

大学施設における環境負荷低減手法に関する研究
 その2 中央式空調システムのエネルギー消費調査と省エネ化提案の事例
A Study of Environmental Load Reduction Technique for University Facilities
Part2 Investigation of energy consumption in a central AC system
and proposal for energy savings

正会員 ○柳原 隆司 (東京大学)

正会員 金田一清香 (東京大学)

正会員 河野 匡志 (東京大学)

正会員 坂本 雄三 (東京大学)

Ryuji YANAGIHARA*¹

Sayaka KINDAICHI*¹

Masashi KAWANO*¹

Yuzo SAKAMOTO*¹

*¹ The University of Tokyo

This paper reports the result of measurement of energy consumption in a central AC system in the University of Tokyo. Average load factor is observed at 9.4% and 17.1% in the cooling and heating seasons, respectively. System simulation by LCEM indicates that cut-down of operating heat sources can lead to increase the load factor and CO₂ reduction by 71 ton in summer season.

はじめに

非住宅建築物は温室効果ガス排出量全体の18%を占めており、これは1990年比で45.4%の増加であった(2005年実績)。規模の大きな大学は、延床面積効果から二酸化炭素の排出総量が非常に大きくなることから、従来の面積原単位の管理に加え総量管理の視点も必要である。東京大学では、2008年7月より東大・サステナブル・キャンパス・プロジェクト¹⁾(以下、TSCP)を発足し、アクションプラン TSCP-2012において、2008年から2012年までに、大型熱源系の二酸化炭素排出量を6.3%削減することを目標としている。ここでは、キャンパス省エネルギー化に向けた実態調査の一環として、本郷キャンパス工学部1号館(以下、1号館)を例にとり、中央式空調システムにおける夏季および冬季の運転挙動やエネルギー消費について分析する。また、熱負荷計算による冷房期間を通した負荷特性の推定と併せてLCEM(Life Cycle Energy Management)を用いたシステムシミュレーションを行うことにより、キャンパスの省エネルギー化に向けた今後の具体策を提案することを目的とする。

1. 建物概要および熱源設備の概要

1.1 対象建物の概要

表1に対象建物(1号館)の基本情報を示し、図1に基準階の平面図を表す。鉄筋コンクリート造の地上5階、地下1階からなり、竣工年で旧館(延床面積10,131 m²)と新館(同6,379 m²)に大別される。各月の電力・ガス消費量を積算して求めた年間一次エネルギー消費量原単

位は約2.3 GJ/(m²・年)となった。これは、非住宅建築物を対象として大規模に行われた調査結果²⁾に比べて1.6倍と大きな結果である。この理由には、同建物には講義室の他、在室時間が極めて長いと予想される研究室も多く含まれていることがあげられる。

表1 対象建物の基本情報

所在地	東京都文京区
主要用途	大学
構造	鉄筋コンクリート造
規模	地上5階 地下1階
竣工年	旧館：1935 新館：1995
建築面積 [m ²]	3,263
延床面積 [m ²]	16,510 旧館：10,131 新館：6,379
単位延床面積当り 水消費量 [m ³ /(m ² ・年)]	0.729
一次エネルギー消費 原単位 [GJ/(m ² ・年)]	2.286



図1 対象建物基準階平面図

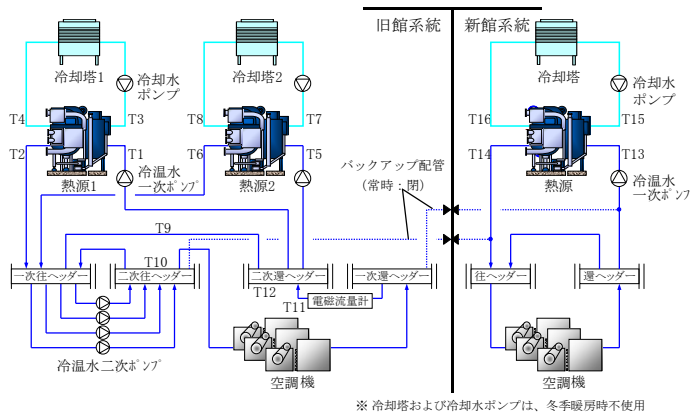


図2 1号館空調システム系統図

1.2 熱源設備および計測の概要

図2に対象建物の空調システムの系統図を示し、表2に各熱源機の仕様を示す。熱源機としては、吸収式冷温水機が3台、うち2台は旧館用、1台は新館用に用いられている。実測は熱源機器の一次側について、夏期冷房時と冬季暖房時に約2週間行い、期間はそれぞれ2008年9月12日(金)～25日(木)(新館側は9月19日午後～25日)、2009年1月10日(土)～23日(金)であった。既設吸収式冷温水機3台と各補機の電力消費量、ガス消費量、温度(図中の記号T)、流量について5分毎(ただしガス消費量は30分毎)に測定した。

2. 実測結果および考察

2.1 夏季冷房時

期間中の製造熱量の変化を図3に示す。図より、旧館熱源機2台は隔日で運転していること、運転開始の5:00から約一時間は比較的負荷が大きくなっていること、新館熱源機は24時間運転し続けていることが見て取れる。また、表3には運転期間平均のシステムCOPと負荷率を表す。システムCOPは投入エネルギーに対する製造熱量の比で表され、製造熱量には熱源機と各補機の運転に要するガスおよび電気エネルギーを考慮している。表より、負荷率は最も高い旧館1号機でも21.1%、3台合計では9.4%と低い値を示した。このように各機器が低負荷域で運転することにより、ハンチングを繰り返した結果、相対的に搬送動力の影響が大きくなり、3台合計のシステムCOPで0.37と低い値になったと考えられる。

ここで図4に、測定代表日における旧館側熱源機(1号機)系統の稼働状況を示す。熱源停止中も二次ポンプが運転を続けていること、冷水出入口温度差が設計値の5°Cに達していないことがわかる。またバイパス管内への逆流が観察された。これは図5に示すように、本来であれば冷水出口温度(T2,T6)と一致するバイパス温度(T9)が、冷水入口温度(T1,T5)と一致していることから推察される。また停止中の熱源の冷水温度は時間とともに上昇しているが、旧館2号機が運転しているときには、旧館

表2 熱源機の仕様

[旧館システム]				
吸収式冷温水機(2台)	設置年月日	平成7年2月	冷水出入口温度	7 °C / 12 °C
	消費電力	7.65 kW	冷却水出入口温度	37.5 °C / 32 °C
	燃料	都市ガス(1.3A)	温水出入口温度	55 °C / 50 °C
(冷房)	能力	240 USRT	COP(単体)	0.9997
	燃料使用量	65.4 m ³ /h		
(暖房)	能力	525 Mcal/h	COP(単体)	0.84
	燃料使用量	55.9 m ³ /h		
[新館システム]				
吸収式冷温水機(1台)	設置年月日	平成7年2月	冷水出入口温度	7 °C / 12 °C
	消費電力	3.5 kW	冷却水出入口温度	37.5 °C / 32 °C
	燃料	都市ガス(1.3A)	温水出入口温度	55 °C / 50 °C
(冷房)	能力	98 USRT	COP(単体)	0.995
	燃料使用量	26.8 m ³ /h		
(暖房)	能力	249 Mcal/h	COP(単体)	0.85
	燃料使用量	26.5 m ³ /h		

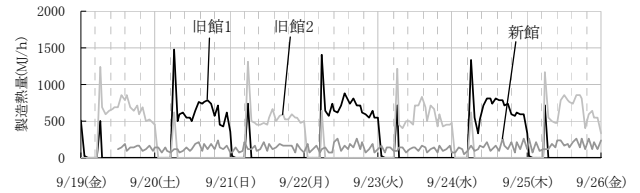


図3 夏季実測期間中の製造熱量

表3 夏季実測期間中のシステムCOPと負荷率

	旧館1	旧館2	新館	3台計
システムCOP	0.56	0.49	0.26	0.37
負荷率(%)	21.1	20.1	11.4	9.4

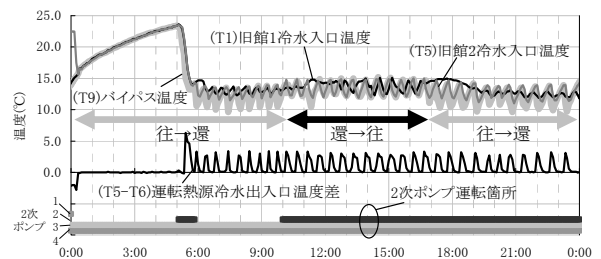


図4 旧館1号機系統の稼働状況<2008.9.23>

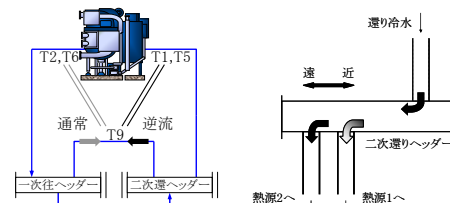


図5 バイパス管内の逆流

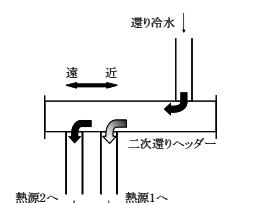


図6 停止中熱源への通水

1号機の冷水温度は約13°Cに保たれていた。これは図6に示すように、二次還ヘッダーにおいて、旧館1号機への接続位置が旧館2号機に比べて物理的に近いことから停止中にも通水されていたことが考えられる。

2.2 冬季暖房時

冬季暖房時の製造熱量の推移を図7に示す。図より、冷房時と同様に、旧館の2台の熱源機は隔日で運転している様子が見て取れる。また、冷房時に24時間運転していた新館の熱源機については、深夜時間帯は停止するよう改善されている。しかし、冷房時と同様に、特に新館において大きなハンチングが確認された。表4に冬季実

測期間中の平均システム COP と負荷率を示す。負荷率は機器毎に見ると冷房時に比べて高くなっているが、前述のように旧館側の熱源機は1台のみの稼働となっているため、3台合計では17%と低い値となった。

3. 数値シミュレーションによる省エネ化対策の検討

3.1 シミュレーションの概要

ここでは、冷房時の省エネ化対策手法について検討する。実測した期間に限られていることから、冷房期間を通じた空調負荷について、FACES2003 (Forecasts of Air-conditioning System's Energy, Environmental and Economic Performance by Simulation 2003)内の熱負荷計算プログラム部分 FACES_ACLD を用いて計算することとした。熱源機およびシステム全体のエネルギー消費量の計算には、LCEM を用いた。LCEM はエクセル上で操作可能な計算シートに外気条件、室内条件、メーカー毎の機器の仕様、性能、空調負荷等を入力することによって、空調設備システムの1時間毎のエネルギー消費量を予測するものである。本稿では、旧館に設置されたガス焚冷温水発生機(冷凍能力240RT)を対象に、上記のFACES から得られた空調負荷を与えた際の1号館における空調エネルギー消費量の計算を行った。

3.2 数値シミュレーション結果の妥当性

3.2.1 FACES による計算結果

FACES における入力条件を表5に示す。また、図8において、シミュレーション計算で得られた毎時熱負荷と、前報の実測結果を比較している。実測期間において、実測値と計算値の平均誤差は約1%となっており、夏期冷房負荷における一定の予測精度を確認できた。

3.2.2 LCEM による計算結果

LCEM の入力条件を表6に示す。LCEM にはメーカーから提示される機器の性能を基にした計算式が組み込まれている。ガス消費率は冷温水発生機の負荷率(以下、負荷率)、冷却水入口温度、冷却水流量比、冷温水出口温度の関数で表されている。今回、冷却水ポンプは常に定流量であったため冷却水流量比は常に100%とした。ここで、負荷率がガス消費率に及ぼす影響を比較するため、冷却水入口温度および冷温水出口温度に期間中の平均値(それぞれ26.3°C、12.2°C)を代入し、ガス消費率を負荷率の関数として簡略化した。

図9にメーカー提示性能を与えたときの負荷率とガス消費率の関係を示す。実測から得られた安定運転時(6:00~24:00)の性能(以下、現性能)との比較から、現性能の方がエネルギー消費量が大きくなっている様子がわかる。一次近似式において、両者の切片を一致させたときの傾きを比較すると、現性能ではメーカー提示性能に比べて約1.8倍のガスを消費している結果となった。これは、設置後13年が経過していることなども影響している

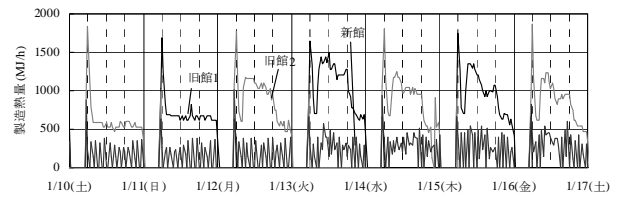


図7 冬季実測期間中の製造熱量

表4 冬季実測期間中のシステム COP と負荷率

	旧館1	旧館2	新館	3台計
システム COP	0.73	0.68	0.45	0.66
負荷率 (%)	34.1	32.4	18.8	17.1

表5 FACES 入力条件

都市	東京	設定温湿度	26°C/50%
延床面積	10,131 m ²	運転時間	5:00~24:00
窓面積比	北側:0% その他:30%	運転曜日	毎日
形状	箱型	発熱	人間 0.20 人/m ² 照明 20 W/m ² 機器 15 W/m ²
コアタイプ	センターコア		
アスペクト比	幅:奥行=1.5:1.0		

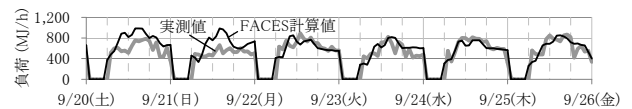


図8 実測と FACES(計算)による熱負荷

表6 LCEM 入力条件

冷水出口温度	12°C
循環推量	2420L/min
外気乾球温度	FACES内蔵のデータ
外気乾球湿度	FACES内蔵のデータ
運転時間	5:00~24:00
冷水入口温度	FACES計算結果をもとに冷水出口設定温度から算出

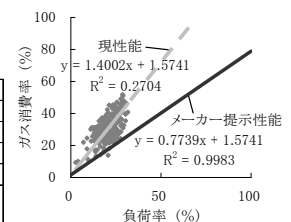


図9 メーカー提示性能と現性能の比較

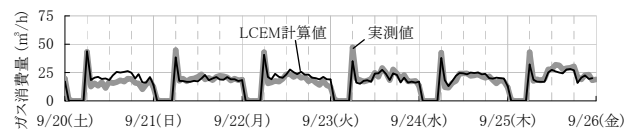


図10 実測と LCEM (計算)によるガス消費量

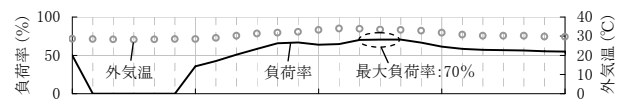


図11 旧館熱源機1台で全館空調を行う場合の負荷率(8月10日)

と考えられる。検討にあたり、メーカー提示性能に基づくガス消費率の関数に前述の傾きの比1.4002/0.7739を乗じた関数が、現性能の再現式であると仮定し、実測期間を対象に計算を行った。結果、図10のように実測期間中において実測値と計算結果の平均誤差は8%となることを確認し、この関数を用いて推定を行なうこととした。

3.3 省エネルギー化対策例とその効果

3.3.1 熱源機 1 台で全館を空調する場合

ここでは、図 2 中の旧館系統と新館系統をつなぐバックアップ配管を開放したとして、現性能の旧館熱源機 1 台で 1 号館全館の空調の実施可否を検討する。図 11 に最高負荷日であった 8 月 10 日の負荷率の変化を示す。最高負荷率は 14:00~16:00 の 70% であり、これより夏期冷房期間を通して、旧館熱源機 1 台のみで 1 号館全館を空調可能であることが示された。これは既設熱源機 3 台のうちの 1 台を、現性能のまま使用した場合を想定しているため、機器更新は不要であり、実現可能性の高い対策であると考えられる。

3.3.2 二次ポンプの運転改善

次に旧館熱源機 1 台のみを使用し、二次ポンプは 4 台中 2 台を熱源の稼働時間と併せて使用する場合の省エネ効果を試算する。この対策を実施すると、まず新館熱源機の停止により、同系統に存在する補機類の電力消費は全て 0 となる。また、旧館系統の二次ポンプ 4 台のうち稼働する 2 台分の電力消費も、熱源の稼働時間(5:00~24:00)以外は 0 となる。

(1) 9 月 20 日(土)~25(木)の省エネルギー化効果

実測期間に該当する 9 月 20 日(土)~25 日(木)において同対策を行った場合の効果試算結果を表 7 に示す。削減量は、ガス消費量で 341 m³、電力消費量で 5,052 kWh となり、金額および二酸化炭素排出量に換算すると、ガス・電力合計でそれぞれ約 10 万円、約 2.7 トンの削減となった。二酸化炭素排出量の削減率は、現状の約 11.9 トンに対して約 23% となり、また平均負荷率も現状の 17.9% から 28.5% に上昇し(図 12)、平均システム COP も 0.41 から 0.52 に向上する結果を得た(図 13)。

(2) 夏期冷房期間の省エネルギー化効果

さらに、同様の省エネルギー化施策を夏期冷房期間の 6 月 1 日から 10 月 31 日まで実施した場合の効果を試算した。9 月 20 日(土)~25 日(木)のガス消費削減量は、実測値の 3,305 m³ と計算値の 2,964 m³ から 341 m³ と算出される。これは計算値の 11.5% となる。したがって、熱源 1 台のみを使用して夏期冷房期間、1 号館全館を空調した場合のガス消費量 90,478 m³ うち 11.5% が削減量に相当するとした結果、ガス消費量の削減量 10,405 m³ と計算される。一方、電力消費量に関しては十分な情報が得られなかったため、実測期間を対象に行った省エネルギー化施策の効果が夏期冷房期間を通して同様に続くとして仮定して削減量を試算した結果、128,826 kWh の削減であった。以上より、夏期冷房期間を通じた想定の効果は、金額、二酸化炭素排出量に換算すると、約 276 万円、約 71 トンと予想される。このように、短期間の計測を通じて、設定変更等の運用改善によっても削減可能であることが確認でき、TSCP-2012 の削減対策にも今後活用できる。

表 7 運転改善による省エネ効果

9月20日(土)~25日(木)	現状 (熱源3台) (実測値)	省エネ化後 (熱源1台) (計算値)	削減量	削減率 [%]
ガス [m ³]	3,305	2,964	341	10.3
電力 [kWh]				
旧館熱源1系統	2,691	5,551	0	0.0
旧館熱源2系統	2,860			
新館系統	3,710	0	3,710	100.0
二次ポンプ4台	2,292	950	1,342	58.6
電力合計	11,553	6,501	5,052	43.7
ガス起因 CO ₂ (kg-CO ₂)				
	7,631	6,788	843	11.0
電力起因 CO ₂ (kg-CO ₂)				
	4,252	2,392	1,860	43.7
合計	11,883	9,180	2,703	22.7

*CO₂ 排出量の換算係数は、TSCP2012 対策の固定値として、都市ガス：2.309kg-CO₂/m³、電力 0.368kg-CO₂/kWh と用いた。またコストについては、都市ガス：80 円/m³、電力 15 円/kWh と仮定して計算を行った。

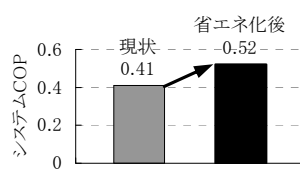


図 12 省エネ化によるシステム COP の変化

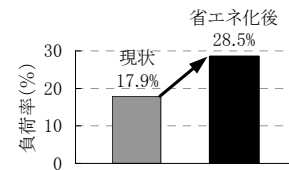


図 13 省エネ化による負荷率の変化

4. まとめ

本報で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 東京大学工学部 1 号館のセントラル空調システムを対象として、夏季・冬季代表期間においてエネルギー消費量の実測を行った。期間平均の負荷率は冷房時に 9.4%、暖房時に 17.1% で、システム COP は冷房時に 0.37、暖房時に 0.66 となった。その他、機器の 24 時間運転、ハンチング、停止中熱源への冷水の通水、バイパス管内の逆流などが確認された。
- 2) 同建物を対象に、LCEM を用いたシステムシミュレーションにより省エネルギー化の効果を検討した。空調熱源の使用台数を現状の 3 台から 1 台に減らしても夏期の冷房負荷に対応可能であり、シーズンで約 276 万円、二酸化炭素約 71 トンが削減可能という結果を得た。
- 3) 設定変更などの運用調整により、既設設備を最大限活用することにより、大きな削減効果が見込めることを示せた。また今後、TSCP-2012 の削減対策においても他の建物へも活用できる有用な情報を収集できた。

謝辞 実測に際しては、東京都市サービス株式会社 竹之内康宏様、株式会社テクノ菱和 福本悦男様に多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 迫田他：東京大学におけるサテライトキャンパス活動，日本建築学会技術報告集，第 15 巻第 30 号，2009.6
- 2) 村上他：非住宅建築物の環境関連データベース構築に関する研究(第 1 報~第 2 報)，平成 20 年度空気調和衛生工学会大会講演論文集，2008.8