

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360424

研究課題名(和文) 次世代X線・ $\gamma$ 線光源用電子銃における  
電子パルス波形整形による超高輝度ビームの生成研究課題名(英文) Generation of high-brilliance electron beams  
via temporal pulse-shaping technique

研究代表者

羽島 良一 (HAJIMA RYOICHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・グループリーダー

研究者番号：30218432

研究成果の概要(和文)：次世代X線・ $\gamma$ 線光源としてエネルギー回収型リニアックに基づく装置が提案され、その開発が進められているが、超高輝度電子ビーム(超低エミッタンス、超短パルスビーム)は、その中心的な開発課題である。本研究では、電子銃から発生する電子ビームを時間方向に対して波形整形を施すことで、輝度の向上が図れることに着目し、これに必要な研究開発を進めた。次世代光源として、共振器型X線自由電子レーザー、レーザーコンプトン $\gamma$ 線源の設計を進め、電子パルス波形整形によりもたらされる光源性能の飛躍的な向上を確認した。

研究成果の概要(英文)：Generation of ultra-bright electron beams is one of the critical R&D items in the development of future X-ray and  $\gamma$ -ray light sources. In this research, we have studied on technologies for temporal shaping of electron beams to achieve ultra-small emittance. We have developed a deflecting RF cavity for an electron beam pulse shape measurement, a slit-screen apparatus for an electron beam emittance measurement. Design study of an X-ray FEL oscillator and a laser Compton scattered  $\gamma$ -ray light source revealed that ultra-small emittance beams from temporally-shaped electron sources are essential for such light sources.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	8,300,000	2,490,000	10,790,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：原子力学

キーワード：放射線工学・ビーム科学

## 1. 研究開始当初の背景

高エネルギー電子加速器を用いた高輝度光の発生は、シンクロトロン放射光(X線)、自由電子レーザー(赤外～X線)、制動放射線( $\gamma$ 線)などあり、これらは、物質科学から生命科学まで広範な学術領域において欠くことのできない基盤技術として大きな役割を果たしている。これら光源では、電子加

速器の性能(電流、ビームサイズなど)が、光源性能(フラックス、輝度など)を決定するため、加速器の性能向上が図られてきた。近年、このような光源の姿を大きく変えようとする革新技術が生まれつつある。高輝度光陰極電子源、エネルギー回収技術がその代表である。

光陰極電子源は、熱陰極電子源に比べて高

輝度（電子ビームエミッタンスが小さく、ピーク電流が大きい）の電子ビームを発生できることから、X線自由電子レーザー、小型X線源の電子源として採用されている。その中でも、NEA半導体光陰極（以下、NEA陰極）は、高輝度大電流電子源として、次世代X線放射光源、大強度単色 $\gamma$ 線源、偏極電子顕微鏡を実現するための鍵技術として注目されている。NEA状態（negative electron affinity）の表面を有する半導体光陰極は、高輝度大電流電子源に適した以下の特徴を持つ。（1）700-900nmのレーザー光で光電子を放出するので、紫外光が必要な光陰極（銅、 $\text{Cs}_2\text{Te}$ ）に比べて大電流化が容易である。（2）バンドギャップエネルギーに一致したレーザー波長を選ぶことで極めて品質のよい（エミッタンスの小さな）電子ビームを引き出せる。

NEA陰極が極めて小さなエミッタンスの電子ビームを発生可能であることは、実験的に示されているが、これまでの実験は微小電流かつ連続ビームの条件のみであった。次世代X線放射光源、大強度 $\gamma$ 線源のような高エネルギー電子（数十MeV～数GeV）が必要な応用では、RF加速器で電子を加速するために、パルス状の電子バンチを発生する必要がある。このようなパルス状の電子バンチでは、時間軸方向に電荷密度が異なるために空間電荷による発散力が不均一に働き、エミッタンス増大が生じる。このエミッタンス増大を抑止するには、電子パルスの時間波形を適切に整形することが有効であり、このために電子銃ドライブレザーのパルス整形技術が銅や $\text{Cs}_2\text{Te}$ 陰極に適用されてきた。銅や $\text{Cs}_2\text{Te}$ がピコ秒以下の時間応答を持つものに対して、NEA陰極は時間応答が遅く数ピコ秒から10ピコ秒である。このため、パルス整形の効果が十分発揮できないことが、NEA陰極を高輝度化する上での大きな問題の一つであった。

## 2. 研究の目的

次世代X線・ $\gamma$ 線光源の実現に必要な超高輝度電子ビームを生成するための技術として、電子パルス波形整形法とこれに関連したビーム計測技術の研究開発を行う。

## 3. 研究の方法

(1)電子パルスの高精度測定手法として、微細スリットによる超低エミッタンス測定技術、偏向空洞による時間波形測定技術の開発を行う。

(2)NEA陰極駆動用レーザーパルスの波形整形技術を確立する。

(3)NEA陰極応答速度の向上を目指したNEA陰極材料の改質と特性評価法の研究を行う。

## 4. 研究成果

超低エミッタンスの電子ビーム測定技術として、微細スリットと蛍光スクリーン（Ce:YAG）を組み合わせた方法を採用し、本手法を用いたビーム測定を行った。実験は日本原子力研究開発機構で開発した250-kV電子銃にて行い、GaAs基板にCsと $\text{O}_2$ を吸着させ

たNEA光陰極を用いた。本研究では、微小スリットの作成方法として、レーザー加工、イオンビーム加工、ワイヤー加工を比較検討し、ワイヤー加工を採用し、最小20 $\mu\text{m}$ までのスリットを作成した。

電子ビームのエミッタンス測定では、測定ノイズの処理方法が問題となることがわかった。蛍光スクリーンにおけるビーム分布の測定では、実際にビームが当たって蛍光を発する部分以外に、周囲の迷光の映りこみやCCDの暗電流に起因するノイズが現れる。データ処理におけるノイズの取り扱いに注意しなければ、正しいエミッタンスを求めることができない。本研究では、SCUBEE法によるノイズ処理を行い、その有効性を確認した。

実験では光陰極面のレーザースポットサイズの関数としてエミッタンスを求め、この結果から熱エミッタンス（初期エミッタンス）の最小値として、0054 mm-mradの値を得た。このエミッタンス値は電子の初期熱エネルギーとして54meVに対応するものである。次世代X線・ガンマ線源の目標値である0.1 mm-mradを得るのに十分小さな熱エミッタンスが得られることを確認した。また、スリットと蛍光スクリーンを組み合わせた装置、SCUBEE法の組み合わせにより、0.1 mm-mrad以下の極小エミッタンスの測定が可能であることを示した。

また、この計測実験において、エミッタンスがレーザースポットサイズの2次に比例する成分がわずかながら存在することが観測された。実験で二つの独立したソレノイド磁場を光陰極に重畳することで光陰極表面における縦磁場を変えながらエミッタンス測定を行った結果、光陰極表面の縦磁場が消さない場合には、エミッタンスに対するレーザースポットサイズの2次の寄与が大きく現れる実験結果を得た。これにより、光陰極における超低エミッタンスビームの発生においては、磁気エミッタンスの寄与を考慮した上で、光陰極表面の縦磁場をキャンセルするようなソレノイド磁場の配置が必要であることがわかった。

光陰極で生成した電子ビームのパルス長、時間波形を測定するための偏向空洞の開発を行った。同軸型偏向空洞の内軸導体ギャップ間にかかる電界と内軸導体を囲む磁界により、電子バンチはギャップ方向にキックされる。電界の大きさと位相情報、及び下流に設置したスクリーンの像の測定から、電子バンチ長を評価することができる。電磁場解析コード（SUPERFISH）を用いて、所定の共振周波数をもつ空洞（中心導体）の形状を決定し、励起される電磁場を評価したところ、250keVの電子ビームを $\pm 1.8\text{keV}$ キックするのに（ $\pm 7\text{mrad}$ ）必要なRFパワーの計算値は165Wとなり、研究グループが所有する400W RF電源で動作可能な設計を得た。エミッタンス測定用スリット、パルス波形測定用偏向空洞を備えた電子ビーム評価用ビームラインを250 kV電子銃に設置した。

光陰極からの電子発生直後の電子ビームは、エネルギーが低いために空間電荷による

反発の効果が無視できない。この空間電荷効果は電子ビームの電荷密度の関数である。一般的なレーザーパルスは時間方向は正規分布に近い波形を持っている、さらに光陰極は有限の応答時間を持つために、電子ビームパルスは時間方向に不均一な電荷密度を持つことになる。この時、電子の空間電荷も時間方向に不均一となり、投影エミッタンスの増大が生じる。超低エミッタンス電子ビームの発生には、時間方向に均一な（矩形波形の）電子ビームパルスが望ましい。

本研究では、矩形波形の電子ビームパルスを発生するためのレーザーパルススタック法の研究を行った。レーザーパルススタック法は、ガウシアン波形のレーザーパルスを時間方向にずらしながら重畳することで、擬似的に矩形波形を得るものである。研究計画時点ではレーザーパルスをスプリッターで分割した後に時間差をつけて重ねる方法（スプリッター方式）を用いる予定であったが、その後の調査により、複屈折光学結晶を用いる方式がより簡便であることがわかった。複屈折結晶は結晶軸に対して偏向面が平行な光と偏向面が垂直な光で群速度が異なる性質を持っている。結晶軸に45度の偏向面でレーザーを入射すると、結晶を透過した後に偏向が0度、90度のレーザーパルス（sパルス、pパルス）が時間差を持って現れる。さらに、結晶の厚さを変えることで二つのパルスの時間差を制御できる。複屈折結晶として $YVO_4$ を採用し、厚さの異なる結晶を直列に並べて、レーザー波形整形装置とした。結晶の厚さは3mm、6mm、12mmである。レーザーとして90fsのチタンサファイアレーザーを用いたところ、結晶厚さ3mmで2.27ps、6mmで5.14psのパルス間隔が得られた。3mmと6mmを重ねた場合は、2.37ps、5.01ps、7.51psの間隔をもった4つのパルスが得られた。入射レーザーとして2psのパルスを用いれば、矩形に近いパルス波形が得られることになる。

波形整形を施したレーザーパルスを用いて、電子ビームパルスの波形整形を実現するためには、光陰極の時間応答が十分に早くなければならない。われわれはイオン注入法による光陰極の応答速度改善を提案した。この手法を効果的に行うためには、注入したイオンが半導体基板内に留まっている必要がある。つまり、アニーリング効果によるイオンの拡散の影響が小さくなるように、光陰極の作成を行わなければならない。通常のNEA光陰極の作成方法では、基板を加熱して表面の洗浄を行う方法＝加熱洗浄が用いられてきた。加熱洗浄の一般的な例では550℃、1時間である。このような加熱洗浄では、イオン注入の履歴が消えてしまう可能性が高い。そこで、比較的低温で基板表面の洗浄が可能な方式として、原子状水素ビームによる方法＝水素洗浄を試みた。水素洗浄は、水素ガスを解離し原子状水素とした後に、この原子状水素をビーム状にして基板に吹き付ける方法である。水素ガスを解離する方法としては、RF放電による方法、フィラメント加熱による方法、キャピラリー加熱による方法があ

り、それぞれについて製品化されている。われわれは、キャピラリー型の原子状水素ビーム発生装置を250kV電子銃、500kV電子銃にそれぞれ導入した。この装置は、タングステン製のキャピラリーを外周からヒーターで加熱し、キャピラリーを通過する水素ガスを原子に解離するものである。

NEA-GaAs光陰極の時間応答性の改善を目指してイオン注入法を提案した。NEA-GaAs光陰極からの光電子放出は、3-ステップモデルにて説明される。すなわち、(1)光子による電子=ホール対の生成、(2)電子の表面までの拡散移動、(3)電子の表面からの放出が順に起こることによって、電子が引き出されるというモデルである。時間応答性は、主に、2番目の拡散過程で制限される。イオン注入による時間応答性の改善はGaAs基板にイオン注入を行い欠陥を導入することで、電子の拡散挙動を制御しようというものである。基板表面から深い位置で生成した電子を欠陥でトラップし再結合を促すことで、時間応答性を改善できる。780nm帯のレーザーは、GaAs基板に対して約1 $\mu$ mほどの吸収長が、イオン注入を適切に行えば、1 $\mu$ mよりも浅い位置で生成した電子のみを選択的に引き出せる。注入するイオンのエネルギーを決めるために、イオン注入シミュレーションコード(SRIM)を用いた計算結果をもとに、10keV、50keV、180keVの3種類のエネルギーでGaAs基板にヘリウムイオンの注入を行い、光陰極のサンプルを作成した。

イオン注入法で作成した光陰極を250kV電子銃に設置し、電子ビーム測定評価用ビームラインで時間応答、エミッタンスの測定を行うべく必要な作業を進めた。東日本震災のために実験の中断を余儀なくされたが、間もなく実験を再開する予定である。

超低エミッタンス電子ビームによる次世代X線/ガンマ線源として、共振器型X線自由電子レーザーとレーザーコンプトン線源について、それぞれ設計を行い、電子ビーム品質（エミッタンス、時間波形）の要求仕様を求めた。X線自由電子レーザー(XFEL)は自己増幅型(SASE型)の装置が日米欧で建設されている。SASE型のXFELは空間コヒーレンスを有しているが、時間コヒーレンスは不十分である。これに対して空間・時間コヒーレンスを備えた「究極のX線自由電子レーザー」と呼ぶべき装置として、共振器型のX線自由電子レーザー(XFEL0)が提案されている。XFEL0では時間コヒーレンスは電子のパルス長と共振器の帯域で決まり、10keV領域のX線レーザーで10meVの狭帯域光が得られる。XFEL0の実現には超低エミッタンスかつ高い繰り返しの電子ビームが必要である。XFEL0の発振には、回折限界電子ビーム（電子ビームの発散を光の回折と同程度まで小さくする）が必要であり、10keVのXFEL0では規格化エミッタンス0.1mm-mrad程度の超低エミッタンス電子ビームが要求される。本研究では、波形整形を施したNEA光陰極からの超低エミッタンス電子ビームを速度集束法でバンチ圧縮することで、XFEL0の発振が可能な電子

ビームが得られることを見出した。粒子追跡コードによるシミュレーション結果から、バンチ圧縮後の電子ビームパラメータは、電荷量 7.7pC、バンチ長 380fs (rms)、規格化エミッタンス 0.16mm-mrad (x 方向、rms)、0.13mm-mrad (y 方向、rms) である。われわれが開発した FEL 発振シミュレーションコードで評価したところ、5GeV 加速後に XFEL0 に導けば、40%の小信号利得が得られ、XFEL0 の発振が可能であることがわかった。

レーザーコンプトン $\gamma$ 線源は、電子ビームによるレーザーの衝突散乱に基づく高エネルギー光子ビーム (X線、 $\gamma$ 線) 源である。特に、 $\gamma$ 線領域においては、単色かつエネルギー可変の光子ビームが得られる唯一の光源である。これまでは電子蓄積リングを用いたレーザーコンプトン $\gamma$ 線源が運転利用されてきた。レーザーコンプトン $\gamma$ 線は $\gamma$ 線の散乱角度とエネルギーに相関があるために、コリメーターを用いて $\gamma$ 線ビームを切り出すことで単色化が行える。しかしながら、電子蓄積リングにおける電子ビームエミッタンス、エネルギー広がりのために、 $\gamma$ 線の単色度は数%に制限されてきた。エネルギー回収型リニアックに基づく次世代 $\gamma$ 線光源では、その超低エミッタンスビームによって $\gamma$ 線の単色性を高めることができる。エミッタンスを変えながら、ガンマ線輝度の計算を行ったところ、規格化エミッタンスが 0.1mm-mrad の時に、単色性と輝度の大幅な向上が行えることがわかった。これは、レーザーコンプトン散乱で用いる衝突用レーザー (一般に波長 1 $\mu$ m 程度) に対して、相対論効果を考慮した回折限界を定義することで明らかな説明が可能であることがわかった。

また、レーザーコンプトン散乱で発生する $\gamma$ 線、X線の狭帯域化、短パルス化を行うために、偏向空洞を用いる方法を提案した。本研究で開発した装置と同様の偏向空洞を用いて、電子ビームの前後に空間的な傾きを与え、この電子をさらに加速した後にレーザーと散乱させる方法である。この手法においても、狭帯域性、短パルス性の向上には、エミッタンスの低減が必須であり、パルス波形整形の手法が有用である。

本研究で実施した電子ビームの発生手法と、エネルギー回収型リニアックに基づく低エミッタンス大電流電子ビームを用いたレーザーコンプトン散乱ガンマ線源は、従来の装置 (蓄積リングを用いたレーザーコンプトン散乱ガンマ線源) をはるかに上回る輝度、強度を実現することが原理的に可能である。ヨーロッパ (EU) で進められている最先端レーザー研究施設群 (Extreme Light Infrastructure; ELI) の 4 つの研究所のうちのひとつとして、光核研究所 (ELI-NP) の建設がルーマニアに決まった。ここでは、10PW 級レーザーと、レーザーコンプトン散乱ガンマ線源を組み合わせた基礎研究と応用研究の展開を目的としている。われわれが提案した ERL ガンマ線源は、輝度、強度に優れているのみならず、繰り返しが 100 MHz と高いために、エネルギー分析型の実験に適して

いることから、実験グループから高く評価された。2016 年からはじまる第二期計画にて、ERL ガンマ線源の導入が検討されている。

## 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 22 件)

- ① R. Hajima, N. Nakamura, M. Shimada, "Generation and Applications of Ultrashort Electron Beams in Energy-Recovery Linacs", Nucl. Instr. Meth., 査読有, A637, S37-S42 (2011).
- ② 永井良治, 羽島良一, 西森信行, 武藤俊哉, 山本将博, 他 7 名, 「次世代放射光源用光陰極 DC 電子銃の開発」加速器, 査読有, 7 巻, pp. 88-94 (2010)
- ③ 永井良治, 羽島良一, 西森信行, 「次世代光源用光陰極直流電子銃」, 光アライアンス, 査読無, 第 22 巻, 第 1 号, pp. 38-43 (2010)
- ④ 羽島良一, 沢村勝, 永井良治, 西森信行, 早川岳人, 静間俊行, 菊澤信宏, 瀬谷道夫, 「ERL による高輝度 X/ $\gamma$  線源の開発と核種非破壊分析への応用」, 第 7 回日本加速器学会年会論文集, 査読無, pp. 214-218 (2010).
- ⑤ 羽島良一, 「エネルギー回収型リニアック (ERL) におけるビーム物理」, J. Plasma Fusion Res., 査読有, Vol. 86, No. 8, pp. 473-477 (2010).
- ⑥ 羽島良一, 沢村勝, 永井良治, 西森信行, 早川岳人, 静間俊行, 菊澤信宏, 藤原守, 瀬谷道夫, 「単色 $\gamma$ 線の核共鳴蛍光散乱による使用済燃料中 Pu の非破壊測定のための要素技術開発の現状」, 第 31 回核物質管理学会日本支部年次大会論文集, 査読無し
- ⑦ R. Hajima, "Energy Recovery Linac Light Sources", Reviews of Accelerator Science and Technology, 査読有, Vol. 3, pp. 121-146 (2010).
- ⑧ R. Nagai, R. Hajima, N. Nishimori et al., "High-voltage testing of a 500-kV dc photocathode electron gun", Review of Scientific Instruments, 査読有, 81, 033304 1-5 (2010).
- ⑨ N. Nishimori, R. Nagai, H. Iijima, R. Hajima, Y. Honda, T. Muto, M. Kuriki, M. Yamamoto, S. Okumi, T. Nakanishi, "Development of an electron gun for an ERL based light source in Japan", AIP Conf. Proc. Vol. 1149, 査読有, pp. 1094-1098 (2009)
- ⑩ N. Nishimori, I. Bazarov, B. Dunham, J. Grames, C. Hernandez-Garcia, M. Poelker, K. Surlles-Law, L. Jones, B. Militsyn, M. Yamamoto, "ERL09 WG1 SUMMARY: DC GUN TECHNOLOGICAL CHALLENGES", Proc. 45<sup>th</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on

- Energy-Recovery Linacs, 査読無, Ithaca, June 2009, pp.6-23 (2009).
- ⑪ 羽島良一、中村典雄、坂中章悟、小林幸則、「エネルギー回収型リニアック次世代放射光源のための要素技術開発とコンパクトERLの建設」、加速器, 査読有, 6巻2号, pp.149-157 (2009)
- ⑫ R. Hajima, N. Kikuzawa, N. Nishimori, T. Hayakawa, T. Shizuma, K. Kawase, M. Kando, E. Minehara, H. Ohgaki, H. Toyokawa, “Detection of nuclear material by laser Compton  $\gamma$ -rays”, Nucl. Instr. Meth. 査読有, A608, S57-S61 (2009).
- ⑬ 飯島北斗、永井良治、西森信行、羽島良二、「エネルギー回収型リニアックによる次世代放射光源のための高輝度電子発生技術」、電気学会論文誌 C, 査読有, Vol. 129, pp. 253-258 (2009)
- ⑭ R. Hajima, “Current Status and Future Perspectives of Energy Recovery Linacs”, Proc. Particle Accelerator Conference 2009, May 2009, Vancouver, Canada, 査読無, pp.97-101 (2009).
- ⑮ 羽島良一、西森信行、「ERL 放射光源における共振器型 XFEL の発振特性」、第 6 回日本加速器学会年会論文集, 査読無, pp.137-139 (2009).
- ⑯ R. Hajima, N. Nishimori, “Simulation of an X-ray FEL Oscillator for the multi-GeV ERL in Japan”, Proc. 31th International Free-Electron Laser Conference (FEL-2009), 査読無, Liverpool UK, August 2009, pp.568-571 (2009).
- ⑰ 飯島北斗、永井良治、西森信行、羽島良二、「JAEA 250kV 電子銃における NEA-GaAs からの初期エミッタンス計測」、第 6 回日本加速器学会論文集, 査読無, pp.897-899 (2009).
- ⑱ N. Nishimori, R. Hajima, H. Iijima, R. Nagai, et al., “Development of a 500-kV Photo-cathode DC Gun for the ERL Light Sources in Japan”, Proc. 31th International Free-Electron Laser Conference (FEL-2009), 査読無, Liverpool UK, August 2009, pp.277-280 (2009).
- ⑲ 西森信行、永井良治、羽島良一、沢村勝、本田洋介、武藤俊哉、「ERL 高輝度電子銃ビーム診断のための偏向空洞の特性」、第 5 回日本加速器学会・第 33 回リニアック技術研究会論文集, 査読無, pp.595-597 (2008)
- ⑳ R. Hajima, N. Kikuzawa, T. Hayakawa, E. Minehara, “Nondestructive Detection and Assay of Nuclear Material by Laser Compton  $\gamma$ -rays from Energy-Recovery Linacs”, Proc. of the 16<sup>th</sup> Pacific Basin Nuclear Conference, 査読有, Oct. 2008, Aomori, P16P1405 (2008).
- ㉑ 羽島良一、永井良治、飯島北斗、西森信行、本田洋介、武藤俊哉、「ERL 放射光源のための高輝度大電流電子銃の開発の現状」、第 5 回日本加速器学会・第 33 回リニアック技術研究会論文集, 査読無, pp.607-609 (2008).
- ㉒ R. Hajima, N. Nishimori, “Free-Electron Laser Options for the Energy-Recovery Linac Light Source in Japan”, Proc. 30<sup>th</sup> International Free-Electron Laser Conference, 査読無, pp.87-89 (2008)
- [学会発表] (計 23 件)
- ① 永井良治、羽島良一、西森信行、「光陰極電子銃におけるバックリングコイルによる磁気エミッタンス補償」、日本原子力学会 2011 年春の年会, 2011 年 3 月, 福井
- ② 永井良治、羽島良一、西森信行、「JAEA-250kV 光陰極電子銃におけるバックリングコイルによる磁気エミッタンス補償」、第 8 回高輝度・高周波電子銃研究会, 2011 年 1 月, 広島
- ③ N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, et al., “JAEA/KEK DC gun for ERLs”, ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources, 2010 年 3 月, Palo Alto USA.
- ④ 西森信行、永井良治、羽島良一、山本将博、武藤俊哉、本田洋介、宮島司、栗木雅夫、飯島北斗、桑原真人、奥見正治、中西疆、「次世代放射光源のための DC 電子銃光陰極準備・電子銃容器開発の現状」、日本原子力学会 2010 年春の年会, 2010 年 3 月, 水戸
- ⑤ 羽島良一、永井良治、西森信行、山本将博、本田洋介、武藤俊哉、宮島司、桑原真人、奥見正治、中西疆、飯島北斗、栗木雅夫、「ERL 放射光源のための低エミッタンス大電流電子銃の開発」、日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム, 2010 年 1 月, 姫路
- ⑥ 西森信行、永井良治、羽島良一、他「次世代放射光源のための 500-kV DC 電子銃の光陰極準備・電子銃容器開発の現状」第 7 回高輝度・高周波電子銃研究会, 2009 年 11 月, 仙台
- ⑦ 永井良治、羽島良一、西森信行、「光陰極電子銃の初期エミッタンス計測と高電圧印加試験」第 7 回高輝度・高周波電子銃研究会, 2009 年 11 月, 仙台
- ⑧ 西森信行、永井良治、羽島良一、山本将博、武藤俊哉、本田洋介、宮島司、栗木雅夫、飯島北斗、桑原真人、奥見正治、中西疆、「次世代放射光源のための 500kV-DC 電子銃の光陰極準備・電子銃容器開発の現状」、第 7 回高輝度高周波電子銃研究会, 2009 年 11 月, 広島
- ⑨ 永井良治、飯島北斗、羽島良一、西森信行、「250-kV 光陰極電子銃の初期エミッタンス測定」、日本原子力学会 2009 年秋の大会, 2009 年 10 月, 仙台
- ⑩ N. Nishimori, R. Nagai, H. Iijima, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, T. Muto, Y. Honda, M. Kuriki, M. Kuwahara,

- S. Okumi, T. Nakanishi, "JAEA/KEK gun status", 45<sup>th</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics on Energy-Recovery Linacs, Ithaca, June 2009.
- ⑪ 飯島北斗、永井良治、西森信行、羽島良二、本田洋介、武藤俊哉、「JAEA フォトカソード DC 電子銃のビームライン構築」、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月、東京
- ⑫ 永井良治、羽島良一、西森信行、飯島北斗、沢村勝、菊澤信宏、「ERL 放射光源用大電流電子銃のビーム試験」、日本原子力学会 2009 年春の年会、2009 年 3 月、東京
- ⑬ N. Nishimori, R. Nagai, H. Iijima, Y. Honda, T. Muto, M. Kuriki, M. Yamamoto, S. Okumi, T. Nakanishi, R. Hajima, "Development of an electron gun for ERL based light source", Korea-Japan Joint Workshop on Quantum Radiation Sources for Advanced Science, Daejeon, Korea, Mar. , 2009.
- ⑭ 西森信行、永井良治、飯島北斗、本田洋介、武藤俊哉、山本将博、奥見正治、中西彊、栗木雅夫、羽島良一、「ERL 電子銃の開発状況」、第 26 回 PF シンポジウム、2009 年 3 月、つくば。
- ⑮ 羽島良一、西森信行、「共振器型 X 線自由電子レーザーの発振特性」、日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2009 年 1 月、東京
- ⑯ 羽島良一、永井良治、飯島北斗、西森信行、本田洋介、武藤俊哉、山本将博、奥見正治、中西彊、栗木雅夫、「ERL 放射光源のための高輝度大電流電子銃の開発」、日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2009 年 1 月、東京
- ⑰ 羽島良一、「ERL 入射器に求められる性能とその達成へのシナリオ」、高輝度電子源検討会、2009 年 1 月、東広島
- ⑱ 飯島北斗、永井良治、西森信行、羽島良二、「JAEA 250kV 電子銃でのビーム試験」、高輝度電子源検討会、2009 年 1 月、東広島
- ⑲ 西森信行、「500kV 電子銃の光陰極準備容器・高電圧容器の設計」、高輝度電子源検討会、2009 年 1 月、東広島
- ⑳ 永井良治、羽島良一、西森信行、飯島北斗、他、「500kV-10mA 電源の製作状況とビームダンプの基本設計」、高輝度電子源検討会、2009 年 1 月、東広島
- ㉑ 羽島良一、「超低エミッタンス電子ビーム発生のための光陰極技術」、第 6 回高輝度・高周波電子銃研究会、2008 年 11 月、宇治
- ㉒ 羽島良一、「超低エミッタンス超短パルス電子ビームの物理」、ビーム物理研究会、2008 年 11 月、佐用町
- ㉓ R. Hajima, "Application of high-flux gamma-ray beams to nuclear and radioactive waste management", Polarized positron for linear colliders workshop (PosiPol 2008), June 2008, Hiroshima

〔図書〕(計 2 件)

- ① The White Book of ELI Nuclear Physics, Bucharest-Magurele, Romania, R. Hajima (分担執筆), 総ページ数 151 (2010)
- ② ELI - Extreme Light Infrastructure Science and Technology with Ultra-Intense Lasers WHITEBOOK, TOSS Media Publisher, R. Hajima (分担執筆), 総ページ数 535 (2011)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.apr.kansai.jaea.go.jp/aprc/ap-p-gna.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

羽島 良一 (HAJIMA RYOICHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・グループリーダー  
研究者番号：30218432

### (2) 研究分担者

永井 良治 (NAGAI RYOJI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹  
研究者番号：40354906

西森 信行 (NISHIMORI NOBUYUKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹  
研究者番号：60354908

飯島 北斗 (IIJIMA HOKUTO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員  
研究者番号：90361534