

第17回R&Dシンポジウム 講演

CO₂削減に向けた研究開発

東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター 環境技術研究所長

真保 光男

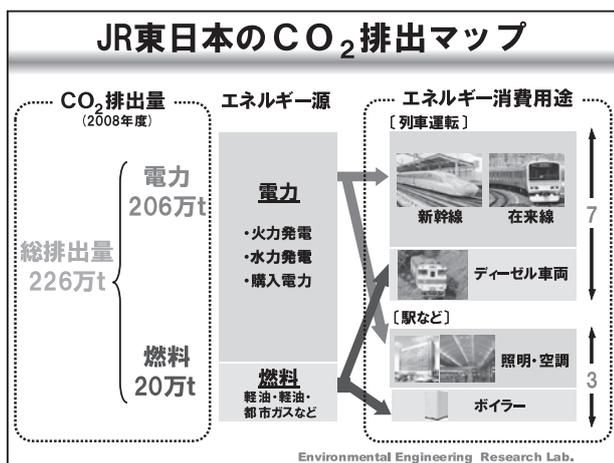
環境技術研究所は、CO₂削減に向けた研究開発を主なミッションとして、2009年4月に発足しました。

CO₂排出は、列車運転からが7割、駅建物からが3割となっているため、列車運転において蓄電池駆動電車「スマート電池くん」をモデルとした、駅建物において東京駅の地下空調システムをモデルとした、省エネルギーの方向性を提案しました。最後に、大切なことは計測・評価・最適化の省エネルギーマネジメントである、と結びました。



1. はじめに

環境技術研究所は2009年の4月に発足しました。研究テーマを選ぶに当たり、まずCO₂削減に向けてどのような研究課題があるか考えることから始めました。

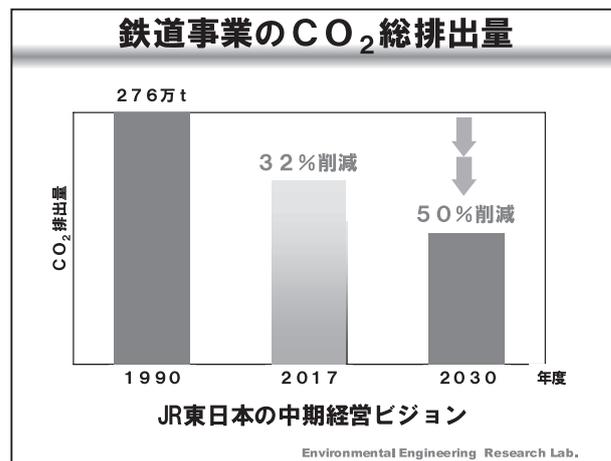


鉄道は1人を1キロ運ぶために発生するCO₂が自動車に比べて小さいと言われていますが、JR東日本全体で年間に200万トンを超えるCO₂を排出しているのも事実です。

CO₂はエネルギーの消費により発生します。消費用途は列車運転と駅などに分かれます。列車運転は、

新幹線や在来線電車のように電力で動くものと、ディーゼル車両のように燃料で動くものに分かれます。同様に、駅などの建物についても照明や空調のように電力を使うものと、ボイラーのように燃料を使うものがありますので、いずれもエネルギー源は電力と燃料ということになります。

CO₂はこの電力と燃料に由来するもの、それぞれで集計いたします。電力は発電所等で集計して206万トン、燃料は油庫等で集計して20万トン、合計226万トンというのがCO₂の総排出量です。これをもう一度最初のエネルギー消費用途に戻しますと、列車運転が7、駅などが3という比率になっております。



JR東日本の中期経営ビジョンでは、2030年度までに1990年度比でCO₂の総排出量を半分にする、という高い目標を掲げています。2030年というのはだいぶ先のことのようにも思いますが、7年後の2017年にも32パーセントを削減するという中間目標を掲げていますので、CO₂削減の具体的なステップが求められているということになります。

この2通りの方向性から研究テーマを列記しました。将来はここに示すように鉄道システムの革新に広く寄与したいと思っておりますが、その手始めとして、2009年度から取り組んできた事柄が、蓄電池駆動電車システムの開発、そして東京駅を例とした省エネルギーの基礎調査です。今日は、これらを中心に研究成果を報告します。

CO₂削減へ向けて

1. 車両と駅の省エネルギー
2. 再生可能なエネルギーの活用

そのための研究開発として

- ・ エネルギーマネジメント
- ・ 省エネ技術等の鉄道への適用

Environmental Engineering Research Lab.

では、どうやってこれを実現するかということですが、消費面で考えると車両と駅の省エネルギー化、エネルギー発生点で考えると再生可能なエネルギーの活用といった、両面のアプローチが必要になると思っています。しかし、従前の対策だけではなかなか高い目標まで達成できないということになりますから、どうしても研究開発が不可欠となります。研究開発としては、鉄道においてエネルギーマネジメントを構築するための開発と、世の中の最新技術を適用して鉄道システムを革新していく開発という2通りの方向性を考えています。

2. 車両の省エネルギー

CO₂発生量の約7割を占める列車運転をターゲットとして、車両の省エネルギーについて報告をします。

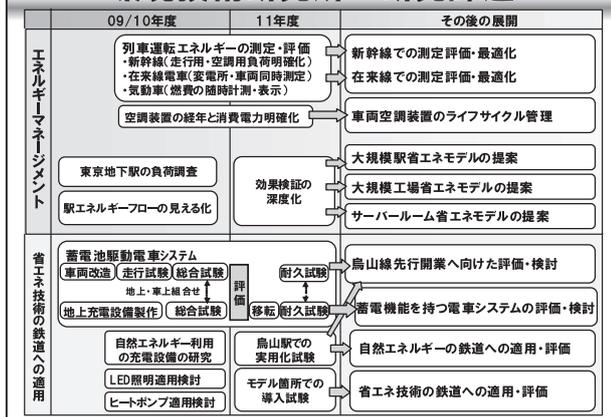
通勤電車を例とした省エネ性能の進化

	消費電力量	最高速度
103系(1963) 抵抗制御	100	100km/h
205系(1985) 界磁添加励磁 回生ブレーキ	66	110km/h
E231系(1999) VVVF制御 回生ブレーキ	47	120km/h

Environmental Engineering Research Lab.

最初に、首都圏を走る通勤電車の世代別の消費電力量を比較してみました。103系、205系、231系と進化の中で、消費電力も半分以下になっています。この進化を支えてきたのは、車両の軽量化とブレーキ時に発生する発電エネルギーを有効活用する回生ブレーキの技術です。

環境技術研究所の研究課題



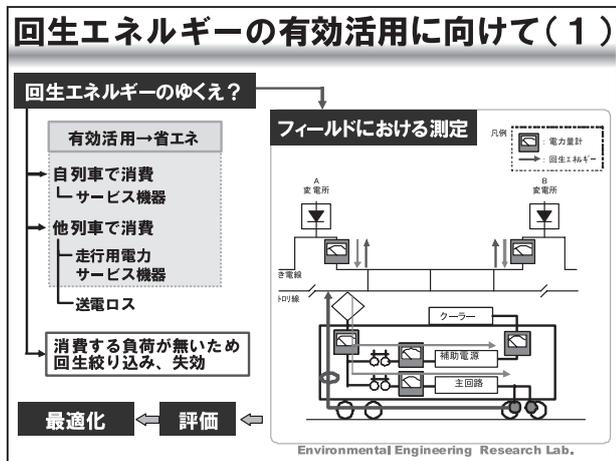
更なる省エネルギーに向けた課題

1. 回生エネルギーの有効活用
2. 空調等の補機の省エネ
3. ハイブリッド車両の開発

Environmental Engineering Research Lab.

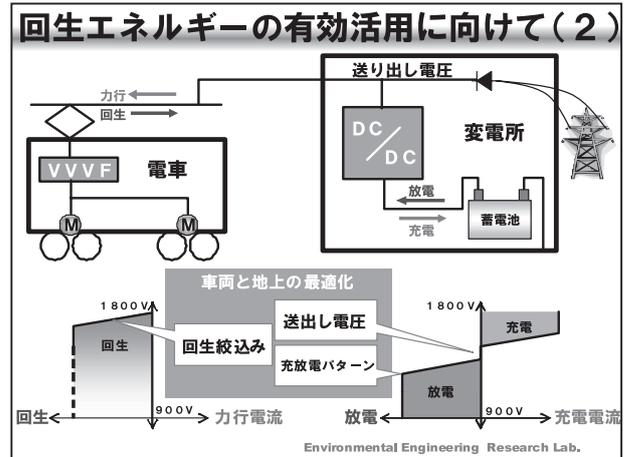
更なる省エネルギー化を実現するためのメニューを挙げてみました。

1点目として、回生エネルギーの有効活用です。回生ブレーキを省エネルギーに生かす工夫は今も課題となっています。2点目は、空調等の補機の省エネ化です。車両技術においてはVVVF制御など、駆動電動機の制御は飛躍的に進化してきましたが、冷暖房や照明等の補機についてはまだまだ改善の余地があると考えております。3点目として、非電化区間等のシステム革新としてハイブリッド車両の開発をあげました。



次に、回生エネルギーの有効活用に向けてフィールドで列車の運転エネルギーの測定評価を行う研究開発について説明します。車両の回生エネルギーは、自列車のサービス機器や他の近隣の列車が消費してくれるれば、有効活用されて省エネになるのですが、使ってくれる負荷がない場合には架線電圧が上がるのみで、やがて回生は失効いたします。

回生エネルギーが活かされる場合と活かされない場合があり、それぞれどのような状況になっているのかはこれまで必ずしもよく把握されてこなかったため、積算電力計を車両と地上設備の双方に設置しまして、実際の回生ブレーキの挙動、エネルギーの行方を調べてみたいと思います。この冬から測定しますが、このデータを評価して、最終的には車両の省エネルギーに向けた最適化に生かしたいというふうに考えています。



回生エネルギーの有効活用に向けて、蓄電池を活用する方策も検討しています。

変電所に蓄電池を設置し、架線電圧が高くなったら蓄電池へ充電し、低ければ放電するという制御を行います。これによって回生車両はいつもエネルギーを吸収してくれる安定的な負荷を得たということになります。一方、変電所の送り出し電圧は、これを低くすれば回生エネルギーを活用しやすくなりますが、車両のパンタグラフ点で900ボルトを下回ると、今度は力行が出来なくなります。架線電圧900ボルトから1800ボルトの間に、車両側の回生絞込み・変電所の送り出し電圧・蓄電池の充放電パターン、という3つの要素が並んでいることになります。これらの全体最適が課題ですが、フィールドでの測定・評価を元にその最適化を追求してまいります。

ハイブリッド車両の試作

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 (2001年～)	ディーゼルエンジン (331kW) → 発電機 → AC/DCコンバータ → DC680V	VVVFインバータ → 主電動機 (駆動) / 補助電源装置
②燃料電池ハイブリッド (2005年～)	燃料電池 (130kW) → DC/DCコンバータ → DC680V	主回路用蓄電池
③架線・蓄電池ハイブリッド (2008年～)	DC1500V 架線 → DC/DCコンバータ → DC600V	蓄電池の容量と役割

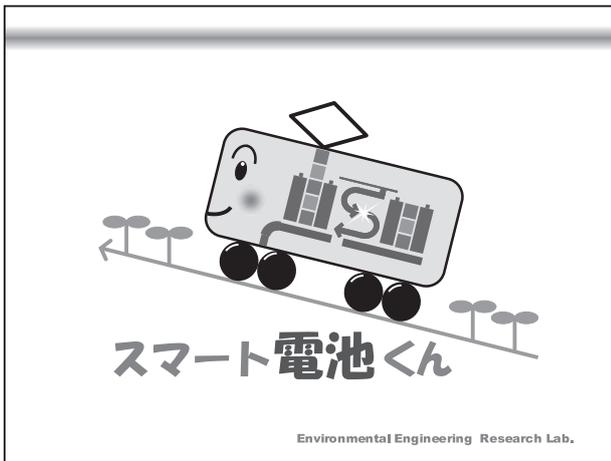
容量	役割
① 15kWh	・回生エネルギー吸収 ・エンジン負荷の調整
② 19kWh	・回生エネルギー吸収 ・燃料電池負荷の調整
③ 163kWh (換算中)	・電化区間：回生エネルギー吸収 架線電力アシスト ・非電化区間：回生エネルギー吸収 蓄電池走行

Environmental Engineering Research Lab.

次に、ハイブリッド車両の試作について報告します。2001年から2010年にわたり、ディーゼルハイブリッド、燃料電池ハイブリッド、架線・蓄電池ハイブリッドの3種類のハイブリッド車両を試作してきました。

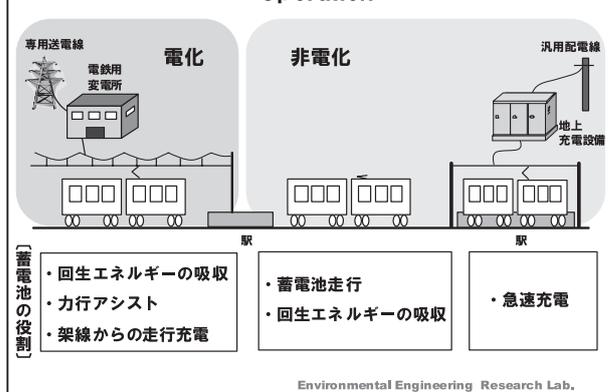
ディーゼルハイブリッド車両は既に実用化され、現在は架線・蓄電池ハイブリッド車両を開発しているところです。これらの駆動システムは、いずれも蓄電池で動く電車という共通構造をしています。つまり、蓄電池にエネルギーを供給する手段として、エンジン、燃料電池、それから架線があると考えられます。

蓄電池の容量と役割について比較してみました。最初は負荷抑制のような補助的な役割でしたが、現在の架線・蓄電池ハイブリッドは蓄電池で走行することで容量も大きくなり、脇役から主役になってきました。



かわいい絵を紹介しましたが、架線・蓄電池ハイブリッド車両のロゴになります。車両の中に電池を持っていて、その間に賢い頭脳を表したS(スマート)の字を表記しました。電気を貯蔵する技術と賢い頭脳でエネルギーのやりくりを上手に行い、地球環境に寄与したいという願いが込められています。愛称を「スマート電池くん」と名付けました。

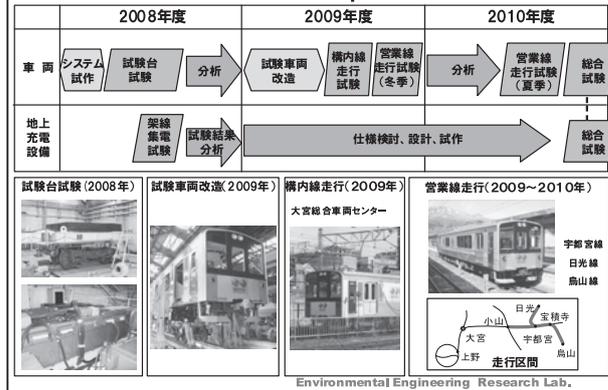
架線・蓄電池ハイブリッド車両の開発(1) — Operation —



次に、架線・蓄電池ハイブリッド車両の機能について説明します。

電化区間では再生エネルギーの吸収、蓄電池で力行の手伝いをする力行アシスト、架線からの充電を行います。非電化区間では蓄電池だけで自力走行し、また回生のエネルギーを吸収します。バッテリーの充電はどこかでする必要があるため、通常は折り返し駅等で10分程度の急速充電を行います。架線・蓄電池ハイブリッド車両では電化区間と非電化区間を直通運転しますが、蓄電池は、エネルギーを吸収したり放出したり、大変忙しく働きます。

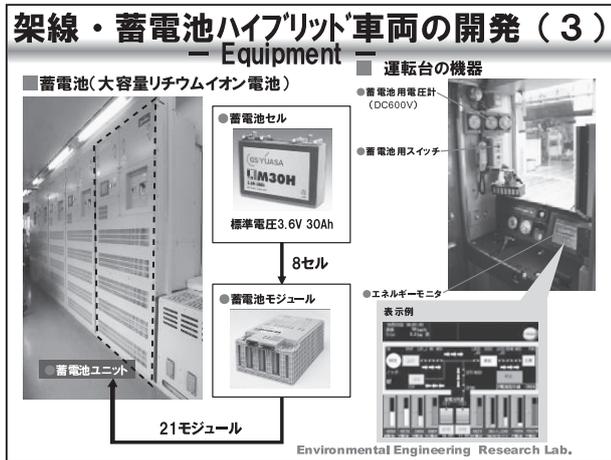
架線・蓄電池ハイブリッド車両の開発(2) — Roadmap —



次に、開発のロードマップについて説明します。

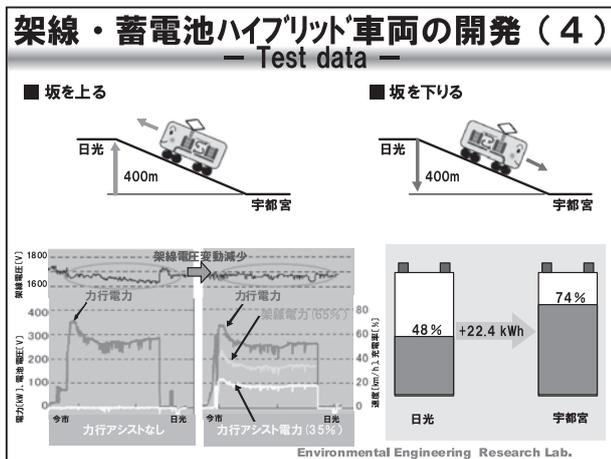
これまで車両各部の機器を組み合わせた試験台試験を工場内で行い、これを試験車両に積み込みまして、構内線走行、営業線走行とステップアップしてきました。

一方の地上充電設備も、仕様検討、設計、試作と進みまして、現在は機器が工場内にでき上がりました。今後はこれをフィールドに設置して、車両と組合わせた総合試験を年度末に行うことを計画しています。



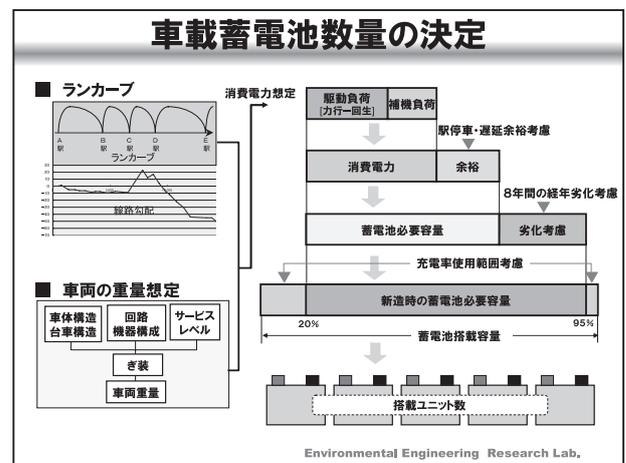
車両に搭載する蓄電池は3.6ボルトのリチウムイオン電池を8セル積んでモジュールとし、21モジュール積んで600ボルトのユニットを構成しております。当初9ユニットを積んでいましたが、現在はより実用化に近い4ユニットで試験を継続しています。

運転台で特徴的なのがエネルギーモニターです。試験車両のエネルギーフローを「見える化」したもので、回生ブレーキのエネルギーが蓄電池に吸収される様子などを見ることができます。将来的には、より簡略化したモニターを運転士だけでなくお客さまにもご覧いただき、省エネ車両の良さを発信していきます。



日光線は電化区間ですが非常に急勾配であるため、現行の車両では、坂を上るときに架線電圧が下がるとか、逆に坂を下るときには、車両が古いのでブレーキ時の発電エネルギーを抵抗器で熱として捨てるしかない悩みがあります。この悩みを、架線・蓄電池ハイブリッド車両で解消できるということが分かりました。

まず、坂を上るときですが、蓄電池を切った走行と蓄電池によるアシスト走行を比較すると、蓄電池のアシストにより架線電圧変動が減少する結果となりました。このように地上設備の弱いところを車両の蓄電池が補うことが確認できました。次に、坂を下るときですが、日光駅から宇都宮駅まで走行するとき発生する回生エネルギーを蓄電池に回収することができるため、蓄電池のエネルギーが増加しています。この22kWhという値は、平坦な線であれば優に20kmは車両が走行できるエネルギーに相当します。

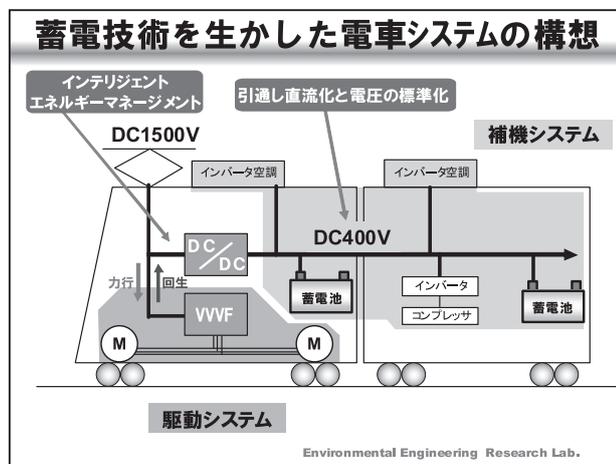


実用化にあたり気になるのは蓄電池の搭載数量です。ここでは蓄電池の搭載数量を決定するプロセスについて説明します。

初めに、線区を想定したランカーブと、車両の重量想定から走行に必要な駆動負荷を算定します。駆動負荷に、空調や照明の補機負荷を合わせたものが車両の消費電力となります。

最低限これだけあれば良いのですが、実用化するには、踏切事故で停車したとき等も照明や空調が働くように考慮する必要があります。また、車両の次のオーバーホールまで蓄電池を交換せずすむように、経年での性能劣化も予測した上で余裕を持った容量を確保することになります。さらに、充電率についても、低いところはパワーが弱くて使いづらい、充電率100%とすると寿命に良くないなど、充電率の使用範囲も制約されますので、蓄電池に求められる必要な容量は増加します。

直感的には、蓄電池の容量は駆動負荷の大きさによると思われるがちですが、実は事故等での停車時の余裕分も、照明や空調のための補機負荷ですから、通常の補機負荷と両方を合わせると駆動負荷を上回るほど蓄電池容量を必要としているということになります。これにより、補機負荷の省エネが課題であるということが改めて浮き彫りになりました。



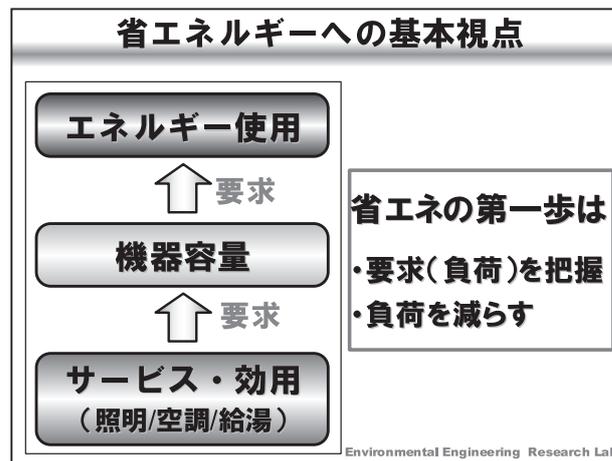
日光線の試験から蓄電技術が電化区間でも有効なことがわかりました。そこで、将来構想として蓄電技術を活かした電車システムを検討してみました。

蓄電池を活かすため、電車の引き通しを直流化して、空調等の補機システムをつなぎました。これまで補機はモータが交流で動くため、永く三相440ボルトで引き通してきましたが、インバータ制御を用いるのであれば直流での引き通しが有利と考えられます。

では、引き通し電圧を何ボルトにすれば良いのかということになりますが、これは世の中の標準化動向をにらみつつ、選択していくことになります。一方の駆動系は鉄道固有の1500ボルトのシステムを継承しています。補機システムと駆動システムの両方を繋ぐ位置に、DC/DCコンバータを配置して、蓄電技術を生かしたエネルギーマネジメントを行います。

3. 駅の省エネルギー

次に、CO₂排出の3割を占める駅・建物をターゲットとして駅の省エネルギーについて報告をします。



何故エネルギーを使用するのかというと、それは人が照明、空調、給湯などのサービス・効用を要求するからです。サービス・効用は、それを実現する機器の容量を要求し、機器の容量が大きくなれば、それだけエネルギー使用も大きくなります。

エネルギー使用というのは、このようなぶら下がり構造になっていますので、ぶら下がっている要求を把握し、減らしていくことが省エネルギーの基本になります。

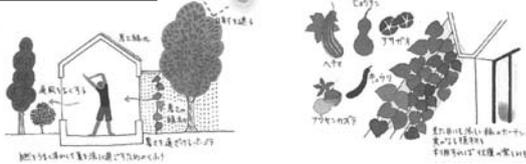
負荷を減らすには

・空調や照明のサービス範囲を小さくする。

例) ・こたつ

- ・照明空間を限定する
- ・駅舎のコンパクト化

・断熱、遮熱

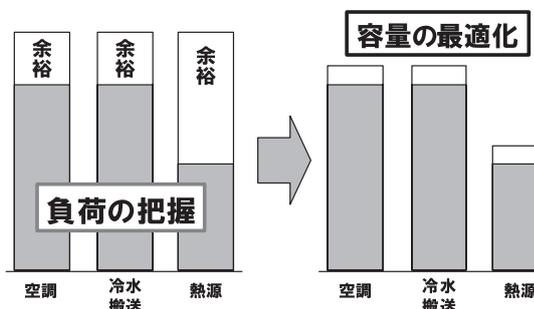


負荷を減らす方策としては、まず、空調や照明のサービス範囲を小さくすることです。

こたつのように暖房空間を限定するとか、執務空間だけを明るくするような照明にする、あるいは古い大きな駅舎をコンパクト化する、というのはいずれも有効な方策です。

簾やヘチマで断熱や遮熱をすることで、蒸し暑い日本の夏を涼しく過ごすことができます。これらは古くから伝わる生活の知恵ですが、実は今でも空調負荷の低減に有効です。ハイテクに頼り過ぎて生活の知恵がおろそかになっていないか、今一度反省してみる必要もありそうです。

負荷にフィットした容量の選定



Environmental Engineering Research Lab.

負荷を把握し、負荷そのものを小さくしたら、次はそれにフィットした設備容量の最適化を行うことが課題になります。

これは空調システムを例とした容量の最適化を表しています。

東京駅総武地下空調負荷の再評価

		建設当時 1972	シミュレーションによる再評価 2009
〔設計条件〕	気流	風量: 固定値 (トンネル内: 2m/s) 温度: 外気温+2℃ タスク時は+4℃	風量: 列車風解析(SES) (地下駅形状、トンネル形状、運転曲線、ダイヤ、送風機稼働) 温度: 熱環境解析
	列車放熱	1列車の固定値×将来予測本数 +常時1列車在線時の列車冷房機熱	1列車ごとに解析(列車放熱解析) (運転曲線、機器稼働、乗車率、ダイヤ)
	旅客発熱	滞在旅客数開業前想定値より	現状の流動統計データより
	照明・機器熱	開業前想定値	現状の設備データ (図面・現場踏査)
〔評価手法〕	負荷の算出	手計算	熱環境解析 (換気量、放熱量の解析値、濡れ面率・壁体伝熱データ)
	気流の動き (ホーム層温度分布)	模型実験 実物大: 柱1/2スパン 1/5スケ: 柱2スパン	熱、流体解析(CFD) (空調風量・温度・吐出箇所データ、トンネル温度解析値、解析風量、外気条件)

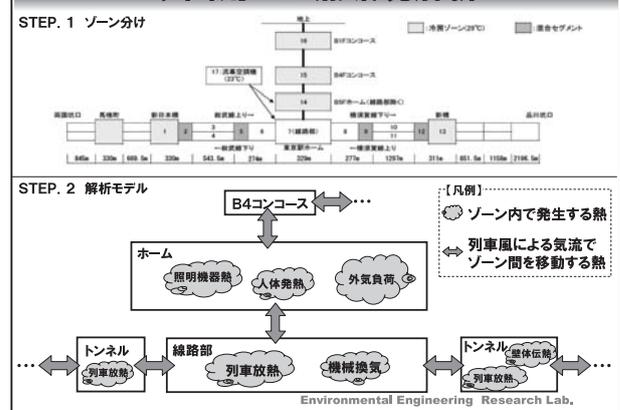
Environmental Engineering Research Lab.

負荷を把握して、容量を最適化する具体例として、負荷の規模が極めて大きい東京駅総武地下の空調負荷の再評価にチャレンジしてみました。

総武地下は、地下5階にホームがあるという桁違いの空間規模を誇っており、設備されている機器の容量もまたけた違いであります。この負荷計算は昭和40年代の空調設計時に行ったものですが、当時は設計条件に想定値を使用したり、評価手法に模型実験を行うなど、制約の多いものでした。

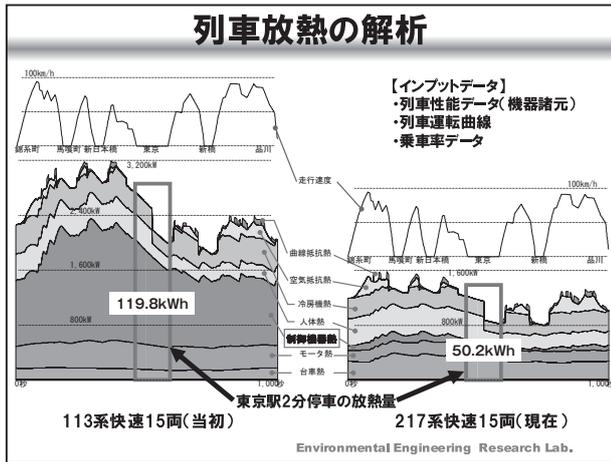
そこで今回は、実際の条件とコンピュータシミュレーションを用いて、再評価を試みました。

今回用いた熱環境解析

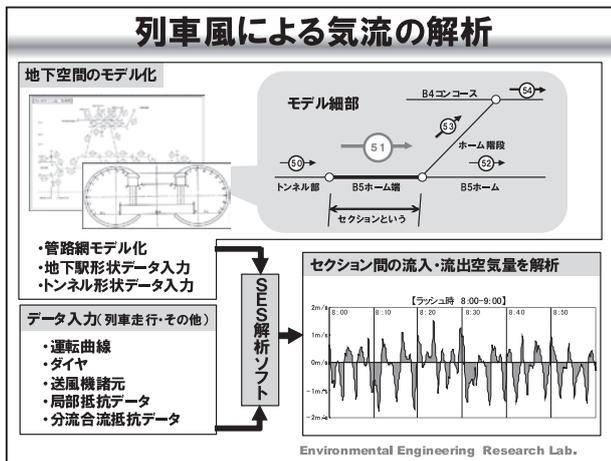


Environmental Engineering Research Lab.

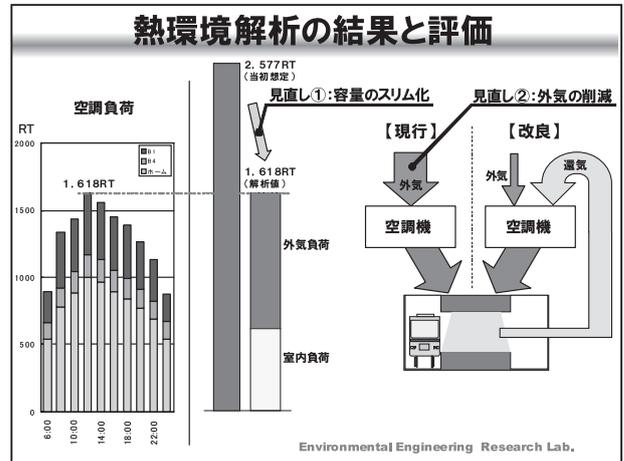
今回用いた再評価の熱環境解析について説明します。まず初めに、地下空間をゾーン分けいたします。次に、各ゾーン内で発生する熱と、列車風による気流でゾーン間を移動する熱を計算します。これらの要素により全体の熱負荷をシミュレーションしました。



ゾーン内で発生する熱の具体例の1つとして、総武地下ホームにおける快速列車の列車放熱を解析したものです。古い113系車両では抵抗制御車のため、ブレーキ時のエネルギーを熱として抵抗器から放熱していました。一方、現行の217系車両では回生ブレーキを用いたことにより制御機熱が大幅に減少しており、また全体として見ても列車放熱が半分以下になっていることがわかります。このように昭和40年代の条件と比較してみると、ゾーン内で発生する熱が大きく変わっていることが明らかになりました。



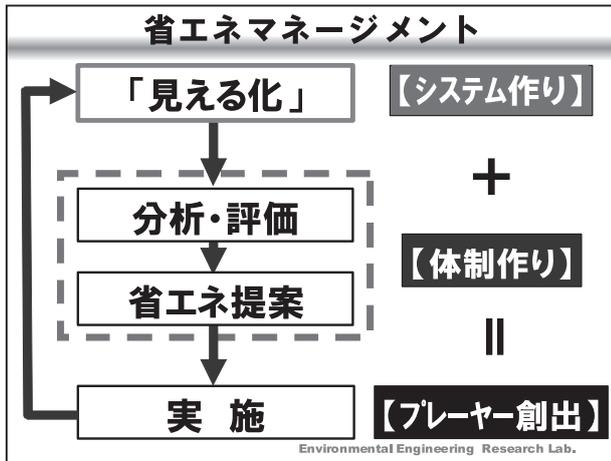
次に、列車風による気流を解析しました。このように地下空間を管路としてモデル化し、SESという解析ソフトにより列車風による気流を解析しました。



最後に熱環境解析の結果を示します。1日の空調負荷をグラフに示しましたが、一番ピークのところで1,618冷凍トンという負荷が得られました。これを当初想定と比較すると、現行の熱源容量が過大であるということがわかりました。

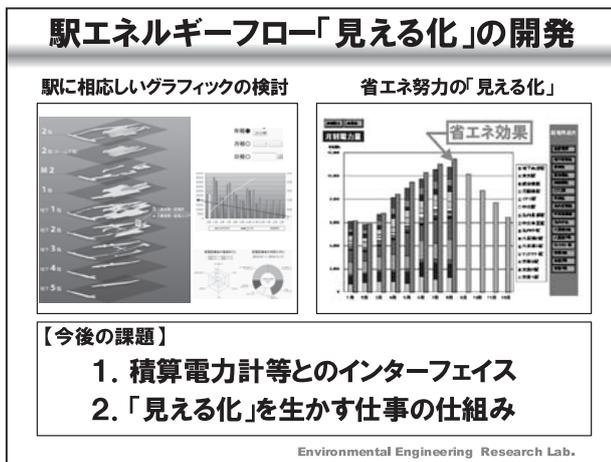
この検討ではもう一つ重要な発見がありました。設計当初はトンネル内が暑いことを想定し、大量の外気を取り入れていたのですが、実際のトンネル内は涼しく、この外気が逆に空調の負荷となっていることが判明しました。そこで外気の取り入れを減らすことができれば空調負荷は減少し、大きな省エネ効果が期待できると思います。

今後は、設備更新計画と併せた外気導入の削減を行う改良や、余剰熱源のスリム化、またはこれを有効活用することによるバックヤードの環境改善などにより、全体最適の東京駅が実現できると考えます。

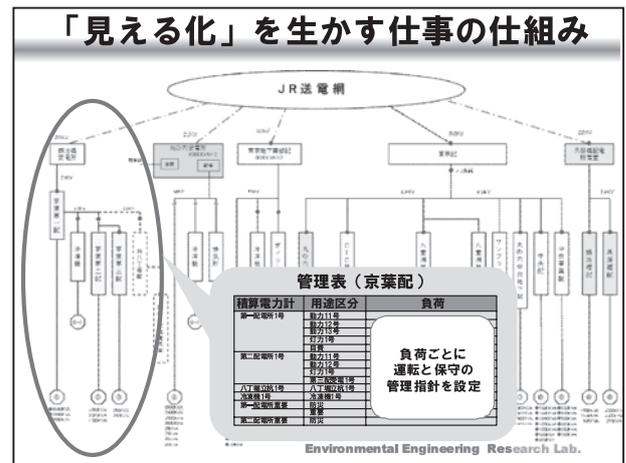


次に、省エネマネジメントを構築するための開発を紹介します。いったい誰が省エネをする主体、つまりプレイヤーであるのかということが、省エネルギーを考える上で極めて大切です。あるべき省エネマネジメントをフロー化すると、エネルギーフローを見える化し、結果を分析・評価して問題点を把握し、そこから省エネ提案が出て実施されるということになります。

では、これを実現するためには何が必要かという、まず「見える化」が図られなければいけないので、見える化のシステム作りということが必要になります。もう1つは、分析・評価して省エネ提案が出るような体制作り、あるいはそれが評価されるような体制作りが必要です。システム作りと体制作りが、省エネプレイヤーを創出することになります。

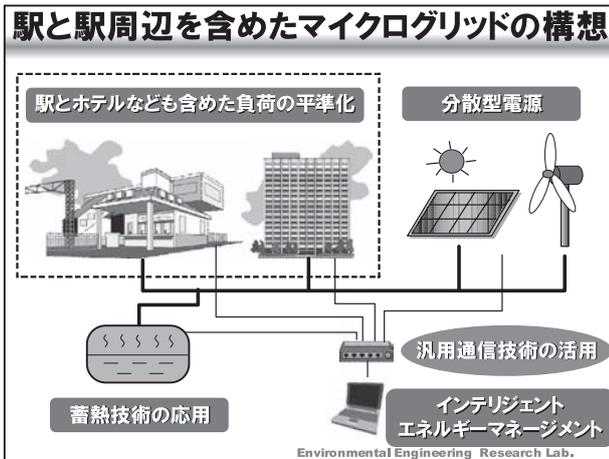


そこで、システム作りとしてまず駅のエネルギーフローの「見える化」の開発を行いました。駅にふさわしいグラフィックの検討と、エネルギーが「見える」だけではなく、省エネ努力が見えるように分析ツールの検討を進めてきました。今後は現地の積算電力計とのインターフェースの構築や、「見える化」を生かす仕事の仕組み作りが課題となります。



見える化を生かす仕事の仕組み作りということについて、若干説明をいたします。

上図は、東京駅の配電系統図と積算電力計の配置を示したのですが、積算電力計毎に用途区分があり、この下に負荷がたくさんあります。負荷ごとの運転と保守の指針をこのように管理表として整備すると、エネルギーデータを分析して各負荷の運転と保守に問題がないかが「見える」ことになります。一方で運転と保守を改善して省エネ努力を行うと、その成果が省エネルギーとして「見える」というようになります。「見える化」というのは、省エネルギーが「見える」ということだけではなく、その先にある運転と保守の管理が見える、あるいはそのマネジメントの最適性が「見える」ということになると思います。そして、このような運転と保守のマネジメントを定着させるには、現地の監視センターのような現場に責任と権限を付与することが重要であると考えます。



まとめ

- ①計測、評価、最適化という省エネマネジメントの構築
- ②「スマート電池くん」と「東京駅」というモデル提案

Environmental Engineering Research Lab.

最後に大風呂敷を広げてみました。

鉄道は、駅周辺にホテルや商業施設をグループとして持っています。朝夕ラッシュ時に負荷が大きくなる駅、一方で夜間に負荷が大きくなるホテルなどを合わせると、1日の負荷平準化が図れます。また、省エネルギーを進めるには、再生可能なエネルギーを分散型電源として持つことも求められます。負荷変動と、分散型電源の発生変動はなかなか一致しませんから、その間にエネルギーを溜める技術が欲しくなります。そして、これら全体の司令塔として、インテリジェントなエネルギーマネジメントを配置します。これが駅と駅周辺を含めたマイクログリッドの構想になります。このようなシステムを自前で出来ることが、鉄道の強みであると考えます。

4. まとめ

最後に、まとめです。CO₂を削減するには、いきなり省エネツールを持って来る前に、計測・評価・最適化という省エネマネジメントを構築することが必要不可欠です。その第一歩として、運転エネルギーにおいて「スマート電池くん」、駅・建物において「東京駅」というモデルを提案いたしました。

今後、これらを深度化して、鉄道だからできること、JR東日本だからできることを発信してまいりたいと願っています。