

1312 NEトレイン (ハイブリッド方式) の開発

Development of the "New Energy Train -hybrid type"

正 大澤 光行 (JR 東日本) 正 豊田 瑛一 (日立製作所)
寺屋 信次 (JR 東日本) 正 嶋田 基巳 (日立製作所)
○ 藤井 威人 (JR 東日本) 金子 貴志 (日立製作所)

Mitsuyuki OOSAWA R&D Center, East Japan Railway Co., Saitama, Japan
Shinji TERAYA R&D Center, East Japan Railway Co., Saitama, Japan
Takehito FUJII R&D Center, East Japan Railway Co., Saitama, Japan
Eichi TOYOTA Mito Transportation Systems Product Div, Hitachi Ltd., Ibaraki, Japan
Motomi SHIMADA Mito Transportation Systems Product Div, Hitachi Ltd., Ibaraki, Japan
Takashi KANEKO Mito Transportation Systems Product Div, Hitachi Ltd., Ibaraki, Japan

Through the innovation of a propulsion system, and by incorporating hybrid technology and fuel cell technology, East Japan Railway Company has been working to develop railcars that have lower environmental impact. We have developed the world's first prototype of a hybrid electric-diesel railcar, called the "NE Train (New Energy Train)" and have begun test runs. The prototype is a single-rail car with an onboard engine that employs a series-hybrid system and has the future potential of being adapted to fuel-cell-driven railcar. The test runs are the first step in evaluating the performance and energy efficiency of the new system. This paper provides information about the train, including test run results.

Key Words: Series-hybrid, Lithium-ion secondary battery, Diesel engine, Control of exhaust gas

1. はじめに

列車運用用のエネルギーは、鉄道会社の企業活動における消費エネルギーの約7割を占めており、そのエネルギー消費をいかに効率化するかが地球温暖化防止へのテーマと言える。

車両の省エネルギー化はこれまでに「軽量化」「動力装置の効率化」そして「ブレーキエネルギーの再利用(回生ブレーキ)によって進められてきた。しかし、非電化区間を走るディーゼル車については、この回生ブレーキが構成できないため、電車に比べて30%程度エネルギー効率が劣っていると考えられている。

そのため、私たちは、ディーゼル車のエネルギー効率向上をターゲットとし、動力システムの革新により車両の環境負荷低減を目指したNEトレインの開発を進めてきた。



(図1) NEトレイン

その第1ステップとして、鉄道車両としては世界で初めてのハイブリッドシステムを搭載した試験車が完成し、今年5月より日光線・烏山線・東北線等の線区において、車両の基本性能・ハイブリッドシステム性能・省エネルギー効果を確認するための試験走行を実施してきた。

2. 開発のコンセプト

ディーゼル車は電車と比べると、次のような課題を抱えている。

- 1) 電車に比べて、エネルギー効率が低い
- 2) エンジンからの排出ガス・騒音
- 3) 機械部品が多く、メンテナンス量が多い
- 4) 中高速域での加速度が低く、走行性能が劣る

そこで、NEトレインの開発のコンセプトを「環境との調和」と「電車技術への転換」の2つとし、具体的には「省エネルギー」「排気ガスの有害物質・騒音の低減」「省メンテナンス」「電車並みの運転性能」を目指すこととした。また、開発に当たっては、将来抜本的な環境負荷低減が期待できる「燃料電池」の搭載を視野に入れると共に、当面は早期の実現が期待できる「ディーゼルエンジン」と「蓄電装置」のハイブリッドシステムの導入をはかることとした。

3. 開発の概要

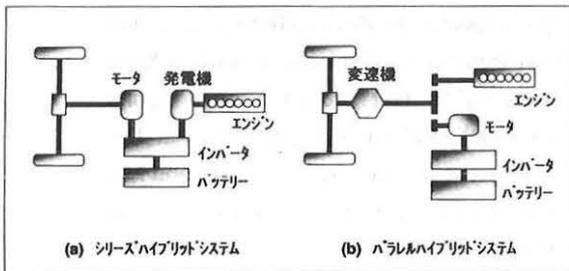
3.1 ハイブリッドシステムの選定

自動車等で用いられているハイブリッドシステムには「シリーズハイブリッド方式」、「パラレルハイブリッド方式」及びこの2方式の特徴を兼ね備えた「シリーズ・パラ

レル方式」の3方式に分けることが出来る。

「NEトレイン」の開発においては、以下の点から「シリーズハイブリッド方式」を採用した。

- ・ 将来燃料電池システムを導入する際、シリーズ方式においては、エンジンを燃料電池に置き換えるだけで良い。
- ・ 鉄道車両は、前後進を均等に使用するため、パラレル方式を採用した場合には逆転機等の機構が必要になる。
- ・ シリーズ方式においては、電車技術が有効に活用でき、電車との機器の共通化によるコストダウン、メンテナンスの軽減がはかれる。また、電車並みの走行性能が可能となる。
- ・ シリーズ方式においては、速度に関わらずエンジン回転数を一定にすることが可能となるため、常に燃費効率・排出ガス量が最良の領域で使用することが出来る。



(図2) ハイブリッドシステム比較

3.2 主電動機・エンジン出力の検討

NEトレインの主電動機出力は、必要とされる力行性能により決定される。

- 1) 電車型引張特性
- 2) 新型気動車並みの登坂性能 (25% 均衡速度 60km/h)
これらの性能を確保するため、E231系通勤電車で実績のある主電動機 (95kW) を2台搭載することとした。なお、熱容量についても、実際の走行線区に基づいた走行シミュレーションにより、十分余裕のある容量が確保できていることも確認している。

エンジン発電機の出力は、連続勾配区間において蓄電池容量が不足した際にもエンジンのみの単独運転で下記のような車両性能を確保できることを考慮して決定されている。

- 1) 前述の登坂性能を確保できること。
 - 2) エンジンのみの出力で最高速度まで加速できること。
- その結果、出力 330kW (2100rpm) のものを採用した。なお、このエンジンは新たに開発された排出ガス対策エンジンで、 $\text{Nox} \cdot \text{PM}$ が 30%以上の削減がはかれるものである。

3.3 蓄電装置の選定

3.3.1 蓄電装置の種類

ハイブリッドシステムのエネルギー効率の鍵を握るのは、回生エネルギーを蓄える蓄電装置である。蓄電装置として実用的なものには、電気二重層キャパシタ、フライホイール、二次電池等がある。選定に当たっては、車両搭載が可能であることが前提条件であることから、重量当たりのパワー密度・エネルギー密度が重要な指標である。代表的な蓄電池の性能比較を(表1)に示す。

(表1) 蓄電装置の性能比較

	エネルギー密度 (Wh/kg)	パワー密度 (W/kg)	寿命 (cycle)	コスト
電気二重層キャパシタ	△ 6	○ 500	○	△
鉛蓄電池	△ 40	△ 300	△	○
ニッケル水素蓄電池	○ 40~70	○ 200~700	○	○
リチウムイオン電池	○ 30~130	○ 30~1400	○	△
フライホイール	△ ~50	○ 1000~	○	○

鉄道車両においては、高出力・大容量・安全安定性の要求レベルが高いことを考慮すると、ニッケル水素電池・リチウムイオン電池が現時点では有力である。実際、多くのハイブリッド自動車においてこれらの蓄電装置が採用されている。自動車においては、コスト面からニッケル水素蓄電池が主体になっているが、リチウムイオン電池のパワー密度等の優れた性能は魅力的であり、NEトレインでは、その将来性に期待しリチウムイオン電池を採用した。また、寿命・コスト面においても現時点での開発状況からコスト低減・長寿命化が期待できる装置であると言える。

3.3.2 蓄電装置の容量

蓄電装置については、大容量であるほどエンジン発電の平準化・エンジンアイドリングストップ拡大・蓄電装置の充放電損失の低減等が可能となり、エネルギー効率的には有利となると考えられる。しかし、現時点では出力 1kW 当たりのコストでは、リチウムイオン電池はエンジンの数倍であり、NEトレイン試験車では、エネルギー効率を十分に確保できる最小限の容量とし、システム設計を行った。

具体的な容量の決定に当たっては、

- 1) ブレーキの回生エネルギーを蓄積できる容量
※平均的な停車1回当たりのブレーキエネルギー ⇒ 1kWh
- 2) 平坦区間走行において必要な力行電力量
※駅間距離 5km の走行に必要な力行電力量 ⇒ 3kWh
等を考慮する必要がある。

また、NEトレインにおいては、蓄電装置の寿命・蓄電池出力等を考慮し、SOC20%~60%の範囲内で使用することとした。

これらを総合的に考え、リチウムイオン電池の容量は、10kWh とした。

3.4 動力制御システム

ハイブリッドシステムの開発においては、「機械エネルギーと電気エネルギーをどのように統合するか」という動力制御システムが重要なポイントである。

動力制御システムには、省エネルギーの観点からは、

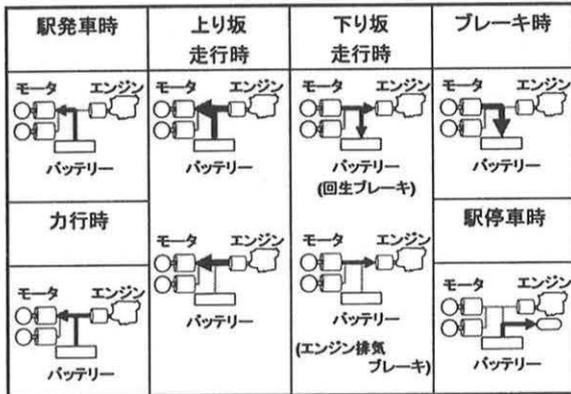
- ・ ブレーキ回生エネルギーを有効に蓄電する。
 - ・ 発電エンジンは、極力最高効率状態で使用する。
- また、騒音・排出ガスの視点から
- ・ 駅停車時や駅構内の低速走行時には、蓄電池出力を主体とし、極力エンジンを稼働しない。

などの要請がある。

これらの点を考慮して、NEトレインでは独自の動力制御システムを開発した。このシステムの基本原理は、「車両の持つ運動エネルギーと蓄電エネルギーの和を速度によらず一定に保つ」ように、車両の速度とバッテリー充電状態に応じて、エンジン発電量を調整するものである。これにより、停車時のバッテリーは、高い充電状態になる。

主な車両状態は、以下のようになる。(図3)

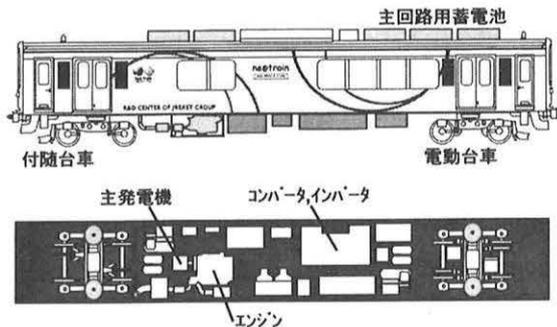
- 1) 駅発車時：バッテリーの動力にてスタートし、加速時に発電エンジンが起動する
- 2) 力行時：発電エンジンは最高効率で稼働し、走行負荷に応じて蓄電池の充放電を行なう
- 3) 上り坂走行時：発電エンジンは、最高出力にて稼働する
- 4) 下り坂走行時：回生ブレーキにてバッテリーを充電するとともに、エンジン排気ブレーキにて速度制御を行なう
- 5) ブレーキ時：発電エンジン停止。回生ブレーキによりバッテリーを充電する
- 6) 駅停車時：発電エンジン停止。バッテリーからサービス用エネルギー供給



(図3) 主な車両制御モード

3.5 試験車の概要

今回の試験車は、最少の試験ユニットとして単独走行が可能な1両構成とした。また、当社の保有している電車技術を最大限に活用するため、最新の電車と極力機器の共通化をはかった。車体は、地方線区を走行する電車E127系と共通のステンレス車体とし、台車・モーター・制御装置などは、蓄電装置との関係から電圧の調整を行ってはいるが、最新の通勤電車E231系と同じものを用いている。台車については、2つの台車のうち1つを電動台車としている。また、蓄電装置はE127系のブレーキ抵抗器と同様に、屋根上に搭載している。試験車の概要と主な仕様を(図4)(表1)に示す。



(図4) NE トレインの概要

(表2) NE トレインの主な仕様

車体	ステンレス製 車長 20m
最高速度	100km/h + α
主回路	<ul style="list-style-type: none"> ・ハイブリッドシステム シリーズハイブリッドシステム ・制御装置 VVVF インバータ装置(IGBT) ・主電動機 誘導電動機(95kW×2) ・主回路用蓄電池 リチウムイオン二次電池(10kwh) ・主発電機 誘導電動機(180kW) ・エンジン ディーゼルエンジン(330kW/2100rpm)
台車	ホルスス台車
ブレーキシステム	回生・発電ブレーキ併用電気指令式空気ブレーキ

4. 評価試験

4.1 試験計画

試験車による走行試験により以下の項目について評価を行っている。

- 1) 車両性能確認(加速度、ブレーキ減速度)
- 2) 異常時模擬試験(バッテリー開放、エンジン開放走行)
- 3) 動力制御システム(線区別省エネルギー効果)
- 4) 環境対応試験(蓄電池の温度特性評価) 等

2003年9月までに日光線を中心に基本的な性能評価を行い、基本的な車両性能・ハイブリッドシステム制御等の確認を行ってきた。今後、各種線区で線区別の省エネルギー効果、環境対応試験等を実施する計画である。

4.2 省エネルギー効果

ハイブリッドシステムの省エネルギー効果について、一般的に言えば、駅間距離が短いほど回生エネルギーが効果的に活用できるため、ディーゼル車に比べてエネルギー効率を高くすることが出来る。しかし、長い勾配区間が多いと、上り坂で消費エネルギーが増大するとともに、下り坂で得られるブレーキエネルギーも過大となり、すべてが有効には使用できないため、理想的なエネルギー効率を確保することが出来ない等の問題がある。実際の線区条件にもとづき、「日光線」、「烏山線」等の「回生エネルギー率=回生エネルギー/走行エネルギー」のシミュレーションを実施した。シミュレーションによれば、回生エネルギー率は線区条件で異なるものの、NE トレインのシステムで20%程度期待できることになった。

4.3 現在までの試験結果

日光線・烏山線・東北線等において既の実施した試験走行の結果、下記の項目について性能確認を行った。

- 1) 車両基本性能
 - 計画通りの性能(電車並みの加減速性能)が確認することが出来た。
 - 加速性能： $\alpha = 2.3\text{km/h/s}$ (35km/h時点)
 - 減速性能： $\beta = 3.6\text{km/h/S}$ 以上
- 2) 異常時模擬試験
 - ①エンジン開放走行
 - バッテリーのみで70km/hまで加速可能(走行距離2~3km)であることを確認することが出来た。
 - ②バッテリー開放走行
 - バッテリー故障時にバッテリーを自動開放し、エンジンのみによる走行するという切換制御を確認することが出来た。

3) 動力制御システム

①エンジンアイドリングストップ

駅停車時のエンジン停止（5分以上）、出発時（約25km/h程度まで）のエンジン停止なども確認された。

②回生エネルギー率

シミュレーションとほぼ同等の数値を示した。
(20%程度)

4) 環境対応試験

①夏季における高温度下における性能試験

気温約35℃における性能確認を実施し、異常ないことが確認できた。

②冬季における低温度下における性能試験

今後の走行試験において実施していく予定である。

各項目において、ハイブリッドシステムは、ほぼ計画通りの機能を示している。

5. おわりに

現在、基本的な車両性能・システム性能の確認がほぼ終わり、今後は環境対応試験や蓄電池の耐久試験等、重要な試験が計画されている。これらを通じて、極力早い時期に、鉄道車両のハイブリッドシステムを確立したいと考えている。前述した動力制御システムは、まさに重要なノウハウで試験走行の中で、細かな調整を重ねながら現在のシステムにいたった。しかし様々な条件で道路を走行する自動車に比べ、定められた線区を走行する鉄道車両に対しては、線区条件を反映した、より計画的な制御方法を導入することも考えられる。また、これらの性能面の課題とともに、実用化に向けてのコストダウンも重要な課題である。環境にやさしい車両 NE トレインの早期の実用化に向けて、これらの課題に着実に取り組んでいく。