



Title	建物の合理的なエネルギー使用を目的とした管理・運用・設計手法に関する研究
Author(s)	山本, 亨
Citation	北海道大学. 博士(工学) 乙第7123号
Issue Date	2021-03-25
DOI	10.14943/doctoral.r7123
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/81288
Type	theses (doctoral)
File Information	Toru_Yamamoto.pdf



[Instructions for use](#)

建物の合理的なエネルギー使用を目的とした
管理・運用・設計手法に関する研究

2021年2月

山本 亨

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と課題	1
1.2 関連する研究	3
1.2.1 エネルギー管理に関する研究	3
1.2.2 コミッショニングに関する研究	4
1.2.3 エネルギー管理情報に基づく設計に関する研究	4
1.2.4 エネルギー管理支援システムに関する研究	5
1.3 本研究の目的と方針	5
1.4 本論文の構成	6
第2章 エネルギー管理と運用手法の研究	10
2.1 緒言	10
2.2 管理対象機器の選定	11
2.2.1 受変電関連機器の効率定義と影響要因	12
2.2.2 熱源機器・補機の効率定義と影響要因	15
2.2.3 空調機・外調機の効率定義と影響要因	20
2.2.4 システムの効率定義と影響要因	21
2.3 管理項目の計測と判断基準	23
2.3.1 管理項目と計測	23
2.3.2 管理項目と判断基準値	26
2.4 合理性判断のためのシミュレーター開発	28
2.4.1 冷却水温度シミュレーター	29
2.4.2 送水温度シミュレーター	32
2.4.3 熱源最適運転シミュレーター	35
2.4.4 空調温度予測シミュレーター	38
2.5 結言	42

第3章 エネルギー管理と熱源システムの設計手法の研究	45
3.1 緒言	45
3.2 熱源システム設計手法の検討	45
3.2.1 設計モデルとアルゴリズム	45
3.2.2 機器特性データ	48
3.2.3 最適熱源設計手法による計算例	53
3.3 熱源システム設計のための要素技術	55
3.3.1 クラスタ分析を用いたエネルギー需要の類型化手法の検討	55
3.3.2 AHP による意思決定法の適用	62
3.4 結言	69
第4章 エネルギー管理及び運用支援システムの開発	72
4.1 緒言	72
4.2 エネルギー管理システムの開発	73
4.2.1 エネルギーナビゲーションシステム	73
4.2.2 省エネ自動運用機能の追加	77
4.3 エネルギー管理システムによる省エネ実証	84
4.3.1 ショッピングモールにおける実証	84
4.3.2 リゾートホテルにおける実証	88
4.4 エネルギー管理とリニューアル設計	95
4.4.1 エネルギー管理と熱源設計の連携運用	95
4.4.2 事務所ビルにおけるリニューアル設計事例	96
4.5 結言	99
第5章 結論	103
5.1 本研究のまとめ	103
5.2 今後の研究課題	104
謝辞	106
付録	
英文要旨	
研究業績目録	

第1章 序章

1.1 本研究の背景と課題

我が国ではエネルギー資源の大部分を海外に依存しており、原油や天然ガスの国際的供給量の変動により国内の備蓄量やエネルギー価格に大きな影響を及ぼす状況が続いている。また近年では気候変動枠組条約締結国会議（Conference Of the Parties）で議論されている地球温暖化防止への対応として、エネルギー消費を起源とする CO₂ 削減などが地方自治体の条例[1]を中心として実施されている。このような状況は国内外を問わず国際的な課題として取り組まれているが、我が国においては省エネルギー法（エネルギーの使用の合理化に関する法律：以下省エネ法）が平成 20 年度に改正され、産業部門だけでなく民生部門においてもエネルギーの合理的な使用を目的としたエネルギー管理が義務付けられた。

省エネ法が要求する建物の主なエネルギー管理はエネルギー管理体制の整備、エネルギー使用量の管理、エネルギー使用機器に対する合理的な使用の判断基準の設定、中長期計画の策定による高効率機器の新設及び更新である。このような省エネ法の改正や CO₂ 排出量削減への取組みにより日本のエネルギー消費量は削減傾向にあり、2017 年 4 月から 2018 年 3 月における 1 年間のエネルギー使用量は 2000 年 4 月から 2001 年 3 月の年間使用量に対して 15% の削減となっている[2]。これらエネルギー削減の取組みは主にエネルギー需要量の削減（運転時間の短縮、設定温度の緩和等）、高効率機器・システムへの改修、再生可能エネルギーの導入が中心である[3]。特に高効率機器・システムへの改修については、各種補助金[3]の活用による省エネルギー（以下省エネ）機器の導入が進んでいる。またエネルギー需要量の削減は、建物利用者の省エネ意識の高まりとともに中央監視装置による空調・照明・給排気機器等の運転スケジュール設定や室内温度設定、あるいは照度センサによる調光システムなどの自動制御装置により合理的な運用が実施されている。

ここで建物のエネルギーフローを図 1.1 に示すが、エネルギーは商用電力や都市ガスなどの一次エネルギーの供給を受け「供給過程」、冷凍機やボイラなどを用いて建物で使用する冷房や暖房・給湯などの需要エネルギーに変換し「変換過程」、変換した需要エネルギーをポンプ等で搬送した後「搬送過程」、建物利用者により使用される「需要過程」。現状の主要な取り組みであるエネルギー需要量削減は図 1.1 に示すエネルギーフロー中の「需要過程」で実施される取組みであり、電力デマンド管理などの「供給過程」の合理的な運用とともに主に建物利用者の判断基準に基づいて合理的な運用が実施されている。

省エネは一次エネルギー量の削減であり、エネルギーフローの最終過程であるエネルギー需要を削減することは最も有効な行為と言える。一方エネルギーフローからは、一次エネルギー量はエネルギー需要量を「変換過程」「搬送過程」の効率で除した値であることが分かる。従って、一次エネルギー量を削減する方法として「変換過程」「搬送過程」の効率的な運用も重要であり、「変換過程」「搬送過程」における合理的な判断基準に基づく運用も実施されるべきである。

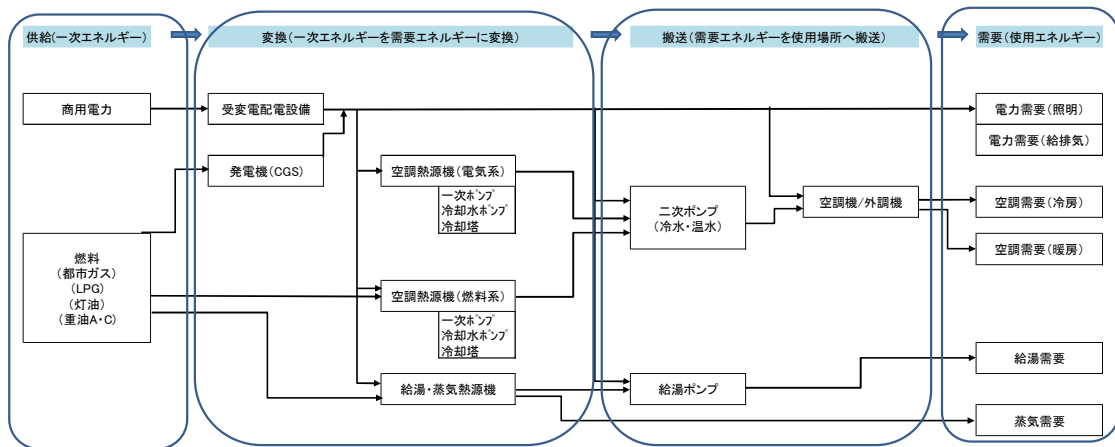


図 1.1 エネルギーフロー

この運用は、設備されている機器を常に高効率で運用するという省エネ対策（以下最適運用対策）であり有効な手段として推奨されている[4]。具体的には、熱源機の最適運転（運転する熱源機の種類及び運転台数の選択）や送水温度の調整、空調用外気導入量の調整、空調温度の調整など、機器・システムの運用や自動制御装置の制御値を建物使用条件や外気温度などの外部条件（以下外部条件）の変化に合わせて最適に設定する行為である。

しかし日本においてはこの有効な省エネ方法はあまり実施されていない。その理由として「変換過程」「搬送過程」において高効率運用を行うためのエネルギー管理が整理されていないことにある。ここで「変換過程」「搬送過程」のエネルギー管理（以下特に記載がない場合は「変換過程」「搬送過程」のエネルギー管理をエネルギー管理と称す）とは機器の性能（能力・効率）評価、自動制御を含むシステムの運用評価、機器本体の性能に影響のある要因（設置状況、補機の運用状況、維持管理状況）の評価、各評価項目に対して合理性を評価するための判断基準値の設定と判断基準値から逸脱した場合の対応からなる管理手法である。設備機器を高効率で運用するためにはこれらの評価項目を管理し、現状の運用状態を常に合理的な状態に維持することが必要である。

現状においては「変換過程」「搬送過程」の対象機器は熱源機や空調機など多義に渡っている。また設備機器及びシステムが高度化かつ複雑化しており、設備運転管理者がこれらの機器を効率的に運用するための判断基準値を見出すのが困難になっている。さらに設備運転管理者は機器運転の他、保守点検業務、施設クレーム対応等の業務量が多く、判断基準値を見出せたとしても判断基準値から逸脱した場合の対応が困難であるという実情もある。しかし「変換過程」「搬送過程」の効率的運用の重要性が増していることから、現場の設備運転管理者でも実施可能なエネルギー管理手法が求められている。

学術的には設備機器や制御システムの性能検証がコミッションング手法として提案されており、また公的機関からは省エネチューニングと称し、設備機器の運用評価が省エネポテンシャルの推計ツールの提供[5]とともに広く推進されている。しかし提案されているコ

ミッションングもチューニングもエネルギー管理項目の部分的な検証・評価であり、「変換過程」「搬送過程」に関連する全ての機器を対象とした包括的なエネルギー管理手法として提案されてはいない。

次にエネルギー管理手法が整理されていないことにより、包括的に省エネ対策が見いだせていない現状がある。省エネ対策が必要となるのはエネルギーの合理的な運用が実施されていない管理項目であることから建物ごとに省エネ対策は異なり、また省エネ対策が必要となる条件も異なる。従って省エネ対策の実施には、建物ごとに「変換過程」「搬送過程」にかかるエネルギー管理項目を設定し、また各項目における合理性を評価するための判断基準値を設定した上で、日々の運用において合理性から逸脱した項目を省エネ対策項目として見出すことが必要である。さらに合理性から逸脱した管理項目を合理的な運用に戻す行為までが省エネ対策であり、省エネ対策を実施してはじめてエネルギー消費量の削減となる。以上のことから省エネ対策はエネルギー管理の一連の行為として位置付けられるべきであり、エネルギー管理を通じて包括的な省エネ対策を常時実施することが一次エネルギーの削減につながる。

一方エネルギー管理は現状設置されている設備機器に対して行われる行為であるが、設備機器あるいはシステムの更新に際してはエネルギー運用が合理的となる設計が求められる。設備更新は更新後のエネルギー消費量に大きな影響を及ぼすことから、エネルギー管理により設計情報を得ることが重要である。しかしながら現状では設計を行うために必要な十分な情報が管理取得されていない。例えば時刻別エネルギー需要量は取得されている事例は多いが、熱源機の効率特性や冷却塔などの性能などを取得していないことが多い。特に熱源機の現状効率は、熱源機を増設する場合や一部の熱源機を継続使用する場合の設計には重要な情報である。また熱源システムの設計に関しては現状の熱源機の性能を考慮しながら増設する熱源機の最適な容量や組合せを評価する手法は提案されておらず、更新計画において十分な設計が実施されていないという課題が生じている。

このように「供給過程」「需要過程」におけるエネルギー管理は実施されている一方で、「変換過程」「搬送過程」のエネルギー管理手法と目的が明確化されていないため、「変換過程」「搬送過程」にかかる管理と設計において、エネルギーの合理的な使用が実施されていない。さらに現状における設備運転管理者の業務量が多いことから、エネルギー管理を常時・継続的に実施する支援システムも必要と考えられる。

1.2 関連する研究

1.2.1 エネルギー管理に関する研究

エネルギー管理に関する研究事例としては、2018年 Nepal Bishnu 等による省エネ対策のためのエネルギー消費量の解析と推定がある[6]。これは建物の運用スケジュールと電力消費量を関連付けた解析を行い、電力消費量の要因を推定する研究である。また1991年大橋等は事務所建物のエネルギー消費量の実態調査結果から、事務所建物の空調用エネルギー消費量及びベースエネルギー量を推定する簡易式を提案している[7]。これらの研究は建

物のエネルギー消費量や消費用途別のエネルギー消費量を推定することにより、省エネ対策の対象となる消費先の選定や省エネ対策によるエネルギー消費量の削減効果を推定する研究である。また 2018 年 Seeam 等は暖房需要の予測管理に基づいた暖房機器のスケジュール調整[8]、Viot 等は床暖房機器の発停制御管理の研究[9]を行っている。これらの研究についてもエネルギー消費量及び需要量の管理であり、「変換過程」「搬送過程」の機器を対象とした包括的なエネルギー管理手法の提案とはなっていない。従って既往のエネルギー管理の研究はエネルギー使用量とエネルギー需要量の管理が中心であり「変換過程」「搬送過程」における機器運用の合理性判断を行う方法は示されていない。

一方、熱源機器を対象にしたエネルギー管理として 2009 年山元等は氷蓄熱システムを対象[10]に、2018 年一瀬等は水蓄熱システムを対象[11]に機器の運転管理情報を用いて運用課題の発見と改善の研究を行っている。また 2017 年 Macarulla 等はボイラ需要を予測しボイラ発停を最適に運用することによりエネルギー削減を行う研究[12]を行っている。しかしこれらの研究においては運用課題の発見過程及び発見方法についての記載がなく、合理性判断基準が示されない状況で継続的にエネルギー管理を実施するのは困難である。

1.2.2 コミッショニングに関する研究

コミッショニングも管理データを用いて設備機器やシステムの性能検証・不具合検知を行うことからエネルギー管理の一手法として位置付けることができる。コミッショニングに関する研究対象は多岐に渡っており、2020 年 Cuerda 等はシミュレーションツールを用いて設計と実運用時のエネルギー消費量の乖離を評価する手法の提案[13]、2013 年大橋等が病院施設の熱源システムの運用検証[10]、2013 年李等が熱源及び空調機を含む空調システムの運用検証[11]、2009 年山口等が空調機の冷却コイルの性能検証[12]などの研究を行っている。さらに 2005 年百田等はライフサイクルに渡る検証を前提に運用段階における実践的なコミッショニングの研究を報告している[13]。

これら研究は「変換過程」「搬送過程」の機器・システムを対象とした検証であり、個々の研究にはコミッショニングを通して考察された省エネ対策によるエネルギー削減の事例が示唆されている。しかしこれらの研究はエネルギー管理がエネルギー削減を実施するために重要であることを示しているが、エネルギー管理を包括的に実施する手法については示していない。またコミッショニング自体が研究レベルの取組みとなっていることから、エネルギー管理の実質的な実施者である設備運転管理者が業務として継続的に実施する提案ではない。コミッショニングに関しては空気調和・衛生工学会より「建築設備の性能検証過程指針」が示されているが、実際のコミッショニングには資格認定制度による専門的な技術者による実施が必要とされている。このような状況から、コミッショニングが設備運転管理者のエネルギー管理業務の一環として実施されるには至っていない。

1.2.3 エネルギー管理情報に基づく設計に関する研究

設計時に使用したシミュレーションモデルに運用時のエネルギー需要データを適用して運用段階でのエネルギー消費量を評価する研究が 2007 年西山等によって報告[14]されてい

る。この研究ではエネルギー管理データから運用時の時刻別エネルギー需要量、熱源機の効率、制御ロジックなどをシミュレーション用データとして取得し運用の課題を評価する研究であるが、運用時のデータを設計にフィードバックするまでには至っていない。一方シミュレーションツールを用いて、検討する熱源システムごとのエネルギー消費量の差異を評価することにより設計に活用することができる。しかし熱源機器の容量計画や多種多様な熱源機器の組合せを効率的に評価する設計手法が提供されていないため、建物の需要特性に応じたエネルギー消費量が最小となる熱源システムの設計は行われていない。

建物の建築設計については2018年 Yigit 等が遺伝的アルゴリズムとエネルギーシミュレーションを組み合わせた建物構成の最適設計手法[19]を提案している。しかしこの手法は熱源システムの設計を対象とした手法ではない。また熱源システム設計に応用したとしても最適化結果として得られる熱源システムの代替案から設計思想を反映した熱源システムを合理的に選択する方法については提案されていない。

1.2.4 エネルギー管理支援システムに関する研究

設備運転管理者のエネルギー管理を支援するシステムについては、熱源システムを中心に判断基準値の研究が行われており、2018年に斯波等や2017年矢嶋等が熱源機器を最適運用する研究[20,21]を行っている。海外でも2020年 Sale-Cardoso 等が熱源システムの最適運用によるエネルギー消費量の削減について報告している[22]。また「需要過程」での運用支援では2010年 Escrivá-Escrivá 等により HVAC 機器にセンサを設置し、機器運用の判断基準値を設定した上で電力需要を制御するシステムの研究[23]も報告されている。しかし熱源システムの最適運用の報告では判断基準値として最適運転方策を求める手段が示されているものの、判断基準値を逸脱した場合の対応である熱源機の具体的な操作支援方法については示されていない。電力需要抑制制御についても HVAC 機器の発停制御により実施しているだけであり、熱源の最適運用の研究とともに発停制御基準値の管理方法を含むエネルギー管理を包括的に支援する提案ではない。

ここで設備運転管理者の運用支援として各種の自動制御装置がメーカーから提案されている。例えば熱源機の運転では自動台数運転制御及び送水温度制御[24]、外気導入量については最小外気取入れ制御[24]などが提案されている。しかし高効率運転のためには最適な制御値を毎時刻自動制御装置に設定する管理行為が必要であるが、現状では制御値を外部条件に合わせて自動設定する汎用的な方法は提案されていない。このように管理項目の判断基準を毎時評価し、判断基準を逸脱した場合の対応として自動制御機器の設定値を自動で更新する、最適な運転機器の発停を自動で実施することを包括的に支援するエネルギー管理システムは提案されていない。

1.3 本研究の目的と方針

本研究は図 1.1 に示した「変換過程」「搬送過程」の機器・システムにおける効率的な運用課題に対して、建物の設備運転管理者が包括的にエネルギー管理を実施するための管理手法の構築を目的とする。ここで本研究の対象建物は、中央熱源システムを有するエネル

ギー管理指定工場規模の業務用建物とする。パッケージエアコンなどの個別熱源が設置されている規模の建物については「変換過程」「搬送過程」よりも「供給過程」「需要過程」におけるエネルギー管理が主体となることから本研究の対象としない。

研究を達成するための大きな方針として、(1)エネルギー管理手法の定義とエネルギー管理の合理性を判断するための研究、(2)エネルギー管理情報を活用した設計手法の研究、(3)エネルギー管理を包括的・継続的に実施する支援システムの研究開発を行う。

(1)エネルギー管理の定義とエネルギー管理の合理性を判断するための研究

「変換過程」「搬送過程」に設置されている設備機器・システムを対象に、エネルギー管理項目の設定、設定した管理項目に対して合理的な運用を判断するための判断基準値の算出方法の検討とシミュレーターの開発を行う。

(2)エネルギー管理情報を活用した設計手法の研究

エネルギー管理は設置されている設備機器・システムについて実施される。特に空調熱源機システムが高効率で運用されるためには機器容量や機器の組合せを適切に計画することが重要である。このことから更新時の熱源システムの設計を合理的に行う手法について研究を行う。

(3)エネルギー管理及び運用支援システムの開発

「変換過程」「搬送過程」に設置されている設備機器・システムは多品目かつ多種多様であるとともに、エネルギー需給状況は時々刻々と変動する。従って設備運転管理者がエネルギー管理を包括的かつ継続的に実施することには困難さを伴う。一方エネルギー管理項目の現状値を評価するための計測データは中央監視装置等によりデジタルデータとして取得されている。また判断基準値も計測データから計算できるため、IT 技術を利用して現状値と判断基準の比較、判断基準値からの逸脱管理が可能である。さらに IT 技術を用いて建物に設備されている中央監視装置を遠隔制御することにより、判断基準値から逸脱した場合の対応についても自動で実施することが可能である。

本研究ではエネルギー管理を設備運転管理者が継続的に実施するために、IT 技術を利用した管理及び運用支援システムの開発を行う。

1.4 本論文の構成

本論文では 2 章以降を以下のように構成する

第 2 章では「変換過程」「搬送過程」を効率的に運用するためのエネルギー管理手法を構築する。

2.2 節では「変換過程」「搬送過程」をエネルギー需要種別ごとに電力、空調、給湯・蒸気に分け、エネルギー種別ごとに標準的に導入設置されている設備機器・システムを選定する。その上で 2.3 節では各設備機器・システムの合理性を判断するために必要な管理項目を機器・システムごとに定義する。また定義した管理項目については合理的な運用状態を判断するための判断基準値を考察するとともに、判断基準値から逸脱した場合の標準的な対応について整理する。加えて各管理項目の運用状態及び判断基準を求めるために必要な

計測データについても整理し、包括的なエネルギー管理手法を定義する。

2.4節では建物使用条件や外気温度などの外部条件の変化に応じて判断基準値を変える必要がある管理項目に対し、シミュレーションによる判断基準値の算出方法を提案する。本論文ではこのような判断基準値を変える必要がある項目として「熱源システムの最適運転方策（運転熱源機の最適選択）」「熱源機の送水温度」「冷却水温度」「空調温度」を選定し、判断基準値を算出する方法とシミュレーターについて考察する。

第3章では熱源設計手法の開発について考察する。

3.2節では熱源機の最適容量及び組合せを行う設計手法について検討を行う。設計手法として最適化手法を用い、最適設計手法を適用するための設計モデル、機器特性データの構築について提案する。3.3節では検討した最適設計手法を実用的に用いるために、エネルギー管理から取得したエネルギー需要データを類型化する手法を検討する。さらに多目的な評価指標に対して、合理的に熱源システムの評価を行うための技術について提案を行う。

第4章は設備運転管理者がエネルギー管理及び運用を包括的・継続的に実施するための支援システムについて提案する。

4.2節では支援システムの設計仕様及びシステム概要を示すとともに、4.3節では支援システムを既存建物に導入した事例とエネルギー削減効果について報告する。さらに4.4節ではエネルギー管理支援システムと熱源設計手法の連携運用を行う方法について提案し、リニューアル時における合理的な熱源システム設計を行った事例について報告する。

第5章は、本研究で得られた成果を要約し、今後に残された課題について述べる。

第1章の参考文献

1. 東京都「環境確保条例」；
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/basic/guide/security_ordinance/index.html
2. 資源エネルギー庁；総合エネルギー統計（Agency for Natural Resource and Energy Japan Report）；https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2
3. 資源エネルギー庁；日本の省エネルギー政策について，令和2年1月
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/pdf/nihon_shouene_seisaku.pdf
4. 一般財団法人省エネルギーセンターホームページ；
<https://eco-hint.tokyo-cci.or.jp/practicalguide2/g2-8>
5. 一般財団法人省エネルギーセンターホームページ；
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/kojo_handan/pdf/2019_003_01_02.pdf
6. Nepal Bishnu; 山羽 基; 川村 貢; 横江 彩; 佐橋 寛也; 多棟の既存建物の低炭素かに向けたエネルギーマネジメントに関する研究，空気調和・衛生学会論文集 No.258, 2018

年 9 月

7. 大橋 一正; 中島 康孝; 既存事務所建物における外界条件とエネルギー消費量に関する調査と解析, 空気調和・衛生学会論文集 No.45, 1991 年 2 月
8. Seeam, A.; Laurenson, D.; Usmani, A.; Evaluating the potential of simulation assisted energy management systems: A case for electrical heating optimisation. *Energy Build.* 2018, 174, pp579-586. [CrossRef]
9. Viot, H.; Sempey, A.; Mora, L.; Batsale, J.C.; Malvestio, J.; Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building: Part II - Potential of predictive strategy. *Energy Build.* 2018, 172, pp385-396. [CrossRef]
10. 山元 武士; 早川 眞; 小型氷蓄熱システムの運転正常化と効率向上に関する実験的研究, 空気調和・衛生学会論文集 No.146, 2009 年 5 月
11. 一瀬 茂弘; 河路 知也; BEMS データを用いた水蓄熱空調システムの継続的性能検証に関する実践研究, 空気調和・衛生学会論文集 No.254, 2018 年 5 月
12. Macarulla, M.; Casals, M.; Forcada, N.; Gangolells, M.; Implementation of predictive control in a commercial building energy management system using neural networks. *Energy Build.* 2017, 151, pp511-519. [CrossRef]
13. Cuerda, E.; Guerra-Santin, O.; JoséSendra, J.; JavierNeila, F.; Understanding the performance gap in energy retrofitting: Measured input data for adjusting building simulation models. *Energy Build.* 2019, 209, 109688. [CrossRef]
14. 大橋 巧; 服部 勇紀; 下田 吉之, シミュレーションを利用した病院施設熱源設備の運用フォルト定量化と回収による省エネルギー効果予測, 空気調和・衛生学会論文集 No.199, 2013 年 10 月
15. 李 榮玲; 大岡 龍三, ゼロ・エネルギー化を目指す建物の実運用段階における空調システムの運用方法最適化に関する研究; 空気調和・衛生学会論文集 No.196, 2013 年 7 月
16. 山口 弘雅; 吉田 治典; 丹羽 英治; 渡邊 剛; 宮田 征門; 小田 久人; 塩谷 正樹; コミッショニングのための冷却コイル特性実験とモデル制度の検証, 空気調和・衛生学会論文集 No.143, 2009 年 2 月
17. 百田 真史; 井上 隆; 射場本 忠彦; 柳原 隆司; 岡垣 晃; 運転保守管理段階における“コミッショニング”の地域冷暖房への適用に関する実践的研究, 空気調和・衛生学会論文集 No.101, 2006 年 8 月
18. 西山 満; 住吉 大輔; 赤司 泰義; シミュレーションを用いた熱源システムのイニシャルコミッショニングに関する研究, 空気調和・衛生学会論文集 No.207, 2014 年 6 月
19. Yigit, S.; Ozorhon, B.; A simulation-based optimization method for designing energy efficient buildings. *Energy Build.* 2016, 178, pp216-227. [CrossRef]
20. 斯波 敬; 上村 泰; 藤江 真也; 阿部 幸司; 木村 雅彦; 高谷 勝; 最適化手法を取り入れ

- た熱源自動運転システムの構築, 空気調和・衛生工学会論文集 No.255, 2018年6月
21. 矢島 和樹; 赤司 泰義; 桑原 泰治; 福井 雅英; 熱源・空調システムの最適制御技術の導入に向けた研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No.248, 2017年11月
22. Sala-Cardoso, E.; Delgado-Prieto, M.; Kampouropoulos, K.; Romeral, L.; Predictive chiller operation: A data-driven loading and scheduling approach. *Energy Build.* 2020, 208, 109639. [CrossRef]
23. Escrivá-Escrivá, G.; Segura-Heras, I.; Alcázar-Ortega, M.; Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in HVAC systems. *Energy Build.* 2010, 42, 2258-2267. [CrossRef]
24. 自動制御装置カタログ, メーカーホームページ Available online:
<https://www.azbil.com/jp/product/building/system/building-automation-system/savic-net-G5/application.html>

第2章 エネルギー管理と運用手法の研究

2.1 緒言

エネルギー管理業務は、建物におけるエネルギーの使用が常に合理的に運用されるように管理することであることは論を待たない。しかしながら「エネルギー管理」と言う、広く一般的に使用されているこの言葉の具体的な業務的位置づけについては明確な定義が整っていない。例えば管理すべき“エネルギー”とは具体的にどのような“エネルギー”を指すのか、また管理の具体的な作業はどのような内容なのか、などである。この問いかけに対する一つの指針が省エネ法の第三条から第五条に示されている。特に第五条に示されている判断基準[1]（表 2.1）に基づき経済産業省告示第 66 号で定められた管理標準[1]（表 2.2）では、エネルギー種別ごとに合理的な運用・維持管理のための「管理」「計測」「保守」「新設時の考慮事項」について制定することを求めている。このことから、管理標準はエネルギー管理を体系的にとらえることができる優れた考え方であると言える。

表 2.1 判断基準項目（省エネ法）

1	燃料の燃焼の合理化<燃焼・燃焼設備>
2	加熱、冷却、伝熱等の合理化<加熱・空調・給湯設備>
3	廃熱の回収設備<廃熱回収設備>
4	熱の動力への変換の合理化等<発電設備・コジェネ設備>
5	放射、電導、抵抗等によるエネルギーの損失の防止<熱の損失・電気の損失>
6	電気の動力、熱等への変換の合理化<電動緑応用・電気加熱・照明設備ほか>

表 2.2 管理標準（燃料の燃焼の合理化）

項目	管理	計測及び記録	保守及び点検	設備新設の措置
1. 燃料の燃焼の合理化	(1) 燃料の燃焼の管理	(2) 燃料の燃焼に関する計測及び記録	(3) 燃焼設備の保守及び点検	(4) 燃焼設備の新設に当たっての措置
	① 燃料の燃焼の管理は、燃料の燃焼を行う設備（以下「燃焼設備」という）及び使用する燃料の種類に応じて、空気比についての「管理標準」を設定して行うこと。	燃焼設備ごとに、燃料の供給量、燃焼に伴う排ガスの温度、排ガス中の残存酸素量その他の燃料の燃焼状態の把握及び改善に必要な事項の計測及び記録に関する管理標準を設定し、これに基づきこれらの事項を定期的に計測し、その結果を記録すること。	燃焼設備は、保守及び点検に関する管理標準を設定し、これに基づき定期的に保守及び点検を行い、良好な状態に維持すること。	① 燃焼設備を新設する場合には、バーナー等の燃焼機器は、燃焼設備及び燃料の種類に適合し、かつ、負荷及び燃焼状態の変動に応じて燃料の供給量及び空気比を調整できるものとする。
	② ①の管理標準は、別表第1(A)に掲げる空気比の値を基準として空気比を低下させるように設定すること。			② 燃焼設備を新設する場合には、通風装置は、通風量及び燃焼室内の圧力を調整できるものとする。
	③ 複数の燃焼設備を使用するときは、燃焼設備全体としての熱効率（投入熱量のうち対象物の付加価値を高めるために使われた熱量の割合をいう。以下同じ。）が高くなるように管理標準を設定し、それぞれの燃焼設備の燃焼負荷を調整すること。			
④ 燃料を燃焼する場合には、燃料の性状に応じて、燃焼効率が高くなるよう燃料の粒度、水分、粘度などについて適切に調整すること。				

しかしながら省エネ法に示される管理標準については具体的な管理方法の記載がなく、エネルギー管理者が管理標準の思想を推察しながら具体的な管理方法を設定しているのが

現状である。従って管理標準の推察においては管理すべき項目が見落とされるという課題とともに、管理標準の思想を忠実に網羅した場合にはエネルギー管理の履行に多大な時間と労力を管理者に課してしまうという課題が生じている。また近年インバータ駆動の冷凍機や送水ポンプにおける末端差圧制御方式など、高度化・複雑化した機器・システムが導入される傾向にある。これらは省エネ化の要求にしたがい導入が進んでいることから、エネルギー管理も高度な管理が要求されている。現状のエネルギー管理は多様なエネルギーと多数の機器を対象としており、膨大な数の管理項目の一つ一つに合理的な判断が要求される困難な業務であることを示している。

しかし現状においては、特定の機器・システムに対してコミッショニングまたはチューニングが非定期に実施される状況に留まっている。またコミッショニング・チューニングの実施者は外部の専門家が行うことが多く、コミッショニングやチューニング結果が建物の設備運転管理者に正確に伝わらず、日々の運用に活かされない状況も多い。

このことからエネルギー管理は全ての機器を対象とした包括的なエネルギー管理手法であり、設備運転管理者が実施可能な管理手法である必要がある。エネルギー管理の目的は「変換過程」「搬送過程」の効率維持であることから、効率を維持するためのエネルギー管理の手順を以下に定義する。

- ①「変換過程」「搬送過程」に関わる機器・システムの選定
- ②選定した機器・システムの効率の定義と効率に影響する要因（以下管理項目）の特定
- ③効率に影響する要因の判断基準値の設定と評価
- ④判断基準値を逸脱した場合の措置の定義

本章では、管理標準の思想を基本とし「変換過程」「搬送過程」の効率的運用を実施するためのエネルギー管理手法について考察する。

2.2 管理対象機器の選定

建物のエネルギー需要種別として電力、空調、給湯・蒸気を取り上げ、エネルギー需要種別ごとに「変換過程」「搬送過程」で効率を管理すべき機器・システムを選定した。表 2.3 に中央熱源システムを有するエネルギー管理指定工場規模の建物が有する機器を示す。ここで発電設備や空調熱源設備は機器本体とともにポンプや冷却塔などの補機から構成されるシステムとして運用される。従って「変換過程」「搬送過程」の管理対象は機器本体とともにシステムとしての評価も必要となる。一方エネルギー管理の対象は「変換過程」「搬送過程」に関わる全ての機器を対象とすべきであるが、エネルギー管理の対象とする機器（表中「○」で表示）と管理対象としない機器（表中「－」で表示）を表 2.3 中の管理対象項目に示す。管理対象としない理由は運用による効率維持や効率改善が困難または改善効果が小さい、あるいは効率を評価する計測が経済上の理由で通常設置されない機器である。具体的には、発電補機は発電機の発熱を廃棄するための機器であることから発電補機自体の効率は発電機本体の効率に影響しない。ファンコイルユニット（以下 FCU）の冷水・温水コイル性能の管理は重要であるが、FCU コイルの冷却・加熱能力は外調機や空調機と比べ

て小さく（通常 1/10 以下）かつ設置台数は外調機や空調機よりも多い（通常 10 倍以上）ため、経済上の理由で FCU コイルの個別能力を評価するための計測器は通常設置されない。給水ポンプや循環ポンプは定格電力量が小さく効率維持による電力削減効果が少なく、熱交換器は伝熱係数を計測するための計測が通常設置されないことから管理対象から除外した。また配電ケーブルは、送電の電力損失がケーブルの抵抗値で決定されるため効率改善の対策ができない。

一方、照明器具は消費電力量当たりの光束（lm/W）が器具自体の変換効率、消費電力量当たりの照度（Lx/kW）がエネルギー管理における効率として定義することができる。しかし照明器具自体の効率は管理による効率改善ができないため管理対象から除外する。また照度は照明の適時点灯管理とともに「需要過程」で管理されていることから管理対象としない。給排気設備のファンの変換効率は消費電力量当たりの送風量（m³/W）で定義できるが、給排気ファン風量は経済上の理由で一般的に計測されないことから、管理対象から除外する。

表 2.3 「変換過程」「搬送過程」の機器・システム

エネルギー 需要種別	設備項目	変換過程			搬送過程		
		機器	備考	管理対象	機器	備考	管理対象
電力	受変電設備	変圧器	三相、単相、スコット変圧器	○	配電ケーブル		—
		進相コンデンサ	高圧コンデンサ	○			
	発電設備	発電機	コージェネレーションシステム	○			
		排熱回収装置	排熱ボイラ	○			
	発電補機	温水循環ポンプ		—			
		冷却水ポンプ		—			
		冷却塔		—			
		熱交換器		—			
	照明設備	照明器具		—			
	空調	熱源設備	水冷式熱源機	電気駆動、燃料駆動、排熱駆動	○	送水ポンプ	冷水ポンプ、温水ポンプ、冷温水ポンプ
空冷式熱源機			電気駆動	○			
ボイラ			温水ボイラ、蒸気ボイラ	○			
熱源補機		一次ポンプ		○			
		冷却水ポンプ		○			
蓄熱設備		蓄熱槽	水蓄熱、水蓄熱槽	○			
		蓄熱ポンプ		○			
		放熱ポンプ		○			
		熱交換器		—			
		空調設備	外調機		○	ファン	給気ファン、還気ファン
空調機		冷水コイル、温水コイル	○				
		ファンコイルユニット		—	ファン	送風ファン	—
		全熱交換器		○			
給排気設備		ファン	給気ファン		—		
	排気ファン			—			
給湯・蒸気	給湯・蒸気設備	蒸気ボイラ		○	送水ポンプ	温水循環ポンプ	—
	ボイラ補機	給水ポンプ		—			

2.2.1 受変電関連機器の効率定義と影響要因

(1) 変圧器

変圧器の効率を式 2.1 に示す。

$$\varepsilon = \frac{W_{inp} - (W_i + W_c \times f^2)}{W_{inp}} \quad (2.1)$$

- ε : 変圧器効率
- W_{inp} : 変圧器一次側電力量(W)
- W_i : 無負荷損(W)
- W_c : 負荷損(W)
- f : 変圧器負荷率 (W_{inp} / 変圧器定格容量 (VA))

変圧器の電力損失は負荷損と無負荷損であり、負荷損失は変圧器の負荷率の2乗に比例し、無負荷損失は通電状態であれば負荷率に関係なく一定である。負荷損及び無負荷損は変圧器ごとに決まった値[2]であるため、変圧器効率の影響要因は変圧器負荷率となる。変圧器の効率が最大となる負荷率は式 2.1 より負荷損と無負荷損が同じになる値である(式 2.2)。

$$f_m = \sqrt{\frac{W_i}{W_c}} \quad (2.2)$$

f_m : 最高効率時の負荷率

変圧器負荷率は電力需要に対応して常に変動するため常時最大効率に運用することはできないが、同仕様の変圧器統合や変圧器が供給する電力負荷の再配分等の運用により各変圧器の年間平均負荷率を式 2.2 に示す最高効率に近づけるように改善することは可能である。従ってエネルギー管理として変圧器の負荷率を管理しておくことは重要である。

一方変圧器においては、電力機器に供給する電圧(以下二次電圧)(低圧:100V、200V、400V)の管理がエネルギー削減には重要である。二次電圧が電力使用機器の要求電圧よりも高い場合は電力使用機器が消費する電力量は増加する。結果的に増加した電力量は必要以上の仕事に消費されるために電力の無駄が生じてしまう。電力損失は式 2.3 に示すように電圧の2乗に比例する(式 2.3)。

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_a}{V_b}\right)^2 \quad (2.3)$$

η : 損失率

V_a : 電力使用機器の要求電圧 (V)

V_b : 変圧器の二次電圧 (V)

反対に電圧が低い場合は電力使用機器が動作不良となることから、二次電圧は配電線路の電圧降下や受電電圧の変動を勘案して、一般的に電力使用機器の要求電圧よりも余裕のある電圧としている場合が多い。一例として要求電圧が100Vの場合の二次電圧は103~110V、200Vの場合は205~215Vなどである。また変圧器の二次電圧は変圧器内の変圧比を選択するタップにより調整することが可能である。二次電圧の管理は変圧器効率には直接関係しないが、変圧器系統ごとに適切な二次電圧で供給することがエネルギーの合理的な使用に寄与することから「変換過程」での管理項目とする。

同様に三相変圧器における各相の二次電圧が同じ電圧(以下三相バランス)となるように管理することについても、電力使用機器が正常に動作するためには重要である。現状に

においては三相変圧器から単相電源を接続して使用するケースも多くあり、三相バランスの悪化による三相モーターの回転ムラ等の不具合が生じ、結果的にエネルギーの無駄につながっている。

(2)進相コンデンサ

進相コンデンサは受電点での力率を調整する機器であり、進相コンデンサ自体に効率の定義はない。しかし受電点での力率管理は遵守すべき事項として省エネ法で要請されているため、進相コンデンサの運用による受電点力率をエネルギー管理項目として策定する。

(3)発電機

一般的に建物で常用発電機として使用されるのはコージェネレーションシステムである。このシステムは発電による電力供給とともに発電に伴い発生する排ガス熱やエンジン冷却熱を回収し、蒸気または温水として供給するものである。従ってコージェネレーションシステムの効率は発電効率と熱回収効率となる。発電効率は入力エネルギーに対する発電量（式 2.4）、熱回収効率は入力エネルギーに対する回収熱量（式 2.5）となるが、発電効率・熱回収効率とも発電負荷率（発電量／定格発電量）に影響する[3]。一般的に発電効率は定格時に最大となり、部分負荷運転になるにしたがい低下する。逆に熱回収効率は部分負荷運転になるにしたがい高くなる。以上のことからコージェネレーションシステムの効率影響要因は発電負荷率となる。

$$\varepsilon_e = \frac{E_{out}}{Q_f} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_h = \frac{Q_h}{Q_f} \quad (2.5)$$

ε_e : 発電効率

ε_h : 熱回収効率

E_{out} : 発電電力量 (MJ/h)

Q_h : 回収熱量 (MJ/h)

Q_f : 入力エネルギー量 (MJ/h)

一方コージェネレーションシステムには回収熱量を廃棄する冷却塔などの補機が付随している。これは回収した熱量に対して、使用する熱需要が少ない場合の熱廃棄のためである。しかし電力需要と熱需要の比率が時刻ごとに変動するため多くの時刻で熱廃棄が生じる[4]。従ってコージェネレーションシステムでは、熱回収効率の他に熱利用効率を定義し（式 2.6）評価すべきである。回収熱量の効率的な利用には、コージェネレーションシステムを含む熱源システム全体の運用にかかわることであるため、熱利用効率の影響要因は熱源システムの運転方策となる。

$$\varepsilon_u = \frac{Q_h - Q_{waste}}{Q_h} \quad (2.6)$$

ε_u : 熱利用効率

Q_{waste} : 廃棄熱量 (MJ/h)

2.2.2 熱源機器・補機の効率定義と影響要因

(1) 水冷式熱源機

水冷式熱源機の効率は Coefficient Of Performance(COP)で評価され、製造熱量に対する入力エネルギーで算出される (式 2.7)。

$$COP = \frac{Q_{sh}}{Q_f} \quad (2.7)$$

Q_{sh} : 製造冷水・温水熱量 (MJ/h)

Q_f : 入力エネルギー量 (MJ/h)

水冷式熱源の COP は熱源機の負荷率 (冷水製造熱量/定格冷水製造能力)、製造する冷水の温度 (以下冷水温度・温水温度を総称して送水温度) 及び冷却水温度により変動する [5]。COP は負荷率が高くなるほど、冷水温度が高くなるほど、冷却水温度が低くなるほど向上する。しかし近年導入事例が多いインバータ駆動式の水冷熱源機では COP が最も高くなる負荷率は冷却水温度毎に異なり、また負荷率毎の COP 推移は非線形 (図 2.1) であることから高効率運転を行うための運転ポイントを見出すのは難しい。

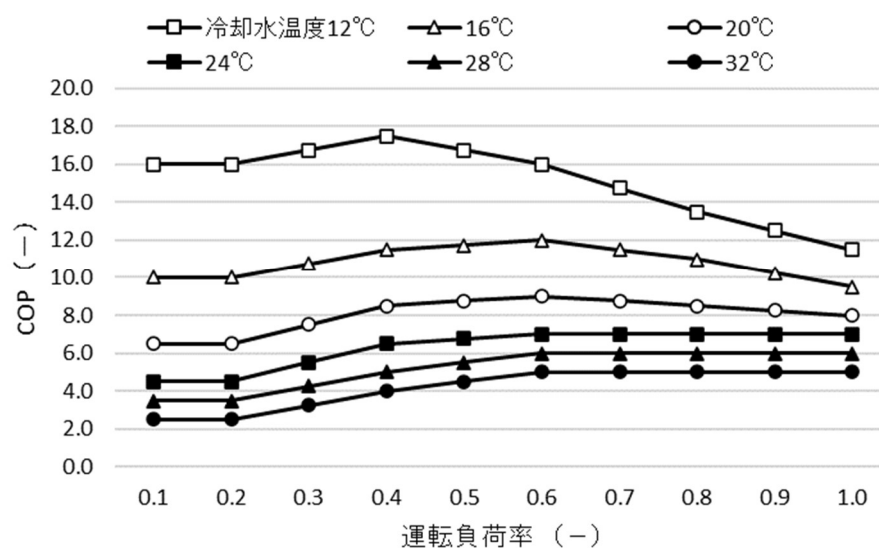


図 2.1 インバータ駆動式ターボ冷凍機の COP 特性

熱源機効率 (COP) の直接的な影響要因は負荷率、送水温度、冷却水温度となるが、各影響要因はその他の要因 (以下間接影響要因) により影響を受ける。図 2.2 に水冷式熱源機の効率に関する要因の関連図を示すが、負荷率は熱源機の運転台数や他の熱源機との運転組合せによる影響を受ける。また送水温度は冷房需要量の大きさに適正な温度が変動するとともに、冷却水温度は外気温度・湿度及び冷房需要量に基づく冷却熱量により影響を受ける。特に冷却水温度に関しては冷却塔自体の冷却性能にも大きく影響を受ける。従って水冷式熱源機の効率を維持するためには直接影響要因の管理とともに、間接影響要因を把握し直接影響要因に与える影響を評価することが重要である。

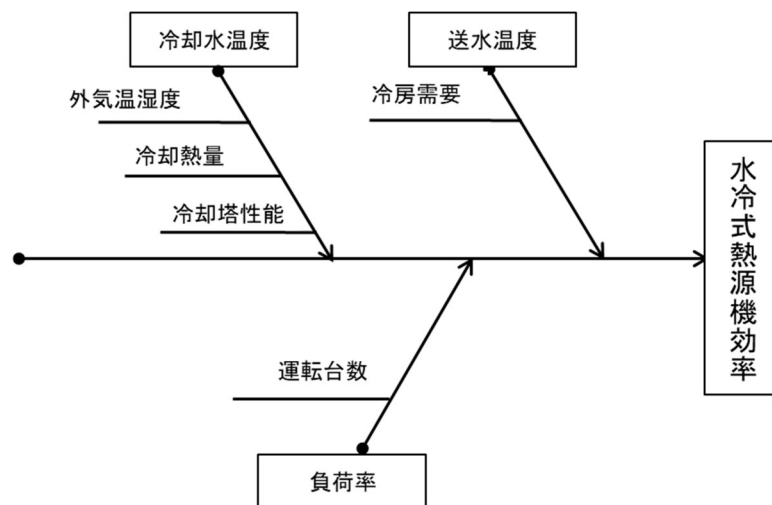


図 2.2 水冷式熱源機効率の影響要因図

(2)空冷式熱源機

空冷式熱源機は水冷式熱源機と異なり空調用温水も製造することが可能であるが、熱源機効率の考え方は水冷式熱源機と同じく式 2.7 で評価できる。また空冷式熱源の COP は熱源機の負荷率（冷温水製造熱量／定格冷温水製造能力）、製造する送水温度及び熱交換温度により変動し[5]、負荷率が高くなるほど、冷水温度が高くなるほど（温水製造時は温水温度が低くなるほど）、熱交換温度が低くなるほど（温水製造時は熱交換温度が高くなるほど）向上する。またインバータ駆動式空冷熱源機では COP が最も高くなる負荷率は熱交換温度毎に異なり、また負荷率毎の COP 推移は非線形である。

ここで熱交換温度とは熱交換器にて冷媒の凝縮を行う媒体の温度であり、通常媒体には外気を用いる。図 2.3 に空冷式熱源機の効率に関する要因の関連図を示す。空冷式熱源機の効率を維持するためには直接影響要因として熱源機負荷率、送水温度及び熱交換温度の管理とともに、間接影響要因として運転台数、冷暖房需要量、熱交換温度、熱交換性能を把握することが重要である。

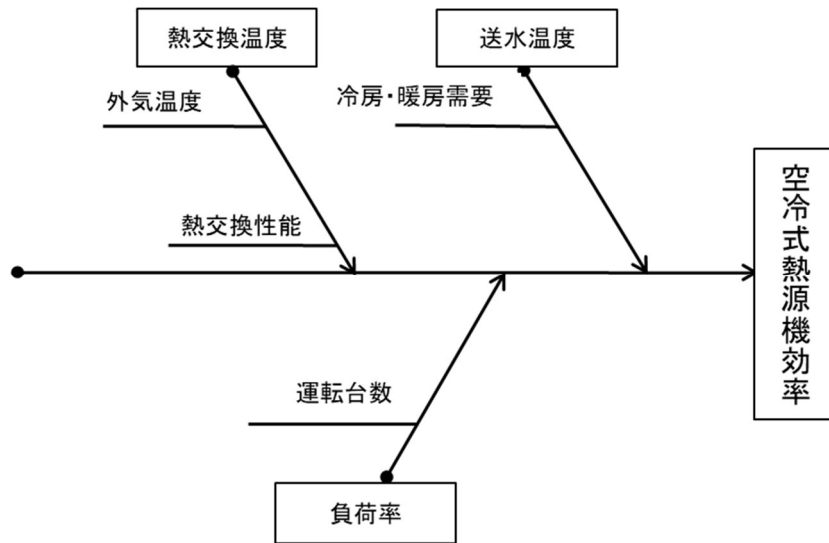


図 2.3 空冷式熱源機効率の影響要因図

(3) ボイラ

ボイラの効率として温水ボイラの効率を式 2.8、蒸気ボイラの効率を式 2.9 に示す。

$$\varepsilon_{hw} = \frac{Q_{hw}}{Q_f} \quad (2.8)$$

ε_{hw} : 温水ボイラ効率
 Q_{hw} : 製造温水熱量 (MJ/h)
 Q_f : 入力エネルギー量 (MJ/h)

$$\varepsilon_{st} = \frac{Q_{st} - (Q_w + Q_d)}{Q_f} \quad (2.9)$$

ε_{st} : 蒸気ボイラ効率
 Q_{st} : 製造蒸気熱量 (MJ/h)
 Q_w : 給水熱量 (MJ/h)
 Q_d : ドレン熱量 (MJ/h)
 Q_f : 入力エネルギー量 (MJ/h)

温水ボイラの効率は温水温度により変動するが、空調用ボイラは温度差での熱利用であり、通常温度差は一定 (5~7°C) であることから温水温度は温水ボイラの効率には影響しない。一方、蒸気ボイラは製造する蒸気圧力によりボイラ効率が変動する。これは空調及び給湯における蒸気が蒸気潜熱利用であることに起因する。つまり蒸気圧力が異なっても蒸気全熱量 (蒸気顕熱と蒸気潜熱の合計) はほぼ同じであるが、蒸気圧力が低いほど多くの蒸気潜熱を得ることができるため (表 2.3)、結果的に蒸気圧力の低減が蒸気ボイラ効率の向上につながる。従って蒸気圧力を適正に管理することが効率向上に大きな影響を与える。ただし蒸気乾き度維持のためメーカー推奨値では蒸気圧力の下限値を 0.5Mpa とし

ている。また蒸気圧力上限値は機器仕様で設定されており、通常の使用圧力は 0.5～0.8Mpa である。この圧力範囲での適正な蒸気圧力は蒸気配管内の蒸気流速の基準値により求めることができる。すなわち蒸気は圧力により比容積が異なるため、蒸気需要量が少ない場合は蒸気圧力を低減して比容積を大きくすることにより蒸気流速を早くすることが可能である。一方蒸気需要量が多い場合には蒸気圧力を高くし、比容積を小さくすることにより蒸気流速を遅くする。従って蒸気流速を一定値に管理することにより蒸気需要量に対応して蒸気圧力を管理することが可能である。式 2.10 に蒸気流速の算出式を示す。

表 2.3 蒸気圧力と蒸気潜熱

絶対圧力 MPa	ゲージ圧		蒸気全熱 kJ/kg	蒸気潜熱 kJ/kg
	MPa	kg		
0.2	0.10	0.97	2,706.3	2,201.6
0.3	0.20	1.95	2,724.7	2,163.2
0.4	0.30	2.93	2,737.6	2,133.0
0.5	0.40	3.91	2,747.5	2,107.4
0.6	0.50	4.89	2,755.5	2,085.0
0.7	0.60	5.87	2,762.0	2,064.9
0.8	0.70	6.85	2,767.5	2,046.5
0.9	0.80	7.83	2,772.1	2,029.5

$$S_{st} = \frac{Q_s \times V_s}{S_p \times 3600} \quad (2.10)$$

ε_{st} : 蒸気流速(m/s)
 Q_s : 蒸気流量 (kg/h)
 V_s : 比容積 (m³/kg) @蒸気圧力
 S_p : 蒸気配管断面積 (m²)

またボイラは燃焼機器であることから燃焼に係る損失を低減することが効率向上には重要である。ここで燃焼に係る損失は燃焼用酸素の取入れ量により調整することが可能であり、燃焼用酸素の取入れ量は排ガス中の残留酸素濃度で管理を行う。また燃焼に係る損失は排ガス温度が高いほど損失量も大きくなる。従ってボイラの効率を維持するためには蒸気圧力、残留酸素濃度及び排ガス温度の管理となる。燃焼に係る損失の管理は燃焼を伴う温水ボイラや燃料駆動の空調熱源機にも同様に必要である。

(3)ポンプ (一次ポンプ、冷却水ポンプ、蓄放熱ポンプ、二次ポンプ)

ポンプ効率は WTF (Water Transportation Factor) と称し電力消費量当たりの送水流量で評価する。

$$WTF = \frac{Q_{water}}{E_p} \quad (2.11)$$

Q_{water} : 送水流量 (m³/min)
 E_p : 電力消費量 (kWh)

一方式 2.12 にポンプの消費電力量[6]を示すが、式 2.12 より流量と消費電力量の比 (WTF) は揚程に反比例することから WTF の影響要因は圧力となる。ポンプ圧力は吐出バルブでの流量調整に加え、配管抵抗、水・冷媒の汚れ等により変動する。ここで送水配管系統が閉回路の場合の圧力は、ポンプ差圧 (吐出圧力-吸込み圧力) で管理する。

$$E_p = \frac{H \times Q_{water}}{6.12 \times \eta_p} \quad (2.12)$$

H : 揚程 (m)
 Q_{water} : 送水流量 (m³/min)
 η_p : ポンプ効率

(4) 冷却塔

一般的に冷却塔の効率は提案されていない。しかし冷却塔は外部に設置されており、ファンモータや駆動ベルトの劣化による風量減少、充填材の汚れや破損、落ち葉等による冷却水の詰まり等が発生する懸念が常にある。また設置環境によっては冷却塔自身の排気を再吸入するショートサーキットを生じる可能性もある。このような状況が発生すると冷却塔の冷却性能が低下する要因になることから冷却塔の効率を評価することが重要である。冷却塔効率を式 2.13 に提案する。

$$\varepsilon_{ct} = \frac{Q_{ct}}{E_{fan}} \quad (2.13)$$

ε_{ct} : 冷却塔効率
 Q_{ct} : 冷却熱量 (MJ/h)
 E_{fan} : 冷却塔ファン電力量(kWh)

一方、冷却水温度は水冷熱源機の COP に大きな影響を与えることから冷却塔の効率とともに性能管理が重要である。性能管理は冷却時の外気温度・湿度及び冷却熱量における冷却水温度下限値に対する現状の冷却水温度を評価するものである。冷却塔性能は効率と同じ要因に影響されることから、冷却塔効率及び性能の影響要因は充填材の汚れ、破損、冷却水の詰まり、ショートサーキット、ファン風量となる。またこれらの影響要因は機器運用ではなく機器保守・メンテナンスによる管理となる。ここで一般的にファン風量の計測は困難であることから式 2.14 を用い、ファン全圧が一定としてファン風量は消費電力量により管理する。

$$E_f = \frac{P_f \times Q_{fan}}{6000 \times \eta_f} \quad (2.14)$$

E_f : ファン電力量 (kWh)
 P_f : ファン全圧 (Pa)
 Q_{fan} : 送風量 (m³/min)
 η_f : ファン効率

(5)蓄熱槽

蓄熱槽の効率は蓄熱量に対する残蓄熱量と放熱量を用いて評価し（式 2.15）、蓄熱量は1日の積算蓄熱量、残蓄熱量は1日の積算蓄熱量か1日の積算放熱熱量と損失熱量の合計を差し引いた熱量である。

$$\varepsilon_{st} = \frac{Q_{rest} + Q_{use}}{Q_{st}} \quad (2.15)$$

ε_{st} : 蓄熱槽効率
 Q_{rest} : 残蓄熱量 (MJ/day)
 Q_{use} : 日積算放熱熱量 (MJ/day)
 Q_{st} : 日積算蓄熱量 (MJ/day)

蓄熱槽は壁体の断熱劣化、漏水により損失熱量が増加し、蓄熱効率が低下する。従って蓄熱槽効率の影響要因として断熱劣化・漏水を管理する。またこれらの影響要因は機器保守・メンテナンスによる管理となる。

2.2.3 空調機・外調機の効率定義と影響要因

(1)空調機・外調機

空調機は空調機コイル及び送風機で構成されることから、空調機効率は入力エネルギー（ファン電力量と冷温水供給熱量）と出力エネルギー（送風熱量）の比で評価するのが妥当である。しかし空調コイルは水と空気の熱交換器であり通常熱交換効率はコイルの伝熱係数として評価することから、空調機は変換過程での効率管理としてコイルの伝熱係数、搬送過程での効率管理として送風機の効率を評価する。

空調機コイルの伝熱係数は式 2.16 から求めるが、伝熱係数はコイルの汚れ、破損により低下する。従って空調機コイルの影響要因は保守・メンテナンスの対象としてコイルの汚れ、破損を管理する。

$$K_f = \frac{Q_{sh}}{S \times dT \times 3.6 \times 1000} \quad (2.15)$$

K_f : 伝熱係数 (W/m²・dT)
 Q_{sh} : 冷水・温水熱量 (MJ/h)
 S : 空調機コイル面積 (m²)
 dT : 対数温度差

$$dT = \frac{(T_o - t_i) - (T_i - t_o)}{\ln \{(T_o - t_i) / (T_i - t_o)\}}$$

T_o : 給気温度 (°C)
 T_i : 還気温度 (°C)
 t_o : 冷水・温水入口温度 (°C)
 t_o : 冷水・温水出口温度 (°C)

ファン効率は ATF (Air Transportation Factor) と称し電力消費量当たりの送風量で評

価する (式 2.16)。

$$ATF = \frac{Q_{fan}}{E_f} \quad (2.16)$$

Q_{fan} : 送風流量 (m³/h)
 E_f : 電力消費量 (kWh)

空調ファンの消費電力量は式 2.14 であり、風量と電力量の比 (ATF) は全圧に反比例することから WTF の影響要因は全圧となる。ファンもポンプと同様のファン特性があり、風量が増えると全圧が下がる下降曲線となる [7]。ファン全圧はダンパでの風量調整に加え、ダクト抵抗、フィルタの汚れ等により変動する。

(2) 全熱交換器

全熱交換器の熱交換効率を式 2.17 に示す。

$$\varepsilon_{hex} = \frac{|Q_{ret} \times (Ent_r - Ent_e)|}{|Q_{sup} \times (Ent_o - Ent_s)|} \quad (2.17)$$

ε_{hex} : 全熱交換効率
 Q_{ret} : 還気風量 (m³/h)
 Q_{sup} : 給気風量 (m³/h)
 Ent_r : 還気エンタルピ (kJ/kgDA)
 Ent_e : 廃気エンタルピ (kJ/kgDA)
 Ent_o : 外気エンタルピ (kJ/kgDA)
 Ent_s : 給気エンタルピ (kJ/kgDA)

熱交換効率は全熱交換器の劣化や汚れにより低下することから、全熱交換器の熱効率の影響要因は保守・メンテナンスの対象として劣化、汚れ、破損を管理する。

2.2.4 システムの効率定義と影響要因

(1) 送水ポンプシステム

空調用冷水・温水の二次ポンプを対象とした複数のポンプで構成されたポンプシステムの効率を評価する。二次ポンプ個々の効率は式 2.11 と同じであり、効率の影響要因は圧力である。一方ポンプシステムには、ポンプ群として協調動作するための制御システムが導入されている。制御システムには運転台数制御、変流量制御があり、変流量制御には吐出圧一定制御、推定末端圧制御、末端圧制御がある [8]。

送水ポンプシステムの効率も式 2.11 で定義するが、ポンプシステムの電力消費量は制御システムの設定値により変動する。つまり運転台数制御は送水流量に対応して運転するポンプ台数を自動で選択する制御であり、制御設定値であるポンプの運転台数設定値が適正でない場合はポンプ運転台数が必要以上に多くなり消費電力も増加する。また変流量制御では設定した吐出圧力または末端差圧制御値に対応して必要な送水圧力で送水する制御方法であるが、吐出圧力や末端差圧制御値が適正でない場合も送水圧力が増加し、ポンプの消費電力量が増加する。これらの制御方式は最先端の省エネシステムであり導入事例も多いが、制御設定値が適正ではない場合がほとんどであり多くの場合において省エネ運

用とはなっていない。このことから送水ポンプシステムの WTF の影響要因として制御システムにおける制御設定値を管理する必要がある。

(2) 熱源システム

熱源機は一般的に複数台数設置され、また水冷式熱源機や空冷式熱源機などの異機種・異容量の熱源機及び冷却塔やポンプなどの補機が組み合わせられ熱源システムとして運用される。式 2.18 に熱源システムの効率、図 2.4 に熱源システムの効率的運用に関する影響要因図を示すが、熱源システムは個々の熱源機の効率管理とともに熱源システムとしての効率的運転が要求される。補機は熱源機と連動運転されるものの、熱源自体の運転は設備運転管理者または台数運転制御システム、熱源機運転順位制御[9]の制御システムにより運転される。熱源機器が最高効率で運転される負荷率、送水温度、冷却水温度、熱交換温度は機器毎に相違する[5]ことから、熱源システムにおいて運転する熱源機台数や運転する熱源機を選択を適切に行うことが高効率に運用には重要である。

$$\varepsilon_{sys} = \frac{Q_{sh}}{Q_f + E_s} \quad (2.18)$$

E_{sys} : 熱源システム効率

Q_{sh} : 製造冷水・温水熱量 (MJ/h)

Q_f : 熱源機入力エネルギー量 (MJ/h)

E_s : 熱源機補機電力量 (MJ/h)

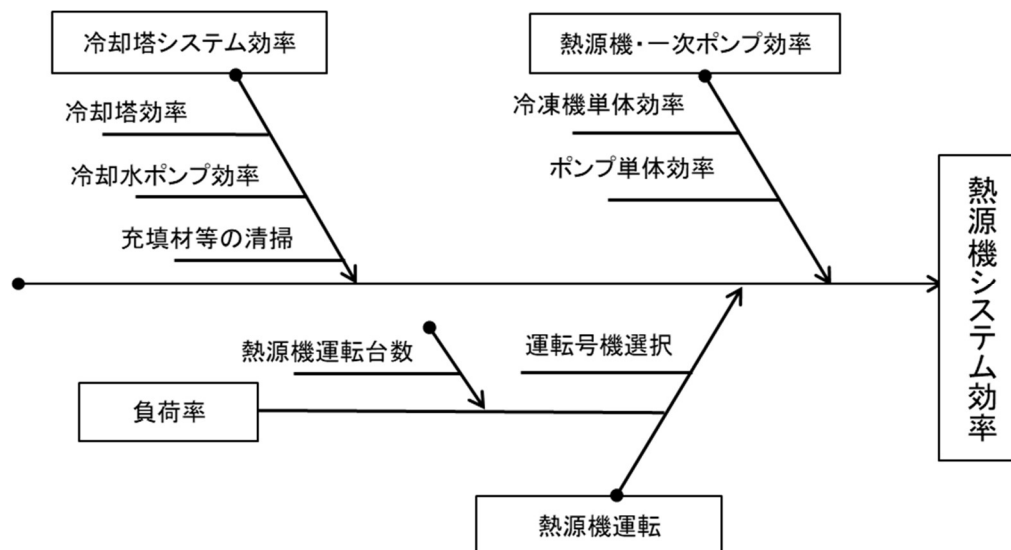


図 2.4 熱源システム効率の影響要因図

以上の考察から「変換過程」「搬送過程」における機器及びシステムの効率管理のための管理項目を省エネ法の判断基準番号[1]とともに表 2.4 に示す。

表 2.4 「変換過程」「搬送過程」における機器の効率管理のための管理項目

エネルギー 需要種別	設備項目	機器・システム	効率の管理項目		省エネ法判断基準番号
			運用項目	保守・メンテナンス項目	
電力	受変電設備	変圧器	負荷率	—	(5-2)①ア
			二次電圧	—	(5-2)①イ
			三相バランス	—	(5-2)①オ
	発電設備	進相コンデンサ	受電点力率	—	(5-2)①ウエ
			発電設備	—	—
空調	熱源設備	水冷式熱源機 (電気駆動)	送水温度	—	(2-2)①ウ
			冷却水温度	—	
			—	—	
		水冷式熱源機 (燃料駆動)	送水温度	—	
			冷却水温度	—	
			—	—	
	熱源補機	ポンプ(一次、冷却水、蓄放熱、二次)	流量(消費電力量)	—	(6-1)①ウカ
			送水差圧	—	
			ファン風量(消費電力量)	—	
	蓄熱設備	蓄熱槽 (氷蓄熱、水蓄熱)	断熱劣化	—	(2-2)③ア
			漏水	—	
			空調コイル	—	
	空調設備	ファン	フィルターの詰まり	—	(6-1)①ア
			ダクトの汚れ	—	
			劣化・汚れ・破損	—	
送水ポンプシステム	制御設定値 (運転管理値)	全圧	—	(2-2)③ア	
		吐出圧力、末端差圧	—	(6-1)①イ	
熱源システム	制御設定値 (運転管理値)	運転台数	—	(1)①アイ	
		運転熱源機選択	—	(2-2)①エオカ	
給湯・蒸気	給湯・蒸気設備	蒸気ボイラ	蒸気圧力	—	(1)①アイ
			—	—	(1)①アイ

注：判断基準番号は工場（専ら事務所その他これに類する用途に供する工場等を除く）におけるエネルギーの使用の合理化に関する事項に準ずる

2.3 管理項目の計測と判断基準

エネルギーデータは中央監視装置（BAS：Building Automation System）あるいはBEMS(Building Energy Management System)により毎時計測・収集されている。しかし現状においては電力やガス使用量などのエネルギー供給量を管理するためのデータ、室内温度・湿度などのエネルギー需要を管理するためのデータ取得が主体となっており、機器・システムの効率管理を評価するデータについては十分な計測・収集が実施されていない。このことは表 2.4 に示す機器・システムの効率管理項目についての整理がなされていないことも一因と考えられる。本節では表 2.4 に示す各管理項目を評価するための計測項目、管理項目の合理性を判断するための基準値及び判断基準を逸脱した場合の対応について考察した。

2.3.1 管理項目と計測

各機器・システムの各管理項目における計測項目及び管理項目を評価するための計算式を表 2.5 に示す。

表 2.5 各機器・システムの管理項目に対する計測項目及び計算式

(a)変圧器・進相コンデンサ

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考
変圧器 (変圧器効率)	負荷率	—	—	変圧器電力÷定格容量
	二次電圧	—	—	Ave(各相電圧)
	三相バランス	—	—	(Max(各相間電圧)－Min(各相間電圧))÷Ave(各相間電圧)
	変圧器電力		kVA	Ave(各相電圧) × Ave(各相電流) × √3/1000
	R-S電圧(二次電圧)		V	単相変圧器の場合 R-T電圧、S-T電圧、R相電流、S相電流
	S-T電圧(二次電圧)		V	
	R-T電圧(二次電圧)		V	
	R相電流		A	
S相電流		A		
進相コンデンサ	受電点力率	力率	%	

(b)コージェネレーションシステム

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考
コージェネレーションシステム (発電効率) (熱回収効率) (熱利用効率)	発電負荷率	—	—	発電量÷定格容量
	熱源システム運転方針	—	—	
	燃料消費量		☆	☆: 燃料種類ごとの単位
	発電量		kWh	
	熱回収量(温水+蒸気)		MJ/h	
	冷却塔廃棄熱量		MJ/h	冷却水流量 × (冷却水往き温度－冷却水還り温度) × 4.186
	冷却水往き温度		°C	
	冷却水還り温度		°C	
		冷却水流量	m ³ /h	

(c)水冷式熱源機

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考
水冷式熱源機 (COP)	運転負荷率	—	—	製造熱量÷定格容量
	送水温度	—	°C	
	冷却水温度	—	°C	
	送水温度		°C	
	冷却水温度		°C	
	製造熱量		MJ/h	(送水温度－還り温度) × 送水流量 × 4.186
	電力消費量		kWh	電力駆動熱源機
	燃料消費量		☆	☆: 燃料種類ごとの単位(燃料駆動熱源機)
	還り温度		°C	
	送水流量		m ³ /h	
	残留酸素濃度		%	メンテナンスデータ
排ガス温度		°C	(燃料駆動の熱源機のみ)	

(c)空冷式熱源機

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考
空冷式熱源機 (COP)	運転負荷率	—	—	製造熱量÷定格容量
	送水温度	—	°C	
	熱交換温度	—	°C	
	送水温度		°C	
	熱交換温度		°C	
	製造熱量		MJ/h	(送水温度－還り温度) × 送水流量 × 4.186
	電力消費量		kWh	電力駆動熱源機
	燃料消費量		☆	☆: 燃料種類ごとの単位(燃料駆動熱源機)
	還り温度		°C	
	送水流量		m ³ /h	

(d) 温水ボイラ

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考	
温水ボイラ (ボイラ効率)		製造熱量	MJ/h	$(\text{温水出口温度} - \text{温水戻り温度}) \times \text{温水循環流量} \times 4.186$	
		燃料消費量	☆		☆: 燃料種類ごとの単位 (燃料駆動熱源機)
		温水出口温度	°C		
		温水戻り温度	°C		
		温水循環流量	m ³ /h		
	残留酸素濃度	—	%	メンテナンスデータ	
排ガス温度	—	°C			

(e) 蒸気ボイラ

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考	
蒸気ボイラ (ボイラ効率)	蒸気流速	—	m/s	式2.10参照	
	(蒸気圧力)	—	Mpa		
		製造熱量	MJ/h	蒸気流量 × 蒸気比エンタルピ (MJ/kgDA) @ 蒸気圧力	
		蒸気流量	kg/h		
		給水熱量	MJ/h		給水量 × (給水温度 - 0°C) × 4.186
		ドレン熱量	MJ/h		ドレン流量 × (ドレン温度 - 給水温度)
		燃料消費量	☆		☆: 燃料種類ごとの単位 (燃料駆動熱源機)
	蒸気圧力	Mpa			
	給水温度	°C			
	給水量	m ³ /h			
	ドレン流量	m ³ /h			
	ドレン温度	°C			
	残留酸素濃度	—	%	メンテナンスデータ	
排ガス温度	—	°C			

(f) ポンプ (一次、冷却水、蓄放熱、二次)

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考	
各種ポンプ (WTF)	流量	—	m ³ /h		
	送水差圧	—	kPa	吐出圧力 - 吸込み圧力	
		ポンプ電力消費量	kWh		
		送水流量	m ³ /h		ポンプ消費電力量で評価可能
		吐出圧力	kPa		
	吸込み圧力	kPa			

(g) 冷却塔

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考
冷却塔 (冷却塔効率)	ファン風量	—		
		冷却熱量	MJ/h	$(\text{冷却水還り温度} - \text{冷却水行き温度}) \times \text{流量} \times 4.186$
		冷却ファン電力量	kWh	
		冷却熱量	MJ/h	
		冷却水行き温度	°C	
		冷却水還り温度	°C	
		冷却水流量	m ³ /h	
	ショートサーキット	—	kJ/kg	冷却塔周囲比エンタルピー - 外気比エンタルピー
		冷却塔周囲比エンタルピー	kJ/kg	冷却塔周囲温度・湿度より計算
		冷却塔周囲温度	°C	
	冷却塔周囲相対湿度	%Rh		
充填材汚れ破損	—	—	メンテナンスデータ	
冷却水詰り	—	—		

(h) 蓄熱槽

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考
蓄熱槽 (蓄熱槽効率)	壁体の断熱	—	—	メンテナンスデータ
	漏水	—	—	
		蓄熱熱量	MJ/h	
		使用熱量	MJ/h	
	残蓄熱量	MJ/h		

(i)空調機コイル

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考
空調機コイル (伝熱係数)	コイルの汚れ	—	—	メンテナンスデータ
	コイルの破損	—	—	
	空調熱量		MJ/h	ABS(冷温水出口温度－冷温水入口温度)×冷温水流量×4.186
	冷温水流量		m ³ /h	
	コイル入口温度		°C	
	コイル出口温度		°C	
	冷温水入口温度		°C	
冷温水出口温度		°C		

(j)空調機ファン

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考	
空調機ファン (ATF)	ファン風量	—	m ³ /h		
	全圧	—	Pa		
	ファン電力量	ファン電力量		kWh	ファン消費電力量で評価可能
		ファン風量		m ³ /h	
		フィルター差圧		Pa	
	フィルター詰り	—	—	メンテナンスデータ	
	ダクトの汚れ	—	—		

(k)全熱交換器

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考	
全熱交換器 (熱交換効率)	ロータの汚れ	—	—	メンテナンスデータ	
	ロータ・モータ破損	—	—		
	還気風量	還気風量		m ³ /h	
		給気風量		m ³ /h	
		還気温度		°C	
		還気相対湿度		%Rh	
		給気温度		°C	
		給気相対湿度		%Rh	

(l)送水ポンプシステム

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考	
送水ポンプシステム (WTF)	運転台数	—	台		
	送水差圧	—	kPa		
	全体送水流量	全体送水流量		m ³ /h	
		全体電力量		kWh	
		吐出圧力		kPa	
		吸込み圧力		kPa	

(m)熱源システム

機器・システム (機器効率)	管理項目	計測項目	単位	計算式／備考	
熱源システム (熱源システム COP)	運転台数	—	台		
	運転熱源機選択	—	kPa		
	運転台数	運転台数		台	
		運転熱源機		—	
		全体製造熱量		MJ/h	
		全体エネルギー消費量		MJ/h	
		全体補機電力量		kWh	

注：Max は最大値、Min は最小値、Ave は平均値、ABS は絶対値を表す

2.3.2 管理項目と判断基準値

各機器・システムの効率及び各管理項目が合理的な状態であると評価するための判断基準値及び判断基準値を逸脱した場合の対応策について表 2.6 に示す。ここで判断基準値には外部条件の変動とは連動せずに一定となる値と、外部条件に応じて基準値が変わる値がある。外部条件に対して一定となる判断基準値は機器・システムの仕様値や推奨値を用い、

外部条件に応じて基準値を変える必要のある管理項目についてはシミュレーションによる判断基準値の算出方法を検討した。実際のエネルギー管理においては、判断基準値は建物ごとの実情に合わせた値に設定する必要があるとともに、判断基準値に上下限の管理幅を設ける必要がある。同様に逸脱時の対応についても建物の管理状況に応じて設定する必要があることから、表 2.6 の判断基準値及び逸脱時の対応は参照値とする。

表 2.6 管理項目と判断基準値及び逸脱時の対応

(a)変圧器・進相コンデンサ

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
変圧器	負荷率	負荷損失と無負荷損失が同じとなる負荷率	式2.2参照	同仕様の変圧器の統廃合による変圧器負荷率の改善及び変圧器に接続されている電力負荷の再配分を行う
	二次電圧	機器仕様電圧+配電線路の降下電圧	受電電圧の変動率を考慮する	変圧器の変圧比タップの調整により二次電圧を変更する
	三相バランス	3%以下	三相不平衡率3.5%で誘導電動機の損失が20%[10]	三相変圧器に接続されている単相負荷の取り外しを行う
進相コンデンサ	受電点力率	進み95%～遅れ95%	省エネ法要請値[1]	進相コンデンサの投入・解列を行う

(b)コージェネレーションシステム

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
コージェネレーションシステム	発電負荷率	シミュレーション値	熱源システム全体の運用で評価	熱源システム全体効率が最大となる運転台数に調整する

(c)水冷式熱源機

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
水冷式熱源機	運転負荷率	シミュレーション値	熱源システム全体の運用で評価	熱源システム全体効率が最大となる運転台数及び運転熱源機を選択する
	送水温度	シミュレーション値	空調機負荷率により最適送水温度を評価	熱源機の送水温度を最適値に設定する
	冷却水温度	シミュレーション値	外気温度・湿度、冷却熱量により評価	シミュレーション計算された冷却水温度以下となるようにファン発停温度の設定、冷却塔の保守を行う

(c)空冷式熱源機

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
空冷式熱源機	運転負荷率	シミュレーション値	熱源システム全体の運用で評価	熱源システム全体効率が最大となる運転台数及び運転熱源機を選択する
	送水温度	シミュレーション値	空調機負荷率により最適送水温度を評価	熱源機の送水温度を最適値に設定する
	熱交換温度	外気温度	-	熱交換部の温度が外気温度となるように、ショートサーキットの改善を行うとともに、熱交換フィン清掃を行う

(d)温水ボイラ

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
温水ボイラ	残留酸素濃度 排ガス温度	3~5% (機器仕様による) 170~200℃ (機器仕様による)	省エネ法要請値[1]	保守・メンテナンス時に燃焼風量の調整を行うとともに炉体内部の清掃を行う

(e)蒸気ボイラ

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
蒸気ボイラ	蒸気流速	30m/s	-	蒸気圧力を調整する
	残留酸素濃度 排ガス温度	3~5% (機器仕様による) 170~200℃ (機器仕様による)	省エネ法要請値[1]	保守・メンテナンス時に燃焼風量の調整を行うとともに炉体内部の清掃を行う

(f)ポンプ (一次、冷却水、蓄放熱、二次)

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
ポンプ(一次、冷却水、蓄放熱、二次)	流量	設計仕様による	-	吐出バルブまたはインバータ周波数を調整する
	送水差圧	設計仕様による	-	配管内汚れ・詰りの確認及び吐出バルブ開度を調整する

(g) 冷却塔

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
冷却塔	ファン風量	設計仕様による	—	ファンの保守・メンテナンスを行う
	ショートサーキット	10kJ/kg以下	外気エンタルピと充填材吸込み空気エンタルピの差	ショートサーキットの要因解除(ファン排出空気の排気経路の確保、エアコン室外機の設置位置変更等)
	充填材汚れ破損	—	—	保守・メンテナンス時に充填材等の清掃、補修を行う
	冷却水詰り	—	—	

(h) 蓄熱槽

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
蓄熱槽	壁体の断熱 漏水	— —	— —	保守・メンテナンス時に断熱・漏水等の補修を行う

(i) 空調機コイル

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
空調機コイル	コイルの汚れ コイルの破損	— —	— —	保守・メンテナンス時にコイルの清掃、補修を行う

(j) 空調機ファン

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
空調機ファン	ファン風量	設計仕様による	—	ファンの保守・メンテナンスを行う
	全圧	設計仕様による	—	保守・メンテナンス時にフィルター・ダクトの清掃、補修を行う
	フィルター詰り	—	—	
	ダクトの汚れ	—	—	

(k) 全熱交換器

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
全熱交換器	ロータの汚れ ロータ・モータ破損	— —	— —	保守・メンテナンス時に全熱交換ロータ及び電動機部の清掃、補修を行う

(l) 送水ポンプシステム

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
送水ポンプシステム	運転台数	1台当たりの送水量から算出(送水差圧に対応した送水量)	運転台数管理値 台数制御設定値	現状の送水差圧に対応したポンプ1台当たりの送水量を能力特性図から求め、ポンプ増段流量を設定する 末端差圧及び配管抵抗を確認し制御設定値を調整する
	送水差圧	末端差圧+配管抵抗	変流量制御設定値	

(m) 熱源システム

機器・システム	管理項目	判断基準値	備考	逸脱時の対応
熱源システム	運転台数 運転熱源機選択	シミュレーション値	熱源システム全体の運用で評価	熱源システム全体効率が増大となる運転台数・運転熱源機選択となるように運用する

エネルギー管理の手順である①管理すべき機器の選定②効率に影響する要因の特性(管理項目)③影響要因の判断基準値及び④基準値を逸脱した場合の対応を表2.4～表2.6に示した。逸脱時の対応はすなわち省エネ対策であることから、表2.4～表2.6に示す管理を毎時刻実施することで常に合理的な運用が実施され、「変換過程」「搬送過程」が高効率に維持される。また建物のエネルギー需給は時々刻々と変動することから、エネルギー管理もエネルギー需給の変動に対応して10分から1時間の頻度で実施する必要があると考える。

2.4 合理性判断のためのシミュレーター開発

表2.6に示すように①冷却塔で冷却される冷却水温度②熱源機の送水温度③コージェネレーションを含む熱源システムの運用については外部条件に応じて判断基準値を変える必要がある。ここで外部条件は時刻ごとに非定常に変化し、判断基準に関係する外部条件の数も多い。さらに機器性能や制御システムが高度化・複雑化していることから、エネルギー管理者が判断基準値を毎時刻評価することが困難である。このことから冷却水温度、送水温度及び合理的熱源運転の判断基準値を算出するためのシミュレーターを開発する。

一方室内温度は需要過程における管理事項であるが、室内温度の設定が空調需要量に影響し結果的に空調に関わる機器・システムの効率に大きく関係することから時刻ごとの判断基準値を設定する。従って室内設定温度の予測シミュレーターについても検討を行う。

2.4.1 冷却水温度シミュレーター

水冷式熱源機の冷却水は冷却塔を用いて冷却するのが一般的である。また冷却塔で冷却される冷却水温度（以下冷却水温度）は簡易的には外気湿球温度を参照した温度で評価する場合が多い[11,12]。しかし冷却水温度は外気温度・湿度とともに冷却塔の処理熱量により変動する。従って外気湿球温度あるいは外気比エンタルピと冷却塔の冷却能力の関係を整理して冷却水温度を求める[11]だけでは熱源機の冷却水温度を正しく求めることはできない。そこで一般に使用されている対向流型冷却塔を対象とし、冷却塔の仕様条件を設定した上で冷却塔の冷却水温度を外気温度・湿度及び冷却熱量から冷却水温度を算出するシミュレーターを開発する。

冷却塔の冷却水温度の算出には移動単位数（以下 NTU : Number of Transfer Unit）を用いた研究[13]が提案されているが、本研究では NTU の代わりに TPF（以下 TPF : Tower Performance Factor）を用いた。ここで TPF は NTU を冷却水流量（L : kg/h）と風量（G : kgDA/h）（L/G）との比で除した値と同じである。さらに本シミュレーターでは計算条件として各充填材の高さにおける伝熱係数と L/G は一定として取り扱った。

式 2.19～式 2.22 に対向流式冷却塔の TPF を導出するための式を示す。各式は対向流型冷却塔における空気と水の熱移動の関係を表しており、図 2.5 に冷却塔における各式に関する状態の概略図を示す。

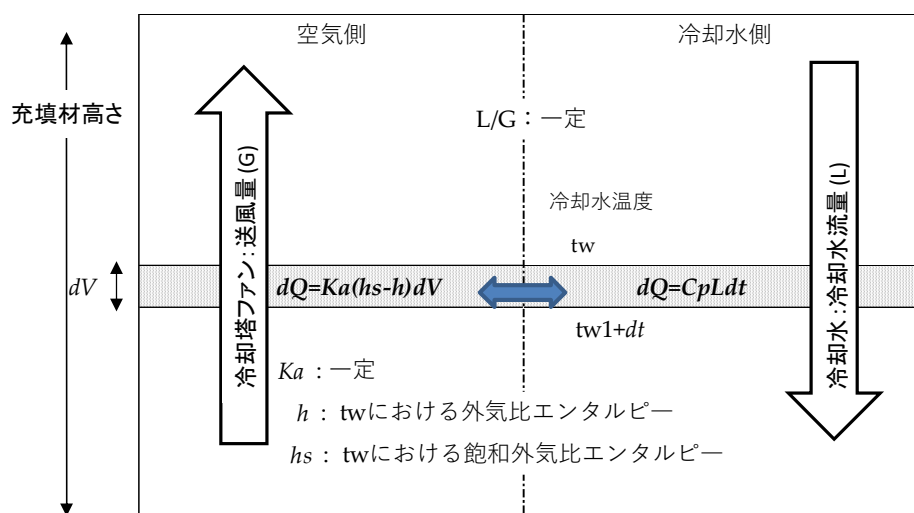


図 2.5 対向流式型冷却塔の状態略図

冷却塔の冷却空気と水の熱交換量は冷却水温度と同じ温度の飽和空気比エンタルピと周囲空気の比エンタルピの差に比例することから、送風空気における熱交換量は式 2.19 となる。一方冷却水の熱交換量は式 2.20 となる。ここで空気側と冷却水側の熱交換量は同じであるため式 2.19 と式 2.20 から式 2.21 が得られる。TPF は式 2.21 を式 2.22 に変形した後、充填物高さについて積分して求めた値であり式 2.23 で表される。

$$dQ = Ka(h_s - h) dV \quad (2.19)$$

$$dQ = CpLdt \quad (2.20)$$

$$Ka(h_s - h) dV = CpLdt \quad (2.21)$$

$$\frac{KadV}{L} = \frac{Cpdt}{(h_s - h)} \quad (2.22)$$

dQ : 熱交換量 (kJ/h)

Ka : 伝熱係数 (kJ/m³・h・△h) △h=(h_s-h)

h_s : 冷却水温度(T_w)と同じ空気温度における飽和空気の比エンタルピ° (kJ/kgDA)

h : 冷却水温度(T_w)と同じ空気温度における空気比エンタルピ° (kJ/kgDA)

V : 充填物容量 (m³)

L : 冷却水量 (kg/h)

Cp : 水の比熱=4.186 (kJ/kg)

$$TPF = \frac{KaV}{L} = \int_{tw_1}^{tw_2} \frac{-Cp}{h_s-h} dt \quad (2.23)$$

tw_1 : 設計冷却水入口温度 (°C)

tw_2 : 設計冷却水出口温度 (°C)

図 2.6 に TPF に関する諸量の関係を冷却水温度と空気比エンタルピの関係として示す。図 2.6 (以下 t-h 線図) に示す操作線は A 点 (冷却水入口温度と出口空気の比エンタルピの交点) と B 点 (冷却水出口温度と入口空気比エンタルピの交点) を結んだ線であり、傾きは L/G となる。

式 2.23 より TPF は操作線上の点における空気比エンタルピ (図 2.6 中 h と表示) とその温度における飽和空気比エンタルピ (図 2.6 中 h_s と表示) の差の逆数を冷却水出口温度から入口温度まで積算した値である。式 2.23 及び図 2.6 に示す諸量に関しては、冷却塔の製品仕様として入口空気の温度・湿度、定格送風量、定格流量、冷却水の出口・入口温度及び冷却塔の定格処理熱量が開示されている。また出口空気比エンタルピは冷却塔の定格処理熱量を定格送風量で除することにより計算で求められることから、冷却塔の TPF は式 2.23 を用いて算出することが可能である。

一方同じ冷却塔では、冷却水流量と送風量が変わらなければ入口空気条件や処理熱量に関係なく TPF は一定である。従って入口空気条件や処理熱量が変動した場合、新しい条件での TPF が製品仕様から求めた TPF と同じになるように図 2.6 に示す A 点及び B 点も移動し、新しい操作線が形成される。このことから冷却水出口温度は t-h 線図上の新しい操作線を求めることにより得ることができる。

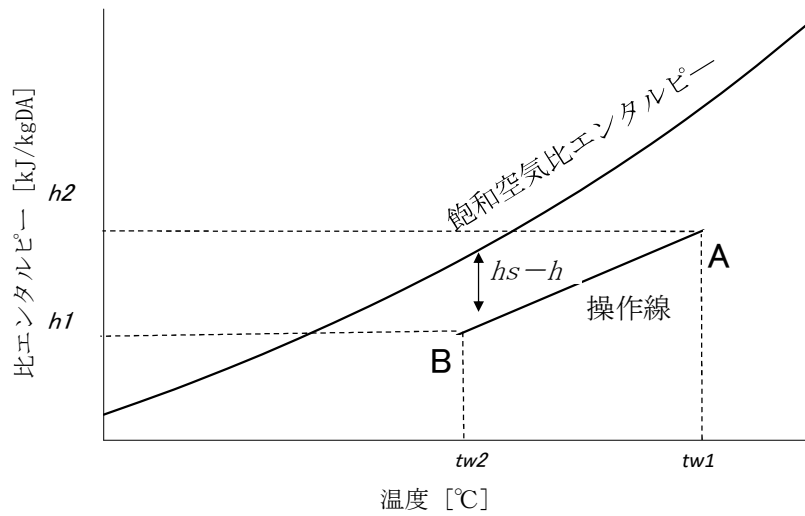


図 2.6 対向流冷却塔の操作線及び TPF に関する諸量

シミュレーターのプログラムフローを図 2.7 に示す。プログラムはスプレッドシート [14] を用いて構築し、新しい TPF を求めるための冷却温度の設定値はニュートン法を用いたスプレッドシートの機能を用いて探査している。

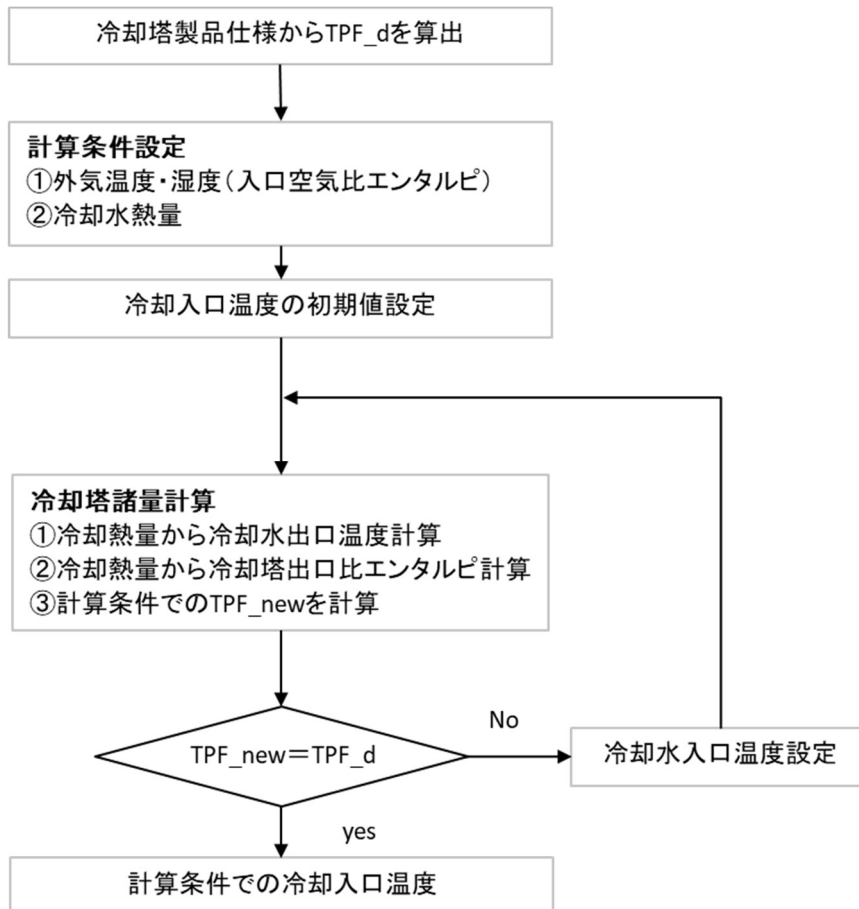


図 2.7 冷却水温度シミュレーターのプログラムフロー

シミュレーション結果を図 2.8 に示す。冷却水温度は同じ外気比エンタルピでも冷却熱量（図 2.8 では冷却塔負荷率で表示）により異なり、冷却熱量が小さくなるにしたがい外気湿球温度に近づく。一方冷却熱量が大きくなるにしたがい冷却水温度も高くなり、冷却熱量におけるアプローチ温度が精度よく計算されている。

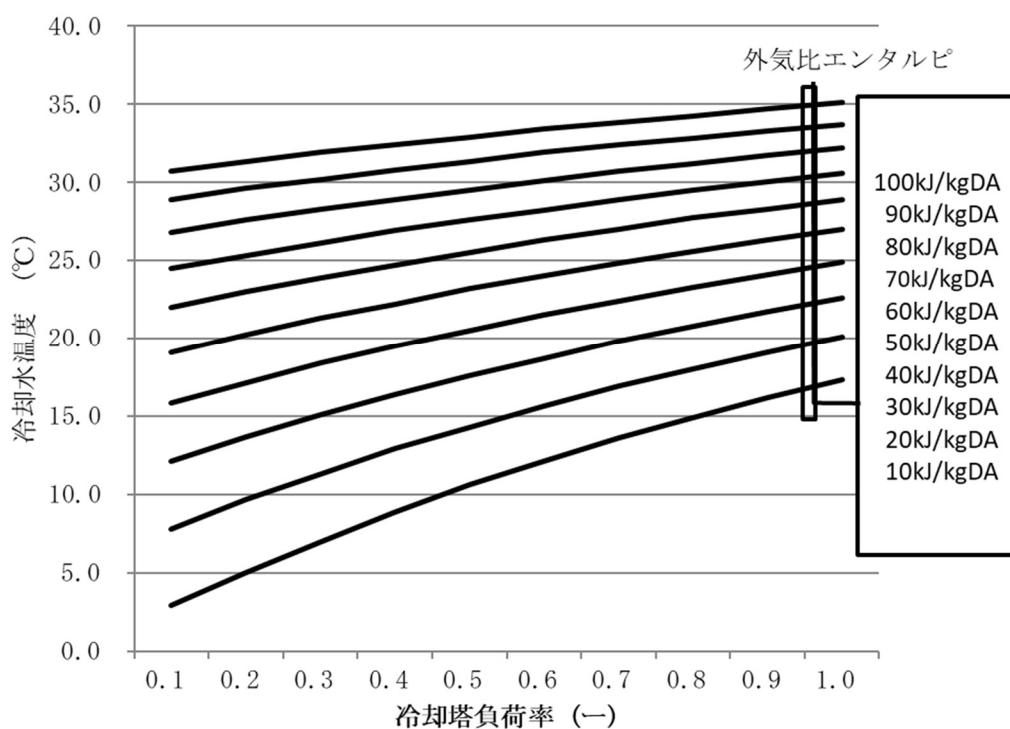


図 2.8 外気比エンタルピ別・冷却塔負荷率別冷却水温度

2.4.2 送水温度評価シミュレーター

熱源機の送水温度も冷却温度とともに熱源機の効率に大きな影響を与える要因である。送水温度は空調機の給気温度が満足する温度である必要があるため、計算時刻の空調機の負荷率に対して給気温度を満足する送水温度を全て求める。また送水温度の計算は建物の代表空調機を対象として空調機コイルの伝熱係数モデルを用いた計算[15]を行う。一方送水温度の値により熱源機の COP と送水流量が変動するため送水温度ごとに熱源機のエネルギー消費量と送水ポンプの電力量の合計値を求めた上で、合計値が最小となる値を適正温度とするシミュレーターを開発する。図 2.9 に冷水供給における送水温度の適正值を算出するためのプログラムフローを示す。なお、温水の場合はプログラムフロー中の冷水を温水に置き換え、温水の送水温度設定範囲を 35~50°C とした。また図 2.9 中のコイル伝熱係数モデルは空調機仕様毎にメーカーから提示されるデータを用い、送水流量の設定値はニュートン法を用いたスプレッドシートの機能を用いて探査している。参考として図 2.10 に空調機コイルの伝熱係数モデルを示す。

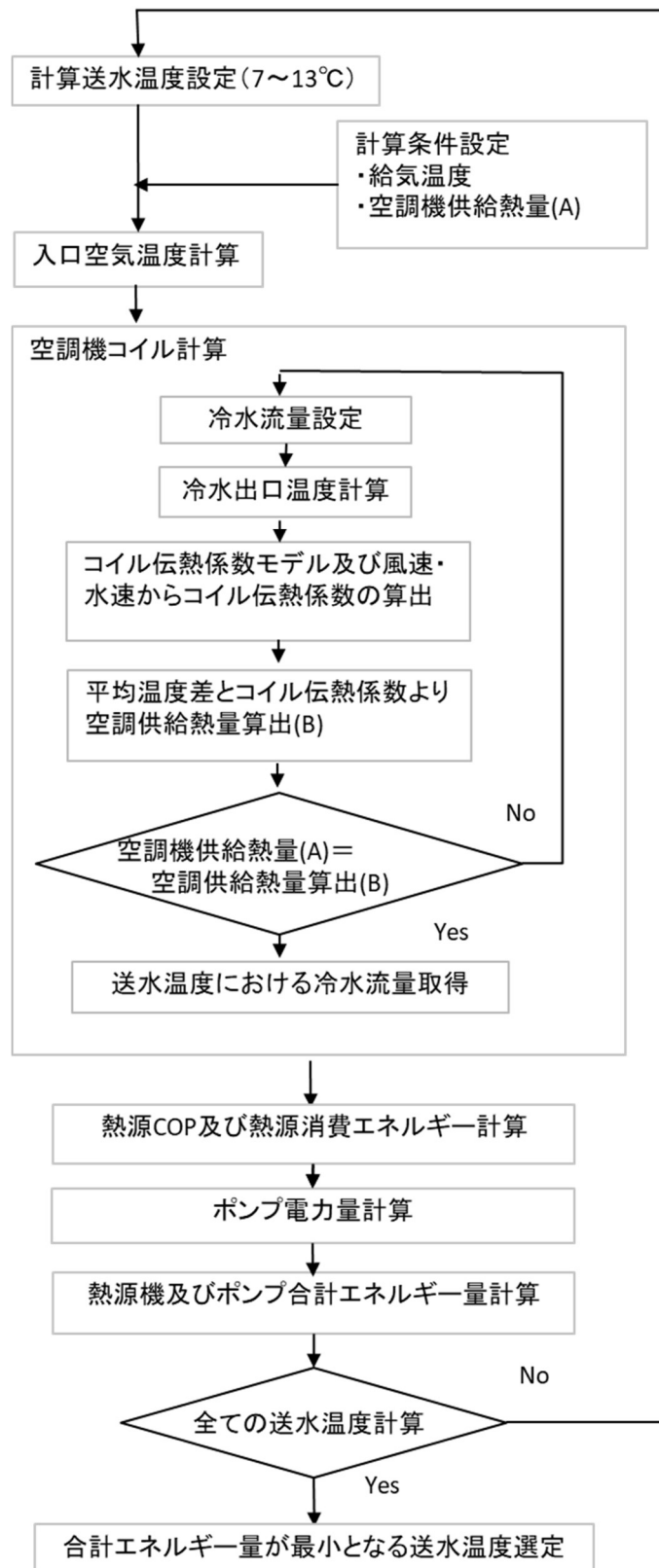


図 2.9 送水温度シミュレーターのプログラムフロー

図-1 フフィン型伝熱係数 K_f

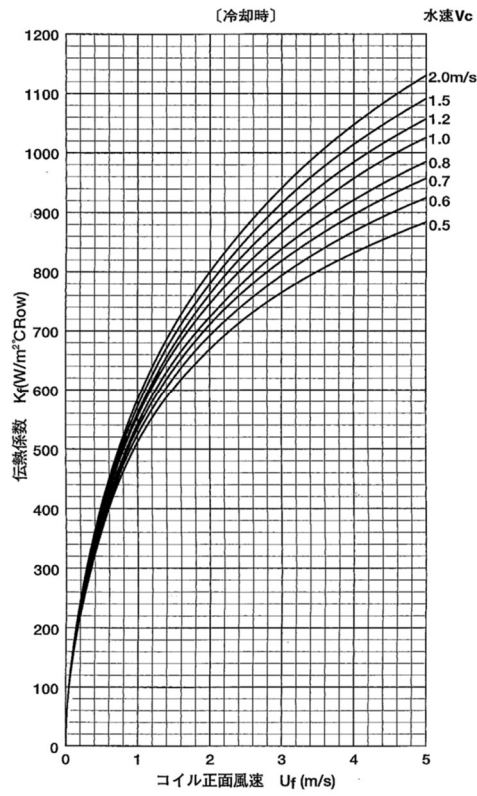


図 2.10 空調機コイルの伝熱係数モデル

図 2.10 に示す空調機コイルの仕様についてシミュレーションを行った結果を表 2.7 に示す。送風量を一定 (9500m³/h、風速 2.98m/s) としたシミュレーションの結果では、各負荷率において計算された水速と風速に基づく伝熱係数の値が図 2.10 と比較して妥当な値である。また送水温度である水側入口温度を変化させても、算出される伝熱係数は妥当な値であることからシミュレーターの信頼性を確認した。

表 2.7 負荷率別の計算水速と伝熱係数

負荷率 (%)	空調供給 熱量 (MJ/h)	空気側		水側			平均 温度差 °C	伝熱係数 W/m ² K
		給気温度	還気温度	入口温度	出口温度	水速		
		°C	°C	°C	°C	m/s		
100	46.08	21.0	25.0	7.0	13.0	0.69	13.07	817.0
70	32.26	21.0	25.0	7.0	18.1	0.26	10.01	742.6
50	23.04	21.0	25.0	7.0	21.7	0.14	7.37	720.5

2.4.3 熱源最適運転シミュレーター

熱源システムの最適運転方策を算出する方法として最適化手法が提案[16,17,18]されているが、最適化手法では対象熱源システム毎に計算モデルを作成する必要があり、熱源機のメンテナンスや更新及び冷暖切替え等によるモデル変更に対応できない。また混合整数線形計画法[18]ではインバータターボ冷凍機など部分負荷特性が非線形である熱源機[5]については部分負荷特性を区間線形近似する必要があり、近似区間数が増えるにしたがい計算時間も指数関数的に増加するという課題がある。

一方設置されている熱源機の全ての組合せを計算（以下総当たり法）し、計算結果においてエネルギー需要量を満足する組合せの中で最もエネルギー消費量が最小となる熱源機を選択を最適解とする手法も提案されている[19]。しかし熱源システムに設置された熱源機の全てを対象とした組合せ数を計算する必要があり、コージェネレーションシステム（以下 CGS）を含む大規模な熱源システムでは実用的な時間での計算処理は困難となる。

熱源システムの最適方策に基づく運転は省エネ効果も高いことから設備運転管理者が容易に取り扱えことができる手法を考慮する必要がある。このような観点から電力や空調用冷水（以下冷水）、空調用温水（以下温水）、給湯、蒸気需要を対象とした熱源システムに対して、総当たり法による算出方法を用いて実用的な時間で計算処理するシミュレーターを開発する。

図 2.11 にプログラムフローを示すが、計算時間を実用的な時間内で実施するために電力、冷水、温水、給湯、蒸気の需要ごとに、独立して熱源機の組合せを計算する方法とする。しかし CGS を有する熱源システムでは CGS の運転方策が電力供給だけではなく他の需要にも影響を与えるため、そのままでは需要ごとに独立して熱源機の運転を計算することができない。そこで CGS の運転は電力需要に対してのみ行う計算とし、CGS の回収熱量は熱源機器構成や一般的な設計主旨に基づいて回収熱量の利用順位をあらかじめ設定した上で計算するという実運転条件を考慮する。以下に計算に反映した実運転条件を列記する。

(1)CGS の運転条件

- ①CGS は電力需要に対して運転する（電主運転）
- ②各 CGS の運転負荷率は運転対象 CGS の発電容量による比例分担とする
- ③CGS の効率（発電及び熱回収）は線形式で近似した運転負荷率を変数とする効率変化率（定格効率に対する変化率）を定格効率に乗じて算出する
- ④CGS 回収熱量は冷水、温水、給湯、蒸気需要の順で利用する
- ⑤電力供給が可能な CGS 組合せの判断は「各 CGS の発電量と購入電力量の合計値が電力需要を満足」（以下電力需要条件）、「購入電力量が契約電力量を超過しない」（以下電力ディマンド条件）及び「CGS は設定した時間以内で運転・停止または停止・運転の切替は行わない」（以下発停切替え条件）の全ての項目を満足した場合とする

(2)冷水、温水、給湯、蒸気供給熱源の運転条件

- ①各熱源機の運転負荷率は運転対象熱源機の定格容量による比例分担とする

- ②CGS 回収熱量が利用できる場合は必ず回収熱量を利用し、各需要から CGS 回収熱量の利用分を差し引く。
 - ③CGS 回収熱量利用の冷水供給熱源機は、CGS 回収熱量が生じた場合は必ず運転する
 - ④熱源機の COP は、線形式で近似した運転負荷率、冷却水温度（外気温度）及び送水温度を変数とした効率変化率を互いに乗じた値に定格効率を乗じて算出する
 - ⑤インバータ駆動熱源機は線形近似式を用いず、冷却水温度（外気温度）別に整理した部分負荷時の効率変化率の値をそのまま計算に用いる（表 2.8）
 - ⑥各需要供給が可能な熱源機の組合せの判断は「各熱源機の供給熱量の合計値が需要量を満足」（以下需要条件）、「補機電力量を含めた熱源運転電力量が契約電力量を超過しない」（以下電力ダイヤモンド条件）及び「熱源機は設定した時間以内で運転・停止または停止・運転の切替は行わない」（以下発停切替え条件）の全ての項目を満足した場合とする
 - ⑦冷水及び温水供給熱源機の組合せにおいて、熱源機の組合せが電力ダイヤモンド条件のみを満たさない場合かつ CGS の運転台数に余裕がある場合は CGS 運転台数を増やして再計算を行い、CGS 追加運転によるエネルギー消費量を算出する
 - ⑧)CGS 追加運転の組合せを含むすべての実施可能な熱源機の組合せの中で、最もエネルギー消費量が小さい組合せを熱源機の運転方策として採用する
- (3)蓄熱
- ①蓄放熱時刻を与条件として設定する
 - ②蓄熱時刻において満蓄となるまで蓄熱運転を実施する
 - ③定格 COP が高い熱源機を優先運転とする

表 2.8 インバータターボ冷凍機の COP 変換率

冷却水 温度℃	負荷率									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
12	3.20	3.20	3.35	3.50	3.35	3.20	2.95	2.70	2.50	2.30
16	2.00	2.00	2.15	2.30	2.35	2.40	2.30	2.20	2.05	1.90
20	1.30	1.30	1.50	1.70	1.75	1.80	1.75	1.70	1.65	1.60
24	0.90	0.90	1.10	1.30	1.35	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
28	0.70	0.70	0.85	1.00	1.10	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
32	0.50	0.50	0.65	0.80	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

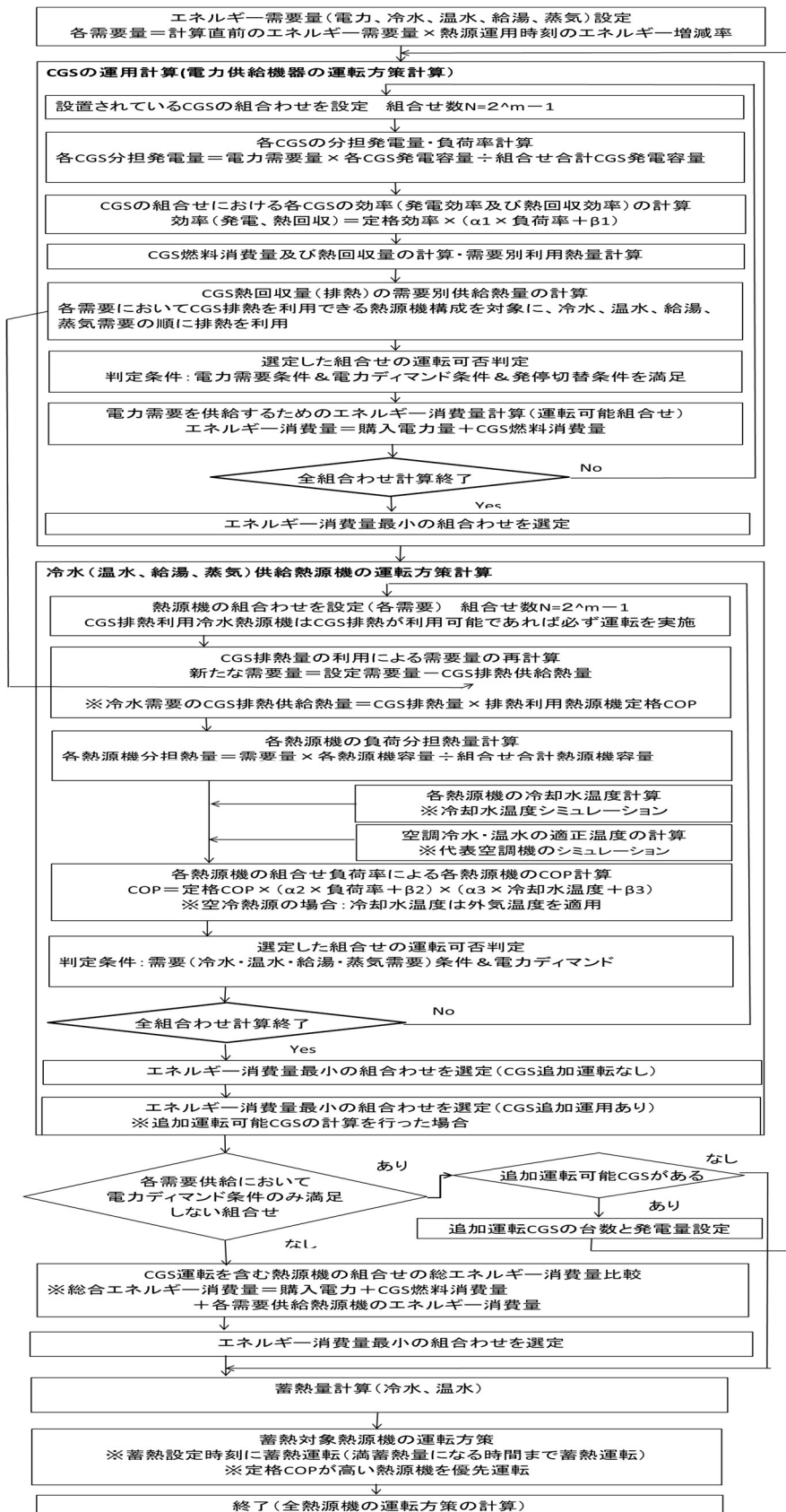


図 2.11 熱源最適運転シミュレーターのプログラムフロー

既存建物の CGS を有する熱源システムにおいて、現状の運転方法と実運転条件を反映した総当たり法により算出した結果を図 2.12 に示す。計算対象の熱源システムは CGS500kW×3 台、ガス吸収式冷温水機 5,063MJ/h×2 台、温水吸収冷凍機 4,557MJ/h×1 台、水冷チラー594MJ/h×1 台、氷蓄熱槽 283m³で構成されており、2018 年 7 月 9 日のエネルギー需要を計算対象とした。1 時間当たりの計算時間は 15 秒 (CPU: Intel(R)Core2 2.93GHz、メモリ:4.00GB、OS: Windows7) であり、24 時間分の運転方策を計算しても約 6 分であることから実用的な計算時間で運転方策が得られることを確認した。図 2.12 に示すように現状運転では空調冷水需要に対して必要台数以上の熱源機が運転されているが、計算結果では熱源機の運転台数が適正化され負荷率の高い運転となる。運転熱源機についても CGS の運転設定時刻に応じて温水吸収式冷凍機が選択されており、運転台数の適正化により温水吸収冷凍機が高い負荷率で運転されるため CGS 排熱が有効に利用される。さらに同じガス吸収式冷温水機でも現状 COP が高い 1 号機の優先運転となり、シミュレーターは有効な計算結果を導くことを確認した。現状運転に対する最適運転結果のエネルギー削減率は 3.2% であり、年間では 18.6% となった。計算結果通りに運用を行うことによりエネルギー使用量を大きく削減できるという結果である。

熱源機/時刻	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
CGS1号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CGS2号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CGS3号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
電力需要(kWh)	310	300	290	300	290	300	290	410	930	1,160	1,240	1,240	1,280	1,160	1,230	1,310	1,290	1,300	1,310	1,190	940	380	300	340
空調熱源運転																								
熱源機/時刻	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
吸収式冷温水機 1号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
吸収式冷温水機 2号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
温水吸収式冷凍機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
アバスター (蓄熱・追掛け)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
蓄熱槽放熱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
空調冷水需要	0	0	0	0	0	0	0	1,000	5,000	7,000	7,000	7,000	8,000	7,000	7,000	7,000	8,000	7,000	7,000	7,000	4,000	0	0	0
空調温水需要	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
エネルギー消費量(MJ/h)	3,026	2,928	2,830	2,928	2,830	2,928	2,830	5,544	13,109	17,630	17,947	17,920	19,095	17,081	17,797	18,937	19,580	18,881	18,955	17,807	11,691	3,709	2,928	3,318

(a) 現状運転 注: 0 時は 0 時~1 時 黒網掛け時刻は運転を表す

CGS1号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CGS2号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CGS3号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
空調熱源運転																								
熱源機/時刻	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
吸収式冷温水機 1号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
吸収式冷温水機 2号機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
温水吸収式冷凍機	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
アバスター (蓄熱・追掛け)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
蓄熱槽放熱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
エネルギー消費量(MJ/h)	3,026	2,928	2,830	2,928	2,830	2,928	2,830	4,839	11,795	16,771	17,578	17,552	18,726	16,745	17,429	18,235	18,824	18,137	18,209	17,064	11,691	3,709	2,928	3,318

(b) 計算結果 注: 0 時は 0 時~1 時 黒網掛け時刻は運転を表す

図 2.12 CGS を含む熱源システムの最適運転シミュレーション結果

2.4.4 空調温度予測シミュレーター

空調需要におけるエネルギー削減は室内設定温度の緩和が重要であるが、室内温度は室内在住者の快適性にに基づき任意の温度が適宜設定される。空調運転においては空調機の間欠運転による快適性と省エネの研究報告[20]があり、空調を間欠的に一定時間停止しても快適性は確保されるとともに空調停止時間において空調エネルギーが削減されるとしている。しかし快適性は被験者の主観を用いているとともに空調エネルギー自体の評価を実施して

いないため、どの程度のエネルギー削減になったのかが不明である。一方室内設定温度を外気温度に連動させる等により時刻別に省エネ設定となるように運用することにより空調エネルギーを削減できる[21,22]。

さらに室内温度を事前に予測できる場合は、以下の空調運用が実施可能となり空調エネルギーの削減に大きく寄与する。

- ①空調停止後の室内温度が十分に快適性を維持できると予測できる場合は、空調運転を早めに停止する。
- ②室内温度を外気温度等と連動させ省エネ設定とした場合に、居住者の快適性を予測値から判断することにより省エネ設定値を補正する。

一般の空調運転制御においても約 5 分周期で給気温度を室内温度に連動[23]させているが、室内設定温度自体は一定であるため快適性は確保できるがエネルギー削減効果は小さい。

室内は常時空調された空間であり、居住者の活動状態や天候、時刻・曜日、その他要因によって室内設定値が人為的に変更される。このことから室内温度予測は深層学習の手法を用いた予測手法を開発した。深層学習はフィードフォワード型ニューラルネットワーク構造を用い、部屋の時刻毎の室温を学習させた[24]。教師データは東京の事務所ビル（自社ビル）を対象とし、エントランスホール空調に対して2016年～2018年の26,280データを用いてAI予測モデルを構築した。表2.9に対象建物、表2.10に学習させた空調系統を示す。

表 2.9 対象建物

建物用途	事務所ビル(自社ビル)
延べ床面積 (m ²)	45,000
所在地	東京

表 2.10 学習対象の空調系統

部屋名	エントランスホール
冷却能力 (kW)	229.9
加熱能力 (kW)	215.7
外気量 (m ³ /h)	7,100
送風量 (m ³ /h)	38,300
制御方式	変風量制御

構築した AI 予測モデルを用いて 2019 年の空調時間における室内温度を予測した結果を図 2.14 に示す。なお図 2.14 は 2019 年室内温度と AI 予測温度の差を誤差（実測温度－予測温度）として示す。AI 予測の月別誤差の傾向として 1 月～3 月と 11 月～12 月の暖房期間にて全体的に誤差が大きくなる傾向にあり、絶対値誤差の平均は 1 月～3 月が 0.35℃、11 月～12 月が 0.44℃、それ以外の月（4 月～10 月）は 0.31℃、年間では 0.34℃である。

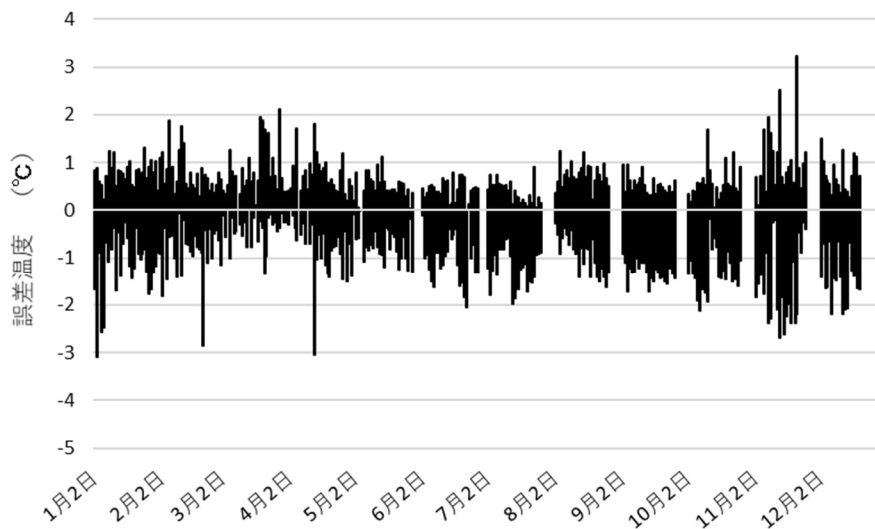


図 2.14 室温予測の誤差

AI による室内温度の予測に関しては、空調システムや室用途ごとにニューラルネットの予測モデルを構築するのは実用的ではない。一方、空調システムや室用途が異なっても空調制御方式が同じであれば同じ予測モデルを適用することが可能と考えられる。つまり空調機は設定した室内温度になるように制御されることから、AI 予測モデルは空調システムや室用途の差異よりも設定温度の追従性（制御性能）や外気条件等による設定温度変更による影響が強いと考えられる。そこで実際の使用においては、代表する空調システムの機械学習により得られた AI 予測モデルを用いて他の室内温度を予測し、予測した室温と実際の室温との誤差を 1 年間評価した後、誤差を補正值として 2 年目以降の室温を予測する方法を検討する。

図 2.15 に同じ空調制御方式である会議室システムの室内温度（2019 年）を予測した結果と 9 時及び 10 時の補正温度を 0.5°C、その他時刻の補正温度を 0.3°C として AI 予測値を補正した結果を図 2.16 に示す。

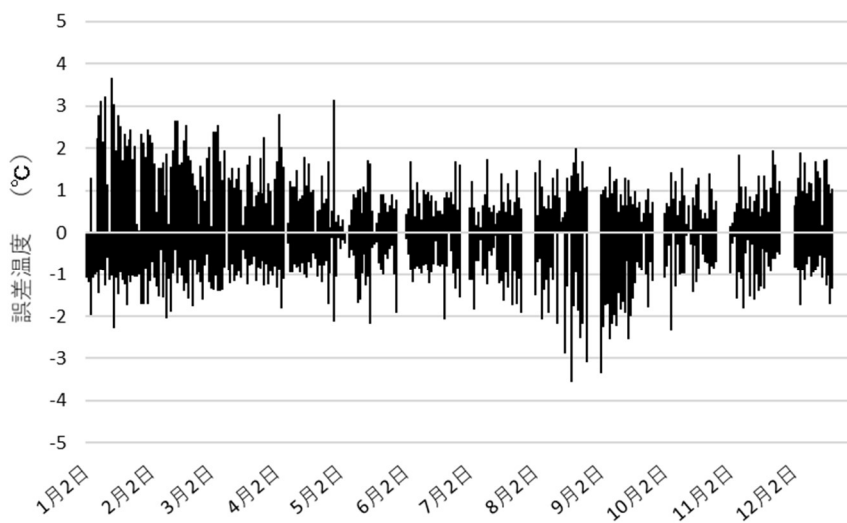


図 2.15 室温予測の誤差（会議室システム）

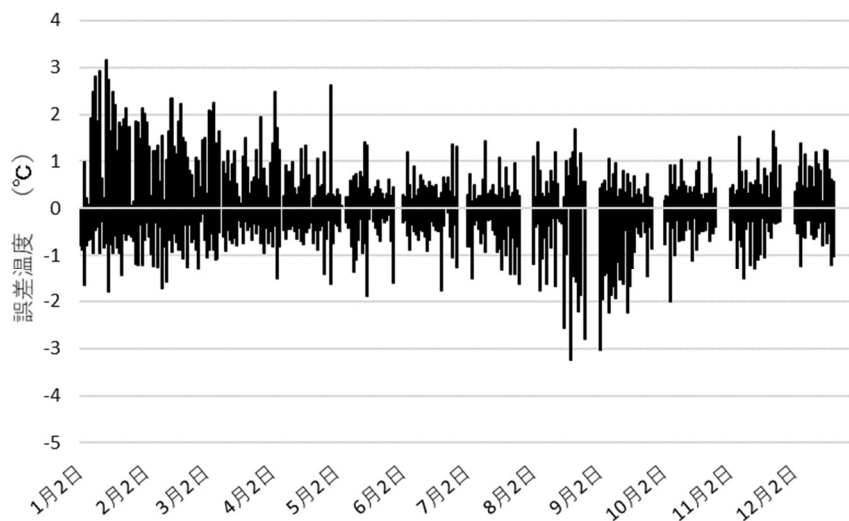


図 2.16 補正後の室温予測の誤差（会議室系統）

図 2.15 より、会議室系統の絶対値誤差の年間平均は 0.48°C でありエントランス系統の年間平均誤差よりも大きくなる。一方 AI 予測値を補正した会議室系統の絶対値誤差の年間平均は図 2.16 より 0.33°C となり、エントランス系統の誤差とほぼ同じ値となる。従って、空調制御方式が同じであれば、空調系統や室仕様が異なる AI 予測モデルを用いても誤差補正を適切に行うことで室温が予測できるものと考えられる。

図 2.17 に AI 予測モデルを用いた室温度予測の実施フローを示すが、実用的には予測した室温と実際の室温との差を 1 年間評価した後、誤差を補正值として 2 年目以降の室温を予測する。

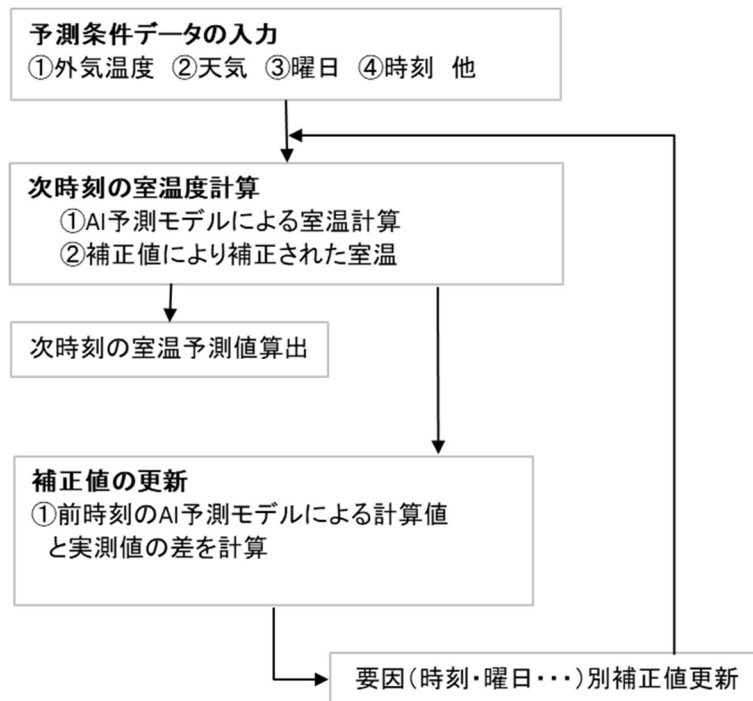


図 2.17 室温予測手法のフロー

図2.15に示したようにAI予測モデルの室温予測精度について計算値と実測値の誤差が大きく誤差量の出現傾向も推定できないため、今後さらなるニューラルネットワークの更新が必要である。しかし予備的な検討では誤差の小さなニューラルネットワークへの更新が可能であることから、今後ニューラルネットワークの更新を含めたシミュレーターの改良を行う予定である。

2.5 結言

「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理手法の構築を目的として各工程に関わる管理すべき機器・システムを検討した。また検討した機器・システムについて、効率運用を行うために必要な管理項目を整理するとともに、管理項目を評価するための計測項目について考察した。計測項目については中央監視装置により各種のデータが毎時刻取得されているが、「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理手法が整理されていないため、エネルギー管理に必要な計測が実施されていないという課題についても指摘した。

次に各管理項目が効率的な観点から合理的な運用となっているかを判断するための判断基準値を考察するとともに、判断基準値を逸脱した場合の対応についても設備運転管理者の業務を勘案して整理した。また省エネルギー対策・コミッショニングは、判断基準値を逸脱した項目に対して判断基準値に戻す行為であり、エネルギー管理の一環であることを述べた。

「変換過程」「搬送過程」においてエネルギー管理が必要であると提案した機器・システムの種類数は17、管理項目数は60である。実際の建物では同じ機器・システムが複数台設置されているとともに、同じ機器でも仕様の違う機器もありエネルギー管理対象は広範囲に及ぶ。しかし定義したエネルギー管理を毎時刻行うことがエネルギー消費量の削減、CO₂排出量の削減に効果的であり、エネルギー管理を実施する意義は大きい。

一方、エネルギー需給は非定常に変動している。また近年の省エネルギーに対応した機器・システムは高度化・複雑化しており、毎時刻判断基準値を評価するのが困難になっている。そこで判断基準値の評価が困難であると考えられる基準値についてはシミュレーターによる算出を検討した。検討したシミュレーターは冷却水温度計算、送水温度計算、熱源システムの最適運転計算、室内の設定温度計算である。これらのシミュレーション計算に必要なデータは管理項目で設定した計測項目を用いることを前提とした。

以上の考察により、「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理が合理的に実施されるものと考えられる。

第2章の参考文献

1. 経済産業省関東経済局;

https://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/sho_energy/data/20190603handankijun.pdf

2. 変圧器メーカーカタログ;
<https://www.daihen.co.jp/products/electric/pdf/trans/trans01.pdf>
3. コージェネレーションメーカーカタログ;
<https://dcs.gamedios.com/iportal/CatalogViewInterfaceStartUpAction.do?method=startUp&mode=PAGE&catalogCategoryId=&catalogId=15644070000&pageGroupId=1&volumeID=OSG00001&designID=OSG&pagePosition=R>
4. 勝田 正文; 金子 智; 山本 亨; 都市型ホテルにおけるコージェネレーションの運用実態評価と CO2 排出量最小運転の解析, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.22 No.1, 2005 年
5. BEST Program (BEST-P), 機器特性マニュアル 2014.06; 財団法人建築環境・省エネルギー機構 Home Page. : http://www.ibec.or.jp/best/program/m_131_kikitokusei.pdf
6. 空気調和・衛生工学会; 空気調和設備の計画設計の実務の知識 pp.251-254, オーム社 平成 12 年 2 月 25 日 第 1 版第 6 刷
7. 空気調和・衛生工学会; 空気調和設備の計画設計の実務の知識 pp.229-232, オーム社 平成 12 年 2 月 25 日 第 1 版第 6 刷
8. 松元 忠雄; 田崎 茂; 環境共生時代の建築設備の自動制御入門 pp.154-158, 日本工業出版株式会社 平成 24 年 7 月 1 日 第 1 版第 2 刷
9. 松元 忠雄; 田崎 茂; 環境共生時代の建築設備の自動制御入門 pp.150-153, 日本工業出版株式会社 平成 24 年 7 月 1 日 第 1 版第 2 刷
10. 第 1 回特別研修テキスト電気分野専門区分編 p.III-90; 財団法人省エネルギーセンター 2006 年 6 月 1 日 第 1 版第 1 刷
11. Xiaoqing Wei, Nianping Li; Jinqing Peng; Jianlin Cheng; Jinhua Hu; Meng Wang; Performance Analyses of Counter-Flow Closed Wet Cooling Towers Based on a Simplified Calculation Metho. *Energies* 2017, 10, 282
12. 古川善教; 久保 隆太郎; 村田 泰孝; 北村 邦彦; 石原 修; 最適熱源機システム構築のための簡易型設計支援ツールの開発, 社団法人空気・衛生工学会論文集 No.142 2009 年 1 月
13. Clemente García Cutillas; Javier Ruiz Ramírez; Manuel Lucas Miralles; Optimum Design and Operation of an HVAC Cooling Tower for Energy and Water Conservation. *Energies* 2017, 10, 299
14. Microsoft® Excel® 2016 MSO 32bit, Manufacturer Home Page. Available online: <https://microsoft-excel-2016.softonic.jp/>
15. 田野辺 淳; 堀川 智章; 山本 亨; 空調機の風量及び水量変化に対する熱交換器の伝熱係数の変動に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2015.9.16~18) F-73
16. 石田義洋; 大岡 龍三; 加用 現空; 中島 慶悟; 数値解析手法による複合熱源システムの機器運用の最適化 第 1 報－数値解析手法と計算例, 空気調和・衛生工学会論文集 No.204,

2014年3月

- 17.前原 則保; 下田 吉之; 熱源最適運転制御手法の研究—PSO(Particle Swarm Optimization)手法による地域冷房プラントの最適運転制御方法の研究—, 空気調和・衛生工学会論文集 No.209,2014年6月
- 18.伊藤弘一; 横山良平; コージェネレーションの最適計画, 産業図書株式会社, 平成24年4月27日初版
- 19.小野 永吉; 吉田 治典; 王 福林; 堀川 晋; 田中 広昌; 高村 秀明; シミュレーションを用いた複合熱源システムの最適組合せ運転法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No.183, 2012年6月
- 20.坊垣 和明; 角谷 三夫; 有川 悦郎; 宮城 啓史; 福森 幹夫; パッシブリズム空調における快適性と省エネルギーに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No.64, 1997年1月
- 21.山本 亨; 羽山 広文; 林 恭生; 中央監視装置の遠隔操作による省エネルギー自動運用システムの開発, 空気調和・衛生工学会論文集 No.274, 2020年1月
- 22.山本 亨; 鈴木 央一; 小島 通雄; 田口 明美; NTT 横須賀研究センタにおける空調制御設定変更システムの開発と熱源最適運転の実施に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2006.9.27~29) B-4
- 23.松元 忠雄; 田崎 茂; 環境共生時代の建築設備の自動制御入門 pp.122-124, 日本工業出版株式会社 平成24年7月1日 第1版第2刷
- 24.中西 啓太; 野口 渉; 飯塚 博幸; 宮田 大輔; 山本 亨; 山本 雅人; 空調データを用いた深層学習による室温変化予測, 2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.46-27, (2020)

第3章 エネルギー管理と熱源システムの設計手法の研究

3.1 緒言

エネルギー管理は既に設備されている機器・システムを対象とした行為である。しかし機器・システムが建物の需要特性に適切に対応した仕様でなければ、エネルギー管理を十分に行ってもエネルギーの合理的な使用は望めない。特に建物の法定耐用年数が65年程度であるのに対して設備機器の耐用年数は15年程度であり、建設から解体・廃棄される間に数回の設備機器の更新が必要となる。またライフサイクルコストの試算では設備機器の保全・修繕・更新及び運用に係る費用は建物全体のライフサイクルコストの50%を占めるとされ[1]、運用時のライフサイクルCO₂排出量は建設時CO₂排出量の2.1倍にも達する[1]。

従って建物需要特性を考慮した設備設計はエネルギー費用だけでなく、エネルギー消費量及びCO₂排出量の低減のためには重要である。特に設備改修においては建物の需要特性をはじめとして、機器特性、運転の制約条件など様々な特性がエネルギー管理情報から得られることから、これらの情報を活用した設計が求められる。

一般的に設備設計は企画、基本計画・設計、実施設計の順で進み、基本計画・設計段階で機器・システムの選定、実施設計で機器能力や台数、制御システムの設計が行われる[2]。新築時の基本計画・設計では、建物用途、建物規模、建設地域などの限られた情報から設計を進めなければならないが、設備改修時の設計においては十分な設計情報を得ることができる。建物のエネルギー消費に大きな影響を及ぼす熱源システムの設計においては、古川らが新築時の設計手法として基本構想段階での限られた情報を用いた簡易設計支援ツールを提案[3]している。一方、改修時の設計ではエネルギー需要特性や熱源機の機器特性を基に、シミュレーションツールを用いて熱源機やシステムの組合せにおける年間エネルギー消費量を算出しながら設計を行う事例[4]が報告されている。シミュレーションツールとしてはBEST[5]やLCEM[6]などが利用可能であり、時刻ごとのエネルギー需要や詳細な熱源機器特性を扱うことができる。そのため複合熱源システムにおいても精度の良い計算結果が得られることから、各種の熱源システムの比較を通じて建物に最も適切な熱源システムを評価することが可能である。しかし設計検討する熱源機器は多種多様であり、また機器容量や台数を含めた熱源機器の組合せは膨大であることから基本設計・実施設計における膨大な熱源システムの代替案をこれらのシミュレーションツールのみで行うことは現実的に困難である。

本章ではこのような課題に対し、設備改修時の設計を想定して熱源システムの基本計画・設計及び実施設計を支援する手法について考察する。

3.2 熱源システム設計手法の検討

3.2.1 設計モデルとアルゴリズム

熱源システムのエネルギー消費量を計算する手法としてBESTやLCEMの他に、数理計画法を用いてエネルギー運用の最適化を図りながらエネルギー消費量を算出する手法についても報告されている[7,8,9]。特に伊東らはエネルギー運転の最適化手法を拡張してコー

ジェネレーションシステムの設計を行う手法について提案を行っている[9]。本研究では伊東らが提案する手法を用い、コージェネレーションシステムを含む熱源システム全体の設計方法を検討した。図 3.1 に目的を費用最小とした熱源機の機器容量の計算フローを示す。計算は初期値として機器容量を設定した後、設定した機器容量をもとに年間の設備償却費、年間の機器保守費、年間の電力及び都市ガスの基本料金及び年間運転費用を算出しながら、総費用が最小となるまで機器容量を再設定し計算処理を繰り返し行う。機器容量の再設定には非線形計画法を用い、総費用及び各機器容量の変化幅が一定値以下となった場合に総費用が最小と判断する。また年間運転費用の計算には混合整数線形計画法を用い、各熱源機の容量の組合せに対して毎時刻最小となる運転方を策定する。さらに非線形計画法は逐次線形計画法を適用した。

図 3.1 において、費用をエネルギー消費量あるいは CO₂ 排出量とすることにより最適化の目的をエネルギー消費量最小、CO₂ 排出量最小とすることができる。

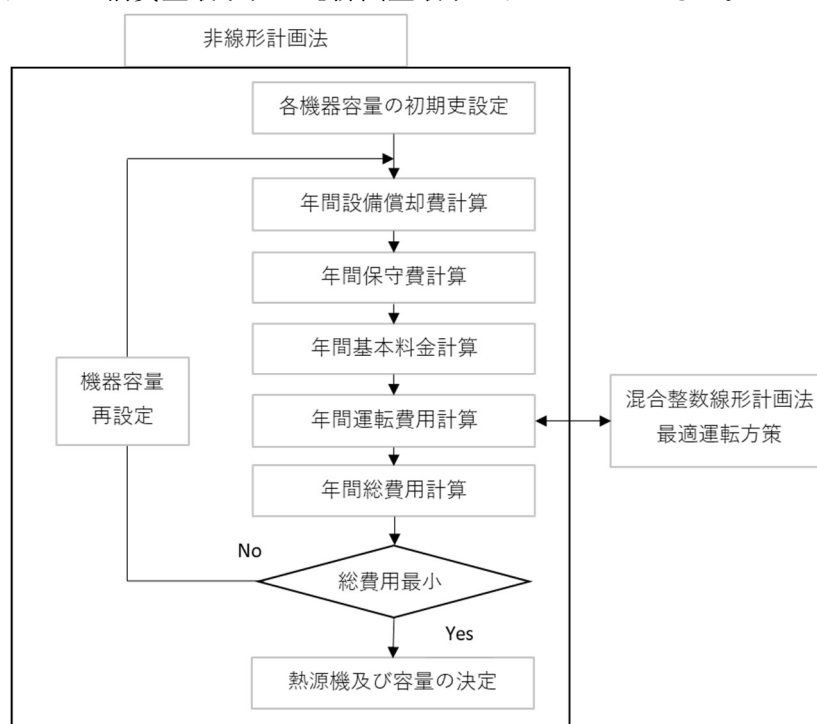


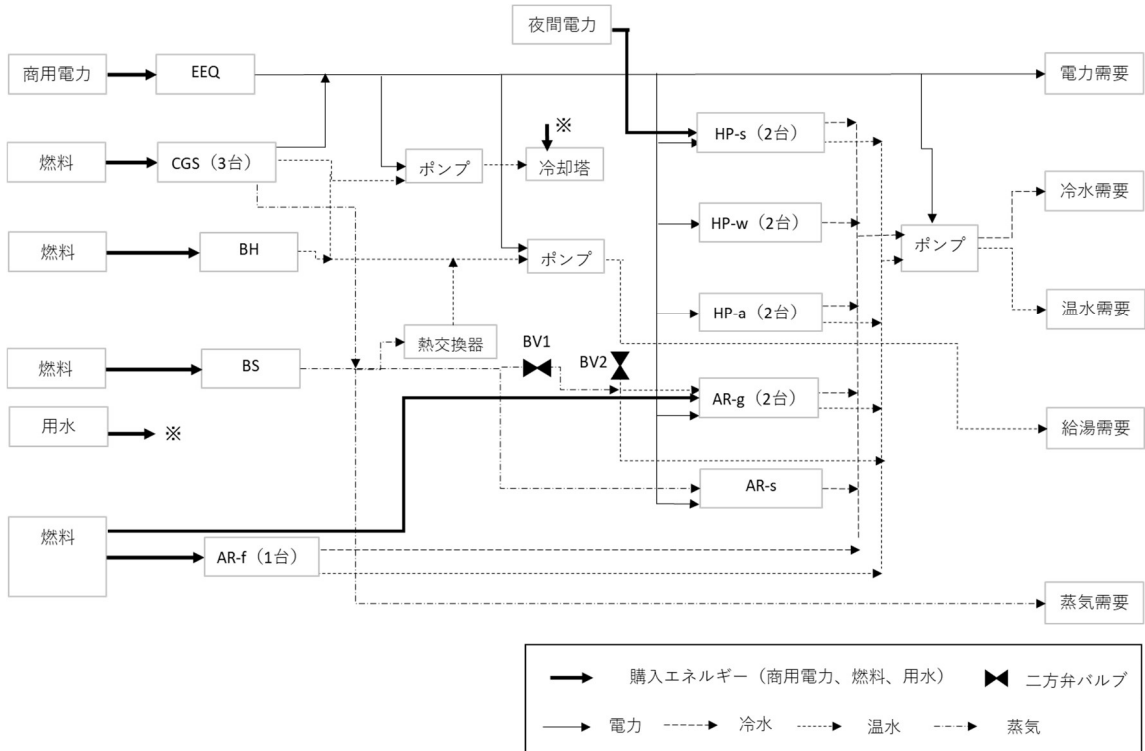
図 3.1 熱源機の機器容量の計算フロー

図 3.2 に設計モデルを示す。設計モデルは、熱源システムとして検討すべき多様な熱源機器を包括した大規模構造モデルとした。このモデルではエネルギー需要として電力需要、空調冷水需要、空調温水需要、給湯需要及び蒸気需要を設定するとともに、変圧器、CGS、温水・蒸気ボイラ、吸収式冷温水機、吸収式冷凍機及び水冷式・空冷式熱源機で構成した。また設計モデルは台数と容量の評価を行うために CGS の評価台数を 3 台、水冷式・空冷式チラー及び吸収式冷温水機の評価台数をそれぞれ 2 台とした。ただし温水・蒸気ボイラの評価台数を 1 台とした。これは温水・蒸気ボイラの定格時と部分負荷時の効率差が小さく [10] また補機電力も小さいことから、評価台数を 1 台としてもエネルギー消費量への影響が

少ないためである。

各熱源機器はエネルギーの需給関係が成立するように同種類の入力・出力のエネルギーで結合している。また各熱源機器は表 2.3 に示した補機を含めた熱源機システムとして定義した。図 3.3 に一例として水冷式熱源機の熱源機システムモデルを示す。

このモデルに図 3.1 に示した計算フローを適用して設計モデルに示した各熱源機の容量を求めるが、計算結果として熱源機器容量がゼロとなった機器は設計機器として選択しない。従って計算結果として機器容量がゼロではない機器の組合せ及び台数が熱源システムとして評価されることとなる。なお図 3.2 における EEQ(変圧器)の容量は受電電力を表す。



記号	機器名称	記号	機器名称
EEQ	変圧器	HP-s	蓄熱槽+蓄熱対応水冷・空冷熱源機
CGS	コージェネレーションシステム	HP-w	水冷式熱源機
BH	温水ボイラ	HP-a	空冷式熱源機
BS	蒸気ボイラ	AR-g	ジェネリック・温水焚き吸収式冷凍機
AR-f	燃料焚き吸収式冷温水機	AR-s	蒸気焚き吸収式冷凍機

図 3.2 設計モデル

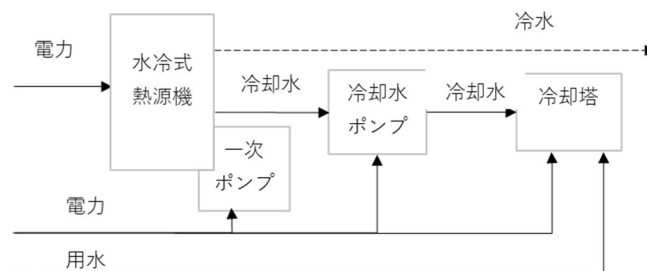


図 3.3 水冷式熱源機システムのモデル

一方各機器には多様な機種が利用可能であることから、同じ機器であっても多様な機種を評価することが設計には必要である。例えば CGS にはエンジン、タービン、燃料電池仕様の機種が利用可能であり、また水冷式熱源機にはスクリー冷凍機やターボ冷凍機が利用可能である。この課題に関しては、機種が異なっても同じ機器であればモデルで用いる入出力の定義は同じであることから機種に応じて入出力データを設定することで対応した。すなわちエンジン、タービン、燃料電池と機種が異なっても CGS 機器としての入出力の定義は同じであり、機種に応じて発電効率や熱回収効率の計算データが異なるだけである。このことから入出力の定義が同じ機器においては機器の効率データを機種特有のデータに設定することで、図 3.2 の計算モデルは多様な熱源システムの評価に適用することが可能となる。さらに機器モデルの入出力データ、補機電力データ及びバルブ開度設定データについても併せて設定変更することにより、既に定義している機器を異なる機器として計算モデルに設定できるように工夫した。

表 3.1 に機器ごとに対応可能な機種の一覧を示す。CGS は出力データを設定することにより 3 台の CGS を任意にエンジン、タービン、燃料電池として評価することが可能であり、補機データ及び発電電力データを変更設定することにより温水ボイラ、蒸気ボイラとして評価することが可能である。従ってボイラの適正台数を評価したい場合は、3 台の CGS をボイラ仕様とすることで最大 4 台のボイラ設置に対して計算することが可能である。同様に蒸気吸収式冷凍機は 1 台設置であるが、バルブデータ及びジェネリンクの燃料入力データを変更し、蒸気吸収冷凍機として機器変更することにより最大 3 台の蒸気吸収冷凍機の評価を行うことができる。

表 3.1 モデル内機器と対応可能な機器・機種

記号	対応機種	入力	出力データの設定	補機データ及び計バルブデータの設定
CGS	エンジン式CGS	燃料	電力、温水（蒸気：出力なし）	
	タービン式CGS	燃料	電力、温水、蒸気	
	燃料電池	燃料	電力、温水（蒸気：出力なし）	
	温水ボイラ	燃料	温水（発電・蒸気：出力なし）	冷却塔・冷却水ポンプ電力消費なし、冷却水消費なし
	蒸気ボイラ	燃料	蒸気（発電・温水：出力なし）	冷却塔・冷却水ポンプ電力消費なし、冷却水消費なし
HP-w	スクリー冷凍機	電力	冷水（温水：出力なし）	
	ターボ冷凍機	電力	冷水（温水：出力なし）	
	空冷式熱源機	電力	冷水、温水	冷却塔・冷却水ポンプ電力消費なし、冷却水消費なし
HP-a	水冷式熱源機	電力	冷水（温水：出力なし）	冷却塔・冷却水ポンプ電力消費あり、冷却水消費あり
	レシプロ式空冷ヒートポンプ	電力	冷水、温水	
AR-g	スクリー式空冷ヒートポンプ	電力	冷水、温水	
		ジェネリンク	都市ガス 温水	冷水、温水
	温水焼き吸収式冷凍機	温水	冷水	バルブ1：閉、バルブ2：開
		都市ガスなし		
	蒸気焼き吸収式冷凍機	蒸気 都市ガスなし	冷水	バルブ1：開、バルブ2：閉

3.2.2 機器特性データ

図 3.2 の設計モデルに対して、計算に用いるための熱源機器の効率データを整理した。効率データについては、機器モデルを定義して入出力間の関係を物理モデルまたは回帰式モデルによって求めたデータが提案されている[10]。しかし本設計手法では機器容量を含めて

評価を行うことから、機器容量の違いによる機器効率の変化についても整理しておく必要がある。従って機器の効率データはメーカーから提供されている技術資料を参照して整理した。また計算目的を費用最小とした場合のデータとして機器能力別の製品価格及び保守費用データも併せて整理した。本設計手法は混合線形計画法を用いていることから、効率データは線形式(式 3.1)、機器容量ごとの定格機器効率変化は機器容量に対する二次式(式 3.2)として整理した。インバータ駆動熱源機の効率は部分負荷率に対して非線形であるため、線形とみなせる区間を区分して数段階の線形式の組合せデータとした。また製品価格及び保守費も機器容量に対する二次式として整理した。

$$Q_p = a \times I_p + b \quad (3.1)$$

Q_p : 出力比率 (部分負荷時出力/定格時出力)

I_p : 入力比率 (部分負荷時入力/定格時入力)

a, b : 定数 (各機器容量一定)

$$P_c = c \times cap^2 + d \times cap + e \quad (3.2)$$

P_c : 定格効率

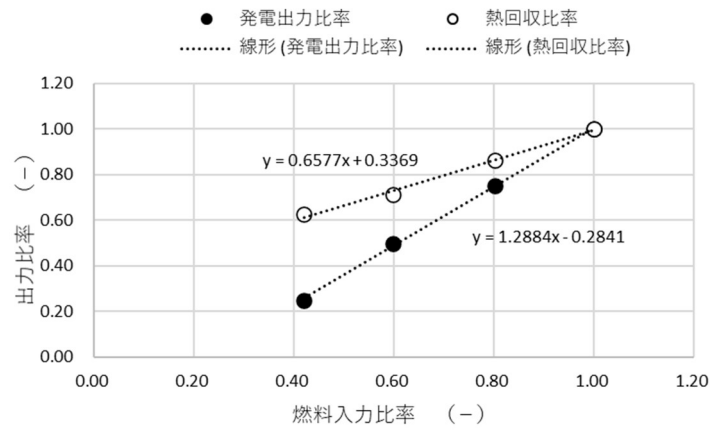
Cap : 機器容量

c, d, e : 定数

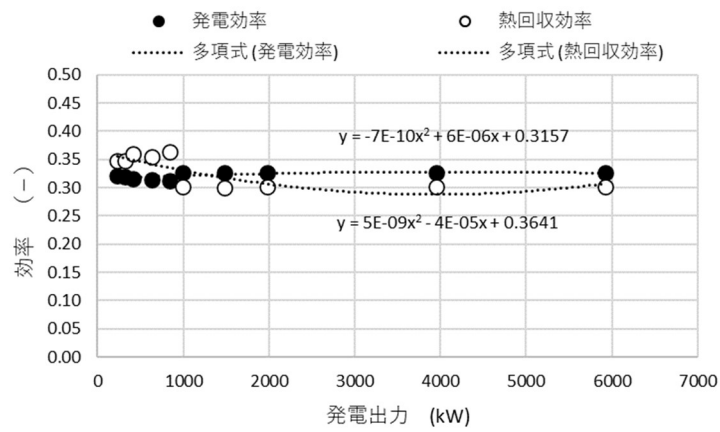
表 3.2 に整理した機器データの種類について示すとともに、整理した機器データの一例として CGS (都市ガス使用のエンジン式)、吸収式冷温水機 (都市ガス使用)、水冷式熱源機 (スクリー式) のデータを図 3.4~図 3.6 に示す。また吸収式冷温水機と水冷式熱源機について冷却水温度別の COP 推移データを図 3.7 に示す。

表 3.2 整理した機器データの種類

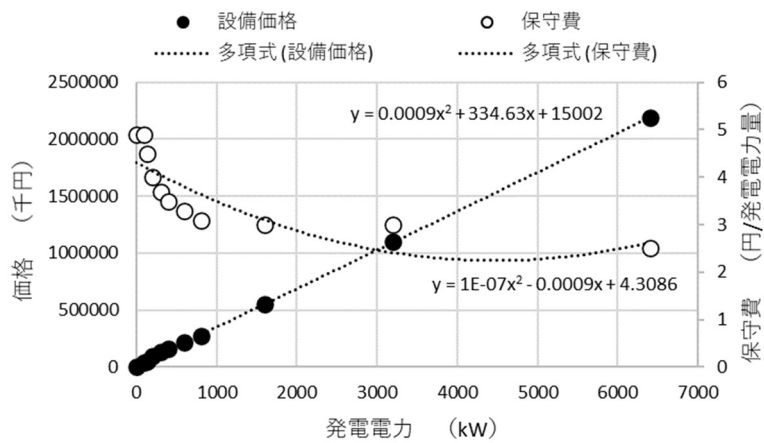
記号	対応機種	使用燃料種別
CGS	エンジン式CGS	都市ガス、LPG、灯油、重油
	タービン式CGS	都市ガス、LPG、灯油
	燃料電池	都市ガス、LPG
BH	温水ボイラ	都市ガス、LPG、灯油、重油
BS	蒸気ボイラ	都市ガス、LPG、灯油、重油
AR-f	燃料焚き吸収式冷温水機	都市ガス、LPG、灯油、重油
HP-s	ブラインスクリー冷凍機	電力
HP-w	スクリー冷凍機	電力
	定速駆動ターボ冷凍機	電力
	インバータ駆動ターボ冷凍機	電力
HP-a	レシプロ式空冷ヒートポンプ	電力
	スクリー式空冷ヒートポンプ	電力
AR-g	ジェネリンク	都市ガス、LPG、灯油、重油
	温水焚き吸収式冷凍機	温水
	蒸気焚き吸収式冷凍機	蒸気



(a)部分負荷特性



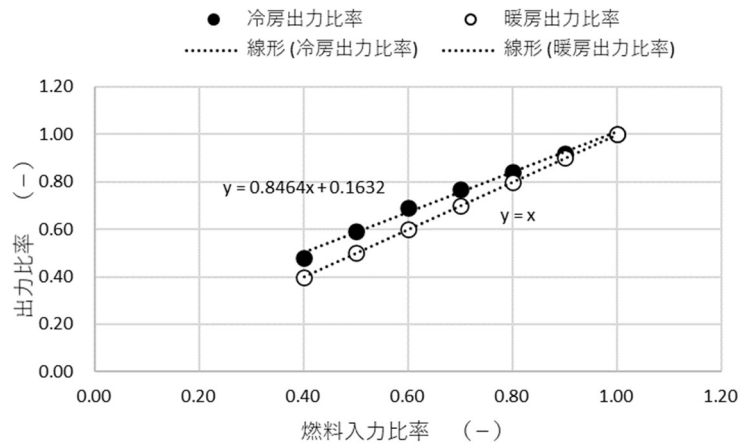
(b)熱電能力別の発電効率・熱回収効率推移



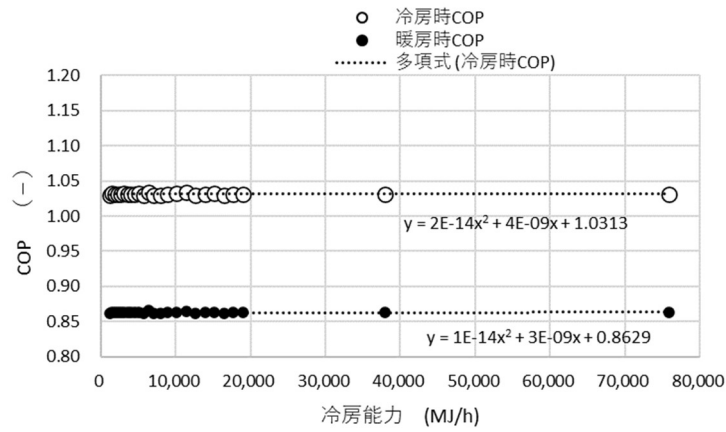
(c)発電能力別の製品価格・保守費推移

注：燃料入力比率＝部分負荷時燃料消費量／定格時燃料消費量
 出力比率＝部分負荷時発電（熱回収）量／定格時発電（熱回収）量

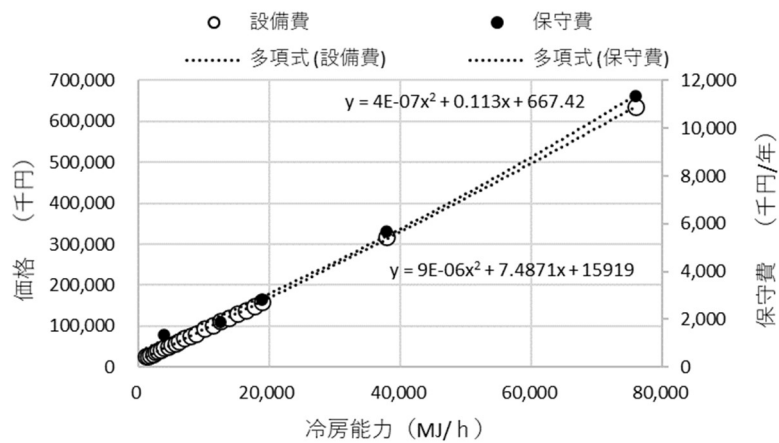
図 3.4 CGS の計算データ



(a)部分負荷特性



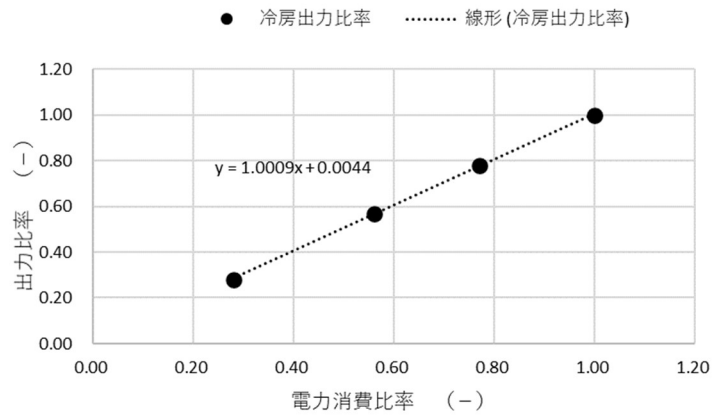
(b)冷房能力別の冷房時 COP・暖房時 COP 推移



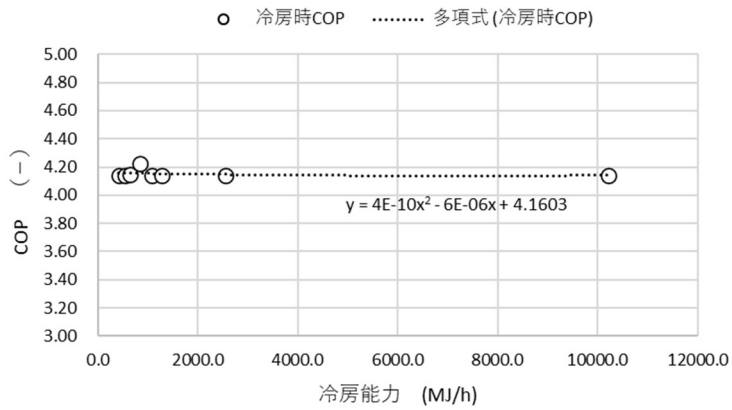
(c)冷房能力別の製品価格・保守費推移

注：燃料入力比率 = 部分負荷時燃料消費量 / 定格時燃料消費量
 出力比率 = 部分負荷時冷房能力（暖房能力） / 定格時冷房能力（暖房能力）

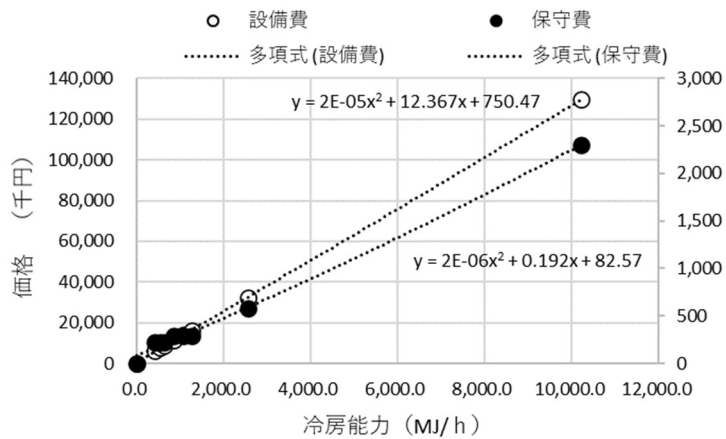
図 3.5 吸収式冷温水機の計算データ



(a)部分負荷特性



(b)冷房能力別の冷房時 COP 推移



(c)冷房能力別の製品価格・保守費推移

注：電力消費比率＝部分負荷時電力消費量／定格時電力消費量

出力比率＝部分負荷時冷房能力／定格時冷房能力

図 3.6 吸収式冷温水機の計算データ

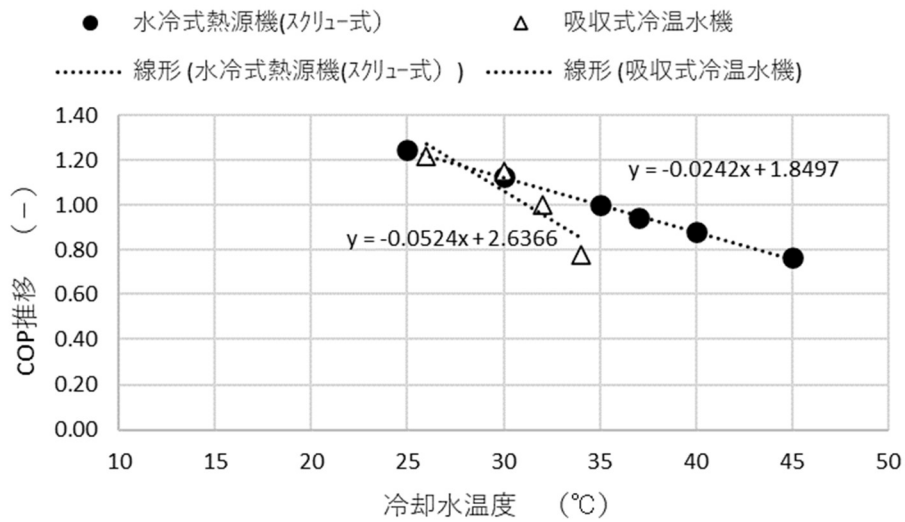


図 3.7 吸収式冷温水機と水冷式熱源機の冷却水温度別 COP 推移
 注：COP 推移＝冷却温度における COP／定格冷却水温度時 COP
 定格冷却水温度：吸収式冷温水機＝32℃、水冷式熱源機＝35℃

3.2.3 最適熱源設計手法による計算例

検討した設計手法を用いて建物の熱源システムを評価した。評価に用いた建物は総合病院であり、延べ床面積 23,000 m²、ベッド数 360 床である。建物のエネルギー需要量について負荷持続曲線を用いて図 3.8 に示す。計算目的を費用最小とし、評価に用いたエネルギー料金単価を表 3.3 に示す。

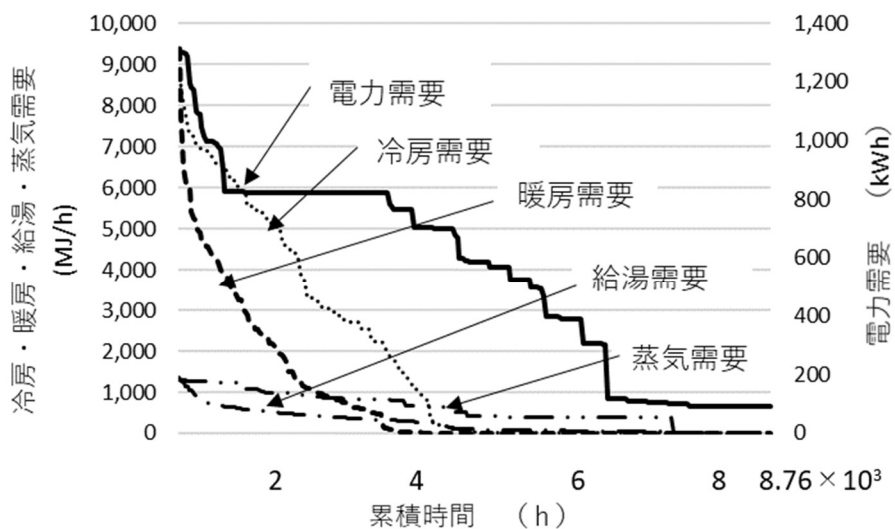


図 3.8 評価建物の負荷持続曲線

表 3.3 エネルギー料金単価

(a)電気料金単価

電力料金単価	単位	単価
基本料金	kW/月	1,200
従量料金（夏季：昼間）	円/kWh	20.85
従量料金（他季：昼間）	円/kWh	18.90
従量料金（夏季：深夜）	円/kWh	6.32
従量料金（他季季：深夜）	円/kWh	6.31

(b)都市ガス料金単価

都市ガス料金単価	単位	単価
定額基本料金（冬季）	円/月	80,000
定額基本料金（他季）	円/月	40,000
従量基本料金（冬季）	円/m ³ ・月	5,377
従量基本料金（他季）	円/m ³ ・月	831
従量料金	円/m ³	41.77

計算は熱源機の組合せを評価することを目的とし、図 3.2 の設計モデルに対して各熱源機器を 1 台として行った。また CGS は都市ガス使用のエンジン式、水冷式熱源機及び空冷式熱源機はスクリー式、蓄熱槽は冷水・温水槽切替えとし蓄熱槽用の熱源機は空冷式熱源機仕様とした。表 3.4 に計算で得られた総費用最小のシステム（表中最適と表示）を示す。また表中に比較 1～4 で示すシステムは最適システムを参照して評価機器を限定し、機器容量の最適化を行った比較システムである。

計算結果では CGS を用い CGS 温水排熱は温水需要に供給し、蒸気ボイラは蒸気需要の供給とともに蒸気吸収式冷凍機供給に使用するシステムが最適であると算出された。しかし算出された最適熱源システムは導入される熱源機器の数が多いことから、最適システムで導入容量の小さい蒸気吸収式冷凍機を除外したシステム（比較 1）を構成した。比較 1 のシステムでは、保守費が増加するものの運転費は最適システムと同額であり、総費用もほぼ同じ値となる。さらに水冷式熱源機を除外した比較 3 のシステムでも最適システムとの総費用の差は少ない。一方比較 2 のシステムは導入熱源機数が少ないため設備償却費が小さいが運転費が大きくなる。また比較 4 のシステムでは蓄熱槽の導入により設備償却費が大きくなり、どちらのシステムも最適システムとの総費用の差は大きい。このように実際の設計においては最適システムを評価した後、最適熱源システムを参照して実際に導入するシステムを検討することが有効である。

表 3.4 計算結果（最適熱源システムと比較熱源システム）

(a) 熱源システム構成

熱源機器	仕様	単位	熱源機構成				
			最適	比較 1	比較 2	比較 3	比較 4
EEQ	商用電力	kW	120	120	900	120	300
CGS	都市ガス使用・エンジン式	kW	800	800	—	800	980
BH	都市ガス使用	MJ/h	1,423	963	2,470	879	4,437
BS	都市ガス使用	MJ/h	1,381	1,381	1,381	1,381	—
AR-f	都市ガス使用	MJ/h	6,279	6,949	9,335	7,953	0
HP-s	水蓄熱（空冷式熱源機）	MJ/h	0	—	—	—	3,307
HP-w	スクリー式	MJ/h	460	419	—	—	—
HP-a	スクリー式	MJ/h	1,967	2,009	0	1,926	2,386
AR-g	温水焚き吸収式冷凍機	MJ/h	0	—	—	—	2,512
AR-s	蒸気焚き吸収式冷凍機	MJ/h	586	—	—	—	—

注：「—」は評価対象としなかったことを表す

(b) 熱源システム別年間総費用（単位：百万円/年）

年間費用	熱源機構成				
	最適	比較 1	比較 2	比較 3	比較 4
設備償却費	26.99	26.92	12.91	26.95	35.15
運転費	75.76	75.76	122.05	76.02	72.58
保守費	13.55	19.06	4.78	18.82	20.54
基本料金	19.08	13.68	23.46	14.34	14.93
総費用	135.38	135.42	163.20	136.13	143.20

3.3 熱源システム設計のための要素技術

3.3.1 クラスタ分析を用いたエネルギー需要の類型化手法の検討

図 3.1 の計算フローで示すように検討した設計手法に用いる各エネルギー需要は時刻別の値であるとともに、年間のエネルギー需要を対象とする必要がある。また年間のエネルギー需要はエネルギー管理情報から 365 日・24 時間データとして取得可能である。しかし非線形計画法による熱源機器容量の探索回数が多く、算出データとして 365 日分のエネルギー需要を対象とした場合には最適解を得るまでに数時間必要である。表 3.5 に図 3.2 の設計モデルにおいて機器容量探索が 100 回で終了した場合の最適解が求まるまでの計算時間を示す。近年コンピューターの処理速度の向上が著しいが、5 種類のエネルギー需要数に対して 24 時間の最適運転方策を混合線形整数計画法により実施した場合の計算時間は 0.5 秒であり、365 日では 182.5 秒を要する。また非線形計画法による機器容量探索が 1 回あたり 100 秒程度であることから、最適解が得られるまでの機器容量探索が 100 回とした場合には 28,250 秒（7.8 時間）を要することになる。このため実際の設計業務に用いるには計算時間の短縮が必要であることから、計算する代表日を限定することを検討した。

表 3.5 計算時間の評価

計算時間対象	秒	備考
24時間の運転方策算出	0.5	混合整数線形系計画法
機器容量の探査	100	非線形計画法
最適解算出(容量探査100回で終了)	28,250	365日×探査回数100回

注：CPU2.4GHz、メモリ 4.0Gbyte

具体的には 365 日分のエネルギー需要を対象とし、設計データとして有効な計算代表日をクラスター分析[11]により類型化する手法を検討した。クラスター分析は電力、冷房、暖房、給湯、蒸気の需要量を対象として、建物を特徴づけるエネルギー需要の組み合わせを選出することである。需要ごとに需要の要素とその発生要因について整理した結果を表 3.6 に示すが、各需要は人為的活動に影響を受ける要素と気象条件に影響を受ける要素で構成される。ここで人為的活動とは建物の営業日／非営業日、イベントの有無等により生じる需要であり、人為的活動量が増加すると各需要の日合計需要量も大きくなる。従って需要を類型化する場合の指標の一つは各需要の日合計需要量の大きさとみなすことができる。また気象条件により生じる需要の組み合わせや各需要量の相対的な大きさも各日において異なることから各需要量の組み合わせについても類型化する指標と考えられる。

一方、時刻推移パターンについても需要を類型化する指標の一つと考えられるが、建物が定常的な運用形態となっている場合には日別の合計需要量が同じで、かつ各需要の日別需要量の組み合わせが同じであれば時刻別推移パターンは近似すると考えられる。従って時刻推移パターンは「日別合計需要量の大きさ」と「日別需要量の組み合わせ」に内在しているとみなし、時刻別パターンの類型化は必要ないものとした。

以上の考察から需要を類型化する指標として、人為的活動を評価する「日別合計需要量の大きさ」と気象条件を評価する「日別需要量の組み合わせ」を取り上げる。また日別合計需要量の大きさを評価する指標 1 の定義式を式 3.3、日別需要量の組み合わせを評価する指標 2 の定義式を式 3.4 に示す。

表 3.6 需要の要素とその発生要因

需要種類	需要の内容	需要の発生要因
電力需要（熱源電力除く）	照明コンセント・一般動力他	人為的活動
空調需要 (冷房需要、暖房需要)	内部発熱需要	人為的活動
	外皮需要 外気需要	気象条件
給湯需要	給湯使用量	人為的活動
	給水温度	気象条件
蒸気需要	滅菌、調理	人為的活動
	加湿	気象条件

$$\text{指標 1} = (E + SC + SH + HW + ST) \quad (3.3)$$

E, SC, SH, HW, ST : 電力, 冷房, 暖房, 給湯, 蒸気の日総需要量 (kWh/day) (MJ/day)

$$\text{指標 2} = C \{SC/E, SH/E, HW/E, ST/E\} \quad (3.4)$$

$C \{ \}$ は組み合わせを表す

式 3.4 において各需要の需要量の組み合わせを熱の需要 (冷房, 暖房, 給湯, 蒸気) と電力需要の比 (以下熱電比) としたのは次の理由である。

表 3.6 より、電力需要の発生要因は人為的活動のみであり、その他の需要の発生要因は人為的活動と気象条件の合成である。従って熱電比を評価することによって人為的活動の影響が相殺され、気象条件による各熱需要量の大きさが強調されると考えられる。

図 3.9 に類型化の手順を示す。類型化の指標である「合計需要量の大きさ」と「需要量の組み合わせ」は独立した指標と考えられることから、第 1 ステップとして「日別合計需要量」(指標 1) を用いてクラスター分析を実施し、第 2 ステップとして第 1 ステップで得られたクラスター毎に「日別需要量の組み合わせ」(指標 2) を用いてクラスター分析を実施する。

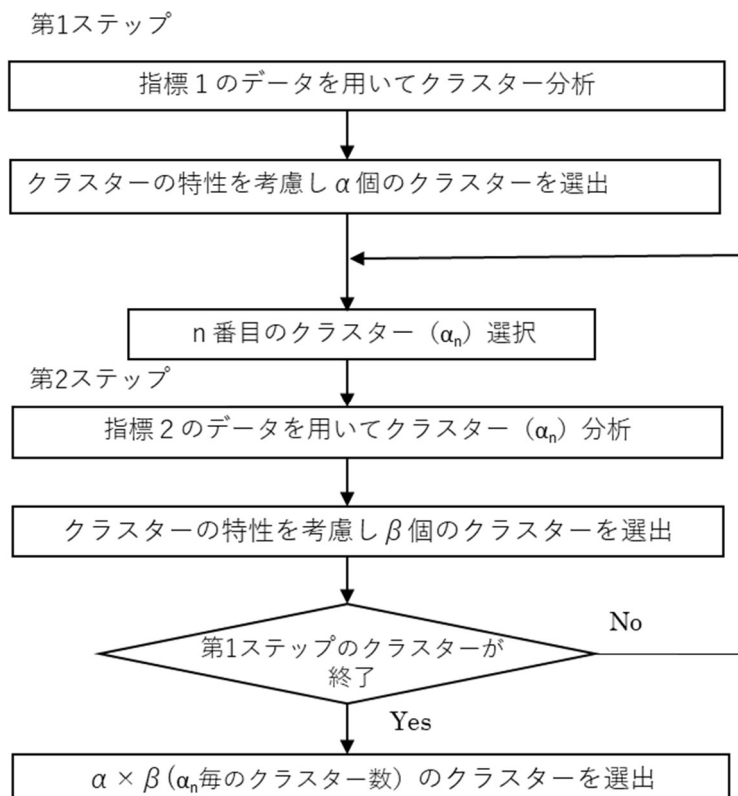


図 3.9 類型化手順

図 3.10 に第 1 ステップ及び第 2 ステップのクラスター分析による類型化の様子を示す。評価データは総合病院のエネルギー需要を対象としたが、類型化データは各月の第 1 週目の日曜日から土曜日までの 1 週間を用いた 84 日/年とした。また図 3.10 はクラスター間距離を表すデンドログラムを用いて示しているが、類型化需要の特徴としてクラスター 1 は中間期平日及び夏期・冬期の土日、クラスター 2 は中間期土日、クラスター 3 は盛夏期・厳冬期平日、クラスター 4 は夏期・冬期の平日として分類されている。なおクラスター分析は Ward 法[11]を用いた。

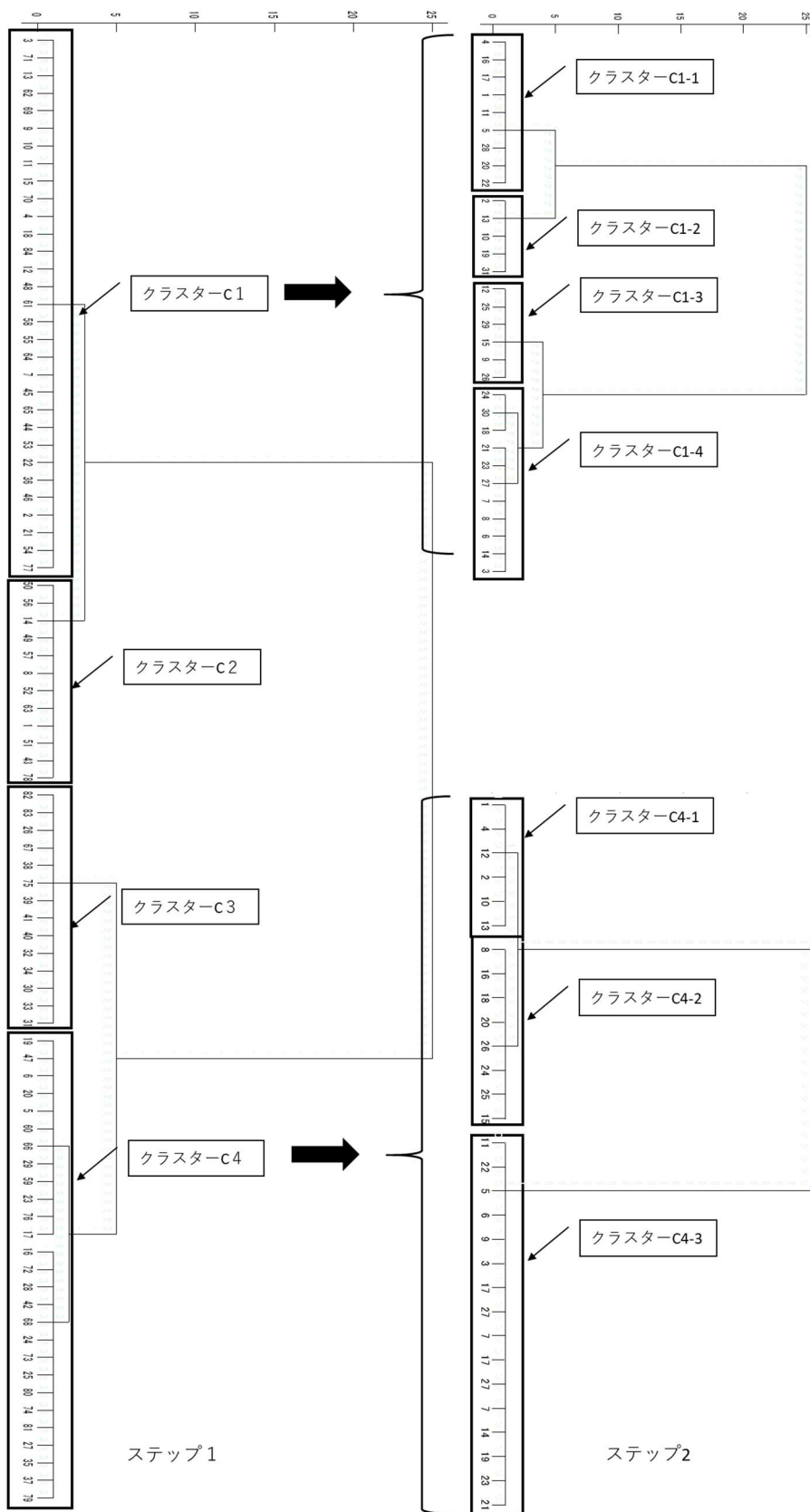


図3.10 第1ステップ及び第2ステップの類型化

表 3.7 に類型化結果を示すが、第 2 ステップのクラスター分析によりさらに特徴化されたエネルギー需要が分類されている。設計計算に用いる代表日は第 2 ステップで分類されたクラスターにおいて、類型化距離が最小値である日を選出する。表 3.8 に選出した代表日と適用日数及び類型化誤差を示すが、クラスター分析の結果 365 日(計算に用いたのは 84 日)のエネルギー需要は特徴を有する 12 日の代表日で評価することが可能であり、誤差は最大でも 4%である。12 代表日を用いて図 3.1 に示す最適設計計算を行った場合の計算時間は約 2.9 時間となり、大幅に短縮される。

表 3.7 クラスター分析による類型化結果

(a)クラスターC1

クラスター	日付	曜日	kWh/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	類型化距離	
			電力需要	冷熱需要	温熱需要	給湯需要	蒸気需要	総エネルギー		
C1-1	4	12月10日	金	76,060	40,604	98,790	17,156	158,382	588,744	41.0
	16	12月9日	木	75,570	41,023	104,231	20,523	157,632	595,458	37.8
	17	12月6日	月	76,120	38,511	113,022	19,561	158,857	603,981	37.0
	1	4月6日	火	74,020	55,255	111,766	16,835	127,909	578,235	33.2
	11	4月7日	水	73,280	50,232	118,045	17,637	121,082	570,801	34.6
	5	1月14日	金	76,070	40,186	134,789	16,354	123,042	588,220	42.0
	28	4月5日	月	73,020	56,930	98,790	17,958	106,520	543,066	49.5
	20	4月10日	土	60,870	58,604	105,487	8,338	125,220	516,778	44.9
	22	1月10日	月	58,590	44,790	123,906	9,620	123,058	512,295	57.8
C1-2	2	2月6日	日	59,240	30,558	169,114	8,177	157,139	578,250	19.7
	13	3月11日	土	62,010	35,162	169,114	8,498	175,036	611,044	19.2
	10	1月15日	土	63,680	28,046	153,626	8,498	146,601	566,016	18.8
	19	1月9日	日	57,060	39,767	135,208	7,376	134,537	522,301	18.8
	31	2月12日	土	59,270	28,465	134,789	9,460	160,146	546,230	19.1
C1-3	12	6月9日	水	82,090	158,231	41,441	16,515	100,105	611,812	22.3
	25	7月4日	日	72,580	139,812	36,418	7,536	91,028	536,080	22.1
	29	6月12日	土	69,940	143,998	39,767	7,376	99,176	542,098	22.6
	15	10月8日	金	81,970	172,045	30,976	14,270	87,152	599,532	23.3
	9	6月6日	日	68,010	172,463	43,953	6,413	93,297	560,960	28.8
	26	9月5日	日	69,150	197,161	25,535	5,932	75,328	552,893	40.4
C1-4	24	11月10日	水	76,800	50,232	66,139	16,835	122,780	532,464	83.9
	30	11月11日	木	77,180	49,813	64,046	15,072	137,647	544,422	91.3
	18	11月12日	金	77,700	72,836	58,185	16,675	95,681	523,095	60.9
	21	10月5日	火	79,600	98,790	21,767	14,270	96,623	518,007	53.6
	23	10月4日	月	80,020	115,115	21,767	14,430	94,646	534,027	53.5
	27	10月6日	水	80,820	130,603	25,953	14,430	87,160	549,096	61.4
	7	5月11日	火	78,730	101,301	51,488	14,751	111,842	562,807	44.7
	8	5月12日	水	79,340	107,162	44,790	15,713	109,964	563,249	42.2
	6	5月10日	月	79,460	127,673	53,581	16,996	102,148	586,450	51.2
	14	5月13日	木	81,040	136,045	48,976	16,835	105,176	598,774	54.3
	3	5月14日	金	81,470	120,975	45,627	14,110	106,853	580,854	43.6

(b) クラスターC2

クラスター		日付	曜日	kWh/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	類型化距離
C2				電力需要	冷熱需要	温熱需要	給湯需要	蒸気需要	総エネルギー	
C2-1	9	4月4日	日	58,060	38,511	110,510	8,338	127,369	493,742	11.5
	12	3月5日	日	58,660	38,930	113,441	8,177	130,063	501,785	12.0
	5	12月5日	日	59,400	26,372	104,650	8,979	103,097	456,936	17.5
	8	12月11日	土	61,450	30,976	82,883	9,781	138,517	483,374	18.5
C2-1	2	11月13日	土	63,450	60,697	46,046	7,857	70,274	413,291	8.1
	10	11月8日	月	76,930	75,348	55,674	16,354	69,465	493,786	10.5
	1	11月7日	日	59,630	37,674	47,720	7,055	70,417	377,532	11.4
	7	11月9日	火	76,140	63,627	42,279	16,194	91,169	487,370	9.5
C2-3	3	5月15日	土	63,730	71,162	37,674	7,696	104,516	450,474	24.5
	4	10月9日	土	66,050	89,999	24,279	9,460	88,034	449,549	20.1
	6	5月9日	日	62,530	110,092	48,139	7,536	96,052	486,924	20.9
	11	10月3日	日	66,830	152,370	23,442	5,932	71,814	494,144	30.8

(c) クラスターC3

クラスター		日付	曜日	kWh/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	類型化距離
C3				電力需要	冷熱需要	温熱需要	給湯需要	蒸気需要	総エネルギー	
C3-1	10	8月4日	水	98,690	368,787	22,186	15,553	71,483	833,288	16.2
	11	8月6日	金	98,510	367,949	23,023	14,911	69,318	829,834	16.6
	12	8月2日	月	96,700	362,089	24,697	15,553	69,475	819,930	16.8
	13	8月5日	木	98,530	359,996	21,349	15,232	70,513	821,794	15.2
	14	8月3日	火	96,830	357,903	22,186	16,034	70,495	815,202	14.9
	3	7月8日	木	84,980	322,741	30,139	15,873	82,757	757,435	30.7
	5	9月7日	火	93,360	316,043	24,697	13,308	73,919	764,060	25.4
	9	9月9日	木	96,950	325,671	23,860	12,506	77,026	788,080	27.5
	7	9月8日	水	96,130	339,485	25,116	12,987	75,536	799,188	17.2
	8	9月10日	金	95,490	341,996	25,116	14,911	78,665	804,449	16.4
C3-2	1	3月9日	木	76,780	60,697	208,463	17,637	206,423	769,625	9.4
	2	3月10日	金	76,660	51,069	220,184	17,156	209,608	773,990	8.0
	6	2月10日	木	76,740	43,953	205,951	16,034	207,212	749,410	9.5
	4	1月5日	水	75,410	46,046	237,765	15,873	187,819	758,976	14.0

(d) クラスターC4

クラスター	日付	曜日	kWh/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	MJ/day	類型化距離	
			電力需要	冷熱需要	温熱需要	給湯需要	蒸気需要	総エネルギー		
C4-1	1	6月10日	木	83,560	173,719	46,046	16,675	107,152	644,404	18.4
	4	6月11日	金	83,420	181,254	44,372	16,835	104,266	647,036	15.1
	12	6月8日	火	83,350	182,510	35,581	15,392	100,450	633,990	14.4
	2	10月7日	木	84,910	215,160	24,697	14,270	82,651	642,452	21.9
	10	7月5日	月	84,960	193,393	36,418	7,055	82,508	625,227	17.2
	13	6月7日	月	83,510	217,253	46,046	14,911	96,372	675,215	21.4
C4-2	8	8月1日	日	76,270	249,904	24,279	7,215	67,942	623,909	35.3
	16	9月11日	土	81,240	276,695	25,953	6,093	83,156	684,358	33.9
	18	7月6日	火	83,370	274,183	35,581	15,873	84,042	709,808	35.1
	20	7月7日	水	85,300	262,881	37,674	14,591	91,341	713,563	43.7
	26	9月6日	月	91,520	279,206	25,953	13,789	78,060	726,476	45.3
	24	7月9日	金	81,290	316,462	28,465	14,591	79,446	731,604	44.1
	25	8月7日	土	84,020	318,973	26,790	8,819	74,742	731,793	40.8
15	7月10日	土	68,370	322,741	23,442	14,110	76,202	682,624	93.6	
C4-3	11	2月11日	金	61,320	42,279	164,091	10,903	189,982	628,005	116.2
	22	2月9日	水	67,750	48,139	209,300	17,316	201,477	720,129	136.3
	5	4月8日	木	74,430	43,534	138,557	16,515	181,521	648,072	72.0
	6	12月8日	水	76,590	38,511	131,859	17,316	185,798	649,205	84.0
	9	12月7日	火	75,840	38,511	125,161	16,194	169,937	622,825	92.2
	3	4月9日	金	74,600	56,930	126,836	17,477	177,077	646,877	84.3
	17	1月6日	木	75,570	42,697	205,533	16,354	153,461	690,094	96.9
	27	3月6日	月	75,870	59,023	199,254	17,316	178,127	726,848	76.9
	7	1月4日	火	72,630	49,813	167,440	16,354	155,677	650,750	66.7
	14	2月7日	月	76,300	50,232	168,696	18,118	166,217	677,940	64.2
	19	2月8日	火	77,040	51,488	177,905	16,034	185,563	708,330	60.6
	23	3月8日	水	76,250	63,627	179,579	16,996	186,427	721,127	64.7
	21	3月7日	火	76,560	66,976	157,394	16,515	183,055	699,552	67.2

表 3.8 選出した代表日と適用日数及び類型化誤差

クラスター	代表日	曜日	適用日数	MWh/day	GJ	GJ	GJ	GJ	GJ
				電力需要	冷熱需要	温熱需要	給湯需要	蒸気需要	総エネルギー
C1-1	4月6日	火	9	666	497	1,006	152	1,151	5,204
C1-2	1月15日	土	5	318	140	768	42	733	2,830
C1-3	7月4日	日	6	435	839	219	45	546	3,216
C1-4	5月12日	水	11	873	1,179	493	173	1,210	6,196
C2-1	4月4日	日	4	232	154	442	33	509	1,975
C2-2	11月13日	土	4	254	243	184	31	281	1,653
C2-3	10月9日	土	4	264	360	97	38	352	1,798
C3-1	8月3日	火	10	968	3,579	222	160	705	8,152
C3-2	3月10日	金	4	307	204	881	69	838	3,096
C4-1	6月8日	火	6	500	1,095	213	92	603	3,804
C4-2	9月11日	土	8	650	2,214	208	49	665	5,475
C4-3	2月8日	火	13	1,002	669	2,313	208	2,412	9,208
類型化需要合計				6,470	11,173	7,045	1,093	10,006	52,608
実需要合計				6,411	11,259	6,955	1,135	9,925	52,354
誤差				-0.01	0.01	-0.01	0.04	-0.01	0.00

注：誤差 = (実需要量 - 類型化需要量) ÷ 実需要量

3.3.2 AHP による意思決定法の適用

検討した熱源システムの設計手法では、設計目的をエネルギー費用最小、エネルギー消費量最小、CO₂ 排出量最小と選ぶことができるが、多数の設計目的を同時に評価することはできない。この課題に対し多目的最適化手法による熱源システム設計の研究[12]が報告されている。この方法は数理計画法を用いた手法であるが、得られる解はパレート最適解であり各目的はトレードオフの関係を有する。従って設計者は得られた幾つかの熱源システムの選択肢から個々の目的の値を評価して主観的に選択せざるを得ない。一方数理計画法を用いずイニシャルとランニングコスト二軸平面座標を用い、設計システムごとの差を平面座標のベクトルとして評価する手法[13]が提案されているが、設計においてはイニシャルコスト、ランニングコストの他にも操作性や信頼性などの評価が重要である。

空気調和設備計画[2]から考察した熱源設計にける評価指標を表 3.9 に示す。設計においてはエネルギー消費量やエネルギー費用など数値評価が可能な指標とともに、機能性や信頼性などの設備グレード、工事条件など設計者の意思や思想を反映する指標も存在する。このように多目的な条件を考慮しながら合理的に熱源システムを決定するのは困難な作業と言わざるを得ない。

表 3.9 熱源設計における評価指標

制約	評価指標
与条件項目	立地条件、都市インフラ条件、法的条件、建物条件
裁量可能項目	設備グレード（機能条件）、工事条件、 経済条件（設備費・運転費・保守費）、環境条件（省エネ・CO ₂ 排出量）

このような多目的な意思決定方法に AHP (Analytic Hierarchy Process) [14,15]があり、感覚的な評価指標も取り扱うことが可能である。AHP を用いた事例として、空調用自動制御機器の保全対策の意思決定[16]や熱源システムの最適運転管理[17]が提案されている。しかし AHP を利用した熱源システム設計についての研究報告はない。本研究では AHP を利用し、数値評価が可能な指標と設計者の思想を反映する指標を統合的に評価して熱源システムの意思決定を行う手法について検討を行う。

AHP を適用する場合の問題点としては①評価すべき代替案の合理的な選定②客観的な階層構造の作成③一対比較の妥当性が指摘されている[18]。本報告では、評価すべき代替案の選定については図 3.2 の設計モデルによる設計手法を用い、客観的な階層構造については ISM (Interpretive Structural Modeling) 手法[15,19]を用いる。これらの手法を統合的に用いることにより AHP を用いた多評価指標における熱源システムの決定を行う。

(1) ISM を用いた意思決定階層構造の構築

表 3.9 の評価指標から具体的に設定した評価指標を表 3.10 に示すとともに、12 の評価項目についての関係性を表す有向グラフを図 3.11 示す。有向グラフでは 2 つの評価指標間に因果関係があるときは関係を表す向きに矢印を記している。次に作成した有向グラフについて、評価指標間に因果関係がある場合は 1、関係がない場合は 0 としてグラフを行列で

表現する (図 3.12)。この行列は隣接行列 $\{A\}$ とよばれ有向グラフを表す。次に隣接行列 $\{A\}$ に単位行列 $\{I\}$ を足し合わせるとともに $\{I+A\}^n$ をブール演算により求める。式 3.5 に示す条件となるまで計算を続け、最終的に得られた $n+1$ 回目の行列を可達行列 (図 3.14) として採用する。

$$\{I+A\}^n = \{I+A\}^{n+1} \quad n=1,2,\dots \quad (3.5)$$

意思決定階層は可到達行列より階層化レベルを得る。可到達行列の第 i 行 j 列要素を m_{ij} とすると、 $R_i = \{\text{第 } i \text{ 行に注目して、} m_{ij} = 1 \text{ となる全ての要素 } s_j\}$, $A_i = \{\text{第 } i \text{ 列に注目して、} m_{ki} = 1 \text{ となる全ての要素 } s_k\}$ を求める。次に R_i と A_i の共通集合 $R_i \cap A_i$ を求め可達行列の始点と終点の関係を評価して階層化レベルを決定する。図 3.14 に可到達行列より作成した評価指標の構造を示す。

表 3.10 具体的な評価指標

①経済性	②設備費	③運転費	④信頼性(故障・災害対応)
⑤設置面積	⑥将来性(需要変動対応 拡張性)	⑦環境性	
⑧騒音・振動	⑨省エネルギー性	⑩機能性	⑪保守管理
⑫排出CO2			

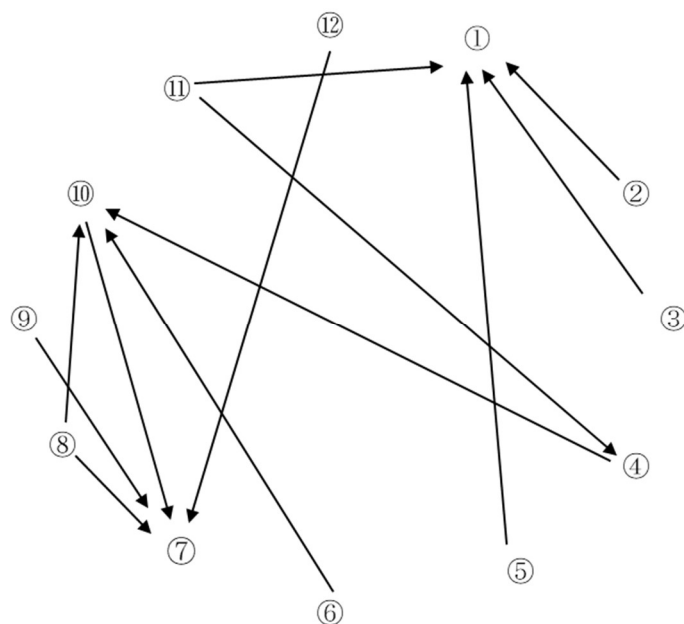


図 3.11 評価指標間の有向グラフ

評価指標の終点側①～⑫

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

始点側 ①
⑫

評価指標の終点側①～⑫

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

始点側 ①
⑫

図 3.12 隣接行列

図 3.13 可達行列

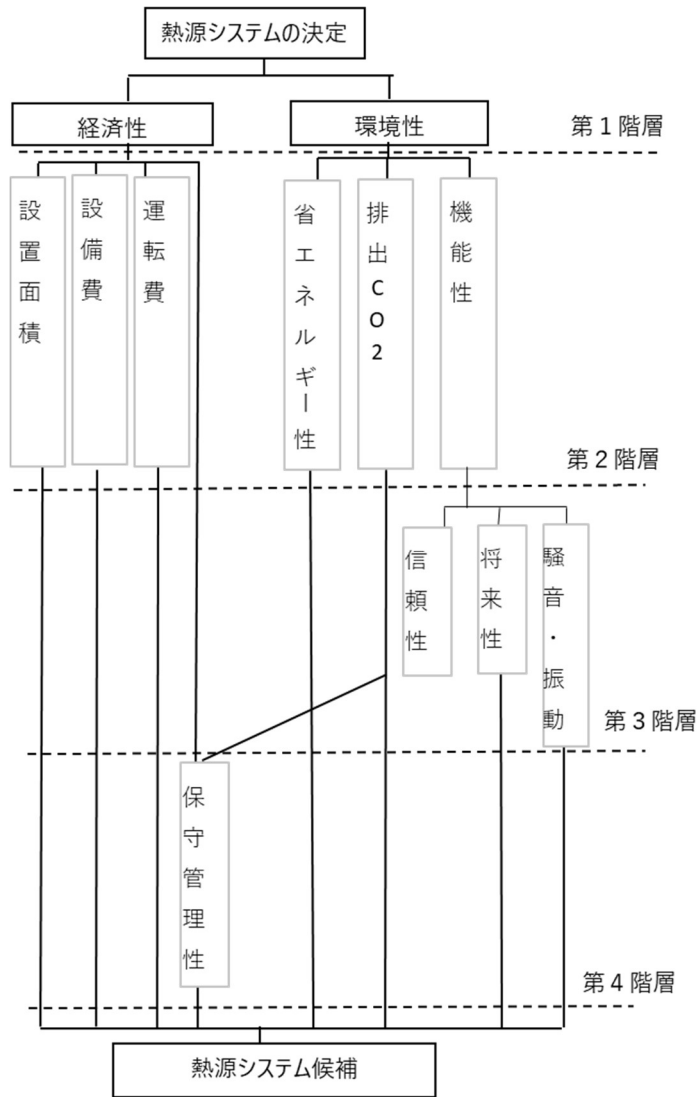


図 3.12 可達行列より求めた意思決定階層

(2)AHP による意思決定

AHP では各評価指標の対比較を評価指標間の比を用いて評価することにより、各評価指標の重要度を求める。次に階層構造を成す評価指標の重要度を合成することにより、全体としての評価指標間の重要度を決定する。熱源システムの評価は、評価指標ごとに熱源システム候補を評価してゆき、この重要度で合成することにより各熱源システムの総合評価を求めることができる。

AHP を用いた多目的評価について、20,000 m²の病院を対象に検討を行った。はじめに AHP で評価するための階層構造はツリー状の構造を仮定していることから図 3.12 の意思決定構造を評価指標の考察に基づき図 3.13 の階層構造に更新した。また設備費、運転費及び保守費管理費は総合費用として合計し階層の一つとした。次に設計モデル 3.2 を用いてエネルギー費用最小とした最適システム及び比較システムを求め、熱源システム候補とした(表 3.11)。表 3.11 に示した設置面積、信頼性、騒音・振動及び将来性は以下の定義としてシステム間の比較尺度(数値が大きいほど好適)で評価した。

- ①設置面積：熱源システムの機械室面積を表し、熱源機器の数が多いシステムほど不利。
- ②信頼性：エネルギー供給の安定性を表し、回転機器が多いシステムほど不利。一方複合熱源を有するシステムほど有利。
- ③騒音・振動：熱源システムから発生する騒音・振動を表し、CGS、回転機器を有するシステムは不利。
- ④将来性：将来的な需要変動や購入エネルギー条件の変動に対する柔軟性を表し、複合熱源を有するシステムほど有利。

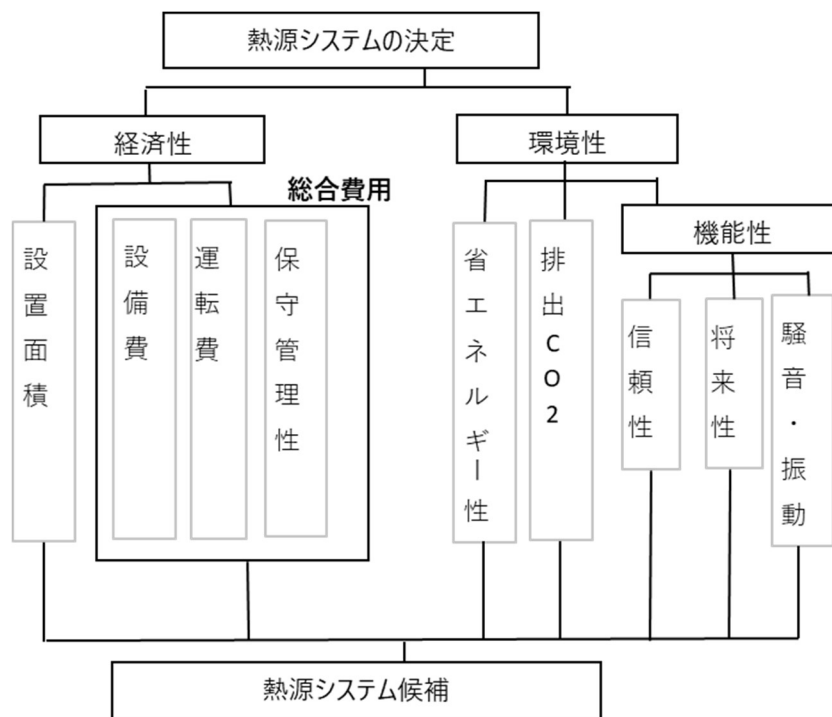


図 3.13 更新した意思決定階層

表 3.11 熱源システムの候補

システム	単位	system1	system2	system3	system4	system5
EEQ	kW	120	900	300	670	120
CGS	kW	800	0	980	770	800
BH	MJ/h	963	2,470	4,437	5,191	963
BS	MJ/h	1,381	1,381	1,381	1,381	1,381
AR-f	MJ/h	6,949	9,335	0	0	6,949
HP-s	MJ/h	0	0	2,512	2,512	0
HP-w	MJ/h	0	0	3,307	5,860	0
HP-a	MJ/h	419	0	0	0	419
AR-g	MJ/h	2,009	0	2,386	0	2,009
AR-s	MJ/h	0	0	0	0	0
設備費	百万円/年	31.07	15.56	37.18	34.00	31.07
運転費	百万円/年	59.00	87.49	57.77	76.86	60.03
保守費	百万円/年	14.74	2.09	16.53	9.48	13.11
基本料金	百万円/年	14.22	26.47	16.04	22.00	14.22
総合費用		119.03	131.61	127.52	142.34	118.43
エネルギー消費量	MJ/年	578.39	586.72	569.18	556.58	577.87
CO ₂ 排出量	t-CO ₂ /年	1019.00	949.00	994.00	919.00	1014.00
設置面積	(比較尺度)	3	9	3	5	3
信頼性	(比較尺度)	3	9	3	5	3
騒音・振動	(比較尺度)	5	9	3	3	3
将来性	(比較尺度)	5	1	9	7	5

更新した意思決定階層図（図 3.13）にもとづき各指標間の一対比較と上位階層の総合評価を行った。総合評価の算出は同階層レベルの一対比較値から各指標の重要度を求め（表 3.12）、上下階層の重要度は上位階層の一対比較から重要度を求めた上で、上位階層の重要度をさらに掛け合わせて求める。結果を表 3.13～表 3.16 に示す。ここで総合費用、エネルギー消費量及び CO₂ 排出量の一対比較値は熱源システム設計時に算出された値を直接用いて算出し、その他比較値については設計者の意思や思想に基づいて任意で設定する。

表 3.12 同じ階層の重要度計算式

指標	A	B	重要度
A	$\alpha 1$	$\beta 1 = 1/\beta 2$	$\gamma 1 = \sqrt[n]{\alpha 1 \times \beta 1} / (\sqrt[n]{\alpha 1 \times \beta 1} + \sqrt[n]{\alpha 2 \times \beta 2})$
B	$\alpha 2$	$\beta 2 = 1/\alpha 1$	$\gamma 2 = \sqrt[n]{\alpha 2 \times \beta 2} / (\sqrt[n]{\alpha 1 \times \beta 1} + \sqrt[n]{\alpha 2 \times \beta 2})$

注：n は指標の数 表 3.12 では n=2

表 3.13 経済性カテゴリの一対比較

(a)設置面積と総合費用

経済性	設置面積	総合費用	重要度
設置面積	1.00	0.05	0.05
総合費用	20.00	1.00	0.95

(b)設置面積と熱源システム

設置面積	システム1	システム2	システム3	システム4	重要度
システム1	1.00	0.43	1.00	0.60	0.17
システム2	2.33	1.00	2.33	1.40	0.39
システム3	1.00	0.43	1.00	0.60	0.17
システム4	1.67	0.71	1.67	1.00	0.28

(c)総合費用と熱源システム

総合費用	システム1	システム2	システム3	システム4	重要度
システム1	1.00	1.11	1.07	1.20	0.27
システム2	0.90	1.00	0.97	1.08	0.25
システム3	0.93	1.03	1.00	1.12	0.25
システム4	0.84	0.92	0.90	1.00	0.23

(d)経済性の総合評価

経済性の総合評価	設置面積	総合費用	重要度
システム1	0.01	0.26	0.27
システム2	0.02	0.23	0.25
システム3	0.01	0.24	0.25
システム4	0.01	0.22	0.23

表 3.14 機能性カテゴリの一対比較

(a)信頼性、将来性、騒音・振動

機能性	信頼性	将来性	騒音・振動	重要度
信頼性	1.00	7.00	3.00	0.67
将来性	0.14	1.00	0.33	0.09
騒音・振動	0.33	3.00	1.00	0.24

(b)信頼性と熱源システム

信頼性	システム1	システム2	システム3	システム4	重要度
システム1	1.00	0.43	1.00	0.60	0.17
システム2	2.33	1.00	2.33	1.40	0.39
システム3	1.00	0.43	1.00	0.60	0.17
システム4	1.67	0.71	1.67	1.00	0.28

(c)将来性と熱源システム

将来性	システム1	システム2	システム3	システム4	重要度
システム1	1.00	7.00	0.78	1.00	0.29
システム2	0.14	1.00	0.11	0.14	0.04
システム3	1.29	9.00	1.00	1.29	0.38
システム4	1.00	7.00	0.78	1.00	0.29

(d)騒音・振動と熱源システム

騒音・振動	システム1	システム2	システム3	システム4	重要度
システム1	1.00	0.71	1.67	1.67	0.28
システム2	1.40	1.00	2.33	2.33	0.39
システム3	0.60	0.43	1.00	1.00	0.17
システム4	0.60	0.43	1.00	1.00	0.17

(e)機能性の総合評価

機能性の総合評価	信頼性	将来性	騒音・振動	重要度
システム1	0.11	0.03	0.07	0.20
システム2	0.26	0.00	0.09	0.36
システム3	0.11	0.03	0.04	0.18
システム4	0.19	0.03	0.04	0.25

表 3.15 環境性カテゴリーの一対比較

(a)省エネルギー性、排出CO₂、機能性

環境性	省エネ	排出CO ₂	機能性	重要度
省エネルギー性	1.00	0.33	0.33	0.14
排出CO ₂	3.00	1.00	1.00	0.43
機能性	3.00	1.00	1.00	0.43

(b)省エネルギー性と熱源システム

省エネルギー性	システム1	システム2	システム3	システム4	重要度
システム1	1.00	1.01	0.98	0.96	0.25
システム2	0.99	1.00	0.97	0.95	0.24
システム3	1.02	1.03	1.00	0.98	0.25
システム4	1.04	1.05	1.02	1.00	0.26

(c) 排出CO₂と熱源システム

排出CO ₂	システム1	システム2	システム3	システム4	重要度
システム1	1.00	0.93	0.98	0.90	0.24
システム2	1.07	1.00	1.05	0.97	0.26
システム3	1.03	0.95	1.00	0.92	0.24
システム4	1.11	1.03	1.08	1.00	0.26

(c) 環境性の総合評価

環境性の総合評価	省エネ	排出CO ₂	機能性	重要度
システム 1	0.04	0.10	0.09	0.22
システム 2	0.03	0.11	0.15	0.30
システム 3	0.04	0.10	0.08	0.22
システム 4	0.04	0.11	0.11	0.26

表 3.16 環境性カテゴリの一对比較

第1階層	経済性	環境性	重要度
経済性	1.00	5.00	0.83
環境性	0.20	1.00	0.17

表 3.13～3.16 の値を用いて熱源システムの総合評価を算出（表 3.17）した結果、熱源システム 1 と熱源システム 2 が設計意思を反映したシステムとして選定された。

表 3.17 熱源システムの総合評価

総合評価	経済性	環境性	重要度
システム 1	0.22	0.04	0.26
システム 2	0.21	0.05	0.26
システム 3	0.21	0.04	0.24
システム 4	0.19	0.04	0.23

3.4 結言

熱源システムの設計は最大負荷による熱源機容量の検討や全負荷運転相当時間にもとづくエネルギー消費量の算出が一般的に行われている。また熱源機の選択に関しては設計者自身の経験にもとづいて検討されているのが一般的である。しかし建物の運用におけるライフサイクルコストは建物全体のライフサイクルコストの 50%と試算されており、合理的な手法による設計が求められている。このような状況から特に設計情報が十分に取得されている改修時の熱源設計を対象として最適化手法を用いた設計方法を検討した。

現状においては各種シミュレーターを用いた設計が提案されている。しかしこれらの設計方法は任意の熱源システムを設定して年間エネルギー消費量を評価するものであり、最適な機器容量や機器の組合せの検討は難しい。検討した設計手法では建物で使用する可能性のある熱源機器を包括した設計モデルを構築し最適化手法を適用することにより機器容量や組合せを評価することが可能である。一方構築した設計モデルは大規模な評価モデルであることから最適解を得るまでに長い時間を要するという課題があった。そこで設計モデルに対して計算時間を短縮するための手法を検討した。この手法はエネルギー管理で取得されている 365 日のエネルギー需要データにクラスター分析を適用し、大規模設計モデルで使用する代表日を合理的に選択するものである。このクラスター分析手法は現在提案

されているシミュレーターを用いた設計方法にも利用可能である。クラスター分析で合理的に選定した代表日数は12～15であり、365日分を対象とした計算よりも短時間で計算することが可能である。

一方、構築した設計手法はエネルギー費用、エネルギー消費量及びCO₂排出量のいずれかを最小化目的とした単目的最適化である。しかし熱源設計では多様な設計指標を考慮する必要がある、将来性や信頼性などの数値では表現できない指標を考慮することも重要である。特に将来性や信頼性などの指標は設計者の意思や思想を反映するものである。このような数値で評価できない指標を含めた多目的評価について、AHPを用いた評価手法を検討した。またAHPを用いるために、ISMを利用した設計における意思決定階層の構築方法についても検討を行った。その結果、熱源システムの候補選定やエネルギー費用・エネルギー消費量などの数値評価が可能な指標については最適化手法を用いた設計手法を用い、設計者の意思や思想を反映する指標と合わせてAHPを適用することにより、熱源システムを総合的に評価することが可能であることを示した。

第3章の参考文献

1. 空気調和・衛生工学会; 空気調和設備の計画設計の実務の知識 pp.15-18, オーム社 平成12年2月25日 第1版第6刷
2. 空気調和・衛生工学会; 空気調和設備の計画設計の実務の知識 pp.33-41, pp.97-104, オーム社 平成12年2月25日 第1版第6刷
3. 古川 善教; 久保 隆太郎; 村田 泰孝; 北村 邦彦; 石原 修; 最適熱源機システム構築のための簡易型設計支援ツールの開発, 社団法人空気・衛生工学会論文集 No.142, 2009年1月
4. 竹島 卓磨; 奥宮 政哉; 丹羽 英治; 村西 良司; 井上 聡; 改修段階のエネルギーマネジメントにおけるLCEM(ライフサイクルエネルギーマネジメント)ツールの活用, 空気調和・衛生工学会論文集 No.161, 2010年8月
5. BEST (Building Energy Simulation Tool); http://www.ibec.or.jp/best/about/pdf/pamphlet_131212.pdf, 一般社団法人 建築環境・省エネルギー機構
6. LCEM (Life Cycle Energy Management) ツール Ver3.10 主要オブジェクトの計算アルゴリズム; 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課, 平成26年2月
7. 石田義洋; 大岡 龍三; 加用 現空; 中島 慶悟; 数値解析手法による複合熱源システムの機器運用の最適化 第1報—数値解析手法と計算例, 空気調和・衛生工学会論文集 No.204, 2014年3月
8. 前原 則保; 下田 吉之, 熱源最適運転制御手法の研究—PSO(Particle Swarm Optimization)手法による地域冷房プラントの最適運転制御方法の研究—; 空気調和・衛

生工学会論文集 No.209, 2014 年 6 月

9. 伊藤弘一; 横山良平; コージェネレーションの最適計画, 産業図書株式会社, 平成 2 年 4 月 27 日初版
10. BEST Program (BEST-P) 機器特性マニュアル 2014.06; 財団法人建築環境・省エネルギー機構 Home Page. : http://www.ibec.or.jp/best/program/m_131_kikitokusei.pdf
11. 永田 靖; 多変量解析法入門, 株式会社サイエンス社, 2003 年 12 月 pp175-185
12. 伊東 弘一; 大河内 勝彦; 柴田 究; 冷暖房負荷を考慮したヒートポンプシステムの多目的最適設計, 空気調和・衛生工学会論文集 No.29, 1985 年 10 月
13. 酒井 寛二; 福島 正之; 遠藤 清尊, 省エネルギー建築の計画に関する研究; 空気調和・衛生工学会論文集 No.11, 1979 年 10 月
14. 刀根 薫; ゲーム感覚意志決定法 AHP 入門, 株式会社日科技連出版社, 1997 年 1 月
15. 木下 栄蔵; 意思決定論入門, 株式会社近代科学社, 1996 年 9 月
16. 田中毅弘; 空調用自動制御機器における AHP を用いた保全対策方法の意志決定メカニズムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.59, 1995 年 10 月
17. 柏木 法仁; 加賀 昭和; 鳶 敏和; 山口 克人; 熱源システムの最適運転管理に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No.64, 1997 年 1 月
18. 長沢伸也; 一対比較型評価手法間の関係, 9th Fuzzy System Symposium, May19~21, 1993
19. 瀬口 靖幸; 尾田 十八; 室津 義定; 機械設計工学<2>, 培風館, 1987 pp56-62.

第4章 エネルギー管理及び運用支援システムの開発

4.1 緒言

近年、エネルギー資源の確保や地球温暖化防止等の観点からエネルギー費用やエネルギー消費量さらにはCO₂排出量の削減への対応が強く求められている。これらの対応はエネルギー管理に携わる関係者全てで実施すべき課題であるが、通常は設備運転管理者がその任を担っている。しかし設備運転管理者の業務は設備運転に留まらず、保守・点検、修繕業務等に多大な労力を要している。このような中、設備運転管理者はエネルギー管理業務を付加して業務を遂行しているが、エネルギー管理が十分ではなく日常業務の中で多くの省エネテーマが見落とされているのが実情である。

第二章では省エネテーマの発見や対応が困難な理由として、エネルギー管理手法が整理されていないことを指摘した。しかし現状の業務量を鑑みるとエネルギー管理手法が整理されていても時間的な制約から十分なエネルギー管理が実施されない可能性が大きい。

ここでエネルギー管理は誰が実施すべきか、あるいはエネルギー管理に携わる関係者は誰かという根本的な疑問が生じる。この疑問に対しては、エネルギー管理情報を収集するシステムであるBEMS (Building Energy Management System) の活用を目的としたBEMS活用階層と活用方法についての提案[1]が報告されている。しかしBEMSの活用はエネルギー消費量の管理が対象であり、本研究が目的としている「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理についての提案は示されていない。そこでエネルギー管理に携わると思われる関係者と業務範囲及びエネルギー管理の目的について考察した(図4.1)。図4.1にはエネルギー管理階層として示しているが、これはエネルギー管理の指揮系統を意味している。

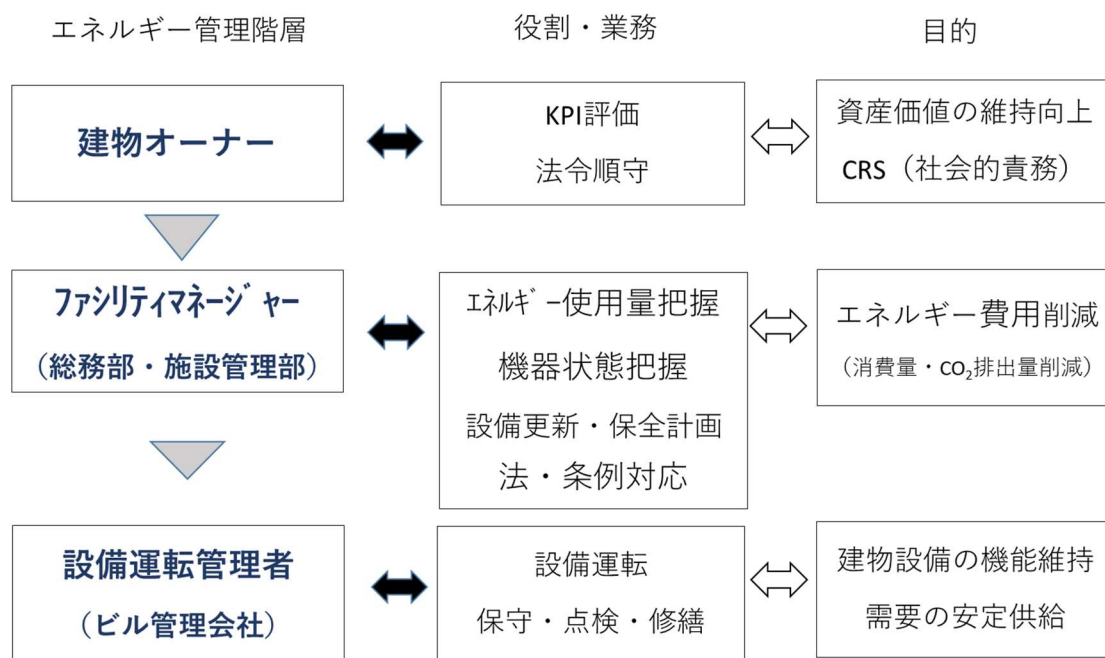


図 4.1 エネルギー管理関係図

日本においてはファシリティーマネージャーがエネルギー管理の全般を担当するが、日々の運転は設備運転管理者が行っているのが一般的である。ファシリティーマネージャーはエネルギー費用や使用量の管理とともに、機器の状態（効率・能力劣化、使用年数等）を把握し、小規模の修繕計画から設備更新計画までを策定するのが主な業務である。従ってこれらの管理・計画業務を通じて、よりエネルギー消費量の少ない建物への移行を担っている。しかし業務用建物の場合、ファシリティーマネージャーは総務部が担当している場合もあり、機器効率の評価や機器更新等の専門的な対応が困難な場合が多い。一方設備運転管理者は外部の専門会社が担当している場合が多く、設備運転や保守・点検業務を通じて安定的にエネルギーを供給するのを目的としている。また設備機器を直接操作する立場から、建物オーナーまたはファシリティーマネージャーからは省エネ運用を求められる。しかし設備運転の目的は建物環境の維持や建物利用者からのクレームがないことであり、また日常の業務量の多さから積極的な省エネ運用を実施するまでには至っていないのが現状である。

エネルギー管理による省エネ運用については、既存の病院建物を対象に BEMS からエネルギー管理情報を取得し熱源システムの運用を行った報告[2]や大学キャンパスを対象に人の所在情報と連携した BEMS 情報を用いて省エネ運用する研究[3]が報告されている。しかしこれらの報告の実施者は外部の専門家が中心であり、設備運転管理者が実施できる提案ではない。

エネルギー管理は継続的に実施されることが必要であり、エネルギー管理の実施者が実質的に関わるような仕組みであることが重要である。またエネルギー管理に携わる関係者ごとに必要なエネルギー管理情報が異なることから、各関係者に必要な頻度で必要な管理情報（現状値、判断基準の逸脱状況、逸脱時の対応）を提示することが重要であると考えられる。また日々の業務の中で各関係者がエネルギー管理を着実に実施するための時間も少ないことから、エネルギー管理自体を支援する方策も必要である。

以上のことから本章では、第二章で考察したエネルギー管理項目を着実に実施するための支援システムについて考察を行う。

4.2 エネルギー管理システムの開発

4.2.1 エネルギーナビゲーションシステム

第二章で示したエネルギー管理手法を実施するための支援システムとして、表 2.4 に示した管理項目について判断基準値が逸脱した場合にその対応策を省エネナビゲーション情報として表示するシステムを開発した。図 4.2 にナビゲーションシステムの概念図を示す。ナビゲーションシステムは中央監視装置（以下 BAS）と LAN で接続し、BAS で毎時収集しているエネルギーデータを取得する。取得したエネルギーデータはシステムの標準フォーマットに変換しデータベースに保存する。これは取得するエネルギーデータが BAS の仕様毎に書式や単位が異なるためであり、ナビゲーションシステムの汎用性の観点から表 2.5 を基本として標準書式を定めた。

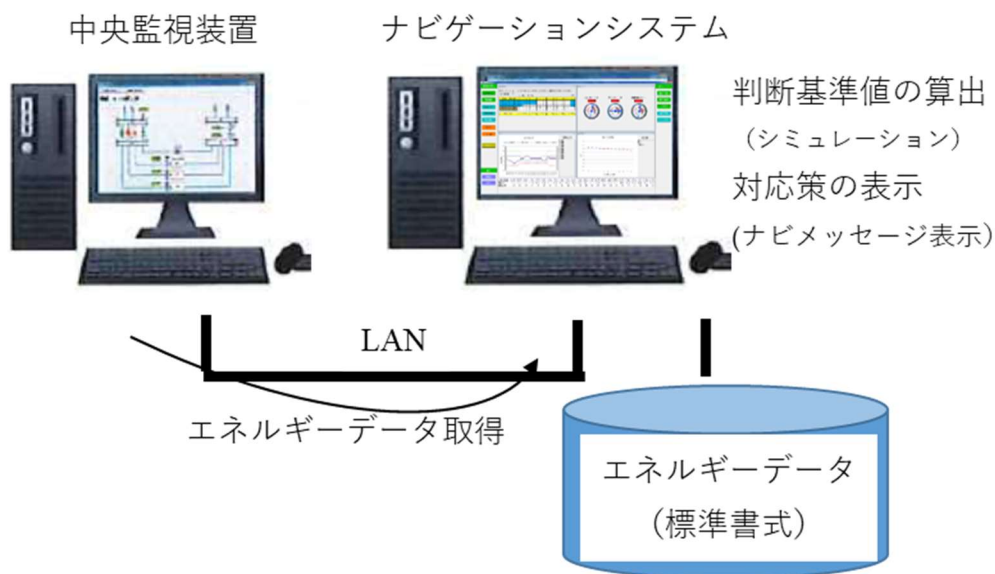


図 4.2 ナビゲーションシステム概念図

表 4.1 に参考として吸収式冷温水機の標準フォーマットを示すが、建物に設置されている機器は複数台あることから、標準フォーマットには各機器 10 台分を保存できる書式とした。従って表 4.1 の吸収式冷温水機の配列番号は 564 から 579 番目が 1 台目であり 10 台目は 708 から 723 の配列番号に保存される。また備考に示した「システム内計算」とは BAS から得られたデータを用いてシステム内で計算した値であり、同様に標準フォーマットに保存される。

表 4.1 吸収式冷温水機の標準フォーマット

機器	管理項目	データ配列	単位	配列番号	備考	
吸収式冷温水機	COP	COP	—	564	システム内計算	
	負荷率	負荷率	—	565	システム内計算	
	送水温度	送水温度	°C	566		
	冷却水温度	冷却水温度	°C	567		
	管理項目を算出するためのデータ	運転状態	ステータス	—	568	システム内計算
		冷却・加熱状態	ステータス	—	569	システム内計算
		製造熱量		MJ/h	570	
		燃料消費量		m ³ /h	571	
		補機電力量		kWh	572	
		送水温度		°C	573	
		還り温度		°C	574	
		送水流量		m ³ /h	575	
	冷却水温度		°C	576		
	空気比	空気比	—	577		
空気比を算出するためのデータ	排ガス温度		°C	578		
	残留酸素濃度		%	579		

システムはBASからエネルギーデータを取得し、取得したデータから現状の管理値を計算するとともに設定した判断基準値との比較を行う。各管理項目の判断基準値はシステム内にデータベースとして保存する。また判断基準値が外部条件により変動する冷却水温度、送水温度、熱源最適運転及び空調設定温度についても2.4節で開発したシミュレーターを用いて毎時計算し、判断基準値として保存する。次に現状管理値が判断基準値から逸脱した場合には、システム内にデータベースとして保存した逸脱時の対応策を検索し表示する。対応策の検索においては関連する管理項目の状態を評価して最も適切な対応策が選択されるように考慮した。図4.2にシステムの動作フロー、図4.3に熱源機効率が逸脱した時の対応策の選出フローを示す。なおエネルギーデータとシミュレーター計算値の入出力フォーマットを規定しておくことで、各種提案されているシミュレーター[4,5,6]を活用することが可能である。従ってエネルギーデータの標準書式は、各種シミュレーターの活用にも有効である。

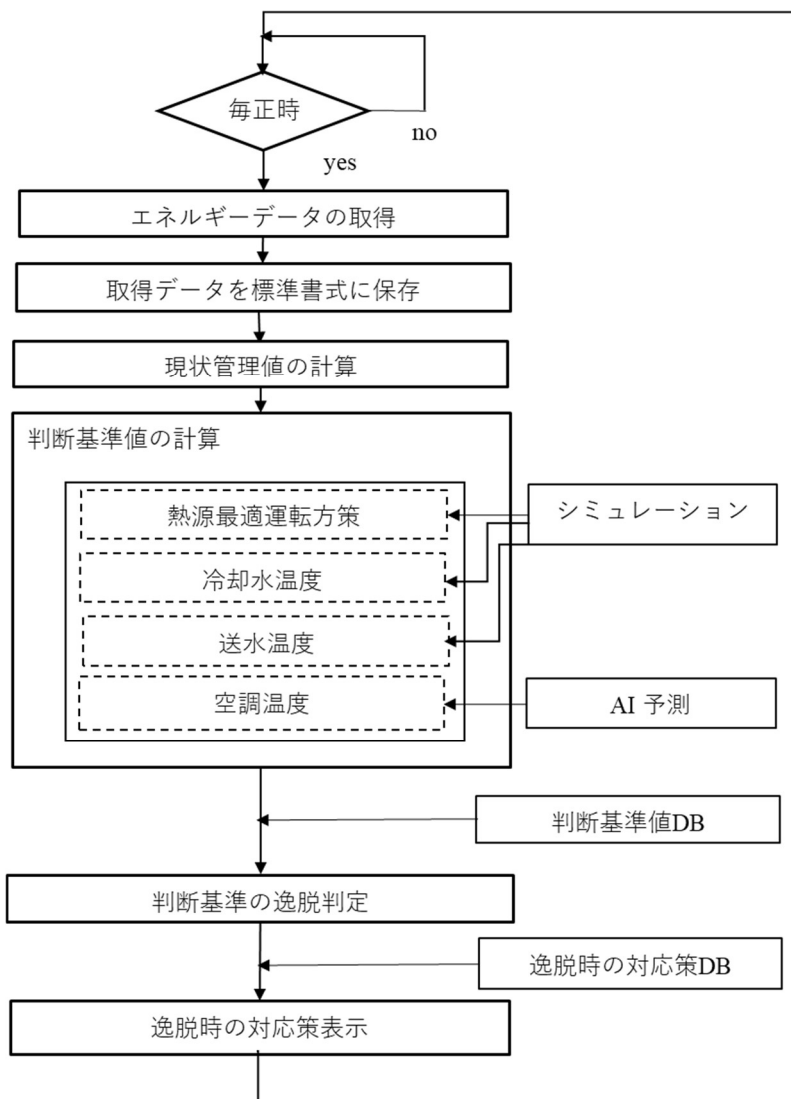


図 4.2 ナビゲーションシステムの動作フロー

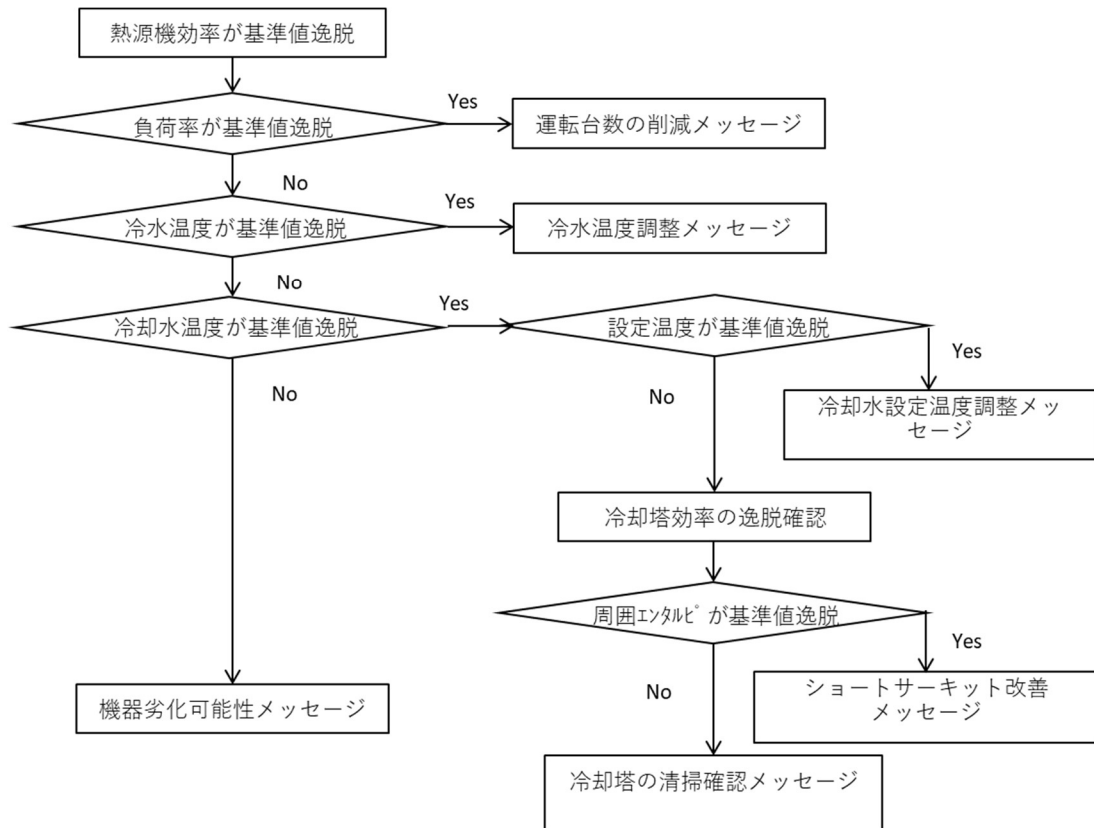


図 4.3 熱源機効率が逸脱した時の対応策の選出フロー

システムはオンサイト型のシステムであるとともに図 4.2 に示す一連の動作を毎時刻実施し、省エネ対策であるナビメッセージを設備運転管理者向けに表示することにより毎時刻省エネ運用を促す。省エネ運用の一例として、現状の冷水温度が判断基準値から逸脱している場合には、ナビメッセージとして表示される冷水温度を参考に熱源機の冷水温度設定を行うよう促す。また熱源システムの運用では運転台数調整や運転する熱源機を選択を画面表示で提案する。さらに冷却水が判断基準値より高い場合は冷却塔の清掃などのメッセージを表示し、保全作業の適宜実施を促すことで、エネルギー使用の合理性を常時維持・管理することが可能となる。

一方ファシリティーマネージャーにはエネルギー消費量や機器効率、劣化状況などの必要な情報をエネルギーレポートとして毎月出力する。このことにより、設備運転管理者へは常に省エネ運用とするための管理情報を表示し、ファシリティーマネージャーには月別のエネルギー消費量の推移を対前年同月対比や機器効率の月別劣化推移、メンテナンスを行った場合の効率改善情報等を提示する。

図 4.4 に本システムのメイン画面、図 4.5 にファシリティーマネージャーに提示するエネルギーレポートの一例を示す。



図 4.4 ナビゲーションシステムのメイン画面

1. エネルギー使用状況の評価

1. 原単位評価

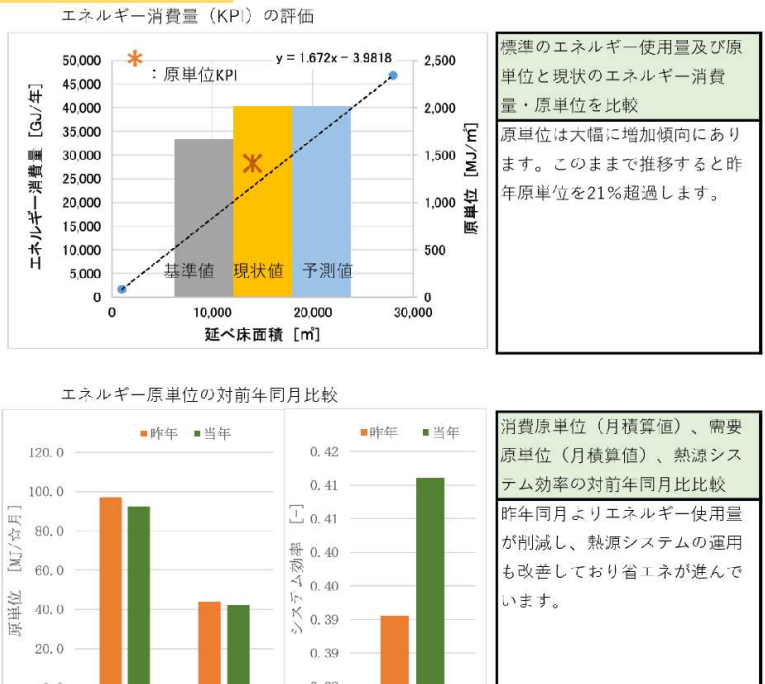


図 4.4 エネルギーレポート (イメージ)

4.2.2 省エネ自動運用機能の追加

(1)ナビゲーションシステムの導入効果

開発したナビゲーションシステムをショッピングモールに導入し、システムによるエネルギー管理支援を行った。システムは2017年5月に設置しファシリティーマネージャー及び設備運転管理者へ現状管理値、判断基準の逸脱判定及び逸脱時の対応を毎時刻モニタ上

に表示した。ショッピングモールの建物概要を表 4.2、エネルギー管理項目を表 4.3 に示す。ショッピングモールの管理体制は、ファシリティーマネージャーには施設管理部署の担当者、設備運転管理者は外部のビル管理会社が担当している。

表 4.2 建物概要

建物用途	ショッピングモール
延床面積/店舗数	80,770m ² /約100
竣工	2017年5月
熱源	ガスエンジンヒートポンプチラー (外気処理) 電動ヒートポンプチラー (外気処理) 個別パッケージエアコン (共用部、専用部)
空調方式	外気処理系統：外調機 共用部・専用部系統：個別空調方式

表 4.3 対象建物の管理項目

管理対象機器	管理項目
原単位管理	供給原単位
	需要原単位
	システムCOP
受電設備	力率
	電圧変動率
	電力デマンド
熱源機群管理	システムCOP
	全体負荷率
冷温水二次ポンプ群管理	WTF
	全体往還温度差
	全体送水差圧
変電設備 SS-A系統 (単相 2 台, 三相 3 台) SS-B系統 (単相 2 台, 三相 5 台) SS-C系統 (単相 2 台, 三相 1 台) SS-D系統 (単相 4 台, 三相 4 台)	負荷率/需要率
	三相バランス
	効率
	電圧
	COP
EHP	負荷率
	冷温水温度
	COP
GHP	負荷率
	冷温水温度
	WTF
1次ポンプ (GHP用4台)	往還温度差
	ポンプ差圧
	WTF
二次ポンプ管理 (3台)	送水差圧
	ATF
外調機 (14台)	コイル劣化状況
	外気導入量
	熱源最適運転

ショッピングモールは2017年5月に竣工し、準備期間を経て2017年5月下旬から営業を開始した。ナビゲーションシステムは竣工時に導入・運用を開始しているが、システムの導入効果の検証はシステムの取扱いが収斂する前（2017年8月～2018年3月）と収斂した後（2018年8月～2019年3月）で比較した。図4.5にシステム収斂前後の月平均外気温度と建物エネルギー使用量の相関図を示す。評価に相関図を用いたのは、建物のエネルギー消費量が外気温度との相関性が強く、また収斂前後の外気条件が異なることからエネルギー消費量と外気温度または外気比エンタルピとの相関で評価するのが妥当である。

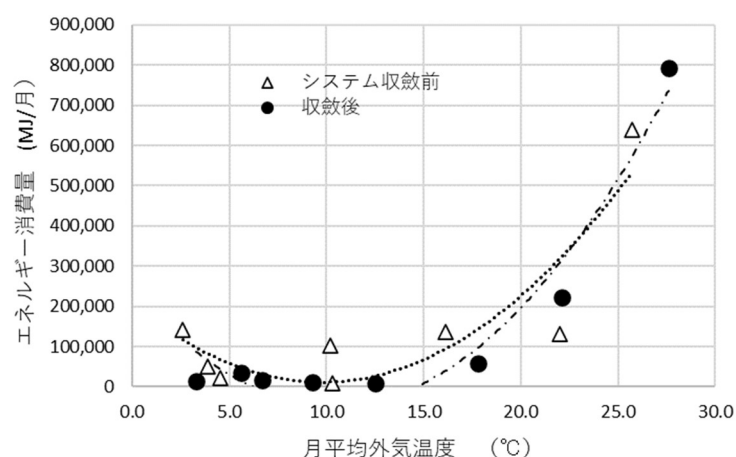


図 4.5 システム収斂前後の月平均外気温度と建物エネルギー使用量の相関

図 4.5 からは外気温度 10～15°C (中間期) 付近でエネルギー消費量の低減がみられるが、全般的には顕著なエネルギー消費量の削減は認められない。実際のシステム使用においては、表 4.3 に示す冷温水二次ポンプ群の省エネ対応をシステムのナビメッセージを参照して実施したが、その他の管理項目についての対応は実施されなかった。この理由として設備運転管理者の業務が機器運転や保守点検業務の他、客・納入業者対応や駐車場内でのクレーム処理等多岐に渡り、パソコン画面に省エネ対応メッセージが表示されてもお客様サービスに関する以外の対応は後回しとなるからである。このことはショッピングモール以外のホテル、病院、事務所ビル等の業務用建物に共通している。ちなみに冷温水二次ポンプ群の省エネ対応として二次ポンプ運転台数制御及び末端送水差圧制御値の調整を行った結果、ポンプ運転台数の削減及びインバータによるポンプ送水圧力の低減により中間期での電力消費量が削減された。熱源システムの最適運転や送水温度の調整等の対応メッセージも表示されていたことから、これらの対応を実施することによりさらなるエネルギー消費量の削減が期待できるものと考えられる。

以上のことから、ナビゲーションシステムによるエネルギー管理支援はエネルギー使用量の削減には有効であると考えられるものの、ナビゲーションメッセージを毎時確認して対応策を実施するのは、現状の業務体制では困難であると推察される。同様なシステムの課題はショッピングモールに先行して導入したホテルでも確認されたことから、ナビゲーションシステムにメッセージの対応支援を行う機能が必要であると考察した。

(2)RPA 技術を用いた自動省エネ運用機能

熱源システムを中心に自動で熱源機器を最適運用する研究[7,8]が行われており、熱源の最適運用によるエネルギー消費量の削減効果が大きいことが報告されている。しかしこれらの研究では熱源の最適運転方策を求める手段が示されているものの熱源機の具体的な操作方法については示されていない。

設備運転管理者の運用を支援するシステムとして各種の自動制御装置が導入されている。自動制御装置では最適運用値を設定することにより運転管理者が操作することなく設備運用を実施することが可能である。例えば熱源機の運転では自動台数運転制御及び送水温度制御[9]、外気導入量については最小外気取入れ制御[9]などがメーカーから提案されている。しかし時刻ごとに最適運用値は変化し、高効率運転のためには最適運用値を毎時刻自動制御装置に設定することが望まれているが、現状では最適運用値を外部条件に合わせて制御装置に自動設定する汎用的な方法の提案はない。

一方、設備運転管理者は BAS を用いて制御設定値を任意に変更設定することが可能である。また自動制御装置の他に直接機器の発停を行うことも可能である。この機能を利用してナビゲーションシステムが建物に設置されている BAS を遠隔制御することにより毎時最適運用を自動で行うシステムを開発した。中央監視装置の遠隔制御には RPA (Robotic Process Automation) を用いた。RPA とは画面上のアプリケーションやシステム画面を識別し人間と同じように操作を行うソフトウェアであり経理処理や人事情報登録等の業務で活用されている[10]。近年 RPA の普及が進んでおり、事務処理用に各種の RPA ソフトウェアが市販[11,12]されている。

エネルギーの効率的運用に関しては個々の設備機器に対して運転を制御する方法[13]が提案されているが、BAS を遠隔制御することにより設備運用を行う報告はない。さらに BAS の遠隔運用に RPA を用いた研究の報告もない。従って市販のソフトウェアではエネルギー運用を柔軟にプログラムに反映させることは困難であるため、スプレッドシートを利用して RPA を開発した。本システムでは Microsoft 社の Excel[14]を用いて RPA を用いた自動運用プログラムを開発した。

開発した RPA の基本機能は画像検出機能、キーボード操作機能（カーソル移動・ENTER など）、マウス操作機能（マウス移動・クリックなど）および文字・数値入力機能である。画像検出機能を用いることにより BAS 画面上の任意画面やアイコンの有無情報を得ることができる。また目的の画像が存在する場合は画面上での位置の取得とともにキーボード操作機能などと組合せ、目的画像をクリックすることが可能である。このことにより目的のメニューボタンの起動、ウィンドウのクローズ、目的の位置での数値入力が可能である。画像検出方法は、あらかじめ取得したい画像をビットマップ画像としてシステムに登録し、BAS で表示されている画面に対して登録した画像の RGB マッチングを行う。ここで RGB マッチングとは画像上の各ビットに対応した色の比較を用いて画像の同一性を判定するものであり、各ビットの RGB 情報が全て同一と判定された場合を「画像あり」と判断する。

またキーボード操作機能やマウス操作機能は基本的にスプレッドシートの予約命令語を活用した。

RPA の実行は、基本プログラムを組み合わせた操作シナリオをスプレッドシート上に作成し、同様に比較プログラムからスプレッドシートに出力された最適運用値を参照しながら操作シナリオを順次実行して行う。RPA をスプレッドシートで構築した利点としては、建物の特有用条件に応じて分岐させるシナリオの作成や最適運用値の調整値をスプレッドシートで記載することが容易であることである。例えばメンテナンスにより運転出来ない熱源機があった場合、該当の熱源機の発停を回避する分岐シナリオを作成することが可能である。あるいは特別な室使用が予定されている場合は算出された室内温度を調整するシナリオを追加することが可能である。このことにより建物に特有用エネルギー運用に対して柔軟に対応することができる。

RPA は BAS 画面を介して操作するシステムであるため、BAS には特別なハードウェアやソフトウェアをインストールする必要がない。従って BAS 仕様や製造メーカーに依存しないことから既存の BAS に対しても容易に接続・設置するという利点もある。

図 4.6 に自動運用機能を追加したナビゲーションシステム概念図を示す。

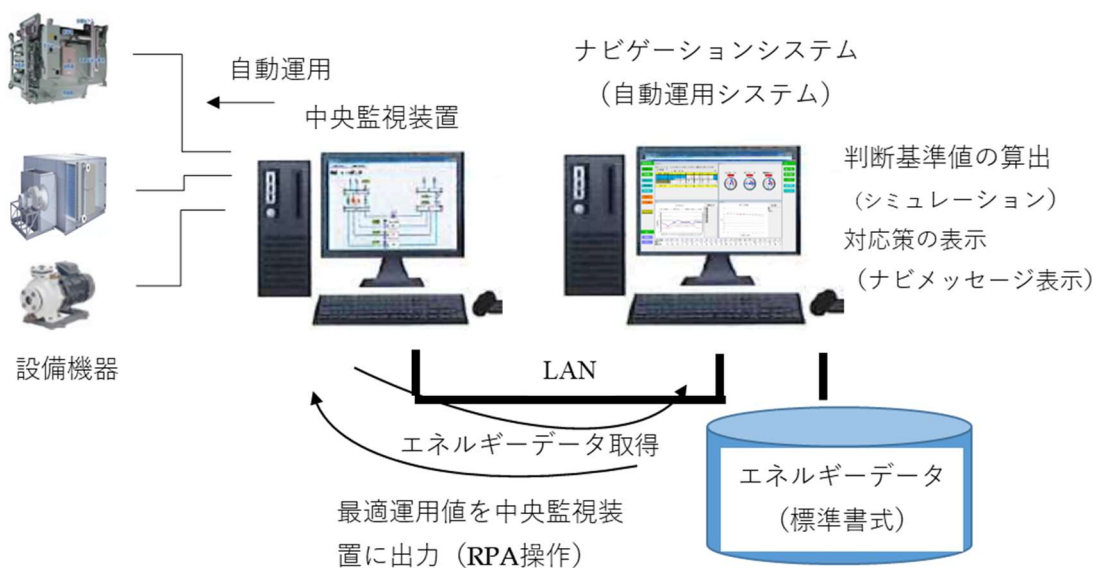


図 4.6 自動運用機能を追加したナビゲーションシステム概念図

システムは BAS からエネルギーデータを取得し RPA による BAS の制御までを基本動作とし毎時刻実施する。図 4.7 に自動運用機能を追加したシステムの動作フローを示す。システムの基本動作の実行時間は最適運用項目数により異なるが、概ね 3 分から 20 分程度で終了する。

BAS からエネルギーデータを取得し標準書式としてデータベースに保存した後、判断基準値との比較及び判断基準値を逸脱した場合の対応策の表示までは図 4.2 に示す機能追加前のナビゲーションシステムと同じである。システムは最適運用値を自動運用プログラム

に出力するとともに、BAS とリモート接続を行い、RPA を起動し自動省エネ運用項目について BAS の遠隔操作を行う。ただし、現状の運用値が最適運用値である項目については遠隔操作をスキップする。システムは BAS による自動運用操作終了後、BAS とのリモート接続を解除し次時刻の操作時間まで待機状態となる。

なおBASの遠隔操作時間中はシステムがBASを占有しているため設備運転管理者はBASを使用することができない。しかし通常BASは複数台増設可能であることから、ナビゲーションシステム内にBAS機能を追加設置することにより、設備運転管理者が使用するBASを操作対象とする必要がなくなる。

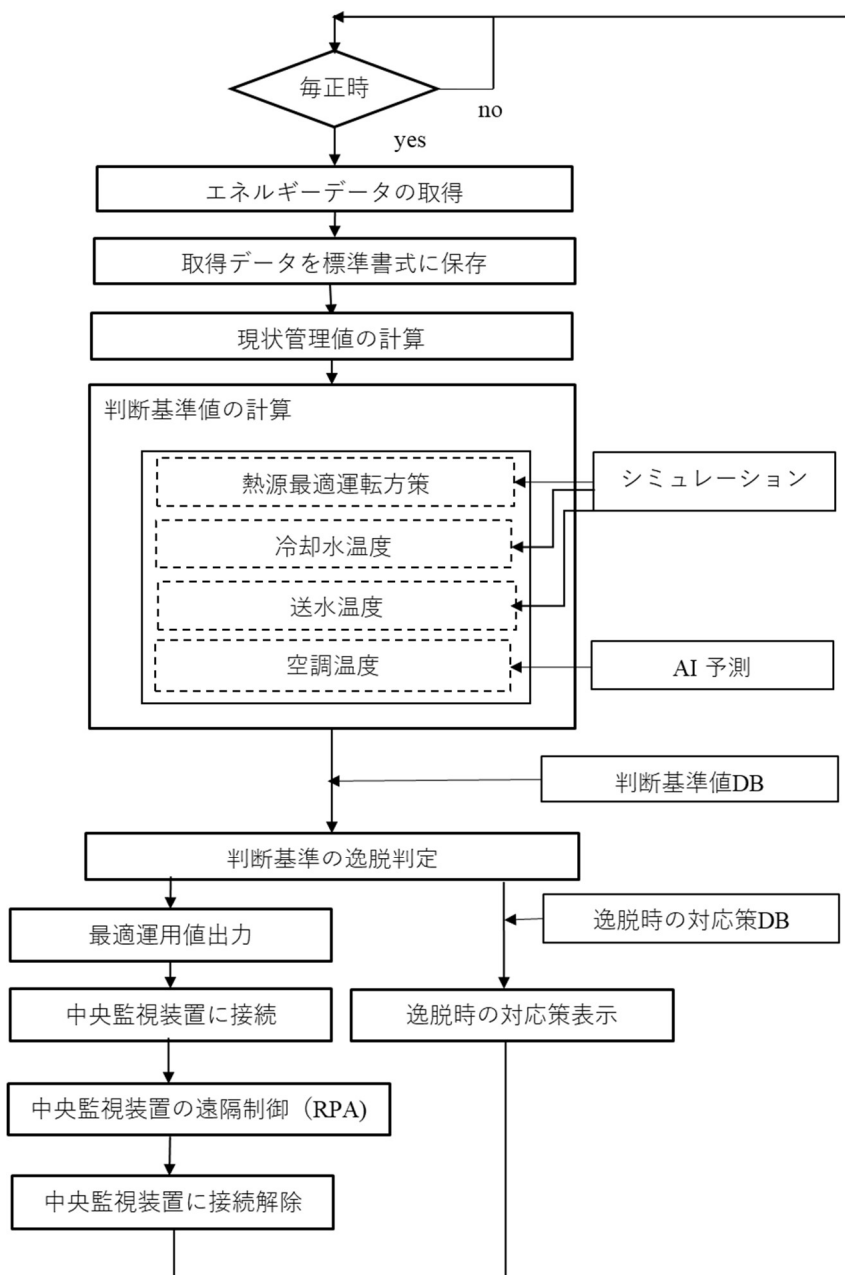


図 4.7 自動運用機能を追加したシステムの動作フロー

本システムではBASが有している運用機能は全て自動運用項目として遠隔操作が可能である。しかしシステムが操作する省エネ自動運用項目は空調関連のエネルギー消費量の削減を主目的として(i)熱源機の最適運転(ii)送水温度の設定(iii)空調用外気導入量の調整(iv)空調温度の調整の4項目とした。他国でも空調にかかわるエネルギー使用量が大きく米国では建物消費量の50% [15]、2012年は2003年と比較して暖房用エネルギーが減少しているのに対して冷房用エネルギーは増加しているとの報告[16]がある。スペインでは冷房用エネルギーが建物全体の36%となっているという調査[17]もあり、空調における省エネ運用による削減効果は大きい。また表4.4に示すように省エネ自動運用項目が対象とするエネルギー消費量の割合が大きい。

表 4.4 事務所ビルのエネルギー消費量割合[18]

エネルギー種別	エネルギー消費量割合 (%)	機器	省エネ対策	
			機器更新	省エネ運用
空調	31.1	熱源機器	高効率機器への更新	熱源機器の運転方法 送水温度の調整
	2.6	冷温水ポンプ	省エネシステムの導入 (インバータ制御装置、全熱交換器、その他)	送水圧力の調整
	9.4	空調機		外気導入量の調整 室内温度の調整
照明	21.3	照明器具	高効率機器への更新	照明時間の調整、照度調整
コンセント	21.1	PC、CRT、その他	(LED照明、その他)	
給湯	0.8	ボイラ	高効率機器への更新	蒸気圧力の調整
一般動力	3.6	昇降機		運転時間の調整
	5.0	給排気機器		運転時間の調整
その他	5.1			

注：太文字・斜文字は省エネ自動運用項目

実際の省エネ自動運用に際しては建物特有の運用条件や自動運用対象機器の保守状況等を考慮する必要がある。一例としてメンテナンスや故障により運転できない機器については自動運用の対象から除外する必要があり、外気露点温度が高い場合は室内の二酸化炭素量が低くても入口部の結露防止のために空調処理した外気を導入する必要がある。

しかしこれらの建物特有条件をシミュレーション等による判断基準値の計算に反映させた場合、システムの汎用性が低くなるとともに計算時間が増加する。そこで図4.7に「判断基準値の計算」として示したシミュレーション計算等による自動運用ルールを基本的な運用ルール（上位運用ルール）として位置付けた。一方建物特有条件による運用については図4.7の「中央監視装置の遠隔制御（RPA）」部に直接建物特有ルール（下位運用ルール）を反映させることにより、システムの汎用性を高めるとともに判断基準値算出の計算時間及び自動運用の対応時間の短縮を実現した。この上位・下位による運用ルールの分担は人間の脳機能（上位ルール）と手の条件反射（下位ルール）を模した機能として工夫したものである。

4.3 エネルギー管理システムによる省エネ実施

4.3.1 ショッピングモールにおける実証

(1)自動運用の概要

ナビゲーションシステムでの省エネ対応表示だけでは顕著なエネルギー消費量の削減は認められなかったショッピングモールに自動運用機能を追加したシステムを導入した。自動運用としては熱源機運転、送水温度調整、空調温度設定及び外気導入量調整が適用可能であるが、中央監視装置の機能制約から外調機の自動運用による外気導入量調整のみ実施した。大型ショッピングセンターについてはエネルギー多消費型建物として、分散型電源の最適設計と運用による省エネの取組みが報告されている[19]。対象のショッピングモールにおいてもエネルギー消費量は約 101TJ/年、CO₂ 排出量は 5000t-CO₂/年とエネルギー多消費型建物である。

自動省エネ運用対象の外調機は 13 台であり、外調機への冷水及び温水は専用の熱源機より供給されている。この建物では建物内での汚染物質及び粉塵等の発生の懸念はないことから CO₂ 濃度だけで外気導入量を調整することが可能である。

外気処理用熱源機は都市ガス使用のガスエンジンヒートポンプチラー（以下 GHP）4 台と電気使用の空冷ヒートポンプチラー（以下 EHP）1 台の合計 5 台が設置されている。これら熱源機のエネルギー消費量は 8400GJ/年であり建物全体の 8%である。また都市ガスと購入電力の月別のエネルギー単価が異なるため、7-10 月は主に GHP を運転し、その他月は EHP を優先運転している。表 4.5 に外調機の仕様、図 4.8 に外気処理熱源システム構成図を示す。

表 4.5 自動運用対象外調機の仕様

外調機	供給場所	冷却能力(kW)	外気量 (m ³ /h)	ファン電力(kW)
OHU-1F-1	物販	210.2	17,600	7.5
OHU-1F-2	飲食・物販	162.5	13,620	7.5
OHU-1F-3	物販・共用廊下	312.4	26,190	15.0
OHU-1F-4	物販・食物販	98.0	8,220	3.7
OHU-1F-5	物販・食物販・廊下	179.1	15,010	7.5
OHU-1F-6	SM・後方エリア	179.4	15,040	7.5
OHU-2F-1	家電	119.3	10,000	5.5
OHU-2F-2	スポーツ用品	117.4	9,840	5.5
OHU-2F-4	物販・共用廊下	328.7	27,560	15.0
OHU-2F-5	物販・サービス	129.6	10,860	5.5
OHU-2F-6	物販・サービス	136.7	11,460	5.5
OHU-2F-7	アミューズメント	79.5	6,660	3.7
OHU-2F-8	フードコート・飲食	111.7	9,360	3.7

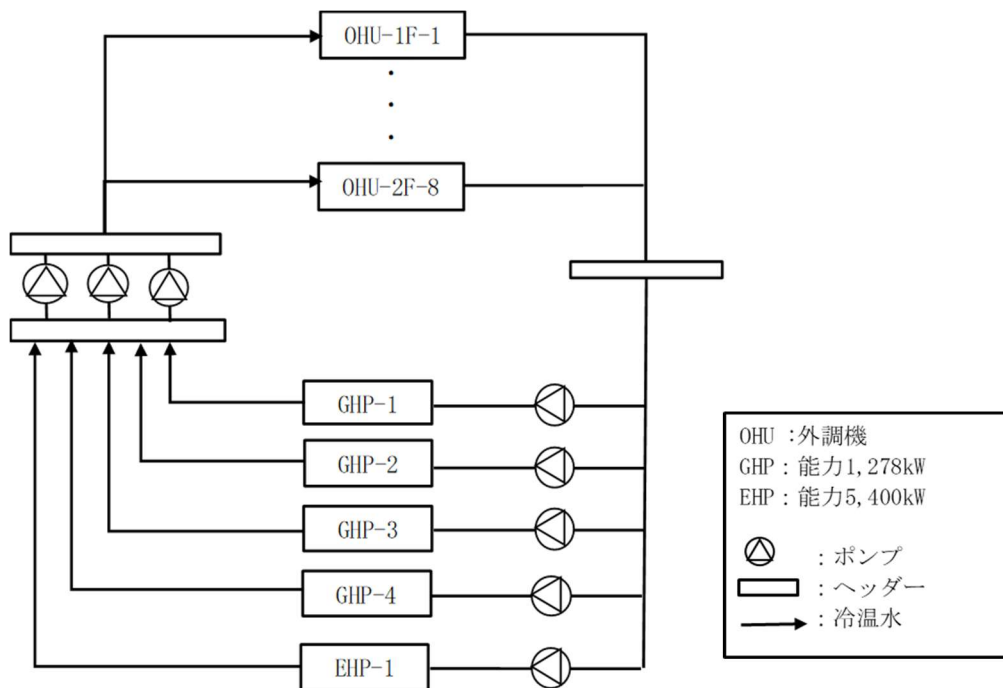


図 4.8 外気処理熱源システム構成

システムはBASからエネルギーデータを所得するとともにBAS画面から直接現状のCO₂濃度を取得し(図4.9)判断基準値(法的基準値)と比較する。現状値が法的基準値未満の場合は対象の外調機を停止し、外気導入量を削減する。反対に現状値が法的基準値を超えていた場合は対象空調機を運転し外気を建物内に取り入れる。外気導入量を適正に調整することは空調用エネルギーの削減に有効な対策であることから多くの建物で実施されている。しかし一般的な運用頻度は一年間に1~2回程度に留まっている。その理由は外気導入量の多寡がお客様サービスのクレームとはならず、法的基準値を十分達成していれば労力を割いてまでもこまめな調整を行う必要性を認めないからである。一方本システムでは設備運転管理者に代わり毎時刻運用を行い続けるため、確実にエネルギー量を削減することが可能である。

外調機名称	系統名称	ファン	風量切替	給気温度		給気露点温度		室内温度	室内CO2濃度	冷暖切替	フィルター目詰	送風モード	凍結防止運転
				計測	設定	計測	設定						
OHU-1F-1	物販系統	●	●	21.3°C	20.0°C	21.5°CDB	10.0°CDB	-	-	冷房	●	●	●
OHU-1F-2	飲食・物販系統 サービス・美容系統	●	●	22.0°C	22.0°C	21.4°CDB	10.0°CDB	-	-	冷房	●	●	●
OHU-1F-3	物販・共用廊下系統	●	●	22.0°C	22.0°C	23.3°CDB	10.0°CDB	24.1°C	579 ppm	冷房	●	●	●
OHU-1F-4	飲食・物販系統 サービス・美容系統	●	●	22.1°C	22.0°C	23.0°CDB	10.0°CDB	24.7°C	633 ppm	冷房	●	●	●
OHU-1F-5	飲食・物販系統 クリニック共用廊下系統	●	●	22.4°C	22.0°C	21.5°CDB	10.0°CDB	24.1°C	584 ppm	冷房	●	●	●
OHU-1F-6	SM・後方エリア系統	●	●	22.2°C	22.0°C	23.0°CDB	10.0°CDB	-	-	冷房	●	●	●
OHU-2F-1	家電系統	●	●	-	-	10.0°CDB	10.0°CDB	-	-	冷房	●	●	●
OHU-2F-2	ｽｰﾌﾞ用品系統	●	●	-	-	10.0°CDB	10.0°CDB	-	-	冷房	●	●	●
OHU-2F-4	物販・共用廊下系統	●	●	22.2°C	22.0°C	22.1°CDB	10.0°CDB	25.1°C	540 ppm	冷房	●	●	●
OHU-2F-5	物販・サービス・美容系統	●	●	22.2°C	22.0°C	22.1°CDB	10.0°CDB	25.0°C	498 ppm	冷房	●	●	●
OHU-2F-6	物販・サービス・美容系統	●	●	22.2°C	22.0°C	22.1°CDB	10.0°CDB	-	-	冷房	●	●	●
OHU-2F-7	ファミースタンプ系統	●	●	21.2°C	17.0°C	20.4°CDB	10.0°CDB	-	-	冷房	●	●	●
OHU-2F-8	フードコート・飲食系統 後方エリア系統	●	●	22.9°C	22.0°C	21.9°CDB	10.0°CDB	-	-	冷房	●	●	●

図 4.9 BAS画面

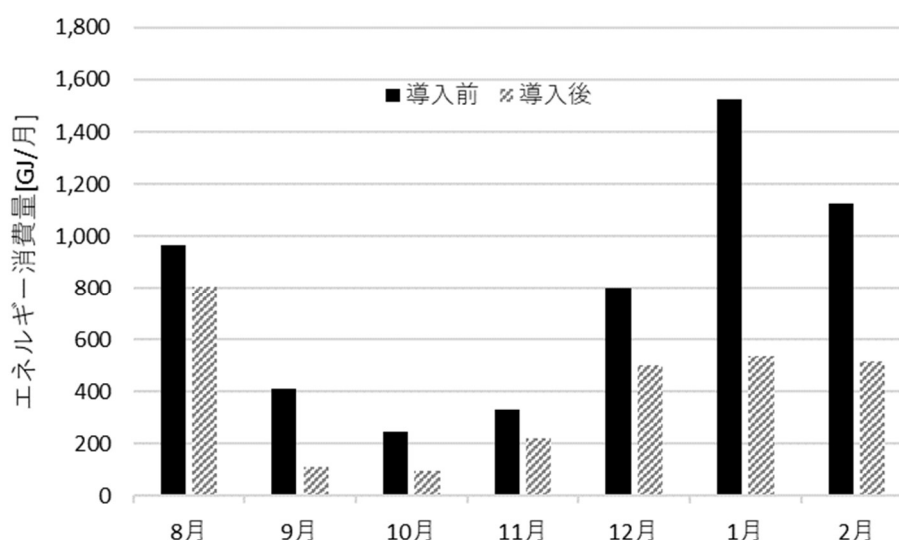
本システムではさらに高度な外調機の運用として、以下に示す3項目を自動運用の手順に加えた。

- (i) 外気露点温度が 20°C DP を超えた場合は、エントランス付近の結露防止のため、CO₂濃度に関係なくエントランス系統の外調機を運転する
- (ii) 冷房期において外気比エンタルピが室内比エンタルピよりも低い場合は、外気を利用した冷房を実施するために CO₂濃度に関係なく外調機を運転する
- (iii) 外気温度が 5°C 以下の場合は、エントランス付近の冷気侵入緩和のため、CO₂濃度に関係なくエントランス系統の外調機を運転する

このような建物に特有の運用手順を考慮することにより、省エネと室内環境維持を両立させることが可能である。

(2) エネルギー削減量の評価

システムの運用を 2018 年 8 月 20 日から開始したが、2020 年 3 月に自動省エネ運用を一旦休止している。これは 2020 年 3 月から新型コロナウイルス対策として外導入量を最大化する措置を行っているためである。従ってシステムによる省エネ効果の評価は自動運用の実施期間である 2019 年 8 月から 2020 年 2 月とした。図 4.10 および表 4.6 に自動運用機能導入前と導入後の熱源機と給気ファンのエネルギー消費量および熱源機と給気ファンを合計した外気処理全体のエネルギー消費量を示す。エネルギー消費量の算出には都市ガスの発熱量を 45MJ/m³、電力の発熱量を 9.76MJ/kWh として求めた。



注： 導入前 2018 年 8 月～2019 年 2 月 導入後 2019 年 8 月～2020 年 2 月

図 4.10 自動機能導入前後のエネルギー消費量

表 4.6 自動機能導入前後のエネルギー消費量

(a)熱源機のエネルギー消費量

月	GHPガス消費量m3			EHP電力消費量kWh		
	導入前	導入後	削減量	導入前	導入後	削減量
8月	17,217	14,722	2,495	0	0	0
9月	5,098	1,789	3,309	0	0	0
10月	1,334	736	598	0	0	0
11月	0	0	0	15,215	10,216	4,999
12月	4	34	-30	69,455	41,622	27,833
1月	59	138	-79	136,995	54,448	82,547
2月	571	26	545	96004	52711	43,293
合計	24,283	17,445	6,838	317,669	158,997	158,672

(b)給気ファン及び熱源機・給気ファン合計エネルギー消費量

月	給気ファン消費電力量kWh			外気処理エネルギー量GJ/月		
	導入前	導入後	削減量	導入前	導入後	削減量
8月	19,534	14,693	4,841	965	806	160
9月	18,751	3,294	15,457	412	113	300
10月	19,105	6,731	12,373	246	99	148
11月	18,486	12,412	6,074	329	221	108
12月	12,298	9,591	2,707	798	501	297
1月	19,087	4,709	14,378	1,526	538	988
2月	16,814	4,709	12,105	1,127	516	611
	124,075	56,140	67,935	5,404	2,793	2,611

注： 導入前 2018年8月～2019年2月 導入後 2019年8月～2020年2月

表 4.6(b)に示す合計エネルギー消費量より、自動機能導入によるエネルギー削減量は2,611GJ/実施期間であり、システム導入前の外気処理エネルギー消費量に対する削減率は48%である。CO₂削減量は439t-CO₂/実施期間(都市ガス0.0138t-C/GJ、電力0.489t-C/kWh)であり、削減率は52%である。このことから年間で自動運用を実施した場合の削減量は5,200GJ/年、8,800t-CO₂/年程度になると推定できる。

一方システム導入前の各外調機系統の平均CO₂濃度はシステムの自動運用により567ppmから600ppmに改善された。また33ppmのCO₂改善量は、外気導入風量の13%削減に相当する(外気CO₂濃度：350ppm)。

システムによる外調機の自動運用状況として外気比エンタルピとエネルギー消費量の相関を図4.11に示す。図4.11のプロットの様子からショッピングモール内の人員が多い時は

CO₂ 濃度も高くなることから外調機は運転され、自動運用導入前後におけるエネルギー消費量の差異は見られない。一方人員が少ない時は CO₂ 濃度も低くなることから自動運用により外調機が停止し、エネルギー消費量が削減されている。外調機の発停による外気導入量の削減は容易な対策ではあるが、自動運用により 24 時間・365 日着実に実施することで大きなエネルギー削減効果があることを示した。

なお自動運転の実施期間において、システムは安定的に稼働し続けたことからシステムの実用性にも問題はないものと考えている。

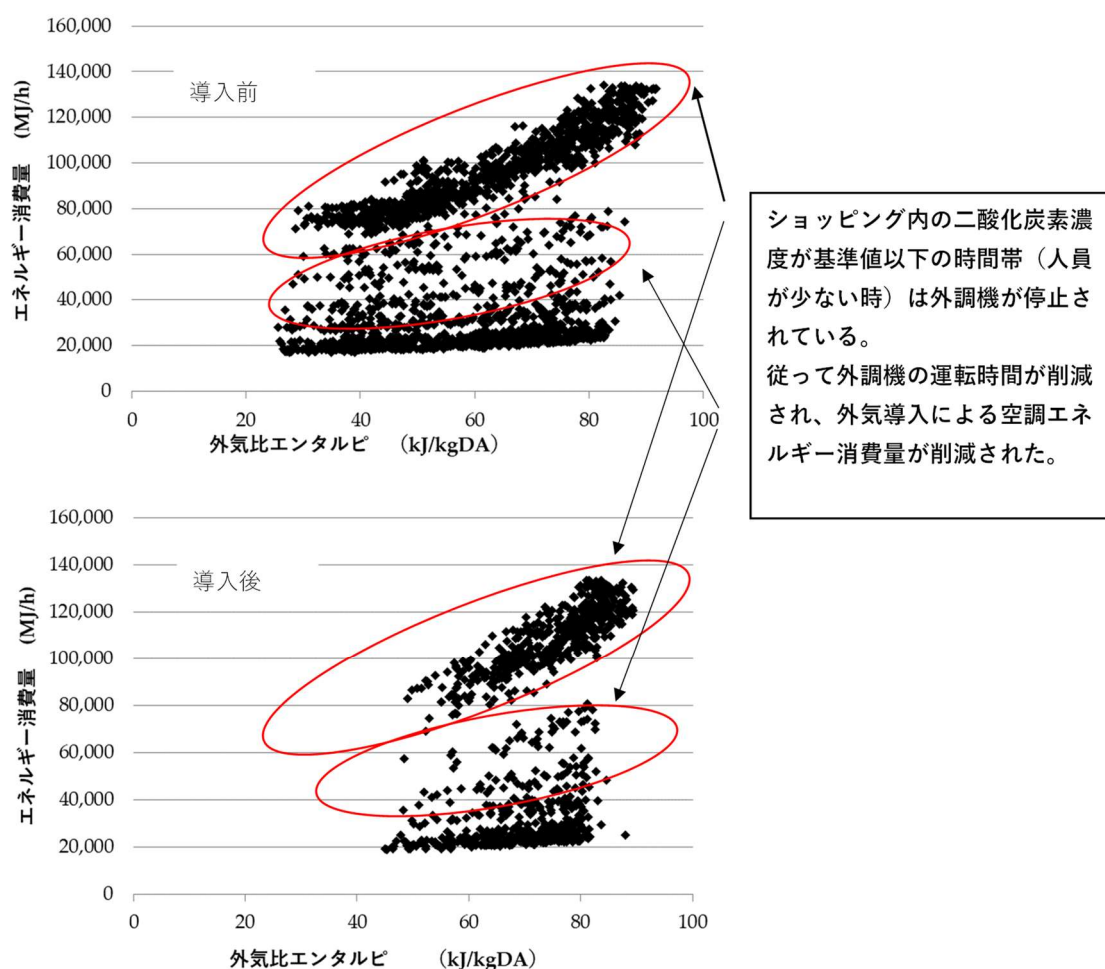


図 4.11 外気比エンタルピとエネルギー消費量の相関

4.3.2 リゾートホテルにおける実証

東京都近郊のリゾートホテルにナビゲーションシステム及び自動運用機能追加システムを導入し、エネルギー消費量の削減効果を検証した。表 4.7 にホテルの概要を示す。ホテルの熱源は蒸気吸収冷凍機 (3 台) と蒸気ボイラ (5 台) で構成され、蒸気ボイラで製造した蒸気は給湯とともに吸収式冷凍機に使用される。従ってエネルギー管理には蒸気ボイラに係る管理が重要であるが、BAS で取得されているデータがガス消費量とボイラ給水量だけであるため蒸気ボイラの管理が実施できない。また送水二次ポンプは冷水と温水の二系統

設備されており 4 管式空調機に対応している。ただしシステム導入時には除湿再熱の運用は中止されており、空調機は冷水と温水の同時使用は回避されている。外調機は客室系統に 3 台設置されているとともに、各系統に空調機が 20 台設置されている。

以上のことからシステムでのエネルギー管理対象は表 4.8 に示した機器とし、自動運用は冷却・加熱容量の大きな空調機 2 台と外調機 3 台の合計 5 台を管理対象として選択した。管理対象の空調機容量は全体の 45%である。表 4.9 に管理対象とした外調機・空調機、図 4.12 にホテルの熱源システム系統図を示す。

表 4.7 ホテルの概要

建物用途	ホテル
延床面積／客室数	約25,000m ² ／約400室
築年数	12年
熱源	蒸気吸収式冷凍機（空調） 蒸気ボイラ（空調／給湯）
空調方式	共用部系統：単一ダクト空調方式 客室系統：外調機＋個別FCU

表 4.8 ナビゲーションシステムの管理項目

管理対象機器	管理項目
原単位管理	供給原単位
	需要原単位
	システムCOP
受電設備	力率
	電圧変動率
	電力ダイヤモンド
熱源機群管理	システムCOP
	全体負荷率
冷水二次ポンプ群管理 温水二次ポンプ群管理	WTF
	全体往還温度差
	全体送水差圧
吸収式冷温水機	COP
	負荷率
	冷温水温度
二次ポンプ管理 (冷水：3台) (温水：2台)	WTF
	送水差圧
外調機・空調機 (5台)	ATF
	外気導入量
熱源最適運転	

表 4.9 管理対象とした外調機及び空調機の仕様

対象空調機	種別	空調エリア	冷却能力 (kW)	加熱能力 (kW)	外気量 (m3/h)	温度制御 湿度制御	システム導入前 設定	制御方式 その他
AHU-1-1	空調機	エントランス	105.0	105.0	3,300.0	還気温度 還気湿度	夏期：24℃、50% 冬期：24℃、40%	定風量制御
AHU-1-2	空調機	アトリウム	105.0	105.0	3,300.0			
OHU-R-1	外調機	客室SE系統	97.2	67.2	13500	給気温度 給気露点	夏期：24℃、50% 冬期：22℃、40%	定風量制御 全熱交換器 組込み
OHU-R-2	外調機	客室W系統	97.2	67.2	19980			
OHU-R-3	外調機	客室NE系統	97.2	67.2	20700			

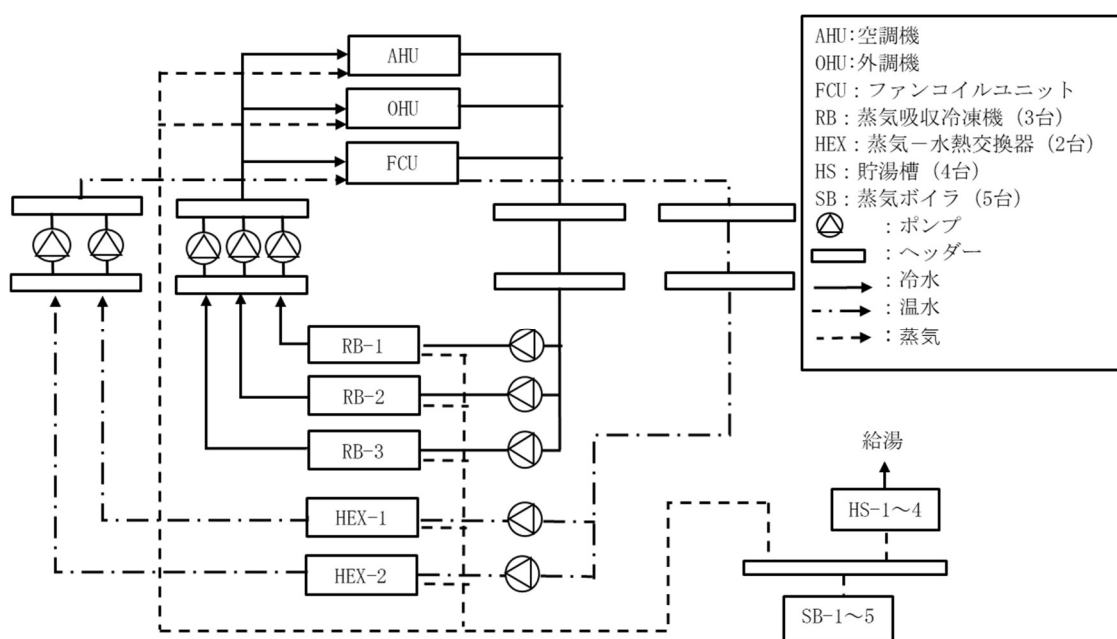


図 4.12 ホテルの熱源システム系統図

システムは2015年10月に導入し、その後2017年1月から自動運用機能を追加した。自動機能がないナビゲーションシステムのエネルギー削減効果を検証するために2015年10月から2015年12月までをシステムの収斂前期間、2016年1月から2016年9月までをシステム収斂後期間として該当期間におけるエネルギー使用量の比較を行った。システムの管理項目は受電設備、二次ポンプ機器を含んでいるが、ホテル担当者と打合せ、空調に関する管理を主体に行うこととした。従ってエネルギー消費量の評価は空調用ガス消費量を用いた。図 4.13 にシステム収斂前と収斂後の空調用ガス消費量を外気比エンタルピとの相関を用いて示す。またファシリティーマネージャーは施設管理部署の担当者、設備運転管理者は外部のビル管理会社の担当者である。なお、対象のホテルの宿泊率を図 4.14 に示すが、ホテルの宿泊率は常に80%以上であることから宿泊者数及びホテル利用者数の変動による空調用ガス消費量への影響はないものと判断した。

収斂時期においてホテル担当者へのヒヤリングを行った結果、システムの表示に基づいた対応ができていないことが判明した。理由としては、判断基準値の逸脱状況及び判断基

準値逸脱時の対応が毎時刻表示されていることは認識しているものの、空調温度設定依頼（暑い、寒いクレーム）やお客様対応、点検・保守に時間を要するためシステムの表示に対応する時間がないとの理由である。さらには中央監視装置で送水温度を変更することができないこと、熱源機の運転台数を削減した場合のクレーム発生を懸念していること、空調温度の調整もホテル利用客のクレームにつながる懸念があるという理由が指摘された。

従ってエネルギー管理を実施しても対応策の表示だけでは省エネ行動につながり難いものと考えた。特に「変換過程」「搬送過程」の管理が直接お客様への快適性につながらないため、業務用建物では「変換過程」「搬送過程」における合理的運用に目が向けられないものと考えられる。

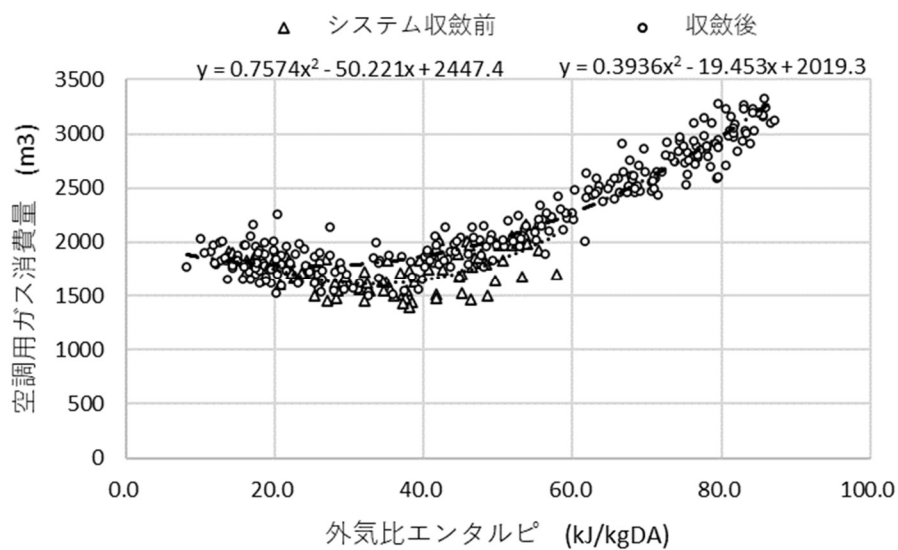


図 4.13 システム収斂前と収斂後の空調用ガス消費量

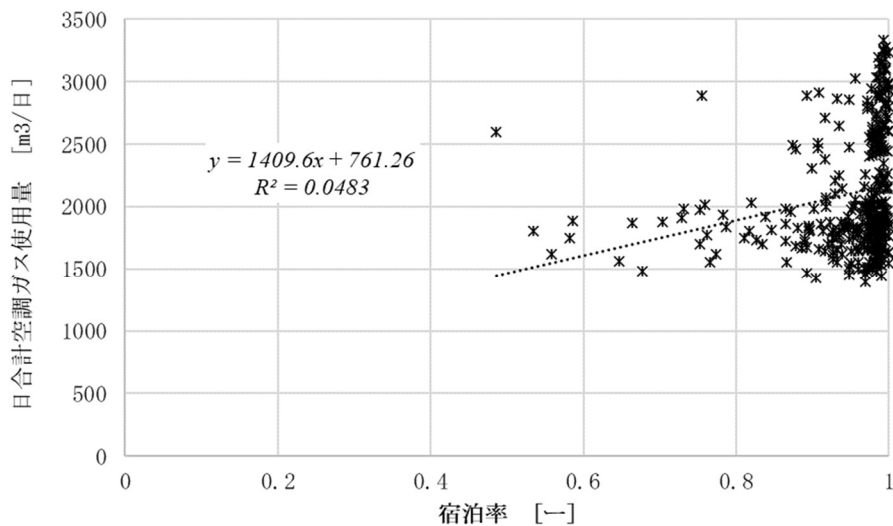


図 4.14 宿泊率と空調用ガス消費量

2017年1月に空調設定温度の自動運用機能をシステムに追加し、自動運用によるエネルギー消費量の削減効果を検証した。自動運用前のエントランス系空調機は還気温度制御により年間24℃一定で運転していた。一方客室系外調機は給気温度制御であり、夏期は24℃、冬期は22℃としてエネルギー管理者が設定を切替えて運転していた。空調機の給気温度や室内温度はエネルギー管理者が季節ごとに基準温度を設定しているのが一般的であり、自動運用においても同様の基準温度を用いる。さらに基準温度に対する上限温度と下限温度を設定し、実際の基準温度は上下限温度間の管理温度幅として運用する。図4.7では空調温度にAI予測を適用するシステムとしているが、2.4.4節で述べたように現状のAI予測シミュレーターに改良の余地があることから式4.1及び式4.2を用いて空調基準温度を算出した。

式4.1及び式4.2に空調機の基準温度の算出式を示す。冷房時の基準温度は外気温度から調整温度を差し引いた値、暖房時は外気温度に調整温度を加えた値とするが、計算された基準温度は上下限値幅の中に納まるように調整する。また上限値、下限値及び調整温度はエネルギー管理者が適宜設定する必要があるが、これらの値を時刻ごとに設定することにより基準温度の変動幅を空調用途に合わせて調整することが可能である。ここで空調機の基準温度が給気温度ロードリセット制御で決定される場合は各室内温度を基準温度として設定する。

基準温度（冷房時）（℃）

$$= \text{外気温度（℃）} - \text{調整温度（℃）} \quad (4.1)$$

但し、基準温度は下記条件により補正する

1) 基準温度 > 上限値温度（℃）

$$\text{基準温度} = \text{上限値温度}$$

2) 基準温度 ≤ 上限値温度

かつ基準温度 ≥ 下限値温度（℃）

$$\text{基準温度} = \text{外気温度} - \text{調整温度}$$

3) 基準温度 < 下限値温度

$$\text{基準温度} = \text{下限値温度}$$

基準温度（暖房時）（℃）

$$= \text{外気温度（℃）} + \text{調整温度（℃）} \quad (4.2)$$

但し、基準温度は下記条件により補正する

1) 基準温度 < 下限値温度（℃）

$$\text{基準温度} = \text{下限値温度}$$

2) 基準温度 ≥ 下限値温度

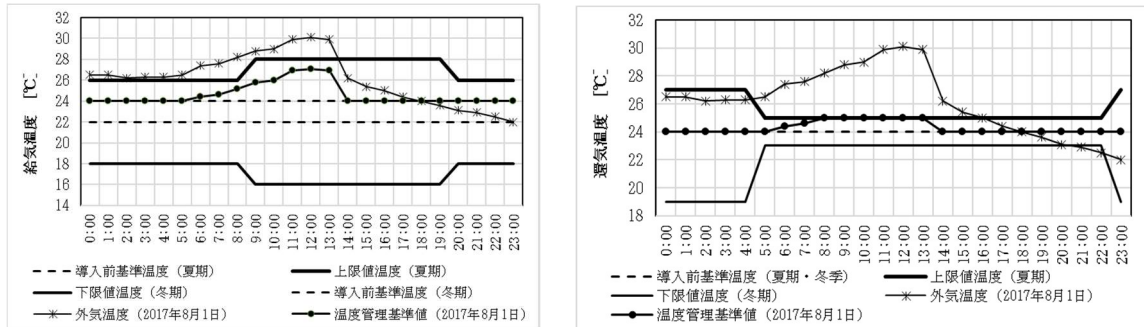
かつ基準温度 ≤ 上限値温度

$$\text{基準温度} = \text{外気温度} + \text{調整温度}$$

3) 基準温度 > 上限値温度

$$\text{基準温度} = \text{上限値温度}$$

システムによる基準温度はシステム導入前の還気温度及び給気温度の省エネ取り組みを参考に上限値・下限値を日昼と夜間に分けて設定した。また外気温度からの調整温度は3°Cとして外気温度と連動させた（図4.15）。



(a)OHU-R-1/2/3

(b)AHU-1/2

図 4.15 基準温度の上下限值

図 4.16 に自動運用導入前と導入後の都市ガス使用量の比較を外気比エンタルピとの相関を用いて示す。ここで自動運用導入前は 2016 年 1 月～2016 年 9 月、導入後は 2017 年 1 月～2017 年 9 月である。いずれの外気比エンタルピでも自動運用導入後の平均ガス消費量が低い値となっており、特に外気比エンタルピが 50kJ/kgDA 以下においてガス消費量の削減が顕著である。これは中間期及び冬期における空調温度調整の効果が大きいことを示している。自動運用導入前 9 ヶ月の空調用ガス消費量は 605,956m³/期間であったのに対し導入後 9 ヶ月の空調用ガス消費量は 550,990m³/期間であり、9.0%の削減率となった。

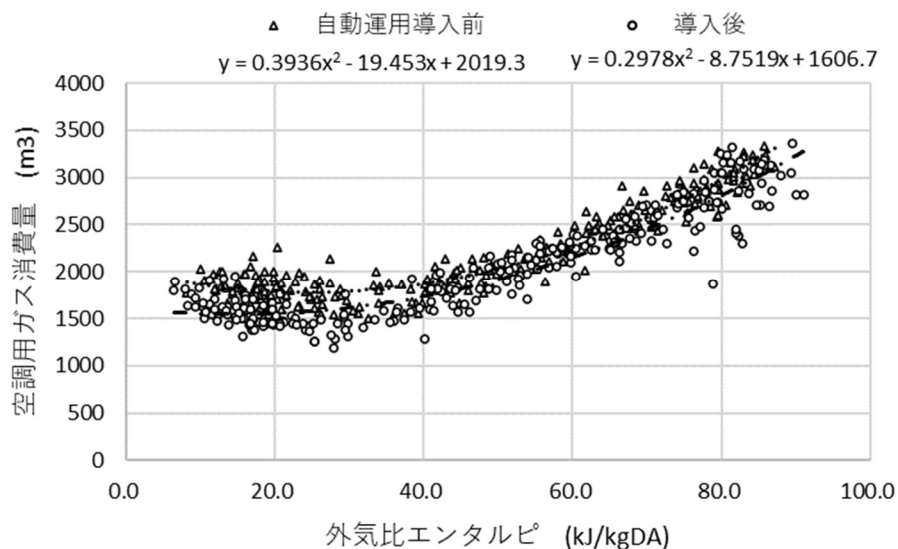


図 4.16 自動運用導入前と導入後の都市ガス使用量

システムの自動運用状況として OHU-R-1 と AHU-1-1 の冷房期（8月1日）における空調設定温度の推移を図 4.17 及び図 4.18 に示す。外調機（OHU-R-1）では外気温度に応じてシステムの基準温度が調整されている。また導入前の設定温度に比較してシステムが設定した温度が高いことから外気処理に必要なエネルギーが毎時刻削減されている。

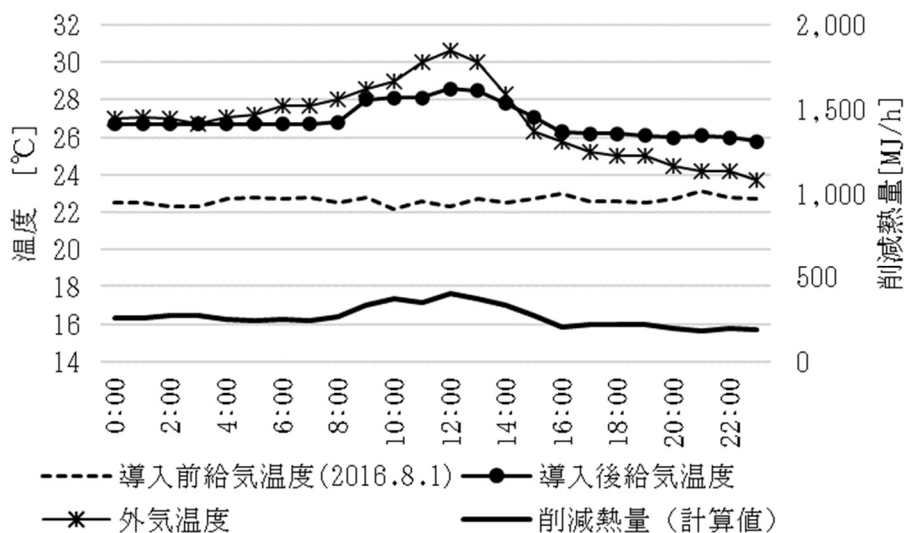


図 4.16 OHU-R-1 の 8 月 1 日における空調設定温度の推移

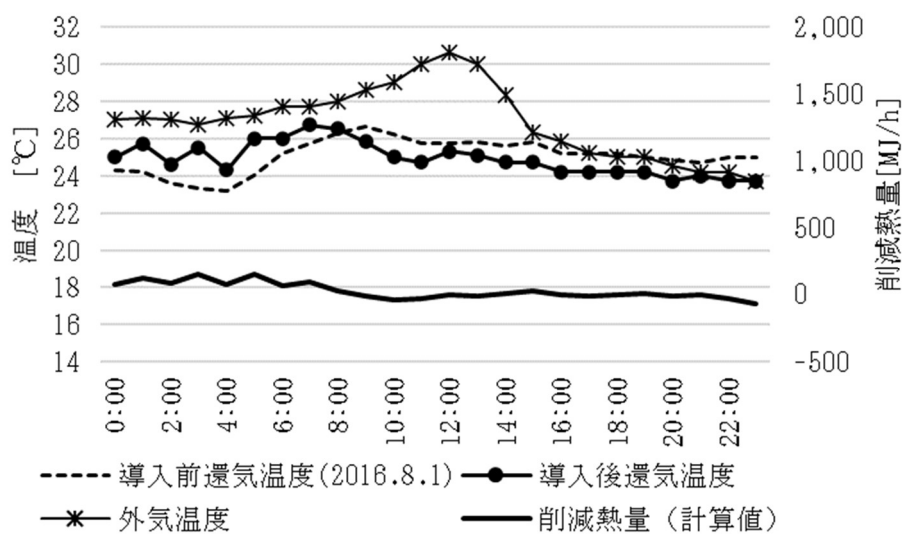


図 4.17 AHU-1-1 の 8 月 1 日における空調設定温度の推移

一方空調機（AHU-1-1）では外気温度により基準温度が変更されてはいるが、システム導入前のホテル担当者による設定温度が良好なため、自動運用によるエネルギー消費量の削減量は外調機に比べて小さい。

実際のシステムによる給気温度・還気温度調整においては、同一空調エリアに対象空調機・外調機の他に内調機やパッケージエアコンがある場合は給気温度（還気温度）調整に

よる削減熱量の一部を他の内調機等が負担してしまい給気温度（還気温度）の調整による省エネ量の全てがエネルギー削減にはならない場合がある。しかし本ホテルでは、エントランス・アトリウム内に他の内調機やパッケージエアコンがなく、他の空調エリアには空調ゾーン毎に専用の空調機が設置されている。従って対象空調機の還気温度調整による影響は受けない。一方客室系外調機は廊下エリア及び客室エリアが対象であり、外調機の給気温度調整に対しては客室内ファンコイルユニット（以下 FCU）の供給エネルギーが増えることとなる。しかし客室系統に関しては給気温度調整による外調機の省エネ量と客室内 FCU の増エネ量は相殺されるとともに、廊下系統及び利用のない客室については省エネになると考えられる。

以上のことから空調温度を外気温度に連動して時刻別に自動設定することによりエネルギー消費量の削減が期待できるとともに、システムの有効性も確認した。なお式 4.1 及び式 4.2 を用いて空調設定温度を外気温度と連動させてもホテル利用者からのクレームがなかったことから、空調温度の設定は基本的に 4.1 及び式 4.2 を用い、算出した基準温度を AI 予測値で補正する方法について検討したいと考えている。

4.4 エネルギー管理とリニューアル設計

4.4.1 エネルギー管理と熱源設計の連携運用

リニューアル時には高効率機器・システムの導入を念頭に現状よりもエネルギー消費量や CO₂ 排出量が少ない設計となることが求められる。特にエネルギー消費量への影響が大きい熱源システムの設計においては、使用する熱源機の機種選定や設置台数と容量の組合せを合理的に評価する必要がある。またリニューアル設計においてはエネルギーの時刻別需要量や継続使用する熱源機の効率劣化・特性など、設計に必要なデータを現状のエネルギー管理情報から取得することも重要である。そこでエネルギー管理情報に基づいたリニューアル設計を行うことを目的として、第 4 章にエネルギー管理システムとして開発したエネルギーナビゲーションシステムと第 3 章で提案した熱源システムの設計手法の連携運用を行った。

図 4.18 にエネルギーナビゲーションシステムから設計情報を取得し必要な設計データを構築した後、最適熱源設計システム及び多目的評価システムに入力した上で、熱源システムを合理的に評価・選択する連携運用フローを示す。ここで設計に必要なデータとは電力や空調用冷暖房などの時刻別エネルギー需要量や外気温度・湿度、継続使用熱源機の効率特性（部分負荷特性、送水温度特性など）あるいは継続使用する冷却塔の冷却塔能力劣化（外気比エンタルピ及び冷却熱量における冷却水温度）などである。これらのデータはエネルギーナビゲーションのデータベースから情報を取得した後、エネルギー需要に関してはクラスター分析を行った結果の評価代表日データ、機器特性に関しては最適熱源設計システムの設定データに構築して入力する。一方多目的評価に関しては最適熱源設計システムを用いて比較熱源システムのエネルギー消費量や CO₂ 排出量などの計算値から数値尺度を求めるとともに、現状機器の保守情報（修繕頻度、運転制約など）を参考に信頼性や将

来性などについて各熱源システムの比較尺度を入力する。

現状においては設計情報の取得、設計データの構築、最適熱源設計システムへの設計データ入力及び熱源システムの評価に至る手順は手動実施である。将来的には自動で連携実施できるようにシステム開発を行い、定期的に熱源システムの中長期計画または中長期修繕計画を出力することを検討している。ここでエネルギーナビゲーションシステムが管理しているエネルギー管理情報データベースは標準書式として保存されているため、最適熱源設計システム以外に様々な熱源システム評価シミュレーションを用いる場合においてもそれぞれのシミュレーション用データを容易に構築することが可能である。

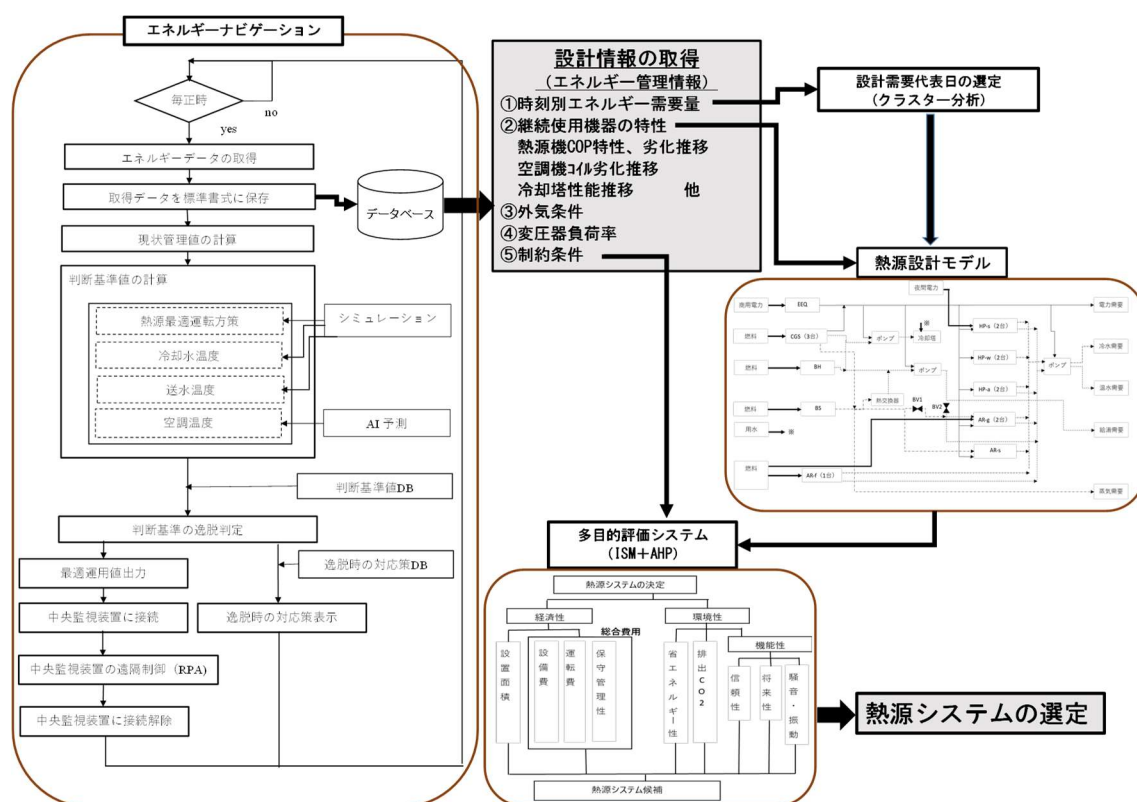


図 4.18 エネルギー管理システムと熱源設計システムとの連携運用フロー

4.4.2 事務所ビルにおけるリニューアル設計事例

図 4.18 に示したエネルギー管理システムと最適熱源設計システムの連携運用により事務所ビルにおけるリニューアル設計を実施した。対象の建物は東京にある 45,000 m²の事務所ビルであり、竣工後 20 年を経過している。現状の熱源システムを図 4.19 に示すが、氷蓄熱のブラインチラーは 3 年前に更新したため継続使用することが条件である。

最初にエネルギーナビゲーションシステムから時刻別エネルギー需要量や外気温度・湿度、継続使用熱源機の効率特性を取得し、最適熱源設計システムに設定するデータを構築した。表 4.10 にクラスター分析から得られた計算代表日を示す。次に最適熱源設計システ

ムを用いて現状の熱源システムをそのまま更新した熱源システムのエネルギー費用・消費量及び CO₂ 排出量を算出するとともに、費用最小となる熱源システムの熱源機構成（機器容量と組合せ）を求めた。さらに費用最小熱源システムを参照して比較熱源システムを検討し、各比較熱源システムについて機器容量の最適化とエネルギー費用・消費量及び CO₂ 排出量を算出した。一方多目的評価については BCP 条件を加えた意思決定構造（図 4.20）を構築し最適熱源設計システムから得られた数値尺度と現状の保守管理情報をもとにした比較尺度を設定して熱源システムの評価を行った。

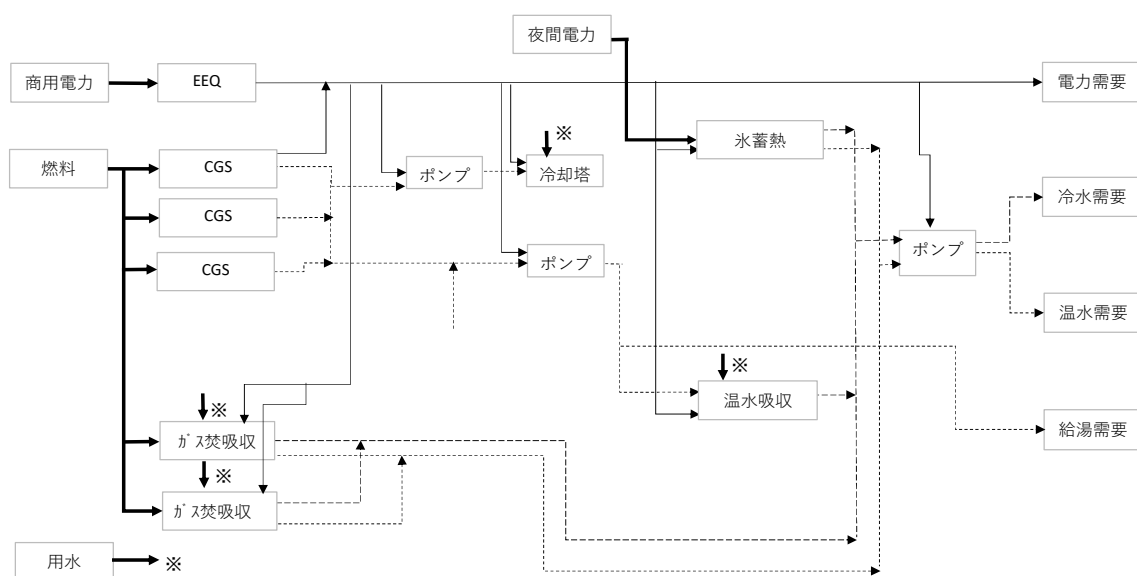


図 4.19 現状の熱源システム

表 4.10 クラスタ分析から得られた計算代表日

需要 No.	該当日と曜日属性						電力需要 MJ/日	冷房需要 MJ/日	暖房需要 MJ/日	給湯需要 MJ/日
	代表日	曜日	季節	冷房	暖房	日数				
1	17/12/15	金	冬季	なし	大	37	49,878	0	79,000	600
2	17/12/11	月	冬季	なし	中	21	47,653	0	45,000	296
3	18/03/30	金	冬季	なし	小	22	51,952	0	12,000	371
4	18/02/11	日	冬季	なし	小	41	24,858	0	26,000	0
5	17/11/22	水	中間期	なし	中	3	46,516	0	50,000	316
6	17/11/15	水	中間期	なし	小	33	48,485	0	19,000	200
7	18/04/24	火	中間期	小	なし	27	48,186	18,000	0	111
8	18/06/19	火	中間期	中	なし	38	50,530	42,000	0	109
9	18/04/29	日	中間期	小	なし	51	24,998	6,000	0	0
10	18/08/17	金	夏季	大	なし	62	55,040	66,000	0	710
11	18/09/09	日	夏季	中	なし	30	35,748	34,000	0	24

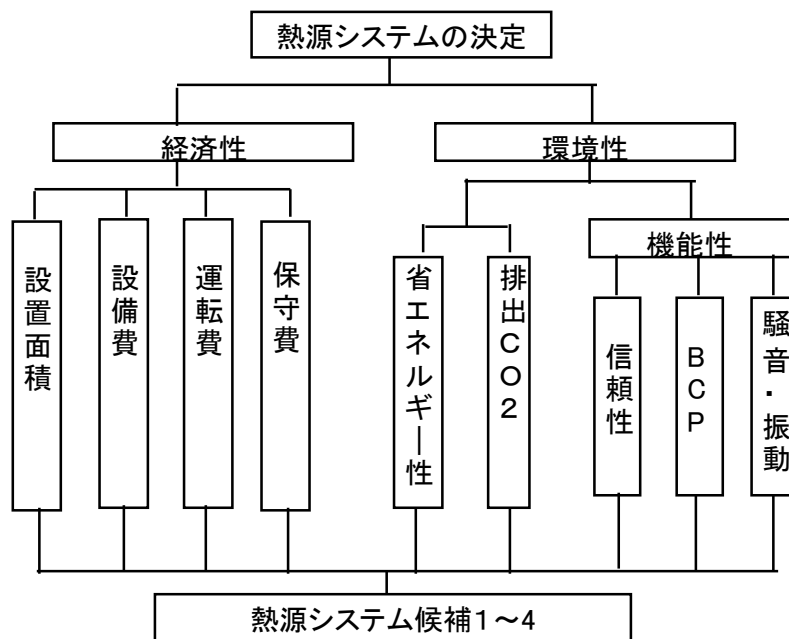


図 4.20 意思決定構造

表 4.11 に熱源システムの比較結果を示す。表 4.11 の機器構成において「現状システム」と表示しているシステムは現状の機器構成及び機器容量・台数をそのまま更新した場合の熱源システムであり「比較システム 1」は設備償却費、運転費、契約料金及びメンテナンス費用の総合費用が最小となる熱源システムである。一方「比較システム 2」「比較システム 3」は「比較システム 1」を参考に機器構成を検討した後、熱源機の機器容量を最適化計算により求めたシステムである。

評価結果から、現状の熱源システムをそのまま更新した場合は電力・都市ガスの契約料金は低減されるものの設備償却費や運転費用が高く総合費用の点で最も不利である。運転費用が不利なのは 500kW×3 台の CGS（コージェネレーションシステム）を電力需要主体で運転を行うと CGS 回収熱を冷房及び暖房用温水に利用したとしても回収熱の廃棄が生じることによる。これに対し 300kW×2 台を導入した「熱源システム 3」では CGS 回収熱を有効に利用できることから運転費用及びエネルギー消費量が最も有利であるが、CGS の設置費用が高いことから総合費用では不利となる。一方高効率水冷チラーを導入した「熱源システム 1」「熱源システム 2」は総合費用が有利である。特に高効率水冷チラーを 2 台かつ異容量に導入した「熱源システム 2」は対象建物のエネルギー需要量の特性に合致した熱源機構成であり、運転費及びエネルギー消費量・CO₂ 排出量が最も優れている。

次に多目的評価を行うために各熱源システムのエネルギー費用・エネルギー消費量及び CO₂ 排出量の値から数値尺度を求めた。また設置面積・信頼性・騒音振動及び BCP について比較尺度を設定した上で AHP を用いて各熱源システムを評価した結果「熱源システム 1」

及び「熱源システム2」の総合評価値が高く、リニューアル更新に適したシステムとして選出された。

表 4.11 熱源システムの比較結果

熱源機器	単位	機器構成			
		現状システム	比較システム1	比較システム2	比較システム3
商用電力	kW	1,230	1,800	1,900	1,300
CGS (No.1)	kW	500	0	0	300
CGS (No.2)	kW	500	0	0	300
CGS (No.3)	kW	500	0	0	0
温水ボイラ	MJ/h	0	6,000	10,000	2,500
蒸気ボイラ	MJ/h	0	0	0	0
直焚き吸収式冷温水機 (No.1)	MJ/h	5,063	4,000	0	0
直焚き吸収式冷温水機 (No.2)	MJ/h	5,063	0	0	0
水冷チラー (No.1)	MJ/h	0	4,000	5,000	4,000
水冷チラー (No.2)	MJ/h	0	0	3,000	1,000
空冷チラー(No.1)	MJ/h	0	0	0	0
空冷チラー(No.2)	MJ/h	0	0	0	0
温水吸収式冷凍機	MJ/h	4,557	0	0	0
ジェネリンク	MJ/h	0	0	0	3,000
蓄熱 (氷)	MJ/h	824	824	824	824
蒸気吸収冷凍機	MJ/h	0	0	0	0
設備償却費	百万円/年	100	19	19	50
運転費	百万円/年	122	118	117	115
契約料金	百万円/年	20	30	31	21
メンテナンス費用	百万円/年	10	2	3	7
総合費用	百万円/年	252	169	170	194
エネルギー消費量	GJ/年	74,705	74,520	73,808	72,698
CO ₂ 排出量	t-CO ₂ /年	4,056	4,162	4,127	3,998
設置面積	—	3	5	7	3
信頼性	—	3	7	9	5
騒音・振動	—	3	9	7	5
BCP	—	9	5	3	7
総合評価結果	—	0.20	0.28	0.28	0.24

4.5 結言

日本におけるエネルギー管理の現状を鑑み、「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理を現状業務の中で実施するための課題を考察した。現状業務においては省エネの実施

者である設備運転管理者の業務範囲が広くまた業務量が多いことから、エネルギー管理手法が整理されていても時間的な制約から十分なエネルギー管理が実施されないという課題がある。また設備運転管理者が外部の専門会社の担当者である場合が多く利用客のクレームがない運用が主体となり、省エネ運用よりも建物内環境の維持が運用目的となっていることなどもエネルギー管理が実施されない理由と考えられる。従って省エネ運用をオーナーまたはファシリティーマネージャーに求められても「需要過程」での管理は実施するが「変換過程」「搬送過程」の管理は後回しになってしまう現状がある。

そこで「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理を支援するシステムを開発し、その有効性を評価した。当初開発したシステムはエネルギー管理手法に則り、建物で必要な管理項目に対して現状の管理値の評価、現状管理値と判断基準値との比較及び判断基準値を逸脱した場合の対応策を毎時表示する機能であった。すなわち毎時省エネ対応を促すことによるエネルギー消費量の削減を期待するシステムである。

このシステムをショッピングモール及びリゾートホテルに導入しエネルギー消費量の削減効果を検証したが、システム導入前後での顕著なエネルギー削減は認められなかった。その理由として毎時省エネ対応策を表示しても、毎時対応するための時間的余裕がなく、直接利用客に影響のない省エネ対応は後回しとなるからである。結局は現状業務として認識されるに至らなかった。このことはショッピングモールやホテル以外の業務用建物においても共通した課題と考えられる。

そこで、判断基準値逸脱時の対応を設備運転管理者に代わり自動で行う機能を検討しシステムに追加した。この自動運用機能は RPA 技術を利用し、中央監視装置を遠隔制御することで実現した。RPA は BAS 画面を介して操作するシステムであるため、BAS には特別なハードウェアやソフトウェアをインストールする必要がない。従って BAS 仕様や製造メーカーに依存しないことから既存の BAS に対しても容易に接続・設置するという利点がある。

本システムでは自動運用項目として (i) 熱源機の最適運転 (ii) 送水温度の設定 (iii) 空調用外気導入量の調整 (iv) 空調温度の調整の 4 項目としたが、基本的に BAS 機能の全てを遠隔制御することが可能である。

本システムを対応策の表示だけはエネルギー消費量の削減が見られなかったショッピングモール及びホテルに導入し、自動省エネ運用の有効性を検証した。ショッピングモールでは外調機の自動運用による外気導入量の削減を行った結果、外気処理に要するエネルギー量の 48% が削減された。またホテルでは外調機及び空調機の給気・還気温度を自動で設定する運用を行った結果、空調に要するエネルギー量の 9.0% が削減された。また東京都の庁舎建物を対象として、システムにより 143 室の温度を自動で設定する運用を行っているが、2019 年 11 月から 2020 年 2 月までの削減実績は空調に要するエネルギー量の 8.0% の削減となった。

以上のことから「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理に対して、判断基準値が逸脱した場合の対応を自動化することにより、今まで実施が行われてこなかった「変換

過程」「搬送過程」を高効率運用することが可能であることを確認した。またこの支援システムを利用することによりエネルギー消費量の削減が可能であることを示した。

さらに本システムを導入している事務所ビルを対象に熱源システムのリニューアル設計を行った。今回実施したリニューアル設計は、複数の熱源システムの候補から合理的に最適な熱源システムを評価・選定することである。リニューアル設計は本システムで管理・蓄積したエネルギー管理情報から必要な設計データを構築し、最適熱源設計システム及び多目的評価システムに入力した上で熱源システムを合理的に選択する手順である。このリニューアル設計は各システムを手動連携にて実施したが、本システムと最適熱源設計手法を連携することにより、リニューアル対象建物に対して適切な熱源システムを評価・選択することが可能であることを示した。

第4章の参考文献

1. 米澤 仁; 開口 善典; 御所園 健士; 鈴木 富生; 増子 正; 松橋 隆; 増子 正; 升川 依士夫; 村上 公哉; BEMS の活用に向けたグラフ画面とデータエクスポートの標準仕様の提案 (第2報) BEMS の活用階層と管理手法の考え方, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, (2012.9.5~7) OS-37
2. 千葉 理恵; 田中 英紀; 奥宮 政哉; シミュレーションを活用した運用段階のエネルギーマネジメント手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No.242, 2017年5月
3. 中里 壮一; 射場本 忠彦; 柳原 隆司; 百田 真史; 稲田 雄大; 南雲 祐輝; 人の所在に関する情報と連携した BEMS の活用に関する実践的研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No.227, 2016年2月
4. Clemente García Cutillas; Javier Ruiz Ramírez; Manuel Lucas Miralles; Optimum Design and Operation of an HVAC Cooling Tower for Energy and Water Conservation. *Energies* 2017, 10, 299
5. BEST (Building Energy Simulation Tool); http://www.ibec.or.jp/best/about/pdf/pamphlet_131212.pdf, 一般社団法人 建築環境・省エネルギー機構
6. LCEM (Life Cycle Energy Management) ツール Ver3.10 主要オブジェクトの計算アルゴリズム; 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課, 平成 26 年 2 月
7. 斯波 敬; 上村 泰; 藤江 真也; 阿部 幸司; 木村 雅彦; 高谷 勝; 最適化手法を取り入れた熱源自動運転システムの構築, 空気調和・衛生工学会論文集 No.255, 2018年6月
8. 矢島 和樹; 赤司 泰義; 桑原 泰治; 福井 雅英; 熱源・空調システムの最適制御技術の導入に向けた研究, 空気調和・衛生工学会論文集 No.248, 2017年11月
9. 自動制御装置カタログ, メーカーホームページ Available online:

<https://www.azbil.com/jp/product/building/system/building-automation-system/savic-net-G5/application.html>

10. Taulli, T. *The Robotic Process Automation Handbook*; Apress: Berkeley, CA, USA, 2020; ISBN 978-1-4842-5728-9, doi:10.1007/978-1-4842-5729-6_1.
11. Manufacturer Home page. Available online:
https://www.abbyy-flexicapture.com/rpa-ocr/?keyword=robotic%20process%20automation%20software&campaignid=333782971&adgroupid=1285329340281015&Network=o&phone=248-447-0100&msclkid=158a9f59fae41570ae2cc134771a05b1&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=ABBY%20FlexiCapture%20RPA%20Imported%20from%20GA&utm_term=robotic%20process%20automation%20software&utm_content=RPA%20OCRRPA
12. Manufacturer Home page. Available online:
https://www.airslate.com/?msclkid=a839053f41f61d4d3b1a5b52cf3db505&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=main-page&utm_term=rpa%20software&utm_content=robotics%20process%20automation
13. Escrivá-Escrivá, G.; Segura-Heras, I.; Alcázar-Ortega, M.; Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in HVAC systems. *Energy Build.* 2010, 42, 2258-2267. [CrossRef]
14. Microsoft® Excel® 2016 MSO 32bit. Available online: <https://microsoft-excel-2016.softonic.jp/>
15. Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C.; A review on buildings energy consumption information. *Energy Build.* 2008, 40, 394–398. [CrossRef]
16. U.S. Energy Information Administration, Commercial Building Energy Consumption Survey. Available online: <https://www.eia.gov/consumption/commercial> (accessed on 15 March 2020).
17. Rey-Hernández, J.M.; Velasco-Gómez, E.; José-Alonso, J.F. San; Tejero-González, A.; González-González, S.L.; Rey-Martínez, F.J.; Monitoring Data Study of the Performance of Renewable Energy Systems in a Near Zero Energy Building in Spain: A Case Study. *Energies* 2018, 11, 2979 ; doi:10.3390/en11112979
18. 省エネルギーセンター ホームページ, https://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html
19. Braslavsky, J.H.; Wall, J.R.; Reedman, L.J.; Optimal distributed energy resources and the cost of reduced greenhouse gas emissions in a large retail shopping centre. *Appl. Energy* 2015, 155, 120–130. [CrossRef]

第5章 結論

5.1 本研究のまとめ

本論文では、中央熱源システムを有するエネルギー管理指定工場規模の業務用建物を対象に「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理手法及び熱源システム設計の提案とともに、エネルギー管理を支援するシステムの開発と実証を行った。エネルギー管理については1960年頃からBEMS (Building Energy Management System) がエネルギー管理装置として紹介されている[1]。またBEMSは広義では中央監視装置を意味し、狭義ではエネルギー情報を収集する装置を意味することもあり中央監視装置と接続して併用されている事例も多い。どちらの形態においてもBEMSで収集しているエネルギーデータは電力やガス、冷温水流量などであり、エネルギー使用量の時系列変化を把握することを目的としている[1]。これらのデータは「供給過程」「需要過程」の管理には有効であるが、「変換過程」「搬送過程」を管理するには十分ではない。またエネルギー使用量は購入伝票等で管理できるとともにコスト管理を含め幅広い関係者の興味の対象となっていることから、エネルギー管理は「供給過程」「需要過程」を主に実施されてきた。これに対し「供給過程」「需要過程」に関わる機器・システムの管理には専門的な知識が必要であり、かつ高度化・複雑化しているため、設備されている機器・システムを常に高効率で運用するという管理はほとんど実施されていない。

一方、既往研究では「変換過程」「搬送過程」の効率向上に関する論文が大学を中心に多数報告されているが、これらの研究は理論解析またはシミュレーションが多く、研究結果をエネルギー管理業務の中で実務的に活用するための提案はない。一部の企業が学術講演会で発表している程度に過ぎない。「変換過程」「搬送過程」の効率向上は建物のエネルギー消費量の削減に有効であり、エネルギー費用の低減だけでなくエネルギー使用に伴うCO₂排出量の削減にも貢献することができる。本論文では建物の合理的なエネルギー使用を目的とした管理、運用、設計手法に関する研究成果を以下の4章に分けて記述した。

第1章では、エネルギーフローの考え方を示し「変換過程」「搬送過程」でのエネルギー管理が実施されない背景と課題を考察し、「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理手法の構築が必要であることを述べた。またコミッショニングや省エネルギー行為をエネルギー管理の一部として位置付け、エネルギー管理の中で包括的に実施することの必要性を述べた。さらにエネルギー管理から得られる情報を活かし、建物の需要特性に応じた熱源設計とすることも改修後のエネルギー管理には重要であることを説明した。

第2章では、「変換過程」「搬送過程」のエネルギー管理手法について具体的な管理機器・システムを選定して提案を行った。「変換過程」「搬送過程」では多くの機器・システムが関係しているが、効率管理に重要な機器・システムを選定するとともに各機器・システムの効率を定義した上で各機器・システムの管理項目を定義した。また管理項目を評価するための計測項目と計算式を整理し、管理項目の妥当性を判断するための判断基準値も考察した。判断基準値が外部条件により時刻ごとに変動する管理項目についてはシミュレーシ

ョンによる判断基準値の算出方法を検討した。さらに現状管理値が判断基準値から逸脱した場合の対応策をまとめた。これらの定義・整理により「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理手法を提案した。

第3章では、熱源更新を対象としてエネルギー管理情報を活用した熱源システムの設計手法について提案した。熱源設計においては導入可能な熱源機器の種類が多く、また機器の仕様も多様である。熱源システムの設計においては熱源機器の組合せとともに機器容量及び機器台数の合理的な検討が必要であることから非線形計画法と混合線形整数計画法を用いた最適化設計手法を用いた。また多種多様な熱源機の検討を行うための設計モデルの提案とともに、設計計算で用いる熱源機の性能特性、機器価格、保守費用等の計算データを整理した。

一方、この設計手法では機器容量の最適化を行うために長時間の計算を要するという課題があった。そこで計算時間を実用的な計算時間とするために365日のエネルギー需要を類型化し、計算に用いる代表日を合理的に選択する手法を提案した。類型化にはクラスター分析を用いた。

さらに熱源設計は多目的な評価指標を総合的に評価して行うとの観点から、AHPとISMを用いた多目的評価方法を提案した。これらの最適化手法、クラスター分析による計算代表日の選択、AHP・ISMを組み合わせて用いることにより設計者の意思・設計思想を反映した合理的な設計が行えることを明らかにした。

第4章では、エネルギー管理に携わるとされる関係者と業務範囲及びエネルギー管理の目的について考察するとともに、「変換過程」「搬送過程」におけるエネルギー管理の実施が実務的に困難である背景を考察した。そこで第二章で提案したエネルギー管理手法を支援するシステムを開発し既存建物に導入した結果について説明した。導入の結果、単に判断基準値を逸脱した管理項目の対策を表示しただけでは、省エネ運用につながらないことが明らかになった。そこでRPA技術を応用し対応策を自動で運用する機能を開発した上で支援システムに機能追加した結果、エネルギー消費量が削減されたことを説明した。

このシステムは、業務用建物における「変換過程」「搬送過程」のエネルギー管理支援とともに省エネ運用によるエネルギーの合理的な使用に寄与できることを明らかにした。

さらに本システムと熱源システムの設計手法を連携運用することにより、熱源システムのリニューアル設計を合理的に実施できることを示した。

5.2 今後の研究課題

開発したシステムがエネルギーの合理的な使用に貢献することを示したが、自動運用に関しては熱源システムの最適運転や送水温度の調整に関する実証は行っていない。従ってこれらの自動運用項目の実物件での導入を通じてエネルギー消費量の削減効果を検証する必要がある。また病院をはじめとしたエネルギー多消費型の建物用途への導入を進め、システムによるエネルギー消費量の削減の評価とともにシステムの安定性と課題について把握することも必要と考えている。

一方既存の中央監視装置では本システムの運用に必要な計測データが十分に取得されていないことや、中央監視装置に自動運用を行うための機能が不足しているなどの課題が残されている。今後本システムの普及を進めるにあたり、本システムの基本であるエネルギー管理を実施するための BAS 機能や計測のあり方についても認識を深めてゆきたい。

現状では本システムの自動運用項目が 4 項目であることから、自動運用項目の拡張も課題である。特にメーカーからは多くの省エネ機器・システムが提案されている。エネルギーに携わる技術者としてはこれらの省エネ機器・システムを使いこなすことは勿論であるが、機器・システムの特徴を理解しさらに省エネとなる使用方法やシステムについて提案するべきであると考えている。これまでに新たな省エネシステムとして冷却塔の直列運転システム[2]、冷温水戻り温度制御[3]、冷却塔飛散水の回収システムを提案している。

特に冷却塔の直列運転システムは、近年導入実績の多いインバータ駆動のターボ冷凍機を対象にさらなる省エネ熱源機として活用するシステムである。この水冷式熱源機は冷却水温度が低いほど効率が向上するという特性がある。従って通常 1 台の熱源機に 1 台設置されている冷却塔に対して、運転していない冷却塔を直列に接続することにより冷却水温度を湿球温度近くまで下げ熱源機の効率をより向上させることが可能である。冷房需要の小さい時には運転されない熱源機が存在することから、冷却塔直列運転システムは冷房需要の小さい冬期や中間期の運用に最適である。

これらの検討したシステムについてもシステムの運用が複雑であることから、合理的なエネルギー管理が必要であり、本システムによる運用支援が必要と考える。

さらに近年においては AI も利用可能となっており、IoT 技術や BIM (Building Information Modeling) の活用も進んでいる。今後においてはこのような技術と連携することにより中央監視装置による自動運用の他にカメラ画像による保守・メンテナンスの省力化技術の開発を目指したいと考えている。今後、設計から運用、改修、廃棄に至るライフサイクルへの拡張を前提に、本システムを中核とした管理及び自動運用技術によるエネルギーの合理的な使用、排出 CO₂ の削減が進むことを強く望んでいる。

第 5 章の参考文献

1. 社団法人空気調和・衛生工学会, 環境・エネルギー性能の最適化のための BEMS ビル管理システム, 丸善株式会社, 平成 13 年 10 月 20 日 初版
2. 田野辺 淳; 廣瀬 直美; 小島 通雄; 山本 亨; NTT 厚木研究開発センタにおける冷却塔直列運転制御の実施と効果検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2014.9.3 ~5) F-60
3. 永桶 均; 小島 通雄; 山本 亨; 空調用二次冷温水搬送ポンプの電力削減対策の実施と効果検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2013.9.25~27) A-18

謝辞

本研究の支援並びに査読論文及び本論文の作成にあたり、終始懇切丁寧なる御指導、ご鞭撻と格別のご配慮を賜りました北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門空間性能分野建築環境学研究室 羽山広文 教授に多大なる感謝の意を表します。合わせて学位取得の機会をご提供頂きましたことに深く感謝いたします。

第2章の冷却塔における冷却水温度及び空調送水温度のシミュレーター構築において、丁寧なる御指導をいただきました 田中稔 氏（元 株式会社イーアンドイープランニング社長）に心より感謝いたします。また空調温度シミュレーションの構築に際し、共同研究を通じ丁寧なる御指導をいただきました北海道大学大学院情報科学研究科情報理工学専攻 山本雅人 教授に心より感謝いたします。

第3章の熱源システム最適化手法の研究に際しては、大阪府立大学 伊東弘一 名誉教授、大阪府立大学 大学院工学研究科 横山良平 教授に貴重なお時間を割いて頂き、多大なる御指導・御教授を賜りました。深く感謝いたします。

第4章のナビゲーションシステム開発に関して、研究の成果を実用的なシステムとして開発して頂きました 林恭生 氏（前 広沢電機工業株式会社社長）及び広沢電機工業株式会社の皆様に厚く感謝の意を表します。またシステムの試行・検証及び実用化に関するご支援を頂きました 奥田知康 氏（ジョーンズラングラサー株式会社 EES 部）に心から感謝いたします。

本研究を通じて管理・設計・実務者支援の全般に対して、実務的な観点から長期間にわたり本研究へのアドバイスを頂きました 小島通雄 氏（元 日比谷総合設備株式会社設計・積算部）に心より感謝いたします。

最後に、いかなる時も適切なアドバイスと協力を行って頂いた株式会社インティ社員の皆様に感謝の意を表します。

お世話になった方々に、ここに記して深甚なる謝意を表します。

Summary of Thesis

Doctoral Field: Engineering Name: Toru Yamamoto

Thesis Title

Study on management, operation, and design methods for rational energy use in buildings

Initiatives toward energy reduction are centered about reducing energy demand and deploying high-efficiency equipment and systems and renewable forms of energy, but there are currently no initiatives on continuously operating existing equipment and systems at high efficiency.

This study aims to have energy managers operate equipment and systems at high efficiency at all times. It aims, in particular, to provide knowledge on techniques for managing high-efficiency operation, simulation techniques for evaluating high-efficiency operation, techniques for designing heat source systems, and a system for supporting these energy management techniques.

Chapter 1 “Introduction” describes the background and purpose of this study, outlines prior research related to this study, and describes the position of this study in relation to other studies.

Chapter 2 “Study of Energy Management and Operation Techniques” first defines energy flow and then examines techniques for managing equipment efficiency in the energy “conversion process” and “transport process.” It sums up equipment and systems that have been introduced and installed as standard in the conversion process and transport process and defines the factors that affect the efficiency of each equipment unit and system as management items. It also defines measurement items and calculation formulas essential to evaluating equipment efficiency and management items and examines criteria values for judging whether each management item is in a rational state. Furthermore, for management items whose judgment criteria values fluctuate with time, this chapter studies a method for calculating criteria values by simulation and discusses the handling of cases that deviate from judgment criteria values.

Next, Chapter 3 “Study of Energy Management and Design Techniques for Heat Source Systems” examines design techniques assuming a renovation period with a focus on heat source systems in a building. In the design of heat source systems, it proposes a calculation method using an optimization technique and a design model for applying an optimization

technique to select and combine different types of heat source equipment and rationally select equipment capacity. Additionally, as elemental technologies for rationally using design data obtained from energy management information, this chapter studies the classification of demand data through cluster analysis and a decision-making method for selecting a heat source system targeting multiple evaluation indices using the analytic hierarchy process (AHP). It is shown that the use of an optimization technique makes it possible to rationally select a heat source system in real time.

Chapter 4 “Energy Management and Operation System Development” summarizes the tasks of personnel involved in energy management and the purpose of energy management and points out that there are issues that prevent the energy management techniques proposed in Chapter 2 from being actively implemented at present. With this in mind, it studies a support system for energy managers to enable them to perform energy management continuously. The developed system uses measurement data obtained from central monitoring equipment, regularly compares the current values of management items with their judgment criteria values, and displays on a personal computer screen countermeasures to be taken with respect to management items that have deviated from their judgment criteria.

The developed system was implemented in existing buildings in a shopping mall and resort hotel and the amount of energy reduction was evaluated. Although countermeasures were displayed regularly on the computer screen, it was found that they did not lead directly to energy-saving actions due to the large amount of tasks involved. In addition, the fact that management of the conversion process and transport process does not directly influence the environment of a building’s inhabitants was also thought to contribute to the lack of a positive and substantial result here.

An automatic operation function for automatically applying countermeasures in the case of deviation from judgment criteria was therefore investigated and added to the system. Using robotic process automation (RPA), this automatic operation function is executed by having the system remotely operate the central monitoring equipment. The system incorporating this function was implemented in the same buildings and an evaluation of the amount of energy reduction achieved was performed. This evaluation revealed a significant energy reduction effect: in the shopping mall, automatic operation of outside air conditioning equipment resulted in a 48% reduction in the energy used for outside-air processing, and in the resort hotel, automatic operation of supply air temperature resulted in a 9% reduction in air conditioning energy.

These results showed that energy management techniques in the conversion process and transport process have an energy reduction effect and that the use of an automatic operation

system using IT technology in energy management can contribute to rational energy use in buildings.

Chapter 5 “Conclusion” summarizes the knowledge obtained from this study and touches upon future issues.

This study targeted energy managers and aimed to achieve the hourly and continuous operation of equipment and systems at high efficiency. It obtained knowledge on management techniques for performing high-efficiency operation, simulation techniques for evaluating high-efficiency operation, design techniques for heat source systems, and a system for supporting these energy management techniques.

研究業績目録

1. 論文（学位論文関係）

- [1]山本亨, 森正夫, 田中稔, 下城宏文, 伊東弘一, 横山良平: 最適化手法を用いた熱源システムの一設計手法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.74, pp49-58, 1999年7月
- [2]勝田正文, 金子智, 山本 亨, 都市型ホテルにおけるコージェネレーションの運用実態評価とCO₂ 排出量最小運転の解析, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.22 No.1, pp25-32, 2005年
- [3]山本亨, 羽山広文, 林恭生: 中央監視装置の遠隔操作による省エネルギー自動運用システムの開発と実証, 空気調和・衛生工学会論文集, No.274, pp11-19, 2020年1月
- [4]Yamamoto T., Hayama H., Hayashi T.: Formulation of Coefficient of Performance Characteristics of Water-cooled Chillers and Evaluation of Composite COP for Combined Chillers, Energies 2020, 13, 1182; doi:10.3390/en13051182
- [5]Yamamoto T., Hayama H., Hayashi T., Mori T.: Automatic Energy-Saving Operations System Using Robotic Process Automation, Energies 2020, 13, 2342; doi:10.3390/en13092342

2. 講演論文（学位論文関係）

- [1]山本亨, 田中稔, 伊東弘一, 横山良平: 最適化手法による建物熱源設備の省エネルギー設計, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (1996.9.18~20) C-28
- [2]山本亨, 田中稔, 伊東弘一, 横山良平: 経済性評価に基づいたコージェネレーションシステムを含む熱源設備の検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (1997.8.27~29) E-43
- [3]山本亨, 田中稔: コージェネレーションシステムを用いた熱源設備の経済性比較, 日本建築学会大会学術講演会梗概集 1997年9月 41424
- [4]森正夫, 下城宏文, 山本亨, 田中稔: ライフサイクル的評価に基づく最適熱源設備設計手法の有効性検討 その2 排出CO₂ 評価に基づく最適熱源設備設計, 日本建築学会大会学術講演会梗概集 1998年9月 41493
- [5]下城宏文, 森正夫, 伊東弘一, 山本亨, 田中稔, 横山良平: 最適化手法を用いた熱源システムの設計手法 その3: 既存建物の運転評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (1999.9.28~30) E-28
- [6]山本亨, 田中稔, 伊東弘一, 森正夫, 下城宏文, 横山良平: 最適化手法を用いた熱源システムの設計手法 その4: 多評価指標を考慮した熱源システム選択の意思決定方法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (1999.9.28~30) E-29
- [7]山本亨, 田中稔, 三船俊治: 最適化手法を用いた建物のエネルギー管理手法 その2: 既存建物を対象とした最適運転による省エネルギー効果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2000.9.27~29) E-61
- [8]高橋雄司, 宮崎康往, 菊池世欧啓, 山本亨, 田中稔: 最適化手法を用いた建物のエネルギー管理手法 その3: 事務所ビルにおけるエネルギー需要パターンの合理的な類型化, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2001.9.26~28) F-50
- [9]山本亨, 田中稔, 小路広之, 森正夫, 佐藤高広: 既存建物における最適運転の実施と省エネルギー効果の検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2002.9.11~13) B-35
- [10]山本亨, 田中稔, 小路広之, 森正夫, 佐藤高広, 最適運転の実施と省エネルギー効果の検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2003.9.17~19) H-3
- [11]山本亨, 鈴木央一, 小島通雄, 田口 明美: NTT 横須賀研究センタにおける空調制御設定変更システムの開発と熱源最適運転の実施に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2006.9.27~29) B-4
- [12]田口 明美, 山本亨, 田中稔: クラスタ分析を用いた負荷の類型化, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2006.9.27~29) B-27

- [13]永桶均, 小島通雄, 山本亨: 空調用二次冷温水搬送ポンプの電力削減対策の実施と効果検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2013.9.25~27) A-18
- [14]田野辺淳, 廣瀬直美, 小島通雄, 山本亨: NTT厚木研究開発センタにおける冷却塔直列運転制御の実施と効果検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2014.9.3~5) F-60
- [15]田野辺淳, 堀川智章, 山本亨: 空調機の風量及び水量変化に対する熱交換器の伝熱係数の変動に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2015.9.16~18) F-73
- [16]山本亨, 小島通雄: エネルギー管理システムの開発: 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2016.9.14~16) D-42
- [17]森雅之, 山本亨, 林恭生, 小島通雄: ナビゲーションシステムを用いたエネルギー管理運用, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2016.9.14~16) D-43
- [18]山本亨, 小島通雄, 林恭生: 空調機の効率的運用に関する一考察, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2017.9.13~15) D-29
- [19]奥田知康, 山本亨, 小林昭二: 省エネルギー運用自動化システム DizBee – その1 開発と実証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2017.9.13~15) E-38
- [20]山本亨, 奥田知康, 林恭生, 小島通雄: 省エネルギー運用自動化システム導入のための設計要件, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2018.9.12~14) H-6
- [21]山本亨, 羽山広文, 林恭生: 熱源システムの最適運転方法に関する一手法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2019.9.18~20) A-4
- [22]中西啓太, 野口渉, 飯塚博幸, 宮田大輔, 山本亨, 山本雅人: 空調データを用いた深層学習による室温変化予測, 2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 46-27, (2020)
- [23]Yamamoto T., Miyata D., Okuda T.: Development of Energy Saving Operation System with Remote Control of Building Automation System, ECOS 2020, June 29-July 3, 2020

3. 論文 (その他)

- [1]足永靖信, 田中稔, 山本亨: 事務所建物の空調システムの排熱特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.75, pp89-97, 1999年10月
- [2]足永靖信, 田中稔, 山本亨, 田口明美: 冷熱源機器の導入割合を考慮した空調システム及び関連機器の地域排熱量に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.86, pp77-86, 2002年7月

4. 講演論文 (その他)

- [1]山本亨, 足永靖信, 大澤元毅, 坊垣和明, 樋口健雄, 田中稔: 保水性建材を用いた市街地熱環境計画手法の開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (1998.8.5~7) F-7
- [2]山本亨, 田中稔, 足永靖信, 田口明美: 都市排熱分布のための建物の熱代謝構造に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2001.9.26~28) B-18
- [3]田口明美, 足永靖信, 田中稔, 山本亨, 鈴木理央: 都市排熱分布のための地域熱供給施設の熱代謝に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集 (2002.9.11~13) F-30

5. 特許 (学位論文関係)

- [1]山本 亨, エネルギー管理支援装置、エネルギー管理支援システム、エネルギー管理支援方法、及びプログラム, 特許第 5773345 号 特許権者 株式会社インティ (韓国特許第 10-2011-7016230)
- [2]山本 亨, 北川 伸太郎, 中村 哲也, 中村 淳, エネルギー管理支援装置、エネルギー管理支援システム、及びエネルギー管理支援プログラム, 特許第 5923922 号 特許権者 株式会社インティ, オムロン株式会社

- [3]高橋 宏徳, 山本 亨, 建物用空調熱源システム, 特許第 5903731 号 特許権者 株式会社イン
ティ
- [4]リ スン フン, ウラベ エイジ, リ ジ ユン, ヤン ギ ヨン, 山本 亨, 産業施設のエネルギー
を管理するシステム, 特許第 5641376 号 特許権者 サムスン シーアンドティー コーポレ
ーション, 株式会社インティ
- [5]山本 亨, 落合 総一郎, エネルギー管理システム、及びエネルギー管理方法, 特許第 62023862
号 特許権者 株式会社インティ
- [6]高橋 宏徳, 山本 亨, 冷凍システム、コントローラー、及び冷却塔, 特許第 6019491 号 特許
権者 株式会社インティ
- [7]山本 亨, 玉手 昌憲, 野田 洋介, 小路 広之, 岸野 幸介, 保全計画支援システム、及び保全計
画支援方法, 特許第 6488253 号 特許権者 株式会社インティ, 高砂熱学工業株式会社, 大和
ハウス工業株式会社
- [8]山本 亨, 小林 昭二, エネルギー管理システム, 特許第 6308538 号 特許権者 株式会社イン
ティ
- [9]山本 亨, エネルギー管理コンピュータ、及び遠隔管理システム, 特許第 6664817 号 特許権者
株式会社インティ

6. 特許（その他）

- [1]山本 亨, 鈴木 友美, 山本 昌樹, 野崎 洋介, 省エネルギー支援システム及び省エネルギー支
援プログラム, 特許第 5394085 号 特許権者 株式会社インティ, 日本電信電話株式会社