

BEMS データを活用した不具合予兆検知システムの開発と適用事例

小 関 由 明 藤 田 尚 志
(設計本部)

竹 井 宏 福 田 裕 行
(エンジニアリング本部) (エンジニアリング本部)

Development and Application Example of a Fault Sign Detection System using BEMS Data

Yoshiaki Ozeki Hisashi Fujita
Hiroshi Takei Hiroyuki Fukuda

Abstract

Recently, the need for BEMS in energy-saving buildings has increased. To achieve proper building maintenance and continuous energy-saving performance, the accumulated BEMS data must be effectively utilized and analyzed. However, because this requires considerable time and effort, BEMS data have not yet been completely utilized. We developed a fault sign detection system using BEMS data, installed it in the main building, “Techno-Station,” of Obayashi Technology Research Institute, and began its operation from April 2020. In this paper, we report on its outline, examples of examination during its development, and its operational status after the beginning of operation and confirm its effectiveness.

概 要

近年省エネ建物では BEMS の必要性が高まっている。適切な建物維持管理や省エネ性能の継続を実現するには蓄積した BEMS データを有効に活用・分析することが不可欠であるが、それには多くの手間がかかるため十分に活用できていないのが現状である。筆者らは BEMS データを活用した不具合予兆検知システムを開発し、大林組技術研究所本館テクノステーションに導入、2020 年 4 月より運用を開始した。本報ではその概要と実データを用いた開発段階における検討事例、および運用開始後の運用状況を報告し、その有効性を確認した。

1. はじめに

我が国のエネルギー基本計画¹⁾によると、2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、住宅・建築物分野の目標として「2030 年度以降新築される住宅・建築物について、ZEH・ZEB 基準の水準の省エネルギー性能の確保を目指す。」「2050 年に住宅・建築物のストック平均で ZEH・ZEB 基準の水準の省エネルギー性能が確保されていることを目指す。」としている。今後増加する ZEB の省エネ初期性能を建物運用段階においても継続して維持していくことは、地球温暖化対策にとって重要な役割と言える。近年 ZEB に代表される省エネ建物では BEMS(Building and Energy Management System)の必要性が高まっている。適切な建物維持管理や省エネ性能の継続を実現するには蓄積した BEMS データを有効に活用・分析することが不可欠であるが、それには多くの手間がかかるため十分に活用できていないのが現状である。その結果エネルギー浪費のまま運転継続したり、不具合兆候に気づかず故障・停止に至ることもあり得る。そこで筆者らは BEMS データを活用した不具合予兆検知システ

ムを開発した。また、運用段階における ZEB を実現・継続している大林組技術研究所本館テクノステーション (Table 1) に導入、2020 年 4 月より運用を開始した。本報ではその概要と実データを用いた開発段階における検討事例、および運用開始後の運用状況を報告する。

Table 1 大林組技術研究所本館テクノステーション
The Main Building “Techno-Station” of Obayashi
Technology Research Institute

建物名称	大林組技術研究所本館 テクノステーション
建築主・設計・施工	株式会社 大林組
構造・規模	鉄骨造、地上3階塔屋1階、延べ面積5,535.38m ²
建物用途	研究所 (事務所)
BEMSポイント数	約5,000点

外観



2. システム概要

2.1 機能

不具合予兆検知システムは、BEMS データを定期的に自動入力・分析して様々な不具合予兆を自動で検知し、建物の管理者等に e メールで通知するシステムである (Fig. 1)。通知情報をもとに建物管理者が対象設備や BEMS データの詳細を確認し、設備機器の故障やエネルギー浪費を未然に防ぐことができる。この不具合検知機能のほかにエネルギー管理機能を備え、各種エネルギー使用量 (電気・ガス他) や一次エネルギー消費量・CO₂ 排出量のグラフを表示する。月末や年度末のエネルギー消費予測値を表示し、管理目標の達成状況を半月ごとに建物管理者に e メールで通知し、日常的な省エネ管理に役立つ。システムはクラウド環境に構築しており、複数建物を同時に遠隔監視が可能である。

2.2 分析方法

不具合予兆検知に限らず AI を用いてビッグデータ解析を行う事例が多数あるが、今回は品質工学の分野で用いられている MT 法²⁾を利用した (Fig. 2)。MT 法とはパターン認識技術の一種で、正常状態のデータ群を単位空間として定義し、対象データの単位空間からの距離をマハラビス距離 (MD, 以下「乖離度」として求め、その大小で正常な状態か否かを判別する手法であり、乖離度が大きいほど異常と判別される。建築設備の BEMS データは正常状態が常であり、AI が異常状態の学習に用いる異常データが極端に少ないため、逆に正常状態の 1 パターンを学習に用いて正常状態から外れた場合に異常と判断する MT 法が適していると考えた。AI の一つである深層学習は文字・言語・画像など複雑な多数のパターンを扱うことに適しているが、計算負荷 (量・時間等) が MT 法に比べてかなり大きく、その点では不利である³⁾。また MT 法では、対象データ項目の有無による SN 比 (信号量 S とノイズ N の比で、ばらつきが大きいほど値は小さくなる。) の差分 (以下「寄与度」) を用いることにより、どのデータ項目が普段と異なり異常と判断したのかを明示できるため、BEMS データのようにデータ項目数が多い場合には異常の原因の特定がしやすい。

3. 実データを用いた不具合予兆検知のケーススタディ

本章では、過去の不具合事例を題材にして、その実データを用いた開発段階における検討事例を報告する。

3.1 水消費傾向からの不具合予兆検知の事例

2018 年 1 月および 3 月の水消費量の傾向変化を題材に不具合予兆検知の検討を行った。Fig. 3 に対象建物の水利用フロー図を示す。この建物の給水は上水と中水 (便所洗浄水、外構灌水) とに分けて利用している。また中

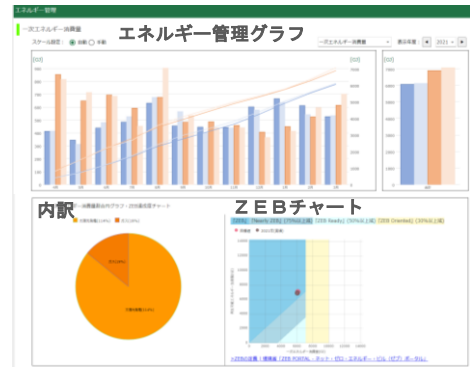
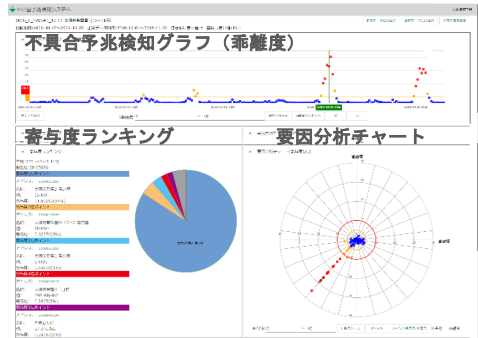
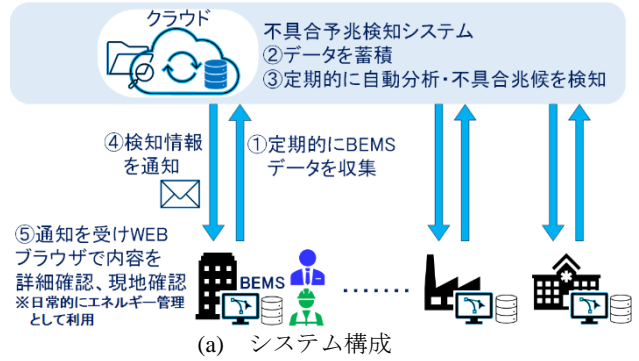


Fig. 1 不具合予兆検知システム
Fault Sign Detection System

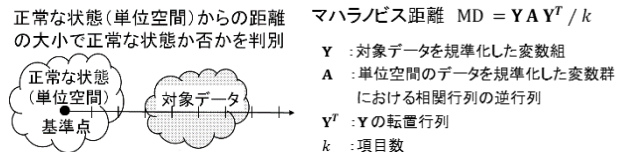


Fig. 2 MT法のイメージ
Image of MT Method

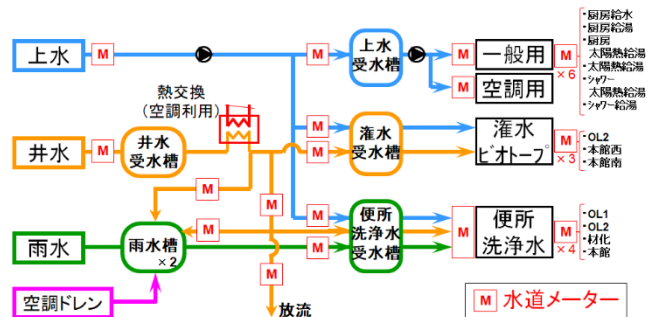


Fig. 3 水利用フロー図
Water Supply Schematic Diagram

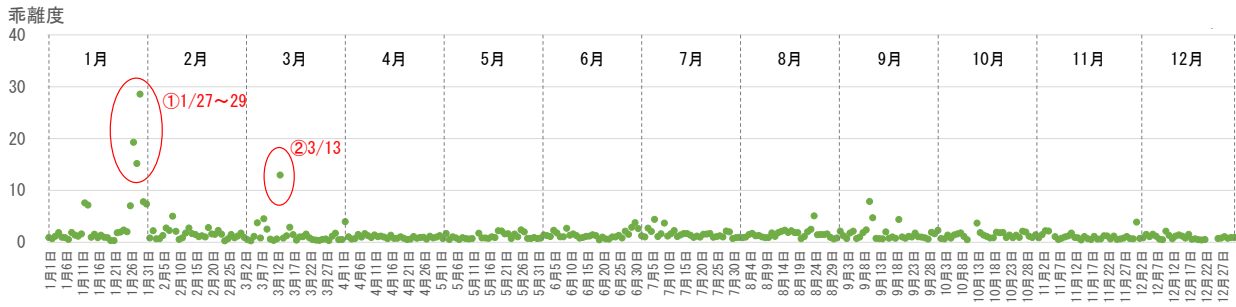
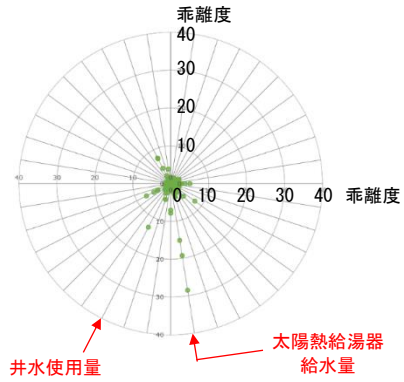


Fig. 4 水消費量傾向異常検知の検討例
Examination Example of Fault Sign Detection
Water Consumption Trends

水として、井水と屋根に降った雨水を灌水や便所洗浄水に利用し、水資源の有効利用を行っている。そのため水道メーターを引込箇所だけではなくそれぞれのユースポイント計 27 か所に設置している。そこで水利用（上水、井水、雨水）関連の BEMS データ計 40 項目（各水消費量、上水ポンプ電力量、在室人数、気象データ他の 1 日毎データ）を用いて水消費傾向異常検知の検討を行った。2016 年を基準とし 2018 年の乖離度を用いて消費傾向を調査した。40 項目のデータから 1 つの乖離度を算出し、時系列にプロットしたものを Fig. 4 に示す。乖離度が普段より大きくなる、例えば 10 を超える日が 1 月と 3 月に存在する。次に 2018 年の寄与度を算出し、その結果を一覧できるようにまとめた「要因分析チャート」を Fig. 5 に示す。プロットが中心から半径方向に離れるほど乖離度が大きいことを示し、またその方向が、寄与度が最大のデータ項目を表す。例えば 1 月 27～29 日において乖離度を押し上げている要因は「太陽熱給湯器給水量」であることがわかる。実際に BEMS 元データを確認すると、普段 0～2m³/日の消費量であるところ、この 3 日間前後に 6～11m³/日の消費量に増加していることがわかった(Fig. 6)。また原因は、太陽熱給湯器からの給湯と上水を混合するミキシングバルブ（屋外設置）内の水が凍結してバルブが破損し、1 月 30 日の朝に発見されるまで漏水し続けていたことが、建物管理者へのヒアリングにより確認できた(Photo 1)。もう一つの 3 月 13 日において乖離度を押し上げている要因は「井水使用量」であることがわかる。実際に BEMS 元データを確認すると、普段 7～8m³/日の消費量であるところ、この日は 39m³/日の消費量に増加していることがわかった(Fig. 7)。また原因は、軟水装置の故障に伴う井水ポンプの不停止に起因するものであることが確認できた。このことから複数の BEMS データをそれぞれ監視するのではなく、一つの乖離度を監視することにより浪費や機器不具合の兆候を検知できる可能性があることがわかった。

次にこれら二つの事象について比較すると、前者 1 月の事象は普段に比べ 4～9m³/日の増加で乖離度 15～29 であるのに対し、後者 3 月の事象は普段に比べ約 30m³/日の増加で乖離度 13 となっており、水消費量の増減量を必ずしも乖離度の大小で表現しているわけではない。仮に不具合予兆検知システムを用いず水道メーターを引込



※放射線状の目盛（40本）は寄与度1位のBEMSデータ項目を示す。

Fig. 5 要因分析チャート
Chart for Factor Analysis

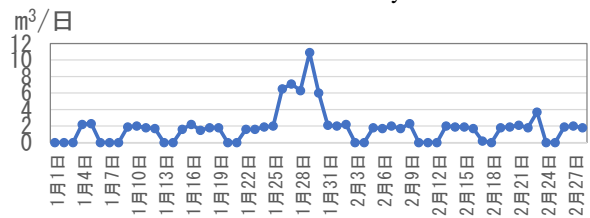


Fig. 6 太陽熱給湯機給水量
Water Consumption of Solar Water Heater

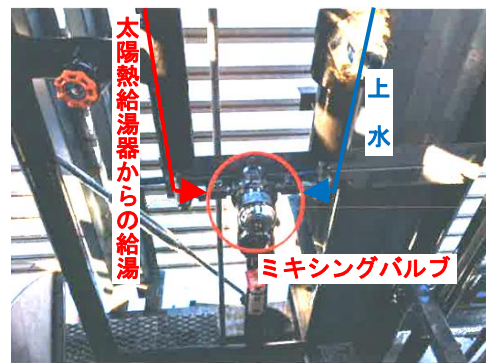


Photo 1 漏水したミキシングバルブ
Leaking Mixing Valve

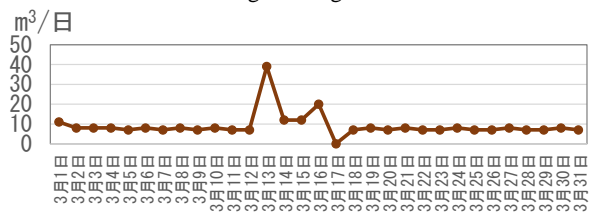


Fig. 7 井水使用量
Well Water Consumption

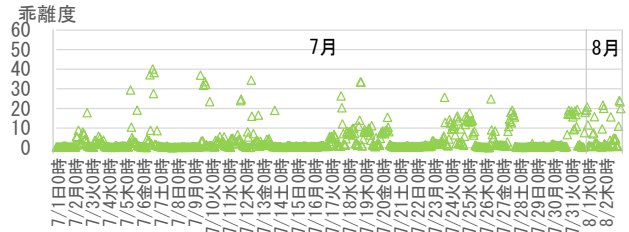
点1か所のみを設置していた場合は、「太陽熱給湯器給水量」の消費量の変化は他のユースポイント消費量の変化に埋もれてしまい、消費パターンの変化が検知できない。また現状のように多数の水道メーターがある場合には各メーターをそれぞれ監視することに労力がかかり、今回のように「太陽熱給湯器給水量」の消費量の変化を見落とすこともあり得る。本システムはそれぞれのメーターにおける消費パターンの変化を乖離度という一つの指標として捉え、また寄与度及び要因分析チャートを用いて異常のあるメーターを明示することで、不具合兆候を検知できる可能性がある。この機能が本システムを利用するメリットと言える。

3.2 空冷HPチラーの不具合予兆検知の事例

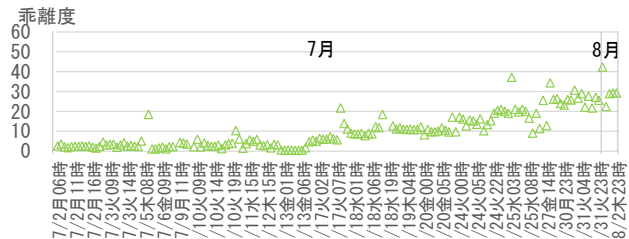
次に実際に故障した空冷HPチラー（8号機）を題材に不具合予兆検知の検討を行った。同機は2018年7月26日から1週間、異常警報が頻発（計6回）したため、8月3日に製造メーカーに点検依頼を行っている（その後、水熱交換器のパンクが原因と判明）。そこで空冷HPチラー8号機関連のBEMSデータ計27項目（電力量、配管系関連（流量、温度、熱量、バルブ状態他）、気象データ他の1時間毎データ）を用いて検討を行った。前項と同様に2016年を基準とし2018年7月1日～8月2日の動作傾向を調査し、27項目のデータから乖離度を算出した（Fig. 8(a)）。随所で乖離度が大きくなっており、7月末の故障に対して明確な予兆を捉えることはできなかった。次に、空冷HPチラーは9台でローテーション運転をしているため、停止時間帯のBEMSデータが検知のノイズとして作用すると考え、停止時間帯のBEMSデータを除外した。また冷水温度等の安定しない運転開始直後1時間のBEMSデータも除外して分析を行った。なお、運転時のみを対象とすると常時同じ値を示すBEMS項目（運転状態やバルブ開閉状態など）は計算に使用できないためこれを除外し、項目数を27から18に変更した。結果をFig. 8(b)に示す。乖離度の傾向は7月前半では概ね6以下を示すのに対し、7月後半では徐々に大きくなり概ね10～30の間で推移し、不具合の兆候を示している。次にBEMS元データを用いて空冷HPチラー8号機のCOP(Coefficient of Performance)を算出し外気温度との相関を7月前半後半に分けて分析した。7月前半（Fig. 9(a)）ではCOPが概ね機器仕様値付近で推移しているのに対し、7月後半（Fig. 9(b)）では明確にCOPの低下がみられた。このことから異常警報が頻発する約10日前から何らかの異常を乖離度によって予兆検知できていると言える。よって乖離度を定期的に監視することで機器の不具合予兆を検知できる可能性があることがわかった。

3.3 検知精度向上のためのデータ利用の工夫

前2節の検討事例を通じて、検知精度向上のためにはデータ利用の工夫が必要であることがわかった。3.2節の事例のような機器単体の不具合予兆検知を行う場合は、

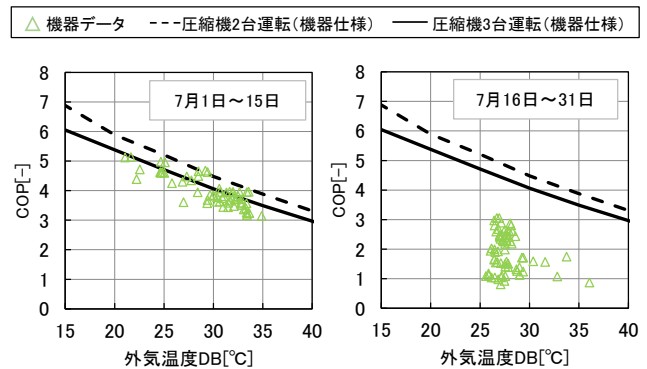


(a) 全期間(7/1～8/2)を対象



(b) 全期間(7/1～8/2)のうち運転時を対象

Fig. 8 空冷HPチラー異常検知の例
Examination Example of Fault Sign Detection
Air-Source Heat Pump Chiller



(a) 7月1日～15日のCOP (b) 7月16日～31日のCOP

Fig. 9 空冷HPチラー8号機のCOP (2018年7月)
COP of Air-Source Heat Pump Chiller No.8 (July 2018)

運転中の動向を監視できるように1時間毎データを用いる。また、前述のように機器停止時・運転開始直後のデータを除外する。一方3.1節の事例のような水消費量や電力消費量等の不具合予兆検知は、1日毎データを用いる。これはメーターのパルス定数などの影響により、メーター指示値が変わる時刻にはあまり意味がなく、逆に検知に対してノイズになってしまうためである。

3.1節の事例の場合、水道メーターをできるだけ多く各所に設置すれば不具合発見の可能性は向上するが、コストの面から限界がある。できる限り系統毎に均一に配置するほか、異なる用途毎（一般用、給湯用、空調用（補給水、加湿）等）にも配置できると良い。例えば空調機のデータと加湿給水量データを組み合わせるパターンの監視にも利用でき、不具合予兆検知に有効である。

4. 実建物における運用状況

本章では、対象建物における不具合予兆検知システム運用開始後の約3年間の運用状況と不具合予兆検知の事例を報告する。

4.1 運用状況

Table 2 に導入後約3年間(2020年4月~2023年2月)で不具合予兆検知をした件数及びその原因となる寄与度1位のデータ項目種別を示す。総検知数は35件であった。なお、故障警報・現場巡視等で瞬時に故障を把握したものの、定期点検により故障を把握したものの、データ欠損によるもの等は集計件数から除いている。次に不具合予兆検知に至った理由について集計し、その内訳を Fig.10(円グラフ内側)に示す。故障・異常が22件で全体の約6割を占める。これは、対象建物が竣工後12年を経過しており、大小様々な設備機器類の不具合が発生する時期に来ていることも関連しているものと考えられる。残り13件は利用形態の変化が理由となっている。なお利用形態の変化とは、室のレイアウト変更に伴うエネルギー消費量の増減や、イベント等で一時的に室を利用する人数・時間帯が変わるなど、普段と異なる利用形態により記録データに変化があった場合を示す。次に故障・異常の理由を細かく見ると (Fig.10 円グラフ外側)、データ項目を計測しているセンサー類自体が故障して異常な数値を記録することで検知し、センサー類の不具合を直接発見するケースが10件であった。一方でデータ項目の数値の増減により検知し、その数値の変化を足がかりとして管理員が推定し、関連する設備機器等の不具合を間接的に発見したケースが12件あり、その割合は検知総数の約1/3を占める。以上のことから、故障警報・現場巡視等の日常管理に加えて、本システムの活用により BEMSデータを網羅的に分析・監視することで、平均1件/月のペースで不具合の発見につながったことを確認した。

4.2 太陽光発電設備の検知事例

太陽光発電設備(以下、PV発電設備)の検知の事例を示す。対象建物には設備容量700kWの太陽光パネルを設置しており ZEB 達成に寄与している。その PV 発電設備関連の BEMS データ計26項目(各システムの発電電力量、日射量、気象データ他の1時間毎データ)を用いて PV 発電設備の監視を行っていたところ、2021年10月18日のデータに異常検知した(Fig.11)。要因分析チャートを確認すると、乖離度を押し上げている原因は太陽光発電D系統電力量であることがわかった(Fig.12)。BEMS元データを確認すると(Fig.13)、10月18日はその数日前(14、15日)と同程度の日射量があり晴天にもかかわらず、太陽光発電D系統の発電電力量が低下していた。またその2日後の10月20日も同様の傾向であった。現地を確認したところD系統のパワーコンディショナから普段と異なる異音が発生しており異常が見つかった。何らかの故障が

Table 2 不具合予兆検知の件数と寄与度1位のデータ項目種別

Number of Fault Sign Detection Cases and Data Item with the Highest Degree of Contribution			
データ項目種別	件数	データ項目種別	件数
電力量	17	井水使用量	2
熱量	5	冷温水温度	2
上水使用量	4	その他	2
流量	3		
不具合予兆検知の件数合計			35

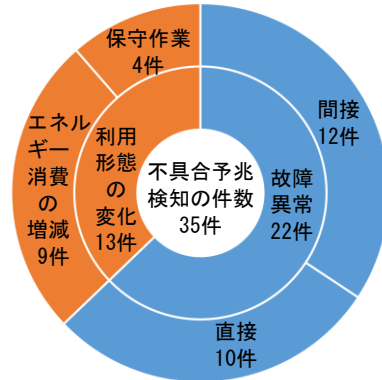


Fig.10 検知した不具合理由の内訳 Breakdown of Reasons for Fault Sign Detection

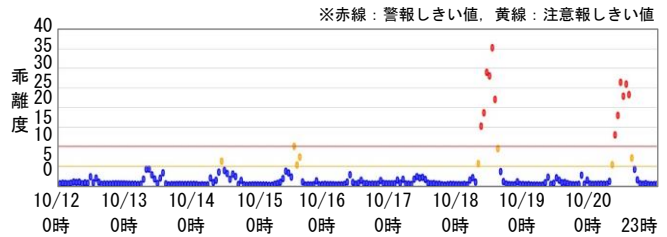


Fig.11 不具合予兆検知事例 太陽光発電設備 Example of Fault Sign Detection Photovoltaic Power Generation

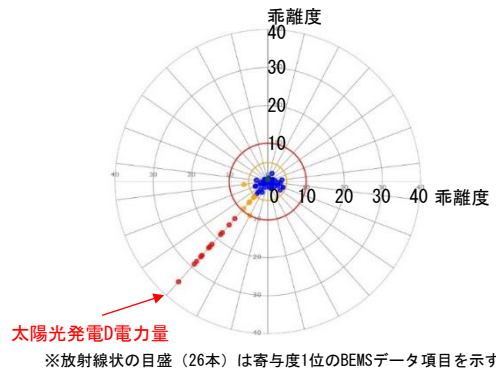


Fig.12 要因分析チャート (太陽光発電設備) Chart for Factor Analysis (Photovoltaic Power Generation)

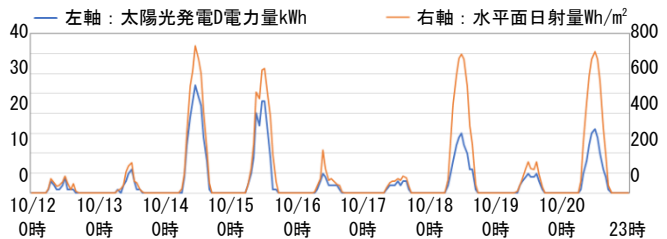


Fig.13 太陽光発電D電力量と水平面日射量 Amount of Photovoltaic Power Generation D and Horizontal Solar Radiation

起きて発電効率が低下していることが発見できた。

4.3 水消費量の検知事例

水消費量の検知から空調用バルブの故障を発見した事例を示す。水系統関連の BEMS データ計 40 項目（上水、井水、雨水他の各水消費量、気象データ他の 1 日毎データ）を用いて水消費量の監視を行っていたところ、2022 年 5 月 30 日から 1 か月間に複数回異常検知した (Fig.14)。要因分析チャートを確認すると、乖離度を押し上げている原因は空調用補給水量であることがわかった (Fig.15)。BEMS 元データを確認すると (Fig.16), 前年の冷房期間（6～9 月）には空調用補給水がほとんど消費されていないにもかかわらず、2022 年は 5 月 30 日から 1 か月間に 6～18m³/日消費する日が複数回あった。また調査の結果、空調用補給水量が多い日は冷房運転した日と重なり、空調運転時間帯のみに消費していることが判明した。現地を確認したところ温水系統の切替バルブが故障しており、暖房から冷房切替時に完全に閉まり切っていなかった (Fig.17)。これにより、この系統につながる中温冷水タンク部分で水がオーバーフローしていたことを発見した。

5. まとめ

BEMS データを活用した不具合予兆検知システムを開発するにあたり、開発段階での検討事例や実建物における運用後の検知事例等を紹介した。検証を通じて得られた知見を以下にまとめる。

- 1) MT 法を用いて複数の BEMS データから求められる 1 つの乖離度という指標を監視することにより、そのデータ群のパターンの変化を捉え、不具合の兆候を検知することが可能。
- 2) 機器運転時のデータのみを分析するなど、監視対象データの工夫により検知精度向上が期待できる。
- 3) 故障警報・現場巡視等の日常管理に加えて、蓄積された BEMS データをこのシステムで分析・監視することで、気づきにくい不具合の早期発見につながる。

本システムの高度化、様々な建物への適用・普及により、建築分野におけるカーボンニュートラルへの貢献の一助としたい。

参考文献

- 1) “第六次エネルギー基本計画”, 経済産業省, 2021-10. <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>, (参照 2022-03-22)
- 2) 立林, 他: 入門 MT システム, 日科技連出版社, 263p., 2017.1
- 3) 手島, 他: MT システム入門, 標準化と品質管理, Vol. 70, No. 7, pp. 2-7, 2017.7

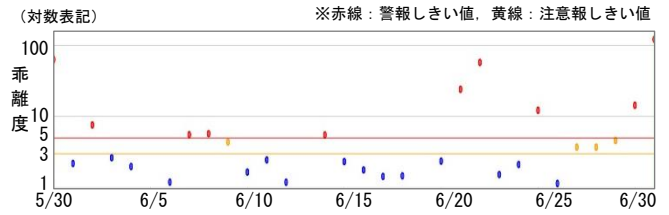
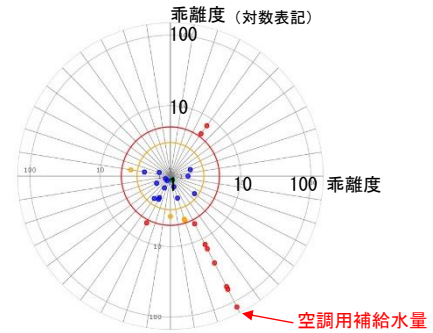


Fig.14 不具合予兆検知事例 水消費量
Example of Fault Sign Detection
Water Consumption



※放射線状の目盛 (40本) は寄与度1位のBEMSデータ項目を示す。
Fig.15 要因分析チャート (水消費量)
Chart for Factor Analysis (Water Consumption)

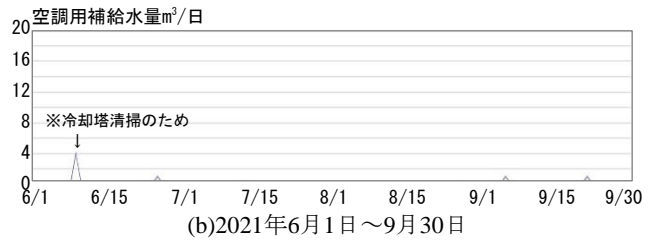
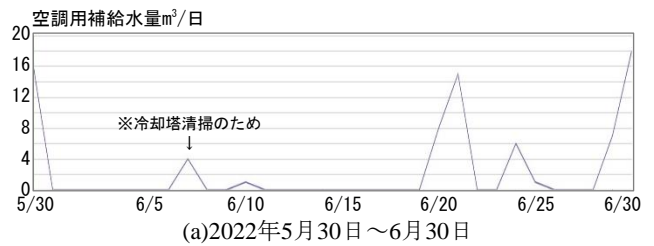


Fig.16 空調用補給水量
Makeup Water Consumption for Air-Conditioning

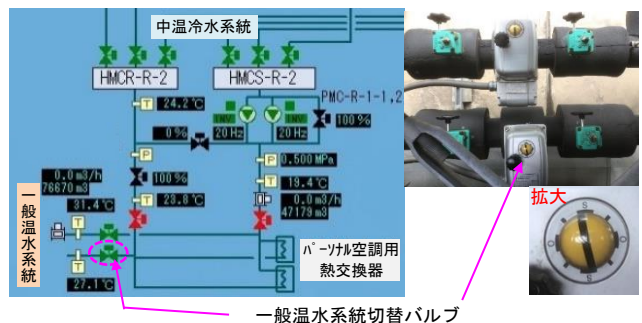


Fig.17 故障した一般温水系統切替バルブ
Faulty Hot Water Switching Valve for Heating