

### 第42回

# 変電所用整流器

## はじめに

電気車(電車, 電気機関車)の運転にはその名のとおり, 電気が必要不可欠です。電気には流れる方向が変化しない直流と, 周期的に変わる交流があります。電池は直流, 家庭のコンセントは交流の電気を供給します。関東, 中京や関西などの大都市圏周辺のJR在来線や民鉄・地下鉄の多くは, 直流で動いています(直流電気鉄道)(☞参照)。

☞ 新幹線や北海道, 東北, 北陸, 九州の在来線など交流方式もあります。

一方で, 電力会社から供給される電気は交流です。したがって, 直流電気鉄道の変電所では電気の流れを一方方向にそろえて, 直流に直す必要があります。これを整流といい, そのための装置が整流器です。整流器は車両などに比べれば目立たない機器ですが, 地道に発展を続け, 電力供給の重責を担っています。

## れい明期の電気鉄道<sup>1)2)</sup>

世界初の電気鉄道は, 1879年のドイツ・ベルリン産業博でヴェルナー・フォン・ジーメンスがデモンストレー

ションしたものとされています(図1)。この車両も直流で運転されており, 蒸気機関を動力に直流発電機で発生させた電力を, 現在でいう第三軌条(サードレール)を介して供給しました。

一方, 日本では1895年に琵琶湖疏水を利用した水力発電の電力で京都市電が初の電車を運行し(図2, 3), さらに名古屋電気鉄道, 大師電気鉄道(現, 京浜急行電鉄)と開業が続きます。いずれの鉄道もジーメンスのものと同様, 直流の自家発電で電力を供給していました。

さて, この時代, 電気といえば直流であり, 電球の発明で有名なトーマス・エジソンも直流の電力供給事業を営んでいました。その後電力業界では, ジョージ・ウェestingハウスとニコラ・テスラの陣営が交流方式を提唱し, エジソン陣営との間でどちらが優れているかの大論争, いわゆる電流戦争(War of Current)を始めます。両者の論戦はし烈を極めました。やがて電圧の変換が容易で長距離・大量送電に有利な交流が優勢となっていきます。そして, 国内の電鉄業界でも交流の自家発電・送電を行う事業者が増えていきます。そこで必要になるのが今回の主役, 整流器です。

## 回転変流機の時代<sup>2)3)</sup>

整流器としてまず考案されたのは, 蒸気機関や水車の代わりに交流電動機

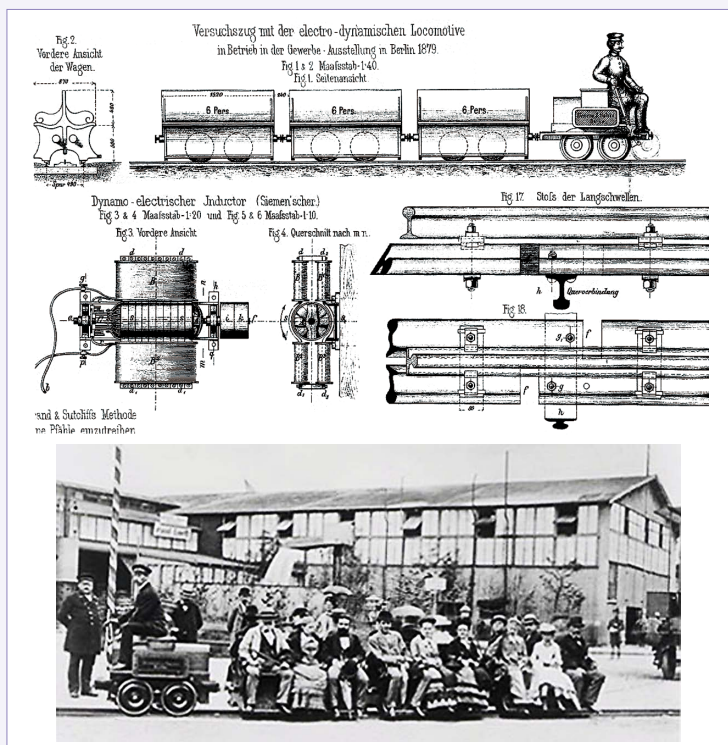


図1 ジーメンスの電気鉄道の模式図(上)と機関車(下)  
 出典:(上)スミソニアン協会所蔵/(下)By User WHell on de.wikipedia (Uploader)  
 [Public domain], via Wikimedia Commons

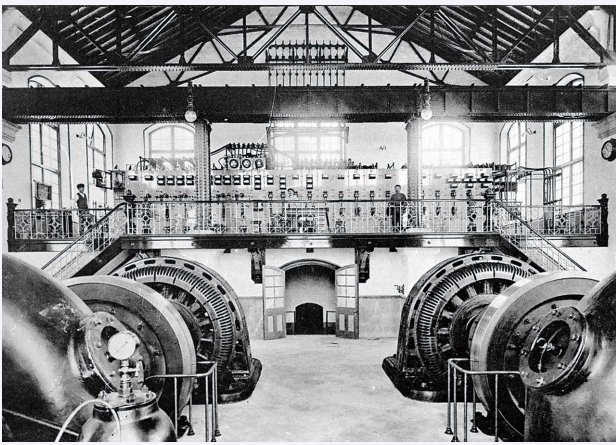


図2 琵琶湖疏水の蹴上水力発電所  
提供：京都市上下水道局

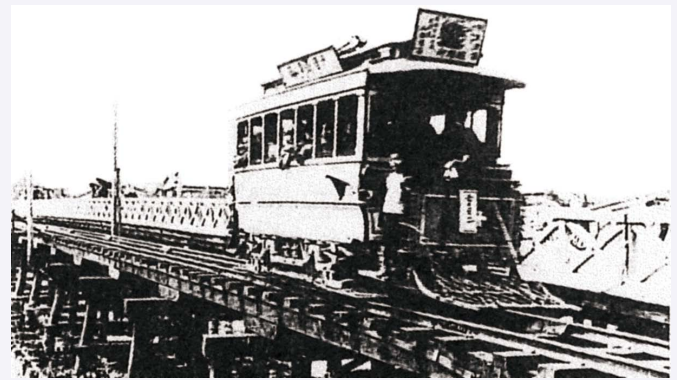


図3 京都市電の車両  
出典：電気鉄道便覧，オーム社，1956

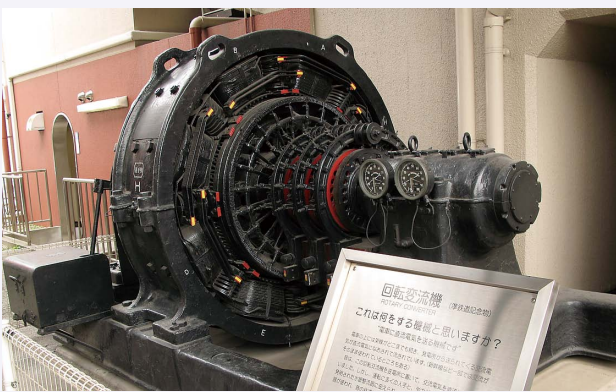


図4 芦屋変電所に設置されていた回轉變流機  
(大阪の交通科学博物館に保存されていたもの)

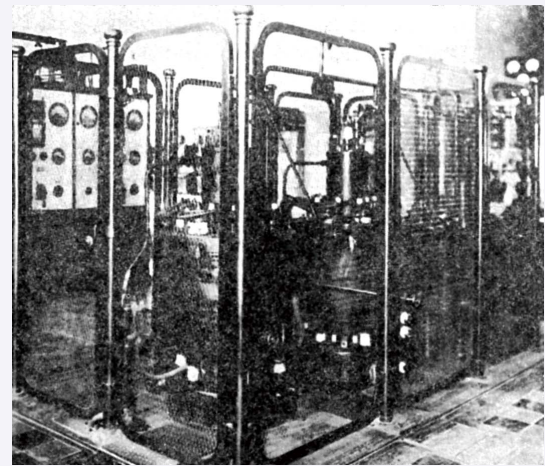


図5 京都嵐山電鉄が導入した日本初の水銀整流器(スイスBBC製)  
出典：電気鉄道技術発達史<sup>3)</sup>

で直流発電機を駆動する電動発電機とその仲間でした。中でも、電動機部分と発電機部分のコイルを一部合体させた回轉變流機は効率がよく、比較的コンパクトな体格で大電力を変換できたため、広く採用されました(図4)。国内では、1900年に小田原電気鉄道(現箱根登山鉄道)が初めてこの回轉變流機を使用してから普及し、国鉄最初の電化区間である中央線(正確には甲武鉄道が1904年に電化し、1906年に国

有化)も、交流発電+回轉變流機で直流電力を得ていました。

その後、電気鉄道の輸送量や路線距離が増大するにつれて自家発電だけでは電力が不足し、電力会社からの電力購入が検討されます。ところが、初期の回轉變流機の性能は25~30Hzの交流の整流が限度で、自家発電所では周波数の低い交流を発電していたのです。一方で、電力会社の周波数は既に現在と同じ50Hz・60Hzが広まっており、電力会社からの電力購入は回轉變流機の性能が向上する大正時代後半まで待たねばなりませんでした。

さて、周波数の問題を解決した回轉變流機は、しばらくの間整流器の主役となります。ところが、回轉變流機の整流子・ブラシはフラッシュオーバー(参照)という短絡事故を起こしや

すいという宿命的な問題がありました。

また、回轉機械ということで整流子・ブラシに限らず摩擦箇所が多いため手間がかかり、運転時はごう音をとどろかせ、効率も現在の整流器より低いという電力屋泣かせの装置でした。

### 回轉機から静止器に<sup>3)</sup>

そのような中、1902年に米国のクーパー・ヒューイットは、真空容器内に水銀と電極棒を封入してアーク放電させると整流作用が生じることを発見します。この現象を利用し、整流子・ブラシの解消という念願をかなえたのが水銀整流器です。国内では、京都嵐山電鉄(現、京福電気鉄道)が1923年に初めて水銀整流器を採用しています(図5)。水銀整流器は、真空度や温度に敏感

#### フラッシュオーバー

整流子・ブラシは回転するコイル(回転子)から直流を取り出す重要な接点部品です。電圧が急変したり過負荷がかかると、この整流子・ブラシ間に大きな火花が発生して整流不良となり、最悪は短絡事故、フラッシュオーバーに至ります。

で、鉄道に使用するような大型整流器には、真空ポンプや水冷設備など大がかりな周辺機器が必要でした。それゆえ、当初はポンプの保守や冷却水管理、腐食対策といった新たな悩みの種も生まれました。しかしそれらも、封じ切り容器によるポンプレス化や強制風冷方式の採用で扱いやすく改良されました。

真空容器には、金属製のタンク状のものやガラス製の電球状のものが使用されました。ガラス製のものはいくつもの電極が足のように飛び出た形から「タコ」の愛称で呼ばれ、アーク放電で妖しく青白く光るタコは直流変電所の特徴的な光景の一つでした(図6)。

しかし、回転変流機にフラッシュオーバーがあったように、水銀整流器にも逆弧(逆参照)と呼ばれる整流不良現象があり、技術者を悩ませました。逆弧の抑制、被害軽減の技術開発は懸命に続けられたものの、ついに根本的解決には至りませんでした。そして、結局は後述する半導体整流器にシフトしていきます。

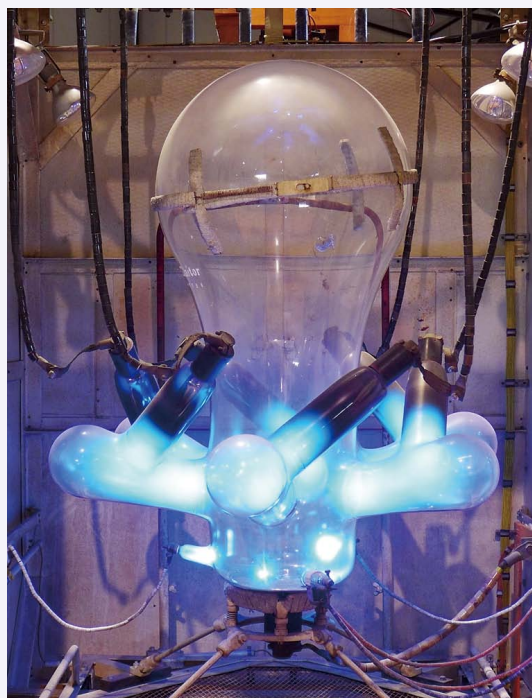


図6 ガラス製水銀整流器  
提供：日本工業大学工業技術博物館

### 半導体整流器の登場<sup>3)</sup>

今や半導体は私たちの生活になくはならないものです。その半導体素子の最も基本的なものの一つに「ダイオード」がありますが、半導体整流器はこのダイオードが持つ整流作用を利用したものです。

実は、電気鉄道の発祥よりも前、1870年代初頭には整流作用を持つ物質は発見されていましたが、当時は半導体という概念も無く、なぜ整流できるかも不明でした。その後、セレンという半導体によるダイオードを使用して電力用整流器が世に出たのが1920年代頃でした。実用になるまで半世紀以上の時間が必要だったことになります。

さて、国内では1957年に西日本鉄道が導入したセレン整流器が初ですが、その後、セレンより生産性やサイズあたりの容量・耐電圧が優れたシリコンが主流となって、一気に普及を始めます。シリコン整流器には接点はもちろん、真空容器も無く、繊細な温度管理も不要で、フラッシュオーバーや逆弧のような弱点もほぼ無く、まさしく夢の整流器でした。そして、今日ではシリコンといえば整流器の代名詞と呼ばれるまでになったのです。

初期のシリコンダイオードは、スタッド型と呼ばれる電圧・電流定格の小さいもので、これを冷却フィン上に多数並べて大電流に対応しました。当初、冷却には強制風冷方式や絶縁油に浸しての油冷方式が使われ、この時点では冷却ファンや送油ポンプなど、周辺機器の可動部分がまだ残っていました。

その後、円盤状の平型素子が開発されて両面放熱することで電流容量も大きくなりました。放熱が良くなったことで送油ポンプを省略したものが現れ、沸騰冷却式という冷媒液体が沸騰する際に潜熱を奪う方式が新たに開発されます。ついに、周辺機器も含めた念願の完全静止形・メンテナンスフリーが実現したのです(図7, 8)。ちなみに、沸騰冷却式の冷媒にはまず伝熱や絶縁に優れたフロンが使用されましたが、地球温暖化作用が発覚し、代替フロン、そして現在は純水へと替わっています。

### 回生電力への対応

シリコン整流器の開発により、ある意味で整流器は一つの到達点に至ったともいえます。ところが、近年思わぬ弱点が表面化します。それが、回生電力の処理です。

ブレーキ時に電力を架線に返す回生ブレーキシステムは、近年の車両には

#### 逆弧

通常、電流は炭素電極から水銀に向けて整流されます。しかし、逆弧が発生すると逆方向にも電流が流れてしまい、短絡事故を起こします。



図7 スタッド型(左)と、平型(右)のシリコンダイオード  
出典：(右)シリコン整流器, 日本鉄道電気技術協会, 2009

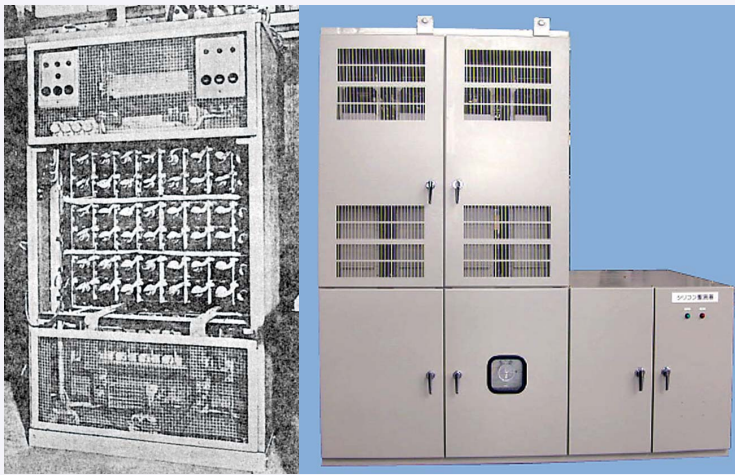


図8 新旧のシリコン整流器  
 (左) スタッド型ダイオードを用いた初期の整流器  
 出典：電気鉄道技術発達史<sup>3)</sup>  
 (右) 最近のヒートパイプ冷却式(沸騰冷却式の一種)整流器  
 出典：明電ヒートパイプ自冷式整流器カタログ、明電舎、2003



図9 つくばエクスプレスのPWM変換装置  
 (自励式整流器)  
 提供：首都圏新都市鉄道株式会社

欠かせない省エネ技術です。しかしながら、シリコン整流器は直流から交流に逆変換はできません。よって、回生ブレーキで発生したせっかくの回生電力は近くに加速中の車両が居なければ活用できず、回生ブレーキ自体も効かなくなります。これが回生失効です。

実は、回生ブレーキ自体の歴史はかなり古く、例えば阪和電気鉄道(現JR阪和線)は戦前から回生ブレーキを使用していました。回生失効対策はというと、当時主流の回転変流機は元から直流を交流に逆変換できる優れた特性があったのです。交流にしてしまえば、車両に限らず周辺の負荷で回生電力は使ってもらえました。この点では、回転変流機も優れた装置です。

さて、シリコン整流器全盛の現代では逆変換を担うために別の装置が必要です。それが回生インバーターです。回生インバーターは半導体のサイリスタを使用して直流を交流に逆変換する装置で、これを整流器と並列に設置します。交流に変換した回生電力は主に空調機器やエスカレーター、照明に使用されます。

最近では、整流器の発展形としてこ

の回生インバーターの機能を組み入れ、双方向に電力変換可能な自励式整流器(図9)が登場し、つくばエクスプレスで運用中です。一度失われた回転変流機の強みを半世紀以上たって取り戻したともいえ、まさしく「歴史は巡る」です。

加えて、自励式整流器には、定電圧特性という負荷の変動に伴う直流電圧の変動を防止する機能もあります。詳しくは割愛しますが、この機能によって、レールから地面に漏れる電流(電食を起こしたり地磁気観測の邪魔をする)が抑制され、回生ブレーキの効きもよくなります。機能の面ではまさしく次世代の整流器といえます。

### 整流器のこれから

自励式整流器には、これまでの整流器にはない直流の電圧を任意に制御できるという大きな特徴もあります。昨今、発展がめざましいICT技術やビッグデータ解析技術のもと将来は列車の位置や時間帯に応じて最適な電圧を出力することも不可能ではありません。これが整流器の一つの未来です。

一方で、シリコン整流器はこれまで述べたようにメンテナンスフリーかつ高信頼で大変優等生です。回生電力の問題など決して万能ではないものの、しばらくは主役であり続けることは想像に難くありません。そこで、シリコン整流器のメンテナンスフリーかつ手頃なコストと自励式整流器の高機能をうまくミックスする道が考えられます。自励式整流器が持つ機能のたとえ一部であっても、より多くの変電所で導入ができれば、トータルでの効果は大きなものになります。これももう一つの整流器の未来です。

鉄道総研としても、両方の未来、あるいは全く新しい整流器の未来を目指して、今後も研究を続けていきます。(吉井剣/電力技術研究部 き電研究室)

### 文献

- 1) William D.Middleton :WHEN THE STEAM RAILROADS ELECTRIFIED, INDIANA University Press, 2000
- 2) 小林輝雄：電気鉄道の技術・研究開発の歩み、(株)鉄道現業社、1996
- 3) 電気鉄道技術発達史、社団法人鉄道電化協会、1983