# 欧州 Railenergy プロジェクトの概要

○［電］兎束　哲夫

# EU's Railenergy project

○Tetsuo Uzuka, (Railway Technical Research Institute)

EU had promoted a project named "Railenergy" to reduce energy consumption for the rail. Several companies and organizations, including UIC and UNIFE, joined Railenergy and they set the target of 6% reduction for whole rail energy consumption toward 2020. Railenergy defined key performance indicators (KPIs) and a simulation model line to evaluate. This paper introduces outline of the Railenergy project, and estimate an influence for Japanese railways.

キーワード：省エネルギー，評価指標，UIC, KPI, TecRec, 電力貯蔵，回生
**Key Words:** Railenergy, energy consumption, UIC, KPI, TecRec, energy storage, regenerative brake

## 1．はじめに

欧州では鉄道の省エネルギーを目的とした 4 ヵ年にわたる Railenergy 研究開発プロジェクトが EU(Europe Union: 欧州連合)研究プロジェクトとして推進され，2011 年 3 月にその最終結果が報告された．参加メンバーは UIC(International Union of Railways: 世界鉄道連盟)・UNIFE(Association of the European Rail Industry: 欧州鉄道業界団体)・メーカ等 27 組織となっている．

成果として車両・電力・運転の各サブシステムがそれぞれ最大 30%の省エネルギーが可能として，さまざまな具体的施策が提示された．鉄道事業者だけの努力に止まらず，鉄道設備保有者等の関係者が協調してこれらの施策が 25%採用されると仮定した，全ヨーロッパの省エネルギー目標は 2020 年に 2005 年基準で 6%と公表された[1)2)3)]．さらに政府等を含む広範囲での長期的協調が得られれば，15%の成果も期待できるとしている（図 1）．

本稿は Railenergy プロジェクトの概要と特徴，具体的な施策を紹介し，電力の視点から日本への影響を考察する．

## 2．Railenergy プロジェクト

### 2.1 枠組みと参加団体

Railenergy プロジェクトの正式名称は"Innovative Integrated Energy Efficiency Solutions for Railway Rolling Stock, Rail Infrastructure and Train Operation.: 鉄道車両・鉄道インフラ・列車運用に関する革新的な統合エネルギー効率向上策"であり，EU の第 6 期研究開発計画(FP6: Sixth Framework Programme)から資金供出されて 2006 年 9 月に開始，2010 年 11 月に最終報告会が開催され，2011 年 5 月に報告書が発行された．

全体資金は 14.7 百万ユーロ(約 15 億円)，内 EU から 8 百万ユーロ，他は UIC，UNIFE，ALSTOM，SIEMENS，Bombardier，TRENITALIA を含む 27 参加組織から拠出されている．以下に，各組織の役割を示す．

(1)　EU(欧州連合)

EU は CO2 削減目標達成のため，研究開発費用を支出した．FP6 の他の鉄道関連プログラムとしては，Modtrain(鉄道車両のモジュラー化)，Modurban(都市交通車両のモジュラー化)，Trainer(運転士の省エネ走行訓練)等がある．

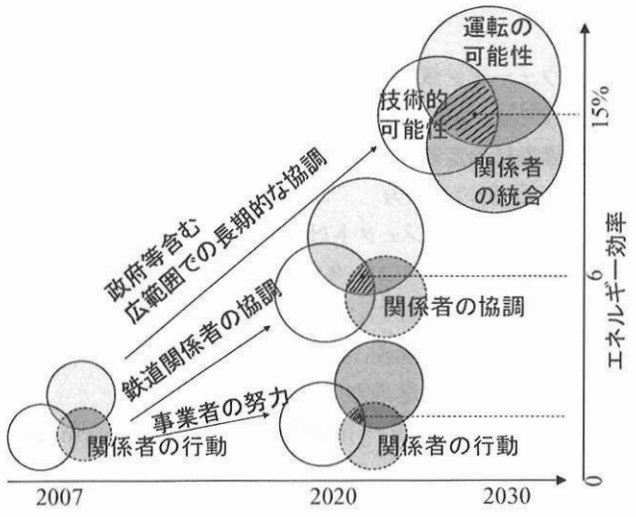


図 1　Railenergy プロジェクトの適用構想[3)]

(2) UIC(世界鉄道連盟)

UICは, Railenergyプロジェクトに関連した訓練と普及の後押し, 効率評価, および各国鉄道との連絡を担当した.

(3) UNIFE(欧州鉄道業界団体)

UNIFEは, 資金・計画・技術評価を担当し, 鉄道産業全体での省エネへの取り組みを示すこと, また技術標準を確立し, 各種の技術推奨仕様(TecRec)をとりまとめて世界的にリードすることを狙った.

(4) 鉄道事業者

DB(Deutsche Bahn: ドイツ鉄道)・SNCF(The Société Nationale des Chemins de fer Français: フランス鉄道)等の大手鉄道事業者は独自に省エネルギー施策(後述)を持つこともあり, UICを通じて間接的にRailenergyプロジェクトに参加した。Railenergyに直接参加したのは, イタリア等の数社に限られている. 一方, 2011年1月にはUIC主催の"UIC Energy Metering and Billing: エネルギー測定と課金"会議が, 同3月にはUIC主催の"Energy Efficiency and Procurement: エネルギー効率と購買"会議がそれぞれ開催され, 多くの鉄道事業者が参加している.

(5) メーカ

三大メーカALSTOM, SIEMENS, Bombardierに加え, イタリアAnsaldoBreda, フランスFaiveleyが参加して, 車両・地上等の個々の施策をメーカ単位で担当している. 一方, 車上電力計測の標準化に備えて, 中小規模の電気計測メーカ数社が参加している.

### 2.2 主要鉄道の省エネルギー目標

各鉄道から以下の省エネルギー目標が公表されている.

1) 欧州鉄道全体: 2020年までにCO2を1990年比 30%削減, 2008年5月CER (The Community of European Railway and Infrastructure Companies: 欧州鉄道事業者団体)総会で宣言
2) ドイツ鉄道(DB): 2020年までにCO2を2006年比 20%削減, 2002~2007年で電力量5%削減済
3) フランス鉄道(SNCF): 2020年までにCO2を1990年比40%削減, 同期間に運転エネルギー消費量5%削減
4) オランダ鉄道: 2020年までにCO2を1990年比 40%削減
5) スウェーデン鉄道: 2020年までに1990年比CO2の30%削減, 2002~2007年で電力量5%削減済

### 2.3 評価指標の定義

(1) 評価の考え方

Railenergyプロジェクトは国際プロジェクトであるため, その目標, スキーム, 各施策の適用と定量的な省エネルギー効果が明記されている. すなわち, 欧州各国鉄道のエネルギー消費現状調査, 省エネルギー指標の制定と公開, 長期にわたる計画, 進め方である.

(2) 省エネルギー指標(KPIs: Key Performance Indicators)

施策の評価用に以下に示す指標が定式化された.

1) KPI1 Final Energy Consumption per traction effort, 輸送量当り電力消費率(kWh/t-km):
最終全エネルギー消費量(受電端測定) / 輸送量(t-km)
2) KPI2 Final Energy Consumption per offered transport, 輸送力当り電力消費率(kWh/seat-km):
最終全エネルギー消費量 / 輸送力(seat-km)
3) KPI3 Primary Energy Consumption per actual traffic output, 基本エネルギー消費率(kJ/人-km):
最終全エネルギー消費量 /送発電効率/ 実輸送量(人-km)
4) KPI4 Final Energy Consumption per actual traffic output, 最終エネルギー消費率(kWh/人-km):
最終全エネルギー消費量 /実輸送量(人-km)
5) KPI5 Share of energy consumption for parked trains, 停車列車消費率(%):
停車列車消費電力量 / 最終全エネルギー消費量
6) KPI6 Energy recuperation rate at pantograph level, 回生率(%):
列車回生電力量 / 全エネルギー消費
7) KPI7 Efficiency of the railway distribution grid including substations, 鉄道電力供給網効率(%):
車両電力消費量 / 電力供給量

(3) ツールの公開

Website[2]上に計算ツールRailenergy Calculateが公開されており, (欧州の)指定線区・指定条件・指定省エネルギー施策(もしくは考案した新施策)・コスト等を入力し, 何年間でどの程度経済効果があるか, またCO2をどの程度削減できるか等を試算することが出来る.

### 2.4 TecRecとその効力

Railenergyプロジェクトの成果は, UIC・UNIFE起草の技術推奨仕様 "Technical Recommendation: TecRec"に随時まとめられ, 発行される. TecRecはEN(Euro Norm: 欧州規格)とUICリーフレットの中間と位置づけられており, EU各国に対しての義務効力は持たないが標準としての扱いが望ましい文書となっている. 書式はENと同一であり, 順次CENELEC(European Committee for Electrotechnical Standardization: 欧州電気標準化機構)からTS(Technical Specification)化される.

(1) TecRec100_001

2010年3月に発行された"Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock 100_001: 鉄道車両エネルギー消費の詳細と確認手法,"は省エネのシミュレーションおよび実測評価の手引きである. 具体的には, 車両の各状態(運転・回生・回送・留置)等の定義と, 運転エネルギーシミュレーションを行う際のモデル線区・モデル走行パターン等が記載されている. 車両の重量は規定するが, 走行抵抗は明記されずに消費電力の一要素として取り扱われる.

今後は, 車両の省エネルギー性能に関して, TecRec100_001のパターンに準拠したシミュレーションによる評価といった使い方が増えると予想される.

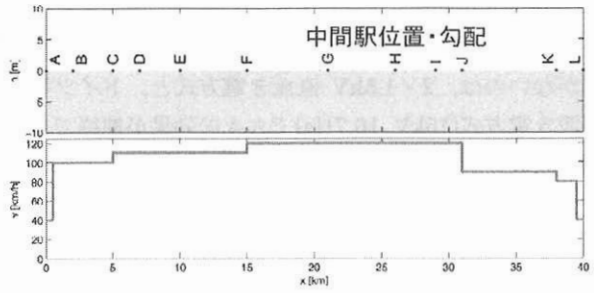


図 2　Suburban(都市近郊)シミュレーション路線[4]

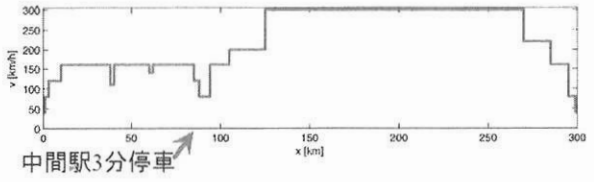


図 3　High-Speed(高速線)シミュレーション路線[4]

モデル線区・モデル走行パターンを以下に示す．5)の幹線貨物以外はすべて平坦線区と定義している．

1)　Suburban(郊外: 10 中間駅，最高 120km/h で 40km を 40 分走行，図 2)
2)　2)　Regional(地域: 13 中間駅，最高 140km/h で 70km を 61 分走行)
3)　Intercity(都市間: 8 中間駅，最高 200km/h で 250km を 159 分走行)
4)　High-Speed(高速: 都心区間の中速走行を想定して 90km の中間駅まで 150km/h，中間駅から 300km/h で 300km 107 分走行，図 3)
5)　Freight mainline(幹線貨物: 300km 長峠越え，3 中間駅，最高 100km/h で 253 分走行)．

(2)　TecRec100_002 他

2010 年 6 月には TecRec100_002 " Driver Machine Interfaces in the scope of TSI High Speed and Conventional Rail: 高速鉄道及び在来線の運転台標準仕様" が発行されており，2011 年末までに TecRec400_001 回生対応直流変電所の発行がアナウンスされている．

## 3．車両・運転の省エネ施策

Railenergy プロジェクトの具体的な省エネルギー施策から電気鉄道に関係する各施策を紹介し，日本の新幹線に近い AC25kV High-Speed 及び日本の通勤鉄道に近い DC1.5kV Suburban の省エネ効果指標(単位%)を示す．

### 3.1 運転と車両の施策

(1)　省エネ運転

以下の三段階が計画されており，第三段階はまだ構想中である．

1)　運転士への省エネ運転方法指導(AC2-6 /DC 2-6%)
2)　車上省エネ運転方法補助機器設置(6-10 / 6-10)
3)　地上車上協調による複数列車制御(10-14 / 10-14)

(2)　誘導電動機磁束制御(1-4 / 1-2)

新製および既存車両の惰行中誘導電動機磁束を制御して，損失を減らすことが，コストパフォーマンスに優れた方法として推奨されている．日本では惰行中にインバータを完全に停止する例が多く，このような施策で損失低減が出来るかどうか不明である．

(3)　既存車両の改造(2-4 / 1-3)

前述の誘導電動機磁束制御や，空調装置の制御改善，窓ガラスの断熱化等，既存車両に対する比較的安価な改造による大きな省エネ効果を推奨している．

(4)　超電導変圧器(3-5 / -)

4.6MVA 容量の変圧器を試作するとのことである．

(5)　中間周波数制御方式車両(1-3 / -, 図 4)

集電した交流電力を多重接続したコンバータで整流し，高周波 DC/DC コンバータで電圧変換してインバータに供給する．車上変圧器を省略して軽量化と効率向上を図る．

(6)　車上電力貯蔵(- / 5-15)

欧州では，安全性確保の見地からリチウムイオン電池の実用化よりも電気二重層キャパシタ(EDLC: Super Capacitor と呼ばれることが多い)を貯蔵媒体とした電力貯蔵の研究開発及び実用化が進んでいる．

### 3.2 電力の施策

(1)　回生可能直流き電(- / 9-11)

自励式のインバータを変電所に設置して，回生電力を積極的に交流側に返還する方式である．欧州でも，都市鉄道で他励式サイリスタインバータは実用化されている．

(2)　2×1.5kV 直流き電(- / 2-4, 図 5)

-1.5kV または+3kV のき電線を敷設し，変電所中間に設置した DC/DC コンバータで 3kV から 1.5kV を作ってき電する方式である．数年前から SNCF で研究開発されており，実用化には至っていない．

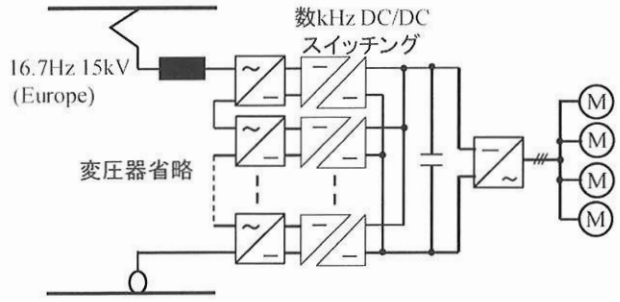


図 4　中間周波数制御方式車両[3]

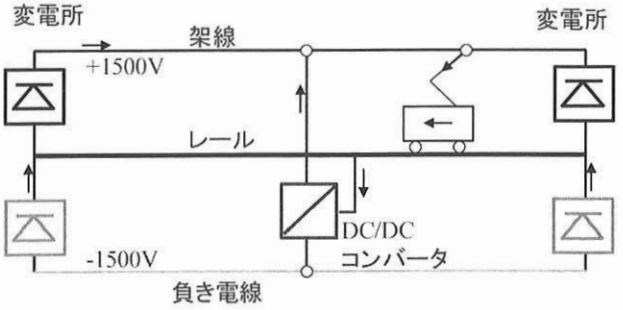


図 5　1.5kV×2 直流き電方式[3]

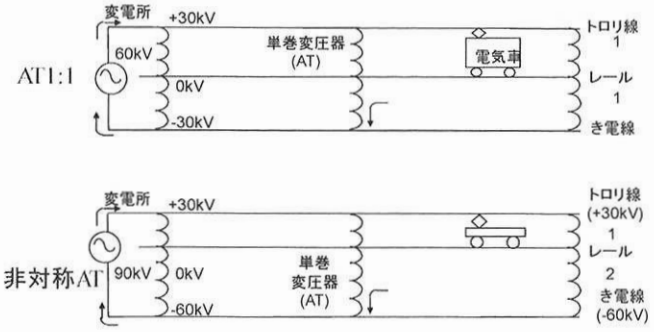


図 6　非対称 AT き電方式

(3)　直流昇圧(- / 5-15)

絶縁性能と地上・車上半導体にさほど影響が出ない範囲で，3kV 直流き電の 4kV への昇圧が提案されている．

(4)　地上電力貯蔵(- / 3-10)

電気二重層キャパシタを地上設置して電圧降下補償または回生電力吸収をさせるシステムが増えている．

(5)　非対称交流 AT き電・交流並列き電(0.3-1.0 / -,図 6)

商用周波 AT き電方式は，既に効率が充分に良いものとして認められている．省エネルギー施策としては，き電線電圧昇圧による非対称 AT き電(日本で言う AT1:n 方式)や可能な場所での並列き電導入が提案されている．

(6)　き電抵抗低減(0-0.3 / 3-10)

電線径増大等によってき電損失低減を図るものだが，投資効果が低いために強い推奨は無い．ただし，ドイツ系高速架線で標準的に使用されている，Mg 入銅架線の旧世代は電気抵抗が大きいため，更新時の新世代への置き換えは価値があるとしている．

### 3.3 施策の計算例

各施策を導入した際の省エネ効果として，TGV 東線の計算例[3]を表 1 に示す．評価は KPI2(kWh/Seat km)で行われている．運転およびき電方式の省エネ効果は限定され，主回路への新技術適用効果が高いとされている．

## 4．考察

(1)　Railenergy プロジェクトの特徴

Railenergy は EU プロジェクトとして，大義名分の立て方，公平な評価手法，全ヨーロッパの鉄道で 2020 年に 2005 年基準で 6%とおいた省エネルギー目標の公表とそれに向かっての努力方法等，体系的に整理されている．定量化を進め，部外者への説得力を強く意識しているように見える．

表 1　TGV 東線での省エネ施策効果計算例[3]

| No. | 施策 | 効果(%) |
|---|---|---|
| 1 | 省エネ運転 | 0.0 |
| 2 | 非対称 AT き電方式 | 0.5 |
| 3 | 交流並列き電 | 0.5 |
| 4 | 回路インピーダンス低減 | 0.5 |
| 5 | 超電導変圧器 | 4.2 |
| 6 | 中間周波数制御方式 | 2.2 |

一方，Railenergy プロジェクトの個々の施策を並べてみると，日本で既に実用化されているものが多い．全く類似例がないのは，2×1.5kV 直流き電方式と，ドイツ等の低周波き電方式(15kV 16.7Hz)で大きな効果が期待できる中間周波数方式コンバータ程度である．

この点，日本では早くから各メーカと事業者がそれぞれに省エネルギー施策を開発・利用し高い実績を得ている．

(2)　目標と評価手法

日本での鉄道省エネルギー施策は，線区ごとの特殊事情(勾配や駅配置・変電所配置等)へ最適化するのが普通である．したがって，その評価は特定の線区で，特定の車種を対象として，特定の期間測定をした結果，その効果は○%といった例が多い．この場合，施策を別の線区に適用した際の効果は判然としない．

これに対して，Railenergy では EU プロジェクトという性格上，各施策に対してできるだけ公平かつ汎用性をもった定量的評価を試みており，シミュレーション用のモデル線区・モデル走行パターンまで作成している．これにより，鉄道事業者サイドから見れば，投資効果を予測しながら施策を適用可能となっている．メーカサイドから見れば，自社の省エネルギー施策の定量的な説明が容易となる．

(3)　今後の影響

短期的には，欧州の鉄道が省エネルギーを目指していることを世界に対してアピールする手段として活用され，続いて，各施策が欧州メーカから一斉に世界中に売り込まれることが予想される．日本で既に実行されている省エネルギー施策が多いとは言え，日本からは体系的・定量的に効果を宣伝していないことから，第三者からは欧州側に説得力を感じるであろう．

一方，省エネルギー効果検証を名目として全ヨーロッパでの車上電力量測定標準化が開始されており，世界標準となって日本にも影響が及ぶことも考えられる．

他方，シミュレーション手法 TecRec100_001 および省エネルギー指標 KPI の標準化が進むことにより，日本でも同様な評価が求められる可能性がある．もっとも，日本の省エネ施策が優れているのならば，公開された条件のシミュレーションによって同じ土俵での勝負が可能になることから，優位性を示す機会ともなり得るであろう．

## 参　考　文　献

1)　http://www.railenergy.org/
2)　http://www.railenergy.eu/
3)　UIC, UNIFE: “Improving the energy efficiency of the railway system: The BEST of Railenergy,” www.railenrgy.eu, (2011)
4)　UIC, UNIFE: “ Technical Recommendation Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock,” TECREC 100_001, (2010)