

Z-poleの電子陽電子ERLコライダーの提案

第22回日本加速器学会年会

2025年8月6日-8日

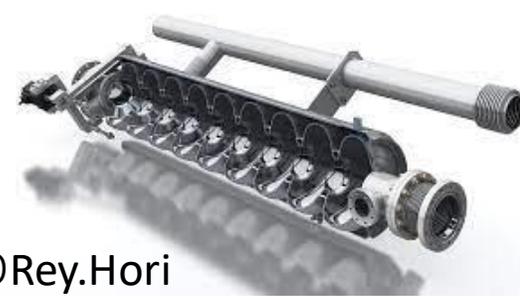
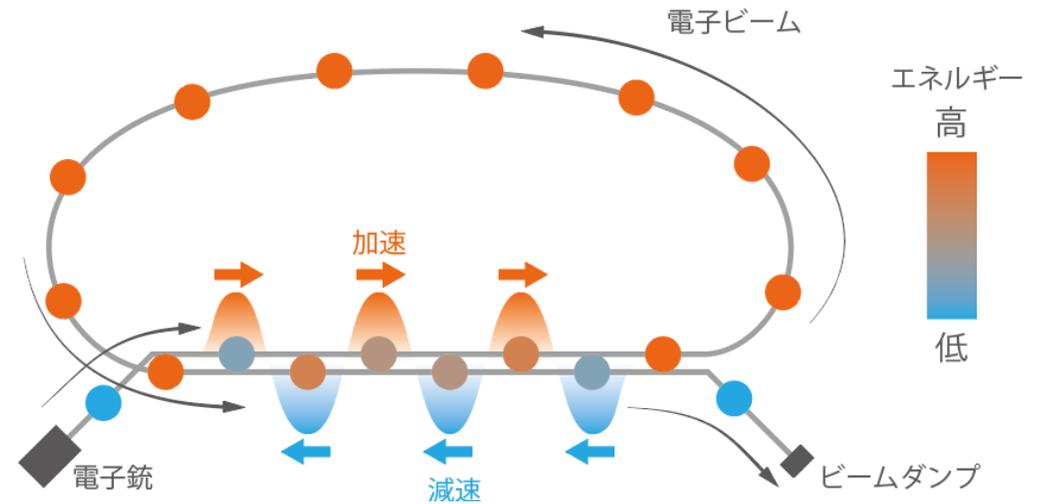
東京都市大学世田谷キャンパス

島田 美帆、横谷 馨

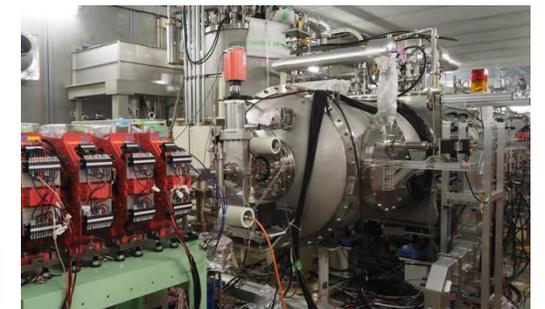
高エネルギー加速器研究機構

エネルギー回収型線形加速器(ERL)とは

- 1周後に線形加速器でエネルギーを回収し、新たなビームの加速に利用
- 線形加速器の高品質のビームと蓄積リングの大電流を兼ねる
- 超伝導加速空洞で高いエネルギー・大きな平均電流のビームを実現
- 高エネルギー物理や放射光施設などで検討

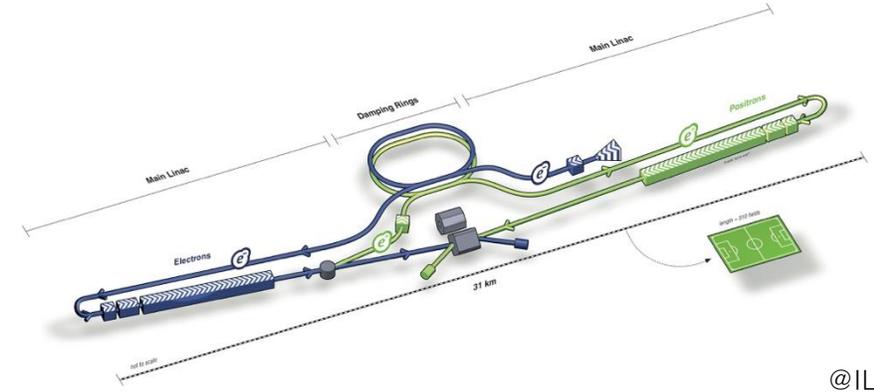


©Rey.Hori



ERLベースのコライダー計画

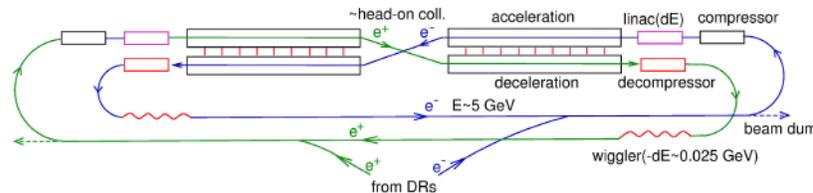
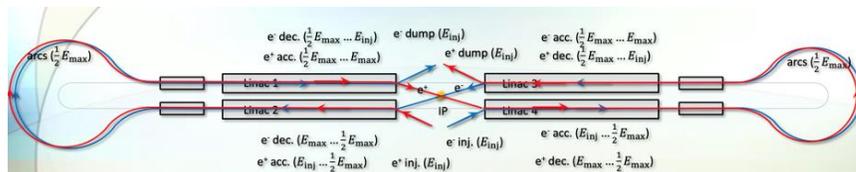
より高いルミノシティーのため、ILCをERLに拡張した案が複数報告されている



@ILC TDR

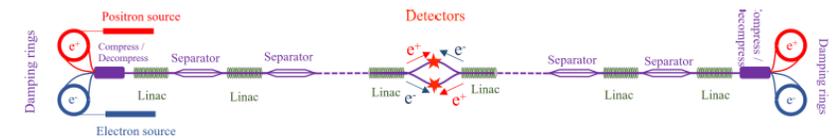
K. Yokoya “ILC Upgrade with Energy Recovery,” (ERL2024) より抜粋

A.Hutton, ERL2022



V. I. Telnov,
JINST 16(2021)p12025,
arXiv2105.11015v5 (Jun.19.2023)
arXiv2302.09758

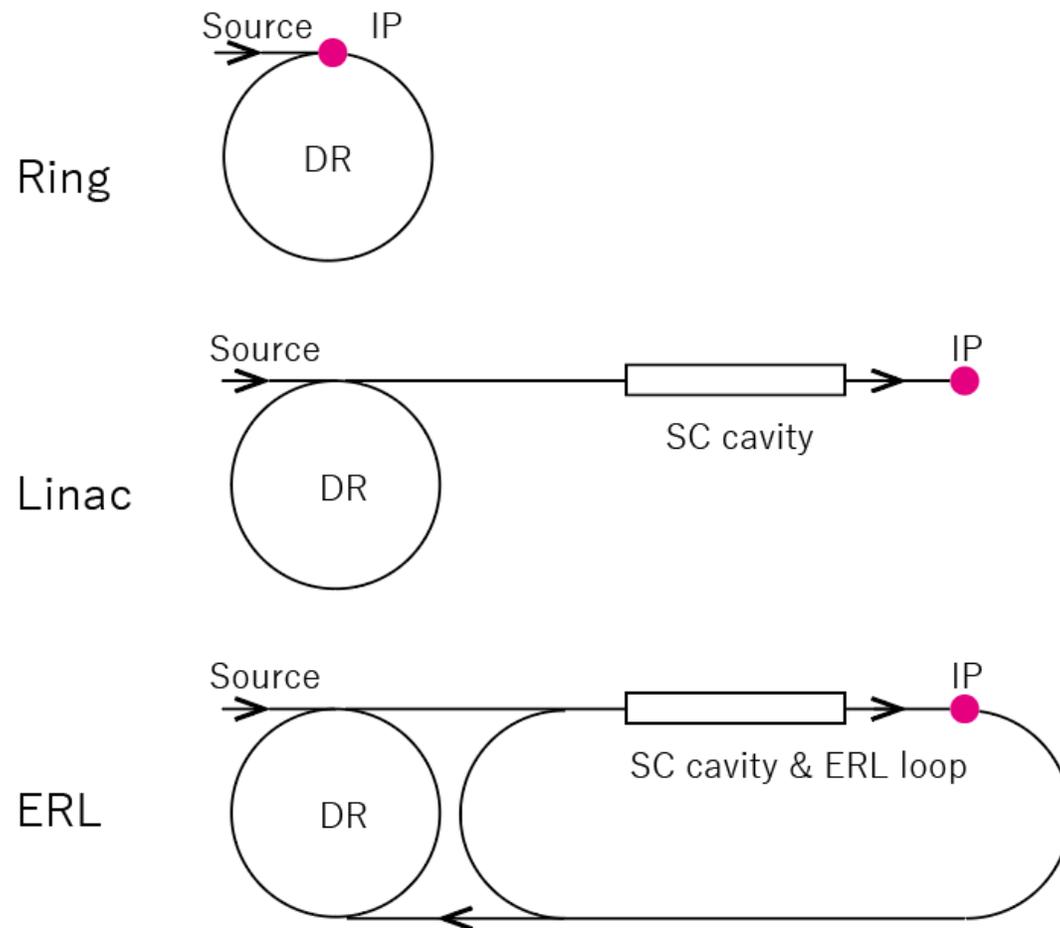
V.Litvinenko et al., ERL2024



コライダー加速器の種類

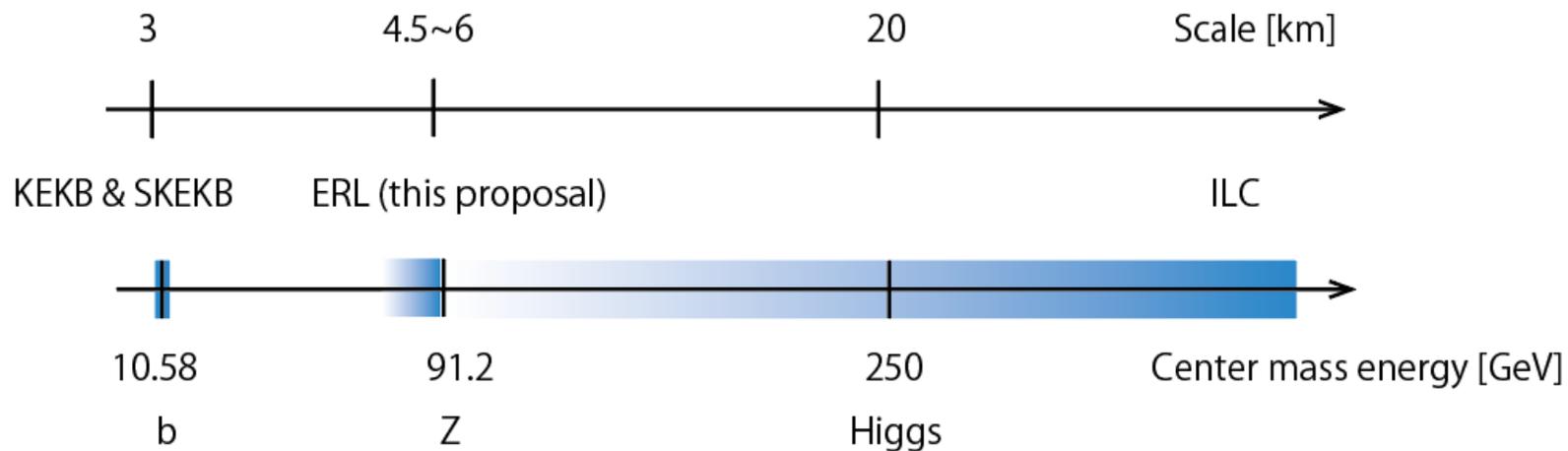
- 蓄積リング
 - 大電流
 - ひとつの加速器でIPとダンピングを兼ねる
- Linacベース
 - 小さなIPビームサイズが可能
- ERL
 - 小さなIPビームサイズと大電流を兼ねる

	放射光損失	電流	ビームサイズ@IP
Ring	△	◎	△
Linac	◎	△	◎
ERL	○	○	○~◎



Z pole ERLの提案

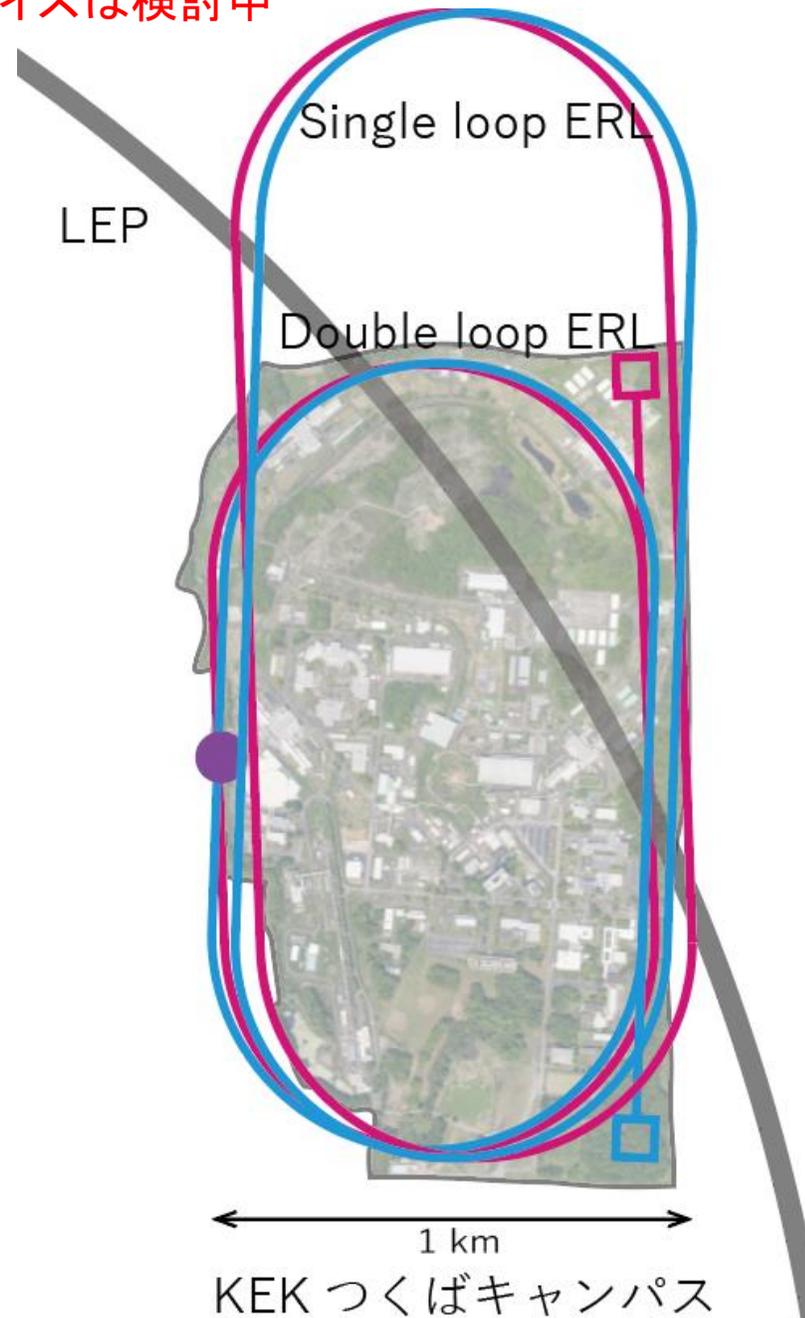
Z pole (@45.6 GeV)



Double loop ERL

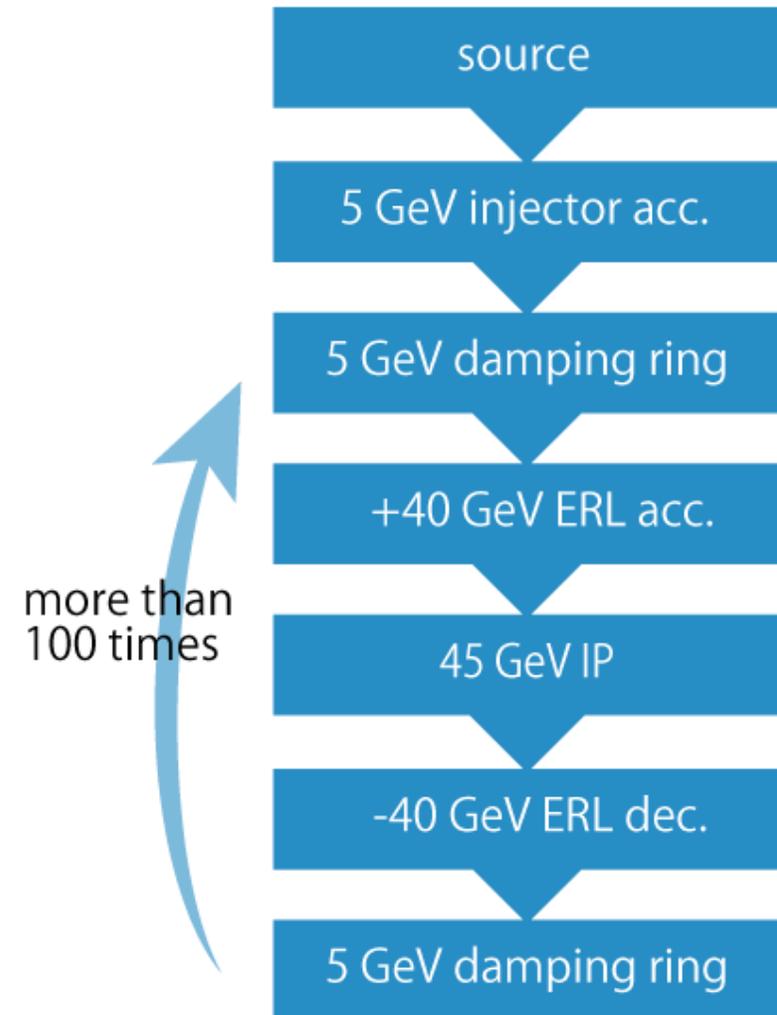
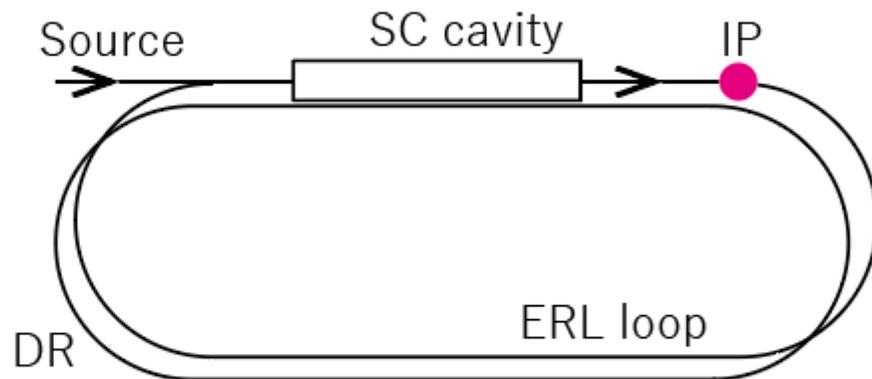
- 空洞の数が半分で済み、ほとんどつくばキャンパスに収まる
- 周回部電磁石が倍以上でルミノシティが半分以下

加速器のサイズは検討中

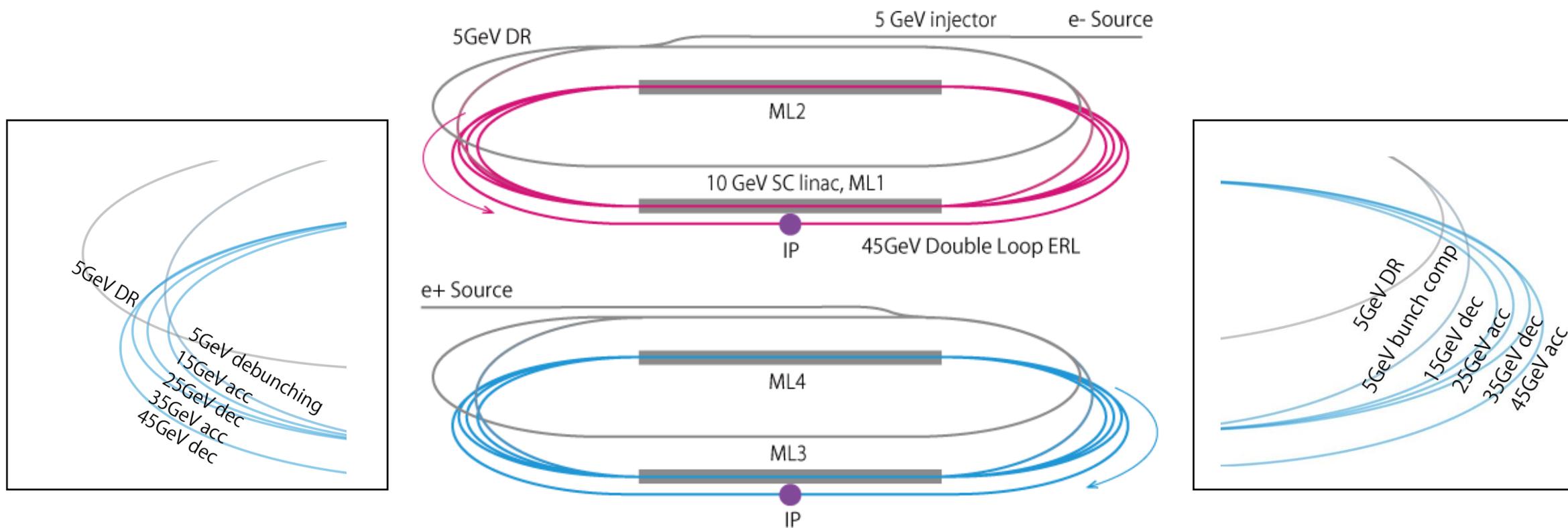


本提案の加速器コンセプト

- IPのあるERLとダンピングリングで別の加速器
- トンネルは共有



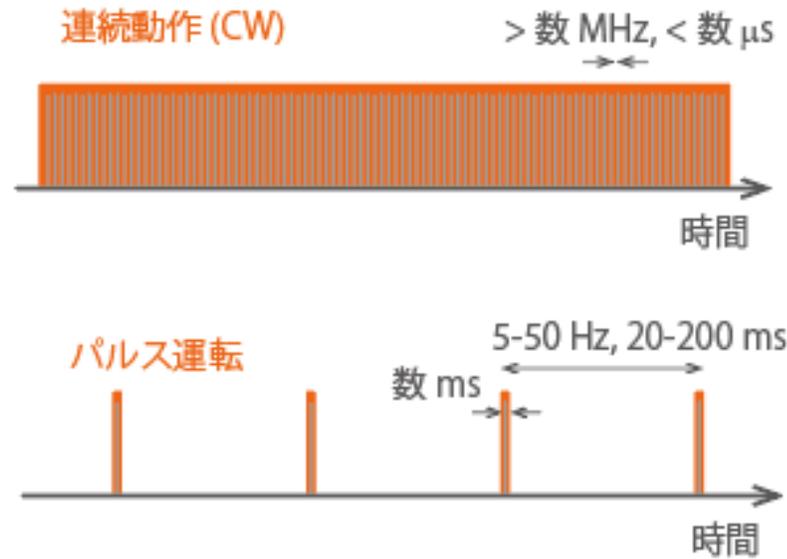
ダブルループのレイアウト案



構成要素

- Double loop ERL (5→45GeV加速, IP, ~1mA大電流)
- Damping Ring (5GeV, ~1A大電流)
- Beam Transport (バンチ圧縮と伸長、spin rotationなど)

超伝導加速空洞の運転モード



典型的な加速勾配

CW: $\sim 15\text{MV/m}$

Pulse: $\sim 30\text{MV/m}$

■ パルス運転のエネルギー回収運転

- 限られた敷地内、現実的なパッキングファクターで45GeVに到達するには、高い加速勾配が必要

■ 高ルミノシティには長いパルス長と高い繰り返しが必要

- パルス長3~10ms, 繰り返し5~50Hz (ILCは1ms, 5Hz)
- field emissionの検討が必要

ERL特有の検討項目

- **パルス運転とエネルギー回収効率**
 - **周回ループのエミッタンス増加**
 - 粒子回収効率（IPビームロスと陽電子源供給バランス）
 - 9セル超伝導加速空洞のHOM発熱とIPの平均電流
- など



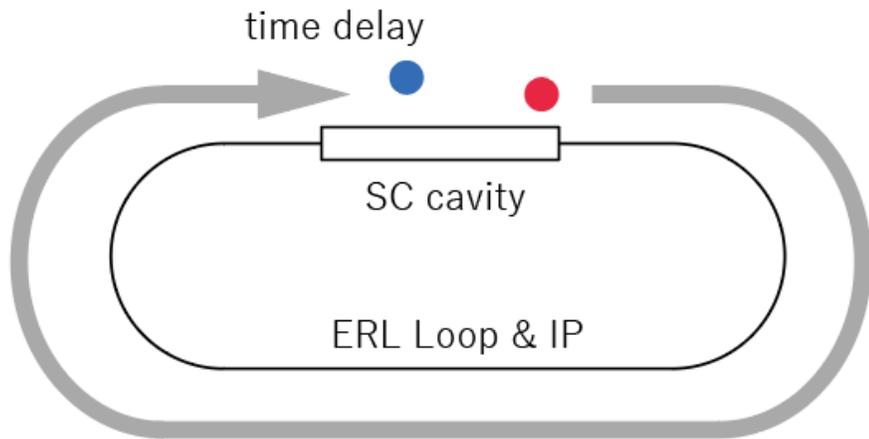
この2点を紹介

他の多くのパラメータはILCと同じ

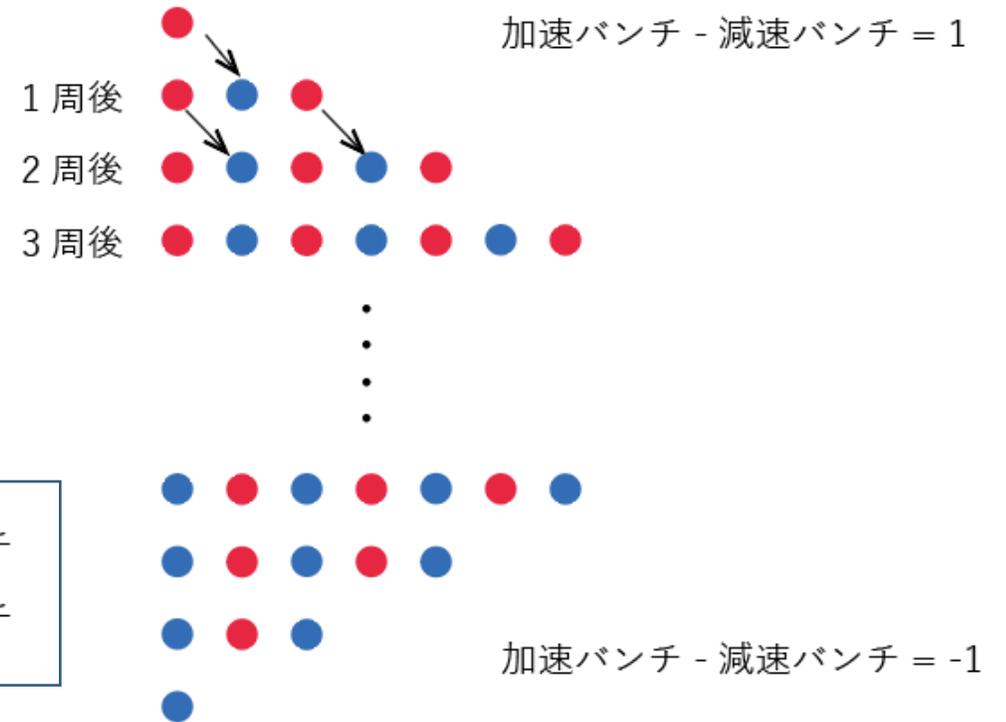
パルス運転のエネルギー回収

加速ビームが戻るまでに数us

→この間はエネルギー回収不可

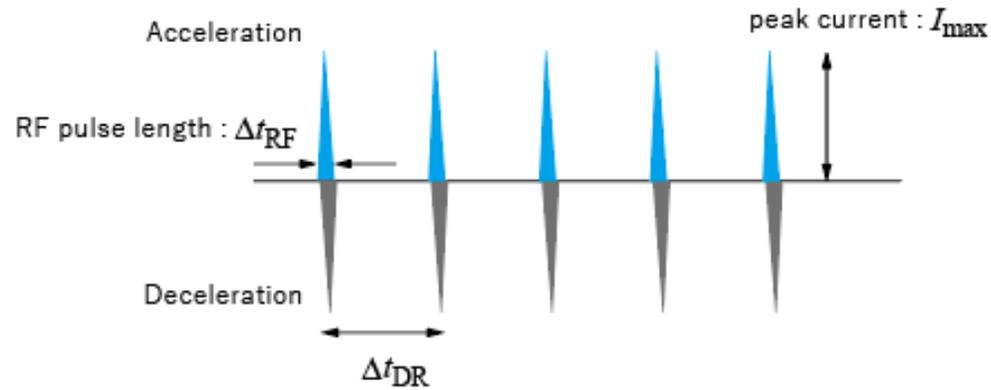


周回ビームが戻るタイミングで加速ビームを徐々に増加し、少ないRFパワーで加速

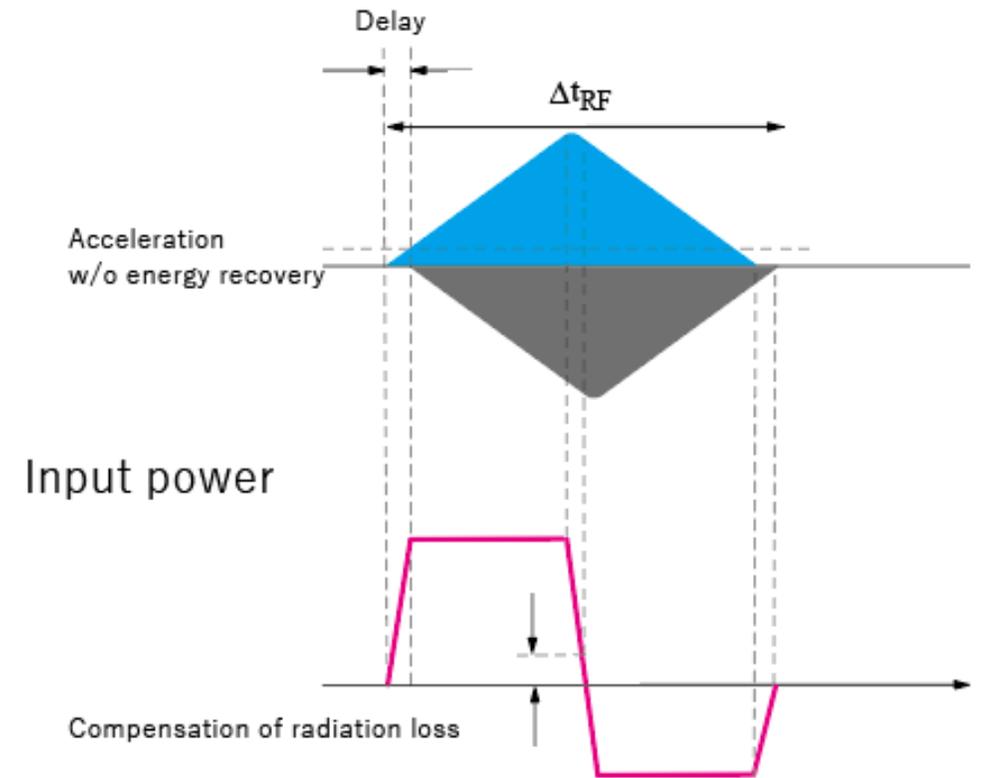


パルス運転のエネルギー回収

Electron/Positron pulse structure



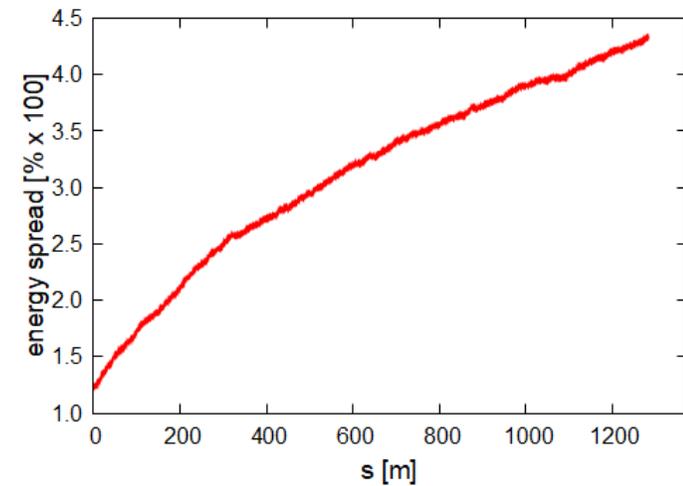
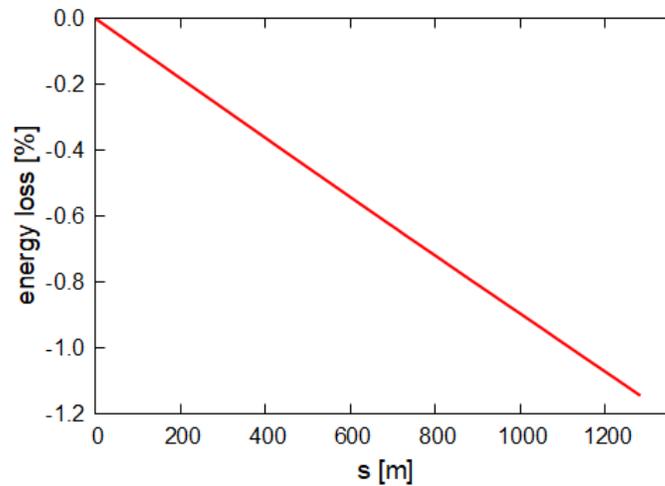
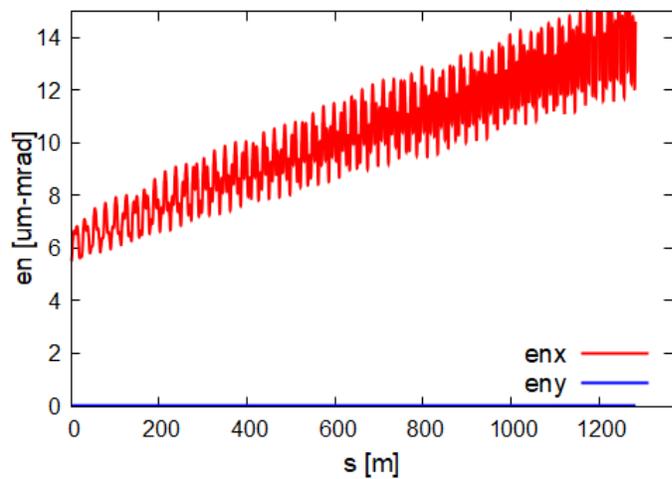
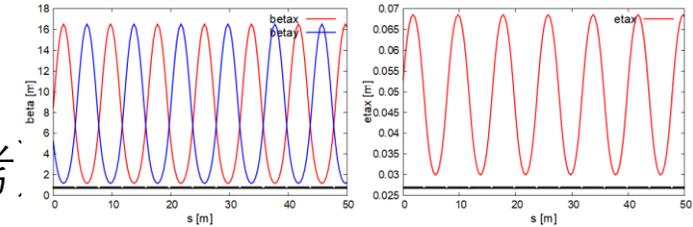
Electron/Positron pulse beam



空洞パルス運転による取りこぼしは1-10%
(周回ループ長さとパルス長に依存)

周回ループ | オプティクス・ラティス設計

- 偏向と収束を兼ねた機能複合型電磁石（放射光将来計画を参考）
- 最大磁場0.43T, 最大磁場勾配30T/m、 $\rho = 350\text{m}$, 3.5m長を320個
- 分散関数を最小化して励起放射によるエミッタンス増加の抑制
- 180度リターンで水平エミッタンスは2-3倍に増加、エネルギーは1.2%減少



電子陽電子ERLコライダーの特徴

	ILC	Z pole ERL
平均電流	< 50uA	~1mA
超伝導空洞HOM発熱	小さい	大きい
エミッタンス	小さい	周回部の放射励起で数倍に増大
放射光損失	ほぼない	1周で数%
衝突後	直後にダンプ	減速後にダンピングリングに回収
ビームダンプ	高エネルギーで負荷が大きい	ダンプせずにリサイクル
陽電子源	大強度が必要で困難	再利用するため少なく済む

		ILC 250	ILC Z	Z pole ERL Single loop
全体	トンネルの長さ [km]	20	←	6
	放射光損失	-	-	1.2% (半周)
IP	平均電流 [mA]	0.02	0.016	1.25
	電荷量 [nC]	3	3	6
	パルス繰り返し [Hz]	5	3.7	50
	水平ビームサイズ [nm]	520	1120	1580
	垂直ビームサイズ [nm]	7.7	14.6	14.6
	ルミノシティー [$1e33 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	13.5	2.0	287

ILC250から換算

まとめ

- つくばキャンパスを想定したERLベースのコライダーを提案
 - ILCをベースに検討
 - レーストラック型のERLとダンピングリング
 - 省スペースのために高加速勾配のパルス運転
 - 暫定的なスペック・ルミノシティーを導出
- ERL特有の課題（今回取り上げたもの）
 - パルス運転エネルギー回収
 - 機能複合型電磁石を用いた周回ループ：半周のエネルギー損失1.2%, エミッタンス倍増

謝辞：KEK-ATFの奥木さんをはじめ、ERLやSuperKEKBの方々から貴重なアドバイスを多くいただきました。