

ハイブリッド入換機関車

HD300形式の概要



添田 正

SOEDA Tadashi

日本貨物鉄道株式会社（JR貨物）では、「モーダルシフトの担い手」としての役割を十分に果たし、環境負荷の低減に貢献することを目指している。このたび、貨物駅の環境負荷低減に向けた対策の一環として、動力協調システムと大容量蓄電池を使用したハイブリッド技術を適用した入換専用機関車を開発した。以下、HD300形式シリーズ式ハイブリッド機関車の概要および新技術を紹介する。

キーワード：ハイブリッド機関車、動力協調システム、大容量蓄電池、環境負荷低減

1. はじめに

JR貨物では、“価値を運ぶネットワーク”を企業目標に掲げ、ほぼ全国規模で鉄道貨物輸送を基軸として営業展開している。当社は、他のJR旅客会社と比較して次のような特徴がある。

- ①JRグループ中、唯一の貨物鉄道事業者であること。
- ②約8,300kmの営業キロを持ち、そのほとんどが第二種鉄道事業者として営業していること。
- ③JR会社2社以上にわたる区間を走行する中長距離列車が多いこと。
- ④一部を除いて、機関車けん引列車が主体であり、コンテナ車では最大で26両1,300tけん引を行っていること。

JR貨物発足直後は、輸送力増強のため旧日本国有鉄道（国鉄）が開発した機関車の仕様を一部変更したEF66形式100代などを投入した。また、インバータ制御技術を駆動システムに適用し、現在JR貨物の主力であるEF510形式交直流電気機関車およびM250系直流貨物電車を開

発し、新形式車両による全国ネットワークを充実させた。

一方、貨物駅構内の入換作業には、旧国鉄から承継した支線区本線用および入換用の機関車であるDE10形式液体式ディーゼル機関車などを使用しているが、それらの車齢は、約40年以上を経過している。そこで、老朽化した入換機関車を置き換えるため、HD300形式（計画時は新型入換専用機関車と称した）の開発を行うこととした。

2. 基本構想

現在、大気汚染防止に向けた窒素酸化物（NOx）および粒状物質（PM）などの排出量の削減に関する取り組みは、全産業において世界的に進められているが、鉄道においても、環境負荷軽減に向けた技術開発は今後深まるものと考えられる。HD300形式の計画時、貨物輸送に使用している機関車の中でディーゼル機関車が占める割合は、約30%となっていたため、ディーゼル機関車の排出ガス軽減対策の検討を行い、取り組む必要があった。しかしながら、大形の機関を搭載しているディーゼル機関車の場合は、排出ガス軽減対策装置の搭載スペースの確保および重量増加がぎ装束の大きな制約となるため、



写真-1 HD300形式ハイブリッド機関車の外観

環境負荷軽減対策の導入が難しいと考えられていた。そこで、今後の社会的な要請に応じるため、新たにディーゼル機関および大容量蓄電池によるハイブリッドシステム（動力協調システム）を適用することとした。開発を進めるに当たり、“環境にやさしいクリーンな機関車”をコンセプトに、次の目標を掲げた。

- ①有害排出ガスをDE10形式に対し30~40%以上低減
- ②車外騒音レベルはDE10形式に対し、10dB（A特性）以上低減
- ③エンジンの効率的運転と回生ブレーキの活用によって、CO₂の大幅低減

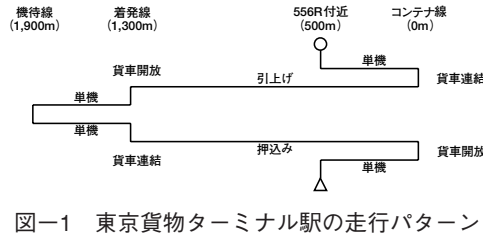


図-1 東京貨物ターミナル駅の走行パターン

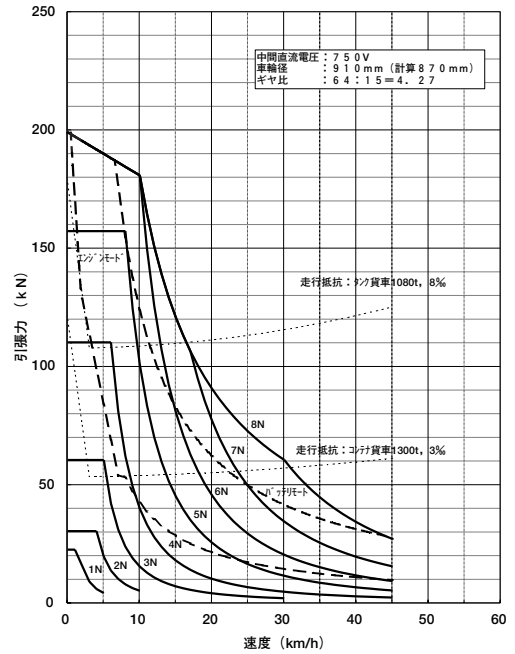


図-2 ノッチ特性図

3. 貨物列車の運行形態と入換作業

JR貨物の列車には、コンテナ単位で輸送を行うコンテナ列車とタンク車など貨車1車単位で物資別輸送を行う車扱列車があるが、現在は直行型のコンテナ列車が主体となっている。コンテナ列車、車扱列車ともに運用に当たり、貨物駅での入換作業が必要となる場合がある。

HD300形式の構成機器の選定および容量を決定するため、JR貨物で取扱量が最大級となる東京貨物ターミナル駅にて実態調査を行った。入換機関車の走行パターンは、発列車を荷役線であるコンテナ線から着発線に移動させる引き上げ作業、着列車を着発線からコンテナ線へ移動させる押し込み作業、空車の貨車を組み替える作業に大別される。また、各作業の間には機関車の単機走行がある。留置時間を除いた運用時の入換作業の時間割合は、貨車をけん引して走行する時間と単機での走行時間のほかに、連結および解放時の地上での作業時間、進路の構成待ち時間およびけん引列車の到着待ち時間など停車時間が長い。

4. 基本構成

(1) 性能

HD300形式の力行最高運転速度は、入換作業に特化することで45km/hに設定した。入換時の最高運転速度は25km/hであるが、一部の入換作業を考慮した。機関区などの配置区から使用駅までの回送手段は、自力回送ではなく、貨物列車に連結することを想定した無動力回送を前提としている。

駆動システムは、インバータ制御による各軸個別駆動方式を採用し、貨物駅構内における最大勾配3%でコンテナ貨車1,300tまたはタンク車1,400tを起動できる性能を確保することを考慮して、主電動機出力を500kWに設定し

た。また、起動時の引張力は、DE10形式と同等の199kN（約20tf）に設定した。

(2) ハイブリッドシステム

ハイブリッド方式としてはシリーズ式やパラレル式など複数の方式があるが、構成機器の互換性や発展性、およびインバータ機関車技術を最大限に活用可能なシリーズ式ハイブリッドシステムを採用した。このシステムは、エネルギーを一時的に蓄える主蓄電装置、発電機とエンジンを組み合わせた発電装置、主変換装置および主電動機から構成される。主蓄電装置は、直流750Vの中間直流回路に直結し、損失低下に努めた。

(3) ハイブリッド入換機関車用トータルエネルギー管理システム（ECOS）

ハイブリッドシステムのエネルギー管理は、主蓄電装置の充電量（SOC：state of charge）に応じて、発電装置の動作状態を管理することが重要となる。HD300形式ではハイブリッド入換機関車用トータルエネルギー管理システム（ECOS：Total Energy Control System for Hybrid Shunting Locomotive）を開発し、SOCの値を適正範囲に収めることおよび停車中の騒音低減を図った。主蓄電装置のSOCの使用範囲は、85%~10%に設定した。85%で発電停止とすることで、充電量が上限の場合でも、残りの15%で回生電力を吸収できるようにした。充電量の下限值は、交番検査などで長期間放置した場合に自己放電によって過放電にならない範囲の10%とした。発電装置は、効率の向上および騒音低減を目指し、一定回転数（1,600min⁻¹）での出力による発電またはアイドルングストップという2つの運転パターンを基本とした。さらに、

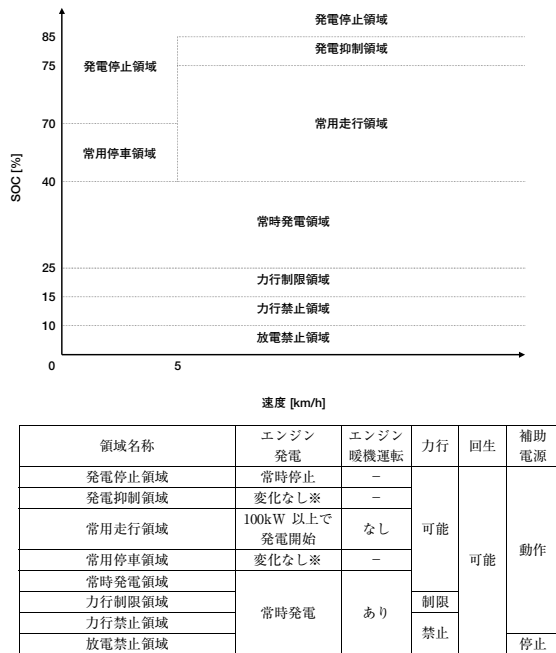


図-3 ECOS動作概要図

走行中と停車中とで制御を分けるため、速度5km/hを目安に制御領域を設定した。なお、SOCの推定精度向上のため、満充電に近づいた場合は、充電電力を小さくする“絞込み制御”が行われる。絞込み制御時は、排出ガス低減のために機関回転を1,400min⁻¹に低下させている。

5. 車両構造の概要

(1) 車体

入換作業は、駅構内の頻繁な往復走行であるため、DE10形式と同様にボンネット形中央運転室方式とした。運転室は、運転台からの視界確保に努め、台枠上面のレール面上高さをDE10形式と同じ1,200mmとした。ボンネット部については、DE10形式では内部に納めた機器を覆うカバーで構成していたが、HD300形式では検修の作業性と将来の拡張性を考慮し、外装部を含めてモジュール化した主変換装置、運転室、主蓄電装置および発電装置を台枠上に並べ“モジュラーコンセプト”を導入した。特に主蓄電池装置については、今後開発が進む高性能蓄電池に適宜換装可能なぎ装としている。

通路部の幅は、新形式機関車で標準の600mmとし、安全に乗降できるように台枠側面に手すりを配置した。また、台枠の車端部には、操車担当者（入換作業員）および運転士の乗降用のための大形のステップを配置した。頻繁に行う連結・解放作業において、操車担当者の夜間作業を改善するため、連結器上部の手すりに連結器灯を設置して、車端部の視認性を向上した。さらに、ステップにはステップ灯を設置した。床下には、空気圧縮機、1,600ℓの燃料タンク、制御用蓄電池などを配置した。

(2) 運転室機器配置

運転室の操縦機器は、DE10形式同様にレール方向に配置し（横向き運転台）、入換作業への負担を軽減した。マスコンハンドル、ブレーキハンドルなどは従来の新形式機関車と同じ方式を流用したが、頻繁なブレーキを扱う入換作業特有の運転操縦を考慮し、単独ブレーキハンドルを主体として操作できるよう右手で操作するようにした。

(3) 台車

台車は、けん引時に必要な引張力を確保するだけでなく、無動力回送時の最高運転速度110km/hでの十分な走行性能を満足するため、DF200形式電気式ディーゼル機関車で使用しているFDT100形軸はり式軸箱支持方式（けん引装置は低心皿Zリンク式）のボルスタレス式2軸ボギー台車をベースとしたが、枕ばねにコイルばねを使用することで、台枠のレール面上高さやコストの低減を図った。

(4) 主電動機

主電動機は回転子に通電する必要がなく効率が良い、永久磁石同期電動機を初めて採用した。高効率（定格効率97.6%）のため、全閉自冷方式が可能となり、電動機損失の低減および主電動機冷却用ファンが不要となったことで、補機損失および騒音の低減につながっている。なお、空転再粘着制御のためにPGセンサ付きとした。

(5) 主変換装置

主変換装置はPWMコンバータ、PWMインバータ、補助電源装置、負荷接触器および高速度遮断器などの保護回路をすべて一体のモジュールとしたPWMインバータは、主電動機に永久磁石同期電動機を採用したことにより、各電動機ごとの回転に同期した制御が必要となるため個別制御とした。なお、冗長性は入換専用機関車であるため、台車単位の開放とした。また、永久磁石同期電動機は、惰行中でも無負荷誘起電圧が発生するため、一定以上の運転速度および中間直流電圧値によっては、惰行制御を実施している。また、無動力回送時に備え、PWMインバータと主電動機との間には主接触器を直列に2個設置した。

(6) 発電装置

発電装置は、機関およびその補機、冷却系統、油系統、発電機を一体のモジュールとした。機関は、高圧噴射による燃焼改善、燃料噴射タイミングの電子制御方式の採用によって、U.S.EPA（米国環境保護庁）のTier3およびEU（欧州連合）指令のStage III Aに適合する環境面でも優れたディーゼル機関を採用した。機関の潤滑油は、保守周期延長のために潤滑油タンクを設置し増量している。発電機は、エンジンの始動電動機にも使用できるように三相誘導発電機を採用した。なお、騒音低減のため国鉄のDE11形式2000代液体式ディーゼル機関車（防音機関車）と同等の防音構造とした。

(7) 主蓄電装置

主蓄電装置に搭載したリチウムイオン蓄電池の1セル当りの公称電圧は3.6V、公称容量は30Ahであり、充放電レート（充電電流および放電電流）は、最大20C（600A）まで対応する^{注1)}。HD300形式に搭載した主蓄電装置は、このセルを8個で1モジュールとした公称電圧28.8Vの蓄電池を26モジュール直列接続することで公称電圧748.8V（≒750V）のバンク（群）を形成し、3バンクを並列に接続している。保護装置としては、ノーヒューズブレーカおよびヒューズを設けてある。

リチウムイオン蓄電池の性能は温度依存性があるので、夏期は冷却性能重視、冬期は保温性能重視の構造にする必要がある。主蓄電装置の外装部には、夏期は防水効果が高いルーバおよびベンチレータを設置して温度上昇を抑制するが、冬期はルーバを断熱材付きのふさぎ板、およびヒータ内蔵のベンチレータに交換して保温性能を確保する。なお、主蓄電装置には、ファンを設置して内部の空気を攪拌し、蓄電池温度のアンバランスを極力抑制している。

(8) ブレーキ装置

新形式機関車で実績のある電気指令式自動空気ブレーキ方式を採用し、回生ブレーキを導入した。回生ブレーキ力が不足する場合は、空気ブレーキが補足する制御としている。また、将来的に電磁ブレーキ使用の貨物列車（最大けん引1,300tまたは最高速度110km/h）が増発することを想定し、無動力回送時に連結できるシステムを初めて導入した。空気圧縮機はDE10形式とほぼ同等の1,750ℓ/minの能力をもち、環境に配慮して潤滑油を使用しないオイルフリー方式を1台搭載し、保守の軽減を図った。

(9) モニタ装置

モニタ装置は、運転士支援機能、検修機能および運転状況記録機能を持っている。運転台には、タッチパネル式のTFTカラー液晶モニタを設置した。

(10) 保安装置

保安装置はATS-SF受信器を搭載した。また、入換時の保安度向上のため、JR貨物で初めてとなるデッドマン装置を試験的に搭載した。デッドマン装置は、近年のヨーロッパにおける機関車のシステムを参考にして開発・設計を行った。運転席足元のペダルを操作すると力行が可能であるが、運転中にペダル操作を行わなければ警報し、非常ブレーキが動作する装置である。なお、ペダルは踏み続けていても一定時間経過後に警報を発して、運転士に踏み替えを促すようにして保安度を向上させている。

6. 環境負荷低減結果

平成22年6月に東京貨物ターミナル駅で実施したけん引走行試験および騒音測定結果では、平均負荷パターン

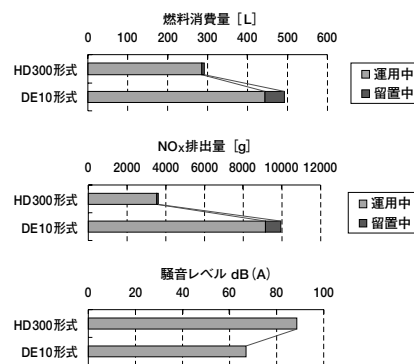


図-4 環境負荷低減結果

の700tけん引時には燃料消費量は36%、NOx排出量は61%、騒音は22dB（A特性）の低減効果が得られた。これに留置時間も考慮した一日分の運用で評価すると、燃料消費量で41%、NOx排出量で64%の低減効果を確認した。環境性能改善の主な要因としては、エンジンの小排気量および小型化、液体変速機（トルクコンバータ）の廃止、高効率点へ限定したエンジン動作、アイドルストップの実現、全閉自冷式永久磁石同期電動機の採用と補機類の削減および低公害エンジンの採用などが考えられる。

7. おわりに

JR貨物では貨物駅を着発線荷役方式（E&S:Effective and Speedy container handling System）に改良するほか、本線機関車で入換による効率化など、入換作業の最小化を進めている。しかしながら、入換機関車は東京貨物ターミナル駅のような大形の貨物駅、そして石油タンク車の入換作業には必要不可欠なものである。

けん引走行試験結果より、HD300形式は負荷の変動が大きく、停車時間も長い入換作業をハイブリッド化することでエンジンの負荷平準化が図られ、さらにシステムを最適化したことで、環境負荷の低減ができる。

また、モジュラーコンセプトにより、発電装置と主蓄電装置の容量を調整することで、中小貨物駅用入換機関車から本線用機関車、あるいは都市部の貨物駅の更なる低環境負荷型機関車などへの展開が容易である。

今後は、モジュラーコンセプトを活用したハイブリッド機関車の技術開発を進めていく予定である。

最後に、本開発に携わっていただいた関係各位に御礼を申し上げる。なお、HD300形式の製作にあたっては、国土交通省の鉄道技術開発費補助金の交付を一部受けて実施した。

【注】

(1) 蓄電池の全容量を1時間で放電させる電流量のことを1Cレートという。