

# SPring-8/SACLAの将来計画の 展望と開発研究の現状

2020.11.26.


前坂 比呂和

理化学研究所 放射光科学研究センター



# 内容

- SPring-8 / SACLA の紹介
- SPring-8-II 計画
- SACLA の将来
- 究極の放射光源に向けて
- 研究開発の状況
  - ビーム光学・磁石・真空・高周波・ビーム診断・電子源・機械学習、などなど
- 最近の論文



## SPring-8 蓄積リング (1997~)

8 GeV, 100 mA, 1436 m, 57 beamlines (62 max.)

X線平均輝度  $\sim 10^{20}$  [photnos / s mm<sup>2</sup> mrad<sup>2</sup> 0.1%BW]  
(10 keV  $\sim$  0.124 nm)

## X線自由電子レーザー SACLA (2011~)

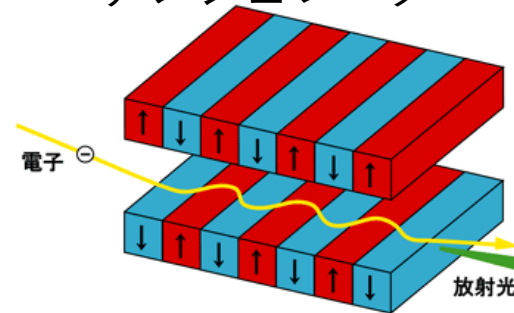
8 GeV max., 0.25 nC/pulse, 10 fs pulse width,  
60 pps,  $\sim$ 700 m, 3 beamlines (5 max.)

X線瞬間輝度  $\sim 10^{32}$  [photnos / s mm<sup>2</sup> mrad<sup>2</sup> 0.1%BW]  
(10 keV  $\sim$  0.124 nm)

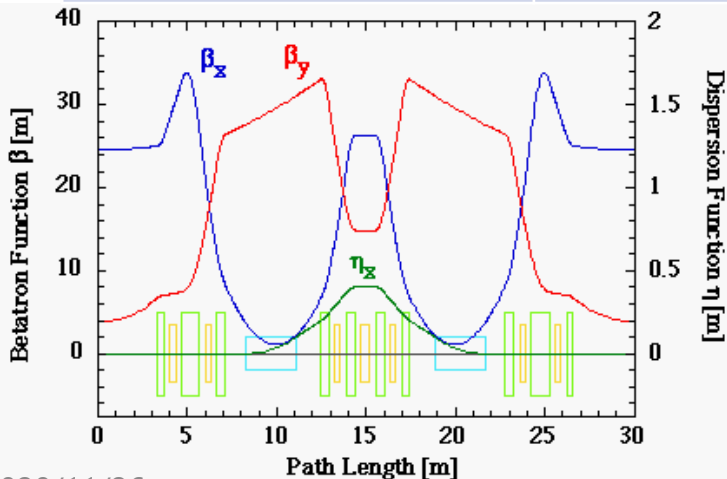
# SPring-8 蓄積リング

アンジュレータ

1997~

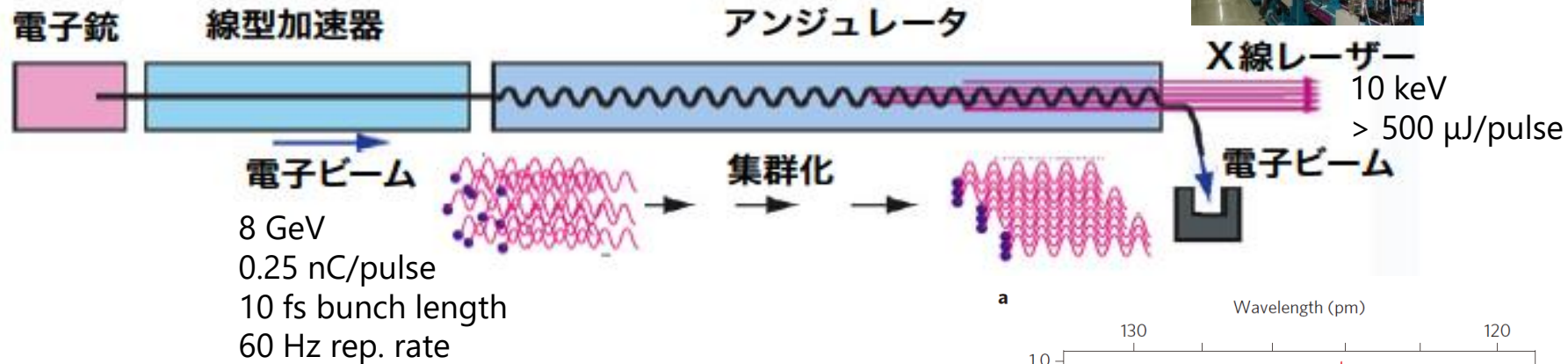
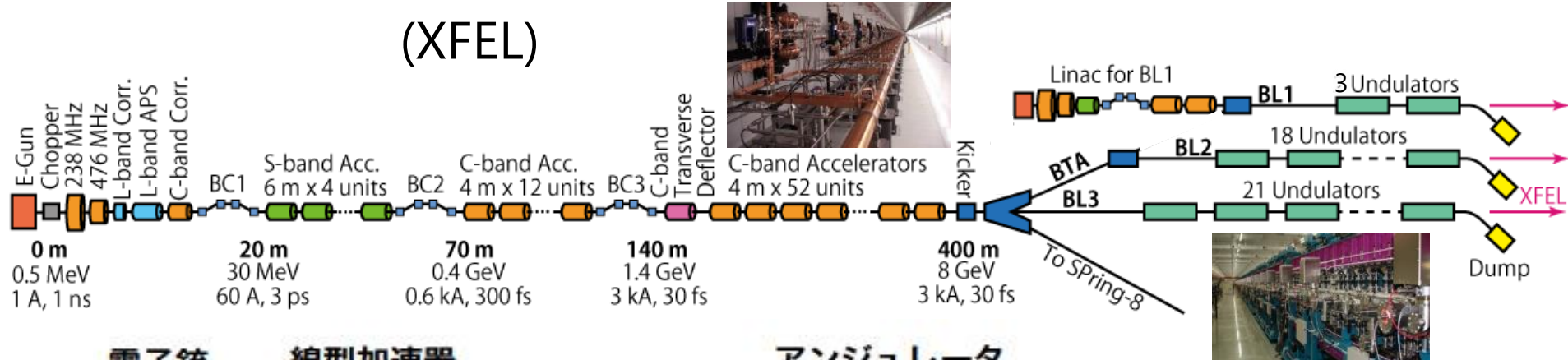


ビームエネルギー	8 GeV
周長	1436 m
ビーム電流	100 mA
自然エミッタンス	2.4 nm rad
ビームサイズ (直線部)	H 316 $\mu\text{m}$ / V 4.9 $\mu\text{m}$
ラティス	Double-bend Achromat
セル数	44
エネルギー幅	0.11%
チューン	H 44.14 / V 19.35
加速周波数	508.58 MHz
ハーモニック数	2436



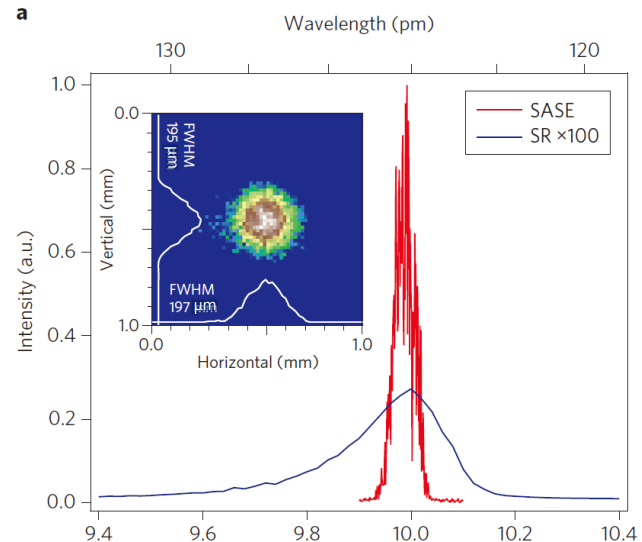
# X線自由電子レーザー SACLA

## (XFEL)



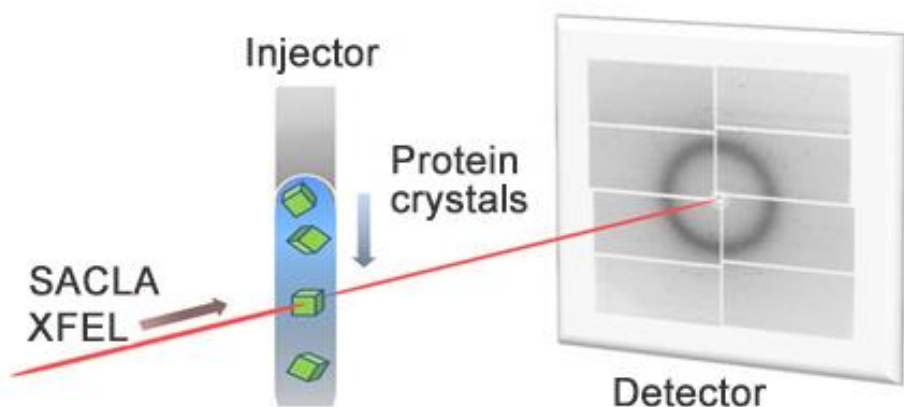
電子とX線放射光がアンジュレータ内で相互作用させることにより、X線の波長と同じ電子の密度モジュレーションを作り、コヒーレントなX線放射を生成 → **X線自由電子レーザー**

- 低エミッタンス熱電子銃: 500 kV, < 1 μm rad normalized emittance
- 高加速勾配 Cバンド線型加速器: ~ 35 MV/m (5712 MHz)
- 真空封止アンジュレータ: 磁場周期 18 mm, ギャップ 3.5 mm

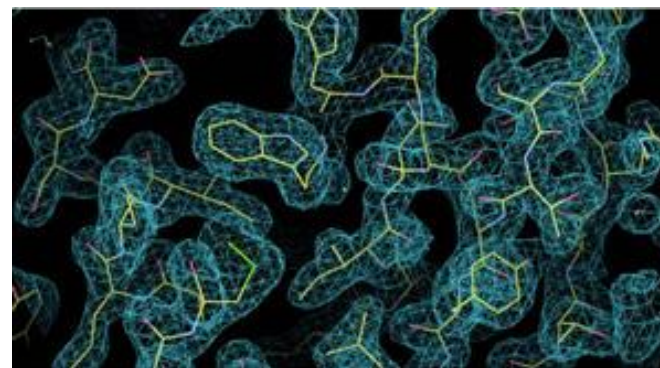


# 放射光の強い X線で原子レベルの構造を解析

- 各種材料やタンパク質などの構造を原子レベルで捉える。



解析  
→



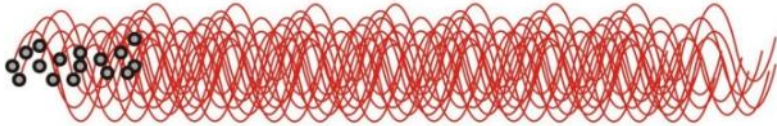
- 日本・世界の技術的基盤。
- SDGs にも大きく貢献できる。
  - エネルギー問題、食糧問題、気候変動、環境問題、健康、地下資源、海洋資源、森林資源、情報技術、などなど。

## SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



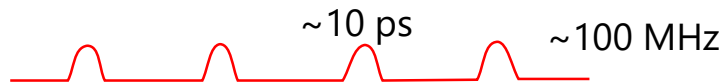
# リング放射光源 v.s. 自由電子レーザー

Incoherent



干渉性が低い分 イメージングに不利

連続波に近い時間構造・高平均輝度



静止した物質の構造解析

化学反応の始状態と終状態のみ

ビームライン数が多い (数10本)

総フラックスが大きい (数 100 W)

静的な構造を観察するのにベストだが、  
まだ輝度や干渉性を高める余地が残されて  
いる。

Coherent



干渉性が強いのでイメージングに有利

短パルス・高ピーク輝度・低繰り返し



物質の構造変化を動的に捉えられる

化学反応の中間状態が見える

ビームライン数が少ない (数本)

総フラックスが小さい (数 10 mW)

干渉性は十分だが繰り返し率が低いため  
統計をとるのに時間がかかる。  
高繰り返し率化や利用機会の増大が課題。

相補的な関係でいずれも欠かすことができない！

# SPring-8-II 計画

ほぼ点光源～準回折限界光源へ

SPring-8 蓄積リングの機器を入れ替えて輝度を数10～100倍にする

ラティス： Double-Bend Achromat (DBA) → 5-Bend Achromat (5BA)

エネルギー： 8 GeV → 6 GeV

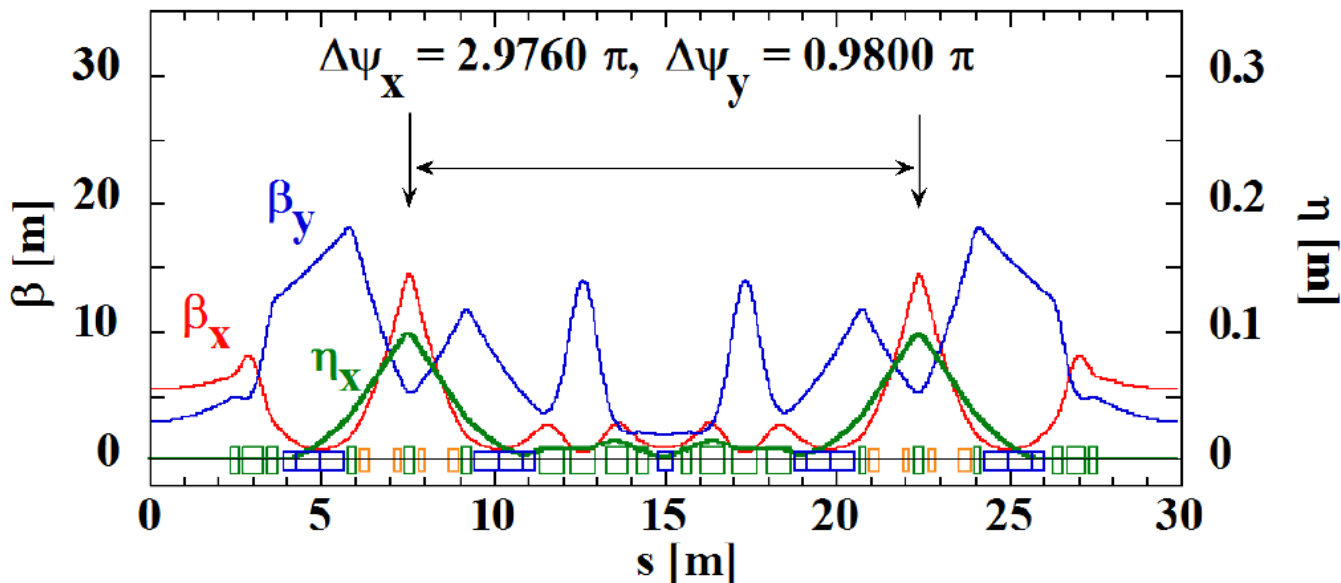
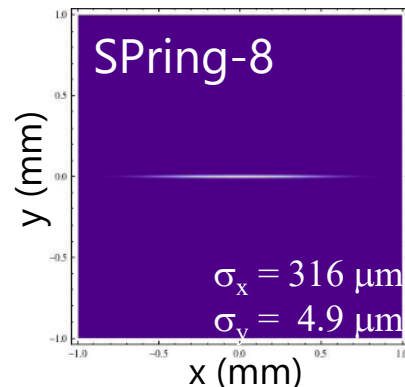
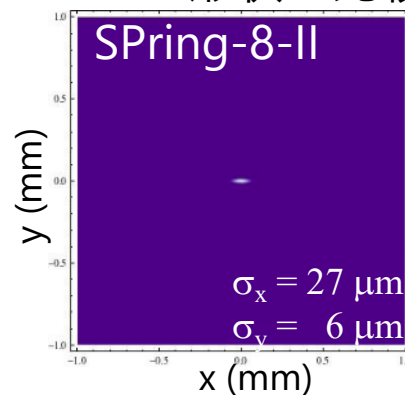
エミッタンス： 2.4 nm rad → 150 pm rad (この半分程度までエミッタンスを下げるラティスも検討中。)

既存のアンジュレータビームラインの光軸は変えない。

偏向磁石を永久磁石にすることで省電力化。

SACLA の低エミッタンスビームを入射。

ビーム形状の比較



SPring-8-II CDR (2014)

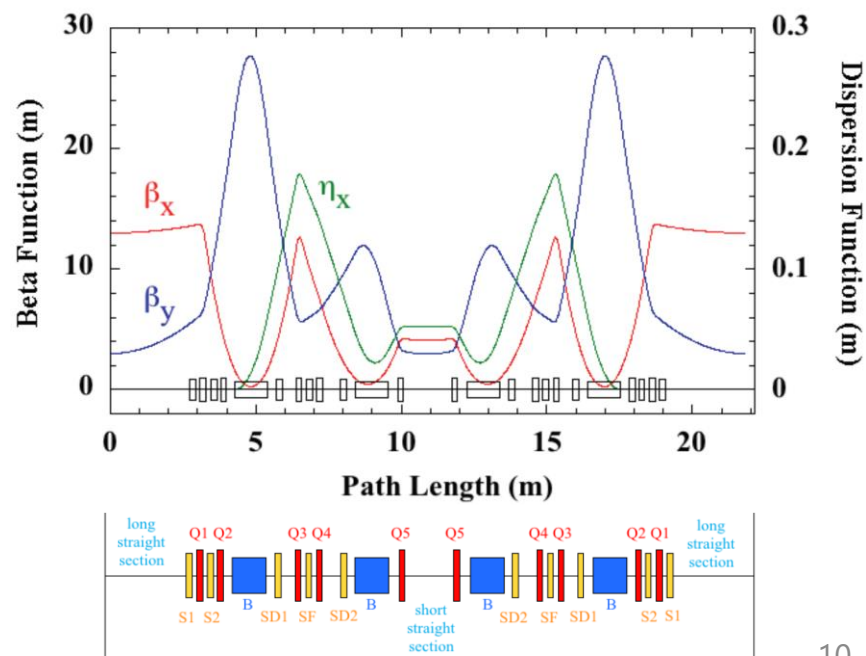
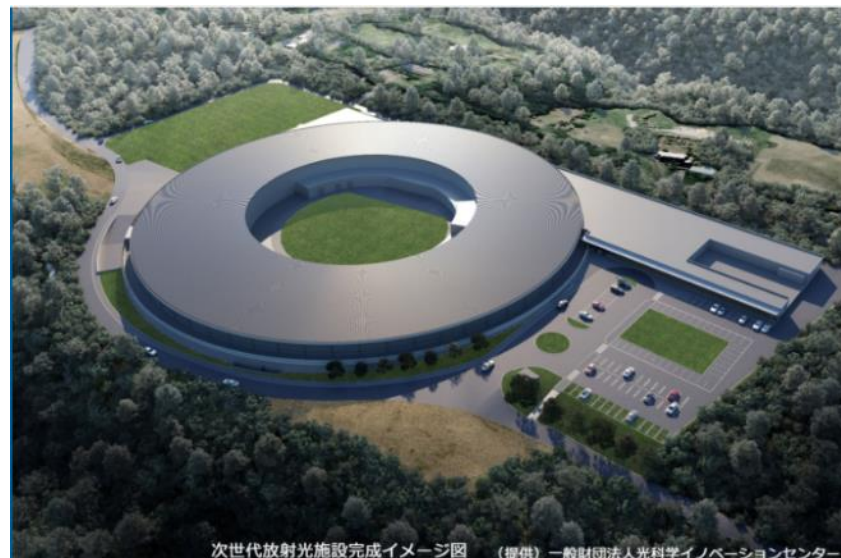


# 高繰り返し XFEL (SACLA-II ??)

- 現状の繰り返し: 60 Hz (BL2 30Hz / BL3 30 Hz)
- ビームラインあたり 1 kHz 以上にしたい。
- 線型加速器の繰り返しを上げるには？
  - 繰り返しを単純に上げようとするのは、熱負荷・電源負荷・電力消費量などの関係で極めて困難。
  - 超伝導空洞を CW (Continuous Wave) 運転することがまず頭に浮かぶが、SPring-8 サイトには超伝導の環境がなく、初期投資（物的・人的）が膨大となる。
    - 超伝導は LCLS-II (SLAC) や SHINE (上海) がすでに建設中である。
  - 常伝導加速管の Q値やクライストロンの効率を大きく向上させてエコに高繰り返し化できないか？
  - 電子銃のカソードの長寿命化も必要。
- これまでの常識にとらわれない新しいアイデアが必要。

# 次世代放射光計画 (東北)

ビームエネルギー	3 GeV
周長	349 m
ビーム電流	400 mA
自然エミッタンス	1.14 nm rad
ビームサイズ (長直線部)	H 122 $\mu\text{m}$ / V 5.8 $\mu\text{m}$
ラティス	Double-Double-bend Achromat (DDBA)
セル数	16
エネルギー幅	0.0843%
チューン	H 28.17 / V 9.23
加速周波数	508.76 MHz
ハーモニック数	592



2019年度 建設開始、2023年度完成予定。  
 SPring-8 / SACLA のメンバーも建設に  
 協力している。  
 SACLA や SPring-8-II の技術が数多く  
 利用されている。

# 究極の放射光源に向けて

## 6次元位相空間で完全なシングルモードのコヒーレント光

これは不確定性限界のため、これ以上のものはない。  
ここに到達するまでは研究開発は終わらない。

XFEL は横方向に完全コヒーレントだが、縦方向に多数のモードがある。  
→縦方向を完全コヒーレントにする方法の考案、開発。(Seeded FEL 等)

XFEL は短パルスであることが大きな特長。  
→ 現状の 10 fs ( $10^{-14}$  s) のパルス長を大幅に縮められないか？

X線の数サイクルのレーザー (超高ピーク輝度)

→  $\sim 10^{-18}$  s (1 アト秒),  $< 10^{-18}$  s (zeptosecond)

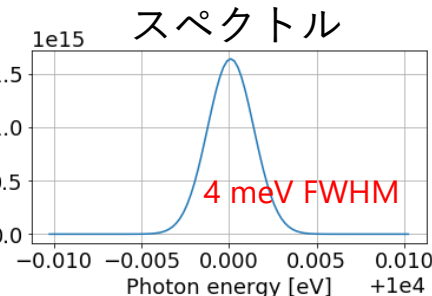
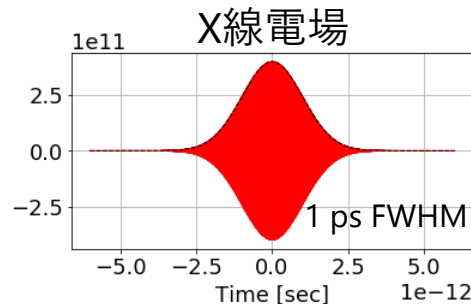
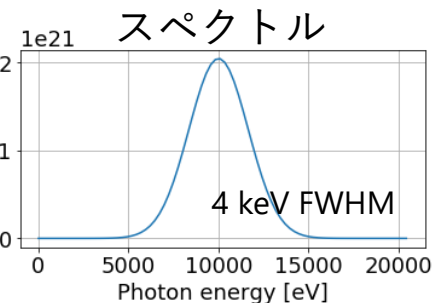
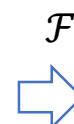
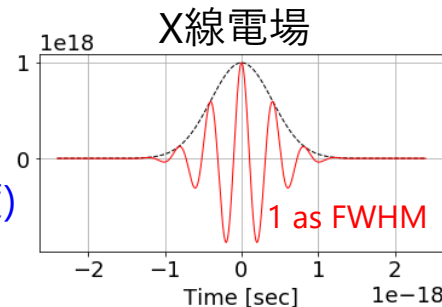
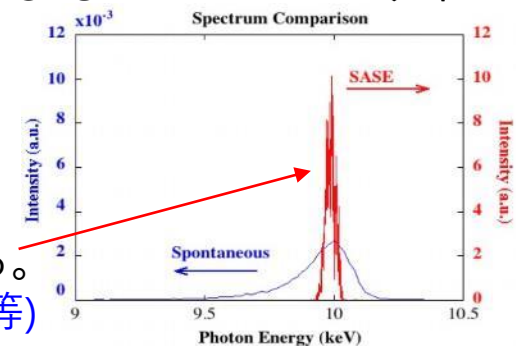
リングでも 100% コヒーレントな光を出す。

→ 「蓄積リング型XFEL」

適度なフラックスで平均輝度の極めて高いコヒーレント光源。

静的なサンプルにベストな光源。

SACLA XFEL のスペクトル



究極の光源には極短パルスレーザーと連続波レーザーという2つのパスがあり、両方とも必須。

究極の光源は、研究されているが、実用化はまだ遠い。

これを実現するための既成概念にとらわれない全く新しいアイデアが必要。

# SPring-8 / SACLA のロードマップ

2060年くらいまでは高度化が続くだろう

2足歩行モデル

SPring-8-III

第5世代放射光源  
連続波 XFEL ??  
204X ~ ??



SPring-8-II

第4世代放射光源  
準回折限界  
202X ~



SPring-8

第3世代放射光源  
1997 ~



次世代放射光

東北 2024 ~

次世代放射光  
Soft XFEL

202X ~

SACLA-III

超高繰り返し XFEL  
1 as duration ??  
205X ~ ??



SACLA-II

高繰り返し XFEL  
Seeded XFEL  
100 as duration ?  
203X ~ ?



SACLA

SASE-XFEL  
10 fs duration  
2011 ~

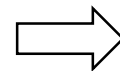


Self-seeding (2019)

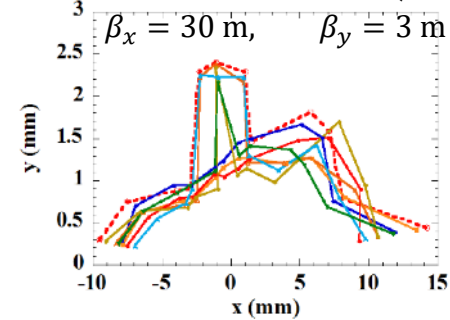
# SPring-8-II に向けた研究開発

## ビーム光学

- 安定にビームを蓄積できる低エミッタンスラティスの設計。
- 安全なビーム廃棄。



ダイナミックアパーチャ (入射点)

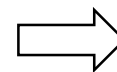


## 磁石・真空

- 永久磁石ダイポールや狭小真空チェンバなど試験ハーフセルにて設計検証。

## 高周波・ビーム診断

- MicroTCA.4などの最新の回路プラットフォームの導入。

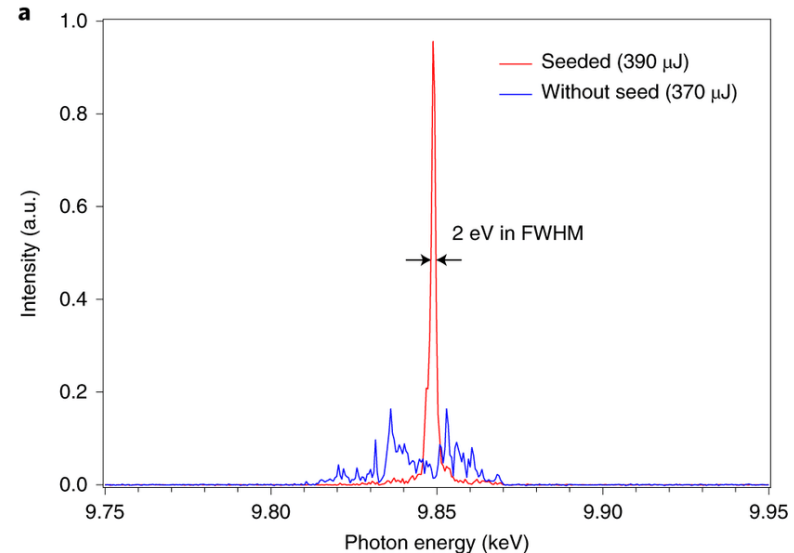
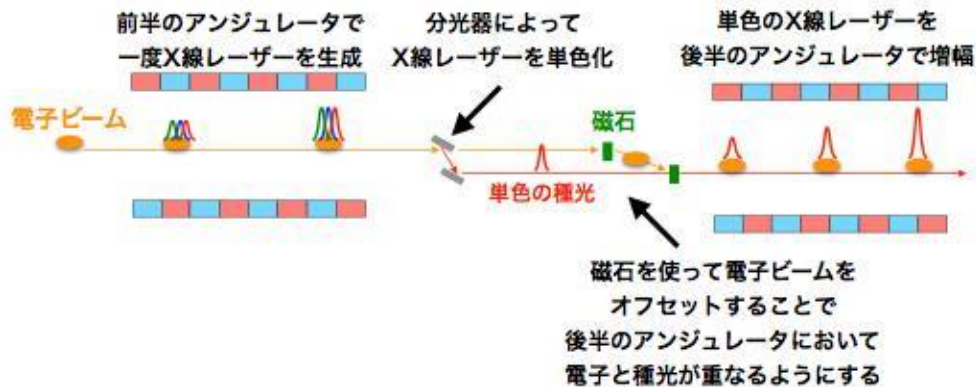


ほか、多数。



# SACLA 高度化に向けた研究開発

## 反射型セルフシーディング



## オンデマンドビーム振り分け

- 60 Hz の電子ビームを BL2, BL3, SPring-8 へショットごとに振り分け。
- ビーム経路ごとに RF パラメータやキッカ磁石励磁量を切り替え。

## SACLA から SPring-8 へのビーム入射

- 2つの加速器のタイミング同期。
- 低エミッタンスビームの輸送。

## 機械学習による運転合理化

## 高繰り返し化

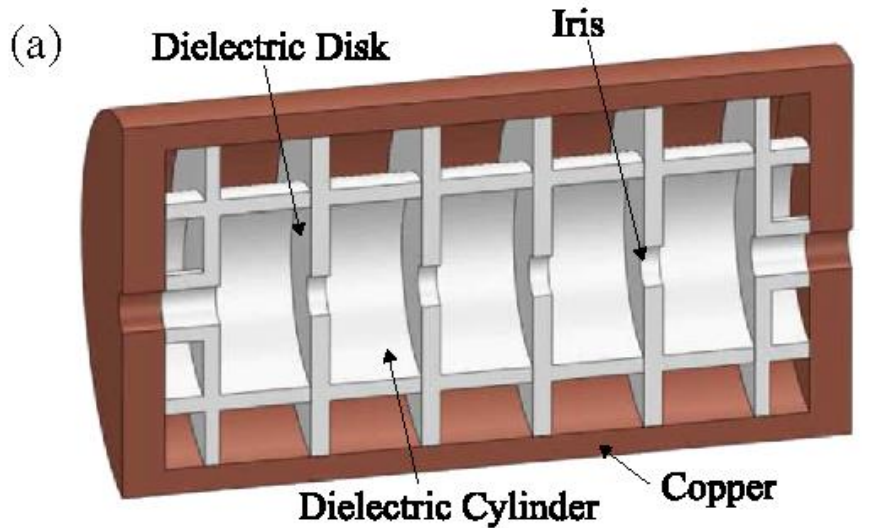
- High Q 常伝導加速管の検討 (誘電体装荷型加速管)。
- 長寿命電子銃カソードの開発。

ビームプロファイルの比較



# 誘電体装荷型加速管の検討

- 加速管に比誘電率の高い誘電体の構造を入れることで金属表面の電磁場を下げることで、金属表面での損失を低減することができる。
  - セラミックの比誘電率: 約 10
- セラミックの誘電体損失があると意味がないが、損失の極めて小さいセラミックが入手可能となってきた。

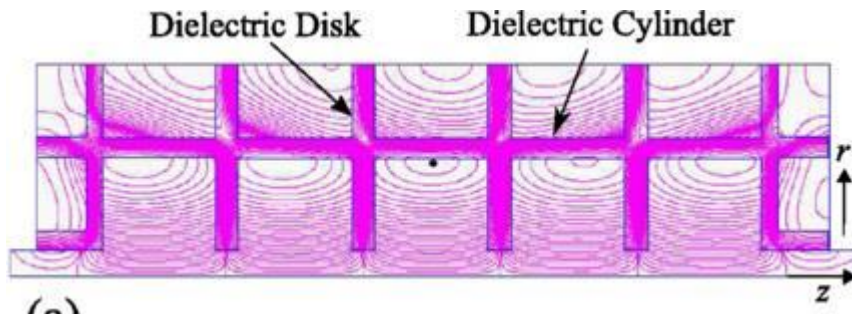


D. Sato, et. al., PRAB 19, 011302 (2016)  
D. Sato, et. al., PRAB 20, 091302 (2017)

これを使えば加速管の Q 値を 数10倍から 100倍程度まで向上させられる可能性がある。  
高繰り返し XFEL の加速管の有力候補。  
KEK 吉田グループとの共同研究を始めた。

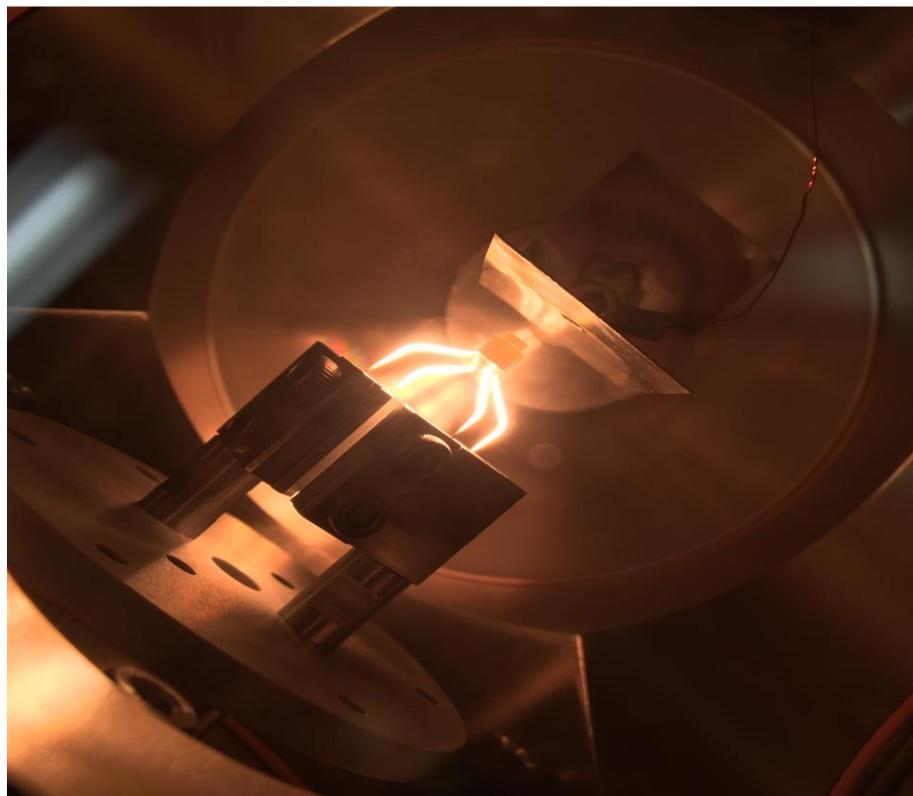
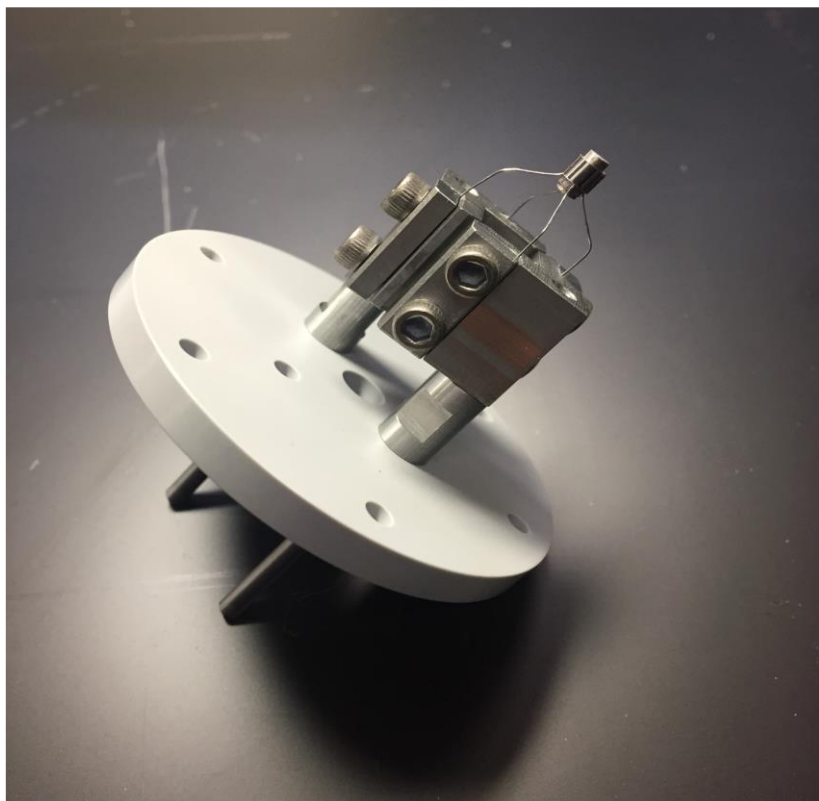
## 課題

35 MV/m 程度の高電界にセラミックが耐えられるか。(放電による破損が心配。)  
セラミックの冷却ができるのか。  
など。



# 長寿命電子銃カソード開発

- 電子銃の繰り返しが上がると電子銃カソードの寿命が短くなる恐れがある。
- 高繰り返し運転でも十分に長寿命な電子銃カソードが必要。
- 現状の  $\text{CeB}_6$  カソードは 60 Hz 運転で 1年に 1回程度交換している。
- 1 kHz 以上の運転で 1年以上の寿命がないといけない。
- SuperKEKB 入射器で使われている IrCe カソードが長寿命とのことで、有力候補としてこちらでも XFEL 向けのカソードを開発中。





# 最近の論文 (2019, 2020)

- Takao Asaka, Nobuyuki Nishimori, Takahiro Inagaki, Yuji Otake, and Hitoshi Tanaka, "Transparent-grid scheme for generating cathode-emittance-dominated beams in a gridded thermionic gun", Submitted to Japanese Journal of Applied Physics under review. [機器開発](#)
- Toshihiko Hiraiwa, Kouichi Soutome, and Hitoshi Tanaka, "Forced harmonic oscillator interpreted as diffraction of light", Phys. Rev. E 102, 032211 (2020). [理論](#)
- Takao Asaka, Takahiro Inagaki, Tamotsu Magome, Nobuyuki Nishimori, Yuji Otake, Tsutomu Taniuchi, Kenich Yanagida, and Hitoshi Tanaka, "Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode", Phys. Rev. Accel. Beams 23, 063401 (2020). [機器開発](#)
- Ryota Kinjo and Takashi Tanaka, "Undulator configuration for helicity switching in in-vacuum undulators", Phys. Rev. Accel. Beams 23, 020705 (2020). [新技術提案](#)
- Takashi Tanaka, "Electron bunch compression with an optical laser", Phys. Rev. Accel. Beams 22, 110704 (2019). [新技術提案](#)
- Takashi Tanaka and Primož Rebernik Ribič, "Shortening the pulse duration in seeded free-electron lasers by chirped microbunching", Opt. Express 27, 30875-30892 (2019). [理論](#)
- Kenji Fukami, Noriyoshi Azumi, Shinobu Inoue, Tomoya Kai, Hiroaki Kimura, Jun Kiuchi, Sakuo Matsui, Shiro Takano, Takahiro Watanabe, and Chao Zhang, "Performance verification of a precise vibrating-wire magnet alignment technique for next-generation light sources", Review of Scientific Instruments 90, 054703 (2019). [機器開発](#)
- Takashi Tanaka and Akihiro Kagamihata, "Demonstration of high-performance pole pieces made of monocrystalline dysprosium for short-period undulators", Journal of Synchrotron Radiation 26, 1220-1225 (2019). [機器開発](#)
- Kensuke Tono, Toru Hara, Makina Yabashi and Hitoshi Tanaka, "Multiple-beamline operation of SACLA", J. Synchrotron Rad. 26, 595-602 (2019). [マルチビームライン運転](#)
- Ichiro Inoue, Taito Osaka, Toru Hara, Takashi Tanaka, Takahiro Inagaki, Toru Fukui, Shunji Goto, Yuichi Inubushi, Hiroaki Kimura, Ryota Kinjo, Haruhiko Ohashi, Kazuaki Togawa, Kensuke Tono, Mitsuhiro Yamaga, Hitoshi Tanaka, Tetsuya Ishikawa, and Makina Yabashi, "Generation of narrowband X-ray free-electron laser via reflection self-seeding", Nature Photonics 13, 319-322 (2019). [セルフシーディング](#)

# 最近の論文 (2017, 2018)

- Takashi Tanaka, "Universal representation of undulator phase errors", Phys. Rev. Accel. Beams 21, 110704 (2018). [理論](#)
- Teruhiko Bizen, Ryota Kinjo, and Takashi Tanaka, "Enhancing the Radiation Resistance of Undulator Permanent Magnets by Tilting the Easy Axis of Magnetization", Phys. Rev. Lett. 121, 124801 (2018). [永久磁石の放射線減磁](#)
- Takashi Tanaka, "Difference frequency generation in free electron lasers", Opt. Lett. 43, 4485 (2018). [理論](#)
- Takashi Tanaka, "Numerical methods for free electron laser simulations", Journal of Electromagnetic Waves and Applications 32, 371 (2018). [シミュレーションコード](#)
- Ichiro Inoue, Toru Hara, Yuichi Inubushi, Kensuke Tono, Takahiro Inagaki, Tetsuo Katayama, Yoshiyuki Amemiya, Hitoshi Tanaka, and Makina Yabashi, "X-ray Hanbury Brown-Twiss interferometry for determination of ultrashort electron-bunch duration", Phys. Rev. Accel. Beams 21, 080704 (2018). [ビーム診断](#)
- Chikara Kondo\*, Toru Hara, Toru Fukui, Takahiro Inagaki, Hideki Takebe, Shingo Nakazawa, Kenji Fukami, Yusuke Kawaguchi, Hideaki Kawaguchi, Yuji Otake, and Hitoshi Tanaka, "A stable pulsed power supply for multi-beamline XFEL operations", Review of Science Instruments 89, 064704 (2018). [機器開発](#)
- Hirokazu Maesaka\*, Toru Hara, Kazuaki Togawa, Takahiro Inagaki, and Hitoshi Tanaka, "Brightness analysis of an electron beam with a complex profile", Phys. Rev. Accel. Beams 21, 050703 (2018). [理論](#)
- Toru Hara\*, Chikara Kondo, Takahiro Inagaki, Kazuaki Togawa, Kenji Fukami, Shingo Nakazawa, Taichi Hasegawa, Osamu Morimoto, Masamichi Yoshioka, Hirokazu Maesaka, Yuji Otake, and Hitoshi Tanaka, "High peak current operation of x-ray free-electron laser multiple beam lines by suppressing coherent synchrotron radiation effect", Phys. Rev. Accel. Beams 21, 040701 (2018). [システム開発](#)
- Shigeki Owada, Kazuaki Togawa, Takahiro Inagaki, Toru Hara, Takashi Tanaka, Yasumasa Joti, Takahisa Koyama, Kyo Nakajima, Haruhiko Ohashi, Yasunori Senba, Tadashi Togashi, Kensuke Tono, Mitsuhiro Yamaga, Hirokatsu Yumoto, Makina Yabashi,\* Hitoshi Tanaka\* and Tetsuya Ishikawa, "A soft X-ray free-electron laser beamline at SACLA: the light source, photon beamline and experimental station", J. Synchrotron Rad. 25, 282-288 (2018). [システム開発](#)
- Takao Asaka\*, Hiroyasu Ego, Hirohumi Hanaki, Toru Hara, Taichi Hasegawa, Teruaki Hasegawa, Takahiro Inagaki, Toshiaki Kobayashi, Chikara Kondo, Hirokazu Maesaka, Shinichi Matsubara, Sakuo Matsui, Takashi Ohshima, Yuji Otake, Tatsuyuki Sakurai, Shinsuke Suzuki, Yasuyuki Tajiri, Shinichiro Tanaka, Kazuaki Togawa, and Hitoshi Tanaka, "Low-emittance thermionic-gun-based injector for a compact free-electron laser", Phys. Rev. Accel. Beams 20, 080702 (2017). [システム開発](#)
- Kouichi Soutome\* and Hitoshi Tanaka, "Higher-order formulas of amplitude-dependent tune shift caused by sextupole magnetic field distribution", Phys. Rev. Accel. Beams 20, 064001 (2017). [理論](#)
- Takahiro Watanabe\*, Tsutomu Taniuchi, Shiro Takano, Tsuyoshi Aoki, and Kenji Fukami, "Permanent magnet based dipole magnets for next generation light sources", Phys. Rev. Accel. Beams 20, 072401 (2017). [機器開発](#)
- Takashi Tanaka and Ryota Kinjo, "High gain harmonic generation free electron lasers enhanced by pseudoenergy bands", Phys. Rev. Accel. Beams 20, 080706 (2017). [理論](#)
- Takashi Tanaka, "Coherent mode decomposition using mixed Wigner functions of Hermite--Gaussian beams", Optics Letters 42, 1576 (2017). [理論](#)

# まとめ

- SPring-8: 第3世代 蓄積リング型放射光源 (1997~)
    - 高輝度 X線源として安定に運転してきた。
  - SACLA: X線自由電子レーザー (2011~)
    - コヒーレント・短パルス (10 fs)・高ピーク輝度の X線レーザーを安定に供給。
- 相補的であり、  
両方必須。
- SPring-8-II
    - Multi-bend achromat lattice で回折限界光源に迫る。
    - 要素技術開発は順調に進んでいる。
    - SPring-8-II の前段階として次世代放射光計画も進んでいる。
  - SACLA 高度化
    - 反射型 Self-seeding による狭線幅 FEL の安定生成に成功。
    - SPring-8 入射や多様な XFEL 運転に向けたオンデマンド切り替えシステム。
    - 将来の高繰り返し FEL に向けた検討を進めている。
  - 6次元位相空間の完全コヒーレント光「究極の放射光源」までは依然として道半ば。
    - SPring-8 → 連続波 X線レーザー
    - SACLA → 1アト秒 超短パルス 高繰り返し X線レーザー
    - いずれにおいても全く新しいアイデアが必要で、研究課題は多数ある。