

令和 4 年 1 月 5 日

報道関係者各位

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

放射光源設計の新機軸 - ハイブリッドリングによる放射光 2 ビーム同時利用 -

本研究成果のポイント

○極低エミッタンス・極短パルスの電子ビームを効率よく生成できる長パルス超伝導線形加速器を入射器として採用することで、放射光源としての蓄積リングの自由度が飛躍的に向上し、多種多様な放射光実験が可能になる。

○線形加速器からの電子ビームを蓄積リングに 1 回だけ通過させて利用することで極低エミッタンス・極短パルスの放射光ビームの利用が可能になるだけでなく、蓄積リングで極低エミッタンスを追求した場合に困難となるような利用の継続と発展も可能になる。

○蓄積ビームと通過ビーム、それぞれが発する放射光をサンプルに照射することで、放射光 2 ビーム同時利用実験が可能になる。新しいタイプの放射光実験が可能になることから、幅広い科学技術分野への一層の貢献が期待される。

【概 要】

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（以下「KEK」）の物質構造科学研究所と加速器研究施設が共同で運営する放射光実験施設フォトンファクトリーにおいて、長パルス超伝導線形加速器と蓄積リングとを組み合わせた新しい放射光源のアイデアが提案された。

フォトンファクトリーは、X線域に及ぶ広範なエネルギーの放射光の利用を可能にする国内最初の専用施設として 1982 年にファーストビームの発生に成功し、40 年の長期にわたり、大学の基礎研究から企業の応用研究まで、幅広く活用されて成果を挙げてきた。KEK では、ファーストビームから 50 周年にあたる 2030 年代前半までにフォトンファクトリーの後継施設を建設することを目指しており、世界的な加速器の研究機関に相応しい新光源施設の検討を進めている。

KEK 加速器研究施設・加速器第六研究系の原田健太郎准教授、同小林幸則教授（研究主幹）、KEK 物質構造科学研究所・放射光実験施設の船守展正教授（実験施設長）らの研究グループは、新概念による放射光源施設「ハイブリッドリング」を考案した。ハイブリッドリングでは、従来の放射光実験を継続・発展できるだけでなく、放射光 2 ビーム同時利用という新しいタイプの放射光実験が可能になることから、幅広い科学技術分野へのより一層の貢献が期待される。

この研究成果は、国際学術誌「Journal of Synchrotron Radiation」に 12 月 29 日に掲載された。

【背景】

電子加速器から発生するシンクロトロン放射光は、1940年代に発見され、1960年代に初めて物質科学分野で利用された。その後、1990年代後半～2000年代に、第3世代光源と呼ばれる使い勝手の良い高性能蓄積リング型光源が普及したことで、一気に全世界で利用実験が拡大した。現在では、世界中の放射光源が、物質科学のみならず、生命科学や宇宙地球科学、考古学などを含むあらゆる分野で、なくてはならない研究インフラとして活用されている。

光源加速器と実験装置の性能は日進月歩で向上しており、最新の第4世代光源では、主にX線領域において、放射光の輝度と空間コヒーレンス(※1)が著しく向上している。しかしながら、その性能を実現するために、加速器の設計と運転に多くの制約が課せられ、柔軟性が失われている。例えば、フォトンファクトリーでは、垂直超伝導ウィグラー(※2)や孤立大電荷バンチ(※3)からの特徴的な放射光が積極的に活用されているが、第4世代光源の設計方針や性能向上とは両立しない。したがって、最新の放射光施設では、それらの特徴のある技術を利用することが難しい状況にある。

【研究内容と成果】

汎用性と先端性、柔軟性のすべてを同時に実現するためには、新しい光源設計のアイデアを導入する必要がある。そこで、使い勝手を優先した設計の蓄積リングを基本とし、入射器として長パルスの超伝導線形加速器(※4)を組み合わせた、ハイブリッドリングを考案した(図1)。ハイブリッドリングでは、従来型の蓄積ビームからの放射光利用に加え、リングの一部分(2/3周)に入射器からの超高性能電子ビームを一度だけ通過(シングルパス)させ、そのビームからの放射光利用も行う。線形加速器からのシングルパスビームを使えば、ビームサイズやパルス幅、ビーム繰返しといった蓄積リングでは変更困難なパラメータに対する柔軟性も得られ、さらに、蓄積ビームからの放射光と組み合わせることで、放射光2ビーム同時利用も可能となる。

長パルス超伝導線形加速器は、ILC計画(※5)のために、KEKが海外の研究機関と共同で開発を進めてきた加速器であり、線形加速器としては極めて大電流のビームを効率的に出力することが可能である。長パルスの名の示す通り、パルス的にRF(加速に用いる電磁場)を投入するため、熱負荷を小さく抑えられて効率的である。一方、1パルス内で多数の電子バンチを加速できるため、平均電流を大きくできる。海外の先端的な自由電子レーザー施設では実用化されており、蓄積リングに比べて格段に性能の高い電子ビームを安定して発生させている。線形加速器からの電子ビームの性能を損なうことなく輸送してリングを通過させるためには、蓄積リングの設計に工夫が必要であるが、蓄積リングで採用されている設計に改良を加えることで、それが可能であることが明らかになった。

【研究意義と展望】

ハイブリッドリングにおいて可能になる放射光2ビーム同時利用は、例えば、持続可能な社会の実現のために有望な人工光合成、太陽電池、光触媒などの研究に役に立つ。サンプル全体の大域的な遅い変化を蓄積ビームからの通常の放射光で観測しつつ、界面や相境界における局所的な速い変化をシングルパスビームからの超高性能な放射光で観測すれば、光化学反応の本質の解明に貢献できる(図2(a))。また、放射光2ビームをポンプ・プローブとして利用する新しい試みも可能になる。シングルパスビームの極短パルス放射光で次世代の磁気記録媒体への応用が期待されている磁気スキルミオン(※6)を生成し、通常の放射光で測定する(図2(b))。これにより、磁気スキルミオンの生成と制

御に関する原理の解明に貢献できる。

稼働中のフォトンファクトリーは、学术界においてはノーベル賞研究、産業界においては製品開発に貢献するなど、大きな成果を挙げてきた。実績のある優れた機能を維持・発展させながら放射光 2 ビーム同時利用を可能とするハイブリッドリングを実現することで、放射光科学の新たな時代を切り開くことができる。研究グループでは、幅広い科学技術分野への一層の貢献のため、ハイブリッドリングの詳細設計を進める予定である。

【参考図】

図1. ハイブリッドリングの概念図

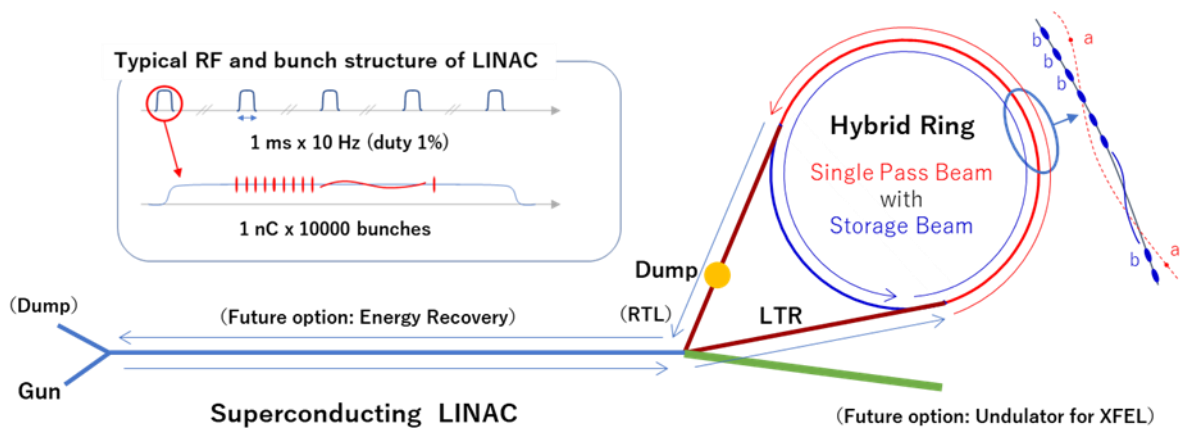
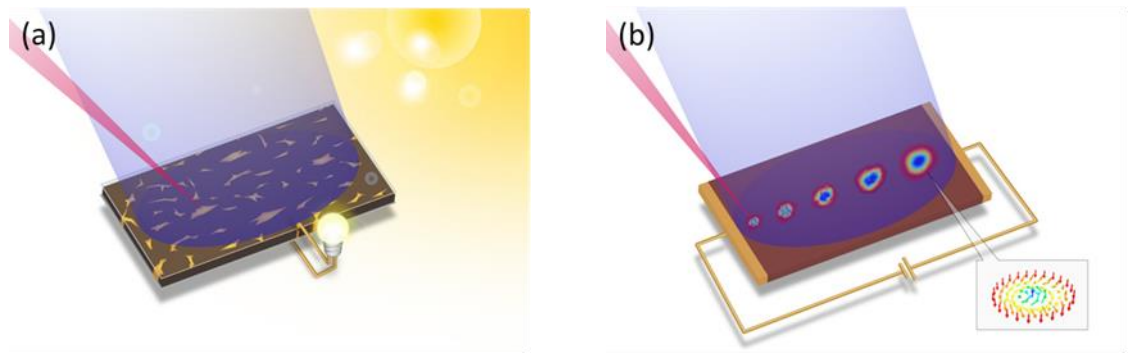


図2. 放射光 2 ビーム利用の概念図： (a) 太陽電池の 2 プローブの例と (b) 磁気スキルミオンのポンプ・プローブの例



<論文情報>

K. Harada et al., Conceptual design of the Hybrid Ring with superconducting linac, Journal of Synchrotron Radiation, in press.

<https://doi.org/10.1107/S1600577521012753>

【用語解説】

※1. 輝度と空間コヒーレンス

光の空間的な密集度、指向性の揃い具合を合わせて輝度という。また、空間的な波面の揃い具合をコヒーレンスという。輝度の高い光はスポットサイズが小さく、向きがそろっており、高コヒーレンスとなる。そのような光は試料上で小さく集光できるほか、コヒーレンス自体を活用した実験も可能となる。

※2. 垂直超伝導ウィグラー

PFリング14番直線部に設置された挿入光源で、超伝導電磁石を使って電子を強く垂直方向に曲げることでエネルギーの高いX線を発生させる装置。発生する光が垂直方向に広がりを持つため、ビームライン光学系や測定装置を、水平に設置した定盤の上に並べて置くことができる。垂直方向に設置した場合に比べ、安定性や精度が向上し、その結果、高性能の測定が可能になる。実際、PFリングの14番ビームラインのCハッチに設置された分離型干渉計は、視野の広さと検出感度で世界最高である。ただし、光源性能の観点からは、電子ビームを強く垂直に曲げることで、垂直方向のエネルギーのばらつきが大きく生じ、ビーム品質が悪化することが避けられない。現在のPFリングでは気にならない程度であるが、最新の第4世代光源では大きな問題となる。

※3. 孤立大電荷バンチ

通常の可視光のカメラ撮影でも、シャッタースピードを上げ、フラッシュを使って撮影すると、動いているもののある瞬間だけを切り出した様な画像が得られる。それを放射光で実現するのが孤立大電荷バンチである。PF-ARでは常に1バンチのみ蓄積した運転が行われており、パルス的なX線を発生させている。PFリングの場合、ハイブリッドモード運転において電子ビームの蓄積パターンを工夫することで、光が途切れる時間を作り、その間に1個だけ、大きな電荷の電子バンチを蓄積している。光源の観点からは、大電荷バンチの蓄積には、不安定性や発熱への対策が必要となるが、最新の第4世代光源では、ビームを小さく絞る際に強い磁場が必要で、真空ダクトを細くするのが一般的となっている。金属製の細い真空ダクトは電子ビームとの相互作用が強いため、現在のPFやPF-ARのような大口径のダクトの場合と比較して、大電荷の孤立バンチの蓄積は、より難しくなる。

※4. 長パルス超伝導線形加速器

超伝導線形加速器では、加速空洞は2Kの減圧液体ヘリウムに漬けられ、超伝導状態となる。長パルスの加速器では、加速のための高周波電場(RF)はパルス的に空洞内に投入され、空洞がRFで満たされている時のみ、電子を加速することができる。パルス繰り返しとパルス幅は加速器によって異なり、例えば常伝導の場合、RFの熱負荷の問題から繰り返し10Hz、パルス幅1 μ s程度が一般的で、通常、電子はRFパルスあたり1バンチしか加速できない。一方、超伝導加速器の場合、熱的には加速管を常時RFで満たし、真の連続運転を行うことも可能だが、冷凍機容量や消費電力が大きくなる。出力電流と必要なコストのバランスを考えると、最も優れているのがILCやEuroXFELと同じ長パルス運転で、例えばEuroXFELの場合、RFのパルス繰り返しは常伝導と同じ10Hzだが、パルス幅が約1msと長く、1パルスあたり2700個の電子バンチを加速している。バンチ数の差が出力電流値の差となり、超伝導加速器は常伝導加速器に比べて1000~10000倍の出力電流を得ることができる。その一方、コストの観点からは、RFをパルス的に投入することで、RF ONの時間を短く抑え、冷凍機負荷や必要な電力を常伝導の場合の2倍程度に抑制できる。

※5. ILC計画

国際リニアコライダー(英: International Linear Collider、略称 ILC)とは、素粒子物理学において超高エネルギーの電子・陽電子の衝突実験をおこなうため、現在、日米欧をはじめ世界の研究者の国際協力によって設計開発が推進されている将来加速器計画である。

※6. 磁気スキルミオン

磁気的な渦構造を持つ準粒子。磁気スキルミオンは、安定した粒子としての性質を持ち、小さな電流で効率的に動かすことができるため、高密度・低電力消費の次世代記録媒体としての応用が期待されている。