

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540353

研究課題名(和文)サブピコバンチ計測を用いたマイクロバンチ不安定性の研究

研究課題名(英文)Study on microbunching instability using a photoemission dc gun

研究代表者

西森 信行(NISHIMORI, Nobuyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：60354908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は光陰極直流電子銃から高輝度電子バンチを生成し、マイクロバンチ不安定性のメカニズム解明を目的とする。500kV光陰極直流電子銃をビーム源とし、スミスパーセル放射光のスペクトル計測により、電子銃ビームのマイクロバンチ不安定性を測定する。まず前提となる電子銃開発に取り組んだ。安定な電圧印加可に必要な高電圧真空容器の最適条件を見出し、500kVで1.8mAの大電流ビーム生成という世界初の成果を挙げた。この成功により電子銃はKEKで開発中の次世代放射光源用試験加速器に移設され、本研究の継続が困難となった。そこで、原子力機構で別途所有の250kV電子銃を再立ち上げしており、本研究を継続する。

研究成果の概要(英文)：This work aims at elucidating mechanism of microbunching instability using high brightness electron beam generated from a photoemission dc electron gun. A train of microbunched electron beam spaced by 0.03 mm is provided from the gun to a Smith-Purcell radiation monitor where the microbunching instability is studied. Our development of the gun led to find an optimum configuration for a high voltage photoemission gun for operation at voltage higher than 500 kV. We generated 500 keV-beam with 1.8 mA for the first time. This gun was shipped to KEK for commissioning of the compact energy recovery linac. We decided to use a 250 kV photoemission electron gun at JAEA for the present study instead of the shipped 500 kV gun and started to prepare the Smith-Purcell radiation experiment.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器 ビーム物理 マイクロバンチ不安定性 光陰極直流電子銃 スミスパーセル放射

1. 研究開始当初の背景

SLAC 国立加速器研究所の X 線自由電子レーザー (XFEL) では、0.1 ピコ秒程度の極短高輝度電子バンチを実現している。しかし、従来知られていなかったマイクロバンチ不安定性が発現し、XFEL の出力が当初の予定より 6 割程度に留まる結果になった。極短高輝度電子バンチの利用は XFEL に留まらず、今後多様に発展していくと考えられ、マイクロバンチ不安定性のメカニズムを解明することが望まれている。

マイクロバンチ不安定性のメカニズムは次のように考えられている。電子銃駆動レーザーのわずかな振幅揺らぎに起因する、電子バンチの 1% 以下の密度揺らぎ (マイクロバンチ) が、空間電荷力の大きな差を生む。この電子バンチを時間軸に対し圧縮すると、揺らぎの拡大と共にエネルギー広がりが増大する。不安定性の種として最も成長するマイクロバンチの波長は 10-40 μm の遠赤外領域にあることが、理論的に指摘されている。しかし、現在の計測技術では、0.1 ピコ秒 (30 μm) の精度で圧縮前の電子バンチ構造を計測できず、メカニズムの検証が進んでいない。

2. 研究の目的

本研究では、従来不可能であった 0.1 ピコ秒の時間分解能でバンチ内のマイクロバンチ構造を測定するため、スミスパーセル放射光を用いた周波数ドメインでの計測手法を提案する。遠赤外波長領域のマイクロバンチ不安定性の成長と由来を実験的に求め、理論モデルと比較し、そのメカニズムを明らかにすることを目的とする。

これまでのマイクロバンチ不安定性の実験的な研究では、RF 電子銃や加速器通過後の電子バンチを初期状態として用いており、そのマイクロバンチ構造が明確でないという問題があった。本研究では光陰極直流電子銃からのビームを用いるため、初期状態の制御が可能で、理論計算と明確な比較ができる上、不安定性の種を明らかにできると考えられる。ただし、エネルギー 500keV でミリアンペア級の大電流ビームが必要であり、これを達成することが最初の目的となる。

3. 研究の方法

エネルギー 500keV の電子バンチ中の 30 μm (0.1 ピコ秒) 間隔のマイクロバンチを計測するため、図 1 に示すマイクロバンチ計測システムを開発する。500keV 光陰極直流電子銃をビーム源とし、レーザー波形整形装置でマイクロバンチ列を形成する。回折格子面上にマイクロバンチビームを通し、マイクロバンチによるコヒーレントスミスパーセル放射光のスペクトルを分光計測する。

電子ビームエネルギー、レーザーパラメータ等を関数として、マイクロバンチの空間電荷力を制御する。実験結果を粒子トラッキングシミュレーションによる計算と比較し、マイクロバン

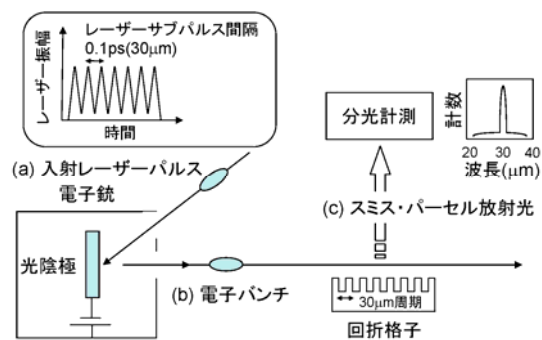


図 1: マイクロバンチ計測システム

チ不安定性メカニズムを明らかにする。

図 2 に示す 500keV 光陰極直流電子銃が本研究の前提となる大きな開発課題となる。開発するスミスパーセル放射光計測装置を、この電子銃ビームラインにインストールして実験を行う。

スミスパーセル放射は、回折格子面上を電子ビームが通過する際に、ビーム電場中の回折条件を満たす波長成分が、平面波として取り出される現象である。放射光波長 λ は回折格子間隔 d 、回折角 θ 、ビーム速度 $\beta = v/c$ に依存し

$$\lambda = d(1/\beta - \cos \theta)$$

で与えられる。 $d=30 \mu\text{m}$ の回折格子面に垂直 ($\theta=90^\circ$) に検出器を置くと、電子ビームエネルギー 500keV に対して $\lambda=35 \mu\text{m}$ となり、30 μm 付近の電子マイクロバンチを測定できる。

電子銃への入射レーザーにはフェムト秒チタンサファイアレーザーの 2 倍波 (繰り返し 83MHz, パワー 30mW, 波長 400nm, パルス幅 80fs) を用いる。レーザー波形整形装置を用いて、30 μm の間隔を持つサブパルス列を生成する。400nm 波長のレーザーに対する、ガリウム砒素光陰極からの光電子生成時間応答速度は 0.1 ピコ秒以下である。

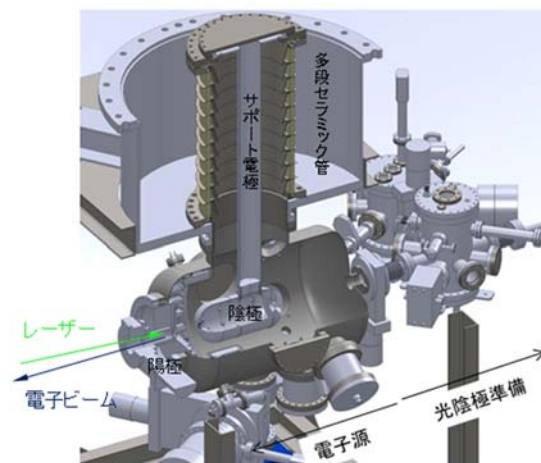


図 2: 500keV 光陰極直流電子銃

4. 研究成果

(1) 500keV 光陰極直流電子銃の開発

本研究の前提となる 500kV 光陰極直流電子銃の開発に取り組んだ。同タイプの電子銃は 1991 年に提案され、以来 20 年以上に渡って世界中で開発が進められてきたが成功に至っていなかった。その大きな理由の一つとして、電子銃の陰極を支えるサポートロッドからの電界放出電流の問題が知られていた。セラミック管表面のチャージアップにより、放電や破損を引き起こす問題に対する対策が必要であった。そこで、図 2 に示す多段セラミック管の各段に金属製のガードリングを設置し、電界放出電流を受け止める構造を提案し、高電圧試験を行った。その結果サポートロッド有の状態の世界初の 500kV 印加に 2009 年に成功した。

次に、サポートロッド先端にビーム生成用の陰極を取り付け、高電圧印加試験を行った。その結果、これまで他機関の研究開発で余り取り上げられていなかった新しい困難な問題に直面した。電圧と共に指数関数的に増加する不要な暗電流が、電圧印加試験中に突然発生する問題である。500kV までの電圧印加に成功しても、一旦暗電流源が生じると、例えば 300kV から暗電流が発生し、高電圧印加試験が継続できなくなる。暗電流発生箇所を特定後、対応する陰極部をリントフリーティッシュで拭き取ると、暗電流源が消失することを突き止め、暗電流発生メカニズムを次のように考えた。

電子銃真空容器内の微細粉塵が放電により正に帯電し、陰極に引き寄せられて付着し、暗電流源になるというシナリオである。対策として、希ガスコンディショニングや容器表面の粉塵を可能な限り除去する努力を行ったが、目に見える効果は現れなかった。そこで、陽極で発生するマイクロ放電が、微細粉塵を帯電する大きな放電の元となると考え、図 3 に示すような陽極対策を実施した。まず、マイクロ放電の源となる (A) 陽極でのガス発生を抑制するため、ギャップ周囲に複数の真空ポンプを配置した。さらに、マイクロ放電を引き起こす (B) 陽極電場を半減するために、陽極-陰極間のギャップ長を拡大した。陰極電場強度の減少は 1 割程度にとどめ (C)、ビーム性能の指標であるエミッタンス劣化を抑制した。

図 4 に陽極対策 (A), (B) の効果を示す。横軸の放電回数は、電圧印加試験の時間に比例し、

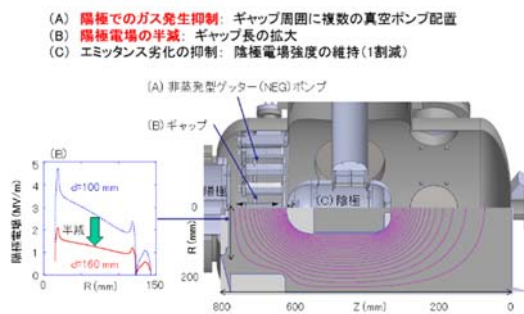


図 3: 暗電流防止のための陽極対策

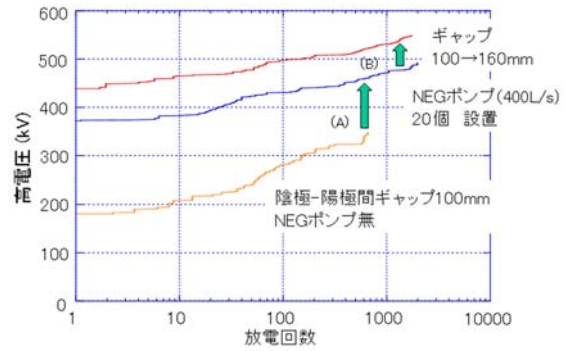


図 4: 陽極対策の効果

1000 回の放電に一ヶ月程度要する。対策なしの場合は 1 カ月で 300kV に到達したが、1 年経過しても 500kV に至らないと考え、電圧印加試験を中止した。ポンプを設置する対策 (A) により、すぐに 370kV 印加を実現し、500kV に到達したが、暗電流が発生したため 500kV での安定印加には成功しなかった。ギャップ長を拡大する対策 (B) により、550kV までの印加と 500kV での安定印加について成功した。この 500kV 印加に最適な電子銃の構成については論文 1 に詳しく報告した。

次に、電子銃下流のビームラインを組み込み、500kV でのビーム生成試験を行った結果を図 5 に示す。2012 年に 500kV で約 2mA までのビーム生成に成功した。詳細については論文 2 に詳しく報告した。この実験では、10mA 生成を目指していたが、コッククロフト高電圧電源の容量不足が実験中に判明し、2mA 以上のビーム生成は困難であった。また、500kV でのビーム生成時間が短かったので、図 5 下に示すように、440kV で 1mA の電子ビーム生成を 30 分間連続的に行った。これにより、長時間ビーム生成を実証した。

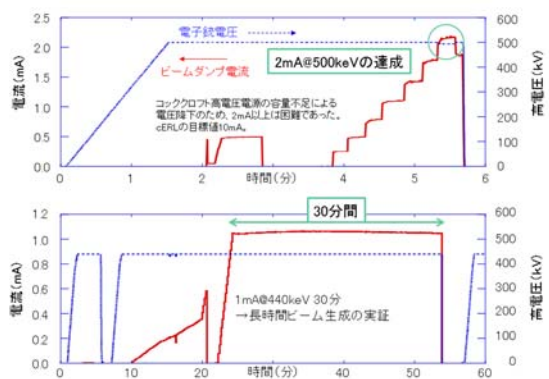


図 5: 500kV mA 電子ビーム生成試験

開発した 500kV 電子銃の高性能が評価され、KEK で開発中のコンパクトエネルギー回収リニアック (cERL) に 2012 年 10 月に移設された。2013 年 4 月からは cERL のビームコミッションングのため、安定な電子ビーム供給を続けている。cERL では、ERL 運転の実証やレーザーコンプトン散乱試験が最優先課題となっており、本研究のスミスパーセル放射光計測シ

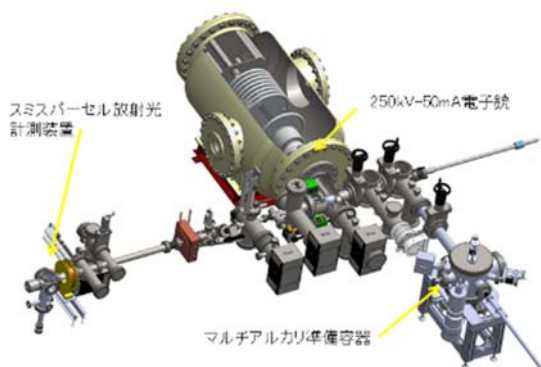


図 6: 250kV 電子銃装置とビームライン

システムを cERL にインストールすることは極めて困難となった。そこで、原子力機構に所有する 250kV 光陰極直流電子銃を用いて研究を継続することにした。

(2) 250kV 光陰極直流電子銃を用いたスミスパーセル放射計測システム

250kV 光陰極直流電子銃は 500kV 電子銃開発の前段階として、500kV 電子銃と同じ実験室で 2010 年まで開発が進められていた。2012 年 10 月に行った 500kV 電子銃の KEK への移設後、2013 年 3 月まで東日本大震災に伴う実験室の改修作業が行われていたため、2013 年 4 月以降に再立ち上げを開始した。2013 年度には所定の真空度である 1×10^{-9} Pa を達成した。電子銃を図 6 に示す。現在は電子ビーム生成の準備、開発したスミスパーセル放射光計測装置 (図 7) のビームラインへの組み込み、2013 年度までに準備したレーザー波形整形用結晶の組み込みを行っている。250kV 電子銃は 50mA までの大電流電子ビームを生成できる高電圧電源を備えている。ガリウムヒ素光陰極よりも長寿命性能を持つマルチアルカリ光陰極を別予算で開発中であり、この光陰極を用いて、本研究開発課題であるマイクロバンチ不安定性のためのスミスパーセル放射光実験を継続したいと考えている。大電流化により、スミスパーセル自由電子レーザーなど、新しい実験への応用も広がる。

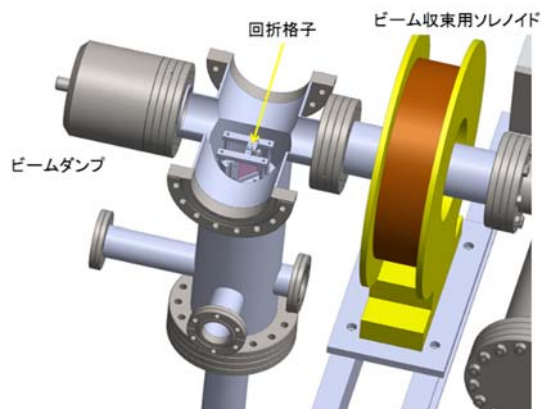


図 7: スミスパーセル放射光計測装置

(3) SPring-8 でのマイクロバンチ不安定性実験

SPring-8 の SCSS 試験加速器で行われたマイクロバンチ不安定性実験に参加した。マイクロバンチ不安定性の種として、電子銃の光陰極を駆動するレーザーの強度モジュレーションが有力視されている。その理由の一つが、電子銃に熱陰極を用いた SPring-8 の SCSS で、マイクロバンチ不安定性が観測されていないことであった。ところが、同じ熱陰極を用いた SPring-8 の XFEL である SACLA でビーム試験が始まると、光遷移放射を用いたビームプロファイルモニターに強いコヒーレント成分が観測された。この原因がマイクロバンチ不安定性によることが明らかとなり、SCSS で観測されなかった理由が、熱陰極によるものと結論づけられなくなったため、再調査をする必要が生じた。

SCSS では、従来シケイン磁石を用いた電子バンチ圧縮を FEL の出力が高くなるように調整していた。新たな実験では、より強い電子バンチ圧縮の条件下でも実験を行い、ビームプロファイルに SACLA と同様なコヒーレント成分が現れることを明らかにした。つまり、熱陰極を用いてもマイクロバンチ不安定性が生じることから、不安定性の原因は光陰極を駆動するレーザーではないことが判明した。通常のノイズ (ショットノイズ) が電子バンチ圧縮により成長し、不安定性の原因となることが明らかとなった。

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 8 件)

1. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、Experimental Investigation of an Optimum Configuration for a High-Voltage Photoemission Gun for operation at ≥ 500 kV、査読有、Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams 17 (2014) 053401-1-17、DOI:10.1103/PhysRevSTAB.17.053401
2. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、Experimental Generation of a 500-keV Electron Beam from a High Voltage Photoemission Gun、査読有、Applied Physics Letters 102 (2013) 234103-1-4、DOI:10.1063/1.481158
3. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、フェムト秒 X 線放射光源のための光陰極直流電子源の開発、査読無、OplusE 35 (2013) 795-800
4. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、宮島司、本田洋介、宮島司、飯

- 島北斗、栗木雅夫、桑原真人、奥見正治、中西疆、JAEA での 500-kV 光陰極 DC 電子銃開発、査読無、第 9 回加速器学会年会論文集 (2013) 255-259
http://www.pas.j.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/FRLR/FRLR07.pdf
5. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、Progress in a Photocathode dc gun at the compact ERL、査読無、Proceedings of the 35th International Free-Electron Laser Conference FEL2013 (2013) 184-188
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/FEL2013/papers/tuocno03.pdf>
 6. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、Beam Generation from a 500 kV dc Photoemission Electron Gun、査読無、Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference IPAC2013 (2013) 321-323
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/mopfi019.pdf>
 7. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、奥見正治、中西疆、Development of a Photoemission dc Gun at JAEA、査読無、Proceedings of the 34th International Free-Electron Laser Conference FEL2012 (2012) 161-164
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/FEL2012/papers/mopd53.pdf>
 8. 西森信行、永井良治、羽島良一、山本将博、宮島司、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、奥見正治、中西疆、500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発、査読無、第 8 回加速器学会年会論文集 (2012) 20-23
http://www.pas.j.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/FRLR/FRLR07.pdf
- [学会発表] (計 15 件)
1. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、光陰極電子銃を用いたスミスパーセル放射光実験、物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27 日、東海大学湘南キャンパス(平塚市)
 2. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、内山隆司、栗木雅夫、Status of the 500 kV DC Photocathode gun at the compact ERL、The International Workshop on Accelerator Science and Technology for Electron Ion collider (EIC14)、2014 年 3 月 19 日、Jefferson Laboratory, Newport News, VA (USA)
 3. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、内山隆司、栗木雅夫、Status of the 500 kV DC Development of a high-brightness and high-current electron gun for high-flux γ -ray generation、Nuclear Physics and Gamma-ray sources for Nuclear Security and Nonproliferation (NPNSNP)、2014 年 1 月 28 日、(東海村)
 4. 永井良治、羽島良一、小菅淳、森道昭、静間俊行、西森信行、赤木智哉、本田洋介、浦川順治、Overview of the Equipment for a Demonstration of Laser Compton-scattered Photon Source at the cERL、Nuclear Physics and Gamma-ray sources for Nuclear Security and Nonproliferation (NPNSNP)、2014 年 1 月 28 日、(東海村)
 5. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、DC Photoemission Gun Development for the compact ERL、The 53th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on "Energy Recovery Linacs" (ERL2013)、2013 年 9 月 12 日、Budker Institute, Novosibirsk (Russia)
 6. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、Progress in a Photocathode dc gun at the compact ERL、The 35th International Free-Electron Laser Conference (FEL2013)、2013 年 8 月 27 日、New York (USA)
 7. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、宮島司、本田洋介、内山隆司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、光陰極直流電子銃から 500keV-mA 電子ビームの生成、第 10 回加速器学会年会、2013 年 8 月 5 日、名古屋大学東山キャンパス(名古屋市)
 8. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、Beam Generation from a 500 kV DC Photoemission electron Gun、The 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC2013)、2013 年 5 月 13 日、Shanghai (China)
 9. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、奥見正治、中西疆、次世代 ERL 光源のための 500kV 光陰極電子銃ビーム生成、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学(東広島市)
 10. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、奥見正治、中西疆、Development of a Photoemission DC Gun at JAEA、The 34th International Free-Electron Laser Conference (FEL2012)、2012 年 8 月 27 日、奈良市
 11. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、

- 山本将博、宮島司、本田洋介、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、奥見正治、中西疆、JAEA での 500-kV 光陰極 DC 電子銃開発、第 9 回加速器学会年会、2012 年 8 月 10 日、大阪大学豊中キャンパス（豊中市）
12. 西森信行、永井良治、羽島良一、マイクロバンチ不安定性研究のためのサブピコバンチスペクトル計測の提案、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 26 日、関西学院大学（西宮市）
13. 西森信行、次世代 ERL 光源のための 500kV 光陰極電子銃開発、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 26 日、関西学院大学（西宮市）
14. 西森信行、永井良治、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、奥見正治、中西疆、Status of Photoemission DC Gun at JAEA、ICFA Workshop on Future Light Sources (FLS2012)、2012 年 3 月 7 日、Jefferson Laboratory, Newport News, VA (USA)
15. 西森信行、永井良治、松葉俊哉、羽島良一、山本将博、宮島司、本田洋介、飯島北斗、栗木雅夫、桑原真人、奥見正治、中西疆、500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発、第 8 回加速器学会年会、2011 年 8 月 1 日、つくば国際会議場（つくば市）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

プレス発表 平成 25 年 3 月 14 日

「次世代光源用光陰極直流電子銃から 500keV 大電流ビーム生成に成功」

<http://www.jaea.go.jp/02/press2012/p13031401/index.html>

日刊工業新聞 平成 25 年 3 月 19 日朝刊 29 面

日経産業新聞 平成 25 年 4 月 4 日朝刊 11 面

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西森 信行 (NISHIMORI Nobuyuki)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：60354908

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

永井 良治 (NAGAI Ryoji)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：40354906

羽島 良一 (HAJIMA Ryoichi)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究主席

研究者番号：30218432