

NewSUBARU SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

*NewSUBARU Division

Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo
1-1-2 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

Abstract

NewSUBARU is a synchrotron radiation facility consist of 1.0 GeV to 1.5 GeV electron storage ring and nine beam lines for mainly soft x-ray radiations. The facility is constructed constructed in the SPring-8 site and operated by University of Hyogo. Top-up injection beams of 1.0 GeV electron are supplied from SPring-8 linac.

ニュースバル放射光施設

1. はじめに

ニュースバルは、兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所が設置・運用している放射光施設で、軟X線領域放射光の産業利用（極端紫外光半導体リソグラフィ、ナノマイクロ加工LIGA、新素材開発・産業用分析等）および新光源開発とその利用を目的とした周長118mのレーストラック型電子蓄積リングと、9本の放射光ビームラインから構成されている。ニュースバルへ入射される1.0 GeV電子ビームはSPring-8線形加速器から供給され、現在、1.0GeV利用運転時には蓄積電流220 mAでのTop-UP運転が行われている。また約1.5日/週で1.5GeV利用運転が行われており、1.0 GeVで400 mAまで蓄積後、1.5 GeVまでエネルギー加速を行う。利用運転中はCOD (Closed Orbit Distortion) の連続補正により、ビーム軌道の安定性は水平・垂直共

に10 μ m以下に保たれている。

また、ニュースバルではモーメンタムコンパクトシオンファクター(α)を容易に正負に可変出来る様に通常の偏向電磁石の他に6台の逆偏向電磁石を採用しており、通常の正 α 運転の他に、ネガティブ α 運転あるいは低 α 運転時の電子ビームの短バンチ化が可能となっている。セル間には約2.5 mおよび14mの磁石のない空間（直線部）があり、ここは電子ビームの入射用機器、高周波加速空洞、および挿入光源が設置されている。偏向電磁石(BM)からの放射光は偏向角度10度の点から、挿入光源放射光は0度方向へ取り出される。

Fig.1にニュースバル放射光施設の航空写真を示す。上方にSPring-8の蓄積リングの一部が見えている。右上のかまぼこ状建物がSPring-8線形加速器(Linac)で、1.0 GeVに加速された電子バンチはSPring-8シンクロトロン(Synchrotron)に入射され、8 GeVまで加速して、蓄積リングへ入射する。ニュースバル側へ電子を射出する場合は、切り替え電磁石(数秒で切り替え)で、電子をニュースバル方向へ曲げ、トランスポートトンネル(L4BT)を介してニュースバルまで伝送される。Table 1にニュースバル電子蓄積リングのパラメーターを示す。



Fig.1. Bird view of NewSUBARU Building.

Table 1 : Parameter of NewSUBARU ring

Injection energy	1.0 GeV
Storage energy	0.5 - 1.5 GeV
Storage current (max)	500 mA
TopUp operation	1.0 GeV / 220 mA
Lattice	DBA(6 cell) + Inv. B(6)
Circumference	118.731 m
RF frequency	499.955 MHz
Harmonic number	198
Betatron tune	6.30 (H) / 2.21 (V)
$\Delta E/E$ (1.0/1.5 GeV)	0.047% / 0.072%
Emittance(1.0/1.5 GeV)	37 nmrاد / 67 nmrاد

*<http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/>

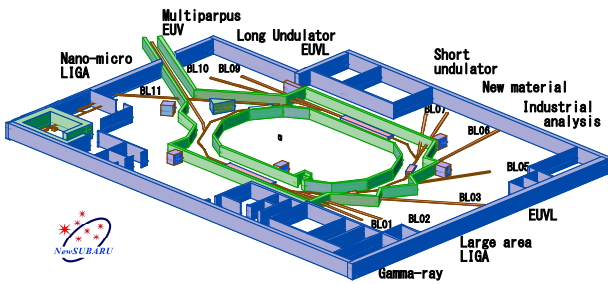


Fig.2. Layout of NewSUBARU experimental hall. BL01: Laser Compton gamma-ray. BL02: Large area LIGA. BL03: EUVL research. BL05: Industrial analysis. BL06: New material development. BL07: Short undulator for analysis. BL09: Long undulator for EUV application. BL10: Multipurpose EUV. BL11: Nano-micro process by LIGA.

ニュースバル実験ホール内の電子蓄積リングおよび放射光ビームラインの配置をFig.2に示す。蓄積リングは、緑色の遮蔽コンクリートトンネル内に収納されている。(図ではトンネルの天井を表示していない。)トンネルの外側に9本のビームラインが設置されている。

BL01はレーザー・コンプトン散乱ガンマ線源BLで、Ndレーザー、CO₂レーザーの入射により2-40MeVの準単色・偏極ガンマ線を発生・利用できる。BL02は大面積の深X線リソグラフィBLでLIGAプロセスによる高アスペクト比、ナノマイクロ加工に用いられている。BL03は極端紫外光リソグラフィ開発BLで、次世代縮小投影露光半導体リソグラフィ用のマスク評価およびレジスト開発に用いられている。BL05は産業用分析ビームラインで、2分岐BLが同時使用可能で、XAFS、XPSなどの計測でき、利用者支援でシンクロトロンアナリシス

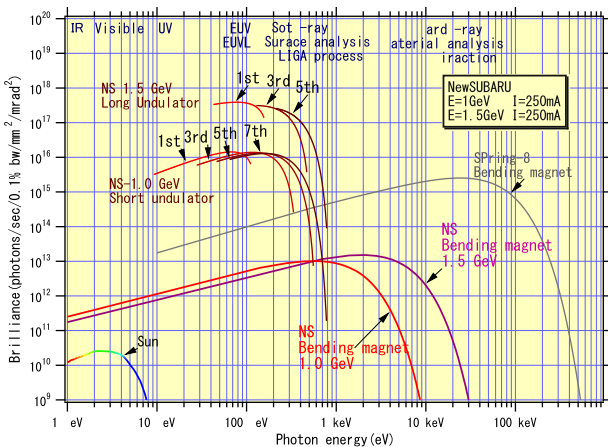


Fig.3 Spectral brightness of NewSUBARU synchrotron radiation. An example of SPring-8 bending magnet source is also shown as a reference.

LLCと協力している。

BL06は表面改質など、材料のSRプロセス研究BLで、作動排気システムによりガス雰囲気中で1keV程度までの軟X線照射が可能である。BL07は短尺アンジュレーター(2.4m長)BLで、材料照射BLと材料評価BLに2分岐している。BL09は長尺アンジュレーター(10.8m長)の高輝度光源に、高分解能分光器を備え、吸収分光やEUVLレジスト評価のための干渉露光に用いられる。BL10は極端紫外光汎用BLで、不等間隔回折格子により多層膜の透過率と反射率を高精度で測定できる。BL11は集光露光LIGA-BLでHe雰囲気で大気圧露光が可能である。

Fig.3に偏向電磁石光源およびアンジュレーター光源のスペクトル輝度を示す。

2. ニュースバルの現状

ニュースバル放射光施設の年間運転時間は2008年度の2,423時間に比べ、2009年度は2,544時間と約5%程度増加した。運転時間の内訳をFig. 4に示す。利用運転時間は140時間あまり増加し、調整時間も70時間程度増加した。トラブルにより利用運転が停止した時間は若干増加しているが、これは、ビームラインのトラブルにより運転を停止した時間(44h)や入射側トラブル時間(5.5h)を含んでいる。この他では以下でビームアポート等が発生した。

(1)クライストロンアノード過電流/真空異常(3回): 1.5GeV加速後、蓄積モードで電流減衰とともにRFパワーも減少するが、RF出力一定値でアポートが発生していた。クライストロン内での2次電子のマルチファクタリングが発生したと考えられる。加速前に問題のRFパワーで焼きだしを繰り返すことで発生をなくすることができた。2007年に交換したクライストロンで、2009年3月まではこのような事象は発生しておらず、原因は不明。

(2)クライストロン出力窓の冷却水量低下(3回): クライストロン出力窓の冷却水は独立の閉ループチャラーで冷却している。2008年度末チャラー本体故障のため、新機種に交換しトレーナーをセットしたが、これの目詰まりによる流量低下で

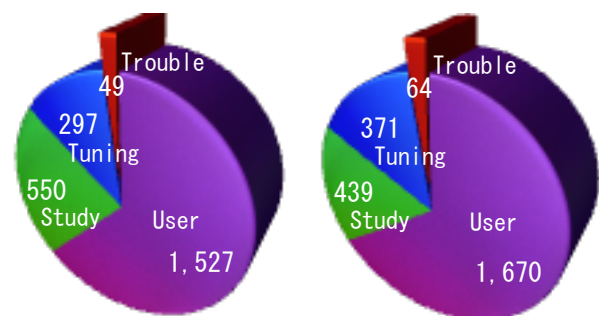


Fig.4. Breakdown of NewSUBARU operation time.

あった。冷却水は精製水を用いていたが、冷却水中に黒い沈殿物が発生しており、それを調べると、少量の銅、亜鉛とともに、モリブデン濃度が高く検出され、またpHが5.5と酸性化していることがわかった。導電率も300 μ S/cmを超える値であったため、i)冷却水路全体の洗浄を繰り返すとともに、ii)pH計を設置して必要に応じて冷却水用中和剤を投入し、iii)流路にフィルター(30 μ m)を設置。さらにiv)閉ループ水の一部をイオン交換樹脂で純水化させる分岐流路を設けた。

(3)RFサーキュレーターアーク発生(2回)：これに関しては特に対処していない。

(4)蓄積電流の削れ発生(2回)：フィリングの乱れが原因と考えられる。現在蓄積リングの利用運転でのバケットフィリングは、フルフィル1回に対して、70バンチ・トレイン2個を3回入射するパターンを用いている。バンチ・トレインのギャップは20/38バケットである。個々の入射バンチの入射電荷量の調整をしていないことに加え、入射切り替え時等に入射できないバケットが発生するため、トップアップ運転を続けると、フィリングパターンが乱れる場合があった。これに対処するため、SPRing-8で使用している方式のバンチ電流モニタ系を構築し、モデルパターンからの偏差が大きいバケットへの追加入射ができるように改良した^[1]。

(5)その他、操作ミスによるトラブルが何度かあったが、操作画面(GUI)の改良で、回避できるように対処した。

3. 電子入射、蓄積ビームおよび放射光安定化

3.1 放射光安定化とXBPM導入^[2]

放射光ビーム安定化のために、冷却水、空調システムの温度安定化を実施してきた。現在までに、温調器PIDパラメータの最適化により、収納トンネル内の気温変動幅を0.1 $^{\circ}$ C以下に抑える事が出来た。また、冷却水の精密温度調整、実験ホールの一部断熱化とともに、温度データのデータベース化を実施した。さらに放射光の安定性をはかるため汎用EUVビームラインBL10に、KEK方式の放射光ビーム位置モニタ(XBPM)を設置した。ビームラインの放射光利用に干渉せずに放射光軸位置を計測し、光軸変動の原因を短時間で特定することで、放射光の光軸安定化をはかる予定である。

3.2 入射バンパパルスの安定化^[3]

安定なTop-up運転を実現する為には入射ビーム、セプタム電磁石、バンパ電磁石等の長期間にわたる安定性が必要となる。NewSUBARUではバンパ電磁石のミスファイアにより、ビーム入射が出来ない不具合かがこれまでに数回発生している。

バンパ電磁石のミスファイアに伴うビーム入射の失敗を検知する為に、入射バンパ波形データの

取得、表示、監視、保存を行うモニターシステムを開発した。パルス事象の低頻度の不具合を記録するシステムを構築した。

3.3 チューン自動補正^[4]

ニュースバルではベータトロンチューンの蓄積電流に依存する変化や、エネルギー加速途中における変動が観測されている。特にエネルギー加速途中では、電磁石間で磁場強度漸近飽和まで僅かな時間差があるため、偏向電磁石、四極電磁石およびステアリング電磁石間の設定のずれが生じ、ビーム軌道とチューンに大きな変動が見られる。これを安定化するためにチューンを自動で測定、補正するシステムを開発した。さらにビーム寿命によるチューンの自動最適化機能を付加した。

3.4 多機能電磁石の準備^[5]

多機能電磁石の導入によるビーム軌道安定化、ビーム不安定性抑制/蓄積ビーム大電流化、蓄積寿命の改善を目指して、8極までの多極磁場成分を発生できる、電磁石を準備した。リング内の設置場所の関係で、一部既存のステアリング磁石と入れ替える必要があるため、ダイポール成分も発生できる仕様である。現在、電磁石は完成し、今後設置を行い、順次試験を行う予定である。

4. まとめ

ニュースバル放射光施設は、建設から12年経過し、機器の劣化が進んでいる。機器の定期点検保守以外に、本年までの3年間で、クライストロン、制御系計算機システム、入退室管理システム、冷却水流量計、電源電解コンデンサ、制御電源など、主要な機器の更新を行ってきた。また、現在SPRing-8と協力して、加速器安全インターロックシステムの更新を行っている。今後とも、放射光利用の安定化と高度化に向けて、加速器システムの改善を実施してゆく予定である。

参考文献

- [1] Y. Minagawa, et al., “ニュースバルのバンチカレントモニタの構築”, 本年会プロシーディングス THPS070 (第7回日本加速器学会年会, 姫路, 2010.8.4-6).
- [2] S.Hashimoto, et al., “ニュースバル放射光施設における光軸安定化に向けた取り組み”, (TPOPA10, 第6回日本加速器学会年会, 姫路, 2009.8.5-7). XBPM導入にはKEKの大学等連携支援事業の支援を受けた。
- [3] T. Shinomoto, et al., “NewSUBARU放射光施設における入射バンパ波形安定性改善”, 本年会プロシーディングス WEPS077 (第7回日本加速器学会年会, 姫路, 2010.8.4-6).
- [4] Y. Hamada, et al., “チューン自動補正によるニュースバル蓄積電子ビームの安定化”, 本年会プロシーディングス THPS068 (第7回日本加速器学会年会, 姫路, 2010.8.4-6).
- [5] Y.Shoji, et al., “ニュースバル用多機能電磁石製作”, THPS055 (第7回日本加速器学会年会, 姫路, 2010.8.4-6).