

# 陽電子源と放射光源の同時運転

ILCの多角的活用を考える会

2018年7月5日（木）

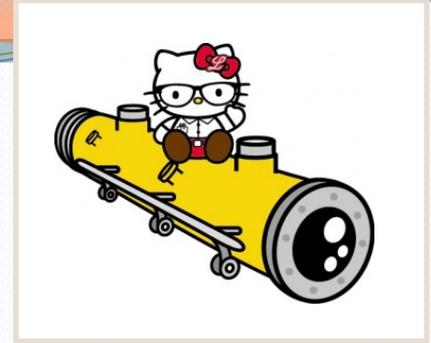
京都大学宇治キャンパス 化学研究所・碧水舎

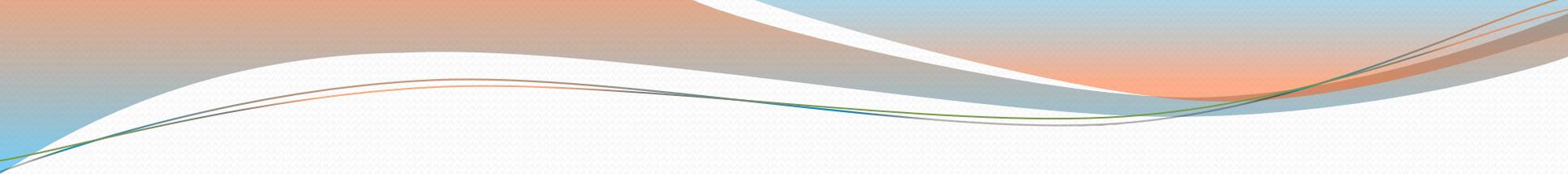
高エネルギー加速器研究機構

島田 美帆

# 発表の流れ

- CW超電導加速器によるILC陽電子源
  - アンジュレータ、電子駆動、逆コンプトン散乱
  - ILC・陽電子源のレイアウト
- CW超電導加速器による放射光源
  - XFEL・ERL高輝度放射光源のレイアウト
  - ERL・X線放射光源のスペック
- マルチビーム運転
  - ビームパラメータ
  - バンチパターン
- 先端的な利用
- まとめ

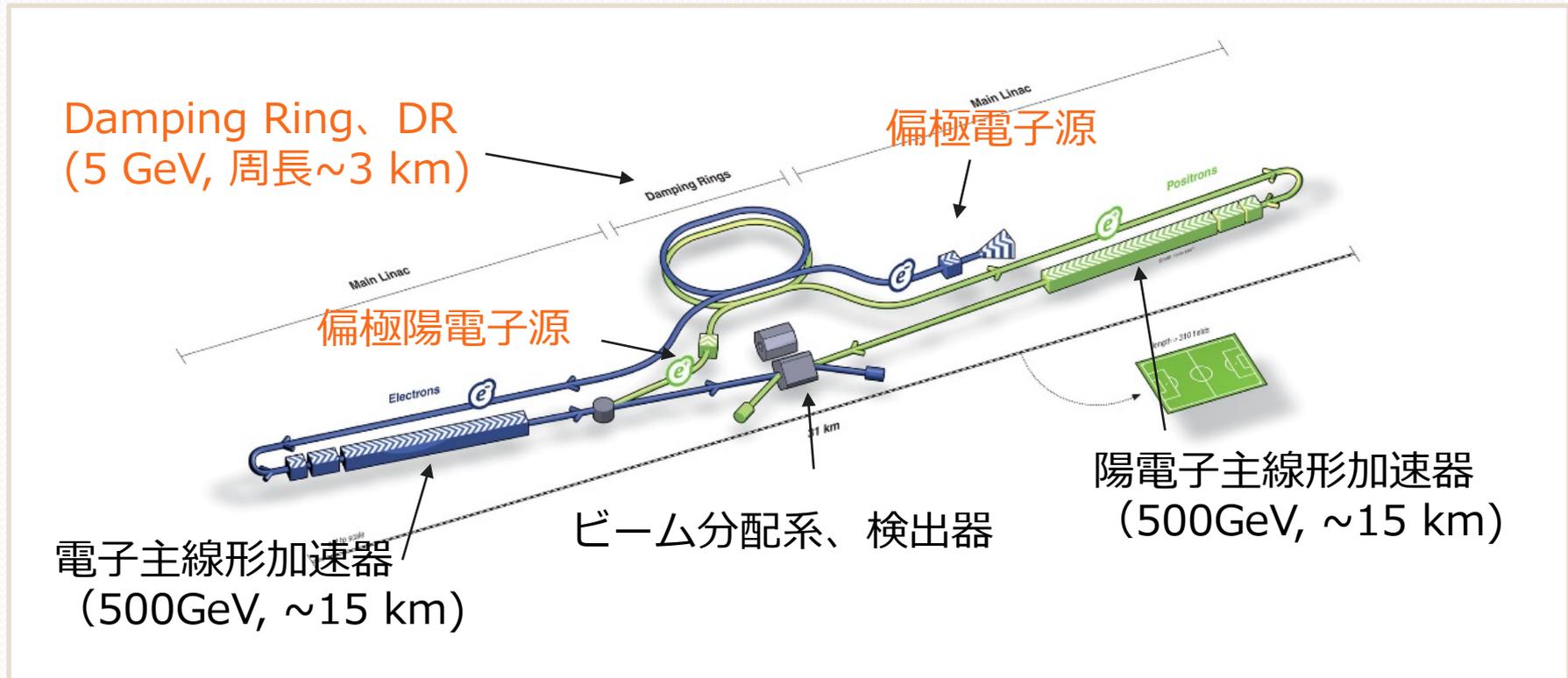




# CW超電導加速器によるILC陽電子源

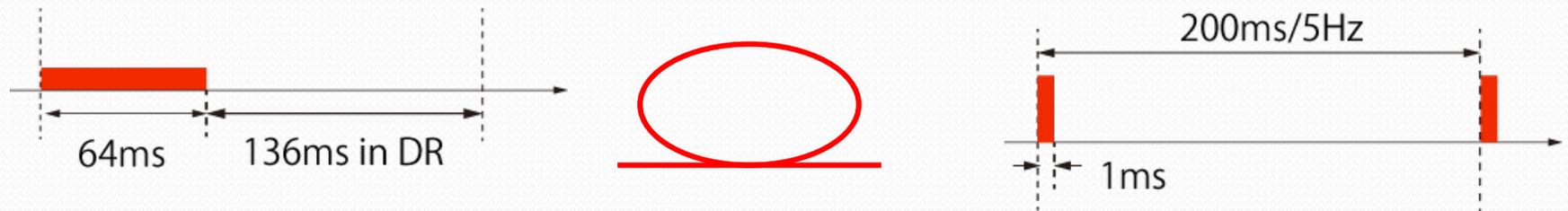
# 国際リニアコライダー計画(ILC)

- 250GeV~1TeVの電子・陽電子衝突型線形加速器
  - およそ30kmのTESLA型超伝導線形加速器
- ILC入射部は中央に配置
  - 粒子源、5GeV線形加速器およびダンピングリング



# バックアップ陽電子源

- 陽電子ターゲットの熱負荷が問題となっている。
- 数GeVの電子を直接ターゲットに照射する電子駆動型陽電子源
- ILC-TDRベースラインの150GeVの電子ビームに比べてエネルギーが一桁以上低い。
- 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



ターゲット付近

Damping Ringパルス整形

250-1000Gev linac

# バックアップ陽電子源とDR入射

- ILC-TDR : 2つの5 GeVパルス常伝導加速器、25 MV/m, 400 m x 2



- 今回の提案 : 5 GeV CW超伝導加速器\*、~15 MV/m, > 1 km



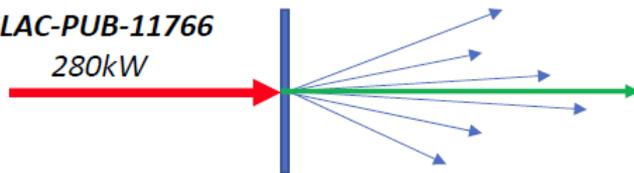
\*CW運転では、FCは超電導、前段加速器(常電導)は低い加速勾配で運転

# 放射線による発熱

The power loss was evaluated at PAC'05 by V. Bharadwaj et al. (SLAC-PUB-11766).

## Electron driven Scheme

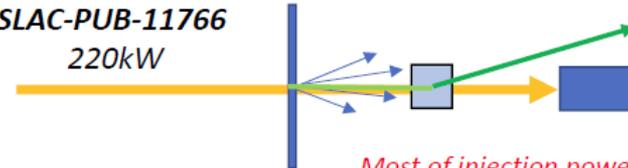
SLAC-PUB-11766  
280kW



Most of injection power will be sprayed around target.

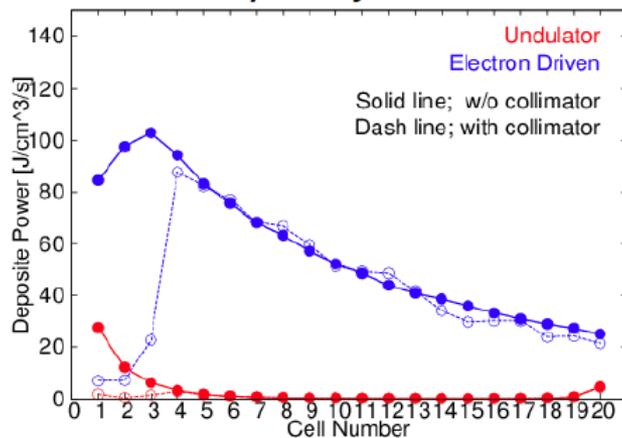
## Undulator Scheme

SLAC-PUB-11766  
220kW



Most of injection power will be dumped to photon dump.

## Power deposit of Innermost iris.



## Injection beam power deposition

### undulator scheme

6.1% in RF structure

1.5% in innermost iris for structures

Main radiation source is restricted around target.

Halo collimator between target and structure is effective.

### electron driven scheme

53% in RF structure

22% in innermost iris for structures

Radiation source is distributed to wide area.

8

- 電子駆動よりガンマ線のほうが発熱量が低いという報告

# Inverse Compton scattering (ICS) によるガンマ線光源

- 数GeVの電子で陽電子生成可能
- KEK-ATFでガンマ線生成がすでに実証
  - T. Omori et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 114801 (2006)
- 蓄積リングとERLの2つが提案
  - ILC TDR(2012)

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)

コンプトン散乱でさらに熱負荷を下げられる可能性

# 放射光によるICS

- CSR-ICS

- 3nC、24fsバンチの中赤外（45um）CSR生成
- Finesse 500nのoptical cavityで蓄積・発振
- 欠点：
  - CSRの集光サイズが250um以下にできないので非効率
  - 中赤外光の高反射率ミラーの開発必須

Incoherent


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

$P(k)$  : total radiation power

Coherent

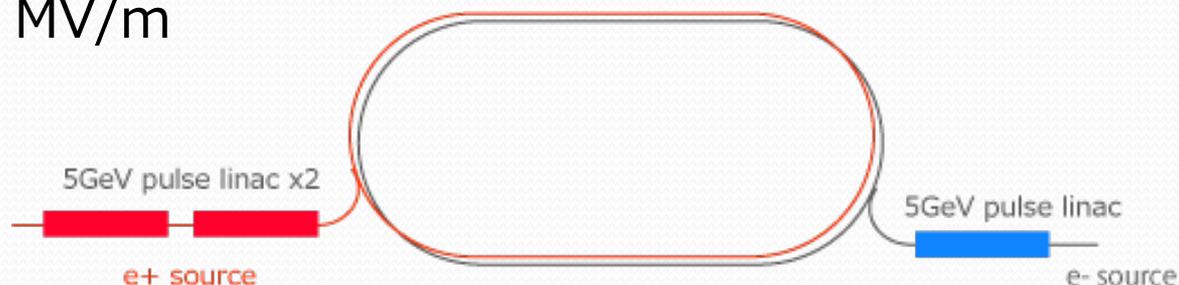

$$P(k) = N^2 p(k)$$

$N$  : number of electrons

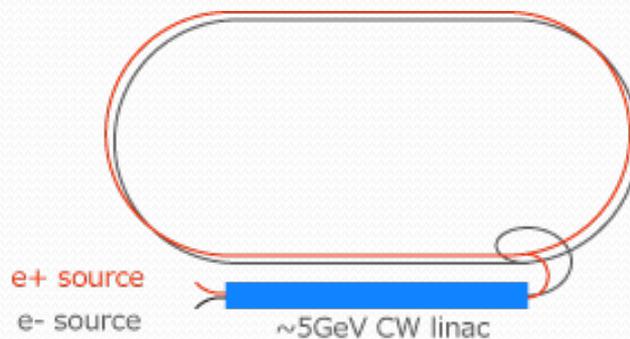
$p(k)$  : radiation power per electron

# ILC入射部レイアウト

- ILC-TDR(バックアップ陽電子源)
  - SC 5 GeV x1,  $\sim 30$  MV/m
  - NC 5 GeV x2,  $\sim 25$  MV/m

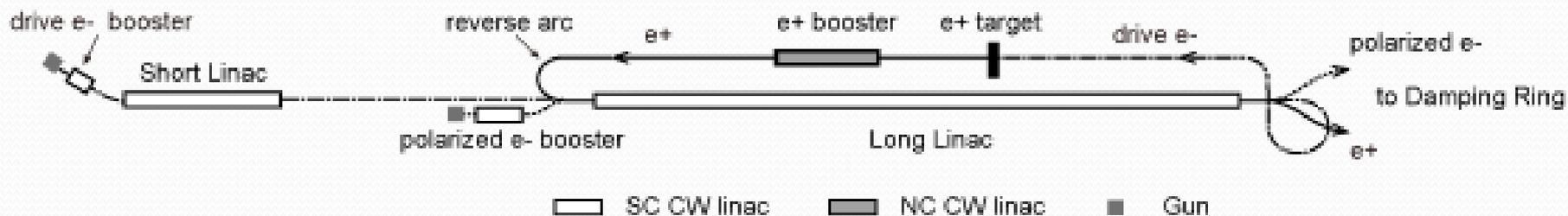


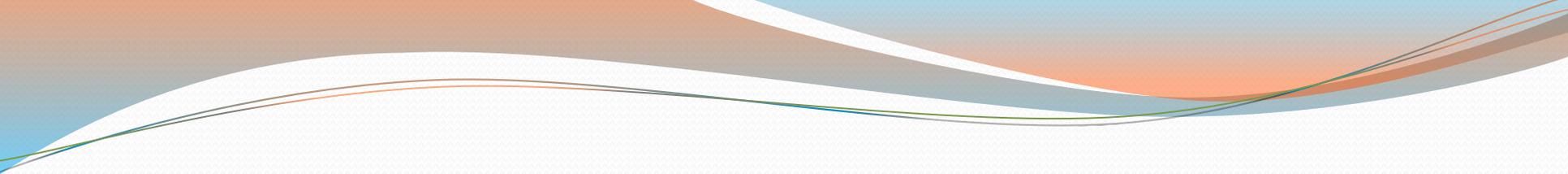
- CW超電導空洞の提案
  - SC 5 GeV x1,  $\sim 15$  MV/m



# 陽電子源・偏極電子源とDR入射

- 陽電子
  - 超伝導空洞(Long linac)に400MeVで入射
  - ターゲット付近は放射線が強いため、400MeVまでは常伝導加速器
  - Long linac手前のreverse arcで大きくずれている陽電子を落とす。
- ターゲットに照射するDrive電子
  - 1.9GeVと高いエネルギーでLong linacに入射
- 偏極電子
  - コストを下げるため、偏極電子も同じLong linacで加速

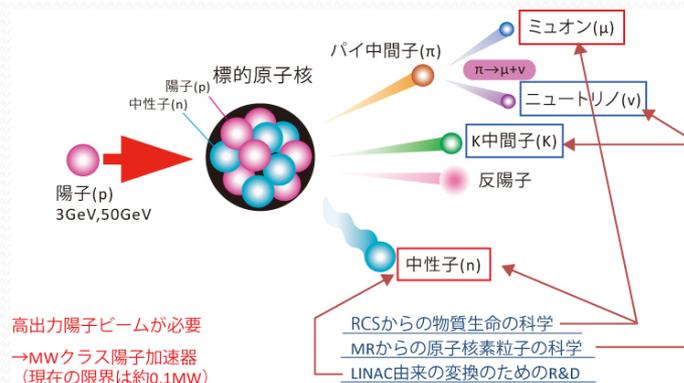
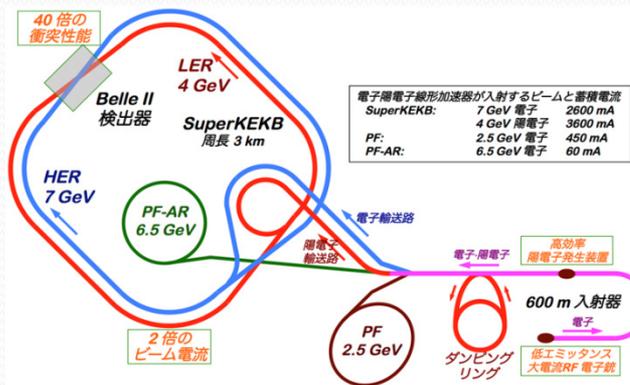
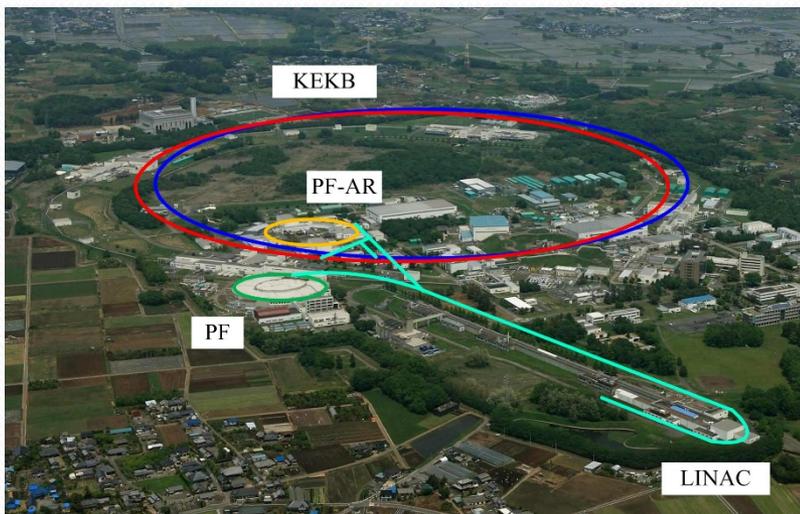




# CW超電導加速器による放射光源

# KEKの加速器施設

物質構造科学研究所と素粒子原子核研究所で線形加速器などを共有



つくばキャンパス・電子陽電子ビーム

東海キャンパス・陽子ビーム

# GeVクラス超伝導加速器の放射光源計画

- ~2005年
    - 5 GeV FRI計画@KEK
    - 6 GeV ERL計画@JAERI
  - 2006~2010年
    - 5 GeV ERL計画 (double loop)
  - 2008年~
    - 6-7GeV XFEL計画
  - 2011年~2015年
    - 3 GeV ERL計画
  - 2015年~
    - 6-8 GeV CW XFEL計画 (提案のみ)
- ただし、10mA運転へ変更

比較的開発要素が少なく、ILCと共有可能と判断

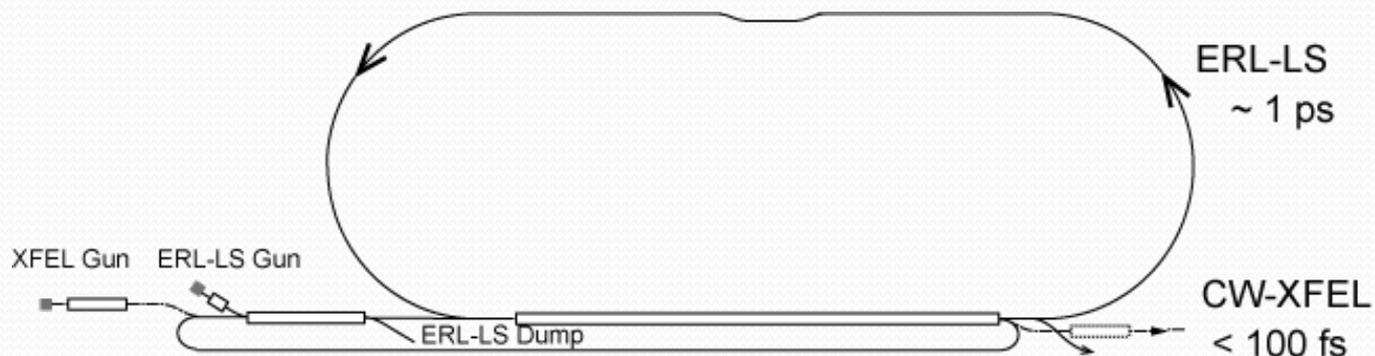
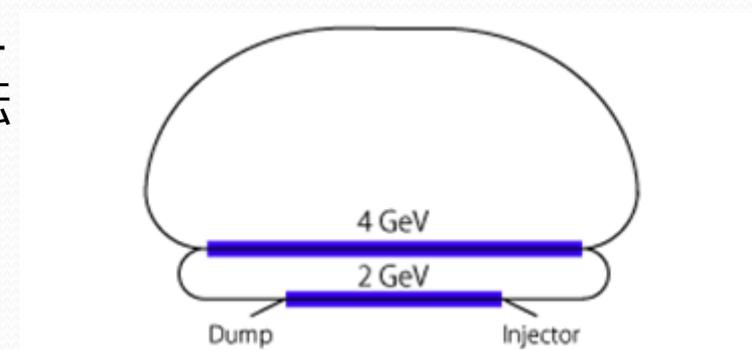
# CW超伝導加速空洞の放射光源

PF・KEKBと同様に同時運転ができれば。。

- XFEL (CW or long pulse)
  - Long pulseのSASE XFEL
  - 輝度・フラックスが高いが、BLが数本
  - 2 color発振、アト秒パルス、 after burning、将来的にXFELへの拡張など
- エネルギー回収型線形加速器、ERL
  - 平均電流10mA\*、30m挿入光源で10keVの1次光で $10^{23}$  phs./s/mm<sup>2</sup> mrad<sup>2</sup> b.w. 0.1%を目指す。
  - およそ30本のBLを目指す。

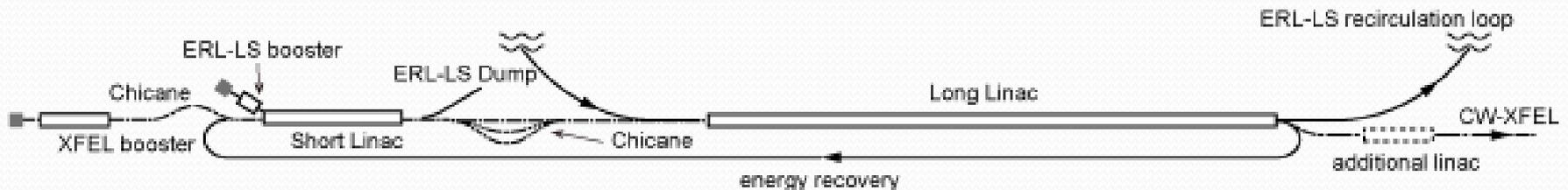
# ERL放射光源のレイアウト

- 超伝導線形加速器を2つに分割
  - マトリョーシュカタイプと呼ばれるERL
  - エミッタンスの大きい陽電子と同時運転するため
- 周回ループ
  - ビームライン建設コストを考慮すると、地上にする必要あり



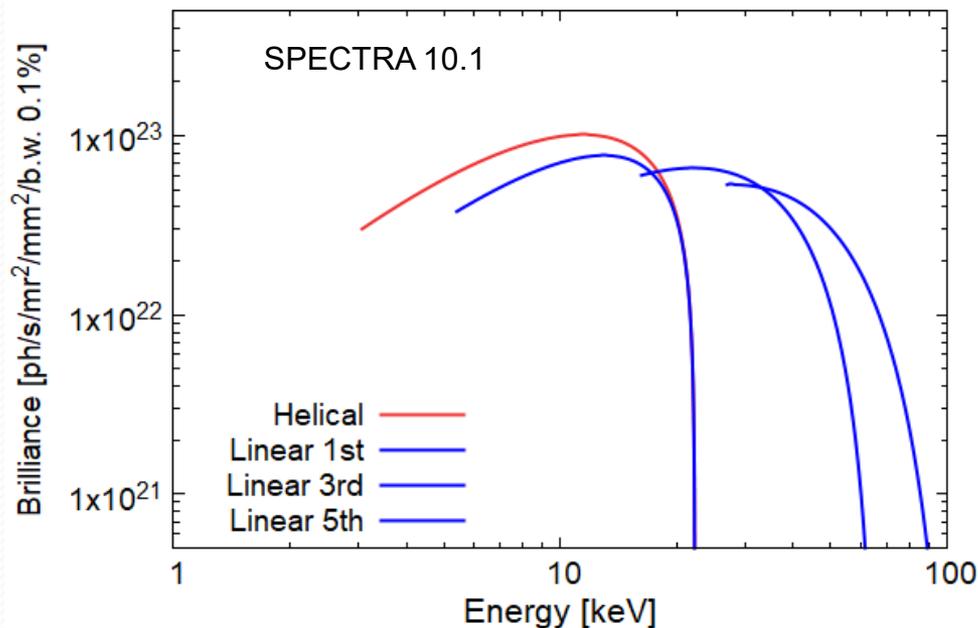
# XFELのレイアウト

- 500MeVのbooster, Short linac, Long linacの3つのライナックで構成
  - それぞれのboosterとlinacの間にシケインを設置、バンチ圧縮を行う。
  - レイアウトはEuro XFELを参考
- 目標とするバンチ長は30fs以下



# 放射光輝度の試算

## 主要パラメータ

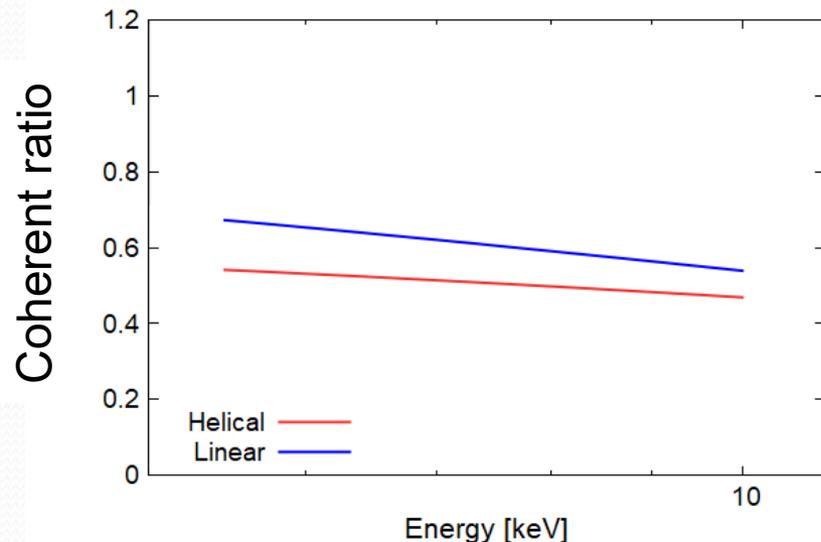
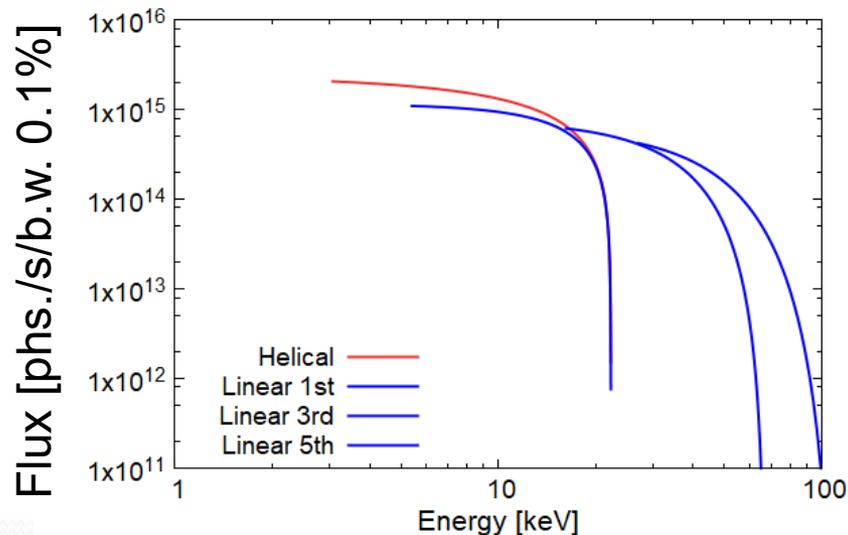


電子エネルギー	6.5 GeV
平均電流	10 mA
電荷量	10 pC/bunch (134ms long pulse)
規格化エミッタンス	$\sim 0.1$ mm · mrad
自然エミッタンス	8 pm · rad
エネルギー広がり	$5 \times 10^{-5}$
undulator長	30 m
周期長	1.8 cm
ベータ関数	5 m

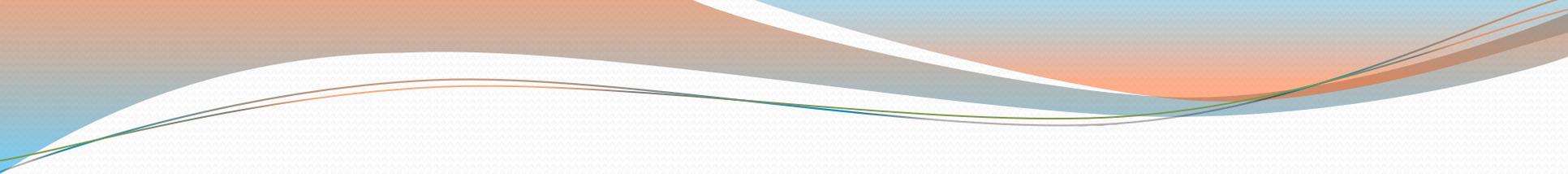
- Helical undulatorの1次光で、輝度 $10^{23}$ @10keVに達成。
- 規格化エミッタンス0.3mm-mradのマルチアルカリカソードは30mAで $10^{23}$ @10keV



# フラックス・コヒーレントの割合



- フラックスは最大 $10^{15}$ ph/s/b.w.0.1%にとどまる。
- コヒーレントの割合はHelicalで0.6前後



# マルチビーム運転

# ビームエネルギー

- それぞれのビームエネルギーに差をつけて、パルスの偏向電磁石を使わずに軌道を振り分ける。
  - 2つのSC linacに対する入射エネルギーをずらす。
  - Drive e-は30度オフクレスト、XFELはshort linacのみ20度オフクレスト
- DRのエネルギー5GeVを基準に設定
  - 自然エミッタンスが大きい陽電子にlinacのOpticsを最適化
  - ビーム輸送を容易にするため、他のビームのエネルギーを陽電子より大きく

	$E_{in}^{short}$ [MeV]	$E_{in}^{long}$ [GeV]	$E_{out}^{long}$ [GeV]
XFEL	500	2.4	7
ERL-LS(acc)	30	1.9	6.5
ERL-LS(dcc)	1900	6.5	1.9
Drive e-	~30	1.7	5.7
e+	-	0.4	5
Polarized e-	-	0.4	5

# 主要のビームパラメータ

- 陽電子のエミッタンスが極めて大きい。
- 平均電流
  - ILCは下流の30kmのmain linacの運転コストで制限
  - ERL-LSの電流はHOM-BBUの影響がないと思われる10mAに設定
  - XFELの電流はダンプのキャパシティで決まる。
- HOMによる空洞の発熱は全体合わせて10W/m程度

	$\varepsilon_n$ [m-rad]	$q$ [nC]	$\sigma_z$ [mm]	$I$ [mA]	<i>Heat Load</i> [W/m]
XFEL	1e-6	0.3	0.02*	0.1	1
ERL-LS	1e-7	0.01	0.3	20 (ER)	5
Drive e-	1e-4	3	0.6	0.05	2
e+	1e-2	3	6	0.05	< 1
Polarized e-	1e-4	3	0.6	0.05	2

\*バンチ圧縮後

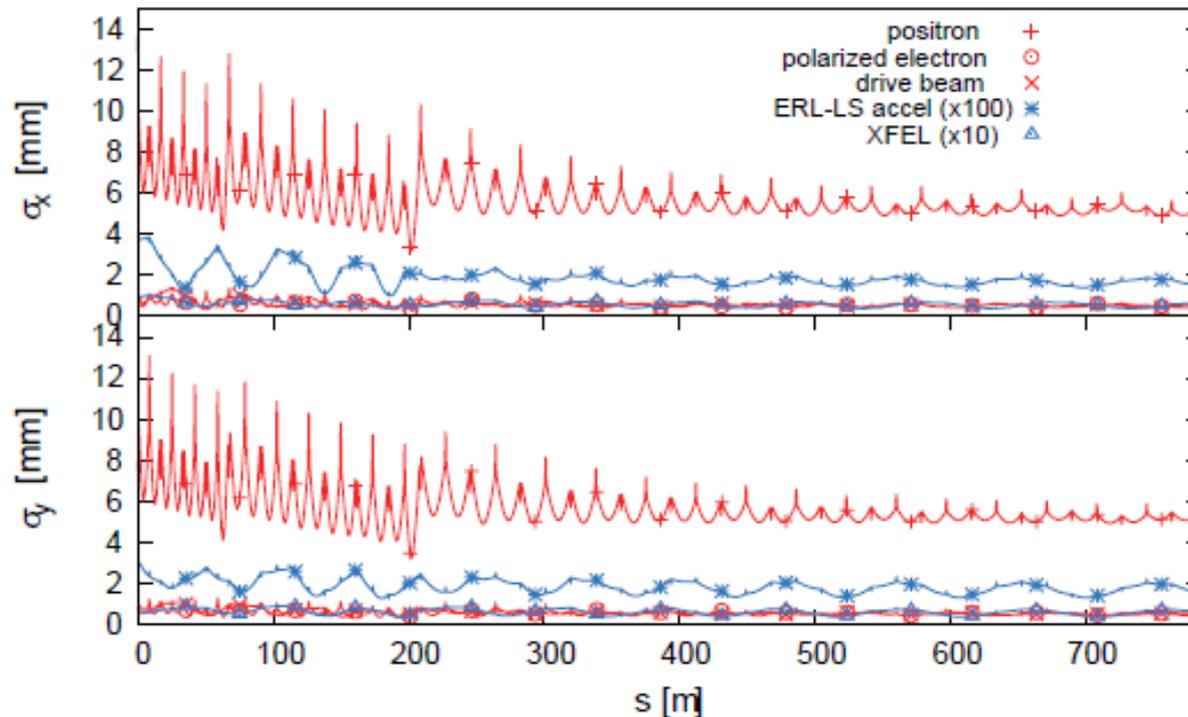
# 放射光源のビームパラメータの比較

	ERL	蓄積リング
エネルギー広がり	◎ $5e-5 \sim 2e-4$ 短いバンチ長で小さい	△ $5e-4 \sim 1e-3$ エネルギーと曲率半径で決まる。
水平エミッタンス	◎ $< 10 \text{ pmrad}$ 主に電子銃・入射部で決まる。	○ $< 100 \text{ pmrad}$ リングの平衡状態で決まる
平均電流	× $< 100 \text{ mA}$ 超伝導空洞のHOMビーム不安定、発熱問題	◎ $100 \sim 500 \text{ mA}$

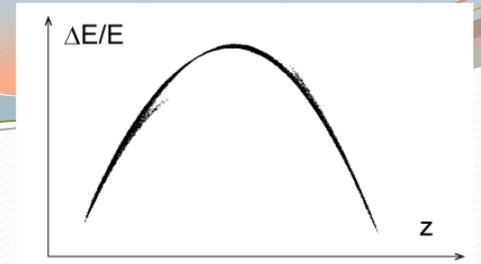
ERLでは小さいエネルギー広がりを重要視している。

# Long linacのビームサイズ

- QMのトリプレットを上流では2空洞・4空洞毎に配置
- 陽電子
  - 空洞内ではアイリスで $5\sigma$ 以下のビームサイズ、tripletで最大12mm
- 放射光(ERL-LS, XFEL)
  - どちらも全体的に100 $\mu\text{m}$ 程度かそれ以下のビームサイズ



# 放射光源の ビームパラメータの比較



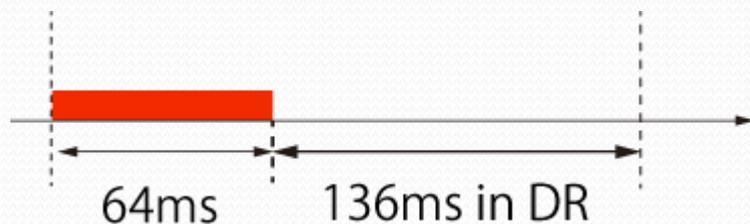
バンチ長とエネルギー広がり  
の位相空間

	ERL	蓄積リング
エネルギー広がり	◎ $5e-5 \sim 2e-4$ 短いバンチ長で小さい	△ $5e-4 \sim 1e-3$ エネルギーと曲率半径で決まる。
水平エミッタンス	◎ $< 10 \text{ pmrad}$ 主に電子銃・入射部で決まる。	○ $< 100 \text{ pmrad}$ リングの平衡状態で決まる
平均電流	× $< 100 \text{ mA}$ 超伝導空洞のHOMビーム不安定、発熱問題	◎ $100 \sim 500 \text{ mA}$

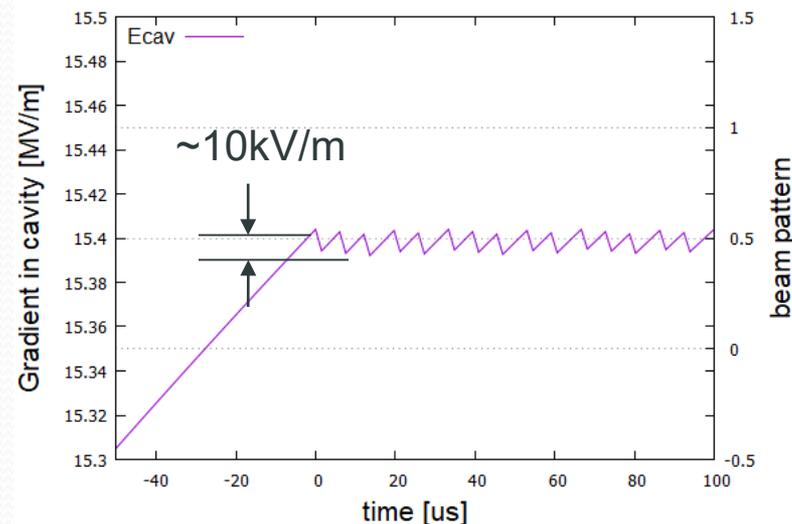
ERLでは小さいエネルギー広がりを重要視している。  
→高いエネルギー安定度が要求される

# フラットトップの安定度

- 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
  - ERLは $5e-5$  (0.005%) 以下、XFELは0.01%
  - ILCビームと重ねて加速すると光源の性能が大幅に落ちる。



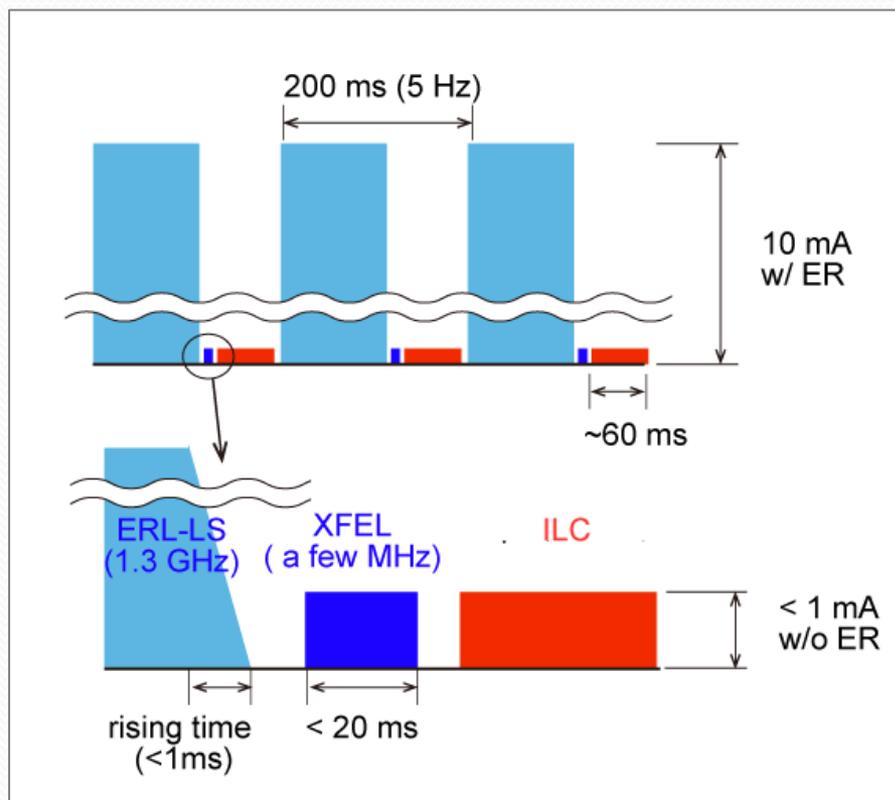
ILCのバンチパターン。ダンピングリングでパルス長1msに変換される

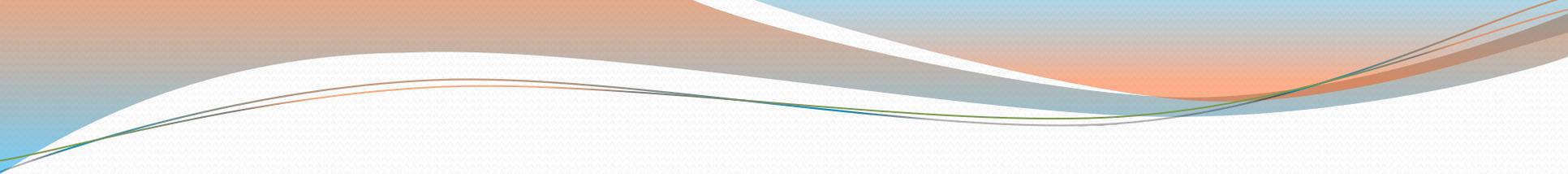


# バンチパターン

- ERL-LS, XFEL, ILCはそれぞれ重ねない
- 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。
- ERL-LSはlong pulse運転
  - 3kmの周回ループを戻るまでの3usの間、エネルギー回収できないため、1ms程度時間をかけて電流を上げる。
- ILCとXFELはエネルギー回収なし

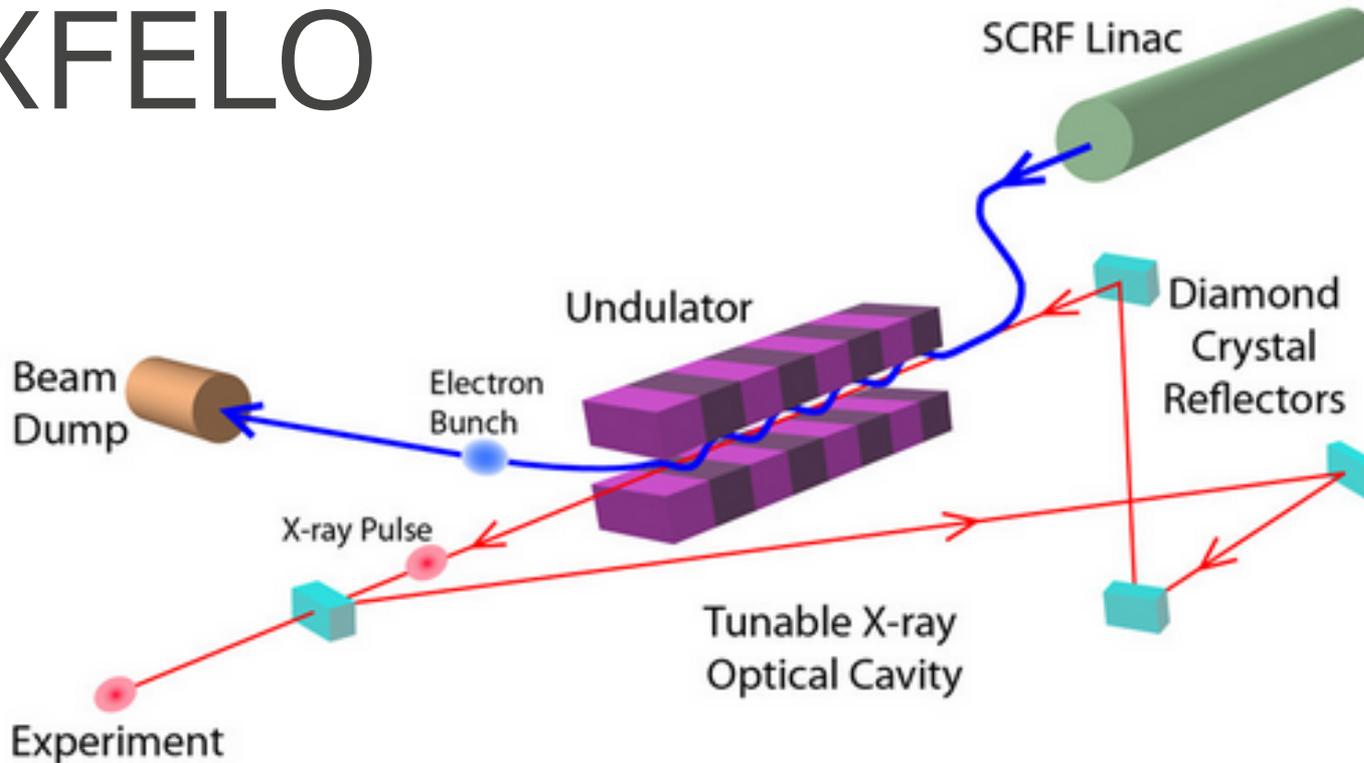
	平坦度および安定度要求値
ILC	0.1%程度
XFEL	0.01%程度
ERL	0.005%以下





# 先端的な利用

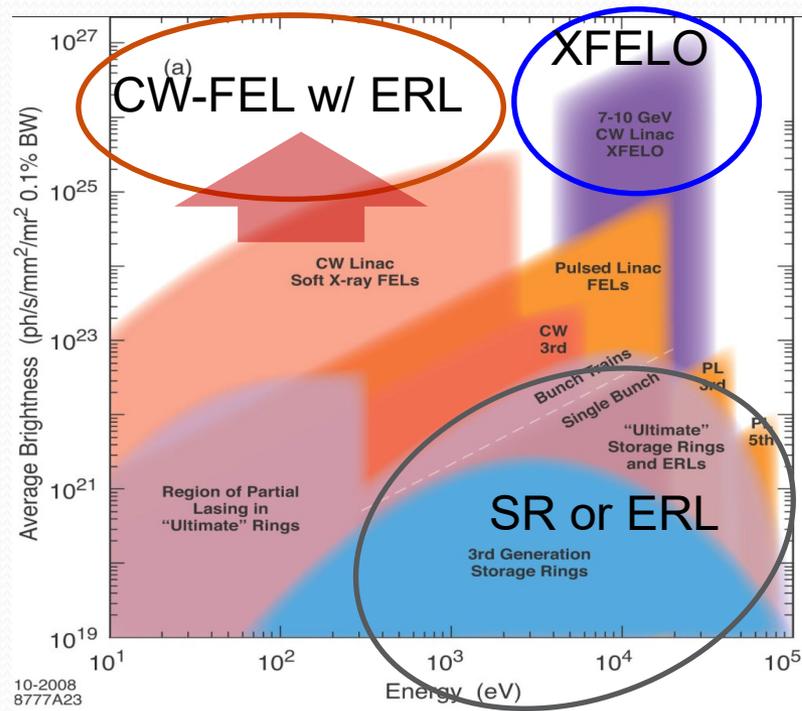
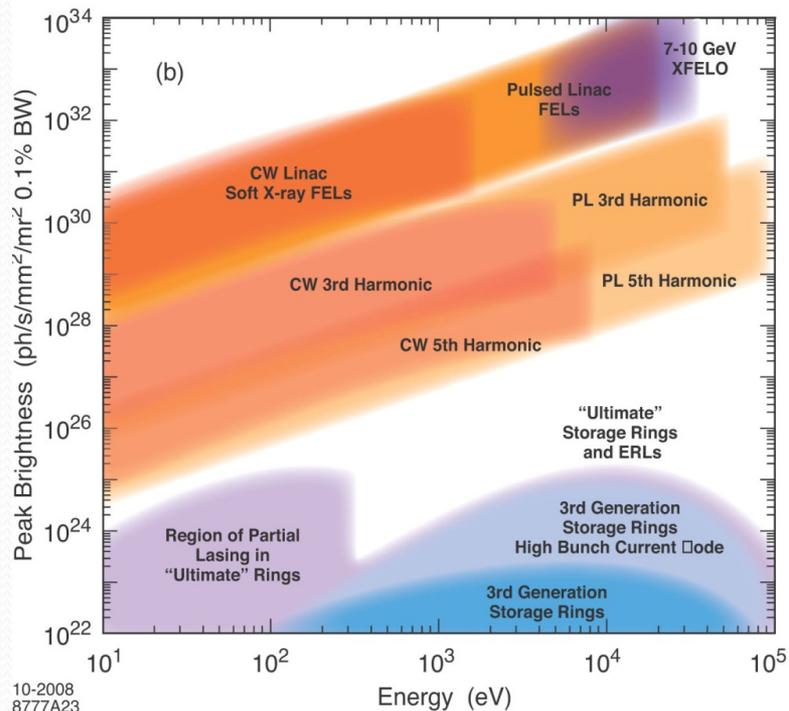
# XFELO



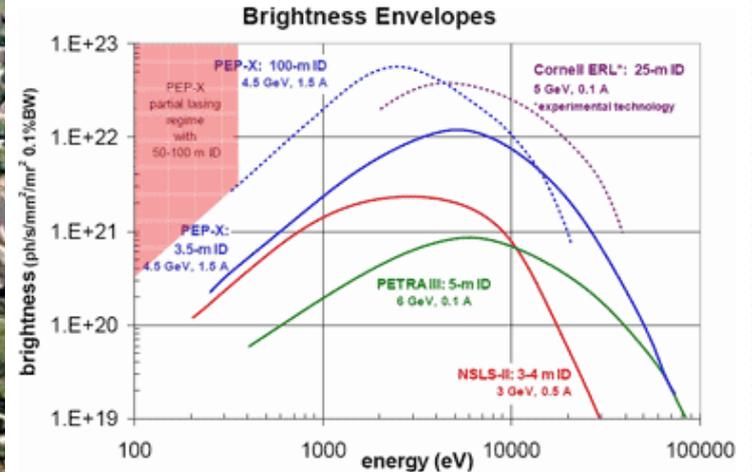
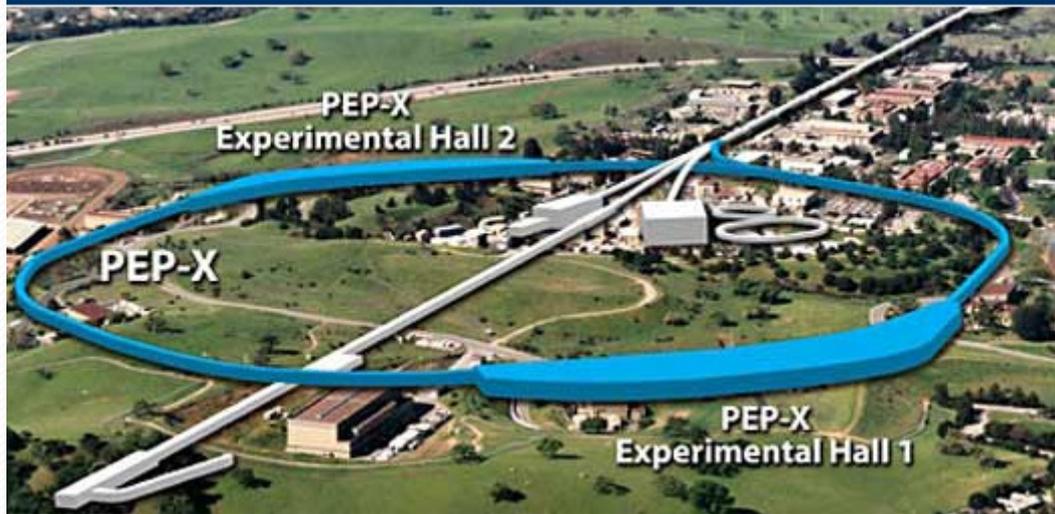
## XFELO Science Workshop

June 29 - July 1, 2016  
SLAC National Accelerator Laboratory  
Menlo Park, CA

# Ring sources are complementary to FELs

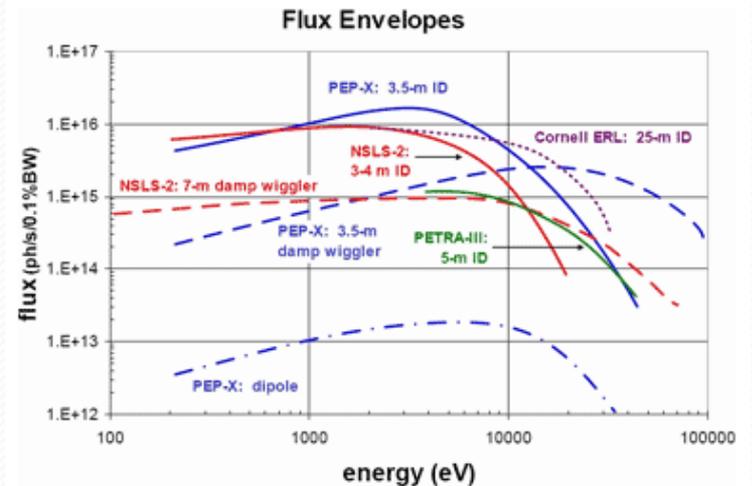


- The low peak power and high average power provided by high repetition rate ring-based X-ray sources, enabling non-destructive study of experimental samples, complementary to the high peak brightness low rep-rate beams provided by X-ray FELs
- Ring-based sources will remain a mainstay of X-ray research in the future.



## PEP-X Project Overview

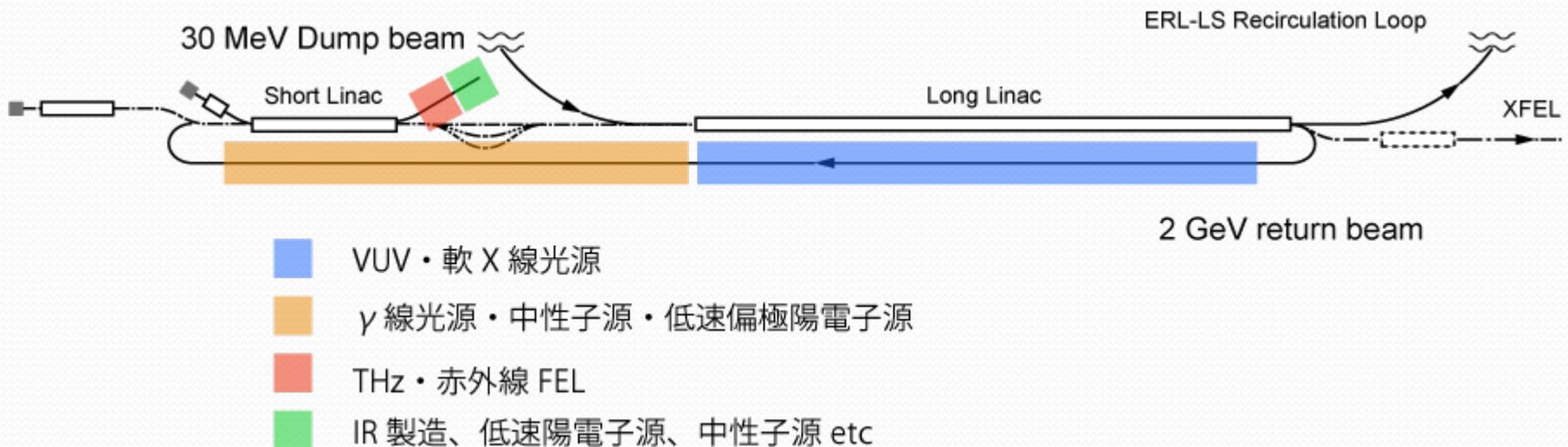
SLAC is developing a long-range plan to transfer the evolving scientific programs at SSRL from the SPEAR3 light source to a much higher performing synchrotron source - PEP-X - a new storage ring that would occupy the existing PEP-II tunnel and support two experimental halls, each containing 16 x-ray beam lines. Operating at 4.5 GeV and 1.5 A with a horizontal emittance of 0.14 nm-rad, reached using 90 m of damping wigglers, PEP-X would have an order of magnitude higher average brightness and flux in the 1-Å x-ray range than any existing or planned future storage ring sources. Higher brightness in the soft x-ray regime might be reached with partial lasing in long undulators, and high peak brightness could be reached with seeded FEL emission. The status of preliminary studies of PEP-X is presented.



<https://www-ssrl.slac.stanford.edu/pep-x/>

# ERL return beamの利用

- 6GeV周回ループ
  - 硬X線光源（エミッタンス悪化させない）
- 2GeV減速後
  - 軟X線光源
  - FEL・CSR-ICSガンマ線（エミッタンス悪化させる。中性子・陽電子生成）
- 30MeVまで減速後
  - 赤外・THz FEL
  - RI製造（これは30～50MeVの様相）



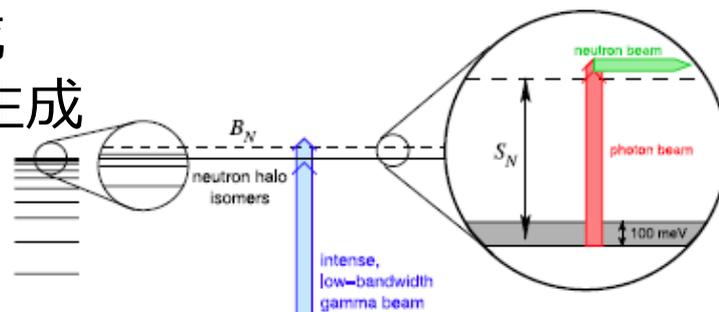
# FEL・CSR-ICSガンマ線光源

- ( $\gamma, n$ )反応を利用した中性子源
  - $\gamma$ 線エネルギー、Be: 1.7MeV、Pb:13 MeV, 7.5 MeV



- 中性子halo isomers
  - 単色のガンマ線を照射し、中性子が原子核の外側で密度の高い励起状態
  - Second laser (可視光～極端紫外光) で低いエネルギーの中性子を生成

- FEL・レーザーICSでガンマ線生成
- undulator光によるsecond laser生成



Habs, D., et al. "Neutron halo isomers in stable nuclei and their possible application for the production of low energy, pulsed, polarized neutron beams of high intensity and high brilliance." *Applied Physics B* 103.2 (2011): 485-499.

# まとめ

- ILC入射部および放射光源の同時運転
  - ILC陽電子源としてCW超伝導空洞の利用を提案している。
  - 余力のあるCW超伝導空洞で放射光源利用など多角的活用の提案
- ビーム運転
  - DRの手前であるため、ILC衝突実験には影響なし
  - エミッタンスの大きい陽電子が超伝導空洞を破壊しないことが重要
  - 他のビームによるエネルギー変動を避けるため、放射光もロングパルス運転とした。
- 放射光源
  - 輝度・フラックスの高いXFELとBLの多いERLを組み合わせた。
  - ERL放射光源については23乗の輝度、50%程度のコヒーレント率を得る見込み。
  - そのほかの先端的な利用として、XFELO, Ring型FEL、単色ガンマ線、低速中性子源、などがある。