



# 将来のリング型光源と 超伝導先端光源の可能性

坂中章悟 (KEK 加速器研究施設)



# 内容

1. イントロダクション
2. 「第4世代」リング型光源の動向と可能性
3. 超伝導先端光源の動向と可能性
  - ERL
  - XFEL-O
  - CW-XFEL
4. コンパクトERLの開発状況 ← 時間があれば
5. まとめ

この発表は、一研究者としての考えを反映したものです

# 1. イントロダクション

# 将来の放射光源への期待

- High brightness
- High coherence
  - 空間的コヒーレンス(小さな光源サイズ)
  - 時間的コヒーレンス(単色性)
- Ultra-short pulses
  - フェムト秒 → アト秒領域へ
  - 高繰り返し化(～50 Hz → 100 kHz - 1 MHz)

共通性

# 将来の放射光源への期待(続)

Spectral brightness (または brilliance)

6次元の位相空間( $x, x', y, y', E, t$ )  
における光子の密度

$$B = \frac{\dot{N}_{\text{ph}}}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_y} \left[ \frac{\text{photons / sec}}{(\text{mrad})^2 (\text{mm})^2 (0.1\% \text{ bandwidth})} \right]$$

$$\Sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_r^2} \cdot \sqrt{\sigma_x'^2 + \sigma_r'^2} \quad \Sigma_y = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_r^2} \cdot \sqrt{\sigma_y'^2 + \sigma_r'^2}$$

$$\sigma_r \approx 1.9 \frac{\sqrt{2\lambda L_u}}{4\pi} \quad \sigma_r' = \sqrt{\frac{\lambda}{2L_u}}$$

$L_u$ : length of undulator  
 $\lambda$ : wavelength  
 $\sigma_{x,y}$ : rms beam size

Coherent flux:  $F_c = B \cdot \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2$

High brightness



- 空間干渉性を使う実験で高フラックスを利用できる
- 狭いバンド幅で、高フラックスが利用できる

- 第3世代光源では、 $B \leq 10^{20}$  が実現できている
- 将来の放射光源では、 $B \geq 10^{21}$  が目標である

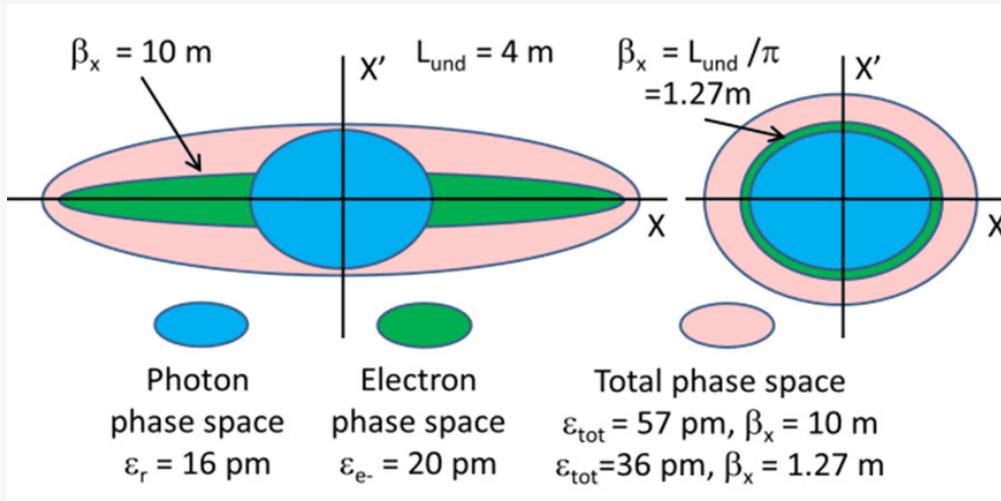
# 回折限界光源

- 回折限界エミッタンス:

(電子ビームのエミッタンス) ~ (フォトンエミッタンス):  $\boxed{\varepsilon = \frac{\lambda}{4\pi}}$  (または  $\frac{\lambda}{2\pi}$ )

- 光波長  $\lambda = 0.1 \text{ nm}$  に対して、電子ビームの回折限界エミッタンスは  $\varepsilon \sim 8 \text{ pm}\cdot\text{rad}$

- 電子ビームのエミッタンスをこれ以下にしても、輝度はあまり上がらない(回折限界)
- 光源加速器の一つの目標は、水平・垂直ともに回折限界エミッタンスを実現することである (幾つかの第3世代リングで、垂直エミッタンスは既に回折限界に到達)



位相空間分布のマッチングも重要

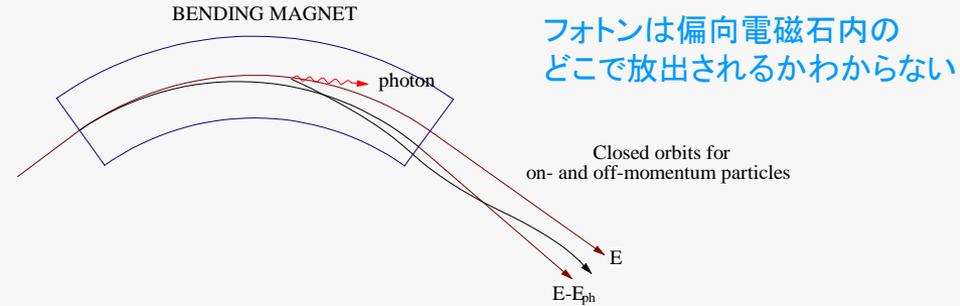
図の出典: R. Hettel, IPAC'14, MOXBA01 (2014).

光源から放出されるフォtonsの位相空間内分布は、電子ビームとフォtonsの位相空間内分布のコンボリューションである

## 2. 「第4世代」リング型光源 の動向と可能性

# 蓄積リングにおけるビームエミッタンス

電子ビームのエミッタンスは放射励起と放射減衰の平衡で決まる



平衡エミッタンス<sup>[2]</sup>:

$$\varepsilon_0 = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{\hbar}{mc} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2 \frac{I_5}{I_2 - I_4}$$

$E$ : 電子のエネルギー

$\rho = p/(eB)$

$m$ : 電子質量

$\eta$ : 分散関数

$\alpha, \beta, \gamma$ : Twiss parameters

$$I_5 = \oint \frac{\gamma\eta^2 + 2\alpha\eta\eta' + \beta(\eta')^2}{|\rho|^3} ds$$

$$I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds$$

$$I_4 = \oint \left[ \frac{1}{\rho^3} + \frac{2K_x}{\rho} \right] \eta ds$$

エミッタンスのスケールリング:  
(近似関係式<sup>[3]</sup>)

$$\varepsilon_0 = F(v_x, \text{lattice}) \frac{E^2}{(N_d)^3}$$

$N_d$ : リング内の偏向電磁石の数

$F(v_x, \text{lattice})$ : ラティスの型とベータatron振動数 $v_x$ に依存する係数

$E^2$ 依存性は厳密、 $N_d^3$ 依存性は大まかな近似

大まかに:

$$\varepsilon_0 \propto \frac{E^2}{C^3}$$

$C$ : リングの周長

[2] R.H. Helm et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-20**, 900 (1973).

[3] J. Murphy, BNL-42333.

# 最近稼働を始めた放射光リング(第3世代光源)

## Taiwan Photon Source (TPS)

- ビームエネルギー: 3 GeV
- 周長 : 518 m
- ビームエミッタンス: **1.6 nm-rad**
- ラティス型 : 24-cell DBA  
(DBA: Double Bend Achromat)
- 2015/12/31 にビーム蓄積成功



[4] C.C. Kuo, IPAC'15, TUXC3.

## NSLS-II

- ビームエネルギー: 3 GeV
- 周長 : 792 m
- ビームエミッタンス: **0.9 nm-rad**
- ラティス型 : 30-cell DBA
- 2014年4月～ コミッショニング

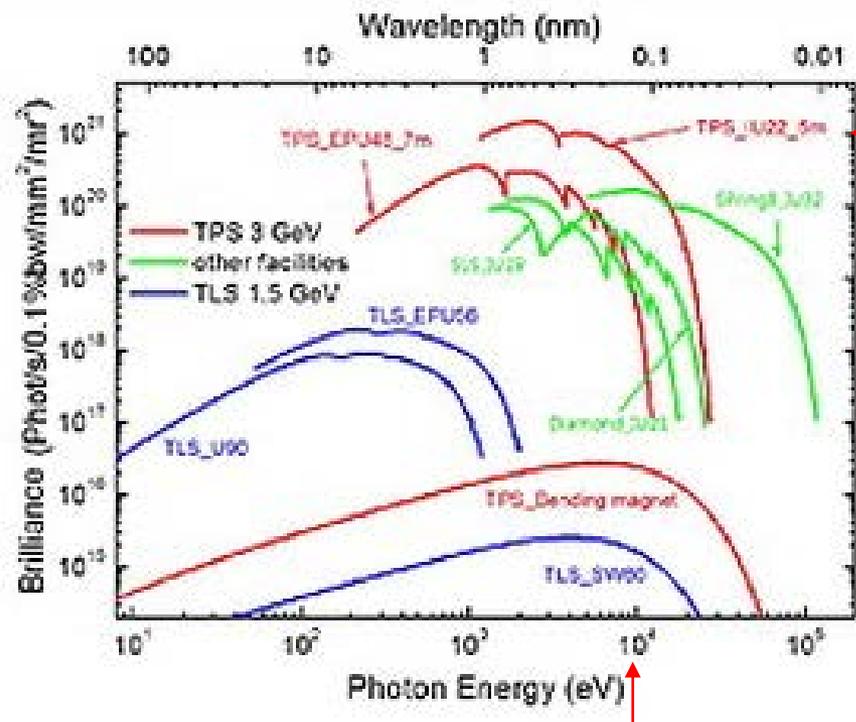


[5] F. Willeke, IPAC'15, MOYGB3.

# 最近稼働を始めた放射光リング: Spectral Brightness

## Taiwan Photon Source (TPS)

- ビーム電流: 500 mA



## NLSL-II

- ビーム電流: 500 mA (10 keV,  $B=10^{21}$  を矢印で示す)

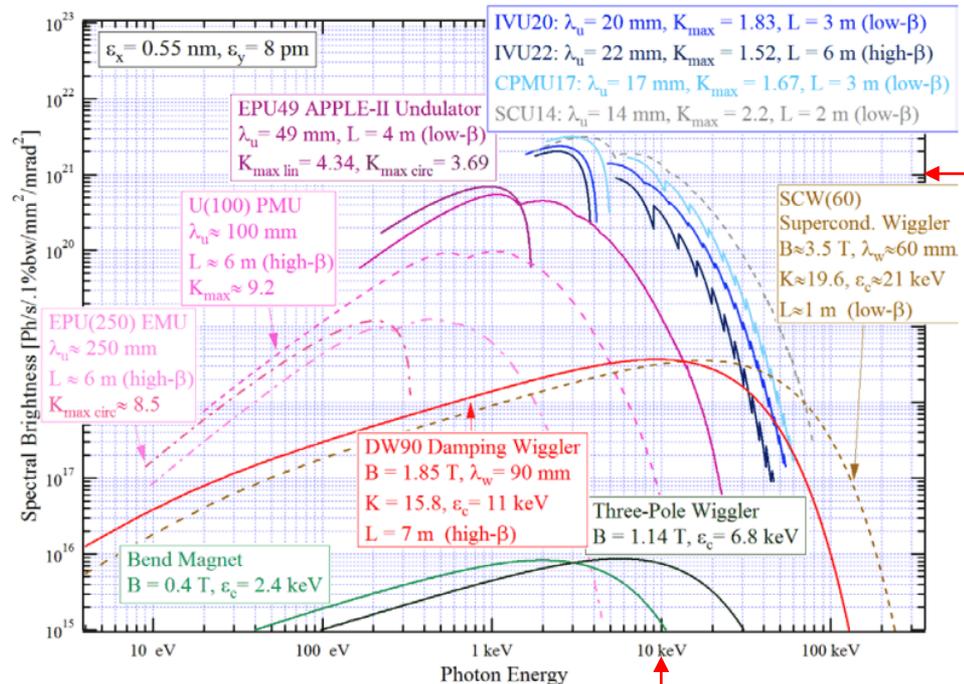


Figure 1. Brightness versus photon energy for a number of different NLSL-II radiation sources, at 3 GeV and 500 mA.

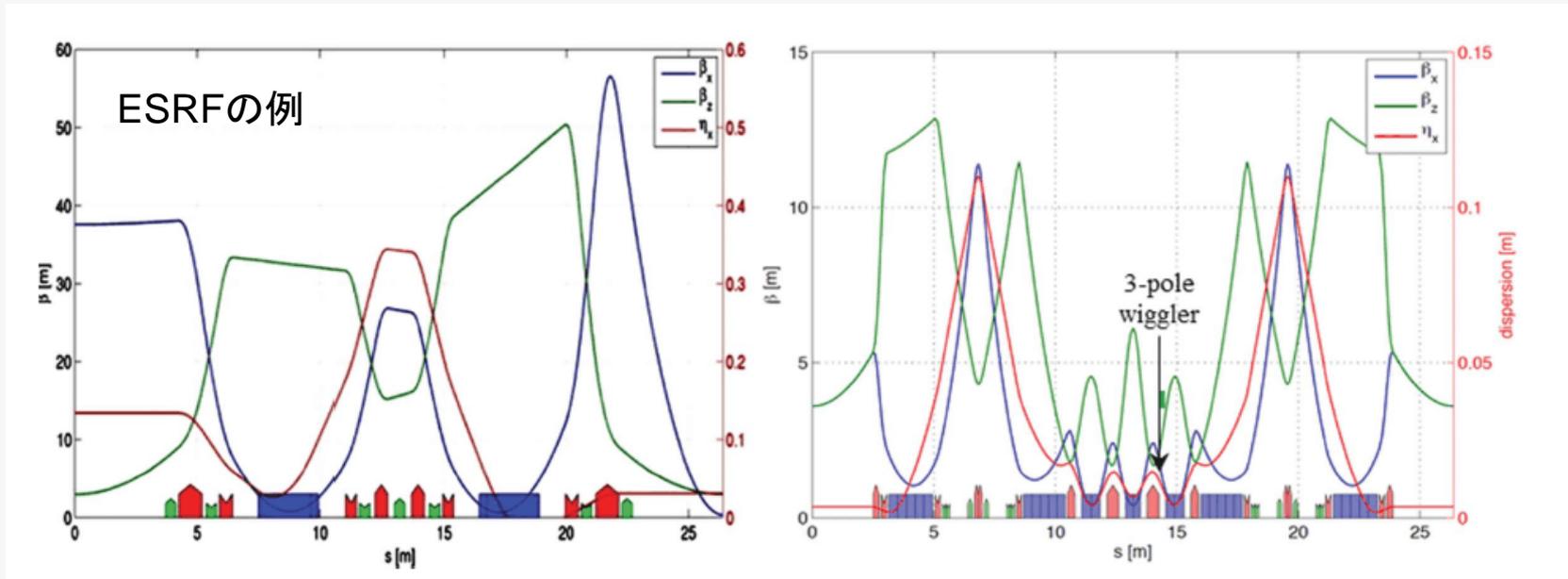
Average brightness:  $B \sim 10^{20} - 10^{21}$  (ph/s/0.1%bw/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>)

[6] <http://www.nsrrc.org.tw/english/tps.aspx>

[7] "NLSL-II Source Properties and Floor Layout", 10 April 12, 2010.

# 「第4世代」リングのコンセプト

- Multi-Bend Achromat (MBA) ラティスを採用し、低エミッタンス化
  - 偏向電磁石内で分散とその傾きを小さく抑える
- 「第4世代」リングという名称が定着しつつある
- 【課題】
  - ダイナミック・アパーチャーが小さい → ビーム入射が難しい、Touschek寿命が短い
  - 磁石同士が接近するため、真空・モニター機器が配置し難い
  - ...



現在のラティス(1セル分): DBA  
 $\varepsilon = 4$  nm-rad



新ラティス: 7-Bend Achromat (7BA)  
 $\varepsilon = 0.16$  nm-rad

# 建設中の「第4世代」リング

## MAX-IV (スウェーデン)

- ビームエネルギー: 3 GeV
- 周長 : 528 m
- ビームエミッタンス: 0.33 nm-rad
- ラティス型 : 7BA
- 2015年夏にコミッショニング予定

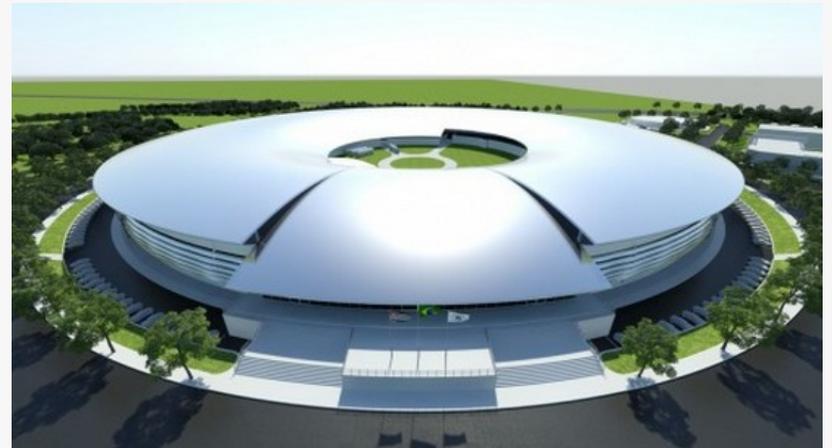


[9] P.F. Tavares et al., "The MAX-IV Project",  
J. Synchrotron Rad. **21**, 862 (2014).

## Sirius (ブラジル)

- ビームエネルギー: 3 GeV
- 周長 : 518 m
- ビームエミッタンス: 0.28 nm-rad
- ラティス型 : modified 5BA
- 建物の建設中

(想像図)



[10] L. Liu et al., "The Sirius Project",  
J. Synchrotron Rad. **21**, 904 (2014).

# 建設中の「第4世代」リング: Spectral Brightness

## MAX-IV (スウェーデン)

- $\varepsilon_x = 0.26$  nm-rad,  $\varepsilon_y = 0.008$  nm-rad

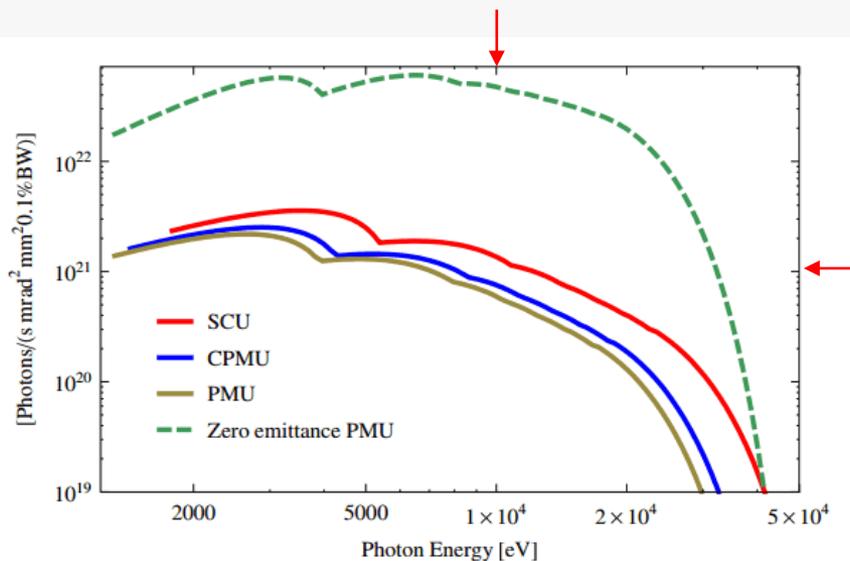


FIG. 17. (Color) Brilliance limit for the MAX IV 3 GeV storage ring for in-vacuum permanent-magnet undulators (PMU), cryogenically cooled in-vacuum undulators (CPMU), and superconducting undulators (SCU). The undulator parameters are given in Table VIII.

## Sirius (ブラジル)

- $I = 500$  mA
- Intrabeam-scattering effect is included

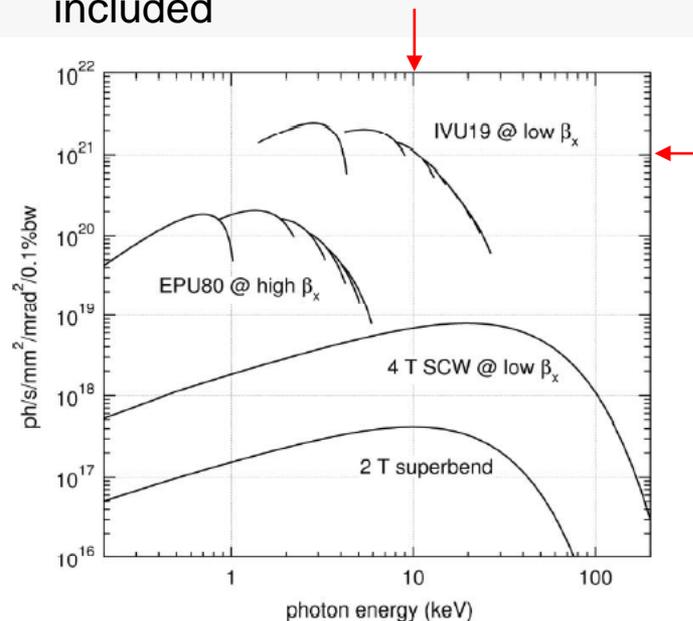


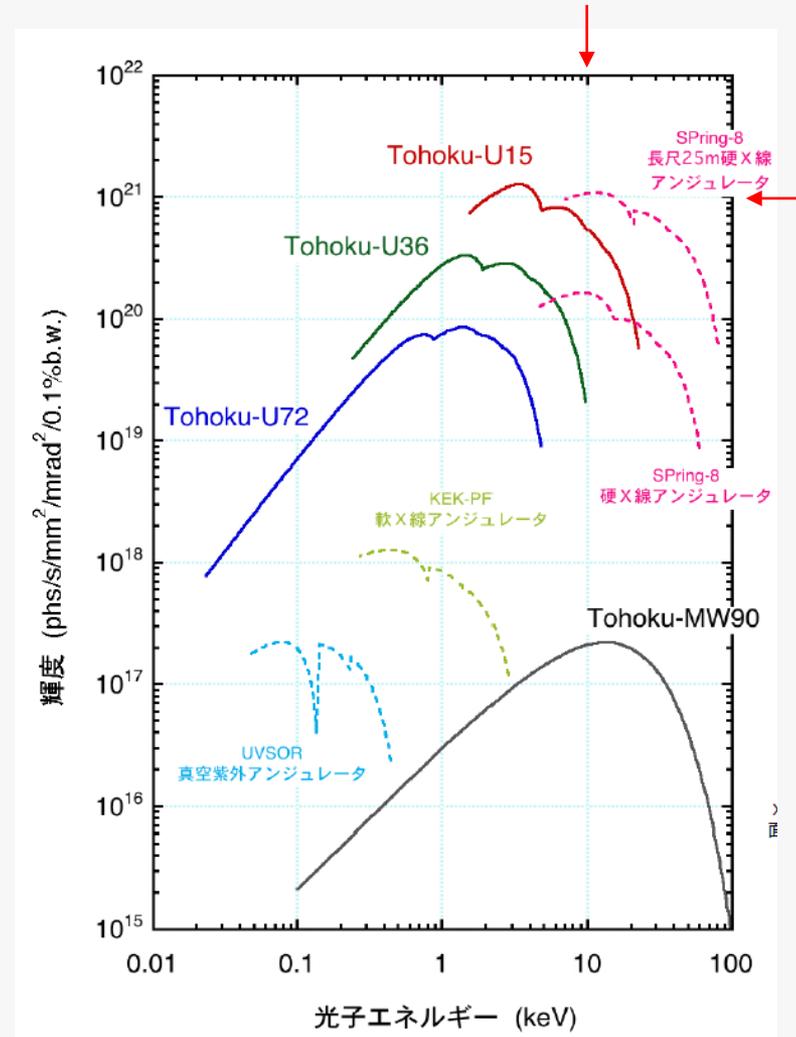
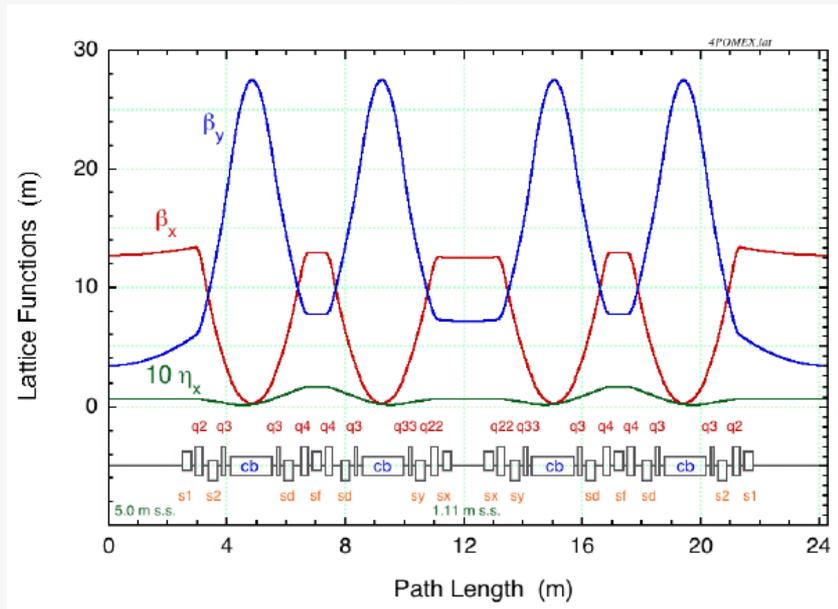
Figure 1

Brightness of the Sirius radiation sources including effects of insertion devices and intrabeam scattering on emittance and energy spread for 500 mA total beam current. IVU19: hard X-ray in-vacuum undulator with 19 mm period and 4.5 mm magnet gap. Odd harmonics up to 15th are plotted. 4 T SCW: 4 T superconducting wiggler presently operating in UVX. EPU80: elliptically polarizing undulator with 80 mm period in planar phase. Calculations performed with *SRW* (Chubar & Elleaume, 1998).

# 東北放射光施設設計画 (SLiT-J)

- ビームエネルギー: 3 GeV
- 周長 : 339.9 m
- ビームエミッタンス: 1.15 nm-rad
- ラティス型 : 4-bend cell (14-cells)

ラティス



[13] <http://www.lns.tohoku.ac.jp/slitj/design.html>

# 「第4世代」光源へのアップグレード計画

## ESRF Upgrade Phase-II

- E=6 GeV, C = 844 m
- $\varepsilon_x = 0.16 \text{ nm-rad}$
- 7BA ラティス
- Officially launched (ESRF News, 70)

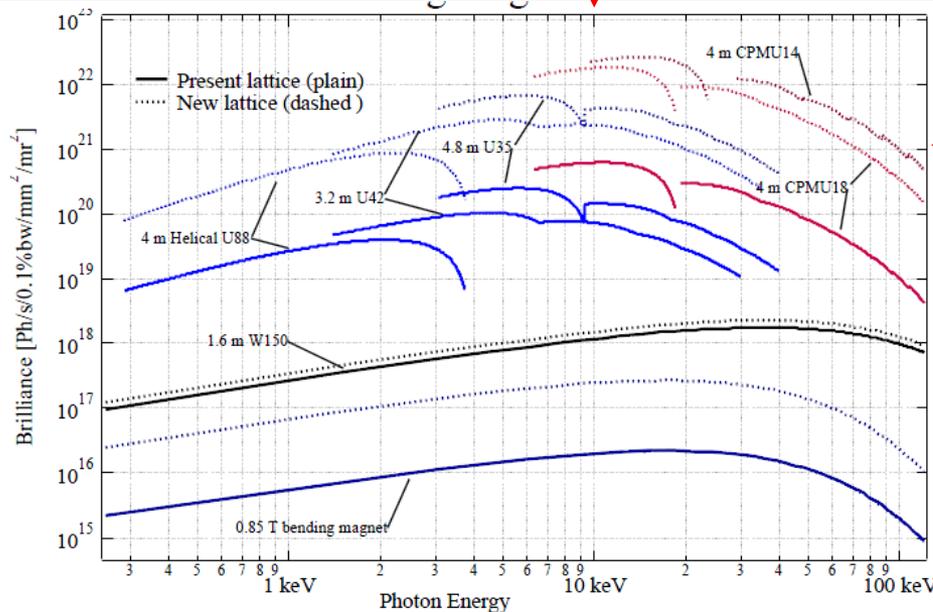


Figure 1: Brilliance of the existing and new lattices for present or planned insertion devices.

## APS Upgrade

- E=6 GeV, C=1104 m
- $\varepsilon_x = 0.067 \text{ nm-rad}$
- hybrid 7BA ラティス
- Swap-out injection
- 今年夏にDOEで認められる可能性

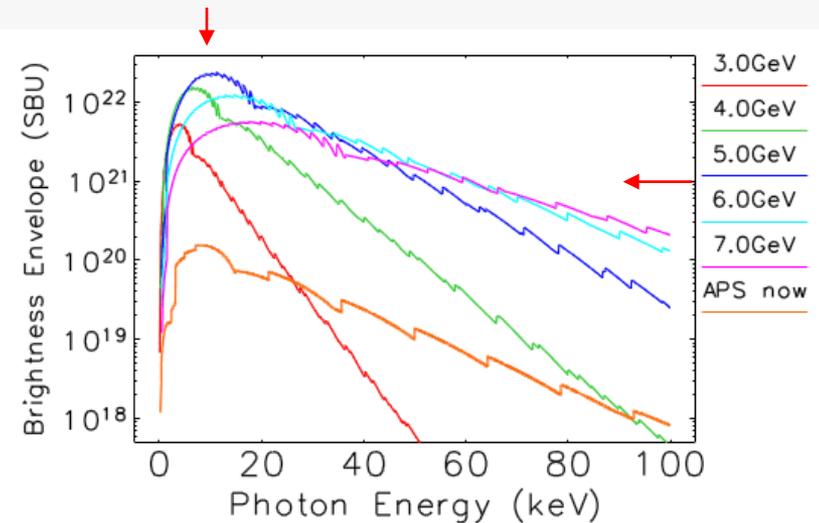


Figure 4: Brightness envelopes for 3.7-m-long SCUs, for various electron beam energies.

Average brightness:  $B \sim 10^{21} - 10^{22}$  (ph/s/0.1%bw/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>)

[14] J.-L. Revol et al., "ESRF Upgrade Phase II", IPAC2013, TUOAB203; "ESRF Upgrade Programme Phase II (2015-2019) White Paper,

[15] M. Borland et al., IPAC15, TUPJE063.

# 「第4世代」光源へのアップグレード計画(続)

## SPring-8 II

- E=6 GeV, C = 1435 m
- $\varepsilon_x = 0.149$  nm-rad
- 5BA ラティス
- CDR 出版 [16]

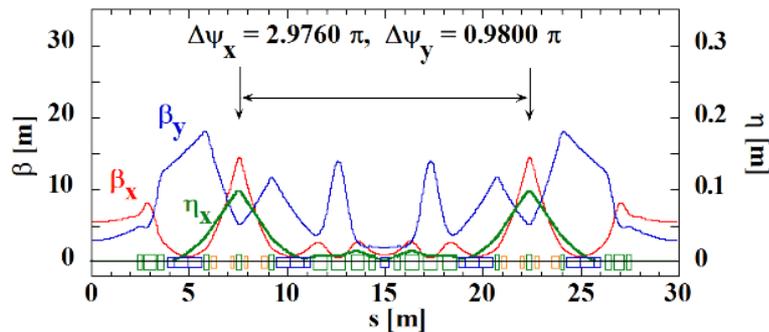
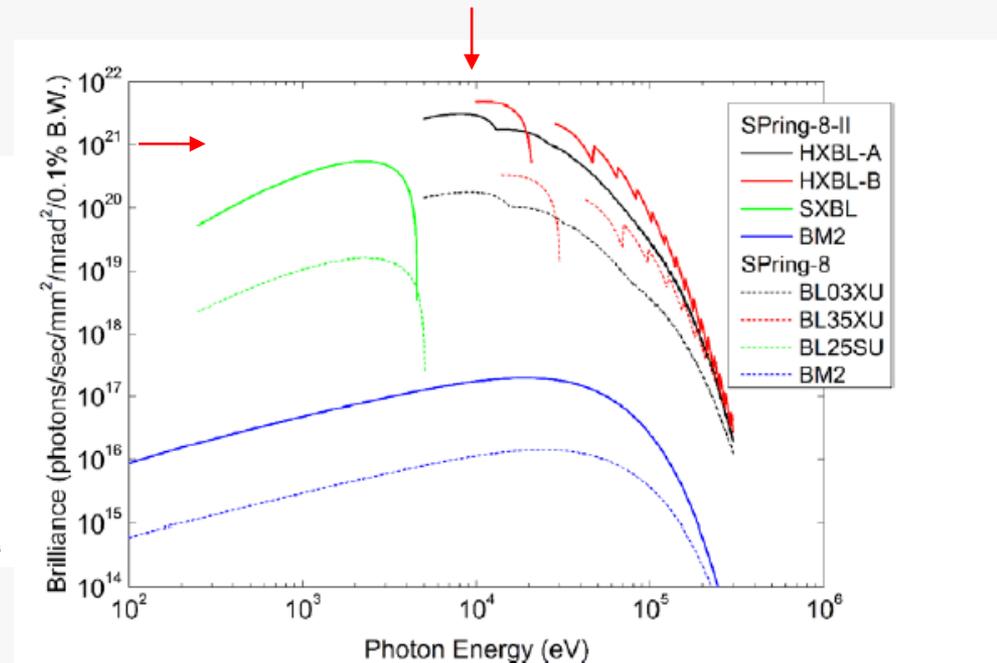


Fig. I 1.2.1: A unit cell of the 5 bend achromat optics. The betatron functions



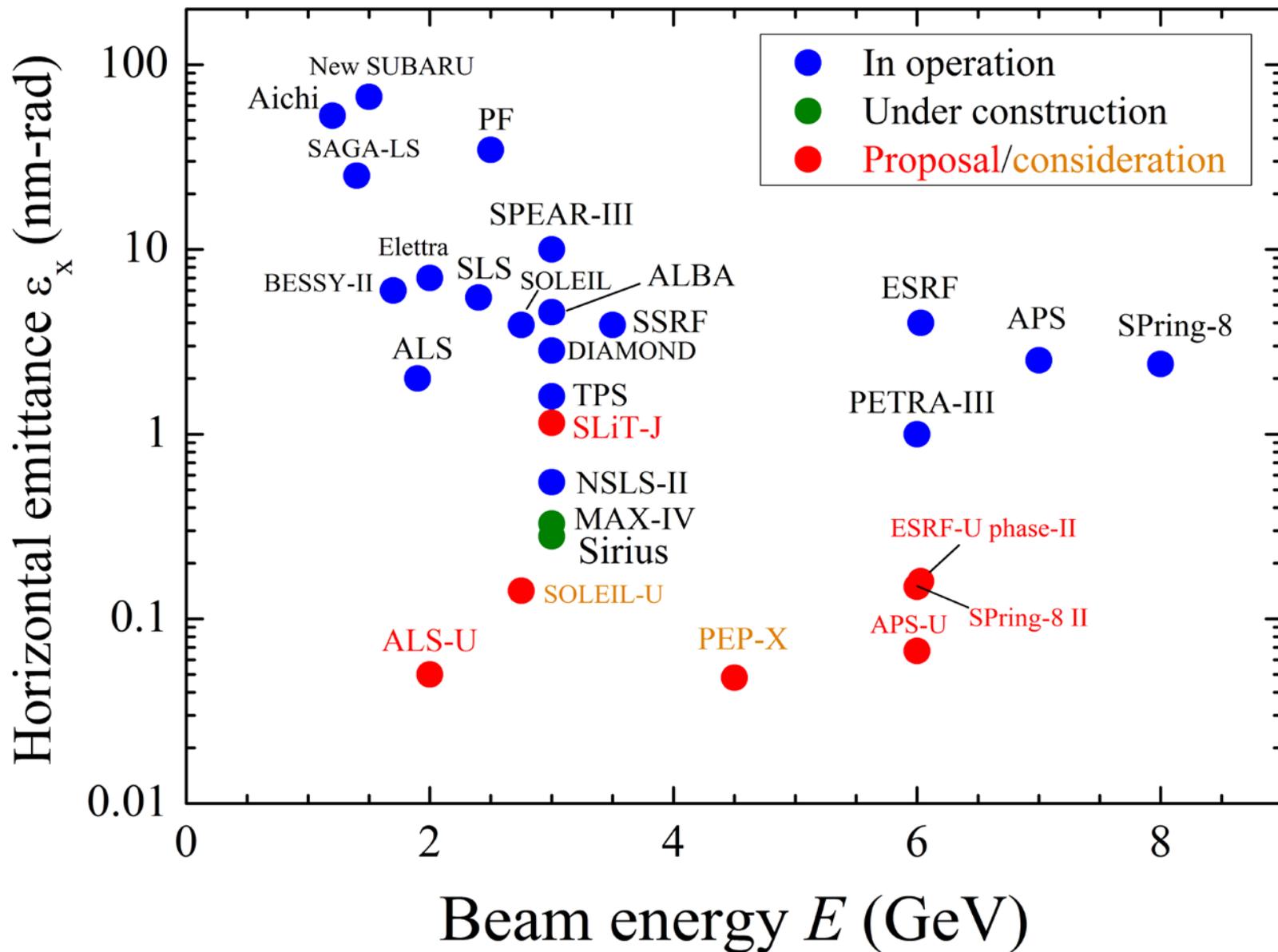
2.4.1: Expected brilliance curves in typical beamlines in SPring-8 II compared with those in SPring-8.

Average brightness:  $B \sim 10^{21} - 10^{22}$  (ph/s/0.1%bw/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>)

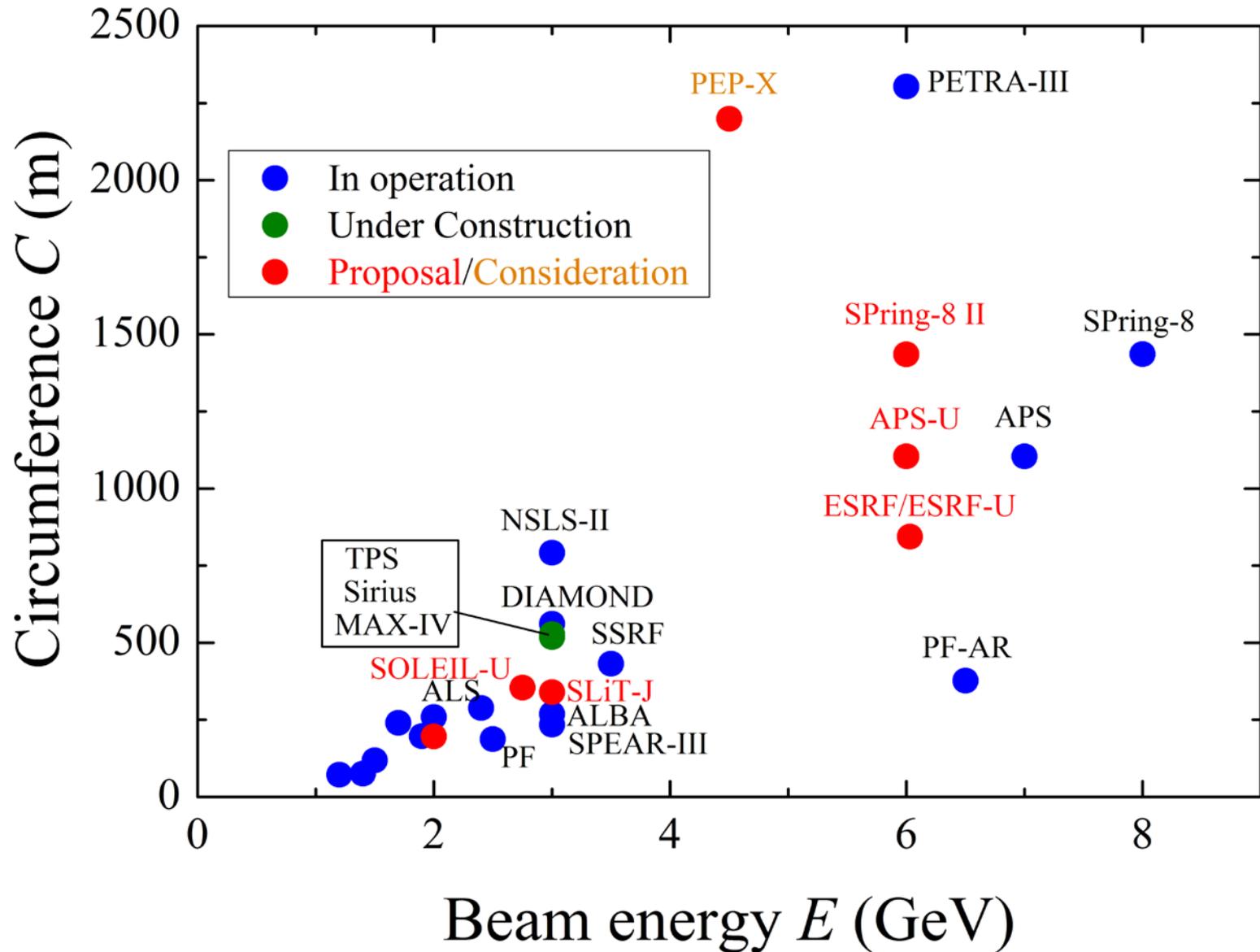
[16] “SPring-8-II Conceptual Design Report”, RIKEN SPring- Center, Nov. 2014.

[17] Y. Shimosaki et al., IPAC2014, MOPRO083.

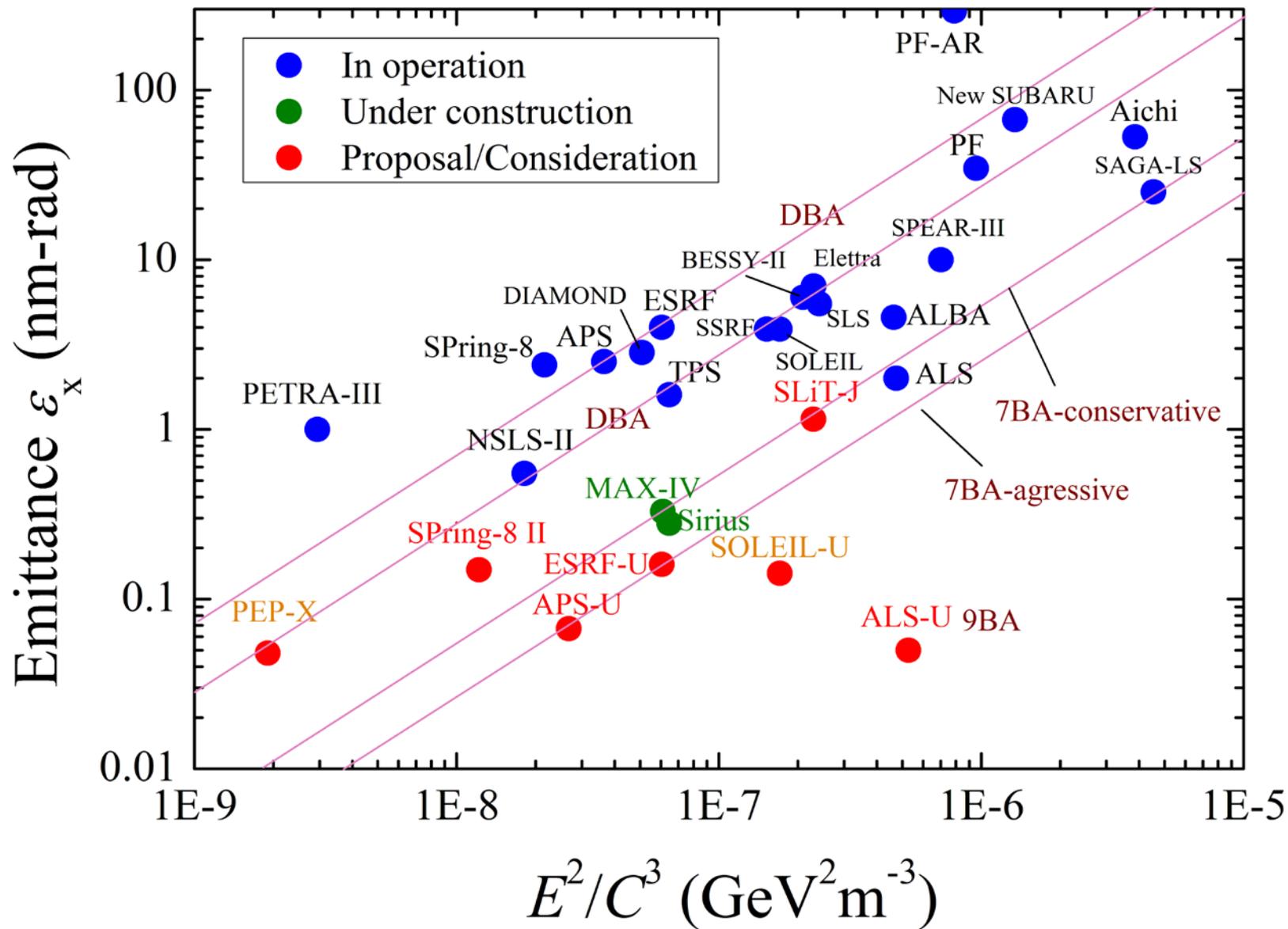
# 主要な光源リング ( $E$ vs. $\varepsilon_x$ )



# 主要な光源リング ( $E$ vs. $C$ )



# 主要な光源リング ( $\varepsilon_x \propto E^2/C^3$ scaling)



# リング型光源のまとめ(私見)

- 第3世代光源で、平均輝度  $B=10^{20} \sim 10^{21}$  ph/s/0.1%bw/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup> (NSLS-IIでは  $10^{22}$  近く)でが可能になっている
- Multi-Bend Achromat (MBA) ラティスを採用した「第4世代」リングでは、 $B=10^{21} \sim 10^{22}$  ( $10^{23}$  近く)がターゲットである
  - ビームエミッタンス ~ 100 pm-rad (準回折限界エミッタンス)が可能になりつつある
  - MAX-IV, Sirius が建設中
  - 既存リングのアップグレード計画が多数ある。ESRF, APS のアップグレードは実現可能性が高い
  - KEKでもMBAラティスを採用したリングのデザインスタディを行っている

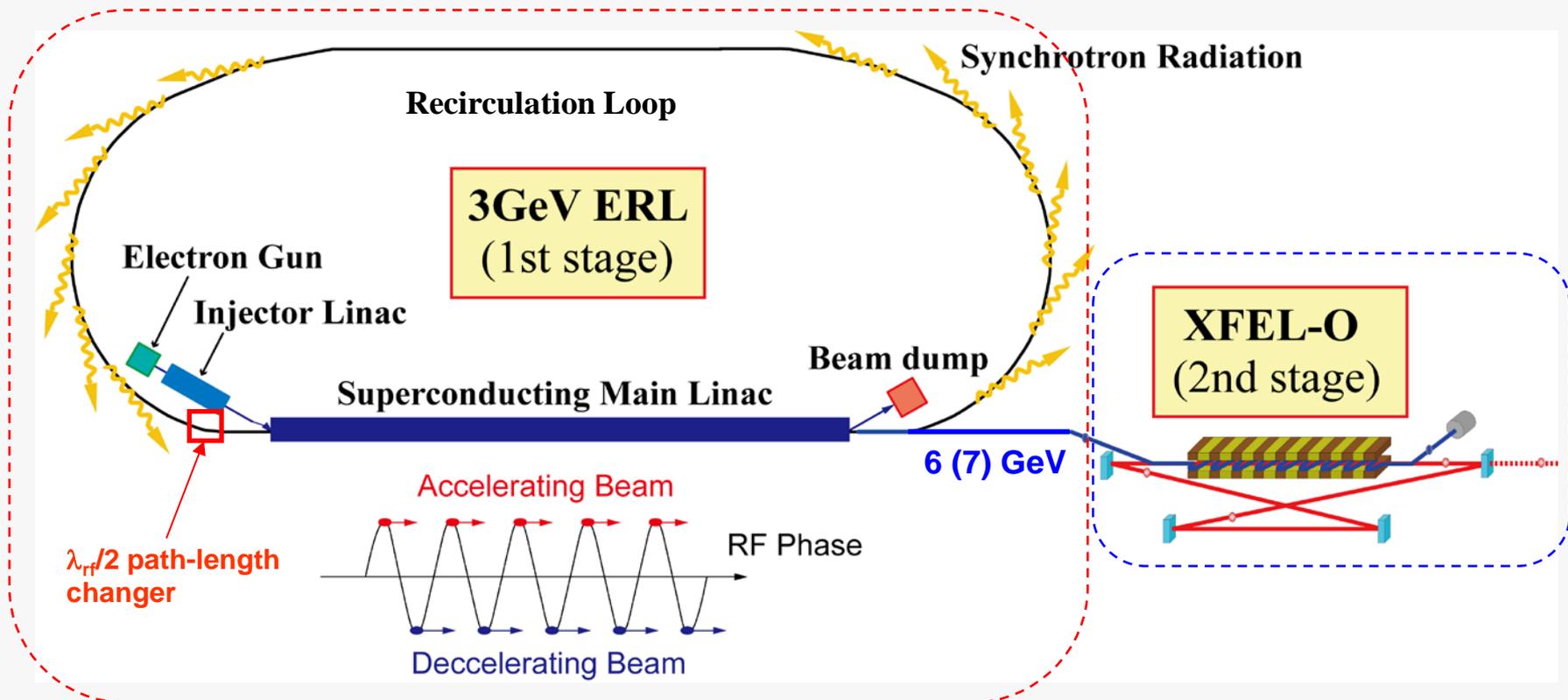
### 3. 超伝導先端光源の動向と可能性

- ERL (Energy Recovery Linac)
- XFEL-O (X-ray Free Electron Laser Oscillator)
- CW-XFEL (Continuous-Wave X-ray Free Electron Laser)

# KEKにおけるERL放射光源計画

第1段階: 3-GeV ERLを建設し、放射光を利用する  
 第2段階: Recirculating linac モードで6-7 GeVの電子ビームを加速し、XFEL Oscillator (XFEL-O)を実現

RF frequency: 1.3 GHz  
 Beam current : 10-100 mA  
 Bunch charge: 7.7-77 pC  
 Normalized emittance: 0.1-1 mm·mrad



# 3-GeV ERL/XFEL-Oの運転モード

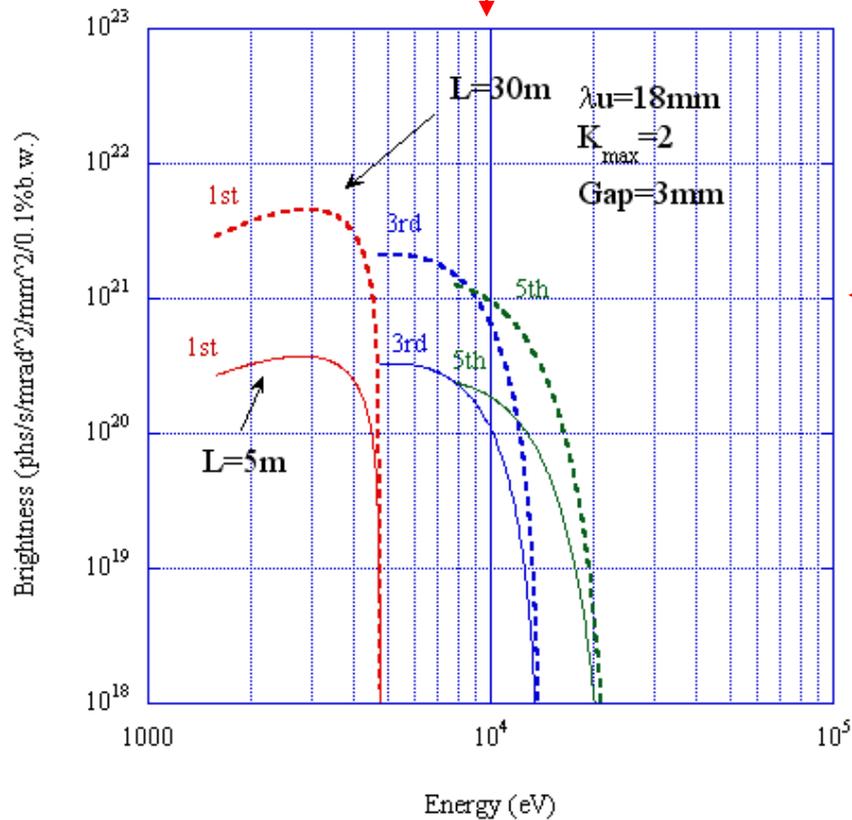
	超高輝度光源			超短パルス光源	X線レーザー
	高コヒーレンス モード	高フラックス モード	高コヒーレン ス・高フラックス モード	超短パルス モード	XFEL-O
ビームエネルギー	3 GeV				7 (6) GeV <sup>1)</sup>
ビーム電流	10 mA	100 mA	100 mA	77 $\mu$ A (typ.)	20 $\mu$ A
バンチ当たりの電荷	7.7 pC	77 pC	77 pC	77 pC	20 pC
バンチの繰り返し	1.3 GHz	1.3 GHz	1.3 GHz	1 MHz	1 MHz
規格化エミッタンス	0.1 mm·mrad	1 mm·mrad	0.1 mm·mrad	検討中	0.2 mm·mrad
フルエネルギーでの ビームエミッタンス	17 pm·rad	170 pm·rad	17 pm·rad	検討中	15 pm·rad
ビームのエネルギー 広がり (rms)	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	検討中	$5 \times 10^{-5}$
バンチ長 (rms)	2 ps	2 ps	2 ps	< 100 fs	1 ps

# Spectral Brightness (3 GeV ERL)

High coherence mode

10 mA, 17 pm-rad

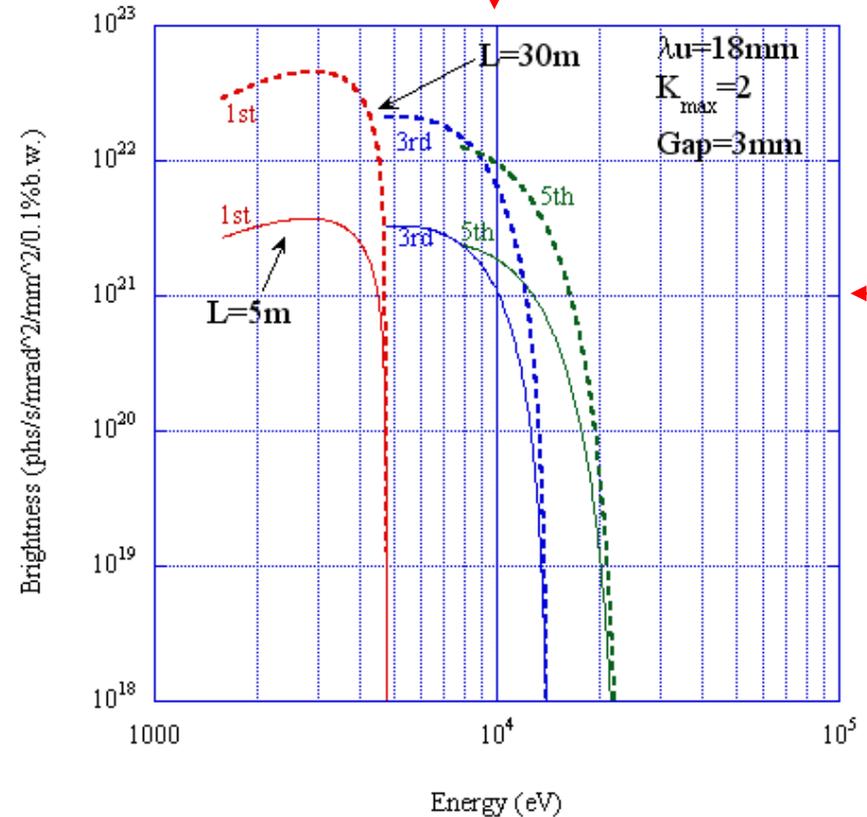
Undulator spectrum at X-ray region (High-coherence mode)



Ultimate mode

100 mA, 17 pm-rad

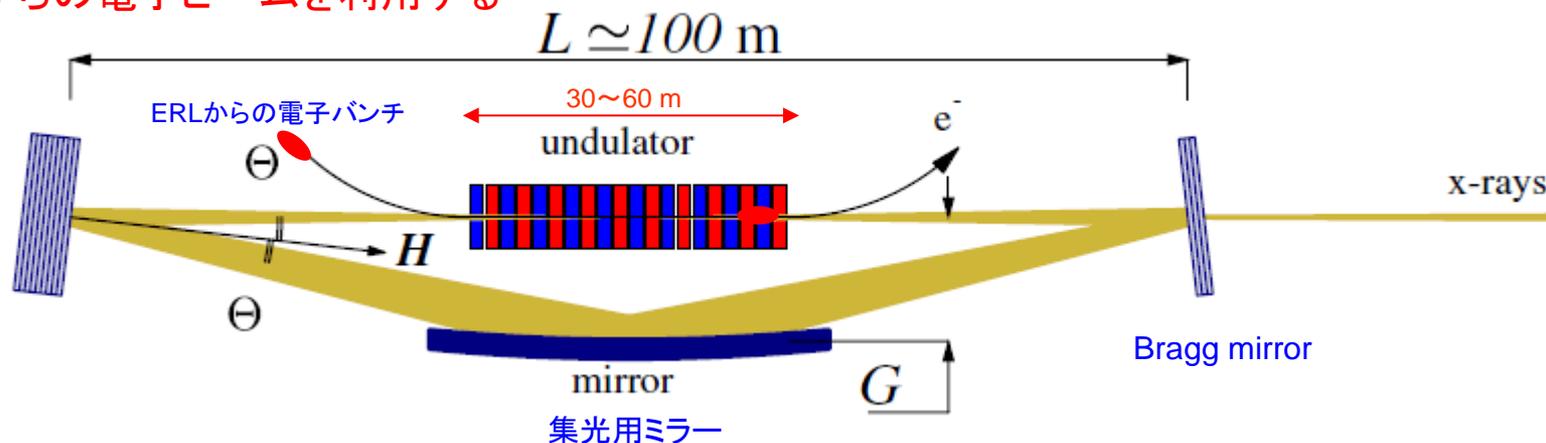
Undulator spectrum at X-ray region (Ultimate mode)



X-ray undulator

# X-ray Free-Electron-Laser Oscillator (XFEL-O) の動作原理

ERLからの電子ビームを利用する



## 動作原理

1. 電子バンチがアンジュレータの中でX線を放射する。
2. **Bragg ミラー**でX線を100%近く反射し、**X線共振器**を構成する。  
(X線パルスが共振器を一往復する間の損失を10~20%以内に抑えること)
3. X線パルスが一往復した時間後に、次の電子バンチを通過させる(周期 約1  $\mu$ s).
4. **ERL**からの高品質な電子バンチが通過する度に、X線パルスを20~40%増幅する  
(低増幅率自由電子レーザー)
5. (増幅率) > (損失) であれば、X線が増幅される。
6. 電子バンチが1000回程度通過する間にX線強度が増幅され、空間的かつ時間的にコヒーレントな強いX線パルスが得られる(X線レーザー; ただし繰り返し約1MHzのパルスレーザー)

[19] R. Coella and A. Luccio, Optics Comm. **50**, 41 (1984). (最初の提案)

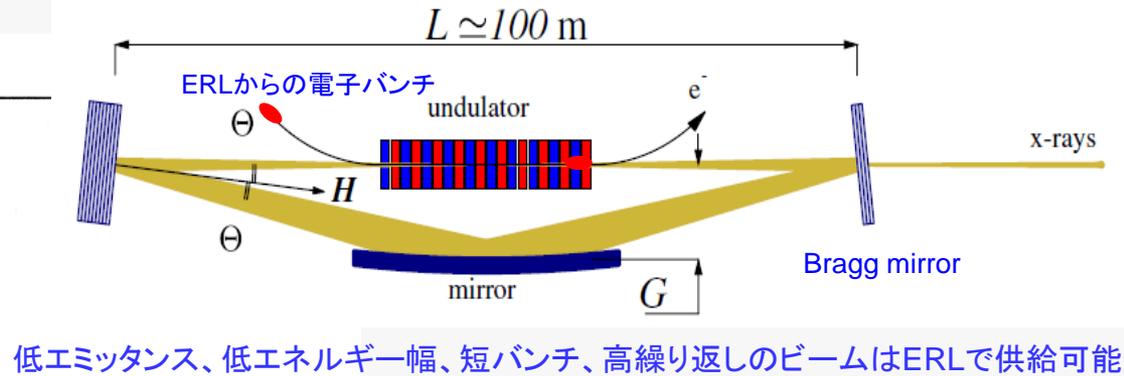
[20] K.-J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 244802 (2008). (ERLを用いたXFELの提案)

[21] K.-J. Kim et al., Synchrotron Radiation News **25**, 25 (2012). (解説記事)

# X-ray Free-Electron-Laser Oscillator (XFEL-O) の特性

Table 1: Major Parameters

Electron beam	
Energy	5 – 7 GeV
Bunch charge	25 – 50 pC
Bunch length (rms)	0.1 – 1 ps
Normalized rms emittance	0.2– 0.3 mm-mrad
Energy spread (rms)	$2 \times 10^{-4}$
Bunch repetition rate	~1 MHz (constant)
Undulator	
Period length	~2 cm
Deflection parameter K	1.0 – 1.5
Total length	30 – 60 m
Optical cavity	
Configuration	2 – 4 diamond crystals and focusing mirrors
Total roundtrip reflectivity	→ 85 % (50% for 100A peak current)
XFEL-O output	
Photon energy coverage	5 – 25 keV (plus the third harmonic)
Spectral purity	1 – 10 meV ( $10^{-6}$ – $10^{-7}$ in relative BW)
Coherence	Fully transverse and temporal
X-ray pulse length	0.1 – 1.0 ps
Tuning range	2 – 6 %
Number of photons/pulse	~ $10^9$
Pulse repetition rate	~1 MHz
Peak spectral brightness	$10^{32}$ – $10^{34}$ ph/[s × mm <sup>2</sup> × mrad <sup>2</sup> × (0.1% BW)]
Average spectral brightness	$10^{26}$ – $10^{28}$ ph/[s × mm <sup>2</sup> × mrad <sup>2</sup> × (0.1% BW)]



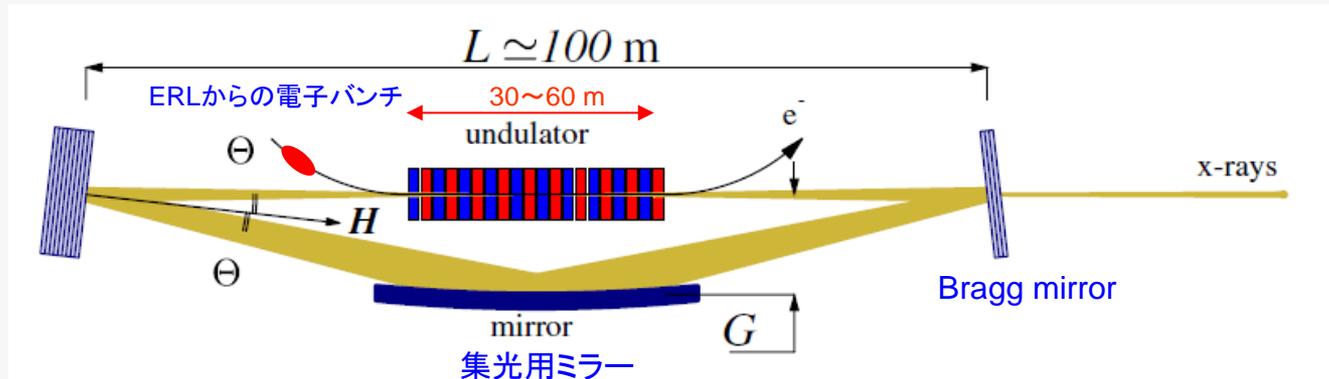
[20] K.-J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 244802 (2008).

[21] K.-J. Kim et al., Synchrotron Radiation News **25**, 25 (2012).

## XFEL-O の特徴

1. X線のスペクトル純度が極めて高い(バンド幅: 1-10 meV)
2. 平均輝度が極めて高い:  
 $B = 10^{26} \sim 10^{28}$   
 [photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw]  
 (第3世代光源(~  $10^{20}$ )に比べて約 $10^6$ 倍高い)
3. 時間的にフルコヒーレントである。  
 (約1 psのパルス内で完全な時間コヒーレンスを持つ)
4. SASEに比べて安定である

# XFEL-O の課題



1. ERL (またはCW-LINAC) で高品質、高繰り返しの電子ビームを生成
2. 高反射率ミラー (硬X線)、高発熱密度 → 低温冷却 ダイヤモンドミラー
3. 厳しい光学系のトレランス: 角度  $\sim 10$  nrad (rms), 位置  $\sim 3$   $\mu$ m (rms)

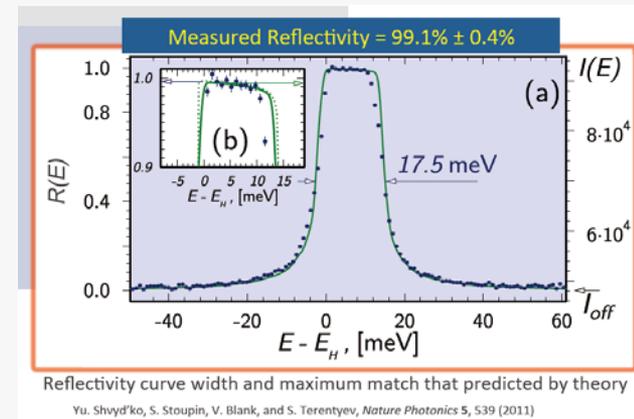
連続 (高繰り返し) SASE / Seeded-FEL よりも、難易度は高いと思われる

## 人工ダイヤモンドを用いた高反射率X線ミラーのR&D

(Argonne National Lab.)

[22] Yuri V. Shvyd'ko et al., Nature Physics **6**, 196 (2010).

[23] Yuri Shvyd'ko et al., "Near-100% Bragg reflectivity for X-rays", Nature Photonics **5**, 539 (2011).



# 連続波(CW) X-FEL

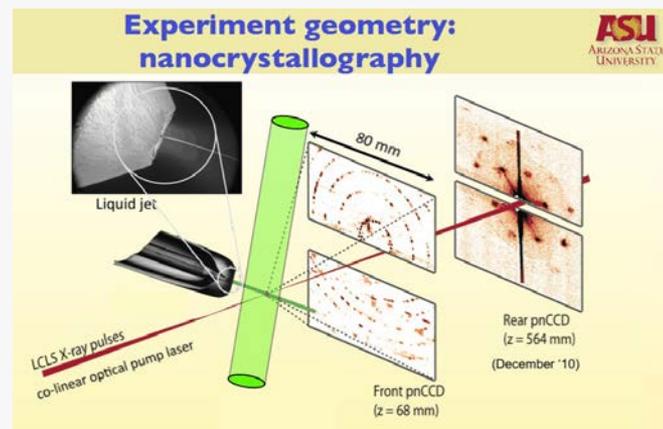
- 常伝導リニアックを用いたX-FELは、X線パルスの繰り返し率が低い
  - LCLS: 120 Hz, SACLA: 30 Hz
- 高繰り返し(~1 MHz)かつ等間隔のX線パルスが得られれば、データ取得効率を $10^4$  倍にできる
  - 1パルス毎の破壊型回折測定(下図)
  - Pump-probe実験による超高速現象の測定
- 超伝導リニアックを用いれば、高周波を連続的(CW)に入れることが可能である
  - ビーム繰り返し周波数は、任意に高くできる(最大1.3 GHz)



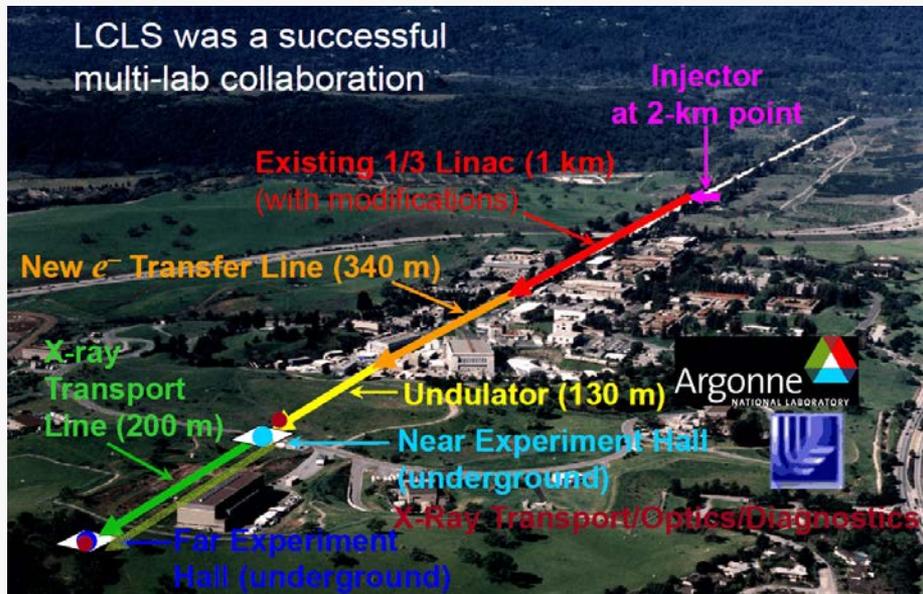
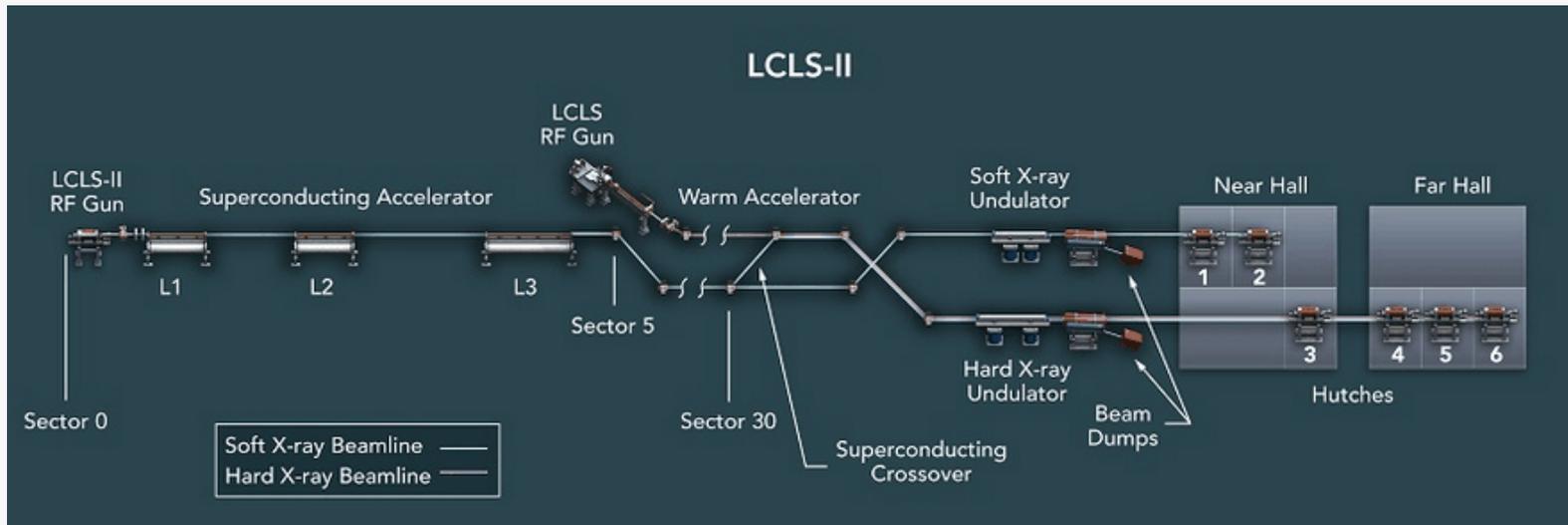
X線FELの次の目標は、超伝導リニアックを用いた高繰り返し化である。  
Seeding も用いて、単色化も目指す

## LCLSにおけるナノ結晶構造解析実験の例

[24] U. Weierstall (ASU), "X-ray Lasers for Structural and Dynamic Biology", invited talk at FLS2012.



# LCLS-II Project: 0.2-5 keV CW-XFEL (建設に向けて開発中@SLAC)



# LCLS-II Project

- 電子ビーム:  $E = 4 \text{ GeV}$
- 光子エネルギー:  $E_{\text{ph}} = 0.2 - 5 \text{ keV}$
- 高繰り返し:  $\sim 0.62 \text{ MHz}$
- 平均輝度:  $10^{23} - 10^{24} \text{ (@}0.2 - 5 \text{ keV)}$

LCLS-IIが成功したら、  
次は硬X線化に進むだろう

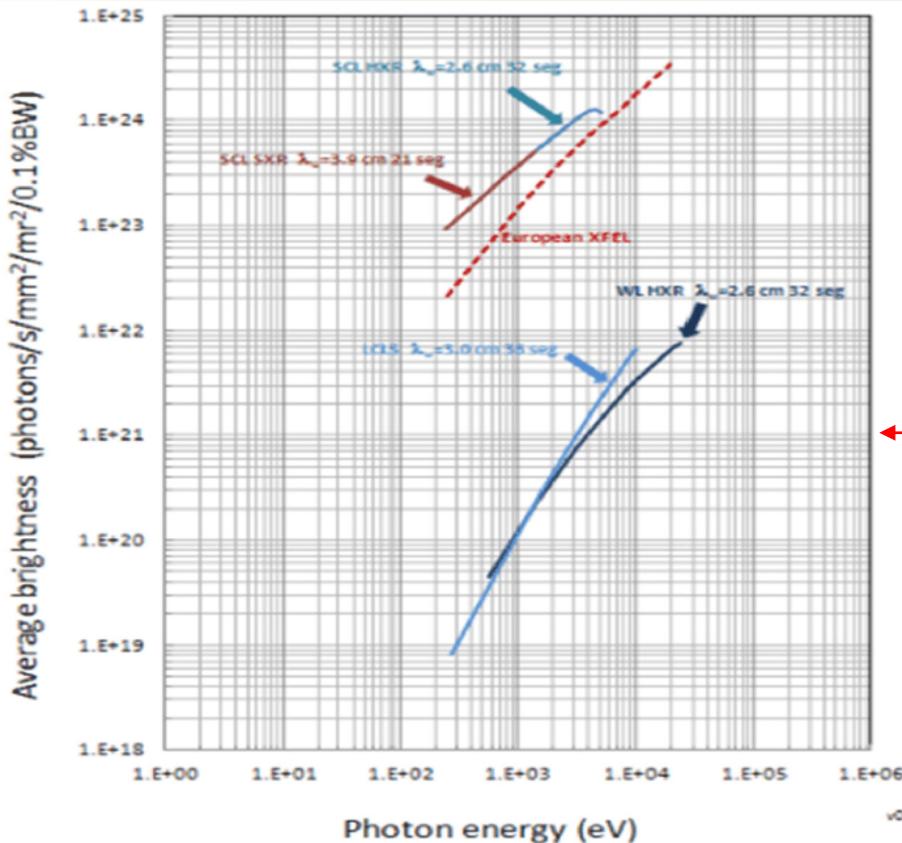
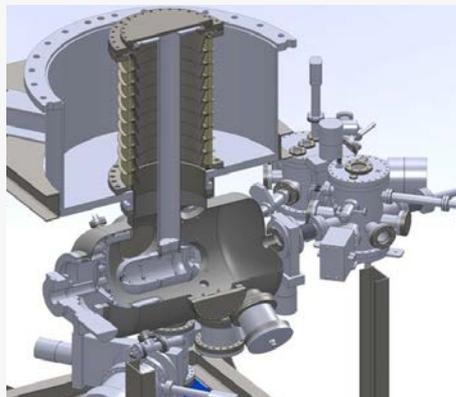


Table 1. LCLS-II Electron Beam Parameters

Parameter	Nominal	Range	Units
Final electron energy	4	2-4.14	GeV
Electron bunch charge	0.1	0.01-0.3	nC
Bunch repetition rate	0.62	0-0.93	MHz
Average linac current	62	1-300	$\mu\text{A}$
Average beam power	0.25	$\leq 1.2$	MW
emittance	0.45	0.2-0.7	$\mu\text{m}$
Peak current	1	0.5-1.5	kA
Bunch length	8.3	0.6-52	$\mu\text{m}$
Usable bunch length	50		%
Compression factor	85	25-150	
Slice energy spread	0.5	0.15-1.5	MeV

# ERL用に開発した技術はCW-XFEL用にも利用可能

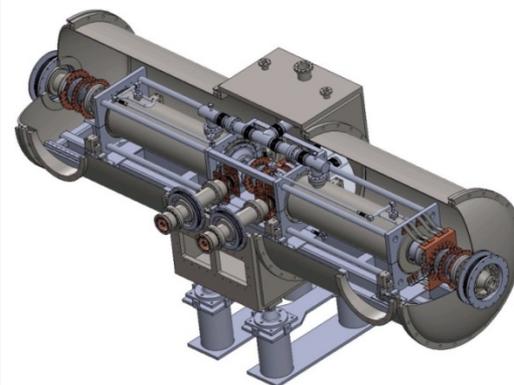
光陰極DC電子銃



入射器超伝導空洞



主加速用超伝導空洞



ERL技術  
@KEK/JAEA

低エミッタンス、  
CWのビームを  
生成・加速できる

+



X-FEL技術 @SACLA  
(Nature Photonics **6**, 505.)

長尺アンジュレータ、FEL発振、利用

最終的には、硬X線領域が目標

X-FELのCW化が可能

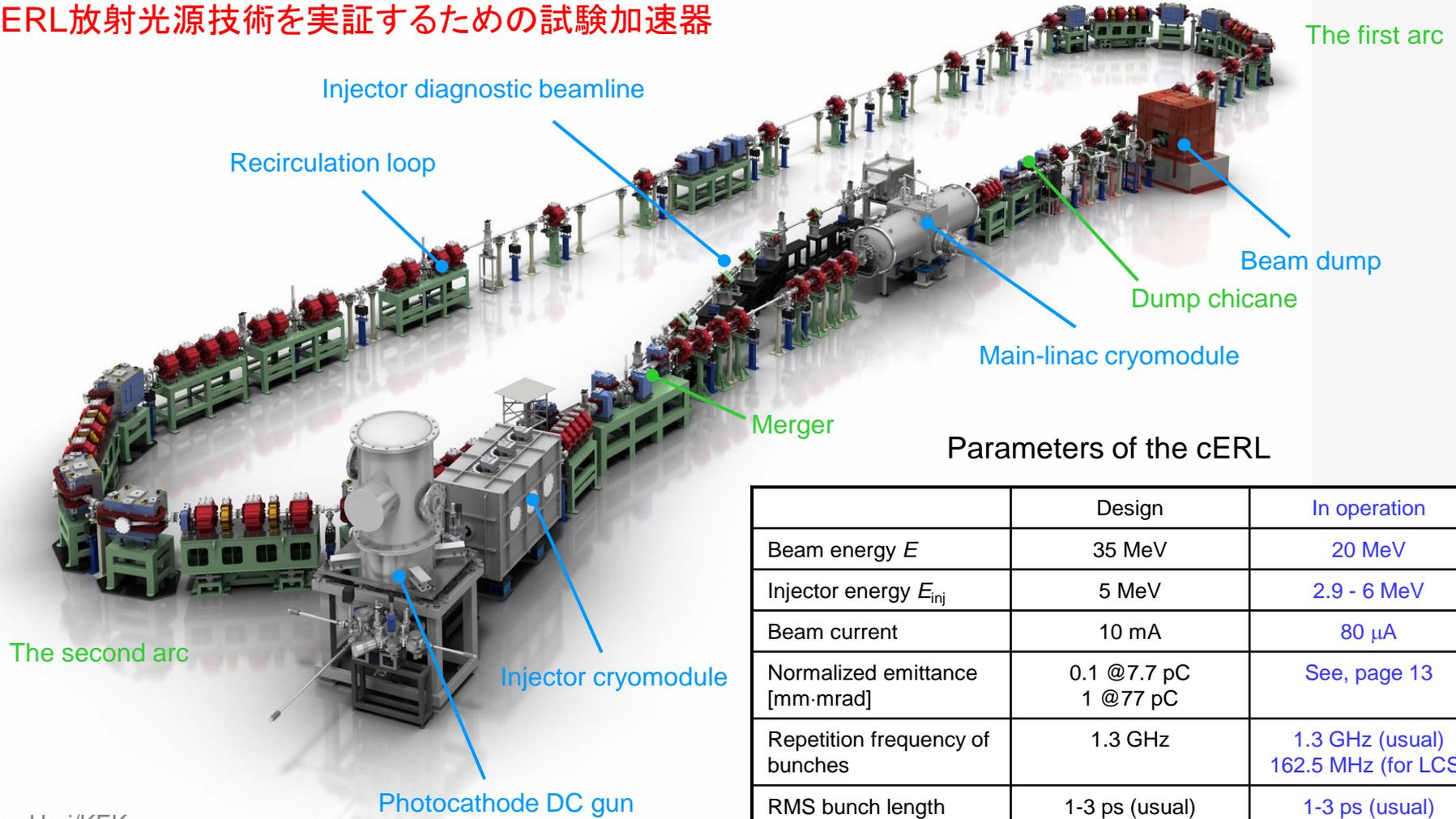
# 超伝導先端光源のまとめ(私見)

- 3 GeV ERL計画では、平均輝度  $B = 10^{20} \sim 10^{22}$  が期待される。高繰り返し・超短パルス光も発生可能である。
  - 平均輝度では、「第4世代」リングと競合している
- 約10年間のR&Dにより、ERL用の多くの技術が開発された。性能向上が必要な部分もあるが、「改善」で対応可能である。
- XFELのCW化が今後の流れである
  - 高繰り返し化により、FELは高平均輝度光源としても魅力あるものになる
  - 高輝度CW電子銃、超伝導空洞が鍵となる技術である
  - 米国ではLCLS-II (0.2-5 keV) が、ヨーロッパではEuro-XFEL (長パルス運転) が進行中である。
  - ERL用に開発した高輝度CW電子銃、超伝導空洞技術を転用すれば、我が国でもCW-XFELが実現可能
- XFEL-Oは、CW-XFEL (SASEまたはseeded-FEL型) の発展形である。平均輝度  $10^{26} \sim 10^{28}$  が狙えるが、技術的難易度は通常のCW-XFELより高い(主にX線光学系)

## 4. コンパクトERLの開発状況

# コンパクトERL (cERL) @KEK

ERL放射光源技術を実証するための試験加速器



Parameters of the cERL

	Design	In operation
Beam energy $E$	35 MeV	20 MeV
Injector energy $E_{inj}$	5 MeV	2.9 - 6 MeV
Beam current	10 mA	80 $\mu$ A
Normalized emittance [mm·mrad]	0.1 @7.7 pC 1 @77 pC	See, page 13
Repetition frequency of bunches	1.3 GHz	1.3 GHz (usual) 162.5 MHz (for LCS)
RMS bunch length	1-3 ps (usual) ~ 100 fs (compress.)	1-3 ps (usual)
$E_{acc}$ in main linac	15 MV/m	8.2 MV/m
Gun high voltage	500 kV	390 kV
Max. heat load at 2K	80 W	100 - 80 W

©Rey.Hori/KEK

Circumference: ~ 90 m

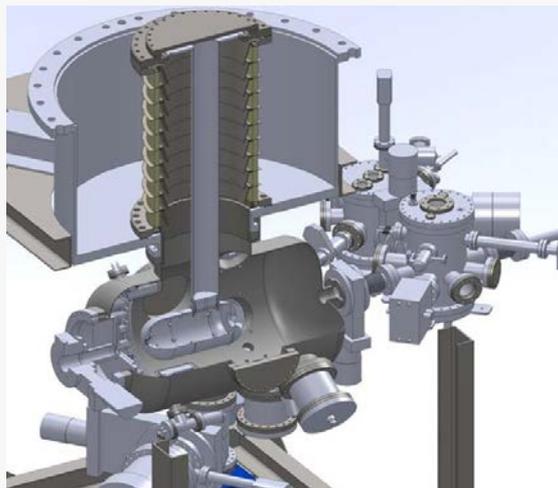
[26] N. Nakamura et al., IPAC'14, MORPO110.

[27] S. Sakanaka et al., IPAC'15, TUBC1.

# 鍵となる加速器技術

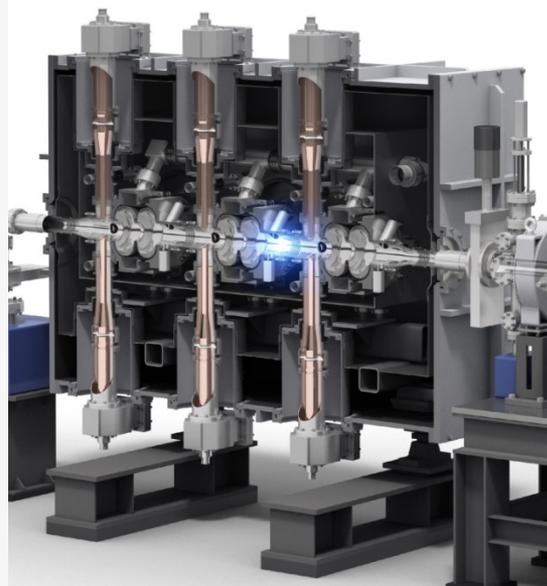
## 光陰極DC電子銃

- 低エミッタンスかつ大電流の電子ビームを生成可能
- 電圧: 500 kV (390 kVで運転中)
- GaAsフォトカソード、NEA表面
- ドライブレーザー: 532 nm



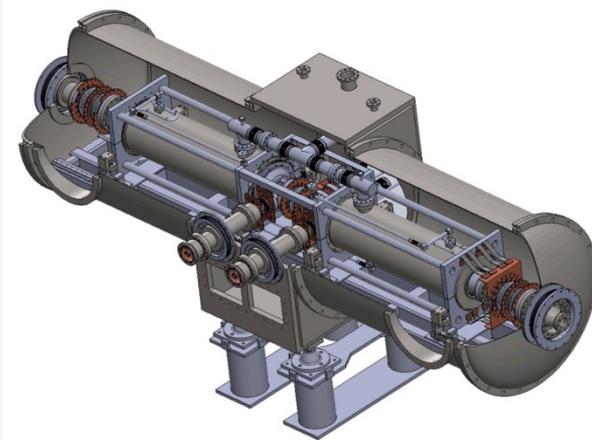
## 入射器用超伝導空洞

- エネルギー回収なしで、大電流の電子ビームを加速
- 2セル空洞を3台収納
- 運転温度 2K
- 加速勾配  $E_{acc}=3.2 - 7$  MV/mで運転中



## 主加速器用超伝導空洞

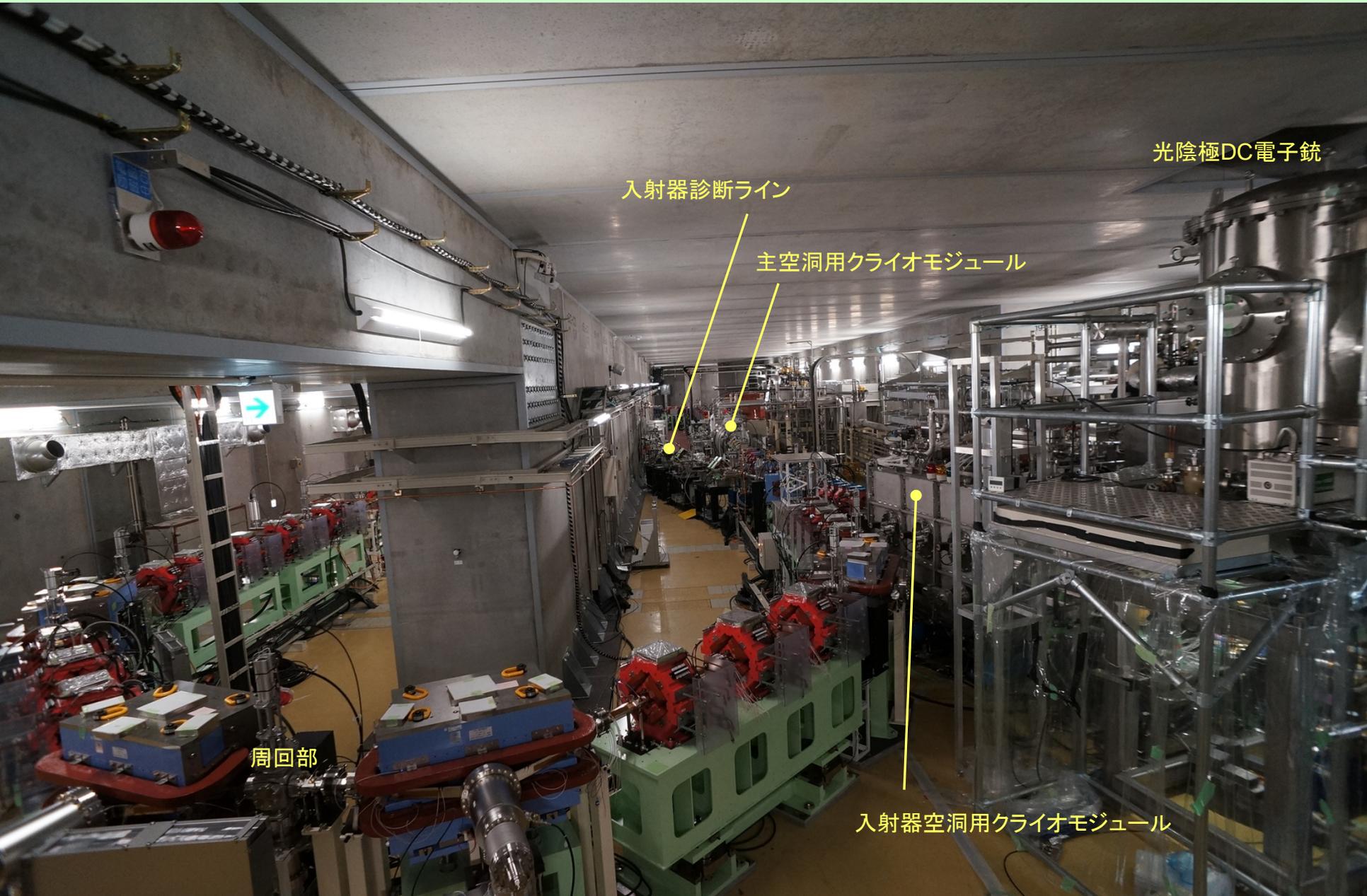
- エネルギー回収ありで、ビームを高電界で加速
- 高次モードを強く減衰
- 9セル空洞を2台収納
- 運転温度: 2K
- 目標加速勾配15 MV/m (8.2 MV/mで運転中)



[28] N. Nishimori et al., FEL2013, TUOCNO03. [29] E. Kako et al., IPAC2013, WEPWO013.

[30] K. Umemori et al., IPAC2014, WEPRI028.

# 完成したコンパクトERL



光陰極DC電子銃

入射器診断ライン

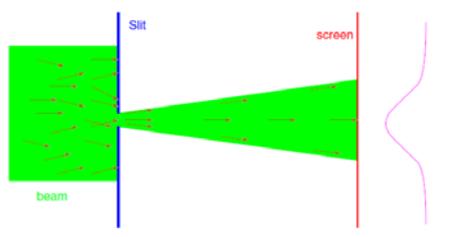
主空洞用クライオモジュール

周回部

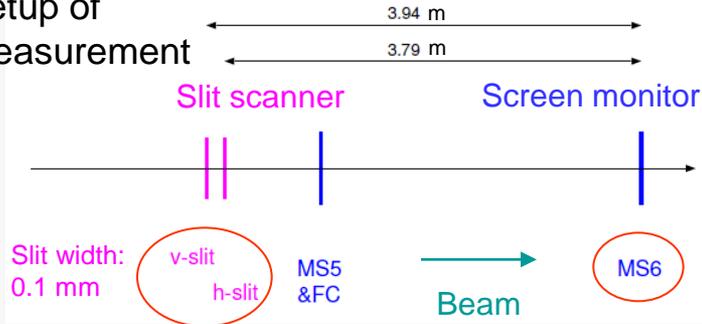
入射器空洞用クライオモジュール

# 入射器で低エミッタンスビームの生成に成功(2013年6月)

## スリットスキャン法



## Setup of measurement



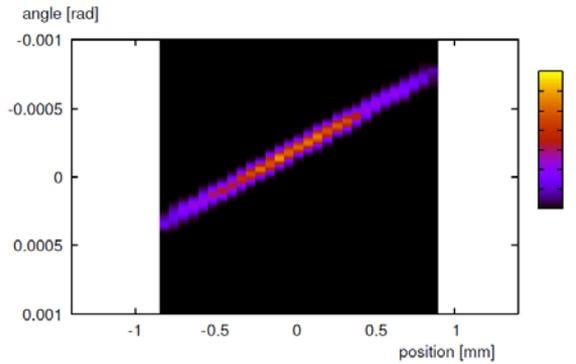
測定条件: 2013/6/21

バーストビームで測定(マクロ  
パルス幅: 1 ms、繰り返し5 Hz)

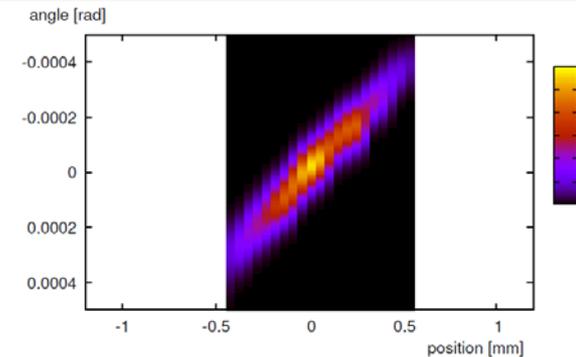
Laser: short-pulse (~3 ps rms)

Bunch charges: 0.02, 0.77 pC

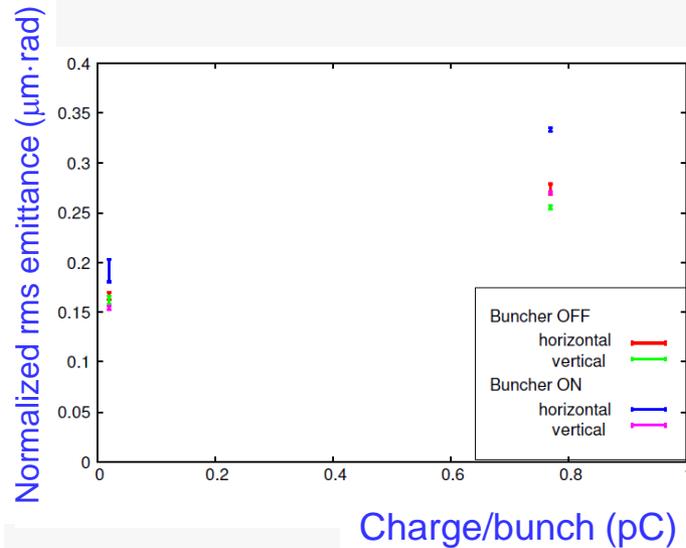
バンチ当たり電荷: 0.02 pC



Horizontal phase-space distribution



Vertical phase-space



エミッタンス測定結果(E=6.1 MeV):

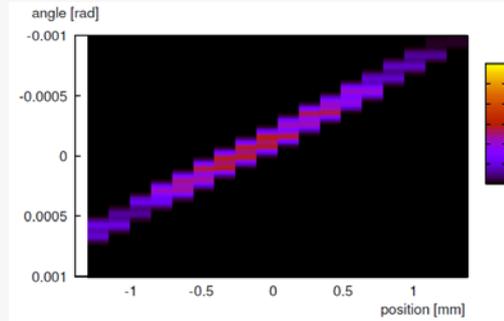
$\epsilon_n \approx 0.17 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$  at 0.02 pC

$\epsilon_n \approx 0.3 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$  at 0.77 pC

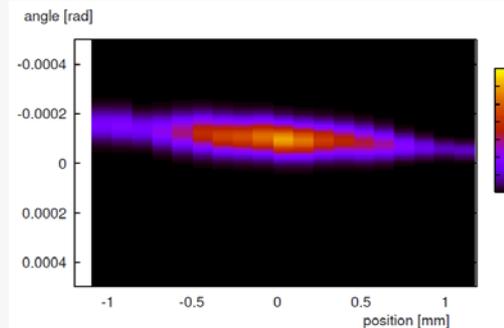
[31] 本田洋介ほか、第10回加速器学会年会、SUP011.

[32] S. Sakanaka et al., ERL2013, WG102.

バンチ当たり電荷: 0.77 pC



Horizontal phase-space



Vertical phase-space

# ビームの加速・周回に成功 (2014年2月6日)

## Beam energy ( $E$ )

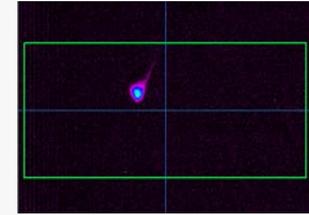
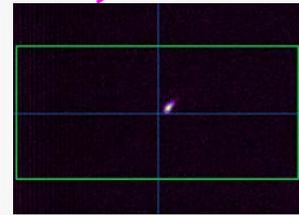
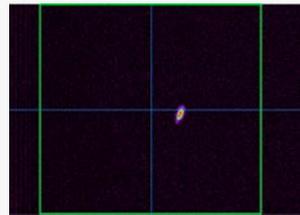
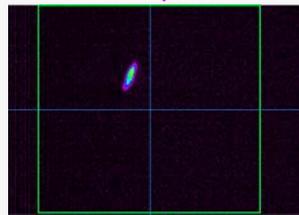
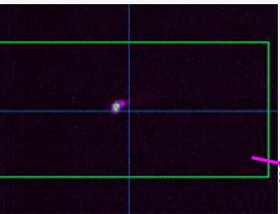
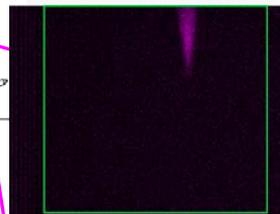
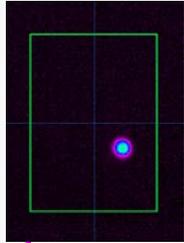
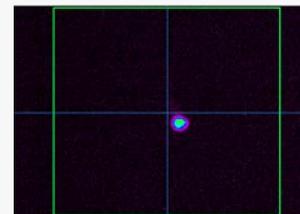
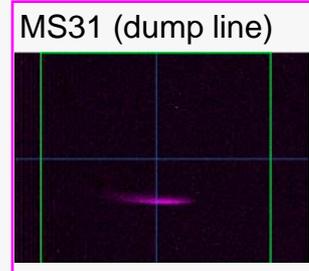
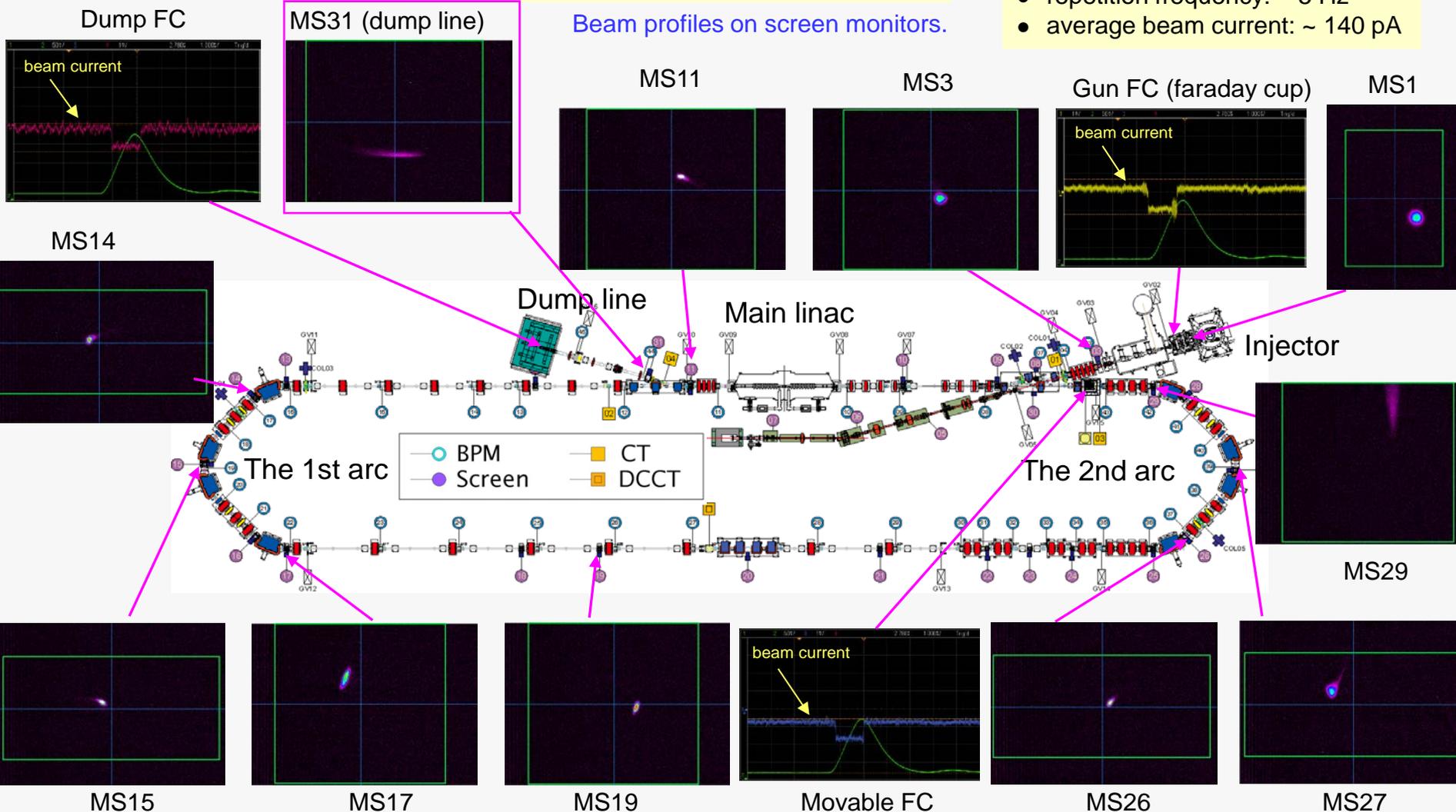
- Injector: 2.9 MeV
- Recirculation loop: 19.9 MeV

## Parameters

- Gun voltage: 390 kV    Buncher: OFF
- Injector cavities:  $E_{acc} = (3.3, 3.3, 3.1)$  MV/m
- Main-Linac cavities:  $V_c = (8.57, 8.57)$  MV

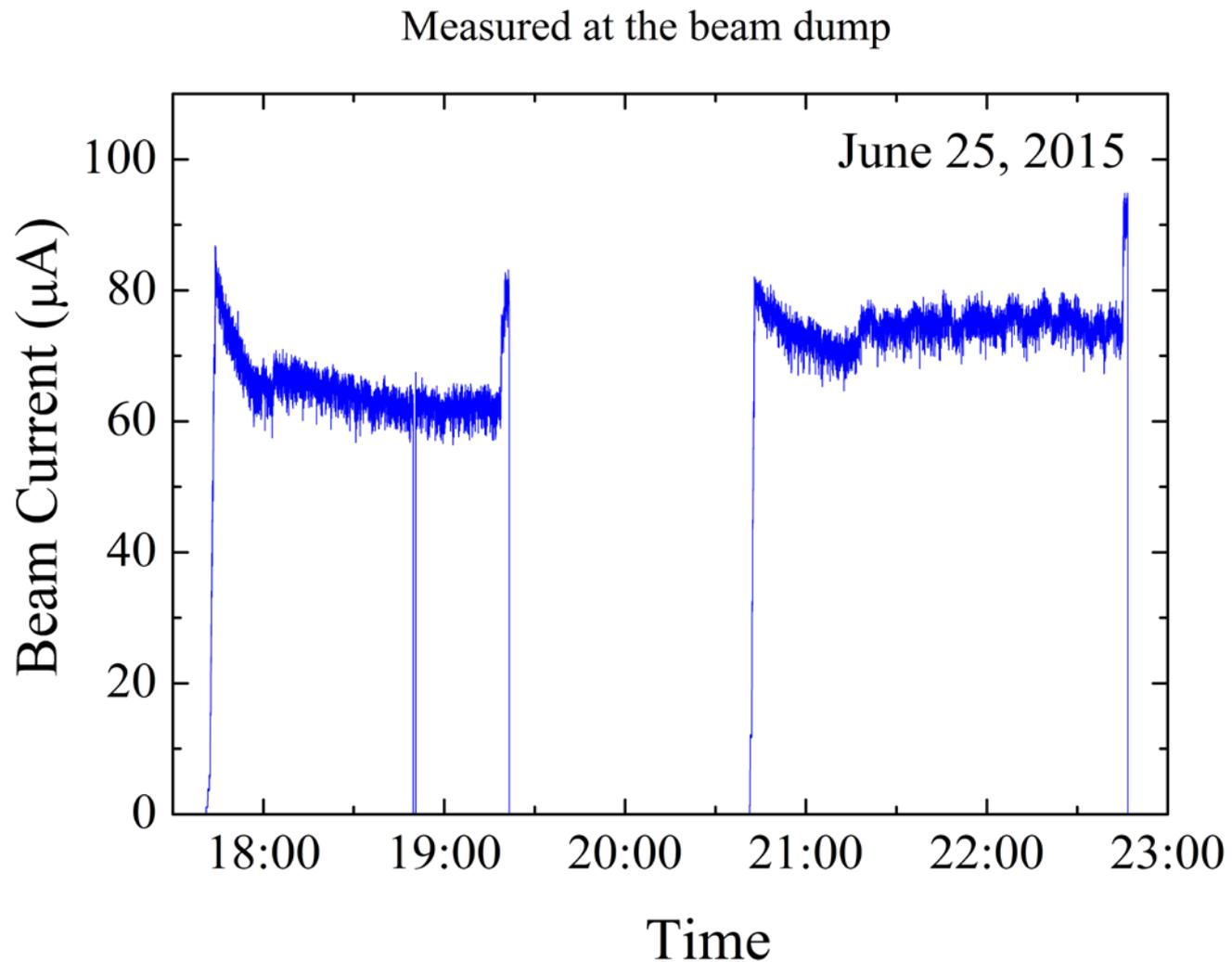
## Beam pulses (macropulse)

- peak current:  $\sim 24 \mu\text{A}$
- macropulse width:  $1.2 \mu\text{s}$
- repetition of bunches: 1.3 GHz
- repetition frequency: 5 Hz
- average beam current:  $\sim 140 \text{ pA}$

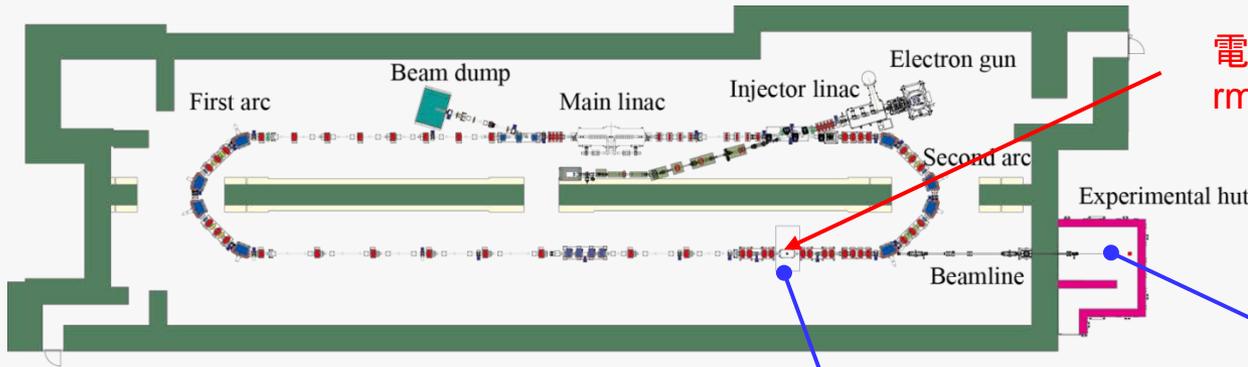


# ビーム電流 80 $\mu\text{A}$ (CW)の周回に成功(2015年3-6月)

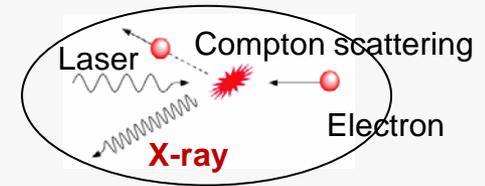
2015年度内にビーム電流1mA達成に向けて、放射線変更申請の準備中



# レーザーコンプトン散乱X線の発生に成功(2015年3月)



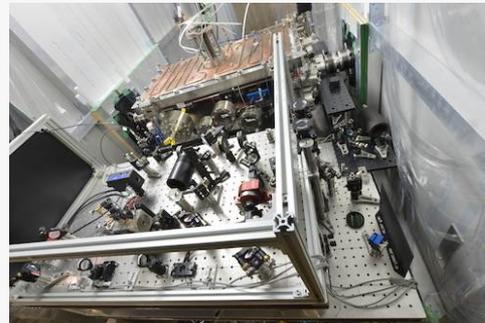
電子ビームとレーザーを共に約 $30 \mu\text{m}$  rms に絞って衝突させ、7 keV X線を発生



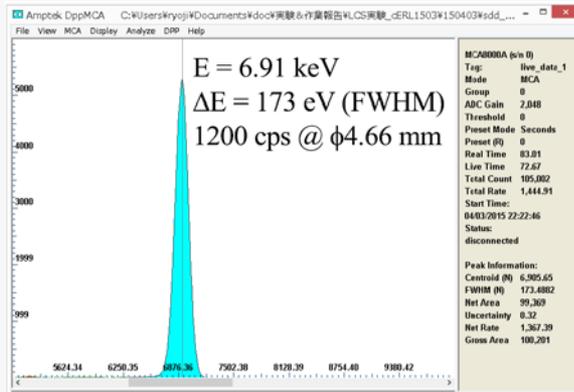
主要なパラメータ

Electron beams:	
Energy	20 MeV
Repetition rate	162.5 MHz
Max. current	80 $\mu\text{A}$
Laser:	
Wavelength	1064 nm
Repetition rate	162.5 MHz
Produced X-ray	
Photon energy	6.9 keV

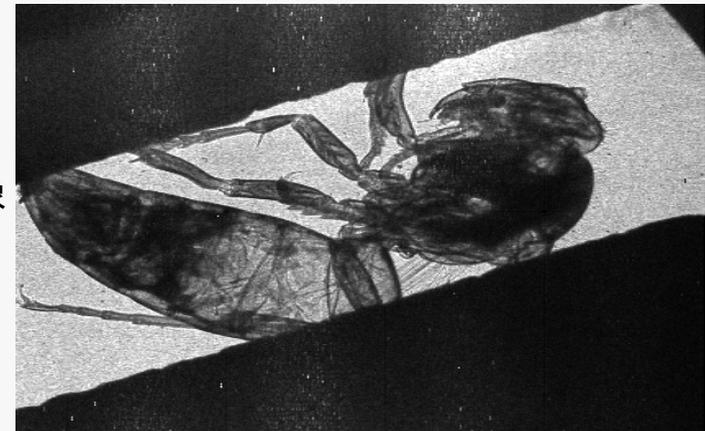
レーザー光蓄積共振器と45Wレーザー



実験ハット



LCS X線で撮影されたハチの画像

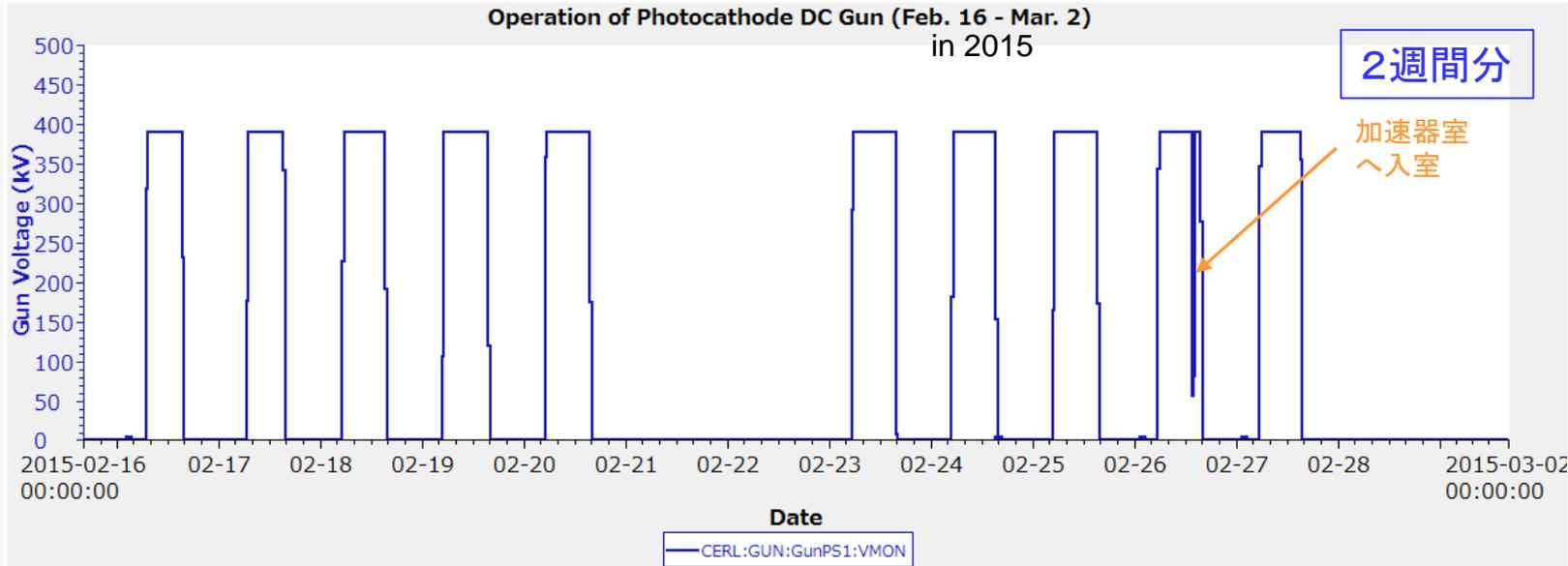


測定されたX線のスペクトル (SDD検出器)

# 電子銃と超伝導空洞の安定な運転の例 (2015年2月後半)

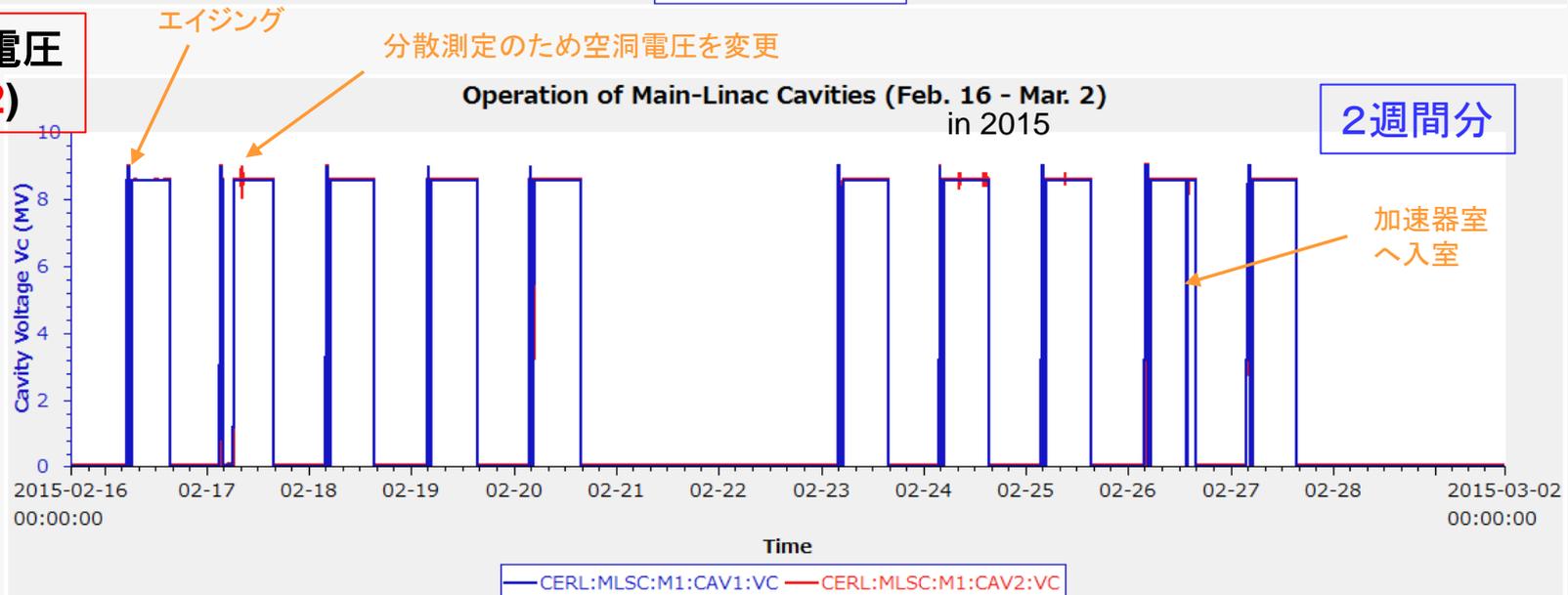
電子銃電圧

0 - 500 kV



主加速空洞の電圧  
(ML-1, ML-2)

Accelerating  
voltage/cavity  
(MV)



## cERL利用の可能性

- ERLでは、超短バンチ(バンチ長: ~100 fs)の電子ビームを大強度で周回させることが可能
  - 通常のリニアックでは、大強度にできない
  - 蓄積リングでは超短バンチにできない(多数回周回のため)



コヒーレント放射光を用いた**大強度テラヘルツ光源**として利用可能。  
高繰り返しで平均強度の高いテラヘルツ光が得られる。

90度でレーザーコンプトン散乱をすれば、**フェムト秒X線源**としても利用可能

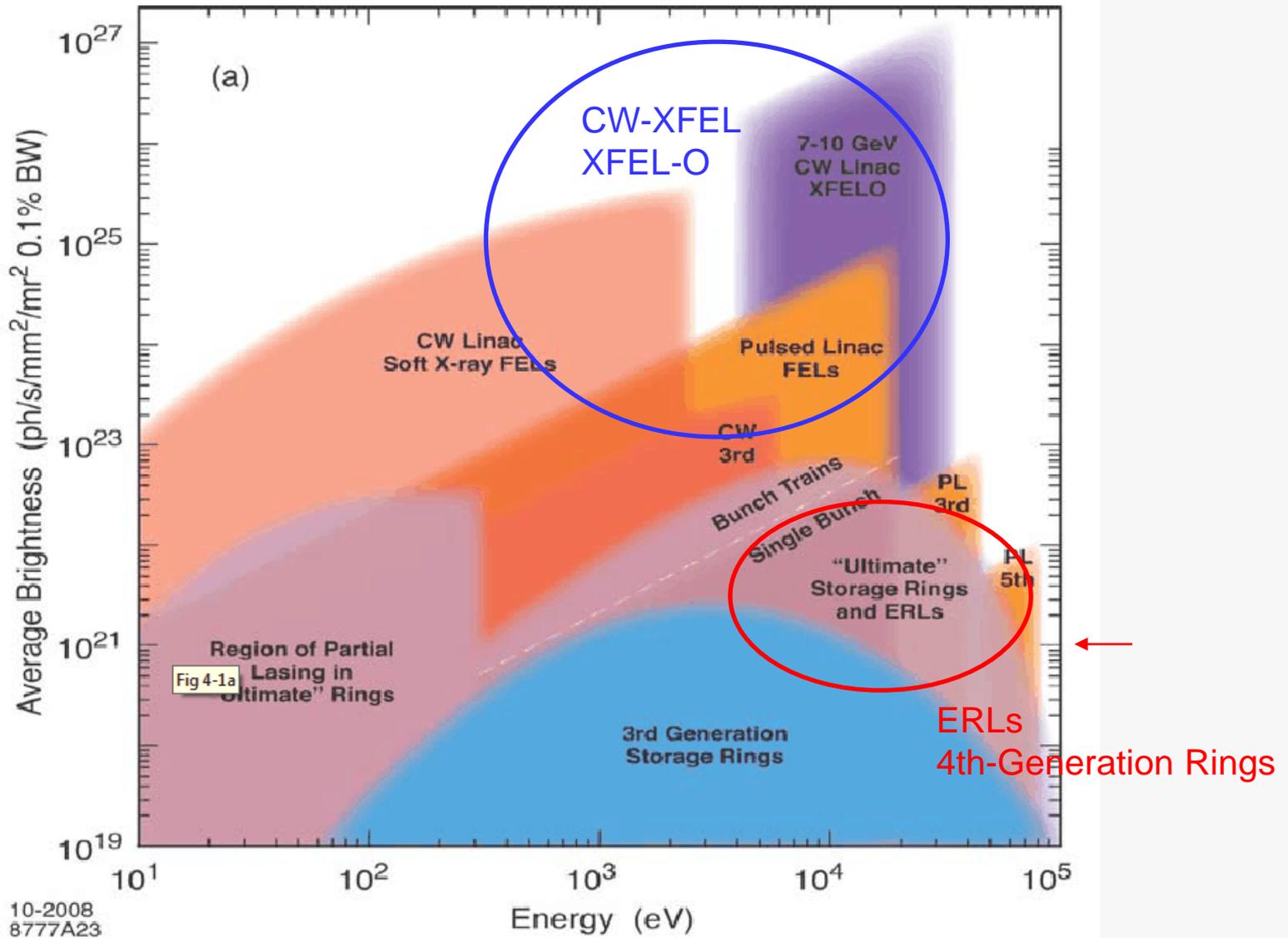
- レーザーコンプトン散乱では、微小(~30 μm)サイズの光源から大角度(約25 mrad)で発散するX線が得られる
  - X線のエネルギーを上げれば:  $E_{\text{ph}} \propto (E_{\text{beam}})^2$



レーザーコンプトン散乱X線を用いたイメージング実験

## 5. まとめ

# 平均輝度



[35] Figure is cited from: R. Hettel, "Performance Metrics of Future Light Sources", talk at FLS2010.