

ASEAN地域向け省エネルギーデータセンター

直野 健
Naono Ken

沖津 潤
Okitsu Jun

Nordin Zakaria

Low Tang Jung

Shaharin Anwar Sulaiman

Mohd Fatimie Irzaq Khamis

藤居 達郎
Fujii Tatsuo

データセンターは、社会インフラに不可欠な施設である。施設内のコンピュータの冷却方式は自然空冷だが、亜熱帯や熱帯の諸国では適用が難しい。日立とペトロナス工科大学は、共同研究を通じて省エネルギーデータセンターを開発した。ASEAN地域での省エネルギーを実現するため、最適化の対象としてデータセンターのエネルギー需要に加えて、エネルギー供給側のガス式地域冷房も含めた。ガス地域冷房では、電気式冷凍機ではなく、よりエネルギー効率に優れた蒸気吸収式冷凍機を使用する。ペトロ

ナス工科大学のガス地域冷房設備の操業データから、日立製蒸気吸収式冷凍機を使用すれば、PUE 1.21が実現可能と推定された（コンピュータ稼働分が1、コンピュータ冷却分が0.21）。これは、マレーシアでみられるPUEの一般的な値1.6、および世界でも最先端のデータセンターの値1.1と比較しても遜色ないといえる。自然空冷の使用が現実的でない亜熱帯や熱帯においても、PUEの低減には蒸気吸収式冷凍機が重要な役割を果たすことが示された。

1. はじめに

DC (Datacenter) は、社会インフラに不可欠な施設であるが、施設内のコンピュータが発生する熱を除去するための冷却により、DCのエネルギー消費は急速に増加している。世界で最先端クラスのDCでも、広く用いられているのは自然空冷であり、DCの設置場所は、涼しい外気を利用できる地域となる。DCのPUE (Power Usage Effectiveness) は、最善の例では1.1から1.07まで抑えられている（PUEは1.0に近いことがより望ましい）。

しかし、マレーシアのような熱帯では、外気による自然空冷は困難である。例えば、マレーシアに設置されたDCの1つでは、冷却設備の最適化に多大な努力が支払われたにも関わらず、PUEは1.6近辺にとどまっている。

この課題を克服するため、日立とペトロナス工科大学（UTP:Universiti Teknologi PETRONAS）の共同研究では、GDC-DC (Gas-district-cooling-based Datacenter: ガス地域冷房利用DC) を検討した。GDC-DCでは、エネルギー利用の最適化をDCのエネルギー需要に限らず、エネルギー供給側のGDC (Gas District Cooling: ガス地域冷房) にまで拡張した。GDCはSAC (Steam Absorption Chiller: 蒸気吸収式冷凍機) を用いており、SACはEC (Electric

Chiller: 電気式冷凍機) よりもエネルギー効率が高い。マレーシアでは、SACを伴ったGDCがすでに10年以上稼働している。ASEAN (東南アジア諸国連合) 地域には、天然ガス資源やパイプラインを利用できるという特長もある。

本研究では、(1) GDC-DCのエネルギーギャップのモデル化、(2) GDC-DCによるキャンパス用グリッドのジョブスケジュール処理、(3) GDC-DCエネルギーセンサシステム、および(4) GDCプラント保守の効率を扱う。まずGDC-DCの概念を解説した後で、検証のために実施された主な研究を振り返る。

2. GDC-DCの基礎概念

本稿で扱うGDC設備は、天然ガスを利用して生成した電力および冷水をUTPのキャンパスに供給している。2003年から、同設備は「キャンパスグリッド」を収めている建物に電力および冷水を供給しており、同グリッドは数千台のPC (Personal Computer) のネットワークから成っている。UTPのGDC設備には、SACが備わっている（2013年に日立製が設置された）。SACは、ガスタービンの排熱から冷水を効率的に生産する（[図1](#)参照）。

UTPにおける研究の重点項目は、以下の4点である。

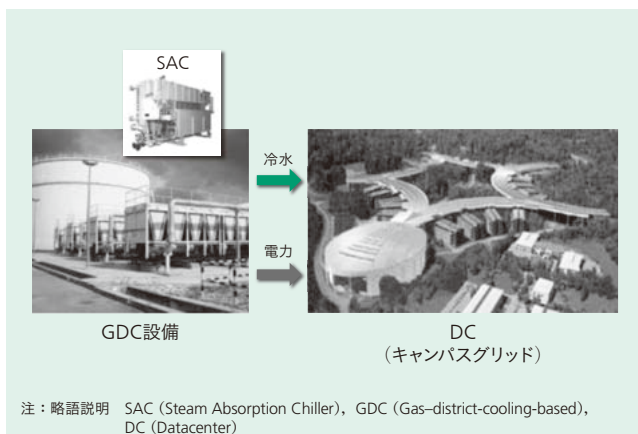


図1 | GDC-DC

ペトロナス工科大学（UTP：Universiti Teknologi PETRONAS）のキャンパスにあるDCのエネルギー管理では、効率の高いSACの使用を検討した。また、DCを含めたキャンパスへの冷水および電力の供給には、GDC設備を使用した。

- (1) GDC-DCのエネルギーギャップのモデル化
- (2) GDC-DCによるキャンパス用グリッドのジョブスケジューリング処理
- (3) GDC-DCエネルギーセンサシステム
- (4) GDCプラント保守の効率

GDC-DCのエネルギーギャップのモデル化では、冷水の需要とエネルギー供給の間のギャップを調べ、モデルの最小化問題を用いて最適化する（この需給のギャップを最小化する）¹⁾。GDC設備の制御では、電力の供給を需要と一致させ、冷水の供給は電力量と比例するように調整する。つまり、冷水の供給量については、冷水の需要で決まるのではなく、電力の需要によって決められるため、需給の不一致が生じることがある。

また、キャンパスグリッド向けGDC-DC用ジョブスケジューリングの作成では、上述のエネルギーギャップを最小にする新たなジョブスケジューリング作成アルゴリズムの設計手法が研究されている^{2), 3)}。例えば、夜間などに冷水が供給過剰となった場合、ジョブスケジューリング作成アルゴリズムがバッチジョブの実行タイミングを変更し、DCでの冷水の需要を日中から夜間に移行させることなどである。DCでの処理には、1日あるいは2日程度で完了させればよいバッチジョブも含まれており、スケジュール変更に柔軟に対応できる。

GDC-DCのエネルギーセンサシステムに関する研究では、DCおよびGDC設備からエネルギー管理コンピュータに送信されるデータを集計するシステムの設計を扱う。エネルギーギャップの計算では、GDC設備の操業データ（冷水の流量、温度など）を用いてエネルギー供給を概算し、DCのエネルギー消費および環境データ（電力消費量、DC内外の気温など）を用いて、エネルギー需要を試算する。GDC設備およびDCから出力されるデータは、

表1 | SACとECのCOP比較

冷水の供給量の単位が、tではなくMWhである点に注意されたい。

性能の指標	SAC	EC
電力消費 (MWh)	6.2	11.4
冷水の供給量 (MWh)	79.0	61.7
電力単位当たりの冷水量 (COP)	12.7	5.4

注：略語説明 EC (Electric Chiller), COP (Coefficient of Performance)

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) システム、および無線センサーによって収集される。SCADAシステムでは多様な通信プロトコルが用いられるため、データの接続性が重要な項目となる。そこで、OSIsoft社⁴⁾が開発および販売しているPI (Plant Information) System^{*}を用いた。

GDC設備の保守整備状況調査では、根本原因分析 (Root Cause Analysis) の相関計算を用いて、GDCの性能を低下させているシステム要素を特定した^{5), 6)}。同設備の稼働効率がGDC-DCの操業に大きく影響するため、GDC設備の保守整備を十分に行うことは重要である。そのため、ECとSACのどちらかを選択する場合は、整備の容易なECが用いられてきたが、エネルギー効率はSACのほうが優れている。例えば、標準的なエネルギー効率尺度であるCOP (Coefficient of Performance) では、UTPで使用されているSACの効率はECの2倍に達している（表1参照）。

3. エネルギーギャップのモデル化と GDC-DC用エネルギーセンサシステム

GDC-DCは、GDC設備、UTPキャンパス、および統合制御システムで構成されている（図2参照）。

GDC設備は、GTG (Gas Turbine Generator：ガスタービン発電機)、HRSG (Heat Recovery Steam Generator：排熱回収ボイラ)、SAC、EC、およびTES (Thermal Energy Storage) で構成され、電力センサーおよび温度センサーを備えている。GTGは、天然ガスを用いて発電し、それに伴う排熱を出す。この電力がUTPキャンパスに供給される。また、HRSGでは排熱を利用して蒸気が生成され、SACはこの蒸気を用いて冷水を生成する。生成された冷水も、UTPキャンパスに供給される。一方、ECでは電力を利用して冷水が生成される。ECからの冷水は、夜間はTESに貯蔵され、日中になるとUTPキャンパスに供給される。GTGによる発電のみでは不十分な場合には、マレーシアの電力会社であるテナガ・ナショナル社からの補助電力がGDC設備に供給される。UTPキャンパスには、研究室、講義室、およびその他の教育施設に加えてDCがあり、同センターにはサーバやストレージが収納されている。冷

* PI Systemは、OSIsoft社の商標である。

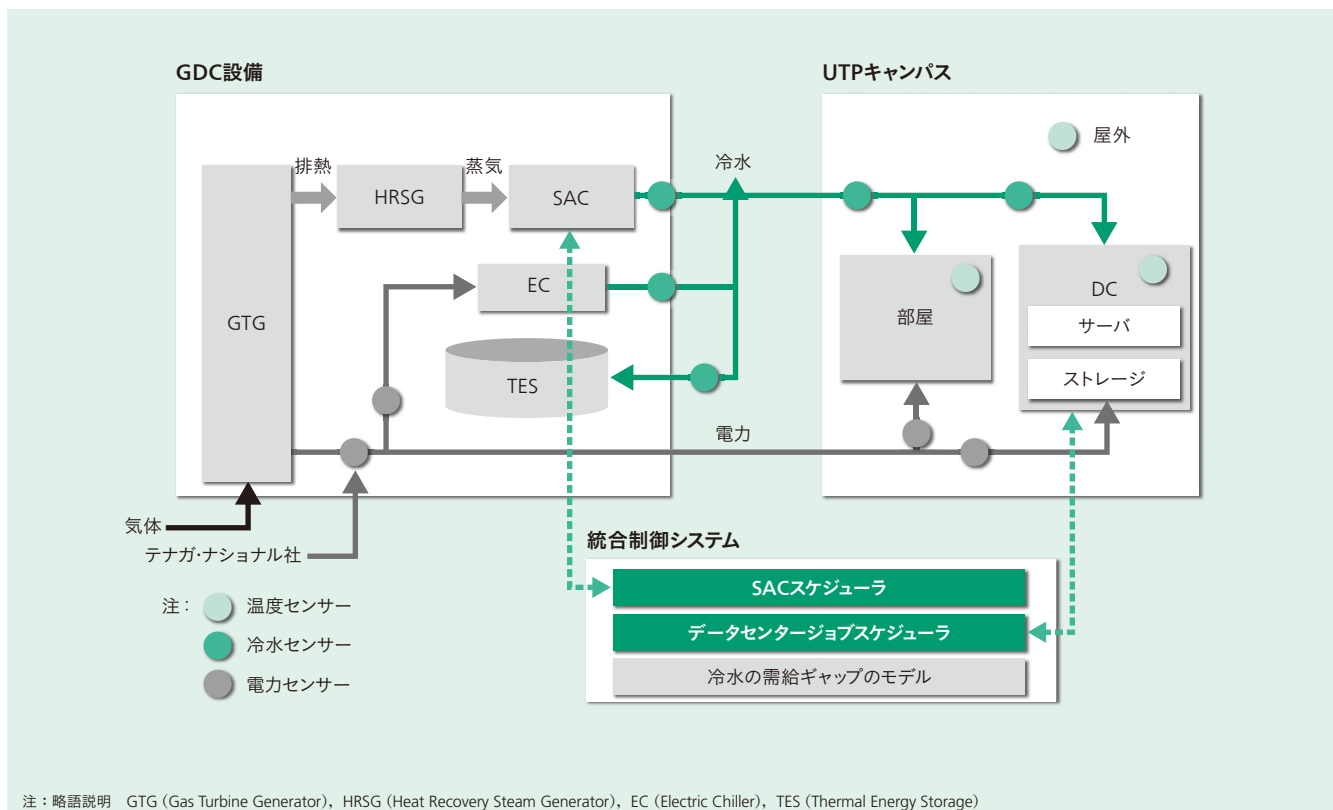


図2 | GDC-DCの構成 (センサシステムおよびエネルギー制御)

SACスケジューラとデータセンタージョブスケジューラは、それぞれSACとデータセンタージョブのスケジュールを作成する。その際には、各センサーからのデータ、および冷水の需給のギャップが考慮される。

水は、DCおよび教育施設を冷却する主な手段となっており、電力による空調は補助として用いられている。

GDC-DCでは、統合制御システムが冷水の需要と供給のギャップを計算する。この計算には、GDC設備とUTPキャンパスに備えられた、電力センサー、温度センサー、および冷水センサー(流量、水圧、および水温)からのデータが利用される。そして、統合制御システムによってSACのスケジュールとDCのジョブのスケジュールが制御され、需要と供給のギャップの最小化、およびDCのエネルギー効率の改善が実現される。

冷水の需給エネルギーギャップモデルの導出の詳細については、参考文献を参照されたい¹⁾。モデルの中心的概念は、次式で表現される。

$$H_GAP(t) = | H_SAC(t) - H_demand(t) |$$

ここで、

$H_GAP(t)$: ある時点tにおけるエネルギーギャップ

$H_SAC(t)$: ある時点tにおけるSACからの冷水のエネルギー

$H_demand(t)$: ある時点tにおけるエネルギー需要

このモデルは、次の2点の仮定に基づいている。

(1) 冷水は主にSACから供給され、ECは補足分を担う。

(2) 電力の需給のバランスは維持されなければならない。

$H_demand(t)$ は、キャンパスの各棟(教育施設およびDC)の内部で生じる熱、および各棟に外部から伝わってくる熱に基づいて算出される。これらの計算には、図2に示された各センサーが利用される。

エネルギーギャップ $H_GAP(t)$ を最小にする方法は2つある。1つは、 $H_SAC(t) > H_demand(t)$ であるときに需要を制御することであり、もう1つは、 $H_SAC(t) < H_demand(t)$ であるときに供給を制御することである。供給側の制御は、SACのスケジュール作成やTESの利用などで行う⁵⁾。需要側の制御は、DCのジョブスケジュール作成などで行う^{2), 3)}。

データ処理システムのアーキテクチャを考えると、2つのSCADAシステム間の接続は重要である(図3参照)。今回の場合は、それらはGDC設備用のSCADAシステムと、UTP各棟向けのSCADAシステムとなる。それぞれが異なるデータフォーマットを使用しているため、PI Systemという相互接続システムが重要な役割を果たした。同システムは、OSIsoft社によって開発および販売されている⁴⁾。PI Systemが相互接続をサポートできるSCADAおよびDCS(Distributed Control System:分散制御システム)の種類は400を超える。

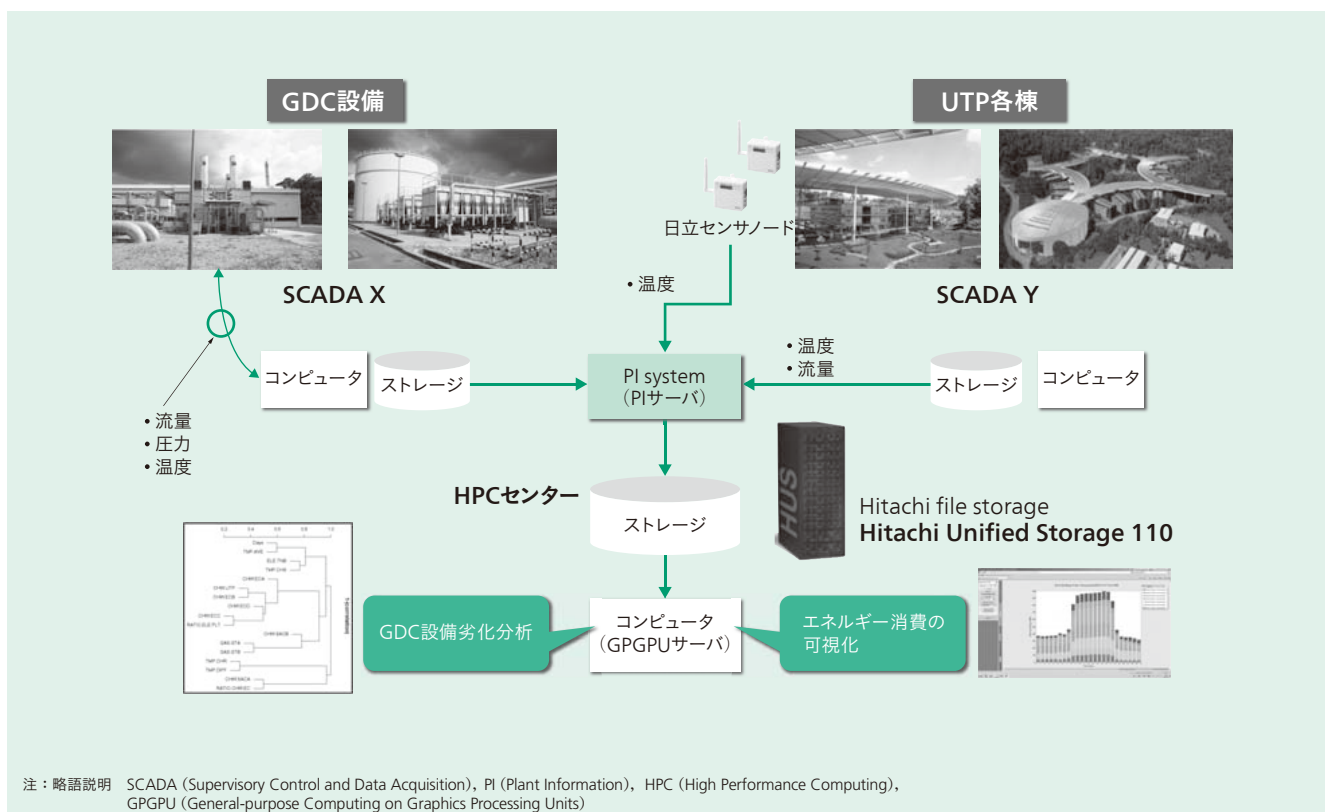


図3 | UTPのGDC-DCにおけるエネルギー監視ネットワーク

使用するデータ形式が異なる2つのSCADAシステムの相互接続には、PI Systemが使用される。データはHPCセンターに格納され、GDC設備の劣化分析およびエネルギー消費可視化などのアプリケーションによって表示あるいは分析される。

4. GDC-DCのPUEの試算

GDC-DCのシステム全体の開発は未だ完了していないが、GDC設備の操業データ、およびキャンパス各棟の外気温および室温を用いれば、エネルギー効率の試算は可能である。UTPでは、キャンパスの拡張に合わせ、2012年から2014年にかけて複数のSACが増設された。このため、3つのSAC操業パターンについて試算を行った(表2参照)。

この試算によれば、GDC-DCの性能は、寒冷な気候下に置かれた、世界でもトップクラスのDCと比較しても遜色がない(図4参照)。性能の改善には、ECをSACで置き換えたことが大きく作用しており、SACのCOPはECのそれよりも優れている(表1参照)。

5. GDC設備の性能低下の原因究明

エネルギー効率の点で有利であるにも関わらず、マレーシアのGDC設備ではSACがあまり使われていない。これは、O&M (Operation and Maintenance) が比較的難しい

ためである。すなわち、GDC-DCの高い効率を現場にもたらすには、O&Mについて検討し、GDC設備の性能低下を招いている要因を取り除いていくことが重要である。

最近の2年間に、UTPのGDC設備でのエネルギー消費量は増大している。しかし、設備は適宜費用を投じて整備および清掃されており、エネルギー消費増の原因ははっきりしない。これを受けて、GDC設備のSCADAシステム

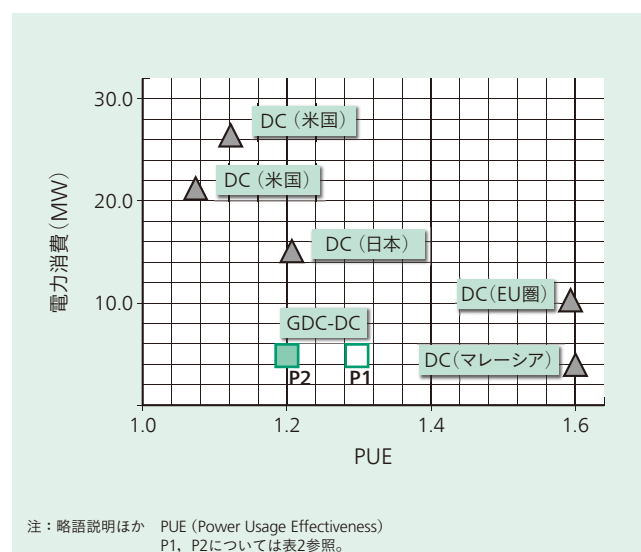


図4 | GDC-DCのPUE試算値(2操業パターン)と他のDCの値の比較
熱帯気候下にあるにも関わらず、GDC-DCのPUE試算値は、マレーシアにある他のDCや、日本にある同様のDCの値よりもよい(小さい)。

表2 | 冷凍機の操業パターン

日中は午前7時から午後7時まで、夜間は午後7時から午前7時までを指す。

パターン (年)	日中	夜間
P1 (2013)	他社製SACおよびEC	EC
P2 (2014)	日立製SAC	EC
P3 (2015予定)	日立製SAC	日立製SAC

に蓄積された履歴データの相関を求める根本原因分析^{5), 6)}を行った(図5参照)。

分析に際しては、RATIO.ELE.PLTとRATIO.CHW.ECの相関が強いと予想された。これは、UTPのGDC設備にある4基のECは、稼働年数と仕様がすべて同じであったことによる。しかし実際には、RATIO.ELE.PLTとCHW.ECCの相関が、他のECよりも強いという結果になった。すなわち、EC-Cはより多くの整備を必要としているということである。また、設備管理者の報告によれば、EC-Cに使用されているポンプには、過去に故障した履歴があるという。これにより、EC-Cおよびそのポンプの整備が不十分であり、他の冷凍機の整備は適切であったことが明らかになった。

また、今回の結果により、SCADAおよびセンサシステムから継続的にデータを収集・分析することが、GDC-DCのエネルギー効率を維持するうえで極めて重要であることも示された。

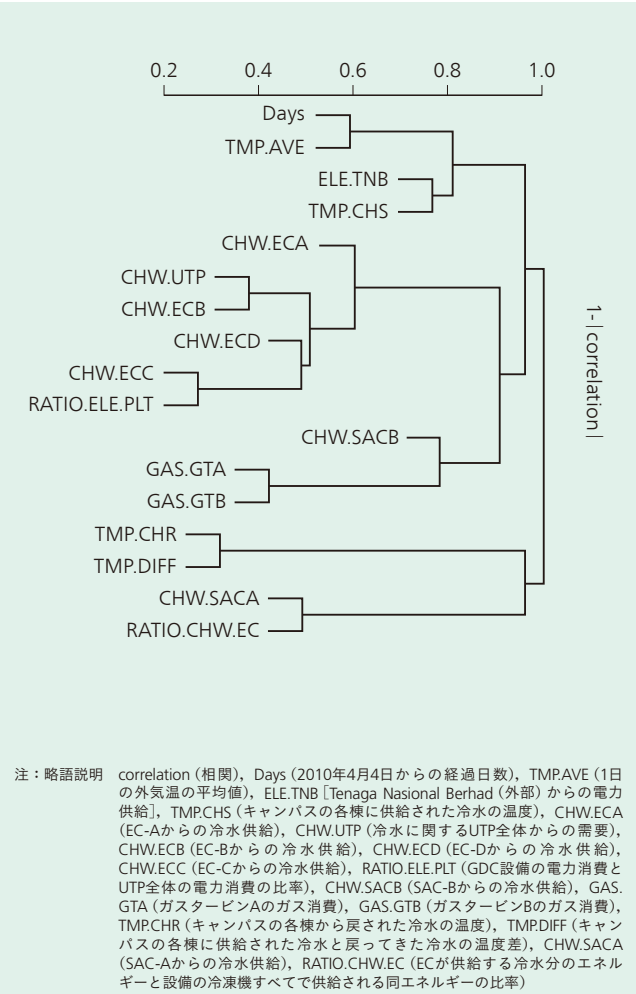


図5 | 2010年から2012年にかけて収集したUTPのGDC設備の日別データの相関に基づく根本原因分析

対にした変数の左右方向の位置が、相関の度合いを示す(左に寄っているほど相関が強い)。例えば、RATIO.ELE.PLTはCHW.ECCとの相関が強い。

6. 関連研究

冷水の需要に関する研究には、需要を削減するための最適化について周到に調べたものがある。サーバの動作保証温度が高い場合に、DCの温度要件を緩和すること⁷⁾、温度の変動を最小にするようにDCのジョブスケジュール作成を利用すること^{8), 9)}などがその例である。冷水の供給に関する研究においても、供給を増やすための最適化方式がテーマとなっており、例えばSACの最適化¹⁰⁾、およびTESの最適化¹¹⁾などがある。一方、GDCの場合は、需要と供給を同時に検討する必要がある。これは、操業の効率は、冷水の需要と供給のギャップに大きく依存しているためである。供給が需要を上回っているときには、需要を削減してもCO₂排出量の削減にはそれほど有効ではない(効率的ではない)。同様に、需要が供給を上回っているときには、供給を増やしても効果は薄い。そこで、需給のギャップのモデルを使い、実際の状況に基づいて、GDCのエネルギー効率にとって最も効果的な最適化方式を選択するのである。

冷水の需要と供給に関する研究では、最適化の方式もテーマになっている。例えば、冷水の需要予測を踏まえた熱貯蔵タンクの最適化¹²⁾、建物の冷房負荷パターンを踏まえた冷水配送の最適化¹³⁾、およびGDC最適化のための電力需要予測¹⁴⁾などがある。ただし、これらの方式は需要の情報に基づいて供給の最適化を図るものであるため、需要と供給の両方を考慮する方式よりも効率が低い。なぜなら、需要を考慮せずに供給を最適化する場合は、需要が予想外に増加したときに備えて、余裕を多めに確保する必要が生じるからである。そこで、需要の最適化も行えば、急な需要増の影響を緩和することが可能となる。つまり、需要を最適化する際に供給の状況にも配慮することにより、効率を改善することができるのである。

7. おわりに

本稿では、マレーシアの発展に貢献する省エネルギーDCに関する、日立とUTPの共同研究を解説した。われわれは、外気が空冷に適さないASEAN地域に向けた、省エネルギーDCを実現するGDC-DCの構想を作り上げた。本研究により、PUEの値を小さくするには、GDC設備においてSACを使用することが効果的であると判明した。また、GDC設備の保守整備システムの設計に関しては、SCADAおよび無線センサーなどから構成される、センサデータ収集ネットワークの重要性が確認された。

今後の課題としては、GDC-DCグリッドのジョブスケジュール作成に関する詳細な研究、PI Systemを導入するエネルギーセンサシステムの実装および評価などがある。

GDC-DCのエネルギー周りのモデル化、およびGDC設備のより効率的な保守作業と、ジョブスケジュール作成、そしてエネルギーセンサシステムとを組み合わせることにより、GDC-DCを備えたDCは、キャンパス内に限らず、大学の関連施設での用途においても、世界に通用するレベルのエネルギー効率を実現可能である。

謝辞

Makhostia社のプラントマネージャーであり、UTPのGDC設備のオペレーターでもあるJafray Hashim氏に、データ提供および設備の保守整備に関する技術的な検討などにおいて継続的にサポートしていただいた。また、UTPのDatuk Abdul Rahim Hashim 博士、Ahmad Fadzil Bin Mohamad Hanni 教授、Abdul Rashid Bin Abd Aziz 教授、およびAlan Oxley 教授には、日立とUTPの共同研究に関するマネジメントおよびサポートをしていただいた。深く感謝の意を表する次第である。

参考文献など

- 1) J. Okitsu, et al.: Towards an architecture for Integrated Gas District Cooling with Data Center control to reduce CO₂ Emission, IEEE Computer Society 2013 Green Computing Conference (2013)
- 2) S. N. M. Shah, et al.: Design and Evaluation of Agent Based Prioritized Dynamic Round Robin Scheduling Algorithm on Computational Grids, AASRI Procedia 1, pp. 531-543 (2012)
- 3) G. Dinis Jr., et al.: Dynamic scheduling on an open-source based volunteer computing infrastructure, The Second International Conference on Green Computing, Technology and Innovation (ICGCTI2014)
- 4) OSIssoft, LLC, <http://www.osissoft.com/>
- 5) M. A. A. Majid, et al.: Studies on Steam Absorption Chillers Performance at a Cogeneration Plant, The Second International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS) (2014)
- 6) J. Okitsu, et al.: Root Cause Analysis on Changes Plant Chiller Performance Using Linear Regression, The Second International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS) (2014)
- 7) The Green Grid: Updated air-side free cooling maps: The impact of ASHRAE 2011 allowable ranges, Tech. Rep., 2011 (online)
- 8) A. Banerjee, et al.: Cooling-aware and thermal-aware workload placement for green HPC data centers, Green Computing Conference, 2010 International, pp. 245-256 (2010)
- 9) M. Mase, et al.: Cooling efficiency aware workload placement using historical sensor data on IT-facility collaborative control, Green Computing Conference (IGCC), 2012 International, pp. 1-6 (2012)
- 10) M. Sid Ahmed, et al.: Steady State Simulation of a Double-Effect Steam Absorption Chiller, Journal of Applied Sciences, Vol. 11, pp. 2018-2023 (2011)
- 11) M. N. Reshid et al.: Availability and reliability modelling for chilled water generation of a cogenerated power plant using multi-state system theory, 2011 National Postgraduate Conference, pp. 1-8 (2011)
- 12) H. Yamaguchi, et al.: Verification of optimum operation method by simulation for the HVAC system with a thermal storage tank in an actual building, Transactions

of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No. 167, pp. 21-29 (2011.2)

- 13) T. T. Chow, et al.: Building-mix optimization in district cooling system implementation, Applied Energy, Vol. 77, No. 1, pp. 1-13 (2004.1)
- 14) M. F. I. Khamis, et al.: Electricity forecasting for small scale power system using fuzzy logic, International Symposium on Parameterized and Exact Computation (IPEC), pp. 1040-1045 (2010)

執筆者紹介



直野 健

日立製作所 中央研究所 情報システム研究センタ プラットフォームシステム研究部 所属

現在、情報システムのプラットフォームシステムの開発に従事
工学博士

情報処理学会会員



沖津 潤

Hitachi Asia (Malaysia) Sdn. Bhd. R&D Department 所属

現在、グリーンITの研究開発に従事

電子情報通信学会会員



Nordin Zakaria

ペトロナス工科大学 コンピュータ情報科学学部 所属

ハイパフォーマンスコンピューティングサービスセンター所長
工学博士

Association for Computing Machinery会員



Low Tang Jung

ペトロナス工科大学 コンピュータ情報科学学部 所属

現在、エネルギーセンサネットワークの開発に従事

工学博士

IEEE会 員, International Institute of Informatics & Systemics会 員,
Malaysia Information Technology Society会 員



Shaharin Anwar Sulaiman

ペトロナス工科大学 機械工学学部 所属

Mission-Oriented Research Group on Hybrid Energy Systemsディ
レクター

工学博士

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning
Engineers会 員



Mohd Fatimie Irzaq Khamis

ペトロナス工科大学 施設管理部 所属

Property Management & Maintenance, Mechanical & Electrical
Services & Operation Unitマネージャー



藤居 達郎

日立製作所 日立研究所 機械研究センタ 生活家電研究部 所属

現在、ヒートポンプおよび再生可能熱エネルギー利用の研究開発に
従事

空気調和・衛生工学会会 員