

# 研 究 期 報

No. 108

平成 30 年 6 月

四 国 電 力 株 式 会 社  
株 式 会 社 四 国 総 合 研 究 所

## 研究期報 108号 目次

画像伝送手法による水素火炎の可視化技術 .....	1
Hydrogen Flame Visualization Technique Using an Image Transmission Method	
ストップホールとボルト締め併用による疲労き裂抑制効果の評価 .....	7
Evaluation of Fatigue Crack Suppression Effect by Combining Stop Hole Method and Bolting	
レーザ走査による貯炭レベル測定装置の開発 .....	14
Development of measuring equipment for coal volume using laser scanning	
V P P 技術を使った新たな住宅向けサービス（第3報） .....	21
The new residential services with Virtual Power Plant technology (the 3rd report)	
鉛蓄電池代替用リチウムイオン蓄電池の評価結果について .....	37
The test result of the alternative lithium-ion battery for lead-acid battery	
OTユニットにおけるパウダースケール対策技術の検討（第1報） －LPドレン水の水環境変更等によるテストピース耐食性評価－ .....	43
Study on Countermeasure Technique for the Powdery Scales Brought over into the OT Operation Boilers	
- Evaluation of the water quality improvement effect of low-pressure heater drain system by the corrosion test-	

---

---

## 画像伝送手法による水素火炎の可視化技術

---

---

### 目 的

通常の状態では視認することのできない水素火炎を確実に検知・検出する技術を提供することにより、水素ステーションなどの水素インフラの運用におけるトラブルの未然防止や、トラブル発生時の迅速で効果的な対応に資する。

### 主な成果

#### 1. 水素火炎の可視化に適する波長領域

水素火炎のスペクトル測定により、1,350～1,500 nmの近赤外光波長領域に、燃焼によって生成した高温水蒸気の強い自発光が存在することを新たに見出した。当該波長領域では太陽光のスペクトル強度が小さいことに鑑み、適切な波長帯域のバンドパスフィルターを用いることにより、水素火炎の誤検知や撮像時の外乱要因となる太陽光の影響を容易に排除することのできる水素火炎可視化手法を提案し、フィールド試験により当該手法の実用性を実証した。

#### 2. 水素火炎判定条件の重畳化

微弱な紫外光に反応する紫外線検知管を搭載する市販の炎検知器は、紫外センサーとしては正動作であっても、炎検知器としては誤動作であるケースが多いことに鑑み、水素火炎の可視化情報と炎検知器の動作信号が予め設定した閾値を満たした場合にのみ水素火炎と判定する「水素火炎判定条件の重畳化」を提案し、フィールド試験により当該提案の妥当性を検証した。

#### 3. 画像伝送手法

危険区域内の画像情報を安全に取得するために、一個の対物レンズで集光した光を波長の異なる可視光と近赤外光に分光し、各々の光を専用のイメージファイバ（マルチコア光ファイバ）で安全な領域まで導光する画像伝送手法を提案し、フィールド試験により当該提案の実用性を実証した。

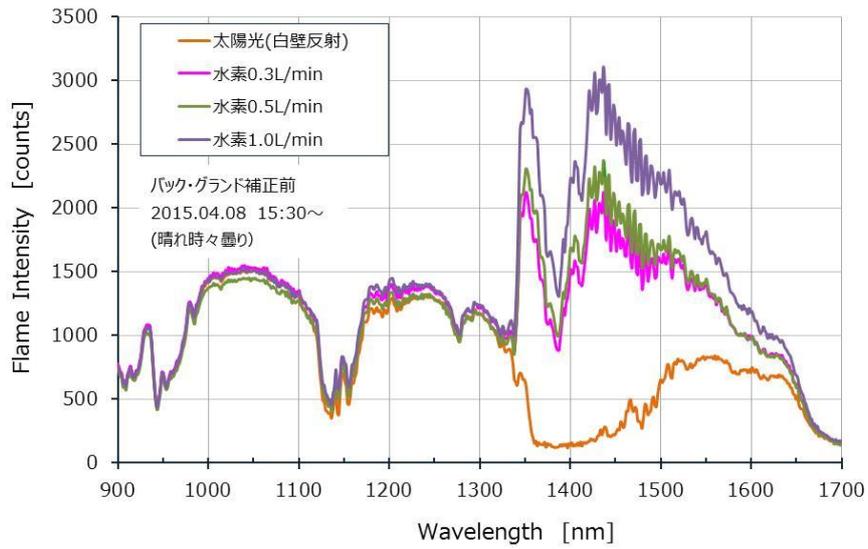


図1 水素火炎と太陽光のスペクトル特性



図2 画像伝送システムの集光部

研究担当者	三木啓史, 星野礼香, 市川祐嗣, 荻田将一, 杉本幸代, 朝日一平 (株式会社四国総合研究所 電子技術部)
キーワード	水素火炎, 発光, 可視化, スペクトル, 炎検知器, OHラジカル, 分光
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp <a href="http://www.ssken.co.jp/">http://www.ssken.co.jp/</a>

[無断転載を禁ず]

---

---

## ストップホールとボルト締め併用による疲労き裂抑制効果の評価

---

---

### 目 的

材料の高経年化により疲労き裂の発生やき裂の進展・成長が想定される。仮に、き裂が発見された場合でも、破損に至るまでの寿命を延伸することができれば応急処理として有効な手法となる。簡便な方法として、「ストップホール法」が使われることがあるが、その有効性や評価方法についてはあまり検討されていない。そこで、ボルト締め併用も含め、検討したので報告する。

### 主な成果

#### 1. 実験から得られた知見

ストップホールは有効であるが、き裂長さが長くなると、ほとんど効かなくなることもある。ボルト締めにより補強する手法についても、き裂長さや使用するワッシャーにより効果が異なることが明らかになった。

#### 2. 寿命延伸効果の評価法

き裂の開口変位から疲労き裂発生の有無を評価する式を導出した。これを実験結果に当てはめたところ、寿命延伸効果を正確に評価できることがわかった。

#### 3. 円板ワッシャーの有効性

ボルト締めには、円板ワッシャーで両側から挟みこむ方法が有効であり、今回の試験条件では、直径 30mm、板厚 5mm の円板ワッシャーをボルト締付トルク 35Nm 以上で締付けた場合に有効性があると評価された。また、円板ワッシャーの板厚が薄い場合には、面圧分布が均一でなく、有効性が劣ることがあるため、円板ワッシャーの板厚の選定が重要であることがわかった。

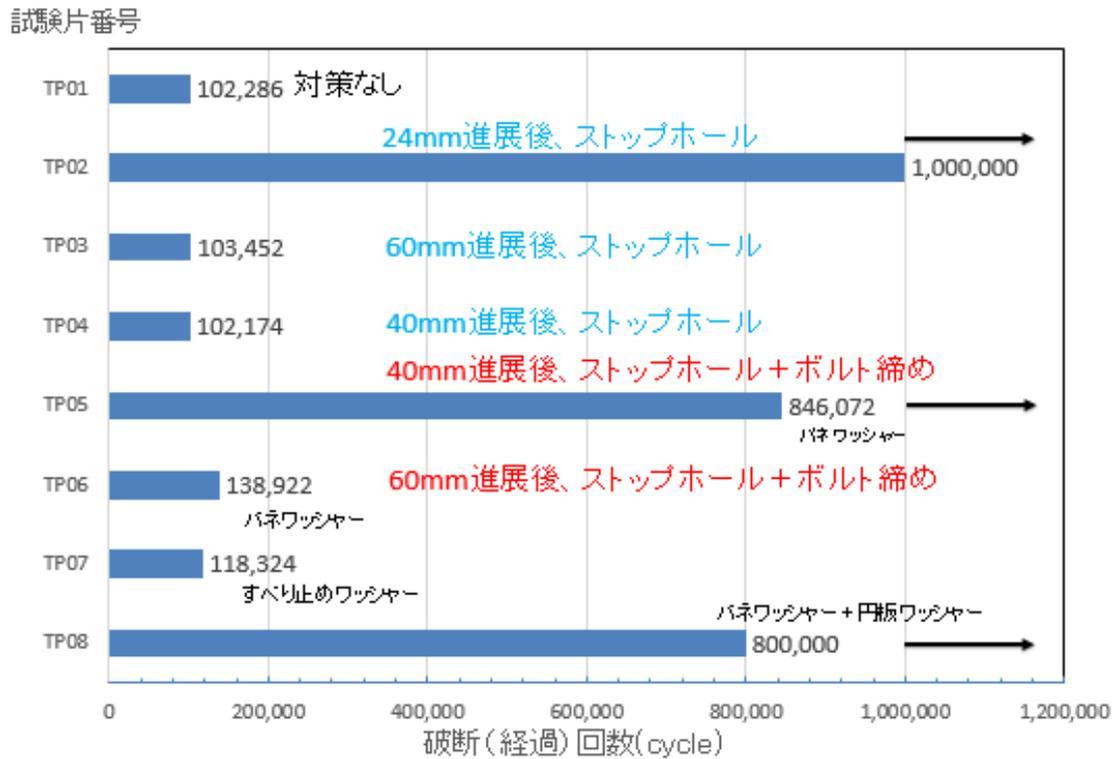


図 1 疲労き裂進展試験結果

研究担当者	松佐利治, 岩田正純, 野口新二 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部)
キーワード	ストップホール, 疲労, き裂停留
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp <a href="http://www.ssken.co.jp/">http://www.ssken.co.jp/</a>

[無断転載を禁ず]

## レーザ走査による貯炭レベル測定装置の開発

---

---

### 目 的

従来から石炭火力発電所では、超音波式レベル計(常設装置)とメジャー測定(手作業)による9個所の平均高さから、サイロ内石炭の体積量を計算して管理している。しかし、サイロ内の貯炭形状は複雑であるため、測定精度や再現性が十分ではない。そこで、貯炭体積量を高精度に測定でき、サイロ内貯炭形状を可視化できるレベル測定装置を開発した。

### 主な成果

サイロ内の石炭表面をレーザ走査し、その貯炭形状から貯炭体積量を自動算出する装置である。設定した時間に、自動でサイロ内状態を認識して、最適なレーザ走査パターンによる測定を行い、体積量算出と立体形状表示を行う。石炭表面温度も同時測定しており、簡易な発熱監視機能も備えている。

H29年度の試運用において、トラブルなく安定した長期連続稼働が可能であり、1年以上のメンテナンスフリーであることが確認でき、現在は石炭火力発電所で本運用されている。

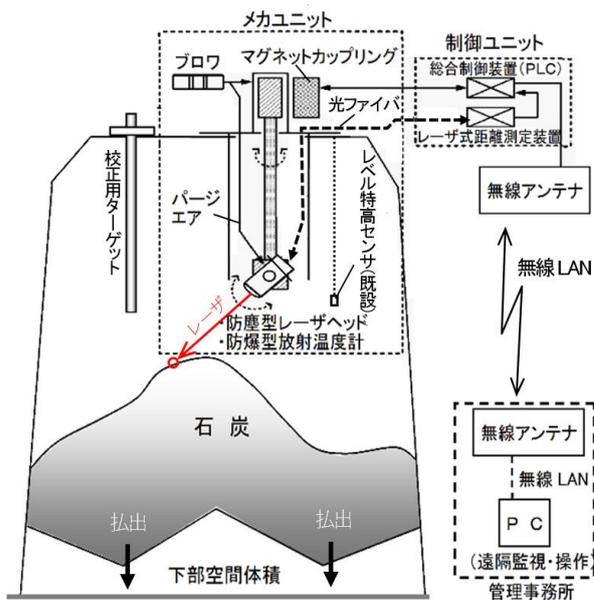


図1 装置構成図



図2 装置外観(装置上架時)

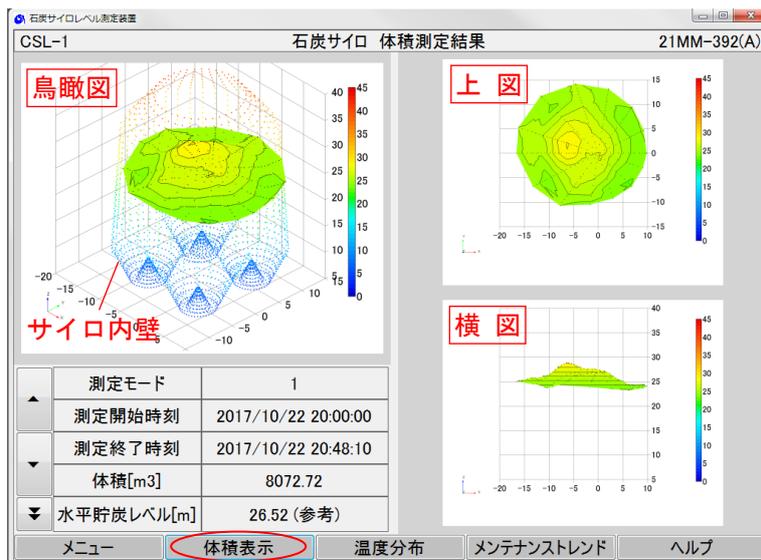


図3 測定結果

研究担当者	高橋克征, 宮崎習 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部)
キーワード	石炭体積測定, レーザ計測, 発熱監視, 防爆措置, 粉じん汚損防止
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

---

---

## VPP技術を使った新たな住宅向けサービス(第3報)

---

---

### 目 的

VPP 技術を使った住宅向けサービスの具体的な実施方法として、入手容易な気象庁天気予報を用いた太陽光発電電力予想方法、住宅需要予想方法を検討した。さらに、これらを使ったエコキュート・蓄電池運転計画策定方法について検討した。

### 主な成果

#### 1. 太陽光発電・住宅需要予想

- ・個々の住宅の発電実績データと天気予報レベルの天候実績および予報で、実用レベルの太陽光発電電力予想は可能である。ただし、天候の地域特性の配慮は必要である。
- ・個々の住宅の需要実績データを、温度感度の高い空調需要、給湯器（エコキュート）需要、年間を通してほぼ一定のその他需要の3要素に分けて分析することで、実用レベルの住宅電力需要予想は可能である。

#### 2. エコキュート運転時間帯調整

- ・昼間シフト時のエコキュート運転時間帯は、夜間と昼間に分割し、それぞれの運転時間帯は電力需給状況に合わせて調整することで、電力需給調整と住宅の経済性を両立できる。

#### 3. 蓄電池運転調整

- ・太陽光FIT 買取り終了住宅での太陽光余剰電力有効活用のための蓄電池運転は、グリーンモード（余剰電力充電）を基本とし、悪天候による蓄電不足時に夜間に適切量充電することで対応できる。
- ・太陽光発電容量に対して蓄電池容量が相対的に小さい場合は、自然体では早い時刻に満充電となるため、電力需給状況に合わせて充電開始時刻を調整することができる。同様に電力需給状況に合わせて夜間充電時間帯の調整ができる。
- ・現状の夜昼格差の大きい電力単価であれば、夜昼需要シフトのための夜間充電は有効であるが、単価差が小さくなると夜間充電の意味がなくなる。この場合蓄電池設置の利益が小さくなり、必要蓄電池容量も小さくなる。
- ・蓄電池に取引用電力量計を設置し、受電点電力量計（スマートメータ）計量値から蓄電池充放電電力量計量値を差し引くことで住宅の送受電電力量を計測できる。2個の取引用電力計計測値で蓄電池を外部制御で充放電した際の精算を行うことができる。

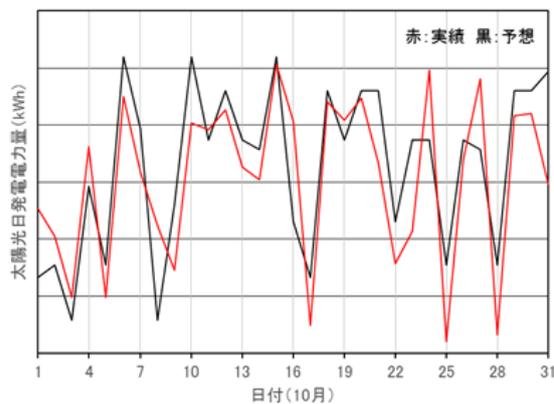


図1 太陽光日発電電力量予想の例

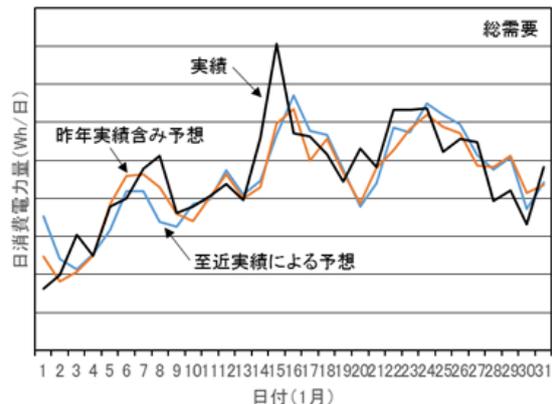


図2 住宅日需要電力量予想の例

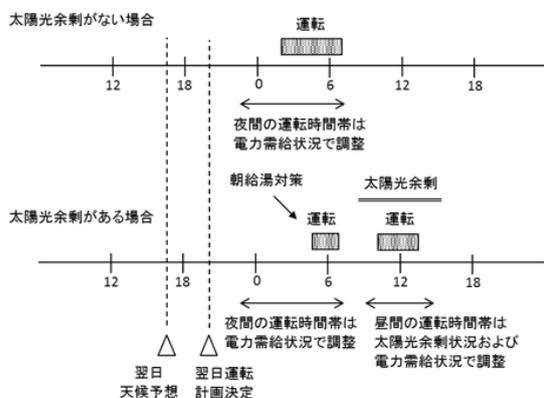


図3 エコキュート運転時間帯調整

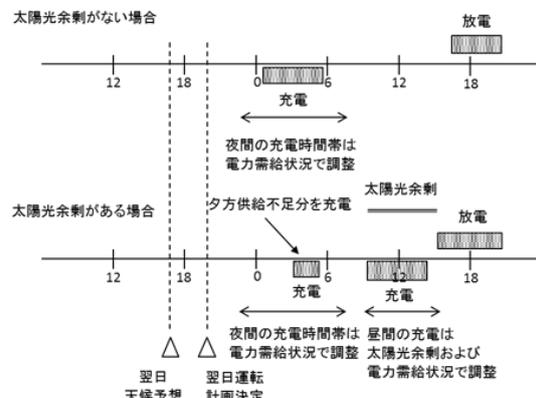


図4 蓄電池運転調整

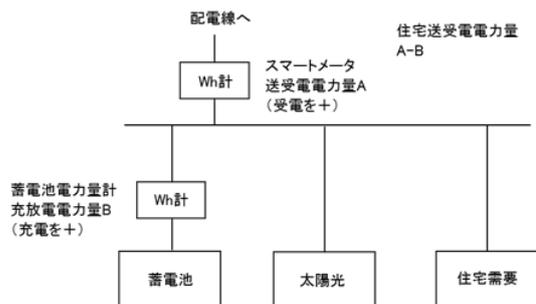


図5 住宅電力量計位置

研究担当者	多田安伸 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部)
キーワード	VPPサービス, EMS, 蓄湯式給湯器, 蓄電池, 発電予想, 需要予想
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

---

---

## 鉛蓄電池代替用リチウムイオン蓄電池の評価結果について

---

---

### 目 的

フロート充電も可能な鉛蓄電池代替用のリチウムイオン蓄電池が発売されたことから、鉛蓄電池の代替として使用可能か、停電補償用途を想定して放電容量を中心に評価を行った。

### 主な成果

#### 1. 性能評価結果

鉛蓄電池代替用のリチウムイオン蓄電池は制御装置（BMS：Battery management System）や保護遮断装置が内蔵されており、ユーザサイドでは鉛蓄電池と同等の扱いで使用できた。また、鉛蓄電池と比べ充放電特性も優れており、特に重量は約 1/3 と非常に軽量であった。（表 1， 2）複数台直並列接続した状態でも問題なくフロート充電が行え、充放電特性からは鉛蓄電池の代替として十分使用が可能と予想された。

#### 2. 放置保管試験結果

放置保管して残容量を測定したところ、鉛蓄電池に比べて放電容量減少率は約 2 倍となり、単純な放置保管には適さないことが明らかになった。（図 1， 2）これは、蓄電池制御装置（BMS）の消費電力が大きいことが原因と推定された。

#### 3. フロート充電時の寿命

フロート充電（図 3）は問題なく行えたものの、短期（6 ヶ月）の検討結果では放置保管時と比べてフロート充電時の放電容量減少率が約 2 倍になった（図 4）。フロート充電時の期待寿命は放電容量が初期値の 70% になった時点を寿命とすると、期待に反して短い 7～8 年となり、鉛蓄電池と大差ない結果となった。

常用電源と蓄電池の電圧差とダイオードを使った常用電源バックアップなどフロート充電ではなく放置保管（定期的に補充電）で停電補償する方法も検討に値すると考えられ、使用方法も含めた長期にわたる評価試験が必要である。

表1 評価に使用した蓄電池の仕様

項目	鉛代替リチウム	鉛	リチウム
電圧(V)	13.2	12	22.2
放電容量(Ah)	35	50(0.2C) 33(1C)	20
放電レート(C)	6	1	0.5
重量(kg)	6.3	19	3.9
付加機能	保護遮断機能 CANモニタ機能	なし	保護遮断機能 充電機能
直並列	4直列10並列 まで可能	可能	不可

表2 低温時の相対放電容量

	鉛代替 リチウム	鉛	リチウム
0°C容量/ 40°C容量	0.94	0.79	0.89

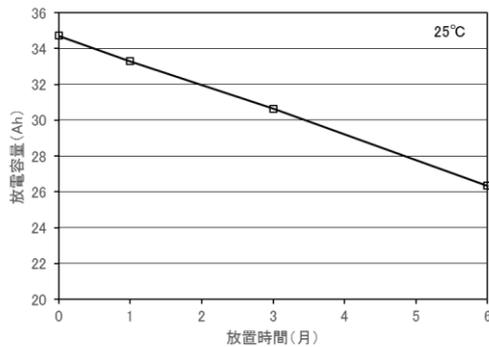


図1 鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池放置保管時放電容量

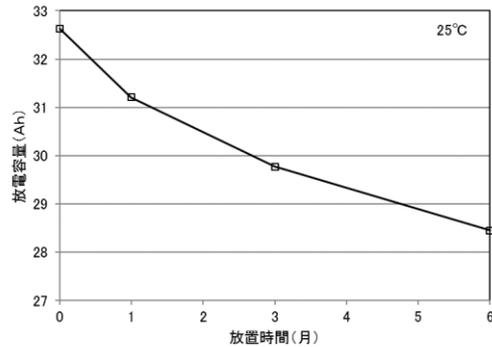


図2 鉛蓄電池放置保管時放電容量

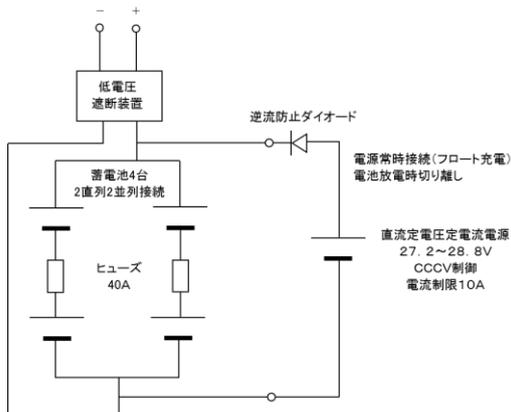


図3 フロート充電回路

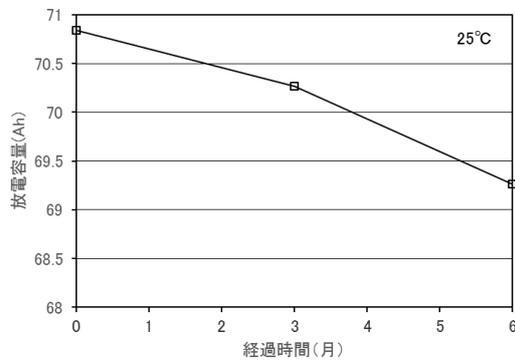


図4 鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池フロート充電時の放電容量の推移

研究担当者	多田安伸 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部)
キーワード	リチウムイオン蓄電池, 鉛蓄電池代替, 鉛蓄電池, フロート充電
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

---

---

## OT ユニットにおけるパウダースケール対策技術の検討(第1報)

### - LP ドレン水の水環境変更等によるテストピース耐食性評価 -

---

---

#### 目 的

近年、酸素処理 (OT : Oxygenated Treatment) ユニットでは、ヘマタイトが空隙の多いパウダースケールとしてボイラ蒸発管内面に厚く堆積して伝熱阻害要因となり、ボイラの熱損傷を引き起こす事例が報告されている。パウダースケールの発生源とされる低圧ヒータドレン (LP ドレン) の鉄濃度を低減する各種対策がプラントメーカから提案されているが定量的な効果は不明である。

そこで、パウダースケール対策としての機器の材質変更および LP ドレン水の水環境変更の有効性を確認するため、実機 OT ユニットの LP ドレン水を用いたテストピース耐食試験によりその効果を定量評価した。

#### 主な成果

##### 1. 材質変更の有効性

現在の LP ドレン相当の水環境 (pH8.9 かつ  $DO < 1 \mu\text{g/L}$ ) において材質の異なるテストピースを 120°C で 14 日間浸漬した結果、炭素鋼 SS400 からクロモリブデン鋼 STBA23 に材質変更すると水側への腐食量は半減し、ステンレス鋼 SUS304 では殆ど腐食しないことを確認した(図 1)。

##### 2. LP ドレン水の水環境変更による効果

pH および DO 濃度を任意に調整した LP ドレン水に炭素鋼 SS400 を 120°C で最大 1.5 ヶ月浸漬し、テストピース鋼材から水側への腐食量を調査した。その結果、現状の LP ドレン相当の低 pH-AVT 環境 (pH8.9 かつ  $DO < 1 \mu\text{g/L}$ ) で SS400 を浸漬すると水側への腐食が継続するが、水環境を変更した場合の腐食抑制効果が定量評価できた。今回の試験条件ではアンモニア注入により pH を上昇して通常 pH の AVT 環境とするより、酸素を注入して OT 環境 (pH8.9 かつ  $DO 50 \sim 100 \mu\text{g/L}$ ) へ移行した方が腐食抑制効果は大きく、現状の 1/10 程度に腐食量が低減できる可能性が示唆された。更に pH と DO 濃度をともに上昇させて高 pH の OT 環境 (pH9.6 かつ  $DO 100 \mu\text{g/L}$ ) へと移行すれば、極めて有効なパウダースケール対策となることが判った (図 2)。

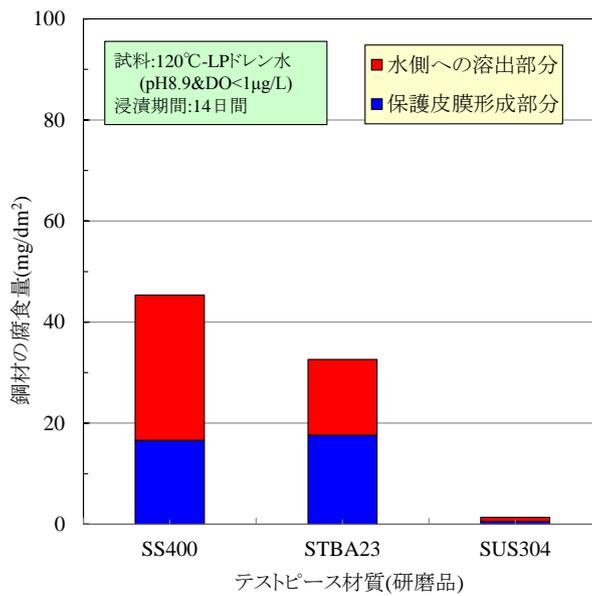


図1 現在の水環境における各種材質での腐食量

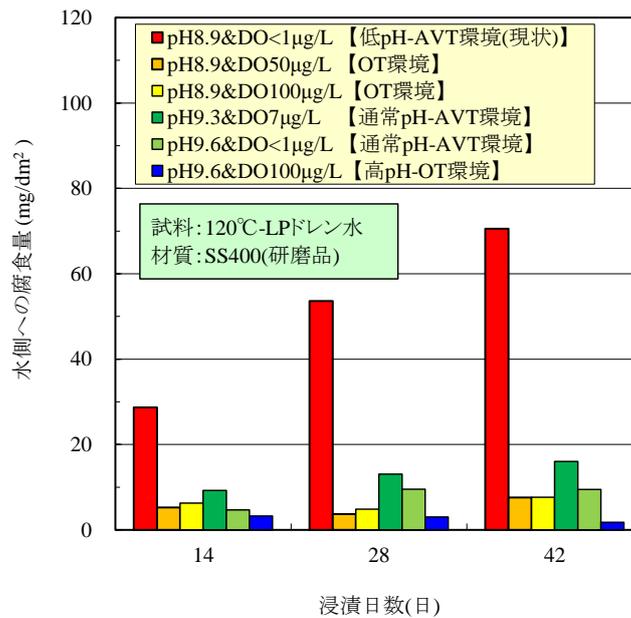


図2 各種水環境による炭素鋼の腐食抑制効果の比較

研究担当者	山地 豪, 難波正徳 (株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部)
キーワード	給水処理法, 酸素処理, パウダースケール, 低圧ヒータドレン, 耐食性
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

## 画像伝送手法による水素火炎の可視化技術

(株)四国総合研究所 電子技術部	三木 啓史
(株)四国総合研究所 電子技術部	星野 礼香
(株)四国総合研究所 電子技術部	荻田 将一
(株)四国総合研究所 電子技術部	市川 祐嗣
(株)四国総合研究所 電子技術部	杉本 幸代
(株)四国総合研究所 電子技術部	朝日 一平

キーワード : 水素火炎  
発光  
スペクトル  
分光  
イメージファイバ

Key Words : hydrogen flame  
luminescence  
spectral  
spectrum  
image fiber

### Hydrogen Flame Visualization Technique Using an Image Transmission Method

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department  
Hirofumi Miki, Ayako Hoshino, Masakazu Ogita, Yuji Ichikawa,  
Sachiyo Sugimoto, and Ippei Asahi

#### Abstract

Because hydrogen flame cannot be seen in an ordinary condition, a flame detector that reacts to ultraviolet emitted from the center of hydrogen flame is provided at sites handling hydrogen. The detector is a sensor to detect the presence of flame and give an alarm. However, it cannot identify the position of fire occurrence or ignition, nor grasp the behavior of flame. In addition, because it reacts to all light components within the detection wavelength region, such as direct sunlight, reflected light and welding sparks, an error alarm (false detection, malfunction) often occurs, which is a big problem in operating and managing hydrogen stations.

Considering these conditions, we developed a method to visualize hydrogen flame. It takes images, using a dedicated camera, of strong light emissions in a specific wavelength region that was newly found by spectrometry of hydrogen flame, and visualizes hydrogen flame through image processing. In addition, we proposed that hydrogen flame judgment conditions be superposed to detect hydrogen flame with high reliability.

In order to transmit the images taken in the area where the occurrence of hydrogen flame is anticipated to a safe area, we also developed an image transmission technique composed of optical parts and an image fiber only.

## 1. はじめに

水素火炎は、可視光波長域に発光が無いため視認することができず、水素ステーションなどの水素ガスを扱う施設には、安全・保安装置として、紫外線検知管をセンサーとして用いる炎検知器が設置されている。

当該検知器は、火炎から発せられる紫外光に反応することによって水素火炎の有無を知る手段であり、火炎の挙動や着火位置などを把握することは出来ないため、着火位置の特定や火炎挙動の把握は、専らパトロール員による現地巡視に委ねられている。社会ニーズとして絶対的な安全性が求められている中、炎検知器が動作した際に、対象区域内にパトロール員が立ち入ることは、安全性確保の観点から大いに問題がある。しかも、紫外線検知管の検知波長域が広く、窓ガラスに反射した太陽光や溶接火花などにも反応するため、紫外センサーとしては正動作であっても、炎検知器としては誤動作である事例が多い。

このような実情に鑑み、著者らは、エネルギー供給事業者や水素インフラ事業者などと意見交換し、実用的な水素火炎検知器の具備すべき仕様の一つとして、5m 遠方の 2cm 程度の微小火炎検知であることを明らかにした。

本報告では、防爆区域内で捉えた水素火炎から発せられる近赤外光をイメージファイバ(マルチコア光ファイバ)で非防爆区域に伝送して撮像する、画像伝送手法による新たな水素火炎の可視化技術を紹介する。

## 2. 水素火炎の可視化

### 2.1 水素火炎の発光

水素火炎は極めて視認性が低く、昼間時に肉眼で火炎を捉えることは極めて困難であり、夜間、ごく僅かな青紫色の発光を確認することが出来るに過ぎない(図1)。



図1 水素火炎の視認性

この点が、一般的な炭化水素ガスの燃焼による火炎と異なる。通常、大気中で水素原子を含む可燃性ガスが燃焼する場合、OHラジカルの発光(紫外光)や高温水蒸気の発光(近赤外光)、高温水蒸気が冷却されて生成した結露の発光(遠赤外光)が観察される。水素火炎の視認が難しいのは、水素火炎には可視光域に発光が無いためである。OHラジカルの発光は火炎の中心部で強く、その周囲で高温水蒸気の自発光が観察され、結露した水蒸気から遠赤外光(熱線)が放射される。

### 2.2 可視化手法

水素火炎から発せられる紫外光や近赤外光を、光学フィルターで選別して取り出すことによって水素火炎を検知することが出来る。また、燃焼で生じる高温水蒸気が火炎周辺の外気に曝されて結露して温度相応の輻射熱を発するため、この熱輻射を検知することにより、火炎近辺の温度分布を熱画像化することが出来る。一方、燃焼によって火炎から発せられる高温水蒸気の発光スペクトルが近赤外光波長領域にピーク値を有することに鑑みれば、外乱としての太陽光の発光が小さく、且つ高温水蒸気の発光スペクトルが強い波長域の光を選別して画像化することでも火炎の可視化は可能である。著者らは、専用のカメラを用いて水素火炎から発せられる各種波長の光を可視画像として捉え、これらの撮像画像を画像処理した後、背景画像(可視画像)に重ね合わせる手法の適用により、水素火炎を可視化している(図2)。

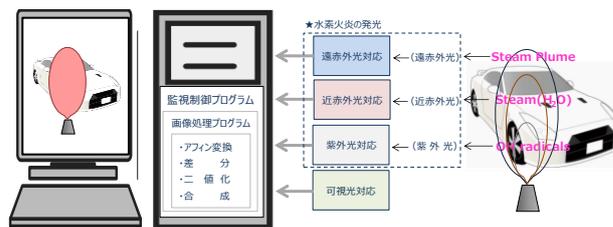


図2 水素火炎可視化の基本手法

### 2.3 撮像に適する波長領域

水素火炎の撮像に適した波長領域を見出すために水素火炎の分光測定を行い、概ね 1,350~1,500nm の近赤外光領域に高温水蒸気の強い自発光が存在することを見出した(図3)。これまで著者らは、紫外光(例えば 309nm)や近赤外光(例えば 950nm)などの水素火炎から発せら

れる特定波長の光と、当該特定波長に近接する波長域の光を撮像し、これらの撮像画像の差分画像を抽出することにより、水素火炎の可視化を実現していた。図3に示されるように、分光測定によって新たに見出した波長領域では、高温水蒸気の発光強度が大きいのにに対して太陽光の発光強度が小さいことを踏まえ、市販の近赤外光カメラを用いて5m遠方の水素火炎の撮像試験を実施した。その結果、適切な波長帯域の光学フィルターを用いれば、外乱としての太陽光の影響を排除するための撮像画像の差分処理が不要であることが明らかとなった。撮像試験の結果から、高温水蒸気の発する近赤外光を効果的に選別・抽出する光学フィルター仕様として、中心波長1,450nm、バンド幅50nm（半値幅25nm）を決定した。当該フィルターを用いることにより、高温水蒸気の自発光に起因する近赤外光の選別が可能であることを検証した。

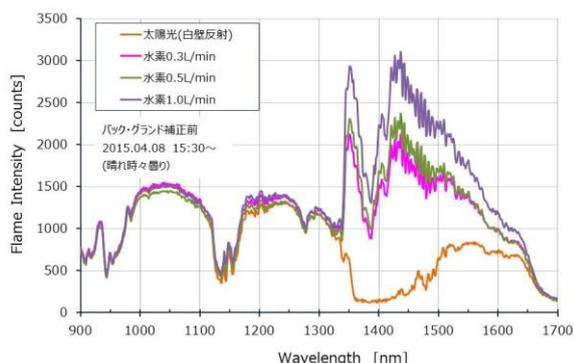


図3 水素火炎と太陽光のスペクトル特性

### 3. 水素火炎判定条件の重畳化

水素火炎は、可視光波長域に発光がないため通常の状態では視認できず、水素を含む可燃性ガスを取り扱う現場や施設には、保安装置として火炎の発光に含まれる微弱な紫外光に反応する炎検知器が設置されている。当該検知器は、検知対象の如何に関わらず検知波長域の全ての光に反応することから、紫外センサーとしては正動作であっても炎検知器としては誤動作である事例が多い。商用水素ステーションでは、誤検知・誤動作が水素ステーションの営業機会の損失を招来するため、水素ステーションの設置者・運営者から、誤検知・誤動作をしない高精度の炎検知技術が求められて

いる。このような事情に鑑み、高い信頼性を以て水素火炎を検知することができるよう、著者らは水素火炎判定条件の重畳化を提案している。つまり、高温水蒸気の自発光を近赤外光画像として捉える「画像判定」と、火炎から放射されるOHラジカル発光（紫外光）をセンサー信号として捉える「信号判定」の両判定条件を満たすことを以て水素火炎と判定する考え方である（図4）。図中の「火炎判定面積」とは、撮像画像を処理する過程で、白黒濃淡で表現された差分画像（グレースケール画像）を256の諧調数を以て二値化する際の、水素火炎可視化システムが水素火炎として認識する画素の総数がモニター画素数（480×640）に占める割合（%）である。現行のデータ処理方法では、条件を満たせば外乱光やノイズなどに起因する近赤外光も火炎として判定する画素に包含されるため、火炎判定面積を大きく設定することは外乱の影響を助長することにつながるため、適切な値を決定する必要がある。



図4 水素火炎判定条件の重畳化

## 4. 画像伝送手法

### 4.1 防爆対応

現行の高圧ガス保安法では、圧縮水素ステーションのディスペンサー周囲と蓄圧器は、水素火炎から発せられる紫外光を検知する手法を用いた水素火炎発生の常時監視を規定している。

ディスペンサー周囲や蓄圧器の近傍は、最も危険度の高い危険区域（ゾーン2）に該当するため、当該区域内に設置する電気機器類は、本質安全防爆や耐圧防爆などの防爆構造容器内に格納しなければならない。他方、微小な水素火炎を可視画像として確実に捉えるためには、可能な限り火炎発生の想定される近傍での監視が有効である。

これらの事情を熟考した結果、著者らは、防爆対応の不要な画像伝送方式を採用するに至った。

### 4.2 画像伝送方式

当該方式は、イメージファイバ（マルチコア光ファイバ）を介して、防爆区域の画像データを非

防爆区域に導く手法であり、集光部（対物レンズ）と画像伝送部（イメージファイバ）、撮像部（CCDカメラ）及び画像処理部（パソコン）の4つの部位から成る。集光部と画像伝送部は光学部品のみで構成されており、電子部品などは一切用いないため防爆対応が不要である。

### (1) 集光部

水素火炎を可視化するために捉える光は、背景画像としての可視光と水素火炎から発する近赤外光であるが、波長帯域が大きく離れているため、微小な焦点距離差が生じる（図5）。対物レンズを設計する上で、この差を完全にゼロとすることが極めて困難であることに鑑み、対物レンズで集光した光を可視光と近赤外光の二波長に分光する手法を考案した（図6）。

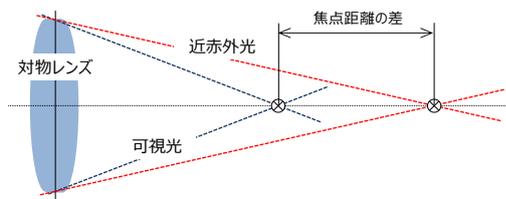


図5 焦点距離差

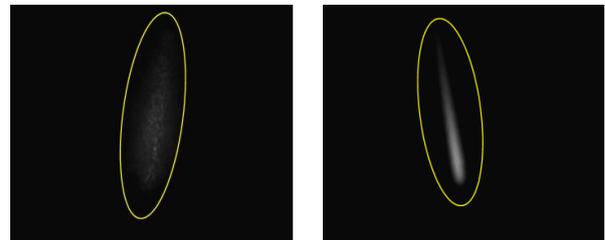


図6 集光部

### (2) 画像伝送部

メーカー標準品である可視光対応のイメージファイバを用いて予備試験を行った結果、光量不足による近赤外光伝送画像のコントラストの低下が大きく、当該画像が不鮮明となる問題が顕在化した。イメージファイバは、各々のコアに入射した光が効率よく出口端まで伝送されることにより、画像伝送を可能とする。伝送する光の波長が長くなれば、コアから光が漏れて隣接するコアに結合され易くなり、コントラストの低下を招来する。そこで、新たなカスタム設計に基づいてコア

間隔を拡大させた近赤外光対応のイメージファイバを試作した。試作した近赤外光対応のイメージファイバは、コントラストの低下が改善されており、近赤外光波長域の光を効率よく撮像部まで導光できる見通しを得た（図7）。



(a) メーカー標準品 画素数 50,000  
(b) カスタム設計品 画素数 20,000

図7 近赤外光伝送画像のコントラスト改善

### (3) 撮像部

専用のイメージファイバで導光した可視光と近赤外光を、各種フィルターを介して CCD カメラで撮像する構成となっている（図8）。可視光カメラは勿論のこと、近赤外光カメラも分光感度特性が 950~1,700nm、撮像素子が InGaAs の市販品を用いている。先に述べたように中心波長が 1,450nm、バンド幅が 50nm の光学フィルター（BPF）により、1,425~1,475nm（波長選別帯域）の近赤外光を選別することができる。

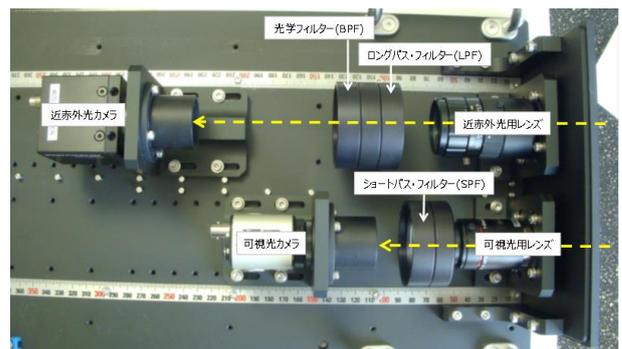


図8 撮像部

### 4.3 実用モデルシステムの試作

事前に、5m 遠方に位置する微小水素火炎を専用の CCD カメラで画像として捉え、画像処理した複数枚の撮像画像を重ね合わせる手法を用いて可視化する手法の有効性を検証している。この検証結果に基づき、光学部品とイメージファイバを

組み合わせる画像伝送方式の実用モデルシステムを設計・試作した（図9）。

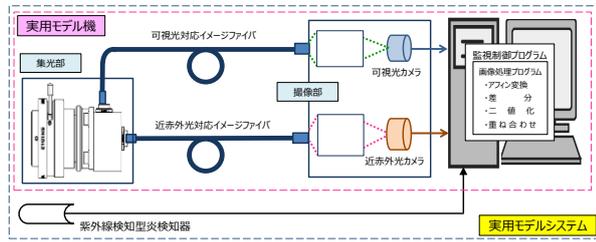


図9 実用モデルシステムの構成

## 5. 実用モデル機による試験

### 5.1 回転灯の分光特性

屋内条件の下、水素ステーションへの出入が想定される緊急車両などに搭載される回転灯（ランプ光源：ハロゲン、カバー色：紫・青・赤・緑・橙）と水素火炎の分光測定を実施した（図10）。回転灯は、ランプ光源の背面に配したリフレクターの反射光を前方に配光する方式であり、発光の大部分を分光器に集光することが出来るのに対して、水素火炎の発光が四方八方に発散することを勘案し、分光器のシャッター開放時間を、水素火炎に対しては300ms、回転灯に対しては8msに設定した。発光強度はシャッター開放時間に比例すると考えてよい。なお、測定データの傾向を読み解くために、3項移動平均を以て測定データの平滑化を図った。

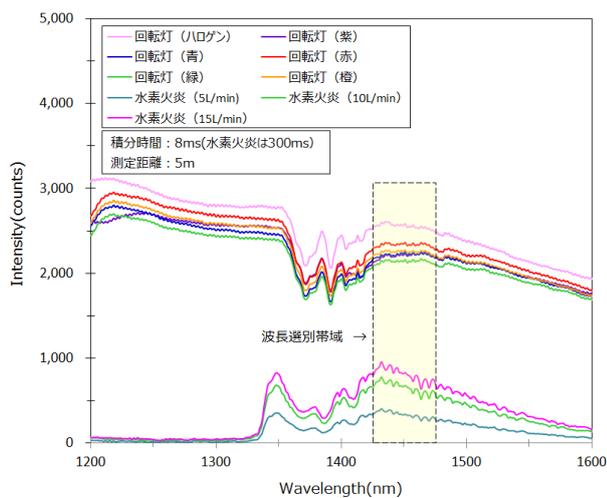


図10 回転灯の分光特性例

分光器の積分時間を勘案すれば、波長選別帯域の水素火炎の発光強度は回転灯の発光に比べて

非常に小さく、回転灯の発光が水素火炎の発光を画像として捉える際の外乱となり得る。特に、回転灯と水素火炎が対物レンズの集光軸上に一直線に並ぶ場合には、近赤外光画像で両者を区別することが難しく、誤検知の発生が懸念される。

## 5.2 水素火炎の撮像

### (1) 屋内条件下での撮像

実用モデル機を用いて屋内条件下の5m遠方の微小水素火炎を撮像した（図11）。イメージファイバの画素数は、可視光用が100,000pix、近赤外光用が20,000pixで、条長は何れも3mである。図中の“火炎表示閾値、とは、白黒の濃淡で表示される差分画像（グレースケール画像）を256の諧調数を以て二値化した際の、実用モデル機が水素火炎として判定する最小画素値であり、画素値0が黒、画素値256が白となる。当該閾値が小さいほど、水素火炎として捉える領域が大きく、同じ大きさの火炎を撮像した場合、閾値が小さいほど火炎の可視化画像は大きい。発光強度の小さい微小水素火炎を画像化するには、当該閾値を小さく設定するほど有利である。火炎表示閾値が4の場合に比べて、同閾値が40の場合の撮像画像領域が一回り小さいのはこのためである。何れに

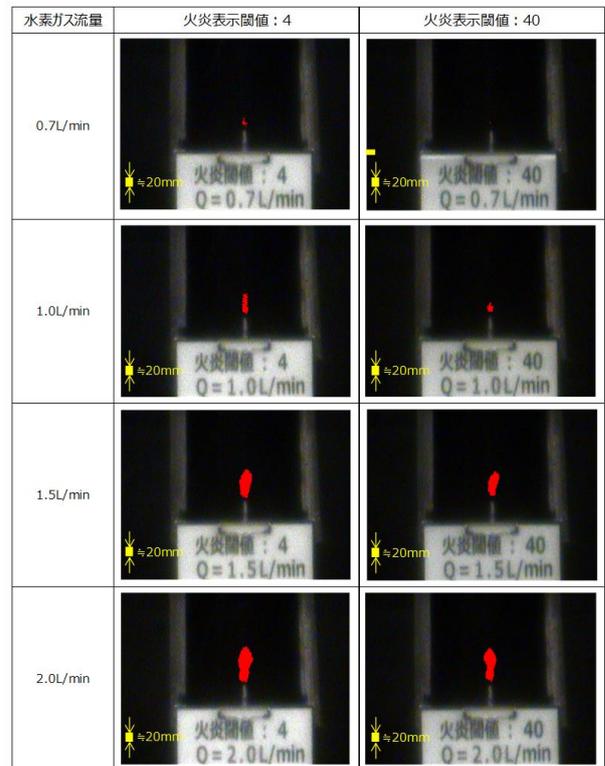


図11 水素火炎の撮像画像（屋内撮像）

せよ、実用モデル機を用いて、5m の離隔距離を以て 2cm ほどの微小水素火炎の撮像、つまり水素火炎の可視化が可能であることを検証することができた。

## (2) 屋外条件下での撮像

5m の離隔距離を以て、風除けのための防風カバーで囲まれた火口から発生する水素火炎を実用モデル機で撮像した (図 1 2、1 3)。イメージファイバの条長を 1m に変更した以外、光学系の仕様は先の屋内撮像条件と同じである。火炎表示閾値が 5 や 10 のように閾値が余りにも小さい場合には、太陽光など外乱光の影響が顕著となるため、撮像環境に応じた適切な閾値の決定が重要である。この撮像結果のみを以て最適とは言えないが、5m の離隔距離を以て 2cm 程度の微小水素火炎を検知するためには、火炎表示閾値として、ひとまず 40 が妥当であると判断した。

流量 (火炎高)	水素火炎可視画像		
	火炎表示閾値5	火炎表示閾値10	火炎表示閾値15
0.7L/min (≒20mm)			
1.0L/min (≒25mm)	外乱光 (太陽光の反射) の影響が大きいため撮像せず。	外乱光 (太陽光の反射) の影響が大きいため撮像せず。	
1.5L/min (≒50mm)	外乱光 (太陽光の反射) の影響が大きいため撮像せず。	外乱光 (太陽光の反射) の影響が大きいため撮像せず。	
2.0L/min (≒65mm)	外乱光 (太陽光の反射) の影響が大きいため撮像せず。	外乱光 (太陽光の反射) の影響が大きいため撮像せず。	

図 1 2 水素火炎の撮像画像 (屋外撮像)

## (3) 妥当性の実証

開発技術の妥当性を検証・評価するために、当社構内の一角に実用モデルシステムと市販の紫外線検知型炎検知器を設置し、平成 29 年 6 月から同年 10 月までの 138 日間に亘るフィールドでの実証試験を行った。実用モデルシステムでは、合計 316 回の画像判定に基づく水素火炎検知が

流量 (火炎高)	水素火炎可視画像		
	火炎表示閾値20	火炎表示閾値30	火炎表示閾値40
0.7L/min (≒20mm)			
1.0L/min (≒25mm)			
1.5L/min (≒50mm)			
2.0L/min (≒65mm)			

図 1 3 水素火炎の撮像画像 (屋外撮像)

あったものの、何れの場合とも同時に紫外線は検知されていなかった。この結果、誤検知回数は、炎検知器の 80 回に対して実用モデルシステムではゼロであったことから (図 4 参照)、開発技術の妥当性が実証されたと言って過言ではない。

## 6. まとめ

光学部品とイメージファイバのみで構成される「画像伝送方式」を提案し、水素火炎の分光測定によって新たに見出した特定波長領域の強い発光を専用のカメラで撮像する手法を用いることにより、高い信頼性を以て、遠方から微小水素火炎を可視化する技術を完成させた。

## 【謝辞】

本研究開発の一部は、平成 26～29 年度 NEDO 水素利用技術研究開発事業の一環として行われたものである。ここに、ご協力を戴いた関係各位に謹んで感謝の意を表する。

## 【参考文献】

- 1) 燃焼現象の基礎 (株式会社オーム社、新高嵩・河野通方・佐藤順一共著)
- 2) 火炎の分光学的計測とその応用 (株式会社学会出版センター、幸田清一郎・田久保嘉隆共著)

## ストップホールとボルト締め併用による疲労き裂抑制効果の評価

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 松佐 利治  
(株)四国総合研究所 産業応用技術部 岩田 正純  
(株)四国総合研究所 産業応用技術部 野口 新二

キーワード: ストップホール  
疲労  
き裂停留

Key Words : stop hole  
fatigue  
crack arrest

### Evaluation of Fatigue Crack Suppression Effect by Combining Stop Hole Method and Bolting

Shikoku Research Institute, Inc., Industrial Application Technology Department  
Toshiharu Matsusa, Masazumi Iwata and Shinji Noguchi

#### Abstract

In recent years, fatigue crack propagation events are prominent due to aging of structures. Therefore, the fatigue crack propagation rate and the characteristics of the progress path were clarified. Also, the relationship between crack opening displacement and load stress was calculated. These results are expected to be useful for estimating the cause of fatigue fracture.

The "stop hole method" is considered to be able to arrest crack propagation. It has already been applied as a life extension method. We examined the effectiveness of this method. As a result, by simultaneously using bolt tightening, crack propagation could be further arrested. In order to ensure the effectiveness of the combined method, the optimum thickness of the washer shape was examined.

## 1. はじめに

材料の高経年化により疲労き裂の発生やき裂の進展・成長が想定される。仮に、き裂が発見された場合でも、破損に至るまでの寿命を延伸することができれば応急処理として有効な手法となる。簡便な方法として、「ストップホール法」が使われることがあるが、その有効性や評価方法についてはあまり検討されていない。そこで、ボルト締め併用も含め、検討したので報告する。

## 2. ストップホール法について

ストップホール法とは、疲労き裂の先端に円孔をあける方法で、円孔端の応力はストップホールをあける前のき裂先端の応力に比べて、低減するため、疲労き裂の進展速度の低下、あるいはき裂の進展を停止させる効果が期待される。

日本鋼構造協会の疲労設計指針<sup>1)</sup>によると、ストップホールをあけた部材の疲労強度は、ストップホールを楕円型長径側とする切欠き材と置き換えて、円底での局部応力を求め、疲労寿命を評価する方法がある。(図1)

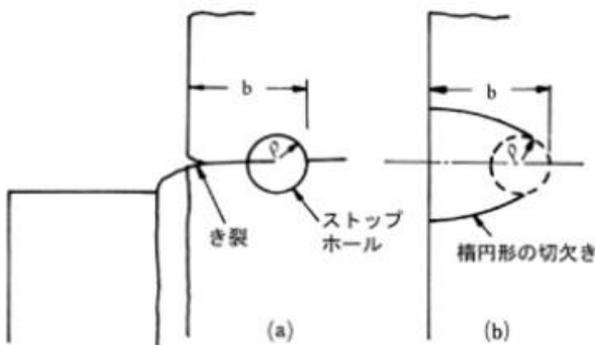


図1 ストップホールの応力集中計算モデル

## 3. 疲労き裂進展試験方法

### 3.1 試験片

図2に平板試験片の形状・寸法を示す。初期き裂として長さ30mmの放電加工スリットを片側に加工した。材質は一般的なSUS304ステンレス鋼である。板厚3mm、幅120mm、断面積 $360\text{mm}^2$ とし、四隅の円孔にピンを入れて治具に固定するピン方式とした。なお、ピンに荷重が集中し、ピンに疲労き裂が発生することが分かったため、途中(後述するTP07以降)からM14ボルトによるボルト締め方式に変更した。

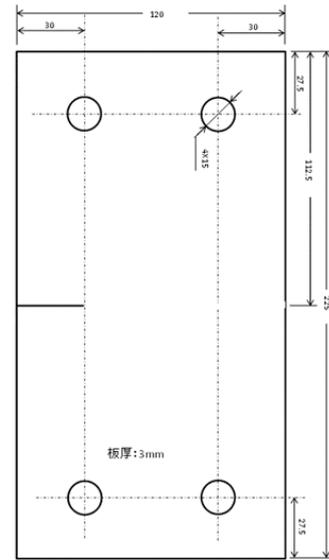


図2 疲労き裂進展試験 試験片

### 3.2 治具

図3に試験治具の形状・寸法を示す。図3では下側の治具を示しているが、同様な治具が上側にも取り付けられる。試験片を2枚の側板で挟みこみ、ピンあるいはボルトで結合する。側板の間隔は10mmで、試験片の厚みが3mmであるため、隙間を埋めるために、厚み3.5mmの平ワッシャーをピンの両側に入れて、試験片が治具の中心にくるように設定した。

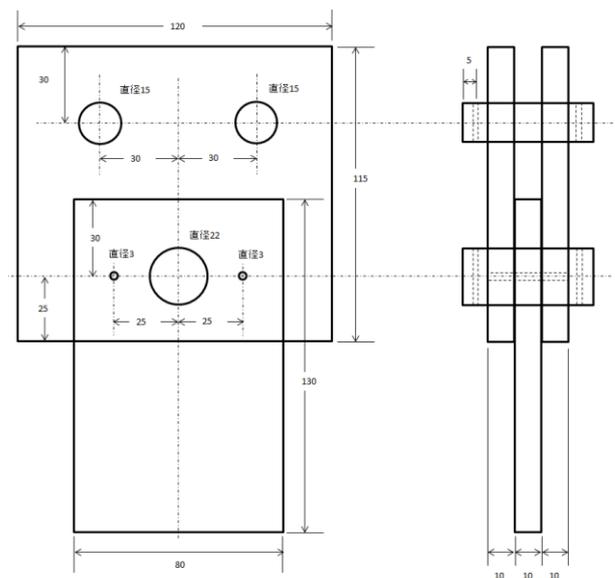


図3 疲労き裂進展試験用治具

### 3.3 試験荷重

疲労き裂伝ば速度やき裂伝ば経路に関するデータを蓄積し、試験条件を決定した。最大荷重 25kN、最小荷重 2.5kN、すなわち応力全振幅  $\Delta \sigma = 62.5\text{MPa}$ 、応力比  $R=0.1$  とし、荷重は 10Hz の正弦波を用いた。所定のき裂寸法まで進展させた後、進展対策として、下記の処理を施した。その後、試験を再開し、破断寿命を求めた。

- ・直径 12mm のストップホール加工
- ・さらに M12 ボルト締め

## 4. 試験結果

### 4.1 試験結果一覧

試験結果を表 1、図 4 に示す。

表 1 疲労き裂進展試験結果

試験片番号	ストップホールの直径	ストップホールの中心位置	ボルト締付け	破断(経過)回数
TP01	-	-	-	102,286
TP02	12mm	開口端より24mm	-	>1,000,000
TP03	"	開口端より60mm	-	103,452
TP04	"	開口端より40mm	-	102,174
TP05	"	"	M12ボルト バネワッシャー 締付トルク42Nm	>846,072
TP06	"	開口端より60mm	"	138,922
TP07	"	"	M12ボルト すべり止めワッシャー 締付トルク42Nm	118,324
TP08	"	"	M12ボルト 30D×5円板ワッシャー バネワッシャー 締付トルク50Nm	>800,000

特徴的な結果について、以下、記述する。

TP02：開口端から 24mm 位置に、直径 12mm の円孔を放電加工した。100 万回でもき裂の発生は無い。き裂が短く、円孔縁が滑らかなため、き裂が発生しなかったものと思われる。図 5 に放電加工孔の外観と 60 万回後の試験片全景を示す。

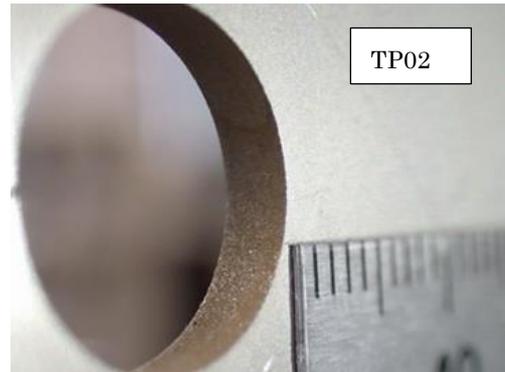


図 5 (a) 放電加工孔の外観

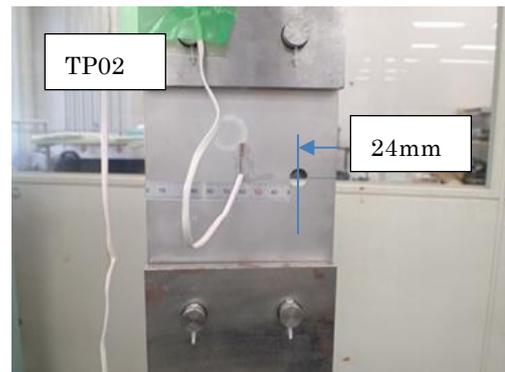


図 5 (b) 60 万回後の試験片全景

TP08：開口端から 60mm 位置に、直径 12mm の円孔をドリル加工し、M12 ボルト＋円板ワッシャー＋バネワッシャーで締めつけた結果、80 万回でも破断しなかった。TP01(対策なし)と比較して、約 8 倍以上の寿命延伸があり、効果は大きい。図 6 にボルト締付後およびボルトをはずした状況を示す。き裂側に摩耗粉が認められた。

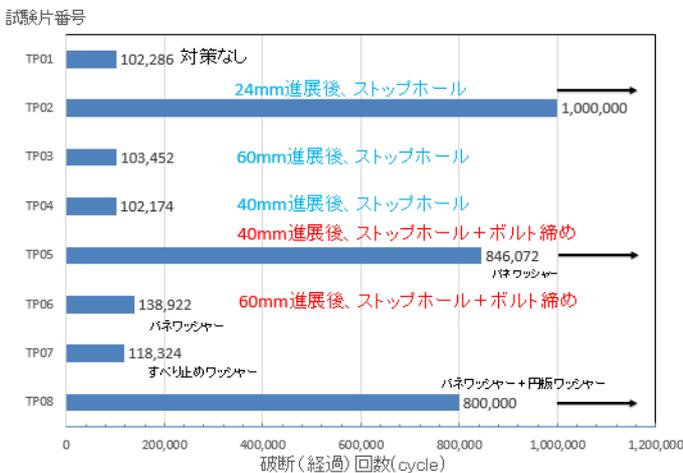


図 4 疲労き裂進展試験結果

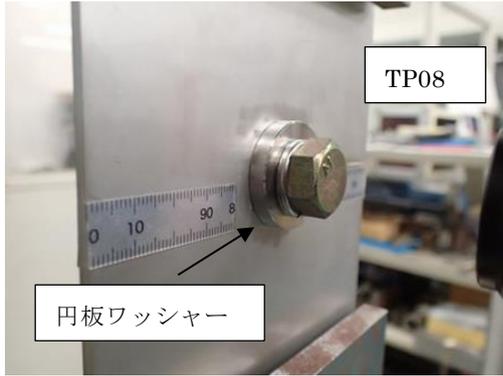


図 6 (a) 対策処理後の試験片

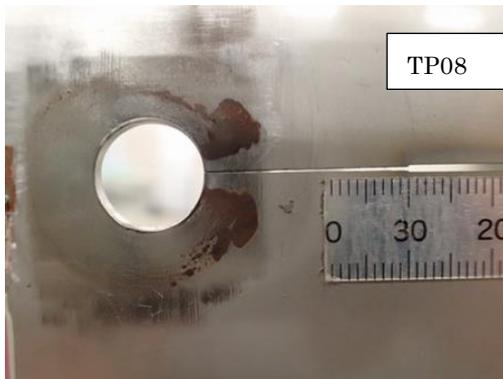


図 6 (b) 80万回後のストップホール

## 4.2 試験結果のまとめ

試験結果から得られた知見を以下に示す。

- ①き裂長さが比較的短い場合(板幅の 20%)は、放電加工孔が有効であるが、現実的でない(TP02)。後述するが、ドリル孔でも効果はありと推定。
- ②き裂長さが板幅の 33%、50%の場合は、ドリル孔のみでは有効でない(TP03,04)。
- ③き裂長さが板幅の 33%の場合は、M12 ボルトを用いて、締付トルク 42Nm で約 8 倍以上の寿命延伸が図られる(TP05)が、き裂長さが板幅の 50%になると、この手法は有効でなくなる(TP06,07)。ボルト締めを用いる場合は、き裂長さを考慮する必要がある。
- ④ボルト締めを用いるワッシャーとして、ボルト径の 2 倍以上で、厚みがある円板ワッシャーを挟み込んだところ、き裂長さが板幅の 50%

においても、80 万回以上の寿命延伸が認められた(TP08)。

## 5. 考察

### 5.1 ストップホール(ドリル孔)の有効性検討

切り欠き材の疲労強度  $\sigma_{wk}$  は、平滑材の疲労強度  $\sigma_w$  と切り欠き係数  $\beta$  (ここでは、疲労強度低下係数  $K_f(=\beta)$  と表す) から、(1)式で求められる。

$$\sigma_{wk} = \sigma_w / \beta = \sigma_w / K_f \quad \dots (1)$$

また、図 7 にステンレス鋼について求められた応力集中係数  $K_t$  と疲労強度低下係数  $K_f$  の関係を示す<sup>2)</sup>。

この図から  $K_f$  が  $K_t$  に比例すると仮定すると、以下の関係が求められる。

$$K_f = 1 + (K_t - 1) * 0.6 \quad \dots (2)$$

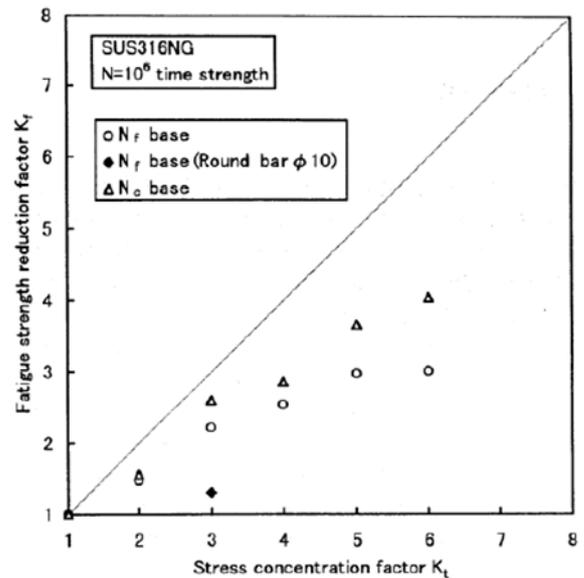


図 7  $K_t$  と  $K_f$  の関係

したがって、ステンレス鋼の平滑材の疲労強度振幅と応力集中係数が分かると、切り欠き材の疲労強度は求められる。そこで、切り欠き材の応力集中係数を有限要素法により解析し、平滑材の疲労強度<sup>3)</sup>を  $\Delta \sigma_w = 380 \text{MPa}$  とし、(1),(2)式の関係を用いて、円孔の中心位置の異なる平板の平均応力振幅と疲労強度の関係を求めた。計算結果を図 8 に示す。

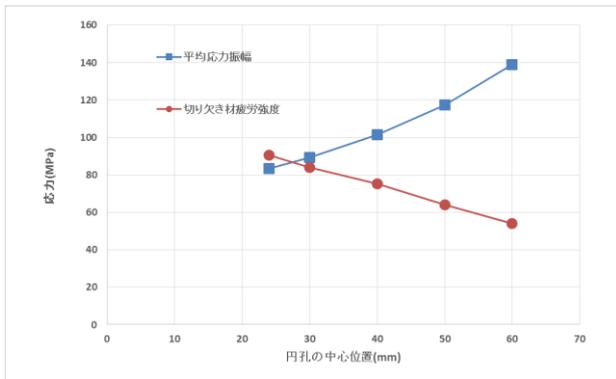


図8 平均応力振幅と疲労強度の比較

応力振幅が疲労強度を上回ると、き裂が発生し破壊することになる。したがって、図8において、赤線が青線を下回る範囲ではき裂が発生することになる。交点は約27mmとなることから、27mm以上ではき裂が発生する。

実験では、円孔位置が24mmの場合では、き裂が発生せず、円孔位置が40,60mmの場合にはき裂が発生した。図8の解析結果は実験結果とよく一致している。

以上から、ドリル孔のみでの対策が有効かどうかの判定を行う方法として、応力集中係数からの推定方法が有効であると考えられる。

## 5.2 ボルト締めによる有効性検討

円孔をあけた後、ボルトで締付ける工法について、通常のパネワッシャーのみで締付けた場合には、円孔の位置が40mmでは有効であったのに対し、60mmでは効果が無いという結果が得られた(図4のTP05,06,07)。このような差異がでた理由について考察を行った。

前項の検討結果から、疲労き裂の発生については、円孔縁の応力すなわち、応力集中係数から推定できる見通しを得た。この考え方をボルト締め状態に適用することとした。しかし、円孔縁の最大応力は、ボルトで締め付けられているため、ひずみゲージでの測定ができず、応力解析も難しい。そこで、円孔の位置によらず、開口変位と円孔縁応力の間には比例関係があることを解析から見出しているため、開口変位の測定から、円孔縁の応力を推定することを試みた。ここで、開口変位(d)とは試験片側端(開口端)における開口変化量の測定値である。

応力解析から、開口変位と円孔縁応力の関係を探り、開口変位から応力を推定する式を直線近似したものを図9に示す。

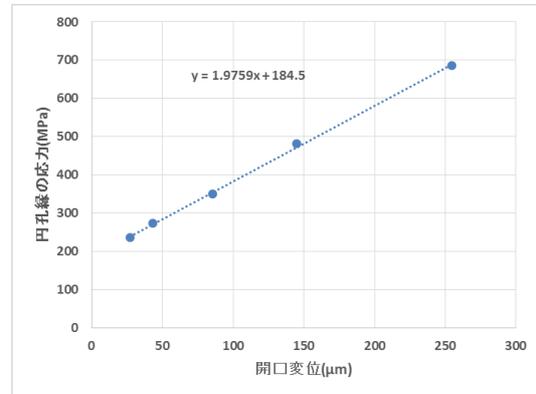


図9 開口変位と円孔縁の応力の関係

これによると、円孔縁の応力  $\sigma_{max}$  は開口変位 d により、下記で求められる。

$$\sigma_{max} = 1.9759d + 184.5 \quad \dots (3)$$

以下に、ストップホール(円孔)をあけた後、ボルトで締付ける工法について、開口変位から、き裂進展対策の効果の評価するフローを示す。

- ① ボルト締めした状態で、疲労試験の最大荷重と最少荷重の差分の荷重 (F=22.5kN) を負荷した時の開口変位 (d) を測定する。
- ② 測定された d を(3)式に代入して、円孔縁の最大応力  $\sigma_{max}$  を求める。
- ③ 最大応力  $\sigma_{max}$  を平均応力  $\sigma_m$  で除して、応力集中係数  $K_t$  を求める。  

$$K_t = \sigma_{max} / \sigma_m$$
- ④  $K_t$  を(2)式に代入して、疲労強度低下係数  $K_f$  を求める。
- ⑤  $K_f$  を(1)式に代入して、切欠き材の疲労限度  $\Delta \sigma_{wk}$  を求める。
- ⑥ 平均応力範囲  $\Delta \sigma_m$  と切欠き材の疲労限度  $\Delta \sigma_{wk}$  を比較する。

- ⑦判定結果  $\Delta \sigma_m < \Delta \sigma_{wk}$ 、→対策効果あり  
 $\Delta \sigma_m > \Delta \sigma_{wk}$ 、→対策効果なし

### 5.3 疲労延伸効果をもたらす有効な円板ワッシャーサイズ、締付トルクについての検討

今回の対策として用いた円板ワッシャーとして、直径 30mm、板厚 5mm を用い、締付トルク 50Nm とした場合に、寿命延伸効果の有効性が認められた。有効な対策を施すためには、円板ワッシャーサイズの選定が重要と考えられるため、ここでは、板厚および締付トルクを変えて有効性を検討した。

板厚が 1,3,5mm の円板ワッシャーについて、締付トルクを変えて、試験応力 62.5MPa を負荷した場合の開口変位を測定した。この結果を図 10 に示す。

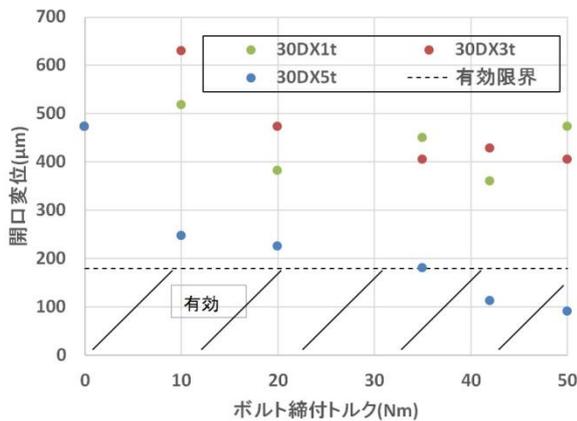


図 10 板厚の異なる円板ワッシャーを用いた場合の開口変位の測定値 ( $\sigma = 62.5\text{MPa}$ )

図 10 を見ると、締付トルクが大きいく程、開口変位は減少し、円板ワッシャーの板厚が 5mm の場合に効果が大きい。

先に示した(1)~(3)式を用いると、疲労寿命延伸効果をもたらす有効な開口変位を求めることができる。それによると、寿命延伸効果が期待できるのは、開口変位が  $180\mu\text{m}$  以下であった。図 10 によると、開口変位が  $180\mu\text{m}$  以下になるのは、円板ワッシャーの直径が 30mm で板厚 5mm を用いて、締付トルクが 35Nm 以上の場合であることがわかる。

開口変位を抑えるためには、ボルト締付により円板ワッシャーと試験片が密着する必要がある。

円板ワッシャーの板厚を変えても、締付トルクが同じであれば、軸力はほぼ同じと考えられる。ところが、開口変位に大きな差が出ており、板厚 1,3mm では締付の効果が十分出していない。

この理由を調べるために、ばねワッシャーと円板ワッシャーについて、試験片と接触する部分の面圧を締付トルクを変えて、面圧測定シールを用いて、測定した。この結果を図 11(a)、(b)に示す。図より、ばねワッシャーではばねの隙間部分が完全に接触していないため、この部分はき裂開口の押さえ込みに有効でない。

また、円板ワッシャーでは、板厚が 1,3mm で締付トルクが低い場合には、面圧分布が均等ではなく、押さえ込みが不十分となり、有効でない。

一方、板厚が 5mm では、均等な面圧分布となり、全体をしっかりと押さえ込んでいるのがわかる。

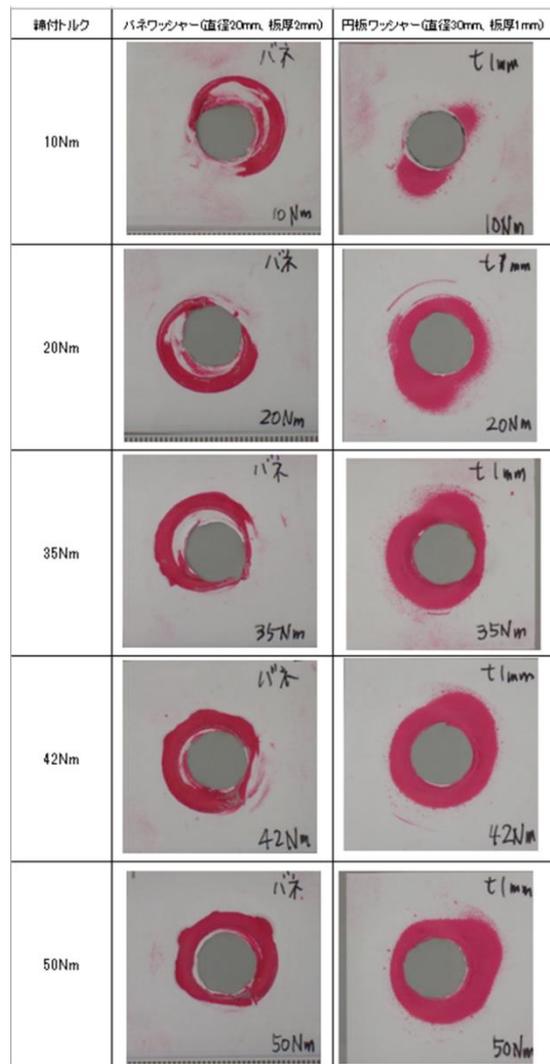


図 11(a) ワッシャーの面圧分布

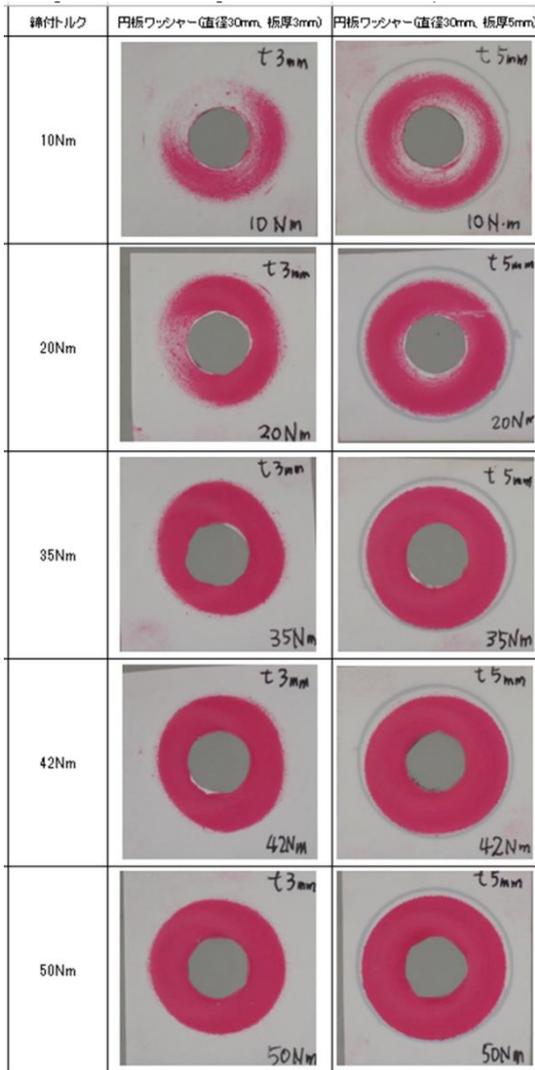


図 1 1 (b) ワッシャーの面圧分布

以上のように、円板ワッシャーの採用が有効であるが、これを用いる場合には、板厚の影響が大きいため、適切な板厚に設定しないと、寿命延伸効果は得られないことが判明した。

## 6. まとめ

ストップホールは有効であるが、き裂長さが長くなると、ほとんど効かなくなることがある。ボルト締めにより補強する手法についても、き裂長さや使用するワッシャーにより効果が異なることが明らかになった。

き裂の開口変位から疲労き裂発生の有無を評価する式を導出した。これを実験結果に当てはめたところ、寿命延伸効果を正確に評価できることがわかった。

ボルト締めには、円板ワッシャーで両側から挟

みこむ方法が有効であり、今回の試験条件では、直径 30mm、板厚 5mm の円板ワッシャーをボルト締付トルク 35Nm 以上で締付けた場合に有効性があると評価された。また、円板ワッシャーの板厚が薄い場合には、面圧分布が均一でなく、有効性が劣ることがあるため、円板ワッシャーの板厚の選定が重要であることがわかった。

## 【謝辞】

本研究は、四国電力(株)殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会：「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」，技報堂出版，p. 317(1993)
- 2) 日本溶接協会：「原子力機器用ステンレス鋼の疲労強度評価研究」，EFS 小委員会(2015)
- 3) 科学技術庁 金属材料技術研究所：「金属材料技術研究所 疲れデータシート」，No. 33(1983)

## レーザ走査による貯炭レベル測定装置の開発

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 高橋 克征  
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 宮崎 習  
四国電力(株) 火力本部 田村 英樹  
四国電力(株) 火力本部 片上 正司  
四国電力(株) 火力本部 (現: 四電ビジネス(株)) 今川 重喜

キーワード: 石炭体積測定  
レーザ計測  
発熱監視  
防爆措置  
粉じん汚損防止

Key Words: Coal volume measurement  
Laser measurement  
Heat monitoring  
Explosion proof measure  
Anti-dust control

### Development of measuring equipment for coal volume using laser scanning

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department  
Yoshiyuki Takahashi, Manabu Miyazaki  
Shikoku Electric Power Co., Inc. Thermal Power Division  
Hideki Tamura, Shoji Katagami, Shigeki Imagawa

### Abstract

In general, a huge volume of coal in a silo is measured by several microwave level meters and managed at a coal-fired power plant. However, since the shape of coal in a silo is complicated, a highly accurate measuring equipment is required. Therefore, we developed an equipment to measure coal volume in a silo using laser scanning. The equipment automatically starts measurement at a set time every night, and can visualize the three-dimensional shape of coal in the silo.

## 1. はじめに

従来から石炭火力発電所では、超音波式レベル計(常設装置)とメジャー測定(手作業)による9個所の平均高さから、サイロ内石炭の体積量を計算して管理している。

しかし、サイロ上部から投入された石炭は、4つの下部ホッパから払い出されて複雑な貯炭形状へ変化するため、測定精度や再現性が十分ではない。このため、貯炭体積量を高精度に測定でき、サイロ内貯炭形状を可視化できる装置へのニーズが非常に高い。

そこで、最新のレーザ距離センサを活用した高精度なレベル測定が可能な装置を開発し、本運用されることとなったので、特徴と運用状況を報告する。

## 2. 本装置の仕様

開発した貯炭レベル測定装置は、石炭表面をレーザ走査し、その貯炭形状から体積量を算出する装置である。

本装置は、レーザを高精度に走査するメカユニット、制御・体積計算する制御ユニット、遠隔監視するPCから構成されている。構成図と装置外観を図1、図2に、主な仕様を表1に示す。

装置外観は、点検などで装置をサイロ内から吊り上げた状態であり、通常運用では、風雨対策用カバーを設置している。

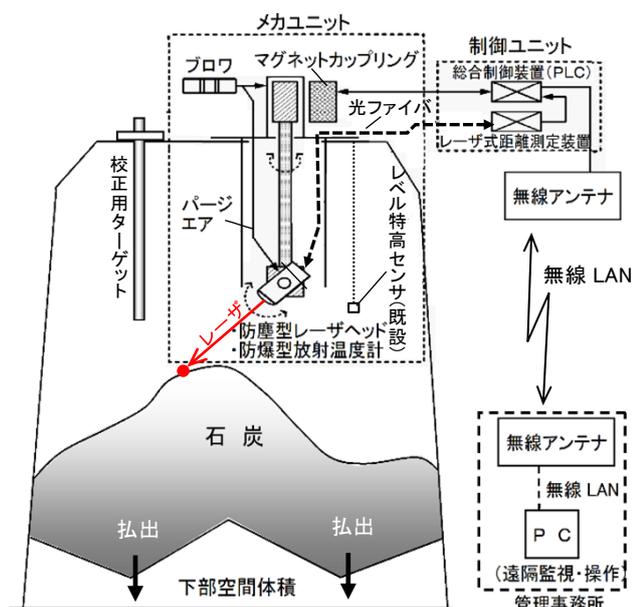


図1 構成図



図2 装置外観(装置上架時)

表1 装置の主な仕様

項目	備考
設置場所	サイロ上部(屋外)
目標精度	全貯炭体積量 $\pm 0.5\%$ 以下
測定原理	レーザ(クラス1)
防爆対策	光ファイバ分離式レーザヘッド、マグネットカップリング
防塵対策	エアパージ(4年以上汚損なし)
耐候性	PLCが制御・計算
監視方法	PCから遠隔監視・操作
石炭温度	防爆型放射温度計
停電対策	UPS、停電時原点自動帰還
ノイズ対策	ノイズカットトランス
校正方法	校正用ターゲット
保守周期	1年

### 3. 距離センサの選定

#### 3.1 距離センサの比較

一般的な距離センサである、超音波、マイクロ波、レーザを比較した(表 2)。いずれの距離精度も同等であり、測定対象が平坦であれば差異はないが、複雑な形状測定にはビーム広がりやを考慮する必要がある。日々の運用では、サイロ上部点検口から約 15mの高さまで貯炭されることが多い。この距離でのビーム広がりや、超音波ではφ1,575mmであり、石炭の安息角を40°とすると高さ方向に最大1,322mmの誤差が予測される(図 3)。

本装置の目標精度は、石炭を搬送するコンベアスケールと同等の±0.5%である。全貯炭体積量の±0.5%は、石炭高さ±100mmに相当することから、超音波やマイクロ波でこの精度を満たすことは困難である。特に壁付近では壁の影響が大きく、貯炭体積量を多く算出する。

このため、石炭表面にレーザを走査させる測定方法が最も適していると判断した。

表 2 距離センサの比較

	超音波 <sup>※1</sup>	マイクロ波 <sup>※1</sup>	レーザ
測定距離	~70m	~70m	~200m 低反射率対象
距離精度	±28mm	±15mm	±25mm
ビーム径 <sup>※2</sup> (15m先)	φ1,575mm	φ920mm	φ30mm
積付角誤差 (tan 40°)	1,322mm	772mm	25mm
体積精度 <sup>※3</sup>	△	△	○

※1 発電所で使用実績のあるセンサ

※2 ビーム径が小さい程、複雑形状には高精度測定

※3 ビーム走査による貯炭形状から算出した場合

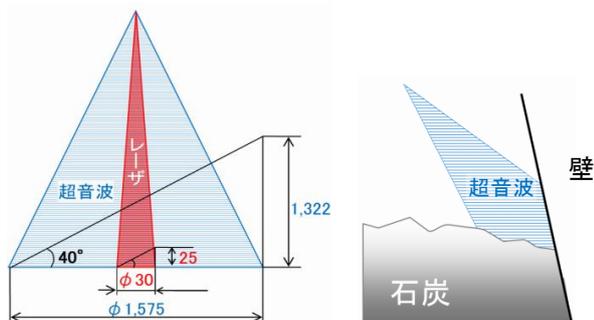


図 3 ビーム径の広がりやと測定精度

#### 3.2 距離センサの選定

石炭から反射されるレーザ光は極僅かであるため、斜め入射の測定には高感度なセンサが必要となる。様々なレーザ距離センサの中で、航空機から地上形状を測定できる高感度レーザ距離センサのみが測定可能であった。そして、レーザ発信器とレーザヘッドが光ファイバで分離された製品(RIEGL社:LD90-3200HiP-GF)は、レーザヘッドのみをサイロ内へ設置でき、サイロ内に電子機器を配置しないため、防爆性に配慮できる(図 4)。また、粉塵雰囲気でも測定できるセンサであり、本装置に適している(図 5)。

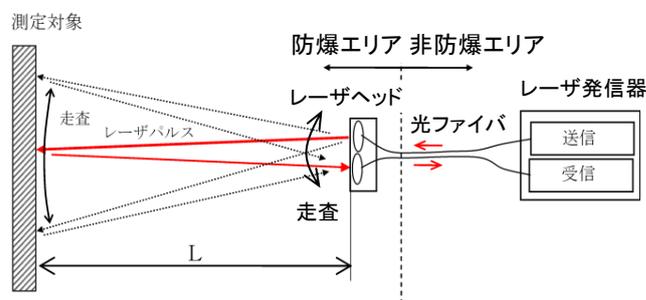


図 4 測定原理

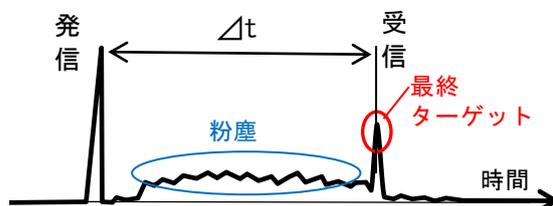


図 5 粉塵雰囲気測定イメージ

### 4. 本装置の特徴

本装置は、高精度に走査するハードウェア、これを制御し体積計算する PLC、立体表示やデータ管理する PC から構成されている。

#### 4.1 ハードウェア

##### (1) 高精度走査機能

高精度にレーザ走査を制御するため、超低バックラッシュ高減速ギア(800:1)を用いて、バックラッシュによる誤差を最小限にした。高減速ギアのため、走査速度が遅くなり測定時間が長くなるが、後述の測定点の最適化などで対処している。

また、マグネットカップリングを用いた構造により、モータを完全にサイロ外に配置するととも

に、機械的な貫通部をなくして、防爆性に配慮している（図6）。

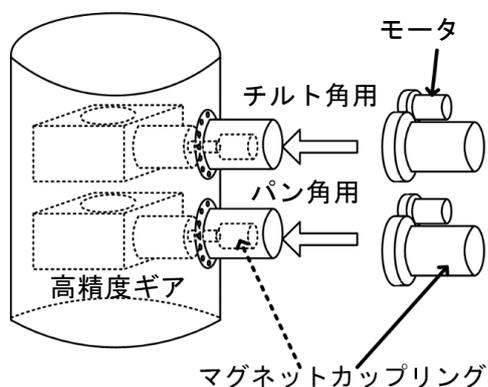


図6 駆動方法

## (2) エアパーズ機能

サイロ内は高湿度で、石炭受入中は多くの粉塵が浮遊するため、レーザヘッドの汚損防止としてエアパーズ機能を備えている。エアカーテン方式やスパイラル方式などでは1か月も経たずに汚損されたが、筒内加圧式エアパーズは防塵効果が高く、4年以上汚損されていない（図7、8）。

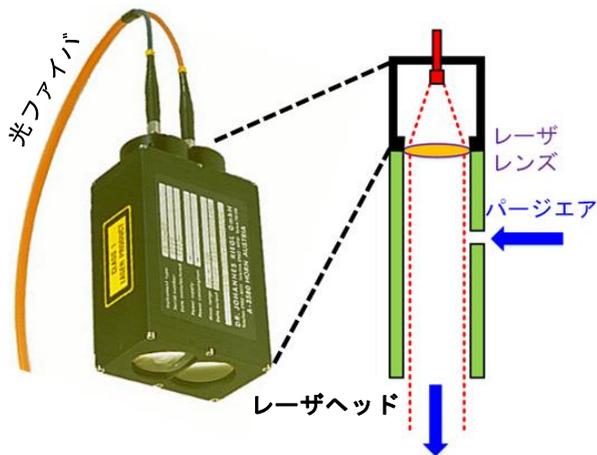


図7 筒内加圧式エアパーズ



図8 エアパーズの効果(4年後)

## 4.2 PLC制御(PLCソフト)

サイロ上部は夏期には45°Cを超えるため、工業的に信頼性の高いPLC(シーケンサ)により機器制御と体積計算を行っている。PLCソフトは以下の機能を有する。

### (1) 自動体積量測定機能

本装置は、設定時間に自動で測定を開始し、測定座標データから貯炭体積量を算出する。

測定点は走査角(パン、チルト)と測定距離から、座標を求める(図9)。石炭と壁が接する箇所(壁座標)は装置直下からの距離が小さく変化する前後の直線の交点としている(図10)。

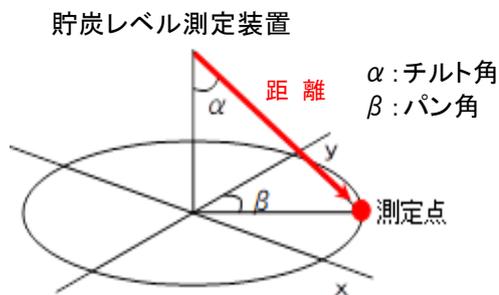


図9 測定座標の算出方法

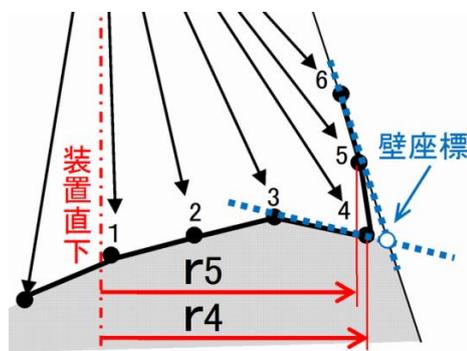
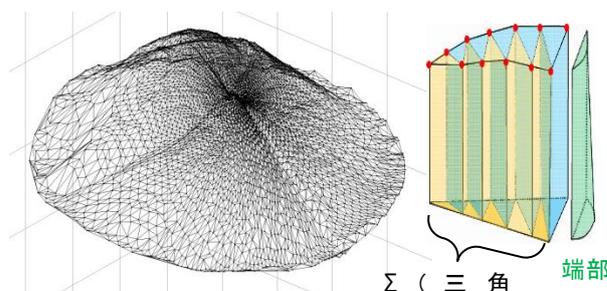


図10 壁座標の算出方法



(a)測定点から作成したメッシュ (b)三角柱と端部

図11 体積量の算出イメージ

3つの測定点からなる三角柱を積分し、下部空間体積量を除くことで貯炭体積量を算出する。サイロは高くなるにつれて内径が小さくなるため、壁高さに応じた端部体積量も加算する(図11)。

また、石炭のないサイロを測定し、正確な下部空間体積量を貯炭体積量へ反映している(図12)。

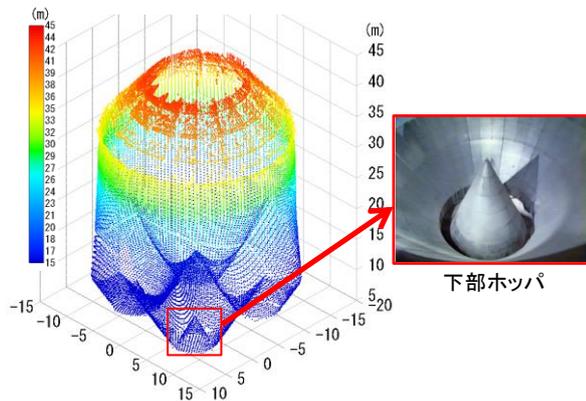


図12 サイロ内部形状(下部空間体積量測定)

## (2) 最適測定点の自動選択機能

測定点は、パン角とチルト角のパターン(測定マップ)を元にレーザ走査し、決定される。高減速ギアにより測定に長時間を要するため、測定精度を維持したままで測定点数を削減するなどして、測定点の最適化を行っている。

装置直下から壁に近づくにつれてチルト角の刻みを細かくすることで、測定点の間隔に粗密ができないよう配慮した。また、装置はサイロの中心から偏った個所に設置されており、パン角毎に有効なチルト角の範囲が異なるため、全パン角に対するチルト角を固定すると不要な壁データが多くなる(図13)。そこで、パン角毎にチルト角範囲を調整して、体積量算出に不要な壁データを削減した。

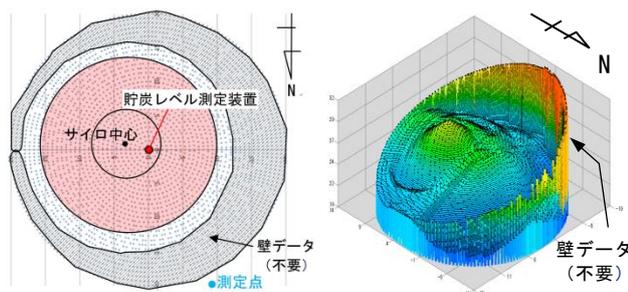


図13 チルト角の刻みを最適化した測定

貯炭体積量が少ないときは石炭表面までの距離が遠くなり、同じチルト角刻みで走査すると測定点の間隔が粗くなる(有効データ数が少なくなる)。そのため、測定開始前に装置直下の距離を測定し、高さに応じた最適な測定マップを自動選択している。

これらの最適化により、当初13時間(約6,000点)要していた測定を約1.5時間(約1,000点)に短縮した。

## (3) サイロ内環境の自動判定機能

本装置は、多少の水蒸気(または粉塵)中でも測定可能であるが、水蒸気過多になると石炭の反射レーザを受信できず測定できなくなる(図14)。

この状況では原理的に貯炭体積量測定が困難であるため、斜め遠方の壁(仮ターゲット)を測定し、その距離からサイロ内環境の良否を自動判定して測定を開始する。

石炭受入中は、サイロ内が粉塵で充満しないように既設集塵機を稼働させている。水蒸気過多時にこの集塵機を稼働させると、90分程度で測定可能な環境に改善されるため、サイロ内環境が悪い時は集塵機を稼働させることを検討している。

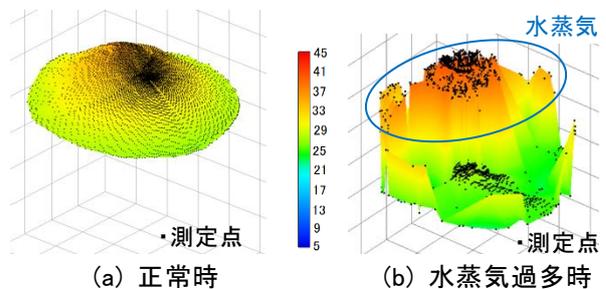


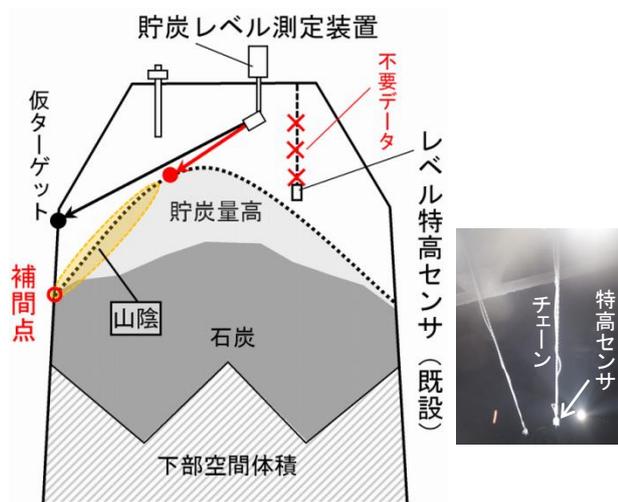
図14 水蒸気過多の影響

## (4) データの自動処理機能

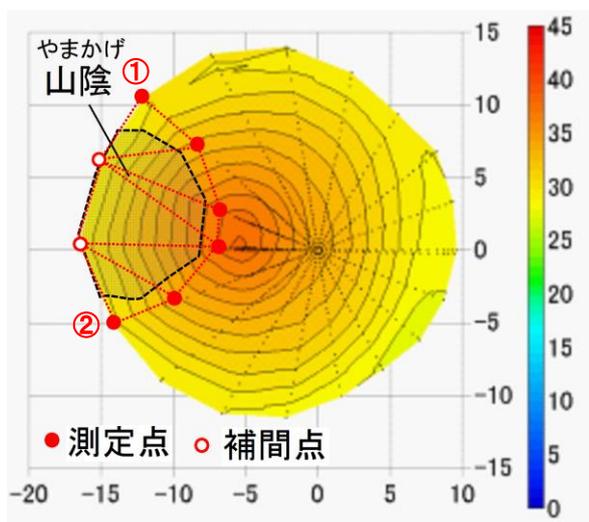
測定されたデータには体積量算出に必要なないデータが含まれており、これを自動処理している。不要データには、貯炭体積量が規定量以上にならないように監視するレベル特高センサのチェーンや、サイロ壁、水蒸気などがあり、周辺データに比べて著しく異なるものを自動で排除している(図15)。

また、貯炭体積量が多くなるとレーザの死角(石炭山陰)が発生して、データが欠損することがある。山陰が発生するのは、石炭を多く受け入

れた直後であるため、欠損箇所を直線（安息角）とみなしている。石炭性状により安息角のばらつきが考えられるため、欠損データ前後の壁測定点から案分して、山陰部の壁データを補間している。



(a) 不要データ等の発生箇所



(b) 欠損壁データの補間

壁測定点①②を案分し、山陰部の壁データを補間

図 15 山陰部の処理

### 4.3 PC制御(PCソフト)

PCは、PLCデータを蓄積し、立体図形作成や各センサのトレンドグラフ表示を行う。また、PLCへアクセスでき遠隔操作も可能である。

#### (1) 立体図形表示機能

PLCで測定したデータを元に、貯炭形状の立体図形を作成している。

#### (2) トレンド表示機能

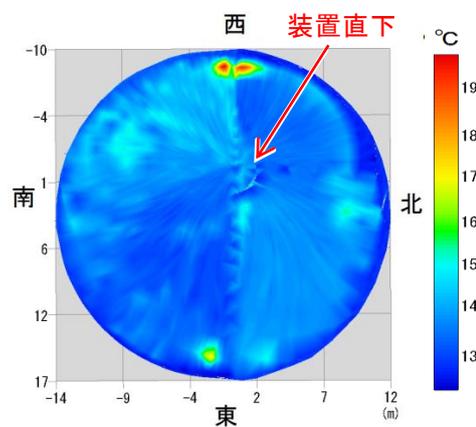
レーザ測定状況（パン角、チルト角、測定距離、レーザ反射強度）や各パージエア流量などのトレンドを表示させており、装置の健全性を確認することができる。これらのデータは無線LAN経由でPLCから取得している。

#### (3) 設定変更・任意測定機能

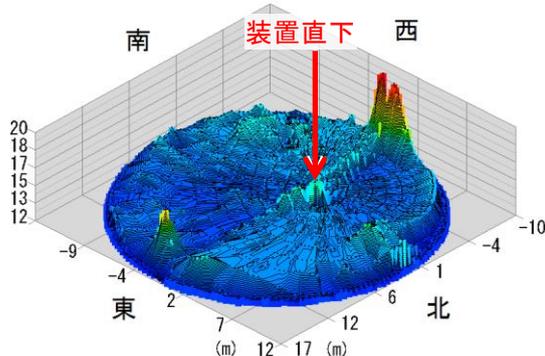
測定開始時間、測定マップ、仮ターゲット座標、モータ回転数など、PLCが制御している機器の設定変更ができる。この機能により、PCからPLCへ任意のレーザ走査測定などの遠隔操作が可能となっている。

#### (4) 石炭表面温度表示機能

本装置には、レーザ距離センサと共に防爆型放射温度計を搭載しており、石炭表面温度も同時測定している。平常時の温度差は僅かであり、0～45℃の温度幅では温度分布は明確ではないため、温度幅を13～20℃に調整したものを図16に示す。



(a) 平面図



(b) 平面図

図 16 石炭表面温度測定結果

## 5. 運用状況

### 5.1 貯炭体積量の測定結果

日中は石炭の受入や石炭バンカへの送炭(払出)により貯炭体積量に変化するため、夜間に貯炭体積量測定を行っている。日々の測定結果例を図17に示す。

貯炭形状の可視化向上のため、鳥瞰図にサイロ内壁を合成させている。

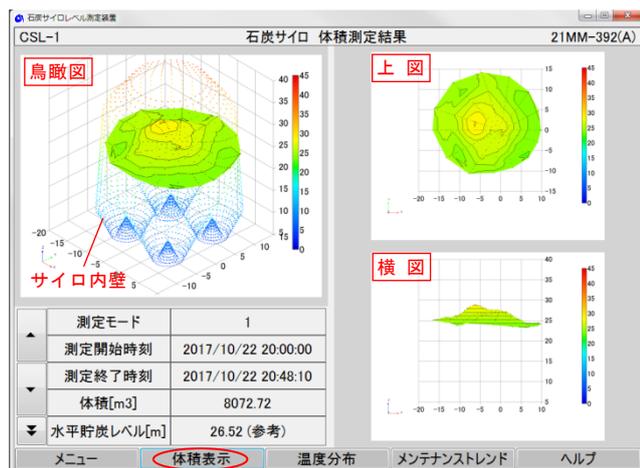


図17 体積量測定結果

### 5.2 温度の測定結果

石炭表面の温度測定結果を図18に示す。最高温度は約30℃であるが、壁際が局部的にやや高くなっていることがわかる。赤外線熱画像カメラのような高精度な発熱監視ではないが、簡易な監視機能としての活用が期待できる。

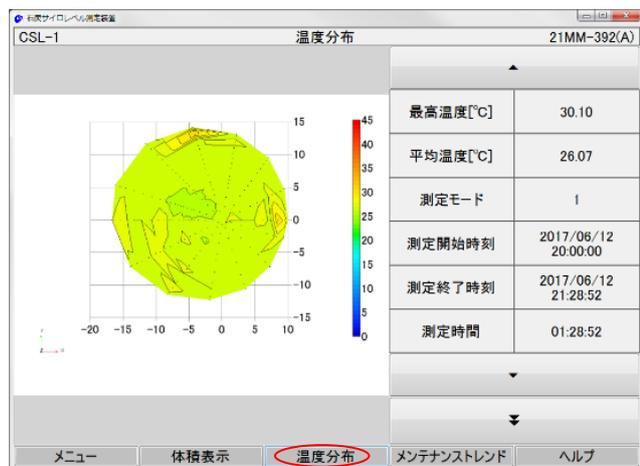


図18 温度測定結果

### 5.3 メンテナンストレンド

図18の温度測定と同日のメンテナンストレンド画面を図19に示す。1日を通して、各種パージエア流量は安定しており、20:00~21:30に貯炭体積量を測定していることがわかる。また、6:00ごろから日差しによるメカユニット温度の上昇、13:00からの石炭受入による石炭温度上昇などが読み取れる。

このように、メンテナンストレンドにより、装置の健全性を遠隔から確認することができる。

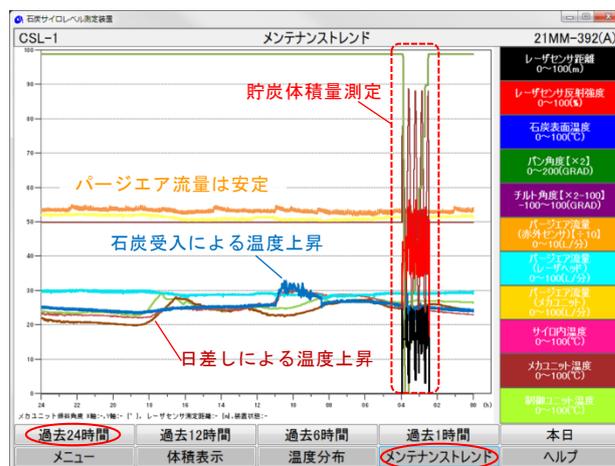


図19 水蒸気過多での連続測定

## 6. まとめ

レーザ走査式貯炭レベル測定装置は、H29年度の試運用において、トラブルなく安定した長期連続稼働が可能であり1年以上メンテナンスフリーであることを確認した。これにより、H30年度からは本運用されており、高精度の貯炭体積量測定に加え、サイロ内貯炭形状の可視化が実現でき、貯炭管理の高度化に貢献している。

### 【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力部より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

## VPP技術を使った新たな住宅向けサービス(第3報)

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 多田 安伸

キーワード： VPPサービス  
EMS  
蓄湯式給湯器  
蓄電池  
発電予想  
需要予想

Key Words : Virtual Power Plant Service  
Energy Management System  
Hot water storage type water heater  
Storage battery  
Power generation prediction  
Demand forecast

### The new residential services with Virtual Power Plant technology (the 3rd report)

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Dept.

Yasunobu Tada

#### Abstract

The Virtual Power Plant(VPP) technologies that control many home devices remotely are in development for effective utilization and home use of solar photovoltaic generation.

We studied the concrete means to realize the VPP services. We proposed the methods to expect the generation kilowatts of photovoltaic cells and the demand kilowatts of houses using the past records of generation and demand kilowatts and the data of weather forecast. We proposed the methods to plan the operation programs of the hot water storage type water heaters (heat pump water heaters) and the Storage batteries of houses.

We studied the operation methods to manage both the home economy and the contribution to power supply and demand adjustments.

## 1. はじめに

小型太陽光発電(10kW 未満)に対する再生可能エネルギー固定価格買取制度(FIT)による買い取りが2019年11月より順次終了することを踏まえ、VPP技術を使った新たな住宅向けサービスに関して2016年度に検討を行った内容についてこれまで2回報告した<sup>1)2)</sup>。前回報告においては、新たな住宅向けサービスとして、蓄エネルギー機器の蓄エネルギー時間帯を、エネルギー需給や価格にあわせて調整する方法、蓄エネルギー機器の運転時間帯調整を行った際の、調整回数や調整電力量を、実際の住宅内電力測定データを使用してシミュレーションを実施し、定量的に評価した結果および、シミュレーションで予想された調整電力量から、蓄エネルギー機器の運転時間帯調整の経済性や実現可能性を評価した結果を報告した。

引き続き2017年度は、太陽光発電電力予想方法、住宅需要予想方法の検討およびこれらを使ったエコキュート・蓄電池運転計画策定方法について検討した。太陽光発電電力予想および住宅需要予想は、全国大でサービスを展開することを想定して、比較的データの得やすい制御対象住宅での実績データと一般的な天気予報(天候および気温の予想)を使って予想することで計画した。2016年度と同じ実際の住宅の電力測定データや天気予報および同じ時期の実際の天候(いずれも気象庁発表データ)を使った検討結果を報告する。

## 2. 太陽光発電電力の予想

### 2.1 太陽光発電電力の予想方法

太陽光発電電力は下記2要素に大きく影響されると考えられる。

- 住宅固有の設置条件

太陽光パネル特性、太陽光パネル設置条件(方位、傾斜角など)

- 気象条件

日射量・気温条件など

すなわち、住宅固有の設置条件と気象条件を組み合わせることで、かなりの精度の予想が可能と考えられる。

ある期間の同じ時間帯の特定住宅の最大発電電力は、その期間の平均的な気温条件下での最高条件の日射量時の発電電力に相当し、住宅固有の設置条件を反映していると考えられる。

気象条件(日射量)により、実際の発電電力量は先に求めた最大発電電力より小さくなる。すなわち、天候による発電電力制限因子を天候係数( $0 < \text{天候係数} < 1$ )と名付

けると、特定時間帯の太陽光発電電力は、  
 $\text{太陽光発電電力} = \text{最大発電電力} \times \text{天候係数}$   
 で求めることができる。毎時のデータが並ぶため、1日では最大発電パターンとなる。(図1)

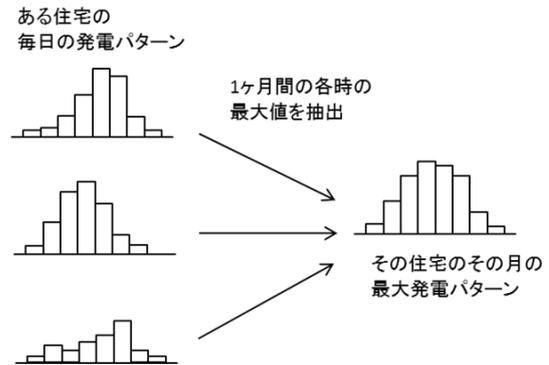


図1 太陽光最大発電パターンの求め方

なお、気温の影響についても補正すべきであるが、平均的な気温の影響は最大発電電力に含まれているため、今回は補正しなかった。

住宅固有の設置条件による特性を把握するためには、ある程度の期間のデータが必要なため、今回の検討では暦の月1ヶ月間のデータを使って特性を分析した。なお、期間の区切りは、実データ分析結果を見ると太陽の天球位置に基づく二十四節気を使った方法(月中旬～翌月上旬)の方が良いと思われる。

天候係数は今回は天気予報に対応させる必要があるため、天気予報の予報文(晴れ、晴れ時々曇り、曇りなど)に相当する天候実績時の太陽光発電データを使って求めた。(図2)

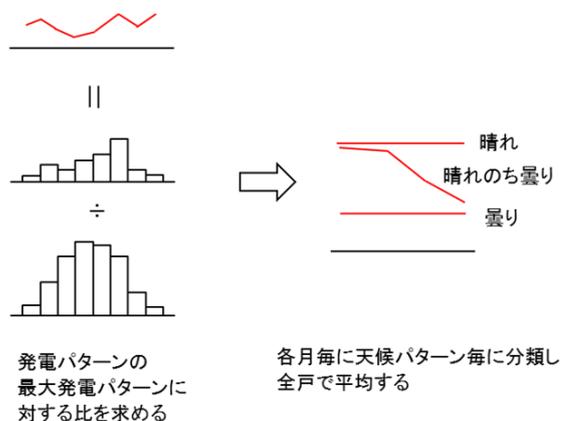


図2 天候係数の求め方

## 2.2 太陽光最大発電パターン

住宅太陽光発電実績データを使って、最大発電パターンを求めた例を図3に示す。太陽光単位容量(1kW)あたりの毎時の発電電力量で表示している。

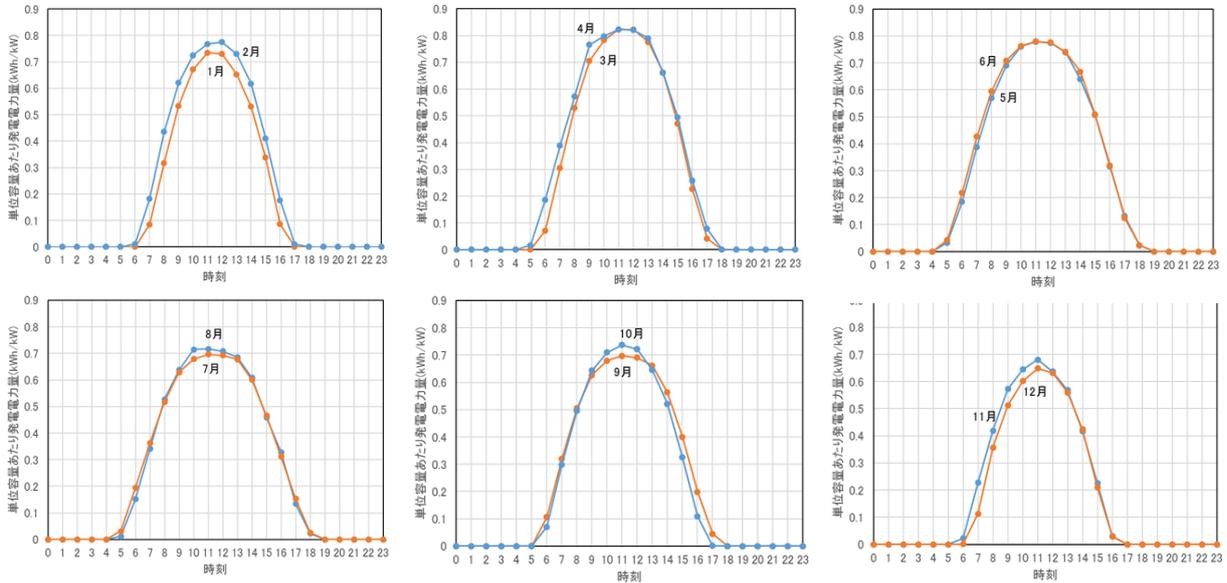


図3 太陽光最大発電パターンの例

## 2.3 天候係数

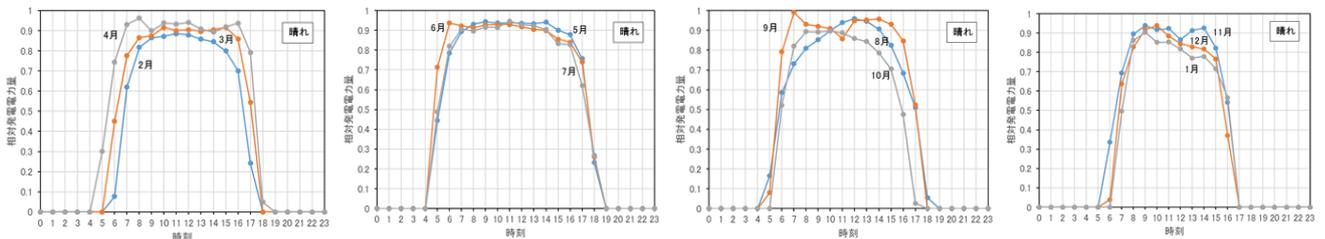
地理的に近い複数の住宅太陽光発電実績データを使って、天候係数平均値を求めた例を図4に示す。なお、天候が変化する場合(例えば晴れのち曇り)は、それぞれの天候の天候係数(晴れと曇り)を組み合わせて対応する。

天候は表1の13分類とした。日射を主に考慮して雨天は(曇り一時雨～雨)ひとくりにまとめた。

表1 天候分類

晴れ	晴れ時々曇り	曇り時々晴れ	晴れのち曇り
晴れのち時々曇り	曇りのち晴れ	曇りのち時々晴れ	曇り
雨	曇りのち雨	雨のち曇り	晴れのち雨
雨のち晴れ	—	—	—

### (1) 晴れ



### (2) 晴れ時々曇り

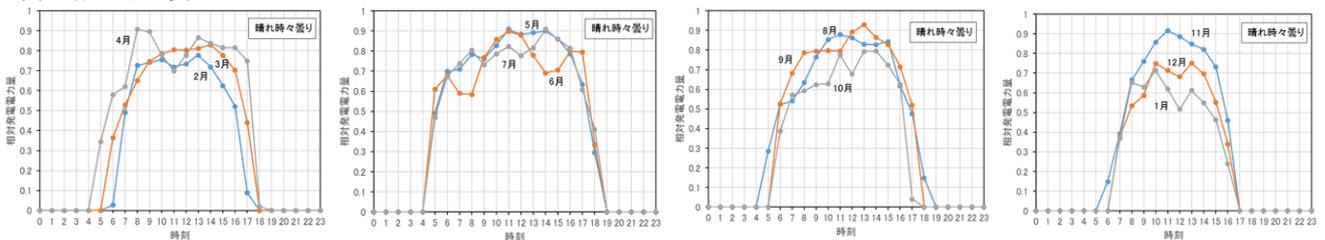
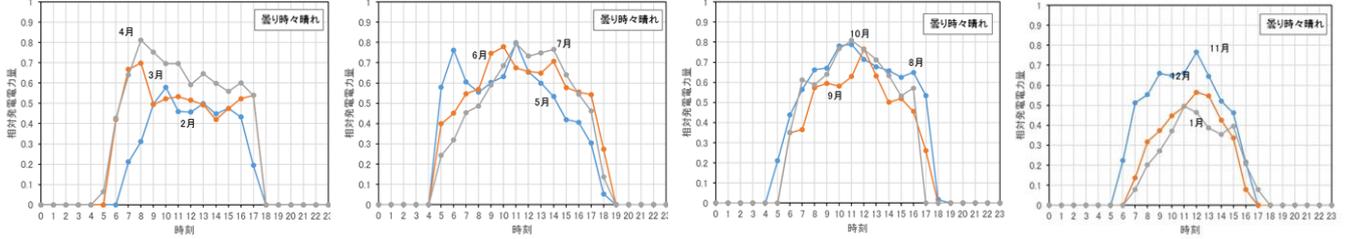
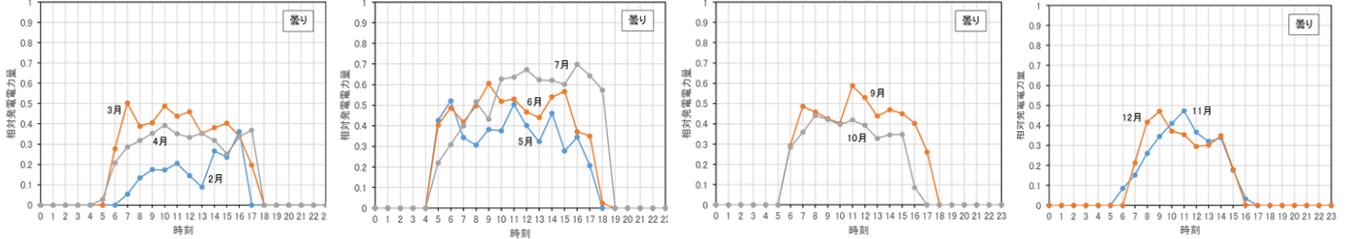


図4 天候係数の例〔(1)～(2)〕

(3) 曇り時々晴れ



(4) 曇り



(5) 雨

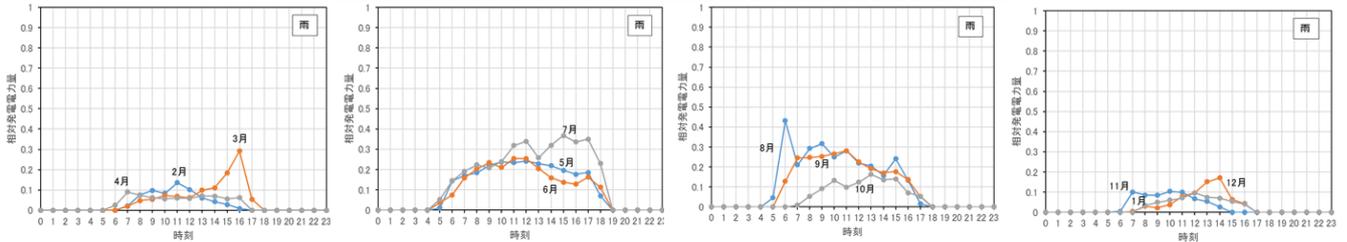


図 4 天候係数の例[(3)~(5)]

天候係数には変動があるため、8時~15時の間の天候係数を平均した結果を図5に示す。冬場は太陽高度が低いため、特に悪天候時に値が小さくなる傾向がある。なお、雨天に関しては比較的明るい(日射量が多い)場合と非常に暗い(極端に日射量が少ない)場合があり本来は2分類する必要があるが、普通の天気予想では区別できないため、ひとまず平均値とした。

図の平均値は予想に使うには変動が大きいため、予想用の単純化した天候係数割切り値を作成した。(図6)

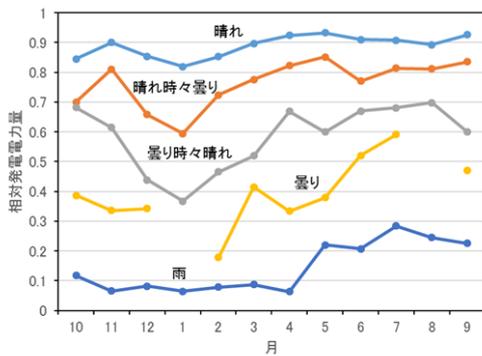


図 5 天候係数 8 時~15 時平均値

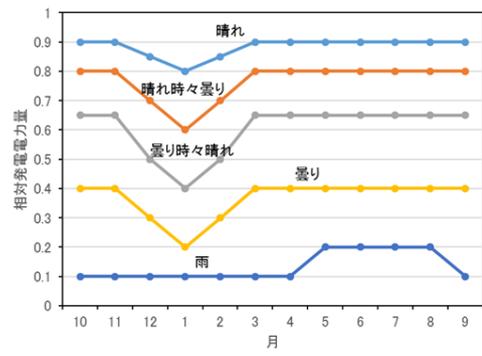


図 6 天候係数割切り値

天候係数割り値を使って予想用の天候係数を求めた結果を図7に示す。

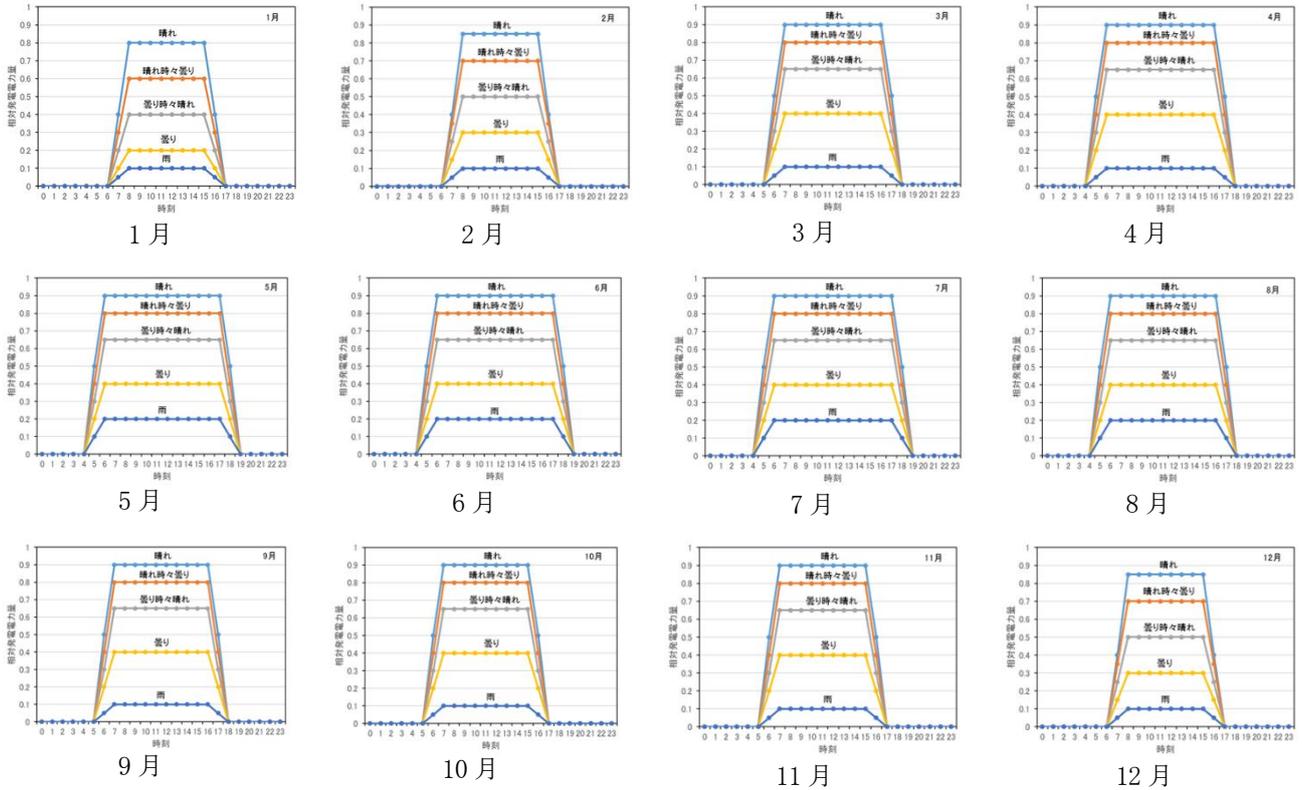


図7 予想用天候係数

天候が変わる場合(例えば晴れのち曇り)は、天候係数を途中で切り替えることで対応する。天候がどの時刻で変わるかで発電電力量に大きな影響があるが、通常の天気予報では対応できず 12 時切替とせざるを得ない。地域時系列予報(3 時間毎の予報)の利用が可能であれば、切替時刻を調整できる。ただし、現状の地域時系列予報では9時、12時、15時の切替となる。晴れのち曇りで切替時刻を変えた場合の天候係数および単位容量あたりの発電電力量の例を図8および図9に示す。

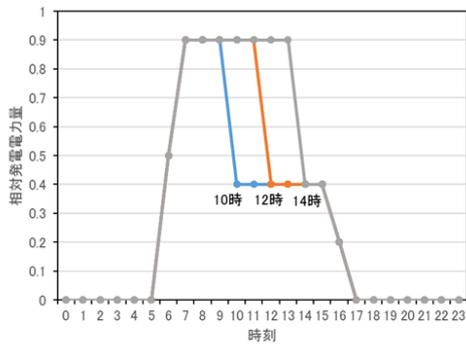


図8 晴れのち曇りの天候係数例

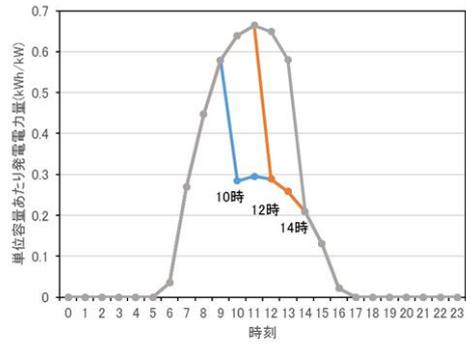


図9 晴れのち曇りの発電予想例

## 2.4 実際の住宅での予想

実際の住宅の最大発電パターンと天候係数および天気予報から毎時の太陽光発電電力を予想した結果と実際の発電電力を比較した例(10月および1月)を図10および11に示す。秋はかなり一致しているが冬は季節風に伴う雨(雪)が予想される際の外れが大きい(予想より実績が相当多い)。冬期の通り雨(雪)時は晴れ間も多いことがこの原因と考えられ、発電実績分析により地域特性を把握し、これに合わせた補正が必要ながうかがわれる。

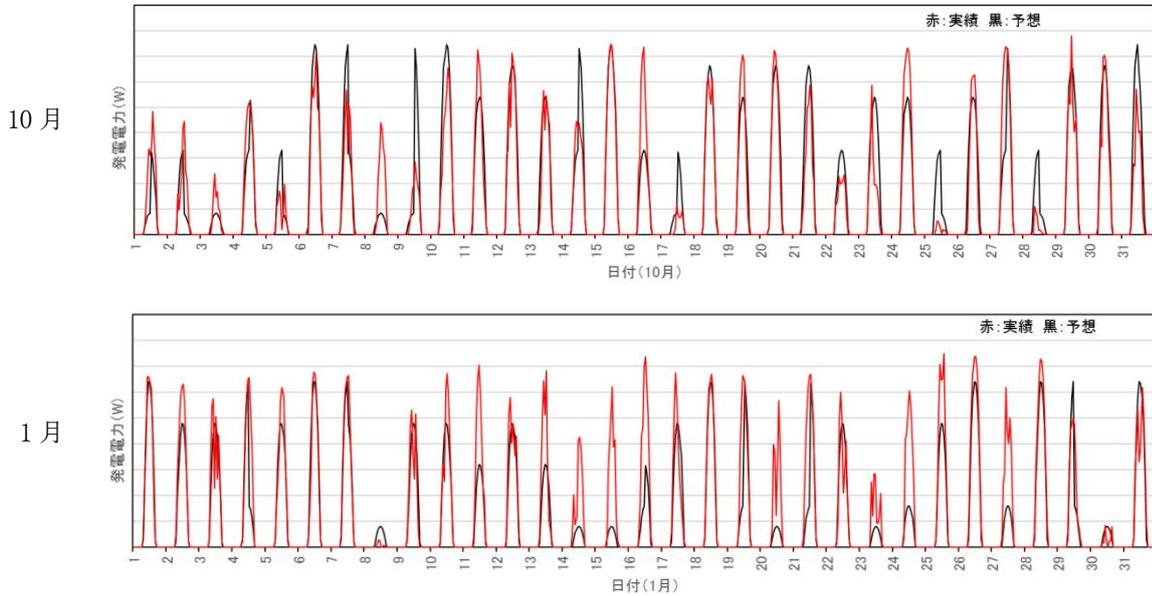


図10 太陽光発電電力予想および実績の例(10月、1月)

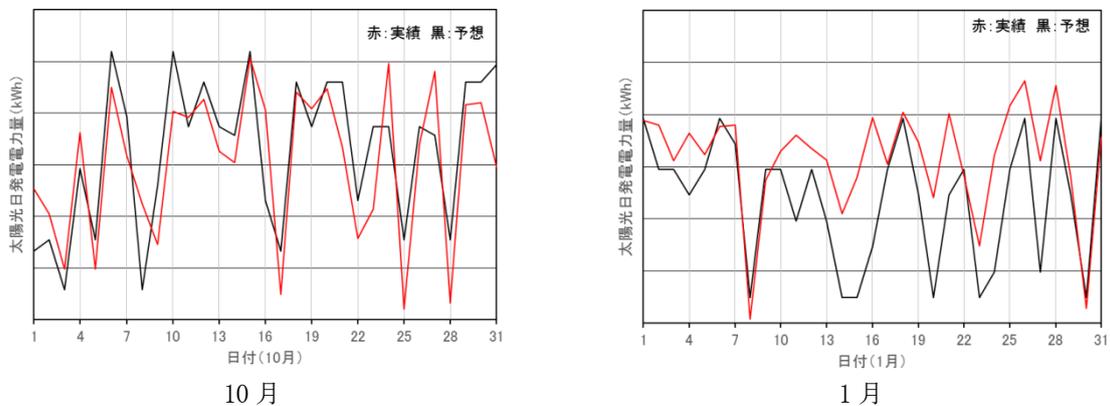


図11 太陽光日発電電力量予想および実績の例(10月、1月)

## 3. 住宅電力需要の予想

### 3.1 住宅電力需要の特徴

ZEH(ゼロエネルギーハウス)の住宅需要の分析結果<sup>2)</sup>から、対象住宅の電力需要は下記特徴がある。

- ・空調需要、給湯需要(エコキュート)は外気温の影響が大きい。
- ・その他需要(照明、調理等)は季節間の差異はあるがほぼ一定である。

このことから、住宅電力需要の予想は下記3要素に分けて予想し、加算することで可能と考えられる。

- ・空調需要(温度補正必要)
- ・給湯需要(温度補正必要)
- ・その他需要

### 3.2 空調電力需要温度特性

複数の住宅の空調日消費電力量と当該日の近隣測候所の平均気温、最低気温、最高気温との関係を図12に示す。住宅間の差をなくするために消費電力量は住宅毎の最大消費電力量で正規化している。ほぼ同じ仕様の住宅のため住宅間の差異はほとんどなかった。住宅の空調消費電力量と気温との相関は、

平均気温 > 最低気温 > 最高気温

となっている。

したがって、空調電力需要を予想する際の温度補正は、当該日の平均気温予想を使うことが望ましいが、通常の天気予報には最高気温、最低気温の予想しかないので、最低気温予想を使用した。また、5月および10月は空調はほとんど使われていないため、暖房時(11月～4月)、冷房時(6月～9月)に分けて相関式を求めた。

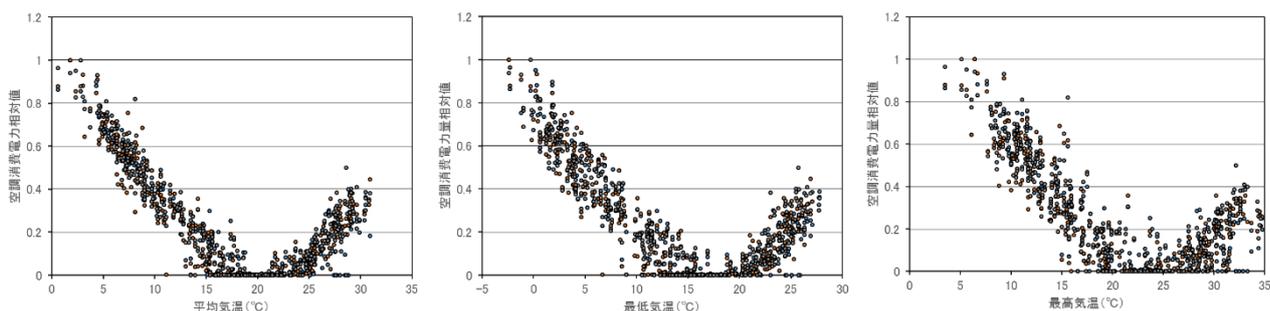


図12 気温と空調日消費電力量の関係

### 3.3 給湯(エコキュート)電力需要温度特性

複数の住宅のエコキュート日消費電力量と当該日の近隣測候所の平均気温、最低気温、最高気温との関係を図13に示す。住宅間の差をなくするために消費電力量は住宅毎の最大消費電力量で正規化している。住宅間の差異はほとんどなかった。消費電力量と気温との相関は、

平均気温～最低気温 > 最高気温

となっている。

エコキュートの運転は現状夜間のため最低気温との相関も高く、エコキュート消費電力を予想する際の温度補正は、当該日の最低気温予想を使用した。最低気温と消費電力量の相関式を求めた。

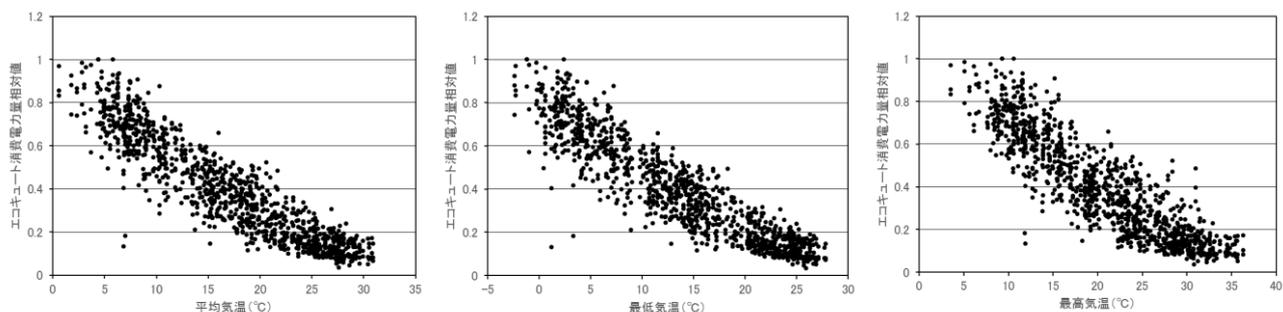


図13 気温とエコキュート消費電力量の関係

### 3.4 住宅電力需要予想方法

住宅電力需要の特徴から、空調電力需要予想、エコキュート電力需要予想、その他電力需要予想を個別に行い、足し合わせて全体の電力需要予想を行った。

それぞれの需要の予想は、複数の過去実績、ただし空調およびエコキュートは実績時の最低気温と予想時の最低気温の差異により先に求めた温度感度で補正した実績値を平均する手法を採用した。

どの過去実績を使用するかは、実際のデータを調査して、下記2とおりの方法を試した。

(1) 極力至近データを使う方法

昨日実績、一昨日実績、1週間前実績の平均

(2) 1年前のデータを使う方法

昨日実績、1週間前実績、1年前実績の平均

至近日のデータは、気温に近いこともありかなり類似性が見られた。実際のデータでは明確な傾向は見いだせなかったが、生活パターンには曜日の周期性があると考えられることから1週間前のデータを採用した。ただし、2週間より前のデータでは気温の差異が大きく、温度補正量が大きくなるため、適切でないと判断した。1年前のデータに関しても天候や生活パターンが反映されると考え採用した。

一方で、データ蓄積の観点からは極力至近データを使う方がデータ蓄積量が少なく済むことから、(1)の方が望ましい。

### 3.5 住宅電力需要予想結果

予想に使用する過去実績データを2通りとして住宅電力需要を予想した。予想結果の例(1月)の各要素の日消費電力量を図14に、予想誤差の絶対値の1ヶ月合計を表2に示す。また、毎時の電力値を図15に示す。

正月は昨年実績使用分が実績に近い。その他の通常日は至近実績使用分と昨年実績使用分の差異はほとんどなかった。また、過去実績平均のためいずれの場合でも突発的な需要の大きな変動は予想できていないが、実用レベルの予想はできている。

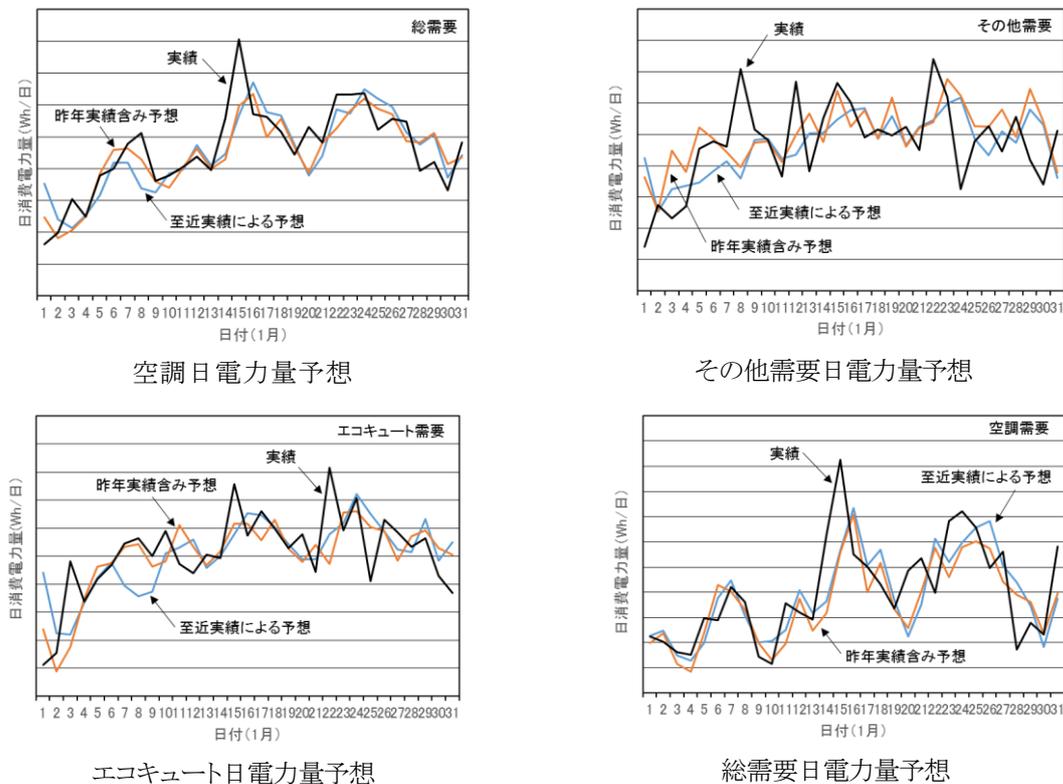
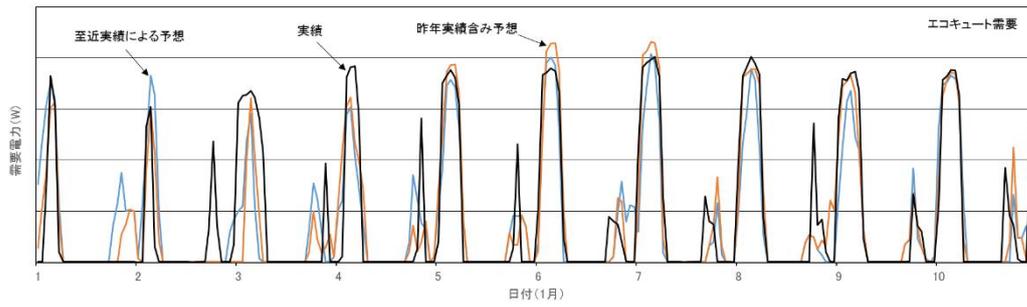
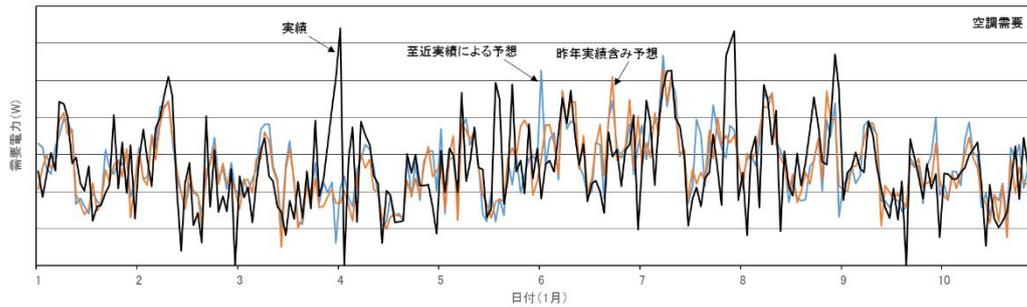


図14 住宅電力需要(日消費電力量)予想例

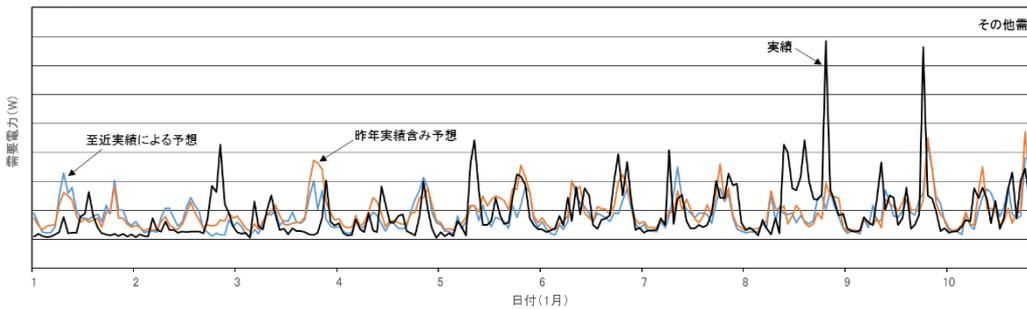
エコキュート



空調



その他



総需要

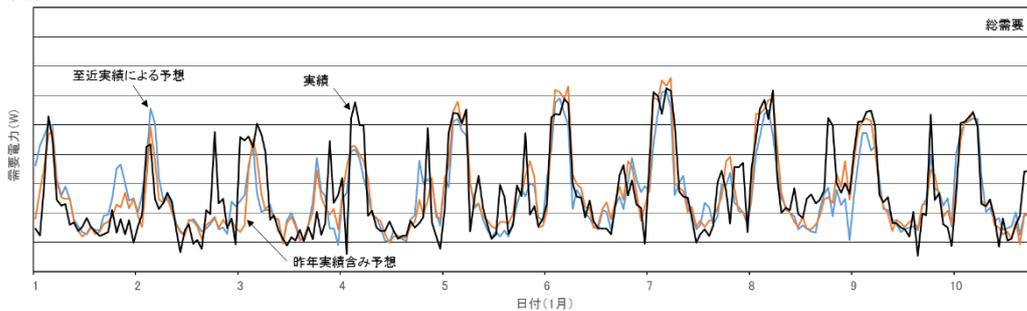


図 15 住宅電力需要(電力)予想例

表2の予想誤差絶対値の合計を見ると、昨年実績使用分が総需要で若干誤差が少ないが、ほぼ同等である。以上のことから、住宅電力需要予想は1週間前までの至近データ使用で十分といえる。

表2 1ヶ月間予想誤差絶対値累計(kWh)

	その他需要	空調需要	EQ需要	総需要
至近実績による予想	32.8	69.7	56.8	101.2
昨年実績を含む予想	33.4	68.4	52.7	86.7

#### 4. エコキュート・蓄電池運転計画の作成

##### 4.1 運転計画作成方法の基本的な考え方

基本的な考え方は、先に行ったシミュレーション<sup>2)</sup>と全く同じである。昼間に太陽光余剰電力の発生が予想される場合、まずエコキュートを太陽光余剰電力で運転することができるか検討し、優先順位の高い時間帯に運転時間をシフトする。次にエコキュートシフト後の余剰電力を蓄電池の充電に充て、夕方に放電して供給することを検討する。

##### 4.2 エコキュート運転計画作成方法

住宅の立場からは昼間時間帯のエコキュートの運転は夕方の給湯需要までの放熱の少ない午後が望ましい。晴天で広い時間帯にシフトできる場合は、電力需給状況に合わせて運転時間帯を調整することも可能である。

朝の給湯需要を考慮して運転シフト時間は最大4時間とし、エコキュートの運転時間が4時間を超える場合は残り時間分は夜間に運転する。夜間運転時間帯は住宅の立場からは朝の給湯需要までの放熱が少ない早朝が望ましいが、電力需給状況に合わせて運転時間帯を調整することも可能である。また、外部からの指令なしに自律的に負荷平準化を行える乱数を使った平準化手法<sup>3)</sup>により運転時間帯を調整することも考えられる。エコキュートの運転時間が4時間以下の場合、残湯量が十分あると考えられることから夜間運転は行わず、昼間運転のみとする。(図16)

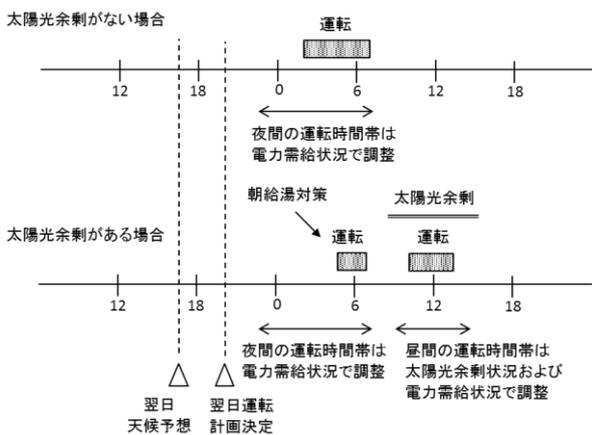


図16 エコキュート運転時間帯シフトの考え方

昼間運転時間帯の決定は、まず昼間運転するエコキュートの予想消費電力カーブを求め、複数の想定する運転時間帯(図17の例では5つの時間帯)にエコキュート予想消費電力カーブをあてはめ、別途太陽光発電電力予想、需要電力予想から求めた余剰電力カーブと比較して受電が発生しない(余剰電力でエコキュート運転電力をまかなえる)場合はシフト可能と判断する。複数の運転時間帯でシフト可能な場合は、午後の遅い時間帯から選択する。電力需給調整の要請がある場合は、要請のある時間帯を選択する。

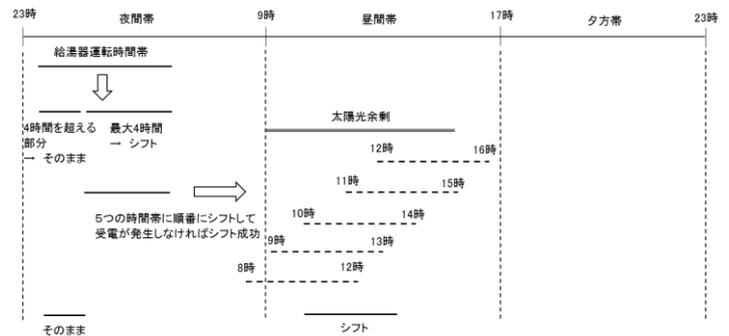


図17 運転シフト可否の判断方法

##### 4.3 蓄電池運転計画作成方法

蓄電池の運転は次の2つの目的がある。

- ・太陽光余剰の有効活用  
太陽光余剰電力を蓄電し、夕方放電する。
- ・昼夜間電力価格差による需要シフト  
夜間帯の安価な電力で充電し、電力単価の高価な昼間夕方に放電する。

太陽光余剰の有効活用は余剰電力買取り価格に影響を受け、昼夜間電力価格差による需要シフトは昼夜間電力価格差に影響を受け、価格によっては成立しない<sup>1)</sup>。太陽光地産地消の観点から、太陽光余剰有効活用を優先することにした。また、調整の柔軟性に劣るエコキュートの昼間シフトを蓄電池より優先させた。

晴天で太陽光発電が見込まれる場合は蓄電池は朝方には全放電として、太陽光余剰電力を積極的に蓄電池充電に使用することとし、太陽光発電が停止する夕刻からは蓄電池から放電して住宅需要をまかなう。

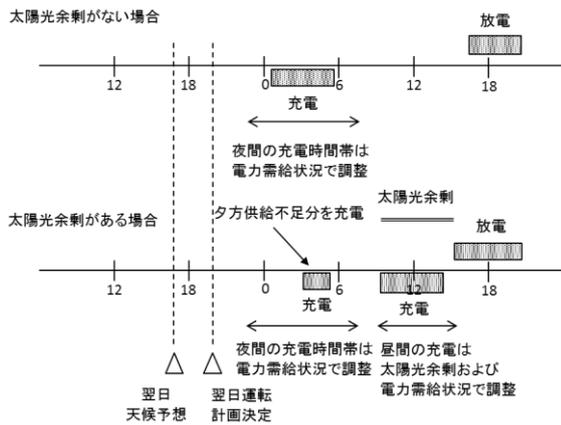


図 18 蓄電池運転の考え方

まず、太陽光発電電力と住宅電力需要の翌日予想(エコキュート昼間シフト後)を作成し、太陽光余剰電力を求め、蓄電池は朝方全放電である前提で太陽光余剰電力を制限内で最大限蓄電池に充電することで蓄電池の蓄電電力量を求める。蓄電電力量は充放電損失を除いた値(蓄電池容量は放電基準のため、充電時にすべての損失が生じるとした計算が蓄電池容量を適切に反映できる)とする。通常は太陽光の容量より蓄電池の容量が小さいため、太陽光余剰により早めに蓄電池は満充電となる。電力需給調整のための余剰充電時間帯調整は、モード切替(停止・グリーンモード)の時刻調整で行う。昼間夕方太陽光余剰がない時間帯は制限内で最大限蓄電池を放電して受電電力量を削減する。

曇天や雨天で昼間に太陽光余剰での充電で蓄電池が満充電にならず夕方需要をまかなえない場合は、蓄電池の残り充電可能電力量と夕方不足電力量の少ない方を夜間(早朝)に充電する(充電電力量は充放電損失分蓄電電力量より多くなる)。ここで、当日の夕方時間帯終了時(23時以降は原則蓄電池放電なし)に蓄電池が全放電でない場合は、蓄電池の蓄電残量と夜間追加充電量を比較し、蓄電残量が多い場合は夜間充電電力量を超えている部分を夜間(早朝)に放電する。夜間充電電力量が多い場合は不足分を充電する。

さらに太陽光余剰が発生するまでの朝方の昼間帯受電を蓄電池でまかなうため、受電電力量予想値に見合う電力を充電する。ただし、蓄電池容量制限までとなる。

翌日の蓄電池運転計画作成の基本手順を図19に示す。夜間充電時間帯については別途外部からの指令で調整し、指令がない場合は0時から実施する。夜間の放電に関しては0時から需要に応じて逆潮流がない条件で行う。夜間需要は少ないため、使い切れないことも十分あり得、

その場合は昼間の送電が増えることになる。なお、当日夕刻に翌日予想を行う必要があるため、需要予想のための需要実績データは当日分のデータがそろっておらず、当日の前日、前々日および当該日(翌日)の1週間前データを使用する。

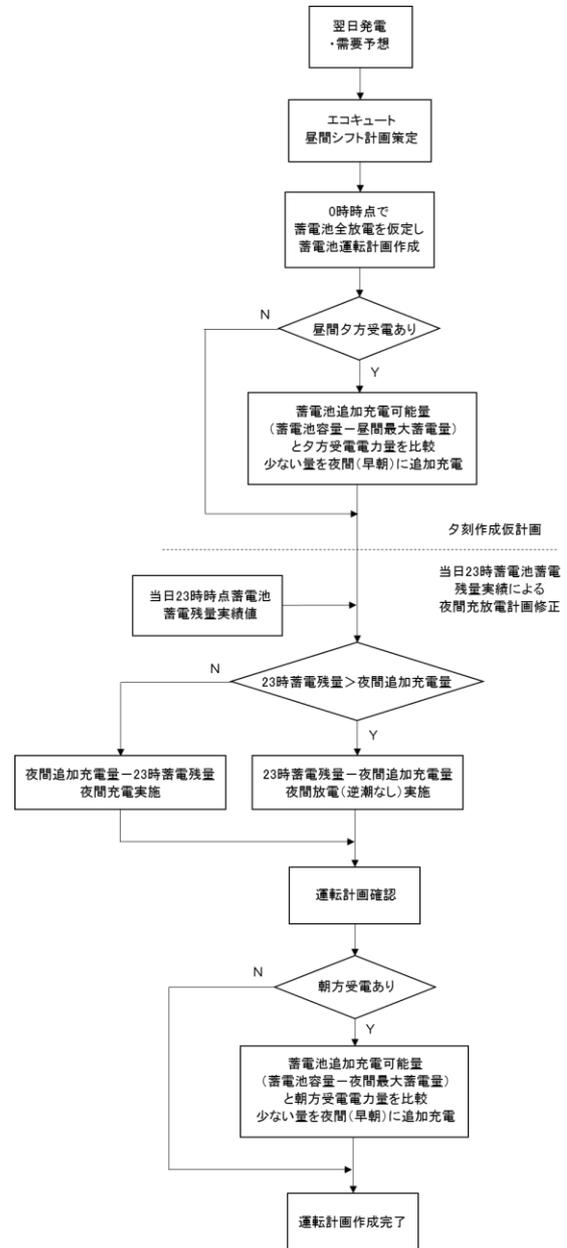


図 19 蓄電池運転計画作成手順

#### 4.4 実績データ蓄積期間中の対応

実績データを使って発電や需要の予想を行うためには実績データの蓄積が必要であり、その間(最低1年間)は発電・需要予想による運転制御が行えない。その間の運転制御をどうするかという課題への対応を検討した。



## 5. 電気料金との関係

ここまでは、昼夜でかなり大きな電気料金単価差があるという前提で検討を行ってきた。一方で Loop でんきのように基本料金なし 24 時間単一単価という単純な電気料金がすでに出現していること、太陽光の大量導入で火力燃料費限界価格は昼間が安価で夕方夜間が高価と料金とは逆になっていること等を考えると、今後は昼夜の電気料金単価差は小さくなっていく（夜間が上昇し昼間は低下する）ことが考えられ、その影響を検討した。

### 5.1 給湯器(エコキュート)への影響

夜間の電力単価の上昇は、太陽光余剰電力買取り単価（火力燃料費限界価格から高価になるとは考えにくい）との差が大きくなり、太陽光余剰電力によるエコキュート昼間運転の利益が大きくなる。太陽光 FIT 買取り終了住宅におけるエコキュート昼間運転は、今後とも経済性が得られると考えられる。

### 5.2 蓄電池への影響

蓄電池の 2 つの運転目的

- ・太陽光余剰の有効活用
- ・昼夜間電力価格差による需要シフト

のうち、昼夜間電力価格差による需要シフトに関しては蓄電池充放電損失から昼夜間で 1.5 倍程度の単価差が必要で、今後経済的に成り立たなくなる可能性がある。また、この場合は夜間充電がなくなることからその制御も不要となる

需要シフトにより得られる利益がなくなることで蓄電池設置により得られる利益は小さくなり、現状でも蓄電池の経済性は低いとさらに低くなると考えられる。また、需要シフトに使われる蓄電池容量は不要ということになる。2 つの運転目的下での住宅用蓄電池最適容量は 6kWh 程度（実効容量）とされている<sup>5)</sup>が、昼夜間需要シフトがなくなると最適容量は小さくなると予想される。現に Loop でんきは蓄電池容量 4kWh を推奨している。また、太陽光 5kW 蓄電池 6kWh の蓄電池運用シミュレーション<sup>2)</sup>において、昼夜間需要シフトをなくすると充電電力量は約 30%減少する。

このように蓄電池の経済性は現状でも低いと今後さらに低下する恐れがあり、経済性だけの設置は難しいと思われる。蓄電池の導入にあたっては停電時の安全安心対策等電気代以外の効用も考慮する必要があると考えられる。

### 5.3 高速 VPP への影響

住宅蓄電池を準リアルタイムで電力需給調整に使用する国プロで開発されている高速 VPP において、外部から

の遠隔運転操作を行った際の電気代精算方法については現時点で一切報告がなされていない。そこであくまで目安を得る目的で単純な仮定をして試算を行った。

住宅側から見ると、外部指令で蓄電池を放電するとその分蓄電池蓄電電力量が不足するため、不足分を系統から受電しなければならない。外部指令で蓄電池を充電するとその分蓄電池蓄電電力量が余るため、余剰分を消費しなければならない。太陽光余剰を充電する予定の場合は充電できずその分余剰を送電しなければならない。住宅蓄電池を外部から操作した後の住宅での受電や消費の時期は不明確であり、電力単価が一定でない場合はその時期が特定できないことから精算が難しい。電力単価が一定であると受電や消費の時期に影響されないため、精算が比較的容易に可能となる。

試算にあたって、下記の条件等を仮定した。

- ・蓄電池外部制御の精算は、蓄電池充放電電力量で行う。そのため、蓄電池出口に取引用電力量計を設置する。(図 21)
- ・蓄電池外部制御による充放電中でも、住宅側は住宅送受電電力量で通常どおり代金の精算を行う。住宅の送受電電力量は、受電点電力量(スマートメータ計量値)から蓄電池充放電電力量を差し引いて求める。(図 21)
- ・蓄電池外部制御後の影響は、余剰分は住宅で使用する、不足分は外部から受電する、太陽光が余る場合は売電するなど住宅側で処理する。
- ・蓄電池外部制御による充放電の電力量は住宅には課金しない。
- ・蓄電池外部制御後の住宅側での処理に対してアグリゲータは充放電電力量に応じた礼金を支払う。
- ・余剰分の消費時にはその分(充電電力量×蓄電池充放電効率)住宅は受電しないため、礼金を差し引いた安価な単価で精算(電力使用分請求)する。
- ・不足分の受電時には住宅はその分(放電電力量)余剰分に受電するため、受電電力量に対応する代金に礼金を加算して精算(通常の電力使用分請求を補填)する。
- ・蓄電池外部制御の充電により太陽光余剰が発生し売電した場合は、余剰分(充電電力量×蓄電池充放電効率)の精算(電力使用分請求)は同じである。ただし、本来太陽光で充電して自己消費するはずであったので、この請求分を補填する。なお、別途太陽光の売電利益が発生しているため、この分は補填から差し引く。

- 蓄電池外部制御の放電により太陽光余剰を充電した場合は、本来余剰は売電されるはずだったので、この部分を補填する。ただし、太陽光余剰が発生する場合は事前に蓄電池を放電しておくため、そもそも外部制御により放電できるだけの蓄電量は無い。従ってこのようなケースは基本ないため、考慮する必要はない。
- 蓄電池外部制御による充電および放電が短時間内に続けて行われた場合は、住宅への影響は実質充放電差のみとなるため、充放電差分で精算する。

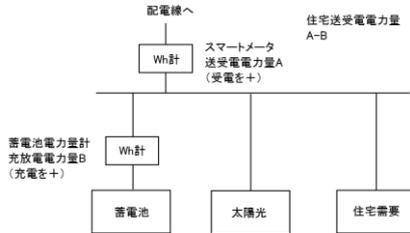


図 21 電力量計位置

表4の単価を仮に設定して、住宅の収支がどうなるか試算した。

表 4 単価等

種別	単価等
受電単価	20円/kWh
太陽光余剰売電単価	7円/kWh
VPP協力礼金	5円/kWh
充放電効率	70%

(1) 外部制御で放電した場合(図 22)

蓄電池外部制御で3kWh 放電したとすると、住宅は後で不足分 3kWh 余分に受電するため、その分の電気代とVPP 協力礼金を精算する。

$$3\text{kWh} \times (20 \text{ 円/kWh} + 5 \text{ 円/kWh}) = 75 \text{ 円}$$

この内 3kWh 分の 60 円は受電電気代として請求されるため、差し引き礼金分の 15 円が住宅の利益となる。

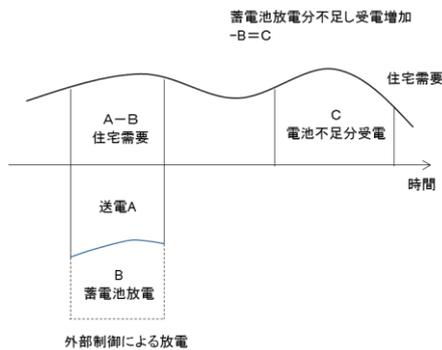


図 22 外部制御で放電した場合

(2) 外部制御で充電した場合(図 23)

蓄電池外部制御で3kWh 充電したとすると、住宅は後で充電分(充電電力量×充放電効率)を消費する。その分受電電力量は減少するため、その分の電気代を請求しVPP 協力礼金を精算する。

$$\text{消費分 } 3\text{kWh} \times 0.7 \times 20 \text{ 円/kWh} = 42 \text{ 円}$$

$$\text{礼金 } 3\text{kWh} \times 5 \text{ 円/kWh} = 15 \text{ 円}$$

差し引き  $42 - 15 = 27$  円の請求となる。礼金分 15 円が住宅の利益となる。

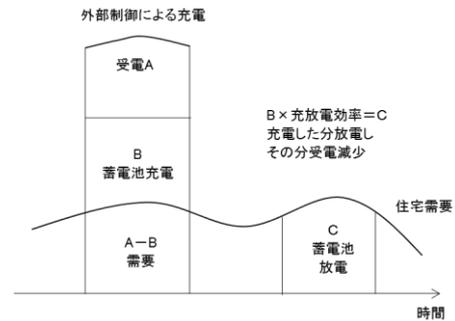


図 23 外部制御で充電した場合

(3) 外部制御で充電し太陽光余剰が発生した場合(図 24)

蓄電池外部制御で3kWh 充電したとすると、住宅は後で充電分(充電電力量×充放電効率)を消費する。その分受電電力量は減少するため、その分の電気代を請求しVPP 協力礼金を精算する。ただし、太陽光余剰増加による売電増があるためこの分も精算する。

$$\text{消費分 } 3\text{kWh} \times 0.7 \times 20 \text{ 円/kWh} = 42 \text{ 円}$$

$$\text{礼金 } 3\text{kWh} \times 5 \text{ 円/kWh} = 15 \text{ 円}$$

$$\text{売電増 } 3\text{kWh} \times 7 \text{ 円/kWh} = 21 \text{ 円}$$

差し引き  $42 - 15 + 21 = 48$  円の請求となる。売電利益は別途支払われるため、差し引き礼金分 15 円が住宅の利益となる。

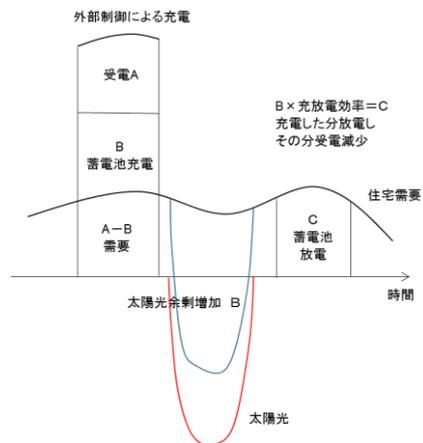


図 24 外部制御で充電(余剰発生)した場合

## 5.4 蓄電池を外部が所有する場合

これまで住宅側で蓄電池を所有している前提であったが、蓄電池を外部で所有し、住宅に有料で使ってもらうビジネスモデル（太陽光のいわゆる屋根貸しと同じ）もありうる。この場合は外部からの充放電には住宅との金銭の授受は生じず、蓄電池の住宅側の利用に課金（太陽光余剰充放電など 充電すれば放電するので充電側だけに課金で十分）することになる。住宅側で充電していた分を外部制御で放電した場合は、同様な精算を行えば良い。

高速 VPP 制御を頻繁に行う場合は、住宅から場所を借りて外部が蓄電池を設置する、このビジネスモデルの方がわかりやすいと思われる。もちろん別途場所借り代を住宅に支払う必要がある。問題はここまでして高速 VPP 制御することに経済合理性があるかどうかである。現状では調整力市場等いわゆる kW 価値の情勢が不透明なため、評価することができなかったが、おそらく経済的に成立することは難しいと予想される。

## 6. まとめ

### (1) 太陽光発電・住宅需要予想

- 個々の住宅の発電実績データと天気予報レベルの天候実績および予報で、実用レベルの発電電力予想は可能である。ただし、天候の地域特性の配慮は必要である。
- 個々の住宅の需要実績データを、温度感度の高い空調需要・給湯器（エコキュート）需要、年間を通してほぼ一定のその他需要の 3 要素に分けて分析することで、実用レベルの住宅電力需要予想は可能である。
- 実績データを得るまでの期間（1 年間）は、エコキュートは晴天予想時に 10 時から運転、蓄電池はグリーンモードとし、悪天候予想時に夜間満充電で対応できると考えられる。
- 電力計測付き分電盤の使用を前提に検討したが、既築住宅では分電盤を交換できない場合も想定される。その場合はスマートメータあるいは蓄電池の連系点電力計測機能を利用して送受電電力から予想する必要がある。同じ考え方で対応できると考えられるが、その評価は今後の課題である。

### (2) エコキュートの運転時間帯調整

- 太陽光余剰活用を目的としたエコキュート運転時間帯夜昼シフトは、十分経済性に成り立つと予想される。
- 昼間シフト時のエコキュート運転時間帯は、夜間と昼間に分割し、それぞれの運転時間帯は電力需給状況に合わせて調整する。

### (3) 蓄電池運転調整

- 太陽光 FIT 買取り終了住宅での太陽光余剰電力有効活用のための蓄電池運転は、グリーンモード（余剰電力充電）を基本とし、悪天候による蓄電不足時に夜間に適切量充電することで対応できる。
- 蓄電池容量が相対的に小さいため、自然体では早い時刻に満充電となるため、電力需給状況に合わせて充電開始時刻を調整することができる。同様に電力需給状況に合わせて夜間充電時間帯の調整ができる。
- 現状の夜昼格差の大きい電力単価であれば、夜昼需要シフトのための夜間充電は有効であるが、単価差が小さくなると夜間充電の意味がなくなる。この場合蓄電池設置の利益が小さくなり、必要蓄電池容量も小さくなる。現状でも蓄電池は高価で経済性は成り立たないが、昼夜電力単価差が小さくなればさらに成り立たなくなる恐れがある。
- 蓄電池に取引用電力量計を設置し、受電点電力量計（スマートメータ）計量値から蓄電池充放電電力量計計量値を差し引くことで住宅の送受電電力量を計測できる。2 個の取引用電力量計計測値で蓄電池を外部制御で充放電した際の精算を行うことができる。

## 7. 今後の課題

- 太陽光発電電力予想への天気予報の利用に関して、今回は 1 地域のみでの検討であったので、多数の地域の実績データ分析を行うことにより地域特性差がどの程度あるか評価が必要である。もちろん外部の太陽光発電電力予想値を活用することも検討に値する。
- 住宅内の詳細な電力量測定が困難な場合も十分あり得るため、スマートメータや蓄電池から得られる受電点送受電電力データ分析から太陽光余剰電力や住宅需要を予想し、エコキュートや蓄電池の運転計画を作成する手法の検討が必要である。かなり多数の住宅のデータ分析が必要と思われる。
- 机上で検討できる範囲はこれまでにほぼ網羅できたと思われ、今後は実際の住宅あるいは住宅を模擬した実験装置での機器制御実験およびデータ測定が必要である。実証実験を通じて制御装置や制御方法の改良を進めていく必要がある。
- 蓄電池取引用電力量計設置による住宅との費用精算ビジネスモデルの例や外部から住宅に蓄電池を置かしてもらったビジネスモデルの例を示した。今後の実用的なシステムの構築にはビジネスモデルの確定が不

可欠なため、早急にビジネスモデルを確定させる必要がある。

## 8. むすび

本稿は平成29年に実施した社内自主調査研究の成果の一部をまとめたものである。一連のVPPサービスに関する3部作で、VPPサービスの基本的な考え方から装置構成、制御方法、制御した場合のシミュレーションによる評価、簡単ではあるがビジネスモデルの提案等事業化に必要な事項をひとつとおり網羅できたと思われる。検討を開始した平成28年年初と比べVPPを取り巻く社会情勢は大きく好転し、VPPは社会インフラとして必要であるという方向に大きく変化してきたと思われ、事業化が待たれる。

住宅の経済性を優先した住宅向けサービスと、電力系統の需給調整を目的とした高速VPPサービスをいかに両立させるかが最大の課題と考えてきた。基本的に両立はしないため、まず、住宅側の経済性確保を前提とした運用を行い、電力需給調整のための運用により住宅側に不利益を与えた場合は金銭的な補填を行うしかないと考えられる。住宅側での電力帳尻あわせがどの時間帯で行われたかは特定できないため、住宅側の電気料金を一定額にしないと精算が難しく、電気料金制度も含めた総合的なビジネスモデルの構築が不可欠である。また、蓄電池に関しては頻りに電力需給調整のための運転を行う場合は、住宅側でなく第三者が所有する(住宅に蓄電池を置かしてもらい)ビジネスモデルの方がわかりやすいと思われる。

住宅向けVPPサービスや高速VPPサービスの実現にあたって本稿が参考になれば幸いである。

## 【謝辞】

本研究の実施にあたり、住宅太陽光発電量や住宅電力需要の予想手法検討や予想精度の検証に不可欠な住宅内電力データのご提供を快諾いただいた某住宅メーカー殿に深く感謝いたします。また、さまざまな住宅に関する知見や研究に対するアドバイスをいただいた住宅メーカー関係各位に深く感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) 四国電力/四国総合研究所 研究期報 No.105  
VPP技術を使った新たな住宅向けサービス 2016.12
- 2) 四国電力/四国総合研究所 研究期報 No.106  
VPP技術を使った新たな住宅向けサービス第2報  
2017.6

- 3) 四国電力/四国総合研究所 研究期報 No.94  
電気自動車深夜電力充電時の充電負荷平準化対策  
2010.6
- 4) すまエコ第2回VPP事業者連絡会議  
東京大学 岩船由美子  
HP給湯機のデマンドレスポンス活用 2017.10
- 5) 資源エネルギー庁/三菱総合研究所  
平成28年度新エネルギー等導入促進基礎調査  
(ソーラーシンギュラリティの影響度等に関する調査)  
2017.3

## 鉛蓄電池代替用リチウムイオン蓄電池の評価結果について

（株）四国総合研究所 産業応用技術部 多田 安伸

キーワード： リチウムイオン蓄電池  
鉛蓄電池代替

鉛蓄電池  
フロート充電

Key Words : Lithium-ion Battery  
Alternative to Substitution of  
Lead-acid Battery  
Lead-acid Battery  
Float Charging

### **The test result of the alternative lithium-ion battery for lead-acid battery**

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Dept.

Yasunobu Tada

### **Abstract**

The alternative lithium-ion battery for lead-acid batteries was on the market recently. Float charging was available for the alternative lithium-ion battery like lead-acid batteries.

We tested the alternative lithium-ion battery for the use of power failure compensations. We examined the discharge capacity of the batteries in various use conditions.

We evaluated that the alternative lithium-ion battery had equal or higher performance than lead-acid batteries. On the other hand, the alternative lithium-ion battery consumed power for the battery control system, the remaining capacity of it reduced rapidly.

The reduction rate of the discharge capacity of the float charging alternative lithium-ion battery was larger than the reduction rate of the discharge capacity of the charging storage alternative lithium-ion battery. The predicting life of the float charging alternative lithium-ion battery was 7 or 8 years, it was very shorter than expected.

## 1. はじめに

軽量で高性能なリチウムイオン蓄電池の普及が進んでおり、鉛蓄電池代替型も市販されるようになった。小型で特に軽量であり、性能や寿命も優れている。さらに、フロート充電も可能であり、性能的には十分鉛蓄電池に取って代わることができる。ただし、価格が高価なことが難点であり、価格の課題が解決される必要がある。

そこで、市販の鉛蓄電池代替型のリチウムイオン蓄電池の性能評価を行った。鉛蓄電池の放電レートは相当小さいためリチウムイオン蓄電池では問題にならない。また、サイクル寿命も鉛蓄電池に比べてリチウムイオン蓄電池は非常に長い。そこで、鉛蓄電池の主な用途である停電時対応に最も考慮が必要な、放置保管した場合やフロート充電した場合の放電容量の維持に関して評価を行った。

また、鉛蓄電池代替型のリチウムイオン蓄電池の性能評価は、密閉型鉛蓄電池および一般的なリチウムイオン蓄電池と相対比較することで行った。

## 2. 蓄電池の評価

### 2.1 評価した蓄電池の仕様

評価に使用した鉛蓄電池代替型のリチウムイオン蓄電池、鉛蓄電池、一般的なリチウムイオン蓄電池の仕様を表1に示す。

表1 評価した蓄電池の仕様

項目	鉛代替リチウム	鉛	リチウム
電圧(V)	13.2	12	22.2
放電容量(Ah)	35	50(0.2C) 33(1C)	20
放電レート(C)	6	1	0.5
重量(kg)	6.3	19	3.9
付加機能	保護遮断機能 CANモニタ機能	なし	保護遮断機能 充電機能
直並列	4直列10並列 まで可能	可能	不可

リチウムイオン蓄電池は通常、過充電・過放電や過電流、異常昇温などで故障・発火の可能性があるため、保護遮断機能が本体に設置(外付けあるいは内蔵)されている。今回比較対象とした一般的なリチウムイオン蓄電池はさらに充電機能が内蔵されている。また、鉛蓄電池は数百回充放電可能な密閉型サイクルサービス用を選定した。

鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池と鉛蓄電池はほぼ同容量であるが、重量は代替型リチウムイオン蓄電池が鉛蓄電池の約1/3で非常に軽量になっている。

### 2.2 試験方法

停電時対応に最も重要な性能項目である放電容量を中心に評価試験を行った。試験方法は既に行ったリチウムイオン電池の評価試験<sup>1)</sup>と同様の方法とした。

#### (1) 放電容量温度特性

環境温度を変えて新品蓄電池の放電容量を測定した。試験温度は0, 10, 25, 40℃とした。

#### (2) 放置保管試験

25℃で満充電後放置保管して放電容量を測定した。放置期間は1, 3, 6ヶ月とした。

#### (3) 放置後の放電容量測定

放置・放電後再度充放電を行い、放電容量を測定した。

#### (4) フロート充電時の放電容量測定

鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池のみ、フロート充電時の放電容量を測定した。

### 2.3 放電容量温度特性測定結果

環境温度を変えて、各蓄電池の放電容量を測定した結果を図1～3に示す。鉛蓄電池および一般的なリチウムイオン蓄電池では4台(代替型は1台)の蓄電池で測定を行い平均した。充放電電流はいずれも0.2Cとした。鉛蓄電池は全放電すると極端に寿命が短くなることが知られており、SOC20%(端子電圧で11.5V 放電容量は40Ahになる)で放電を停止した。

40℃の放電容量に対する0℃の放電容量の比を表2に示す。ただし、一般的なリチウムイオン蓄電池は温度保護が働いて充電が制限されたため25℃の放電容量との比とした。鉛蓄電池と比べてリチウムイオン蓄電池は低温時の放電容量減少が少なく低温特性が良い。

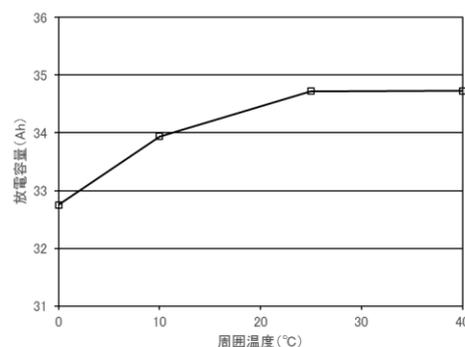


図1 鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池放電容量温度特性

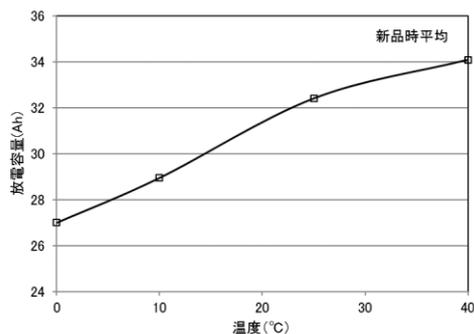


図2 鉛蓄電池放電容量温度特性

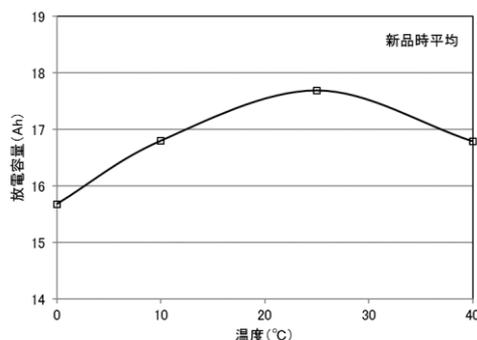


図3 一般的なリチウムイオン蓄電池放電容量温度特性

表2 低温時の放電容量減少割合

	鉛代替 リチウム	鉛	リチウム
0°C容量/ 40°C容量	0.94	0.79	0.89

## 2.4 放置保管試験結果

25°Cで満充電後、端子開放状態で放置し、一定期間後残っている放電容量を測定(25°C)した結果を図4~6に示す。試験は充電、放置、放電を繰り返して行った。6ヶ月後の放電容量の初期値に対する減少率を表3に示す。ただし、一般的なリチウムイオン蓄電池は残容量の減少が極端に大きく保護動作(放電終了)の可能性があるので3ヶ月で試験を中止した。これは制御装置(Battery Management System:BMS)の消費電力が大きいことが原因と推定される。鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池でも鉛蓄電池と比較すると残容量の減少が大きい、同様に制御装置(BMS)の消費電力が原因と考えられる。鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池の容量減少割合は一般的なリチウムイオン蓄電池の約1/3であり、かなり低消費電力化されているものの、鉛蓄電池と比較してリチウムイ

オン蓄電池は制御装置の電力消費により放置時の残容量は小さく、放置保管には適さないといえる。

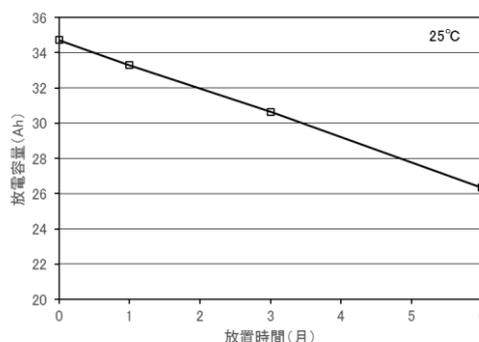


図4 鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池放置時放電容量

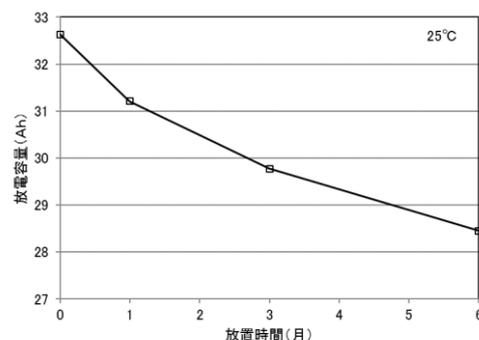


図5 鉛蓄電池放置時放電容量

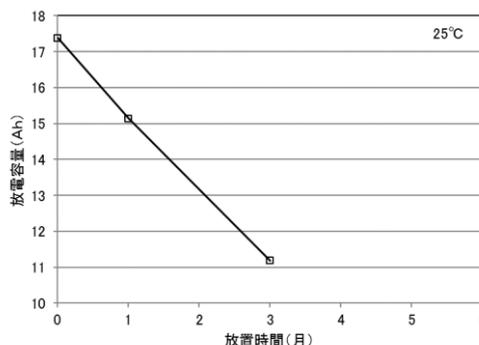


図6 一般的なリチウムイオン蓄電池放置時放電容量

表3 放置保管時の放電容量減少

	鉛代替 リチウム	鉛	リチウム
6ヶ月後容量 減少率(%/月)	4.0	2.1	11.9 (3ヶ月)

## 2.5 放置保管後の放電容量測定結果

放置保管放電後、通常の充放電を行って放電容量を測定した結果を図7～9に示す。放電容量の減少率を表4に示す。放電容量減少率は明らかに2種類のリチウムイオン蓄電池が小さく、特に鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池の減少率が非常に小さい。これは鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池の寿命が極めて長いことを示している。

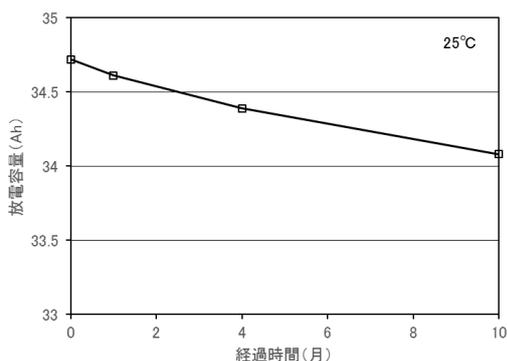


図7 鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池放電容量の推移

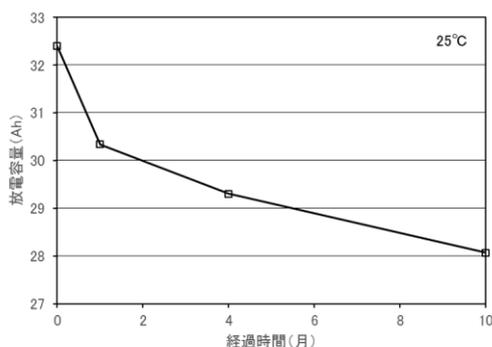


図8 鉛蓄電池放電容量の推移

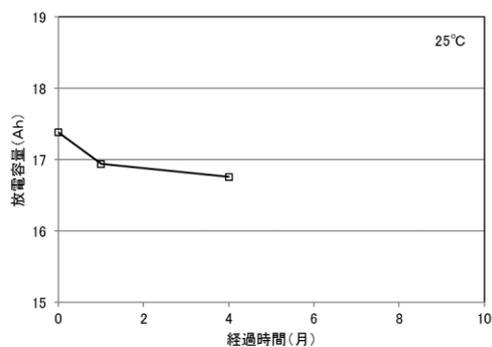


図9 一般的リチウムイオン蓄電池放電容量の推移

表4 放電容量の経時減少率

	鉛代替 リチウム	鉛	リチウム
放電容量 減少率(%/月)	0.18	1.34	0.89 (4ヶ月)

## 2.6 フロート充電時の放電容量測定結果

鉛蓄電池代替型リチウムイオン蓄電池はリチウムイオン蓄電池としては極めてまれなフロート充電が可能な仕様となっている。フロート充電推奨電圧は最大充電電圧14.4Vに対して、13.6～14.4Vの範囲となっている。まず、フロート充電電圧を変化させて、放電容量を測定した。測定にあたっては、実用時に不可欠な直並列接続が問題なく行えることの検証も行うため、蓄電池を2直列2並列接続した。測定回路図および測定結果を図10および11に示す。フロート充電電圧を変化させてもそれほど大きな放電容量差はなかった。

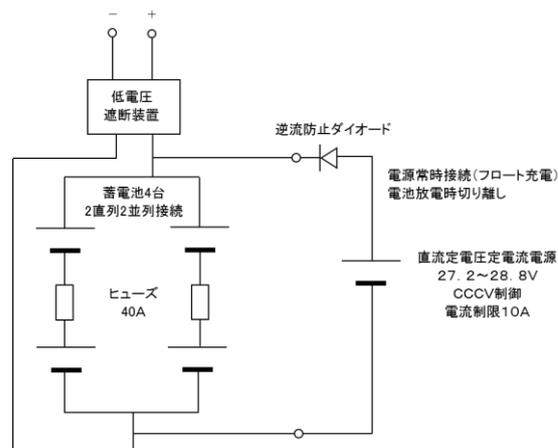


図10 フロート充電回路

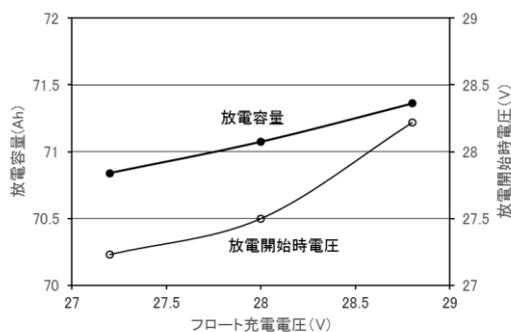


図11 フロート充電時放電容量

直並列接続した蓄電池がフロート充電時に均等に充放電しているかどうか大きな関心事である。蓄電池の CAN モニタ機能を使って、蓄電池の電圧や SOC を監視した。

蓄電池の CAN モニタ接続回路を図 12 に、監視できる状態量および警報項目を表5に示す。USB-CANアダプタを介してパソコンに接続した。CAN通信速度は低速の 125kbps、多数の蓄電池をカスケード接続できる仕様であり、CAN線路終端には終端抵抗(120Ω)を接続した。モニタリングソフトは蓄電池メーカーから供給されたものをパソコンにインストールした。

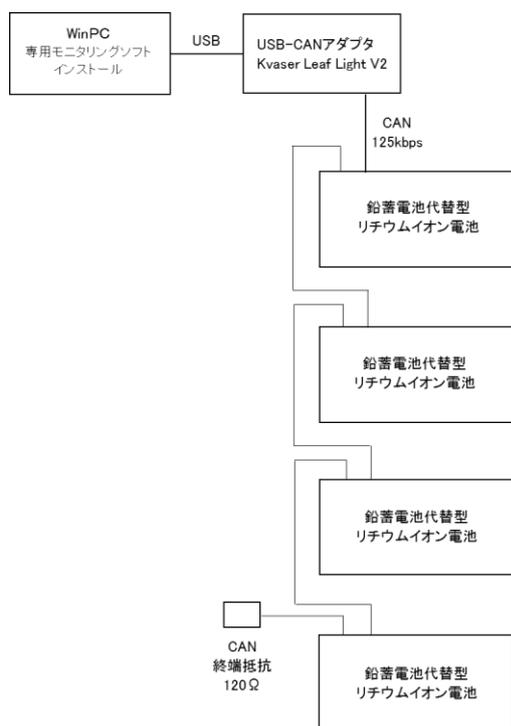


図 12 蓄電池モニタリング装置構成

表 5 モニタ項目および警報項目

モニタ項目		警報項目	設定値
電池モジュール電圧	(V)	単セル過電圧警報	3.95V
電池モジュール電流	(A)	単セル過電圧遮断	4.1V
単セル温度	(°C)	単セル低電圧警報	2.2V
出力FETスイッチ温度	(°C)	単セル低電圧遮断	2.0V
SOC	(%)	単セル温度高警報	63°C
残り充電量	(Ah)	単セル温度高遮断	68°C
放電容量	(Ah)	単セル温度低警報	-10°C
単セル電圧	(V)	出力FETスイッチ温度高警報	100°C
		出力FETスイッチ温度高遮断	110°C

フロート充電を停止し完全放電させた際の直並列した各蓄電池の電圧、SOC の表示値を表6に示す。ほぼ均等な値になっており、蓄電池を直並列接続した状態でフロート

充電しても特に問題はなかった。ただし、経年時に蓄電池間の特性差が大きくなった際には状態値の差も大きくなると予想される。

表 6 放電前後の蓄電池電圧および SOC 値

蓄電池NO	放電前電圧 (V)	放電後電圧 (V)	放電前SOC (%)	放電後SOC (%)
1	13.59	10.36	97	0
2	13.60	10.90	96	0
3	13.62	10.91	97	0
4	13.58	10.38	97	0

注) No.1,2 および No.3,4 が同じ直列回路

## 2.7 フロート充電時の放電容量測定結果

フロート充電を継続した後、充電を停止し放電させた際の放電容量測定結果を図 13 に示す。また、放電容量減少率を放置保管後放電充電した場合と比較した結果を表7に示す。試験期間が短いもののフロート充電時の放電容量減少率が放置保管時に比べて約 2 倍となっている。フロート充電ができることは大きな長所であるものの寿命が短くなると経済的に成り立たなくなる。年間 4%程度の放電容量減少であれば、容量 70%を寿命とすると7~8年で寿命に達し鉛蓄電池と同等となる。フロート充電に関してはさらに長期間の評価が必要と考えられる。

表 7 放電容量減少率の比較

	放置時	フロート充電時
放電容量減少率(%/月)	0.18	0.37

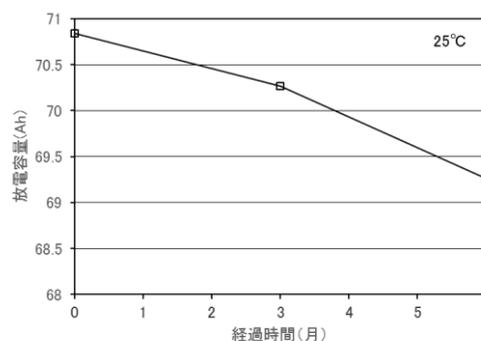


図 13 フロート充電時の放電容量の推移

### 3. まとめ

- 鉛蓄電池代替型のリチウムイオン蓄電池は制御装置(BMS)や保護遮断装置が内蔵されており、ユーザサイドでは密閉型鉛蓄電池と同等の扱いで使用できる。鉛蓄電池と比べ充放電特性も優れており、特に重量は約 1/3 と非常に軽量である。
- リチウムイオン蓄電池は制御装置(BMS)が電力を消費するため放置保管には適さない。鉛蓄電池代替型のリチウムイオン蓄電池では消費電力はかなり小さいものの、鉛蓄電池と比較して残容量の減少率は2倍程度となった。
- リチウムイオン蓄電池の放電容量の減少は、鉛蓄電池と比べ相当小さく長寿命が期待できる。
- 鉛蓄電池代替型のリチウムイオン蓄電池はフロート充電が可能であり、複数直並列接続した状態で問題なくフロート充電ができた。ただし、フロート充電した際の放電容量減少率が大きく、寿命に対する影響が懸念される。

### 4. 今後の課題

リチウムイオン蓄電池は安全上の問題から通常は外部設置の保護遮断装置が必要であるが、これをコンパクトに本体内部に収納し、かつ複数の蓄電装置を単純に直並列接続できるようにしたこと、フロート充電を可能にしたことは非常に画期的で評価できる。

ただし、鉛蓄電池代替使用時の標準的な利用形態であるフロート充電時の放電容量減少率が大きいことから期待ほど長期間使用できないと予想され、経済性の問題など懸念が残る。電圧差(常用電源電圧>蓄電池電圧)とダイオードを使った常用電源バックアップなどフロート充電でなく放置保管(定期的に補充充電)で停電補償する方法も検討に値する。使用方法も含めた長期にわたる評価試験が必要と考えられる。

また、リチウムイオン蓄電池は現状非常に高価であり、コストの問題から直ちに鉛蓄電池の代替になることはあり得ない。コスト低減が最大の課題といえる。

### 5. むすび

本稿は平成 28～29 年度に実施した制御電源装置に関する研究の一部内容を取りまとめたものである。リチウムイオン蓄電池の改良は着実に行われており、本稿で扱った蓄電池のように数年前には思いもよらなかった仕様の製品が発売されている。本稿がリチウムイオン蓄電池の新た

な適用検討の参考になれば幸いである。

#### [謝辞]

本研究は四国電力株式会社原子力部殿より委託を受けて実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

#### [参考文献]

- 1) 四国電力/四国総合研究所研究期報 No.100  
リチウムイオン電池特性試験結果について 2013.6

## OTユニットにおけるパウダースケール対策技術の検討(第1報)

—LP ドレン水の水環境変更等によるテストピース耐食性評価—

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 山地 豪  
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 難波 正徳

キーワード： 給水処理法  
酸素処理  
パウダースケール  
低圧ヒータドレン  
耐食性

Key Words : feedwater treatment  
oxygenated treatment  
powdery scale  
low-pressure heater drain  
corrosion resistance

**Study on Countermeasure Technique for the Powdery Scales Brought over into the OT Operation Boilers**  
**- Evaluation of the water quality improvement effect of low-pressure heater drain system by the corrosion test -**

Shikoku Research Institute, Inc., Department of Chemical and Biological Technologies  
Tsuyoshi Yamaji and Seitoku Namba

### Abstract

In recent years, OT operation boilers have produced powdery scales which accumulate on the inner surface of the evaporation tubes and cause temperature rise of the metal. The main cause of the occurrence of the powdery scale is the increase in the iron concentration in the low-pressure heater drain water. Since low-pressure heater drainage system generates corrosion due to low dissolved oxygen concentration and low pH, various techniques for reducing the iron concentration recovered in the feed-water from the drainage system have been proposed.

In this study, the corrosion test of the materials constituting the power plant was immersed in low-pressure heater drain water at 120 ° C for several weeks and the corrosion resistance due to the difference in material and the difference in water quality was evaluated. Increasing the dissolved oxygen or pH showed higher corrosion resistance than ordinary heater drain water and showed extremely high corrosion resistance when both dissolved oxygen and pH were increased.

Based on the results of this research, we plan to consider application of cost effective countermeasure technique such as closing the low pressure heater vent valve of the actual plant.

## 1. はじめに

国内の電力事業用貫流ユニットでは、ボイラ給水処理法に揮発性物質処理(AVT : All Volatile Treatment)か酸素処理(OT : Oxygenated Treatment)を適用している。AVT は給水中の溶存酸素(DO)を除去し、還元雰囲気にしてボイラ蒸発管内面にマグネタイト保護皮膜を生成する給水処理法であり、OT は給水を高純度に維持して酸素を注入し、酸化雰囲気でマグネタイト保護皮膜の上に薄いヘマタイト保護皮膜を生成する給水処理法である。高温水中でのヘマタイトの溶解度は、広いpH 領域でマグネタイトよりも大幅に低いため、OT はAVT より給水pH を低く管理でき、ボイラへの鉄の持込量を低減できてボイラ化学洗浄頻度を延伸できる。このため、大型貫流ボイラの多くでOT が適用され良好な運転実績が得られている<sup>1)</sup>。しかし、近年、OT ユニットではヘマタイトが空隙の多い軟質スケール(パウダースケール)としてボイラ蒸発管内面に厚く堆積して伝熱阻害要因となり、ボイラの熱損傷を引き起こす事例が報告され、その対策が求められている<sup>2),3)</sup>。

## 2. プラントメーカーが推奨するパウダースケール対策

給水処理法にOT を適用した場合でも復水器は真空状態であり、復水器から酸素注入設備までの復水系統、復水器に連結された低圧ヒータの蒸気側配管は構造的に脱酸素状態となる。OT はAVT より給水pH を低く管理しており、復水系統と低圧ヒータドレン(LP ドレン)は低pH のAVT 環境となるため腐食しやすく、ボイラへの鉄の持込要因となる。このため、プラントメーカーではパウダースケール対策として、LP ドレン水中の鉄濃度低減を中心とした各種対策(①材質変更、②給水pH 変更、③LP ドレン系統へのアンモニア注入、④LP ドレン系統への酸素注入、⑤LP ベント弁の閉止運用、⑥LP ドレン系統への高温フィルタ設置)を推奨している<sup>3)</sup>。しかし、ユニット毎に運転条件が異なるため、各種対策を適用した際の定量的な鉄濃度低減効果は不明である。そこで、OT 運用中の実機プラントのLP ドレン水を用いたテストピース耐食試験を行い、機器の材質変更およびLP ドレン水の水環境を改善した場合の腐食抑制効果を比較評価することとした。

## 3. 試験方法

### (1)テストピースの浸漬方法

LP ドレン系統の主要材質は炭素鋼であり、テストピースにはSS400(30mm×50mm、全面#400 研磨)を用いた。また、同一の水環境でクロムモリブデン鋼STBA23、ステンレス鋼SUS304 も浸漬試験して材質変更の有効性を評価した。

テストピース耐食試験の具体的な試験条件を表1に示した。通常運転中のOT ユニットのLP ドレン水を試験装置に導入して脱気後、アンモニアや酸素を注入して所定の水環境に調整し、LP ドレン系統相当の120℃に加温し、僅かな流動状態(0.3~0.6mm/s 程度)でテストピースを2週間浸漬した。なお、一部の条件については最大1.5ヶ月浸漬して長期浸漬による挙動を調査した。

表1 120℃テストピース耐食試験の試験条件

【水環境】 鉄濃度の低減対策	試験条件名	DO濃度 (μg/L)	pH (-)	アンモニア (mg/L)	浸漬 期間
【低pHのAVT環境】 (現状のまま)	pH8.9&DO<1μg/L (SS400)	1未満	8.9程度	0.15~0.2	2週間
材質変更	(STBA23, SUS304)				
【OT環境】 ヒータベント弁の閉運用 ドレン系統への酸素注入	pH8.9&DO50μg/L	50程度			
	pH8.9&DO100μg/L	100程度			
	pH8.9&DO150μg/L	150程度			
	pH8.9&DO200μg/L	200程度			
	pH8.9&DO1000μg/L	1000程度			最大 1.5ヶ月
【通常pHのAVT環境】 給水のpH上昇	pH9.3&DO7μg/L	7程度	9.3程度	0.5~0.9	
ドレン系統へのアンモニア注入	pH9.6&DO<1μg/L	1未満	9.6程度	1.1~1.5	
【高pHのOT環境】	pH9.6&DO100μg/L	100程度			
	pH9.6&DO200μg/L	200程度			

### (2)浸漬後のテストピース評価方法

浸漬後のテストピースを電子顕微鏡(SEM)観察やX線回折分析等により表面分析し、腐食の有無や保護皮膜の組成を調査した。また、5%塩酸(インヒビター添加)で化学洗浄して脱スケールし、重量変化から各条件での腐食量を算出した。

テストピース母材から高温水に溶出した鉄イオンは、高温水中のDOと反応して表面にマグネタイトやヘマタイト皮膜を生成するが、一部は皮膜とならずに水側に溶出して腐食を進展させる。そこで、母材からの鉄溶出量のうち、保護皮膜形成部分と水側への溶出部分(水側への腐食量と称す)を初期重量、浸漬後重量、脱スケール後重量から算出し、LP ドレン水の水環境変更による耐食性を比較評価した。なお、保護皮膜は酸化鉄であるため、X線回折分析によりマグネタイトとヘマタイト含有割合を求めて、保護皮膜形成部分の鉄溶出量を算出した。

#### 4. 試験結果と考察

##### 4.1 材質変更の有効性

現在のLPドレン水相当の水環境(pH8.9&DO<1 μg/L)で14日間浸漬した研磨テストピースの外観写真とSEM写真を写真1に示した。

SS400とSTBA23浸漬後の表面には1 μm未満の黒色粒子(マグネタイト単体)が観察されたが、SUS304では金属光沢が維持されていた。

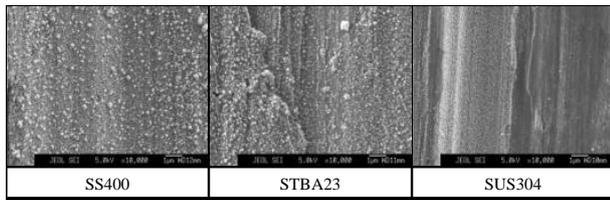


写真1 各材質の外観およびSEM写真(10000倍)

テストピースを化学洗浄し、母材からの鉄溶出量のうち、保護皮膜形成部分と水側への腐食量を算出した結果を図1に示した。今回の試験条件では、水側への腐食量はSS400では30mg/dm<sup>2</sup>程度だがSTBA23では半減し、SUS304では殆ど腐食しないことが判った。LPドレンシステム全体を材質変更することは困難だが、ヒータチューブやLPドレンタンクの材質変更は有効なパウダースケール対策であることが判った。

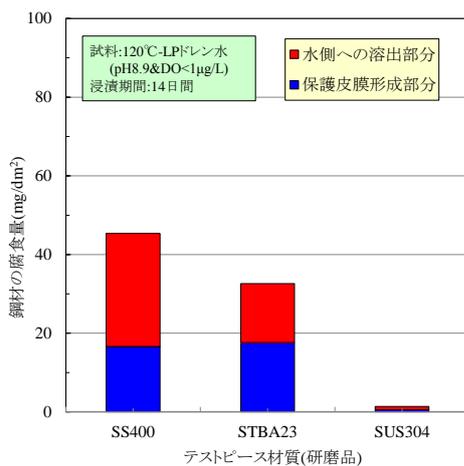


図1 現在のLPドレン水環境における各種材質での腐食量

##### 4.2 OT環境移行による効果

現在のLPドレンの水環境は低pHのAVT環境だが、LPベント弁の閉止運用やLPドレン系統へ

の酸素注入を行えばOT環境に移行できる。

一例としてpH8.9&DO<1,50,100 μg/Lで42日間浸漬したSS400の外観写真とSEM写真を写真2に示した。AVT環境(DO<1 μg/L)で長期浸漬すると1 μm未満の黒色マグネタイト粒子が観察されたが、OT環境(DO50~100 μg/L)で長期浸漬するとテストピース表面は、マグネタイトとヘマタイトが混在した灰色皮膜が観察され、1 μm程度に結晶成長した粒子も見られた。

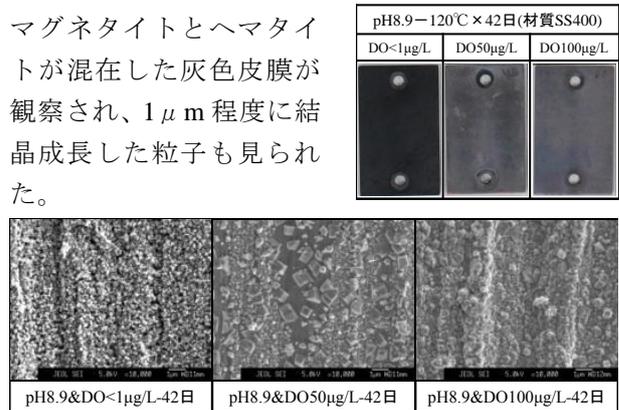


写真2 OT環境での外観およびSEM写真(10000倍)

様々なDO濃度に調整したLPドレン水中で14日間浸漬したテストピースを化学洗浄し、同様に水側への腐食量を算出した結果を図2に示した。AVT環境(DO<1 μg/L)で浸漬したSS400研磨品の水側への腐食量は30mg/dm<sup>2</sup>程度だがLPドレン水のDO濃度を給水レベルのOT環境(50~150 μg/L)とすれば腐食量は10mg/dm<sup>2</sup>未満に低減した。

ただし、OT給水基準の上限値(DO200 μg/L)以上では、皮膜付テストピースでは耐食性が維持されたが、研磨品では腐食量が増加しており、更にDO濃度を上昇しても防食効果は望めないと考えられる。

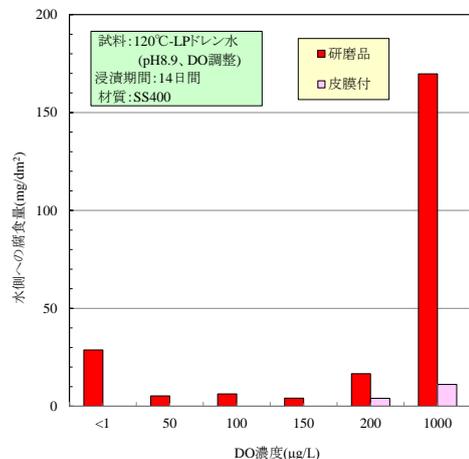


図2 様々なDO濃度における炭素鋼の腐食量

DO濃度<1,50,100 μg/Lに調整したLP ドレン水中で長期浸漬した研磨テストピースを化学洗浄し、同様に水側への腐食量を算出した結果を図3に示した。現在のLP ドレン水はAVT環境(pH8.9&DO<1 μg/L)であり、長期間浸漬すると腐食量が増加し、炭素鋼の腐食が継続することが判る。一方、LP ドレン水のDO濃度を給水レベルのOT環境とすると腐食量は大幅に低下し、長期間浸漬しても腐食量に大きな変化はなく、水環境変更により炭素鋼の腐食が停止する傾向が見られた。

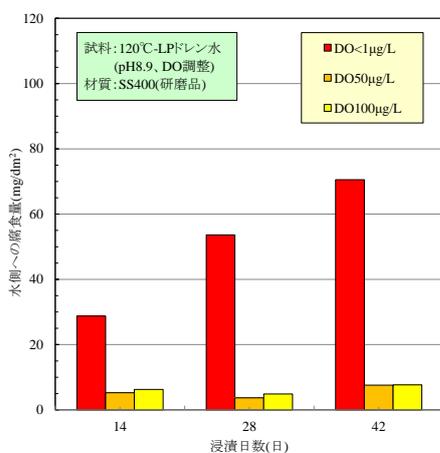


図3 様々なDO濃度における炭素鋼の長期的な腐食量

従って、LP ドレンの水環境を給水系統と同程度のDO濃度に上昇できれば、LP ドレンシステムの腐食が抑制できる有効なパウダースケール対策となることが判った。

#### 4.3 通常pHのAVT、高pHのOT環境移行の効果

給水pH管理値の上昇やLP ドレンシステムへのアンモニア注入を行えば、LP ドレンのpHが上昇し、水環境を通常pH領域のAVT環境に移行できる。更にLP ベント弁の閉止運用等を併用してDO濃度を上昇させれば、LP ドレンの水環境を通常より高pHのOT環境に移行できる。

一例としてpH8.9とpH9.6でDO<1 μg/L、pH9.6&DO100 μg/Lで42日間浸漬したSS400の外観写真とSEM写真を写真3に示した。低pH(pH8.9)のAVT環境で長期浸漬すると前述の通り1 μm未満の黒色マグネタイトが観察されたが、アンモニア注入により通常pH(pH9.6)のAVT環境とすると数 μmに結晶成長した八面体のマグネ

タイト粒子が観察された。また、通常より高pHのOT環境(pH9.6&DO100 μg/L)とするとマグネタイトとヘマタイトが混在した灰色皮膜となり、数 μm程度に結晶成長した粒子も見られた。

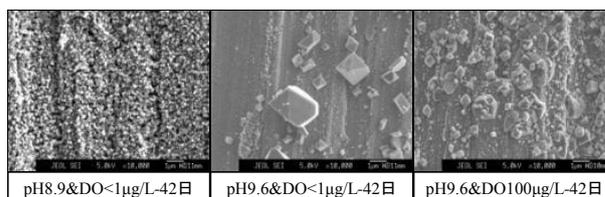
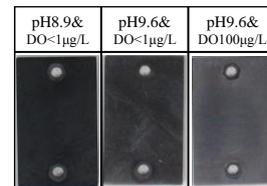


写真3 pH上昇時の外観およびSEM写真(10000倍)

様々なpHとDO濃度で調整したLP ドレン水中で長期浸漬した研磨テストピースを化学洗浄し、同様に水側への腐食量を算出した結果を図4に示した。前述のとおり、低pH(pH8.9)のAVT環境では、浸漬日数とともに腐食量が増加したが、pHを上昇すると腐食量増加は緩やかになり、腐食量も大きく低減した。また、pHとDO濃度の両方を上昇して通常より高pHのOT環境とすれば、腐食量は極めて低い値に抑制され、長期浸漬しても腐食量は増加せず、炭素鋼の腐食がほぼ停止することが判った。

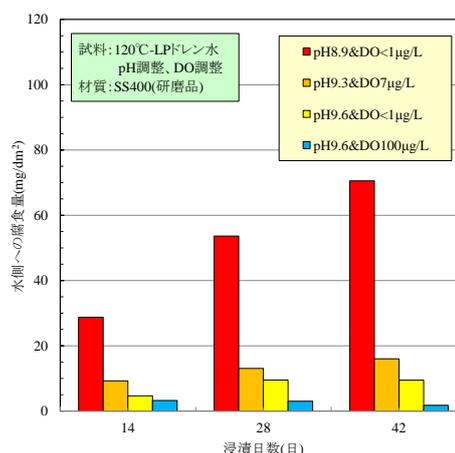


図4 様々なpH,DO濃度における炭素鋼の長期的な腐食量

従って、LP ドレン水のpHを上昇すれば、現在よりLP ドレンシステムの腐食が抑制でき、更にLP ベント弁の閉止運用等を併用して給水系統相当のDO濃度に上昇すれば、より有効なパウダースケール対策となると考えられる。

なお、給水 pH 管理値を上昇すると、復水系統の pH 上昇効果はあるが、アンモニア注入濃度が大幅に上昇し、復水脱塩装置への負荷が大きくなるため、復水脱塩装置のアンモニア型運用などを検討する必要がある。

## 5. まとめ

近年、OT ユニットではヘマタイトが空隙の多いパウダースケールとしてボイラ蒸発管内面に厚く堆積して伝熱阻害要因となり、ボイラの熱損傷を引き起こす事例が報告されている。パウダースケールの発生源とされる LP ドレン水中の鉄濃度を低減する各種対策がプラントメーカーから提案されているが定量的な効果は不明である。そこで、実機 OT ユニットの LP ドレン水とテストピースを用いて、機器の材質変更および LP ドレン水の水環境を改善した場合の腐食抑制効果を比較評価した。

その結果、現在の LP ドレン系統の水環境は低 pH の AVT 環境であるため、炭素鋼の腐食が継続し、給水への鉄の持込原因となることが判り、LP ドレンタンクなどはステンレス鋼などへの材質変更も有効であることが確認された。

また、LP ドレン系統の水環境変更による炭素鋼の腐食抑制効果を比較して図 5 に示した。LP ドレン系統の水環境を OT 環境や通常 pH の AVT 環境、高 pH の OT 環境に移行した場合の腐食抑制効果が定量的に比較評価できた。

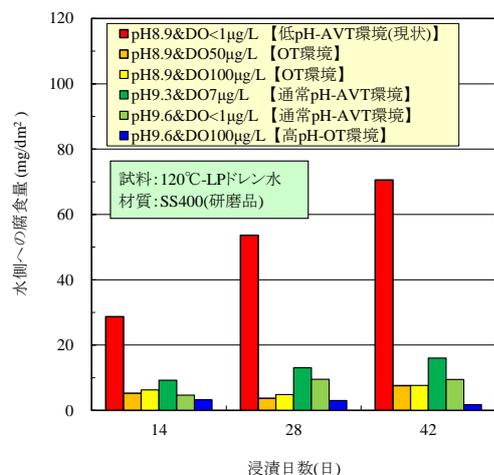


図 5 水環境変更による炭素鋼の腐食抑制効果の比較

今回の試験条件では、炭素鋼に対する腐食抑制効果は、pH 上昇による通常 pH の AVT 環境への移行より DO 濃度上昇による OT 環境への移行がやや優れており、腐食量が現状の 1/10 程度に低減できる可能性が示唆された。更に pH と DO 濃度をともに上昇させて高 pH の OT 環境へと移行すれば、より有効なパウダースケール対策となることが判った。

これらパウダースケール対策を実機適用する場合、pH 上昇には給水 pH 管理値の上昇や LP ドレン系統へのアンモニア注入が必要であり、アンモニア注入量増加による復水脱塩装置への負荷を考慮する必要がある。DO 濃度上昇には、復水器に繋がる LP ベント弁の閉止運用を行えば対応可能であり、非凝縮性ガス滞留などの影響を評価する必要はあるが、大幅な設備改造や薬品費等の増加を伴わない費用対効果の高い対策と考えられる。

今後は、これら試験結果を踏まえ、最も費用対効果の高い LP ベント弁の閉止運用の実機適用に向けた各種検討を進めていく予定である。

## 【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力部殿より委託を受け実施したもので、各種試験・評価にご協力頂きました関係各位に深く感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) 椿崎仙市, “水処理の大切さー火力発電プラントの水質管理技術(その 2)ー”, 火力原子力発電, Vol. 59 No. 1, 29-34(2008 年 1 月).
- 2) 広田守, 福原広嗣, 佐藤俊一, 村上実和子, 八代仁“火力プラントのパウダー状スケール層の伝熱特性について”, 火力原子力発電, Vol. 65, No. 7, 520-526 (2014 年 7 月).
- 3) 高田政治, 椿崎仙市, 南条成徳, 佐藤昭房, 朝田裕之, 中原敏次, “酸素処理法適用プラントにおけるパウダースケールトラブル対策検討”, 平成 23 年度火力原子力発電大会論文集, 34-39(2012 年 2 月).

最後に執筆者、編集ならびに審査にあられた方々のご協力に対して厚くお礼申し上げます。

研究期報 第108号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 中 川 勇  
株式会社四国総合研究所

発 行 株式会社四国総合研究所  
〒761-0192  
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8  
T E L (087) 843-8111  
E-mail jigyo\_kanri@ssken.co.jp