

MONTE CARLO CALCULATIONS OF PHOTON AND NEUTRON DOSES AROUND SPRING-8 ELECTRON BEAM DUMPS

Nobuteru Nariyama

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

Photon and neutron doses around the L2 and L3 electron beam dumps in SPring-8 were calculated with a Monte Carlo code FLUKA. In the calculations, 1-GeV electrons were incident to each dump. For the L2 dump, the doses at the exit of the penetration holes for Synchrotron and L3BT were the critical points to set the additional shields when the safety interlock system was updated. The results were compared with the experimental values, and neutrons from the L2 dump were found to contribute by 20% and 33% to the neutron doses at the exit of the holes in Synchrotron and L3BT, respectively. For the photon doses, other loss points were dominant sources.

SPring-8 電子ビームダンプ周りの光子および中性子線量モンテカルロ解析

1. はじめに

SPring-8 では 2010 年 10 月より、加速器安全インターロックシステムが「運転モード管理」から「エリア管理」に移行された^[1]。これは、全エリアをリニアック(Li)、シンクロトロン(Sy)、蓄積リング(SR)、L3、ニュースバル(NS)の 5 つに区分し(Fig.1)、エリア毎に独立して RF、電子入射の許可を出すことに特色がある。したがって、従来は運転中、人が立ち入れなかったエリア、たとえば、線形加速器のみが運転中の場合、シンクロトロンや L3 ビームトランスポート内に人が立ち入れるようにする必要が生じた。線量が基準値を超えていれば、追加遮蔽を施す必要が生じ、その設計のためには加速器内の線源強度分布が必要となる。そこで、2009 年 7 月から 12 月にかけて、L2 および L3 ダンプ入射時の加速器収納部内の線量分布測定を実施したところ、貫通孔出口 2 カ所において γ 線線量が、1 ヶ所において中性子線量が基準値を超えることが明らかになった。そこで、線量分布の測定値に基づき、局所遮蔽を施した^[2]。線量分布は、複数箇所でのロスを重ね合わせになっており、正確にシミュレーションできるダンプ部からの寄与がわかれば、他からの成分、たとえばシケイン等からの寄与もおおよそ推測することが可能になる。そこで、今回、L2 および L3 ダンプに加速電子が入射したときの周辺的光子および中性子線量分布を、モンテカルロコードを用いて計算した。実験値との比較とあわせて報告する。

2. 計算方法

計算には光核反応による中性子発生を取り扱える FLUKA コード(Ver. 2011.2.11)を用いた^[3]。Flair(Ver. 0.9-7)ユーザーインターフェイス^[4]上において入力データを作成し、計算実行と結果の出力を行った。OS は Fedora16(64 ビット)である。Intel Xeon の 4 コアを用いた並列計算を実施し、 γ 線および中性子線量当量を各々計算した。

L2 ダンプは電子源から 1GeV に加速された電子が直に入射されるダンプである。91cm ϕ の鉄に 29.5cm ϕ の孔が開いている(Fig.2 左)。Fig.1 の Li 内の赤四角の位置にあり、入射部から約 150m 離れている。シンクロトロン、L3BT、ニュースバルに輸送される電子はこの手前で左右に分岐され、その分岐線が Li と Sy 及び L3 エリア境界のコンクリート遮蔽体を貫く孔の出口を基準値以下に抑える必要があった。孔の直径は、シンクロトロン側で 25cm、L3 側で 30cm と 50cm の 2 段ダクトである。計算では、線形加速器中流から最下流のその貫通孔までの線量分布を求めた。

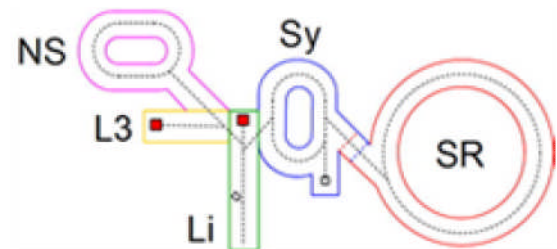


Fig.1: Five areas defined in the updated safety interlock system: linac, synchrotron, storage ring, L3BT and New SUBARU. The red squares denote L2 and L3 dumps.

L3 ダンプは、L3 ビームトランスポート(BT)内の終端に位置し (Fig.1)、水平から下 30 度方向に向けた床下にある(Fig.2 右)。厚さ 45cm の鉄で囲まれている。計算では、1GeV 電子ダンプ入射時の、ダンプ付近の室内から最下流出口までの線量を計算した。

測定時は 1GeV、10pps、40ns で運転され、L2 ダンプへの電子数が 3.35×10^{15} 個、L3 ダンプへは 1.75×10^{15} 個であった^[2]。これは 1 週間に許可された量の各々 1/17、1/2.1 である。

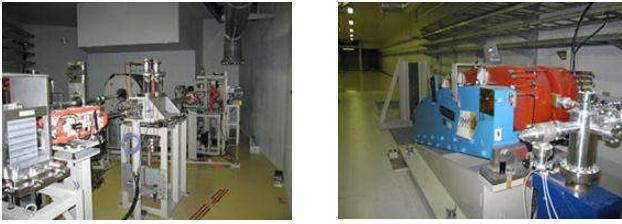


Fig.2: L2 (left) and L3 (right) dumps.

3. 結果、考察

3.1 L2 ダンプ貫通孔

L2 ダンプ付近の光子および中性子線量分布の計算結果を Fig.3 に示す。床から 140cm のビーム高さの値で、単位は $10^{-12}\text{Sv/electron}$ である。光子は前方性がかなり強く、同時にダンプの開口から上流方向にも指向性をもって放出されていることがわかる。一方、中性子の方はもっと等方に近い分布をしている。計算値は、シンクロトロン貫通孔出口で $40\mu\text{Sv}$ 、L3 貫通孔出口で $11\mu\text{Sv}$ であった。ほぼ中性子の寄与による。同図では γ 線が L3 側に出ているように見えるが、モンテカルロ法であるので乱数によりたまたまカウントされたもので統計誤差の範囲内に入るほど弱い。

測定値はシンクロトロン貫通孔出口で γ 線が $1150\mu\text{Sv}$ 、中性子が $200\mu\text{Sv}$ 、L3 貫通孔出口で γ 線が $24\mu\text{Sv}$ 、中性子が $33\mu\text{Sv}$ であった。レムカウンターの測定値は $2\sim 3\mu\text{Sv}$ とずっと小さく、これはスペースの関係上、孔から少し離れた場所に設置したためと考えられる。上記の値を示したバブル検出器は、孔出口近傍に設置した。Sy、L3 各々の中性子に関しては、ダンプからの寄与にプラスして、シケイン等における電子ロスからの高エネルギー X 線による発生中性子が影響したと考えられる。光子線量も測定値の方がずっと高く、これも 30m 手前にあるシケイン付近の γ 線量が高いことから、その寄与によると判断できる。シンクロトロン側は γ 線、中性子とも基準値を越えていたため、貫通孔手前に鉛 16cm とポリエチレン 10cm、貫通孔上にポリエチレン 10cm の局所遮蔽をそれぞれ設置した。設置後の線量は、 γ 線が $65\mu\text{Sv}$ 、中性子が $14\mu\text{Sv}$ まで減少した(定格換算)。これは運転状態により多少、変動する。

ダンプ横のシンクロトロン内の壁で中性子が $13\mu\text{Sv}$ ほどある(Fig.3)。レムカウンターによる実測値も $2.4\mu\text{Sv}$ であった。

線形加速器内部では、ダンプ真横のシンクロトロン側壁で γ 線が 1.1mSv 、中性子が 57mSv となった。一方、測定値は γ 線が 36mSv 、中性子が 48mSv である。貫通孔入口では、計算は Sy 側が γ 線 0.70mSv 、中性子 14mSv あり、L3 側が γ 線 0.39mSv 、中性子 16mSv であった。一方、測定値は Sy 側が γ 線 26mSv 、中性子 17mSv であり、L3 側が γ 線 10mSv 、中性子 42mSv であった。中性子は測定値と

良く一致したが、 γ 線は他のロスによるものと結論づけられる。

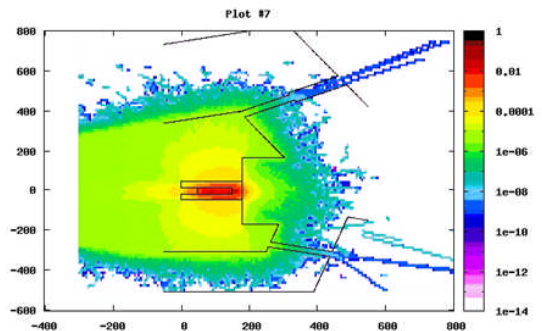
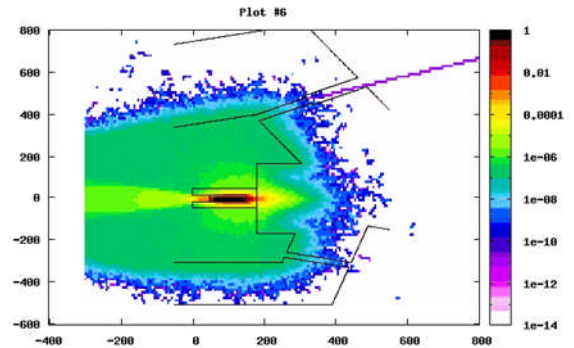


Fig.3: Photon (upper) and neutron (bottom) dose distributions at the beam height around L2 beam dump. The units of the dose and the positions are pSv/e⁻ and cm.

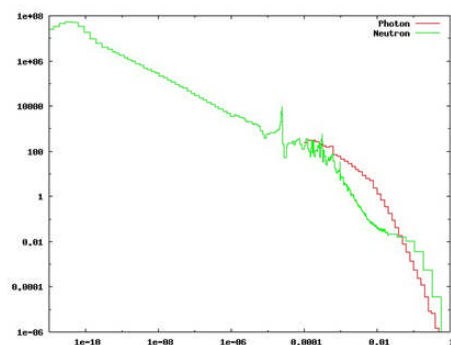


Fig.4: Calculated photon and neutron fluence emitted from iron to air. The X-axis denotes the energy (GeV) and Y-axis shows the fluence (particles/cm²).

Fig.4 にダンプ鉄から空气中に放出される光子と中性子のスペクトル計算結果を示す。光子は、制動放射線の典型的なスペクトルであり、中性子は光核反応による発生中性子から減速されたスペクトルである。数十 keV 付近に見える上下ピークは、鉄の断面積の構造に対応したものである。

3.2 L2 ダンプ手前

Fig.5 に線形加速器下流部全域の光子および中性子線量分布を示す。光子の場合、ほとんどダンプから上流方向へ指向性をもって放出され、脇に外れ迷路付近に来る場合は少ないことがわかる。一方、中性子はダンプ付近の減衰が若干大きいこと、脇にもかなり飛んで来ることが特徴である。光子、中性子とも構造支持用の2本の柱が、偶然、一定の遮蔽の役割を發揮している。計算値は、X=-50m, Y=-4mの位置でγ線が10μSv、中性子が34μSvであった。一方、測定値はγ線が1100μSv、中性子が800μSvとずっと高いため、これはダンプからの寄与ではないと判断される。X=-50m, Y=-15m(扉前)位置の計算値は十分低く、測定値もγ線が40μSvであった。これらの線量は、それより上流部の例えばシケインでのロスによるものと考えられる。

Fig.5の高さ方向の積分範囲はFig.3の24cm(貫通孔の径に対応)に比べて120cmと広いため、統計誤差が小さくなっており、ダンプ真横のシンクロトン側にて粒子がカウントされている。しかし、線量値としては十分小さい。

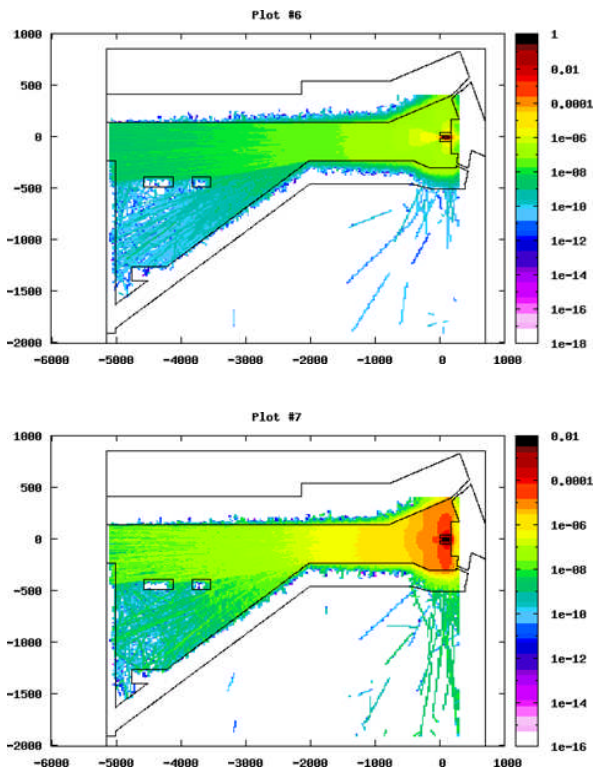


Fig.5: Photon (upper) and neutron (bottom) dose distributions at the beam height in the linac tunnel.

3.3 L3 ダンプ周り

L3 ダンプ付近の光子および中性子線量分布をFig.6に示す。立面図である。光子、中性子ともダ

ンプ開口方向の斜め上上流方向と真上へ強く放出されており、中性子はトンネルの前後にも良く散乱されている。ダンプの真上に厚さ5cmの鉄板が置かれており、これが局所的な遮蔽体としてγ線、中性子の線量分布に影響を与えている。天井部では中性子の方が線量が高く、天井部内側でγ線が0.28mSv、中性子が15mSvあり、外側は無視できる量であった。サーベイメータによる測定値も、外側でγ線0.7μSv/hに対し、中性子は1.54μSv/hあった。

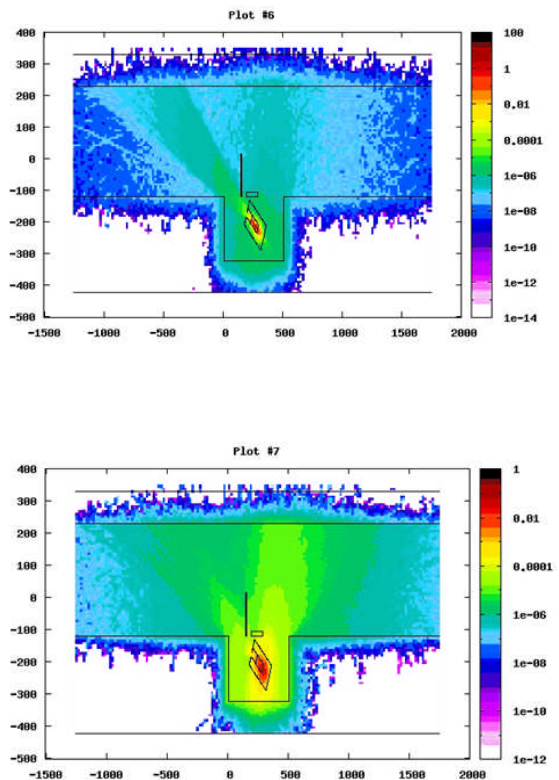


Fig.6: Elevation views of the photon (upper) and neutron (bottom) dose distributions around L3 dump.

平面分布図をFig.7に示す。高さ方向の積分範囲により、最大値の位置は必ずしもダンプ位置と一致していない。ダンプ真横の側壁内側では、γ線が0.33mSv、中性子が8.5mSvであった。一方、測定値は、γ線が35mSv、中性子が1.3mSvである。中性子はダンプからの寄与が有意にあったと考えられるが、γ線はダンプからではなく、上流からのロスによると考えられる。ビームライン延長上の壁上で、γ線が2.1μSv、中性子が19μSvである。これは測定値であるγ線1.5mSv、中性子が測定限界(100μSv)以下と比べると、γ線量がかかなり低い。ダンプからの放射線ではなく、上流でのロスによるγ線と思われる。

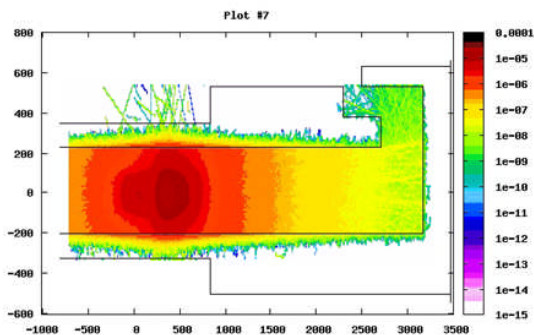
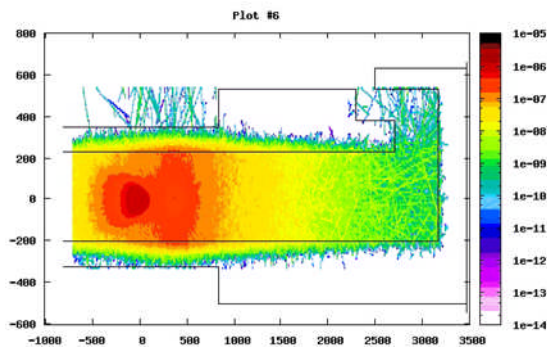


Fig.7: Plans of the photon (upper) and neutron (bottom) dose distributions at the beam height in the downstream of L3 dump.

4. まとめ

モンテカルロ計算コードを用いて、1GeV 電子の L2 および L3 ダンプ入射時の γ 線および中性子線量分布を計算した。L2 ダンプからの中性子は貫通孔出口の線量に有意に影響していることが示された。これは、ダンプ周りの中性子線量分布測定値から予測されていたことが確認されたことになり、設置したポリエチレン遮蔽が一定の役割を担っていることの裏付けとなった。しかし他の場所ではシケイン等からの寄与が大きいことが確かめられた。L3BT についても、 γ 線量については、ダンプからの寄与よりは、スリットや偏向電磁石等でのロスによる寄与の方が大きい。こうした線源は、運転状態により線量がかなり左右されるため、今回のように複数回、実測して線源の特性を押さえておくことが遮蔽追加に有効であった。

参考文献

- [1] C. Saji, *et al.*, "Upgrade of accelerator radiation safety system for SPring-8 (2)", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.

- [2] N. Nariyama, S. Suzuki, Y. Tsuduki, and M. Ohkita, SPring-8 Document A 2010-003 (2010).
- [3] 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.
- [4] V.Vlachoudis, "FLAIR: A Powerful But User Friendly Graphical Interface For FLUKA" Proc. Int. Conf. on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics, Saratoga Springs, New York, 2009.