

4-4-2 クリーンルーム設備の低消費電力化

4-4-2 Cut Down Power Donsumption of Clean Room

広瀬 信光

HIROSE Nobumitsu

通信技術の発展は、半導体技術の発展によるところが大きい。半導体技術の研究開発にはクリーンルームが必要不可欠である。クリーンルームは温湿度を一定に保ちながら^{じんあい}塵埃が少ない(通常の居室 1/100 以下)、極めて人工的な空間である。そのため電力消費が大きく、環境保全の観点から効率的な運転が強く求められる。本稿ではクリーンルームを構成する機器の中でとりわけ電力消費が大きい冷熱源であるチラーの運転パラメータを最適化することによる電力削減について述べる。

The development of communication technology depends largely on the development of semiconductor technology. Clean rooms are essential for research and development of semiconductor technology. A clean room is an extremely artificial space that maintains a constant temperature and humidity and contains very little dust (less than 1/100 of a usual office room). Therefore, the power consumption is high, and efficient operation is strongly required from the viewpoint of environmental preservation. This paper describes the power reduction by optimizing the operating parameters of the chillers, which are the cold source that has the highest power consumption among the equipment that make up a clean room.

1 クリーンルーム概要

半導体技術の研究開発にはクリーンルームが不可欠である。クリーンルームの清浄度(クラス)*は1立方フィートあたりの0.5 μm以上の粒子の数で規定される。今回取り上げるミリ波棟クリーンルーム(以下、本クリーンルーム)の床面積は前室等を含めて約400 m²、うち塵埃を最も嫌うレジスト塗布・露光・現像を行う空間はクラス100、その他の装置を設置している空間はクラス1,000もしくは10,000である。清浄度と共に温湿度の安定度も求められる。温度については±1℃、湿度については40～60%を目標としている。

図1にミリ波棟クリーンルームの空調系を模式的に示す。クリーンルームの天井にはフィルタ付の送風機が埋め込まれており、常に天井から下方向に層流が作られている。床の一部(クラス100領域では全面)はグレイティング形状となっており、天井から吹き出した層流は床下に抜け、換気ダクト -- 斯界ではレターンダクトと呼ばれる -- を通って再び天井裏に戻る。循環回数は毎時数十回である。換言するとクリーンルーム中の空気は天井のフィルタを毎時数十回通ることになる。また、クリーンルーム内は外周部に対し数十Paの

陽圧となっており、外部からの塵埃の侵入を低減している。この2つが相まってクリーンルームの清浄度を維持している。クリーンルーム内には有機溶剤を安全に扱うための有機ドラフトと、酸性溶液を安全に扱う

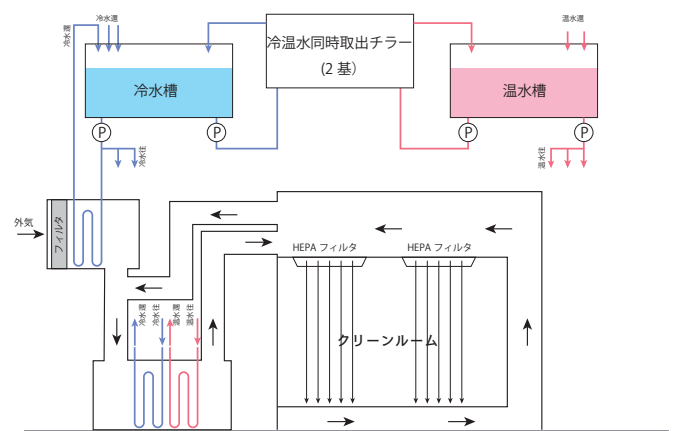


図1 ミリ波棟クリーンルームの模式的構造図、実物は送気ダクトや配水管が複雑に入り組んでいる

* クリーンルームのクラス：FED-STD-209E

http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-209E_21739/

ための酸・アルカリドラフトが設置されており、クリーンルーム内の清浄空気を外部に排気している。これを補い、陽圧を維持するために外気を導入しなければならない。外気は外調機で露点温度 12℃まで除湿される(導入外気の温度を 12℃まで下げる)。内調機での除湿も可能であるが、クリーンルームからの還流気を一旦 12℃まで冷却したのち、クリーンルーム室温が適温となるよう昇温(冬季はおよそ 20℃、夏季でも 18℃前後)しなければならないので、冷水負荷・温水負荷が大幅増となる。外調機はそれなりの初期投資を要し、冬季にはコイルの凍結破裂に注意しながら運用するなどの手間も掛かるが、大きな省エネルギー効果が期待できる。

本クリーンルームには冷水槽、温水槽が設備されている。冷水槽、温水槽を持たず、家庭用の空調機同様、室外機で冷却/加熱した冷媒で直接冷房/暖房する形式のクリーンルームも広く用いられているが、冷水槽、温水槽を設けることによりチラー負荷が平準化され、温湿度を制御しやすいという大きな利点を得られる。また、通常は冷水専用のチラーと温水専用のチラーをそれぞれ設備するが、本クリーンルームでは冷水と温水を同時に取り出せるチラーを設備し、電力削減を目論んだが、夏季はもちろん冬季も多くの時間帯で冷房要求の方が暖房要求よりも高く、電力削減効果は限定的であった。

冷水系、温水系それぞれに水量計と往還それぞれに温度計を設けている。往還の温度差と水量の積から熱量が求められる。また、4室に分かれたクリーンルームそれぞれに温湿度計、冷水槽、温水槽にも温度計を設け、これらのデータを自動記録している。このデータを解析することにより、所望条件を満たしつつ、運転パラメータの最適化を図った。

2 クリーンルーム固有の諸パラメータ

クリーンルームの運転パラメータを最適化には、クリーンルーム自体の諸パラメータの把握が重要である。以下、取得した本クリーンルームの諸パラメータについて述べる。

2.1 クリーンルームの基礎代謝

ダイエット同様、クリーンルームの基礎代謝(内部に設置された装置と送風系の発熱)は重要なパラメータである。外気温がクリーンルーム目標室温(24℃)に近く、湿度が 50%前後であるとき、外調機の除湿負荷も、加湿器で奪われる水の蒸発熱も発生せず、建物躯体の熱伝導による熱の侵入・放熱も小さく、冷水負荷が基礎代謝に等しいと考えた。結果、基礎代謝は

およそ 50 kW ないし 60 kW と見積もられた。

2.2 冷房負荷と暖房負荷の最大値

典型的な猛暑日の冷水負荷の時間推移を図 2 に示す。この日は気象観測史上 2 番目となる最高気温 38.8℃(府中アメダスデータ)を記録した。14時から16時に冷水負荷は最大となった。これはこの日に限ったことではなく、夏季を通し同様の傾向を示す。隣接する光技術センタのクリーンルームも同様である。この間の平均冷水負荷は 103 kW、最大 125 kW であった。チラーの実測最大冷却能力は 120 kW(後述)程度であるが、冷水槽や配管での熱流入による損失があるため、チラー 1 台ではまかないきれない負荷である。

典型的な冬季の温水負荷の時間推移を図 3 に示す。この日の最低気温は 7時に記録された零下 5℃であるが、より気温が高い 14:27 から 14:32 に最大温水負荷が発生した。ドラフトの使用により、外気導入量(排風量に等しい)が増加したためと考えている。最大温水負荷は 44 kW、平均負荷は 42 kW であった。

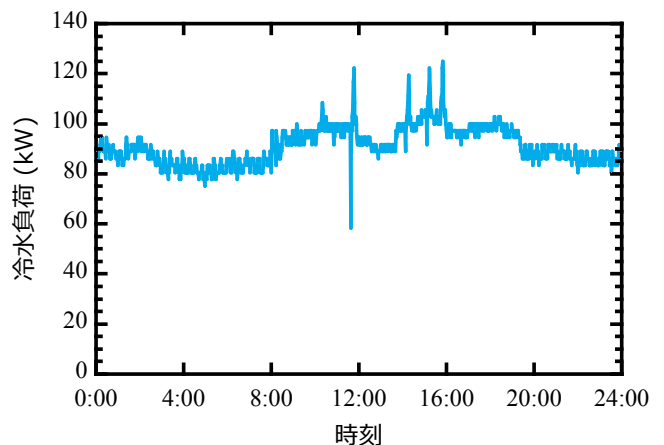


図 2 典型的な猛暑日の冷水負荷、最大 125 kW

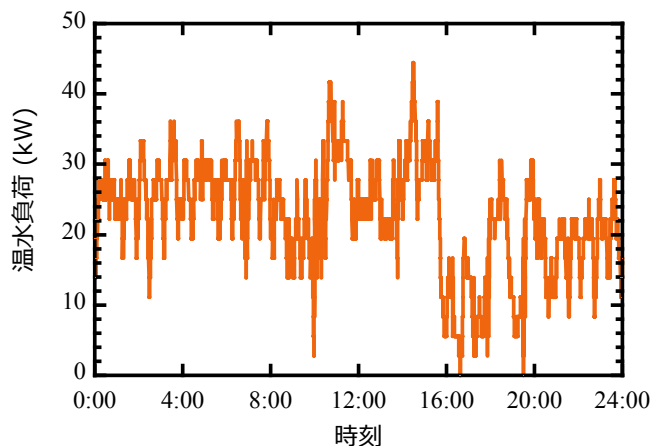


図 3 典型的な冬季の温水負荷、最大 45 kW

3 運転パラメータの最適化

3.1 チラーの出力特性

チラーは消費電力が大きい(46 kW × 2基 + 送水ポンプ 2.2 kW × 4基)ため、クリーンルームの温湿度を一定に保ちながらその運転パラメータを最適化することは、省エネルギーに有効である。本クリーンルームに設備されたチラーは、冷媒系に3方弁を備え、冷水温水いずれについてもチラー内部でチラー運転指令制御とは独立にその開閉により出力を調節する機構を有しているが、低出力では効率の低下が懸念される場所である。図4に消費電力と冷水出力並びに効率の関係を示す。消費電力は、商用電源に対する力率は75%と仮定して電流値から、冷水出力はチラー内蔵の温度計により水の出入口温度差に水量を乗じそれぞれ算出した。横軸の消費電力には1次送水ポンプの消費電力を含み、右縦軸の効率は冷水出力を消費電力で除したものである。1号機と2号機でやや異なった特性となっているが、冷水最大出力は約120 kW、冷水出力75 kW以下での効率低下は共通している。送水系での損失を考慮すると、効率が低下し始める冷水出力は、クリーンルームの基礎代謝に近い値である。1年間を通しての気象状況を勘案すると、チラー冷水出力はやや小さ

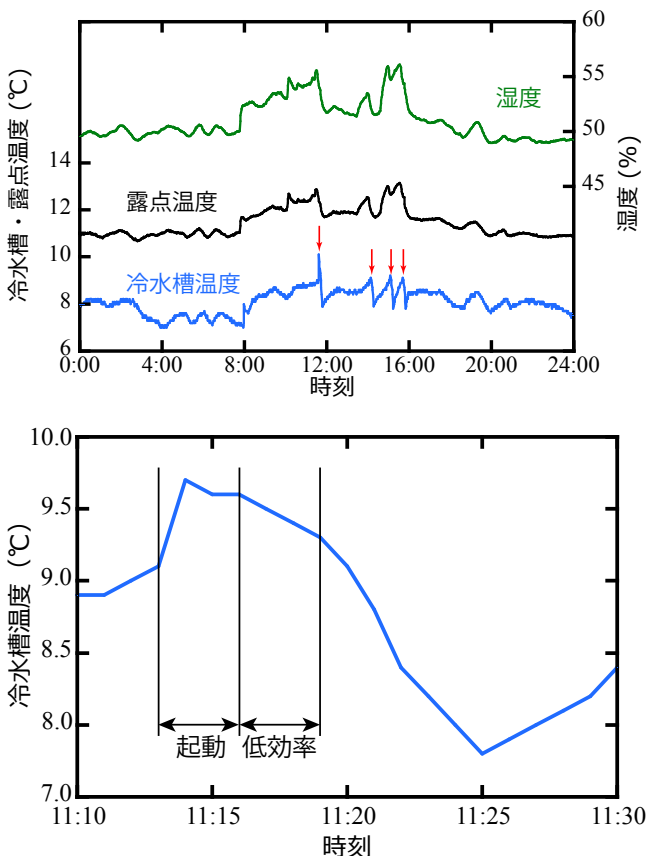


図4 チラーの消費電力と冷水出力の関係、1号機(上)では冷水出力75 kW以下、2号機では50 kW以下で効率が低下している

い方が電力効率を高められると予想される。また、高出力領域でも効率が低下しているが、高出力を要求されるのは外気温が高い気象状況であり、外気温の高さが効率を低下させていると考えられる。

なお、図4に表れた1号機と2号機の特長差について、その原因を製造元に問い合わせたところ、

「主として内蔵している温度計の個体差による。コストダウン要求が厳しく、温度計を選別する余裕がない」

との回答であった。

3.2 冷水槽、温水槽の許容温度

冷水槽温度の許容温度は除湿された導入外気の露点温度との相関から検討した。前述したように、内調機での除湿は冷水負荷、温水負荷が大幅増となる。図5に典型的な猛暑日の冷水槽温度、導入外気を処理後の露点温度、クリーンルーム内の湿度の時間推移を示す。高負荷時に冷水槽温度が9℃を超えて上昇し、露点温度が13℃付近まで上昇しているが、湿度はその目標値たる50±10%に十分収まっている。このことから除湿が必要な時季は冷水槽温度が9℃を超えた時にチラーが2台運転となるよう、諸パラメータを設定した。なお、図中赤矢印で示した冷水槽温度のスパイクは、チラーが1台運転から2台運転に切り替わった際、2台目の起動直後の数分間、チラーが冷水を生成できず、かえって送水中に暖められた水がチラーから給水されることによるものである。そのあとのおよそ3分間も低出力・低効率領域での動作となる。その後本来の冷却能力をようやく発揮するが、およそ6分後には冷水槽温度が設定温度である8℃まで下がったので、1台運転に戻っている。このような非効率動作を避けるため、夏季は常時チラー2台運転を行ったこともあるが、消費電力が大幅増となり、失敗と判断した。

温水槽温度については、主として冬季の室温との相

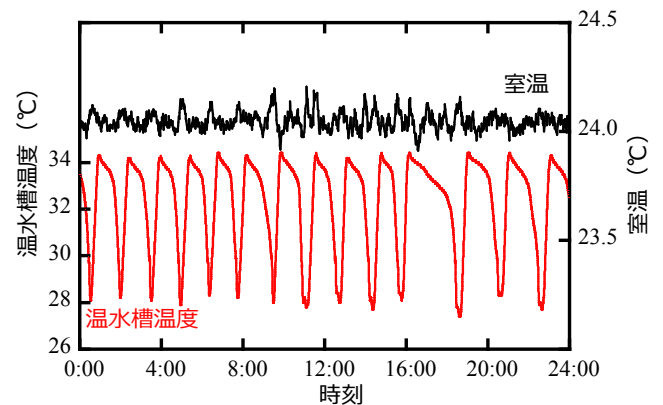


図5 典型的な猛暑日の冷水槽温度、導入外気を処理後の露点温度、クリーンルーム内の湿度の推移と冷水槽温度スパイク部の拡大図

4 百折不撓・デバイス研究

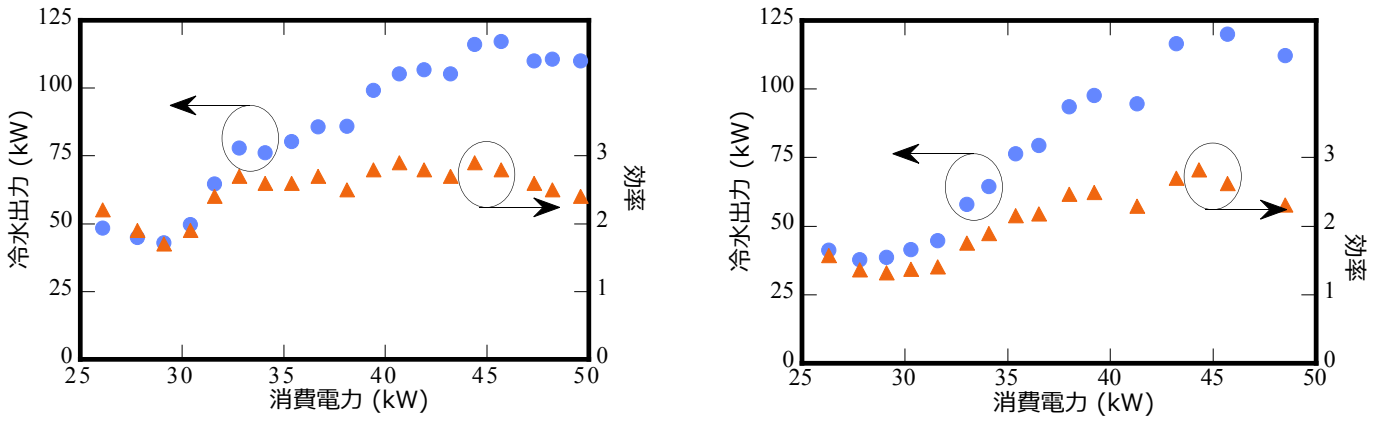


図6 典型的な冬季の温水槽温度と室温の推移

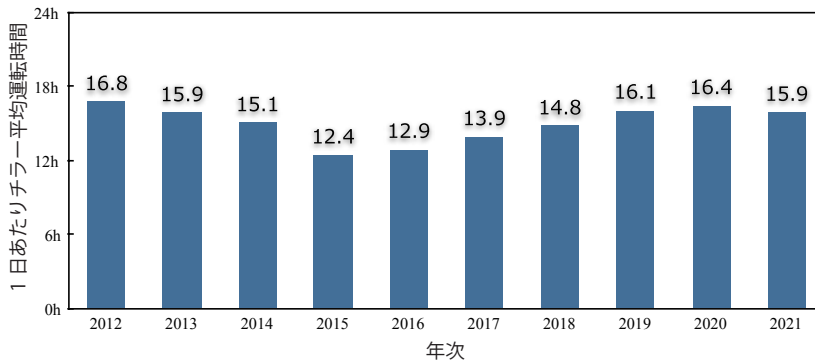
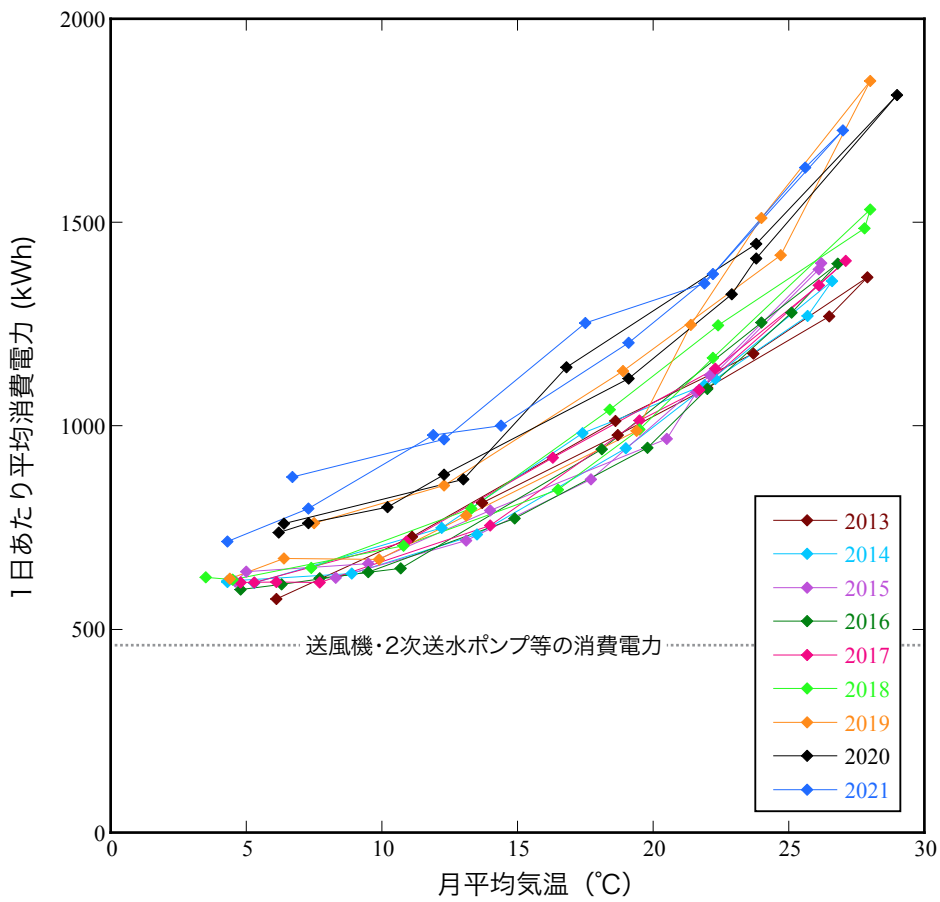


図7 (上) 月平均気温と月ごと1日あたり平均消費電力の関係。測定機器の都合上、チラーのみの電力データは得られず、送風機や2次送水ポンプ等の電力を含む値(450 kW、図中電線でそれらの消費電力を示した)。(下) 年次ごとの1日あたりチラー平均運転時間。
データ提供：NICT 施設整備グループ並びに施設管理グループ

表1 最適化された運転パラメータ

適用気象条件	外気露点温度	冷水槽温度に対するチラー運転	チラー停止温度	運転状況	目安負荷
夏季	>12℃	9.0℃を超えたら2台運転	---	連続	> 60 kW
冬季	<12℃	12.5℃を超えたら1台起動	7.5℃	間欠	< 40 kW

関から検討した。図6に典型的な冬季の温水槽温度と室温の推移を示す。温水槽の最低温度は28℃をやや下回っているが、室温に顕著な変動はなく、十分に安定している。冷水の場合と同様、チラー起動直後は温水が生成されず、かえって温水槽温度が低下している様子が看取される。

3.3 運転パラメータの決定

前述したように電力-冷水出力特性からは、冷水槽から見た冷水負荷が一定以上であれば、チラーを連続運転した方がエネルギー効率が高くなる。間欠運転する場合にはチラーの運転時間と休止時間は可能な限り長く、すなわち起動温度と停止温度の差を大きくするのが省電力上有効であるが、クリーンルームの温湿度に影響を与えない範囲という条件が付く。特にクリーンルームの温湿度維持ためには、導入外気の露点を12℃以下に保つ必要があり、外気露点温度が12℃以上であれば、チラーを連続運転し、冷水槽の温度を9℃、より望ましくは8℃以下に保つ必要がある。表1に示すパラメータを決定した。中間季には気象条件をにらみながら、頻繁にパラメータを変更している。

4 チラーの運転時間と消費電力の年次推移

運転パラメータの最適化にはおよそ4年を要した。運転パラメータを試行しながら、1年間を通しての評価が必要なので、なかなか時間を要する作業であった。図7に月平均気温(府中アメダスデータ)と月ごとの1日あたり平均消費電力の関係及び年次ごとの1日あたりチラー平均運転時間を示す。測定機器の都合上、チラーのみの電力データは得られず、チラーのほかに送風機、2次送水ポンプ等の電力(450kWと見積もった)も含んだ値である。月平均気温20℃以下では、運転パラメータの最適化が完了した2015年、2016年が消費電力最小となっている。他方、高温期では、おおむね年を追うごとに消費電力が増加している。これはチラーの経年劣化によるものと考えている。チラーの運転時間も同様の傾向を示している。2018年にチラーの分解整備を実施したが、経時劣化を押しとどめるには至らなかった。

また、2019年には前述のとおり、夏季にチラーを常時2台運転とし、消費電力削減を試みたが、かえって

大幅に消費電力が増加する結果となった。クリーンルーム内の湿度はもちろんより安定したが、消費電力削減を優先し、翌年からは元の設定に戻した。

クリーンルームの能力増強計画

5 (結論にかえて)

今年度、幸いに予算を得て能力増強工事を計画している。主たる現状からの変更点は以下のとおりである。

冷温水同時取り出しチラーの取り止め

冷水(冬季は温水)のついでに温水(冬季は冷水)を作れるのは電力削減に有効であるが、温水負荷より冷水負荷の方が数倍大きく、“ついで”による電力削減効果は限定的であった。最新のチラーは、高出力時の効率のみならず、圧縮機の能力をインバータ制御して、低負荷時の効率も改善されている。以上のことから、冷水用チラーと温水用チラーを個別に設置することとした。

冷水用チラーの小容量化

現状は37.5kWの圧縮機を内蔵するチラーを2台設備しているが、運転データから能力がやや過大と判明し、7.5kWの圧縮機4台内蔵したチラーに小容量化した。小容量の圧縮機を多数持つ構成なので、負荷に応じて運転台数を増減し、またインバータ制御することにより消費電力の削減に期待した。

温水については、コージェネレーションシステムも検討した。発電容量10kVAの機器2台が温水出力としては適切と算出されたが、年間の運転時間は1,000時間程度に留まり、費用対効果の観点から断念した。

外調機の能力増強

夏季には外気除湿処理能力が不足していることが判明したので、冷水コイルの段数を4段から6段に増段することとした。

これらの変更により、一層の消費電力の削減が図れると期待している。



広瀬 信光 (ひろせ のぶみつ)

ネットワーク研究所
先端ICTデバイスラボ
博士(工学)
SiGeの結晶成長及びそれを用いた電子素子