

# 研 究 期 報

No. 106

平成 29 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 106号 目次

長期使用された高クロム鋼配管溶接継手のクリープ損傷評価 ..... 1

Evaluation of creep damage of long-term used high chromium  
steel piping weld joint

V P P 技術を使った新たな住宅向けサービス（第2報） ..... 6

The new residential services with Virtual Power Plant technology  
(2nd report)

高空間分解能酸素分布モニタリング技術の実現に向けた実験的検証..... 19

Experimental verification of high-resolution monitoring  
technology for oxygen concentration distribution

---

---

## 長期使用された高クロム鋼配管溶接継手のクリープ損傷評価

---

---

### 目 的

超々臨界圧火力発電プラントの蒸気配管に使用されている高クロム鋼（9Cr鋼）においては、長期使用による溶接継手の強度低下、蒸気リークの発生が懸念されている。そこで、約12万時間使用された蒸気配管からサンプルを採取し、クリープ損傷状態を評価した。

### 主な成果

クリープ破断試験の結果、供試材のクリープ強度は新材の平均的なクリープ強度に近く、約16万時間の余寿命を有すると評価した。さらに、クリープ中断試験を実施して、試験片の硬さやボイドの測定により、クリープ損傷の過程を調査した。

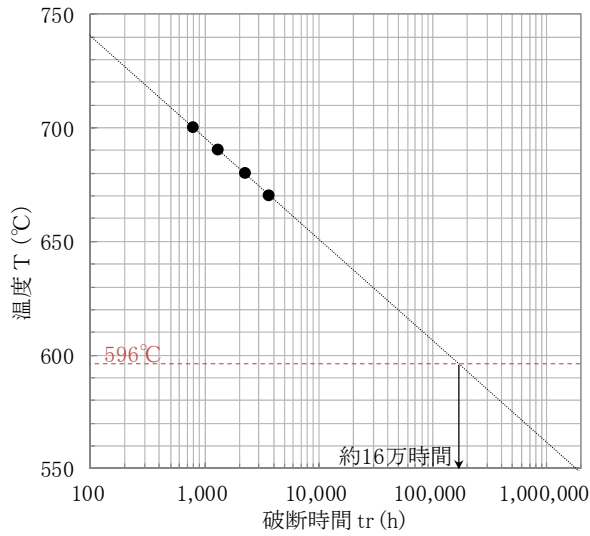


図1 クリープ破断試験に基づく余寿命評価

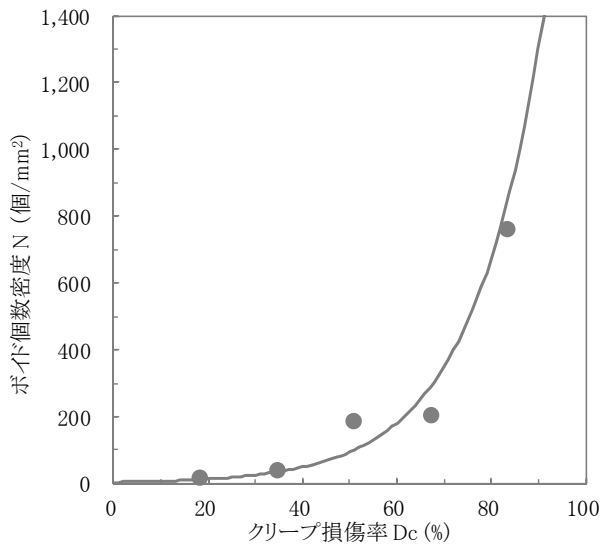


図2 ボイド個数密度とクリープ損傷率の関係

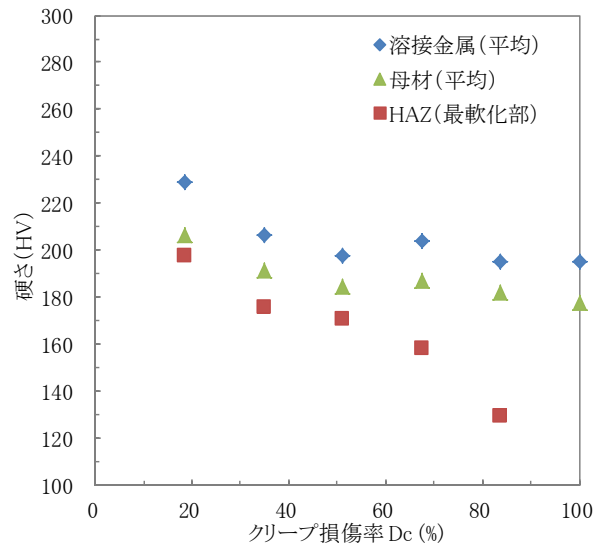


図3 硬さとクリープ損傷率の関係

研究担当者	中村拓弥, 杉本健二, 安藤秀彰 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部)
キーワード	高クロム鋼, 溶接継手, 経年材, クリープ損傷, 余寿命
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]

---

---

## VPP技術を使った新たな住宅向けサービス(第2報)

---

---

### 目 的

バーチャルパワープラント（VPP）サービスとして、蓄湯式給湯器の運転時間帯調整および蓄電池の充電時間帯調整を具体的に想定し、実際の住宅内電力データを使用して、調整される電力量や得られる利益等を定量的に評価した。

### 主な成果

#### 1. 蓄湯式給湯器（エコキュート）運転時間帯調整

- ・給湯器（エコキュート）の運転時間帯を昼間に移動させることで、給湯器消費電力を夏期はほぼ全量、冬期でも40～50%を太陽光発電でまかなうことができる。
- ・冬期に給湯器を昼間に移動させるためには、太陽光発電の容量は5kWでは不足で、8kWあれば冬期も60～80%の日数で移動が可能である。
- ・給湯器運転を昼間に移動させた場合の太陽光発電電力量に対する給湯器消費電力量の比率は、太陽光5kWで7～20%、8kWで4～19%程度と小さく、給湯器の昼間運転だけでは太陽光余剰対策として十分な効果は得られない。
- ・給湯器の運転時間帯を昼間に移動させることによる需要家利益は6～10千円/年程度と予想され、サービス実施は十分可能と考えられる。

#### 2. 蓄電池充電時間帯調整

- ・昼間夕方の受電電力量は大幅に減少し、冬期以外はほぼゼロとなる。
- ・太陽光余剰電力は大幅に減少し、特に太陽光発電量の少ない冬期は減少幅が大きい。
- ・冬期は昼間夕方に使う電力を蓄電するために夜間受電が増加し、春期～秋期は夕方使い切れなかった太陽光余剰の蓄電を夜間に使用するため夜間受電が減少する。
- ・蓄電池容量は、太陽光の自家消費目的では、夕方の消費電力量に相当する実効容量6kWhで十分である。
- ・単容量あたり蓄電池限界価格は容量6kWhで4～5万円/kWh程度と予想される。現状蓄電池価格は20万円/kWh程度であり、今後劇的に蓄電池価格が低下しない限り、蓄電池設置が経済的に見合うことはないと予想されるが、劇

的な価格低下が実現した場合は影響が大きいいため、サービス実施に向けた技術開発は必要である。

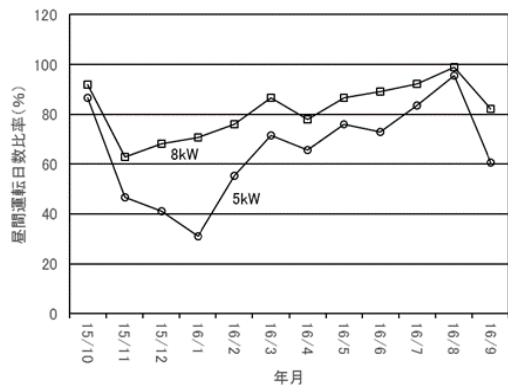


図1 給湯器昼間運転日数比率

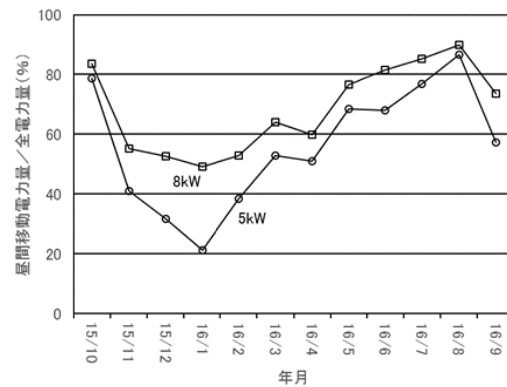


図2 給湯器昼間運転電力量比率

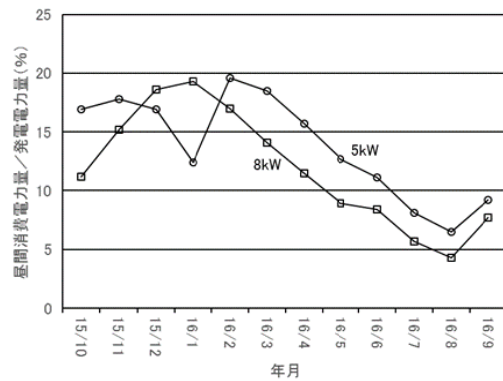


図3 太陽光発電中給湯器が消費する比率

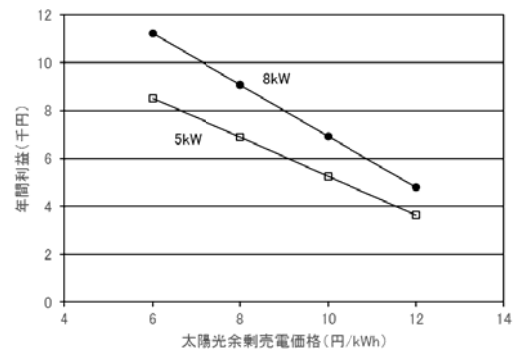


図4 給湯器運転時間帯調整による需要家利益

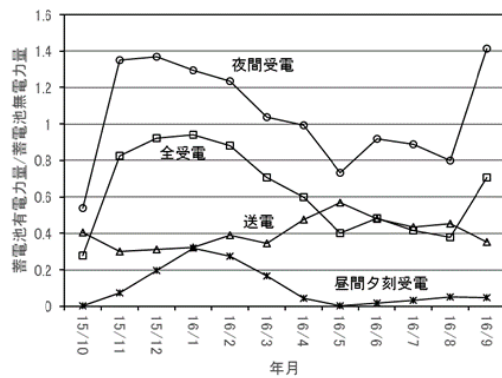


図5 蓄電池運用による住宅内電力量変化 (6kWh)

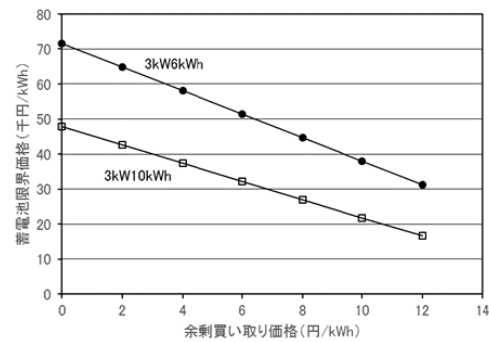


図6 単位容量あたり蓄電池限界価格

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, 蓄電池限界価格
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]

---

---

## 高空間分解能酸素分布モニタリング技術の実現に向けた実験的検証

---

---

### 目 的

酸素欠乏症による労働災害は致死率が極めて高く、事故を未然に防ぐ必要がある一方、作業時の酸素事故の防止策として主流なものは接触式センサ本体を測定環境に曝して行う酸素濃度の随時測定であり、安全性に課題がある。酸素濃度の遠隔計測技術の需要が高まっている中、著者らは、これまでに技術開発を重ねてきたラマンライダによるガス濃度遠隔計測技術を用い、高い位置特定性を有する酸素濃度分布モニタリング技術の実現に向けた実験的検証を行った。本稿では、装置構成と検証試験結果の詳細について述べる。

### 主な成果

#### 1. 装置構成及び実験配置

酸素濃度分布遠隔計測技術の実現性評価に向け、試作したラマンライダ装置の光学系構成を図 1 に示す。ライダ光学系は *biaxial* 型とし、送信系はマイクロチップレーザ(波長 355nm, パルス幅 1.6ns, 繰返し 1kHz), 受信光学系は屈折式望遠鏡を用いた。酸素分子によって生じるラマン散乱光は、開口径 170mm のフレネルレンズにより受信光学系内に集光され、各種フィルタを経て光電子増倍管に結合する。出力は測定更新周期 1 秒で時間波形として取得した。

#### 2. 機能試験と評価

試作した酸素ラマンライダにより、20cm 間隔で位置を変化させたハードターゲットからの反射光を検知し、本装置の空間分解能を評価した。実験結果事例を図 2 に示す。光源を短パルス発振が可能なマイクロチップレーザとしたことにより、一般的な広域観測用ライダシステムの空間分解能を大幅に上回る約 30cm の高空間分解能化が可能であることを実証した。

本装置から 7m の位置に設置した 1.5m 長の塩ビ管内に窒素ガスを放出し、管内の酸素濃度を減少させ、低酸素領域を模擬的に再現した。本装置により管内の酸素濃度分布を計測し、酸素モニタリング機能の評価した。実験配置を図 3 に、実験結果事例を図 4 に示す。通常の大気中における酸素のライダエコーは、*biaxial* 型ライダによる典型的な時間波形が得られており、本装置により良好に酸素の空間分布が計測されていることを検証した。また、低酸素状態の計測で

は、塩ビ管配置箇所の酸素ラマン信号が著しく低下していることが確認され、本技術により、酸欠事故防止に向けた酸素モニタリングシステムの実現が可能であることを示した。

今後の展開として、装置の小型・高性能化を進め、更なる高分解能化の実現と、他のガスへの応用などの検討を進める予定である。

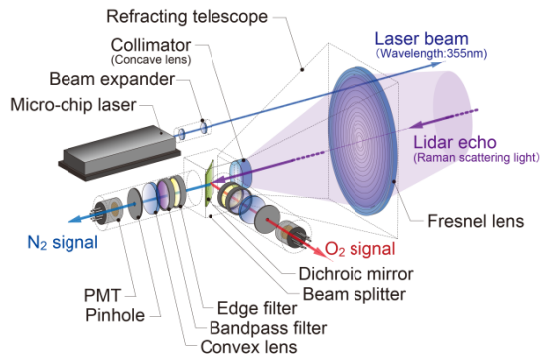


図1 酸素ラマンライダの光学系構成

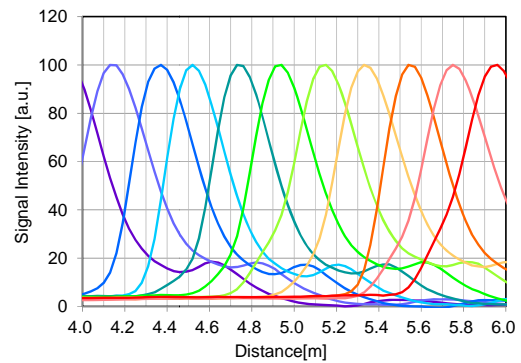


図2 空間分解能評価結果事例

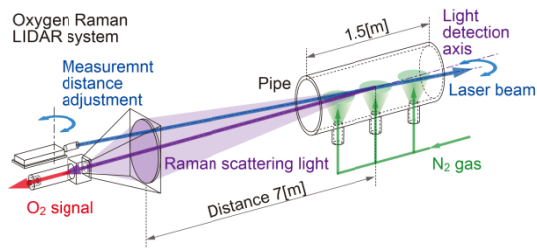


図3 酸素計測機能検証の実験配置

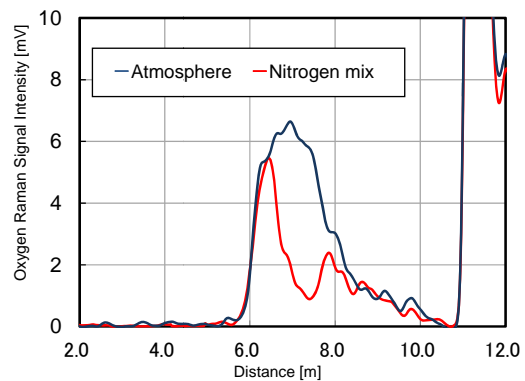


図4 酸素計測実験の結果事例

研究担当者	荻田将一, 市川祐嗣, 星野礼香, 杉本幸代, 三木啓史, 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	レーザラマン分光, 酸素, 水素, 酸素欠乏症, 遠隔計測, L I D A R マルチガス計測, 非接触計測, 高空間分解能
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.sskn.co.jp/">http://www.sskn.co.jp/</a>

[無断転載を禁ず]



## 長期使用された高クロム鋼配管溶接継手のクリープ損傷評価

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 中村 拓弥  
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 杉本 健二  
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 安藤 秀彰

キーワード : 高クロム鋼  
溶接継手  
経年材  
クリープ損傷  
余寿命

Key Words : High chromium steel  
Weld joint  
Used material  
Creep damage  
Remaining life

### Evaluation of creep damage of long-term used high chromium steel piping weld joint

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department  
Takuya Nakamura, Kenji Sugimoto and Hideaki Ando

#### Abstract

In high chromium steel (9Cr steel) used for the steam piping in the ultra super critical pressure thermal power plants, there are concerns about the decrease in strength of weld joint due to long-term use and the occurrence of steam leak. Therefore, the sample was collected from the steam piping that has been used for about 120,000 hours, and the state of creep damage was evaluated.

As a result of the creep rupture tests, the creep strength of the used material was close to the average creep strength of the virgin material and it was evaluated that it has a remaining life of about 160,000 hours. Furthermore, creep interrupted tests were carried out and the process of creep damage was investigated by measuring the hardness and the voids of the test pieces.

## 1. はじめに

超々臨界圧(蒸気圧力 24.1MPa 以上、蒸気温度 593℃以上)火力発電プラントの蒸気配管に使用されている高クロム鋼(9Cr 鋼)においては、溶接継手を起点とした損傷事例が報告されており、長時間領域のクリープ強度が当初の想定よりも低いことが明らかになっている<sup>1)</sup>。現状の高クロム鋼溶接継手のクリープ損傷評価は、クリープ破断試験データをもとに作成された寿命評価式<sup>2)</sup>による安全側の評価を基本としている。しかし、試験データは、バラツキが大きく、最長 5 万時間程度と実機での使用時間に比べて短いことから、寿命評価式による評価と実機配管の損傷状態の乖離が大きい事例も確認されている。また、溶接継手外面を対象にレプリカ法によるボイド観察も実施されるが、高クロム鋼の場合は肉厚内部からクリープ損傷が進行することが多いため、最大損傷部位を評価できない問題がある。

一方、実機で長期使用された使用材を対象としたクリープ試験により直接的にクリープ損傷を評価できるが、その調査報告事例はごく限られている。

そこで本研究では、超々臨界圧火力発電プラントにて約 12 万時間使用された高温再熱蒸気管からサンプルを採取し、クリープ破断試験を実施して余寿命を評価するとともに、クリープ試験によりクリープ損傷過程を調査した。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材および試験片

供試材は、超々臨界圧火力発電プラント(定格出力 70 万 kW)にて約 12 万時間使用された改良 9Cr 鋼製の高温再熱蒸気管直管長手溶接継手から採取した。高温再熱蒸気管の仕様および蒸気条件を表1に、供試材(母材部)の化学成分および熱処理条件を表2に示す。供試材の化学成分および熱処理条件は規格<sup>3)</sup>の範囲を満足していた。

試験片は、上記供試材の肉厚中央部から、溶接金属を中心として左右の HAZ(Heat Affected Zone: 熱影響部)を含むように標点間直径 10mm、標点間長さ 50mm の寸法で採取した。試験片の採取位置および寸法を図1に示す。

### 2.2 クリープ破断試験

クリープ破断試験は試験応力または試験温度を実機使用条件より高めた加速クリープ条件で行われるが、このうち使用材について応力加速試験を行うと試験応力が高いほど未使用材の破断時間に対する使用材の破断時間低下割合が大きくなることが多くの材料で認められている<sup>4)</sup>。このため、本研究では、試験応力は、実機の使用応力とし、試験温度を加速させるアインストレス法を採用した。表3にクリープ破断試験条件を示す。試験応力は次に示す周応力の平均径式を用いて算出した。

$$\sigma = p \left( \frac{D}{2t} - 0.5 \right) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$  は周応力[MPa]、 $p$  は蒸気圧力[MPa]、 $D$  は外径[mm]、 $t$  は肉厚[mm]である。試験温度は試験期間(1年以内)を考慮して 670℃、680℃、690℃、700℃の 4 条件を設定した。なお、クリープ破断試験は JIS Z 2271-2010 に基づいて実施した。

表1 高温再熱蒸気管の仕様および蒸気条件

管仕様	材質	火SCMV28NT SR (改良9Cr鋼)
	外径	711.2mm
	肉厚	39mm
蒸気条件	圧力	4.52MPa
	温度	596℃
使用時間		約12万時間

表2 供試材(母材部)の化学成分および熱処理条件<sup>3)</sup>

	化学成分(wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	V	Nb
供試材	0.09	0.35	0.44	0.006	0.001	0.14	0.2	0.08
規格値	0.08~0.12	0.20~0.50	0.30~0.60	≤0.020	≤0.010	≤0.40	0.18~0.25	0.06~0.10
	化学成分(wt%)				熱処理条件			
	Cr	Mo	N	Al	焼ならし		焼き戻し	
供試材	8.44	0.98	0.047	0.01	1050℃×30min		780℃×30min	
規格値	8.00~9.50	0.85~1.05	0.030~0.070	≤0.04	1040℃~1095℃		730℃以上	

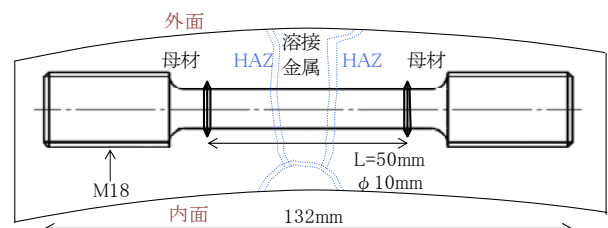


図1 試験片採取位置および寸法

### 2.3 クリープ中断試験

クリープ損傷過程を調査するため、クリープ破断試験のうち、最も実機に近い 670℃条件の破断時間をもとに 20%、40%、60%、80%のクリープ時間で中断させるクリープ中断試験を JIS Z 2271-2010 に基づいて実施した(表3)。

### 2.4 金属組織観察およびボイド個数密度計測

各試験片断面観察用のサンプルは、試験片中心軸を含む面で半裁し、観察面を耐水研磨紙にて #800 まで研磨した後、ダイヤモンド研磨、アルミナ研磨にて鏡面に仕上げ、塩酸・ピクリン酸混合液によりエッチングして作製した。SEM 観察前には断面を白金蒸着した。各試験片断面の金属組織を日本電子(株)製の SEM(JSM-6010LA)を用いて観察し、光学倍率 500 倍の 16 視野(0.711mm<sup>2</sup>)の中で観察されたボイド数からボイド個数密度を算出した。

### 2.5 硬さ計測

硬さ計測は、各試験片断面の中心線上をミットヨ(株)製マイクロビッカース硬さ計(HM-200)を用い、試験力 HV0.3(2.942N)、押し込み時間 10 秒、計測間隔 0.25mm で JIS Z 2244-2009 に基づいて計測した。各試験片の端部 10mm の母材領域は計測間隔 0.5mm で計測した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 クリープ破断試験

クリープ破断試験結果を新材の平均的なクリープ強度(寿命評価式平均線)とともに図2に示す。各試験片の破断時間は、寿命評価式の平均線に概ね近い結果が得られており、供試材のクリープ強度は新材の平均的なクリープ強度と同程度と推測された。破断試験片の外観写真を図3に示す。破断位置は全て HAZ 破断であった。クリープ破断絞りを図4に示す。破断絞りは 30%前後であり、破断時間が短いほど延性的になる傾向がみられた。

### 3.2 余寿命評価

アイソストレス法にもとづき、各試験片の破断時間と温度の間に回帰線を作成して求めた余寿命評価結果を図5に示す。評価温度 596℃における余寿命は約 16 万時間と評価された。

表3 クリープ試験条件

	応力	温度	試験時間
クリープ破断試験	39MPa (周応力)	670℃	破断まで
		680℃	
		690℃	
		700℃	
クリープ中断試験	39MPa (周応力)	670℃	破断時間×20%
			破断時間×40%
			破断時間×60%
			破断時間×80%

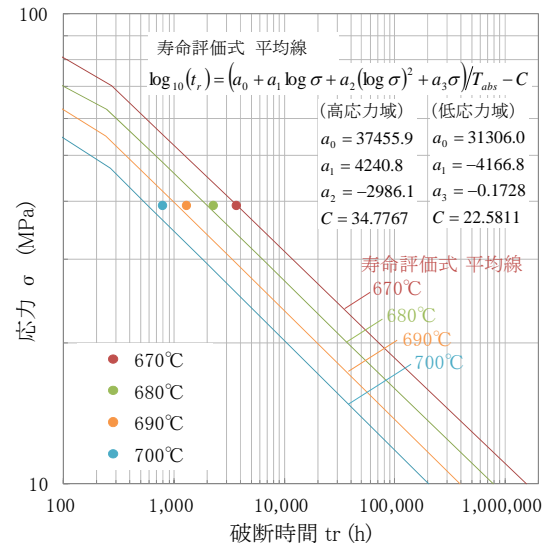


図2 破断時間と寿命評価式(平均線)の比較

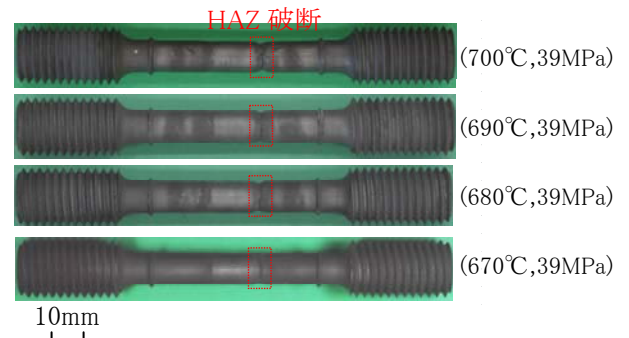


図3 破断試験片の外観写真

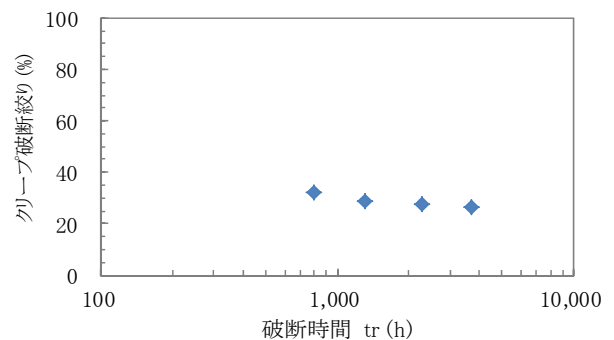


図4 クリープ破断絞り

### 3.3 金属組織観察およびボイド個数密度計測

中断試験片(中断時間 80%)断面金属組織のSEM写真を図6に示す。母材や溶接金属に比べて、HAZに多くのボイドが認められた。各試験片 HAZ の最大ボイド個数密度とクリープ損傷率との関係を図7に示す。ここで、供試材のクリープ損傷率  $D_c$  を実機使用時間と寿命評価式平均線の比から求めたうえで、各中断時間のクリープ損傷率を設定した。HAZ におけるボイド個数密度はクリープ損傷の進行とともに  $11 \text{ 個}/\text{mm}^2$  ( $D_c 18.6\%$ )、 $34 \text{ 個}/\text{mm}^2$  ( $D_c 34.9\%$ )、 $180 \text{ 個}/\text{mm}^2$  ( $D_c 51.2\%$ )、 $200 \text{ 個}/\text{mm}^2$  ( $D_c 67.4\%$ )、 $755 \text{ 個}/\text{mm}^2$  ( $D_c 81.6\%$ )と計測され、クリープ前半に比べて後半において、より増大していた。

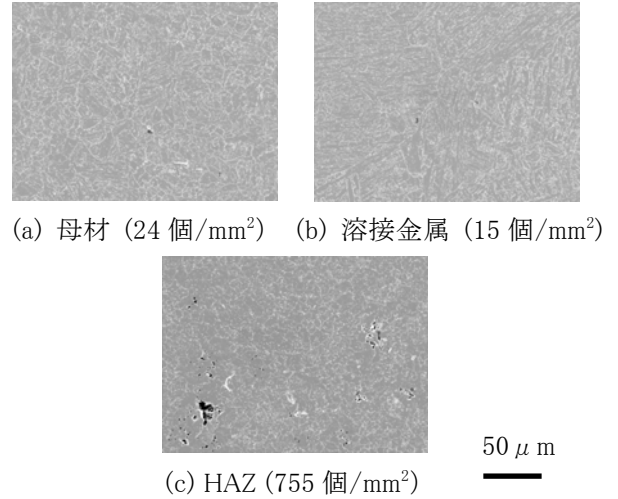


図6 金属組織観察写真(中断時間 80%)

### 3.4 硬さ計測

各試験片中心線上の硬さ分布計測結果を図8に示す。クリープ損傷の進行とともに HAZ の軟化は著しく、HAZ 最軟化部の硬さは約 130HV であった。また、母材部および溶接金属部においても 30HV 程度の軟化が進行していた。硬さとクリープ損傷率の関係を図9に示す。母材および溶接金属はクリープ前半で軟化が進行し、後半の軟化は緩やかであった。一方、HAZ はクリープ後半においても軟化が進行しており、軟化進行はボイドの増大との関連が強いと推測された。

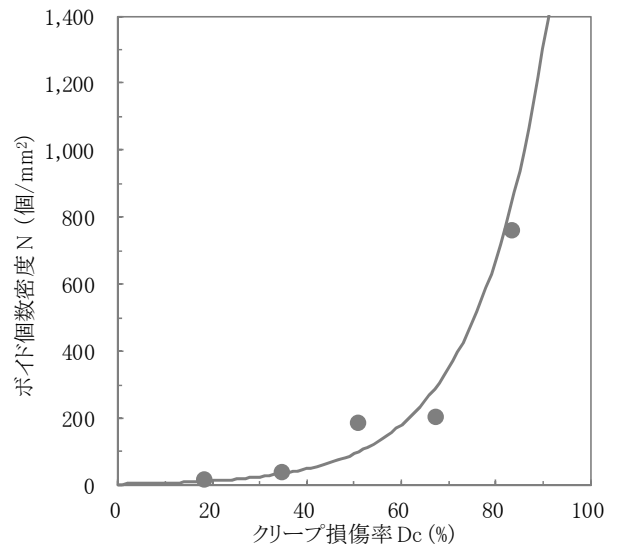


図7 ボイド個数密度とクリープ損傷率の関係

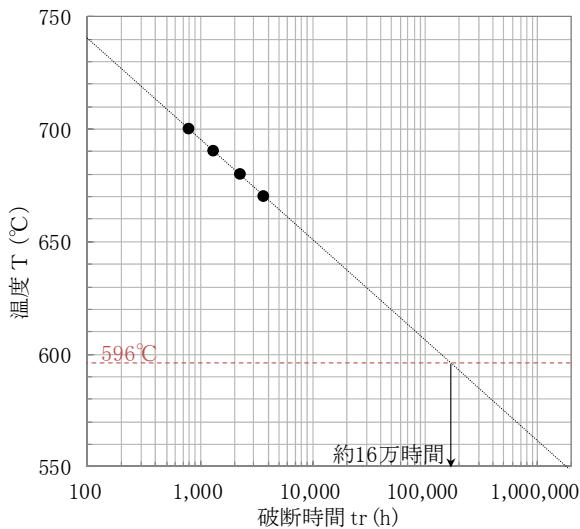


図5 クリープ破断試験に基づく余寿命評価

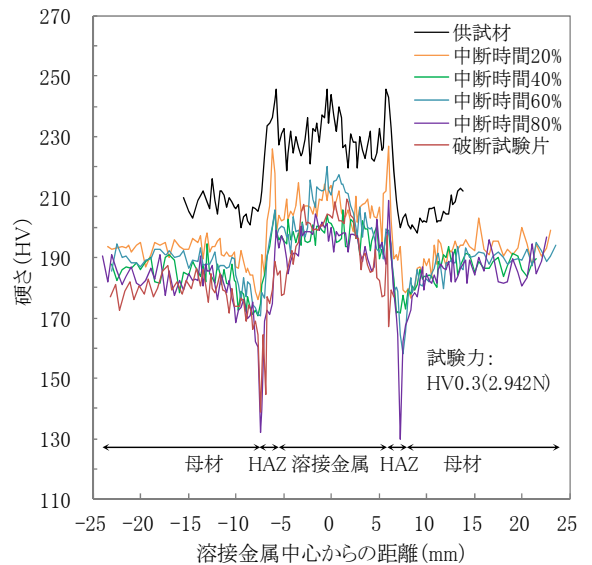


図8 硬さ計測結果

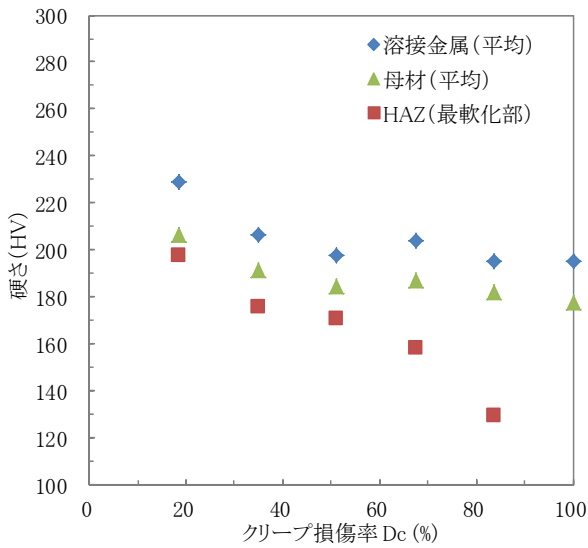


図9 硬さとクリープ損傷率の関係

#### 4. まとめ

超々臨界圧火力発電プラントにおいて長期(約 12 万時間)使用された高クロム鋼配管直管長手溶接継手から採取した試験片を対象にクリープ破断試験を実施した。試験の結果、供試材のクリープ強度は新材の平均的なクリープ強度に近く、約 16 万時間の余寿命を有すると評価した。さらに、クリープ中断試験を実施して、クリープ損傷過程を調査した結果、HAZ に多くのボイドが確認され、それらはクリープ損傷の進行とともに増大していた。HAZ においてはクリープ後半においても軟化が進行しており、軟化進行はボイドの増大との関連が強いと推測した。

#### 【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、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) 長井誠示, 山崎壮一, 屋口正次, 実機高クロム鋼溶接部の損傷状態および余寿命評価に関するデータベース構築-第 1 報, 電力中央研究所報告 Q14002, (2014.8)
- 2) M. Yaguchi, K. Nakamura, S. Nakahashi, “Re-Evaluation of Long-Term Creep Strength of Welded Joint of ASME Grade 91 Type Steel” Proceedings of ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63316, 2016
- 3) 経済産業省, 「発電用火力設備の技術基準の解釈」, p129, (2013.5)
- 4) 金丸修, 清水勝, 大場敏夫, 八木晃一, 加藤雄平, 服部健司, 長期使用ボイラ配管の内圧クリープ破断強度と Iso-stress 法による寿命予測, 火力原子力発電, (1990.3)

## VPP技術を使った新たな住宅向けサービス(第2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  
蓄電池限界価格

Key Words : Virtual Power Plant service  
Energy Management System  
Water storage type water heater  
Battery  
Marginal cost of battery

### The new residential services with Virtual Power Plant technology (2nd report)

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

Yasunobu Tada

#### Abstract

The Virtual Power Plant technologies that remotely control the operations of many home devices like water heaters and batteries are in development for effective utilization and home use of solar photovoltaic generation.

We evaluated the quantities of the regulated electric energy and the profit gained by the controlled operation of heat pump type water heaters or batteries placed in houses.

The remote control of the operation of a heat pump type water heater brought a moderate profit and was easily realizable. Because the placement of a battery in house was very expensive, the remote control of the operation of a battery brought no profit and was difficult to realize. In the near future, through the popularization of electric vehicles, the price of battery would greatly go down, the remote control of the operation of batteries would be realizable.

## 1. はじめに

小型太陽光発電(10kW 未満)の発電電力の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、需要家の蓄電池や蓄湯式給湯器など蓄エネルギー機器を遠方から一括制御するバーチャルパワープラント(VPP)の開発が政府主導で行われていることを踏まえ、このVPP技術を使った新たな住宅向けサービスに関して2016年度上期に検討を行った内容について前回報告した<sup>1)</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こと、具体的には、蓄湯式給湯器の運転時間帯調整および蓄電池の充電時間帯調整を提案した。

今回の報告では、これらの実施方法をさらに詳細に検討した結果を報告する。また、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する。

定量的な評価を行うことで、これらサービスの経済性や実現可能性を明確にできた。ただし、予想どおり得られる利益は非常に小さく、実現するためには実施のための費用を極限まで低下させる必要があり、この結果を実施方法にフィードバックして、実施方法や機器構成等の合理化を図った。

## 2. 新たな住宅向けサービスの内容および実施方法

### 2.1 蓄湯式給湯器の運転時間帯調整

太陽光発電を有する住宅において、小型太陽光発電のFIT買い取り終了後の余剰電力売電価格は現状では不明であるが、夜間帯買電価格(15円/kWh程度)を上回することはまず考えられないことから、夜間帯の需要を昼間の太陽光の余剰がある時間帯にシフトすることは、深夜帯電力買電価格と太陽光余剰売電価格の差だけ利益を得ることができる。ただし、朝の給湯需要を満たす必要があることから、朝にある程度の蓄湯量を確保する必要があり、一部夜間に運転する必要があるが、個別の住宅で毎日運転時間帯を手動調整することは不可能なため、外部から自動で調整するサービスが必要である。

住宅側から見れば夜間運転の運転時間帯は夜間料金時間帯であれば料金は同じ(外気温や保温期間中の放熱の影響により正確にはわずかに変化)なのでいつでも

よく、同様に昼間の運転時間帯は太陽光の余剰が給湯器の運転に十分ある時間帯であればいつでもよい。一方、電力小売り事業者側から見れば、夜間および昼間の運転時間帯を電力余剰が大きい時間帯あるいは電力供給コストの低い時間帯に調整できれば、電力需給調整コストの低減に資することができる。また、夏期など供給力が不足している場合は、あえて昼間に運転せず、太陽光発電をピーク時の供給力として活用することも考えられる。

すなわち、FIT買い取り期間が終了した太陽光発電を有する住宅で、太陽光発電の余剰の発生状況に合わせて蓄湯式給湯器の運転時間帯を調整することで、

- ・住宅側は、深夜帯電力買電価格と太陽光余剰売電価格の差だけ利益を得ることができる。
- ・電力小売り事業者側は、夜間および昼間の運転時間帯を電力余剰が大きい時間帯あるいは電力供給コストの低い時間帯に調整することで、電力需給調整コストの低減を図ることができる。

調整のイメージを図1に示す。

一方、夜間帯および太陽光発電が豊富にある昼間帯は在来電源からの供給が少ない時間帯であり、電源構成はベース電源(水力および原子力)とミドル電源(石炭火力および天然ガス火力)と考えられる。蓄湯式給湯器の運転時間帯調整で電力小売り事業者側が得られる利益は、発電電力の平準化に伴うものであり、供給力が自前である場合は火力発電の運転調整による運転費(ほぼ燃料費)の低減分と考えられる。具体的には石炭火力およびガス火力の運転台数低減や高出力化による発電効率向上、ガス火力の石炭火力への一部置き換えによる運転費低減と考えられる。現状の燃料価格であれば、運転費低減効果は最大でも数円/kWhと推定される。

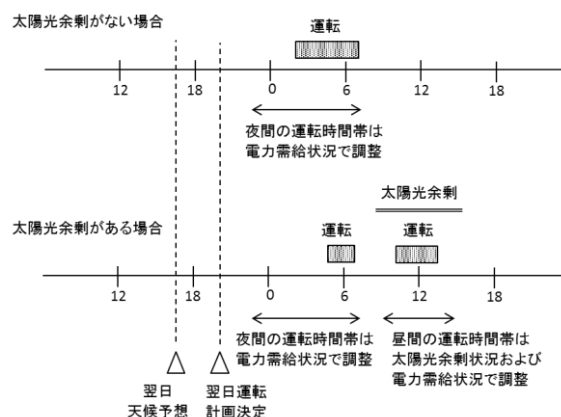


図1 蓄湯式給湯器運転時間帯調整イメージ

近年の太陽光発電の大量導入により、太陽光抑制が現実味を増すに従い、需要を創出することにより太陽光



余剰を吸収する上げデマンドレスポンス(上げ DR)が、国の検討会等で取り上げられている<sup>2)</sup>。上記の蓄湯式給湯器の運転時間帯調整は上げ DR の一例といえる。上げ DR の資源として、太陽光発電を有しない住宅あるいは太陽光発電を有するが FIT 買い取り期間中の住宅が保有する蓄湯式給湯器を充てる考え方も存在する。しかし、現状の電気料金では夜間帯と昼間帯では 15 円/kWh 程度の単価差があり、太陽光発電を有しない住宅の給湯器の運転時間帯を昼間に調整した際に発生する電気料金の増分負担をどうするかが問題である。同様に、FIT 買い取り期間中の太陽光発電を有する住宅の給湯器の運転時間帯を昼間に調整した際には、現状では FIT 買い取り価格が深夜帯電力単価よりはるかに高価(15~25 円/kWh 程度の単価差)なため、太陽光余剰売電減少による収入減が夜間帯買電減少による支出減をはるかに上回り、収入減をどう補填するかの問題がある。一方前述のとおり、給湯器運転時間帯調整による電力供給側の利益は最大でも数円/kWh 程度と予想されること、運転時間帯調整のための費用も発生することから、太陽光発電を有しない住宅あるいは太陽光発電を有するが FIT 買い取り期間中の住宅が保有する蓄湯式給湯器を上げ DR 資源とすることは、単純な経済性では不可能である。

## 2.2 蓄電池の充電時間帯調整

太陽光発電の余剰を蓄電し夕方に利用することは、蓄電池の充放電損失(30%程度)を考慮しても、夕方帯の買電価格が 30 円/kWh 程度と高価なため、経済的に成り立つと考えられる。一方、夜間に利用することは、夜間帯の買電価格が 15 円/kWh 程度のため、充放電損失を考慮するとほとんど利益はなく、余剰売電価格が高価(10 円/kWh 以上)な場合は充放電損失を考慮すると、むしろ経済的な損失が発生する。また、夜間帯の電力(15 円/kWh 程度)を蓄電して昼間・夕方(30 円/kWh 程度)に利用することは、値差が大きいため充放電損失を考慮しても経済的に成り立つと考えられる。ただし、個々の住宅で毎日太陽光の余剰を予想し、夜間の充電量を定めることや蓄電池の運転モードを手動で切り替えることは不可能なため、外部から自動で調整するサービスが必要である。

夜間帯の充電に関しては、住宅側から見れば、夜間料金時間帯であればいつでもよい。昼間帯の余剰充電に関しては、余剰発生に合わせる必要があるため、調整はできない。ただし、一般的には太陽光発電電力量より蓄電池容量が小さいため、蓄電池は早めに満充電になり、午後は送電することになる。放電に関しては、昼間夕方

ないように放電すれば良い。

電気小売り事業者側の立場からは夜間帯の充電は蓄湯式給湯器と同様に、電力余剰が大きい時間帯あるいは電力供給コストの低い時間帯に調整できる。昼間帯の充電に関しても、太陽光発電電力が高精度で予想できれば、送電が平準化するよう充電時間帯を調整することができる。なお、蓄電池の充電時間帯調整で電気小売り事業者が得られる利益は、蓄湯式給湯器運転時間帯調整と同様と考えられる。調整のイメージを図2に示す。

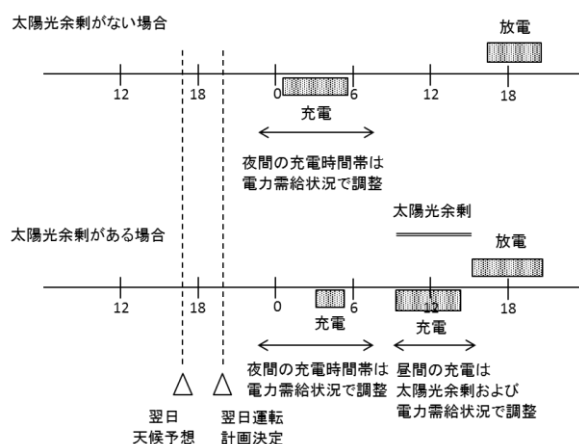


図2 蓄電池充電時間帯調整イメージ

## 2.3 実施方法

### (1) 電気温水器の制御

電気温水器は、通信による外部からの制御ができないため、ヒータ電源を開閉スイッチで開閉する必要がある。電気温水器の制御電源は確保しておく必要があるため、別途供給する。開閉スイッチは外部からインターネット回線を使って制御する。インターネットインフラのない住宅が増えており、これに対応するためには携帯回線を使ったデータ伝送網の利用が必要である(図3)。

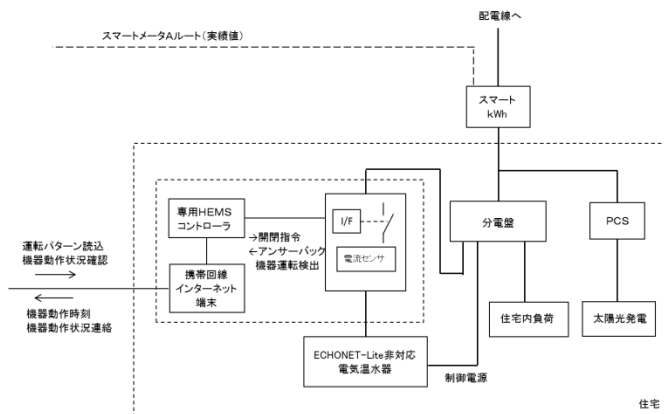


図3 電気温水器制御方法





事業者の電力需給状況を改善できるような蓄電池充放電計画を作成する。これらの予想や計画作成は、インターネットでつながったCEMSで実施する(図5)。太陽光発電電力、住宅内需要電力の予想には、機械学習等人工知能系技術の活用が望ましい。最近のクラウドには人工知能機能を有しているものがあり(例えば IBM 社 Watson)、これらの活用も考えられる。ただし、クラウドの活用はある程度の規模がないとコスト的に厳しいようである。実証実験のように小規模の場合は実ハードのCEMS活用の方が現実的である。

蓄電池は単純な充放電に加えて、受電点電力を制御して受電しないように充電する、あるいは送電(逆潮)しないように放電する機能が求められる。これら機能は必要に応じて切り替えて使用する必要があり、想定される蓄電池の運転モードの例を表1に示す。運転モードの切替えはCEMSで実施する。ただし、通常放電モードや受電抑制放電モードを選択しても放電が終了してしまえば蓄電池側で充放電停止モードに自動で移行する。

表1 蓄電池運転モード例

運転モード	受電点電力制御	備考
①通常充電	制御なしあるいは受電電力が契約電力を超えないよう制御	電力指定も可
②太陽光余剰充電	太陽光送電最小、かつ、受電しないよう充電制御(充電しきれない太陽光余りは送電)	
③逆潮なし放電	逆潮がないように制御(通常は定格で逆潮ありで制限)	電力指定も可
④通常放電	制御なし(通常は定格で逆潮あり)	現状不許可 電力指定も可
⑤充放電停止	-	
⑥メンテナンス	-	

代表的な運転パターンでの運転モード切替えの状況を図6に示す。図中番号は、表1の運転モードを示す。

ケース1は最も一般的なケースで、太陽光余剰を極力送電せず蓄電し、夕方帯に使用する。太陽光直接および太陽光の蓄電でまかなえない昼間帯および夕方帯の電力を供給するために、不足分を夜間帯に充電する。夜間帯の充電に関しては、電力小売り事業者が電力需給状況を見て、充電時間帯を指定する。

ケース2は夏期など太陽光発電を供給力として積極的に活用する場合で、太陽光余剰は充電せずに積極的に送電する。昼間帯および夕方帯の電力を供給するために夜間帯に充電することはケース1と同様であるが、ケース2では昼間の充電がないため、夜間帯で十分充電する必要がある。

ケース3は、VPP等で住宅用蓄電池を電力需給調整用途に積極的に活用する場合で、住宅内の電力収支調整だけでなく、電力需給調整のための充放電を行う場合である。昼間帯の太陽光余剰の充電は、受電して充電することで自己の余剰吸収だけでなく外部の余剰も積極的に吸収する。夕方帯の放電は、自己の需要以上に放電し積極的に送電することで、夕方帯の供給力として活用する。なお、現状では蓄電池からの送電は認められていないが、このように蓄電池を自己の電力収支調整だけでなく、電力需給調整に積極的に活用するためには、蓄電池からの送電は必須である。

蓄電池を電力需給調整にさらに活用するには、通常の充放電における電力を定格一定でなく可変にすることが考えられる。ただし、制御は相当複雑化するが1戸あたり得られる電力調整可能量は小さく、経済的に見合わない

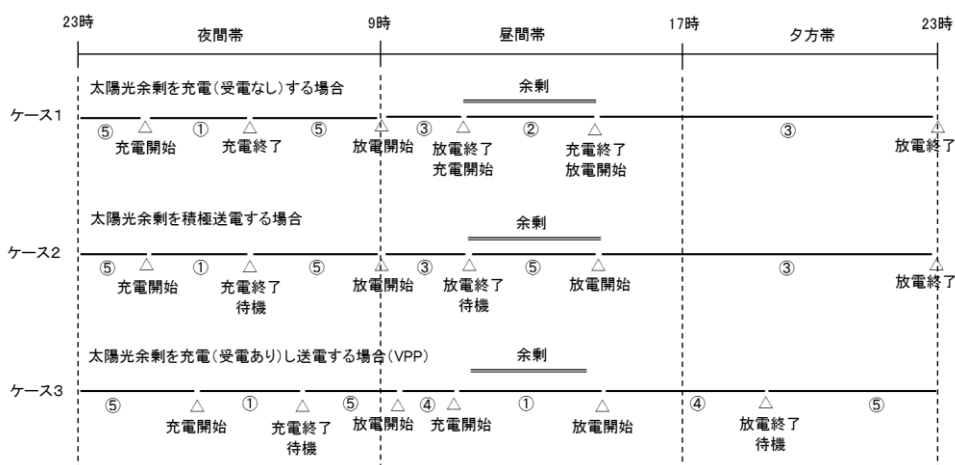


図6 蓄電池運転モード切替えの代表例

と考えられる。むしろ、地域で個々の蓄電池を束ねてグループ化し、グループ単位で充放電の時間帯を適切に配分する(個々の蓄電池は定格で充放電する)方が、制御が比較的簡単で実用的な調整も可能であり、現実的と考えられる。電気自動車の充電需要を、乱数を使って適切に配分することで充電需要全体の平準化を図る(乱数修飾関数の工夫で平準化だけでなく需要の谷間を埋めることも可能)手法をすでに提案している<sup>3)</sup>が、同様の手法でグループ化した蓄電池の充放電時間帯を調整することが可能である。

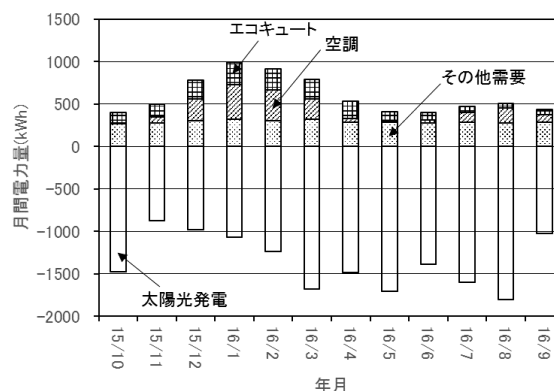


図7 各月の住宅内電力量平均値

### 3. 蓄湯式給湯器・蓄電池の運転時間帯調整の効果

実際の住宅内電力データを使用して、蓄湯式給湯器の運転時間帯、蓄電池の充放電時間帯および充放電電力を、図1, 2の要領で調整した際のシミュレーションを行い、その効果を評価した。

#### 3.1 住宅内電力データ

シミュレーション用のための住宅内電力データは、住宅メーカーが保有する ZEH(ゼロエネルギーハウス)の HEMS で測定した住宅内電力データを借用し利用した。現状 ZEH は HEMS 設置が補助金を得るための条件となっているため HEMS を設置しているが、ZEH 以外で HEMS を設置している住宅はほとんどないとのことである。シミュレーションは、2015年10月から2016年9月までの1年間(閏年のため366日)の18戸のデータを使って実施した。

HEMS で測定した住宅内電力データは、分電盤の全ファイダ毎で1戸あたり20~30データとデータ量が非常に大きいためデータを集約し、1戸あたり下記の4項目に電力量データを整理した。

- ・太陽光発電
- ・蓄湯式給湯器(全戸エコキュート)
- ・空調機(床暖房を含む)
- ・その他需要合計

また、データの周期は1時間とした。

各月の18戸の住宅内電力上記4項目の電力量平均値を図7に示す。大容量の太陽光発電を保有しており、全月で太陽光発電電力量が必要電力量合計を上回っている。

生データでは太陽光発電容量が各戸異なるため、シミュレーションでは容量を5kW, 8kWとし、実設備容量との容量比で電力量を換算したデータを使用した。各電力量項目の月別相対値(最大月を100% 暦日日数補正実施)を図8~11に示す。

太陽光発電電力量は春期~秋期間の変動が小さい。これはパネルの傾斜角が比較的小さいことの影響と考えられる。蓄湯式給湯器(エコキュート)の消費電力量は季節間の変動が非常に大きく、8月は2月の約20%となっている。空調機の消費電力量は冬期と夏期が大きく、特に冬期が大きくなっている。高断熱住宅のため、夏期冷房需要が相対的に小さくなっていると予想される。また、10月、5月が冷暖房の切替え時期となっている。その他需要電力合計は冬期が若干増加しているもののほぼ一定となっており、実績からの予想は可能と考えられる。以上の結果から、データ項目を増やさなくてもこれら4項目のデータ分析で、発電予想や需要予想は十分可能と考えられる。

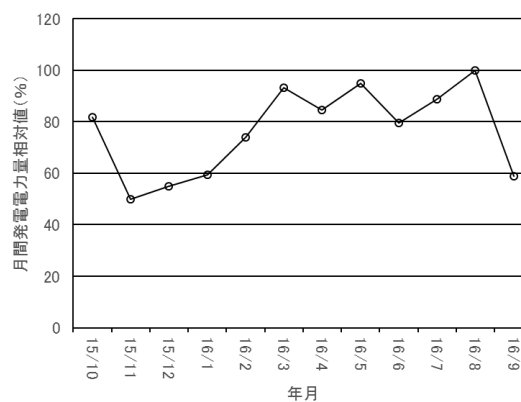


図8 月間太陽光発電電力量相対値

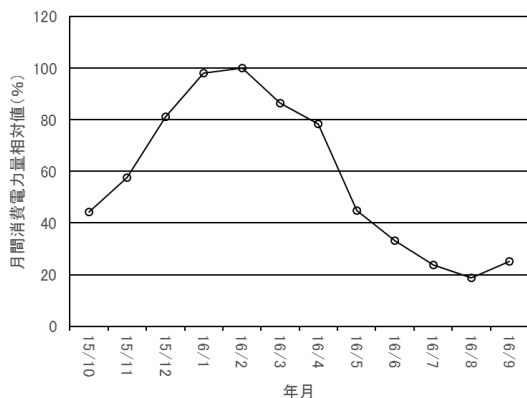


図9 月間エコキュート消費電力量相対値

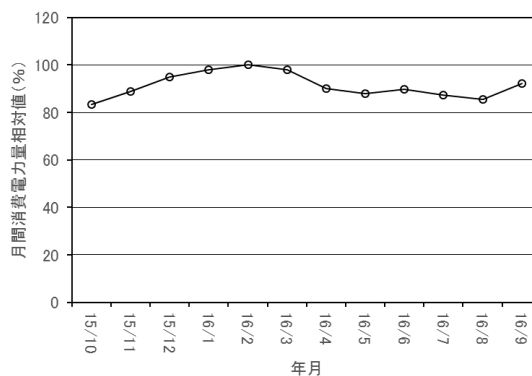


図11 月間その他需要消費電力量相対値

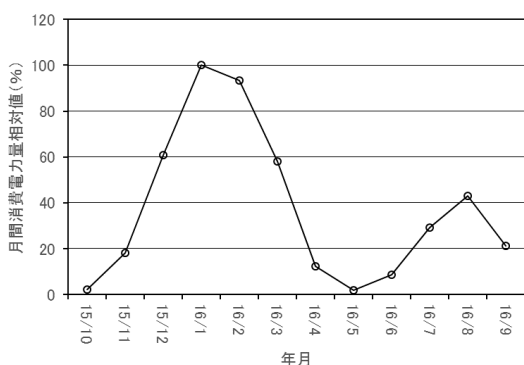


図10 月間空調機消費電力量相対値

### 3.2 蓄湯式給湯器(エコキュート)の運転時間帯調整の効果

#### (1) 調整シミュレーション方法

太陽光余剰があり、かつ給湯器を昼間に運転しても受電が発生しない場合に限り給湯器の運転を昼間に移動させた。ただし、朝の給湯を考慮して、昼間への移動は最大4時間とし、給湯器の運転が4時間を超える場合は、4時間を超える部分はそのまま夜間に残した。給湯器の運転時間が4時間以下の場合、全量昼間に移動させた。なお、昼間移動により給湯器の消費電力は変化しないものとした。移動先の時間帯として10時～14時、9時～13時、11時～15時、8時～12時、12時～16時の5パターンを準備した(図12)。それぞれの時間帯に移動させ、いずれかのパターンで受電が発生しなければ移動可能と判断した。なお、夏期に13時～17時のパターンで移動できる場合がごくわずかに存在するが、結果にほとんど影響しないため追加しなかった。

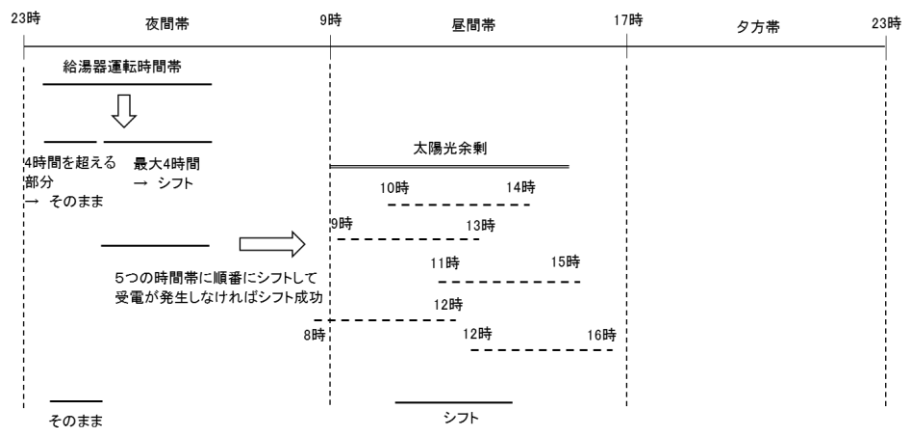


図12 給湯器運転時間帯調整シミュレーション方法

シミュレーションは実績データで行っているため、発電電力量や需要電力量の予想誤差は発生しないが、実際の運用では予想誤差により昼間運転中に受電が発生することも考えられる。これを回避するにはある程度余剰電力予想にマージンを見る必要があるが、マージンを見過ぎると移動する回数が減少してしまう。予想精度とマージンをどう見るかは今後の大きな課題である。

(2) シミュレーション結果

18 戸の住宅内電力データを使い、太陽光発電容量を 5kW、8kW に換算してシミュレーションを実施し、各戸のシミュレーション結果を平均して評価した。給湯器の運転を昼間に移動できる日数比率を図 13 に、給湯器が消費する電力量の内、昼間に移動できる電力量の比率を図 14 に、太陽光発電電力量の内、給湯器で消費される電力量の比率を図 15 に示す。シミュレーション結果を以下にまとめる。

- 給湯器は冬期に消費電力が多く夏期に少ない。一方で太陽光発電は冬期に発電量が少なく夏期に多い。両者のマッチングが悪く冬期は給湯器の運転を昼間に移動できる日数は少ない。夏期は移動できる日数は多いが、消費される電力量は少ない。
- 給湯器の運転時間帯を昼間に移動させることで、給湯器消費電力を夏期は全量近く、冬期でも 40~50% を太陽光でまかなうことができる。
- 冬期に給湯器を昼間に移動させるためには、太陽光発電の容量は 5kW では容量不足である。8kW の容量があれば冬期に大きく落ち込むことなく 60~80% の日数で移動が可能である。
- 給湯器運転を昼間に移動させた場合の太陽光発電電力量に対する給湯器消費電力量の比率は、太陽光 5kW で 7~20%、8kW で 4~19% 程度で小さく、給湯器の昼間運転だけでは太陽光余剰対策としては十分な効果は得られない。

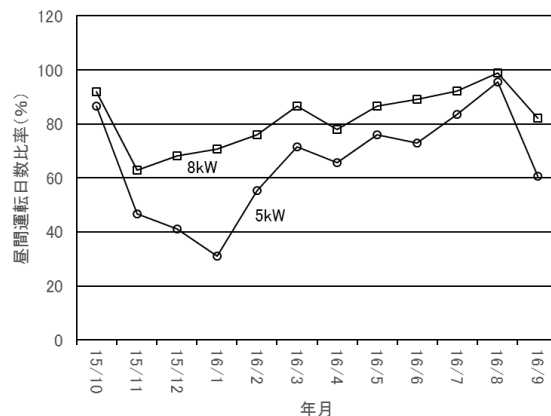


図 13 給湯器昼間運転日数比率

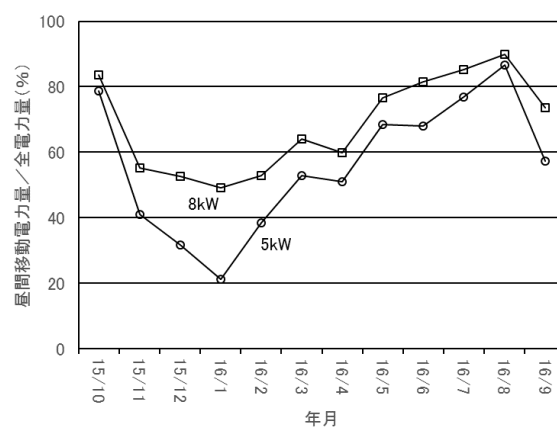


図 14 給湯器昼間運転電力量比率

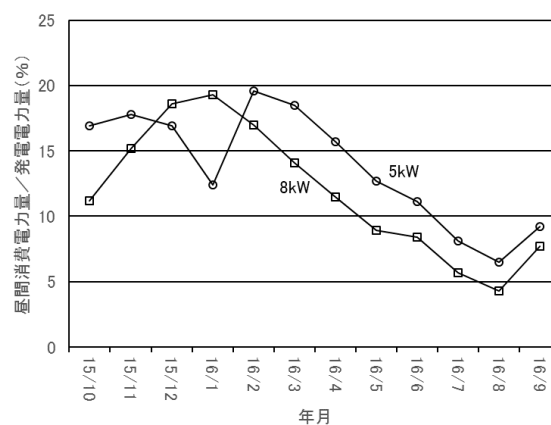


図 15 太陽光の内、給湯器で消費される比率

### (3) 給湯器昼間運転の経済性

給湯器の昼間運転は、蓄電池の充放電損失のような損失がなく、さらに昼間運転では外気温が夜間より相対的に高く効率が向上してむしろ消費電力は若干減少する(シミュレーションでは考慮していない)こと、夜間帯受電電力買電単価より太陽光余剰売電単価が安価と予想されることから、給湯器の運転を昼間に移動させることの利益は、

昼間に移動する電力量×(夜間買電単価－昼間売電単価)

となる。シミュレーションで求めた昼間に移動する電力量から昼間売電価格をパラメータとして利益を求めた結果を図16に示す。夜間買電単価は四国電力の住宅向け料金メニューであるスマートeプランの夜間帯料金 14.22 円/kWhとした。再エネ賦課金は現状の 2.25 円/kWhとした。太陽光売電価格 10 円/kWh で需要家の年間利益は 6 千円程度でそれほど大きなものではない。

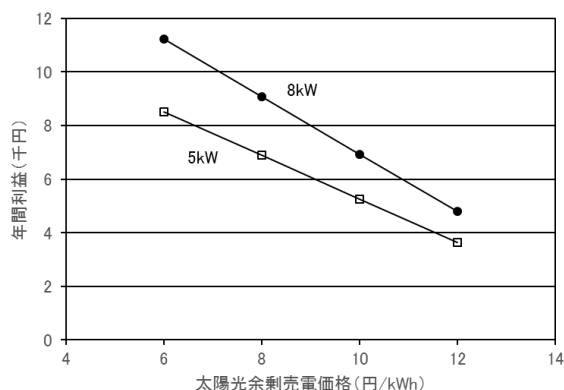


図16 給湯器運転時間帯昼間運転の経済性

### 3.3 蓄電池の効果

#### (1) 蓄電池運用シミュレーション方法

蓄電池の運用は、昼間の太陽光余剰電力を蓄電し、昼間夕方に利用すること(太陽光の自家消費)を主に、蓄電池容量に対して太陽光余剰蓄電量が少なく余裕がある場合は、昼間夕方に受電する電力を夜間帯に充電した電力でまかなうこととした。また、太陽光余剰電力を最大限蓄電した場合、夕方で使い切れない場合が発生するが、夜間帯で使用して翌朝までに使い切ることとした。ただし、蓄電池容量が大きい場合は翌朝までに使い切れない場合も発生し、その場合は蓄電できないため翌日の太陽光余剰は送電することになる。

蓄電池運用例を図17に示す。左側の図は蓄電池がない場合の需要電力、太陽光発電電力、受電電力を示す。中央の図は太陽光の余剰を充電し夕方に放電して使った場合を示す。この例では太陽光発電の余剰が少なく、太陽光だけでは蓄電池は満充電にならず夕方の需要をまかなえない。右側の図は上記に夜間帯の充電を追加し、昼間の太陽光余剰と合わせて蓄電池を満充電にして、夕方に放電して使った例を示す。この例でもわかるように、昼間の太陽光余剰電力量による充電の不足分から夜間の充電電力量を決める必要がある。シミュレーションでは実績値を使えるが、実際には予想値から夜間充電電力を決める必要があり、予想誤差が発生する。予想誤差をどこまで減らせるか、マージンをどう見るかは今後の大きな課題である。

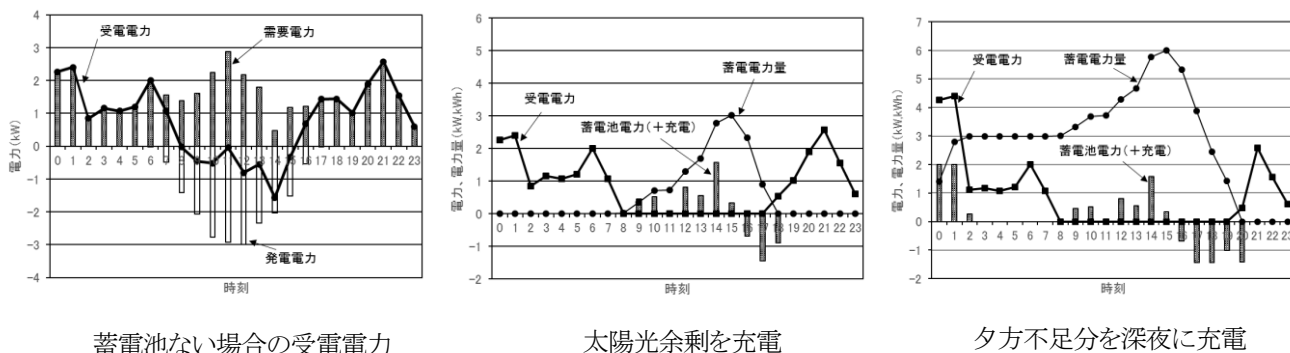


図17 蓄電池運用例(蓄電池容量 6kWh)

## (2) シミュレーション結果

18 戸の住宅内電力データを使い、需要はエコキュートの運転時間帯調整を行った後のデータ(電力量は変化なし)を使用した。太陽光発電容量は 5kW に換算し、蓄電池容量は 3kW-6kWh、3kW-10kWh(蓄電池容量は公称容量でなく実効容量)の 2 ケースでシミュレーションを実施した。蓄電池充放電効率は 70%(交流端)とし、各戸のシミュレーション結果を平均して評価した。蓄電池容量 6kWh のシミュレーション結果を図 18 に、10kWh のシミュレーション結果を図 19 に示す。

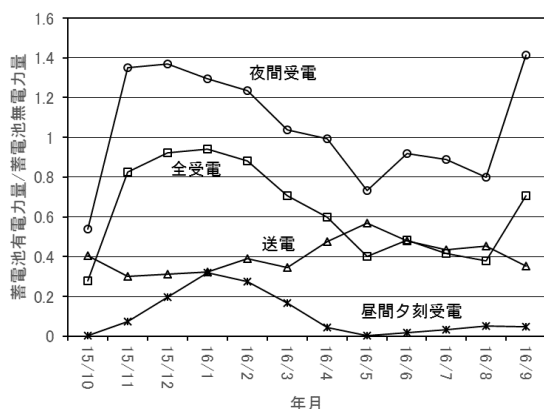


図 18 蓄電池運用シミュレーション結果(6kWh)

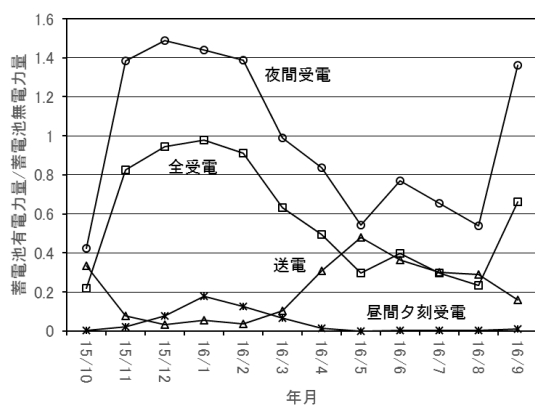


図 19 蓄電池運用シミュレーション結果(10kWh)

シミュレーション結果を下記にまとめる。

- 太陽光発電量が多く消費電力の少ない春期～秋期は、昼間の太陽光を蓄電して夕方使う運用パターンが主であるが、太陽光発電量が少なく消費電力の多い冬期は、夜間帯に充電して昼間夕方に使う運用パターンの比率が高くなっている。
- 昼間夕方の受電電力量は大幅に減少し、冬期以外はほぼゼロとなる。
- 太陽光余剰電力は大幅に減少し、特に太陽光発電量

の少ない冬期は減少幅が大きい。

- 冬期は昼間夕方に使う電力を蓄電するために夜間受電が増加しており、春期～秋期は夕方使い切れなかった太陽光余剰の蓄電を夜間に使用するため夜間受電が減少している。
- 蓄電池容量 6kWh と 10kWh を比較すると、全受電量は太陽光が多い時期に 10kWh が 10%程度減少するものの、大きな差はない。すなわち両者の充放電電力量はほとんど同じである。太陽光の自家消費目的では、夕方の消費電力量に相当する容量 6kWh で十分といえる。

## (3) 蓄電池の経済性

蓄電池設置により得られる利益は以下のとおりとなる。

蓄電池設置による利益

$$= \text{昼間夕方受電電力量減少量} \times \text{電力単価} - \text{太陽光発電売電減少量} \times \text{電力単価} - \text{夜間受電増加量} \times \text{電力単価}$$

電力単価は四国電力の住宅向け料金メニューであるスマートeプランを使用し、昼間夕方帯料金は夕方が多いため夕方帯料金 28.85 円/kWh、夜間帯料金は 14.22 円/kWh とした。再エネ賦課金は現状の 2.25 円/kWh とした。

シミュレーション結果の太陽光余剰売電量、昼間夕方受電量、夜間受電量から求まる、蓄電池設置により得られる年間利益を図 20 に示す。

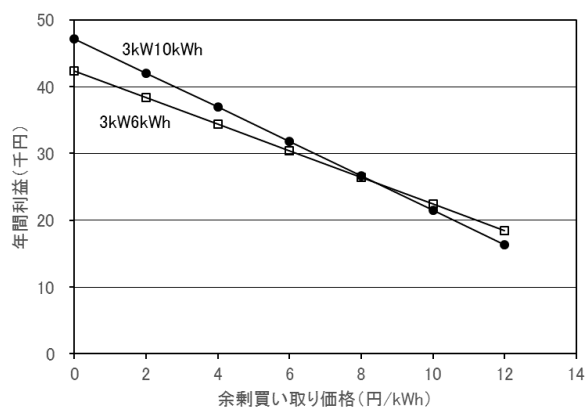


図 20 蓄電池設置により得られる利益

余剰買い取り価格が高価なほど余剰売上利益損失が大きくなるため、右肩下がりのグラフとなっている。余剰買い取り価格 0 円は現実的でないと考えられるが、FIT 買い取りで設備償却は終わっており後の発電原価は 0 円という考え方もあるため 0 円まで計算している。また、余剰買い取り価格が 10 円/kWh を超えると、太陽光余剰の夜

間放電は、夜間帯買電減少による利益より余剰売電減少による損失額が大きくなって経済性を損なうが、シミュレーションには反映していない(夜間帯での放電を許容している)。

6kWh と比べ 10kWh の太陽光自家消費率がやや高く、夜間充電も若干増えている。一方で充放電電力量が増える分損失が増え全体の消費電力量が増加している。10kWh は太陽光の自家消費分が多い分、太陽光余剰買い取り価格が高くなると利益が減少している。充放電電力量には大差がないため、利益もほぼ同じとなっている。

上記年間利益から、得られる利益と投資額が等しくなる単位容量あたり蓄電池限界価格を求めた結果を図 21 に示す。これまでのシミュレーションは実効容量で行っている。計算では、金利を年 3%、蓄電池寿命を 20 年、放電深度(DOD)を 80%、寿命期間中平均容量(対初期値)を 85% とした。

実効容量での単位容量あたり蓄電池限界価格

= 年間利益 / 資本回収係数 / 蓄電池容量

金利:  $i$  耐用年数:  $n$  として

資本回収係数 =  $(i \times (1+i)^n) / ((1+i)^n - 1)$

$i=0$  の場合は  $1/n$

蓄電池価格は公称容量で表示されるので、

公称容量 = 実効容量 / (DOD × 寿命期間中平均容量)

公称容量での蓄電池限界価格

= 実効容量での限界価格 × DOD × 寿命期間中平均容量

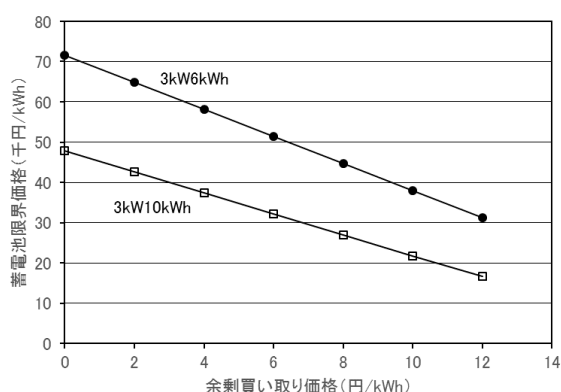


図 21 単位容量あたり蓄電池限界価格

6kWh と 10kWh で得られる利益がほぼ同じであるため、単位容量あたり蓄電池限界価格は 10kWh がはるかに低くなっている。6kWh で単位容量あたり限界価格は 4~5 万円/kWh 程度と予想される。経済産業省の 2020 年住宅用蓄電池価格目標値<sup>4)</sup>は 9 万円/kWh(寿命 15 年、現状

20 万円/kWh)であるが、この価格では余剰買い取り価格 0 円でも利益は出ない。このように蓄電池価格がさらに劇的に低下しない限り蓄電池設置の経済性は確保できず、停電対策等別の利益を考慮する場合を除き蓄電池の普及は難しいと考えられる。一方で電気自動車の普及が進めばリチウムイオン電池の価格は劇的に低下するという見通しもあり、現に米国テスラモーターズ社の例もあることから、2020 年代半ばに蓄電池の価格が大幅に低下する可能性も十分あり得る。

#### 4. まとめ

VPP 技術を使った新たな住宅向けサービスとして実現可能性があると考えられる、蓄湯式給湯器の運転時間帯調整および蓄電池の充電時間帯調整に関し、具体的なサービス内容を想定し、実際の住宅内電力データを使って定量評価を行った。

[蓄湯式給湯器運転時間帯調整]

- ・給湯器(エコキュート)は、冬期に消費電力が多く夏期に少ない。一方で太陽光発電は冬期に発電量が少なく夏期に多い。両者のマッチングが悪く冬期は給湯器の運転を昼間に移動できる日数は少ない。夏期は移動できる日数は多いが、消費される電力量は少ない。それでも給湯器の運転時間帯を昼間に移動させることで、給湯器消費電力を夏期はほぼ全量、冬期でも 40~50%を太陽光でまかなうことができる。
- ・冬期に給湯器を昼間に移動させるためには、太陽光発電の容量は 5kW では容量不足である。8kW の容量があれば冬期に大きく落ち込むことなく 60~80%の日数で移動が可能である。
- ・給湯器運転を昼間に移動させた場合の太陽光発電電力量に対する給湯器消費電力量の比率は、太陽光 5kW で 7~20%、8kW で 4~19%程度で小さく、給湯器の昼間運転だけでは太陽光余剰対策としては十分な効果は得られない。
- ・給湯器の運転時間帯を昼間に移動させることによる需要家利益は 6~10 千円/年程度と予想される。
- ・給湯器の運転時間帯を昼間に移動させることや時間帯内で調整することによる電力小売り事業者の利益は最大でも数円/kWh 程度で通常はかなり小さいと予想される。

[蓄電池充電時間帯調整]

- ・太陽光発電量が多く消費電力の少ない春期~秋期は昼間の太陽光を蓄電して夕方使う運用パターンが主であるが、太陽光発電量が少なく消費電力の多い



- 冬期は夜間帯に充電して昼間夕方に使う運用パターンの比率が高くなる。
- ・昼間夕方の受電電力量は大幅に減少し、冬期以外はほぼゼロとなる。
- ・太陽光余剰電力は大幅に減少し、特に太陽光発電量の少ない冬期は減少幅が大きい。
- ・冬期は昼間夕方に使う電力を蓄電するために夜間受電が増加しており、春期～秋期は夕方使い切れなかった太陽光余剰の蓄電を夜間に使用するため夜間受電が減少する。
- ・蓄電池容量 6kWh と 10kWh を比較すると、全受電量は太陽光が多い時期に 10kWh が 10%程度減少するものの、大きな差はなく充放電電力量はほとんど同じである。太陽光の自家消費目的では、夕方の消費電力量に相当する容量 6kWh で十分といえる。
- ・蓄電池設置による需要家の利益は、年間 2～4 万円程度である。蓄電池設置の利益と蓄電池への投資が同じになる単位容量あたり蓄電池限界価格は容量 6kWh で 4～5 万円/kWh 程度と予想される。現状蓄電池価格は 20 万円/kWh 程度であり、今後劇的に蓄電池価格が低下しない限り、蓄電池設置が経済的に見合うことはないと考えられる。
- ・蓄電池の充電時間帯を昼間に移動させることや時間帯内で調整することによる電力小売り事業者の利益は最大でも数円/kWh 程度で通常はかなり小さいと予想される。

## 5. 今後の課題

### 5.1 蓄湯式給湯器の運転時間帯調整

太陽光 FIT 買い取り終了後の住宅における蓄湯式給湯器の運転時間帯調整は、需要家・電力小売り事業者双方に利益があると予想されること、また既存給湯器の制御だけであることから追加機器も少なく、費用もそれほど多額にはならないと予想され、実現は比較的容易と予想され、積極的に実現に向けて取り組むべきと考えられる。しかし、利益の額は需要家サイド、供給サイドとも数千円/年程度と予想され、需要家に利益を還元しながら設備費や運用費を捻出するためには、実施にあたっては相当のコストダウンが必要である。コストダウンのために考えられる方策として下記がある。

- ・個別制御は実施せず、多数の需要家を束ねたグループで大まかに制御する。
- ・制御のために需要家に設置する設備を極力簡略化する。

- ・運用費の大半を占めると予想されるデータ通信費用を抑えるため、通常の LTE データ通信でなく、LPWA ネットワーク等 IoT 向け低速低価格データ通信網<sup>5)</sup>を活用する。

また、エコキュートに関しては外部から制御するために不可欠な ECHONET-Lite 通信機能付き機種種の普及が遅れている。ECHONET-Lite 対応機種は 1 万円ほど高価であること、対応サービスがなく通信機能付き機種をわざわざ購入する動機付けがないことが原因である。まず需要家に利益のあるサービスを開始することが通信機能付き機種を普及させるために必要であろう。

太陽光 FIT 買い取り中の住宅に関しては、給湯器の運転時間帯調整より買い取りの方が経済的にはるかに有利なため、適用は不可能である。FIT 買い取り終了住宅から順次適用していくことになる。

### 5.2 蓄電池の設置および充電時間帯調整

太陽光 FIT 買い取り終了後の住宅における蓄電池の設置および蓄電池充電時間帯調整は、蓄電池を新たに設置する必要があること、蓄電池が非常に高価なことから当面の実現は非常に難しいと考えられる。ただし、将来的に蓄電池価格が劇的に低下した場合は、一気に普及することも考えられること、また、蓄電池が普及した場合は電力消費パターンが大幅に変化し、電力小売り事業者に大きな影響を与えると予想されることから、将来に向けた技術開発は必要と考えられる。

給湯器と同様に得られる利益は少ないため、実施にあたって同様のコストダウン対策が必要である。さらに、蓄電池制御は太陽光余剰電力の蓄電と夜間帯電力の蓄電を組み合わせる最適化を図る必要があり、給湯器より複雑で高度な制御を求められる。発電・需要予想に関してもより高精度が求められる。このため、サービス実施にあたっては、給湯器に比べて相当運用ノウハウを蓄積する必要があり、時間をかけて十分な技術検討や実証実験を積み重ねる必要がある。

## 6. むすび

本稿は 2016 年度下期に実施した VPP サービスに関する社内研究の成果を取りまとめたものである。VPP サービスに関しては、国プロで複数の企業グループにより開発が進められており、これに用いられるシステムは多数のアプリケーションの活用を前提とした階層構造の非常に高度な構成となっている。商用化の折にはアプリケーションの活用も必要なことから、国内標準になると予想されるこれらシステムの採用が必要と考えられる。ただし、サービスの内容

に関しては本稿に記した単純なシステムと同様であり、アグリゲータを活用しない実証実験までは、本稿に記したシステムで対応できると考えている。

本稿に詳細を記載したとおり、住宅向けの VPP サービスは太陽光 FIT 買い取り終了後の住宅しか経済的に成り立たない。また、買い取りが終了する太陽光発電の容量は 4~5kW がほとんどであり、電気温水器(ヒータ容量 4~5kW)を昼間運転するには常時容量不足である。受電なしで安定的に電気温水器を昼間運転するには太陽光発電は倍の 10kW 近く必要で、対象となる住宅は極めて限られること(大容量の太陽光発電を有し、エコキュートではなく電気温水器を所有する住宅はほとんどないと予想される)、温水器は順次エコキュートに置き換わっていることから、将来的にも電気温水器の VPP サービスはまじないと考えられる。

一方、エコキュートの消費電力は最大で 1~2kW 程度(外気温で変化するため太陽光発電容量 4~5kW で問題なく昼間運転可能であり(ただし、本稿に記載したとおり冬期は運転できる日数が限られる)、現状でも VPP サービスは十分実現可能と考えられる。

蓄電池の設置および運用 VPP サービスは技術的には問題ないものの、現状では蓄電池価格の課題がある。しかし、今後価格低下が見込まれることから将来的には実現していくと予想される。

以上のことから、住宅向け VPP サービスは太陽光 FIT 買い取り終了後の住宅を対象として、エコキュート運転時間帯調整サービスから始まり、次の段階で蓄電池の設置および蓄電池運用サービスに発展していくと予想される。したがって、今後の技術開発は、まずエコキュートの運転時間帯調整に取り組むべきである。また、蓄電池の運用調整はすぐには実現しないものの、技術的に高度なため早期に実証実験を伴う検討に着手すべきと考えられる。なお、現在行われている国プロでの研究開発においてもこれと同じ方向性<sup>6)</sup>となっている。

小型太陽光発電のFIT買い取り終了は2年後に迫っており、早期のサービス実現に向けた取り組みが求められる。

#### [謝辞]

本研究の実施にあたり、VPP サービスの定量評価に不可欠であった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某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) 経済産業省 デイマンドリスポンスハンドブック, 2016.12
- 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) 経済産業省第4回 ERAB 検討会,定置用蓄電池の目標価格設定,2016.9
- 5) NTTdocomo 報道発表資料,LPWA 通信を活用した IoT サービスを実現する「ドコモ IoT/LPWA 実証実験環境」を提供,2017.3
- 6) 関西電力 HP,「バーチャルパワープラント構築実証事業への参画について」,2016.7

## 高空間分解能酸素分布モニタリング技術の実現に向けた実験的検証

株式会社 四国総合研究所 電子技術部	荻田 将一
株式会社 四国総合研究所 電子技術部	市川 祐嗣
株式会社 四国総合研究所 電子技術部	星野 礼香
株式会社 四国総合研究所 電子技術部	杉本 幸代
株式会社 四国総合研究所 電子技術部	三木 啓史
株式会社 四国総合研究所 電子技術部	朝日 一平

キーワード： レーザラマン分光  
酸素欠乏症  
遠隔計測  
L I D A R  
マルチガス計測

Key Words : Laser Raman Spectroscopy  
Oxygen deficiency  
Remote sensing  
LIDAR  
Multi-gas measurement

### Experimental verification of high-resolution monitoring technology for oxygen concentration distribution

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

#### Abstract

More than fifty industrial accidents have been reported to be caused by oxygen deficiency for the last ten years. Those kinds of accidents often lead to death and it is necessary to prevent them beforehand. A common method to prevent accidents in the work site, for example, when inspecting tunnels, manholes, or pipelines, is to measure oxygen concentration at any time, which requires a contact-type sensor body of a portable oxygen detector to be exposed to the environment there, but there are a lot of issues about the safety of the method. Therefore, there is a growing need to develop remote oxygen concentration measurement techniques. We experimentally verified a new high-resolution LIDAR system for monitoring oxygen concentration distribution with high position specification accuracy using remote gas concentration measurement technology applying Raman LIDAR that we had developed. In this paper the configuration of the system and the results of the verification test are presented in detail.

## 1. 序論

酸素欠乏症による労働災害は、平成 18～27 年度の 10 年間で 50 件以上の発生が報告されている<sup>1)</sup>。酸素欠による事故は致死率が極めて高く、死に至らずとも脳に障害が残る危険性があり、事故を未然に防ぐことが必須である。一方、トンネルやマンホール、あるいは管路点検等の作業時の酸素欠事故の防止策として主流となっている手法は、携帯型の酸素検知器を用いて、作業箇所の酸素濃度を随時測定して安全性の確認を行うものである。この手法は、酸素分子とセンサ素子が直接接触することにより検知する接触式センサを用いるため、センサ本体を測定環境に曝す必要がありオペレータの安全性に課題がある。また、センサが置かれた 1 点における酸素検知を行うものであり、空間的な濃度分布計測や遠隔からの計測は困難である。したがって、酸素濃度の空間的な分布を遠隔から安全に計測する技術が現在求められている。これらの背景を踏まえて、本稿では、著者らがこれまでに開発を行ってきたガス濃度遠隔計測技術<sup>2)</sup>を応用して、高い位置特定精度を有する酸素濃度空間分布モニタリングを目的としたライダシステム(以下、本装置)の実現に向けた実験的検証を行ったので、その装置構成及び機能検証試験の詳細について述べる。

## 2. 計測手法

### 2.1 ラマン効果

本装置は計測原理としてラマン効果を用いる。ラマン効果の概念を図 1 に示す。

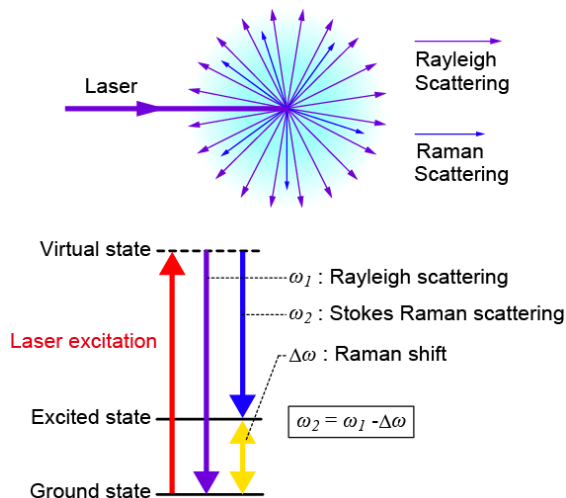


図 1 ラマン効果の概念(上)とエネルギー準位(下)

一般に、光が気体中を進行すると、分子による光の散乱が起こる。その大部分は、レイリー散乱と呼ばれ、照射された光と同じ波長の散乱光となるが、極一部は、元の光と異なる波長となって散乱される。この現象をラマン効果、元の波長と異なる波長となった散乱光のことをラマン散乱光と呼ぶ。ラマン効果は、入射光と、散乱体である気体分子との間でエネルギーの授受が行われることによって生じる現象であり、その結果、散乱光波長がシフトする。分子は、分子種ごとに固有の内部エネルギーを有するため、ラマン散乱光の波長は分子種ごとに固有の値となる<sup>3)</sup>。ラマン散乱光にはいくつかの種類があるが、本装置では、ストークス光と呼ばれるラマン散乱光を検出することによって酸素濃度のモニタリングを行う。ストークス光は、入射光のエネルギーの一部が分子の内部エネルギーに転化することによって生じるもので、入射光よりもエネルギーの低い光となる。したがって、ストークス光の波長は、入射光よりも長くなる。

表 1 に、大気の主成分である窒素及び酸素と、代表的な可燃性ガスである水素及びメタンのラマンシフト及びラマン散乱波長を、図 2 に窒素及び酸素のラマンスペクトルの一例をそれぞれ示す。

表 1 各種ガスのラマン散乱波長(355nm 励起)

Molecular species	Raman shift [cm <sup>-1</sup> ]	Raman scattering wavelength [nm]
O <sub>2</sub>	1556.0	375.8
N <sub>2</sub>	2330.7	387.0
H <sub>2</sub>	4160.2	416.5
CH <sub>4</sub>	2914.0	396.0

表 1 に示すように、ラマン散乱光の波長は散乱体となるガスの種類によって異なるため、分光器や光学フィルタ等で分光して計測することにより、複数のガスが存在する環境下でも、対象とするガスのみを分離して検出することが可能である。また、図 2 に示すように、355nm のレーザー光で励起した場合、酸素のラマン散乱波長は、大気中に多量に存在する窒素分子のラマン散乱波長に対し 10nm 以上離れていることから、透過波長

域が比較的広い汎用的な光学フィルタを用いて酸素のみの観測が可能であり、励起レーザ光とも十分に分離することができる。

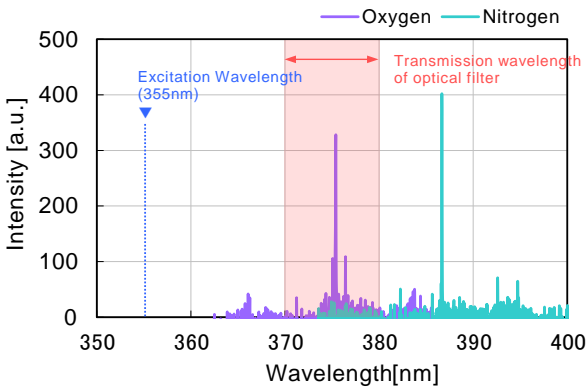


図2 窒素と酸素のラマンスペクトル (355nm 励起)

また、ラマン散乱光の強度は分子の数、即ちガス濃度に比例する。したがって、ラマン効果を捉えることにより、分子種の特特定と濃度の定量化を同時に行うことができる。図3に、ガスセル内に充填した酸素ガス濃度を段階的に変化させた場合におけるラマン散乱光強度計測結果を示す。

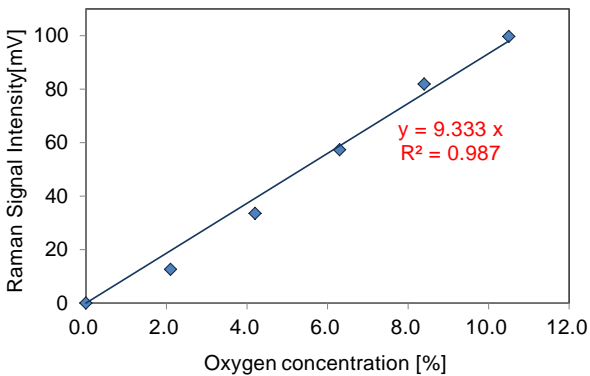


図3 酸素ラマン信号強度の濃度依存性

酸素濃度とラマン信号強度の相関係数は、図3に示すように、0.9以上の高い線形の相関を示している。このように、事前に検量線を取得しておくことで、未知の酸素濃度を計測することができる。

## 2.2 ライダによる気体の空間分布遠隔計測

ライダ(LIDAR : Light Detection And Ranging)はレーザレーダとも呼ばれる光を用いた遠隔計測

技術であり<sup>4)</sup>、一般的に知られている電波帯の電磁波を送信波として用いるレーダ(RADAR : Radio Detection And Ranging)計測とは異なり、ライダ計測では送信波に光の波長帯域の電磁波であるレーザ光を用いている(図4)。ライダは、レーザ光の単色性や指向性等の特性を利用し、遠方にある物質までの距離やその形状、及び濃度等の諸情報を遠隔計測する手法である<sup>5)6)</sup>。

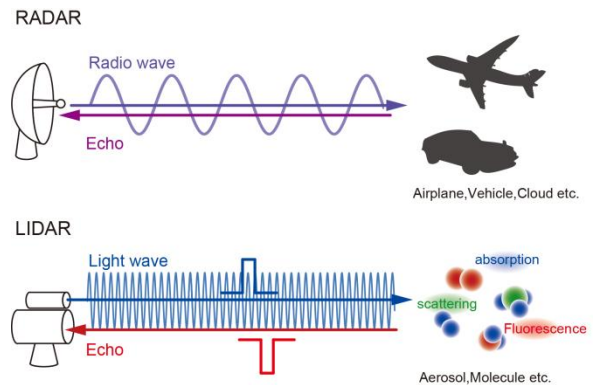


図4 ライダの概念

ライダの基本原理は、観測空間にパルスレーザ光を照射し、被検物質と光の間に生じる散乱光、吸収、蛍光等の相互作用をライダエコーとして検出するものである。測定対象となる物質や得られる情報は、ライダエコーとして受信する相互作用によって異なり、一般的には、エアロゾル<sup>7)8)</sup>、水蒸気<sup>9)</sup>、風速<sup>10)</sup>等の大気観測に用いられている。本稿では、ライダによる観測としては近距離となる10m程度を対象とし、被検ガスの位置特定と濃度情報を得るためにライダエコーとしてラマン散乱光を捉えるシステムを開発する。

ラマンライダによる遠隔計測において、離隔距離 $r$ の位置から得られるエコー信号強度 $P(r)$ は一般に(1)に示すライダ方程式によって記述される<sup>11)12)</sup>。

$$P(r) = P_L \frac{c\Delta\tau}{2} \eta_R \sigma_R N(r) \frac{A}{r^2} \xi(r) e^{-(\alpha_L + \alpha_R)r} \dots (1)$$

ここで $P_L$ はレーザ出力、 $c$ は光速、 $\Delta\tau$ はレーザ光パルス幅、 $\eta_R$ はラマン散乱光の受光効率、 $\sigma_R$ は対象分子の後方ラマン散乱断面積、 $N(r)$ は距離 $r$ の位置における被検ガスの分子密度、 $A$ は受光面積、 $\xi(r)$ は視野重なり関数、 $\alpha_L$ と $\alpha_R$ はレーザ波

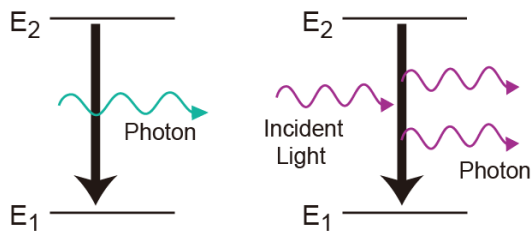
長とラマン散乱波長における消散係数である。

(1)式により、ライダーエコーとして得られるラマン信号強度は、送信系のレーザ出力または受信系の受光面積を増大するほど強くなるが、これは装置の大型化に繋がり、またレーザ出力については、大気空間中への放射に制約が生じる。受光効率 $\eta_R$ は、ライダーを構成する光学系の分光透過特性や、検出器の量子効率等に依存し、視野重なり関数 $\xi(r)$ は、ライダー送受信光学系の配置に依存する。また両者はアライメント精度の影響を大きく受ける。これらを踏まえ、酸素ラマンライダー開発の指針は、光学系の材質や配置の観測波長域での最適化と、受光面積の拡大を必要最小限に留めるものとし、コンパクトかつレーザの出力を可能な限り抑えた上で、十分なライダーエコーを取得できる光学系の実現を目指した。

## 2.3 短パルスレーザ励起による高空間分解能化

### (1) レーザ装置の動作原理

図5に示すように、原子、分子、半導体などで、異なる2つのエネルギー状態 $E_1$ 、 $E_2$ が存在し、エネルギーの高い状態から低い状態へと遷移が起これる時、そのエネルギー差に対応した波長の光が放出される。この過程を自然放出と呼ぶ。これに対し、励起状態にある分子などが、外部からのエネルギーの入射に伴いより低い準位へ遷移すると共に、これに相当するエネルギーを光として放射する現象を誘導放出と呼ぶ。誘導放出によって放射される光は、位相、波長、偏光等の光学的特性が入射した光と一致する。レーザは、この誘導放出を利用して増幅された光であり、単色性、直進性等、通常の光と比較して際立った特徴を持つようになる<sup>13)</sup>。



(a) spontaneous emission (b) stimulated emission

図5 自然放出(a)と誘導放出(b)

誘導放出により光を増幅させるには、下位のエネルギー準位よりも上位のエネルギー準位に存在する電子が多い状態(反転分布)が必要であり、反転分布の状態を形成できる物質がレーザ装置のコアとなるレーザ媒質に用いられている。一般にレーザ媒質が固体であれば固体レーザ、気体であれば気体レーザと呼称し、それぞれ代表的なものとしては、YAG(Yttrium Aluminum Garnet)結晶、CO<sub>2</sub>などが用いられている<sup>14)</sup>。励起の方法には、光照射、放電等がある。また、誘導放出によって生じた光は、共振器内に閉じ込めることによって更に効率的に増幅される。典型的なレーザ共振器は、2枚の高反射ミラーを向い合わせにした構造になっており、出射側のミラーの反射率は、反対側のミラーに比べていくらか低く、閉じ込めた光の一部を透過させることによってレーザ光が発振される。したがって、レーザ装置はいずれも図6に示すように、励起エネルギー源、レーザ媒質、光共振器からなる構造となっている。

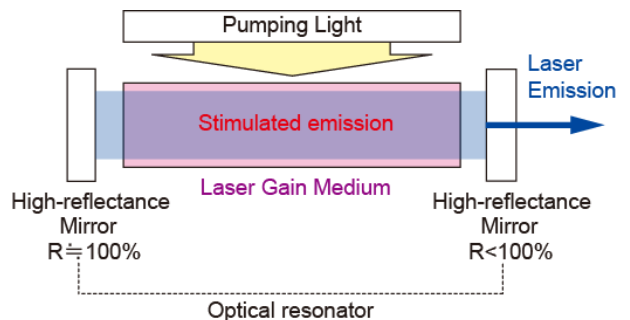


図6 レーザ装置の仕組み

### (2) DPSS マイクロチップレーザの適用

本装置の送信系の光源として、マイクロチップDPSS(Diode-Pumped Solid-State)レーザを用いる。マイクロチップDPSSレーザの基本構造を図7に示す。

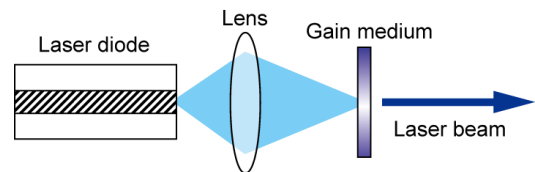


図7 マイクロチップDPSSレーザの構造

DPSSレーザは、半導体レーザを励起光源とす



る固体レーザーの一種である。一般にレーザー発振器は、光の照射や電流を流すなどして内部のレーザー媒質を励起させてレーザー光の発振を行うが、DPSS レーザの場合、半導体レーザー(Laser diode, 以下 LD) の照射で媒質を励起させる。また、レーザー媒質の長さが mm オーダ以下の固体レーザーはマイクロチップレーザーと呼ばれている。これはレーザー装置におけるレーザー媒質と光共振器、更には波長変換結晶や受動 Q スイッチ素子の機能をわずか数 mm 角のモノリシックデバイスに集積化したものである。したがって、DPSS マイクロチップレーザーは、励起用の LD とマイクロチップにより構成され、LD と同等のサイズながら、高出力化・高機能化が容易であるため、近年急速に開発が進められている<sup>20)</sup>。

マイクロチップ DPSS レーザは、媒質の吸収特性に応じて、狭いスペクトルで励起が行われることから、励起効率が非常に高く、加えて曲率加工を施さずとも励起に付随した熱レンズ効果で安定した共振器が形成されるため、飛躍的に高輝度で高いビーム品質を持ったレーザー光の発振が可能となる。また、フラッシュランプ励起の固体レーザー等と比較して、小型で軽量、周波数・強度雑音が高い、波長変換が容易、長寿命で保守が容易であるなどの特徴を持ち、非線形光学波長変換素子や Q スイッチ素子との組合せにより、LD 単体では困難であった様々な機能を実現することができる特徴がある。これらの特徴は、ライダシステムの実用化に向けて、極めて重要な要素である。

一方、ライダ計測における空間分解能  $\Delta r$  は、送信レーザー光のパルス幅  $\Delta \tau$  により、 $\Delta r = c \cdot \Delta \tau / 2$  として決定される。本装置は、10m 程度の近距離での測距を行うため、従来のライダシステムにおける m~数十 m オーダの空間分解能に対し少なくとも 10 倍以上の高い空間分解能が必要となる。マイクロチップレーザーは、共振器等がモノリシック化された構造となっているため、一般に、ns ~数百 ps でパルス発振が可能となる。これは、空間分解能として数 cm~十数 cm に相当し、従来のライダシステムと比較して大幅な高空間分解能化が実現できる。また、ラマン散乱光強度は、パルスレーザー光の瞬間的な尖頭出力に依存するため、短パルス化することにより、実質的には励起エネルギーを抑えることができる。

### 3. 酸素ラマンライダの装置構成

図 8 に酸素ラマンライダシステムの光学系構成を示す。ライダ光学系の配置としては、光送受信軸が分離された biaxial 型(双頭型)とした。biaxial 型は、受信光軸に対する送信光軸のなす角度に依存するブラインドエリアが生じる一方、光学系の構成としては比較的シンプルなため構成が容易であり、かつ、送信ビームに起因するノイズ成分が少ないといった特徴を持つ。送信系の光源にマイクロチップレーザー(波長 355nm, パルスエネルギー 42μJ, パルス幅 1.5ns, パルス繰返し周波数 1kHz)を用い、受信系は、屈折式望遠鏡によりライダエコーを集光し、光電子増倍管(浜松ホトニクス社製, R7400U)により検出する構成とした。レーザー光は、放射後ビームエキスパンダによりコリメートされ観測空間中に照射した。これに伴って生じるラマン散乱光は、ライダエコーとして開口径 170mm のアクリル製フレネルレンズにより受信光学系内に集光され、エッジフィルタ(レーザー波長遮断率  $< 10^{-6}$ )によるレーザー波長成分の除去と干渉フィルタ(中心波長 375.1nm, 帯域幅 1.0nm)による酸素のラマン散乱光(波長 375.1nm)の抽出を経て、光電子増倍管に結合される。光電子増倍管の出力はオシロスコープ(Tektronix 社製, DPO7104C)に伝送され、時間波形として取得される。測定更新周期は 1 秒である。また、レーザーパルス光を一部分岐検出し、オシロスコープのトリガ信号として用いた。

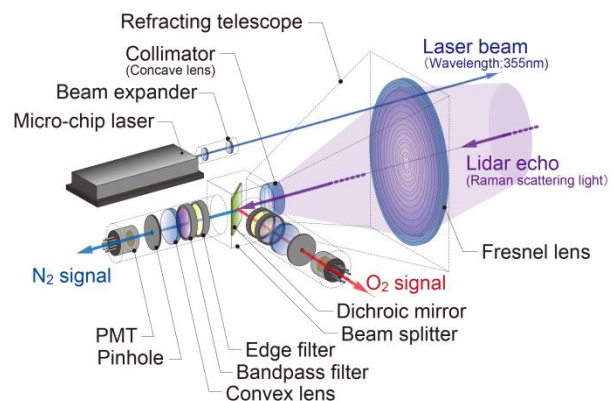


図 8 酸素ラマンライダの光学系構成

本装置では、高空間分解能を実現するために、送信系レーザー光のパルス幅が 1.5ns となっており、ラマン散乱光信号もこれと同等のパルス光とな

って光電子増倍管により検出される。即ち、光学系で得られた短パルスのラマン散乱光を、時間波形で正確にデジタル信号として取得するためには、高速に応答する光検出器と、高速 A/D 変換機能を有するデジタイザが必要である。したがってここでは、検出器として立ち上がり時間が速いヘッドオン型光電子増倍管を用い、デジタイザとして 5GS/s のサンプルレート有する高速オシロスコープを用いて信号を取得した。

#### 4. 機能検証

##### 4.1 空間分解能の評価

試作した酸素ラマンライダを用いて、装置の空間分解能の評価を行った。実験配置を図 9 に示す。

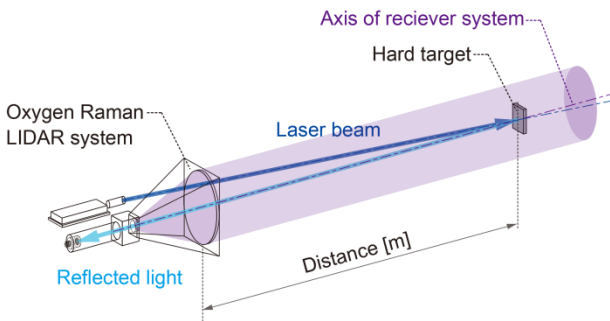


図 9 酸素濃度遠隔計測実験の配置

ライダの視野内にハードターゲットを配置し、その反射光を検出した。ターゲットの位置をレーザー光のパルス幅から求めた空間分解能 ( $\Delta r=22.5\text{cm}$ ) 程度の 20cm 毎で移動させた場合のライダエコー信号を比較することで、本装置の空間分解能を評価した。実験結果を図 10 に示す。

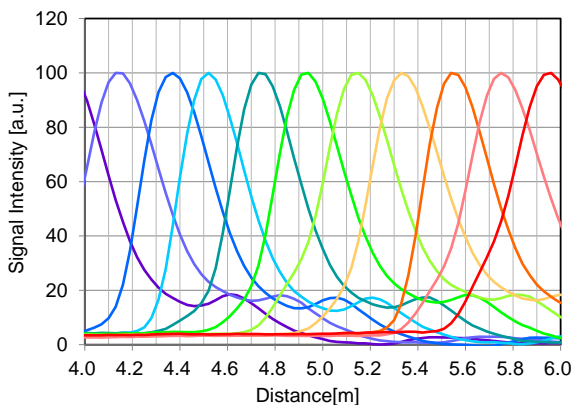


図 10 空間分解能の評価結果事例

図 10 に示すように、20cm 間隔で取得したライダエコー(ハードターゲットからの反射光)がいずれもパルス光として検出されている。実施した計測では、ライダシステムの感度に空間的な分布があるため、各位置毎にライダエコー強度は変動するが、ここでは評価のため、信号強度は規格化して表記している。空間分解能について見ると、それぞれ隣接するパルス波形についてピークが確認できる一方で、信号強度約 80% で波形が重なっており分離度は低い。ここでは、波形の分解能を半値全幅(FWHM : Full width at half maximum) の 50% における分離で評価する。これに照らし合わせると、本装置の空間分解能は約 30cm となり、パルス幅から求めた空間分解能に対し広がっている。これは、主に検出器に用いた光電子増倍管の応答速度によって、パルス光が若干時間的に広がって検出されていることに由来するものである。しかしながら、一般的なライダシステムと比較すると十分に高い空間分解能が実現されており、本装置によれば、30cm 程度の分解能で位置の特定が可能となる。

##### 4.2 大気中酸欠モニタリング機能の評価

大気中に酸欠状態を模擬した空間を形成し、本装置による低酸素領域の検出機能を評価した。実験配置を図 11 に示す。

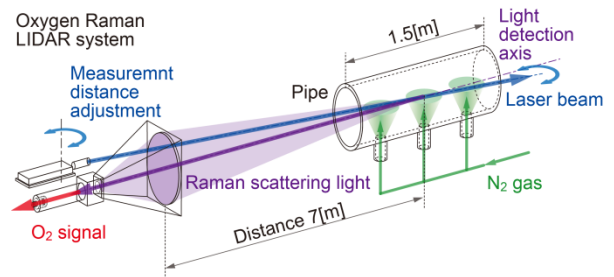


図 11 酸素濃度遠隔計測実験の配置

本装置の観測領域に長さ 1.5m の塩化ビニル管を 7m 離隔して設置し、管内に窒素ガスを放出することにより低酸素領域を模擬した空間を再現した。管内にレーザー光を照射し、発生する酸素ガスのラマン散乱光をライダエコーとして取得した。得られた信号を通常の大気中において取得した酸素のラマンエコーと比較した。また、管内に設置した接触式酸素濃度計の指示値とライダに



より得られた酸素濃度とを比較することにより、定量性を評価した。

ライダの観測領域は 6m から 12m とし、6m の位置が焦点となる光学系配置とした。図 12 に、大気中及び低酸素領域における酸素ラマン信号を比較した結果を示す。

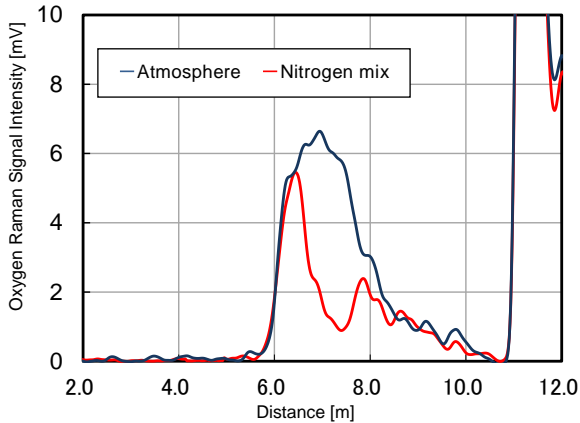


図 12 大気中及び低酸素時における酸素のラマン散乱光信号

図 12 における通常の大気中における酸素のラマン信号波形についてみると、本装置の観測領域である 6m から 12m の領域で焦点位置から後方の約 7m 付近にピークを持つ酸素ラマン信号の分布が確認できる。これは biaxial 型のライダシステムにおけるラマンエコーの典型的な時間波形となっており、本装置が遠隔計測装置として良好に機能していることを示している。低酸素領域を形成した場合の波形についてみると、塩化ビニル管が設置された 7m 地点を中心に約 2m の領域における信号が著しく低下していることが確認できる。これは本装置が、大気中における酸素濃度の空間分布モニタリングが可能であることを示す結果である。

次に、管内下方 3 箇所配置した接触式センサにより測定した酸素濃度と、本装置により取得した各センサ配置箇所における酸素ラマン信号強度を比較した結果を図 13 に示す。

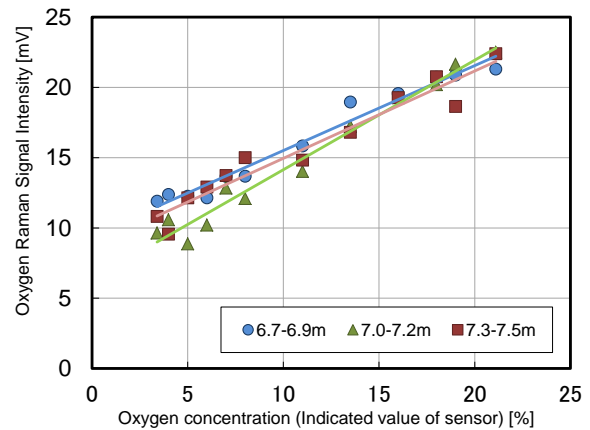


図 13 酸素ラマン信号とセンサによる酸素濃度指示値の比較

図 13 によると、低酸素領域のいずれの箇所においても、接触式センサの指示値に対して良好な相関が得られており、本装置の酸素の定量性が示されている。実用においては、図 12 における大気中の酸素によるラマン信号を事前取得し、これを酸素濃度 20.95% (一定) として、濃度換算することができる。本結果における相関のバラつきや線形近似直線の勾配の差は、主に酸素センサ設置位置と測定箇所(レーザー照射位置)の差異に起因するものと考えられる。

## 5. 結論

高い空間分解能を有する酸素濃度分布モニタリングを目的としたラマンライダシステムの実現に向け、試作機の開発と機能の実験的検証を行った。本装置の空間分解能は約 30cm であり、通常のリダシステムと比較して大幅な空間分解能の向上を実現した。また、大気中の酸素濃度の空間分布のモニタリングが可能であり、濃度の定量評価が可能であることを示した。これにより、本装置を用いて、遠隔から酸素濃度の低下とその位置及び範囲をリアルタイムにモニタリングすることができ、酸欠による災害事故防止に向けた低酸素領域の連続監視等に有効であることを確認した。

今後は、ライダシステムの小型化、高性能化を進め、更なる高分解能化の実現や、他のガス種への応用など、実用化に向けた研究開発を進めていく予定である。

**【参考文献】**

- 1) 「平成 27 年に発生した酸素欠乏症等の労働災害発生状況について」, 厚生労働省労働基準局(2016)
- 2) 朝日一平 他 : 「低出力レーザによる水素ガス濃度遠隔計測」, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.7, pp.1145-1150 (2010)
- 3) R. M. Measures: “Laser Remote Sensing”, John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984)
- 4) T. Fujii, T. Fukuchi : “Laser Remote Sensing”, Taylor & Francis, pp.1-36 (2005)
- 5) 小林喬郎 他 : 「レーザによる環境大気のリモートセンシング」, 計測と制御, Vol.16, No.12, pp908-916 (1977)
- 6) 鹿野哲夫 他:「大気環境のレーザ・リモートセンシング –レーザ・レーダシステム–」, 環境科学年報 –信州大学–, 第 12 巻, pp.1-11 (1990)
- 7) Y. Mabuchi et al. : “Multi-wavelength lidar system for the characterization of tropospheric aerosols and clouds”, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, pp.2505-2508 (2012)
- 8) S. Ishii et al. : “Arctic haze and clouds observed by lidar during four winter seasons of 1993–1997, at Eureka, Canada”, Atmospheric Environment, Vol.33, pp.2459-2470 (1999)
- 9) S. M. Spuler et al. : “Field-deployable diode-laser-based differential absorption lidar (DIAL) for profiling water vapor”, Atmospheric Measurement Techniques, 8, pp.1073-1087 (2015)
- 10) S.Kameyama et al. : “Compact All-fiber Pulsed Coherent Doppler Lidar System for Wind Sensing”, Applied Optics, Vol.46, Issue 11, pp.1935-1962 (2007)
- 11) K.Stelmaszczyk,M.Dell'Aglio,S.Chudzynski,T. Stacewicz,L.Woste:”Analytical function for lidar geometrical compression from-factor calculation” Appl. Opt, Vol.44, No.7, pp.1323-1331 (2005)
- 12) 椎名達雄 : 「近距離ライダの光学設計」, 電気学会 C 部門大会予稿集, OSI-2, pp.548-553 (2011)
- 13) 片山幹郎 : 「レーザ化学 –基礎とレーザ–」, 裳華房, pp.17-123 (1985)
- 14) レーザ学会編 : 「レーザハンドブック」, オーム社, pp.177-238 (2005)
- 15) R. L. Byer : “Diode laser-pumped solid-state lasers”, Science, Vol.239, pp.742-747 (1988)
- 16) T. Y. Fan et al. : “Diode laser-pumped solid-state lasers”, IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-24, pp.895-912 (1988)
- 17) J. J. Zayhowski and A. Mooradian : “Single-frequency microchip Nd lasers”, Opt. Lett., Vol.14, Issue 1, pp.24-26 (1989)
- 18) T. Taira et al. : “Single-mode oscillation of laser-diode-pumped Nd:YVO4 microchip lasers”, Opt. Lett., vol. 16, no. 24, pp. 1955-1957 (1991).
- 19) 平等拓範 : 「マイクロチップ固体レーザ」, レーザ研究, Vol.26, p.847-854 (1998)
- 20) レーザ学会編 : 「レーザハンドブック」, オーム社, pp.311-319(2005)

## 学位取得のお知らせ

四国総合研究所では新たに1名が学位を取得されましたのでお知らせいたします。

学位取得者：天野 雄一郎

論文：「業務用途建築物における空調設備の省エネルギー・  
負荷平準化に寄与する設計・運用手法に関する実践  
的研究」

論文提出先：信州大学

取得学位：博士（工学）

取得日：平成29年3月20日

取得者略歴：

平成17年3月 信州大学大学院工学研究科社会開発工学専攻修士課程修了

同年4月 四国電力㈱入社 土木建築部に配属

建築設備に関する計画・保全・研究業務に従事

平成28年8月 ㈱四国総合研究所に出向 土木技術部に配属

一般建物および電源建物の建築耐震に関わる研究に従事

平成29年3月 信州大学大学院総合工学系研究科山岳地域環境科学専攻修了

現在、土木技術部 副主席研究員

