

港湾荷役機械の電動化による効率化の検証

淵ノ上 篤史¹・北地 幸二²・飯田 輝智³

¹正会員 国土交通省 中部地方整備局（〒460-8517 愛知県名古屋市中区丸の内二丁目1-36）

E-mail:fuchinoue-a852a@mlit.go.jp

²非会員 名古屋ユナイテッドコンテナターミナル株式会社（〒455-0037 愛知県名古屋港区名港2-9-27）

E-mail:kitachi@nuct.co.jp

³非会員 名古屋港運協会（〒455-8650 愛知県名古屋港区入船二丁目2-28）

E-mail:terumoto.iida@meiko-trans.co.jp

コンテナ・ターミナルにおいて荷役作業の中核をなすRTG（Rubber Tired Gantry Crane）の効率的な運用が望まれる。軽油を燃料とするエンジン型RTGは、給油や定期的な維持点検に時間を要し排出ガスも無視できない。著者らは、RTGの運用効率の向上のため、エンジン型RTGに給電機能を付加し外部電力でも駆動するハイブリッド型RTGを開発した。名古屋港におけるエンジン型RTGとハイブリッド型RTGの運行実績から、ハイブリッド型は1台当たり給油・維持点検時間を102.5時間削減した。つまり、年間の運転時間3,258時間を102.5時間増加、取扱能力も62,500個から1,966個増加できると試算した。CO₂は61%、NO_xは93%削減できた。ハイブリッド型は初期投資は嵩むものの、運用後16年でエンジン型の経費を下回することも確認した。

Key Words : Rubber tired gantry crane, Electric RTG, Hybrid RTG, Container terminal

1. はじめに

コンテナ・ターミナル（以下「CT」と略す）における荷役作業は、主に本船荷役と搬出入荷役に分類され、各々の荷役では、いくつかの荷役機械を稼働し作業を行っている。荷役機械の中で稼働率が高いものとして、RTG（Rubber tired gantry crane）がある。RTGは、トレーラーに積載されたコンテナをヤードに卸す作業、若しくは、ヤードに蔵置されたコンテナをトレーラーに積む作業を担務している。

RTGは、軽油を燃料とするエンジンで発電機を稼働させ、その電力で移動や荷役作業を行っている（以下、このタイプのRTGを「エンジン型RTG」と称す）。エンジン型RTGは、給油やエンジンのメンテナンス頻度が高く、時間を割かれる結果、荷役作業の効率が悪くなり、CTの生産性を低下させる事態を招くこととなる。

この課題を解消するため、中部地方整備局は、名古屋ユナイテッドコンテナターミナル株式会社（以下

「NUCT」と略す）及び名古屋港運協会と連携し、2011年2月に名古屋港鍋田ふ頭CTにおいて、エンジン型RTG24基の電動化を行い、効果の検証を始めた。なお、この電動化は、エンジン型RTGに搭載していたエンジン

と発電機を存置した状態で行っている（以下、このタイプのRTGを「ハイブリッド型RTG」と称す）。その後、NUCTによりエンジンの無い電力供給のみで稼働するRTG（以下、このタイプのRTGを「完全電動型RTG」と称す）14基が導入され、現在は鍋田ふ頭CTにある全てのRTGの電動化が完了している。現在も試験運用中であるが、これまでに、作業効率の向上や、温室効果ガス（CO₂・NO_x）の排出量の削減を確認できた。

本稿では、まず、ハイブリッド型RTGの開発コンセプトを紹介する。次に、名古屋港鍋田ふ頭においてエンジン型、ハイブリッド型の試験運用により給油及びメンテナンス時間の削減時間を調査した。それを基に稼働時間の増加、荷役処理能力の向上、および環境負荷の低減量を試算した。また、エンジン型、ハイブリッド型、完全電動型の3つのRTGのコスト比較を行い、ハイブリッド型、完全電動型の優位性を確認する。最後に災害時における強靱さや、復旧のしやすさについても検討した。

2. ハイブリッド型RTGの開発目的

(1) エンジン型RTGの課題

エンジン型 RTG の課題として、①給油に時間を要するため、荷役できない時間が発生してしまうこと、②発電機稼働のため、エンジンの定期的なメンテナンス（オーバーホール）が必要となること、③燃料となる軽油のコストが比較的高いこと、④軽油によるエンジン稼働のため CO₂ や NO_x が発生し環境負荷が大きいことが挙げられる。

これらの課題を解消するために、エンジン型 RTG の電源を、RTG 搭載の発電機から外部電源に切り替えることで、荷役効率の向上、環境負荷の低減を目指すこととした。

(2) ハイブリッド型 RTG の開発コンセプト

ハイブリッド型 RTG は、以下の 3 点をコンセプトとして開発を行った。

a) 荷役効率向上

電動化前の 2010 年に調査した結果によると、鍋田ふ頭 CT における、エンジン型 RTG1 台当たりの年間稼働時間は 3,426 時間、給油回数は 186 回であり、およそ 18.4 時間の稼働毎に給油を行っていた。1 回の給油に要する時間は平均 0.5 時間であったことから、年間 93 時間を給油作業に費やしていた。また、エンジンメンテナンス（オーバーホール）は、エンジン稼働が 6,000 時間に到達した際に実施しており、1 回の作業で 7 日を要する。従って、2 年に 1 回の頻度で 56 時間（8 時間稼働×7 日）をメンテナンスに費やしていた。

そのため、動力をエンジン発電から外部電力にすることで、エンジン稼働時間を減らし、給油とメンテナンスに割かれていた時間を荷役時間へ還元する。

b) コスト縮減

2010 年のコンテナ取扱個数 1,577,378 個に対し、エンジン型 RTG 全 24 台の使用した軽油は 1,573,200 リットルであった。これは取扱コンテナ 1 個当たり、ほぼ 1 リットルの軽油を使用している。軽油単価を 77 円/リットルと仮定すると、年間 1 億 2,114 万円の燃料コストが掛かっている。

ハイブリッド型 RTG の導入により、動力をエンジン発電から外部電力とすることで、軽油使用量を削減し、コスト縮減を図る。

c) 環境負荷低減

エンジン発電から外部電力での稼働とすることで、温室効果ガス（CO₂・NO_x）の排出量を削減し、環境負荷の低減を図る。

3. ハイブリッド型 RTG の概要

(1) 電動化の概要

図-1 に鍋田ふ頭 CT を示す。RTG の電動化の方法は、国内の実績がほとんどなかったため、海外の事例等を参考に検討を行った。電動化の方法として、RTG より高い位置に配線を行い、RTG の頂部から給電する「Pantograph（パンタグラフ）方式」、RTG にケーブルリールを設置し、移動の際は電力ケーブルの巻き取り、若しくは巻き出しながらその電力ケーブルを介して給電を行う「Cable reel（ケーブルリール）方式」、RTG の稼働レーンに、電力を供給する母線（Bus）として金属製の導体棒（Bar）を設置し、RTG へ給電を行う「Busbar（バスバー）方式」等がある。今回は、鍋田ふ頭 CT の施設特性等を勘案し、①レーンチェンジが可能であること、②1 レーンに複数の RTG の配備が可能であること、③通常荷役に支障を与えず地上設備の整備が可能であること等の理由より「Busbar 方式」を採用した。

Busbar 方式の仕組みとして、まず、外部電力を敷地内の特別高圧受変電設備に引き込む。次に、地下配管により各レーン手前のヤード変圧器に送電する。そして、ヤード変圧器で降圧した電力を Busbar に送電し、給電台車を經由して RTG 本体に給電される（図-2）。なお、給電時は RTG と給電台車はワイヤーで連結された状態であり、RTG が同一レーンを移動する際は、Busbar に沿って RTG と給電台車が一緒に移動する（写真-1）。

ただし、レーンチェンジのための移動を行う際は、外部電源による移動が出来ないため、レーン出入りの際に地上作業員がプラグの脱着を行うこととした（写真-2）。

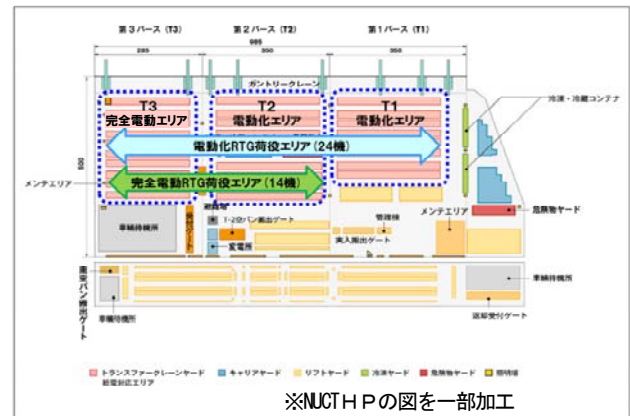


図-1 鍋田ふ頭CT施設配置図

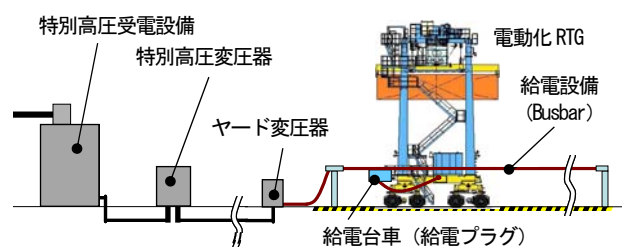
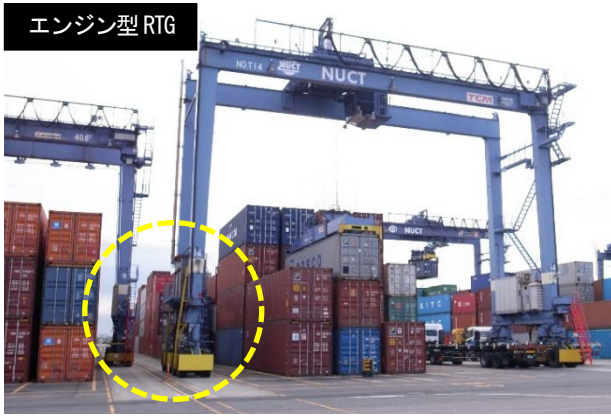


図-2 Busbar方式による給電イメージ



早期復旧が可能となる。また、基礎ブロックは凹凸を組み合わせることで一体化され、転倒しにくい構造とした（写真-3）。

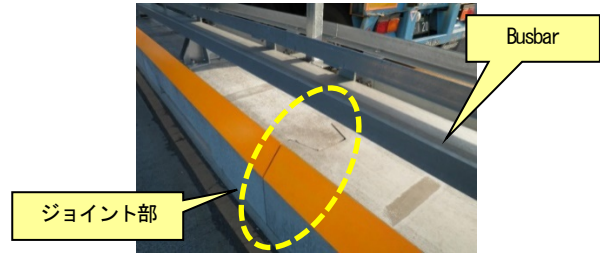


写真-3 Busbarの基礎ブロック

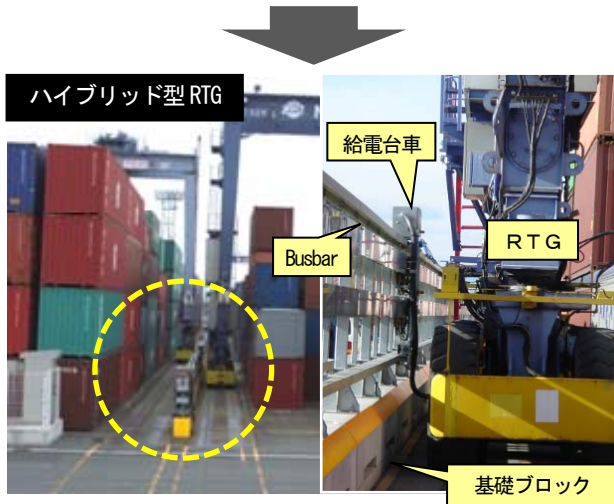


写真-1 電動化したRTG

4. ハイブリッド型RTGの試験導入による効果の検証

ハイブリッド型 RTG 導入による効果の検証を行った。検証に際して、NUCT 協力の下、RTG のエンジン稼働時間、給油回数、エネルギー使用量を計測した。

電動化した RTG は鍋田ふ頭 CT の T1, T2, T3 全てのバースで荷役することから、ここでは鍋田ふ頭全体で効率化の検証を行うこととした。また、検証は表-1 に示したケースとしたが、各ケースのコンテナ取扱量が異なるため、比較が可能となるよう、各指標は鍋田ふ頭 CT の年間コンテナ取扱量に近い 150 万個の値に換算した。

給電台車 (Busbar 側)

受電設備 (RTG 側)



写真-2 給電台車及びRTGの受電状況

表-1 検証ケース

ケース	計測時期	RTG 台数	コンテナ取扱個数
電動化前	2010.1.1～ 2010.12.31	24	1,577,378
電動化後	2015.1.1～ 2015.12.31	38*	1,700,321

※38台のうち、ハイブリッド型24台、完全電動型14台

(2) 給電施設の基礎構造の工夫

Busbar による給電方式の場合、Busbar を支える架台を設置する必要がある。その基礎は、通常、地中に埋設固定するが、大規模地震により架台が変形した場合、大掛かりな復旧工事が必要となり、CT の復旧に時間を要してしまう。そのため、ユニット化した基礎ブロックを置き、その上に架台を設置することとした。これにより、被災を受けた際にはユニット単位の交換で済み、CT の

(1) 給油及びメンテナンス時間削減による荷役効率の向上

RTG の電動化による、給油及びエンジンメンテナンスの削減時間を算出した。その削減時間を荷役可能時間として確保できるものとし、RTG の荷役効率向上を検証した。なお、先に述べた通り、ハイブリッド型 RTG においても、レーンチェンジやメンテナンスエリアへの移動はエンジン稼働によるため、頻度は低くなるものの、給油やエンジンメンテナンスは発生する。

a) 給油時間の削減

RTG1台当たりの年間平均作業時間3,258時間に対する給油時間及びその割合は、エンジン型RTGが88時間

(2.7%)，ハイブリッド型RTGが13時間 (0.4%) となり，削減率は約85%であった。後述のメンテナンス時間と比較してやや削減率が低いのは，RTGの給油は荷役作業の状況に応じて適宜行っているためであり，1回あたりの給油量が少ない場合があると推測される。

b) メンテナンス時間の削減

RTG1 台当たりの年間平均作業時間 3,258 時間に対する，メンテナンス時間及びその割合は，エンジン型 RTG が 30 時間 (0.9%)，ハイブリッド型 RTG が 3 時間 (0.1%) となり，削減率は約 90% であった。

c) 荷役可能時間の増加による荷役効率の向上

ハイブリッド型 RTG 導入による，給油時間およびメンテナンス時間の削減は，表-2 に示すとおり，1 台当たり年間 102.5 時間となった。即ち，この 102.5 時間を荷役可能時間として確保できることとなり，年間コンテナ取扱量は，RTG1 基当たり 1,966 個増加，CT 全体で 47,197 個増加が可能と試算できる。

表-2 RTG1 台当たりの年間所要時間の比較

	エンジン型RTG	ハイブリッド型RTG	削減時間
給油時間	88.3	13.3	75.0 (約85%) ※
メンテナンス時間	30.4	2.9	27.5 (約90%) ※
計	118.7	16.2	102.5

※カッコは削減率を示す

(2) 環境負荷の低減

電動化の進捗による RTG の電力使用量と燃料使用量の変化に基づき，CO₂及び NO_x排出量の削減量を検証した。燃料使用量の減少とともに電力使用量が増加するため，発電所から排出される CO₂及び NO_xも考慮した。なお，算定原単位は表-3 に示すとおりとした。

表-3 排出原単位

	軽油	電力
CO ₂	0.00262t-CO ₂ /ℓ	[電動化前：2010年度] 0.000555t-CO ₂ /kWh [電動化後：2015年度] 0.000497t-CO ₂ /kWh
NO _x	0.0059 kg/kg	0.2×10 ⁻⁶ t/kWh

エンジン型 RTG，ハイブリッド型 RTG の 1 台当たりの年間排出量を図-3 に示す。年間 CO₂ 排出量は，エンジン型 RTG1 台当たり 163t-CO₂に対し，ハイブリッド型 RTG では 64t-CO₂まで減少し，削減率約 61%となった。また，年間 NO_x 排出量は，エンジン型 1 台当たり 0.43t-

NO_x に対し，ハイブリッド型 RTG では 0.03t- NO_x まで大きく減少し，削減率約 93%となった。電力の NO_x 排出原単位は軽油に比べ遙かに小さいため，発電所からの NO_x 排出量を考慮しても燃料使用量の削減による削減率に対して影響を与えるものでは無かった。

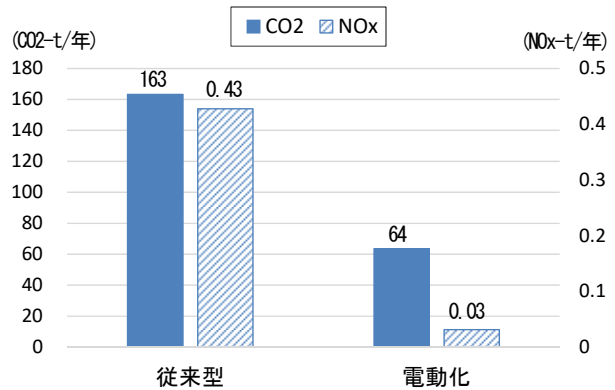


図-3 RTG1台当たりの環境負荷

(3) エンジン型 RTG との経済比較

モデル計算による経済性の比較を行った。比較はエンジン型 RTG，ハイブリッド型 RTG，完全電動型 RTG の計 3 種類とした。

a) 比較条件及び算定方法

算定モデルは，RTG20 台により，年間 70 万個（荷線り等を含む）のコンテナを 2 バース（35 万個/バース）で扱うものと設定した。経済性は，10 年間の減価償却を考慮し，初期投資，燃料・電力コスト，メンテナンスコストに基づき，年間の必要コストを算出した。即ち，毎年のコスト＝初期投資の減価償却費＋燃料・電力コスト＋メンテナンスコストとなり，比較に使用した条件を表-4 に示す。

減価償却の算定方法は定率法とした。ただし，定率法の償却率により計算した償却額が「償却保証額」に満たなくなった年以降は毎年同額とした。

表-4 比較に使用した初期投資とコスト

	初期投資	燃料・電力コスト	メンテナンスコスト
エンジン型	30億円	1億618万円	4,500万円 (2年に1回)
ハイブリッド型	34億円	4,620万円	1,125万円 (8年に1回) 1,300万円 (10年に1回)
完全電動型	40億円	1,050万円	2,000万円 (10年に1回)

※カッコは頻度を示す

b) 定率法による比較検証

定率法による検証結果を図-4に示す。エンジン型RTGは初期投資が低いため償却期間10年間の累積コストは最も低い。11年目以降は燃料・電力コスト、メンテナンスコストの頻度の違いにより徐々に差が小さくなり、16年目にハイブリッド型RTGと完全電動型RTGがエンジン型RTGを逆転する。そして、17年目以降はエンジン型との差がより広がる結果となった。

完全電動型RTGとハイブリッド型RTGの累積コストの差は僅差であるが、完全電動型RTGは稼働期間中のCO₂とNO_x排出量はハイブリッド型RTGより小さく、環境負荷低減効果がより大きいことから、より優位であることが考えられた。

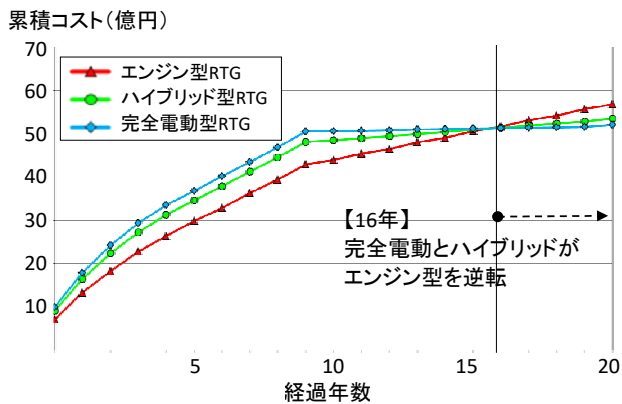


図-4 定率法による経済比較

(4) ハイブリッド型 RTG の災害リスクと対応

ハイブリッド型 RTG 導入のメリットとして、これまで述べてきたとおり、給油及びメンテナンス時間削減による荷役効率の向上、環境負荷の低減、経済性が挙げられるが、一方で、外部電力を動力とすることでリスクも生じる。例えば、災害時における電源の喪失や配電網の途絶、或いは電力規制や大規模停電により RTG が稼働不可能となることが想定される。

これらのリスクを勘案し、今回の電動化に際しては、エンジン型 RTG に搭載されていたエンジンと発電機を存置した。電力供給が遮断された際には、動力を電力から燃料に切り替えて荷役作業を行うことが可能であり、リスクマネジメントの観点からも有効な手段となったと言える。

さらに、大規模地震発生後における電動化施設の機能復旧までに要する時間を検証するため、現地にて復旧試験を行った。試験は、Busbar3 スパン (6m×3=18m) にて行い、被害はレーン中央部の Busbar が転倒した状況、及び Busbar の転倒は無いが許容範囲を超えた法線のズレにより使用不可となった状況を想定した。使用重機は、

Busbar 設置箇所への進入が可能で、基礎ブロック据付、Busbar の設置・撤去ができるフォークリフトを使用し、作業は 8 名で行った。

復旧手順は、Busbar 解体 (手作業、フォークリフト)、基礎ブロックの撤去・据付 (フォークリフト)、Busbar 組立・調整 (手作業、フォークリフト) とした。

結果は、1 スパン (6m) 当たり、解体・撤去約 30 分、基礎設置約 15 分、組立・調整約 60 分、計 105 分を要した。これにより、1 レーン (48 スパン) の復旧はおよそ 84 時間となり、24 時間作業を行った場合は 3.7 日で復旧できる結果となった。なお、作業パーティ数や作業員の慣れを加味すれば、さらに早期の復旧も可能である。

5. まとめ

(1) ハイブリッド型 RTG の効果検証結果

2011 年から実施している実証試験から、既存 RTG を電動化することの有効性が確認された。

給油時間、エンジンメンテナンス時間の削減により、その削減時間を荷役可能時間として確保できるものとし、RTG の荷役効率の向上を検証した。エンジン型 RTG の一年あたりの稼働時間 3,258 時間に対して、電動化により、エンジン型に比べ 1 台当たりの給油時間は年間 75 時間、エンジンメンテナンス時間は年間 27.5 時間削減され、102.5 時間 (年間稼働時間の 3.1 パーセントに相当) の作業時間が確保されることを確認できた。これにより、年間コンテナ取扱量は、RTG1 基当たり 62,500 個から 1,966 個 (年間取扱量の 3.1 パーセントに相当) 増加、CT 全体で 47,197 個増加が可能であると試算され、荷役効率の向上につながることを確認できた。

環境面の効果として、電動化による CO₂ と NO_x 排出削減量を検証した。電動化によりエンジン稼働のための燃料使用量が減少する一方、電力使用量が増加するため、発電所から排出される CO₂ と NO_x も考慮した結果、CO₂ の排出量 163 トンのうち 99 トンを削減 (削減率 61%)、NO_x は排出量 0.43 トンのうち 0.4 トンの削減 (削減率 93%) を確認できた。

エンジン型、ハイブリッド型 RTG、完全電動型 RTG の維持管理のコスト比較を行った。ハイブリッド型 RTG、完全電動型 RTG は初期費用が嵩むものの、導入後 16 年経過すると累積コストがエンジン型 RTG を逆転し、より経済的となる結果となった。

災害時対応として、大規模地震で被災を受けた際の早期復旧を目的に、給電施設 (Busbar) の基礎はブロック式を採用した。現地での復旧作業試験により、3.7 日/レーンで施設の復旧が可能であることを確認できた。

(2) 今後の取り組み

今後、長期稼動による給電施設 (Busbar) の摩耗状況など施設の健全度を調査する。

また、本試験で得られた知見を他港においても活用できるように、今後は最終取りまとめを行い、周知展開を進めていきたい。

謝辞: 本検証は、名古屋ユナイテッドコンテナターミナル株式会社、名古屋港運協会の協力のもと実現した。厚く御礼申し上げる。並びに、効果の検証のご指導を賜っ

た「名古屋港コンテナターミナル電動化技術検討委員会 (委員長: 山本幸司名古屋工業大学名誉教授)」の委員各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 港湾における温室効果ガス排出量算定マニュアル (案) Ver1.0, 国土交通省港湾局国債・環境課, 2009.6
- 2) 窒素酸化物総量規制マニュアル (新版), 公害研究対策センター, 2000.12.

(2019.3.8 受付)

OPERATIONAL AND MAINTENANCE EFFICIENCY OF HYBRID RUBBER TIRED GANTRY CRANES

Atsushi FUCHINOUE, Kouji KITACHI and Terumoto IIDA

A conventional rubber tired gantry crane (RTG) driven by an internal combustion engine requires frequent light oil supply and regular engine maintenances. These reduce operation hours of the RTGs. In addition, the engine type RTGs exhaust carbon dioxide and nitrogen oxide in the air. To compensate these issues, Chubu regional bureau, a container terminal operator in the port of Nagoya and Nagoya harbor transport association jointly worked to develop the hybrid RTGs powered by both the combustion engine and electricity supply.

In this paper, we will outline a concept of the hybrid RTGs and examine its effects. Demonstration of the two types of RTGs indicates that the hybrid RTGs can save 85 percents of oil supply hours and 90 percents of maintenance hours of the engine type RTGs. The total saving hour was 102.5 hours in a year. This increases handling capacity 1,966 TEUs in a year. The emission volume of carbon dioxide was reduced 61 percents and that of nitrogen oxide was 93 percents respectively. In addition, financial analysis indicates that the cost performance of the hybrid RTGs surpasses that of the engine type in 16 years even though the initial cost of the hybrid was higher than the engine type.