

省エネ・省資源を実現するクリーン空調システムの開発(その1)

- タスク&アンビエントクリーン空調システム概要とクリーン性能 -

長谷部 弥 白谷 毅 水原 一樹 小松原 正幸 梶間 智明

(技術研究所)

(設計本部)

(名古屋支店)

(設計本部)

(技術研究所)

Development of an Energy and Resource-saving Air Cleaning System (part 1)

- Outline of task and ambient air cleaning system and air cleaning performance -

by Hisashi Hasebe, Takeshi Shiratani, Kazuki Mizuhara, Masayuki Komatsubara and Tomoaki Kajima

Abstract

As industrial cleanrooms become larger and require higher levels of cleanliness, important issues such as the increased energy consumption and increased resources for construction arise. In light of this background, a new innovative energy and resource saving system was developed by separating the heat treatment and cleaning functions and by using the minimum elements required for a cleanroom system, and then an Ambient system which can perform heat treatment and air cleaning of whole cleanroom and a Task system which can control the space needed high cleanliness are put in practical use. These systems have a high local recovery characteristic and a small influence of particle generation as compared with the conventional system.

概要

工業用クリーンルームでは、高浄度の要求と大規模化によりエネルギー消費量・建設資材量が増大している。そこで、必要最小限の要素でクリーンルーム(CR: Cleanroom)を構成することと熱処理と清浄化を分離するという発想でCRの基本構造を新たに構築し、そこから、CR全体の熱処理と清浄化を行うアンビエントクリーン空調システムと高い清浄度が必要な空間の制御を行うタスククリーン空調システムの2つのシステムを実用化した。これらのシステムは、従来システムよりも換気効率が大きく(汚染時の回復性能に優れ)、また、発塵の影響が非常に少ない、性能の高いクリーン空調システムである。

§1.はじめに

地球温暖化に代表される地球環境問題が大きい問題となっており、省エネ化・省資源化などのCO₂排出量削減対策がICR(ICR: Industrial Cleanroom)の空調計画においても重要なテーマとなっている。

ICRでは、生産効率向上のためウエハやガラス基板が大型化し、クリーンルーム(CR: Cleanroom)も大規模化しており、建設時の資材量が増大している。ところが、基本的なCR構造(空気循環のための床・壁・天井の2重構造)は、CRが実用化された1960年代初頭¹⁾からほとんど変化がなく、CRの要求性能を確保する構造という意味では完成された形状となっている。その意味においては、省資源化の取り組みが行われているとは言い難い。

また、製造されるデバイスの高集積化・微細化に伴い高浄環境が必要とされ、エネルギー消費量(特に清浄化のための空気の搬送動力)も増大している。これまで、生産システム側の工夫により高浄エリアを限定して区画し搬送動力を削減するミニエンバイロメントシステムが

開発されている²⁾が、省エネを目的とした空調システム側の工夫は行われていない。現状では、供給空気すべてをHEPA(High Efficiency Particulate Air)フィルタで清浄化するために熱処理と清浄化が連結され必要以上の高浄度となる上、エネルギーの無駄が大きい。

本開発では、従来システムの上記の課題に鑑み、CR特有の床・壁・天井の2重構造がなく、かつ、熱処理と清浄化の連結を行わない、省エネ・省資源を実現でき、さらに、清浄化力が高い新たな空調システムを構築した。CR構造はCR性能(気流分布・清浄度など)を確保するために構築されているため、省エネ・省資源を目的として部材を減らすだけでは性能が確保できない。そこで、①従来CRの構成部材の役割を抽出、②部材をなくした場合にその役割を補完する考え方と課題を整理、③課題解決のための開発、という手順で開発を進めた。

本報では、開発した新システムの概要、必要な制御技術の開発について述べ、また、クリーン空調システムとして重要な気流性状・発塵時の影響・温度分布に関する検証実験の結果を報告する。

§2.従来のクリーン空調システムの基本構造

現在のCRでは、CR規格による性能確保のための基本構造が適用され、省資源の取り組みが行われていない。ここでは、CR規格と空調システムの変遷について触れ、規格によるCRの基本構造が現在のCRに適用されていることを示す。

CR規格として最初にまとめられたのは、1961年の米国空軍規格T.O.00-25-203³⁾であり、設計基準・構造上の指針が記載してある。その後、1963年に米国連邦規格Fed.Std.209⁴⁾が発行され、2001年に廃止されるまでに5回にわたって改訂され、CR構築の基本となっている。これらの規格のうち、設計基準・構造上の指針が記載してあるものは、T.O.00-25-203からFed.Std.209B⁵⁾まで(表-1の太矢印間)で、その内容はほとんど変わっていない。

実際のクリーン空調システムは、要求性能の高度化や技術の進歩によりさまざまなシステムを経て(表-1)、現在に至っているが、そのほとんどがCR規格に設計基準・構造上の指針が記載されている期間に開発され実用化されている。

規格には設計基準・構造上の指針として、以下の内容が記載されている。

- ・ 外部空間との区画を行い加圧する。
- ・ 内部仕上げは発塵の少ないものとし、容易に清掃できるものとする。
- ・ 供給空気はすべてHEPAを通す。
- ・ 気流をさえぎるような構造は避ける。
- ・ 配管・ダクト・ケーブル類は天井・シャフト内等に隠す。
- ・ 高潔浄空間に対しては、天井または壁一面全体を吹出しとし、吹出し面の対面は調整可能な格子状とする。

これらの基本構造は現在のCRにも適用(図-1)され、性能を確保するという意味においては、完成された形状となっている。

§3.省エネ・省資源を実現するクリーン空調システム

ここでは、CR性能を確保し、かつ、省エネ・省資源を実現できる新システム構築を目的として、従来システムにおける構成部材の性能確保のための役割とその部材をなくした場合の代替技術を整理し、さらに、CR性能を確保するうえで非常に重要な気流の構築について検討した。

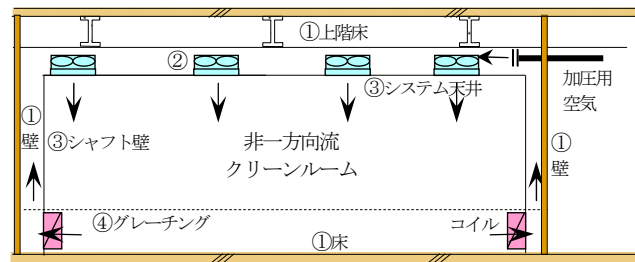
3.1 CR構成部材の役割と新システムでの代替技術

表-2に従来システムの構成部材の役割と新システムにおいてその役割を補完する代替技術を示す。

従来システムで必要とされていた床・壁・天井の2重

表-1 CR規格と主なクリーン空調システムの変遷⁶⁾

年	規格	主なクリーン空調システム
'61	T.O.00-25-203	Sandia corp. 層流型CR 初期の乱流小規模CR ↓ ホール型乱流大規模CR ↓ 大規模CRにクリーンベンチを併用 ↓ ベンチ内流方式とダウンフローシステム方式 ↓ トネルモジュール方式とダウンフローシステム方式
'63	Fed.std.209	
'66	Fed.std.209A	
'73	Fed.std.209B	↓ ダウンフローシステム ホールルームが多く、ベタイプが少ない ↓ ダウンフローシステム ベタイプが多く、ホールルームが少ない
'76	Fed.std.209B 補足	
'87	Fed.std.209C	↓ ミューバ イロイト+ホールルームシステム ↓
'88	Fed.std.209D	
'92	Fed.std.209E	
'99	ISO14644-1	
'01	Fed.std.209E 廃止 現在	



- ① 外部空間との区画(床・壁・上階床)
- ② 供給空気は全てHEPAを通す(FFU)
- ③ 配管類の隠蔽のために設置される天井、シャフト壁
- ④ グレーチング床

図-1 規格によるCR構造が現在のCRに適用されていることを示す例

構造は、以下に示す役割を担っていた。

- ・ 埃だまりを作らないように梁や柱・配管やダクトなどを隠す。堆積塵の再飛散を防止する。ただし、これまでは、梁やダクトの堆積塵が、CR内の通常の気流で飛散するかどうかは確認されていない。
- ・ FCU(Fan Coil Unit)とFFU(Fan Filter Unit)を連結して循環空気中の粒子をすべて除去する。
- ・ 高潔浄エリアを区画し粒子の侵入を防止する。

新システムでは、再飛散しても目標潔浄度に影響がなければ問題ないと考え、床・壁・天井の2重構造をなくし、梁・柱・配管・ダクトなどをCR内に露出とした。また、循環空気中の粒子をすべて除去する必要はないと考え、FCUとFFUを分離した。さらに、高潔浄エリアの区画を気流制御により行うこととした。

従来システムでは、空間上部から吹出し空間下部で吸込む気流を構築しているが、FFUが分散配置された場合、FFU間には必ず上昇流が発生する(図-2)。

新システムでは、上昇流の上部に、下面から空気を吸

表 - 2 従来システムの構成部材の役割と新システムにおいてその役割を補完する代替技術

構成部材	従来システムの構成部材が持つ役割	代替技術	
		その役割を補完する考え方	検討課題
天井と壁	梁・柱・ダクト・配管などを隠ぺいし、堆積塵を再飛散させない。	目標清浄度に影響を与えない範囲であれば、再飛散しても良いと考える。	気流による堆積塵の再飛散の確認、CR 上部から発塵した場合の影響の確認
グレーチング床	微小粒子を床に堆積させない。	目標清浄度に影響を与えない範囲であれば、再飛散しても良いと考える。	人の歩行や台車の移動により堆積塵が再飛散するかどうかの確認
ダクト、2重区画を利用したリターンシャフト	FCU と FFU を連結し、循環空気の冷却と粒子の除去を行う。	全循環風量を HEPA に通す必要はないと考え、FCU と FFU を連結しない。清浄化に必要な循環空気量のみを FFU で清浄化する。	FCU から FFU への吹出し気流制御方式の開発、FCU の発塵量の把握、清浄度への影響確認
間仕切り壁・垂れ壁	高清浄エリアを区画し、浮遊微小粒子の侵入を防ぐ。	吹出し気流制御により高清浄エリアを区画する(粒子の侵入を防止、素早く排除)。	FFU の吹出し気流制御方式の開発

込み FFU に向かって緩やかに吹出す FCU を配置し、FFU 気流により形成される循環気流を FCU で補強するように考えた気流構成である(図 - 3)。CR 内の上昇流がリターンとなり、2重の床・壁・天井なしで循環気流が形成でき、クリーン環境が構築できる。

3.2 熱処理と清浄化の分離の実現

熱処理と清浄化を分離して CR 性能を確保するには、前述の循環気流の形成と FCU から FFU への冷風の受渡しが重要となる。そこで、下面から空気を吸込み FFU に向かって横方向に緩やかに吹出す FCU と、FFU への気流の受渡しを効率よく行う気流制御方式を検討した。

3.2.1 下面から空気を吸込み横方向に吹出す大型 FCU

標準仕様の大型 4 方向吹出し FCU を改造し、意図に合致する FCU を開発した。

改造前の吹出し風速は非常に速く、吹出し気流は FFU に吸い込まれずに上部を通過した。FCU は、コイルで冷却された後に気流方向が変えられ、下面から吹出される構造となっている(図 - 4 の上図)。そこで、図 - 4 の下図に示すように、FCU の側面から緩やかに吹出すように改造した。この FCU は、空気抵抗が減り省エネ化され、同時に、部材数量が減り省資源になっている。

3.2.2 FFU への冷風の受渡しを効率よく行う FCU 吹出し気流制御方式

自由空間において、FCU から FFU へ高効率で冷風を受渡すことを目的として気流制御方式を検討した。開口率の異なるパンチング板による吹出口で気流を制御することにより、開発の意図に合致する気流を実現できた。吹出し風速は、FFU がつくる循環気流を乱さず冷却だけを行うように 1.4m/s 程度に抑えている。

1) 受渡し率の定義

受渡し量を定量的に評価する指標として、FFU に吸込まれる到達空気量と FCU まで到達した空気量から、式(1)で受渡し率 η を定義し、FCU の吹出し気流系と FFU 系の風量と濃度収支から式(2)を導出した。図 - 5 に受渡し率の概念図を示す。

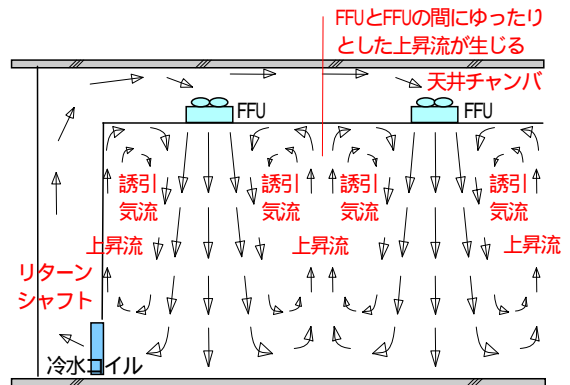


図 - 2 従来システムの気流構成(断面)

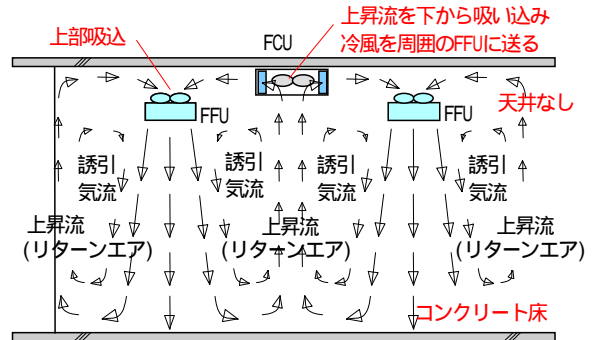


図 - 3 新システムの気流構成(断面)

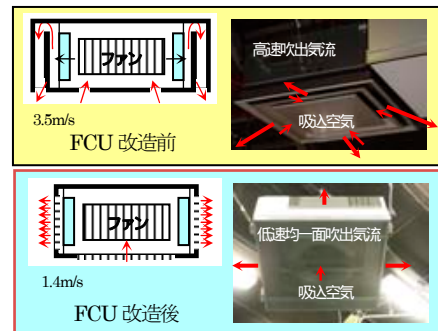


図 - 4 改造前後のFCU断面構造及び空気の流れ

$$\eta = \frac{[\text{FFUに吸込まれる到達空気量}]}{[\text{到達空気量}]} \dots\dots(1)$$

$$\eta = \frac{Q_{1-in}}{Q_1} = \frac{C_r - C_2}{C_r - C_0} \times \frac{Q_2}{Q_0} \times 100 \dots\dots(2)$$

- 【 C_0, Q_0 】 : FCU 吹出口空気 の物質濃度と風量
- 【 C_1, q 】 : FCU から吹出され FFU 吸込口到達するまでに誘引される室内空気 の物質濃度と風量
- 【 C_1, Q_1 】 : FFU 吸込口までの到達空気 の物質濃度と風量
- 【 C_1, Q_{in} 】 : FFU に吸込まれる到達空気 の物質濃度と風量
- 【 C_1, Q_{out} 】 : FFU に到達した空気のうち吸込まれずにオーバーシュートする空気 の物質濃度と風量
- 【 C_2, Q_2 】 : FFU が到達空気以外に吸込む室内空気 の物質濃度と風量
- 【 C_2, Q_2 】 : FFU 吹出口空気 の物質濃度と風量

2) 受渡し率測定結果

トレーサとして粒子を使用し、図-6に示す設備で実験を行った。FCU と FFU の水平距離を設定し、高受渡し率となる垂直距離を求めた。吹出し温度は15℃、実験室内温度は23℃とした。

受渡し率が最も高いFFUの位置は、水平距離1.5mでは垂直距離0.2m、水平距離3mでは垂直距離0.3m、水平距離5mでは垂直距離0.6~0.7mであり、それぞれ約84%、約68%、約45%の受渡し率であった。これにより、FCUとFFUを分離しても、熱処理と清浄化を行うことができる。写真-1に受渡しの様子を示す。吹出し気流がFFUにきれいに受け渡されている。

このFCUにはフィルタは設置されていないが、発塵量は3.0個/cf(0.3μm以上)と非常に少なく、室内清浄度への影響は認められなかった。

3.3 省エネ・省資源を実現するクリーン空調システム

これまでの構造の見直し、代替技術の開発により、建築的には、CR空間とそれ以外の周囲空間を区画する床と壁で構成され、空調的には、FFUとFCUで構成される新たな基本構造が構築できた(図-7)。

§4.タスク&アンビエントクリーン空調システム

§3.で構築した省エネ・省資源を実現するクリーン空調システムをさらに発展させ、CR全体の熱処理と清浄化を行うシステムとより高い清浄度が必要な空間の制御を行うシステムの2つの実用的なシステムの構築を検討した。前者をアンビエントクリーン空調システム(Aシステム)、後者をタスククリーン空調システム(Tシステム)と命名した。Aシステムは非一方向流方式クリーン空調システムであり、Tシステムは局所クリーン空調システムである。2つのシステムを合わせてタスク&アンビエントクリーン空調システム(T&Aシステム)と命名した(図-8)。

4.1 Aシステムの特徴と検討課題

Aシステム(図-9)は、従来システムで必要とされた床・壁・天井の2重構造を必要とせず、FCUとFFUが分離して配置されており、気流制御のみで冷風の受渡しを行い、それぞれの風量が異なっても良いシステムであ

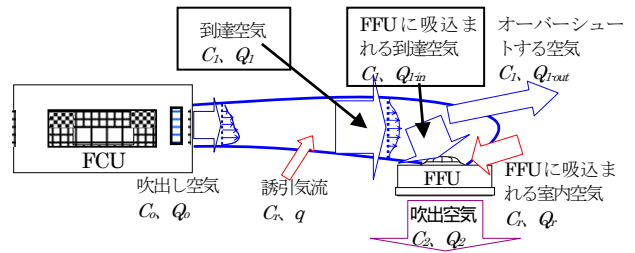


図-5 受渡し率の概念

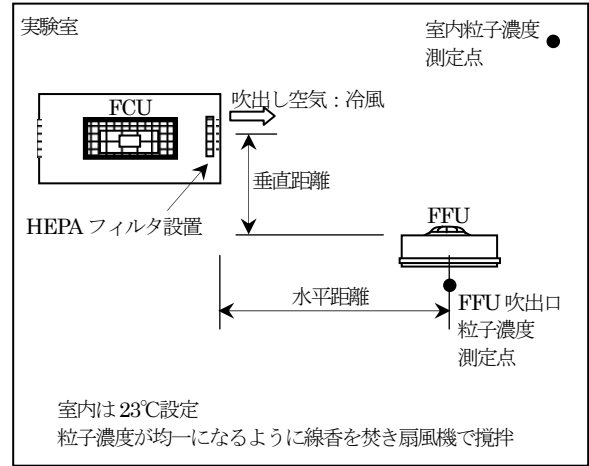


図-6 受渡し率測定実験設備の概要



写真-1 気流受け渡しの可視化

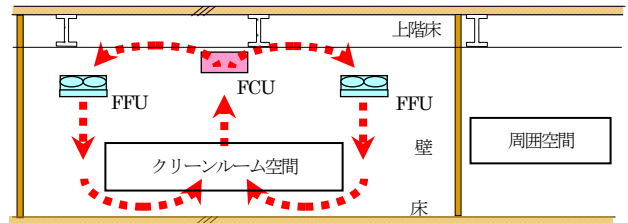


図-7 省エネ・省資源を実現するクリーン空調システム

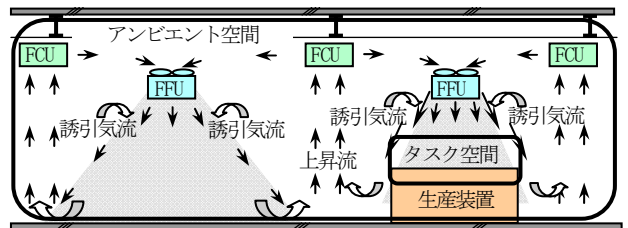


図-8 T&Aシステムの概念図

る。FCUは熱負荷に応じて、FFUは清浄度に応じて設置されるため、無駄なく最適な清浄環境、温熱環境が構築できる。対応可能な清浄度レベルはJISクラス6~8である。以下に特徴と検討課題を示す。

●特徴

- ・床・壁・天井の部材が削減できる。
- ・壁がないため、有効スペースが増加(5~10%)し、さらにフレキシビリティの高い空間となる。
- ・階高を低くできる。
- ・清浄化と熱処理に必要な風量と機器台数を必要最小限とすることができる。
- ・ダクトがなく、搬送動力を削減できる。
- ・効率の良いFCUが採用でき、送水量を削減できる。
- ・FCUやFFUを容易に増設・移設でき、装置レイアウトや条件の変更時の対応も容易である。

●検討課題

- ・省資源を目的として多風量型FFUとしているため、FFU配置間隔が広くなり、よどみ域が多くなる。そこで、よどみ域が少なく換気効率の良い気流を形成できる気流制御方式を開発する必要がある。
- ・2重構造の取りやめにより、梁・柱・ダクト・配管等が露出となり、堆積塵の再飛散の可能性がある。
- ・人の歩行や台車の移動により、床の堆積塵の再飛散の可能性がある。

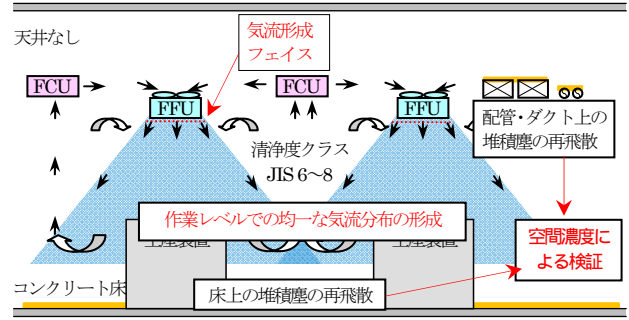


図 - 9 Aシステムの概念図

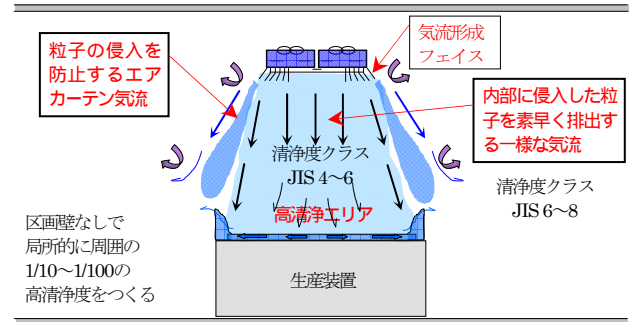


図 - 10 Tシステムの概念図

4.2 Tシステムの特徴と検討課題

Tシステム(図 - 10)はJISクラス6~8のCR内に、区画壁なしで気流制御のみで局所的に、周囲濃度の1/10~1/100の高清浄な空間が構築できるシステムである。フィルタ面積より広いエリアを高浄化することで、より省エネ・省資源とした。対応可能な清浄度レベルはJISクラス4~6である。以下に特徴と検討課題を示す。

●特徴

- ・区画壁や垂れ壁がない。
- ・装置とFFUの間に装置用クレーンなどを走行させることができる。
- ・見通しが良く、安全を確認しやすい。
- ・FFUの設置台数を削減できる。

●検討課題

区画壁なしで局所清浄化を実現する吹出口の検討が行われているが、清浄化できるエリアが小さく近年の大型装置には適用できない。また、吹出し気流により周囲の粒子が誘引されるため、従来のFFUでは区画壁なしでフィルタ面積より広いエリアを高浄化することは困難であった。以下に示す気流を検討し、フィルタ面積より広いエリアの高浄化を実現した。

- ・より高浄化するために、多風量FFUとする。
- ・周囲空間の粒子の侵入を防止できるエアカーテン状の気流を形成する。
- ・侵入した粒子を素早く排除するために、エアカーテン内部の気流を乱れが少ない一様な気流にする。
- ・エアカーテン気流を乱れないように広げる。

§5.Aシステムの開発と性能検証

ここでは4.1に示した検討課題解決のための開発と性能検証について述べる。性能検証については、実際の使用状況を想定して、汚染後の回復特性(換気効率)、検討課題に示した発塵時の影響、温度分布特性に関して、従来(FFU)システムとの比較実験を行った。

5.1 FFU用の気流形成フェイスの開発

4.1で指摘したようによどみ域が少なく換気効率の良い気流を形成するために、吹出し気流を広げてFL+600mm近傍で均等な気流分布を形成することを考え、11パターンフェイスを検討した。その結果、2種類のパンチング板と端部開口から構成されるフェイス(写真 - 2)により意図する気流を形成できた。図 - 11に示すように、FFUからの水平距離0~1.5mの範囲ではほぼ0.4m/sの均一な風速が得られた。

5.2 性能検証実験

はじめにCRの基本となる気流性状の確認を行った。名目換気回数を45回/h、装置発熱を想定して加熱条件を600W/m²とした。

図 - 12に実験CRの概要を示す。中央部を通路とし、両側に模擬装置とオープナーを想定した箱(ミニエン)を5台配置した。CRは0~600W/m²で任意に加熱できる。図 - 12の左図にFFUシステムの機器配置を示す。模擬装置上部にFFU(1.2m×1.2m、2,240m³/h×12台)、床下にドライコイル(DC、9kW×4,500m³/h×10台)を設置

している。床はグレーチングで、CR 周囲にリターンシャフトを配置している。図-12 の右図に A システムの機器配置を示す。通路上部に FCU(23.2kW×8,500m³/h×4 台)、模擬装置上部に FFU(0.6m×1.2m、2,660m³/h×10 台)を設置している。床は長尺シート仕上げとした。

5.2.1 気流性状

図-13、図-14 に FFU システムと A システムの代表的な気流性状を示す。

FFU システムでは、装置表面(50~70℃)の熱上昇流により FFU 気流がミニエン上部に到達しない。また、熱上昇流を補うように通路部と床下からミニエン側に空気が流れている。天井面や床付近での発塵は気流によって室全体、ミニエン上部に影響する。

A システムでは、FCU⇒FFU⇒ミニエン⇒上昇流⇒FCU という循環気流が形成され、FFU 気流は熱上昇流に勝ちミニエン上部を覆っている。通路部では FCU に向かう積極的な上昇流となっている。天井面や床付近での発塵のミニエンへの影響は少ない。名目換気回数 15 回/h、25 回/h においても同様の気流性状であった。

5.2.2 回復特性

1) 局所回復特性

CR 内を所定の濃度(100,000 個/0.01cf)に汚染し、空調開始と同時に粒子濃度を測定した。測定は光散乱式粒子計数器(KC-01A、リオン)で行った。測定点は各ミニエンの上部(FL+1.2m)とした。

図-15 に実験結果を示す。FFU システムの各測定点の局所換気回数平均値は 29~31 回で、名目換気回数 45 回/h を下回っている。A システムは 49~52 回で、45 回/h を上回っており、局所回復特性が高い結果となった。名目換気回数 15 回/h、25 回/h の場合も同様に、FFU システムでは名目換気回数を下回り、A システムでは名目換気回数を上回る結果となった。

2) A システムの局所回復特性が高い理由の検討

図-16 に示すように、FFU と FCU で形成される空気の流れに沿って、通路部を共通点として 2 点同時に粒子濃度を測定した。

その結果、各点の局所換気回数は 53~54 回/h であったが、通路を基準とした濃度比から、FFU 吹出口下(①)から FCU 吸込口下(③)間には濃度減衰に時間遅れがあり、流れに沿った濃度勾配があることが確認された(図-17)。このことから、この流れ場は『疑似押し出し流れ』であり、FFU は常に高い粒子濃度の空気を清浄化しているため、回復特性が高いことが明らかになった。

FFU システムにおいて、扇風機で攪拌しながら回復特性を測定したところ、名目換気回数に近い値が得られた。FFU システムでは十分な混合が行われておらず、また、押し出し流れも形成されていない乱流のため、回復特性が低いと考えられる。

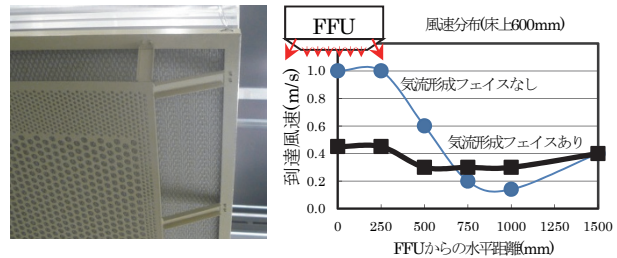


図-11 気流形成フェイスの効果

写真-2 完成した気流形成フェイス

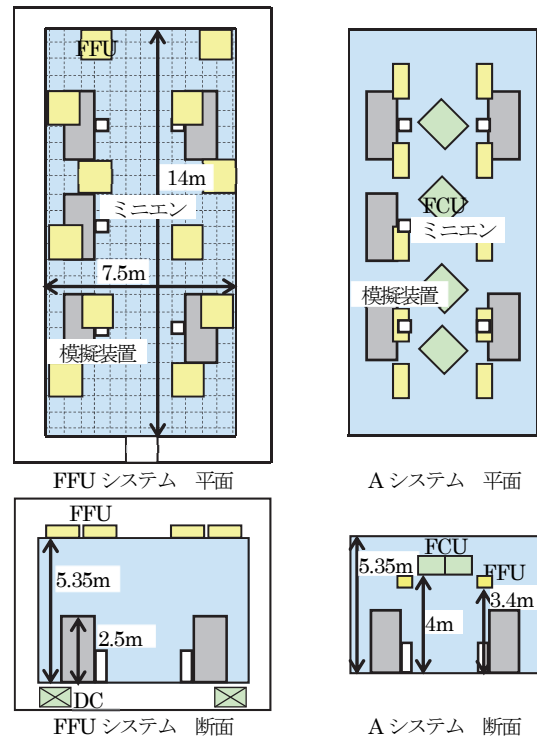
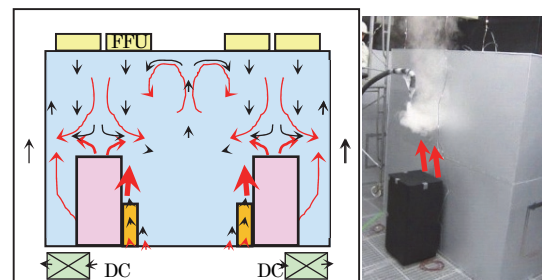
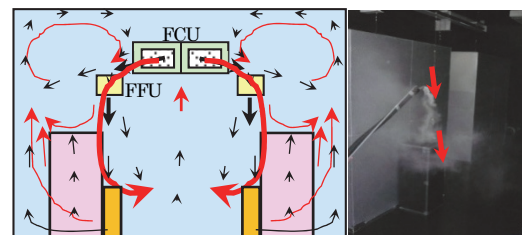


図-12 実験 CR の概要



装置の熱上昇流により清浄空気がミニエンに届かない。床下から空気が上がってくる。

図-13 FFU システムの代表的な気流性状



FFU の清浄空気がミニエンを覆っている。FCU に向かう積極的な上昇流が見られる。

図-14 A システムの代表的な気流性状

5.2.3 発塵時の影響

1) 天井面発塵の影響

空間上部に配置される搬送装置や天井配管などからの発塵を想定している。発塵源として外気を導入(1.0×10⁶個/min)した。測定は、光散乱式粒子計数器(KC-01A、リオン)で行った。測定点は各ミニエンの上部 6 点 (FL+1.2m)、発塵位置は通路中央部の上部天井面とした。

図 - 18 に実験結果を示す。FFU システムでは発塵開始後徐々に粒子濃度が増加し、影響がすべての測定点に及んでいる。A システムでは発塵しても粒子濃度は増加しない。FFU⇒ミニエン⇒上昇流⇒FCU の気流により、発生粒子が FFU で清浄化されているからである。

2) 歩行者発塵の影響

クリーンスーツ着衣者歩行時の発塵の影響をミニエン上部で評価した。測定は光散乱式粒子計数器(LASAIR II、PMS)で行った。床の状態は通常の使用状態を想定し、実験前に一度掃除機による清掃を行ったのみである。測定は 1 点(FL+1.2m)とした。

図 - 19 に実験結果を示す。FFU システムでは歩行開始後に粒子濃度が上昇し、歩行の影響が顕著に現れている。A システムでは影響は小さく FFU 方式の 1/5 程度である。A システム特有の気流により、発生粒子がミニエン側に流れにくいことが要因である。名目換気回数 15 回/h、25 回/h においても同様の結果が得られた。

5.2.4 温度分布特性

空間的な均一性と同一点での時間的な均一性の評価を行った。図 - 20 に測定点を示す。平面で 20 点、各点で上下方向に 3 レベル(FL+1.2m、FL+2.8m、FL+4.6m)とした。測定は T 熱電対を用いて行い、データロガー(メモリーハイロガー-8422-50、HIOKI)で 10 分間記録した。模擬装置近傍はアルミ箔で輻射の影響をカットした。

1) 空間的な温度均一性

図 - 21 に測定高さごとの平均値を示す。FFU システムでは測定場所による変動が小さい。A システムでは通路部と両端部は温度が低く、模擬装置の間は温度が高い傾向にあり、場所によりばらつきがある。

2) 同一点での時間的な温度均一性

図 - 22 に測定点ごとの時間標準偏差を示す。FFU システムでは各測定点の時間標準偏差は 0.3~1.0℃でばらつきが大きい。FFU システムの 45 回/h では、600w/m²には対応できず、測定時間内に温度が徐々に上昇したためである。A システムでは 600W/m²に十分に対応でき、各測定点の時間標準偏差は 0.1~0.3℃でばらつきは非常に小さい。吹出気流が熱上昇流を抑え込み気流が安定し、揺らぎが少なくなっていることが要因と考えられる。以上より、A システムでは、温度分布を 23±2℃ (FL+1.2m レベル)に制御でき、同一点の温度変化を ±0.5℃ (FL+1.2m)に抑えられることが確認できた。

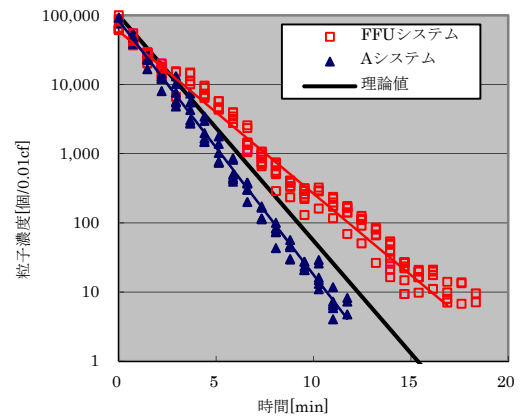


図 - 15 局所回復特性の実験結果

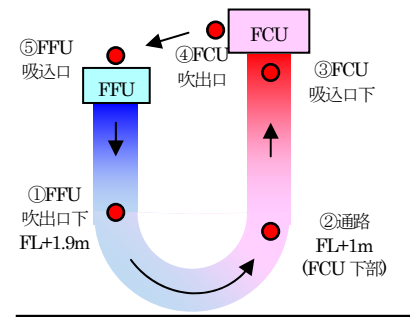


図 - 16 粒子濃度測定点

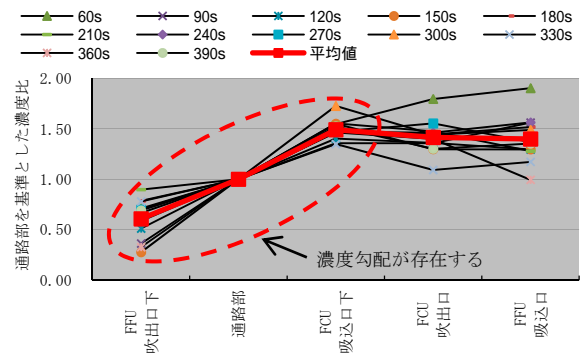


図 - 17 通路部を基準とした粒子濃度比

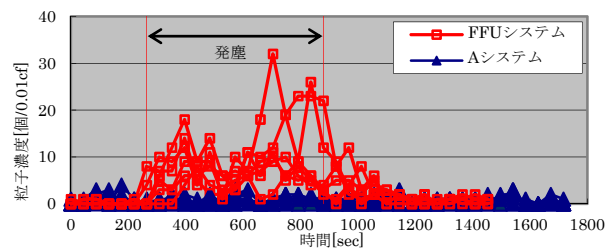


図 - 18 天井面発塵の影響(粒径 0.3μm 以上)

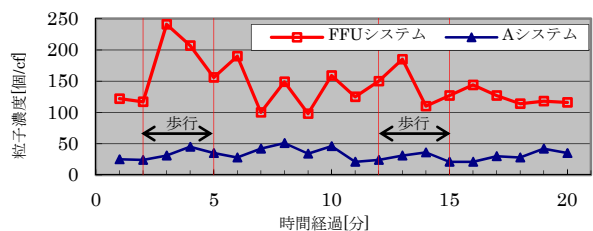


図 - 19 歩行者発塵の影響(粒径 0.1μm 以上)

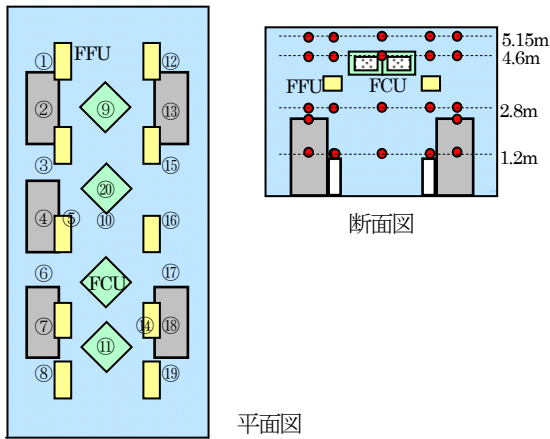


図 - 20 温度分布測定点

§6.T システムの開発と性能検証

ここでは 4.2 に示した検討課題解決のための開発と性能検証について述べる。課題解決のために、①T システムの条件設定、②フィルタ面積より広いエリアを高浄化できる気流性状を模索する予備実験、③理想的な吹出し気流を形成できる FFU と気流制御方式の開発、の手順で検討を行った。

6.1 空間条件および目標濃度の設定

大型の生産装置を対象として T システムの条件を設定した。図 - 23 に高浄化対象域の断面と平面を示す。高浄化域は 2.6m x 2.3m で、形状は清浄化しにくい凹面(深さは 100mm)とし、FFU と高浄化面の距離は 3m とした。目標濃度は周囲空間粒子濃度の 1/10 未満とした。

6.2 吹出し面積と気流制御方式を模索する予備実験

図 - 23 に示す対象域内の測定点と周囲空間 1 点の粒子濃度から算出される濃度比により、検討内容の良し悪しを判断した。測定は光散乱式粒子計数器(KC-01A、リオン)で行った。

より省資源とするために、対象域を高浄化できる必要最低限の吹出し面積を検討した。1.2m x 0.6m と 1.2m x 1.2m の検討を行ったが 1.2m x 0.6m では対象域に十分な気流が届かなかったため、1.2m x 1.2m (FFU2 台を連結)を基本システムとした。

吹出し面積の検討により目標濃度を達成するには、気流を広げること、FFU 連結部の誘引対策、気流の乱れを少なくすることが必要であることが明らかになった。

吹出し気流を広げるガイド板、誘引防止のふさぎ板、気流の乱れ防止のパンチング板の検討を行った。図 - 24 に検討結果を示す。ガイド板方式は周囲部の粒子濃度が低減され、ふさぎ板方式は対策効果あまりない。パンチング板方式では中央部の濃度比が低減されており、また、パンチングの抵抗により吹出し面とパンチング板間

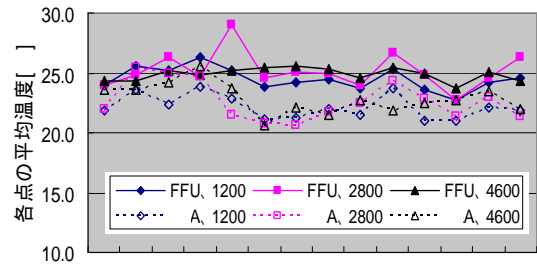


図 - 21 測定高さごとの平均値

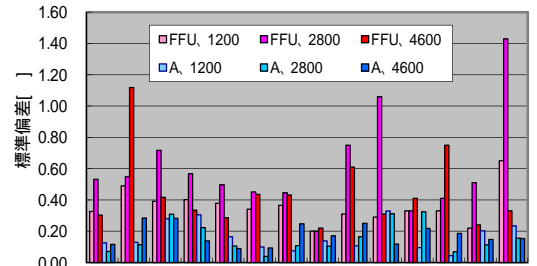


図 - 22 測定点ごとの時間標準偏差

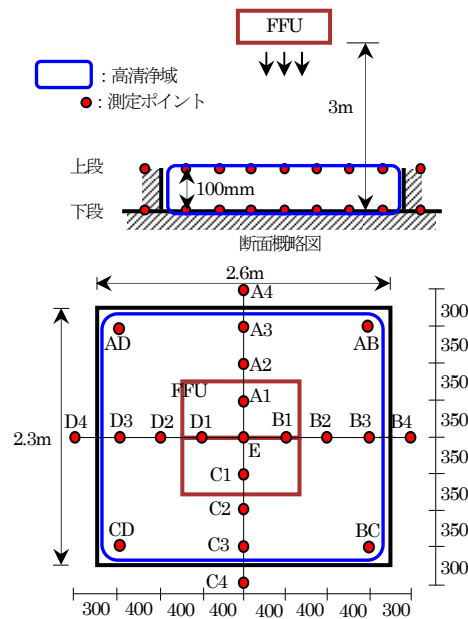
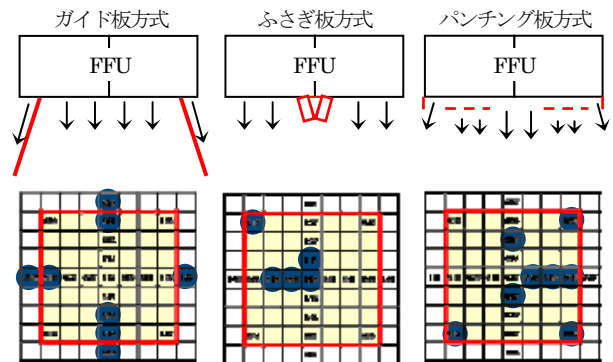


図 - 23 高浄化域と粒子濃度の測定点



青丸は FFU のみの時より粒子濃度比が改善されている部位を示す。

図 - 24 気流制御方式の検討結果

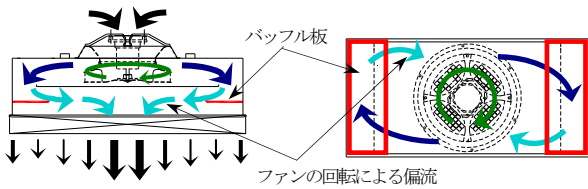


図 - 25 改造前のFFUの内部気流

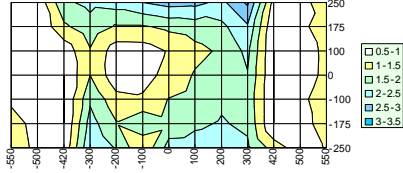


図 - 26 改造前のFFUの吹出し面風速分布[m/s]

の圧力が上がり誘引を防止できることが確認された。

以上の結果から、吹出し面積 1.2m×1.2m、気流を広げるガイドと乱れ防止のパンチング板で構成されるフェイスを気流制御方式の基本形とした。

6.3 FFU と気流制御方式の開発

6.3.1 吹出し面風速が均一化されたFFUの開発

T システムでは、中央部の風速が均一で、周囲風速が速い多風量のFFUが理想である。従来FFUは上部から空気を吸込み、横に向きを変えて下面から吹出す構造(図-25)となっており、吹出し面風速(フィルタから5cm)はバッフル板・ファン下部の風速が遅く、回転による偏流もみられ(図-26)、改善の余地があった。そこで、ファンブレード・モータ変更、低圧損HEPAによる風量アップ、バッフル板の開孔加工による分布ムラの改善、気流調整板による偏流防止(図-27)などを実施した。図-28に改造後の吹出し面風速分布を示す。中央部の風速が均一化され、周囲部の風速が速くなっている。

表-3に改造前後の吹出し面風速測定結果を示す。平均風速がアップし多風量となり、標準偏差が約半分・変動係数が約1/3になり、乱れが小さくなっている。また、周囲部の平均風速が改造前の約1.5倍になり、意図する気流が形成できている。

6.3.2 区画壁なしでフィルタより広いエリアを高浄化できるタスク用気流制御方式

FFUの吹出し気流は、周囲の粒子を誘引するため区画壁なしでは高浄化度が維持できない。また、下流ほど粒子が内部へ拡散するため、高浄化域から離れた場所から清浄空気を供給する場合、フィルタより広いエリアを高浄化することは難しい。本開発では、外側に広がるエアカーテン気流を形成するガイド、内部の一様な気流を形成するメッシュ金網による気流制御方式を検討した。その結果、誘引防止ガイドと気流を広げる順次角度を変えて設置した4枚のガイドとメッシュ金網で構成されるフェイス(写真-4)により目標とする気流を形成した。

開発したFFUに前述のフェイスを設置した場合と設

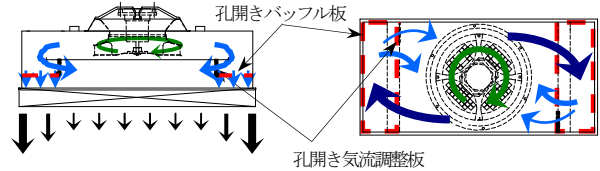


図 - 27 改造したFFUの内部気流

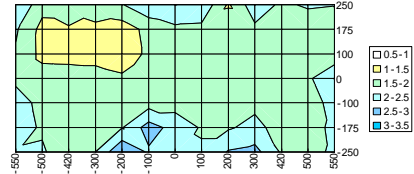


図 - 28 改造後のFFUの吹出し面風速分布[m/s]

表 - 3 FFUの吹出し面風速測定結果

		平均風速 [m/s]	標準 偏差	変動 係数
改造前	全体	1.24	0.62	0.50
	中央部	1.17	0.56	0.48
	周囲部	1.34	0.63	0.47
改造後	全体	1.89	0.33	0.18
	中央部	1.76	0.26	0.15
	周囲部	2.10	0.34	0.16

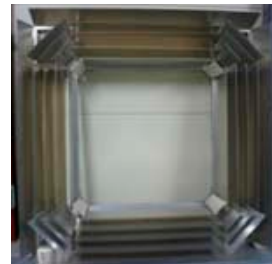


写真 - 4 気流形成フェイス

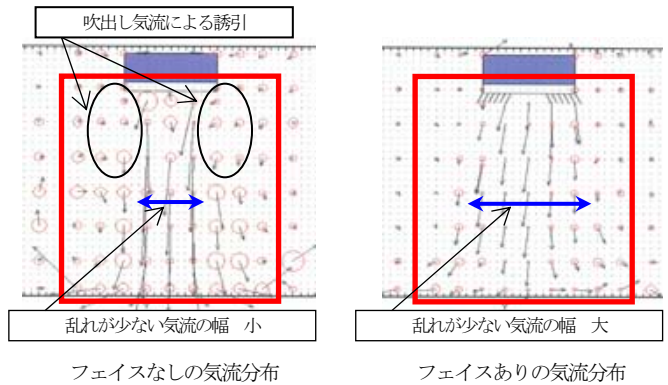


図 - 29 超音波風速計による気流分布測定

置しない場合のFFU中心部の気流分布を超音波風速計(WA-590型超音波風速計、ソニック)で測定した。図-29の左図にフェイスなし、図-29の右図にフェイスありの測定結果を示す。矢印の大きさは平均風速、円の大きさは乱流の強さを表している。

フェイスなしでは、乱れが小さい気流の幅は吹出口より狭く、また、吹出口直下での誘引気流が大きい。気流の境界部の乱流の強さも大きく、周囲空気の巻き込みが大きい。

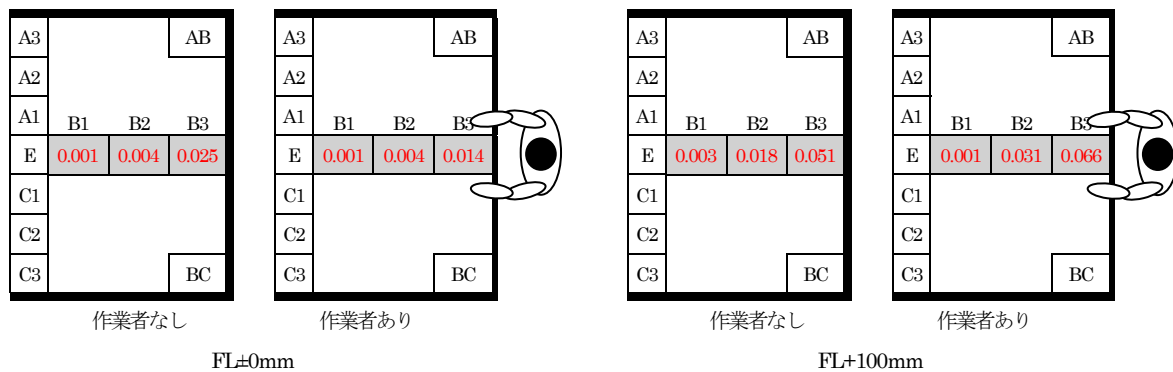


図 - 30 高浄化エリア近傍で作業を行った場合の粒子濃度比

フェイスありでは、乱流の強さが非常に小さい。また、乱れが小さい気流の幅はFFUの幅よりも広く、吹出口より広い範囲が清浄空気で覆われている。気流の境界部の乱流の強さも小さく、周囲空気の巻き込みも少ない。

図 - 29 の赤線内の乱流の強さは、フェイスなしでは125.4mm/s、フェイスありでは61.4mm/sであり、フェイスを設置することで乱れが約半分に低減されている。

6.4 Tシステムの性能検証

実CRでは作業者が高浄化エリア近傍で作業を行い、気流の乱れや発塵があるため、作業による発塵の影響評価を行った。測定は光散乱式粒子計数器(KC-01、リオン)で行った。

図 - 23 のB4の位置にクリーンスーツを着た作業者が中腰で立ち、模擬作業として上下腕振り運動を1分間行い発塵させた。発塵中にB1、B2、B3の各点の粒子濃度と周囲濃度を測定し、粒子濃度比を算出した。この運動による発塵量は200,000個/min程度である。

図 - 30 にFL+0mm(左図)とFL+100mm(右図)における粒子濃度測定結果を示す。FL+0mm、FL+100mm共に、模擬作業中の濃度比は作業者なしと同等であり、目標値を満足していることが確認された。以上より、Tシステムでは、高浄化エリアの端部で作業を行っても、内部への影響はほとんどないことが検証できた。

<参考文献>

- 1) PHILIP R. AUSTIN, STEWART W. TIMMERMAN : "DESIGN & OPERATION OF CLEAN ROOMS", Business News Pub. Co., 1965
- 2) 東芝セミコンダクター社大分工場 : "SMIF導入に伴う空調エネルギー削減", 省エネルギー, Vol.55, No.2, 2003, pp.56~60.
- 3) Air Force Technical Order 00-25-203 : "Standard Functional Criteria for the Design and Operation of Clean Rooms", 1961.3
- 4) Federal Standard 209 : "Airborne Particulate Cleanliness Classes in Clean Rooms and Clean Zones", 1963.12
- 5) Federal Standard 209B : "Clean Room and Work Station Requirements, Controlled Environment", 1973.4
- 6) 平沢紘介他 : "最近のフィルター", 建築設備と配管工事, 1989.6, pp.70~82.
- 7) 坂本数彦他 : "局所清浄化のための特殊形状吹き出しノズルの開発", 第19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, 2001, pp.99~101.
- 8) 長谷部弥他 : "クリーンルームシステムにおける建設段階の環境負荷低減に関する研究 第1報—新クリーンルームシステムの提案と建設段階の環境負荷", 空気調和・衛生工学会論文集, No.143, 2009, pp.11~20.

§7.まとめ

従来CRの基本構造にとらわれず、CRの構成部材が持つ役割を制御技術で補完することにより、CR特有の床・壁・天井の2重構造がなく、かつ、熱処理と清浄化の連結を行わない、新たな空調システムを構築し、そこから実用的な省エネ・省資源を実現できるクリーン空調システム、タスク&アンビエントクリーン空調システムを開発した。Aシステムは非一方向流方式クリーン空調システム、Tシステムは局所クリーン空調システムである。

Aシステムは、特有の気流性状により、汚染時の回復特性に優れ、発塵時の影響が非常に少なく、従来のFFUシステムと比較して、クリーン性能が高いシステムであることを実験により検証した。

Tシステムは、区画壁なしで気流制御のみでフィルタより広い面積を周囲空間の粒子濃度より1/10~1/100の濃度に局所的に高浄化できるクリーン空調システムであることを実験により検証した。

謝辞

本研究を行うに際しては、OB鈴木良延氏、伊澤康一氏に多大なご指導・ご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。