

Hybrid リングによる放射光 2 ビーム同時利用

五十嵐教之

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

中尾裕則

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

丹羽尉博

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

野澤俊介

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

雨宮健太

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

要旨

汎用性と先端性、柔軟性のすべてを高いレベルで同時に実現し、既存の実験手法の強化および新たな実験手法の創出の可能な光源として、超伝導リニアックを入射器とする Hybrid リングの検討を進めている。Hybrid リングでは、蓄積リングの性能で決まる SR (ストレージ) バンチと超伝導リニアックの性能で決まる SP (シングルパス) バンチが共存する形で運転される。SR バンチからのビームによる多様な実験手法による研究や、SP バンチからのビームの超短パルス性能を活用した超高速ダイナミクス研究などに加え、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。また、Hybrid リングは拡張性にも優れているため、将来的に放射光コンプレックスへの発展も期待される。

1. はじめに

現在電子加速器から発生するシンクロトロン放射光は、物質科学や生命科学、宇宙地球科学、考古学などを含むあらゆる研究分野で、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、X線領域において放射光の輝度と空間コヒーレンスが著しく向上している。これは、主にサンプルをより高い空間分解能で観察したいというニーズによるものであるが、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や孤立大電荷バンチ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。放射光科学の長期・持続的な発展のためには、特定の性能に特化した光源だけではなく、目的に応じた放射光を発生させることの可能な柔軟性の高い光源も有用であると考えられる。これにより、研究者独自のアイデアの試行と実現を促進することができる。

汎用性と先端性、柔軟性のすべてを高いレベルで同時に

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リニアックを組み合わせた、Hybrid リングを考案した¹⁾。Hybrid 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(約2/3周)に入射器からの極低エミッタンス・極短バンチの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。リニアック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、ビーム繰り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、異なる性質の放射光2ビーム同時利用も可能となる。

ここでは、最近我々が論文¹⁾で報告した Hybrid リングについて、その基本コンセプトや得られる光の特徴を簡単に説明し、それを利用した際に期待される最も特徴的な測定技術である、放射光2ビーム同時利用について、ビームライン案や利用例について紹介したい。

2. Hybrid リング

Hybrid リングは、汎用性と先端性を併せもつ可変光源であり、蓄積リングと超伝導リニアックで構成される

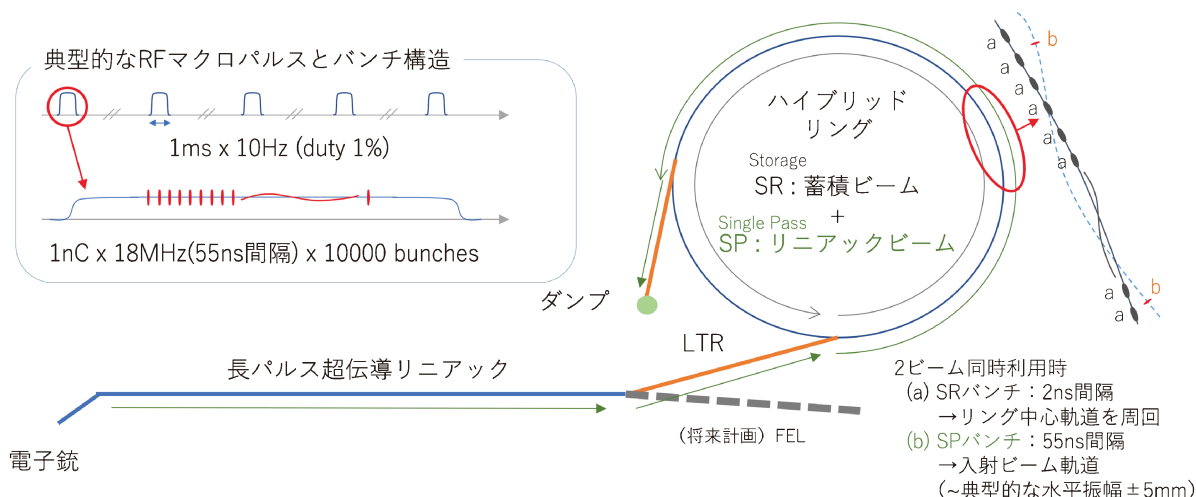


Fig. 1 (Color online) Concept of the Hybrid Ring with superconducting LINAC.

(Fig. 1)。蓄積リングの性能で決まる SR (ストレージ) バンチと超伝導リニアックの性能で決まる SP (シングルパス) バンチが共存する形で運転される。SP バンチは、名称の通り、蓄積リングの一部を一回だけ通過してビームダンプに導かれる。SP バンチは、SR バンチと空間的な距離をおき共存する。これは、トップアップ入射の際に蓄積ビームの存在下で入射ビームが導入されるのと同様である。ビームラインでは、SR バンチと SP バンチのビームの選択利用が可能であるだけでなく、両者の同時利用も可能である。

蓄積リングとしては、第三世代と第四世代の中間のラティスを想定する。第四世代の極低エミッタンスやその実現に必須の細管真空ダクトは、PF の光源の特徴である垂直ウィグラーからの縦長垂直偏光放射光や大電荷シングルバンチからの高強度パルス放射光の利用に大きな制限となる。前者は X 線光学素子の水平面内の展開に適しており、例えば、分離型干涉計による世界最高感度の X 線位相イメージングを可能にしている³⁾。後者はシングルショット時間分解測定や核共鳴散乱測定などに有効である。SR バンチについては、第二世代および第三世代施設で展開されている多様な実験手法の全てを強化可能な性能をもつことが理想である。Hybrid リングのための蓄積リングの設計としては、Hybrid リングのラティスには、SP バンチの性能を維持して輸送すること、ダイナミックアパーチャを確保して SR バンチを安定に蓄積すること、この 2 点の両立が求められる。そのため、SP ビームが通過する部分だけ等時セル、通過しない部分は元のセルのままとし、リング全体としてバンチ長やモーメントムコンパクションを有限な値に保つように設計することで、ラティスの最適化を行った。この検討は、日本に建設中の新放射光施設の DDBA ラティス²⁾ (16セル) をベースにして進めた。現在検討中の、等時化したノーマルセルのオプティクスを Fig. 2、パラメータを Table 1 に示す。

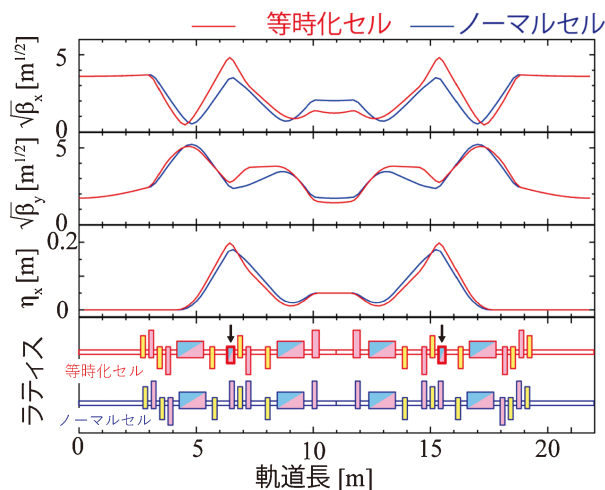


Fig. 2 (Color online) Optics and lattice of the Hybrid Ring. Blue, pink and yellow boxes in the bottom figure denote bending, quadrupole and sextupole magnets, respectively. Arrows indicate combined-function bending magnets with inverse polarity to make the beam optics isochronous.

超伝導リニアックとしては、XFEL で実績のある長パルス型を想定している⁴⁾。長パルス超伝導リニアックは、ILC 計画のために、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、リニアック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、パルスの RF 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、通常蓄積リング用のラティス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。リニアック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

Table 1 Tentative parameters of the Hybrid Ring.

パラメータ	元のリング	等時化したリング	Hybrid リング
ビームエネルギー [GeV]	3	3	3
周長 [m]	350	350	350
RF 電圧 [MV]	3.6	—	3.6
RF 周波数 [MHz]	500.0	—	500.0
バケットハイト [%]	4.70	—	7.30
エネルギーロス [MeV/turn]	0.62	0.83	0.75
モーメントムコンパクトション	4.26×10^{-4}	0.00	1.59×10^{-4}
ベータatronチューン v_x/v_y	28.17/9.23	28.17/9.23	28.17/9.23
減衰時間 x/y/z [ms]	8.12/1.12/6.93	3.23/8.43/21.7	4.17/9.30/12.1
蓄積電流値 [mA]	500	—	500
水平自然エミッタンス [nm · rad]	1.15	0.55	0.66
エネルギー拡がり	8.42×10^{-4}	1.80×10^{-3}	1.26×10^{-3}
バンチ長 [ps]	9.64	—	8.84

Table 2 Tentative parameters of superconducting LINAC.

エネルギー [GeV]	3
平均電流 [mA]	0.1
バンチ電荷 [nC]	1
規格化エミッタンス [mm · mrad]	0.6
自然エミッタンス [nm · rad]	0.1
バンチ長 [fs]	50
エネルギー拡がり [%]	0.50

加えることで、それが可能であることが明らかになった。SP バンチについては、極低エミッタンス0.1 nmrad、極短バンチ長50 fs、大電荷 1 nC を初期の目標とし、これらの性能の同時実現やそれぞれの性能の強化を段階・継続的に進める。現在検討中の長パルス超伝導リニアックの電子ビームパラメータを **Table 2** に示す。どの性能を優先するかに加えて長パルス内のバンチ構造にも自由度があり、この点でも光源の柔軟性が高い。なお、超伝導リニアックはSR バンチへの多バケット同時トップアップ入射も行う。

Hybrid リングの設計や仕様の詳細については、近日常に発刊される加速器学会誌に掲載予定なので、そちらを参考されたい。検討にあたっては、技術的・経済的な実行可能性を重視して、実績のある要素技術の活用を優先しているが、まだまだ検討は初期の段階にあり、リングのラティスや電子エネルギー等を含めて暫定的である。今後より詳細な検討を進めていく予定である。

3. 放射光 2 ビーム同時利用ビームライン

これまで、極短バンチ長を活用したダイナミクス研究は主に XFEL を利用して実施されてきた。Hybrid リングによる利用機会の大幅な増加は、超高速ダイナミクス研究の大幅な進展をもたらすと期待される。更に、Hybrid リングの真価が発揮されるのは、SR バンチと SP バンチから

の 2 ビーム同時利用である。フォトンファクトリーでも、2 種類の偏光ビームを高速に切り替えてサンプルに照射する BL-16A や、硬 X 線と白色 X 線を切り替えて照射する AR-NE5C、軟 X 線と硬 X 線を切り替えて照射する BL-2B 等が実用化されており、その発展形として、現在建設に向けて準備を進めている開発研究多機能ビームラインでは、SR ビームではあるが軟 X 線と硬 X 線の同時利用ができるようになる。また、他施設でも、XFEL での分割パルスを利用した 2 ビーム利用や、最近では海外の放射光施設での 2 ビーム同時利用ビームライン^{5,6)}なども実用化されつつある状況である。今後 Hybrid リングが実用化されれば、様々な 2 ビーム同時利用実験ができるようになり、更なる研究展開が期待される。また、常設で SP ビームと SR ビームを広範に使えるようになるため、異なる性質の 2 ビームを活用したポンプ&プローブや 2 プローブによる新しい実験手法の創出が期待される。

Hybrid リングの各ビームラインでは、SR バンチと SP バンチからのビームの選択利用や同時利用を行う。ビームライン毎にローカルバンチを立てることでビームの選択が可能である。1 本の直線部に 2 台の挿入光源を設置して、バンチ軌道を制御すれば、違う光軸で 2 ビームを同時利用することも可能である。2 ビームを同時利用するためには、両者の光軸を独立に調整する必要がある。SP ビームと SR ビームの軌道は、バンチ周波数の違いを利用して独立に測定することを考えている。SR ビームは軌道中心を通過し、SP ビームは水平振幅を持つので、パルス多極磁石を使うことで、ダイナミックアパーチャに影響を与えることなく SP ビームの軌道のみを補正することが可能である。

SR バンチと SP バンチからのビームの同時利用を可能にするビームライン案を **Fig. 3** に示す。**Fig. 3(a)** の例では、それぞれ 2 ビームとも軟 X 線領域の利用を想定し、ともに回折格子を利用した斜入射光学系 (VLS-PGM⁷⁾)

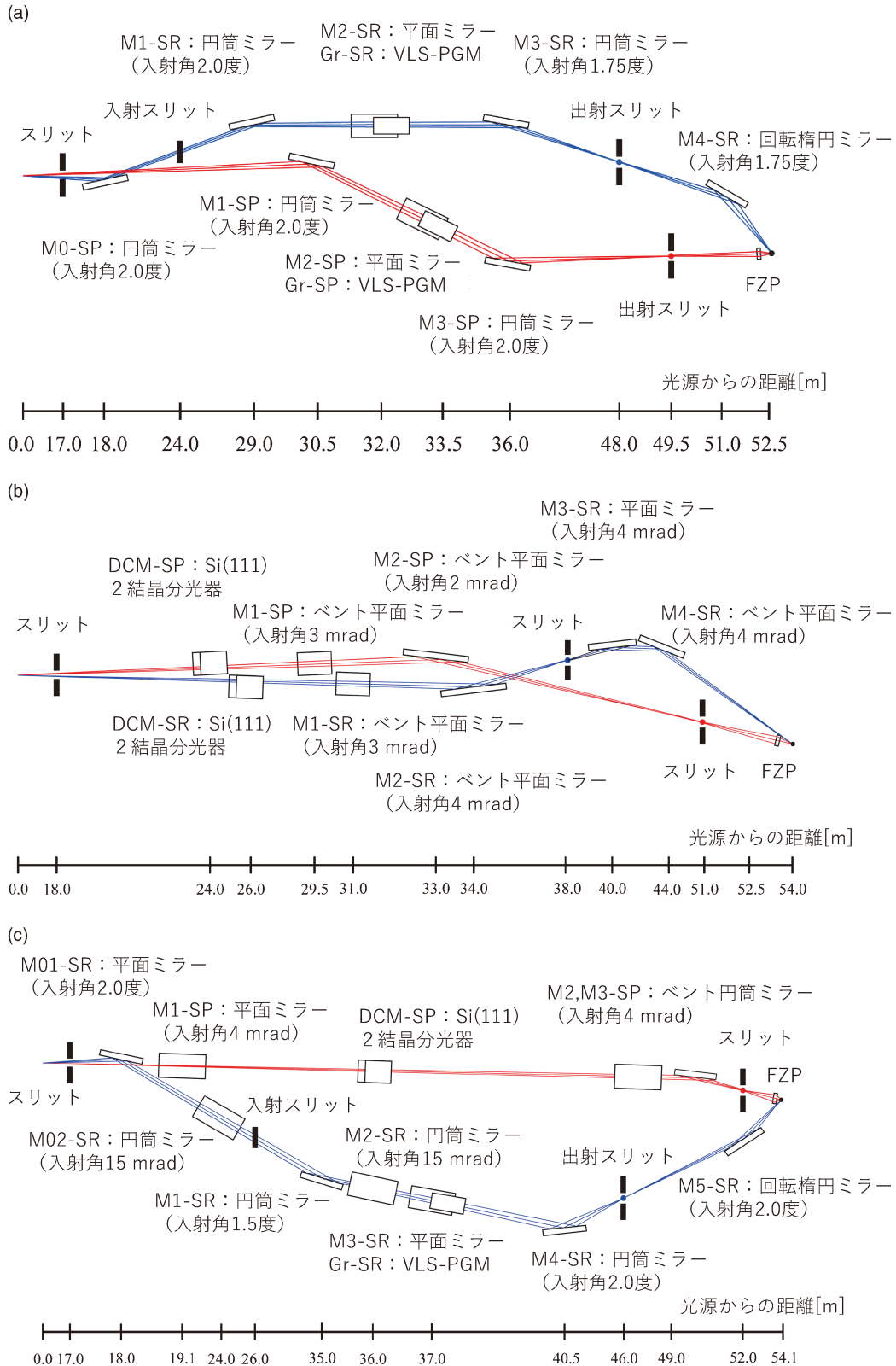


Fig. 3 (Color online) Example of the beamline designs (Blue line: SR beam, Red line: SP beam).
 (a) for soft X-ray and soft X-ray two-beam applications.
 (b) for hard X-ray and hard X-ray two-beam applications.
 (c) for soft X-ray and hard X-ray two-beam applications.

としている。SR ビームと SP ビームは、1 mrad の方位差をもって出射され、50 m 程度の距離のサンプル位置で、それぞれ10 μm と 50 nm に集光される。SR ビーム用の光学系は、複数のミラーを駆使した多様な実験手法に適用可能な構成としている。M0-SR ミラーでは、SP ビームとの光路を離すとともに入射スリットへの集光を行う。また、M3-SR ミラーでは、ストライプ化したコートにより高調波を除去し、広範なエネルギー選択を可能にする。一方、SP ビーム用の光学系は、フラックス損失の低減を重視した単純な構成としている。また、1 バンチあたりの電荷は 1 nC であるが、Duty は 1% 程度なので、熱負荷は問題にならないと予想している。高調波の処理は M3-SP ミラーで行う。2 ビームの同時利用には集光位置の調整が必要となる。SR ビームの集光位置に対して、SP ビームの集光位置を M3-SP ミラーの出射角で粗調整した上で、FZP 位置により微調整ができるようにする。意図しない 2 ビームの相対的な位置変動を防止するため、出射スリットと M4-SR ミラー、FZP を単一の堅牢な架台に搭載する。

Fig. 3(b) の例では、2 ビームとも硬 X 線領域の利用を想定したものであり、2 結晶分光器を利用した光学系を想定している。**Fig. 3(a)** の例と比較して、2 ビームの近接条件がより厳しくなるが、分光器を互い違いに配置、水平ミラーを正対配置にして反射させるなどによりクリアできるものと思われる。サンプル位置での集光ビームの相対制御についても、より厳しい条件になるため、最終光学素子の形状や配置について詳細な設計が必要になる。**Fig. 3(c)** は、SP ビームが硬 X 線領域、SR ビームが軟 X 線領域の場合を想定したものであり、SR ビームの角度をつけて SP ビーム位置に合わせることで実現可能と思われる。その他、2 ビームとも複数種類のバンチ構造での運転が想定されるため、その有効活用には十分な時間分解能のある測定器系が必要となる。特に SP ビームでは、ジッターの低減とタイミング調整機構の開発が重要な課題となる。

4. 放射光 2 ビーム同時利用のサイエンスケース

Hybrid リングでは、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など、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。開発研究多機能ビームラインで開発を進めようとしている、2 つの SR ビームを活用するビームラインも新たな利用方法として考えられる。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

み合わせて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。ここでは一つの例として、2 ビームをともにプローブ光として用いる場合と、サンプルを SP ビームでポンプした後の変化を SR ビームでプローブする場合のサイエンスケースを紹介する。

SP ビーム、SR ビームをともにプローブ光として利用する例として、マルチ時空間スケールでの次世代放射光オペランド測定が挙げられる。例えば、光化学反応は人工光合成、太陽電池、光触媒などへの応用が期待されているが⁸⁻¹⁰⁾、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、局所構造変化など) 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。例えば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ことが期待される (**Fig. 4**)。これにより太陽光の最適利用を実現し、国連が掲げる持続可能社会 (SDGs) の目標達成を後押しすることができるだろう。

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 線誘起相転移の観察が挙げられる。XFEL をポンプ光とする研究も出つつあるが、通常の放射光はポンプ光としての利用には不向きとされており、そのような利用研究は知られていない。一方、放射光をプローブ光とする利用研究の中から、当初予想もしていなかった X 線誘起相転移が複数見出されてきた¹¹⁻¹⁴⁾。これらは、放射光 1 パルスで励起された状態が次のパルスまでに緩和されず生き残り、それが蓄積し、系の大きな変化、つまり相転移として観測された結果と考えられる。これらの X 線誘起相転移の機構の理解には、放射光 1 パルスで励起しても緩和してしまう系から、相転移に至る系までの系統だった研究や、集光した SP ビームによりピンポイントで効率良く励起し、そこから広がる核生成と成長過程を時空間観察することが必要である。Hybrid リングの 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 線誘起相転移が報告されている¹³⁾。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¹⁵⁻¹⁷⁾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¹⁸⁾。

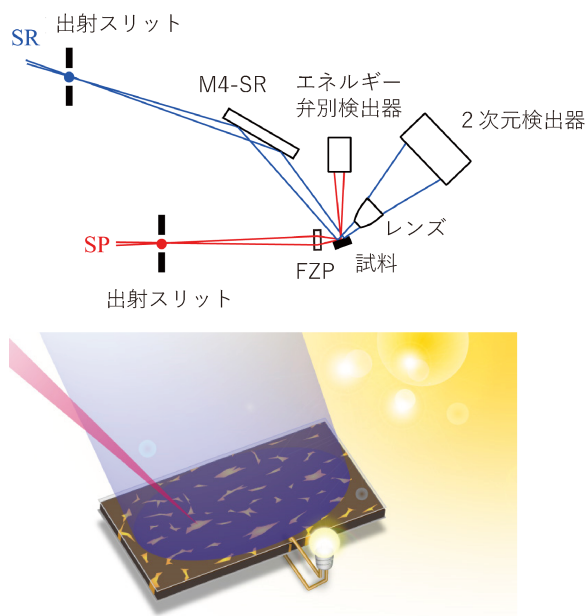


Fig. 4 (Color online) Observation of the photochemical reaction in a solar cell as an example of using the two beams as probes (Blue line: SR beam, Red line: SP beam).

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¹⁹⁾ (Fig. 5)。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できる。このように特殊な利用例であるが、データキャリアとしても期待される磁気スキルミオンの光渦による生成と制御についての知見を得ることも期待できる。

5. 解決すべき重要課題

Hybrid リングの詳細設計を進めている段階ではあるが、実現に向けた重要な課題としては、蓄積リングとしてのダイナミックアパーチャの確保、放射線安全や機器保護の観点からのビームロス対策が挙げられる。ダイナミックアパーチャについては、六極磁石の更なる最適化を進める。また、理想状態からの磁場誤差の影響や多極磁石の制御にともなう局所変化の影響、入射と出射の影響の検討を予定している。SP バンチは、平均電流こそ低いものの、10 Hz の長パルス内にリング 1 周分の SR バンチの 10~100 倍が存在するため、ビームロスの影響は甚大である。ビームロスの際、瞬時に入射を停止することが重要であり、インターロックの高速化を進める。更に、ビームロスの際に特に放射線レベルが上がる場所への実験者の立ち入りを制限するために、ビームラインの遠隔制御技術の開発を進める。入射器については、新しい要素技術が必要とし

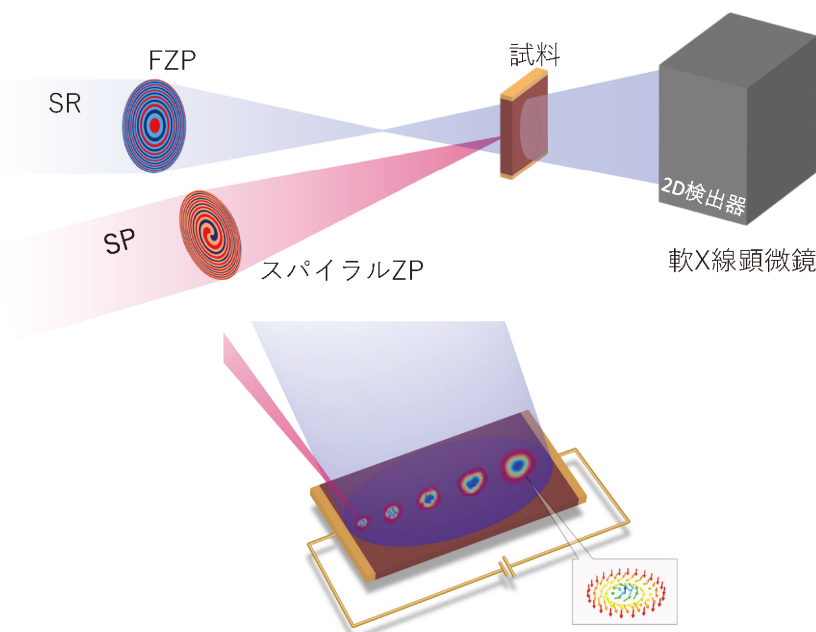


Fig. 5 (Color online) Observation of the generation process of a nano-scale magnetic structure as an example of using the SP beam for pumping and the SR beam for probing (Blue line: SR beam, Red line: SP beam).

ないが、実現されているよりも高い電流値を目標とするため、各要素の性能向上とシステム全体としての動作試験が重要である。ビームラインについても、2ビームの制御や機器間の干渉の回避など、ハード・ソフト両面での詳細検討を進める必要がある。現在 PF リングの BL-11 セクションに、各種 R&D が可能な、開発研究多機能ビームラインの建設計画を進めている。そこでは光軸の違う軟 X 線と硬 X 線を同一サンプル上に照射できるように設計されており、2ビーム同時利用実験のテストができるようになる。Hybrid リングの実現に向けて、2ビーム利用ビームラインの設計や必要な光学素子の開発だけでなく、加速器側とも協力してビーム観測・制御技術の開発を進めるとともに、ユーザーとも協力してビーム計測技術・利用技術の開発を進める予定である。

6. まとめ

既存の多くの実験手法を強化し、新しい実験手法を創出する光源として、長パルスの超伝導リニアックを入射器とする Hybrid リングを提案した。Hybrid リングは、目的に応じた放射光を発生させることの可能な柔軟性の高い光源であるとともに、拡張性にも優れた光源である。Hybrid リングの拡張性は、多種多様な研究に貢献する放射光コンプレックスへの発展も可能であると考えている。2022年には、KEK にフォトンファクトリー計画推進委員会が立ち上がり、内外の専門家も交えた本格的な検討が開始された。今後より詳細な設計や仕様の検討を進めるとともに、加速器の各種スタディや開発研究多機能ビームラインの活用により、各種 R&D を進めて技術的な課題を順次解決することで、実現に向けた準備を進めたい。また、利用に関しても、ここに挙げたサイエンスケースはあくまで例であり、幅広い時空間観察の実現は、今後多くの研究分野での展開に繋がっていくものと期待される。今後研究会などを開催し、広くオープンに議論することで、様々な利用展開を図りたいと考えている。

謝辞

本案の検討にあたり、PF 企画委員会、加速器研究施設加速器第六研究系、物質構造科学研究所放射光実験施設及び放射光科学第一・第二研究系の皆様、KEK 将来光源検討会参加者各位には大変お世話になりました。特に、詳細検討や資料準備には、加速器研究施設の三浦孝子、松本利

広、仲井浩孝、周徳民の各氏、ならびに物質構造科学研究所の千田俊哉、岩野薫、宇佐美徳子、大島寛子の各氏、及び放射光実験基盤技術部門のメンバーにご協力いただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) K. Harada, N. Funamori, N. Yamamoto, Y. Shimosaki, M. Shimada, T. Miyajima, K. Umemori, H. Sakai, N. Nakamura, S. Sakanaka, Y. Kobayashi, T. Honda, S. Nozawa, H. Nakao, Y. Niwa, D. Wakabayashi, K. Amemiya and N. Igarashi: *J. Synchrotron Rad.* **29**, 118 (2022).
- 2) N. Nishimori, T. Watanabe and H. Tanaka: *Proc. IPAC'19*, 1478 (2019).
- 3) A. Yoneyama, A. Nambu, K. Ueda, S. Yamada, S. Takeya, K. Hyodo and T. Takeda: *J. Phys.: Conf. Ser.* **425**, 192007 (2013).
- 4) W. Decking *et al.*: *Nature Photonics* **14**, 391 (2020).
- 5) T.-L. Lee and D. A. Duncan: *Synchrotron Radiation News* **31**, 16 (2018).
- 6) C. Reinhard, M. Drakopoulos, S. I. Ahmed, H. Deyhle, A. James, C. M. Charlesworth, M. Burt, J. Sutter, S. Alexander, P. Garland, T. Yates, R. Marshall, B. Kemp, E. Warrick, A. Pueyos, B. Bradnick, M. Nagni, A. D. Winter, J. Filik, M. Basham, N. Wadson, O. N. F. King, N. Aslani and A. J. Denta: *J. Synchrotron Rad.* **28**, 1985 (2021).
- 7) K. Amemiya and T. Ohta: *J. Synchrotron Rad.* **11**, 171 (2004).
- 8) A. Fujishima and K. Honda: *Nature* **238**, 37 (1972).
- 9) A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai and T. Miyasaka: *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 6050 (2009).
- 10) Y. Tachibana, L. Vayssieres and J. R. Durrant: *Nature Photonics* **6**, 511 (2012).
- 11) K. Shibuya, D. Okuyama, R. Kumai, Y. Yamasaki, H. Nakao, Y. Murakami, Y. Taguchi, T. Arima, M. Kawasaki and Y. Tokura: *Phys. Rev. B* **84**, 165108: 1-6 (2011).
- 12) Y. Yamaki, Y. Yamasaki, H. Nakao, Y. Murakami, Y. Kaneko and Y. Tokura: *Phys. Rev. B* **87**, 081107(R): 1-5 (2013).
- 13) Y. Sekine, M. Nihei, R. Kumai, H. Nakao, Y. Murakami and H. Oshio: *Chem. Commun.* **50**, 4050 (2014).
- 14) Y. Yamasaki, H. Nakao, Y. Murakami, T. Nakajima, A. S. Lafuente, H. Ohsumi, M. Takata, T. Arima and Y. Tokura: *Phys. Rev. B* **91**, 100403(R): 1-5 (2015).
- 15) S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii and P. Böni: *Science* **323**, 915 (2009).
- 16) X. Z. Yu, Y. Onose, N. Kanazawa, J. H. Park, J. H. Han, Y. Matsui, N. Nagaosa and Y. Tokura: *Nature* **465**, 901 (2010).
- 17) N. Nagaosa and Y. Tokura: *Nature Nanotech.* **8**, 899 (2013).
- 18) H. Fujita and M. Sato: *Phys. Rev. B* **95**, 054421 (2017).
- 19) A. Sakdinawat and Y. Liu: *Opt. Lett.* **32**, 2635 (2007).

著者紹介

**五十嵐教之**

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設 教授

E-mail: noriyuki.igarashi@kek.jp

専門：放射光科学、構造生物学

【略歴】

1997年 東京工業大学大学院生命理工学研究科 博士課程修了，博士(理学)。1997年 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 助手，2008年 同 准教授，2019年より現職。

**野澤俊介**

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 准教授

E-mail: noz@post.kek.jp

専門：光物性、時間分解 X 線計測

【略歴】

2002年 東京理科大学 理学研究科 博士課程修了，博士(理学)。名古屋産業科学研究機構 研究補助員，高エネルギー加速器研究機構 研究機関研究員，科学技術振興機構 ERATO 腰原非平衡ダイナミクスプロジェクト 研究員，高エネルギー加速器研究機構 特任助教を経て，2012年 4月より現職。

**中尾裕則**

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 准教授

E-mail: hironori.nakao@kek.jp

専門：共鳴 X 線散乱を利用した構造物性研究

【略歴】

1999年 東京大学大学院理学系研究科 博士課程修了，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 助手，東北大学 大学院理学研究科 助教を経て，2009年より現職。

**雨宮健太**

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授

E-mail: kenta.amemiya@kek.jp

専門：表面科学，軟 X 線光学

【略歴】

1999年 東京大学大学院理学系研究科 博士課程中退，博士(理学)。1999年 東京大学大学院理学系研究科 助手，2006年 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 助教授(2007年 4月より准教授)，2012年 4月より現職。

**丹羽尉博**

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光実験施設 特別助教

E-mail: yasuihiro.niwa@kek.jp

専門：X 線吸収分光

【略歴】

2005年 立命館大学大学院理工学研究科 博士後期課程満期退学，博士(理学)。2005年 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 研究員，2021年12月より現職。

Conceptual design of the Hybrid Ring and unique applications by simultaneous use of two characteristic beams

Noriyuki IGARASHI	Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, KEK, Tsukuba 305-0801, Japan
Hironori NAKAO	Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, KEK, Tsukuba 305-0801, Japan
Yasuhiro NIWA	Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, KEK, Tsukuba 305-0801, Japan
Shunsuke NOZAWA	Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, KEK, Tsukuba 305-0801, Japan
Kenta AMEMIYA	Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, KEK, Tsukuba 305-0801, Japan

Abstract The Hybrid Ring with a superconducting-linac injector as a highly flexible synchrotron radiation source to enable new experimental techniques and enhance many existing ones is proposed. It is designed to be operated with the coexistence of the SR (storage) bunches characterized by the performance of the storage ring, and the SP (single pass) bunches characterized by the performance of the superconducting linac are operated. Users can directly use the cutting-edge SP beam from the superconducting linac in addition to the conventional SR beam. Unique experiments can be performed by simultaneous use of the SR and SP beams, in addition to research with various experimental techniques utilizing the versatile SR beam and research in the field of ultrafast dynamics utilizing the ultrashort pulse of the SP beam. We describe the conceptual design of the Hybrid Ring with superconducting linac and show examples of the beamline designs for two-beam applications and the science cases to be performed by simultaneous use of two beams.