

世界初、燃料電池を動力源としたラバータイヤ式門型クレーンの開発と実証試験に成功

港湾荷役機器分野で、温室効果ガスの排出量削減に貢献

村山 哲郎・市村 欣也

世界的にサプライチェーンの脱炭素化に取り組む荷主が増える中、海陸の結節点である港湾においても、荷主や船社・物流事業者の要請に対応して港湾施設の脱炭素化に取り組み、競争力を強化していくことが必要である。コンテナターミナルで使用される荷役機器であるラバータイヤ式門型クレーン（以下、RTGC; Rubber Tired Gantry Crane）を対象に、従来のディーゼルエンジン発電機を燃料電池（FC; Fuel Cell）に換装し、荷役を模した連続試験により実証試験を行ったので報告する。

キーワード：荷役機器、クレーン、燃料電池、技術実証

1. はじめに

1950年代に登場した「コンテナ」は物資の輸送に大きな影響を与えた。コンテナという規格化された箱を使うことにより、安全、確実、安定的に貨物を輸送することができるようになったのである。世界のコンテナターミナルにおけるコンテナ取扱個数は、2010年から2020年までの10年間で1.5倍に増加している。特に東・東南アジア地域（日本を除く）の取扱個数は、2010年の約2億6千万TEU^{a)}から2020年には約4億1千万TEUに増加している。一方、2021年の国内港湾のコンテナ取扱貨物量は、2,246万TEU（前年比+3.7%）である。内貿コンテナ取扱貨物量は、455万TEU（前年比+6.6%）と大きな伸びを示し、コロナ禍以前の2019年を上回り、過去2番目に多い貨物量となっている¹⁾。

コンテナターミナルの主な役割は、コンテナ船からのコンテナ積み降ろしやコンテナを一時的に保管する機能を有するほか、国際貨物の輸出入時の保税地域としての役割も果たしている。コンテナターミナルにおいて、コンテナをコンテナ船に積み込むまでの間、あるいはコンテナ船から荷揚げした後に荷主が引き取りにくるまでの間、一時的にコンテナを蔵置しているエリアがコンテナヤード（以下、CY）である。コンテナターミナルの敷地面積の多くを占めるCYでは、コンテナを行き先別、輸出入別、実入り・空コンテナなどで区別されて配置、保管され、これにより、荷主

に対して効率的なコンテナの引き渡しが可能となっている。

CYはより多くのコンテナを蔵置するため、コンテナ間の隙間は最小限であり、積み上げ段数は概ね3～4段程度、海外では6段程度のところもある。そしてこのコンテナのハンドリングを行うための港湾荷役機器が、CY内に設置されたトランスファークレーンである。

トランスファークレーンには走行装置の違いにより、レール式、タイヤ式があり、タイヤで走行するクレーンが本報告のRTGC（写真-1）である。CYにおけるコンテナの蔵置作業にはRTGCが世界中で広く使用されている（写真-2）。

RTGCは、ラバータイヤ式の走行装置を有しているため機動性が高く、作業の繁忙度に応じて必要な蔵置エリアに配置できるため、より少ない設備投資で効



写真-1 ラバータイヤ式門型クレーンとFCPP

a) TEU (Twenty Equivalent Unit) : コンテナ取扱個数の単位 1 TEU は 20ft コンテナ 1 個のこと、40ft コンテナ 1 個を 2 TEU とするもの。



写真一 2 CYにおけるコンテナの蔵置作業

率的なコンテナターミナルの運営が可能となる。一方で、機動性を維持するため、RTGCの機上にディーゼルエンジン発電機セット（以下、DGset）を搭載し軽油を燃焼して電力に替え、荷役を行うための各種電動モータを駆動している。

2. 港湾荷役機器の脱炭素化と水素駆動 RTGC の必要性

CYにおいて、RTGCを含む港湾荷役機器から排出される二酸化炭素やディーゼル排気ガス中の有害物質が問題視されており、これまでは、ディーゼルエンジン排気ガス規制が順次強化されてきた。これに対して、DGset及び蓄電池を用いたハイブリッドシステムの採用や排気ガスフィルタの搭載による対策が行われてきた。更に近年では、海外において米国ロサンゼルス・ロングビーチ港にて2030年には港湾の排出ガスをゼロにするクリーン・エア・アクション・プラン（ゼロエミッション化）が推進されており、国内では国土交通省から水素等を活用したカーボンニュートラルポート（CNP）を形成することが報道発表されている（図一1）。加えて、1959年に姉妹港提携を行った

米国ロサンゼルス港と名古屋港では、2020年に「環境面の持続可能性と業務効率分野における、協議、議論、協力及び情報交換」のための覚書を締結し、同枠組みの中においても港湾荷役機器の環境対策の検討が進められている。

米国においてはクリーン・エア・アクション・プランに基づきロサンゼルス・ロングビーチ港の港湾管理者と、国内においてはカーボンニュートラルポート（CNP）形成の政策決定を受けて主要港湾の関係者と意見交換を行ってきたが、これらの実現には、港湾荷役機器のゼロエミッション化が不可欠であり、中でもコンテナターミナルにおける排出ガスの多くを占めているRTGCを、従来のDGsetによる軽油駆動から、FCパワーパック（以下、FCPP）を搭載し水素燃料に転換することで、ゼロエミッション化することが有効な対策となることが明らかになった。

3. RTGCの水素駆動化による港湾施設のCO₂排出削減効果

DGsetを搭載した従来のRTGCは、排気量14～16L、出力500～550kW程度のディーゼルエンジンを搭載しており、1時間あたり平均的に20Lの軽油を消費している（ハイブリッドタイプのRTGCの場合は上記の半分程度の軽油消費量）。RTGCはターミナルの稼働状況によるが年間4,000時間程度稼働しており、RTGC1機あたり年間80kLの軽油を消費している。環境省の公表資料によると、軽油使用によるCO₂排出係数²⁾は2.58トン/kLであるため、RTGC1機あたり年間80kLの軽油消費に対して206.4トンのCO₂を排出していることになる。現在、日本国内には約480機のRTGCが稼働しており、そのうち約20%がハイブリッドタイプのRTGCとすると下式より、1年間にRTGCが排出するCO₂の総量が89,164.8トンであると計算される。

$$(206.4 \text{ CO}_2 \text{ トン} \times 480 \text{ 機}) \times 0.8 + (206.4 \text{ CO}_2 \text{ トン} \times 0.5 \times 480 \text{ 機}) \times 0.2 = 89,164.8 \text{ CO}_2 \text{ トン}$$

RTGCを水素駆動化することで前述の排出量を大幅に削減することが可能となるため、港湾のコンテナターミナル及び周辺地域の環境改善に寄与することが期待できる。また、RTGCの水素駆動化が全世界に波及すると仮定すると、国内の約20倍、180万トン以上のCO₂削減効果が見込まれる。



図一 1 CNPイメージ（出典：国土交通省）

4. 水素駆動 RTGC の実用化への課題

(1) 燃料電池の特徴

RTGC を水素駆動化するためのキーデバイスが燃料電池である。図-2 に燃料電池セルの発電原理³⁾を示す。燃料電池は水素と酸素から電気化学反応でエネルギーを取り出すため、内燃機関に比べ、エネルギー効率が高いことが特徴である。

(2) RTGC のハイブリッドシステム

RTGC は、コンテナを吊り巻上速度を加速する際に最も多くの電力を消費するため、ピーク電力に対応可能な出力の DGset を選定する必要がある。従来の RTGC では 500 kW 級の DGset を搭載していた。また、コンテナを吊り巻下げる際には、その位置エネルギーによりモーターが発電し回生電力が発生するが、従来の RTGC ではこの回生電力を抵抗器で熱に変換して放出していた。近年ではこの回生電力を蓄電池（リチウムイオンバッテリー）に回収し、コンテナを吊り巻上げる際に再利用し DGset をアシストし DGset 定格出力を下げたハイブリッドタイプの RTGC が普及しつつあるが、同ハイブリッドタイプの RTGC の場合であっても、依然として 200 kW 程度の出力の DGset を必要としている。図-3 にハイブリッド RTGC の駆動系構成と FCPP（後述）に換装する機能を示す。

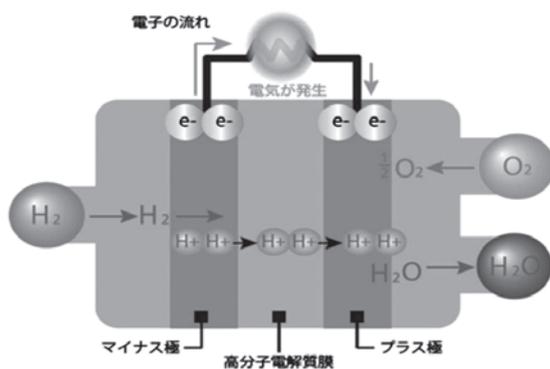


図-2 燃料電池セルの発電原理

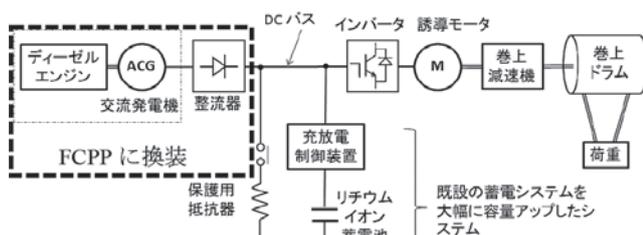


図-3 ハイブリッド RTGC の駆動系構成

RTGC を水素駆動化するために、燃料電池による発電パッケージ（FCPP）を開発した。FCPP の開発にあたり、以下の課題がある。

(3) FCPP 出力と回生エネルギーシステムとのバランス

燃料電池自動車（以下、FCV）では最大出力 120 kW 級の燃料電池を搭載したものが市販されている。この FCV の基幹部品を使うことで、費用対効果に優れ、一定以上の信頼性が期待できる燃料電池が FC モジュールとして外販されている。この FC モジュールでは定格出力を 60 kW とし、負荷変動を抑えた定常連続運転を行うことで、性能低下を抑制する仕様となっている。従って、従来のハイブリッドシステムの DGset より発電出力が小さい。

RTGC の荷役能力の観点では、最大出力を 60 kW で運転する場合、巻き上げ加速時のピーク負荷を賄えず蓄電池の充電率（SOC）が徐々に低下し、荷役作業を継続することが困難になることが考えられる。従ってピーク負荷に対応する蓄電池容量が必要だが、蓄電池を大型化すると、RTGC 上に相応の蓄電池の設置スペースが確保しなければならない。

(4) FCPP の搭載スペースに関する制限

CY において、RTGC は積み上げられたコンテナの間を走行している。そのため、機上に搭載される機器の張り出し寸法が大きい場合、隣接する RTGC や蔵置コンテナと接触する可能性がある。従って RTGC 機上に設置できるスペースに制限がある。

一方で、RTGC への水素の充填頻度を抑え、連続稼働時間を確保するため、RTGC 機上に連続稼働時間相当量の水素を貯蔵する水素タンクを設置する必要がある。水素タンクの貯蔵量は充填圧力が大きく影響を与える。具体的には、70 MPa の充填圧力を持つタンクは同じ大きさの 35 MPa のタンクよりも約 1.7 倍多くの水素を貯蔵できる。FCPP では、70MPa の充填が可能な水素タンクを採用し、スペースの制約に対応している。

以上のように、FC モジュールと蓄電池の出力、設置スペース全てで要求を満たすバランスを見つけなければ水素駆動 RTGC の実用化はできない。

5. FCPP のシステム構成

FC モジュール出力が 60 kW であるため、FC モジュールの出力のみでは荷役に必要な電力を得られないことから、大容量の蓄電池を搭載し回生電力を回収

することで、FC モジュール出力と回生エネルギーシステムとのバランスを確保した。

FCPP は FC モジュール及び FC モジュールを冷却する放熱ユニット、水素有効搭載量を確保した燃料供給システム（水素タンク）で構成される。図-4 に FCPP の搭載図^{b)}を示す。水素タンクを横置き4段で2ユニットとすることで、RTGC に搭載可能なサイズにすることができ、FCPP 内の必要なメンテナンススペースも確保した。

表-1 に FCPP の主要スペックを示す。また図-5 に燃料供給システムの基本構成を示す。タンクは最高70 MPa で水素充填され、燃料供給システム内の減圧弁と FC モジュール内のインジェクタにより二段階で減圧され、FC スタックに供給される。

6. 実証試験

実証試験の成果の一部を報告する。FCPP を搭載した RTGC で連続荷役試験を行い、連続荷役における蓄電池容量と FC モジュールの出力の検証を行った。連続荷役試験は、既存 RTGC の改造 (DGset を FCPP に換装、蓄電池の追加)した試験用 RTGC 用い、港湾でのコンテナ荷役を模した試験（実荷役に用いられているコンテナ、トラック・シャーシを使用）とし、図-6 に示す荷役サイクルを用いた。コンテナ重量は平均コンテナ重量である 20 トンを使用し、1 時間あたりのサイクル数は港湾でのコンテナ荷役で平均的な 20 サイクルとした。FC モジュール出力を 30 kW、40 kW で試験を行い、蓄電池 SOC の変化量を確認した。

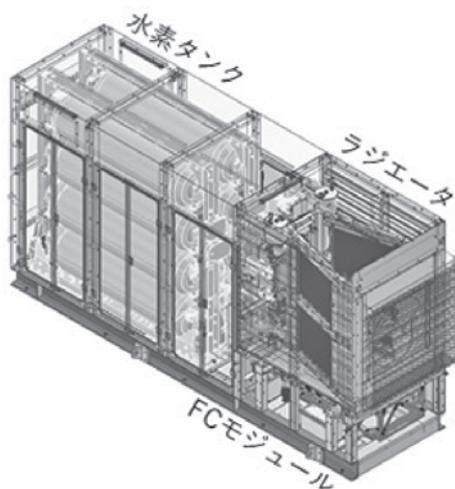


図-4 FCPP 内の機器配置

表-1 FCPP の主要スペック

Item		FCPP
Type		8 tanks
Rated power	kW	60
voltage range	V (DC)	400 ~ 750
Dimension (L×W×H)	mm	5,000 × 1,400 × 2,500
Mass	kg	6,800
Hydrogen capacity	kg	75.2 (水素有効搭載量は残圧によって異なる)
RTGCO perating time	hour	16
Ambient temperature	℃	-40 ~ 50
Atmospheric pressure	kPa	60 ~ 105
Allowable tank P.T range	MPa, ℃	0.98~87.6 MPa. abs/ -55 ~ 85℃
Hydrogen quality	-	ISO 14687-2 : 2012 (Type 1, Grade D)
Communication	-	SAEJ2799 (Infrared Communication)
Filling protocol	-	SAEJ2601-1, JPEC-S0003 H35, H70
Filling rate	g/sec	29 min (H70)

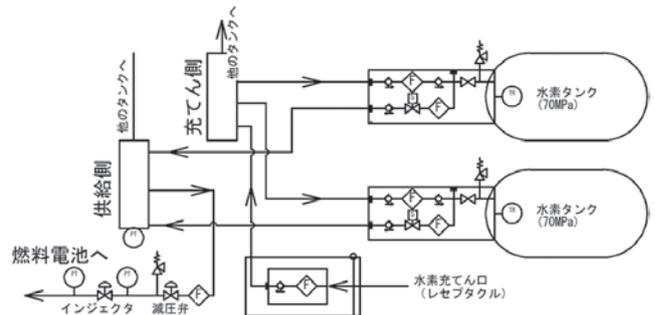


図-5 燃料供給システムの基本構成

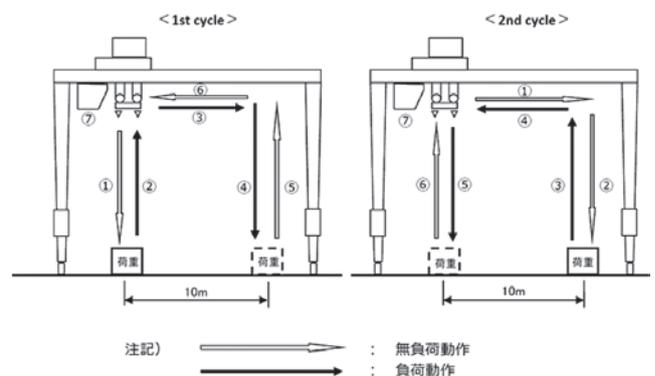
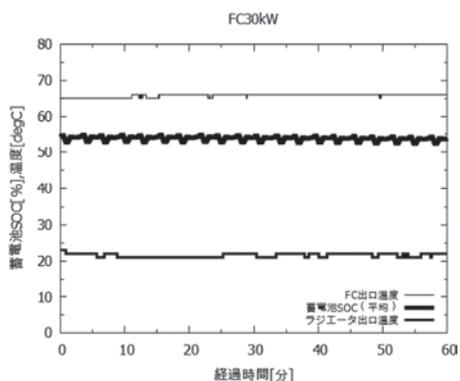


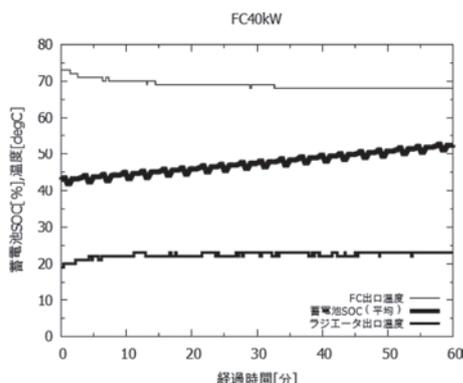
図-6 連続荷役試験の荷役サイクルのイメージ

各 FC モジュール出力での蓄電池 SOC のトレンドを図-7 及び図-8 に示す。連続荷役サイクル後の SOC 変化量は 30 kW 出力で 1.0% 増加, 40 kW 出力では 11.4% 増加が確認された。

b) 図は 24 年度からロサンゼルス港で実荷役環境下での検証を行う FCPP



図一七 FCモジュール出力30kW試験結果



図一八 FCモジュール出力40kW試験結果

連続荷役試験の荷役負荷変動に対して、蓄電池SOCが変動または低下しないことから、FCモジュールと回生エネルギーシステムとのバランスがとれており、本試験は実際の荷役を模した負荷条件であるが、従来のRTGCと同等の荷役能力を達成していることを確認した。

7. おわりに

本報ではRTGCのDGsetをFCPPに換装しRTGCを水素駆動化した。その後、実際のコンテナターミナルでの荷役を模した試験を行い、水素駆動RTGCが

従来のDGsetを搭載したRTGCと同等の荷役能力であることを報告した。

水素駆動RTGCは24年度からロサンゼルス港において、実荷役環境下での検証を行う予定である。NEDO事業の一環として、豊田通商などの取り組みに参画し2026年3月まで、港湾荷役機器とドレージトラック（コンテナで海上輸送された貨物をコンテナのまま陸上輸送するトラック）を燃料電池により水素駆動化し、港湾における地産地消型クリーン水素サプライチェーンを社会実装し、実証を行う計画である。

最後に、この成果は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP100182)「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」の結果得られたものです。深く御礼申し上げます。

JICMA

《参考文献》

- 1) 国土交通省, 流を取り巻く動向について <https://www.mlit.go.jp/common/001354692.pdf>
- 2) 環境省, 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calculiran_2020_rev.pdf
- 3) 折橋信行, トヨタにおけるFCV開発について, 低温工学, 2020, 55巻, 1号, p.10-13

【筆者紹介】



村山 哲郎 (むらやま てつろう)
 (株)三井E&S
 成長事業推進事業部
 脱炭素ソリューション部
 ゼロエミ・システムグループ長



市村 欣也 (いちむら きんや)
 (株)三井E&S
 成長事業推進事業部
 マーケティング部
 マーケティンググループ長