

# SLAC-LCLS の放射線安全設計

佐波 俊哉<sup>\*1,\*2</sup>

## Radiation Safety Design for SLAC-LCLS

Toshiya SANAMI<sup>\*1,\*2</sup>

### Abstract

Radiation safety design for the Linac Coherent Light Source (LCLS), which provides ultra fast intense X-ray FEL, was performed at SLAC national accelerator laboratory. The LCLS has specific layout, i.e, an experimental area having through holes sits in front of intense high energy electron beam. For this condition extensive simulations and experiments had been carried out during several years to find out solutions to meet requirements of radiation dose rates under normal operation, mis-steering condition and system failure. In this effort, prompt dose rate in accessible area and ground water activity were estimated for shielding structure of 17 GeV, 5 kW main dump. To obtain dose rate in the experimental area, production of muon and high energy bremsstrahlung were estimated for beam losses of a bending magnet and thin insertion devices at more than 70 m upstream of the area. Dose rates for failure cases of beam containment system and personal protection system were estimated to ensure that the dose rate in accessible area is kept below the limit under these conditions. The accuracy of the design was confirmed during commissioning phase through field measurements prior to user runs.

## 1. はじめに

Linac Coherent Light Source (LCLS) は米国 SLAC 国立加速器研究所 (以下 SLAC) に建設された, 世界初の X 線自由電子レーザー (Free electron laser-FEL) 施設である. LCLS は 2009 年 4 月に FEL 光の発振を確認し, 2009 年 10 月からユーザー運転を開始しているが, 筆者は LCLS の設計, 建設が進められていた 2006 年から 2007 年と, コミッショニングが行われていた 2009 年に SLAC に滞在し, Radiation Physics (SLAC-RP) グループの一員として LCLS の放射線安全設計に携わる機会を得た. 本稿ではその際の放射線安全設計の概要を述べ, SLAC の加速器安全設計について述べることにしたい. これは, 今後国際協力で建設されると予想される大型加速器の設計を行う際に有用であると考えられるからである. 例えば, International Linear Collider (ILC) では, どのサイトが選定されるとも, ILC に参画する国・研究所の放射線安全設計基準を満たすために, 参画国・研究所の設計基準のうちもっとも安全側のものを採用することが検討されている. また, ILC はこれまでの加

速器と比して非常に低いビーム損失率を仮定していることから, 機器故障等で全出力が一点で失われた場合との損失率の乖離が大きく, 通常運転よりも機器故障時の漏洩線量率を抑えるための遮蔽設計が必要となる. SLAC は ILC に参画を期待される研究所の一つであるとともに機器故障時の漏洩線量率について明確な基準を持ち, 加速器の安全設計に取り入れている. LCLS は, その固有の加速器配置形態から筆者が担当したビームダンプまわりの遮蔽設計に同様の問題が内在しており, これらのことを知るためにより材料となると考えられる.

## 2. LCLS の概要

LCLS の詳細については <http://lcls.slac.stanford.edu> および参考文献<sup>1,2)</sup>を参照されたい. 本稿では LCLS の概要について放射線安全設計の観点から必要な事項を述べるにとどめる. LCLS の全体像とビームパラメータについて図 1 に示す. SLAC の 2 mile リニアックのうち下流部分の約 1/3 の場所に新設した加速空洞と大出力レーザー, 銅カソードからなる電子銃から生成した低エミッタンス電子ビームを, S-

\*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: toshiya.sanami@kek.jp)

\*2 SLAC 国立加速器研究所 Department associate, SLAC National Accelerator Laboratory

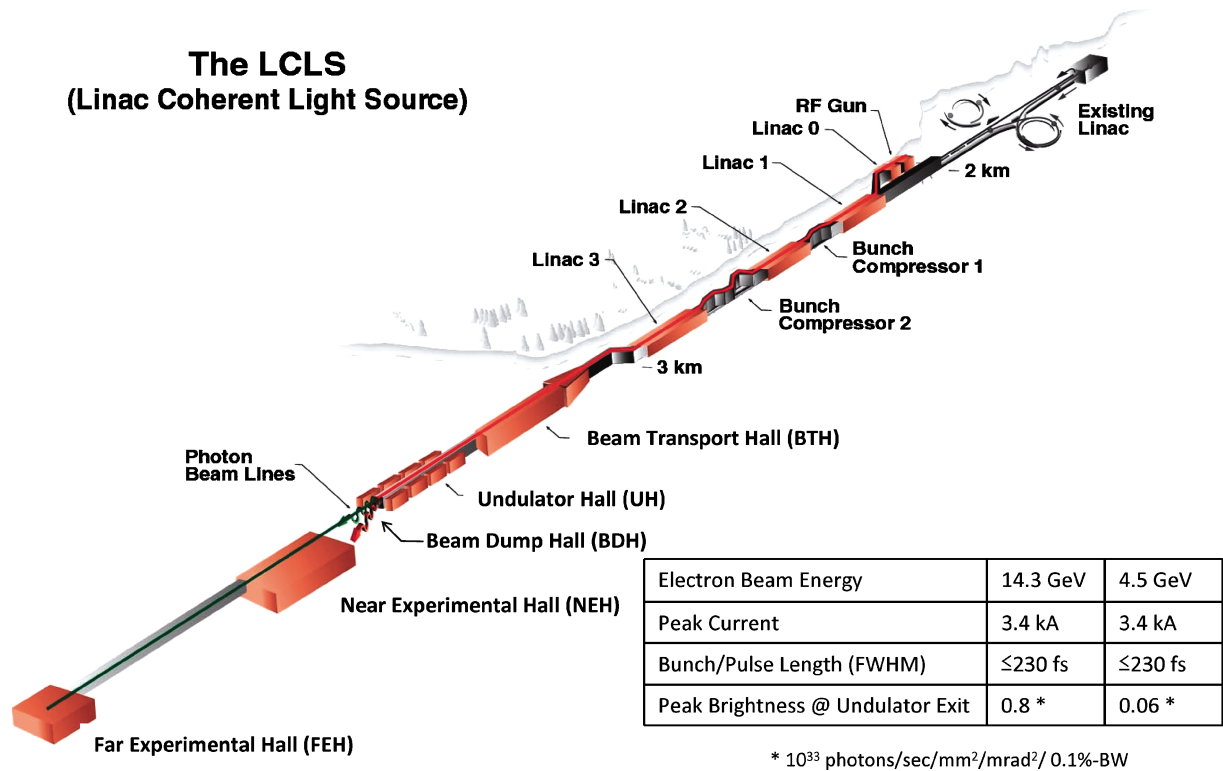


図1 LCLS の全体構成とビームパラメータ

band 加速管で最大 17 GeV, 2 kW まで加速する。加速されたビームは従前 2 mile リニアックの終端部に設置されていた Final Focus Test Beam line (FFTB) を撤去し, 新設された Beam Transfer Hall (BTH) 内に導かれる。BTH は今後のビームライン拡張を見こんだ Head house 部分があり, ビームはここを抜けて 2 mile リニアック正面の丘に掘られたトンネル中にある Undulator Hall (UH) に導かれる。UH には合計 33 台の undulator が設置されており, ここで電子ビームは共振変調され, FEL 光が励振される。FEL 光励振後の電子ビームは Beam Dump Hall (BDH) の偏向電磁石で下方方向に曲げられ, 鉄製のビームダンプに捨てられる。一方, FEL 光は偏向電磁石を直進し, Front End Enclosure (FEE) に導かれる。FEE 内にはビームアッテネータ, 診断機器, ミラー, コリメータが設置されており, 下流に位置する Near Experimental Hall (NEH) の 3 本のビームラインに FEL 光を供する。FEL 光はさらに X-Ray Transport tunnel (XRT) を経て Far Experimental Hall (FEH) に導かれる。

このように LCLS は上流から下流まで直線構造を持つことから, (1)上流におけるビームロスから生成した  $\mu$  粒子, 高エネルギー制動放射線に起因する下流 FEE, NEH での線量率上昇, (2)機器故障などにおい

てビームが直進したときの安全の担保, と言った特有の問題があることが知れる。これまでのリング型光源でも同様な問題が見られる場合もあるが, LCLS では高出力ビームが連続的に供給されることから, より設計には慎重さが求められる。

### 3. SLAC の放射線安全設計基準

SLAC の放射線安全設計基準は Radiation Safety System<sup>3)</sup> という文書にまとめられている。この中には遮蔽設計の基準となる線量率が, Normal operation, Mis-steering conditions, System failure の 3 状態について規定されている。これらの線量上限値を表 1 に示す。

Normal operation は通常の運転状態を指しており, ビーム光学から推定されるビームロス, コリメータやダンプなどのビームロスの他, ビーム診断装置 (LCLS で検討されたものは Beam Finding Wire - BFW, Optical Transition Radiation monitor - OTR) などを用いた場合のビームロスについても検討される。このことは BFW や OTR の位置を設計時に確定し, 変更の際には放射線安全評価を必要とすること, 場合によっては使用時間制限等の管理対象となり得ることを意味している。特に LCLS では, これらビーム診断機器が発生する高いエネルギーと指向性を

表 1 SLAC の遮蔽設計のための線量率基準

Operation Conditions	Dose equivalent Rate
Normal operation	10 mSv/year (5 mSv/h for 2000 h radiological worker occupancy) 1 mSv/year (0.5 mSv/h for 2000 h non-radiological worker occupancy)
Miss steering conditions	4 mSv/h
System failure	250 mSv/h, but 30 mSv/event

有する制動放射線が前方方向に位置する実験室の線量上昇に寄与するために評価が重要である。遮蔽は外側表面から 30 cm の位置で 10 mSv/year 以下の線量率を与えるように設計されなければならない。これは年間 2000 時間の放射線業務従事者の滞在時間を想定すると、5  $\mu$ Sv/h の線量率に相当する。放射線業務従事者でない人に対しては 1 mSv/year が設定されている。同じく 2000 時間の滞在に対しては 0.5  $\mu$ Sv/h の線量率である。

Mis-steering conditions はビームの調整等に係わるオペレータの誤操作、機器の故障などでビームがある限定された領域で損失される状態として定義される。このような状態は Beam Containment System (BCS) により回避されるが、それまでに至らないビームロスとして仮定される設計基準線量率は 4 mSv/h とされている。実際の放射線安全設計では、偏向電磁石、収束電磁石の設定値からのズレを仮定する。ズレの量としては 5-10% 程度を仮定する場合が多かった。

System failure は mis-steering conditions に相当する状態が BCS の故障等により継続的に続いた場合として定義される。同様に Personal Protection System (PPS) の故障による線量上昇についても、System failure として見積もる。このような状態での設計基準線量率は 250 mSv/h または Burn through monitor (BTM: 後述) によるビーム停止までの積算線量として 30 mSv/event である。損失ビームとしては Maximum Credible Beam が仮定される。これは BCS が動作しなかった場合に損失場所に届きうる最大出力のビームとされる。実際の設計では、加速器構成機器の故障、すなわち電磁石電源が落ちてビームの制御が効かなかったり、ゲートバルブが予期せず閉まったり、といったことを仮定する。これらの仮定は遮蔽の能力を決めるためのものであり、実際に起こり得ないようハードウェアが設計されるのはもちろんのことである。

#### 4. 放射線安全設計に用いる計算手法

高エネルギー電子加速器の遮蔽設計には半経験式による手法と、モンテカルロ法による手法が使われる。

通常のビームロスと遮蔽の組み合わせ、例えばビームがターゲットやダンプに衝突して生成した 2 次放射線を側方に位置する厚みのある遮蔽体で遮蔽すると言った場合は半経験式による手法が使われる。一方、上記以外の状況、前方方向の遮蔽や迷路、ダクトの評価などにはモンテカルロコードが使用される。

SHIELD11<sup>4)</sup> は SLAC で開発されたコードであり、PEPII 計画の遮蔽設計で用いられた、15 GeV 電子による実験値を元にした Jenkins ら<sup>5)</sup> の半経験式に基づいている。LCLS についても適用可能な範囲、BTH のトンネル部分のコンクリート厚み等について SHIELD11 コードによる遮蔽設計がされた。

一方で、LCLS では運転中に人が立ち入る場所である FEE, NEH がビームの進行方向に位置し、半経験式での評価が難しい。そこで、前方方向の評価には 3 次元多粒子輸送モンテカルロコード、FLUKA<sup>6,7)</sup> と MARS<sup>8,9)</sup> を用いた。この 2 つのコードはどちらも高エネルギー電子の相互作用から始まる一連の放射線輸送を計算することができ、遮蔽設計に必要な線量率の導出や、熱中性子までの輸送などの計算が可能である。また、これらのコードは多くの実験値に対してベンチマークがなされている。複数のコードを設計に用いたのは SLAC-RP の方針でもあり、モンテカルロ法は入力や体系を間違えても答えが出てきてしまうので、その妥当性をクロスチェックするためである。

#### 5. LCLS のダンプラインの放射線安全設計

LCLS の電子ダンプライン周辺の放射線安全設計のうち、3 つの特徴的なケース、(1) Main dump の評価、(2) FEE, NEH の線量率評価、(3) System failure 時の安全解析、について述べる。図 2 に BDH-FEE-NEH の平面図と縦断面図を示す。図中には安全に係わる機器についてもあわせて示している。灰色がコンクリート、水色が空気、茶色が土、紫色が鉄をそれぞれ表している。図の左側が上流で、UH がある。Undulator で FEL 光を発生した電子ビームは偏向電磁石 BYD により下方向 15 度に曲げられ、Main dump に導かれる。FEL 光は BYD を直進し、PCPM1, PCPM2 の

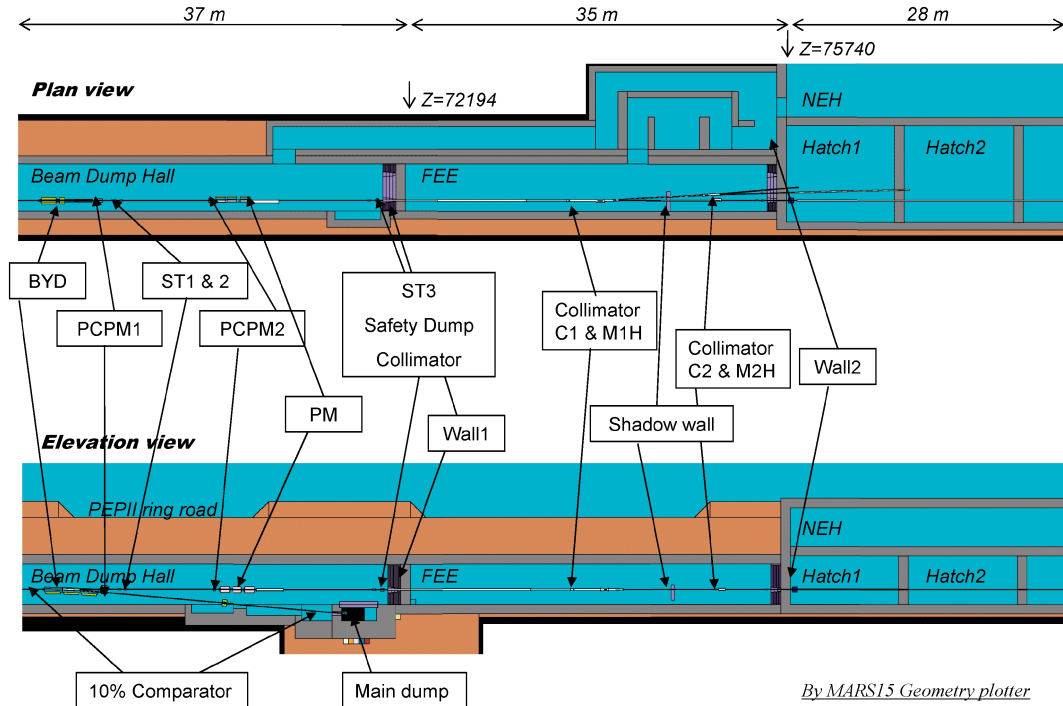


図2 LCLS の電子ビームダンプ付近の遮蔽、機器の構成図

2つのコリメータを通過し、FEEへ入射する。BDHとFEEは120 cm厚の鉄と90 cm厚のコンクリート(Wall1)で仕切られている。ビーム運転中にFEEに入域する場合はビームストッパー(ST1, ST2<sup>†1</sup>, ST3)がビームラインに挿入される。PMは永久磁石で、万が一電子ビームがBYDを直進した場合、ビームがFEEに入射しないよう偏向させ、Safety dump (SDUMP)に導く。FEEには各種の機器が設置されるが、そのうち重要なのはコリメータ(C1, C2)とミラー(M1H, M2H)である。FEL光はM1H, M2Hにより向きを変えられ、コリメータを通過してNEHに入射する。FEEとNEHの間は90 cm厚の鉄と90 cm厚のコンクリート(Wall2)で仕切られている。

ビームの最大定格は17 GeV, 2 kWである。このビームがFEL光を生成しMain dumpまで導かれる間に想定されるビームロス<sup>10)</sup>を表2に示す。定常的なビーム損失としてBYDでの20 W, Main dumpでの5 kW(2 kWが最大であるがビームラインを将来2本にする計画があることから余裕を持って5 kWとされた)である。その他に一時的なビーム損失として、OTR, BFWでの2 kWが設定されている。これらのビームロスは加速器のデザインから決定され、Phys-

表2 Undulator 通過後のビームロス

Loss components, conditions	Quantity
OTR, BFW33, tentative for tuning	2000 W
BYD, continuous	20 W
Main dump, continuous	5000 W

ics Requirement Document (PRD)として放射線安全設計に先立ち与えられる。Radiation Safety Officer (RSO)は必要に応じてPRDの内容をRadiation Safety Committee (RSC)に諮問することができる。これにより放射線安全設計の基本パラメータであるビーム損失率が明確に与えられ、設計が進められる。PRDに記述のないビームロスや付帯条件は放射線安全設計では考慮されない。

PRDを元に放射線安全設計に係わるRadiation Physics Note (RPnote), Engineering Specification Document (ESD)が用意される。RPnoteはESDを参照して機器の構造等の情報を得て遮蔽に係わる設計を行い、ESDはRPnoteを参照して機器の機械設計を行う。ESDで顕在化する実装における問題点、遮蔽体構成物の組み合わせや、隙間などについては、遮蔽設計の実施の際に工程管理まで含めた検討がなされ、その結果はRPnote, ESDにそれぞれ反映される。

<sup>†1</sup> ST2は本安全解析の結果実装されなかった。

### 5.1 Main dump の放射線安全設計

Main dump は LCLS の最大 17 GeV, 5 kW のビームを受け止める。Main dump に 5 kW のビームが入射したときに満たすべき条件は、(1) FEE での線量率が  $5 \mu\text{Sv/h}$  以下、(2) Main dump 外側への漏洩放射線により生成する放射能が十分低い、(3) Main dump 上部の地表面の線量率が  $0.5 \mu\text{Sv/h}$  以下、である。

図 3 に Main dump 周辺の縦断面図と MARS コードで計算した線量率分布を示す。この線量分布計算では、計算時間の短縮のために、透過力の高く、指向性を持つ  $\mu$  粒子の寄与を除いてある。FEE の線量率、地上部分の線量率とも目標値を下回っていることが確認できる。

図中に現れない  $\mu$  粒子の寄与は別途計算し、FEE の線量上昇には直接的には寄与しないことを確認している。これは BYD の偏向角が適切に選択された結果である。シミュレーションにより得られた  $\mu$  粒子の角度広がりについては SLAC の End Station A で行われた実験<sup>11)</sup>を計算で再現することにより妥当性を確認した<sup>12)</sup>。

土中の放射能については、ダンプの周囲の土を  $30 \text{ cm}^3$  の領域に分け、土と 2 次放射線との反応生成物である  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^3\text{H}$  について MARS コードで求めた。 $^3\text{H}$  については地下水への移行を、(1) 2 kW,

300 days/year の運転、(2)  $1 \text{ m}^3$  の領域において 30 重量パーセントが水、(3) 生成した  $^3\text{H}$  は 100% 水へ移行、(4)  $1 \text{ m/year}$  の水の下降がある、という仮定の下で評価を行った。(4)の水の下降からダンプ外側の領域にとどまり  $^3\text{H}$  の生成を受けるのは長くて 4 年と見積もられる。これらの安全側の仮定にも係わらず、 $^3\text{H}$  の推定濃度は検出限界濃度を下回るという結果が得られた。この高エネルギー電子からの 2 次放射線による水の放射化と生成  $^3\text{H}$  濃度については 2007 年に SLAC End Station A においてベンチマーク実験を行い、計算コードの再現性の確認を行っている<sup>13,14)</sup>。

### 5.2 NEH の放射線安全設計

NEH の線量上昇に寄与するビームロスについての模式図を図 4 に示す。検討すべきビームロスと 2 次放射線は (1) ビームライン上に挿入された機器 (OTR, BFW), および BYD でのビーム損失に伴う高エネルギー制動放射線、(2) これらのビームロスから発生する  $\mu$  粒子、である。(1)の制動放射線の量は、挿入される機器の材質、厚みに依存し、放射線安全設計段階でこれらを規定する必要があった。機器担当者との数回の打ち合わせから、OTR は  $1 \mu\text{m}$  厚みの Al 板、BFW については  $40 \mu\text{m}$  径の炭素線により評価を進めることとなった。 $5 \text{ kW}$  のビームによりこれらが生成する制動放射線のパワーを表 3 に示す<sup>15)</sup>。この制動放射

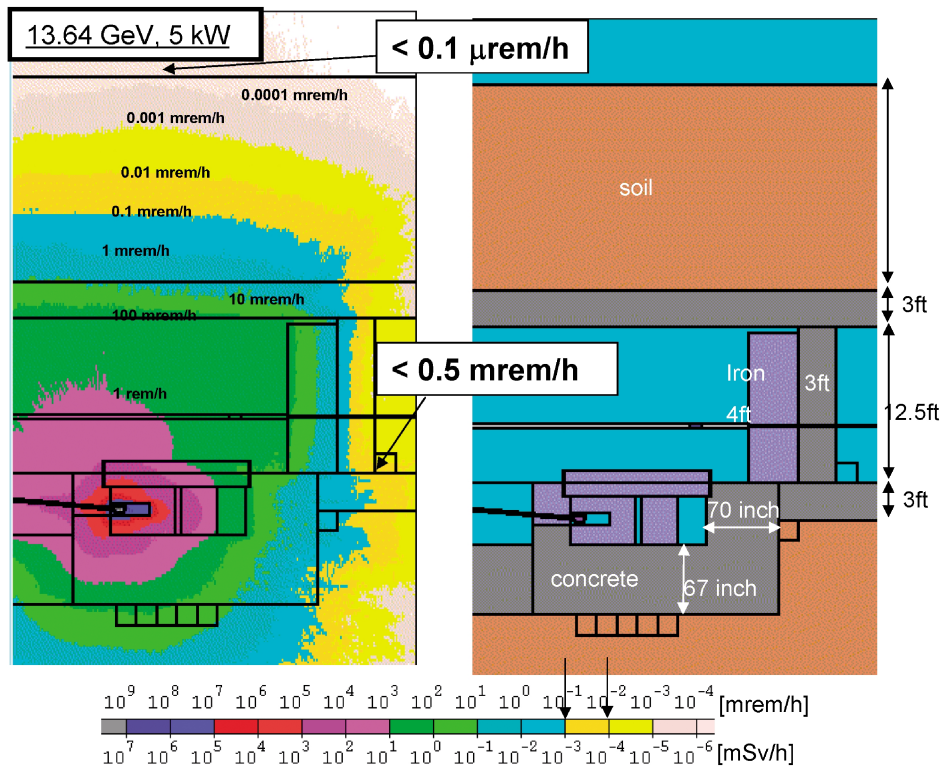


図 3 Main dump からの線量分布

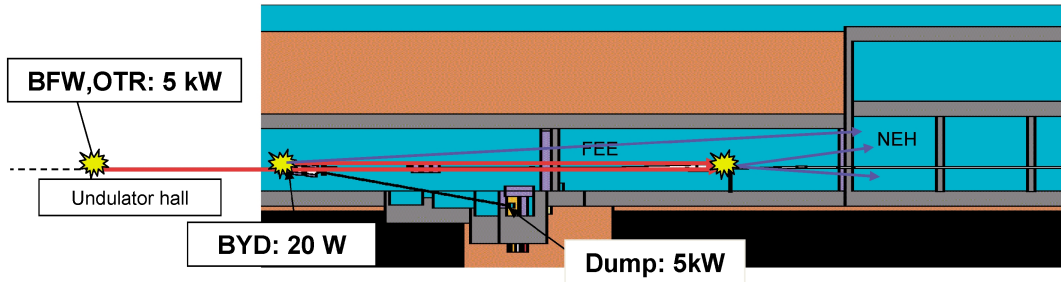


図4 NEHに寄与を及ぼすビームロスの模式図. 赤線が制動放射線, 青線が $\mu$ 粒子を示す

表3 5 kW 運転時に FEE に入射する制動放射線のパワー<sup>15)</sup>

Loss components	Bremsstrahlung to FEE
BFW33 (BFW for last undulator, 40 $\mu\text{m}$ diam)	751 mW
OTR (Al 1 $\mu\text{m}$ )	12 mW
BYD side wall	37 mW

線が FEL 光利用時には FEL 光とともに FEE に入射し, ミラー (M1H) とコリメータ (C1/C2) に衝突して 2 次放射線を生成する. この制動放射線の入射は LCLS の構成上不可避であり, (a) FEE に入射する可能性のある最大の制動放射線パワー, (b) FEE に設置可能な 2 次放射線用の遮蔽, についてシミュレーション結果を元に SLAC-RP 内で議論がもたれた. 結果として, 制動放射線のパワーは 800 mW と見積もり, C1 背後に 30 cm の鉄遮蔽体を設置することにより NEH の線量上昇が許容できる範囲 (0.05 mrem/h 以下) に抑えられることが見いだされた.

### 5.3 機器異常時の線量率評価

BDH 運転中に FEE に, FEE 運転中に NEH に, それぞれ入域するために, 遮蔽壁の他に以下の安全装置が設けられている. (1) Magnet current ratio: BYD と BTH の上流にある Dog-leg の偏向電磁石のコイル電流がハードウェア的に関連づけてあり, Dog-leg を通過したエネルギーの電子ビームは確実に BYD で曲げられるようにする, (2) 10% ビームコンパレータ: BYD の入り口と出口のビーム量を比較し, BYD での過大なビームロスを防ぐ, (3) ST1, 2, 3: BDH ビーム運転時に FEE に入域するために用いるビームストッパー, (4) PM, SDUMP, PCPM1, 2: PM は万が一ビームが BYD を直進してしまった場合にビームが FEE に入射することを防ぐための永久磁石. この時ビームは SDUMP に導かれる. PCPM1,

2 は PM にビームが当たり減磁してしまうのを防ぐための Protection Collimator, (5) C1, 2: NEH に制動放射線が入射するのを防ぐコリメータ, である. これらの装置は BCS および PPS に分類され, これらのうち動的な機器である Magnet Current ratio や, コンパレータ, ストッパーについて故障が生じた場合の線量率の評価を行った. ここで仮定した故障の組み合わせは, (1) 1 BCS failure, (2) 2 BCS failure, (3) 1 BCS + 1 PPS failure, (4) 2 PPS failure の 4 ケースである.

計算例として図 5 に FEE no-access/NEH access 時の 2 BCS failure の場合の線量率分布について示す. この場合は Magnet current ratio とコンパレータが正常でなく, BYD 設定値が不定となり, 最悪の場合は BYD をビームが直進する事態となる. この場合でも, ビームは PM で偏向され, SDump に衝突し, FEE に入射されることはない. NEH の線量率は図 5 より 430  $\mu\text{Sv/h}$  であり, System failure の上限 250 mSv/h を下回っている. 他の場合についても同様であることが計算により確認された.

## 6. 機器の実装

以上の放射線安全設計に基づき実装された機器の写真を, 図 6 に示す. 左写真の ST2 は図 2 の ST3 の位置に設置されたビームストッパーであり, FEE 入室時に上流からの制動放射線と FEL 光を止めるための 2 つのストッパーのうちの 1 つである. ストッパーの表面は FEL 光の熱衝撃に耐えるよう  $\text{B}_4\text{C}$  で覆われている. ストッパーでのビームロスを検知し, ビームを止めるための Protection Ion Chamber (PIC) が 2 組設置されている. この PIC は ST2 の他にも BDH 内に限っても, BYD, Main dump の側方, PCPM1, ST1, PCPM2, SDUMP など, 機器故障時にビームが当たると考えられる場所にインストールされている.

右写真の PCPM1 は BYD の直後に位置し, PCPM2 と共同して PM に 1 次ビーム, 制動放射線, FEL 光が当たるのを防ぐとともに, BYD における

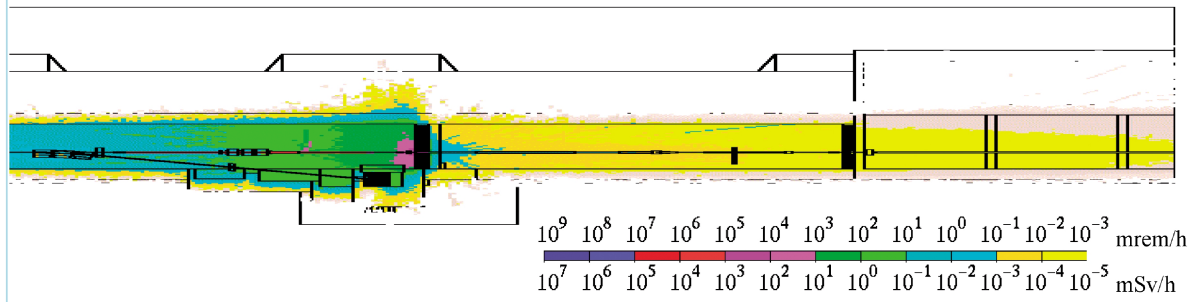


図5 FEE no-access/NEH access時の2 BCS failure に対する線量率計算の結果. 17 GeV, 1 W の場合. 5 kW にスケールした場合 NEH の線量は  $430 \mu\text{Sv/h}$  となり, System failure の  $250 \text{mSv/h}$  を下回る

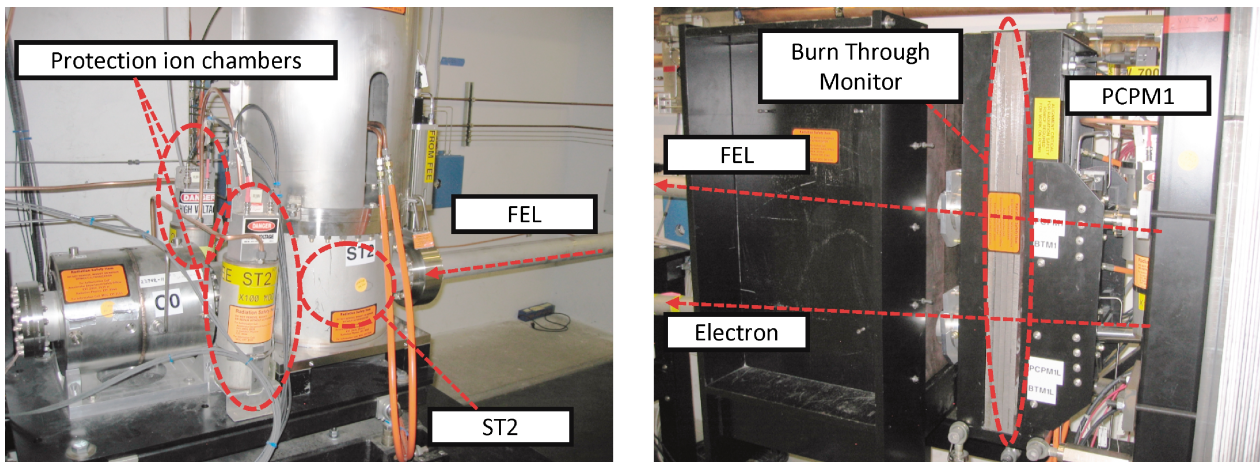


図6 放射線安全設計に基づき実際に設置された機器の例. ST2 (左写真), PCPM1 (右写真). ST2は図2のST3の位置に設置されている (機器異常時の線量評価結果からSTの数を減らしたため). STでのビームロスを検知してビームを止めるためのPICが2組備えられている. PCPM1はBYDの直後に位置し, 厚さ方向中央部にビームロスによる電磁シャワーを検知する, ガス封入型のチェンバー (BTM) を備えている

ビーム損失に起因する制動放射線を止め, また,  $\mu$  粒子の最初の遮蔽となる重要な機器である. このPCPM1は鉄板の積層構造をしており, その厚手方向の中程にはガスを封入した領域を持っている. 機器異常時にPCPM1でビーム損失が起こった場合は, このガスの圧力上昇をハードウェア的に検知してビームを停止する (Burn Through Monitor - BTM). このBTMはLCLSのコリメータおよびSDUMPに実装されており, BCSの一部をなしている.

放射線安全設計の妥当性は2008年末から2009年9月までのコミッショニングにおいて漏洩放射線の実測定が行われることにより確認された.

## 7. おわりに

以上, 概略ではあるがLCLSを例に, SLACの放射線安全設計手法について述べた. LCLSのBeam Dump HallからNear Experimental Hallまでの領域

について, FEL施設に特徴的であり, 他のリング型放射光施設では見られない, (1)ビームダンプ, (2)上流からの制動放射線と $\mu$ 粒子の寄与, (3)機器異常時の線量率の評価, について述べ, 機器の実装例を挙げた. 複数のシミュレーションコードを用い, 一時的にしか使用しない機器のビームロスも含めた安全設計, ビームを閉じ込め機器を守るための多数の装置など, 万全の安全対策が取られている様子がうかがえる. そしてもう一つ特筆すべきは, シミュレーションの結果について, 自ら検証実験を行い, 妥当性を確認するという姿勢である. 今後, 国際協力で大規模加速器の安全設計を進めるに当たり, これまでの設計思想や手法をトレースするだけでは解決できない問題が生じると考えられる. このような時こそ, 手間はかかるがシミュレーションを実験で確認し, 議論を通じて安全システムとして作り上げていくという手法が重要であろう.

## 謝辞

本稿をまとめるきっかけとなった SLAC での研修をサポートしてくださった、高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター長、伴秀一教授を初めとする放射線科学センターの方々に深く御礼を申し上げます。また、SLAC での研修を受け入れていただき、数々のミッションに参加させていただいた Dr. Sayed Rokni をはじめとする SLAC Radiation Physics のメンバーに感謝します。

## 参考文献

- 1) J. Hastings, LCLS: Short X-Ray Optics and Diagnostics on the Linac Coherent Light Source (LCLS), Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Free Electron Laser Conference and 9<sup>th</sup> annual FEL User Workshop, Argonne, IL, USA, 9–13 September (2002).
- 2) C. Limborg, Design Considerations of LCLS, Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Free Electron Laser Conference and 9<sup>th</sup> annual FEL User Workshop, Argonne, IL, USA, 9–13 September (2002).
- 3) Radiation Safety Systems, Technical Basis Document, ES&H Division, SLAC-I-720-0A05Z-002- R002, 26 April 2006 (updated 22 June 2007).
- 4) W. R. Nelson and T. M. Jenkins, The SHIELD11 computer code, SLAC-R-737 (Stanford, SLAC national accelerator laboratory) (2005).
- 5) T. M. Jenkins, Nuclear Instrum. Meth., 159, 265 (1979).
- 6) G. Battistoni, S. Muraro, P. R. Sala, F. Cerruti, A. Ferrari, S. Roesler, A. Fasso and J. Ranft, The FLUKA CODE: Description and Benchmarking, Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab 6–8 September 2006, M. ALBROW, R. RAJA eds., AIP Conference Proceeding 896, 31–49 (2007).
- 7) A. Fassò, A. Ferrari, J. Ranft and P. R. Sala, FLUKA: a multi-particle transport code, CERN-2005-10 (2005), INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773.
- 8) N. V. Mokhov, The MARS Code System User Guide, Fermilab-FN-628 (1995).
- 9) O. E. Krivosheev and N. V. Mokhov, MARS Code Status, Proc. Monte Carlo 2000 Conference pp. 943, Lisbon, October 23–26, 2000; Fermilab-Conf 00/181 (2000).
- 10) D. Dowell, P. Emma, J. Welch, Electron Beam Loss in the LCLS, LCLS Physics Requirement Document PRD-1.1-011, SLAC (2006).
- 11) W. R. Nelson, K. R. Kase and G. K. Svensson, Nucl. Instrum. Meth., 120 (1974) 413.
- 12) T. Sanami, W. R. Nelson and N. V. Mokhov, “Code benchmark of muon flux after a several meters of iron from 14 and 18 GeV electron induced reactions in forward direction”, SLAC Radiation Physics Note RP-07-15 (2007).
- 13) J. M. Bauer, V. Bharadwaj, H. Brogonia, M. Brugger, M. Kerimbaev, J. C. Liu, S. Mallows, A. A. Prinz, S. Roesler, S. H. Rokni, T. Sanami, M. Santana-Leitner, J. Sheppard, H. Vincke, J. Vollaie, *Benchmark study of induced radioactivity at a high energy accelerator, Part I, Specific activities*, Proceedings of the first International Workshop on Accelerator Induced Activation (ARIA '08), Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland, October 13–17 2008.
- 14) J. M. Bauer, V. Bharadwaj, H. Brogonia, M. Brugger, M. Kerimbaev, J. C. Liu, S. Mallows, A. A. Prinz, S. Roesler, S. H. Rokni, T. Sanami, M. Santana-Leitner, J. Sheppard, H. Vincke, J. Vollaie, Benchmark study of induced radioactivity at a high energy accelerator, Proceedings of the 11th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-11), Callaway Gardens, Pine Mountain, Georgia, USA, April 13–18, 2008.
- 15) J. Vollaie, M. Santana, J. Liu, A. Prinz, S. Mao and S. Rokni, “Overview of the Radiation Safety Systems for the operation of the LCLS Front End Enclosure (FEE)”, SLAC radiation physics note, RP-09-13, (2009).