

新概念による放射光源施設：Hybrid Ring



原田健太郎
Harada Kentaro



五十嵐教之
Igarashi Noriyuki

1 はじめに

高エネルギー加速器研究機構（KEK）には PF、PF-AR という 2 台の蓄積リング型放射光源があり、PF リングは年間約 3000 時間程度、PF-AR は 2000 時間程度のユーザー利用運転を行っている。利用実験の成果による学術論文数は年間約 600 本、その他に学位論文が約 350 本程度ある。ユーザー利用実験課題数は約 700 件、登録ユーザー数は約 2500 人程度となっている。PF、PF-AR 共に建設されたのは 1980 年代初頭であり、何度か大規模な改造を経てはいるものの、老朽化と最新施設と比較した場合の性能の差が目立ってきているため、新施設の建設が期待されている。多数のユーザーが同時に多様な分野の実験を行えるという、現在の施設の特徴を維持、発展させつつ、極低エミッタンスや極短パルスといった極端な光源パラメータや、放射光 2 ビーム同時利用実験といった新しい実験手法の開拓を実現できる新施設計画の 1 つの候補として、Hybrid Ring が提案された¹⁾。

2 Hybrid Ring と運転モード

Hybrid Ring は伝統的な蓄積リング型放射光源としての利用が可能な蓄積リングに、入射器として、大電流出力可能でビーム品質が良い、国際リニアコライダー（ILC）型の長パルスの超伝導タイプの線

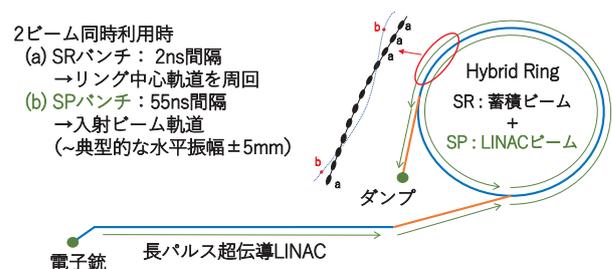


図 1 Hybrid Ring の概念図

形加速器（LINAC）を組み合わせた光源である。全体の概念図を図 1 に示す。長パルスの超伝導線形加速器は、加速に使う高周波電磁場（RF）を加速器に断続的に投入することで RF の熱負荷を大幅に減らしつつ、常伝導の加速器に比べて長い投入時間とすることで、多バンチの加速を可能とし、大電流の出力を実現した加速器である。このタイプの加速器は、例えばドイツにある European XFEL では既に実用化されており、そこでは、RMS パルス幅 50 fs、水平及び垂直共に 3 GeV 相当で 0.1 nm·rad の RMS 実エミッタンス、電荷 1 nC というビームパラメータが設計値となっている^{2,3)}。線形加速器のビームの時間構造を図 2 に、ILC⁴⁾、European XFEL との比較を表 1 に示す。筆者らは ILC や European XFEL の 3~5 倍の出力電流値を目指すことになる。

Hybrid Ring の運転形態としては、

- ・従来のリング型放射光源と同じ、蓄積（Storage Beam, SR）ビームのみを周回させ、トップアップ

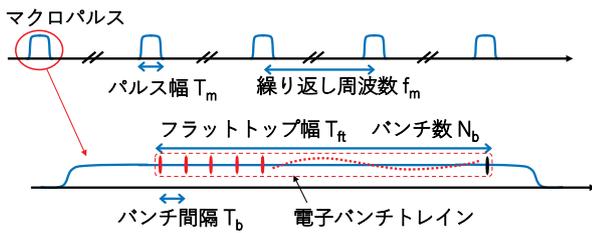


図2 線形加速器ビームの時間構造

表1 電子ビームの時間構造の比較

	Euro-XFEL	ILC	Hybrid Ring
現在の状況	運転中	R & D	設計中
ビームエネルギー [GeV]	17.5	2 x 125	3
加速モジュール数	100	900	12
加速勾配 [MV/m]	23.6	31.5	30
マクロパルス幅 T_m [ms]	1	1	1
フラットトップ幅 T_{ft} [ms]	0.6	0.73	0.6
マクロパルス繰り返し f_m [Hz]	10	5	10
バンチ数/パルス N_b [個]	2700	1312	10000
パルス内バンチ間隔 T_b [ns]	220	554	60
パルス内バンチ周波数 [MHz]	4.55	1.81	16.67
バンチ電荷 C [nC]	1	3.2	1
ピーク電流 I_p [mA]	4.55	5.78	16.67
平均電流 I_a [μ A]	27	21	100

プ入射を行いつつ利用するモード。

- ・LINAC からの1回だけ通過 (Single Pass, SP) ビームを、リング中心軌道に入射、リング全体のおよそ2/3周程度の部分で利用後、リングから取り出して、ダンプに打ち込むモード。
- ・SR ビームが中心軌道を周回中に、SP ビームをトップアップ入射ビームと同じような軌道で通過させ、2ビームを同時に利用するモード。

の3通りを考えている。

3 ILC 型超伝導 LINAC の利点

相対論的領域の電子蓄積リングの電子ビームのエミッタンス、エネルギー広がり、パルス長といったパラメータは、原理的に放射光の発生による平衡状態で決まる固定値であり、加速器全体の設計パラメータを変更することで改善可能な場合もあるが、限界がある。その限界を超えるためには、大出力で高性能、パラメータに関する柔軟性に優れている超伝導線形加速器を利用するのが良い。出力電流とコストの観点から最もバランスが取れていると思われる加速器が、ILC 型の長パルス型超伝導線形加速器である。常伝導同様のパルス運転ながら、マクロパ

ルス幅が約 1000 倍の 1 ms 程度あるため、パルス当たりの加速可能な電子バンチ数が飛躍的に向上している一方、RF が印加されるのはパルス幅 1 ms の繰り返し 10 Hz で、時間的には毎秒 10 ms 間だけ (duty 1%) なので、RF による発熱の効果は非常に小さく、真空ダクトや RF 結合器等からの熱流入と同程度に抑えられている。必要な冷凍機の容量や電気代を抑制しつつ、大出力の電流値を実現できるのが利点である。

4 蓄積リングの設計

概念設計の例として試行した Hybrid Ring のビームパラメータ例を表2に示す。Hybrid Ring の蓄積リングは、通常の蓄積運転を可能にしつつ、SP ビームが通過する部分において、その極低エミッタンス、極短パルス、大電荷等の特徴を損なわないようにする必要がある。通常の蓄積リング型光源において高品質の入射ビームの品質が通過中に悪化していく原因には、そもそも線形光学設計として電子ビームのパルス長を一定に保つ設計になっていないことと、特に極短パルスビームから発生するコヒーレント放射光 (CSR) による航跡場の効果の2つがある。

まず、線形光学設計に関しては、SP ビームが通過する部分の設計を等時的、すなわちエネルギーが変わっても軌道長が変わらないような設計にすれば

表2 Hybrid Ring 試行例のパラメータ

ビームエネルギー [GeV]	3
周長 [m]	350
RF 電圧 [MV]	3.6
RF 周波数 [MHz]	500
バケットハイト [%]	7.3
エネルギーロス [MeV/turn]	0.75
モーメンタムコンパクトション	1.59×10^{-4}
ベータatronチユーン v_x/v_y	28.17/9.23
減衰時間 $x/y/z$ [ms]	4.17/9.30/12.1
蓄積電流値 [mA]	500
SR (蓄積) ビームのパラメータ	
水平エミッタンス [nm·rad]	0.66
エネルギー広がり [%]	0.126
バンチ長 [ps]	8.84
SP (通過) ビームのパラメータ	
平均電流 [mA]	0.1
バンチ電荷 [nC]	1
水平・垂直エミッタンス [nm·rad]	0.1
バンチ長 [fs]	50
エネルギー広がり [%]	0.5

良い。

CSR の効果に関しては、最新の低エミッタンス蓄積リングの設計と同様に、短い偏向電磁石を多数使用することや、磁場の弱い偏向電磁石を使うこと、偏向電磁石内の分散関数を小さく抑えること等で抑制できる。CSR 航跡場の効果とは、電子が偏向電磁石で曲げられた際に、バンチ長と同程度の波長の放射光が大強度で発生し、特にバンチ後方から出た光が、電子軌道の円弧軌道に対して弦となる直線光路でバンチ前方に追いつき、電子を加速するという効果である。それにより、バンチ前方が加速、バンチ後方が減速となり、バンチ内で大きなエネルギー偏差が生じることになる。低エミッタンスリングのラティスを元に設計を進めることで、効果的に CSR の発生自体を抑制すると共に、バンチ内のエネルギー偏差が性能悪化につながりにくくできるということになる。

5 Hybrid Ring の利用実験

Hybrid Ring では、まず高輝度 SR ビームの高フラックスとナノ集光特性を利用した実験や、垂直ウィグラーや大電荷バンチの利用等、多種多様な幅広いサイエンスが発展的に展開されることが期待される。また、蓄積リングでは実現不可能な、SP バンチの超短パルス性能を活用した超高速ダイナミクス研究の発展も期待される。

これらに加え、SP ビームと SR ビームの、異なる性質を持つ 2 ビーム同時利用によるユニークな実験が展開される。従来の 2 ビーム同時利用と比較して、より高い空間分解能やフェムト秒ダイナミクスを組み合わせることで関心領域を観察することが可能となり、新たなサイエンスの発展が期待される。例えば、光化学反応は人工光合成、太陽電池、光触媒等への応用が期待されているが⁵⁻⁷⁾、この研究分野では、反応において重要な役割を果たす微小領域の構造と電子状態の動的情報が必要とされる。SR ビームの広視野イメージングにより動作中のサンプル全体の緩やかな時間変化 (> 1 ms) を連続的に観察して注目すべき部位 (結晶粒界や結晶面) を定め、SP ビームのナノ集光性 (< 100 nm) と超短パルス性 (< 1 ps) を活用してその部位の超高速現象 (光キャリアダイナミクスや酸化還元反応、局所構造変化等)

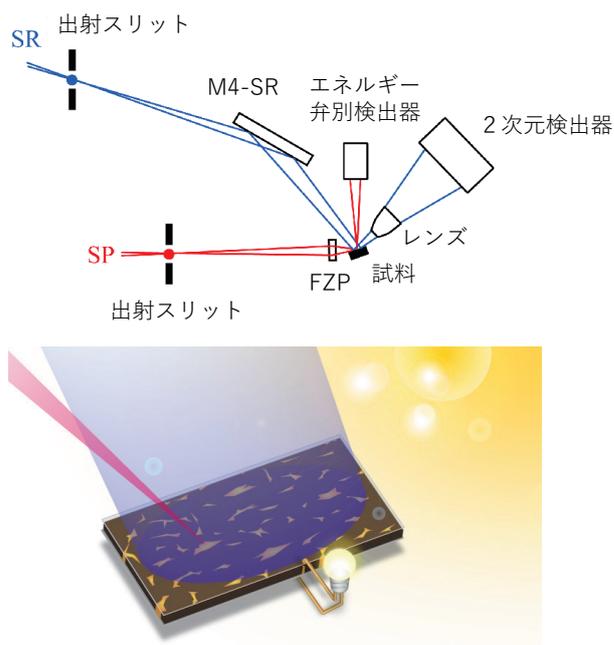


図3 放射光 2 ビームを使った太陽電池における光化学反応の測定例

青：SR ビームからの放射光，赤：SP ビームからの放射光，どちらも測定に用いる

を動作状態で観察することで、目的とする情報を得る。このように、2 ビームをプローブ光として用いることで、広い時空間階層構造の中でのサンプルの振る舞いを追うことが可能になる。図3に、太陽電池の場合の測定例を示す。太陽電池の場合では、現在高効率なものが開発されているが、まだまだ不安定で短時間しか性能が出せていない状況である。これを動作環境下で 2 ビーム同時利用観察することで動作原理を詳細に解明し、安定化、長寿命化を実現するのに必要不可欠な情報を得ることが可能になると期待される。

また、SP ビームをポンプ光、SR ビームをプローブ光として利用する例として、X 線誘起相転移⁸⁻¹¹⁾の観察が挙げられる。Hybrid Ring の SP ビームは、1 バンチ 1 nC と通常の放射光と同程度だが、バンチ長が 50 fs であり、光密度は 3 桁向上する。また SP ビームは、極低エミッタンスでありナノ集光性が高く、更なる光密度の向上が期待でき、これまで汎用的には利用することができなかった X 線のポンプ光と言える。特に X 線領域ということで、元素の吸収端を利用した元素選択的なスピン・軌道状態を制御する超高速内殻励起ダイナミクス研究への発展も期待される。実際、吸収端エネルギーに依存した X 線誘起

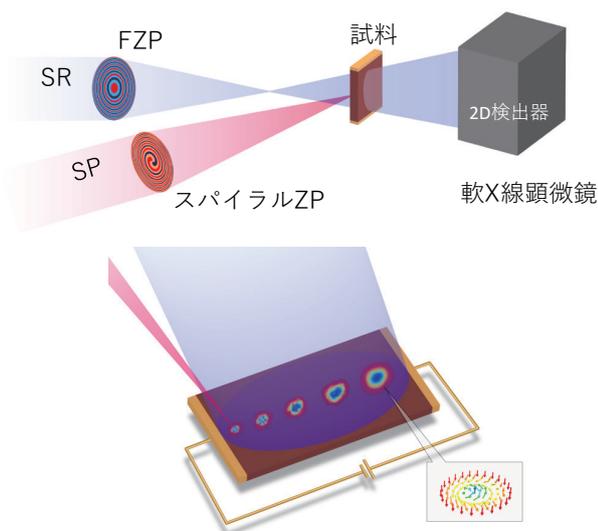


図4 放射光2ビームを使ったナノスケールの磁気構造の生成過程の測定例

SPビームからの放射光(赤)で生成した構造を、SRビームからの放射光(青)で観測する

相転移が報告されている¹²⁾。最近、特異な磁気構造として注目されている磁気スキルミオン¹³⁻¹⁵⁾をナノ集光した超短パルスの光渦で励起することで磁性材料に書き込めることが理論的に予測された¹⁶⁾。SPビームのコヒーレント特性を使えば、集光素子にスパイラルゾーンプレートを使って光渦ビームを高効率に生成することができる¹⁷⁾(図4)。そこで、磁気スキルミオンのサイズ(<100 nm)程度に小さく集光し、緩和時間(1 ps)よりも短パルスのSPビームで磁気スキルミオンを書き込み、SRビームによるピコ秒の時間分解能で磁気スキルミオンの動きを観察することが期待される。

このように、Hybrid Ringは、超短パルスSPビームや高輝度SRビームを活用した従来型の放射光利用研究を底上げするだけでなく、新たに2ビームの同時利用によるユニークな実験への展開が可能であり、放射光科学の幅広いニーズに応えることができると考えられる。

6 課題と展望

Hybrid Ringに関して、現在、周長やエネルギーを決めるための具体的な設計、詳細なビーム力学的設計が行われている。蓄積リングとしてのダイナミックアパーチャの確保と、2ビーム同時利用のた

めのSPビームの最適化、光軸補正等を具体的にどう両立させていくかについても今後の課題である。ハードウェア的にも、SP、SRの2ビーム同時測定や制御が必要となる。

線形加速器からの出力平均電流値、ピーク電流値とも、European XFELやILCの約3~5倍に増強するため、そのために電子銃や入射部分、RF源やRF要素(導波管や方向性結合器、入力結合器等)についても特にR&Dを行う必要がある。

大出力のLINACを用いるので、ビーム損失の抑止と、機械的、人的安全の確保も極めて重要な課題である。例えば蓄積リングの場合、周長を300 m、リングRF周波数を500 MHzとすると、1 nCのパンチを500個、合計500 nCを蓄積すると電流500 mAとなる。ビーム寿命を10時間(36000秒)とすると、平常運転時の電荷損失は13.9 fC/sとなる。不具合等に起因する全ビーム損失時には500 nCが一気に失われることもあるが、それが日常的に繰り返されることはない。そのような、蓄積ビームのみを利用する既存の加速器と似たような建屋、インフラ設計で、SPビーム利用を実現しようとする場合、SPビームのビーム損失も蓄積ビームと同程度まで抑制する必要があると思われる。その場合、ビーム損失モニタや高速インターロックの整備が必須となることが予想され、実際の運転時にはKEKのcERL実験で行われたように¹⁸⁾、線形加速器からの大出力通過ビーム(SPビーム)に関しては、ビーム損失の抑止とビーム制御、調整の最適化を進めながら徐々に電流値を増やしていくことになるだろうと思われる。

最後に、この記事でHybrid Ringに興味を持っていただいた方には、和文解説が加速器学会誌¹⁹⁾や放射光学会誌²⁰⁾等にも掲載されているので、是非、参照していただきたい。

謝辞

Hybrid Ringの検討について、PF企画委員会の皆様、KEK加速器研究施設加速器第六研究系と応用超伝導加速器イノベーションセンターの皆様、三浦孝子、松本利広、仲井浩孝、宮島司、周徳民の各氏、物質構造科学研究所放射光科学第一研究系、放射光科学第二研究系、放射光実験施設の皆様にご協力をいただきました。どうもありがとうございました。

参考文献

- 1) K.Harada., *et.al.*, *Journal of Synchrotron Radiation*, **29**, 118 (2022)
- 2) B.Beutner, *Proc. of FEL2017*, WEA01, 381-385 (2017)
- 3) G.Feng, *TESLA-FEL* 2013-04 (2013)
- 4) 山本康史, *et.al.*, *Proc. of PASJ2019*, FROH05, 187-192 (2019)
- 5) A. Fujishima and K. Honda, *Nature*, **238**, 37-38 (1972)
- 6) A. Kojima., *et.al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 6050-6051 (2009)
- 7) Y. Tachibana., *et.al.*, *Nature Photonics*, **6**, 511-518 (2012)
- 8) K. Shibuya., *et.al.*, *Phys. Rev. B*, **84**, 165108:1-6 (2011)
- 9) Y. Yamaki., *et.al.*, *Phys. Rev. B*, **87**, 081107(R):1-5 (2013)
- 10) Y. Sekine., *et.al.*, *Chem. Commun.*, **50**, 4050-4052 (2014)
- 11) Y. Yamasaki., *et.al.*, *Phys. Rev. B*, **91**, 100403(R):1-5 (2015)
- 12) Y. Sekine., *et.al.*, *Chem. Commun.*, **50**, 4050-4052 (2014)
- 13) S. Mühlbauer., *et.al.*, *Science*, **323**, 915-919 (2009)
- 14) X. Z. Yu., *et.al.*, *Nature*, **465**, 901-904 (2010)
- 15) N. Nagaosa and Y. Tokura, *Nature Nanotech.*, **8**, 899-911 (2013)
- 16) H. Fujita and M. Sato, *Phys. Rev. B*, **95**, 054421 (2017)
- 17) A. Sakdinawat and Y. Liu, *Opt. Lett.*, **32**, 2635-2637 (2007)
- 18) M. Akemoto., *et.al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **877**, 197-219 (2018)
- 19) 原田健太郎, *et.al.*, *加速器*, **19**, (2), 62-28 (2022)
- 20) 五十嵐教之, *et.al.*, *放射光*, **35**, (4), 238-246 (2022)

(高エネルギー加速器研究機構)