【レビュー】

建物エネルギー管理システム（BEMS）概説

柴田克彦

Overview of Building and Energy Management System

Katsuhiko Shibata

1970 年代からミニコンによる中央監視制御装置が大規模ビルを中心に試用され始め、建物エネルギー管理システム（BEMS）が導入されるようになった。以降、学協会による技術の標準化、性能検証（コミッショニング）の適用、補助事業による導入普及により性能評価や省エネルギー効果の数値化が進められ、BEMS 導入効果への認知度が高まってきた。半世紀を経た今日では、多くのビルにて設備管理に実用されるに至っている。この間の BEMS の変遷と、空気調和・衛生工学会の取組みを既往の文献を通してまとめ、当社における既開発技術からカーボンニュートラルに資する取組について概説した。

1. はじめに

1970 年代からミニコンによる中央監視装置が大規模ビルを中心に試用され始め、1980 年代のインテリジェントビルの建設など構内通信網、各種ビル内情報サービスが進んだ。これに伴い、建物エネルギー管理システム（BEMS）が導入され、その守備範囲もエネルギーの需給に加え、監視、制御、維持管理、テナントサービス、診断と建物内の管理全般に及んできた。BEMS は、情報通信技術（ICT）の進化に大きく影響を受けている。コンピュータの進化では BEMS の処理機能が向上し、ネットワークのオープン化では管理データの設置範囲・項目・点数が増加し、インターネットの普及では遠隔からの監視操作が可能となった。また、時代の潮流により求められる機能が変化してきている。エネルギー問題と少子高齢化では、省エネルギーと省力化・省人化が繰り返し求められ、震災を経験して頑健性が BCP 対応に、今ではレジリエンスへと概念が拡張してきている。これらを通して、建物の管理に BEMS は必須のツールとなっている。

そこで本報では、これまでの空気調和・衛生工学会（SHASE）の大会発表、委員会活動を中心とした BEMS の変遷と高砂熱学工業における関連技術の開発、そしてカーボンニュートラルに向けての取組について概説する。

2. BEMS の定義

1980 年代後半、建物の制御機器と操作端末との間でデータ通信機能を持つ自動制御、監視システムとして International Energy Agency（IEA）から ANNEX16 において Building Energy Management Systems（BEMS）という用語がもたらされた。既往の文献では、中原信生（当時、名古屋大学教授）らの国内委員会は、Annex16 の研究会において BEMS を Building and Energy Management System と読み替えて定義すること、さらには E の中に Environment の意味も含める事を提案し、受け入れられ、国際共通用語として BEMS が定義されたとある [1]。その後、BEMS の概念は拡張され、**図 1** に示す建物のエネルギーの需給に加え、設備の自動制御・最適化、設備運用、予防保全など建物を統合的に管理するシステムとなり、基本機能から建物群管理まで 9 機能に分類された [2]。

なお、BEMS の主管学会である SHASE の便覧に「BEMS」が掲載されたのは、2010 年発行の第 14 版 [3]

が最初である。そこには「大規模・複合化された建築で効率的なビル管理を行うためには、中央監視設備はもとより、モニタリングシステムを活用して収集したデータを分析・評価して運用にフィードバックさせる BMS(Building Management System)、さらに環境配慮・エネルギー消費の分析に特化した BEMS(Building Energy Management System)を導入する事例も増えてきている」とある。

3. BEMS の普及展開

1973 年大阪大林ビルに逸早く導入された BEMS は ICT の発展に伴い進化を続け、半世紀を迎えようとしている。**図 2** に、BEMS の歴史的発展のプロセスを示す。以下に、1985 年頃の汎用コンピュータ導入以降の BEMS の普及展開を四つの視点で整理して概要を述べる。

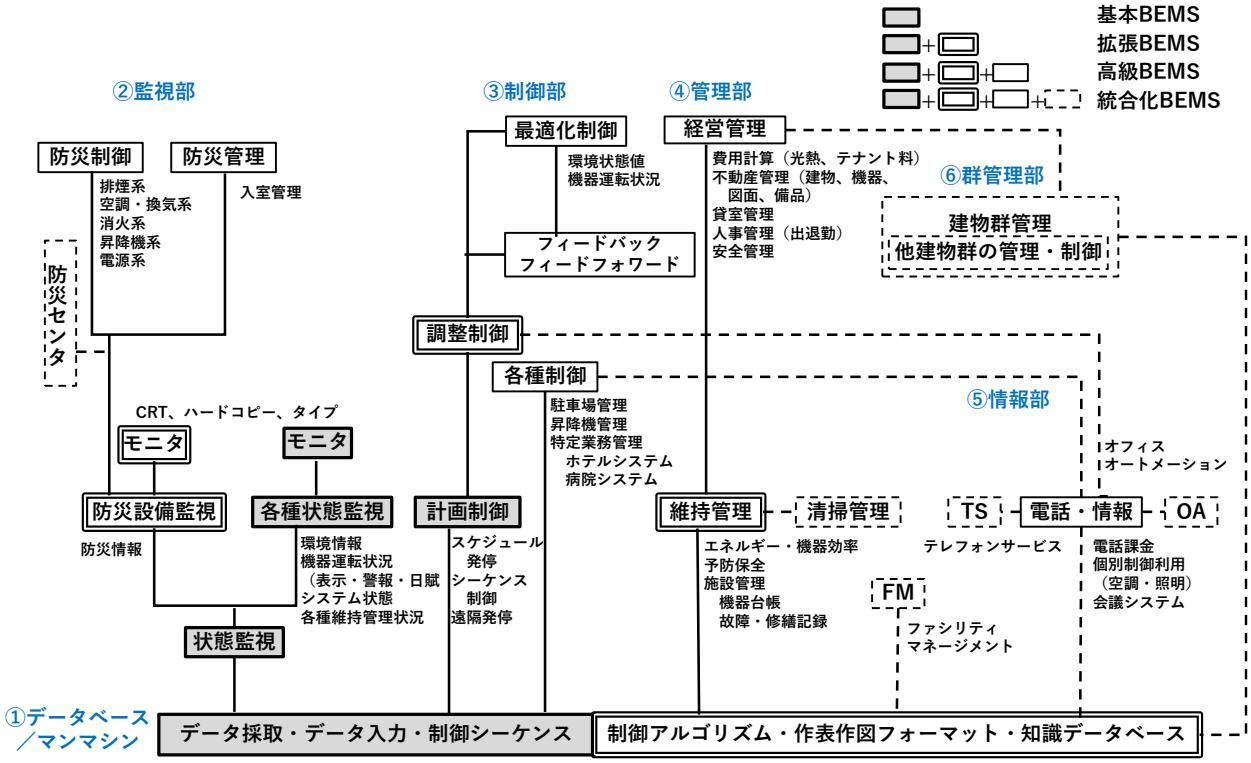


図 1 BEMS の構成と階層

1965以前 リレーシーケンス全盛	信号伝送距離の制限 信号伝送線数の低減努力
1965～1975 ミニコン利用の試行と発展期	ミニコンによる集中システム、データロギング、スケジュール制御、熱源台数制御など部分的省エネルギー制御
1975～1985 ミニコン利用初期の普及期	ミニコンによる集中システム能力向上、リモートIO（RS)通信技術、空調DDC
1985～1995 インテリジェントビルによる変革期	分散統合化、通信技術応用（情報統合）テナントサービスとユーザーオペレーション、BAS(Building Automation System),FMS(Facility Management System)
1995～1999 PC、ネットワークによる変革期	中央の汎用PC化、ネットワークのTCP/IP活用、水平分散、自律分散、BACnet、LonWorksの出現
1999～ マルチベンダー化とオープン化	マルチベンダー対応のシステム構成、BACnetとLonWorksによるオープン化、インターネット活用
2004～ 国際標準化への対応	BACS(Building Automation and Control System)とBACnetのISO規格化、Lon通信のISO/IEC規格化、BACS技術のインフラ化
2004～ 省エネルギー、低炭素化への対応	インターネットWeb利用の遠隔管理技術の確立、 IPアドレス枯渇問題から、IPv6アドレス対応の研究
2011～ 節電と電力平準化への対応	電力の供給と需要の安定化に向けたスマートグリッド技術 再生可能エネルギー

図 2 BEMS の歴史的発展プロセス

3.1 導入黎明期(1980 年代後半)

BEMS 普及の初期は、コンピュータの演算処理能力が低く、メモリ容量が少ないため、一度に多量のデータを扱うことができなかった。また、外部記憶装置もコンピュータ本体とバスで接続されているため、コンピュータ間でのファイル共有が不可能で、シーケンシャル処理となった。加えて、グラフィック表示が脆弱で、データのトレンドグラフを表示するにも苦労していた。

この段階における BEMS 導入の実態調査としては、1987 年建設省(当時)の後援で「建築物の環境・エネルギー管理システム研究委員会」(委員長：中原信生）が発足され、日本独自の調査・研究に加え、IEA のもとに建築物およびコミュニティシステム省エネルギー実施協定に関する国際研究活動の一課題として BEMS に関する調査研究が行われた[5),6),7),8),9),10)]。

当時のアンケートの内容を**表 1** に示す[5)]。設置されている BEMS の方式、規模、機能などとその使われ方、日常の管理体制、建物・設備の特性など多岐に渡っている。基本的に建物の管理者を対象とした調査で、BEMS を有していると思われる 112 件の建物を抽出し、アンケートを 1989 年 3 月発送、同年 8 月を目途に 60 件の回収を得ていた。調査対象は事務所ビルで過去 5 年以内に竣工したビルを基準に抽出している。回収できた建物の地域は東京 44 件、愛知 8 件、大阪 7 件、福岡 1 件であった。

アンケートでの環境評価の項目について、温熱環境は現在とほぼ同じ内容であった。空気環境では、喫煙対策が異なり、無制限の建物があることが当時を思わせる。視環境については、照度分布が 500～1,000 lx、平均 676lx となっていた。音環境では、BGM による能動的対策が 20%で行われていたことが興味深い。

図 3 に BEMS 導入の期待値と導入後に効果を発揮している項目を示す[6)]。「省力」「省エネルギー」「環境の快適性向上」に対する期待が高く、「省力」が効果を発揮している。**図 4** に建物規模と管理点数の関係を示す。単位面積 m^2 当りおおよそ 0.05 点となり、最近の事務所建築[11)]の管理点数 0.117 点/m^2 に比べ 4 割程度である。基本機能の実装状況、活用状況を**表 2** に示す。表示、計測記録、状態監視、スケジュールが多くの建物で導入されているが、稼働状況は非常に低く半数に満たない。また、主な省エネルギー項目を**表 3** に示す。現在も活用されている項目が多いものの、インバータによる回転数制御はまだ導入されていないことが分かる。

表 1 調査項目の概要

	調査項目	質問事項
1	建物について	建物の概要（用途・構造・竣工年など） 省エネ面での特徴（PAL・CEC・断熱配慮の有無など） 設備面での特徴（熱源・空調方式・冷暖房能力）
2	環境について	温熱・空気環境・視音環境・臭気対策・飲料水・中水・有害生物・オフィス空間 （設定・目標値・所見・BEMSによる管理の有無）
3	BEMSのシステム構成について	システム名・製造者名・管理範囲・制御方式・点数・記憶容量・入出力装置 導入目的
4	BEMSの機能について	基本機能・省エネ制御機能・管理支援機能 システム間の連携状態 導入効果
5	管理態勢について	管理項目（管理の仕方・今後の予定など） 報告事項（頻度・利用法など） 管理要員（主任・事務係・電気・機械係など）
6	管理の経過から	保証期間・引渡図書・運転時間・期間など 年間維持費（保守契約・部品消耗品） 年間エネルギー消費量（電気・ガス・油・地域熱供給）
7	不具合調査	不具合の概要（系統・設備・装置など） 原因・対策・管理領域など

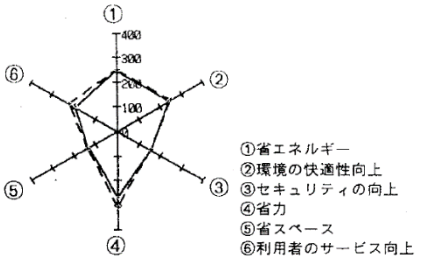


図 3 BEMS 導入目的と実際に効果を発揮している領域(全体)[6)]

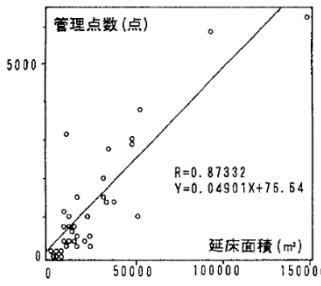


図 4 建物規模と管理点数の関係[6)]

表 2 基本管理機能の適用状況

	運転状態	計測	警報	操作記録	計測量テナント計	警報	状態監視	上下限監視	設定変更	制御シーケンス	ルスケジュール制御	台数制御	御間欠運転制	御予測学習制
適用率（%）														
冷熱源	82	68	78	57	58	5	70	73	38	42	18	65	43	10	18
温熱源	77	65	70	55	53	5	65	67	37	37	18	58	35	7	10
蓄熱槽	67	75	67	50	75	0	67	83	58	50	17	33	0	8	17
ポンプ	85	23	82	62	25	2	72	72	15	12	23	53	32	7	2
空調機	88	58	87	68	52	12	77	83	33	55	13	82	12	20	28
全熱交換器	76	22	56	41	20	0	59	68	7	17	17	44	5	24	5
換気	80	15	68	52	13	0	60	70	7	12	7	60	2	17	2
有効活用率（%）														
冷熱源	27	29	38	9	23	33	12	18	13	20	9	31	38	0	18
温熱源	24	28	12	9	22	33	13	18	14	18	9	31	33	0	17
蓄熱槽	38	33	13	17	33	0	13	30	29	33	0	75	0	0	50
ポンプ	22	7	20	5	13	0	12	18	0	43	21	34	58	0	100
空調機	28	31	25	10	19	71	13	16	30	33	25	39	0	25	24
全熱交換器	13	22	9	6	13	0	0	4	0	29	14	33	0	10	0
換気	10	0	10	3	0	0	3	7	0	29	25	25	0	30	100
適用有効率（%）														
冷熱源	22	20	13	7	17	2	8	13	5	8	2	20	17	2	3
温熱源	18	18	8	5	13	2	8	12	5	7	2	18	12	2	2
蓄熱槽	25	25	8	8	25	0	8	25	17	17	0	25	0	0	8
ポンプ	18	2	17	3	3	0	8	13	0	5	5	18	18	0	2
空調機	25	18	22	8	13	12	10	13	10	22	3	32	0	7	7
全熱交換器	10	5	5	2	2	0	0	2	0	5	2	15	0	2	0
換気	8	0	7	2	0	0	2	5	0	3	2	15	0	7	2

表 3 省エネルギー制御機能の適用状況

省エネルギー制御機能	適用率（%）	有効活用率（%）	適用有効率（%）
デマンド制御	45.0	37.0	20.0
力率制御	76.7	23.9	18.3
停復電制御	65.0	20.5	15.0
発電機負荷制御	36.7	13.6	5.0
外気冷房制御	56.7	20.6	16.7
最小外気取入制御(CO2)	25.0	33.3	10.0
立上時外気シャットオフ制御	50.0	26.7	15.0
VAV制御	38.3	30.4	13.3
VWV制御	10.0	33.3	3.3
節水制御（中水）	13.3	25.0	5.0
節水制御（その他）	10.0	16.7	1.7
熱回収制御（全熱交換器）	50.0	33.3	18.3
熱回収制御（その他）	6.7	33.3	11.7
窓際照明制御	5.0	33.3	11.7
ブラインド制御	8.3	0.0	6.7
ソーラー制御	6.7	25.0	1.7

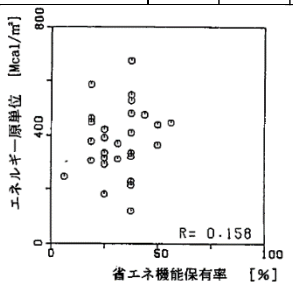


図 5 省エネ機器保有率とエネルギー消費原単位 [10)]

また、全体的に省エネルギー管理・制御機能を有することが有効であるとの意識はかなり低い。これは当時「省エネルギー」による利益が管理者に直接的に還元されない体制上の事情によるのではと考察されている。さらに、省エネルギー効果の定量化で表示面の不十分さが要因ともいえる。まだまだ BEMS 設計者と管理者に大きなギャップがあった時代である。また、省エネルギー機能とエネルギー消費原単位との相関を**図 5** に示す [10)]。省エネルギー機能を多く有するほどエネルギー消費量が少ないという結果は導かれていなく、省エネルギー機能がまだ十分に発揮されていなかったことが伺える。

一方、1987 年頃から中、大規模ビルにおける空調熱源では、複合エネルギー源を用いた熱源システムが導入され始めた。これは、建物用途の複合化や社会状況の変化などの要因により各種エネルギー源を使用するメリットや多様な熱源システムとの組合せにより得られるメリットを享受しようとするものである。これにより、評価指標の選定によっては熱源の組合せ、負荷分担を一義的に決定するのが困難となり、BEMS を用いた解析、評価、判断が不可欠となってきた [12)]。

3.2 コミッショニングの導入(2000 年頃)

1990 年代後半になると欧米からコミッショニング（性能検証、以下 Cx と記す）の概念が入り [13),14),15)]、検証業務への投資による建物のエネルギー消費量の削減効果が示された。国内においても、空気調和・衛生工学会（SHASE）に Cx の指針作成に関する委員会が立ち上がり、実在建物で Cx が試行され始めた [16)]。

その中で、設計の企画段階から引渡し段階までの各プロセスにおいて、Cx で必要とされる文章化と技術検証を行った最初のケーススタディが、都内に新築された某環境技術センターである [17)]。このケーススタディでは、先の SHASE の委員会でまとめられた性能検証基本指針 [18)]から「環境・エネルギー並びに使い易さの観点から、使用者にとって最適な状態に保たれるように性能を診断・検証し、性能改善法を提示すること、さらに建物オーナーの事業に関連し BEMS に必要とされる機能と被検証の対象として、どのような試験が適用されるかの課題解決」を目的とした。

また、筆者が最初に Cx に接したのは都内に新築された某超高層ビルである [19)]。当時の設計図書では、「試運転調整にて性能検証を行うこと」の一文が記載されているだけであった。Cx については当社での経

験も未だ少なく、技術部門（設計、施工）、計装部門、開発部門が集まった全社横断のプロジェクトながら、各種設備の性能検証と、BEMS で常設されているセンサの不足分を精度検証した表面計測で行った。また、性能評価の見える化として、評価目的に好適なグラフ表現を整理した。これは後に当社の見える化ツールの要件作成に大いに役立った [20]。

3.3 補助事業による導入普及(2002 年～2009 年)

住宅･建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業が 1999 年度に創設され､3 年後の 2002 年度に BEMS 導入支援事業が始まった [21]。本事業では、補助事業者に対し事業終了後 3 年間のデータ収集とその公表が義務付けられたが、これを契機に、BEMS による省エネルギー効果が数値で示されるようになり、BEMS の普及が進んだ。**表 4** に、導入事業物件の推移を示す。2002（H14）年度から 2009（H21）年度までの間に合計 456 件の受託事業者があった。事業者の 90%は既築建物であり、新築建物の割合が少なかった。これは補助事業の２つの形態の内、新築建物は「BEMS 導入補助事業」より「建築物に係るもの」の事業利用に適していたことによる。建物用途別の受託事業者を**図 6** に示す。事務所、物販店舗、病院、学校、宿泊が多く、これは産業分野を除く既存ストック建築物の用途別割合と同じ傾向であった。導入建物の規模は平均延床面積が 35,620m^2 となり、大規模建物への BEMS 導入が多かった。事業者数の推移は、事業初期の導入が多く、以降緩やかな減少傾向であった。この背景には、BEMS 導入効果が認知され始め、大規模建物では民間事業者による自発的導入が進展してきたためと思われる。

補助事業の最も大きな成果は、一次エネルギー消費量の削減であった。各事業所とも導入後 3 年間の実施状況を報告しているが、**図 7** に、事業所全体の省エネルギー効果を示す。計画段階で 5.8%の削減が、実績段階では 11.2%の削減となり、計画値を 2 倍近く上回る効果が報告されている。なお、事業年度ごとの削減率は低下傾向にあった。これは、開始当初に比べ建物の省エネルギー化が進んだことでベースラインが低くなり、いわゆる乾いた雑巾を絞るような省エネルギー対策を実施してきた結果と言える。

図 8 に、2011 年度夏季の節電対策実施状況を示す。東日本大震災直後の夏季対策アンケートであったことから、前年度と比較して「積極的に取り組んでいる」の回答が増加している。空調対策では、冷房温度の適正化、未使用エリアの空調停止など、BEMS による実態把握とそれに基づく運用の見直しが多かった。このような取り組みは、運用の基本的な考え方として現在に引き継がれている。

表 4 新築･既築別の補助事業者数

年度	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	合計
新築	60	88	59	53	86	28	24	13	411
既築	11	16	6	3	4	5	0	0	45
計	71	104	65	56	90	33	24	13	456

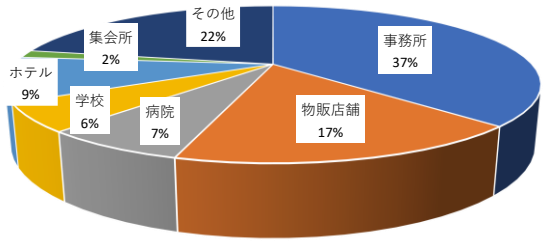


図 6 建物用途別の補助事業者

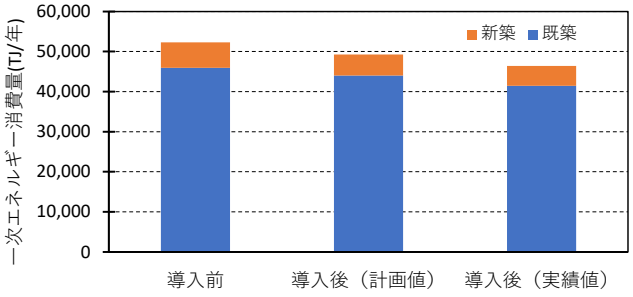


図 7 事業所全体の一次エネルギー消費量

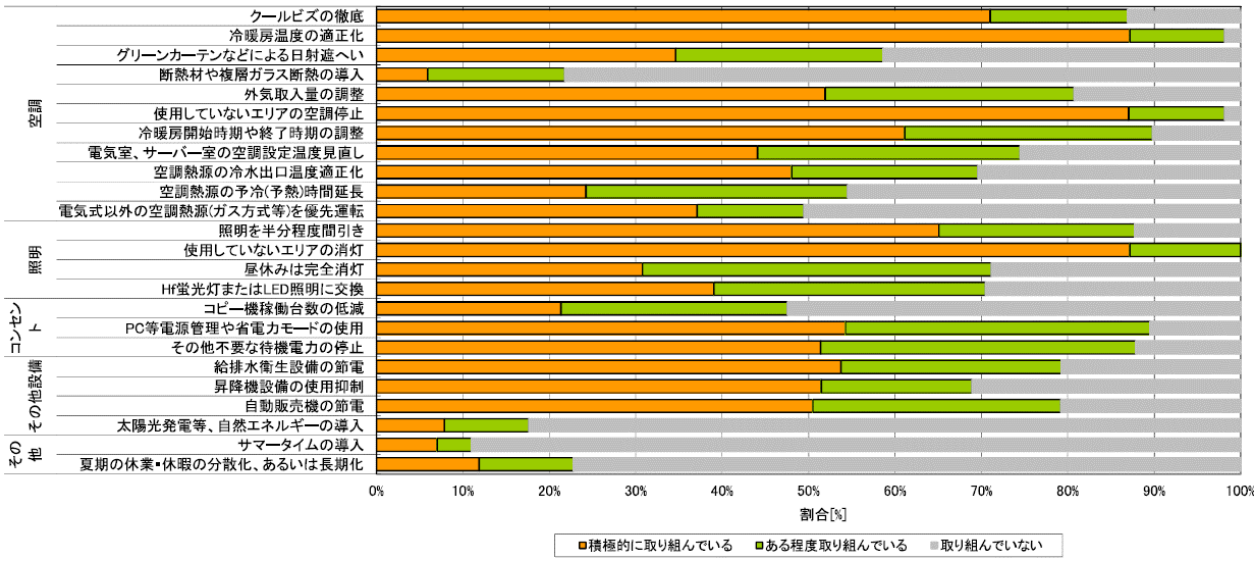


図 8 2011 年度夏季の節電対策実施状況結果 [21)]

3.4 空気調和・衛生工学会（SHASE）での活動(1990 年～現在)

BEMS の主管学会である SHASE での活動として、年次の大会論文数と BEMS 委員会について以下に示す。

3.4.1 年次大会での発表状況

BEMS の展開状況は、SHASE 年次大会の論文数から推定可能と考える。論文検索サイト [22)]を用いて、1990 年以降の発表論文から「BEMS」をキーワードに検索した結果を**図 9** に示す。1990 年代は、試験的導入が多いためか発表件数が数件程度であった。2000 年代に入ると、先に述べた補助事業などの導入普及効果により急激に発表件数が増加した。一旦減少するものの、東日本大震災以降急激に増加し 50～60 本/年の発表数で推移している。2010 年以前と以降で、論文の題目および概要から分類した BEMS の用途を**図 10** に示す。2010 年以前の普及導入期はエネルギー環境管理、制御・最適化が多かったが、2010 年以降は運用実績が多くなり BEMS が日常化した様子が伺える。

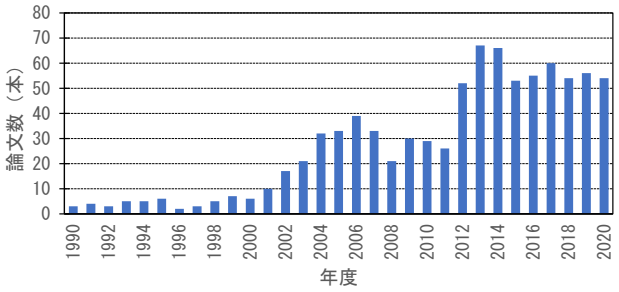
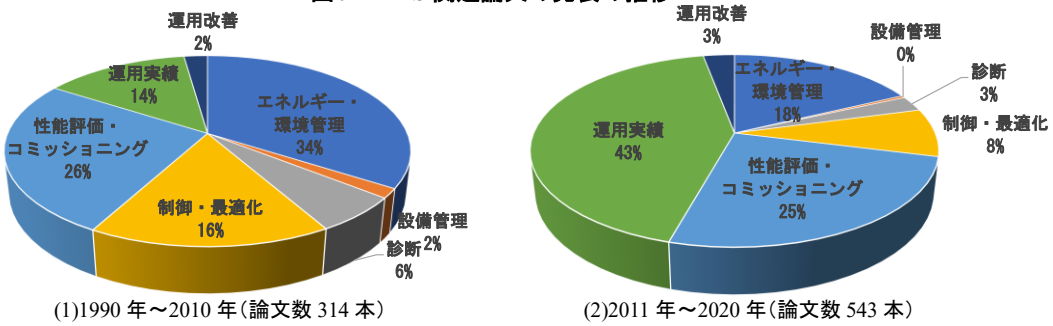


図 9 BEMS 関連論文の発表の推移



(1)1990 年～2010 年（論文数 314 本）　(2)2011 年～2020 年（論文数 543 本）

図 10 論文題目および概要から分類した BEMS の用途

3.4.2 BEMS 委員会活動

SHASE のビル管理システム委員会が 1995 年に発足し、その後 2000 年度から現在まで時代の技術トレンドや社会ニーズに適合すべく 25 の小委員会が設置されてきた。**表 5** に現在のビル管理システム委員長（東京電機大学百田教授）のまとめによる小委員会の名称と設置期間を示す[23]。表中の小委員会から、SHASE ホームページの会員専用サイトでダウンロード可能な報告書を元に、時代を象徴したと思われる小委員会の概要を示す。

表 5 ビル管理システム委員会活動の変遷

	年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	委員長	船津正義		田中良彦				平岡雅哉			佐々木邦治			村上公哉			大島一夫			枡川依士夫			百田真史		
No.	小委員会名																								
1	オープン化時代における設備技術者のBEMS対応	■	■																						
2	改正省エネ法に対応したBEMSのあり方	■																							
3	エネルギーデータ解析・評価			■	■																				
4	ライフサイクルマネジメントの為のBEMS			■	■																				
5	ビル設備ネットワークオープン化ガイドライン作成					■	■																		
6	BEMS計測評価手法					■	■																		
7	ベテラン技術者の技術力活用中小ビル省エネ推進検討					■	■																		
8	優良ストック形成					■	■	■																	
9	BEMS衛生計測評価手法							■	■																
10	BEMS改善手法								■																
11	カーボンニュートラル構築									■	■														
12	BEMS活用標準化										■	■													
13	改正省エネ法(H20)対応BEMS										■														
14	BEMSポイント名称標準化												■	■											
15	BEMS「エネルギーの見える化」												■	■											
16	スマートBEMS・クラウド活用													■	■										
17	ビックデータ活用BEMS														■	■									
18	サブシステム情報連動制御検討															■	■								
19	既存BEMS保全・更新検討																■	■							
20	BCP対応型BEMS検討																	■	■						
21	建物エネルギーシステムの運用最適化検討																	■							
22	在室者情報活用BEMS検討																			■	■	■	■		
23	AI活用による建物システムの運用最適化検討																			■	■	■			
24	BEMSの活用によるBCPのあり方検討																				■	■	■	■	
25	建物の管理・運用におけるAI活用																						■	■	■

(1) No.5_ビル設備ネットワークオープン化ガイドライン作成(2004 年,2005 年)[24]

本小委員会は、ビル設備の通信ネットワークのオープン化に伴い 2001 年～2002 年に開かれた BEMS 対応小委員会の検討成果に適用事例を加え、オープン化 BEMS の動向や内容を整理し、快適環境のもと実効性の高い省エネルギー施策の実現を目的としていた。ここでオープン化とは、①設備制御系通信ネットワークの標準化・開放性、②通信プロトコルの標準化、③マルチベンダー環境、④空調制御アプリケーションの開放性、⑤運転データ情報の収集およびデータベースの開放性、が挙げられた。

図 11 にオープン化 BEMS の構成例を示す。ネットワークの主幹線に BACnet、機器やセンサなど端末のネットワークに LonWorks、Web 型による遠隔監視が盛り込まれている。当時の課題として、①汎用環境の利用による信頼性、②通信での応答性、③PC の OS バージョン変更が示され、情報取集と発信の継続性について言及されている。これは、現在も課題となっている情報セキュリティに繋がる。

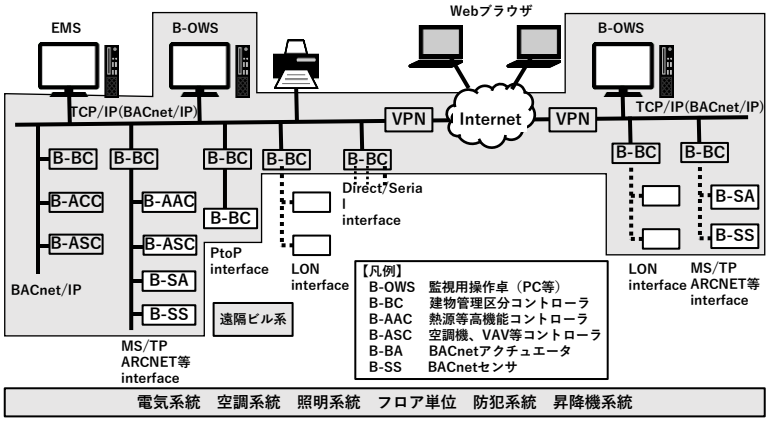
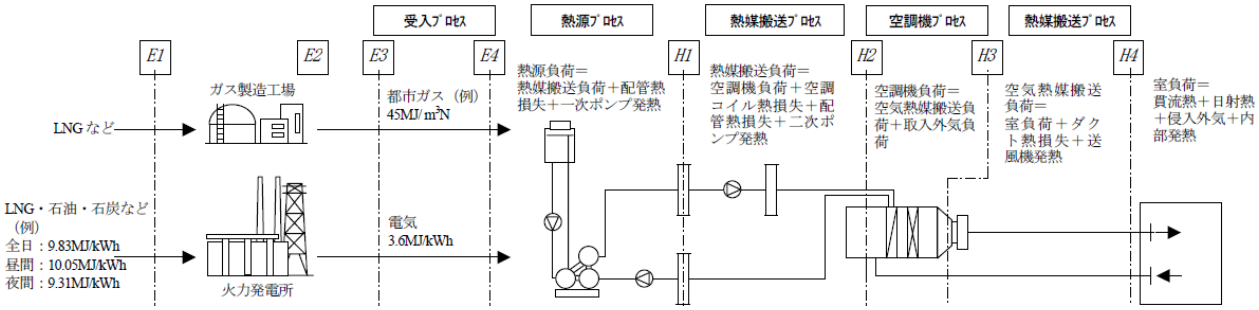


図 11 オープン化 BEMS の構成例

(2) No.6_BEMS 計測評価手法（2004-2005）[25)]

BEMS におけるデータの確からしさは不可欠である。本小委員会は、計測評価手法をより深く検討するために設置された。BEMS の普及や性能検証のニーズに伴い、各種評価指標や計測ポイントが提示されているが、用途によって計測範囲、計測ポイントが統一されていなかった。また、計測データの保存状態（帳票、デジタル値、積算値、瞬時値）に適合したデータの活用方法や各種評価指標別の具体的な評価手法の事例が少なかった。そこで、用途に合った計測ポイント、評価指標の整理と管理実務者や中小ビルへの普及を目的に設置された。

図 12 に代表的な空調システムの機器構成と性能指標を示す。性能は、システムのプロセス性能、システムの性能、機器の性能と階層化することで、俯瞰からマクロ評価まで一元的に管理できる。評価に必要なデータ項目も整理してあり、一例として**表 6** に電動冷凍機を示す。また、**表 7** に熱源機の評価項目を示す。ここで整理された手法は、評価の基準が例示されているため合理的な評価が可能となる。また本報での図示は無いが、データ項目とサンプリング周期、評価シートも掲載されて、実用的な報告書となっている。



		都市設備		建築設備					
	一次エネルギー			電力システム		空調システム			室内
		変換	搬送	変換	搬送	変換(熱)	搬送(熱)	変換(熱)	搬送(熱)	
サブシステム名		二次エネルギー生産システム	二次エネルギー搬送システム			熱源システム	熱媒搬送システム	空調機 熱交換システム	空気熱媒 搬送システム	
構成機器		発電所	・送電施設 ・変電施設 ・配電施設			・熱源機器 ・冷却塔 ・冷却水ポンプ ・一次ポンプ ・一次ヘッダ	・二次ポンプ ・配管 ・二次ヘッダ	・冷却コイル ・加熱コイル	・送風機 ・ダクト	
エネルギー損失要因		・発電効率 ・所内電力	・送配電ロス			・効率 ・一次ポンプ発熱	・二次ポンプ発熱 ・配管熱損失	・効率	・送風機発熱 ・ダクト熱損失 ・取入外気熱損失	
プロセス性能		E2/E1	E3/E2	E4/E3		H1/E4	H2/H1	H3/H2	H4/H3	
システム性能						プロセス性能と同上	系統別	系統別	系統別	
機器性能						成績係数(COP) ボイラ効率 一次エネルギー利用効率(PER)	水搬送効率(WTF)	熱交換効率	空気搬送効率(ATF)	

図 12 空調システムのサブシステムおよび機器構成と性能指標

表 6 電動冷凍機の評価に必要なデータ項目

評価項目	冷水入口温度	冷水出口温度	冷水流量	冷凍機電力量	冷水一次ポンプ電力量	冷却水ポンプ電力量	冷却塔ファン電力量	冷却水入口温度	冷却水出口温度	冷却水流量	冷凍機運転状態	外気温度	外気湿球温度
機器単体COP (二次エネルギー基準・一次エネルギー基準)	○	○	○	○				△	△	△	○	△	△
システムCOP (二次エネルギー基準・一次エネルギー基準)	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	○	△	△
冷水一次ポンプWTF	○	○	○		○						○		
冷却水ポンプWTF						○		○	○	○	○		
機器出力								△	△	△	○	△	△

○：必須計測ポイント　△：参考計測ポイント

表 7 熱源機の評価項目

評価シートNo.	評価対象機器	評価項目	評価目的
A-R-001	電動冷凍機	冷凍機単体COP	COPを算出して、機器単体として適正な運転状態にあるか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-R-002	電動ヒートポンプ	冷凍機単体COP	同　上
A-R-003	吸収冷凍機	吸収冷凍機単体COP	同　上
A-R-004	吸収冷凍機	吸収冷凍機能力	冷凍機能力を算出し、本来の能力が出ているか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-R-005	直たき吸収冷温水機	吸収冷温水機単体COP	COPを算出して、機器単体として適正な運転状態にあるか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-R-006	直たき吸収冷温水機	吸収冷温水機能力	冷凍機能力を算出し、本来の能力が出ているか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-B-001	ボイラ	ボイラ効率	ボイラ効率を算出し、適正な運転状態にあるか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-CT-001	冷却塔	冷却塔補給水量と冷却水水質	冷却水の水質と補給水量を評価し、電気伝導度(濃縮倍率)の設定値を確認する
A-R･S-001	熱源システム	システムCOP	補機を含むシステムCOPを算出して、冷却水や台数制御などの問題を含め、適正な運転状態にあるか、メンテナンス時期にないかなどを確認する
A-R･S-002	熱源システム	熱源システム負荷率	熱源機負荷率や運転台数の関係を評価し、台数分割や運用方法の適否を確認する

(3) No.12_BEMS 活用標準化（2009-2011）[26)]

本小委員会は、BEMS の普及促進として BEMS 活用者の立場からニーズを把握し、その提供を検討の起点に BEMS の機能に付属されるグラフ画面の標準化を目的とした。建築物の関係者と各々が活用する BEMS データの関係を**図 13** に示す。例えば、建物所有者の役割は、法令対策、建物運営・維持に様々な省エネルギー・省コスト対策、さらに社会貢献の実践である。それらの目的遂行のため BEMS を活用していることから、建物所有者用には、建物全体の状況が俯瞰できるグラフ画面を標準とした。また、建設当初は「設計者」、「施工者」と「建物所有者」の関連、建物の稼働後は「建物所有者」と「設備管理者」との関連など、その建物のライフサイクルにおいて様々な関係者の間でその関係に見合った BEMS データを継承できるグラフ画面を標準とした。さらには、管理に従事する者の立場ごとに目的が異なることから、それらに合致した画面表示を標準化する考え方を**図 14** に示す階層的グラフ表示で提言している。これは、後述する表面計測技術での解析評価手法として、当社が検討していた階層化表現の思考と合致するものである。

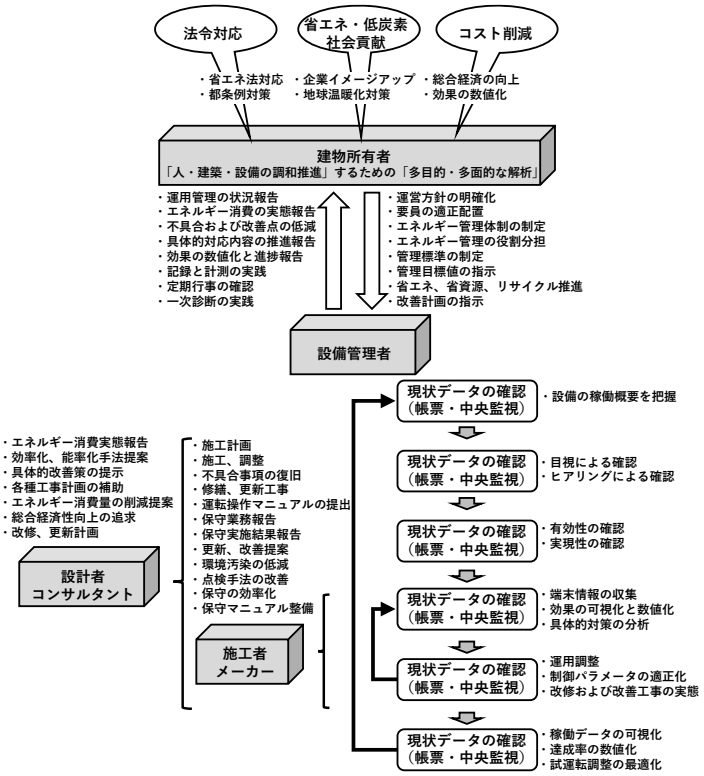


図 13 建築物の関係者と BEMS データの活用項目

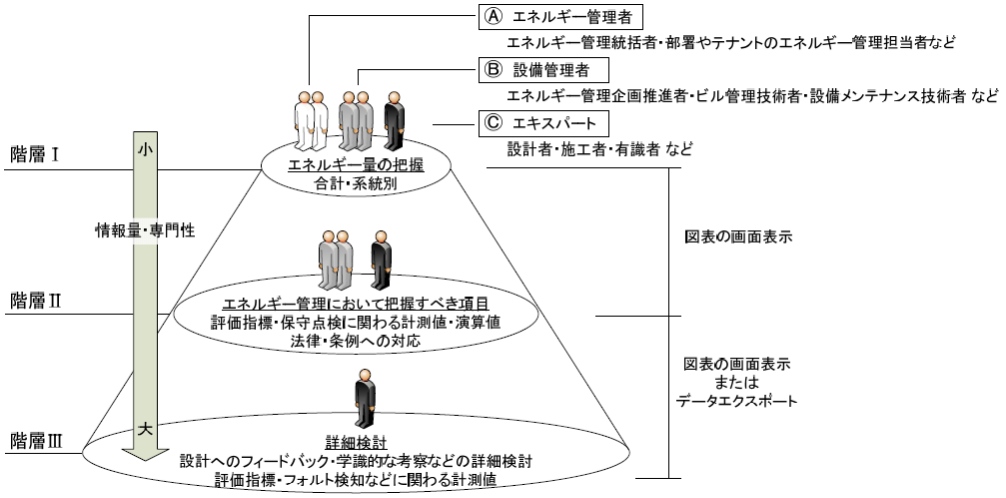


図 14 BEMS の活用者別の階層化 [4)]

(4) No.15,No.17_BEMS「エネルギーの見える化」とビックデータの活用 BEMS（2011-2015）[27),28)]

トヨタの製造現場から生まれた言葉に「見える化」がある。BEMS を効果的に活用する上でも、データを平易に、問題の所在を視覚に訴えられるように数値化・グラフ化することが重要で、誰に、何を、どうやって見える化するかの検討を目的に本委員会が設置された。さらに、この延長としてビックデータの活用が検討された。BEMS に活用可能なビックデータを**図 15** に示す。単にデータ量が多いだけでなく、データの

種類、更新頻度が多い特徴を持つため、従来型 BEMS では取り扱いが困難であった。本小委員会では異業種での活用事例を調査研究することで、BEMS への好適な応用を検討している。ポイントは、欲しい情報を理解できる形で提示する「可視化」、データに基づく「予測」、需給・無駄の削減・リスクとリターンの「最適化」としている。

(5) No.20_BCP 対応型 BEMS 検討（2016-2018）[30)]

東日本大震災以降、災害拠点の建物では、機能を維持する BCP（Business Continuity Plan）が策定されている。BCP の観点から BEMS がどうあるべきかが重要なテーマとなり、本委員会にて検討が進められた。BCP 対応型 BEMS の例示として計測点配置の考え方を**図 16** に示す。リソースを特定エリアに集中することで、事業継続の時間を長期化するという考え方で、従来の計量計測の計画と異なる。また、防災拠点としてのまちづくりの概念も登場し、**図 17** に示す統合モニタリングの事例は特徴的な適用と言える。

図 15 ビックデータを構成する各種データ(例)[29)]

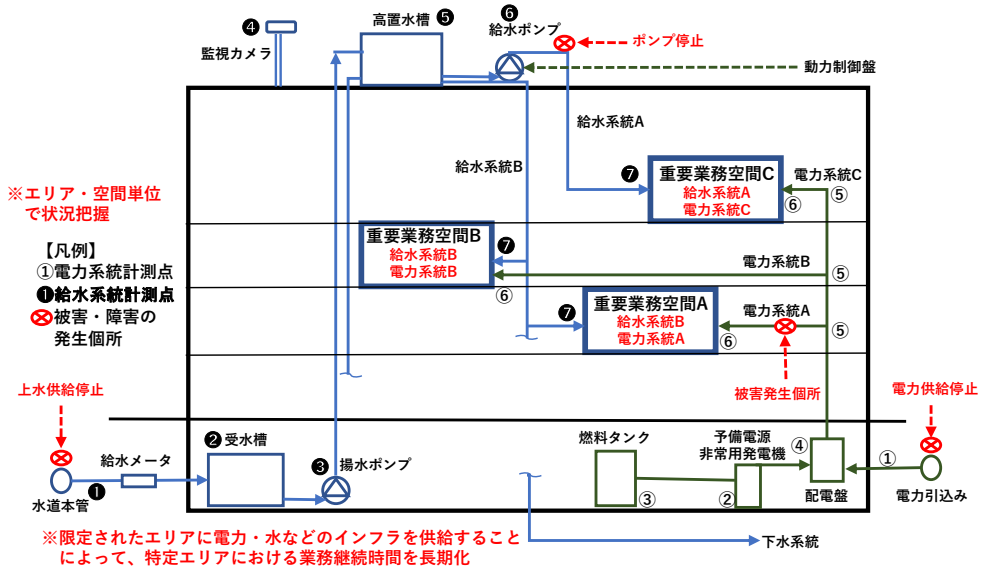


図 16 計測点配置の考え方

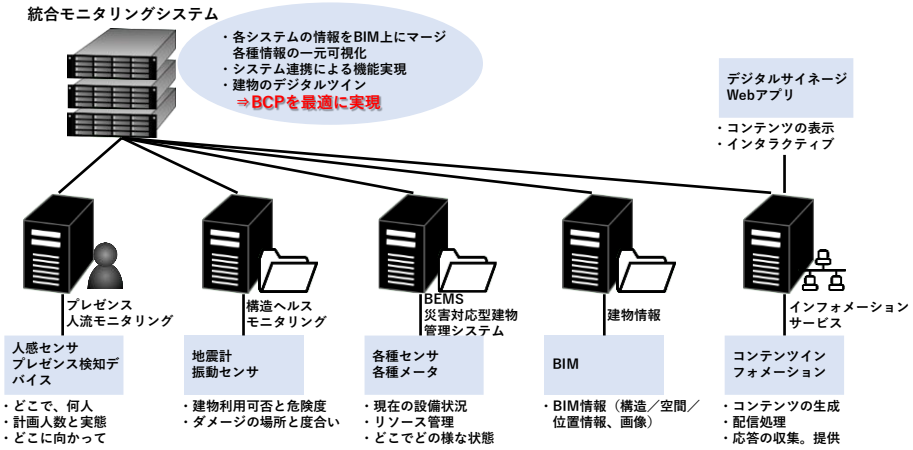


図 17 統合モニタリングシステムのイメージ

(6) No.23_AI 活用による建物システムの運用最適化検討（2018-2020）[31)]

第三世代の人工知能（AI）は、一時的なブームからシステムの中核プロセスとなりつつある。このような時流の下、建物システム運用に対して AI に何ができるのか、できないのか、何が期待されているのか、何が解決されて、何ができないのか、実用化するためにどのような課題があるのかの洗出しを目的に本委員会が設置された。報告書では多くの実例を含め、内容の議論において得られた知見が盛り込まれている。一例としてエネルギー管理への AI 適用を**図 18** に示す。実際の建物とサイバー空間の設備を連携し、実際に試験困難な運用を事前検証した上で実設備に適用するものである。一世代前の第二世代 AI では、専門家の知識をルールベース化して推論することで、専門家の代替を狙ったものであったが [32)~36)]、次の第四世代では教師なし学習など未経験の事象に対しても適用するデジタルツイン型の BEMS の実装が予想され、AI の活用がますます期待される。

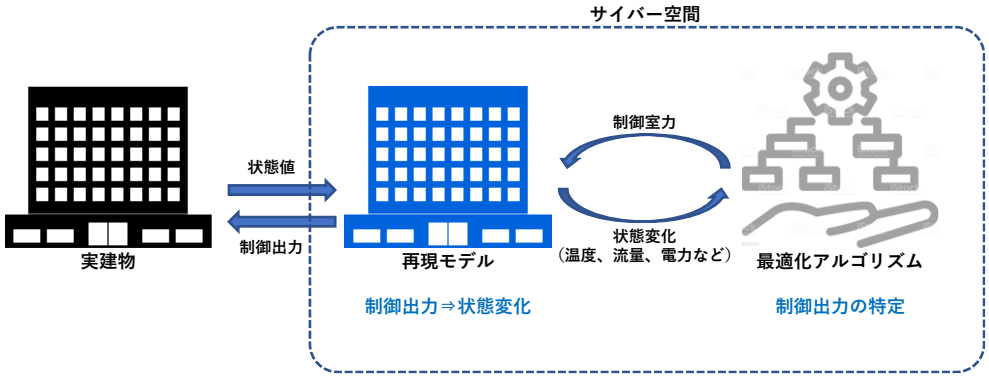


図 18 エネルギーマネジメントにおける IoT と AI の連携例

4. 当社の既開発技術と今後の取組

図 19 に、拡張 BEMS（最適制御、監視、診断、エネルギー管理）の位置付けに相当する当社開発技術の変遷を示す。開発は 3 つのステージから成る。第 1 ステージでは「TIS（タカサゴ・インテリジェント・システム）」を構成する省エネルギー制御（SECTAT®）・高精度制御（DELTAT®）・管理システム（SIGMAT®）の 3 つのシリーズを中心に開発を進めてきた。第 2 ステージでは「ネットワーク」をキーテクノロジーとしてサービス事業への展開を目的とした技術開発を行ってきた。第 2 ステージまでは、ソフトウェアの全てを自社開発としてきたが、機能の社会的劣化、OS のバージョンアップ対応などフォローアップが業務負荷となってきたため、現在に至る第 3 ステージでは「ICT」を要素技術として、技術の進化に迅速に追従できるよう汎用ソフトウェアを適用した開発形態となっている。以下に、特徴ある開発技術を示す。

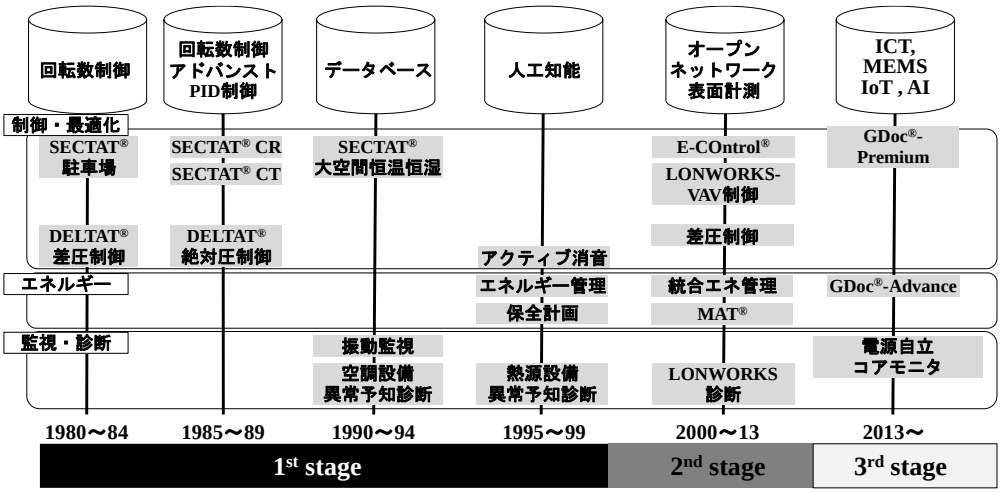


図 19 BEMS に関連する研究開発の系譜

4.1 AI（エキスパートシステム）を活用した設備異常診断

第二世代 AI 全盛期、当社業務への適用として、設計、施工計画、試運転調整、運用計画、劣化診断、社員教育が検討される中、参考になった事柄は、米国のロングビーチで開催されたエキスパートシステムに関する講演会で発表された概念設計で、戦闘機エンジンの状態値を地上で監視し、エキスパートシステムで異常を診断するというものであった [37]。これにヒントを得て、当時ミニコンから派生した EWS（Engineering Work Station）を用いて設備異常診断システムの研究開発を 1985 年から開始した。空調設備の異常予知診断機能を実験検証するために、1988 年には、御茶ノ水の当時社屋の空調設備を厚木の研究所で遠隔監視して診断するといった実証を行った。診断ルールの構築は、FMEA（Failure Mood and Effects Analysis）及び FTA（Fault Tree Analysis）の信頼性解析法を活用して、機器メーカーや保守員など専門家の持つ設備機器の知識から異常現象と異常原因の因果関係を整理し、EWS に収納した。空調設備を構成する機器の膨大な組合わせについては、階層構造型のデータベースを研究開発し、設備機器に関する知識ベースとして EWS に収納した。**図 20** にシステム構成を示す通り、1 台の EWS で最大 20 カ所の施設までを遠隔で監視・診断できる設計とした。当時としては画期的な技術開発で空気調和・衛生工学会技術賞開発賞を受賞した [38]。

4.2 建物全体最適化を狙った運転管理・制御システム

本システム開発以前の省エネルギー制御は、主に単一制御ループを対象とした個別機器の最適化制御であった。この開発事例として、パワー半導体に伴って実現したインバータを用いた送風機の変風量制御 [39]、マイクロコンピュータを用いた分散型デジタル制御（DDC）[40]、さらには通信ネットワークのオープン化に伴い情報の相互運用性を用いた個別分散型制御がある [41]。しかし、個別機器の最適化では設備全体のエネルギー収支に不均衡が生じ、省エネルギー効果が得られない場合がある。

そこで当社は、熱源設備と二次側空調機の熱収支から現在の運転方法を評価し、最適な運転計画を支援するエネルギー管理支援システムを開発し、1991 年には業界に先駆けて実在設備に導入した [42] 。これらの実績を踏まえて、設備全体のエネルギー消費量が少なくなるように制御目標値を設定する設備全体の最適化制御システム「E-COntrol®」を開発した [43]。 E-COntrol®の制御動作を**図 21** に示す。動的に制御目標値を設定し、かつ機器の運転停止を指令することで、時々刻々変化する負荷変動に伴い最適な運転条件に移行する。また、一品生産に近い空調設備に対応するため、**図 22** に示すモジュール構造のソフトウェアを開発した。ソフトウェアのパッケージは、データ処理に関する共有部分と制御目標値の特定に関する個別部分からなる。個別部分はプロシジャーと呼ぶ手続き宣言によって演算を実行させることで、制御フローに応じたプログラム（制御ロジック）の作成がパラメータ設定で可能となる拡張性の高い物とした。

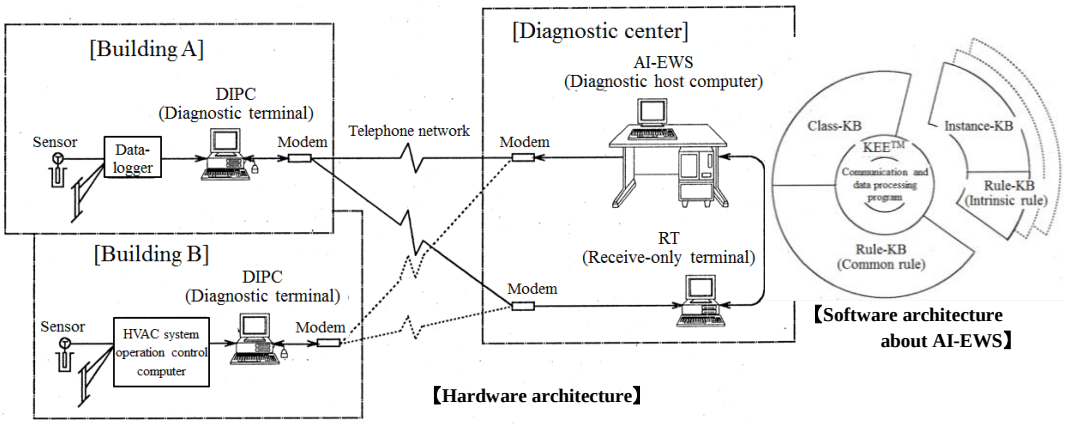


図 20 空調設備異常予知診断システムの構成 [38)]

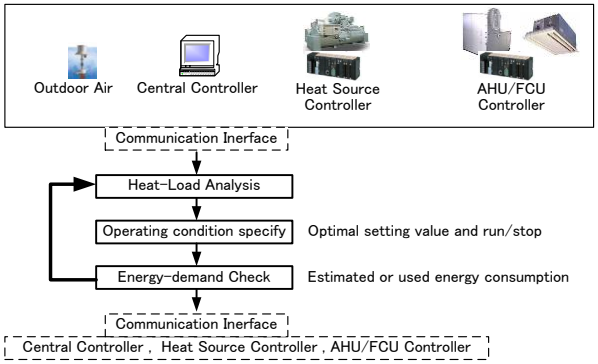


図 21 E-COntrol の処理フロー[43)]

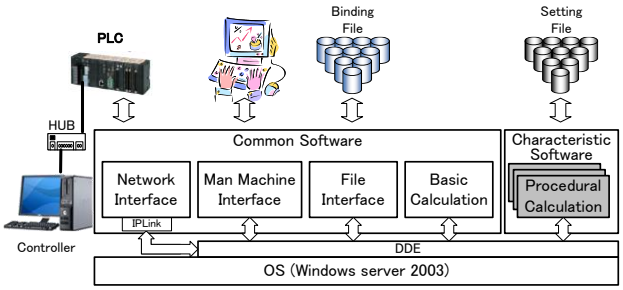


図 22 E-COntrol のソフトウェア構成 [43)]

4.3 精度検証した外表面計測技術

建築設備の性能検証は、高価な計測機器を多数取り付けるのであれば、開発当時の技術で誰にでも出来るが、費用対効果の面から、限定した範囲しか計測していないのが実態である。また、既設建物において新たなセンサを取り付けるには、営業中止、火災、漏水などのリスクを負わなければならない。そこで、配管やダクトに穴を開ける挿入型センサを使わずに、安価なセンサで計測精度が確保できれば、これらの客先の費用とリスクの負担を根本的に解決できる。つまりは、「顧客に負担をかけない・設備を遊休させない・顧客を待たせない」運用者主体の技術になる。このコンセプトの下、センサ仕様と設置方法などの使い勝手が適正な表面計測センサの選定と、得られた計測値を補正して、管内部の状態を推定する外表面計測技術（MAT®）を開発した[44)]。**図 23** に表面計測の概要を示す。この計測手法では、センサ本体の誤差の校正、および配管内部と周囲との熱伝導計算と実験を基に整理した補正を加えることで、配管表面の温度計測から内部の流体温度を±0.4℃（屋内配管測定時）の確からしさが得られる。これは丸形温度計に比べて一桁高い精度であり、業務用建築の温度計測に用いる白金測温抵抗体(Pt100Ω－JIS 0.3 級）とほぼ同等である。本技術は、これまで当社 BEMS の基盤技術として多くの熱源機器の性能評価に活用してきている。

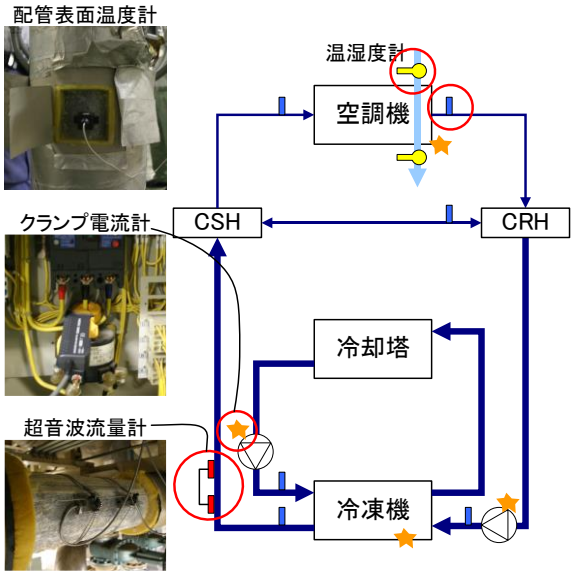


図 23 表面計測の概要 [44)]

4.6 今後の取組

カーボンニュートラルに向けて、当社では二つの人工知能技術を活用した管理システムに取り組んでいる。以下にそれらの開発状況を紹介する。

4.6.1 汎用推論エンジンを用いた運転支援システム

推論エンジンは人工知能技術の一つで、業務知識をルールベースとして蓄積し、推論機能による判断で意思決定の自動化を行うシステムである。当社では、この推論エンジンを搭載したクラウド対応 BEMS の開発[45),46)]と熱源システムの運用最適化技術を開発[47)]し、その普及展開を進めている。**図 24** にシステムの最適化に対する概念を示す。空調に係る熱源・冷却塔・搬送・二次側の全設備を対象に推論エンジンを用いて、空調設備全体のエネルギー消費量をミニマムにする空調設備の全体最適化を目指している。現在、熱源系統の運用最適化技術の開発と実装を進めている。本技術で採用した推論技術は、当社が長年培ってきた熱源の運用ノウハウを整理・体系化して構築したルールベースを基に、推論エンジンを用いて最適解を推論する技術である[48)]。これにより、熱源の運転条件を網羅的に検証し、熱源および二次側の諸条件を満たす現実的で最適な運転条件を自動的に特定可能としている。

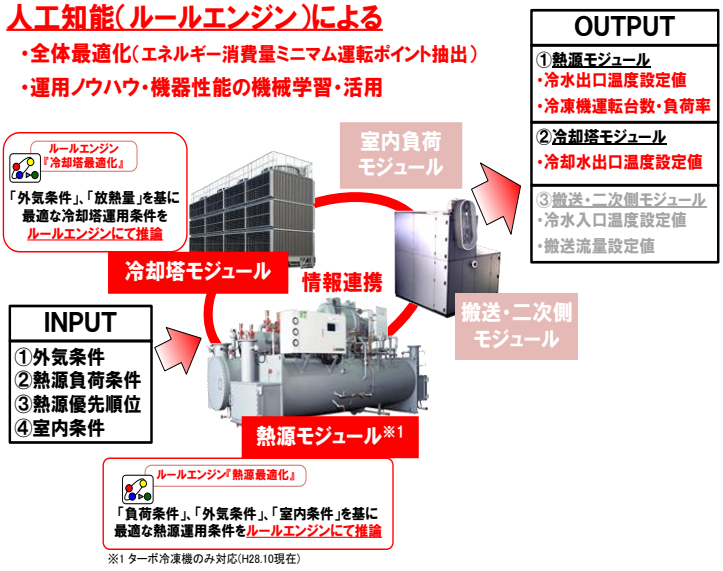


図 24 推論エンジンによる空調システムの最適化の概念[47)]

4.6.2 モデル予測制御を用いた電力エネルギー管理システム

カーボンニュートラルに向けて、エネルギー管理はこれまでの熱・空気に加え、発電、蓄電、電力利用を含む電力需給バランスの最適化が重要となる。当社では、現在再生可能エネルギーによる電力を有効活用するためにモデル予測制御を取り入れたデータドリブン型のエネルギーマネジメントシステム（EMS）を研究開発している[49),50)]。現在、高砂熱学イノベーションセンターにて機能検証を進めている最中である[51)]。今後カーボンニュートラルに向けた電化推進で導入が見込まれる自立型エネルギーシステム（オフグリッド）、電力の FIP（Feed in Premium）制度などにおいて、その運用には不可欠のシステムと考える。**図 25** にモデル予測制御の概念を示す。モデル予測制御とは、各時刻で未来の応答を予測しながら最適化を行う手法で、複雑な系に対して、より高性能な制御が期待される。変動の大きな再生可能エネルギーと急峻または緩やかな負荷変動を伴う需要側、そしてバッファーの蓄エネルギーのバランスを保ち、高効率点での運用を実現するには、EMS の高度な制御技術への要望が高まる。

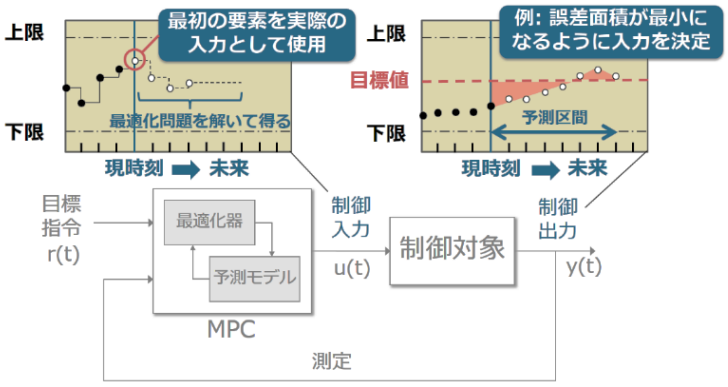


図 25 モデル予測制御の概念[44)]

5. おわりに

最初の導入から半世紀が経過する BEMS について、黎明期での導入状況から、コミッショニング・補助事業による導入普及、そして空気調和・衛生工学会での活動について俯瞰した。この間、空調設備は、中央方式から個別方式そして熱融通へと管理対象の範囲が変わってきている。また、熱利用も 7℃/45℃の冷温水から、液化天然ガスの-160℃～燃焼の 1,700℃までのカスケード利用へと広範になり、エネルギー管理も電力・熱・水と領域が広がり、BEMS の導入が不可欠となっている。

これまで当社の BEMS 関連の開発はもっぱら空調に軸足を置いてきたが、これからは電力・熱・水そして環境の統合管理を目指したシステムへ進化できればと思う。

文　献

1) 中原信生：省エネルギーと BEMS、IBEC(1992.9)
2) 中原信生：BEMS の発達、機能と課題、IMES(1988.9)
3) 空機調和・衛生工学便覧、第 14 版、第２章 統合計画の実際、p.38(2010.4)
4) BEMS ビル管理システムの計画・設計と運用の知識、空気調和・衛生工学会、p.3､173(2016.3)
5) 伊藤尚寛､柴田義隆､村上公哉､田中建美､中原信生:建築物の環境・エネルギー管理システムに関する調査研究 その 1 建物の建築的・設備的特性と室内環境の実態について、日本建築学会東海支部研究報告、pp.281-284(1990.2)
6) 伊藤尚寛､柴田義隆､村上公哉､田中建美､中原信生:建築物の環境・エネルギー管理システムに関する調査研究 その 2 BEMS 導入の目的・効果およびシステム構成・機能について、日本建築学会東海支部研究報告､pp.285-288(1990.2)
7) 西村英樹､佐藤文人､村上公哉､伊藤尚寛､中原信生､尾島敏雄：建築物及びエネルギー管理システム(BEMS)に関する基礎調査研究（その１）、日本建築学会梗概集、4615、pp.1229-1230(1990.10)
8) 佐藤文人､西村英樹､村上公哉､伊藤尚寛､中原信生､尾島敏雄：建築物及びエネルギー管理システム(BEMS)に関する基礎調査研究（その２）、日本建築学会梗概集、4616、pp.1231-1232(1990.10)
9) 柴田義隆､伊藤尚寛､村上公哉､佐藤文人､西村英樹､中原信生､尾島敏雄：建物の環境・エネルギー管理システム(BEMS)の実態に関する基礎調査 その１ BEMS の機能と管理実態に関する分析、空衛講論、D-47、pp.973-976(1990.10)
10) 中井一夫､伊藤尚寛､中原信生:建物の環境・エネルギー管理システム(BEMS)の実態に関する基礎調査 その 2 環境・エネルギー管理の実態と BEMS の効果に関する分析、空衛講論、E-2、pp.997-1000(1991.10)
11) 2019 建築設備情報年鑑、事務所建築における竣工設備データ、建築設備士(2019.12)s
12) 松縄堅､伊香賀俊治：第 27 回学会賞受賞物件 伊藤忠横浜湖北ビルの空気調和設備、空気調和・衛生工学、No.63、Vol.12(1989.12)
13) ASHRAE GUIDELINE 1-1996: The HVAC Commissioning Process(1996)
14) Portland Energy Conservation、Inc.、 Model Commissioning Plan and Guide Specifications、 Ver.2.05、(1998)
15) インタビュー中原信生：建築設備の真の性能保証実現へ、日経アーキテクチャー(2000.9.4)
16) 清水昭浩､佐々木邦治､村上俊博､松田浩康：事務所ビル(N ビル)での BEMS を活用した空調機廻りの実測結果、空衛講論、C-35、pp.701-704(1999.9)
17) 廣岡正､玉置進､末岡直彦､中原信生:空気調和設備の当初性能検証(コミッショニング)の実践研究 :(第一報)性能検証実施の目的・実施体制、空衛講論、E-10、pp.309-312(2001.9)
18) 委員会報告：建築設備の性能検証（コミッショニング）基本指針(案)、空気調和・衛生工学会ビル管理システム委員会コミッショニングワーキンググループ(1997)
19) 清水昭浩, 佐々木 邦治, 田中 良彦, 柴田 克彦, 池田 昌弘, 高玉 守之：事務所ビル(S ビル)でのコミッショニング結果、空衛講論、E-18、pp.341-344(2001.9)
20) GODA(ゴォーダ)クラウド、https://www.tte-net.com/solution/goda.html(2022.1 検索)
21) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業（建築

物に係るもの)・(BEMS 導入支援事業) 平成 11～21 年度補助事業における成果の総合的分析、平成 23 年度成果報告書(平成 24.2)
22) J-STAGE：https://www.jstage.jst.go.jp/browse/-char/ja(2022.1 検索)
23) 百田真史：シンポジウム BEMS の新たな活用を目指して～ニューノーマル社会に向けた在室者情報の活用と課題～趣旨説明(2021.8)
24) ビル管理システム委員会：空調制御アプリケーションから見たオープン化 BEMS ガイド、空気調和・衛生工学会(H18.3)
25) ビル管理システム委員会：BEMS の普及と活用促進に向けて、空気調和・衛生工学会(H18.3)
26) ビル管理システム委員会：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、空気調和・衛生工学会(H23.12)
27) ビル管理システム委員会：BEMS-エネルギーの見える化に関する調査研究、空気調和・衛生工学会(H24.11)
28) ビル管理システム委員会：BEMS におけるビッグデータの活用に関する調査研究、空気調和・衛生工学会(H27.10)
29) 総務省情報通信白書平成 24 年版：第１部 ICT が導く震災復興・日本再生の道筋、p.154(平成 24.7)
30) ビル管理システム委員会：災害時の建物の機能維持を支援するためのビル管理システム-BCP 対応型 BEMS の検討、空気調和・衛生工学会(H31.2)
31) ビル管理システム委員会：AI・IoT 時代のエネルギーマネジメント～基礎知識の整理と最先端事例、空気調和・衛生工学会(2020.11)
32) 柴田克彦、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇：空調設備の故障予知診断用エキスパートシステム、空衛講論、pp.1029-1031(1988.9)
33) 柴田克彦、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇：空調設備の故障予知診断用エキスパートシステム（第２報)、空衛講論、pp.185-190(1989.10)
34) 柴田克彦、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇：設備診断システムの開発（第 1 報）システム概要、空衛講論、pp.993-996(1990.10)
35) 清水昭浩、柴田克彦、伊東民雄、高橋惇：設備診断システムの開発（第 2 報）実施例の紹介、空衛講論、pp.997-1000(1990.10)
36) 柴田克彦、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇：設備診断システムの開発（第 3 報）実用型診断システムの稼働状況、空衛講論、pp.1041-1044(1991.11)
37) Leonald Chesler et.al, Applications of Expert System to Classical Issues of Defense, The 4th Annual Artificial Intelligence & Advanced Computer Technology Conference,197 (1988)
38) 高橋惇、伊東民雄、柴田克彦、清水昭浩：第 30 回空気調和・衛生工学会学会賞技術賞／技術開発部門の受賞物件報告「空調設備異常予知診断エキスパートシステム」、空気調和・衛生工学、第 66 巻第 12 号、pp.47-56(1992.12)
39) 高橋惇：駐車場換気設備の省動力制御システム、建築設備と配管工事、12,55(1983.5)
40) 柴田克彦、高橋惇、大神龍幾, 木山昌良：微差圧制御システムの開発、空衛講論、pp.129-132(2004.9)
41) 友田衛、八田康之、柴田克彦：過冷を抑止する VAV 空調システムの開発、空衛講論、pp.1953-1956(2002.9)
42) 孔鉄男、清水昭浩、伊東民雄、高橋惇、高瀬知章：空調設備のエネルギー管理支援システムの開発、空気調和・衛生工学、第 67 巻第 3 号(1993.9)
43) 柴田克彦、米澤仁、津田譲二、茂森昭博、今野一富：設備全体の最適化制御システム「E-COntrol」、高砂熱学工業総合研究所報、No.22、pp,7-12(2008.11)
44) 柴田克彦、石塚圭一、友田衛、相澤直樹、米澤仁、山田哲司：計測＋解析＋評価の統合化技術の開発、高砂熱学工業総合研究所報、No.18、pp,13-26(2004.11)
45) 米澤仁、寺岡慎介、金田純一、片山健一郎、岡本英之、清水昭浩、柴田克彦：次世代空調システムの実現に向けた「８つのトライ」－情報通信技術の空調設備への導入事例－、空衛講論、pp.33-36(2016.9)
46) 米澤仁、岡本英之、入部真武、清水昭浩、柴田克彦:人工知能を搭載したクラウド対応 BEMS の開発、空衛講論、pp.165-168(2016.9)
47) 岡本英之、米澤仁、柴田克彦、入部真武:人工知能を用いた熱源システムの運用最適化技術の開発、空衛講論、pp.313-

316(2016.9)
48) ルールエンジンとは、https://www.nau.co.jp/rule-engine/ (2022.1 検索)
49) Yuki MATSUNAMI, Yuan GAO, Shohei MIYATA, Yasunori AKASHI, Katsuhiko SHIBATA, Kenichiro KATAYAMA, Yoshihiro HIRAHARA：Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction (Part 1) Concept and problem identification from operational data、空衛講論、IS-8、pp.1-4(2021.9)
50) Yuan GAO, Yuki MATSUNAMI, Shohei MIYATA, Yasunori AKASHI, Katsuhiko SHIBATA, Kenichiro KATAYAMA, Yoshihiro HIRAHARA：Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction (Part 2) Solar radiation prediction based on Graph neural network and long short-term memory network、空衛講論、IS-9、pp.5-8(2021.9)
51) 清水昭浩、平原美博、松浪佑宜、羽鳥大輔、高正明、田辺新一：エネルギー自立型サスティナブル研究施設の計画と実証評価（第 16 報）ZEB 達成状況、空衛講論、J-55、pp.221-224(2021.9)

ABSTRACT

In the 1970s, trials of a centralized supervisory control system using a minicomputer began, primarily in large-scale buildings. Moreover, a building and energy management system (BEMS) was introduced. Thereafter, its performance evaluation and energy saving effect have been quantified owing to the standardization of technology by the academic society, application of performance verification (commissioning), and introduction and dissemination by subsidized projects; awareness of effects of introducing BEMS has increased. Now, half a century later, it has been applied practically to equipment management in several buildings. The transition of BEMS during this period and the efforts made by the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan are summarized with the aid of past literature. Furthermore, the prospective path to carbon neutrality, using the developed technology in Takasago Thermal Engineering, is outlined.