

SIMCO IONTM

An ITW Company

worldwide leaders in **static control**

M E D I C A L . .

Air Ionization

生命科学ライフサイエンス
製造の理論と実践

イオナイザーを使用した静電気・パーティクル汚染制御



概要

誰もが、カーペットの上を歩いてドアノブに触れた時に、静電気的作用を感じたことがあるでしょう。ドアノブから時には 5000 ボルトにもなる電撃が身体に走る場合もあり、スマートフォンなどに使用されているマイクロ IC の導通路を溶かす程のエネルギーを有する場合があります。

静電荷は、自動化された装置内での材料や部品のハンドリングを妨害する可能性があり、貼り付きや、詰まりなどの原因となります。静電気による異物を原因とする歩留まりの損失、製品の再加工や返品、およびこれらが品質に与える影響は、歩留まりの損失と再加工により生じるコストに留まらず、その汚染された製品が顧客や市場から拒否される事態につながります。

医療用電子機器の場合、静電気放電 (ESD) により、さまざまな方法で精密電子部品がたやすく破損してしまいます。さらに、静電荷 (ESC) により、空中や作業台上のパーティクルがカテーテルや注射器といった製品の表面に付着します。

静電気は生産速度や製品品質にも影響を及ぼし、収益の低下を招きます。構成部品から最終製品に至るまで、ESD、パーティクルの静電引力 (ESA) により、破損または製品のハンドリング上の問題が発生する可能性は常にあります。製品が製造工程の後段になるにつれて、これらの問題により生じるコストは増加します。ペースメーカーや診断装置など、信頼性と患者の安全がことのほか重視される医療用電子機器分野においては、部品のダメージが出荷前試験中には発見されず、使用現場にて障害が発生するとクリティカルな問題となる可能性もあります。

静電気の帯電は大幅に低減、緩和及び制御することが可能であり、製品のパーティクル汚染および医療用電子部品への ESD の影響に対処することができます。この冊子は、静電気の帯電の制御を達成する方法について説明することを目的としています。

「ライフサイエンス製造の静電気・パーティクル制御」は、静電気に関するの基礎情報の概要です。具体的には、静電気とは何か、静電気がどのように作用し、またなぜ問題になるのかを説明し、静電気の影響に対処する段階的な改善方法を示します。最後に、静電気の帯電、ESD、パーティクル汚染を制御するためのプログラムの成功にイオナイザーが不可欠である理由の検証について取り上げます。



静電気

静電気を原因とする問題

- 静電引力 (ESA) と帯電表面へのパーティクルの付着を原因とする汚染
- 静電気放電 (ESD) に起因するセンシティブなデバイスの破壊
- 静電気起因の電磁気干渉による機器のロックアップと不安定化
- 静電気を原因とする製品フローや製造工程の問題

静電気はよく知られていますが、移動しない電荷に関連した現象については誤解されていることが多くあります。自然の法則では正電荷と負電荷のバランスを維持しようという力が働き、理想的には物体は電氣的にニュートラルな状態を保とうとします。静電気帯電は、物体の表面にある分子が電荷を帯びた場合、または分極した場合に発生します。帯電表面を形成する原子が過剰電子を含んでいるか、電子が欠損しているかによって、静電荷が正電荷または負電荷のいずれかになります。

一般に、電荷の移動を許容できる能力がある素材は、導電性もしくは静電気拡散性素材と呼ばれます。一方、非導電性もしくは絶縁素材は電荷の移動を許容しません。水道水と大半の金属は非常に優れた電気伝導体ですが、ほとんどの種類のゴム、プラスチック、デルリン、テフロン、ガラスなどは絶縁体です。静電気はどのような材料にも帯電します。静電気を生成する最も一般的な方法は誘導帯電と摩擦帯電です。

摩擦帯電

接触している2つの表面を分離すると必ず、一方の表面が電子を失って正電荷を帯びます。もう一方の表面は電子を得て負電荷を帯びます。



誘導による帯電

誘導帯電は、帯電した物体により定常静電界が形成されると発生します。絶縁体を誘導で帯電させるのは困難です。しかし導体は静電界内で導電性物体を接地すると、帯電している物体に触れなくても、静電界の極性とは逆の極性の静電気を帯びます。

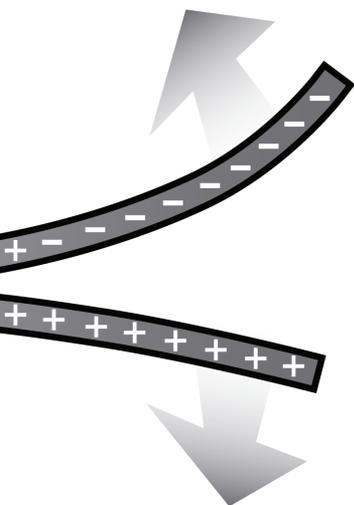
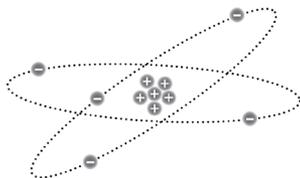
物体からの静電界内に、新たな物体が置かれると表面に逆の極性の電荷が引き付けられます(または誘導されます)。もしその物体がグラウンドから絶縁されており、その静電界から取り出されると、その物体は静電荷を帯びます。

摩擦帯電

摩擦は主な静電気生成方法です。接触している2つの表面を分離すると必ず、一方の表面が電子を失って正電荷を帯び、もう一方の表面がその電子を得て負電荷を帯びます。2つの物質の全電荷は増えることが無く、ゼロになる場合もあります。しかし分離後の各表面では、表面が導電性かつ接地の経路が確保されない限り、正電荷または負電荷が維持されます。

導体か絶縁体かに関わらず、あらゆる物質(固体、気体、液体)は摩擦により帯電する可能性があります。電荷の大きさと極性は、2つの物質の特性によって異なり、いくつかの要因の影響を受けます。この要因には、表面の状態、擦られている部分または分離された部分のサイズ、表面間の圧力、分離または摩擦の速度などがあります。一般に、表面がより滑らかで表面積が広く、表面間の摩擦速度または圧力が高いほど、生成される静電気帯電のレベルが高くなります。

摩擦またはその他の物理的力により、1つの物質の表面の電子が軌道を外れて別の物質の表面に移動すると、摩擦帯電が発生します。



摩擦帯電列

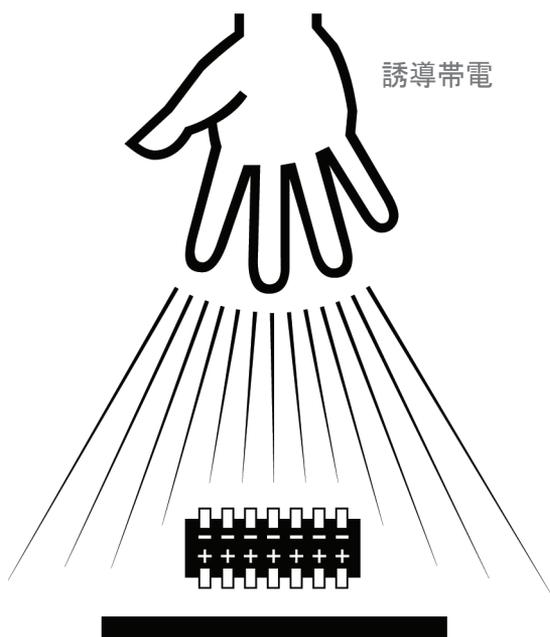
正

空気
人間の手
水
ガラス
マイカ
人間の毛髪
ナイロン
ウール
鉛
アルミニウム
紙
綿
鋼鉄
木
硬質ゴム
ニッケル、銅
真鍮、銀
金、白金
アセテートレーヨン
ポリエステル
ポリウレタン
ポリエチレン
PVC(ビニール)
シリコン
テフロン

負

左のチャートに表示されている帯電列は、正電荷または負電荷を帯びやすい順に物質をランク付けしたものです。2つの物質を合わせて擦ると、リストの上位にある方の物質が正電荷を帯び、リストの下位にある方の物質が負電荷を帯びます。絶縁性が高いほど、摩擦により帯電しやすくなります。Plexiglas® やテフロンなどの非導電性素材は容易に帯電するため、大量の静電気(時には25,000Vを超える)を生成することができます。

絶縁体は導体との接触と分離による摩擦から帯電します。その導体が接地されていても変わりません。導体は、グラウンドから絶縁されていれば、絶縁体から分離することで帯電します。



誘導帯電は、帯電した物体により定常静電界が形成されると発生します。その静電界内に導電性のある物体を置くと、帯電物体に接触していなくても静電気を帯びます。



静電気が問題になる理由

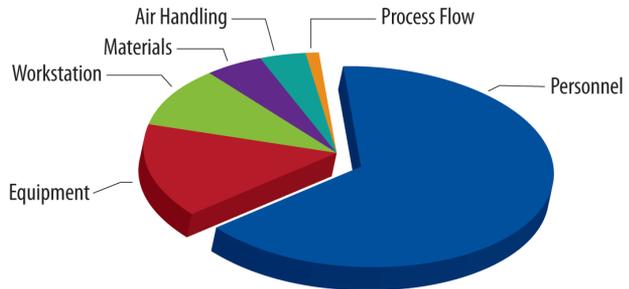
人間の動きや機械部品の動き、流体の流れなど、あらゆるものから静電気は発生します。静電気はあらゆるところに存在するのに、なぜ問題視されるのでしょうか。

静電気に弱い製品、工作物の表面、装置や人体などで静電気が増大すると、破損につながる可能性があります。製品の汚染、プロセスの劣化、その他のさまざまな問題（原因不明な問題を含む）が発生する可能性があります。

パーティクル汚染

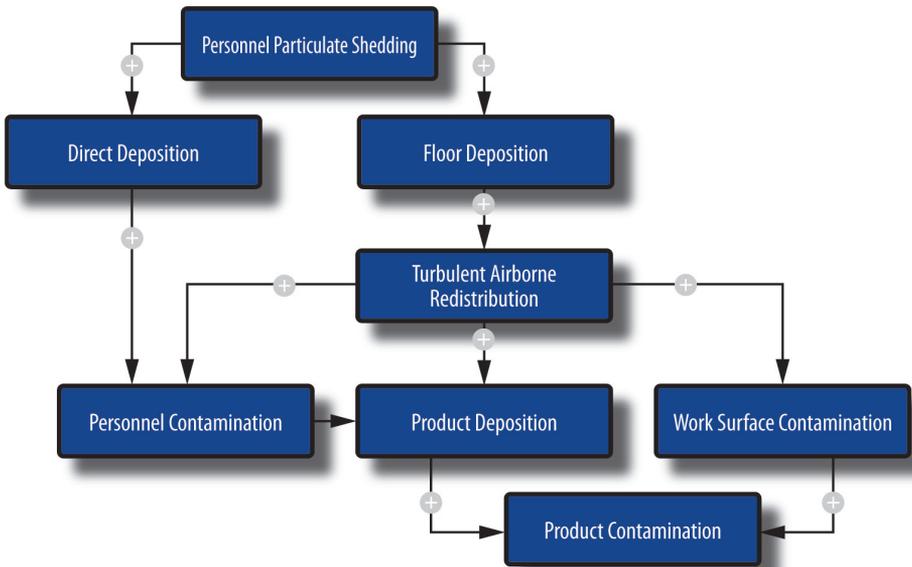
クリーンルームはその名が示すように、完全にクリーンというわけではありません。高効率の空気ろ過システムにより、クリーンルーム内に入り込む空気中には、パーティクルやイオン化エアが除かれた状態になっています。しかしクリーンルーム内には、人間、機械、さまざまなタイプのプロセス設備なども存在しており、そのそれぞれが環境汚染に関与しています。ライフサイエンスクリーンルームで通常使用する材質（プラスチック、手袋、セラミック、ガラス、シリコン）は絶縁性が高いので、容易に帯電します。大気中に存在する空気イオンは、通常、クリーンルームの空気ろ過システムにおける微小パーティクルと同様にろ過されてしまう為、静電気の制電機能が失われます。したがって最新のクリーンルームでは、さらに高レベルの静電気が生成され、物体に長時間残留します。クリーンルーム本来の性質と、可能な限り製品の清浄度を維持する必要性により、静電気防止策を施すことは困難です。なぜなら大半の表面処理と多くの静電気拡散性素材は医療用グレードではなく、医療用製品に対応していないためです。

クリーンルームにおける汚染源の比率



出典: Managing Particulates in Cell Therapy: Guidance for best practice, Cytotherapy, Cytotherapy, 2016, Clark et.al.

クリーンルームでのほとんどの処理や作業における主要な汚染源は人間です。外からクリーンルームに入ってくる人間によって、大量のパーティクルが製造プロセスに持ち込まれます。人間の皮膚や抜け毛などの人間から自然に発生する広範囲なパーティクル源以外にも、戸外着や構内着の繊維がクリーンスーツやスモックに転移します。床からパーティクルのサンプルを採取すると、このことがはっきりと判ります。下図は、汚染源の製造工程への経路の基本モデルを示しています。



1980年代後半から1990年代初頭にかけて、世界の半導体関連の主だった研究者により、帯電した表面へのパーティクルの誘引現象を扱った研究が数多く行われました。一見するとこの誘引現象がライフサイエンス用途に関連していないように見えるかもしれませんが、そのデータと原理はあらゆるクリーン環境に適用できます。

1991年にサンノゼで開催された環境科学研究所(IES)技術会議で、IBMのロジャー・ウェルカー氏は「空気イオンの使用により、全く同じ試験条件で空気イオンを使用しない場合に対し、表面汚染率が大幅に低下した」と結論付けました。その試験が実施されたクリーンルームでは、バックグラウンドの空中パーティクル数が極めて少なく、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上のパーティクル数は1立方フィート当たりわずか2.0でした。

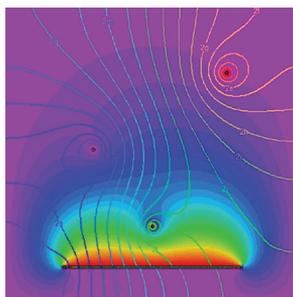
1988年のIES技術会議で発表された井上正憲氏の論文「ウェーハ表面へのエアロゾル粒子の付着」(Inoue, et al., 1988)の中で、井上氏は、約0.3ミクロンのパーティクルによって、表面汚染を引き起こす最も重要な要因はクリーンルーム内の帯電であることを実証しました。さらにその試験条件下で井上氏は、表面へのパーティクル付着において、静電気帯電が拡散或いは重力の1000倍以上の大きな要因となっていることを発見しました。井上氏のこの発見は、D.W. クーパー Deposition of Submicron Aerosol Particles During Integrated Circuit Manufacturing (集積回路製造時のサブミクロンエアロゾル粒子の付着:実験)(Cooper et al., 1988)が行った研究によって裏付けられています。

クーパー氏は、運用中のクリーンルーム内でウェーハに帯電の傾向がみられる実験を再検討し、大きさが0.1~1.0ミクロンのパーティクルに関しては、静電気の影響が最も支配的なパーティクル付着メカニズムになり得ることを発見しました。

マイケル・ヨスト氏による別の論文「Electrostatic Attraction and Particle Control (静電引力およびパーティクル制御)」(Yost et al., 1986)では、静電引力の物理特性が研究されています。帯電表面に付着したパーティクルを保持する静電気力は、重力や気流に比べるとはるかに強力であると論じています。この研究結果は、[1]クリーンルームに生じた静電気が原因で表面が汚染され、洗浄が困難になる[2]ことを明確に実証しています。ロング氏、ピーターマン氏、レビット氏の共著による半導体製造装置に関する論文(Long et al., 2006)では、表面から静電気を除去することにより、表面の洗浄効果が改善することが証明されました。

静電引力(ESA)

厳密な管理が必要な製品の表面が帯電した場合 - 実際に頻繁に製造工程内では帯電が多見されますが - 静電気が除去されないと、クリーンルーム内で空気中のパーティクルがその表面に引きつけられます。パーティクルのフィルタリングシステムがあっても、人間、機械、工程によってパーティクルが気中に存在する可能性があります。このようなパーティクルに作用するESAは驚くほど強力です。帯電した表面にパーティクルが付着すると、除染が非常に困難になります。クリーンルームのエアフローには付着したパーティクルを除去する力はありません。この類の汚染は、ライフサイエンス製品の製造における製品汚染と不良品の主な原因となります。

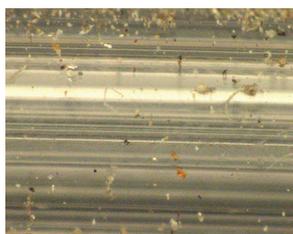


帯電表面と帯電パーティクルの静電引力 (ESA) の図

クリーンルーム内の空気中のパーティクルは、他のパーティクルや物体との定常的な衝突によって帯電します。衝突するたびに電子が交換され、それによって正または負の静電気を帯びたパーティクルが発生します。パーティクルが大きいほど、電子の交換がより盛んになり、電荷が高くなります。

左のグラフは、帯電したパーティクルと帯電した製品表面の間に引力が形成される静電界構造を示しています。パーティクルが高速で移動して高い結合エネルギーで付着した場合、除去は困難になります。実際、目視可能な最も小さいクラスのパーティクルの場合は通常、先にパーティクルを結合している静電気を除去しないとパーティクル除去ができません。

左の写真は、通常のクリーンルーム環境にさらされている一般的なカテーテル材料を示しています。上の写真は典型的な帯電しているカテーテルを示しており、下の写真はイオナイザーが設置された同一環境のクリーンルーム内にあるカテーテルを示しています。



パーティクルで汚染されているクリーンルームの表面付近にさらした後の帯電したカテーテルの写真

静電気放電 (ESD)

数十年に及ぶハイテクエレクトロニクス産業界における経験より、電子機器の製造工程では、ESD が製造・梱包・テストプロセス等にて電子機器の故障を引き起こすということは周知された内容と位置付けられて

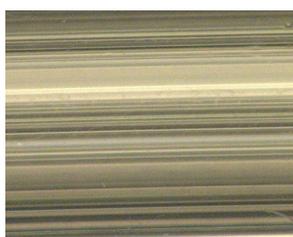
います。医療機器製品において重要な機能を賄う電子部品を使用している場合、静電気による製造工程での悪影響が、測定エラーや、お客様による使用時に製品故障するといった潜在的 (レイテント) 故障を招く恐れがあります。多くの新製品で、能動素子センサーを搭載した非常に繊細な電子モジュールが使用され始めているため、潜在的故障発生のリ

スクリーンルームに見られる一般的な帯電レベル

クリーンルームでよく使用されている多くの物体は非常に高いレベルの静電気を帯びている場合があります。

カテーテル	5-25 kV
注射器	2-15 kV
ウェブフィルム	10-30 kV
チューブ	3-15 kV
ツールカバー	4-18 kV

スクが高まってきています。使用部品内部のクリティカルな部位の寸法及びその寸法公差や電子回路パターンは急速に微小化が進んでいるため、ESD に対する耐性が低下してきています。非常に低い電圧で動作するように設計されている回路では、わずかなレベルの帯電でも機器のダメージや破壊を招く恐れがあります。



クリーンルームの表面付近に5分間さらした非帯電カテーテルの写真

故障したデバイスを走査型電子顕微鏡で検査すると、ESDによる壊滅的な損傷を見ることができます。酸化膜欠損やメタル配線の蒸発により生じた電氣的ショートは、観察された幾多の悪影響の内のほんの2つに過ぎません。

最近の研究で、静電気放電は製造歩留まりの低下よりも更に深刻な問題を引き起こす可能性があることが分かりました。静電気放電によるデバイスの弱体化は、部品試験では検出できない場合があります。製造工程の後段にデバイスが不良となった場合は、修正や交換のために余計にコストが発生することになります。

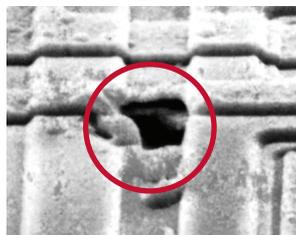
しかし、ユーザーの使用環境で機器が不良となった場合は、製造工程中に故障が発覚した場合より 100 倍以上のコストが修理や交換に発生する可能性があります。産業界の推定では、製造段階で見つかったESD関連の1件の不良につき、出荷後には 2~5 件の追加の不良が発生するとされています。ESDによりダウンタイムと製品ロスに数百万ドルのコストが発生するのみではなく、ユーザーからの貴重な信頼が失われます。最悪のケースでは、重要性の高い医療用機器の故障は人命にも関わります。

材料のハンドリング

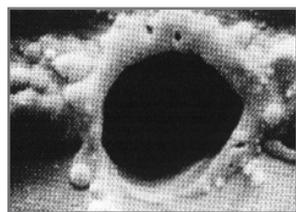
静電気によってハンドリングが困難になる材料は無数に存在し、例として、製品組立用のフィーダーツールや、医療用シート製品を生産する織機に問題を引き起こす場合があります。フィーダーボウル内で部品が組立ポイントに移動する際、静電気による部品の貼り付き・詰まりが生じる場合が多見されます。

薄い材料がシートやウェブに加工されてハンドリングされると、高いレベルの静電気を引き起こす場合があります。例えば、手術用品に使用される樹脂フィルムは、一般的に「静電気によるまとわりつき」現象を引き起こしやすい材料です。フィーダーボウルのある医療製品組立装置も、静電気の蓄積による詰まり不良を発生しやすい装置の一例です。

加えて、ウェブ加工処理装置で多見される非常に高いレベルの静電気は、周辺領域から多くの異物を引き寄せせることに繋がっています。ウェブ材が装置下部を通過し床に近接してしまう場合、床上の異物が大量にウェブに付着する場合もあります。



200x



5000x

ESD によるダメージ

製造プロセスでは、たった1度の ESD イベントにより、センシティブな医療用電子機器が致命的なダメージを受ける可能性があります。1枚目の写真の赤丸の部分は、ESD により破損した半導体の一部です。2枚目の写真は、ESD により2つの金属ライン間に形成された金属ブリッジの詳細画像です。

3M のご厚意によりご提供いただいた SEM 写真です。



ガウニングルーム

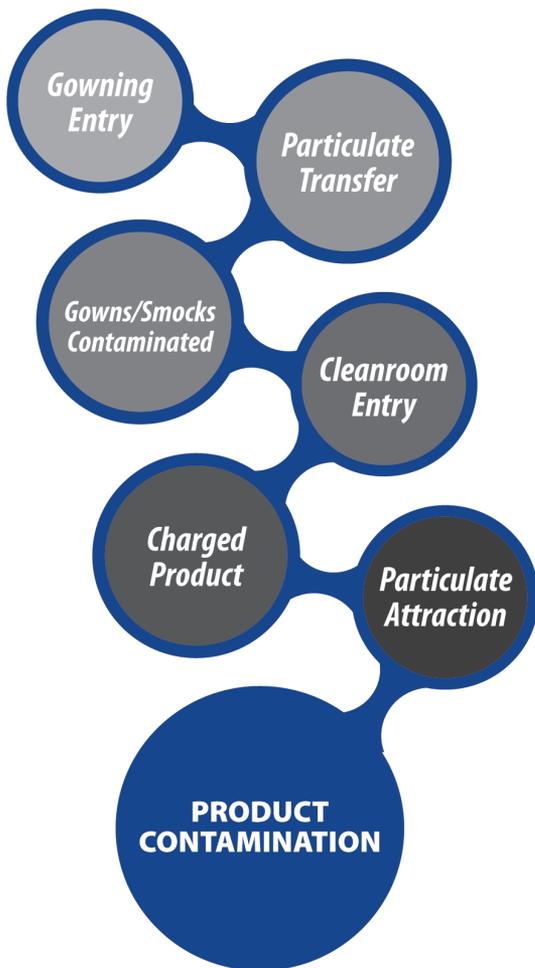
ガウニングルームは汚染物質がクリーンルームへ侵入するメイン玄関です。人員によってクリーンルーム外から汚染物質が持ち込まれると、その汚染物質が生産施設全体に拡散され、露出している製品に付着します。汚染物質の戸外・構内着からスモックやクリーンスーツへの移動は、それらが近傍に存在する際に、静電引力により吸着することで発生します。ガウニングエリアに適切なイオナイザーシステムが設けられた場合 100 万個余り 0.5 um 以上のパーティクル、製造環境へ侵入することを防ぐことが可能です。



WITHOUT IONIZATION
PARTICLE ATTRACTION



WITH IONIZATION
PARTICLES FALL TO GROUND



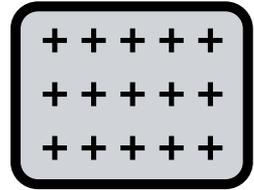
静電気の管理方法

製造環境から静電気を完全に除去することは概して困難ですが、適切な設備と管理手法を用いて、大方の静電気による不具合をコントロールすることが可能です。幾年にもわたり、静電気の管理について数多くのアプローチが試されてきました。

適切な方法を選ぶ際に注意すべきことは、帯電した材料が導体か絶縁体のどちらであるかということです。物体が導体の場合、接地することで静電気は簡単に制御できます。静電気は接地によって簡単にグラウンドへ移動したり、グラウンドから移動したりすることができます。導体が接地されている場合、すべての静電気は中和され、導体はグラウンド電位に保持されます。しかし絶縁体の場合は静電気が移動しないため、接地では効果がありません。右図が示す通り、絶縁体を接地しても静電気は除去されず、帯電状態にも影響はありません。

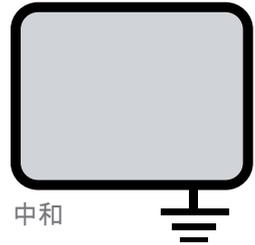
正しい手順と管理を行うならば、静電気拡散性のクリーンスーツ、スモック、手袋、リスト／ヒールストラップを使用することで人員を接地させることができます。作業台は、静電気拡散性のテーブル表面とマット、および導電性フロアによって保護することができます。材料とデバイスは、導電性または静電気拡散性の素材で構成された保護バック、容器、箱に入れて輸送することができます。これらの「受動的」な静電気対策が一点の隙も無く構築されるとは限らず、ヒューマンエラーも生じる場合があります。製造工程で使用される数多くの物品は、テフロン、石英、レキサシTMなどの素材で作られています。これらの材料は「帯電防止」機能を有した代替品が無い代表的な絶縁体です。

絶縁された導体



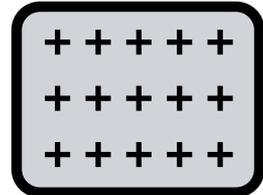
帯電+

接地された導体



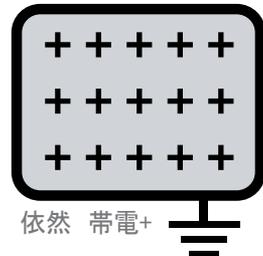
中和

絶縁体



帯電+

接地された絶縁体



依然 帯電+

帯電防止材や静電気拡散性材の主要なものの一つは、材料の表面に添加物が移動して薄い水分子膜を引き寄せます。この薄い水分子膜により材料の表面が導電性を有し、表面からグラウンドへと静電気が移動できるようになります。この水分子膜が失われると、帯電防止特性が失われ、その材料は絶縁体として作用するようになります。もう一つの静電気拡散材は、カーボンなどの導電性微粒子を非導電性材料と混合して作られたものもあります。しかしそのような材料は、しばし削られやすい場合が多く、汚染の原因となり得ます。

これらの対策方法の多くは、一般的なクリーンルームへの採用には制限が存在します。製造工程では、人間と製品が作業場の間を頻繁に移動することが多く、リストストラップの使用は実用的ではありません。大半の帯電防止材料や静電拡散性材料には、クリーンルームや製品の汚染を引き起こす添加物が含まれています。



大気のイオン化- 導電性空気

イオナイザーは、厳密な管理が必要なクリーンルーム環境で発生する静電気の制御や中和のために利用されることが年々増大しています。実際に、イオナイザーは静電気を拡散させるだけの十分な導電性を空気に与え、絶縁体と接地されていない導体の両方に作用します。

空気イオンおよびイオン化プロセス

空気イオンとは、電子を失った、または獲得した空気分子です。イオンは普通の空気内に存在していますが、空気がフィルタリングおよびコンディショニング処理を受けると取り除かれます。イオンは、放射線や「コロナ放電」と呼ばれる現象により生成されます。コロナ放電は尖った部分に高い電圧を印加するものです。

すべてのイオナイザーは、正イオンと負イオンを大気中に放出することにより機能します。イオン化された空気が帯電表面に接触すると、反対の極性を持つイオンがその帯電表面に引きつけられます。その結果、製品、設備、様々な表面に存在する静電気が中和されます。

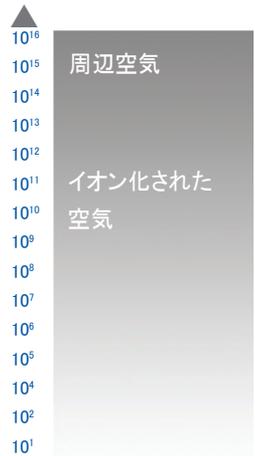
一般に、 $10^{15} \Omega / m$ を超える抵抗率を有する空気は絶縁性が非常に高いものです。空気中のイオンの数を増やして空気の抵抗率を $10^{11} \Omega / m$ まで低下させることにより、空気の導電性が上がります。導電性空気は接触するあらゆる表面上の静電気を中和することができます。帯電表面の静電気が中和されるまで、帯電表面の電界に反対の極性を持つイオンが引きつけられます。

イオナイザーのどのよう
に作用するか?

全てのイオナイザーシステムは、正イオンと負イオンを大気中に溢れさせることにより機能します。イオン化された空気が帯電表面に接触すると、反対の極性を持つイオンがその帯電表面に引きつけられます。その結果、製品と設備に蓄積した静電気が中和されます。

空気の絶縁抵抗を低下

イオン化により、周辺空気の絶縁抵抗が4桁低下し、それによって空気の導電性が上がります。



測定単位: オーム/1メートル



両極性のイオン化

製造工程では正と負の帯電が発生するため、正イオンと負イオンの両方が必要になります。大気の両極性イオン化を達成する方法は数多くあり、全ての状況に対応できる単一の「ベストソリューション」は存在しません。どの方法を選定するかは、使用環境や解決すべき課題、その区域で行われる作業の性質等に左右されます。イオンの移動は電界と空気の流れ等に従い、静電気中和システムの有効性は、さまざまな環境条件に依存しています。

幾年にも渡り、イオン生成を目的とするシステムが数多く開発されてきました。これらのシステムはイオン生成のために、高電圧の AC/DC/パルス DC を利用するか、アルファ線或いは X線を利用するかでおおまかに区別されます。これら 5 種類のシステムはそれぞれ効率性が異なります。システムを適切に稼働させるには、イオンの再結合の問題とホットスポット（イオン極性が偏ったエリア）の問題を事前に解決しておかなければならない場合もあります。

以下は各イオン化技術の差異についての概要説明と、使用事例をまとめたものです。

イオナイザーのタイプ

- AC 方式
- DC 方式
- パルス DC 方式
- アルファ線方式
- X線方式

AC 方式

電極間隔の狭い数多くのエミッターポイントに高い電圧が商用電源周波数（50/60 Hz）で印加されます。AC 方式は、イオングリッド、イオンブロー、イオンガンおよびバーに使用されています。高速の正負スイッチングとそれにより生じるイオン再結合により、AC 方式は、強いエアフローでエミッターポイントのイオンを飛ばす必要があります。

DC 方式

この方法では、それぞれの極性に対して個別のエミッターポイントが存在します。エミッターポイントの半数に対して正高電圧が定期的印加され、残りの半数には負高電圧が定期的印加されます。DC 方式は、ルームシステム、クリーンベン

チ、イオンブロー、イオンガンに使用されています。DC 方式は弱いエアフローでも高いエアフローでも機能します。ただし、ホットスポットを作ることなくイオン再結合を低減できるように、エミッターポイントの間隔を適切に設ける必要があります。

パルス DC 方式

正と負のエミッターポイントへの高電圧が交互にオン/オフされ、正イオンと負イオンの“雲”が形成されます。パルス DC 方式は、非クリーンルーム内、クリーンルーム内、クリーンベンチで利用可能です。通常、イオンブローとイオンガンには使用されません。

このシステムの利点は柔軟性と多用性で、特定のエアフロー条件に合わせてタイミングを最適化可能です。例えば、エアフローが弱いエリアでは、長い単一イオン発生タイミングを設定して、イオン再結合を低減し除電対象ヘイオンの供給を行う場合があります。ある種の環境では、片方の極性のイオンがもう片方の極性のおイオンよりもはるかに大量に必要となる場合もあります。パルス DC を利用すれば、片方の極性のイオン発生時間を必要に応じて長くすることも可能です。幾つかのシステムでは、イオン発生オフ時間を設定できるものあり、同機能を使用するとイオンの拡散効率を高めることができます。

アルファ線方式

イオンバー、イオンガン、ブローとして利用されています。放射線式イオナイザーには通常、放射線源としてポロニウム 210 が利用されています。ポロニウムの放射性崩壊により、空気をイオン化するアルファ粒子が放出されます。米国連邦規制により放射性装置の販売は禁止されているため、アルファ線イオナイザーはリースのみの提供となります。

X線方式

生産設備内での使用を目的として設計されており、空気のイオン化に低エネルギーX線（軟X線。4.9~9 keV）を使用するイオナイザーです。このX線は、生産設備内部の空気を通り抜け、1メートル程度の範囲までの空気をイオン化します。イオンを拡散させるためのエアフローは必要ありません。このタイプのイオナイザーを 5 keV 以上の出力で使用する際には、米国連邦規制により遮蔽と電気インターロックが義務付けられています。

パルス DC 方式

パルス DC システムでは正負独立したエミッターポイントを使用します。正と負エミッターポイント交互にONとなり、正イオンと負イオンの雲が形成されます。

イオン発生タイミングと極性を調整して、特定の環境に必要なイオンバランスと除電レベルを確保します。



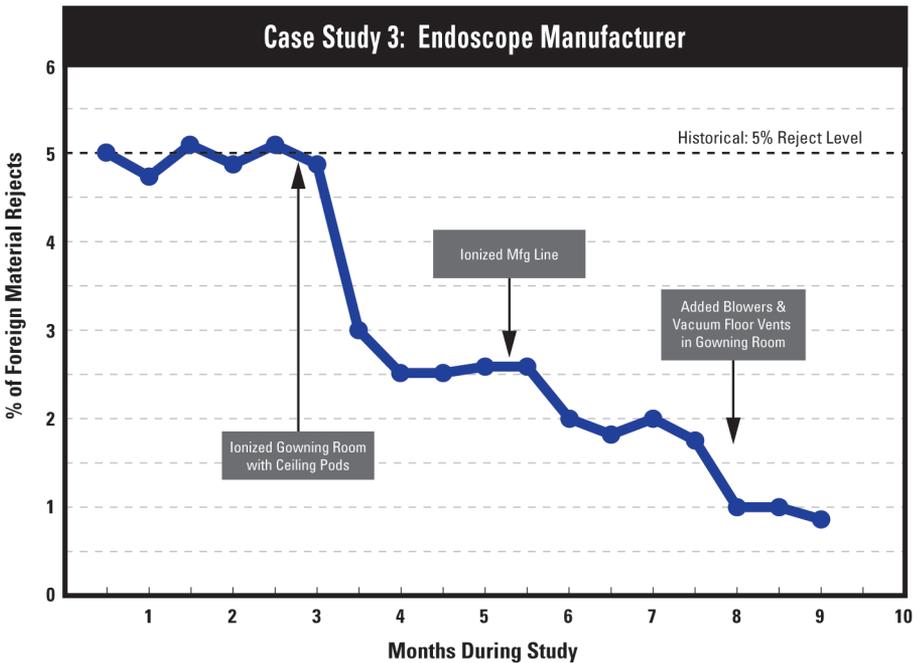
シーリングエミッター



パルス DC システムでは正イオンと負イオンの雲が形成される

歩留まりの向上

以下のグラフは、ある大手医療機器製造工場がイオナイザーを段階的に導入した場合の、一般的な不良品の低減率を示しています。この製造ラインでは製品の約 5% が不良品でした。更衣室をイオン化すると、不良率が約半分に減少しました。イオナイザーを生産エリアに追加し、さらなる改善(環境からの異物の除去)を実行したところ、不良率が1%未満まで減少しました。





アプリケーションエンジニアリング

静電気問題は、効率良く解決する為には様々なソリューションが必要な、複雑な課題となっている場合があります。イオナイザーシステムを選定する際には、数多くの重要な要因を検討する必要があります。

エアフロー

イオナイザーの中には、効果を発揮するためにエアフローを必要とするものがあります。エアフローを必要とするイオナイザーを選定した場合、利用可能なエアフローに依存するか、ファンを含んでいることが必須です。設置環境でのファンの利用が適したものであるかを判断する必要があります。圧空を利用するイオナイザーは、設置環境に適応したガス（通常は空気又は窒素）とフィルタリングが必要になります。

電源の供給と制御

電源・制御一体式イオナイザーは商用 AC 電源入力を必要とし、各イオナイザーに供給することが必要になります。多数のイオナイザーを伴う大型システムでは、低電圧または高電圧ケーブルを使用して、集中コントローラーから電力を供給します。

制御を必要とされる範囲は各用途によって異なります。厳密な管理が必要でない用途であれば、工場出荷時の設定そのままや、集中コントローラーによる全システム共通の調整で用を為します。厳密な管理が必要な用途や、他の区域と条件の異なる区域では、小さな区域にてイオン発生を微調整してイオンバランスとイオン供給量の両方を的確に制御することが可能です。厳密な管理が必要な用途（ディスクドライブ製造工程など）での監視と制御には、フィードバックセンサーを使用します。

エンジニアリング

静電気問題は、効率良く解決する為には様々なソリューションが必要な、複雑な課題となっている場合があります。

イオナイザーシステムを選定する際には、数多くの重要な要因を検討する必要があります。

- エアフロー特性
- 電源供給
- エミッターポイント材質
- 設置の際の検討事項
- 信頼性およびメンテナンス
- 試験および評価
- サービスおよび保証
- システムコスト

エミッターポイントの材料

イオナイザーの様々な用途に対応するには、様々な材質のエミッターポイントが利用できることが重要です。エミッターポイント材質の選定には、常に使用環境が求める項目を考慮する必要があります。一般的にライフサイエンス用途ではエミッターポイント材料としてチタンやタングステンが推奨されます。

設置の際の考慮事項

イオナイザーの取り付けおよび配線方法は重要な検討事項であり、全ての安全規定と施設要件に準拠していなければなりません。運用中のクリーンルーム内で設置作業を行う場合、稼働中の生産プロセスを阻害せず、環境の完全性が損なわれないようにする必要があります。

信頼性およびメンテナンス

全てのイオナイザーは定期的なメンテナンスが不可欠です。通常、メンテナンス作業はエミッターポイントのシンプルなクリーニングのみであり、実施頻度は3～12カ月に1回です。このメンテナンスの実施頻度は、エミッターポイント先端の材質と形状、イオン発生パラメーター、そして最重要事項である空気中の浮遊分子状汚染物質（AMC）の濃度によって変わります。このメンテナンスは、エンドユーザーまたはイオナイザーメーカー人員により実施することができます。常時使用する設備には長期的な信頼性と安定性が不可欠です。

ライフサイエンス用途における品質管理システムの鍵は、運用する人員が、システムが継続的に適切に稼働していることを確認できる能力です。従って、システムが通常のパラメーターの範囲内で稼働しているかを確認するための信頼のおける手法が必須となります。設備モニタリングシステム（FMS）へ動作状態を常にレポートする手法も有効な方法となる場合があります。

試験および評価

多くのケースにて、実際の作業エリアにおける評価試験が、必要な性能レベルを見極め、要求仕様を確立する為の唯一の手段となります。特定の用途のために、意義のある要求仕様の作成を支援してくれるイオナイザー製造メーカーを選ぶことが重要です。

サービスおよび保証

イオナイザーメーカーは、除電性能仕様の設定や、評価測定方法の導入、性能測定作業、設置調整作業、稼働後のメンテナンス等に対しサポートが提供可能である必要があります。

多くのイオナイザーはメーカー保証の対象となっています。保証期間や保証対象・範囲・条件を必ず明確に把握しておいてください。

コスト

イオナイザーシステムを比較検討する際に、トータルコストオブオーナーシップを計算することが肝要です。トータルコストオブオーナーシップには、設備費、設置費、運用費、メンテナンス費が含まれます。イオナイザーシステムを設置しない場合の損失・得失を検討することも重要です。多くのケースにて、静電気問題に起因する製品ロスコストは、イオナイザーシステムの実質的なコストの数倍になります。

医療機器の場合は、汚染が原因で製品の受け入れ拒否、顧客からの苦情、製品の返却、さらには市場機会の損失につながる可能性があります。

管理規格

アメリカの ESD 協会 (ESDA) と環境科学技術研究所 (IEST) の両機関は、イオナイザーシステムを比較するための手法を規定した管理規格の草案を作成しました。チャージプレートモニター (GPM) を使用すると、1000V の電圧を初期値の 10% まで低下させるために必要な時間を正確に測定できます。



イオナイザー管理規格

管理規格

アメリカの ESD 協会と環境科学技術研究所の両機関は、イオナイザーを比較するための手法を規定した管理規格の草案を作成しました。チャージプレートモニター(CPM)を使用すれば、1000V の電位を初期値の 10% まで低下させるために必要な時間を正確に測定できます。



チャージプレートモニター

ESDA と IEST の双方が、イオナイザーの性能に関する管理規格を設けています。これらの管理規格 - ANSI/ESD STM3.1、ANSI/ESD SP3.3、ANSI/ESD SP3.4、IEST RP-CC-022 - では、異なった或いは同一のイオナイザーシステムの比較方法が長い時間を掛けて規定されて来ました。計測には主に、チャージプレートモニター(CPM)という装置が使用されています。CPM は、任意の電圧を印加可能な電氣的にアイソレートされた導電材のプレートが設けられています。イオナイザーにより電圧を初期値の 10% まで低下させるために必要な時間を測定します。一般的に、電位減衰時間はプレートの電圧に 1000 ボルトを印加し、100 ボルトまで下がるのに要した時間を測定します。相対湿度 60% の通常の大気中における電位減衰時間は約 12 時間です。イオナイザーを使用した場合は通常、クリーンベンチでは 15 秒未満、クリーンルームでは 60 秒未満、空調設備が微弱に稼働しているオープン室内環境では 300 秒未満で同じ結果を達成できます。スポットエリア用イオナイザーの場合、イオンブローアを使えば 10 秒未満で同じ結果を達成でき、イオンガンではわずか 1~2 秒で達成できます。

イオナイザーは、全ての効果的な静電気管理プログラムにて、静電気管理に必須です。ESDA では、ANSI/ESD S20.20 静電気管理プログラムを発行しています。このプログラムでは、100V HBM モデルと 125V CDM モデルの ESD 脆弱性のデバイスを保護するために必要なイオナイザー性能が定義されています。これらの規格で推奨されているレベルを達成するには、イオナイザーが必要不可欠です。FDA では、ANSI/ESD S20.20 を医療機器製造業者が考慮すべき産業規格として認識しています。



結論とまとめ

製品と製造プロセスの高度技術化と微細化により、静電気によるダメージのリスクが増大しています。ライフサイエンス業界は、利用可能な計測デバイスと医療テクノロジーの進歩により急速な複雑化・精密化が進んでいます。この進化によって、ライフサイエンス製造工場は半導体製造工場が数十年前に直面した問題に近づきつつあります。静電気放電が、多くの電子機器の故障における直接的な原因であることが科学者のリサーチにより証明されています。“静電気の正しい認識”を伴ったイオナイザーの導入、人員への教育と正しい接地技術により、ESDと製品汚染に起因する損失を著しく削減することが可能です。クリーンルームやその他の厳密な管理を必要とする生産区域のESD問題及び静電気関連の異物汚染問題の解決において、イオナイザーは最重要な要因になる可能性があります。製品の成形工程から組み立てと梱包に至るまで、イオナイザーを使用した静電気管理はコスト削減、歩留まりの向上、製品品質の向上に貢献します。ハイテク製品製造工場の急速な増大期において、製造ラインの成功はイオナイザー無しには実現が不可能となっています。

参照資料

ANSI/ESD S20.20-2014 “Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies, and Equipment,” ESD Association, Rome, New York. www.esda.org

ESD TR11-01 “Electrostatic Guidelines and Considerations for Cleanrooms and Clean Manufacturing,” ESD Association, Rome, New York. www.esda.org

ISO 14644 Series Cleanroom Standards. Institute for Environmental Standards & Testing, Schaumburg, Illinois, www.iest.org

IEST RP-CC003.4 “Garment System Considerations for Cleanrooms & Other Controlled Environments” Institute for Environmental Standards & Testing, Schaumburg, Illinois, www.iest.org

IEST RP-CC022 “Electrostatic Charge in Cleanrooms and Other Controlled Environments” Institute for Environmental Standards & Testing, Schaumburg, Illinois, www.iest.org

IEST-RP-CC023 “Microorganisms in Cleanroom” Institute for Environmental Standards & Testing, Schaumburg, Illinois, www.iest.org

Cooper, D.W., Miller, R.J., Wu, J.J., “Deposition of Submicron Aerosol Particles During Integrated Circuit Manufacturing,” Experiments, 9th ICCCS Proceedings, 1998.

Fuqua, Norman, “ESD Control in the Manufacturing Environment,” IIT Research Institute for the DOD Reliability Analysis Center, 1986.

Guliano, Jerry/Julie, Inc., “Discharging the Static Threat,” Computer/Electronic Service News, January 1988.

Inoue, M., Sakata, S., Chirifu, S., Yoshida, T. Okada, T., “Aerosol Deposition on Wafers,” IES Proceedings, 34th Technical Meeting, 1988.

Liu, B.Y.H., and Ahn, K. H., “Particle Deposition on Semiconductor Wafers,” Aerosol Sci. Technol. 6; 215-224 (1987).

Long, C.W., Peterman, J., and Levit, L., “Implementing a Static Control Program to Increase the Efficiency of Wet Cleaning Tools,” MICRO, January/February 2006.



Steinman, Arnold, “Clean Room Ionization for ESD Control,” Electrical Overstress Exposition, 1984.

Taylor, David H., “A Review of the Benefits of Air Ionization in the Cleanroom,” Spring 1990 NONEC Conference, April 1990.

Welker, R., “Effectiveness of Isolated Panels and Air Ionization on Cleanroom Performance in a Direct Access Storage Assembly Line.” Presented at the IES 37th Technical meeting, 1991.

Yost, M, Steinman, A., “Electrostatic Attraction and Particle Control,” Microcontamination, June 1986.

Liu, B.Y.H., and Ahn, K. H., “Particle Deposition on Semiconductor Wafers,” Aerosol Sci. Technol. 6; 215–224 (1987).

Long, C.W., Peterman, J., and Levit, L., “Implementing a Static Control Program to Increase the Efficiency of Wet Cleaning Tools,” MICRO, January/February 2006.

Montoya, J.A., Levit, L., and Englisch, A., “A Study of the Mechanisms of ESD Damage for Reticles,” Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 394–405 (2000).

Stalker, Richard D., “NFPA 77 Static Electricity, 1988 Edition,” National Fire Protection Association.

Steinman, Arnold, “Clean Room Ionization for ESD Control,” Electrical Overstress Exposition, 1984.

Steinman, Arnold, “Semiconductor Trends Affecting Air Ionization,” Proceedings of Taiwan ESD Symposium, Taiwan ESD Association, Hsinchu, Taiwan, 2004.

Taylor, David H., “A Review of the Benefits of Air Ionization in the Cleanroom,” Spring 1990 NONEC Conference, April 1990.

Technical Staff of KeyTek Instrument Corporation, “Electrostatic Discharge Protection Handbook,” Wilmington, MA, 1986.

Welker, R., “Effectiveness of Isolated Panels and Air Ionization on Cleanroom Performance in a Direct Access Storage Assembly Line.” Presented at the IES 37th Technical meeting, 1991.

Yost, M, Steinman, A., “Electrostatic Attraction and Particle Control,” Microcontamination, June 1986.



An ITW Company

Simco-Ion

Technology Group

1141 Harbor Bay Parkway, Ste 201
Alameda, CA USA 94502

Tel: 510.217.0600 • 800.367.2452

Fax: 510.217.0484

Sales Services: 510.217.0460

Tech Support: 510.217.0470

ioninfo@simco-ion.com

saleservices@simco-ion.com

techsupport@simco-ion.com

www.simco-ion.technology

Simco-Ion, Japan

シムコジャパン株式会社

本社 650-0046 神戸市中央区港島
中町1丁目 2-4

Tel: 078-303-4651

Fax: 078-303-4655

営業所: 仙台東京神戸

info@simcoion.jp

www.simcoion.jp