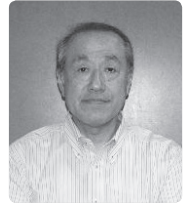


ハイブリッド車両と蓄電池駆動電車システムの開発

JR東日本研究開発センター 環境技術研究所 次長
神孫子 博



JR東日本研究開発センターでは、環境負荷低減をめざした新しい動力システムの開発に向けて、2003年度に試験車両NETレイン（New Energy Train）を製作し、ディーゼルハイブリッドの開発試験を行いました。その後、燃料電池ハイブリッドの試験を行い、それらの開発成果を踏まえ、2008年度から蓄電池駆動電車システム（試験車愛称「スマート電池くん」）の開発に取り組みました。各種評価試験を行い、2011年度末の非電化区間におけるシステムの実用性評価試験で、システムの開発が終了しました。ここではハイブリッド車両と蓄電池駆動電車システムの考え方などについて紹介します。

1. はじめに

鉄道はほかの交通機関と比較してエネルギー効率が高く省エネルギーと言われていますが、JR東日本では業務運営のため527億MJ（2010年度）という多くのエネルギーを使用しています。その内の約7割を列車運転用エネルギーが占めており、そのエネルギー消費を抑制し、CO₂排出量削減を図ることが、重要な課題の一つです。

車両の省エネルギー化は、主に「軽量化」「動力装置の高効率化」「回生ブレーキの有効活用」によって進められてきました。しかし、非電化区間を走行する気動車は、この回生ブレーキが構成できないこともあり、電車に比べて約3割程度エネルギー効率が劣っていると考えられています。また、気動車は排出ガス・騒音の発生の点でも、電車に比べて課題がありました。そこで、動力システムの革新による車両の環境負荷低減をめざして、NETレイン（New Energy Train）を開発しました。

NETレインは、新しいエネルギー技術を鉄道車両に取り込んでいくという思いを込めて命名され、「環境との調和」（「省エネルギー」「排出ガス・騒音の低減」と、「電車技術への転換」（「省メンテナンス」「運転性能の改善」）が開発コンセプトです。

ここでは、NETレインを使用して開発してきたディーゼルハイブリッド車両と燃料電池ハイブリッド車両の開発成果を振り返るとともに、蓄電池駆動電車システムの考え方などについて紹介します。

表1はこれら3種類のハイブリッドシステムの開発の流れで、表2はシステム比較です。いずれも蓄電池で動く駆動システムという点で共通の構造をしており、蓄電池にエネルギーを供給する手段として、エンジン、燃料電池、架線と進化してきたと考えることもできます。一方、蓄電池駆動電車システムは、蓄電池へのエネルギー供給源が車両に搭載されていないという点で、ほかのハイブリッドシステムと異なっています。そのため、搭載する蓄電池容量の設定をはじめとして、システムの考え方がより重要です。

表1 ハイブリッドシステム開発の流れ

| 年度 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|----------------|------|--------|------------|---------|------------|------------|----------|----------------------------------|----------|------------|---------|--|
| ① ディーゼルハイブリッド | 動向調査 | システム試作 | NE Train試作 | 橋内・本線試験 | 改良 本線試験 | 営業車両 | | ★2007年7月 ※E200形 ハイブリッド車両「こぐま」 | | | | ★2010年12月～ HB-E300形 リードハイブリッド車両 （長野、秋田、青森地区） |
| ② 燃料電池ハイブリッド | | | | | 動向調査 | NE Train改良 | 橋内・本線試験 | 改良 本線試験 | | | | |
| ③ 架線-蓄電池ハイブリッド | | | | | | | 【車両】動向調査 | システム試作 | 試験台試験 | NE Train改良 | 橋内・本線試験 | 組合せ試験 改良 本線試験 組合せ試験 |
| | | | | | | | | | 【地上充電設備】 | システム試験 | システム試作 | 鳥山駅へ移設 |

2. ハイブリッド車両の開発

2.1 ディーゼルハイブリッド車両

ハイブリッド方式は、シリーズハイブリッド方式とパラレルハイブリッド方式に大別され、それらの方式を組み合わせた複合ハイブリッド方式と合わせて、3方式があります。シリーズハイブリッド方式は、機械的動力源と電気的動力源が直列に配置され、機械エネルギーはすべて電気エネルギーに変換され、電気エネルギーの状態エネルギーが統合されます。一方、パラレルハイブリッド方式は機械的動力源と電気的動力源が並列に配置され、歯車装置や変速機などの機械的機構によりエネルギーが統合されます。

NEトレインの開発では、①電車技術が有効に活用できる。②パラレル方式とすると機械的機構が複雑となる（メンテナンスなどで劣る）。③将来、燃料電池システムの導入が容易である。などから、シリーズハイブリッド方式としました。

蓄電装置として、電気二重層キャパシタ、フライホイール、二次電池などが考えられますが、鉄道車両において要求される高出力・大容量・安全安定性を考慮すると、ニッケル水素蓄電池とリチウムイオン蓄電池が有力で、リチウムイオン電池のパワー密度などの優れた性能とその将来性を期待し、リチウムイオン蓄電池を採用しました。

蓄電池容量が大きいほどエネルギー効率的に有利になりますが、コストなどを考慮し必要最小限の容量としています。平均的な停車1回当たりのブレーキエネルギーは約1kWhで、平均的な駅間距離5kmを走行するのに必要な力行電力量は約3kWhです。それと、リチウムイオン電池の寿命や出力を考慮して設定した充電率（SOC:state of charge）の範囲（20～60%）で使用することなどを総合的に検討し、蓄電池容量を10kWhとしています。

制御への要求として、①省エネルギーの視点で、「回生エネルギーを有効に蓄電する」「発電用エンジンは、極力最高効率状態で運転する」②騒音・排出ガス抑制の視点で、

「駅停車時や駅構内の低速走行時に、蓄電池出力を主体として、極力エンジンを稼働しない」、があります。それらを考慮し、「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、車両の速度と蓄電池の充電状態に応じてエンジンによる発電量を制御します。これにより力行時の必要な電力の確保と回生エネルギーの最大限の回収を実現しています。

2003年から実施した走行試験により、従来のディーゼル車と比較して、約20%の省エネルギー効果が得られました。その成果を踏まえ、キハE200形車両が世界初のディーゼルハイブリッド営業車両として、2007年から小海線で営業運転を開始しました。

2.2 燃料電池ハイブリッド車両

ディーゼルハイブリッド車両の開発が終了し、さらなる環境負荷低減と自律分散型エネルギーシステム車両（各車両が発電とエネルギー管理をして走行）をめざして、燃料電池ハイブリッド車両の開発を行いました。

水素を燃料とした燃料電池は、地球環境に優しく、化石燃料の枯渇にも対応可能な動力源として注目されており、

- ①将来の燃料電池技術のブレークスルーに対応可能な燃料電池を用いた車両システム技術の開発
- ②燃料電池システムを鉄道で使用する場合の課題の把握が開発目的です。

燃料電池は、水素と酸素が化学反応し、水が発生する際に電子を取り出す（発電する）もので、電解質の違いにより数種類のものが実用化されていますが、①運転温度が低い。②起動・停止時間が短い。③発電効率が高く小型化が可能。などの特徴を有する固体高分子形燃料電池を使用することとしました。

燃料電池と蓄電池を組み合わせ、回生電力を有効に活用し、車両の加減速、燃料電池発電量制御および蓄電池充放電制御など、走行に必要なエネルギーを得るための発電装置と蓄電池のエネルギーバランス制御を行うことにより、効率的なエネルギー管理を実現しました。

表2 ハイブリッド車両のシステム比較

| 種類 | エネルギー供給システム | 駆動システム | | | | | | | | |
|---------------|---|--|----|--|---|---------------------------|---|---------------------------|---|---|
| ①ディーゼルハイブリッド | <p>軽油タンク → ディーゼルエンジン (331kW (480PS)) → 発電機 → 電力変換装置 (AC/DCコンバータ) → DC680V</p> | <p>VVVFインバータ → 主電動機 (車輪) ×2 → 補助電源装置 → 主回路用蓄電池</p> <p>蓄電池の用途</p> <table border="1"> <tr><th colspan="2">用途</th></tr> <tr><td>①</td><td>・回生エネルギー吸収 ・エンジン最大負荷抑制</td></tr> <tr><td>②</td><td>・回生エネルギー吸収 ・燃料電池負荷の平準化</td></tr> <tr><td>③</td><td>・電化区間：回生エネルギー吸収 架線電力吸収 ・非電化区間：回生エネルギー吸収 走行電力供給</td></tr> </table> | 用途 | | ① | ・回生エネルギー吸収 ・エンジン最大負荷抑制 | ② | ・回生エネルギー吸収 ・燃料電池負荷の平準化 | ③ | ・電化区間：回生エネルギー吸収 架線電力吸収 ・非電化区間：回生エネルギー吸収 走行電力供給 |
| 用途 | | | | | | | | | | |
| ① | ・回生エネルギー吸収 ・エンジン最大負荷抑制 | | | | | | | | | |
| ② | ・回生エネルギー吸収 ・燃料電池負荷の平準化 | | | | | | | | | |
| ③ | ・電化区間：回生エネルギー吸収 架線電力吸収 ・非電化区間：回生エネルギー吸収 走行電力供給 | | | | | | | | | |
| ②燃料電池ハイブリッド | <p>水素タンク → 燃料電池 (130kW) → 発電機 → 電力変換装置 (DC/DCコンバータ) → DC680V</p> | | | | | | | | | |
| ③架線・蓄電池ハイブリッド | <p>集電装置 → 電力変換装置 (DC/DCコンバータ) → DC600V</p> | | | | | | | | | |

また、使用する高圧水素の安全対策として、車両においては、燃料電池自動車の安全対策を参考に、高圧水素を漏洩させない対策と、万一漏洩した場合においても火災や爆発を起こさない対策を行っています。地上側においては、車両への高圧水素充填時の対策を主に実施しました。

走行試験により、100km/hまでの走行を確認しましたが、燃料電池の信頼性や効率の向上が課題として残りました。今後については、燃料電池の性能向上とコスト低減のほか、グリーン水素製造（CO₂を発生させない水素の生産）や水素の貯蔵・供給などのインフラ整備など、周辺動向を注視していくこととしました。

3. 蓄電池駆動電車システムの開発

3.1 開発の背景と目的

ハイブリッド自動車や電気自動車のさらなる普及に伴い、蓄電池の性能向上が著しくなるとともに、蓄電池市場も拡大してきました。JR東日本では、ディーゼルハイブリッド車両と燃料電池ハイブリッド車両の開発で得た知見や蓄電池技術の進展状況から、非電化区間を蓄電池に貯めた電力エネルギーのみで走行する車両システムの実現性が見えてきたことから、非電化区間の新たな環境負荷の低減方策として、「蓄電池駆動電車システム」の開発に取り組むこととしました。

このシステムは、エンジンからの排気ガスをなくし、CO₂排出や騒音を低減することを目的としています。付帯的な効果として、電化区間と非電化区間の共通運用が可能となり車両運用の効率向上が図れることや、エンジン・変速機などの手のかかる機械部品の削減など、メンテナンスの省力化を期待しています。

3.2 システムの全体構成 (図1)

電化区間では、パンタグラフを上げて普通の電車と同様に走行するほか、蓄電池の充電率が低い場合は架線から蓄電池に充電を行います。また逆に架線電圧が低い場合には、蓄電池からの電力で走行アシストすることもできます。

電化区間から非電化区間に乗り入れる際はパンタグラフを降下させ、蓄電池電力のみで走行します。ブレーキ時は回生電力で蓄電池を充電し、電力の有効活用を図ります。

非電化区間の距離などに応じて、非電化区間の折り返し駅や途中駅に地上充電設備を設け、車両に急速充電を行います。車両蓄電池への充電設備を電化区間側のみに設ける方法（電化区間における走行充電を含む）も考えられますが、システムのタフネス性や蓄電池搭載量などを考慮すると、非電化区間の折り返し駅に地上充電装置を設ける方が合理的と考えています。

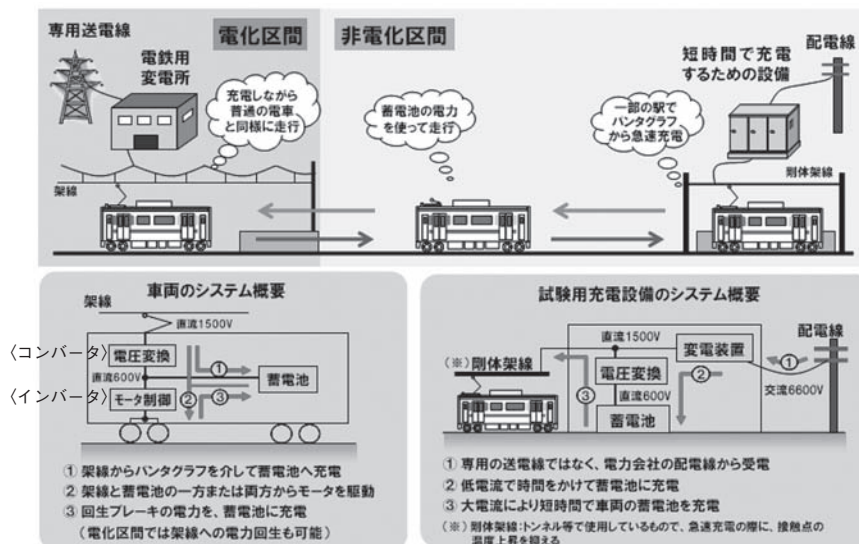


図1 蓄電池駆動電車システムの全体構成

3.3 蓄電池の選定と電圧設定

大宮総合車両センター内の台車試験装置を使用し、リチウムイオン蓄電池とニッケル水素蓄電池による駆動基礎試験を行いました（図2）。その結果、蓄電池のみでの走行が可能ことや、充放電性能などを考慮して設定した蓄電池の重量の観点からリチウムイオン蓄電池が車載に有利、との結果を得ました。また、蓄電池電圧としては、従来からの蓄電池技術・電力変換装置技術の活用や絶縁などを考慮し、直流600Vとしました。

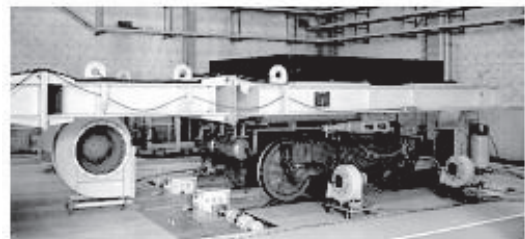
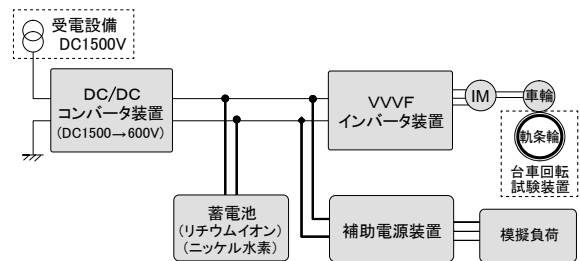


図2 台車試験装置による試験機器構成と試験状況

3.4 蓄電池容量の設定

蓄電池を車両に多く搭載することは、回生エネルギーの有効活用やシステムの自由度を上げるために有効ですが、蓄電池の価格・重量・搭載場所などを考慮すると、限られた搭載量（蓄電池容量）の中で有効に活用する方法が重要になります。

鉄道の特長として、基本の運行パターンや走行パターンが決まっていますので、シミュレーションなどで基本の容量設定

を行います。勾配区間などでは、上り勾配時の登坂能力の確保や下り勾配時の回生エネルギーの吸収などの検討も必要になります。

また、蓄電池の性能を安定して発揮させるためには、図3に示す考え方をもとに容量の設定を行う必要があります。車両の消費電力は駆動負荷と補機負荷の合計であり、これに列車遅延による補機負荷の余裕、蓄電池の経年劣化による容量低減分や使用する充電率範囲を考慮します。

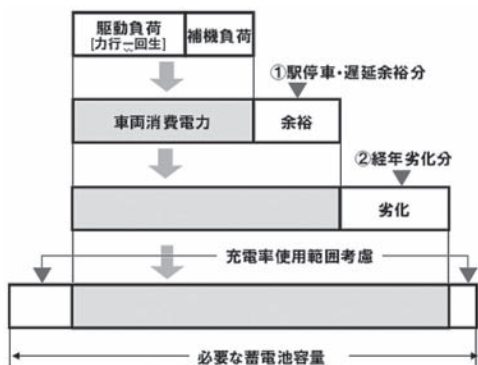


図3 蓄電池容量の考え方

3.5 車載蓄電池への充電時間と充電システム

1時間に1本程度の運転が行われる線区を想定して、システム検討しています。列車の折り返し時間を考慮して地上充電装置から車載蓄電池への充電時間を10分、配電線から地上充電装置（蓄電池）への充電に45分、制御の切換えなどの余裕時間として5分、と割り振っています。

地上充電装置は、極力、設備投資を抑制する観点から、一般の配電線からの受電とすることで、検討しました。また、受電電力・設備容量の低減のため地上にも蓄電池を設置し、列車が在線していない時間帯に地上蓄電池を充電しておき、列車到着後に急速放電する方式としています。このように地上に蓄電池を設置する方式とすると、将来は太陽光発電などと組み合わせて自然エネルギーの有効活用の可能性も考えられます。

地上充電装置と車両システムは、それぞれ架線電圧と電流を監視し、蓄電池の充電状態に応じてそれらを制御することにより、特別な情報通信手段を用いることなく、相互に自律的に動作するようにしています。

なお、車載蓄電池への充電時間は、その容量設定（使い方）と蓄電池の温度管理を適切に行うことにより、目標としている10分以内で充電できることを確認しています。

3.6 車両システム

(1) 主回路システム構成

直流1500VをDC/DCコンバータにより直流600Vに変換し、蓄電池に充電するようにしています。また、駆動用のVVVFインバータと補助電源装置は、この直流600Vを入力としています（図1）。蓄電池の電圧に対してコンバータの出力電圧を調整することで、電力の流れる向きと電流値を制御し、電

流を切り換えるための接触器などを設けず、信頼性の高いシステムとしています。

(2) 蓄電池搭載方法

試験開始当初は、さまざまな試験条件を容易に設定できるように蓄電池ユニットを客室内に設置していましたが、2011年度にそのうちの1ユニットを座席下に移設して走り込み試験を行い、営業車を想定した搭載方法について評価しました。蓄電池の充放電により周囲温度が上昇して蓄電池寿命へ影響することはないか、車内のお客さまの乗車環境に影響を与えるようなことはないか、冬季の留置環境における蓄電池充電時間への影響がないか、などについて検証をおこない、特に問題ないことを確認しています。

また、蓄電池搭載にあたっては、メンテナンスや万一の不具合時への配慮についても検討を加えています。

(3) 運転台エネルギーモニター表示（図4）

通常運転する場合は、蓄電池の充電状況を意識する必要はありませんが、列車の運転整備時や車両故障・輸送障害などの異常時に、蓄電池状態やシステム動作状況を確認するエネルギーモニター表示器を運転台に設けています。これはエネルギーフローを「見える化」したもので、さらに望ましい情報提供のあり方を検討しています。

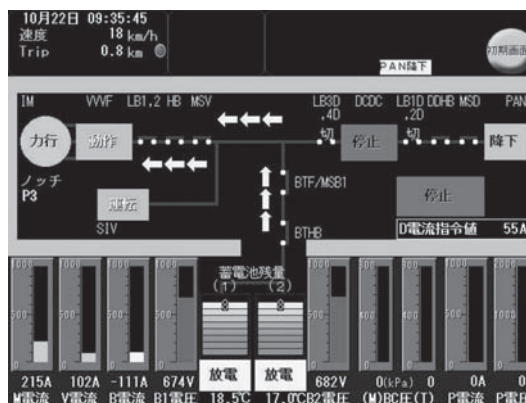


図4 エネルギーモニター表示例（パン下げ、力行）

4. まとめ

蓄電池駆動電車システムの開発は、2011年度末の非電化区間のシステム実用性評価試験で終了しました。電化区間においても蓄電池を車載することで、上り勾配の蓄電池力行アシストによる架線電圧変動抑制効果や、下り勾配での抑速ブレーキ回生電力回収効果も合わせて確認しました。

今後はさらに省エネルギーな鉄道システムの実現をめざし、車両システムの高効率化、経済的な列車運転、地上と車上で連携したエネルギーシステム構築に向け、取り組んでいきたいと考えています。