

セッション1 大型車分野の先進技術

講演Ⅳ

自動車への給電・エネルギー貯蔵技術と 将来の交通システム

東京大学大学院
新領域創成科学研究科
堀 洋一 教授

自動車への給電・エネルギー貯蔵技術と 将来の交通システム

モータ/キャパシタ/ワイヤレスによるもう一つのEV社会

東京大学大学院

- (1) 新領域創成科学研究科
先端エネルギー工学専攻
- (2) 工学系研究科電気工学専攻

堀 洋一



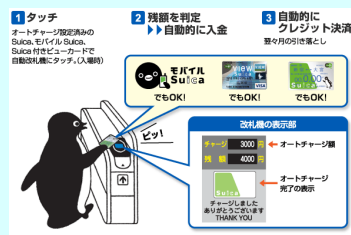
モータ/キャパシタ/ワイヤレス

キャパシタクルマ



=

オートチャージのスイカ



ワイヤレス給電



=

エネルギーのETC



まとめ

とにかく、EVは 一充電走行距離が短い のが大問題

↓
ではどうするか。

①高性能バッテリーを開発

← いま世の中はこれの大合唱

②インフラからエネルギーをもらう仕組みを開発

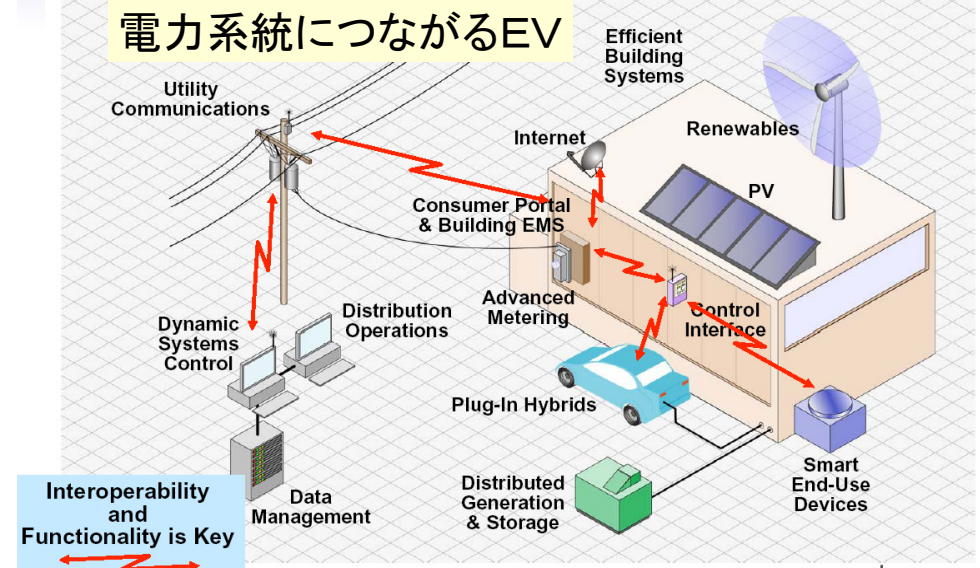
← ワイヤレス給電はこちら、もっと予算を！

そして、等価的に航続距離を伸ばす、という考え方
電車の航続距離は、0 km とも、 ∞ km ともいえる

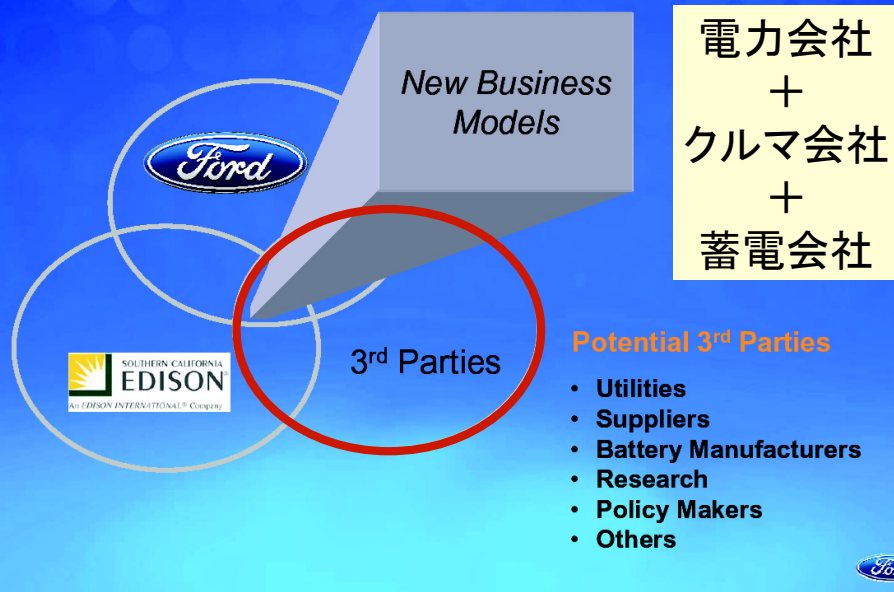
ついでに、電磁誘導か磁気共鳴か？
電池かキャパシタか？ とかいわないで、
→対立ではなく力を合わせて共存を

Future Intelligent Infrastructure Enabling PHEV and Consumer Choice

電力系統につながるEV



We are seeking new levels of cooperation and new relationships between all stakeholders



多様な車両に充電可能な急速充電器



- ・ 5分で40 km、15分で60 km 走行分の充電が可能
- ・ 車両の指令に従って動作するので自動車メーカー各社の多様な車両に充電可能

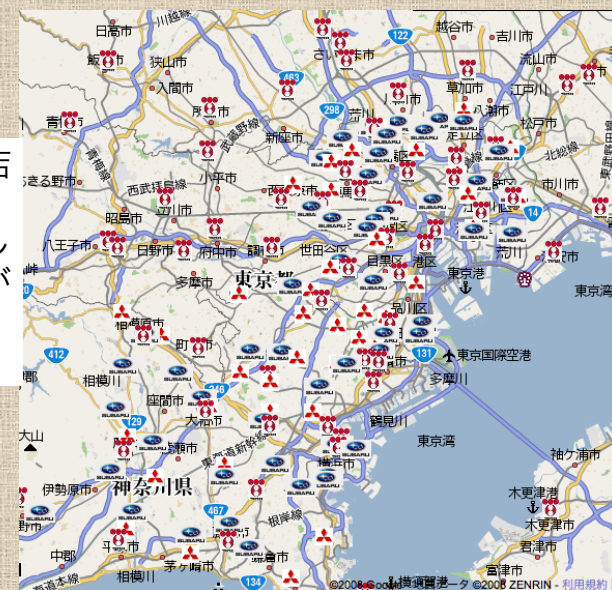
イオンモール 越谷レイクタウン



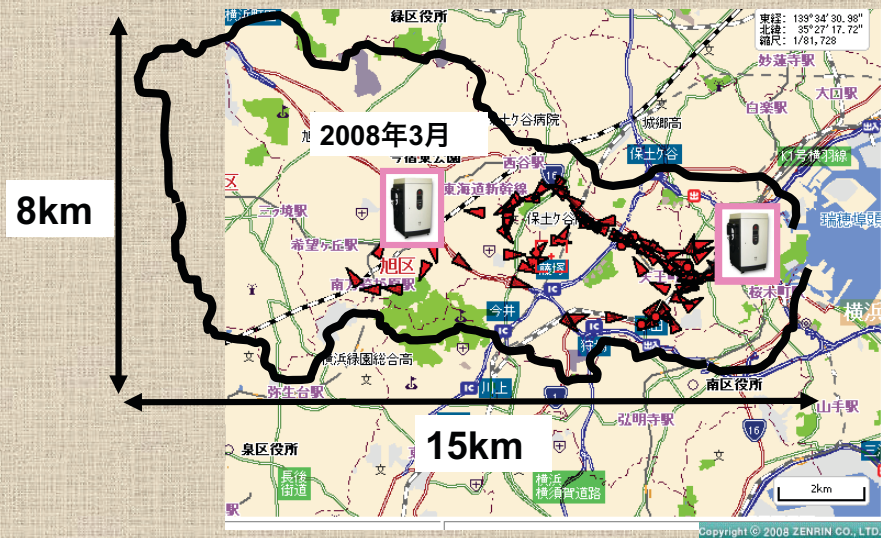
電気学会公開シンポジウム (09.3; 東京電力提供)

急速充電器の設置

自動車販売店
大型店舗
オフィスビル
などの協力が
得られれば
更に充実

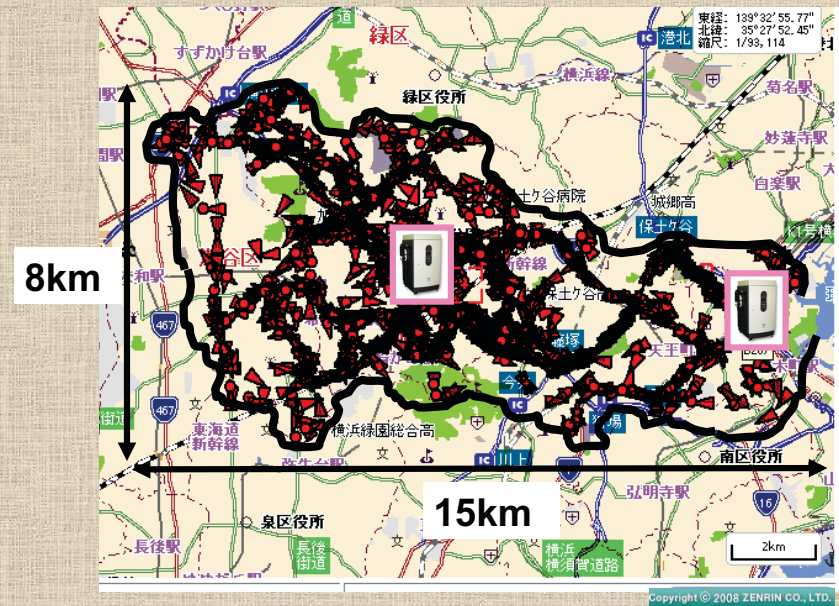


急速充電器の増設前 (2007年10月)



電気学会公開シンポジウム (09.3; 東京電力提供)

急速充電器の増設後 (2008年7月)

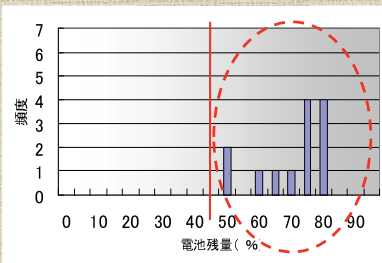


電気学会公開シンポジウム (09.3; 東京電力提供)

急速充電器の効果

事務所に帰ってきたEVの電池残量の分布状況

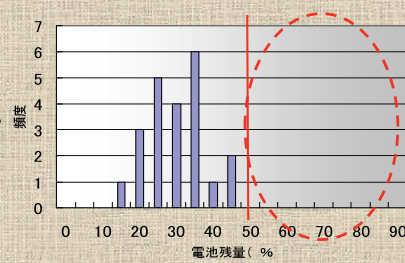
2007年10月



電池残量は50%以上

必要になればいつでも充電できるという安心感
⇒ 電池が持っている容量を有効に利用できる

2008年7月



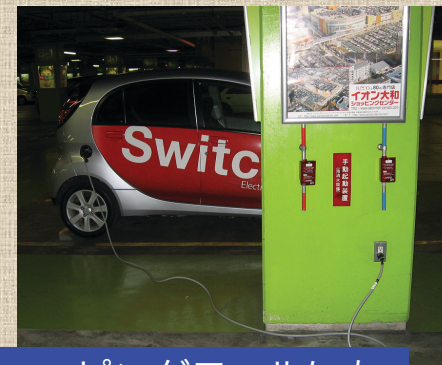
電池残量は50%を下回る

急速
充電器
の増設

電気自動車の普及の鍵→電池革新と安心感の両立

電気学会公開シンポジウム (09.3; 東京電力提供)

ほんとうはコンセントは至る所にある



ショッピングモールにも

おそらく1~2kW
ワイヤレス給電と相性がよく
無限のインフラを提供する。

コンビニにも



あやしい者です

電気学会公開シンポジウム (09.3; 東京電力)

EV充電のビジネスモデルは公衆トイレ

駅, SA, 空港, レストラン, コンビニ, デパート,

- (1) どこにでもある
- (2) 無料
- (3) すぐに使える

なぜか？

- (1) 来客へのサービス
- (2) お金は別の商品でもうける
- (3) 規格チェックなし

電気自動車に当てはめると

- (1) 安心できる数が必要
- (2) 課金しない(もともと安いのもうからない)
- (3) クルマとインフラが妙な通信をしないこと



考え方を換えよう！

自動車会社のふしぎな論理

「いつでも, 誰でも, どこでも」

→ 500km走る車がすべてを支配

東京の真ん中でサハラ砂漠でも走れる車を使っている

鉄道とクルマのおおきな違い

鉄道: インフラからエネルギーをもらって走る乗物

クルマ: インフラからエネルギーをもらわないで走る乗物

(歩みよれば→充電しながらちょこちょこ走るクルマ)

将来のクルマは電力系統につながる

(V2H, V2G, G2V) ???

★課題は, 移動体へのエネルギー供給と貯蔵

キャパシタとバッテリーの特徴比較



提供: 本田技研工業

提供: トヨタ自動車

	キャパシタ	バッテリー
長所	短時間で電気が出し入れできる 長期間使っても性能が落ちにくい	たくさん電気がためられる
短所	バッテリーに比べてためられる電気が少ない	電気の出し入れに時間がかかる 性能が長持ちしない

若者

おっちゃん

C-COMS 1



C-COMS 2



NISSHINBO
JRC 日本無線

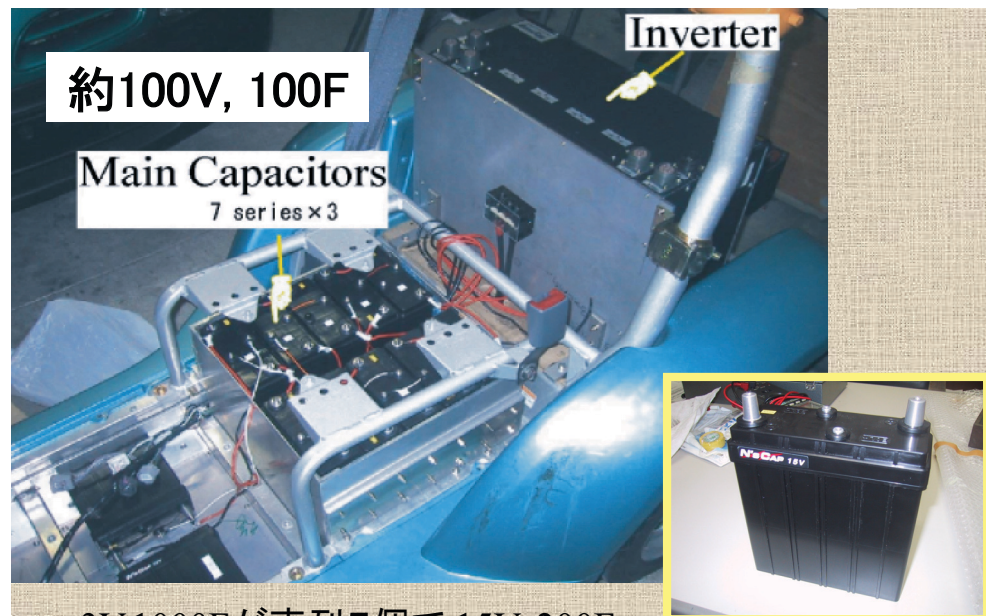


Power Systems





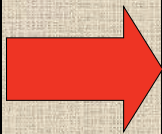
1セル(3.0V, 1000F) が5個直列で1モジュール。
モジュールを3並列, 7直列で使用。
練習問題: 全体の静電容量と耐圧を求めよ。



3V, 1000Fが直列5個で 15V, 200F
3個並列で15V, 600F
これを7個直列だから, $15V \times 7 = 105V$, $600F \div 7 = 86F$



Old charger
20min drive needs
150sec charging(30A)



New charger
20min drive needs
30sec charging(150A)

electric charge: $Q = CV = IT$, $Q = C\Delta V = I\Delta T$
 $100[F] \times 50[V] = 150[A] \times 30[s]$

キャパシタはエネルギーと知恵の缶詰

キャパシタの特長

- (1)寿命が長い(化学変化を伴わない「物理電池」)
- (2)大電流での充放電が可能(とくに数分で充電完了)
- (3)重金属を用いないため環境にやさしい
- (4)端子電圧から残存容量が正確にわかる ← かなり重要

留意点(腕の見せ所)

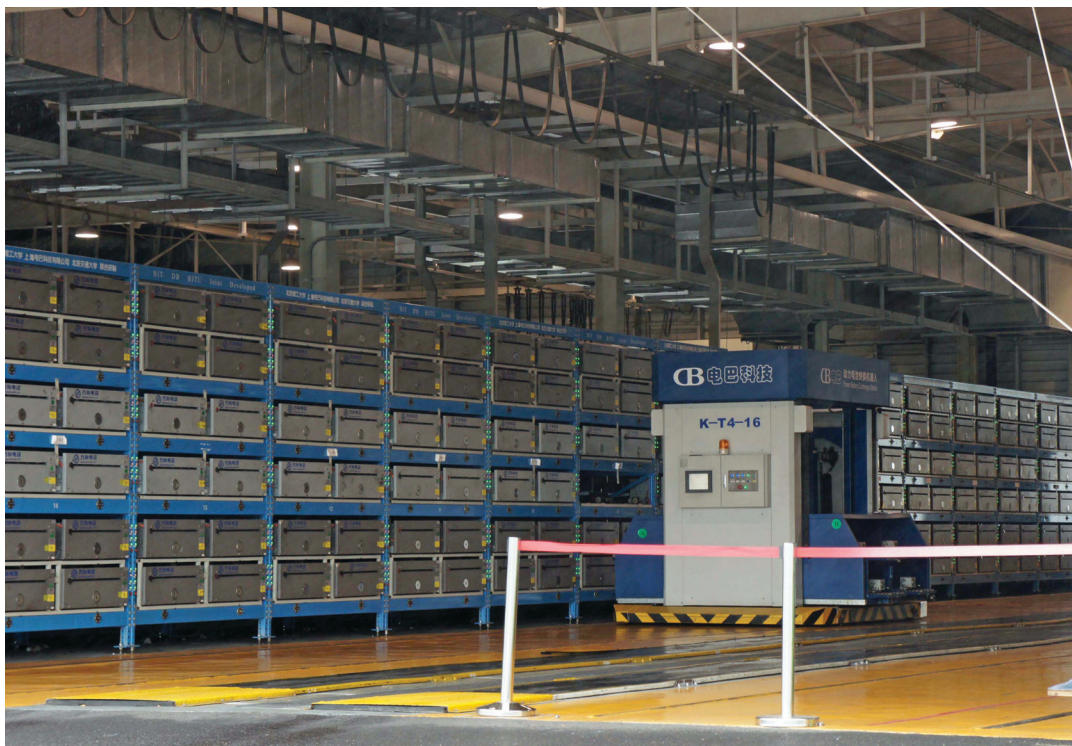
- (5)周辺回路が重要(「エネルギーと知恵の缶詰」)
- (6)欠点はエネルギー密度(密度10倍の新しいタイプが開発済み)

しかももう十分かも

完全に放電するまで使える

→ たとえば30~100Vで入れたエネルギーの90%が利用できる

キャパシタフォーラム(応援団長)

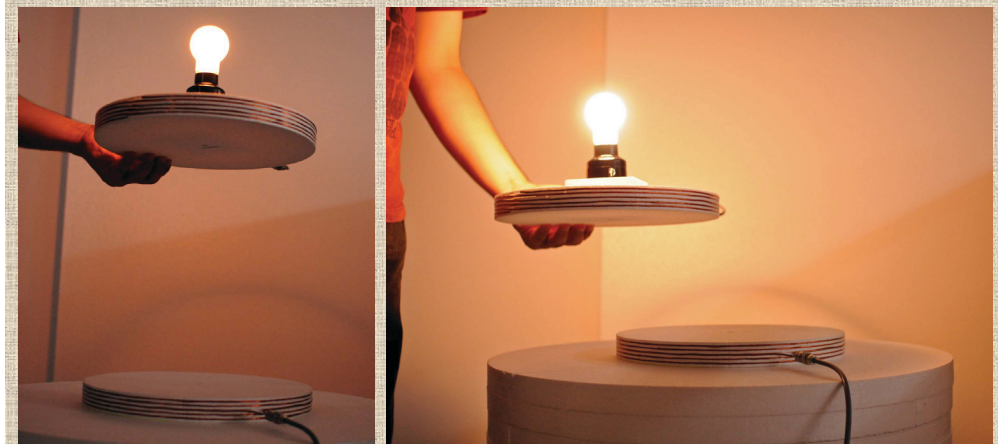
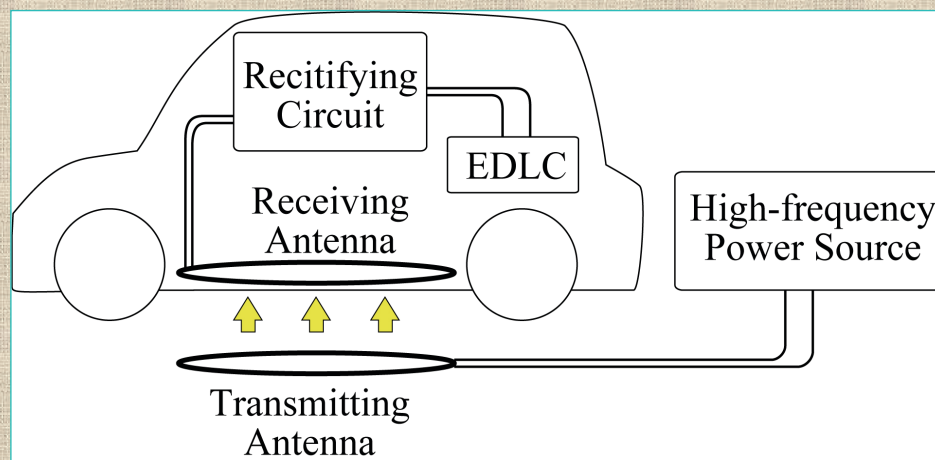


Bus can be charged
at bus-stops
in 30 secs.





ワイヤレス給電システムのイメージ ワイヤレス給電, 非接触充電 プラグレスハイブリッド車



このぐらい離れたりずれたりしても大丈夫

ワイヤレス給電(堀研の実験例)
ここでは約10MHz, 効率90%以上



(a) ギャップが狭いとき (b) ギャップが最適 (c) ギャップが広いとき

図 3.10: 電球点灯実験におけるギャップ変化の影響



(a) 位置ずれがないとき (b) 位置ずれが小さいとき (c) 位置ずれが大きいとき

図 3.11: 電球点灯実験における位置ずれ変化の影響

Bad
Bad

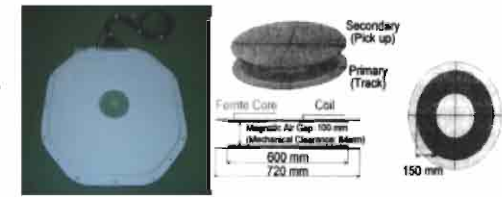
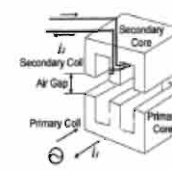
Excellent

① Electromagnetic induction: Gap is 20cm. Displacement is very small.

② Microwave power transition: Very long distance, low efficiency

③ Electromagnetic resonant coupling (WiTricity): Gap is a few meter.

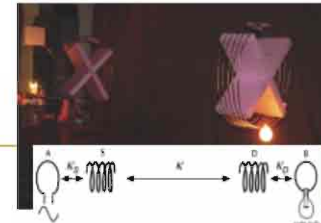
①



②



③



	Gap	Efficiency	Displacement	Power
① Electromagnetic induction (50, 60Hz)	Bad	Excellent, bad	Bad	Excellent
② Electromagnetic induction (kHz)	Good	Excellent	fair	Excellent
③ Microwave power transmission (GHz)	Excellent, bad	fair	fair	fair
④ Electromagnetic resonant coupling (MHz)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent

Non-radiative energy

Radiative energy

Hz	kHz	MHz	GHz
Electromagnetic induction (Commercial frequency) 50/60Hz	Electromagnetic induction (High frequency) 20-40kHz	Electromagnetic resonant coupling 13.56MHz	Microwave power transmission 2.45GHz
①	①	③	②

貯蔵エネルギー

近傍界

電磁誘導
磁界共鳴
電界共鳴
エバネッセント波

電界蓄積エネルギー

$$\text{密度: } \frac{1}{2} ED \text{ [J/m}^3\text{]}$$

磁界蓄積エネルギー

$$\text{密度: } \frac{1}{2} BH \text{ [J/m}^3\text{]}$$

遠方界

レーザ
マイクロ波

電波伝送エネルギー

$$\text{密度: } |\vec{E} \times \vec{H}| \text{ [W/m}^2\text{]}$$

図 2.9 ワイヤレス給電方式と介在エネルギー

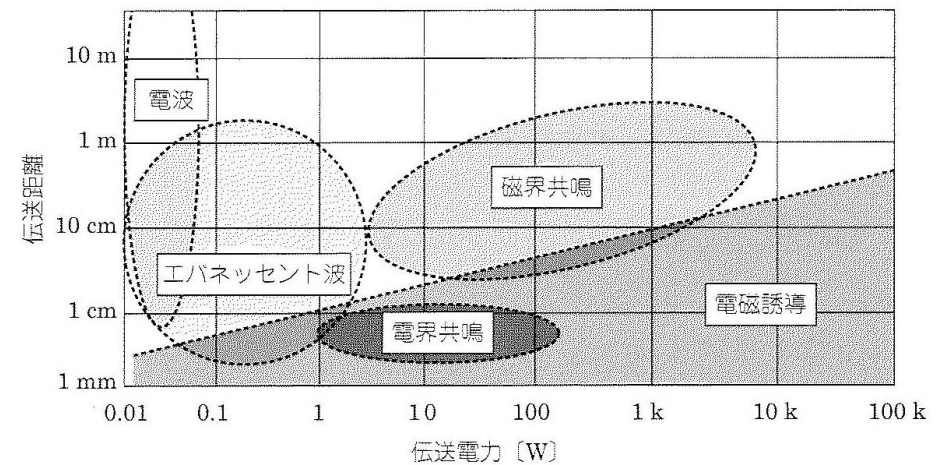


図 2.10 各方式の伝送電力と伝送距離



(a) MIT



(b) SONY



(c) 米 Intel

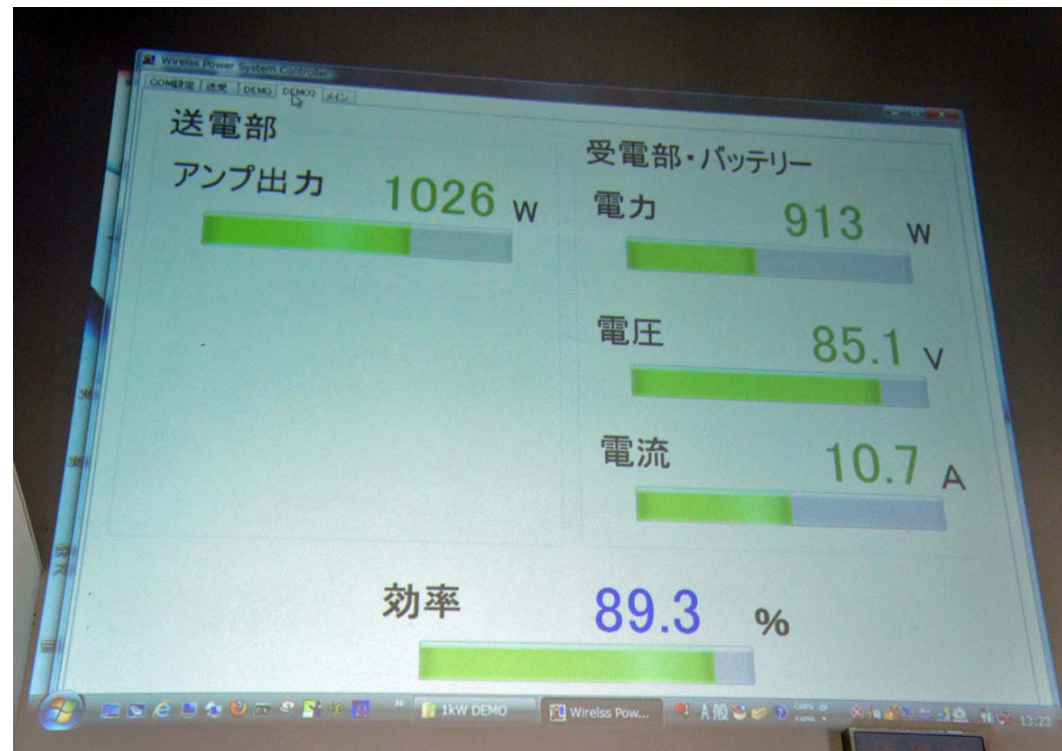


(d) 長野日本無線



(e) ネバダ・ライトニング研究所 (Nevada Lightning Laboratory)

図 2.9: 様々な企業、研究機関で研究されている電磁界共振結合方式



Research Direction

- Main Issues in Magnetic Resonance Coupling:
 - Resonance Frequency vs ISM band
 - Efficiency at Variable Position & Load
 - Power Source
 - Safety

Research Direction

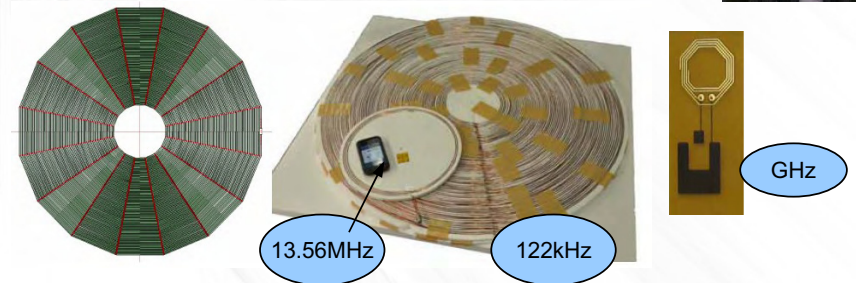
Antenna Design	System Control	Power Electronics
• kHz ~ MHz ~ GHz Antennas • Asymmetrical Antennas • Multiple Receiver Analysis • Repeater Antennas	• Impedance Matching System • Frequency Matching System • Battery/Capacitor Charging System	• Efficient Power Source • Analysis with Power Electronics Theories

11

Antenna Design

All Antennas must have:

- Identical Self Resonance Frequency
- High Q value = Low Ohmic Loss and Low Radiation



MHz : Smaller sized antennas, Narrow ISM Band, No efficient power source
 kHz : Power source exists, Wide ISM Band, Larger antennas

12

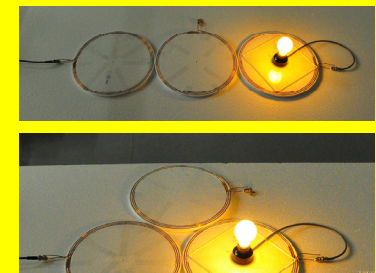
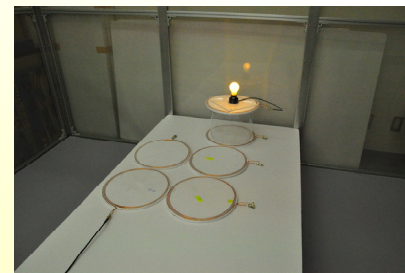
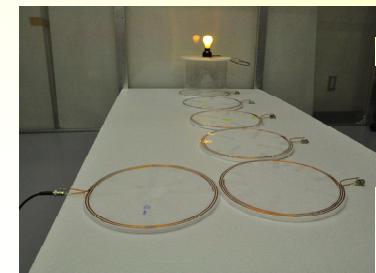
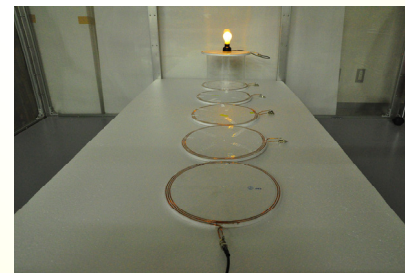
Asymmetrical Antenna Design



The Antennas may be asymmetrical as long as their self resonance frequency is similar

13

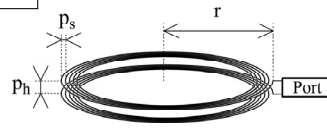
2.2 Repeater antennas



12

2.3 Effect of repeater antennas

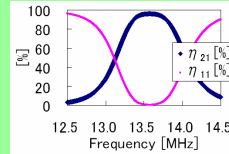
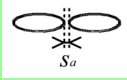
Parameter of antenna



Radius: $r = 150 \text{ mm}$
Turn: $t = 5.5$
Pitch: $p_s = 5 \text{ mm}$
Length between layers $p_h = 8 \text{ mm}$
Impedance of port is 50Ω

Without a repeater antenna

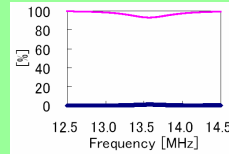
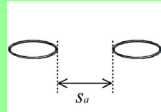
$S_a = 10 \text{ mm}$



η_{21} : Efficiency
 η_{11} : Ratio of power reflection

Short range has HIGH efficiency

$S_a = 320 \text{ mm}$

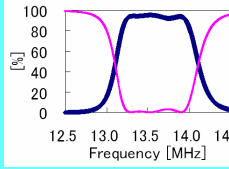
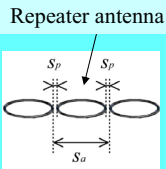


Long range has LOW efficiency

With a repeater antenna

$S_p = 10 \text{ mm}$

$S_a = 320 \text{ mm}$



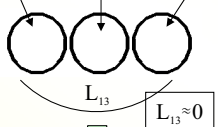
Long range with
repeater antenna
has HIGH efficiency

3.1 Cross coupling

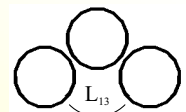
Repeater antenna

Transmitting antenna

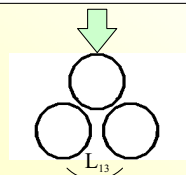
Receiving antenna



$L_{13} \approx 0$

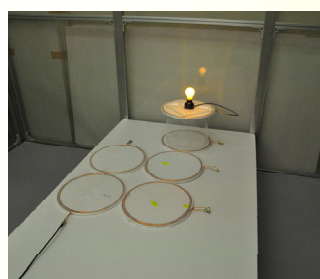


L_{13} is increased gradually

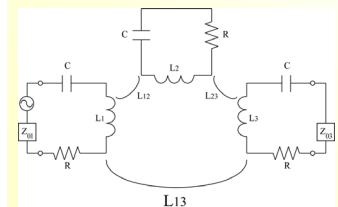
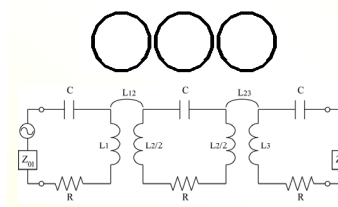


$L_{13} = 279.6 \text{ nH}$, $k_{13} = 0.025$

$L_1 = 11.024 \mu\text{H}$, $C_1 = 12.467 \text{ pF}$



3.2 Equivalent circuit considering cross coupling



$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & 0 \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ 0 & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & j\omega L_{12} & 0 \\ j\omega L_{21} & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & j\omega L_{23} \\ 0 & j\omega L_{32} & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & j\omega L_{12} & j\omega L_{13} \\ j\omega L_{21} & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & j\omega L_{23} \\ j\omega L_{31} & j\omega L_{32} & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \end{bmatrix}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

$$[Z_0] = \begin{bmatrix} Z_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{03} \end{bmatrix}$$

$$[S] = \{[Z] + [I]\}^{-1} \{[Z] - [I]\}$$

$$[Y_0] = [Z_0]^{-1}$$

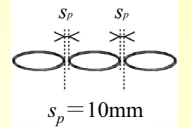
$$[\hat{Z}] = [\sqrt{Y_0}] Z [\sqrt{Y_0}]$$

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\eta_{11} = |S_{11}|^2$$

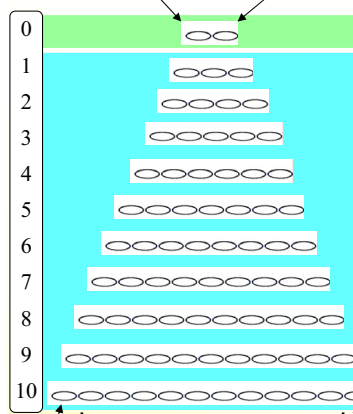
$$\eta_{31} = |S_{31}|^2$$

2.4 Repeater antennas: 0-10



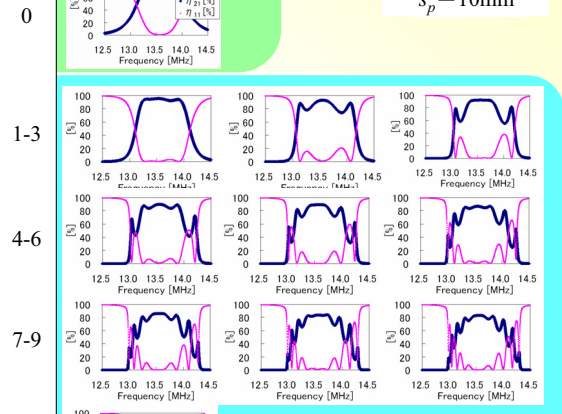
Transmitting antenna

Receiving antenna



Number of
repeater antenna

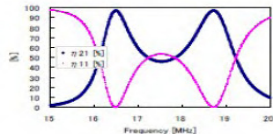
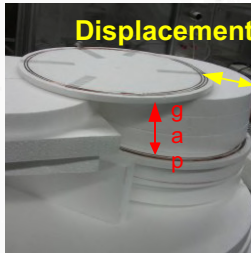
Number of
repeater antenna



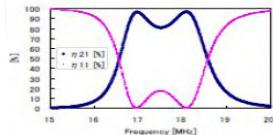
Long distance power transfer is possible by using many repeater antennas.
There are ohmic loss and radiation loss.
The efficiency is decreased only about 1% at each repeater antenna.

System Control

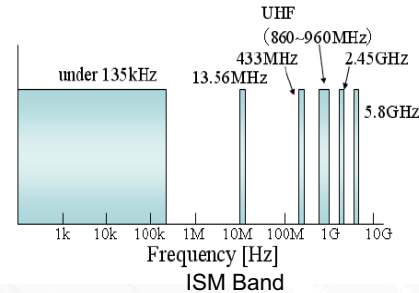
- kHz (Wide ISM Band) :
 - Frequency Matching System
- MHz (Narrow ISM Band):
 - Impedance Matching System



(a) $g=100\text{mm}$



(b) $g=150\text{mm}$

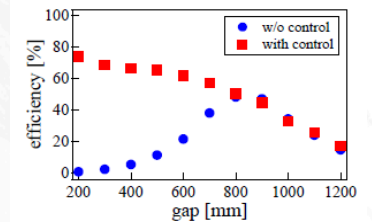
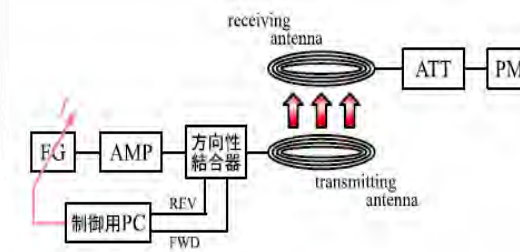
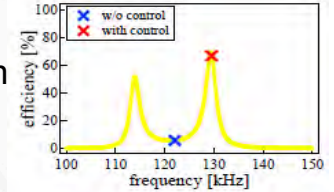


A System to maintain maximum efficiency when positional shifts occurs is needed.

15

System Control

- kHz (Wide ISM Band) :
 - Frequency Matching System
- MHz (Narrow ISM Band):
 - Impedance Matching System



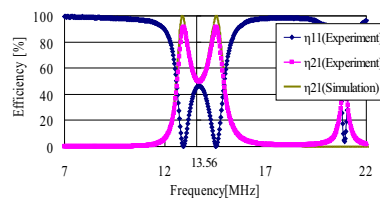
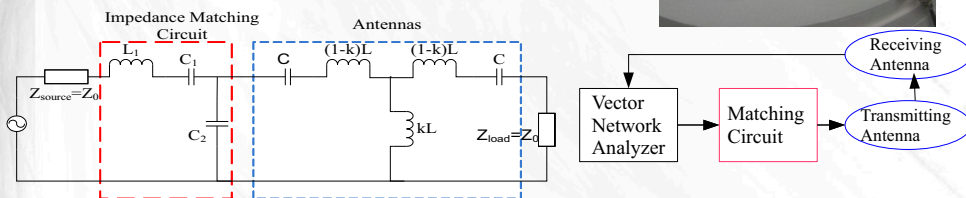
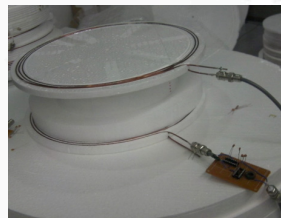
Experimental Results

Maximum Efficiency can be maintained even when positional shifts occur by **shifting the frequency** of the power source to the resonance frequency

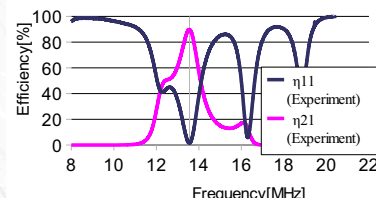
16

System Control

- kHz (Wide ISM Band) :
 - Frequency Matching System
- MHz (Narrow ISM Band):
 - Impedance Matching System



Before Impedance Matching



After Impedance Matching

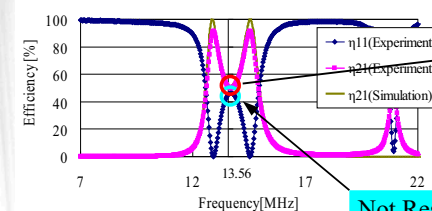
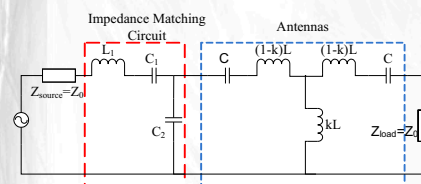
17

System Control

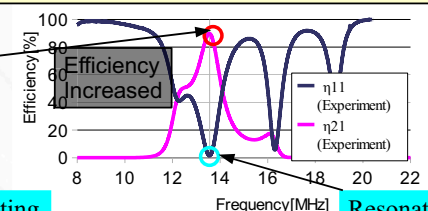
- kHz (Wide ISM Band) :
 - Frequency Matching System
- MHz (Narrow ISM Band):
 - Impedance Matching System



Maximum efficiency can also be achieved by matching the resonance frequency to the power source frequency (13.56MHz) using an **Impedance Matching Circuit**



Before Impedance Matching



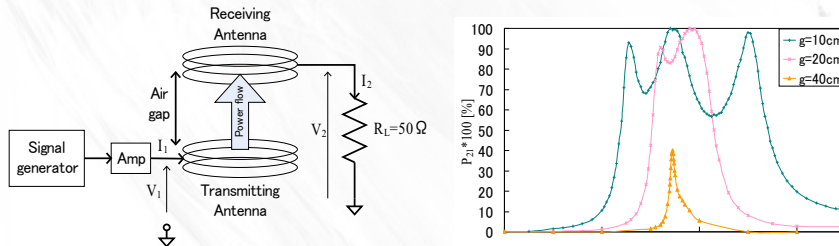
After Impedance Matching

18

Power Electronics

• Analysis with Power Electronics

- Analysis without using S-Parameters
 - Using V, I only!!
- Using self resonance frequency only to transmit energy



This system may also be used without any control if we can create a system that does not create a reflected wave.

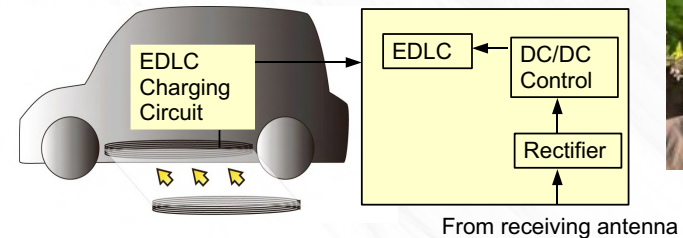
- NO coaxial cable
- Input Impedance = 0Ω
- Length of Antenna $\ll$ Wavelength

19

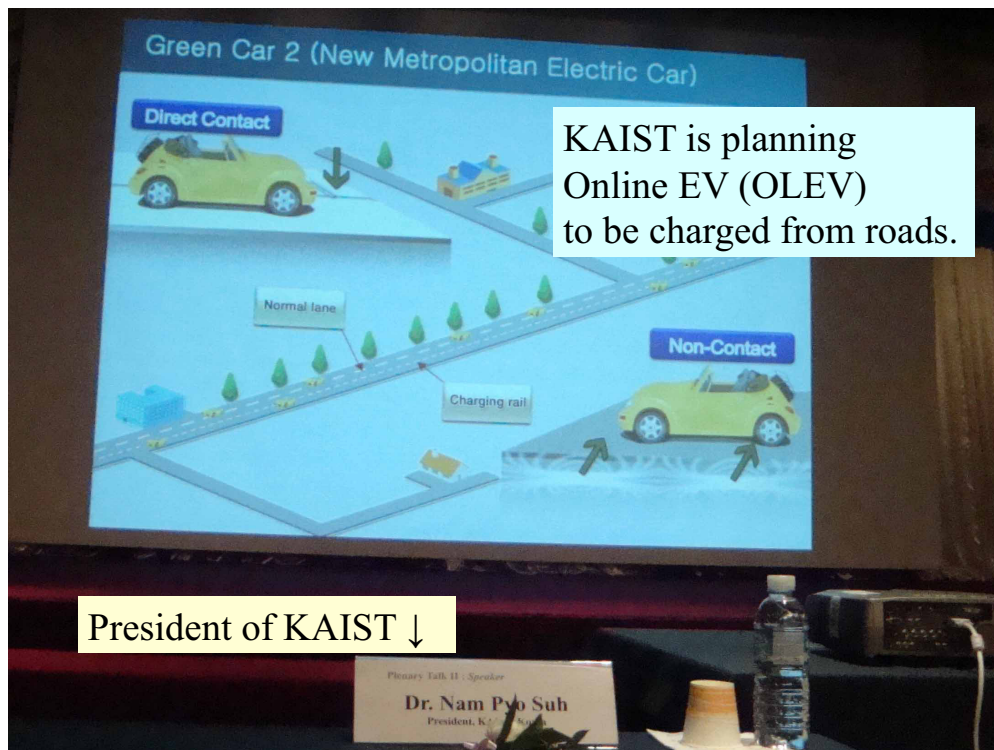
Power Electronics

• EV charging system

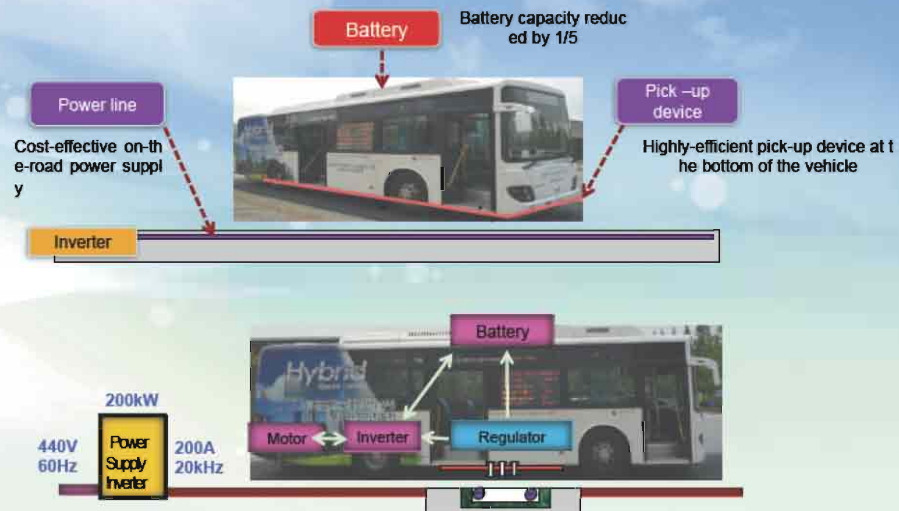
- System Design
- EDLC/Battery Charging circuit
- Power transfer antennas as a position sensor to assist in parking



20



Concept of OLEV



※ Utilizing the Hybrid Bus, co-developed by Hyundai Heavy Industry and Daewoo Bus, KAIST has been successful in demonstrating the KAIST's core technology in on-the-road power supply system and pick-up device attached to the bus.

KAIST OLEV

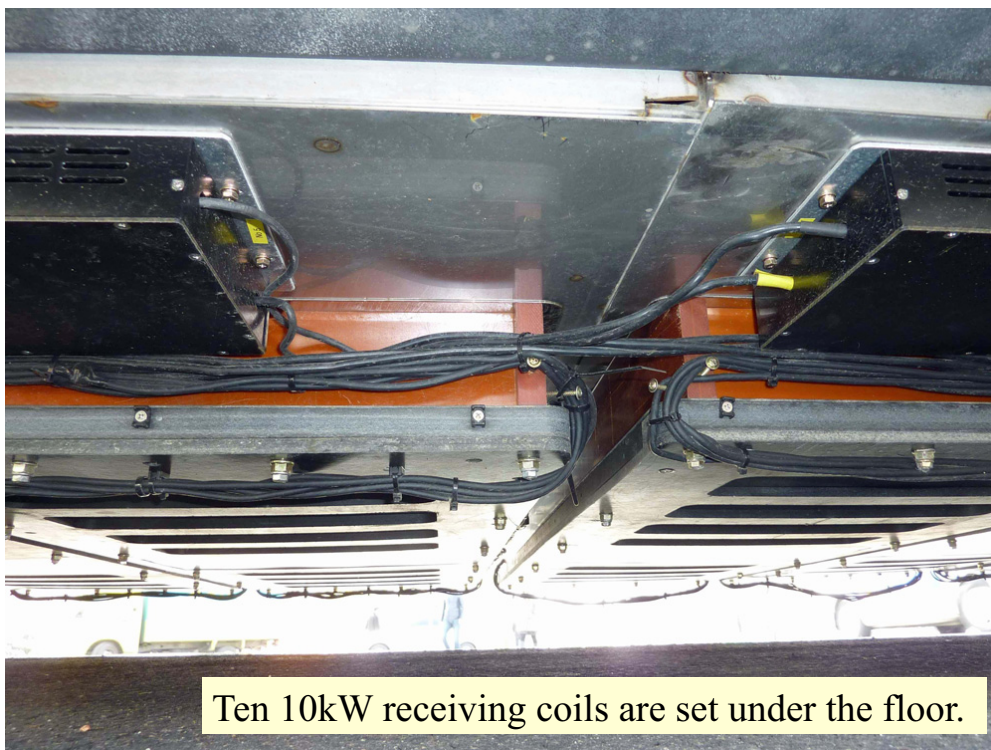
2



電気と制御で走る未来の車

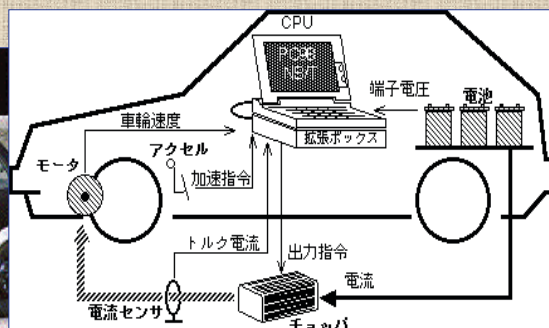
電気モータの最大の特徴 → 高い制御性

- 高速トルク応答
 - 車輪のスリップ防止制御
- モータの分散配置, 各輪独立駆動
 - 2次元車体運動の制御
- 正確なトルク値の把握
 - 路面状態の推定



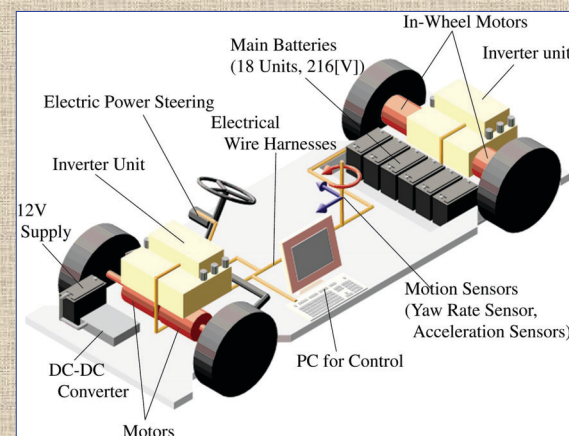
Ten 10kW receiving coils are set under the floor.

東大三月号 I



- ・1996年完成。
- ・直流モータ1基搭載。回生ブレーキは不可。
- ・前後輪の回転速度を計測。ノートPCによる制御。

東大三月号 II



- ・2001年完成。
- ・インホイールモータ4基搭載。
- ・各輪の完全独立駆動可能。回生ブレーキも可。
- ・4輪の速度、ヨーレート、前後加速度を計測。

堀研の C-COMS ファミリーは運動制御の実験装置



COMS3

(従来技術の汎用機)
(電池駆動)

C-COMS1

(キャパシタ駆動)
(特注インバータ)

C-COMS2

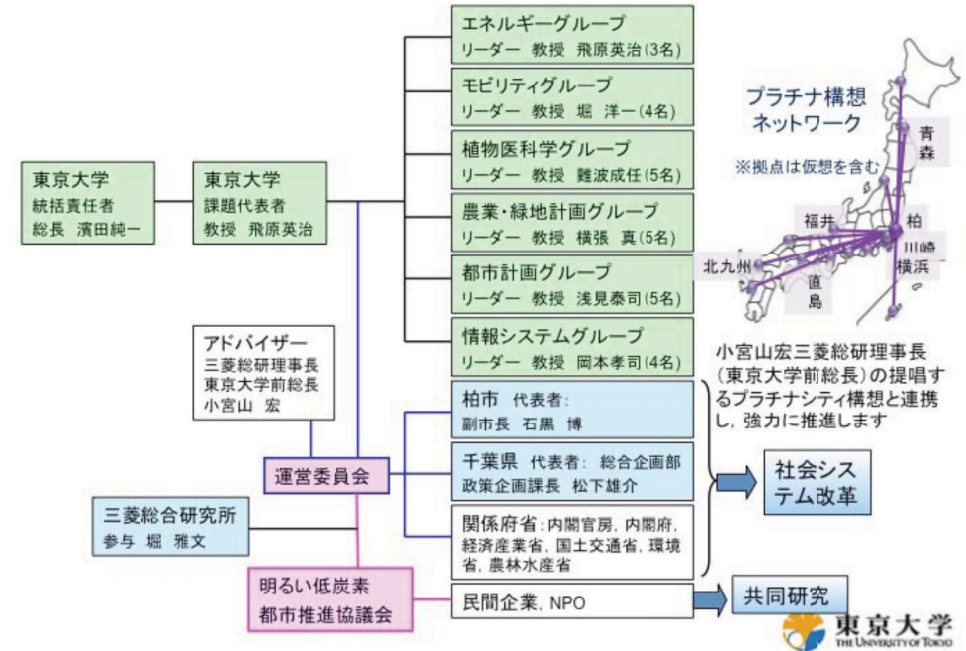
(キャパシタ駆動)
(DDインホイールモータ)

平成22年度 科学技術振興調整費「気候変動に対応した新たな社会の創出に向けた社会システムの改革プログラム」

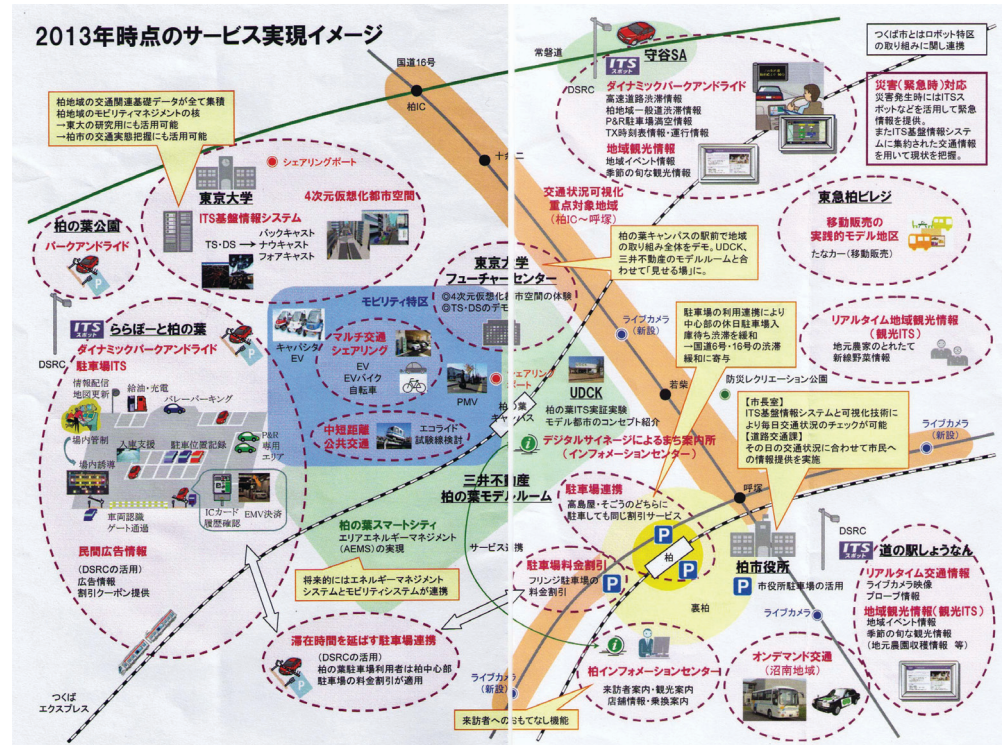
明るい低炭素社会の実現に向けた都市変革プログラム

東京大学・千葉県 柏市・三菱総合研究所
課題代表者 飛原 英治(東京大学)

運営体制



2013年時点のサービス実現イメージ



第2部会：次世代車両の研究開発・実用化・普及

部会長 東京大学 堀教授 **事務局** 東京大学 堀／藤本研究室
目的 モーション制御・急速充放電可能なキャパシタを用いた電気自動車・ワイヤレス電力伝送システム技術の開発。
活動 電気モータの高い制御性を生かした自動車のモーション制御技術の開発、キャパシタを用いた移動体エネルギーストレージ・供給技術の開発、電磁気共鳴現象を利用した移動体へのワイヤレス給電技術の開発

キャパシタ駆動の超小型電気自動車



・大きなエネルギー蓄積デバイス(電池)をもたず、ちょこちょこ充電で走る、電車のようなクルマ
 ・すでに存在する電力インフラから直接エネルギーをもらい、航続距離は無量大。

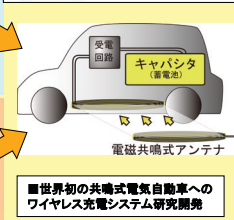


オートチャージのスイカ



未来の車

- ・ワイヤレスで充電できる
- ・キャパシタで走る
- ・モータによる運動制御



社会実験

■社会実験
 カーシェアリング
 運行状況管理
 位置情報管理
 モビリティマネジメント



→ 高齢者にもやさしい
 モビリティ (社会実験@柏の葉)

