

電子機器製造施設向け環境制御技術

Environment Control Technologies for Electronic Equipment Manufacturing Facilities

神谷 松雄

Kamitani Matsuo

頭島 康博

Kashirajima Yasuhiro

後藤田 龍介

Gotoda Ryusuke

田中 真

Tanaka Makoto

電子機器デバイスの高性能化に伴い、その製造環境における各種環境因子の制御が重要となってきた。株式会社日立プラントテクノロジーは、(1) 大型搬送装置が動作する液晶工場における動的現象を踏まえたクリーン化技術、(2) 空気温度の変動を 0.001°C レベルまで精密に制御できる高精度な温度制御技術、(3) 空調設備の動的な圧力変化を予測できる圧力制御技術、(4) 有機EL製造環境などを対象とした露点 -100°C 以下の環境を構築できる超低露点・低有機空気製造技術など、さまざまな環境制御技術に取り組んでいる。

1. はじめに

半導体の微細化、高性能化や液晶基板の大型化に伴い、その製造環境に要求される雰囲気環境因子（清浄度、温度、圧力など）の制御がますます重要となってきた。また、有機EL (Electroluminescence) やリチウムイオン電池などのデバイスの製造環境では、空気中の微量な水分や有機物が制御されている環境が求められている。

このような中、日立プラントテクノロジーは、産業分野を中心に製造環境中の各種環境因子を制御できるソリューションを提供し、電子機器向けに環境制御技術を構築してきた。

ここでは、液晶工場向けのクリーン化技術として動的現象を踏まえた気流塵埃（じんあい）解析¹⁾、半導体製造工程における加工や計測精度を向上させるための高精度温度制御技術²⁾、圧力制御技術として空調設備の圧力変化を予測できる圧力制御シミュレータ³⁾、有機EL製造環境に適用可能な超低露点・低有機空気製造技術⁴⁾について述べる。

2. 液晶工場向けクリーン化技術

2.1 液晶工場での課題

FPD (Flat Panel Display) 工場では、ガラス基板の大型

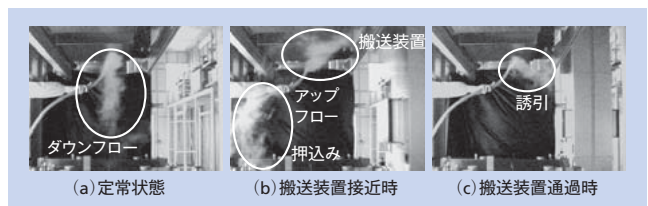


図1 | 搬送装置走行時のストック内気流可視化

スタッククレーン（搬送装置）が走行時の気流の乱れを可視化する。動的現象を踏まえたクリーン化が必要である。

化に伴い、基板が保管されるカセットストック（自動保管棚）も大型化している。このような大型ストックにおいて最適にクリーン化を維持するためには、従来の静的な定常状態のクリーン化評価に加えて、ストック内部を高速移動するスタッククレーン（搬送装置）の動作に起因する気流の乱れを考慮した動的現象でのクリーン化が必要不可欠となってきた。

大型ストック内の気流の乱れの一例を図1に示す。静的な定常状態ではダウフローが形成されているが、装置が接近すると上昇流や押込み気流が発生し、通過後は誘引気流が確認される。このほかにも搬送装置の動作は組み合わせで行われ、気流を大きく乱すと推察される。そこで、動的な現象がストック内に及ぼす影響に関して解析的に基礎検討した結果について以下に述べる。

2.2 気流塵埃解析手法

カセットストックを基本モデルとして気流分布と塵埃拡散特性について解析を行った（図2参照）。搬送装置の動作は、カセット上昇と搬送装置走行の同時動作とした。シミュレーションモデルは標準k-εモデルで、搬送装置の動作のモデル化のポイントとして、移動境界には数種類あるダイナミックメッシュ（移動変形メッシュ）の組み合わせを事前検討し、最適な組み合わせを採用した。

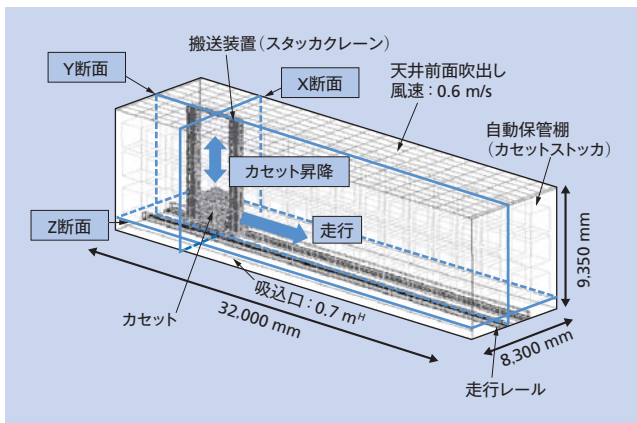


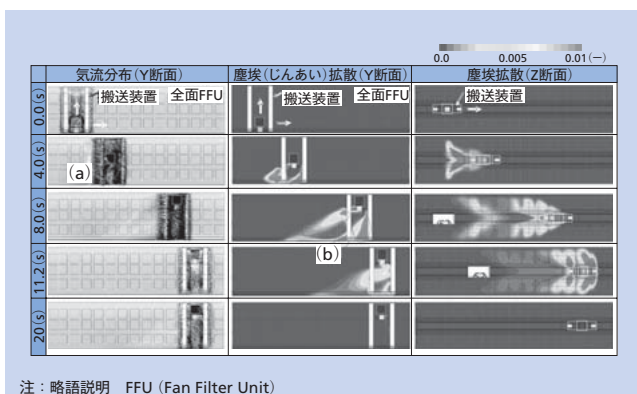
図2 | カセットストッカの基本モデル
今回解析した液晶基板を一時保管するカセットストッカ（自動保管棚）の基本モデルの概要を示す。

2.3 解析結果

カセット上昇動作と同時に搬送装置が走行する複合動作について解析した事例を図3に示す。走行開始前ではダウンフローが形成され、その後、上昇動作による巻き上がりや搬送装置の走行動作の影響を複合的に受け、カセット内部に右斜め上方向への気流が確認できる[図3(a)参照]。

塵埃拡散結果から上昇による発塵により、走行が複合的に絡んでストッカ内の棚へ影響が拡大する傾向がわかる。また、搬送装置下部の後流側に塵埃が巻き上がる[図3(b)参照]。これは、搬送装置後方の気流分布とリンクしており、上昇動作が複合的に絡んでくる走行時の発塵に対しては、ダウンフローの気流だけでは搬送装置後方で巻き上がりが起こる可能性が示唆されている。

そこで、搬送装置の各動作による塵埃拡散を抑制するためのクリーン化対策として、発塵源近傍での局所排気による分離除去の一例を検討した。想定した発塵源[上昇動作：搬送装置と昇降装置の摺(しゅう)動部、および、搬送装置走行動作：搬送装置車輪とレール部の摺動部]に対し、その近傍での局所排気の効果を検討した例を図4に示す。



注：略語説明 FFU (Fan Filter Unit)
図3 | 搬送装置動作時のカセットストッカ内の気流および塵埃拡散解析結果
搬送装置がカセット上昇および走行動作したときの気流分布と塵埃拡散状況から、動作によってストッカ室内に塵埃が拡散することが示唆される。

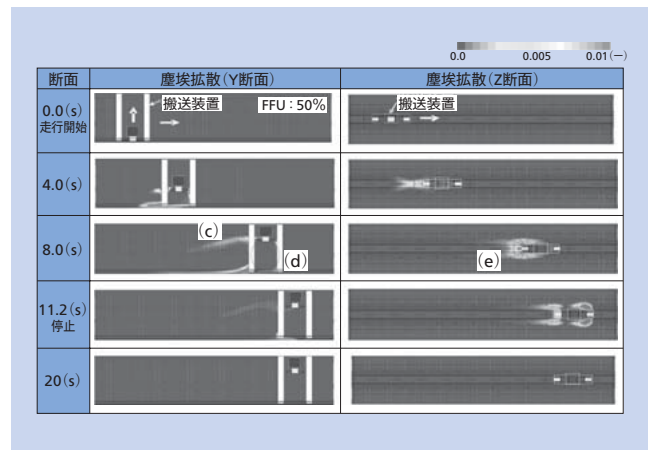


図4 | 局所排気によるクリーン化時の気流および塵埃拡散解析結果
局所排気の効果により、カセットストッカ室内への塵埃拡散が抑制される。

図3と比較すると、カセット上昇に伴う搬送装置後方[図4(c)参照]および上昇カセット下部[図4(d)参照]の塵埃拡散が抑制されていることがわかる。Z断面を見ると、レール近傍からの吸込み効果でレール幅以上に塵埃が拡散しないことが確認できる[図4(e)参照]。

このように、大空間内において移動体が及ぼす影響を解析的に把握し、その発塵源に対する拡散抑制対策を事前に予想することができるクリーン化技術を構築した。

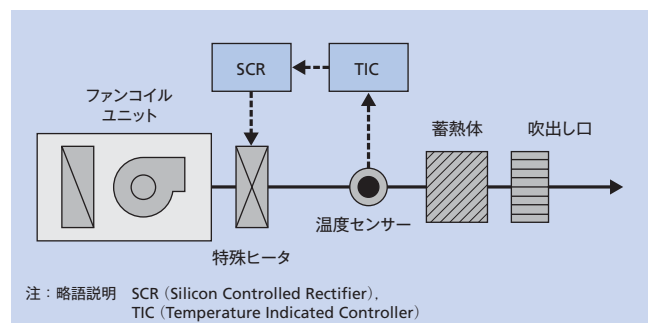
3. 高精度温度制御技術

3.1 制御技術の概要

半導体製造装置などの製造工程において計測精度に対する要求は年々厳しくなり、その設置環境に対して、高い精度を得るために厳密な温度管理が求められる。ここでは、空気温度の変動を0.001℃レベルで精密に制御できる空調システムについて述べる。

この空調システムは、チラーで製造した冷水を熱源としたファンコイルユニットとヒータを組み合わせた一般的な構成であるが、個々の構成要素のブラッシュアップで精密温度制御を実現しており、(1) 高応答性ヒータの採用、(2) 蓄熱体による温度変動の緩和などが特徴である(図5参照)。

一般の温度制御は、1時間～数十分周期の変動を対象と



注：略語説明 SCR (Silicon Controlled Rectifier), TIC (Temperature Indicated Controller)
図5 | 高精度温度制御空調システム
高応答性ヒータの採用や、蓄熱体による温度変動の緩和などに特徴がある。

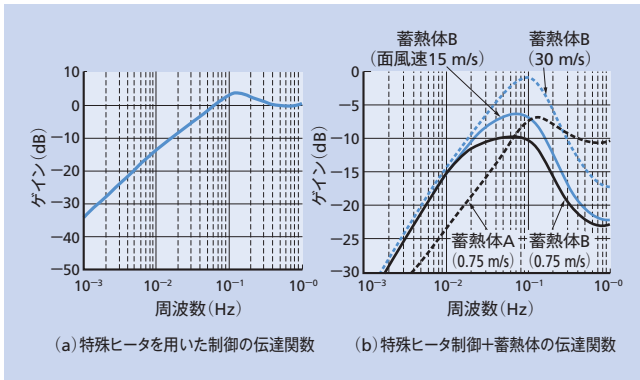


図6 | 特殊ヒータおよび蓄熱体との組み合わせにおける伝達関数
特殊ヒータ、蓄熱体の伝達関数を求め、適切に組み合わせることで長い周期から短い周期まで全域で温度変動を抑制することができる。

するが、 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ レベルにするためには、数分～数十秒の短周期の変動に対応する必要がある。このシステムでは、一般ヒータよりも応答性の高い特殊ヒータを開発し、従来よりも短周期の変動に対応可能とした〔図6 (a) 参照〕。

蓄熱体は、空気と接触して熱交換し、温度変動を抑制する。形状や材質によって特性が異なるが、ヒータ制御と比べてさらに短周期の変動を抑制する効果がある。蓄熱体とヒータ制御を適切に組み合わせることで、長周期から短周期まで全域で温度変動を抑制できた〔図6 (b) 参照〕。

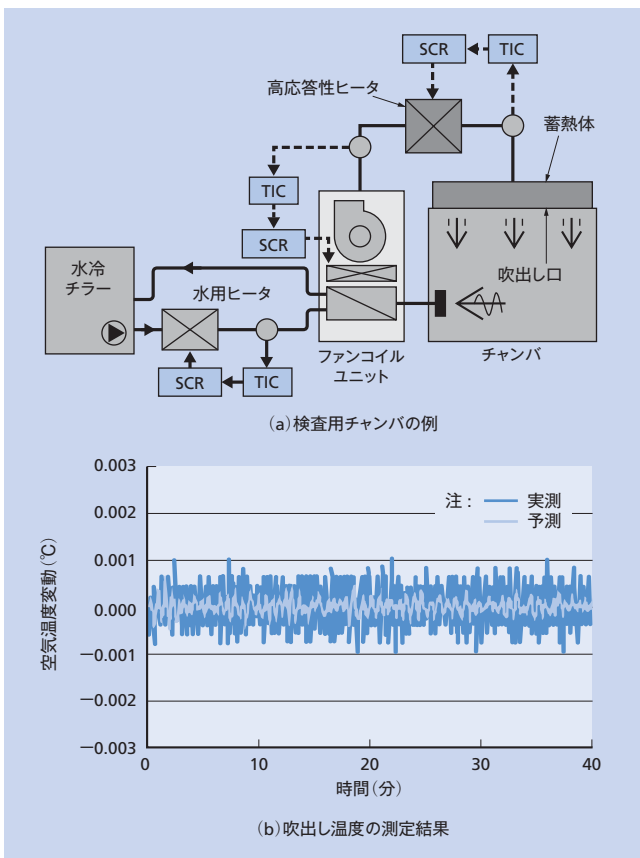


図7 | 精密温度制御空調システムの検査用チャンバへの適用例
半導体部品の検査用チャンバにこのシステムを適用し、吹出し温度が $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ レベルに制御できることを確認した。

3.2 精密温度制御空調システムの適用例

この空調システムを半導体部品の検査用チャンバに適用した例を図7 (a) に示す。先に述べた高応答性ヒータや蓄熱体の採用のほか、断熱方法、冷水・冷却水の制御、気流のデザインを組み合わせ、小型サーミスタセンサー(時定数3~4秒)の指示値で $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ レベルに制御できる空調システムを実現した〔図7 (b) 参照〕。

4. 圧力制御技術

4.1 圧力制御系シミュレーション

電子デバイスを製造する部屋間の清浄度を維持するには室圧を適切に制御することが重要である。しかし、空調設計時に種々の外乱を考慮した室圧変動を予測することは難しい。そのため、空調設備用の圧力変化を予測できる圧力制御系シミュレーションを開発した。

このシミュレーションは管路網などの解析で用いられるボリュームジャンクション法を採用している。この手法では、ダクトおよび部屋を「ボリューム」と呼ぶ小部分に分割し、ボリューム間の空気の移動を「ジャンクション」で表す。

今回は数値計算ソフトウェアMATLAB/Simulink[※])を利用してシミュレーション環境を構築した。ボリュームや

※) MATLAB/Simulinkは、The MathWorks, Inc.の登録商標である。

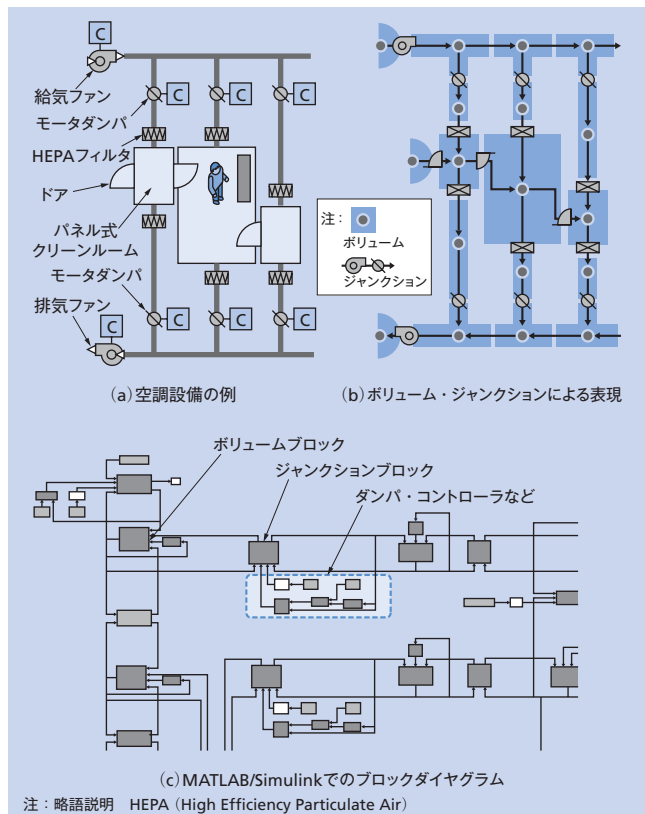


図8 | 空調設備の圧力制御系シミュレーションのイメージ
ボリュームジャンクション法を採用して、空調設備機器、ダクト、制御機器などをモデル化し、MATLAB/Simulinkを利用して解析環境を構築した。

ジャンクション、ファン、ダンパなどの機器をブロック化し、分岐・合流・ループがある複雑な空調ダクトシステムを、ブロックダイアグラムの形式で表現できるようにした(図8参照)。特長は、容易にモデルが作成でき、空気挙動と制御システムの連成解析ができる点であり、さまざまな運転状況を設定し、制御システムの検証が可能なシミュレータを開発した。

4.2 圧力制御手法

前述のシミュレーションを用いて、図9(a)のように2室から成る設備でさまざまな外乱が発生した場合を想定し、排気ダクトにある圧力制御機器による制御性能を比較した。図9(b)は室圧の変化をシミュレーションで予測した例であるが、一般的なモータダンパを用いた圧力制御に比べ、小型ファンの回転数制御による圧力制御は圧力が安定しており、良好な制御性能が得られることがわかった。

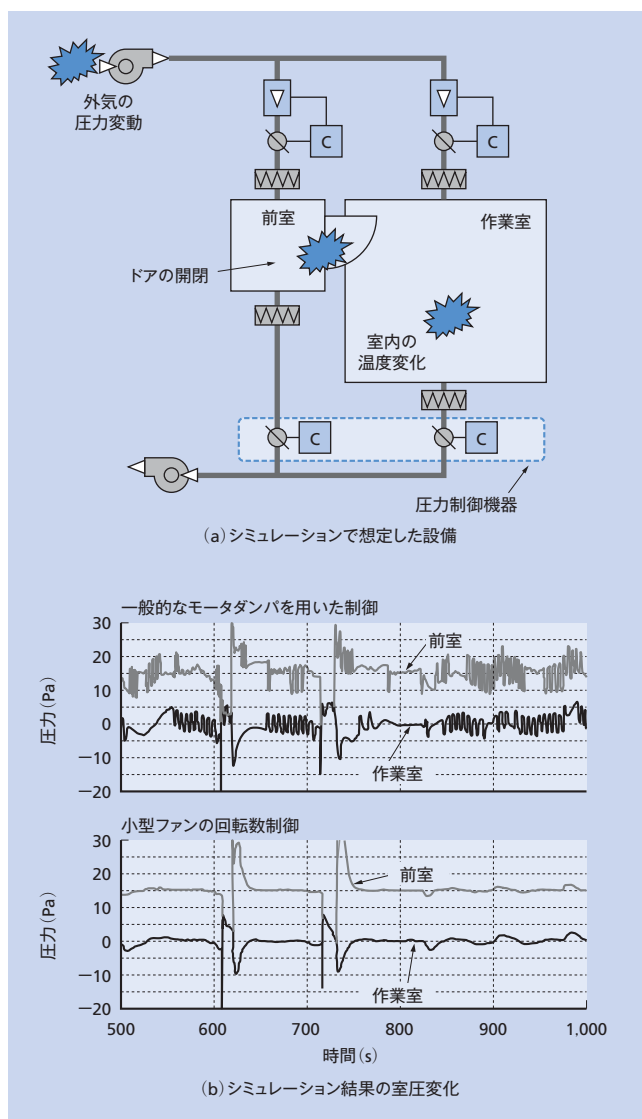


図9 | 圧力制御系シミュレーションでの圧力制御機器の性能比較
外乱(外気変動、ドア開閉)に対する2種類の圧力制御機器の性能を比較して示す。

この小型ファンによる圧力制御は、実設備にも適用して良好な制御性能が得られた。今後もさまざまなクリーンルームの稼働状況に応じた制御手法を提案できるように、シミュレーションによる検討を続ける予定である。

5. 超低露点・低有機空気製造技術

5.1 除湿・吸着原理

有機薄膜を利用する有機半導体や有機ELなどの製造環境として必要とされる分子状汚染物質を極力低減した高洁净空間のニーズが高まっている。そこで、水分子と有機物分子を低減する超低露点・低有機空気製造技術について開発した。

温熱を利用して空気を除湿する乾式除湿方式の基本構成を図10(a)に示す。乾式除湿方式は供給空気を除湿処理する除湿域と除湿ロータの再生を行う再生域、空気中の水分を吸着によって除去する除湿ロータ、および再生空気を加熱する再生ヒータから構成される。処理空気は、除湿ロータ通過時に水分が除湿材に吸着されることで減湿されると同時に発生する吸着熱によって温度が上昇する。一方、再生域に導入された空気は、再生ヒータで除湿ロータの再生に必要な温度まで加熱後、除湿ロータを通過する際に水分を脱離させ、除湿ロータを再生する。この乾式除湿方式は、従来の低温冷水を製造して空気を冷却除湿する方式とは異なり、吸着材に水分を吸着させて除去することによって、低湿度の空気を得るものである。

5.2 超低露点・低有機空気製造装置の概要

超低露点・低有機空気製造装置の外観を図10(b)に示す。水分を極力除去した超低露点空気を製造するため、除湿ロータを3段直列に接続し、空気を複数回除湿ロータに通過させることで微量水分の除去を可能とした。

5.3 装置性能

5.3.1 水分除去性能

除湿機運転パラメータの最適化を行った後、水分および

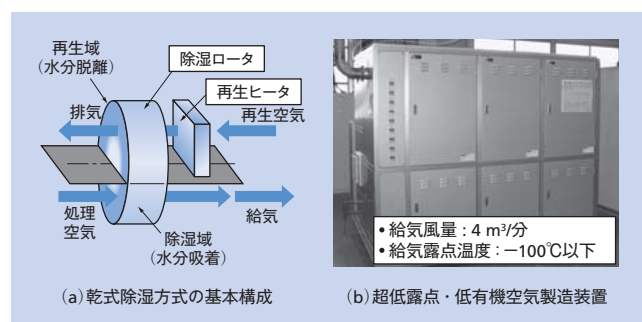


図10 | 超低露点・低有機空気製造技術の原理と製造装置の外観
原理は乾式除湿方式で除湿ロータを3段直列に取り付けている。

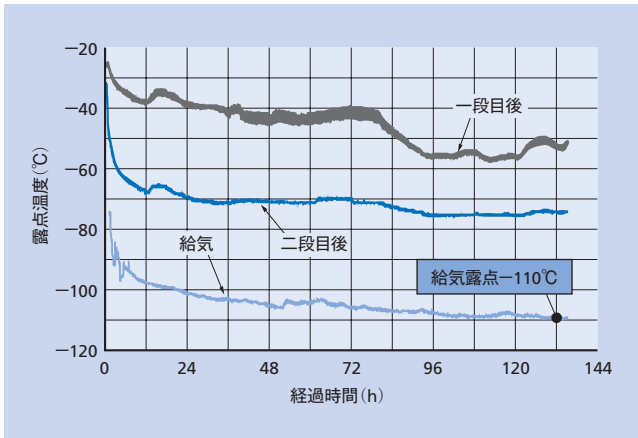


図11 給気露点温度の経時変化

超低露点・低有機空気製造装置の立ち上がりの運転データを示す。20時間後には -100°C 、6日後には給気露点 -110°C に到達し、高い除湿性能を確認した。

分子状汚染物質の除去性能を評価した。この装置の立ち上がり運転データの一例を図11に示す。給気露点は運転開始から徐々に低下し、20時間後には -100°C に到達した。その後も水分濃度は徐々に低下し、運転開始6日後には給気露点 -110°C に到達し、除湿ロータを複数段使用したこの装置の高い除湿性能を確認した。

5.3.2 有機物除去性能

この装置では、吸着材を用いて除湿を行うが、吸着原理が選択性のない物理吸着であるとするれば、水分子以外の有機物分子などの分子状汚染物質も同時に吸着・除去されると考えられる。そこで、運転条件を変えて給気露点温度を変化させた場合の気中有機物除去性能について検討した。有機物除去性能を図12に示す。有機物除去性能は給気露点低下するに伴って向上した。また、給気露点が -100°C 以下で除去率99%以上となり、通常、有機物除去

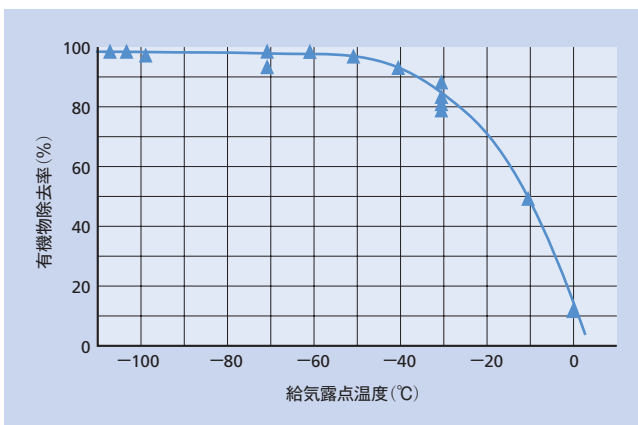


図12 給気露点温度と有機物除去性能

有機物除去性能は給気露点低下するに伴って向上し、給気露点が -100°C 以下の除去率は99%以上となる。

フィルタとして採用されるケミカルフィルタの除去率90%を上回る除去性能が得られることがわかった。

これらの技術により、給気露点温度 -100°C 以下、環境中の有機物の除去率99%以上を実現できる超低露点・低有機空気製造装置を構築した。

6. おわりに

ここでは、電子機器製造施設向けの環境制御技術として、日立プラントテクノロジーのクリーン化技術、高精度温度制御技術、圧力制御技術、超低露点・低有機空気製造技術について述べた。

今後も高精度化していく各種分野の電子機器製造施設構築に寄与する環境制御技術の開発を推進していく考えである。

参考文献

- 1) 神谷, 外: 大型ガラス基板向けクリーンストック内の気流制御—スタッククリーン動作を考慮した気流解析—, 第17回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, p.51~53 (2008.4)
- 2) 田中: 精密温度制御チャンバの研究(第2報) 高応答性ヒータ, 蓄熱体の組み合わせ検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, p.405~408 (2005.9)
- 3) 田中: バイオロジカルクリーンルームにおける換気設備の圧力解析手法: 日本機械学会論文集(B編), 75巻, 757号, p.1728~1731 (2009.9)
- 4) 頭島, 外: 超低露点・低有機チャンバ, クリーンテクノロジー, 日本工業出版, p.53~56 (2006.7)

執筆者紹介



神谷 松雄

1994年日立プラント建設株式会社(現 株式会社日立プラントテクノロジー)入社, 研究開発本部 松戸研究所 空調・プラントシステム部 所属
現在, 空調設備の研究開発に従事
空気調和・衛生工学会会員



後藤田 龍介

1988年日立プラント建設株式会社(現 株式会社日立プラントテクノロジー)入社, 研究開発本部 松戸研究所 空調・プラントシステム部 所属
現在, 空調設備の研究開発に従事
空気調和・衛生工学会会員



頭島 康博

1996年日立プラント建設株式会社(現 株式会社日立プラントテクノロジー)入社, 研究開発本部 松戸研究所 空調・プラントシステム部 所属
現在, 空調設備の研究開発に従事
空気調和・衛生工学会会員



田中 真

1997年日立プラント建設株式会社(現 株式会社日立プラントテクノロジー)入社, 研究開発本部 松戸研究所 空調・プラントシステム部 所属
現在, 空調設備の研究開発に従事
日本機械学会会員