

フォークリフト向け第2世代燃料電池システムの開発 Development of the Second Generation Fuel Cell System for Forklift

山本 哲太郎^{*1} 下築 祐介^{*1} 西村 幸史^{*1} 富本 尚也^{*1} 垣見 洋輔^{*1}
Tetsutaro Yamamoto Yusuke Shimoyana Koji Nishimura Naoya Tomimoto Yosuke Kakimi

*1 トヨタL&Fカンパニー H2プロジェクト

要旨

当社は2016年11月より、日本で初めて(当社調べ)FCフォークリフトの販売を開始した。今後さらに水素社会実現にむけた貢献をするためスタック寿命向上と大幅な原価低減を図った第2世代FCシステムを開発、1.8トン積FCフォークリフトに搭載し2022年度中に販売予定である。

キーワード:FC、水素、FCフォークリフト

Abstract

We started the sale of the Fuel Cell forklift (FC forklift) in November, 2016 for the first time in Japan. We developed the second generation FC system which planned stack life improvement and large cost price reduction in future to do contribution for the hydrogen society realization more. We are going to put it on 1.8 tons FC forklift of L/O in 2022.

Keywords: FC, Hydrogen, FC forklift

1 はじめに

世界的にもカーボンニュートラルへの動きが加速しているなか、当社では、2004年よりトヨタ自動車(株)と共同で第1世代フォークリフト用燃料電池システム(以降FCシステム)の開発を開始し、2016年11月に2.5トン、2019年9月には1.8トン積FCフォークリフトの販売を開始した。

今回、原価大幅減、スタック寿命2倍を図った第2世代FCシステムを開発、1.8トン積FCフォークリフトに搭載し2022年度中に販売予定である。本稿ではその取り組みを紹介する。

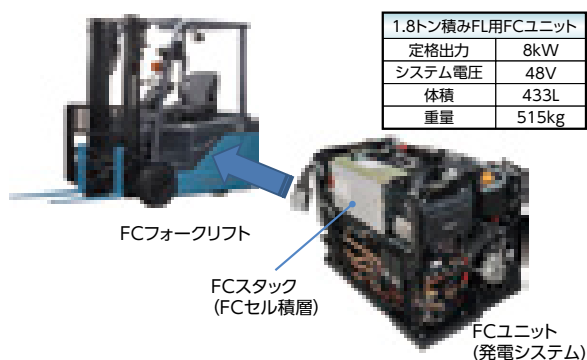


図1 FCフォークリフトとFCユニット
Fig.1 FC Forklift and FC Unit

ルの構成は、2枚のセパレータが電解質膜をはさむ構成になっている。セパレータと電解質膜の間には外部からガスを流し込むための溝や空間が設けられていて、一方に水素、もう一方に空気(酸素)を送ると電解質膜を介して反応が起こり、電気(および水)が発生する。

セル1枚で得られる出力は限られているため、実際に発電システムとして使用する際は必要な出力が得られるよう多くのセルを積み重ねてパッケージ化する。これを「FCスタック」と呼ぶ。出力を変更したい場合は、セルの積層数を変えることで調整が可能である。この締結構造については当社にて専用設計を行っている。

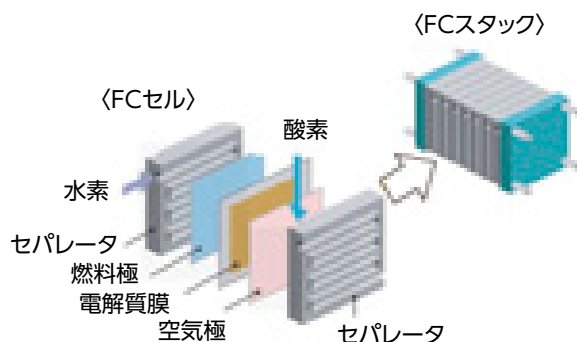


図2 FCセルの構成
Fig.2 Structure of fuel cell

2 フォークリフト向けFCシステム概要

1) FCセル

フォークリフト向けFCシステムで使用しているFCセルは、トヨタ自動車(株)FCEV(燃料電池車)「MIRAI」の第2世代セルを使用している。FCセ

2) FCシステム

図3にFCユニットのシステム概要を示す。心臓部であるFCスタックを中心に、水素供給系装置、空気供給装置、電気装置、冷却装置などで構成されている。これらをワンパッケージ化したユニッ

トがFCフォークリフトに搭載されている。FCユニットは、水素を燃料とし電気を発生するシステムであり、この発電システムを従来の鉛バッテリーに代わる動力源として搭載した電動フォークリフトがFCフォークリフトである。

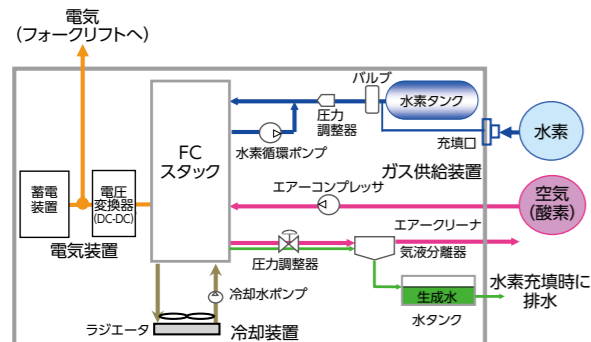


図3 FCシステム図
Fig.3 Fuel cell system diagram

3 第2世代FCシステム開発

第2世代FCシステム開発の主なコンセプトは下記のとおりである。それぞれについて述べる。

- ・FCユニット原価 第1世代比 大幅減
- ・FCスタック寿命 第1世代比 2倍
- ・稼働データ管理システムの海外対応(将来対応)

1) FCユニット原価 第1世代比 大幅減

(1) FC電圧変換システムの変更

FCスタックを構成するセル枚数を減らすことで大幅なコスト低減が図れる。セル枚数を少なくしたうえで、1.8トンFCフォークリフトに求められるシステム電力を供給するシステムを構築する必要がある。

第1世代はセル枚数82セルで構成して降圧DC-DCコンバータを用いる降圧システムであった。第2世代ではセル枚数を減らしてコスト低減するため、昇圧DC-DCコンバータを用いた簡易昇降圧システムを考案した。

項目	第1世代	第2世代
基本構成	FCスタック nセル → 電圧変換器 (DC-DC) → フォークリフト	FCスタック nセル → 電圧変換器 (DC-DC) → フォークリフト
システム	降圧システム	簡易昇降圧システム
DC-DC	降圧式	昇圧式
セル数	82	58
考え方	「スタック電圧>蓄電装置電圧」の関係が必要 要求出力以上のセル数82セルで構成	簡易昇降圧を実現することで、要求出力にあったセル数(82→58セル)にしてコスト低減

図4 FC電圧変換システムの世代比較
Fig.4 Generation comparison of the FC voltage conversion system

従来、昇降圧を実現するためには昇圧式と降圧式の2つDC-DCコンバータが必要であったが、第2世代では今回1つの昇圧DC-DCコンバータで昇降圧を実現している。昇圧式DC-DCコンバータによる昇圧動作だけでなくDC-DCコンバータ上アームダイオードに電流(10~20A)を流すことで降圧動作を行う独自のシステムである。

これは燃料電池の低電流域における電圧ドロップ特性から小電流・小電力で降圧可能なことを利用している。なおセル枚数を減らすことはシステム効率には不利な条件となるが、トヨタ自動車(株)第2世代セル採用による発電IV性能向上や発電制御の工夫等により第1世代同等の効率を達成している。

このセル枚数を減らした58セルスタックと昇圧DC-DCコンバータの組み合わせで簡易昇降圧システムを考案したことで、システム出力目標8.0kW確保したうえでコスト低減を達成した。

(2) 補機部品の変更

全部品について選定から見直し、要求仕様を満足しながらより安価な汎用部品や、とりわけトヨタ自動車(株)のFCEV部品を多数採用(そのまま、もしくは一部変更して採用)した。主要機能部品のFCEV部品流用比率は第1世代約20%に対し、第2世代では約40%と2倍に高めコスト低減を推進した。また各補機の部品点数を削減することでコスト削減できないかを検討した。一例をあげるとDC-DCコンバータアッシーにおいては、ダイオード・コンデンサ・電流センサ・リアクトルヒートシンクを廃止することで、変更前比で60%の原価低減を図っている。

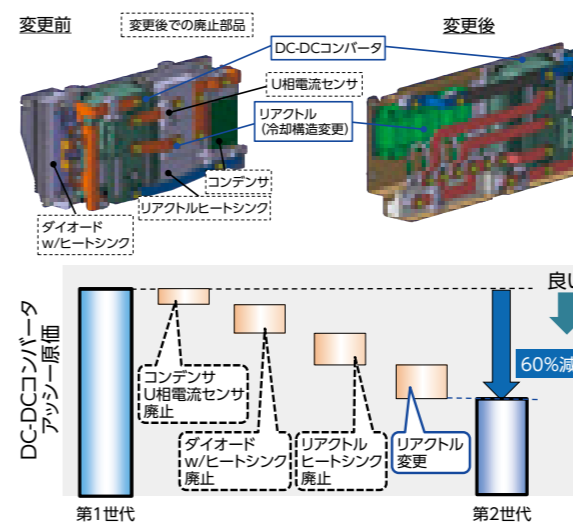


図5 DC-DCコンバータアッシーの原価低減策
Fig.5 The cost price reduction measures of the DC-DC converter assy

なお各補機については1.8トン向けだけでなく、2.5トン向けFCフォークリフトにも共通して使える部品を選定することに留意し今後のラインナップ展開も見据えた。

以上の取り組みによりFCユニット原価 第1世代比大幅減を達成した。

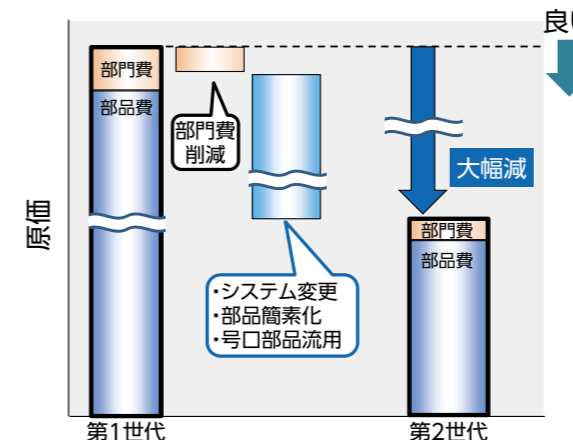


図6 FCユニット原価 第1世代比大幅減
Fig.6 FC unit cost price reduction

2) FCスタック寿命 第1世代比 2倍

(1) スタック劣化許容率の拡大

スタックは通常発電やアイドル、起動停止時に様々な要因で劣化し徐々に電圧が低下、必要なシステム出力を出せなくなった際に寿命となる。第1世代の降圧システムの場合「スタック電圧>蓄電装置電圧」と常に蓄電装置よりも高い電圧が必要なため許容できるスタック劣化量に制限があった。今回、簡易昇降圧システムを採用したことは、その制限をなくし、より多くの劣化が許容できるようになった。

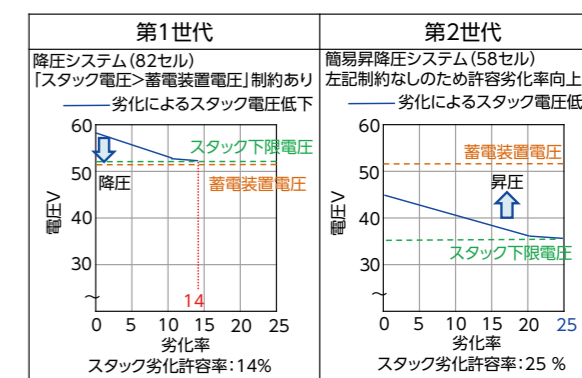


図7 スタック劣化許容率の世代比較
Fig.7 Generation comparison of the stack deterioration permission rate

市場データ解析によりお客様での使われ方をもとにしたスタック耐久パターンを策定し、シミュレーションを行った結果、簡易昇降圧システム採用でスタック劣化許容率が大幅に増加したことにより第1世代比でスタック寿命約1.8倍の見込みとなった。

(2) 新発電制御の開発

簡易昇降圧システム採用によりスタック劣化許容率が向上しスタック寿命が延長したものの、目標の第1世代比2倍には未達であった。スタック劣化要因を分析すると、アイドル時と発電時の劣化が大きいことが分かった。そこでアイドル時と発電時の劣化メカニズムに着目した。スタックはFCセルを複数枚積層して構成され、セルは水素と酸素を供給すると発電する。このとき投入された水素は膜に付着する触媒に触れることでイオン化して発電する仕組みである。

ポイントは水素分子が触媒に触れることでイオン化し発電するという点であり、基本的にこの反応が阻害されることが劣化につながる。セルは発電すると電位が変動するが、高電位(0.85V以上)になると触媒が溶出し、逆に下がる際には触媒が凝縮し粒径が大きくなる特徴がある。触媒溶出は高電位にさらされる時間が長いほど溶出率が増加し、その分触媒が減少、水素の反応率が低下し劣化につながる。また触媒凝縮は、凝縮した際に触媒粒径が大きくなるため、電位変動回数が増えるほど触媒が肥大化する傾向がある。肥大化すると反応面積が低下するため劣化につながる。

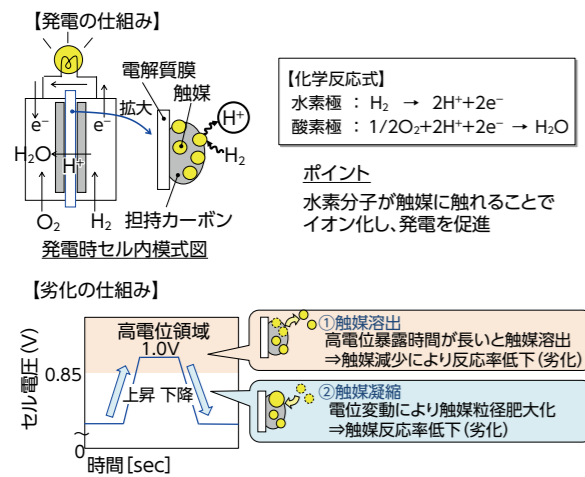


図8 アイドル時、発電時のスタック劣化メカニズム
 Fig.8 Stack deterioration mechanism at the time of idol and the generation

以上のことからアイドル時の高電位暴露時間の短縮化、また発電時の電位変動抑制という新しい制御を導入したので次に示す。

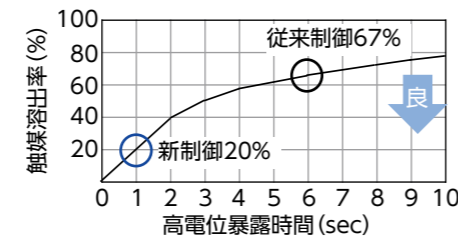
①アイドル時の高電位暴露時間の短縮化

アイドル時はエアコンプレッサを制御し、微量なエア(空気)を間欠的にスタックに供給することにより、劣化の少ない電圧領域に収まるよう制御する必要がある。

しかし従来制御だと最低エア流量100L/minとなるため、エア供給量の加減が難しく、高電位暴露時間が長くなってしまい触媒溶出率が大きかった。今回、エアコンプレッサによるエア供給にあたり、これまでの流量指令でなく回転角指令を用いてエアコンプレッサインバータのDuty算出、モータ角度をより細かく制御する新たな手法を構築した。

これにより約20L/minと従来の約1/5のエア流量で制御可能となり、高電位暴露時間も従来制御に比較し1/6に短縮。アイドル時のスタック劣化率も低減することに成功した。

【効果】
 高電位暴露時間の短縮化



スタック劣化率

電位変動頻度増加による凝縮率増という背反の一方、溶出率低下メリットが劣化率改善に大きく貢献

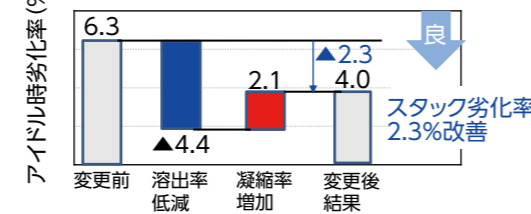


図9 アイドル時の高電位暴露時間短縮による効果
 Fig.9 Effect by high electric potential retention time shortening

②発電時の電位変動回数抑制

発電は車両負荷に応じてスタック発電量を段階的に制御することで低負荷/中負荷/高負荷の3段階で発電量切替を行っている。

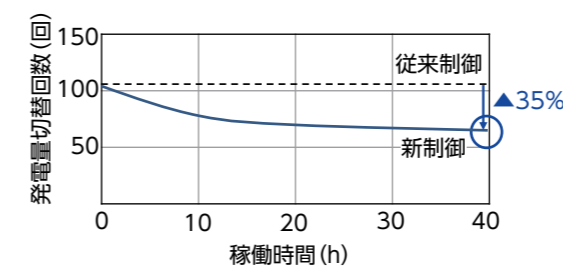
従来制御においては、この3段階の発電量は車両負荷に対応し固定値で発電量切替が行われる。

今回新たに車両負荷から直近40Hの平均発電量を算出し3段階のスタック発電量に適合する制御を構築した。

これによりスタック発電量切替頻度を35%低減し、発電時のスタック劣化率を抑制することに成功した。

【効果】

スタック発電量切替回数推移



スタック劣化率

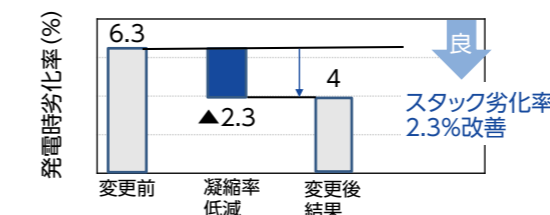


図10 発電時の電位変動回数抑制による効果
 Fig.10 Effect by the electric potential change number of times reduction

以上の取り組みによりFCスタック寿命 第1世代比2倍を達成した。

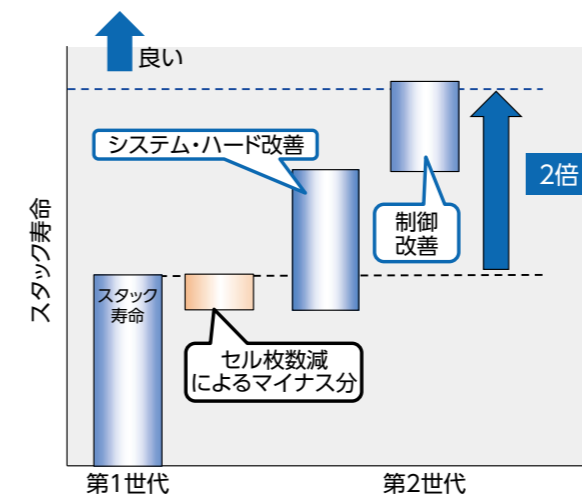


図11 FCスタック寿命 第1世代比2倍
 Fig.11 Extension of the FC stack life

3) 稼働データ管理システムの海外対応(将来対応)

第1世代FCシステムから開発データ収集目的での稼働データ管理システムを搭載していたが、国内専用回線・煩雑な手動解析が必要という制約があった。

第2世代では今後のサービス提供や海外展開を見据え、海外対応端末を採用。さらにFCシステムデータ収集をクラウド化することで解析処理の自動化を実現し、今後のサービス拡張が可能なシステムとした。

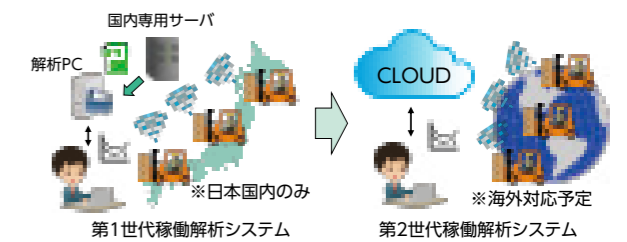


図12 稼働データ管理システムのクラウド化
 Fig.12 Cloud of the operation FC data management system

4 まとめ

FCシステム開発にあたっては原価第1世代比大幅減、スタック寿命第1世代比2倍を掲げ、部品・制御・システムの全てにおいて見直しを図った。今後は燃料電池フォークリフトのラインナップ展開を図るとともに、FCシステムの定置発電機・農機・建機等への展開も見据えて技術開発を継続していく。

■著者紹介■



開発の経緯と開発者の思い

2016年11月に、日本で初めて(当社調べ)燃料電池フォークリフト(以下、FCFL)の2.5トン積タイプを発売し、2019年9月に1.8トン積タイプを追加するなど、FCFLの製品開発に取り組んできた。今回、燃料電池タイプの産業車両の普及に向け、トヨタ自動車(株)MIRAI第2世代FCセルを搭載した低コストかつ寿命向上した燃料電池システムを開発した。この開発にあたっては、全部品再選定し、システム構造を根本から見直して刷新することで目標達成した。環境課題への対応は、年々その重要性を増しており、水素の利活用に向けた技術開発を積極的に取り組んでいきたい。