

# プラント安定稼働と発電コスト低減を実現する デジタルソリューション:TOMONI®導入事例

Improving Plant Stability and Reducing Power Generation Costs:  
An Implementation of TOMONI® Digital Solutions



平田 英治\*<sup>1</sup>  
Eiji Hirata

原口 英剛\*<sup>2</sup>  
Hidetaka Haraguchi

森本 健太郎\*<sup>3</sup>  
Kentaro Morimoto

山内 貴洋\*<sup>1</sup>  
Takahiro Yamauchi

中島 正貴\*<sup>1</sup>  
Masataka Nakajima

社本 晃大\*<sup>1</sup>  
Akihiro Shamoto

本報では、プラントの安定稼働と発電コストの低減を目的とした、デジタルトランスフォーメーション(DX)推進事例を紹介する。三菱重工業株式会社は、遠隔監視の基盤として開発した異常検知やプラント性能診断等のアプリケーション提供を通じ、プラント設備の安定稼働の実現や、熟練技術伝承による運転・運用に関わる負担軽減を支援した。特に、当社が納入した複数ユニットを抱えるお客様向けに初めて提供した燃料配分の最適化等のアプリケーションでは、お客様から伺った発電所の運用や制約事項を反映した DX 推進活動となった。今後も多種多様な機械製品をデジタル技術で“かしこく・つなぐ”ことにより、機械システム同士が協調するエコシステムをお客様へ提案していきたい。

## 1. はじめに

近年、最新鋭のガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)プラントの需要が増加している一方で、長期間にわたり稼働している発電設備では経年劣化及び脱炭素対応という主要な課題が顕在化している。特に、設備トラブルの増加、維持・管理費の増加、発電効率の低下といった問題が指摘されている。三菱重工業株式会社(以下、当社)は、設計、製作から据付工事、アフターサービスに至るまで全てを自主技術で行う国内唯一のメーカーであり、これらの問題をデジタルトランスフォーメーション(DX)の推進、つまり当社が提供しているインテリジェントソリューション TOMONI®の活用により解決・サポートしている。

TOMONI は、約 25 年前から開始しているガスタービン遠隔監視の実績をもとに、TOMONI クラウド基盤上に運転データを収集、異常検知や性能診断、ダッシュボードによる短期・中長期の運転状態や運用を把握できる機能を備えている。一方で、お客様は、オペレーション&メンテナンス(O&M)の高度化、DX 推進によるプラントの起動停止を含む安定稼働や発電コストの低減を期待している。その期待に応えるために TOMONI を活用し、お客様自身が持つ O&M ノウハウと当社のガスタービン及びスチームパワープラントの設計・運用実績、さらに AI や機械学習などのデジタル技術の要素を融合することで期待に合致した DX を推進、成功へと導くことができると考える。<sup>(1)~(12)</sup>

本報では、瀬戸内共同火力株式会社に提供開始した TOMONI アプリケーションを中心に紹介し、どのようにお客様の課題と向き合い、ともに解決しようとしているか実際に提供したコンテンツを用いて紹介する。なお、今回紹介する事例は特定のプラントに導入したものではあるが、幅広く展開できる技術と考える。

\*1 エナジードメイン GTCC 事業部 サービス技術部

\*2 エナジードメイン GTCC 事業部 サービス技術部 主席技師(工学博士)

\*3 エナジードメイン スチームパワー事業部 計画部 技術士(機械部門)

## 2. TOMONI を導入したプラントの概要

### 2.1 導入プラントの紹介

本報において取り上げる導入プラントは、製鉄所の操業過程で発生する副生ガスを有効活用し、エネルギー効率の最適化と環境負荷の低減を目指している。本プラントは、最新の技術を駆使して設計された高効率なガスタービン発電設備と 50 年以上経過したボイラ発電設備を併設しており、これらの設備の効果的な活用も重要な課題となっている。まずは、本プラントの主要な特徴とその運用について触れる(表 1)。

表1 福山共同発電所 各設備の概要

|        | 原動力の種類  | 燃 料                     | 営業運転開始日     |
|--------|---------|-------------------------|-------------|
| 新 1 号機 | GTCC 発電 | 高炉ガス, 混合ガス              | 1995 年 7 月  |
| 新 2 号機 |         |                         | 2020 年 12 月 |
| 4 号機*  | 汽力発電    | 高炉ガス, 混合ガス, コークス炉ガス, 重油 | 1970 年 2 月  |
| 5 号機*  |         |                         | 1971 年 4 月  |
| 6 号機   |         |                         | 1972 年 9 月  |

\*工場送気を有する

瀬戸内共同火力株式会社 HP より抜粋<sup>(13)</sup>

これらの設備は、それぞれ異なる時期に導入され、使用される燃料や運用方法にも差異がある。特に新 2 号機は最新の技術を取り入れており、高効率な運転が可能である。一方、5 号機及び 4 号機は長年の運用により経年劣化が進んでいるものの、工場送気機能を有しており、副生ガスの有効利用に寄与している。

本プラントの運用においては、これらの設備を効果的に活用し、エネルギー効率を最適化することが求められる。また、環境負荷の低減を図るためには、各設備の特性を考慮した運転管理が重要である。次に、運用改善方針・目的を整理する。

### 2.2 当該プラントの課題, 目標

昨今、働き方改革、人材不足、技術ノウハウの伝承など、多岐にわたる問題が発生していることは、本報に限らず広く叫ばれている。これに加え、設備の経年劣化が進む一方で、具体的な設備更新の計画が見通せず、維持管理費及び重大トラブル発生リスクが増している。これらを抑制するためには、より高度な操業管理を実現させる必要がある。

このような状況を効率的に解決するため、従来の業務における無駄を省き、DX を活用してこれらの課題に取り組む。以下に具体的な取組みを示す。

#### (1) オペレーションの高度化

発電コストの低減を主要推進項目とし、各設備の燃料配分を最適化することでプラント全体の運用効率を向上させるために『燃料配分最適アプリケーション』を導入した。

#### (2) 最適点での運転継続

設備改造を伴わず、かつプラントの信頼性を維持した状態で高負荷帯の運用改善で長期的な発電コストの低減を目指すために『GTCC 最大負荷最適アプリケーション』を導入した。

#### (3) 異常の早期発見と見える化

リアルタイムモニタリングとデータ解析を同時に行うことで高度な診断を実現、異常の早期検知とプラントの安定稼働・迅速な対応に繋げるために『異常予兆検知アプリケーション (Pre-ACT)』を導入した。

#### (4) 設備状態の見える化

性能を維持するための設備保全には、適切な計画の立案が重要であり、設備の劣化など効率低下の兆候を捉え、性能回復に必要な点検や部品交換といった長期的な計画を立案できるよう、GTCC ならびにボイラ、タービン、発電機(以下、BTG)プラントを対象とした『効率監視ア

アプリケーション』を導入した。なお、ここでは“効率”はエネルギーを電力に変換する発電効率を指し、“性能”は機器の能力を示す指標としている。

以上の取組みにより、当該プラントの運用効率を向上させ、人材不足が進む中で操業管理の高度化を行うという課題を解決し、持続可能な運用を実現することを目指している。次章では、これらの取組みの具体的な実施内容について詳述する。なお、具体的な効果は、今後の運用データを確認しながら検証を進めていく。

### 3. TOMONI アプリケーションの導入事例

#### 3.1 燃料配分最適アプリケーション

当社は、持続可能なエネルギー利用を目指したエナジートランジションの一環として、エネルギーマネジメントシステム(以下、EMS)を提供している。

EMS は、総合プラントメーカーとして得た知見とノウハウを集約して開発され、設備の運転特性を反映できる制御アルゴリズムを搭載している。具体的には、クラウド上に複数の発電設備の運転特性を考慮したプラントモデルを構築し、要求事項を定義することで、要求事項を満たした最適解を繰り返し計算で導き出すシステムである。

多種燃料の高精度管理を実現する為に不可欠な技術であると共に、火力発電プラントにおいても、その安定性と柔軟性を活かしながらエネルギーコストや化石燃料使用量の削減に貢献する可能性を秘めている。この EMS の基盤技術を活用した TOMONI アプリケーションを導入した事例を紹介したい。

導入プラントに於ける燃料配分指令は、収益に直結する重要な業務であり、わずかな配分の違いが全体の効率に大きな影響を与える。従って、燃料配分指令を決定するに際し、各発電設備の基本的な効率特性を把握することに加えて、定期点検の影響や外的要因によって変動することを考慮する必要がある。また、操業は 24 時間連続稼働であり、常に燃料配分指令を決定することができる人員配備が必須であり、かつ短時間での判断を求められている。

このように高度な技術を要する燃料配分指令の決定は、これまで熟練運転員の経験に基づいて遂行されていたが、瀬戸内共同火力株式会社に提供するアプリケーションでは、EMS を活用し、要求事項を満足する効率的な燃料配分指令値を導き出すシステムを構築することができた。

本アプリケーションでは、クラウド上に複数の発電設備の運転特性を考慮したプラントモデルを構築した。今回構築したモデルは、図 1 に示すとおり 5 台中 4 台が稼働している状態(BTG1 台が予備機)を対象にしており、様々な要求事項を付加した複雑な構成となっている。参考として、定義した要求事項の代表例を以下に示す。

1. 副生ガス余剰(放散量)の削減
2. 重油使用量の削減
3. 構外からの電力供給を抑制
4. 操業に必要な電力や蒸気の供給

なお、必要に応じて、今回定義した以外の要求事項についても追加で条件定義することが可能である。

先に述べたとおり、このモデルはクラウド上に構築されたモデルであるがプラント側の運転データを連携させることで送電や送気デマンドを的確に把握することが可能であり、デマンド変化を検知して最適解を繰り返し計算で算出することが可能となっている。

今回の導入では、5 台中 4 台が稼働している状態に限定したモデル構築に留まっているが、活用範囲を広げることで、より多様な運転状態を想定した更なるモデル構築も計画中である。

つまり、定検工事や高炉停止を含め短期停止タイミングを想定した包括的なシステムへ改善することを目指している。併せて、過去の運転データに基づく AI を活用した燃料配分予測や、副生ガスの発生予測などの技術活用も検討している。

本節で紹介した EMS は、総合プラントメーカーとしての知見を活かし、単なる可視化を超えた“運用最適化”を実現することで、オペレーションの高度化に貢献可能な技術である。

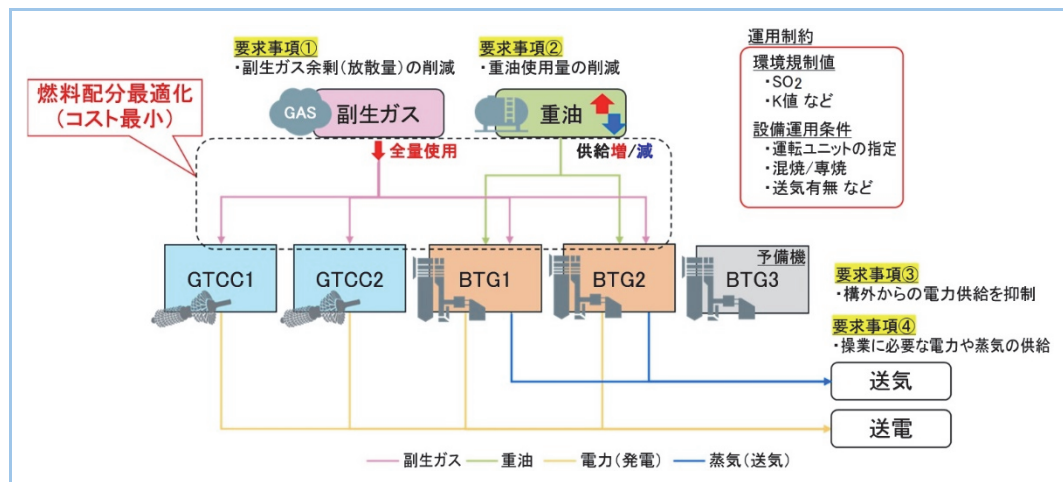


図1 導入モデル概略図

### 3.2 GTCC 最大負荷最適アプリケーション

ガスタービンは、燃焼温度を決めて設計されている。目標負荷に到達する際は、設計時に規定した燃焼温度を超えないように制御されており、その燃焼温度で運転されている状態を温調運転と呼んでいる(図2)。一般的に温調運転時は、効率が最大となるので、温調運転かつ目標負荷を満足できる状態が望ましい。

しかし、ガスタービンの劣化状態などの影響により、目標負荷に到達する前に温調運転になる場合や目標負荷に到達しても温調運転にならない場合がある。

目標負荷に到達するための制御パラメータとして、入口案内翼(以下、IGV)の開度設定値がある(図3)。

通常、IGV 開度は圧縮機入口温度と目標負荷により決定されるが、IGV 開度を調整することでガスタービンの劣化などの影響を相殺して、温調運転かつ目標負荷を満足した最適運転を実現することができる。

この考えを具現化するために IGV 開度を調整することができる制御ロジックの改造を実施した。制御ロジックは、以下の機能を有している。

1. 温調運転であるか目標負荷であるかを判定し、IGV 開度は閉側または開側のどちらが最適運転となるかを判断する。
2. IGV 動作は、ガスタービン以外のパラメータも監視し、起動時などの過渡的な状況を除外して、目標負荷に近い状態で静定・保持されていることを許可条件に組み込んだ。
3. IGV 開度を調整する際は、徐々に目標負荷に到達するように開度調整を行う。

このような制御ロジックにすることで、設計時に規定した燃焼温度を超過させず、温調運転かつ目標負荷を両立することが可能となった。更に、この効果を可視化するために TOMONI クラウドに接続された運転データを活用している。

TOMONI クラウド接続により目標負荷で最適な運転が持続しているかを把握できるだけでなく、運転データを用いた効率・出力向上量の表示が可能となっている。また、性能向上量の累積値(出力、燃料消費量)を算出し、表示する機能も有している。

今回の取組みにより、GTCC プラントの効率は改善され、経済性の向上に貢献できたと考える。

以上が、GTCC プラントにおける最大負荷最適化に向けた取組みの詳細である。

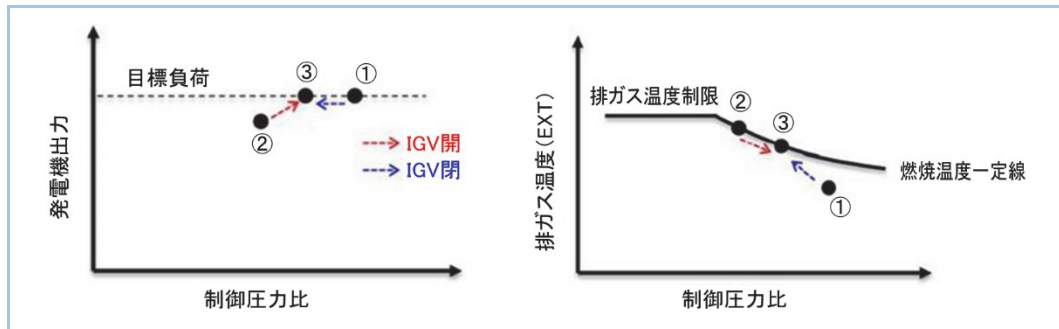


図2 当社 GTCC 特性 概念図



図3 当社ガスタービン機構 概念図

### 3.3 異常予兆検知アプリケーション(Pre-ACT)

2025 年 5 月現在、当社は GTCC プラントやスチームパワープラントを中心に、全世界で 199 台の火力発電プラントに遠隔監視サービスを提供している。このサービスは、ガスタービンの LTSA (Long Term Service Agreement) に代表される発電プラントの総合メンテナンスサービスや稼働率保証を支える基盤として重要な役割を果たしている。

遠隔監視における最も重要な目的は、トラブルの未然防止であり、当社ではガスタービンや蒸気タービンのリアルタイム監視を強化し、トラブルに繋がる異常兆候を素早く捉えている。

異常予兆を捉えるためには、トレンド監視のみならず、パラメータ相関の監視が有効である。しかしながら、発電プラントの監視点数は膨大であり、すべてのパラメータ相関を少人数で監視し続けることは困難である。

そこで当社は、パラメータ間の相関をマハラノビス距離という一つの指標で確認することにより、TOMONI に接続されている多くのプラントに対して、異常の兆候をリアルタイムで監視することを可能としている。つまり、MT 法(マハラノビス・タグチ法)を適用した異常予兆検知システム(以下、アプリケーション名“Pre-ACT”)である。

当社は、この独自で開発した Pre-ACT を運用し、多くの実績を積み上げると共に、実際の発電所運用に合わせた機能改修も行い、絶えずシステムの有効性を高めてきた。

今回、お客様に本システムを採用頂けた背景には、当社が GTCC プラントの異常検知技術において長期間の実績を有していることを評価頂いたことがある。一方で近年、全世界的に発展したクラウド技術を活用し、お客様ご自身でシステムを運用したいというニーズがあった。これらを踏まえ、従来当社が Pre-ACT の初期設定や運用中の調整などを実施するのに用いていた、当社内用のアプリケーションである“Pre-ACT Tuning”をお客様にも公開し、お客様自身でも Pre-ACT の運用を行えるようにした。この Pre-ACT Tuning では検知しきい値をはじめとした検知感度等の調整を行うことができる。

Pre-ACT Tuning のお客様への公開にあたり、専門用語の表現やユーザーインターフェースについても見直しを行い、MT 法に関する専門知識を持たない人でも使いやすく汎用的なものとした。これにより、お客様の判断の下、GTCC プラント設備に限らないあらゆる機器に対して当社で

実績のある予兆検知アプリケーションを適用することが可能となった。実際に、今回の活動を通じて GTCC プラントだけでなく BTG プラントに対しても Pre-ACT を提供できた(図 4)。

このように、クラウド環境を活用したリアルタイムモニタリングとデータ解析を実現した Pre-ACT は、当社のみならずお客様のノウハウを反映する活用が可能となった。これからの多様な活用により、お客様へ貢献できることを期待する。

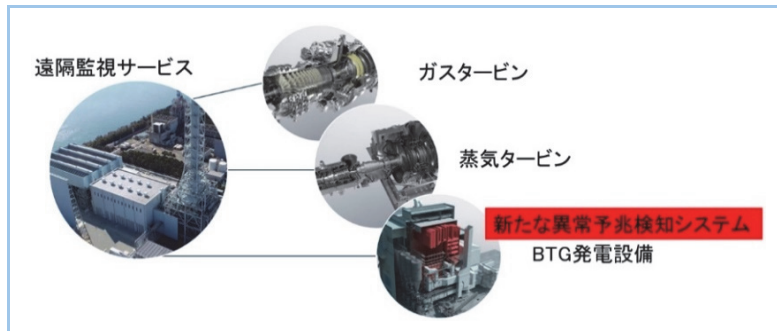


図4 異常予兆検知システムの対象機器

### 3.4 効率監視アプリケーション

#### 3.4.1 効率監視アプリケーション(GTCC 性能診断)

GTCC プラントは、その高効率性と低排出ガス特性により、発電事業のみならず、製鉄所の副生ガス利用においても重要な役割を果たしている。GTCC プラントの効率的かつ安定的な運用を実現するには、ガスタービンをはじめとする主機の状態を把握し適切にメンテナンスすることが不可欠である。当社はこれまでに、発電設備メーカーの知見とデジタル技術を融合し、GTCC プラントの設備状態を評価する GTCC 性能診断アプリケーションを開発してきた。本アプリケーションは、GTCC プラントの基準値と、収集した運転データに基づく効率計算値により劣化量を算出し、経時的な推移をモニタリング可能とする。これは、物理的な構造物やプロセスをデジタル空間に再現してシミュレーションなどを行う、デジタルツインの概念を体現したものであり、当社内における GTCC プラント分析や改良検討のために活用することに加え、お客様に対しても所有設備の保全計画に役立てていただくことを期待し、天然ガスや高炉ガスなどを燃料とする火力発電所へのアプリケーション導入を進めている。

本アプリケーションのウェブ画面イメージを図 5 に示す。本アプリケーションは、画面左側中央にはガスタービンの出力または効率のトレンドグラフを、その下のグラフにはガスタービン構成機器の劣化の推移を表示する。さらに、性能評価を用い設備の状態を A(上位)から E(下位)の 5 段階で自動判定し、画面左側上部のパネルは、現時点で最も下位の判定結果を表す。また、画面右側にはガスタービン構成要素の評価結果をリスト表示し、劣化が認められ B 判定以下となった場合はその推定要因を併記する。これにより、プラントの運用状態を適切に捉え、設備の保全計画の策定や次回の機器点検項目の検討の一助となることを目指している。



図5 GTCC 性能診断アプリによるガスタービン健全性評価の画面イメージ

### 3.4.2 効率監視アプリケーション(BTG 性能診断)

BTG プラントは製鉄プロセスから生成される副生ガスを燃料として活用している。また、蒸気の一部は発電だけでなく、製鉄プロセス用蒸気(工場送気)としても利用できるため、製鉄所の操業には欠かせない設備である。

今回、効率監視アプリケーションを開発するにあたり、ポイントとなった点を紹介したい。

- ① 今回開発したアプリケーションでは、発電出力、工場送気量等を指定することで、同等の運転状態における性能計算値を抜粋し、時系列データとしてグラフ化できるようにした。
- ② プラント主機であるタービン、ボイラに加え、給水加熱器や復水器等の補機も性能計算・監視できるようにした。中には計器が設置されておらず、性能計算に必要な計測データが不足している機器もあったが、他データとの相関性を利用した推定値を用いることで、性能計算を可能なものとした。

以上より、“BTG プラントの性能劣化傾向の可視化”と“性能劣化の要因推定”が容易になり、適切なメンテナンス計画の立案や、プラント性能の維持・向上、設備更新の検討など、発電所運用計画をサポートできるようになった。

## 4. まとめ

本報では、GTCC プラントを中心に、デジタルトランスフォーメーション(DX)やクラウド環境を活用した効率的かつ持続可能なエネルギー利用の取組みを紹介した。熟練技術の伝承や経年劣化した発電設備の課題に対して、当社のインテリジェントソリューション TOMONI を通じて“燃料配分最適アプリケーション”、“GTCC 最大負荷最適アプリケーション”、“異常予兆検知アプリケーション(Pre-ACT)”、“効率監視アプリケーション(GTCC/BTG 性能監視)”などの技術を提供している。

今回の瀬戸内共同火力株式会社への導入事例では、異常予兆検知システムの活用によりトラブル未然防止、GTCC・BTG プラントの性能診断や GTCC プラントの最大負荷最適化に向けた取組みを通じて、プラント全体の運用効率向上に寄与できると期待しているが、具体的な効果については今後の運用データを確認しながら検証を進めていく予定である。

また、各設備の特性を活かした運用によりエネルギー効率の最適化と環境負荷の低減を実現した。特に、燃料配分最適アプリケーションの導入により、副生ガスの有効利用や化石燃料消費の抑制が期待される。さらに、今後も、当社の技術ノウハウとDXを組み合わせることで、持続可能なエネルギー社会の実現に更に貢献していく。

TOMONI<sup>®</sup>は、三菱重工業株式会社の日本及びその他の国における登録商標です。

## 参考文献

- (1) 三菱重工業株式会社, “かしこく・つなぐ”でお客様のビジネスモデルを変革“デジタルイノベーション本部”を新設  
<https://www.mhi.com/jp/news/22062001.html>
- (2) デジタルトランスフォーメーション銘柄(DX 銘柄)  
[https://www.meti.go.jp/policy/it\\_policy/investment/keiei\\_meigara/dx\\_meigara.html](https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/investment/keiei_meigara/dx_meigara.html)
- (3) 石垣博康ほか, カーボンニュートラルに向けたプラント設備 O&M のデジタル支援, ペトロテック石油学会情報誌, (2023) VOL.46 NO.11
- (4) 石垣博康ほか, 激変する時代の発電プラントデジタルゼーション ～脱炭素, 燃料費高騰, スマート保安, AI, 火力原子力発電技術協会 Vol74 No10(2023)
- (5) 後藤大輔ほか, 生成 AI を活用した TOMONI<sup>®</sup>のスマート保全と遠隔監視:現状と将来展望, 三菱重工技報 Vol.60 No.4(2023)
- (6) 田中徹ほか, カーボンニュートラルの達成に向けたインテリジェントソリューション TOMONI<sup>®</sup>の最新の

- 取組み, 三菱重工技報 Vol.60 No.3 (2023)
- (7) 安形友希子ほか, 重要インフラの高度保守運用を実現するインテリジェントソリューション TOMONI®, 三菱重工技報 Vol.59 No.3 (2022)
- (8) 梶田美紗ほか, 脱炭素社会に向けた火力発電プラントの ICT 活用と新技術の開発について, 配管技術 No.3 (2022)p.59-66
- (9) 石垣博康ほか, TOMONI<sub>TM</sub>による発電プラントのデジタル変革, 三菱重工技報 Vol.58 No.3 (2021)
- (10) 安威俊重ほか, デジタルソリューション TOMONI による発電プラント自動自律化と脱炭素社会への貢献, 日本ガスタービン学会誌第 49 巻, 5 号 (2021)p.46-51
- (11) 高木洋和ほか, 時系列 XAI 技術による電力需要予測モデルの説明性獲得と予測性能向上, 三菱重工技報 Vol. 61 No. 3 (2024)
- (12) 磯部勇介ほか, カーボンニュートラル型エネルギーマネジメント技術の開発, 三菱重工技報 Vol.59 No.4 (2022)
- (13) 瀬戸内共同火力株式会社 事業案内 福山共同発電所  
<https://www.setouchi-kyouka.co.jp/business/fukuyama.html>