

日立電力用シリコン整流素子

Silicon Power Rectifying Elements

近藤喜久雄* 草鹿阜太郎*
Kikuo Kondō Kōtarō Kusaka

内 容 梗 概

電力用シリコン整流器は実用期に入り運転実績がきわめて良好である。制御極付シリコン整流器は最近国産化され、その優秀な特性により各方面の応用が期待されている。ここではシリコン整流素子の特長、製法を述べ、各素子の特性と制御極付シリコン整流素子の特性を紹介する。

1. 緒 言

シリコン整流器(以下SRと略称する)の急速な進歩は、最初の国産品が登場してから、わずか3年を待たずして整流器の王座を占めるに至った。整流器として電氣的、機械的、熱的にほぼ理想的な特性を有しているため、電気化学工業、電気鉄道、一般動力を始め各分野で使用されて好成績を収めており、今後その用途はますます拡大するであろう。とくに制御極付シリコン整流器(以下SCRと略称する)の工業化により、その応用分野はさらに広いものとなった。

このような飛躍的進歩をとげた一因としては、原材料であるシリコン単結晶製造技術の急速な発達とpn接合製造技術の向上により、理想に近い特性が得られるようになったことがあげられる。

pn接合の製造技術は合金法、成長法、拡散法など種々方法がありおのおのその特長をもっているので素子の仕様に依りて最適の方法を選択する必要がある。

日立製作所が最初の国産化に成功して以来、アルミニウム製錬用直流電源を始め、交直両用電車、電気機関車、電鉄地上変電所用などに総数34,000個使用され、いずれもきわめて好調に運転中である。最初、合金法による50A形SR素子の量産化に成功し、次いで拡散法により200A形、300A形素子を量産化し続いて記録的大容量である500A形素子を完成した。欧米では最大電流容量は200~250Aで400~500A級は試作中といわれる現在、海外にさきがけて500A素子を完成したことはわが国のSRが世界水準にあることを示すものと称しても過言ではないであろう。

従来はセレン整流器が使用されてきた1~10A級の小中容量整流素子も高性能のSRを使うことにより機器は小形化され、性能が向上するので、需要家各方面の要望に応じて、このほど1A形、10A形素子を量産化し、1Aより500A形に至る一連の系列を完成した。第1表にこの系列表を第1図にその外観を示す。

一方半導体技術の急速な進歩は、pn pn接合による制御可能な電力用シリコン整流素子を開発し、昭和33年アメリカGE社がSilicon Controlled Rectifierの名称で発表した。以来国産化が待望されていたが、このほど16A形、50A形の量産化に成功し半導体工業界の新製品として登場することになった。第2表にこれらの系列表を、第2図にその外観を示す。

第1表 日立電力用シリコン整流素子系列

形 式	最大許容せん頭逆電圧 (PIV) (V)					定 格 電 流 (A)
DF	600	800	1,000			500
DH	600	800	1,000			300
DJ	600	800	1,000			200
SN	100	200	300	400	500	50
DS	200	400	600			10
DV	200	400	600			1

日立製作所日立工場



第1図 日立電力用シリコン整流素子

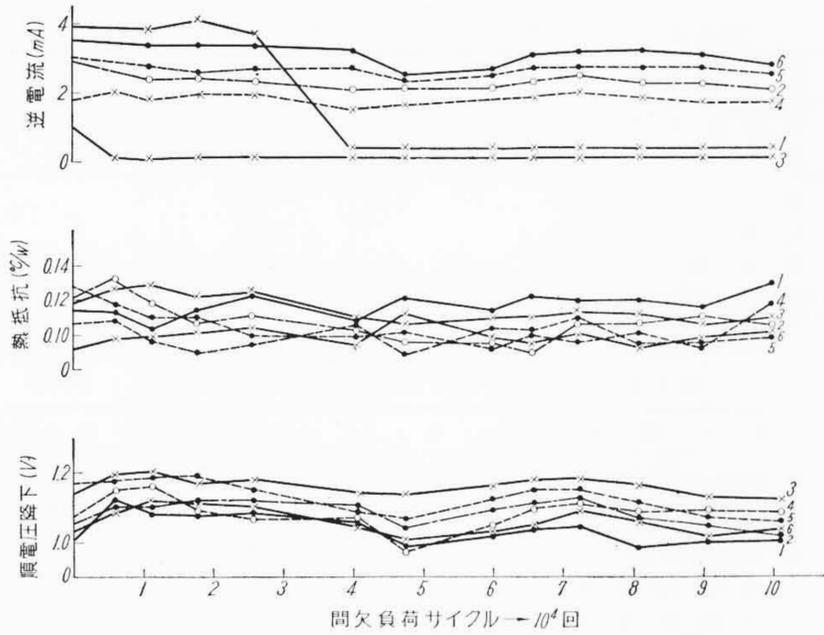
第2表 日立電力用制御極付シリコン整流素子系列

形 式	最大許容せん頭逆電圧および最小順方向ブレークオーバー電圧(V)								定 格 電 流 (A)
CS	25	50	100	150	200	250	300	400	10
CR	25	50	100	150	200	250	300	400	16
CN	25	50	100	150	200	250	300	400	50



第2図 日立電力用制御極付シリコン整流素子

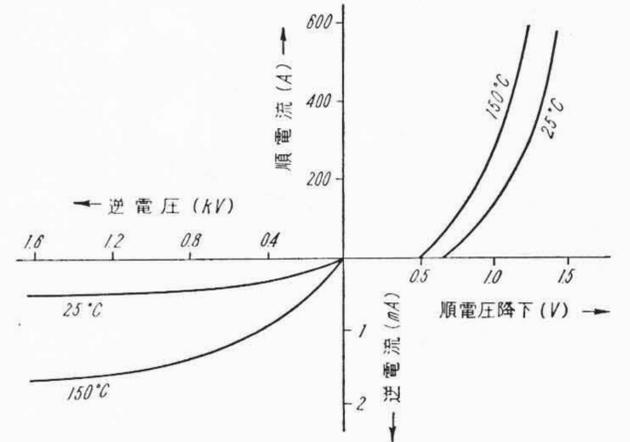
この新製品SCRは小形で制御電力、補助電力がきわめて小さいため応用分野は広く、従来のサイラトロン、水銀整流器、磁気増幅器、継電器、開閉器、遮断器などの部品に置き替えることができる。一方いままでにみられない新しい用途も開拓されつつあるので今後の



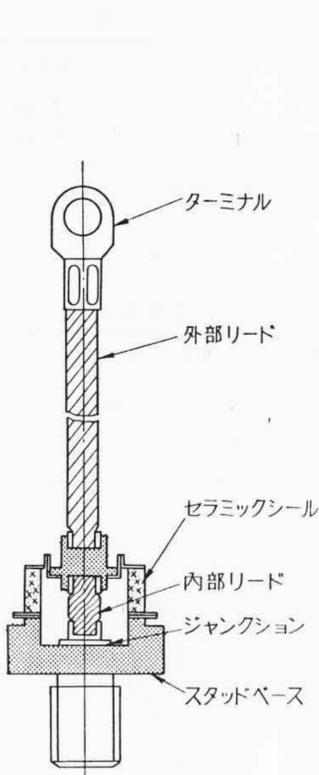
第3図 シリコン整流素子の間欠負荷試験における特性経過



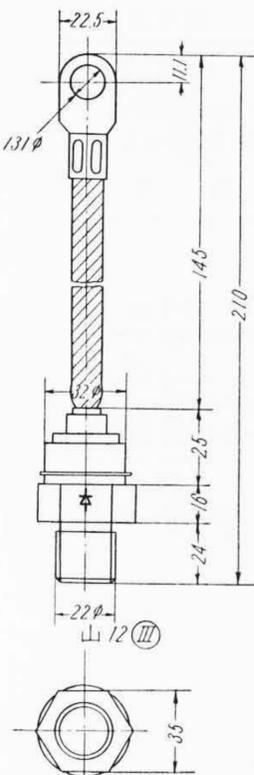
第6図 DJ14形シリコン整流素子



第7図 DJ形シリコン整流素子順逆特性



第4図 シリコン整流素子の構造



第5図 DJ14形シリコン整流素子寸法

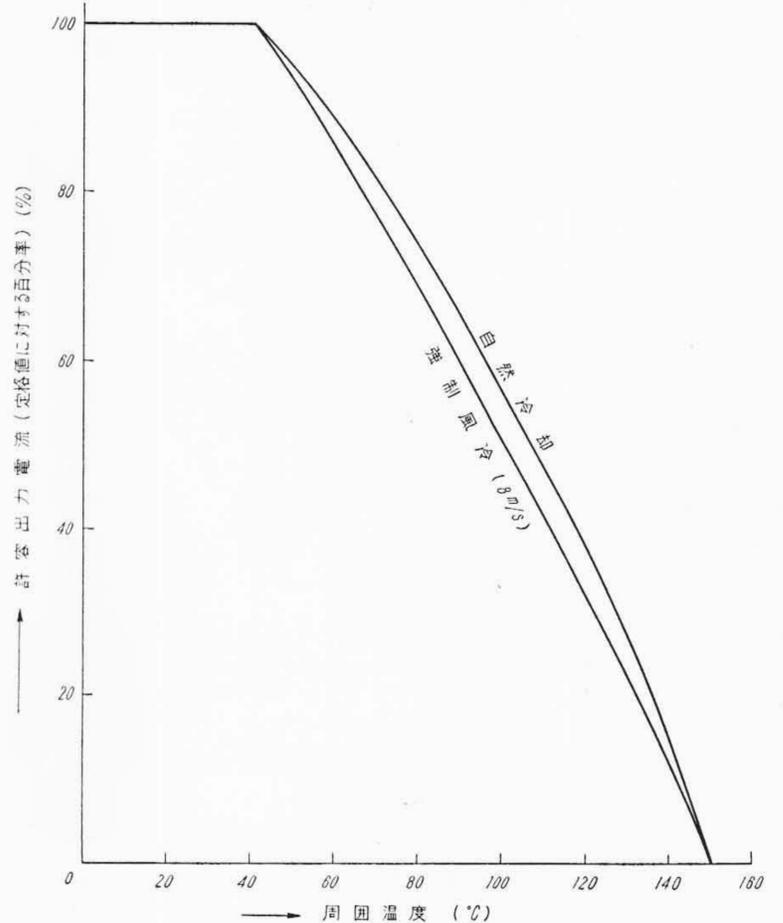
と同時に重要である。この接着に要求される条件は次のとおりである。

- (1) 電気抵抗が小さい
- (2) 熱抵抗が小さい
- (3) 電極と基体間の熱膨張の差を吸収する
- (4) 熱サイクルによる疲労がない
- (5) pn接合部の熱ひずみを小さくするため接着作業温度はできるだけ低いこと。

この問題は、日立製作所ではすでに以前から研究しており、10万回の間欠負荷サイクルに対し特性の変化を生じないろう付法を完成した。最近、ハードソルダ法が熱サイクルに対し良いことが発表⁽²⁾されている。ハードソルダ法 pn では拡散法でも合金法でも接合ができるが、融点が高いため接着時の温度が高く、pn接合に熱応力が残って、必ずしも完全とはいえない。これに対し日立製作所では、融点の低い特性ソルダにより、素子の電気特性熱抵抗特性が10万回の間欠負荷試験後も変化しないろう付法を完成した。第3図はその試験経過を示す。

4. 構造

日立電力用シリコン整流素子の代表的な構造を第4図に示す。接



第8図 DJ形シリコン整流素子の温度—許容出力電流

合部は表面を清浄にして安定化してからハーメチックシールの容器に収納し片側はスタッドベースに、ほかの片側は内部たわみリード線にろう付し、大気と完全に遮断するため不活性ガスを満して封かんする。

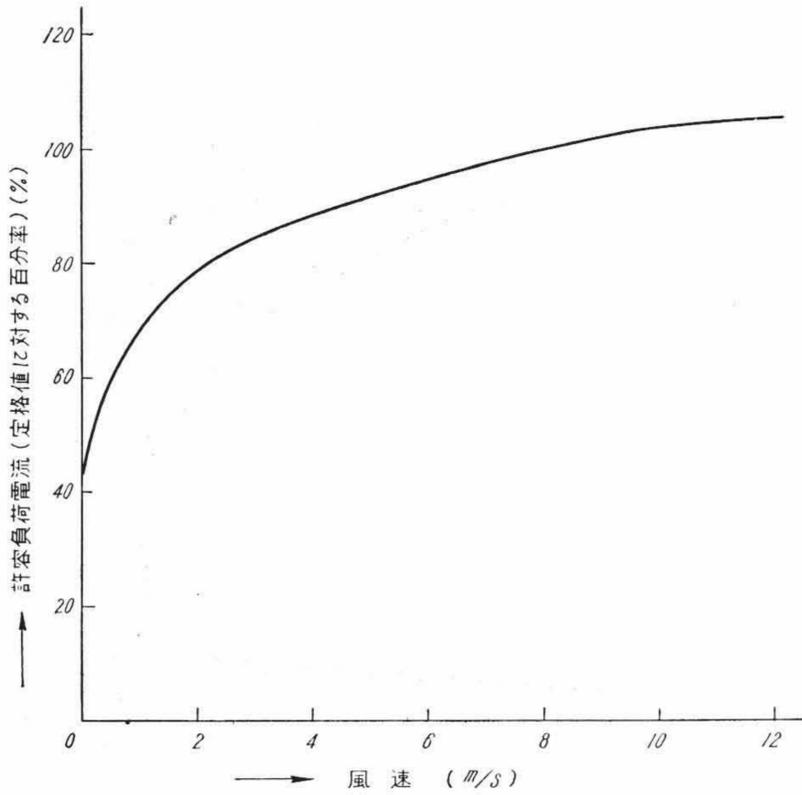
たわみリード線は容器の外部に引出され、その末端に接続用圧縮端子が取付けられているから、スタッドベースは整流素子の一極、圧着端子は他の一極となっている。なおスタッドベースは一極と同時に、冷却フィンに取付けられるようになっている。構造は、原理的には他の形式の素子に共通であり、容量に応じた適切な構造である。

5. シリコン整流素子の仕様と特性

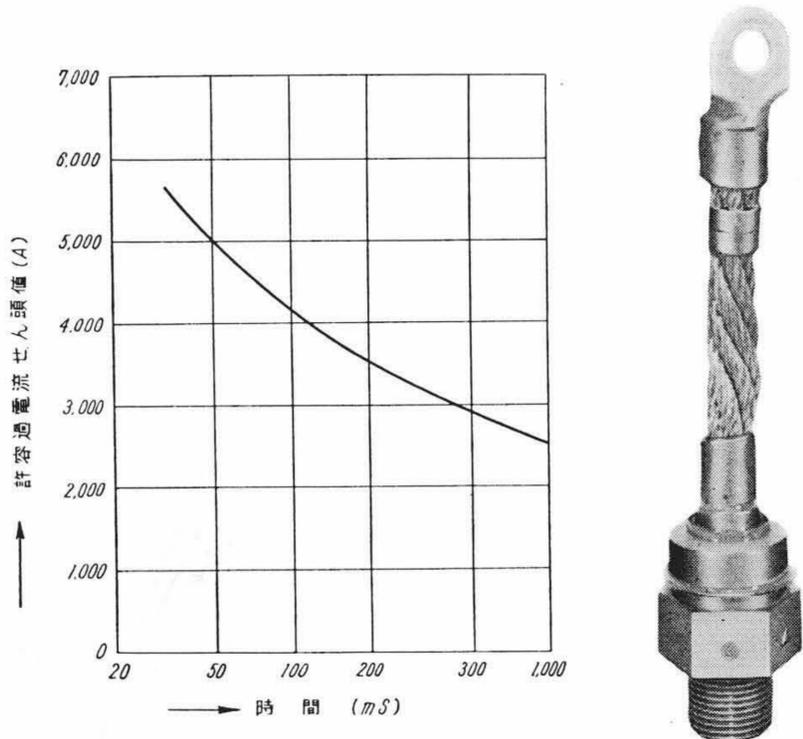
完成された電力用シリコン整流素子系列のおのおのにつきその仕様と特性につき概説する。

5.1 DJ形 200A 整流素子

第4表に標準仕様を第5、6図にその外観を示す。本素子は拡散形大電流素子として最初に完成したもので、使用実績はSN形50A



第9図 DJ形シリコン整流素子の風速と許容負荷電流



第10図 DJ形シリコン整流素子負過荷特性 第11図 DH14形シリコン整流素子

素子に次いで多く、運転成績も事故素子皆無という好成績である。本素子の完成により、従来の50A級素子を使用して構成されていた電鉄用地上変電所1,000~3,000kWシリコン整流器キュービクルの容積は約20%に低減されるという飛躍的な進歩がもたらされた。

第7~10図にそれぞれ本素子の標準特性を示す。

5.2 DH形300A整流素子

第5表に標準仕様を第11図にその外観を示す。本素子は拡散形素子としてDJ形に次いで完成された300A級素子で、電流量が大きいので大電流整流器に適している。第12図にその静特性を示す。

5.3 DF形500A整流素子

第6表に標準仕様を第13図に静特性を示す。本素子は記録的大容量で、シリコン整流素子製造技術の集大成によるものである。原材料であるシリコン単結晶は直径20mmをこえる大きな、特性の均一なものを必要とし、一様な薄片に加工するにも細心の注意が肝要で、接合面積が大きいので種々問題が多い。接合部で約500Wの熱が発生するので、有効に冷却するようろう付法、冷却体の構造に十分な検討がなされている。

第4表 DJ14形200Aシリコン整流素子標準仕様

電圧階級	G	J	L
定格最大逆電圧	600V	800V	1,000V
最大許容瞬時電圧	800V	1,000V	1,300V
形式	DJ14		
定格平均電流	200A		
最高動作温度	150°C		
重量	0.335kg		

第5表 DH14形シリコン整流素子標準仕様

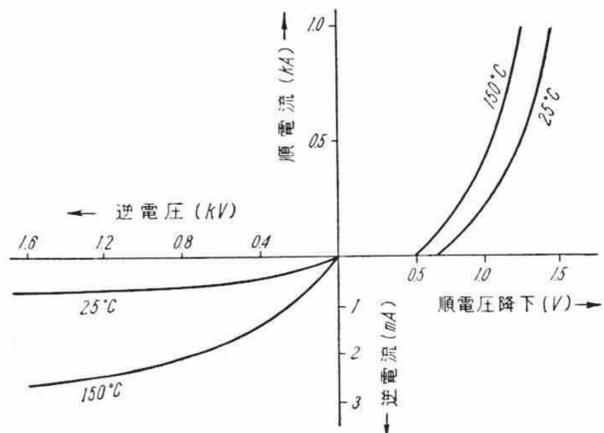
電圧階級	G	J	L
定格最大逆電圧	600V	800V	1,000V
最大許容瞬時逆電圧	800V	1,000V	1,300V
形式	DH14形		
定格平均電流	300A		
最高動作温度	150°C		
重量	0.603kg		

第6表 DF12形シリコン整流素子標準仕様

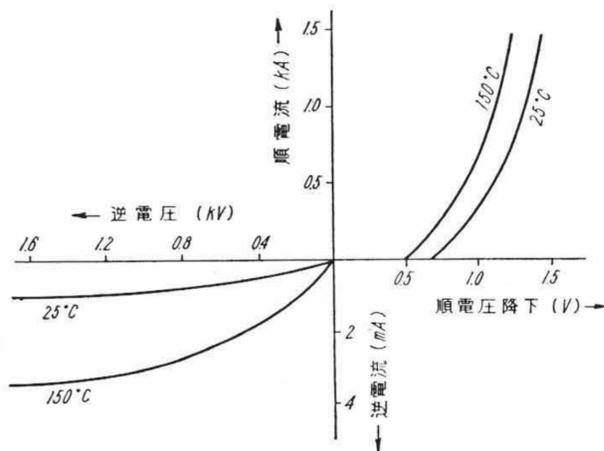
形式	DF12G	DF12J	DF12L
最大許容せん頭逆電圧(PIV)	600V	800V	1,000V
最大許容瞬時逆電圧	800V	1,000V	1,300V
定格電流	500A		
最高動作温度	150°C		

第7表 SN14形シリコン整流素子標準仕様

形式	SN14B	SN14C	SN14D	SN14E	SN14F
最大許容せん頭逆電圧(PIV)	100V	200V	300V	400V	500V
最大許容瞬時逆電圧	200V	300V	400V	500V	600V
定格電流	50A				
最高動作温度	150°C				



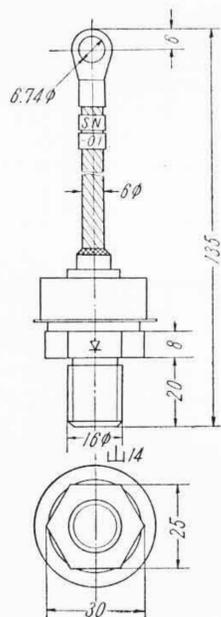
第12図 DH14形シリコン整流素子順逆特性



第13図 DF12形シリコン整流素子順逆特性

5.4 SN形50A整流素子

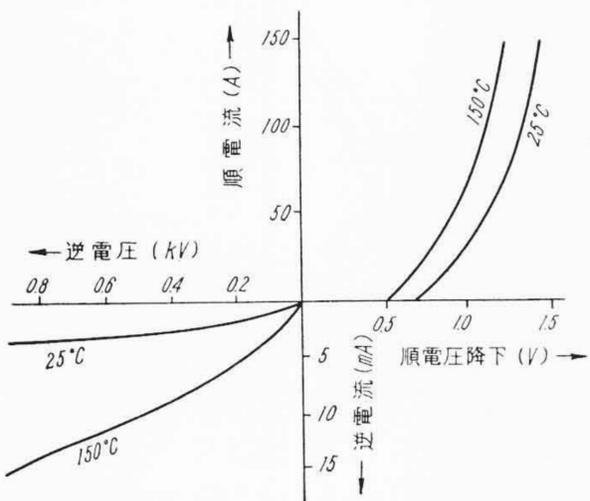
第7表に標準仕様を第14,15図にその外観を示す。本素子は国産シリコン整流素子として合金法で最初に実用化されたもので、使用実績も最も多くその運転成績はきわめて好調である。記録的大容量



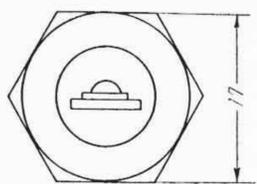
第15図 SN14形シリコン整流素子



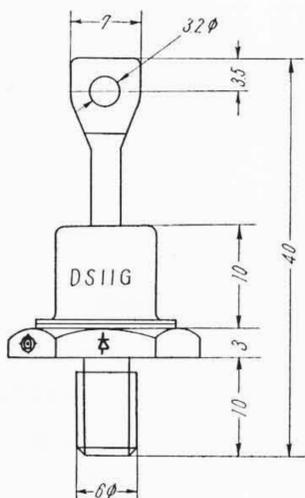
第14図 SN14形シリコン整流素子寸法



第16図 SN14形シリコン整流素子順逆特性



第18図 DS11形シリコン整流素子



第17図 DS11形シリコン整流素子寸法

器であるアルミニウム製錬用 320V 112,500A シリコン整流器は本素子により構成され、昭和35年3月以来無事故で連続運転中である。第16図にその静特性を示す。

5.5 DS形 10A 整流素子

第8表に標準仕様を第17, 18図にその外観を示す。本素子は通信機、電源蓄電池充電、保護制御回路などに使用されるもので、拡散法により逆流は極度に小さく、外形寸法も小形に作られている。本素子による標準スタックを設けて使用上の便をはかった。第9図に素子の静特性を示す。

5.6 DV形 1A 整流素子

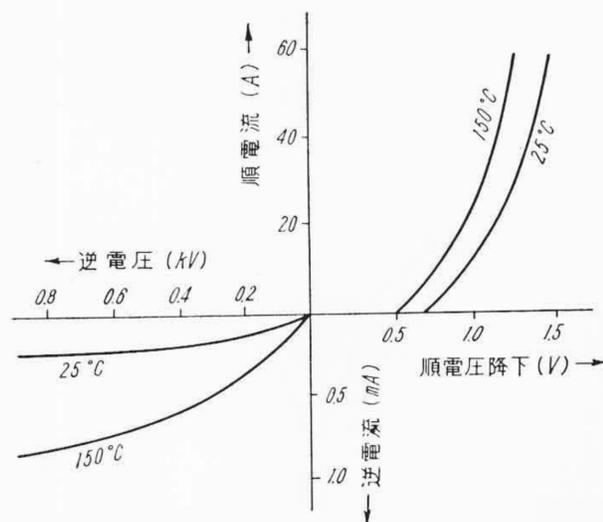
DS形と同様、通信機電源、磁気増幅器回路などの保護制御回路

第8表 DS11形シリコン整流素子標準仕様

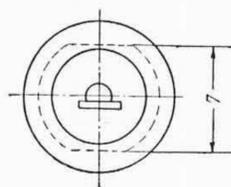
形 式	DS11C	DS11E	DS11G
最大許容せん頭逆電圧(PIV)	200V	400V	600V
最大許容瞬時逆電圧	300V	500V	750V
順方向電流 最高動作温度	5~20A (使用条件による) 150°C		

第9表 DV11形シリコン整流素子標準仕様

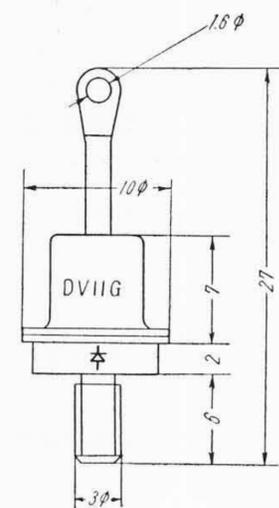
形 式	DV11C	DV11E	DV11G
最大許容せん頭逆電圧(PIV)	200V	400V	600V
最大許容瞬時逆電圧	300V	500V	750V
順方向電流 最高動作温度	1~3A (使用条件による) 150°C		



第19図 DS11形シリコン整流素子順逆特性



第21図 DV11形シリコン整流素子



第20図 DV11形シリコン整流素子寸法

に使用されるもので、拡散法により接合は作られ逆流はきわめて小さい。従来のセレン整流素子に代り各分野で広く使用される素子である。第9表に標準仕様を第20, 21図にその外観を示す。本素子による標準スタックを設けて、使用上の便をはかった。

6. 制御極付シリコン整流素子

制御極付シリコン整流素子は、格子制御放電管に似たスイッチング特性をもった半導体素子である。一名固体サイラトロンともいわれ、1958年アメリカGE社から発売されたがそのすぐれた性能のため、その応用分野は広く、スイッチング素子として計算機に、制御回路に多く利用されるのを始め、周波数変換装置、電動力応用、調光装置などに用いられ、SCRの出現によって電力応用技術に革命が

第10表 CR12形制御極付シリコン整流素子標準仕様

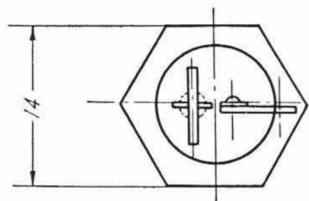
形式	CR12A'	CR12A	CR12B	CR12C'	CR12C	CR12D'	CR12D	CR12E
最大許容せん頭逆電圧(V)	25	50	100	150	200	250	300	400
最小順方向ブレークオーバー電圧(V)	25	50	100	150	200	250	300	400

定格電流 16A, 最大ゲート電力(平均値) 0.5W, 最大ゲート電圧(順方向) 5V, 最高動作温度 100°C

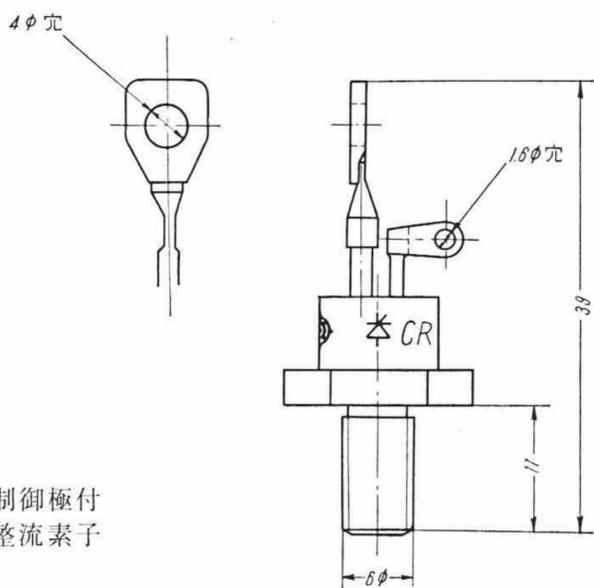
第11表 CN12形制御極付シリコン整流素子標準仕様

形式	CN12A'	CN12A	CN12B	CN12C'	CN12C	CN12D'	CN12D	CN12E
最大許容せん頭逆電圧(V)	25	50	100	150	200	250	300	400
最小順方向ブレークオーバー電圧(V)	25	50	100	150	200	250	300	400

定格電流 50A, 最大ゲート電力(平均値) 0.5W, 最大ゲート電圧(順方向) 5V, 最高動作温度 100°C



第22図 CR12形制御極付シリコン整流素子



第23図 CR12形制御極付シリコン整流素子寸法

もたらされるといわれるほどである。SCRの構成およびその作用に関してはいくつかの論文が出ており⁽³⁾また応用に関しては別稿「制御極付シリコン整流素子の応用」で発表されているので、ここではSCRの特長と日立CR形素子CN形素子の特性について紹介する。

6.1 SCRの特長

特長を列記すると次のとおりである。

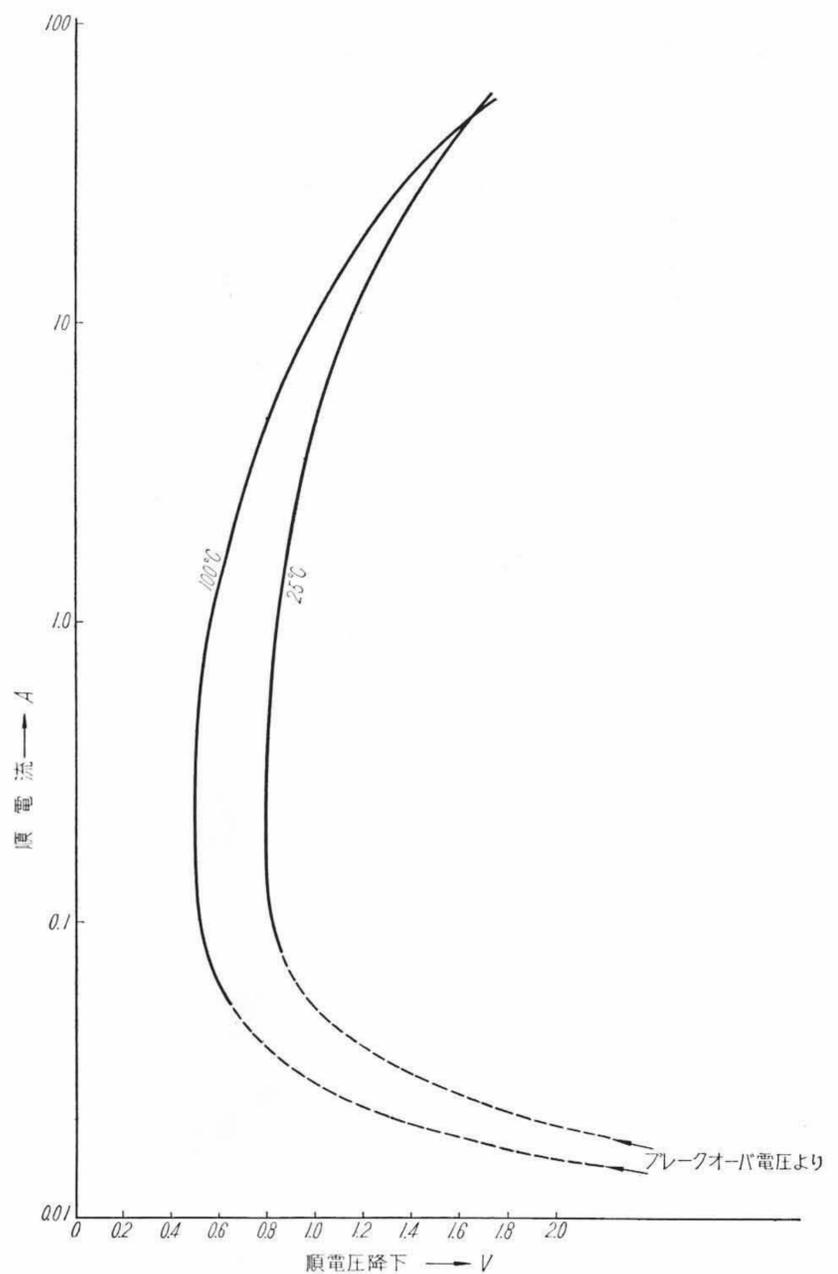
- (1) p-n-p-nの4層より成る接合で構成されているため構造が簡単である。
- (2) 小形であり、0.1W以下のわずかの制御電力により数キロワットの電力を制御することができる。
- (3) 通電時の電圧降下は小さく、損失が少ない。
- (4) スイッチング速度は回路によって異なるが、非常に速く、Turn-on 時間は5μs以下、Turn-off 時間は10~100μs程度である。
- (5) 動作温度は-65°Cから+100°Cまでの広範囲であるため、低温でも特に保温する必要はない。
- (6) ほかの半導体整流器と同じく定格内での使用に対しては非常に長い寿命が期待される。

6.2 CR形16A SCR素子

第10表に標準仕様を、第22図に外観、第23図に外形寸法を示す。

(1) 逆方向特性

逆方向特性はpn接合の逆方向とよく類似しており、逆電圧と逆



第24図 CR12形SCR順方向特性(代表例)

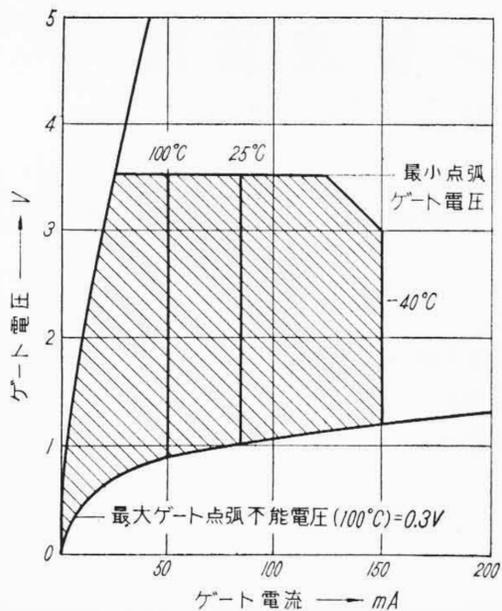
電流によりいくつかの電圧階級に分類している。接合部温度が100~125°Cの近傍では逆電流は指数関数で増加の傾向があり、またゲート電流によって逆電流が大きくなる性質があるため、あまり逆流が大きくなると接合の温度上昇が大きくなって Thermal Runaway の原因となることがある。

(2) 順方向特性(Offの状態)

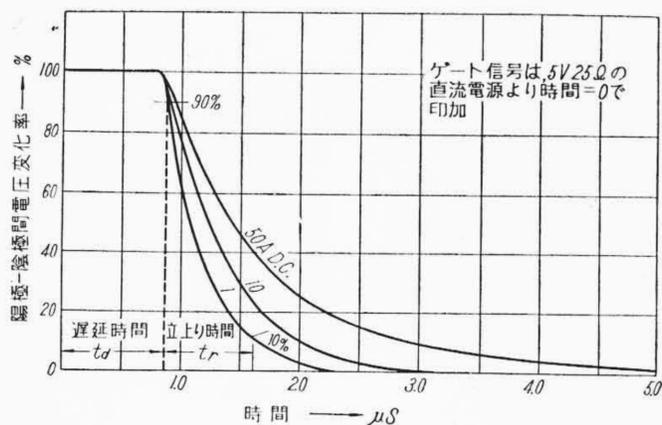
Breakover するまでの順方向特性は逆方向と同じくわずかの飽和電流が流れる。阻止電圧 V_{B0} は温度の影響を受け、温度上昇に伴って低下するので、仕様は最高温度における最低の V_{B0} で決められる。

(3) 順方向特性(Onの状態)

電圧が V_{B0} をこえると電流は急に流れやすくなり、p-n接合の順方向特性と同じように負荷と入力電圧で決まる電流が流れ、その特性は第24図に示したように低い値となる。約0.1A以下では、電流が減ると電圧が高くなって負性抵抗を示すが、これは on



第25図 CR 12形 SCR 点弧特性



第26図 CR 12形 SCR Turn on時間(代表例)

から off に移行し始めるからである。

(4) 点弧特性

V_{B0} はゲートから陰極に電流を流すことによって低くなるので、点弧を制御することができる。この点弧は広い温度範囲にわたってゲートの定格内で确实安定に行う必要があり、 V_{B0} の温度による変化および個々についてのばらつきがあるので使用の際は注意せねばならない。点弧特性を第25図に示す。

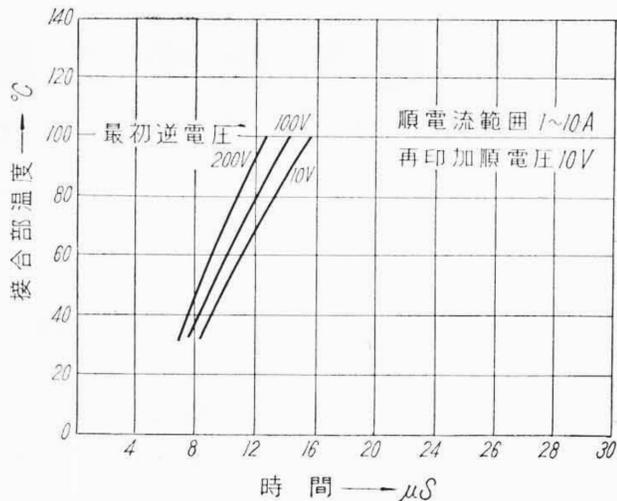
V_{B0} をこえてスイッチしたり、ゲートに逆方向に電圧をかけると素子は劣化することがあるので、これを防ぐ必要がある。

(5) スイッチング速度

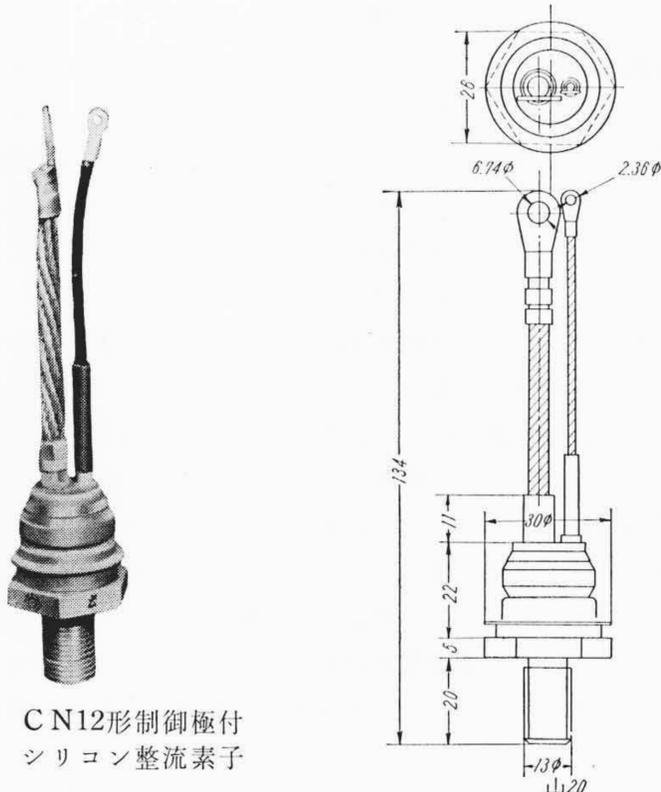
素子の Breakover すなわち off の状態から on の状態へスイッチする Turn-on 時間を第26図に示す。逆に off の状態から on の状態へスイッチする Turn-off 時間は第27図に示すとおり、電圧と接合部温度に左右され電流値にはあまり影響されないが、大電流になると若干長くなる傾向がある。

6.3 CN形 50A SCR 素子

第11表に標準仕様を、第28図に外観を示す。CR形 16A SCR 素子に次いで完成された素子で電流容量が大きいので電力用としての応用分野が広い。各特性についてはその傾向がまったくCR形と同様であるためここでは省略する。



第27図 CR 21形 SCR Turn off時間(代表例)



第28図 CN 12形制御極付シリコン整流素子

第29図 CN 12形制御極付シリコン整流素子

7. 結 言

電力用シリコン整流素子と制御極付シリコン流整素子の各特性を中心にその概要を紹介した。シリコン整流器はすでに数多の運転実績が出て完全に実用期に入った。素子の種類も3Aから500Aに至る系列を完成して量産化されているので価格も低廉となり、また制御極付シリコン整流素子も実用化されて間もないが、すぐれた特性から応用分野は非常に広く、急速な発展が期待される。

製造技術も急速に進歩しているので、さらに特性は向上し小形化するであろう。需要家各位のご指導をお願いする次第である。

参 考 文 献

- (1) 中戸川, 小川: 日立評論 別 32, 14 (昭 34-11)
- (2) R. F. Dyer: AIEE DP 59-670
- (3) たとえば R. W. Aldrich and N. Holonyak: Proc. of IRE 46, 1236 (Jun. 1958)
- M. Mackintosh: Proc. of IRE 46, 1229 (Jun. 1958)