

## PF の超伝導ウィグラー下流における線量分布測定

### DOSE DISTRIBUTION MEASUREMENT DOWNSTREAM OF SUPERCONDUCTING WIGGLER IN PF

塩澤真未<sup>#</sup>, 帯名崇

Mami Shiozawa <sup>#</sup>, Takashi Obina

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

#### Abstract

In operating the accelerator, it is necessary to use various radiation measurement tools according to the purpose in order to measure the radiation generated by the beam loss. Gafchromic films, which change color due to the rupture and polymerization of radiation-sensitive monomers, have recently been used not only in the medical field but also in the accelerator field as a simple tool for measuring radiation. Although it is not suitable for real-time adjustment during operation, the film, which does not require wiring and has a high degree of freedom in installation location, is very suitable for measuring doses at multiple locations at once. Taking of this advantage, we have measured the beam loss distribution during accelerator operation over a wide area such as accelerator rooms and tunnels of various large accelerators in KEK. Beam loss distribution evaluation at the synchrotron accelerator Photon Factory (PF) revealed that the radiation dose downstream of the superconducting wiggler was the highest in the PF ring. Therefore, we also measured the detailed beam loss during excitation and demagnetization of the superconducting wiggler. This paper reports the results.

#### 1. はじめに

KEKの放射光実験施設 Photon Factory (PF)ではユーザーに輝度の高い放射光を提供するため、超伝導ウィグラーが採用されている。PFの超伝導ウィグラーは、入射点の対称となるBL14に位置し、Fig. 1に示すような軌道でビームを鉛直下方に6 mm曲げている。一般的に超伝導ウィグラーは水平方向にビーム軌道を曲げることによって放射光を発生させるものがほとんどだが、PFでは実験ホールの測定器配置の都合により鉛直方式になっており、世界的にも非常に珍しい超伝導ウィグラーである。

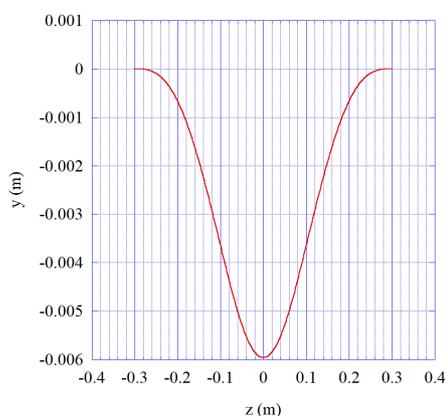


Figure 1: Assumed electron trajectory of VW#14 at B=4.8 T.

これまで、この超伝導ウィグラー下流において機器の故障などが比較的多くみられていたが、近年我々が行っているガフクロミックフィルムを用いた PF リング内のビー

ムロス分布測定[1]により、超伝導ウィグラー下流が PF リング内で最も放射線量が高い場所であることが分かった。そこで超伝導ウィグラー下流のより詳細な線量分布測定を行った。また、通常は超伝導ウィグラーを励磁してユーザー運転を行っているが、今回は消磁した際の測定も行い、励磁した場合と消磁した場合のビームロス分布を比較した。本稿ではこの結果について紹介する。

#### 2. ガフクロミックフィルム

ガフクロミックフィルムとは放射線への暴露によって変色するフィルムで、アメリカの Ashland 社が製造・販売を行っている。現像や暗室が不要なフィルムであり、エネルギー依存性が少ないという特徴がある。測定後のスキャナでの読み取り方式や感度の違いにより数種類のフィルムが販売されているが、今回の測定では感度が20~8000 mGyのRTQA2を用いた。RTQA2はFig. 2に示すような四層構造をしており、Active Layer 中に含まれる放射線感受性モノマーの破断・重合作用によって、オレンジ色(新品)から、茶色、こげ茶色、黒色へと積算放射線量(Dose 量)に応じて変色していく。配線などの設置の手間がかからず測定箇所ので自由度が高い上に複数の場所を同時に測定できるので、分布測定等に非常に適している。

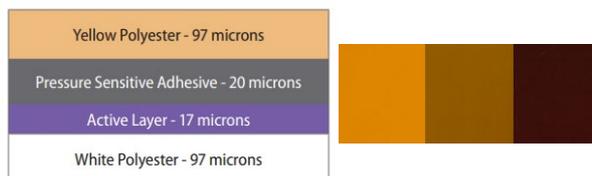


Figure 2: Layer structure and color change of Gafchromic film [2].

<sup>#</sup> mami@post.kek.jp

ガフクロミックフィルムにより Dose 量の見積もりを行うには、較正曲線の取得が必要である。そこで我々は 2022 年 8 月に量子科学技術研究開発機構(QST)高崎量子応用研究所においてコバルト 60 を用いた較正照射実験を行った。これ以降の測定においては、較正照射実験により得られた較正曲線を用いて Dose 量の見積もりを行っている。PF 加速器室内の同じ場所で同期間に設置したガフクロミックフィルムと OSL バッジにより見積もった Dose 量とを比較すると、比較的高線量の領域においてオーダーではよく一致すると分かっている。値が一致しないのは、コバルト 60 が放出する 1.17 MeV と 1.33 MeV のガンマ線に対し、加速器室内で発生している X 線、ガンマ線のエネルギーにばらつきがあることが原因と考えられるが、ビームロス分布を測定するにはこの程度の精度で十分と考え、測定にはガフクロミックフィルムを用いている。

### 3. 測定について

消磁・励磁した際の超伝導ウイグラー付近の線量分布をそれぞれ鉛直方向、ビーム進行方向に分けて、ガフクロミックフィルム(RTQA2)、OSL バッジ(InLight)を用いて測定を行った。

#### 3.1 ビーム条件

消磁、励磁のいずれの測定の場合も測定時間は Fig. 3 に示すように蓄積電流値が 450 mA になってから 1 時間とし、1 時間経過した時点でビームを落として加速器室内に入域しフィルムの回収を行った。

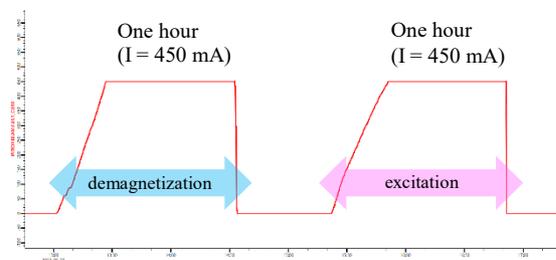


Figure 3: Accumulated current value during measurement.

#### 3.2 線量評価

線量評価に用いたツールはガフクロミックフィルム(RTQA2)、OSL バッジ(InLight)、放射線エアモニターの 3 種類である。ガフクロミックフィルムは蛍光灯環境下でわずかに反応してしまうため、遮光袋に OSL バッジとともに鉛直方向の測定に用いた。この鉛直方向の測定ではエネルギー分布の傾向を知るため、遮光袋に 1 mm 厚の鉛シートを入れたセットと鉛シートなしのセットを用意して測定し比較した。ビーム進行方向の測定ではガフクロミックフィルムのみを用いている。また、既設の放射線エアモニターは超伝導ウイグラーに近づけすぎると線量率が高すぎて故障してしまうことがわかっているため、Fig. 4 に黒丸で示した超伝導ウイグラーから約 8 m ほど下流でケーブルラダーの高さである床から 2 m の場所での線量率をモニターした。

### 3.3 測定場所

測定場所はいずれも超伝導ウイグラー付近の加速器室内の内側の壁である。Figure 4 に黄色で示したビーム進行方向の測定では、加速器室内の床から 1200 mm のビームと同じ高さにおいて進行方向に約 1000 mm 間隔で合計 14 枚のフィルムを設置した。以前にビーム進行方向の測定を行った際に最も Dose 量が高かった場所(赤の丸で示した)では鉛直方向の測定を行った。この測定では鉛シートありとなしのフィルムを床面より 0 mm から 1800 mm までを 200 mm 間隔で計 10 箇所にて 20 組設置した。これらの測定を消磁・励磁の両方の場合に行った。

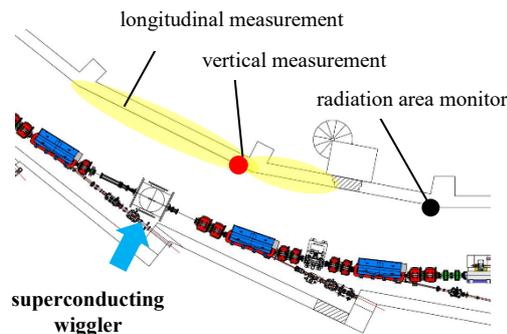


Figure 4: Measurement location.

## 4. 測定結果と考察

放射線エアモニター、ビーム進行方向、鉛直方向のそれぞれの測定で、超伝導ウイグラーを消磁した場合と励磁した場合の結果を紹介する。

#### 4.1 放射線エアモニター

放射線エアモニターの値を Fig. 5 に緑線で示す。赤線は参考のために示した蓄積電流値である。消磁した際は入射が終わると線量率は 0.01 mSv/h 程度で安定するのに対し、励磁するとその 100 倍の 1 mSv/h 程度になっていることが分かった。さらに、励磁中では入射中の線量率は蓄積電流値に比例するため、蓄積ビームからのロスに見えるが、消磁した際にも入射ビームのロスが見えていることより、蓄積ビーム由来のロスが圧倒的に多いために見えていなかったと考えられる。

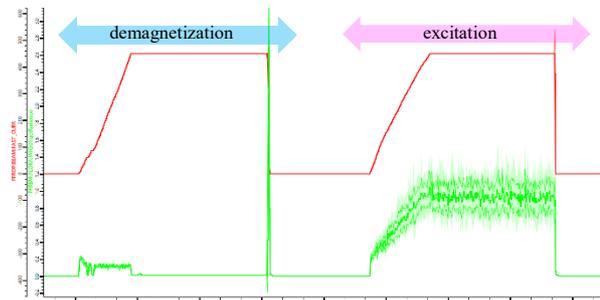


Figure 5: Accumulated current value (red line) and radiation area monitor value (green line).

#### 4.2 ビーム進行方向の測定

ビーム進行方向の測定後のガフクロミックフィルムとそれらのフィルムから見積もった Dose 量分布を Fig. 6 に示す。グラフの横軸は film number となっており、順に左側の各フィルムに対応し、縦軸はそれぞれ見積もった Dose 量となっている。消磁した場合は RTQA2 の感度である 20 mGy 以下のフィルムもあるが、低線量では InLight の値とよく一致することが確認できているため正しい Dose 量となっている。また、消磁した際の film13,14 はフィルムの有意な変色が見られなかったため 0 mGy とした。

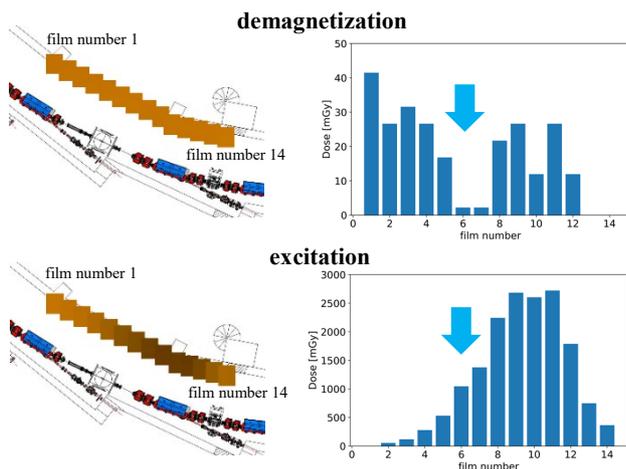


Figure 6: Gafchromic film after irradiation and dose distribution estimated from Gafchromic film. The location of the blue arrow is right next to the superconducting wiggler.

ガフクロミックフィルムの変色度合を見ると、全体的に励磁した時の方がフィルムの黒化が著しく、高 Dose 量となっていることがわかる。グラフ中に青い矢印で示したのは film number 6 であり超伝導ウィグラーのほぼ真横に設置したフィルムである。消磁した際には超伝導ウィグラー真横とその直下流のフィルムでは低 Dose 量となっているが、これは超伝導ウィグラー筐体のシールドの効果と考えられる。一方で励磁した際には真横より数メートル下流のフィルムで最も高い Dose 量となり消磁した時と比べ 2 桁程度高く、シールドの効果が見えないほどに大量の X 線が発生していることがわかる。

#### 4.3 鉛直方向の測定

##### 4.3.1 消磁した場合

消磁した場合の鉛直方向の測定後のフィルムと InLight により見積もった Dose 量分布を Fig. 7 に示した。グラフの縦軸は加速器室の床面からの高さで横軸は Dose 量となっている。消磁した際には有意な変色が見られなかったフィルムが多くあり正確な Dose 量が計算できなかったため、鉛直方向の測定ではガフクロミックフィルムではなく全て InLight から見積もられた Dose 量となっている。InLight は人間の被ばく管理が目的の製品であるため、ガフクロミックフィルムより低線量領域での正確な測定が可能である。

超伝導ウィグラーを消磁した場合は鉛シートの有無に

かかわらず床から 1200 mm のビームと同じ高さをピークに山なりの Dose 量分布となっている。鉛シートが有りの分布ではよりピークが鋭いことがわかる。いずれにせよビームの高さで最も Dose 量が多いという非常に納得のいく結果となった。

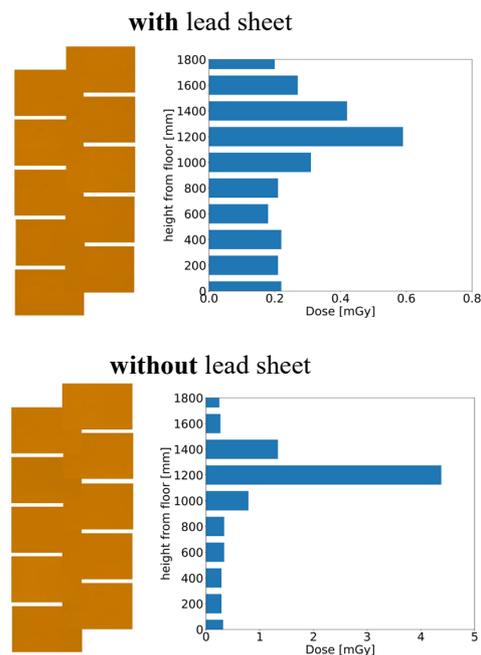


Figure 7: Gafchromic film after irradiation and dose distribution estimated from InLight (during demagnetization).

##### 4.3.2 励磁した場合

励磁した場合の鉛直方向の測定後のフィルムと InLight により見積もった Dose 量分布を Fig. 8 に示した。フィルムの変色度合からもよくわかるが、鉛シートの有無によらずビーム高さより床面での Dose 量の方が 2 倍以上も多いという分布が得られた。これは超伝導ウィグラーが鉛直下方にビームを蹴っていることに起因すると考えられる。

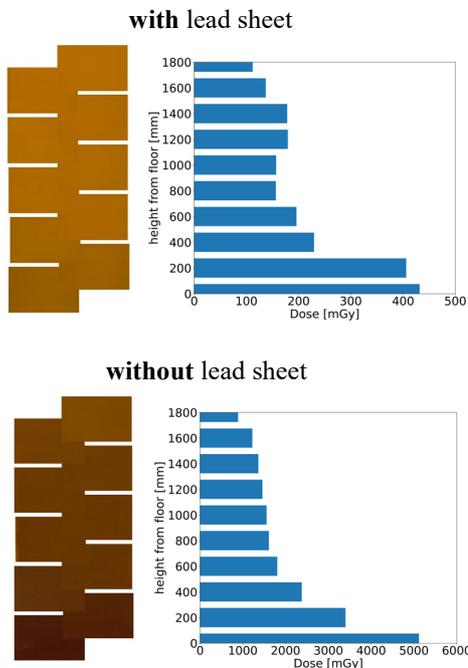


Figure 8: Gafchromic film after irradiation and dose distribution estimated from InLight (during excitation).

#### 4.3.3 1 mm 厚の鉛による効果

1 mm 厚の鉛シートにより X 線が何%失われたのかを減衰比として消磁・励磁のそれぞれの場合で計算した。鉛シートなしの Dose 量と鉛シートありの Dose 量の差を鉛シートなしの Dose 量で割った値をプロットしたのが、Fig. 9 である。減衰比が 100%に近いほど鉛による効果が大きいといえる。

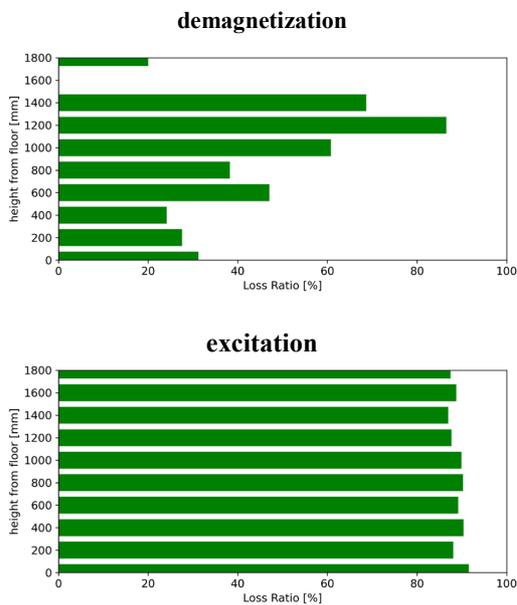


Figure 9: Ratio of radiation dose lost in 1 mm thick lead.

消磁した場合の床から 1600 mm の高さでは鉛シートの有無にかかわらず同じ Dose 量であったため減衰比は 0%となっているが、概ねビーム高さでの 90%をピークに床面ほど減衰比は低く、50%に満たない場所も多くある。一方で、励磁した場合は高さによらず減衰比は 90%程度でほぼ一定となった。

次に、1 mm 厚の鉛シートがどの程度のエネルギーの X 線をカットできるのかを NIMS のサイト[3]を参考に計算した結果を Fig. 10 に示す。この結果より、消磁の際はビーム高さ以外での減衰比が低いことから比較的高エネルギー(数百 keV 以上)の X 線がわずかに発生していると考えられる。また、励磁すると減衰比は高さによらず 90%程度であることから、励磁中は 100 keV 程度の X 線が大量に発生しているといえる。

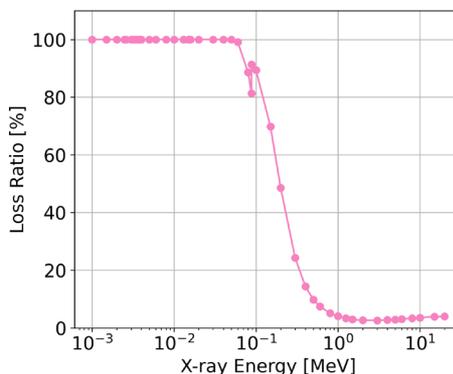


Figure 10: X-ray attenuation rate with 1mm lead thickness.

## 5. 今後の展望

励磁した際に超伝導ウイグラー下流で大量の X 線が発生している原因には以下の2つが考えられる。

- 2.5 GeV の電子ビームそのものの裾部分が 31 mm 径のダクトに当たっているため
- ビームが鉛直下方に曲げられることによって発生した高エネルギーの X 線が超伝導ウイグラー下流のアブソーバ等に当たって二次的に大量の X 線を生じさせているため

しかし、今回の測定では原因の特定に至っていない。そのため、超伝導ウイグラーで 2.5 GeV の電子がロスした際に測定場所ではどの程度の線量率になるのかの計算を行う必要がある。また、超伝導ウイグラーを通過する際のビームの軌道を変更した際にロス分布がどのように変化するか測定も行いたい。

## 6. まとめ

PF の超伝導ウイグラーを消磁・励磁した状態で付近の詳細な放射線量分布測定を行い比較した。その結果、超伝導ウイグラーを励磁すると消磁した際と比較して周辺の放射線は 2 桁程度多く発生し、その 9 割程度が 100 keV 程度のエネルギーの X 線であると分かった。また、励磁した際はビーム高さより床面での放射線量が高いということが明らかになった。

## 謝辞

超伝導ウイグラーの消磁、励磁の切り替え作業には加速器第六研究系の野上隆史氏にご協力頂きました。また、今回の測定について放射線科学センターの岸本祐二氏より貴重なアドバイスを頂きました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] M. Shiozawa *et al.*, “Beam Loss Evaluation by Gafchromic Film”, in the Proceedings of the 19th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Online, 2022.
- [2] Gafchromic RTQA2 film;  
[http://www.gafchromic.com/documents/RTQA2\\_Literature.pdf](http://www.gafchromic.com/documents/RTQA2_Literature.pdf)
- [3] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>