ハイブリッド電源鉄道車両の技術動向調査

千葉大学大学院　工学研究科　人工システム科学専攻　電気電子系コース　准教授
近藤圭一郎

１．調査研究の目的

近年，リチウムイオンバッテリに代表される蓄電素子の発達により，車上や地上に蓄電素子を配置した，ハイブリッド電源車両の研究開発が盛んに行われている。

蓄電素子と電力変換回路等を組み合わせた蓄電装置と，他の電源とを組み合わせたハイブリッド電源駆動車両は，その構成によって下記のように分類できる。

・非電化区間を対象としたもの

ディーゼル発電機や燃料電池等のエネルギー源と，バッテリや電気二重層コンデンサ等の蓄電素子を組み合わせた，ハイブリッド電源鉄道車両および，充電ポスト等で蓄電素子に充電し，架線レスでの走行が可能な車両

・電化区間を対象としたもの

電化区間走行中は，架線からの電力と車上の蓄電素子からの電力の双方を用いて走行できる，もしくは架線下走行時等に充電を行い，架線レスで走行が可能なハイブリッド電源鉄道車両

このようにいくつか類型化が可能であるが，蓄電素子の種類や，応用対象，およびその設計法等の体系化は未実施である。限られた蓄電素子性能のもと，ハイブリッド電源車両のメリットを引き出しつつ，低コスト，小型軽量なシステムとするためには，技術の体系化が有用である。

そこで、本調査では，我が国をはじめとする世界のハイブリッド電源鉄道車両に調査を行ない，その技術の体系化を試みる。

２．ハイブリッド電源車両の応用事例

2．1　応用動向

ハイブリッド電源車両は前述のように，非電化区間向けの車両と電化区間向けの車両に分けられる。具体的な応用としては非電化区間車両では，旅客用ディーゼル動車で蓄電装置とのハイブリッド化を行うものと，入換用ディーゼル機関車をハイブリッド化するものに分けられる。前者はエンジン動作点の最適化および回生電力有効利用による燃費低減と排出ガス低減を目指している。後者は蓄電装置により，エンジン出力の平準化を行うことで，エンジン容量の低減を目指している。また，電化区

表１　ハイブリッド電気車両蓄電媒体の特徴 (1)

	リチウムイオン電池	EDLC
利点	・高エネルギー密度 ・電圧変動が小さい ・充放電効率高い	・高パワー密度 ・過負荷等耐量高 ・蓄電量検出容易
弱点	・低パワー密度 ・充電深度範囲が狭い ・過負荷等耐量低	・低エネルギー密度 ・電圧変動が大きい ・充放電効率低い

間を対象としたものは，路面電車等に蓄電装置を搭載し一部を架線レス化したり，あるいは回生電力有効利用が行われている。

鉄道車両駆動に適用あるいはその検討が行われている蓄エネルギー媒体としては、リチウムイオンバッテリ、鉛バッテリ、電気二重層キャパシタ（Electrical Double Layer Capacitor：EDLC)、フライホイールなどが挙げられる。また、蓄電媒体ではないが，燃料電池の適用についても実証試験を含めた検討が行われている。蓄電媒体のうち、エネルギー源として用いられる燃料電池を除くと、現時点で本命視されているのは、リチウムイオンバッテリと EDLC である。表１はリチウムイオンバッテリと EDLC の特徴を比較したものである [(1)]。両者それぞれに利点、弱点を有しており、用途に応じた選択がなされている。適用の動向は後述するが、日本ではエネルギー密度の高さを重視して、リチウムイオンバッテリが，欧州では EDLC が重視されている点が対照的である。

2. 2　蓄電システムとエネルギー供給源の構成　～エネルギーとパワーの視点～

ハイブリッド電源車両における蓄電素子に要求される性能とそれを含めたシステムの最適構成を考える上で，ハイブリッド電源車両のエネルギー供給源と蓄電装置の組み合わせのバリエーションを図１に示す。この図からエネルギーの観点からは以下のように考えることができる。ハイブリッド電源車両とは運動エネルギーと蓄電素子の間でエネルギーのやり取りをすることで，車両の運行を行い，それに伴う損失分のエネルギーは，架線およびディーゼル発電機等のエネルギー源から供給される。また，電力の面から考えると，蓄電装置はエネルギー供給源の出力が不足するような場合，例えば燃料電池の場合，蓄電装置はパワーアシストを行う装置とみなすことができる。すなわち，ハイブリッド電源鉄道車両においては，エネルギーマネジメントとパワーフロー制御の双方の視点から考えることが重要であることがわかる。

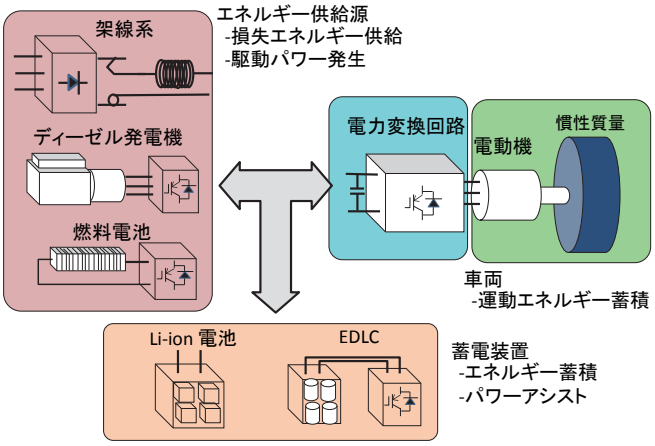

図１　蓄電装置を用いた駆動システムの構成要素

2. 3　蓄電素子の選定基準

ハイブリッド電源鉄道車両における蓄電装置応用は，図２に示すように，エネルギー放出を主たる目的とする場合と，パワー吸収を主たる目的とする場合に分けられる。前者については，ディーゼルエンジンとリチウムイオンバッテリのハイブリッド駆動車両におけるエンジンの燃費低減や排気ガスのクリーン化等，リチウムイオンバッテリによる燃料電池のパワーアシスト，およびトラムの架線レス化への応用などがその例として挙げられる。一方，後者の例としては，電車に EDLC を搭載し，高速域で回生ブレーキを確実に動作させたり，主回路のピーク電力を抑制する用途が挙げられる。現在の蓄電装置の性能・コストが鉄道車両駆動応用の要求するレベルに対してまだ向上の余地がある現状では，その

要求される性能にあった蓄電媒体を選定することが重要である。選定上の最も大きなポイントは，エネルギーに着目した応用であるか，パワーに着目した応用であるかであり，それぞれに応じて適切に蓄電媒体を選定することが重要である。

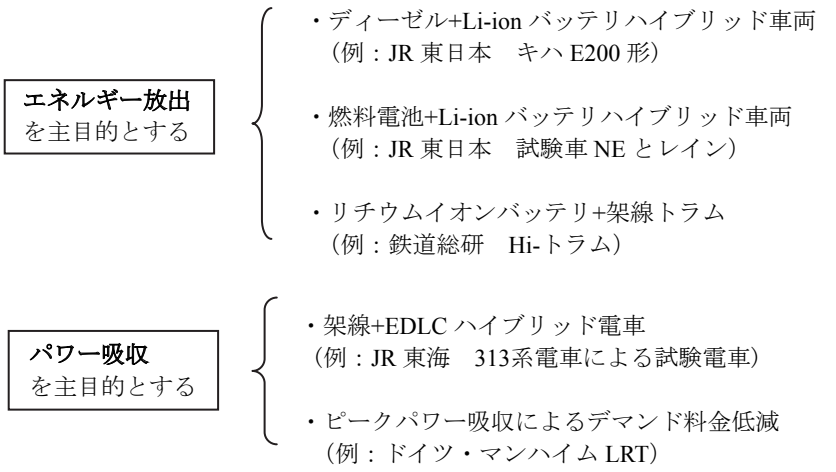

図２　鉄道における蓄電素子とその応用

ハイブリッド電源車両の種類と蓄電装置の比較

3. 1　ハイブリッド電源鉄道車両の種類と特徴

現在，実用および実証等が行われているハイブリッド電源車両では多くの場合，車上にエネルギーを蓄積することにより，効果を得るものが多い。そこで，我が国を中心としたハイブリッド電源駆動車両の蓄電装置の主としてエネルギーおよびパワー面から性能例を表２に示す。以下，その用途に分けて考察する。

(1) ハイブリッドディーゼル動車

キハ E200 形[(2)(3)], キハ 160 形[(4)], およびキハ 122 系[(5)] のハイブリッドディーゼル動車における用途では，蓄電装置の性能は車両によって大きく異なる。これは，エンジン出力との出力配分等がシリーズ / パラレルのハイブリッド方式によってバリエーションが広いためである。この理由はディーゼルエンジンはコスト・性能の面で成熟しており，システムの設計上の自由度が高いためと考えられる。

(2) 架線ハイブリッド電気車

313 系電車およびマンハイムの路面電車[(6)] は，いずれも EDLC と架線のハイブリッドシステムである。いずれもエネルギーに対して相対的にパワーが大きい。マンハイムの路面電車は省エネルギー効果が EDLC 搭載の有無で 30％電力消費量減とされているが，搭載エネルギーはそれほど大きくないことがわかる。すなわち，313 系[(7)] とともに，電力吸収の用途で用いられ，高速域での回生ブレーキの動作や変電所のピーク電力カットの効果を主に期待したものであることがわかる。すなわち，EDLC は架線系のようにエネルギー面で制約が少ない場合にパワー吸収に用いると効果的であることがわかる。

(3) 架線レス電気車

スマート電池くん[(8)] や路面電車類[(9)(10)] のような架線レスシステムへの応用の場合は，充電箇所の間隔を長くとり，地上設備抑制効果を期待するために，極力多くのエネルギーを蓄積できることが求められる。したがって，架線レスハイブリッドでは蓄電装置としては電池を含んだシステムとして，搭載エネルギー量を増やしていることがわかる。

(4) 燃料電池ハイブリッド車

燃料電池ハイブリッド車両[(11)(12)] では，燃料電池の出力が限定されるため，電池からの出力によるパ

ワーアシストが必須となる。また，パワーアシストは走行中の比較的長い時間行われる。そのため，電池から供給する出力も大きくなる。そのため，同様な車両性能のハイブリッドディーゼル動車比べ，電池の搭載量は大きくなる傾向にある。

(5) 入換用ハイブリッドディーゼル機関車

表 2　ハイブリッド電源駆動車両の蓄電装置性能の例

事例	蓄電装置の 出力 / エネルギー	車両／列車 質量	ハイブリッド方式
キハ E200 形 (JR 東日本)	270kW[4] 15kWh	40.0 t	ディーゼル (331kW) -Li-ion 電池 シリーズハイブリッド
キハ 160 形 (JR 北海道)	192kW/ 7.5kWh	34.2 t	ディーゼル (243kW) -Li-ion 電池 シリーズハイブリッド
マイルド Hyb 試験車 (JR 西日本)	120kW/ 18kWh	40t (Estimated)	ディーゼル (243kW) -Li-ion 電池 パラレル（タンデム）ハイブリッド
313 系電車 (JR 東海)	200 kW/ 0.28kWh	60.0t (推定 , 2 両)	架線 -EDLC(1.4F-1.42kV) ハイブリッド
路面電車 (マンハイム交通局)	300kW/ 1kWh	70t(推定 ,3 両)	架線 -EDLC(45F-400kV) ハイブリッド
スマート電池くん (FC クモヤ 993) (JR 東日本)	300kW(推定)/ 163kWh	44.0t	架線 -Li-ion 電池ハイブリッド
Hi-tram ! (鉄道総研)	600kW/ 72kWh	24.0 t	架線 -Li-ion 電池ハイブリッド
SWIMO (川崎重工)	- kW/ 120kWh	30.0 t (3 bodies)	架線 - ニッケル水素電池ハイブリッド
FC クモヤ 993 (JR 東日本)	340kW/ 19 kWh	39.5 t (estimeted)	燃料電池(130kW) -Li-ion 電池ハイブリッド
291 系試験車 (鉄道総研)	360kW/ 36kWh	60 t (2 cars)	燃料電池(120kW) -Li-ion 電池ハイブリッド
HD300 入換機関車 (JR 貨物)	300kW(推定)/ 67.4kWh	60t	ディーゼル (200kW) -Li-ion 電池 シリーズハイブリッド
BB63000 改入換機関車 (フランス国鉄)	375kW/74kWh (NI-Cd) - kW/0.8kWh	70t(推定)	ディーゼル (238kW) −FC(50kW)-Ni-Cd 電池 -EDLC　シリーズハイブリッド
BR203H 入換機関車 (ドイツ鉄道)	350kW/ - kWh	70t(推定)	ディーゼル (200kW) -Ni-Cd 電池 シリーズハイブリッド
入換機関車 (米連邦政府 /VP LLC)	1MW/ - kWh	100t	燃料電池(250kW) − 鉛蓄電池ハイブリッド

HD300 形をはじめとする入換用ディーゼル機関車[13][14][15][16]は，エンジン出力を機関車の平均出力まで低減するために，ピーク負荷電力分を電池等の蓄電装置から供給することをハイブリッド化の目的としている。また，機関車に比べ牽引する貨車等の質量の方が数倍大きいことから，回生ブレーキによる運動エネルギー回収の効果は小さい。そのため，エンジン容量を低減するためには，充放電サイクルを長くとる必要がある。その結果，電池の搭載エネルギーはハイブリッドディーゼル動車に比べ大きくな

る傾向にある。

3. 2　質量を考慮した搭載エネルギーと出力の比較

表２に示したハイブリッド電源鉄道車両のうち，使用環境が同じ我が国の応用例のうち，蓄電装置に電池を用いるものについて，車両質量で正規化した搭載電池の出力とエネルギーをプロットしたものを図３に示す。質量で正規化することで，車両性能に対する蓄電装置の性能を評価できる。また，図中の時間を記した各線は，縦軸のエネルギーを横軸の出力で除したものであり，相対的な充放電サイクル時間を表わしたものである。SWIMO や Hi-Tram 等の架線レストラムは地上の充電設備低減のため，充放電サイクルを相対的に長く必要がある。そのため，車両質量当たりのエネルギー搭載量は他の用途に比べ多いことがわかる。また，電池の搭載量が多いことから，結果的に出力も大きくなることがわかる。

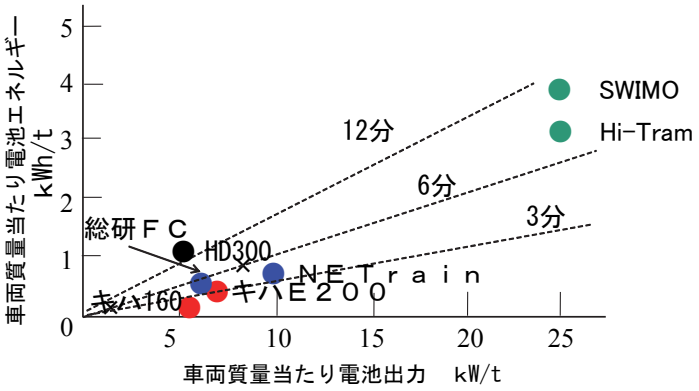

図３　蓄電媒体の車両質量当りのパワーとエネルギー

燃料電池ハイブリッド車は，ハイブリッドディーゼル動車のディーゼルエンジンが 300kW 程度であるのに比べ, 燃料電池出力はコスト等の面から現在の実証車両でも 150kW 程度に制約される。そのため，既存のディーゼル動車やハイブリッドディーゼル動車と同等の性能を確保するためには，電池出力を大きくする必要がある。また，燃料電池の出力をアシストする時間も長い。そのため，ディーゼルハイブリッド車両に比べ概ね倍程度の電池エネルギーとなっている。充放電サイクルに関してはディーゼルハイブリッドと概ね近い値となっているが，燃料電池ハイブリッド車同様これは非電化ローカル路線での運用という類似の用途であることに起因している。

ディーゼルハイブリッド動車は燃料電池に比べるとエンジン出力の制約は比較的小さいため，電池容量は相対的に少なくなる。また，ハイブリッド化の狙いに応じて，搭載エネルギー量を抑制するようなシステム構成も可能であり，リチウムイオン電池のような高性能電池以外の，例えば EDLC 等を用いた蓄電装置の適用可能性も高い。

また，HD300 形は回生ブレーキによる力行時に放出した電池エネルギーを回収することは困難な状況で，エンジン出力を抑制するため，充放電サイクルを長くとる必要がある。そのため，出力に比べ，エネルギー搭載量が多く相対的な充放電サイクルもディーゼルハイブリッド車両等と比べ長くなっている。

3. 3　蓄電装置応用の今後

(1) 蓄電装置性能の今後

蓄電装置の応用では，その目的の明確化が重要である，すなわち，何を実現するかをクリアにするこ

とが重要ではある。しかし，一方で目的をどの程度達成できるかという点では，蓄電素子のエネルギー・パワー双方の密度および寿命，コスト等に大きく依存する。エネルギー総合工学研究所が著わした超長期エネルギー技術ロードマップ[17]によると，約20年後の2030年における二次電池のエネルギー密度は現在の約2倍の200W/kg程度に向上すると予測されている。EDLCについても，同様に容量が倍になると考えると，現状の応用と同じ方向で考えた場合には，以下のようなメリットが期待できる。

－架線レスLRTの低コスト化（単純計算で設備が半分となる）

- 鉄道系電気車の架線レス化
- ディーゼル－２次電池ハイブリッド車で，エンジンの大幅な排気量低減および運転時間短縮
- キャパシタを用いた架線レスLRTの実現
  (急速充電性能と併せて，適用範囲の拡大)
- EDLCによる回生電力吸収システムの省エネルギー効果拡大(電力容量だけではなく，エネルギー容量も考慮した設計が可能となる)

(2) 蓄電装置応用の鉄道システム技術における位置づけ

蓄電装置を鉄道車両駆動に応用するということは，広い意味では鉄道システムのエネルギー供給システムをどのように構築するか，という問題と一緒に考える必要がある。図4は非電化区間におけるディーゼル駆動車両の場合（図4(a)）から架線から電力供給を行なう現行の電気車方式（図4(f)）までの，蓄電装置技術を応用する場合の例を段階的に示したものである。この図の示すものは，蓄電装置の応用とは，電力系統から供給される従来の電源も含めて，どこにどのような電源をどれほどの容量で配置し，どのように車両にそれを供給するか，という鉄道システムとそのエネルギー供給の問題に展開されうる，ということである。

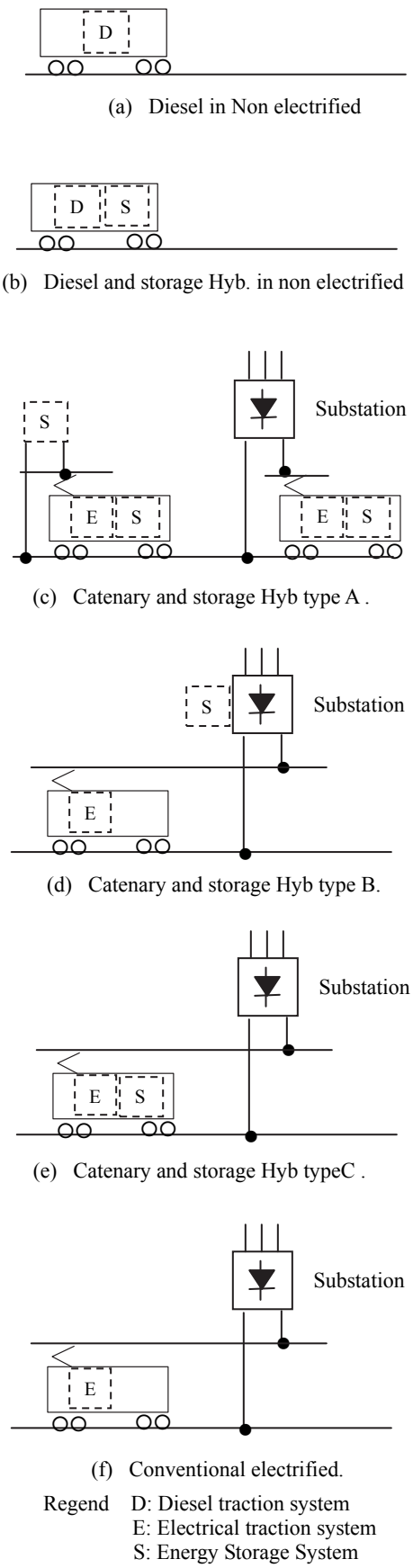

図4　電力供給システムと蓄電装置応用

あまり問題を一般化すると分かりにくくなるので，少し限定的な例として，ある非電化路線（図４ (a)）について考える。これまでは，輸送力を増強する場合には，通常の変電所を建設し，架線を全線に引く電化方式（図４(f)）がこれまで一般的であった。しかし，蓄電装置が使用可能であれば，非電化のままディーゼルハイブリッド車両を構成する方法（図４(b)）や，途中駅で充電を行う方式や，場合によっては部分的に架線を張ることで，初期・運用双方のコストを全線電化の場合よりも下げるという選択肢（図４ (c)）もあり得る。この問題が難しいのは，蓄電装置の性能が向上すると，設置箇所と併せて設置する容量も性能の範囲で自由に決められることである。

前述のように，実際には，蓄電素子のコスト・寿命・信頼性を含めた性能が電気動力システムの仕様を決定する支配的要因であることは確かであろう。特に図４(c) のパターンでは，図４(d) との組み合わせも含め，いろいろな組み合わせがありうる。これを一般的な対象として，目的に応じてどのような蓄電素子の配置とするかの体系的設計法を確立することは，今後の課題の一つであり，その前提として，蓄電装置デバイスの性能向上が不可欠である。

４．まとめ

以上，蓄電装置を応用したハイブリッド電源鉄道車両の実際例について調査を行うとともに，その体系化を試みた。現在，用途としては，大きく分けて，非電化区間用車両としてはハイブリッドディーゼル動車，燃料電池ハイブリッド車両への適用が検討されている。また，電気車への応用としては，電化区間の回生電力有効活用を狙ったものの他，架線レス電気車への応用が期待されている。また，エンジン負荷変動の大きい入換機関車のハイブリッド化による，エンジン諸問題の軽減も世界的に興味が持たれている。蓄電素子の性能・コストは，鉄道車両駆動に応用する点ではまだ不十分であることから，用途に応じた適切な素子の選択を行う他，蓄電装置システム構成およびその制御にもさまざまな工夫が行われている。これらを総括すると，用途に応じて概ね適切な種類，容量となっていることがわかる。今回の調査結果が，今後の蓄電装置（素子）の性能向上に応じてどのような方向に用途を広げるのが得策かを探る，あるいは，現在の性能でさらなるコストや性能向上の余地を探る上で有益であると考える。

参考文献

(1) 電気二重層キャパシタを用いたハイブリッド　鉄道車両の制御法，松尾貢三，澁谷浩之，近藤圭一郎，第 14 回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2007）講演論文集 ,2007.12

(2) 新井静男，白木直樹，佐藤春雄：「キハ２００形ディーゼル気動車のハイブリッドシステム」，平成２２年電気学会産業応用部門大会論文集，pp. Ⅰ－ 143 ～ 148 ，2010.8

(3) Ryosuke Furuta, Junji Kawasaki, Keiichiro Kondo, "Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction System," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Volume 5, Issue 3, pp.298-303, (2010.5)

(4) Ihara H, Kakinuma H, Sato I, Inaba T,Anada K, Morimoto M, Oda T, Kobayashi S, Ono T, Karasawa R, “Development of Motor-Assisted Hybrid Traction System,” Proceedings of World Congress on Railway Research 2008, (CD-ROM), R2.2.3.4 , 2008.6

(5) 小林誠，児玉佳則，八野英美：「マイルドハイブリッド気動車の開発」，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2010) 講演論文集，（主催　電気学会交通電気鉄道技術委員会，pp.405-408，2010.12

(6) M.Froehlich, M.Klohr, S.Pagiela, “Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicle,” Proceedings of World Congress on Railway Research 2008, (CD-ROM), R3.4.3.2, 2008.6

(7) 関島康直，戸田伸一：「車両用 EDLC 電力貯蔵システムの走行試験」，平成 20 年電気学会産業応用部門大会講演論文集（CD-ROM），3-21，pp. Ⅲ -201 ～ 204，2008 年 8 月

(8) 野元浩，吉田耕治，竹田進治：「蓄電池駆動電車システムの開発」，JREA Vo.53, No.5, pp.35069-35072, 2010 年 5 月

(9) 小笠正道他：「架線ハイブリッド LRV（架線レス LRV）の軌道線走行試験結果概要」，平成 20 年電気学会産業応用部門大会講演論文集（CD-ROM），3-18，pp. Ⅲ -187 ～ 190，2008 年 8 月

(10) 奥保政，秋山悟：「川崎重工業　低床電池駆動 LRV “SWIMO-X” の開発」，車両技術 239 号，pp.113 -119, 2009 年 .3 月

(11) 小川賢一，山本貴光，長谷川均，古谷勇真：「燃料電池・バッテリーハイブリッド試験車両の開発」，平成 20 年電気学会産業応用部門大会講演論文集（CD-ROM），3-63，pp. Ⅲ -371 ～ 374，2008 年 8 月

(12) 中神，古田，嶋田，金子，豊田：「燃料電池車両ハイブリッドシステムのエネルギ管理」，平成 19 年電気学会産業応用部門大会講演論文集 (CD-ROM)、3-34，pp. Ⅲ -235 - Ⅲ -238，2007.8

(13) 添田正，寺内伸雄，新田浩，杉山義一，小川知行：「入換用ハイブリッド機関車の開発」，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2010）講演論文集，（主催　電気学会交通電気鉄道技術委員会，pp.401-404，2010.12

(14) M.Thiounn，A.Jeunesse，“PLATHEE　Platform for Enegy-Efficient and Enviromentally Friendly Hybrid Trains,” Proceedings of World Congress on Railway Research 2008, (CD-ROM), R3.4.3.3, 2008.6

(15) Hervé GIRARD, Jolt Oostra, Joerg Neubauer, “Hybrid shunter locomotive,” Proceedings of World Congress on Railway Research 2008, (CD-ROM), R3.2.3.1, 2008.6

(16) A.R. Miller, K.S. Hess, D.L. Barnes, T.L. Erickson, “Zero-Emission, Hydrogen-Fuelcell Locomotive for Urban Rail,” Proceedings of World Congress on Railway Research 2008, (CD-ROM), R2.2.3.3, 2008.6

(17) エネルギー総合工学研究所 , “超長期エネルギー技術ロードマップ”
http://www.iae.or.jp/research/result/ene_map_2008.htmla