

作業者保護のためのクリーン機器応用技術

クリーンルーム関連機器と技術を活用した 粉体取り扱い現場における作業者保護の方法

ホソカワミクロン(株) 井上 義之

● はじめに

粉体を取り扱う現場は、通常の室内における粉塵量とは比較にならないほど多量の粉塵が浮遊・飛散していることが多い。このような作業環境では作業員への暴露による健康被害、製品へのコンタミ、有害物質の外部への拡散などが危惧される。逆にいえば、このような作業環境を改善することができれば、作業員への暴露防止による安全が図れるのはもちろんのこと、コンタミ防止による製品品質の向上、外部への漏えい防止による事故の防止と周辺環境の改善も期待できる。したがって、粉体を取り扱う工程における作業環境の改善は、コスト削減に有効であるとの認識が高まってきており、近年注目を浴びている。

粉体を取り扱う作業環境の改善のためには、発塵・飛散・浮遊を徹底的に排除し、クリーン（清浄空間）環境を作り出し、またその環境を制御する必要がある。このためにはクリーンルームなどで用いられている粉塵コントロールの方法を適用することが可能である。しかし、粉体を取り扱う現場では、クリーンルームが対象としている粉塵濃度とはその濃度が余りにも異なるため、クリーンルームで用いられている機器をそのまま使用することはできない。また、このような現場では粉体を取り扱う機器、特に粉塵を発生しやすい供給機・排出機・粉碎機といった粉体機器が用いられており、そのような装置を使用しながら環境を制御すると

いったノウハウが必要となる。

当社は創業以来、95年にわたって粉体技術に取り組んできており、粉体製品を製造する機器やそのハンドリングに関するノウハウを豊富に所有している。一方、当社は、粉体技術の一翼を担う集塵や粉体製品の回収装置としてのバグフィルタ、病院・半導体工場向けのクリーンルーム、製薬工場向けのラミナーフローブースなどの空調関係の機器も製造・販売している。したがって、このようなさまざまな技術を融合させることにより、粉体を取り扱う現場のような高濃度粉塵環境においても作業環境を改善することができると考えている。本稿では当社が開発・販売している高濃度粉塵環境に対応した、作業環境を改善するための機器やシステムを紹介する。

● 高濃度粉塵に対応した 作業者保護設備

(1) エアシャワー：

清層圏（当社商品名）

通常のエアシャワーは食品や半導体工場の現場の入り口に設置される場合が多い。清浄な空間に入室するため、人体や搬入品の塵埃を除去して内部の清浄度を壊さないようにするためである。粉体を取り扱う現場においてはこの逆であり、現場の塵埃を一般棟や建屋外に漏出・持ち出させないようにすることが目的である。作業員や製品に付着している塵埃量が非常に多い場合は、通常のエアシャワーを使用しても、

パワー不足なことが多い。したがって、除去された塵埃を捕集し、エアをろ過するためのフィルタも高濃度粉塵に対応したろ過システムが必要となる。さらに一般のエアシャワーでは除塵作業中に塵埃が飛散して呼吸域に到達してしまうことが多く、作業員保護の観点から見て好ましくない。そこでこのような問題を解消するために開発した当社のエアシャワー“清層圏”を写真1、写真2および図1に示す。このエアシャワーの特長は次の3点である。



写真1 人用清層圏の外観

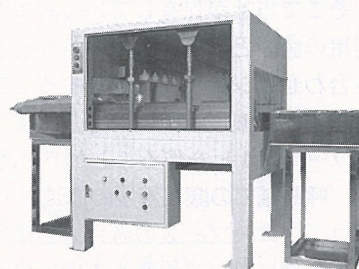


写真2 荷物用清層圏の外観

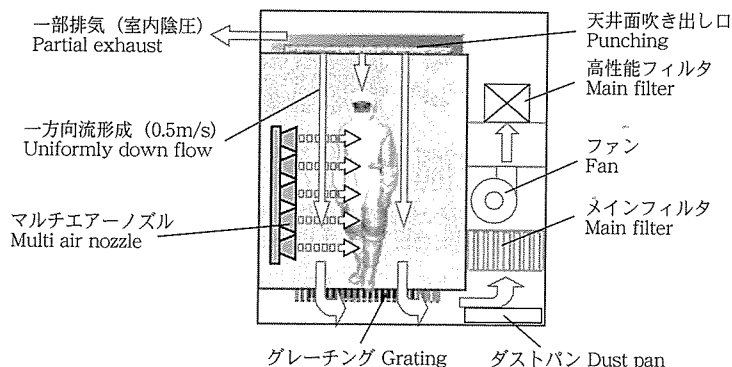


図1 高濃度粉塵対応清層圏の構造

① 高速かつ除去効率の高い流れ場
通常のエアシャワーで採用されている洗浄エアの速度は20 m/s程度であるが、本機では100 m/sと5倍程度、高速な洗浄エアを採用している。さらに被洗浄物表面において、速度場が時間とともに変化する洗浄エアを用いているため、衣服や製品表面を叩くような効果がある。このため、一般的なエアシャワーで利用されている一様な速度場を持つ洗浄エアを使う場合よりも粉塵の除去に有効である。

② 高濃度粉塵に対応するための塵埃回収部

一般的なエアシャワーでは目に見えない程度の塵埃を除去することが多いため、塵埃回収部のフィルタが詰まってしまうことは余りない。しかし、粉体が舞っているような現場から帰ってくる作業員や、外部に搬出される製品においては多量の塵埃が付着しているため、一般的なエアシャワーを用いると即座にフィルタが目詰まりしてしまう。そこで当社が保有している高濃度集塵用の装置と、このエアシャワーを組み合わせたシステムを構築することによって、高濃度粉塵に対応したエアシャワー（図1）を作ることができた。

③ 呼吸域での塵埃濃度の低減

ダウンフローブースの考え方を適用し、呼吸域において鉛直下方向への流れ場を形成させることにより、塵埃が

できる限り呼吸域に到達しないようにしている。

(2) プッシュプルブース

作業域を囲ってブース状にすることは、塵埃の外部への漏出を防ぐために有効な手段である。しかし、部屋を仕切って出入り口にエアシャワーを設けただけでは、内部で作業する作業員の環境は改善されないどころか、粉塵が外部に拡散しないために室内での粉塵濃度が高くなるため危険でもある。そのためクリーンブースなどで用いられている気流制御を行い、塵埃の効率的な除去が必要である。この種の装置で最も安全性が高く、かつ安全に作業できる面積が広い装置は、次節で述べるセーフティブースである。しかしこの

装置には、イニシャルおよびランニングコストが比較的高いという問題がある。そこで作業空間の大きさや安全性はセーフティブースに及ばないものの、これらのコストを低減しうるプッシュプルブースも開発・販売している。具体的には作業空間と実際に粉体機器が設置される場所を分けて取り扱い、作業空間のみを清浄に保つ場所として、集中的に清浄化するという考え方を採用している。写真3にブースの外観を、図2に構造を示す。セーフティブースの最大の特長であり、かつ上記の問題の原因でもある天井全体からの気流の吹き出しを止め、二ヶ所の給気口から吹き出すように変更している。これに

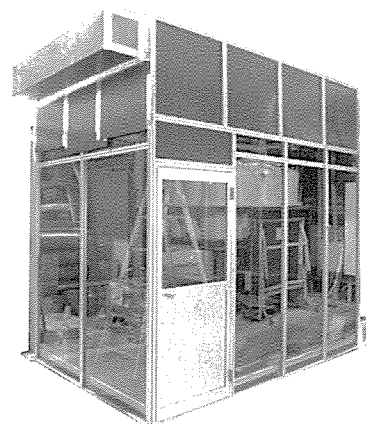


写真3 プッシュプルブースの外観

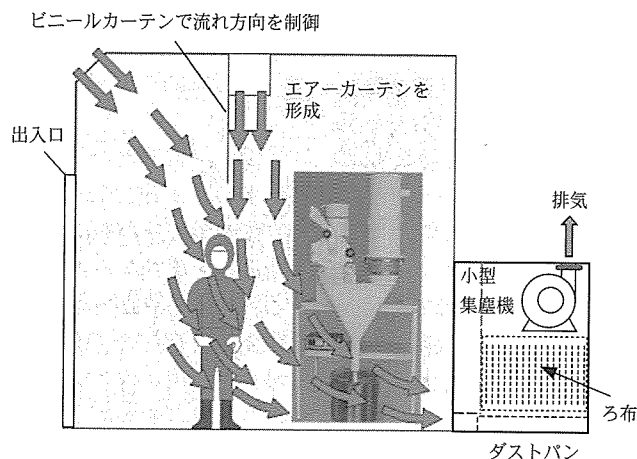


図2 プッシュプルブースとビンミルの組み合わせ

よって必要風量が、通常のセーフティブースの2分の1程度となり、インシヤルコストもランニングコストも低減できる。この設計には当社で実施したCFD（数値流体力学）の結果（図3）を参考にした。シミュレーション結果より、この位置関係と吹き出し風速の制御によって作業空間での適切な気流方向と速度が確保できるとともに、作業空間外であるが出入り口に近い領域（図3の左側）への流れの抑制、すなわち塵埃の漏出が抑制できることが示唆された。また、実際の実験でも定性的にシミュレーション結果が示された。

なお、排気部で強制的にエアを排出しているため、本ブースはプッシュプル方式ではあるが、上述したように壁で囲っているため、一般的なプッシュプル方式で問題とされている塵埃のブ

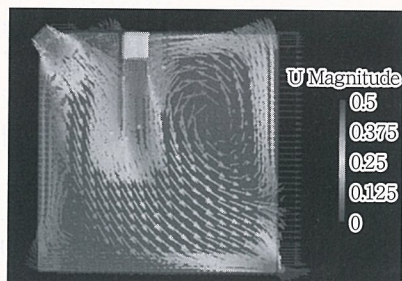


図3 プッシュプルブースの構造決定のためのCFD結果

ース外への漏出を大きく抑制することができる。

(3) ダウンフローブース：

セーフティブースブース®

前節で述べたようにブースを形成して、その天井のほぼ全面から鉛直下方向に気流を吹き出し、出入り口から遠い床面付近で排気する方法をセーフティブース（写真4、図4）と名付けている。ダウンフローによって発塵が発生しても速やかに廃棄されることが実験でも示されており、安全性の高い方法である。なお、吹き出し部の直下の領域ほぼ全体で安全に作業することが可能である。したがって、卓上サイズの装置だけではなく机程度のサイズの装置でも設置して利用することができるため治験薬製造等に用いられている。なお、本装置においても高濃度粉塵回収用の装置と組み合わせたシステムを構築することによって、高濃度粉塵に対応している。

このとき作業者の安全性を確保するためには、0.3～0.45 m/sの速度でエアを吹き出させる必要がある。例えば、幅2 m、奥行き1 mの作業空間を確保する場合、吹き出し部に設置されるスクリーンもほぼ同じ面積のものが必要

となり、さらに必要な風量は36～54 m³/minとなってしまふ。このため通常はろ過したエア量の90%程度を再度吹き出しエアとして利用している。なお、ろ過フィルタの交換をバグインーバグアウトで交換して、より安全性を高めることもできる（オプション）。

(4) ナノリスク対策用

セーフティブース®

ナノ粒子はさまざまな分野において広く使われ始めており、特に研究開発では盛んに利用されている。しかし、ナノ粒子は生体に悪影響を及ぼすという報告もあり、ナノ粒子の取り扱いに対しては、厚生労働省・環境省・経済産業省から予防的見地に立った取り扱い方法が推奨されている。それによればナノ粒子を扱う工程を密閉状態にするか、密閉化が困難な場合はプッシュプル型換気装置を設けることになっている。しかし、一般的に粉体を取り扱う作業や装置の清掃作業等を密閉化することは困難なことが多い。また、密閉化が可能であっても、作業性が極めて悪くなる場合が多い。したがって、現実的には、工程を囲いつつもある程度フリーアクセスできる環境を準備することが求められる。

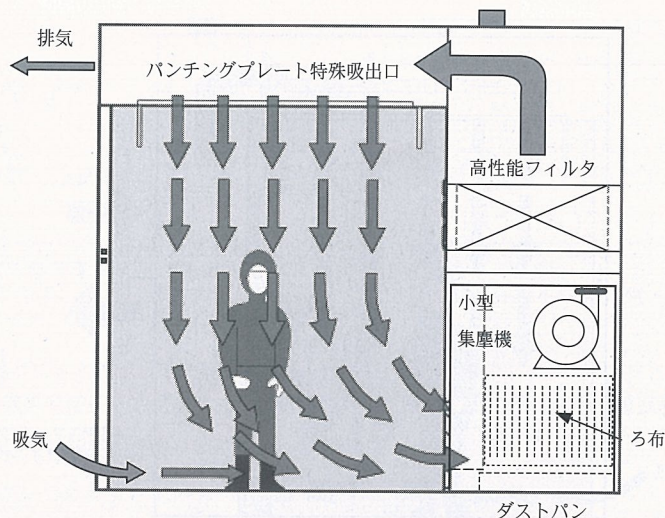


図4 セーフティブースの構造

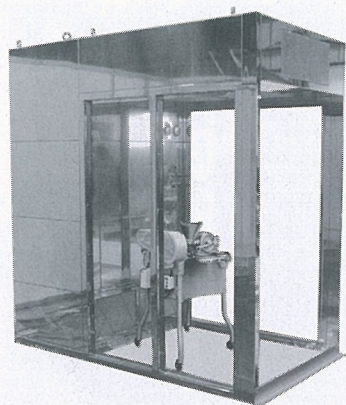


写真4 セーフティブースと衝撃式粉砕機の組み合わせ

一方、プッシュプル型の換気装置を使ったところで、ブース状にしない場合は粉塵が作業域からリークする問題が残る。このためケミカルハザードの防止が必要とされる医薬分野などでは、水平流を使うドラフト型のブースやより安全性の高いダウフロー型のブースの内部で粉体を取り扱うことが多い。したがって、ナノリスク対策においても一定以上のレベルを持つ装置が必要である。そのため当社は、“ナノリスク対応セーフティブース”を開発し、利用していただいている。写真5と図5に、このブースと当社の酸化物ナノ粒子合成装置（FCM-MINI）を組み合わせた模式図と外観写真を示す。

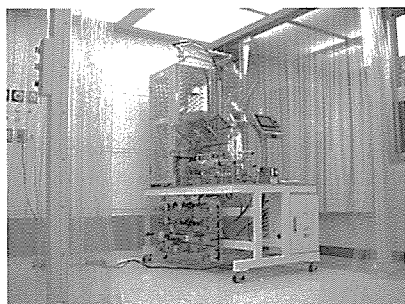


写真5 ナノリスク対応セーフティブースとナノクリエータの組み合わせ

本ブースにおいては、一般的なダウフローブースと同様に、天井からエアが鉛直下方に均一速度で吹き出している。このダウフローによってナノ粒子を含む塵埃は速やかに装置下部の奥側の設けられた排気口に向かって輸送される。また、ブース内は外部よりもわずかに負圧になるように調整されている。これらによって作業者の呼吸域における暴露を抑えるとともに外部環境への漏出も防ぐことができる。排気用のフィルタは粉体濃度によって適切なものを選択しているが、厚生労働省の指針に基づき、最終的には必ずHEPAフィルタによってろ過してから屋外に排気するようにしている。また、同指針に基づきプッシュプル方式を採用しているため、一般向けのセーフティブースとは異なり、吸気・供給用と排気用のブロウを各一台内蔵している。なお、一般向けセーフティブースと同様に、バグインーバグアウトでフィルタを交換できるようにオプションで対応している。

(5) 粉体機器内蔵アイソレータ

主に医薬分野、特に抗癌剤など非常に少量で生体に影響を与える物質を取り扱うためには、ばく露量をできる限

り低く、例えばOEL（作業曝露限界）として数 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に下げることがある。アイソレータはこの目的のために、局所空調の考え方を応用して考案された装置であり広く用いられている。アイソレータは、グローブボックスの一種であるが、内圧が管理されており、万一グローブが損傷しても内部の物質を漏出させないことが求められる装置である。しかし、通常のアイソレータでは、原料の反応容器への供給、あるいは秤量のために使われており、粉体の単位操作の基本ともいえる粉碎まで行える装置はほとんどなかった。10年ほど前から粉碎机とアイソレータを一体化することによって、高活性薬剤等を微粉碎し、さまざまな実験に供することができるようになってきた。このシステムでは今までに紹介した他の装置と同様に、粉碎机や粉体をハンドリングする技術と使い易さが重要となる。もちろん粉碎机に要求される性能も高く、当社の持つさまざまな粉碎机をアイソレータとセットにして設計・製造・販売して広い分野のユーザーに利用していただいている。

写真6と図6にアイソレータと当社の粉碎机の1つであるピンミル（100

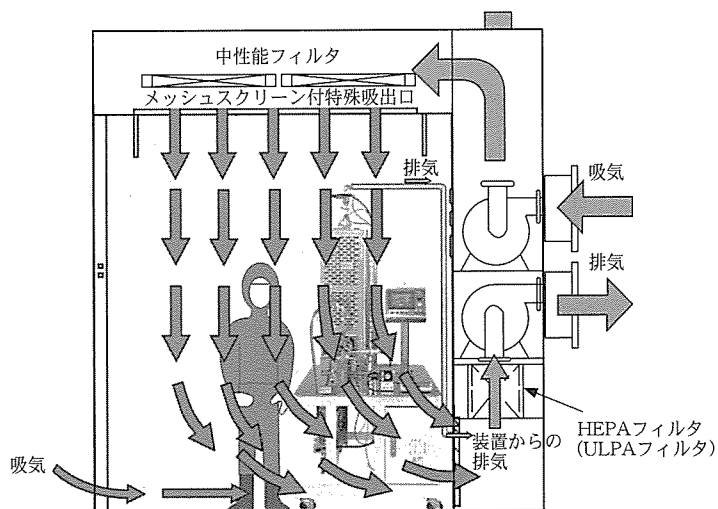


図5 ナノリスク対応セーフティブースの構造

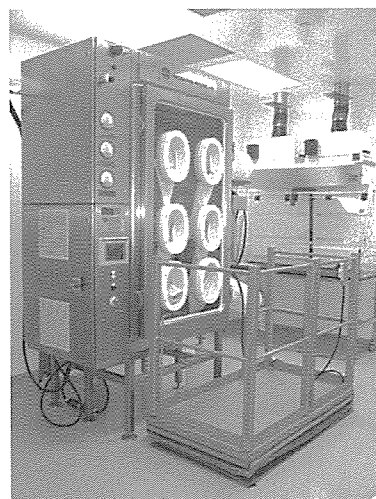


写真6 ピンミル内蔵アイソレータの外観

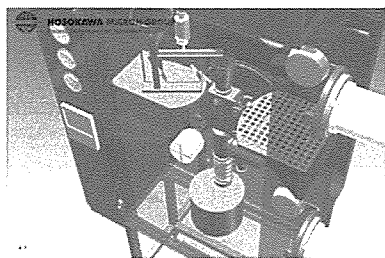


図6 ピンミル内蔵アイソレータの内部

UPZ)を組み合わせた例を示す。この装置では多数のグローブが取り付けられているが、その位置と個数は、受注後に実機と同じ大きさをモックアップを作成してグローブ越しに粉碎機の分解・洗浄・組み立てができるように設計される。なお、内部の粉碎機は、軸封や駆動形式をアイソレータ用に工夫している。

この他にスパイラルジェットミルを組み合わせたシステム、これらの装置を使って連続生産するための供給あるいは製品回収部をアイソレータ内に設置したシステム、さらにこれらの複数のアイソレータを接続して製造ラインを構成しているシステムも取り扱っている。

● クリーン機器と粉体機器の適切なレイアウトによる作業保護

粉塵濃度がそれほど高くない場合は、クリーンルーム用の装置を応用して作業環境の改善を行うことができる。例えば発塵しやすい場所である原料の供給部やフルイ機の設置箇所にクリーンブースを設置し、発塵を防止するという対策を行っている。また、発塵箇所の外側の清浄度が比較的高い場合は、外気をろ過することなく吸引する水平ラミナーブースを設置することも多い。このとき必要であれば風上に給気ファンを設けて、フィルタによってろ過されたエアを流す場合もある。

● おわりに

本稿では粉体を取り扱う現場で、高濃度の粉塵が存在するような環境に対応した作業保護機器について紹介した。どの装置についても、クリーンルーム向けの技術がベースとなっているが、粉体機器の機械構造やハンドリング方法とクリーン技術のハイブリッド化が重要である。

作業環境の改善は作業者の生活の質を向上させるだけではなく、製品品質の向上や工場の外部環境の改善につながり、結果としてトータルコスト削減につながることで認識されるようになってきており、今後も装置の技術開発を進めて本分野に貢献していきたいと考えている。

筆者紹介

井上義之

ホソカワミクロン㈱ 大阪本社
営業本部 営業統括部 営業部
営業支援課 主事
〒573-1132
大阪府枚方市招提田近1-9
TEL : 072-855-2221
FAX : 072-855-2669
E-mail : YINOUE
@hmc.hosokawa.com