

LoRa コア基板とリアルタイムクロックを用いたクリーンルーム

風量・差圧自動制御の試み

○豊田朋範^{A)}、千葉寿^{B)}、古舘守通^{B)}、藤崎聡美^{C)}、木村和典^{A)}

^{A)} 分子科学研究所 技術推進部 装置開発ユニット

^{B)} 岩手大学 理工学系技術部 第1技術室

^{C)} 岩手大学 理工学系技術部 第3技術室

概要

2020年4月に稼働開始した分子科学研究所C棟クリーンルーム(以下「クリーンルーム」)は、16台のFFU(Fan Filter Unit)を用いた水平層流方式で外気より30Pa高い差圧環境とクラス10程度の清浄度を得ている。我々は、FFUの風量を制御するFFU制御ユニットを開発し、クリーンルームの稼働開始から適用している。以降大小5回の改修を経て、2025年10月に(1)1台のユニットで2台のFFUを同時制御できる (2)LoRaで2台のFFUの風量を独立で遠隔制御できる一の2項目を完全実現した。

現在、FFUをはじめとする各種空調設備は24時間稼働しているが、昨今の電気料金の高騰や約30%程度と試算されるクリーンルームの稼働率に対して効率的とは言えない。クリーンルーム未使用時は必要最小限の差圧を維持できる程度にFFUの回転数を下げること、消費電力の削減とFFUの長寿命化を両立できると考えた。

我々は、FFU制御ユニットなどの基礎を成すLoRaコア基板と、自身で計時可能なリアルタイムクロックを中心とするマスターユニットV2の開発に着手し、FFUの風量と差圧をスケジューリングすることで、必要最小限の差圧維持とFFUの消費電力削減の両立を試みた。

1 クリーンルームの環境構築と改良の歴史

2019年、分子科学研究所の各所に分散していたクリーンルームを、改修された共同研究棟C棟(以下「C棟」)に集約することになった。各種工事が進行する中、我々はFFU(Fan Filter Unit)を制御して高い清浄度と適切な差圧を構築・維持・計測することを目的に、FFU制御ユニットと差圧測定ユニットを開発した。

2020年4月の稼働開始以降、FFU制御ユニットを段階的に改良すると共に、リソグラフィ工程で使用する窒素ガスやアルゴンガスの残量低下など、各種トラブル発生時に後半に通知することを目的として、我々が共同開発し出願した特許^[1]に基づくWAN-WAN(Wireless Alarm Network for Wide Area Notification)の導入・拡張を進めて来た。一連の開発の歴史を図1に示す。

2 クリーンルーム統合制御システム構想とFFU制御ユニットの大改修

我々はC棟クリーンルームの適切な差圧維持とその自動化である「クリーンルーム統合制御システム(以下「制御システム」)」構想を提唱し、実現に向けて開発や改修を進めている(図2)。

制御システムでは、差圧を構築・維持するためにFFU制御ユニットの制御が重要である。一方、C棟クリーンルームは正常な環境を周囲から隔離するため、周囲を鉄板で囲まれている。この事実上シールドされた

環境では、無線 LAN 通信は困難である。また、ランサムウェアなどサイバー攻撃による被害が頻発している昨今では、有線／無線問わず攻撃対象にされやすい LAN を施設設備の通信に使用することは好ましくない。

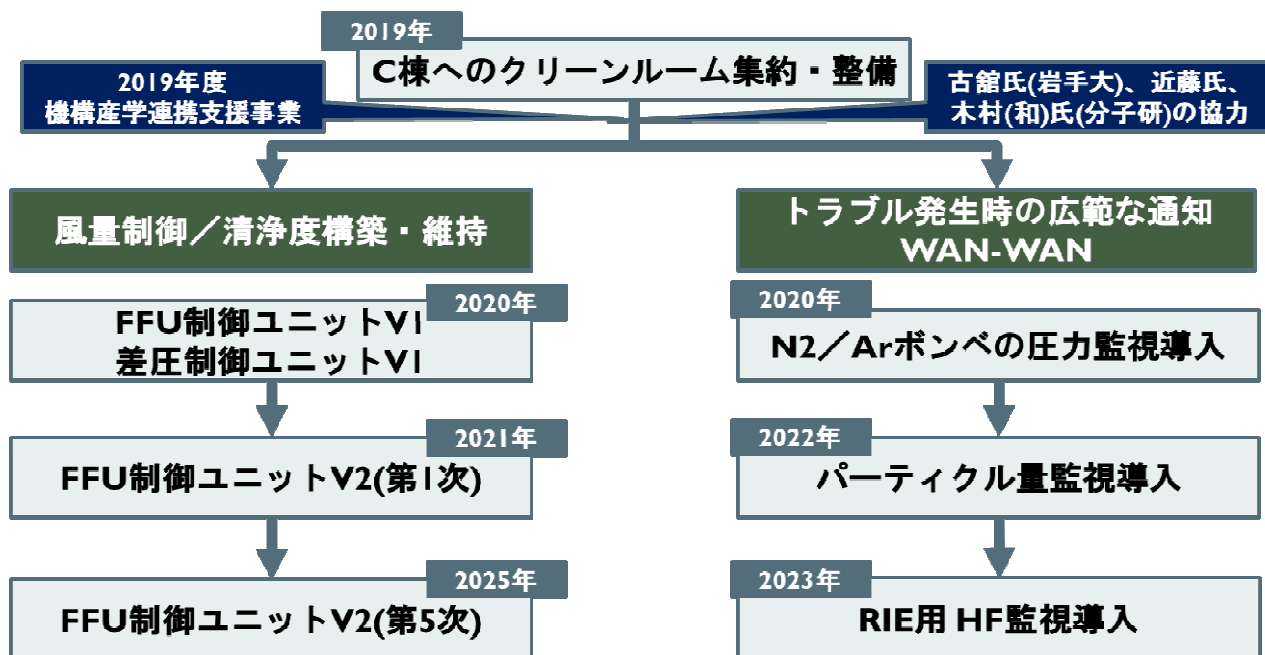


図1. C棟クリーンルームに関連する開発の主な歴史

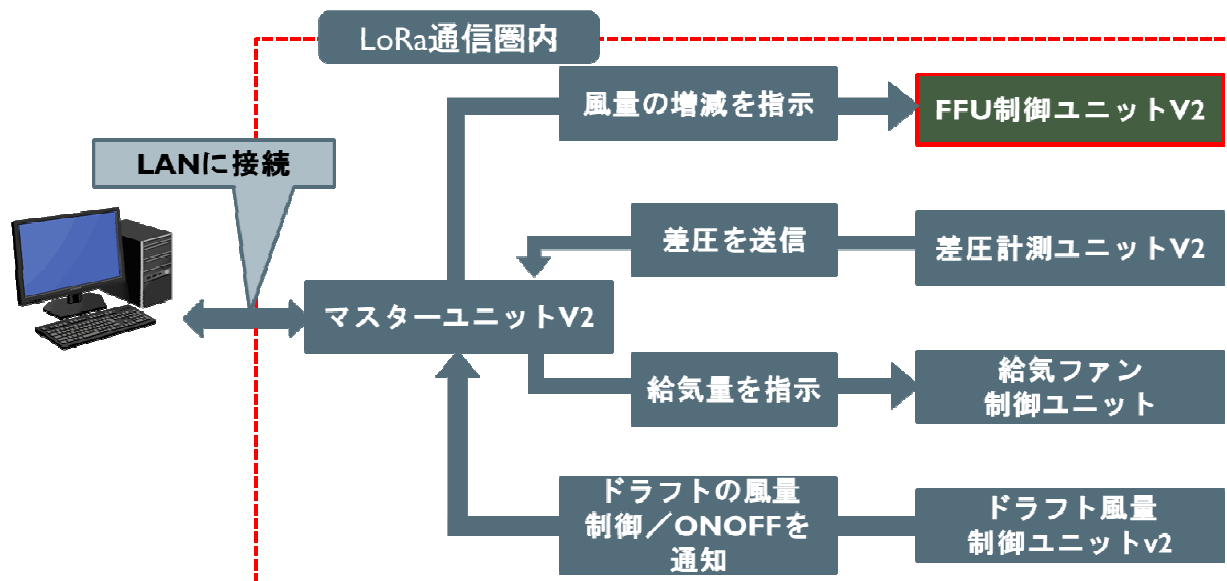


図2. クリーンルーム統合システムのブロック図

制御システムでは、内包する制御／測定ユニットへの指示やデータの取得をマスターユニットで行ない、マスターユニットは LAN に接続するが、マスターユニットが LAN 通信するのは清浄度や風量など運用上場のモニタリングに留め、各種ユニットへのコマンド送信やデータ受信は LoRa(Long Range)無線を用いる。LoRa を用いることで、C 棟クリーンルーム内外と通信可能であることは確認済みである。

LoRa は 920MHz 帯無線通信の規格である。制御システムを構成するすべてのユニットは、搭載するコア基板(図 3)に実装された LoRa モジュール ES920LR(EASEL 社)を使用できる。LoRa モジュールには共同開発し

た独自ファームウェアが搭載されており、128bit AES 暗号化に加えて、複数のパラメータが完全に一致しないと受信すらしない強固なセキュリティを有する。更に、LoRa モジュールの設定は専用コネクタで物理的に接続して初めて可能となり、ユーザーID とパスワードが必要とされる。

「1 台の FFU 制御ユニットで 2 台の FFU を同時制御する」プログラミング開発の実証試験が成功したのを受けて、2025 年 10 月、(1)16 台すべての FFU 制御ユニットを 8 台の FFU 制御ユニット V2（図 4）に置き換える (2)FFU と接続するすべてのケーブルを換装するの 2 項目を実施する大改修を実施した(図 5)。

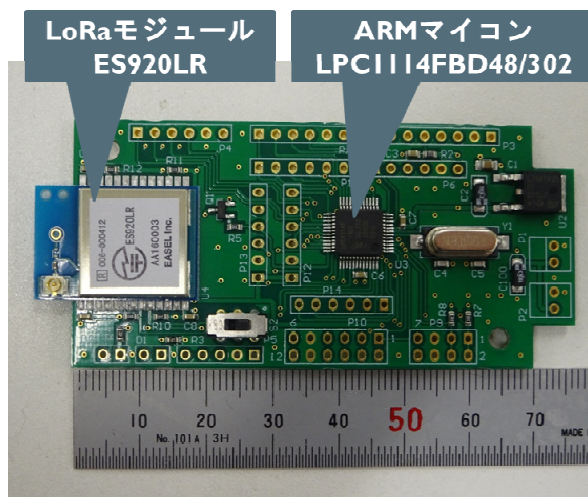


図 3. コア基板と LoRa モジュール RS920LR



図 4. FFU 制御ユニット V2 の外観



図 5. 大改修後、全面稼働再開した FFU と
FFU 制御ユニット V2

3 C 棟クリーンルームの省エネルギー化の試み

3.1 高騰する電気料金と制御システムの省エネルギー化への適用

稼働開始から現在に至るまで、C 棟クリーンルームの空調や FFU はほぼ 24 時間稼働している。しかしながら、C 棟クリーンルームの実質稼働率は「年間休日 120 日 稼働時間 8:00～20:00」と仮定して 33.56%と算出される。つまり約 67%は未使用にもかかわらず定常運転していることであり、到底効率的とは言えない。

一方、昨今の電気料金の高騰は分子科学研究所も無関係ではない。極端紫外光実験施設(UVSOR)と計算科学研究センター並びに山手地区を除いた分子科学研究所の消費電力は、2021 年度 5,294,331kWh に対し、2025 年度は 5,323,974kWh と大きな増加はないが、電気料金は、2021 年度の 82,131,690 円に対し、2025 年度は 358,800,000 円、約 4.7 倍と見込まれている^[2]。一方、16 台の FFU の消費電力は前述の仮定に基づくと 15,480kWh と算出できる。これは分子科学研究所の消費電力の約 0.291%であり、2021 年度と 2025 年度でほぼ変わらない。しかしながら、電気料金は 2021 年度の 239,090 円に対し 1,122,678 円と大幅に上昇する。

制御システム構想は差圧の維持管理に主眼を置いたものだが、これを省エネルギー化にも適用できると考えた。「FFU の定常風量 50000 に対し、非稼働時間の風量を 30000」と仮定すると、FFU の消費電力量は 11,196kWh、終日定常運転の 72.3%と算出でき、電気料金は 811,696 円と約 30 万円削減できる。分子科学研究所全体の消費電力と電気料金に対して微々たるものではあるが、電気料金は運営費交付金、すなわち税金である以上、省エネルギー化を推進しない理由はない。

3.2 リアルタイムクロックと EEPROM、LoRa を用いたマスターユニット V2 の開発

FFU 制御ユニットの大改修以前は、FFU の風量はマスターユニット V1(図 6)で設定していた。2025 年 10 月の大改修の後、制御システム構想に基づき、(1)LAN 接続とモニタリングを可能にする (2)平日 8:00～20:00 は定常運転、それ以外の時間帯はスリープ運転などスケジューリング機能を搭載するの 2 項目をコンセプトとするマスターユニット V2(図 7)の開発に着手した。

コア基板は LoRa を制御するマイコン LPC1148FBD48/302(NXP 社)を搭載しているが、LAN はペリフェラル(周辺機能)に含まれておらず、別途開発するのは困難である。そこで、LAN と親和性が高く実績が豊富な Raspberry Pi を採用した。

スケジューリング機能の実現には、実績が豊富な NE555(Texas Instruments 社など)でも可能であるが、祝祭日やうるう年の対処が煩雑である。今回はリアルタイムクロック (Real Time Clock : 以下「RTC」)DS3231MZ+(Analog Devices 社)を採用した。

RTC は電池バックアップが可能な年月日のカレンダーと時分秒の時計を集約した IC である。DS3231MZ+はコア基板で使用可能なペリフェラルの 1 つ、I²C で設定や読み出しができ、周辺部品がバイパスコンデンサ 1 個で良いことが採用の理由である。DS3231MZ+は 2 つの時刻アラームを持つ。これと EEPROM を組み合わせることで、祝祭日やうるう年、臨時の運用や停止にも対応できるスケジューリング機能を実現できる。



図 6. マスターユニット V1

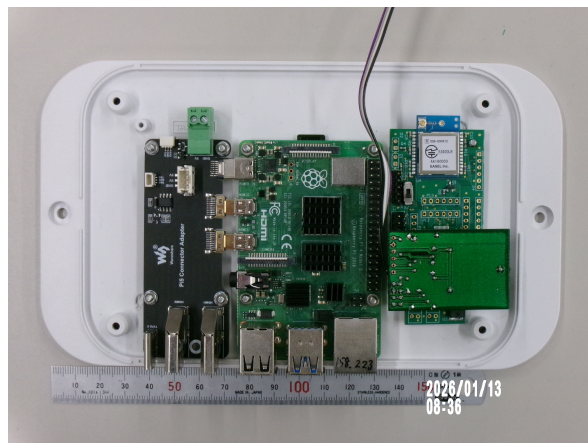


図 7. マスターユニット V2(開発中)

3.3 LoRa を用いた FFU の遠隔制御とその影響・効果

LoRa を用いた C 棟クリーンルーム内外の通信は、C 棟であればどこでも可能であることを確認した。次に、16 台の FFU すべてに対してマスターユニットからの通信で風量 0 から段階的に定常の 50000 まで引き上げ、差圧とパーティクル量の変動を多地点カメラのログ機能で観察した。

差圧の推移を図 8 に示す。風量 35000 で 6Pa 程度の陽圧が確保できること、この時点での清浄度は定常運

転時と有意な差は見られないことを確認した。陽圧を維持できれば外部からのゴミの侵入を防げるので、非稼働時間のFFU風量削減で「必要最小限の環境維持」と「省エネルギー運転」の両立が可能であると言える。

なお、前述の仮定における「非稼働時間の風量」で30000を35000に修正して再度試算すると、FFUの消費電力量は12,588kWh、終日定常運転の81.3%であり、電気料金は912,737円と約20万円削減できる。

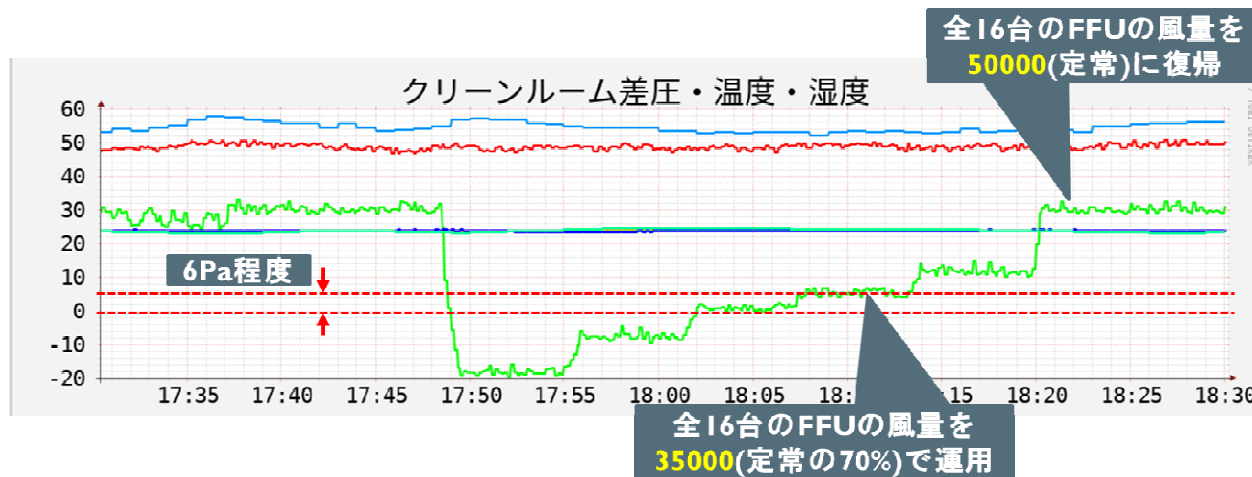


図8. マスターユニットから16台のFFUの風量を段階的に引き上げた際の差圧の推移

4 まとめと展望—施設維持管理に技術の導入を—

2025年10月のFFU制御ユニット大改修を行い、「1台のユニットで2台のFFUを同時制御する」目標を達成できた。また、LoRaを用いて事実上シールドされたC棟クリーンルームのFFUに対して風量制御を行ない、必要最小限の陽圧を維持できることと、定常時に清浄度に有意な差が見られないことを確認した。

今後は、電力モニタの導入で消費電力推移を常時監視できるシステムを構築し、消費電力の「見える化」を実現し、他施設への波及を目指す。また、消費電力で最も大きな割合を占める空調の消費電力削減に向けて、特に室外機に着目して新素材を導入し、室外機の負担軽減、すなわち消費電力削減の可能性を見出している。現在は、2026年夏以降の長期実証試験を目指して準備を進めている。

大学・研究機関の施設設備を研究インフラと見た場合、昨今のランサムウェア被害の教訓として、やみくもにこれらをLAN接続するのは好ましくない。一方で、立ち入りや配線が困難な場面は数多いのも事実である。これらの課題に対して、LANとは周波数帯も変調方式も異なり、強固なセキュリティを有するLoRaは最適解の1つとして検討に値すると思われる。

大学・研究機関において24時間体制で運用される施設設備は複数存在する。しかしながら、電気料金の高騰に収束の目途が立たず、運営費交付金を大きく圧迫している現状を踏まえ、それらは本当に24時間体制で運用する必要があるかを改めて検討する必要がある。未使用時の空調や照明は無駄の塊であり、手動制御はどうしても面倒だったり忘れていたりといったヒューマンエラーが付きまとう。施設設備の運用にLoRaを含めた遠隔・自動制御を導入するのは、管理運営の負担軽減につながると共に、省エネルギー化の力になる可能性がある。

C棟クリーンルームは、2020年4月の稼働開始前から、LoRa通信やWAN-WANなど我々の共同開発成果の応用や実証試験で使用されており、一大実験場と言える。C棟クリーンルームの立ち上げ段階から参画できたことで、苦労や失敗は数多いが、メリットはそれらを補って余りある。今後も「現場に足を運び、共に

考え、共に創る」という我々の活動コンセプトを堅持し、「DX」や「見える化」に加え、「省エネルギー化」という全国的な重要課題に取り組む所存である。

5 謝辞

本開発は2019年度 自然科学研究機構 産学連携支援事業と2019年度～2025年度分子科学研究所所長奨励研究費の助成を受けて行われた。

本開発は、千葉寿氏、古舘守通氏、藤崎聡美氏(以上、岩手大学理工学系技術部)との10年来の共同開発の成果であり、各種ユニットの筐体のモデリングや加工は木村和典氏(分子科学研究所)の多大な協力を得て実現された。

本開発に際しては、山本浩史・分子科学研究所教授、繁政英治・分子科学研究所技術推進部長、近藤聖彦氏、高田紀子氏、木村幸代氏、石川晶子氏(以上、分子科学研究所)のご理解ご協力を賜った。各位に深い感謝の意を表する。

参考・引用文献・特許情報

- [1] 千葉寿、豊田朋範、古舘守通、藤崎聡美：特許第7341426号、特許第7170260号、特許第6954530号
- [2] 施設マネジメント「電気料金の見直し等について」：自然科学研究機構(内部のみ閲覧可能)