

光反応プロセスの省電力化に貢献する 47 kW LED ランプ

47 kW LED Lamp for Reduction of Power Consumption in Photochemical Reaction Processes

長野 信久 岩尾 明男 石川 達章
 ■NAGANO Nobuhisa ■IWAO Akio ■ISHIKAWA Tatsuaki

東芝ライテック(株)は、ナイロン原料であるカプロラクタムの合成に使用される光反応プロセス用光源として、1959年の水銀ランプから始まり、効率を改善した現行のナトリウムランプに至るまでの開発及び製造を担ってきた。

今回当社は、東レ(株)と共同で、更なる消費電力の削減を目指し、ナトリウムランプに代わる光源としてLED(発光ダイオード)ランプの開発に取り組んだ。星形の16面体形状によるLEDの高密度実装技術、LEDを低ジャンクション温度で動作させるための水冷式の冷却構造、及び小型・高効率な定電流電源を開発し、光反応プロセスでの消費電力を、ナトリウムランプに比べ約30%削減できる47 kWの大電力LEDランプを実現した。

Toshiba Lighting & Technology Corporation has been engaged in the research and development of light sources for photochemical reaction processes developed by Toray Industries, Inc. for the synthesis of caprolactam, a raw material for nylon. We manufactured mercury lamps for these processes in the 1960s, and have been supplying sodium lamps with improved efficiency up to the present time.

In cooperation with Toray Industries, we have now developed a light-emitting diode (LED) lamp with a large output power of 47 kW to replace existing sodium lamps, with the aim of reducing power consumption. This LED lamp achieves an approximately 30% reduction in power consumption compared with that of a sodium lamp by applying the following technologies: (1) a high-density packaging technology in which a large number of LEDs are mounted on a 16-sided polyhedral structure, (2) a water-cooled system achieving a lower junction temperature for each LED, and (3) a constant-current power supply offering high efficiency and compactness.

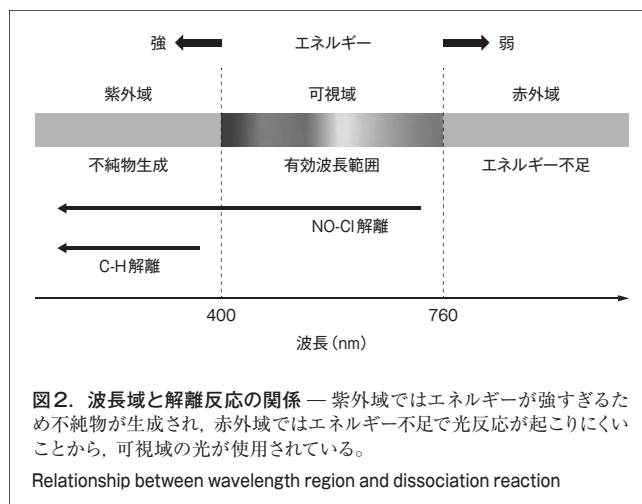
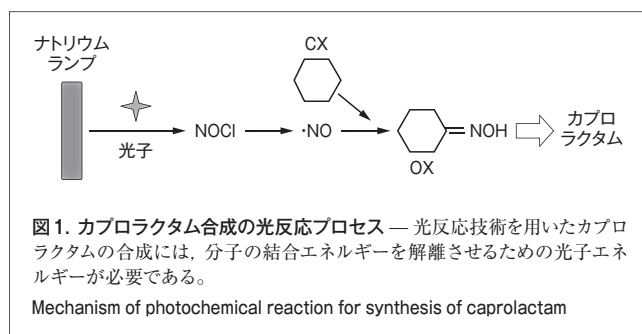
1 まえがき

東芝ライテック(株)は、ナイロン原料であるカプロラクタムの合成に使用される光反応プロセス用光源として、水銀ランプから始まり、効率を改善したナトリウムランプの開発及び製造を続けてきた。しかし、ナトリウムランプ以上の効率を放電ランプで実現するのは難しく、更なる消費電力の削減のため、LEDランプを東レ(株)と共同で開発した。ここでは、今回開発した光反応プロセス用LEDランプの技術及び特長について述べる。

2 LEDによる光反応プロセスの省電力化

光反応によるカプロラクタム製造プロセスは、東レ(株)で開発された技術である。この光反応プロセスを図1に示す。ナトリウムランプから放射される光子エネルギーによって、出発原料である塩化ニトロシル(NOCl)を解離させ、発生した一酸化窒素ラジカル(以下、 $\cdot\text{NO}$ と略記)をシクロヘキサン(以下、CXと略記)と反応させて中間体のシクロヘキサノンオキシム(以下、OXと略記)を作り、カプロラクタムを合成するプロセスである。

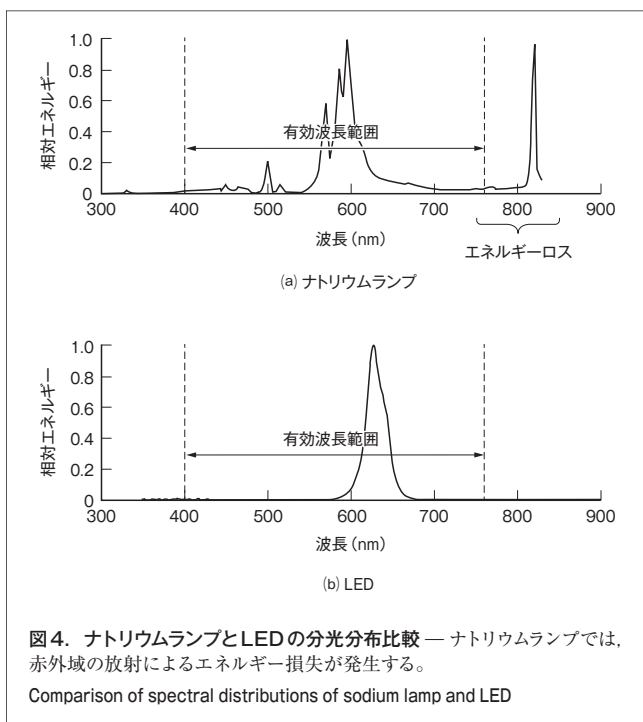
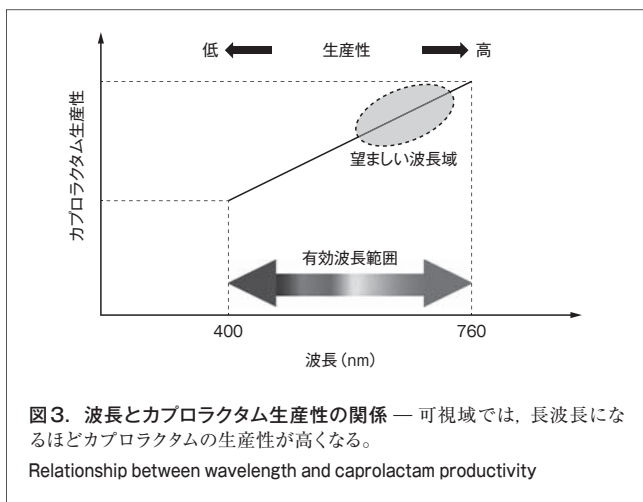
波長域と解離反応の関係を図2に示す。光反応プロセスで使用する光は、紫外光放射ではエネルギーが強すぎるため不



純物が生成され、赤外光放射ではエネルギー不足のため反応が起こりにくい。したがって、効率的な反応のためには、一酸化窒素 (NO) 分子と塩素 (Cl) 原子との結合 (NO-Cl) を解離でき、かつ、炭素原子 (C) と水素原子 (H) との結合 (C-H) を分解しない可視域の波長の光を利用することが必要である。

可視域の波長とカプロラクタムの生産性の関係を図3に示す。全光エネルギーを E (J), 光子数を N , 光子1個のエネルギーを e (J), プランク定数を h ($=6.626 \times 10^{-34}$ J·s), 光の振動数を ν (s^{-1}), 光速を c (m/s), 波長を λ (m) とすると, $E = N \cdot e$ 及び $e = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$ であることから, 式(1)より, 同じ E を照射しても, 長波長ほど多数の光子を利用できることがわかる。

$$N = E\lambda / (h \cdot c) \quad (1)$$



光子数が多いほど生産性が向上するため, 光反応プロセス用光源の波長を波長域 600 ~ 700 nm から選択することにし, この中のピーク波長 615 nm のLEDを採用して開発を進めた。

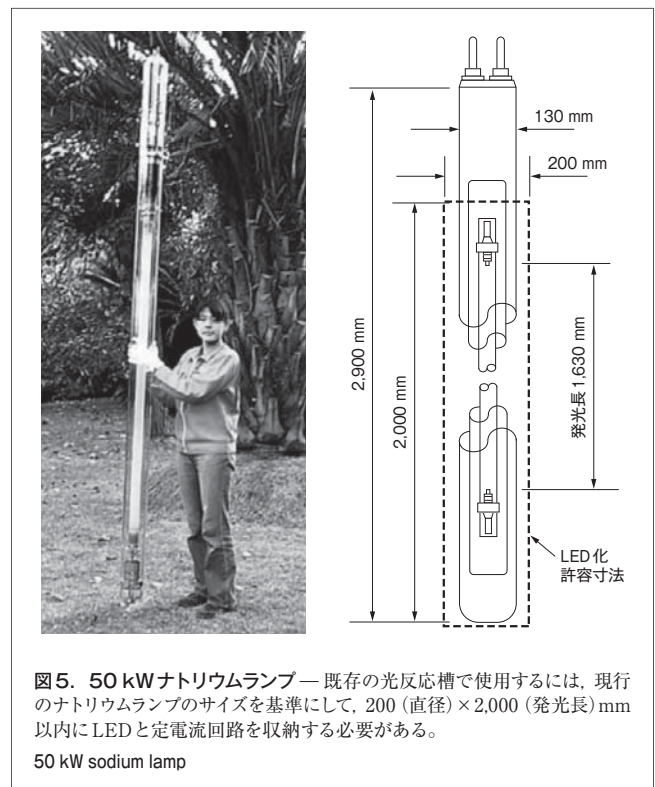
従来用いていたナトリウムランプとピーク波長が 615 nm のLEDにおける分光分布の比較を図4に示す。ナトリウムランプは 800 nm より長波長の赤外域の放射を含むので, この波長域のエネルギーを有効利用できない。一方, LEDの発光波長は 600 ~ 700 nm の範囲内にあるため, 全放射エネルギーを有効利用できる。したがって, ナトリウムランプからLEDランプへの置換え (以下, LED化と呼ぶ) によって, 省電力化を実現できる⁽¹⁾。

3 LED化の課題

現行のナトリウムランプの外観を図5に示す。LEDランプは, 既存の光反応槽で使用されるため, 現行の 50 kW ナトリウムランプのサイズを基準とした 200 (直径) × 2,000 (発光長) mm に, LED 約 4 万個と 47 kW の定電流回路を収納することが求められる。そのため, 数多くのLEDを動作させるための冷却方式や大電力に対応した定電流回路の新規開発が必要になる。

3.1 LEDの冷却

LEDの動作温度は, 発光部のジャンクション温度 150℃以下が必須条件であるが, 低い温度で動作させるほど, より高効率になる。LEDに投入される電力 47 kW の約 7 割 (33 kW) は熱に変換されるため, そのエネルギーの放熱が重要になる。



3.2 47 kWの定電流回路の組み込み

前述したように、LEDランプは200 (直径)×2,000 (発光長) mmのスペースに収納する必要があるため、LEDを駆動する定電流回路の小型化が必須である。一般に、回路を小型化すると放熱面積が減少して部品温度が上昇する傾向があるので、回路の高効率化による発熱量の抑制が必要になる。

4 LED化に向けた技術開発

光反応プロセス用LEDランプの概略図を図6に示す。200 (直径)×2,000 (発光長) mmのスペースで、表面にはLEDを実装し、内部には電源回路を収納する構成とし、冷却は水冷式を採用した。

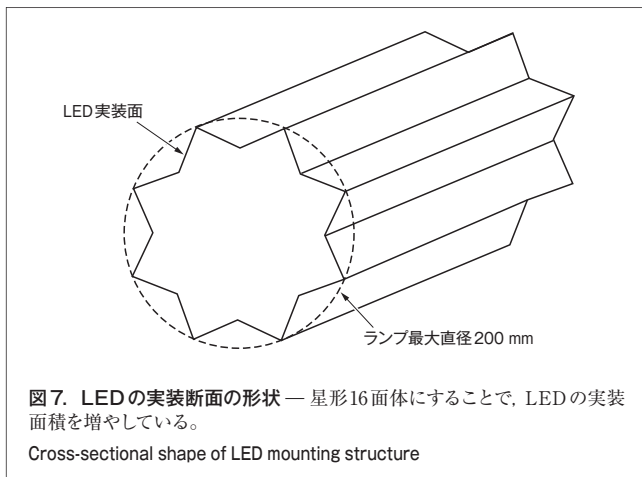
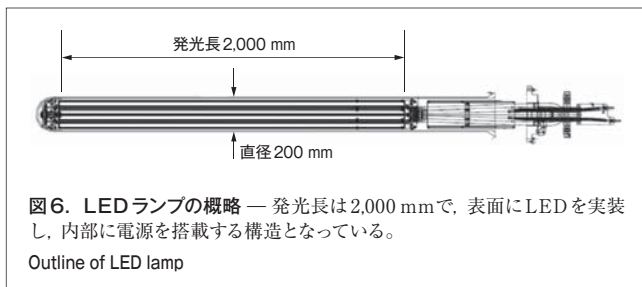
4.1 高密度LED実装

約4万個のLEDを収納するために、図7に示すように、LEDの実装断面を星形の16面体とすることで面積を増大した。

絶縁性と放熱性を考慮して、LED基板にはセラミックを用い、パッケージサイズ2.45×2.45 mmのLEDを280×31 mmの基板に約380個実装した。LED実装後の基板の外観を図8に示す。LEDランプには112枚のLED基板を搭載している。

4.2 水冷式の冷却構造

冷却は水冷式とし、組立性を考慮した4分割のアルミニウム製ヒートシンクを採用した。LEDランプの断面内部構造を図9に示す。



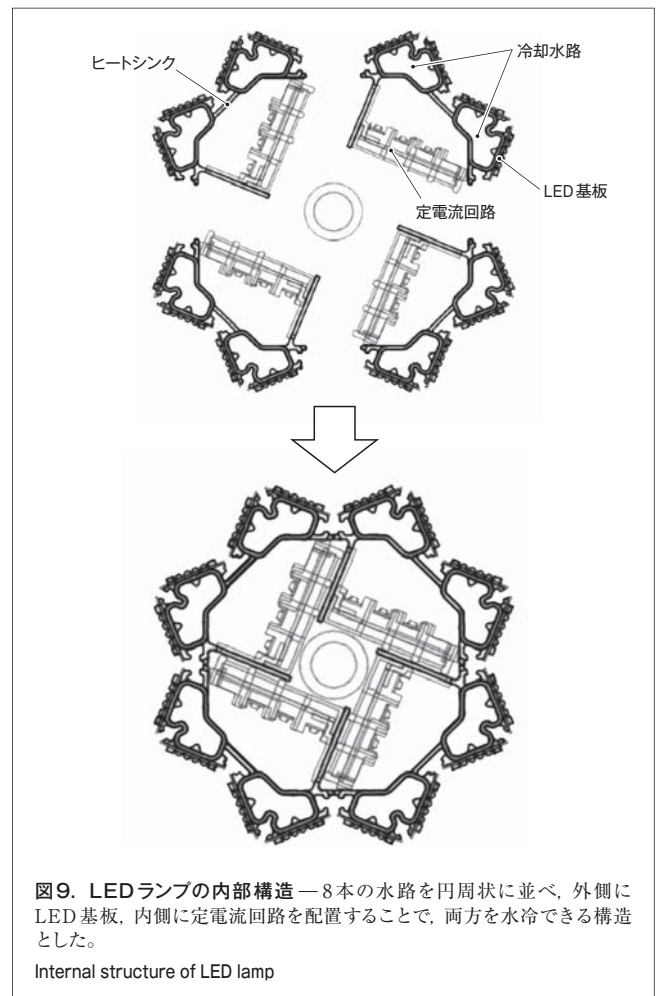
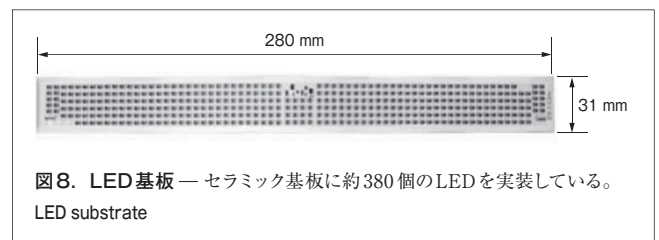
8本の水路を円周状に並べ、外側にLED基板、内側に定電流回路を配置し、両方を水冷できる構造とした。

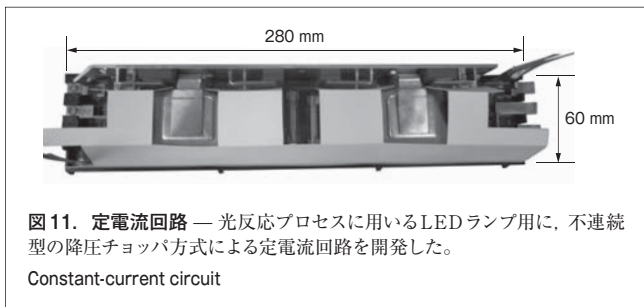
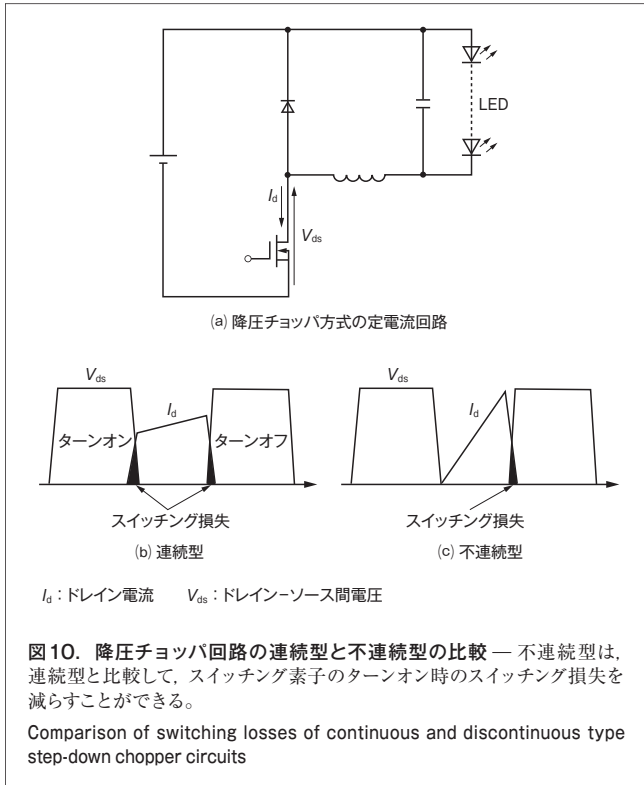
4.3 高効率定電流回路

定電流回路では、小型・高効率を達成するため、非絶縁タイプの降圧チョッパ回路を採用し、更なる効率向上のため、動作モードを電流不連続型とした。不連続型と連続型との比較を図10に示す。

不連続型は、連続型と比較してターンオン時のスイッチング損失を減らすことができる。この動作モードの採用により、回路変換効率97%を達成した。

今回開発した定電流回路の外観を図11に示す。LEDランプには28個の定電流回路を内蔵し合計47 kWに対応した。





5 光反応プロセス用LEDランプの特長

製品化した光反応プロセス用LEDランプの外観及び特長を以下に述べる。

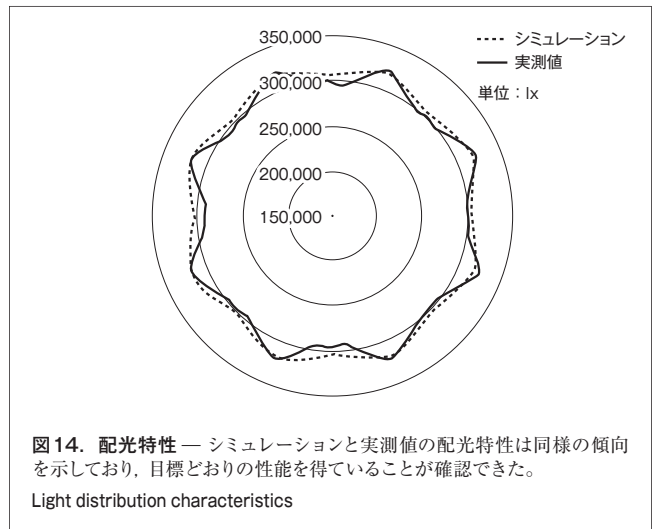
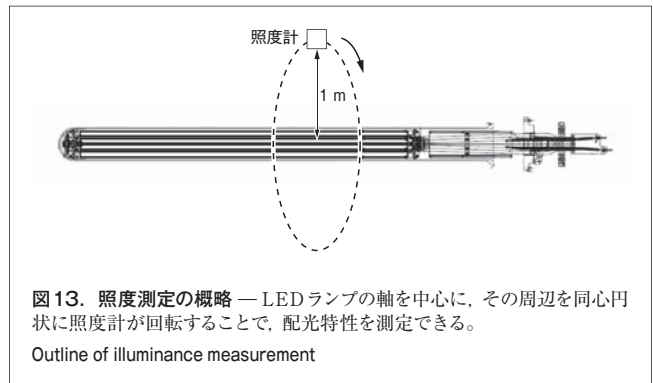
5.1 外観及び光学特性

LEDランプの消灯時、点灯時の外観を図12に示す。円周方向及び長さ方向ともに、ほぼ均一に点灯していることがわかる。

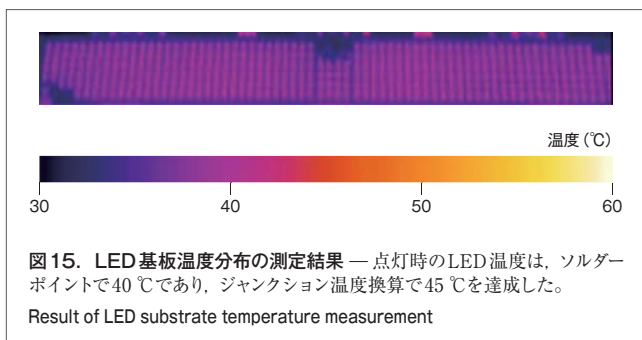
47 kWの大電力ランプの照度測定をするため、ランプ軸を中心に半径1 mの同心円状に照度計が回転する測定装置を導入した。照度測定装置の概略を図13に示す。これを用いて測定した配光特性の実測値と光学シミュレーション結果との比較を図14に示す。シミュレーション結果と実測値は同様の傾向を示し、平均値の差も2%で目標どおりの性能を得ていることが確認できた。

5.2 LED温度

LEDの動作温度は、LEDの出力(光束)を高めるために低



く抑える必要がある。そこで、水冷式の採用や、冷却水量の最適化、ヒートシンク及びLED基板の熱抵抗低減などを行うことで、動作温度の低減を図った。サーモグラフィで観測したLED基板の温度分布を図15に示す。ソルダーポイントの温度で40℃、ジャンクション温度換算で45℃を達成した。



5.3 電球形LEDランプとの比較

今回開発したランプと当社製電球形LEDランプとのサイズ比較を図16に示す。また、電力密度による比較を表1に示す。電球形LEDランプと比較して、長さが約20倍で体積が約120倍であるのに対し、出力は約6,000倍、電力密度は約50倍を実現している。これにより、今回開発したLEDランプのLEDが、いかに高密度に実装されているかがわかる。

5.4 LED化による削減電力

ナトリウムランプと比較して、全放射エネルギーを光反応プ

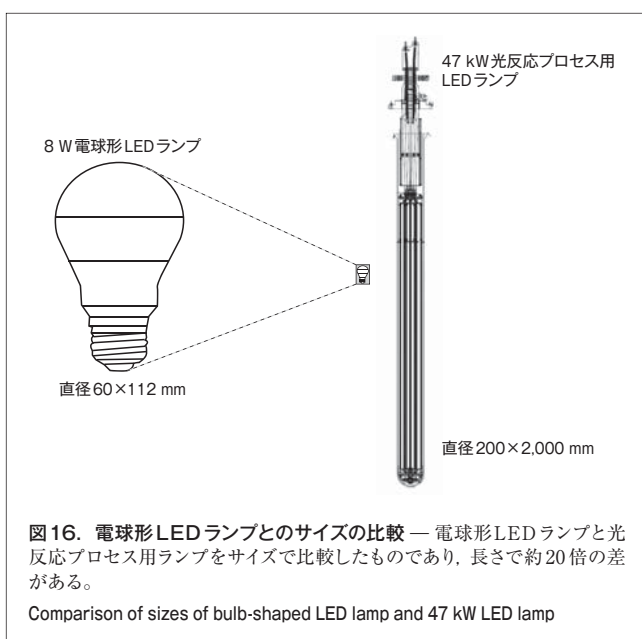


表1. 電球形LEDランプとの電力密度の比較

Comparison of power densities of bulb-shaped LED lamp and 47 kW LED lamp

項目	光反応プロセス用LEDランプ	電球形LEDランプ	倍率 (光反応プロセス用/電球形)
体積	約35,000 cm ³	約300 cm ³	約120倍
出力	47,000 W	8 W	約6,000倍
電力密度	約1.3 W/cm ³	約0.027 W/cm ³	約50倍

(注1) 2015年10月現在、光反応プロセス用LEDランプにおいて、当社調べ。

ロセスに有効利用できることから、東レ(株)の反応槽に組み込むLEDランプ本数を、現行のナトリウムランプと比較して約3/4に削減でき、またランプ1本当たりの消費電力を約4%削減できることにより、光反応プロセスでの消費電力を、約30%削減できる見込みである。

6 あとがき

LEDランプの断面形状を星形16面体としたことで、LEDの高密度実装や、LED基板と定電流回路の両方を冷却できる水冷式構造を実現するとともに、不連続型の降圧チョップ方式の採用で高効率定電流回路を実現し、世界最大級^(注1)の200(直径)×2,000(発光長)mmの光反応プロセス用LEDランプを製品化した。これにより、カプロラクタム合成の光反応プロセスにおける消費電力を約30%削減することが可能になった。

LEDの効率向上は日進月歩であることから、今後も、更なる省エネの達成に向けて継続的な開発を進めていく。

文 献

- (1) 東レ, “カプロラクタム合成用光反応ランプのLED化による省エネルギーの推進について”, TORAY, <<http://www.toray.co.jp/news/plastics/detail.html?key=CE5DE0696ED17F9F49257E650027DD61>>, (参照 2015-09-25).



長野 信久 NAGANO Nobuhisa

東芝ライテック(株) 産業デバイス事業部 産業光源技術部グループ長。スイッチング電源の設計・開発に従事。照明学会会員。

Toshiba Lighting & Technology Corp.



岩尾 明男 IWAO Akio

東芝ライテック(株) 産業デバイス事業部 産業光源技術部。スイッチング電源及びLEDランプの設計・開発に従事。

Toshiba Lighting & Technology Corp.



石川 達章 ISHIKAWA Tatsuaki

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ランプ安定器及びLEDランプの設計・開発に従事。

Toshiba Lighting & Technology Corp.