

ニュースバル放射光施設の現状

STATUS REPORT OF NEWSUBARU SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

宮本修治^{A)}、庄司善彦^{A)}、橋本智^{A)}、天野壮^{A)}、
皆川康幸^{*B)}、竹村育浩^{B)}、濱田洋輔^{B)}、出羽英紀^{B)}、大熊春夫^{B)}、後藤俊治^{B)}

Shuji Miyamoto^{A)}, Yoshihiko Shoji^{A)}, Satoshi Hashimoto^{A)}, Sho Amano^{A)},

Yasuyuki Minagawa^{*B)}, Yasuhiro Takemura^{B)}, Yousuke Hamada^{B)}, Hideki Dewa^{B)}, Haruo Ohkuma^{B)}, Shunji Goto^{B)},

^{A)}Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo

^{B)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

NewSUBARU is a synchrotron radiation facility consist of 0.5 GeV to 1.5 GeV electron storage ring and nine beam lines. The facility was constructed in the SPring-8 site and is operated by University of Hyogo. Injection beam of 1.0 GeV electron are supplied from SPring-8 linac. The stored beam current of 1.0 GeV top-up operation is 300mA and the current stability of ± 0.2 mA is achieved by the fast switching of beam injection to SPring-8 and NewSUBARU.

1. はじめに

ニュースバル放射光施設は、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所が SPring-8 サイトに設置し、運用している放射光施設である (Fig 1)。1.0GeV の電子ビームを生成している SPring-8 線形加速器 (Linac) は、SPring-8 とニュースバルの両方で使用されており、振り分け電磁石によって二つの加速器への交互入射が可能となっている。Linac から出射された電子はトランスポートを介してニュースバルまで伝送される。



Figure 1: Bird view of NewSUBARU Building.

ニュースバル放射光施設は周長 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。蓄積リングのハーモニック数は 198 で、通常運転時のフィリングパターンは 70バンチ×2個入射後、フルバンチに入射する。現在、1.0GeV 利用運転時には蓄積電流 300-mA 一定の随時継ぎ足し入射 (Top-Up 運転) が行われている。昨年、1Hz の高速振り分けが実現されたことで、平均電流が ± 0.2 mA 以内の安定性で運用されている。また 1 週間の内 1 日または 2 日は、1.0GeV で 350mA まで電子を蓄積後、1.5GeV

まで加速を行い、その後 Decay 運転で 1.5GeV の利用運転を行っている。Table I にニュースバル電子蓄積リングのパラメーターを示す。

Table 1: Parameter of NewSUBARU Storage Ring

Injection energy	1.0 GeV
Storage energy	0.5 - 1.5 GeV
Storage current (max)	500 mA
TopUp operation	1.0 GeV / 300 mA
Lattice	DBA(6 cell) + Inv. B(6)
Circumference	118.731 m
RF frequency	499.955 MHz
Harmonic number	198
Betatron tune	6.29 (H) / 2.23 (V)
$\Delta E/E$ (1.0/1.5 GeV)	0.047% / 0.072%
Emittance(1.0/1.5 GeV)	50 nmrad / 112 nmrad

2. ニュースバル放射光施設の現状

放射光利用では、軟 X 線領域放射光の産業利用として、極端紫外光半導体リソグラフィ関連研究開発、LIGA プロセスによるナノマイクロ加工、新素材開発・産業用分析等に使われている。また、レーザ Compton 散乱ガンマ線ビームラインを 1 本設置しており、1-70 MeV のガンマ線ビームを 0.33mW 発生できる。

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、遮蔽コンクリートトンネル内に収納されている。収納トンネル外側に 9 本のビームラインが設置されている。昨年度、このビームラインのうち 5 本のビームラインで先進的研究と産業利用のための高度化の改造を行っている。

2.1 各ビームラインの特徴と高度化内容

BL01 はレーザ Compton 散乱ガンマ線源 BL で、Nd レーザ (波長 1064 nm)、CO2 レーザ (波長 10592 nm)、

* minagawa@spring8.or.jp

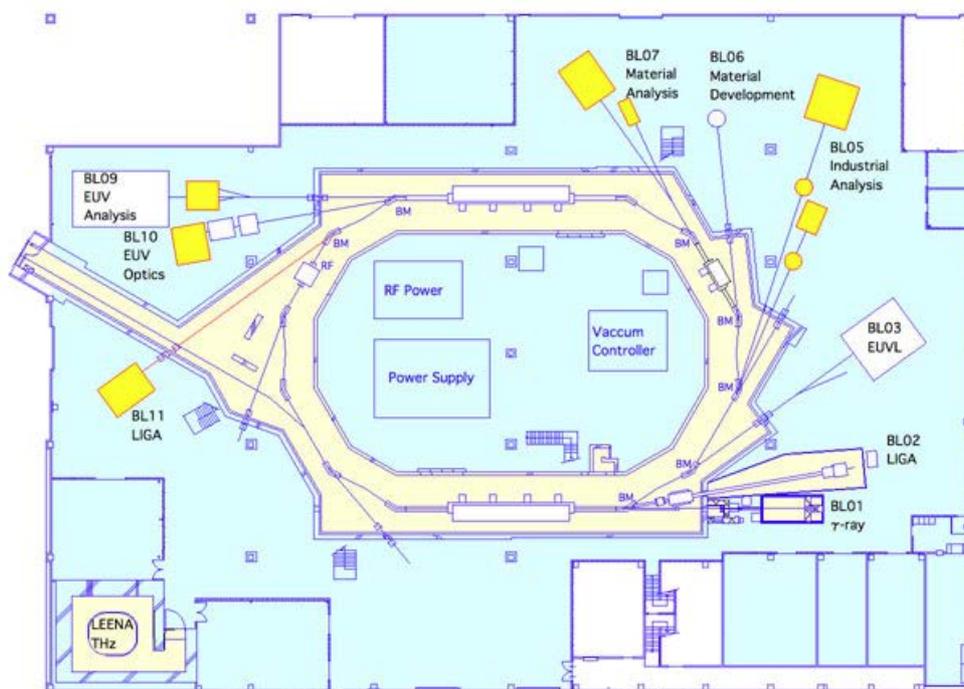


Figure 2: Layout of NewSUBARU experimental hall. Upgraded beamlines are marked in yellow.

Er ファイバーレーザ (波長 1550 nm) 等の入射により準単色・偏極ガンマ線を発生・利用している。2013 年から新しいガンマ線実験ハッチでの利用が可能となり、外部からのユーザーの利用が増えている。

BL02 は大面積の深 X 線リソグラフィー 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ー (EUVL) 開発 BL で、次世代縮小投影露光半導体リソグラフィー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 などの計測ができ、利用者支援でシンクロトロンアナリシス LLC と協力している。高度化で、二結晶分光器を更新し、EXAFS 領域までの分析を可能にした。光学素子等の制御も自動化され、調整の簡便化がはかられている。ユーザーの便宜の為に表面清浄化装置、嫌気性試料導入システムも設置された。

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。高度化で、多層膜鏡分光器、蛍光分光分析装置、高エネルギー分解能電子分析アナライザーの導入がなされている。また、集光ミラーの設置により放射光のマイクロビーム化もはかられた。

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 用レジスト開発のための 13.5 nm 干渉露光に用いられる。高度化で発光分光装置が導入されている。

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ミラーの反射率やフィルターの透過率を高

精度で測定できるシステムを構築している。高度化で、ユーザーからの要望が多い 1m 径の大型 EUV ミラー用反射率計を導入した。また、EUVL 用レジストの反応解析用に回折格子を新たに 1 枚追加している。

BL11 は X 線微細加工ビームラインであったが、高度化でビームラインを全面的に改造しナノ加工からマイクロ加工が同時かつ高効率に可能な産業試作加工用ビームラインとなっている。

3. ニュースバル運転の現状

ニュースバル放射光施設の 2012 年度および 2013 年度の年間運転時間の内訳を Fig. 3 に示す。総運転時間は 2012 年度の 2,623 時間から、2013 年度の 2,183 時間と約 16% 程度減少した。これは SPring8 の工事の関係で全体的な運転時間が短くなっていたことと、夜間や土日の調整運転が減っている事に起因している。

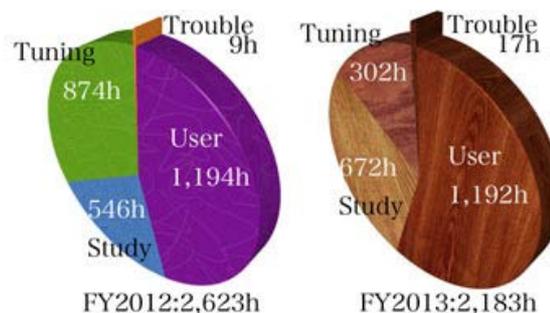


Figure 3: Breakdown of NewSUBARU operation time.

3.1 加速器性能の改善

(1) 蓄積リング電子エネルギーの較正

レーザー Compton 散乱ガンマ線の正確なエネルギーを知る為に、ガンマ線による蓄積リングの電子エネルギー計測を行った。この計測により蓄積リングの電子エネルギーを 0.01%以上の精度で較正できた。電子エネルギーは操作パネルの表示より最大 10MeV 程度高めとの結果となっている。[1]

(2) ビームラインの ABS 開閉状況の可視化

レーザー Compton 散乱ガンマ線の実験が頻繁に行われるようになってきて、大強度のレーザーを導入した際にビーム寿命が大幅に短くなる現象が度々観測された。その為にビームラインの ABS の開閉状況をすぐに把握出来るよう、LabVIEW の GUI による可視化を行い、ビーム寿命が短くなったときにレーザー導入の有無を確認出来るようにした。また、この GUI によって各ビームラインの利用状況も一目で把握出来るようになっている。

(3) RF Feedback によるシンクロトロン振動抑制

以前からシンクロトロン振動は観測されており、マシンスタディでの精密測定のとときに障害になることが度々あった。そこで、シンクロトロン振動を抑える為の RF Feedback を構築した。BPM からの信号を Single Pass Monitor を通して、ビーム位置の信号を得て、そこに含まれるシンクロトロン振動成分を抽出して、RF 制御の位相成分に戻す事でコヒーレント振動を抑制している。図に示すように RF Feedback によりシンクロトロン振動が抑えられ、ビーム寿命も少し伸びている。

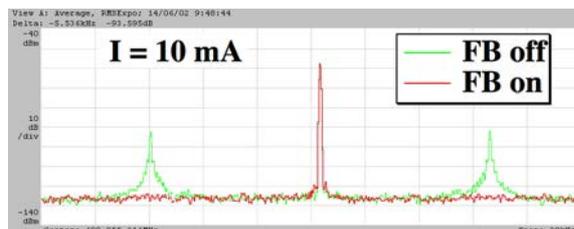


Figure 4: Measured spectrum with and without feedback of synchrotron oscillation.

(4) リング対称性の回復

垂直方向の single kick で測定された応答関数のデータ解析から、リングに linear focusing error を特定した。計算によって 3 台の Quadrupole error を仮定すれば、この現象を説明出来る事が分かった。そこで、最適と思われる四極電磁石 3 台に補助コイルを巻いて、ビーム寿命の影響を調べている。3 台の補助コイルのうち、計算で最大の効果が予想された 1 台、QC1 と呼ぶ電磁石の補助コイルを励磁したときに挿入光源を閉じた状態で最もビーム寿命が伸びて、約 4%ほどビーム寿命が伸びた。

QC1 の補助コイルを励磁すると vertical tune が 0.0059 シフトする。また、QC1 における beam off-set は QC1 の補助コイルを励磁したときの COD 変化から -1.38[mm] と求まる。この同じ beam off-set が QC1 のすぐ上流に

ある六極電磁石 S3 にもあると仮定して tune shift を計算してみると 0.0057 となる。この結果から、QC1 の補助コイルで補正出来た Quadrupole error の原因が、S3 であることが判明している。

(5) 四極マッチング調整の精度向上

Linac からニュースバルへの入射ビームトランスポートに挿入されたスクリーンモニタの 1 台 (M3) を、2012 年にオプティクス確認のテスト用として薄さ 0.2mm のスクリーンに変更し、高分解能での Q-scan を行ってきた。

今回、Q-scan を行う上で、調整を行いやすいスクリーン M5 についても薄さ 0.1mm のスクリーンに交換して高分解能での Q-scan が出来るようにした。M3 を使用していた時は、四極電磁石とビームサイズの 2 乗の関係の極小点が horizontal と vertical 方向で離れた位置で観測されることが多く、調整を難しい物にしていたが、M5 ではそのすぐ上流にトリプレットの四極電磁石が設置されており、horizontal と vertical の極小点が同じ位置に来るように調整しやすく、Q-scan の結果も容易に得られるようになった。



Figure 5: Screen monitor (M5).

(6) タイミングジッターの改善

入射効率の精度が上がってきて、Linac からのビーム形状が shot by shot で変化する影響が大きく現れており、ビーム形状の変化で入射効率が大きく下がる現象が見られた。そこで、Linac とニュースバルの間のタイミング系の機器で大きなジッターが発生している可能性があり調査を行った。Linac 側とニュースバル側でそれぞれ調査を行ったところ、Linac 側の Constant Fraction Discriminator のモジュールで使用する ch を変更すると信号のジッターが σ で 56.7ps から 18.6ps に減る事が分かり、現在はジッターが少ない ch を使用している。

現在、入射効率が大きく下がることは無くなっているが、これは上記の Q-scan の調整の精度が向上したことによる可能性もあり、モジュールの ch 変更の効果であるかは確定出来ない。また、ストリークカメラで shot by shot のビーム形状のバラツキを見る限りでは、モジュールの ch 変更前との差はあまり無く、その点についても改善にはいたっていない。

3.2 トラブル

2013 年度および 2014 年度中期まで、以下のトラブルの発生があり、それぞれ対処した。

(1) ビームアバート

ノイズ信号によるインターロック発報、制御系トラブル、RFのアーカ放電、落雷による電圧変動、ビームラインで誤操作で非常停止ボタンが押されたことなどによるビームアバート。

(2) 電磁石電源のアラーム発報

自動立ち上げ時に発報が6回。そのうち1回は地震後の処理の不備によるもの。電源のリセットと電磁石の初期化で対応。

(3) ビームライン BL7 の冷却水ホースから水漏れ

収納トンネル内でフレキシブルホースから水漏れ。ホースを交換。

(4) ビーム寿命急落

1.5GeV 運転で、ID gap open 時にビーム寿命が急落して戻らず。一度ビームを廃棄して再入射。

(5) タイミング系モジュールの故障

このモジュールはニュースバルで5台使用されているが、ここ5年で3台交換している。

(6) 上流側機器の故障による入射調整

Linac で機器が交換された為にニュースバルへの入射調整が必要となった。3回発生。

(7) 放射線アラーム発報

入射調整時に電磁石を通常と異なった状態で運転していたところ、電子銃の暗電流によって、1時間の積算値で発報。後に電子銃は他の物に交換された。また、ビーム入射調整でビームトランスポートのスクリーンにビームを照射している時に1時間の積算値で発報。今後は入射調整時は積算値を注意しながら行う。

(8) RF 系制御コントローラ停止

GPIB 接続の機器の操作の際に度々停止。6回発生。

(9) 電磁石電源内で水漏れ

電源稼働中は、水が乾いてしまい気がつけなかったが、電源が停止しているときに冷却水ホースからの水漏れを発見。3回発生して、その都度、水漏れしたホースを交換。経年劣化と思われる。他にビームトランスポートの電磁石電源内でも水漏れが1回。

4. まとめ

ニュースバル放射光施設は、建設から16年経過しているが、必要な保守と改修を加え、現在1.0 GeV/300mA のトップアップ運転と、1.5 GeV/350mA からの電流減衰運転を週間スケジュール配分して安定に運用している。しかし経年劣化によるトラブルが増えてきているのも事実であり、今後、機器を更新していく事に対応する必要がある。準単色ガンマ線利用ビームライン (BL01) では、夜間等を用いた調整運転およびスタディ運転で、0.55GeV から1.47GeV の間で電子エネルギーを変化させて積極的な実験が実施されている。

5. 関連報告

本学会でニュースバル関連の以下の報告がある。

- 蓄積リングレーザー Compton 散乱ガンマ線による利用研究
ガンマ線による蓄積電子ビームエネルギーの校正、陽電子による材料ポイド欠陥の非破壊検査、ガンマ線偏光測定法の試験と磁気コンプトン散乱の評価を行っている。^[1]
- BPM 信号のビームサイズ依存
ベータトロン振動振幅依存の軌道中心シフトの測定結果に BPM システム起因のシフトが含まれている事が分かり、その補正によって理論通りのシフトの測定結果が得られた。^[2]
- 兵庫県立大学 15MeV 線型加速器 LEENA 施設報告
テラヘルツ光源の開発と利用に向けた準備を行っており、ビームラインを設置して利用実験が可能となった。^[3]

参考文献

- [1] 宮本修治 他, "蓄積リングレーザー Compton 散乱ガンマ線による利用研究", 本学会プロシーディングス, SAP014, 第11回日本加速器学会年会, 青森, 8月9日 (2014).
- [2] 庄司善彦, "BPM 信号のビームサイズ依存", 本学会プロシーディングス, SUP079, 第11回日本加速器学会年会, 青森, 8月10日 (2014).
- [3] 橋本智 他, "兵庫県立大学 15MeV 線型加速器 LEENA 施設報告", 本学会プロシーディングス, FSP012, 第11回日本加速器学会年会, 青森, 8月9-10日 (2014).