

産業分野の多様な用途に対応した紫外線ランプ及び紫外線LEDモジュールの最新技術

Latest Technologies for Ultraviolet Lamp and LED Modules Corresponding to Various Industrial Applications

田内 亮彦 藤岡 純 峯山 智行

■ TAUCHI Akihiko ■ FUJIOKA Atsushi ■ MINEYAMA Tomoyuki

産業用途として生産設備や製品に搭載されている紫外線 (UV) ランプは、短波長のUV光を用途に合わせて効率よく、高い放射エネルギーで照射できるため、様々な分野で使用されている。

東芝ライテック(株)は、既存のUVランプと器具や光学系など、周辺応用技術の融合により、高性能液晶パネル製造用UV照射モジュールなどの製造設備を液晶パネルメーカーへ供給している。また、船舶のバラスト水中の外来生物によって生態系が破壊されるのを防ぐために、船舶搭載用で省スペースかつ大容量処理に対応した、バラスト水処理用の長寿命な高圧水銀 (Hg) ランプも装置メーカーと共同で開発した。現在は、次世代UV光源としてUV発光のLED (発光ダイオード) を搭載したUV照射モジュールについても、印刷や液晶市場などでの利用拡大が予想されているため、冷却方式や光学設計技術を活用した製品開発を行っている。

Ultraviolet (UV) lamps, which can efficiently provide short-wavelength UV irradiation with high energy according to the application, are installed in production facilities and products in a variety of industrial fields.

In response to market needs, Toshiba Lighting & Technology Corporation is continuously engaged in the development of UV lamps and systems and is also developing UV light-emitting diode (LED) modules as a next-generation light source. We have been supplying a UV irradiation module for high-performance liquid crystal display (LCD) panel manufacturing equipment, which was realized by integrating our established UV lamp and module technologies including optical systems and devices. We have also developed and released a dedicated high-pressure mercury lamp for marine ballast water treatment systems in cooperation with system manufacturers, in order to prevent ecosystem degradation by alien species in ballast water. Moreover, we are developing UV LED mounting modules for the printing and LCD panel markets, which are expected to further expand in the future, through the application of our cooling and optical design technologies.

1 まえがき

UVランプは、既に多くの製品が実用化され、技術的に成熟している分野である。広い波長域に強い発光強度を持つその特徴から、産業用途全体では多くの種類のUVランプが使用されている(表1)。またUVランプは、特定の波長域をカットする光学フィルタを装備した照射器具に搭載してモジュール化することで、ランプが放射するUV光を必要に応じた波長域に制限できることも、産業用途で使用される理由の一つである。その用途には、光洗浄や光重合などの光化学反応が挙げられ、代表的な市場として液晶パネル製造工程やタッチパネル用の機能性フィルム製造工程などがある。また、環境対応として注目されている水及び空気殺菌用途でも使用されている。

しかし近年では、環境負荷の低減を目的とした水銀 (Hg) 規制や省エネ化の要求から、一般照明用ランプと同様に、一部の波長帯ではUVランプのLED化が急速に進んでいる。

ここでは、様々な市場で利用されているUVランプとUV照射モジュールについて、東芝ライテック(株)の代表的な製品、市場要求と技術的な課題、及びその達成手段を中心に述べるとともに、次世代のUV光源として期待されているUV発光の

表1. 代表的なUVランプの種類と用途
Types and applications of typical UV lamps

種 類	用 途	波長帯 (nm)
低圧Hgランプ	殺菌、光洗浄	185, 254
高圧Hgランプ	硬化、露光	254, 365
超高圧Hgランプ	硬化、露光	365, 436
メタルハライドランプ	硬化、光重合	300 ~ 400
誘電体バリア放電ランプ	光洗浄	172

LED (以下、UV-LEDと呼ぶ) を搭載したUV照射モジュールについての技術開発や製品性能について述べる。

2 液晶パネル製造用UVランプモジュール

液晶テレビやスマートフォンに代表される液晶ディスプレイの製造工程にUVランプが使用されている。代表的な工程として、光洗浄や、露光、接着剤硬化などが挙げられる。この章では、大型液晶テレビで高品質な画像を達成するために確立された、最先端の高視野角技術であるPSA (Polymer Sustained Alignment) 液晶パネルの製造工程で採用されたUV

ランプとUV照射モジュールについて述べる。

2.1 PSA液晶パネルの製造におけるUV光の役割⁽¹⁾

PSA液晶パネルの製造工程においてUV光が果たす役割は、液晶内に組み込まれたモノマーをUV光照射によりポリマーフィルムに転移させることであり、基板の配向膜（ポリイミド層）上にポリマー層を形成することで液晶の事前傾斜角が設定される。これにより、液晶が配向膜の表面上に適切に配向され、高コントラストかつ高透過率のディスプレイの製造が可能になる。

この光配向技術を実現するには、液晶内に組み込まれるモノマーが効率よくポリマー化するための分光波長特性と、大型ガラス基板に均等なポリマー層を形成するためのUV照度の均一性（均斉度）が要求される。

2.2 UVランプ及びUVランプモジュールの仕様

UVランプは、PSA液晶パネルの製造工程での使用に適した300～400 nmのUV光を効率よく放射する鉄（Fe）とヨウ化水銀（HgI₂）を封入したロングアークのメタルハライドランプとした。このランプの仕様を表2に、外観を図1に示す。発光管（バルブ）内でヨウ化鉄（FeI₂）となったFeは、高温プラズマ内で熱励起され、Fe特有の強いUV発光（358 nm、及び372 nm）を示し、Hgの発光（365 nm）と併せた連続発光となることで、UV発光効率の高いランプとなる。このランプは、古くから印刷インクや樹脂硬化用のランプとして使用されている。

表2. PSA液晶パネル製造用のUVランプの仕様

Specifications of UV lamp for polymer sustained alignment (PSA) LCD panel manufacturing

項 目	仕 様
発光長	2,000 mm
管直径	27.5 mm
ランプ電力	24 kW
封入物	Hg, Fe, Sn, HgI ₂
実力寿命	3,000 h以上

Sn：すず



図1. PSA液晶パネル製造用のUVランプー 代表的なロングアークランプの外観である。高効率で安定した分光特性のUV光が得られる。
UV lamp for PSA LCD panel manufacturing

PSA液晶パネル製造用としては、波長320 nm以下の不要なUV光をカットするための二酸化チタン（TiO₂）を添加した専用フィルタと、400 nm以上の可視光線及び赤外線（IR）をカットするフィルタとを組み合わせたUV照射モジュールに、このメタルハライドランプを搭載したUVランプモジュールが用いられる。

このUVランプモジュールから照射されるUV光は、効率よいポリマー化を達成するために、液晶にダメージを与える320 nm以下の波長をカットした、図2に示すような分光分布になっている。また、冷却には独自の間接水冷方式を採用し、発光長2,000 mmの長尺UVランプにおいても軸方向の高い照度均一性と長寿命化（実力寿命3,000 h以上）を実現した。そのため、2007年度から現在に至るまで、大型パネル製造用のUVランプモジュール（図3）として、台湾と中国を中心とした液晶パネルメーカーに採用されている。

2.3 省エネ対応のUVランプモジュールの開発

このようなメタルハライドランプ搭載のUVランプモジュールは、PSA液晶パネルの生産性向上に貢献した。しかし、ラン

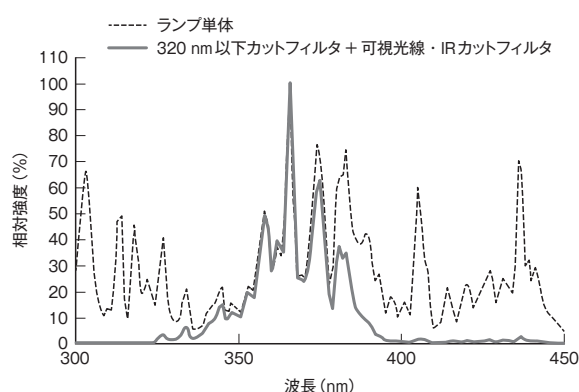


図2. PSA液晶パネル製造用のUVランプモジュールの分光分布 — 320 nm以下の波長をカットする専用のUVカットフィルタと可視光線及びIRをカットするフィルタの組合せにより、有効なUV域だけを分光できるモジュールを開発した。

Spectral distribution characteristics of UV lamp module for PSA LCD panel manufacturing

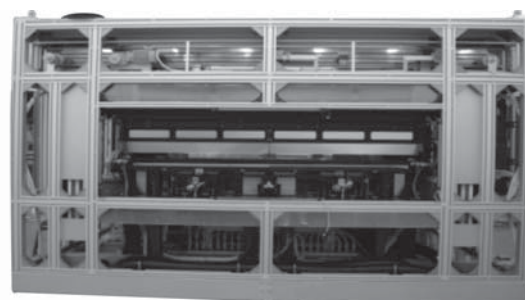


図3. PSA液晶パネル製造用のUVランプモジュールー 第8.5世代のガラス基板サイズ2,200×2,500 mmに対応したUVランプモジュールである。
UV lamp module for large PSA LCD panel manufacturing



図4. UV-FL — UV照射モジュールに搭載されるUVランプで、従来の
メタルハライドランプに比べ、消費電力を大幅に削減できる。
UV irradiation type hot-cathode lamps (UV-FL)

プの消費電力が大きいため、ランニングコストが高いという課題が挙げられた。

このようななかで、ポリマー化に必要なUV波長域のうち、365 nmの波長の照度が小さくても安定してポリマー化される新たな材料が開発されたことを受け、当社は、カットする波長を320 nm以下から360 nm以下にすることで照射波長域を狭小化し、消費電力を削減した熱陰極蛍光形UVランプ（以下、UV-FLと呼ぶ）を新たに開発した（図4）。これにより、第4.5世代のガラス基板サイズ730×920 mmに対応したUVランプモジュールの場合、従来は12 kWのメタルハライドランプ5灯（合計60 kW）の搭載が必要であったのに対し、新たなモジュールでは45 WのUV-FLが26灯（合計約1.2 kW）となり、消費電力を1/50まで削減した。

現在は、更なる高性能（高均斉度）及び低ランニングコスト（省電力）の要求に対応するUVランプモジュールの開発を進めている。

3 水処理用UVランプ

上下水道水の殺菌や半導体工場で使用される超純水中に含まれる有機物の分解など、水処理用には、254 nmの波長を利用した低圧Hgランプが広く使用されている。

また近年、水処理市場では、バラスト水の処理が注目されている。バラスト水とは、外航船が空荷の際に船舶を安定させるための“おもり”として積載する海水のことで、バラスト水の中に吸入された生物が船舶の航行によって非生息海域に移入し、外来種として繁殖することによる生態系の破壊や、漁業活動などの経済活動への被害が懸念されている。

この対応として、2004年2月に国際海事機関（IMO）において「二千四年の船舶のバラスト水及び沈殿物の規制及び管理のための国際条約」が採択され、近い将来に発効する予定である。この条約の基準を満たすものとして、UVランプを用い

た水処理方法がある。

既存船舶への搭載も考慮し、省スペースかつ大容量処理に対応するために当社が開発した専用の高圧Hgランプについて、以下に述べる。

3.1 高圧Hgランプの基本仕様

高圧Hgランプの開発目標として、生物DNA（デオキシリボ核酸）の光吸収波長域の高発光効率化と、船舶メンテナンスサイクルである3年間の無交換運転を達成するための長寿命化を挙げた。開発品の概略を図5に、基本仕様を他社製品と比較して表3に示す。

開発品では、高発光効率を達成するためにHg量の調整による電位傾度の最適化を、長寿命を達成するためにハロゲン添加量の最適化と電極のエミッタフリー化を実施した。

3.2 発光効率とUV照度維持率の改善

ランプ電極間の電位傾度に対するUV照度及び分光分布の測定結果を図6及び図7に示す。UV照度は電位傾度が14 V/cmのときに最大となり、14 V/cm以上ではHg蒸気圧の上昇に伴うUV光の自己吸収により低下している。分光分布は、電位傾度が増加、すなわちHg蒸気圧が上昇することで、254 nm波長域から長波長側にブロードな発光となる。これは、Hg蒸気圧の上昇により原子間距離が短くなり、原子どうしに働く分子間力の影響が強まるためと考えられ、ブロード発光はランプ管径によっても効率の最適値がある。開発品の外径23 mm

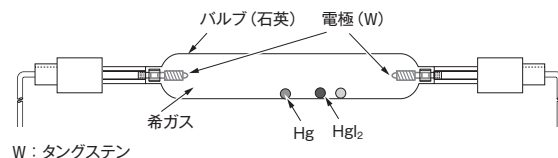


図5. 高圧Hgランプの構造 — 船舶用のバラスト水処理専用開発したもので、高い発光効率とUV照度維持率が得られている。
Structure of high-pressure mercury lamp

表3. 高圧Hgランプの基本仕様

Basic specifications of high-pressure mercury lamp

項 目		開発品	他社品
構成	管直径 (mm)	23	22.5
	電極	2.0 %ThO ₂ -W	2.0 %ThO ₂ -W
	エミッタ	なし	Y ₂ O ₃
	封入物	Hg, I	Hg, F, I
特性	ランプ電力 (W)	3,000	3,000
	入力密度 (W/cm)	100	100
	電位傾度 (V/cm)	14	14
	UV照度* (mW/cm ²)	37.7	37.5
	5,000 h維持率* (%)	84	69
	実力寿命* (h)	8,000以上	5,000

ThO₂ : 二酸化トリウム Y₂O₃ : 酸化イットリウム F : フッ素 I : ヨウ素

*社内比較データ（（株）オーク製作所製照度計UV-M03にて評価）

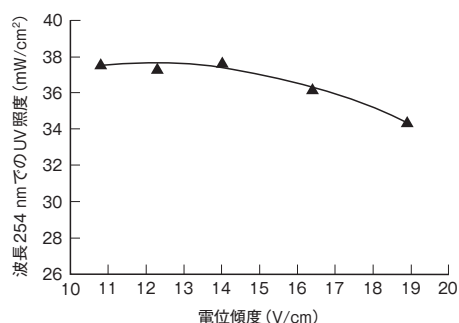


図6. 電位傾度に対するUV照度の測定結果 — UVランプの電位傾度をHg量により調整した結果、14 V/cmにおいてもっとも照度が高くなることを確認した。

Potential gradient vs. UV illuminance

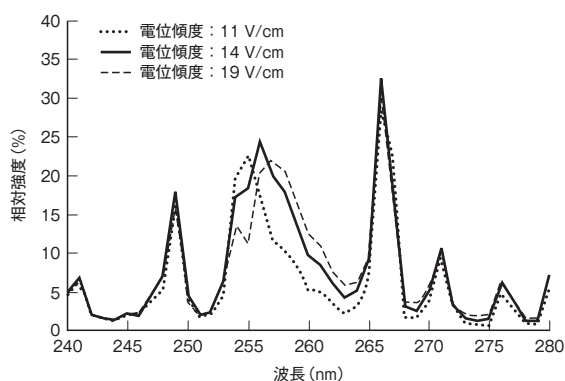


図7. 電位傾度に対する分光分布の測定結果 — 図6のUV照度と同様に、14 V/cmにおいて254 nmより長波長側がブロードに発光することを確認した。

Dependence of spectral distribution characteristics on potential gradient

では、電位傾度を14 V/cmとすることで、DNAの光吸収波長域である240～280 nmの分光分布の積分値（分光積分強度）が最大となり、他の用途で代表的な11 V/cmと比較して23%の効率改善を達成できた。

次に、UV照度維持率の改善として、ハロゲン添加量の最適化とエミッタフリー化を実施した結果を図8に示す。発光管へのHg付着やエミッタ飛散を抑制できたことで、発光管の透過特性低下によるUV照度の低下が軽減され、UV照度維持率が改善された。この結果、他社品と比較して大幅なUV照度維持率の改善を実現し、8,000 h以上の実寿命を確保できた。

開発した高圧Hgランプは、小型、軽量、高効率、及び低コストを実現した専用電子安定器と併せて、2013年度の船上試験を経て、2014年度より正式採用されている。現在、更なる高性能、高信頼性、及び低コストの実現に向け開発を継続している。

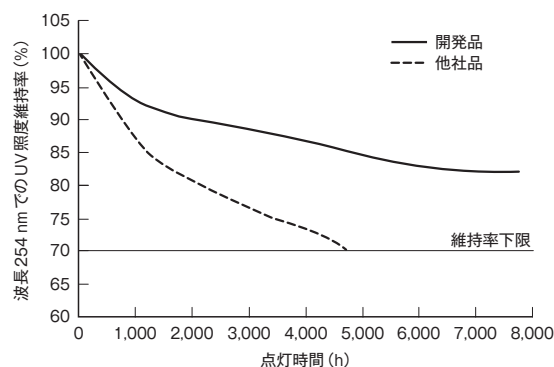


図8. UV照度維持率 — 添加ハロゲンの最適化と電極エミッタ飛散の抑制により、UV照度維持率が大幅に改善し、実寿命として8,000 hで維持率70%以上を確保できることを確認した。

UV irradiation maintenance rates

4 UV-LEDモジュール

一般照明用ランプのLEDへの置換えが飛躍的に進んだように、UVランプにおいても、UV-LEDの外部量子効率の高効率化とともに、UV-LEDへ置き換えるUV-LED化が進んでいる。今後、長尺のUVランプや大面積対応のUV照射装置もUV-LED化が進むと考えられる。UV-LEDの動向と、UV-LEDを搭載したUV照射モジュールの構造設計と光学評価の状況について、以下に述べる。

4.1 UV-LEDのラインアップの状況

現在、量産化されているUV-LEDの発光波長は、UV-A領域（波長315～400 nm）に区分される365 nm、375 nm、及び385 nmの波長域がほとんどで、チップ単体の外部量子効率は40～50%である。この領域の高効率化が進んだ理由は、基本材料が青色LEDと同一の窒化ガリウム（GaN）系半導体であることが大きい。結果、この領域のUV-LEDは飛躍的に高効率化が達成され、出力に合わせて1素子に1チップ又は4チップのUV-LEDを実装する製品がラインアップされている（図9）。一方、窒化アルミニウム（AlN）系材料を使用せざるをえないUV-B領域（波長280～315 nm）及びUV-C領域（波

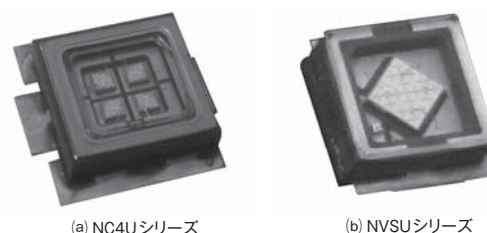


図9. UV-LED素子 — 量産化されているUV-LED素子（日亜化学工業（株）製の社内評価を進めている。

UV LED elements made by Nichia Corporation

長 100 ～ 280 nm) の UV-LED は、効率が数 % 程度と低く、製品化は進んでいるが殺菌用の UV ランプの置換えには、更なる効率向上が必要である。

4.2 水冷式 UV-LED モジュール

現在、UV-LED 化はスポット UV 照射装置を中心として進んでいるが、今後は、乾燥硬化や重合用としてロングアークの UV ランプが採用されている、印刷や液晶市場での利用拡大が予想される。

そこでロングアーク高圧 Hg ランプを搭載した既存 UV ランプモジュールの UV-LED 化を想定し、UV-LED を搭載した水冷式の UV 照射モジュール (UV-LED モジュール) の基礎評価を実施した。

チップは高圧 Hg ランプのピーク波長である 365 nm で比較を行うため、日亜化学工業 (株) 製の波長 365 nm で高出力仕様の UV-LED NC4U シリーズを使用した。また、発光エリアを合わせるため、合計 28 個の UV-LED を、図 10 に示すように、ピッチ 10 mm で 14 直列 2 並列に実装し、その実装基板を水冷ブロックに密着させた構成とした。

UV-LED モジュールと UV ランプモジュールの仕様及び性能比較を表 4 に示す。

UV-LED モジュールは、高圧 Hg ランプ搭載の UV ランプモジュールと比較して、順電流値 700 mA のときに、365 nm の UV 照度が約 1.5 倍で、積算光量が 1.32 倍であることを確認した。また、投入電力も約 20 % の省電力となり、長寿命で省エネ化

が実現できることを確認した。

しかし、UV 照度差の 1.5 倍に対し、積算光量差が 1.32 倍であることからわかるように、UV-LED では、その単一波長特性により、UV ランプよりも狭い波長域で発光する影響が見られている。光反応の用途によっては、365 nm の UV 照度ではなく、UV 波長域の積算光量が重要となる場合があり、UV-LED の単一波長特性がデメリットになることが考えられる。

今回は、高圧 Hg ランプの UV-LED 化を想定したが、今後は、ブロードな分光分布を持つ金属ハライドランプの置換えも視野に入れると同時に、分光分布による被照射物の反応性についても検討していく。

5 あとがき

産業用途に使用される UV ランプは、UV 照射モジュール技術との融合により、現在も多くの市場で様々な用途に使用されている。同時に次世代光源として、UV-LED も急速な高効率化が進んでいる。

当社は今後も、UV 事業の更なる拡大に向け、市場要求に最適な UV ランプの開発や UV-LED の最適選定などにより、UV 照射モジュール技術の向上に努めていく。

文 献

- (1) Chiu, C.-Y. 他. 時代の波を超え、成長続ける FPD 産業～第 5 回●パネル・メーカーの技術と戦略 (AUO 編). 日経マイクロデバイス. 288, 2009, p.46～52.

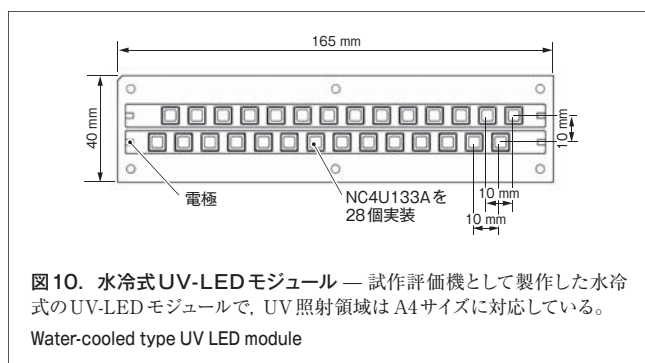


図 10. 水冷式 UV-LED モジュール — 試作評価機として製作した水冷式の UV-LED モジュールで、UV 照射領域は A4 サイズに対応している。

Water-cooled type UV LED module

表 4. UV-LED モジュールと UV ランプモジュールの仕様比較

Comparison of specifications of UV LED and high-pressure mercury lamp modules

項 目	UV-LED モジュール	UV ランプモジュール
光源種	UV-LED	高圧 Hg ランプ
発光長 (mm)	125	140
投入電力 (W)	286	1,500
電力密度 (W/cm)	20	120
ピーク照度* (mW/cm ²)	365	250
積算光量* (mJ/cm ²)	2,210	1,675
照度寿命 (h)	10,000 以上	1,000

*ピーク照度及び積算光量は照射距離 30 mm、搬送速度 10 mm/s のときの値



田内 亮彦 TAUCHI Akihiko, Ph.D.

東芝ライテック (株) 産業デバイス事業部 産業光源技術部参事、博士 (工学)。UV モジュールの設計・開発に従事。
Toshiba Lighting & Technology Corp.



藤岡 純 FUJIOKA Atsushi

東芝ライテック (株) 産業デバイス事業部 産業光源技術部。UV モジュールの設計・開発に従事。
Toshiba Lighting & Technology Corp.



峯山 智行 MINEYAMA Tomoyuki

東芝ライテック (株) 産業デバイス事業部 産業光源技術部。UV ランプの設計・開発に従事。
Toshiba Lighting & Technology Corp.