

ILC 入射部と放射光源の CW 超伝導加速器共有の提案

PROPOSAL OF SHARING OF CW SUPERCONDUCTING LINAC WITH ILC INJECTOR AND PHOTON LIGHT SOURCE

島田美帆

Miho Shimada*

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

We propose sharing of the 6-GeV class CW superconducting (SC) linac with ILC and X-ray light source. Although the main linac of ILC is operated at 1ms pulse at 5Hz, CW operation can be better solution for the positron source to avoid the thermal loading problem of the positron target. In this scheme, CW linac accelerates not only the positron beam but the GeV class driven electron beam for the conventional positron source. The stretch of the pulse duration is limited in 64 ms to ensure the damping time the at the damping ring. Thanks to the low average current of the beams of ILC and the 136 ms margin at 5 Hz, it is possible to simultaneously operate the high quality electron beams for brilliant light source, such as ERL and CW-XFEL.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) とは、全長 30km に及ぶ電子と陽電子の衝突型線形加速器であり [1]、パルス長 1ms で繰り返し 5Hz のパルス運転で、運転電力を抑えつつ電子・陽電子の最高エネルギーを目指す (Fig. 1)。

線形加速器ならではの利点を最大限に生かすために偏極性を追求しており、偏極陽電子については、150GeV の電子ビームと 200m 長の超伝導アンジュレーターで得られる 10MeV 以上の偏極ガンマ線から生成する方法がベースラインとなっている。しかし、陽電子ターゲットの熱負荷による破壊が深刻な課題となっている。パルス長を数 10 倍伸長することで、その問題を回避することが可能だが、長いパルスで 150GeV まで加速するには運転コストが深刻になる。そこで、数 GeV 程度の比較的低いエネルギーの電子をターゲットに照射する従来の方法 (電子ビーム駆動型) をバックアップとして準備することを決めている [2]。この手法で偏極性は期待できないものの、現実性が高い計画として受け入れられている。常伝導空洞を使ったスキームでは、3つのミニトレインで構成されるおよそ $1\mu\text{s}$ のパルスを 300Hz 繰り返しでロングパルスを構成しており、空洞の発熱の問題を解決している [3]。運転コストやターゲット直後のパルスソレノイド、ダンピングリングへの入射との整合性も考慮されている。この方法ではピーク電流が 500mA と高い。CW のロングパルス運転ではピーク電流を数桁小さく抑えることができるため、さらにターゲットの負荷が下げられると期待される。

一方で、KEK は放射光将来計画として GeV クラスのエネルギー回収型線形加速器 (ERL) の実現を目指して開発を行っていたという土台がある [4]。これは CW 超伝導加速空洞をベースとしたもので、試験機として数 10MeV クラスのコンパクト ERL を建設し、コミッションを経験してきた [5]。また近年、CW 超伝導空洞は高いフラックス・高い輝度の X 線自由電子

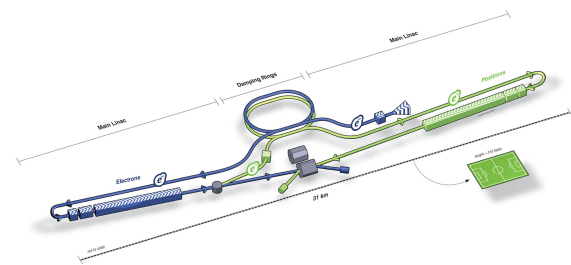


Figure 1: Schematic layout of ILC. The positron and polarized electron source, and the damping rings are located at the center.

レーザー (XFEL) として注目を集めており、SLAC では軟 X 線をターゲットに据えた 4GeV の CW-XFEL の LCLS-II 計画が進行中であるほか、EURO-XFEL も CW 運転をする計画を出している [6,7]。さらに、CEBAF、PERLE や CBETA など、粒子衝突型実験への利用も目立つが [8]、これらの計画では一つの加速空洞で複数のビームを同時運転するという特徴がある。

以上から、CW 超伝導加速空洞は陽電子ビームのロングパルス運転にも適用でき、ILC の偏極電子ビームや放射光源のための高品質の電子ビームも同時に運転できる可能性がある [9]。また、ドライブ電子を ERL に拡張すればレーザーや CSR や逆コンプトン散乱による偏極ガンマ線で偏極陽電子を生成するアップグレードにつなげることも可能である [10,11]。本発表ではその全体像の検討状況について報告する。

2. ILC 入射部および放射光源のレイアウト

ILC 入射部である偏極電子源、陽電子源、ダンピングリング (DR) までのブースターの模式図を Fig.2 を示す。ドライブ電子が加速され、ターゲットに照射して陽電子を生成する。ターゲットから取り出された直後の陽電子ビームには他のビームも混ざっているため加速空洞に対する放射線のダメージが深刻である。そのため、400MeV まで常伝導空洞で加速した

*miho.shimada@kek.jp

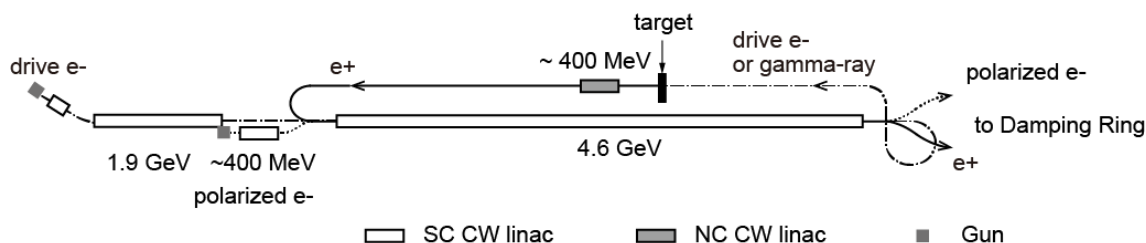


Figure 2: Schematic figure of the sources and booster of ILC. CW Superconducting linac accelerates three beams, polarized electron, positron and its drive beam. Drive electron injects at higher energy to make simultaneous beam operation easy.

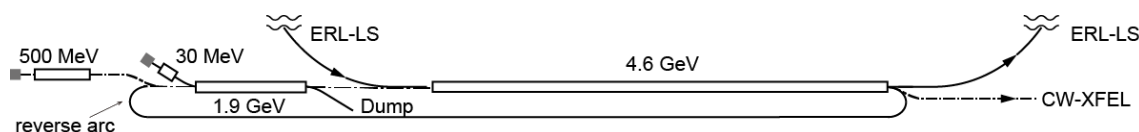


Figure 3: Schematic figure of simultaneous operation of the high quality electron beams for ERL and CW-XFEL at the CW superconducting linac. To share it with ILC, the injection energy to 4.6GeV linac are different each beams as shown in Table 1.

後に 4.6GeV 超電導加速空洞に入射し、DR のエネルギー 5GeV まで加速する。エミッタンスが電子ビームに比べて非常に大きいことから、ビームサイズを小さく抑えるためにオプティクスを陽電子に最適化する必要がある。そのため、ドライブ電子は 1GeV 以上の高いエネルギーで 4.6GeV 超電導加速空洞に入射し、ビーム調整が容易になるように設定した。また、偏極電子は陽電子と同じエネルギーで入射する。バンチの繰り返しは最大 3MHz と高く、パルス電磁石で軌道を振り分けることは困難であるが、最終エネルギーに差があるため DC 偏向電磁石でも振り分けることが可能である。このスキームで陽電子を確実に生成するには、ターゲットから 400MeV までの CW 運転についてトラッキングなどによる検討が必要である。

放射光源では、30 本近くのビームラインを挿入できる ERL と高輝度・高フラックスの CW-XFEL の共存を目指して、Fig.3 に示すようなレイアウトとした。4.6GeV 超電導加速器の入射エネルギーには数 100MeV の差をつけ、ビーム調整を容易にするため高めに設定している。ILC のビームも含めたパラメータを Table 1 に示す。ともに入射エネルギーが 2GeV 近くと大きいため、1.9GeV 超電導加速空洞を共有する。このような 2 段の超電導空洞を使う ERL の形はマトリョーシュカタイプと呼ばれているものであるが [12]、CW-XFEL を確実に発振させるため直線状に並べている。ILC と同じセル形状の空洞を想定しているため、高次モードによるビーム不安定 (HOM-BBU) が発生する電流閾値は 100mA を大幅に超えるものではないと見積もっている。そのため、ERL の目標電流を 10mA とし、1.9GeV 超電導空洞へ入射エネルギーを 30MeV とやや高めに設定した。エネルギー回収のない入射部の消費電力は 0.3MW 程度である。

偏極電子源、陽電子源、DR までのブースターおよび DR の全体のレイアウトを Fig.4 に示す。DR は周長およそ 3km のレーストラック型であり、およそ 1km

の 2 つのアーク部を持つ。そこで、同じ加速器室に ERL の周回ループを入れ、一部の直線部は電子ビームの輸送路も共有することを検討している。その直線部にはシケインや位相トロンボーンなど ERL のビームが通過しても問題のないものを設置することができるが、ストリップラインのキッカーや DR の高周波空洞、ウィグラーなどとは重ならないように配置する。このように DR の加速器室を放射光源と共有する場合はコストの面から地上に作る必要があり、検討項目の一つとなっている。

3. パルス構造とビームローディング

ロングパルスの陽電子は DR から ILC の主加速空洞に取り出すときに、1ms のパルス長に成形される。エミッタンスを十分に小さくするためには、ダンピングタイム 100ms 以上を DR で周回させる必要がある。そこで、ダンピングの間に新しいビームが入射しないようなパルス構造となるため、ロングパルスの長さは制限される。本論では、パルス長を 64ms 付近として検討を行った [3]。パルス構造の模式図を Fig.5 に示す。

一様な CW で運転すると仮定して、パルス長 1ms で 3MHz の繰り返し引き延ばされて、64ms で 47kHz と小さくした。ILC のビームはすでに述べたように偏極電子、陽電子、ドライブ電子ビームの 3 つで構成される。陽電子はドライブ電子によって生成するため、その 2 つのバンチの時間差はおよそ 0.5~1km の超伝導加速空洞の入口に戻ってくるまでの時間で決まるが、ここではおよそ 3 μ s と仮定した。偏極電子と陽電子の時間差には自由度があるが、同じ 3 μ s の間隔を持った場合について考える。そのバンチ構造を Fig.6 に示す。それぞれ、バンチ当たりの電荷が 3nC と大きく、ビームローディングの影響が懸念されるため、マイクロパルスのピーク電流を 3 \times 3nC/3 \times 3 μ s \sim 1mA として電圧変動を見積もった [13, 14]。時間 t にお

Table 1: Main parameters of beams for ILC and light source E_{full} : full energy, E_{in} : injection energy of 4.6 GeV linac, ε_{nx} : normalized emittance, q : bunch charge, I_m : mean current, ER: energy recovery. *30 deg off crest acceleration, **upgrade for laser or CSR Compton scattering schemes

	E_{full} [GeV]	E_{in} [GeV]	ε_{nx} [mrad]	q [nC]	I_m [mA]	ER
CW-XFEL	7	2.4	10^{-6}	~ 0.3	0.3	no
ERL LS	6.5	1.9	10^{-7}	~ 0.01	10	yes
Drive e-*	5.7	1.7	10^{-4}	3	0.05	no/yes**
e- for DR	5	0.4	10^{-4}	3	0.05	no
e+ for DR	5	0.4	10^{-2}	3	0.05	no

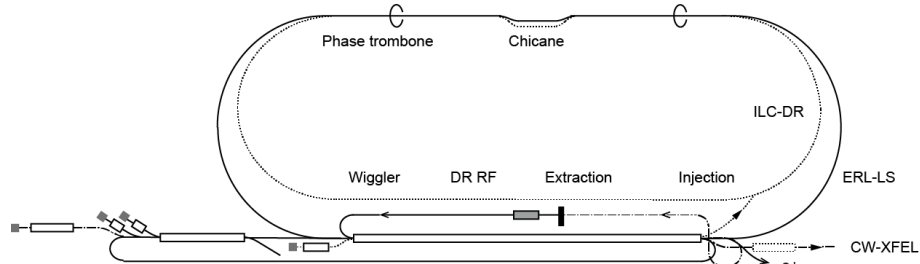


Figure 4: Schematic figure of ILC injector. DR and ERL recirculation loop share the acceleration rooms and an straight transport line.

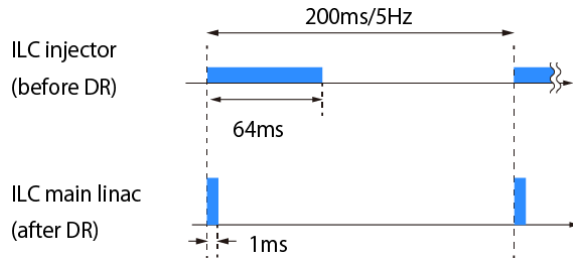


Figure 5: Pulse structure before injection to DR and after extraction from DR.

る空洞内の電圧 V_{cav} は RF 源の供給 V_g とビームローディングによる電圧降下 V_b の和で表すことができる。

$$V_{cav}(t) = V_g(t) + V_b(t)$$

$$V_g(t) = R_L 2I_g \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

$$V_b(t) = -R_L 2I_b \left(1 - e^{-(t-t_{inj})/\tau}\right)$$

ここで、 R_L は loaded shunt impedance、 I_g は generator induced current、 I_b はビーム電流、 t_{inj} は RF が立ち上がったからビームが来るまでの時間、 τ は空洞の時定数であり、 $t > t_{inj}$ のときに成立する。 $t_{inj} = \tau \ln 2$ が成立するときに電圧が一定に保たれる。しかし、時定数 τ がサブ ms であり、マイクロパルスのビームのパルス長 $9\mu s$ に比べて非常に長いいため揺らぎが生じ、TESLA 空洞のパラメータでは、およそ 0.1~0.2% の電圧変動が現れる。このような電圧変動は ILC の要求は満たすものの、0.01% 以下の小さなエネルギー広がりが必要な ERL にとっては輝度が大きく減少する要因となる。そのため、ダンピングタイムのために空

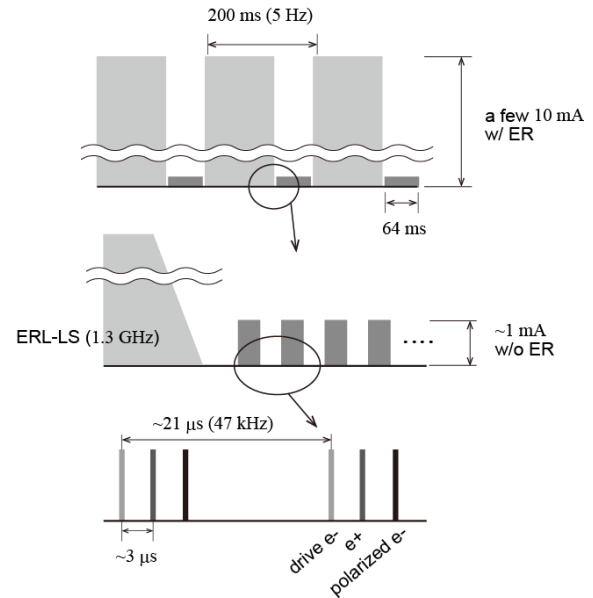


Figure 6: Bunch pattern and pulse structure of ILC and ERL.

けている 134ms の間で ERL をロングパルスで運転して、ILC のビームと重ならないようにすることを検討中である。3km の周回ループを戻ってくるまでの時間がおおよそ $10\mu s$ あることを考慮し、徐々に電流を変えていく。CW-XFEL についても同様に ILC と重ならないように運転する。CW-XFEL の電荷量は ILC 程ではないが ERL に比べて大きいため、この 2 つの放射光ビームを重ねて運転できるかどうかは慎重に検討する必要がある。

4. 超伝導空洞の線形オプティクス設計

2つの線形加速器ではエネルギーの異なるのビームを加速および減速する。このビームのエネルギーおよび線形オプティクスを Fig.7 および Fig.8 に示す。2つの線形加速器では設計方針がやや異なる。4.6GeVの超伝導空洞はエミッタンスが大きい陽電子のビームサイズを抑えるために最適化を行っており、先に述べたように電子の入射エネルギーは陽電子以上に設定した。しかし、ERLの減速ビームは出口付近で陽電子よりもエネルギーが小さくなってしまふ。そこで、線形加速器では自然エミッタンスは断熱減衰するため、200m以降では陽電子のサイズが一定となるようにベータ関数を増加させ、ERL減速ビームのベータ関数が大きくなりすぎないように配慮した。1.9GeV線形加速器ではエネルギーが低いビームに合わせて最適化した。特に30MeV付近の入射・ダンプビームは広がりやすく、蹴られやすいため HOM-BBU の原因となりやすい。そこで、クライオスタット内部に収束電磁石のトリプレットを配置し、ベータ関数を小さく抑えた。

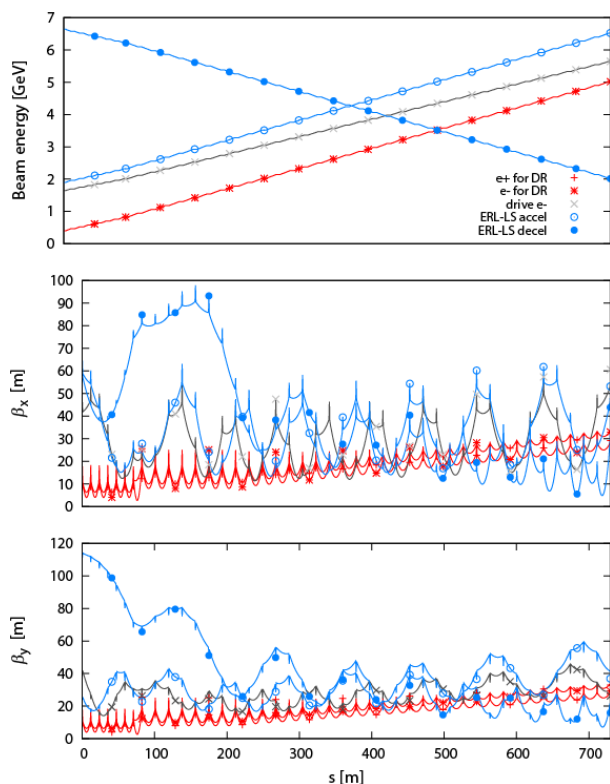


Figure 7: Beam energy and linear optics of 4.6 GeV linac for ILC and ERL beams.

参考文献

- [1] The International Linear Collider - Technical Design Report, CERN, FNAL, KEK, 2013.
- [2] KEK-ILC Action Plan, 2016.
- [3] T. Ohmori *et al.*, "A conventional positron source for international linear collider", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 672 p.55-56 (2012).

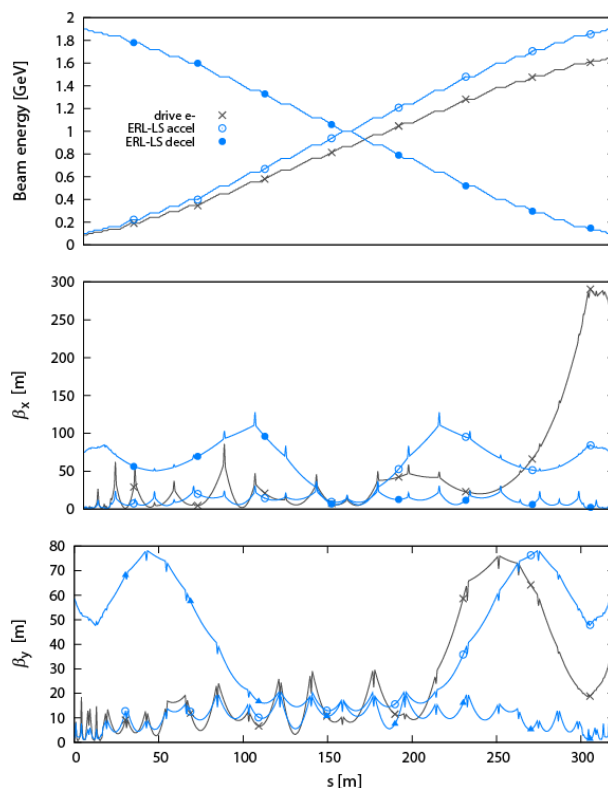


Figure 8: Beam energy and linear optics of 1.9GeV linac for ILC and ERL beams.

- [4] Energy Recovery Linac Conceptual Design Report, KEK-Report 2012-4 2012.
- [5] 加藤龍好, "KEK コンパクト ERL の現状", FSP006 in this proceedings.
- [6] LCLS-II Conceptual Design Report, 2014.
- [7] The European X-ray Free-Electron Laser Technical design report DESY 2006-097 2006.
- [8] ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs ERL17, CERN, 2017; <https://indico.cern.ch/event/470407/>
- [9] M. Shimada *et al.*, "Proposal of 6 GeV energy recovery linac hybrid machine", Proceedings of IPAC'16, Busan, Korea, 2016, pp.1598-1600.
- [10] M. Kuriki *et al.*, "ILC positron source based on laser Compton", AIP conference proceedings 980, p.92-101 2008.
- [11] M. Shimada *et al.*, "Proposal of polarized gamma-ray source for ILC based on CSR inverse Compton scattering", Proceedings of IPAC'13, Shanghai, China, 2013, pp.1598-1600.
- [12] 横谷馨, "ERL 入門", OHO テキスト (2003).
- [13] T. Schilcher, Ph.D. thesis, Universität Hamburg, 1998.
- [14] M. Omet *et al.*, "High-gradient near-quench-limit operation of superconducting Tesla-type cavities in scope of the International Linear Collider", Phys. Rev. Special Topics - Accel. Beams, 17, 072003 2014.