

研 究 期 報

No. 117

2022 年 12 月

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

研 究 期 報 1 1 7 号 目 次

収穫後のミニトマトの外観品質に及ぼす近赤外光照射の影響	1
-----------------------------------	---

Effects of near infrared light exposure after harvest on appearance in cherry tomato

コヒーレントアンチストークスラマン散乱による

漏えい水素ガス検知技術（第2報）	7
------------------------	---

Leakage hydrogen gas detection technology using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (the second report)

原子力発電所の廃止措置における配管等の残水検知技術に関する研究	15
---------------------------------------	----

Study on technology for detecting residual water in piping, etc. in decommissioning of nuclear power plants

放送型無線通信を用いた需要家機器活用技術の開発	21
-------------------------------	----

Development of Technology to Utilize Consumer Equipment Using Broadcast-type Wireless Communication

コミッショニングによる省エネルギー・光熱費削減サービス

～地方自治体の建物におけるサービス実施事例と今後の展開について～	25
--	----

Energy saving and utility cost reduction services by commissioning
- Examples of service implementation in local government buildings and future developments -

収穫後のミニトマトの外観品質に及ぼす近赤外光照射の影響

目 的

これまでに、収穫後の青果物に近赤外光を照射することで鮮度保持効果が得られることが分かっており、柑橘類の選果場を中心にこの技術が利用されている。柑橘類以外の青果物の選果場での、本技術の有用性の検討を目的として、収穫後のミニトマトへの近赤外光照射による影響を調査した。

主な成果

収穫後のミニトマトへの近赤外光照射によって、へたと果実のカビ発生の抑制、裂果による傷の拡大の抑制が確認された。特にへたのカビ発生に対して有意な効果を示した。この結果から、収穫後の青果物への近赤外光照射の効果は柑橘類だけでなく、より多くの品目の選果場への本技術導入が期待できると考えられた。

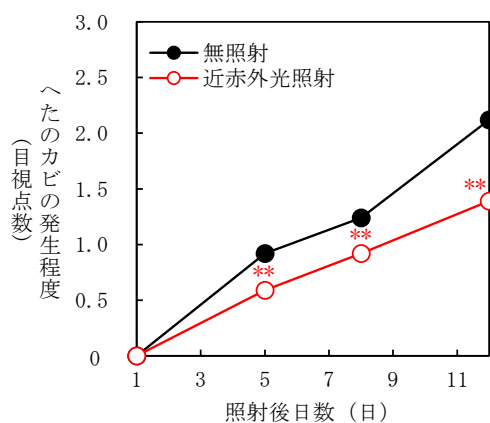


図1 へたのカビ発生程度に及ぼす近赤外光照射の影響 (付傷試験, n=50~51)
t 検定で無照射に対して有意差あり,
** $P < 0.01$

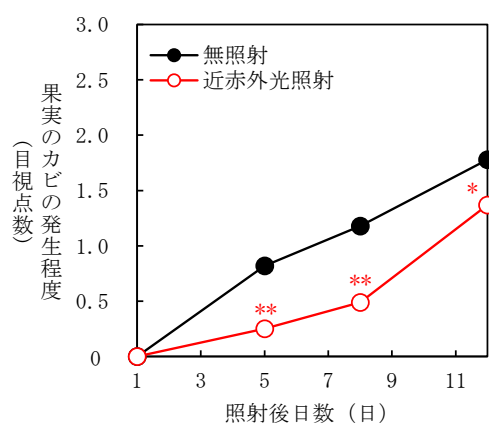


図2 果実のカビ発生程度に及ぼす近赤外光照射の影響 (付傷試験, n=50~51)
t 検定で無照射に対して有意差あり,
** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

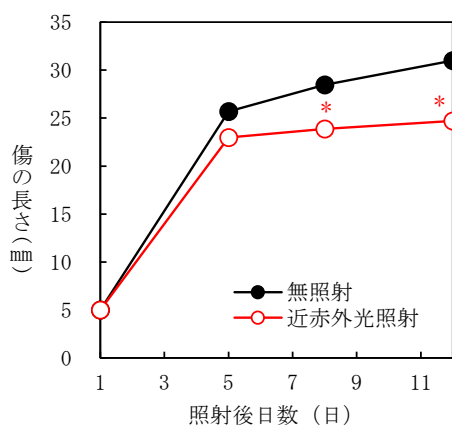


図3 傷の長さに及ぼす近赤外光照射の影響
(付傷試験, n=50~51)
t 検定で無照射に対して有意差あり,
* $P < 0.05$



写真1 付傷試験のミニトマトの外観

研究担当者	阿部晴希, 秦亜矢子, 石田豊, 垣渕和正 (株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部)
キーワード	青果物, 野菜, 鮮度保持, 日持ち延長, 近赤外光, 照射, ミニトマト, カビ, 裂果
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

コヒーレントアンチストークスラマン散乱による漏えい水素ガス検知技術 (第2報)

目 的

CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy: コヒーレントアンチストークスラマン分光法) を適用し, 水素のアンチストークス光を発生させて計測することにより, 計測箇所近接してレーザ誘起蛍光を発生する物体がある場合においても漏えい位置の探査を可能とする水素ガス検知技術を開発する。

主な成果

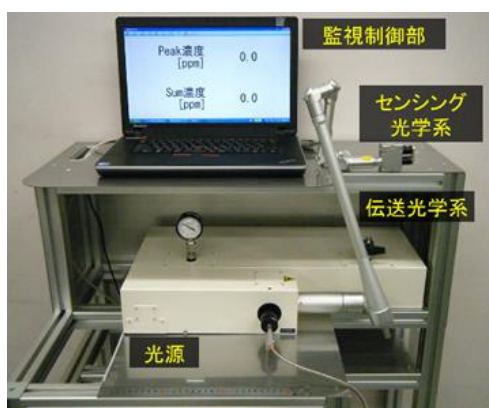
1. 水素ガスリークディテクタの構築

CARS (コヒーレントアンチストークスラマン散乱) による水素ガス検知技術を適用し, 目標検知濃度 500 ppm, 目標計測時間 1 s として, 水素ガスリークディテクタの開発を行った。第 1 報にて最適化を行った光源と, 本稿にて設計製作したセンシング光学系, 伝送光学系, 接続光学系を組み合わせ, 水素ガスリークディテクタを構築した。本装置の計測範囲はセンシング光学系に組み込んだ 2 個のプリズム間距離にあたる, 光路長 10 mm 範囲である。

2. 水素計測性能の評価

水素ガスリークディテクタの計測性能を評価し, 濃度 200 ppm 以上で $S/N=1$ 以上の信号を確認した。また, 濃度 500 ppm の水素計測時の計測精度が $\pm 15\%$ 以内であることを検証した。

また, 水素ガスリークディテクタと他の水素センサの性能を比較し, 本研究において開発した CARS による水素検知手法が, 検知濃度範囲および検知速度の両者において優れた性能を有することが確認された。

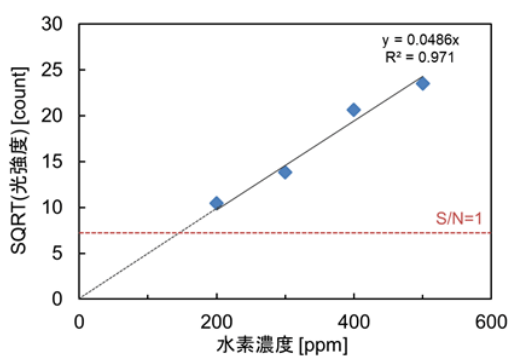


(a)

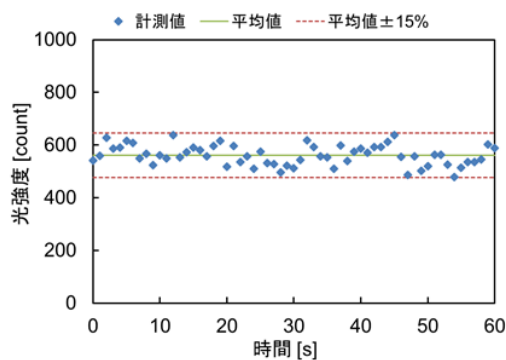


(b)

図1 水素ガスリークディテクタの外観
(a) 監視制御部を含む装置外観, (b) 装置使用イメージ



(a)



(b)

図2 水素計測結果の一例
(a) 低濃度水素計測結果, (b) 計測精度(水素濃度 : 500 ppm)

研究担当者	杉本幸代, 朝日一平 (株式会社四国総合研究所 電子アグリ技術部)
キーワード	アンチストークス, レーザ, 水素, 漏えい検知器, コヒーレントアンチストークスラマン分光法
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

原子力発電所の廃止措置における配管等の 残水検知技術に関する研究

目 的

国内の半数近くの商業用原子炉において進行中である廃止措置作業においては、作業員の放射線被ばくを如何に抑えるかが重要課題の一つとなっている。廃止措置では非常に多数の配管等を解体・撤去する必要があるが、例えば、加圧水型軽水炉（PWR）の一次系配管は放射性物質を含む液体が残っている可能性があるため、配管を切断するときに事前の排水が不完全であれば汚染水が飛散し、作業員が身体汚染する可能性があると考えられる。このようなトラブルを未然に防止するため、超音波技術により配管等の残水を確実に検知する技術について開発を行った。

主な成果

1. 垂直超音波センサによる配管残水検知方法

四国総合研究所が持つ伊方発電所の原子炉配管ノズルセンタ水位監視技術を応用し、垂直超音波センサによる水平配管や垂直配管の残水検知方法を開発した。呼び径 80A（外径 89.1mm）肉厚 7.6mm の配管モックアップによる検証試験の結果、水平配管の場合、20mm（配管肉厚の約 2.6 倍）より低水位では水面反射が多重反射の山に埋もれて残水の検知が難しくなる問題が存在するが、ある程度配管に水が残っていれば、残水検知可能であることが確認できた。

2. 横波斜角超音波センサによる配管残水検知方法

垂直超音波センサによる配管残水検知方法が低水位で多重反射の影響を受けやすいという問題を改善するため、横波斜角超音波センサによる配管残水検知方法を開発した。配管モックアップによる検証試験の結果、水面反射の検出を妨げる信号がほとんどないことから確実性の高い残水検知が期待できること、垂直超音波センサの下限水位の半分程度の水位でも検知可能であることが確認できた。また、この方法には鋼中屈折角 45° の横波斜角超音波センサが適していること、小口径配管より大口径配管で効果が高いなどの重要な特性が明らかになった。

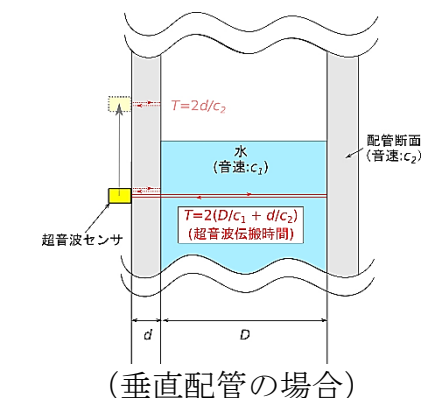
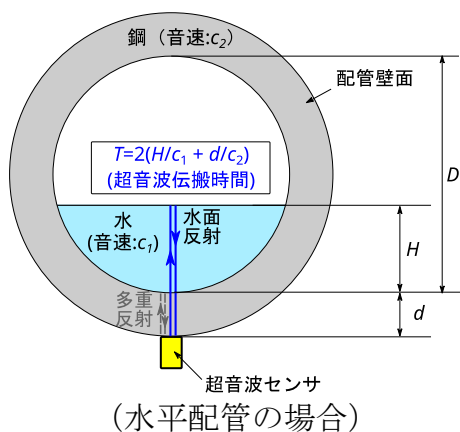


図1 垂直超音波センサによる
残水検知方法

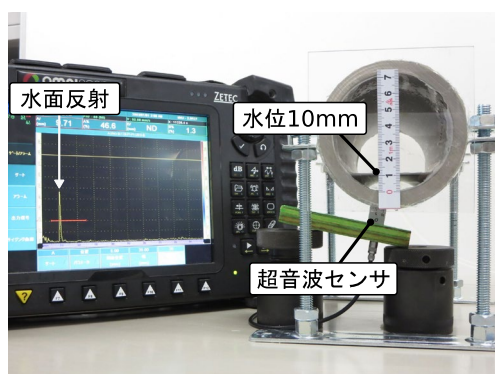


図4 実験風景

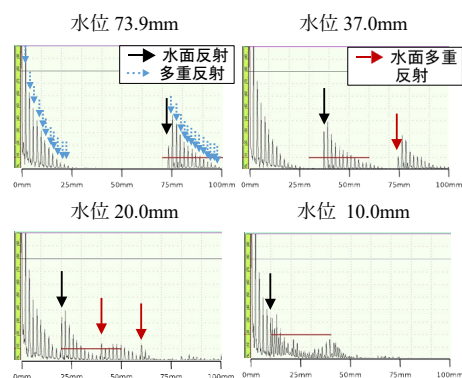


図2 垂直超音波センサの受信波形

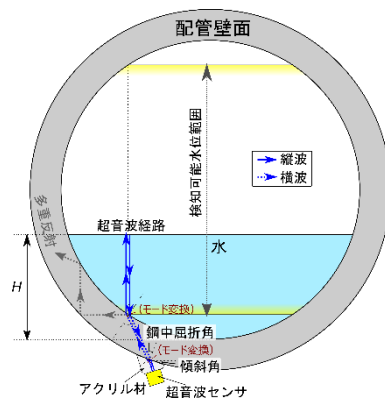


図3 横波斜角超音波センサによる
残水検知方法

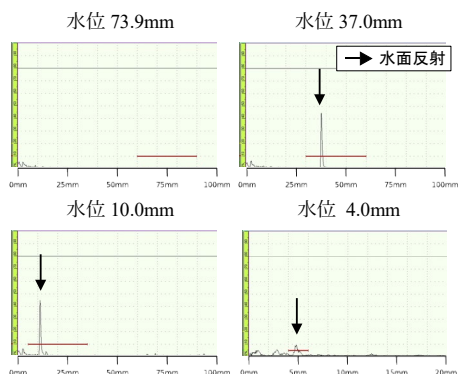


図5 横波斜角超音波センサの
受信波形

研究担当者	岡部克也 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部)
キーワード	超音波検査, 配管内水面検知, 原子力発電所, 加圧水型軽水炉, 廃止措置, 横波斜角超音波探触子, ステンレス配管, 非破壊検査
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

放送型無線通信を用いた需要家機器活用技術の開発

目 的

天候などの様々な条件により出力が変動する太陽光発電などの再エネ発電が急増している中、需給調整は格段に難しくなっており、実現可能かつ実効性ある新たな需給運用対策や対応が求められている。早期実現性ある取り組みとして既に大量に普及している電気給湯器（電気温水器，エコキュート）等を活用し，様変わりした需給バランス環境に柔軟に適合する需要家機器活用技術を開発したので報告する。

主な成果

1. 開発した需要家機器活用技術の概要

点在する小容量で大量な需要家機器の活用に適した手法として，放送型無線通信による一方向の制御指令を行い，受信した需要家機器が自律制御するシステムを開発した。（図 1）

2. 放送型無線通信と需要家機器の自律制御システム

安価なコストで広域送信に適した省電力長距離無線（920MHz・250mW・LoRa）を用いて，太陽光発電出力予測結果に基づいた制御指令を中継局経由で送信し，需要家機器に設置したリモート制御アダプター（受信制御装置）が制御指令を受信・識別し自律制御する。翌日昼間の上げ DR 指令を行えば，電気給湯器の場合通常の夜間沸き上げを停止し，翌日昼間に沸き上げを行う。需要家機器の制御プログラムに擬似乱数を用いたことで，制御対象の集合体は晴天時の太陽光発電カーブに類似した負荷を構成する。（図 2）

3. 需要家機器（電気給湯器）活用技術の検証結果

香川県内で実施した電気給湯器（電気温水器 30 台，エコキュート 10 台）を活用した 1 年間の実証試験において，住居内等の閉所設置の給湯器であっても良好に受信制御できること，放送型の一方向指令による制御でも良質な擬似乱数を用いたことで，40 台の少ない集合体でも太陽光発電カーブに類似した負荷を形成すること，さらに，制御プログラムに組み込んだ湯切れ防止機能により給湯利用に支障はなく，日常生活に影響を与えないことを確認した。

4. 電気給湯器以外の需要家機器活用

コンセント式 EV 充電 (MOD01, MOD02) に、お客さまの利用形態に合わせた EV 充電時間帯選択を簡易操作で設定でき、割安な夜間時間帯充電や充電負荷の平準化および放送型無線通信の活用機器として利用できる、容易に後付設置が可能な「放送型制御機能を搭載した EV 充電制御装置」を開発した。(図 3)

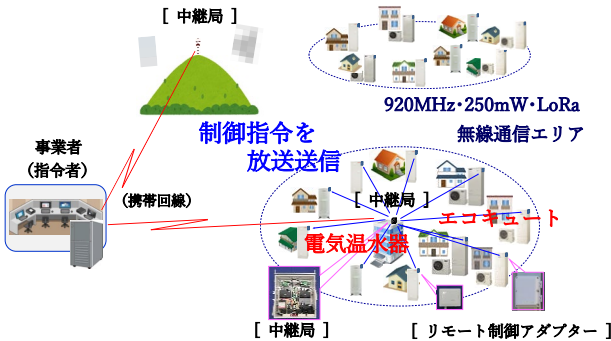


図 1 放送型無線通信を用いた需要家機器活用技術

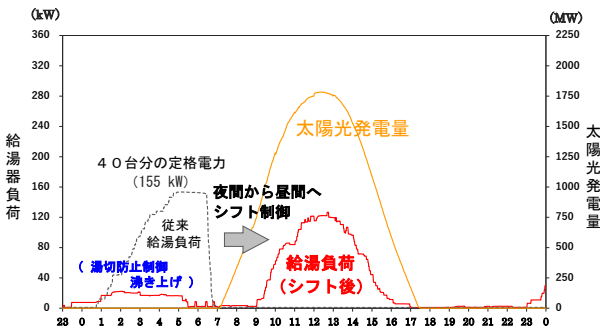


図 2 電気給湯器活用実証試験結果 (冬期試験)



図 3 放送型制御機能を搭載した EV 充電装置

研究担当者	吉田正志 (株式会社四国総合研究所 電力技術部)
キーワード	放送型無線通信制御, 需要家機器制御, 需要家機器活用, 再エネ抑制回避, 再エネ普及, 需給運用, 擬似乱数制御
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

コミッショニングによる省エネルギー・光熱費削減サービス ～地方自治体の建物におけるサービス実施事例と 今後の展開について～

目 的

四国電力ではこれまで培ってきた建築技術を活用した新しい顧客サービスとして「コミッショニングによる省エネルギー・光熱費削減サービス」に取り組んでいる。コミッショニング（以下、Cx とする）とは、空調設備や照明設備などの建物設備に対して「建物が持つ本来の性能を実現する」ため、運転データの分析やシミュレーションなどによる性能検証、設計意図などの見える化による適正な運用改善を実施することである。一般的に建物オーナーが気付かないままエネルギーの浪費を続けている建物が非常に多い中、Cx は既存の建物に対する省エネ・省コストの有効な手段となる。また、昨今の新型コロナ対策にもあるように十分な換気量を確保しながらも、過度な換気とならないように換気設備の運転適正化を図り、空調設備の省エネを行う上でも、Cx は重要な要素となる。

本サービスは、これまで自社建物で培ってきた Cx 技術を初めてお客さまの建物に適用したものである。設備の把握、データ計測・解析、運用改善、成果報告のサイクルをワンスルーで実施し、省エネルギーと電力デマンドの低減を迅速に実現することで、顧客との更なる良好な関係の醸成や離脱防止等に寄与するとともに Cx 事業による収益獲得を図る。

主な成果

1. 水蓄熱空調システムの Cx 事例

熱源設備の運用変更や 3 方弁不具合解消、BEMS を活用したエネルギーの見える化を通じ、Cx を実施していなかった前年の実績と比較して、建物全体の使用電力量を約 15%、電力デマンドは約 30%削減した（図 1）。

2. 氷蓄熱空調システムの Cx 事例

氷蓄熱設備の運用改善や空調室内機の運用変更、全熱交換器の運転台数適正化等を通じ、Cx を実施していなかった前年の実績と比較して、使用電力量を約 10%、電力デマンドは約 20%削減した（図 2）。

3. 新型コロナ対策としてのCx事例

無線式モニタリングシステムを活用した換気状況の見える化を通じ、過度な窓開け換気による空調負荷の増大や温熱環境の悪化を解消し、適正な換気量を確保した自然換気が可能となり、空調用エネルギー使用量の削減にも貢献した（図3）。

4. 給食センターにおけるCxの事例

電気式厨房設備の実態に即した換気設備の運用改善を通じ、換気設備の風量適正化および外気負荷による空調負荷を低減し、換気設備全体の消費電力量を約48%、空調設備の消費電力量を約9%削減した（図4）。

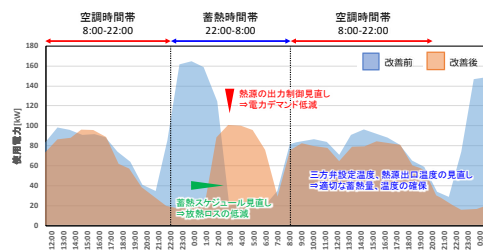


図1 水蓄熱の運用改善イメージ

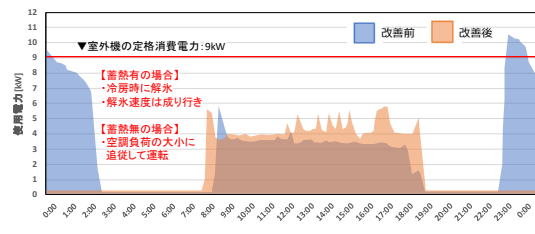


図2 水蓄熱の運用改善イメージ



図3 無線式モニタリングシステム

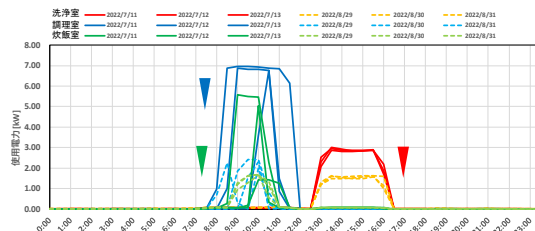


図4 給食センター
換気設備消費電力の変化

研究担当者	松田健太郎, 天野雄一郎, 石川 大 (四国電力株式会社 土木建築部) 藤井良平 (株式会社四国総合研究所 土木技術部)
キーワード	コミッションング, 省エネ, 無線式モニタリング
問い合わせ先	四国電力株式会社 土木建築部 天野雄一郎 TEL 087-821-5061 (代表) E-mail amano15500@yonden.co.jp https://www.yonden.co.jp/

収穫後のミニトマトの外観品質に及ぼす近赤外光照射の影響

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 阿部 晴希
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 秦 亜矢子
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 石田 豊
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 垣渕 和正

キーワード： 青果物
鮮度保持
近赤外光
照射
ミニトマト
カビ
裂果

Key Words : Fruits and Vegetables
Freshness retention
Near infrared light
Irradiation
Cherry tomato
Mold
Fruit cracking

Effects of near infrared light exposure after harvest on appearance in cherry tomato

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical Technology and Biotechnology Department
Haruki Abe, Ayako Hada, Yutaka Ishida, Kazumasa Kakibuchi

Abstract

Effects of near infrared light exposure after harvest on appearance in cherry tomato was investigated. Irradiation of near infrared light on cherry tomatoes with artificial cracks significantly inhibited the growth of mold on the calyx and fruit. In addition, the spread of the fruit cracking was significantly suppressed by irradiation with near infrared light. From this outcome, it was turned out that the effect of near infrared light exposure after harvest is effective not only for citrus fruits but also for cherry tomatoes.

1 はじめに

青果物は収穫されてから農協、卸売業者、仲卸業者、小売業者の経路で流通されることが多く¹⁾、消費者に届くまでに数日を要する。また、青果物は収穫後も生命活動を続けており、収穫から店頭までまでの流通、貯蔵中にカビや傷みの発生などが進行し、次第に鮮度が低下する²⁾。ミニトマトでは、へたや果実のカビ発生や、裂果³⁾が流通中に発生することが課題となっている。

これまでに、850nm 付近の近赤外光を一定条件で収穫後の青果物に照射することで、葉菜類の蒸散や萎れの抑制^{4,5,6,7)}、ナスやイチゴなどの果菜類や、柑橘類の品質保持やカビ抑制^{8,9,10,11,12)}、サトイモのカビや発芽抑制¹³⁾などの鮮度保持効果が得られることが判明している。この近赤外光照射技術を「iR フレッシュ」と名付け、商標および特許を取得しており、現在は柑橘選果場を中心に全国に普及している。

本報告では、収穫後のミニトマトの鮮度保持への近赤外光照射の効果について検討した。

2 材料及び方法

供試材料には高知県内の栽培温室で促成栽培したミニトマトを用いた。近赤外光の照射は、実際の照射場面を想定した選果時の照射と、収穫から流通までの衝撃等による受傷を模擬した付傷試験を行った。

2.1 選果時照射試験

実際のミニトマト選果機に近赤外光照射装置 (Fkeep-NIS, 三井金属計測機工(株)) を設置した。近赤外光の照射は 2020 年 4 月 14 日に行い、中心波長 850nm の LED 光を $300\text{W}/\text{m}^2$ の光強度で 1 秒間照射した。照射後は選果装置にてプラスチックパックに規定の重量で自動充てん (10~16 個体詰め) し、(株) 四国総合研究所 (高松市) に発送した。近赤外光を照射しなかった無照射区についても、近赤外光照射区と同じ選果とパック詰めを行った。

ミニトマトは近赤外光照射区、無照射区それぞれ

各 10 パックを透明プラスチックコンテナ容器 (縦 31cm、横 40cm、高さ 25cm、蓋付) に入れた。プラスチックコンテナ容器の底には、湿度を保つため水で濡らしたキムタオルを敷いた。その後、23℃に保ったインキュベータ (CR-41, (株) 日立製作所) に保管した。

近赤外光照射 5 日後、8 日後、12 日後に、へたと果実のカビ発生程度を、0~3 点の 4 段階 (0: なし、1: 僅かなカビの発生、2: 明らかなカビの発生、3: 顕著なカビの発生) で、目視で評価した (写真 1、2)。また、裂果が生じた個体の傷の長さを定規で測定した。



写真1 へたのカビの発生程度の基準
(左から 0、1、2、3 点)



写真2 実のカビの発生程度の基準
(左から 0、1、2、3 点)

2.2 付傷試験

後述のとおり、選果時の近赤外光照射ではミニトマトの品質低下が小さく、パック間の個体差に効果

が埋没したため、収穫から流通までの受傷による品質低下を模擬した付傷試験を行った。付傷方法は、収穫したミニトマトに対して両刃カミソリで赤道部に縦 5mm の傷を付けることで行った（写真 3）。付傷処理後、近赤外光照射装置（iR フレッシュャー（株）四国総合研究所）で、中心波長 850nm の LED で $300\text{W}/\text{m}^2$ の光強度で 1 秒近赤外光を照射した。

プラスチック製の密閉容器（容積 5.1L、蓋付）に、水で濡らしたキムタオル（日本製紙クレシア（株）、4つ折り 6 プライ、380mm×330mm）を敷き、無照射・近赤外光照射ミニトマト各 50 個体を、それぞれ別のタッパウェアに、赤道部の傷が上向きになるよう平置きで並べ、23℃で保管した。

選果時照射試験と同様の項目について、近赤外光照射後 5 日後、8 日後、12 日後に調査した。



写真 3 ミニトマトへの付傷状況

3 結果及び考察

3.1 選果時照射試験

へたと果実のカビ発生程度を図 1、2 に示した。カビの発生程度は経時的に大きくなったものの顕著な発生はなく、処理区間の有意な差もなかった。これは、自動選別時のパック詰めで近赤外光照射区が 16 個、無照射区が 10 個となり、近赤外光照射区が小玉で無照射区が大玉であったことから、パック間の環境の差が大きいため近赤外光照射の効果が埋没したと考えられた。

また、裂果が発生したのは近赤外光照射区の 1 個体のみでこれも近赤外光の影響を判断するに足る発生率ではなかった（データ省略）。

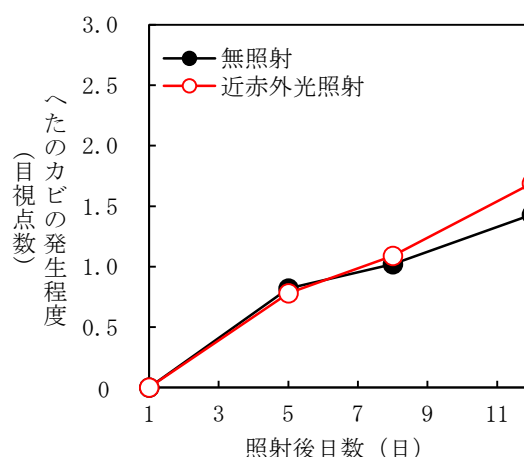


図 1 へたのカビの発生程度に及ぼす近赤外光照射の影響（選果時照射試験、n=100~162）

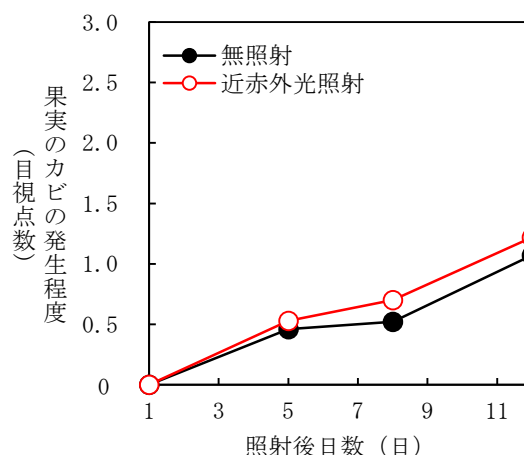


図 2 果実のカビ発生に及ぼす近赤外光照射の影響（選果時照射試験、n=100~160）

3.2 付傷試験

付傷試験の調査結果を図 3~5 および写真 4 に示した。選果時照射試験と同様にへたと果実のカビの発生程度は経時的に増加し、特に無照射区の発生程度が高くなった。対して、近赤外光照射区ではカビの発生程度は傷を付けなかった選果時照射試験と同等であり、無照射区と比較して有意に低くなった。

柑橘類での近赤外光照射試験においても、付傷なしの場合カビの発生率は 1~3%程度であり、近赤外光の照射で有意差を出すためには 100kg 程度（約 1,000 個体）の等階級が揃ったものが必要であった。

が、柑橘の果皮に傷を付けることで数十個単位の個体で評価できた¹⁴⁾。本試験の結果、ミニトマトにおいても、近赤外光のカビに対する効果を評価するのに、付傷処理が有効であることが示された。なお、ウンシュウミカンにおいて、近赤外光照射により病害抵抗性に関わるフェニルアラニンアンモニアリアーゼ（PAL）遺伝子の発現量が上昇し、果皮のカビ発生が抑制されることが分かっている¹²⁾。これらのことから、ミニトマトにおいても同様の現象が起こっている可能性が高いと考えられた。

傷の長さについては、近赤外光照射 5 日後までは、無照射区、近赤外光照射区いずれも傷が広がったが、無照射区は近赤外光照射 12 日後まで傷が広がり続けたのに対し、近赤外光照射区はその後裂果の進行が横ばいになり、近赤外光照射 8 日後と 12 日後において有意な差が認められた。

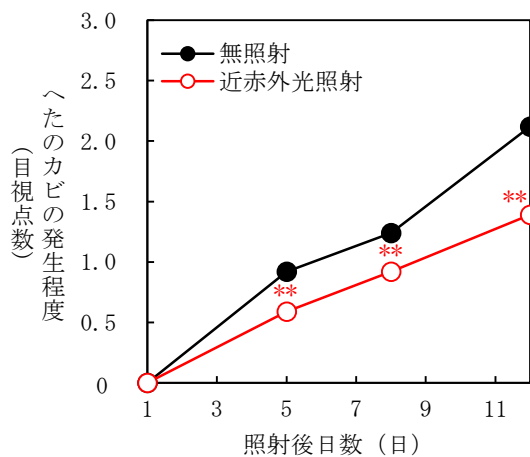


図 3 へたのカビ発生程度に及ぼす近赤外光照射の影響（付傷試験，n=50～51）
t 検定で無照射に対して有意差あり，
** $P < 0.01$

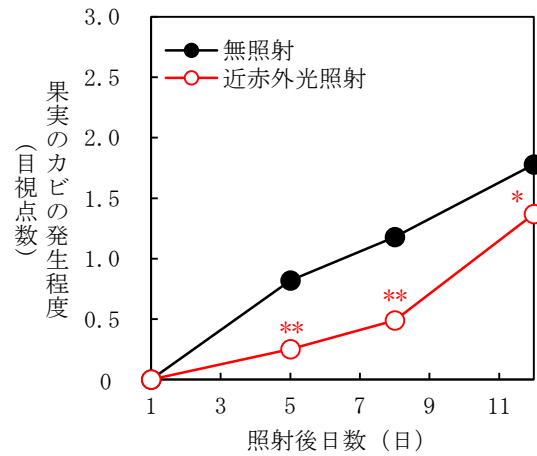


図 4 果実のカビ発生程度に及ぼす近赤外光照射の影響（付傷試験，n=50～51）
t 検定で無照射に対して有意差あり，
** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

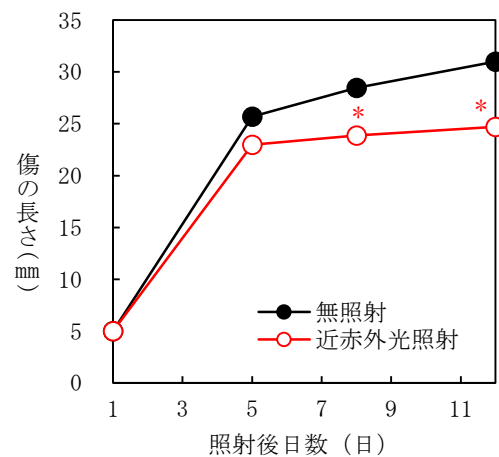


図 5 傷の長さに及ぼす近赤外光照射の影響（付傷試験，n=50～51）
t 検定で無照射に対して有意差あり，
* $P < 0.05$

照射5日後



照射8日後



照射12日後



無照射区

近赤外光照射区

写真4 付傷試験のミニトマトの外観

ミニトマトの主なクレームとなっているカビについて、へたと果実のいずれにもカビの発生が認められなかったか、発生しても程度が軽微であった、スコア0、1の果実の割合を可販果率として、その変化を図6に示した。その結果、無照射区は近赤外光照射5日後で可販果率が64%とおよそ半分の果実が販売出来ないレベルに達していたのに対して、近赤外光照射区の可販果率は94%を維持していた。近赤外光照射12日後では無照射区の可販果率は10%まで低下したが、近赤外光照射区は51%と約5倍となった。

イチゴでは輸送中の振動によって果実が受傷することで鮮度が顕著に低下することと、近赤外光照射によってそれを抑制できることが示されている⁹⁾。ミニトマトについても、収穫から流通時の振動や衝撃による品質の低下を、近赤外光照射で抑制でき、商品価値を保てると考えられた。

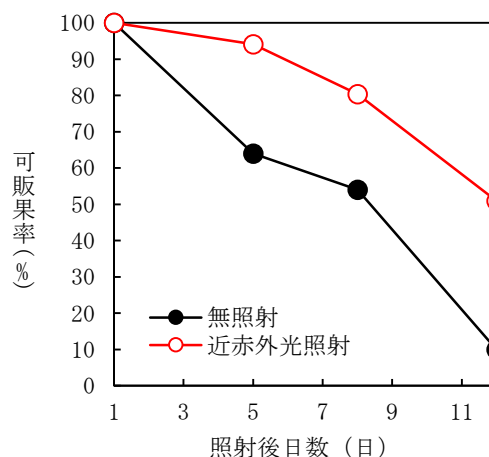


図6 ミニトマトの可販果率に及ぼす近赤外光照射の影響（付傷試験、へたと果実のカビについていずれもスコア1以下のものを可販果とした）

4 まとめ

これまでに、近赤外光を一定条件で収穫後の青果物に照射することで、品質保持やカビ抑制などの鮮度保持効果が得られることが判明している。この効果がミニトマトでも得られるか検討した。収穫から流通までの受傷による品質低下を模擬した付傷試験を行い、へたと果実のカビ発生の抑制、裂果による傷の拡大の抑制が確認された。特にへたのカビ発生に対して有意な効果を示した。この結果から、収穫後の近赤外光照射の効果は柑橘類だけでなく、他の品目への導入拡大も期待された。

【謝辞】

本試験を行うにあたって、三井金属計測機工(株) 殿には選果装置への近赤外光照射装置を設置頂いた。ここに深く感謝します。

【参考文献】

- 1) 樽谷隆之, 北川博敏：園芸食品の流通・貯蔵・加工, 養賢堂(1982)
- 2) 石田豊ら：柑橘類の腐敗抑制や品質保持に役立つ近赤外光の照射技術, 熊本の果樹 フルーツ&フルーツ, vol.58(2021年9月)
- 3) 農業技術体系, 野菜編, 第12巻, 共通技術 先端技術, 品質・鮮度, 97(1995)
- 4) 高附(秦) 亜矢子ら：近赤外光照射が収穫後のレタスの蒸散に及ぼす影響, 園学研, 11(別2), 305(2012)
- 5) 高附(秦) 亜矢子ら：収穫後の近赤外光照射が数種野菜の蒸散、気孔開閉および活性酸素生成に及ぼす影響, 園学研, 12(別2), 257(2016)
- 6) 高附(秦) 亜矢子ら：収穫後の近赤外光照射が数種葉菜類の蒸散、気孔開度および外観品質に及ぼす影響, 園学研, 15(2), 197-206(2016)
- 7) 秦亜矢子ら：近赤外光照射がレタス幼苗のPALと抗酸化活性に及ぼす影響, 園学研, 18(別1), 459(2019)
- 8) 垣渕和正ら：近赤外光照射したナスのカビ発生や抗酸化活性に及ぼす収穫時期や温度の影響, 園学研, 18(別2), 280(2019)
- 9) 秦亜矢子ら：収穫後の近赤外光照射がイチゴの果実品質に及ぼす影響, 園学研, 20(別2), 203(2021)
- 10) 垣渕和正ら：選果時の近赤外光照射がウンシュウミカンの果実品質に及ぼす影響, 園学研, 17(別2), 338(2018)
- 11) 垣渕和正ら：選果時の近赤外光照射が‘清見’の貯蔵中の果実品質に及ぼす影響, 園学研, 18(別1), 458(2019)
- 12) 秦亜矢子ら：近赤外光照射がウンシュウミカンのPALと抗酸化活性に及ぼす影響, 園学研, 18(別2), 279(2019)
- 13) 垣渕和正ら：サトイモ球茎の腐敗や発芽に及ぼす近赤外光照射の影響, 園学研, 20(別2), 205(2021)
- 14) 垣渕和正ら：数種柑橘類果実の収穫後における腐敗果発生と果皮色に及ぼす近赤外光照射の影響, 日本生物環境工学会, 松山大会(2017)

コヒーレントアンチストークスラマン散乱による漏えい水素ガス検知技術 (第2報)

(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 杉本 幸代
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 朝日 一平

キーワード: アンチストークス
レーザ
水素
漏えい検知器
コヒーレントアンチストークス
ラマン分光法

Key Words: Anti-Stokes
Laser
Hydrogen
Leak detector
CARS

Leakage hydrogen gas detection technology using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (the second report)

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural technology Department
Sachiyo Sugimoto, Ippei Asahi

Abstract

Hydrogen is expected to be a next-generation clean energy to replace fossil energy. To expand its use in daily life, its safety must be ensured. This paper reports about the development of a hydrogen gas leak detection technology using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS). In this paper, we designed and fabricated sensing optics, transmission optics, and connection optics that constitute the hydrogen gas leak detector. The hydrogen gas leak detector was constructed by combining them with a light source optimized in the first paper. The measurement range of this device is the 10 mm optical path length range between two prisms incorporated in the sensing optics. The detection limit of hydrogen gas concentration of our detector was set to 500 ppm. As a result, hydrogen gas up to 200 ppm $\pm$ 15% could be measured. Furthermore, the performance of the hydrogen gas leak detector was compared with that of other hydrogen sensors, and it was confirmed that this device has superior performance in terms of detection concentration range and detection speed.

1. 序論

2020 年 10 月に「2050 年カーボンニュートラル宣言」がなされたことを機に、水素の利活用に向けた取り組みが多様化している。これまでに水素を扱うことのなかった業種においても、CO₂排出抑制の観点から水素の利用を検討するようになり、安全に取り扱うための検討が行われている。

我々はこれまでに、水素関連施設の安全運用に資する技術として、水素ガス遠隔計測装置^{1), 2)}や水素火炎可視化装置³⁾を開発してきた。

第 1 報⁴⁾で述べたとおり、水素ガス遠隔計測装置は、危険区域外から水素の存在する位置と濃度を得ることが可能な優れた装置であるが、漏えい箇所の背後に近接してレーザ誘起蛍光を発する物体がある場合、微量な漏えいの検知が困難となる。

そこで本研究では微量の水素漏えいを対象として、計測箇所に近接してレーザ誘起蛍光を発生する物体がある場合においても漏えい位置の探査を可能とする水素検知技術を開発するため、計測原理として CARS を適用し、ラマン散乱光のうちレーザ波長より短波長に発生するアンチストークス光を捉えて水素計測を行う手法を検討した。

目標検知濃度は、一般的な水素検知器の警報設定値である濃度 500 ppm とし、目標計測時間については水素センサの応答速度⁵⁾⁻⁷⁾以下を目指し 1 s とした。

CARS では、ポンプ光とストークス光の 2 種の光を計測対象に照射することにより、アンチストークス光を発生させる。本研究では、ポンプ光としてレーザ光を利用し、ストークス光は高圧で水素を充填したラマンセルにレーザ光を照射することにより発生させた。第 1 報では、1 台のレーザ装置からポンプ光とストークス光を得る場合の光源の最適化について述べた。

本稿では、計測プローブの開発及びプローブと第 1 報で報告した光源を組み合わせて製作した水素ガスリークディテクタの構成、水素ガスリークディテクタを用いて実施した低濃度水素計測について述べる。

2. 計測原理

計測原理の詳細については、第 1 報において述べたとおりであり、ここでは、簡単に要点のみを述べる。

常温、大気圧下においてアンチストークス光を検出するため、本研究では、CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy: コヒーレントアンチストークスラマン分光法)⁸⁾⁻¹⁰⁾を適用した。図 1 に CARS のエネルギー準位図を示す。

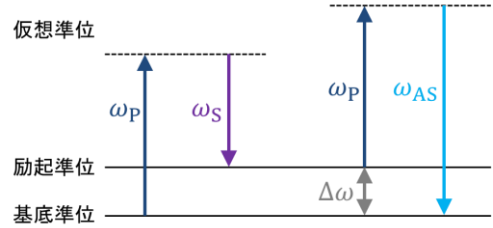


図 1 CARS のエネルギー準位図

本研究では、Nd : YAG レーザの第 3 高調波（波長 355 nm）をポンプ光として用いた。その際のストークス波長は 416 nm、アンチストークス波長は 309 nm となる。

CARS においては、ポンプ光、ストークス光、アンチストークス光の波数ベクトル $\mathbf{k}_P, \mathbf{k}_S, \mathbf{k}_{AS}$ が、

$$2\mathbf{k}_P = \mathbf{k}_S + \mathbf{k}_{AS} \quad (1)$$

で表される位相整合条件を満たす必要がある。(1) 式を満たす最も容易な配置は、すべての波数ベクトルが同一線上にある Collinear CARS の配置(図 2)であり、本研究ではこの配置を適用した。



図 2 Collinear CARS の配置

また、CARS により発生するアンチストークス光の強度 P_{AS} は、

$$P_{AS} = \left(\frac{2}{\lambda_P}\right)^2 \left(\frac{4\pi^2\omega_{AS}}{c^2}\right)^2 |3\chi^{(3)}|^2 P_P^2 P_S \quad (2)$$

で表される。ここで、 P_P はポンプ光強度、 P_S はストークス光強度、 λ_P はポンプ光波長、 ω_{AS} はアンチストークス光角周波数、 c は光速、 $\chi^{(3)}$ は 3 次の非線形感受率である。

(2) 式より、アンチストークス光強度はポンプ光強度の 2 乗に比例し、ストークス光強度に比例する。また、 $\chi^{(3)}$ は分子密度 N に比例するため、 P_{AS} は分子密度、即ちガス濃度の 2 乗に比例する。

3. 計測プローブの開発

計測プローブは、計測箇所にはポンプ光とストークス光を照射し、発生したアンチストークス光を集光するセンシング光学系と、ポンプ光、ストークス光、アンチストークス光を伝送する伝送光学系により構築した。

本研究で適用した Collinear CARS の配置において発生するアンチストークス光は、ポンプ光およびストークス光の入射方向と同じ方向へ強い指向性を持って発生する。このため、光源側に受光器を設置する場合、何らかの反射体により反射されるアンチストークス光を計測する、または、光軸を折り返し光源側に導いて計測する必要があるが、前者の場合、アンチストークス光の強度は反射体の素材や形状の影響を受ける。そのような中で一定の検知基準を満たすリークディテクタを実現することは困難であるため、ここでは、光軸を折り返す方法を採用し、図3に示すセンシング光学系を考案した。

図3に示したセンシング光学系は、BK7製45°直角プリズムによりポンプ光とストークス光の光軸を90°曲げて計測対象ガスに照射し、発生したアンチストークス光をSQ製45°直角プリズムにより90°曲げ、アンチストークス光を光源側へ導く。プリズム間の距離すなわち計測範囲は、市販の水素ガスリークディテクタのガス吸引ノズル先端と同等の寸法である10mmとした。

光源とセンシング光学系を接続し3種の光の伝送を行う伝送光学系については、ミラーを用いる手法と光ファイバを用いる手法が考えられるが、

光ファイバを用いる場合、ファイバへの送受信光の結合効率や、パルスレーザ光による端面の損傷等の懸念があるため、ここではミラーを用いて伝送することとした。

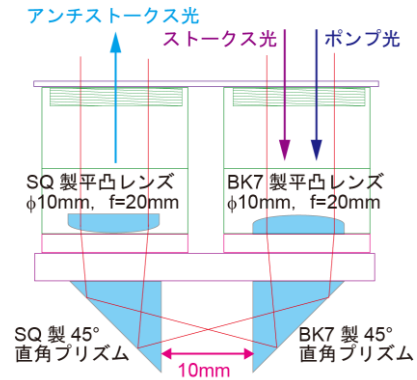


図3 センシング光学系の構成

ミラーは、ポンプ光、ストークス光、アンチストークス光の波長において高い反射率を持つ超広帯域誘多膜平面ミラー（シグマ光機社製 TFMS-2/7）を用いた。超広帯域誘多膜平面ミラーの反射特性を図4に示す。TFMS-2/7の適用波長域における平均反射率は97%以上であり、レーザ耐力は0.5 J/cm²である。

ミラーを用いた伝送光学系として、レーザメス用の多関節レーザ導光路（波長10.6 μm用）を基に、導光路内の反射ミラーとして前述のTFMS-2/7を用い、7関節導光路（光路長1m）を製作した。導光路の設計図を図5に、外観を図6に示す。

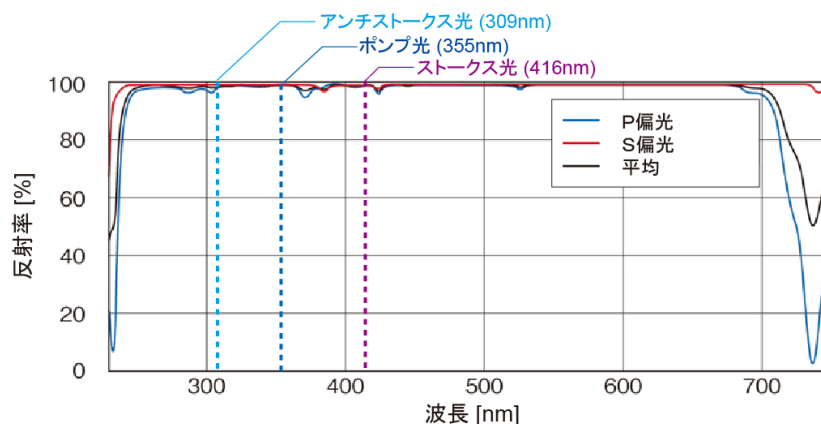


図4 超広帯域誘多膜平面ミラー（TFMS-2/7）の反射率特性

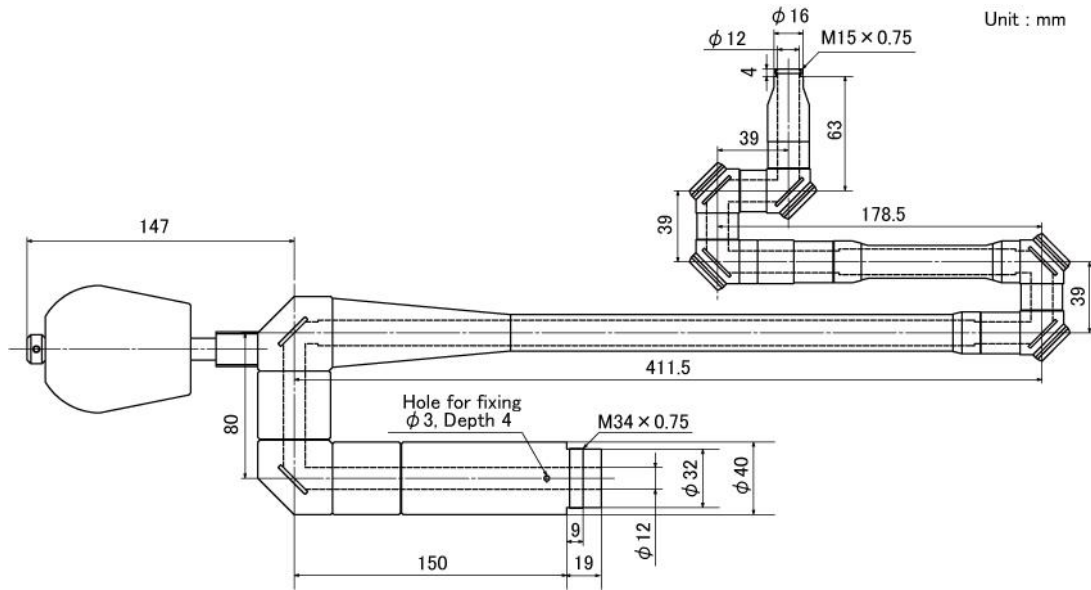


図5 7関節導光路の設計図



図6 7関節導光路の外観

4. 水素ガスリークディテクタの構築

これまでの検討結果に基づき、水素の漏えい位置探査を行うための水素ガスリークディテクタを構築した。水素ガスリークディテクタを構築するにあたり、光源、伝送光学系、センシング光学系を接続するための光学系が必要であるため、光源と伝送光学系を接続するためのダイクロイックミラーマウント①と、伝送光学系とセンシング光学系を接続するダイクロイックミラーマウント②を設計製作した。ダイクロイックミラーマウント①の構成を図7に、ダイクロイックミラーマウント②の構成を図8に示す。

図7に示したダイクロイックミラーマウント①には、ポンプ光とストークス光を透過し、アンチ

ストークス光を反射するダイクロイックミラーを配置することにより、光源から出射されるポンプ光とストークス光を伝送光学系へ導入し、伝送光学系から光源側へ向かって直進するアンチストークス光を分光器に入射させる構造とした。ダイクロイックミラーの光学特性を図9に示す。また、図8に示したダイクロイックミラーマウント②には、図9に示す特性を有するダイクロイックミラーと、アンチストークス光を反射する誘多膜ミラーを配置し、計測箇所へポンプ光とストークス光を導き、計測部にて発生したアンチストークス光を伝送光学系へ導く構造とした。

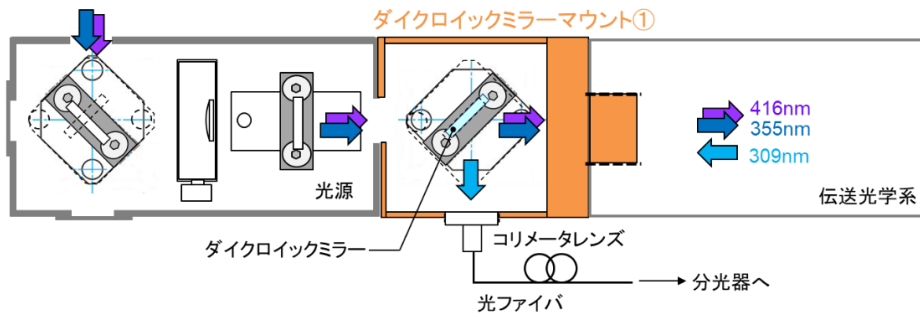


図7 ダイクロイックミラーマウント①の構成

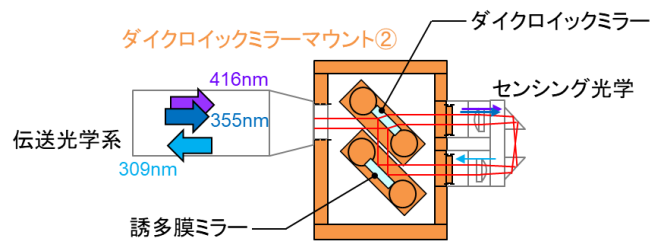


図8 ダイクロイックミラーマウント②の構成

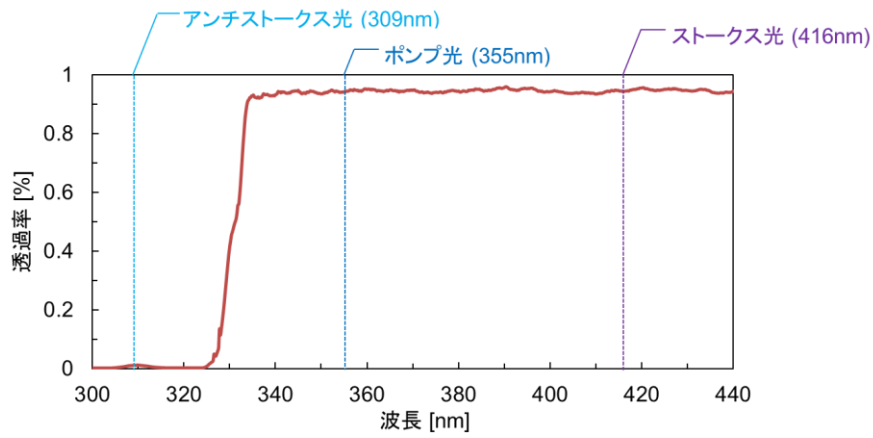


図9 ダイクロイックミラーの光学特性

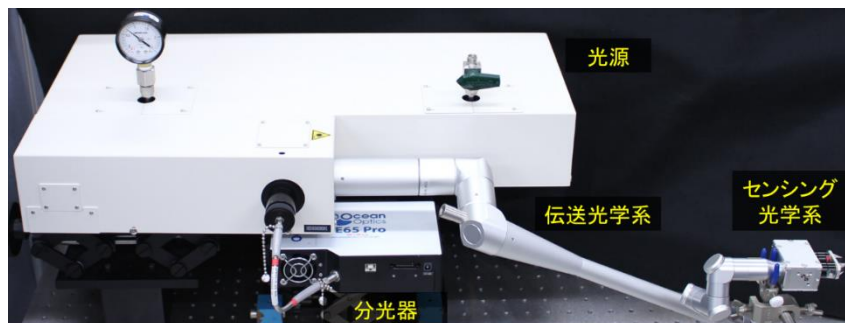


図10 水素ガスリークディテクタの外観 (カバー有り)

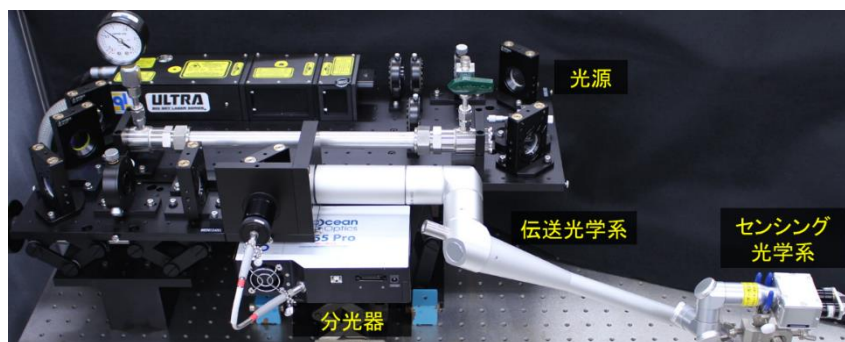


図 11 水素ガスリークディテクタの外観（カバー無し）



図 12 監視制御部を含む装置外観



図 13 装置使用イメージ

製作したダイクロイックミラーマウントと光源、伝送光学系、センシング光学系を接続して図 10 に示す水素ガスリークディテクタを構築した。図 11 は本体カバーを外した装置外観である。システム本体の寸法は、長さ 600 mm、幅 320 mm、高さ 100 mm であり、伝送路の光路長は 1 m である。これに濃度演算ソフトウェアをインストールした任意のノート PC を接続し、水素の計測を行う。監視制御部を含む装置外観は図 12 のとおりである。装置には、この他に本システムにはレーザ装置電源（寸法 長さ 430 mm、幅 450 mm、高さ 130 mm）が付属する。図 13 は装置使用イメージである。

5. 低濃度水素計測試験および結果

機能試験として、水素濃度 500 ppm の標準ガス（バランスガス：窒素）を用い、水素計測試験を実施した。図 14 に低濃度水素計測結果を、図 15 に水素濃度 500 ppm の場合の計測精度を示す。

図 14 に示す結果は、水素濃度を 500, 400, 300, 200 ppm と減少させて計測した結果である。濃度 100 ppm では、ノイズ信号に対し優位な光強度を確認できなかった。グラフの縦軸には光強度の平方根をプロットしており、光強度が水素濃度の 2 乗に比例することが分かる。図 15 に示すグラフの青色のプロットは濃度 500 ppm の水素を計測更新周期を 1 s として計測した光強度の 60 s 間の経時変化であり、緑線はその平均値を、赤鎖線は平均値に対し $\pm 15\%$ の光強度を示す。図 15 に示したとおり、計測値のばらつきは平均値に対し $\pm 15\%$ 以内であった。

また、水素濃度 3.5%の標準ガス（バランスガス：窒素）を流量 100 mL/min で内径 1 mm のノズルから放出し、ノズル上方 10 mm の位置の水素濃度を本装置により計測した結果、408.6 ppm の濃度値が得られた。

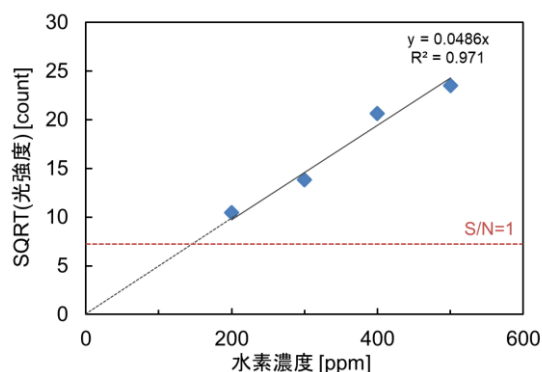


図 14 低濃度水素計測結果

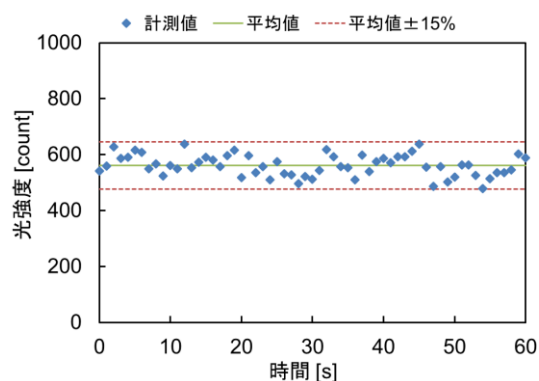


図 15 計測精度（水素濃度：500 ppm）

本研究にて開発した CARS を用いた水素ガスリークディテクタと他の水素センサの比較を表 1 に示す。比較は、国内において、保安用センサとして実用化されている、熱線型半導体式、接触燃焼式、気体熱伝導式の 3 種^{5), 6)}と、近年開発が進んでいる新型のセンサのうち、応答速度の速い静電容量式ナノセンサ⁷⁾を挙げて行った。

表 1 に示すとおり、他の水素センサに比べ、CARS

を用いたリークディテクタは応答速度が早く、検知濃度範囲が広いという観点から、非常に有用な計測システムであると言える。本装置の使用可能温度範囲については、適用したレーザ装置の出力の維持が可能な温度範囲に基づき決定したが、温度調整が可能な筐体を使用することで、更に広い温度範囲での使用にも対応可能である。

表 1 CARS を用いた水素ガスリークディテクタと他の水素センサの性能比較

センサ種	検知濃度範囲	応答速度 [s]	使用可能温度範囲 [°C]
CARS 法	200 ppm～100 vol%	1 (20 パルス積算)	0～30
熱線型半導体式	0.1 ppm～2 vol%	t90 : 20 未満	-10～50
接触燃焼式	1000 ppm～4 vol%	t 90 : 5～10	-10～50
気体熱伝導式	1～100 vol%	t 90 : 5～10	-10 to 50
静電容量式ナノセンサ	1～4 vol%	t 90 : 1.4	室温

* t90 : 到達する指示値を 100%としたときに、その 90%に到達する時間

6. 結論

CARS（コヒーレントアンチストークスラマン散乱）による水素ガス検知技術を適用し、目標検知濃度 500 ppm、目標計測時間 1 s として、水素ガスリークディテクタの開発を行った。第 1 報にて最適化を行った光源と、本稿にて設計製作したセンシング光学系、伝送光学系、接続光学系を組み合わせ、水素ガスリークディテクタを構築した。

本装置の計測範囲はセンシング光学系に組み込んだ 2 個のプリズム間距離にあたる、光路長 10 mm 範囲である。

水素ガスリークディテクタの計測性能を評価し、濃度 200 ppm 以上で S/N=1 以上の信号を確認し、濃度 500 ppm の水素計測時の計測精度が±15%以内であることを検証した。

また、水素ガスリークディテクタと他の水素セ

ンサの性能を比較し、本研究において開発した CARS による水素検知手法が、検知濃度範囲および検知速度の両者において優れた性能を有することが確認された。

【謝辞】

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP13002）の結果得られたものです。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) 朝日一平, 二宮英樹, 杉本幸代:「低出力レーザー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)
- 2) 荻田将一, 杉本幸代, 朝日一平, 椎名達雄:「昼間屋外計測可能なマルチガスラマン LIDAR の開発」, 第 38 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, レーザーセンシング学会, pp.64-65 (2020)
- 3) 三木啓史, 星野礼香, 荻田将一, 市川祐嗣, 杉本幸代, 朝日一平:「画像伝送手法による水素火災の可視化技術」, 四国電力, 四国総合研究所 研究期報, No.108, pp.1-6 (2018)
- 4) 杉本幸代, 朝日一平:「コヒーレントアンチストークスラマン散乱による漏えい水素ガス検知技術 (第 1 報)」, 四国電力, 四国総合研究所 研究期報, No.116, pp.31-40 (2022)
- 5) 鈴木健吾:「各種ガスセンサと水素検知・警報システム」, 日本燃焼学会誌, Vol.61, No.195, pp.30-36 (2019)
- 6) 北口久雄:「水素用ガスセンサの現状と課題」, 水素エネルギーシステム, Vol.30, No.2, pp.35-40 (2005)
- 7) G.B. Pour and L.F. Aval: “Monitoring of hydrogen concentration using capacitive nanosensor in a 1% H₂-N₂ mixture”, Micro & Nano Letters, Vol.13, Issue 2, pp.149-153 (2018)
- 8) M.D. Levenson, 狩野覚:「非線形レーザー分光光学」, 第 1 刷, オーム社, 東京, pp.159-212 (1988)
- 9) J.W. Nibler: “Coherent anti-Stokes Raman scattering of gases”, in “Non-linear Raman spectroscopy and its chemical applications”, W. Kiefer and D.A. Long, eds., Springer Netherlands: Heidelberg, Germany, pp.261-280 (1982)
- 10) J.P. Taran: “Coherent anti-Stokes Raman scattering”, in “Non-linear Raman spectroscopy and its chemical applications”, W. Kiefer and D.A. Long, eds., Springer Netherlands: Heidelberg, Germany, pp.281-323 (1982)

原子力発電所の廃止措置における配管等の残水検知技術に関する研究

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 岡部 克也

キーワード： 超音波検査
配管内水面検知

原子力発電所
加圧水型軽水炉
廃止措置
横波斜角超音波探触子

ステンレス配管
非破壊検査

Key Words : Ultrasonic Inspection
Water Surface Detection in
Piping
Nuclear power plants
Pressurized water reactor
Decommissioning
Transverse oblique angle
ultrasonic probe
Stainless steel piping
Non-destructive inspection

Study on technology for detecting residual water in piping, etc. in decommissioning of nuclear power plants

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

Abstract

Currently, 24 out of 57 commercial nuclear reactors in Japan have been decided to be decommissioned (as of the end of October 2022), and decommissioning is in progress. One of the most important issues in decommissioning work is how to minimize radiation exposure of workers. For example, the primary system piping of a pressurized water reactor (PWR) may contain radioactive liquid, and if the drainage is incomplete before cutting the piping, contaminated water may be dispersed and workers may be contaminated. If the drainage is incomplete prior to cutting the pipes, contaminated water could scatter and contaminate workers. To prevent such problems, it would be good if the presence or absence of residual water could be checked by a water level gauge before dismantling, but since most pipes do not have a water level gauge, it is necessary to check for residual water in the pipes by means of a device that can be attached externally.

At the Ikata Power Station, ultrasonic technology developed by the Shikoku Research Institute is used to monitor the water level at the nozzle center of the reactor piping during routine inspections. In this study, we used this knowledge to develop a technology to reliably detect residual water in piping, etc.

1. はじめに

現在、国内の商業用原子炉 57 基中の 24 基で廃炉となることが決定されており（2022 年 10 月末時点）、廃止措置が進行中である。廃止措置作業においては、作業員の放射線被ばくを如何に抑えるかが重要課題の一つとなっている。廃止措置では非常に多数の配管等を解体・撤去する必要があるが、例えば、加圧水型軽水炉（PWR）の一次系配管は放射性物質を含む液体が残っている可能性があるため、配管を切断するときに事前の排水が不完全であれば汚染水が飛散し、作業員が身体汚染する可能性があると考えられる。このようなトラブルを未然に防止するためには、解体前に水位計によって残水の有無を確認できれば良いが、ほとんどの配管では水位計が設置されていないため、外付可能な装置等により配管内の残水の有無を確認することが有効な対策となる。

伊方発電所では、定検時における原子炉配管ノズルセンタ水位の監視に四国総合研究所で開発した超音波技術を使っている。本研究では、この知見を活用し、配管等の残水を確実に検知する技術について開発を行った。

2. 垂直超音波センサによる配管残水検知

図 1 は垂直超音波センサによる水平配管内の残水検知方法を示したものである。これは原子炉配管ノズルセンタ水位計と同じ原理に基づく方法である。この方法では、垂直超音波センサを配管底面に取り付けて水面との間を往復する超音波信号を検出する。このとき、往復する超音波の伝搬時間 T が分かれば(1)式によって配管内の水位 H が算出できるため、残水の有無を判定することが可能になる。

$$H = c_1 \left(\frac{T}{2} - \frac{d}{c_2} \right) \quad (1)$$

この方法は垂直配管の場合にも容易に拡張できる（図 2）。垂直配管の場合は、垂直超音波センサを配管側面に取り付ける。このとき、超音波センサの取り付け位置より水面が高ければ、(2)式で与えられる超音波伝搬時間 T 付近に超音波信号が検出される。

$$T = 2 \left(\frac{D}{c_1} + \frac{d}{c_2} \right) \quad (2)$$

この信号は超音波センサの取り付け位置より水面が低いときは検出されないため、信号の有無から超音波センサより高い位置に水面があるか否かが判定できる。

なお、垂直配管の超音波経路は、水平配管の水位が

100%の場合（満水 $H = D$ を 100%とする）と全く同じであるため、以後は水平配管の特別な場合として扱う。

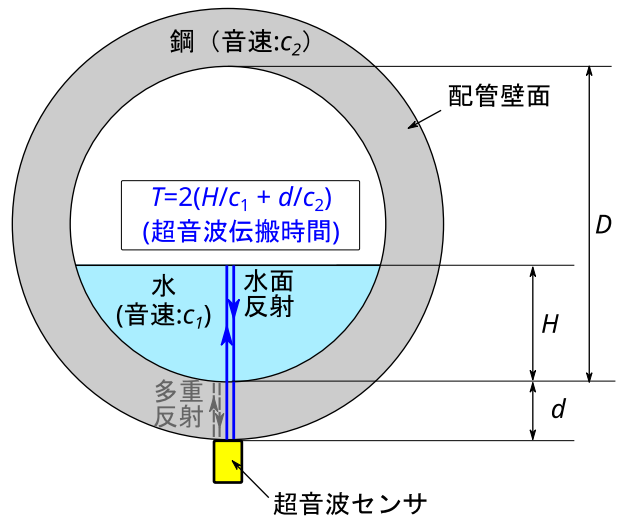


図 1 垂直超音波センサによる残水検知方法
（水平配管の場合）

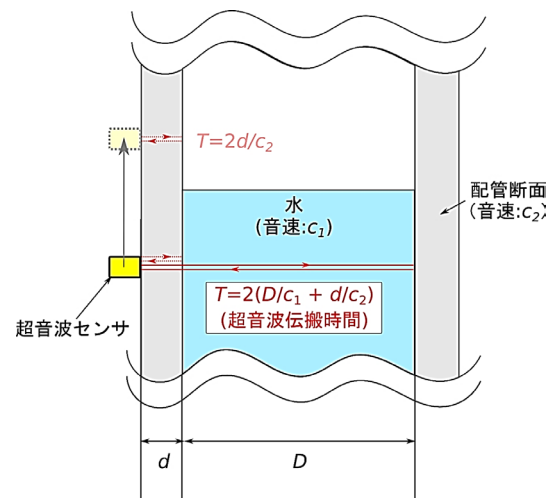


図 2 垂直超音波センサによる残水検知方法
（垂直配管の場合）

垂直超音波センサによる残水検知方法（図 1）の有効性を確認するため、配管モックアップによる検証実験を実施した。表 1 に配管モックアップの仕様を、図 3 に水位が 73.9mm (100%)、37.0mm (50%)、20.0mm (27%)、10.0mm (14%) のときの受信波形を示す。横軸の水位付近の信号が残水を示す水面反射であるが、その他にも多数の信号が検出される。これらは、

- ① 水面と配管内面の間で超音波が反射を繰り返すことで生じる多重反射波
- ② 配管内面と外面の間で超音波が反射を繰り返す

すことで生じる多重反射波

のいずれかである。その間隔は、①の場合は水位と同じであり、②の場合は配管肉厚に比例する（SUS304 中の音速は水中の約4倍であるため、 $7.6\text{mm} \div 4 \div \text{約} 1.9\text{mm}$ 間隔）。水位が低くなると、水面反射が多重反射の山に埋もれて判別が困難になるため、確実に残水を検知するには水位が 20mm（配管肉厚の約 2.6 倍）以上必要であることが分かった。

表 1 配管モックアップの主な仕様

配管外径(D+2d)	89.1mm (呼び径 80A)
配管内径(D)	73.9mm
配管肉厚(d)	7.6mm
配管材質	SUS304

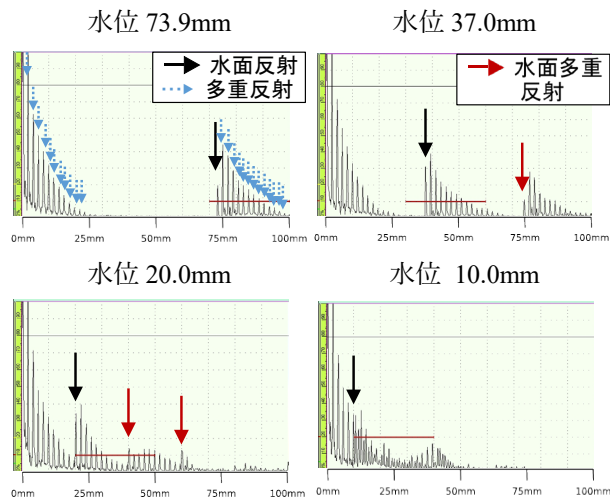


図 3 垂直超音波センサの受信波形

3. 横波斜角超音波センサによる配管残水検知

誤検知の要因となる多重反射の影響を軽減するため、横波斜角超音波センサによる残水検知法を検討した。

前項の垂直超音波センサは縦波を送信するが、物体中を伝搬する波には、横波等の異なる種類（振動モード）も存在する。図 4 は縦波と横波の違いを示したものである。縦波は進行方向と振動方向が平行な波であり、波の中に密度が高いところと低いところが存在することから疎密波とも呼ばれる。横波は進行方向と振動方向が直交する波で、せん断波とも呼ばれる。よく知られた例としては、地震の際に最初に到達する波（P 波）が縦波、2 番目に到達する波（S 波）が横波である。鋼中は縦波と横波どちらも伝わるができるが、水中（液体）では縦波のみ伝わるができる。鋼中の横波の伝搬速度は縦波の約半分である。

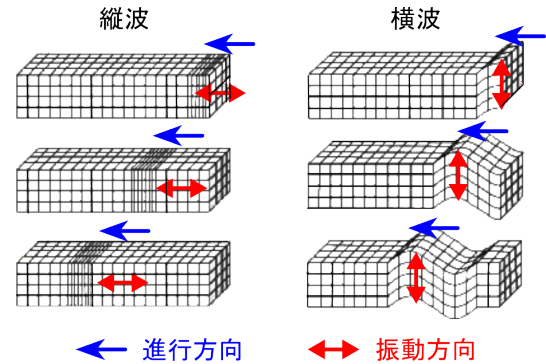


図 4 縦波と横波の違い

超音波が音速の異なる媒質の境界面に斜め方向から入射するとき、屈折や反射によって超音波の一部のモードが変化する（モード変換）。図 5 の例では、アクリルから鋼に向かって縦波超音波が入射し、アクリル内で反射したものが縦波と横波に、鋼中で屈折したものがさらに縦波と横波に分かれている。このとき、入射角が臨界角 27° （縦波屈折角が 90° のときの入射角）を超えると、鋼中を伝搬する超音波は横波だけになる。横波斜角超音波センサ（図 6）は、この特性を利用して横波超音波を送信可能にしたものである。

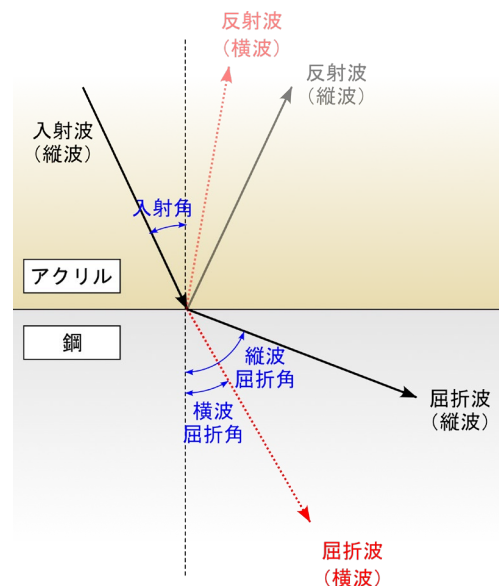


図 5 超音波のモード変換の例

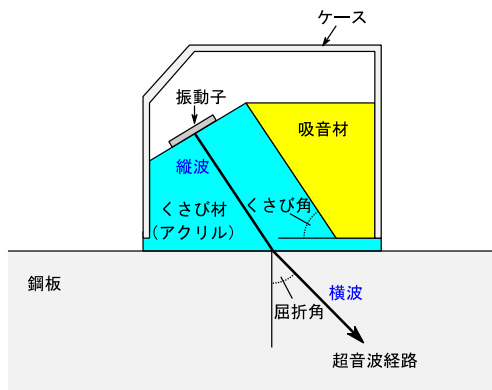
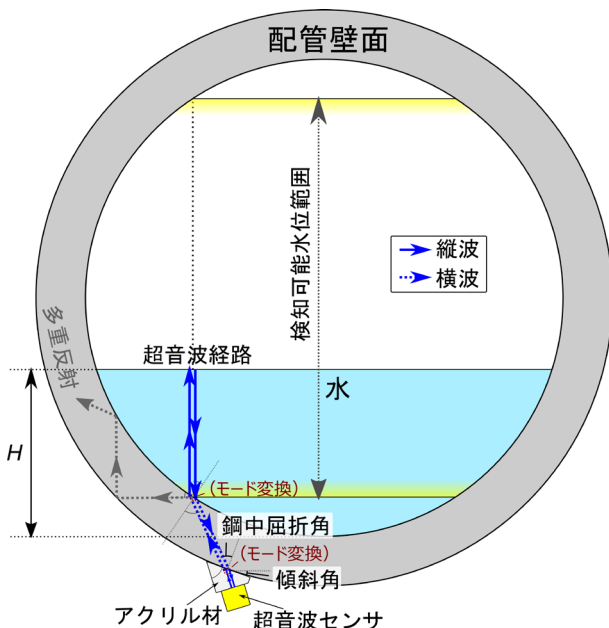


図 6 横波斜角超音波センサの構造

図 7 に横波斜角超音波センサによる残水検知方法を示す。この方法では、横波斜角超音波センサ（鋼中屈折角 45° ）を配管下部の傾斜面に取り付ける。センサ取付位置は、超音波が水中に入射した際に、垂直上向きに伝搬するようにあらかじめ計算しておく必要があるが、通常の配管であれば傾斜角はほぼ一定の範囲に収まる（ $5 \sim 10^\circ$ ）。配管壁面で反射した超音波はセンサから遠ざかる方向に反射・伝搬することから、受信波から多重反射の影響をほぼ取り除くことができる。ただし、100%水位付近では、超音波経路上で水面が露出していないことから、水面反射が検出できない可能性が高いため、垂直超音波センサによる方法と使い分ける必要がある。

図 7 横波斜角超音波センサによる
残水検知方法

横波斜角超音波センサによる残水検知法（図 7）の有効性を確認するため、配管モックアップ（表 1）による検証実験を実施した。実験では水位が 73.9mm（100%）から 0.0mm（0%）になるまで少しずつ水を抜き、その間の水面反射信号の変化を確認した。図 8 に実験風景、図 9 に受信波形を示す。

実験の結果、水面反射の検出を妨げる信号はほとんど存在せず、確実性の高い残水検知が期待できることが分かった。また、確実に水面反射が検出可能な水位の上限は約 67mm（91%）、下限は約 10mm（13%）であることが確認できた。特に、下限水位は垂直超音波センサによる残水検知の下限水位の約 1/2 であり、より低水位の残水を検出できることが分かった。

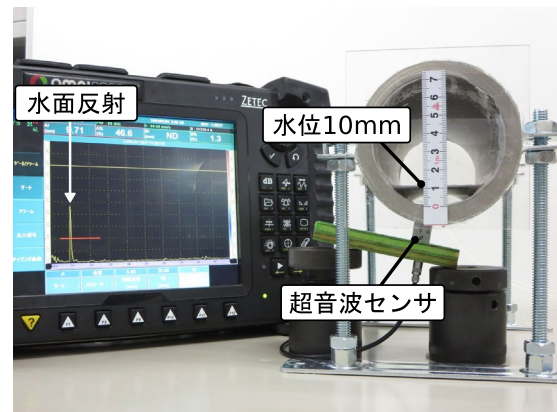


図 8 実験風景

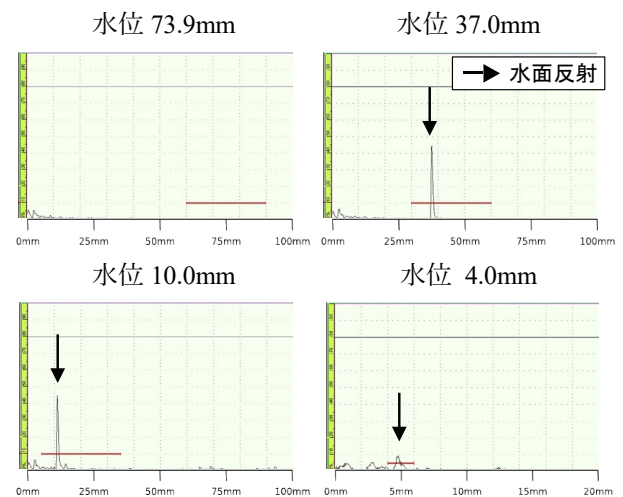


図 9 横波斜角超音波センサの受信波形

4. 横波斜角超音波センサの最適化

超音波センサから送信された超音波は、配管内面を透過する度に反射等によりエネルギーを失う。図 10 は超音波が銅板と水の間を 1 往復した後に残るエネル

ギーの比率（エネルギー透過率）と水中屈折角（傾斜角に一致）や鋼中屈折角との関係を示したものである。垂直超音波センサのエネルギー透過率は 1.5%程度であるのに対して、鋼中屈折角 45° （水中屈折角 19.5° ）の横波斜角超音波センサは 2.7%と 2 倍近いエネルギーが残っており、垂直超音波センサより横波斜角超音波センサを使った方が超音波の伝達効率が高いことを示している。

図 10 によると超音波伝達効率のピーク位置は鋼中屈折角 45° より小さいところにあるため、超音波センサの屈折角を小さくすることで、さらに超音波の伝達効率が向上する可能性がある。そこで、図 11 のように鋼中屈折角 45° の超音波センサをフライス加工することで、鋼中屈折角 40° の超音波センサを作成し、前項と同様の試験手順で、配管モックアップによる検証実験を実施した。また、この方法が適用可能な配管について確認するため、実験用配管には、80A 配管（表 1）の他に 25A、150A の配管モックアップ（表 2）を追加した。

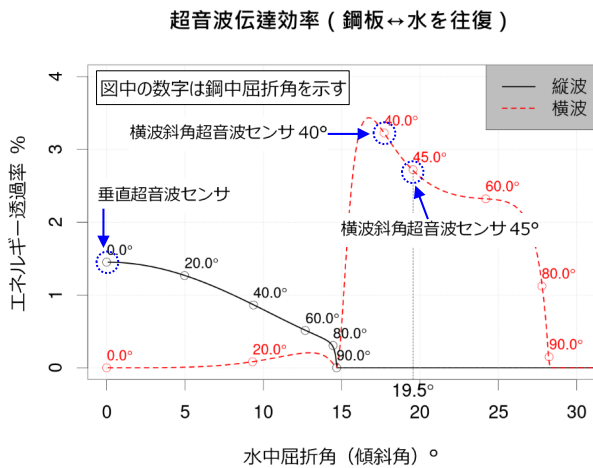


図 10 鋼板と水を往復する超音波の伝達効率

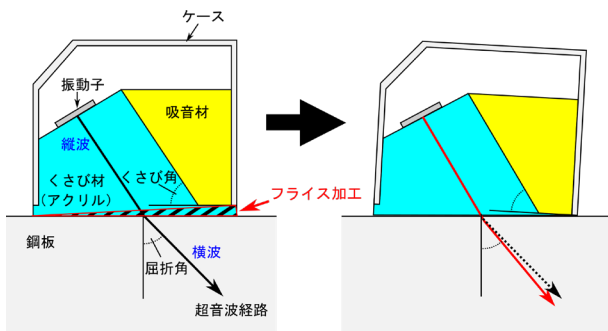


図 11 横波斜角超音波センサの屈折角の変更

表 2 追加した配管モックアップの主な仕様

配管外径(D+2d)	34.0 (呼び径 25A)	165.2 (呼び径 150A)
配管内径(D)	25.0	143.2
配管肉厚(d)	4.5	11.0
配管材質	SUS304	

図 12 に 2 種類（鋼中屈折角 45° と 40° ）の横波斜角超音波センサの受信波形（水位 50%の場合）、表 3 に 2 種類の横波斜角超音波センサと垂直超音波センサの水位の検出限界をまとめた結果を示す。受信波形については、鋼中屈折角 45° の場合よりわずかに 40° の方が信号が高くなっており、超音波伝達効率が上がっているように見えるが、水位検出限界については、ほとんど差がないことが分かった。このことから、横波斜角超音波センサは、鋼中屈折角 45° のみで十分といえる。各配管への適用性については、25A 配管では下限水位は垂直超音波センサと大きな差はないが、80A 配管や 150A 配管では 1/2 程度となっており、横波斜角超音波センサによる方法は外径が大きい配管で効果が高いことが分かった。これは、図 7 に示した理論上の検知可能水位範囲が、肉厚に対する内径の比（25A 配管：5.6、80A 配管：9.7、150A 配管：13.0）が大きいほど広くなることを反映していると考えられる。

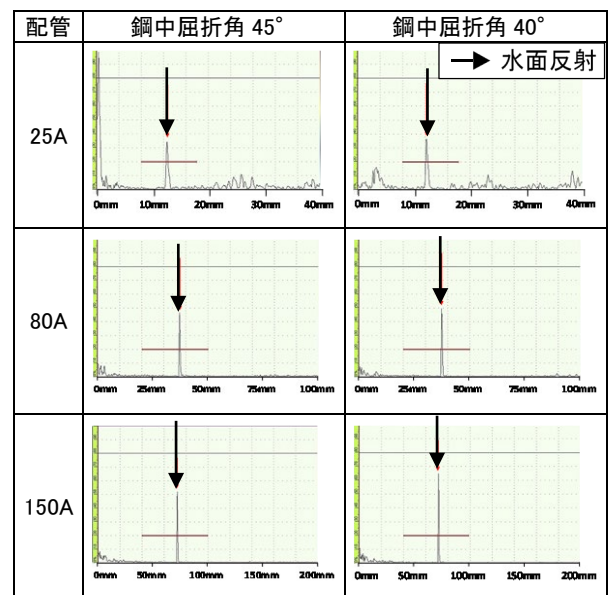


図 12 2 種類の横波斜角超音波センサの受信波形(水位 50%の場合)

表 3 各超音波センサの水位検出限界のまとめ

配管	下限 (mm)			上限 (mm)		
	45°	40°	垂直	45°	40°	垂直
25A	8 (32%)	8 (32%)	10 (40%)	20 (80%)	20 (80%)	25 (100%)
80A	10 (13%)	10 (13%)	20 (27%)	67 (91%)	67 (91%)	73.9 (100%)
150A	10 (7%)	10 (7%)	20 (14%)	135 (94%)	132 (92%)	143.2 (100%)

45° , 40° :横波斜角超音波センサの鋼中屈折角

垂直 :垂直超音波センサ

5. おわりに

本稿では、配管等の残水の有無を超音波により判定する技術に関する研究成果を紹介した。この技術は、原子力発電所の廃止措置において、また運転中においても PWR の一次系配管等の残水を確実に検知することで、配管切断作業における作業員の放射線被ばくリスクの低減が期待できる。

【謝辞】

本研究は、四国電力㈱原子力本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。

放送型無線通信を用いた需要家機器活用技術の開発

(株)四国総合研究所 電力技術部 吉田 正志

キーワード： 放送型無線通信制御
需要家機器制御
需要家機器活用
再エネ抑制回避
再エネ普及
需給運用
擬似乱数制御

Key Words : Broadcast-type wireless communication control
Consumer equipment control
Consumer equipment utilization
Avoidance of renewable energy suppression
Spread of renewable energy
Supply and demand management
Pseudo-random number control

Development of Technology to Utilize Consumer Equipment Using Broadcast-type Wireless Communication

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technology Department
Masashi Yoshida

Abstract

With the rapid increase in renewable energy power generation, such as photovoltaic power generation, whose output varies depending on weather and other conditions, adjusting supply and demand is becoming increasingly difficult; hence, new feasible and effective supply and demand management measures and responses are required. As a feasible approach, we have developed a technology for utilizing consumer equipment suitable for the changing supply-demand balance environment by utilizing widely used electric water heaters (e.g., EcoCute) and similar devices. We developed a system for utilizing a large amount of scattered small-capacity consumer equipment in which one-way control commands are issued via broadcast-type wireless communication, and the consumer equipment receiving the commands controls the equipment autonomously. Using a low-cost, power-saving long-distance radio suitable for wide-area transmission, control commands based on the output prediction results of photovoltaic power generation are sent via relay stations. Remote-control adapters installed in consumer equipment receive control commands and autonomously control the equipment. When an electric water heater is used and a boiling DR command is issued for the daytime the following day, the water will be boiled during the daytime instead of the usual nighttime boiling. By using pseudo-random numbers in the control program, the aggregate to be controlled is configured to generate a load similar to the photovoltaic power generation curve in sunny weather. We confirmed that good reception control is an effective method for controlling a large amount of customer equipment at a low cost and without interfering with the use of hot water supplies.

1. はじめに

天候などの様々な条件により出力が変動する太陽光発電（以下、PV）などの再エネ発電が急増している中、需給運用の安定化と再エネ発電抑制回避のため、需要家側エネルギーリソースを活用することが全国大で注目され、高度なエネルギーマネジメント技術によりそれらを束ねて、あたかも一つの発電所のように機能させる「仮想発電所（以下、VPP）」に関する取り組みが活発化している。四国においてもPV増加に伴い需給調整は格段に難しくなっており、実現可能かつ実効性ある新たな需給運用対策や対応が求められている。

このような環境の中、早期実現の可能性がある独自の取り組みとして、既に大量に普及している電気給湯器（電気温水器・エコキュート）等を活用し、様変わりした需給バランス環境に柔軟に適合する需要家機器活用技術を開発したので紹介する。

2. 開発した需要家機器活用技術の概要

点在する小容量で大量な需要家機器の活用に適した手法として、放送型無線通信による一方向の制御指令（制御指令を無線を用いて放送送信）を行い、受信した需要家機器が自律制御するシステムを開発した。^{※1}

2.1 放送型無線通信

制御指令を行う放送型無線通信には、安価なコストで広域なエリア送信に適した省電力長距離無線技術（920MHz・250mW・LoRa方式）を用いて、PV発電出力予測結果に基づいた需要家機器制御指令（翌日の上げDR指令^{※2}）を中継局（放送局）経由で送信し、需要家機器に設置したリモート制御アダプター（受信制御装置、以下、RCA）が制御指令を受信する。（図1）

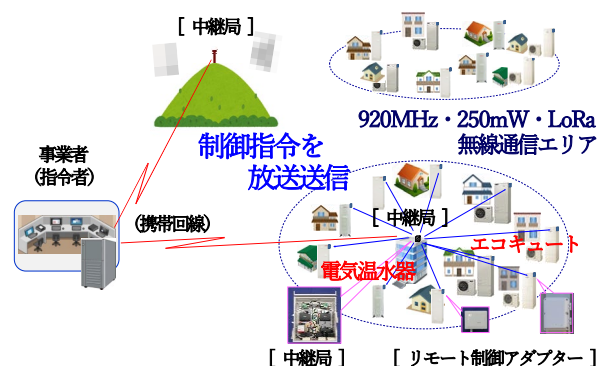


図1 制御指令伝送ルート

※1：四国電力株式会社および当社の共同で特許取得（2021年11月16日登録）

※2：上げDRとは、デマンドレスポンスにより電気の使用量を増やすこと。本制御では、翌日昼間に湯沸かしを行う指令を出す。

2.2 需要家機器（電気給湯器）自律制御システム

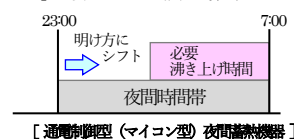
一般的な家庭用電気給湯器は、電気料金の安い夜間時間帯に翌日分の湯を沸かし貯湯する。残湯量・給水温度をもとに沸き上げに必要な時間を計算し、明け方に湯沸かしを行う「通電制御型（マイコン型）夜間蓄熱機器」である。これに対し、開発した自律制御システムでは、RCAが制御指令を受信し、その指令をもとに電気給湯器が昼間に湯沸かしを行う。電気温水器の場合は、制御指令をRCAが受信し、昼間シフトに対応した電気温水器^{※3}に指令を伝送することで制御実行する。エコキュートの場合は、制御指令をRCAが受信し、ECHONET-Lite通信で給湯器本体のHEMSアダプターを介して直接制御実行する。

具体的には、制御指令（暗号化された無線電波で、管理コード・制御日・対象機器・グループ番号・指令内容等）を1電文で送信する。RCAが翌日の上げDR指令を受信し識別すると、夜間の湯沸かしを行わず翌日昼間（9:00～17:00の間）に沸き上げを行う。制御対象給湯器の集合体が晴天時のPV発電カーブに類似した負荷を構成するよう、沸き上げ開始時刻の決定に擬似乱数（Xorshift・16bit）を用いる手法^{※4}とした。

また、夜間の湯沸かしを行わないことから、明け方の湯切れリスクを防ぐため、23時の残湯量判断により「夜間沸き上げ+昼間沸き上げ」制御を組み込み、給湯利用に支障しない制御（図2）とした。さらに、電気温水器では、通常の夜間沸き上げにも擬似乱数を用いて、明け方に集中する電気給湯器湯沸かし負荷の平準化をはかる。

○ 現状制御

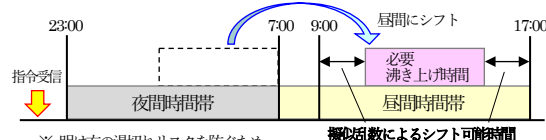
〔・必要な沸き上げ時間を計算し、明け方にシフト湯沸かし〕



○ シフト制御

〔・昼間シフト指令を受信

〕・必要な沸き上げ時間を計算し、擬似乱数を用いて沸き上げ開始時刻を決定し実行〕



※ 明け方の湯切れリスクを防ぐため、23時の残湯量が少なければ「夜間湯沸かし+昼間湯沸かし」制御

図2 電気給湯器自律制御の概要

※3：現在、昼間シフト制御に対応した電気温水器を製造しているのは、四国電力グループ会社である四変テック株式会社のみである。

既に設置済みの電気温水器であれば、基板交換を行うことで制御可能である。また、2019年10月からの販売機種には本制御プログラムが搭載されている。

※4：四国電力株式会社および当社の共同で特許取得（2014年2月28日登録）

3. 需要家機器(電気給湯器)活用技術の検証結果

香川県内 2 地点に中継局を設置し、香川県西讃地区から高松市街地のモニター40 軒(電気温水器 30 台、エコキュート 10 台)で1年間における実証試験を行った。(図3、図4、図5)

電気給湯器の設置場所が一般的な屋外設置でなく、住居内・倉庫内・集合住宅メーターボックス内などの閉所への設置であっても、良好に受信制御できることを確認した。また、放送型の一方向指令による期待値制御でも高質な擬似乱数を用いたことで、40 台の少ない集合体でも PV 発電カーブに類似した負荷を形成することを確認した。さらに、制御プログラムに組み込んだ湯切れ防止機能により、残湯量が少ない電気給湯器では夜間湯沸かしが確実に行われることを確認した。

(図6、図7、図8、図9)

また、モニターさまへのアンケート調査結果でも、給湯利用に支障はなく日常生活に影響を与えないことを確認した。

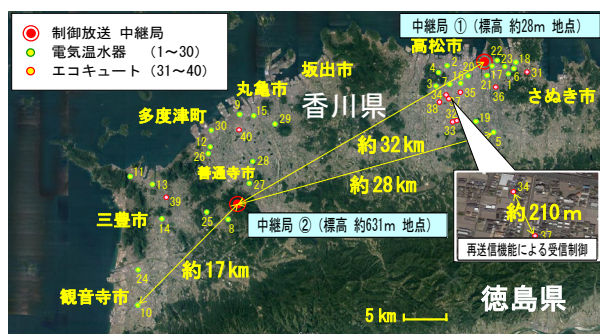


図3 遠隔制御実証試験エリア



図4 中継局(放送局)の設置状況



図5 電気給湯器への試験用 RCA 設置状況

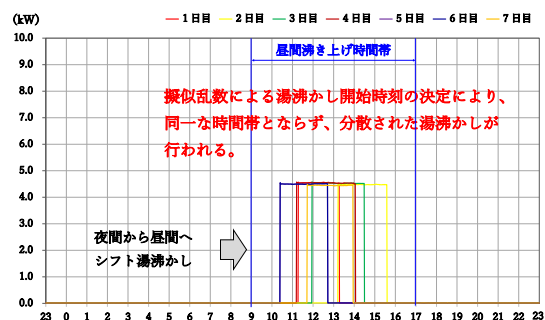


図6 370L 電気温水器・戸別の湯沸かし状況

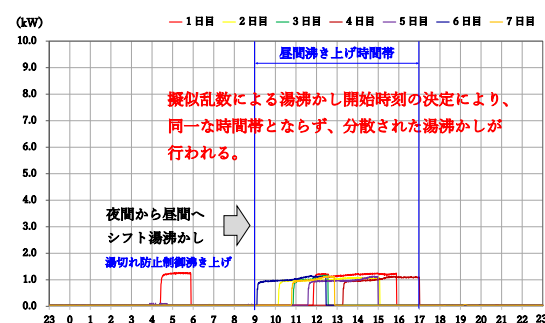


図7 460L エコキュート・戸別の湯沸かし状況

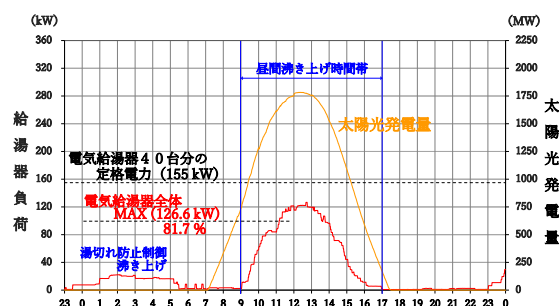


図8 冬期試験結果(2020年2月4日集合体)

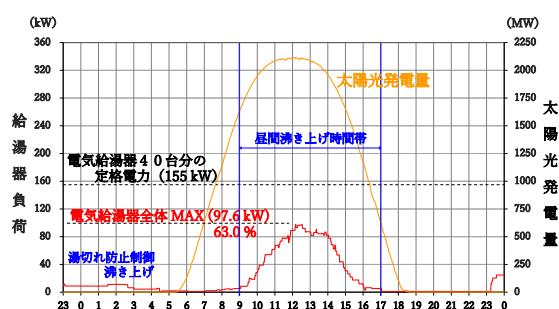


図9 春期試験結果(2020年5月7日集合体)

4. 実用化装置

電気温水器用 RCA の実用化に向け、受信感度が更に向上する「簡易アンテナ×2本」ホイップアンテナ仕様の専用基板製作・電気温水器基板からの RCA 電源供給・電源線と信号線の 1 ケーブル化・専用小型ケース製作により量産化・低価格化および設置工事の容易化をはかった。(図 10, 図 11, 図 12)



図 10 自作試験用 RCA 基板



図 11 実用化 RCA



図 12 実用化 RCA の設置状況

また、高圧一括受電におけるデマンド抑制用途など制御指令場所と対象需要家機器が比較的近傍な事業者向けに、中継局を用いず直接 PC から制御指令を送信する装置も製作した。(図 13)



図 13 制御指令 PC 直接送信装置

5. 電気給湯器以外の需要家機器活用

普及が進む EV 用に、高機能な充電器を導入することなく充電制御が行え、お客さまの車両利用形態に合わせた EV 充電時間帯「①直ぐに充電、②割安な夜間料金時間帯充電、③PV 発電に合わせた翌日昼間充電（放送型制御活用）」の選択式で、ボタンを押すだけで設定ができる。お客さまと電力側との双方にメリットが得られる「EV 充電装置 (RCA)」を開発した。簡易操作で充電制御が行える後付設置が容易な「放送型制御機能を搭載した EV 充電装置」とした。

具体的には、コンセント式 EV 充電器 (MOD01, MOD02) に、容易に後付設置 (既設充電コンセントと車載充電ケーブル間に挿入) できる装置で、利用時に 3 つのボタンからの選択で充電時間帯を設定する。(図 14)

擬似乱数による充電開始時間の決定により「②夜間時間帯充電」の選択時は、割安な充電料金利用と EV 充電負荷の平準化ができる。「③翌日昼間時間帯充電」の選択時は、放送型無線通信の活用機器として指令受信時は翌日上げ DR 活用機器として利用できる。



図 14 放送型制御機能を搭載した EV 充電装置

6. まとめ

今回開発した需要家機器（電気給湯器）活用の実証試験を通じて、本技術が想定通り小容量かつ大量に存在する需要家機器を制御する手法として有効であることを確認した。

1 対 1 の双方向通信を必要とせず、安価で容易に上げ DR 構築を行うことができ、さらに普及している既存設備が利用できることで、早期実現が可能な装置とすることができた。

制御対象となる需要家機器を拡大することで、より実効性ある技術にできることから、需給運用の安定化に資する需要家機器の更なる活用について可能性を探っていく。

【謝辞】

電気給湯器を活用する需要家機器活用研究は、四国電力（株）事業開発室 新技術活用プロジェクトチーム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) 多田安伸：「電気自動車深夜電力充電時の充電負荷平準化対策」，四国電力，四国総合研究所 研究期報，No.94，pp.15-23（2010.6）

コミッショニングによる省エネルギー・光熱費削減サービス ～地方自治体の建物におけるサービス実施事例と 今後の展開について～

四国電力(株)	土木建築部	松田 健太郎
四国電力(株)	土木建築部	天野 雄一朗
(株)四国総合研究所	土木技術部	藤井 良平
四国電力(株)	土木建築部	石川 大

キーワード : コミッショニング
 省エネ
 無線式モニタリング

Key Words : Commissioning
 Energy saving
 Wireless monitoring

Energy saving and utility cost reduction services by commissioning
- Examples of service implementation in local government buildings and future developments -

Shikoku Electric Power Company, Civil Engineering and Construction Department
Kentaro Matsuda, Yuichiro Amano, Masaru Ishikawa
Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department
Ryohei Fujii

Abstract

In this paper, we report the outline of this service, the contents of the implementation, and the results. At present, several years after the start of the service, not only the commissioning aimed at energy saving and cost saving in the local government buildings targeted at the start of the service, but also the visualization of the air environment in government buildings and schools and the commissioning of air conditioning and ventilation facilities in all-electric food service centers as measures against the new coronavirus.

In the future, in addition to the applications we have worked on, we would like to expand the service to include hot bath facilities and hospital facilities with high energy use density.

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラル宣言や近年改正された省エネ法などを背景に、企業や自治体の省エネ義務が強化されており、自治体におけるカーボンマネジメント事業や省エネ化に関する各種助成など、全国大での持続可能な循環型社会の形成への取り組みが一段と活発となっている。

このような背景の中、四国電力ではこれまで培ってきた建築技術を活用した新しい顧客サービスとして、自治体庁舎などの事務所ビル、オール電化給食センター、学校校舎などを対象とした「コミッションングによる省エネルギー・光熱費削減サービス」に取り組んでいる。コミッションング（以下、Cx とする）とは、空調設備や照明設備などの建物設備に対して「建物が持つ本来の性能を実現する」ため、運転データの分析やシミュレーションなどによる性能検証、設計意図などの見える化による適正な運用改善を実施することである。一般的に建物オーナーが気付かないままエネルギーの浪費を続けている建物が非常に多く、Cx は既存の建物に対する省エネ・省コストの有効な手段となる（図 1）。

また、昨今の新型コロナ対策にもあるように十分な換気量を確保しながらも、過度な換気とならないように換気設備の運転の適正化を図り、空調設備の省エネを行う上でも、Cx は重要な要素となる。

本サービスは、ヨンデビル新館で採用した冬期の冷熱を土壌にため夏期の冷房エネルギーとして使用する再生可能エネルギーを利用した季節間土壌蓄熱空調システムの運用最適化 Cx や高松電気ビルにおける設計から運用時に亘る継続的な Cx など、これまで培ってきた Cx 技術を初めてお客さまの建物に適用したものである。これは、設備の把握、データ計測・解析、運用改善、成果報告のサイクルをワンスルーで実施し、省エネルギーと電力デマンド低減を迅速に実現することで、顧客との更なる良好な関係の醸成や離脱防止等に寄与するとともに Cx 業務による収益獲得を図るものである。

2. Cx とは

本サービスにおける Cx¹⁾では既設建物の空調設備や電気設備などを対象として、設計時における目標使用エネルギー量を満たすよう詳細なデータ分析等により設備の運転状況を検証し、エネルギー削減量やコスト削減の目標を OPR（発注者要件書：Owner's

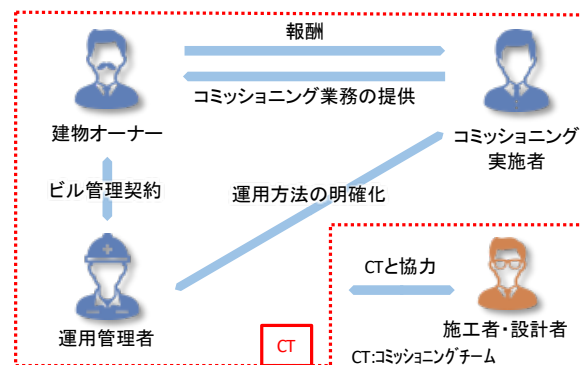


図1 Cx体制

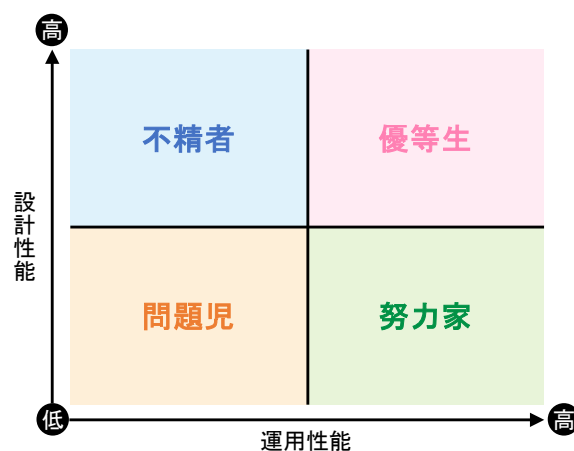


図2 Cxによる運用改善のイメージ

Project Requirement) としてまとめる。Cx を実施する会議体には CMT (Commissioning Managing Team) だけでなく、建物オーナーも巻き込んだ Cx チームとして構成することが肝要である。この Cx は、このように専門家や建物オーナーなど関係者による意思決定を行うことで、データの見える化による制御変更など専門的な運用改善を実施することが可能となり、本来設備が持つ性能を継続的に発揮させるプロセスのことを指す。

このような専門的な運用改善により、設計性能が良くても運用性能の悪い「不精者」を設計性能も運用性能も良い「優等生」としたり、両者とも悪く「問題児」とされる建物でも運用性能を向上させ「努力家」にできるような有効な手法である（図 2）。

また、設計時には明確な意図があり導入した設備が、運用段階において担当者間でうまく情報が引き継がれないことが散見され「この設備は何のためにあるのか?」、「どのように使うのが適正か?」ということを明らかにし運用に反映するのも、本サービ

スにおける Cx の目的とした。

本報では、Cx の実施事例と進捗状況およびその成果、今後の展開等について述べる。

3. Cx 事例とその成果

3.1 水蓄熱空調システムの Cx 事例

M 市庁舎（1989 年竣工：RC 造 5 階、地下 1 階、延床 4,886 m^2 ）は、水蓄熱空調システムを採用しており、2018 年度から地方公共団体カーボンマネジメント強化事業の一環として、2 年間に亘りシステム全体のリニューアル工事を実施した（図 3）。省エネ設備として、高効率空冷ヒートポンプチラー（118 $\text{kW} \times 4$ 台）や高効率 AHU、高効率ポンプ設備などを導入することで、空調設備の年間使用電力量を約 20%削減することができた。しかし、リニューアル後の運転においては、適正な蓄熱温度帯や蓄熱量が定まっておらず、冷温水ポンプが 24 時間運転することや、夏期に加湿運転をするなどの制御上の不具合も散見されることから、更なる使用エネルギー低減を目標に、工事後の空調設備を対象とした既存 Cx を実施し、運用改善を図ることとなった。OPR として、「建物全体の使用電力量と電力デマンドを約 10%削減」とした。

はじめに、エネルギー削減の即効性の高い熱源システムから運用改善に取り組んだ。蓄熱温度については、データ分析から目標温度より約 3 $^{\circ}\text{C}$ の乖離があることがわかり、調査により熱源の容量制御が原因ではなく、蓄熱時に 3 方弁が作動していないことが原因とわかった。また、蓄熱槽の容量は 550 トンだが、日空調使用熱量としては半分程度の容量で補えると推定できたため、目標温度で蓄熱することで必要な蓄熱量を確保する計画とした。さらに、熱源機が 2 台同時に動いて夜間デマンドとなっている状況を緩和するため、制御盤の改修計画に併せ熱源機の台数選択が可能となるように制御システムの変更を自治体担当者に提案し、具体的な設計仕様を工事業者に連携することで改修工事を円滑に進めることができた。これらの運用改善により、「熱源機の効率向上」、「搬送動力の削減」、「電力デマンドの削減」を同時に達成することができた（図 4）。

また、空調機側の 2 方弁の不具合による冷温水ポンプの 24 時間運転や夏期の加湿運転、VAV の不具合、空調機の外気給気過多などについても定期的な Cx 会議で報告し、改善方法を提示することで運用改善に繋げた。これらの Cx による運用適正化を実施する



図3 M 市庁舎建物外観

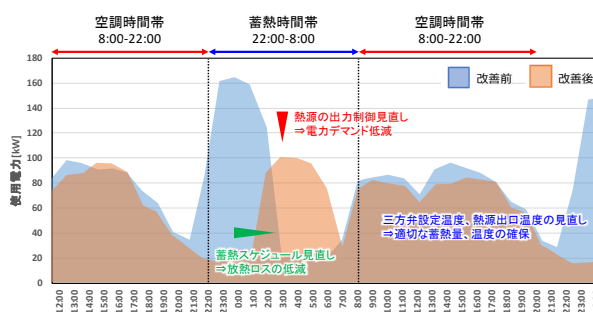


図4 水蓄熱の運用改善イメージ

ことで、空調設備の年間使用電力量を更に約 20%削減することができた。併せて、利用頻度の低かったクラウド BEMS を利用した見える化を提案することで、効果的なエネルギーマネジメントシステムを構築でき、運用時におけるデータの見える化と空調設備の一元管理が可能となった。

Cx を実施していなかった前年の実績と比較すると、建物全体の使用電力量を約 15%、電力デマンドは約 30%削減できており、OPR を達成した。

3.2 氷蓄熱空調システムの Cx 事例

K 市庁舎（2011 年竣工、S 造 5 階、延床 6,400 m^2 ）では、省エネ法対応、温暖化ガス排出抑制を目的とした省エネ施策として、高効率蛍光灯から LED 灯具への改修を検討していたが、BEMS データより導入されている設備が適正に運用されていないことが判明したため、2019 年より建物全体を対象とした既存 Cx を実施した（図 5）。この建物は、氷蓄熱ビルマルチ空調システム、自然換気システム、昼光利用型調光システムなどを導入している。OPR は「建物全体の使用電力量と電力デマンドを約 10%削減」とした。

空調設備について、各階の使用状況や人員密度が違っていることから時刻ごとの使用電力量や処理熱量等を計測し、氷蓄熱が必要な期間、システムを検討し

たうで氷蓄熱の運用改善を行った。氷蓄熱ビルマルチ空調システムは、夜間氷蓄熱槽に製氷し冷媒を介して冷熱を取り出すことで、空調運転開始時の負荷を低減し電力のピークカットに寄与するシステムである。しかし、製氷による蓄熱は、水蓄熱の冷水蓄熱運転と比較すると効率が悪く増エネになる傾向がある。このため、電力ピークカットによるデマンド低減と省エネを両立する手法として、各階の空調系統ごとの氷蓄熱運転の必要性を空調負荷の観点から検討を行った。その結果、4 階を除き氷蓄熱運転をしなくとも、負荷的に対応ができるということから氷蓄熱運転を停止することとした。また、氷蓄熱運転を停止することで、停止前の 8 月 5 日と停止後の 8 月 13 日を比較すると 約 30% 省エネとなった (図 6)。しかし、空調運転開始時のピークカットができなくなるため、系統ごとの空調の運転開始時をずらし、段階的に起動することで電力デマンドを低減することが可能となり省エネとの両立を図った。

換気設備については、職員の使用状況と CO₂ 濃度の計測結果より、全熱交換器の適正な運転台数、スケジュールを設定した。また、自然換気システムに関しては、ビルコン上は中間期の運転を許可している設定になっているが BEMS データを確認すると、竣工後一度も稼働していないことが判明した。自然換気システムにおいては設計図書にパラメータ設定などが一切記述されておらず、設定値も不明であった。建築工事で設置された屋上排気窓と各階のエコレータ、設備工事で設置された制御盤やセンサ類、ビルコンと多岐にわたっており、担当者やビル管理者も把握していない状況であった。このため、主制御盤から末端の制御盤までを現地で目視確認し、調査結果や設計図書から制御方法を推定し、パラメータを再設定することで設計思想に準ずる運転を試みた。結果としては、末端の制御盤内に設置されているデジタルコントローラ内に制御用のシーケンスが格納されているのを発見し、設定値が中間期の気象条件と大きく乖離していたため、実状の温度差で作動するようにチューニングを行った。このように、設計図から設備の詳細が読み取れず、高価な建設費をかけた設備が建物引き渡し時から一切利用されていない事例は他にも多く散見されており、Cx による運用改善により適正な運転が行えるようになる場合がある。設計時から Cx のプロセスにより設備ごとの機



図5 K 市庁舎建物外観

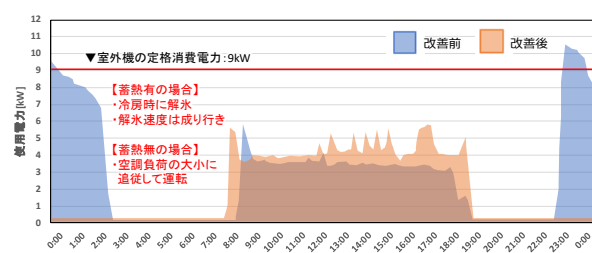


図6 氷蓄熱の運用改善イメージ

能性能確認を行い、設計思想通りの運転ができることを確認したうえで、建物所有者に引き渡しを行うことが肝要である。

電気設備においては、各部署によって照度設定が大きく違っており、高い箇所は 1,000lx を越える場所も多く存在しており、基準照度を 800lx から 600lx に再設定することでエネルギー削減を試みた。本建物の照度制御は中央監視盤で建物全体を一括で設定できるようになっており、人間の感覚で暗くなったことがわからないよう 1 週間に 50lx ずつ照度を下げていき、1 か月程度の期間をかけ徐々に照度変更を行った。この結果、照明設備に使用する電力量の 10% を削減することができた。

これらの運用改善により、Cx を実施していなかった前年の実績と比較し、使用電力量を約 10%、電力デマンドは約 20% 削減でき、OPR を達成することができた。運用担当者も各設備が何のために設置されてどのように運用するのが適正なのかということを理解しておらず、情報も引き継がれていなかったことから、建物全体の設備運用マニュアルを作成し、担当者が交代したとしても適正な運転が継続できるような仕組みを整備した。

3.3 新型コロナ対策としての Cx 事例

新型コロナウイルスの影響により、換気量の増大、空調範囲の拡張など建築設備の運用は大きく変化し

ており、またこれに伴い執務者の生活様式も大きく変化している。いわゆる「3密」を避けるために換気行動が推奨されているが、窓開け等による過度な換気は空調の増エネにつながるだけでなく、夏期の熱中症リスクを高めることや冬期の湿度低下をまねく等、室内環境の悪化による在室者の健康への影響が懸念されている。このため、無線式環境モニタリングシステム Energy Minder²⁾を新規開発し、新型コロナ対策としてのCxに取り組んだ(図7)。対象施設は前項のM市庁舎とその附属建物とし、空調設備のCxに併せて2020年10月から実施した。このシステムは、親機となるデータ収集ユニットとセンサ子機で構成されており、無線通信により子機で計測したデータを親機に集約し、インターネットを通じて遠隔から監視ができる。子機にはCO₂濃度の他に温度、湿度、体温、電流など任意のセンサを接続し、計測状況に応じたシステム構築することが可能である。

今回は、子機を各階1～2台ずつ設置し、子機表面にはLEDランプを設置することで職員に換気状況を示し、必要に応じて換気行動を促すこととした。Cxの目標として、CO₂濃度を1,000ppm以下とするように風量やダンパーを調整し、換気量の確保と空調消費エネルギーの抑制の両立とした。

この建物では執務者密度を緩和するため土日も建物を通常通り使用する計画としており、空調の稼働時間が例年に比べ約40%増加したが、これらのCxの実施により前年の実績と比較すると、使用電力量を約2%の微増に抑えることができた。

3.4 小学校教室の換気の見える化事例

新型コロナのオミクロン株による学校施設でのクラスターが全国的に発生していたこともあり、教室において適正な換気量を確保し「密閉」を防ぐことが重要とされている。しかし、地方自治体の小学校では、機械換気設備が無く窓開け換気のための校舎もまだ数多く存在しており、このような校舎では、室内温熱環境の悪化や大幅な空調エネルギー増加となるような窓開け換気、また窓開けの抑制による換気不足などの問題が危惧される。このような背景から、文部科学省の周知³⁾では、CO₂濃度のモニタリングシステムを利用した換気状況の見える化と換気設備の運用の適正化が推奨されている。

本事例⁴⁾では、換気設備の無い教室に Energy Minder を導入し、全教室のデータ計測と各教室にお

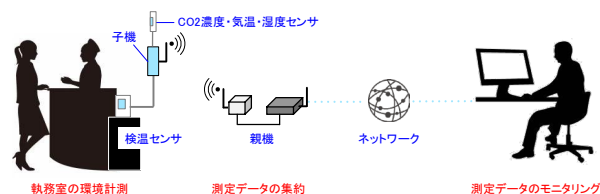


図7 無線式環境モニタリングシステム

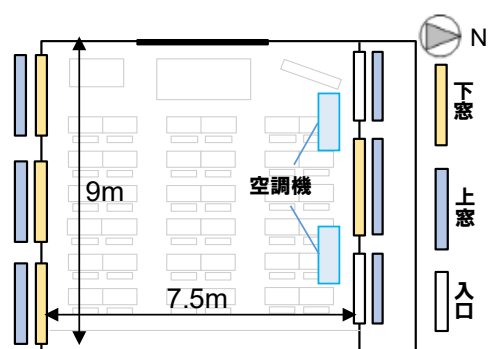


図8 教室の平面図



図9 センサの取付状況例

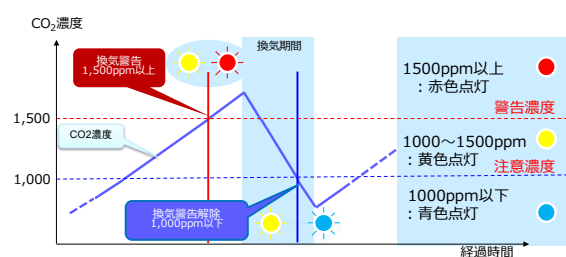


図10 LED点灯色

けるLED表示を利用したCO₂濃度表示による換気行動変容を促すことで、換気状況の改善と省エネルギー化を試みた。また、データ分析やアンケート調査を通じて、各教室における窓開け換気の定量化と教職員および児童の換気行動の状況を把握し、同様の校舎に対しても水平展開できるような知見を収集することとした。

対象とした学校は高松市立K小学校とした。校舎

は南北2棟あり、南校舎は昭和30年代竣工のRC造3階建、北校舎は昭和50年代竣工のRC造4階建である。各学年3学級の編成となっており、全18学級と職員室の計19室を計測対象とした。なお、1学級あたり30～35名程度の児童が在籍しており、教室の大きさは7.5m(幅)×9m(奥行)×3m(高さ)である(図8)。センサ位置は、教室後方の中央部分の高さ約2mの1か所とした(図9)。

なお、換気行動変容を促すために、子機は3色LEDランプを具備しており、今回はCO₂濃度の変化によって、青(1,000ppm以下)、黄(1,000ppm～1,500ppm)、赤(1,500ppm以上)に点灯するようにした(図10)。

冬期の計測期間は2021年12月2日～2022年2月17日とした。LED表示の有無による窓開け換気状況と行動変容の差異を評価するため、約3週間ごとに①LED表示無(12月2日～12月27日)、②LED表示有(12月28日～1月21日)、③LED表示有：蔓延防止適用期間(1月22日～2月17日)の3期間とし、各学年3学級の平均値を算出した結果を図11～13に示す。なお、この3期間中の在室児童数に大きな変動はなく30名前後であった。

①の期間において、5、6年生の教室では学校環境衛生基準である1,500ppmを超える場合が散見された。各学級のデータでは最大2,552ppmを計測する教室もあった。4年生以下では、1,500ppmは超えないものの新型コロナウイルス対策として厚生労働省が推奨する建築物衛生法等で定められる1,000ppm以上となる時間帯もみられた。②の期間においては、①の期間と比べ全学年において明らかに平均濃度が低下しており、概ね1,000ppm以下となっていることがわかる。③の期間においては、②よりも更に低くなる傾向がみられた。この結果より、LED表示により何らかの換気行動変容が起きたと推測される。③の期間における換気回数をCO₂濃度から逆算すると4回程度と推定され、機械換気設備が無い教室においても、厚生労働省が推奨する2回以上を満たす結果となった。

また、空調用ガス使用量は、前年度同時期より12月は65%増加していたにも関わらず、1月は平均気温が1℃以上低かったが25%低減されており、各教室の換気状況とエネルギー消費量についても、今後詳細に分析したい。

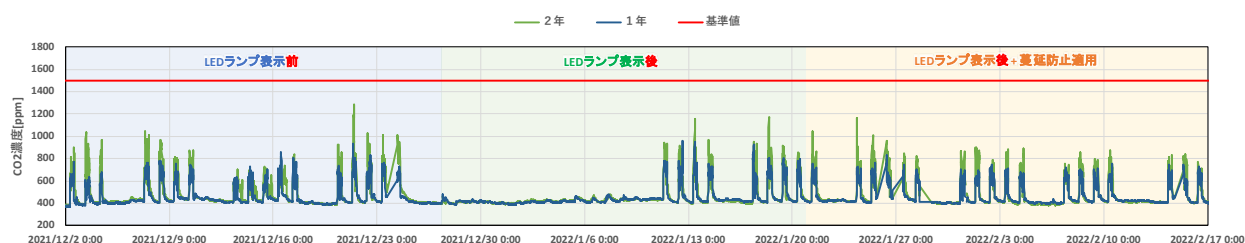


図11 室内CO₂濃度の推移(1、2年生)

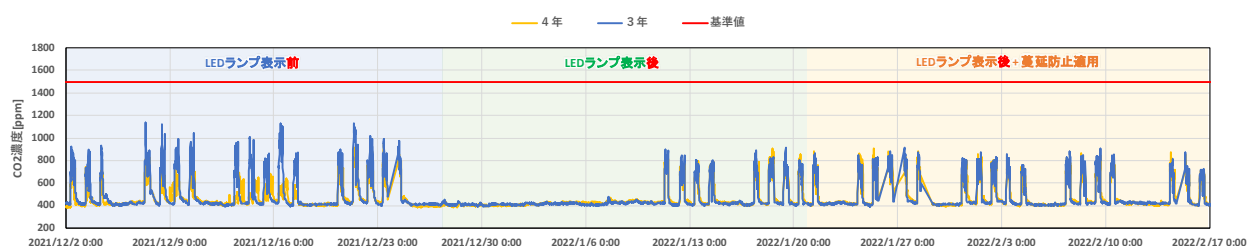


図12 室内CO₂濃度の推移(3、4年生)

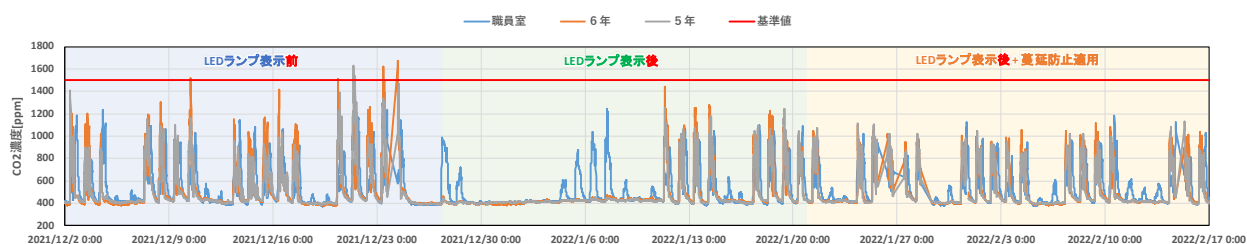


図13 室内CO₂濃度の推移(5、6年生)

3.5 給食センターにおける Cx の事例

K 市給食センター（2014 年竣工：S 造 2 階、延床 2,023m²）は、電気式厨房設備を採用しているオール電化給食センターである（図 14）。「建築設備設計基準」による設計では、電気式厨房設備の換気量基準が場合によっては有毒ガスが発生する燃焼式厨房設備とほぼ同等であり、運用上過大設計となることが散見されている。換気量の増大は空調エネルギーと建設費用の増大と関係しており、換気の増大が、ときに HACCP などの管理基準温度に達することができないなどの調理環境上の弊害も引き起こすことが指摘されている。平成 30 年度版までこの基準が採用されてきたが、令和 3 年の改訂では記述が変更され、電化厨房は「厨房の使用条件、厨房器具、フード形状等に応じた換気量の算定が可能」となる旨のただし書きが追加されることとなった。

以上の背景から、K 市給食センターにおいても、Cx による換気量の適正化と換気空調エネルギーの削減が可能と考え、OPR を「建物全体の使用電力量の約 10%削減および電力デマンドの 30kW 削減」とし、2022 年 6 月より計測を開始した。

現状の風量を把握するために、フード面での面風速とフード式風量計による風量計測を行った。Cx による運用改善後の面風速が、エレクトロヒートセンターの推奨値である 0.25 [m/s] 程度の範囲となるように、INV 値の設定値を決定した。なお、面風速は INV 値に比例、エネルギーは 3 乗に比例することから、面風速から逆算して求めた。

換気設備の消費電力について、換気能力の高い洗浄室（定格電力合計：7.2kW）、調理室（15.0kW）、炊飯室（7.7kW）の電力量を運用改善の前後で比較する（図 15）。代表週における月～水の 3 日間で 3 系統とも 50%以上の削減を確認した。計測しているファン 12 系統の合計では、48.1%（68kWh）の削減を達成した。

空調設備の消費電力について、空調能力の高い洗浄室（定格電力：15.4kW）、調理室（22.8kW）、炊飯室（15.4kW）の電力量を運用改善の前後で比較する（図 16）。代表週における月～水の 3 日間の日中平均気温は運用改善後の方が 0.6℃高いにもかかわらず、洗浄室は 16.9%減、調理室：13.1%減であった。

また、炊飯室は 12.3%増となっていたが、炊飯メニューによっても稼働時間の差が大きいことによるものと考えられる。この稼働時間の観点は換気設備



図14 K 市給食センター建物外観

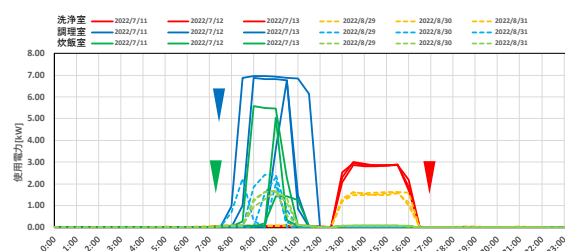


図15 換気設備消費電力の変化

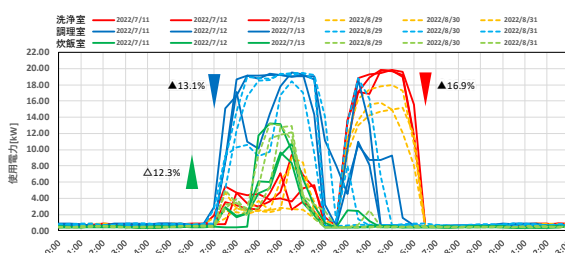


図16 空調設備消費電力の変化

についても同様である。計測している 8 系統のビルマル空調合計では約 9%（111kWh）の減であった。

本施設の Cx は 2 年間の計画となっており、デマンドが発生する冬期に関しても、空調、換気設備だけでなく給湯設備を併せた運用改善など引き続き検証を行う予定としている。

4. おわりに

本報では、本サービスの概要と実施内容、その成果について報告した。サービルを開始し数年経った現在では、サービス開始時に対象とした自治体の庁舎における省エネルギーおよび省コストを目標とした Cx だけでなく、新型コロナ対策として庁舎や学校の空気環境の見える化、オール電化給食センターの空調・換気設備の Cx など様々な用途の施設に取り組んでいる状況である。

今後は、これまで取り組んだ用途以外にも、温浴施設やエネルギー使用密度の高い病院施設などを対

象としたサービスとして展開していきたい。

【謝辞】

本サービスの実施にあたり、(株)四国総合研究所
中西美一氏には多大なるご支援・ご協力をいただきました。
ここに謹んで謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 建築設備コミッショニングマニュアル（第3版）、NPO 建築設備コミッショニング協会、2016
- 2) 松田、天野、藤井：無線式環境モニタリングシステムの開発、空気調和・衛生工学会大会学術論文集（福島）、2021.9
- 3) 小学校、中学校及び高等学校等における新学期に向けた新型コロナウイルス感染症対策の徹底について、文科省、2021
- 4) 天野、松田、藤井、田島：小学校を対象とした環境モニタリングシステムによる換気行動の変容に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術論文集（神戸）、2022.9

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：山崎崇寛

論 文：「地震発生直後におけるインフラ企業が有する事務所建物を
対象とした被害推定手法に関する研究」

論文提出先：香川大学

取 得 学 位：博士（工学）

取 得 日：2022 年 9 月 30 日

取得者略歴：

2011 年 3 月	東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻博士課程前期修了
同年 4 月	四国電力㈱入社 建築物の保守、耐震評価に関する業務に従事
2018 年 8 月	㈱四国総合研究に出向 土木技術部に配属 地震発生後の建物被害推定手法および建築物の耐震評価に関する 研究に従事
2022 年 9 月	香川大学大学院工学研究科 安全システム建設工学専攻博士後期課程修了 現在、土木技術部 副主席研究員



最後に執筆者、編集ならびに審査にあた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 117 号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 塚 本 正 敏
(株)四国総合研究所

発 行 (株)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