

各研究開発成果の詳細内容

- ・ 1 高機能センサネットシステム開発
- ・ 1.1 半導体クリーンルームセンサネットシステム開発

(1) 研究目的

全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が各国毎、各産業毎に強く求められている。特に、省資源や高効率、低環境負荷化として温室効果ガス排出量削減に向けた取り組みが重要となる。特に、クリーンルームでは非常に大きなエネルギーが使用されており、CO2 排出量削減に向けた取り組みが望まれる。

表V.1.1-1に実際の半導体工場での消費電力量の一例を示す。

2000 平米(クリーン度 10 個/cf)クリーンルームが 3 箇所ある半導体工場の年間消費電力量である。非常に大きな電力が消費されていることが分かる。金額換算すると、施設設備では、4.2 億円。生産設備では、1.8 億円の電力が毎年消費されている。電力量単価を 12 円/kWh とする。

施設設備：35048000(kWh) × 12(円/kWh) = 420,576,000(円)

生産設備：14947000(kWh) × 12(円/kWh) = 179,364,000(円)

表V.1.1-1 (某)半導体工場での年間電力量(千 kWh)

施設設備	千kWh/年	生産設備	千kWh/年
空調設備用冷凍機	11316	ドライエッチング装置	3162
空調機	9158	枚様式生膜装置	2894
パッケージ空調機	173	イオン注入装置	1953
生産排気設備	2246	縦型炉	1858
生産冷却水設備	1296	露光装置	1797
N2製設備	3710	スパッタ装置	1140
超純水設備	1123	レジスト除去装置	527
排水処理設備	864	試験装置	1616
圧縮空気設備	1384	小計	14947
照明設備	1253		
特別高圧変圧器損失	1683		
高圧用変圧器損失	842		
小計	35048		

表V.1.1-2に国内のクリーンルーム数を示す。

2007年10月時点で国内には8000以上のクリーンルームが存在することが分かる。

表V.1.1-2 国内クリーンルーム数

	合計数量	平成3年以降	平成元年～2年	昭和59年～63年	昭和58年以前
クリーンルーム 全体	8,372 (100.0%)	1,611 (19.2%)	1,648 (19.7%)	3,121 (37.3%)	1,992 (23.8%)
クラス100以下	1,710 (100.0%)	357 (20.9%)	314 (18.4%)	734 (42.9%)	305 (17.8%)
クラス1000以上	6,662 (100.0%)	1,254 (18.8%)	1,334 (20.0%)	2,387 (35.8%)	1,687 (25.3%)

■特定機械設備統計調査
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kikaise/tokei.html>
 最終更新日:2007.10.1
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kikaise/xls/hm24940j.xls>

仮に、クラス100以下のクリーンルームの年間電力量を5000万円、クラス1000以上のクリーンルームの年間電力量を500万円と仮定すると、国内のクリーンルームでは、年間1200億円弱の電力量が毎年消費されていることとなり、非常に大きなエネルギーが使われている。クリーンルームでのエネルギー削減は非常に大きな意義があることが分かる。表V.1.1-3に国内クリーンルームでの年間電力料金を示す。

表V.1.1-3 国内クリーンルームでの年間電力料金

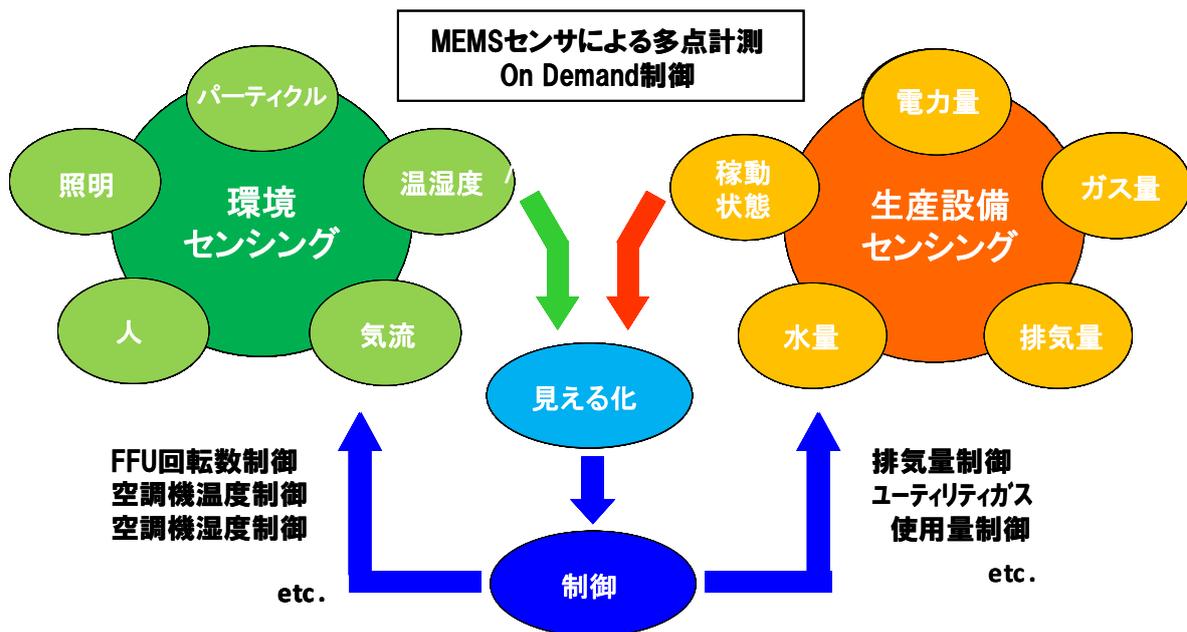
	合計_電力料金@年	数量	電力料金@年
クラス100以下	855億円	1,710	5000万円
クラス1000以上	333.1億円	6,662	500万円
クリーンルーム全体	1188.1億円	8,372	---

高機能センサネットワークシステムを実現するに際し、下記3項目の検討を行った。

- ・エネルギー(CO2)見える化システムの検討
- ・CO2_60%削減の検討
- ・エネルギー最適_空調自動制御システムの検討

図V.1.2-1に高機能センサネットワークシステムで目指している最終の姿を記載する。

最終的には、クリーンルームで消費されている様々なエネルギーおよびエネルギーに影響を与える項目の「見える化」を行い、エネルギーのムダを抽出し、あるムダは運用改善で、あるムダは自動制御を行って、エネルギーの削減を行うことを目指している。そのための手段として、MEMSセンサによる多点計測とオンデマンド制御をキーワードに各種検討を行った。



図V.1.2-1 高機能センサネットワークシステムでの最終の姿

(2) エネルギー(CO2)見える化システムについて

(2) -1 エネルギー(CO2)見える化システムの検討

エネルギー(CO2)排出量削減に向けた取り組みを継続して推進して行くためには、使用されるエネルギーの消費量や消費傾向を把握することは重要である。

クリーンルームで消費されているエネルギーおよび、そのエネルギーに影響を与える項目の見える化の検討を行った。

エネルギー見える化の項目

下記項目の見える化を行う。

- ・ 電力消費量：エネルギーの基本単位であり、生産設備、空調設備、付帯設備の全てにおいて、見える化を行う。
- ・ ガス消費量：プロセスガスやユーティリティガスも多量に使用されており、見える化を行う。
- ・ 純水消費量：純水も多量に使用されており、見える化を行う。
- ・ 温湿度：空調エネルギーに大きく影響を与える項目であり、見える化を行う。
- ・ パーティクル量：パーティクル量の有無に係わらず、空調設備が稼動しており、空調設備エネルギーに影響を与える項目であり、見える化を行う。次ステップとしては、パーティクル量に応じた空調設備の自動制御に繋げる。自動制御のイメージとしては、パー

ティクル量が少ない時は、FFU(FanFilterUnit)などの空調設備の稼働状態を低く抑えて、省エネを図る。

- ・ 人在室情報：人の有無に係わらず、空調設備が稼働しており、空調設備エネルギーに影響を与える項目であり、見える化を行う。次ステップとしては、人の在室状況に応じた空調設備の自動制御に空調設備の自動制御に繋げる。自動制御のイメージとしては、人が居ない時、もしくは少ない時は、FFU(FanFilterUnit)などの空調設備の稼働状態を低く抑えて、省エネを図る。
- ・ 設備排気量：設備からの排気量の見える化を行う。現状、設備の稼働状態に係わらず、設備排気は行われている。排気を行うということは、排気を行った分だけ、外気を新たに温湿度調整して取り込む必要がある。次ステップとしては、設備稼働状態に応じた排気設備の自動制御に繋げる。自動制御のイメージとしては、プロセス以外の時は、排気量を制限し、外気取り組み量も併せて制限することにより、空調設備の省エネを図る。
- ・ 設備稼働情報：設備稼働状態を把握することは重要であり、見える化を行う。例えば、設備の稼働情報から、設備電力量のムダを抽出したり、設備の稼働情報から、生産設備が稼働していない時は、その生産設備周辺の空調設備の稼働状態を低く抑えて、省エネを図ることなども想定できる。

■ ユーザフレンドリーな情報端末の導入検討

組織的に継続して省エネに取り組むためには、構成メンバの前向きな取り組み参加が重要である。その際、エネルギーに関する各種情報が、誰でも、何処でも、簡単に情報共有できることは重要である。一般的に、研究所では研究員、開発現場では開発員、製造現場では製造スタッフにとって、省エネ活動は主目的な取り組み業務ではない。何らかの研究や商品開発や納期通りに製品を作り上げることが最優先業務であり、省エネ活動は付随的な業務に成りがちである。特に、エネルギーに関する各種情報へのアクセスが面倒であれば、益々、構成メンバは、継続的な省エネ活動を後回しにすることとなる。それを防ぎ、構成メンバの前向きな取り組みの動機付けを行うためにも、「誰でも、何処でも、簡単に」、クリーンルームでのエネルギー情報を共有できることは重要である。上記理由により、ユーザフレンドリーな情報端末の導入を行った。

■ エネルギー分析支援ツールの導入検討

エネルギー削減の専任担当者もしくは準専任担当者が、エネルギーの詳細データを分析するには、任意のデータを任意の期間、任意の組み合わせで、データ加工／再表示できることは重要である。例えば、設備 A と設備 B を比較する場

合、電力量のみならず、周辺の温湿度やパーティクル量や稼動状態などの情報を任意に選択でき、再表示できれば、エネルギーのムダを抽出することに役立たせることは可能となる。

上記理由により、エネルギー分析を行う支援ツールの導入を行った。

■運用イメージ

実際に、ユーザフレンドリーな情報端末とエネルギー分析支援ツールを導入して、工場などの現場で運用するイメージは下記の通りである。

エネルギー削減専任責任者が「エネルギー見える化システム」で収集したデータを「エネルギー分析支援ツール」でムダを抽出し、削減の指針や方向性を示し、構成メンバは、いつでも、どこでも、誰でも、簡単に情報を共有できるユーザフレンドリーな情報端末を利用して、省エネ活動を継続して取り組み、エネルギー削減に繋げる。

(2) -2 エネルギー(CO2)見える化システムの評価

■エネルギー見える化

3D棟、3B棟、2G棟クリーンルームにおいて、エネルギーの見える化を行った。見える化を行った項目の詳細を表V.2.2.-1、表V.2.2.-2、表V.2.2.-3に記載する。3D棟クリーンルームでは、157点。3B棟クリーンルームでは、179点。2G棟クリーンルームでは、105点。合計：441点の項目の見える化を実現した。計測間隔は、10分。

表V.2.2-1 3D棟クリーンルーム エネルギー見える化システム項目

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ウェハ洗浄装置(1)(kWh)	ウェハ洗浄装置(2)(kWh)	薬液発生機(kWh)	ウェハ検査装置(kWh)	ウェットエッチング装置(kWh)	有機ドラフト(kWh)	アッシャー(kWh)	IPAバーバー乾燥機(kWh)	CL2除害(kWh)	PFC除害(kWh)	その他(N-24B-21)(kWh)	その他(N-26A-28)(kWh)	その他(N-24B-22)(kWh)	その他(N-26A-29)(kWh)	HF酸性層エッチャー(kWh)
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
高品質膜作成装置(シリクロシラン)(kWh)	高品質膜作成装置(モラン)(kWh)	低温成膜装置(kWh)	金属機能性材料膜形成装置(kWh)	金属機能性材料膜エッチング装置(kWh)	金属機能性材料膜エッチング装置(SF6ガス)(kWh)	酸化炉(kWh)	大面積シリコン深堀加工装置(kWh)	マスク露出装置(kWh)	マスク露光機(kWh)	段差測定装置(kWh)	コーターデロパ(kWh)	ステップ(kWh)	シリコン深堀加工装置(kWh)	酸化炉・窒化物エッチング装置(kWh)
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
拡散炉(kWh)	超純水製造装置(kWh)	ガス監視UPS(kWh)	酸・アルカリ排気ガス処理装置(kWh)	有機排気ガス処理装置(kWh)	熱回収チラーユニット(RHU-1)(kWh)	冷水1次ポンプ(PH-1-1)(kWh)	温水1次ポンプ(PH-1-1)(kWh)	冷水2次ポンプ(PH-2-1)(kWh)	温水2次ポンプ(PH-2-1)(kWh)	空冷パッケージ(PAC-1)(kWh)	空冷パッケージ(PAC-2)(kWh)	空冷パッケージ(PAC-3)(kWh)	空冷ヒートポンプパッケージ(PAC-4)(kWh)	熱一般排気ファン(kWh)
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
加湿器(WM-2)(kWh)	加湿器(WM-3)(kWh)	外調機(AHU-1)(kWh)	コンセントA(3D-8-04)(kWh)	コンセントB(3D-9-03)(kWh)	その他(N-23A-10)(kWh)	その他(N-23A-11)(kWh)	その他(G-23A-06-1)(kWh)	その他(N-26A-29)(kWh)	その他(N-23A-36)(kWh)	その他(N-24B-30)(kWh)	その他(N-26A-37)(kWh)	その他(N-24B-23)(kWh)	その他(N-26A-30)(kWh)	その他(N-24B-28)(kWh)
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
その他(N-26A-35)(kWh)	その他(N-24B-24)(kWh)	その他(N-26A-31)(kWh)	その他(N-24B-25)(kWh)	その他(N-26A-32)(kWh)	その他(N-26B-26)(kWh)	その他(N-26A-33)(kWh)	その他(N-24B-27)(kWh)	その他(N-26A-34)(kWh)	その他(N-23A-13)(kWh)	その他(N-23A-14)(kWh)	G23-06(kWh)	その他(N-24B-12)(kWh)	その他(N-24B-20)(kWh)	その他(N-26A-27)(kWh)
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
その他(N-24B-19)(kWh)	その他(N-26A-26)(kWh)	パーティクル量0.3μm(Wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(Wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(Wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(Wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(Wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(Wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[0.3μm]
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
パーティクル量0.5μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/リノ室)出入口(個)/cf[1.0μm]	薬液発生機(N2ガス)(L)	アッシャー(N2ガス)(L)	低温成膜装置(N2ガス)(L)	金属機能性材料膜形成装置(N2ガス)(L)
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
高品質膜作成装置(N2ガス)(L)	コーターデロパ(N2ガス)(L)	金属機能性材料膜エッチング装置(N2ガス)(L)	大面積シリコン深堀装置(SF6ガス1系統)(L)	大面積シリコン深堀装置(SF6ガス2系統)(L)	大面積シリコン深堀装置(C4F8ガス1系統)(L)	大面積シリコン深堀装置(C4F8ガス2系統)(L)	シリコン深堀加工装置(SF6ガス)(L)	シリコン深堀加工装置(C4F8ガス)(L)	酸化炉・窒化物エッチング装置(SF6ガス)(L)	高品質膜作成装置(シリクロシラン)(L)	高品質膜作成装置(モラン)(L)	超純水製造装置(上)(L)	ウェットエッチング装置(カナックス)純水(L)	コーターデロパ(純水)(L)
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
ウェハ洗浄装置(1)純水入力(L)	ウェハ洗浄装置(2)純水出力(L)	熱一般排気量(m3)	酸・アルカリ排気量(m3)	有機排気(排気量)(m3)	ウェハ洗浄装置(1)排気量(m3)	ウェハ洗浄装置(2)排気量(m3)	有機ドラフト(排気量)(m3)	シリコン深堀加工装置(排気量)(m3)	酸化炉・窒化物エッチング装置(排気量)(m3)	コーターデロパ(排気量)(m3)	ステップ(排気量)(m3)	拡散炉(排気量)(m3)	酸化炉(排気量)(m3)	ウェハ洗浄装置(2)薬品(L/min)
136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
ウェットエッチング装置(カナックス)薬品	メイン室温度(リノ室) (℃)	メイン室温度(Wet室) (℃)	Wet室温度(℃)	リノ室温度(℃)	メイン室温度(リノ室) (%)	メイン室温度(Wet室) (%)	Wet室温度(%)	リノ室温度(%)	差圧メイン室-Wet室(Pa)	差圧リノ室-Wet室(Pa)	差圧リノ室-メイン室(Pa)	差圧測定リノ室(Pa)	差圧測定メイン室(Pa)	差圧測定Wet室(Pa)
151	152	153	154	155	156	157								
人感センサ(Wet室)([0-1])	人感センサ(リノ室)([0-1])	人感センサ(メイン室A)([0-1])	人感センサ(メイン室B)([0-1])	シリコン深堀装置(タウラン) ([0-1])	高品質膜作成装置(タウラン) ([0-1])	拡散炉(タウラン) ([0-1])								

電力量
パーティクル量
ガス量/排気量/市水純水量

温度/湿度
室圧
人感
設備稼働

表V.2.2-2 3B棟クリーンルーム エネルギー見える化システム項目

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
電気特性検査装置電力量 (kWh)	内部構造観察装置(本機)電力量 (kWh)	内部構造観察装置(PC)電力量 (kWh)	マルチプローブ電力量 (kWh)	薄膜内部応力評価装置電力量	分析構造解析装置電力量	高精度寸法測定装置電力量 (kWh)	赤外線顕微鏡電力量 (kWh)	電極形成装置電力量 (kWh)	熱処理炉電力量 (kWh)	ウェハtoウェハ接合装置(プロセス)電力量 (kWh)	ウェハtoウェハ接合装置(接合)電力量 (kWh)	チップtoチップ接合装置(接合)電力量 (kWh)	FFU1 (FFU-1 8台) 合計電力量 (kWh)	FFU2 (FFU-2, 10台) 合計電力量 (kWh)
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
FFU3 (FFU-3 1台) 合計電力量 (kWh)	FCU3 (FCU-2 1台) 合計電力量 (kWh)	FCU2 (FCU-12 3台) 合計電力量 (kWh)	FCU1 (FCU-8 2台) 合計電力量 (kWh)	FFU-1-01 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-02 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-03 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-04 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-05 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-06 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-07 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-08 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-01 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-02 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-03 CR2 FFU電力量 (kWh)
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
FFU-2-04 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-05 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-06 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-07 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-08 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-09 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-10 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-3 更衣室 FFU電力量 (kWh)	FCU-2 更衣室 FCU電力量 (kWh)	FCU-12-1 CR2 FCU電力量 (kWh)	FCU-12-2 CR2 FCU電力量 (kWh)	FCU-12-3 CR2 FCU電力量 (kWh)	FCU-8-1 CR1 FCU電力量 (kWh)	FCU-8-2 CR1 FCU電力量 (kWh)	空調盤-1電力量 (kWh)
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
空調盤-2電力量 (kWh)	照明電灯盤電力量 (kWh)	31BP-1114-1 主幹電力量 (kWh)	31BP-1116-1-1 主幹電力量 (kWh)	31BP-1116-1-2 主幹電力量 (kWh)	31BP-1117-1 主幹電力量 (kWh)	31BP-1118-1 主幹電力量 (kWh)	RH-1 空冷ヒートポンプ電力量 (kWh)	R-1 空冷チラー電力量 (kWh)	PCH-1 冷温水ポンプ電力量 (kWh)	PC-1 冷水ポンプ電力量 (kWh)	VP-1 真空ポンプ電力量 (kWh)	COM-1 空気圧縮機電力量 (kWh)	AD-1 エアライナー電力量 (kWh)	MVD装置(トランポン)電力量 (kWh)
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
MVD装置(トランス)電力量 (kWh)	MVD装置(PC)電力量 (kWh)	UV照射装置電力量 (kWh)	接合欠陥観察装置電力量1 (kWh)	接合欠陥観察装置電力量2 (kWh)	FE-1 排気ファン電力量 (kWh)	FE-2 排気ファン電力量 (kWh)	OAC-1 加湿器電力量 (kWh)	OAC-1 外気処理空調機電力量 (kWh)	OAC-1 外気処理空調機電力量 (kWh)	電気特性検査装置 (0.3 μm) (個/cf)	電気特性検査装置 (0.5 μm) (個/cf)	電気特性検査装置 (1.0 μm) (個/cf)	内部構造観察装置 (0.3 μm) (個/cf)	内部構造観察装置 (0.5 μm) (個/cf)
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
内部構造観察装置 (1.0 μm) (個/cf)	高精度寸法測定装置 (0.3 μm) (個/cf)	高精度寸法測定装置 (0.5 μm) (個/cf)	高精度寸法測定装置 (1.0 μm) (個/cf)	電極形成装置 (0.3 μm) (個/cf)	電極形成装置 (0.5 μm) (個/cf)	電極形成装置 (1.0 μm) (個/cf)	熱処理炉 (0.3 μm) (個/cf)	熱処理炉 (0.5 μm) (個/cf)	熱処理炉 (1.0 μm) (個/cf)	ウェハtoウェハ接合装置 (0.3 μm) (個/cf)	ウェハtoウェハ接合装置 (0.5 μm) (個/cf)	ウェハtoウェハ接合装置 (1.0 μm) (個/cf)	チップtoチップ接合装置 (0.3 μm) (個/cf)	チップtoチップ接合装置 (0.5 μm) (個/cf)
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
チップtoチップ接合装置 (1.0 μm) (個/cf)	MVD装置 (0.3 μm) (個/cf)	MVD装置 (0.5 μm) (個/cf)	MVD装置 (1.0 μm) (個/cf)	UV照射装置 (0.3 μm) (個/cf)	UV照射装置 (0.5 μm) (個/cf)	UV照射装置 (1.0 μm) (個/cf)	接合欠陥観察装置 (0.3 μm) (個/cf)	接合欠陥観察装置 (0.5 μm) (個/cf)	接合欠陥観察装置 (1.0 μm) (個/cf)	THE1-2-T CR1 室内温度 (°C)	TE-1-01-T CR1 室内温度 (°C)	TE-1-02-T CR1 室内温度 (°C)	電気特性検査装置 温度 (°C)	マルチプローブ 温度 (°C)
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
高精度寸法測定装置 温度 (°C)	TE-1-03-T CR2 室内温度 (°C)	TE-1-04-T CR2 室内温度 (°C)	TE-1-05-T CR2 室内温度 (°C)	電極形成装置 温度 (°C)	熱処理炉 温度 (°C)	ウェハtoウェハ接合装置 温度 (°C)	THE1-1-T 外気温度 (°C)	TE-1-06-T 更衣室 室内温度 (°C)	TE-OAC 給気温度 (°C)	TE-CS 冷水温度 (°C)	チップtoチップ接合装置 温度 (°C)	接合欠陥観察装置 温度 (°C)	MVD装置 温度 (°C)	UV照射装置 温度 (°C)
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
THE1-3-T CR2 温度 (°C)	TE-CR 冷水温度 (°C)	OAC内部温度 (°C)	TE-HCS 冷温水温度 (°C)	TE-HCR 冷温水温度 (°C)	THE1-1-H 外気湿度 (%)	THE1-2-H CR1 湿度 (%)	THE1-3-H CR2 湿度 (%)	電気特性検査装置 湿度 (%RH)	マルチプローブ 湿度 (%RH)	高精度寸法測定装置 湿度 (%RH)	電極形成装置 湿度 (%RH)	熱処理炉 湿度 (%RH)	ウェハtoウェハ接合装置 湿度 (%RH)	UV照射装置 湿度 (%RH)
136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
接合欠陥観察装置 湿度 (%RH)	チップtoチップ接合装置 湿度 (%RH)	MVD装置 湿度 (%RH)	DE-OAC 給気露点 (°CDP)	電極形成装置 露点温度 (°CDP)	チップtoチップ接合装置 露点温度 (°CDP)	電気特性検査装置 露点温度 (°CDP)	UV照射装置 露点温度 (°CDP)	マルチプローブ 露点温度 (°CDP)	熱処理炉 露点温度 (°CDP)	高精度寸法測定装置 露点温度 (°CDP)	ウェハtoウェハ接合装置 露点温度 (°CDP)	MVD装置 露点温度 (°CDP)	接合欠陥観察装置 露点温度 (°CDP)	GD-2 CR1 露点湿度 (%)
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
GD-3 CR2 酸素濃度 (%)	GD-1 CR1 酸素濃度 (%)	DPE-1-1 CR1 室内差圧 (Pa)	DPE-1-2 CR2 室内差圧 (Pa)	DPED-1 給気静圧 (Pa)	DPED-2 排気静圧 (Pa)	人感センサ1	人感センサ2	人感センサ3	人感センサ4	FM-C 冷水流量 (L/min)	FM-HC 冷温水流量 (L/min)	VAV-1S VAV 風量出力値 (m3/h)	VAV-2S VAV 風量出力値 (m3/h)	PE-HCS 冷温水圧力 (Mpa)
166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	
PE-CS 冷水圧力 (Mpa)	MV-C-01 FCU冷水弁01 開度出力値 (%)	MV-C-02 FCU冷水弁02 開度出力値 (%)	MV-C-03 FCU冷水弁03 開度出力値 (%)	MV-C-04 FCU冷水弁04 開度出力値 (%)	MV-C-05 FCU冷水弁05 開度出力値 (%)	MV-C-06 FCU冷水弁06 開度出力値 (%)	OAC-1 ファンINV 出力値 (Hz)	OAC-1 ヒーター 出力値 (%)	OAC-1 加湿器 出力値 (%)	MV-CB FCU冷水ハイパス弁 開度出力値 (%)	MV-HCB OAC冷温水ハイパス弁 開度出力値 (%)	MV-HC OAC冷温水弁 開度出力値 (%)	FE-1 ファンINV 出力値 (Hz)	

電力量
パーティクル量
ガス量/排気量/市水純水量

温度/湿度
室圧
人感
設備稼働

表V.2.2-3 2G棟クリーンルーム エネルギー見える化システム項目

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
密閉型大気圧プラズマ方式評価装置 1/3単相 (kWh)	密閉型大気圧プラズマ方式評価装置 2/3三相 (kWh)	密閉型大気圧プラズマ方式評価装置 3/3三相 (kWh)	4インチ熱処理炉 (kWh)	マグネトロンスパッタ装置 1/2単相 (kWh)	マグネトロンスパッタ装置 2/2三相 (kWh)	RIE 電力量 (kWh)	SEM (CHILLER) 1/2 (kWh)	SEM (MAIN) 2/2 (kWh)	抵抗金属電極スパッタ装置 (kWh)	ICP STS #1 電力量 (kWh)	ICP STS #2 電力量 (kWh)	自動酸化炉 (kWh)	CVD (kWh)	AHU-2 1Fドライ加工室空調機 (kWh)
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
コンプレッサ (kWh)	窒素製造装置 (kWh)	PFC除外装置 (kWh)	1LM-B 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-C 実験電力単相主幹 (kWh)	1LM-C 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-D 実験電力単相主幹 (kWh)	1LM-D 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-E 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-E 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-F 実験電力単相主幹 (kWh)	1LM-F 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-G 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-G 実験電力三相主幹 (kWh)	1LM-H 実験電力三相 (その他) (kWh)
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
1LM-H 実験電力三相主幹 (kWh)	AHU-1 1Fナ加工室空調機 (kWh)	電子線描画 1/4単相 (kWh)	電子線描画 2/4単相 (kWh)	電子線描画 3/4単相 (kWh)	電子線描画 4/4三相 (kWh)	ステップ露光装置 (kWh)	ヘーク炉 (kWh)	現像ドラフト (kWh)	ホットプレート HP-2S (kWh)	両面マスクライター (kWh)	ホットプレート TH-900 (kWh)	1LM-J 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-J 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-K 実験電力三相 (その他) (kWh)
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1LM-K 実験電力三相主幹 (kWh)	精密塗布装置 (kWh)	純水製造システム 1/2単相 (kWh)	純水製造システム 2/2三相 (kWh)	ドラフト 1/2 鏡単相 (kWh)	ドラフト 1/2 有機単相 (kWh)	ドラフト 2/2 共通三相 (kWh)	AHU-3 1F化学実験室空調機 (kWh)	1LM-A 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-A 実験電力三相 (その他) (kWh)	1L-1 一般照明コンセント 1F (kWh)	RM-1 一般空調一括 (kWh)	R-1-1 空冷式チラーユニット (kWh)	R-1-2 空冷式チラーユニット (kWh)	OHU-1 1F系統外調機 (kWh)
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
AS-1 エアークリーン (kWh)	B-1 ボイラー (kWh)	PH-1 温水ポンプ (kWh)	1M-1 特殊空調 (その他) (kWh)	1LM-I 実験電力単相主幹 (kWh)	1LM-I 実験電力三相主幹 (kWh)	パーティクル量 #1 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 #1 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 #1 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])	パーティクル量 #2 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 #2 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 #2 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])	パーティクル量 #3 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 #3 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 #3 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
パーティクル量 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])	パーティクル量 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])	OHU-1 給気露点温度指示調節計 (°C)	AHU-2 室内温度指示調節計 (°C)	AHU-1 室内温度指示調節計 (°C)	AHU-3 室内温度指示調節計 (°C)	AHU-2 室内湿度指示調節計 (%RH)	AHU-1 室内湿度指示調節計 (%RH)	AHU-3 室内湿度指示調節計 (%RH)	差圧ドライ加工室 (Pa)	OHU-1 給気露点温度指示調節計 (Pa)
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
AHU-2 室内差圧指示調節計 (Pa)	差圧ドライ加工室-化学実験室 (Pa)	AHU-1 室内差圧指示調節計 (Pa)	AHU-3 室内差圧指示調節計 (Pa)	純水 純水製造装置 (m3)	市水 #1 抵抗金属電極スパッタ装置 (m3)	市水 #2 マグネトロンスパッタ装置 (m3)	市水 露点ドラフト (m3)	市水 #4 ICP STS共通 (m3)	市水 #5 密閉型大気圧プラズマ方式評価装置 (m3)	市水 #6 RIE (m3)	ICP STS #1 SF6使用量 (L)	ICP STS #1 C4F8使用量 (L)	ICP STS #2 SF6使用量 (L)	ICP STS #2 C4F8使用量 (L)

電力量
パーティクル量
ガス量/排気量/市水純水量

温度/湿度
室圧
人感
設備稼働

■ユーザフレンドリーな情報端末

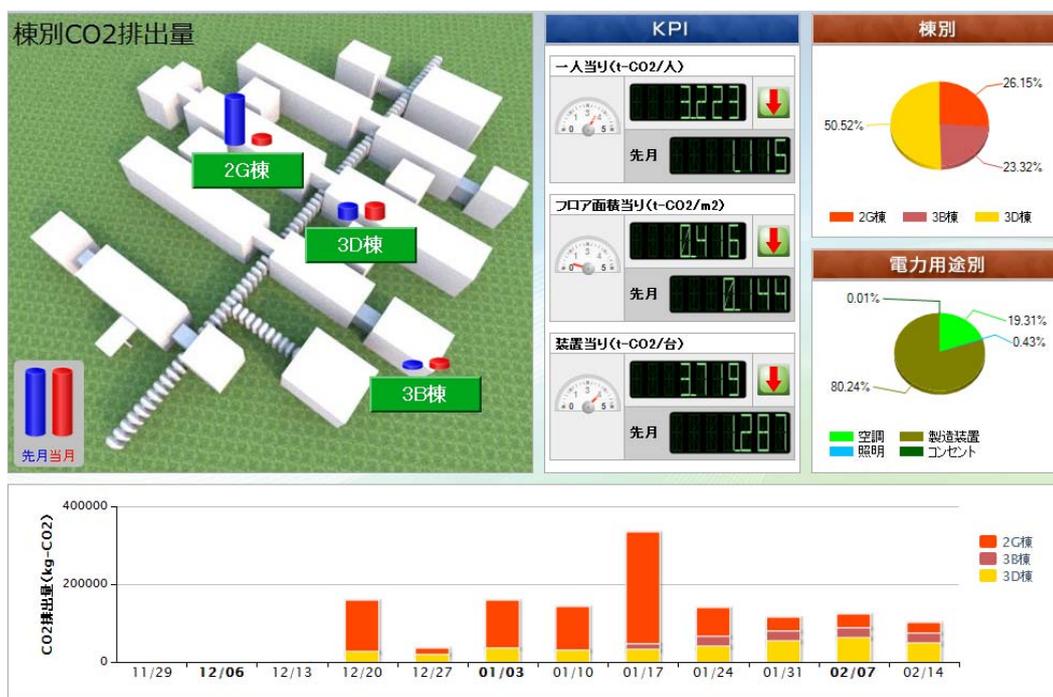
非常に操作性の良い情報端末(iPad)を導入した。クリーンルームおよび事務所に無線のアクセスポイントを設置し、クリーンルーム内/外だけでなく、事務所においても、「いつでも、何処でも、誰でも、簡単」にクリーンルームのエネルギーおよびエネルギーに影響を与える項目の情報共有が可能となった。

図V.2.2-1、図V.2.2-2、図V.2.2-3、図V.2.2-4に画面の一例を示す。

TOP画面では、各々のクリーンルーム毎のCO2排出量を確認できる。

電力量だけでなく、SF6などのプロセスガス使用量や純水使用量などもCO2に換算して、表示している。

また、一人当たり/フロア面積当たり/装置辺りのCO2排出量を先月比で表示しており、経営上位層などが全体のエネルギー使用量を大きく把握し易い画面構成となっている。図V.2.2-1に画面一例を示す。



図V.2.2-1 情報端末の画面一例 その1

TOP 画面において、クリーンルーム箇所を指でタッチすると、クリーンルームの部屋ごとの CO2 排出状況が確認できる画面に移る。TOP 画面が経営上位層向けであるのに対して、この画面は、クリーンルーム管理者向けに、クリーンルームとしてのエネルギー使用量が把握できる画面構成としている。

図 V.2.2-2 に画面一例を示す。

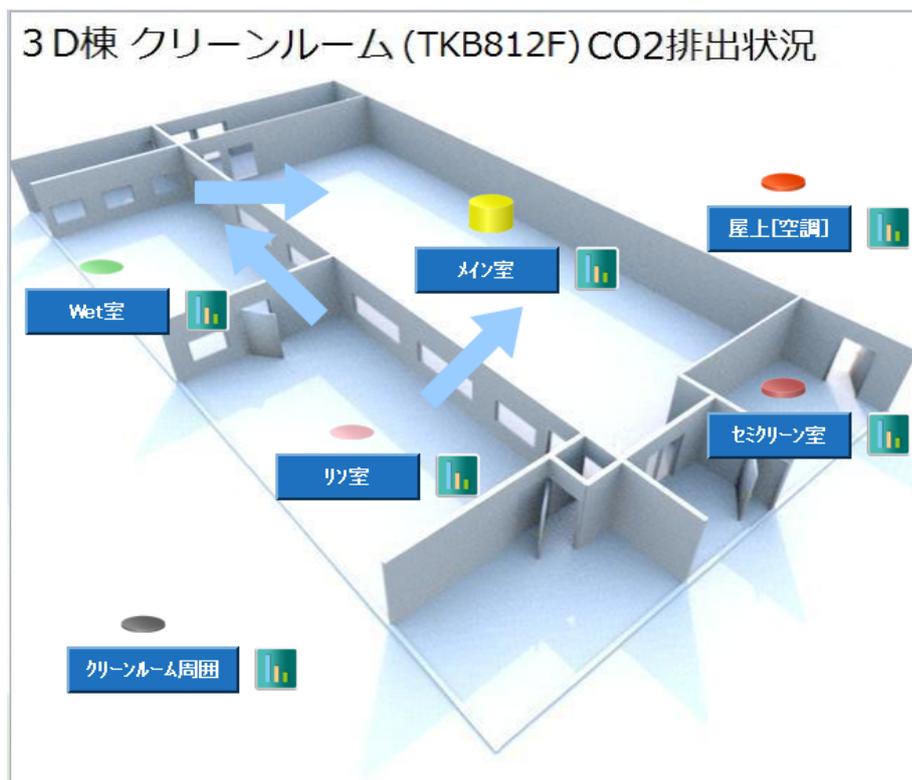


図 V.2.2-2 情報端末の画面一例 その2

次に、クリーンルームの部屋を指でタッチすると、その部屋に設置されている設備が確認できる画面に移る。任意の設備をタッチ操作すると、その設備の画像とともに、リアルタイムのエネルギー使用量が確認できる。また、部屋での共通事項である温室度やパーティクル量や人の在室状況などは共通事項として、グルーピングしている。また、設備ごとに、どのような項目を測定しているかが一目で分かるように、測定項目に対応したアイコンを表示し、設定値を超えると、そのアイコンが緑から赤表示となるようにしている。

図 V.2.2-3 に画面一例を示す。

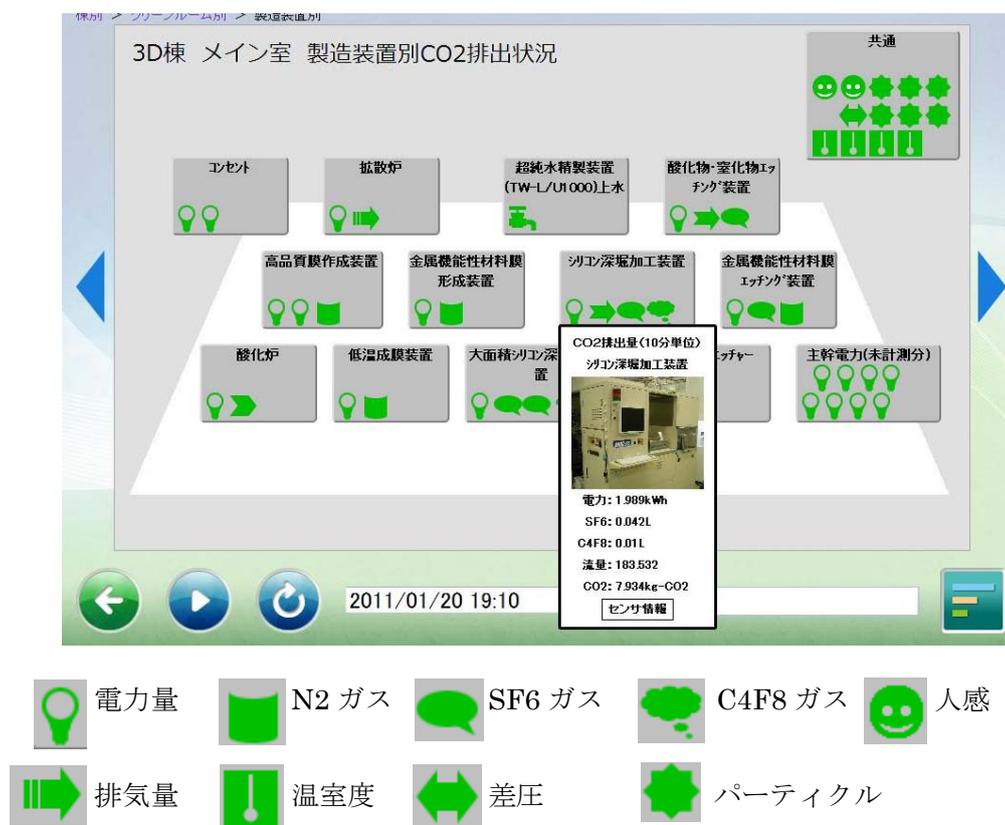
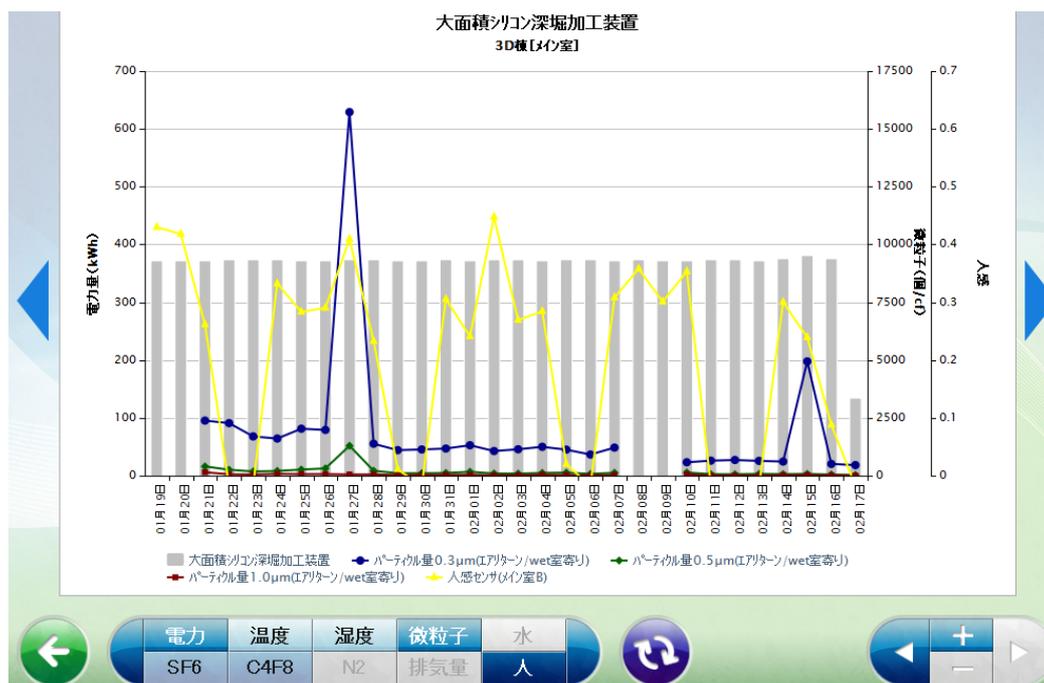


図 V.2.2-3 情報端末の画面一例 その3

次に、設備を指でタッチすると、その設備でのエネルギー経緯が確認できる。設備ごとに測定項目が異なるため、任意の項目を選択できる構成としている。例えば、ある設備の電力量とSF6ガスを選択することも可能であるし、電力量と設備稼働状態を選択することも可能であるし、設備周辺のパーティクル量と人情報を表示することも可能である。この画面は、各設備担当者向けに、設備でのエネルギー使用量および関連情報が把握できる画面構成としている。

図V.2.2-4に画面一例を示す。



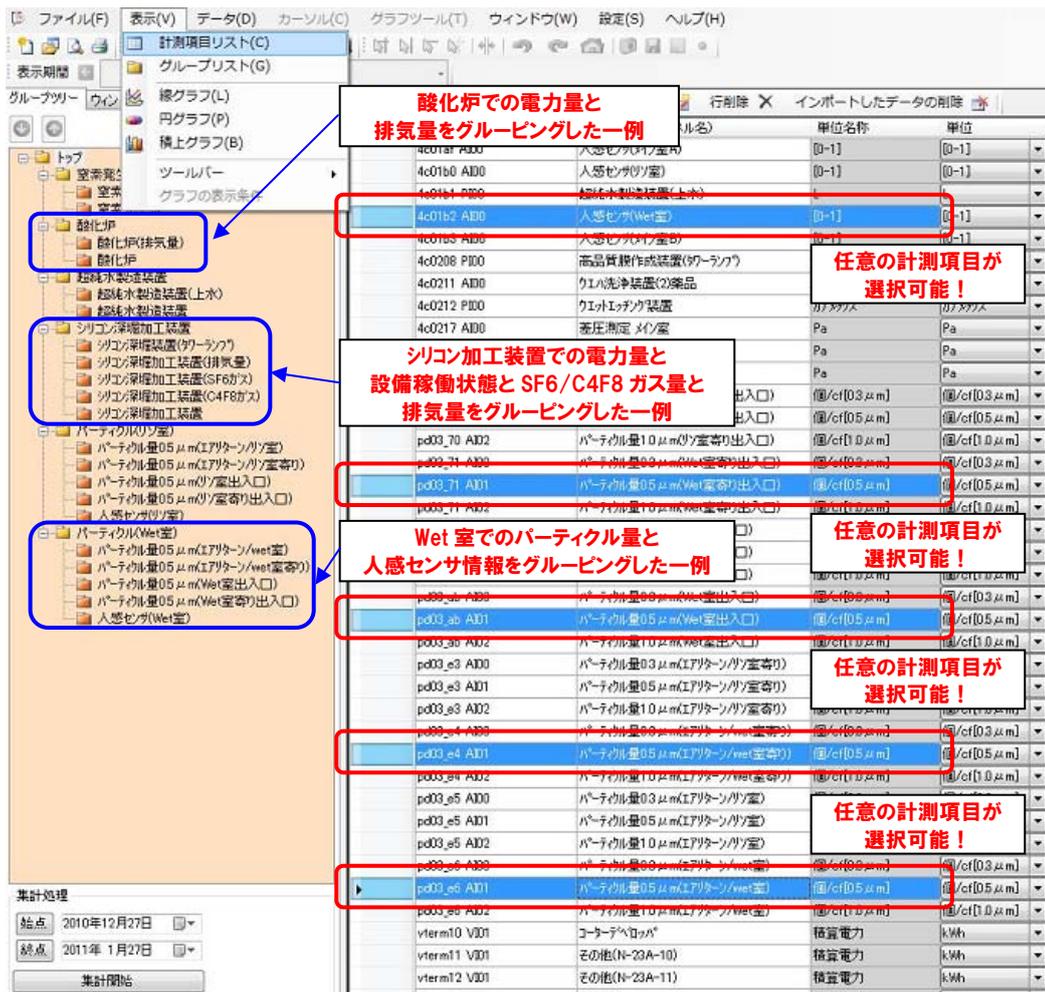
図V.2.2-4 情報端末の画面一例 その4

■エネルギー分析支援ツール

クリーンルームでのエネルギーおよびエネルギーに影響を与える詳細データの分析を支援するツールを導入した。

基本的な操作は、任意のデータを分析支援ツールに取り込み、その後、計測項目の中から任意の項目を選択し、グルーピングする。そして、グルーピングごとに、グラフ表示を行うことが可能である。

図V.2.2-5、図V.2.2-6に画面一例を示す。



図V.2.2-5 分析支援ツールの画面一例 その1

■エネルギー見える化により抽出されたムダの一例

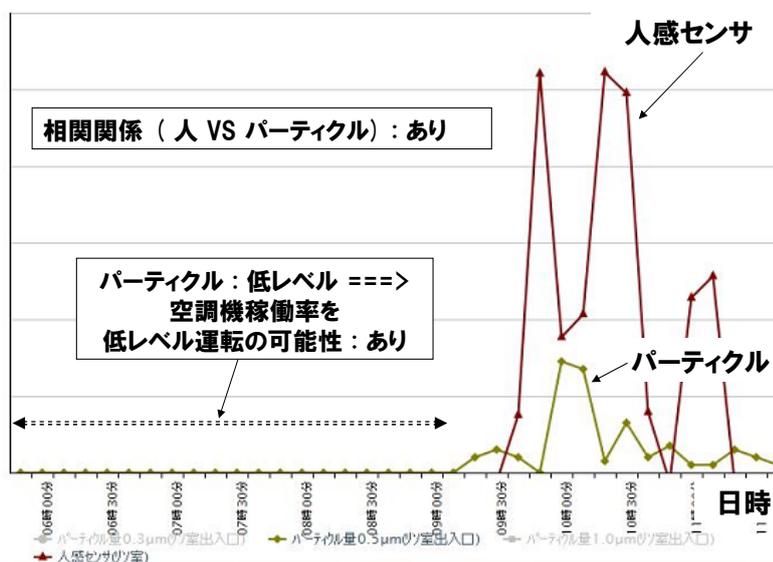
エネルギー見える化により抽出されたムダの一例を記載する。

図V.2.2-7、図V.2.2-8、図V.2.2-9、図V.2.2-10、図V.2.2-11 にエネルギーのムダの一例を示す。

図V.2.2-7は、人感センサとパーティクルセンサの情報である。

横軸は日時。縦軸はパーティクルの個数。

パーティクル量と人に相関関係があることが分かる。現状では、人感センサの反応が無く、パーティクルも発生していない期間であっても、空調設備はフル稼働している。例えば、その期間(作業者も居なく、パーティクルも未発生)においては、空調設備の運転を省エネ運転できる可能性があることが分かる。



図V.2.2-7 空調エネルギーのムダの一例

図V.2.2-8は、温度と湿度の情報である。横軸は日時。

湿度が大きく変化していることが分かる。この湿度が大きく変化していた期間は、加湿器が異常な運転をしていた。誰でも、何処でも、簡単に情報を共有できる情報端末により、加湿器の異常を早めに検知することができた。

エネルギーのムダだけでなく、設備異常の早期発見にも貢献できた一例である。

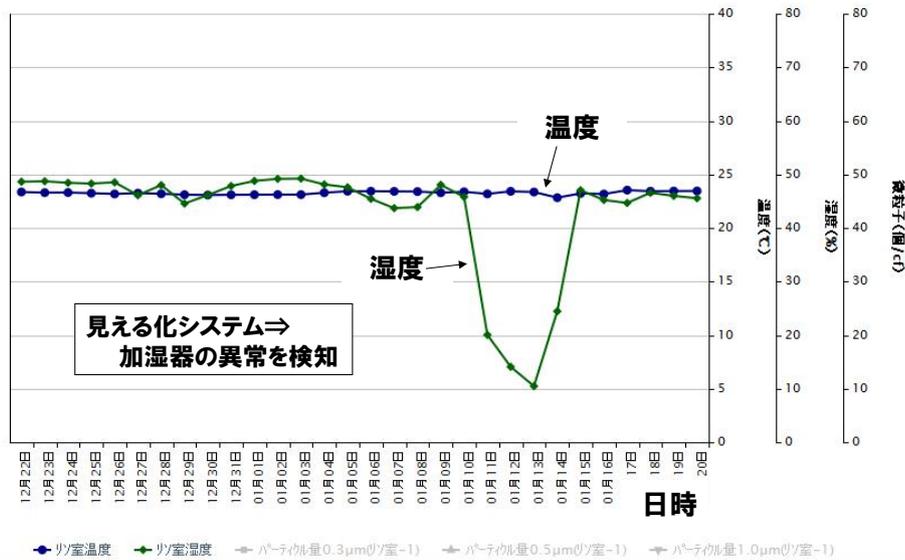


図 V.2.2-8 加湿器異常運転検知の一例

図 V.2.2-9 は、成膜装置の電力量と N2 ガス使用量の情報である。横軸は日時。長期休暇の期間、設備電力が 0 であり、装置の電源が OFF となっていることが分かる。しかし、N2 ガスの流量に大きな変化は無い。装置汚染の都合上、N2 ガスを 0 とすることは不可能かもしれないが、流量を制限することは可能であると思われる。ここにも、エネルギー削減の可能性があることが分かる。

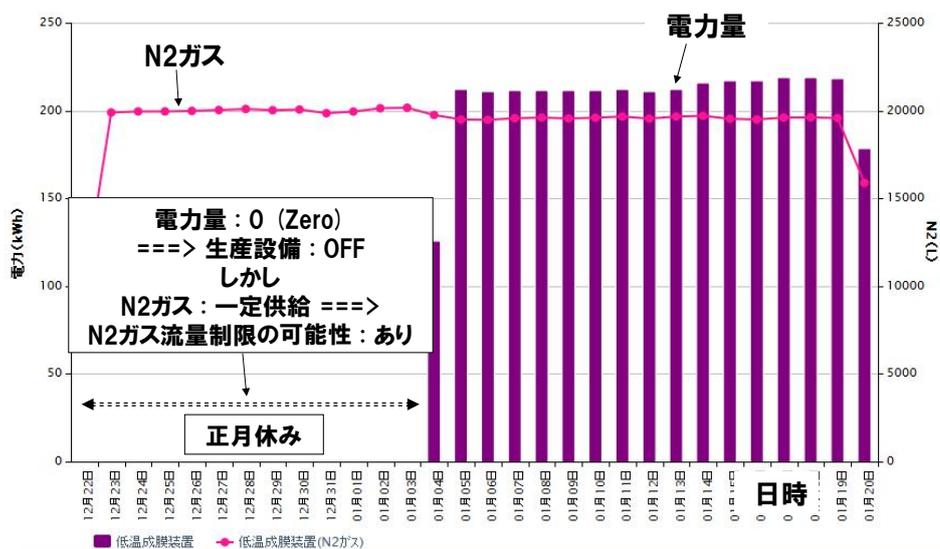
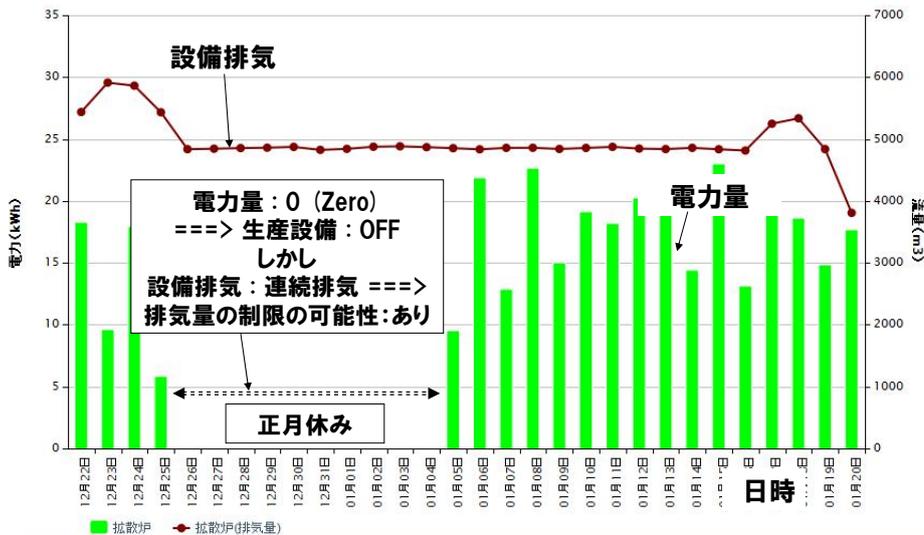


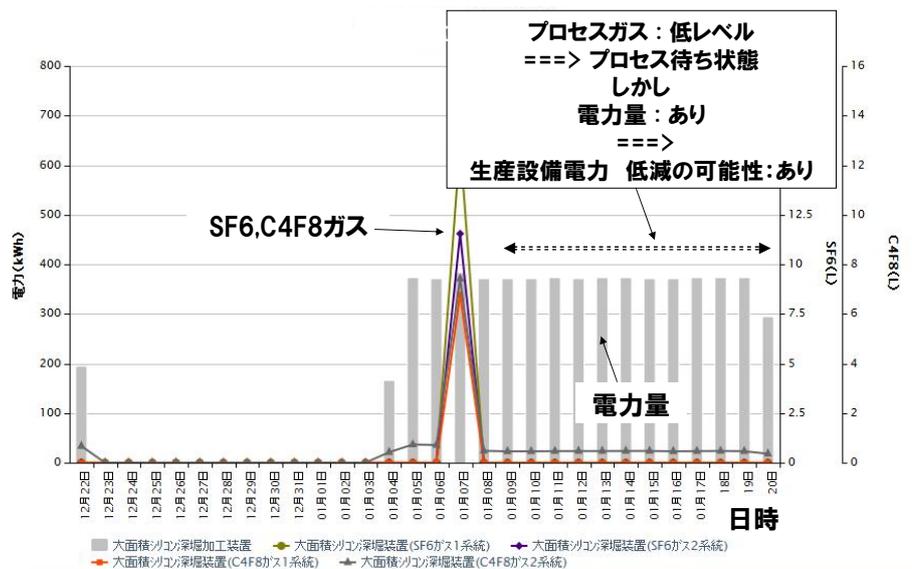
図 V.2.2-9 N2 ガスのムダの一例

図V.2.2-10は、拡散炉の電力量と設備排気量の情報である。横軸は日時。長期休暇の期間、設備電力が0であり、装置の電源がOFFとなっていることが分かる。しかし、排気の流量に大きな変化は無い。排気量を少なくすると、新たに温湿度調整して取り込む外気量を減らすことができるため、ここにも、エネルギー削減の可能性があることが分かる。



図V.2.2-10 排気量のムダの一例

図V.2.2-11は、シリコン深堀加工装置の電力量とプロセスガス使用量である。プロセスガスの流量が低い時、つまりプロセスが行われていない時でも、プロセスが行われている時と同じ程度の電力量が使用されている。プロセスを行っていない時は、設備電源をOFFするなどの電力量削減の余地があることが分かる。



図V.2.2-11 電力量のムダの一例

(2) -3 エネルギー(CO2)見える化システムのまとめ

産業総合技術研究所つくば東事業所の3箇所のクリーンルームにおいて、エネルギー見える化システムを開発した。

3D棟クリーンルームでは、157点。3B棟クリーンルームでは、179点。
2G棟クリーンルームでは、105点。合計：441点の項目の見える化を実現した。
計測間隔は、10分。

クリーンルームのエネルギーおよびエネルギーに影響を与える事項に関する情報を、いつでも、何処でも、誰でも、簡単に共有できるユーザフレンドリーな情報端末を採用したシステムを開発した。

継続的なエネルギー削減活動の取り組みを支援するためのデータ分析ツールを開発した。

今後は、導入したシステムを活用して、継続的なエネルギー削減活動を展開し、エネルギーの削減に取り組む。

(3) CO2_60%削減について

(3) -1 従来技術と課題

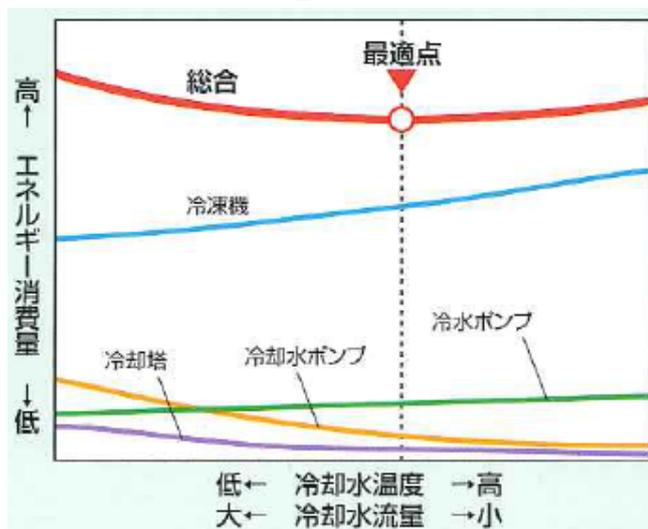
従来、クリーンルームの空調設備におけるエネルギー削減対策としては、熱源系に対する空調自動制御が多く実施されている。

実施内容は、熱源システム全体の省エネ制御により冷凍機、冷却塔、ポンプを高効率運転させるとともに季節に応じた運転モード自動切換えによるフリークーリングの長期運転により大きな電力量の削減が実現されている。

1990年度比でCO2_50%の削減が実現されている。

・冷凍機、冷却塔、ポンプの高効率運転システムの特徴

熱源系全体の消費エネルギーが最も低くなるポイント(最適点)に基づいて冷水・冷却水の温度・流量等を自動で変更し、熱源系全体の消費エネルギーを削減する。図V.3.1-1に最適化のイメージを示す。



図V.3.1-1 最適化のイメージ

・長期間運転フリークーリングの特徴

外気・負荷条件に応じて運転モードの自動切り替えを行い、中間期における冷凍機とフリークーリングの併用運転を行う。



図V.3.1-2 長期間運転フリークーリング運転のイメージ

クリーンルームにおける空調制御システムとしては、いかに熱源を効率的に運転させるかの制御であった。クリーンルーム内の空調環境、特に、パーティクル量に関しては、定期的な測定は行われているが、連続測定されることは稀であり、空調制御に使用されることは行われていない。理由としては、下記が考えられる。

技術的に管理対象への制御の考え方が違う。

従来技術は、温度を測定して、温度を制御する。

例：室内温度を測定して、空調機の給気温度を制御する。しかし、パーティクルを測定しても、パーティクルを直接制御することはできない。パーティクルを制御するには、空調機の風量を制御して、間接的に、パーティクル量を制御するしかない。

パーティクル量と風量との相関関係が分からない。

パーティクルの発生具合は、現場や時間帯で異なる。作業者の有/無や多い/少ないで異なってくる。単純に、このくらいの風量にすれば、必ず、このくらいのパーティクル量になると言い難い。

サブコン業者は、JIS 規定に従うことで済ませている。

JIS から、クリーン度と風量(換気回数)が規定されており、サブコン業者は、①②のような面倒なことはしたくない。面倒なことをしなくとも設備と、その工事で商売が成立しているのです、エネルギーに無駄があると分かっている、固定の設計値で運用している。

投資対効果が分からない。

パーティクルに応じた風量制御を行う場合、②の理由から、削減効果が現場ごとに異なる。客先に提案する際、客先の運用実態の詳細を把握しないと、削減効果の目処が付かない。

パーティクルセンサが高額

温湿度センサは、各社より様々なセンサが市販されているが、パーティクルセンサは、生産しているメーカーも限定されていて、価格も高い。温度：1～5 万円。パーティクル：30～100 万円。

上記のような理由から、空調環境、特に、パーティクル量に応じた空調制御は行われていない。そこで、BEANS 研究所の取り組みとして、空調環境に応じた空調自動制御を行うことにより、従来技術では達成できていなかった更なるエネルギー削減(CO2 削減)を目指すこととした。

(3) -2 CO2_60%削減の検討

1990年度比、CO2_60%削減を実現するために、実際の半導体工場を想定し、年間の電力量を机上にて算出した。2010年度まで1990年度比で熱源系の制御などにより50%の削減が実現されている。更に10%を上積みし60%を実現するためには、空調機(FFU)の電力量を64%削減すれば、1990年度比でCO2_60%削減を実現できることが分かった。

また、想定した半導体工場の場合、空調機(FFU)の電力量が64%削減できた場合、年間電力量の削減金額は、1380万円。電力量単価を12円/kWhとする。

$$(1800-650)\text{MWh/年} \times 1000\text{k} \times 12(\text{円/kWh}) = 13,800,000(\text{円})$$

非常に大きな削減が見込めることが分かった。

表V.3.2-1 半導体工場での年間電力量(机上計算)

半導体工場(一例)	1990年	2010年	BEANS
冷凍機	6850	3050	3050
冷却水ポンプ	995	590	590
冷却塔	380	260	260
冷水ポンプ	550	300	300
フリークリング	0	200	200
空調機(FFU)	3700	1800	650
小計	12475	6200	5050
比率	100%	50%	40%

年間削減見込み金額: **1380万円**

(1800-650) MWh/年 × 1000k × 12円 (kWh単価)

空調機(FFU) 電力を64%削減する必要がある。

$$\frac{1800-650}{1800} = 63.8\% \approx 64\%$$

6000平米の半導体工場の場合 単位MWh/年

机上計算の算出条件

1990年度システム:

冷水製造温度系統: 1系統, 冷水・冷却水一定流量, フリークリング無し

冷凍機: 標準ターボ冷凍機 COP4.6(冷水温度 7-12)

冷水制御: 空調機 二方弁による変流量制御

冷水主管 主管ヘッダ差圧バイパス制御

冷凍機 定流量

装置冷却水: 7℃冷水を用いて熱交換器で装置冷却水(15~25)を製造

FFU: 10W/m³/min 24時間 365日運転, 換気回数 300回/h(天井高 4m)

2010年度システム:

冷水製造温度系統: 3系統, 冷水・冷却水変流量制御, フリークリング有り

冷凍機: 高効率ターボ冷凍機 COP6.0(冷水温度 7-12)

冷水制御: 1990年度と同様

装置冷却水: 夏期、中間期 7℃の冷水を用い熱交換器で装置冷却水

(15℃~25℃)を製造。冬期 外気を利用し装置冷却水を製造。

FFU: 2.9W/m³/min 24時間 365日運転, 換気回数 300回/h(天井高 4m)

冷却負荷 外気風量 0.5m³/min/m², 顕熱 0.55kW/m²

図V.3.2-1にFFU(Fan Filter Unit)電力量を削減する制御イメージを記載する。従来は、クリーンルーム内の代表的な箇所のみ温湿度が測定され、そのデータが、空調制御に使用されている。また、パーティクルは、連続測定されておらず、定期的な測定のみであり、空調制御には反映されていない。例：1週間に1回、パーティクルを測定するだけ。

今回は、多点でパーティクルと温室度を測定し、その情報を空調制御に使用し、エネルギー削減を行う空調自動制御を目指している。

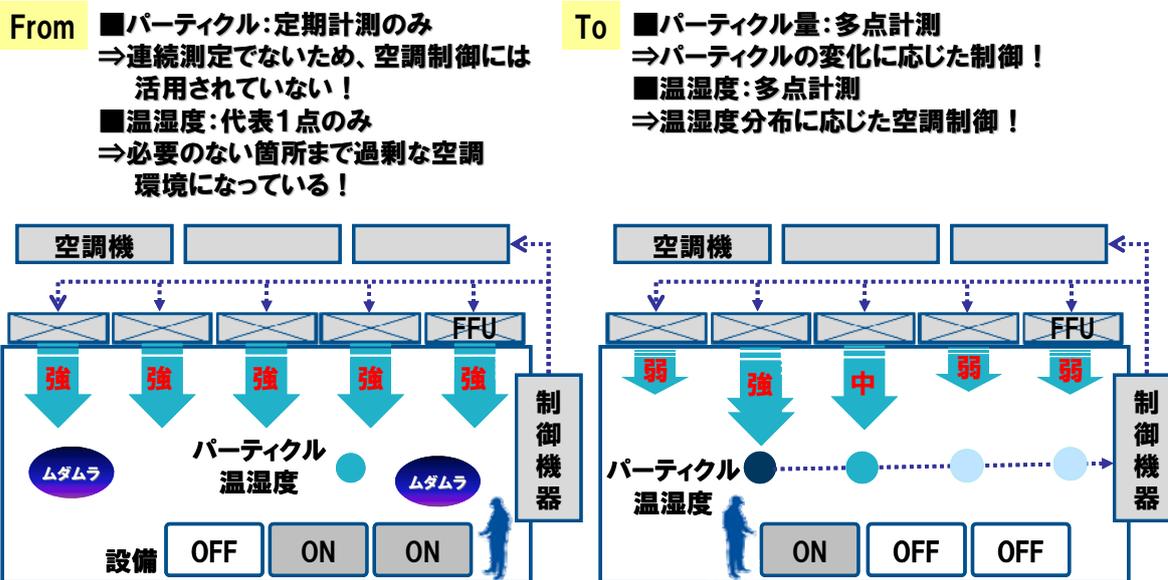
今回、導入を検討している空調自動制御のイメージ画像を図V.3.2-2に記載する。デモ機によるイメージ画像である。

図V.3.2-2では、クリーンルームエリア①では、パーティクルが発生している。クリーンルームエリア②③では、パーティクルは発生していない。今回の自動制御では、パーティクルの発生しているエリア①の空調設備①のみをフル稼働させて、パーティクルの発生していないエリア②③の空調設備②③は、省エネ運転とする空調自動制御を目指している。

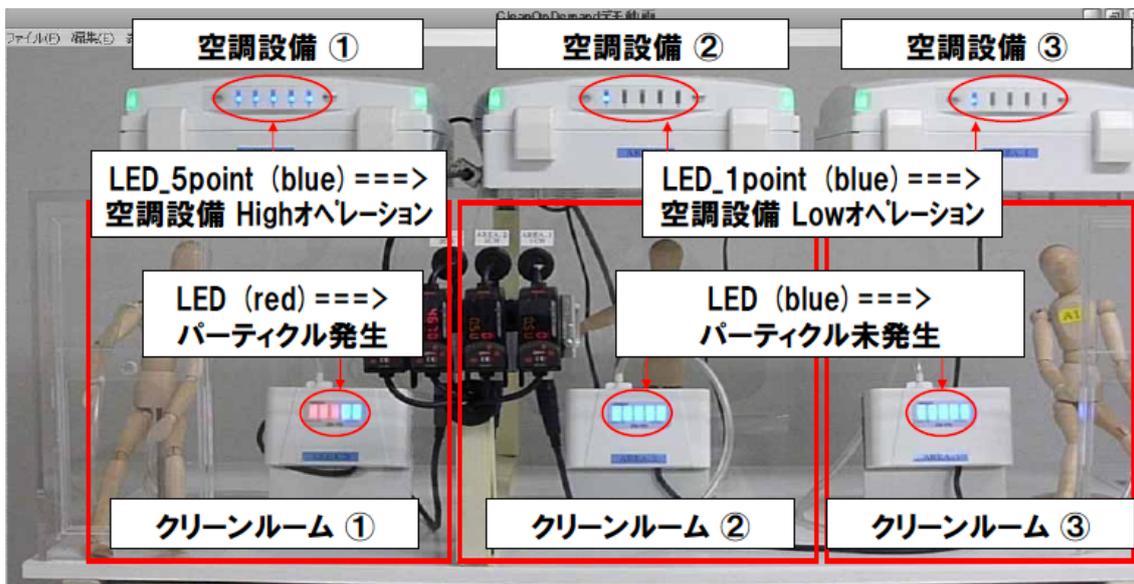
その際、下記事項が懸念される。

- ・空調制御を行うことにより、パーティクル量は許容範囲以内となるか？
- ・空調制御を行うことにより、室内の温度上昇は許容範囲以内となるか？

上記懸念事項を確認するため、事前の検証を行った。



図V.3.2-1 FFU(Fan Filter Unit)電力量削減制御イメージ



図V.3.2-2 導入を検討している空調自動制御のイメージ画像

空調制御を行うことによるパーティクル量と温度上昇の事前検証を行った。6m平米のクリーンルームに、各種センサを設置した。設置したセンサは下記の通り。

- ・ パーティクルセンサ：16 個
- ・ 温度センサ：16 個
- ・ 湿度センサ：16 個

上記以外にも、空調設備電力を計測する電力センサや、天井に人を検知するための人感センサや、空調設備の冷水温度や流量を計測するセンサを設置し、空調設備の状態をモニターしながら評価を行った。また、意図的にパーティクル量を増加させるために外気を取り込むダクトを設けるとともに、室内の擬似的熱負荷として電気ヒータを設置した。また、本クリーンルームの空調設備(FFU：23台)は、個別にインバータ制御可能な設備である。

図V.3.2-3 に実験場所の画像を示す。

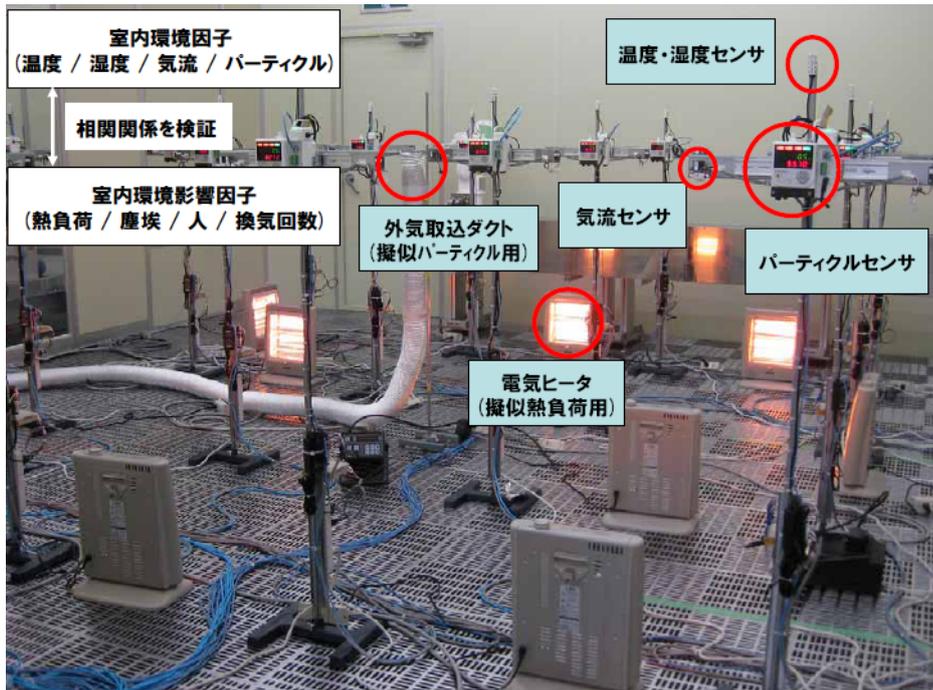
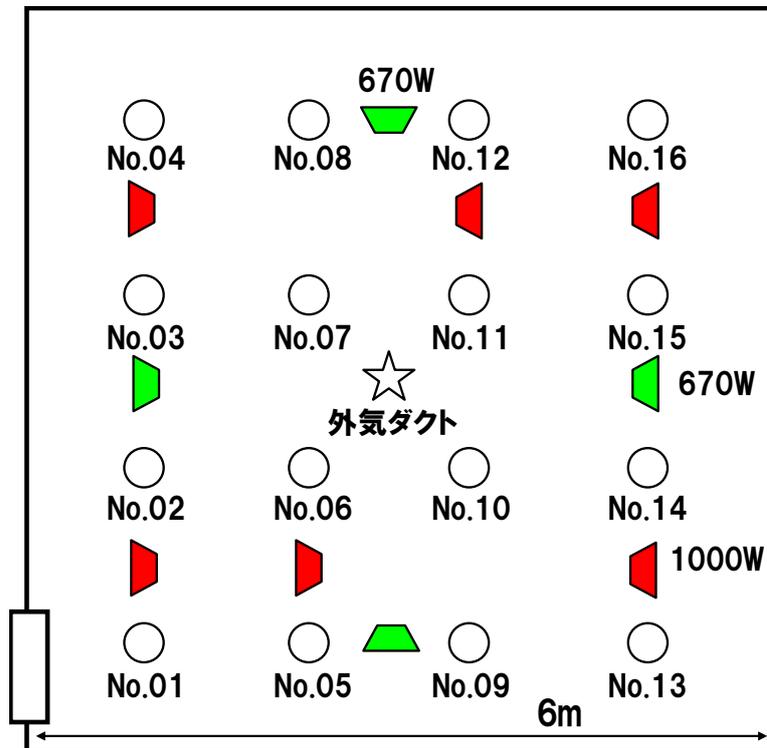


図 V.3.2-3 実験場所風景

図 V.3.2-4 に実験場所の鳥瞰図を示す。



- センサ設置箇所
- △ 熱負荷用電気ヒータ設置箇所
- ☆ 外気取り込みダクト位置

図 V.3.2-4 実験場所 Top View

3) -3 CO2_60%削減の評価(電力量について)

FFU(Fan Filter Unit)の回転数を変化させた時の電力量を測定した。

表V.3.3-1と図V.3.3-1にFFU回転数と電力量の実測値を示す。

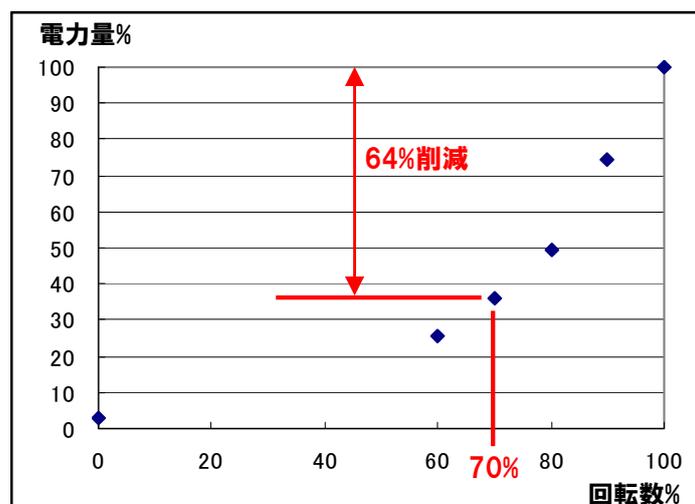
また、回転数100%とした時の電力量を100とした時の比率も記載している。

図V.3.3-1よりFFU回転数を100%から70%まで低減すれば、電力量としては、64%の削減が実現できることが分かる。

次頁以降では、FFU回転数を70%以下とした時のパーティクル量と温度上昇の検証を行い、問題がないことを確認する。

表V.3.3-1 FFU回転数と電力量(実測値)

回転数%	電力量W	電力量%
0	4	3
60	33	26
70	46	36
80	63	49
90	95	74
100	128	100



図V.3.3-1 FFU回転数と電力量(実測値)

3) -4 CO2_60%削減の評価(パーティクル量について)

FFU(Fan Filter Unit)の回転数を低下させた時のパーティクル量を測定した。測定方法は、FFU回転数とFFU稼働台数を変化させ、その時のパーティクル量を測定した。表V.3.4-1にFFU回転数とFFU稼働台数に対するクリーン度を示す。つまり、FFUを15台、100%運転した場合は、クリーン度100個/cfに相当するクリーンルームを擬似的に再現したこととなる。参考として、表V.3.4-2にJISで規定されているクリーン度と換気回数および気流速度の関係を示す。

表V.3.4-1 FFU(回転数、稼働台数)と換気回数(≒クリーン度)の関係

FFU稼働台数	FFU回転数	換気回数(時間当り)	クリーン度個/cf
23台	100% (0.5m/s)	237回	10相当
15台		154回	100相当
8台		82回	1,000相当
4台		42回	10,000相当

計算の算出条件

FFU100%運転時の風速：0.5m/s

FFUサイズ：1.2×0.6m

クリーンルームサイズ6×6×3.5m

計算一例(FFU15台/100%)

$$0.5(\text{m/s}) \times 1.2(\text{m}) \times 0.6(\text{m}) \times 3600(\text{hour}) \times 15(\text{台}) = 19440\text{m}^3/\text{hour}$$

$$6(\text{m}) \times 6(\text{m}) \times 3.5(\text{m}) = 126\text{m}^3$$

$$\text{換気回数} = () / () = 19440 / 126 = 154(\text{回}/\text{hour})$$

表V.3.4-2 JIS-B-9919 クリーン度と換気回数、気流速度

クリーン度個/cf	換気回数(時間当り)	気流速度(m/s)
10	-	0.3-0.5
100	-	0.2-0.5
1,000	30-90	-
10,000	20-40	-

JIS-B-9919

表V.3.4-3にFFU15台を回転数100%運転とした時と60%運転に回転数を低下させた時のパーティクル(粒径0.5μm)量の実測値を示す。

FFU15台、回転数100%はクラス100個/cf相当のクリーンルームを擬似的に再現しており、そのクリーンルームにおいて、FFU回転数を低下させた時の

パーティクル量の変化を擬似的に再現したデータとなる。

歩行 No.01-16 の平均値では、FFU 回転数を 100% から 60% に低下させても、基準値 100 個を大きく下回った 18 個であり、回転数の低減によるパーティクルの増加は少ないことが分かる。しかし、作業 No.01 および作業 No.7 の最大値のデータでは、基準値の 100 個を超えている。しかし、FFU100% 運転の場合でも基準値の 100 を超えている。つまり、100% 運転においても、特定箇所にピークとして発生するパーティクルに関しては、基準値を超えることがあるということの意味している。

図 V.3.4-1、図 V.3.4-2 に波形データを示す。波形データから、FFU 回転数を 100% から 60% に低減させた場合のパーティクルの最大値と平均値の検討を行う。

表 V.3.4-3

クラス 100 相当クリーンルームにて FFU 回転数を低下させた時のパーティクル

0.5 μm	FFU: 15台					
	歩行No.01-16		作業No.01		作業No.07	
	最大	平均	最大	平均	最大	平均
100%運転 (クラス100相当)	48	4	211	22	105	18
60%運転	136	18	642	82	461	127

単位: 個/cf

パーティクル: 16 箇所のデータ

最大: 16 箇所のデータの最大値(個)

平均: 16 箇所のデータの平均値(個)

歩行 No.01-16: No.1~16 のセンサの間を 5 分間歩行した場合のデータ

作業 No.01: No.1 のセンサの前で大きく手回し動作(5 分間)をした場合のデータ

作業 No.07: No.7 のセンサの前で大きく手回し動作(5 分間)をした場合のデータ

図 V.3.4-1 に FFU 回転数を 100% 運転とした場合のパーティクル量の波形データを示す。100% 運転においても、ピークとして発生している値は基準値の 100 を超えている。しかし、ベースとして常に発生しているパーティクルは 50 個を下回っている。つまり、ピークとして発生しているパーティクルやピークに引き連られて上昇しているパーティクルは、作業者の作業内容などにより異なるため、参考とはするべきではあるが、FFU 回転数低下での必須管理項目とはすべきではないことを意味している。常にベースとして発生しているパーティクル量を必須の管理項目とするべきである。

乱暴な言い方をすれば、汚れた防塵服を着て作業をすれば、FFU が 100% 運転をしていても、基準値を超えるので、別の管理方法で管理するべきであり、FFU 回転数により制御できる事項ではない、ということである。ピークとして発生する

パーティクルの管理方法としては、例えば、定期的なウェアのクリーニングの実施やエアシャワーの適切な浴び方の徹底や、設備の物理的な局所化(ミニエンバイロメント化)が考えられる。

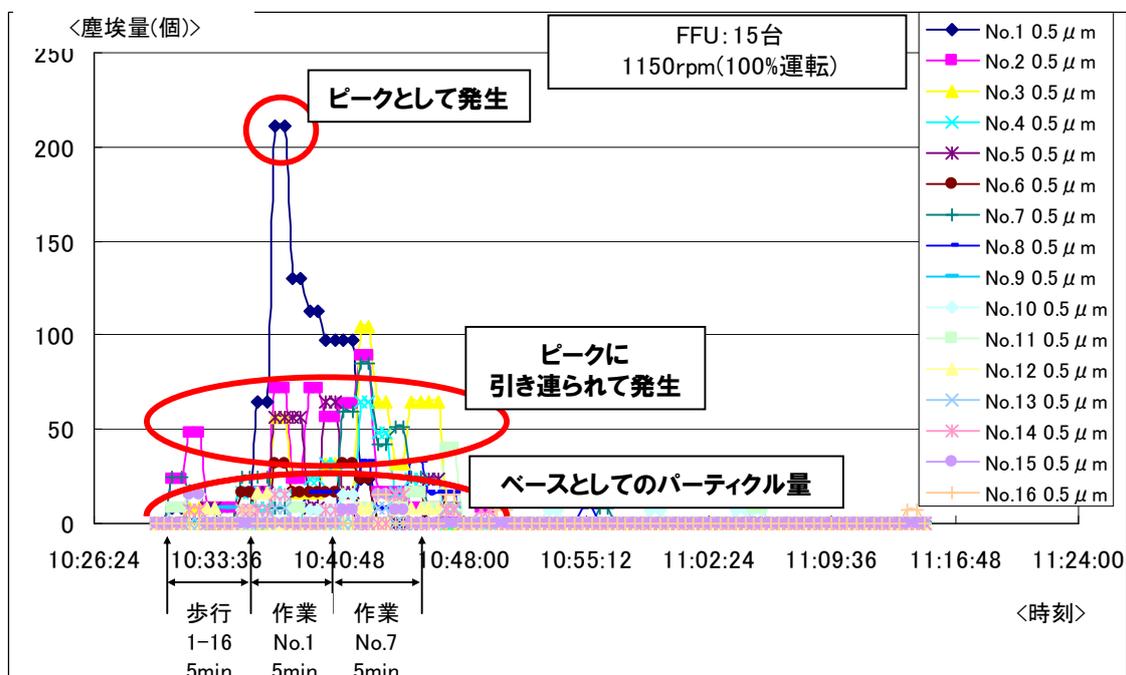


図 V.3.4-1

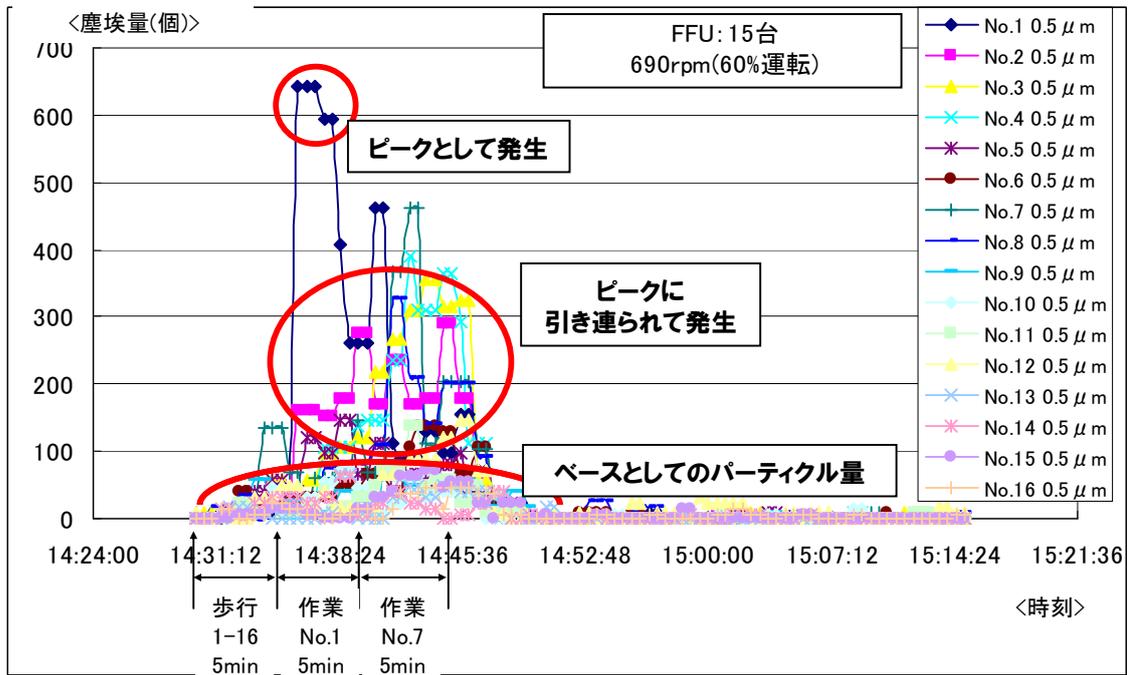
クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数 100%時のパーティクル量

図 V.3.4-2 にクラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60%に低下させた時のパーティクル量を記載する。

ベースとして常に発生しているパーティクル量は、基準値の 100 以下であり、FFU の回転数を低下させても、パーティクル量が基準値以内であることが分かる。

しかし、必須の管理項目とはしないが、ピークとして発生したパーティクルが、周辺に対して、どの程度の影響を与えるのかについては、検討が必要である。

次頁以降で検討する。



図V.3.4-2

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60% に
低下させた時のパーティクル量

3) -5 CO2_60%削減の評価(パーティクルの拡散について)

ある箇所が発生したパーティクルの周辺への影響を検討する。

評価方法は、クリーンルームの中央に設けた外気取り込みダクトより強制的にクリーンルーム内に外気を取り込む。そして、クリーンルーム内に設置した 16 箇所パーティクル量を測定し、測定されたパーティクル量の最大値を 100 とし、データを規格化した。

表 V.3.5-1 にクラス 100 相当の場合と、FFU 回転数を 60%に低下させた場合のパーティクル量の規格化値を示す。表 V.3.5-2 に平均値を抜粋した値を示す。

表 V.3.5-2 から分かるように、パーティクル発生地点から 1.5m 離れば、その影響は、FFU 回転数が 100%の場合で 25%、FFU 回転数が 60%運転の場合で 27%であり、両者に大きな差異はないことが分かるとともに、その影響も 25%前後であり大きくはない。しかし、パーティクル発生地点から 1.0m 地点では、60-70%の影響を受けることが予想されるため、注意が必要であることが分かった。

表 V.3.5-1 パーティクル拡散度合い(実測値)

0.5 μm	FFU:15台															
	中心4点(1m地点)				周辺8点(1.5m地点)								外周4点(2m地点)			
	No.06	No.07	No.10	No.11	No.02	No.03	No.05	No.08	No.09	No.12	No.14	No.15	No.01	No.04	No.13	No.16
100%運転 (クラス100相当)	32	100	44	68	21	40	15	56	13	40	5	8	12	50	8	17
	61				25								22			
60%運転	72	100	37	66	36	25	26	60	22	31	4	10	15	46	5	19
	69				27								21			

単位:%

中心 4 点 : 外気取り込みダクトから 1.0m 地点。

測定箇所 No.06,07,10,11 のデータとその 4 点の平均値。

周辺 8 点 : 外気取り込みダクトから 1.5m 地点。

測定箇所 No.02,03,05,08,09,12,14,15 のデータとその 8 点の平均値。

外周 4 点 : 外気取り込みダクトから 2.0m 地点。

測定箇所 No.01,04,13,16 のデータとその 4 点の平均値。

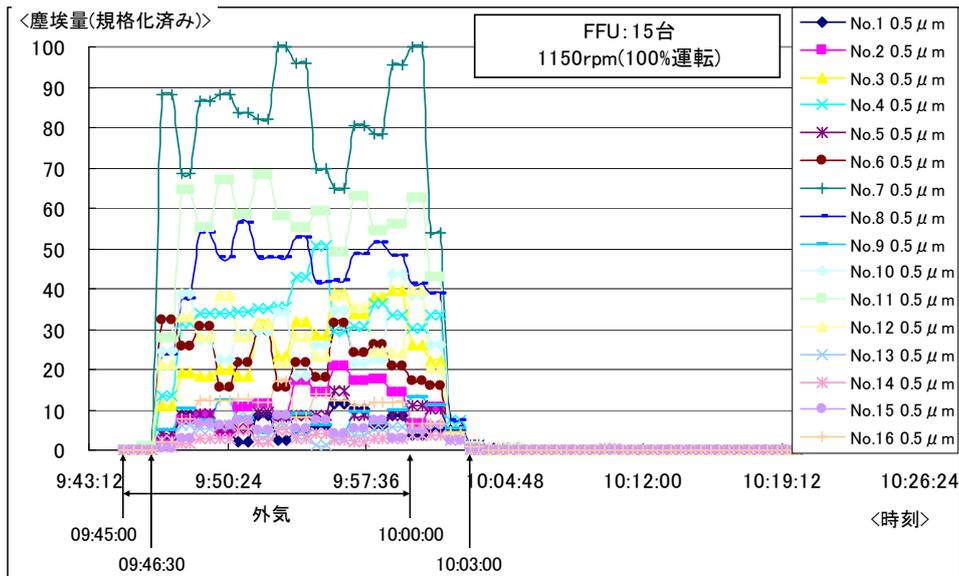
表 V.3.5-2 パーティクル拡散度合い(実測値の平均値)

0.5 μm	FFU:15台		
	1m地点	1.5m地点	2m地点
100%運転(クラス100相当)	61	25	22
60%運転	69	27	21

単位:%

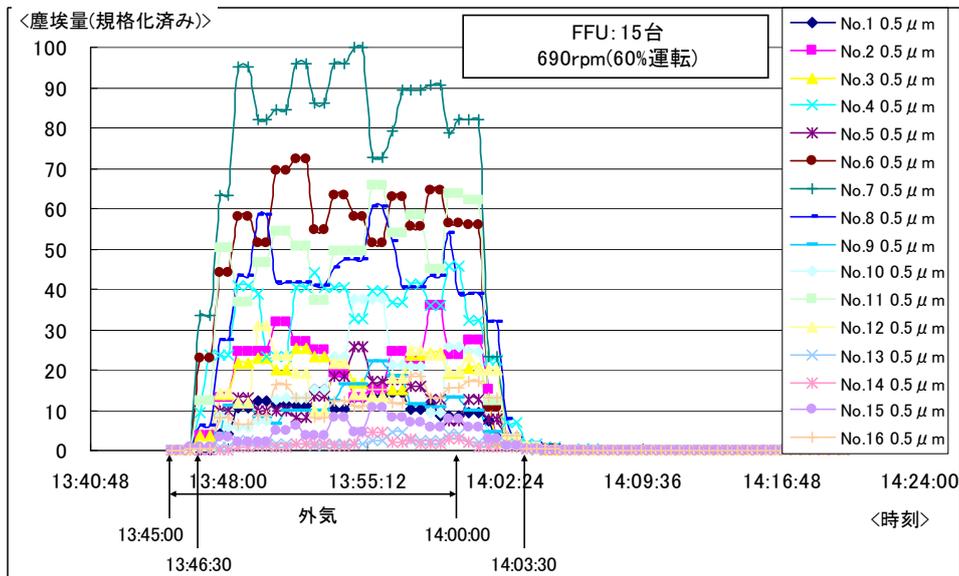
表の見方 : 防塵服が汚れていたなど何らかの理由でパーティクルが 1300 個/cf 発生した場合、その地点から 1.5m 離れた地点では、FFU が 60%の運転の場合、351 個/cf (1300 × 27%) が観測される可能性がある、ということ。

図V.3.5-1、図V.3.5-2にパーティクル拡散度合いの波形データを示す。
 外気の取り込み開始から1.5分後に大きくパーティクル量が上昇している。
 言い方を換えれば、1.5分後には周辺に影響を与えることを意味している。
 また、外気取り込み停止後、3~3.5分後には、パーティクル量は減少している。
 言い方を換えれば、FFU回転数を60%に低下させていても、3.5分後には
 パーティクルは低い値に収束することを意味している。



図V.3.5-1

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数 100%時のパーティクル拡散度合い



図V.3.5-2

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60%に
 低下させた時のパーティクル拡散度合い

3) -6 CO2_60%削減の評価(温度上昇について)

FFU回転数を低下させた時のクリーンルーム内の温度上昇を検討する。

評価方法は、クリーンルームで想定される熱負荷を擬似的に電気ヒータで与え、クリーンルーム内に設置した16箇所温度を測定した。また、今回は、擬似的に与えた熱負荷(顕熱)をクリーンルーム施設のドライコイルで顕熱処理をせずに、そのままの温度上昇を測定した。測定結果の評価基準は、下記の通りとした。電気ヒータで与えた熱負荷は250W/m²とした。一般的なクリーンルームで想定される値の最大値を用いた。

温度上昇の許容値

温度上昇が6.5℃以内

評価基準の考え方と算出方法

- ・空調設備で処理する必要がある熱量=9000W
 $250\text{W}/\text{m}^2$ (今回の実験で与えた熱負荷) \times 6m(クリーンルーム横) \times 6m(クリーンルーム縦)
- ・一般的なクリーンルームでの空調設備による熱負荷(9000W)処理
 $9000\text{W} / (6.5 \times 0.33) = 4195\text{m}^3/\text{hour}$
温度差6.5℃、風量4195m³/hourの空気で9000Wの熱負荷が処理可能。
- ・温度差6.5℃について
一般的なクリーンルーム空調設備では、給気と還気の温度差が6.5℃確保できるように空調設備は設計されている。
- ・風量4195m³/hourについて
FFU回転数を60%とした場合、FFU風速は0.2m/s。
FFUサイズは1.2m \times 0.6m。
 $0.2(\text{m}/\text{s}) \times 1.2(\text{m}) \times 0.6(\text{m}) \times 3600(\text{hour}) \times 15(\text{台}) = 7776\text{m}^3/\text{hour}$

上記より、FFU回転数を低減させても十分な風量が確保されており、温度上昇が6.5℃以内であれば、一般的なクリーンルームでの空調設備で熱負荷を処理できる。

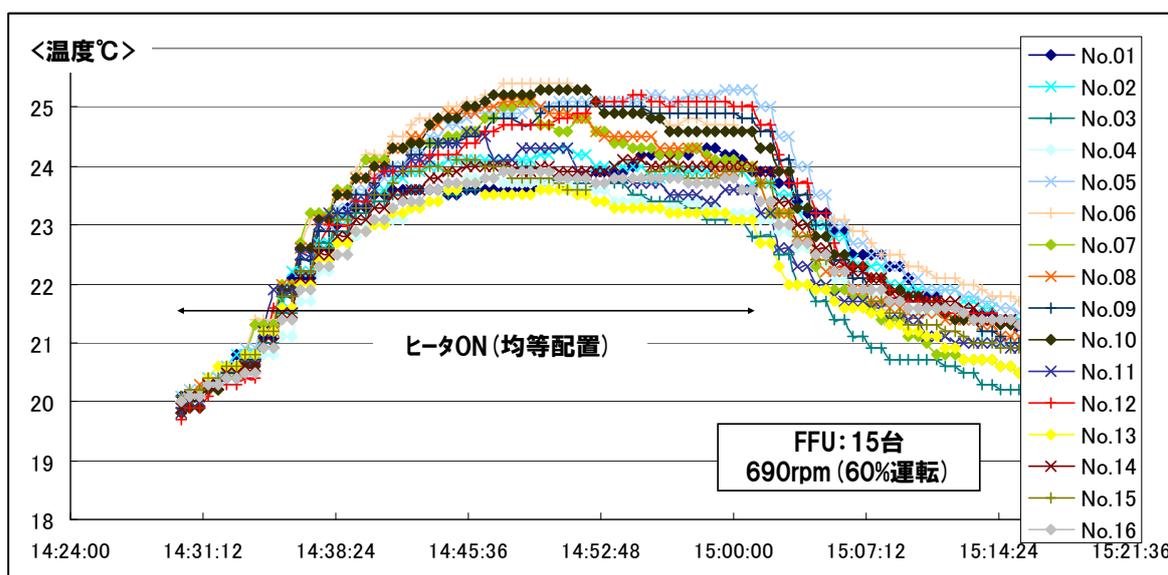
表V.3.6-1、図V.3.6-1 にクラス 100 相当のクリーンルームにおいて、FFU 回転数を 60%に低減させた場合の温度上昇を示す。

最も温度上昇が大きかった箇所でも 5.3℃であり、許容範囲以内であることが分かる。平均値としては、4.1℃の温度上昇であった。

表V.3.6-1

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60%に
低下させた時の室内温度上昇

ヒータ均等配置	No.01	No.02	No.03	No.04	No.05	No.06	No.07	No.08	No.09	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	平均
開始時 (00:00)	20.1	20.1	20.0	19.9	20.1	20.0	19.8	19.9	19.9	19.8	19.8	19.7	20.0	19.9	20.1	20.0	19.94
終了時 (00:30)	24.2	23.9	23.1	23.2	25.3	24.7	24.1	23.9	24.9	24.6	23.6	25.0	23.1	24.0	23.9	23.8	24.08
Δ	4.1	3.8	3.1	3.3	5.2	4.7	4.3	4	5	4.8	3.8	5.3	3.1	4.1	3.8	3.8	4.14



図V.3.6-1

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60%に
低下させた時の室内温度上昇

3) -7 CO2_60%削減のまとめ

1990 年度比として CO2_60%を削減するためには、FFU 電力量を 64%削減すれば実現できることが分かった。

FFU 回転数を 70%以下に低減すれば、FFU 電力量を 64%削減することができることが分かった。

クラス 100 相当のクリーンルームにおいて、FFU 回転数を 70%以下に低減させた場合のパーティクル量と室内温度上昇を検証した結果、許容範囲以内に収まることが分かった。

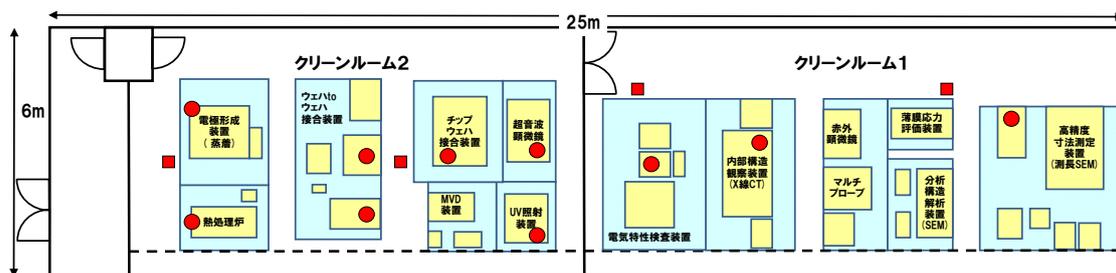
*今回の実験では、FFU 回転数を 60%にまで低減させても問題がないことを確認。

同様に、クラス 10 相当およびクラス 1000 相当のクリーンルームにおいても、FFU 回転数を 60%に低下させた時の検証を行っているが、同様の結果を得ることができた。

今回は、検証用クリーンルームにて事前検証という位置付けで検証を行った。この結果を受けて、実際に半導体プロセスが行われている産業総合技術研究所つくば東 3B 棟のクリーンルームに空調制御システムを導入して、次頁以降で削減効果を確認する。

- 4) エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)について
 4) -1 エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)の検討
 つくば東 3B 棟クリーンルームに空調自動制御システムを導入した。

図 V.4.1-1 にクリーンルームとセンサの配置図を示す。図 V.4.1-2 にセンサの設置箇所画像を示す。クリーンルーム 2 には、後工程の生産設備が設置されているため、全ての設備にパーティクルセンサ/温度センサ/湿度センサを配置した。クリーンルーム 1 に導入されている設備は検査設備であるため、設置箇所を絞って配置した。



● パーティクルセンサ/温度センサ/湿度センサ ■ 人感センサ

図 V.4.1-1 3B 棟クリーンルームとセンサ配置図(Top View)

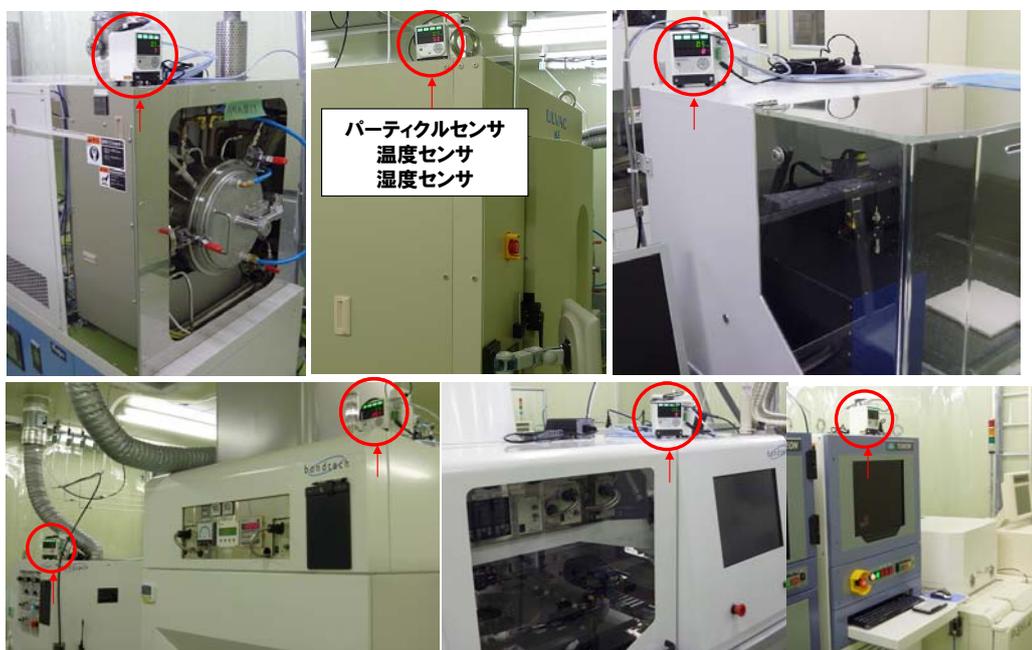
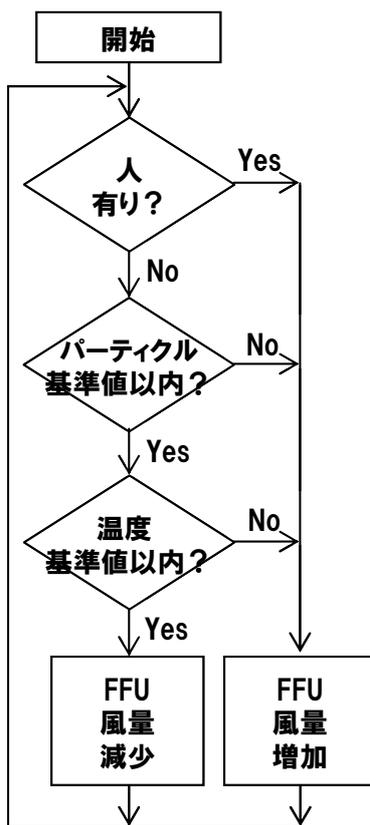


図 V.4.1-2 センサ設置箇所画像

図V.4.1-3に制御フローチャートを示す。

人感センサと多点パーティクルおよび温度情報をもとに、FFU(Fan Filter Unit)の回転数を制御する制御フローとしている。

パーティクルと温度が設定した値を満足しているか否かを判定し、その基準を満足している間は、FFUの回転数を徐々に下げて行くこととしている。しかし、人感センサがアクティブとなった時は、入室作業が行われていると判断して、パーティクルと温度が規定値以内であっても、FFU回転数を増加させることとした。



図V.4.1-3に制御フローチャート

制御盤の導入に際しては、実際のクリーンルームでは、現場ごとに判定基準や設置するセンサの数量などは異なることが想定されるため、多様な現場に臨機応変に対応ができる構成とした。

導入した制御盤の特徴は、下記の通り。

複数の論理ブロックを持ち、その論理ブロックで判定するためのセンサを任意に選択できるとともに、判定基準およびFFU回転数も任意に選択が可能な構成。具体的には、論理ブロックごとに情報源とするセンサを登録するとともに判定基準などを設定し、その論理ブロックで制御対象とするFFUを割り付けることで実現している。

図V.4.1-4に制御盤外観画像と操作パネル画面の一例を示す。

図V.4.1-4では、パーティクル/温度センサ1と2および人感センサ2の情報をもとに、FFUの回転数を制御する論理ブロックの一例を示している。



図V.4.1-4 制御盤外観画像と操作パネル画面の一例

4) -2 エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)の評価
 FFU(Fan Filter Unit)空調自動制御システムを導入した。

パーティクル量の変化を検討する。システムを導入したクリーンルームのパーティクルの基準値(設計値)は 1000 個/cf である。

図V.4.2-1に通常制御時の波形データを示す。図V.4.2-2にFFU空調自動制御時の波形データを示す。

通常制御時において、突発的に大きな値が測定されている。事前検証で検証を行った通り、通常制御においても、作業者の作業内容によっては基準値を超えることが分かる。しかし、通常制御時では、作業者が居ない深夜から明け方については、パーティクルがほぼ0であるのに対し、FFU空調自動制御時は、100前後の値が観測されており、パーティクル量が上昇していることが分かる。しかし、基準値1000以内であり、問題のないレベルであることも分かる。

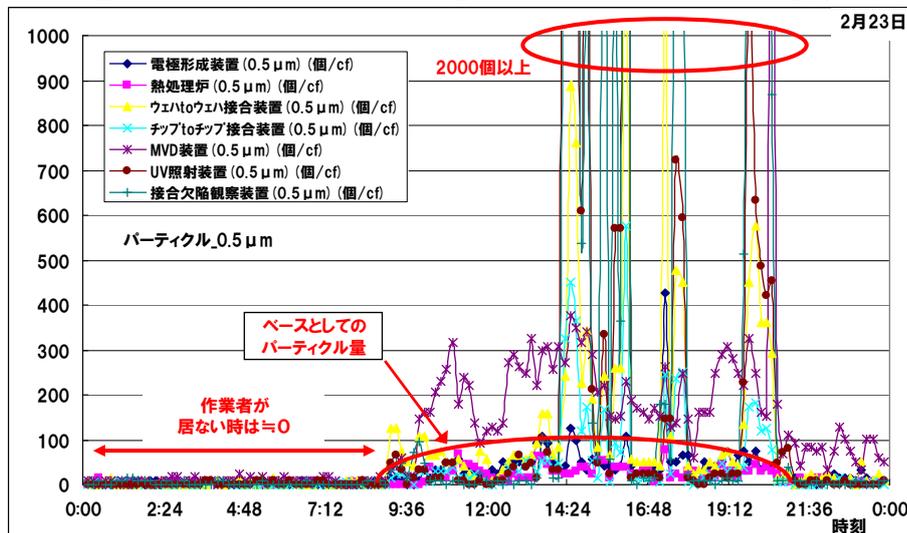


図 V.4.2-1 通常制御時のパーティクル量

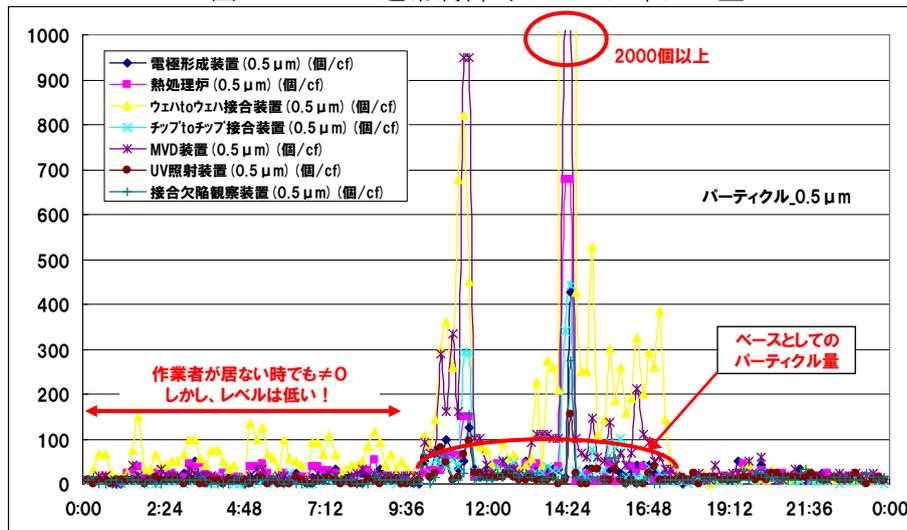
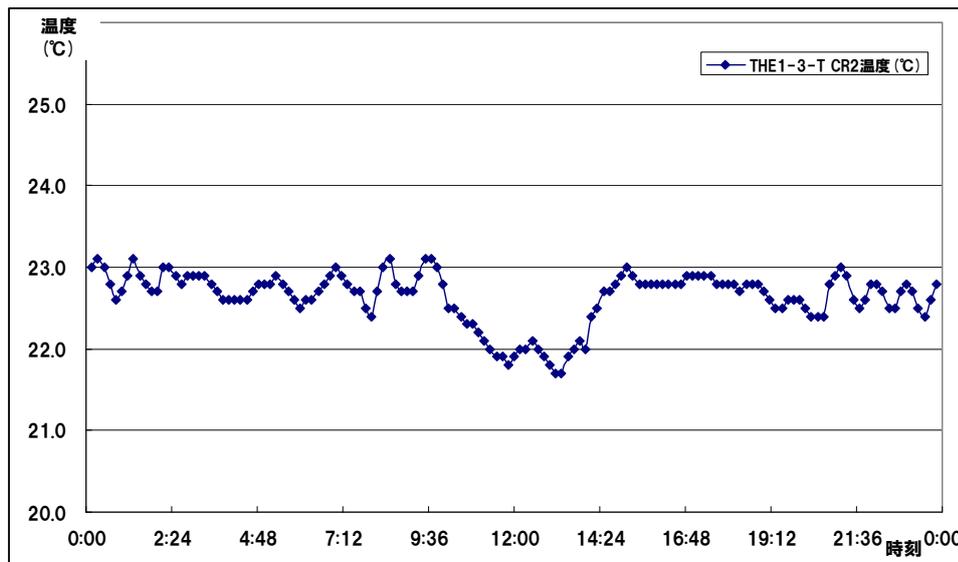


図 V.4.2-2 FFU空調自動制御時のパーティクル量

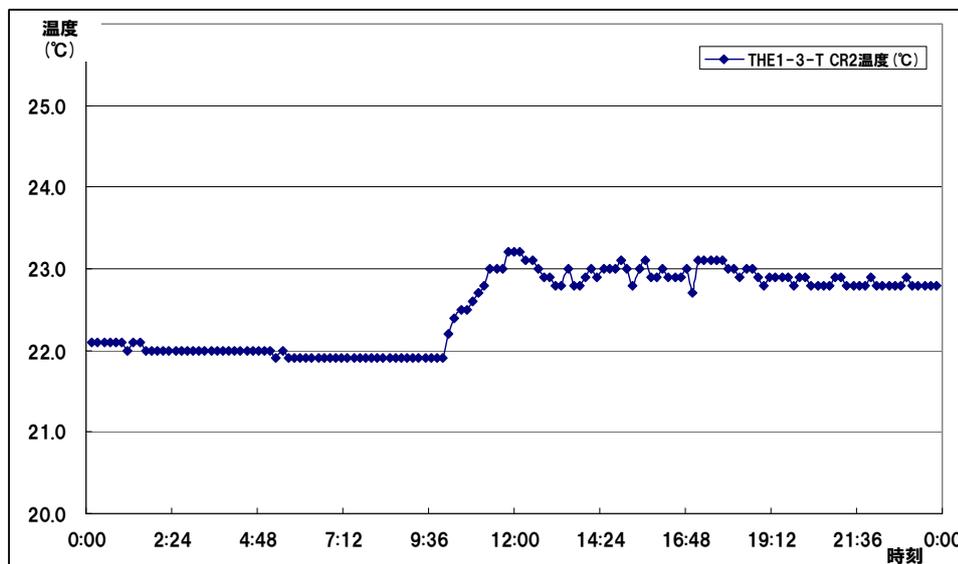
温度変化を検討する。システムを導入したクリーンルーム温度の基準値(設計値)は22~24℃である。

図V.4.2-3に通常制御時の波形データを示す。図V.4.2-4にFFU空調自動制御時の波形データを示す。

通常制御時において、若干、基準値を下回っているが、概ね、通常制御時およびFFU空調自動制御時ともに基準値の範囲に収まっている。



図V.4.2-3 通常制御時のクリーンルーム内の温度



図V.4.2-4 FFU空調自動制御時のクリーンルーム内の温度

電力量の変化を検討する。

算出方法は、数日間の電力量データより、平日の平均電力と休日の平均電力を算出し、1週間および年間の電力量を計算した。

表V.4.2-1に通常制御時とFFU空調自動制御時の電力量を示す。

表V.4.2-2に削減量を示す。

FFU空調自動制御を行うことにより、電力量として56%の削減を達成していることが分かった。

今回は、実際に製造プロセスを行っているクリーンルームへの初めての適用であったため、パーティクル量をあまり悪化させられなかった。事前検証で目標としていた64%の削減までには至らなかったが、先に記載したパーティクル量の波形データから更にFFU回転数を低下させても、パーティクルの基準値を満足できると思われる。実際のクリーンルームにおいても、FFU回転数の更なる低下により、FFU電力量の64%削減は十分に可能であることが分かる。

表V.4.2-1 FFU電力量(通常制御とFFU自動制御)

通常制御	クリーンルーム_2 FFU:10台	FFU自動制御	クリーンルーム_2 FFU:10台
2/21(月)	22.9	3/7(月)	9.4
2/22(火)	23.1	3/8(火)	11.3
2/23(水)	23.1	平日平均@1日	10.4
平均@1日	23.0	3/5(土)	9.7
1週間	161.2	3/6(日)	9.2
52週間(1年)	8384	休日平均@1日	9.4
		1週間	70.7
		52週間(1年)	3674

単位:kWh

単位:kWh

表V.4.2-2 FFU電力量の削減量

	クリーンルーム_2 FFU:10台
通常制御	8384
FFU自動制御	3674
削減量	4710
削減率	56%

単位:kWh

FFU(Fan Filter Unit)空調自動制御システムを導入し、パーティクル量の変化、室内温度の変化および電力量の削減量を検討した。しかし、現状、パーティクルセンサは非常に高額(30~100万円)であり、クリーンルームの規模によっては、多数のパーティクルセンサを設置したのでは、投資対効果が合わないことが想定される。そこで、人感センサのみでFFU空調自動制御システムを運用した場合の検討を行う。

図V.4.2-5に人感センサ情報のみでFFU空調自動制御を行った場合のパーティクルの波形データを示す。パーティクルは、モニターのみであり、制御には使用していない。

制御にパーティクル情報を使用していないため、深夜0時ごろにパーティクル量が上昇していることが分かる。また、ベースレベルとしてのパーティクル量も全体的に上昇していることが分かる。しかし、基準値1000以内である。

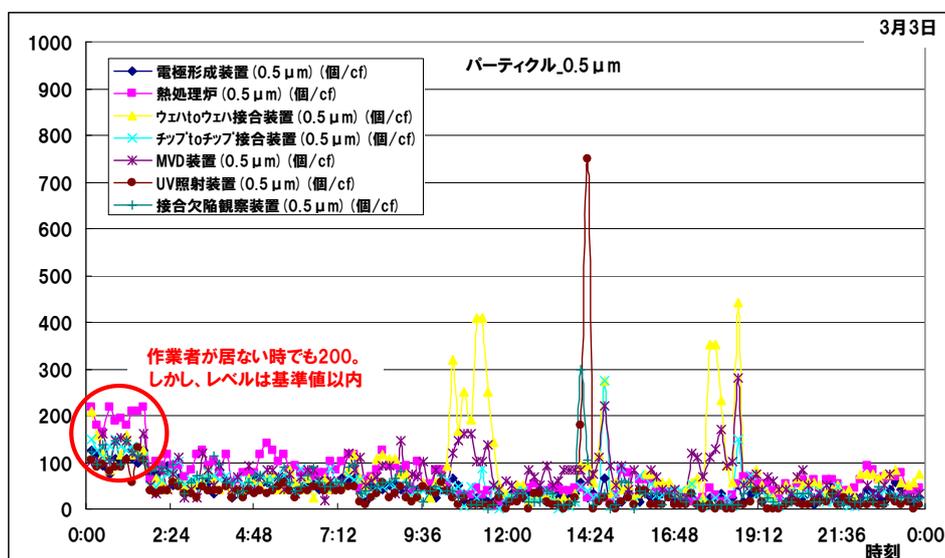


図 .4.2-5 FFU空調自動制御時のパーティクル量

表 .4.2-3 にパーティクルセンサ、温度センサ、人感センサを使用してFFU空調制御を行った場合と人感センサのみでFFU空調制御を行った場合のFFU電力量の値を示す。人感センサのみでの制御の場合は、若干、FFU電力量は大きいですが、通常制御時より大きく削減されていることが分かる。

表 .4.2-3 FFU電力量(@1日)の比較

自動制御	クリーンルーム_2 FFU:10台
パーティクル+温度+人	10.4
人	11.1

単位:kWh

通常制御時は23kWh

空調 FFU(Fan Filter Unit)自動制御システム時の電力量波形を示す。

図 V.4.2-6 に通常制御時と FFU 空調自動制御時の電力波形データを示す。

通常制御時は、電力量が一定であるのに対し、FFU 空調自動制御時は、電力量が大きく変動していることが分かる。昼間は、パーティクル量に応じて、FFU が制御されているためである。また、夜間においては低いレベルで電力量が推移していることが分かる。夜間は作業者の入室がなく、常にパーティクルが低いレベルであるため、FFU 回転数が低いレベルで運転されているためである。

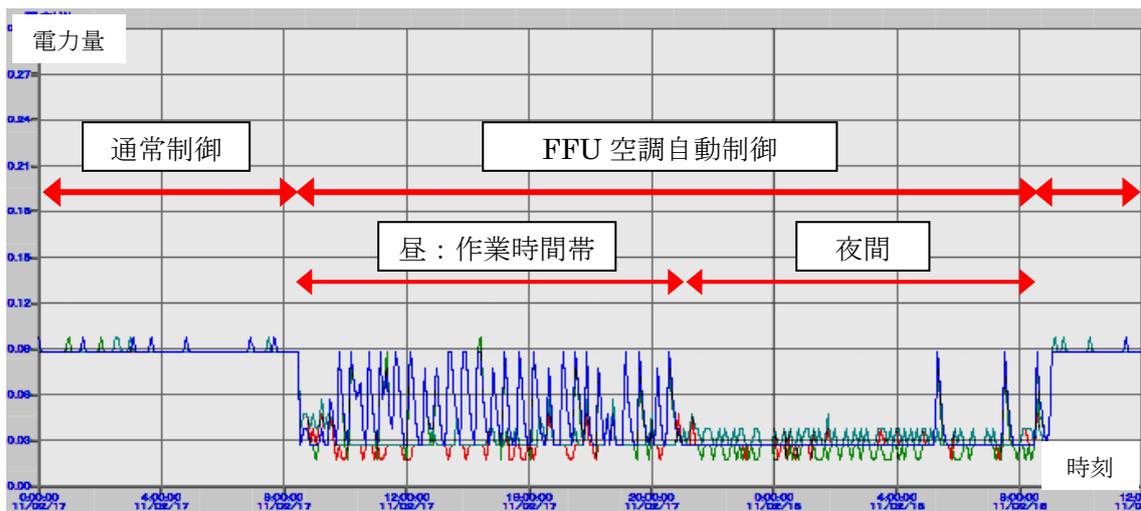


図 V.4.2-6 FFU 電力波形(通常制御と FFU 自動制御)

図 V.4.2-7 にパーティクルセンサ+温度センサ+人感センサと人感センサのみで FFU を自動制御した場合の電力波形データを示す。人感センサのみの場合は、パーティクル量が少なくても、人が作業している場合には、FFU 回転数が高い値に設定されるため、電力量についても、ある値が継続していることが分かる。



図 V.4.2-7 FFU 電力波形(パーティクル+温度+人感と人感のみ)

空調(FFU)自動制御システムにより、品質を維持しつつ、電力量を削減できることが分かった。投資対効果を検討する。

実際のクリーンルームでは、運用形態に応じて異なると思われるが、FFU 電力量の削減量は、事前検証で確認できた 64%と仮定する。

表 V.4.2-4 に FFU 台数とそれに相当するクリーン度クラスと削減見込み電力量を示す。

表 V.4.2-4 FFU 台数、相当するクリーン度クラス、削減見込み電力量

FFU台数	換気回数	クラス 個/cf	電力量 kWh@1台	合計電力量 kWh@1日	削減電力量 kWh@1日	削減電力金額 円@1年	削減電力金額 円@5年
100	11.3	10000	1.6	160	102.4	¥448,512	¥2,242,560
150	16.9		1.6	240	153.6	¥672,768	¥3,363,840
200	22.5		1.6	320	204.8	¥897,024	¥4,485,120
300	33.8	1000	1.6	480	307.2	¥1,345,536	¥6,727,680
500	56.3		2.3	1150	736	¥3,223,680	¥16,118,400
1000	112.5	100	2.3	2300	1472	¥6,447,360	¥32,236,800
1300	146.3		2.3	2990	1913.6	¥8,381,568	¥41,907,840
1500	168.8		2.3	3450	2208	¥9,671,040	¥48,355,200
2000	225	10	2.3	4600	2944	¥12,894,720	¥64,473,600
2500	281.3		2.3	5750	3680	¥16,118,400	¥80,592,000

計算条件

- ・クリーンルームサイズ：40×50×4m
- ・FFU 風量：900m³/hour(回転数 100 運転時)
- ・FFU 電力量：2.3kWh/day

3B 棟クリーンルームでの FFU 電力量実測値(回転数 100%運転時)。

但し、クラス 10000、1000 については、FFU による換気ではなく、AHU による換気が一般的に採用されることが多く、電力量の改善が見込めるため、FFU 電力換算として、0.7 倍の 1.6 kWh/day。

- ・電力料金単価：12 円/ kWh。
- ・計算の一例(FFU：500 台の場合)

クリーンルーム体積：40m×50m×4m=8000m³

FFU 風量：900m³/hour×500 台=450000m³/hour

換気回数：450000/8000=56.3 回/hour⇒クラス 1000 相当の換気回数

削減電力量/day：2.3 kWh/day×500 台×0.64=736kWh/day

削減電力金額/year：736 kWh/day×365day×12 円=3,223,680 円

クラス 100 相当 (FFU : 1000 台) クリーンルームの場合の投資対効果を考慮した機器、システム費用を想定した。投資金額は、表 V.4.2-4 の結果より 3200 万円と仮定した。工事費用は、機器合計金額の同額と仮定した。よって、工事費用などに含まれる宿泊旅費や、工事管理費は工事には含めずに、小計の合計金額に一定の倍率を掛けて、最終のトータル費用とした。

クラス 100 相当のクリーンルームの場合、既に FFU が何らかの制御システム下に置かれていることが想定されるため、既存システムとの連携を考慮した制御ソフトウェアとする必要があり、1200 万円を見込んだ。但し、この 1200 万円には、試運転調整費用も込みの価格である。表 V.4.2-5 にクラス 100 クリーンルームにおいて、投資対効果を考慮した場合に許容される機器/システム費用を示す。

表 V.4.2-5 クラス 100 クリーンルームでの機器/システム費用

項目	数量	単価	小計
制御ソフトウェア	1	¥12,000,000	¥12,000,000
制御盤	1	¥3,000,000	¥3,000,000
パーティクルセンサ	6	¥350,000	¥2,100,000
温湿度センサ	6	¥50,000	¥300,000
工事 (H/W関連)	1	¥5,400,000	¥5,400,000
		合計	¥22,800,000
		合計*1.4	¥31,920,000

クラス 1000 相当 (FFU : 300 台) クリーンルームの場合の投資対効果を考慮した機器、システム費用を想定した。投資金額は、表 V.4.2-4 の結果より 670 万円と仮定した。パーティクルおよび温湿度センサともに、もう少し設置数を増やしたいが、投資対効果に見合わなくなるため、2 個とした。言い方を変えると、適切な箇所に設置する必要があるということを示唆している。また、FFU が 300 台相当存在するシステムの制御盤として、150 万円は非常に厳しい金額と想定される。その場合は、FFU で換気を行っているアプリケーションは切り捨て、AHU で換気を行っているアプリケーションに限定するなどの対応が必要である。AHU でのアプリケーションであれば、制御対象が FFU のように 300 台ではなく、数台に減少されるため、制御盤も安価な構成が可能であると思われる。表 V.4.2-6 にクラス 1000 クリーンルームにおいて、投資対効果を考慮した場合に許容される機器/システム費用を示す。

表 V.4.2-6 クラス 1000 クリーンルームでの機器/システム費用

項目	数量	単価	小計
制御盤	1	¥1,500,000	¥1,500,000
パーティクルセンサ	2	¥350,000	¥700,000
温湿度センサ	2	¥50,000	¥100,000
工事 (H/W関連)	1	¥2,300,000	¥2,300,000
		合計	¥4,600,000
		合計*1.4	¥6,440,000

クラス 10000 相当 (FFU : 100 台) クリーンルームの場合の投資対効果を考慮した機器、システム費用を想定した。投資金額は、表 V.4.2-4 の結果より 330 万円と仮定した。投資金額が少ないため、パーティクルセンサを設置する場合と、パーティクルセンサの代替として人感センサを設置する場合を検討した。

表 V.4.2-7 にはパーティクルセンサを設置した場合、表 V.4.2-8 には人感センサを設置した場合のクラス 10000 クリーンルームにおける投資対効果を考慮した場合に許容される機器/システム費用を示す。

表 V.4.2-7 クラス 10000 クリーンルームでの機器/システム費用 その 1

項目	数量	単価	小計
制御盤	1	¥1,000,000	¥1,000,000
パーティクルセンサ	1	¥350,000	¥350,000
温湿度センサ	0	¥50,000	¥0
工事 (H/W関連)	1	¥1,350,000	¥1,350,000
		合計	¥2,700,000
		合計*1.2	¥3,240,000

表 V.4.2-8 クラス 10000 クリーンルームでの機器/システム費用 その 2

項目	数量	単価	小計
制御盤	1	¥1,000,000	¥1,000,000
人感センサ	6	¥50,000	¥300,000
温湿度センサ	0	¥50,000	¥0
工事 (H/W関連)	1	¥1,300,000	¥1,300,000
		合計	¥2,600,000
		合計*1.2	¥3,120,000

空調 (FFU) 自動制御システムの投資対効果を検討した。

基本的な考え方として、費用の積上げではなく、投資対効果を考慮した場合には、これぐらいの費用で収める必要がある、という考え方で費用を算出している。

今回は、現状のセンサ市場価格をベースに投資対効果を検討した。そのため、多点計測によりキメ細かく測定することが困難ケースでは、人感センサで代替するなどの回避策を採用した。

特に、現状では、パーティクルセンサが非常に高額であり、パーティクルセンサの MEMS 化による低価格化が急がれる。また、今回の工事では、有線によるセンサを想定しているが、将来的に、各種センサが MEMS 化され、電源もバッテリー化されれば、工事費用も大きく低減することが想定され、その場合には、更に、キメ細かく多点計測が可能になる。

各種センサ (温度、湿度、パーティクル) の MEMS 化による小型⇒安価および無線化による工事費用の低減が急がれる。

4) -4 エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)のまとめ

半導体プロセスが行われている産業総合技術研究所つくば東 3B 棟のクリーンルームに空調制御システムを導入して、削減効果を確認した。

FFU 空調制御システムにより、FFU 電力量の 56%削減を達成した。
また、その際のパーティクル量および温湿度も許容範囲以内であることを確認した。

クラス 100、1000、10000 のクリーンルームにおける投資対効果を検討し、回収年月 5 年の場合の機器およびシステム費用の概算を算出した。

今後は、実際のクリーンルームを所有しているユーザにヒアリングを行い、課題などを明確にする必要がある。

5) エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)について

5) -1 エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)の検討

従来の空調制御システムでは、室内の温湿度設定値(Set Point)は固定値となっている。クリーン度の低いクリーンルームでは、夏場と冬場に設定値を手動で変更して運用されていることもあるが、設定許容範囲を有効に活用することは行われていない。そこで、今回、設定温度および設定湿度の許容範囲を有効活用しながら、設定値を自動変更するシステムを検討した。

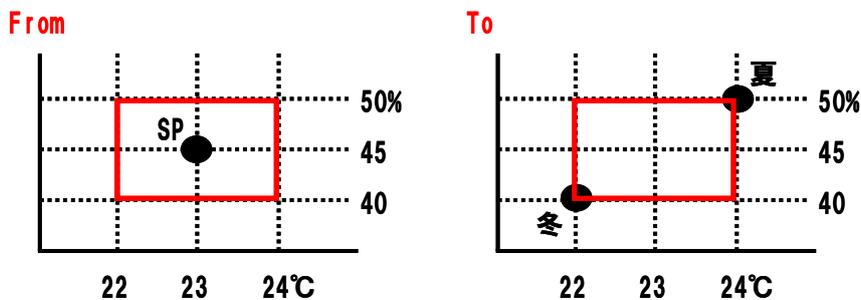
図V.5.1-1に温湿度設定値(Set Point)イメージを示す。

従来は、外気温湿度に関わらず、制御システムの設定値(Set Point)は一定である。エネルギー最適_温湿度空調自動制御システムでは、外気の温度および湿度と室内の温度と湿度から、空調設備のエネルギーが最小となる制御システムの設定値(Set Point)を自動でリアルタイムに変更しながら、空調制御を行う制御システムである。

平たく言えば、設定値を夏であれば、温度、湿度ともに高い値に設定し、冬は温度、湿度ともに低い値に設定することにより空調のエネルギー削減を目指している。

夏場と冬場に設定値を手動で変更するのに対して、中間期も含めて、リアルタイムに自動で制御するため、よりキメ細かい制御が可能となる。

もちろん、許容範囲を有効活用するのであって、最終的なクリーンルームの温湿度は、許容範囲以内となることを制御の前提としている。



図V.5.1-1 温湿度設定値(Set Point)イメージ

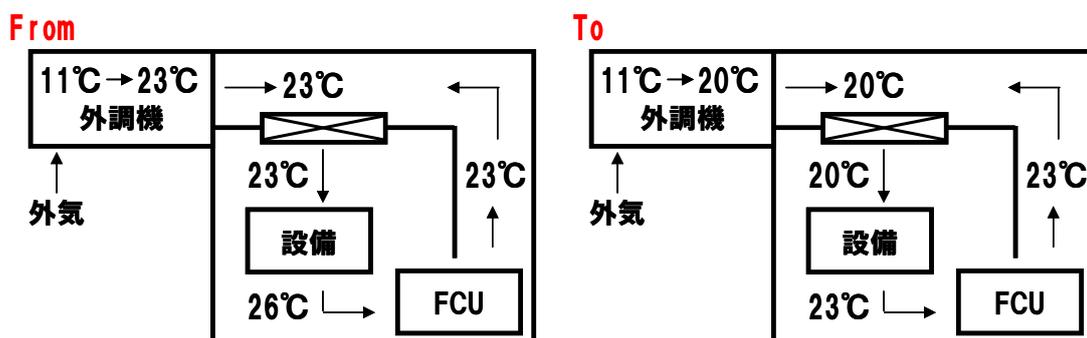
また、クリーンルームでは、湿度管理を厳密に行う必要から、一旦、空気を過冷却し、再熱・再加湿されている。エネルギー最適_温湿度空調自動制御システムでは、この過冷却による再熱・再加湿のムダ削減にも対応した制御システムとした。

図V.5.1-2に設定温度イメージを示す。室内の設定温度は23℃とする。

従来は、外調機にて外気を一旦、11℃まで過冷却し、除湿した後、23℃まで再熱している。再熱された空気は、クリーンルーム内に送られ、設備などの熱負荷により、例えば、26℃まで上昇する。室内の熱負荷で上昇した26℃の空気を室内の顕熱処理用のFCU(Fan Coil Unit)やDC(Dry Coil)で、熱処理して、所定の23℃に温度調整して、クリーンルーム内に戻している。

エネルギー最適_温湿度空調自動制御システムでは、除湿のため11℃まで過冷却するのは同じであるが、その後の、再熱を23℃までとせず、室内熱負荷の温度上昇を考慮して、20℃までの再熱とする。そして、室内の熱負荷により所定の23℃まで上昇させることにより、外調機での再熱ムダとFCUでの熱処理ムダの両方を削減することを目指している。

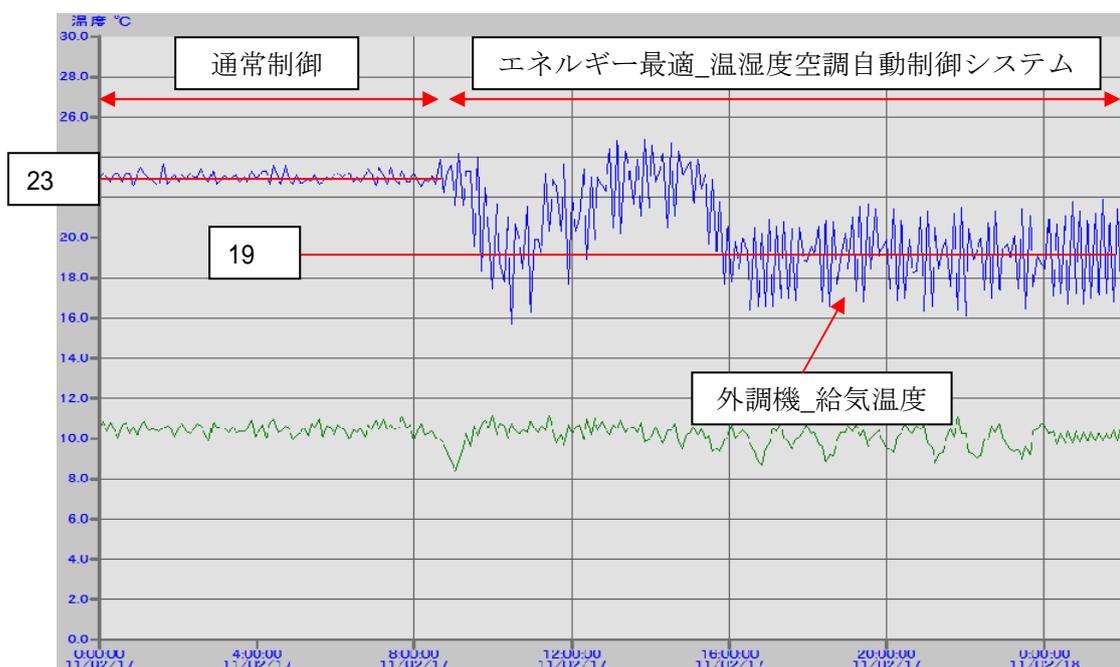
しかし、設備の熱負荷は刻々と変化するため、その変化に対応が可能な制御システムが要求される。



図V.5.1-2 設定温度イメージ

5) -2 エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)の評価
エネルギー最適_温湿度空調自動制御システムを導入した。

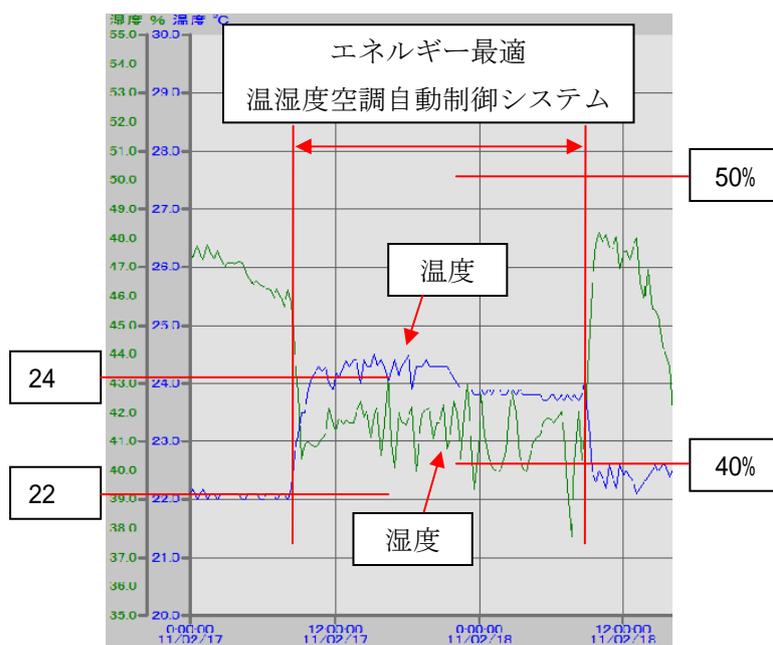
図V.5.2-1に外調機の給気温度変化を示す。図V.5.2-2に室内の温湿度を示す。
通常制御では、給気温度は、ほぼ23°C一定である。しかし、エネルギー最適_
温湿度空調自動制御システムでは、給気温度は、19°C前後で大きく変動している。
つまり、11°Cまで過冷却された空気は、23°Cまで再熱されず、19°C前後までの
再熱処理となり、再熱のムダが削減されていることが分かる。また、室内の熱
負荷に応じて、給気温度が大きく変動していることも分かる。



図V.5.2-1 外調機_給気温度

室内の許容温度範囲は、22～24℃である。エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム時では、上限を若干超えている。今回、検証時間の都合上、微調整をする時間がなく、FCUの制御が上手く連動していないと思われる。しかし、この程度の超過は調整できる範囲であると思われる。

また、湿度についての許容範囲は、40～50%である。通常制御時よりも低い値で推移しており、余計な加湿を行っていないことが分かる。



図V.5.2-2 室内の温度と湿度

エネルギー最適_空調温湿度自動制御システムによる電力量の削減を検討する。
しかし、検証期間が短く、その期間での外気の温湿度を考慮した比較までには至っていない。

特に、検証期間が冬場であり、外気の湿度によって削減量は左右されるため、参考値として記載する。

また、排気量の制限による検証も行っており、単純な評価はできない。

表V.5.2-1 に通常制御時の電力量を示す。表V.5.2-2 にエネルギー最適_温湿度空調自動制御システム時の電力量を示す。設備排気は 100%設定。表V.5.2-3 に設備排気を 50%に絞った時の電力量を示す。通常制御時の設備排気は 100%設定。
電力使用量の多い熱源系に関して、14~17%の削減が確認できた。

表V.5.2-1 通常制御時の電力量

	合計電力量 kWh	外気温度 Max値	外気温度 Min値	外気湿度 Max値	外気湿度 Min値	FCU3 (1台)	FCU2 (3台)	FCU1 (2台)	加湿器	外調機	RH-1 チラー @OAC	R-1 チラー @FCU	備考
2/21(月)	291	9.6	4.6	63.7	41.2	0.8	8.2	5.2	169.7	11.7	73.1	22.2	OAC:通常モード/FCU:通常モード 排気:終日100%
2/22(火)	310	9.4	2.9	68.7	46.4	0.8	8.3	5.1	168.4	11.9	93.6	22.0	OAC:通常モード/FCU:通常モード 排気:終日100%
2/23(水)	290	10.8	4.4	67.7	48.9	0.7	8.3	5.2	152.4	11.8	81.1	30.9	OAC:通常モード/FCU:通常モード 排気:終日100%
平均値	297												

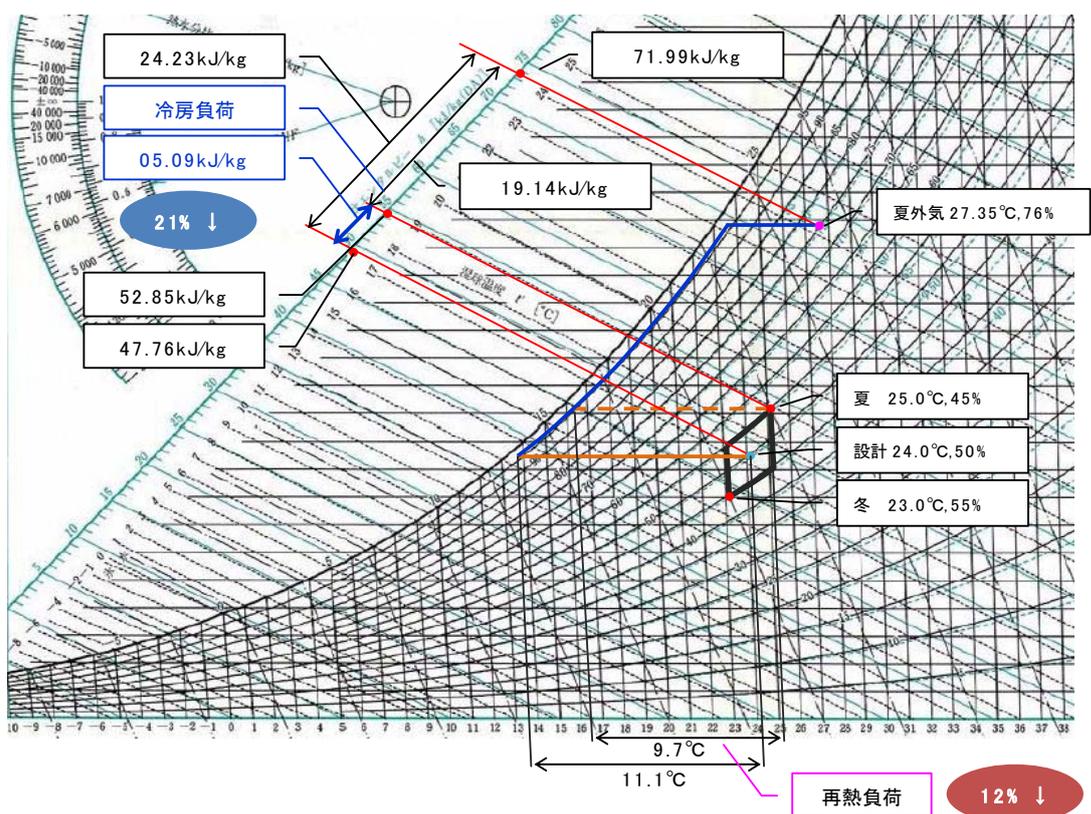
表V.5.2-2 エネルギー最適_温湿度空調自動制御システム時の電力量

	合計電力量 kWh	外気温度 Max値	外気温度 Min値	外気湿度 Max値	外気湿度 Min値	FCU3 (1台)	FCU2 (3台)	FCU1 (2台)	加湿器	外調機	RH-1 チラー @OAC	R-1 チラー @FCU	備考
2/28(月)	254	8.9	3.7	87.3	60.3	0.7	8.4	5.0	121.4	11.7	88.9	18.2	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:終日100%
3/1(火)	239	8.7	4.8	88.7	65.6	0.7	8.3	5.1	112.9	11.7	82.1	18.0	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:終日100%
3/7(月)	264	8.5	3.3	83.9	55.8	0.7	8.4	5.1	125.2	11.7	95.9	16.5	OAC:自動制御/FCU12系:自動制御 /FCU8系:通常モード 排気:終日100%
3/8(火)	261	10.0	4.4	80.6	36.6	0.8	8.3	5.1	133.3	11.6	84.4	17.9	OAC:自動制御/FCU12系:自動制御 /FCU8系:通常モード 排気:終日100%
平均値	255												
削減量	43												
削減率	14%												

表V.5.2-3 エネルギー最適_温湿度空調自動制御システム時の電力量(設備排気 50%)

	合計電力量 kWh	外気温度 Max値	外気温度 Min値	外気湿度 Max値	外気湿度 Min値	FCU3 (1台)	FCU2 (3台)	FCU1 (2台)	加湿器	外調機	RH-1 チラー @OAC	R-1 チラー @FCU	備考
2/26(土)	284	9.6	5.6	50.1	24.8	0.8	8.4	5.1	176.4	10.4	64.8	18.1	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:0-6のみ50%
2/27(日)	177	15.0	5.7	71.8	46.5	0.8	8.4	5.2	101.4	7.9	35.0	18.1	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:終日50%
3/3(木)	310	6.6	2.7	44.7	19.3	0.8	8.4	5.2	196.7	10.4	70.1	17.9	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:0-7のみ50%
3/5(土)	272	10.1	1.4	61.5	23.6	0.8	8.4	5.1	168.4	10.4	62.9	16.4	OAC:自動制御/FCU12系:自動制御 /FCU8系:通常モード 排気:0-6のみ50%
3/6(日)	193	13.2	3.0	65.5	21.8	0.7	8.5	5.1	115.5	7.8	37.9	17.7	OAC:自動制御/FCU12系:自動制御 /FCU8系:通常モード 排気:終日50%
平均値	247												
削減量	50												
削減率	17%												

今回は、検証期間が冬季ということもあり、夏季の削減量は測定できていない。
 そこで、夏季における削減見込みを机上で算出する。
 冷房負荷として21%、再熱負荷として12%の削減が期待されることが分かった。
 熱源系の電力量は非常に大きいため、金額ベースとしても大きな削減が見込める。
 図V.5.2-3に夏季の空調温湿度の遷移を空気線図で示す。



図V.5.2-3 夏季の削減見込み(空気線図)

5) -3 エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)のまとめ

半導体プロセスが行われている産業総合技術研究所つくば東 3B 棟のクリーンルームにエネルギー最適_空調温湿度自動制御システムを導入した。

温度および湿度の設定許容範囲を有効に活用しつつ、再熱のムダを削減した空調自動制御システムを開発した。

参考値ではあるが、冬季データとして、熱原系の電力量で 15%の削減が確認できた。

熱原系では非常に大きな電力が使用されており、大きな削減が見込める。

今後は、夏季および中間期での電力の削減量を検証しつつ、実際のクリーンルームを所有しているユーザにヒアリングを行い、課題などを明確にする必要がある。

6) 高機能センサネットワークシステム開発の全体まとめ

エネルギー見える化システムについて

エネルギーマネジメント統合管理システム(3D棟、3B棟、2G棟クリーンルーム)を開発した。見える化項目として、エネルギーおよびエネルギーに影響を与える項目全ての見える化を実現した。

電力量(生産設備、空調設備、付帯設備)、ガス使用量(N₂、SF₆、C₄F₈)、純水使用量、温湿度(多点)、設備排気量、パーティクル量(多点)、人在室情報、設備稼働情報。合計：441点(3D棟 157点、3B棟 179点、2G棟 105点)の見える化を実現した。

いつでも、どこでも、だれでも、簡単にクリーンルームのエネルギーに関する情報が共有できるユーザフレンドリーな情報端末(iPad)を採用したシステムを開発するとともに、効率的にエネルギーのムダを抽出できるデータ分析支援ツールを開発した。

CO₂_60%削減について

検証用クリーンルームにて、パーティクル、温湿度に関する基本データを取得し、その知見を空調自動制御(On Demand制御)システム開発に反映させた。

クラス 10、100、1000 クリーンルームを擬似的に再現し、塵埃負荷および熱負荷を与えた時のパーティクル量、パーティクル拡散量、温度上昇などの基本データを取得し、1990年度比、CO₂_60%削減の検証を実施した。

エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)

温湿度を満足しつつ、パーティクル量に応じたFFU(Fan Filter Unit)自動制御システムを開発した。

つくば3B棟クリーンルームにてFFU電力量56%削減を実現した。

エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)

温湿度設定許容範囲を有効活用しつつ、再熱処理のムダを削減した空調温湿度自動制御システムを開発した。

つくば3B棟クリーンルームにてエネルギー消費量の大きい熱源系電力の15%削減を実現した。

次世代オンデマンド型ユビキタスセンサネットワークについて

クリーンルームでの各種エネルギーの見える化システムおよびパーティクル量に応じた空調自動制御システムを開発した。しかし、クリーンルームではモノ作りが行われており、そのモノ作りの力こそが、日本の国際競争力の源泉ともなっている。しかし、未だ、モノ作りと連携した空調自動制御システムは、実現していない。次世代オンデマンド型ユビキタスセンサネットワークの目指すべき姿としては、モノ作り情報(いつ、どの設備で、何を作るという生産管理情報)と環境情報(室内温湿度、パーティクルなど)と空調設備情報(熱源、空調機など)から、エネルギーが最適となる空調自動制御システムが目指すべき姿である。

図 V.6-1 に次世代オンデマンド型ユビキタスセンサネットワーク活用イメージを示す。

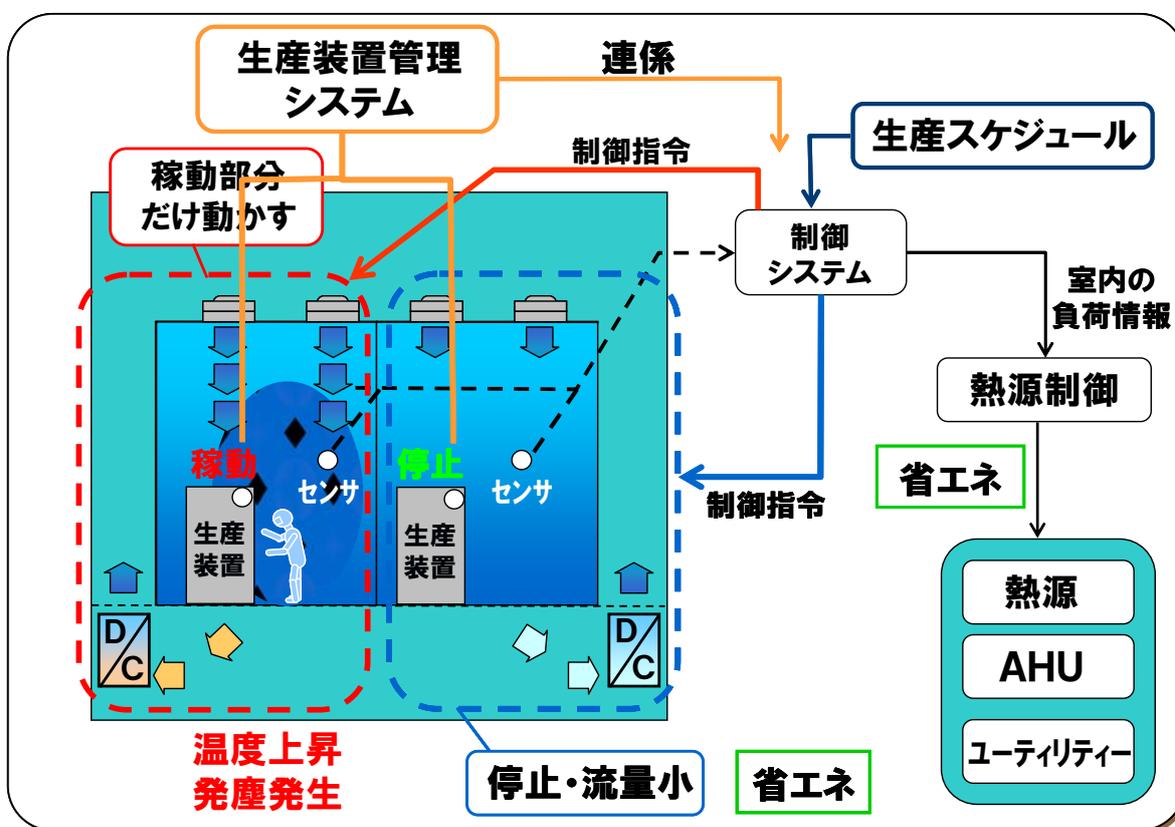


図 V.6-1 次世代オンデマンド型ユビキタスセンサネットワーク活用イメージ

以上

1. 2 8インチ MEMS プロセスラインの構築

(1) 研究の目的

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」で得られた研究開発成果である 3次元ナノ構造形成プロセス技術においては、試作プロセスから大口径での(8インチ)性能ばらつき等を実証できる段階にある。また、研究開発項目⑤の「高機能センサネットシステムの開発」の一環として実施されるクリーンルームの環境負荷低減を目指したエネルギー管理用センサネットシステムの検証と、同じく研究開発項目⑤の「低環境負荷型プロセス技術開発」において実施される高生産性・低環境負荷型 MEMS デバイス製造のためのプロセスプラットフォーム構築に向けたジャイロ、加速度、MEMS 振動子などのセンサ TEG (Test Element Group) の試作が必要である。また、これまで日本が必ずしも得意とはして来なかった、MEMS プロトタイピングから量産想定パイロット生産の開発支援に対応し、“Commercialization Gap” 克服の一助となること、さらに、つくばナノテク拠点の TIA-NMEMS W/G と一般財団法人マイクロマシンセンターが目指す、将来のマイクロナノオープンイノベーションセンター (MNOIC) 構想の中核拠点を立ち上げることも重要課題である。

以上の課題に対応するため、独立行政法人産業技術総合研究所(産総研)つくば東事業所の集積マイクロシステム研究センター内に、MEMS 製造ラインとして、クラス 1000 以下のクリーンルームと最先端 8 インチラインを設置した。これらの MEMS ラインは、異分野融合型次世代デバイス製造技術の実証や現在の MEMS 製造の動向をふまえた最先端ラインとしての 8 インチシリコンウェハベース MEMS ラインとした。ラインの構成としては、MEMS/LSI の前工程から後工程、評価までカバーする一貫ラインであり、ウェハの洗浄、リソグラフィ、拡散、酸化、成膜、エッチングから、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、さらに、デバイス表面及び内部の形状評価までを実施する装置を導入した。

(2) 最先端 8 インチラインのコンセプト及び特長

MEMS デバイスの製造現場を持たないファブレス企業が MEMS 応用製品を商業化しようとする場合、MEMS ファンドリーとの連携が非常に重要である。国内の場合、MEMS の新規のアプリケーション・アイデアや基礎研究と製品化・量産化の“Commercialization Gap”を橋渡しする仕組みが脆弱といわれているが、海外では、コンセプトモデル開発から量産までをカバーする量産試作ファンドリーもあり、スタートアップ育成、産業拡大のキープレーヤーとなっている。このような仕組みを国内で展開することが可能か、米国のみで可能なビジネスモデルなのか、今後の詳細な検討が課題となっている。

以下、最先端 8 インチラインの特長を列挙する。

i) 最先端レベルの 8 インチウェハ対応 (クラス 1000 以下)

図 V.1.2.2-1 に最先端 8 インチラインの設置場所を示す。本ラインを産総研つくば東事業所に設置することで、産総研 12 インチ半導体ラインとの合体によりシナジー効果を発揮

することを目指している。

ii) 環境負荷測定センサネットワークシステムによる監視ライン

エネルギー見える化システムによる環境負荷の監視と個別空調システムによるライン環境のスマート制御の併用により低環境負荷生産の実現を目指している。

iii) MEMS プロトタイピングから、量産想定パイロット生産まで対応

図V.1.2.2-2に8インチラインの想定開発ステージを示す。本ラインは、MEMS デバイス開発におけるプロトタイピング段階から量産試作プロセス開発段階への適用を主な対象としており、MEMS デバイス開発の初期段階から、将来の量産化に円滑に移行できるようなプロセスを採用するとともに、国内ファンドリー企業との連携が容易な半量産仕様の装置群を選定した。

iv) MEMS/LSI の前工程から後工程、評価までカバーする一貫ライン

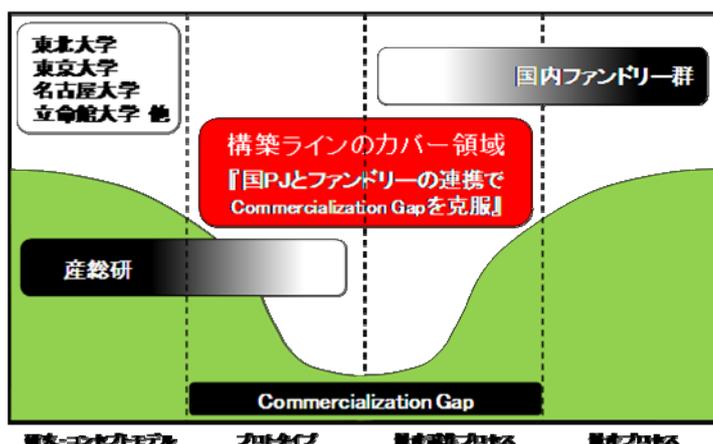
ウェハの洗浄、リソグラフィ、拡散、酸化、成膜、エッチング、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、デバイス表面及び内部の形状評価が可能な一貫製造ラインを構築した。

v) 3次元マイクロ加工からサブハーフミクロン加工まで対応。

異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト成果プロセスの検証デバイス試作と高生産性・低環境負荷型 MEMS デバイス製造のためのプロセスプラットフォーム構築に向けたジャイロ、加速度、MEMS 振動子などのセンサ TEG (Test Element Group) の試作に使用するため、実績あるセンサ等の MEMS から、最先端レベルデバイスまで対応可能な装置群を選択した。



図V.1.2.2-1 設置場所



図V.1.2.2-2 8インチラインの想定開発ステージ

(3) 最先端 8 インチライン(TKB812)と導入設備

表V.1.2.3-1に最先端 8 インチラインに導入した設備の一覧表を示す。

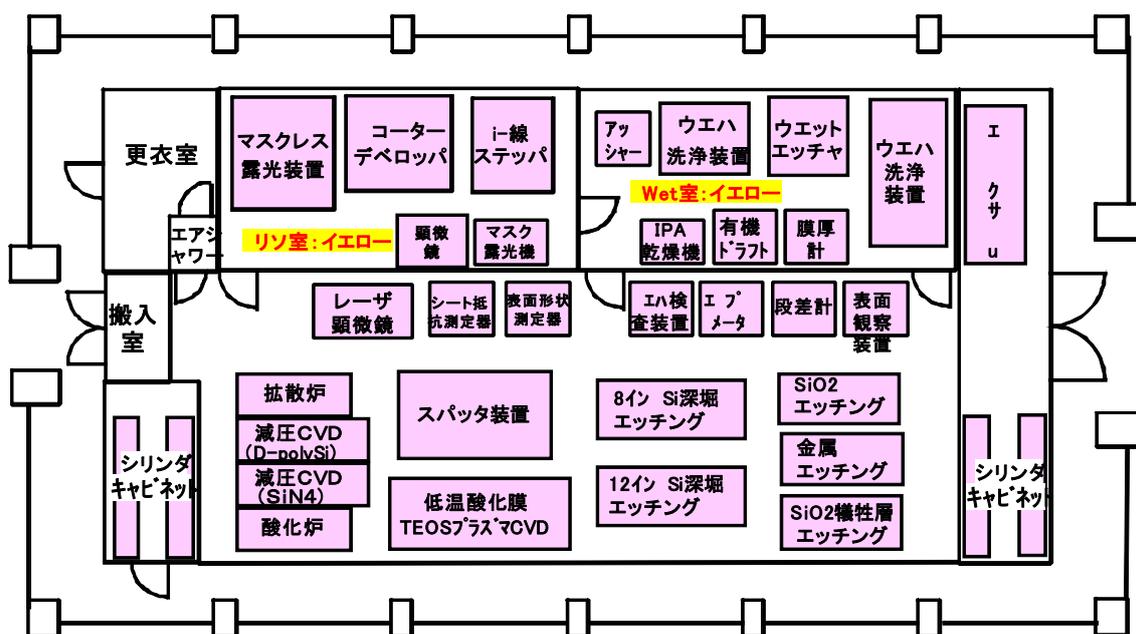
前工程クリーンルームは産総研建設設備で、その中に前工程ライン(以下、TKB812F ラインと称する)として、ウェハ洗浄・乾燥、リソグラフィ、成膜、エッチングプロセス装置とプロセス中のウェハの評価装置を設置した。

後工程・評価用クリーンルームは本研究開発プロジェクトで建設したスマート空調クリーンルームで、その中に後工程・評価ライン (以下、TKB812B ラインと称する)として、接合・実装装置と評価装置を設置した。

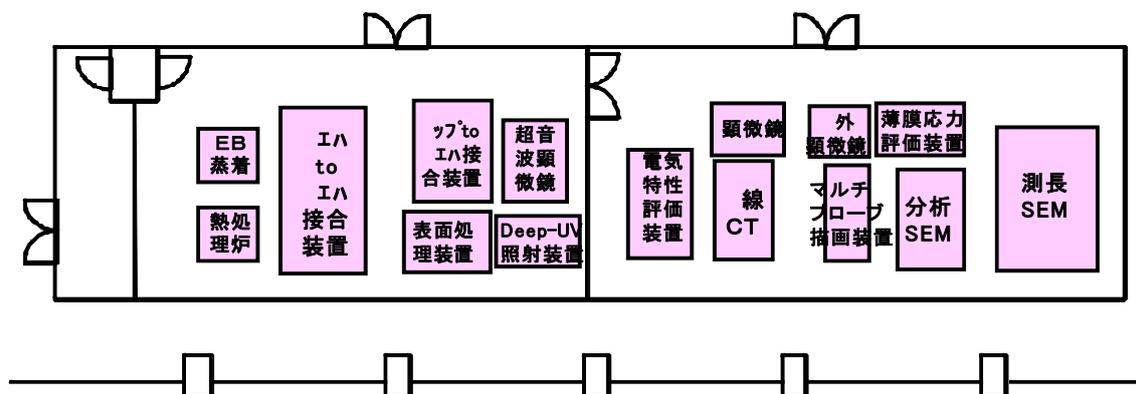
表V.1.2.3-1 最先端 8 インチライン導入設備一覧表

工程	プロセス/評価装置	設置場所
洗浄・乾燥	ディップ型/スピン型ウェハ洗浄装置(RCA洗浄)	前工程 クリーン ルーム TKB812F
	有機ドラフト、IPAペーパー乾燥装置、超純水精製装置	
リソグラフィ	マスクレス露光装置、i-線ステッパ、マスク露光機	
	コーターディベロッパ、アッシャー	
成膜	酸化炉、ボロン拡散炉、低温酸化膜TEOSプラズマCVD	
	シリコン窒化膜減圧CVD	
	リンドープポリシリコン膜減圧CVD	
	金属・圧電材料・絶縁膜スパッタ装置	
エッチング	シリコン深堀、酸化膜・窒化膜ドライエッチング(フッ素系ガス)	
	金属ドライエッチング装置(塩素系ガス)	
	シリコン異方性ウェットエッチング装置	
	酸化膜犠牲層エッチング装置	
評価	ウェハ検査装置、触針式段差測定機、反射分光膜厚計、光学顕微鏡	
接合・実装	チップtoウェハ接合装置、ウェハtoウェハ接合装置	後工程・評価 クリーン ルーム TKB812B
	レーザ・ステルスダイサー、ブレードダイサー(別棟に設置)	
	電子ビーム加熱真空蒸着、熱処理炉	
評価	測長電子顕微鏡、分析電子顕微鏡(元素分析、結晶解析)	
	ウェハスタブローバ、X線CT評価装置、薄膜応力評価装置	
	ウェハ表面観察装置、光学顕微鏡	

図V.1.2.3-1に前工程ライン (TKB812F) のレイアウト、図V.1.2.3-2に後工程・評価ライン (TKB812B) のレイアウトを示す。前工程クリーンルームは約 350m² の広さがあり、清浄度クラスは 1000 である。リソグラフィとウェットプロセス装置はそれぞれ仕切られたイエロー照明室に配置した。成膜、エッチング、プロセス中評価装置はメイン室に配置した。後工程・評価クリーンルームは約 150m² の広さで、清浄度クラスは前工程と同様に 1000 とした。接合・実装装置と評価装置を仕切られた 2 部屋にそれぞれ配置した。

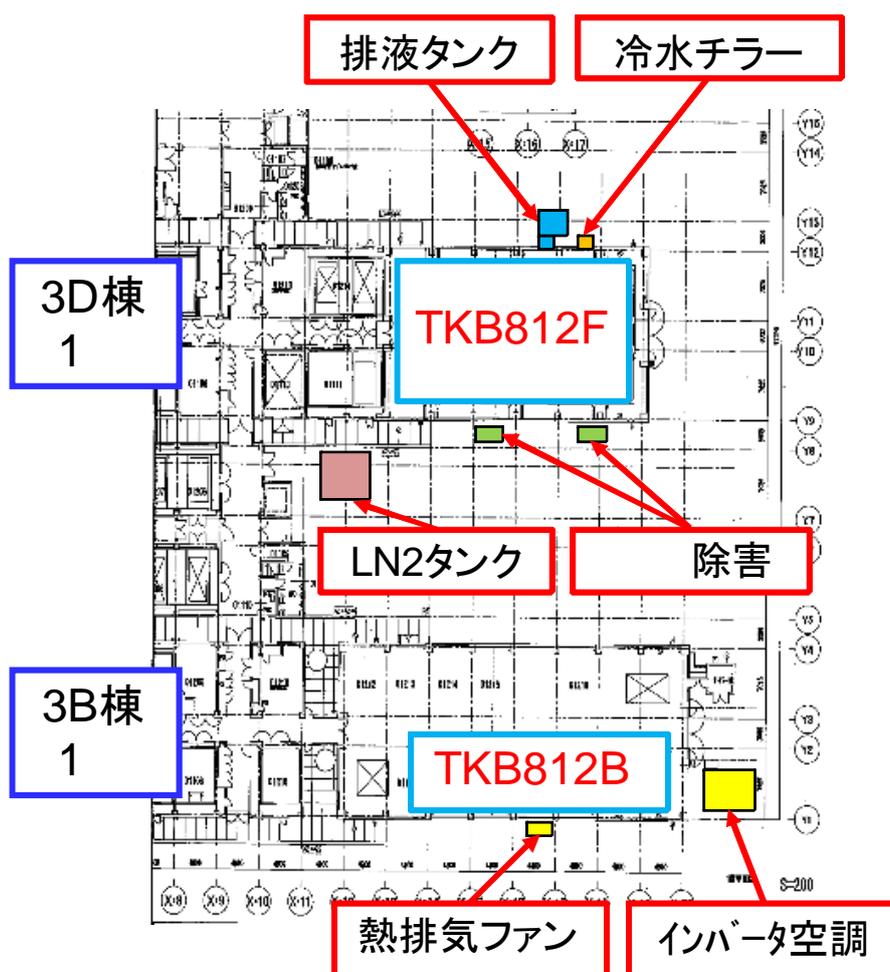


図V.1.2.3-1 前工程ライン (TKB812F) レイアウト



図V.1.2.3-2 後工程・評価ライン (TKB812B) レイアウト

図V.1.2.3-3に前工程、後工程・評価ラインにユーティリティを供給する屋外設備のレイアウトを示す。産総研つくば東事業所 3D 棟 1 階に前工程ライン(TKB812F)を設置し、その屋外ユーティリティ設備として、排液タンクと冷水チラーおよび緊急除害装置を設置した。後工程・評価ライン(TKB812B)は、同事業所 3B 棟 1 階に設置し、同じく屋外ユーティリティ設備として、熱排気ファンとインバータ空調装置を設置した。さらに両ラインに超高純度窒素ガスを供給する LN2(液体窒素)タンクを設置した。



図V.1.2.3-3 屋外ユーティリティ設備レイアウト

以下に、最先端 8 インチラインの代表的な装置を列記する。

図 V.1.2.3-4~9 に前工程ライン (TKB812F) 設置装置の外観と主な仕様・性能を示す。

ウェハ洗浄・乾燥装置として、超純水精製装置、スピン型ウェット洗浄装置、IPA ベーパー乾燥装置を設置し、産総研の 12 インチ対応ディップ型ウェット洗浄装置及びスピン乾燥装置と組み合わせて、半導体工程で必須の RCA 洗浄が可能になるよう配置した。

リソグラフィ装置としては、i-線ステッパ、マスク露光機、12 インチ対応アッシャーを設置し、産総研の 12 インチ対応マスクレス露光機とコーターディベロッパと相互の利用が可能になるように配置した。

拡散・酸化・成膜装置としては、酸化炉、ボロン拡散炉、12 インチ対応 TEOS プラズマ CVD 装置、シリコン窒化膜・リンドーパポリシリコン膜減圧 CVD 装置、金属・圧電材料・絶縁膜スパッタ装置を設置した。

エッチング装置としては、シリコン深堀エッチング装置、酸化膜・窒化膜エッチング装置、金属エッチング装置、シリコン異方性ウェットエッチング装置、酸化膜犠牲層エッチング装置を設置した。なお、シリコン深堀エッチングについては、産総研の大口径 (12 インチ) 対応装置も隣接・配置した。

さらに、プロセス中のウェハ評価装置として、ウェハ検査装置、触針式段差測定機、反射分光膜厚計、12 インチ対応光学顕微鏡を設置した。

<p>装置名：超純水精製装置</p>	<p>主な仕様・性能</p>
	<p>低グレード市水を原水とする超純水製造 抵抗率・水温・パーティクルの管理が可能。 抵抗率：18M cm 以上 水温：25 ± 2 パーティクル (0.1 μ m 以上) : 10 個/ml 以下 精製水量：1m³/h</p>
<p>装置名： スピン型ウェット洗浄装置</p>	<p>主な仕様・性能</p>
	<p>ウェハのspin型ウェット洗浄 (spin乾燥機能付き) 8インチウェハ枚葉処理方式 エッチング液調合・供給・廃液回収機能付属 洗浄プロセス： APM (アンモニア過酸化水素水洗浄) HPM (塩酸過酸化水素水洗浄) DHF (希釈フッ酸洗浄) QDR (超純水リンス洗浄)</p>
<p>装置名：IPA ベーパー乾燥装置</p>	<p>主な仕様・性能</p>
	<p>ウェハを IPA ベーパー雰囲気にして水分を除去・乾燥させる。 8インチウェハの5枚バッチ処理 スピン型ウェット洗浄装置及び Si 異方性ウェットエッチング装置と共通のウェハカセットを使用。</p>

図 V.1.2.3-4 最先端 8 インチライン装置(1)

装置名：i線ステッパ	主な仕様・性能
	<p>i線による 1/5 縮小投影ステップアンドリピート露光</p> <p>最小解像線幅：0.35 μm</p> <p>使用レチクル：6 インチ角</p> <p>標準レジスト厚さ：1 μm</p>
装置名：マスク露光機	主な仕様・性能
	<p>ラージギャップ・高段差露光、裏面アライメント対応マスクアライナ</p> <p>6、8 インチウェハ対応</p> <p>マスク寸法：7、9 インチ角</p> <p>露光モード：</p> <p>バキューム/ハードコンタクト露光</p> <p>プロキシミティ露光</p> <p>アライメント精度：±0.5 μm 以内</p> <p>標準レジスト厚さ：1 μm、10 μm</p>
装置名：アッシャー	主な仕様・性能
	<p>ウェハの酸素プラズマアッシング</p> <p>8 及び 12 ウェハ対応、2 バッチ処理</p>

図 V.1.2.3-5 最先端 8 インチライン装置(2)

装置名：酸化炉	主な仕様・性能
	<p>ウェット/ドライ熱酸化膜形成 水蒸気発生用燃焼器内蔵 8 インチウェハ 25 枚バッチ縦型チューブ 最高温度：1150 カセット・ツー・カセットウェハ搬送方式</p>
装置名：ボロン拡散炉	主な仕様・性能
	<p>ドライ方式ボロンドーピング 固体拡散ソース使用 8 インチウェハ 25 枚バッチ縦型チューブ カセット・ツー・カセットウェハ搬送方式</p>
装置名：TEOS プラズマ CVD 装置	主な仕様・性能
	<p>プラズマ CVD 低温酸化膜形成装置 TEOS 液体ソース内蔵 8、12 インチ対応バッチ処理装置 成膜温度：200</p>

図 V.1.2.3-6 最先端 8 インチライン装置(3)

装置名：シリコン窒化膜減圧 CVD 装置	主な仕様・性能
	減圧 CVD によるシリコン窒化膜形成 8 インチウェハ 25 枚バッチ縦型チューブ カセット・ツー・カセットウェハ搬送方式 内部応力制御成膜可能
装置名：P ドープ polySi 膜減圧 CVD 装置	主な仕様・性能
	減圧 CVD によるポリシリコン膜形成 8 インチウェハ 25 枚バッチ縦型チューブ カセット・ツー・カセットウェハ搬送方式
装置名：金属・圧電材料・絶縁膜スパッタ装置	主な仕様・性能
	3 チャンバ構成マグネトロンスパッタ装置 ターゲットへの DC/RF 電圧選択印加 8 インチウェハ対応 各種金属、圧電材料(ALN)、絶縁膜の成膜

図 V.1.2.3-6 最先端 8 インチライン装置(4)

装置名：Si 深堀エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>フッ素系ガス ICP ドライエッチング 8 インチ Si および SOI ウェハの ボッシュプロセスによる深堀り溝加工 プラズマ発光分光検出器付属 ウェハエッジ保護機能付属 カセット・ツー・カセット搬送方式</p>
装置名：酸化膜・窒化膜エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>フッ素系ガス ICP ドライエッチング 8 インチ Si ウェハ、Si 酸化膜・Si 窒化膜の 非ボッシュプロセスによる加工 エッチング終点判定機能付属 カセット・ツー・カセット搬送方式</p>
装置名：金属エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>塩素系ガス ICP ドライエッチング 8 インチ対応、金属、polySi、圧電膜加工 ウェハの腐食防止アッシングチャンバ付属 エッチング終点判定機能付属 カセット・ツー・カセット搬送方式</p>

図 V.1.2.3-7 最先端 8 インチライン装置(5)

装置名：Si 異方性ウェットエッチング装置	主な仕様・性能
	<p>TMAH 恒温薬品槽へのディッピングによるシリコン異方性エッチング</p> <p>8 インチウェハの 5 枚バッチ全自動搬送</p> <p>ウェハ処理槽内揺動による均一エッチング</p> <p>QDR 超純水リンス洗浄槽</p> <p>エッチング液濃度調整供給・廃液回収機能</p>
装置名：酸化膜犠牲層エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>フッ酸ベーパーによる酸化膜犠牲層のドライエッチング</p> <p>可動 MEMS 構造のドライリリース用</p> <p>終点判定機能付属</p>
装置名：大口径 Si 深堀エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>フッ素系ガス ICP ドライエッチング</p> <p>12 インチ Si および SOI ウェハのボッシュプロセスによる深堀り溝加工</p> <p>プラズマ発光分光検出器付属</p> <p>カセット・ツー・カセット搬送方式</p>

図 V.1.2.3-8 最先端 8 インチライン装置(6)

装置名：ウェハ検査装置	主な仕様・性能・特長
	<p>8インチウェハ面内の塵埃数カウント ステージ移動によるマッピング機能 粒子径分布ヒストグラム表示 検出粒子径：0.079－5.0 μm カセット・ツー・カセット搬送方式</p>
装置名：触針式段差測定機	主な仕様・性能
	<p>触針式表面プロファイル測定 先端角 20 度の鋭角スタイラス付属 プロファイル及びストレスマッピング機能 測定レンジ：5－300 μm 再現性：最小レンジで 1nm</p>
装置名：反射分光膜厚計	主な仕様・性能
	<p>反射分光方式非接触膜厚計 分光曲線フィッティングによる 屈折率及び膜厚測定 8 及び 12 インチウェハ対応 測定エリアは 8 インチ径以内 測定膜厚：10nm－40 μm 繰り返し精度：0.1%</p>

図 V.1.2.3-9 最先端 8 インチライン装置(7)

図V.1.2.3-10～13に後工程・評価ライン（TKB812B）設置装置の外観と主な仕様・性能を示す。

接合・封止装置として、チップ to 12 インチウェハ接合装置及びウェハ to ウェハ接合装置、表面処理装置、その他の関連装置を設置した。デバイスチップ切断装置としては、レーザ・ステルスダイサー及び 12 インチ対応ブレードダイサーを別棟に設置した。

実装用配線装置としては、電子ビーム加熱真空蒸着装置及び熱処理炉を設置した。また、デバイス表面の形状評価装置として、測長電子顕微鏡、分析電子顕微鏡、ウェハ表面観察装置、ウェハテスタプローバを設置した。さらに、デバイス内部の形状評価装置として、12 インチ対応 X 線 CT 評価装置、薄膜応力評価装置を設置した。

装置名：チップ to ウェハ接合装置	主な仕様・性能
	<p>8 及び 12 インチウェハ/チップ接合 チップ寸法：1-20mm角 接合温度：60-450 アライメント精度：±0.5 μm 以内</p>
装置名：ウェハ to ウェハ接合装置	主な仕様・性能
	<p>6 及び 8 インチウェハ同士の接合 6-12 インチウェハのプラズマ表面処理モジュール付属 接合チャンバ内でのウェハアライメント 陽極接合、プラズマ低温接合可能 接合温度：60-250 アライメント精度：±0.5 μm 以内</p>
装置名：レーザ・ステルスダイサー	主な仕様・性能
	<p>3-8 インチウェハのドライ切断 低ダメージ・レーザステルスダイシング カセット・ツー・カセット搬送方式 ステージ分解能：0.1 μm 送り速度：1-1000mm/s</p>

図V.1.2.3-10 最先端 8 インチライン装置(8)

装置名：ブレードダイサー	主な仕様・性能
	<p>最大 12 インチウェハのダイシングソー ダイヤモンドブレードによる切断 ステージ分解能：0.1 μm 送り速度：0.1–600mm/s</p>
装置名：電子ビーム加熱真空蒸着装置	主な仕様・性能・特長
	<p>電子ビーム及び抵抗加熱方式真空蒸着 8、12 インチウェハバッチ処理 加熱源/ウェハ間距離が両加熱方式でほぼ等しいチャンバ内配置 成膜速度例：30–60nm/分</p>
装置名：熱処理炉	主な仕様・性能
	<p>真空及び N2 ガスフロー熱処理 8 インチウェハ 10 枚バッチ 真空排気チューブ方式 最大加熱温度：600 オーミック電極シタリング処理</p>

図 V.1.2.3-11 最先端 8 インチライン装置(9)

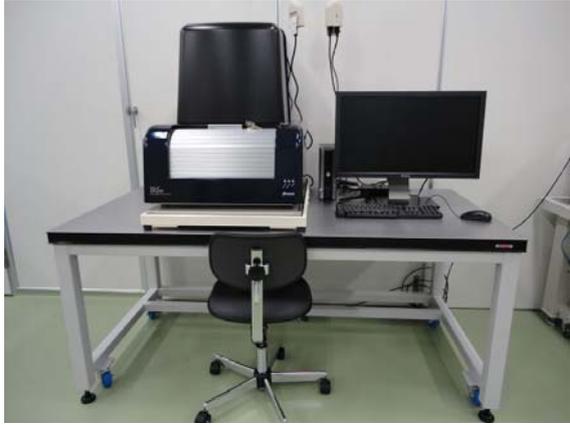
装置名：測長電子顕微鏡	主な仕様・性能
	<p>走査型測長電子顕微鏡 4、6、8 インチウェハ対応ステージ 測長範囲：0.1–2.0 μm 解像分解能：3nm 観察倍率：1000–300000 倍</p>
装置名：分析電子顕微鏡	主な仕様・性能・特長
	<p>ウェハ走査型電子顕微鏡 元素分析、結晶解析ユニット付属 試料ホルダ：チップ、4, 6, 8, 12”ウェハ 観察倍率：30–300000 倍</p>
装置名：ウェハ表面観察装置	主な仕様・性能
	<p>4、6、8 インチ対応光学顕微鏡 ステージ移動によるウェハ欠陥検査 最小検出欠陥(異物)寸法：2 μm 測定エリア：最大 8 インチ</p>

図 V.1.2.3-12 最先端 8 インチライン装置(10)

装置名：ウェハテスタプローバ	主な仕様・性能
	<p>8インチウェハレベル電气的特性評価 セミオートウェハ搬送 プローブカードによる大気中プローブ 容量計測・周波数解析機能 音響加振機能付属</p>
装置名：X線CT評価装置	主な仕様・性能
	<p>X線CTスキャン顕微鏡観察 チップ、8及び12インチウェハ対応 8インチエリアのウェハ観察 分解能：1μm程度 取込み画像ファイルのCADフォーマット 変換ソフト付属。</p>
装置名：薄膜応力評価装置	主な仕様・性能・特長
	<p>ウェハ反り量の非接触自動マッピング計測 内部応力値を換算評価 加熱中のin-situ計測による応力変化の温度 履歴評価機能 最高加熱温度：600</p>

図V.1.2.3-13 最先端8インチライン装置(11)

(4) まとめ

MEMS/LSI の前工程から後工程、評価までカバーする一貫ラインとして、ウェハの洗浄、リソグラフィ、拡散、酸化、成膜、エッチングから、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、さらに、デバイス表面及び内部の形状評価までを実施する装置を導入し、各研究テーマの実証に供することで、研究開発目標を 100%達成した。

本研究成果で得られた装置と各研究テーマ実行のために立ち上げた加工プロセスを基にして、将来の TIA-NMEMS 拠点としてのオープンイノベーションセンター(MNOIC) の標準 MEMS デバイス製造メニューにブラッシュアップし、新デバイスプロトタイピングから量産化に至る早期実用化開発に役立つ最先端 MEMS ラインを目指す。

1. 3 植物工場センサネットワークシステムの開発

(1) 研究目的

1) 植物工場の概要

植物工場は、施設内の環境及び植物の生育をモニタリングして、高度な環境制御を行うことにより、野菜等の植物の周年・計画生産が可能な栽培施設である。植物工場は、完全人工光型と太陽光利用型の2種類のタイプに分けることができる。完全人工光型植物工場は、閉鎖環境で太陽光を用いずに人工光を利用して栽培する設備である。太陽光利用型植物工場は、温室等において、太陽光の利用を基本とし、人工光による補光や夏季の高温抑制技術等を用いて栽培する設備である。

植物工場には、以下に示す利点と将来性がある。

() 運営

季節・天候に左右されない。地域や土地を選ばない。マーケットインの農業生産が可能。異業種からの参入が可能。

() 生産性

単位面積当りの生産性が高い。環境と生育のモニタリングと生育予測に基づいた計画的・安定的な生産が可能。

() 品質向上・需要創出

養水分制御による食味の向上。アクや苦味が少ない作物の生産。医薬品、機能性食品（サプリメント）向け等新しい作物（新需要）の栽培が期待できる。

() 安全性

農薬が少ない。虫・異物の混入が少ない。雑菌が少なく日持ちする。エグミのない、洗わずに食べることが可能な野菜の提供。生産履歴（トレーサビリティ）が正確である。

() 作業環境

労働の平準化、作業環境の快適化、軽労化。若い人の農業産業への参画を促す。

2) 研究背景と目的

上記のような将来性のある植物工場であるが、植物工場の制御方法には、以下の課題があった。

- ・植物工場内にセンサが1個であり、植物工場内のきめ細かな環境計測ができていない。
- ・植物工場で使用する消費エネルギーの分析ができていない。
- ・植物工場用のセンサが高価である。

そこで、植物工場にセンサネットワークシステム（以下、センサネットと略す）を導入し、きめ細かな計測制御を実現することにより、生産計測設備の省資源化、高効率化および作物の収穫量改善を評価検証する。本研究の目的は、以下の通りである。

(i) 植物工場において作物の生育を促進するための生産計測設備の省資源化、高効率化に最も適したセンサネットの検討

(ii) 省エネルギー、生産性の高い作物栽培などの効果を分析するセンサネットの適用による省資源化、高効率化の効果の検証

(iii) 植物工場に適した MEMS デバイスに求められる機能の検証

本研究における省エネの数値目標は、エネルギーの 20%削減と、植物の収穫量の 10%改善とする。収穫量の 10%改善は、エネルギーの 10%削減と同等の効果とする。

(2) 植物工場センサネットの検討

1) 植物工場センサネットの提案

植物工場の制御設備の中で、センサネットによる省エネや収量改善に効果がある方法を検討した。検討内容を表 V.1.3.2.1-1 に示す。

表 V.1.3.2.1-1 植物工場へのセンサネット適用検討一覧表

NO	分類		提案システム構成	センサの種類
1	きめ細かな環境制御	空調	温風ボイラー+ヒートポンプ	温度センサ
2		照明	太陽光+LED 補光照明	日射センサ
3	夏季の高温対策	細霧冷却	ノズル+ファン	温湿度センサ、風量/風向センサ
4	養液栽培適性品種の育成	高糖度トマト	灌液チューブ+電磁弁+流量計	土壌水分センサ、電磁弁
5		夏季のいちご	クラウン冷却システム、一株単位での温度制御	温度センサ
6		土壌センシング	土壌の管理	PH、電気伝導度 (EC)、リン酸吸収係数、塩基置換容量 (CEC)、塩基飽和度
7		水養液センシング	水養液の管理	硝酸態窒素、アンモニア態窒素
8	雑菌・病気対策 (リスク対策)	菌数管理	パーティクルカウンタ+ファン	パーティクルカウンタ
9	人件費削減	作業者監視		位置検知

今回の実験では、この中で、特に省エネの効果が高いと想定される下記の 4 つの方法を実証し、評価することとした。これらの方法の共通点は、栽培エリアを分割し、分割したエリア毎に独立制御できるようにし、各栽培エリアにセンサを配置し、そのセンサ情報を利用して、効率的な省エネ制御、栽培制御を評価するものである。センサ、および計測部分をセンサネットで実現するものである。

(i) 細霧冷却システム（上記表の No3）

夏の暑い時期に植物工場の中は、高温になり冷却が必要になる。冷却方法としては、細霧冷却方法が有効である。細霧冷却は、細霧の気化熱により温室内の温度を下げる方式である。湿度が 100%に近くなると、細霧が気化しなくなるため、この状態で噴霧を続けても効果が少ない。従来は、晴れの日を想定して、噴霧する水量をタイマで制御していた。このため、雨や曇りの日には、過剰な噴霧を行っていた。

そこで、湿度をモニタリングして噴霧出力のオンオフ制御を行なう方式を提案した。湿度をモニタすることにより、湿度が高い時の噴霧量を抑制できる。複数の温度センサ、湿度センサと噴霧装置を栽培エリア毎に設置し、そのエリアの温度と湿度に応じて、細霧冷却装置の噴霧量を制御することとする。なお細霧冷却装置は、ファンと一体型の噴霧器とする。

(ii) 補光照明システム（上記表の No2）

植物を計画的に安定出荷するためには、日照時間確保が必要である。植物を効率よく栽培するためには、2500 時間/年の日射時間が望まれる。日照不足を補完するには補光照明が有効である。複数の日射センサと補光照明を栽培エリア毎に設置し、その日射量に応じて、補光照明を制御する。補光照明としては、オンオフの切り替えが容易な LED 照明を評価する。

(iii) 冬季暖房システム（上記表の No1）

冬季の低温は、植物の成長を著しく妨げる。植物を計画的に安定出荷するためには、冬季の暖房による作物の生育を促す必要がある。複数の温度センサと暖房装置を栽培エリア毎に設置し、各エリアの温度に応じて、暖房装置を制御する。暖房装置としては、エリア毎の設置が容易なヒートポンプと、外部温度が低い時に暖房効率の良いガスボイラーを併用する。

(iv) 土壌灌水システムの省エネルギー評価実験（上記表の No4）

ミニトマトの栽培には、土壌灌水の管理が重要である。従来は、晴れの日を想定して、灌水量をタイマで制御していた。このため、雨や曇りの日には、過剰な灌水を行っていた。本実験では、トマトの栽培を行なう培地（ロックウール等）の水分をモニタし、トマトの栽培に使用する水量を削減できる制御方式とする。複数の土壌水分センサと灌水装置を栽培エリア毎に設置し、その土壌の水分量に応じて、灌水量を制御する。

2) 評価用植物工場の構成

本研究における実証実験の環境は、下記の方針で構築した。

(i) MEMS によるセンサネット構築を前提とし、その効果を検証するために既存のディスプレイのセンサを活用した植物工場の省エネ評価環境を構築する。

(ii) 本実験では、太陽光併用型植物工場を評価する。

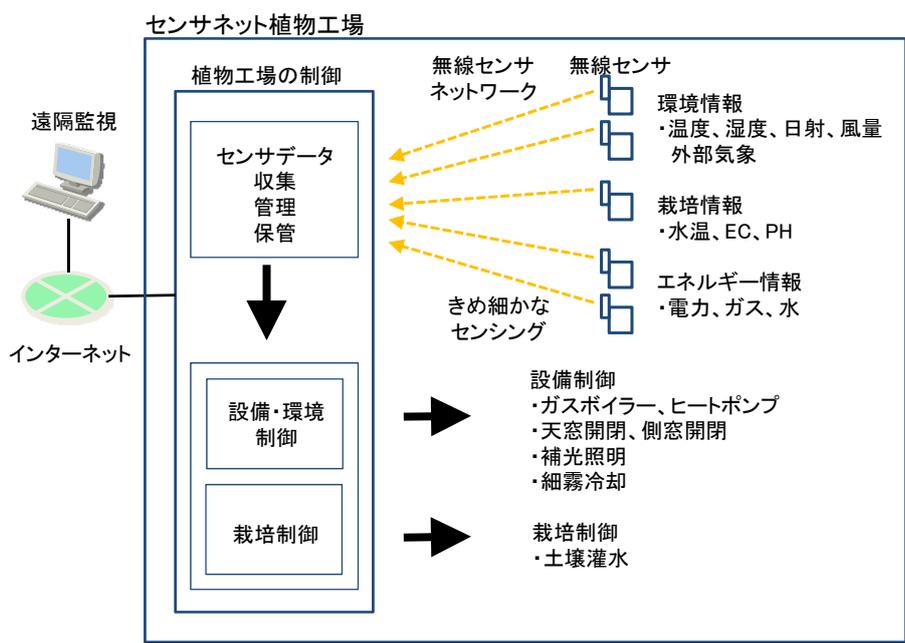
(iii) 評価方法は、一般的な植物工場の設備と、センサネットを活用した省エネ設備の二

つの設備を同じ場所に構築し、同じ環境で同じ作物を栽培し、省エネの効果と植物の秀品率を評価する。

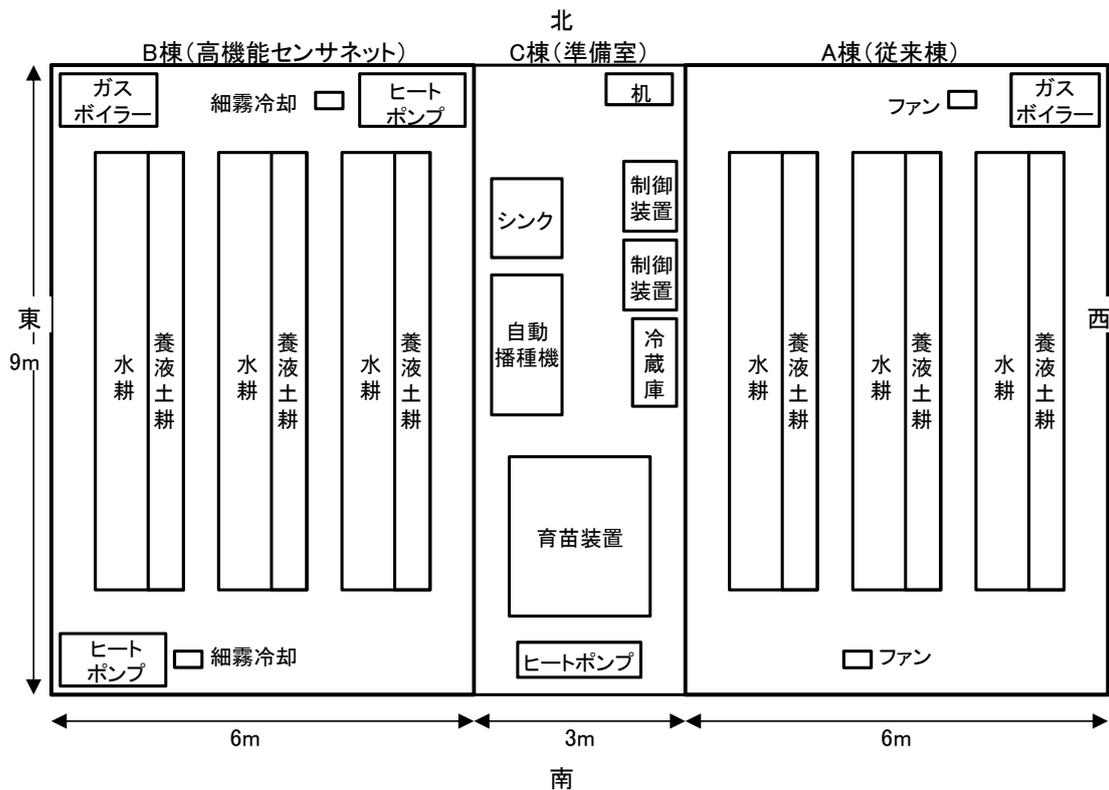
図V.1.3.2.2-1にセンサネット植物工場概念図を示す。植物工場の制御部は、センサデータの収集、管理、保管、設備・環境の制御および栽培制御を行なう。各種センサは、無線または有線のネットワークで接続され、植物工場の制御部は、これらのデータを元に設備や環境を制御する。なお、収集したデータは、インターネット経由で遠隔監視することが可能である。

図V.1.3.2.2-2に評価用植物工場の構成図を示す。従来の設備を利用した一般的な植物工場（A棟）と、センサネットを活用した省エネ植物工場（B棟）を同じ場所に構築し、省エネおよび収穫量を比較できるようにした。本研究で提案する方式は、B棟の設備に採用する。C棟は準備室である。A棟、B棟の大きさは同じで、9m×6m（54m²）である。植物工場方向は、図の上側が北、下側が南、A棟が東、B棟が西になる。

図V.1.3.2.2-3に構築した評価用植物工場の概観を示す。本実験は、東京農業大学の世田谷キャンパスのエコテクゾーンで行なわれた。



図V.1.3.2.2-1 センサネット植物工場概念図



図V.1.3.2.2-2 評価用植物工場の構成図



図V.1.3.2.2-3 評価用植物工場の概観

表V.1.3.2.2-1にA棟とB棟の設備の比較を示す。A棟の設備は、従来型の植物工場の設備である。B棟は、センサネット評価用の設備であり、本提案の細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌灌水システムの実験ができる。表V.1.3.2.2-2に植物工場用センサネットで利用したセンサの一覧を示す。環境計測用として、温度、湿度、風量、日射、土壌水分を計測できるようにした。また、エネルギーは、水量、ガス量、電力量を計測できるようにし

た。以下、各実験設備の詳細仕様を説明する。

表V.1.3.2.2-1 A棟とB棟の比較

実験内容		A棟(従来棟)	B棟(センサネット適用多点計測)
細霧冷却	設備	ノズル	ファン+ノズル(2ブロック分割制御)
	制御方式	温度とタイマによるオンオフ制御	温度、湿度を監視してオンオフ制御
	省エネ評価	水の使用量	同左
	収穫量評価	-	-
補光照明	設備	ナトリウムランプ	LED(4ブロック分割制御)
	制御方式	日射量によるオンオフ制御	日射量によるオンオフ制御
	省エネ評価	補光照明の電力量	同左
	収穫量評価	秀品率	同左
冬季暖房	設備	ガスボイラー	ガスボイラー+ヒートポンプ(2ブロック分割制御)
	制御方式	温度によるオンオフ制御	温度によるオンオフ制御
	省エネ評価	エネルギー使用量をCO ₂ 換算値にて評価	同左
	収穫量評価	秀品率	同左
土壌灌水	設備	灌水システム	灌水システム(3ブロック分割制御)
	制御方式	タイマによるオンオフ制御	土壌水分によるオンオフ制御
	省エネ効果	水の使用量	同左
	収穫量評価	秀品率	同左

表V.1.3.2.2-2 植物工場用センサー一覧

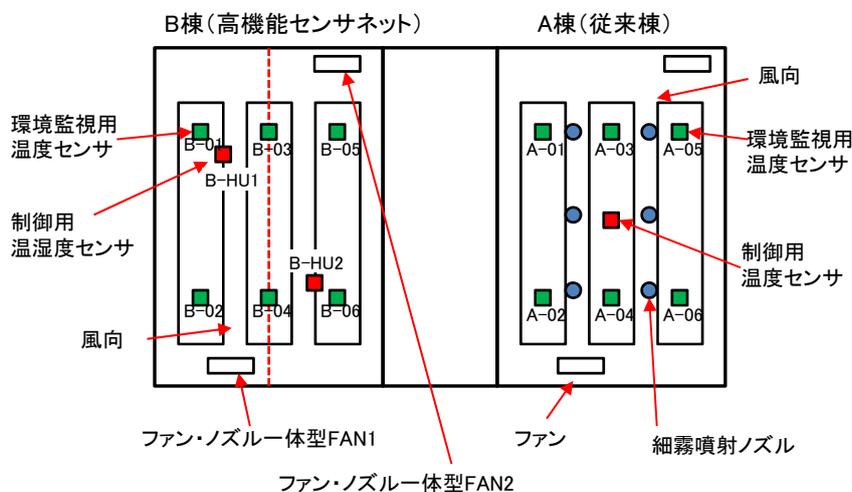
項目	センサの種類	センサ電源、 センサインタフェース
環境計測	温湿度 ・SHT11(センシリオン) 温度センサ(サーミスタ)	電源、インタフェース共にセンサノードに内蔵
	風量 風量センサ:風量 0~1m/秒 ・D6F-W01A1(オムロン)	電源 12V 出力 DC 1~5V
	日射 日射センサ:日射量 0~1.750W/m ² ・PYR 全天日射計(Apogee)	電源 無し 出力 0~250mV
	土壌水分 土壌水分センサ:土壌水分、温度、EC ・5TE(デカゴン)	電源 5V 出力 専用シリアル(DIO)

エネルギー計測	電力量	積算電力量計 ・TWPS (タケモトデンキ)	電源 AC100V/AC200V 出力 RS485
	水量	流量計 ・EDS20Q-8452 (愛知時計電気)	電源 無し 出力 パルス(1L/パルス)
	ガス量	ガスセンサ ・NDS-NS (金門製作所)	電源 無し 出力 パルス(100L/パルス)

1 細霧冷却システム

図V.1.3.2.2.1-1に、細霧冷却の実験設備の構成図を示す。A棟の細霧冷却設備は、ファンとノズルタイプ噴霧器から構成される。制御用の温度センサは1ヶ所とし、噴霧のオンオフ制御はタイマ制御とする。

B棟の細霧冷却装置は、ファンと一体型の噴霧器にて構成される。細霧冷却装置を2台(FAN1、FAN2)設置し、それぞれの装置に温湿度センサ(B-HU1、B-HU2)を設置する。噴霧器出力は、湿度センサの出力により制御される。



図V.1.3.2.2.1-1 細霧冷却の実験設備の構成図

以下、実験の概要を説明する。

() 制御方法

A棟は、細霧冷却が稼動する温度を設定し、温度がそのしきい値以上になると細霧を噴霧する制御方法とする。噴霧時間はタイマ制御とする。

B棟は、細霧冷却が稼動する温度と湿度を設定し、温度がそのしきい値以上でかつ湿度が設定範囲内の場合に細霧を噴霧する制御方法とする。

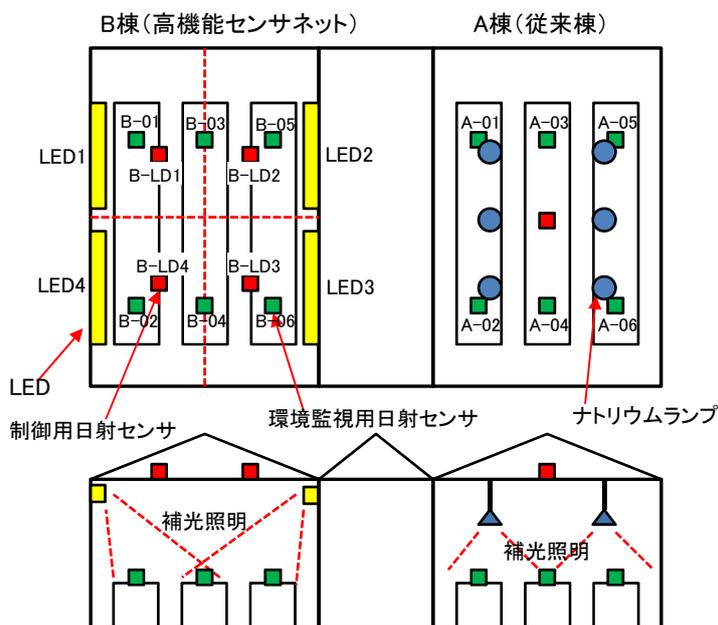
() 給水量の測定

細霧冷却装置のポンプ部に給水された水量をパルス発信装置付き水量計にて計測する。水量計は、A棟、B棟別に設置され、それぞれパルス入力インターフェース付きの無線センサノードに接続され、計測データは無線で収集される。

2 補光照明システム

図V.1.3.2.2.2-1に補光照明の実験設備の構成図を示す。A棟の補光照明は、高圧ナトリウムランプである。日射センサは1個設置し、このセンサで補光照明のオンオフを制御する。

B棟の補光照明は、LED照明である。LEDの照射エリアを4分割し、それぞれのLED(LED1~LED4)を独立にオンオフ制御できるようにした。オンオフ制御のための日射センサは、それぞれのLEDに対応して4個(B-LD1~BLD4)用意した。各照射エリアで、日射量が異なれば、独立に制御することにより、無駄な補光照明を抑えることが可能となる。



図V.1.3.2.2.2-1 補光照明の実験設備の構成図

以下、実験の概要を説明する。

() 制御方法

補光照明動作時間は、A棟B棟共通で、7時~19時(12時間/日)とする。この時間内で、

日射量が所定のしきい値以下の場合に、補光照明が点灯するようにする。補光照明の点灯するのは、朝方、夕方および天気の良い日である。A棟は、1個の日射センサで補光を制御する。B棟は、栽培エリアを4分割（東西南北）し、各エリアを4個の補光照明で、独立制御するようにする。

() 電力量の測定方法

A棟は全体で1系統、B棟は4エリア分割で4系統の電力を電力量計にて集計する。電力量計と無線センサノードは、RS485 インタフェースで接続される。

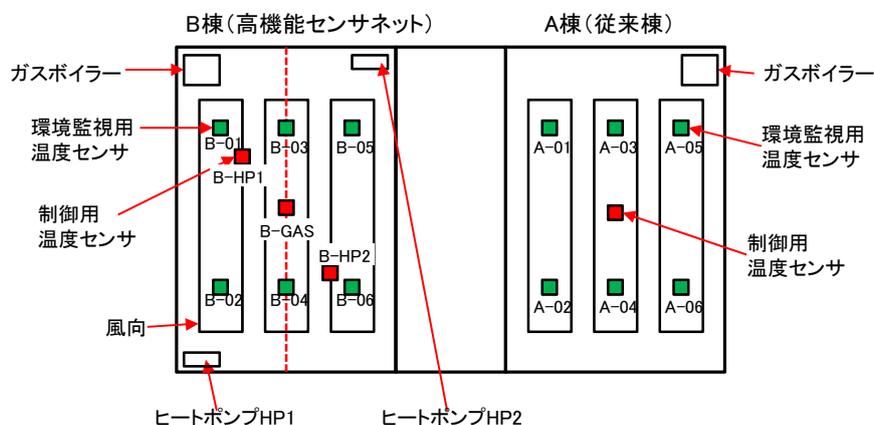
() 収穫量の評価方法

A棟、B棟共に、リーフレタスを栽培し、その秀品率で比較する。

3 冬季暖房システム

図V.1.3.2.2.3-1に冬季暖房の実験設備の構成図を示す。A棟は、ガスボイラーとする。制御用温度センサは1ヶ所とする。

B棟は、ガスボイラー1台とヒートポンプ2台（HP1、HP2）のハイブリッド構成とする。温度センサは、3ヶ所（B-GAS、B-HP1、B-HP2）に用意し、それぞれの暖房装置を独立に制御できるようにする。



図V.1.3.2.2.3-1 冬季暖房の実験設備の構成図

以下、実験の概要を説明する。

() 制御方法

設定温度は、A棟、B棟共通である。暖房稼働温度は、13℃以下で、暖房停止温度を14

以上とする。また、B棟では、ヒートポンプとガスボイラーの切り替え温度を外気温で制御することにした。外気温が0℃以上の時は、ヒートポンプが稼動し、外気温0℃以下の時ガスボイラーが稼動する。

() エネルギー使用量の測定方法

A棟、B棟のガス使用量は、パルス発信装置付きガスメータにて計測する。ガスメータは、A棟、B棟別に設置され、それぞれパルス入力インタフェース付きの無線センサノードに接続され、計測データは無線で収集される。B棟のヒートポンプの電力量は、2台の電力を電力量計にて集計する。電力量計と無線センサノードは、RS485インタフェースで接続され、計測データは無線で収集される。

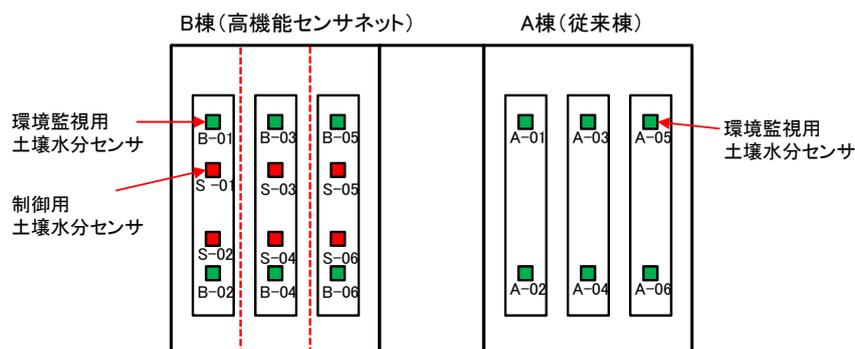
() 収穫量の評価方法

A棟、B棟共に、リーフレタスを栽培し、その秀品率で比較する。

4 土壌灌水システム

図V.1.3.2.2.4-1に土壌灌水の実験設備の構成を示す。A棟は、土壌水分センサを利用せず、培地に与える水量をタイマで管理する方法とする。

B棟は、培地に与える水量を土壌水分センサでモニタ（S-01～S-06）し、その土壌水分に応じて、灌水量を制御するものとする。土壌水分センサ、灌水用のバルブは栽培エリアの6ヶ所に設置し、それぞれが独立に制御できるようにした。



図V.1.3.2.2.4-1 土壌灌水の実験設備の構成図

以下、実験設備の概要を示す。

() 制御方法

灌水の時間周期の設定は下記の通りとする。A棟は、1日4回（0時、6時、12時、18時に1分間の灌水をタイマ制御にて行なう。B棟は、土壌湿度を計測し、その計測値がしきい値以下の場合のみ1分間灌水するようにした。

（ ） 給水量の測定

土壌に給水された水量をパルス発信装置付き水量計にて計測する。水量計は、A棟、B棟別に設置され、それぞれパルス入力インタフェース付きの無線センサノードに接続され、計測データは無線で収集される。

（ ） 収穫量の評価方法

A棟、B棟共にミニトマトを栽培し、トマトの糖度を評価する。

(3) 植物工場センサネット実験結果およびその評価

1) 細霧冷却の実験結果

細霧冷却は夏に行なう実験であるが、日程の都合上12月に行なった。本実験環境は、大きな温室（東京農大の既設設備）の中に植物工場の設備を設置したので、昼間の植物工場の外の温度（大きな温室の中の温度）は、40℃近くになり、細霧冷却の実験が可能となった。

細霧冷却の実験パラメータを、表V.1.3.3.1-1に示す。

表V.1.3.3.1-1 細霧冷却の実験パラメータ

制御項目	A棟	B棟
細霧冷却の稼働しきい値	25℃以上で稼働	同左
細霧冷却稼働中のオンオフ制御	稼働時間はタイマ管理で、15秒稼働、30秒停止を繰り返す。温度が稼働しきい値を下回ると停止。	稼働期間は湿度センサで管理、湿度が80%以上で停止、70%以下で稼働を繰り返す。温度が稼働しきい値を下回ると停止。

細霧冷却実験における実験結果を以下に示す。

(i) 温度制御

B棟（センサネット棟）には、2台の細霧冷却装置（ファン+ノズルタイプ）を設置し、同時に動作させた。細霧冷却稼働中の温室内の温度と湿度の分布を図V.1.3.3.1-1、図1.3.3.1.3に示す。噴霧を行なうと、湿度が上昇し、その気化熱で温度が下がるが、直に温度が上昇し、再度噴霧を行なうという制御が繰り返し発生している。この期間の温度分布は、栽培室の中で23℃～33℃になっている。また、湿度は、管理幅70～80%に対して、60%～90%の間で分布している。

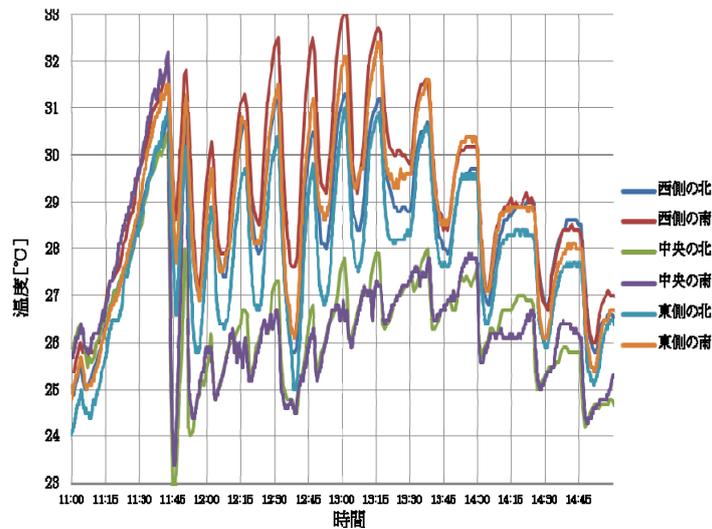


図 V.1.3.3.1-1 B 棟の温度分布

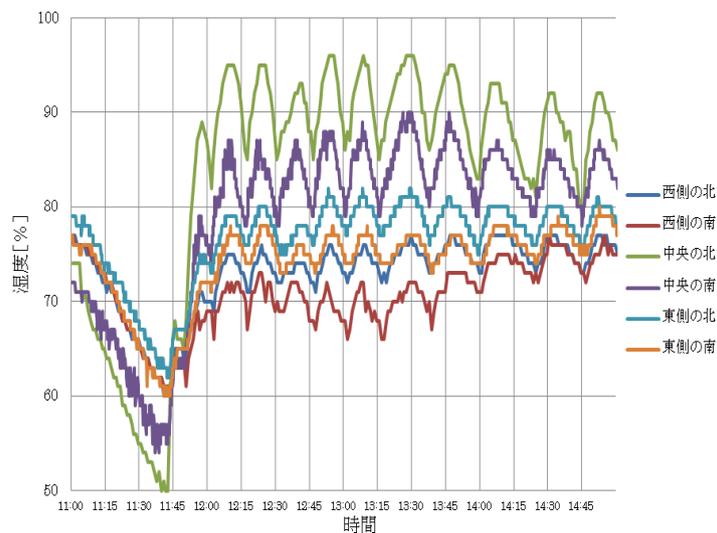


図 V.1.3.3.1.3 B 棟の湿度分布

表 V.1.3.3.1-3 に、計測した温度データの平均値を示す。細霧を噴出している時間帯では、温室の中心部分の温度が、周辺に比べて低くなっていた。これは、細霧冷却設備 1、2 の両方の細霧噴射の冷却効果によるものと考えられる。今回の実験環境では、2 台の細霧冷却設備の設置位置が近かったためだと思われる。よって、各細霧冷却設備の間にセンサーを設置し、この部分の温度をモニタすることにより、噴霧量の調整が可能となる。

実際の植物工場に本提案の細霧冷却装置を適用する場合には、各細霧冷却設備間の距離が最適になるよう、温室内を適当なエリアに区分けし、その区分けしたエリアに細霧冷却装置を一台ずつ設置し、それらの装置が自律分散的に動作する制御方式が適すると考えられる。

表V.1.3.3.1.3 B棟の細霧冷却時の温度の平均値

設置位置	西側	中央	東側
北側	28.5	26.4	27.8
南側	29.2	26.5	28.7

(ii) 水の使用量

表V.1.3.3.1-3にA棟とB棟の水の使用量の比較を示す。A棟の水の使用量は、約60リットル/日、B棟の使用量は、15リットル/日であった。B棟の水の使用量は、A棟の約25%であった。本結果から、提案した湿度センサによる制御方式は、水の使用量の削減に効果があることが分かった。

表V.1.3.3.1-3 A棟とB棟の水の使用量の比較

項目	A棟	B棟	備考
細霧冷却用水量(リットル)	60	15	1日の使用量

(iii) 結露

細霧冷却では、結露による液だれの防止が重要である。結露が発生すると水滴が植物の葉に落ち、この水滴がレンズの役割をして、葉焼けを起こす可能性がある。葉焼けすると作物の品質が下がる。

A棟のタイマによる細霧の噴射量を制御する方式では、温室内の湿度によらず、細霧を噴霧するため、温室内の湿度が100%を超えても細霧の噴射を停止することができなかった。このため、A棟の栽培室が結露し、水滴が溜まる現象も発生した。湿度で制御するB棟の場合には、結露は発生しなかった。

2) 補光照明の評価

補光照明の実験パラメータを表V.1.3.3.2-1に示す。栽培する植物は、リーフレタスで、栽培期間は12月7日～1月5日であった。

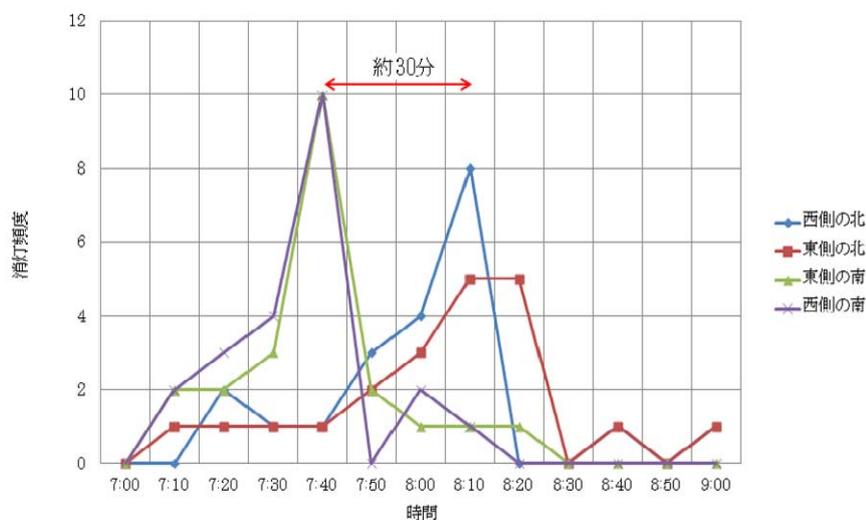
表V.1.3.3.2-1 補光照明の実験パラメータ

制御項目	A棟	B棟
補光照明の稼働しきい値	0.006kW/m ² 以下で稼働	同左
補光照明稼働時間	7時～19時(日射時間は12時間/日)	同左

(i) 日射量の分布評価

補光照明の照射時間を1ヶ月評価した。補光は、夕方と朝方に行なった。夕方の点灯時間に関して、大きな差は見られなかった。朝方の消灯時間に関しては、図V.1.3.3.2-1に示すように、南側と北側で約30分の時間差が見られた。栽培エリアの西側と東側では、消灯時間に大きな差は見られなかった。この結果、本実証実験の環境では、栽培エリアの北

側と南側に各1個の日射センサを設置し、南側と北側のLEDを独立に制御することにより、省エネを実現できることが分かった。



図V.1.3.3.2-1 朝方の消灯時間の差のグラフ

(ii) 電力使用量の評価

A棟のナトリウムランプとB棟のLEDの消費電力を比較する。その比較結果を表V.1.3.3.2-1に示す。B棟の消費電力は、A棟の約30%である。これにより、LEDによる省エネ効果を確認できた。

表V.1.3.3.2-1 LEDとナトリウムランプの電力量の比較

項目	A棟	B棟
電力使用量	9.3 kWh/日	2.5 kWh/日

表V.1.3.3.2-2に、4つのLEDの電力使用量の比較を示す。南側と北側で約10%の消費電力の差がある。

表2.3.2-2 4つのLEDの電力使用量の比較

項目	電力使用量
LED1 (北側の西)	0.67kWh/日
LED2 (北側の東)	0.67kWh/日
LED3 (南側の東)	0.60kWh/日
LED4 (南側の西)	0.58kWh/日

(iii) 収量の評価

補光照明の実験では、暖房機能をなるべく使わないようにしたため、夜間の温度が低く、生育が遅れた。このため、収穫量の評価は、作物の大きさではなく、大きさのばらつきで評価することとした。

秀品率は、A棟、B棟それぞれのリーフレタスの1本当りの平均重量を基準として、平均重量の50%以下を不良品として秀品率を算出した。この結果を表V.1.3.3.2-3に示す。B棟の秀品率は、A棟よりも約10%改善されている。図V.1.3.3.2-2にリーフレタスの栽培状況を示す。

表V.1.3.3.2-3 A棟とB棟の秀品率の比較表

項目	A棟	B棟
栽培本数	144	144
総重量の平均値(根含む)	5.2g	8.8g
葉重量の平均値(葉のみ)	2.9g	5.8g
秀品本数	126	143
秀品率	88%	99%

(注)秀品率の定義：作物の葉重量の平均の50%以下を不良品とする。



図V.1.3.3.2-2 リーフレタスの栽培状況

() 補光照明の照度分布の評価

A棟の秀品率が下がった原因として下記が考えられる。

ナトリウムランプは、栽培エリア内での光量のばらつきが大きい可能性がある、ランプの下は明るい、ランプから離れると暗くなる。ナトリウムランプのシェード(直径約45cmのかさ)が昼間の太陽光の影になる。ナトリウムランプは、点灯してから光量が安定するのに5分程度必要で、この期間の補光照明の効果が少ない可能性がある。

図V.1.3.3.2-2、図V.1.3.3.2-3にA棟の補光照明の照度分布図と、植物の重量の分布図を示す。図V.1.3.3.2-4、図V.1.3.3.2-5に、B棟の補光照明の照度分布図と、植物の重量の分布図を示す。

A棟では、中央の栽培エリアでは、補光照明の照度は低くなっているが、この部分の植物の成長は悪くない。秀品率の低下は、ナトリウムランプのシェードが、太陽光を遮った影響である可能性が高い。

B棟では、中央の栽培エリアのLEDの照度が低いため、これが原因で中央エリアの成長

がやや遅くなった可能性がある。照度分布を一定になるように調整すれば、さらに成長のばらつきを抑えられる可能性がある。

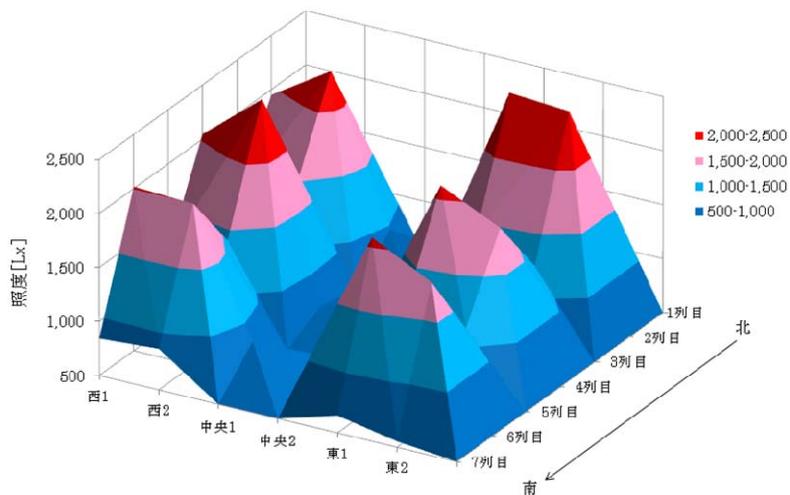


図 V.1.3.3.2-2 A 棟の補光照明の照度分布図

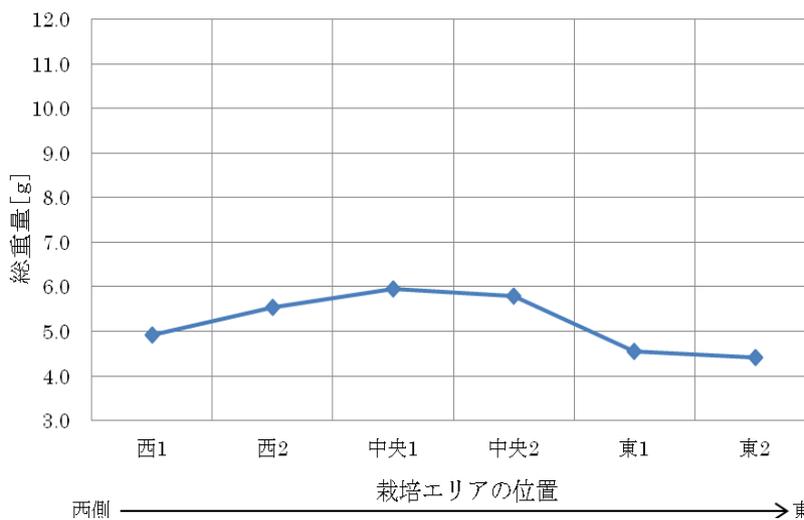


図 V.1.3.3.2-3 A 棟の植物の重量の分布図 (栽培エリアの西から東の分布)

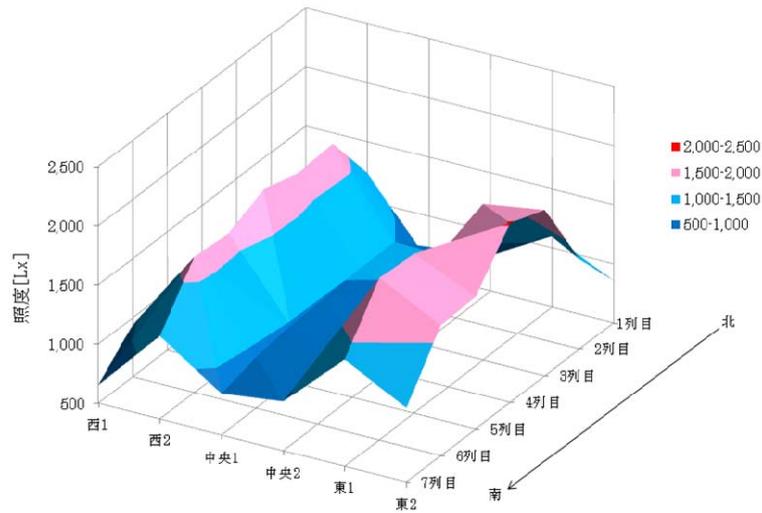


図 V.1.3.3.2-4 B棟の補光照明の照度分布図

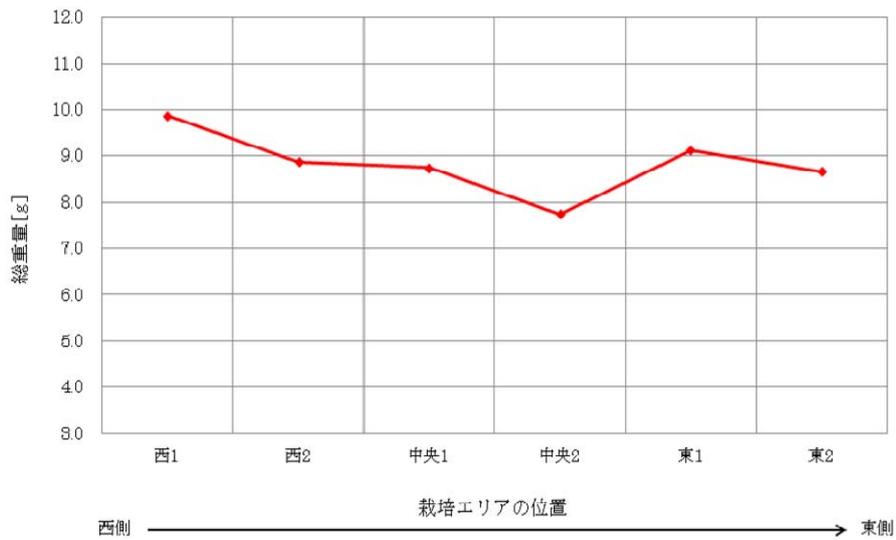


図 V.1.3.3.2-5 B棟の植物の重量の分布図（栽培エリアの西から東の分布）

3) 冬季暖房の評価

冬季暖房の実験パラメータを表 V.1.3.3.3-1 に示す。栽培する植物はリーフレタスで、栽培期間は1月11日～2月15日である。

表 V.1.3.3.3-1 冬季暖房の実験パラメータ

制御項目	A棟	B棟
冬季暖房稼働しきい値	13℃以下で稼働、14℃以上で停止	同左
ガスボイラーとヒートポンプの切り替え方法	ガスボイラーのみ	外気温が0℃以上の場合ヒートポンプを稼働、0℃以下の場合ガスボイラーを稼働

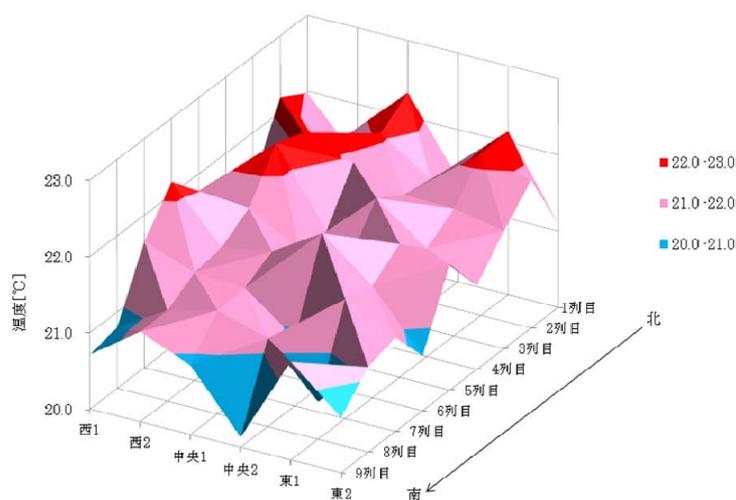
実験結果を以下に示す。

B棟の栽培エリアの温度分布を調査した。図V.1.3.3.3-1、図V.1.3.3.3-2、図V.1.3.3.3-3に、ヒートポンプ1台で暖房した場合、ヒートポンプ2台で暖房した場合、ガスボイラーで暖房した場合の温度分布を示す。

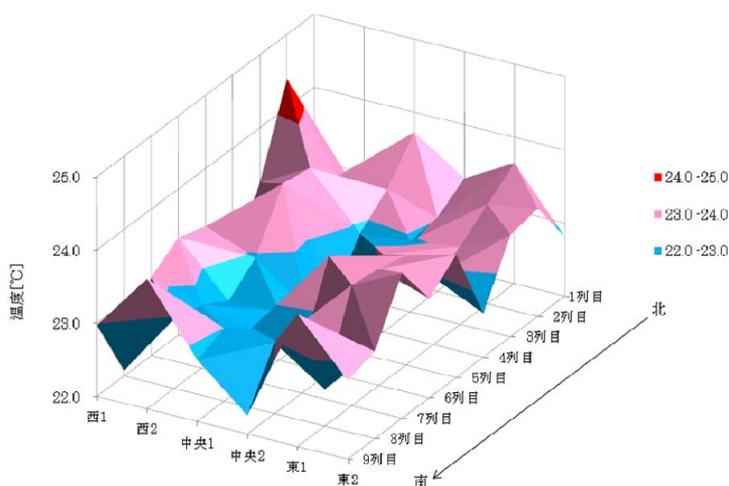
ヒートポンプ1台の実験は、栽培室の南西に設置されているヒートポンプ1を利用した。この場合は、ヒートポンプからの温風が吹き出す方向（栽培室の北側）は、暖められるが、ヒートポンプの横（栽培室の南側）が暖まりにくいという傾向が見られる。

ヒートポンプ2台で暖房した場合は、栽培室全体が均一に暖められる傾向が見られる。

ガスボイラーで暖房した場合は、栽培室の南西および西側が暖まりにくいという傾向が見られる。これは、ガスボイラーの設置位置が、栽培室の西北であり、温風の吹き出し方向が東南東のためだと思われる。



図V.1.3.3.3-1 ヒートポンプ1台で暖房した場合のB棟の温度分布



図V.1.3.3.3-2 ヒートポンプ2台で暖房した場合のB棟の温度分布

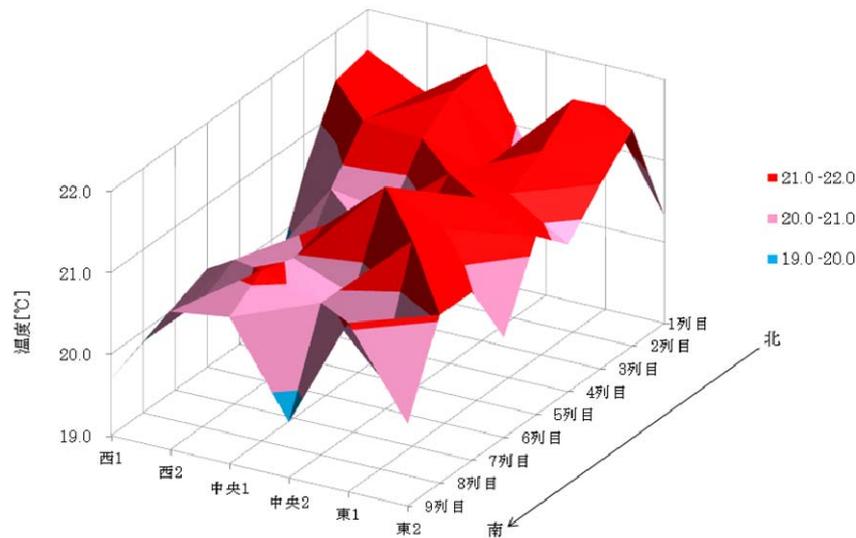


図 V.1.3.3.3-3 ガスボイラーで暖房した場合の B 棟の温度分布

図 V.1.3.3.3-4 に栽培室の高さ方向の温度分布を示す。このグラフは冬季暖房が稼働中の温度分布であり、暖房機が間欠動作していることを示す図である。地上から 1.5m、1m、50cm、20cm の 4ヶ所で測定したものである。高い位置ほど、暖房による温度上昇が高い。

よって、省エネを行なうためには、制御用の温度センサを高い位置に設置すればよい。高い位置では、温度上昇が早いので、暖房を稼働してから停止するまでの制御時間が短くなる。

また、温度センサの高さを変えることにより、作物に一番近いところの温度計測が可能となる。50cm の高さが水耕栽培の高さであり、この高さでリーフレタスが栽培される。また、1.5m、1m の位置は、トマトの実ができる場所である。ここに温度センサを設置することにより、植物の環境計測を正確に行なえる。

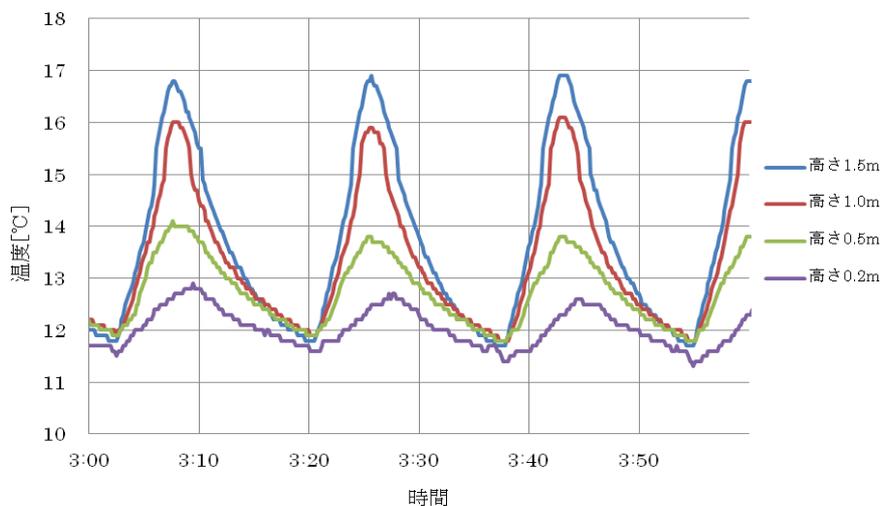


図 V.1.3.3.3-4 B 棟の高さ方向の温度分布

() エネルギー使用量

A 棟と B 棟のガス使用量とヒートポンプの電力量と、そのエネルギー量に対応する CO₂ 排出量を表 V.1.3.3.3-1 を示す。このデータは、2 月 23 日～3 月 3 日のものである。B 棟の CO₂ 排出量は、A 棟の約 60%となる。

表 V.1.3.3.3-1 A 棟と B 棟の CO₂ 排出量の比較表

項目		A 棟	B 棟
エネルギー使用量	ガス	2.49m ³	0.33m ³
	ヒートポンプ	0	9.11kWh
CO ₂ 換算値	ガス	5.7kg	0.66kg
	ヒートポンプ	0	3.09kg
	合計	5.7kg	3.75kg (A 棟の 66%)

() 収穫量の評価

A 棟と B 棟の収穫結果を表 V.1.3.3.3-2 に示す。栽培エリア全体の比較では、B 棟の秀品率が A 棟に比べて、約 10%高くなっている。

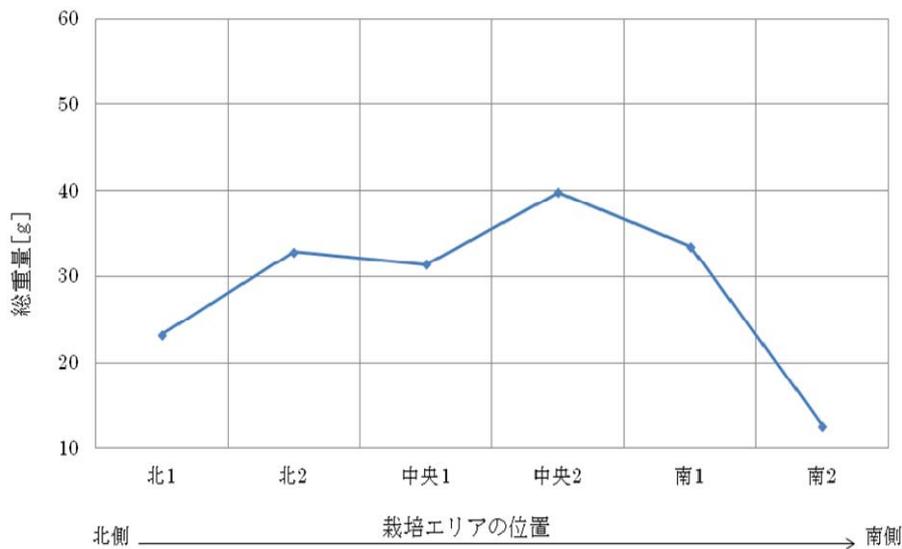
表 V.1.3.3.3-2 A 棟と B 棟の秀品率の比較表

項目	A 棟	B 棟
栽培本数	144	144
総重量の平均値 (根含む)	28.9g	44.9g
葉重量の平均値 (葉のみ)	24.3g	38.6g
秀品本数	109	122
秀品率	76%	85%

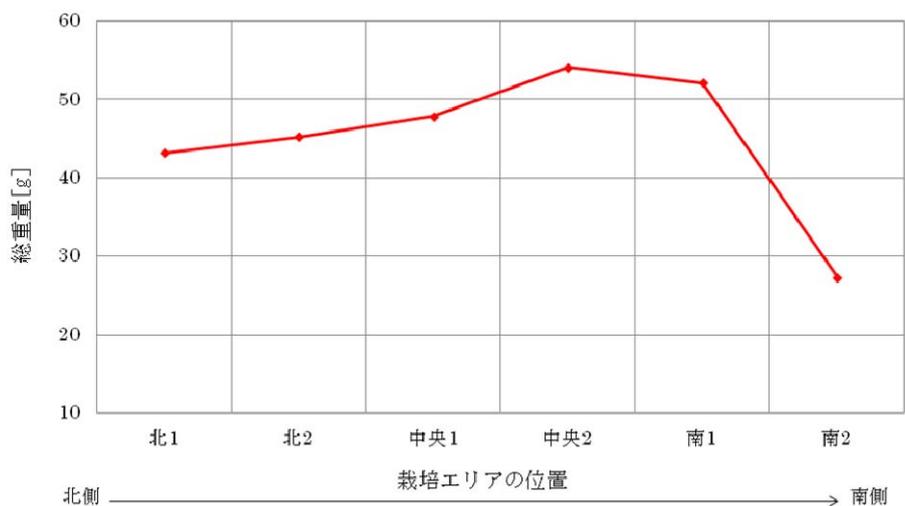
(注)秀品率の定義：作物の葉重量の平均の 50%以下を不良品とする。

() 収穫量の評価

図 V.1.3.3.3-5 に A 棟の植物の重量の分布図(栽培エリアの北から南の分布)を示す。図 V.1.3.3.3-6 に B 棟の植物の重量の分布図(栽培エリアの北から南の分布)を示す。栽培室の南北方法の分布を見ると、両棟共に南側の成長が悪い。



図V.1.3.3.3-5 A棟の植物の重量の分布図（栽培エリアの北から南の分布）



図V.1.3.3.3-6 B棟の植物の重量の分布図（栽培エリアの北から南の分布）

A棟は、ガスボイラーのみの暖房であるが、南側が暖まりにくいためであると予想される。B棟も同じ傾向があるが、B棟はヒートポンプとガスボイラーが外気温に応じて切り替えられて動作する。それぞれが切り替わって動作したため、暖まりにくい栽培エリアが移動し、植物の均一性がA棟よりも向上したと思われる。

表V.1.3.3.3-3にB棟の暖房機の動作比率を以下に示す。ヒートポンプは2台あるが、南西側に設置したヒートポンプ1の動作比率が高かった。外気温に近いところにヒートポンプ1の温度センサが設置されているため、この温度センサが先に低温になり、ヒートポンプ1が稼動する。この温風により、ヒートポンプ2の温度センサ周辺が暖められ、その温度センサの値が、稼動しきい値を下回らず、ヒートポンプ2が稼動しなくなることが多かった。2台のヒートポンプを設置してあるが、1台だけ動作する時間が長かったので、省エ

ネに貢献する運用方法といえる。

一方、収穫量優先で制御する場合には、ヒートポンプ 2 台を同時に稼働させ、温室内の温度の均一化せるようにした方が良いと思われる。

表V.1.3.3.3-3 ヒートポンプとガスボイラーの動作比率

項目	動作比率
ヒートポンプ 1 が動作	72%
ヒートポンプ 2 が動作	0%
ヒートポンプが 2 台動作	16%
ガスボイラーが動作	12%

4) 土壌灌水の評価

土壌灌水の実験パラメータを表V.1.3.3.4-1に示す。栽培する植物は、ミニトマトで、栽培期間は1月20日からである。

表V.1.3.3.4-1 実験パラメータ

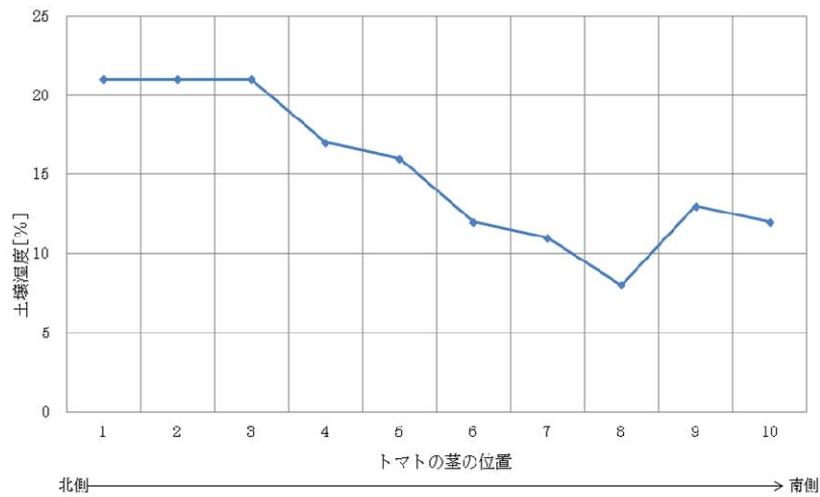
制御項目	A 棟	B 棟
土壌灌水制御	1日4回灌水(0時、6時、12時、18時)、灌水時間はタイマ制御とし、1回に1分間灌水する。	10分周期で計測し、土壌水分がしきい値(25%)を下回ったら1分間灌水する。

() 土壌水分の評価

土壌灌水実験は、次の通り行なった。まず、A棟、B棟共に、苗を定植させて、その後に、一旦土壌水分が、100%近くになるまで、ロックウール培地に給水させて、苗の根の活着を促進させた。その後、2月5日から土壌灌水制御を開始した。

図V.1.3.3.4-1に栽培エリアの土壌水分の分布を示す。測定点は、トマトの茎の近くと、2本のトマトの茎の間を交互に測定した。本データの取得時は、北側の方の水分量が大きく、南側が低いという結果が得られた。

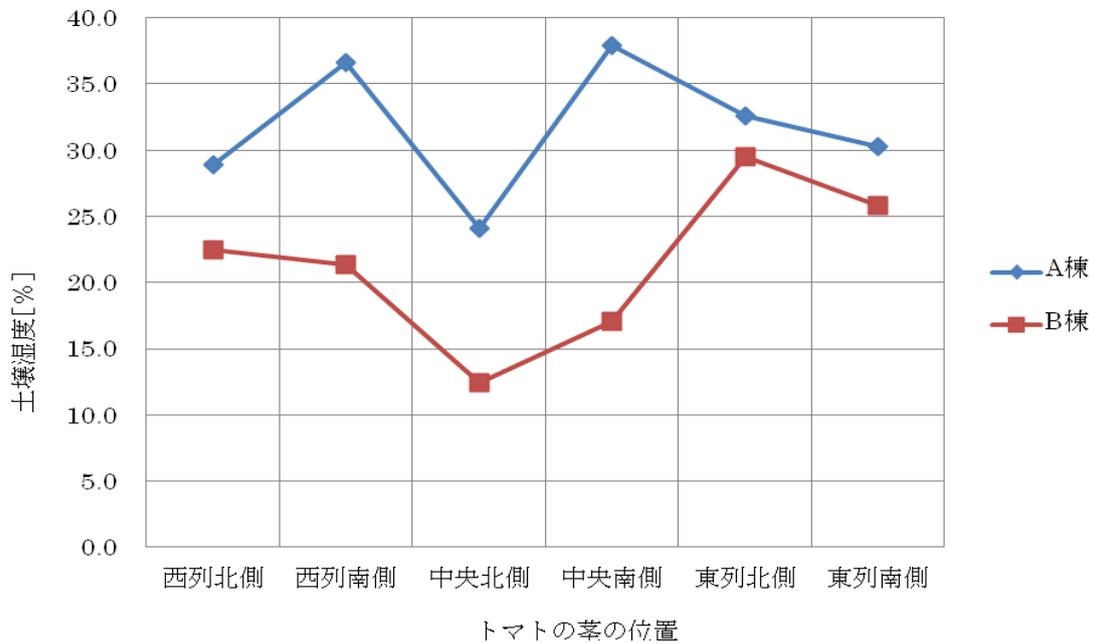
また、計測ポイント毎に、センサの表示値が異なっていた。本実験で採用したロックウール培地は、保水力が高く、土のように密度が一定ではない。灌水は、スポイトのような細い管から行なっている。ロックウール培地の保水力が高いため、その水滴が落ちる場所と、そこから離れた場所で、水分量が異なると思われる。土壌水分の測定には、センサの設置位置が重要となる。きめ細かな計測を行なうことで、不要な場所への灌水を抑制し、灌水量を削減できる可能性が高い。将来は、トマト1本毎にセンサを設置し、土壌水分を測定するのが良いと思われる。一株単位の計測の場合には、センサノードも含めて1cm～2cm角程度の小型化も必要である。



図V.1.3.3.4-1 栽培エリアの南北方向の土壌水分の分布

() 水量の評価

図V.1.3.3.4-2にA棟とB棟のトマトを栽培した期間の土壌水分の平均値を示す。A棟の土壌水分は、25~40%の範囲で分布し、B棟は、17~30%の範囲で分布している。



図V.1.3.3.4-2 A棟とB棟の土壌湿度分布

表V.1.3.3.4-1に、土壌灌水に利用された水の量の比較を示す。B棟の使用量は、A棟の約15%程度である。

表V.1.3.3.4-1 土壌灌水の水の使用量

項目	A 棟	B 棟	備考
灌水用水量 (リットル)	336	51	約1ヶ月の使用量

() 秀品率

A 棟と B 棟の着花数、徒長率を表V.1.3.3.4-2 に示す。A 棟のミニトマトは、茎の成長が早く、徒長現象が見られる。トマトの生育としては、あまり良くない状況である。灌水量を絞った B 棟は、全体的にコンパクトに育っていて、優秀である。

表V.1.3.3.4-2 トマトの着花率の比較

項目	A 棟	B 棟
苗本数	32 本	32 本
平均着花数 (1 段目)	10.6 個	12.9 個
徒長率	130cm	114cm

秀品率は、A 棟、B 棟からそれぞれトマトのサンプルを 5 個取り、糖度を測定した。トマトの糖度の測定結果を表V.1.3.3.4-3 に示す。B 棟のトマトは、A 棟に比べて、22%糖度が良くなった。栽培したトマトの写真を図V.1.3.3.4-4 に示す。

表V.1.3.3.4-3 トマトの糖度の測定結果

サンプル	A 棟	B 棟
1	5.9	7.4
2	6.7	7.8
3	6.9	8.7
4	6.6	8
5	6.6	7.6
糖度の平均値	6.5	7.9



図V.1.3.3.4-4 栽培したトマトの写真

5) 植物工場に適した制御方式のまとめ

今回の評価環境は小さな設備であったが、その環境内でも温度や日射量の分布があることが分かった。今回実験した4つの制御方式に関して、以下にまとめる。

細霧冷却実験では、栽培室の湿度を計測することにより、節水しながら温度を調節できることを示した。栽培エリア毎に湿度を計測して噴霧量を制御するようにしたが、細霧冷却装置間の設置位置が近いと、二つの装置の影響を受ける栽培エリアでは、過剰な噴霧がかかり、その部分の温度が設定以上に下がることが分かった。この部分をセンサネットで計測することにより、省エネ制御が可能になる。また、設備の配置を改善することも可能になる。

補光照明実験では、栽培エリア毎に日射量を測定し、そのエリアに必要な照射時間を計測することにより、それぞれの栽培エリアで照射時間を変えられることが分かった。本実証実験では、施設の南側は、北側に比べて照射時間を約10%削減できることが分かった。

冬季暖房実験では、ガスボイラーとヒートポンプを併用し、外気温が一定の温度以下の場合のみ、ガスボイラーを利用することにより、CO₂の排出量を削減した。

複数のヒートポンプを制御する場合、省エネを優先する制御と秀品率を優先する場合で制御方法を変える必要がある。省エネを優先する場合には、制御用の温度センサをヒートポンプと一対一で設置し、一方のヒートポンプが動作により室温が上昇し、他方のヒートポンプが動作を抑制する方が良い。秀品率を優先にする場合には、同時に複数のヒートポンプを動作させ、温室内の温度の均一性を保つ方が良い。

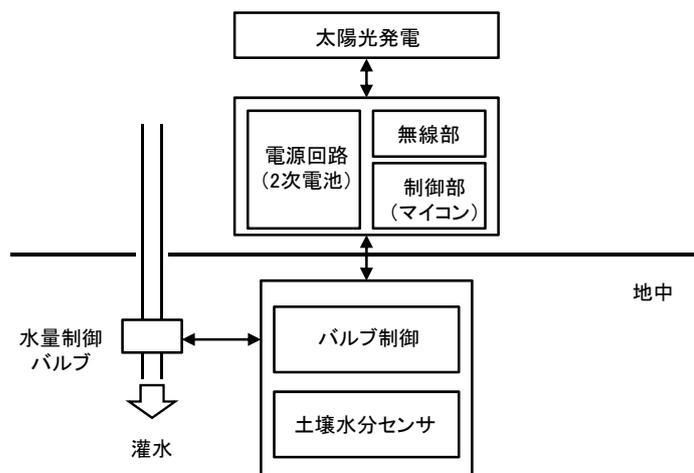
土壌灌水実験では、土壌水分を計測することで、灌水量を削減できることが分かった。保水性の高いロックウール培地では、計測位置により土壌水分量が異なる。また、太陽光が長く当たる南側部分と北側部分で土壌水分量が異なる傾向を示すことが分かった。南側と北側の栽培エリアに土壌水分センサを設置することにより、土壌水分量を最適制御できる

可能性がある。

6) MEMS 化の検討

本研究では、温度センサ、湿度センサ、日射センサ、土壌水分センサを有効利用した。日射センサは、照度センサで代用できる。植物工場では、温度センサ、湿度センサ、照度センサを、1 個のセンサノードに実装し、これらのセンサをまとめて MEMS 化できれば、センサノードの低コスト化が図れる。電源としては、太陽光発電が適している。ボタン電池サイズの 2 次電池も開発されているので、太陽光発電とボタン型 2 次電池の組合せで小型のセンサノードを実現できる。

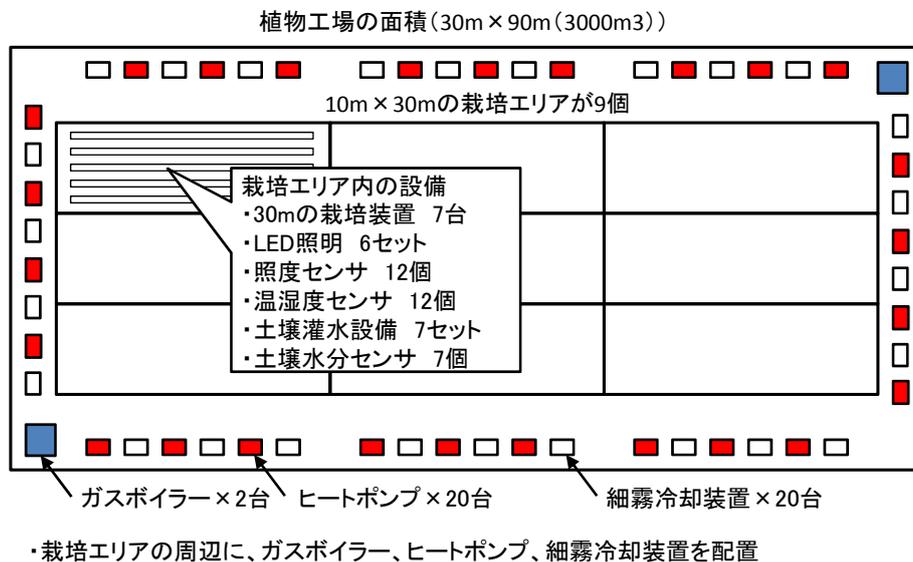
土壌水分センサは、まだ高価であり、MEMS 化による低コスト化が期待される。図 1.3.3.6-1 に将来の土壌水分センサノードの構成案を示す。水を供給する細いチューブの先端に、土壌水分センサと灌水を制御するバルブ開閉用アクチュエータを取り付けるのが理想的である。このセンサ付きアクチュエータを植物の根の近くに設置する。現状は、一つの栽培エリアにセンサ数個程度の設置となるが、本センサが数百円で実現できれば、植物一株単位での計測制御が可能になるとと思われる。



図V.1.3.3.6-1 土壌水分センサノードの構成案

(i) 実用化の検討 システム構成

本研究で提案したシステムを制御するセンサネット植物工場の機器の配置例を図 1.3.3.6.1-1 に示す。植物工場の大きさとしては、 3000m^2 の広さを想定する。栽培エリアは、 $10\text{m} \times 30\text{m}$ のエリアが 9 個である。栽培エリアの周辺に、ガスボイラー、ヒートポンプ、細霧冷房装置を配置し、各栽培エリアには、 30m の栽培装置、LED 照明、土壌灌水設備、照度センサ、温湿度センサ、土壌水分センサを配置する。



図V.1.3.3.6.1-1 センサネット植物工場の実用化時の実装イメージ

(ii) 実用化の検討 コスト試算

本提案システムによる省エネの効果を試算する。エネルギー使用料金の削減額を表

.1.3.3.6.2-1 に示す。上下水道料金 829 円/m³ (農大と同じレベル)、電気料金 12 円/kWh、ガス料金 79 円/m³ として試算している。冬季暖房では、ガス料金は減少するが、ヒートポンプの電気代が増えるので、その差額を削減金額としている。

実用化時の植物工場の面積は、3000m² として試算する。本評価環境の面積は、54m² なので、実用化時には、その 55 倍の面積になる。エネルギーコスト削減額についても同じ比率で試算する。表 V.1.3.3.6.2-2 に実用化時のエネルギー削減効果を示す。年間で、約 130 万円の削減効果がある。

表V.1.3.3.6.2-1 本評価環境（54m²）におけるエネルギーの削減効果

実験内容	エネルギー	1日の削減量	利用期間	1年間の削減量	1年間の削減金額
細霧冷却	水	45リットル/日	6ヶ月 (5月～10月) 利用率 66%	5.4m ³ /年	¥4,477
補光照明	電気	6.7KWh/日	3ヶ月 (12月～2月) 利用率 100%	603kWh/年	¥7,236
冬季暖房	ガス +電気	ガス削減量 2.16m ³ /日 電気使用量 9.1KW/日	5ヶ月 (11月～3月) 利用率 100%	ガス削減量 324m ³ /年 電気使用量 1365KW/年	¥9,300
土壌灌水	水	10リットル/日	通年	3.65m ³ /年	¥3,026
合計					¥24,038

表V.1.3.3.6.2-2 実用化時（3000m²）におけるエネルギーの削減効果

実験内容	エネルギー	1年間の削減量	1年間の削減金額
細霧冷却	水	330m ³ /年	¥246,213
補光照明	電気	33165kWh/年	¥397,980
冬季暖房	ガス+電気	ガス削減量 17820m ³ /年 電気使用量 75075KW/年	¥511,500
土壌灌水	水	200m ³ /年	¥166,422
合計			¥1,322,115

センサネット植物工場を実現するために必要な費用を表V.1.3.3.6.2-3に示す。A棟（従来棟）の設備費を基準として、提案システムの設備費を算出した。設備の構成は、この結果、その二つの設備の差額は、約1200万円となった。これをエネルギー削減コストで回収する場合には、回収期間が約10年となる。

表 V.1.3.3.6.2-3 本提案システム実用化時の設備費の試算

NO	機能		A 棟 (従来)			B 棟 (提案方式)			差額 (K¥) (B 棟-A 棟)	備考
			単価 (K¥)	台数	金額 (K¥)	単価 (K¥)	台数	金額 (K¥)		
1	全体制御	複合制御	1,400	1	1,400	1,400	1	1,400	0	
		センサネット制御				500	1	500	500	
2	細霧冷却	制御部分	400	20	8,000	550	20	11,000	3,000	注 1
		センサノード				10	108	1,080	1,080	
3	補光照明	制御部分	400	55	22,000	450	54	24,300	2,300	注 2
		センサノード				10	108	1,080	1,080	
4	冬季暖房	ガスヒータ	8,500	2	17,000	8,500	2	17,000	0	
		ヒートポンプ		0	0	100	20	2,000	2,000	注 3
		センサノード				10	0	0	0	注 4
5	土壌灌水	制御部分	0	0	0	1,000	1	1,000	1,000	
		センサノード				15	63	945	945	
	合計			48,400			60,795	11,905		

注 1) 1 台の細霧冷却装置がカバーできる範囲を 5m x 30m として試算

注 2) LED の単価は 2 年後の単価で試算

注 3) ヒートポンプは、家庭用機器レベルの単価で試算

注 4) 冬季暖房のセンサノードは、細霧冷却のセンサノードと共通化する

センサネット植物工場では、秀品率も改善できる。表 V.1.3.3.6.2-4 に秀品率の改善を 10%程度とした場合の売上金額を試算する。作物は、リーフレタスを前提とすると、600 万円の売上増加が見込まれる。この売上の 50%程度を投資の回収に組み込めると想定すると、エネルギーの削減コストと秀品率による売上の増加分の合計は、年間 400 万円程度となる。回収期間を 2~3 年に短縮できる可能性がある。

表 V.1.3.3.6.2-4 本提案システムによる売上金額の試算

項目	A 棟 (従来棟)	B 棟 (提案方式)
リーフレタスの出荷単価	100 円	100 円
年間の出荷株数	60 万株	66 万株
年間の出荷金額	6000 万円	6600 万円
売上増分		600 万円

(4) まとめ

本研究の内容を以下にまとめる。

1) センサネットに適した制御方式の提案

植物工場の制御システムとして、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌水分の4つの方式を提案した。これらの方式は、栽培エリアを分割して、それらのエリアを個別制御する方式である。栽培エリア毎の環境計測や、各栽培エリアの境界の環境測定にセンサネットを適用することにより、省エネを実現できる可能性を示した。

2) 省エネ効果と収量改善のまとめ

本研究で行なった4つの制御システムの実験結果を表V.1.3.4-1に示す。目標の省エネ20%削減、秀品率10%改善に対して、目標を達成できたと考える。

細霧冷却実験は、日程の関係で、植物の栽培が行なえなかった。補光照明、冬季暖房、土壌灌水実験に関しては、ほぼ目標を達成できた。

表V.1.3.4-1 実験結果まとめ

NO	実験項目	省エネ	秀品率
1	細霧冷却	水の使用量を75%削減	-
2	補光照明	電力量を約70%削減	リーフレタスの秀品率を約10%改善
3	冬季暖房	CO ₂ 排出量を約30%~40%削減	リーフレタス秀品率を約10%改善
4	土壌灌水	水の使用量を約80%削減	トマトの糖度を約20%改善

3) MEMS 化の検討

植物工場用センサノードは、温度センサ、湿度センサ、照度センサを実装したものが適することを示した。土壌水分センサに関しては、土壌水分測定センサとバルブ制御を一体化した方式を提案した。これらのセンサのMEMS化による低コスト化が期待される。

4) 実用化の見通し

本提案の省エネ方式を植物工場に適用する場合のコストを試算した。本提案システムの導入コストは、本方式による省エネ効果の金額の約10年分相当であり、10年間で投資を回収できる見込みである。秀品率の改善効果を含めると、回収期間を2~3年に短縮できる可能性も示した。

5) 今後の課題

本研究では、省エネを主目的に植物工場のセンサネットを評価した。本提案のセンサネットを植物工場に導入すれば、新たなセンサも本プラットフォームに接続可能となる。高級な果物の栽培(夏季のイチゴ)、植物単体のモニタ(蒸散、CO₂等)、土壌・水養液の管理、虫の検知(虫センサ)、病気の検知、作業監視、盗難防止等へのセンサネットの適用は、今後の課題である。