



PF, PF-AR の将来計画 —cERL の建設から 3 GeV ERL の実現へ—

原田健太郎 KEK-PF 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

ERL プロジェクトチーム

(KEK, JAEA, ISSP, UVSOR, JASRI, AIST, 広島大学, 名古屋大学, 山口大学, 茨城大学)

ERL 計画推進室 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

要旨 PF リング (Photon Factory storage ring) は1978年に第2世代 (放射光利用専用) 放射光源として建設が始まり, 1983年より全国共同利用実験が開始された。AR (Accumulation Ring: 現在 PF-AR: Photon Factory Advanced Ring) はトリスタン入射用ブースターリングとして衝突型リング (MR: Main Ring) への入射の合間を縫って, 1987年より第1世代 (衝突実験・放射光利用共用) 光源として全国共同利用実験を開始した。PF リングおよび PF-AR は, その後何度か高度化・高性能化の為に改造を行い, 安定度や輝度を向上させることによって, 現在も年間約4000時間の共同利用実験を行っている。しかしながら, 両リングとも建設開始から30年以上が経過し, さすがに老朽化が進み, 世界レベルでの放射光性能向上の流れから取り残されつつある。そこで, KEK では, 現在, KEK 加速器研究施設の超伝導技術を基盤にして, 次世代放射光計画としてのエネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac: ERL) の研究開発を推進している。そして, その原理実証器としての cERL (compact ERL) が KEK つくばキャンパス ERL 開発棟において, 2012年度内のビーム運転を目指して建設されている。ここでは, KEK 放射光実験施設の現状, ERL とは何か, KEK 全体の将来計画として目指す ERL 光源の性能・仕様, ERL キーコンポーネント開発の現状および cERL の建設状況について順に述べる。

1. 初めに

PF リングは1978年に第2世代放射光源として建設が始まり¹⁾, 1983年より全国共同利用実験が開始された。建設当初のエミッタンスは約460 nmrad であったが, 1986年の低エミッタンス化改造²⁾で128 nmrad, 1996年の高輝度化改造³⁾で37 nmrad まで下げられて, ほぼ現在のビームオプティクスとなった。PF リングは偏向電磁石からの放射光を主に利用する第2世代放射光源として始まったが, 当時の標準であった FODO 構造の弧部に加え, 挿入光源の利用を前提とした DBA 構造の直線部が設けられており, 超伝導ウィグラーやアンジュレータ等, 当時としては先端的な光源利用も建設直後から行われていた。2005年の直線部増強改造後⁴⁾には, やはり当時としては最新の新第3世代光源と同様に, 真空封止型短周期アンジュレータの利用が可能となり, ある程度高輝度な硬 X 線の利用が実現した。先人の先見の明とその時々職員の工夫とで, 30年間, ほぼ世界レベルを維持できている PF リングであるが, さすがに老朽化と改造の限界が見えてきている。一方, PF-AR は1980年にトリスタン入射用ブースターリング⁵⁾として建設開始され, 1987年より, 衝突実験の為にトリスタン主リングへの加速入射の合間を縫って第

1世代光源として全国共同利用が開始された。トリスタンが KEKB になると, 入射用リングは不要となり, トリスタン AR は放射光専用蓄積リング PF-AR となった。その後, 2002年の高度化により, 真空ダクトと診断系が一部更新され, ビーム寿命が10倍以上に伸び, 2時間おきの入射から1日2回の入射となり, また軌道補正を充実させるなど, 光軸の安定度が大幅に改善された⁶⁾。しかしながら, 主要電磁石および電源, 高周波加速空洞システム, 入射路・入射システムなどのハードウェアはほとんど建設当時のままで運転されている。老朽化は着実に進行しており, 毎期の運転ではそれらの機器で何かしらの故障が起こっている。ビームオプティクスも建設当時から変わっていない。それにも関わらず運転され続けているのは, 放射光源としては世界で3番目に高いエネルギー6.5 GeV で運転され, しかも世界で唯一の常時シングルバンチ運転を行っているリングであるとい貴重価値からであろうか。30年前のリングでも, 十分な光束の硬 X 線と時間分解実験の可能性があれば, これまでは利用価値があったと思われる。PF における低エミッタンス化, AR における硬 X 線とシングルショット放射光, それらが将来計画を考える上での重要なキーワードとなる。硬 X 線まで光が利用可能で, さらに, 現在の蓄積リングに対し, 超低エミッタンス, 超

短パルスの光を作り出すことが可能な光源、その候補となるのがエネルギー回収型線形加速器（Energy Recovery LINAC: ERL）である^{7,8)}。

KEK 放射光実験施設では、PF 高輝度化改造完成後の1997年頃から将来光源への議論が始まり、2003年には途中経過として ERL 光源計画が発表された⁹⁾。その後、2004年度には蓄積リング型光源、FEL を含めた光源の比較検討がさらに詳細に行われ、2005年度末には KEK 全体として ERL 計画を実際に進めることがほぼ明確となった。2006年からは具体的な原理実証器としての cERL の設計研究が KEK, JAEA を中心として、全国の様々な施設の加速器研究者の協力の下で始められ、2007年末にその概念設計書が完成し、2008年1月末に出版¹⁰⁾された。2009年には PF の放射光源系は物構研から加速器研究施設に融合され、KEK 加速器施設全体として ERL を推進することになり、ERL 試験器である cERL の建設予定地の東カウンターホール（現在は正式に ERL 開発棟と改称）の改修工事及びヘリウム冷凍機の整備が行われた。現在、高輝度大電流電子銃や超伝導加速空洞などの各要素の開発研究とあわせ、cERL の建設を行いながら、実機 ERL の具体的な詳細設計を始めた段階である^{11,12)}。放射光研究施設としての KEK の役割は、常に世界最高の実験が行える様な最高性能の光源加速器を建設し、そこから発生する最先端の放射光をユーザーに供給し続けることである。KEK が長い間開発を続けてきた超伝導加速器技術が集結している ERL は、まさに KEK の使命とその目的にふさわしいと言えるだろう。

2. ERL とは

ERL は線形加速器を基にしたリング型の加速器で、全体は入射部、主線形加速器、周回部、ビームダンプからなる（Fig. 1）。入射部で作られた超高品質の電子ビームは、主線形加速器で加速され、周回部で放射光利用が行われ

る。その後、再び主線形加速器に戻り、減速され、最後にビームダンプで止められる。加速したビームを同じ線形加速器で減速することでビームのエネルギーを回収し、それを次のビームの加速に用いることができるので、エネルギー回収型線形加速器という。目標とする電子ビームのエミッタンスは、10 keV の X 線で回折限界に達する 10 pmrad 程度、平均電流値は蓄積リング並みの 100 mA、極短パルスモードも用意され、その場合のパルス長は 100 fs 以下が目標である。ところで、蓄積リングでは、電子ビームのエミッタンスやバンチ長などのパラメータは、蓄積リング側のビーム光学パラメータによって決められる。どのような状態の電子ビームであっても、蓄積リングに入射、蓄積されれば、放射励起と放射減衰の平衡状態となり、蓄積リング側で決まるビーム品質になる。平衡状態で極低エミッタンスを実現する為には、大きなリングに密に電磁石を並べる必要があり、また、極短パルスは放射平衡状態ではほぼ不可能である。そこで、ERL では放射平衡を避けるためにビーム蓄積を行わず、常に入射部から供給される高品質の新しい電子ビームで放射光利用が行われる。周回部で放射光を出して品質が悪化したビームは、減速された後にダンプで止められ、再度利用されることはない。ただし、線形加速器を使って平均電流 100 mA を常に供給する為には、エネルギー回収することが必須となる。例えば、エネルギー 3 GeV で平均電流 100 mA のビームを作る為には、ビームに直接与えられるエネルギーだけでも 300 MW となり、また、このビームを減速なしに止めるには、300 MW を熱として吸収するビームダンプと放射線遮蔽が必要となる。KEK の電子陽電子入射器でもビームに直接与えられるエネルギーが数百 W、インフラを含む全消費電力が数 MW でしかないことを考えると、数 GeV、100 mA の電子ビームを連続的に生成する上で、エネルギー回収することがいかに重要かがわかる。

ERL では、入射部で超高品質のビームを作り出すことが絶対条件である。蓄積リングと異なり、電子ビームは平

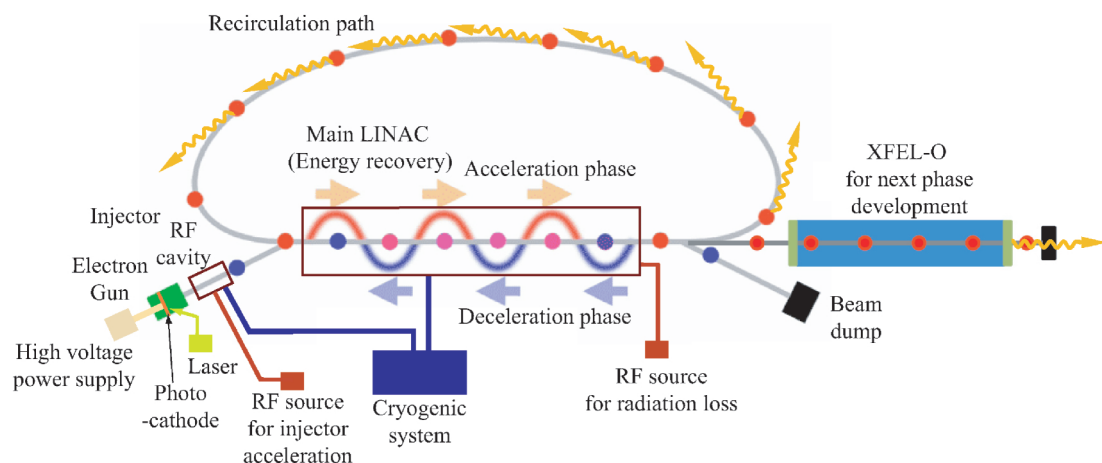


Fig. 1 Concept of ERL.

衡状態にはならないので、入射部での電子ビームの品質が ERL 全体のビーム品質の上限を決定する。また、蓄積リングの場合は入射器ではなく、蓄積リングのラティス設計がビーム品質を決めるが、ERL では周回部の設計はビーム品質の悪化を如何に防ぐかが焦点であり、バンチ圧縮を別にすれば、周回部でビーム品質が向上することはほとんどない。最も上流の電子銃では、陰極から出る電子のエミッタンスが小さいことが必要で、その為には熱エミッタンスが小さい光陰極電子銃が適している。電子ビームのエミッタンスが低エネルギー領域で悪化する原因は、電子同士のカロン反発力である空間電荷効果であり、それは電子のエネルギーが高くなるほど相対論的效果で低減される。従って、電子銃で陰極から電子を引き出す電圧は高い方がよい。高電圧、大電流、長寿命、低エミッタンスの光電子銃の開発は ERL の最重要テーマの一つである。空間電荷効果を抑える為には、電子はできるだけ早く、ある程度のエネルギーまで加速した方がよい。従って、電子銃直後に加速空洞を設置するが、そこで加速に使われるエネルギーは減速によって回収されることはなく、ビームダンプで熱に変えられる。従って、入射部の加速空洞には、ビームを加速する為に必要な全てのエネルギーを常に与える必要がある。例えば、100 mA のビームを10 MV の電圧で加速するなら、それは1 MW である。入射部の空洞の為に、非常に大きな RF パワーに耐えられる超伝導 RF 空洞及び RF 結合器が開発されている。入射部では、電子は超相対論的ではない為、エネルギー差は速度差となり、到達時間差となる。上流部分の誤差は下流には拡大されて伝搬する為、入射部は最も精密に作らなければならない部分である。

入射部から合流部を通り、ビームは周回部に入る。合流部は入射部からの低エネルギーのビームと、周回部で使用後の高エネルギーのビームを合流させ、主線形加速器へ導く部分である。運転条件によって高・低エネルギーのビームのエネルギー比が変わる可能性があるため、ある程度の柔軟性が必要となる一方、空間電荷効果や曲げられることによって発生するコヒーレント放射光の効果を抑えながら、無理のない電磁石配置を実現しなければいけない。

主線形加速器でビームは放射光利用の為に必要なエネルギーまで加速される。このエネルギーは回収される為、主線形加速器の空洞に対しては、大パワーの RF 系は不要である。一方、ビーム不安定性の抑制は非常に重要で、その為に高調波の減衰や、加速管内のビーム光学的な最適化が必要となる。高加速勾配の加速管を使えば加速空洞の数は減らせるが、大電流でのビーム不安定性の抑制が難しくなるとともに、冷凍機への負荷は増大する。また、空洞の品質によっても、加速電圧によって冷凍機負荷が大きく変動する。多数の空洞を生産した時の一定の品質の維持、ある程度の品質のばらつきに対する安全性の確保、与えられた冷凍機容量で十分な加速勾配を達成できて、ビーム不安定性を励起しない安定かつ安価な超伝導加速空洞の開発が、

電子銃と並ぶ ERL の最重要課題の一つである。

さて、線形加速器では一般に、エネルギーで規格化した規格化エミッタンスが保存量となる。ビームが加速されると、ビームの進行方向の運動量のみが増大する為、ビームの発散角は小さくなり、ビームの自然エミッタンスは減少する。それを断熱減衰という。実際のビームサイズや光の性質を決める自然エミッタンスは、超相対論的な領域では、ビームエネルギーに逆比例して減少してゆく。例えば、電子を5 GeV まで加速した時の自然エミッタンスは、同じ電子の1 GeV の時の値の20%に減り、光学関数にもよるが、ビームサイズは約44%まで小さくなる。

主線形加速器で加速されたビームは、周回部で放射光を出しながら、再び主線形加速器入り口まで戻される。超低エミッタンス、極短バンチなどのビーム品質を維持することが周回部の設計の目標となる。特に、パルス長が短い大電荷のバンチからは、バンチ長と同じ波長域まで長波長側で強いコヒーレントな放射光 (CSR) が出るが、それはバンチの先頭側の電子を加速、後尾側を減速する様なビーム不安定性と等価な働きをする。CSR によるエネルギー広がりが増大は、エミッタンス及びバンチ長などのビーム品質の悪化を招くが、CSR の効果は集団的かつ系統的である為、ビーム光学的な設計の最適化で、ある程度の抑制が可能である。超高輝度または極短パルスの光を出せるという点を除けば、平均電流値や光の繰り返し周期、ビームライン配置や同時に使えるユーザー数などについては、ERL は既存の蓄積リングとほとんど同じである。超高輝度や極短パルスを生かした最先端の実験から、高光束が必要な偏向電磁石ユーザーまで、幅広いユーザー層の同時利用が可能である。

主加速器に戻ってきたビームは、減速、エネルギー回収された後に取り出し部でビームダンプへと導かれる。数 MW のビームダンプは熱的にも放射線的にも大規模なものとなる。また、使用済みのビームはビーム品質の悪化が激しいことが予想される為、ビームをきちんと損失なくダンプへ導くことが、取り出し部やビームダンプ部の設計の目標となる。蓄積リングの場合、蓄積中に失われたビームは入射によって継ぎ足されるまで、失われたままである。また、入射は通常、数 Hz と、非常に繰り返しが遅い。一方、ERL の場合、RF 周波数1.3 GHz に同期して、全電流分の電荷のバンチが常に入射されている。その為、ある部分で望まぬビーム損失が起り始めると、エネルギー回収効率の低下が許容範囲内である限り、同じ場所に新しいビームが当たり続ける。これは、ほとんどビーム溶接と言ってもよく、熱的、放射線的に非常に危険である。もちろん、蓄積リングにおいても、望まぬビームロス真空事故や超伝導状態のクエンチを招く為、特に大電流、高エネルギーの蓄積リングでは何重にも保護対策が講じられている。ERL では、蓄積リングと比べると遙かに少量のビーム損失に対しても、きちんと対策を講じることが重要となる。

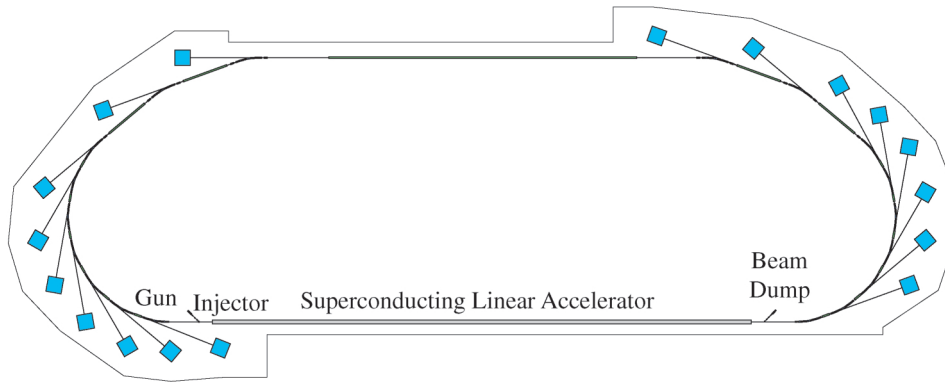


Fig. 2 Conceptual design of 3 GeV class ERL.

3. 目標とする ERL 将来光源の設計状況

2003年に目標とした ERL は、主線形加速器の長さ約 400 m、加速勾配は最大約 20 MV/m、周回部は 2 ループで、2 回の加速後のビームエネルギーは最大 5 GeV、電子ビームのエミッタンスは水平垂直とも 10 pmrad であった。これはエネルギー 10 keV、波長約 1 Å の硬 X 線が挿入光源の 1 次光として回折限界となる様に決められた。極短パルスモードではパルス長は 100 fs 以下、建設費は約 800 億円以上と見積られた。予算的に大規模な計画は非現実的で実行が困難である為、既存の挿入光源性能を仮定すると硬 X 線領域の性能は若干落ちるが、将来的な挿入光源開発に期待し、予算規模 300 億クラス、3 GeV、1 ループの ERL 計画に変更された (Fig. 2)。この変更に伴い、電子ビームのエミッタンスは 5/3 倍の約 17 pmrad、典型的なビームサイズは 1.3 倍となる。挿入光源に対しては、ある波長の光を同じ次数で発生させる為には周期長を短くしなければいけないが、既存の技術では周期長と磁場の強さに限界がある為、X 線領域では高次光の利用が必要となる。既存の技術のみを組み合わせた場合、3 GeV クラスでは通常の軟 X 線から X 線領域で、アンジュレータ光として 10^{22} オーダーの輝度が確保できる (Fig. 3)。ただし、波長可変域に制限がつく (ギャップを変えた場合にスペクトルが一部不連続となる) が、狙った波長で 10^{23} 台の輝度を確保することもできるし、挿入光源や電子銃開発が進めば、さらに上の輝度を目指すことも可能である。現在、その詳細な設計と予算の積み上げが行われている。

ERL はリング型光源であり、30 本程度の挿入光源ビームラインおよび偏向電磁石ビームラインを利用することができる。すなわち、従来の蓄積リングで行われてきた様々な汎用的な測定を、全てのユーザーが高度化しつつ継続して行うことが可能である。また一方で、ERL は線形加速器を基盤とする先端的なビーム性能を持っており、第 3 世代光源を上回る回折限界、空間コヒーレンス、100 フェムト秒の短パルス測定が実現可能である。さらに、ERL

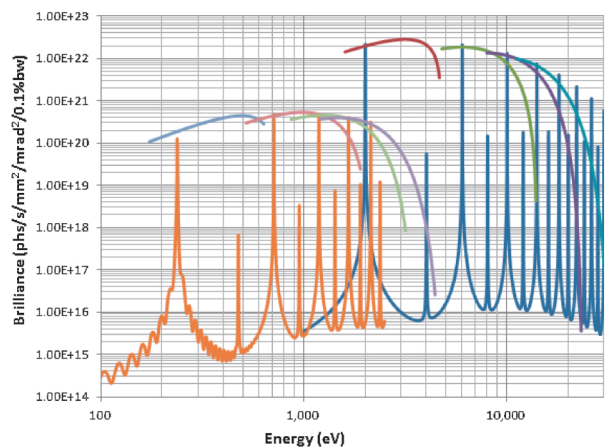


Fig. 3 Typical undulator spectra for 3 GeV ERL. (For calculation, undulator period λ_u 18 mm, total pole length L 30 m and maximum K 1.99 (hard X-ray undulator), and undulator period λ_u 120 mm, total pole length L 30 m and maximum K 2.50 (soft X-ray undulator).)

では、常に新しい電子ビームが入射器から供給され続ける為、電子ビームに外部から摂動を加えても、次のビームに履歴が残らない。このような特徴を活かすと、ERL は、1 MHz–1 GHz 程度の比較的高繰返し周波数で、共振器型 XFEL (XFEL-O)¹³、Self-seeded XFEL、Echo-enabled Harmonic Generation (EEHG)¹⁴ など、時間コヒーレンスを備えたより先端的な光源へと発展可能である。例えば EEHG は、電子ビームとレーザー光との相互作用により、アト秒オーダーのフーリエ限界 X 線パルスを生じさせる方法である。また、エネルギー回収を行わない 2 回加速モードを用いれば、6 GeV の電子ビームを使って XFEL-O が実現可能である。現在、ERL をベースとしたこれらの光源開発の可能性についても検討を進めている。

4. cERL の要素開発及び建設の現状

2012年度末のビーム運転開始を目指し、ERL の原理実

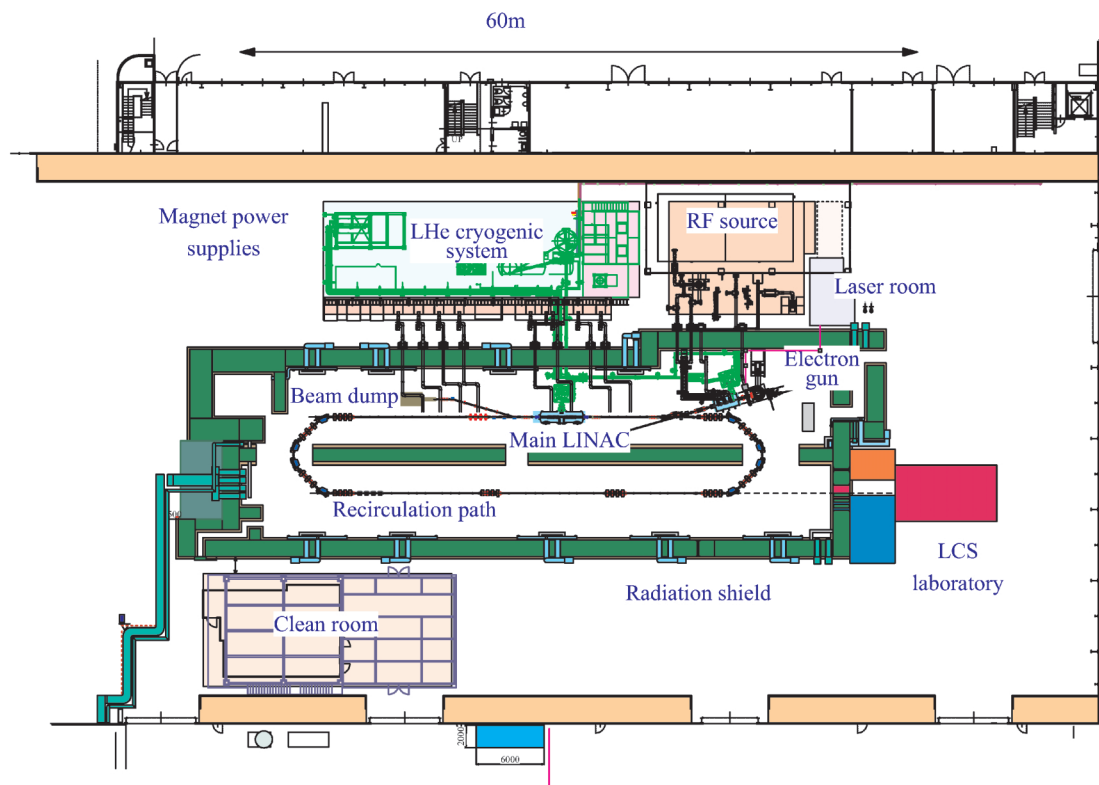


Fig. 4 Layout of cERL.

Table 1 Main parameters of cERL

Parameters of cERL	
Beam energy	35–245 MeV
Injection energy	5 MeV
Average current	10–100 mA
Acc. gradient (main linac)	15 MV/m
Normalized emittance	0.1–1 mm•mrad
Bunch length (rms)	1–3 ps (usual)~100 fs (with B.C.)
RF frequency	1.3 GHz

証器である cERL (Fig. 4) が KEK つくばキャンパスの ERL 開発棟で建設中である。主要なパラメータを Table 1 に示す。最終的には 2 ループの周回部と、9 セルの主加速空洞 8 本を用い、245 MeV まで加速することが目標であるが、2012 年度には周回部は 1 ループ、主加速空洞 2 本で 35 MeV で運転を開始する予定である。今後、平均電流値を含めた最終目標に達するまでには、冷凍機容量の拡張、主加速空洞モジュールの追加、入射部の増強、外側周回部の建設等が必要である。

電子銃¹⁵⁻²⁰⁾

最初の実証機として、加速電圧 500 kV、ビーム電流 10 mA の電子銃開発を JAEA, KEK, 広島大学, 名古屋大学が共同で進めており、1 号機および 2 号機の開発がそれぞれ JAEA および KEK にて進められている。

JAEA では、500 kV 電子銃 1 号機の開発が行われており、ガードリング電極を設置した分割型セラミック加速管を用い、2009 年 11 月にカソードサポート電極を挿入した状態で、世界で初めて 500 kV の電圧印加に成功した。その後、カソード電極を設置し、2010 年 10 月にカソード電圧 300 kV において 5.7 μ A のビーム引出しを確認後、エージングを進め 2011 年 2 月までに 466 kV までの高電圧印加が行われた。現在は 500 kV 印加に向けたコンディショニングが進められている。

KEK では、2 号機の開発が 2009 年より進められている。2 号機は、1 号機で得られた結果をフィードバックしつつ、特にカソード寿命問題に直結する極高真空生成に力点を置いた立上げを行っており、山口大学および産総研圧力真空標準研究室の協力のもと、電子銃の各構成要素のガス放出速度の評価ならびに超高～極高真空領域での主排気系の排気速度評価を 2010 年より取り組んでいる。現状では、組上げた実際の装置で全ガス放出速度が 1.0×10^{-10} Pa \cdot m³/s と非常に低く抑えられていることを確認し、主排気系のベークブルクライオポンプでは、He および H₂ を除く各種ガスについて極高真空環境下においても十分高い排気能力を有することを確認している。また、2011 年度より 600 kV 高圧電源を用いたエージングを開始し、2012 年度中に極高真空となった電子銃よりビームを引き出す予定となっている。

広島大学では、小型の直流電子源装置を開発・利用して

NEA 表面の寿命評価および装置からのガス放出速度の評価についての試験が行われている。

カソード開発および評価に関しては KEK において、名古屋大学にて開発された 200 kV 電子銃を用いたカソード評価試験が 2010 年 12 月より行われている。エミッタンスの波長・QE 依存性や活性層厚の異なるカソードの応答性、レーザ波長と応答性の関係、カソード寿命試験などの多くのカソード評価測定が可能であり、エミッタンス・量子効率・応答性・寿命について、ERL 仕様最適化したカソード開発が名古屋大学と共同で進行中である。

ドライブレザに関しては、KEK において、市販の繰返し周波数 1.3 GHz のファイバレーザ発振器とファイバ増幅器を組み合わせたシステムに、独自に開発を進めている共振器型 SHG を加え、10 mA の電子ビーム生成が可能となる、励起波長約 530 nm、平均出力 1 W 級のレーザシステムの構築を進めている。

他方、東大物性研・産総研・茨城大では、フォトニック結晶ファイバ増幅器を用いた高出力レーザ開発を進めており、これまでに波長 1030 nm、繰返し 85 MHz にて平均出力 31 W の増幅に成功している。またファイバレーザシステムによって得られた高いレーザ出力を、非線形光学材料でもあるフォトニック結晶ファイバへ通すことにより、広帯域なレーザ光を生成する試験を進めており、適切な励起波長のレーザ光で陰極を励起することで、エミッタ

ンスを低く抑えるための準備が進められている。

入射部空洞²¹⁻²⁵⁾

入射部空洞は、cERL では、約 10 mA の電子ビームを、エネルギー約 500 keV から 5 MeV まで加速することが目標であるが、現在、ERL 実機で必要な、最大 100 mA の電子ビームを 10 MeV まで加速する目標に、各構成要素部品の開発を行っている。3 台の 2 セル超伝導空洞を内蔵する cERL 用入射器クライオモジュールを Fig. 5 に示す。各 2 セル空洞には、高周波電力を供給するために上下 2 本の大電力入力結合器が取り付けられ、また、空洞内を通過する電子ビームによって誘起される高調波モードを取り出す為、5 台の HOM カップラーが取り付けられている。cERL での入射部空洞の運転において、各空洞の運転加速電界と入力結合器 1 本あたりの投入高周波電力は、それぞれ、第 1 空洞では 6.5 MV/m、約 10 kW であり、第 2、第 3 空洞では 11 MV/m、約 25 kW となる。すでに、2 台のプロトタイプ空洞での縦型性能試験（縦型のクライオモジュール内で行う、ビームなしの超伝導状態での RF 投入測定試験）が行われ、その結果として、両空洞において 40 MV/m が達成されたが、HOM カップラーでの発熱が問題点として判明し、その改善に取り組んでいる。また、2 台のプロトタイプ入力結合器の、テストスタンドでの大電力試験を行い、CW で 50 kW までの運転が確認され

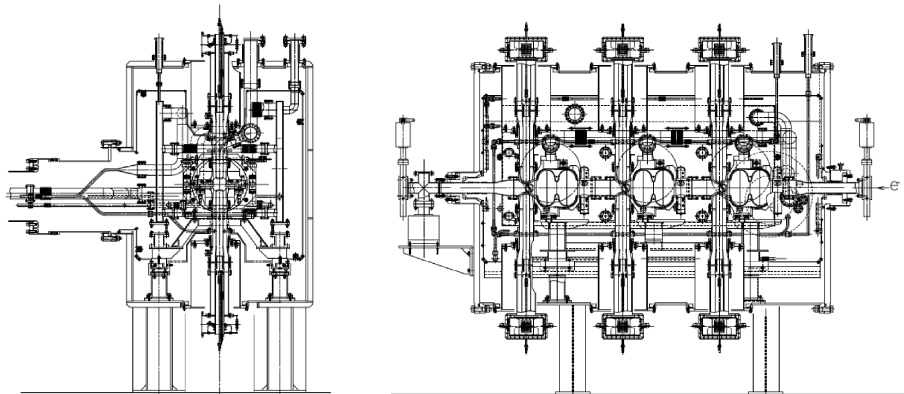


Fig. 5 Design of cERL injector cryomodule.

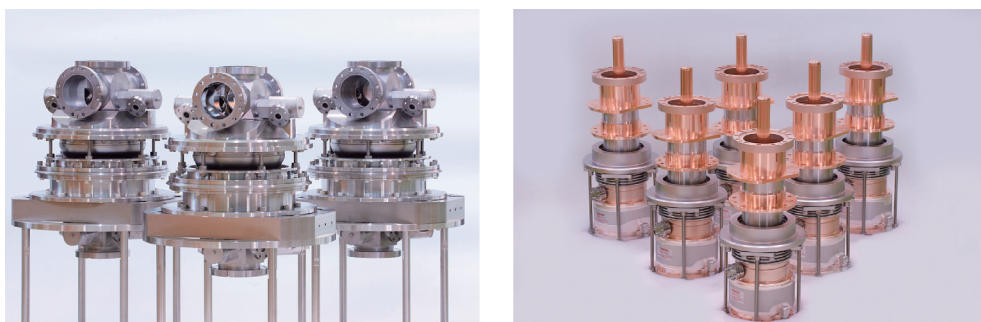


Fig. 6 Three 2-cell superconducting cavities (left) and six high power input couplers (right) for injector cryomodule.

た。従って、cERLの運転に必要なとされる性能の確認にはほぼ目処がついている状況である。

cERL用入射器クライオモジュールに組み込まれる3台の2セル超伝導空洞と6台の大電力高周波入力結合器の製作はすでに完成しており、それをFig. 6に示す。これらの2セル空洞の表面処理および縦型性能試験は現在進行中である。今後、空洞性能確認後、2011年末までにはチタン製ヘリウム槽ジャケットの溶接工程へと進む予定である。また、同時期までに6台の入力結合器のテストスタンドでの大電力試験を終了し、2012年2月頃から入射器クライオモジュールの組み立てを開始、高圧ガス完成検査を経て、5月頃には最初の冷却試験が行えるようなスケジュールで取り組んでいる。

ビーム光学設計^{26,27)}

ERLの光学系の設計には、いかにして超低エミッタンスビームの品質を保持しながら輸送するか、という大きな課題がある。電子銃直後の低エネルギーの領域において、バンチあたりの電荷量が最大77 pCであり、バンチ長が数psから数十psと短いため、空間電荷効果によるエミッタンス増大が無視できない。この影響は β 関数にも歪みを与えるため、マトリクスによる計算が不可能である。そこで、空間電荷効果の影響が大きい低エネルギーでは、General Particle Tracer (GPT)によるシミュレーションを行っている。一方、周回部でも、CSR wakeによるエミッタンス増大が懸念されている。この影響は、バンチ長が短いほど顕著で、電子のエネルギーによらない為、特にエネルギーの低いcERLでは実機よりも大きな影響を及ぼす。GPTはこのCSR wakeのシミュレーションも可能だが、計算に膨大な時間がかかるという欠点がある。周回部は入射部に比べて距離が長く、加速直線部は異なるエネルギーのビームに対して最適化するために線形オプティクス設計にも繰り返し演算を必要とする。そのため、周回部の光学系の設計には1次元のCSR wakeの計算が可能なelegantを使用している。このように、場所や電子エネルギーによって異なる計算コードで最適化をする方法はStart-to-End simulationとよばれており、今回のcERLの光学系でもそれを行っている。計算コードの切り替えは、35 MeVに加速した直後で行っている。Fig. 7に周回部の β 関数および分散関数を載せる。全周にわたって β 関数を30 m以内にすると同時に、ビームが広がり易いビームダンプへ向かうラインでのビームサイズを3.4 mm以下に抑えている。

周回部空洞²⁸⁻³¹⁾

周回部空洞開発は、高電界での連続波運転(CW: continuous wave)と100 mA級の大電流加速を可能にする超伝導空洞の実現をめざして、2006年にKEK, JAEA, ISSPが合同チームを結成して活動を開始した。

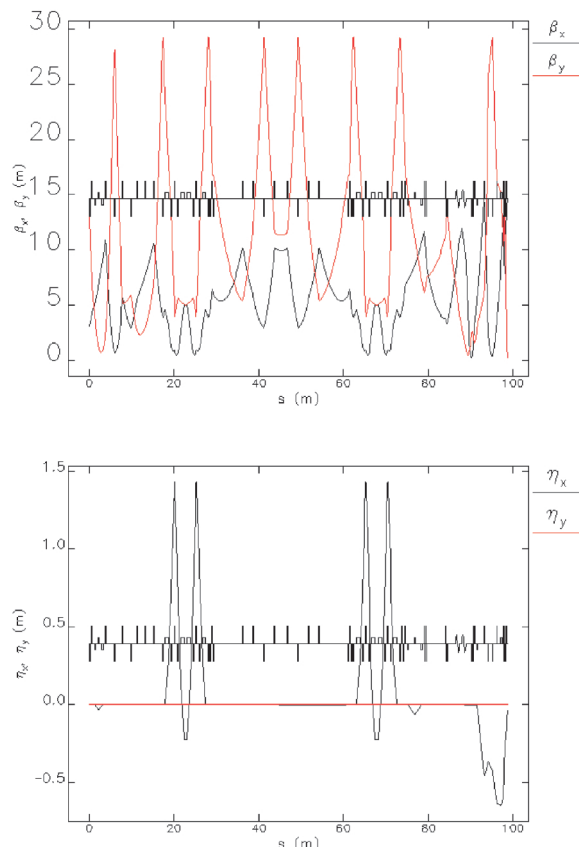


Fig. 7 Optics for the first commissioning of cERL with 1-loop recirculation path of 35 MeV beam energy.

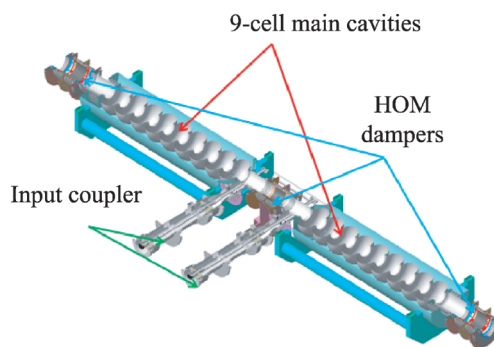


Fig. 8 Configuration of main superconducting cavity module.

空洞本体には、KEKが進めるリニアコライダー計画で開発された1.3 GHz超伝導空洞技術とKEKB加速器に使われている大電流加速用超伝導空洞技術とを基礎として、新たにERL用途に最適化された9連型空洞を設計(Fig. 8)した。アイリス口径を大きくして高調波を取出し易くするとともに、大口径ビームパイプの先にフェライト吸収体を配置して高調波を減衰させる。また、ビームパイプ部にEFB (eccentric fluted beam pipe)と呼ばれるモード変換器を取り付け4極モードの減衰を行うなどの特徴ある設計により、9連空洞にもかかわらず加速ビームと回収ビームを合わせた200 mAのビーム負荷に耐える構造になって

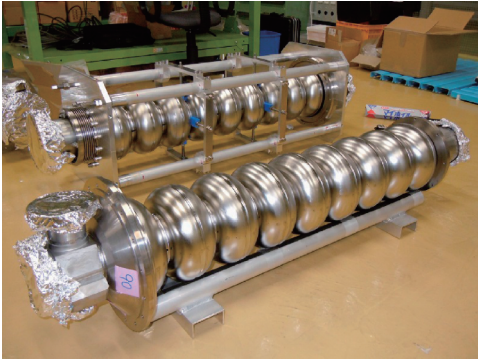


Fig. 9 9-cells superconducting cavities.



Fig. 10 Cryogenic system.

いる (Fig. 9)。

高周波電力としては、周波数変動に対して安定な加速電場を保証するために20 kW を想定し、そのための入力結合器を設計した。電力移送とともに断熱真空を通過するカプラーの冷却、2 K 空洞への熱侵入の低減などの熱設計が必要であった。

短パンチが空洞内に励起する高調波は40 GHz 以上にもおよぶ広帯域であり、電力も100 W を超えると推定される。これを吸収するフェライト吸収体は液体窒素で冷却されるが、隣接する2 K の超伝導空洞への熱侵入を防ぐ工夫が必要である。

これらの要素開発はほぼ完了し、試作空洞では設計値15 MV/m に対し25 MV/m 以上の加速電場が得られており、結合器も窒素温度で25 kW の電力試験に成功、また高調波減衰器についても低温での吸収特性の計測などが行われた。現在はこれらを集約するクライオスタットの設計を進めており、2012年の完成をめざしている。

ヘリウム冷却システム

2009年度より建設を行ってきたcERL用2 Kヘリウム冷却システム (Fig. 10) は、2010年8月に高圧ガス保安法に定める茨城県による完成検査を受検、合格し、正式な運転が許可された。物質・材料研究機構から移設されたTCF200ヘリウム液化冷凍機 (冷凍能力500 W@4.4 K, 液化率250 L/h) は既に長時間に亘って運転されていたため、ヘリウム液化冷凍機の配管内部を洗浄し、液化冷凍機の性能回復を目指した。配管の洗浄には長い時間をかけて、液化冷凍機の運転に万全を期した。2011年1月に移設後初の運転を行い、無事、ヘリウムの液化に成功した。その後、容量3,000 Lの液化ヘリウム貯槽の冷却を行い、液化冷凍機で生成した液体ヘリウムを貯槽内へ移送して、液体ヘリウムの貯蔵を行っている。

高周波源³²⁻³⁴⁾

cERLでは高周波源としては、30 kWクラスのクライストロンおよびIOTを合計3台、また300 kWクライス

トロンを1台を利用する予定である。30 kW高周波源は、バンチャー、入射部第一空洞およびメインリニアック (2空洞のベクターサム)、300 kW高周波源は、入射部第二空洞、第三空洞のベクターサム運転に利用する。最大の高周波源である300 kWクライストロンおよび30 kWのIOTについては、2010年度に受け入れ試験を終えている。今年度、バンチャー用IOTを購入すれば、cERL用の大電力高周波源は全数がそろえることになる。これらIOTやクライストロンを駆動する為の電源についても、すでにERL開発棟に設置済である。高周波源と空洞間の立体回路系 (高周波分岐や高周波モニター用のカプラー、サーキュレータなどを含む) については、現在、放射線シールドの貫通口を通して接続するための配置設計を進めている。

cERLでは空洞電界について、振幅安定度0.1% rms, 位相安定度0.1度 rms が求められている。これらの要求仕様を満たすために、これまで、J-PARCリニアックやSTFにおいて開発してきた高周波デジタルフィードバックシステムを採用する。デジタル系の中心となる高速ADCを搭載したFPGAボードについては、 μ TCA規格に則ったものを開発しており、現在評価中である。

5. 今後のスケジュール

現在、cERLの建設と必要な要素開発を、2012年度末のコミッショニング開始を目標に進めている。高輝度電子銃では、300 kVの高電圧を印加したビーム引き出しに成功し、極高真空の達成に向けた準備を進めている。ビーム光学設計も、様々なモードに対する電子銃からビームダンプまでの一通りのシミュレーションが完了しつつある。入射器用と主加速器用の2つの超伝導クライオモジュールも、2012年末には完成する予定である。周回部の電磁石については、プロトタイプの磁場測定を行うとともに、量産を開始している。RF源については、管球と高圧電源の調達

がほぼ終わり、調整試験と cERL 用立体回路の構築に向けた準備、デジタルローレベル系の開発等を行っている。液体ヘリウム冷凍機についても液化に成功し、想定以上の性能を確認し、現在絶対温度 2 K のためのシステムの整備中である。ERL 開発棟内では残留放射化物の撤去が完了し、放射線シールドの設計がほぼ終了した。放射線シールドは 2011 年秋から 2012 年夏の期間に建設される予定で、建設後に cERL の周回部等の機器が設置される。一部の機器 (クライオモジュール等) については、シールドが一部完成した時点で設置され、性能試験を始める予定である。

謝辞

各部の原稿、図及び全体の構成等に関し、足立伸一氏、山本将博氏、西森信行氏、本田洋介氏、加古永治氏、島田美帆氏、古屋貴章氏、道園真一郎氏、仲井浩孝氏、小林幸則氏、中村典雄氏、河田洋氏に感謝致します。ありがとうございます。

参考文献

- 1) S. Kamada, Y. Kamiya and M. Kihara: "Lattice of Photon Factory Storage Ring", Proc. of PAC 1979, p3848.
- 2) Y. Kamiya and M. Kihara: "Low emittance configuration for Photon Factory storage ring", KEK-Internal 85-10, 1985, in Japanese.
- 3) M. Katoh, *et al.*: "Design study on a high brilliance lattice of the PF storage ring", 9th Symposium on Accelerator Science and Technology, KEK, Tsukuba, Japan, 1993, p312
- 4) T. Honda, *et al.*: "Commissioning of the PF Ring after the Reconstruction for the Straight-sections Upgrade", Proc. of SRI 2006, pp. 87-90
- 5) K. Yokoya, T. Suzuki and Y. Kimura: "Accumulation Ring Linear Lattice", Tristan design note, TN-80-001.
- 6) T. Miyajima, *et al.*: "Present Status of Photon Factory Advanced Ring", Proc of PAC 2003, pp. 860-862.
- 7) See, for example, D. Bilderback *et al.*: New J. Phys. 12, 035011 (2010).
- 8) 羽島良一: "エネルギー回収型リニアック (ERL) におけるビーム物理", J. Plasma Fusion Res. Vol. 86, No. 8, 473-477 (2010).
- 9) 諏訪田 剛, 飯田厚夫編集: "放射光将来計画検討報告—ERL 光源と利用研究—", March, 2003.
- 10) R. Hajima, N. Nakamura, S. Sakanaka and Y. Kobayashi: "Design Study of the Compact ERL", Feb, 2008, KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032.
- 11) 島田美帆: "ERL 計画の進捗状況", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TULH09, Tsukuba, 2011.
- 12) 坂中章悟他: "コンパクト ERL 建設の進捗状況", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS079, Tsukuba, 2011.
- 13) R. R. Lindberg and K.-J. Kim: PAC09, pp. 1198-1200, K.-J. Kim, Y. Shvyd'ko and S. Reiche: Phys. Rev. Lett. 100, 244802 (2008).
- 14) D. Xiang, Z. Huang and G. Stupakov: Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 060701 (2009).
- 15) 西森信行他: "500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, MOPL05, Tsukuba, 2011.
- 16) 永井良治他: "JAEA-250 kV 光陰極電子銃における磁気エミッタンス補償", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS106, Tsukuba, 2011.
- 17) 山本将博他: "ERL 高輝度電子源のための極高真空系の開発と評価", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS160, Tsukuba, 2011.
- 18) 松葉俊哉他: "NEA-GaAs フォトカソードのエミッタンス及び時間応答測定", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, MOPS073, Tsukuba, 2011.
- 19) 本田洋介他: "高輝度電子銃関係の進捗状況", 第 28 回 PF シンポジウム, ポスター FE-03, Tsukuba, Jul. 12-13, 2011.
- 20) 笠原 亮他: "ERL 光陰極電子銃励起用 Yb ファイバーレーザーシステムの進捗状況", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS064, Tsukuba, 2011.
- 21) K. Watanabe, *et al.*: "New HOM coupler design for ERL injector at KEK", SRF '2007, Beijing, China (2007) p530.
- 22) K. Watanabe, *et al.*: "SC cavity system for ERL injector at KEK", SRF '2009, Berlin, Germany (2009) p359.
- 23) E. Kako, *et al.*: "Advances and performance of input couplers at KEK", SRF '2009, Berlin, Germany (2009) p485.
- 24) S. Noguchi, *et al.*: "Present status of superconducting cavity system for cERL injector linac at KEK", IPAC '10, Kyoto, Japan (2010) p2944.
- 25) K. Watanabe, *et al.*: "Status of development of the cERL superconducting injector linac", LINAC10, Tsukuba, Japan (2010) p401.
- 26) 島田美帆他: "cERL のラティスおよび CSR による逆コンプトン軟 X 線源", 第 28 回, PF シンポジウム, 口頭発表及びポスター FE-09, Tsukuba, Jul. 12-13, 2011.
- 27) 宮島 司他: "ERL 超伝導加速空洞での減速ビームのシミュレーション", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS058, Tsukuba, 2011.
- 28) Takaaki Furuya, *et al.*: Development of a Prototype Module for the ERL Superconducting Main Linac at KEK, Proc. of the IPAC10, Kyoto, 2010.
- 29) Kensei Umemori, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Takeshi Takahashi, Masaru Sawamura and Kenji Shinoe: Results of Vertical Tests for KEK-ERL 9-cell Superconducting Cavity Proc. of the IPAC10, Kyoto, 2010.
- 30) Hiroshi Sakai, Takaaki Furuya, Shogo Sakanaka, Takeshi Takahashi, Kensei Umemori, Atsushi Ishii, Norio Nakamura, Kenji Shinoe and Masaru Sawamura: Power Coupler Development for ERL Main LINAC in Japan. Proc. of the IPAC10, Kyoto, 2010.
- 31) M. Sawamura, T. Furuya, H. Sakai, *et al.*: Eccentric-fluted beam pipes to damp quadrupole higher-order-modes, Phys. Rev. ST-AB, 13, 2010, 022003-1-9.
- 32) S. Fukuda, *et al.*: "RF Source of Compact ERL in KEK", IPAC10, pp. 3981-3983, Kyoto, May 23-28, 2010.
- 33) T. Miura *et al.*: "Low-Level RF System for cERL", IPAC10, pp. 1440-1442, Kyoto, May 23-28, 2010.
- 34) 三浦孝子他: "KEK における cERL の高周波源", 第 7 回加速器学会年会プロシーディングス, pp. 927-929, Himeji, Aug. 4-6, 2010.

● 著者紹介 ●



原田健太郎

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第七研究系・助教

E-mail: kentaro.harada@kek.jp

専門：放射光源

【略歴】

2002年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程単位取得後退学，博士（理学），高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光源研究系助手，2007年助教（職名変更），2009年加速器研究施設加速器第七研究系助教（現職へ組織変更）。

ERL プロジェクトチーム

連絡先：ERL 計画推進室（KEK）

E-mail: erl-sec@pfiqst.kek.jp

【紹介】

KEK, JAEA, ISSP, UVSOR, JASRI, AIST, 広島大学, 名古屋大学, 山口大学, 茨城大学の加速器及び関連分野の研究者からなる合同チーム。

Future plan of PF and PF-AR —Construction of cERL and design of 3 GeV ERL—

Kentaro HARADA KEK-PF, 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

ERL Project Team

(KEK, JAEA, ISSP, UVSOR, JASRI, AIST, Hiroshima University, Nagoya University, Yamaguchi University, Ibaraki University)

ERL Project Office, 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract The PF ring was constructed in 1978 as a second generation synchrotron light source. PF-AR was originally constructed as the TRISTAN-AR that was booster ring for electron-positron collider. The user experiments began in 1983 at the PF ring and in 1987 at the TRISTAN-AR. After several times upgrades, PF and PF-AR are operated for over 4000 hours a year for user experiments until these years. However, because it was over 30 years from construction, the aging was severe for both previous generation light sources. Thus the development for the 3 GeV class ERL is promoted in KEK Tsukuba campus based upon the superconducting technology as the future plan of the both rings. We are now constructing compact-ERL that is test machine for the 3 GeV class ERL. In this paper, after the basic explanation of ERL, we show the characteristics of 3GeV ERL and the status of cERL.