

SPring-8 におけるトップアップ運転の現状と今後の課題—理想の放射光光源を目指して—

田中 均¹, 木村洋昭², 青木 毅², 石川哲也^{2,3}, 大熊春夫², 大島 隆¹
 熊谷教孝², 小原真司¹, 鈴木基寛², 鈴木伸介², 鈴木芳生², 高雄 勝²
 高田昌樹¹, 竹内晃久², 田村和宏², 田中義人⁴, 深見健司², 依田芳卓²

¹財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1, CREST, JST

²財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

³独立法人理化学研究所播磨研究所 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

⁴独立法人理化学研究所播磨研究所 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1, CREST, JST

要旨 2004年5月から, SPring-8でトップアップ運転が極めて理想に近い形で開始された。ここでいう理想的運転形態とは、「求める時間構造を持った高輝度光パルスが、一定の強度で安定に供給される」状態を指し、これまで放射光ユーザーが待ち望んでいたものといえる。SPring-8蓄積リングでは、トップアップ入射により電流値が 10^{-3} 以下の精度で制御され、プローブ強度が正確に定義できる電流安定性、軌道安定性が実現されている。様々な加速器学的工夫の積み上げによって、最大の問題であった入射時の軌道変動も、イメージング実験において影響が見られないほど小さく抑制することに成功した。さらに、シングルバンチの不純度は、一週間の連続運転で $1\sim 2\times 10^{-9}$ に維持されている。また、入射による放射線漏洩線量の低減や挿入光源永久磁石への放射線ダメージを回避するために重要となる高い入射効率も、入射ビームの水平位相空間を整形する操作と低クロマチシティ運転を組み合わせることで実現、多数の真空封止アンジュレータがギャップを閉じた状態で90%程度の高効率を得られている。この極めて理想的なトップアップ運転が、どのように実現されたのか、今後この運転をさらに進化させていくにはどうしていくべきか、また、実験にとってどのようなメリットを生み、新たな実験を切り開く可能性があるのかを述べる。

1. はじめに —どうしてトップアップ運転が必要になるのか¹⁾—

光源を利用する実験ユーザーにとって理想的な放射光源とは、求めるエネルギーと時間構造を持つ高輝度光パルスが一定の強度で、安定に供給されるものであろう。実験ハッチでの光強度の安定化には、電子ビームの空間分布（エミッタンスと軌道）や周回電子数（平均電流とバンチ電流）並びにビームライン光学系の時間安定性が要求される。高輝度光パルスの生成には、高密度電子ビームが必要不可欠であり、理想的光源におけるこの2つの要素、「高輝度」と「安定性」は実は互いに相反する。SPring-8を例にとって説明すると以下ようになる。SPring-8では、現在、水平エミッタンスが数 $\text{nm}\cdot\text{rad}$ 、垂直エミッタンスはさらにその約500分の1が達成されている²⁾。この条件で、1個のバンチ（電子ビームの固まりで約40ピコ秒の時間幅を持つ）に0.1 mAに相当する電子（約 3×10^9 個の電子）を貯めた場合、ビーム寿命は200時間程度になる。これ

は、蓄積時の真空度の向上、並びに蓄積ビームの高いエネルギーにより、真空チェンバー内の残留ガスと電子ビームとの散乱の効果が十分に抑制された結果である。しかし、さらに10倍多くの光子を得るために、1個のバンチの電流を1 mA（約 3×10^{10} 個の電子）まで引き上げていくと、電子密度の増加で電子・電子散乱によるビームロスが顕著となり、ビーム寿命は25時間程度にまで激減してしまう。

光源性能の改善を進めつつ、平均電流値を維持する方法として登場したのが、短いビーム寿命で損失した電子を継ぎ足し入射で補い、蓄積電流を一定に維持するトップアップ運転である。これにより、平均入射間隔に比べ長い時間スケールで見ると、一定の蓄積電流、言い換えれば無限の平均ビーム寿命が与えられる。蓄積電流の最小変動幅は、どのくらい微少な電流まで安定に入射が可能かという技術的問題に依るので、 10^{-4} の電流安定性は実現可能である。この運転により、蓄積電流は通常運転時の上限一杯に維持されるので、実験時の光強度の規格化も不必要となる。理想的な運転ではビーム入射による外乱もなく、入射時にも入射のない時と同様の実験が可能であり、これまで

のように入射の度に挿入光源のギャップを全開にし、ビームシャッターを閉じて実験を停止する必要もない。ビームライン光学系の熱負荷も一定にでき、実験ステーションにおける X 線の強度と位置が安定化される。大部分のユーザーはビーム入射を意識することなく、安定で連続的な実験を実現できる訳である。

このトップアップ運転のアイデアを放射光光源に最初に持ち込んだのは、SORTEC の 1 GeV 放射光光源であろう³⁾。しかし、1990年当時、この試みは余り脚光を浴びなかった。6年後の1996年、第5回 European Particle Accelerator Conference (EPAC) で、台湾の国立放射光研究センター (NSRRC) が、電流値を194~200 mA の範囲(3%幅)で約6時間一定に維持したトップアップ試験運転結果を報告している⁴⁾。この時の報告では、入射時の軌道変動、並びに挿入光源部の狭い垂直ギャップチェンバーでの入射ビーム損失が著しく、トップアップ運転の導入にはこれらの改善が必要との結論であった。トップアップが高輝度光源、特に、エネルギーの低い放射光源の必須アイテムであると認知させた立役者は、Advanced Photon Source (APS) と Swiss Light Source (SLS) である。APS では、設計当初からトップアップ運転を最重要オプションとして掲げてきた。しかし、SPring-8 と同じく、従来の光源設計を踏襲したため、その導入までの道のりは大変だったようである⁵⁾。1996年8月のユーザー運転開始以来、実に6年の歳月を経て、2001年10月からユーザー運転へのトップアップ運転の導入が開始された⁶⁾。これに対し、SLS はトップアップ運転を行うことを前提に設計された世界初の高輝度放射光光源である。入射時のビームロスを抑えるため、入射ビームのエミッタンスを蓄積リングと同様に小さくし、3つしかないディスパーションフリーの長直線部(11 m)に入射部を設け、対称に配置された4つのパルスポンプ電磁石による理想的な入射スキームを導入した⁷⁻⁹⁾。理想的なスキームは蓄積ビームの振動を抑えるのにも効果的である。故に、APS とは異なり、SLS ではコミッショニングの当初からトップアップ運転が実現、APS とほぼ同時期の2001年秋からトップアップ運転が導入される事になった。

これら二施設のトップアップ運転の成功により、現状計画されているほぼ全ての高輝度光源、SOLEIL^{10,11)}、SSRF¹²⁾、DIAMOND¹³⁾、日本の極紫外・軟 X 線放射光光源計画¹⁴⁾等でトップアップ運転が前提となった光源の設計・検討が進められているばかりか、既存の放射光光源でもトップアップ運転導入の気運が高まっている。SORTEC による試みから十数年が経過した今、トップアップ運転は、高輝度光源の運転として世界の標準になりつつある。

2. 理想的トップアップ運転実現に向けた SPring-8 の試み

トップアップ運転には、原理的な制限はないものの、

- (a) 電子ビームを入射する際に、蓄積ビームの振動を引き起こし、放射光利用実験を妨げる、
- (b) 入射された電子ビームが真空封止型挿入光源の永久磁石にぶつかり磁石の減磁を引き起こす、
- (c) 頻繁なビーム入射により孤立バンチの純度が低下する

という3つの大きな技術的問題点があった。SPring-8 でもトップアップ運転の導入に向けた検討が1999年から開始された。ビームライン研究者や実験ユーザーとの議論を通し、SPring-8 が目指すべきは、上記の技術的問題点を克服した理想的な運転、即ち、ビーム入射が蓄積ビームの基本的特性を一切阻害しない安定な運転を目指すとの方向性が打ち出された¹⁵⁾。この実現に向け、加速器研究者、ビームライン研究者、実験ユーザーとで構成された分野横断型のタスクフォースが作られ、トップアップ運転の要素技術の開発及び実証を組織的に行っていった。

2.1 蓄積電流の安定化

蓄積リングの電流値変動を小さく抑えるため、蓄積リングへ入射する電流値の安定化、入射器各機器コンポーネントの長期安定化に向けた加速器の改善が進められた。また、様々なフィリングに対して、平均電流とバンチ電流を精度良く制御するために必要な測定系が整備された。

2.1.1 入射ビーム電流の安定化

蓄積リングの電流値変動を0.1%以下に抑えると共に、様々なフィリングを精度良く維持するため、入射ビームの長時間、並びにショット毎の電流安定性を高める改善を進めた。線型加速器では、RF パワーと RF 位相の安定化を実施し、最終段に Energy Compression System (ECS)^{16,17)}を設置、線型加速器からの出射ビームのエネルギーと電流値を長時間に渡り安定化した。また、シンクロトロンからの出射電流を安定化するため、RF 空洞の冷却水温度の精密制御を実施した。シンクロトロンでのバンチ純化過程で生じるショット毎の出射電流変動を抑制するため、異なる RF 周波数で加速する線型加速器とシンクロトロンの加速位相を同期させる事ができるタイミングシステムも開発された¹⁸⁾。SPring-8 サイトには、Fig. 1 に示すように 8 GeV の SPring-8 と最大蓄積エネルギー 1.5 GeV の New SUBARU の2つの蓄積リングが稼働しており、入射器である 1 GeV 線型加速器はタイムシェアして使用されている。蓄積電流変動目標値を維持しながら、2つのリングへビームを高速に振り分けて入射できるように、制御系の改造、並びに線型加速器出口の振り分け電磁石のパターン化を行った。これによりステータスの確認等を含めて5秒

以内にビームの入射先を切り替えられるようになった¹⁹⁾。また、最近、線型加速器から2つの蓄積リングへ向けたビーム出射軌道を安定化する軌道フィードバックシステムが導入²⁰⁾され、入射ビームアクセプタンスの小さなNewSUBARUにおいても入射効率の長期安定性が確保された。

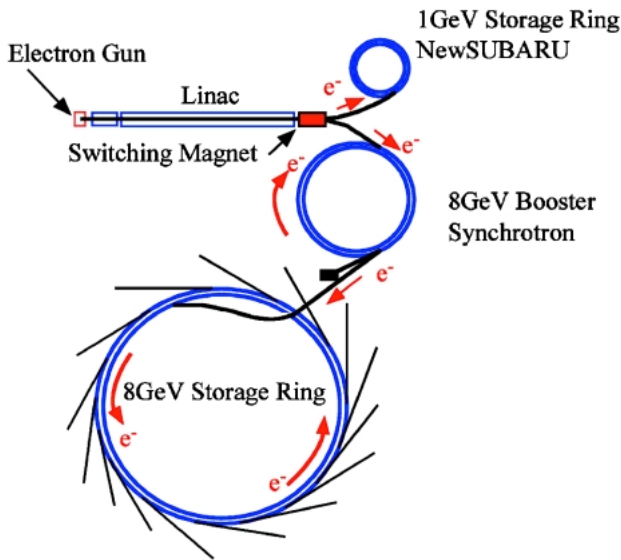


Fig. 1 Schematic view of the SPring-8 accelerator complex. The complex is composed of the 1-GeV linac, the 8-GeV booster synchrotron, the 1 to 1.5-GeV NewSUBARU storage ring and the 8-GeV SPring-8 storage ring.

2.1.2 バンチ電流計測システム

SPring-8 蓄積リングは、一周に2436個のRF バケツを持ち、最大2436個のバンチを蓄積可能である。この2436個のRF バケツを利用し、様々なフィリングパターンがユーザー運転に用いられている。通常、孤立バンチとバンチトレイン（連続した複数のバンチ）では、実験上の要請から、バンチ電流値が同一ではなく、その結果、電流の減少率も大きく異なる。フィリングパターンと目標電流値を同時に維持しつつ、どのバンチにどれだけ電子を入射するのかを、簡単なアルゴリズムで決定するのは難しい。この問題を解決するため、1つのビーム位置モニタの4電極の出力電圧を、10 MHz から2.5 GHz の帯域を有するパワー結合器で合成し、その信号をバンチに同期して、20 G-Samples/sec の高速オシロスコープで読み取るバンチ電流計測システムを構築した²¹⁾。このシステムでは、2436個全てのバンチ毎の電流値を1%の精度で、約25秒で測定できる。ビーム入射終了後に、このシステムでバンチ電流を計測することで、次回のビーム入射時にどのバンチにどれだけの電流を入射すれば良いかが決定できる。

2.2 入射時の蓄積ビーム振動の低減化

SPring-8 蓄積リングの入射点近傍での入射バンチ軌道、入射ビーム軌道、及びそれらを形成する電磁石の配置を Fig. 2 に示す。シンクロトロンから出射されたビームは、ビーム輸送系を経て、リング内側から3台のDCセプタム電磁石、1台のパルスセプタム電磁石で水平面内から入射点に導かれる。一方、蓄積ビームは入射点手前の2台の入射バンチ電磁石で、入射ビーム側（リング内側）に

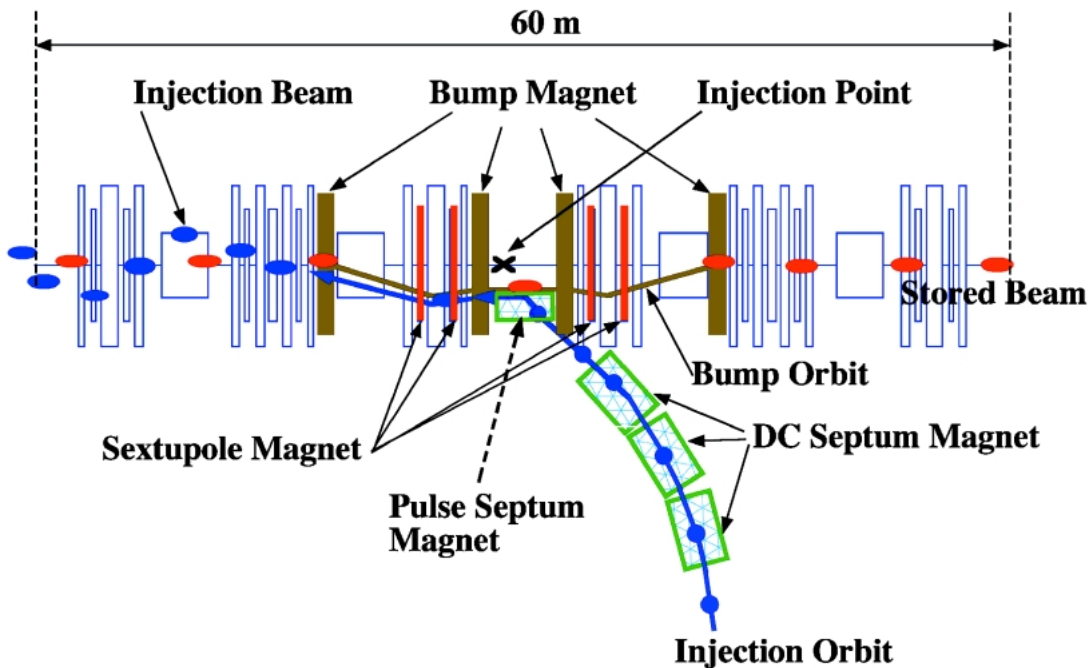


Fig. 2 Schematic view of the beam injection system of the SPring-8 storage ring.

大きくこぶ状（バンプ）に曲げられ、入射ビームとの水平距離を詰め、入射後の入射ビームの水平振動振幅を低減するように設計されている²²⁾。入射バンプ軌道は、4台の入射バンプ電磁石で台形状に形成され、理想的には閉じて蓄積ビームを振動させることはない。しかし、実際には様々なエラーにより蓄積ビームの振動が誘起されていた。これを抑えるため、振動を誘起するソースの抑制と残った振動の補正の2つに分けて対策が取られた。

2.2.1 入射時の蓄積ビーム振動要因の抑制²³⁾

(a) DCセプタム電磁石の漏れ磁場対策：当初設置されていた3台のDCセプタム電磁石の磁気シールドが不完全で、中心軌道（蓄積ビームが通常周回する軌道）上に強い漏れ磁場を発生させていた。特に、水平磁場成分が大きく、入射バンプ軌道と中心軌道上の積分漏れ磁場の差で生じる軌道変動振幅は、垂直ビームサイズの数十倍に達すると評価された。このため、磁気シールドの強化並びに磁石端部の対称性の改善を施した新しいセプタム電磁石を製作し交換した。これにより、入射バンプ軌道と中心軌道上の漏れ磁場の積分値の差は劇的に小さくなり、それにより生じる軌道変動振幅は、垂直ビームサイズの1/10以下に抑制された²⁴⁾。

(b) 入射バンプ軌道内の6極電磁石による軌道変動対策：6極電磁石が入射バンプ軌道内に存在すると、その非

線形性により、入射バンプ軌道が全てのバンプ振幅で原理的に閉じない。設計当初、トップアップ運転を考えていなかったため、Fig. 2に示すように、入射バンプ軌道内に4台の6極電磁石が存在し、これによる軌道振動の大きさは1mmを超える大きなものとなった。色々と検討した結果、入射バンプ漏れに対する6極磁場の最低次の摂動を旨く制御することで、入射バンプの高さに依らず入射バンプの漏れを極小化できることを見いだした²⁵⁾。この結果、理想的な入射バンプ波形を仮定すれば、極小点でのビーム振動は数10 μm まで低減できる（Fig. 3）。見いだされた最適な6極電磁石のパラメータを実現し、かつ、安定なビーム入射が可能なダイナミックアパチャを確保するため、リングの基本構造を、1つのChasman-Green (CG)セルから2つのCGセルへ拡張した。さらに6極電磁石のケーブル接続の変更を実施し、基本構造における6極電磁石のファミリーと呼ばれる種類を4から6ファミリーに増やした。これにより、6極電磁石の引き起こすバンプの漏れに起因した水平軌道振動を抑制するとともに、安定入射に必要なダイナミックアパチャを確保する6極電磁石の設定が実現した²⁶⁾。

(c) 入射バンプ電磁石の磁場波形相似性の改善²³⁾：入射バンプ軌道は約8マイクロ秒のサイン半波の時間構造を持つ磁場波形で形成され、ゼロ振幅から徐々に立ち上がり、4マイクロ秒でピークとなり、その後減衰する。非線

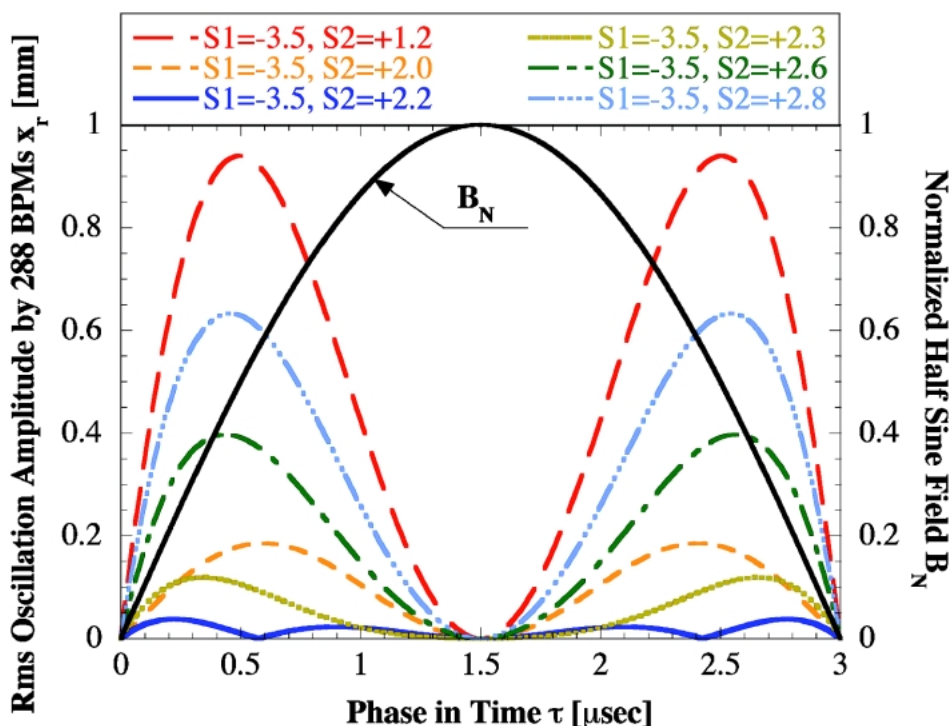


Fig. 3 Calculated bump leakage variation as a function of the ratio of two sextupole strengths within the bump orbit. Here, the strengths of the bump magnets are adjusted to close the bump orbit at its peak amplitude in consideration of sextupole nonlinearity. The pulse width of 3 μsec was used in the calculation.

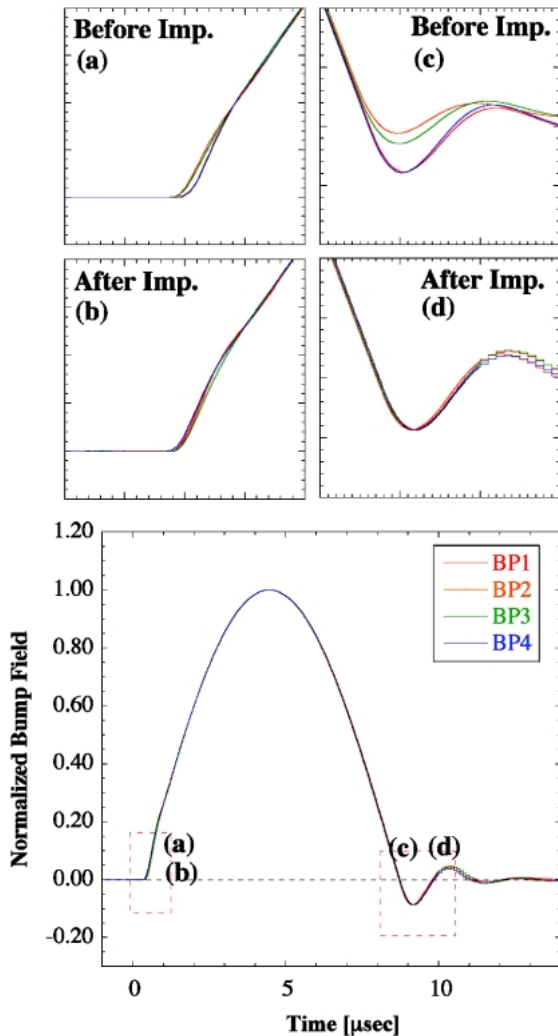


Fig. 4 Similarity improvement of four bump-field waveforms before and after the improvement. Figures 4(a) and 4(b) show the magnified rising parts of the pulses before and after the improvement, respectively. Figures 4(c) and 4(d) show the magnified falling parts of the pulses before and after the improvement, respectively.

形電磁石がバンプ内に存在しない場合でも、4 台の磁場波形が完全に相似形でないと、入射バンプ軌道は閉じず、蓄積ビームを振動させることになる。最初は、4 台の電磁石の電流波形を合わせることから始めた。電源から見たときの電磁石のインピーダンス特性がケーブルも含めて4 台とも同じになるよう調整を行った。入射バンプ電磁石の励磁と同期して計測可能なシングルパスビーム位置モニタ (SPBPM) を用い、蓄積ビームの振動振幅を測定することで、各バンプ電磁石の磁場波形を評価した。すると、電流波形が一致しているにも拘わらず、サイン半波の後半部で磁場波形にズレが生じることが見いだされた。色々調べた結果、バンプ電磁石のヨークを構成する絶縁被膜付き珪素鋼板 (厚さ0.1 mm) を抑えるステンレス製の端板で渦電流が発生し、磁場波形の相似性を、特に波形の後半部で

崩していることが分かった。そこで、渦電流の発生を抑えるよう樹脂を含浸した積層ガラスマットシートに端板の材質を変更した入射バンプ電磁石を4 台製作し、電流波形調整、並びにロングコイルを用いた積分磁場に基づく磁場波形調整を実施した。この結果、Fig. 4 に示すように、調整以前に比べ、4 台の電磁石の磁場波形の相似性が格段に改善された。また、波形相似性の改善と平行し、4 台の電磁石の励磁タイミングの調整も積分磁場を用いて行った。ここでも、微調整及び最終確認には、SPBPM で測定した蓄積ビームの振動データが用いられた。

(d) 入射バンプ電磁石の傾き調整²³⁾: 入射時の蓄積ビームの垂直振動に、入射バンプ電磁石の磁場波形との強い相関が見られた。原因として、水平面内の入射バンプ軌道漏れの垂直面内への直接の結合が考えられた。これは、入射バンプ電磁石がビーム進行方向を回転軸として僅かに回転して傾くことで引き起こされる。SPBPM で計測された蓄積ビームの垂直振動データを用いて、どの入射バンプ電磁石の回転誤差で、測定結果がもっとも合理的に説明できるかをフィッティングにより求めた。もっとも怪しいと評価された2 台の入射バンプ電磁石に対し、誤差を是正する方向へ傾き調整を施した結果、入射時の垂直ビーム振動は約半分まで減少し、蓄積ビームの垂直振動のバンプ磁場波形との明確な相関が見られなくなった。

2.2.2 入射時の蓄積ビーム振動の補正²³⁾

当初から、高速励磁の補正電磁石を用いて蓄積ビーム振動を補正することを考えていたが、補正量が大きく、電源の開発に困難があった。2.2.1. で述べてきたように蓄積ビームの振動要因抑制対策を徹底して行い残留振動を低減し、必要な補正磁場の強さを弱めた結果、補正電磁石とその電源の開発を行うことが現実的となった。先ず、入射時の蓄積ビームの残留振動を SPBPM で詳細に計測し、水平、垂直振動をそれぞれ効率良く補正できる位相位置の選定を行った。次に、その位置にセラミックチェンバーと水平、垂直振動補正用の高速補正電磁石を設置した。補正電流パターンは、SPBPM で得られた振動データをもとに計算した。任意波形発生装置で合成した補正電流パターンを広帯域アンプで増幅し、ビーム入射に同期して水平、垂直それぞれ1 台の補正電磁石に供給する蓄積ビーム振動フィードフォワード補正システムを構築した。

2.3 入射ビーム損失の低減化

入射ビーム損失は、ベータトロロン振動とシンクロトロン振動が結合した、非常に複雑な非線形過程で生じる。モデルキャリブレーション法で求めた誤差磁場分布²⁷⁾に基づく SPring-8 蓄積リングの高精度リング模型を用いた粒子追跡シミュレーションの結果、ビームロスを生じさせる主な要因は、入射ビームの大きな水平ビーム振動と蓄積リン

グの高いクロマチシティであることが分かった²⁸⁾。

2.3.1 入射ビームの水平エミッタンスの低減

SPring-8のブースターシンクロトロンは、建設コストを抑えるためコンパクトに設計され、エミッタンスは $230 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ (蓄積リングの約40倍)と大きい。このため、入射ビームの水平サイズは、入射点で 1σ が 1.7 mm 程の大きさになる。このビームサイズは、入射ビームの重心振動振幅 14 mm (これは入射バンパ軌道のこぶの高さ、こぶと入射ビーム重心までの距離、入射ビームサイズで決まる)に比べ、無視できない大きさである。即ち、入射ビームの水平サイズを小さくすることができれば、入射ビームの水平ビーム振動を抑制することができる。このため、シンクロトロンから蓄積リングへのビーム輸送系に、水平ベータatron振動の位相進みが 90° 異なる2台のビーム成型用スリットから構成されるコリメータシステムを設置した²⁹⁾。これを用いると、入射ビームの水平位相空間を4角形に切り取ることができる。ビームの中心に近いところまで切り取っていくと、それに伴いコリメータシステムを通過する入射ビームの電流値が減少する。例えば、水平位相空間の2軸で $\pm 1\sigma$ の中心を残し、テールが切り取られた場合、シンクロトロンを出射されたビームの約44%がコリメータシステムを通過し、リングへ輸送される。入射ビームのエミッタンスはこの場合、実効的に約1桁小さくなる。さらに、入射点でも重心から 1σ まで入射ビームをセプタム壁に接近させることができ、入射ビームの最大振動振幅だけでなく重心振動の振幅も 2 mm 程度、約15%小さくすることが可能になった。

2.3.2 運転時のクロマチシティの低減

蓄積リングには真空封止型挿入光源が多数設置され、その狭い垂直ギャップがビームに対し低周波数領域で大きなインピーダンスを与える。このため、挿入光源設置台数の増加に伴い、垂直狭ギャップによる不安定性が強く励起されるようになった。2004年の時点で、ユーザー運転時のクロマチシティ (ξ_x, ξ_y) は、この不安定性をランダウ減衰により抑制するため、($\xi_x = +8, \xi_y = +8$) と大きな値で運転されていた。挿入光源の垂直ギャップを最小ギャップまで閉め、ユーザー運転で用いる全てのフィリングパターンで安定に運転が行えるよう、FPGAを用いたBunch-by-Bunch フィードバックシステム (BBF) が開発された³⁰⁾。BBFの導入により、ユーザー運転時のクロマチシティは ($\xi_x = +8, \xi_y = +8$) から ($\xi_x = +2, \xi_y = +2$) と1/4まで低減することが可能になった。

コリメータを用いて入射ビームの水平エミッタンスを低減し、入射ビーム振動を抑制すること、並びにBBFフィードバックによる低クロマチシティ運転を組み合わせることで、入射ビームロスの低減が図られた。低クロマチシティ ($\xi_x = +2, \xi_y = +2$) の条件で、コリメータスリ

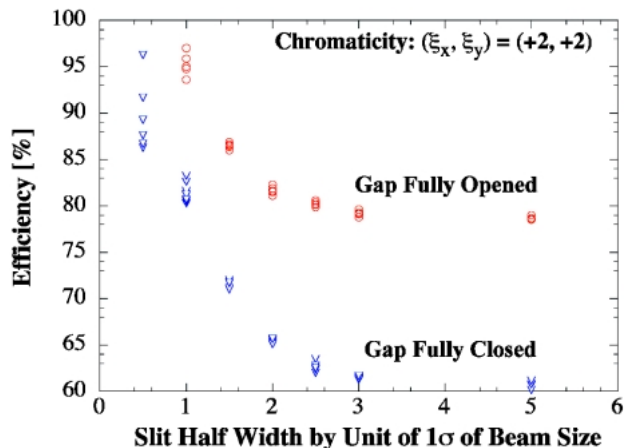


Fig. 5 Dependence of injection efficiency on a half width of a pair of horizontal slits. The unit of the horizontal axis is 1σ of a horizontal beam size at the slit.

ットの半幅に対する入射効率の依存性を Fig. 5 に示す。全ての真空封止型挿入光源のギャップを最小値まで閉じて、スリット半幅をビームサイズの 0.5σ (全幅で 1σ) とすれば、約90%の入射効率が得られる。しかし、一方でスリット半幅を小さくしていくと入射電流値のばらつきが大きくなる。スリット半幅は入射電流のばらつき抑制を考慮し、ビームサイズの 1σ (全幅で 2σ) で運転に使用されている。

2.4 高純度シングルバンチの生成

バンチ当たりの電流値が 1 mA の場合、電子ビームの時間幅は、SPring-8蓄積リングでは、FWHMで40ピコ秒程度である。この電子ビームから出る短パルスX線を利用し、核共鳴散乱実験等が行われている。プローブ光を発生する孤立バンチは、通常、僅かではあるが前後のRFバケットにも電子を伴っている。このため、プローブ光によって生じた反応の時間応答を高精度で測定する実験では、孤立バンチ後方のバックグラウンドを引き上げる“ゴミ電子”を如何に少なくするかが勝負となる。孤立バンチの電子数で規格化したゴミ電子の数を不純度と呼び、孤立バンチの質を計る指標として用いられるが、トップアップ運転では、繰り返し入射により電流値を一定に維持するので、ビーム寿命の短い大強度孤立バンチの不純度を運転期間に渡って、如何に小さく抑えていくかが大きな問題であった。

2.4.1 ブースターシンクロトロンにおける孤立バンチの純化

SPring-8蓄積リングは、 8 GeV と高エネルギーであるため、放射減衰の効果が大きい。このため、孤立バンチの電子が電子・電子散乱でエネルギー偏差をある程度持つても、放射減衰で同じRFバケットに戻ってくる。蓄積リン

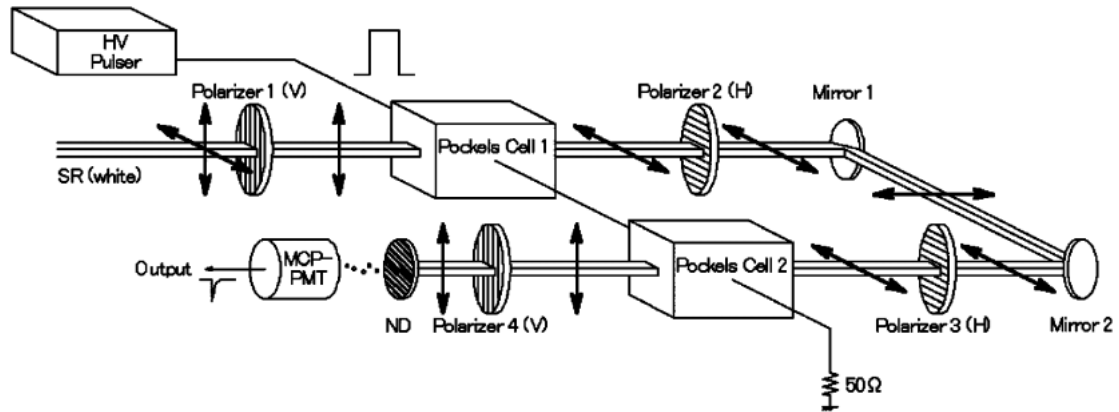


Fig. 6 Schematic view of a monitoring system for impurity measurement.

グ内で後方へ拡散するには、非常に大きなエネルギー偏差が必要になり、該当するエネルギー偏差を持つ電子はエネルギー分散の大きい位置で真空チェンバー壁の外側の軌道を通ることになる。つまり、蓄積リング内で後方のRFバケットへ（前方へも）拡散する可能性は存在しない。蓄積リングのユーザー運転をスタートした当時、蓄積リングの孤立バンチの純度が悪化しないという計測結果から、このメカニズムが明らかにされた。そもそもトップアップ運転では頻繁にビーム入射を行うので、入射後に蓄積リングで孤立バンチを純化する方式は実験を大きく制限するだけでなく、場合によっては高精度の実験そのものが不可能になる。そこで、入射ビームの不純度を徹底的に低下させる戦略が取られた。当初から、任意波形発生装置とハイパワーアンプを用いて4本のストリップラインに高周波電流を流し、特定のRFバケットを除く全てのRFバケットに存在する電子を蹴り飛ばすRF Knock Out (RFKO) 法³¹⁾を用いて、ブースターシンクロトロンで孤立バンチの生成が行われていた。RFKO法の性能改善に向けて、シンクロトロン機器の様々な安定性の改善とチューニング、特に、RF空洞の冷却水温度設定とその安定化、ベータトロニックチューンやクロマティシティの最適化と安定化、加速電圧の最適設定等が行われた。また、前述した異なる加速周波数を持つ線型加速器の加速位相とブースターシンクロトロンの加速位相を10ピコ秒程度の時間偏差で正確に同期させるタイミングシステムの開発も行われた。これらの調整、改善や開発の積み上げにより、不純度が 10^{-10} 台の孤立バンチの安定生成がブースターシンクロトロンで実現した³²⁾。

2.4.2 孤立バンチ不純度の精密計測

RFKOによる孤立バンチ純化の精密なチューニング、並びにユーザー運転時の孤立バンチ不純度の監視には、不純度を高分解能で測定できる観測系が不可欠である。このため、加速器診断ビームラインBL38B2において、可視光を用いた光子計数法による孤立バンチ不純度測定システ

ムが開発された³³⁾。孤立バンチ前後の僅かなゴミ電子を短い時間で計測するには、孤立バンチからの強い放射光を如何に遮るかが鍵となる。そこで、ポッケルスセルを2段に組み合わせて高速シャッターとして用いる Fig. 6 に模式的に示すシステムが構築された³³⁾。反射光の除去やマルチチャンネルプレート型光電子増倍管の性能改善等を経て、最終的に 10^5 の消光比を達成した。これにより、特定バンチに同期させるタイミング系を用いて、ユーザー運転時の孤立バンチ不純度（前後のRFバケット）を 10^{-10} の分解能で30分以内に測定できるようになった。

3. 現時点でのトップアップ運転のビーム性能

トップアップ入射のユーザー運転への導入に向けた調整は、2003年夏期運転停止期間明けから開始された。2003年10月16日（第7サイクル）、12時間もしくは24時間毎^{注1)}の定時トップアップ入射、トップアップPhase-1がユーザー運転に導入されるに至った。真空封止型挿入光源ギャップの開閉状況に関わらず、ビームシャッターを開けた状態でのビーム入射がユーザー運転で初めて可能になった訳である。引き続き、2004年第1サイクルからBBFの導入による低クロマティシティでのユーザー運転が開始され、入射効率の改善が図られた。その後も入射時の蓄積ビーム振動抑制と高い入射効率の両立を可能とする振動抑制型オブティックスの最終調整が粘り強く続けられた。ユーザーとビームライン研究者の最終性能確認、並びに放射線漏洩検査を経て、2004年5月20日（第4サイクル）から、1分もしくは5分毎の入射^{注2)}により一定の蓄積電流

注1) マルチバンチフィリングで運転する場合は24時間毎に、またセベラルバンチフィリングで運転する場合は12時間毎にビームを入射し、減少した蓄積電流を約99 mAまで引き上げる。

注2) マルチバンチフィリングで運転する場合は5分毎に、セベラルバンチフィリングで運転する場合は1分毎にビームを入射し、蓄積電流値を99 mAに維持する。

を維持する本格的トップアップ運転，トップアップ Phase-2 によるユーザー運転がスタートした¹⁵⁾。2004年9月23日（第6サイクル）から，線型加速器から出射されるビームの2つの輸送先を高速で切り替える振り分け電磁石の運用が開始された。これにより，SPring-8 サイト内にある NewSUBARU と SPring-8 蓄積リング，2つのリングの随時振り分けトップアップ運転が可能になった。これまでに得られたビーム性能を以下にまとめる。

3.1 トップアップ運転時の漏洩線量

入射ビーム損失抑制対策が実施された後，ビームシャッター開，真空封止型挿入光源のギャップを最小値まで閉じた状態で，SPring-8 蓄積リング実験ホールのビームライン光学ハッチを中心に放射線漏洩線量が詳細に測定された。その結果，トップアップ運転時のガンマー線と中性子線による漏洩線量は，通常運転（ビーム入射をビームシャッター閉，真空封止型挿入光源のギャップ全開で実施）時の線量と違いが見られないことが確認された。また，トップアップ運転導入後の定期線量測定においても，収納部天井，収納部側面，実験ホール等広範囲に渡る測定点で漏洩線量測定が実施され，ガンマー線と中性子線による漏洩線量がトップアップ運転導入前と変わらない事も確認されている。

3.2 蓄積電流の安定性

SPring-8 蓄積リングと NewSUBARU の随時振り分けトップアップ運転で得られた両リングでの蓄積電流の安定性を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) に長時間安定性（5日間）を示す。SPring-8 蓄積リングは，この時マルチバンチフィリングで運転されており，5分毎にビームを数発入射している。ここでは NewSUBARU へのビーム入射に伴う蓄積電流の大きなくぼみ（一日に数回）がなくなり，入射器トラブルによる電流減少を除けば，長時間にわたり約0.1%の電流安定性が実現されていることが分かる。一方，NewSUBARU でも，8秒周期で蓄積電流をモニタし，下限値を下回った所でビームを1発入射するスキームで電流値を一定に維持する運転が平行して行われている。Fig. 7(b) に10月2日の1時間の短時間安定性を示す。ビーム入射は SPring-8 蓄積リングが優先であるため，5分ごとに NewSUBARU 蓄積電流の落ち込みが見られるが，それでも0.3%の電流安定性が実現されている。Fig. 7(c) に，全周の2/21分を埋めているバンチトレインとその残りの19/21分に等間隔に並んでいる18の孤立バンチで構成されるフィリングパターン（Fig. 15(a)参照，以下“2/21バンチトレイン+18孤立バンチ”と記載）における18孤立バンチのバンチ電流のばらつきの一週間に渡る変動を示す。孤立バンチ間のバンチ電流ばらつきは2~3%に抑えられている事が分かる。

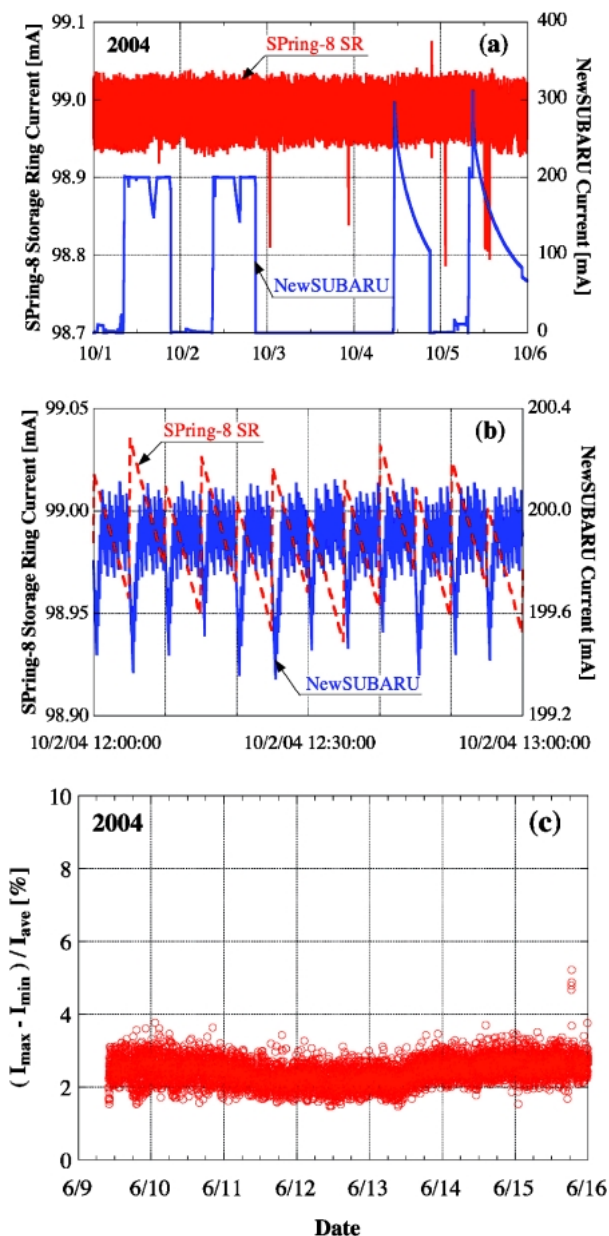


Fig. 7 Stored current stability of two storage rings in the SPring-8 site. The long-term stability over 5 days (a), the short-term stability of one hour (b) and the current uniformity of 18 single bunches over one week (c). The vertical axis of (c) represents a peak-to-peak variation of 18 single bunch current data normalized by the average of the 18 bunch current data.

3.3 入射時の蓄積ビームの振動²³⁾

ユーザー運転中の条件（振動抑制型オプティックスを用い，BBF と蓄積ビーム振動フィードフォワード補正システムがオン）で得られたビーム入射時の水平，垂直蓄積ビーム振動を Fig. 8(a)，(b) にそれぞれ示す。このデータは入射に同期したトリガーを用いて SPBPM で測定したものである。比較のため，振動抑制対策の進捗に応じた蓄積ビーム振動データも併せて示した。最終的には，リング一周に分布した280台の SPBPM の2乗平均として，水平

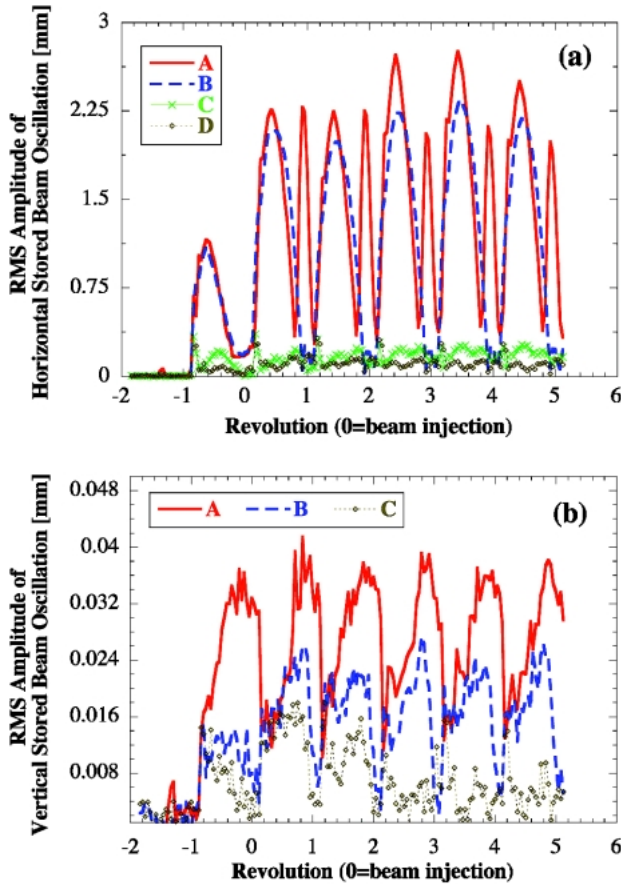


Fig. 8 Rms amplitudes of horizontal (a) and vertical (b) stored beam oscillations caused by a beam injection at each correction step. In Fig. 8(a) the symbols A: before the correction, B: by the bump field adjustment, C: by the bump field adjustment + sextupole field optimization and D: by the bump field adjustment + sextupole field optimization + feed-forward correction. In Fig. 8(b), the symbols A: before the correction, B: by the tilt error correction and C: by the tilt error correction + feed-forward correction.

約100 μm , 垂直約 6 μm が達成された。挿入光源部のベータatron関数値を考慮すると、挿入光源点において、水平、垂直ビーム振動は、各ビームサイズの概ね1/3と1/2まで抑制された事になる。**Fig. 8(b)**において、垂直振動のフィードフォワード補正が入射後3ターン目から効いている。これは、場所の制約から、補正器設置場所を、垂直振動を1ターン目から補正可能な位相位置に選べなかったためである。

3.4 入射ビーム損失¹⁵⁾

入射効率は、蓄積リングの入射点直近上流に設置されたビーム電荷モニタ (BCM) による入射毎の入射電流と蓄積リングに設置された電流モニタ (DCCT) の電流増分から計算される。入射効率のキャリブレーションはビームロスが基本的に生じないオン軸の入射条件で複数の電流検出器を用いて実施した。ユーザー運転中の6日間に

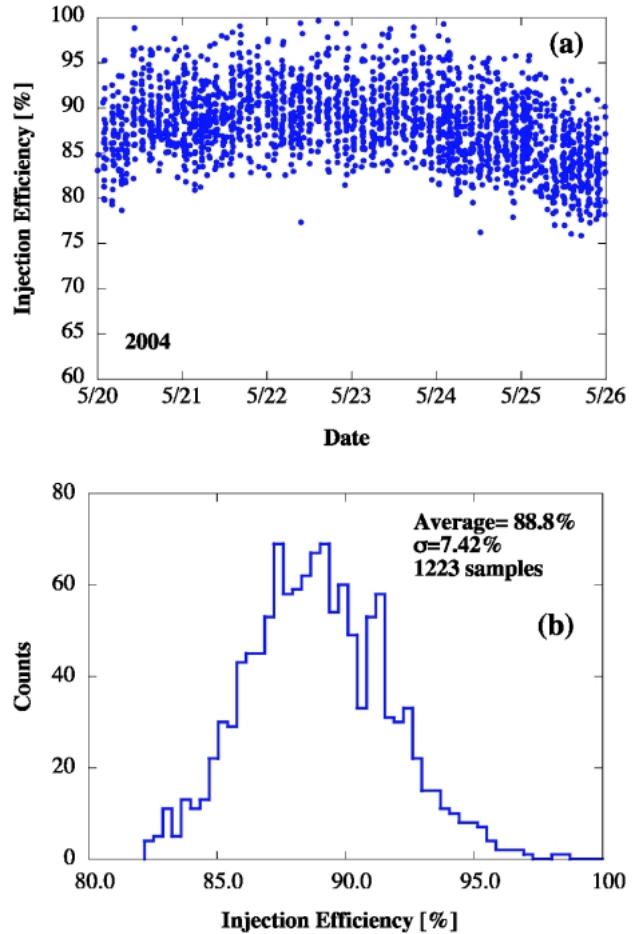


Fig. 9 Variation of injection beam efficiency. The long-term variation over 6 days (a) and the statistical distribution of the injection beam efficiency for one day (b).

渡る入射効率の変動を **Fig. 9(a)** に示す。このときのコリメータのスリット半幅は2台とも 1σ (全幅 2σ) の設定である。BBFはオンの状態で、クロマチシティは ($\xi_x = +2$, $\xi_y = +2$)、オプティックスは入射時の蓄積ビーム振動を低減した振動抑制型オプティックスが用いられている。平均として80%を上回る入射効率が安定して得られていることが分かる。ここで見られる入射効率の長周期変動は、挿入光源のギャップの開閉とは相関していない。現状では、入射ビーム軌道のゆっくりしたドリフトを反映したものと考えられ、調査を行っている。また、**Fig. 9(b)** に典型的な一日分の入射効率の統計分布を示す。入射効率は挿入光源のギャップ値に依存するが、このときの平均入射効率は約90%であった。**Fig. 9(a), (b)** から分かるように入射効率は $\pm 5\%$ 程度でばらついている。この主な原因は、入射パルス電磁石の励磁が誘起するBCMのノイズと現状考えられている。

3.5 孤立バンチの不純度の増加^{15,32,33)}

一週間のユーザー運転中における特定の孤立バンチの不

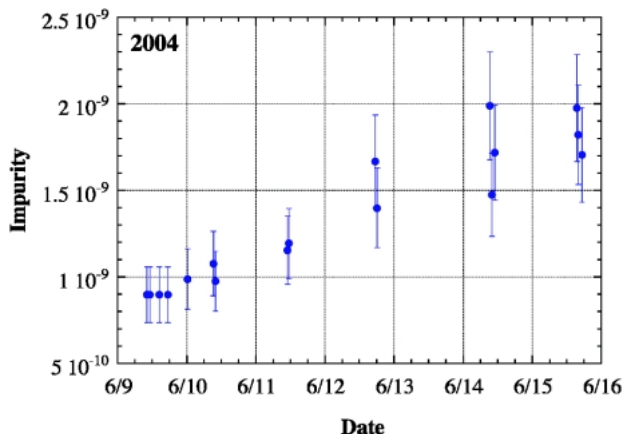


Fig. 10 Variation of single bunch impurity over one week. The impurity of the RF bucket adjacent to the target bunch on the trailing time side was measured by the photon counting system. The error-bar represents a statistical error in the measurement.

純度増加を **Fig. 10** に示す。測定には、孤立バンチ直後の RF バケツ (2 ナノ秒後方) が選択された。この時のフィリングパターンは 2/21 バンチトレイン + 18 孤立バンチが用いられ、孤立バンチにはバンチ当たり 1.5 mA の電流が蓄積されていた。この運転期間中に、孤立バンチ当たり約 15 mA、電子数で 5×10^{11} 個の電子が入射されている。一週間の運転で不純度は 2×10^{-9} まで増加し、孤立バンチ直後の RF バケツでは、約 1×10^{-9} の不純度に対応する電子 50 個が、入射によって増加した事になる。これから、平均的な入射ビームの不純度 (2 ナノ秒後方の RF バケツ) が 1×10^{-10} と評価できる。

4. 放射光を利用する実験ユーザーの視点からの取り組み

ビームライングループは、加速器 (光源) グループと実験ユーザーの間に位置し、保守的な放射光ユーザーと光源性能向上に励む加速器グループとを整合させるパイプ役である。トップアップ運転の導入を進める過程で、ビームライングループは加速器グループに光源性能改善の的確な指標を与えると共に、実験条件や光源の運転方法の変更を容易には受け入れない放射光ユーザーに、トップアップ運転のメリットとデメリットを定量的データにより説明し、その導入の正しい理解を促すという極めて重要な役割を担う事になった。このため、加速器グループと緊密な連携を取りながら、入射による蓄積電流のジャンプ、入射ビームからのノイズ光や入射時の蓄積ビーム振動の各種実験に及ぼす影響の詳細な評価をビームラインスタディの時間枠で実施するだけでなく、必要なトリガー信号や入射予告信号の仕様決定とその整備等を組織的に進めてきた。ここでは、SPring-8 で実施した影響評価の中の 2 つの事例により、

マシンの性能改善の結果、実験ハッチの X 線ビームが如何に安定化していったかを述べる。また、トップアップ運転の導入によりデータの質、及び実験効率の向上が確認された実験例についても紹介する。

4.1 トップアップ入射時の X 線ビーム変動の評価

ビームライン側では X 線ビームの変動を定量的に評価し、ユーザー実験への影響を調査した。こうして得られたデータは加速器グループへフィードバックされ、入射時の蓄積ビーム振動の低減化に役立てられた。評価実験を始めた当初、アンジュレータービームラインでは蛍光板を見ただけで、入射に同期して X 線がまたたいている様が目視で確認できた。一方、偏向電磁石ビームラインでは変動を観測する事が殆どできず、実験を問題なく行える事もわかった。特に XAFS 実験を主体とする BL01B1 は、その光源とする偏向電磁石が入射バンパ軌道に位置し、入射の瞬間確実に中心軌道上の蓄積ビームがバンパ軌道にシフトする。このため、ビーム入射の実験に対する影響が甚大であると予測されていた。しかし、実際に測定データを調べてみると、XAFS のような X 線ビームの強度・位置の変動に敏感な実験にも拘わらず、ビーム入射時の蓄積ビームの変動の影響が全く確認できなかった。以下ではアンジュレータービームラインでの X 線ビームの定量的変動評価について述べる。

4.1.1 強度変動とフロントエンド部での重心位置変動の測定

X 線ビーム強度および位置の変動の測定を BL39XU アンジュレータービームラインで行った。分光器からの単色 X 線強度を Si PIN フォトダイオードで測定し、その出力信号をデジタルストレージオシロに取り込むことにより、1 マイクロ秒の時間分解能で X 線強度変動を観測した。さらに、フロントエンド部 (光源から 29 m) の XY スリットの取り込み位置を変えながら強度変動データを収集することにより、ビーム形状と位置の時分割測定を擬似的に行った。

強度変動の測定結果を **Fig. 11** に示す¹⁵⁾。トップアップ運転のスタディが始まったばかりの 2002 年 6 月と、入射時の蓄積ビーム振動の抑制 (2.2 節) が完了した 2004 年 3 月のデータを比較している。2002 年 6 月当初には、軌道バンパの瞬間に X 線ビーム強度が定常時から 70% 近くも減少していた。X 線強度は周期 4.8 マイクロ秒の速い振動を伴って指数関数的に回復するが、バンパ前の値に戻るには 20 ミリ秒以上かかった (完全に回復するまでの範囲は示していない)。振動が抑制された 2004 年 3 月のデータでは、バンパによる X 線強度の減少は 15% にまで改善された。しかも、元の強度に回復するまでの時間も約 10 ミリ秒に短縮されている。

Fig. 12 に、フロントエンド XY スリット位置での X 線

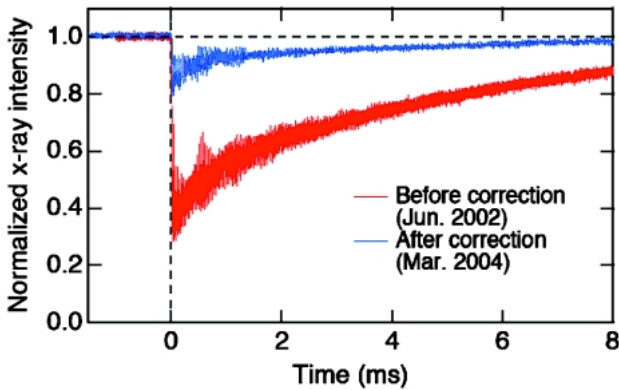


Fig. 11 Drop in x-ray intensity at the moment of beam injection. Red (blue) line shows the intensity variation before (after) the bump leakage is suppressed.

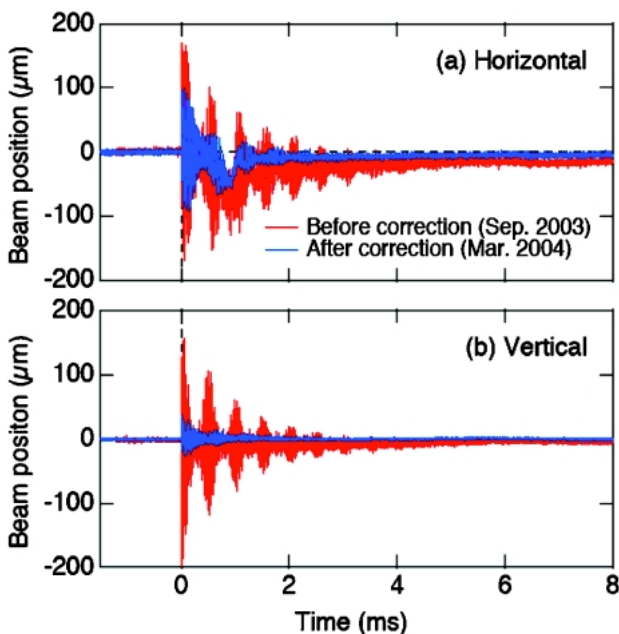


Fig. 12 Horizontal (a) and vertical (b) x-ray beam positions at the front-end slit at the moment of beam injection. Red (blue) lines show the beam position before (after) the bump leakage is suppressed.

ビームの重心位置の変動を示す。2003年9月^{注3}には、水平方向に最大 $\pm 170 \mu\text{m}$ 、垂直方向には $\pm 200 \mu\text{m}$ の振幅でビーム位置が振動する様子が観測された。ビーム幅の拡がりは見られず、ビーム形状を維持したまま重心位置が振動していた。2004年3月には、このビーム位置振動の振幅が水平方向 $\pm 100 \mu\text{m}$ 、垂直方向 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以内に抑えられ

^{注3} 2003年9月の時点では、水平振動抑制対策(2.2.1.(b)と(c)節)により当初に比べ水平振動が抑制されていた。Fig. 11の強度変動を測定した2002年6月はこれらの抑制対策実施前に当たり、水平方向のビーム位置は重心がスリットを外れるほど大きく振動していた。このため、データからX線ビームの重心位置の変動を正確に再構成できなかった。

た。とくに垂直方向の振動が大きく改善されており、入射バンプ電磁石の傾き調整(2.2.1.(d)節)の効果がはっきりとあらわれている。XYスリット位置でのX線ビームサイズは水平方向 $1300 \mu\text{m}$ 、垂直方向 $500 \mu\text{m}$ (ともにFWHM)であり、観測されたビーム位置の変動はビームサイズの1/10以下である。また、ビーム位置は入射後1.5ミリ秒以内に入射前の位置に戻っている。入射頻度を現状のとおり1分に一回とすると、トップアップ入射によってX線ビーム位置が変動している時間の割合は、全運転時間の0.01%にも満たない。

4.1.2 実験ステーションでのイメージング実験への影響

BL47XUではCTと走査型顕微鏡(マイクロビーム)の2通りのX線マイクロイメージング用装置が設置されている。イメージングにおいて光源の安定性は系の最も基本的な性能である像の質を左右する。全体強度の変動はさることながら、強度分布の空間的な変動は空間分解能、像コントラストの低下に直結する。さらに、CTにおいては、試料の正確な透過率分布を測るために、試料の透過像(I)と別に、試料なしのビーム像(I₀)を撮像する必要があるが、他の実験と違い、CTにおいてこのIとI₀は同時に測定することができない。それゆえ光源が時間的に不安定だと正確な再構成演算が行えなくなる。BL47XUのマイクロビーム実験においては、測定の際、空間分解能を良くするため、水平方向のみ上流に仮想光源用のスリットを設置し、ビームのコリメーションを非常に高くしている。これは、発光点の不安定性に対する系の空間分解能劣化への影響を低減する効果はあるが、不安定性が測定データに強度変動として現れやすくなる事をも意味する。ビーム入射に伴うビーム軌道変動が、これらの装置にどの程度影響を及ぼすかを調べるために以下の2通りの実験を行った。

(a) 実験ステーションでのX線ビーム位置変動

高速X線カメラを用いて、BL47XU実験ステーション位置で観測されるビームの位置変動を調べた。X線カメラは、蛍光板(P43)、光学レンズ系、冷却CCDカメラで構成されている。測定時の条件は、ピクセルサイズ約 $20 \mu\text{m}$ 、フレームレート約200 Hz、一枚当り露光時間約5ミリ秒である。ビームそのものの変動を見るために、結晶分光器、X線窓、X線カメラ以外のあらゆる光学素子はビームにかからないようにした。Fig. 13は、得られたビーム像の、水平方向の重心位置の時間変化を示したものである。上は蓄積ビームの振動対策が講じられる前(2002年12月)、下は振動対策後(2004年2月)に測定したものである。2002年12月の時点では、ビーム入射の瞬間に水平方向に $40 \mu\text{m}$ 程度のビーム位置変動があり、強度も約70%程度の低下が見られた。しかし2004年2月の時点では、位置変動、強度減衰共に確認できなかった。この測定における時間分解能は、現時点でのマイクロイメージング技術においてほぼ限界に近く、それゆえこの測定で確認で

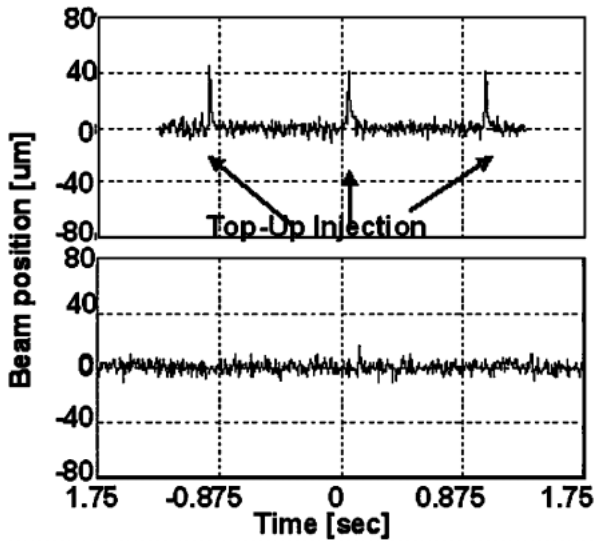


Fig. 13 Time fluctuation of horizontal x-ray beam position. Above: measured Dec. 02 before the improvement, below: measured Feb. 04 after the improvement.

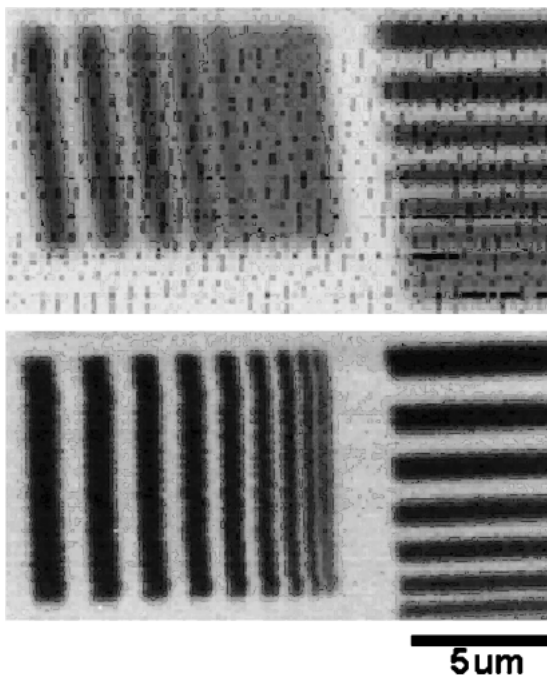


Fig. 14 Transmission image of test-pattern obtained with scanning x-ray microscope. Above: measured Oct. 02 before the improvement, below: Jun. 04 after the improvement.

きない程度の変動であれば、あらゆるイメージング実験において測定に悪影響はないと言える。

(b) マイクロビーム実験への影響

BL47XUにおける走査型顕微鏡装置が、どの程度トップアップ運転の影響を受けるかを調べるために、ビーム入射が行われている条件で標準試料をサンプルとして透過像の測定を行った。本装置は、フレネルゾーンプレートを集

光素子として用いている。空間分解能（スポットサイズ）は、光源の実効的な大きさとフレネルゾーンプレートの縮小率で決定され、約 $0.5\ \mu\text{m}$ である。水平方向は、前述したように仮想光源として、発光点から29 m下流のフロントエンドスリットを用いている。発光点からフレネルゾーンプレートまで約50 m、フレネルゾーンプレートの焦点距離は200 mm (10 keV 時)である。結果を Fig. 14に示す。スキャンピッチ150 nm、スキャンレート約4 Hz、測定の所要時間は約45分である。上は2002年10月のもの、下は2004年6月の時のもので、両者とも同じ試料を見たものである。I₀による像の規格化はしていない。2002年10月のものは、ビーム入射の影響により、バックグラウンドに5%程度の強度変調（上の図中の斑点上にみえる模様）が確認された。しかし、2004年の測定結果からは強度変調や像のゆがみは全く確認されなかった。

4.2 トップアップ運転の実験に対するインパクト

2004年5月からトップアップ運転の本格的ユーザー利用がはじまった。入射の瞬間の振動を観測するための実験システムを組めばそれをとらえる事はできるが、ほとんどの利用実験にとってそれは無視できる事が確認されている。当初心配されていた高分解能CT、PEEM、光電子分光、MCD等の実験も問題なく行われており、時分割実験等の一部を除きトップアップ運転により測定精度が低下した実験はない。尚、ビーム入射の間にどうしても中断しなければならない実験に備えて、入射予告メッセージ（ネットワーク通信で、次の入射までの秒数等の情報を取得）と入射時マスク信号（TTLレベル信号で入射の瞬間の1ミリ秒前にON、11ミリ秒後にOFF）を配信しているが、実際には殆ど利用されていない。トップアップ運転の導入により、各種放射光実験の質が大幅に向上したが、そのメリットをまとめると以下ようになる。

(a) 実効積分電流値の向上

- 単に平均の蓄積電流値だけでなく入射前後のビームシャッター開閉による待ち時間を考慮した実効積分電流値は、蓄積電流が99 mAに保たれたことで普通のユーザーで1.5倍、孤立バンチユーザーでは実に3倍弱向上した。(1/12+10フィリングモード運転時)

(b) 蓄積電流値が一定でその変動が0.1%以内

- 蓄積電流値の変化による強度変動がなくなったので電流値の減少に伴う測定系のゲイン等の再調整が不要になり、同時に光学系の熱負荷も一定になったのでその変化に対応する再調整も不要になった。結局、挿入光源や分光器を同じ条件で使用する実験の場合、一度光学系や測定系を調整してしまえば再調整が不要になった。
- 同様に、強度検出器や実験のシグナルがある一定の値になっているかどうかで測定系全体の健全性チェック

が簡単にできるようになった。

(c) 入射による実験の中断がない

- ・入射スケジュールを気にせず自由に測定スケジュールをたてる事ができるようになり、24時間以上の長時間連続測定も可能となった。

以下に、トップアップ運転により実験効率および精度が向上した具体例を4つ挙げる。

4.2.1 シングルバンチを利用したピコ秒時間分解実験へのメリット

数十ピコ秒の時間分解能をもつX線回折測定では、外部刺激（たとえばパルスレーザー照射）の繰り返しに対応した特定のバンチからのX線パルスを経験的あるいは電氣的にとりだし、その時間遅延を変えながら測定するポンプ・プローブ法が用いられる。供用開始当初より特定のバンチ電流を稼ぐために、Fig. 15(a)のようなフィリングでの運転がなされ、このうち電流1.5 mAをもつバンチの一つから発生するX線パルスが利用されてきた。しかしながら、このような大電流バンチの寿命は短く、効率よく実

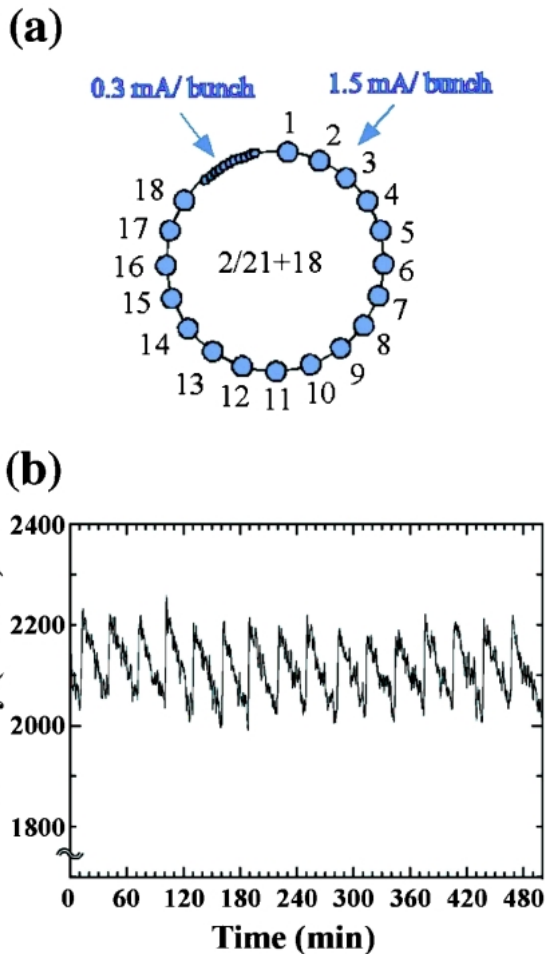


Fig. 15 Schematic view of filling pattern of “2/21+18” (a) and time dependence of intensity of a 1.5 mA bunch (b).

験できるのは1日2回の入射直後の限られた時間内であった。そのため、せっかく高いバンチ電流が実現されても、積分値ではそれほどの効果はなかったが、トップアップ運転の成功により、バンチ電流の大きさに比例した効果が維持できるようになった。Fig. 15(b)は、フィリングパターンが Fig. 15(a)の時に、電流1.5 mAのバンチからのX線を用いてある回折実験を行ったときのX線光子数の時間変化である。数十分に一度トップアップ入射されている様子がわかり、約6%の変動として現れている。この変動は統計誤差やその他の測定系による誤差を考慮すると、規格化の必要がない程度になっている。なお Fig. 15(b)に見られる、実際のバンチ電流変化(2~3%)より強調された変動の原因は現時点では自明ではない。このようにバンチ電流変化が強調される系がある限り規格化の有効性が問題になり、トップアップ運転の重要性が再認識される。さらに今後、全電流だけでなく、特定のバンチに特化して一定強度に近づけるトップアップ運転が行われるようになれば、より高精度の時間分解測定が可能になるであろう。

4.2.2 非晶質回折データへの効果

高エネルギーX線回折ビームラインBL04B2では非晶質物質のX線回折実験が行われている。一例として、BL04B2で61.6 keVの単色光を用いて測定した標準試料であるシリカ(SiO₂)ガラスの回折パターンを Fig. 16に示す。回折パターンは高角側では非常に強度が弱く、絶対強度として規格化するためには、この高角のデータを正確に測定する必要がある。そのため、エネルギー分解能の良い検出器(例えばGe半導体検出器)を用いてステップスキャン法で測定する必要がある。1試料の測定に要する時間は通常4~12時間である。こういった強度の弱いデータを長時間かけて正確に測定するためには、入射X線の安定性が要求される。

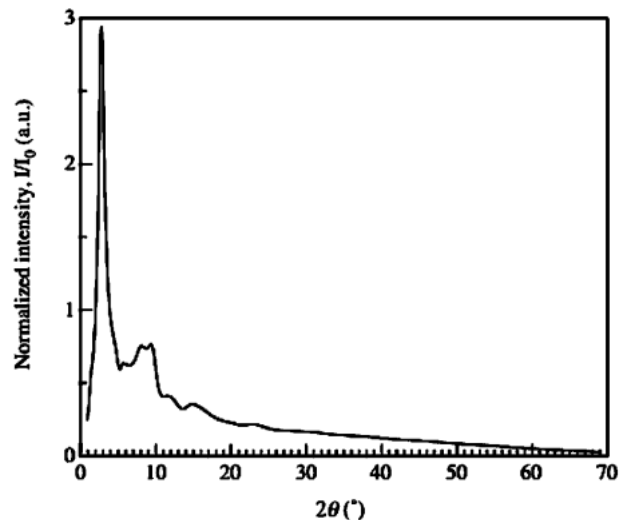


Fig. 16 X-ray diffraction pattern of amorphous silica.

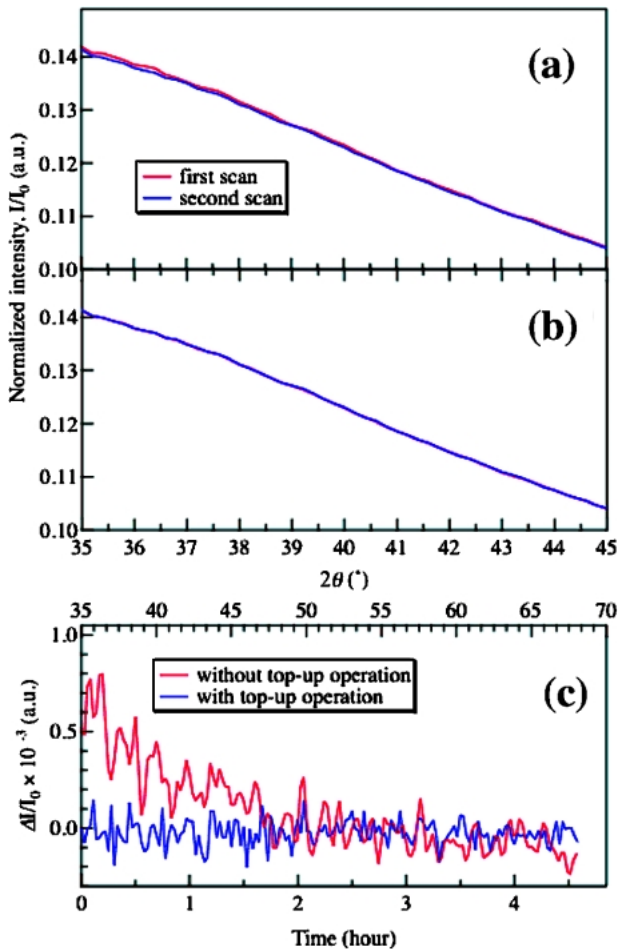


Fig. 17 X-ray diffraction patterns of amorphous silica without top-up operation (a), with top-up operation (b), and the differential of first scan and second scan (c).

Fig. 17(a)に通常運転時に得られた高角側のスキャンの繰り返し測定結果を示す。1回目と2回目のスキャンデータに差が見られ、入射X線が変動していることがこの原因と考えられていた。一方 Fig. 17(b)に示すようにトップアップ運転時には、繰り返し測定の結果はほぼ一致しており、Fig. 17(c)に示す1回目と2回目のスキャンの差分はほぼ0となっている。これはトップアップ運転により分光結晶への熱負荷が一定になり入射X線が格段に安定した事を示している。

Fig. 17(a)を見る限り1回目と2回目のスキャンの差がそれほど大きくないと感じられるかも知れない。しかし、Fig. 18(a)に示す構造因子 $S(Q)$ には大きな変化として現れていることが分かる。通常運転時に測定されたデータは $S(Q)$ が Q の大きい領域で1の周りで振動していない。その影響で、Fig. 18(b)に示す $S(Q)$ をフーリエ変換することにより得られる全相関関数 $T(r)$ において $r < 1 \text{ \AA}$ 、および $r > 4.5 \text{ \AA}$ の領域でリップルが発生していることが分かる。このような実験データは、逆モンテカルロシミュレーションをはじめとする精密構造解析に耐えうるデータでは

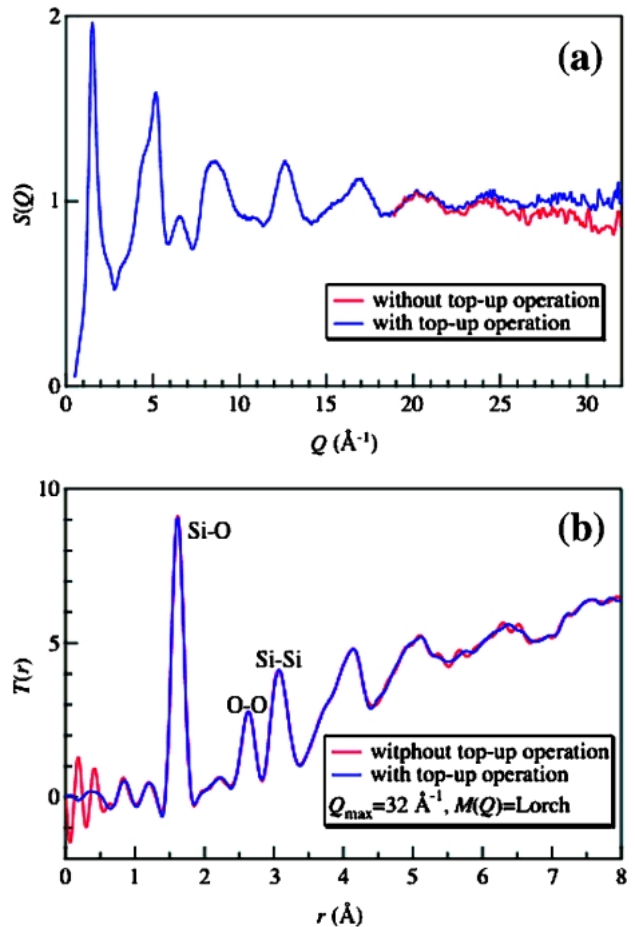


Fig. 18 Total structure factor $S(Q)$ (a) and total correlation function $T(r)$ (b) of amorphous silica.

ない。通常このような $S(Q)$ が得られた場合、高い Q 領域の測定をさらに行い、なるべく $S(Q)$ が1の周りで振動するデータのみを使うか、あるいは経験的に補正を施していた。しかし、トップアップ運転時に測定したデータでは、 $S(Q)$ は正確に1の周りで振動しており、何度測定および解析を繰り返しても同じ $S(Q)$ が得られるようになった。回折パターンを構造因子 $S(Q)$ へ規格化する難しさが、実験室光源を用いた場合を含め、これまでの非晶質X線回折の敷居を高くする原因であった。しかし、トップアップ運転のおかげでこれまでより遙かに高精度のデータが得られるようになり、初心者の実験者でも実験およびデータ解析が簡単にできるようになった。

4.2.3 X線分光実験へのメリット

トップアップ運転による蓄積電流の安定性は、X線分光実験にも確実なメリットを与えている。X線分光実験のデータのクオリティを左右するのは、光源の強度自体よりもむしろ光源や測定系の安定度による場合が少なくない。この観点に立つと、(a)電子ビーム軌道、(b)光学素子、(c)分光器フィードバックの3つの安定性向上がトップア

ップ運転の利点としてあげられる。

(a) 電子ビームの軌道は蓄積電流値が高いほど安定する。このことは軌道補正の精度と関係している。電流値が高いほど電子ビーム位置モニターの信号強度が増すのでノイズが相対的に減り、電子ビーム軌道フィードバック補正の精度が上がるためである。トップアップ運転以前には、ビーム寿命の短いフィリングパターンの場合、電流値が低い明け方にデータのS/Nが悪い（電流値の減衰の割合以上に悪い）ことがあった。トップアップ運転を行っている現在では、電流値が上限一杯に維持されているので、フィードバックの精度が常に高く、軌道を安定化しやすい条件で運転している。

(b) 蓄積電流が一定なので、分光器をはじめとする光学素子への熱負荷の変動が非常に小さくなり、素子やステージの温度が安定する。このため電子ビーム軌道が十分安定であれば、強度や位置が安定したX線が利用できる。

(c) 精密な測定には、分光器にフィードバックをかけてX線強度を安定化させる手法が使われている。この手法では I_0 の値を一定に保つように二結晶の平行度を補正するが、蓄積電流値の減少とともに二結晶の平行度が変わってしまい、その結果X線ビーム位置やエネルギーがずれていくという問題があった。トップアップ運転の導入によってこれらのドリフトが解消された。

以上の利点によって、X線分光実験の精度や信頼性が向上した。たとえば、BL39XUで行われているX線磁気円二色性(XMCD)実験—左右円偏光に対するわずかな吸収強度の差を検出する—では、通常の吸収強度に対して5桁小さいXMCD信号を安定に測定できるようになった。つけ加えれば、上に述べた3つの利点は、X線分光実験だけでなくほとんど全ての放射光実験に対してメリットとなることは明らかである。

4.2.4 セベラルバンチを利用した核共鳴散乱実験へのメリット

放射光による核共鳴散乱は極端条件下や回折条件下、適当な線源がない核種等のメスbauer分光に利用されるとともに、核共鳴非弾性散乱により元素を特定した振動状態の測定に用いられている。核共鳴散乱がトップアップ運転により大きな恩恵を受けるのには、原子核の共鳴エネルギー幅に起因する大きな理由がある。ひとつは多くの核種の寿命がナノ秒からマイクロ秒の時間領域にあり、スペクトルを得るためにはセベラルバンチ運転が必須となることである。一方、核共鳴散乱はその寿命に対応して共鳴に寄与するX線のエネルギー幅がneVから μeV の領域にありシグナルレートが一般に高くない。そのため、トップアップ運転による積分強度の増加は測定の可能性を大きく広げることになる。

その例として瀬戸らによりSPring-8で開発されたサイ

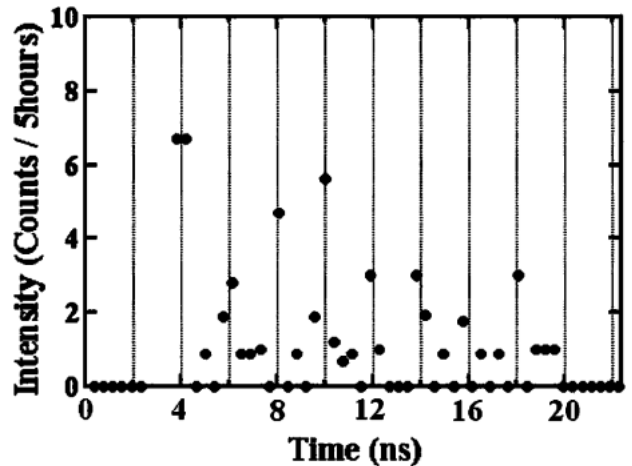


Fig. 19 Measured time spectrum of noise in top-up operation with 203 single bunches. The data was measured with APD at BL09XU July 3rd 2004. The total counts from the 203 single bunches in this measurement period were 8×10^{10} and the averaged impurity can be estimated by normalizing the measured counts by 8×10^{10} . The reference of the horizontal axis (relative time) is the middle of each single bunch. The separation of the RF buckets is 2 nsec and each dashed vertical line represents the center of the corresponding RF bucket in the relative time.

トを特定した振動状態の測定³⁴⁾が挙げられる。これにより他の手法では得られない情報を得ることができるが、1/12+10バンチの孤立バンチを利用して、各エネルギーで時間スペクトルを蓄積するために、単純な条件でもひとつの測定に数日以上を要していた。トップアップ運転の実現により3倍弱の積分強度の増加があり、より希薄な系での測定や温度・圧力等の条件を変えた測定が可能になる。また他の例としては核共鳴非弾性散乱の分解能の向上が挙げられる。酵素やタンパク質等の高分子試料では隣接した振動モードを分解するために高分解能が要求される場合が多いが、実際の測定では強度とのトレードオフで分解能を決める必要がある。測定する試料にももちろん依存するが、トップアップ運転での積分強度の増加は許容できる分解能を倍以上改善させるはずである。論文投稿の事情で具体的データを示して説明できないのが残念ではあるが、トップアップ運転にもなつて実現した高精度実験データが発表される日もそう遠くはない。

高精度実験の鍵を握る孤立バンチの純度の高さを示す例として、Fig. 19に2004年7月3日のトップアップ運転時にBL09XUで測定した孤立バンチ後方でのノイズ分布を示す。この時ビームフィリングは203バンチであり、図のデータは一周当たり203個の孤立バンチからのデータを折り重ねて積算したものである。孤立バンチからの光による全カウント数が 8×10^{10} であることから、孤立バンチの4ナノ秒以上後方（孤立バンチから数えて2番目のRFバケット以降）で、平均不純度が 10^{-10} 台前半であることが分かる。図中のカウントのうち、2ナノ秒の整数倍の時間か

ら大きく外れているものは測定系自身のノイズによる寄与であり、ゴミ電子からのものではないことを注意しておく。

最後にビームラインユーザーとしての立場から、トップアップ運転によって実験が非常にやりやすくなったことを強調したい。 I_0 が一定なので実験の状況を把握しやすい。 I_0 の値を常時モニターすることで、正常に測定が行えていることを確認できるし、逆に測定系にトラブルがあった場合にはすぐに気づくことができる。これまでは蓄積電流が時間とともに減衰していくため、 I_0 モニターの値だけでは直感的に判断しにくかった。また、これまでは定時入射の時刻に測定の区切りが来るように積算時間などを決めていたが、今では非常に自由に測定の計画を立てられるようになった。このことは、データの信頼性の向上に加えて実験の種類にかかわらず大きなメリットであろう。

5. 今後の課題と展望

革新的なアイデアと十分な検討に基づく開発、及びマシン調整を積み上げ問題点を克服することで、設計時にトップアップ運転を前提としなかった SPring-8 蓄積リングのトップアップ運転が現実のものとなった。しかも、得られた性能はトップアップ運転を前提として建設された蓄積リングの性能と比肩、凌駕しうるものである。SPring-8 で行われた多くの取り組みは、今後トップアップ運転の導入を考えている既存の光源のみならず、新たに設計する光源にも十分参考になるものであろう。しかしながら、SPring-8 のトップアップ運転はスタートしたばかりであり、理想的な運転にさらに近づけるため、今後も改善に向けた継続的な取り組みが必要である。当面の課題として以下のものが挙げられる。

(a) 入射効率の向上：ビーム寿命がさらに短くなる低エミッタンスオプティックス (約 $3 \text{ nm} \cdot \text{rad}$) や、大電流孤立バンチでのトップアップ運転を実現するには、入射効率を今以上に高める努力が不可欠となる。入射効率は挿入光源のパラメータに依存して変動し、また入射軌道の長期ドリフトによる低下も見られる。挿入光源の透明化に向けた非線形磁場補正スキームの確立、入射ビーム輸送系での水平・垂直結合による挿入光源ギャップ閉時の入射ビーム損失の抑制、入射軌道ドリフトのフィードバック補正等に取り組んでいく必要がある。

(b) 入射ビーム不純度の低減：孤立バンチの不純度は、孤立バンチ直後の RF バケットにおいて、入射ビームの不純度のパイルアップにより一週間の運転で 1×10^{-9} 程度悪化する。十分小さい量ではあるが、運転期間が長くなった場合に精密実験の妨げとなる可能性があり、現状の 1×10^{-10} の入射ビームの不純度をさらに 1 桁下げる努力を行っていく必要がある。これには線型加速器でのダーク電流の低減やシンクロトロン内での純化プロセスの精密解析等

を進める必要がある。

(c) 蓄積電流安定性の向上：蓄積電流の変動は通常 0.1% 以下に維持され、多くの実験で入射 X 線の規格化が不要な電流安定性が実現している。ここからさらに一桁高い電流安定性を目指すには、入射ビーム電流をさら低減し、入射頻度を増加させる必要がある。入射ビーム電流の低減には、入射電流値を測定するビーム電荷モニタのノイズが障害となっており、入射電流値の精密測定システムの構築を進める必要がある。また、長期的な蓄積電流の安定性向上には、入射器の安定化、特にブースターシンクロトロン RF 加速系の安定性向上が不可欠である。

(d) 特定バンチの電流変動の低減：トップアップ運転は全蓄積電流の安定性確保を第一目標として進められてきたが、利用実験の中には特定の孤立バンチからのパルス放射光を利用する場合 (4.2.1 節) もある。大電流孤立バンチの強度変動は、トップアップによって数%程度に抑えられるようになったが、高精度計測にはまだ不十分である。大電流孤立バンチを利用した究極の高精度計測を目指し、特定のバンチ電流変動を $\sim 0.1\%$ に抑えるための高頻度、高分解能のトップアップ運転の実現が急務である。この達成には、ビームフィリングの最適化と同時に、入射ビーム電流の低減が不可欠となる。

(e) 入射時の蓄積ビーム振動の低減：入射時の蓄積ビームの振動抑制は、現状第一段階をようやくクリアした状況にある。実験ハッチで分光された X 線強度には、入射直後に瞬間的ではあるが 15% 程度の強度の低下が見られる。さらなる放射光実験の精密化に対応するには、今後、この強度の低下をバックグラウンド (数%以下) 以下に抑える必要がある。このためには、入射で誘起される蓄積ビーム振動の測定精度の向上等を進める必要がある。

謝辞

SPring-8 でのトップアップ運転の実現は、高輝度光科学研究センター (JASRI) のスタッフのみならず、理化学研究所播磨研究所、日本原子力研究所関西研究所等、SPring-8 で放射光利用実験を行っている関係研究組織に属する多くの研究者の努力と情熱の賜である。この実現に向けて、ご努力頂いた全ての方々に感謝致します。また、Fig. 19 のデータ取得に協力頂いた京都大学原子炉実験所・瀬戸誠助教教授、放射線線量測定の情報を提供下さった高城徹也氏には重ねて感謝致します。

参考文献

- 1) 田中 均, 大熊春夫: SPring-8 利用者情報 **8**, 298 (2003); 木村洋昭: SPring-8 利用者情報, **8**, 305 (2003).
- 2) M. Yabashi et al.: Phys. Rev. Lett. **87**, 140801 (2001); M. Masaki and S. Takano: J. Synchrotron Rad. **10**, 295 (2003); H. Tanaka et al.: Proc. of the 7th European Particle Accel. Conf., Vienna, June, pp. 1575-1577 (2000); H. Tanaka et al.: Nucl. Instr. and Meth. A **486**, 521 (2002). The detailed

- comparison between two vertical emittance values estimated by 2D-interferometer and analysis of Touschek lifetime are seen in the last reference.
- 3) S. Nakamura et al.: Proc. of the 2nd European Particle Accel. Conf., Nice, June, pp. 472-474 (1990).
 - 4) T. S. Ueng et al.: Proc. of the 5th European Particle Accel. Conf., Sitges, June, pp. 2477-2479 (1996).
 - 5) L. Emery: Proc. of the 19th Particle Accel. Conf., Chicago, June, pp. 2599-2601 (2001).
 - 6) L. Emery and M. Borland: Proc. of the 8th European Particle Accel. Conf., Paris, June, pp. 218-220 (2002).
 - 7) L. Rivkin et al.: Proc. of the 6th European Particle Accel. Conf., Stockholm, June, pp. 623-625 (1998).
 - 8) M. Böge: Proc. of the 8th European Particle Accel. Conf., Paris, June, pp. 39-43 (2002).
 - 9) A. Lüdeke and M. Munoz: Proc. of the 8th European Particle Accel. Conf., Paris, June, pp. 721-723 (2002).
 - 10) M. P. Level et al.: Proc. of the 8th European Particle Accel. Conf., Paris, June, pp. 212-214 (2002).
 - 11) A. Loulergue et al.: Proc. of the 8th European Particle Accel. Conf., Paris, June, pp. 593-595 (2002).
 - 12) G. Liu, private communication.
 - 13) D. J. Scott et al.: Proc. of the 8th European Particle Accel. Conf., Paris, June, pp. 617-619 (2002).
 - 14) 極紫外・軟 X 線放射光光源計画デザインレポート, 極紫外・軟 X 線放射光光源計画検討会議世話人会/加速器仕様策定ワーキンググループ/ビームライン仕様策定ワーキンググループ/利用計画ワーキンググループ, 平成14年9月.
 - 15) H. Tanaka et al.: Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., Lucerne, July, pp. 222-224 (2004).
 - 16) T. Asaka et al.: Nucl. Instr. and Meth. A **488**, 26 (2002).
 - 17) T. Asaka et al.: Nucl. Instr. and Meth. A **516**, 249 (2004).
 - 18) Y. Kawashima et al.: Phys. Rev. Special Topic AB **4**, 082001 (2001).
 - 19) S. Suzuki et al.: Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., Lucerne, July, pp. 1327-1329 (2004).
 - 20) K. Yanagida et al.: Proc. of the 22nd International Linear Accel. Conf., Lubeck, Aug., pp. 464-466 (2004).
 - 21) M. Yoshioka et al.: Proc. of the 14th Symp. on Accel. Sci. and Tech., Tsukuba, Nov., pp. 428-430 (2003).
 - 22) Conceptual design Report, SPring-8 Project Part I Facility design [Revised], JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team (1991).
 - 23) T. Ohshima et al.: Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., Lucerne, July, pp. 414-416 (2004).
 - 24) K. Tsumaki et al.: IEEE Trans. on Appl. Superconductivity **14**, 433 (2004).
 - 25) H. Tanaka et al.: Nucl. Instr. and Meth. A **539**, 547 (2005).
 - 26) H. Tanaka et al.: Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., Lucerne, July, pp. 1330-1332 (2004).
 - 27) K. Soutome et al.: Proc. of the 18th Particle Accel. Conf., New York, Mar., pp. 2337-2339 (1999); H. Tanaka et al.: Proc. of the 13th Symp. on Accel. Sci. and Tech., Suita, Osaka, Oct., pp. 83-85 (2001).
 - 28) M. Takao et al.: Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., Lucerne, July, pp. 417-419 (2004).
 - 29) K. Fukami et al.: to be published in Proc. of the 3rd Asian Particle Accel. Conf., Gyeongju, Mar., (2004).
 - 30) T. Nakamura et al.: Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., Lucerne, July, pp. 2649-2651 (2004).
 - 31) H. Suzuki et al.: Nucl. Instr. and Meth. A **444**, 515 (2000).
 - 32) T. Aoki et al.: Proc. of the 20th Particle Accel. Conf., Portland, May, pp. 2551-2553 (2003).
 - 33) K. Tamura et al.: Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accel. Society of Japan, Funabashi, Aug., pp. 581-583 (2004).
 - 34) M. Seto et al.: Phys. Rev. Lett. **91**, 185505 (2003).

SPring-8 Top-up operation present status and future prospect—Aiming at Perfect Top-up Operation—

Hitoshi TANAKA¹, Hiroaki KIMURA²,
Tsuyoshi AOKI², Tetsuya ISHIKAWA^{2,3},
Haruo OHKUMA², Takashi OHSHIMA¹,
Noritaka KUMAGAI², Shinji KOHARA¹,
Motohiro SUZUKI², Shinsuke SUZUKI²,
Yoshio SUZUKI², Masaru TAKAO²,
Masaki TAKATA¹, Akihisa TAKEUCHI²,
Kazuhiro TAMURA², Yoshihito TANAKA⁴,
Kenji FUKAMI², Yoshitaka YODA²

¹Japan Synchrotron Radiation Research Institute/SPring-8 and CREST, Japan Science and Technology Agency

²Japan Synchrotron Radiation Research Institute/SPring-8

³RIKEN, Harima Institute/SPring-8

⁴RIKEN, Harima Institute/SPring-8 and CREST, Japan Science and Technology Agency

Abstract Since May 2004, top-up operation has been started at SPring-8. This operation is nearly ideal compared with the conventional operation of a synchrotron radiation (SR) source. Here, ideal operation for SR users is defined as the operation where brilliant and stable SR is supplied with fixed intensity and a required time-structure. It is just what all SR users desire. In the SPring-8 storage ring, 10^{-3} is routinely obtained for constancy of the stored current by the top-up operation. The current constancy and high stability of electron and photon beams assure constant intensity of the probe on an experimental sample. This means that normalization of the probe intensity is unnecessary. A stored beam oscillation at the beam injection, which was predicted to be a most serious problem, has successfully being suppressed to the low level that never perturbs any imaging experiments. Furthermore, impurity of a single bunch is constantly kept in a level of 10^{-9} for one-week operation. High injection efficiency, which is critical to prevent the radiation damage of permanent magnets of insertion devices (IDs) and to reduce the dose of leakage radiation, is also routinely obtained by cutting the tails of the injection beam in a horizontal phase space. Under the condition where the gaps of various in-vacuum IDs are closed down to the minimum, the injection efficiency is still kept in $\sim 90\%$. In this paper, we describe how the elaborated top-up operation was attained at SPring-8, what is the next step towards the perfect operation of a SR source, how effective this top-up operation is for precise experiments, and also a possibility of new experimental frontiers by the operation as well as the present status of the top-up operation at SPring-8.

このトップアップ運転の素晴らしさを、何か文学的な表現で表して欲しいとあちこちをお願いしていたところ、あるビームライン担当者が“日本昔話風物語”を創作してくれました。ここでご披露させていただきます。

西播磨の山奥にとても泉質の良い温泉が湧き出す村がありました。村人はそこに温泉宿や公共の入浴場をつくり、春八温泉という名で売り出しました。その泉質の良さが評判になり、日本各地や海外からもたくさんの客がやってきました。客たちはみな、泉質については大満足です。外国の客からは、「ヨーロッパの温泉よりも快適だ」、「アメリカの温泉よりも滋養にいい」、などとお褒めの言葉をいただくこともありました。ところが、この春八温泉にも困った問題がひとつだけあり、そのことには客も不満をもらすことしばしばでした。

それは源泉が間欠泉であったため、一日一度だけ朝の10時にしか湧き出さないことです。そのため、源泉からの熱くて新鮮なお湯を湯船に継ぎ足すことができるのは、このときだけです。一日に一度しか温泉を汲めないで、湯船のお湯は時間が経つにつれてだんだんぬるくなっていきます。特に冬場の寒い朝には、前日の継ぎ足しからほぼ丸一日経っているため、お湯は半分の温度に冷えてしまいます。体を芯から温めて温泉の効能を十分得るためには、お湯が熱いときよりも長時間入っていなければなりません。そのうえ、お湯を継ぎ足すときには、泉質の確認や衛生検査のために、全員いったん湯船からあがらなければなりません。この検査には通常20分から30分かかります。さらに、検査が終わっても、お湯の温度が一定になるまでもう30分から1時間も待たされる場合もありました。本来、源泉を継ぎ足した直後が一番お湯が熱く効能も高いのに、そのお湯に入ることができないのです。春八温泉ではどの宿も24時間入浴できることを売り物にしているのですが、これではせっかく泉質が良くても、温泉の魅力は半減してしまいます。

あるとき村の寄り合いで庄屋さんが言いました。“一日中継ぎ足せる源泉を探そう。”この日から村人たちは総出で新しい源泉を探す作業を始めました。そしてついに、新しい温泉の源泉が見つかりました。なんと、その源泉からは一日中熱いお湯が沸き出しているのです。さっそく村人はこの源泉をめいめいの風呂に引き、24時間お湯を継ぎ足せるようにしました。最初のうちは、お湯を継ぎ足すとき湯船のお湯が大きく波立ったり、お湯の温度が急に熱くなったりして、客から文句が出ることもありました。しかし、村人たちはがんばって、継ぎ足し方を工夫しました。その甲斐あって、ついに誰にも気づかれにくいくらい、静かに継ぎ足しができるようになったのです。そして、春八温泉では、一日中源泉からの熱くて泉質の良いお湯に誰もが入れられるようになりました。継ぎ足しによる中断がなくなったため、「100時間耐久入浴」なんていうテレビ番組の取材も訪れました。こうして春八温泉はますます賑わうこととなり、村人たちはたくさんの温泉客の笑顔に囲まれて幸せに暮らしたということでした。

(文責：JASRI/SPring-8 木村洋昭)