

# Z-pole の電子陽電子 ERL コライダーの提案

## PROPOSAL OF Z-POLE $e^-e^+$ ERL COLLIDER

島田美帆<sup>#</sup>, 横谷馨

Miho Shimada<sup>#</sup>, Kaoru Yokoya

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

### Abstract

We proposed an Energy Recovery Linac (ERL) electron-positron collider at the KEK Tsukuba campus. Due to the restriction on the site area, Z-pole is chosen as the collision beam energy. ERL is accompanied by a damping ring like the International Linear Collider (ILC) project. In addition, the key technologies such as the superconducting cavity, positron source, and final focus are designed based on the ILC project. To minimize the length of the superconducting linac, energy recovery is operated at pulse mode at a high accelerating gradient. Combined magnets are used at the recirculation loop to minimize the radiation loss and emittance growth. The compact Z-pole collider with racetrack shape is expected to realize high luminosity.

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 KEK では、次世代の電子陽電子コライダーとして、国際リアコライダー計画 (International linear collider, ILC) を推進している[1]。超伝導加速空洞をベースとした線形加速器であり、エネルギーフロンティアを目指している。一方で、超伝導加速空洞の技術を応用したエネルギー回収型加速器 (Energy Recovery Linac, ERL) の開発を並行して進めている[2, 3]。本研究では、これらの技術を合わせて、ERL による電子陽電子コライダーを提案する。

ERL とは、実験などで利用した加速ビームを周回ループで加速空洞に戻し、減速位相でエネルギーを回収する加速器である。模式図を Fig. 1 に載せる。少ない入力 RF パワーで大電流運転が可能である。一度周回した後に、エネルギーが回収され新しいビームにエネルギーを渡すため、ビームに対する悪影響が残らず、蓄積リング型加速器では実現困難な低エミッタンスや短いソシチ長が可能となる。これは、M. Tigner 氏によって 1965 年にコライダー加速器として提案された[4]。

いくつかの ERL コライダーがエネルギーフロンティアでより高いルミノシティーを目指して提案されている[5-7]。ILC では、Nb 材による TESLA 空洞を用いるが、空洞の形状が異なる twin cavity や、材質を臨界磁場の大きい Nb<sub>3</sub>Sn にする案、進行波を用いる HELEN 空洞で高加速勾配を狙う案、など挑戦的な戦略で高エネルギーかつ高ルミノシティーのコライダーを目指している。これらの提案は、ILC 計画のさらに先のアップグレードを想定している。

本研究では、KEK のつくばキャンパスを想定した ERL 電子陽電子コライダーを提案した。限られた敷地で高いルミノシティーを得るため、重心エネルギー 91.2 GeV の Z-pole を検討した。Figure 2 で ILC や蓄積リング型コライダー SuperKEKB と衝突エネルギーを比較する。現在、つくばキャンパスで稼働している SuperKEKB は技術的に成熟しており、世界最高ルミノシティーを更新している

ところである [8]。

今回の ERL コライダーの提案では、超伝導線形加速空洞をベースにした ERL とダンピングリングを組み合わせており、ILC 計画を踏襲している。また、超伝導加速空洞、電子駆動型の陽電子源、最終収束系なども ILC の技術を参考にした。一方で、ERL 特有の課題は多くある。大電流運転やエネルギー回収のための周回ループの設計では、低エミッタンスの放射光将来計画を参考にして[9]。また、敷地が限られているため、高い加速勾配が必要になる。そこで、パルス運転によるエネルギー回収について検討した。

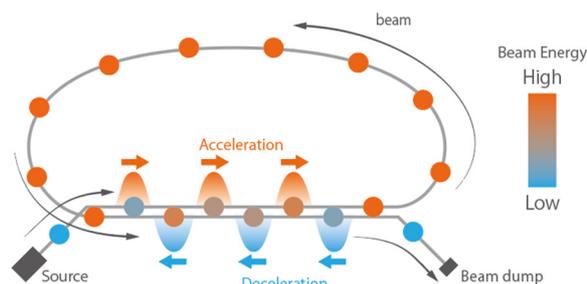


Figure 1: Schematic of energy recovery linac.

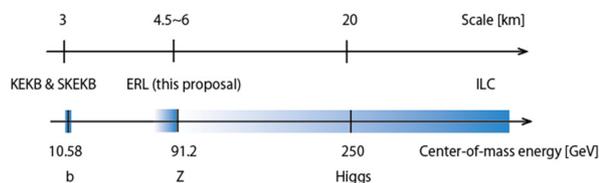


Figure 2: Center-of-mass energy of ILC, SuperKEKB, and Z-pole ERL.

### 2. コライダー加速器の種類

コライダー加速器には SuperKEKB に代表される蓄積リング型と、ILC に代表される線形加速器がある。電流は蓄積リング型が突出して大きく、数 A の大電流ビームを

<sup>#</sup> miho.shimada@kek.jp

蓄積可能である。しかし、ビームサイズを十分に絞ることが困難である。蓄積リングでは安定した平衡状態にする必要があるため、リング内の衝突点(Interaction point, IP)のチューンシフトが制限される。衝突によってかく乱したビームをダンプしながら蓄積するには、繊細なビーム光学調整が要求される。

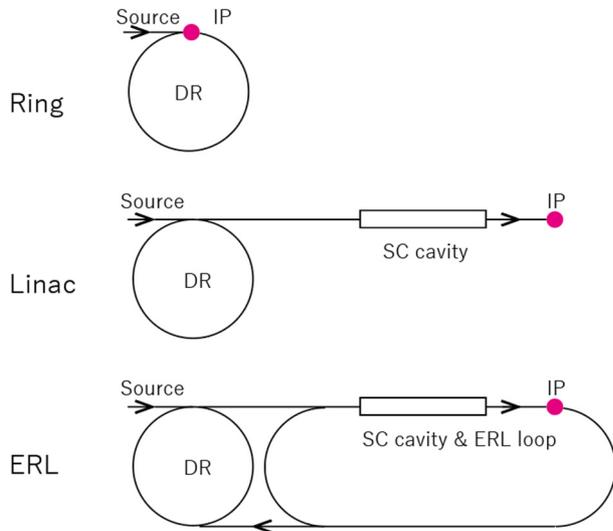


Figure 3: Concepts of colliders based on storage ring, linac, ERL.

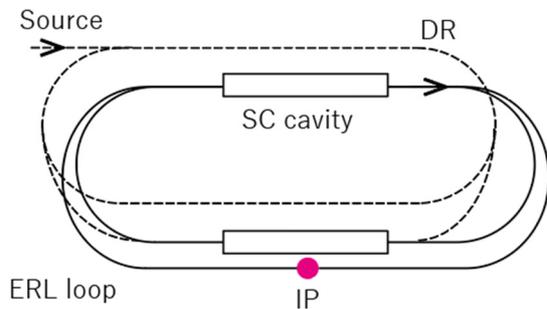


Figure 4: Concept of ERL collider in racetrack shape.

ILC では衝突後にそのままビームダンプで廃棄されるため、IP のビームサイズを極限まで絞ることが可能である。粒子源のエミッタンスは十分小さいとは言えないため、ダンピングリング(Damping Ring, DR)を用いて小さくしている。DR のエネルギーは 3-6 GeV であり、DR から取り出され加速する部分では軌道を大きく曲げない。そのため、IP のビームエネルギーが高くても放射光損失がほぼ無視できる。

ERL コライダーは ILC に周回ループを組み合わせたものになる。1度衝突させた後は DR に戻し、IP で増加したエミッタンスやエネルギー広がりを元に戻す。DR 以降の加速した後に軌道を曲げるが、基本的には、1 周しかない。そのため、蓄積リングに比べて放射光損失が桁違いに小さく、小さなループでも周回可能である。ILC と同様に IP のビームサイズを絞ることができるが、DR に戻す必要がある。DR のエネルギーアクセプタンスはおおよそ

0.1%である。IP でエネルギー広がりが増加するが、エネルギー回収のときに小さく抑えるように減速する必要がある。IP の平均電流は DR の回収効率と補充可能な陽電子数のバランスで決まる。蓄積リングと同様に同じビームを使い続けるため、ILC のような大きなビームダンプを必要としない。

蓄積リング型、線形加速器、ERL の模式図を Fig.3 で比較する。ここで、蓄積リングはダンピングリングを機能的に兼ねているとみなしている。

### 3. 加速器レイアウト

IP のビームサイズは ILC と同程度のため、地盤振動の影響を抑えるために、深い地下となることが想定される。建設コストや期間を抑えるには、極力トンネルなどを共有するほうが好ましい。そのため、Fig. 4 に示すようなレーストラック型の ERL とダンピングリングを重ね合わせたものを提案する。2 か所の直線部にそれぞれ超伝導加速空洞を配置し、周長を短くした。

ここで、KEK のつくばキャンパスを想定したレイアウトを Fig. 5 に示す。敷地はおおよそ、南北に 2 km、東西に 1 km である。すると、周回ループの半径は 500 m 以下に制限される。放射光によるエネルギー損失はエネルギーの 4 乗に比例することから周回可能なビームエネルギーが上限が決まる。そこで、ビームエネルギーが 45.6 GeV、重心エネルギーが 91.2 GeV の Z-pole を検討した。放射光によるエネルギー損失は一度の周回で数%程度である。ERL は一度周回した後、エネルギーが回収されるた

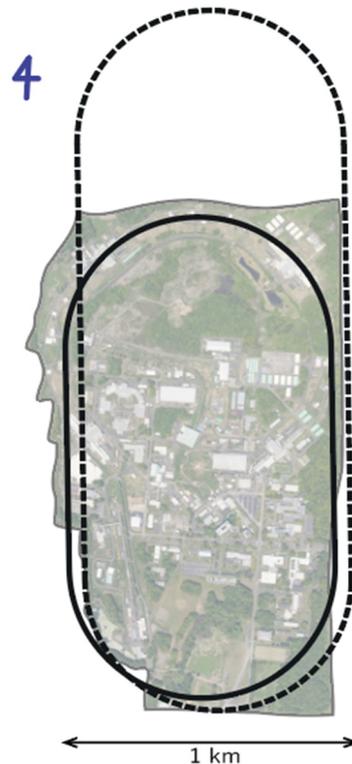


Figure 5: Schematic layout of Tsukuba campus of KEK. Solid line: double acceleration, dotted line: single acceleration.

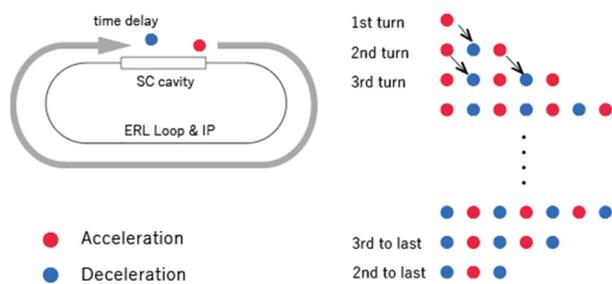


Figure 6: Energy recovery of the pulse beam and time delay. A single circle is not necessarily a single bunch.

め、数%のエネルギーロス許容範囲である。超伝導空洞は ILC と同じ 9 セルの TESLA 空洞を想定している。加速勾配は 30 MV/m で、50%のパッキングファクターとした。

建設コストや消費電力を下げるために、一つの線形加速器で 2 回加速する方法がある。超伝導空洞の数が半分で済み、トンネルを短くなるという利点があるが、周回ループの数が倍になるという点で不利である。2 回加速の場合、超伝導加速空洞のビーム電流を半分に抑える必要があり、周回ループの数が多くエミッタンスが増加する。そのため、1 回加速に比べて、ルミノシティが半分以下となり、放射光損失が数割増加する。2 回加速の大きな利点は KEK のつくばキャンパスに収まることである。そのレイアウトを Fig. 5 に示す。1 回加速の場合は若干敷地をはみ出る。

ERL 加速器全体の模式図は Fig. 4 のようになる。粒子源からのビームは線形加速器で DR のエネルギー 5 GeV まで加速し、ILC の高速ストリップラインキッカーで入射する。DR でエミッタンスが小さくなったビームはストリップラインキッカーで ERL 周回ループに輸送される。DR のバンチ長は長く、そのまま 1.3 GHz の RF 周波数で加速すると、エネルギー広がりを小さく抑えることができない。そこで、超伝導加速空洞で加速する前に半周のループでバンチ圧縮を行う。また、偏極電子を用いる場合は、スピンの向きの変換も行う。

ERL 周回ループでは 5 GeV から 45.6 GeV までの加速を行う。IP の前後は最終収束のために長い直線部を確保する。そのため、45.6 GeV で半周させる必要があるが、エミッタンスが増加しないように輸送する。衝突後にエネルギー回収のために減速するが、その周回ループは独立したループを用意する。5 GeV まで減速したのち、バンチ長を伸長しながらエネルギー圧縮を行い、DR のアクセプタンスを満たすように輸送する。また、偏極電子のスピンの向きを戻す。

この手順を 100-1000 回程度繰り返す。ERL ループや IP の平均電流は 1 mA 程度、DR の平均電流は数 A を想定している。

#### 4. RF のパルス運転とエネルギー回収

多くの ERL は RF を連続運転(CW)で動かし、100% 近いエネルギー回収効率で運転する。しかし、空洞内部

で放電を起こしやすく、加速勾配は 15 MV/m かそれ以下に制限される。加速器を現実的な大きさに抑えるため、パルス運転の RF で ILC と同程度の 30 MV/m を想定した。パルス運転により、若干エネルギー回収効率が落ちるが、高い加速勾配で線形加速器の長さを抑えることができる。加速空洞が収まっているクライオスタットの中には、空洞本体のほかに多くの構成要素がある。また、ビーム収束のための四極電磁石やモニタ類が挟まる。したがって、加速勾配と空洞の数だけで線形加速器の長さは決まらない。線形加速器全体に対する空洞の占める割合をパッキングファクターとよび、過去の ERL 計画を参考に 50%に設定した。

パルス運転ではすべてのエネルギーを回収することができない。パルス先頭のバンチを加速するときには、エネルギー回収をするバンチがないため、RF からパワーを供給する必要がある。エネルギー回収を行うには、バンチが周回して空洞に戻ってくるまで待つ必要がある。入力 RF パワーを少なく抑えるため、周回バンチが戻ってから、バンチ数を増やす。周回による遅延とバンチ構造の模式図を Fig. 6 に示す。パルス後半は逆転し、加速するバンチより、減速するバンチの数が多くなり、RF にエネルギーが戻ってくる状態になる。ここで回収されるエネルギーは加速に使用できないため、エネルギー回収効率が下がる原因となる。エネルギー回収なしで加速できるバンチ数は一つとは限らない。Figure 4 に示した ERL 周回ループでは、衝突点を通過して戻ってくるまでに、周長の 2 倍の距離がある。周長 6 km の場合は、遅延が 0.04 ms になる。ILC のパルス長 1 ms では 4%に相当する。パル

#### Electron/Positron pulse structure

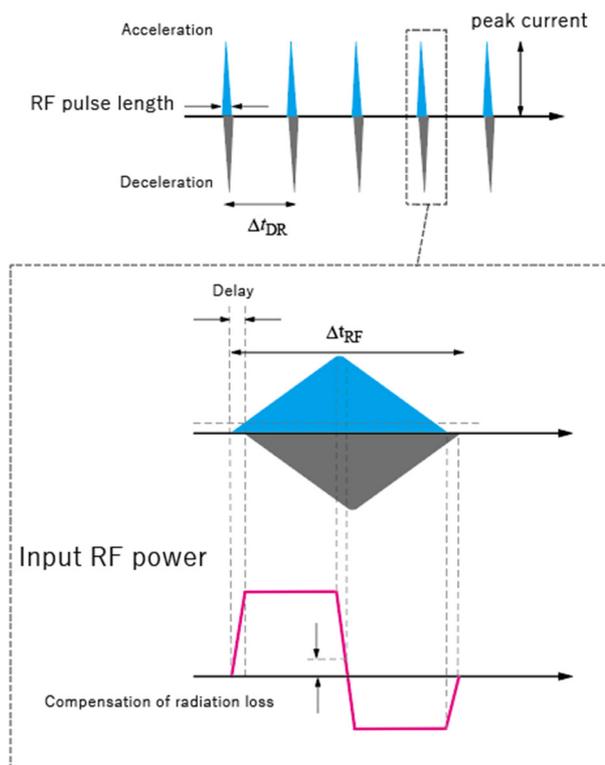


Figure 7: Pulse structure and RF input power.

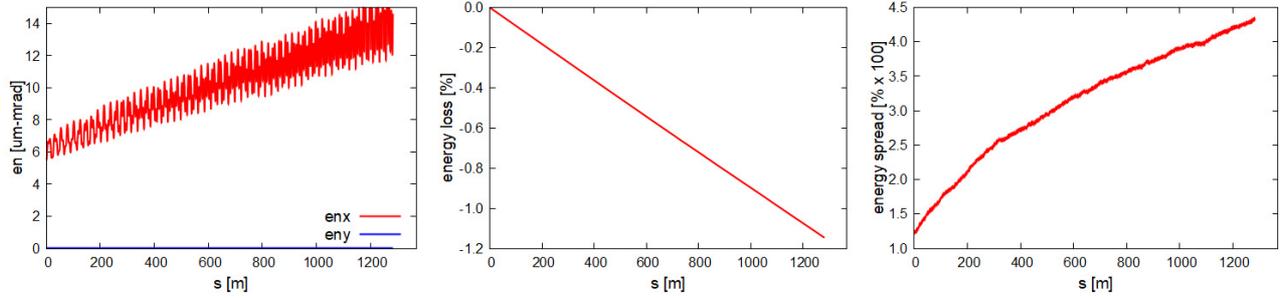


Figure 8: Tracking results at the half of the 45.6 GeV recirculation loop. Left: Transverse emittance, Center: Beam energy loss, Right: Energy spread.

ス長が長く遅延の割合が小さいほうがエネルギー回収効率が低い。

Figure 7 にパルス構造を載せる。一度衝突した後は減速し DR に戻る。時間  $\Delta t_{DR}$  をかけて放射減衰を行い、エミッタンスやエネルギー広がりなどを衝突前に戻す。その後、再び ERL 周回ループで加速され衝突点に輸送する。パルス内部の構造は Fig. 7 の下側で示している。パルス先頭から徐々に加速するバンチ数を増やす。周回したバンチが戻ってくるとエネルギー回収が成立するため、さらに加速バンチを増やすことができる。パルスの半分を過ぎたところで、加速バンチを徐々に減らしていく。RF パワーは、パルス前半で加速と減速バンチの差分を入力し、後半は戻ってくる。周回ループで放射光によるエネルギー損失が数%あるため、そのパワーは補充する必要がある。DR から 5 GeV で加速した後、周回ループの放射光損失を考慮し、衝突点で 45.6 GeV になるように加速する。エネルギー回収の際は、さらに放射光損失があることを考慮し、DR に戻すために 5 GeV まで減速する。したがって、エネルギー回収で戻ってくるパワーは放射光損失の分だけ少ない。

## 5. 周回ループの影響

およそ半径 500 m のループで 45.6 GeV の電子・陽電子を周回するためには、放射光損失やエミッタンス増加に配慮する必要がある。そこで、低エミッタンス放射光加速器で取り入れられている結合機能型電磁石を取り入れた。偏向電磁石と収束電磁石を兼ねることで、偏向電磁石の占める割合を大きくし、曲率半径を大きくすることができる。長さ 3.5 m の電磁石で曲率半径を 350 m とした。磁場は 0.43 T である。収束電磁石を兼ねているため、十分に強い磁場で収束することができる。放射励起によるエミッタンス増加を小さく抑えるには、小さな分散関数で輸送することが効果的である。最大磁場勾配 30 T/m でベータ関数と分散関数が最小になるオプティクスを設計した。電磁石の数は 320 個になる。

加速後から衝突点までの半周を ELEGANT で粒子トラッキングを行った。結果を Fig. 8 に載せる。初期値は ILC の DR を参考にした。水平方向のエミッタンス増加は 2 倍程度に抑えることができた。垂直方向には偏向しないためエミッタンス増加はない。放射光のエネルギー損失は半周で 1.2%となる。また、放射光によるエネルギー広がりには 4 倍に増加しているが、0.1%以下であり大きなルミノシティの減少にはつながらないと考えている。

## 6. ルミノシティの概算

ルミノシティは、式(1)に示すように、バンチ当たりの粒子数  $N$ 、バンチ繰り返し  $f$ 、IP の水平・垂直のビームサイズ  $\sigma_x, \sigma_y$  の逆数と比例関係にある。

$$L \propto \frac{N^2 f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \quad (1)$$

Table 1 に ILC の衝突エネルギー 250 GeV のケースと ILCと同じレイアウトで Z-pole を行うケース[10]のパラメータを載せている。ILC Z-pole ではビームエネルギー 250 GeV に対して最適化したレイアウトで 45.6 GeV に切り替える。陽電子供給の都合で繰り返しが低く、衝突点のビームサイズが大きいため、ルミノシティは ILC250 に比べて 1/5 程度になる。ERL コライダーのルミノシティの概算は ILC をもとに算して行った。大電流によって高いルミノシティが可能であり、暫定的な結果を Table 1 に示す。

大電流運転では超伝導空洞の HOM による発熱が深刻になる。発熱量は  $N^2 f$  に比例するが、ERL 放射光将来計画[3]や ERLC[5]と同等に設定した。衝突点のビーム

Table 1: Main Parameters

	ILC 250	ILC Z	Z pole ERL (single loop)
Overall			
Tunnel length [km]		20	← 6
Radiation loss per turn [%]		-	- 2.4
IP			
Average current [mA]	0.02	0.016	1.25
Bunch charge [nC]		3	3 6
Pulse repetition [Hz]		5	3.7 50
No. of bunch per pulse	1312	1312	3936
Horizontal beam size [nm]	520	1120	1580
Vertical beam size [nm]	7.7	14.6	14.6
Luminosity [1e33 cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	13.5	2.0	287

サイズは、ILC Z-pole に Fig. 8 に示したエミッタンス増加を反映して求めている。すると、ILC250 のおよそ 10 倍、ILC Z-pole のおよそ 100 倍となる。しかし、これらのパラメータが問題なく成立するかどうかを詳細に確認する必要がある。

平均電流は 1.25 mA を想定している。エネルギー回収をするため、RF の負荷は ILC よりも低い。しかし、パルス長は数 ms と長く、数 10 Hz の高い繰り返しを想定しており、空洞で電界放出が起きないように duty を考える必要がある。超伝導空洞や IP におけるパルスのピーク電流は、HOM による BBU が発生しないように目安として 10 mA 以下とする。

陽電子源は SuperKEKB と同じ方式で生成する。ILC では、アンジュレータガンマ線による偏極陽電子が基本方式になっているが、150 GeV の電子を必要とするため、本提案では不可能に近い。必要とされる電流は ILC よりも一桁小さく済むように検討をしている。これは ERL による陽電子回収効率で決まる。IP で大きくエネルギーがシフトすると、DR のエネルギーアクセプタンスから外れ、ビームロスとなる。ビームロスは 0.1 %程度を想定しており、陽電子源で補充する。

2 回加速の ERL では、つくばキャンパスに収まるというメリットはあるが、デメリットも多い。超伝導空洞の HOM 発熱で電流が半分に制限され、周回ループが増えるため水平エミッタンスが増加し、ルミノシティーが減少する。放射光損失も大きくなり、電磁石の数も増えるため、消費電力が節約できるとは限らない。

IP のビームサイズは ILC の最終収束系のオプティクスをもとにしているが、改善の余地はある。また、他の ERL コライダー計画では突出したルミノシティーと電力効率が示されている。DR の平均電流は 1-2 A を想定している。ILC のストリップラインキッカーで蹴りだせるように 3 ns 以上のバンチ間隔をあけるほか、電子雲の不安定が起きないようにバンチスペースを空ける必要がある。これらの具体的なパラメータはまだ決まっておらず、今後の課題としたい。

## 7. まとめ

ILC や ERL の技術を取り入れて、電子陽電子の ERL コライダーを提案した。衝突実験後のビームはエネルギー回収をして DR に戻し、ダンプした後、再び衝突実験に用いる。KEK つくばキャンパスの限られた敷地面積を

想定し、レーストラック型の加速器で、Z-pole の衝突エネルギーで検討した。超伝導加速空洞を ILC と同等の高い加速勾配で運転するためパルス運転でエネルギー回収を行う。周回ループにおける放射光損失やエミッタンス増加を最小に抑えるため、結合機能型電磁石を導入した。まだ概算ではあるが、コンパクトな Z-pole コライダーで高いルミノシティーを得られることがわかった。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、KEK-ATF の奥木敏行教授より、数多くの助言をいただきました。また、コンパクト ERL や SuperKEKB の方々から貴重な意見をいただきました。

## 参考文献

- [1] The International Linear Collider, Technical Design Report volume 3.II: Accelerator Base-line Design. 2013, <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] M. Akemoto *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 877 (2018) 197–219.
- [3] “Energy Recovery Linac Conceptual Design Report”, KEK Report 2012-4, [https://pfwww.kek.jp/ERLoffice/detabase/ERL\\_CDR\\_full\\_text.pdf](https://pfwww.kek.jp/ERLoffice/detabase/ERL_CDR_full_text.pdf)
- [4] M. Tigner, “A possible apparatus for electron clashing-beam experiments”, Nuovo Cimento, 37, 1228-1231 (1965).
- [5] V. I. Telnov, “A high-luminosity superconducting twin e+e-linear collider with energy recovery”, J. of Instrum. 16, 2021, JINST 16 P12025. doi:10.1088/1748-0221/16/12/P12025
- [6] V. N. Litvinenko *et al.*, “The ReLiC: Recycling Linear e+e-Collider”. doi:10.48550/arXiv.2203.06476
- [7] K. Yokoya *et al.*, “ILC Upgrade with Energy Recovery”, EPJ Web of Conferences 315, 02016 (2024). doi:10.1051/epjconf/202431502016
- [8] D. Zhou *et al.*, “Luminosity performance of SuperKEKB”. doi:10.48550/arXiv.2306.02692
- [9] “KEK 放射光 Conceptual Design Report (CDR) ver. 1.1”, [https://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS\\_CDR\\_170522.pdf](https://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS_CDR_170522.pdf)
- [10] K. Yokoya *et al.*, “Operation of ILC250 at the Z-pole”. doi:10.48550/arXiv.1908.08212