

クリーンルーム環境構築 4 年の軌跡と機器開発

豊田 朋範（分子科学研究所 技術推進部）

TOYODA Tomonori : Four years of clean room environment construction and equipment development

The clean rooms scattered throughout the Institute for Molecular Science have been consolidated on the first floor of Joint Research Building C and began operation in April 2020. There are many challenges in constructing and maintaining a clean room environment, such as remote control of 16 FFUs (Fan filter units), daily monitoring of remaining cylinder levels, and various risk factors and notification methods. Based on the technology obtained through joint development, we developed the equipment which are necessary to construct and maintain a clean room environment.

1. はじめに

分子科学研究所に散在していたクリーンルームは、共同研究棟 C 棟 1 階に集約され、2020 年 4 月に稼働を開始した。クリーンルーム構築時点から、16 台の FFU(Fan Filter Unit)の遠隔操作やボンベ残量の日常的な監視、様々な危険因子と通知方法など様々な課題が生じた。

我々は、共同開発を通じて得た技術を基に、クリーンルームの環境の構築と維持に必要な機器を開発した。

2. 分子科学研究所 C 棟クリーンルームの概要¹⁾²⁾

分子科学研究所の共同研究棟 C 棟 1 階に集約されたクリーンルーム(以下、特記なき限り「クリーンルーム」)における風の流れを図 1 に示す。

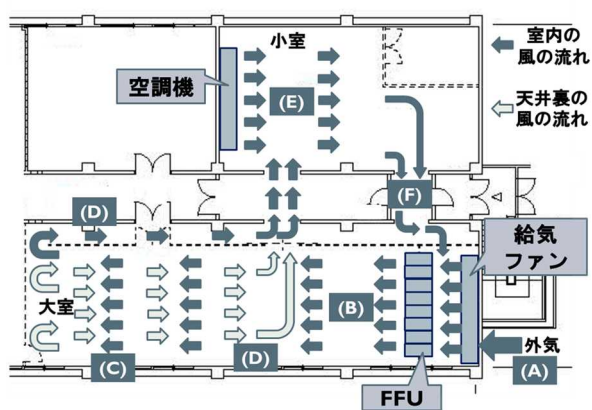


図 1. クリーンルームにおける風の流れ

まず、給気ファンからフィルターを通して外気を取り込む(A)。取り込んだ外気は、FFU からフィルターを通して大室に向けて送風する(B)。風は大室(147m²)を通り(C)、通路と天井を通過して(D)、イエローランプが

ある小室に入る。空調機からの風も加わって小室(80m²)を通過した後(E)、廊下を通過して(F)FFU に戻り、再びフィルターを通して送風される。これを繰り返すことで、清浄度を構築・維持する。

横方向から清浄な空気を送り出すこの方式は水平層流方式と呼ばれ、清浄な空気が発塵源を包み込むように気流を形成するため微粒子の拡散が防止され、速やかに排出されることから、高い清浄度が得られる。一方で、下流側で清浄度が低くなることに注意が必要である。クリーンルームは、無人時で ISO14644-1 の Class 3 相当、有人時で ISO14644-1 の Class 4~Class 5 相当と高い清浄度を有する。

3. FFU の遠隔制御の必要性並びにコア基板と FFU 制御ユニットの開発

最初に浮上した課題は、FFU 制御の安全性と再現性である。

FFU の上流側が最も清浄度が高いことから、FFU 近傍に電子ビーム描画装置(EB)を設置する運びとなったが、FFU の風量制御回路は、風量調整用ボリュームで調整した電圧値を基に制御するインバータ回路であることが判明して、EB 描画が FFU の電磁ノイズの影響を受けることが懸念された。対策として EB 描画中に FFU の風量を一時的に低減あるいは停止することが考えられた。

ここで、FFU の大きさと制御方法が問題になった。クリーンルームの清浄度構築の根幹をなす FFU は、水平方向に 8 台並べたものを垂直方向に 2 列重ねた 16 台が壁をなすように配置される(図 2)。しかしながら、FFU の高さは約 1.6m あり、垂直方向に 2 列並べた高さは 3m を超える。しかも、FFU の風量調整用ボリュ

ームは上部にあるため、上段のFFUの風量調整を手動で行うには、脚立や梯子が必須であり、高所作業を伴うため安全性が懸念された。また、風量調整用ボリュームはアナログ方式であるため、風量調整の統一性や再現性が低いことが課題として挙げられた。



図 2. 壁のように配置されたFFU

筆者は、岩手大学の技術職員と防災システムの共同開発を進める過程で複数の特許を共同出願し³⁾、これらの特許の社会実装を進めるため、障害物に強く遠距離通信が可能なLoRa(Long Range)無線モジュールとARMマイコンを搭載した汎用プリント基板であるコア基板V1の開発・量産を2020年1月に完了した。このコア基板V1をFFU制御に適用することを要請され、FFU制御ユニットV1の開発に着手した。

コア基板の外観を図3に、FFU制御ユニットV1の外観を図4に示す。

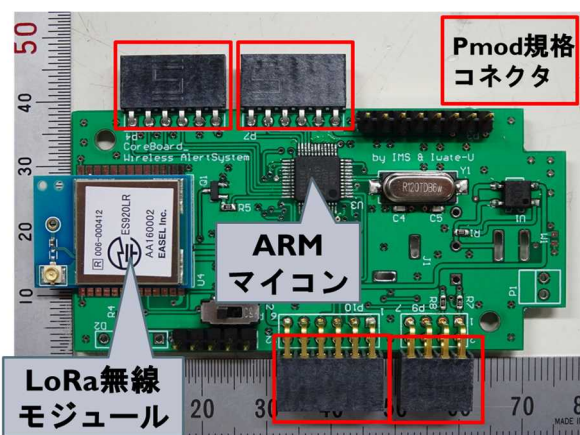


図 3. コア基板V1の外観

コア基板は、75.5×37.0(mm)のプリント基板にLoRa無線モジュールES920LRA1(EASEL社)とARMマイコンLPC1114FBD48/302,1(NXP社)を搭載し、周辺回路と

のインターフェースとしてPmod規格のコネクタを採用した。

PmodはPeripheral moduleの略で、マイコンボードなどに機能拡張ボードを接続するためにDigilent社が策定したインターフェース規格であり、ピン間隔はユニバーサル基板やブレッドボードで使用しやすい2.54mmと定義されている。コア基板ではType1のGPIO(General Purpose Input/Output)を2つ、Type2Aのexpanded SPI(Serial Peripheral Interface)を1つ、Type6Aのexpanded I²C(Inter IC)を1つ搭載している⁴⁾⁵⁾。

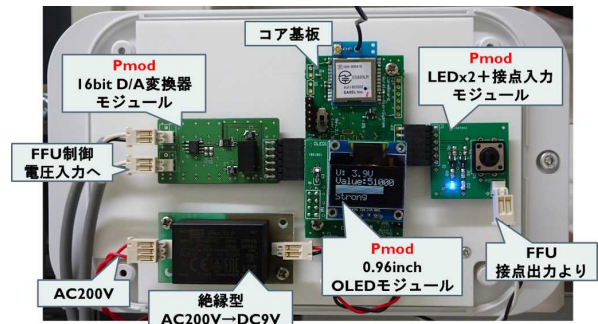


図 4. FFU制御ユニットV1の外観

FFU制御ユニットV1は、コア基板V1を中心にLED2個を搭載した接点入力モジュール、16bit D/A変換器モジュール、0.94inch OLED(有機ELディスプレイ)モジュール、そして絶縁型AC200V-DC9Vコンバータで構成される。

風量調整は、16bit D/A変換器モジュールで生成する0~5Vを制御電圧として、FFU内部のインバータ回路に入力して行う。D/A変換器モジュールの出力の直線性に問題はなく、応答速度はD/A値0→65535並びに65535→0のどちらも約3μsであり、FFUの制御電圧として使用するには十分である⁶⁾。

筆者らは2020年3月末までにFFU制御ユニットV1の16台製作と、現地での配置配線を完了し、クリーンルームは2020年4月に稼働開始した(図5)。

4. ボンベ残量の監視と通知の必要性並びにWAN-WANの適用

稼働開始したクリーンルームで新たな課題が浮上した。それは、ボンベの残量監視と通知である。

リソグラフィの工程においては、不活性ガスである窒素やアルゴンを多く使用する。しかし、これらのボンベがあるボンベ室は業者の立ち入りのため、クリーンルーム内部ではなく、外部に設けられている(図6)。そのため、ボンベ残量の低下を知らずにクリーンルー

ムに入室すると、作業中に窒素やアルゴンが使用不能に陥る恐れがある。このような場合でもボンベ室に直接アクセスできないため、スタッフやユーザーの負担やストレスは大きい。

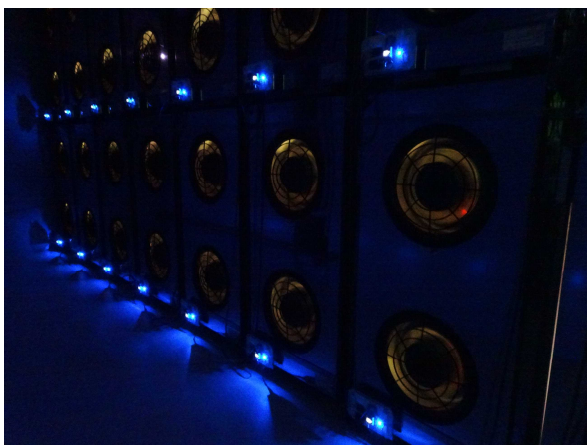


図 5.稼働中のFFU 制御ユニット V1 と FFU

一方、スタッフが毎朝出勤時にボンベ室に立ち寄り、ボンベ残量を確認するのも負担であるし、安全衛生巡視でよく見られるマナーに陥り、残量確認を怠る恐れがある。このような背景から、ボンベ残量を常時監視し、一定値を下回った際に分かりやすく通知するシステムの開発を要請された。2020年6月のことである。



図 6. クリーンルームのボンベ室

緑のドアの向こう側はクリーンルームであり、非常時以外は開放厳禁である

筆者は、岩手大学との共同開発で、センサや外部機器の警報信号を検出すると、Wi-Fi を介してスマート機

器を駆動する汎用一斉警報通知システム WAN-WAN(Wireless Alarm Network for Wide Area Notification)を開発し、特許出願を完了していた(図 7)³。また、圧力計は閾値を下回ると警報信号が出力される製品であった。これらのことから、ボンベの圧力計が閾値を下回ったらスマートスピーカーでアナウンスし、スマート LED が点滅し、筆者のスマートフォンに通知するシステムを WAN-WAN で実現した。



図 7. WAN-WAN の基本構成

各種センサや外部機器の警報信号を接続し、通知動作の起動トリガを送信する WAN-WAN 基本モジュールのプリント基板を図 8 に示す。

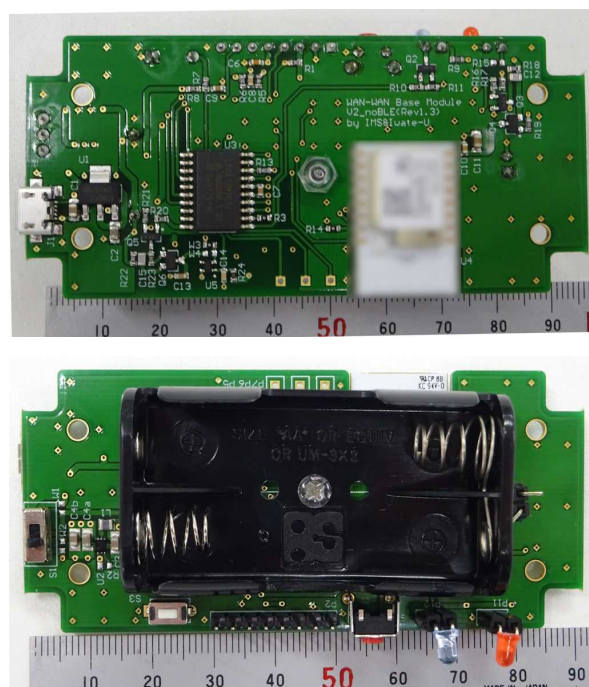


図 8. WAN-WAN 基本モジュールのプリント基板

現在のプリント基板は、(1)低消費電力 (2)低コスト重視—の 2 項目をコンセプトとして開発した。(1)は約 12×12(mm)の狭小エリアに最新の DC-DC コンバータ回路を搭載し、単 3 電池の電圧が 0.9V に低下するま

で、回路全体の電源電圧である 3.3V を生成できる。これにより、単 3 電池 2 本でも定常状態で 10 年動作する。(2)はマイコンに LPC812M101JD20(NXP 社)を採用するなど、部品選定から低コストを意識した。

ポンベの圧力低下に端を発した WAN-WAN の適用は、対象を洗浄用ドラフト室、イエロールーム内パーティクルセンサー、アンビエントモニタ、RIE(Reactive Ion Etching : 反応式イオンエッチング)の CF₄ ガスセンサーと順次拡大し、2025 年 2 月現在では図 9 に示す規模に至った。現在もフルカラーLED 電光掲示板の導入による通知動作の視認性向上などに取り組んでいる。



図 9. 2025 年 2 月現在のクリーンルームにおける WAN-WAN の適用状況

5. まとめ～クリーンルームの将来像～

近年の猛暑とエネルギー問題による電気料金の高騰は、大学や研究機関の財政に深刻な影響を及ぼしている。筆者らは 24 時間定常運転を続けている FFU の消費電力と電気料金に関心を抱き、試算した。

FFU の定格電力は 1 台あたり 125W で、現在はこの 80%程度で稼働している。1 か月を 30 日とすると、16 台の合計電力量は 1 か月あたり 1,152kWh、年間で 13,824kWh と算出できる。これは 2021 年度の分子研全体の消費電力量に対して 0.261%であることから、FFU の年間電気料金は 214,451 円と算出できる。金額的には少額であるが、省エネルギーの観点から無視できるものではない。一方、年間休日を 120 日、稼働時間を 8:00～20:00 と仮定すると、クリーンルームの実質稼働日数は 122.5 日、実質年間稼働率は 33.56%と算出できる。すなわち、約 2/3 は未使用であるにもかかわらず定常運転を続けていることになる。

筆者らは、図 10 に示すクリーンルーム統合制御システム構想の下、風量の自動制御による差圧の維持と、クリーンルーム全体の省エネルギー運転を実現するため、FFU 制御ユニットの V1→V2 更新、給気ファンと

ドラフトへの制御ユニットの適用、電力モニタシステムの開発などに取り組んでいる。

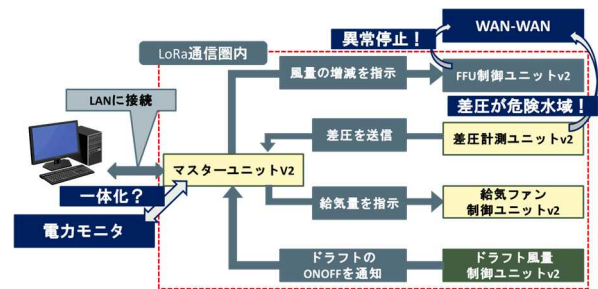


図 10. クリーンルーム統合制御システムの構想図

大型施設は研究開発のインフラであり、その環境構築と維持には様々な課題がある。引き続き現場に足を運び、専門技術と協働で課題解決に取り組む所存である。

謝辞

本稿で報告した各種機器の開発は、2019 年度自然科学研究機構産学連携支援事業や 2019 年度～2024 年度所長奨励研究費の助成を受けて行われた。関連特許は千葉寿氏、古館守通氏、藤崎聡美氏(いずれも岩手大学理工学系技術部)との共同開発の成果であり、機器製作や試験では、分子科学研究所装置開発室の協力を得た。各位に深い感謝の意を表す。

参考・引用文献・特許情報

- 1) 豊田朋範：「クリーンルーム統合制御システムの開発－FFU 制御ユニットとトラブル対策－」, 装置開発室 Annual Report2020, p24-25
- 2) 蒲田工業株式会社：「クリーンルームの特徴・四原則と清浄度」, https://www.kamata.co.jp/html/clean/knowledge/about_clean.html
- 3) 千葉寿、豊田朋範、古館守通、藤崎聡美：特許第 7341426 号、特許第 7170260 号、特許第 6954530 号
- 4) 株式会社アルファプロジェクト：技術コラム Vol.12 「Pmod でサクッとプロトタイピング!」, <https://www.apnet.co.jp/column/vol012.html>
- 5) Digilent：「Digilent Pmod Interface Specification」, https://digilent.com/reference/_media/reference/pmod/pmod-interface-specification-1_3_1.pdf
- 6) 豊田朋範、千葉寿、古館守通、藤崎聡美、木村和典：「マイコン開発における Pmod インターフェースの採用と活用事例」, 第 30 回静岡大学技術報告会