レンズで他端に集光する. 集光強度は $91.5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ である. 規格化ベクトルポテンシャル

$$a_0 = eE/m_e\omega_{Lc} \quad (1)$$

はそれぞれ0.84と0.064となる. 但し $E$ は電場、 $m_e$ は電子質量、 $\omega_{Lc}$ はレーザーの角周波数である. 2次ビームのスポットサイズは $32 \mu\text{m}$ であるが、その13%に36 mJが含まれる.

上記ビームのパルス圧縮器内での漏れ光を2倍高調波 (407nm) に波長変換し、1次ビームと直交する方向からヘリウムガスに照射し、透過光をシェアリング干渉法で検出した.

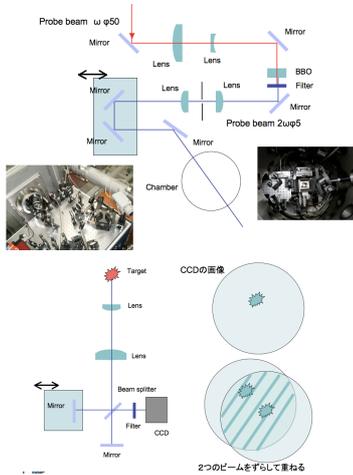


図6. シェアリング干渉計配位

計測システムを図6に示す. プロブビームは、ピンホールを通す. 干渉計は当初マッハツェ

ンダー型を構築したが、アライメント及び干渉縞の制御が困難であった. 従来の干渉システムで使用するレーザーと比較して、ピートレーザーのパルス幅が150fsと短いため、コヒーレント長さが短いためである. そこで、シェアリング干渉計に変更した結果、フリンジシフト幅の調整が可能となった.

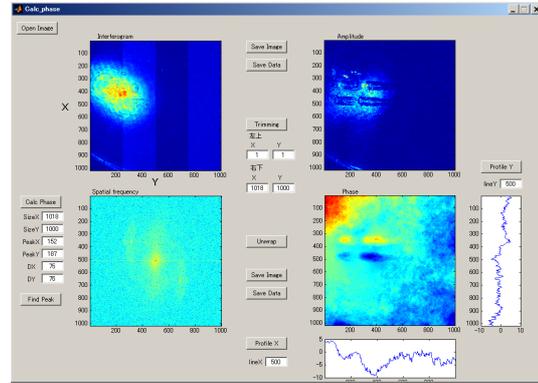


図7. 干渉縞解析ソフトGUI画面

干渉縞解析のために、新たにGUIベースで処理可能な干渉縞解析ソフトを構築した. 解析ソフトのGUI画面を図7に示す. 本ソフトウェアでは、TIFF形式画像データより、干渉縞間隔を読み取り、振幅情報と位相情報を算出する. 位相情報については、位相の飛びを検出するアンラップ機能が搭載されており、フリンジシフト量が瞬時に求まる. 従来、解析に数時間以上費やしていた作業が1分以内で可能となったため、実験効率が向上した.

信号をアーベル変換したものが、図4の下図である. 電子ビーム発生最適ガス流束はガス溜め圧力が80 atmの時に得られる. その時、1次ビームがちょうど流束の出口端に掛かるようにする. 即ち1次ビームと2次ビームの時間差を3.3psととると、この時点で、二つのビームをちょうど出会う.

アーベル変換の結果、プラズマ中心で電子密度は $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であった. 航跡場は、

$$a_0^2/(1 + a_0^2)^{1/2} (m_e c \omega_p)/e = 97 \text{ MV} \quad (2)$$

と評価でき、加速長 dephasing length は

$$\gamma^2 \phi \lambda_p (1 + a_0^2)^{1/2} = 0.45 \text{ mm} \quad (3)$$

となる. ここで $\gamma^2 \phi = nc/n_e = 58$ ,  $\lambda_p$ はプラズマ波長 $6 \mu\text{m}$ ,  $nc$ は遮断密度で $1.7 \times 10^{21} \text{ /cm}^3$ である.

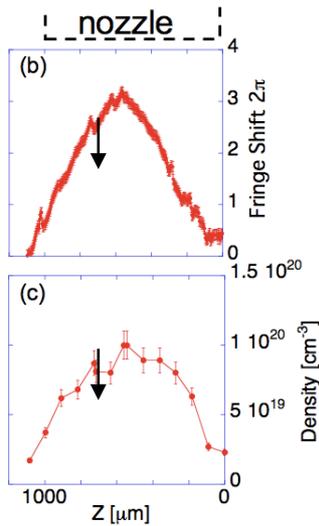


図 8. プラズマ電子密度分布

図4右下を再度図8にプロットする。  
 $z=600 \mu m$ 付近にプラズマ密度のくぼみがあることがわかる。ここは、レーザーパルスが丁度到達している点と一致する。プローブパルスのパルス幅が100fsであるため、空間分解能は  $30 \mu m$ である。くぼみの深さと幅はそれぞれ  $(1.6 \pm 0.8) \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $130 \pm 30 \mu m$ であった。

このくぼみは80気圧未満のガスパフ圧力では観測されなかった。また、このくぼみが観測された条件下において、高品質電子ビームの特徴の一つであるエネルギー準単色化(図6)に成功した。故に、このくぼみは単色電子ビーム発生時にシミュレーションで予言されているプラズマバブル構造を実験的に検証した可能性がある。

#### 4. 研究成果

散乱される入射レーザー光の光子エネルギー $\epsilon_L$ と散乱させる電子ビームのエネルギー $\gamma$ に対して、逆コンプトン散乱光のエネルギーは、

$$E_r = \frac{4\gamma^2 \epsilon_L}{1 + (\gamma\theta)^2 + 4\gamma\epsilon_L / (m_e c^2)} \quad (4)$$

と与えられる。

今、入射レーザー光の波長は、800nm でエネルギーに換算すると 1.5 eV である。電子ビームのエネルギーは最大 50 MeV とすると、 $\gamma$ はせいぜい100以下それ以下である。従ってこの式の分母の第3項は、散乱光のエネルギーと電子の静止エネルギー511keV との比で、この実験ではほぼ無視できる。

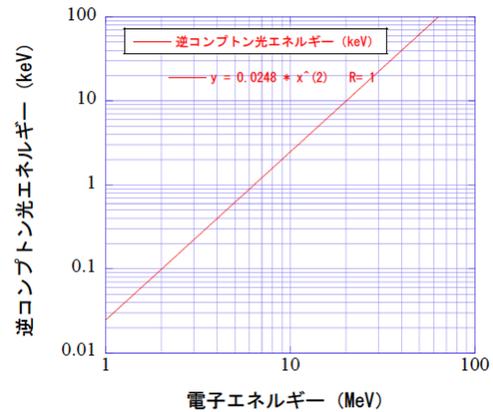


図 9. 光から逆 Compton 光への変換

電子ビーム方向のみに注目すると散乱角度 $\theta$ はゼロのオーダーなので、この項も無視できて

$$E_r \sim 4\gamma^2 \epsilon_L \quad (5)$$

としてよい。これを図9にプロットする。その時散乱角は

$$\theta \approx \frac{1}{\gamma} \quad (6)$$

となるので、電子ビームのエネルギー $\gamma$ が大きければ大きいほど、散乱角は小さくペンシルビームのように絞り込むことが出来る。これが応用上逆コンプトン散乱光の最大の利点といえる。 $\gamma=100$ なら

$$\theta = 1/100 = 0.3^\circ \quad (7)$$

である。

#### (1) 実際レーザー照射配位

図4のようにレーザー光を対向させ、一方のレーザーでガスジェット内に航跡場という相対論的位相速度をもつプラズマ波を励起する。図10が実際の配位で下側の軸外し放

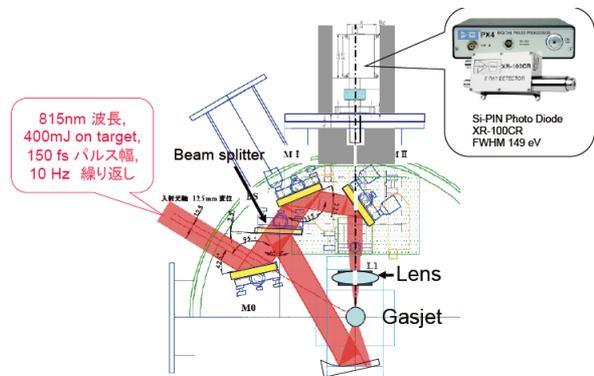


図 10. レーザー対向照射配位とシングルフォトン X線検出器

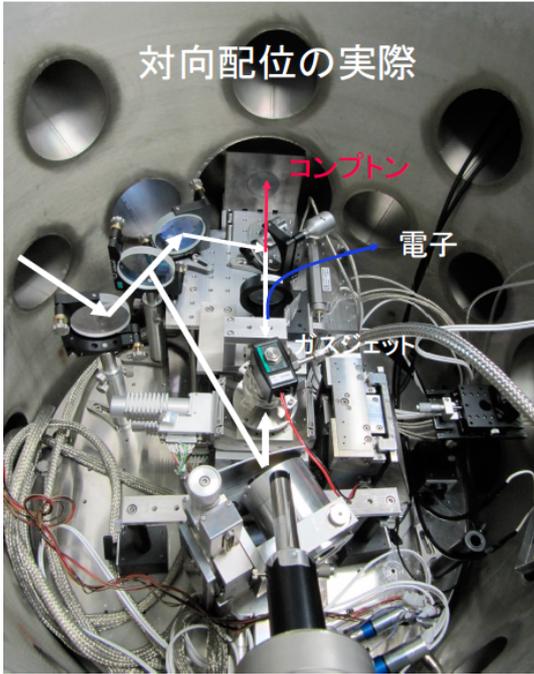


図 11. 真空容器内のレーザー対向照射配位の実際写真

物面鏡 (OAP) で集光する. 図 11 は実際の写真で図 10 と同じ方向からみたものである.

## (2) 電子ビーム計測

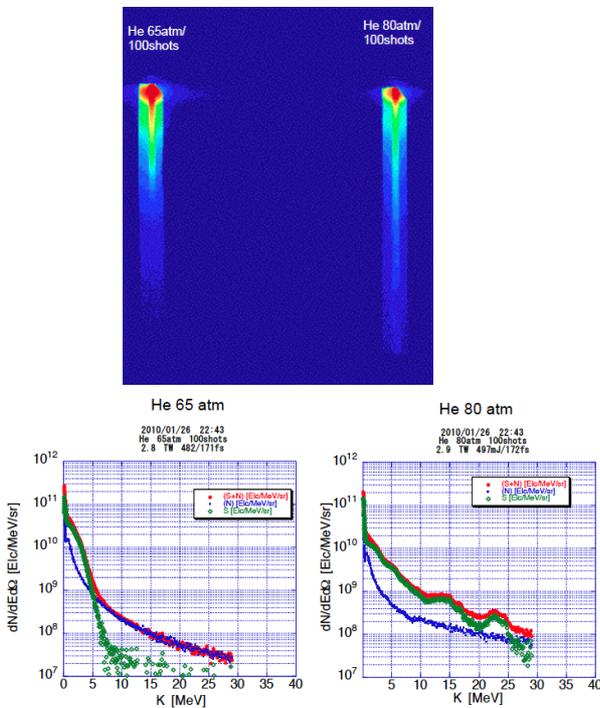


図 12. 電子スペクトルのガスジェット背圧依存性. (上) IP フィルム上の電子スペクトル. 上端はエ

ネルギーゼロ、下端が 29 MeV に対応する。(下) 横軸エネルギーに再プロットしたもの. 赤:生データ、緑:背景ノイズ、青: 正味電子スペクトル.

航跡場によって加速された電子ビームのエネルギースペクトルを計測するために電子スペクトルメーター (ESM) をこのレーザーの下流に設置した. ダイポール磁場でエネルギー分解した電子スペクトルをイメージングプレート (IP) に記録するもので, 検出立体角は,  $3.1 \times 10^{-4}$  str で, 最大 29 MeV まで検出可能である. IP から読み取ったものが図 12 である. 左はガスジェットの背圧が 65 atm, 右は 80 atm の時でそれぞれ 100 ショットずつ重ねどりのものである.

上の図は, IP フィルム上の電子スペクトルで, 上端はエネルギーゼロ、下端が 29 MeV に対応する. 下図は, 横軸エネルギーに再プロットしたもの. 赤は, IP 中心線上の生データ, 緑は, IP 縁の背景ノイズをプロットしたもの. 青は, 2 者の差をとった正味電子スペクトルである.

右側の 80 atm の時, 14 MeV to 23 MeV に準単色の電子のコブが見える. 23.3 MeV での荷電量は 100 ショットで 74 fC、集光角は 2 mrad. 但し荷電量は [文献 13] に準拠して求めた. IP.13) 65 atm ではこのようばコブは見られない. レーザー強度が足りないためと思われる. 図 12 は, 右下の図を拡大したもの.

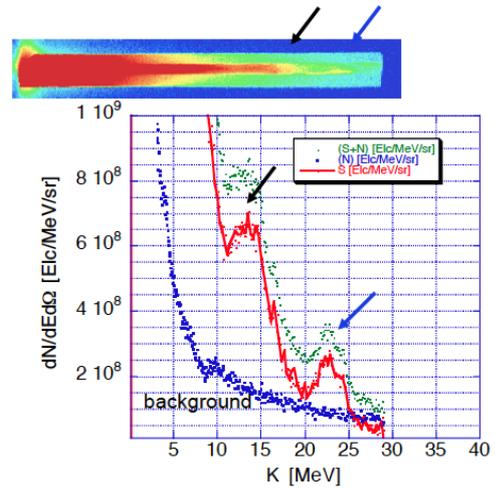


図 13. 図 12 の右下の図を拡大したもの

## (3) X線検出

フォトンカウンティングモードで動作する X線検出器 (Si-PIN photodiode, XR-100CR, FWHM: 149 eV, Be 窓厚 0.5 mm, Si 厚さ 0.5 mm)<sup>8)</sup> をレーザー光軸上、2 番目のビームの上流に設置した. 図 9 にあるようにターゲット

から散乱される X 線は、先ず集光レンズの中心に開られた直径 8mm の穴を通り、長さ 5 cm、内径 2 mm の鉛コリメーターを通して検出器に到達する。検出器のエネルギー分解能は 1 チャンネルあたり 35 eV である。コンプトン散乱光量は平均ショットあたり 0.1 光量子と予想され、1000 ショットの重ねどりで結果をえた。散乱光のほとんどは電子ビームが周辺機器に衝突して発生する直接の制動輻射 X 線であり、そのうちコンプトン散乱光は 1 % 程度である。そのため、2 番目のレーザービームの有りの無しのデータを図 14 に取り、その差をコンプトン散乱光とし図 15 にプロットした。

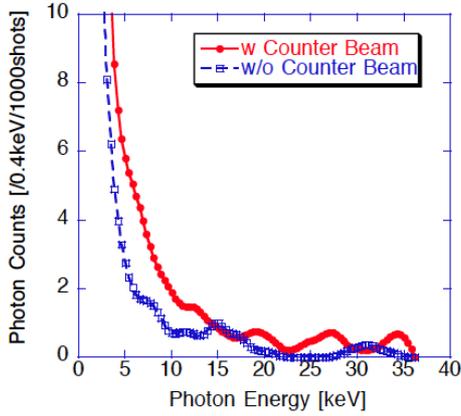


図 14. 軸上後方散乱 X 線 (フォトンカウントモード)

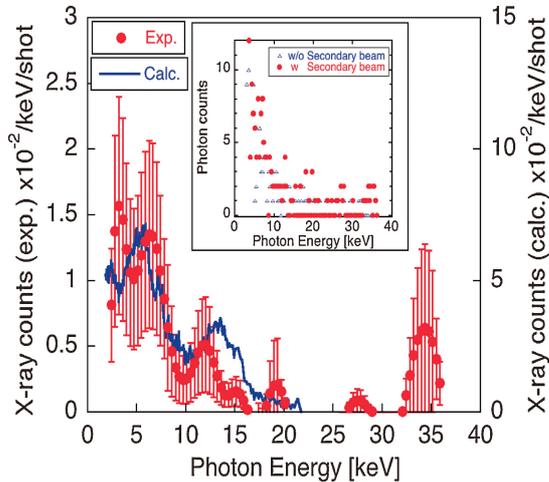


図 15. 軸上コンプトン散乱 X 線 (フォトンカウントモード)

生データは、11チャンネル毎 (0.385 keV) に平均して赤点でプロットした。その際の標準偏差をエラーバーとした。ショット毎のバラつきはターゲットから 1.2m の位置のプラスチックシンチレーターでモニターして補正した。

図中の青線は、図 13 から求めた電子ビームスペクトルをもとに下記の式<sup>1,2)</sup>

$$\frac{dN_x}{dE_x} = \frac{\alpha_f}{8\epsilon_L} a_0^2 m_e \gamma N_0 \frac{dN_e}{dE_e} d\Omega \quad (10)$$

を使って求めたものである。この式で  $\alpha_f$  は微細構造定数、 $N_0$  は 2 番目のレーザーの振動子数、 $N_e$  は衝突電子数を意味する。加速電子のエネルギースペクトルは、

$$m_e \gamma c^2 \frac{dN_e}{dE_e} \quad (11)$$

とした。集光角  $d\Omega$  は 50  $\mu\text{sr}$  だった。図の青線の 5, 13, 22 keV ピークは、電子ビームの準単色ピーク 14, 23 MeV に対応する逆コンプトン散乱光の計算値である。

赤線の検出された X 線ピークの 27 と 34 keV がこれらに対応する実際の逆コンプトン光と考えられる。

2keV 以下の X 線は、検出器の全面の窓で遮断されるので、3keV に見えるピークはピークでない。図 15 の左側に実験で得られたフォトン数 (赤線)、右側に計算で得られるフォトン数 (青線) をプロットしているが、絶対値は 5 倍の範囲内でほぼ一致していることから、実験的に得られた散乱光は数値的に予測される逆コンプトン散乱光と結論される。

### コンプトン光子の導出

今の場合、観測角度  $\theta$  は光軸に対して 0 なので単位立体角あたりの光子数  $dN_x/d\Omega$  は Klein-Nishina formula で簡単に与えられる。電子のローレンツファクターは 1 よりかなり大きい ( $\gamma^2 \gg 1$ ) としてよいので、立体角は小さい ( $d\Omega \ll 1$ )。

$$\frac{dN_x}{d\Omega} = 4\gamma^2 N_e N_p \sigma(\gamma E_L) / S_c \approx 4\gamma^2 N_e N_p r_e^2 / S_c \quad (1)$$

ここで  $E_L$  は入射レーザー光子のエネルギー、 $N_e$  は衝突する電子の数、 $N_p$  は衝突光子数、 $S_c$  は衝突面積、 $\sigma$  は Klein-Nishina 断面積。  $r_e = e^2 / (4\pi \epsilon_0 m_0 c^2)$  は電子の古典半径である。最大光子エネルギー  $E_{max} = 4\gamma^2 \hbar \omega_L$  は前方輻射の時に与えられる。

加速電子のスペクトルを  $N_e \Phi(\gamma) = m_0 c^2 dN_e / dE_e$  と仮定する。ここで  $N_e$  は加速バンチの中に含まれる電子の総数である。Eq. (1) を  $\Phi(\gamma)$  に渡って積分する。立体角  $d\Omega \approx 20 \mu\text{sr}$  の中ではフラットとする。815 nm レーザーで X-ray photon density は

$$\frac{dN_x}{dE_x} \approx 0.32 \gamma N_e N_p r_e^2 \Phi(\gamma) d\Omega / S_c, \quad (2)$$

となる。  $E_x = \hbar \omega$  は X-ray の光子エネルギー

で  $E_{max}$  に等しい。

#### (4) 放射光の空間分布

前節で得られた X 線散乱光がコンプトン散乱光ならば、レーザー軸の周りだけに局在しているはずである。それを観測するために、図 16 のように、照射容器の 3 箇所（ポート）で、同じ PIN X 線検出器による検出を試みた。

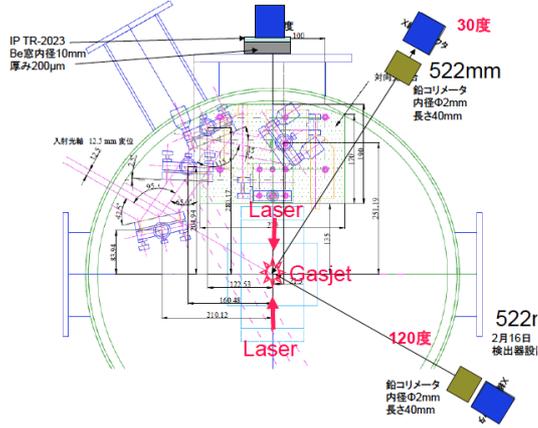


図 16. 空間分布測定のための PIN X 線検出器配置

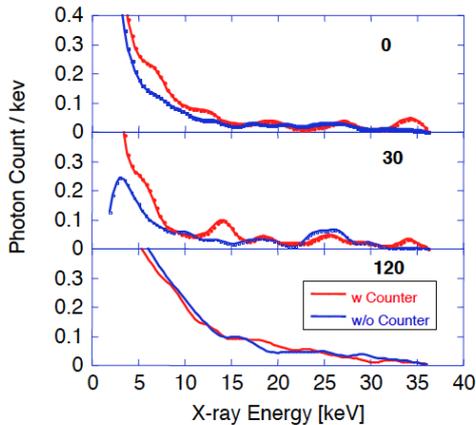


図 17. コンプトン散乱光スペクトルの角度依存性

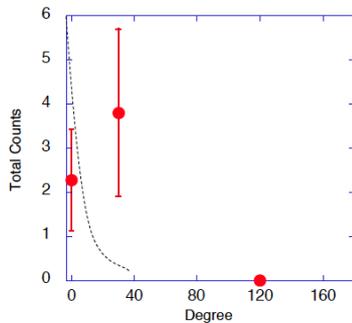


図 18. コンプトン散乱光総量の角度依存性。点線は予測計算値。

図18は、図17にあるデータから正味の散乱光を抜き出して積分したものを角度ごとにふろっとしたものである。予測値からするとほとんど0°付近に集まるべきであるが、実際は30°付近に強い散乱光がみられる。1番目のレーザーによる電子ビーム軸と2番目の散乱レーザー光軸がズレているためかもしれないが、実測上はほとんどズレがみられない。散乱光の空間集光性（空間分布）は継続課題である。

#### 参考文献

- 1) H. Schworer, B. Liesfeld, H.-P. Schlenvoigt, K.-U. Amthor, and R. Sau  
erbrey: *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 014802.
- 2) P. Catravas, E. Esarey, and W. P. Leemans: *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001) 1828.

#### (5) 成果と今後の課題

##### ① 研究成果

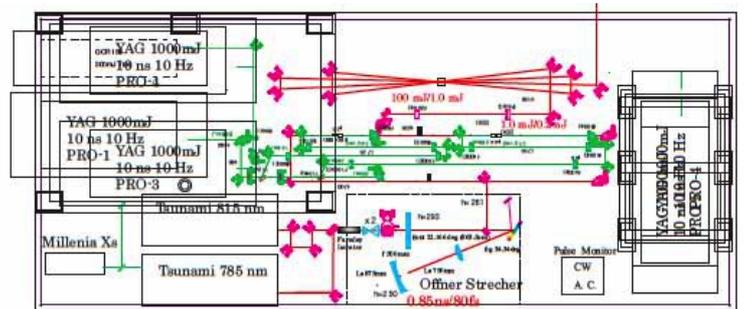


図 19. (上) 2 段立体構成高出力超短パルスレーザー装置図 (下) その光学配置図

##### ② 遠隔透視に必要な X 線量の推定

レーザー加速電子と極短パルスレーザー衝突による全光学的構成の逆コンプトン散乱 X 線に成功したが、その発生 X 線量はまだ微

弱な物である。X線発生量増強を検討するに当って、まず昨年度発生X線量の定量的推定と、実用時に必要とされるX線量の推定を行い、現状レベルの認識、X線増強の目標数値を明確化する事とした。

### ③発生X線量の推定（現状把握）

実験レイアウトから、発生X線の検出立体角は既知である。また対向レーザー有無の実験でのX線カウント数の差分を取る事により、高エネルギー電子の制動輻射によるX線量をキャンセルし、電子ビーム-対向レーザー衝突により発生する逆コンプトン散乱X線の検出数を推定することができる。

これらから、H21年度発生逆コンプトン散乱X線量は、電子ビーム進行方向で  $2.4 \times 10^3$  photon/shot/sr と、推定される。

### ④ 遠隔透視に必要とされるX線量の推定

図 20 は、後方散乱 X 線光子数見積を行う際の、光源、検出器、透視対象の位置関係、一次 X 線条件、後方散乱 X 線の検出条件等のモデル化を示している。厳密に言えば、一次 X 線を対象に向けて走査するため、透視対象物への一次 X 線の入射角は、対象物中央と端部では差が生じる。しかし、遠隔透視（離隔距離 10m 程度を想定）の場合、その偏向角は数十 mrad と小さく、後方散乱 X 線光子数の概略評価に影響を与えないため、このモデルでは一次 X 線の透視対象への入射は垂直入射として扱っている。

また、同様に後方散乱 X 線の検出立体角も厳密に言えば透視対象の中央部、端部で異なるが、概略検討には影響が無いため中央部

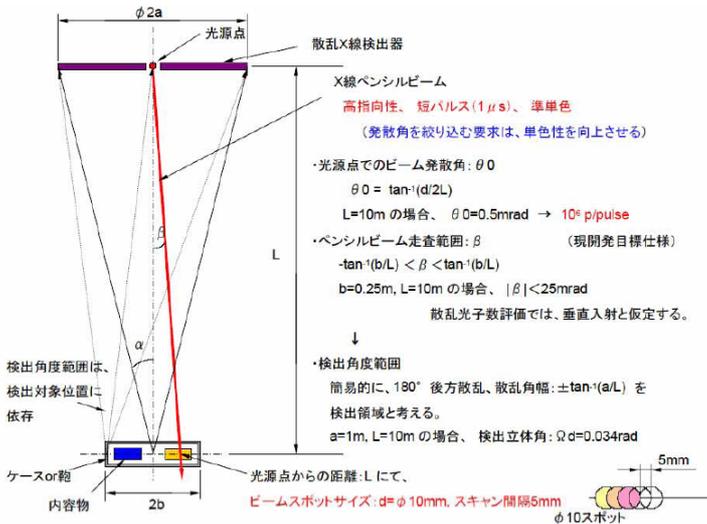


図 20. 後方散乱 X 線光源、検出器、透視対象の位置関係、一次 X 線条件、後方散乱 X 線の検出条件等のモデル化

での検出立体角で評価している。図 21 は、

後方散乱 X 線光子数の計算概要を示したものである。透視対象の深度  $z=0$  の点からの後方散乱 X 線量に着目すれば、この量は概略以下のように評価できる。

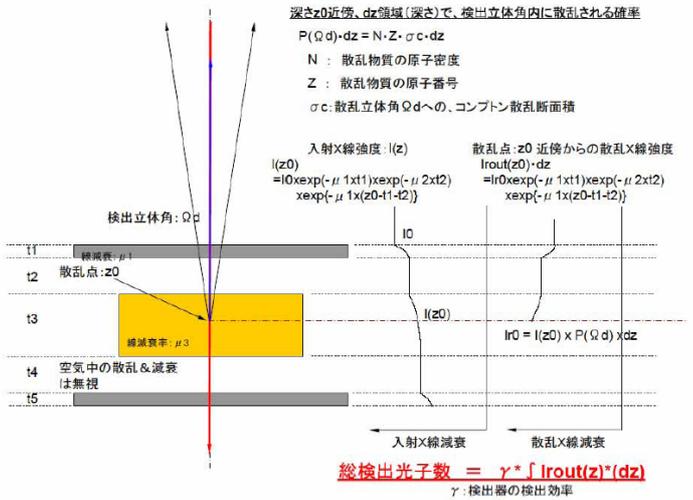


図 21. 後方散乱 X 線光子数の計算概要

( $z = z_0$  からの後方散乱 X 線量)  
 = (入射 X 線光子数) x ( $z = z_0$  までの一次 X 線透過率) x ( $z = z_0$  での所定散乱立体角中への散乱確率) x ( $z = z_0$  から対象物表面に抜けるまでの X 線透過率)

$$\text{総検出光子数} = \gamma \int I_{\text{out}}(z) \cdot (dz)$$

物質	検出散乱光子数/pulse
無し(隙間)	183.5
鉄	142.5
水	440.0

入射X線光子数:  $1 \times 10^6$ /pulse,  $\gamma = 0.5$  を仮定

シンチレータの材質と厚さを適当に選べば、捕集率 ~ 100%  
 検出効率はPMTの量子効率に依存

図 22. 透視対象物のモデル化

X 線後方散乱は、ほとんどが X 線-電子のコンプトン散乱によるものであり、上記式における散乱確率の計算にはクライン-仁科の式を用いて計算を行う。透視対象物を図 20 でモデル化し、後方散乱 X 線光子数の見積を行うと、10m 遠方の対象物に、一次 X 線光子数として  $1 \times 10^6$  光子/shot を照射した場合、直径 2 m の大面積 X 線検出器で観測される後方散乱 X 線光子数は図 22 中の表のようになる。この計算結果に示されるように、この条件で 1shot 当たり数百個の後方散乱 X 線光子

が観測されると見積もられる。また、この程度の X 線光子を検出できれば、後方散乱 X 線の発生、検出に関わる量子ノイズ（確率的な揺らぎ）があっても、鉄のような重元素物質と水のような軽元素物質の境界を後方散乱 X 線光子数の差で検出できる可能性が示されている。したがって、実用レベルの目標として 10m 遠方の物体を分解能 5mm 程度で透視することを想定した場合、出射  $\theta = 0^\circ$  方向の X 線強度として、 $10^{12}$  photon/sr/shot 程度の強度が必要となる。

以上の検討結果から、原理実証実験レベルとして、離隔距離 2m、検出器口径 10cm（現有検出器サイズ）を想定し、1 次元構造体を対象に、10Hz 運転、1 時間の積算ショットでの画像化を想定した場合（重元素物質と軽元素物質で後方散乱 X 線計測数に有意な差が出る）でも、昨年度発生 X 線強度の 100 倍程度の強度が必要と考えられる。

### (6) 今後の目標性能と技術課題

X線エネルギー160keV以上、広がり角6mrad以下を実現し1m遠方の模擬物体の遠隔断層情報が取得可能である事を実証する。そのための技術課題を下記表に纏める。

表1. 技術課題と達成度

	技術課題	達成レベル
1	指向性が良く高強度のペンシルビームX線の実証（重要課題）	エネルギー > 160 keV 指向性（広がり角） < 6 mrad 繰り返し > 0.5Hz
2	遠隔での模擬物体の検出の実証（重要課題）	離隔距離 > 1 m 計測時間分解能 < 200ps 断層分解能 < 3cm 遮蔽体厚さ > 1cm
3	スキヤニング可能な照射装置の小型化	水平スキヤンレンジ > $\pm 20^\circ$ 垂直スキヤンレンジ > $-0-20^\circ$ 分解能 < $0.2^\circ$
4	2D透視情報取得の実証	1m離隔, 1cmの土砂遮蔽体で模擬物体(20cmプラスチック)の透視情報取得

### 50m遠隔の地中30cm/雪中1mの透視の可能性

雪、ないし水は成分がH, Oなので、人体との識別ができるが、土砂はSi, Oが主成分のため、人体との識別が難しく、実用化上の課題である。

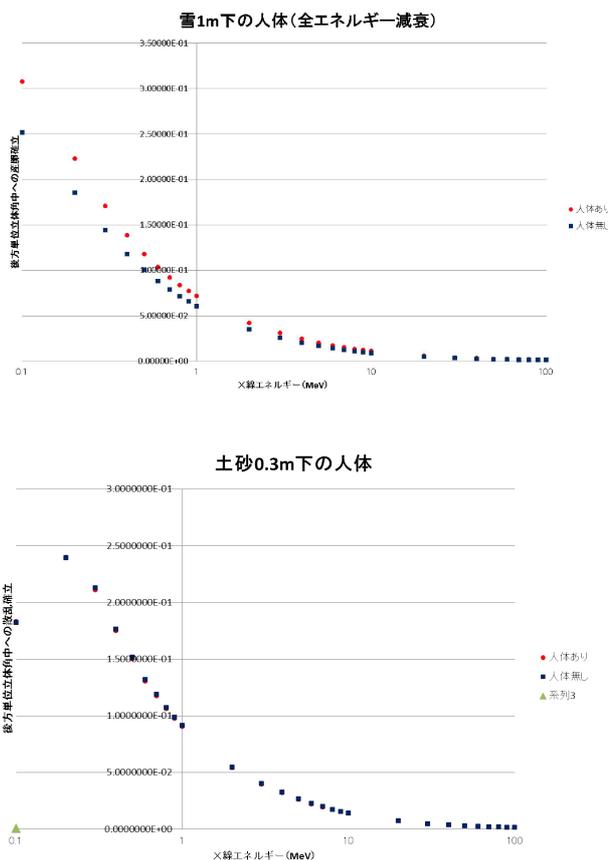


図 23. 雪中（上）、“土砂中（下）の人体からの後方散乱光強度：赤点が人体有り、黒点は人体なしの場合。

### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 10 件）

[1] Yoneyoshi Kitagawa, Yoshitaka Mori, Hajime Kuwabara, Shuji Ootsuka, Takahiro Makino, Mari Ohta, Tetsuya Suzuki, “Ultra-intense Laser Applications to the Industries at GPI”, Advanced Accelerator Concepts (13th Advanced Accelerator Concepts Workshop at Santa Cruz, Cal. 27 July- 2 August 2008) edited by C. B. Schroeder, W. Leemans, and W. Esarey, AIP Conference Proceedings vol.1086, 171-176 (2009). ISBN: 978-0-7354-0617-9

[2] Y. Mori, Y. Sentoku, K. Kondo, K. Tsuji, N. Nakanii, S. Fukumochi, M. Kashiwara, K. Kimura, K. Takeda, K. A. Tanaka, T. Norimatsu, Tsuyoshi Tanimoto, H. Nakamura, M. Tampo, R. Kodama, E. Miura, K. Mima, and Y. Kitagawa, “Auto-injection of electrons into a wake field using a capillary with attached cone”, Physics Plasmas, 16, 1231031-1-5 (2009). DOI:10.1063/1.3271152

[3] Shuuji OOTSUKA, Yoshitaka MORI, Takahiro MAKINO, Mari OHTA, Hajime

KUWABARA, Yoneyoshi KITAGAWA  
“Influence of femtosecond laser generated X-ray irradiation on germination of *Aspergillus Awamori*”, *The Review of Laser Engineering*, 38, 386-388 (2010).

[4] 関根尊史, 川嶋利幸, 佐藤仲弘, 高木勝, 菅博文, 北川米喜, 森 芳孝, 花山良平, 沖原伸一郎, 藤田和久, 石井勝弘, 中村直樹, 宮本康司, 東 博純, 元廣友美, 日置辰視, “高繰り返し高強度レーザー HAMA の開発と DD 核融合中性子の発生”, レーザー学会第 407 回研究会報告「短波長光の発生とその応用」 No. RTM-10-56, 2010, 12, pp.17-21 (2010).

[5] Y. Mori †, K. Fujita, R. Hanayama, K. Ishii, Y. Kitagawa, H. Kuwabara, T. Kawashima, “INVERSE COMPTON SCATTERING BY LASER ACCELERATED ELECTRONS AND ITS APPLICATION TO STANDOFF DETECTION OF HIDDEN OBJECTS”, *Proceedings of IPAC '10, Kyoto, Japan*, Published by the IPAC'10 OC/ACFA (23-28 May 2010 at Kyoto International Conference Center) THPD054, pp.4404-4406(2010) on WEB site.

[6] Yoneyoshi Kitagawa, Yoshitaka Mori, Ryohei Hanayama, Shinichiro Okihara, Kazuhisa Fujita, Katsuhiko Ishii, Toshiyuki Kawashima, Nakahiro Sato, Takashi Sekine, Ryo Yasuhara, Masaru Takagi, Naoki Nakamura, Yasushi Miyamoto, Hirozumi Azuma, Tomoyoshi Motohiro, Tatsumi Hioki and Hirofumi Kan. “Efficient fusion neutron generation using 10 TW high-repetition rate diode-pumped laser”, *Plasma and Fusion Research: Letters*, 6, 1306006 (2011). DOI: 10.1585/pfr.6.1306006

[7] Y. Kitagawa\*, Y. Mori, O. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, T. Sekine, N. Satoh, T. Kurita, M. Takagi, T. Kawashima, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, H. Azuma, T. Motohiro, T. Hioki, Y. Nishimura, A. Sunahara, and Y. Sentoku, “Fusion Using Fast Heating of a Compactly Imploded CD Core”, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 155001 (2012) [5 pages]. DOI: [10.1103/PhysRevLett.108.155001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.155001)

[8] Yoshitaka Mori, Hajime Kuwabara, Katsuhiko Ishii, Ryohei Hanayama, Toshiyuki Kawashima, Yoneyoshi Kitagawa “Head-On Inverse Compton Scattering X-rays with Energy Beyond 10 keV from Laser-Accelerated Quasi-Monoenergetic Electron Bunches”, *Applied Physics Express* **5**, (2012)056401. DOI: 10.1143/APEX.5.056401

[9] Y. Mori and Y. Kitagawa, “Acceleration of cone-produced electrons by double-line Ti-sapphire laser beating”, *Physics of Plasmas* **19**, 053106-1-6 (2012).

[http:// dx.doi.org/ 10.1063/ 1.4707390](http://dx.doi.org/10.1063/1.4707390)

[10] レーザー装置を用いた科学研究の新展開3. 超高強度レーザーのもたらす可能性” プラズマ

核融合学会誌(J. Plasma Fusion Res. 86, No. 10, 582-588 (2010).

〔学会発表〕(計3件)

[1] 北川米喜, 森 芳孝, 藤田和久, 桑原一, 石井勝弘, 花山良平, 川嶋利幸, “レーザー加速電子によるレーザー光の逆コンプトン散乱エックス線発生と遠隔透視応用” 日本物理学会第65回年次大会平成22年3月22日岡山大学

[2] 森芳孝, 桑原一, 藤田和久, 石井勝弘, 花山良平, 川嶋利幸, 北川米喜 レーザー加速電子によるレーザー逆コンプトン散乱X線発生と遠隔透視応用 プラズマ核融合学会第27回年会 2010. 11. 30-12. 4札幌市北海道大学

[3] 森芳孝, 桑原一, 石井勝弘, 花山良平, 川嶋利幸, 北川米喜 “レーザー加速電子によるレーザー逆コンプトン散乱X線発生と遠隔透視応用IV” 日本物理学会第67回年次大会 2012. 3. 24-3. 27. 関西学院大学

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: 電子加速装置

発明者: 桑原 一, 河口 紀仁, 瀧上 健児,

北川 米喜, 森 芳孝

権利者: IHI 株式会社

種類: 特許 H05H 1/00

番号: 特願 2010-108068

出願年月日: 2010年5月10日

国内外の別: 国際

名称: 核融合ターゲット材、核融合装置、及び核融合方法

発明者: 関根尊史、川嶋利幸、菅博文、北川米喜、森芳孝、東博純、日置辰視、元廣友美、宮本康司、中村直樹

権利者: 浜松ホトニクス株式会社、トヨタ自動車株式会社

種類: 特許 G21B 1/15(2006.01), G21B 1/03(2006.01)

番号: PCT/JP2010/072573

出願年月日: 2010年12月15日

国内外の別: 国際

○取得状況 (計 2 件)

名称: 遺伝子改変装置

発明者: 北川米喜

権利者: 学校法人光産業創成大学院大学

種類: 特許 G21K 5/00

番号: 特許第 4713362 号

取得年月日：平成 23 年 4 月 1 日  
国内外の別：国内

名称：核融合燃料保持部材及び核融合燃料カプセル

発明者：北川米喜

権利者：学校法人光産業創成大学院大学

種類：特許 GPI2006011

番号：特許第 4989301 号

取得年月日：平成 24 年 5 月 11 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.gpi.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北川 米喜 (KITAGAWA YONEYOSHI)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・教授

研究者番号：40093405

### (2) 研究分担者

森 芳孝 (MORI YOSHITAKA)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・助教

研究者番号：60440616

藤田 和久 (FUJITA KAZUHISA)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・准教授

研究者番号：30410533

石井 勝弘 (ISHII KATUHIRO)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・准教授

研究者番号：30311517

花山 良平 (HANAYAMA RYOUHEI)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・助教

研究者番号：20418924

### (3) 連携研究者

桑原 一 (KUWABARA HAJIME)

株式会社 IHI・技術開発本部

川嶋 利幸 (KAWASHIMA TOSHIYUKI)

浜松ホトニクス株式会社・大出力レーザー開発部・部長代理