

平形シリコン整流素子

加藤 幸二郎*

Kojiro Kato

Disk Type Silicon Power Diode

Synopsis

At present, the "stud type", which has a hexagonal base equipped with a stud and a flexible lead, is the most popular silicon power diode construction. When we examine this construction in detail we find it is not the most logical from the viewpoints of cooling effect, mechanical strength, simplicity, polarity change, and economy.

Development of the disk type silicon power diode was based on a new concept. This remarkably improved construction eliminates the previous defects and permits further expansion of the field of application of silicon power diodes.

I. ま え が き

中容量ないしは大容量シリコン整流素子に対してスタッド付ベースと可とうリード線を有するいわゆるスタッド形構造が今日もっとも広く用いられており、これ以外の構造はほとんど顧みられないほどの状況であるが、シリコン素子構造の重要な諸条件、たとえば冷却効果、機械的強度、スタック構成の難易、小形軽量化、極性交換可否、材料価格などの観点からこの構造を検討すると必ずしも合理的であるとはいえない。むしろシリコンペレットと電極の接着などの製造工程による制約、素子交換の容易性の条件によって上記諸条件がかなり犠牲にされていることがわかる。

加圧接触形シリコン素子が開発され電極接着の問題が解消し、かつ素子の製造技術が格段に進歩し、高い信頼度が多数の素子の長期にわたる実績によって実証された現在では、より小形、軽量で、より経済的な整流器を作るためにこの構造は根本的に再検討されるべきであろう。

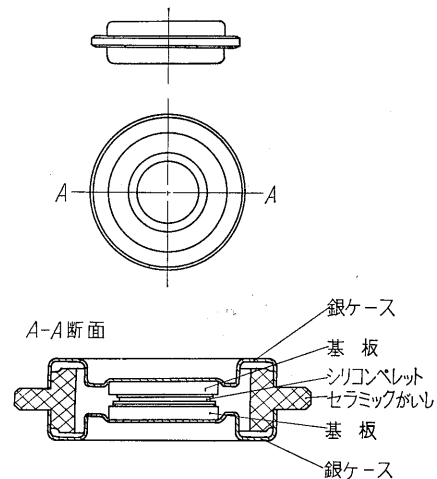
平形シリコン整流素子は加圧接触形シリコン素子の長所を活用し、従来のスタッド形素子の構造上の欠点を根本的に改良したものであって、将来の半導体素子構造の方向を示すものとして注目されるべきものである。

II. 構 造

1. 平形シリコン素子の構造概要

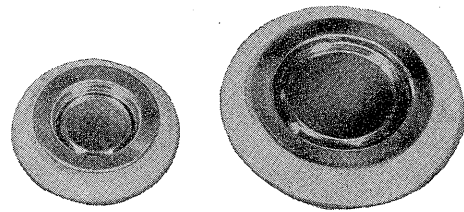
第1図に平形シリコン素子の構造を示す。シリコンペレットの両側にこれと膨張係数のほぼ等しい基板が接着されており、薄い銀板製のケースの中に收容されている。銀ケースと基板とは硬ろうなどで接着されてはおら

* 松本工場



第1図 平形シリコン素子構造

Fig. 1. Construction of disk type silicon power diode



第2図 平形シリコン整流素子

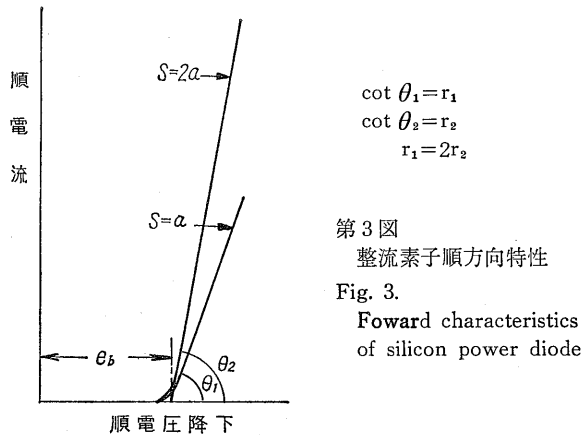
Fig. 2. Disk type silicon power diode

ず外部からの加圧力によって圧接されている。銀ケースは両側電極を兼ねており中間にはリング状のセラミックがいしがあって絶縁されている。

2. 両面放熱構造による内部熱抵抗の低減

シリコン素子の小形化、大容量化のためにまず問題となることは電流負担能力をいかにして高めるかということである。シリコン素子の電流負担能力は主として次の3点によって決まる。

- (1) 許容接合部温度

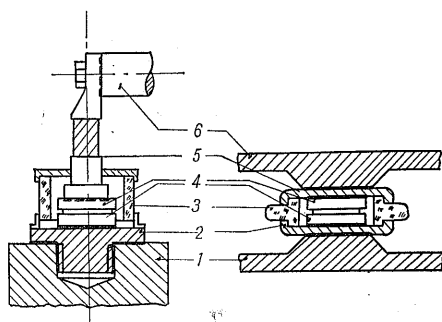


(2) 順方向特性および負荷電流によってきまる順方向損失

(3) 接合一ベース間およびベース一周囲間熱抵抗

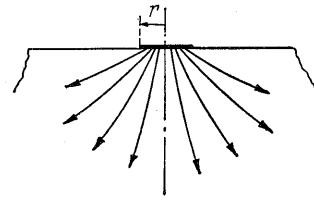
許容接合部温度は高温における逆漏れ電流の低減，接合表面の保護による劣化防止，エレメント接着部分の熱疲労によってきまり，p-n 接合の製法改良，表面処理方法の改善，加圧接触機構の採用によって向上する．順方向特性は主として p-n 接合面積を増すことによって改善され，第3図に示されるように微分抵抗 r は p-n 接合の面積 s に反比例する．しかし順電圧降下の中には電流密度に関係のない障壁電圧 e_b が含まれており，定常負荷電流の範囲では e_b はかなり大きな割合を占めるので面積を大きくしても同一電流に対する順電圧降下はあまり小さくならず，したがって順方向損失も面積の割合には低減しない．

接合一ベース間熱抵抗 R_{jb} は接合面積を大きくすれば当然低減する．スタッド形素子における熱放散の大部分はベース側から行なわれ，リード側からの放熱は無視し



第4図 整流素子の電流および熱径路
1: 冷却体, 端子 3: 絶縁物 5: 上部電極
2: 下部電極 4: 整流片 6: 端子
(b)の場合冷却体を兼ねる)

Fig. 4. Current and heat path of silicon power diode



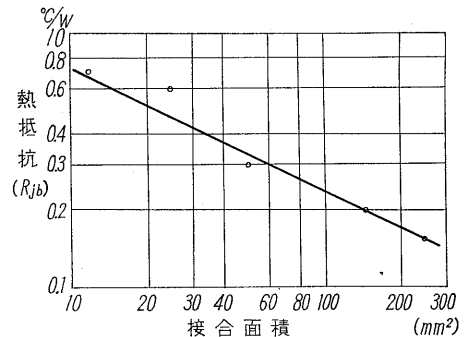
第5図
円板状熱源から半球への放熱
Fig. 5.
Thermal conduction
from disk to hemisphere

得るので第5図に示されるような無限大半球に対する半径 r の円板状熱源からの広がり熱抵抗によって R_{jb} を近似的に推定し得る．広がり熱抵抗 R_v は次式で示され円板状熱源の半径，すなわち面積の平方根に反比例する．

$$R_v = \frac{1}{4\lambda r}$$

λ : 無限大半球材料の熱伝導率

実際の素子構造は無限大半球とは異なり，かつシリコンペレットと銅ベースとの間に他の材料も介在するのでこの理論式どおりにはならないが，従来製品化されたスタッド形素子の内部熱抵抗と接合面積の関係からも $R_{jb} \propto 1/\sqrt{F}$ の関係が肯定される(第6図参照)．

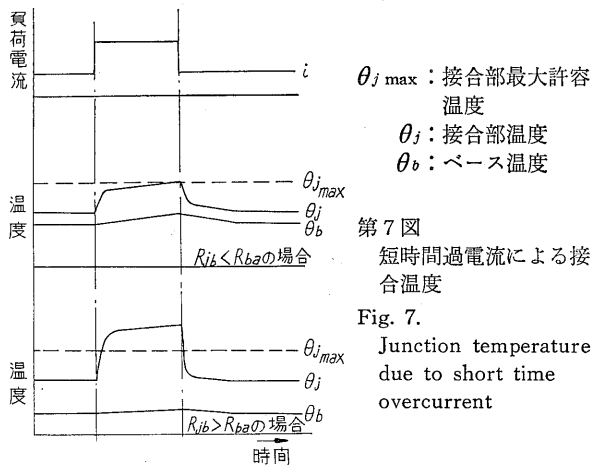


第6図 接合面積と熱抵抗
Fig. 6. Relationship between junction area and thermal impedance

ベース一周囲間の熱抵抗 R_{ba} は主として冷却体構造および冷却方式によってきまる．冷却体を大形にし強制風冷ないしは油，水冷方式を採用すれば R_{ba} は低下するが外形，重量，コストおよび R_{jb} とのバランスの問題があり， R_{ba} のみを極端に低減することはできない．シリコンペレットの熱容量はベース，冷却体のそれに比べて著しく小さいため， $R_{jb} \gg R_{ba}$ であれば短時間過電流に対して接合一ケース間の温度差が大きくなり接合部温度が短時間で許容値をこすため過電流耐量が著しく小さくなる．したがって普通の素子では大体次の関係が成り立っている．

$$R_{jb} \leq R_{ba}$$

以上の考察からスタッド形素子では接合面積を大きくし素子を大形にしても，その割合には電流負担能力が増えず，かえって不経済となってくることがわかる．



第7図
短時間過電流による接合温度
Fig. 7.
Junction temperature due to short time overcurrent

第4図(b)のような両面放熱構造では熱放散径路から容易に推定されるように、同じ接合面積に対し R_{jb} はスタッド形素子のほぼ1/2となる。この場合には順方向損失は低減しなくても R_{jb} の低減で補うことが可能であり、また R_{jb} の減少に見合って冷却体の大形化、水冷、油冷方式の採用により R_{ba} を低減させ小さな接合面積で大電流を整流することが可能である。

3. 機械強度および重量

半導体素子は従来の真空管、水銀整流器などに比し機械強度、耐震性の点で著しくすぐれているが、応用分野の拡大とともにこれらの要求もますます過酷なものとなり、たとえばきわめて長時間の連続振動、数千Gに及ぶ円心加速度、衝撃に耐えることを要求される場合も少なくない。このような場合従来のスタッド形素子では、重くかつ過度の振動によって切れやすいリード線が弱点となる。スタッド形素子ではさらにスタッドを冷却体にねじこむために、かなりの機械強度が必要となるため銅製の厚いベースが用いられており、素子の重量がかなり大きくなる。

平形素子ではリード線も厚い銅ベースも不要であり、シリコンエレメントが薄い銀板を介して両側放熱体により締め付けられる構造であるから従来の素子の1/10以下という軽量であり、耐震、耐衝撃、耐円心加速度の点で格段にすぐれている。

4. 絶 縁

特にほこり、有害ガス、塩分などを多量に含むふんい気強制風冷式で使用する場合、陽極、陰極間の絶縁がいし表面の汚れによる耐圧不良が問題となることがあり、この沿面距離ができる限り大きいことが望ましい。

スタッド形素子では沿面距離を大きくする場合、素子の高さまたは直径を大きくする必要があり、いずれの場合も素子およびスタックの外形、重量、互換性に影響が

大きく簡単ではない。

平形素子では第1図に示すような断面のリング状がいしの使用が可能で、中央突起の両側面が沿面を形成するので同一の外径に対して沿面が2倍以上となる。さらにリングの外径はスタックの大きさにあまり影響を及ぼさないで沿面距離はかなり自由に増大することができる。

5. 加圧接触機構

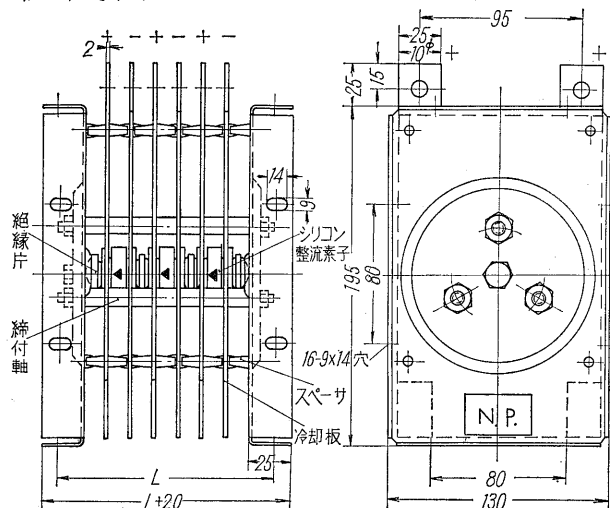
平形素子のケースと基板との間には軟ろうないしは硬ろうによる接着部分が全然存在せず、外部から加えられる圧力によって圧接されている。したがって加圧接触形素子の場合と同様に温度サイクルによるろう材の熱疲労の心配が全くない。

加圧接触形素子 Si 250.3 に比較すると平形素子の場合には加圧を個々の素子ごとに行なう必要はなく、スタック構成の際多数の素子に一組の加圧機構を設ければよいので構造は一段と簡単になっている。

6. 整流スタックの構造

基本的な整流スタックの構造を第8図に示す。

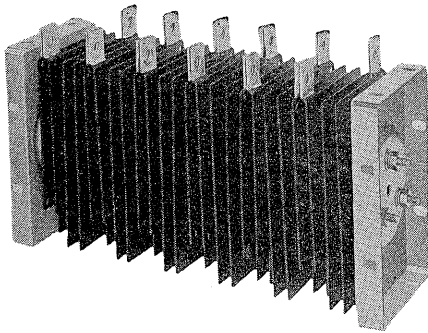
平形素子の両側に接触板を有する冷却板を当てたものをユニットとし数個のユニットを積み重ねて両端に支持板を置き、絶縁パイプで被覆された3本のボルトで一括



本図はKS110...3PJ2の場合を示す
平形シリコン整流スタック寸法表

形 名	寸 法 L
KS110...2PJ 2	98
KS110...2PJ 3	154
KS110...3PJ 2	126
KS110...3PJ 3	210
KS110...4PJ 2	154
KS110...4PJ 3	266
KS110...6PJ 2	210
KS110...6PJ 3	378

第8図 平形シリコン整流スタック外形寸法図
Fig. 8. Outline of disk type silicon rectifier stack



第9図 平形シリコン整流スタック
Fig. 9. Disk type silicon rectifier stack

して締め付けてある。支持板の締め部には皿ばねが用いられ、締め力がほぼ一定となるように考慮されている。平形素子および接触板の両側面は充分な平行度が得られるように加工されているが多数の単体が積重ねられているので全体としての平行度が充分得られない恐れがあり、このために平形素子の接触面内の加圧力が不均一となり良好な熱抵抗が得られないことも考えられるので各ユニット間にレンズ状絶縁物をそう入し、球面による接触部を導入してこの問題を解決している。各素子はレンズ状絶縁物によってそれぞれ絶縁されており接続は外部で行なわれることが原則であるが場合によってはレンズ状導体を用いてスタック内部で直列接続したり、整流結線を構成したりすることもできる。この場合整流素子の極性交換が容易であることは非常に有利である。

取付板はそのまま冷却風胴の一部を構成し得るように考慮されている。

冷却板の一端には端子孔が設けられており外部リード線との接続がここで行なわれる。

平形素子が薄い板状の構造を有するため冷却媒体の循環を妨げない範囲で冷却板間隔を狭くし、冷却面積を増やすことが容易である。平板を平行に配置した冷却体構造は通風、通油による放熱体として理想的なものであり、高い熱交換効率と均一な冷却が得られる。

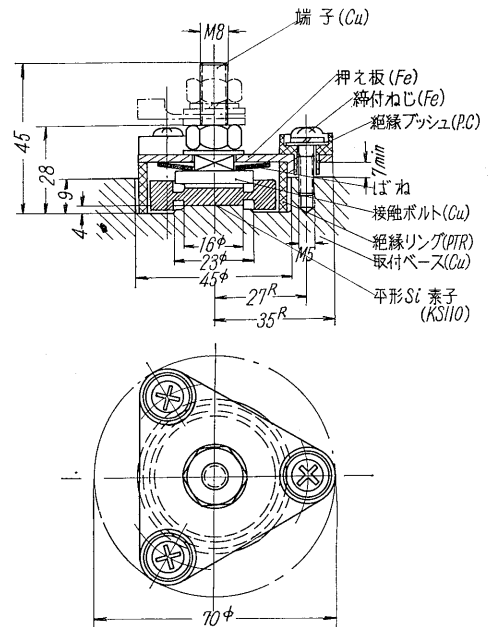
素子およびスタックの放熱効果が大幅に改善された結果、スタックの重量、所要空間も著しく小さくすることが可能となった。従来一般に用いられているスタッド形素子による、ほぼ同出力のスタックと比較すると第1表のような結果が得られる。

発電機の回転子、固定子に取り付ける場合の構造の一例を第10図に示す。この場合は主として片面からの放熱となるが薄い板状の構造であるため占積率がよいことと、機械強度がスタッド形素子に比較して格段にすぐれていることが有利である。

第1表 整流スタックの重量所要空間比較

Table 1. Comparison in weight and volume of rectifier stacks

整流スタック形名	KS 110 H 6 PJ 2	Si 50 F-T 6/1
直 流 出 力	500 V 350 A 175 kW	500 V 250 A 125 kW
重 量	6.7 kg	15 kg
所 要 空 間	230×220×130mm 6,600cm ³	290×270×285mm 22,300cm ³
kW当たりの重量 (g)	38.3	120
kW当たりの重量比	1	3.13
kW当たりの所要空間 (cm ³)	37.7	179
kW当たりの所要空間比	1	4.75



第10図 平形シリコン整流素子取付構造図 (KS 110)
Fig. 10. Mounting construction of disk type diode

III. 特 性

1. 定格および特性

平形シリコン整流素子 KS 110 H, KS 250 H の定格および特性を第2表に示す。

平形シリコン整流素子 KS 110 H を使用した標準スタックの定格を第3表に示す。

2. 諸特性の試験結果

1) 過電流耐量試験

第11図の原理回路により試料 KS 250 H に対し定格負荷状態よりあらかじめ規定された時間の過電流を流し、そのせん頭値を階段状に上昇させて破壊値を求めた。この結果を第12図に示す。

第2表 素子定格および特性

Table 2. Ratings and characteristics of disk type diodes

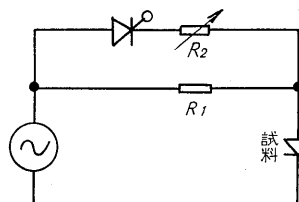
形名	KS 110H	KS 250H
せん頭逆耐電圧 (V_{peak})	1,200	1,200
サージ破壊電圧 (V_{peak})	>1,500	>1,500
逆漏れ電流 (mA_{mean}) 1,200V 正弦半波逆電圧 25°C	≤ 3	≤ 5
160°C	≤ 12	≤ 20
最大交流入力電圧 (V_{eff})	420	420
定格交流入力電圧 (V_{eff})	380	380
直流阻止電圧 (V)	540	540
順電圧降下 (V) 25°C	≤ 1.1 (DC 200A)	≤ 1.0 (DC 300A)
定格平均順電流 (A_{mean}) ケース温度 120°C 単相半波結線	180	280
半サイクルサージ電流 (A_{peak}) 50%正弦半波 定格負荷状態より	3,300	7,500
許容 I^2t 値 (A^2S) 定格負荷状態より	27,000	140,000
許容周波数 (%)	15~2,000	15~2,000
連続許容接合部温度 (°C)	160	160
連続許容ケース温度 (°C) 定格負荷状態	120	120
接合-ケース間熱抵抗 (°C/W) 陽極側	≤ 0.28	≤ 0.14
陰極側	≤ 0.40	≤ 0.20
素子重量 (g)	20	40

第3表 スタック定格

Table 3. Ratings of disk type rectifier stacks

交流入力電圧 (V_{eff})	結線方式	直流出力電圧 (V)	直流出力電流 (A)	スタック形名	素子数	冷却体形名	重量 (kg)
380	C	170	110(250)	KS 110 H 2 PJ 2	2	PJ 2	3.2
	C	170	170(360)	KS 110 H 2 PJ 3	2	PJ 3	5.0
	B	340	110(250)	KS 110 H 4 PJ 2	4	PJ 2	5.0
	B	340	170(360)	KS 110 H 4 PJ 3	4	PJ 3	8.7
	S	250	150(350)	KS 110 H 3 PJ 2	3	PJ 2	4.1
	S	250	240(500)	KS 110 H 3 PJ 3	3	PJ 3	6.7
	T	505	150(350)	KS 110 H 6 PJ 2	6	PJ 2	6.7
	T	505	240(500)	KS 110 H 6 PJ 3	6	PJ 3	12.2

注) 直流出力電流の括弧内数値は風冷(風速 6m/s)の場合に適用する。



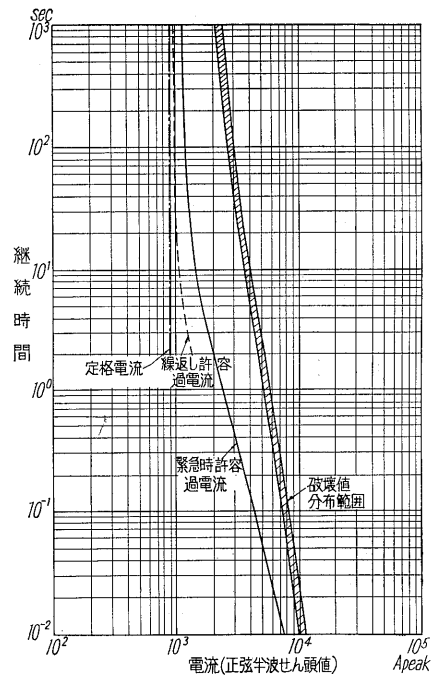
第11図 過電流耐量試験回路

Fig. 11. Test circuit for overcurrent characteristic

R_1 : 定常負荷電流を流すための抵抗
 R_2 : 短時間過電流を流すための抵抗

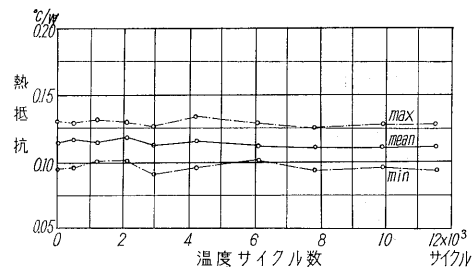
2) 温度サイクル試験

試料 KS 250 H を用い、約 100°C の沸とう水中に 1 分間、次いで約 0°C の冷水中に 1 分間素子を投入し、これ

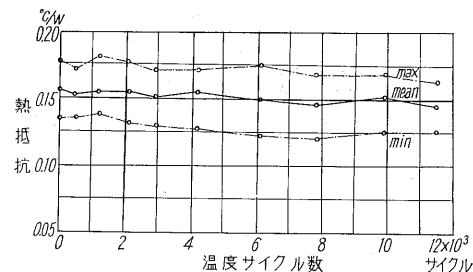


第12図 KS 250 過電流耐量

Fig. 12. Relationship between overcurrent and time



(a) 陽極側



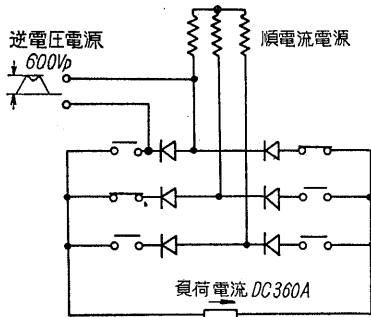
(b) 陰極側

注) 30個の試料の最大平均最小値を示す

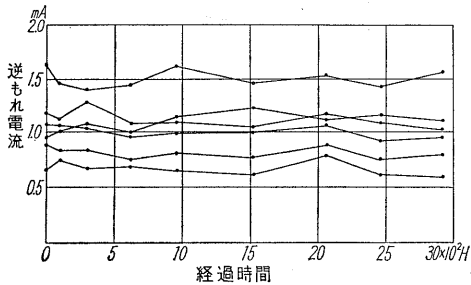
第13図 温度サイクル試験における熱抵抗経過

Fig. 13. Test result of thermal impedance for temperature cycles

を1サイクルとして約1万サイクルの温度変化を与え、この間の接合-ケース間熱抵抗経過を測定し、かつ試験前後の素子の気密度をヘリウムリークテスタにより測定した。熱抵抗の経過は第13図に示すようにほとんど測定誤差範囲の変動にとどまり、気密度にも全く異常が認



第14図 等価負荷試験回路
Fig. 14. Equivalent load test circuit



第15図 等価負荷試験中の逆電流経過
Fig. 15. Reverse current during equivalent load test

められなかった。

3) 等価負荷試験

第14図に示す等価負荷試験回路を用いて長期間にわたり多数の素子の通電試験を行ない、主として逆漏れ電流の経過を測定して信頼度を確認した。結果の一例を第15図に示す。

従来の素子と同等の高い信頼度を有することが実証された。

IV. 応用分野

平形シリコン整流素子は前述のようにほぼ理想的な構造を有するためスタッド形整流素子の応用分野のほとんどすべてに適用可能であり、かつ従来困難とされていた

範囲にまで適用される。さらに平形素子の使用によって、シリコン整流器の構造、冷却方式に画期的な進歩もたらされるものと期待される。

現在考えられている応用分野のうち主要なものは次のとおりである。

- (1) 数百アンペア数千アンペア程度の中小容量の整流スタックの構造を簡易、小形、軽量化する。特に直流アーク溶接器、交流自励発電機励磁用整流器などに適用される。
- (2) 電鉄地上変電所用整流器にて、従来の風冷式スタックでは不適当な場合、たとえば低騒音を要求される場合、完全な無人運転の場合、有害ガスなどにより絶縁物の劣化が懸念される場合などには平形素子による油入自冷、または油入風冷式整流器が有利である。
- (3) 車両用シリコン整流器において風冷式スタックでは雨水、雪、ほこりなどの侵入が著しいため絶縁耐圧の低下が起り、また寒冷地では風取入口のフィルタに雪が凍結し、風量低下の問題を生ずることがある。この場合には油入風冷式整流器として、高圧導電部をすべて油タンク中に收容することが合理的である。
- (4) 交流ブラシレス発電機においては回転子にシリコン素子を組み込むため、数千Gにも達する円心加速度、衝撃力に耐えることを要求されることがあり、平形素子ではこれらの機械強度を十分に満足する。

参考文献

- (1) 森, 加藤: 加圧接触形シリコン整流素子
富士時報 38 No.3 (昭40)
- (2) Karl Heinz Geiyer, Heinz Martin: Silizium-Scheibenzellen und Silizium-Gleichrichter säulen.
Siemens Z. April 1963 Heft 4.
- (3) Adolf Herlet, Arnulf Hoffmann: Flächengröße und Strombelastbarkeit von Thyristoren.
Siemens Z. März 1965 Heft 3.



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。