

室内空気質づくり比較考

呂 俊民

元 東京文化財研究所 保存科学研究センター
元 株式会社竹中工務店 技術研究所

1. はじめに

私が長年携わった研究は、住宅、オフィス、病院、半導体工場、博物館・美術館などの空気環境の汚染源の把握とその対策であった。建物毎に求められる空気清浄レベルと影響する汚染物質は異なるが、共通している汚染源は、建物が立地する大気汚染に由来するもの、建物を使用した際に発生するもの、建築内装材からのガスの放散によるものからなる。求められる技術は、空気清浄レベルの高度化と空気質の多様化への対応であり、建築設備・環境工学が基盤となっており、各分野に応用展開できる技術が多々あった。そこで、住宅やオフィス、特に、半導体工場と博物館・美術館を中心に対比できる研究を整理してみた。

2. 空気汚染の影響

2.1 管理レベル

住宅やオフィスでの空気汚染の許容レベルは、居住者や執務者の健康影響や公衆衛生上の観点から、厚生労働省によって室内濃度に関する指針値や、建築物における衛生的環境の確保に関する法律で定められている。

半導体工場のクリーンルームは、もともとNASAの航空宇宙の分野で宇宙船やそれに搭載される機器の信頼性や精度を維持するために必要とされたのがはじまりで、1980年代の半導体産業で、製造中に塵埃が半導体デバイスに付着すると配線切れやショートが生じたため、製品の歩留まり低下に対する技術的な対応が必要となった。そのため、デバイスの集積度の向上にともない、対象粒径の微小化と粒子数の少ない空間が求められ、クリーンルームでは粒子径と粒子数でクラスという表示で清浄度を表した。

一方、博物館・美術館は文化財(ここでは資料と呼ぶ)の劣化を防ぐため、温湿度をコントロールし、清浄な空間で収蔵・展示することが求められる。資料に対する汚染の影響は、最低健康障害発現量

LOAEL(Lowest Observed Adverse Effect Level)、健康障害非発現量NOAEL(No Observed Adverse Effect Level)の考えに近く、この濃度までは資料にほとんど影響しない(あるいは修復し許容できる濃度)と考える。ただし、資料に影響する汚染物質と資料の素材が多岐にわたり、別の環境因子の影響もあり管理基準値の設定を難しくしている。

2.2 化学物質の影響

住宅内の空気汚染源は燃焼生成物から建築材料の脱ガスへと変わった。1990年代の半ば頃、住宅やマンションでは新築やリニューアル時において、入居者が体調の不良を訴えるといったシックハウス問題が生じた。これは住宅の省エネルギー化をはかることから高气密・高断熱となり、換気量が極めて少なくなってきたことと、使用される内装材や接着剤等からホルムアルデヒド、VOCs(揮発性有機化合物)などの放散が起因している。

半導体工場では2000年頃になると、分子汚染(Airborne Molecular Contaminants)と称して、アンモニアなどの化学物質も制御対象となった。分子汚染物質の明確な定義はないが、粒子除去用のHEPAフィルタでは除去できない粒子でない物質で、分子状、原子状、イオン状のような状態で存在するもので、基板表面に付着し半導体デバイスに何らかの影響を与えるものとされている。半導体工場でアンモニアが問題となったのは、256 Mbitの集積度のデバイスの製造がはじまりかけた時で、シリコンウエハー上にレジストを塗布し、光を当てて微細な線幅の設計図を描く工程(露光工程)で反応を伴う化学増幅型レジストを用いる。そこで雰囲気中にアンモニアが存在すると、レジストと反応しうまくパターンが形成できなく、半導体製造の側からアンモニアの管理値1 ppb以下の環境が要求された。

博物館・美術館における館内の空気汚染は1960年代に、打立て躯体コンクリート造の建物では、コン

クリーンから発生するアンモニアが油絵の亜麻仁油と反応し変色する問題にさかのぼる。その後さらに、博物館・美術館建築でも新建材の使用と建物の高气密化でシックハウスと同様、有機酸やアルデヒド類の汚染による資料への影響が問題となった。東京文化財研究所ではそのガイドラインを、アンモニアなどのアルカリ性ガスと酢酸などの酸性ガスに対して設けた。ここで展示・収蔵環境の“のぞましい基準値”のアンモニア30 ppbは、かなり清浄な環境といえる。

3. 汚染制御と予防保存

クリーンルームではコンタミネーションコントロール(contamination control, 汚染制御)といい、クリーンルームの3原則「ゴミを外から持ち込まない」「発生したゴミを取り除く」「ゴミを内部で発生させない」が基本である。この考えをベースに半導体工場のクリーンルームでは、製品の歩留り向上のために3原則をバランスよく(総合的な汚染制御)をおこなうことが合理的で、それが競争力のある生産工場につながる考えである(図1)。

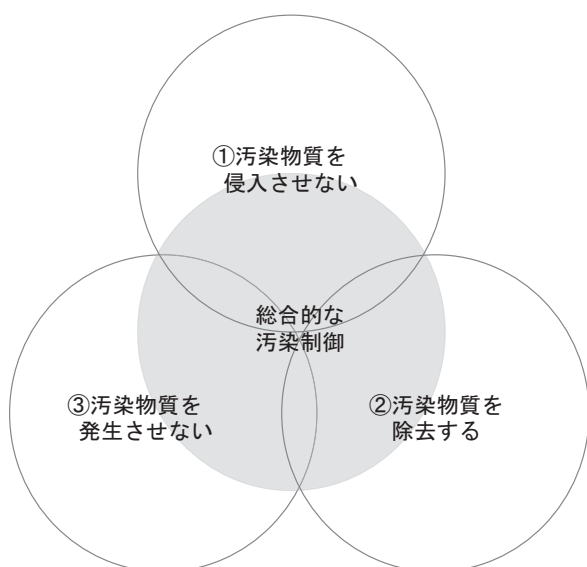


図1 汚染制御の基本

博物館・美術館の文化財保存の考え方は、プリベンティブコンサーベーション(preventive conservation, 予防保存=保存環境づくり)といわれているもので、以前の修理優先から環境整備に重点をおき、処置中心の被害が生じた後の対策から、被害を未然に防ぐ予防中心の対策が重要であることによる。予防保存のフローは図2に示すように、まずは資料を劣化因

子から回避、遮断し、環境を監視し、その兆候がみられたら対処し、見直すのが保存環境づくりである。回避・遮断は汚染制御と共通しており、監視・対処・見直しは生産現場の品質管理といえる。

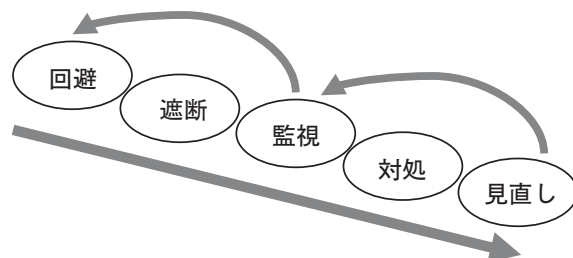


図2 予防保存のフロー

4. 室内の汚染源

住宅における内装材からの脱ガスによる空気汚染に対しては、ホルムアルデヒドを中心に、建材メーカーの努力で脱ガスの少ない材料を容易に選べるようになった。ただし、それ以上に脱ガスを減らす努力が必要な場合がある。化学物質過敏症診断治療施設の設計では、試験室は棚類、医師の椅子、検査室の患者用のチェアから極力ガスが出にくい什器が必要とされた。そのため、部材毎にホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、トルエンなどVOCsの化学物質放散速度を求め使用部材を吟味して製作した。その中にはいくつかの自然素材があったが、放散が確認されたものがあり、木材を中心とした自然素材・健康仕様といった素材といえども化学物質の放散には注意を要した。最終的には、木材の持っている成分を減らすためなるべくねかせ養生することで、放散を低減させ化学物質の放散量の少ない家具を製作した(図3)¹⁾。

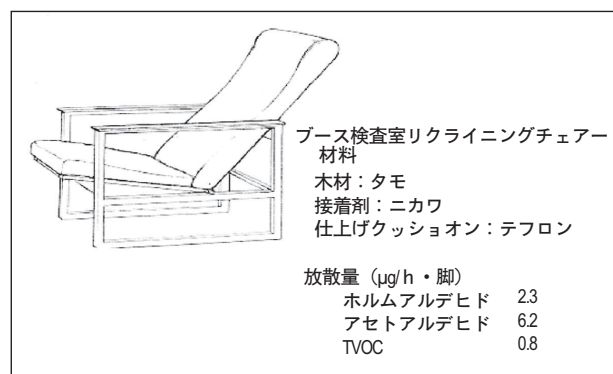
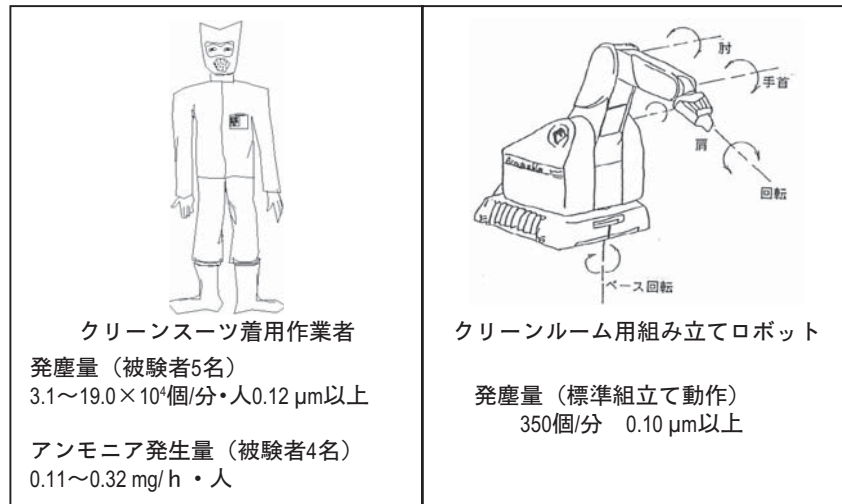


図3 化学物質過敏症検査室の家具からのガス放散量¹⁾

図4 クリーンルームの発塵負荷²⁾

半導体工場ではクリーンルーム内の発塵源を減らす必要があり、クリーンスーツを着用した作業からの動作別発塵量の試験をした。一方、発塵対策として作業を自動化するためのクリーンルーム用組み立てロボットの発塵量を求め、クリーンルームの浄化設計に反映させた(図4)²⁾。

クリーンルームの分子汚染については、クリーンルーム構成材からの脱ガスがターゲットになり、シーリング剤や可塑剤、難燃剤といった、住宅とは違った構成材料までが対象となった。また、汚染負荷低減のためには、アンモニアが出にくいコンクリートを採用した。

美術館・博物館でもコンクリート造であるため、アンモニアの発生を低減させるため、シーリングと称して枯らし期間を建設から開館まで20ヶ月程度要した。ただ、早い時期での開館を目指す際には、半導体工場での経験からアンモニアの発生が少ないコンクリートプラントを選び採用した。

アンモニアの汚染負荷となるヒトからの発生については、クリーンスーツを着用した作業からの発生量を試験し図4に併記した。衣服や行動が異なる博物館・美術館では発生量が多くなると考えられるが、関根ら³⁾による皮膚表面からのアンモニア放散の研究が参考となる。

5. 空気清浄化

5.1 塵埃除去とガス除去

空調設備による室内の空気清浄化は、一般ビルでは空調機のエアフィルタで取り入れ外気と室内から

循環した還気をエアフィルタで除去する。1975年に実施した空調機エアフィルタのアンダーセンサンプラーによる粒径別除塵性能の実測から、外気は2 μmを境に5 μm付近の粗大粒子と1 μm以下の微小粒子からなる2山型の分布を有していることを確認した⁴⁾。粗大粒子は土壌粒子など、微小粒子は燃焼に伴って発生する粒子で発生源が異なる。この実測を通じて、昨今問題となっているPM_{2.5}を考慮した空調エアフィルタによる粒子除去の重要性を示唆した。

半導体工場は、循環空気をHEPAフィルタ、ULPAフィルタといった高性能エアフィルタによって処理し高浄度を維持するが、分子汚染が問題になり空調機に化学フィルタを取り付けるようになった。この頃から化学フィルタの研究が加速され、活性炭フィルタだけでなく、ガスの種類によって選択できるようになった。博物館・美術館でも火山地帯に立地する館などでは、外気処理には専用の化学フィルタを設け、内部で発生する有機酸やアンモニアの除去には、循環空気の処理に化学フィルタを取り付けた(図5)⁵⁾。これも半導体工場の分子汚染対策技術の展開例であるが、博物館・美術館ではコストや交換時期など多くの課題を残している。

5.2 換気回数と空気交換率

建築基準法ではシックハウス対策の規制が盛り込まれ、ホルムアルデヒドの放散量による材料等級区分を設け、換気回数に応じて使用できる材料は等級毎に面積制限を受けた。また、換気量の確保には、24時間常時換気設備の設置が必須となった。

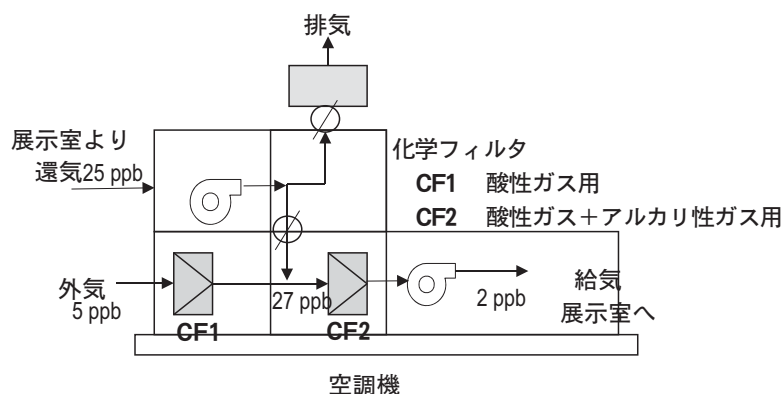


図5 博物館・美術館における化学フィルタとアンモニア測定例⁹⁾

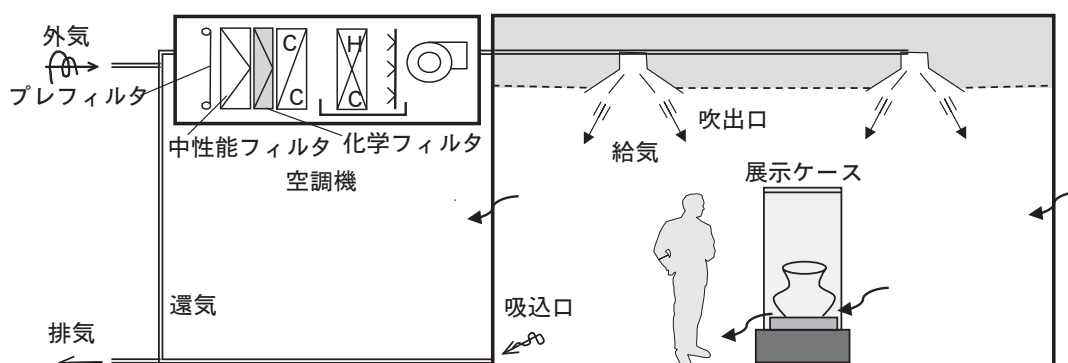


図6 博物館・美術館の換気と展示ケースの空気交換

機械換気設備が設けられたオフィスや博物館・美術館の展示室などでは、建築物における衛生的環境の確保に関する法律で定められた二酸化炭素濃度1000 ppm以下とするため、一人当たり30 m³/h程度の換気量を確保できるように設計されている。機械換気設備を有していない居室などでは、窓開けによる自然換気に頼るが、外の空気が新鮮でなければならない。

2018年におこなったイランの首都テヘランの国立博物館の保存展示環境の調査では、博物館の空調設備が完備されておらず窓開けによる換気をおこなっており、大気汚染物質による展示品への影響が課題となった。

半導体工場では製品を密閉箱に入れて搬送し、製造装置にアクセスする考えがある。クリーンルームも部屋全体を高清浄度に保つ方式から、部屋全体の清浄度を緩和して、製造する空間などの必要な部分だけを高い清浄レベルに制御する方式(ミニエンバイロメント方式)に移行した。この方式の究極は、専用容器に入れ製品を移動させるので、クリーンルー

ム不要論が取り上げられた。ただし、容器からの汚染や製品自体からの脱ガスも問題になった。

博物館・美術館でも、資料を桐の箱に収納する際、密閉空間であり桐箱の素材を吟味しないと材料からでる有機酸により汚染される。エアタイトの展示ケースも密閉空間に近いので、汚染発生に注意しなければならない。

展示室の換気と展示ケースの空気交換の概念を図6に示す。展示ケースは、換気回数にあたるケース内空気の入れ替りを空気交換率と呼び、日当たりの空気の交換回数で表し、エアタイトの展示ケースは0.1回/日から0.5回/日と極めて少ない。これは、湿度制御と展示室からの汚染対策であるが、展示ケースの内装材は合板に接着剤でクロス貼りしたものが多く、ここから発生する酸性ガスが、換気量が少ないため長期間減衰せずに問題となる。空調機に化学フィルタをつけ展示室の空気は清浄であっても、展示ケース内は汚染された環境となる⁹⁾。これは展示環境で直面している問題であり関係者に発信した。

6. 建物や管理の共通点

建築設計におけるゾーニングによる汚染対策を比較してみる。クリーンルームは最も高い清浄度域を中心とし、清浄度がやや低いエリアを周辺に配置する。室圧も高清浄度域を最も高くなるように設計する。入室はクリーンスーツに着替えクリーンシューズに履き替え、粘着マットがひかれたエアージャワーを通り入室するなど、入室者の管理は徹底している。

博物館・美術館は収蔵庫などの収蔵エリアと観覧者がいる展示室などのエリアをゾーニングしているが、収蔵エリアは収蔵庫から資料の搬出入ルートまでのエリアで収蔵庫を高清浄域とし室圧を高くし、収蔵庫内へは履き物を交換し粘着マットを設けるなどクリーンルームに近い。

設計にあたっての材料選定は、半導体工場では使用する建材、設備部材を洗い出し、分子汚染の少ない材料を選び、施工から完成まではクリーン施工と称し、施工段階から持ち込む材料の管理、工事中のダスト清掃、最終の完成時には純水拭きをおこなう。収蔵庫でも、内装材料の吟味の他に、クリーン施工としての掃除機かけ、拭き掃除の徹底など目の届かない部分での清掃は半導体工場と共通している。完成後も展示室も含めクリーン清掃や、清掃時の堆積塵のチェックは、博物館・美術館のIPM(総合的防虫管理)と呼ばれる保存環境づくりの考えといえる。

7. おわりに

博物館・美術館の資料保存対策は半導体工場の汚染対策と共通した技術があり、すぐに展開できた。日本の半導体産業は衰退したが、クリーン化技術は様々な分野で展開できると考える。一方で、「博物館・美術館は文化財を公開し保存する」、「半導体工場は製品を安定して供給する」という各々の使命・目的が異なり、実施にあたっては言語や文化が異なることも感じた。

博物館・美術館でも新型コロナウイルス対策で苦勞しており、展示室では一定の温湿度に維持しつつ換気量をより多くするためには機械空調では限界があり、循環空気に対する空調エアフィルタのウイルス除去の効果に対して見解が求められる。病院空調では高浄化が必要なICUなどと、感染防止エリアでは圧力制御の考えは逆であるが、その技術はクリーンとハザードで共通している。

また、博物館施設の燻蒸処理や、津波被害で被災

資料の保存修理には、高濃度の殺菌剤や防虫薬剤が使用されており、リスクとベネフィットにどう向き合っていくか大事である。室内の環境はウェルネス指向もあるが、社会状況に合わせたタイムリーな研究を室内環境学会に期待したい。

参考情報

- ・佐野千絵, 呂俊民, 吉田直人, 三浦定俊: 博物館資料保存論, 文化財と空気汚染, みみずく舎, (2010).
- ・半導体プロセス環境における化学汚染とその対策: リアライズ社, (1997).
- ・東京文化財研究所保存科学研究センター: 美術館・博物館のための空気清浄化の手引き, (2019).
https://www.tobunken.go.jp/~ccr/pub/190410aircleaning_guideline.pdf
- ・東京文化財研究所: 日本・イラン60年の歩み-考古学調査と文化遺産保護の協力, 東京池袋古代オリエント博物館展示パネル, (2020).

引用文献

- 1) 呂俊民, 天野健太郎, 石黒武, 小泉允則: 化学物質の放散を抑制した家具の制作, 平成17年室内環境学会学術大会講演要旨集 (2005).
- 2) Ro T. and Unno K.: Experiments on particulate generation from the robots in a clean room, International Symposium on Contamination Control, 843-849 (1986).
- 3) 古川英伸, 関根嘉香, 高橋万葉, 浅井さとみ, 宮地勇人: ヒト皮膚から放散するアンモニアの室内拡散濃度の推定, 平成24年室内環境学会学術大会講演要旨集 (2012).
- 4) 藤村満, 呂俊民, 橋本芳一: 大気浮遊粒子の粒度分布と空調フィルタのろ過特性, 大気汚染研究, 11(1), 26-31 (1976).
- 5) 呂俊民, 佐野千絵, 内呂博之, 瀬古繁喜, 天野健太郎: 美術館におけるアンモニア汚染と対策, 平成20年室内環境学会学術大会講演要旨集 (2008).
- 6) 呂俊民, 古田嶋智子, 林良典, 須賀政晴, 佐野千絵: 試験用実大展示ケースを用いたケース内のガス清浄化と濃度予測, 保存科学, 55, 125-138 (2016).