

SACLA 高度化に向けた高輝度高繰り返し電子源の開発状況

PRESENT STATUS OF A HIGH-BRIGHTNESS HIGH-REPETITION-RATE ELECTRON GUN TOWARD SACLA UPGRADE

渡川和晃^{#A)}, 佐藤大輔^{B)}, ゴリヤシュコ ビタリー^{C)}, オパナセンコ アナトリー^{C)}, 馬込保^{D)}, 桑原真人^{E)}, 石田高史^{E)}, 菅原仁^{F)}, 吉越章隆^{G)}, 津田泰孝^{G)}, 小川修一^{H)}, 林田寿和^{I)}, 前平晃太郎^{I)}, 竹村育浩^{I)}, 金谷壮真^{I)}
Kazuaki Togawa^{#,A)}, Daisuke Satoh^{B)}, Vitaliy Goryashko^{C)}, Anatoliy Opanasenko^{C)}, Tamotsu Magome^{D)}, Makoto Kuwahara^{E)}, Takafumi Ishida^{E)}, Hitoshi Sugawara^{F)}, Akitaka Yoshigoe^{G)}, Yasutaka Tsuda^{G)}, Shuichi Ogawa^{H)},
Toshikazu Hayashida^{I)}, Koutarou Maehira^{I)}, Yasuhiro Takemura^{I)}, Souma Kanaya^{I)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{C)} Uppsala University

^{D)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{E)} Nagoya University

^{F)} Kobe University

^{G)} The Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{H)} Nihon University

^{I)} SPring-8 Service Co., Ltd. (SES)

Abstract

Present status of a high-brightness, high-repetition electron gun and injector developments toward SACLA upgrade is described here. The basic concept of the new system inherits the present SACLA's thermionic injector. New cathode emitter and accelerating electrode materials have been tested to realize the extraction of higher-brightness electron beams than ever achieved before. A new high-voltage power supply based on the conventional klystron technology is proposed to increase the pulse repetition rate from 60 Hz to 600 Hz. A new injector system which can minimize emittance growth in the process of longitudinal bunching is also proposed with a good result of beam simulations. This project has been conducted since 2024, and we are aiming to start construction of a test accelerator in 2028.

1. はじめに

SPring-8 キャンパスでは、次世代の蓄積リング型光源加速器 SPring-8-II の建設プロジェクトが正式に予算化され、現在建設の準備が急ピッチで進められている[1]。一方、直線型の X 線自由電子レーザー (XFEL) 加速器 SACLA は共用運転開始から 13 年が経過し、その間にアンジュレータビームラインの増設や蓄積リングへの同時入射運転など様々なアップグレードが行われてきたのであるが[2-4]、現代の社会的ニーズと科学的ニーズにマッチした省エネルギー型の高繰り返し線形加速器にアップグレードする構想が理化学研究所より立てられた[5]。

XFEL パルス光の高輝度化も高繰り返し化と同様に実験ユーザーから求められる。XFEL パルス光の高輝度化には電子源ビームの高輝度化が必須であると言っても過言ではないため、数年前よりその課題に取り組んできた[6-8]。これを将来の SACLA アップグレードに適用するためには、高輝度化と高繰り返し化を両立させなければならない。そこで 2023 年度に具体的な SACLA 電子銃、入射器の高輝度高繰り返し化アップグレードプランを打ち立てた[9]。2024 年度をスタートとした 5 カ年計画で、旧 SCSS 試験加速器で使用された加速器トンネルを利用して 2028 年度から試験加速器建設をスタートすること

を目標としている。

本稿では、SACLA 高度化に向けた高輝度高繰り返し電子銃、入射器のための開発に関する現状を報告する。

2. 開発方針

熱電子銃を用いた XFEL 加速器は世界で類がなく SACLA が唯一のものである[10]。その安定性とビーム再現性、チューナビリティーの利点を生かすために、アップグレードにおいても熱電子銃方式を継承することにした。

電子ビームの 4 次元規格化輝度は 4 次元位相空間の hyper-ellipsoid 内に存在する電子の平均密度として定義される。この定義に従って、電子銃カソードにおける輝度を表すと以下の式で表すことができる。

$$B_n \equiv \frac{2I}{(4\pi)^2 \varepsilon_{n,x} \varepsilon_{n,y}} = \frac{j_c m_e c^2}{2\pi k_B T} \propto \frac{j_c(T, \phi, E_s)}{T}$$

ここで I は電子ビームの電流値、 $\varepsilon_{n,x(y)}$ は電子ビームの規格化エミッタンス、 j_c はカソードのエミッション電流密度、 T はカソードの温度、 ϕ はカソード物質の仕事関数、 E_s はカソードの加速表面電界である。上式が示すように、電子ビーム輝度はエミッション密度に比例するため、いかにしてエミッション密度を上げるかが高輝度電子ビームの生

[#] togawa@spring8.or.jp

成にとって最も重要な課題となる。熱電子銃の場合、エミッション密度は Richardson-Dushman 方程式に従う。

$$j_c = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{eff}}{k_B T}\right)$$

ϕ_{eff} は Shottky 効果で表される実効的な仕事関数であり、次の関係式で表される。

$$\phi_{eff} = \phi - \frac{e}{2} \sqrt{\frac{eE_s}{\pi\epsilon_0}}$$

上記関係式より、カソードにおけるビーム輝度を大幅に引き上げる手法は次の2つに限られる。1) カソード固有の物質質量である仕事関数 ϕ が小さく高温の動作温度に耐えられる物質を探索する、もしくは局所的に ϕ を下げる表面状態を作り出す。2) カソードの表面電界 E_s を高電界化し、相対的な動作温度を下げる。現状の SACLA は直径 3 mm の CeB₆ 単結晶をエミッターとして使用しており、1500 °C 程度まで加熱して 14 A/cm² のエミッション密度を生成し加速器運転を行っている。ビーム輝度を 1 桁向上しようとする、カソード温度を現状より 250 °C 以上引き上げなければならず、寿命の観点からこのままでは現実的ではない。そこで、開発方針として上記 2 つの手法に従った 2 つの方針を打ち立てた。

- I) CeB₆ 単結晶と同様に高温下でナノメートルレベルの表面粗度を長時間保つことができる熱電子カソード物質を探索する。
- II) CeB₆ 単結晶など六ホウ化希土類単結晶の動作温度を下げるために、電子銃チャンバーを高電界化する。

エミッション密度と同様にカソード寿命も重要なファクターであるが、SACLA における CeB₆ カソードの寿命は 1 年弱と決して長くはない。そのため、将来の高輝度高繰返し化に向け次の課題も方針の一つに取り入れた。

- III) カソード寿命を決定している要因を突き止め、長寿命化を実現するための研究を継続して行う。

電子銃のパルス繰返しを現状の 60 Hz から 600 Hz まで増強するためには、パルス電源の開発が必要である。現電子銃システムはクライストロン電源の技術をそのまま流用しているため、3 μs もの長パルス電子ビームを電子銃で生成し、チョッパーシステムで僅か 1 ns の必要なバンチを切り出している。高繰返し化のためには電源システムのパルス幅を 1 桁短縮しなければならない。高電圧パルスの短パルス化は II) の電子銃の高電界化のためにも望まれる課題である。

- IV) 応答時間の早い電源システムを開発し、高繰返し化を実現する。

上述した課題をクリアして高輝度電子ビームの発生が実現したとしても、後続の加速及びバンチ圧縮の過程でビーム輝度が悪化してしまえば研究開発が意味をなさなくなってしまう。従って、次の課題も極めて重要なものとなる。

- V) 電子銃から出射した高輝度電子ビームのスライスおよび射影エミッタンスの悪化を最小限に抑制して加速とバンチ圧縮を行う電子入射器のデザインとハードウェア開発を行う。

上記課題に対する開発研究の進展状況を次章以降で順に述べてゆく。

3. カソード開発

XFEL 光の生成が可能な高輝度低エミッタンス電子ビームを発生できる熱陰極材料は、今のところ六ホウ化希土類単結晶が唯一のものであるが、寿命など CeB₆ 単結晶の弱点を克服できると期待される熱陰極材料がセリウムイリジウム (CeIr) である[11]。多結晶に関しては、筆者の一人である佐藤大輔氏、KEK の吉田光宏氏らによって SuperKEKB 入射器の RF 電子銃用フォトカソードとして実用化されている[12, 13]。XFEL では低エミッタンスビームを生成するために極めて平坦な表面と一様なエミッション密度分布が要求されるので、それに適している単結晶材料に着目することにした。安定した単結晶の成長が可能な組成は CeIr₂ であることが知られているので、まずは CeIr₂ 単結晶の試験を行うことにした。結晶は筆者の一人である菅原仁氏の研究室で Czochralski 法により作製された[14, 15]。

最初のエミッション試験、エミッタンス測定は SACLA の電子銃テストスタンド[16]で昨年度に実施した。特別な表面処理を行うことなく加熱後すぐにエミッションが観測され、最大で SACLA の数倍のピークエミッション密度を得ることができた。また、規格化エミッタンスも SACLA と遜色ない性能が得られることを確認した。1ヶ月の加熱でエミッション電流が顕著に劣化することはなかったが、電子顕微鏡等による分析で表面の結晶構造が変化していることが分かってきた。現在詳細な分析を行うとともに、今回試料の方位面[111]とは異なる方位面を持つ試料のビーム試験を準備している。今年会でも筆者の一人である佐藤大輔氏による発表があるが[17]、詳細な結果は論文にまとめて学術雑誌に投稿する予定である。

4. 高電界加速電極

SACLA では電子銃チャンバーの加速電極材料に真空溶解処理をした清浄ステンレス SUS316L を使用してきた。加速ギャップは 50 mm で、500 kV を印加した時のカソード表面電界は 13 MV/m、ウェネルトエッジ (R10 mm) の最大表面電界は 25 MV/m である。カソード加熱の影響でウェネルトが 1000 °C レベルにまで上昇する過酷な条件で運用していることから、現状のステンレスではこれ以上の高電界は期待できないと判断し、新しい材料の導入を試みることにした。

着目したのは、2 次電子放出係数が小さく耐放電電圧が高いチタン材である。電子顕微鏡や電子陽電子コライ

ダー用の DC セパレータなど古くから実績があり、最近では ERL 用 DC 電子銃でも高い絶縁性能が得られている [18]。まずは SACLA と同一形状で、ウェネルトには化学研磨処理を行なった第 2 種純チタン、アノードにはモリブデンを使用した加速電極で高電圧印加を行なった。清浄 SUS316L より早いペースで高電圧コンディショニングが終了し、安定した印加ができたものの、1 年間使用を続けると逆に放電が多発するようになった。大気解放後に観察すると、表面が荒れた状態となっていて、チタン表面の再結晶化が進み不純物らしき黒点が多数表面に浮き出ていることが光学顕微鏡で確認された。

パルスではあるが 500 kV で 40 MV/m レベルの高電界を目標としているため、以下の新たな技術を導入して高電界に挑むことにした。1) 不純物が少ない純度 5N の純チタンを母材として使用する [19]。2) チタン母材を予め高温環境に晒すことで結晶が安定化することを期待し、加工前に HIP 処理を行う [20]。3) 既に取り入れているが、機械加工後には放電の種となる砥粒が残留しないようバブ研磨は行わず、チタン専用の化学研磨処理を行う [21]。

加速電極の形状は、カソード表面電界とウェネルト最大電界の差が大きく開かないよう、ウェネルトエッジを R25 mm とした。Figure 1 に試験電極の断面図を示す。

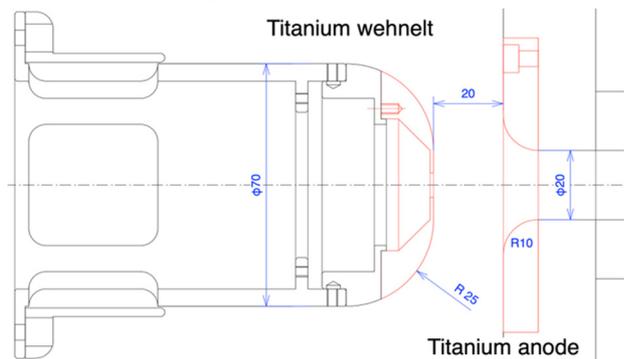


Figure 1: Test electrodes made of pure titanium. Red colored parts are made of pure titanium.

高純度チタンの基本的な特徴を知るために、アノードにも同じ処理を施した 5N チタン材を使用し、高電圧試験は室温で行なった。Figure 2 に高電圧コンディショニングの様子を示す。電極ギャップ 20 mm では、僅か 2 回の放電を起こしただけで 500 kV (ウェネルト最大電界 32 MV/m, カソード電界 26 MV/m) に到達し、24 時間放電することなく安定に 500 kV の印加を継続できた [22]。次に、一旦大気開放して 10 mm まで電極ギャップを狭め、同様の高電圧試験を行なった。放電を繰り返しながら印加電圧は上昇して最大で 470 kV (ウェネルト最大電界 49 MV/m, カソード電界 34 MV/m) まで達したが、放電電圧が徐々に低下し、30 MV/m から 40 MV/m の間をふらつく不安定な状態となった。実験後の電極の表面写真を Fig. 3 に示す。アノードには多くの融解した跡があり、ウェネルトには融解して飛散し付着したと思われる液滴状のチタンらしき物質が確認できる。パルス電源に蓄積される電気エネルギーは 0.3 kJ/pulse と非常に大きい。このレベルのエネルギーが放電により 1 点に集中することでチタンアノードが局所的に融解したものと考えられる。

最初の構想ではアノードにはモリブデン等の高融点金属が適していると考えていたので、そのアイデアに立ち戻って次は高融点金属製のアノードで試験を行う予定である。

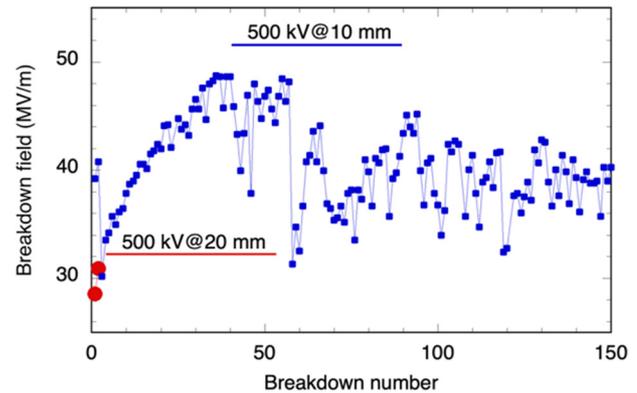


Figure 2: High-voltage conditioning of the pure titanium electrodes.

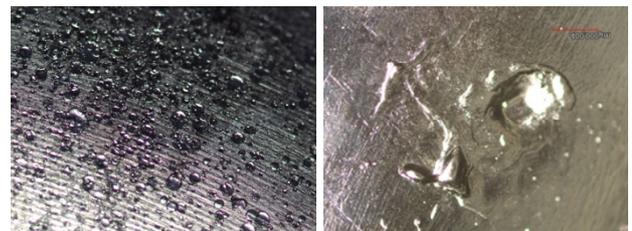


Figure 3: Damaged titanium electrodes after 150-breakdowns observed using an optical microscope. Left: wehnelt, right: anode.

チタンの結晶構造は、約 880 °C で α 相 (六方最密充填構造 hcp) から β 相 (体心立方構造 bcc) へと転移することが知られている。高電界に対する絶縁性を保つには、結晶構造を安定化させることが重要であると考えられる。従って、カソードの加熱パワーを下げることも重要な課題である。加熱方式については 6 章で述べる。

5. カソードの長寿命化

カソードの長寿命化は、電子源分野で最も難しい課題の一つである。CeB₆ 単結晶は比較的寿命が長いカソードに分類されるが、年間を通して 24 時間営業運転を行なっている加速器では必ずしもそうではないことがこの 13 年の SACLA での経験で分かってきた [23-25]。将来の高輝度高繰り返し化アップグレードではさらにカソードの環境が厳しくなると考えられるので、長寿命化対策も重要な課題の一つと位置付けている。寿命を決めている要因を特定して対策を行うためには、様々な物性の知識と評価装置が必要となってくる。そこで、所内の試験装置に加えて、国内の研究機関と連携してこの問題に取り組むことにした。1) 名古屋大学超高压電子顕微鏡施設 [26]: 透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて表面からバルクにかけての連続した結晶構造の変化を精密に分析する。長期間使用した CeB₆ 結晶では表面に留まらずバルク内部でも stoichiometry の変化が生じていることが既に

観測されている。2) SPring-8 ビームライン BL23SU[27]: 結晶表面の原子組成を精密に分析する。本装置では高温加熱途中の表面の構造変化をダイナミックに観測することが期待される。3) SACLA 電子銃テストスタンドおよびカソード試験装置[16, 28]: 可能な限り実機に近い *in-situ* の条件で、エミッション密度に直結している物理量である仕事関数を精密に測定し評価を行う。

最近、実機と同条件で動作する電子銃テストスタンドにおいて、ビーム運転を妨げることなく仕事関数を精密に測定することに初めて成功した。詳細は筆者の一人である馬込保氏による本年会の報告を参照されたい[29]。

6. 短パルス高電圧電源

電子銃高電圧の短パルス化は、SACLA クライストロン電源の技術[30]をベースに高電圧回路を見直すという方針で進めることにした。SACLA 電子銃では、クライストロンを代替するインピーダンス整合用のダミー真空管と電子銃チャンバー本体がパルストランスの 2 次側の負荷となっている。高電圧パルスの幅を決めているのが立ち上りと立ち下りの応答時間であるが、電子銃に必要な高電圧領域は僅か 1 ns であるので、クライストロンのようにフラットトップ部を設ける必要はない。そこで、パルス電源とのインピーダンス整合はパルストランスの 1 次側でとり、2 次側はインピーダンスの高い実抵抗体を用いてあえて不整合の状態で作成することを考えた。そうすると 2 次側の熱負荷が抑えられ、負荷を小型にすることができるので、パルス幅を決める浮遊容量を小さくできる。

また、電子銃カソードを加熱するために交流電流を高電圧側に伝送しているヒータートランスも浮遊容量の一部を占めているが、高出力の赤外線半導体レーザーを利用して電子銃チャンバー側からカソードを加熱することで、ヒータートランスを撤去することができる。半導体レーザーを利用したカソード加熱は、佐藤大輔氏らによって先行して開発がなされている[31]。その技術を利用して最近 40 W 程度のパワーで CeB_6 カソードを 1500 °C まで加熱することに成功した。現在、加熱用レーザーを実装するために電子銃チャンバーの改造を進めている。

Figure 4 に考案した高電圧システムの回路図を示す。電子銃タンクのパルストランス 2 次側は 1 次側に換算した等価回路で表している。一例として SACLA 電子銃の回路定数を元に LTspice でシミュレートした高電圧波形を Fig. 5 に示す。まだ浮遊容量と漏れインダクタンスが正確に決められておらず楽観視は出来ないが、本方式で数 100 ns のパルス幅が実現できそうであることが示された。本年度内に原理検証実験を行う予定で、その準備を進めている。

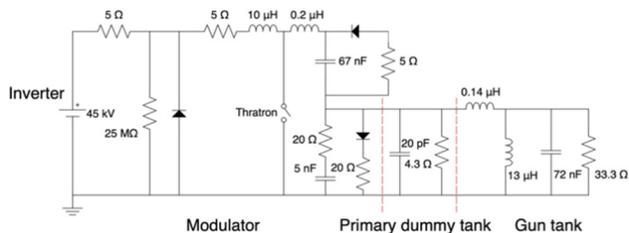


Figure 4: Proposed high-voltage circuit for a short-pulsed electron gun.

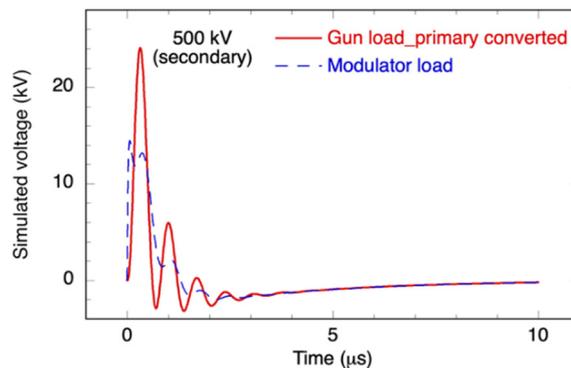


Figure 5: Simulated waveform of the gun voltage.

7. 入射器高度化の構想

低エネルギー領域で複数の周波数の RF 空洞を用いて段階的にバンチ長を圧縮しながら加速する方式は熱電子銃には不可欠なもので SACLA の特徴の一つでもある[32]。電子銃と入射器は密接な関わりがあるため、電子銃で発生した高輝度ビームの性能を劣化させずに主加速器に送り込むためには、入射器全体の見直しも必要となってくる。

昨年度、筆者の一人である Vitaliy Goryashko 氏を中心にビームダイナミクスの検討が進められ、2 つの重要なことが明らかとなった。1) 磁気レンズにおける電子ビームの運動を厳密に解析することで、近似的に得られる球面収差効果より大きな収差が生じることが分かった[33]。特に電子銃出口ではアノードの発散レンズ効果でビームが広がりやすく、高電界電子銃ではそれが増長される。ビームを広げないよう可能な限り初段の磁気レンズをアノードに近づけることが重要となるが、磁場の裾野がカソードに浸透するとビームが回転してエミッタンスが悪化するので、浸透磁場は 1 Gauss 以下のレベルに抑えなければならない。これらを両立するために、永久磁石と電磁石を組み合わせたハイブリッド磁気レンズが提案された[34]。製作は終了しており、高電界電子銃と組み合わせるその効果を確認する予定である。2) SACLA ではバンチャーの後でエネルギーを 1 MeV まで加速するブースター空洞を使用しているが、これを 3 連空洞としてエネルギーを 3 MeV まで上げ、その区間に設置した磁気レンズの強度を調整すると、射影エミッタンスの悪化を低減できることが ASTRA 等のシミュレーターを用いた解析で分かった。エミッタンス補償効果がどのようなメカニズムで働いているのかについては明確な解釈がまだ得られていないが、フォトカソード型の入射器と遜色のないエミッタンスが得られそうであることが判明したことは大きな成果であったと考えている。詳細は文献 35 を参照されたい。

新しく提案した入射器の概要を Fig. 6 に示す。今回のビーム設計をいかにしてハードウェア設計に落とし込んでいくかが次の重要な課題であり、早急に進めていきたいと考えている。

8. まとめ

SACLA における XFEL パルス光の高輝度高繰り返し化を目的とした電子源、入射器のアップグレード計画に

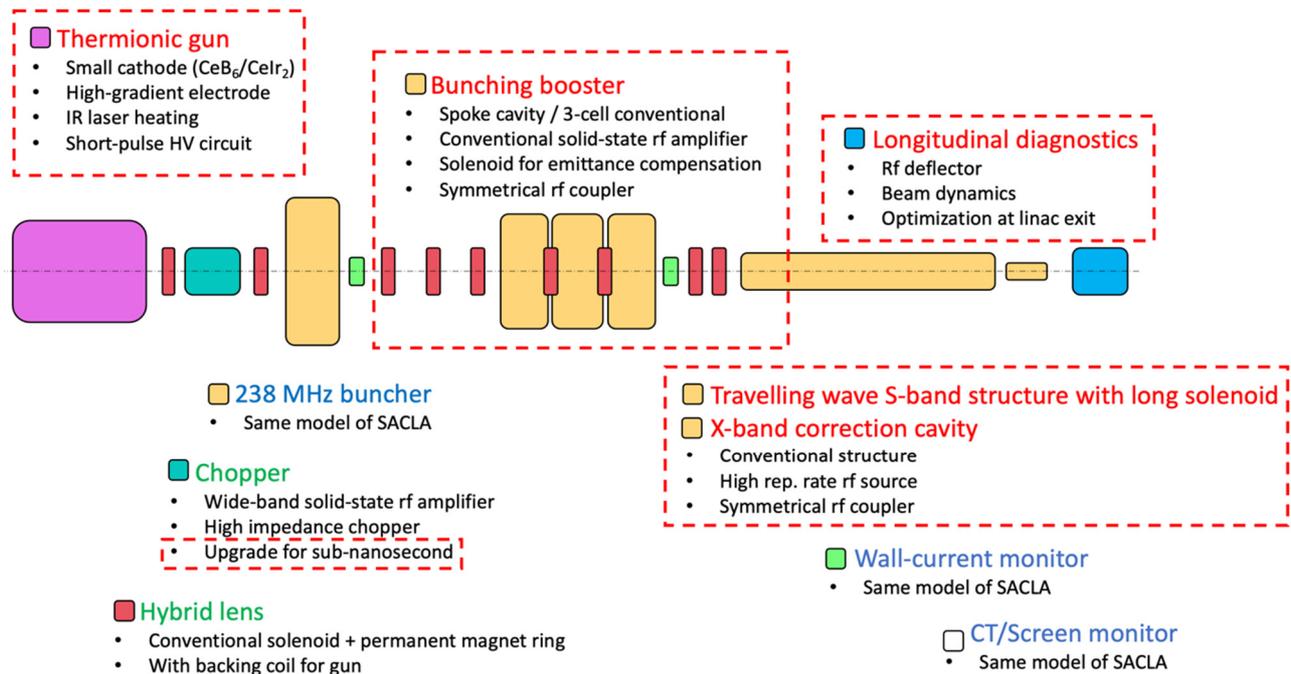


Figure 6: Schematic of the proposed new SACLA injector for high-brightness and high-repetition rate upgrade.

関する概要と要素技術開発の現状を述べた。2028 年度から試験加速器の建設をスタートすることを目標として、今後も開発研究を継続してゆく。

謝辞

本計画を進める上で、理化学研究所放射光科学研究センターの石川哲也センター長および田中均副センター長からは多大なるご支援を頂いております。また、研究所スタッフの皆様からも惜しみないご協力を頂いております。この場をお借りして感謝の意を申し上げます。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “Green upgrading of SPring-8 to produce stable, ultrabright hard X-ray beams”, *Journal of Synchrotron Radiation* (2024), 31, 1420–1437. doi:10.1107/S1600577524008348
- [2] T. Ishikawa *et al.*, “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, *Nature Photonics* 6 (2012) pp. 540–544. doi:10.1038/NPHOTON.2012.141
- [3] T. Hara *et al.*, “High peak current operation of x-ray free-electron laser multiple beam lines by suppressing coherent synchrotron radiation effect”, *Physical Review Accelerators and Beams* 21, 040701 (2018). doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.040701
- [4] T. Hara *et al.*, “Low-emittance beam injection for a synchrotron radiation source using an X-ray free-electron laser linear accelerator”, *Physical Review Accelerators and Beams* 24, 110702 (2021). doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.24.110702
- [5] H. Tanaka *et al.*, “Green-oriented upgrade of accelerator complex at the SPring-8 campus”, *Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC2023)*, May 7–12, 2023, Venice, Italy, pp. 2590–2593, <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2023/pdf/WEOGA3.pdf>
- [6] K. Togawa, “XFEL の出力増強に向けた高輝度熱電子源の開発状況”, 第 20 回 FEL と High-power Radiation 研究会, 2019 年 12 月 17-18 日, 広島大学.
- [7] K. Togawa, “熱電子銃と短波長 FEL のビーム物理”, ビーム物理研究会, 2020 年 12 月 8-9 日, リモート開催.
- [8] K. Togawa, “Toward higher brightness beam of the SACLA electron source”, *Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023)*, Aug 29-September 1, 2023, Funabashi, Japan, pp. 185-189, THOB5, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/THOB/THOB5.pdf
- [9] K. Togawa, “SACLA upgrade based on electron source technologies”, Internal report, December 22, 2023.
- [10] K. Togawa *et al.*, “CeB6 electron gun for low-emittance injector”, *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* 10, 020703 (2007). doi:10.1103/PhysRevSTAB.10.020703
- [11] G. Kuznetsov, “High temperature cathodes for high current density”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 340 (1994) pp. 204-208. doi:10.1016/0168-9002(94)91302-1
- [12] D. Satoh *et al.*, “Research and development of iridium cerium photocathode for SuperKEKB injector linac”, *Energy Procedia* 131 (2017) pp. 326–333. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.430
- [13] D. Satoh *et al.*, “Characterization of binary Ce–Ir alloy photocathodes”, *Japanese Journal of Applied Physics* 58 (2019) SIIB10. doi:10.7567/1347-4065/ab19a5
- [14] H. Sugawara *et al.*, “Single crystal growth and electrical properties of CeRh₂ and CeIr₂”, *Physica B* 199&200 (1994) pp. 570-571. doi:10.1016/0921-4526(94)91908-9
- [15] K. Omasa *et al.*, “Superconducting and Fermi Surface Properties of a Valence Fluctuation Compound CeIr₂”, *Journal of the Physical Society of Japan* 93, 034704 (2024). doi:10.7566/JPSJ.93.034704

- [16] K. Togawa, "Slice emittance measurements using a slit-grid system and a fast wall-current monitor", *Review of Scientific Instruments* 95, 043304 (2024). doi:10.1063/5.0191141
- [17] 佐藤大輔 他, "SACLA 高度化に向けた高輝度電子銃用単結晶 CeIr₂ 熱電子源の研究開発", 第 22 回日本加速器学会年会, 2025 年 8 月 6-8 日, 東京都市大学, THP040.
- [18] M. Yamamoto *et al.*, "High voltage threshold for stable operation in a dc electron gun", *Applied Physics Letters* 109, 014103 (2016). doi:10.1063/1.4955180
- [19] <https://www.osaka-ti.co.jp/e/>
- [20] <https://www.kinzoku.co.jp/en.html>
- [21] <https://www.san-ai-obblitech.com>
- [22] K. Togawa, "Development of a high-gradient thermionic electron gun for a future X-ray free-electron laser", 12th International Workshop on the Mechanisms of Vacuum Arcs (MeVArc2025), June 1-6, 2025, Uppsala, Sweden, <https://indico.cern.ch/event/1424597/>
- [23] K. Togawa *et al.*, "Toward lifetime extension of the thermionic gun cathode at SACLA", *Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016)*, August 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp. 473-475, MOP049, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP049.pdf
- [24] K. Togawa *et al.*, "Operational experiences and issues of the CeB6 electron gun", *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018)*, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, pp. 893-895, THP042, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP0/THP042.pdf
- [25] K. Togawa, "Lifetime improvement of the CeB6 thermionic cathode at the X-ray free-electron laser facility SACLA by avoiding backward-accelerated electrons", *The 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC2023)*, May 7-12, 2023, Venice, Italy, unpublished.
- [26] https://www.imass.nagoya-u.ac.jp/organization/organization_cat/hvem/
- [27] <https://new.spring8.or.jp/index.php/ArticleBeamlinePage?blname=BL23SU>
- [28] T. Magome *et al.*, "Precise measurement of the work function of a hot CeB6 thermionic cathode through photoelectron yield spectroscopy using a tunable pulsed laser", *Journal of Applied Physics* 133, 165107 (2023). doi:10.1063/5.0139366
- [29] 馬込保 他, "SACLA 電子銃カソードの仕事関数その場測定", 第 22 回日本加速器学会年会, 2025 年 8 月 6-8 日, 東京都市大学, FRP044.
- [30] 馬場齊 他, "C-band 50-MW クライストロン用コンパクト密閉型変調器電源の開発", *Proceedings of the 26th linear accelerator meeting in Japan*, August 1-3, 2001, Tsukuba, Japan, 2P-36, https://www.pasj.jp/web_publish/lam26/PDF/2P-36web.PDF
- [31] D. Satoh *et al.*, "Development of iridium cerium photocathode for the generation of high-charge electron beam", *Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC2014)*, June 15-20, 2014, Dresden, Germany, pp. 679-681, <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2014/papers/mopri037.pdf>
- [32] T. Shintake *et al.*, "Spring-8 Compact SASE Source (SCSS)", *Proceedings of SPIE, Optics for Fourth-Generation X-Ray Sources*, edited by R. O. Tatchyn, A. K. Freund, and T. Matsushita (SPIE, Bellingham, WA, 2001), Vol. 4500, pp. 12-23, <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4500/1/SPRING-8-compact-SASE-source-SCSS/10.1117/12.452964.short>
- [33] V. Goryashko *et al.*, "Self-aberration in high-brightness uniformly charged particle beams", *Results in Physics* 68 (2025) 108096. doi:10.1016/j.rinp.2024.108096
- [34] V. Goryashko *et al.*, "Design study of a high-brightness high-repetition rate thermionic injector for Free-Electron Laser applications: Part II, Gun technology", submitted to *Physical Review Accelerators and Beams*.
- [35] V. Goryashko *et al.*, "Design study of a high-brightness high-repetition rate thermionic injector for Free-Electron Laser applications: Part I, The architecture", *Physical Review Accelerators and Beams*, accepted for publication. doi:10.1103/b7sd-jvxxq