

## SPRING-8 蓄積リング直線部における発生放射線線量

### RADIATION DOSES PRODUCED AT THE STRAIGHT SECTIONS IN THE STORAGE RING OF SPRING-8

成山展照<sup>#</sup>

Nobuteru Nariyama<sup>#</sup>

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

#### Abstract

At the straight sections in the storage ring of electron accelerators, gas bremsstrahlung X rays are emitted. The X-ray doses scattered at the absorbers of the front end were calculated using a Monte Carlo code with and without a lead local shield. The collimator shield was found to contribute to the dose reduction on the ratchet. For electron losses, the neutron doses were measured using solid-state track detectors in the storage ring. The result showed that the intense losses occurred equally at both ends of the long undulators corresponding to the high betatron function positions.

#### 1. はじめに

シンクロトロン放射光源用電子蓄積リングには、挿入光源用に直線部が複数配置され、その長さに応じて、ガス制動 X 線が発生する。ガス制動 X 線は、非常に前方に偏って放出されるため、安全上ビーム軸上に遮蔽ブロックを配置し対応しているが、フロントエンドにはアブソーバなど散乱体となるコンポーネントが配置されており、これによる散乱線を遮蔽するため後方には鉛コリメータが設置されている。今回、このコリメータによる遮蔽効果をモンテカルロコード FLUKA<sup>[1]</sup>により計算した。

この他、直線部ではラティスに起因した電子損失が起きる。すなわち、垂直ベータatron関数が、直線部両端の4極電磁石の位置において大きな値を取る<sup>[2]</sup>。挿入光源の最小ギャップは、真空容器の大きさより小さいが、実際にどのような損失分布をしているのかは実測されていない。電子損失時には、高エネルギー X 線と光中性子が発生するが、中性子は X 線と比べると比較的等方に近く放出されるため、測定により損失位置の特定が容易である。しかし、放射光源用蓄積リング内では、発生した大強度放射光がクロッチ等により散乱し、強いバックグラウンドとして存在する<sup>[3]</sup>。そこで今回、 $\gamma$ 線に対してほとんど感度を有しないプラスチック飛跡検出器 CR-39 を用いることにより、蓄積リング内の中性子線量測定を行った。

#### 2. ガス制動放射線散乱線解析

##### 2.1 計算方法

Figure 1 に典型的なフロントエンド構成を示す<sup>[4]</sup>。後続機器への熱負荷を減らすため、余分な放射光を吸収するアブソーバやフィルターが配置されている。SPRING-8 のアンジュレータビームラインでは、ラチェット壁から前方 2.8m と 9.7m の 2 カ所にあるの

が代表的な配置である。その各後ろ 1m ほどの位置に、20cm 四方で長さが 30cm の鉛コリメータが設置されている。放射光や高エネルギー X 線を直接あるいは上記コンポーネントからの散乱線を減衰させるためである。

ラチェット面のコンクリート壁は、入射部以外では厚さ 80cm である。ビーム軸上の壁内には、径 15cm、長さ 50cm と 10cm の鉛が挿入され、手前 63cm には、断面 6cm $\times$ 7cm、長さ 40cm のタングステン合金製ビームラインシャッター(MBS)が設置されている。

ガス制動 X 線の線量計算には、FLUKA モンテカルロコード(Ver. 2011.2.11)を用いた。電子エネルギー8GeV、蓄積電流値 200mA( $1.25 \times 10^{18}$  個/秒)の条件下において、真空度 66.5nPa( $10^{-9}$ Torr)、19m の直線部にて発生したガス制動 X 線が、厚さ 5cm の銅円柱に散乱された場合の空間線量分布を MBS 閉の状態にて計算した。

##### 2.2 結果

収納部壁から前方 9.7m のアブソーバに対する結果を Figure 2 に示す。左図は、鉛コリメータがない場合の空間線量分布である。ビーム軸から径方向に離れるにつれ緩やかに線量が減衰している。右図には、ラチェット外壁上の線量分布を示している。横軸は、ビーム軸から垂直方向の距離を表し、縦軸は、入射電子数当たりの線量を表す。0.001pSv/e が 3 $\mu$ Sv/h に相当する。ビーム軸から 20cm の高さにおいて最大となり、その値は 11 $\mu$ Sv/h であった。

次に、鉛コリメータをその銅散乱体の 1m 後方に配置した場合の線量分布を Figure 3 左図に示す。コリメータ影の部分において、線量が大きく減衰しているのがわかる。銅からパイプ内を通過して後方に放出される成分が見られるが、MBS によって遮蔽されている。実際には、下流に別の鉛コリメータがあるので、この成分の遮蔽に寄与していると考えられる。右図は、ラチェット外壁上の線量分布である。ビーム軸から 20cm の線量率は、3 $\mu$ Sv/h に減少した。設

<sup>#</sup>nariyama@spring8.or.jp

計目標値 8.3 $\mu$ Sv/h に対して、9.7m 位置のアブソーバ後方のコリメータは必要であることを確認した。

Figure 4 左図は、鉛コリメータを銅散乱体の 2m 後方に配置した場合の線量分布である。ビーム軸から離れた場所に散乱線が新たに入射している。Figure 4 右図の収納部外壁上の線量率は、20cm と 60cm の線量が高いが、0.54 $\mu$ Sv/h である。鉛コリメータを銅散乱体の 3m 後方に配置した場合は、40cm 位置の線量率が 1.5 $\mu$ Sv/h に増加した。

次に、収納部壁から前方 2.8m の位置にあるアブ

ソーバの結果を Figure 5 に示す。コリメータを設置しない場合でも最大値は 0.0012pSv/e、すなわち 3.6 $\mu$ Sv/h であった。ビームラインシャッターやラチェット壁中の鉛がかなり近接しているためと考えられる。コリメータを後方 1m に設置しても、線量はあまり変わらなかった。しかし、コリメータの効果についてはこの他に、電子損失時や放射光の散乱について評価する必要がある。また、長直線部は長さが 49m あるため、線量値を 2.6 倍する必要がある。

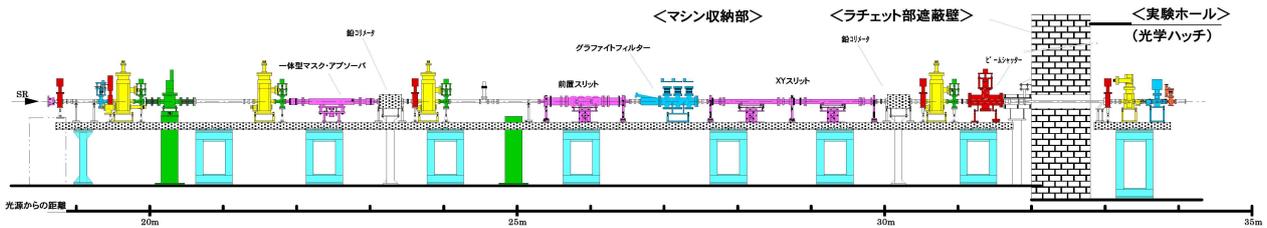


Figure 1: The front end layout of an ID beamline<sup>[4]</sup>.

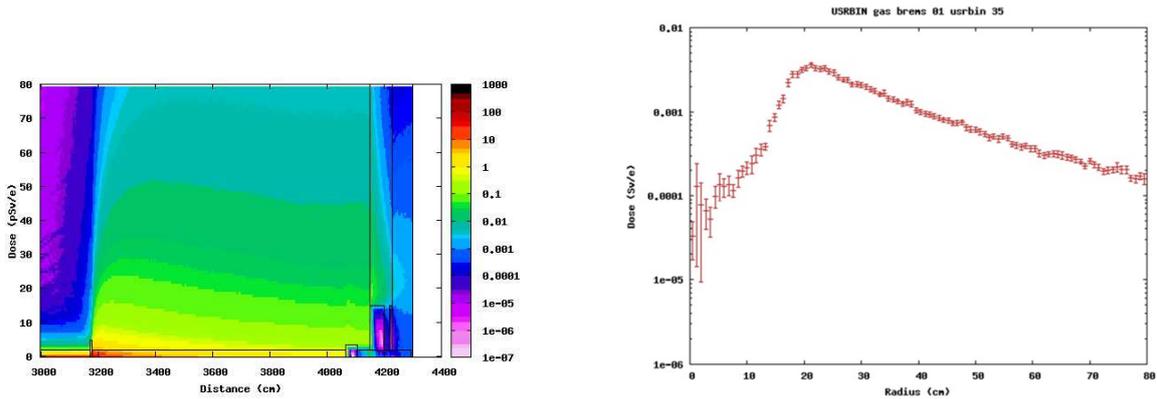


Figure 2: Dose distribution along the front end (left hand) and on the ratchet wall (right hand) with no collimator when the copper scattering is located at 9.7 m before from the ratchet, *i.e.*, at 3175 cm in the left contour.

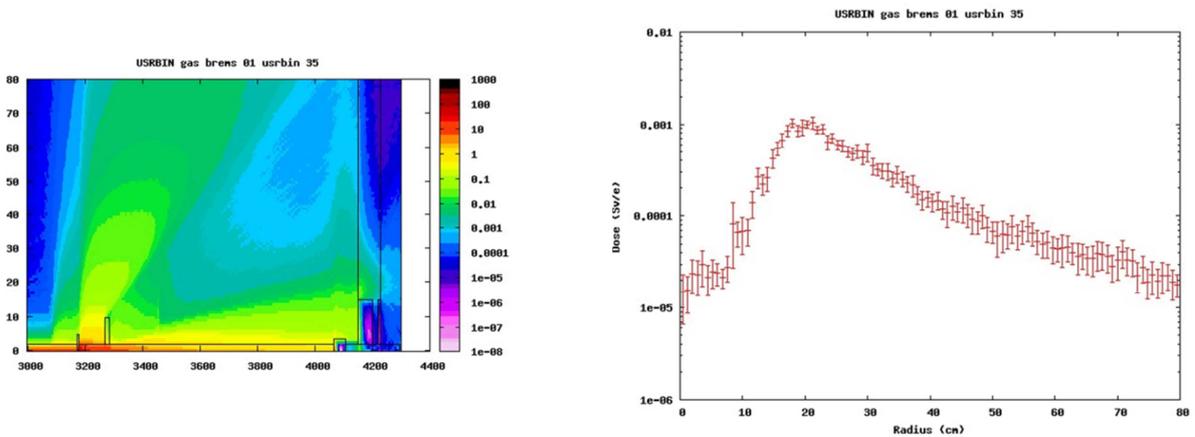


Figure 3: Dose distributions when the lead collimator was set at 1 m behind from the scattering of Fig. 2.

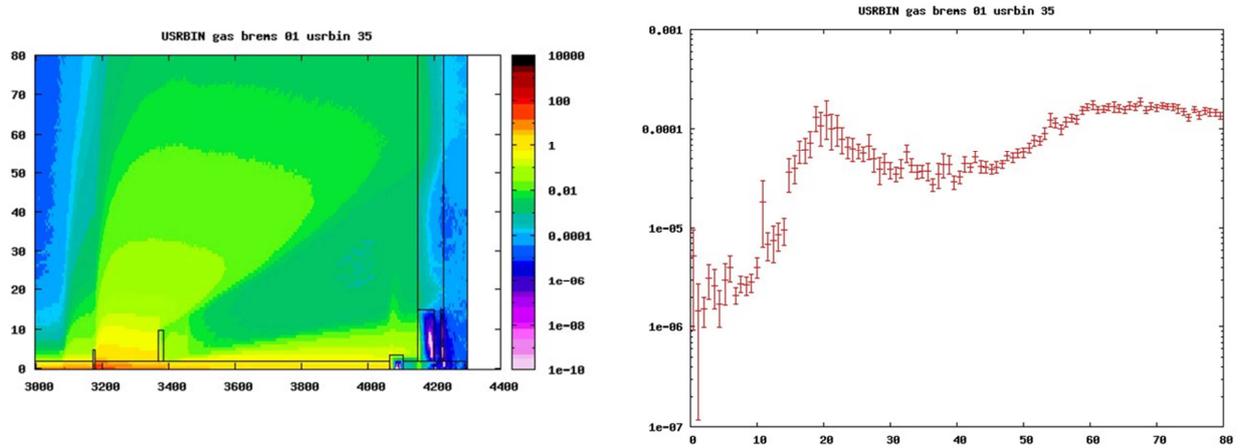


Figure 4: Dose distributions when the collimator was set at 2 m behind from the scattering of Fig. 2.

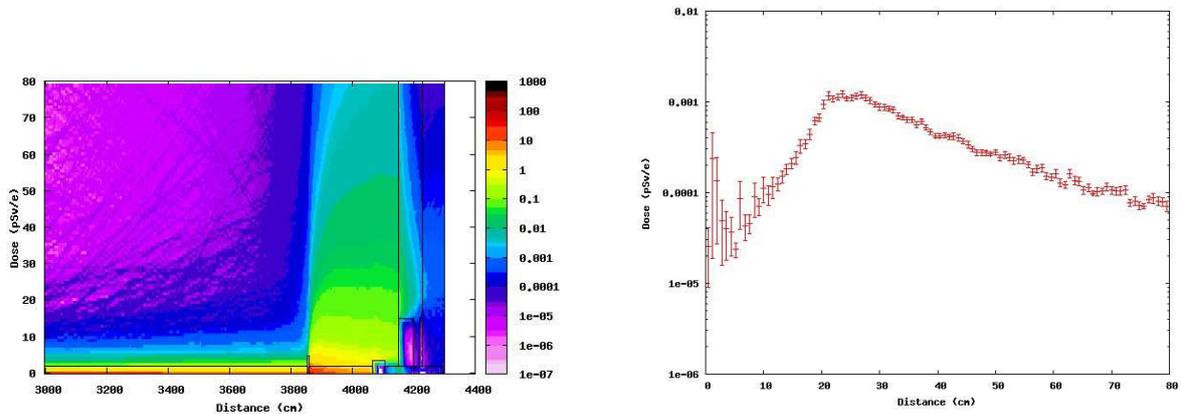


Figure 5: Dose distribution with no collimator when the copper scattering is located at 2.8 m before from the ratchet.

### 3. 中性子線量測定

#### 3.1 測定方法

まず、CR-39 を蓄積リング内全周 1.4km のおよそ等間隔 26 箇所のフロントエンド部に設置し、40 日の運転期間(2012.6.4-7.18)、照射した。その後、線量の高かった長直線部のアンジュレータ ID07 および ID19 に、等間隔 10 箇所に CR-39 を設置し、81 日の運転期間(2012.9.24-12.27)、照射を行った。速中性子には、ポリエチレン減速材からの反跳陽子によるエッチピット数を、熱中性子には窒化ボロンからのアルファ粒子によるエッチピット数を長瀬ランダウア(株)が計数した。検出下限値は、速中性子が 0.2mSv、熱中性子が 0.1mSv である。

#### 3.2 結果

蓄積リング全周の結果を Figure 6 に示す。ID07 および ID19 各々の近辺で 1mSv および 2.1mSv と高い値を得た。どちらも長直線部にある ID(挿入光源)で

ある。最も高い値は、入射部の少し上流にある BL47 の 17.5mSv であった。BL01B1 も入射部の少し下流に当たる。他の地点の値は、再度の測定では下限値以下であった。

ID07 及び ID19 内の測定結果を Figure 7 に示す。ID07 は 8 つのセグメントから構成され(Figure 8)、ID19 は 3 つのユニット、5 つのセグメントから構成される。ビームから各々内周側斜め下方 50, 60cm の位置に線量計を設置した。50mSv 以上の値は、エッチピット数が多いため大きな誤差を含む。どちらも ID の前後部で高く、中央で低い弓形を成していた。ID07 の線量は、ID19 の線量より 20 倍大きく、また速中性子線量も熱中性子線量より 20 倍ほど大きかった。ここで、垂直ベータトロン関数<sup>[2]</sup>の最大地点に点線源があると仮定して計算した曲線を同図に示す。分布は相対的に実験値とほぼ一致した。ID ギャップが狭まれば、損失は増加するはずであるが、この結果を見る限り、ID 内ではなく、両端において強く損失していることが示唆されている。

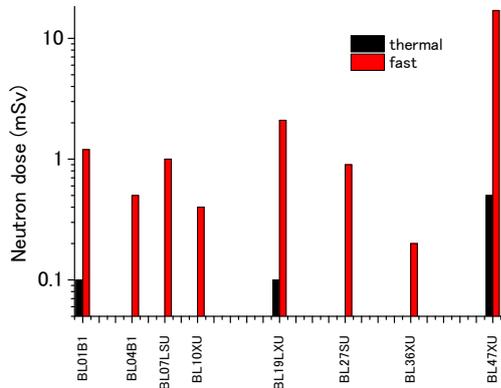


Figure 6: Measured fast and thermal neutron doses with CR-39 at the 26 front ends around the ring.

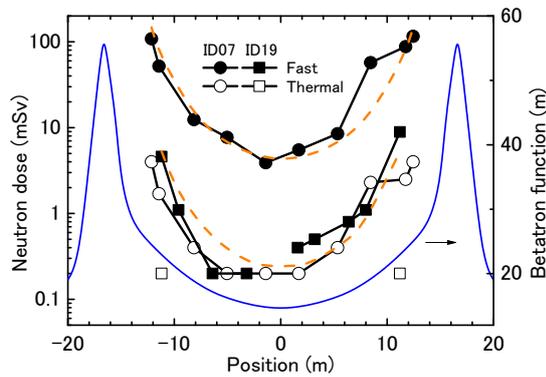


Figure 7: Neutron dose distributions at ID07 and ID19. The orange dotted lines indicate the distribution assuming that the point sources were positioned in the front and end of IDs. The blue line expresses the calculated vertical betatron function at the long straight section<sup>[2]</sup>.



Figure 8: ID07 segments

#### 4. まとめ

SPring-8 電子蓄積リングに多数ある直線部における線量について、計算と測定により評価した。ガス制動 X 線の散乱線に関するモンテカルロ計算の結果では、上流にあるアブソーバからの散乱線を遮蔽するため、鉛コリメータが必要である。アブソーバからの距離は 1~3m で確認した。下流の XY スリットからの散乱線については、鉛コリメータは必要ないことが示されたが、壁との距離が近いこと、放射光の散乱についても調べる必要がある。これは、個々のビームラインにおいて異なる。

電子損失は、ID 両端において強く生じていることが示された。これは垂直ベータトロン関数が高い値を取る場所と一致している。すなわち、電子損失は ID ギャップの変化よりはラティス固有の特性に依存していたことになる。

#### 謝辞

CR-39 の測定は、JASRI 挿入光源・フロントエンドグループ及び安全管理室の協力を得て実施した。

#### 参考文献

- [1] A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fassò, and J. Ranft, "FLUKA: a multi-particle transport code", CERN-2005-10 (2005), INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773
- [2] Takao, M., Ohshima, T., Sasaki, S., Schimizu, J., Soutome, K., Tanaka, H., "Injection beam loss at the SPring-8 storage ring", Proc. EPAC2004, 2004
- [3] Nariyama, N., Magome T., Ohishi M., Yonehara H., "High-dose dosimetry system at SPring-8", Radiat. Mea. 41, S274-S278, 2007
- [4] 日本放射光学学会、増補版放射光ビームライン光学技術入門, 2013