

富士高耐压大容量サイリスタEGS 03-40

Fuji High-voltage, Large-current Thyristor EGS 03-40

橋本 理* Osamu Hashimoto・大衛建也* Kenya Ohhira・遠藤勝弘* Katsuhiko Endoh

佐藤安行* Yasuyuki Satoh・松沢秀美** Hidemi Matsuzawa

I. まえがき

高圧サイリスタ変換装置の小形化と高信頼化への指向、また高品質大口径シリコン単結晶の実用化により、高耐压大容量サイリスタの進歩は最近著しい。

当社においても、アーク炉用フリッカ防止装置、系統連係用周波数変換装置、同期電動機用始動装置などの高圧変換装置に2,500 V 1,000 A 級サイリスタ (EGR 03-25) が積極的に使用され、2,500 V 400 A 級サイリスタ (KGP 02-25) に比べ装置全体の小型化、高信頼化に大きく寄与している。しかし、これらの高圧変換装置ではサイリスタの直列個数が多く、装置全体として一層の小型化、高信頼化及びコストダウンを図るために、より高耐压大容量サイリスタへの要望が強い。

また、鉄鋼圧延機用直流モータの電圧定格を750 V から1,200 V にアップし、直流モータの小型化、高出力化を図る計画があることや、アルミ製錬用電解装置などの化学電解装置の高圧化への気運が強いことなどから、この面でも、高耐压大容量サイリスタの開発要望が強くなっている。

本稿では、このような背景に基づき、65mmφの中性子照射結晶を使用して開発、製品化した4,000 V 1,000 A 級サイリスタ (EGS 03-40) の製造技術及び定格特性について紹介する。

II. 素子の設計及び製造技術

高耐压大電流サイリスタを開発するに当たって、特性面における主なポイントは、

- 1) 耐压特性の確保
- 2) オン電圧の増大防止
- 3) di/dt 耐量の向上
- 4) dv/dt 耐量の向上
- 5) ターンオフ時間の短縮
- 6) 逆回復電荷の低減

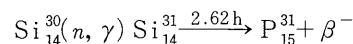
などが挙げられる。今回開発した4kV 1,000 A サイリスタは、従来の2.5kV 1,000 A サイリスタに比べ耐压が1.6 倍程高い。そのため、耐压を維持するベース層の厚みが増大し、特性面で1)と4)項を除く上記項目が悪化する傾向になる。これらの特性を改良するための製造面

からの方策は、

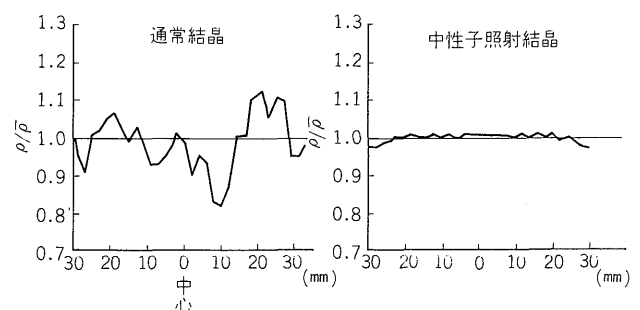
- 1) 中性子照射結晶の適用
 - 2) 特殊表面形状の開発
 - 3) 高水準ライフタイムの確保とライフタイムキラーの最適制御
 - 4) 特殊ゲート構造の採用
 - 5) カソードショートパターンの最適設計
- などが挙げられる。以下、これらの項目について説明する。

1. 中性子照射結晶の適用

シリコンウェハの厚みを極力小さく抑えるために、4kV 1,000 A サイリスタには中性子照射結晶を適用した。中性子照射結晶は高純度シリコンに中性子を照射し、 Si^{30} 原子を P^{31} 原子に核変換させ、シリコン中にりん原子をドーピングさせる方法で製造される。



Si^{30} は天然のシリコン中に約3%，均一な分布で存在する。中性子照射によりこれを一部りん原子に変えると極めて均一な比抵抗分布をもったシリコン単結晶が得られる。第1図に通常結晶と中性子照射結晶の4端子法で測定した比抵抗分布を示す。中性子照射結晶は比抵抗のばらつきが極めて小さく、通常結晶にみられる比抵抗の部分的な低下による耐压低下はほとんどみられない。このため、中性子照射結晶を適用した本サイリスタではほぼ理論耐压を得ることができ、通常結晶使用の素子には必要であったシリコン厚みの余裕分を大幅に減少させることができた。



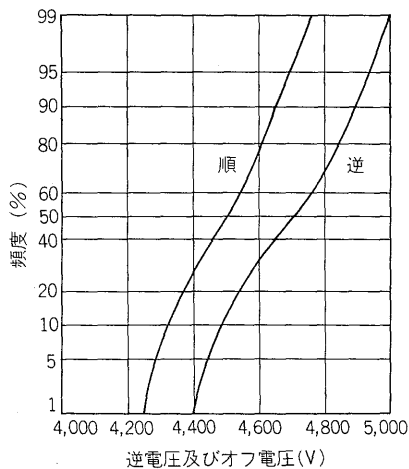
第1図 通常結晶と中性子照射結晶の比抵抗分布
Fig. 1. Typical lateral resistivity distribution in conventional and neutron-irradiated silicon crystals

* 中央研究所 第五部 ** 松本工場 第二製造部

2. 特殊な表面形状の開発

高耐圧サイリスタの表面形状は、通常、二段ベベルになっている。2.5kV サイリスタの負ベベル角は数度である。しかし、4kV サイリスタの表面耐圧を安定に確保するためには、この角度を1°以下に抑える必要がある。一方、この角度が小さいとベベル部分の面積が大きくなるため、有効カソード面積が減少してしまう。このサイリスタを開発するに当たり、耐圧を維持する領域は1°以下の負ベベル構造とし、耐圧の維持に無関係な領域の角度を大きくする表面形状とすることにより、有効カソード面積の減少を極力抑えた。

この特殊な負ベベル構造の開発により、オフ電圧と逆電圧の比が約0.95となり、良好な耐圧特性上の対称性が得られた。第2図にオフ電圧と逆電圧の分布を示す。また、1°以下の負ベベル構造であるにもかかわらず有効カソード面積の減少は極めて少ない。

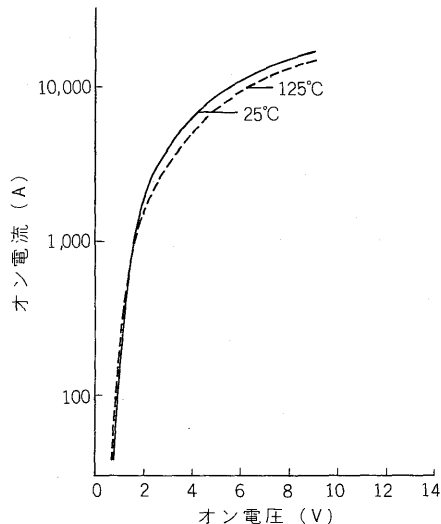


第2図 逆電圧及びオフ電圧の分布
Fig. 2. Distribution of reverse voltage and off-state voltage

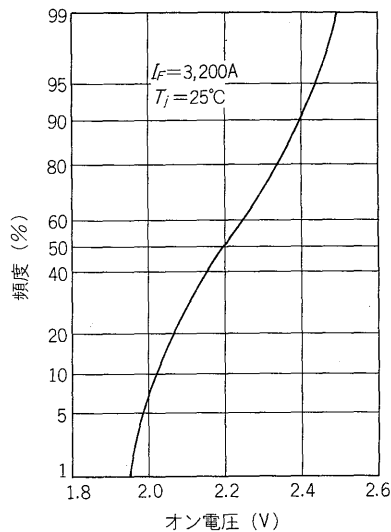
3. 高水準ライフタイムレベルの確保とライフタイムキラーの最適制御

4kV 1,000 A サイリスタは、2.5kV 1,000 A サイリスタに比べシリコンウェハが厚くなり、直径もまた大きくなっているため、ライフタイムレベルを低下させる要因を多く含んでいる。本サイリスタの製作に当たって、オン電圧に大きな影響を及ぼすライフタイムレベルを各拡散工程で高水準に維持するために、拡散温度プロファイルの最適化と前処理工程の改良を実施し、ライフタイムレベルを大幅に改善した。また、シリコンウェハと支持板との合金工程の検討により、高水準のライフタイムレベルを悪化させないような拡散以降の工程を確立した。第3図にオン電圧-電流特性、第4図にオン電圧の分布を示す。

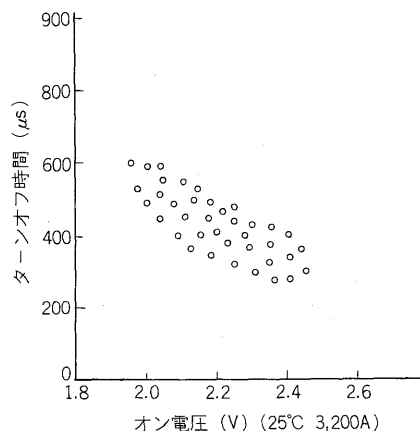
一方、応用面からの要求によりターンオフ時間を800 μ s以下に制御する必要があり、ライフタイムキラーの導入



第3図 オン電圧-電流特性
Fig. 3. On-state characteristics



第4図 オン電圧の分布
Fig. 4. Distribution of on-state voltage



第5図 ターンオフ時間とオン電圧の相関
Fig. 5. Turn-off time vs. on-state voltage

を行っている。しかし、多量のライフタイムキラーの導入は、オン電圧の増大を招き好ましくない。このため、オン電圧の増大を極力小さく抑えてターンオフ時間だけを短縮できるライフタイムキラーの導入法を確立した。第 5 図にターンオフ時間とオン電圧の関係を示す。

4. 特殊ゲート構造

di/dt 耐量を決定する大きな要因の一つにゲート構造がある。特に高耐压大電流サイリスタにおいては di/dt 責務で発生するターンオン損失が大きく、この損失をどのようにして広い領域で分担させるかが設計のポイントになる。

本サイリスタでは従来のゲート構造パターンを改良し、初期点弧面積を広くとれるように考慮をした。このため di/dt 損失の単位面積当たりの負担を軽減でき、実使用時に発生する di/dt 責務に対して十分余裕のある設計となっている。また赤外線温度計によって di/dt 責務で発生するホットスポットの温度を実測し、ホットスポットの温度は十分低く抑えられていることを確認している。

5. カソードショートパターンの最適設計

急しゅんなオフ電圧をサイリスタに印加すると、 $C_j \frac{dv}{dt}$ (C_j :サイリスタの接合容量)の変位電流が流れる。この変位電流をカソード接合を通さずに外部に引き出すことによって、 dv/dt 耐量を上げることができる。一般にカソードショート孔がこの役目をしている。一方、 dv/dt 耐量を高めるために、カソードショート孔の密度を高めると電流広がり速度が低下し、 di/dt 耐量が小さくなるのでカソードショート孔の大きさ、配置、密度の決定に際しては十分注意を払う必要がある。このような観点から赤外線観測法を駆使して基礎的検討を行い、カソードショートパターンについて最適な設計を行った。

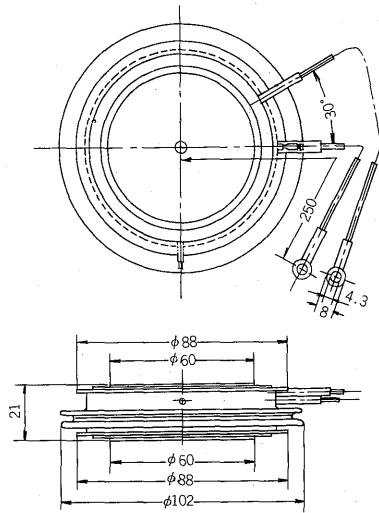
III. 構造

4kV 1,000 A サイリスタ EGS 03-40 の外形図及び外観写真を第 6 図に示す。平形構造を採用し、エレメント、内部電極及び外部電極はすべて加圧接触で支えられているため、間欠負荷通電などの熱疲労に対して強い構造となっている。

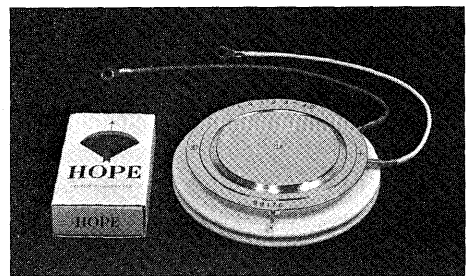
また、シリコンと支持板の合金時における温度プロフィールを改良し、熱膨張係数の差によるエレメントの曲りについて十分な検討を加えた結果、第 7 図に示すように 3 トンの加圧力で十分実使用できる熱抵抗を確保している。

IV. 定格と特性

スイッチング特性に特別の考慮を払い、ライフタイムレベルの最適制御法を確立し、中性子照射結晶の適用により、各特性間でバランスのとれた 4kV 1,000 A サイリ



(a) 外形図

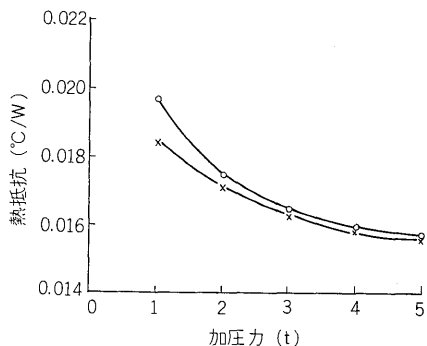


(b) 外観

第 6 図 EGS 03-40 の外形図及び外観
Fig. 6. Exterior size and view of thyristor EGS 03-40

第 1 表 EGS 03-40 形サイリスタの定格及び特性
Table 1. Ratings and characteristics of EGS 03-40 thyristor

項 目	EGS 03-40
ピーク繰返し逆電圧	4,000 V
ピーク繰返しオフ電圧	4,000V
ピーク非繰返し逆電圧	4,400V
臨界オフ電圧上昇率(dv/dt)	1,500V/ μ s(1/2 PFV, $T_j=125^\circ$ C)
オン電圧	2.5V(25 $^\circ$ C, 3,200A)
平均オン電流	1,000A(正弦半波 180 $^\circ$ el 導通, $T_c=75^\circ$ C)
臨界オン電流上昇率(di/dt)	200A/ μ s(1/2PFV からターンオン $T_j=125^\circ$ C)
せん頭ターンオン電流	200A(1/2PFV からターンオン $T_j=125^\circ$ C)
サージオン電流	17,500A(50Hz ベース, 1 サイクル定格負荷)
保持電流	300 mA ($T_j=25^\circ$ C)
逆電流	120mA(ピーク繰返し逆電圧 $T_j=125^\circ$ C)
オフ電流	120mA(ピーク繰返しオフ電圧 $T_j=125^\circ$ C)
接合温度	-40 ~ 125 $^\circ$ C
保存温度	-40 ~ 125 $^\circ$ C
熱抵抗	0.018 $^\circ$ C/W(平滑, 接合部-基準点間)
ゲートトリガ電圧	2.5V($T_j=25^\circ$ C)
ゲートトリガ電流	250mA($T_j=25^\circ$ C)
ゲート非トリガ電圧	0.2V($T_j=125^\circ$ C)
ゲート非トリガ電流	10mA($T_j=125^\circ$ C)
平均ゲート損失	20 W
せん頭ゲート損失	70 W(パルス幅 \leq 100 μ s)
ゲート逆電圧	10V
ターンオン時間	10 μ s(ゲート電流 1Apeak, 0.5A/ μ s)
ターンオフ時間	400 μ s(Typ) ($T_j=125^\circ$ C)
加圧力	3 t
重量	700 g



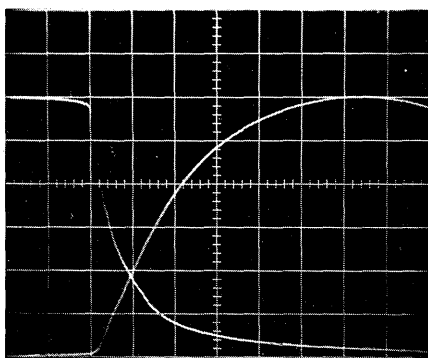
第7図 熱抵抗の加圧力依存性
Fig. 7. Contact pressure dependence of thermal resistance

スタ EGS 03-40 を開発した。第1表に一般定格特性を示す。

以下に、高耐圧・大電流サイリスタとして特に重要な特性である動特性を中心に、主要点を述べる。

1. di/dt 耐量

第8図に di/dt 耐量試験時の電圧電流波形を示す。本試験では並列 RC スナバ回路から流入するターンオン電流を重畳している。第2表に di/dt 耐量試験結果を示す。初期点弧面積の増大によって、保証値であるターンオン電流 200 A, di/dt = 200 A/μs に対して余裕のある耐量を有している。



縦軸：電圧400V/div
電流400A/div
横軸：時間1 μs/div

第8図 di/dt 耐量試験波形
Fig. 8. Voltage and current wave-forms in di/dt test

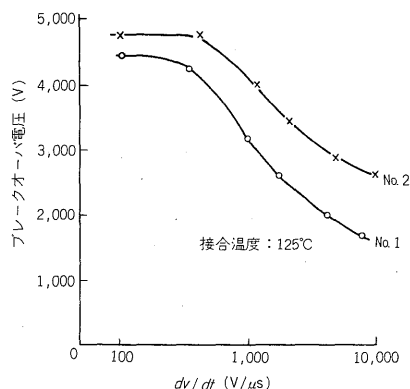
第2表 di/dt 耐量試験結果
Table 2. Results of di/dt test

ステップNo.	1	2	備考
V _{AK} (V)	2,000	2,400	
I _F (A)	2,000	2,400	
di/dt (A/μs)	200	730	
I _{on} (A)	200	1,040	
I _G (A)	1.0	1.0	
di _G /dt (A/μs)	0.5	0.5	
良品 / 試験数	47/47	47/47	

周波数：50Hz
試験時間：2min
T_C(END)：125℃

2. dv/dt 耐量

第9図にブレイクオーバー電圧と dv/dt の関係を示す。カソードショートパターンの最適設計によって V_{BO} = 2,000 V, dv/dt = 1,500 V/μs の規格値に対して余裕を有している。

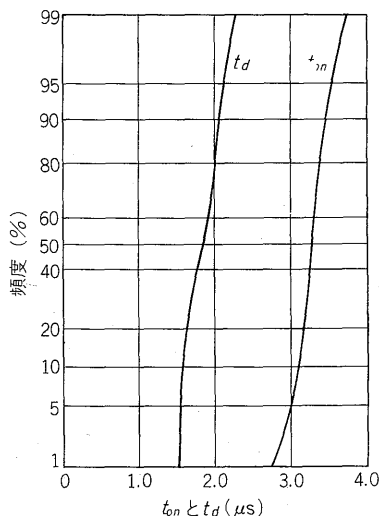


第9図 ブレイクオーバー電圧と dv/dt の関係
Fig. 9. Forward breakover voltage vs. dv/dt

3. ターンオン特性

第10図にターンオン時間と遅れ時間の分布を示す。高圧変換装置においてはサイリスタを多数個直列接続して使用する場合が多いため、ターンオン特性のばらつきが大きいことは望ましくない。

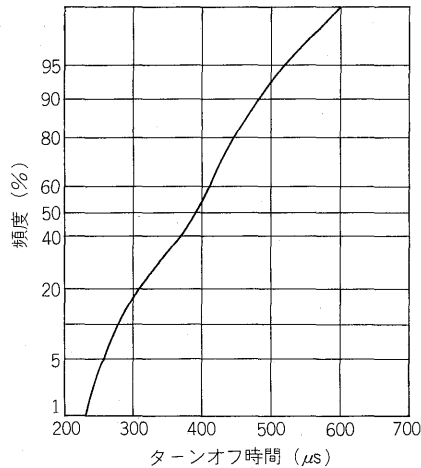
本サイリスタはターンオン時間のばらつきが2μs以下と小さいために、このような直列接続で使用する場合に適している。



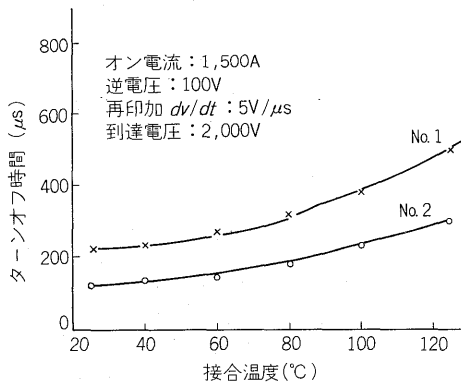
第10図 ターンオン時間と遅れ時間の分布
Fig. 10. Distribution of turn-on time and delay time

4. ターンオフ特性

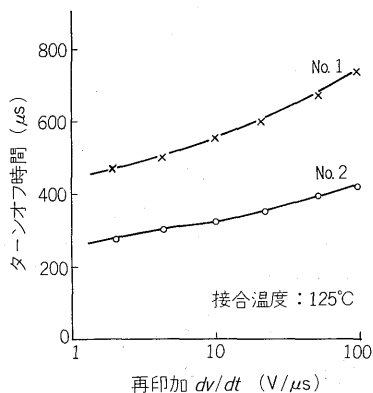
第11図にターンオフ時間の分布を示す。ターンオフ時間の最大値は700 μs であり、90%以上が500 μs 以下に分布している。また第12図、第13図には接合温度及び再印加 dv/dt 依存性を示す。



第 11 図 ターンオフ時間の分布
Fig. 11. Distribution of turn-off time



第 12 図 ターンオフ時間の接合温度依存性
Fig. 12. Dependence of turn-off time upon junction temperature



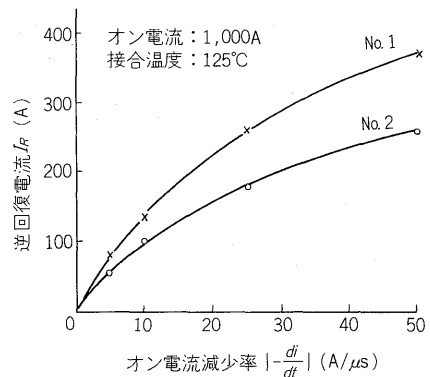
第 13 図 ターンオフ時間の再印加 dv/dt 依存性
Fig. 13. Dependence of turn-off time upon reapplied dv/dt

5. 逆回復特性

本特性はサイリスタを直列接続したときの、電圧分担や転流動作時に発生する飛躍逆電圧の大きさを決定する並列 RC スナバ回路の設計に不可欠である。第14図に逆回復電流とオン電流減少率の関係を示す。

6. ゲート非点弧特性

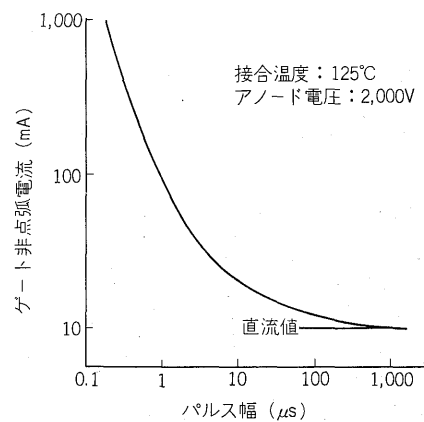
高圧変換装置に使用されるサイリスタは高い耐ノイズ性が要求される。本サイリスタは 2.5kV 1,000A サイリ



第 14 図 逆回復電流とオン電流減少率の関係
Fig. 14. Reverse recovery current vs. $-di/dt$

スタに比べゲート非点弧電流が 2 倍に設計されており、耐ノイズ性が強化されている。第15図に非点弧電流のパルス幅依存性を示す。

また、実機においてサイリスタのゲートに進入するノイズ電流は 1 ~ 数 MHz の高周波が多く、この高周波ノイズ電流に対するサイリスタの非点弧特性を調べた結果、ノイズ電流パルス幅と点弧するまでのパルス数の間に大体次式の関係があることが明らかになった。



第 15 図 ゲート非点弧電流のゲートパルス幅依存性
Fig. 15. Non-triggering current level vs. pulse width for gate pulse

$$N = A T_P^n$$

$$n = 1.6 \sim 1.7$$

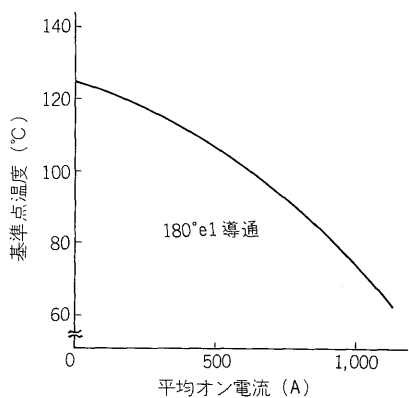
N : 点弧するまでのパルス数

T_P : ノイズ電流パルス幅, A : 定数

このサイリスタの高周波の耐ノイズ性は直流に比べて 8 ~ 10 倍強化されており、高圧変換装置への適用性が優れている。

7. 電流容量

オン電圧が 2.5 V/3,200 A と低く、また熱抵抗も 0.018 °C/W と小さいため、ケース温度 75°C で平均オン電流 1,000 A の通電能力を有する。第16図に平均オン電流と



第 16 図 平均オン電流と基準点温度の関係
Fig. 16. Average on-state current vs. maximum allowable reference point temperature

基準点温度の関係を示す。

V. 信頼性

最近の電力用半導体装置は、高圧大容量化の傾向にある。このため、サイリスタ自体の信頼性に対する要求は厳しい。

以下、本サイリスタの信頼性試験について述べる。

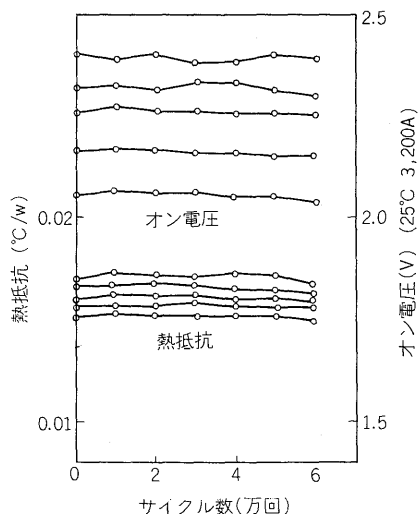
1. 高温電圧印加試験

定格最高温度において、定格電圧の 2/3 の直流電圧を 1,000 h 印加し、全く異常が認められなかった。

2. 熱疲労試験

高耐压大容量サイリスタでは、使用される構成材料の直径が大きくなり、間欠負荷通電を行ったときの熱疲労が問題になる。定格平均オン電流を間欠通電し、接合部温度の変化量を 80°C 以上にとって 6 万回の試験を行った結果、熱抵抗及びオン電圧は安定しており、また、他の諸特性もほとんど変動が認められず構造的にも問題なかった。第 17 図に熱抵抗とオン電圧の経時変化を示す。

3. その他の信頼性試験



第 17 図 熱疲労試験結果
Fig. 17. Results of thermal fatigue test

第 3 表 信頼性試験項目

Table 3. Reliability test items of EGS 03-40 thyristor

No.	試 験 項 目
1	高温放置試験
2	高温電圧印加試験
3	等価負荷試験
4	低圧通電試験
5	熱疲労試験
6	di/dt 寿命試験
7	冷熱サイクル試験

実施した信頼性試験項目を第 3 表に示す。これらの信頼性試験で全く異常がないことを確認した。

VI. 応用

本サイリスタの通電による発生損失は 2~3kW にもなり大きい。したがって、変換装置に適用する場合は、この膨大な発熱量をいかに効率よく外部に逃がすがポイントとなる。この観点から冷却体についても研究が行われ、ヒートパイプ方式の冷却法が開発されている。

また、ゲート電流供給方式として従来はパルストランスが使用されていた。しかし、変換装置の高圧化に伴って耐ノイズ性の強化に対する要望が強く、光伝送方式の検討に着手し、現在実機に使用できる段階に到達した。

これらの周辺適用技術の進歩により、本サイリスタの特性が変換装置において十分に発揮されることが期待される。

VII. あとがき

4,000 V 1,000 A 級サイリスタ EGS 03-40 の設計、製造、定格特性及び信頼性について紹介した。

鉄鋼圧延機用レオナード装置や電解装置の高圧化に伴い、また、フリッカ防止装置や周波数変換装置などの高圧サイリスタ変換装置に、今後幅広く応用されることが期待される。

参考文献

- (1) E. W. Haas and M. S. Schnöller : Phosphorus Doping of Silicon by Means of Neutron Irradiation, IEEE Trans. Electron Devices **23**, No. 8, 803(1976)
- (2) 佐藤ほか：全拡散大容量サイリスタ，富士時報 **43**, No. 10 (昭45)
- (3) 佐藤・白井：大電流半導体素子，富士時報 **45**, No. 7 (昭47)
- (4) 橋本：赤外法による高速サイリスタの電流の拡がりの測定，富士時報 **47**, No. 8 (昭49)
- (5) 橋本・佐藤：サイリスタのスイッチング動作時の熱挙動電子装置制御変換装置合同研究会資料 EDD-77-109 (Pcc-77-4) 1977.9.22
- (6) 橋本・上條：赤外線放射温度計による半導体素子の熱挙動の観測，富士時報 **50** No. 2 (昭52)
- (7) 橋本ほか：高耐压サイリスタの高周波非点弧電流について，昭和52年電気学会全国大会 643



*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。