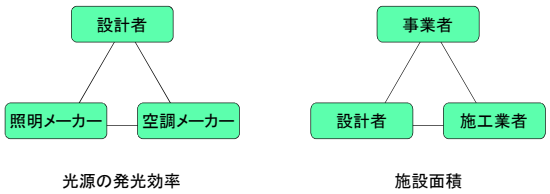
人工光型植物工場の標準仕様（案）について

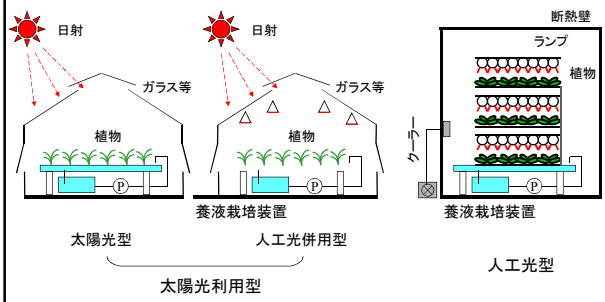
千葉大学大学院園芸学研究科
後藤　英司

背景
コストパフォーマンス向上のための標準化・規格化（技術情報の文書化の必要性）



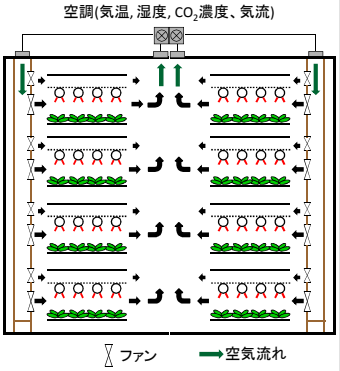
オーバースペックにならないよう。。。
作物が設計通りに生育するように。。。

植物工場の種類（光源による分類）



人工光型植物工場の構成

- 施設：断熱壁をベース
- 換気：最小限
- 光源：蛍光ランプ、LED
- 空調：おもに冷房・除湿
- 栽培：養液栽培法



人工光型植物工場の特徴(1)　生産環境

- 水の使用量が極めて少ない
- 無農薬栽培を容易に実現できる
- 作物生育に最適な環境を作れる
- 365日同一の品質で生産できる
- 外食産業のニーズに合う農産物

リーフレタス・サラダ菜

リーフレタス

苗生産システム（トマト苗）

人工光型植物工場の特徴(2)
生産性向上に貢献した技術

1）照明

近接照明の実現

1980s – 1990s
光源: 高圧ナトリウムランプ
栽培棚：平面式

2000s –
光源: Hf 蛍光ランプ、LED
栽培棚：多段式

2）空調（冷凍機）

インバーター式への変更とCOP（成績係数）の向上による省エネ

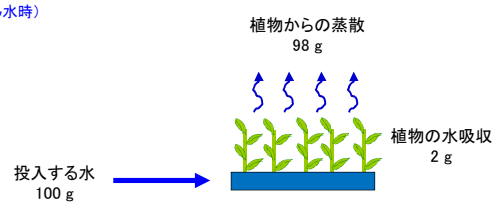
栽培システムの特徴　1）環境が均一

光強度，温湿度，気流速度のむらがない。
また，デッドスペースが少ない。

広い平面の栽培室はもちろん，多段棚の栽培室でも成長のバラツキが少ない。 均一性向上、歩留まり改善。

栽培システムの特徴　2）高い水利用効率

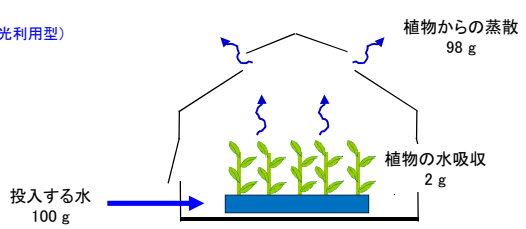
露地
（かん水時）



投入水は、かん水または培養液として供給される。
植物の根が吸収した水の大部分は、葉を通して蒸散により大気中へ水蒸気として放出される。

栽培システムの特徴　2）高い水利用効率

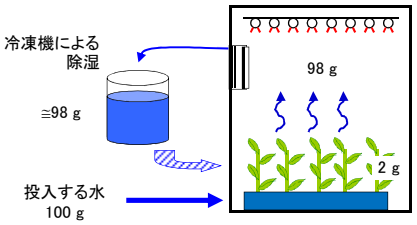
温室
（太陽光利用型）



温室においても同様である。
植物の根が吸収した水の大部分は、葉を通して蒸散により空気中へ水蒸気として放出され、再利用されることはない。

栽培システムの特徴　2）高い水利用効率

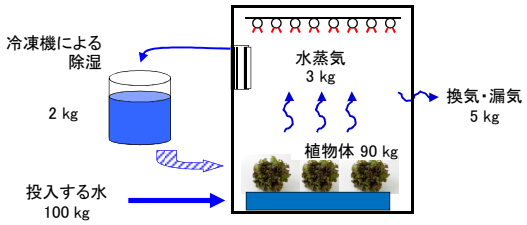
人工光型



閉鎖型の人工光型植物工場では、葉から蒸散した水蒸気は冷房時に冷却除湿により水（ドレイン水）として回収できる。その水は培養液に再利用できる。

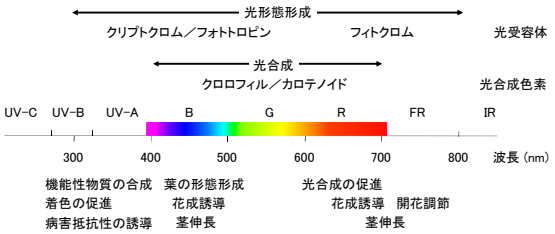
栽培システムの特徴　2）高い水利用効率

人工光型



ある期間のレタス栽培室の水収支の例

栽培システムの特徴　3）光源を選べる



植物生育に有効な波長域

背景
コストパフォーマンス向上のための標準化・規格化
（技術情報の文書化の必要性）

光源の発光効率　　施設面積

オーバースペックにならないよう。。。
作物が設計通りに生育するように。。。

人工光型植物工場　標準仕様書（案*1）

人工光型植物工場（Closed Plant Factory with Artificial Lighting）は、光源に人工光を用い、空調を導入し、植物生育に必要な環境要因である光、温度、湿度、CO_2濃度、気流速を制御し、周年安定的に高品質の植物を栽培する施設である。また人工光型植物工場では、農林業においては葉菜類・果菜類などの野菜、果樹、野菜苗、花き苗、樹木苗などを栽培し、その他の植物生産業においては薬用植物、遺伝子組換え作物などを栽培することができる。

本書は、人工光型植物工場の構築にあたり必要な材料、設備、工法、試験等の仕様や植物栽培施設としての性能を標準化するとともに、発注者と施工者に有用な技術情報の提供を目的としている。なお本書では、人工光型植物工場の仕様の記述に重点をおき、工場における作業者の安全管理については関連法規等を踏まえた設計・運用を行うことを前提としている。

*1: 本日の資料は暫定版であり、今後変更する可能性があります。

人工光型植物工場　標準仕様書（案）

目次

1. 対象とする植物栽培施設
2. 建築・機器類ほか
3. 衛生管理
4. 栽培用照明
5. 空調
6. 施設と生産量
7. その他
8. レタス工場モデル

1. 対象とする植物栽培施設

対象とする施設は、発芽、育苗、収穫までの栽培を行う部屋（以下、栽培室）とする。

1. 1　規模と設置場所

床面積が数 m^2 以下で作業者が立ち入らない規模の栽培室は、対象にしない。

また、従来から植物栽培装置（グロースチャンバーまたはインキュベータ）として実験機器等のメーカーが販売している装置は、対象にしない。

また、居住空間や工場等内で照明付き栽培棚を設けて植物を栽培する場合で、環境管理を居住者・作業者用の空調に依存する場合は、通年、明暗期を通じて植物栽培に好適な環境を維持するのは難しいと考えられるため、対象にしない。

1. 2　その他

本書では、遺伝子組換え作物を栽培する工場に必要な物理的封じ込めについては記述しない。物理的封じ込めの要件については「遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律（カルタヘナ法）」を参照のこと。

2. 建築・機器類ほか

2．1　建築

・空調のエネルギー効率と制御性を高めるために、密閉性・断熱性の高い仕様とすることが望ましい。

・高相対湿度の室内環境となるため、結露対策を講じること。特に既存施設を利用する場合は栽培室外部での結露についても考慮すること。

・結露または濡れやすい箇所には耐蝕性の材料を用いること。

・外部からの病害虫の侵入・増殖を防ぐために、以下①～⑤に留意することが望ましい。

①床面に水たまりができない仕様とすること。

②室内にごみがたまりにくい仕様とすること。

③雑菌が繁殖しにくい材料、構造とすること。

④できるだけ密閉性を高くすること。

⑤病害虫防除のために燻蒸（くんじょう）等の滅菌を行う可能性も考慮し、燻蒸後の排気機能を設けること。

2. 建築・機器類ほか

2．2　機器類・栽培装置等

・高相対湿度の室内環境となるため、結露対策を講じること。

・結露または濡れやすい箇所には耐蝕性の材料を用いること。

・雑菌が繁殖しにくい材料、掃除しやすい構造とすること。

3. 衛生管理

3．1　一般事項

・病害虫・雑菌の侵入および繁殖を防ぐために必要な清浄度を維持する以下①～④のような機能を有すること。

①出入り口に前室、エアシャワー等を設けることが望ましい。

②外部との換気設備には必要に応じて適切な機能のフィルターを設置すること。

③排水口からの虫、小動物の侵入対策を講じること。

④適切な清掃・消毒計画を立案し、実施すること。

3. 衛生管理

3．2　培養液の水

・培養液に用いる水には、原則として水道水または井水（水道法に基づく水質基準に準ずる）を使用する。

・培養液等の水中菌の増殖に注意すること。

・必要に応じてフィルター処理、紫外線殺菌、オゾン殺菌等の殺菌処理を講じること。

3．3　加湿に用いる水

・加湿に用いる水には、原則として水道水または井水（水道法に基づく水質基準に準ずる）を使用する。

・必要に応じてフィルター処理、紫外線殺菌、オゾン殺菌等の殺菌処理を講じること。

3．4　ドレイン水

・冷却除湿により得るドレイン水を培養液または加湿に再利用する場合は、必要な水の処理を行い、水質を保持すること。

4. 栽培用照明

4．1　一般事項

植物栽培用の光源には蛍光ランプ、高輝度放電灯（高圧ナトリウムランプ、メタルハライドランプ）、LED等を使用する。

蛍光ランプと高輝度放電ランプの機能、構造は、照明器具はJIS、JIL、安定器はJIS、ランプはJIS、JEL、ソケットはJISによる。

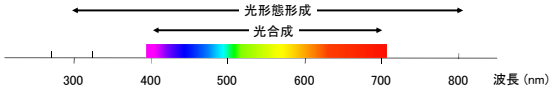
紫外線（UV）を放射するランプの点灯時は、作業者の安全性に留意すること。

照明器具の特性として、安定器・インバータ・電源および灯具などの寿命と交換頻度、防水レベルなどを記すこと。

4. 栽培用照明

4．2　植物栽培に関わる特性

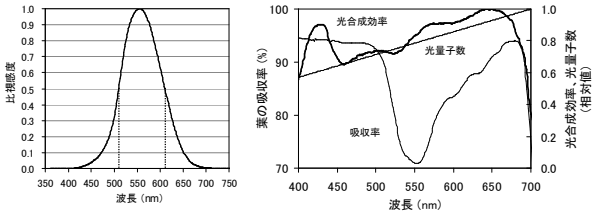
植物の光合成に有効な光波長（光合成有効放射域）は400nm～700nmである。葉の光合成速度は、一般に、受光面の光合成有効放射域の光量束密度の影響を受ける。光合成有効光量束密度（PPFD）の単位には μ mol m^{-2} s^{-1} を用いる。光形態形成に有効な光波長（生理的有効放射域）は300nm～800nmである。光源および照明器具の特性として、以下の電気－光変換効率および分光放射束（あるいは分光光量子束）を示すこと。



【参考】

照度（lx）は単位面積に入射する光束（lm/m^2）であり、放射照度（W/m^2）を人間の明所視標準比視感度で重み付けした値である。したがって、植物の光環境を記述する物理量として照度を用いてはいけない。

4. 栽培用照明



人間の比視感度（左）と植物葉の吸収スペクトル・光合成効率（右）

1. 緑色光を多く含む人間照明用の光源は植物学的に非効率
2. 光合成に無関係な照度の単位（lx）を使ってはいけない

4. 栽培用照明

①　照明器具の電気－光変換効率（エネルギー）

交流100Vまたは200Vの商用電源を用いる場合の消費電力に対する生理的有効放射域のエネルギーを　W/W　で示すこと。消費電力には、安定器、インバータ、直流変換器、その他の電子回路、放熱ファンなど全ての電気部品の消費電力を含めること。

【参考】

照明器具の電気－光変換効率（エネルギー）は、植物の成長に必要な照明の消費電力量（Wh; 消費電力［W］×使用時間［h］）の目安として、また異なる照明器具の比較に有用である。

4. 栽培用照明

② 照明器具の電気ー光変換効率（光量子）

交流100Vまたは200Vの商用電源を用いる場合の消費電力量に対する光合成有効放射域の光量子束量（消費電気エネルギーに対する光量子数に等しい）を mol/J で示すこと。消費電力量には、安定器、インバータ、直流変換器、その他の電子回路、放熱ファンなど全ての電気部品の消費電力量を含めること。

【参考】

照明器具の電気ー光変換効率（光量子）は、単位時間あたりに照明器具が射出する光量子数（＝光量子束）（mol s^{-1}）を照明器具の消費電力（W = J s^{-1}）で割った値である。この変換効率は、光合成に必要な照明の消費電力の目安として、また異なる照明器具の比較に有用である。

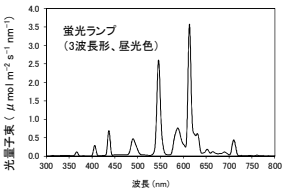
4. 栽培用照明

③ 分光放射束および分光光量子束

分光放射束の単位にはW m^{-2} nm^{-1} を用いる。分光光量子束密度の単位には μmol m^{-2} s^{-1} nm^{-1} を用いる。

【測定】

分光放射束の測定には分光放射計（スペクトロラジオメータ）を用いること。分光放射計によっては分光光量子束を表示する機種があるが、そうでない場合は、分光放射束値から理論式で求めた分光光量子束を用いてもよい。



4. 栽培用照明

4．3 栽植面の光強度

栽培棚の栽植面における光強度はPPFDを用いること。
栽植面における光強度の均一度を示すために、無栽植時のPPFDの測定値±標準偏差（S.D.）（例: 200 μmol m^{-2} s^{-1}±30 μmol m^{-2} s^{-1}）を示すこと。また、光源と栽植面の距離、栽植面の材質を記すこと。

【測定】

光強度は、1m^2当たり20ブロックに分けて各ブロックの中央点で測定する。20ポイントの測定値と標準偏差（S.D.）を求めて、測定値±S.D.と表す。なお、必要に応じてポイント数を増やしてよい。
植物個体間の成長のばらつきを抑えるためには、栽植面の光強度のばらつきを小さくすることが重要である。たとえば、葉菜類を栽培する場合は、変動係数（CV =S.D./平均値）が10%以下であることが望ましい。
光強度の均一性を高めるために、側面に反射板を設置することが望ましい。

4. 栽培用照明

4．4 LEDの規格

LED照明器具はまだ開発途中であるため、JIS及びTS（標準仕様書）では一部の項目しか規定していない。植物栽培の照明は一般照明に準ずることから、その利用においては、LED照明推進協議会、日本電球工業会、日本照明器具工業会、照明学会などの照明関係団体の活動およびそれらが公開している利用法、導入事例、留意点などの情報を参考にする。

4．5 LED照明器具の発光効率

LEDは、チップの発光効率と器具組込み時の発光効率が大きく異なる。チップを100%とする場合の器具総合効率は70～75%である。植物栽培用に照明器具を特注する場合、器具の性能により、器具総合効率はこの範囲以下にも以上にもなり得る点に留意する。

5. 空調

5．1　一般事項

植物工場の栽培室における空調の目的は、気温、相対湿度、CO_2濃度、気流速度を植物生育に合う条件に調整し、その空気を栽植面に均一に分布させることである。空調設計においては、以降に示す気温、相対湿度、CO_2濃度、気流速度の条件に留意すること。なお、栽培室の規模、栽培棚の構成および空調負荷により空調方式、空調機、熱源などは異なるため、本書では詳述しない。

5. 空調

5．2　気温

無栽植時、栽培棚の栽植面への給気温度は任意に設定できること。気温の可変範囲は栽培する植物の種類もしくは発注者の要求条件に応じて定めること。また、栽植面における気温の許容制御範囲は発注者の要求条件に応じて定めること。また、明期・暗期ごとのスケジュール制御が可能なこと。

【測定】

気温は、測定対象の栽植面において、1分間隔で60分間以上連続して測定する。60ポイントの平均値を測定値とする場合、標準偏差(S.D.)を求めて、測定値±S.D. と表す。明期・暗期ごとに、気温変動の安定した状態で測定する。

5．3　相対湿度

気温と同様

5. 空調

5．3　相対湿度

無栽植時、栽培棚の栽植面への給気相対湿度は任意に設定できること。相対湿度の可変範囲は栽培する植物の種類もしくは発注者の要求条件に応じて定めること。また、栽植面における相対湿度の許容制御範囲は発注者の要求条件に応じて定めること。また、明期・暗期ごとのスケジュール制御が可能なこと。

【測定】

相対湿度は、測定対象の栽植面において、1分間隔で60分間以上連続して測定する。60ポイントの平均値を測定値とする場合、標準偏差(S.D.)を求めて、測定値±S.D. と表す。明期・暗期ごとに、相対湿度の変動の安定した状態で測定する。

5. 空調

5．4　CO_2濃度

無栽植時、栽培棚の栽植面への給気CO_2濃度は任意に設定できること。CO_2濃度の可変範囲は栽培する植物の種類もしくは発注者の要求条件に応じて定めること。また、栽植面におけるCO_2濃度の許容制御範囲は発注者の要求条件に応じて定めること。

【測定】

CO_2濃度は、測定対象の栽植面において、1分間隔で60分間以上連続して測定する。60ポイントの平均値を測定値とする場合、標準偏差(S.D.)を求めて、測定値±S.D. と表す。明期・暗期ごとに、CO_2濃度の変動の安定した状態で測定する。

5. 空調

5. 5　気流速度

無栽植時、栽培棚の栽植面の気流速度は任意の範囲に維持すること。

【測定】

気流速度は、無指向性プローブを用いる熱線風速計で測定する。

【参考】

気流速度が0.1 m/s以下の場合、空気流動が抑制されて、気温、相対湿度およびCO_2濃度の均一性が低下しやすい。また、葉の葉面境界層抵抗が増加して、葉面におけるCO_2と水蒸気の交換速度が抑制されて光合成速度や蒸散速度が低下する可能性がある。

1.0 m/s以上の場合、葉の葉面境界層抵抗は小さくなるが蒸散が過剰となり、水分ストレスや葉枯れが生じる可能性がある。

5. 空調

5. 6　気流方式

栽培室内の気温・相対湿度などの環境を均一にするためには、気流の分布をよくすることが必要である。そのためには、空調空気の吹出し口と吸込み口の位置、開口面積などを考慮すること。なお、空調機のみで栽植面における目標風速の確保が達成できない場合は、室内設置のサーキュレーターや栽培棚に設置する小型ファン等を活用すること。

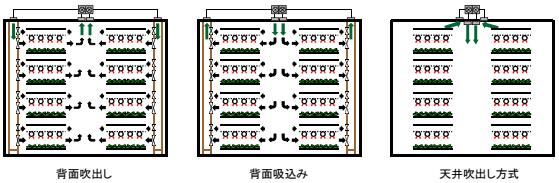


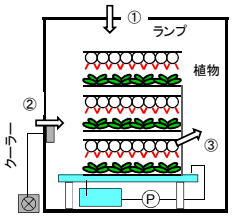
図　栽培室の吹出し口と吸込み口

5. 空調

5. 7　空調負荷

栽培室の熱負荷は次のように分けられ、これらが空調負荷となる。

① 外界から壁体を通り侵入する熱負荷
② 外気導入とすきまを通じての熱負荷
③ 栽培室内で発生する熱負荷



(3)栽培室内で発生する熱の発生源には、室内に置いてある照明器具・送風機・ポンプ・機械類、作業者などがありこれらは顕熱負荷となるが、このうち一部は植物から蒸散、培養液からの水分蒸発、作業者からの蒸発として潜熱負荷になる。

空調設計にあたっては、明期と暗期、生育ステージなどによって熱負荷が大きく異なる点に留意すること。

5. 空調

5. 7　空調負荷

【参考】

植物に照射した光は、植物体で反射、吸収、透過される。植物が受光する光エネルギーのうち1～2%程度が光合成で化学エネルギーとして固定され、それ以外は植物体表面から空気中へ顕熱および蒸散作用による潜熱として放出される。そのため、植物体に照射した光はすべて空調負荷になるとみなしてよい。

【参考】

照明器具には、植物体への照射光以外に、発光面、ソケット、安定器等から発生する熱がある。ただし安定器やインバータが栽培室外に設置されている場合や、照射面側でない放熱部位からの熱を外気冷房等の方法で除去する場合は、これらを空調負荷に含めなくてよい。

5. 空調

5．7　空調負荷

【参考】
植物は、根から吸収した培養液の水の95%以上を蒸散作用により葉などの器官から空気中に放出する。これは空気中の潜熱量を増加させる。明期中の蒸散による潜熱量増加は、居住空間の人間からの潜熱量増加よりもかなり大きい。そのため、温湿度を一定値に制御する場合、居住空間用のエアコンでは除湿能力が不足することがある点に留意する。

光合成と蒸散の1%理論
（注：こういう理論はありませんが）

照射熱の1%が植物に固定、99%が放出されて熱負荷

吸収水の1%が植物に保持、99%が蒸散して水蒸気

6. 施設と生産量

6．1　栽培施設の定義
栽培室床面積・・・・・・・栽培棚などが設置されている栽培室の床面積
栽培室容積・・・・・・・・・その部屋の容積
栽培総面積・・・・・・・・・実際に栽培している栽培ベッドの総面積
栽植密度・・・・・・・・・・・実際に栽培している栽培パネルにおける
単位面積当たりの株数

6．2　生産量の定義
日生産株数・・・・・・・・・・・その施設で1日に生産する株数
例）リーフレタス　1000 株/日
株生重量・・・・・・・・・・・・その株の可食部の生重量
例）リーフレタス　90 g/株
日生産量・・・・・・・・・・・・その施設で1日に生産する総生重量
例）リーフレタス　90 kg/日

Ⅰ. 資料集

1. 絵でみる栽培室のエネルギー収支、物質収支
2. 閉鎖系施設の必要電力量、水量、CO_2量の考え方
3. 主な作物のCO_2交換速度（光合成速度、呼吸速度）
4. 主な作物の蒸散速度
5. 主な作物の光要求量
6. 光源の分光放射束および分光光量子束の測定例
7. 気温、相対湿度、光強度、気流速度の測定例
8. 関係文献
9. 用語集

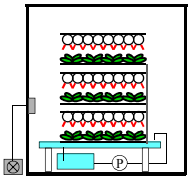
（暫定目次、作成中）

Ⅱ. レタス工場モデル

1. 工場の構成例
2. 生産施設の仕様の表示方法
3. 生産能力の表示方法
4. 栽培棚の種類
5. 栽培プロセス
6. 栽培管理の要点

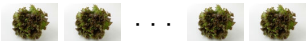
（暫定目次、作成中）

植物工場の物質収支とエネルギー収支



植物工場

レタス（１株100g、出荷価格100円）を
毎日3,000株、生産する植物工場を例にする。
閉鎖度100%の理想型の植物工場を仮定する。



植物工場に毎日、

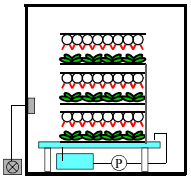
- 投入する水：300 kg（300 L）
- 投入するCO_2：22 kg
- 投入する電気エネルギー： 6,000 kWh*1
  内訳
  照明　4,500 kWh
  空調　1,500 kWh　（年中、冷房必要）

*1生重量100gのリーフレタスを生産するための照明と空調の消費電力量を2.0 kWhと仮定

標準的な植物工場の収支

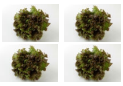
インプット

水：300 kg
CO_2：22 kg
電気エネルギー：
6,000 kWh



植物工場

熱エネルギー：
=< 6,000 kWh

アウトプット

レタス　3,000株
内訳
水　285 kg
乾物 15 kg