

ERLをベースにした ガンマ線光源とXFELの提案

ILCの多角的利用を考える会3
2018年11月13日（火）
3号館セミナーホール

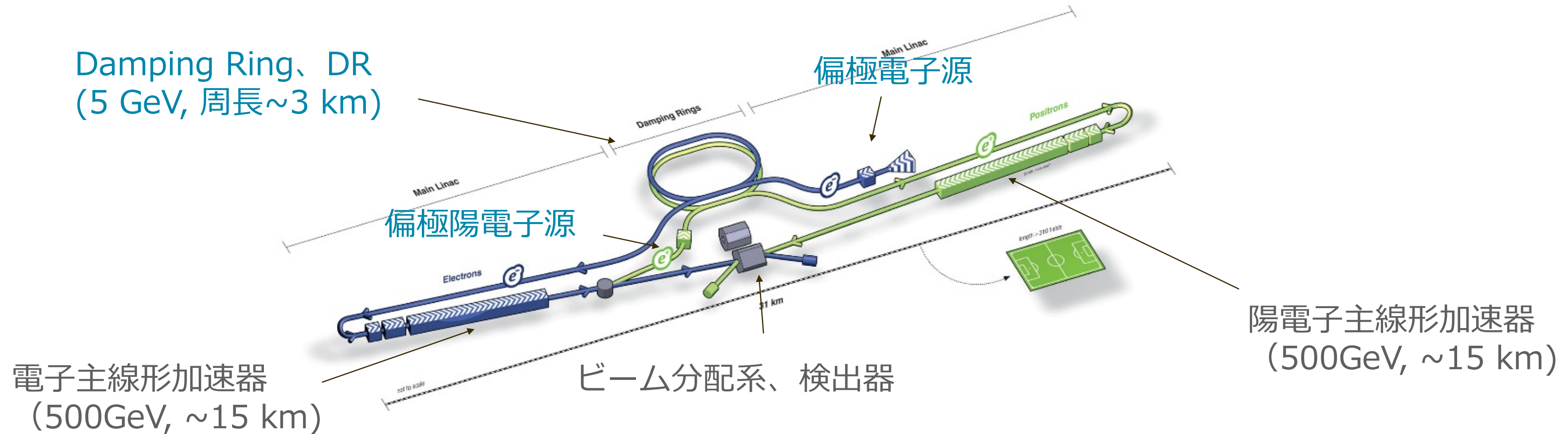
高エネルギー加速器研究機構
加速器第7研究系
島田 美帆

発表の流れ

- ERLガンマ線源による陽電子源の提案（2014年POSIPOL）
- ERL-XFELの提案

国際リニアコライダー計画(ILC)

- 250GeV~1TeVの電子・陽電子衝突型線形加速器
 - 最大30kmのTESLA型超伝導線形加速器
- ILC入射部は中央に配置
 - 電子・陽電子源、5GeV線形加速器



ILC陽電子源

1. ベースライン案

- アンジュレータ γ 線による陽電子源
- 150 GeV電子ビーム、200mヘリカルアンジュレータ、10MeV偏極 γ 線で偏極陽電子生成

2. バックアップ案

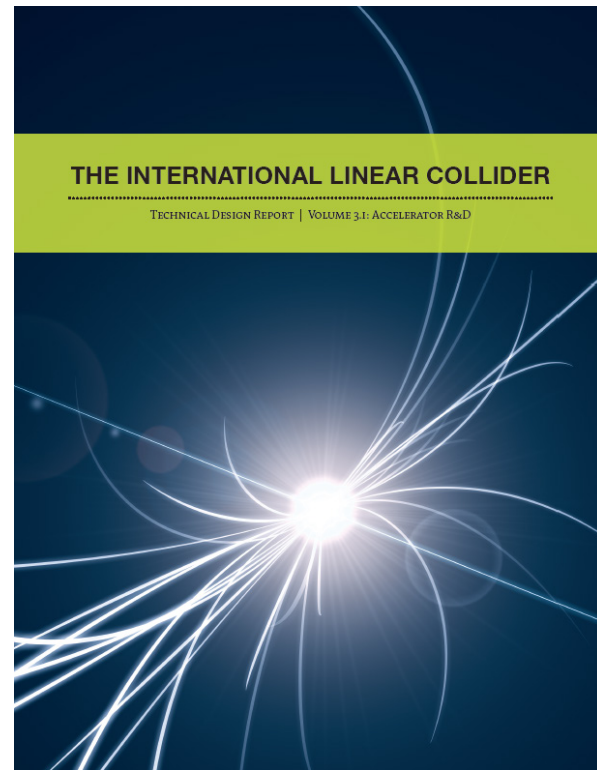
- 5-6GeV電子ビーム、常伝導加速器ロングパルス運転、電子照射による無偏極陽電子源(2014年当時)

■ その他

1. 1-2GeV電子ビーム、ERLor蓄積リング、レーザー逆コンプトン散乱 γ 線で偏極陽電子生成
2. 5-6GeV電子ビーム、超伝導加速器ロングパルス運転、電子照射による無偏極陽電子源
3. 5-6GeV電子ビーム、ERL、CSR逆コンプトン散乱 γ 線で偏極陽電子生成

など

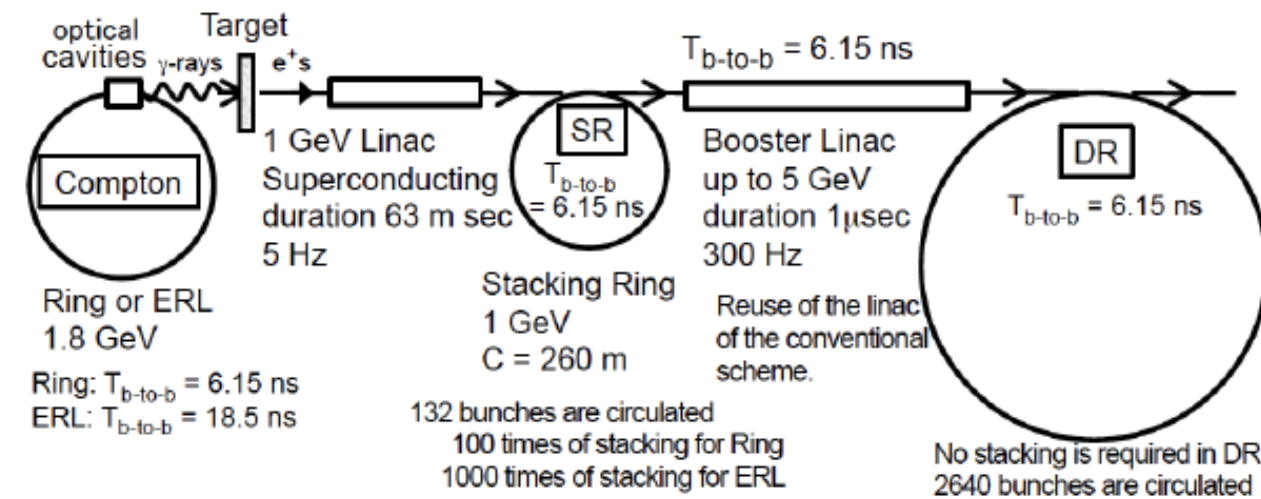
Compton Source in ILC-TDR



ilc international linear collider

Laser - inverse Compton scattering scheme is proposed for **highly polarized positron source**

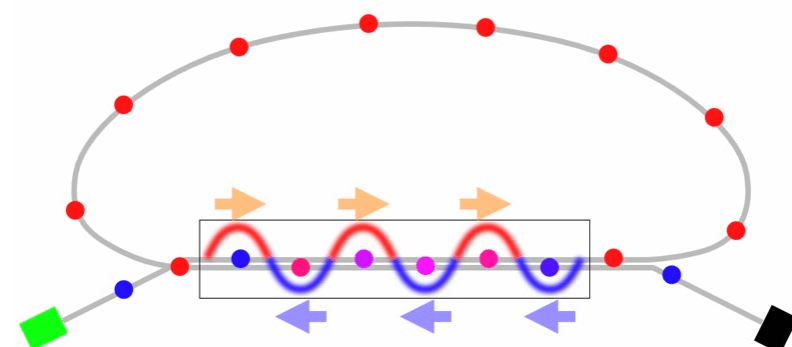
Figure 4.19
The conceptual design of Ring-Compton and ERL-Compton for the future upgrade from the 300 Hz conventional positron source.



Pros and cons of ERL

Three scheme in TDR

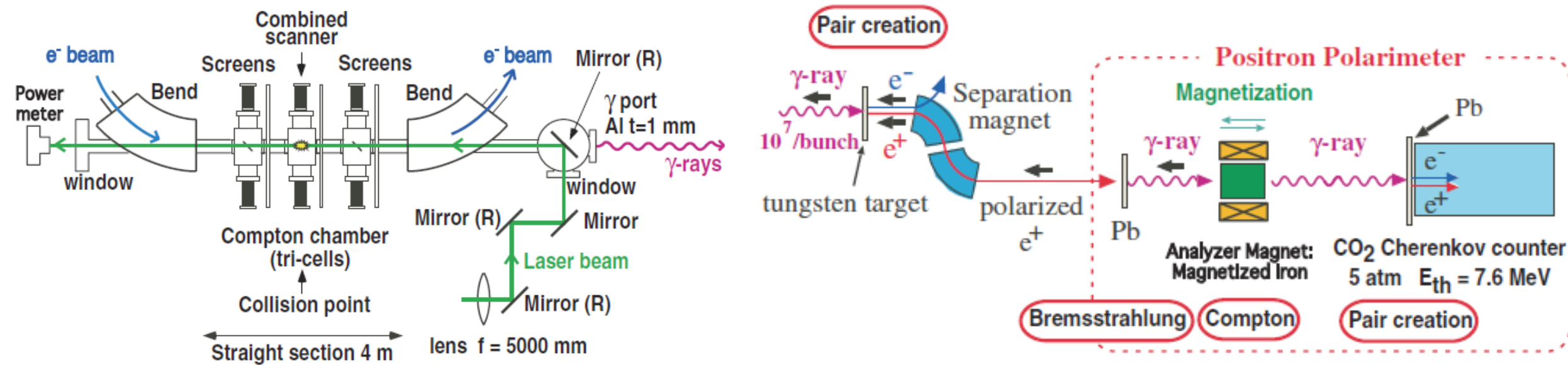
- Linac- Compton
- Ring - Compton
- ERL - Compton



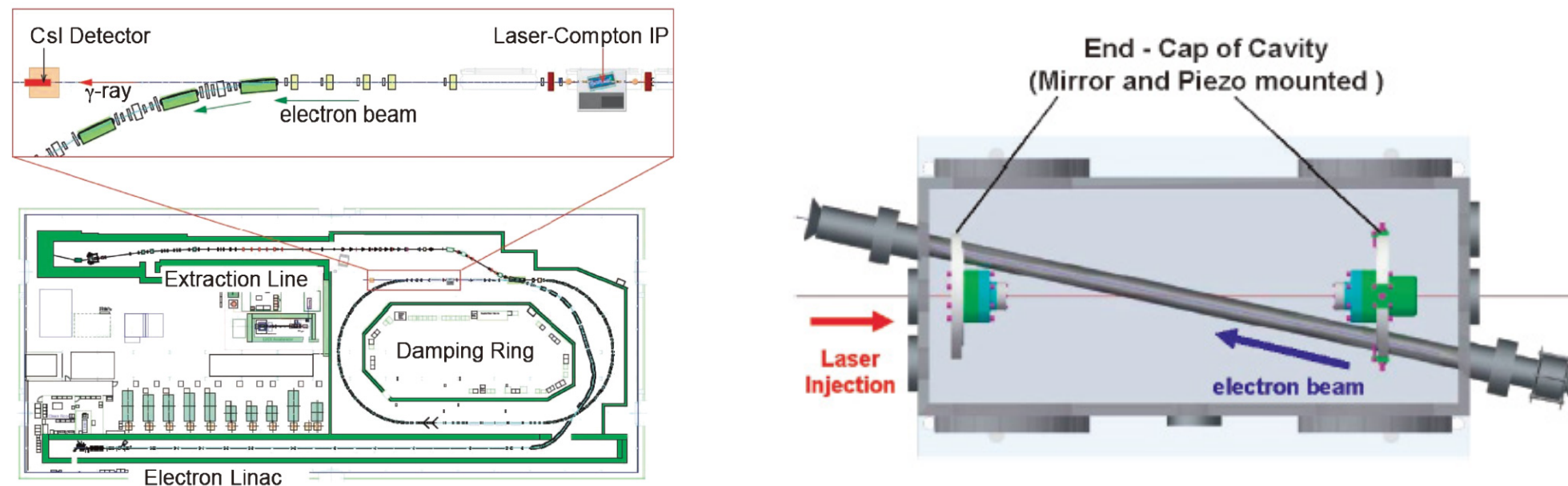
	Pros of ERL	Cons of ERL
Linac	Higher beam current Lower dump energy	Recirculation loop is necessary
Ring	Higher beam quality	Lower beam current (Limited by HOM heat load of superconducting cavity)

KEK-ATFにおける逆コンプトン散乱実験

“Efficient propagation of polarization from laser photons to positrons through Compton scattering and electron-positron pair creation”
 T. Omori et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 114801 (2006)



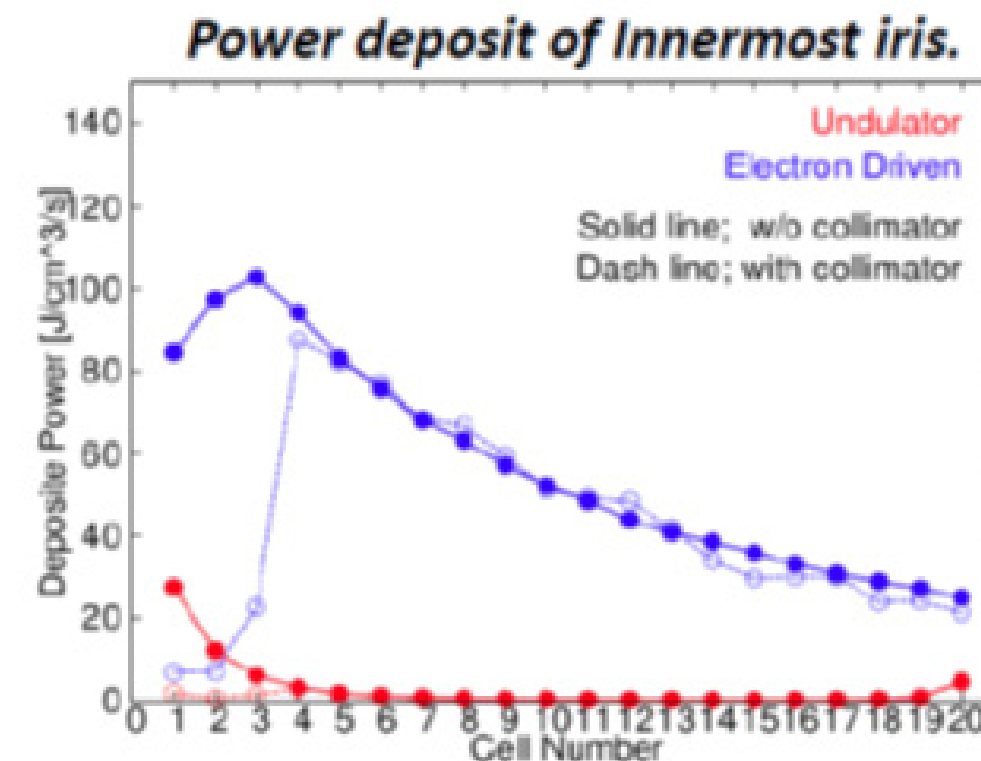
“Photon generation by laser Compton scattering using an optical resonant cavity at the KEK-ATF electron ring”
 H. Shimizu et al., J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 074501 (2009)



陽電子源ターゲットの熱負荷低減

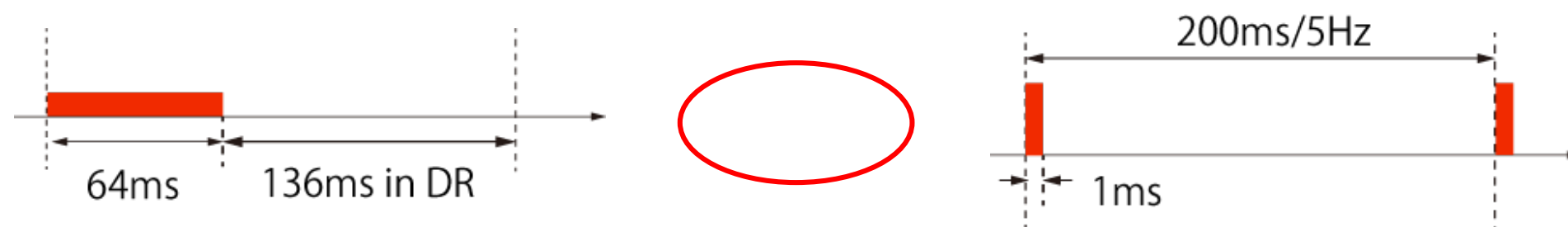
■ ガンマ線による陽電子生成

- ガンマ線による陽電子生成は電子駆動より熱負荷が小さい
- ヘリカルアンジュレータで10MeVのガンマ線を生成
- 150 GeV電子を使うため、ロングパルス運転がコスト的に不可能



■ ロングパルスによる陽電子生成

- 電子のエネルギーが数GeV程度である必要
- ターゲット付近のパルス長を数十倍に伸長して熱負荷の問題に対応
- 現在の案は電子駆動型（ガンマ線より熱負荷高め）



ターゲット付近

Damping Ringパルス整形

250-1000Gev linac

逆コンプトン散乱ガンマ線光源の陽電子源

TDRベースライン (アンジュレーター案)	ガンマ線	ショートパルス (1ms)
バックアップ案	電子駆動	ロングパルス (~60ms)
逆コンプトン散乱	ガンマ線	ロングパルス (~60ms)

■ メリット

- ロングパルスのガンマ線でよりターゲット負荷を低く
- 偏極陽電子源が可能

■ 課題

- ダンピングリングでのスタッキングが必要になる。
- 難易度が高く、十分なガンマ線量が生成できない可能性。
- 中赤外領域のCSRを使う場合高反射率ミラーの開発が必要→波長の変更を検討中

CSRによる逆コンプトン散乱

Photon energy of inverse Compton scattering

$$E_X = \frac{4\gamma^2}{1+K^2} E_L$$

Head-on collision
circular polarization

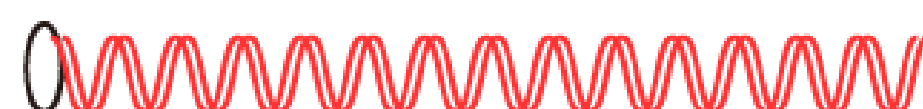
E_X : Energy of scattered photon E_L : Energy of laser γ : Lorentz factor K : Deflection parameter

Incoherent



$$P(k) = Np(k)$$

Coherent



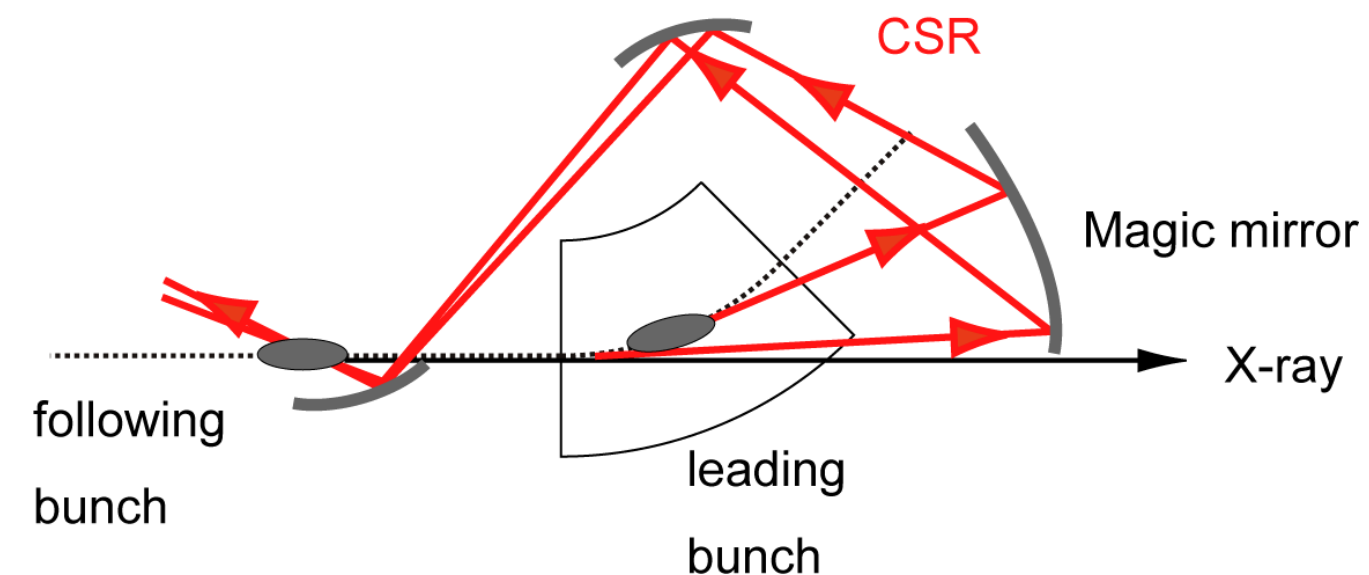
$$P(k) = N^2 p(k)$$

$P(k)$: total radiation power

N : number of electrons

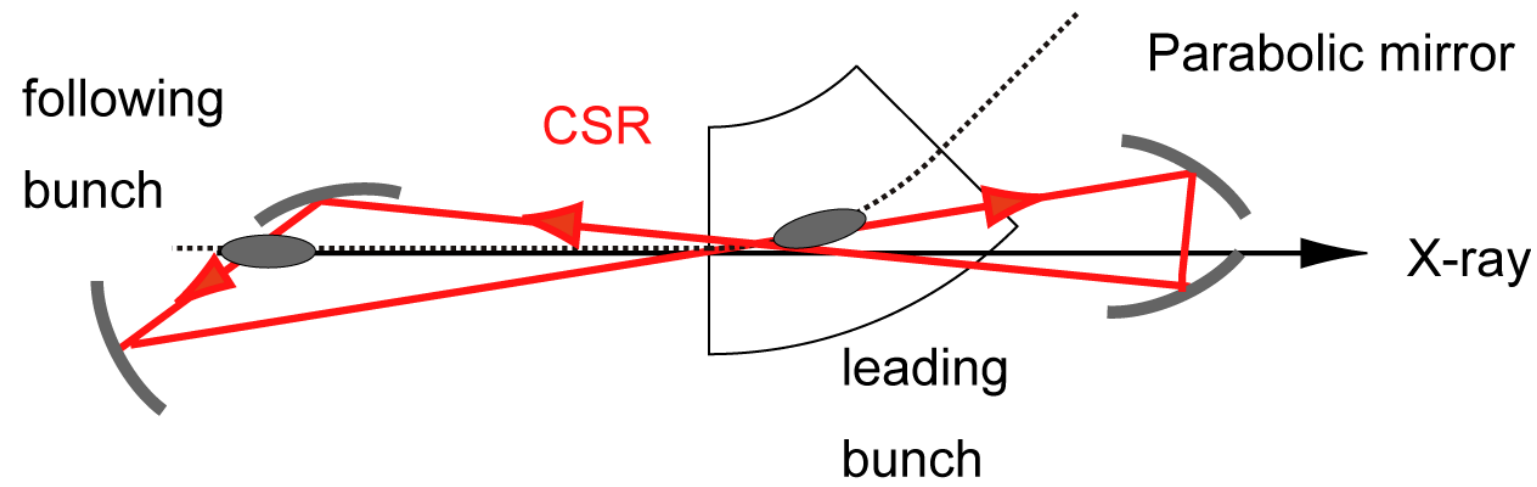
$p(k)$: radiation power per electron

CSR - ICS



CSR emitted from a leading bunch collides with a following bunch after reflection of a mirror

CSR pulse in optical cavity



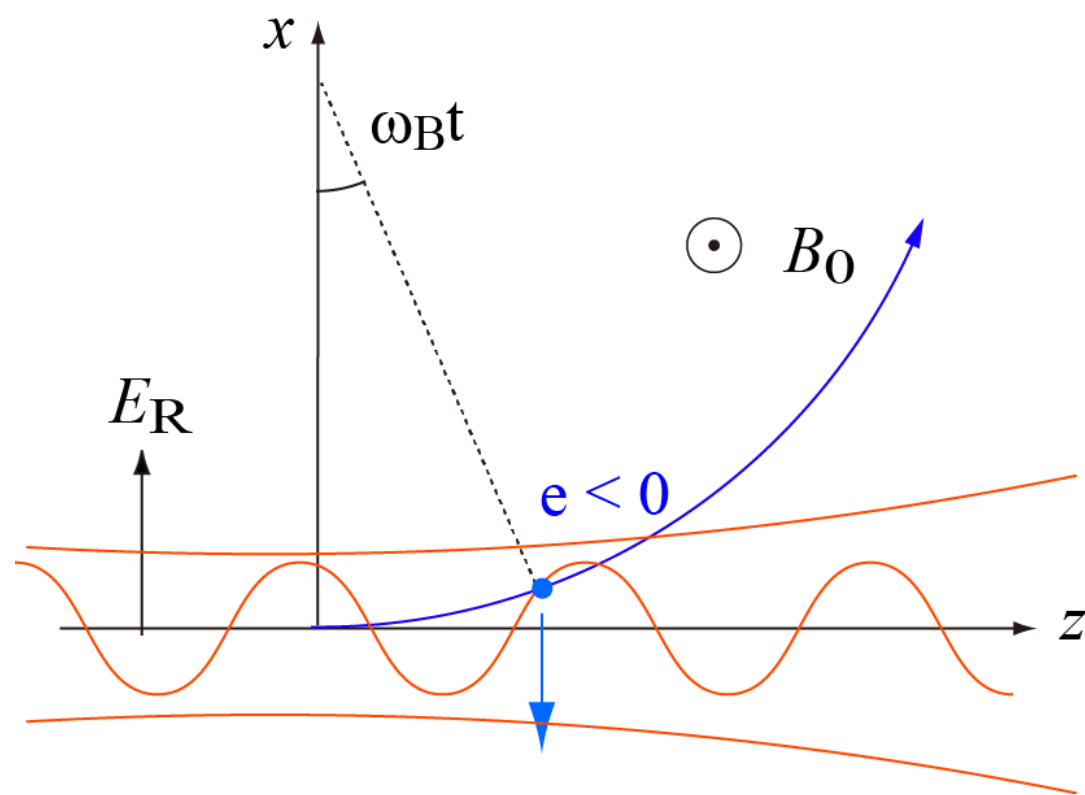
Equation of motion

It is determined by only magnetic field of a bending magnet

$$\frac{d}{dt}(\gamma m_0 \mathbf{v}) = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\sim e\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0$$

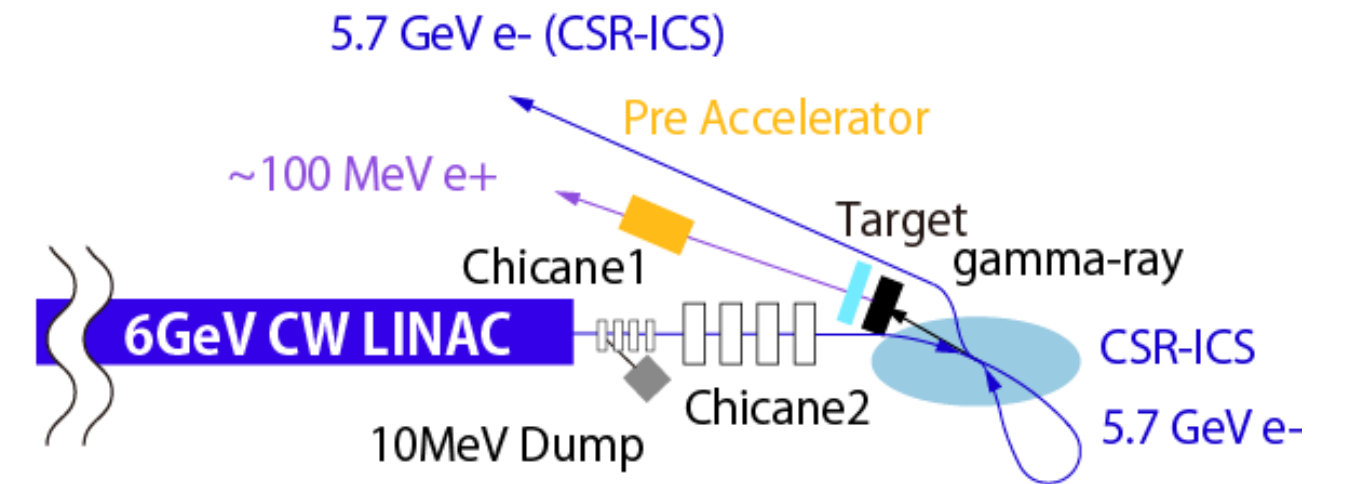
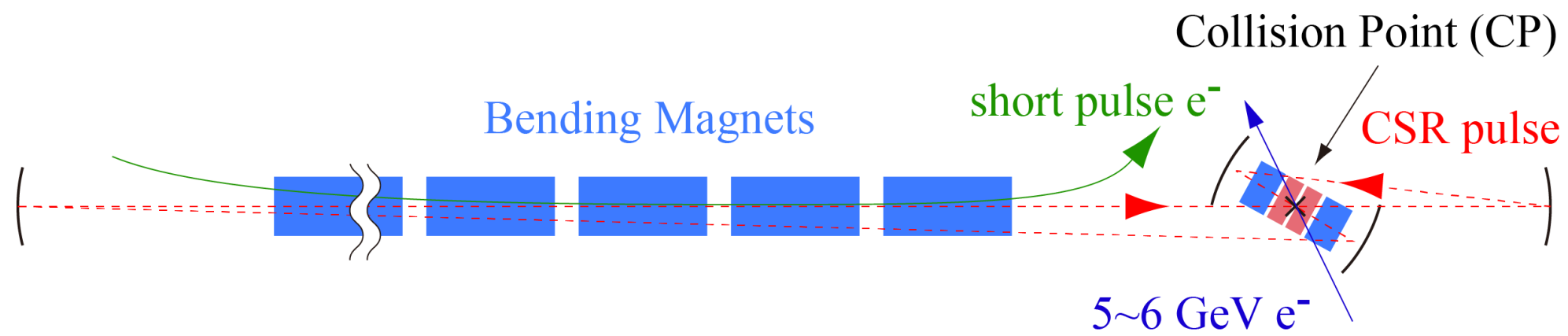
B_0 : magnetic field of bending magnet



Change in electron energy U_B

$$\frac{dU_B}{dt} = m_0 c^2 \frac{d\gamma}{dt} = e\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}_R$$

CSR逆コンプトン散乱のレイアウトおよび ガンマ線量の見積もり



$$N_\gamma \sim \pi \alpha K^2 N_R$$

Deflection parameter : K
 Fine-structure constant : α

K. -J. Kim et al, Nucl. Instrum. Meth. A. **341**, (1994) 351

Energy of γ -ray : 10 MeV

Number of γ -ray, N_γ : 2×10^{10} phs./bunch

Number of positron beam : 2×10^8 /bunch

at 3~4 MHz with quasi-CW

the conversion efficiency is assumed to be 1%

100 times stacking is needed at the dumping ring

主要パラメータ

今後再検討する予定

電子バンチ

Electron energy	5 ~ 6 GeV (off crest Acc.)
Normalized emittance	$10^{-3} \sim 10^{-4}$ mrad
Bunch length (rms)	24 fs
Energy spread	< 300keV
Electron charge	3 nC
Beam current	5 mA

Optical cavity

Wavelength, λ_R	45 μm
Spot size w_0 at CP	250 μm
Size w at mirror	4.6 cm
Rayleigh Length	4.5 mm
Number of cycles, N_R	100
Deflection parameter, K	0.6
Finesse, F	500 π
Stacked CSR energy, U_R	8 J/pulse
Repetition rate	3 ~ 4 MHz

偏向電磁石

Bending radius	2000 m
Critical wavelength	5 nm
Cutoff wavelength	1 mm (h=10cm)
Beam size	60 μm ($\beta = 0.5\text{m}$, $\eta \sim 0\text{m}$)

中赤外の高反射率ミラーはまだ作られていない。

ミラーの熱負荷が問題

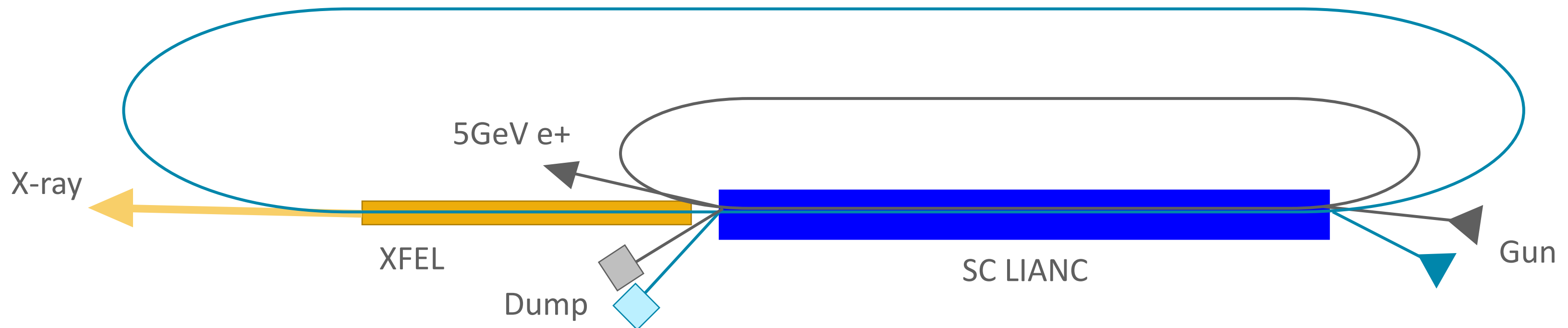
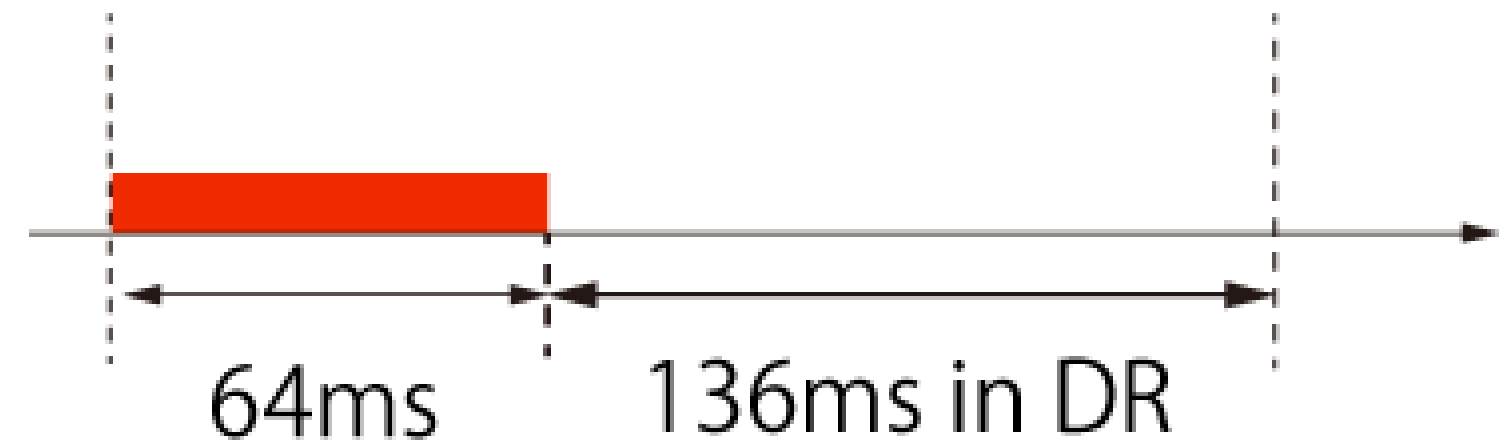
CW超伝導空洞による陽電子源とERL-XFEL加速器の提案

■ 偏極陽電子源としてERLを利用

- DRに蓄積する時間入射しない

■ XFELとして5-6GeVの超電導加速空洞を共有

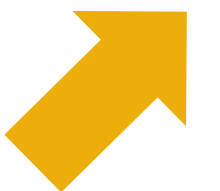
- ILCが使わない時間空白を利用



XFEL施設

	Euro XFEL	LCLS	LCLS-II (SCRF)	SACLA	SwissFEL	PAL-XFEL	SHINE
Location	Germany	USA	USA	Japan	Switzerland	South Korea	China
Accelerator	Super	Normal	Super	Normal	Normal	Normal	Super
No. light flashes / sec	27,000	120	1,000,000	60	100	60	1,000,000
Max. electron energy	17.5 GeV	14.3 GeV	5 GeV	8.5 GeV	5.8 GeV	10 GeV	8 GeV
Length of the facility	3.4 km	3 km	3 km	0.75 km	0.74 km	1.1 km	-
Min. wavelength	0.05 nm	0.15 nm	0.25 nm	0.08 nm	0.1 nm	0.06 nm	0.05 nm
Peak Brilliance	5×10^{33}	2×10^{33}	1×10^{32}	1×10^{33}	1×10^{33}	1.3×10^{33}	1×10^{33}
Electron beam Average current*	~30uA	~0.03 uA	~ 100 uA	~0.02 uA		~0.06 uA	

ERL化



https://www.xfel.eu/facility/comparison/index_eng.htmlより抜粋

*のデータはほかの資料から推定

CW-XFEL@Euro XFEL

■ CW運転のメリット

- 電流を下げずに、X線パルス間隔をあけると、時間分解の測定に便利
- 電流がどちらかというとき大きくなるため、平均輝度が上がる。
- ビームの安定度が上がる。

■ デメリット

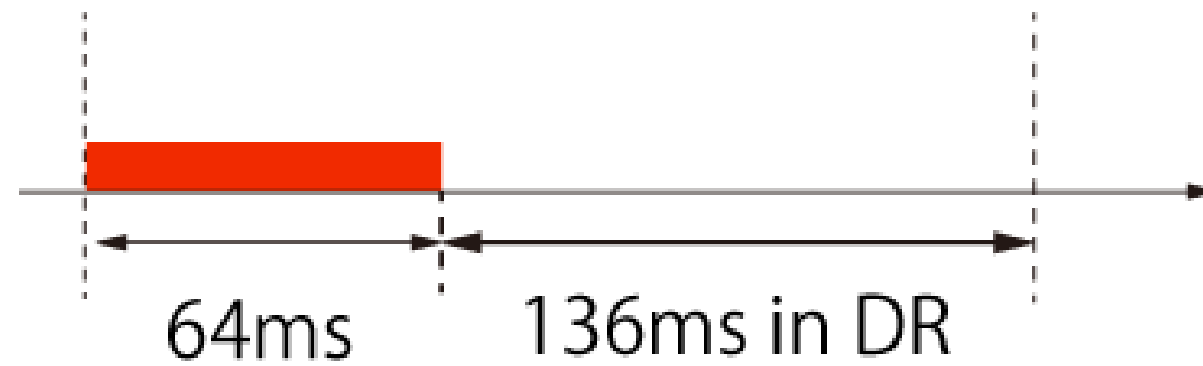
- 電子エネルギーが低くなるため、短波長のX線発振が困難。
- ピーク輝度は下がる。

■ Short pulse運転とCW運転をうまく切り替える。

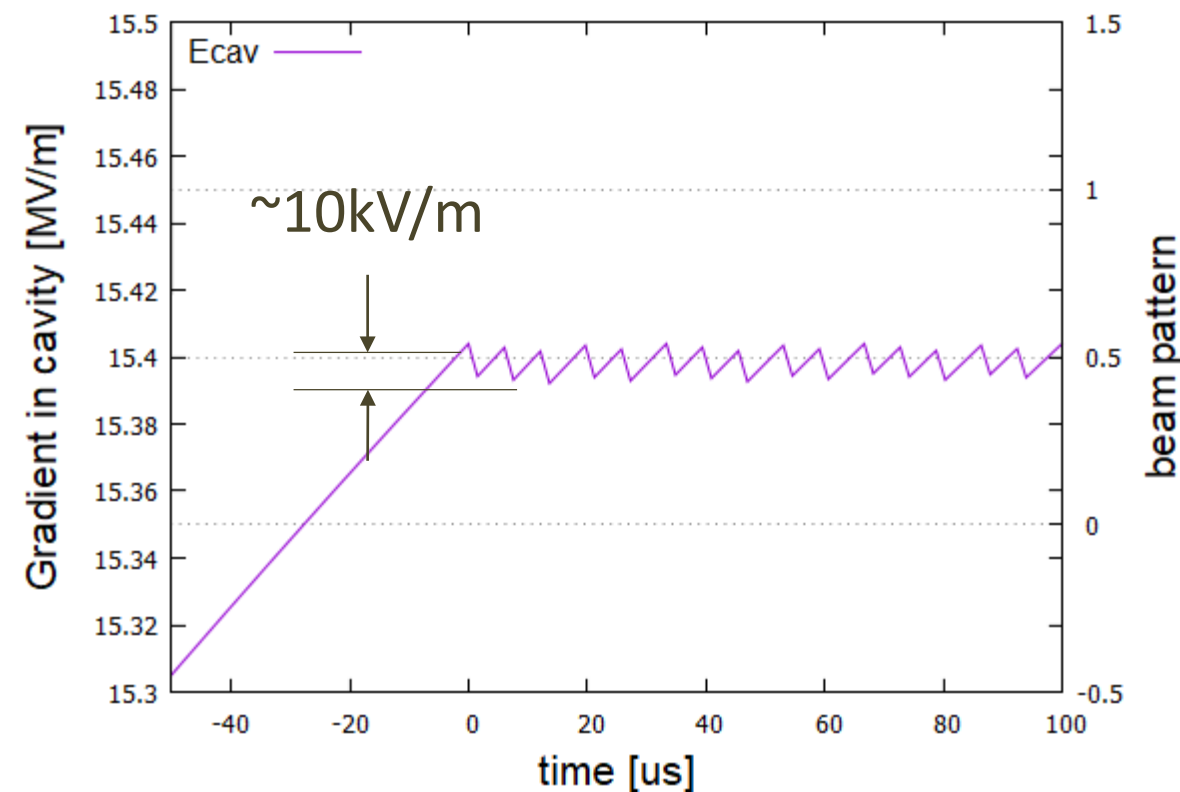
- ビームの質を上げたり、高次項発振で短い波長を目指す。
- 同じ挿入光源を使用するためか、真空封止アンジュレータは候補に挙がっていない。

	Short Pulse	Long pulse	CW
Time between bunches	0.24 us	4 us	4us
Max. beam energy	17.5 GeV	10 GeV	7 GeV
Acc. gradient	23.6 MV/m		7.3 MV/m
Max average beam current	~30uA		0.125 uA

RF加速勾配の安定度



ILC陽電子のバンチパターン



陽電子バンチによるビームローディングによる
RF加速勾配のふらつき

■ ILC陽電子源

- パルス長はおよそ60ms
- ダンピングリングで1msに変換

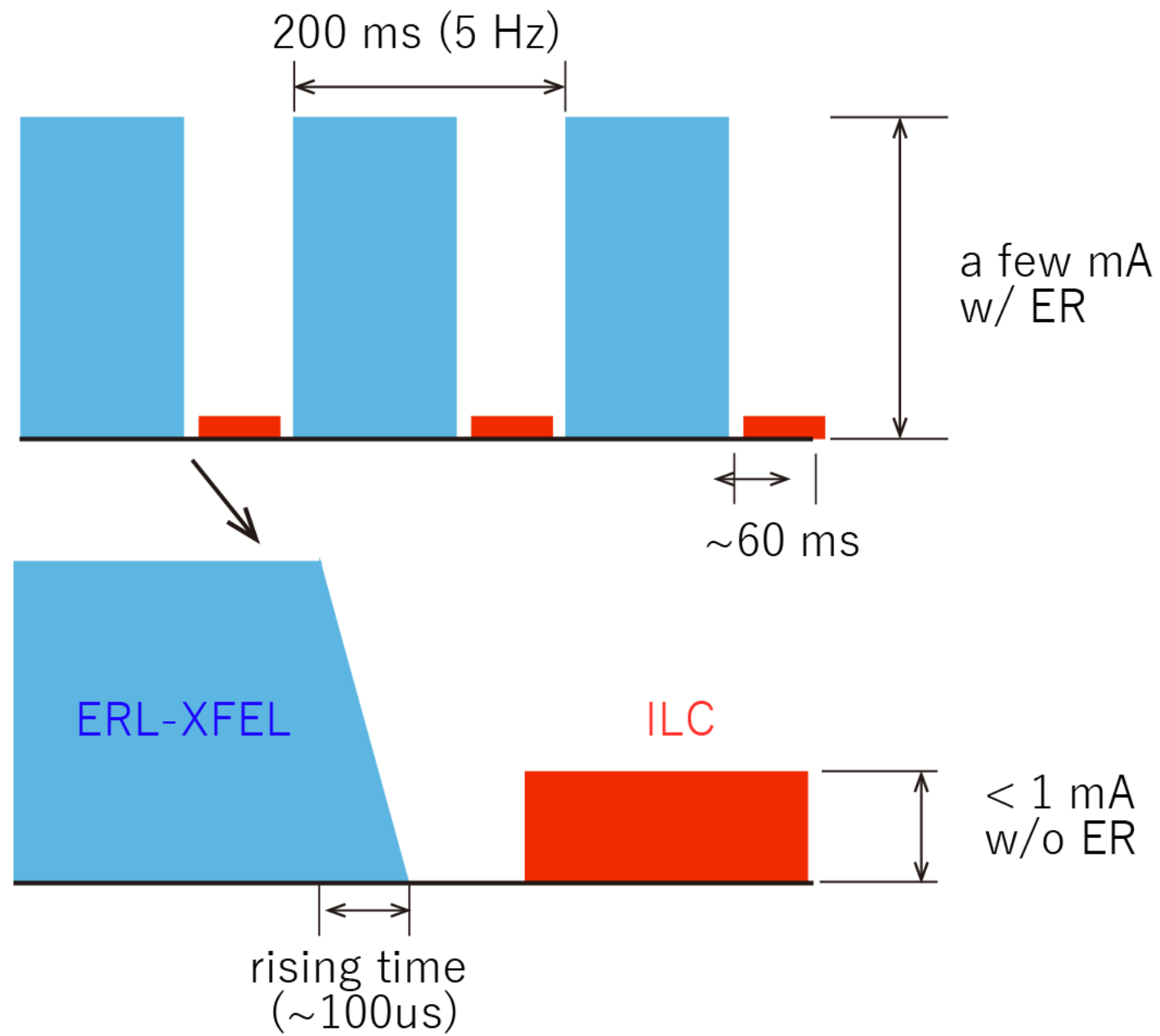
■ フラットトップのRF安定度

- 3nCの電荷量によりおよそ10kV/mの電圧低下。
- 加速勾配15MeV/mに対し、およそ0.1%の振幅変動

■ 放射光源の要求する安定度

- XFELのビームエネルギーは0.01%の安定度が要求される。
- ILCビームと重ねて0.1%のエネルギー変動を受けると、発振しない可能性あり。

パルス電流・パルスパターン



	エネルギー安定度 要求値	ロングパルス ピーク電流
ILC入射部 (CW空洞の案)	0.1%程度	< 500uA (e, e+, drive e-)
ERL-XFEL	0.01%程度	A few mA

■ ERL-XFEL, ILCはlong pulse運転

- ビームローディングによるエネルギーのふらつきを避けるため、パルス同士が重ならないように
- それぞれのパルスは空洞の時定数(数ms)以上の間隔を空ける。

■ ILCはエネルギー回収なし

- エネルギー回収で、メインダンプの熱負荷が下がるため、平均電流を数倍~10倍に上げることが可能。

まとめ

■ ERLをベースにしたガンマ線光源

- CSRの逆コンプトン散乱によるガンマ線光源・陽電子源の提案
- さらに熱負荷の小さい陽電子源を目指す。
- 偏極陽電子を生成可能

■ XFELにERLの適用

- CW-XFELよりさらに平均輝度の高い光源を目指す。

■ 陽電子源と放射光源の同時運転を提案している。

- 陽電子・放射光源のビームをロングパルス運転で切り替え