

「第3回植物工場ワーキンググループ」

資料4

栽培光源として利用される人工光源

- 1.栽培光源としてのLEDの特徴
- 2.LED素子の特徴と各種照明の比較
- 3.LED研究開発の現状と課題について
- 4.今後の新光源研究開発、コストダウンに向けての提言
- 5.LED植物工場の紹介
- 6.スタンレー電気の光源について

平成21年3月

森 康裕*・平本廣幸**

*東海大学理学部化学科非常勤講師

**スタンレー電気株式会社横浜技術センター 新規事業開発室室長

栽培光源としてのLEDの特徴

[1] 照射光の波長制御と光量調節が可能

植物の様々な光応答反応を利用して特定の波長の光を効率良く植物に照射
開花や結実時期の調節、植物の形態や栄養成分のコントロールが可能

[2] 小型軽量・低消費電力・熱放射が少ない

栽培植物の高さに合わせた近接照明が可能
場所をとらないコンパクトな照明装置や小型の栽培装置をビル状に何層も
積み重ねて栽培できる

[3] 長寿命

従来光源である高圧ナトリウムランプ(1万2千時間)やメタルハライドランプ(1万時間)、
蛍光灯(6千から1万3千時間)と比較して長寿命である。

植物栽培で最も重要な赤色LEDの寿命は10万時間、白色LEDでも6万時間と
長寿命でランプ交換が不要。

[4] 光合成に有効なパルス照射が可能

従来光源でのパルス照射は、照明ランプに対する負荷が大きく短命になるのに対して、
LEDは素子の冷却効率が上がり長寿命化する。

植物の光合成反応は、常に光を要求しているわけではないため間欠照射を行い
単位光量当たりの光合成速度を増大させる事が可能。

(例、光合成明反応系の律速因子であり光化学系 の反応中心であるP680の還元時間は200 μ s)

栽培光源としてのLEDの特徴

[1] 照射光の波長制御と光量調節が可能

植物の成長には、可視光に含まれる全ての波長が必要なわけではなく、特定の波長の光を取り入れて成長する。例えば光合成反応では、クロロフィルの吸収ピークがある660nm近辺(650~700nm)の赤色光がもっとも強く影響し、花芽形成や光屈性では、クリプトクロームやフォトロピンの吸収ピークがある450nm近辺(380nm~450nm)の青色光が影響を与えている。また、発芽や節間伸長に作用しているフィトクロームと言われる光受容体は、660nm近辺の赤色光が反応を誘導する一方で、730nmを中心にした遠赤色光(700~750nm)がその効果を打ち消す性質(赤・遠赤色光可逆反応性)を持っている。つまり、赤色光が強い発芽誘導作用を示し、遠赤色光が強い抑制作用を示すというように、可逆的にスイッチングする仕組みである。

このように、植物の様々な光応答反応を利用して栽培するさい、LEDを用いれば特定の波長の光を効率良く植物に照射することが可能である。また将来的には、開花や結実時期の調節、植物の形態や栄養成分のコントロールをすることも可能になるだろう。

[2] 小型軽量・低消費電力・熱放射が少ない

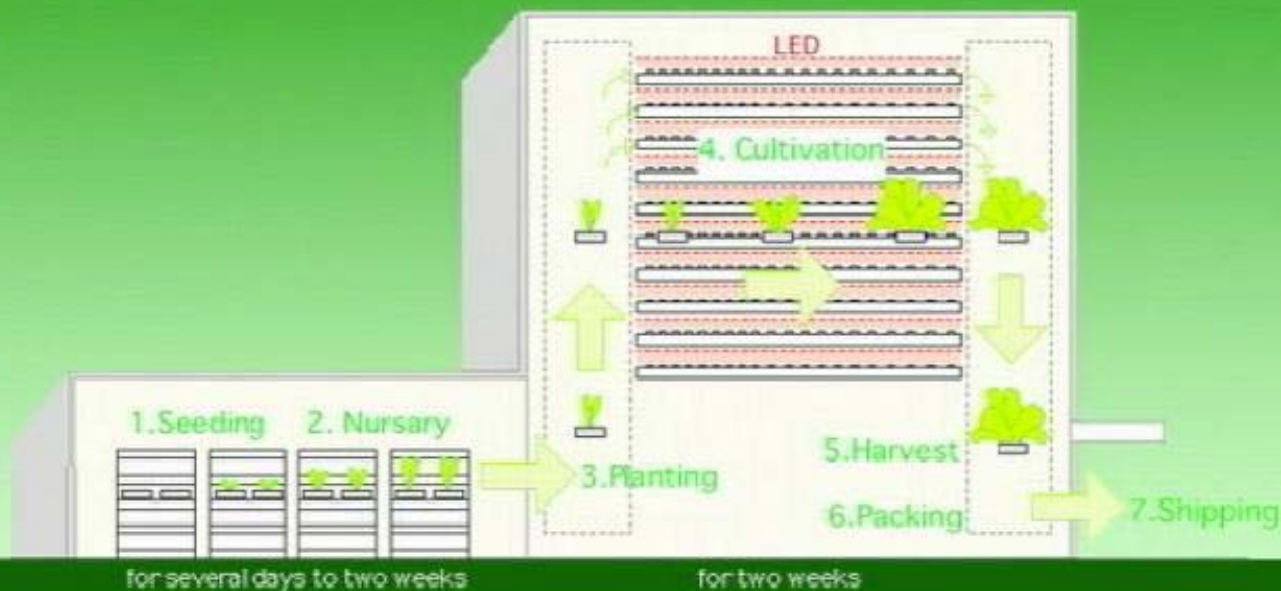
植物栽培に利用する可視領域のLED光は赤外領域のエネルギー放射が少ない。そのため光源を栽培植物に近づけて設置することができる。つまり、栽培する植物の高さに合わせて光源を設置し、近接照明することによって植物に無駄なく光を照射することが可能である。また、小型の栽培装置をビル状に何層も積み重ねて栽培することでスペースの有効利用もできる。従来の完全制御型植物工場では、生産コストに占める電力代の割合が大きい。LEDを採用すれば照明熱を取り去るために従来必要だった空調電力代を大幅に節約する効果が期待できる。加えてLEDは小型軽量で加工も容易なため、場所をとらない、コンパクトな照明装置を作ることも可能である。

LED植物工場の基本構造

資料提供:サンパワー(株)
配布資料

LEDは小型の栽培装置をビル状に何層も積み重ねて栽培できる

Process of production
in Cosmofarm



栽培光源としてのLEDの特徴

[3] 長寿命

現在、植物工場用光源には高圧ナトリウムランプとメタルハライドランプ、蛍光灯が一般的に使用されている。高圧ナトリウムランプの寿命は1万2千時間であり、メタルハライドランプと蛍光灯は1万時間程度である。

一方、冷却方法にもよるが植物栽培で最も重要な赤色光を発するLEDの寿命は10万時間とされている。これは1日24時間照明した状態で、およそ10年稼働させることが可能である。赤色よりも多少寿命が短い白色光を発するLEDでも6万時間程度の寿命を持つ。

[4] 光合成に有効なパルス照射が可能

植物の光合成反応は、常に光を要求しているわけではなく、光を当てる必要のない反応も存在する。一般的に知られているのは明反応と暗反応であり、炭水化物を生成する暗反応では光を必要としない。更に光合成の明反応系にも律速因子が存在しており、光化学系の反応中心であるP680の還元時間が $200 \mu\text{s}$ であると言われている。このような光合成反応において、光を必要としない時間には光を当てず、光を必要とする時間だけ光を当てるような間欠照射を行えば、単位光量当たりの光合成速度を増大させることが可能となる。

通常の植物栽培用光源でもパルス光照射は可能である。しかし、マイクロ秒やナノ秒のパルス周期での照射が困難であったり、照明ランプに対する負荷が大きく、寿命は極端に短くなる。

一方、LEDは他の植物栽培用光源が駆動できないパルス条件でも劣化せず発振可能である。更に連続光よりもパルス光で使用する方が素子の冷却効率が上がり寿命が長くなる側面を持っている。このように、LEDは他の光源に比べてパルス光照射に適しているのだ。

LEDの特徴

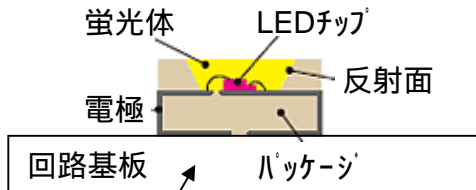
長所

単色光が可能
 さまざまな発光波長の素子がある
 P P F Dの高い素子が造れる(赤)
 熱の無い光が得られる
 パルス発光が可能
 光源を小さくできる
 水銀などの有害物を使用していない
 長寿命

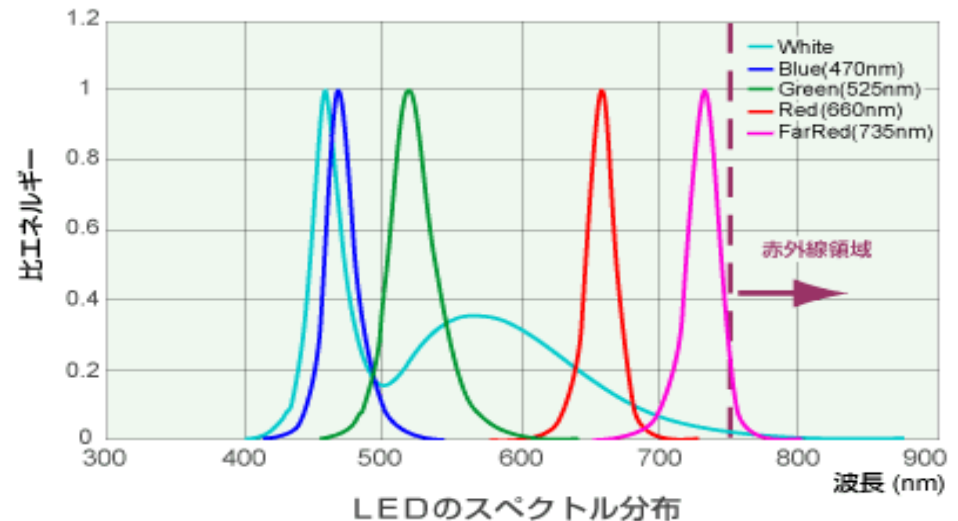
短所

電流を上げると発熱がある
 温度が上がると効率が下がる(熱引きが必要)
 高温で素子が劣化する
 発熱部と発光部の分離が困難
 価格が比較的高い

白色LEDの構造



チップで発生する熱を引くことが重要



チップLEDは大きな出力が得られる

各種照明の比較

項目	光束効率 2008	光束効率 2010	寿命*	コスト パフォーマンス	備考
	lm / w	lm / w	hrs	円 / lm	
白色LED	50	100	60,000*	30	円 / lmが課題
赤色LED	12*	15	100,000	190*	PPFDが高い
白色蛍光灯	80	80	10,000	1.0	安価
白熱電球	15	15	2,000	0.5	安価、発熱あり
高圧Naランプ	140	140	12,000	1.7	発熱が大きい
メタハラランプ	100	100	10,000	1.8	発熱が大きい
CCFL	50	50	50,000	-	高電圧使用、市販なし

* 寿命: 白色LEDは70%輝度低下時点を寿命とする(JLEDS)。
 寿命は素子構造やメーカーによって大きく異なる
 660nm赤色LEDを「lm」で評価することは不適切であり、mWが望ましい。

赤色LEDはPPFDが高く、長寿命である(植物工場に適している)
 白色LEDの光束効率は2010年に蛍光灯を超える(LED照明元年)

人から見た照明(円 / lm、寿命) 植物から見た照明(円 / PPFD、寿命)

赤色LEDの現状

人間生活では一般的に620-630nmの赤色LEDが使用されている。

赤色LED(630nm)の主な市場:ストップランプ、信号灯など

材料がGaAlAsからAlInGaPになり、チップLEDになってきている。

発光効率、信頼性、環境性の向上が見込める。

赤色LEDはPPFDが高く、植物工場に適している。

光合成に最適な660nmの赤色LEDはニッチな分野である。

赤色LEDは、蛍光体を用いず、10万時間と長寿命である。

照射方向を制御して光の利用効率を上げてコストダウンを図る方法。

例) レンズ配光、面光源

使用に当たっては湿度対策や熱対策が必要

660nm、5砲弾型LEDの価格は20円程度(超高輝度品は2倍程度)。

チップLEDの進化、光の利用効率の向上がコストダウンの鍵

LED研究開発の現状と課題について

【現状】

人間生活で一般的に使用される赤色LEDの波長は620～630nm。従来量産されていた植物栽培で最も重要な660nmの赤色LEDの用途が限られるため製造メーカーは減少。

これ以上の低価格化は望めず、特別注文製品になりコストが高くなる。

家庭用照明用途の白色LEDの低価格高出力化が急速に進んでおり、植物工場用光源として注目されつつある。しかし、白色LEDは青色LEDに黄色の蛍光体を塗布したものにすぎず、青色成分(450nmから470nm)が中心となり660nmの赤色成分が極端に不足する傾向が強い。消費電力も赤色の倍である。

波長分布と消費電力、寿命の点から、現状、植物工場用光源には赤色以外難しい。

栽培作物や品種によっては、単色LEDでは生育が悪く複数の波長が必要。また、植物はLEDの波長の違いにより形態形成に大きな差が出る。

複数の単色LEDの配置を基盤上で変えても光が均一化しない。生育に差がでる。



赤色 緑色 青緑色 青色 白色

種々の波長のLEDでバラ (*Rosa hybrida*. “Rote Rose”) を組織培養している様子



培養している様子



培養開始



10日後



20日後



30日後

特定の波長を効率良く
照射して開花促進



40日後



50日後



55日後



60日後

LED研究開発の現状と課題について

植物栽培環境での照明は、市販のLEDには過酷な条件であり、これらの環境に耐える照明設計は困難。複数の照明メーカーから市販されているLED照明も同様に最適な照明設計が行われておらず、LEDの特徴も生かされていない。

使用する素子のサイズや指向性、冷却、防水方法が異なるため、LEDの製造ラインを持たない照明メーカーが、これら全てを把握した上で植物栽培に最適な照明を設計することは困難。

例、植物工場で使用される光量(栽培面上のPPFD $80 \mu \text{molm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上)は、LEDの発熱が大きく冷却が不十分。その結果、素子が劣化して低寿命化してしまう。

【課題】

人工光源は一般的な生活照明としての用途に最適な設計がされており、植物育成用として販売されていても、必ずしも植物の栽培に適した仕様で製造されていない。

植物栽培の研究を行っている複数のLED照明メーカーはあるが、素子の製造から取り組めないために、植物栽培用照明の製造に限界がある。

植物工場(=植物栽培)を真に理解しているLED製造メーカーが不存在

今後の新光源研究開発、コストダウンに向けての提言

(植物工場用照明開発時に求められる思想と方向性)

植物栽培用光源は人間の眼が求める“基準”とは異なる

既存のLEDでも栽培可能だが生産効率は最大ではない。よって植物栽培用に最適な波長を持ち、低消費電力で出力可能なLEDを開発し収量増大させる必要がある。

例、赤色の波長が強い白色LED(青色LEDに赤と緑の蛍光体を塗布)の開発

過酷な条件で光を照射させ続けるために耐久性が求められる

湿度に強く放熱性の高い素材でLEDを製造する必要がある。

開発時から素材を吟味し、“植物栽培用”を企図とした開発が必要である。

製造ラインを有する照明メーカーとの共同開発が必要

採算ベースに乗せていくためには量産可能な製造ラインを持つ一部上場企業の照明メーカーによる生産が望ましい。製造と照明を同じメーカーで行う事が重要。

産・学・官の連携について

産:学のデータ活用。市場にマッチするものを提供できる生産技術の確立と利益創出への努力。

学:研究開発を積極的に進め、データを公開して、工業化に役立つ連携が必要。

官:学の研究を資金的に支援する。事業化における初期リスクの低減を支援する。

植物工場(=植物栽培)用照明にはLED製造メーカーの協力が必要

スタンレー電気の光源について

各種LED

車載用(ヘッドランプ、テール&ストップ、ウィンカー)

LCDバックライト(TV、PC、携帯電話)

街路灯、自販機、遊戯用等

CCFL、HCFL

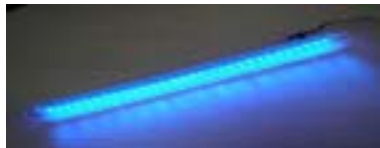
液晶のバックライト(TV、PC)

Xeランプ、白熱電球(車載用)

植物育成用光源の開発

砲弾型LED応用品、チップLED応用品、

CCFL応用品、HCFL応用品 -



LEDライン光源



育生用CCFL



LED育生光源



インビトロフラワー

新光源も含め、光合成に最適な「光」を提供できます。

LEDの基礎

発光原理

半導体によりPN接合を形成し、順方向に電圧を印加すると電流が流れる。P層を正孔、N層を電子が移動し、PN接合部で再結合して発光する。使用する結晶材料の禁止帯幅(E_g)の違いによって、発光波長()が決まる。

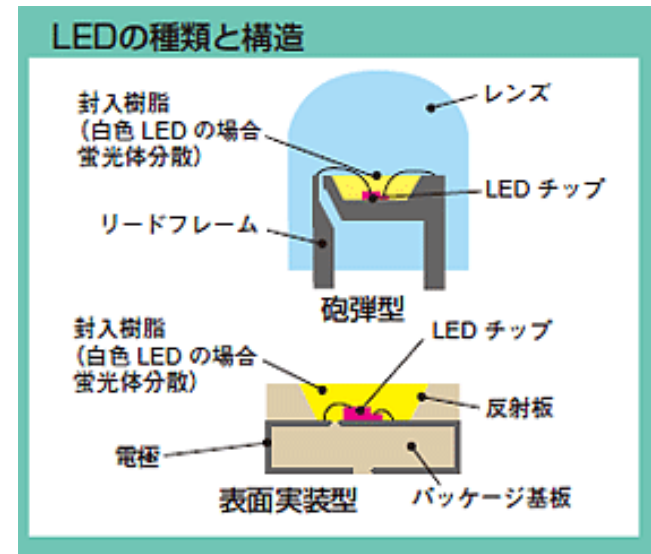
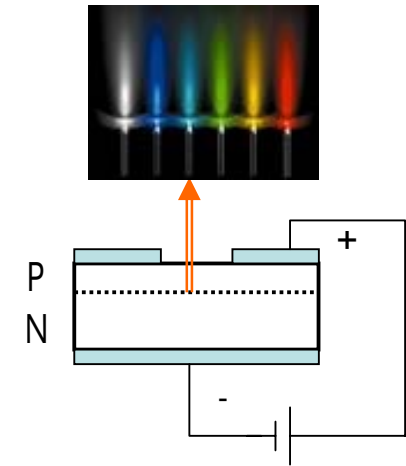
$$= hc / E_g \quad (h \text{ プランク定数、} c \text{ 光速})$$

1) 砲弾型LED

リードフレームと一体化形成したカップ内にLEDチップを実装し、カップ内に蛍光体を分散させた樹脂を封入して、その周りを砲弾型にエポキシ樹脂でモールドした構造。
発光量は小さいが安価。

2) チップLED

セラミックなどで成型したキャビティの中にLEDチップを実装し、キャビティに蛍光体を分散し、エポキシやシリコンなどの樹脂を封入する。回路基板に大きなチップを実装して大電流を流し、熱引きをすることで、大光量が可能である。



CCFL (冷陰極型蛍光ランプ) の基礎

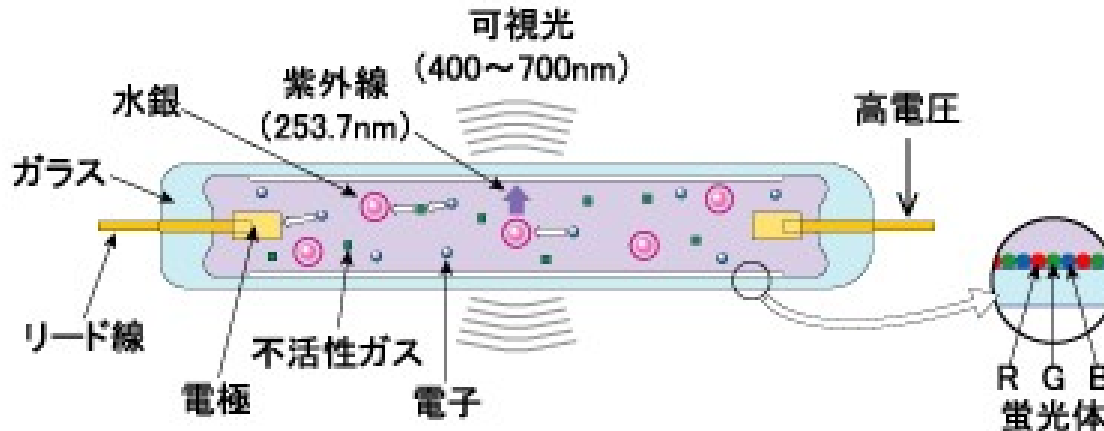
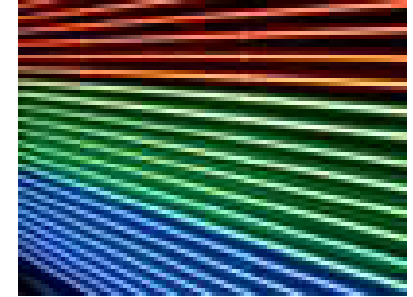
発光原理

ガラス内に不活性ガスと微量の水銀を封入し、管の内壁には蛍光体を塗布している。

管両端の電極間に高電圧(500V程度)を印加することにより放電が開始され、水銀が電子や封入ガスの原子との衝突により励起され、紫外線(主に253.7nm)を発生させる。

この紫外線が蛍光体を励起し、可視光となる。

蛍光体の材料・組成によって、様々な発光が可能である。



面光源

導光板との組合せによって効率よく真下に発光できます。直下方式とエッジライト方式がある。

エッジライト方式では全く熱のない光が取り出せる。