

高放射線場における照明機器の検討

○下山哲矢、近藤茂実、今井重文、橋本明宏、平墳義正、青木延幸

工学系技術支援室 環境安全技術系

概要

工学部・工学研究科の放射線取扱施設では、耐震工事に伴い照明器具の更新も行われた。照明器具は、LED照明に更新されたが、第一特別実験棟の高放射線場であるコバルト60照射室において、LED照明器具の不具合が問題となっていた。コバルト60照射室は、昭和38年に設置され、現在の最高線量率は約2.0 kGy/h (34.5 TBq) である (コバルト60の承認数量は163 TBq)。数回の施設更新を行ってきたが、照明器具の不具合は発生していなかった。今回、我々は、市販の照明器具を用いて、安全・安価に一般的な更新サイクルに従う安定した照明器具にするための様々な検討を行った。その検討結果を報告する。

1 ガンマ線と物質との相互作用

コバルト60は図1に示すようにニッケル60の励起状態にベータ崩壊をして、基底状態に戻る際に2回のガンマ線を放出する。これらのガンマ線のエネルギーは、それぞれ、1.173 MeVと1.333 MeVであり、コバルト60の半減期は5.27年である^[1]。ここでは、ガンマ線と物質との相互作用について述べる。

ガンマ線と物質との相互作用には3種類あり、光電効果、コンプトン効果及び電子対生成である。これらの相互作用は、ガンマ線光子のエネルギーを電子のエネルギーに変換するものである^[2]。光電効果は、光子が原子と相互作用してエネルギーを失い、エネルギーを持った光電子が原子の束縛された殻から放出される。この時放出される光電子は、原子中で最も結合が強いK殻から放出する確率が高い。光電子として放出された殻は空孔になるが、この空孔は自由電子か他の殻の電子によって満たされる。この光電効果の確率 (断面積 σ_{phot}) は、原子の原子番号 Z 、ガンマ線のエネルギーを E_{γ} とすると $\sigma_{\text{phot}} \propto Z^5/E_{\gamma}^{0.5}$ となる^[2]。コンプトン効果は、自由電子によってガンマ線が散乱を受ける主要な相互作用である。コンプトン効果の確率 (断面積: σ_{comp}) は物質中の電子の数に依存するため原子番号と共に増加する ($\sigma_{\text{comp}} \propto Z$)。エネルギーが増加するに従いガンマ線エネルギーが1 MeVあたりから断面積は減少し始める^[2]。電子対生成は、1.022 MeVを超えるエネルギーのガンマ線で起こる相互作用である (断面積: $\sigma_{\text{pair}} \propto Z^2$)。この相互作用は原子核のクーロン場で起こり、ガンマ線光子は消失して電子と陽電子の対に変わる^[2]。この作用でつくられた電子は物質中でエネルギーを失うが、陽電子は止まる寸前に電子と合体して消滅する。この消滅で2つの電子の静止エネルギー分の2つのガンマ線を放出する。

照明器具に対して高線量の放射線の影響で考えられるのは、電力供給や制御系の回路等に使われている半導体やLED素子に対するものと考えられる。そこで、一般的な半導体素子の原料のケイ素に対するコバルト60のガンマ線の振る舞いをモンテカルロシミュレーション EGS5^[3] で計算した。ケイ素におけるエネルギー付与の計算結果を図2に示す。図2からコンプトン効果が主であることがわかる。

2 放射線損傷

照明器具で高線量の放射線の影響で考えられるのは、既に述べたように電力供給や制御系の回路等に使われている半導体やLEDチップに対する損傷が考えられる。ここでは半導体に対する放射線損傷の種類につい

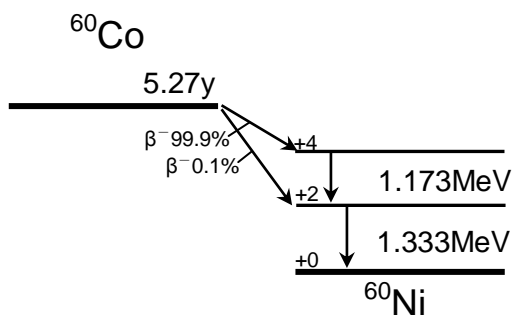


図 1. コバルト 60 の壊変図式

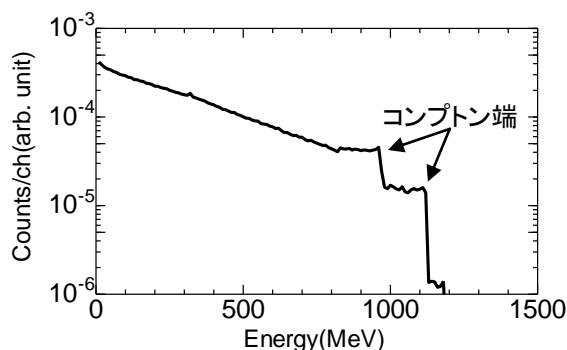


図 2. コバルト 60 のゲイ素におけるエネルギー付与

て述べる。

放射線の損傷効果は、損傷の過程・機構により 3 種類ほどに分けられる。(1) トータルドーズ効果 (表面効果、イオン化損傷) は、多量の放射線による電離作用 (イオン化) によって引き起こされる。半導体内の電離作用によって生じた電子-正孔対が絶縁膜にトラップされるなど、半導体の特性に影響を与える効果 (損傷) である^{[2][4]}。ガンマ線の損傷の多くはこの損傷によるものと考えられる。(2) はじき出し損傷効果 (バルク効果、変位損傷) は、放射線により半導体結晶を形成する原子がはじきだされ、半導体の結晶構造に欠陥を作り、半導体の特性に影響を与える効果 (損傷) である^{[2][4]}。(3) シングルイベント効果は、重粒子の電離作用によって高密度の電荷が生成されることにより生じる。電流スパイクノイズを作り、誤動作を起こさせる^[4]。

ガンマ線照射施設ではトータルドーズ効果の試験を行っている施設もあり、また、本検討をしているコバルト 60 照射室でも放射線量に対する各種影響試験等を行っている。

3 照明器具の放射線損傷の検討

照明器具の放射線損傷の検討及び改善法の確認としては、① 不具合箇所の検討 ② 通電 (LED 照明を点灯させること) による影響の確認、③ 不具合箇所を遮蔽することによる効果確認、④ 他の照明器具での確認、⑤ 不具合箇所を低線量位置へ移動する効果確認、⑥ LED 照明管の損傷確認 を行った。④ については、③の結果からの予備確認作業である。

これらの確認作業において、照明器具は、市販されている天井に設置する LED 照明器具及び蛍光灯照明器具を照射室内にあるコンセントから電源をとるように改良して用いた。コバルト 60 照射室は、図 3 に示すようになっており、低線量位置に設置されたカメラによって鏡に映る照射室内を観測できるので、消灯してしまう等の照明器具の不具合を確認できる。また、カメラ映像は録画できるため、不具合が起こった正確な照射時間 (線量) が分かる。操作室から直接観測できる鉛ガラス窓もあるが、今回は照射対象の照明器具の不具合を観測しやすくするために照射室の通常照明を消灯し、照射室側の鉛ガラス窓にある鉛窓を閉じて制御室からの明かりを遮断し確認作業を行った。

① 不具合箇所の検討

不具合箇所の検討は、図 4 に示すようにコバルト 60 線源位置から照明器具の制御・電源基板が 10 cm になる位置に照明器具を固定して行った。照射開始から 18 分で LED 照明は消灯し、基板位置での線量は 256 Gy であった。制御・電源基板を確認した結果、制御に使われていると思われる電界効果トランジスタ (FET) に不具合が確認された。この確認ではこの FET に不具合があったが、制御・電源基板には他にも同様の FET があり、また、他の半導体素子や IC 等が使われているため、今後の何種類かの確認によって不具合が起こる箇所を検討することとした。

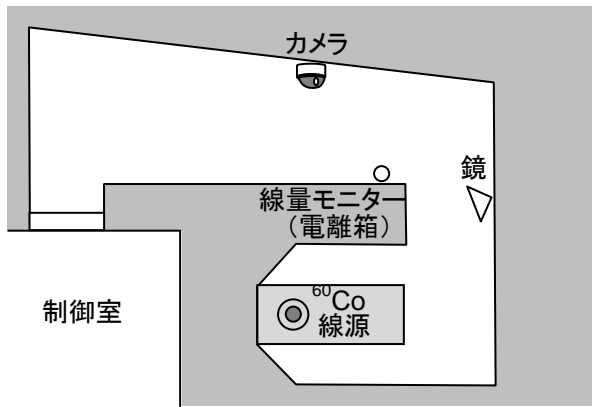


図 3. コバルト 60 照射室の概略図

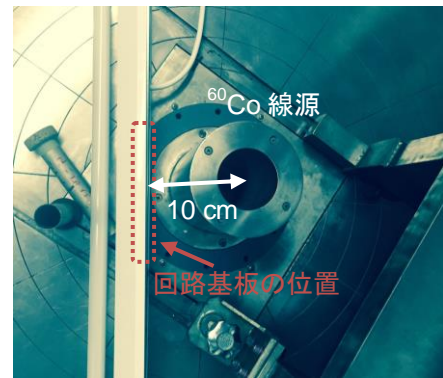


図 4. 確認作業設置状況

② 通電による影響確認

通電による影響確認は、照明を点灯させず、任意の時間に通電して照明器具に不具合がないか確認する方法をとった。コバルト 60 線源位置から 44 cm の位置に照明器具を①と同様に固定した。照射開始から 8 時間後、通電して照明器具の不具合を確認したが、不具合はなかった。この時の制御・電源基板位置での線量は 350 Gy である。さらに 6 時間照射し通電して照明器具の不具合を確認したところ、一時点灯するがすぐに消灯してしまう不具合が起こった。この時の制御・電源基板位置での累積線量は、613 Gy であった。制御・電源基板を確認した結果、電源 IC に不具合が確認された。

③ 不具合箇所を遮蔽することによる効果確認

照明器具の制御・電源回路の基板の全体を覆うように（図 5 参照）、鉛よりも遮蔽効果があるタングステン合金（5 mm）を設置して、コバルト 60 線源位置から 28 cm の位置に照明器具を①とは逆の LED 照明管を線源方向になるように固定した。照射開始から 4 時間 21 分で LED 照明は消灯し、タングステン合金の遮蔽効果を計算すると（図 6 参照）制御・電源基板位置での線量は 328 Gy と推定された。制御・電源基板を確認した結果、①と同じ FET と②と同じ電源 IC に不具合が確認された。この遮蔽効果の確認結果から、通常の照明器具の消耗サイクル以上になるようにタングステン合金で遮蔽を行うとすると、実際の照明の設置位置での線量から推定した厚さのタングステン合金の値段は高価であるため実用的ではなかった。また、同遮蔽材を鉛にした場合は、タングステン合金より厚さが増し、重量物を天井に設置しなければならないため、安全面から容認できないと考えた。

以上を表 1 にまとめる。①～③より、高線量の放射線に影響を受ける不具合箇所は、制御・電源基板の FET と電源 IC だと分かった。高線量の放射線照射における通電時の影響は多少あると推定できるが、制御・電源基板の半導体素子が不具合を起こす時間を推定するには非通電を含む全照射時間を考える必要があることが分かった。そのため、仮にこれまでのコバルト 60 照射室の実働平均である年間 300 時間照射すると、実際の照明設置位置での線量率から 495 Gy/年となり、不具合が起こった線量を年数に変換すると表 1 のようになった。遮蔽材による線量低減化の効果は確認できたが、費用及び安全面から実用的でないことが分かった。

①～③の確認作業を受けて、LED 照明器具を他の照明機器へ変更する案（④）と LED 照明器具の制御・電源基板を放射線量の少ない位置へ移動する案（⑤）を確認することとした。

④ 他の照明器具での確認

確認作業に用いていた LED 照明器具と照明管が同型の最新の蛍光灯照明器具を①と同様の位置に固定して確認を行った。制御・電源基板位置での線量で 57 Gy の時に不具合が起き、制御・電源基板を確認した結果、電源 IC に不具合が確認された。最新の蛍光灯照明器具に関しても、最新の IC が使われているため、LED

照明器具と同様な不具合が起きたと考えられた。

⑤ 不具合箇所を低線量位置へ移動する効果確認

LED 照明器具の制御・電源基板は、ネジを外すことで従来の蛍光灯照明器具の安定器と同様に取り替え可能になっている。そのため、制御・電源基板を取り外し、制御・電源基板と LED 照明管とを接続するケーブルをのばすことによって制御・電源基板を照明器具から距離をとることができる。ケーブルをのばすことによる電氣的な影響がないことを照射前に確認して、LED 照明器具はコバルト 60 線源位置から 130 cm の位置に①と同様に固定した。制御・電源基板は図 3 における線量モニター（日立アロカ製：DAM-131C）が設置されている付近の天井ケーブルラックに設置し、制御・電源基板を十分に線源から離れた。図 3 の線量モニターでは、照射時には 3.5 mSv/h 程度を示している。結果として、次の⑥の作業を行う間においても、不具合は起こっていない。

⑥ LED 照明管の損傷確認

⑤で一応の解決策が見つかったので、LED 照明管自体にも放射線損傷による影響が顕著に見られないかを確認を行った。LED 照明管は蛍光灯管のような外観をしており、プラスチック管内のほぼ中央部の板上の基板に LED が並べられている構造になっている。①～③、⑤において LED 照明管自体は同一のものを使用した。結果として、照射室内の照明設置位置で推定される線量から、通常の照明器具の消耗サイクル以上の時間における累積放射線量を推定し、それ以上の放射線量を累積で照射したが、LED 自体の不具合は外見上確認できなかった。しかし、LED 照明管を構成するプラスチック管に変色が見られた。（図 7 参照）

以上、④、⑤について表 1 にまとめる。また、先の確認結果と同様に不具合が起こった線量を年数に変換して表 1 にまとめる。蛍光灯照明器具は、LED 照明器具よりも放射線損傷による不具合発生が早くなる結果となった。制御・電源基板部分を照明器具から分離して、低線量位置に移動させる方法が有効であることが分かった。LED 照明管自体も照明として十分な耐久性があることが分かった。

4 まとめ

照明器具の放射線損傷の検討として市販されている LED 照明器具と蛍光灯照明器具を用いて行った。LED 照明器具の制御・電源基板の FET や IC で不具合が確認された。遮蔽材による線量低減化効果は確認できたが、費用及び安全面から実用的ではなかった。蛍光灯照明器具に関しては、LED 照明器具より不具合が早く起きる可能性があることが分かった。LED 照明管は、高線量の照射室内でも十分な耐久性があると考えられた。結果として、市販の照明器具を使用し安全・安価に照明を維持するためには、LED 照明器具を用いて制御・電源基板部分を低線量の位置へ移動する方法（不具合箇所が線源から距離をとる線量低減化方法）が最善であると分かった。

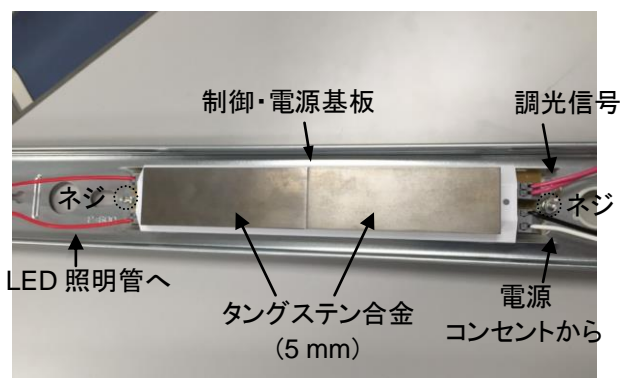


図 5. 制御・電源基板へのタングステン合金設置図

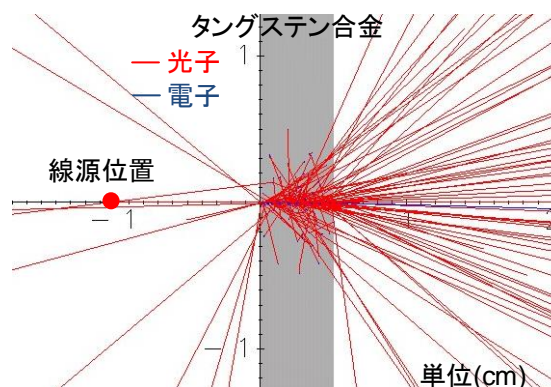


図 6. タングステン合金 5 mm 遮蔽計算例



図 7. LED 照明管の照射の影響

表 1. 放射線損傷の確認結果

確認作業内容	不具合の確認された線量 (Gy)	不具合箇所	年数
① 不具合箇所	256	FET	0.5
② 導通による影響	350 - 613	電源 IC	0.7 - 1.2
③ 遮蔽による効果	328	FET、電源 IC	0.7
④ 蛍光灯照明	57	電源 IC	0.1
⑤ 基板を低線量の位置	サイクル以上照射で不具合なし		

参考文献

- [1] アイソトープ手帳 11 版
- [2] Glenn. F. Knoll, 放射線計測ハンドブック第 3 版
- [3] H. Hirayama, et al, "The EGS5 Code System", SLAC-730, (2005)
- [4] 下平勝幸, "宇宙用半導体とその放射線対策", RADIOISOTOPES **86**, 81-90, (1980)