

わが国における直流機の歴史

広 瀬 敬 一

1 総 説

Faraday が 1822 年に電動機の原理を、1831 年に発電機の原理を発見してから、数多くのにより電気機械の発明および改良が行なわれたが、1833年に H. F. E. Lenz が発電機と電動機の可逆性を発見し、1839 年に M. H. von Jacobi が 1 HP の電動機を電池で運転した。その頃すでに直流発電機もできてはいたが、幾多の改良ののち 1883 年になって Edison によってほぼ今日の形態に近いまでに完成された。しかしその頃の電力は主として電灯をつけるために使用され、動力用としてはあまり使用されなかった。電気が動力用のエネルギーとして注目されたのは 1887 年に Tesla および Ferraris によって多相誘導電動機が発明されてからである。

電動機は蒸気機関や内燃機関にくらべて効率が非常に高く、小容量のものも経済的に使用できるだけでなく、その他種々の利点をもっているため、現在では産業動力の大部分を占めるようになった。

電動機には交流電動機および直流電動機の別がある。

一般的には交流電動機は定速度特性（分巻特性）であるのに対して、直流電動機は定速度特性のものも変速度特性（直巻特性）のものもあり、また広い範囲にしかも平滑に（階段的でなく）速度を制御することができる加減速度特性のものもある。このように細かく速度を制御することができることが交流電動機では得られない重要な特性である。

直流電動機は交流電動機よりも構造が複雑であり、特に整流に問題があるので、その取り扱いが容易でない。さらに価格も交流機にくらべて非常に高い。しかも直流電動機を運転するには直流電源が必要であることがますます直流電動機を使用するためには不利の条件となる。

これらの不利な点が多々あるにも拘らず、直巻特性、加減速度特性を必要とする用途には絶対に直流電動機は欠くことのできないものである。

電力会社から購入できる電力は、わが国では 50Hz または 60Hz の三相交流電力である。直流電動機の直流電源としては、この交流電力を直流電力に変換する必要がある。その方法には次の 7 種類がある。

- (1) 電動発電機による方法。
- (2) 縦続変流機による方法。
- (3) 回転変流機による方法。
- (4) 水銀整流器による方法。
- (5) 格子制御水銀整流器による方法
- (6) 半導体整流器による方法
- (7) サイリスタによる方法

(1)は交流電動機と直流発電機を直結し、交流電動機端子の交流入力を変換して直流出力に変換するもので、効率も低く価格も高いが、交流側と直流側が電氣的に全く独立しているので、交流側の電圧変動がすぐには直流側に影響を与えることなく、直流側電圧を広い範囲に制御することができる利点がある。レオナード方式、イルグナ方式はこの1種である。

(2)および(3)はいずれも回転機であるが現在では使用されることがないので省略する。

(4)および(5)は水銀アークを利用した静止器である。水銀アークの弁作用を利用して交流電力を直流電力に変換するものであるが、(4)はその場合の交流電圧と直流電圧の比が一定のもの、(5)は格子によってその比が変えられるものである。これらも現在は(6)または(7)にその座を譲りあまり使用されない。(6)(7)は半導体を利用した静止器であって、(6)は交流電圧と直流電圧の比の一定のもの、(7)はゲートによってこの電圧比を広い範囲に変えられるもので、必要に応じて(6)または(7)が現在では最も広く使用されている。直流電動機を速度を広い範囲に平滑に制御するためには、電動機の端子電圧を広い範囲に制御することが必要である。そのためには上記7種類のうち(1)、(5)または(7)の3種類が選択されるが、現在ではサイリスタが著しく発達しているので、ほとんどサイリスタが使用されている。したがって、速度制御のための直流発電機の必要性は全くなくなった。

したがって直流発電機はきわめて特殊な低電圧大電流のもの以外には全く使用されない。一方直流電動機は上記のような特性をもっているため、交流電動機では代替できないので今後もその需要はますます増加するであろう。

わが国で初めて発電機を作ったのは1882～1884年頃工部大学、工部省電信寮および三吉電機工場で、それぞれ直流発電機を試作したのが始まりとなっている。

その後田中製造所を継承した芝浦製作所（現在の東京芝浦電気株式会社）(S)が1893年頃直流機を多数製作したと伝えられている。当時の機械の電圧は100kW以下のものは105Vそれ以上のものは105Vと125Vの2種類で用途は電灯用が多かった。その頃製作された発電機の多くはエジソン式二極機であった。それはわが国の電灯事業が漸く開始された1887年頃から東京を始め各地の電灯会社に据けられた外国製発電機がエジソン形であったため、これにならったものであろう。1897年頃から多極発電機を製作し、早くも1998年には(S) 78kW 直流発電機が製作された。この機械はスロット付電機子鉄心および炭素ブラシを持っていたものである。1902年頃から、(S) 岸形発電機が多数製作された。これは界磁鉄心にくふうを加え、電機子反作用を減少させたもので、その構造は筒形の鉄わく内に鉄線を差し込み、これを鋳鉄の継鉄に鑄込んで界磁鉄心としたものである。

その後、直流機の設計、製造は逐年発展して、1905年には(S)100kW 1910年には(S)300kW、1911年には(S) 400kWおよび(S) 600kWのものが製作され、1913年には(S) 1,000kW 514rpmの電動発電機、1916年には(S) 2,000kW 100rpmのガス機関直結の発電機が作られた。これらはいずれもその当時の国産記録品で、特に2,000kWは電機子直径3660mm、整流子直径2500mmで、現在でも恐らくは記録品であろう。

これより先、

1897年に明電舎

1898年に三菱長崎造船所に電機工場(M)

1908年に日立鉾山に修理工場(H)

1913年に小穴製作所（現在の日本電気精機）

1915年に安川電機
の各社が創設され、また
1923年に富士電機(F)
が創立されて現在の電気機械製造業の大系が確立した。

2 わが国における直流機の発達

低電圧大電流の直流発電機および最も技術の水準の高い製鉄用圧延電動機についてその
発達の歴史をたどってみよう。

(A) 大電流発電機

1931年 (F) 12kW 3V 4,000A

これは0.2V 800A～4.05V 5400Aでまで調整きるものである。

1931年 (H) 25kW 5V 5,000A

(H) 100kW 10V 10,000A

(S) 240kW 12V 20,000A

1933年 (S) 1500kW 150V 10,000A

これは150V～0Vまで調整できるものである。

1932年 (F) 1495kW 230V 6,500A

1934年 (M) 3000kW 300V 10,000A

330V～150Vまで制御可能のものである。

1935年 (F) 48kW 12V 4,000A

1935年 (M) 120kW 15/12V 8,000A

1955年 (H) 1100kW 27.5V 40,000A

1941年 (H) 2×6,720kW 840V

～1943年 総出力 13,440kW 840V 8,000Aの世界でも非常にめずらしい水車直結立て形
直流発電機で、世界記録品である。

(B) 製鉄用圧延電動機 (主要なるもの)

1925年 (S) 4,500HP 50～120rpm

二重電機子形で当時の国産記録品

1933年 (H) 7,000HP 0～80rpm

二重電機子形、速応励磁採用、当時の国産記録品

1936年 (H) 5,000HP

1937年に格子制御水銀整流器を電源としたものが (F) にて製作された。

1940年 (M) 7,000HP 40/100rpm

1941年 (M) 7,000HP 40/140rpm

1942年 (S) 7,000HP 45/75rpm

スパイダ軟鋼板溶接組立構造

(M) 7,000HP 80/140rpm

1643年 (F) 2,650kW 480～510rpm

この電源のイルグナ発電機にスロットダンパを採用

1951年 (H) 4000kW 50/100rpm

戦後の記録品、HTD 増幅発電機を採用

1952年 (F) 5,000kW 50/100rpm

銑鉄成層化

1953年 (F) 5,000kW 50/120rpm

単機の戦後記録品

1953年 (S) 1,800HP

水銀整流器を電源とする

1954年 (S) 3,500IP 35/85rpm

双電動機駆動方式の最初・加速減速を速かにするために主電動機の GD^2 を小さくすることが要求されるが、増幅発電機の使用によって、負荷平衡制御が可能となり、圧延機の上下のロールを別個の電動機によって駆動する方式が採用された。

1955年 (M) 5,000IP 40/80rpm

単電機子による双電動機駆動方式の記録品

1957年 (H) 6,000HP 40/80rpm

電動機の銑鉄成層、二重電機子形の双電動機駆動方式の記録品

1959年 (S) 3,000kW 30/80rpm

電動機および発電機の励磁に水銀整流器を使用し速応励磁とする。

1960年 (F) 3,550kW 450rpm

スロットダンパ採用、非対称二重重ね巻採用

1962年 (S) 6000kw 40/120rpm

二重電機子

1966年 (S) 6,000kW 40/80rpm

二重電機子、双電動機駆動の記録品

(H) 4,500kW 40/80rpm

励磁電源にサイリスタを採用

(S) 900kW 400/1,000rpm (アルミ圧延用)

サイリスタを電源とする。

1967年 (H) 1,500kW 268/402rpm

サイリスタを電源とする。

(H) 2,250kW 212/636rpm

サイリスタを電源とする。

1968年 (M) 6,700kW 40/80rpm

二重電機子形、双電動機駆動方式

(M) 4,500kW 40/100rpm

サイリスタを電源とする。

(S) 4,500kW 40/80rpm

サイリスタを電源とする。この年度からほとんど電源はサイリスタとなる。

1969年 (H) 8,100kW 116/232rpm

二重電機子、サイリスタ電源、記録品

(S) 7,000kW 50/90rpm

二重電機子、単電機子最大トルク

1970年 (F) 5,600kW 35/70rpm

二重電機子，双電動機駆動方式

(M) 6,700kW 40/80rpm

(F) 5,600kW 35/70rpm

(S) 5,000kW 45/85rpm

(M) 5,600kW 35/70rpm

上記4機は二重電機子，双電動機駆動方式サイリスタ電源

(S) 6,500kW 50/100rpm

(S) 6,000kW 65/150rpm

上記2機は二重電機子，サイリスタ電源

この年度から電源は全部サイリスタとなる。

1971年 (M) 5,600kW 35/70rpm

(H) 5,600kW 35/70rpm

(F) 5,000kW 30/60rpm

(H) 5,000kW 30/60rpm

(H) 6,720kW 40/80rpm

上記5機は二重電機子，双電動機駆動方式

(S) 8,000kW 140/180rpm

二重電機子，サイリスタ電源

1972年 (H) 6,720kW 40/80rpm

二重電機子，双電動機駆動方式

(M) 5,000kW 50/100rpm

双電動機駆動方式

(C) 超電導発電機

−270°Cの極低温状態を利用して，超小形大容量発電が可能となり，1973年(S)世界最大の超電導発電機の実用機を製作した。

これは単極発電機で300kW 3,000rpm 150V，20,000Aの定格をもち，これは界磁コイルに超電導現象を利用して大電流を流して得られたもので，将来の直流機の方角を示すものとして注目される。

3 直流機に関する研究

(1) 整流の研究

直流機で最も重要な問題は良好な整流を具現化することである。直流機の発明されてから今日に到るまでの直流機の研究や改良は，大部分整流の改善にあったといっても過言ではないであろう。

ブラシとして初期の直流機では銅片または銅網を使用していたのを炭素に変えたり，電機子巻線の改良，補極巻線や補償巻線の設置など数多くの改良があるが，その基本的ものはリアクタンス電圧の適正なる選択である。

筆者の現役であった頃，無火花帯の測定，それによって直流機自体およびブラシの性能の判定が行なわれたが，現在では無火花帯の測定ではなく，無火花帯の計算が電子計算機によって可能になり，それによって整流の予測が可能になった。

まず平均リアクタンス電圧を考える。

直流機では良好な整流を具現化させるために特に努力が払われている。しかし整流現象を表現する整流方程式は、高次元性、特異性、非線形性を有するためはなはだ複雑であり、従来はブラシ厚さが整流子片ピッチに等しい特殊の場合についてのみの解析に限られてきたが、最近電子計算機を利用した無火花帯の計算が可能になった。この結果、従来予想計算の困難であった無火花帯の幅、湾曲の程度、ずれの程度についてもかなりの精度で予測が可能になった。無火花帯の幅は、平均リアクタンス電圧と相関を有するもので、一般には平均リアクタンス電圧を計算し、ちょうどこれを打消すだけの整流電圧を与えるような補極を設けることによって、無火花整流の目的を達することができる。

無火花整流を具現化するには、たとえ補極を用いても無制限に高い平均リアクタンス電圧の値は採用できない。できるだけ小さい値が望ましいが、連続使用で8 Vぐらい、瞬時過負荷で15 Vぐらいが限度である。無火花整流でなく有害な火花の発生を抑えるためであれば、瞬時過負荷はさらに高く取ることができる。

無火花帯は、負荷の増加によって狭くなり、やがて消滅するが、ブラシの接触特性により無火花帯の幅は左右される。特にブラシの火花電圧、接触安定度、整流子面の酸化皮膜の影響が大きい。

したがって無火花帯を長期にわたって安定化するためには、適度の研磨性と潤滑性のあるブラシを使用し、整流子面にむらのない安定した皮膜を形成させることが必要である。なおコイルのインダクタンスは小さい程過負荷まで無火花帯を消失させない。またコイルの抵抗やブラシの接触抵抗が大きい程無火花帯は過負荷まで存続するが、その幅はあまり広がらず、逆に回転速度による無火花帯のずれが大きくなる。補極磁束分布の形は条件の異なるコイルの無火花帯間のずれの程度を左右し、同一スロットでの総合の無火花帯の形を制約するので、適当な分布形に選ぶことが必要となる。主極磁束は無火花帯全体を電動機の場合は上方、発電機の場合は下方に平行的にずらせる。そのずれの量は回転速度に逆比例する。通常コイル抵抗、ブラシ接触抵抗を高めて整流を改善するというのも回転速度の一定な発電機では有効であるが、電動機では逆に無火花帯の高低速度のときのずれを大きくするだけで、むしろ有害となる。このほか、大形機の整流を改善する方法として、リアクタンス電圧を積極的に下げるためにスロットダンパを入れる方法が採用される。

直流機の整流火花はブラシの接触電圧降下がある電圧以上になった場合に発生する。その火花発生限界におけるブラシ接触電圧降下をいわゆるブラシ火花電圧と呼び、通常用いられる電気黒鉛質ブラシでは2～3 V程度である。したがって整流中の短絡コイルに誘導するリアクタンス電圧と補極の作る整流電圧との差が火花電圧をこえると整流火花を生じはじめ、この差電圧が大きいほど火花は大きくなる。

定常負荷で無火花帯からはずれた過負荷では、もちろん火花を発生し、この火花を定常火花という。定常火花は無火花帯があるときは補極の強さを適当に調整することによって防止できる。

負荷が急激に変化する過渡時負荷に対しては、いくら定常火花がないように補極を調整しておいても、補極磁気回路のうず電流による補極磁束のおくれによって火花を発生する。この火花を過渡火花という。これを防止するには、うず電流を防ぐため、補極はもちろん継鉄も成層する必要がある。無火花帯の広い中小形機では過渡火花はあまり問題にならないが、無火花帯の狭い大形機では定常火花より過渡火花に対する考慮が必要であり、このため成層継鉄がよく使用される。

短絡コイル中の差電圧がブラシの火花電圧程度で火花番号数が4号以内であれば、ほとんど火花の実害はないようである。むしろ微量の火花は適度な整流子面の皮膜の成長を助け整流の安定化に効果がある、しかし短絡コイル中の差電圧が10V程度となり、5号火花を生ずるようになると、火花はアーク放電となるため実害を発生するようになる。これはアーク放電によってブラシに高温スポットを生じ、ブラシの異常摩耗が起こり、また整流子は部分的に軟化を起こすため、これによる多量のカーボン粉、銅粉の発生がフラッシュオーバーの危険性を誘発するからである。したがって火花号数が4号以下であれば問題はないが、5号以上は有害な火花といえよう。

(2) 脈流電源による整流

電機子電源にサイリスタ、半導体整流器(シリコン、セレンなど)や水銀整流器を使用する場合には、補極磁束の追従が遅れるため整流を悪化する。この対策としては補極鉄心および継鉄を成層構造にする。さらに直流リアクトルを電機子回路に直列に接続して電流の脈動を抑えるようにする。許容脈動率は直流機の整流能力によって決定されるが、その概略値は、六相100kWまでは10%、1,000kW以上は6%である。励磁電流に整流器を使用した場合は、主磁束の脈動によってブラシで短絡される電機子コイルに誘導される変圧器電圧が整流を悪化させる。変圧器電圧とリアクタンス電圧の和がブラシ火花電圧より低ければよいわけであるが、整流子片間変圧器電圧が1～2V以下ならば問題はない。主磁束の脈動を減少する方法には、脈動磁束の短絡回路の設置、界磁分絡抵抗の設置などがある。

(3) 磁気わく

直流機の磁気わくは、主要な磁気回路を構成すると同時に構造材料として、界磁鉄心、界磁コイルなどを支えるものである。初期の直流機では鋳鉄が主体であり、小形軽量を必要とする場合や、振動などの烈しい苛酷な用途に使用する機械強さの大きいものを必要とする場合に限り、高価ではあるが鋳鋼が使用されていた。

筆者が1927年にアメリカのG. E.社に学んだ頃、始めて直流機の磁気わくに軟鋼板溶接構造のものが製作されるのを見学した。交流機の固定子わくはそれより少し以前にすでに軟鋼板溶接構造のものが実用化されていたが、直流機の磁気わくに対してはその時が最初であった。

そもそも磁気わく用の鋳鋼製造技術は困難なものであって、鋳造の容易な組成では磁気特性があまり優秀でなく、磁気特性に重点をおけば鋳造が困難になり、内部に巣が生じやすくなる。この内部の巣が磁気わくの磁氣的均一性を欠き、整流不良の原因となったこともある。

軟鋼板溶接構造のものは、市販の軟鋼板を材料として、これを適當の寸法にガス切断して bending roll で適當に曲げて磁気わくを仕上げるものである。この方法によれば鋳鋼のように内部に巣のあることはなく、必要にして十分な最小限度の材料を使用し、しかも最小の加工賃をもって磁気わくを製造することができる。筆者らはあり合わせの工具を使って困難に打ち勝ってこれを完成した。この場合必要なのは bending roll だけで、場合によってはガス切断工事は、野天でもできるから、鋳鋼の場合のように、鋳物工場、木型工場などのぼう大の設備を必要としない。また肉が少ないから仕上げも工賃を節約することができる。これによって直流機の小型軽量化が達成され、しかも原因不明の整流の不良も避けられたのである。初めは大形機だけにこの方法が採用されたが現在では中小形機にも広く採用されている。

(4) 整流子片

整流子片としては古くから硬引純銅がもっぱら採用されていた。しかし国産の整流子は外国製のものよりも赤味を帯び、しかも機械的に柔いように思われた。筆者らは諸外国製の直流機の整流子片を細かく調査し、特にその成分をも詳細に分析したが、その結果はやはり純銅という結論に達した、そこでその機械強さを増すための方法が研究された。銅はごく少量の不純物、たとえばわずとか燐とかを添加すれば、直ちに強きを増すが同時にその電気抵抗が急速に増加して、電気の主回路に使う整流子片としては不適當である。またわずや燐はイオン化傾向が大きいのので僅かの火花でも整流子を損傷するので、なおさら整流子片としてはますます不適當である。そこで不純物ではあっても、その抵抗の増加のあまり著しくないものを調査した結果、カドミウムと銀がこの目的にかなうことが判明したので、筆者は高速度直流機の整流子片としてカドミウム入りのものを採用して小形化に成功した。その後は主として銀入銅が採用され、現在では、大形機や高速度機の整流子片にこれが採用され、JISでも銀入銅が規定された。

(5) バインド線

バインド線には普通はピアノ線が使用される。しかし高速度機でこのバインド線の磁性のために漏れ磁束が多くなり、機械の加熱や整流の不良の原因となる。この漏れ磁束をできるだけ減少させるために、非磁性銅線や非鉄金属線が採用されるが、現在ではガラス絵筆を主体としてエポキシ樹脂などでまとめたガラスバインド線が採用されることもある、無誘導性のバインド線を使用することによって無火花帯を直線的にすることができる。

(6) 電機子巻線

電機子巻線はエジソンダイナモでは、平滑電機子で環状巻であったが、スロット付電機子の採用とともに鼓状巻の二層巻が採用され、小容量機では波巻、中容量以上のものでは重ね巻が採用された。重ね巻の場合には整流を改善するため均圧結線を取りつけなければならない。

大容量機や高速度機のように整流の困難な機械に対しては、各コイル片ごとに均圧結線を取りつけることが望ましい。しかしこのためにはそれだけ材料が増し工賃も増加するのはもち論であるが、最も重大な問題は取り付け空間の増大である。これを解決するには各コイル辺に均圧結線を取りつけた場合と全く同じ効果のあるBBC巻線、かえる足巻線または均圧ライザを使用した例もある。均圧ライザはライザ部分の通風効果が全くなくなるのであまり優れた方法ではない、筆者は好んでBBC巻線を使用した。

最近では特に大形機では二重重ね巻が採用され、単重重ね巻での設計可能な限度が拡大された。しかし二重重ね巻の場合には、第二種均圧結線を設けなければならない欠点があるがそれが克服された。

(7) ブラシ

直流機のブラシは初期のものは銅片または銅網が採用された、これは恐らくは主電気回路に使用されるものであるから、電気抵抗のなるべく低いものが選ばれたものであろう。その後ブラシと整流子との接触抵抗の大きいことが、良好なる整流を具現するために絶対的に必要であることが解明され、炭素質ブラシが採用された。その後炭素よりも黒鉛のほうが不純物が少なく性能が優れているので、現在では主として電気黒鉛質ブラシが採用されている。

ブラシについては、その材質とともにその形状、すなわちブラシの厚さ、幅、および高

さおよび整流子への取り付け方法を適当に選定するとともに、1個のブラシを数個に分割した分割ブラシ、またはタンデムブラシが採用されている。整流の困難なものに対しては単体のブラシよりこれらのブラシが優秀であることが認められ、多く使用されている。

昭和初期までは大体外国製ブラシが使用され、特に中形以上の機械には外国製ブラシに限られていた。筆者は1927年にアメリカの National Carbon Co. の工場を見学する機会があったが、そのとき同社の宣伝用映画 Behind the Pyramid (ピラミッドは同社の商標) を見せられたが、その映画は非常に参考になるので、筆者は帰国後その映画をわが国に紹介したところ、電気学会などでもそれを高く評価して講演会などで一般に公開したことは記憶に新たである。その時同社の SA45 という新しいブラシを知り直ちにこれを輸入して採用したところ、その当時の整流問題は一応解決したようで、戦争で輸入が困難になるまでは、重要な直流機には専らこれが採用された。国産で優秀なブラシが完成したのは戦後である。

筆者はかつて分割ブラシの両片を接着して、単体のブラシとして採用することを研究し、その際その接着部の電気抵抗をいろいろ変えて効果を実験した。その抵抗は無限大から0まで広い範囲に変えて見たが、この抵抗の値が無限大のときはかえって結果が悪く、比較的低い値のとき、約 15Ω のときに、普通の分割ブラシよりも良好な整流が得られることをことを確認した。しかしこのものは製作方法が簡単でないので実用化はされなかった。

終戦後問題になったのは整流子の荒損である。筆者の現役であった当時は、無火花整流帯を求めることが至上命令であった。ある官庁の監督官は無火花を確認するために、夜間電灯を消して暗の中で整流試験を行なうよう指示されたことがあった。これ程火花に対して神経質であったのである。筆者がかつてアメリカ各地の発電機の使用現場を視察したことがあったが、その時その機械は火花番号3号くらいそのまま運転されていた。そしてそれに対してメーカはそれで O.K. という指示をしていた。現在ではある程度の火花の発生が整流子の荒損を防ぐという結論に達しているが、アメリカのメーカはその当時そのことを知っていたのであろうか。要するにその当時わが国の直流機は相当に余就のあるものであったのが現在では高速になり、温度上昇も高く許されている場合が多いので、昔は荒損が問題にならなかったが、今では問題になるのであろう。

(8) 鉄心および絶縁材料

電気機械の米の飯ともいべき電気鉄板は大正大震災直後までは、アメリカからの輸入に頼っていたし、ワニスクロスやエナメル線などの主要材料も輸入品であって、電気機械の国産化といっても実は大変に恥かしい状況であった。

電気鉄板が国産化されたのは昭和になってからであり、またワニスクロスは1932年、1933年頃始めて国産品が使用されるようになった。

絶縁ワニスも同じく1934年頃にグリブタルワニスが国産品として製作された。

ホルアール線用ワニス、エポキシワニス、ポリエステルワニス、シリコンワニスも1950年頃によりやく国産化された。

マグネットワイヤは1927年頃直径0.35mm以上のものであった1933年頃0.03mmのものまで国産でできるようになった。

ホルアール線は1952年頃、ポリウレタン線は1956年頃、シリコンポリエステル線は1959年頃国産品が完成した。

アスベスト線

B種絶縁の機械の巻線の絶縁皮覆としては、現在ではガラス皮覆線が専ら使用されているが、初期においては、無アルカリ性の細いガラス繊維を製作することができなかったもので、輸入のアスベスト皮覆線を使用していた。1936年にアスベストの長繊維を水に懸垂し、その中に銅線を通すことによって優秀なアスベスト被覆線を製作するのに成功し、実用化されたのは1937年であった。それはそれまでの輸入品にくらべてその性能が長足に進歩したもので、丸線や細い平角線のB種およびそれより高級の絶縁皮覆線として完全なものが完成した。その後5 μ の無アルカリ性ガラス繊維がわが国で開発されて、現在ではこれを主体とするガラス皮覆線を使用し、これをシリコンワニスで処理したものがH種絶縁のコイル材料として最高級なものである。

参 考 文 献

本邦に於ける晩近の電気工学	電気学会	14.2.15
四半世紀における電気工学の変貌と発展 (1938~1963)	電気学会	38.10.20
日本電機工業会史	日本電機工業会	31.4.15
芝浦製作所六十五年史	東京芝浦電気KK	15.4.30
東京芝浦電気株式会社八十五年史	東京芝浦電気KK	38.12.25
日立製作所史1および2	日立製作所	35.10.5
電気工学年報		35.12.1
昭和38~昭和47年	電気学会	
整流火花の分類法	電気学会直流機 専門委員会	電気学会技術報告 第61号 39.6.
直流発電機の無火花帯の測定について	広瀬, 山口	中央大学七十五年 記念論文集 30.11.8
直流機におけるブラシの接触安定度と無火花帯	一木	日立研究所創立三 十周年記念論文集 p.23 40.
アナログ計算機による整流方程式の解析	乙武, 玄地	電気学会誌 79巻849号 p.714
	乙武	同79巻852号 p.1192
直流機補極および継鉄成層による整流改善	斉藤	東芝レビュー 15巻10号 p.1104
大形直流機の整流理論と無火花帯の計算誌	乙武	東芝レビュー 16巻8号 p.1030
直流機の整流子荒損に対する研究	稲垣, 伊東	東芝レビュー 17巻12号 p.1356
水銀整流器による直流電源が直流電動機に及ぼす影響	鬼頭, 仲村	東芝レビュー 17巻7号 p.722
サイリスタで騒動される直流電動機の問題点	和田, 松本	東芝レビュー 22巻9号 p.1067