Plant Production Management System for PFAL (plant factory with artificial lighting)

#### Beijing, China May 9-10, 2015 Association for Vertical Farming

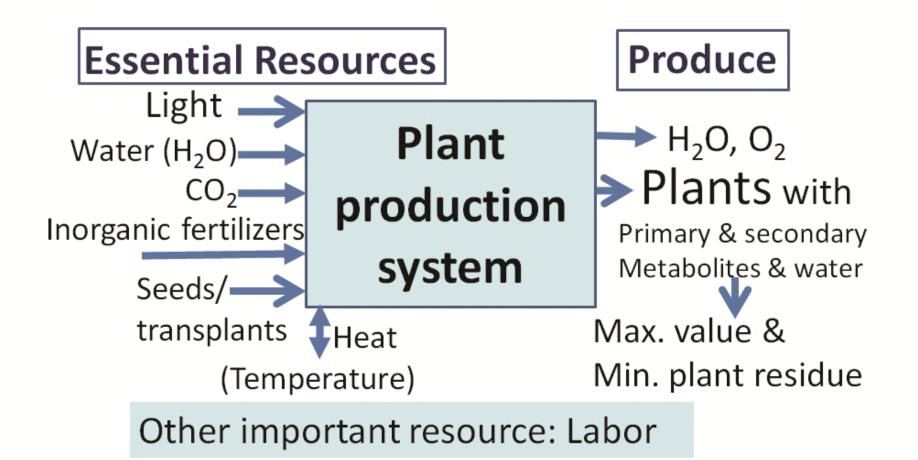


Toyoki Kozai, Japan Plant Factory Association S. Sakaguchi, T. Akiyama, K . Ohshima and K. Yamada, Plantx Co. Ltd.

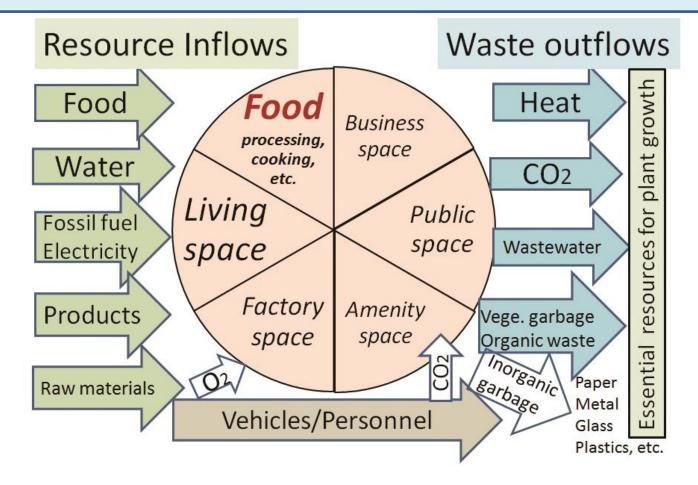
### Contents

- Introduction essential resources for plant production -
- Current status of PFALs in Japan and issues to be solves
- Structure of PFAL (plant production system)

Essential resources (left) in plant production system & produce obtained form the system (right)



### Most fresh garbage in the city can be converted into essential resources for plant production



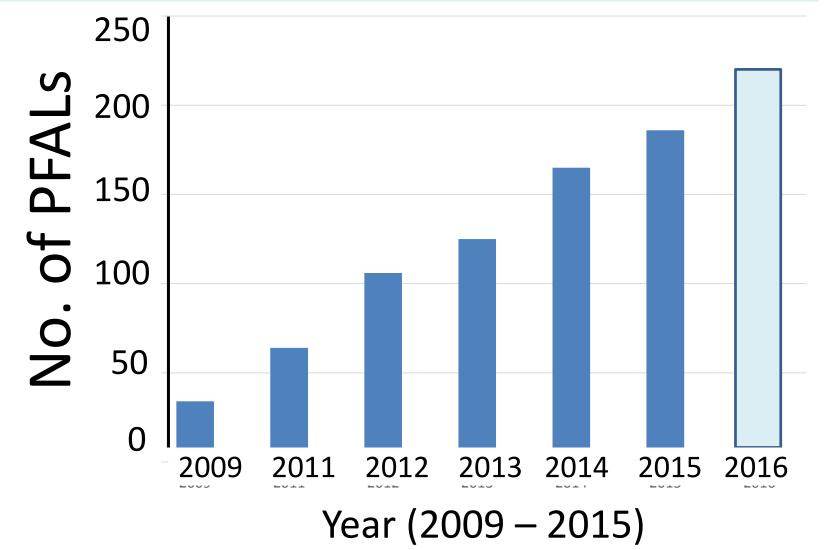
## Annual production capacity is 100 -200 times higher in the PFAL than in the open-field



Yearly production capacity 2,500 lettuce heads/m<sup>2</sup> Sales: 2,500 US\$/m<sup>2</sup>

The PFAL with LEDs in Japan by Mirai Co. Ltd.

# The number of PFALs has been increasing in Japan. Why?



### Production costs by components

Consumables 3%, Seeds 2%, Repair 2% Supplies 1%, Water 1%, Land rental 1%, Miscellaneous 1%, Land rental 1%

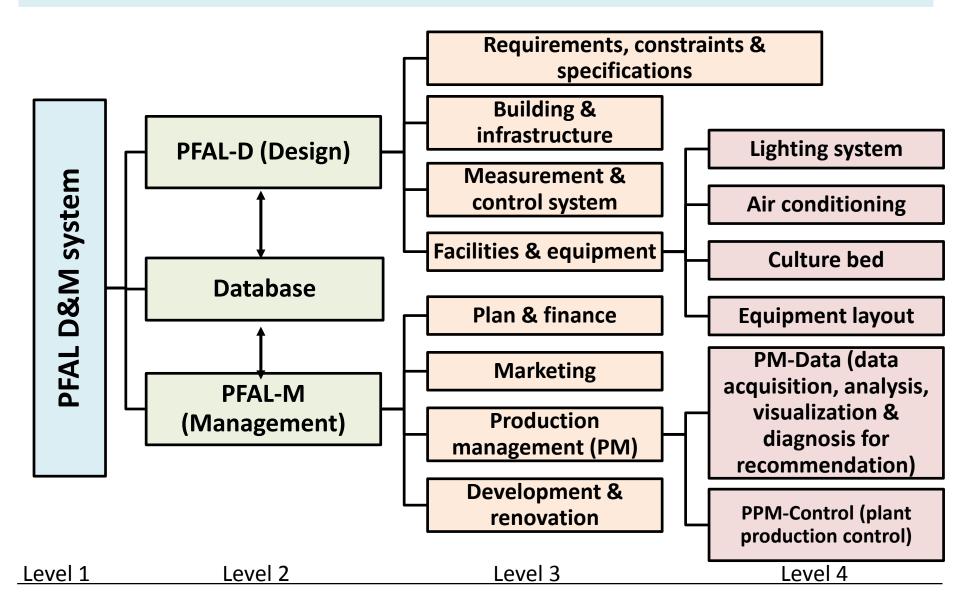
#### Packing, shipping, transportation 12%

Electricity 28%

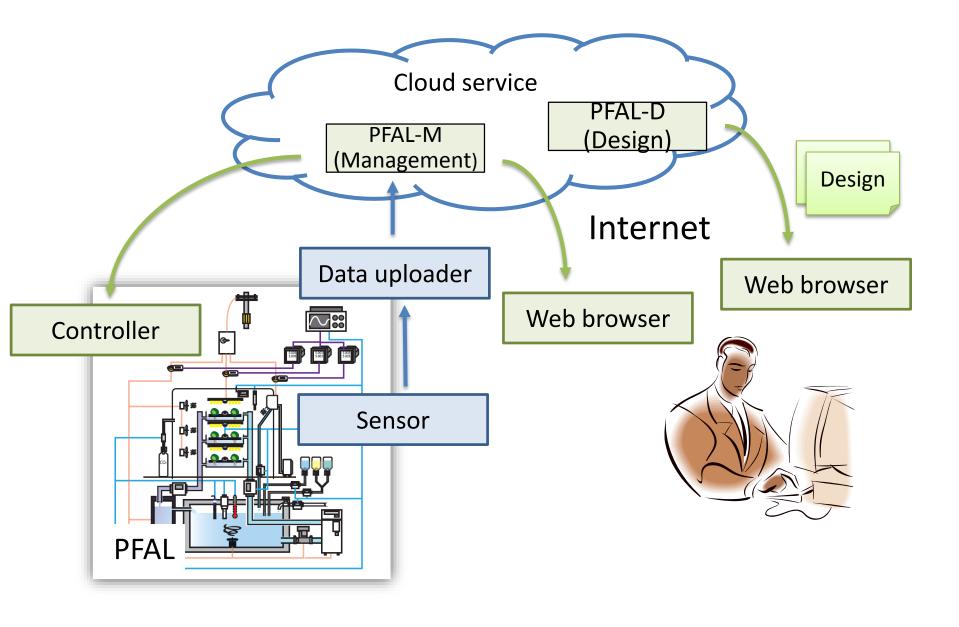
Depreciation 23%

Labor 26%

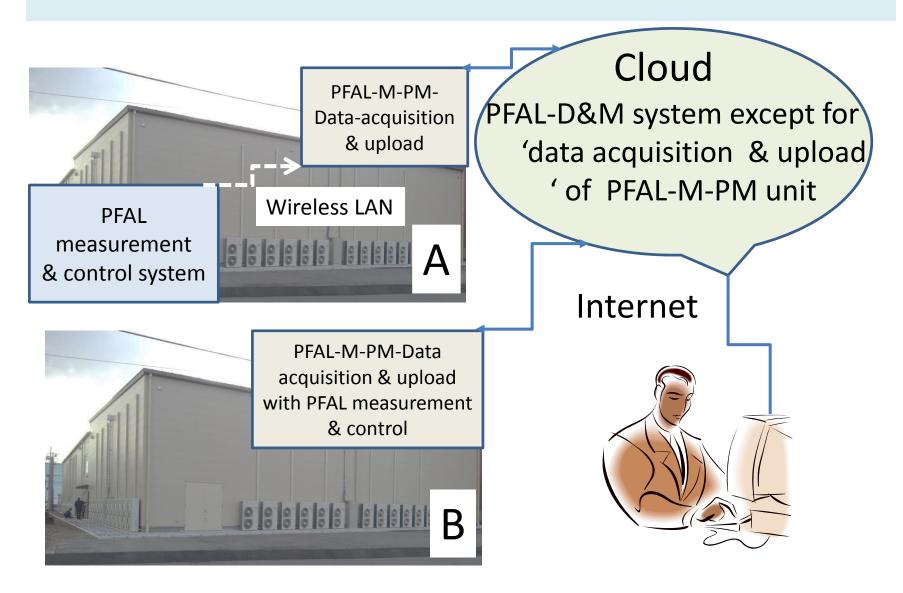
## Structure of PFAL-D&M (plant factory with artificial lighting - design and management ) system



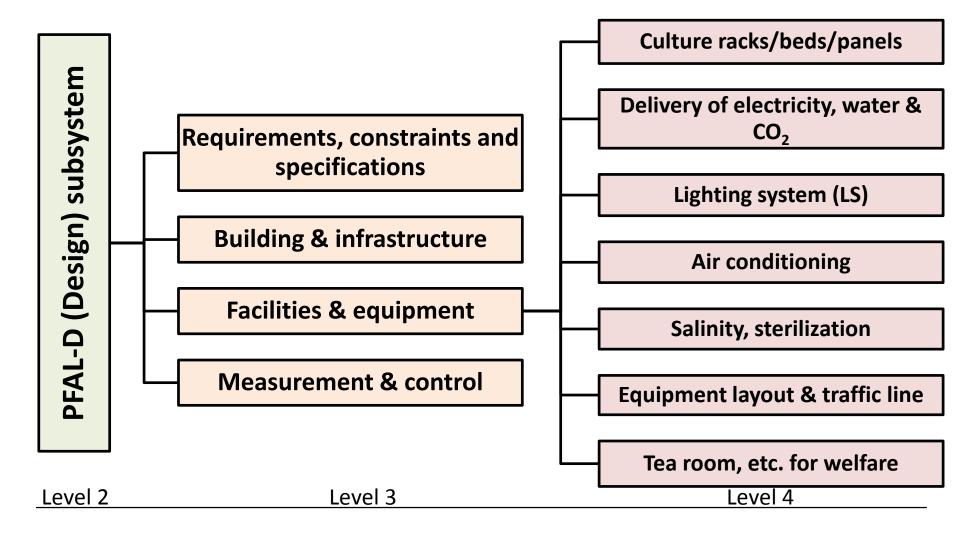
#### Structure of PFAL-D&M system in the cloud and PFAL



PFAL-D&M is used via Internet. Type A: Installed at an existing PFAL, Type B: Installed at a newly built PFAL



### **Structure of PFAL-D (Design) system**



## Parameters used to simulate the light environment using PFAL-D-LS (design of lighting system)

	Luminous intensity distribution curve of lamps
PFAL-D-Lighting (LS) simulation software)	Optical properties of reflectors, culture panels & plant canopy
	3-Dimensional structure of culture shelf, culture bed & plant canopy
L-D-Ligh ulation	Temperature dependencies of photosynthetic photon flux efficiency (μmol/s), wattage & life span of lamps
PFA (sim	Type, size and shape and layout of lamps
	Sink/release of thermal energy generated by lamps
Level 4	Level 5

#### Data collected by PFAL-M-PM Data acquisition part

collected by PFAL-M-PM-Data acquisition part Data

Electricity consumption rates by components

Water, CO<sub>2</sub> & fertilizer consumption rates

**Consumption rates of various supplies** 

**Environmental factors in the culture room** 

Plant growth rate, daily yields & sales figures

**Wastes** (plant residue, used supports & supplies)

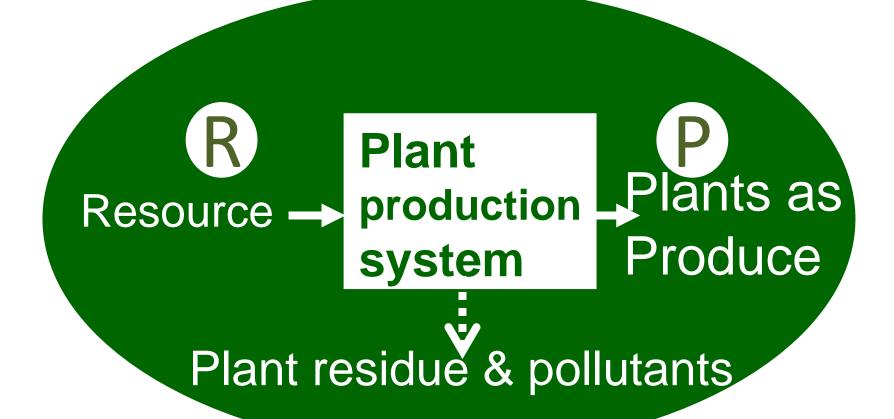
Photosynthesis, respiration & water uptake rates

Human jobs, working status of machine & equipment

2-D Images by visible light & thermal radiation cameras

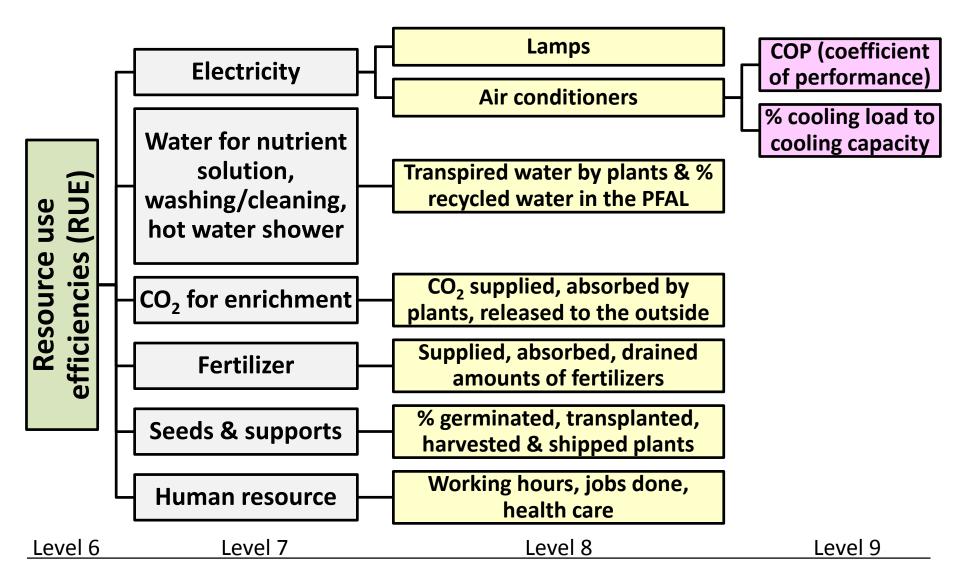
Level 7

### **Resource Use Efficiency (RUE) = P/R**



Resource: electricity, light, water, CO<sub>2</sub>, fertilizer Seeds/cuttings, human power, PFAL building

## Resource use efficiencies (RUE) to be displayed on the screen



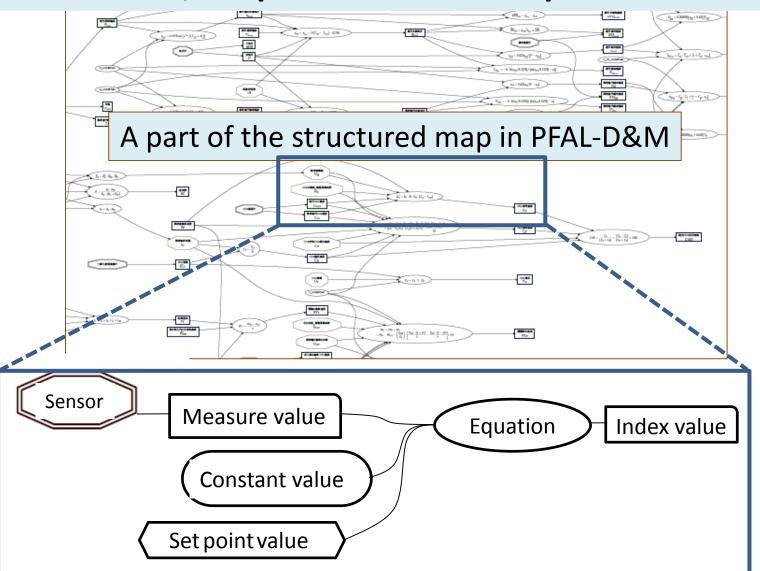
#### Tabulated list of variables on electricity consumption and light environment together with their attributes $1 \sim 14$ stored in PFAL-M

serial number ②variable name ③ symbol ④unit ⑤category ⑥ time interval
 equations ⑧equations in TEX ⑨ URL ⑩definition ⑪explanations
 reference ⑬equation number ⑭ variable name in English

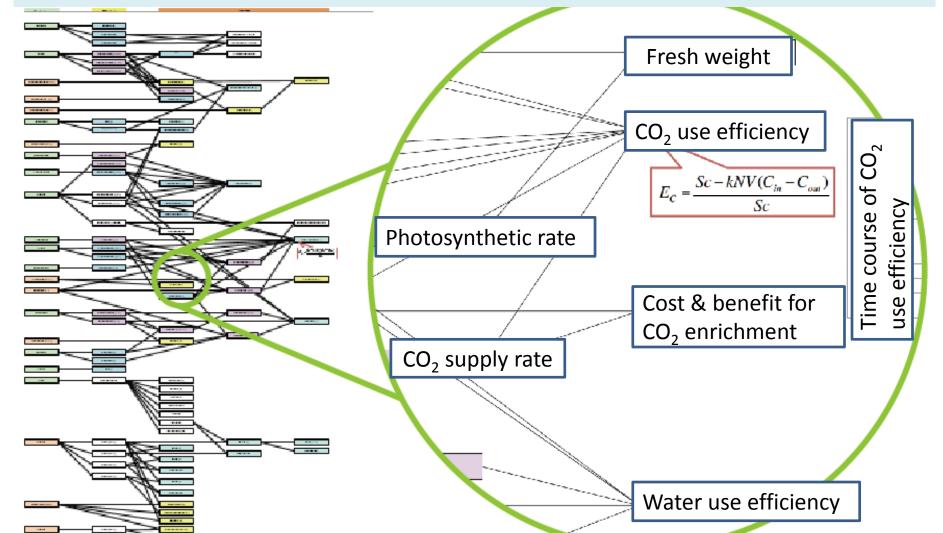
19 4 3 変要・変数 31 会単倍 金単倍 2 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	LUE_L	PJAKW           PJAKW           PJAKMh           MJ m*2 n*1 (kWh/h?)           PJ           PJ	<b>定数</b> 定数 深数 测定值 指標值 指標值 指標值	<ul> <li>1時間</li> <li>1時間</li> <li>1ヶ月</li> </ul>	$A_T = A_A + A_L + A_L$	基本料金 - 電力量料 - 電力基本 -	単位電力量とりの基本料金           単位電力量当たりの使用料金           単位電力量当たりの使用料金           2月300使用した電力量料金の合計           電力基本料金と電力量料金の合計           一支販売に使用した電力の使用料           ーッ月当たりの電力の基本料金           27/100 エアコンの冷却性描に相当する価	電力会社に応じて料金体系は異なる。 電力会社に応じて料金体系は異なる。 消費電力をも言う。※ここでは、電力会社の用語 に統一 電力会社によっては、再生可原エネルギー参数化 る場合さめる。 契約電力別、季節別、時間帯別で開金係水が異な る場合が多い。 契約電力別、季節別、時間帯別で開金係水が異な の場合、決点11ヶ月のビーク電力に応じて決 まる。		◇ 章番号/式番↓ Webサイト等参照 Webサイト等参照 Eq. 11	
(金単価) 開 (金) (金) (金) (金) (金) (金) (金) (金) (金) (金)	COP	円/kWh MJ m^-2 h^-1 (kWh/h?) 円	22数	<ul> <li>1時間</li> <li>1時間</li> <li>1ヶ月</li> </ul>	$COP = \frac{H}{COP}$	基本料金 - 電力量料 - 電力基本 -	単位電力量当たりの使用料金 <u>*///mto</u> 使用した電力量の合計 電力減水料金と電力量料金の合計 一定期間に使用した電力の使用料 一ヶ月当たりの電力の基本料金	単力会社に応じて料金体系は異なる。 消費電力とも言う。米ごては、電力合社の用語 に充一 電力会社によっては、再生可能エネルギー条電管 は認識やす場合発電性的加速などが加速され る場合がある。 契約電力に影く挙行』、弊情が影で料金体系が資な る場合が多い。 契約電力に応じたけ7月当たりの基本料金、東京 電力の場合、送点11ヶ月のビーク電力に応じて決 まる。	各電力会社の	Webサイト等参照	2 2
3度 2 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 3 2 3 3 2 3	COP	MJ m^-2 h^-1 (kWh/h?) 円	测定值。 指標值。 指標值。 指標值。	<ul> <li>1時間</li> <li>1時間</li> <li>1ヶ月</li> </ul>	$COP = \frac{H}{COP}$	基本料金 - 電力量料 - 電力基本 -	111100         使用した電力量の合計           電力基本料金と電力量料金の合計         -           一支販問に使用した電力の使用料         -           ーヶ月当たりの電力の基本料金         -	1月費電力なも言う。米ここでは、電力会社の用語 に統一 電力会社によっては、再を可原工ネルギー専種型 超辺識会や北最外費電気が加速などが加速などが加速な 医外電力は、発気別、医標準別で料金体系が現な 名場合が多ム。 服外電力は、発気別、時間帯辺で料金体系が現な 電力の場合、渋点11ヶ月のビーク電力に応じて決 まる。			
2 1合 2 2 2 2 2 2 3 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	COP	B	招標値。 指標値。 指標値。	<ul> <li>1時間</li> <li>1時間</li> <li>1ヶ月</li> </ul>	$COP = \frac{H}{COP}$	基本料金 - 電力量料 - 電力基本 -	電力基本料金と電力量料金の合計 一定期限に使用した電力の使用料 一ヶ月当たりの電力の基本料金	上続一 電力会社によっては、再生可能エネルギー务電促 通道課金やス環光発電空送付加算され る場合がある。 契約電力別、季節別、時間帯別で料金体系が異な る場合が多い。 契約電力に応じた1ヶ月当たりの基本料金。東原 電力の基合、過去11ヶ月のビーク電力に応じて決 まる。。	[Kozai2013]	Eq. 11	Total electricity consumption
i会 3料金 2 2 2 2 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2	2	円 円	指標価。 指標価。 指標価。	1時間 1ヶ月	COP = -	電力量料 - 電力基本 -	<ul> <li>一定期間に使用した電力の使用料</li> <li>ーヶ月当たりの電力の基本料金</li> </ul>	電力会社によっては、再生可能エネルギー発電使 減退変会でX環光発電空油付加金などが加算され る場合がある。 気術電力別、芽類別、時間帯別で料金体系が異な ち場合があい。 支援時電力に応じた1ヶ月当たりの基本料金、東京 電力の場合、過去11ヶ月のビーク電力に応じて決 まる。			
料金 2 2 2 (負荷車 2 (関する光エネルギー利用効率	2		指標值 *	1ヶ月	COP = -	電力基本 -	一ヶ月当たりの電力の基本料金	契約電力別、季節別、時間帯別で料金体系が異な る場合が多い。 契約電力に応じた1ヶ月当たりの基本料金。東京 電力の場合、過去11ヶ月のビーク電力に応じて決 まる。			
2 2 負荷車 に関する光エネルギー利用効率	2	円 - % %	指標值。		COP = -	2000000		電力の場合、過去11ヶ月のビーク電力に応じて決 まる。			
・ ・ 夏夏する光エネルギー利用効率	2	*		1分	COP = -	h COP = Vf http	y/late エアコンの冷却性能に相当する値				
に関する光エネルギー利用効率	LUE_L	%	指標值。		$A_{\lambda}$	4		ビートボンブによって栽培室から除去された熱エ ネルギー(H_n)とヒートボンブの電力消費量( A_A)との比で表わされる。実用上は、H_hの代 わりに照明消費電力(A_L)とその修消費電力( A_M)の含質値を用いる。		Eq. 9, 12	Coefficient Of Performance of heat pumps for cooling
	LUE_L	%			-	エアコン-	エアコン定格消費電力に対するエアコン消費電力の			28	
こ関する光エネルギー利用効率		1	指標値	1時間	$LUE_L = \frac{f \cdot D}{PAR_I}$	LUE_L =	~ - ~			·	with respect to PAR_L
	LUE_P	%	指標值	1時間	$LUE_P = \frac{f \cdot D}{PAB_P}$	LUE_P =	250 equa	tions in t	his	; ta	ole (with respect to PAR_P
ルギー利用効率	EUE_L	96	指標值。	1時間	$EUE_L = h \cdot LUE_L = \frac{h \cdot f}{PAR}$	D EUE_L =					ncy
>消費電力量	A_A	MJ m^-2 h^-1 (kWh/h?)	测定值。	1分	-		単位時間にエアコンが消費した電力量		[Kozai2013]	Eq. 9,11,12	Electricity consumption of air conditioners (heat pumps)
建電力量	A_L	MJ m^-2 h^-1 (kWh/h?)			-		単位時間に照明機器が消費した電力量		[Kozai2013]	Eq. 8,11,12	Electricity consumption of lamps
<b>消費電力量</b>	A_M			1分	-				[Kozai2013]	Eq. 11,12	Electricity consumption of water pumps, air fans, etc.
<定格消費電力		kW	定数	-	-		定格能力で運転した時の消費電力	定格冷房・暖房能力で運転した時に必要となる消 費電力。			Rated power of air conditioners (heat pumps)
/定格冷房能力		kW	定数	2	-	1 2	単位時間当たりに室内から取り除ける熱エネルギー	※以前は"kcalh"を使っていたが、単位の国際統一 でkWになっている。			Rated cooling capacity of air conditioners (heat pumps)
/定格暖房能力		kW	定数	1	-		単位時間当たりに室内に加えられる熱エネルギー	※以前は"kcalh"を使っていたが、単位の国際統一 でkWになっている。			Rated heating capacity of air conditioners (heat pumps)
Rエネルギー変換率	h		指標值	-	-		電気エネルギーから光源のPAR_Lへの変換率		[Kozai2013]	Eq. 7, 8	Conversion factor from electric energy to PAR_L
『ンプによって栽培室から除去された熱エネルギー	H_h	MJ m^-2 h^-1 (kWh/h?)	指標値	-			ヒートポンプによって栽培室から除去された熱エネ ルギー		[Kozai2013]	Eq. 9, 12	Heat energy removed from culture room by heat pumps
	H_v		指標值。	· -	-	· ·			[Kozai2013]		Heat energy exchange by air infiltraction and penetration th
	f	MJ kg^-1	定数	-			生体乾物重量から化学エネルギーに変換する係数	fの値は植物体が含む炭水化物、タンパク質、脂肪 の比率にやや影響されるが、概ね20 MJ kg^-1程 度である。	[Kozai2013]	Eq. 5, 6, 7	Conversion factor from plant dry mass to chemical energy
る変数・定数			Statute Inte								
		Im	洞定值。	?	-		人間の祝藤度を基準とした場合の可視光の量	光東の大小は、波長ごとの可視光域エネルギー量 と視感度を乗じた積の積算値の大小に相当する。	[古任2012]	7.3.6	luminous flux
		cd	測定值。	?	-		点光源から単位立体角当たりに発散する光束	*	[古在2012]	7.3.6	luminous intensity
	6	İx	測定值	?	-		光東を面積で除したもの	人の目にとっての明るさを表す。1 Imの光束が1 m*2に入射した時のその面の照度が1 Ixとなる。	[古在2012]	7.3.6	illuminance
		1					光合成有効放射束密度	単位面積あたりの光合成有効光子の毎秒のフラッ		7.3.7	
11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本	57章 27篇力量 27篇力間 28希望周衛力 21系辺府借力 エスルギー変換率 レプによって取得官から除去された施エネルギー によって交換された施エネルギー 2番 化学エネルギー変換所数	th	加工         A_L         MJ m <sup>4</sup> 2 h <sup>4</sup> 1 (wWnh?)           福力量         A_M         MJ m <sup>4</sup> 2 h <sup>4</sup> 1 (wWnh?)           福力量         A_M         MJ m <sup>4</sup> 2 h <sup>4</sup> 1 (wWnh?)           昭希原局力         wW         wW           昭希原局力         wW         wW           江本ルギー安静率         n         -           バブによって花地空から原去された熱エネルギー         H_h         MJ m <sup>4</sup> 2 h <sup>4</sup> 1 (wWnh?)           加工ホルギー安静率         f         MJ kg^41           加工 ペンデュネルギー 安静病数         f         MJ kg^41           調査 化学正本ルギー 安静病数         in         in	加加         人工         MJ m^2 2h <sup>-1</sup> (Whnh?)         測定値 満定 第名消費電力         人工         MJ m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> (Whnh?)         測定値 深格消費電力         認定値           (本格)算電力         KW         KW         定数         KW         定数           (本格)算電力         KW         KW         定数         KW         定数           (本格)算電力         KW         KW         定数         工業           (本市場)算電力         KW         KW         定数           (本市場)算能力         KW         KW         定数           (本市場)算能力         KW         定数         工業           (本市) (本市) (本市) (本市) (本市) (本市) (本市) (本市)	法工         MJ m^-2 h^-1 (WMM/7)         調定者         1分           2種力量         人.M         MJ m^-2 h^-1 (WMM/7)         調定者         1分           2種力量         人.M         MJ m^-2 h^-1 (WMM/7)         調定者         1分           2種力量         人.M         MJ m^-2 h^-1 (WMM/7)         調定者         1分           2番茄須賀電力         4V         変数         -         -           2番茄夏飯店力         H_1/h         MJ m*2 h*1 (WMn/7)         期借価         -           2運用・グラスやス 税利 デントルギー 変換合数         H_1/N         MJ m*2 h*1 (WMn/7)         新価価         -           2運用・グラスやス 税利 デントルギー 変換合数数         MJ m*2 h*1 (WMn/7)         第価価         -         -           2運用・グラスやス 税利 デンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンドンド	助量         人_L         MJ m <sup>2</sup> 2 h <sup>-1</sup> (kWhn?)         数学者         1分         -           電力量         人_M         MJ m <sup>2</sup> 2 h <sup>-1</sup> (kWhn?)         第次者         19         -           電力量         人_M         MJ m <sup>2</sup> 2 h <sup>-1</sup> (kWhn?)         第次者         19         -           電力量         KW         変数         -         -         -           S格振振力         KW         変数         -         -         -           S格振振力         KW         変数         -         -         -           SALF         KW         変数         -         -         -           SALF         MJ         KW         変数         -         -           SALF         H_h         -         -         -         -           SALF         H_h         MJ m <sup>5</sup> 2 h <sup>-1</sup> (kWh)?)         開催         -         -           SALF         H_L         MJ m <sup>5</sup> 2 h <sup>-1</sup> (kWh)?)         開催         -         -           SALF         F         MJ m <sup>5</sup> 2 h <sup>-1</sup> (kWh)?)         開催         -         -           SALF         F         MJ m <sup>5</sup> 2 h <sup>-1</sup> (kWh)?)         開催         -         -           SALF         F         MJ m <sup>5</sup> 2 h <sup>-1</sup> (kWh)?) </td <td>加力量         人工         加力率之か-1 (whnh?)         加支盤         1分         -</td> <td>加加         入し 電力量         人し 利加・2 h・1 (dVMnn?)         加速電         1分         -         -         単位時間に満用機器が発見した見力量           電力量         入加         NJM・2 h・1 (dVMnn?)         測定電         1分         -         -         単位時間に満用機器が見した人の支力量           電力量         入加         NJM・2 h・1 (dVMnn?)         測定電         1分         -         -         単位時間に消用した人の上以外の電力量           電力量         W         定電         -         -         こ         型位時間に消用したのしました用の消費用           15% 方面的目的         W         定電         -         -         -         単位時間に対した人の上以外の電力量           15% 方面的目的         W         定電         -         -         -         単位時間に消したのした用の消費力           15% 方面の目的目的         W         定電         -         -         -         単位時間に対したのし取り防えられき施ェネルギー           15% 方面の目的目的         W         定電         -         -         -         単位時間に対えられき施えるしたのの変換率           15.4 パギー         N         M・         -         -         -         電気エネルギー           15.4 パギー         N         M・         -         -         -         -         ビー         -         -         -         -         -         -         -         -         -</td> <td>力量         人」         MJ m<sup>A</sup> 2 h<sup>A</sup> [ 44W h<sup>A</sup>?]         製産性         1分         -         単位時間に原明機器が消費した電力量           確力量         人         MJ m<sup>A</sup> 2 h<sup>A</sup> [ 44W h<sup>A</sup>?]         製産性         1分         -         単位時間に原明機器が消費した電力量           確力量         人         M         Mi m<sup>A</sup> 2 h<sup>A</sup> [ 44W h<sup>A</sup>?]         製産性         1分         -         単位時間に原明とみんえ上は分の電力量           確応用のすることをの消費費力         W         定載         -         -         単位時間に方したのから取り除ける熱エネルギー         実績能力: 定当から取り除ける熱エネルギー           構成期所         W         定載         -         -         -         単位時間に方りに定内から取り除ける熱エネルギー           構成期所         W         定載         -         -         -         単位時間に方りに定内から取り除ける熱エネルギー           構成期         W         定載         -         -         -         単位時間出方りに定内から取ら除ける熱エネルギー           パグによって取用空から除去された地エネルギー         H         MI m<sup>A</sup> 2 h<sup>A</sup> [ 64M n<sup>A</sup>)         調整量         -         -         -         空気の運用しつ空気等           12.5 &lt; ご気換算</td> A         -         -         -         -         空気の運用しつご気換         -         -         -         200 m 14 c <sup>A</sup> 1 c	加力量         人工         加力率之か-1 (whnh?)         加支盤         1分         -	加加         入し 電力量         人し 利加・2 h・1 (dVMnn?)         加速電         1分         -         -         単位時間に満用機器が発見した見力量           電力量         入加         NJM・2 h・1 (dVMnn?)         測定電         1分         -         -         単位時間に満用機器が見した人の支力量           電力量         入加         NJM・2 h・1 (dVMnn?)         測定電         1分         -         -         単位時間に消用した人の上以外の電力量           電力量         W         定電         -         -         こ         型位時間に消用したのしました用の消費用           15% 方面的目的         W         定電         -         -         -         単位時間に対した人の上以外の電力量           15% 方面的目的         W         定電         -         -         -         単位時間に消したのした用の消費力           15% 方面の目的目的         W         定電         -         -         -         単位時間に対したのし取り防えられき施ェネルギー           15% 方面の目的目的         W         定電         -         -         -         単位時間に対えられき施えるしたのの変換率           15.4 パギー         N         M・         -         -         -         電気エネルギー           15.4 パギー         N         M・         -         -         -         -         ビー         -         -         -         -         -         -         -         -         -	力量         人」         MJ m <sup>A</sup> 2 h <sup>A</sup> [ 44W h <sup>A</sup> ?]         製産性         1分         -         単位時間に原明機器が消費した電力量           確力量         人         MJ m <sup>A</sup> 2 h <sup>A</sup> [ 44W h <sup>A</sup> ?]         製産性         1分         -         単位時間に原明機器が消費した電力量           確力量         人         M         Mi m <sup>A</sup> 2 h <sup>A</sup> [ 44W h <sup>A</sup> ?]         製産性         1分         -         単位時間に原明とみんえ上は分の電力量           確応用のすることをの消費費力         W         定載         -         -         単位時間に方したのから取り除ける熱エネルギー         実績能力: 定当から取り除ける熱エネルギー           構成期所         W         定載         -         -         -         単位時間に方りに定内から取り除ける熱エネルギー           構成期所         W         定載         -         -         -         単位時間に方りに定内から取り除ける熱エネルギー           構成期         W         定載         -         -         -         単位時間出方りに定内から取ら除ける熱エネルギー           パグによって取用空から除去された地エネルギー         H         MI m <sup>A</sup> 2 h <sup>A</sup> [ 64M n <sup>A</sup> )         調整量         -         -         -         空気の運用しつ空気等           12.5 < ご気換算	力量         人」         MJ m <sup>2</sup> 2 h <sup>4</sup> (WMn <sup>2</sup> )         第2番、1分         -         単位時間に周囲した電力量         (Kozz2013)           福力量         人         MJ m <sup>2</sup> 2 h <sup>4</sup> (WMn <sup>2</sup> )         第2番、1分         -         単位時間に周囲した電力量         (Kozz2013)           福力量         人         MJ m <sup>2</sup> 2 h <sup>4</sup> (WMn <sup>2</sup> )         第2番<1分	力量         人工         MJ m^2 Ph.4 (WMm/7)         調整値         1分         -         単位期間に到限したな能力量         (Kozz001)         (Kozz001)         (E.a. 51, 1;2)           確力量         人.M         MJ m^2 Ph.4 (WMm/7)         調定値         1分         -         -         単位期間に到限したA_LA_LUXAの電力量         (Kozz001)         (E.a. 51, 1;2)           確力量         人.M         MJ m^2 Ph.4 (WMm/7)         調定値         1分         -         -         単位期間に対像したA_LA_LUXAの電力量         (Kozz011)         (E.a. 51, 1;2)           死態消費(加)         KW         KW         KW         KW         (Kozz010)         (E.a. 51, 1;2)         (Kozz010)         (E.a. 51, 1;2)           死態消費(加)         KW         KW         KW         (Kozz010)         (E.a. 51, 1;2)         (Kozz010)         (E.a. 51, 1;2)           死態消費(加)         KW         KW         KW         (Kozz010)         (E.a. 51, 1;2)         (Kozz010)         (E.a. 51, 1;2)           死態消費(D)         KW         KW         KW         (Kozz010)         (E.a. 51, 1;2)         (Kozz010)         (E.a. 51, 1;2)           死態消費(D)         KW         KW         KW         (KW         (KW         (KW         (KW         (KW         (KW         (KW         (KW         (KW         (KW

The variables on CO<sub>2</sub>, water, heat energy, plant growth, etc. are also stored in the same way.

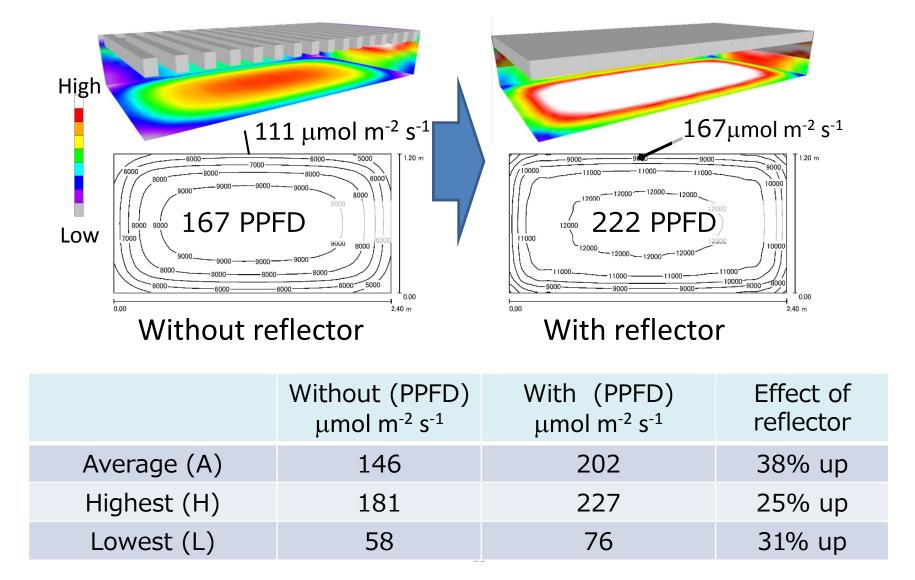
A part of the structure map in PFAL-D&M showing how to obtain the index value from the measured value, constant value, set point value and equation



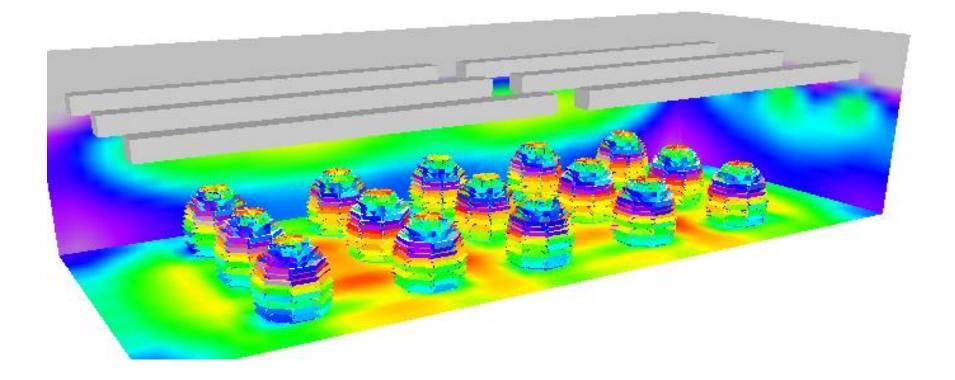
A logical structure of the equations stored in PFAL D&M. Equations are logically connected as show. The variables in the circle show the indices such as  $CO_2$  and water use efficiencies and rates of photosynthesis and  $CO_2$  supply



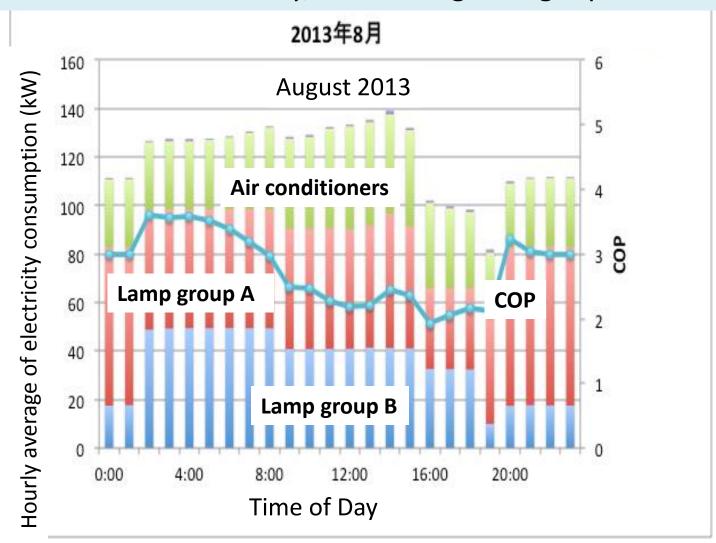
## An output example of PFAL-D for light environment improvement by use of light a reflector



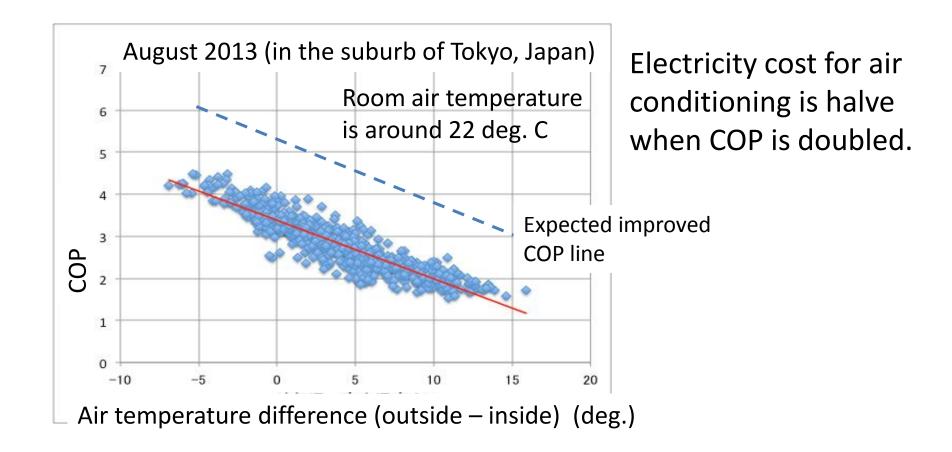
A simulated result using PFAL-D of 3 dimensional PPFD distribution on crisp head lettuce plants planted on the culture panels



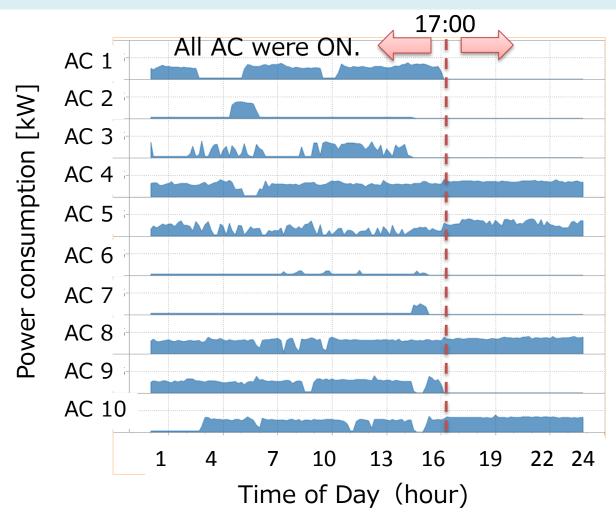
Daily changes in electricity consumption by lamp groups A and B, and COP (coefficient of performance) of air conditioners in a PFAL. Lamps of each tier are turned on together for 16 continuous hours a day, but shifting the light period.



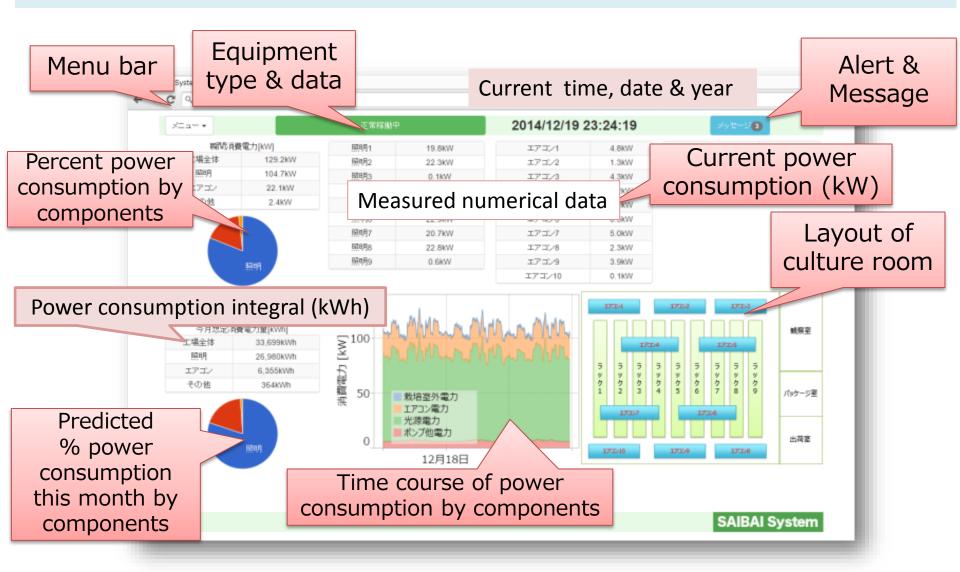
COPs of air conditioners in August as affected by air temperature difference between inside and outside. The dashed line indicates the maximum possible COP at the cooling load of around 70% of the cooling capacity



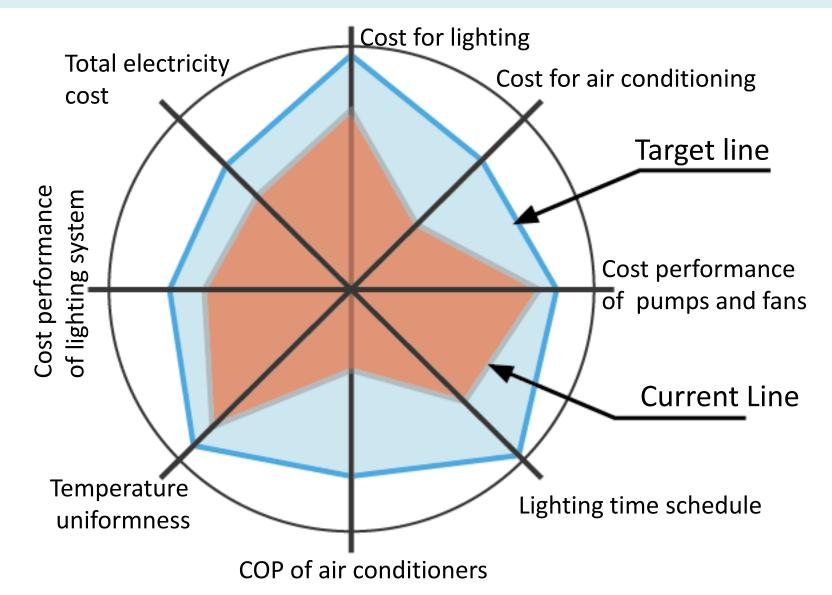
Diurnal courses of power consumptions of air conditioners (AC). From 1:00 to 17:00, all ACs were turned on, but 4 ACs only were turned on after 17:00. In either case, air temperature was controlled at the set point of 22. Average COP of ACs in operation was 20-25% higher after 17:00 than before 17:00.



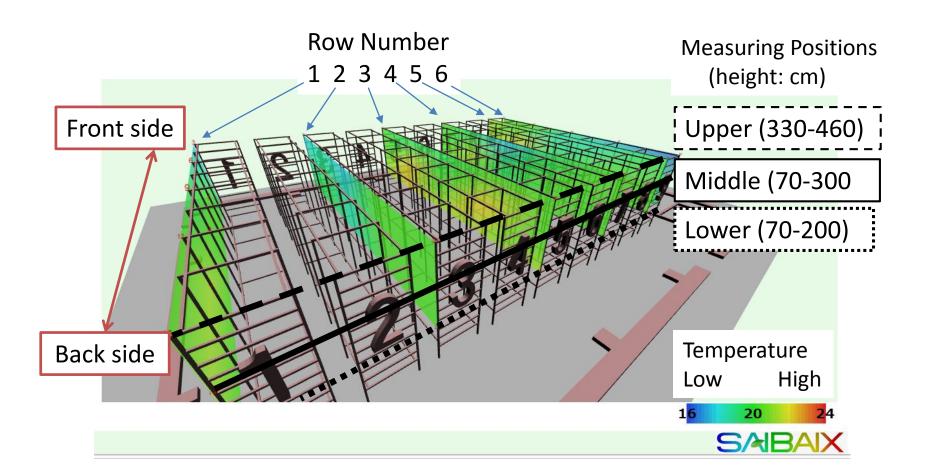
#### Visualized daily report of power consumptions by components on the computer display screen for the PFAL manager as a daily report



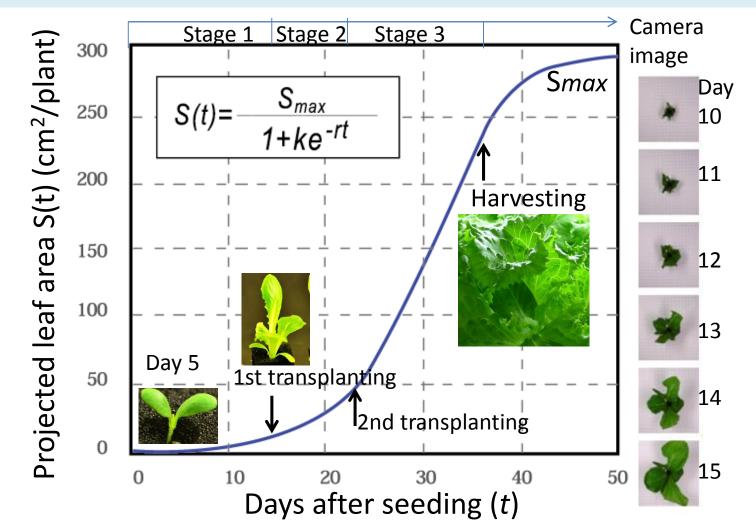
## Radar chart showing the overall performance of electricity. Each axis is automatically scaled.



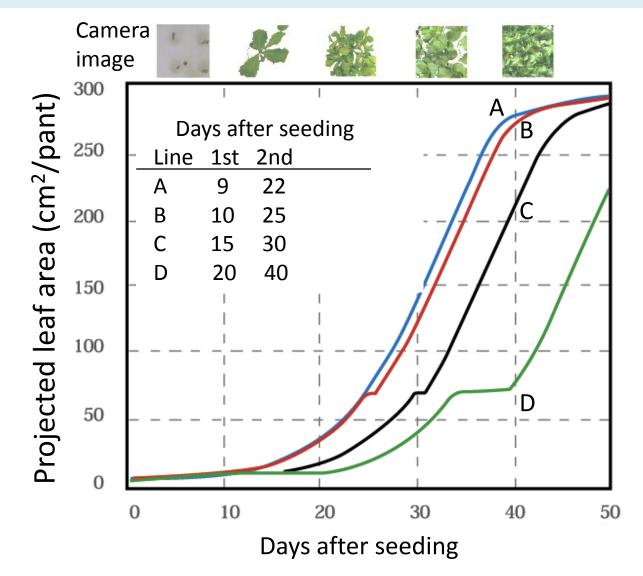
### An example of three dimensional air temperature distribution in the culture room with 9 rows & 10 tiers in the PFAL.



**Plant growth curve expressed as logistic growth equation.** Stage 1: from seeding to 1st transplanting; Stage 2: from 1st to 2nd transplanting; Stage 3: from 2nd transplanting to harvesting.



## Projected leaf areas as affected by the days after seeding of 1st and 2nd transplanting





To be published by Elsevier in October 2015

#### **PLANT FACTORY**

An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production







Edited by Toyoki Kozai, Genhua Niu, Michiko Takagaki

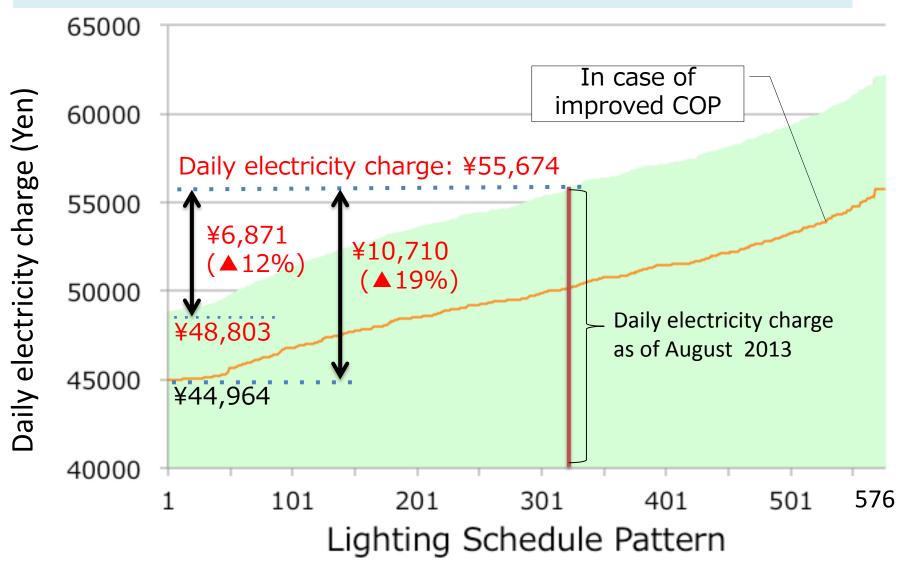


Edited by T. Kozai, G. Niu and M. Takagaki

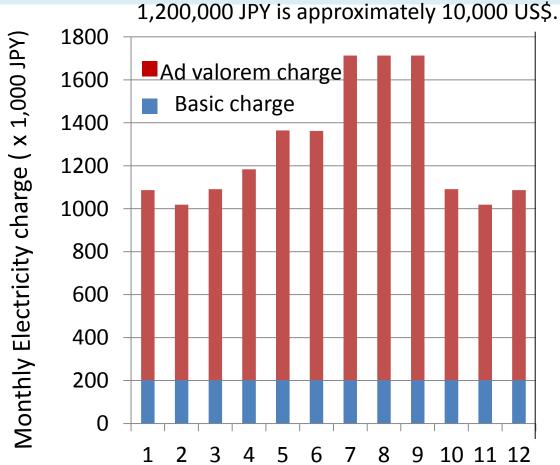
### Conclusion

- A design and operation tool for PFAL was developed as a cloud computing service.
- By improving the design and operation of current PFAL, it is expected that:
  - Electricity costs is halved.
  - 3-D distributions of light and temperature distributions are significantly improved.
  - Labor cost is saved and productivity is improved.

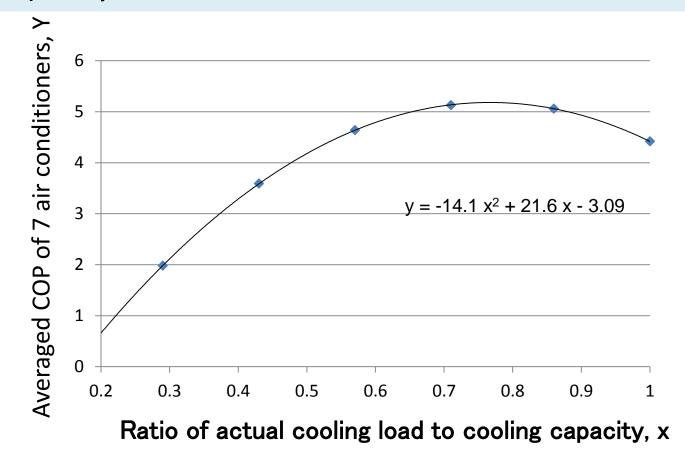
Daily electricity charge of 'ad valorem' as affected by lighting time scheduling pattern in Tokyo. (1 US\$ = 120 Yen as of 2013)

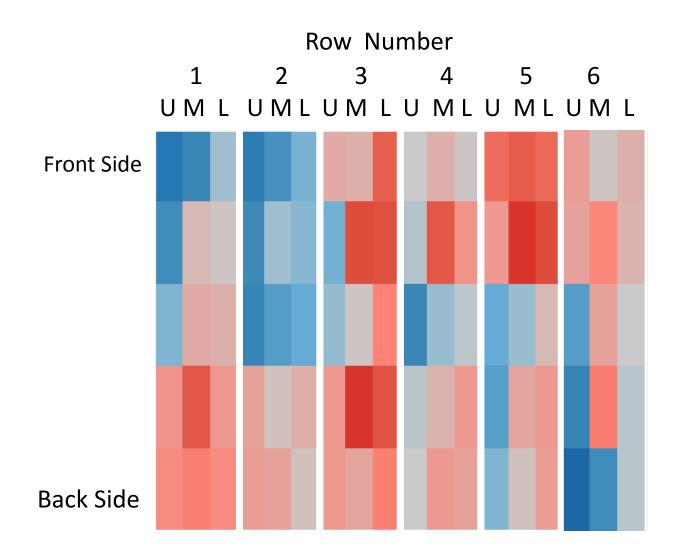


An example of monthly electricity charge for a PFAL in Japan, producing about 100,000 leaf lettuce heads per month. Percent base charge is lowest (12%) in summer and highest in winter (16%) with average of 16%. In Japan, monthly basic charge is determined by the maximum 30-minute power consumption (kW) during the past one year.



Averaged COP of 7 air conditioners as affected by the ratio of actual cooling load to full cooling capacity. Total electricity consumption of 7 air conditioners at full cooling capacity is 58.6 kW (Sekiyama and Kozai, 2015).





Shelves U: Upper, M: Middle, L: Lower (3 shelves each)

Fig. 22.22 Three dimensional air temperature distributions in the culture room of PFAL. U, M and L denote the upper, middle and low shelves. For row numbers, floor layout and heights of shelves, see Fig. 22.21.