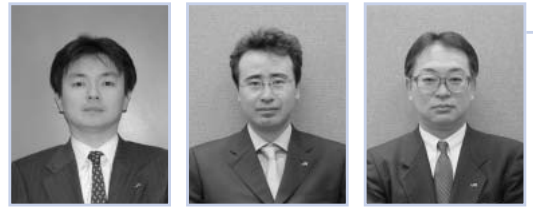


NEトレインの開発



藤井 威人* 寺屋 信次** 大澤 光行***

JR東日本では、燃料電池やハイブリッドシステム等を活用した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(New Energy Train)”の開発を進めてきた。その第一ステップとして、鉄道車両としては世界で初めてハイブリッドシステムを搭載した試験車が完成した。2003年5月より、日光線・烏山線を中心に、システム性能や省エネルギー効果等を確認する試験走行を実施し、2004年1月より寒冷地における性能確認のための試験走行を実施し、ハイブリッドシステム制御が正常に行われていることを確認した。

●キーワード：ハイブリッドシステム、リチウムイオン二次電池、ディーゼルエンジン、燃料電池

1 はじめに

列車運転用のエネルギーは、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当社の地球温暖化防止に対する取り組みテーマのひとつと言える。

車両の省エネルギー化はこれまでに「軽量化」「動力装置の高効率化」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。

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、2003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。



図1：NEトレイン

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・騒音が発生する
- (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。

「NET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。

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。

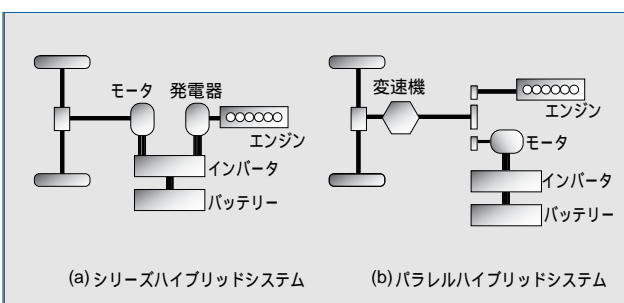


図2：ハイブリッドシステム比較

3.2 主電動機・エンジン出力の検討

NET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)のエンジン発電機を採用した。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、NOx・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、NET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・エンジンアイドルストップ拡大・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、NET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
⇒約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
⇒約3kWh

等を考慮する必要がある。

また、NET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

3.4.1 エネルギー管理制御システム概要

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。

- (1) 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。

- (2) 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

- (3) 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、NETレインでは独自の動力制御システムを開発した。

このシステムの各装置間の制御情報の流れを示したものが図3である。エネルギー管理制御システムにおいては、蓄電池、インバータ・コンバータ、主電動機、発電機、ディーゼルエンジンといった各装置からの情報はすべて集約され、車両加減速及びエンジン発電制御に反映される。

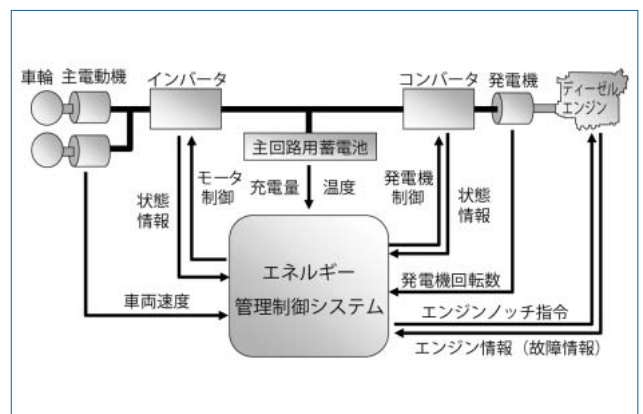


図3：エネルギー管理制御システム概要

3.4.2 エネルギー管理制御システムの基本原理

このシステムの基本原理は、「車両の持つ運動エネルギー（車両速度により変化）と蓄電エネルギー（蓄電池に保存）の和を速度によらず一定に保つ」ように、エンジン発電の制御を行うという考え方である。

車両の速度が増加すると、車両の運動エネルギーつまり車両としての潜在的な回生エネルギーが増加する。そのため、蓄電池の充電量としては停車している際の充電量よりも少ないレベルに抑えるべきであり、ブレーキ時に回生エネルギーを回収できなくなる。つまり、速度に応じて最適な充電量があり、エンジン発電機まではそのレベルまで充電するように制御する。

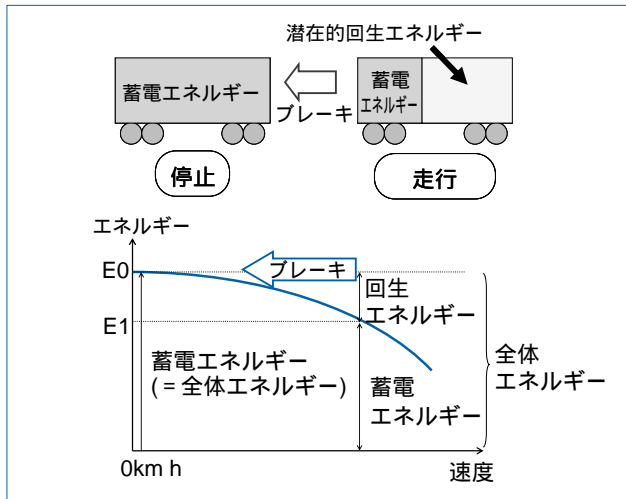


図4：基本原理

3.4.3 エネルギー管理制御図

この基本原理に基づき、車両速度と蓄電池の充電量に応じ、エンジン出力制御の考え方を図に示したものがこの「エネルギー管理制御図」(図5)である。

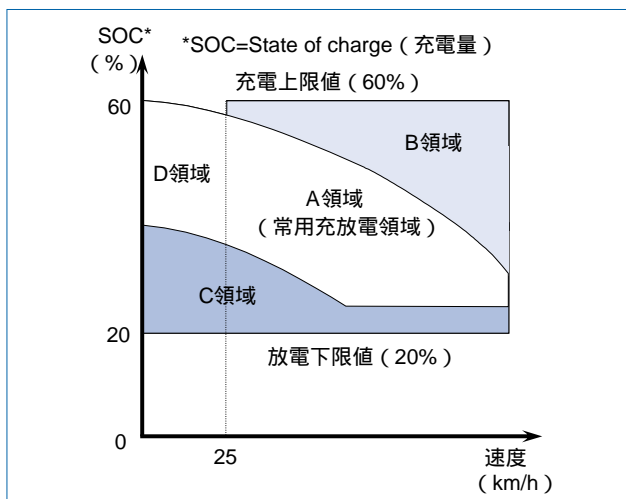


図5：基エネルギー管理制御図

SOCとは、蓄電池の充電状態を示す指標であり、蓄電池の寿命を考慮し、出来る限り狭い容量幅で充放電を繰り返すことが望ましいとされているが、ハイブリッド自動車での実績等も参考にしつつ、20～60%の領域で制御することとしている。

エネルギー管理制御図においては、車両速度と蓄電池の充電量に応じて4つの領域に区分している。

ここで、A領域の上下の曲線については、前項のエネルギー管理制御の基本原則に基づいて設定しており、上の曲線を充

電余力限界線、下の曲線を放電余力限界線という。

(1) A領域(常用充放電領域)

エンジンは燃料消費率の良い出力点で発電を行う。

極力、この領域内で蓄電池が充放電を行うように制御を行う。

(2) B領域

これ以上充電を行うと車両速度に対して過充電の状態となるため、エンジン発電を停止し、充電量をA領域に戻そうとする。実際にはエンジンの応答性の観点から現時点ではアイドリングの状態としている。

(3) C領域

線区条件、運転条件、環境条件等で蓄電池の容量が速度に対して極端に少なくなった状態であり、エンジンは最大出力点で発電を行い、充電量をA領域に戻そうとする。

(4) D領域

駅構内等におけるアイドリングストップの観点からエンジン停止とする。

3.4.4 主な車両制御モード

主な車両状態は、以下のようになる。

- 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

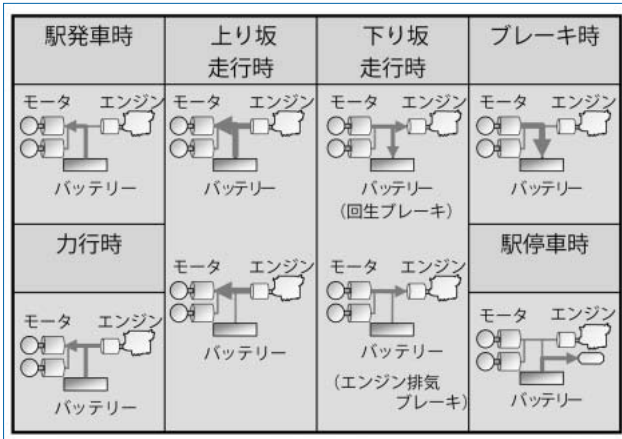


図 6：主な車両制御モード

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。試験車の概要を図7、主な仕様を表2に示す。

表 2：NE列車の主な仕様

最高運転速度	100km/h	
形式	キヤE991	
長さ	20,000mm	
車体長さ	19,500mm	
車体幅	2,800mm	
屋根高さ	3,655mm (最大高さ：4051.5mm)	
台車中心間距離	13,800mm	
台車形式	DT959 (前位)	TR918 (後位)
主要機器	主電動機	MT936 × 2 (誘導電動機95kW × 2)
	主制御器	CI905
	主回路用蓄電池	リチウムイオンバッテリー (10kWh)
	発電用エンジン	ディーゼルエンジン (331kW/2100rpm)
	主発電機	DM927 (誘導発電機180kW)
	補助電源装置	SC934 (45kVA)
	電動空気圧縮機	385NL/min
ブレーキ方式	回生・発電併用電気指令式空気ブレーキ 抑速ブレーキ、直通予備ブレーキ	

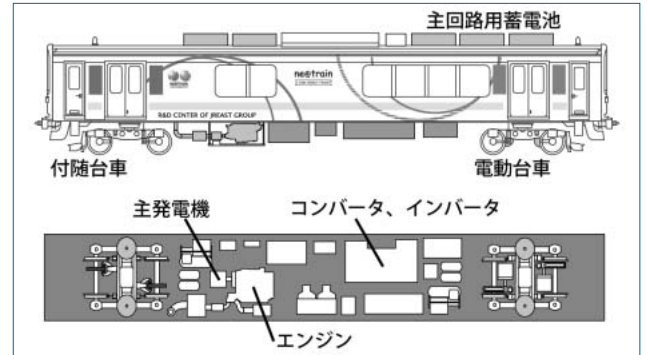


図 7：NE列車の概要

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) 基本車両性能確認 (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) エネルギー管理制御
(制御手法・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)

走行試験は2003年5月から9月までに日光線・烏山線・宇都宮線等により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。現在、2003年11月以降、日光線等で線区別の省エネルギー効果確認試験を実施するとともに、陸羽東線、釜石線等により低温度下における車両性能確認試験を実施している。

4.2 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: $a=23\text{km/h/s}$ (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(空調負荷にもよるが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 夏季における高温下における性能試験

外気温約35°C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 冬季における低温下における性能試験

氷点下における性能確認試験を現在実施中。

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。

図8は宇都宮線(西那須野~野崎)での実際の走行試験データを示している。

西那須野駅、野崎駅発車時の「エンジン回転速度」の曲線から、駅停車時においてはエンジンが停止しており、25km/h以上においてエンジンが始動していることが判る。また、約80km/h以上になって初めてエンジンが「2N(1700rpm)」から「3N(2100rpm)」に出力アップしていることが判る。その後、エンジンが蓄電池の充電量に応じて「アイドリング」、「2N」、「3N」と段階的に発電出力を切り換えていることが判る。

また、野崎停車時のブレーキ時において、回生ブレーキにより約1.5kWh程度の電力が蓄電池に充電されていることが「2次電池蓄電量」の曲線から読み取ることが出来る。なお、回生ブレーキは微量ながら停止直前の5km/h程度まで動作していることも判る。

図9は、日光線(日光~今市)での測定データである。この区間は約25%の下り勾配が続く場所である。

NETレインには、下り勾配において速度を一定以下に抑える「抑速ブレーキ」機能を有している。

抑速ブレーキの制御は2段階に分けることが出来る。第1段階は、バッテリーにおいて回生エネルギーの吸収を行う。第2段階

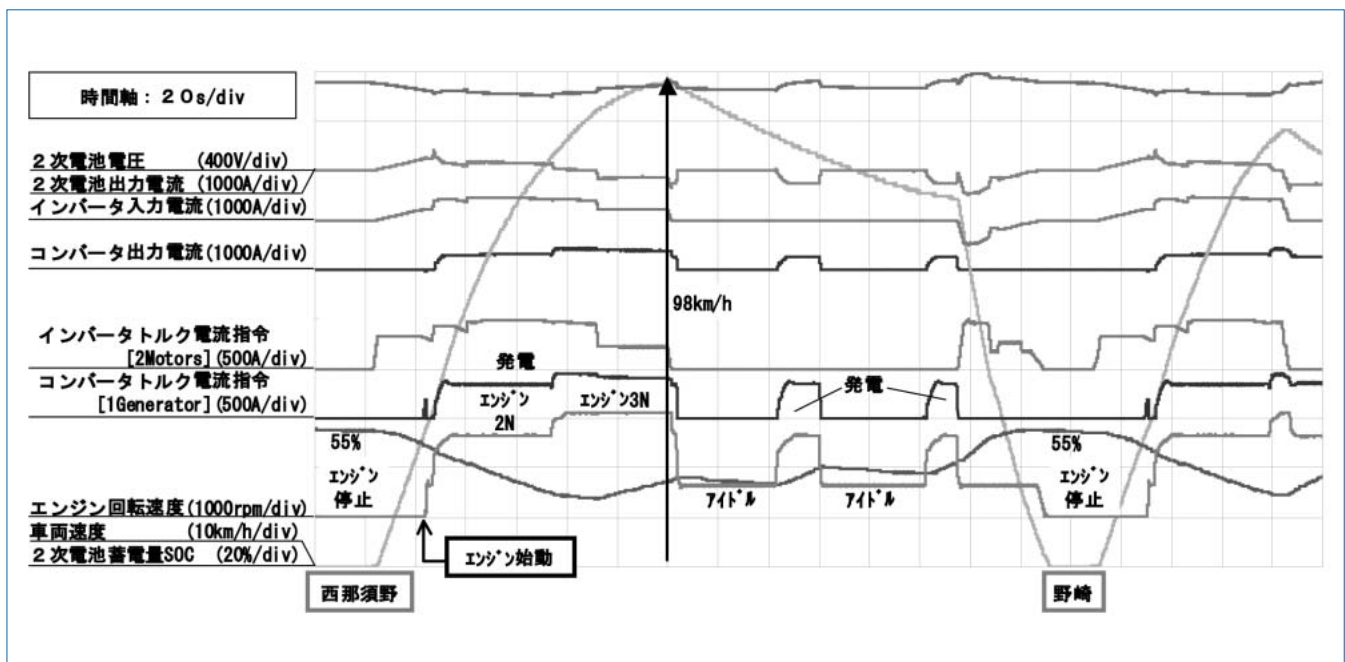


図8：走行試験チャート(西那須野→野崎)

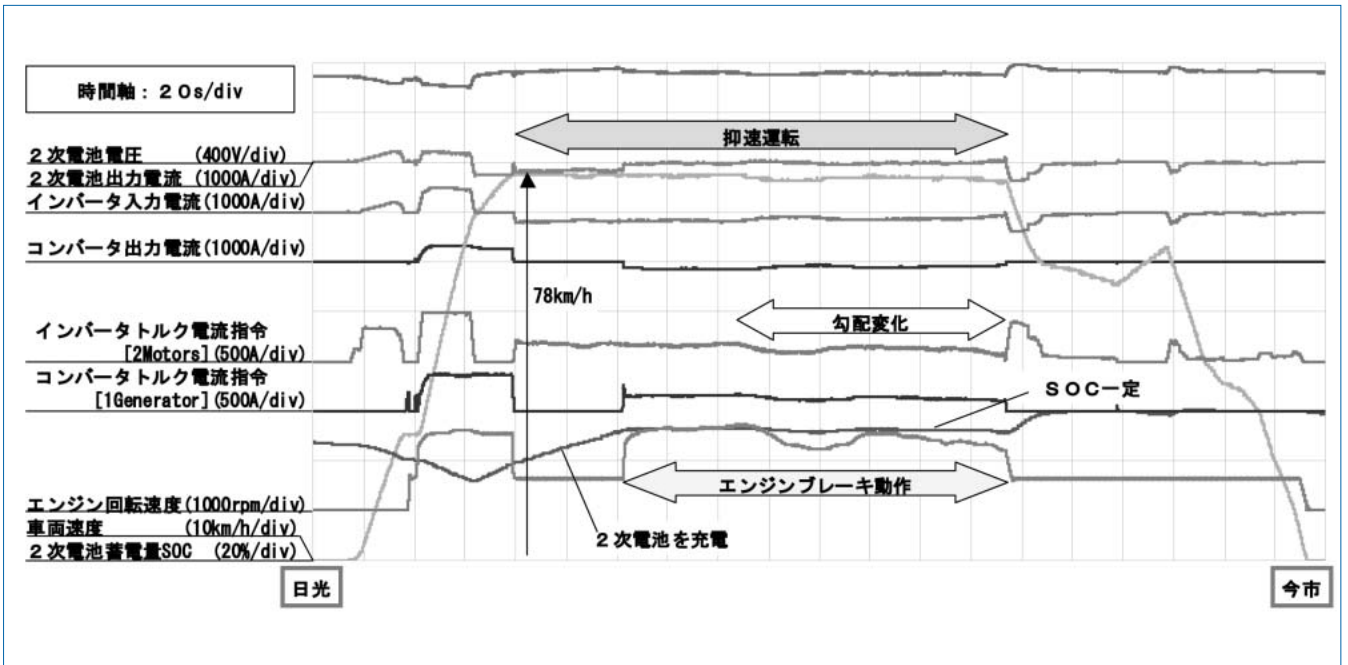


図9：走行試験チャート（日光⇒今市）

階として、バッテリーの充電状態が高いレベルまで上昇すると、エンジンの排気ブレーキによりブレーキエネルギーを消費する。このチャートを見て判るように、抑速ブレーキを動作してしばらくは、エンジンアイドリング状態で「2次電池蓄電量」が上昇している。その後、蓄電量が一定水準に達するとエンジン回転数が勾配変化に応じて小刻みに変化していることが判る。これがエンジン排気ブレーキを行っていることを示している。

(注) N:ノッチ

4.3 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、NETレインのシステムで20%程度期待できることとなった。

また、シミュレーション結果と現在までの走行試験結果を比較すると以下ようになる。

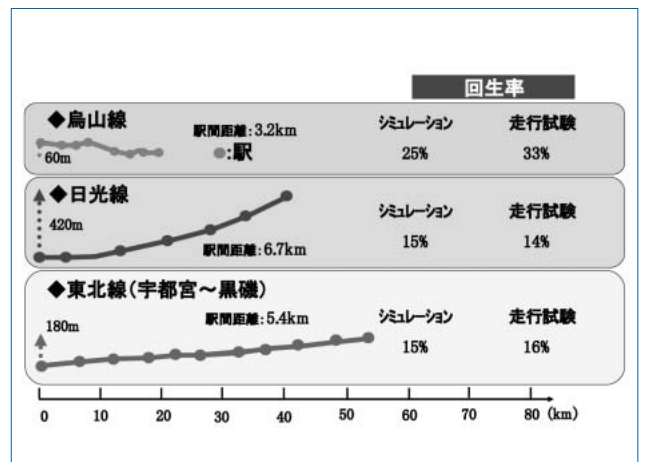


図10：線区別回生率比較

シミュレーションと走行試験の回生率の値については、ほぼ同等の数値となっている。なお、1月から走行試験を実施している「陸羽東線」は25%、東北線（盛岡～北上間）は23%という結果も得られている。走行試験結果においても、約20%程度の回生率となっている。

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、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NET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。