

SACLA高度化に向けた 高輝度高繰り返し電子源の開発状況

渡川和晃^{A)}, 佐藤大輔^{B)}, Vitaliy Goryashko^{C)}, Anatoliy Opanasenko^{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)}

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)

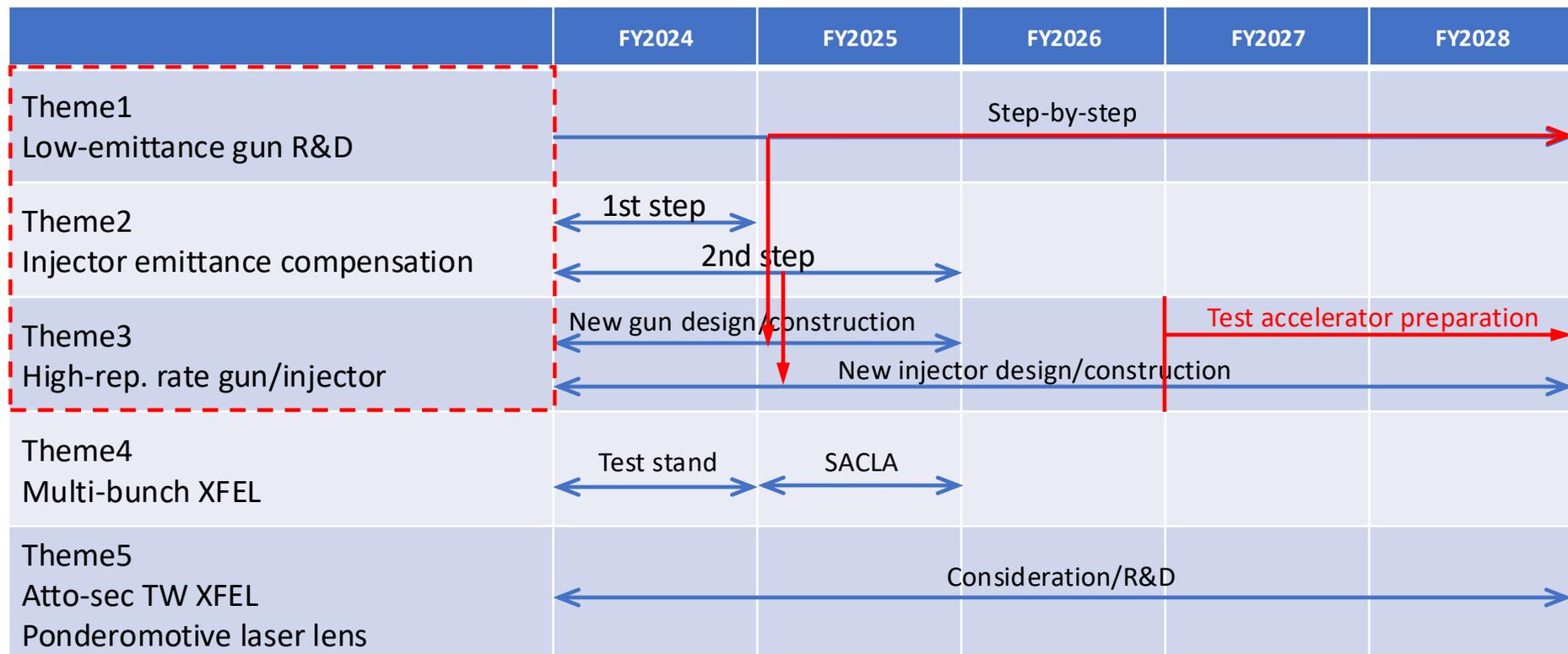
H) Nihon University

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

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, 現在建設の準備が急ピッチで進められている.
渡部貴宏 他, “次世代放射光源SPring-8-IIのための加速器設計・開発”, 本年会, WEPO702
- **SACLA**は共用運転開始から13年が経過. 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立てられた.
- **XFELパルス光の高輝度化**も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.
- 高輝度化と高繰り返し化を両立させる**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2023年度に打ち立て, 2024年度から本格的にスタート.
- 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開始**することを目標としている.

高輝度高繰り返し電子銃開発の5カ年計画



↑
**SCSS tunnel
will be available**

電子ビームの輝度

$$B_n \equiv \frac{2I}{(4\pi)^2 \varepsilon_{n,x} \varepsilon_{n,y}}$$

4次元位相空間のhyper-ellipsoid内
電子の平均密度

$$= \frac{j_e m_e c^2}{2\pi k_B T} \propto \frac{j_e(T, \phi, E_s)}{T}$$

あらわな T には強く依存しない

輝度の熱的限界値

- I : ビーム電流
- ε_n : 規格化エミッタンス
- j_e : エミッション密度
- T : カソード温度
- ϕ : カソード仕事関数
- E_s : カソード表面電界

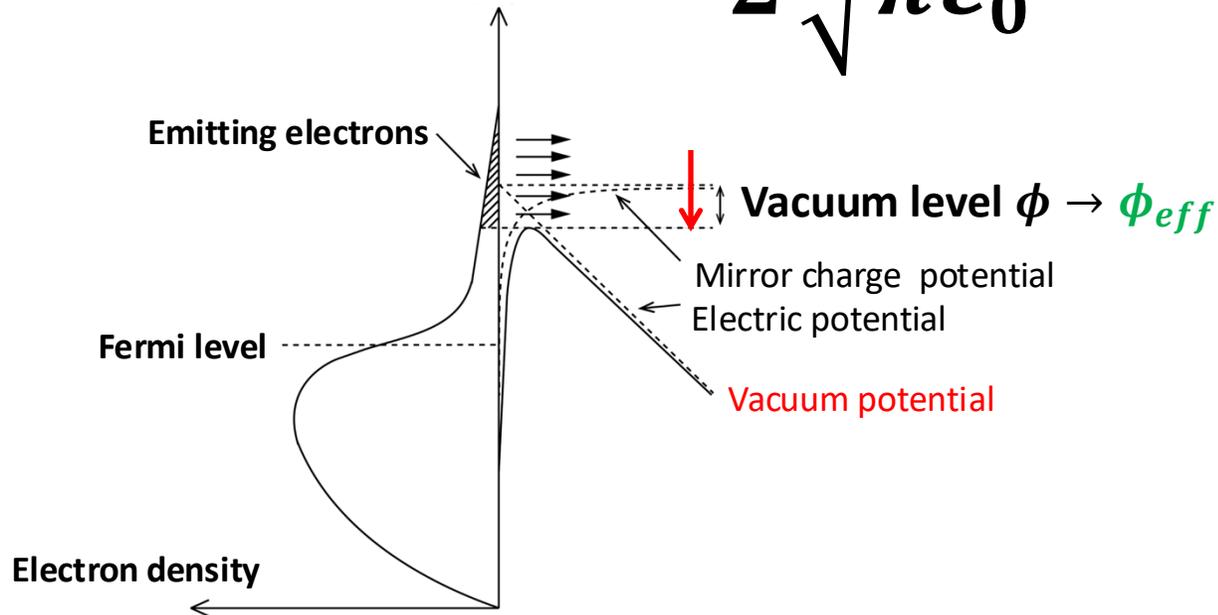
熱電子放出

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

Richardson-Dushman方程式

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

Shottky効果



A : Richardson定数

ϕ_{eff} : 実効仕事関数

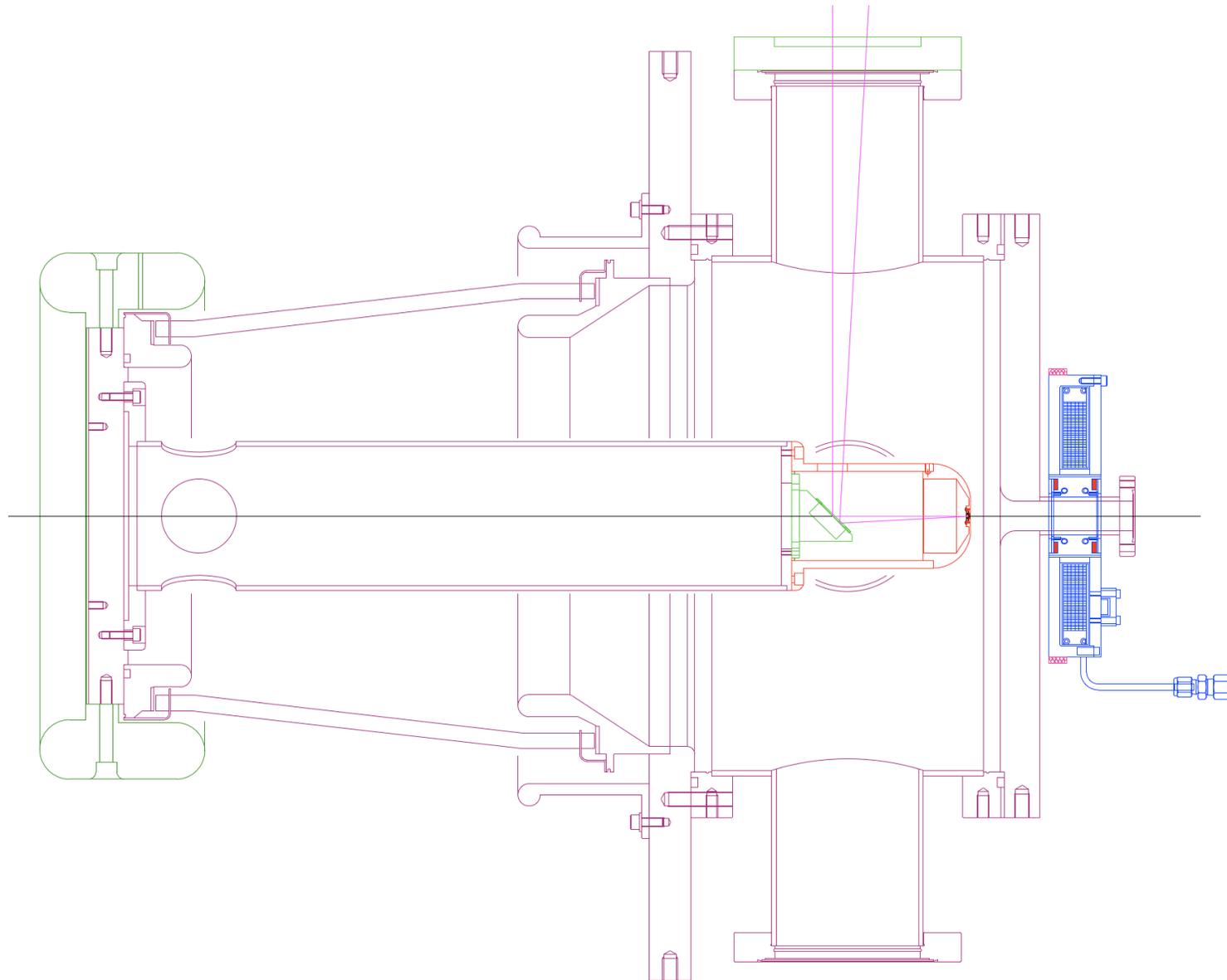
ϕ : カソード仕事関数

E_s : カソード表面電界

開発方針

- I. CeB_6 単結晶と同様に仕事関数が低く、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. CeB_6 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。
- III. カソード寿命を決めている要因を突き止め、**カソードの長寿命化**を実現するための研究を継続して行う。
- IV. **応答時間の早い電源システム**を開発し、高繰り返し化を実現する。
- 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**新しい電子入射器のデザインとハードウェア開発**を行う。

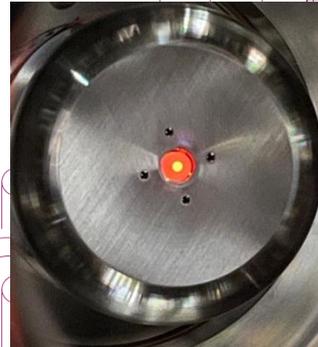
究極の熱電子銃を目指して



究極の熱電子銃を目指して

3. Low heat load and short pulse

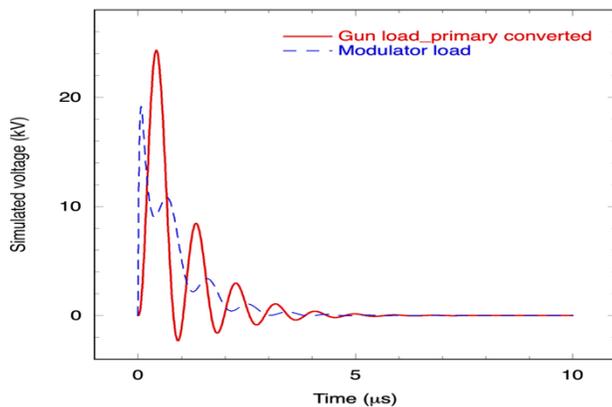
IR-laser heating
with AIST



1. Small emitter

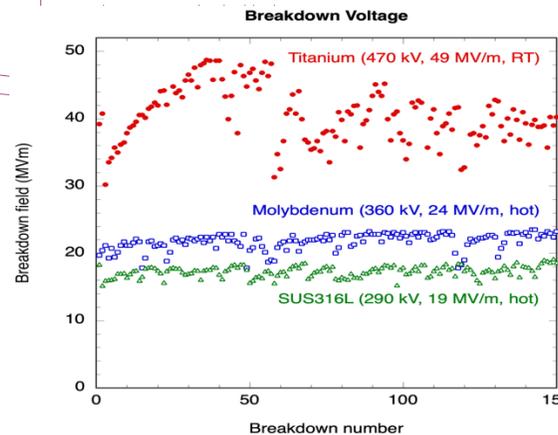
Single-crystal CeIr₂
with AIST/Kobe Univ./Nagoya Univ.

4. Short pulse New HV circuit



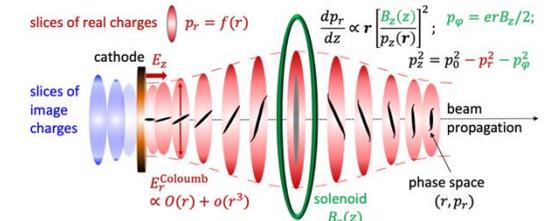
2. High gradient

Super-clean titanium



5. Minimum aberration Solenoid dynamics Hybrid magnetic lens with Uppsala Univ.

Physics behind the emittance growth



$$r'' + \frac{1+r'^2}{1-k_c^2 r^2} \left\{ \left[k_c^2(z) - k_p^2(r) \right] r - k_c^2 \frac{K'}{K} r^2 r' \right\} = 0,$$

$$k_c = eB_z(z)/2p_0 \quad k_p^2 = \frac{K}{R^2} \quad K = \frac{2I}{I_0(\gamma_0^2 - 1)^{3/2}}$$

新しい高輝度熱カソードの探索
(Single-crystal CeIr₂)

研究の経緯

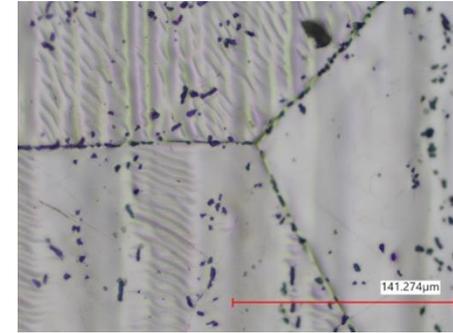
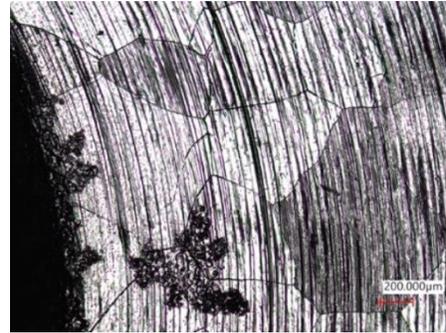
- **CeIr系カソード**は, 1990年代にEBIS用熱電子源カソードとしてロシアグループにより開発された.
- 仕事関数が2.5 eVとCeB₆と同程度に低く, 寿命も40,000時間と非常に長い強靱なカソードであると言われている.
- **SuperKEKB入射器**のRF電子銃用フォトカソードとして, AIST佐藤大輔氏, KEK吉田光宏氏らによって実用化されている.
- XFELの高輝度化に適した単結晶材が可能な組成はCeIr₂であるが, 結晶生成が難しく神戸大学 菅原仁教授のグループが唯一その技術を持つ.
- 有望なカソードとして**単結晶CeIr₂**に着目し, AIST, 神戸大学, 名古屋大 (電子顕微鏡) と共同研究を開始.

電子銃チャンバーの高電界化 (Super-clean titanium)

研究の経緯

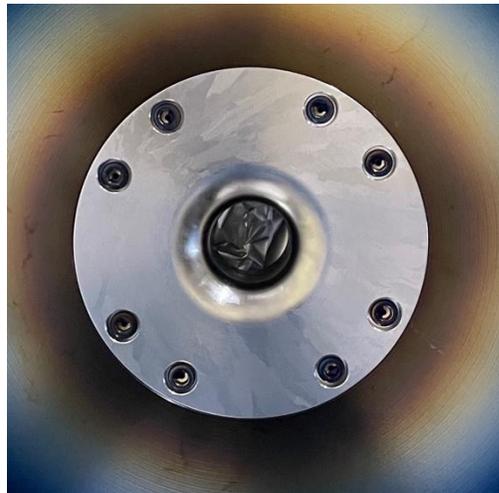
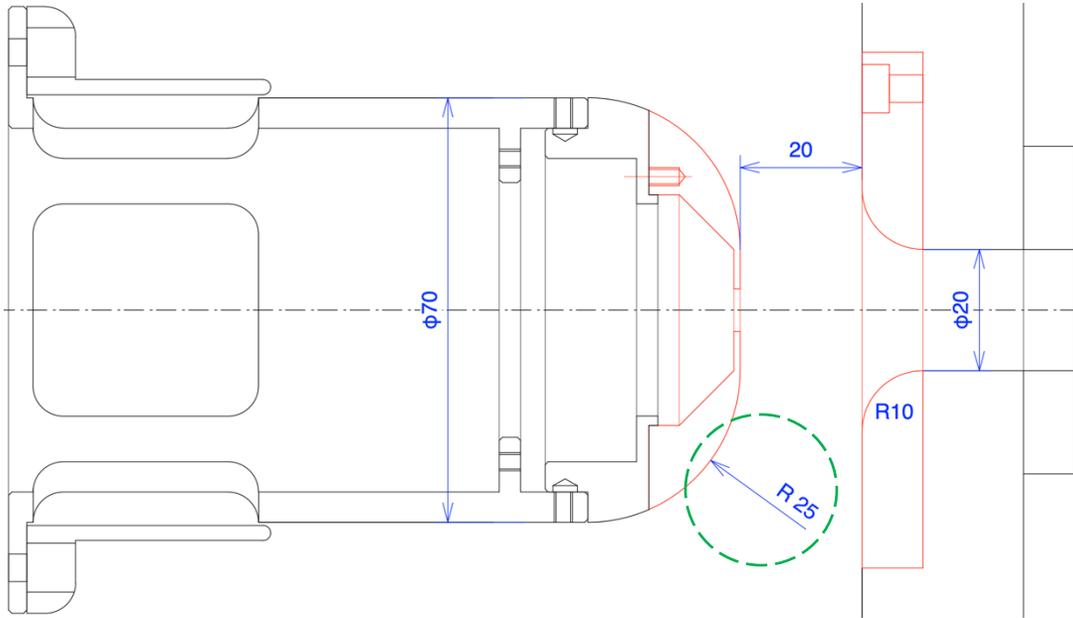
- **チタン**は2次電子放出係数の低さから、耐電圧の高い電極材料として使われてきた（電子顕微鏡, ビームセパレータ, ERL用電子銃）。
- 通常の**第2種純チタン電極**は、長時間高温に晒されると再結晶化が進むとともに不純物らしき異物が表面に析出され、逆に放電が多発。

SACLA電子銃の例



- 新たな試みとして下記の技術を取り入れ試験を行うことにした。
 - 1) 不純物が少ない**純度5Nの純チタン**を母材として使用。
 - 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** (Ar gas, 120 MPa, 920°C, 2 h)。
 - 3) 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フ研磨は行わず、チタン専用の**化学研磨処理**。

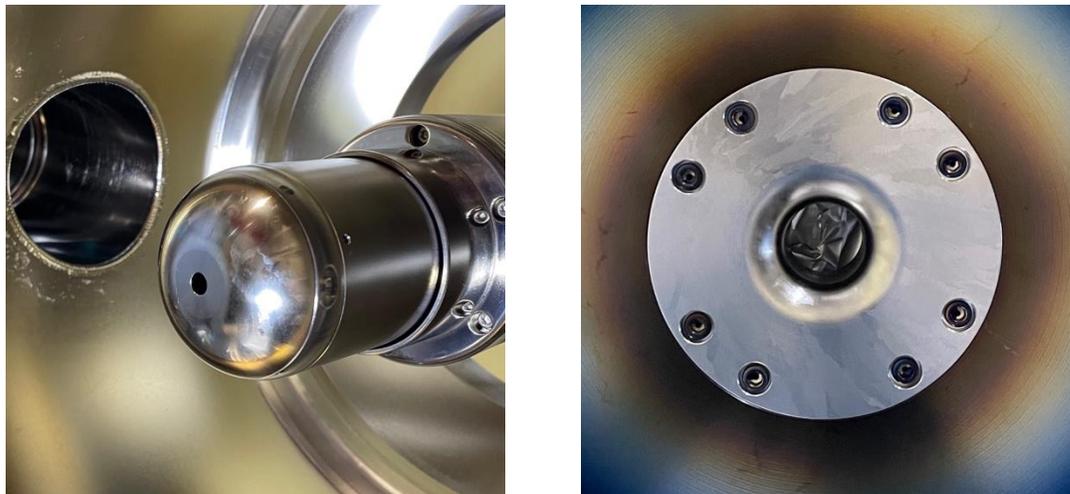
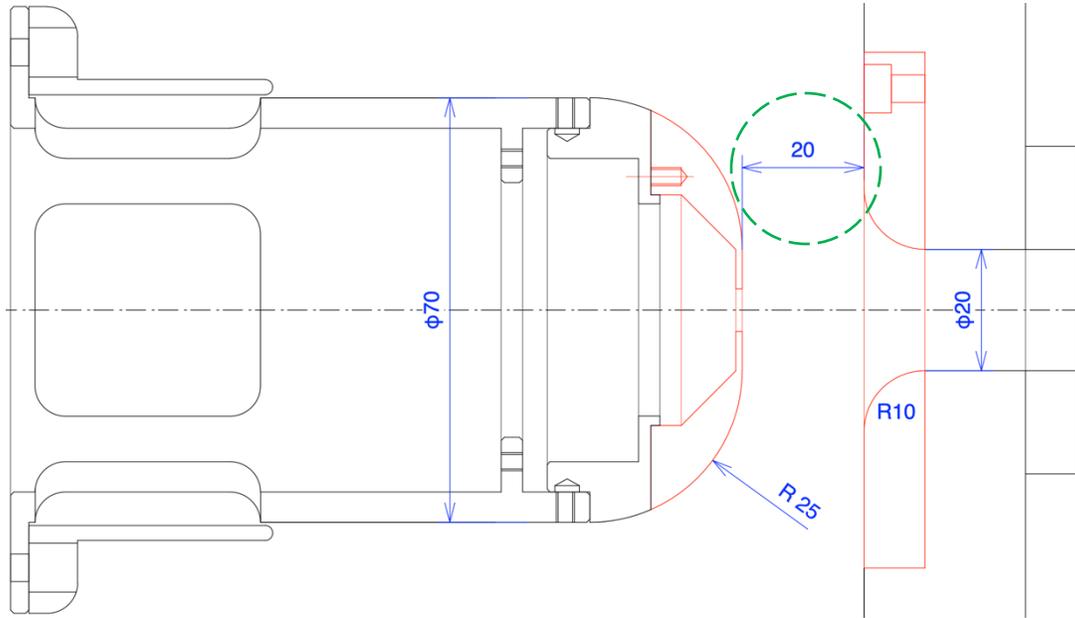
高純度チタン電極の高電圧コンディショニング



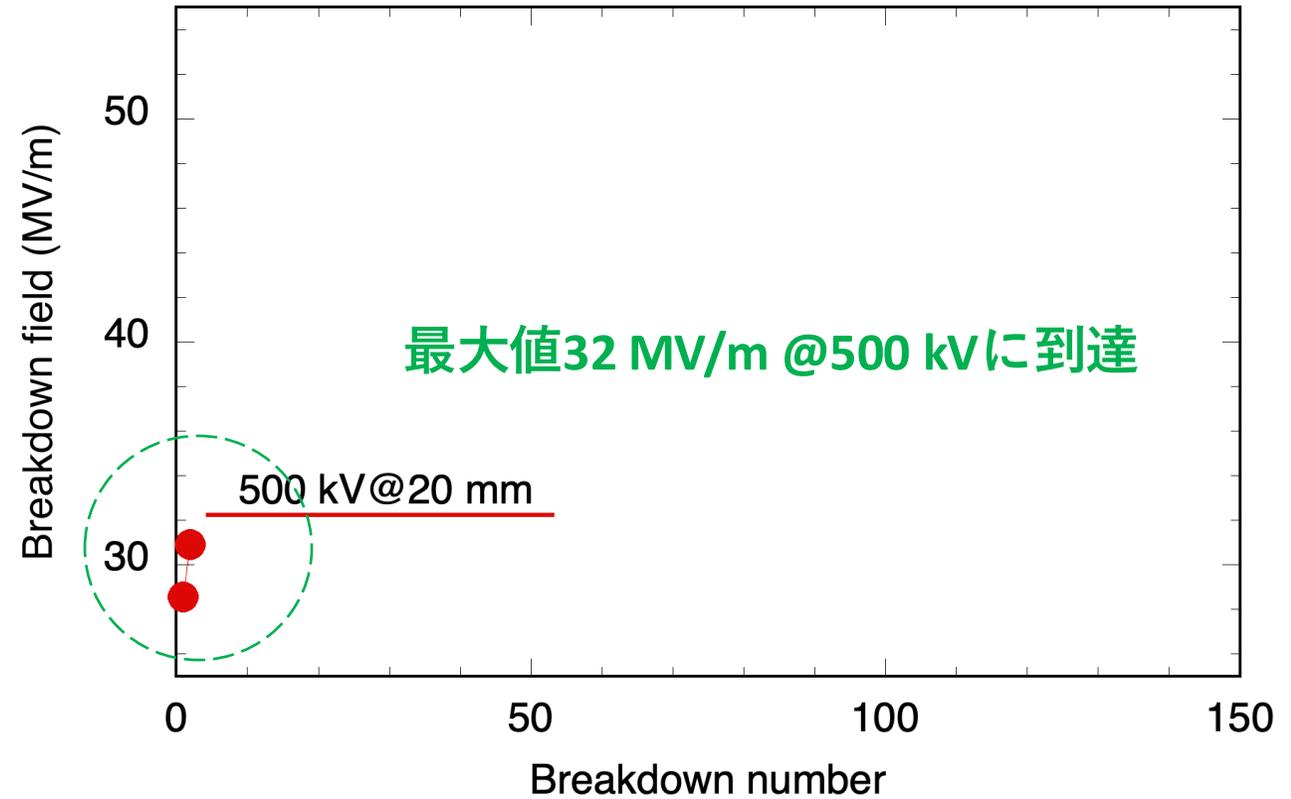
The remaining stain seems not to affect.

performed at RT

高純度チタン電極の高電圧コンディショニング

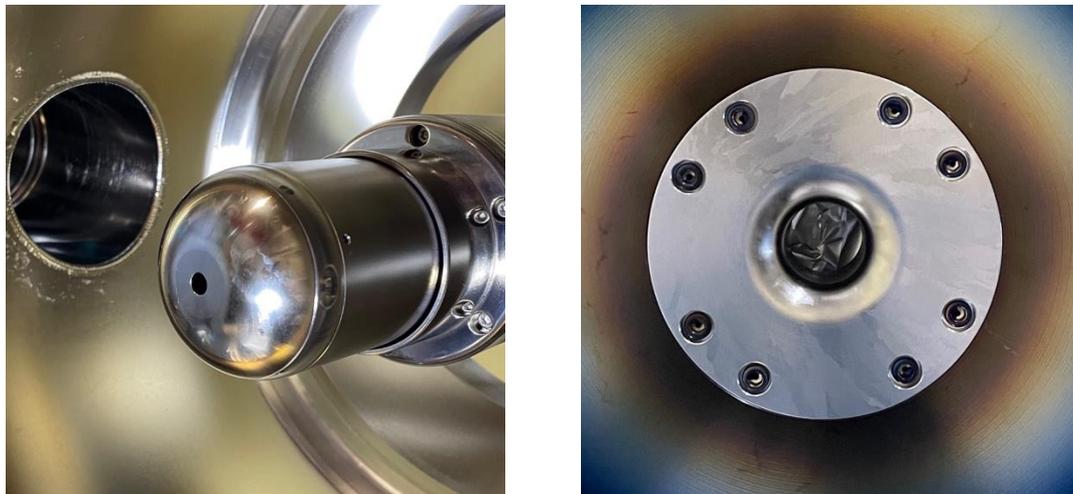
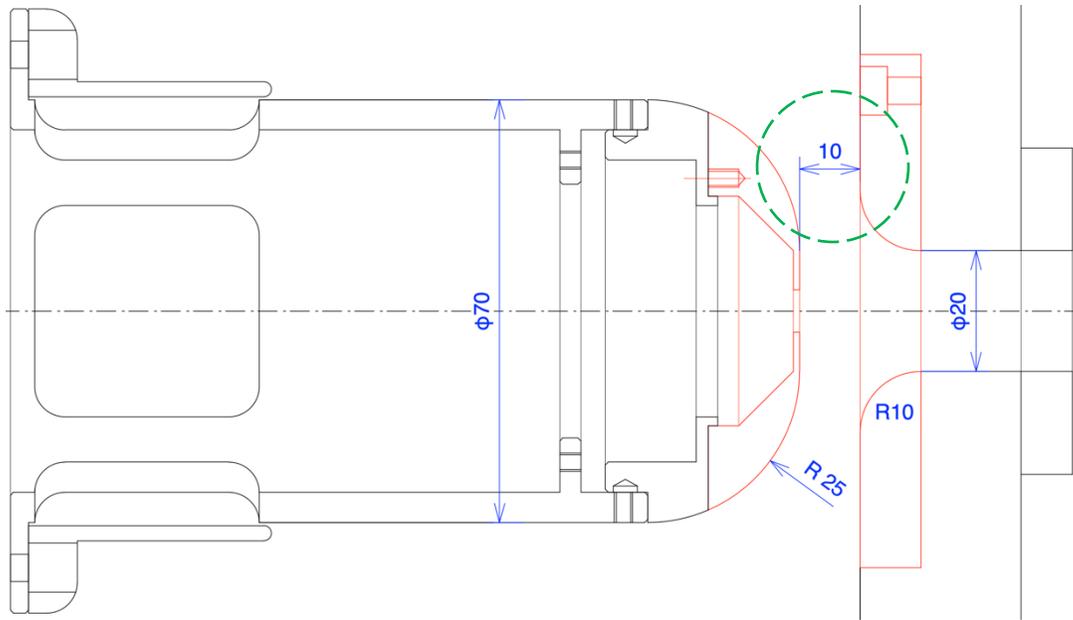


The remaining stain seems not to affect.



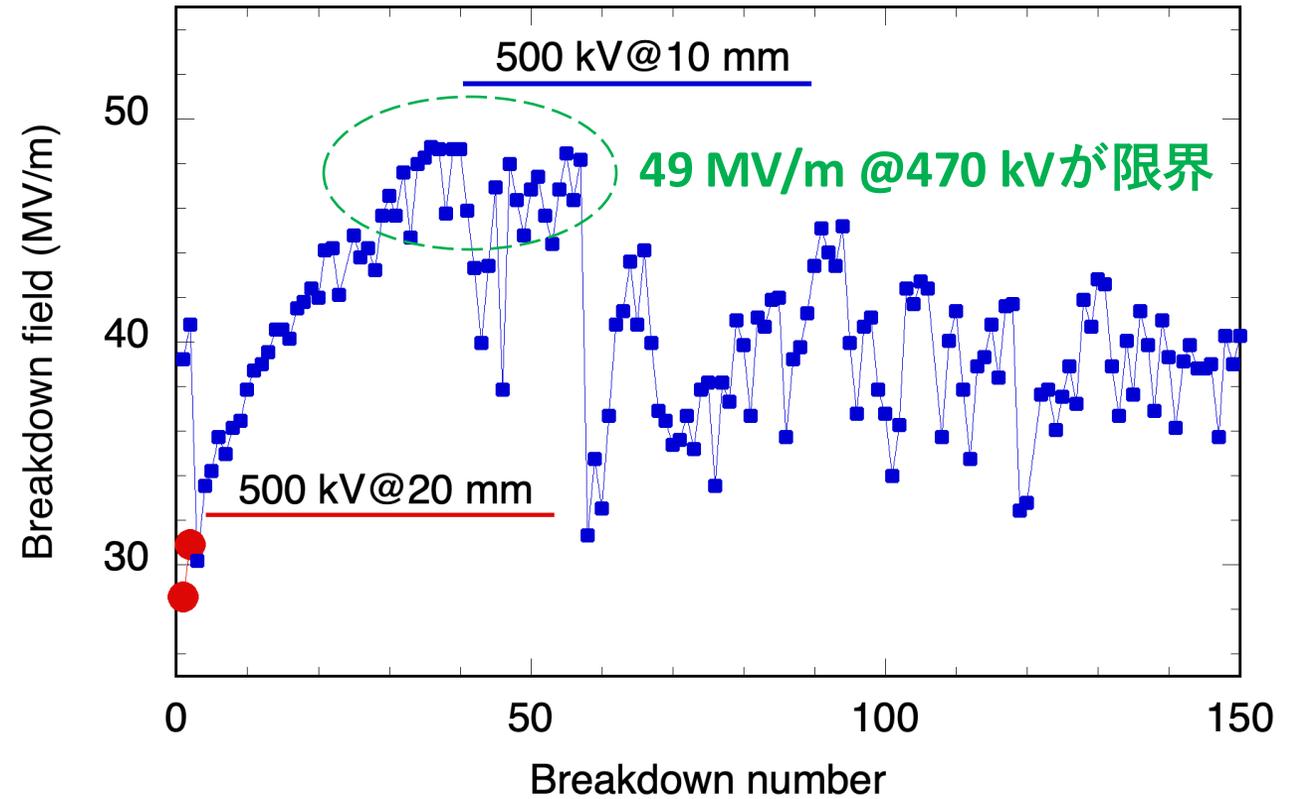
performed at RT

高純度チタン電極の高電圧コンディショニング



The remaining stain seems not to affect.

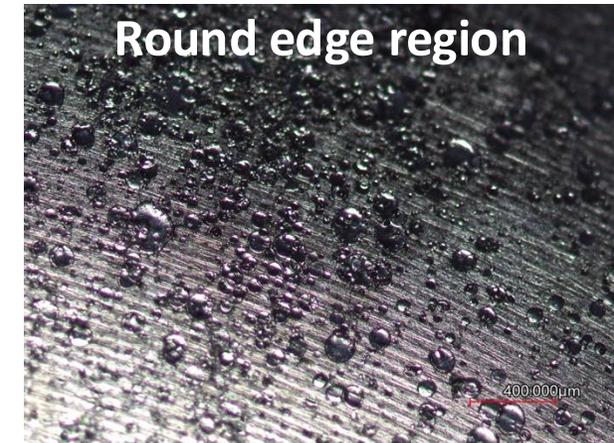
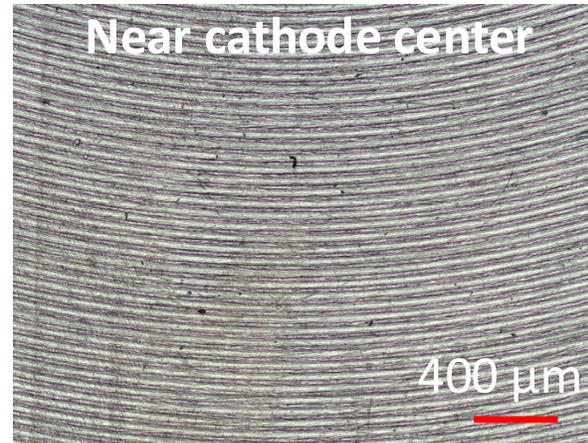
gap: 20 mm \rightarrow 10 mm



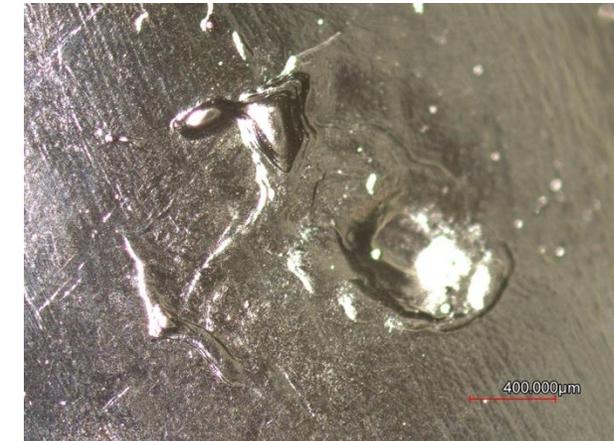
performed at RT

150回の放電後の表面状態

Ti wehnelt



Ti anode



- アノードには多くの融解した放電痕.
- ウェネルトには飛散した液滴状のチタンらしき物質が付着.
- 最初のアイデアに立ち戻り, 次は高融点金属材アノードで試験予定.

カソードの長寿命化

(Surface and material investigation)

研究プラン

物性物理の専門的な知識と設備が必要. 国内の研究機関と連携.
新しい高輝度カソード開発にも重要な役割を果たす.

1) 名古屋大学超高压電子顕微鏡施設：

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 CeB_6 結晶では表面に留まらずバルク内部でも連続的な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：

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：

可能な限り実機に近い*in-situ*の条件で, エッ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.

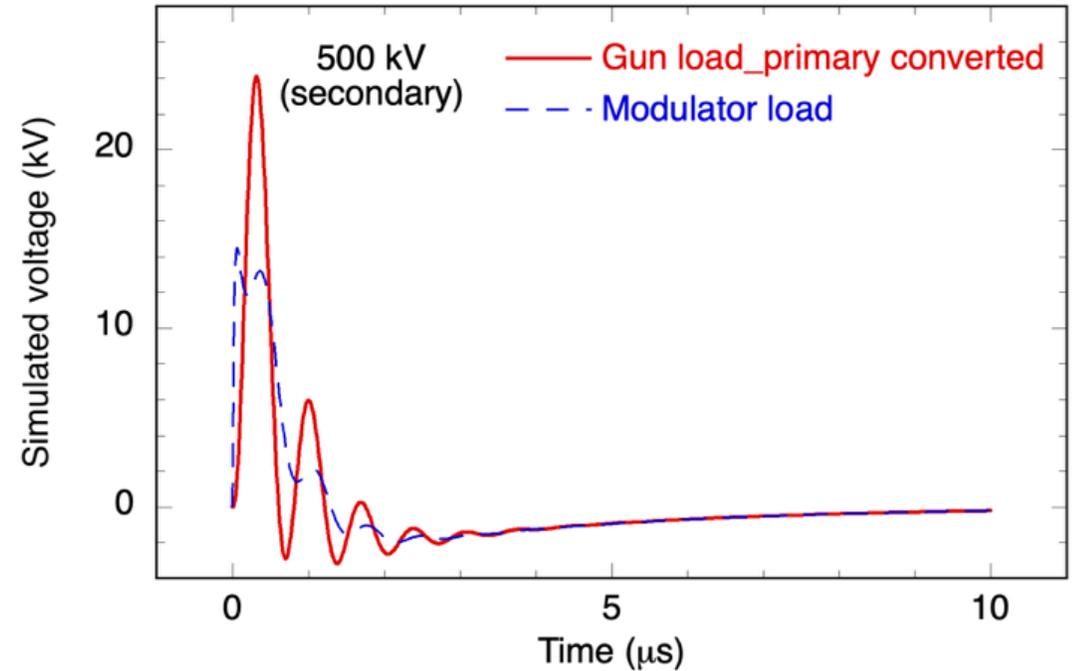
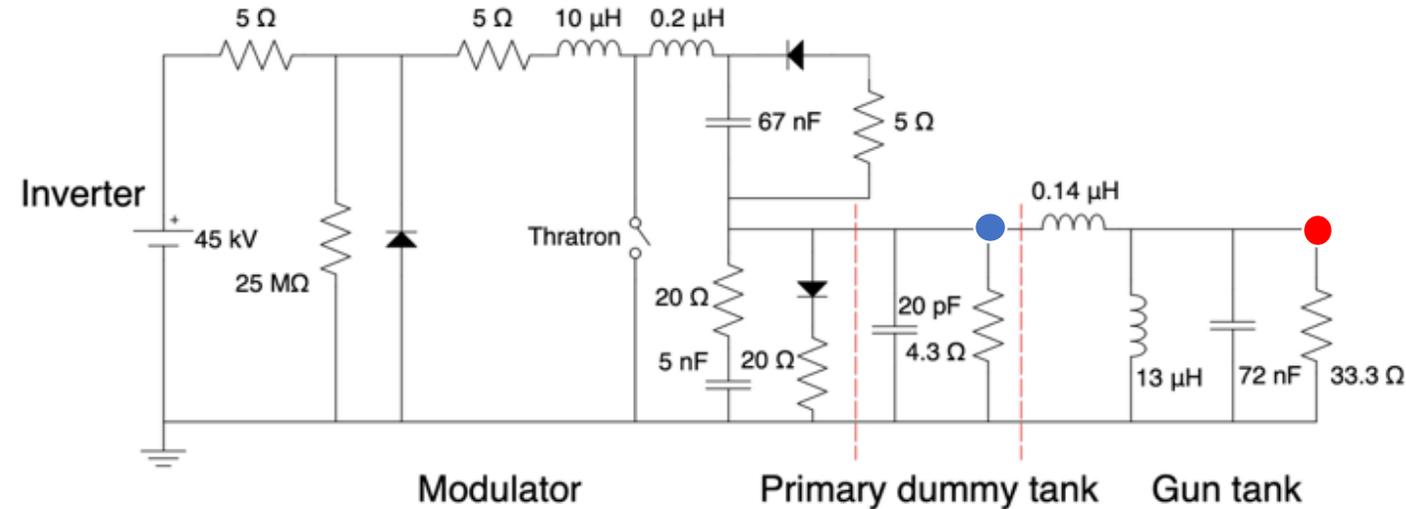
馬込保 他, “SACLA電子銃カソードの仕事関数その場測定”, 本年会, FRP044

電子銃の高繰り返し化
(Short-pulse HV power supply)

研究の経緯

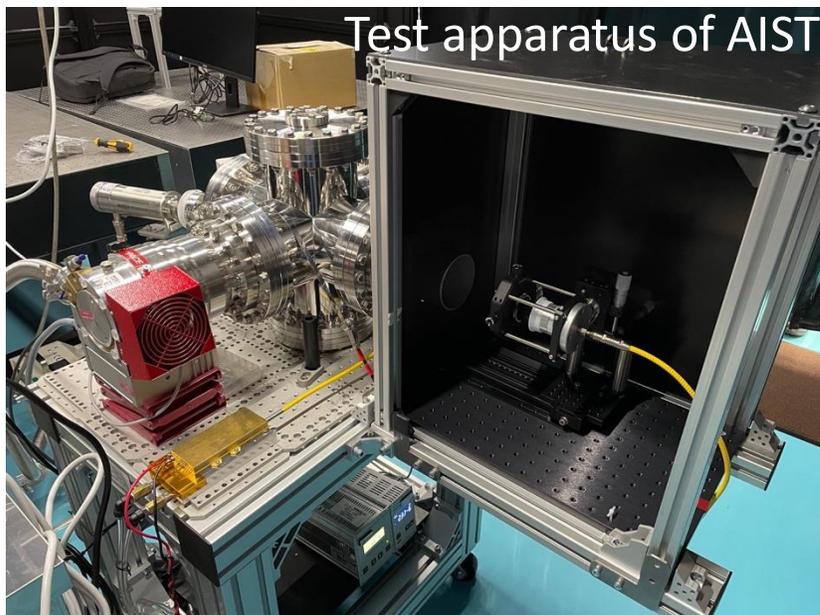
- SACLA電子銃システムはクライストロン電源の技術をそのまま流用.
- 3 μs もの長パルス電子ビームを電子銃で生成し, チョッパーシステムで僅か1 nsの必要なバンチを切り出し.
- **高繰り返し化**のためには電源システムの**パルス幅を1桁短縮**しなければならない.
- 短パルス化は**電子銃チャンバーの高電界化**のためにも望まれる課題.
- 従来のクライストロン電源の技術をベースに高電圧回路を見直すという方針で開発を進めることにした.

短パルス電源の提案

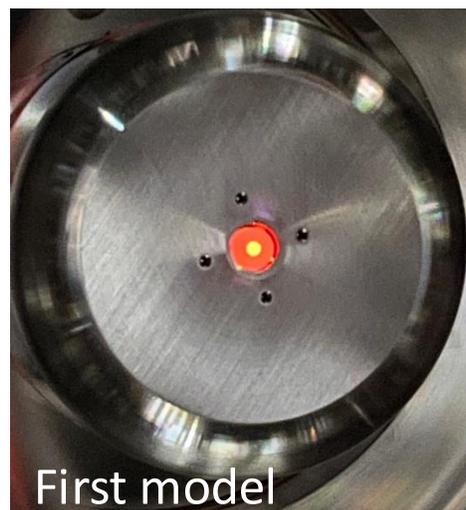


- PFNを構成しないsingle capacitor bank.
- 電子銃タンクのダミー負荷のサイズを小さくして浮遊容量を低減するために、**負荷をトランス1次側と2次側に分散**.
- 浮遊容量を減らすため**ヒーター回路を撤去**. **IRレーザー**でカソード加熱.
- 漏れインダクタンスを減らす (twin trans, make small), などなど.

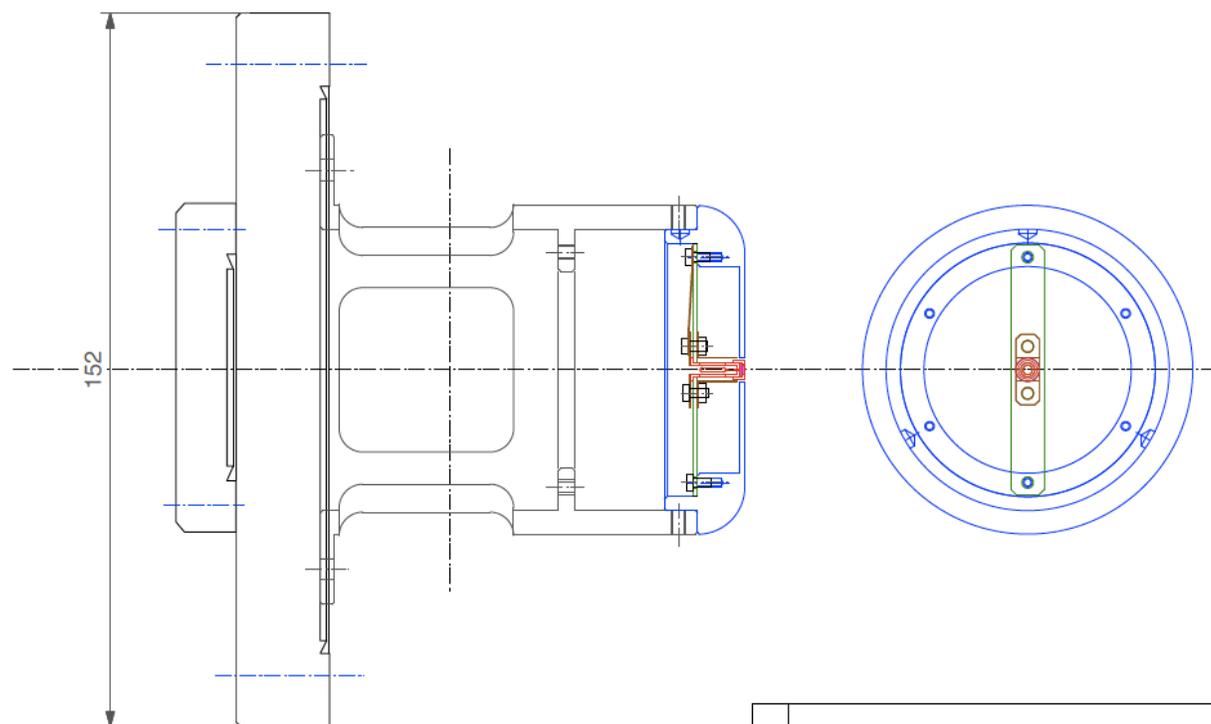
IRレーザーによるカソードの加熱



IRレーザーは背面から黒体のグラファイトホルダーに照射.



Newest model based on the SACL A's assembly design



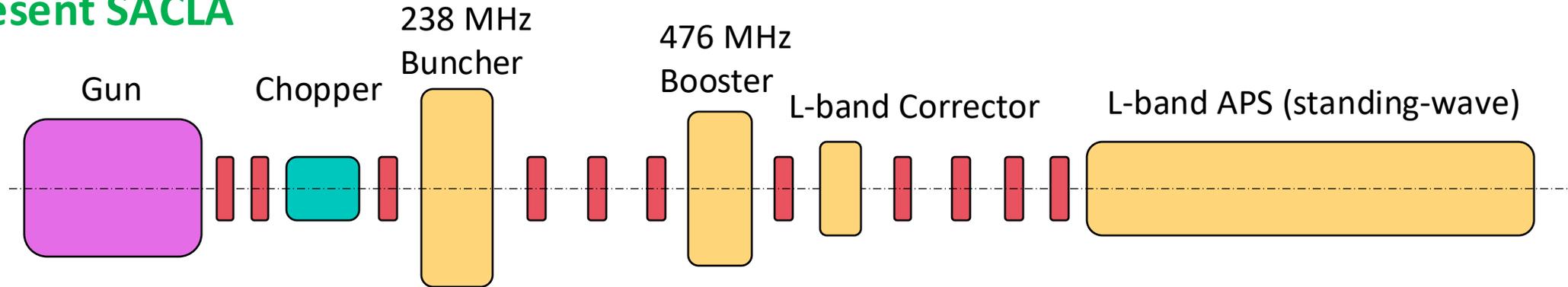
品名	レーザー加熱カソード ver. 3
個数	理化学研究所 渡川和晃 2025. 1. 10 E-mail : togawa@spring8.or.jp

- 約**40 W**のレーザー出力で**CeB₆**結晶を**1500°C**に加熱することに成功.

新しい入射器の開発 (Minimum emittance growth)

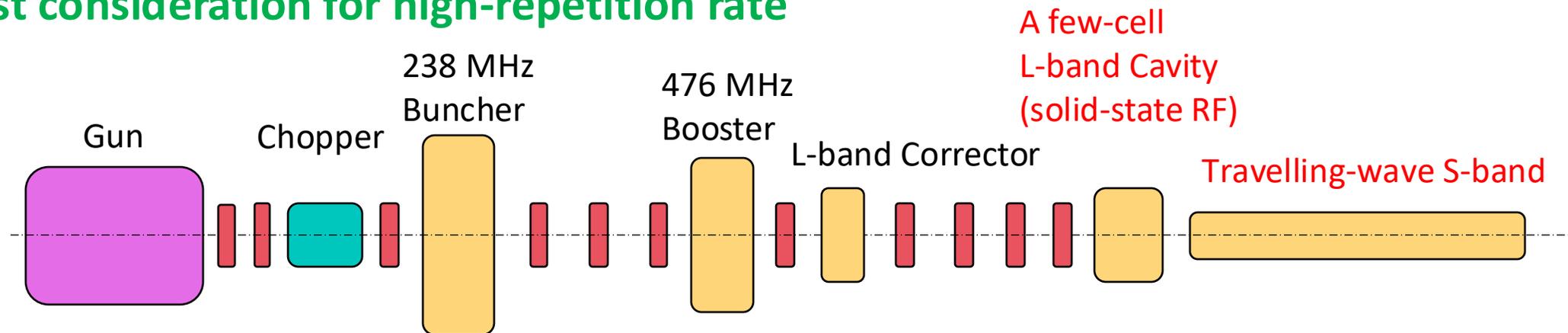
最初の構想

Present SACLA



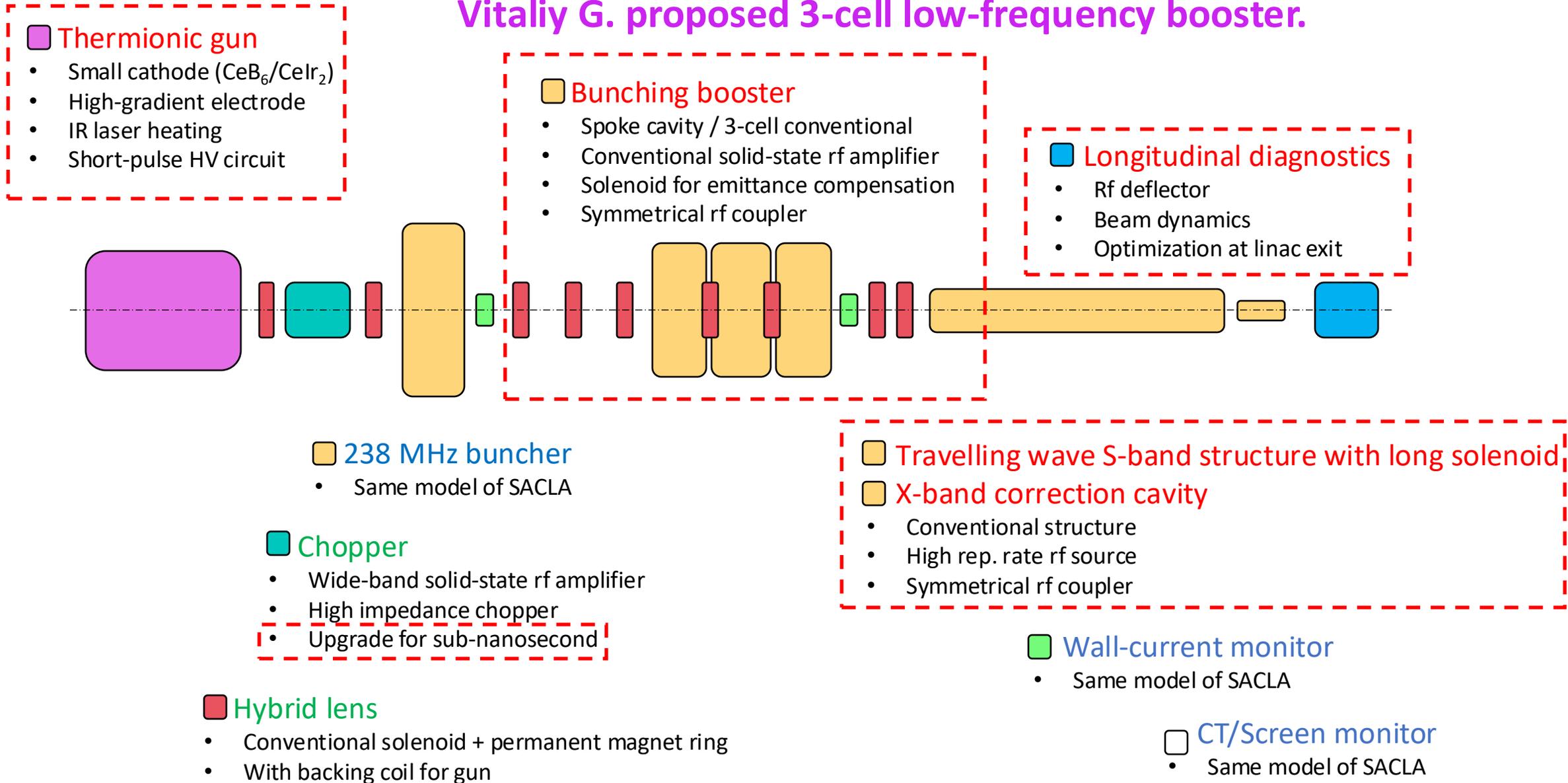
- Not to produce backward electrons to protect cathode (SW→TW).
- Adapt high-repetition rate.
- Keep longitudinal bunch acceptance.
- Tunability for velocity bunching (ex. half-wave bunching by Vitaliy G).

First consideration for high-repetition rate



Schematic of the Next SACLA Injector

Vitaliy G. proposed 3-cell low-frequency booster.



ACCEPTED PAPER

Design study of a high-brightness high-repetition rate thermionic injector for Free-Electron Laser applications. I. The architecture

Vitaliy Goryashko, Kazuaki Togawa, Peter Salén, and Anatoliy Opanasenko

Phys. Rev. Accel. Beams - **Accepted** 28 July, 2025

DOI: <https://doi.org/10.1103/b7sd-jvxq>

[Export Citation](#)

Abstract

SACLA is the world's most compact hard X-ray Free-Electron Laser and has been successfully and reliably operated for over a decade. To meet increasing user demands, an upgrade of the SACLA linear accelerator is planned in order to achieve a kHz-level repetition rate and enhanced beam brightness. A key component of this upgrade is a new injector, based on the existing pulsed DC gun with a thermionic cathode, which has demonstrated high beam quality, excellent stability, and simple maintenance. In this work, we present an in-depth beam dynamics study of a highly promising new SACLA injector architecture. A multistage velocity bunching combined with one stage of magnetic compression and a careful control of emittance growth allow for up to three orders of magnitude bunch compression while keeping the emittance growth on the sub- μm level. Our optimization approach utilizes a genetic algorithm coupled to 3D space-charge-dominated beam tracking to refine beam performance and identify optimal injector parameters. Thus, we demonstrate that the proposed injector can deliver electron beams with bunch durations and emittances comparable to those produced by the state-of-the-art μm -band injector based on an RF photocathode gun [A. Giribono et al., PRAB 26 (2023)]. Additionally, our extensive beam dynamics analysis of the DC electron gun (see Part 2) provides valuable insights applicable to low-voltage continuous-wave very high frequency guns and superconducting radio-frequency guns.



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.
- 既にプロジェクトは2年目に突入した.

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。
- 既にプロジェクトは2年目に突入した。
- **若手研究者の皆さん、究極の高輝度熱電子源の開発にチャレンジしてみませんか？**

プロジェクト参加を心よりお待ちしております！！