

全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS

Digital-Twin Model Based CEMS for Total Optimization

竜田 尚登 TATTA, Naoto

飯坂 達也 IIZAKA, Tatsuya

松本 宏治 MATSUMOTO, Koji

近年、CO₂ 排出量削減の社会的要求が高まっており、効率的なエネルギー運用が求められている。富士電機は、地域単位でのエネルギー需給一体の運用課題を解決するために、“新さっぽろ駅周辺地区Ⅰ街区開発プロジェクト”に参画し、AI 技術を活用したデジタルツインモデル型の地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS）を新たに構築した。街区にある各施設のエネルギー需要を高精度に予測し、その予測に基づいてエネルギー供給側と需要側の双方を自動的に調整することにより、効率的なエネルギー運用を実現し、街区全体の大幅な CO₂ 削減に貢献する。

In recent years, reductions in CO₂ emissions have been increasingly sought in society, necessitating increased efficiency in the use of energy. Fuji Electric participated in the New Sapporo Station District I Development Project and built a community energy management system (CEMS) based on digital-twin model using AI technology to solve the challenge of regionally consolidating the management of energy supply and demand. This system accurately predicts the energy demand of each facility in the district and automatically adjusts the supply and demand to use energy efficiently, significantly reducing CO₂ emissions for the whole district.

① まえがき

日本国内の人口減少・少子高齢化が進む中、国土交通省は、特に地方都市において地域の活力を維持するために、医療機関、福祉施設、商業施設などの生活機能を確保し、高齢者が安心して暮らせるよう、地域公共交通と連携したコンパクトシティを推進している。コンパクトシティでは、熱と電気を地産地消するコージェネレーション設備を核とする地域単位のエネルギーシステムを構築してエネルギー利用を最適化し、都市の活動に必要なインフラを高度に整備した快適な街づくりを目指している。また、大規模災害時にもエネルギーの供給を確保し、事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）や生活継続計画（LCP：Life Continuity Plan）を実現することも求められている。地域においてエネルギーを最大限に効率よく利用することは、今や地球規模の課題であるカーボンニュートラルの実現に貢献することにもつながる。

このエネルギー運用を実現する基盤となるのが地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS：Community Energy Management System）である。富士電機はこれまで、エネルギー運用に必要なさまざまな計測・分析・制御技術を開発し、個々のお客さまにシステムとして提供してきた。最近では、“新さっぽろ駅周辺地区Ⅰ街区開発プロジェクト”に参画してデジタルツインモデル型 CEMS を構築した。本稿では、全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS について述べる。

② CEMS の課題

一般的な CEMS の適用例を図1に示す。対象地域へのエネルギー供給源としては、電力会社からの系統電力に加

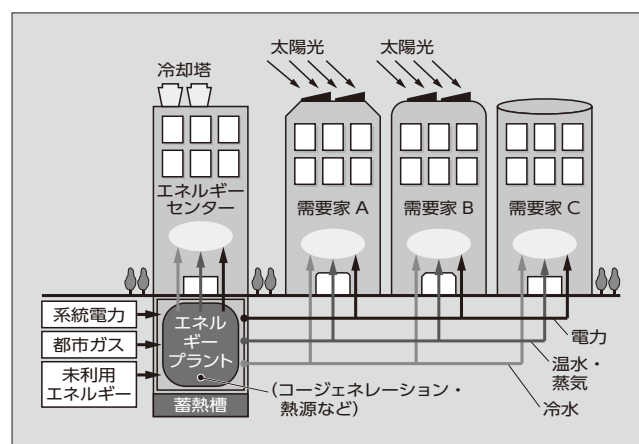


図1 一般的な CEMS の適用例

えて、地産地消するための電力と熱を同時に供給するコージェネレーション設備を導入することが多く、さらに太陽光発電などの再生可能エネルギー発電設備や蓄エネルギー設備、あるいは河川水や地中熱などの未利用エネルギーを有効活用する設備が加わる場合もある。エネルギー需要側に対しては、消費電力量などを計測して収集するためのスマートメータを需要家ごとに設置し、コージェネレーション設備からの熱を利用する設備には熱量計なども取り付ける。これらの計測システムを通じて地域全体のエネルギーの需要と供給の状態に関する情報がエネルギーセンターに集約される。この結果を分析して把握した地域の状況に基づいて、エネルギーセンターからエネルギーの需給を調整する指示が出される。具体的な需給調整の方法としては、例えば、需要に応じたコージェネレーション設備の出力調整、需要ピークに備えた蓄熱設備の活用、あるいは、需要が供給を上回ると予想される際には各需要家にエネルギー消費を抑制するように促すことなどがある。これらを適切

に組み合わせて運用し、地域全体でのエネルギー利用効率を高めることが CEMS の目的となる。

このように CEMS を運用して地域のエネルギー需給を管理する上で、次のような課題が明らかになっている。

(1) 課題 1：需要側と供給側の連携の強化

エネルギーの需要と供給を均衡させるために需要側に調整を促すことはデマンドレスポンス（DR：Demand Response）と呼ばれる。その代表的な手法として、エネルギー需要が逼迫する時間帯に需要を抑制した需要家に何らかの報酬を与えるインセンティブ型 DR がある。この DR は多くの需要家に適用しやすいが、需要が実際にどの程度調整されるかは個々の需要家に委ねられている。したがって、報酬を得ることよりもこまめに省エネルギーを行う手間を惜むなどにより、実際に調整される需要の量やタイミングが必ずしもエネルギーセンター側の期待どおりになるとは限らない。

エネルギー供給側にも同様の状況があり、季節の移り変わりや需要の変化に対して供給設備の運用調整が限られた場合にしか実施されず、初期設定のまま運用されることが多い。

(2) 課題 2：需要予測と需給調整の高精度化

エネルギーの需給調整をリアルタイムに実行できる手段が限られているので、エネルギー需要を精度良く適切なタイミングで予測することは CEMS を運用する上で不可欠である。エネルギー利用効率を一層高めるためには、予測精度の向上が課題である。

さらに、この予測に基づいて、どのような需給調整手段を組み合わせて指示するかの判断は、専らエネルギーセンターのオペレーターに委ねられていた。そのため、地域のエネルギー利用効率をどこまで高められるかはオペレー

ターの経験と力量に頼るところが大きく、エネルギーセンターの運用実績に精通したオペレーターが望まれている。昨今の社会の少子高齢化に伴う人手不足の状況の下で、熟練したオペレーターが培った運用技術を、経験未熟なオペレーターでも実行できるようにシステム化することが課題となっている。

③ デジタルツインモデル型 CEMS の構成と機能

3.1 デジタルツインモデル型 CEMS の構成

②章で述べた課題に応えることができる、AI（Artificial Intelligence）技術を活用したデジタルツインモデル型 CEMS を新たに構築した。デジタルツインとは、文字通りの意味は“デジタルで出来た双子”であり、現実世界（フィジカル空間）に存在する対象をデータによってコンピュータ上（サイバー空間）に再現したものを、その対象の“双子”になぞらえた名称である。図 2 にデジタルツインモデル型 CEMS の構成を示す。このように、デジタルツインモデル型 CEMS は高度 CEMS と進化型 CEMS から構成される。従来の CEMS を高機能化したものが高度 CEMS である。この高度 CEMS の運用対象となる地域内のエネルギー需給設備などと高度 CEMS とを併せてデジタルデータで再現して構築したものが進化型 CEMS である。

高度 CEMS は、従来の CEMS と同様にエネルギーセンターに設置して地域内のエネルギー需給調整を実行するためのオンプレミス^(注)型のシステムである。進化型 CEMS はクラウド上に構築され、さまざまな状況の下での高度 CEMS の運用をシミュレーションする機能を持つ。クラウド上に構築することにより、CEMS の機能を改良する

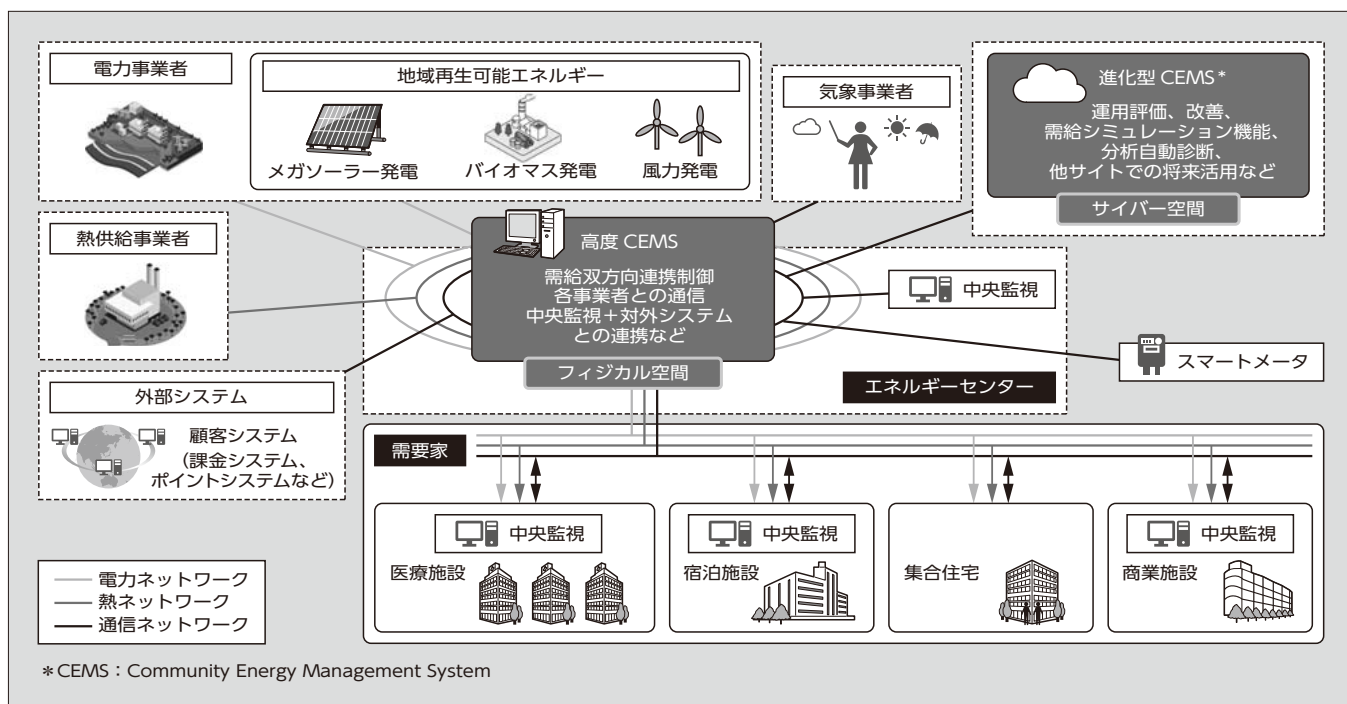


図 2 デジタルツインモデル型 CEMS の構成

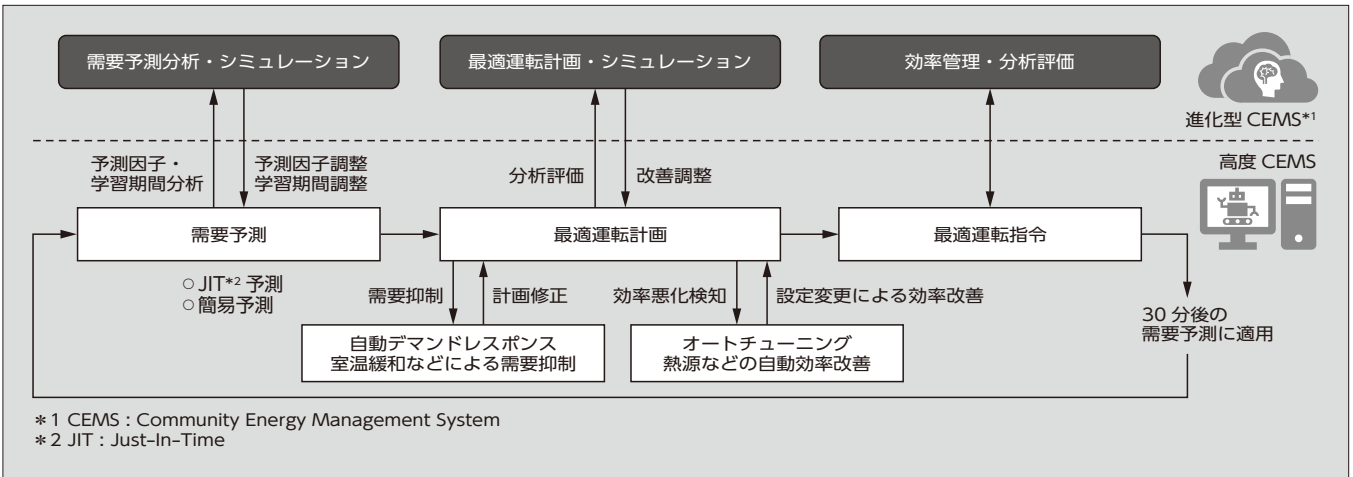


図3 高度 CEMS と進化型 CEMS の主要機能

際も、その効果をあらかじめシミュレーションにより容易に検証することができる⁽¹⁾。

3.2 デジタルツインモデル型 CEMS の機能の概要

図3に高度 CEMS と進化型 CEMS の主要機能を示す。高度 CEMS は、地域内のエネルギー需要を予測し、最適運転計画を立案する機能を備えるとともに、需要側の空調設備や、供給側のコージェネレーション設備などの制御パラメータを自動調整する機能も持っている。

また、進化型 CEMS では、高度 CEMS を介して取得する地域の実際のエネルギー需給の状況のデータを使って需給調整の効果をシミュレーションにより確認することができる。より効果的な運用結果が得られたら、その運用を高度 CEMS で実施して現実化することができる。

3.3 需要予測機能

エネルギー需要予測は、従来はエネルギーセンターのオペレーターが経験に基づいて行うことが多かった。これを自動的に行うために、統計的機械学習手法を用いてオペレーターの予測手順を再現する JIT (Just-In-Time) 予測法を開発した。図4に JIT 予測の構造を示す。JIT 予測法は、代表的な AI 手法の一つであるディープラーニングと比較して、次の三つの利点がある。

- (a) 予測手順がオペレーターと類似するため、予測結果の説明が容易
- (b) 少ない学習データでも予測可能
- (c) 突発的な負荷変動にも追従容易

(a)の特徴は、運用者に安心感を与えるメリットがある。(b)の特徴は、CEMS の運用実績が少ない再開発地域でも予測できるメリットがある。(c)の特徴は、負荷のばらつきが大きい小地域の需要でも高精度に予測できるメリットがある。

〈注〉 オンプレミス：サーバやソフトウェアなどの情報システムを、使用者が管理している施設の構内に機器を設置して運用すること。

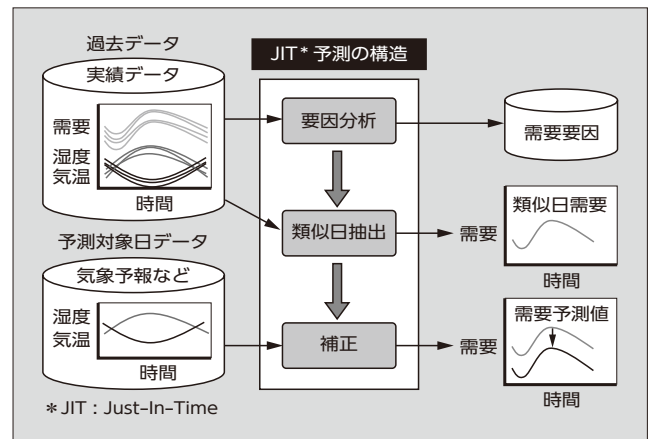


図4 JIT 予測の構造

ある。

CEMS の運用対象となる地域の環境はさまざまな理由で変化する。季節ごとの気象条件による需要の変化や、設備の更新に伴う変化などである。JIT 予測法では、予測モデルを更新することでこれらの環境変化に対応して予測精度を維持することができる。この予測モデルの調整をエネルギーセンターのオペレーターが担うことは一般的に難しいが、進化型 CEMS を使って予測モデル候補を評価することができる。予測精度の高いモデルを選んで高度 CEMS に適用することにより、一般のオペレーターでも環境変化に容易に対応できる。

3.4 需給双方向最適運転計画

富士電機は、以前からエネルギー供給設備の最適運用支援機能を提供している。この最適運用支援機能には、設備の動作をシミュレーションできるようにするためのモデリング機能と、このモデルを使ったシミュレーションを繰り返して設備間の最適な供給配分を求める機能が含まれる。運転条件として、エネルギー単価、メンテナンス単価、CO₂ 換算係数などを設定し、需給バランスなどの運用上の制約条件を満たすシミュレーションが実行できる。

エネルギー需要を満たしながらエネルギー供給設備の運

用を最適化する前述の運用計画支援機能に加えて、今回のデジタルツインモデル型 CEMS では、需要と供給のそれぞれを事前に調整して最適化する機能を新規に開発した。その一つは、従来同様の需要予測を出発点としながら、エネルギー供給設備の能力と効率を考慮して需要量を自動調整する需要抑制（ADR：Auto Demand Response）機能である。もう一つは、エネルギー供給設備の効率に関わる制御パラメータを需要量に対して供給設備の効率が最大になるように自動調整するオートチューニング（AT：Auto

Tuning）機能である。図5に需給双方最適運転計画を示す。このようにして、ADR 機能と AT 機能を利用して地域内のエネルギー需給設備の運転計画を段階的に最適化する。計画作成プロセスにおける ADR と AT の動作の例を図6に示す。

運転計画の策定手順として、初めに、需要予測に基づいて従来と同様に供給設備の運転計画を作成する。並行して、需要家側ではエリア内の快適性を確保できる範囲でエネルギー消費量が最小限となるような需要家の空調設備の運転条件があらかじめ設定されており、これに基づいてエネルギー需要を定常的に抑制する。

次に、ADR 機能を利用して、エネルギー需要をわずかに抑制することで供給設備の運転効率を向上できる場合がないかを、供給設備の調整可能な範囲で探し出して、需要家設備の運転条件を自動的に変更することで需要量を追加的に抑制し、予測される需要量を見直す。

続いて、見直された需要量に基づいて AT 機能を利用する。その働きを冷熱源設備の場合で説明する。冷熱源設備は一般に年間の需要量のピークを賄えるように設備容量が決められ、需要である空調の使用条件に適合するように制御パラメータが決められているので、需要が少ない状態では運転効率が低いことがある。ここで、冷熱源設備から供給される冷水の温度を上げると冷熱源設備のエネルギー消費効率（成績係数）（COP：Coefficient of Performance）が高くなるが、空調設備の需要を満たすために供給する冷水流量と、それに伴う搬送ポンプの消費電力が増加する可能性がある。このような冷熱源設備の特性やトレードオフ関係も含めてモデル化しておき、需要量を賄いつつエネルギー消費量が最も少なくなるような供給

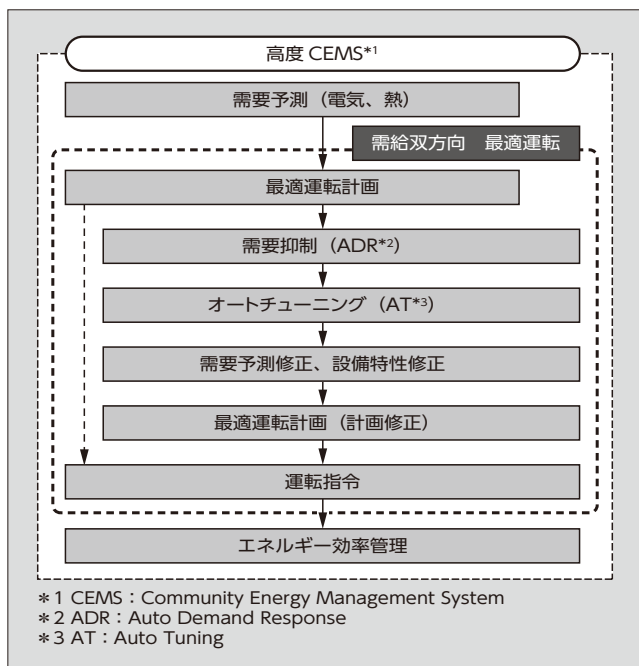


図5 需給双方最適運転計画

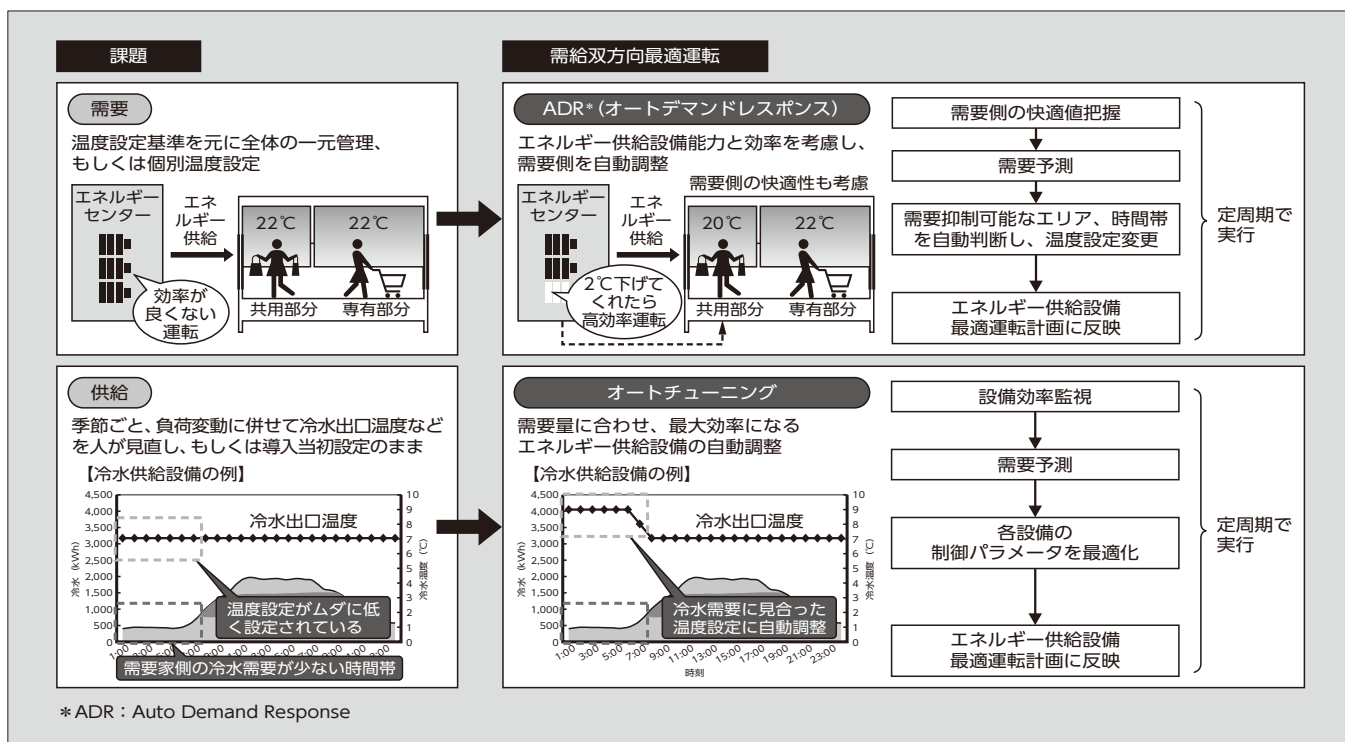


図6 ADR と AT の動作の例

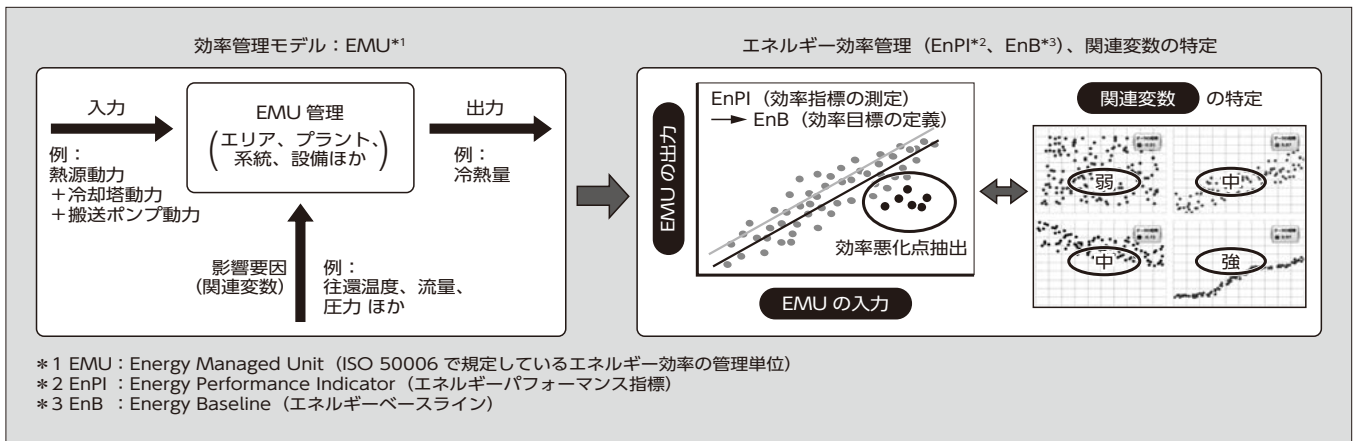


図7 エネルギー効率管理モデル

設備の制御パラメータを求める。この結果に基づいて当初の運転計画を修正して最適化された運転計画として決定し、これに従って各設備を運転する。これにより、これまで実施できなかった需要側と供給側を連携させた運用が実現できる。

また、最適化された運転計画によるエネルギー需給調整の効果を進化型 CEMS により確認することもできる。

3.5 エネルギー効率管理

エネルギー管理手法を定めた国際規格 ISO 50006 に則って CEMS を運用できるように実績データからエネルギー効率に影響する要因を自動抽出する AI エンジンを開発した⁽³⁾。

ISO 50006 の管理フレームワークでは、図7に示すエネルギー効率管理モデルのように、エネルギー効率を管理する領域を定めた上で、エネルギー効率に影響を与える要因（関連変数）を散布図を用いた相関分析などにより特定することを重要視している。過去の効率実績データから管理目標値の基準を定め、エネルギー効率（プラント効率、機器効率など）の管理、効率に深く影響を及ぼす関連変数を管理することが重要である。

今回開発した AI エンジンを用いると、最も効率に影響する因子項目とそのデータ境界値が自動抽出できるので、エネルギー効率の改善活動に貢献できる。進化型 CEMS を用いて抽出した因子の影響を詳細に評価し、それに基づいて運用の改善策を検討することができる。

④ デジタルツインモデル型 CEMS の実用化

“新さっぽろ駅周辺地区 I 街区開発プロジェクト”は、他地域に見られる民間デベロッパー主体でパッケージ化された街づくりとは異なり、自治体の策定する計画に沿って地元企業主体のコンソーシアムにより推進されている。自治体が示す長期的ビジョンの下、少子高齢化社会を見据えて病院や住宅などの多用途で構成されるコンパクトシティを目指している。新さっぽろ駅周辺地区 I 街区を図8に示す。この開発プロジェクトにおける建物用途は、医療施設



図8 新さっぽろ駅周辺地区 I 街区
(写真提供：北海道ガス株式会社)

(3 専門病院とメディカルビル)、マンション、ホテル、商業施設の全 7 棟からなる。駅徒歩圏内にある、延床面積約 10 万 m² の開発プロジェクトである⁽⁴⁾。

富士電機はこのプロジェクトに参画し、新たなエネルギーセンターの運用を支援するデジタルツインモデル型 CEMS を構築した。街区にある各施設のエネルギー需要を高精度に予測し、その予測に基づいてエネルギー供給側と需要側の両方を自動的に調整して地域全体のエネルギー利用効率を最適化することを目指している。デジタルツインモデル型 CEMS を使って街区全体のエネルギー効率を管理するモデルを図9に示す。街区全体、エネルギーセンター、各需要家、各設備と階層を掘り下げて分析していくドリルダウン分析を実施し、進化型 CEMS を用いて、エネルギー効率の目標と実績の乖離（かいり）を把握して効率に影響を与える要因を逐次捕捉することで、エネルギー利用を適正に運用するための示唆が得られる。これを高度 CEMS 側にフィードバックすることにより、ボトムアップにて ADR や AT による部分最適化と、予測精度調整、最適運転計画調整による全体最適化を実施して、街区全体を考慮した効率的なエネルギー運用を実現する。

2023 年 11 月 30 日、商業施設が開業したことで、新さっぽろ駅周辺地区 I 街区の建物が全てそろう、街開きと

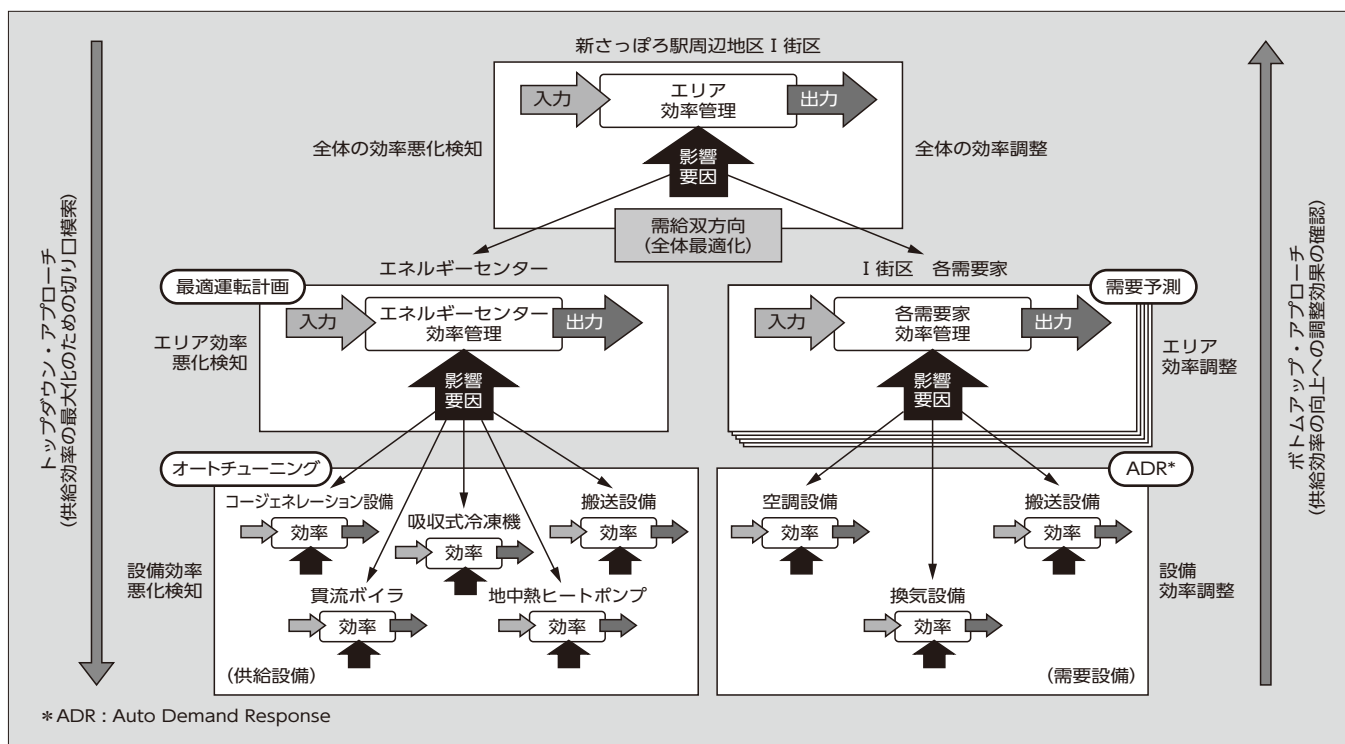


図9 街区全体のエネルギー効率管理モデル

なった。今後、高度 CEMS で収集した各建物のデータを進化型 CEMS で分析するとともに、高度 CEMS の各種機能を評価していく。

5 あとがき

全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS について述べた。富士電機はこれまでに培ってきたエネルギー管理ソリューションをさらに進化させて、エネルギー管理に関するお客さまの多様なニーズに応じていく所存である。

最後に、本システムを構築するに当たり、お客さまである北海道ガス株式会社殿および大成建設株式会社殿には多くのご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 鈴木武彦ほか，“地方都市コンパクトシティにおける先導的スマートコミュニティ技術に関する研究（その2）：CEMS（地域エネルギー管理システム）の概要”，空気調和・衛生工学会，2022。
- (2) 飯坂達也ほか，価値創出のコアとなるアナリティクス・AI，富士電機技報，2018，vol.91，no3，p.169-174。
- (3) 竜田尚登ほか，国際規格に準拠したエネルギー運用効率の

改善—アナリティクス・AIを活用したEMSアドオン機能—，富士電機技報，2018，vol.91，no3，p.130-134。

- (4) 萩野伸悟ほか，“地方都市コンパクトシティにおける先導的スマートコミュニティ技術に関する研究（その1）プロジェクトとエネルギー管理システムの概要”，空気調和・衛生工学会，2022。



竜田 尚登

製造管理・エネルギー管理・監視制御システムの企画・開発・技術に従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部情報ソリューション事業部 DX 技術部主査。エネルギー管理士。



飯坂 達也

各種産業システムへの予測、最適化技術の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルサイエンス研究センター AI 研究部マネージャー。電気学会上級会員。博士（工学）。



松本 宏治

各種プラント制御システムのシステム設計・開発企画業務に従事。現在、富士電機株式会社インダストリー事業本部プラント制御システムセンターシステム技術部主席。エネルギー管理士。



＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。