

# 高エネルギー中性子を含む放射線環境下における市販 LED 照明の寿命評価 EVALUATION OF AN LED LIGHTING EQUIPMENT IN A RADIATION AREA INCLUDING HIGH ENERGY NEUTRONS

渡邊 丈晃<sup>#,A)</sup>, 野村 正<sup>A)</sup>, GeiYoub Lim<sup>A)</sup>

Hiroaki Watanabe<sup>#,A)</sup>, Tadashi Nomura<sup>A)</sup>, GeiYoub Lim<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

In the neutral K-meson experiment area at J-PARC Hadron Experimental Facility, all lighting equipment were upgraded from fluorescent lamps to commercially available LEDs in 2023 because of the discontinuation of fluorescent-lamp production and the energy-efficiency improvement. The experimental area is a radiation environment, consisting mainly of neutrons with energy up to several GeV and photons with energy up to 0.1 GeV. Currently, there is limited knowledge regarding the lifespan of commercially available LEDs in such an environment. Thus, lifespan evaluation was examined during beam operation from April to May in 2025 by installing new LEDs near a beam dump, where the radiation level is relatively high in the experimental area. This paper reports on the dose estimations until the LED failures and the behavior of the LED at the failure.

## 1. KL 実験エリアの放射線環境および照明

J-PARC ハドロン実験施設(Fig. 1)では、30 GeV の 1 次陽子ビームを生成標的(以下、標的)へ照射し、そこで発生する 2 次粒子(K 中間子、 $\pi$  中間子など)を実験エリアへ輸送することで、バラエティに富んだ原子核物理・素粒子物理実験を行っている[1]。2025 年 4 月には、1 次陽子ビーム強度で 92 kW での安定なビーム運転を達成している。加速器からの取り出しは Slow extraction 方式で、1 サイクル 4.24 秒で、そのうち 2 秒間 DC ビームがハドロン実験施設へ取り出される方式となっている。

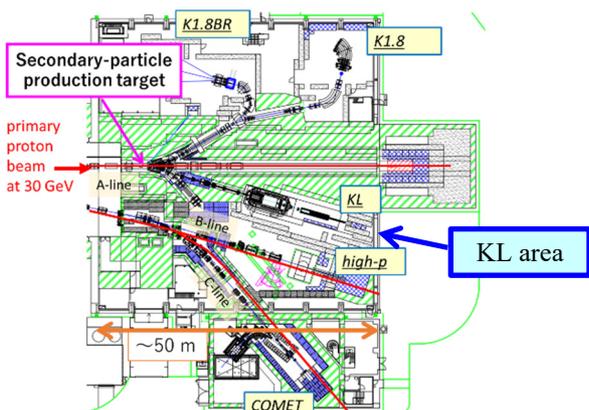


Figure 1: Plan view of the Hadron Experimental Facility at J-PARC.

KL ビームライン[2-4]は、標的から 16 度の取り出し角で中性粒子を輸送する直線ビームラインで、2 段の金属コリメータにより角形に成形された  $K_L$  中間子ビームを KL 実験エリアへ輸送している。KL 実験エリアでは現在  $K_L$  中間子稀崩壊測定実験(J-PARC E14 KOTO experiment)[5, 6]が行われている。KL ビームラインでは、コリメータ間にある Dipole 型電磁石により上流からの荷

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

電粒子を排除している。また、ビームライン上流に厚さ 7 cm の鉛製ガンマ線アブソーバが設置されており標的からのガンマ線を低減している。KL ビームライン出口(= 実験エリア入口)においては、Beam-line simulation[2, 5] から、92 kW ( $8.1 \times 10^{13}$  protons/4.24 秒)運転時の 0.1 MeV 以上のビームコア成分として、中性子が約  $770 \times 10^6$  個/4.24 秒、ガンマ線が約  $870 \times 10^6$  個/4.24 秒、 $K_L$  中間子が約  $9 \times 10^6$  個/4.24 秒程度の収量と想定されている。特に中性子は平均エネルギーが約 300 MeV で、最大 8 GeV 程度までのブロードなエネルギースペクトルと想定されており、高エネルギー中性子が多いことは KL ビームラインの1つの特徴である。なお、 $K_L$  中間子は平均エネルギーが約 1.5 GeV で、ガンマ線は約 6 MeV 程度の平均エネルギーと想定されている。

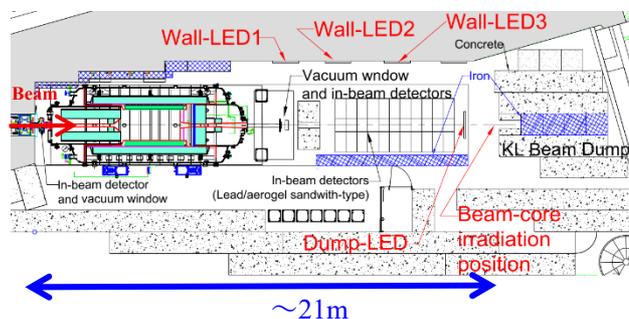


Figure 2: Plan view of KL experimental area (KL area).

Figure 2 に KL 実験エリアの平面図を示す。KL ビームラインおよび測定器の途中(実験エリア入口から約 11 m 下流)までは真空中で接続されており、それより下流はビームコアが空气中を通過している。空気以外にビームコアと反応をする要素としては、荷電粒子検出器(plastic scintillator, および gas chamber)や真空仕切り膜(ステンレス、ポリイミド、エパール)、および下流の In-beam 測定器(主な物質として $\gamma$ 線コンバータ用鉛板)がある。KL 実験エリア最下流には、鉄製のビームダンプが設置されて

おり、鉄の周辺はコンクリート遮蔽でおおわれている。実験エリア内の空間線量に寄与する放射線の発生源としては、 $K_L$  中間子崩壊による生成粒子の他に、ビームコア成分がビーム中の各要素と反応した際の散乱粒子または生成される粒子が主なソースと考えられる。

$K_L$  実験エリアは、天井および側面すべてがコンクリート遮蔽体で構成されているため、外部からの採光経路はなく、照度を確保するため合計 21 個の照明(ベースライト)が側壁等に取り付けられている。2012 年の  $K_L$  実験エリア構築時に蛍光灯を設置して使用していたが、水銀に関する国際条約[7]により蛍光灯の生産中止が決定していたことや省エネルギー対策の一環として、2023 年 2 月にすべての蛍光灯を市販 LED 照明へ換装した。LED 照明としては、入手性、施工性、および一般的な環境下における信頼性を勘案して Panasonic のベースライト(40 形 5200 lm)を採用した。本ベースライトは通常の使用環境では想定寿命が 8~10 年で、LED 本体の光束維持時間として 4 万時間の仕様となっている。

2023 年 2 月から LED 照明を運用していたが、2025 年 3 月に LED 照明 1 台が故障した(Fig. 2 と Fig. 3, wallLED-2 の位置)。通常の故障の可能性もあるが、使用期間が 2 年程度で、かつ比較的ビームロスの大い区間の近傍に位置していたため、放射線起因による故障の可能性も排除できないと考えられた。

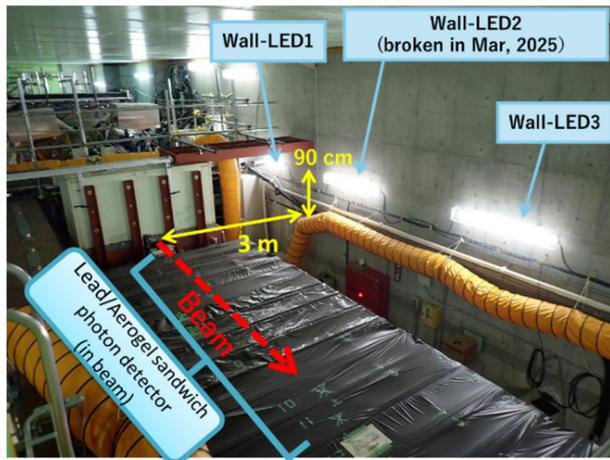


Figure 3: Photograph of wall-LEDs in the KL area (Bird's eye view).

市販 LED 照明については、文献[8]において X 線環境下にて 199 Gy 以上で LED 照明の故障例が示されており、また電源にある半導体素子(MOSFET)の X 線照射による損傷プロセス等が詳しく示されている。しかし、高エネルギー中性子を含むような放射線環境下での市販 LED ベースライトについては実証データがない状況である。特に中性子の場合、半導体中で単発の中性子により発生する主な効果(Single Event Effects, SEE)として、①IC に寄生するサイリスタが On 状態となり過電流が流れ続ける Single Event Latchup(SEL)、②MOSFET の空乏層において中性子反応で荷電粒子が生成され、そこに多量のイオンペアが誘起され大電流が流れてデバイスが破壊される Single Event Burnout (SEB)、③IC 中の記憶素子等でロジック反転が起きる Single Event

Upset(SEU)が発生し制御のソフトウェアが発生する現象等がある[9-11]。①②は主に 10 MeV 以上の中性子で発生し、③は低エネルギー(熱中性子以上)でも発生する。いずれも単発の中性子により発生するため、X 線と比較して低線量で故障が発生する可能性が考えられる。そこで、 $K_L$  実験エリアでも比較的空間線量の高いビームダンプの上流部に新たに LED 照明を設置し、放射線起因で故障するか確認することとした(以下、Dump-LED)。その際、既存の壁面 LED(以下、Wall-LED)と共に、線量計(ガラスバッチ)を取り付けて吸収線量の推定を試みた。

## 2. 実験セットアップおよびビーム条件

壁面ベースライト(Wall-LED)は、Panasonic 社製 NNL4500ENTを使用している。ビームダンプ上流に新たに取り付けした Dump-LED は、同等仕様(後継品)である NEL4500EN を使用した。いずれも非調光型で電源は AC100V である。Figure 4 に実験セットアップの写真を示す。Dump-LED は、ビームダンプから約 1.5 m 上流で、ビームコアには触れないようビーム中心から 30 cm 上部に取り付けた。文献[8]から LED 電源故障を想定して、Fig. 5 に示すよう LED に内蔵されている電源ユニットの近くに線量計を取り付けた。線量計には、千代田テクニカル社の中性子広範囲ガラスバッチ環境タイプ(EN 型)を

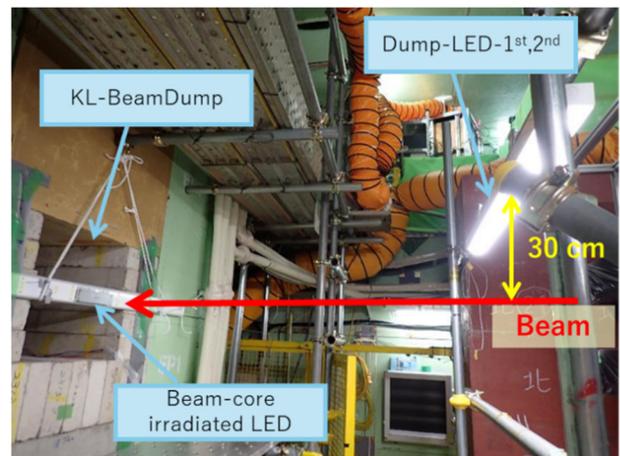


Figure 4: Photograph of the experimental apparatus around the KL beam dump (side view).

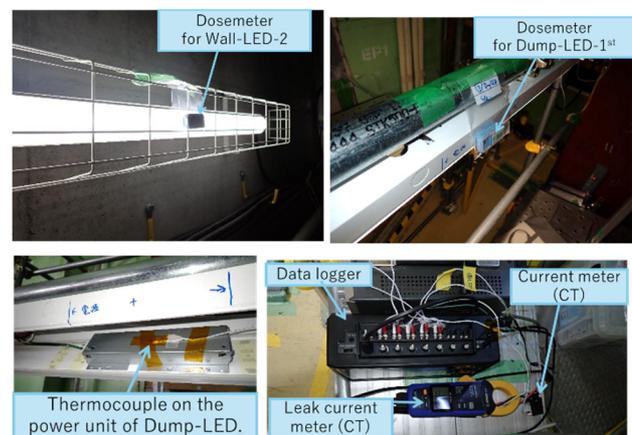


Figure 5: Photographs of the experimental equipment.

使用した。具体的には、X線・ $\gamma$ 線用として蛍光ガラス線量計(測定範囲 10 keV - 10 MeV)、中性子用として固体飛跡検出方式の CR-39(測定範囲 0.025 eV - 15 MeV)を使用したもので、周辺線量当量  $H^*(10)$  が測定できるものである。KL 実験エリアは高エネルギー中性子が多い環境と想定されたため、CR-39 の測定範囲内で最も高エネルギーである 14.8 MeV の単色中性子場で実施された校正[12]による線量測定値を採用した。また、Dump-LED には、電源ユニット表面および LED 基板上に K 型熱電対を取り付けて温度監視を行うとともに、LED 電流値およびリーク電流を測定した。電流測定はどちらも Current transformer タイプで、LED 電流はユー・アール・ディー社製 CTT-10-CLS-CV5 を使用し、リーク電流は日置電機社製 CM4003 を使用して AC100V の配線部で測定し、その出力をデータロガーで記録した。

本照射試験は、2025 年 4 月 17 日から 5 月 19 日にかけてのビームタイムに合わせて実施したもので、累計約 420 時間の照射時間で、約  $3 \times 10^{19}$  proton-on-target (pot) 程度のビーム量であった。

上記試験と並行して、無通電(無点灯)の状態、LED 電源部にビームコアを直撃させる照射試験を約 110 時間実施した。これは、前述した中性子による SEE が通電中のみ起こる現象であるため、無通電であれば寿命を延伸できる可能性があり、その確認のために試行したものである。ビームコアにおける線量値は、2021 年に今回と同じ線量計を照射して得られたデータ(線量率)を使い、標的での陽子数比を使って算出した。照射位置におけるビームコアのサイズは、おおよそ幅 11 cm × 高さ 13 cm である[13]。電源部における主要な半導体素子(スイッチング電源を含む素子)がビームコアの範囲に含まれていることを確認している。

### 3. Monte-Carlo simulation による環境評価

照射環境を評価するため Monte-Carlo simulation により各 LED へ入射する粒子の収量やエネルギー分布を計算した。標的から KL ビームライン出口(実験エリア入

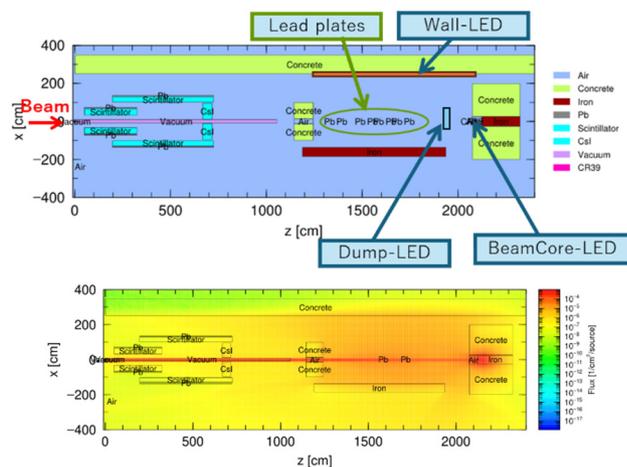


Figure 6: Input geometry (top) and particle-fluence distribution (bottom) in the KL area calculated by PHITS. Positions of three tagging regions: Dump-LED, Wall-LED, and BeamCore-LED are shown in the top figure.

口)までは、GEANT-3[14]を使用した。エネルギー閾値は 0.1 MeV で、ハドロン相互作用は G-FLUKA コードを使用した。次に、実験エリア内は、PHITS v3.351[15]を使用し、熱中性子まで含めたエネルギー範囲(中性子閾値  $1 \times 10^{-11}$  MeV)で計算を行った(Fig. 6)。光子・電子・陽電子については PHITS 組み込みの EGS5 を使用した。特に、ビームコアと反応する主要な要素(鉛板、真空膜等)は設定されている。ビームラインおよび実験エリア内の Simulation は  $10^{12}$  pot 相当の統計量で計算を行った。

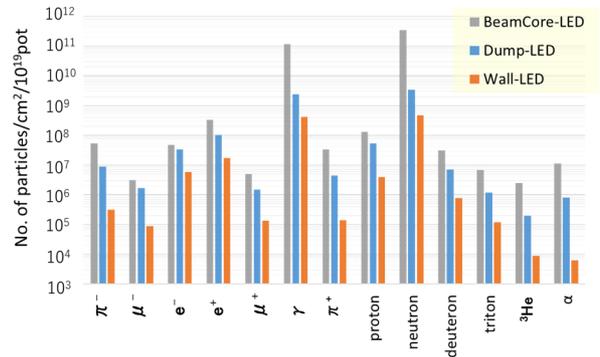
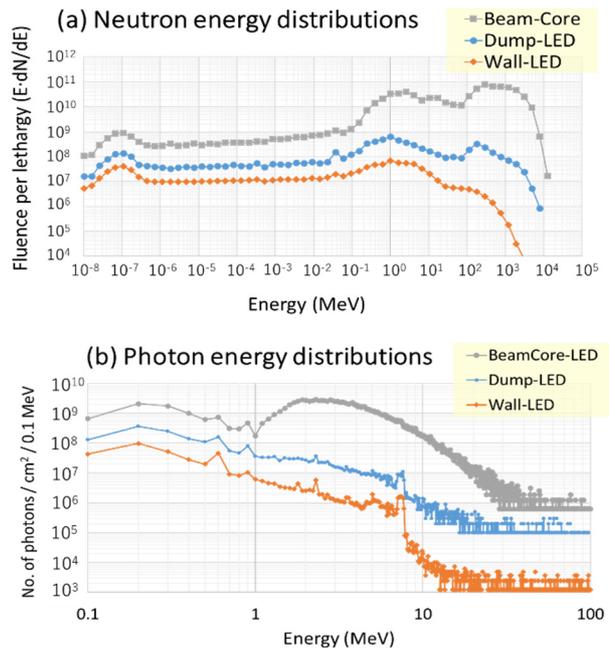


Figure 7: Particle-type distribution in each tagging region for  $10^{19}$  pot.



	Average energy of photon	Average energy of neutron	Ratio of neutrons with $E_n > 15$ MeV
BeamCore-LED	4.5 MeV	344 MeV	63.7 %
Dump-LED	4.3 MeV	53 MeV	19.9 %
Wall-LED	1.4 MeV	3.4 MeV	3.0 %

Figure 8: Energy distributions of (a) neutrons, and (b) photons at each tagging region for  $10^{19}$  pot. The bottom table shows the average energy of photons and neutrons, and the ratio with energy higher than 15 MeV for neutrons.

Table 1: Results of irradiation tests for commercially available LEDs. “ $\gamma$ ” denotes gamma ray (photon), and “n” denotes neutron. The errors in the right column show statistical errors of the PHITS simulation.

LED name	Operation status (operated period)	Ambient dose equivalent estimated with dosimeter <sup>1)</sup> (mSv)	Absorbed dose estimated from the ambient dose <sup>2)</sup> (mGy)	Total absorbed dose with PHITS simulation (mGy)
Wall-LED-1	In service (27 months)	152 ( $\gamma$ :20.4, n:132)	33.6 ( $\gamma$ :16.7, n:16.9)	38.0 ( $\pm$ 3.2)
Wall-LED-2	<b>Broken in March 2025</b> <b>(broken at 25 months)</b>	317 ( $\gamma$ : 40.4, n:277)	69.1 ( $\gamma$ :33.7, n:35.4)	77.9 ( $\pm$ 4.1)
Wall-LED-3	In service (27 months)	646 ( $\gamma$ :130, n:516)	174 ( $\gamma$ :108, n:66.0)	283 ( $\pm$ 11)
Dump-LED-1 <sup>st</sup>	<b>Broken in May 2025</b> <b>(broken at 23 days)</b>	382 ( $\gamma$ :171, n:211)	170 ( $\gamma$ :143, n:27.0)	108 ( $\pm$ 5)
Dump-LED-2 <sup>nd</sup>	In service (1 month)	403 ( $\gamma$ :180, n:223)	179 ( $\gamma$ :150, n:28.5)	114 ( $\pm$ 6)
BeamCore-LED without lighting	Lighting after irradiation was confirmed. (N.A.)	6226 ( $\gamma$ :2258, n:3968)	2389 ( $\gamma$ :1882, n:507)	8677 ( $\pm$ 250)

- 1) Ambient dose equivalents by neutron were estimated using dosimeters (CR-39), where the calibration factor obtained by exposing the CR-39 in a 14.8-MeV monochromatic neutron field was adopted[12].
- 2) Absorption doses were calculated from the ambient dose equivalents, in which a conversion factor for neutrons was calculated by exposing an ICRU ball to 14.8-MeV neutrons using PHITS[15]. A conversion factor for photons was adopted to be a <sup>137</sup>Cs value from JIS-Z4511:2018[16].

Figure 7 に PHITS 計算による各 LED 位置での粒子種類分布を示す。中性子が最も多く、次いで  $\gamma$  線が多い計算結果である。Figure 8 に中性子と  $\gamma$  線のエネルギー分布を示す。BeamCore-LED は標的から直接到達する成分が多いため高エネルギー粒子の割合が最も多い計算結果となっている。

## 4. 結果

### 4.1 照射結果および考察

Table 1 に LED の照射結果を示す。前述したよう壁面の LED 照明の 1 台(wall-LED-2)は約 2 年で故障したが、今回のビーム期間における線量計による測定値から、故障に至るまでの累計として、周辺線量当量  $H^*(10)$ としてガンマ線で 40.4 mSv, 中性子 277 mSv, 合計 317 mSv と推定した。これを吸収線量(Gy)へ換算する。前述したとおり今回の中性子線量計(CR-39)は 14.8 MeV の単色中性子場による校正係数を使用している。そこで、PHITS により、ICRU 球を設定し、14.8 MeV の単色中性子を等方的に発生させ、ICRU 球の深さ 1 cm での吸収線量(Gy)と、周辺線量当量  $H^*(10)$ (Sv)を計算し、その比をとって、吸収線量への換算係数として 7.82 (Sv/Gy)とした。ただし、CR-39 による線量測定は高エネルギー中性子については検出感度が低下する傾向[12]があるため、測定線量を過小評価している可能性がある。15 MeV 以上の中性子に対する線量測定手法(校正方法)の確立は今後の課題である。ガンマ線については、蛍光ガラス線量計内の組み込みフィルタによる選別結果から X 線など

の低エネルギー成分が検出されなかったため <sup>137</sup>Cs のガンマ線による校正係数を使用している。ガンマ線については JIS-Z4511:2018[16]に <sup>137</sup>Cs の場合の換算係数 1.2 (Sv/Gy)が規定されており、その係数を適用した。ここで使用したガラス線量計は高エネルギー側のガンマ線では 6.13 MeV (<sup>16</sup>N による校正)にて精度が確認されている。6.13 MeV を超えるガンマ線の割合は、PHITS 計算 (Fig. 8)から、Wall-LED で約 4%、Dump-LED で約 9%。Dump-Core で約 18%と推定されている。6.13 MeV を超えるガンマ線による線量評価への影響および換算係数の妥当性については、文献[17]等を参考に PHITS 計算を合わせて、今後評価を行う必要があると考えている。

上記換算係数から、Wall-LED-2 は、ガンマ線: 33.7 mGy、中性子: 35.4 mGy の吸収線量と推定した。これに対して、Wall-LED-3 は、故障した Wall-LED-2 より約 2 m 下流に設置されており、Wall-LED-2 より約 2 倍多い吸収線量であったが、まだ故障していないことから、線量に対してバラツキの大きい故障原因の可能性はある。

次に、今回新たに設置した Dump-LED-1<sup>st</sup> は、設置から約 23 日後に故障した。線量計データからの換算により、ガンマ線で 143 mGy、中性子 27.0 mGy の吸収線量と推定した。現時点では統計が足りないが、故障した Wall-LED-2 の中性子線量 35.4 mGy と近いことから、中性子でおおよそ 30 mGy 程度の線量から故障する可能性があると考えている。これは文献[8]に示されている X 線環境で故障が起こり始める 199 Gy と比較すると、中性子照射では 4 桁低い線量域でも故障し得ることを示唆してい

る。なお、今回の故障はガンマ線による故障の可能性を排除するものではないが、一般的な Si MOFSET がガンマ線に対し 100 Gy 程度の放射線耐性を有しており [18, 19]、今回の照射量は 3 桁低い線量域のため、ガンマ線による故障の可能性は低いと考えている。

Dump-LED-2<sup>nd</sup> は、Dump-LED-1<sup>st</sup> が故障後に同タイプに入れ替えたもので、Dump-LED-1<sup>st</sup> を少し超えた線量まで照射を行ったが、故障せずに今回の照射期間が終了となった。仮に前述した SEE(SEL,SEB,SEU)が故障原因とすると、ランダム故障(確率的故障)となることが想定される。そのため、故障統計を増やして故障に至る平均の吸収線量と中性子 fluence を算定する必要がある。

最後に、文献[8]に示されているように、LED 寿命の延伸方法としてビーム運転中は通電しない(LED を点灯しない)方法がある。この方法が KL 実験エリアの放射線環境下でも有効であるかを確認するため、無通電の LED 電源部をビームコアに直接照射する試験を行った。結果は、Table 1 に示すとおり推定値としてガンマ線: 1882 mGy、中性子: 507 mGy まで照射を行い、その後、通電させたところ正常に点灯した。電流値や温度を測定したが照射前と比べて有意な差は観測されなかった。通電中照射で故障した 2 台の LED が中性子線量で 30 mGy 程度であったことから、その約 17 倍の線量でも故障に至らなかったことになる。より統計が必要であるが、ビーム運転中に無通電(無点灯)にすることは LED 寿命延伸に有効である可能性が高いと考えている。

Table 1 の線量評価に関して、PHITS により粒子を区別しない吸収線量の計算を行ったところ、Wall-LED-2 は計算と線量計からの推定値がほぼ一致していた。Dump-LED については、PHITS 計算と比べて線量計からの推定値はやや大きな値だが、factor 1.6 程度で一致しているといえる。ビームコアについては、線量計からの推定値が、PHITS の約 1/3 であった。これは、Fig. 8 下表に示すとおり 15 MeV 以上の中性子の割合が 64%と多く、中性子線量計(CR-39)は高エネルギー側で感度が低下する傾向があることから、吸収線量を過小評価している可能性があると考えている。

参考として、PHITS 計算結果から、SEB,SEL が発生する 10 MeV 以上の中性子フルエンスを算出すると、Wall-LED-2 の故障までに  $1.1 \times 10^8$  (n's/cm<sup>2</sup>)、Dump-LED-1<sup>st</sup> の故障までに  $9.3 \times 10^8$  (n's/cm<sup>2</sup>)となる。これに海面レベルの基準中性子線フルエンス率(13 n's/cm<sup>2</sup>/h)をつかって、自然放射線環境における 10<sup>9</sup>時間故障率 Failure in Time (FIT) に換算すると、Wall-LED-2 で 118 FIT、Dump-LED-1<sup>st</sup> で 14 FIT となる。これは、一般的な半導体の故障率(または要求値)0.1~1000 FIT[9, 10, 20]と整合性がある。

#### 4.2 故障時の応答

Dump-LED-1<sup>st</sup> の故障時の応答データを Fig. 9 に示す。1 次陽子ビーム強度 92 kW での安定したビーム運転中に故障が発生した。運用開始から 23 日目での故障であった。故障直前まで LED 電流値は 0.31 A 程度で安定していたが、突然約 0.62 A に跳ね上がり、それに伴い、電源部の表面温度が 53°C から 95°C へ上昇、LED 基板表面温度も 35°C から 45°C へ上昇している。電流値上昇から約 2 時間で電源断となった。リーク電流値が徐々に増

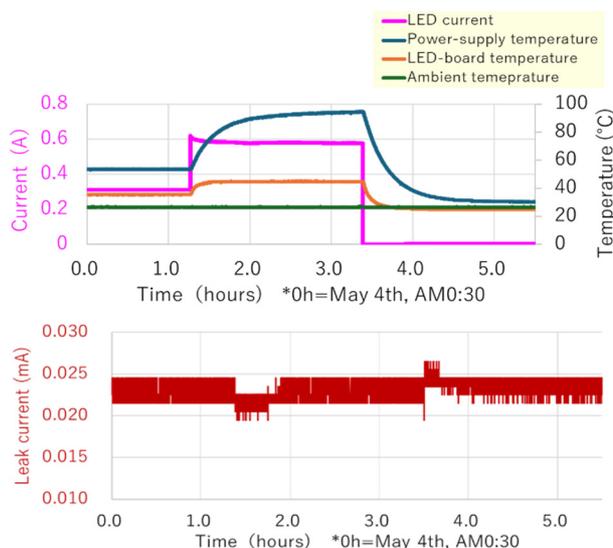


Figure 9: Behavior of Dump-LED-1<sup>st</sup> at the failure. The top figure shows LED current and temperatures. The bottom figure shows the leakage current.

えるといった長期変動は今回の測定感度(~0.02 mA)では観測されなかった。なお、ここで試験した LED 電源は定電流回路(メーカー情報)であり、同メーカーの LED 電源回路構成は文献[21]が参考となる。上記挙動から、定電流制御に関わる素子またはスイッチング電源素子が故障・誤動作した可能性が考えられる。その結果として過大な電流が流れ、電流の二乗に比例した発熱が発生し耐熱温度を超えて、溶融による断線または素子損傷が発生したことで電流断に至ったと推定している。現状では、中性子による SEE がトリガーとなり過電流が発生した可能性が高いと考えているが、SEL,SEB,SEU(または他の SEE)の中で何が原因であるかは推定できていない。今後、回路 simulation や故障統計を増やすなどして、より詳しい原因分析を進めたい考えである。

#### 4.3 故障品分析

Panasonic 社による故障分析から、Wall-LED-2 および Dump-LED-1<sup>st</sup> は、ともに電源 IC(スイッチング電源および降圧チョップ機能をもつ IC)のリード溶融、および保護抵抗 2 個の損傷が確認された。Dump-LED-1<sup>st</sup> は、上記に加えてトランジスタ(昇圧チョッパー回路)の故障も確認された。メーカーにて故障部品を交換したところ LED が正常に点灯することが確認された。上記故障箇所は、Dump-LED-1<sup>st</sup> の故障時応答(過電流・温度上昇)と整合性のある故障箇所と考えられる。

### 5. Summary

高エネルギー中性子を含む放射線環境である KL 実験エリアにて市販 LED 照明の寿命評価を試みた。現時点では統計不足だが、LED 照明 2 台の電源回路が故障し、中性子による推定吸収線量として 30 mGy 程度という低い線量域でも故障が起こり得るという結果であった。また、無通電でのビームコア照射の結果から、ビーム運転中は点灯させなければ寿命を延伸できる可能性が高いと考えられる。今後は、照射試験を続けて故障統計を増

やすことを計画しており、合わせて文献[22]にあるような耐放射線型 LED 照明の試用も検討している。

## 参考文献

- [1] A list of experiments in the J-PARC Hadron Experimental Facility,  
<http://research.kek.jp/group/nuclpart/HDeppc/Exp/>
- [2] T. Shimogawa *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 623, pp. 585-587 (2010).
- [3] H. Watanabe *et al.*, Proc. 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Japan, pp. 76-78 (2019).
- [4] K. Shiomi *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 662, pp. 264-271 (2012).
- [5] J. Comfort *et al.*, Proposal for  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  experiment at J-Parc (2006),  
[https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac\\_0606/pdf/p14-Yamanaka.pdf](https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_0606/pdf/p14-Yamanaka.pdf)
- [6] J.K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. Lett. 134, 081802 (2025).
- [7] 水銀に関する水俣条約 (2013),  
<https://www.env.go.jp/chemi/tmms/convention.html>
- [8] Y. Hosaka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 61 076504 (2022).  
doi:10.35848/1347-4065/ac7836
- [9] K. Kobayashi, J. Particle Accelerator Society of Japan, vol. 13, no. 4, pp. 245-252 (2016).
- [10] 日本電子部品信頼性センター, 2022 年度故障物理研究委員会研究成果報告書, R-2022-RS-01 (2023).
- [11] H. Iwashita *et al.*, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 70, no. 3, pp. 216-221 (2023).
- [12] D. Maki *et al.*, Jpn. J. Health Phys., 45 (4), 335-341 (2010).
- [13] A. Kanai, M. Hagiwara *et al.*, 19th workshop on environmental radioactivity, (2018).
- [14] GEANT3: CERN Program Library Long Writeup W5013 (1993).
- [15] T. Sato *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024).
- [16] JIS Z 4511:2018, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy, Table B.8.
- [17] M. Kurata *et al.*, Proc. 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokyo, Japan, 2025, THP023, this meeting.
- [18] F. Shi *et al.*, RADIOISOTOPES, 70, 219-225 (2021).
- [19] 九州工業大学他, 超小型衛星搭載民生部品データベース, <https://space-cots-data.jp/>
- [20] H. Asai *et al.*, IEEE NS-61, No.6, pp.3109-3114 (2014).
- [21] T. Kunimatsu *et al.*, Panasonic Technical Journal Vol. 58, No.1, pp. 18-23 (2012).
- [22] M. Kamikawa *et al.*, Proc. 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, pp. 262-266 (2018).