

環境ナノテクがエレクトリック・カーの未来を開く

～ 自動車産業のシリコンバレー・モデル～

AZCA、Inc. マネジングディレクター

Noventi マネジングディレクター

石井正純

2009年3月22日

1. とても古い電気自動車の歴史

今から100年前、1900年から1908年の間に米国では480社以上の会社が自動車に参入したといわれている。10年目のシリコンバレーのインターネット・バブルと似た様相を呈していたのではないかと想像される。有名なFord T型自動車をフォードが売り出した1908年時点でも253社の自動車メーカーがしのぎを削っていたといわれている。その後、米国の自動車産業界は淘汰に淘汰を重ねて、誰もが知っているように、今ではフォード、GM、クライスラーに集約されている。これらのビッグ・スリーも昨年の経済危機以来、GMとクライスラーが合併の予備交渉に入る、フォードもマツダの保有株33%の大半売却を検討など、今後生き残れるかどうかの瀬戸際に来ている。

電気自動車の歴史は実は内燃機関の自動車よりも古く、イタリアのアレッサンドロ・ボルタが電池というもの(ボルタ電池)を1799年に開発した時までさかのぼることが出来る。1838年にスコットランドのロバート・アンダーソンがモータを製造し、1873年にイギリスでロバート・ダビットソンが鉄亜鉛電池(一次電池)を使用した電気自動車の実用化に成功。1897年には図表1にあるようにニューヨークの市内で電気自動車タクシーが走りまわっていた。1900年時点で、米国での電気自動車台数は約4、000台、自動車生産で全体の約40%占めていた。1912年頃に電気自動車の生産はピークを迎えたが、第一次世界大戦が終わり1920年頃からは、衰退の一途をたどった。

その後、1965年頃に大気汚染の問題が深刻化してきたため、電気自動車に対する関心が再び高まり、日本では当時の通産省による研究開発プロジェクトが始まった。1990年代に入ると、地球温暖化、都市環境が社会問題化し始め、米国では一定規模以上の自動車を生産、販売するメーカーに対して、2003年に州内で生産する自動車の総台数の少なくとも10%をZEV (zero emission vehicle)にすることを義務付けたZEV規制がカリフォルニア州で1990年に制定されたことで、電気自動車の開発が加速。だが、EVは一般には普及せず、ごく最近まで、ほとんど特殊な用途にしか使われなかった。その理由として「石油会社と政府が電気自動車を葬った」というコンスピラシー・セオリー(陰謀説)もあるが、実際は、急速な発展をとげた内燃機関の技術に対し、利便性、継続走行距離、走行性能などの点から、コンシューマーがガソリンエンジン車を選択してきた、というのが本当のようだ。

2. エレクトリック・カーの進化

このような衰退一途の歴史をたどった電気自動車だが、最近になって再び脚光を浴びるようになった。これは、近年、地球温暖化や環境汚染が本当に深刻な問題となりつつあり、化石燃料を使用するこれまでの自動車が排出する二酸化炭素(CO₂)、NO_x、粒子状物質など、温室効果ガスや大気汚染物質がその大きな要因であるからである。低公害車としてはガソリンやディーゼルなど化石燃料を使う従来の自動車に対して、同じ内燃機関自動車でも非化石由来の、バイオディーゼルやバイオエタノールなどのバイオ燃料を使う自動車が出回るようになった。また、天然ガスやメタノールなどを燃料とする自動車も開発されている。しかし、特にスポーツカーを含む乗用車の今後の大きな流れは、ハイブリッド車、プラグイン・ハイブリッド、エレクトリック・カーという流れになると考えられる。

トヨタのプリウスに代表されるハイブリッド車の市場はここ数年大きな成長が見込まれ、2012年には世界で230万台規模の市場に成長すると予想される。ハイブリッド車は簡単にいうと、(ガソリン)エンジンと(電気)モーターで動く自動車といえる。この電気は外部から供給されるものではなく、ガソリンエンジンが発電機を動かして作ったものなので、エンジンがバイオ燃料を使わない場合はハイブリッド車のエネルギー源は化石燃料ということになる。ハイブリッド車の効率がなぜ良いかというところ、回転数の低いところではガソリンの効率の悪いところをエンジンとモーターの協調によって全体のシステムとしての効果を上げているから。図表2に示すように、ハイブリッド車の基本的な構成はエンジン、必要な際にエンジンを稼働して発電する発電機、バッテリー、バッテリーからの直流電流を交流に変換するインバーター、バッテリーからインバーターを通して供給される電気で動くモーター、車輪を廻すための動力源であるエンジンとモーターの使い方を最適制御する動力分割機構からなる。実際にはハイブリッド車はシリアル・ハイブリッド方式とパラレル・ハイブリッド方式に大きく分かれる。シリアル・ハイブリッド方式ではエンジンはバッテリーの充電のための発電機を動かすためだけに使われ、モーターだけを駆動源として使用する。一方、パラレル・ハイブリッド方式ではエンジンとモーターの両方の出力を駆動源として使用し、エンジンのみで走行、モーターのみで走行、エンジンとモーターを併用して走行という三つの方法を最適に使い分けて使用する。トヨタのプリウスは正確にはパワースプリット方式というパラレル方式でありながらシリアル方式も使えるように、一つで二つ美味しいと取りした、賢い方式といえる。

プラグイン・ハイブリッド車は家庭用電源で電池を充電出来るハイブリッド車である。バッテリーの容量を増やすことにより、モーターで走行できる距離を長くする。高速走行や長距離の場合はエンジンとモーターの併用で駆動する。プラグイン・ハイブリッド車は駆動エネルギー源として電気を用いる比率が高まるため、電気自動車に一步近づいた方式といえる。また、CO₂削減や大気汚染防止への一層の効果が期待でき、さらに料金の安い深夜電力を利用して充電することにより、燃料代の低減というメリットも生まれる。

ハイブリッド(HEV)、プラグイン・ハイブリッド(PHEV)などのハイブリッド方式が実用最先端のエコ技術とされ、これらのほかにも燃料電池により発電してその電気を使用する燃料電池自動車(FCEV)も開発されているが、さらにエンジンを搭載せず、全く排気ガスを出さない100%電気駆動の電気自動車がこれから大いに発展し、リチウムイオン電池の大容量化と低コスト化が実現していけば、2015年までに全世界で3、300万台レベルまで市場が拡大することが予想される。電気自動車という日本語はちょっと古臭い感じがするので、ここからはエレクトリック・カーあるいはEV(Electric Vehicle)という呼び方もしよう。EVの基本構造は図表3に示されるように非常に簡単である。エンジンは使わずに、バッテリー、駆動モーター、滑らかな加速減、一定速度での走行を可能にするためのモーターコントローラーなどから構成されている。冒頭に述べたように、EVの歴史はガソリン自動車の歴史よりも古い。低公害車としての価値もさることながら、100年経ったあとで自動車も本来の姿に戻ろうとしているとすれば、それだけでかなりエキサイティングな話となるだろう。

3. 最先端の電気自動車はシリコンバレーから

さて、当地シリコンバレーで世界でも最先端の電気自動車を開発、販売している会社がある。「Pure Electric」、「60 mph (96Km/時)まで3.9秒の加速」、「一回の充電で244マイル(390Km)」、「1マイルあたりの電気代は数セント」というキャッチフレーズでテスラ・ロードスター (Tesla Roadster)を開発、販売しているテスラモーターズ社 (Tesla Motors, Inc.) である。図表4はテスラモーターズが販売しているロードスターの写真である。すでに流線型のこのスポーツカーの写真を目にした読者も多いだろう。ロードスターの性能は図表5の通りである。

テスラモーターズ社は創業してからまだ5年というのに、すでにスピンアウトした会社がある。テスラのチーフ・エンジニアであったイアン・ライト (Ian Wright) が始めたライトスピード社 (Wrightspeed, Inc.) である。筆者も試乗したことのある Wrightspeed X1はゼロから60 mphまでの加速が3秒でテスラ・ロードスターより速いスポーツカーである(図表6)。このような素晴らしいスポーツカーを製作し、もともとは本年中に量産を計画していたライトスピード社であるが、ニッチ市場であるスポーツカーだけでは事業の成長が見込めないと判断し、方向を180度転換し、EV市場がもっと成長するまでは、バッテリーパック、制御ソフトウェア、その他のコンポーネントなど、EVの性能を向上させるためのパワートレインの開発・販売に専心するという。

ノルウェーの会社ピブコ (PIVCO) は1990年代に小型EVを開発していたが、1999年にフォードがこの会社を買収しシンク・ノルディック (Think Nordic AS) と改名、その後2年間の間に1000台以上のEVを生産した。2004年にフォードはヨーロッパの投資家に技術を売却、ことしの三月になって、米国で著名なベンチャーキャピタル会社クライナー・パーキンス・コーフィールド・バイヤーズ (Kleiner Perkins Caufield & Byers - KPCB) などが投資を決め、あらたにシンク・グローバル社 (TH!NK GLOBAL) として、小型のEVの開発・販売を行なうため、再出発することになった。シンク・グローバル社は小型のEV、シンク・シティ (Th!nk City) (図表7) をまずノルウェーで発売、次世代モデル Th!nk Ox は米国でも生産、販売の予定。Th!nk City は最大速度100Km/h、加速も50Km/hまで6秒、80Km/hまで16.0秒とスポーツカー並みといかないが、テスラ・ロードスターの10万ドル近い価格に比べると2万5千ドル程度と安価で、通勤や市街地での運転を目標として、今後販売が大きく拡大することが予想される。

電気自動車普及のためのインフラ整備はどうか？ 2007年にシリコンバレーで創立されたクーロン・テクノロジー社 (Coulomb Technology, Inc.) は今年1月にはドイツのベンチャーキャピタル会社エスタッグ・キャピタル (Estag Capital AG) などから350万ドル(約3億円)資金調達を受け、チャージポイント・ネットワーク (ChargePoint Network) というプラグイン車のためのチャージステーションのインフラを提供し始めた。すでにサンフランシスコ市は一部でこのインフラを採用し始めている。このインフラはプラグイン車のユーザーに対して、空いているチャージステーションへのナビゲーションなどの利便性を提供し、今後のEVの購入者の増加に寄与するとされている。

クーロン・テクノロジー社に対して、全く別考え方でEVのインフラを提供しようとしているベンチャー企業ベタープレイス (Better Place) がある。ベンチャー企業といっても、この会社はイスラエルのベンチャーキャピタル、イスラエル・クリーンテック・ベンチャーズ (Israel Cleantech Ventures)、イスラエル・コープ (Israel Corp.)、モーガンスタンレー (Morgan Stanley) などから2億ドル(約190億円)もの資金を得て2007年に創業した。かれらのEVに関する基本的な考え方は、100マイル未満の走行に対してはチャージステーション、100マイル以上に対してはバッテリーの交換ステーションを設置しようというものである。本社はシリコンバレーだが、まずイスラエル、デンマークでこのインフラを導入し、さらにオーストラリア、ハワイへと拡大する計画を持っている。

4. シリコンバレーとグリーンテクノロジー

テスラモーターズの創業者エロン・マスク(Elon Musk)はインターネット決済のPayPalの創業者であり、自動車産業で長い経験を積んだ上でテスラを創業したわけではない。また、テスラモーターズには、グーグルの創業者のラリー・ページ(Larry Page)、セルゲイ・ブリン(Sergey Brin)などインターネットの申し子であるが、これまでの自動車産業とは全く関係ない人たちがこの企業の投資家として名を連ねている。クーロン・テクノロジーの創業者リチャード・ローエンソール(Richard Lawenthal)はもともと、グラフィカルワークステーションのベンチャー企業、スターデント(Stardent)やテレコム関連のベンチャー企業、ストラータコム(StarataCom)など、シリコンバレーで典型的なハイテクベンチャー企業で経験を積んだ起業家であり、自動車関連の仕事をしてきたわけではない。また、ベクタープレイスの創業者シェイ・アガシ(Shai Agassi)は、以前はドイツのソフトウェア大手のサップ(SAP AG)のプロダクト・技術グループの責任者、彼も自動車業界にいたわけではない。因みに、ラリー・ページ、セルゲイ・ブリンはともに36歳、エロン・マスクは37歳、シェイ・アガシは41歳と、皆すごく若い。

自動車産業はこれまで100年かけて今日の市場を形成し、インフラを醸成してきた。ところが、これまで全くといってよいほどデトロイトとは直接関係の無い人生を歩んできた、とても若い人たちによって新たな自動車産業が、いまシリコンバレーから生まれようとしている。テスラは2003年に無名のベンチャー企業として創立され、ゼロから出発してほんの5年のうちに、世界で最先端とされるEVを生み出した。テスラモーターズは自動車産業にシリコンバレー・モデル(シリコンバレーのビジネスモデル)を持ち込んだといえる。シリコンバレーでテスラのような企業を生み出すことが可能になった背景は何処にあるのだろうか？

この問いに答えるためには、シリコンバレーのハイテク・インフラについて理解を深める必要がある。シリコンバレーの始まりは1939年にヒューレット・パッカード創立の時と言われている。それ以来、いくつものハイテクノロジーの波がシリコンバレーにやってきた。これは世界中は勿論のこと、米国内をとっても他の土地には見られない特殊な現象といっても良いかもしれない。シリコンバレーがハイテク分野でここまで育つに至った背景には四つのインフラ要素が考えられる。まず、優秀な大学や、研究機関の存在。シリコンバレーではスタンフォード大学、カリフォルニア大学バークレー校、サンタクララ大学などシリコンバレーの成立には欠かせない、大学がある。先に述べたようにヒューレット・パッカードを初め、近年ではヤフーを創立したジェリー・ヤング、グーグルを創立したセルゲイ・ブリン、ラリー・ページらはともにスタンフォード大学出身である。また、SRIインターナショナル、PARC(2002年まではXEROX PARC)といった優れた研究機関も同様にシリコンバレーの発展に多く寄与した。二番目に、多くの起業家の存在、あるいは起業家精神の存在。前述のように、シリコンバレーの大学、研究機関から生まれたベンチャー企業がこれらの大学・研究機関から多くの起業家予備軍を雇い、さらに多くの起業家が生まれるためのトレーニング・グラウンドを提供している。また、多くのベンチャー起業家は、自らの成功体験、あるいは失敗経験をもとにさらに次のベンチャーを立ち上げるべく毎日を送っている。三番目に、ベンチャーキャピタルの存在が挙げられる。ベンチャーキャピタルは提供する資金も経営に関する様々なアドバイスも、売上げを未だ出していないベンチャー企業にとってはその活動を支える、無くてはならない酸素の役割を果たしている。これらの三つの要素に加え、四つ目の要素として、ベンチャーキャピタルおよびベンチャー企業の活動に詳しい法律家、会計士、コンサルタント、調査会社、投資銀行、ヘッドハンターなど、いわゆるプロフェッショナルの存在がある。これらのプロフェッショナルは上述の三つのプレーヤーの間の連携をスムーズにし、いわば潤滑油の役目を果たしている。

シリコンバレーはこれらのインフラ要素が長い年月を経て醸成されてきた、世界的に見ても大変特殊な地域と言える。これらの四つのインフラ要素が醸成され、シリコンバレーというハイテククラスターの形成、発展を促すことになった根底にある最も重要なキーワードを挙げるならば、□多様な文化的背景の人たちに対する「オープンネス」、□新しいアイデア (“out of the box” thinking) に対する「オープンネス」、□新しいビジネスモデルに対する「オープンネス」など、「オープンネス」(openness) ということになるであろう。

半導体、ハードウェア、ソフトウェア、通信・インターネット、バイオテクノロジー、ナノテクノロジーといったハイテクノロジーの波の恩恵を受け発展して来たシリコンバレーが「オープンネス」という基本的なカルチャーの上にハイテクインフラの四つの要素を満たしていることはこれまで記してきた通りだが、情報通信技術やエレクトロニクスとは一見係わりの無いグリーンテック分野で現在なぜここまで脚光を浴びるようになったのか？シリコンバレーという地域はハイテクベンチャーが育つインフラ要素を備えているのに加え、州政府の積極策という、グリーンテックにお金が流れるためのもうひとつの要件を満たしているところといえる。また、オバマ政権の「グリーン・ニューディール」政策も大きな追い風になっている。もう一つ言及しなくてはならないのは、これまで長い年月を経てシリコンバレーで培われたエレクトロニクス、情報通信技術、材料技術、ナノテクノロジーなどの技術の多くが、実は燃料電池、太陽電池、バイオ燃料、先端的電池、電力分配管理技術、固体照明など、グリーンテックの多くのアプリケーションの要素技術でもあるということである。これらの技術の発展、これらの技術を駆使して新しい企業を起こそうという起業家、これらの起業家に資金を提供するベンチャーキャピタル、さらに、これらの活動を後押しする州政府および連邦政府の積極策が、イノベーションのネットワークを形成し、シリコンバレーでグリーンテックの地域クラスターの醸成を可能にしているということになる。

テスラモーターズのビジネスモデルを見ると、まるでシリコンバレーでこれまで行なわれてきた、半導体やコンピュータ・システムのビジネスモデルに非常に似ていることが分かる。つまり、キーテクノロジーあるいはキーコンピテンスは自社でガッチリ抑え、世界で最先端のポジションを維持しつつ、それ以外の技術、コンポーネントは外部から調達し、出来るだけ身軽な経営を行なっていくとするものだ。たとえば2ヶ月ほど前に筆者自身がテスラモーターズに訪問しCEOのエロン・マスク、CTOのジェー・ビー・ストローベル (JB Straubel) とあって話を聞いた際にも、テスラのコア技術はバッテリーの制御技術(ソフトウェア)という話であった。シャーシはノルウェイ、ブレーキとエアバッグはドイツ、バッテリーパックは日本から調達してタイでアSEMBル、またファイナル・アSEMBリーは英国で、といった具合に、ほとんどシリコンバレーの得意な「ファブレス」といった感がある。もっとも、次のモデルは米国内で生産という話も聞いている。また、少なくとも現時点では販売もディーラー網に頼るのではなく、直販店を設置している。ガソリン車ではなく、EVであるからこそ、このモデルが可能ともいえる。

5. EV普及のカギとなるバッテリー技術

さて、話題をエレクトリック・カーに戻そう。冒頭に述べたように、電気自動車用電池の開発は意外と歴史が長い。しかし、電気自動車は次第に消滅していった。その理由は、電池のエネルギー容量はガソリン1ガロンのほんの数分の一にも満たない程度だったためだ。

フルサイズのスedanでエネルギー密度100Wh/kgの場合は、航続距離に換算するとおよそ160km (100マイル)。現在の最も高性能の電池はおよそ150WH/kgのエネルギー密度を供給する。ガソリンのエネルギー密度の値は1万2,722Wh/kgとされている。ガソリンのエネルギーのうち実際何割が使われているかについては、エンジニアの間でよく議論的になるが、4,000WH/kgしか利用できないと仮定しても、ガソリンの方がリチウムイオン電池の25倍も多いエネルギーを持っていることになる。2008年の米国エネルギー省の報告によれば、現時点で最も優れているとされているリチウムイオン電池がハイブリッド車に取り入れられ、普及するためには、①生産コストの大幅な低減(50%以下)、②

航続距離、③充電に必要な時間、④寿命(30万サイクル、15年の寿命)、が大きな課題とされた。さらにプラグイン・ハイブリッド車に普及するには生産コストが現在のものより67%から80%安くなる必要がある、としている。従って、グリーン・イニシアチブによる「下駄」を履かせてもらったとしても、今後EVが普及するためのキーはバッテリー技術の改良とコストの低減に集約されそうだ。そして、バッテリー技術の改良にはナノテクノロジーが一役買うことになりそうだ。

実際のところバッテリー技術はナノテクノロジーを活用し、着々と進化している。たとえば、2007年にはスタンフォード大学のマテリアル・サイエンス助教授のイー・クイ (Yi Cui) 氏と同氏のチームがシリコンナノワイヤーを使用して既存のリチウムイオン・バッテリーの10倍ものエネルギー密度を達成する技術を開発した。電池のエネルギー密度は充電の際にバッテリーのアノード(負電極)にどのくらいのリチウムを溜められるかによる。正極活物質には普通 LiCoO_2 などの遷移金属酸化物、負極活物質には黒鉛などの炭素材料が使われる。シリコンは炭素に比べ、より多くのリチウムを蓄積できるが、充電中に膨張し、放電中に縮小するために、性能が低下し、壊れたりする。クイ氏のバッテリーはナノテクノロジーを使い、リチウムを微細なシリコンナノワイヤに蓄積する。ナノワイヤはリチウム蓄積中は4倍に膨らむが、これまでのシリコンの形態とは違って壊れることはない。バッテリーにシリコンを使うことは30年前から研究されてきたが、容量が十分でない、寿命が短い、など難点が多く、ほとんどの人があきらめてしまった。しかしナノテクノロジーが進歩してきたおかげで今回のような成果を生み出すことが出来た。クイ氏はこの技術に関する特許を出願済みで、起業するか、バッテリー製造会社とライセンス契約することを検討している。

このほか、最近ステルス・モードからようやく世間の目に触れるようになったメンロパークにあるイマラ・コーポレーション (Imara Corporation) はSRIインターナショナル (SRI International) の技術をベースに、次世代ビイクル・パートナーシップ (the Partnership for the Next Generation Vehicle Initiative) プログラムの一環で米国エネルギー省からの補助金も使い、既存に比べ性能があらゆる面で各段に勝る次世代のリチウムイオン電池の開発を行なっている。また、ニュージャージー州にあるエムフェーズ (m PHASE) 社は、エレクトロウエッティング技術と多孔性のナノメンブレンを組み合わせた新しいバッテリーを開発している。

6. 環境ナノテックが開くエレクトリック・カーの未来

米国では新政権が発足し、オバマ新大統領は「グリーン・ニューディール」政策を打ち出した。その骨、今後10年の間に\$150 Billion (約14兆2500億円) をクリーンエネルギーに戦略的に投資して500万人の雇用を生み出し、10年以内に現在中東とベネズエラから輸入している量に匹敵する石油の使用量を削減し、2015年までに米国製のプラグイン・ハイブリッド車を100万台走らせ、代替資源による電力を2012年までに10%、2025年まで25%達成し、さらに温室効果ガスを2050年までに1990年比で80%削減する、というものだ。

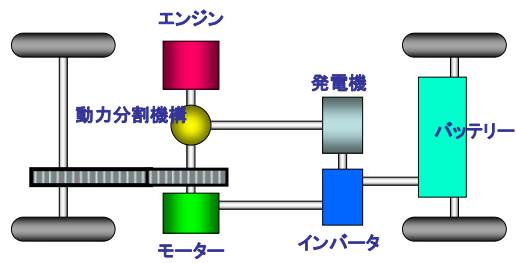
その一環として、今年の3月19日に訪問先のカリフォルニア州で、プラグイン・ハイブリッド車や次世代バッテリーの開発などに24億ドル(約2300億円)の補助金を用意していることを明らかにした。これはエレクトリック・カーの開発にとって大きな追い風となる。バッテリー技術の改良にともない、ゼロ・エミッションのエレクトリック・カーは普及の度合いを高め、石油資源の価格高騰、枯渇化、地球温暖化と環境破壊という深刻な問題に対処するうえで大きな役割を担うことになるであろう。ナノテクノロジーはエレクトリック・カーの未来を開くため、いっそう大きな役割が期待される。

参考文献

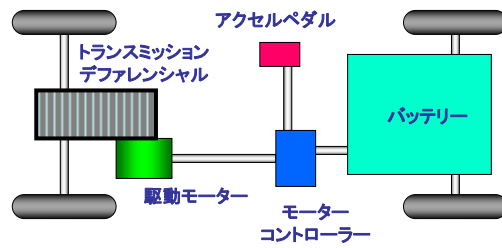
1. About.com、“The History of Electric Vehicles” (2009)
2. Forbes、“Can Silicon Valley Reinvent The Car?” (2007)
3. FT.com、“California Scheming” (2009)
4. Tesla Website (2009)
5. 石井正純、“グリーンテクノロジーが世界を変える”、「経営システム」第19巻第1号 (2009)
6. Pupukids.com、“ハイブリッドカーの仕組み” (2009)
7. Dailygalaxy.com、“Will Silicon Valley Become the ‘World’s Electric Car Headquarters?’” (2009)
8. Stanford Report (12/18/2007)
9. mPhase Technolgies 社 ウェブサイト



図表1. 1897年当時のニューヨーク市の電気タクシー



図表2. ハイブリッド車の構造
(プリウスの情報に基づいて筆者作成)



図表3. 電気自動車の構造
(筆者作成)



図表4. テスラモーターズ ロードスター

スタイル	2座席, オープン・トップ, リアドライブのスポーツカー
モーター	375 ボルト三相交流モーター
最大出力	248馬力 (185kW)
最大回転数	14,000 rpm
シャーシ	成型によるモノコック・アルミ製
加速	96Km/h まで4秒以下
最大速度	200Km/h
航続走行距離	225マイル
フルチャージ時間	3.5時間
バッテリー寿命	18万5000Km

図表5. Tesla Roadsterの主な性能・仕様



図表6. Wrightspeed X1



图表7. THINK city