

● 1. クリーンルーム

1.1 はじめに

クリーンルームとは温度、湿度、気流、圧力、特に空気中の微粒子（パーティクル）を一定の範囲内に制御する為に作られた部屋であり研究施設等あらゆる分野で利用されています。一般にクリーンルームと呼べるのは粒径 $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子が 1ft^3 当たり100,000個以下の空間ですが、UCF (Ultra Clean Facility) では、粒径 $0.1\mu\text{m}$ 以上の粒子が 1ft^3 当たり1個以下となっておりClass1という高清浄なクリーンルームとなっています。さらに温湿度($\pm 0.1^\circ\text{C}$)・騒音(55dB[A])・微振動(0.1gal)・静電気さらには化学汚染物質濃度に至るあらゆる要素に関し、世界最高レベルの環境性能を実現しています。本施設で実現される環境性能は、研究用クリーンルームの域に留まることなく半導体工場、病院、製薬施設さらには食品工場に用いられるあらゆるクリーンルームを凌駕するものです。また本施設は、以上の様な理想的な研究環境を創成すると同時に地球環境に配慮し、省エネルギー・省資源対策を要所に盛り込み、研究施設特有の負荷変動に対しても追従できるシステムとなっています。とりわけ微振動対策、静電気(微小ノイズ)対策については建築設計から施工に至るまで一貫した品質管理により後述する高度な性能を得る結果となっています。

1.2 微振動対策

1.2.1 微振動に対する設計

計測評価室において使用する実験装置は、振動により影響を受ける機器が多いため、グレーティング床面での振動を、加速度0.1gal以下、振動振幅 $1.0\mu\text{m p-p}$ 以下に抑制する必要があります。そこで、UCFが設置される建築建物(21世紀プラザ)の建設にあたり、数値シミュレーションにより以下の三項目の検討を行い、建築計画を立案しています。

・杭打ち込み深さ

21世紀プラザ建設地におけるボーリング調査の結果から地表から20mの深さまで掘り込むことにより、N値 ≈ 50 の固い地盤が現れることが明らかになっています。よって、建物すべての杭を地表から20mの深さまで打ち込むこととしています。

・マットスラブ

構造物の水平面の大きさが大きくなればなるほど加振力が失われ、地動の入力損失が大きくなります。とりわけ図1.1に示すシミュレーションの結果から主要な外部振動源である車両通行時の振動(周波数=10Hz、地表の伝播速度=200m/s)は、20m四方の構造物を構築する事でほとんど伝達しない事が明らかになっています。そこで、今回はUCFクリーンルーム部全域の基礎を20m四方のマットスラブとして設置し、振動を抑制することとしています。また、日常的な作業すなわち980N程度の荷重がかかった時の変位量を数値シミュレーションし(表1.1)、変位量を $1\mu\text{m}$ 以下

に抑えるためには、スラブ厚が1500mm以上必要であることが明らかになっています。

表1.1 荷重印加時の固有振動数並びに変位量

スラブ厚	固有振動数(Hz)	最大変位量(μm)
1,500mmの場合	11.7	0.73
1,300mmの場合	10.1	1.1
1,000mmの場合	7.77	2.4

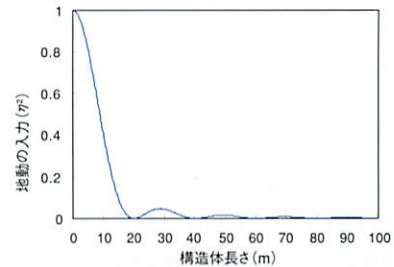


図1.1 地動の入力損失のパワースペクトル

・高剛性架台

杭の打ち込み深さ、マットスラブ等の対策により地下スラブ上での振動抑制ができていても、グレーティング架台上(作業面)での剛性が保たれていなければ意味がありません。よって、クリーンルームとしての空気の流れも考慮した解析モデルにより数値シミュレーションを行い(図1.2)、鉄筋コンクリート製の高剛性架台の構造を決定しています。

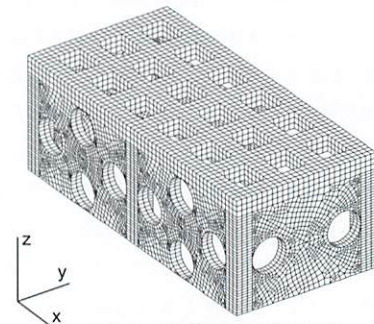


図1.2 高剛性架台解析モデル

1.2.2 微振動測定結果

前述した微振動対策より、下図に示す有効な結果を得る事ができています。

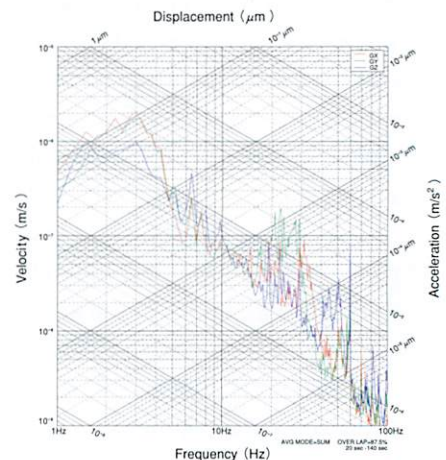


図1.3 床微振動スペクトル(計測評価室)

1.3 特殊アース

1.3.1 微小静電気の除電によるノイズ対策

ナノテクノロジーという言葉に代表されるように、技術の進歩により電子デバイスの微細化が進み、製造・分析装置に対し微小な静電気によるノイズの影響が大きくなっており、建物内外部が有する帯電電位を抑えるため、できる限り速やかに除電する必要があります。そこでUCFでは、従来からのステップアース（連結アース棒88ヶ所）に加えメッシュアースを併用し、接地抵抗0.19Ωという世界最小レベルの特殊アースを作りだしています。この特殊アースはクリーンルーム内すべての配電盤の中に取められ、装置電源を接続する際に合わせて接地でき、簡易に利用できるものとしています。又、その他一般的なD種アース、避雷用、躯体用、実験用等10種類ものアースを独立して設置しており、一般電動機械等から発生するノイズが特殊アースに干渉するのを防止すると共に、様々な用途に適したアースを区別して利用できるようにしています。



図1.4 特殊メッシュアースおよびステップアースの施工

1.3.2 電気抵抗測定結果

各アース種別の接地抵抗測定結果を表1.2に示します。

表1.2 接地抵抗測定結果

記号	接地種別	接地形式	測定値(Ω)
E(ACD)	A種,B種,D種	銅板 900mm×900mm×1.5mm	9.0
E _B	B種銅板	900mm×900mm×1.5mm	7.0
EA(S)	A種銅板	900mm×900mm×1.5mm	6.5
ED1(実)	D種銅板	900mm×900mm×1.5mm	10.8
ED2(実)	D種銅板	900mm×900mm×1.5mm	12.6
ED(ELB)(実)	D種銅板	900mm×900mm×1.5mm	11.5
ED(ELB)	D種銅板	900mm×900mm×1.5mm	12.0
E(SP)	特殊	ステップ・メッシュアース	0.19
E(鉄)	特殊	鉄筋アース	0.17

1.4 クリーン環境に求められる要件

クリーンルーム環境を構築する上で以下の四原則に基づきシステム設計を行っています。

- 汚染物質の流入防止
- 汚染物質の発生防止
- 汚染物質の拡散防止（滞留・堆積防止）
- 汚染物質の速やかな除去

1.4.1 流入防止

クリーンルームの清浄度を維持する上で陽圧管理が絶対不可欠となります。そこでクリーンルーム内に排気風量を超える外気量を導入することで、クリーンルーム内を加圧します。超過分の空気量は微差圧ダンパーを介して室外へ排出し、室間の差圧制御を行います。今回、外気導入ダクト系に高機能ダンパーを設置していますので高度な室圧制御を実現しています。

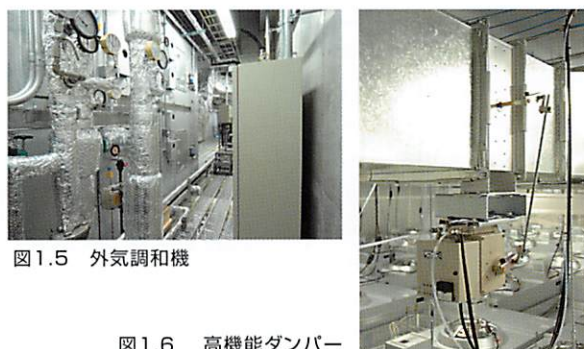


図1.5 外気調和機

図1.6 高機能ダンパー

1.4.2 発生防止

UCFでは、FFU（ファンフィルターユニット）にDCブラシレスモーターを採用し発塵量の低減を図っています。又、化学汚染物質の発生を低減するため低ボロン・低有機又はボロンフリーのPTFE（poly-tetra-fluoro-ethylene）製のフィルターを採用している他、ノンシールの内装工法、シール材から電線ケーブルに至るまで、低アウトガス対策品を使用することにより汚染物質の発生源を抑えています。

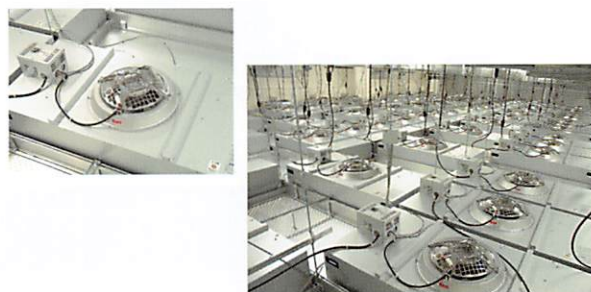


図1.7 FFU(DCブラシレスモータ採用)

1.4.3 拡散防止

汚染物質の拡散防止には垂直層流方式が理想的とされており、このため天井全面にFFUを設置することが必要とされてきました。しかし、UCFでは天井リターン式滞留域低減システムを採用しFFU未装着面に半閉止板を取り付け、室内・天井内間での圧力差による還気流（室内から天井内へ気流）を形成させる事で理想的な垂直層流の気流性状を実現しています。なお、滞留域の形成抑制に関しては気流制御のみならず、静電気対策も重要であり導電性能に優れたクロス・カーテン・鋼材・塗料を採用しています。



図1.8 半閉止板

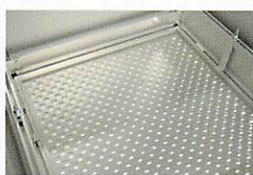


図1.9半閉止板(天井裏)

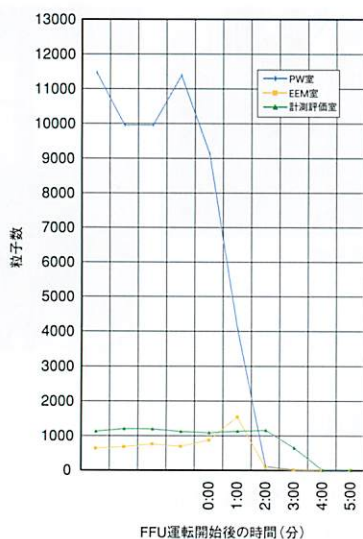


図1.10 清浄度回復特性



図1.11 フィルター配置

1.4.4 除去技術

導入される外気中の化学汚染物質除去には、外調機内のフィルター及び超低補給水型のケミカルウォッシャー[高砂熱学工業(株)製]を用いており、外部からの汚染物質侵入を防止しています。室内で発生する汚染物質を除去するため、FFUにて室内空気を平均1時間に120回循環させ、高性能フィルター(99.9999% 0.1 μ m)で濾過しています。また前述した半閉止板を用いず同じ清浄度を維持するためには、1時間に200回以上の空気循環が必要であり、半閉止板は省エネルギー運転にも貢献しています。さらにUCFでは、FFUの個別運転並びに個別周波数制御を可能としているので汚染物質発生源(実験装置配置)に合った効率的な除去効果が発揮できるものとなっています。



図1.12 ケミカルウォッシャー制御盤

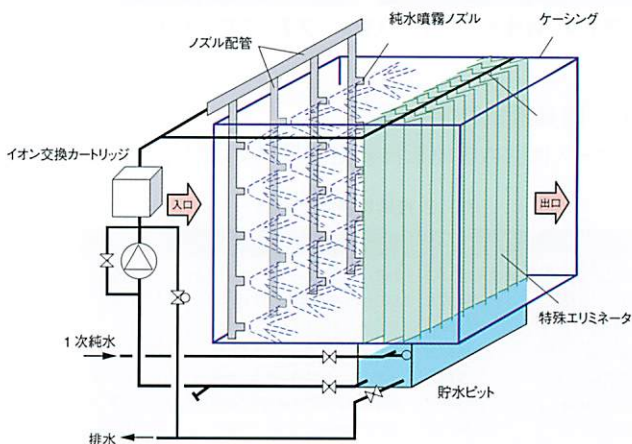


図1.13 ケミカルウォッシャーシステム概念図

表1.3 ケミカル測定結果

測定日 (計画値)	金属、ドーナント (ng/m ³)										酸・アルカリイオン (μg/m ³)		
	Na	K	Ca	Li	Mg	Si	B	P	Cl ⁻	NO ₂	NO ₃	SO ₄ ²⁻	
フィルター装着前	—	—	—	—	—	—	2	19	<0.1	0.8	0.4	0.6	
運転開始直後	—	—	—	—	—	—	2	11	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	
運転後1ヶ月	—	—	—	—	—	—	4	19	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	
運転後2ヶ月	—	—	—	—	—	—	<3	<10	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	

「—」については未検出

1.5 クリーンルームの構成と性能

UCFにおける部屋別の構成を表1.4に示します。表から全ての実験室においてClass1の清浄度を求めており、とりわけ計測評価室においては、許容される室温変動が $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、許容騒音値が55dB(A)以下と非常に精密な環境仕様となっています。本節では、UCFで採用した各室の空調システムに関して述べます。

1.5.1 空調システム1

プラズマ・ウェットプロセス室(PW室)、EEM室の空調システムについては、FFU方式による個別循環型とし、DCブラシレスモータ仕様のFFUを採用することで、従来のACモータ仕様のFFUに比べて高効率でより高度な個別エリア運転を可能としています。個別エリア運転制御が可能な事から、用途にあった最適最小運転ができ、また半閉止板利用によるFFU台数低減の結果、搬送動力の大幅な低減が

見込まれます。室内温度制御は 12°C の冷水によるドライコイル方式を採用し、湿度に関しては外調機の吹出露点温度を制御することで安定した温湿度環境を実現しています。さらにPW室の露光エリアにおいてフッ酸等の腐食性ガスが、万一発生した場合に備えてFFUのフィルターはすべて耐薬品性、耐水性の優れたPTFE製を使用しています。同様にEEM室においても純水を多量に使用する事から全てのフィルターにPTFE製を使用しています。

PW室ユーティリティエリア(床下)においては、配管・ダクトから発生する振動の伝播防止策として、支持架台をグレーティング架台とは独立に設置し、すべてのユーティリティ設備の支持を行っています。

更衣室の空調については、FFU方式とし温度制御をFCU(ファンコイルユニット)にて行っています。なおFFUフィルターには、低ボロン・低有機仕様のものを使用しています。

表1.4 クリーンルーム構成と性能

室名	床面積	天井高	清浄度 (at $0.1\mu\text{m}$)	温度変動	湿度変動	騒音条件
プラズマ・ウェットプロセス室	262.5m ²	3.5m	1個/cft	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 10\%$	65dB(A)
EEM室	87.5m ²	3.5m	1個/cft	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 10\%$	65dB(A)
計測評価室(床下含む)	87.5m ²	3.5m	1個/cft	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$\pm 10\%$	55dB(A)
更衣室	50.0m ²	3.5m	1000個/cft	成り行き	成り行き	65dB(A)

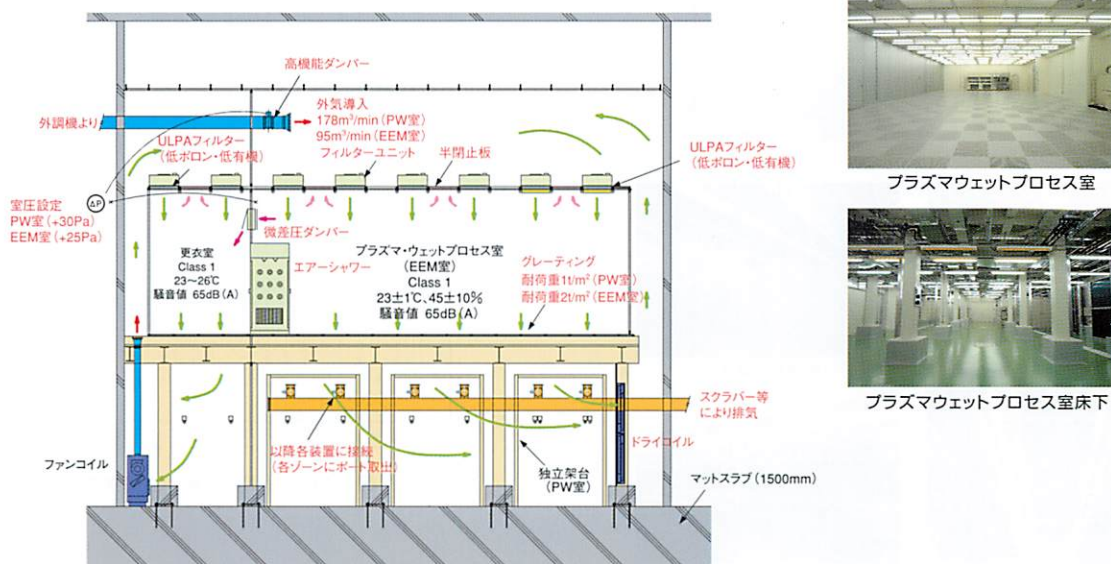
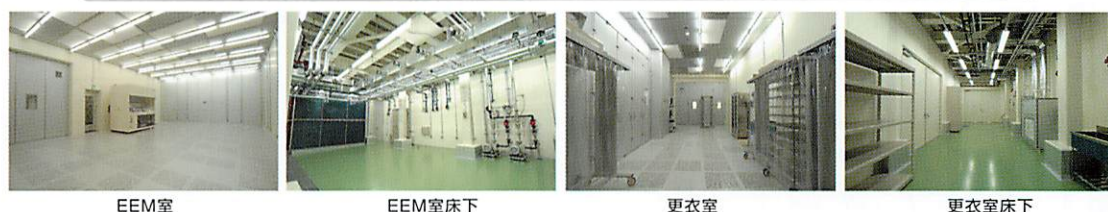


図1.14空調システム1(プラズマ・ウェットプロセス室・EEM室・更衣室)

1.5.2 空調システム2

計測評価室の空調システムは、DCブラシレスモータ仕様のFFUを設置しているため、他室と同様に個別エリア運転が可能なシステムとなっています。また温度精度並びに温度分布精度を上げる必要があるため全面にFFUを設置しています。一方温度制御については、ドライコイルの使用は他室と同様ですが、 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の厳しい温度精度を達成するため、グレーティング上下エリアでの装置熱負荷を考慮し床上用、床下用にそれぞれドライコイルを配置し、さらに小温度差 ($18 \rightarrow 19^{\circ}\text{C}$)、大水量仕様としています。またFFUから発生する騒音値を低減するため、FFUとフィルターの間に挿入する低圧損のサイレンサーを新たに開発し、クリーンルームにおいて非常に厳しい条件である55dB(A)以下を達成しています(図1.17)。なおフィルターは、低ボロン・低有機仕様のものを採用しています。ユーティリティ設備支持についても嫌振対策としてPW室と同様に支持架を独立に設置し、ドライコイルもそれで支持しています。



図1.16 低圧損サイレンサー付きFFU

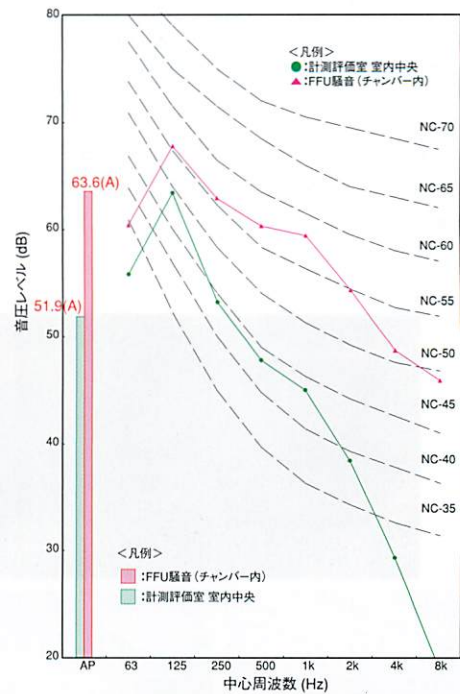
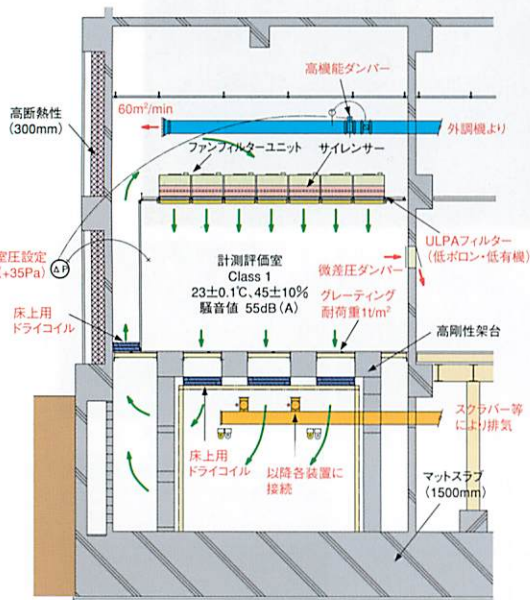


図1.17 騒音測定結果



図1.15 空調システム2 (計測評価室)

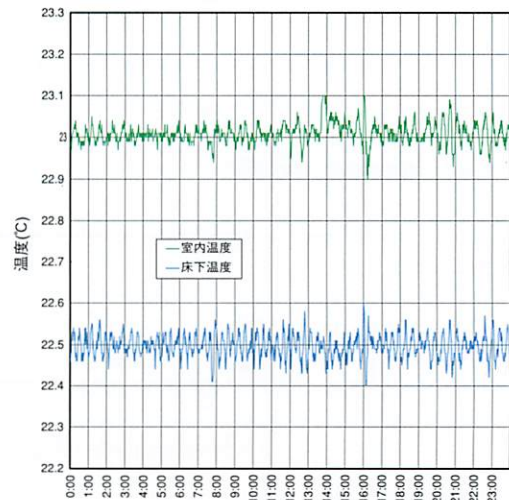


図1.18 計測評価室 温度推移

1.6 静電気対策

1.6.1 内装材の選定および接地

内装材に発生する静電気は、汚染物質の付着の原因となり清浄度に影響を及ぼすため、今回のような高 cleanliness 空間においては静電気対策が必要不可欠となります。よって UCF ではクリーンルームの天井フレーム、パネル、クリーンクロス、塗床にいたるすべての仕上げ材が、表面固有抵抗値 $1 \times 10^9 \Omega / \square$ 以下という導電性の優れたもので構成されています。またこれらの仕上げ材を、前述した接地抵抗の非常に小さいアース (E (鉄) = 0.17Ω) へ金属配線で接地しているため、確実な除電効果が得られます。

1.6.2 クリーンイオナイザー

内装材に導電性の物を選定し、それらを確実に接地する事で建物内部に発生する静電気を抑制する事が可能です。しかしながら、UCF で使用する研究試料には、ガラス基板や高分子基板など導電性に乏しく帯電しやすいものが存在します。この様な絶縁性の研究試料が帯電することで、試料表面へ汚染物質の付着が著しく生じ、実験結果に重大な影響を与えます。そこでこのような絶縁性試料の帯電を防止する為、静電気を中和させるクリーンイオナイザーを設置しています。本イオナイザーは電極針に高純度単結晶シリコンを採用している為、電極針自身の磨耗がなく微粒子および重金属類の発生を極限まで抑制しています (図 1.20、1.21 発塵比較グラフ参照)。さらに放電対極バイアス電圧制御により、オフセット電圧 $\pm 5V$ という精密な除電性能と交流の低電位放電方式による低ノイズ化を実現しています。UCF では、室内の FFU 直下いずれの場所においても、絶縁試料を帯電させることなく扱うため、イオナイザーを可動式ラックに設置しています (図 1.22)。図 1.19 に本イオナイザーからの距離と除電時間の関係を示します。

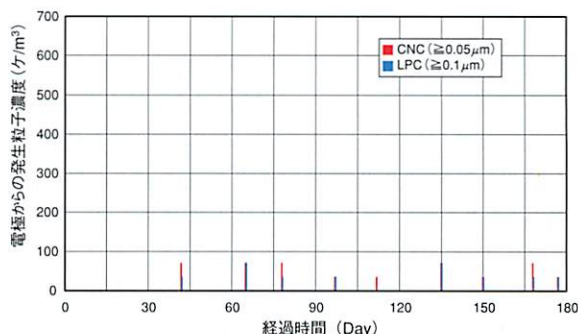


図 1.20 単結晶Si電極からの発塵量

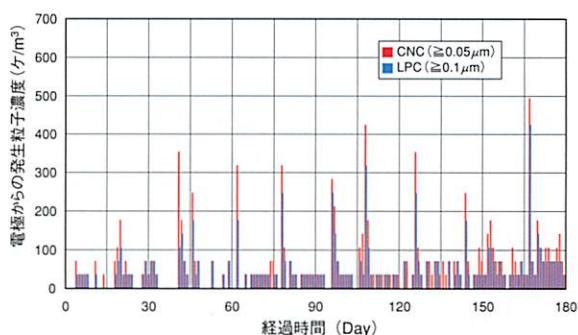


図 1.21 多結晶Si電極からの発塵量



図 1.22 大型基板対応可動式イオナイザー

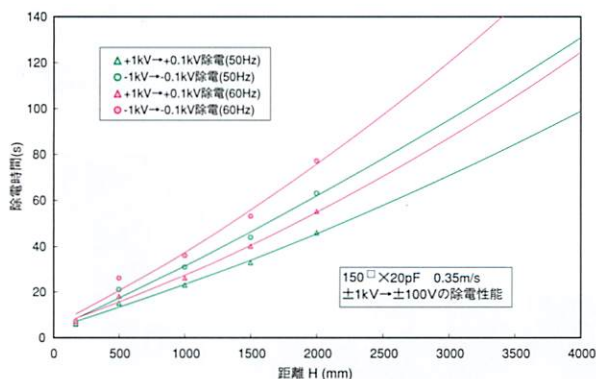


図 1.19 イオナイザーからの距離と除電時間の関係

1.7 空調・用役システム

1.7.1 熱源機器

冷熱源には、高効率のインバータ制御水冷スクリーチャー150RT (527kW)×3台、熱源にはガス焼き温水ボイラー233kW×2台を設置しています。UCFは、研究施設という特徴から年間の負荷変動が大きく、そのほとんどが部分負荷となります。よって今回採用の水冷チラーは、インバータ制御方式であると同時に、部分負荷特性に優れたものであり、同時に冬期には低冷却水温度 (15℃) を使用できるため、年間のエネルギー消費量の大幅な低減が見込まれます。又、省エネ対策として冬期外気条件により、冷却塔で冷水を製造するフリークーリングシステムを採用しています。

さらに冷熱源、温熱源とも複数台設置を行っている為、機器故障時・メンテナンス時の完全停止がなく、年間を通しUCFを運転する事が出来ます。また台数制御を行っている為、負荷に応じた最適な運転状態を維持できます。

1.7.2 配管系統

配管系統は、室内熱負荷を処理するドライコイル系統、外気熱負荷を処理する外調機系統および10℃、20℃の装置冷却水を生成する生産冷却水系統の3つに大別されます。ドライコイル系統では、室内熱負荷に応じてドライコイルの循環系統へ冷水を直接注入するブリードイン制御方式を採

用しているため、熱伝達効率もよく温湿度制御も非常に安定したものとなっています。また各部屋毎の配管系統が独立しているため、低負荷時における送水ポンプのインバータ制御を各部屋独立で行えることから、循環水量の削減による大幅な搬送エネルギーの低減が見込まれます。一方、外調機系統では、夏期において冷水による外気の冷却、冬期において温水による外気の加熱が行われますが、冬期には省エネ対策として冷水を通水し、導入外気からの冷熱回収を行っています。これにより導入外気のプレヒート・凍結防止の役割も担っています。また外調機の外気熱処理により発生する凝縮水を冷却塔の補給水として再利用しています。生産冷却水系統では、プレート熱交換器を介し10℃、20℃の冷却水をそれぞれ独立に生成しており、万一の漏水時のバックアップを考慮し、系統間にはバイパスを設けています。また各生産冷却水に使用する水は超純水製造設備より供給される超純水を採用し、これを常にオーバーフローさせる事で銅やSUS配管から溶出する金属イオンの濃縮および水質 (比抵抗・50kΩ・cm以上) の低下を防止しています。さらに各系統の冷水ポンプには吐出圧によるインバータ制御を組み込んでおり、低負荷時の省エネルギー対策を行っています。すべての系統の送水ポンプに関して複数台の設置を行っている為、故障時・メンテナンス時の連続運転を可能にしています。

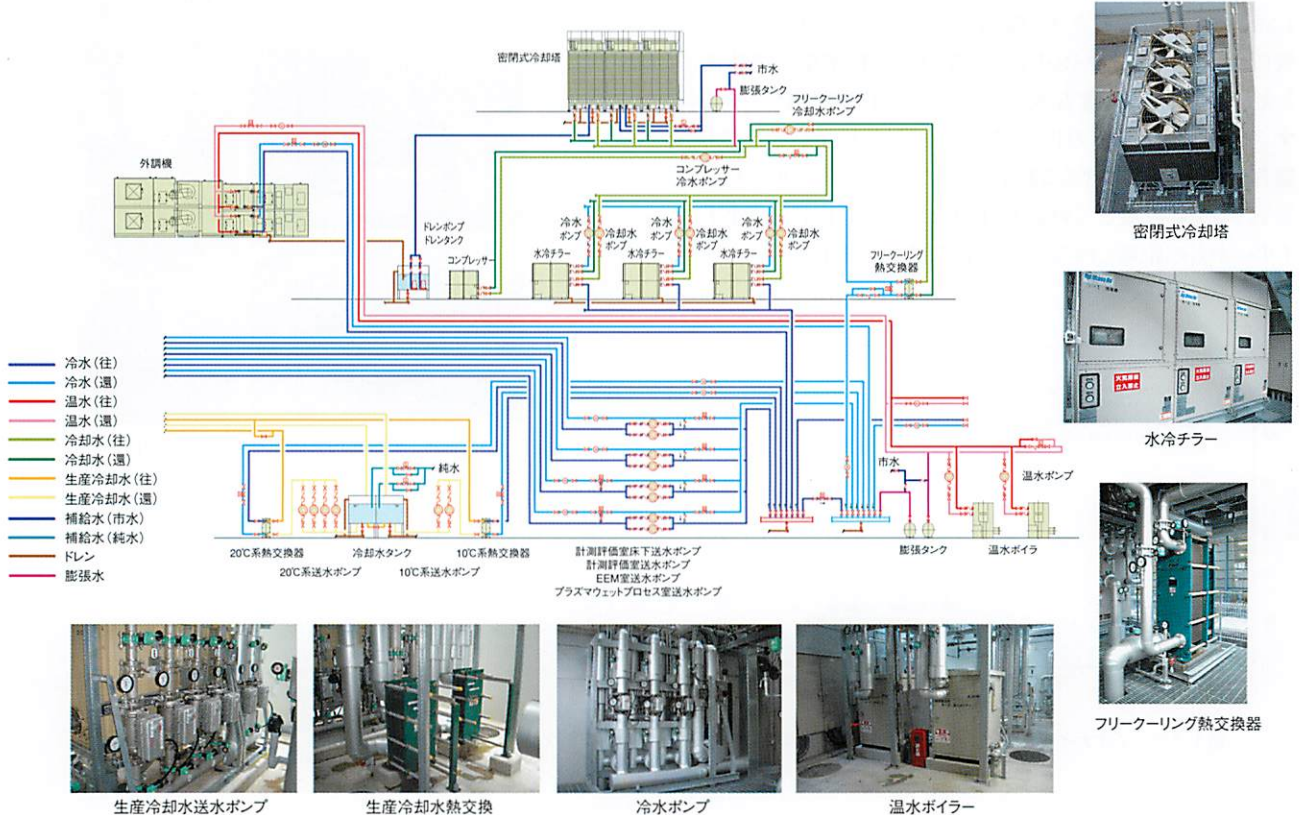


図1.23 熱源配管系統図

1.7.3 ダクト系統

ダクト系統は外調機により外気を導入する給気系統と熱、粉塵、さらに装置排気を排出する排気系統に大別されます。給気系統は各部屋毎の差圧を維持する為の高機能ダンパーと外調機から構成され、ダンパーには吐出圧によるインバータ制御を採用しています。更に外調機には極めて小さなL/G(純水量/空気量)で化学物質の高効率除去を実現できるケミカルウォッシャーを併用し、室内のケミカル対策

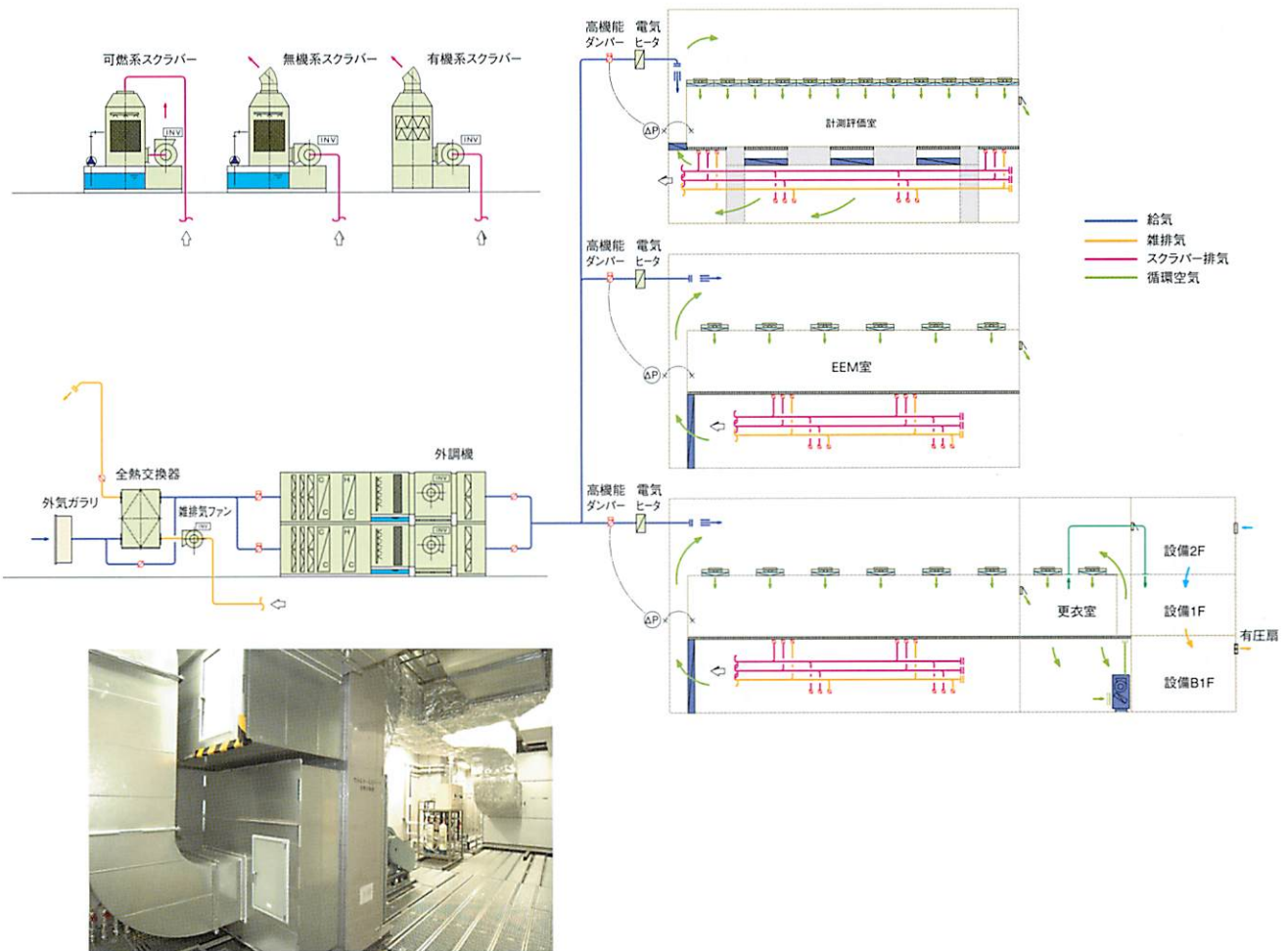
を行っています。排気系統は、雑排気・有機排気・無機排気・可燃排気系統から構成され、雑排気系統では全熱交換器を設置し、導入外気との熱交換を行っています。無機排気・可燃排気系統では洗浄塔による排気処理、有機排気系統では吸着塔による排気処理をそれぞれ行っており、排気の各系統において吸入圧力によるファンのインバータ制御を行い排気風量の適正化を図っています。



可燃・無機・有機系スクラバー



雑排気ファン



全熱交換器および外気調和機

図1.24 給・排気ダクト系統図

< 高砂熱学工業株式会社 >