

SACLA でのハローモニタの改良

IMPROVEMENT OF HALO MONITOR AT SACLA

大島隆^{#,A,B)}, 前坂比呂和^{A)}, 松原伸一^{B)}, 大竹雄次^{A)}
Takashi Ohshima^{#,A,B)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Shinichi Matsubara^{B)}, Yuji Otake^{A)},
^{A)} RIKEN SPring-8 Center
^{B)} Japan Synchrotron Radiation Institute, XFEL Division

Abstract

To mitigate demagnetization of the permanent magnet of an undulator by irradiation of the halo component of an electron beam, a halo monitor is installed in the beam line BL3 at SACLA. There was a trouble in the rf fingers of the monitor during the vacuum maintenance work in 2012. From this experience we found that the fingers had a role to protect the monitor from the radiation generated at the bending magnet located upstream, in addition to the reduction of the strength of the wake field. Further suppression of a wake field effect induced by the electron beam was also desired to improve the signal to noise ratio. In 2014 we installed a new beam line BL2. A halo monitor for the BL2 was newly designed to make the rf finger more mechanically stiff, and to reduce the wake-field. The stiffness of the finger was confirmed by a evacuation test without any problem. The result of a beam test for this improved halo-monitor shows that the wake-field strength was reduced by -20dB compared to that of the monitor used for the BL3. The strengths of halo components of BL3 and BL2 are routinely monitored with a resolution of 0.2 fC per pulse. During the experimental user time, if the integrated charge for 60 seconds exceeds an irradiation charge limit value of 5 pC, a voice alarm automatically notifies an operator with this situation.

1. はじめに

放射光発生に使用されるアンジュレータの永久磁石は 4×10^{14} 個の高エネルギー電子ビームの照射によって 1%の磁力の低下が起こることが報告されている^[1, 2]。X線自由電子レーザー施設 SACLA では、アンジュレータの永久磁石を照射する電子ビームのハロー成分の量を監視するために、ハローモニタ^[3]がビームライン BL3 に設置されている(Figure 1 参照)。このモニタでは、2012 年に真空パージ時に RF

フィンガが曲がるというトラブルが発生し、問題となった。また、信号に混入する電子ビームのウェイク場の抑制も望まれた。そのため、2014 年に新設されたビームライン BL2^[4]で使用されるハローモニタは、BL3 のモニタで見られた問題点に対処した新規設計のものとした。本論文では、BL3 で使用しているハローモニタで発生したトラブルの詳細、新たに製作した BL2 用ハローモニタの構造、動作試験の結果、およびその運用について報告する。

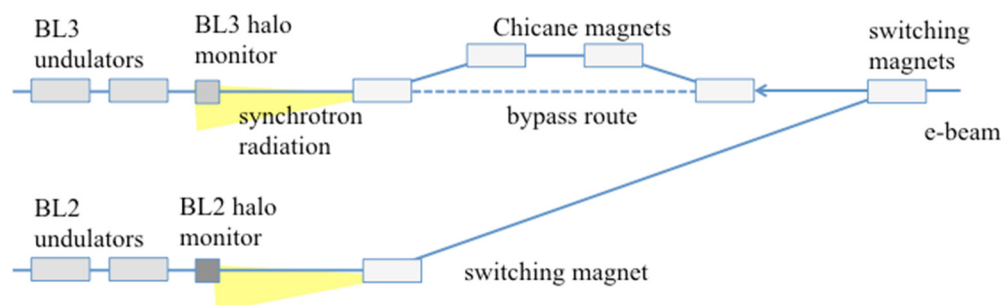


Figure 1: Schematic layout of the halo monitors and undulators of the beam lines, BL3 and BL2.

2. BL3 のハローモニタの問題点とその改良型モニタの製作

2.1 BL3 のハローモニタの問題点

この節では、BL3 のハローモニタの構造と発生したトラブルの詳細を述べる。

BL3 用ハローモニタの構造^[3]を Figure 2 に示す。

[#] ohshima@spring8.or.jp

高エネルギー電子ビームのハロー成分は、ダイヤモンド基板(ダイヤモンドブレード)を通過する際に電子・正孔対を生成する。ダイヤモンドブレードの厚さは 0.3mm で、その表裏に、垂直方向に 1mm、水平方向に 10mm の幅を持つ電極を取り付けてある。この電極には 100V の電圧が印加され、電子が通過したときに発生する電子・正孔対を収集する。2つのブレード電極はそれぞれマイクロストリップラインの伝送路を通して、ICF フランジに取り付けられた SMA コネクタに接続されている。

高いピーク電流を持つ電子ビームが不連続な構造物を通過する際にはウェイク場が発生する。強いウェイク場を生じるような不連続な構造は、電子ビームに対してエネルギー広がりの増加やビーム

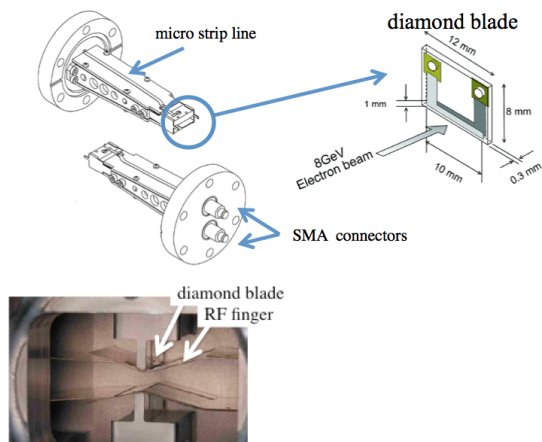


Figure 2: Configuration of the halo monitor used at BL3^[3].

サイズの増大などの悪影響を与える^[5]可能性がある。また、この信号がモニタの電極から取り出されると、モニタの信号対雑音比が低下する。そこで、電子ビームの感じるインピーダンスを低減させるために、モニタ真空槽のブレード挿入部分には上下にそれぞれ2枚の長さが約100mm幅21mm厚さ0.1mmのCuBe製のRFフィンガを取り付けられている。このRFフィンガはブレードが上下に動く際に擦動により電氣的接触を保つ。

次に、このモニタで発生した不具合について述べる。このモニタが設置されたBL3で2012年の加速器の夏期停止期間に、ハローモニタのRFフィンガの曲がりが発生した。これは、真空槽に乾燥窒素を導入する時、作業手順を誤り、一度に導入した窒素の量が多過ぎたため、突入した窒素がハローモニタのRFフィンガに当たり曲がったと考えられた。そこで、当面の対策としてRFフィンガを取り外して再設置を行った。しかし、この状態ではビームから充分離れたブレード位置でも、以前には見られなかった信号が観測され、ハロー成分以外の信号の混入が疑われた。このノイズ信号の原因として加速空洞からの暗電流が考えられたが、ビームをオフするとなくなることから否定された。次に、ハローモニタの上流に設置されたシケインの偏向電磁石から発生する放射光が原因として考えられた。そこで、電子ビームがシケインを通過した場合と、直線的にバイパスした時のハローモニタの信号を確認した。Figure 3にその結果を示す。シケインをバイパスした時にはノイズ信号が大幅に減少したことから、放射光がノイズの原因であることがわかった。しかし、このシケインは、加速管から放出される暗電流の抑制、および電子ビームのエネルギー確認のために使用されており、ユーザー運転中にバイパスすることは出来ない。そこでRFフィンガを再製作して2013

年に設置しビームハローのモニタを再開した。

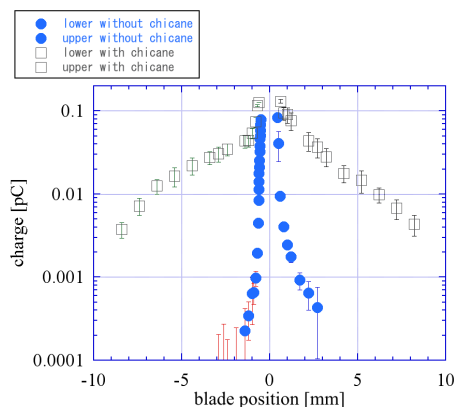


Figure 3: Measured signals of the BL3 halo monitor without RF shielding fingers as a function of the blade position from the beam. Open squares / solid circles show the data with / without passing through the Chicane.

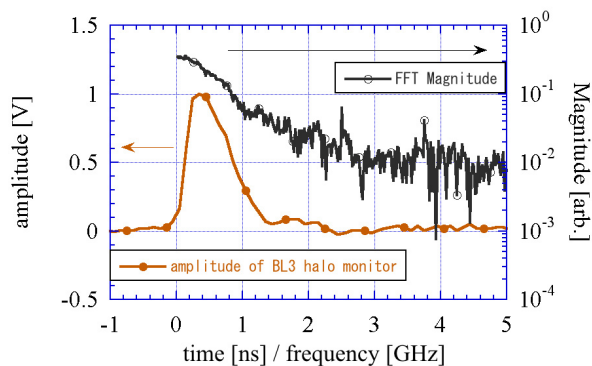


Figure 4: Time domain signal of the BL3 halo monitor with irradiation of a low-current electron beam (the line with solid circles). The horizontal axis is a time in ns, and the vertical axis is amplitude in a unit of V (left axis). The FFT spectrum (the line with open circle) of the signal is also shown. The horizontal axis is frequency in a unit of GHz and the vertical axis is the magnitude (right axis).

このハローモニタのブレードをビーム位置まで挿入して、ブレードに電荷を絞った電子ビームを照射した。このときに、高速オシロスコープで測定した信号の時間波形^[3]とそのフーリエ変換 (FFT) スペクトルを Figure 4 に示す。この信号のパルス幅は前幅でおよそ1.5nsであり、FFT スペクトル強度は周波数が高くなるに従って弱くなっている。2GHzのスペクトル強度は0Hz近傍の低周波での値の1/10となっており、この周波数以下の成分を逆変換すれば、時間波形ほぼ再現できると考えられる。一方このモニタのブレードを電子ビームから充分離れた15.5mmの位置にセットして、観測したウェイク場による信号波形の例を Figure 5 に示す。このウェイ

ク場による信号の大部分は、信号処理回路の入力部に取り付けられた低域通過フィルターで減衰される。しかし、信号対雑音比を向上させるためには、ハロー信号と重なる 1GHz から 2GHz の領域のウェイクによる信号をさらに抑制することが望ましいことがわかった。

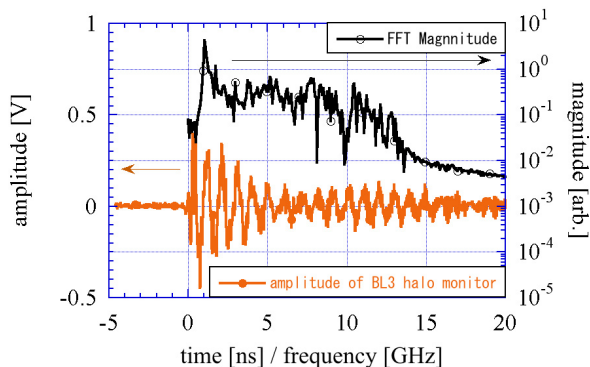


Figure 5: Time domain wake field signal of the BL3 halo monitor at a blade position of 15.5 mm apart from the electron beam (the line with solid circle), and its FFT spectrum (the line with open circle). The axes on the graph are the same as those of Figure 4.

2.2 改良型 BL2 用ハローモニタの構造

第 2 章に述べたように BL3 で使用しているハローモニタには改良の余地があった。そこで、2014 年度に新規設置されたビームライン BL2 で使用するハローモニタについては、設計を新しいものとした。

RF フィンガには通過する電子ビーム感じる高周波的不連続性の緩和の役割が有るが、同時にブレード電極や伝送路へのウェイク場の侵入抑制、上流に設置された偏向電磁石からの放射光の抑制の役割を果たしていることがわかった。これらの点を念頭に置き、この RF フィンガの機械的堅牢性の向上を図った。Figure 6 には BL2 用のハローモニタの構造概念図を示す。ブレードは、4 面を金属で覆った伝送路の先に取り付けられ、全体がリアガイド上をパルスモータにより駆動され移動する。この構造体の出し入れのための真空槽に開ける開口は、なるべく狭くするように工夫した。この構造体と真空槽の電氣的接触は RF フィンガで行った。RF フィンガが短く強度が大きいことから、乾燥窒素の突入があったとしても RF フィンガが曲がってビーム通路を塞ぐような事態は発生しない。我々は、ダイヤモンドブレードの近くは電子ビームに対して 45 度の角度を持つ 0.2mm 厚のベリリウム銅製の RF シールドで囲った。8GeV の電子ビームはこのシールドを通過するが、ビームの振り戻しを行うシケインの偏向電磁石で発生する X 線と電子ビームがモニタ真空槽に発生するウェイク場は、このシールドによって減衰される。ダイヤモンドブレードおよび電極の構造に

関しては、実績のある前のモニタとほぼ同じとした。

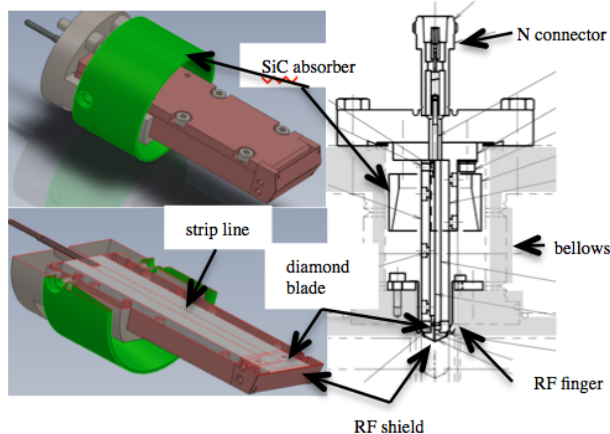


Figure 6: Configuration of the new halo monitor installed at BL2.

信号対雑音比の向上に関しては、以下に述べる対策を取った。BL3 のモニタの伝送路は、信号線が外に露出したマイクロストリップライン構造となっており、ノイズを拾いやすい。そこで、新方式では信号線をグラウンド電位で包むストリップライン構造の区間を多くとる構造とした。また、ブレード電極の裏面電極はブレード近傍で接地面と接触させ、表面の電極の信号のみを伝送した。これにより伝送路の本数を 2 本から 1 本に減らせた。ブレードへの DC バイアスの印加とハローからのパルス信号の分離には、10GHz の帯域幅を持つバイアス T を用いた。このバイアス T はトンネル外の保守通路に設置したバイアス電源に内蔵した。コネクタには RF-Beam Position Monitor [6] で使用実績のある N 型コネクタを採用し、トンネル外に設置された信号処理回路との間を結ぶ 20m の同軸ケーブルを接続する際の機械強度向上を行った。この伝送路の特性インピーダンスを Time Domain Reflectometry の手法を用いて確認した。結果を Figure 7 に示す。全領域で 50 Ω の特性イ

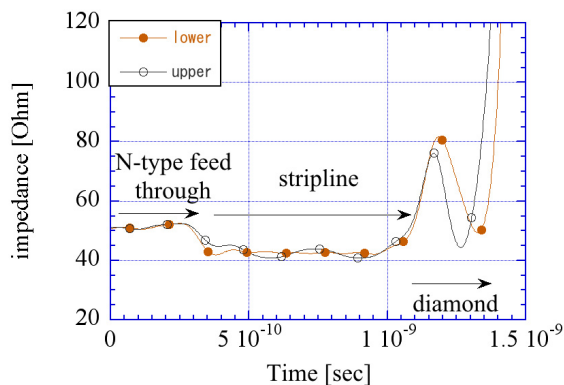


Figure 7: Characteristic impedance of the signal transmission line of the BL2 halo monitor. This data were measured by the time domain reflectometry method.

ンピーダンスとなることを目指したが、ダイヤモンドブレードの電極が対向していない部分で 80Ω 程度になっていた。それ以外の部分ではおおむね 50Ω に近い値となっており、GHz 以下の領域の信号を主に使用するこのモニタとしては十分な性能であると考えられる。また、ベローズと構造体との間にウェイク場の高周波が溜まることを抑制し検出信号の S/N を向上するために、筒状の SiC 高周波吸収体を設置した。

3. 改良型モニタの動作試験と運用

RF フィンガの堅牢化に関しては、真空槽の真空排気、大気開放時の操作でも、問題なくその形状を維持することが確認された。

ウェイク場の抑制による信号対雑音比の向上確認に関しては、実際のビームを使った動作試験を行った。BL2 用ハローモニタからのウェイク場の信号について、12GHz のアナログ帯域を持つ高速オシロスコープで計測した波形を Figure 8 に示す。ウェイク場の信号強度は、モニタに 240pC の電子ビームを通してブレード位置をビームから 11mm 離れた位置にセットした条件で、 0.5Vp-p であることが観測された。BL3 のモニタでは Figure 5 に示すようにビームから 15.5mm 離れた条件で 0.9Vp-p の強度であった。このことから、BL2 のモニタではブレードを BL3 の

モニタより近づけた状況でもウェイク場の信号振幅が抑えられていることになる。Figure 8 には時間波形を周波数変換した FFT スペクトラムも合わせて示す。4GHz 以下の成分の強度が BL3 の場合に比べ 20dB 以上低減できていることが確認できた。これらの結果は、新規設計装置の信号対雑音比向上の対策が有効であったことを示している。電子ビームの検出効率に関しては、加速器の上流部のスリットを

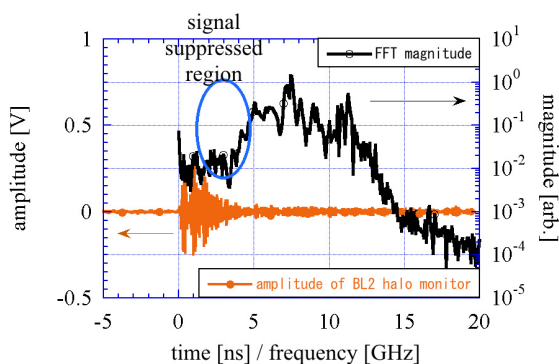


Figure 8: Time domain wake field signal of the BL2 halo monitor at a blade position of 11mm apart from the beam (the line with solid circle), and its FFT spectrum (the line with open circle). The axes on the graph are the same as those of Figure 4. The circle on the graph shows the frequency region where the wake field signals are successfully suppressed compared to that of the BL3 halo monitor.

使ってビーム電流を 0.32pC まで絞った状態でブレードに当てて、モニタから得られる信号強度を測

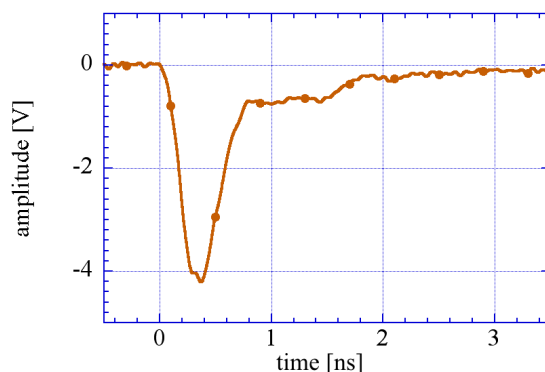


Figure 9: Time domain signal from the BL2 halo monitor at an incident electron beam charge of 0.32pC .

定した。その時の信号波形を Figure 9 に示す。この波形の時間積分した値から計算した電荷量は、 64pC となった。モニタの感度係数は、 $64\text{pC}/0.32\text{pC} = 200$ となり、BL3 に設置済みのハローモニタの係数と 20% 以内の偏差で一致していた。

通常運転においては、ハローモニタの出力信号は低域通過フィルターを通され、 30dB の利得を持つベースバンド増幅器で増幅された後、ADC に入力されている。ADC で読み取った信号はデータベースに 2 秒毎に保存されている。BL3 において、アンジュレータの永久磁石に照射されるハロー成分の測定 s するため、我々は、ハローモニタのブレード位置をアンジュレータのギャップに追従して動かすプロセスをユーザー運転期間に起動している^[3, 7]。このプロセスは同時に、ハロー成分の信号の 60 秒積分値も監視している。BL2 においても同様のプロセスを現在動作させている。このプロセスは、信号の積分

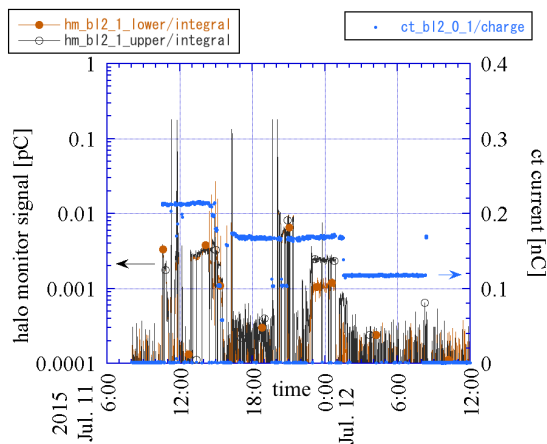


Figure 10: Trend of the output signal from the BL2 halo monitor during a machine-tuning period. The trend of the charge passing through the BL2 is also shown.

強度がしきい値を越えた場合には音声による警告を行い、運転員に異常状態を知らせる。Figure 10 には、BL2 の加速器調整時のハローモニタ信号強度の推移を示す。調整当初は 0.1pC 程度の信号が見られたが、調整後のハロー成分の強度はほとんどノイズフロアと同程度の $\pm 0.3\text{fCrms}$ 以内で推移していることが確認できた。

4. まとめと今後

BL3 では、ハローモニタを設置し、アンジュレータに照射される電子ビームのハロー成分をモニタしている。2012 年に発生したトラブルから、モニタに設置した RF フィンガには、電子ビームのウェイク場を抑制する役割のみではなく、上流に設置された偏向電磁石からの放射光を抑制する効果もあることがわかった。

新規ビームライン BL2 が設置されることになり、このビームライン用にハローモニタを新規製作した。このモニタでは、BL3 のモニタで得た経験を元に、RF シールドの機械的堅牢性の向上、伝送路の電氣的遮蔽効果の向上を行った。電子ビームのウェイク場の抑制効果について、4GHz 以下の成分は BL3 用に既設のモニタに比べ 20dB 以上抑制できた。現在、我々はユーザー運転においてはアンジュレータのギャップに応じてハローモニタのブレード位置を追従させそのハロー成分の信号強度を連続的にモニタしている。その積分強度がしきい値を越えた場合には音声による警告を行うシステムを運用している。

BL2 では当初想定していた 3.5mm よりも狭いギャップでアンジュレータを動作する運転が行われている。今後は、これに対応して RF シールドの薄肉化など不感領域の削減を予定している。また、ハロー成分の垂直方向の強度分布測定を BL3 では行った^[7]が、同様の測定を BL2 でも行う予定である。

参考文献

- [1] T. Bizen, et. Al., "High-energy electron irradiation of NdFeB permanent magnets: Dependence of radiation damage on the electron energy", N. I. M. A 574, (2007)401-406.
- [2] T. Hasegawa, et. al., "Evaluation of Permanent Magnet Demagnetization of the SPring-8 In-vacuum Undulator by In-situ Magnetic Measurements", in these proceedings.
- [3] H. Aoyagi, et.al., "Electron beam halo monitor for a compact x-ray free-electron laser", Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 032802 (2013).
- [4] T. Hara, et.al., "Pulse by Pulse Electron Beam Distribution for Multi-Beamline Operation at SACLA", Proc. of FEL2014, Basel, Switzerland, (2014), pp.71-71.
- [5] A. Chao: "Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators", Wiley.
- [6] H. Maesaka et. a al., "Sub-micron resolution rf cavity beam position monitor system at the SACLA XFEL facility", N. I. M. A, 696 (2012) 66-74.
- [7] T. Ohshima, et. al., "Measurement of Vertical Beam Profile Using Halo Monitor", Proc. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, (2013), pp.702-704.