

車両用主回路システムの海外の研究開発動向

秦 広*

Recent Trends of a R&D of Propulsion Systems in Abroad

Hiroshi HATA

In the background that environment issue has become more important globally, various Japanese railway companies, institutes and manufactures have carried out various R&D of propulsion systems, such as brake energy storage to on-board secondary battery or capacitor and its reuse, fuel cell railway vehicle and high efficiency propulsion equipment. Such R&Ds have been carried out by foreign manufacturers or railway operators also. In this paper, concept, progress and prospect of R&D in the foreign countries and comparison of them with Japan, are shown.

キーワード：主回路，ハイブリッド，燃料電池，電気二重層キャパシタ，永久磁石

1. はじめに

最近のわが国の車両用主回路システムの研究開発の動向として、環境問題への取り組みが年ごとに高まるという背景のもと、ハイブリッドシステム、燃料電池の車両の駆動源への適用、主回路機器の効率向上（永久磁石同期機など）などが挙げられる。これらについては海外の各メーカー、鉄道事業者でも同様に広く行われている。本稿では、それらの開発のコンセプト、進行状況、日本との比較、課題と見通しを概説する。また、最近の海外の営業車両の主回路システムの動向と EMC についても触れる。

2. ヨーロッパの Railenergy Project^{1) 2)}

主回路システムの求められる特性に省エネがあるが、ヨーロッパでは現在包括的に進められているプロジェクトがある。これは Railenergy という名称で、目標は「2020年に輸送量が2倍になることを織り込んで消費エネルギーを現在の6%減」としている。この目標は輸送量あたりにすると53%減となる。このプロジェクトは UIC, UNIFE（ヨーロッパ鉄道工業会）、メーカーではシーメンス、ボンバルディア、アルストム、アンサルドブレダなど合計27の組織が参加している。2006年9月から4年間でプロジェクト実施期間で、4つの分科会が設けられている。うち3つが車両関係であり、下記のようにメーカーが分担している。

トラクション分科会（シーメンス）
超電導主変圧器

中周波変圧器

ディーゼルハイブリッド

コンポーネント分科会（ボンバルディア）

エネルギー蓄積装置

排熱の再利用

省エネ運転の計測

トポロジー分科会（アンサルドブレダ）

高効率主回路システム

補助回路の構成

冷却回路

車両関係の分担をみると、超電導主変圧器や中周波変圧器など各メーカーが従来から独自に実施しているものを取り込んだものもある。また、実質的に重複している内容もあるように見える。6月に開催された STECH'09 でこのプロジェクトについて発表したシーメンスのヘニング氏の話では、メーカー間の調整には苦心があったとのことである。なお、予算はプロジェクト全体で1470万ユーロであり、うち800万ユーロがEUからである。この予算では上記の開発を全て賄えるとは考えられず、各メーカーの開発の一部補助という意味合いと思われる。

2006年9月のキックオフミーティングの後、最近は数カ月ピッチでヨーロッパ各地でワークショップを行うという精力的な活動を行っており、成果が目される。

3. ハイブリッド車両の研究開発

3.1 SNCF のエンジン・ハイブリッド入換機関車³⁾

フランス国鉄 (SNCF) が主体となって、入換用ディーゼル機関車のハイブリッド化、燃料電池の適用についての研究開発をメーカーなどと進めている。概要を表1に示す。

* 車両制御技術研究部 主管研究員

特集：車両技術

表1 SNCFのハイブリッド入換機関車の概要

名称	PLATHEE
用途	ディーゼル入換機関車等
方式	エンジンとニッカド電池と電気二重層キャパシタのハイブリッド
蓄エネ媒体等の諸元	ニッカド電池：容量138Ah、効率75%、放電電流5C、充電電流は3/C 電気二重層キャパシタ：容量5000F、セル電圧2.5V、寿命は50万サイクル。
車両の概要	SNCFのBB63000形ディーゼル機関車を改造。主電動機は100kW×4台。

ハイブリッド機関車の用途は、

- ・貨物列車の組成、入換
- ・大都市の枝線の列車
- ・駅での旅客列車の組成
- ・大都市またはトンネルでの夜間作業列車
- ・トンネル内での架線停電時の救援

を考えているが、当面は、貨物列車の組成、入換と大都市の枝線の列車を目標としている。

主回路構成はシリーズハイブリッド方式で、蓄エネ媒体として電気二重層キャパシタとニッカド電池を併用している。ベースロード対応がニッカド電池、ピークロード対応がキャパシタである。

機関車の元々のエンジンの出力は600kWであるが、このシステムではエンジンは一仕業の間の平均の出力を分担すればよいので245kWに抑えることができた。エンジンに発電機を直結し、発生した交流電力を整流器で直流に変換する。整流器の出力電圧は540Vである。

また、エンジン、発電機および整流器に代えて燃料電池を搭載する試験も行う予定である。発電電力72kW、外部出力電力50kW以上が目標である。定置試験をSNCFルマン工場で行い、その後車両での試験を2008年秋に行った。

試験に使う車両は、入換用のディーゼル機関車を改造する。同型の機関車の外観を図1に示す。



図1 試験に用いられる車両と同型のBB63000形機関車 (提供：飯島 仁)

3.2 アルストムのエンジン・ハイブリッド入換機関車⁴⁾

アルストムでは、ニッカド電池とディーゼルエンジンのハイブリッドシステムを開発し、ドイツのBR203形入換機関車に搭載して試験を行っている。媒体の選定に際して、鉛蓄電池は容積、質量が大きく内部抵抗が大きいこと、ニッケル水素電池は使用経験が少ないことと管理装置が必要なことからニッカド電池を選定した。1インバータで2台の主電動機を駆動する主回路構成である。概要を表2に、同型の機関車の外観を図2に示す。

回生ブレーキは、入換機関車ではメリットが小さいのでシステム開発に当たっては考慮しなかった。エンジンに直結する発電機は水冷の永久磁石同期機を用いた。整流器の出力は200kWである。バッテリーの出力は350kW、標準電圧は600V、536セルで構成する。バッテリーの質量は6t以上だが、重量増は粘着上よい。

入換運転が1時間に5回程度、1回数分程度、最高速度20km/hという前提でシミュレーションすると、エンジンは1時間に2回、1回あたり数分から10分程度の運転になり、それ以外は電池の動力で運転できる。その結果、燃料消費量を40%削減可能というシミュレーション結果を得た。これはエンジンの動作時間が短く、動作時は定格点付近の効率が良い回転数で運転できることや低速では効率の悪い液体変速機を使わないことなどによる。

1000トンを超える入換作業を含めたヤードでの試験で、燃料消費量30%低減という結果を得た。

2009年4月8日からオランダのロッテルダム港で2ヶ月間の試験を開始した。

表2 アルストムのハイブリッド入換機関車の概要

名称	なし
用途	ディーゼル入換機関車
方式	エンジンとニッカド電池のハイブリッド
蓄エネ媒体諸元	ニッカド電池：出力350kW。600V。536セル。
車両の概要	DBのBR203形ディーゼル機関車を改造。4軸中2軸が動軸。



図2 試験に用いられる車両と同型のBR203形機関車 (提供：野島昌志)

3.3 ボンバルディアのハイブリッド車両⁵⁾

ボンバルディアでは、架線と電気二重層キャパシタのハイブリッドトラムを開発している。また、ディーゼルエンジンと電気二重層キャパシタのハイブリッド車両についても検討を行っている。トラムについては、1kWhで450kgのキャパシタとこれを制御するIGBTチョップからなる「エネルギー節約ユニット」をマンハイムのトラムの屋根上に搭載した。2003年9月から4年間長期試験を行い、消費エネルギーが約30%低減というデータを得た。また、一部区間の架線レス運転についても試験し、500m架線レスで走らせることができた。この時の最高速度は26km/hである。トラムの概要を表3に示す。

上記のユニットを二つ搭載することにより、架線からの電力をほぼ半減することができる。その結果、き電設備でのエネルギーロスを低減することができる。これによる所要変電所数について17.7kmの線区で5分間隔での運転という条件で試算した結果、8か所から6か所に減らせることがわかった。

また、駅に充電設備を設けることにより連続架線レス運転も可能である。1.7kWhのキャパシタ2台を搭載すれば30mの長さのトラムでも運転可能と試算している。この場合、600kWで20秒充電すると3kWh蓄えられる。

開発したシステムを搭載した車両を既に受注している。

3両編成、100tの電気式ディーゼル車への電気二重層キャパシタの搭載による効果についても試算した。4.5kWhの「エネルギー節約ユニット」の搭載により、加速度を約2割向上し、運転時間を一定にすれば惰行時間が多くなるので6kmの駅間で9kWh、割合で28%エネルギー消費を節約できると試算した。蓄エネ媒体としてバッテリー（ニッケル水素）も検討したが、サイクル寿命から無理と判断した。

同社では今後も媒体については注意深くウオッチしていくとしている。

表3 ボンバルディアのハイブリッドトラムの概要

名称	MITRAC
用途	トラム
方式	架線電源と電気二重層キャパシタのハイブリッド
蓄エネ媒体等の諸元	電気二重層キャパシタ：1kWh, 300kW, 450kg × 2 制御はIGBTチョップ
車両の概要	ドイツ各地で使用されているVariotramと思われる。長さ約30m。主電動機は95kW × 4台。

3.4 シーメンスの架線ハイブリッドトラム^{6) 7)}

シーメンスでは、ニッケル水素電池と電気二重層キャパシタを車両に搭載し、架線電源とのハイブリッド運転

あるいは架線レス運転ができる車両を開発している。同社のトラム標準車両であるCombino plusに蓄エネ関係の機器を搭載して、2008年11月からポルトガルのリスボンで営業車両で走行を行っている。概要を表4に示す。

ニッケル水素電池がベースロード用、電気二重層キャパシタがピークパワー用と考えて併用している。

回生失効防止できることによりエネルギー消費を30%低減し、年間80tのCO₂排出削減ができる。また、架線レス走行の場合充電間隔を2500mとすることができる。

リスボンでは既に2万kmの営業走行実績がある。実績ではエネルギー消費は11%減にとどまっているが、これは走行線区に勾配が多いことなどによる。

表4 シーメンスのハイブリッド（架線レス）トラムの概要

名称	HES
用途	トラム
方式	架線電源とニッケル水素電池と電気二重層キャパシタのハイブリッド
蓄エネ媒体諸元	ニッケル水素電池：不明 電気二重層キャパシタ：80F
車両の概要	シーメンス標準形Combino plus。長さ33m, 4車体。主電動機は100kW × 6台

3.5 アメリカVP LLC社の燃料電池ハイブリッド入換機関車^{8) 9)}

Vehicle Project LLCで燃料電池とバッテリー（鉛蓄電池と思われる）のハイブリッド入換機関車を開発している。プロジェクトのメンバーには燃料電池メーカーのパラード社や鉄道事業者のBNSFなどが入っている。車両の概要を表5に示す。

開発期間は2006年夏から2008年夏までである。燃料電池にすでにヨーロッパ各国で合計150万kmのバスの走行実績があるCitaroを使うことでこの短期間の開発を達成する。

表5 VP LLCのハイブリッド機関車の概要

名称	なし
用途	入換機関車
方式	燃料電池とバッテリー（鉛蓄電池と思われる）のハイブリッド
燃料電池諸元	定格出力250kW。
蓄エネ媒体諸元	鉛蓄電池と思われる。
車両の概要	エンジンとバッテリーで構成されるグリーンゴート形機関車を改造（エンジンを降ろして燃料電池を搭載）。主電動機4台。燃料電池とバッテリーを合わせた車両としての最大出力は1000kW以上。重量127t。

特集：車両技術

設計に当たってはまず機関車に求められる負荷を検討した。要求されるピーク出力は600～1100kWであるが数分しか続かない。アイドル時間の割合は50～90%であった。すると所要出力の平均は40～100kWとなる。そこで定格出力250kWの燃料電池で十分対応できると判断した。燃料は高圧水素を使い、カーボンファイバ製のタンクを14個搭載する。水素の供給周期は機関車の仕業条件に依存するが1日～5日毎と考えている。供給時間は10～30分である。

3.6 各社の研究開発についての評価、考察

ハイブリッド車両の研究開発に際しては、蓄エネ媒体の選定が重要なポイントになる。当該車両の運転パターンを分析してから最大パワーとトータルエネルギーをそれぞれ計算し、両方を満足する量の媒体を載せる必要がある。海外の動向を見て気がつくのは、エネルギー密度が他の媒体より大きいことから日本で多く使われているリチウムイオン二次電池が使われていないことである。これはヨーロッパでは入手が困難であるためと思われる。そこで、SNCFやシーメンスのようにパワー密度に優れた電気二重層キャパシタとエネルギー密度に優れた電池の併用という苦心が出てくる。この場合、それぞれの媒体に電圧調整用のチョップ装置が必要になり、システムの複雑性、コストの面で不利となる。当面の開発ではともかく、ハイブリッド車両が量産される将来においては併用はないと考えられる。また、二次電池もニッカド電池やニッケル水素電池という記述であるが将来的にはリチウムイオン二次電池になると思われる。文献でもそこを意識しているのか、「今後も媒体についてはウオッチしていく」といった含みを持たせる表現がみられる。

SNCFとアルストムがそれぞれ行っているエンジンと蓄エネ媒体のハイブリッドは、日本ではJR東日本がキハE200で既に実用化し、機関車版をJR貨物が開発している。また、SNCFの計画にある燃料電池と蓄エネ媒体とのハイブリッドは鉄道総研が試験車両で構内試験線での走行を行った実績がある。JR東日本ではNEトレインを用いて本線走行も行っている。

ボンバルディアのハイブリッドトラムは4年間という長期の営業線での試験を行った実績が目玉を引く。営業車両を受注しているとのことで今後の進展が期待される。

シーメンスのハイブリッドトラムは、架線レス運転可能という報告であるが、リスボンでは架線レス運転はしていない模様である。なお、鉄道総研のHi-tramは1分間の充電で4kmの走行ができる。

アメリカの燃料電池ハイブリッドは、元の機関車はエンジンと鉛蓄電池という構成であり、エンジン（+発電機）を燃料電池に置き換えるものである。4軸127tというアメリカならではの軸重の大きさにより、鉛蓄電池の適用が可能になる。2008年夏に走行試験を含めてプロ

ジェクト終了の予定であるが、2008年5月のWCRR2008での発表以来報告がない。プロジェクトの進捗になんらかの問題があると推測される。

4. 永久磁石主電動機の研究開発

4.1 アルストムの永久磁石主電動機とAGV^{10) 11)}

アルストムは次世代高速車両AGV(図3)の主電動機として永久磁石同期機を開発した。磁石にサマリウムコバルトを使っているところがネオジウム鉄ボロンを使っている日本や他のメーカー(後述)と異なっている。TGV東線の開業前に行われた高速試験では、東線向け車両(両端の動力車)に加えて永久磁石機をとりつけたAGV車両を編成に組み込み571.4km/hの記録を作った。

ヨーロッパで進んでいる鉄道の上下分離、運行の自由化に対応して設立されたイタリアのNTVからAGVを25編成受注しており、予定通りにいけば2011年にミラノ、フィレンツェ、ローマを結ぶ高速列車として運転が始まる。本稿執筆時点で発表されている唯一の永久磁石同期機の量産営業車両であり、今後の動向が注目される。



図3 AGV プロトタイプ車両

4.2 シーメンスの永久磁石機^{12) 13)}

シーメンスはsyntegraという名称で永久磁石機を開発している¹⁾。出力は150kWで、磁石には日本での製作例と同じネオジウム鉄ボロン磁石を用いている。輪軸と一体化させて駆動装置を省略するダイレクトドライブを併用している。台車全体で30%質量を減らした。また、横圧を40%減らすことができた。また、走行中は常に励磁が確立していることを利用して、三相を短絡する電気ブレーキを非常ブレーキとして使い、これにより機械ブレーキを簡素化するというメリットも挙げている。ミュンヘンの地下鉄の営業車両で2007年夏から2年間の長期試験を行っている。

4.3 ボンバルディアの永久磁石機^{14) 15)}

ボンバルディアは、2006年にプロトタイプ機を試作し、試験結果から永久磁石機のメリットを確認した。次の段

階としてスウェーデンのREGINA という2両編成の車両に定格出力302kWの永久磁石主電動機を2台搭載して走行試験を行った。その結果、効率は誘導機の95%から97%に向上した。また、最大1046kWの出力を得ることができ、誘導機4台分に相当するという評価をしている。

5. 最近の海外車両の動向

5.1 全体的な動向

今まで主回路に関する研究開発について述べてきたが、次に最近の営業車両の主回路システムの動向を述べる。

主電動機の種類については、一時期フランスのTGV、通勤電車や電気機関車、スペインのAVE向けなどに巻線形同期電動機を作り続けてきたアルストムも、ここしばらくはTGV、通勤電車、電気機関車に誘導機を採用している。3大メーカーの残りのシーメンス、ボンバルディアは従来から誘導機を製作しており、日本も含めて全世界的に誘導機駆動となった。しかし、先に述べたようにアルストムではAGVの試験編成で永久磁石同期機を使い、イタリアから量産編成の受注を受けている。今後、永久磁石機の広まりの動向が注目される。

電力変換装置の主素子については海外の各メーカーとも最近の新製車両は日本同様にIGBTを用いている。日本では定格3.3kVの素子が使われているが、海外では直流3000V電化区間があることもあって6.5kVの素子が使われている例もある。

高速車両の動力集中、動力分散については、フランスのSNCFは最新のTGVであるTGV-POSでも編成の両端に動力車を配置する動力集中方式を踏襲し、現在アルストムで製作している次期TGVも同じ構成である。しかし、アルストムは国外への対応も考慮して動力分散のAGVを開発しており、先述のようにイタリアから量産編成の受注を得ている。ドイツのシーメンスは最近では動力分散のICE3をスペイン向けにしたVeraloE (RENFEでの形式名はS103)、中国向けのVeraloCN (中国での形式名はCRH3)、ロシア向けのVeraloRSを次々製作しており、動力分散が定着している。イタリアでも最新のアルストム (旧フィアット) 製の国内向けのETR.600、スイスとの国際列車向けETR.610はともに動力分散である。また、最近次々と標準軌の高速新線を開業させているスペインではシーメンスとCAF (スペインの車両メーカー) 製車両は動力分散、ボンバルディア、タルゴ (スペインの車両メーカー) 製は動力集中と共存している。中国では日本製を含め4種類の高速度車両を走らせているが全て動力分散である。全体的な流れで見ると、日本が新幹線開業以来続けてきた動力分散方式の流れが強くなっている。最近の代表的な高速車両の概要を表6に示す。またS103の外観を図4に示す。

表6 最近の代表的な高速車両の例

	TGV-POS	AGV	ETR600	S103
運行者	SNCF	NTV	Trenitalia	RENFE
運行国	フランス	イタリア	イタリア	スペイン
メーカー	アルストム	アルストム	アルストム	シーメンス
運行開始	2007年	2011年予定	2008年	2007年
営業最高速度	320km/h	300km/h	250km/h	300km/h
編成	動力車+客車10両+動力車	連接11両 (動台車6, 従台車6)	4M3T	4M4T
編成出力	8800kW	9000kW	5600kW	8800kW
主電動機	誘導機	永久磁石同期機	誘導機	誘導機
主変換装置主素子	IGBT	IGBT	IGBT	IGBT



図4 スペインのS103

5.2 AGVの主回路システムの概要^{10) 11)}

最も新しく開発された高速車両ということでAGVの主回路システムを簡単に紹介する。

主回路は交流25kVと直流3kVに対応しているが、交流15kVと直流1.5kVにも対応可能であり、ヨーロッパ全域に対応できる。主回路の一つのユニットは主変圧器1台、その二つの二次巻線に電力変換装置が接続され、インバータと主電動機は4台である。1ユニットの出力は3200kWである。AGVは客先のニーズに対応して編成両数を変えられるようになってきている。たとえば11両編成 (編成長200m) のバージョンでは、上記の主回路を3ユニット設ける。主電動機は先に述べた通りであるが、電力変換装置には6.5kVのIGBTを使用している。文献では、11両編成 (編成長200m) のケースでライバル車両より70t軽くなり、消費エネルギーが15%減ると報告している。また、旅客1名を1km運ぶ際に排出するCO₂は

特集：車両技術

2.2gで、バスの30g、自動車の115g、航空機の153gよりはるかに小さいと報告している。日本のデータでは、鉄道が18g、バスが55g、自家用乗用車が172g、航空機が111gである¹⁶⁾。

6. EMCの動向

EMC (Electromagnetic compatibility) は電磁両立性と訳されている。鉄道とその周辺のいろいろな機器、装置が電磁気的なトラブルを起こさず「両立」できるという意味である。

問題となることが多いのが車両の主回路の電力変換装置から電磁ノイズが信号設備に影響を及ぼす可能性があるいわゆる誘導障害である。このほかにも架線とパンタの離線時のアークによる沿線のテレビの受信障害などさまざまなトラブルがある。これは海外でも同様であり、海外での事例を二つ簡単に紹介する。

オランダで25kV50Hz電化の貨物線が建設され、一部で直流電化の地下鉄と近接する。この地下鉄は50Hzの軌道回路を使っており、貨物線からの電流により軌道回路の誤動作が懸念された。対策として地下鉄の軌道を大容量のキャパシタを介して接地する方法が採られた¹⁷⁾。

イギリスで開催された鉄道のEMCのセミナープログラムには、390系電車(図5)のEMCの事例紹介という項目があった。この車両は広く使われている振り特急電車である。「絶縁サージ保護デバイスの開発」という項目があり、サージ関連のトラブルがあったと思われる¹⁸⁾。



図5 イギリスの390系電車

7. おわりに

ハイブリッドに似たものに二つの動力源を切り換えて使うデュアルモードがある。フランスのニースにおける部分架線レストラムなどの例があるが紙幅の制約から本稿では割愛した。

本稿作成のために文献、インターネットをいろいろと調査したが、記述の中に、「省エネ」「燃費向上」「CO₂排出を低減」などの表現が多く目についた。今後も地球環

境問題は全世界的に重要性が増していくと考えられ、他の交通機関より環境にやさしい鉄道の特性にさらに磨きをかける研究開発が進むと思われる。

文献

- 1) Railenergy URL, <http://www.railenergy.org>
- 2) U. Henning et al., "INNOVATIVE ENERGY SAVING SOLUTIONS FOR RAILWAY SYSTEM" presented at the STECH'09, Niigata, Japan, June 16-19, 2009.
- 3) M. Thiounn, A. Jeunesse, "PRATHEE A Platform for Energy Efficiency and Environmentally Friendly Hybrid Trains" presented at the WCRR2008, Seoul, Korea, May 18-22, 2008.
- 4) H. Girard et al., "Hybrid shunter locomotive" presented at the WCRR2008, Seoul, Korea, May 18-22, 2008.
- 5) M. Frohlich et al., "Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles" presented at the WCRR2008, Seoul, Korea, May 18-22, 2008.
- 6) Siemens transportation URL <http://w1.siemens.com/press/en/pressrelease/mobility/imo200903024.htm>
- 7) Siemens Sitras - another technique to replace catenary, Today's Railway Europe 161, pp.9, 2009.
- 8) Fuelcell propulsion Institute URL, <http://www.fuelcellpropulsion.org/Rail/Websites/Switcher.htm>
- 9) A.R. Miller et al., "Zero- Emission , Hydrogen-Fuelcell Locomotive for Urban Rail" presented at the WCRR2008, Seoul, Korea, May 18-22, 2008.
- 10) Alstom URL, <http://transport.alstom.com>
- 11) L'Automotrice a Grande Vitesse d'Alstom: des idees novatrices!, Revue Generale des Chimins de Fer, May 2008. pp46-50
- 12) Siemens transportation URL, <http://www.mobility.siemens.com/ts/en/pub/products/comp/syntegra.htm>
- 13) L. Lowenstein et al, "Syntegra - The intelligent Integration of Traction, Bogie and Braking Technology" presented at the WCRR2008, Seoul, Korea, May 18-22, 2008.
- 14) Bombardier transportation URL, <http://www.bombardier.com/en/transportation/sustainability/technology/mitrac-permanent-magnet-motor>
- 15) Green train shows Swedish technology, International Railway Journal, September 2008, pp.51-54
- 16) 数字で見る鉄道2008, p.317
- 17) R. Koopal et al. "50Hz Track Circuits Parallel to a 25kV 50Hz railway line" presented at the WCRR2008, Seoul, Korea, May 18-22, 2008.
- 18) The Institution of Engineering and Technology URL, <http://www.theiet.org/events/2009/EMC%20in%20Railways%202009%20Programme%20v4.pdf>