

わが国における 電気鉄道 車両 制御装置 の発達

鉄道の始まりと鉄道馬車

鉄道の始まりは紀元前後、道路に切石を敷いた馬車軌道がすでにギリシャやローマ帝国で用いられていた。その後、1500年代半ばに入ると木製の軌道が登場する。1793(寛政5)年には英国でL型の鑄鉄レールが使われ始め、鉱山などでは強度が高く路面抵抗の少ない鉄製レールの上を人力、あるいは馬力で牽引するのが一般的であった。1820(文政3)年には耐久性のある錬鉄レールが主流となるが、これに先立つ1807(文化4)年、英国ウェールズ地方で道路面を利用した馬車鉄道が登場した。この馬車鉄道はヨーロッパの各都市に広がるとともに、米国では1832(天保3)年、ニューヨークを皮切りに1870年代後半には全米の大都市に普及していった。

日本で初めて鉄道が開業したのは1872(明治5)年、「新橋～横浜間」を蒸気機関車で牽引した旅客鉄道であることは広く知られているが、首都圏の鉄道網は1882年に東京馬車鉄道による「新橋～日本橋」の開業に始まり、最盛期には2,000頭以上の馬と300両の車両が運行していた。

馬車鉄道最盛期の1911(明治44)年には、日本全国で41社が運営しており、宮崎県の銀鏡(しろみ)軌道は第二次大戦後の1949(昭和24)年まで存続した。

蒸気機関車が牽引する鉄道

実際には、蒸気機関車の運行が始まるよりも前、蒸気機関によるケールカーが世界各地で製造されていたのだが、ここでは割愛する。

世界で初めて蒸気機関車が実用化されたのは、1821(文政4)年に英国東海岸のストックトン&ダーリントン鉄道の建設時に採用された、スティーブソン(George Stephenson, 1781-1848)が開発した機関車であった。英国ではその後、人々が自動車中心の生活に移行する1930年代までの約100年間、都市を結ぶ鉄道網の拡張が続いた。ヨーロッパにおいては、フランスでは1832(天保3)年に、ドイツでは車両を英国から輸入して1935年に、ベルギーでも同じく1935年に、オランダでは1839年に、スイスでは1847(弘化4)年に、スペインでは1848(嘉永元)年に、それぞれ蒸気運転による鉄道が開通した。一方、1783(天明3)年に独立した米国では、広大な地域を結ぶ蒸気鉄道網の建設は、1830年に東海岸から始まった。1865(慶応元)年に南北戦争が終結すると西部開拓が始まり、大陸横断鉄道の先陣を切ってユニオン・パシフィック鉄道が

1869(明治2)年に全通した。その後、鉄道輸送が衰退する1930年代までは、蒸気機関車による鉄道網の拡大とサービスは堅実に推移していった。また、都市部では1871年、ニューヨーク市の高架鉄道で蒸気機関車の牽引による旅客列車の運行が始まり、1888年にはシカゴでも建設ラッシュが始まった。

わが国では、前述のとおり1872年に「新橋～横浜間」で営業を開始した官営路線が最初であるが、当時は機関車本体をはじめ多くの設備を英国から輸入していた。その後は米国からも多数輸入し、初めて国産化を達成したのは1893年の通信省鉄道庁・神戸工場と、1902年の汽車製造であった。

蒸気機関車の歴史と経緯は、本章のテーマ「電気鉄道車両制御装置」とは直接的には結び付かないが、その歴史がいかに古く長いものであるかを伝えたく、あえて紹介した。

路面電車の誕生

世界で初めて電車の走行に成功したのは1879年、ドイツのシーメンス(SIEMENS)である。ベルリンの博覧会展示場を走ったこの電車は、現在の電車や電気機関車の概念からはおよそかけ離れた、走行レール間のむき出しの第3軌条からDC150Vを集電し、直流モーターで走る2軸の機関車が3両のトロッキを牽引するもので、車輪へはむき出しのモーターから歯車で回転を伝える、極めてシンプルな構造であった。

シーメンスはその後、1881年にベルリン近郊で営業運転を始めるが、このときは馬車鉄道の車体を改造し、床下にモーターを取り付けていた。集電方法は博覧会のものと同様で、車体と車輪の間にはバネも取り付けいていたようだが、主電動機と車輪の間はワイヤーでつないでいた。おそらく、長期の実用に耐え得るものではなかったであろう。

一方、米国の海軍少尉スプレイグ(Frank Julian Sprague, 1857-1934)は、電気機械の優れた発明家でもあり、乗艦中にも数々の電気機器を創作していた。1883年、エジソン(Thomas Alva Edison, 1847-1931)の誘いを受けて海軍を辞め、エジソンの研究所に参加するが、翌年、電気鉄道システムの開発に専念するため研究所を辞め、スプレイグ電気鉄道・モーター会社(Sprague Electric Railway & Motor Co.)を設立した。そこからわずか5年で、スプレイグは直接制御から総括制御までの、今日の電気鉄道の給電・集電・駆動・制御技術の基礎を、ほぼ完成の域にまで引き上げたといわれている。

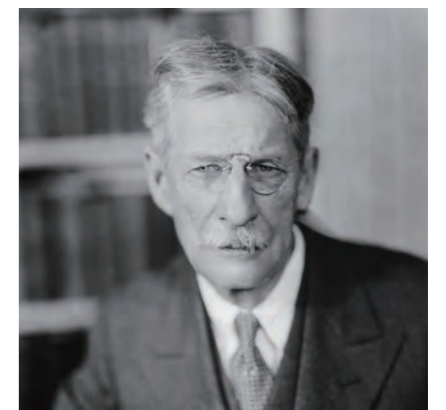
スプレイグが完成させた開発の成果は、架線からトロリー・ポールによって低圧の直流(DC500～600V)を集電する方式、車軸に



シーメンス社がベルリンの博覧会で初めて走らせた電車(1879年) (C)Siemens AG



シーメンス社が製作した世界初の営業電車(1881年) (C)Siemens AG



発明家 スプレイグ(1857年～1934年)
Courtesy of IEEE History Center

対してモータを正確な位置に支持する吊掛方式、小型で信頼性に優れた直接式制御器などであった。1887年3月、複数の実業家から電気駆動による鉄道敷設の契約を獲得し、大変な苦勞を乗り越えて、翌年1月までにバージニア州リッチモンドでの実用性の実証にこぎつけた。

スプレイグの発明は、エジソンが1889年に創立したエジソン総合電気 (Edison General Electric) が同年、丸ごと買い上げ、その後はエジソン総合電気ですべての生産が行われた。1892年、エジソンは社名をGeneral Electric Co. (GE) と変更し、GEが電車用電機品の分野で世界を一步リードすることとなった。このGEの成功によって、米国のWestinghouse Electric Co. (WH) をはじめ、ヨーロッパや日本でも、多くのメーカーが電気鉄道車両用機器の開発・製作に参入した。

国内に目を転じると、スプレイグが実用的な電車用電機システムを開発してからわずか2年後の1890年5月、電気・白熱電球の普及で有名な藤岡市助 (1857-1918 日本のエジソン・電力の父と呼ばれ、1886年の東京電燈創立時の発起人の一人) が、上野公園で開催された第3回国勲業博覧会に向けて米国・ブリル社製のスプレイグ式路面電車2両を購入し (購入元は東京電燈)、博覧会場で展示公開した。これは、架線電圧DC500V、軌間1,372mm、距離400mであったとされる。

その5年後の1895年2月1日、京都電気鉄道がわが国初の電車営業を開始した。同年4月から7月まで、京都で開かれた第4回国勲業博覧会に合わせた開業であり、京都駅から会場までの足となった。車体は平岡工場で作られた4両で、軌間1,067mm、架線電圧DC500V、モータはGE製と三吉電機工場製が採用された。なお、三吉電機工場は、前述の藤岡市助の同郷の友人・三吉正一が興した会社で、電燈器具と発電機の製作において、わが国初の「重電」メーカーといえる企業である。

1899年には関東で最初の鉄道会社、大師電気鉄道が開通した。この電鉄は、同時にわが国初の軌間1,435mmの鉄道でもあった。このときの車載電機品は、輸入品2両の他、芝浦製作所製の試作品2両が使われる予定であったが、国産品が納期に間に合わず、前述の上野公園での博覧会に出品された米国製電車の1両を借り受け、電動車3両、付随車2両で営業を開始した。

首都では、前述の東京馬車鉄道が東京電車鉄道と改名し、1903年に「新橋～八つ山 (品川) 間」を電化した。後に同社と、1903年に開業した東京市街鉄道、1904年に開業した東京電気鉄道の3社が合併し、東京鉄道となったが、1911年に東京市がこれを買収し、東京市電が誕生した。

それから20年余りの間に、国内の50近くの都市で路面電車が走

行するようになった。路面電車は、原則として電動車の連結運転を行わないため、一か所の運転台から複数の制御装置を操作する必要がない。そのため、構造が簡単な直接制御器を用いるのが一般的であった。1914 (大正3) 年ごろまではGEとWHから、1918年までは英国のDick, Kerr & Co. (DK) から多くの直接制御器を輸入していたが、その後はGEに代わって芝浦製作所が、WHに代わって三菱電機が、DKに代わって当社が国産品を製造するようになり、1921年には日立製作所も参入した。

米国においては、市街地を自由に移動できる自動車に対抗すべく、路面電車の生き残りを賭けて1933 (昭和8) 年にPCC (President's Conference Committee) カーが開発されたが、時代の流れには逆らえず、1945年の第二次世界大戦集結に伴う不況とともに新製は中止された。

わが国でも、1953年に始まった鉄道の技術革新の波に乗り、多くの日本流PCCカーが登場した。しかし、各都市ともに交通渋滞と経営への圧迫は避けられず、1969年に大阪市で、1972年に東京都 (荒川線を除く) と横浜市で、1974年に名古屋市、1978年には京都市で路面電車は全廃となった。



PCCカー (資料提供:Pentrex Media Group, LLC)

郊外電車の誕生

郊外電車は、ある意味では最も興味深いと同時に、最も厄介な存在でもある。それは、それぞれの鉄道事業者の設立目的、発展経緯、競合路線との関係などから、各社ともに千差万別だからである。

例えば、開業当初は路面電車として出発し、乗客数の拡大につれて総括制御装置を備えた大型車の運行へと移行していった電鉄 (京阪電鉄・京王帝都電鉄・京浜急行電鉄・阪神電鉄など) と、開業当初から大型車の複数連結による高速運転を行っていた電鉄 (東武鉄道・小田急電鉄・名古屋鉄道・阪急電鉄・西鉄大牟田線など) が、その対極であろう。ここでは、大型車の運行を行うようになってからの、制御装置の供給状況について注目してみたい。

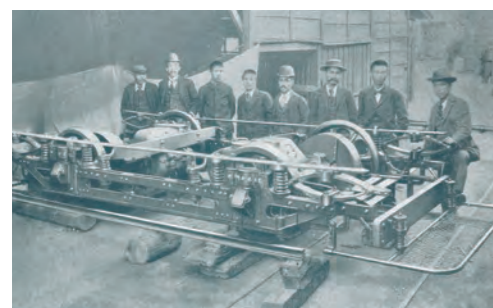
まず、首都圏では1906年に甲武鉄道を買収し、新宿からお茶の水までを延長させた鉄道院の電車には、当初GEの電磁接触器式が多用されていたが、1923年に芝浦と日立の電空カム軸式が参入した。また、京成電鉄が1921年に新造した20形車両にはGEの、1923年に新造した33形にはDKの電機品が装備されていたが、1926年に新造した100形からは当社製電機品が採用された。大型車の導入が比較的遅かった首都圏では、鉄道院を除くと輸入電機品は少なかったように思われる。関西地区では、阪急電鉄 (神戸線・宝塚線) や阪神電鉄 (本線) に多くの海外製電機品が採用されていたが、1920年代後半には大半が国産品に切り替えられた。



第3回国勲業博覧会 (上野公園) で走った日本初の電車 (1890年 資料提供:電気の史料館)



名古屋の明治村に保存されている日本初の営業電車 (京都電気鉄道)

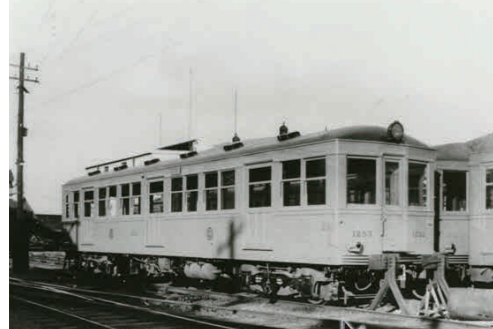


大師電気鉄道に納入された国産台車 (1901年 資料提供:東芝未来科学館)

地下鉄電車の誕生

世界で最初の地下鉄は1862(文久2)年、ロンドンの蒸気機関車による牽引であるが、1905年に電車方式に改められた。米国でも、ロンドン地下鉄の電化とほぼ同時期の1904年にニューヨーク地下鉄が開業した。例外的には、1898年にボストンの高架鉄道網の一部をトンネルに改造し、このトンネルは現在も地下鉄網の一部に組み込まれている。いずれにしても、欧米ではかなり早い時期から地下鉄が発達し、一方、日本で第二次世界大戦終結前までに開通した地下鉄は、1927年の東京地下鉄道と1933年の大阪市電気局だけである。そのため、東京地下鉄道が1927年から1931年に新造した30両にはGE製の電機品が装備されていたが、1934年に登場した1200形からは国産品に代わっている。片や、大阪市電気局の新造車には、当社の制御装置が東芝製主電動機とともに採用された。

その他、東京・大阪以外の都市部の地下鉄は、いずれも日本の車両用電機品が発展した1954年以降の開業となるので輸入品は使われておらず、ここでの記述は割愛する。



東京地下鉄道1200形車両
(1934年 資料提供:地下鉄博物館)

電気機関車の誕生

日本の官営鉄道が最初に採用した電気機関車は、従来の蒸気機関車に加えて、碓氷峠のアプト式区間用に1912年、ドイツのAllgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG) から購入したEC40形12両である。しかし、1919年からは国産(大宮工場製)のED40形が14両増備され、1921年に蒸気機関車は廃止された。

一方、幹線電化の先駆けとして、1922年から1928年にかけて東海道電化用電気機関車の国産化を目指し、欧米の主要メーカーから14形式56両の完成機関車を輸入した。

これらの輸入電気機関車の技術を基に、電気機関車の国産化が始まったのである。最初の機器は、日立製作所が1924年に完成させた3両(ED15)で、東海道本線などでの性能試験を経て、1925年に鉄道省の買い上げとなった。その後、しばらく間が空くが、鉄道省主導の下、全メーカーの協力体制で1928年から国産電気機関車の製作が始まり、EF52、EF10、EF53など、次々と名機が誕生した。

一方、私鉄が購入した電気機関車については目立った輸入電機品は少ないが、1924年に上信電鉄がドイツから輸入した小型機関車(デキ1~3)にはシーメンス製電機品が装備され、現在でもイベント列車を牽引しており、鉄道マニアからは「上州のシーラカンス」と呼ばれている。



EF53形電気機関車(1932年)

欧米の電気鉄道車両駆動用制御装置 メーカーの変遷

電気鉄道発祥の地であるヨーロッパでは、多くの電機メーカーが比較的安定した経営を続けていたが、1960年代に入ると大規模な企業合併が始まった。しかし、わが国への電機品輸出は1930年までに終了していたので、これら合併の日本への影響はなかった。

具体的には、ドイツのシーメンス、AEG、スイスのBrown Boveri & Cie (BBC)、英国のEnglish Electric Co. (EE)、Metropolitan Vickers Co. (MV)、British Thompson Houston (BTH)、フランスのAlsthom、イタリアのAnsaldoで、わが国の輸入品も仏伊の2社を除く上記メーカーに限られていた。

また、米国でも1911年、西海岸のロサンゼルスを中心とした電鉄会社8社が合併し、パシフィック電鉄が発足した。同社は、1920年代前半に最盛期を迎えるものの、ロサンゼルス地区の人口増加率に比べると業績は明らかに不調であった。乗客をつなぎとめるため自社路線を増やしたが、1930年代から始まった大規模な電車路線廃止は止まらず、1958年にロサンゼルス都市圏交通局が発足したことでパシフィック電鉄はその役目を終えた。

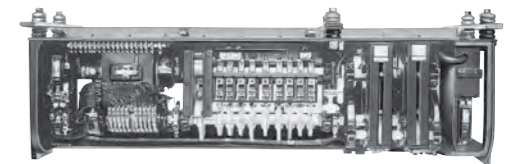
現在では、近代的な地下鉄路線と路面電車路線が共存し、1990年から順次開業を進めている。一方、東海岸では高架鉄道と地下鉄の共存を維持するため、GE、WHの2社が競合してきたが、ヨーロッパを中心とする技術革新の波に押され、WHの鉄道車両用電機品部門は1990(平成2)年、AEGに吸収合併された。

わが国の電気鉄道車両駆動用制御装置 メーカーの誕生

芝浦製作所は1909年、GEとの技術提携契約を結んでおり、電車用電機品の初機器は、1900年ごろに製作した大師電気鉄道向け試作品であった。1922年から電空カム軸式制御装置を含む電機品の供給を始め、1923年には首都圏を走る鉄道院の電車用にも納入を開始、私鉄にもGE設計による電気品の販路を広げて行った。

一方、DKからの技術導入によって発足した当社は、1919年に日本で2番目の路面電車となる名古屋電気鉄道に制御器を納入し、1921年には京成電鉄に初の制御装置を納入した。これを皮切りに、関西・中京・関東地区の電鉄各社に電動カム軸式制御装置をはじめとする電機品の供給を始め、現在の地位を確立するに至った。

また、鉾山向け電機品からスタートした日立製作所では、1921年に南海鉄道に初の直接制御器を納入し、その翌年には独自の構造による電空カム軸制御装置を鉄道省に納入した。その後は、目黒蒲



電動カム軸式制御装置 ES152-D形(1926年ごろ)

田電鉄などの私鉄にもカム軸制御装置の供給を開始した。

三菱造船の電機製作所から分離・独立した三菱電機では、1923年にWHと技術提携契約を結び、1925年ごろから直接制御器の供給を始めた。1926年に小田原急行電鉄に電機品を納入して以降、単位スイッチ式制御装置の分野では独自の地位を築いていった。

わが国で1953年から始まった近代化の波

三菱電機がWHのライセンスに基づいて製作した高規格の単位スイッチ式制御装置は、1954年に開業した帝都高速度交通営団・丸の内線に採用された。当時のWHでは、単位スイッチと、その連動接点によって自動進段させるABS方式が主流であり、営団にもこの方式が導入された。一方、GEでは当時、油圧カム軸式のPCM制御装置が主流であり、次世代用の全電気式カム軸制御器MCMの完成には1956年まで待たなければならなかった。そこで、東京芝浦電気では、PCM制御装置のカム軸機構2本を1台のパイロット・モータで駆動する新機軸のPEシリーズ制御装置を開発し、阪急1000形用と東急5000形用に納入した。こうした流れが、国内の技術革新の飛躍にもつながった。米国からの技術導入による発電ブレーキ・空気ブレーキの連動化技術（それに伴う発電ブレーキの常用）に加え、わが国での8個・12個モータの一括制御や、回生ブレーキへの適用、そして最終的には界磁添加励磁方式による究極の抵抗制御方式に到達したといえよう。

電力用大型半導体の発展と応用

1958年、GEがSCR (Silicon Controlled Rectifier:後にIECにより“サイリスタ”と呼称統一)の開発成功を発表した。これまでは、トランジスタ、集積回路(IC)等の先進技術の開発により、工学系の学生はいわゆる「弱電系統」に流れがちであったが、「強電系統」の分野にも、この開発成功が革命的な可能性をもたらしたといえる。

1962年、まずはAEGがSCRを使ったバッテリーチョップパ機関車(400V)の試験を開始した。一方、国内では、電気車の電気品にこれらの半導体を適用する研究が進められていた。具体的には、直流電動機に複巻電動機を導入し、分巻界磁回路の電流調整を行うことで力行⇔回生の2領域にわたる連続制御を行う界磁制御方式への適用を試みた。電機子回路への、有接点スイッチによって調整する抵抗器(主抵抗器)回路の適用は従来どおりとし、分巻界磁回路にチョップパ装置を設けて電流調整を行う界磁チョップパ方式としたものである。

当社では阪急電鉄2800系車に世界初の試作車を納入し、量産車

としては京王帝都3100形車に、日立は東急8000系車に適用し、三菱は小田急9000形車に納入し、これらを皮切りにメーカ各社が大手私鉄への電力回生ブレーキ適用を拡大し、制御方式の一ジャンルを確立するまでに至った。

同時に、主抵抗器に代わってチョップパ装置を導入し、連続的に主電動機の電圧を調整する電機子チョップパ制御方式の開発を進め、日立・三菱の両社は営団との共同で1966年、それぞれ力行制御と発電ブレーキ制御の現車試験を行った。当社においては1967年、わが国初の回生ブレーキの現車試験を都営地下鉄で行い、成功を取めた。こうした努力を経て、他社でも開発が進み、1970年に阪神電鉄7000形力行専用車に、1971年には営団に回生ブレーキも使えるチョップパ制御(6000系)電車が登場した。さらに1979年、国鉄201系車にも採用され、営団・公営交通・私鉄の各社へと採用が広がりを見せた。当社においては阪急電鉄2300系車に試作車として納入した自動界磁励磁(AFE)方式を量産し、1981年から東武鉄道9000系車に納入した。その後、電力半導体もサイリスタからGTO(Gate Turn Off)サイリスタへと変遷していった。

しかし、いずれにしても直流電動機を使用することに変わりはなく、整流子等、保守負担の問題や主回路スイッチ類、リアクトルなどの機器構成の複雑さによる新製時のコスト負担等々からインバータ制御方式の進歩に太刀打ちできず、最終的にチョップパ制御方式は終焉を迎えることとなった。

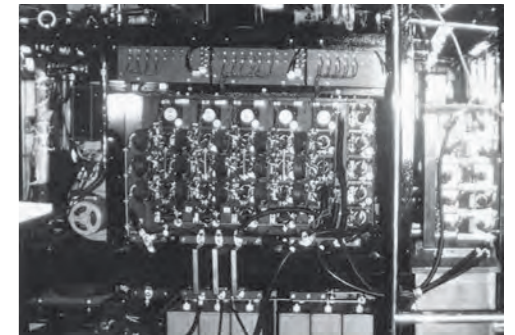
一方、1970年代以降のチョップパ制御方式の普及の陰で、究極の駆動システムとして三相誘導電動機を適用したVVVFインバータ制御方式の研究が各社によって進められていた。当時はまだ、GTOの耐圧が十分ではなかったため、逆導通サイリスタに大きな転流回路部品を組み合わせ、大型のインバータで試作・試験を行っていた。同時に、この研究には半導体分野でのもう一つの進歩として、マイクロプロセッサ(マイコン)の開発が大きな力となったことも欠かせない要素であった。すなわち、電力用半導体の発展には、その素子を動作させる制御部分の開発も不可欠である。特に、VVVFインバータ制御においては、多くの情報を高速に演算処理しなければならず、マイコンの適用が必須となる。8ビットマイコンの組み合わせから始まったこの研究は、現在も継続・進歩を続けている。

こうした経緯を背景に、1982年の熊本市交通局への路面電車用VVVFインバータシステムを皮切りに、各社がVVVFインバータシステムの納入を拡大していった。これには、マイコンの高機能化に加え、電力用半導体がGTOからIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)へと大容量化・高速化・高効率化したことが挙げられる。

さらに近年では、SiC(Silicon Carbide)製のスイッチング素子も実用段階へと入り、さらなる高効率化が期待されている。



回生ブレーキの試験車両外観
(1969年 都営地下鉄1号線)



チョップパ装置(1969年 東京都交通局納入)



SiC素子適用VVVFインバータ装置を搭載した広島電鉄3900形電車(2017年インバータ更新)

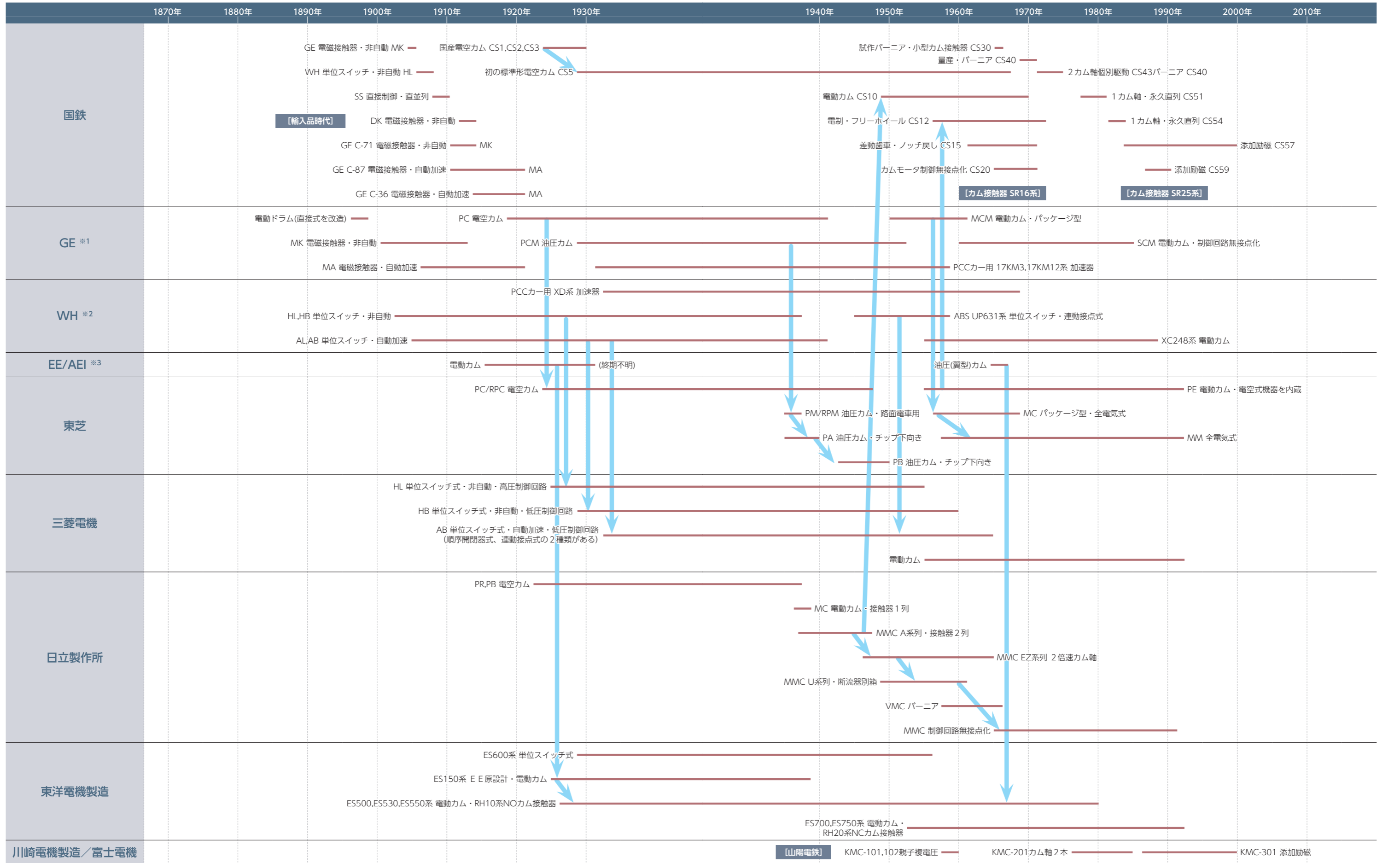


界磁チョップパ装置(1971年 京王帝都電鉄納入)

電管用主制御器の系譜

※1...General Electric Co. ※2...Westinghouse Electric Co.
 ※3...English Electric Co. / Associated Electrical Industries

→ [技術導入]あるいは[強い影響]



電気鉄道車両用駆動システムメーカーの系譜

● 企業創立/企業名変更
 → 鉄道車両用電気機器に参入の時期(推定も含む)

