

成果報告書

平成22年度科学技術試験研究委託事業

「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」

(X線検出器の開発)

平成23年5月

学校法人早稲田大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、学校法人早稲田大学が実施した平成22年度「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」(X線検出器の開発)の成果を取りまとめたものです。

委託業務成果報告書

業務題目

「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」 (X線検出器の開発)

1. 委託業務の目的

超伝導高周波加速器技術とレーザーパルス蓄積技術の融合によって、ポストゲノム時代の生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、医療診断、マイクロリソグラフィへの利用を画期的に飛躍させる軟X線から硬X線領域の小型高輝度X線発生装置(10m×6m程度)を実現する。本装置実現のために、高品質大強度電子ビーム生成装置、大強度・高電界超伝導高周波加速装置、高品質短パルス大強度レーザー蓄積装置、ミクロン精度での電子ビーム軌道制御技術及び、レーザー光路精密調整といった技術の実用化を図る。よって、超伝導高周波加速器技術を使った5 nm～0.025 nm 波長領域の小型高輝度X線発生装置の開発とその実用化に必要な基幹技術の確立を行うことを目的とする。

さらに大強度安定化に必要な次の技術開発を行う。500～750kV数十mAの高電圧DC電子源開発、高性能光L-band RF Gun開発、小型高信頼性L-band高周波源開発および3次元4枚ミラーリング光蓄積装置開発を行う。これにより、生成するX線輝度を格段に高くすると同時に、レーザー光の偏光を高速で制御することによってのみ可能な世界でも特筆すべき高速可変偏光小型軟X線源を実現し、「軟X線領域における円二色性光源」として実用化を図る。

このため、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人広島大学、学校法人早稲田大学、東芝電子管デバイス株式会社及び株式会社日立ハイテクノロジーズは共同で業務を行う。

学校法人早稲田大学では、X線発生総合試験において、次の項目について、高い精度でX線のエネルギー及び角度分布等の計測を可能とする以下のシステムの開発を実施する。

2. 平成22年度（報告年度）の実施内容

2. 1 実施計画

① X線検出器の評価試験

早稲田大学内に設置したX線検出器試験装置にて下記③で使用予定の検出器試験を継続して行う。実際にはレーザーコンプトン散乱X線ほど線源サイズは小さくないものの、強度は十分な準単色制動放射X線を用いて、これまでに構築したX線検出器の試験を行う。また、本項目で得られる成果は実機で得られた結果との比較にも用いることができると考えている。

② レーザーコンプトン散乱X線の検出試験（於KEK-LUCX）

平成22年度夏ごろより予定されている高エネルギー加速器研究機構内LUCX加速器における前段試験においてこれまでに開発した検出器を持ち込み、検出試験を行う。本プロジェクトの最終目標としているX線のエネルギーより1桁程度低いエネルギーであるため、全ての検出器を利用できるわけではないが、特にレーザーコンプトン散乱の一つの特徴である大面積のX線描画に関して評価できるものと考えている。

③ X線の偏光測定に関する検討と検出器設計

本プロジェクトにおけるX線源において期待され始めているもう一つの特徴としてX線の偏光高速制御が挙げられる。衝突用レーザー共振器側の新しい発見によって付加的に期待され始めている項目であるが、この特徴を検出器としてしっかり計測できるようにすることが要求されている。そこで、平成22年度はこのX線の偏光特性の測定方法に関して検討するとともに最終年度には検出・評価が行えるよう検出システムの設計を行う。

2. 2 実施内容(成果)

2.2.1 X線検出器の評価試験

昨年度までに、MCPによる増幅を用いたX線画像読み出しシステムの構築に成功している。これはこれまでの経験からもっともS/Nの大きな測定が期待できる検出器として開発を行っており、最初の検出に用いる予定である。この検出器を早稲田大学の加速器を用いて評価し、検出システムを立ち上げた。機器自体は昨年度報告したようにすでに立ち上がっており、画像の読み出しプログラムなどを構築した。まずは次節に報告するLUCXでの検出を念頭に検出システムを構築した。画像取得はもちろん、信号となるX線が到達する時間のみにゲートをかけてより大きなS/Nで画像を取得できることを確認した。また、画像を蓄積・平均化するシステムを組みX線信号とバックグラウンドのみのイベントを自動的に差し引くシステムとした。これによりレーザーコンプトン散乱X線の検出は準備完了となった。

2.2.2 レーザーコンプトン散乱X線の検出試験

LUCX における X 線検出試験を始めるにあたり、レーザーコンプトン散乱用レーザーシステムの立ち上げを行った。バースト増幅のための増幅システムを増強することによってより長いかつ可変なバースト幅を実現した。以下の図が設置した際の写真となっている。

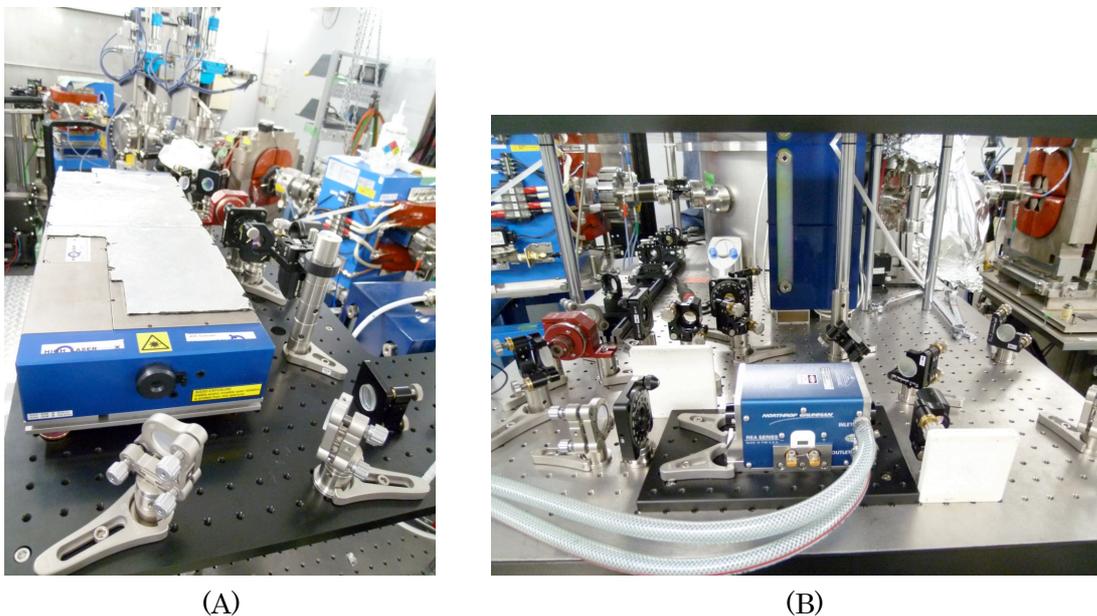


図 1：設置したレーザーシステムとバースト増幅器の写真
 (A)モードロックレーザー(B)バースト増幅器

図 1 (B)に示すようにモジュール式の LD 励起バースト増幅器を設置した。LD に流す電流の幅を制御することで増幅するバースト時のゲイン及びバースト幅を調整することができる。新しく設置したバースト増幅器システムの試験結果を以下の図 2 に示す。

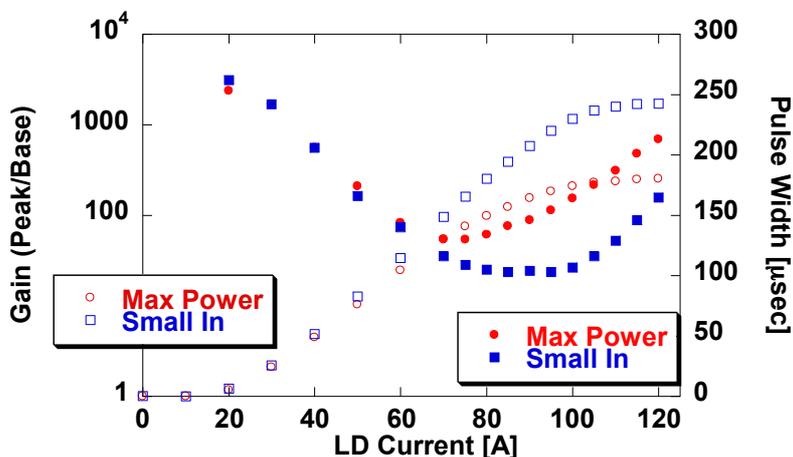


図 2：LD 励起バースト増幅器試験結果

結果を見てわかるように電流値が 80A を超えるあたりで増幅率が頭打ちとなり飽和していることがわかる。これは増幅されたレーザー光強度が増幅媒質である Nd:YAG の飽和強度に達していることを示している。今後より高い増幅率を目指す場合にはより径の大きな増幅媒質を用いてレーザー径を拡げることで強度を向上させる必要がある。実際にこれを用いたバースト蓄積を行った際の様子を以下の図 3 である。紫線が共振器内のレーザー強度を、黄線がバースト蓄積部を、緑線が共振器 FB 用信号を示している。紫線を見てわかるようにバースト時に蓄積強度が格段に

向上していることがわかる。また、(A)(B)を比較してわかるように LD Current 140A を超えて飽和している(B)ではバースト幅が広くっており、これは共振器内でも同様のことが起こっていることがわかる。バースト時の蓄積強度としては、最大 60kW を達成している。改良前の 40kW から向上し、かつバースト幅の制御が可能となったことで、より効率よく X 線が生成できるようになった。

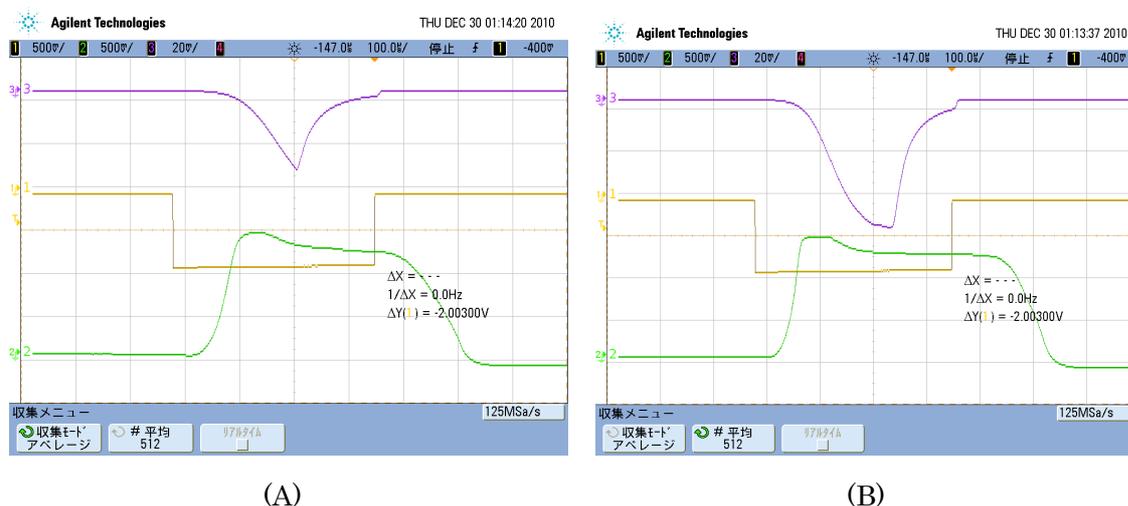


図 3 : バースト蓄積時の波形(A)LD Current 100A (B)LD Current 140A

レーザーの準備とともに電子ビーム側の準備も整え、衝突実験の準備を行った。LUCX 加速器は改造を行い、バックグラウンドを極力減らし、X 線の検出器スペースを広くとるようにした。(図 4 参照)そこで衝突試験用のビーム調整が必要となる。これに要求される事項としては、「X 線検出器においてバックグラウンドが小さいこと」「レーザーとの衝突点において小さく絞れていること」である。

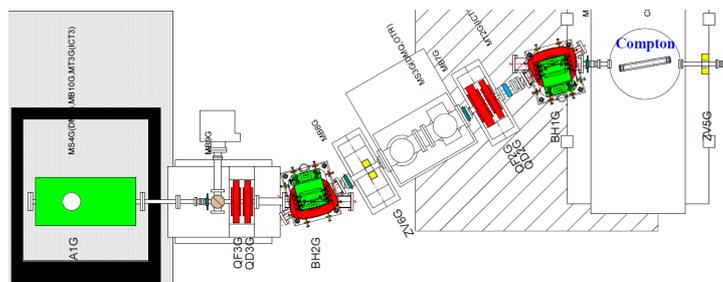


図 4 : 改造後の LUCX ビームライン(衝突点以降)

すでに実績のある検出器である MCP を設置し、ビーム調整にも用いつつバックグラウンド計測を行った。図 5 に設置した様子を、図 6 に検出したバックグラウンド波形を示す。



図5：ビームラインに設置した MCP 検出器

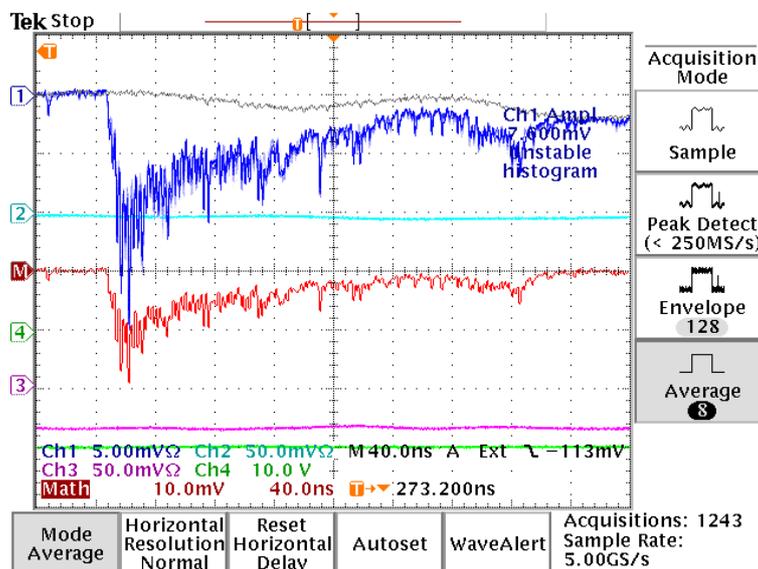
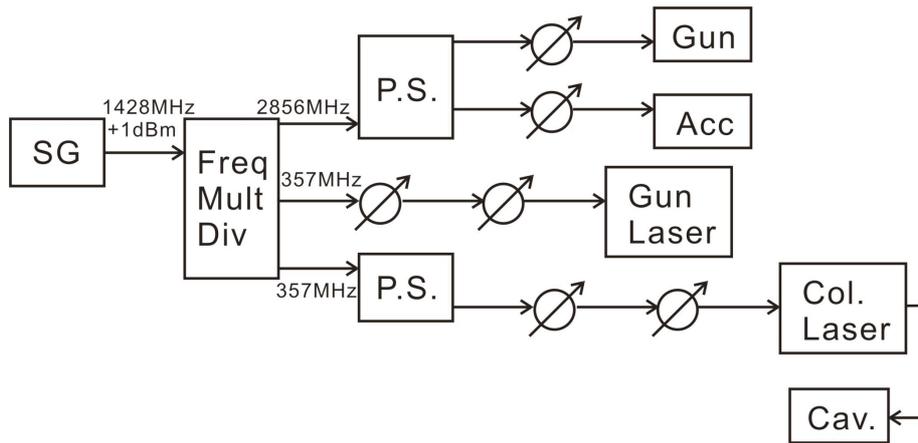


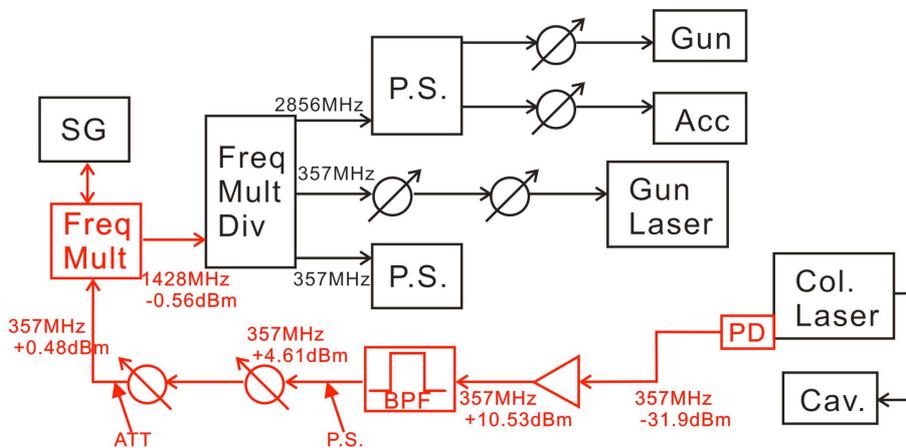
図6：MCPによって取得したバックグラウンド波形

図5の手前に示している鉛に覆われた真空容器が MCP を付属したチャンバーである。X 線は奥に見えている偏向電磁石の直線ラインから空気中を輸送されて検出器に入る。検出器はアパーチャー30 mmφであり、X 線のエネルギー幅 10%が検出器内に入るように設置している。図6は検出したバックグラウンド信号を示している。青線が生信号・赤線が電子ビーム起因のバックグラウンドである。この波形取得時は電子ビーム 100Bunch/train・40MeV・40nC/train の実績のあるビームパラメータを用いた。以前と比較して、バックグラウンド強度としては半分程度となっており、バックグラウンドの削減には成功している。今後さらにビーム調整を行うことで改善が見込まれる。さらに、以前のバックグラウンド波形と比較してバックグラウンドの見え方が違うことから、X 線と全く同じタイミングで検出器に入っているのではなく、偏向電磁石で曲げられた後やビームダンプで生成したバックグラウンドが多数混じっていると考えている。

将来の様々な利用研究を見据えて非常に複雑だったタイミング同期システムの改良を行った。従来の RF システムを図7の(A)に新しいシステムを(B)に示す。



(A)従来のRFシステム



(B)レーザーを基準としたRFシステム

図7：レーザーを基準としたRFシステム図

図中では(B)の方が複雑になっているように見えるが、衝突レーザー側では共振を維持するFBとRFに同期するFB(PLL)が混在しており、非常に複雑なシステムであった。このシステムは衝突用レーザー共振器を熟練した者でないと扱えないシステムで、再調整すら熟練者でないと難しかった。そこでこのシステムを簡易化するためにレーザー光を基準信号にするようにシステムを組み上げた。(B)の赤で示しているのがレーザーから基準信号を生成するラインである。最終的には周波数がずれすぎないようにSG(Signal Generator)とドリフトを抑える程度のFB回路を構成することになる。すでにこのシステムを導入しており、ビーム加速を行っても問題なく動作することが確認できている。

2.2.3 X線の偏光測定に関する検討と検出器設計

本プロジェクトでは、レーザー光の偏光制御によってX線に円偏光を持たせることが可能かつその高速切り替えが可能である。そこでX線の偏光、特に円偏光度の計測に関する検討を行った。これまでに報告されている論文などを整理したところ『直線偏光の計測』と『低エネルギーX線の偏光度計測』に関しては多数の報告がなされているが、10keVを超えるような硬X線での円偏光度の計測は例がない。また、1keV程度の低エネルギー領域においても放射光施設から得られる

X線のように非常に指向性の良いX線に限った測定方法となっている。そこで我々が γ 線領域のエネルギーに対して経験を持つ磁化鉄の透過率非対称性を用いる手法[M. Fukuda et al., PRL 91(2003)164801]が最も有効と判断した。これは磁化鉄と偏光したX線のコンプトン散乱断面積がスピンの方向によって異なることを用いた手法である。ただし γ 線と比較して、エネルギーが低いため、鉄の透過率は非常に低くなる。そのため多数の偏光X線が必要であり、かつ数 μm オーダー厚の磁化鉄ターゲットを製作する必要があることが分かった。検出器の概念設計は完了し、実際に偏光特性を計測する必要があるれば製作する予定である。

2.2.4 総括

昨年度までに開発したMCPベースの画像読み出し検出器をPCにおける読み出しも含め完成させた。すでにX線が得られればすぐにテストできる状況にある。KEKの小型加速器LUCXにおけるX線生成試験を開始した。衝突レーザーを立ち上げ、改良することでこれまで以上の60kWの蓄積を達成するとともにバースト幅を可変とすることができた。加速器内に設置したMCPを用いてバックグラウンド計測及びこれを用いたビーム調整を行った。加速器の改良によってすでにバックグラウンドは半分程度まで落とすことができしており、ビーム運転が上達することによってさらなる向上が見込まれる。全体のシステムとしては、熟練者以外でも衝突用のレーザーを調整できるようにレーザーを基準信号としたタイミング同期システムを構築し、問題なく動作することを確認した。

次年度はこれらを踏まえてLUCXにおけるX線生成試験を行い、X線の検出・X線の増強・X線による撮像を行う。さらに次年度末から予定されている超伝導加速器試験施設STFでの本実験に向けてバックグラウンド測定やX線生成試験の準備を行っていく予定である。

2. 3 成果の外部への発表

[1] “Photon generation by laser-Compton scattering at the KEK-ATF” S. Miyoshi, T. Akagi, S. Araki, Y. Funahashi, T. Hirose, Y. Honda, M. Kuriki, X. Li, T. Okugi, T. Omori, G. Pei, K. Sakaue, H. Shimizu, T. Takahashi, N. Terunuma, J. Urakawa, Y. Ushio, M. Washio, Nucl. Instrum. Meth., A623 (2010) 576-578.

[2] “Design of high brightness light source based on laser-Compton undulator for EUV lithography mask inspection” Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Akira Endo, International Particle Accelerator Conference 2010, Aug 2010

[3] “Multi-bunch electron beam generation based on Cs-Te photocathode rf-gun at Waseda university” Yukihiya Yokoyama, Tatsuro Aoki, Kazuyuki Sakaue, Tatsuya Suzuki, Junichiro Yokose, Masakazu Washio, Junji Urakawa, Nobuhiro Terunuma, Hitoshi Hayano, Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, International Particle Accelerator Conference 2010, Aug 2010

[4] “Pulse radiolysis with supercontinuum probe generated by PCF” Yuji Hosaka, Ryosuke Betto, Akihiro Fujita, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Ryunosuke Kuroda, Shigeru

Kashiawagi, Kiminori Ushida, International Particle Accelerator Conference 2010, Aug 2010

[5] “Cs-Te photo-cathode RF electron gun for applied researches at Waseda University”

Kazuyuki Sakaue, Hitoshi Hayano, Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, Akihiko Masuda, Tatsuya Suzuki, Toshikazu Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, 10th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, Sep 2010

[6] 「早稲田大学フォトカソードRF電子銃における応用研究の現状と今後の展望」坂上和之、青木達朗、浦川順治、柏木茂、黒田隆之助、篠原邦夫、鈴木達也、照沼信浩、早野仁司、別當良介、保坂勇志、横山悠久、鷺尾方一、第7回日本加速器学会、2010年8月

[7] 「3.5Cell S-bandフォトカソードRF電子銃開発」青木達朗、Abhay Deshpande、浦川順治、工藤昇、坂上和之、鈴木達也、高富俊和、照沼信浩、福田将史、鷺尾方一、第7回日本加速器学会、2010年8月

[8] 「早稲田大学におけるCs-TeフォトカソードRF電子銃を用いたマルチバンチ電子ビーム生成システムの開発」横山悠久、青木達朗、浦川順治、柏木茂、黒田隆之助、坂上和之、鈴木達也、照沼信浩、早野仁司、鷺尾方一、第7回日本加速器学会、2010年8月

[9] 「光共振器を用いた小型高輝度レーザーコンプトン散乱X線源開発」坂上和之、ビーム物理研究会2010、2010年11月

[10] 「早稲田大学におけるRF電子銃を用いたマルチバンチ電子ビーム生成」鈴木達也、青木達朗、浦川順治、柏木茂、黒田隆之助、坂上和之、照沼信浩、早野仁司、山本隆之、横山悠久、鷺尾方一、ビーム物理研究会2010、2010年11月

[11] 「S-band Linacを用いたTHz波発生とイメージング応用」熊木雅史、黒田隆之助、山口映理子、豊川弘之、坂上和之、鈴木達也、大山智子、川内洋平、山田家和勝、鷺尾方一、ビーム物理研究会2010、2010年11月

[12] 「早稲田大学フォトカソードRF電子銃におけるマルチバンチ電子ビーム生成」坂上和之、第7回高輝度高周波電子銃研究会、2011年1月

[13] 「KEK小型電子加速器におけるレーザー蓄積装置を用いた小型X線源(LUCX)の開発(10)」坂上和之、荒木栄、浦川順治、笹尾登、照沼信浩、福田将史、本田洋介、鷺尾方一、第66回日本物理学会年会、2011年3月

[14] 「3.5cell S-band フォトカソードRF電子銃開発」青木達朗、Ahbya Deshpande、浦川順治、工藤昇、坂上和之、鈴木達也、高富俊和、照沼信浩、福田将史、鷺尾方一、第66回日本物理学会年会、2011年3月

[15] 「フォトカソードRF電子銃とスーパーコンティニューム光を用いたパルスラジオリシスのシステム構築についての研究」小方宏一、川内洋平、坂上和之、鈴木達也、保坂勇志、別當良介、鷺尾方一、柏木茂、黒田隆之助、第66回日本物理学会年会、2011年3月

[16] 「フォトカソードRF電子銃を用いたマルチバンチ電子ビーム加速に関する研究」横山悠久、青木達朗、浦川順治、柏木茂、黒田隆之助、坂上和之、鈴木達也、照沼信浩、早野仁司、山本隆之、鷺尾方一、第66回日本物理学会年会、2011年3月

2. 4 活動（運営委員会等の活動等）

なし

2. 5 実施体制

別表1の通り。

別表1 平成22年度に於ける実施体制

業務項目	担当機関等	研究担当者
① X線検出器の評価試験	早稲田大学 理工学術院 教授 早稲田大学 理工学術院 准教授 早稲田大学 理工学術院 客員教授 早稲田大学 理工学術院 助教	◎○ 鷺尾 方一 片岡 淳 篠原 邦夫 坂上 和之
② レーザーコンプトン散乱 X線の検出試験	早稲田大学 理工学術院 教授 早稲田大学 理工学術院 助教	◎○ 鷺尾 方一 坂上 和之
③ X線の偏光測定に関する検討と検出器設計	早稲田大学 理工学術院 教授 早稲田大学 理工学術院 准教授 早稲田大学 理工学術院 客員教授 早稲田大学 理工学術院 助教	◎○ 鷺尾 方一 片岡 淳 篠原 邦夫 坂上 和之

注1. ◎:業務主任者、○:実施責任者（業務計画書のⅡ.2章の2.業務項目別実施区分の業務項目と担当責任者に対応）

注2. 本業務に携わっている方(参加者リストに記載されている方)を、全て記入。