



UV-LED を利用した水処理技術

東京大学 大学院工学系研究科 都市工学専攻
小熊久美子

1. 紫外線による水の消毒

紫外線は、太陽放射のうち X 線より長く可視光より短い波長を持つ電磁波と定義され、特に波長によって真空紫外線 (10 - 200nm), UV-C (200 - 280 nm), UV-B (280 - 315 nm), UV-A (315 - 400 nm) に分類される（境界波長はやや異なる定義もある）。真空紫外線は大気を透過できないため、また、UV-C はオゾン層でほとんどカットされるため、地表には届かない。オゾン層の破壊により皮膚がんが増えると懸念されるのは、UV-C が地表まで到達しやすくなるためである。一方、UV-C, UV-B が生物にダメージを与えることを積極的に利用すれば、消毒技術として有効である。紫外線消毒の作用メカニズムは、光子 (photon) が生物の遺伝子塩基にピリミジン二量体などの損傷を与え、細胞の代謝機能や自己複製能に異常をきたすことによる。この場合、紫外線照射によってその細胞自体が直ちに死滅するわけではなく、次世代の細胞を残せない（増殖できない）ままいずれ死滅する現象を意味するため、厳密には紫外線の効果は“殺菌”ではなく“不活化”と称する。多くの場合、病原微生物が宿主（ホスト）に感染するのは宿主内で増殖しある閾値に達することで成立するため、増殖能力を奪うことが感染性を奪うこととほぼ同義であることは理解できる。また、紫外線により励起された細胞内外の光増感物質がラジカルなどの活性酸素種を生成し、それにより細胞に酸化ダメージを与えて不活化する機構も知られている。

紫外線ランプを用いて水を消毒した記録は、1910 年のフランス・マルセイユの事例に源流を見ることができる。当時は水処理技術として定着せず、紫外線消毒の本格的な利用は 1970 年代後半から始まった。これは、1972 年に水道水中のクロロホルム（トリハロメタンの一種）が世界で初めて同定され、それ以降検出報告が相次ぎ、塩素消毒で非意図的に生成する消毒副生成物への社会的な懸念が急速に高まつたことに端を発する。その後、1990 年代後半の病原原虫クリプトスピリジウムをめぐる騒動が紫外線消毒の普及をさらに加速させた。1996 年にアメリカのミルウォーキーで発生したクリプトスピリジウムの集団感染は、感染者数 400 万人と推定され、今なお世界最大規模の水道を介した感染事故として悪名を残している。水道を介したクリプトスピリジウム感染事故は今なお世界各地で散発しているが、それは、この病原原虫が著しく高い塩素耐性を有し、一般に浄水場で採用される塩素消毒条件ではほとんど不活化されないためである。1998 年、紫外線はクリプトスピリジウムに極めて有効との最初の報告がなされ、それを支持する科学的データが世界中で次々と発表された。なお、塩素がほとんど効かない原虫に紫外線が有効な原理は、水環境中でクリプトスピリジウムがとる形態（オーシスト）の“殻”は薬剤に対し強固なバリアとして機能するが、紫外線に対するバリア機能はほとんどなく、紫外線がオーシスト内部に潜む生命体（スプロゾイド）に到達できるためと考えられている。実際に、クリプトスピリジウムのオーシストに紫外線を照射するとスプロゾイド遺伝子にピリミジン二量体を生じることが実験的に証明されている¹⁾。これらの科学的知見を受け、クリプトスピリジウム対策として紫外線消毒を位置づける機運が世界中で高まり、先進国を中心に導入が進んだ。日本では、2007 年、クリプトスピリジウム等対策指針の改訂により、原水が一定の基準を満たす場合には淨