

「環境にやさしい未来の鉄道 その実現に向けて JR東日本の研究開発」

東日本旅客鉄道株式会社 常務取締役 技術企画部長 JR東日本研究開発センター所長 有森 幸雄

CO₂排出量の削減、ゼロエミッションの達成、鉄道沿線環境との調和という3つの目標を掲げて、環境に関わる様々なテーマについて研究開発を進めています。技術の進歩は大変早く、以前にはできないと思っていたことが、5年、10年ぐらいたつと手の内に入ってくるという非常に技術革新の激しい時代になりました。今は夢と思っているものかいつか実現できるだろうと信じて、私どもは開発を進めていきます。

1 はじめに

技術的な分野から、JR東日本が環境にどのように貢献できるかを中心にお話します。CO₂排出量の削減、ゼロエミッションの達成、鉄道沿線環境との調和という3つの目標を掲げて、環境に関わる様々なテーマについて研究開発を進めています。



2 環境にやさしい車両

2.1 ハイブリッド車両NEトレイン (New Energy Train)

動力システムの革新により車両の環境負荷を低減することをコンセプトに、ハイブリッドシステムを採用した車両です(図1)。2003年の春に落成して、現在走行試験を実施しています。将来の燃料電池の搭載も視野に入れており、省エネルギー、排気・騒音の低減、省メンテナンス、運転性能の改善といったことを目標に開発を進めています。新しい車両を開発する際にいちばん問題となるのは安全性と安定性ですが、メインの台車部分、駆動部分については、量産型のE231系のものをそのまま使用しており、あとは、エンジン発電機あるいは蓄電池の性能の確認ができれば、直ちに営業線区で運転可能な設計にしました。

起動時にはバッテリーから電力を供給し、速度25 km/h以

上になるとエンジンが始動して発電し、その電力を使いながら走ります。エンジンは一番その性能を引き出せる一定の回転数で発電をしており、またブレーキ時には回生モーターで発電した電力を蓄電池に充電します。従来の気動車だと全く回生することができなかったエネルギーを電池に蓄電して使うことで、大幅な省エネルギー効果をねらっているわけです(図2)。

これまでの試験の結果、燃料消費率20%削減の目標値に対して、ほぼ予定どおりの省エネルギー効果が得られることがわかりました。また運転性能に関しても、2.3 km/h/sの加速度を



図1：NEトレインの開発コンセプト

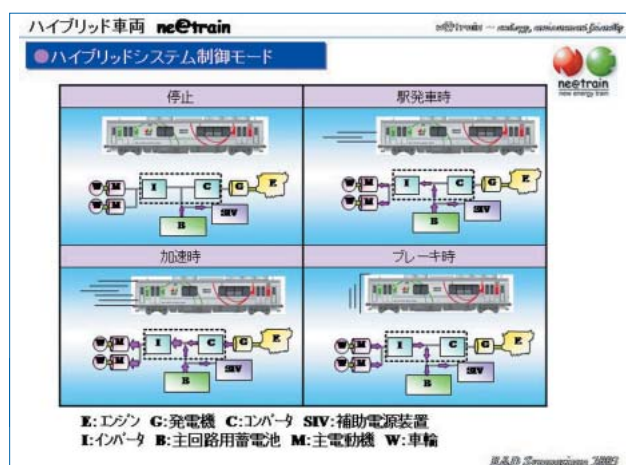


図2：ハイブリッドシステム制御モード

速度35km/hの時点で発生できており、電車並の性能を十分に確保しています。駅停車時および低速走行時にはエンジンが止まるので、駅・ホームでの騒音も低減されます。

2.2 次世代通勤車両ACTレイン

ACTレインについては、コストダウン、輸送の安定性向上、旅客サービスの向上、バリアフリー、エコロジーといった大きな五つの目標を持って開発を進めてきました(図3)。すでに昨年から10万km以上の走行試験を実施しています。DDM(ダイレクトドライブモーター)という新しいタイプのモーターを搭載しており、これについては、現車試験とは別に大宮の研究開発センターにある台車試験装置で、起動と停止だけを70秒サイクルで繰り返す加速試験を行って、実走行で25万km相当の耐久テストが終了しています。

システムチェンジとコストダウンを目指して、車体の構造は今主流のボギー方式ではなく連節構造を採用しました。モーターはDDMで、直接モーターの回転軸をそのまま車輪の回転に伝える構造なので、エネルギー効率が高くなるとともに、歯車箱がないので騒音の低減にもつながるという効果があります。バリアフリーについては車いすスロープや車いすステップがいずれも良好に動作しています。エコロジーという観点においては、すべてリサイクル、リユースできる素材を使ってゼロエミッションを達成しました。サービス向上については、列車内の情報サービスとしてディスプレイを戸袋上に設置し、いろいろな情報をお客様に提供し、広告等も掲載できます。それから、連節構造では車両と車両の間が仕切られておらず、車体長を短くしたこともあって、室内を広く取れる車体構成になっています。さらに、ACTレインではLONという伝送システムを使って配線数を6割くらい削減するとともに、例えば戸閉め装置の一つが故障した場合でも、別の装置を使ってドアを正常に動作させるとか、両運転台に積んでいるATS-Pのような保安機器も、片運転台のものが故障しても反対側の運転台を使って制御ができるようにして、安定性の向上を図っています。それぞれのシステム自体も自立分散、自己診断可能なシステムで構成されています。

ACTレインでは軽量化に向けて連節構造を採用しています(図4)。通常のボギー構造では、10両編成のうち4両、すなわち

軸数は16軸で駆動します。4M6Tというスタイルで駆動しているこの車体をより軽量化する場合、ボギー構造では軸重が軽くなり過ぎて所要の粘着力が得られないという問題がありました。そこで、全体の重量はE231系よりもさらに軽量化し、かつ駆動軸の数を減らすことを目指して採用したのがこの連節構造です。車体長が短くなるので編成の両数は増えますが、同じ200



図3：次世代通勤車両 ACTレイン

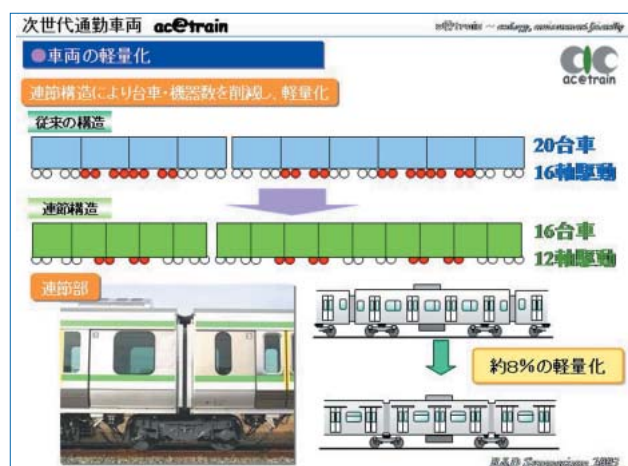


図4：連節構造



図5：DDM(ダイレクトドライブモーター)



図 6：電車で必要な電気の量の変遷

m という一つの編成で考えると、現在16軸で駆動しているものが12軸で駆動できるようになるというメリットも得られます。車体全体としては8%の軽量化を図りました。

DDMは直接モーターの駆動軸を車輪に連結します(図5)。直接車輪を駆動するのでギア箱がありません。すなわち、モーターの回転数を減速することなく回転数そのままで車両を走行させるわけです。モーターは低い回転数で回るので、モーター自体の騒音も下がるし、ギアケースもないのでその騒音も発生しません。さらに外部から冷却風を取り入れないで済むような工夫もしました。その結果13年間、基本的にノーメンテナンスで走行することが可能になり、またDDMの採用によりE231系に比べて10%程度の省エネ化と5dBの騒音低減が実現できました。

2.3 環境にやさしい車両の未来像

NETレインには最終的にエンジンに代えて燃料電池を搭載したいと考えています。それが可能になるのは、早ければ10年～15年ぐらいの間ではないかと思いますが、最終的に山手線に燃料電池電車を投入することも夢として描いています。どの程度まで電池や水素の供給能力が向上し、コストが下がれば実現の可能性があるかということについて説明します。

燃料電池車両が走る鉄道のイメージは、全く架線構造のいらないシンプルなものになります(図7)。水素貯蔵タンクは基本的には屋根上に搭載します。それから、ダイレクトドライブモーターを採用し、燃料電池は床下に搭載します。山手線の場合は



図 7：燃料電池車両イメージ

1周で29駅あり加速・減速を繰り返すので、減速のときのエネルギーを2次電池にためて、よりエネルギー効率を高めます。燃料電池は数年前の検討では相当大的な容量が必要ではないかと考えていましたが、この2次電池と組み合わせることによって、燃料電池自体はかなり小さな容量で走行できそうだということがわかってきました。これを山手線52編成に適用する場合、どの程度の燃料電池の仕様が必要かということについて説明します(図8)。山手線は1日当たり約400km走行し、52編成全部で1日当たり約45万kWhの電力を消費します。それから、車両寿命が概ね20年とすると、燃料電池の寿命は約8万時間が必要ということになります。8万時間の燃料電池の寿命というのはかなりハードルの高い目標なので、半分の10年で燃料電池を一度取り替えるという前提で仕様を検討してみました。

自動車の燃料電池は、固体高分子型スタックを使っており、出力100kW、電圧300V、出力密度がkg当たりもしくは1リットル当たり1kWという値が達成されています。また寿命は5000時間、コストもkW当たり5000円ぐらいを目標にしていると伺っています。自動車の燃料電池のコストの現状については、はっきりしたものは発表されていませんが、例えばトヨタの場合、燃料電池自動車の月のリース料は120万円、30か月で提供されているということで、それも相当コスト割れしているのではないかと思います。自動車の耐用年数6年で考えると6000～7000万円ぐらいのリース料になると思います。ホンダの場合は、月80万円で12か月単位、年間1000万円ということで、6年だと6000万円ぐらいです。それを前提に試算すると、車体の価格自体は現



図8：燃料電池車両
山手線への適用シミュレーション



図9：水素ステーション

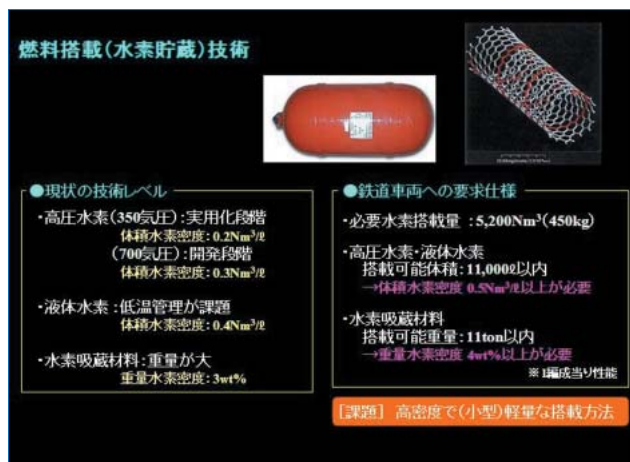


図10：水素貯蔵技術

在の自動車とそう変わらず、数百万円で動力装置が構成できるとして、自動車の場合、大体100kWの燃料電池の出力なので、適正なコストでリースをされているという前提に立っても、1kW当たり50～60万円ぐらいのコストがかかっているものと推測できます。そういう意味で、kW当たり5000円という自動車の燃料電池のコスト目標は、さらに100分の1ぐらいにコストダウンしなくてはならないということで、相当厳しい目標ではあると思いますが、自動車業界でこれを目指しているということなので、私どもはその開発に期待したいと思います。

燃料電池を鉄道車両の山手線の11両に適用した場合、出力は1100kW必要なので100kWを11個積みばいいことになります。電圧は1500Vが必要になるので、出力電圧は相当上げなければなりません。出力密度は自動車と同等で問題ありません。コストもkW当たり5000円が達成できれば十分効果は出てきます。仮に数万円であっても十分効果が期待でき、実用化は可能だと考えています。それから、自動車業界での寿命目標は5000時間ですが、鉄道では10年で取り替えるとしても4万時間が必要で、この面ではまだまだハードルは高いと言えます。

燃料電池車両の導入効果ですが、CO₂の排出量の低減ということでは、山手線全体で見ると1年間に約6万tのCO₂を排出しており、これは、新幹線は別にして、在来線の電車排出量全体の約5%に相当します。これを森林で吸収するということになると、山手線内面積の3倍相当の森林が吸収するCO₂に相当しますので、かなり大きな効果が得られるはずですが、もう一つは、架線設備が不要になります。現在はインテグレート型という新しい架線の更新がすでに終わったところですが、その次の更新時期を考えると、30年後には何とか山手線から架線をなくし、景観のいい鉄道にしたいと考えています。

気動車に燃料電池を適用する場合には、回生エネルギー量が少ないという問題があります。地方の閑散線を走っていると駅間距離が長いので、回生電力を二次電池にためることはあまり期待できません。すなわち車両1両当たりには大容量の燃料電池が必要ということになります。ただ、出力的には自動車が開発しているものが達成できれば、それを複数積むことも可能なので、気動車の適用のほうが早い段階で実現できる可能性もあります。

水素の供給はもう一つの大きな問題です(図9)。高圧水素は350気圧まで実用化段階になっており、液体水素については低温管理が課題、水素吸蔵合金は重量が大きいといった問題があります。自動車の水素ステーションとして10数か所、パイロットステーションができていますが、オンサイト型(その場で水素を製造するタイプのもの)で、水素製造能力が1日当たり700Nm³、オフサイトで水素を作ってトレーラーで運搬する場合には、トレーラー1台当たり1000Nm³ぐらいというのが現状です。これを鉄道車両に供給することを考えると、山手線の例では、1編成当り水素搭載量5200Nm³、重量450kgが必要です(図10)。高圧水素あるいは液体水素を使用する場合の積載可能体積は、車両を構成できるかどうかということから考えると、1編成当り1万1000ℓ以内になるので、高圧水素・液体水素の体積水素密度としては0.5Nm³/ℓが必要ということになります。水素吸蔵材料で水素を供給する場合には、積載可能重量として11両で11t、1両1tぐらいのものは搭載できるので、重量水素密度としては4wt%が必要です。現在の供給側の技術レベルはどうかというと、先ほど言ったように350気圧は既に達成されています。700気圧のものは開発段階ですが、この体積密度が0.3Nm³/ℓなので、0.5Nm³/ℓにはまだこの段階でも届きません。液体水素だと体積密度は0.4Nm³/ℓですが、これでもやはり0.5Nm³/ℓには届きません。いちばん可能性として期待できるのは、水素吸蔵材料によって水素を中に吸収しておくタイプのものです。これは重量水素密度3wt%なので、もう1%上げることができれば実現の可能性があります。やはり5200Nm³あるいは450kgの水素を毎日運搬するというのは大変な話であり、全体で1日当

り体積にして27万Nm³以上を供給しなくてはいけないことから、水素吸蔵材料の中に吸収された形でカセット式で取り替えていくのがいちばん現実的だと思います。燃料コストは、1Nm³当たり17円以下になれば、現在の架線方式に変えてシステムチェンジができるレベルになります(図11)。

今日はメーカーのかたも来ておられますし、こういった目標に対してどのような情報をお持ちか、ぜひ後ほど教えていただきたいと思います。

3 ゼロエミッション

3.1 鉄道車両のゼロエミッション

従来の車両のリサイクル率は約94%でしたが、ACTレインは、ゼロエミッションというねらいを掲げて開発しており、例えばFRP、床骨材、グラスウール、塩ビといったものもリユースもしくはマテリアルリサイクルが可能なものを採用しています。サマールリサイクルは考えていません(図12)。

FRPについては、廃車から取り出したFRPを繊維、樹脂、充填材に分類し、その回収材料で整形して再度車両用材料としてリサイクルします。工場廃棄物の再資源化については、例えばブレーキライニングについては残った部分をパット材の基材としてリサイクルし、その基盤の部分は鉄材としてリサイクルしています。それから、主電動機用のカーボンブラシについては、近年交流モーターが主流になってきているので、カーボンブラシ自体がゆくゆく淘汰されていくとは思いますが、それでもまだ古いタイプの電車が残り、分別技術を開発中です。



図11：水素供給設備

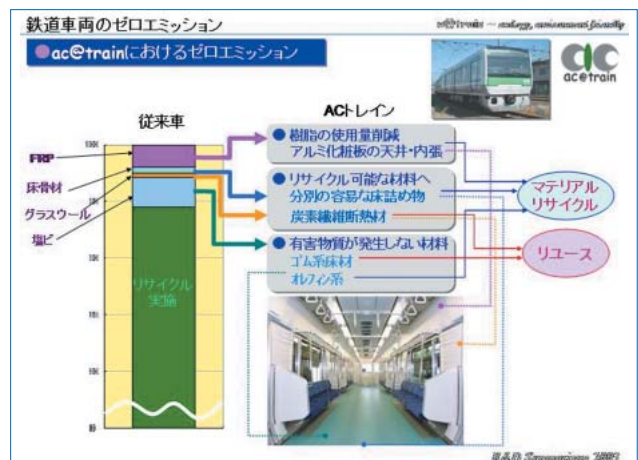


図12：ACTレインにおけるゼロエミッション

3.2 鉄道設備の寿命延伸

メンテナンスレスのTC型省力化軌道を1998年度から山手線を手始めに導入しています(図13)。今後貨物列車が走るようなところに対してや軌道が比較的弱いところには補強構造を投入していくことも想定しており、同タイプの省力化軌道を現在、研究開発センターにある試験装置を使用して開発しています。敷設に伴い発生するバラスト、枕木は道路の路盤材などとして再利用しています。

レールの寿命延伸については、在来線では6億とか8億、新幹線で6億という通過トン数で交換基準を定めていますが、2億 ぐらい寿命延伸を図っていきたいと考えており、載荷試験や応力測定試験によるレール溶接部の疲労寿命の把握などについて研究開発センターで実験しています(図14)。それから、表面にシェリングなどが発生する前に、表面を薄く削り取って傷の発生を防ぐことで、通過トン数に達する前に交換せざるをえないようなレールを交換基準まで使えるようにしようという研究も行っています。

トオリ線は、実はすでにかなりの線区にカーボン系のすり板を導入しており、以前のものに比べて3分の1ぐらいにまで磨耗量が減ってきていますが、そのトオリ線をさらに3割寿命延伸するために、トオリ線自体の材質を変えていこうという研究も行っています(図15)。現在のものよりも高強度で電導性が高いタイプのものを採用したいということで、すずを添加したり、クロム、ジルコニウム、アルミニウムを添加したり、インジウムを添加したりしたタイプのトオリ線について研究開発センターで耐久疲労試験を実施しています。

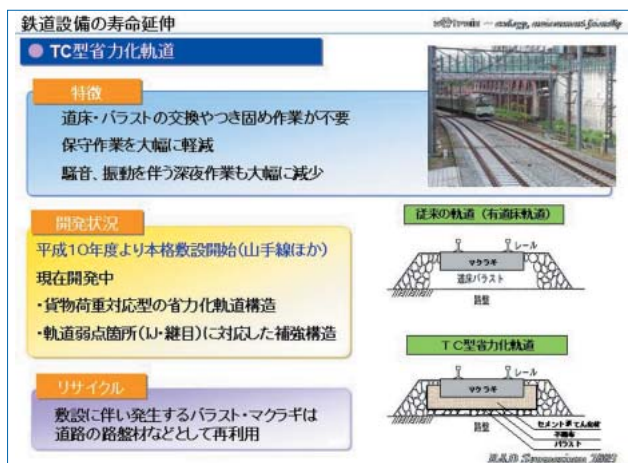


図13：TC型省力化軌道

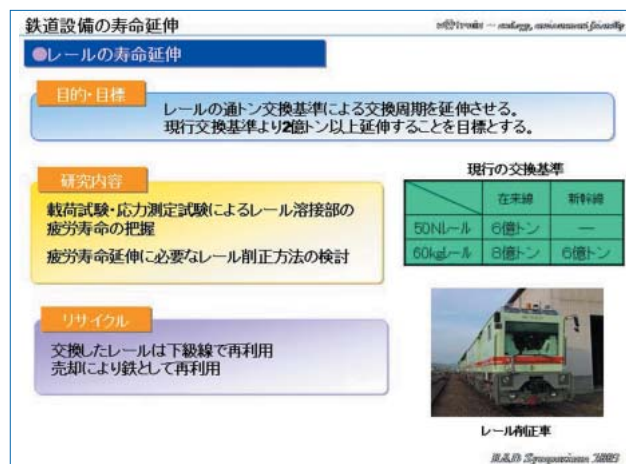


図14：レールの寿命延伸

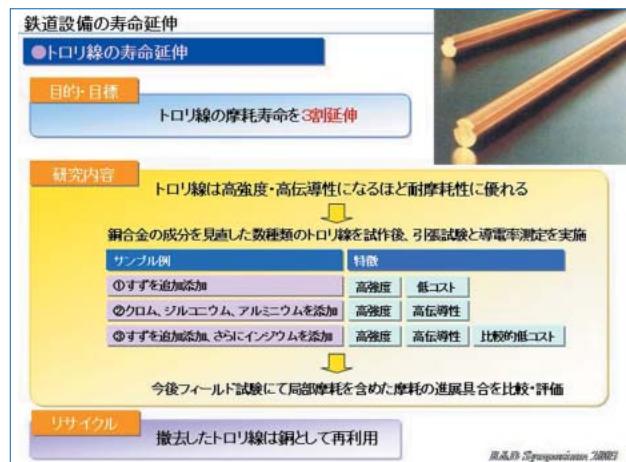


図15：トオリ線の寿命延伸

4 エネルギー供給

4.1 自営発電

必要電力の56%程度を自営の水力と火力発電で供給しています(図16)。単位発電量当たりのCO₂排出量を90年度に対して3割減らすことを目標にしており、90年度に726gであった排出量を519gまで減らしました。2005年度までに508gにするという目標に対して、もう少しで達成できる段階にきています。

4.2 自然エネルギー発電

自然エネルギーの発電としては太陽電池があり、様々な場所で試験をしています(図17)。高崎駅のホームの上屋に建材一体型の100kW級の太陽光発電システムを2001年から設置しています。また、研究開発センターのホールの上にピラミッド型



図16：自営発電



図17：太陽光発電システム

と板型を並べたものを設置して発電能力をチェックしています。一方向にパネルを張ったものについては、 m^2 当たり大体130Wぐらいの発電能力がありますが、面の両側から受光できる太陽光発電パネルも研究開発センターの中に4基設置して試験しており、この場合は平米当たり160Wで、4割弱両面から受光できるもののほうが単位面積当たりの発電能力が高まるという結果が得られました。今後どういった設置のしかたがいちばんいいのかさらに研究を続けていきたいと思っています。

4.3 電力貯蔵技術

電力貯蔵技術として実用可能と考えているものとしては、レドックスフロー電池というバナジウム硫酸水溶液の酸化還元反応を応用したもの、あるいはNaS電池という、ナトリウムと硫黄を使い、固体電解質を通して電力をためる装置等があります(図18)。NaS電池の場合は、固定式の電池なので定格での出力以上のものはなかなか望めませんが、鉄道の場合、多少定格を超えた電力が必要な場合があります。そういう意味では、レドックスフロー電池は短時間なら定格の2倍の出力が可能で、こちらのほうが現実的な使用を考えた場合には適しています。しかし設置スペースが大きいため、本命の電力貯蔵のツールとしてはまだ最適とはいえない状況です。電気二重層キャパシタは、電荷を電極にためるもので、普通の電解コンデンサーのように面しか帯電できないのではなくて、空間全体に帯電できるような活性炭を使ったシステムです(図19)。従来のコンデンサーに比べて大きな電荷を貯蔵できるという特徴があります。それから、充放

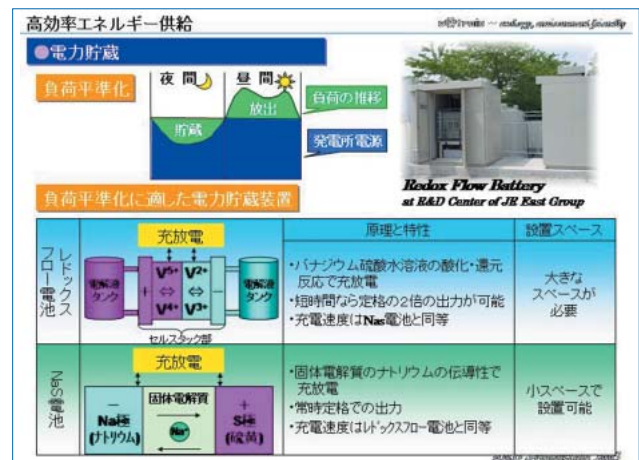


図18：レドックスフロー電池とNaS電池

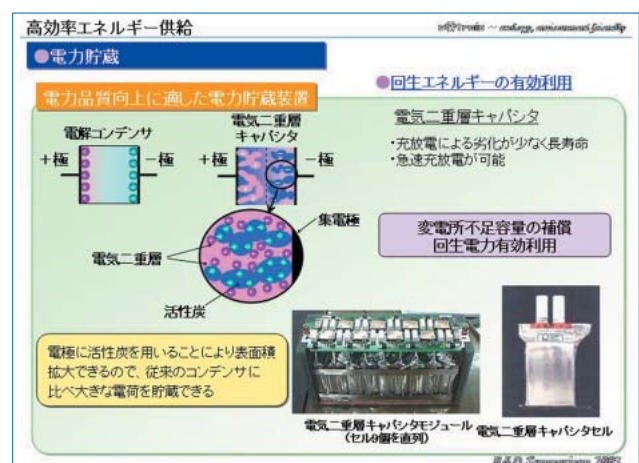


図19：電気二重層キャパシタ

電による劣化が少なく長寿命であり、急速充放電が可能であるという能力を持っているので、変電所の不足容量の補償とか、回生電力を有効利用するためにこの装置が使えないか勉強し

ています。

回生エネルギーを有効に利用するには、同じ変電所の区間に回生車と力行車の両方がある必要があり、エネルギーを使う相手がいないとエネルギーは回生失効してしまいます(図20)。例えば埼京線では、新宿から大宮 辺りは回生電力をかなり有効に使っているのに対して、日進から先になるとほとんど回生電力を使いきれいでありません。これを有効利用するためには、変電所の区間に電気二重層キャパシタを使って、補償ポスの的なものを作り、ほかに車両がいなくても回生されたエネルギーを電気二重層キャパシタに充電しておき、次に別の力行車が来たときに、変電所からではなくて、まず優先的にこちらの補償ポストから送電するシステムが考えられます(図21)。技術課題としては、優先的に補償ポストから供給する制御をどうするかということと、電気二重層キャパシタ自体の製品の品質の統一が必要であるということがあります。現在は需要が少なく少量生産であり、工業製品としてではなく、いわば手作りで作っている状況で非常に高価格ですが、1998年の段階でkW当たり120万円だったものが、現在は60万円までコストが下がってきました。私どもがこれを実際に導入できる価格を試算した結果は3万円で、まだ現状の20分の1にならないといけないが、需要が増えてライン生産ができるようになると、コストダウンがかなり図られる可能性があるので、全く手の届かない話ではないと期待しています。

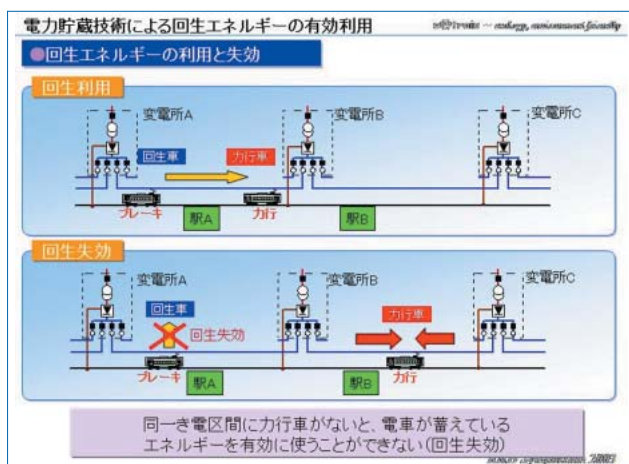


図20：回生エネルギーの利用と失効

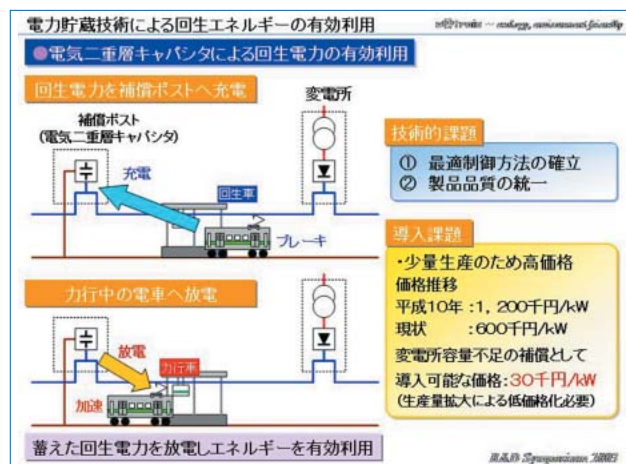


図21：回生電力の有効利用



図22：新しい発熱体（半導体熱交換素子）

4.4 新しい発熱体

半導体の熱交換素子というものがあります(図22)。その熱交換率は93%で極めて高い熱交換ができます。また30%以上の消費電力が節約可能で、自己発火せず安全性も高いものです。

2003年の冬、こまちの床下裏にこのヒーターを張って着雪防止の試験をしました。雪がついたあとにこの半導体熱交換素子に電圧を加えると熱が発生します。瞬時に高熱が出るものの、熱容量が少ないので使い道は限られますが、タイプによっては数秒で1000度になるものもあります。雪がついているとこのヒーターに接した面だけがすぐに液体になって、雪の塊全体が滑り落ちる効果が確認できたので、スケート効果という名前をつけました。

自由落下するようなタイプの雪のつき方についてはかなり有

効な方法なので、2004年の冬に、こまちの1編成全体にこういった熱交換装置を取りつけて実車試験をする計画です。そのほか、雪質にもよりますが、分岐器融雪等にも適用可能なので、これに対する試験も行う予定です。

5 エコステーション

これからの駅は、省エネルギーの観点から、太陽光、熱の取り入れ、パッシブ制御、自然エネルギー発電、緑の活用といったことを考えていく必要があります(図23)。マテリアル的には、自然材の利用、循環可能材の使用、それから人間にとって健康な材料を使う、デザイン的にはエコデザイン、ユニバーサルデザインを採用する、といったことが必要です。人と環境にやさしい駅はまだまだ現実にはできていませんが、将来、新しい駅を造る場合には、こういった考え方を応用していきたいと考えています。



図23：エコステーション

6 世界一の新幹線

6.1 プロジェクトの概要

世界最高レベルの高速運転を環境負荷を増大させないで実現しようというプロジェクトです(図24)。5方面の新幹線ネットワークが2012年に向けて延伸していく計画があります。また、航空機との競争を考えると、3時間の到達時間がシェアの分水嶺になることが明らかになってきています。ヨーロッパでは、実現するかどうかは別として、最高速度350km/hが現在計画されて

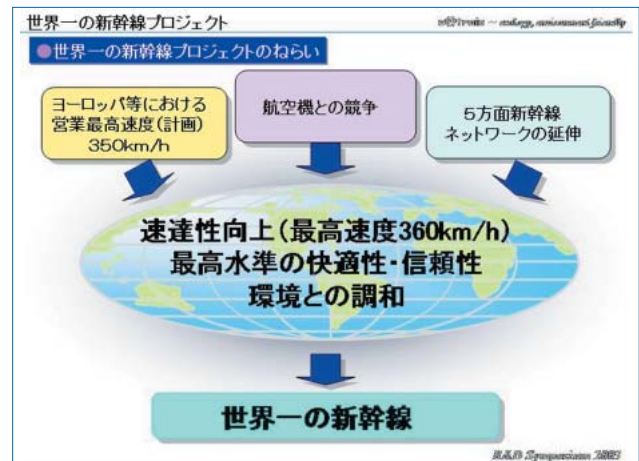


図24：世界一の新幹線プロジェクト

いるので、世界一の新幹線として最高速度360km/hの営業運転を目指して研究開発をスタートさせました。すでに2003年度、3回ほど現有車両をチューンアップして高速試験を実施し、ある程度の手ごたえを得ることができました。

6.2 騒音源の特定

騒音源の特定のため、114個のマイクからなるスパイラルアレイマイクロホンとラインセンサカメラを同時に設置し、何ヘルツの音がどこから出ているか、現有のE2系の車両を速度360km/hで走行させて測定しました(図25、26)。その結果、騒音が高いところは先頭部、運転室のドアの部分、パンタグラフの部分、車両と車両の間のほろの部分であることが分かりました。また車輪がスラブ軌道と接しているところで反射音が出てくることも分かりました。したがって、それらの部分にしっかりと対策を実施していくことが必要です。



図25：スパイラルアレイマイクロホン

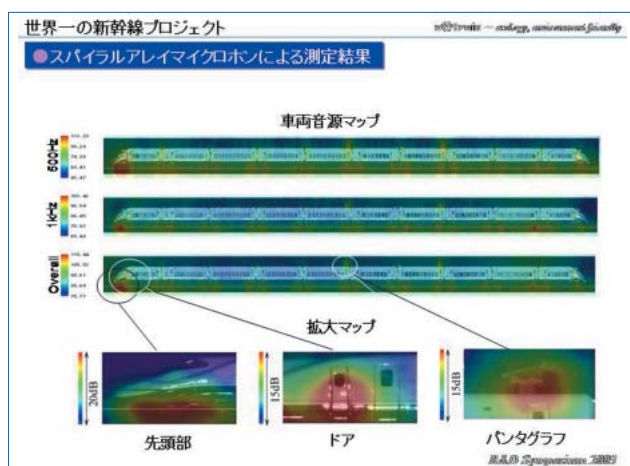


図26：騒音源の特定

6.3 騒音の抑制

車両の下部音を低減するために内側に吸音材を張った台車カバーをつけます。集電系音の低減については、現在、はやくてに使っているE2系の1000番代は低騒音パンタグラフを搭載していますが、さらに速度を上げるとのことになると、のぞみなどでも使っているようなパンタ遮音板をつける必要があります。北国を走る新幹線特有のスノーブラウの形状も変更します。それから、球面軸受タイプの全周ホロで車両と車両の間を平滑化します。あるいは運転台部分の平滑化も行います。

地上対策としては、軌道路盤面に吸音材を取りつける、防音壁の内側に吸音材を取りつける、あるいは単に防音壁をかさ上げするのではなくて、回折効果をねらったY字型等の防音材をプラスするといったことを試験しています。

6.4 微気圧波の抑制

微気圧波の抑制も非常に重要な問題です（図27、28）。トンネル緩衝工を現在設置していますが、突入のときに形成される圧縮波の圧力勾配を更に下げることがあります。あるいはバラスト軌道の場合に圧力波が減衰して、あまり微気圧波が出ないことが確認されているのでトンネルの中に吸音材を張って、圧力勾配を伝播過程で下げるといった工夫も考えられます。

先頭車の断面積変化率を最適化していくことも有効な方策なので、今後検討する新しいタイプの新幹線については、そのようなタイプの先頭形状を採用する必要があります。地上側の対策としては、今は横に窓がついているだけの突入側の緩衝

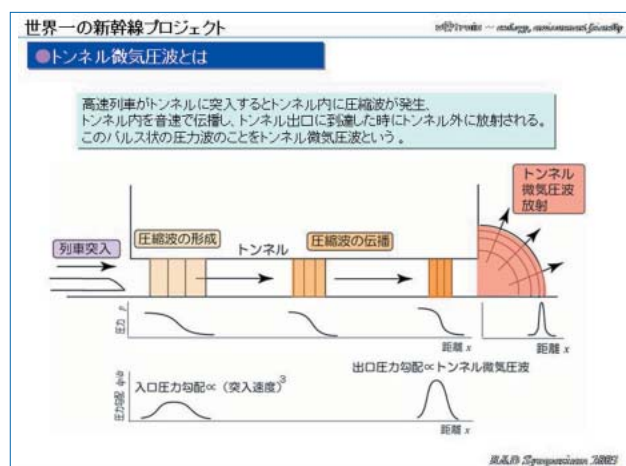


図27：トンネル微気圧波



図28：微気圧波の抑制

工において、圧縮波の一部を一時的に取り込む仕組みを付け加えるなど、圧縮波の圧力勾配を下げしていく工夫もしていかなければなりません。

7 おわりに

具体的にどの程度の技術レベルになれば鉄道システムに採用できるかという話もできる限りしたつもりです。技術の進歩は非常に早く、5年前にはできないと思っていたことが、5年～10年ぐらいたつと手の内に入ってくるという非常に技術革新の激しい時代になりました。今は夢と思っているものかいつか実現できると信じて、私どもは開発を進めていきます。ぜひいろいろな情報交換、お力添えを宜しくお願いいたします。