

# 人工光型植物工場の構成要素と設計留意点 —大阪府立大学植物工場研究センターの取組みから—

小倉 東 一 大阪府立大学植物工場研究センター

和田 光 生 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科

キーワード:人工光型植物工場(Plant Factory), 養液回路(Solution Circuit), LED 光源(LED), 葉菜(Leafy Vegetables), 多段型(Multi-Layer)

大阪府立大学植物工場研究センターでは、2014年9月に日産5000株の量産型施設“新世代植物工場”を建設し、生産コスト40%減を目標に稼働させている。この新工場の設計過程の一部を紹介し、植物工場を設計するうえで必要な構成要素のうち、栽培ベッド、栽培ラック、養液回路、光源などの栽培システム、空調システム、制御システムおよび周辺機器システムについて設計留意点について解説する。また、設計段階で消費電力量を試算した結果を紹介する。

## はじめに

大阪府立大学植物工場研究センターは、経済産業省・農林水産省による研究開発拠点整備事業として採択された13拠点の一つとして、2011年施設整備され、約80社との企業コンソーシアムを結成し、国内で唯一の人工光型植物工場に特化した拠点として、研究開発や普及拡大に取り組んでいる。2014年9月、それまでの研究成果を織り込んだ日産5000株の量産型施設“新世代植物工場(以後新棟)”を経済産業省の支援により建設し、運用に移行している。ここでは、①苗診断システムによる良苗選抜、②自動化栽培システムによる人件費の削減、③栽培光源の完全LED化による省エネルギー生産、④ダイレクト送風システムによる栽培環境の均一化、などの実証を行っている<sup>1)</sup>。これらの経験も踏まえ人工光型植物工場の主な構成要素と、それらを設計する場合の留意点について紹介したい。

## 1. 人工光型植物工場の構成要素と設計留意点

人工光型植物工場は、野菜を生産するシステムで、屋内に、栽培するためのシステム(栽培ベッド、栽培ラック、養液回路、光源、空調、制御系統など)が組み込まれている。主な構成要素と設計段階での留意点について紹介する。図-1は、人工光型植物工場のシステム構成イメージとして2011年に設置した本学のレタス生産室の例を示す。

### 1.1 栽培システム

栽培ベッド、栽培ラック、養液回路、光源などで構成される設備の根幹となる部分である。栽培品目を何にする

か、どれだけ生産するか決定をして、これらの仕様を決めていく手順となる。

#### (1) 栽培ベッド

栽培ベッドは、畑や水田での土に相当する部分で、根から養分や水分を供給したり、植物体を保持するなど、植物を栽培するうえで根幹となる部分である。植物工場においては、土を使わない水耕栽培が一般的に用いられている。これは土などの培地を使わないことによる生育の速さや輪作障害もなく同じ場所で永久に栽培できる、砂など夾雑物の混入もない、栽培管理の機械化が可能になるなど、衛生的な環境で、生育性を高め、安全性の高い野菜を生産しようとする植物工場システムの目標に合致していることによる。水耕栽培では、プール状に液を溜めその上で栽培する湛液水耕(DFT)と、薄い膜状に液を流す薄膜水耕(NFT)があるが、国内の植物工場ではDFTが用いられる例が多い。DFTでは、発泡スチロール製成型品を繋ぎ合わせ、その上にポリエチレンシートを敷設し、水深3~10cmのプール状ベッドを形成する。このベッドの上に、発泡スチロール製の栽培パネルを浮かせ栽培するもので、ベッド長20~30mも可能で、施設の的にも割安であるが、重量が重い場合高強度の架台が必要になることやベッド内清掃が簡単にはできないなどの難点もある。一方、NFTは培養液をベッド内に貯めずに流す方式であり、栽培ベッドの軽量化が可能であるほか、ベッドそのものを移動する自動化システムにおいては、移動時にベッド内に養液がない状態にする必要があり、こちらが採用されている。新棟では、図-2に示したように独自に設計した樹脂成型品とした。費用は割高となるが、一作ごとに栽培ベッドの洗浄ができるなどメリットも大きい。

#### (2) 栽培ラック

人工光型植物工場は、多段型が基本になってきており、十数段の多層階も可能である。因みに図-1の事例では、天井高さ7mで15段、新棟では、天井高さ9mで18段となっている。何段設置可能となるかを決定するポイントは、棚間隔をいくりにするかである。1ピッチの間に、栽培ベッド、光源、栽培植物の草丈、棚構造材が収まる必要

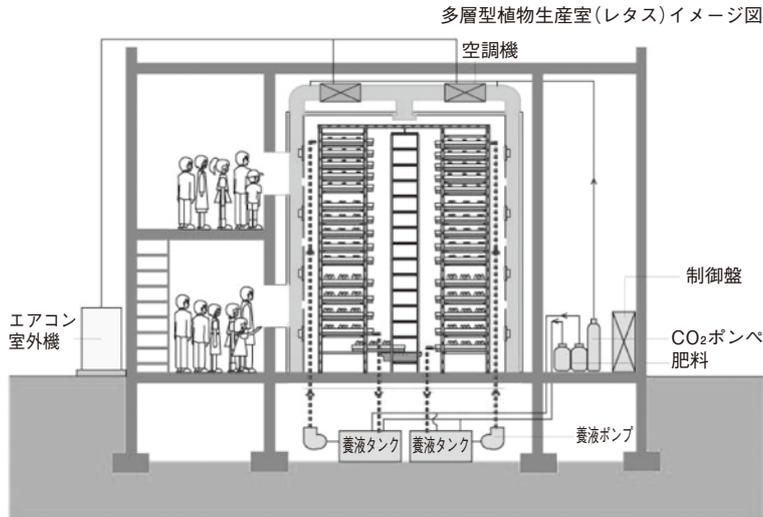


図-1 人工光型植物工場イメージ図



図-2 樹脂成型品の栽培ベッド

があり、それぞれ何を選択するかで決まってくる。新棟では、棚は耐候性鋼板素材の組立て式ラック、ユニット化されたLED、NFT方式移動式ベッドを採用し、栽培植物草丈を20cmと設定、棚ピッチを40cmとした。これによって、図-3に示すように天井高さ9mで18段のベッドを設置することができた。ここでの栽培品目はレタス類を想定しており、株重90gのレタスが草丈20cmの中に収まってくれるかどうかを事前検証し決定した。栽培室内は暗期に結露する場合があります、また水耕養液中には肥料成分由来の塩類が多く含まれ腐食性を有していることから、栽培ラックは耐蝕性が求められ、樹脂コーティングパイプ、アルミ押し出し型材などが使用される例もある。耐震強度や養液、ベッド、栽培野菜などの重量にも耐え得るなど機能性やコスト以外にも工事期間短縮やメンテナンス性への配慮も必要である。

### (3) 養液回路

新棟では、育苗室はDFT方式を採用し、ベッド幅1.2m×9m×15段×2系統としている。養液供給は、妻側の一方から空気混入機構を装備した給液管によって行い、他端側に排水口を設け、そこから地下埋設の養液タンクへ返る回路構成としている。養液供給量は、25L/min、15段同時給液とし、養液タンク容量は7m<sup>3</sup>としている。タンク容量決定は、養液循環ポンプ停止の間、ベッドから還流してくる流量によってタンクが溢水しないように、ポンプ運転時(通常運転モード)はタンク容量50%程度の液位で均衡する容量を装備すべきである。栽培室は、ベッドそのものが移動する自動搬送システムを導入したことから、NFT方式とした。栽培室の生育日数を18日とし、毎日2ベッド収穫と設定したことから、1段のラック長は約30m、ベッド数は36ベッドとなり、この36ベッ



図-3 栽培ラック図

ドへ個別に養液供給が必要となる。1ベッドあたりの養液供給量を3L/minとすると、1段における養液供給量は108L/minとなり、2列を1系統として全段同時供給すると18段では3.9m<sup>3</sup>/minもの供給量が必要で、大容量のポンプが必要となる。またこの方式だと、養液は1ベッドの1.2mだけ流れてすぐタンクへ返ることとなり、効率が悪い。そこで18段を上下の2区画に分け、供給された養液は1段目のベッドを介して、重力で、2段目のベッドへ流れ、順次落下していき9段目のベッドを出てから養液タンクへ返る方式とした。これによって給液量は、全ベッド同時給液に対して1/9でいいことになる。ただこの方式

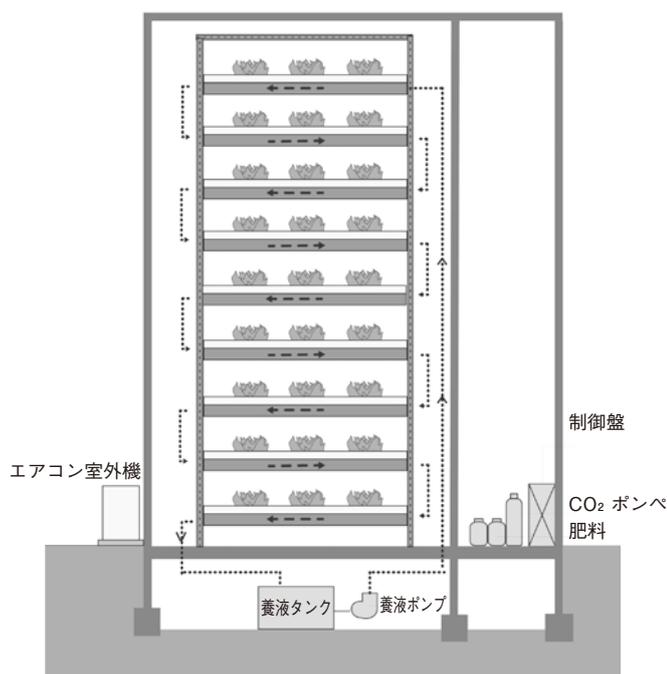


図-4 多段栽培の給液システム

にすると 図-4 に示すように1段ごとに、給液位置と排水位置が変わるベッド配列となり、作業員の混乱を招きかねないのでフェイルセーフの仕組み導入など工夫が必要である。

栽培に用いる原水にも配慮が必要である。①病原菌を含まず、②浮遊物や微生物などの有機物の混入がなく、③懸濁がなく、④有害物質を含まず、⑤多量の無機塩類が含まれておらず、培養液の組成を大きく乱さないものなどが必要条件としてあげられる。また、井水など地下水やため池や河川の水利用の場合は、有害菌の混入がないか常に監視する体制と、塩素消毒義務などが必要である<sup>2)</sup>。新棟では原水に水道水を利用しており、必要条件はクリアできているが、消毒のために添加された次亜塩素酸が残留(残留塩素)しており、培養液のアンモニウムイオンと結合して植物の根にとって有害なクロラミン(結合塩素)を生成し、急速な萎れや根が褐変し生育が著しく抑制されるので、前もって残留塩素を除去しておく必要がある<sup>3)</sup>。解放されたタンクに水をため、数日放置して除去、あるいは還元剤のチオ硫酸ナトリウム(ハイポ)を、原水1m<sup>3</sup>あたり2.5g添加する作業をするかであるが、毎日の作業となるので、恒久的な除塩フィルタを原水導入部に設ける方式で考えるべきであろう。新棟では除塩フィルタ設置と原水導入量の流量計を装備した。原水導入量は、養液更新水量は別として、基本的には植物体吸収水分量との相関があり、この値を経過観察しておくことで、プラント全体の正常度の指標となりうると考えている。

追肥は100倍程度の濃厚原液を調整し、養液タンク中の

EC・pH値を連続モニタし、設定値を下回れば、原液ポンプが作動し、濃厚原液が投入される自動追肥装置が組み込まれることがほとんどである。小規模施設では、連続モニタでなく携帯測定器活用のバッチ測定、手動で肥料成分を調整する手動対処方式としているところも見受けられるが、変化を見逃して大きな障害を招くことも考えられ、フィードバック系の自動制御システムの装備を勧める。また、定期的な培養液中無機成分分析が望まれ、分析委託をする体制を整えるとともに、主要元素については簡易測定器を用いた自主的な分析が行われるべきである。

#### (4) 光源

作物の光要求量は、光合成有効光子束密度(PPFD)として、葉菜類では100~300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、果菜類の場合200~600  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、花卉類は50~200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であるとされている<sup>4)</sup>。ここで、100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ は白色蛍光灯の場合で、照度として約9000 lux、放射照度として約25 W m<sup>-2</sup>に相当する。葉菜生産手法として人工光型植物工場が定着してきた背景には、せいぜい200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でいいという弱い光要求量と、生育期間が短く施設回転率が高いなどの特性からビジネスモデルとして成立していることによる。これら施設で利用される光源は、1990年代には高圧ナトリウム灯であったが、2000年代には蛍光灯利用による多段型栽培が登場し、面積効率のよさと相まって人工光型の主流となっていった。2010年代に入ると電力代高騰の背景もあり、より省エネルギーの光源としてLED光源導入が加速されてきており、今後の主役の座につかんと国内外企業の開発努力が続けられている。人工光型植物工場における光源は、根幹中の根幹デバイスであり、どれを採用するかは決定は、設計における最も重要な決断である。新棟では、先進的技術実証施設の位置づけとしていることから、今後の展開を考えLED採用を基本方針として定めていた。どこのメーカーのものを採用するかはセクションにあたっては、学内の知見だけに留まらず、有識者の意見や、各社から供試品提供を受けての栽培試験など踏まえ、オランダのP社製モジュールの採用を決断した。評価項目として考えていた①野菜の生育性、②コスト、③電源接続だけで点灯可能な使い勝手のよさ、④器具としてIP66の高い耐湿性能、⑤栽培時の野菜の色が緑に見える演色性など、他より高い評価となった製品完成度の高さであった。図-5に示したが、1.2mのモジュール内に青・白・赤・FRのLED素子が配置されており、1本の消費電力は28Wであり、60cmの栽培ベッドに3本ずつ配置し、栽培パネル面でのPPFDは約180  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ である。

昨年10月の運用開始から4箇月を経過したに過ぎないが、未だ不点灯発生は皆無である。特徴となっているFR



図-5 LED 光源モジュール

素子の配置は、品種によっては、チップバーン発生を加速させる側面もあり、今後の検証がまだまだ必要であるが、相対的に生育加速に機能しており、プラス要因であると考えている。

## 1.2 空調システム

植物工場においては温度の均一性を実現すると同時に、野菜の葉面周辺に停滞するCO<sub>2</sub>や水蒸気などを拡散するための適度な風速が要求され、さまざま工夫が行われている。特に、大型多段の植物工場においては低コストで各栽培棚に最適な送風を行うことが課題となっていた。そこで今回、5000株/日の生産能力を持つ大型設備(6列18段/16段)に対して栽培棚ごとに送風ダクトを設けて各段に送風できる垂直ダクト送風方式を考案した。プレナムチャンバの吹出し部に抵抗を設けることで複数の吹出し部の風量を均一にする手法はよく知られているが、寸法的に制限を受ける設備で十分なプレナムチャンバを設けることは不可能なので、ほぼダクトとしての機能に対し複数の吹出し部に異なる抵抗を設ける、すなわち、開口部の開口率を変えることで実現を目指した。2列18段の栽培棚の中間に両サイドに吹出し部をそれぞれ18個有した吹出しダクトから左右に気流を供給するシステムを考案した。

実設計の前に三次元モデルを用いて開口率の最適化を目的に気流シミュレーションを実施した。シミュレーションにはソフトウェアクレイドル社のSTREAMを使用し構造格子系汎用三次元熱流解析システムで実施した。図-6にシミュレーションの結果を示すが、風速が速い所を赤色、遅い所を青色で示している。左側がすべて同じ開口率の場合の気流分布で下部の吹出し部の風速が速く気流が下部に集中しているのが読み取れる。これに対して、右側の上中下3分割で開口率を変えたモデルでは比較的風速が均一化されているのがわかる。

人工光型植物工場における空調負荷は、外部からの侵入熱量と、室内で発生する光源からの発熱負荷の総和であ

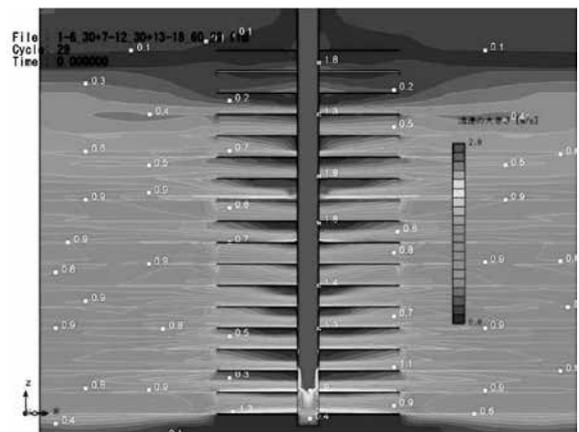
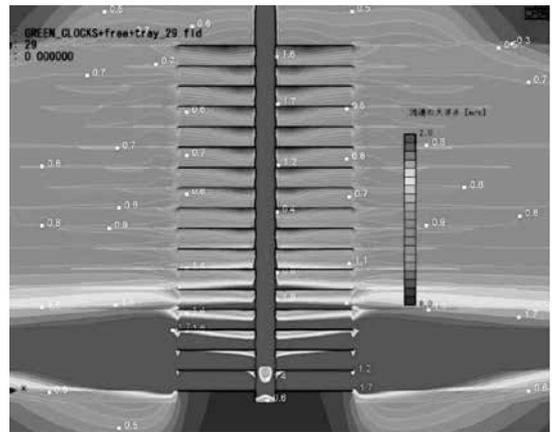


図-6 シミュレーション結果

る。LED化によって蛍光灯に比較して30%は低減するとしても、新棟での28W×約13000本装備では、後者での発熱負荷は364kWとなる。人工光型での電力負荷が最大となるのは、明期でありその時間帯を夜間にシフトし、電気料金が割安となる深夜電力を活用している事例が多い。このような運転パターンを導入すると、この時間帯では日射負荷もないことから、外部からの侵入熱量はほとんど考慮しなくてもいい。つまり、内部発熱負荷分だけの設備を装備すればいいことになる。外部侵入熱量の大きくなる昼間では、室内では暗期となっており、内部発熱負荷はほとんどない状況であり、有している冷却能力の数%で賄える構図となる。新棟では、前述した内部負荷を取り去るため、200kW×3系統の冷凍機を装備しており、各段に確実に送風するため730m<sup>3</sup>/minの送風機を配した空調機3台で対応している。栽培室気積5832m<sup>3</sup>であり、循環回数は22回/hとなっている。図-7に、室外機の様子を示す。

## 1.3 制御システム

すでに述べてきたように植物工場の構成要素は多岐にわたっており、それぞれが動作するための制御系が付属している。これまでは、系ごとにローカル制御として自己完結している形が一般的であったが、新棟では、系ごとに



図-7 室外機群

PLC 利用の制御ループを構成し、その上位 PC による統合管理システムを構築した。図-8 に、システム構成図を示す。これによって、制御ログデータは PC に蓄積され、さまざまな動作解析や故障解析にも活用できる。また、ネット接続することによって、ホスト PC と遠隔地 PC の情報共有が可能となり、生育の遠隔診断や、関係者間の連携が促進され故障解析の迅速化によるダウンタイムの極小化な

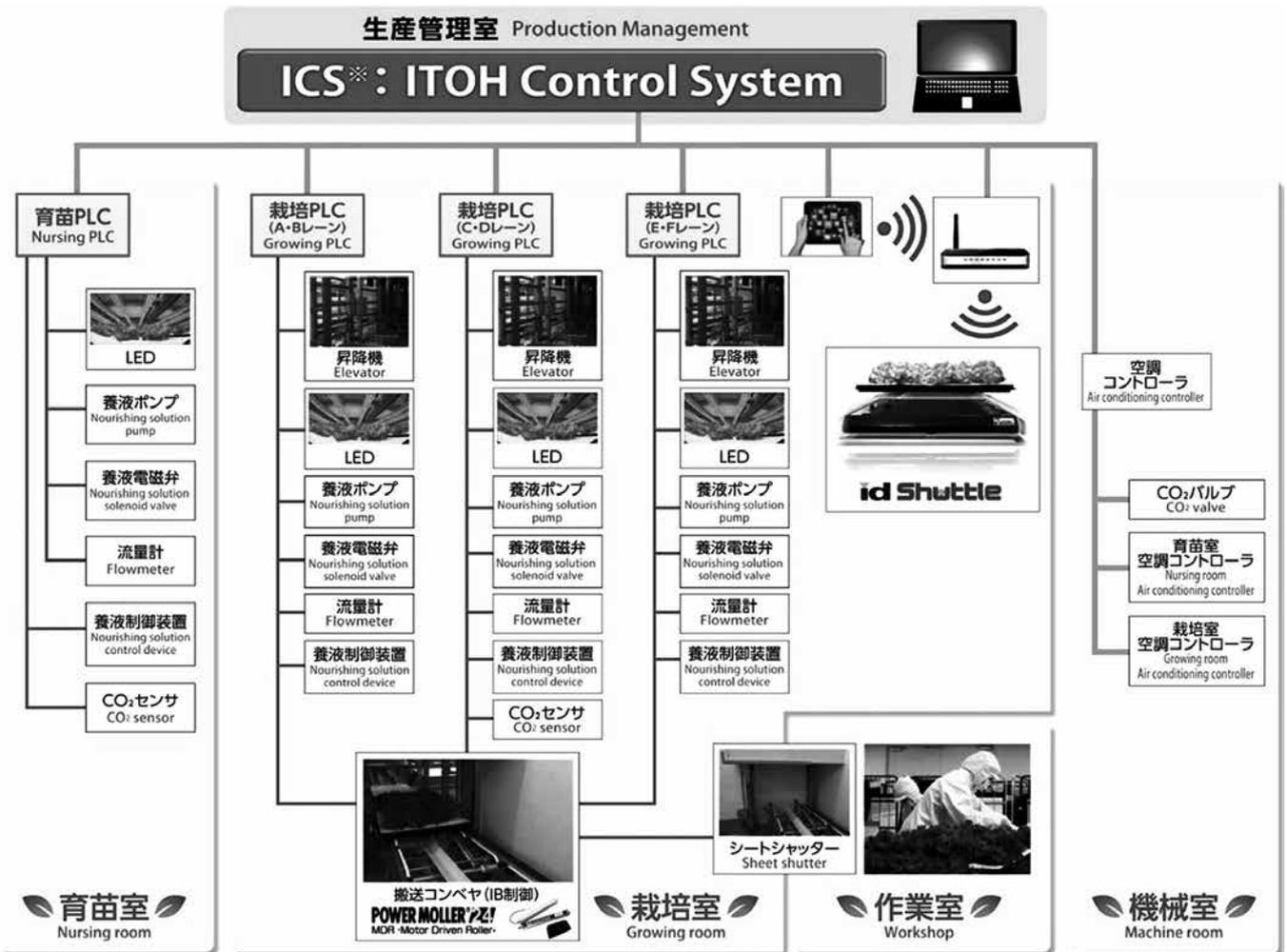
どの効用が期待できると考えている。

1.4 周辺機器システム

植物工場は野菜を生産するシステムで、生産をするというプロセスの中で、作業をアシストしたり効率的に処理したりするための機器も必要となる。播種機、苗移植機、パネル洗浄機、包装機、金属探知付き検量機、エアシャワー、防じん服、マスク、帽子、冷蔵庫など多岐に渡っている。どういった物を選択するか、経験者のアドバイスが有効なので、先進施設見学機会を活用するなどの工夫とか、自分たちに合ったものを順次揃えていくとかのやり方も考えるべきである。

2. 日産 5 000 株植物工場における消費電力量試算

人工光型植物工場の生産コスト構成は、電力料、人件費、減価償却がそれぞれ 30% で、これが 3 大コスト要因とされている。新棟は、生産コスト 40% 縮減を目標としており、電力料削減のため LED 光源の全面採用、人件費



※ ICS とは、I 電機独自の制御システム。新植物工場 C 22 棟全体の制御を行っている。

図-8 制御システム図

削減のため、生産ラインの自動化を取り入れている。これらの検証については今後の取組みであるが、消費電力量については設計段階で試算したので、表-1にそれを紹介する。最も大きいのが光源で、消費電力量の52.7%を占めている。年間生産株数(180万株)で、光源だけの年間消費電力量を除すと1.05 kWhと、株あたり1 kWの目標値は、ほぼクリアしている。LED化の効用であろう。次に大きいのが空調部分で、34.1%と大きな構成比となっている。内訳に記載しているが、栽培室室内機の送風機が18.5 kW×3系統と大容量となっていることによる。室内温度のより均一化を目指した結果であるが、経済性の観点では、今後詳細な検証と検討を行っていききたい。工場全体としては、1株あたり消費電力量は約2 kWとなっている。

### おわりに

本稿では、主だった植物工場の構成要素について解説したが、設計にあたっては、このほかにも建屋の構造、断熱性、ゾーニングと作業動線、作業姿勢と作業環境などの労働負荷、衛生管理、流通、その他多岐に渡る。現在、日本においては日産5000株以上を生産する大規模植物工場が10箇所程度稼働しているといわれる。大規模化するほど建設後の設計変更は難しく、設計段階での詳細な解析とコンピュータおよび試験プラントでのシミュレーションの重要性が増している。また、近年の電気料金の高騰により、さらなる生産コストの低減が望まれており、そのためのハード、ソフト両面からの技術開発が必要とされている。本稿が植物工場の普及、発展の一助になれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 小倉東一・福田弘和・和田光生：大阪府立大学の新世代植物工場、施設と園芸、168(2015)、pp.12~15
- 2) 日本施設園芸協会：生鮮野菜衛生管理ガイド—生産から消費まで—(2003)
- 3) 寺林 敏：1. 用水、日本施設園芸協会/日本養液栽培研究会共編、養液栽培のすべて(2012)、誠文堂新光社、pp.54~64
- 4) 後藤英司：第3章光源利用の実際、後藤英司編、人工光源の農林水産分野への応用(2010)、農業電化協会、pp.111~114

## Elemental Systems and Consideration Points for the Design of a Plant Factory

Toichi Ogura\*1  
Teruo Wada\*2

Synopsis A commercial plant factory "New genera-

表-1 日産5000株生産工場の電力消費量試算

区分	内 訳	年消費電力量[kWh]		構成比[%]
光 源	育苗室	183 960	1 905 826	52.7
	栽培室	1 721 866		
空 調	育苗室室内機	38 544	1 232 112	34.1
	育苗室室外機	92 856		
	育苗外気導入	2 628		
	栽培室室内機	598 764		
	栽培室室外機	486 180		
	栽培外気導入	13 140		
緑 化	緑化移植機	15 330	119 030	3.3
	緑化LED	17 520		
	緑化空調	52 560		
	緑化搬送	13 140		
	緑化検査	6 570		
	他	13 910		
ポ ン プ	育苗循環ポンプ	23 652	95 046	2.6
	栽培循環ポンプ	69 642		
	育苗追肥ポンプ	438		
	栽培追肥ポンプ	1 314		
搬 送	育苗リフター	6 570	43 252	1.2
	栽培前詰め	15 330		
	栽培リフター	8 212		
	出庫コンベヤ	8 760		
	作業室コンベヤ	4 380		
そ の 他	包装機	8 760	91 688	2.5
	コンベヤ	1 825		
	計量機	1 825		
	洗浄機	8 468		
	エアシャワー	730		
	冷蔵庫	70 080		
生産設備消費電力量合計			3 486 954	
建築設備	居室照明・空調	129 126	129 126	3.6
建築設備消費電力量合計			129 126	
全体消費電力量			3 616 080	100

tion plant factory", which produces 5 000 lettuces per day, was built in R & D center for the Plant factory of Osaka prefecture university in September, 2014. The plant factory is operated to establish saving 40 % of cost for growing plants. In this paper a part of design process

\*1 R&D Center for the Plant Factory, Osaka Prefecture University

\*2 Graduate School of Life & Environmental Sciences, Osaka Prefecture University

of elemental system for the new plant factory is introduced. Especially, consideration points of design for plant growing system including hydroponic system, multi-layered rack, solution circuit and light source, air conditioning system, control system, and other peripheral systems in the plant factory are reviewed. Furthermore, an electric power consumption preliminarily calculated with simulated operation of the new plant factory is shown.

(Received February 10, 2015)



小倉東一 おぐらとういち  
昭和19年生まれ/出身地 京都/最終学歴 大阪府立大学工業短期大学部溶接科



和田光生 わだてるお  
昭和42年生まれ/出身地 大阪/最終学歴 大阪府立大学大学院農学研究科博士前期課程/学位 博士(農学)

## SHASE-S (スタンダード) 空気調和・衛生工学会規格

SHASE-S 117-2010

# 換気・空調設備の現場風量測定法

適用範囲/用語及び定義/記号/現場風量測定法の概要とその方法/各種現場風量測定法/測定報告書/引用規格

付属書A (参考) 各種測定機器の (推奨) 精度 (ISO14644-3) 解説

- ・平成22年4月5日発行
- ・A4判 29頁
- ・価格 1,619円+税 会員価格 1,448円+税

当学会ホームページ (<http://www.shasej.org/>) にて、PDFファイルのダウンロード販売を行っております。詳細は、ホームページ“発行図書案内”をご覧ください。