

令和元年6月18日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03594

研究課題名(和文)次世代自由電子レーザー用高輝度電子ビーム生成とマイクロバンチ不安定性抑制法の研究

研究課題名(英文) Generation of high brightness electron beam and suppression of micro-bunching instability for XFEL operating at MHz-class repetition rate

研究代表者

西森 信行 (NISHIMORI, NOBUYUKI)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所・上席研究員(定常)

研究者番号：60354908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,490,000円

研究成果の概要(和文)：次世代高繰り返しX線自由電子レーザー(XFEL)用高輝度電子バンチ生成に必須である電子源の高電圧化と高電荷電子バンチ用レーザーシステム開発に取り組んだ。世界最高電圧500kVで0.8mA以上の大電流運転を長時間安定に達成すると共に、300pCの大電荷生成を可能とするレーザーシステム開発に成功した。ビーム性能試験では、電荷10pC以上で電子ビームの空間形状に歪みが生じ、目標とする高輝度ビームを実現出来ていない。原因と考えられるビーム軌道上の制御出来ていない磁場を除去し、高輝度性能達成とマイクロバンチ不安定性抑制の有効性実証を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代XFELは高輝度電子バンチをメガヘルツ程度の繰り返しで生成するCW電子源を必要とする。世界的に見て186MHzのRF光陰極電子源と直流光陰極電子源のみが有力な候補である。直流電子源で高輝度性能を達成するには、高加速電界と高加速エネルギーが必要である。それには電子源の高電圧化が必要だが、同時に放電問題を克服する必要がある。本研究では、直流電子源における放電現象の解明にも取り組み、世界最高電圧の500kVで長時間安定に直流光陰極電子源を運転し、暗電流を数ピコアンペア以下に抑制することに成功した。数百キロボルト以上の高電圧が必要とされる多様な技術開発にとって意義のある研究成果である。

研究成果の概要(英文)：We developed a high voltage photoemission dc gun capable of delivering high brightness electron beam for the next generation X-ray FEL that will be operated at high repetition rate above 0.1 MHz. Stable generation of a 500 keV beam with current greater than 0.8 mA was demonstrated for more than two hours. A dark current from the gun was successfully suppressed below a few pA. We also developed a drive laser system of the photoemission dc gun for generation of high bunch charge up to 300 pC. However, high brightness beam at bunch charge higher than 10 pC has not been generated due to uncontrolled magnetic field along the beam transport line downstream the gun exit. We will solve this problem and perform a proof of principle experiment of a new method for micro-bunching instability suppression.

研究分野：物理

キーワード：自由電子レーザー 光陰極電子銃 マイクロバンチ不安定性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 米国スタンフォードの X 線自由電子レーザー (XFEL) LCLS (Linac Coherent Light Source) では 0.1 ピコ秒の極短高輝度電子バンチを用いて 2009 年に XFEL を実現した。しかし、電子バンチを時間方向に圧縮する際、バンチ内部の微細な初期エネルギー分布構造が、電荷密度マイクロ構造に発展するマイクロバンチ不安定性のため、XFEL 出力が予定より低くなった。これを解決するため、圧縮前の電子バンチのエネルギー広がり、外部レーザーで意図的に増やすレーザーヒーターという抑制法を開発した。この技術で、初期エネルギー分布構造を薄めることに成功し、LCLS では一桁の高出力化を実現した。XFEL の成功を受け、米国は 2019 年完成を目指し LCLS-II 計画を開始した。繰り返し周期を 100Hz から 3 桁増やし、フェムト秒 X 線構造解析を駆使して、創薬、人工光合成、新たなサイエンス開拓を目指す。半導体リソグラフィ業界では産業用キロワット EUV-FEL 開発に取り組み始めた。これらメガヘルツ繰り返しの次世代 FEL でも、マイクロバンチ不安定性が問題となるが、数百 W もの大出力レーザーがレーザーヒーターに要求される。そこで、新たなマイクロバンチ不安定性抑制手法が待望された。

(2) 次世代 XFEL は、高輝度電子バンチをメガヘルツ繰り返して生成するための CW 電子源を必要とする。186MHz の RF 光陰極電子源 と直流光陰極電子源 が候補であったが、次世代 XFEL 性能を満たす仕様は世界的に満足されていなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、新たに提案する反転チャープ型バンチ圧縮器を用いたマイクロバンチ不安定性抑制方法の有効性を実証するのが最終目的である。不安定性の種となる電子バンチの初期エネルギー変調は、電子源から圧縮器入り口までの空間電荷力を用いて評価される。一方で、空間電荷力が最も強くなる圧縮器内での効果は、理論的扱いが困難という理由で無視されている。通常のバンチ圧縮器では、低エネルギー電子が遠回り、高エネルギーが近回りする。圧縮器への入射電子に対しては、バンチ前方のエネルギーを低く後方の高いチャープを加速器で与え、行路差によりバンチ圧縮する。空間電荷力はバンチ前方のエネルギーを高く、後方を低くするように働く。このため圧縮器出口で重なるはずのビーム軌道が交差する。交差点付近で強い空間電荷力が働き、マイクロバンチ不安定性を増幅する。一方、反転圧縮器では高エネルギー電子が遠回り、低エネルギーが近回りで行路差が反対になる。入射電子バンチには反転チャープを与えるため、空間電荷力がお互いの軌道を遠ざけ不安定性を抑制する。

(2) 本研究では、次世代 FEL 用高輝度電子バンチ生成が最初に取り組みべき研究課題である。そこで、以下の目的に順次取り組んだ。

- ・ 高繰り返し FEL に適用可能な電子源を改良し、300pC までの大電荷高輝度電子バンチ生成。
- ・ 得られた大電荷高輝度電子バンチを用いて cERL で反転チャープ型バンチ圧縮器を用いたマイクロバンチ不安定性抑制方法の有効性の実証。

3. 研究の方法

本研究では以下の順序で研究開発を行う。(1)と(2)及び(3)の達成が(4)の研究の前提となる。

- (1) 光陰極電子源の高電圧化：次世代高繰り返し FEL に適用可能な電子源として、KEK コンパクトエネルギー回収リニアック (cERL) 加速器の光陰極直流電子源を用いる。本研究で必要な高輝度電子バンチ生成のため、直流電子源の電圧として世界最高である 500kV での安定な電圧印加を目標に高電圧化の研究開発に取り組む。
- (2) 大電荷電子バンチ生成のためのレーザー開発：cERL 電子源は、電子バンチ繰り返し 1.3GHz で電流 10mA の ERL 放射光源のために開発された。電子源用レーザーシステムは最大電荷 8pC を想定していたため、300pC 以上への拡張は非線形性問題のため容易でない。本研究ではパルス幅 2ps、300pC 以上の電荷を生成できるレーザーシステムを開発する。

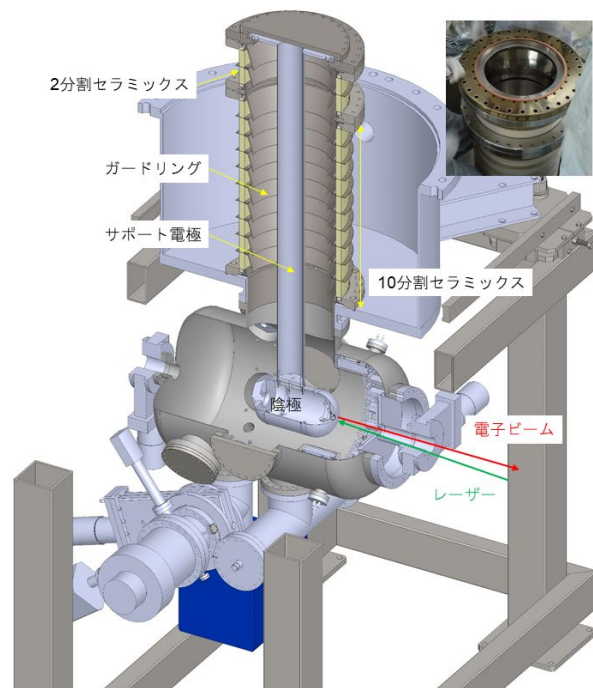


図1 高電圧光陰極電子銃

(3) エミッタンス計測： 光陰極 500kV 電子銃と大電荷用レーザーシステムを組み合わせ、電荷 300pC、規格化エミッタンス $en_x=1\text{mmrad}$ 以下の電子ビーム生成。

(4) cERL にて反転チャープ圧縮器を用いたマイクロバンチ不安定性抑制法の研究

4. 研究成果

(1) 光陰極電子源の高電圧化

本研究で使用する高電圧光陰極電子銃は原子力機構で開発され、2012 年に世界初の 500kV 電子ビーム生成を実証後、KEK のコンパクト ERL (cERL) に移設されたものである。移設後に 10 段分割セラミック管の 2 段に不具合があることが判明し、500kV 運転が困難となった。そこで、既存 10 段セラミック管に新規 2 段セラミック管を増設し、10 段運転を行うことを企画した (図 1 参照)。2015 年にセラミック管を増設し、電子銃高電圧コンディショニングを行った。セラミック管増設に伴いサポート電極も延長したが、継ぎ目から電界放出電子が発生し、高電圧印加に支障をきたした。継ぎ目なしのサポート電極に変更して 500kV 運転の目処をたてたが、電子ビーム生成のためのガリウムヒ素光陰極からの暗電流発生により 500kV の運転を行うことはできなかった。2016 年度の通常運転は、2 段セラミック管増設前と同じ 390kV で行った。

2017 年度は暗電流の原因を突き止めた。ガリウムヒ素光陰極を金属製ホルダーにインジウムで接着し、ホルダーを陰極に装着してビーム生成を行う。装着が不十分だとホルダーと電極間に隙間が生じ、暗電流が発生することがわかった。装着機構の調整後、暗電流を 5pA 以下に抑制することに成功した。

さらに、電子銃の追加コンディショニングを行い、500kV での安定運転の準備を行った。図 2 は電子銃のコンディショニング時の放電回数の関数として、放電開始電圧と放電停止電圧をプロットしたものである。放電開始電圧とは、電子銃の設定電圧である。コンディショニングが進んでいない状態では、設定電圧で放電が発生し大電流が陰極から陽極に流れる。高電圧源の容量は限られているため、大電流生成に伴い陰極の電圧が低下する。電圧が低下すると、放電により陰極から生成する電子のエネルギーも下がるため、電子が陽極で生成する電子刺激ガス脱離の影響が弱くなる。電子刺激ガス脱離が発生しない電圧まで低下すると、アバランシェ放電が停止する。これが放電停止電圧である。我々はこのメカニズムに着目し、図 2 に示す実験データを得た。脱離したガスは真空ポンプで排気され、同じ箇所には吸着されないと考えると、放電回数の増加に伴い、放電停止電圧は徐々に増加し、放電停止電圧以下では安定な高電圧印加が可能である。

放電回数 3000 回付近では、放電停止電圧は 500kV を越えた (図 2)。その後、電圧 500kV において 0.8mA 以上の電子ビームを 2 時間以上安定に生成することに 2018 年度までに成功した (図 3)。cERL における 500kV 運転において、電子銃に起因する放電や放射線発生は一度も観測されておらず、種々の実験に安定なビームの供給を続けている。このように、次世代 FEL 用高輝度電子バンチ生成に必要な電子銃高電圧化に成功した。

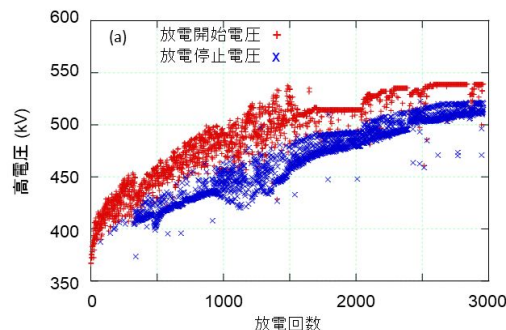


図 2 電子銃の放電開始電圧 (赤) と放電停止電圧 (青) を放電回数の関数としてプロット。

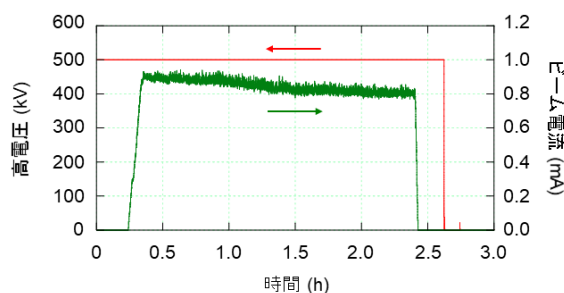


図 3 500kV 電子銃から $>0.8\text{mA}$ の電子ビームを 2 時間安定に供給。

(2) 大電荷電子バンチ生成のためのレーザー開発

次世代 FEL 用 300pC の電子バンチを量子効率 1% の光陰極から生成するには、波長 515nm のレーザーが $0.07\mu\text{J}$ 程度必要である。レーザー波形整形でロスする分を考慮すると $0.5\mu\text{J}$ / パルス程度が必要である。cERL のレーザーシステムは 60pC の電子ビーム生成を想定しており、300pC に対応していない。そこで、本研究でパルス幅 2ps、300pC 以上の電子バンチ生成可能なレーザーシステムの開発を行った。2015 年度にシステム設計と 8MHz のオシレーターからなる前段増幅器を組み上げた。2017 年度までに、後段増幅器を組み上げ、 $8\mu\text{J}$ / パルスを波長 1030nm、繰り返し 12.5kHz で達成し、レーザーのチャープパルス圧縮にも成功した。文献値で変換効率 10% 以上ある結晶を用いて 515 nm への波長変換を行い、 $0.5\mu\text{J}$ のパルスエネルギー達成を目論んだが、期待通りの変換効率を得られていない。ただし、 $0.2\mu\text{J}$ のパルスは得られているため、光陰極の量子効率の向上、レーザー波形整形でのロスの減少により、300pC 生成は可能である。

本レーザーシステムは量研関西光科学研究所で開発された。2018 年度までに cERL に移設す

る予定で準備を進めたが、移設とビーム運転のタイミングが合わずに延期した。

(3) エミッタンス計測

大電荷電子バンチ生成予備試験として、ソレノイドスキャンエミッタンス計測を電子バンチ 60pC まで行った。その結果、10pC 以上の電荷では電子ビームの空間プロファイルに歪みが生じ、シミュレーションとずれることが分かった。ソレノイド内に取り付けたビーム位置モニタ(BPM)のコバルト電極の磁性による影響と考えられている。しかしながら、cERL 運転に利用されているため、電子銃直後の真空作業が困難であり、現在まで原因の特定には至っていない。

(4) cERL にて反転チャープ圧縮器を用いたマイクロバンチ不安定性抑制法の研究

電子源の高電圧化、レーザーシステム開発を予定通り終えたが、大電荷でエミッタンスが増大する問題を解決することができていないため、マイクロバンチ不安定性抑制の研究を実施することが出来なかった。

<引用文献>

- Z. Huang et al., Phys. Rev. STAB **13**, 020703 (2010).
F. Sannibale et al., Phys. Rev. STAB **15**, 103501 (2012).
N. Nishimori et al., Appl. Phys. Lett. **102**, 234103 (2013).
M. Yamamoto and N. Nishimori, Appl. Phys. Lett. **109**, 014103 (2016).
N. Nishimori et al., Phys. Rev. AB **22**, 053402 (2019).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

- N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, and T. Uchiyama
“Operational experience of a 500 kV photoemission gun”
Physical Review Accelerators and Beams、査読有、Vol.22、2019、053402-1-10
DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.053402
- Nobuyuki Nishimori, Ryoji Nagai, Masaru Sawamura, Ryoichi Hajima
“Development of a Multialkali Photocathode Dc Gun for a Smith-Purcell Terahertz Free-Electron Laser”
Particles、査読有、Vol.1、2018、166-174
DOI: 10.3390/particles1010012
- 山本 将博、西森 信行、宮島 司、本田 洋介、羽島 良一
「Compact-ERL DC 電子銃の 500kV 長期安定運転」
第 15 回加速器学会年会論文集、査読無、2018、189-193
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/FROM/FROM03.pdf
- M. Akemoto, Y. Honda(15 番目), T. Miyajima(31 番目), N. Nishimori(39 番目), 全 62 名,
“Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK”
NIMA、査読有、Vol.877、2018、197-219
DOI: 10.1016/j.nima.2017.08.051
- T. Miyajima, Y. Honda, N. Nishimori(16 番目), 全 16 名
“60 pC Bunch Charge Operation of the Compact ERL at KEK”
Proceedings of IPAC2017、査読無、2017、890-893
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/papers/mopva019.pdf>
- T. Hotei, T. Miyajima, M. Shimada, N. Nakamura, R. Kato
“Optics Design of the compact ERL Injector for 60 pC Bunch Charge Operation”
Proceedings of IPAC2017、査読無、2017、898-901
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/papers/mopva021.pdf>
- Masahiro Yamamoto and Nobuyuki Nishimori
“High voltage threshold for stable operation in a dc electron gun”
Applied Physics Letters、査読有、Vol. 109、2016、014103-1-4
DOI: 10.1063/1.4955180
- T. Obina, Y. Honda(18 番目), T. Miyajima(40 番目), M. Mori(87 番目), N. Nishimori, (89 番目), 全 92 名
“Recent Developments and Operational Status of the Compact ERL at KEK”
Proceedings of IPAC2016、査読無、2016、1835-1838
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/tupow036.pdf>
- N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, 全 10 名
“DC Photoemission Gun Upgrade at the compact ERL”
Proceedings of IPAC2016、査読無、2016、3944-3946
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2016/papers/thpow008.pdf>

山本将博、西森信行

「超高真空における電子刺激脱離と直流放電現象の関係」

第13回加速器学会年会論文集、査読無、2016、47-51

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/M00L/M00L07.pdf

坂中章悟、芳賀開一、本田洋介、松村宏、宮島司、西森信行(21番目)、全21名

「コンパクト ERL におけるビーム電流約 1 mA の運転」

第13回加速器学会年会論文集、査読無、2016、291-295

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/WEOM/WEOM15.pdf

西森信行、山本将博、羽島良一、森道昭、永井良治、宮島司、内山隆司、本田洋介

「コンパクト ERL 電子銃の高性能化」

第13回加速器学会年会論文集、査読無、2016、468-472

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP048.pdf

Nobuyuki Nishimori

“Review of Experimental Results from High Brightness DC Guns: Highlights in FEL Applications”

Proceedings of FEL2015、査読無、2015、269-273

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEPO/WEPO37.pdf

T. Miyajima, Y. Honda, N. Nishimori(14番目)、全16名

“Status of higher bunch charge operation in compact ERL”

Proceedings of IPAC2015、査読無、2015、1583-1586

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/papers/tupwa067.pdf>

西森信行、永井良治、森道昭、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、全11名

「コンパクト ERL 電子銃の現状とアップグレード計画」

第12回加速器学会年会論文集、査読無、2015、511-515

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEPO/WEPO37.pdf

[学会発表](計 18 件)

山本将博、西森信行、宮島司、本田洋介、羽島良一

「Compact-ERL DC 電子銃の 500kV 長期安定運転」

第15回加速器学会年会、2017年8月10日、ハイブ長岡(長岡市)

T. Miyajima, Y. Honda, N. Nishimori(16番目)、全16名

“60 pC Bunch Charge Operation of the Compact ERL at KEK”

IPAC2017, 2017年5月15日、Copenhagen, Denmark

T. Hotei, T. Miyajima, M. Shimada, N. Nakamura, R. Kato

“Optics Design of the compact ERL Injector for 60 pC Bunch Charge Operation”

IPAC2017, 2017年5月15日、Copenhagen, Denmark

N. Nishimori, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, M. Mori(8番目)、全11名 (Invited)

“Commission results of the compact ERL High voltage DC gun”

The 59th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs

2017年6月21日、CERN, Geneva, Switzerland

山本将博、西森信行

「超高真空における直流高電圧放電と電子刺激脱離の関係性」

2017年真空・表面科学合同講演会、2017年8月18日、横浜市立大学(横浜市)

西森信行、森道昭、永井良治、羽島良一、山本将博、内山隆司、本田洋介、宮島司

「高繰り返し FEL のための DC 電子銃開発」

第14回高輝度高周波電子銃研究会、2017年2月23日、東北大学電子光理学研究センター

Masahiro Yamamoto and Nobuyuki Nishimori

“Relation between electron stimulated desorption and dc high voltage discharge under ultra-high vacuum”

International Vacuum Congress (IVC-20)、2016年8月25日、BEXCO, Busan, Korea

山本将博、西森信行

「超高真空における電子刺激脱離と直流放電現象の関係」

第13回加速器学会年会、2016年8月8日、幕張メッセ国際会議場(千葉市)

坂中章悟、芳賀開一、本田洋介、松村宏、宮島司、西森信行(21番目)、全21名

「コンパクト ERL におけるビーム電流約 1 mA の運転」

第13回加速器学会年会、2016年8月10日、幕張メッセ国際会議場(千葉市)

西森信行、山本将博、羽島良一、森道昭、永井良治、宮島司、内山隆司、本田洋介

「コンパクト ERL 電子銃の高性能化」

第13回加速器学会年会、2016年8月8日、幕張メッセ国際会議場(千葉市)

T. Obina, Y. Honda(18番目)、T. Miyajima(40番目)、M. Mori(87番目)、N. Nishimori,(89番目)、全92名

“Recent Developments and Operational Status of the Compact ERL at KEK”

IPAC2016, 2016年5月12日、Busan, Korea

N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, 全 10 名
“DC Photoemission Gun Upgrade at the compact ERL”
IPAC2016, 2016 年 5 月 12 日, Busan, Korea
西森信行
「次世代放射光源のための高輝度電子源開発」
平成 27 年度阪大産研量子ビーム科学研究施設成果報告会、2016 年 3 月 2 日、大阪大学
西森信行、羽島良一、山本将博、内山隆司、宮島司
「次世代 FEL を見据えた cERL 電子銃アップグレード」
第 22 回 FEL と High Power Radiation 研究会、2016 年 1 月 21 日、KEK (つくば市)
西森信行、森道昭、永井良治、羽島良一、山本将博、内山隆司、本田洋介、宮島司
「次世代放射光源用 dc 電子銃開発の最近の進捗」
第 13 回高輝度高周波電子銃研究会、2015 年 12 月 8 日、京都大学宇治キャンパス (宇治市)
Nobuyuki Nishimori (Invited)
“Review of Experimental Results from High Brightness DC Guns: Highlights in FEL Applications”
The 37th International FEL Conference, 2015 年 8 月 26 日, Daejeon, Korea
西森信行、永井良治、沢村勝、羽島良一
「コンパクト ERL 電子銃の現状とアップグレード計画」
第 12 回加速器学会年会、2015 年 8 月 5 日、プラザ萬象・あいあいプラザ (敦賀市)
N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, 全 10 名
“Operational Experience of DC Photoemission Gun at the compact ERL”
The 56th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs
2015 年 6 月 9 日, Stony Brook University, Stony Brook, New York, USA

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：森 道昭

ローマ字氏名：(MORI, michiaki)

所属研究機関名：量子科学技術研究開発機構

部局名：関西光科学研究所 光量子科学研究部

職名：上席研究員

研究者番号 (8 桁)：10323271

研究分担者氏名：本田 洋介

ローマ字氏名：(HONDA, yosuke)

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名：加速器研究施設

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：40509783

研究分担者氏名：宮島 司

ローマ字氏名：(MIYAJIMA, tsukasa)

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名：加速器研究施設

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：50391769

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。