

半 導 体 IC の 信 頼 性

Reliability of Monolithic Integrated Circuits

片 山 勝 彦* 杉 山 彰*
Katsuhiko Katayama Akira Sugiyama

要 旨

半導体 IC の信頼性について、品質保証体系と試験方法の解説から、MOS 形、DTL 形、リニヤ形 IC の開発品の実績データをまとめて IC の信頼性の現状と問題点を紹介する。

1. 緒 言

近年、電子工学の目ざましい進歩に伴い、トランジスタ、ダイオード、IC などの半導体部品は、テレビ、ラジオはもちろん、卓上計算機、電子計算機、電子交換機と巨大化するシステムの主要部品の座を占めていることは説明するまでもない。

たとえば 99% の信頼度を有する部品を 10 個使うと 90% の信頼度が期待できるが、100 個使うと 37% と急速に低下する。したがって巨大化するシステムに使用される部品の信頼度はきわめてきびしいものとなる。また特性にバラツキの少ないこと、安定性の良いことも部品として重要な要素である。

本論文では開発途上の新製品 IC の品質保証体系からはじめ、試験法の要約、タイプごとの実績データを紹介します。

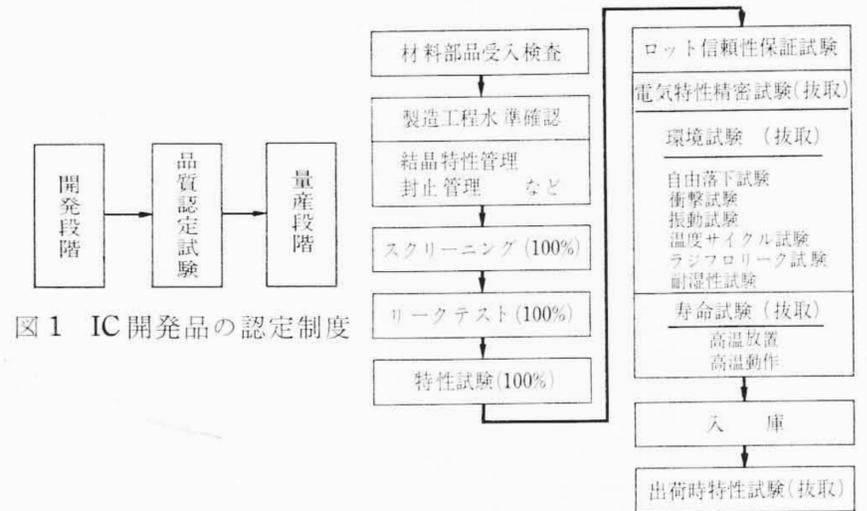


図 1 IC 開発品の認定制度

図 3 IC 量産品の信頼性保証試験

2. 半導体 IC の信頼性保証体系

2.1 新製品の信頼性保証体系

半導体工業のように、技術革新のテンポの著しく早いものは、IC も含めて新製品の開発テンポもまたきわめて早く、その信頼性の保証体系が特に重要になる。

現在半導体 IC で採用している新製品の信頼性保証体系は図 1 に示すとおり、量産段階にのせる前に、開発当初に品質認定試験により、信頼性の評価を実施する。図 2 に信頼性評価の内容の一例を示す。

2.2 量産品の信頼性保証のための管理活動

前節の品質認定制度が確認され、合格した IC は漸次量産に移され、販売活動がなされるが、量産品について信頼性の確認もロットごとに続けられる。図 3 はその方法を示したものである。材料の受入検査、製造工程の品質管理、製品の検査、信頼性の確認、顧客苦情処理を一貫した組織で品質管理課が行ない、情報のフィードバック、調整、対策の促進が追求される。

3. IC 信頼性試験法

3.1 寿命試験法

放置寿命試験(室温、高温、高温高湿、低温)と動作寿命試験(室温、高温、実装)と 2 大別されるが代表的な二つについて説明する。

高温放置寿命試験: 無電圧で最大保存温度の高温槽中に放置する。MOS 形(150°C)、DTL 形(175°C)、リニヤ形(200°C)

高温動作寿命試験: 125°C の高温槽中で電力を加えて動作させる。

- 直流バイアス
- スイッチング動作
- リングカウンタ
- 直流動作

などがある。

* 日立製作所武蔵工場

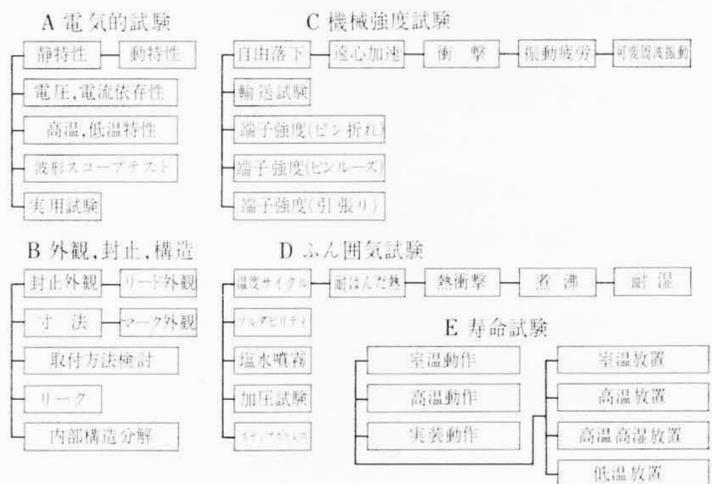


図 2 認定試験における信頼性評価の内容

3.2 環境試験法

3.2.1 ふん囲気試験

主要な環境試験法を MIL-STD-750A (アメリカの Military Standard-Test method for semiconductor devices) と JIS-C-7030 (トランジスタ試験方法) から引用した試験方法を紹介します。

温度サイクル (MIL-STD-750A の方法 1051):

-65°C から最高保存温度 150°C (MOS 形)、175°C (DTL 形)、200°C (リニヤ形) の槽に交互に 5 分以内に移動させる。最低および最高温度槽には 30 分以上放置する。5 サイクル。

耐はんだ熱 (方法 2031・1):

260°C のはんだ液中にリード付け根から 1.6 mm の所まで 10 秒間浸す。

熱衝撃 (方法 1056・1):

100°C 煮沸水および 0°C の氷水の間を交互に 5 秒以内に移動させる。100°C および 0°C 中には 15 秒以上浸す。5 サイクル実施。

ソルダビリティ (方法 2026・1):

ロジン系フラックスを用いて、230°C のはんだ槽に浸漬して 95% 以上ぬれていること。

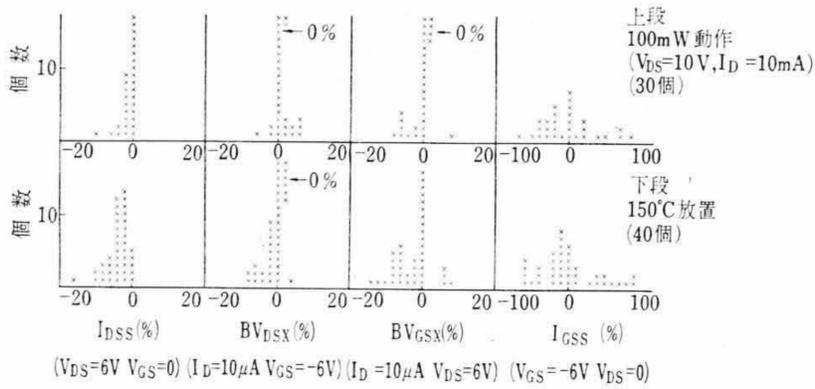


図4 単体 MOS 3SK21 ⑧ の寿命試験における特性変動

MIL 耐湿試験 (方法 1021・1) :

225gのおもりを掛けリード線を1回折曲げた後、湿度90%~98%の槽中で25°Cから65°Cの温度上下2回、湿度制御なしで-10°C冷ショックを1回加える条件を1サイクル(24時間)として10サイクル(10日間)施行する。

煮沸試験:

煮沸水中で2時間、または2気圧に加圧した条件で煮沸と冷却を20サイクル繰り返す。

3.2.2 機械的強度試験

自由落下 (JIS-C-7030・5・4) :

75cmの高さから水平方向に置かれたかえで板に3回自由落下させる。

遠心加速 (方法 2006) :

XYZ 6方向に各1分間20,000Gの遠心加速を加える。

衝撃落下 (方法 2016) :

XYZ 6方向に各3回、1,500G、0.5msのショックを加える。

振動疲労 (方法 2046) :

XYZ方向に各32時間、60cps 20Gの振動を加える。

端子強度 (方法 2036) :

リード線に225gの荷重を加えて、同一平面内で同一方向に90度折曲げを繰り返す。3回以上

4. MOS IC の信頼性

4.1 MOS 特性の変動

MOS形構造特有のため、従来のトランジスタに比べて、特性変動に不安感をもたれるが、日立では単体のMOSの経験も古く、安定なものを作る技術を開発、確立している。参考のためにN-channel Depletion modeの単体MOS 3SK21 ⑧の寿命試験の特性変動データを示すと図4のようになる。グラフの意味は1,000時間終了後の初期値から変動のパーセントを示す。IGSSのpA以下の特性を除いてほぼ±10%以内の変動に入り安定なことがわかる。MOS ICのHD 701 Mの高温直流バイアス動作1,000時間後の特性変動を示したのが図5である。ただし、

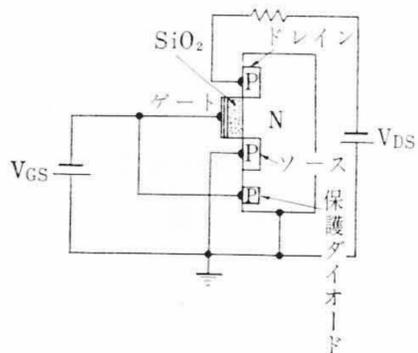


図6 MOS FFT の構造

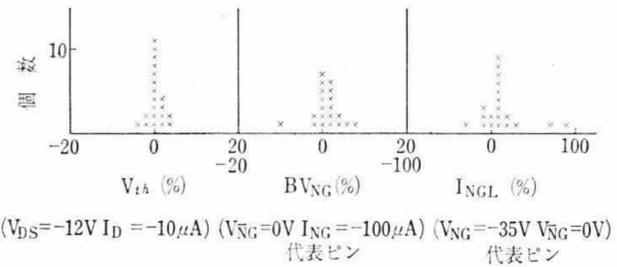


図5 MOS HD 701 M の高温バイアス動作寿命試験変動

$$\text{変動値}(\%) = \frac{1,000 \text{ 時間後の値} - 0 \text{ 時間の値}}{0 \text{ 時間の値}} \times 100$$

4.2 MOS IC のゲート破壊

MOS形ICは図6のように非常に薄いSiO₂の絶縁酸化膜で入力回路を構成しているため、ゲート電極に過大電圧を印加すると絶縁破壊を起こす。この破壊は入力を短絡させる。またトランジスタの一次破壊と異なり永久破壊であるので、信頼性の面から非常に重要な問題となる。

過大電圧の発生原因は、カーブトレーサ、シンクロスコープ、パルス発生器などの測定器の交流の漏電、はんだごての漏電、サージ電圧誘導など種々考えられるが、人体に発生する静電気は特に強く問題になる。

人体に帯電する静電気は、衣類、はき物、体質、周囲温度、周囲湿度などの複雑な要素に支配されるが、帯電しやすい、人造繊維の作業衣を脱いだ場合、20°C 40%と比較的に起こりやすい周囲条件でも-13,000Vも帯電することを観測している。一般に走行後約800V(0.3kV~1.8kV観測)、作業衣着脱後約6kV(2~10kVを観測)に帯電する。人体容量は約150pF(100~200pF観測)である。普通MOS ICを素手で扱う場合は、数10kΩの接触抵抗のために減衰され、大半は破壊をまぬがれるが、一部絶縁破壊をする。

破壊個所を明確に示すために、500pFに300V帯電して人為的に破壊したMOS ICの写真を図7に示す。極端な例なので全ゲート明確に破壊しているが、自然破壊の場合はもっとわかりにくい。

日立MOS ICは保護ダイオードなど特有の技術により、ゲート破壊に対してできるだけ強いものに設計してあるが、十分に下記の注意を守ると信頼性良く安定に動作する。

- (1) 各端子とも-30V以下の電圧で動作させない。
- (2) 各端子に正電圧は印加しない。
- (3) 使用しない端子は浮動電位にならないよう接地またはバイアスを与える。
- (4) 運搬、保存時は端子間をアルミハク、金属輪などを巻き短絡しておく。
- (5) 作業者の帯電は交流からの漏電に注意した1MΩぐらいの高抵抗で接地しておく。
- (6) 電気設備の漏電、特にはんだごてのリーク、測定器の100Vのリークを防ぐため、低接地抵抗で接地しておく。

4.3 MOS IC の信頼性データの実例

MOS形ICの各種寿命試験データの一例を紹介する。

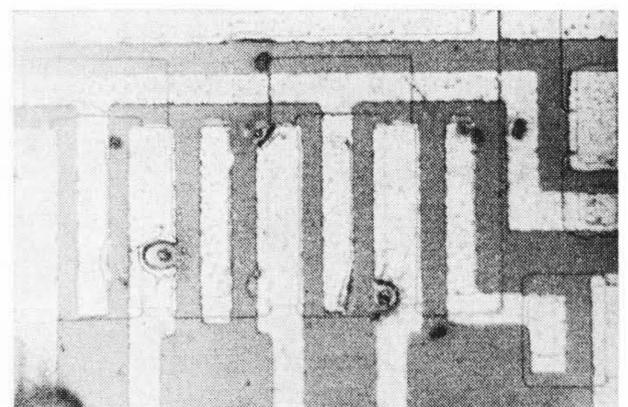
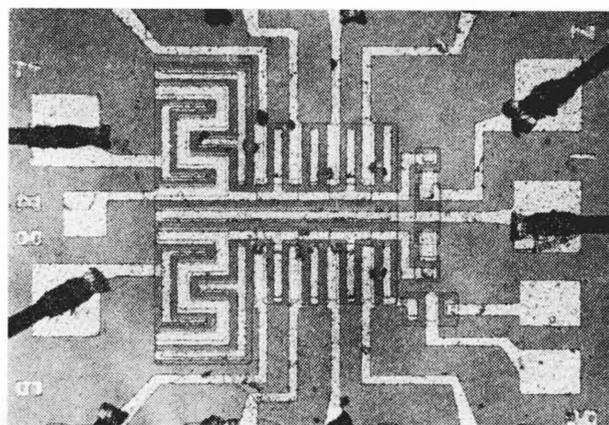


図7 MOS IC の人為的ゲート破壊 (拡大)

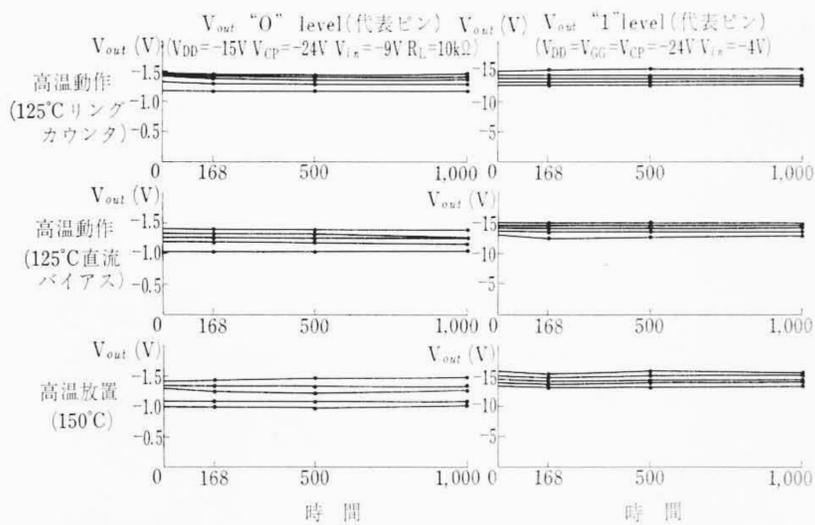


図 8 MOS HD 703 M 各種寿命試験における V_{out} の変化例

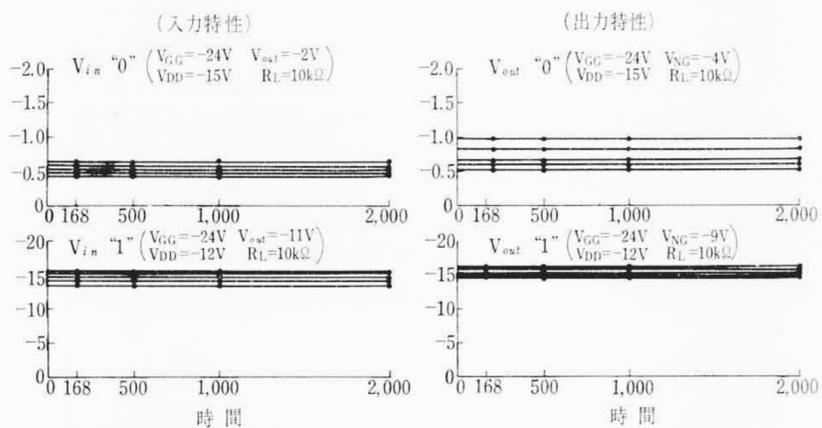


図 9 HD 704 M 高温 (175°C) 放置寿命試験例 (代表ピン)

図 8 は HD 703 M の高温動作リングカウンタ, 直流バイアス, および高温放置の V_{out} 特性変化を比較した 5 試験の代表ピンの出力特性の例である。きわめて安定であることがわかる。

図 9 は HD 704 M のオーバ定格の 175°C 放置の代表ピンの入出力特性変化を示す。

図 10 は HD701 M の温度サイクル, 耐はんだ熱, 熱衝撃, MIL 耐湿試験をこの順でシリーズに行なったときの各試験後の初期値に対する変動を示す。横軸は試験前, 縦軸は試験後の値を示す。

図 11 は HD 703 M 自由落下, 遠心加速, 衝撃落下, 振動疲労試験をこの順で行なったときの各試験後の初期値に対する変動を示す。

開発した MOS 形 IC の信頼性データの一例を下記する。

寿命試験については, 高温放置, および高温動作試験でおおの 130 個の例では不良は発生していない。

ふん囲気試験については, 温度サイクル, 耐はんだ熱, 熱衝撃, ソルダビリティ, MIL 耐湿試験をシリーズに 344 個について実施した例では不良は 0 である。

機械的強度試験として自由落下, 遠心加速, 衝撃落下, 振動疲労試験を 298 個についてシリーズに実施し不良は発生していない。

さらに大量, 長時間の寿命試験, 大量のフィールドデータの収集は今後の問題として残るが, 開発した MOS IC としては十分な信頼性を有することがわかる。

5. リニヤ IC の信頼性

5.1 Step Stress 試験

リニヤ形 IC は MOS 形とは異なり, 量産経験の豊かな, 普通のトランジスタ, ダイオードの組合せであり, 高抵抗, 微小電流の変化の心配もなく安定である。発熱の多い状態で使われるため, 熱放散の問題が重要となる。

熱的ストレスをステップ状に加えた, いわゆるステップストレス試験の結果を図 12 に示す。サンプルは落下試験の履歴を経たもので 199°C, 230°C, 259°C, 295°C, 337°C, 360°C の 6 ステップについて各

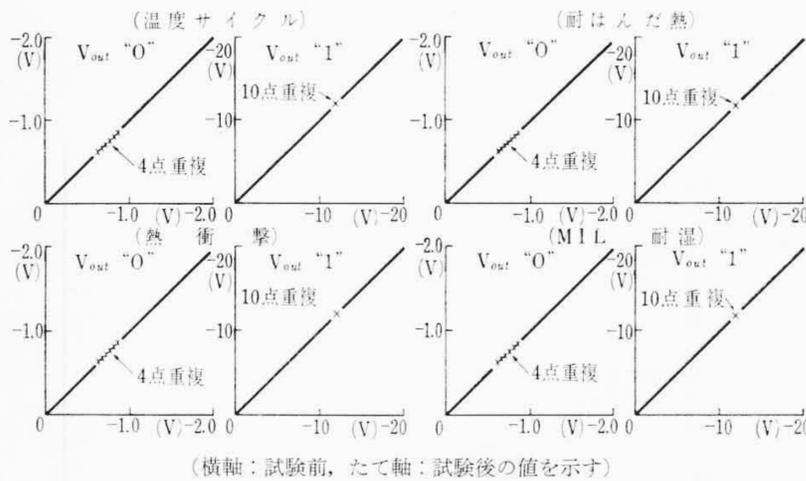


図 10 MOS HD 701 M のふん囲気試験前後の特性変動相対図

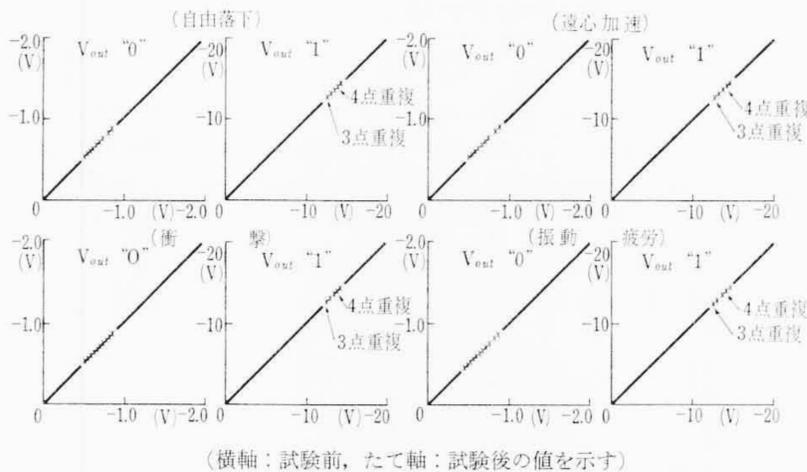


図 11 MOS HD 703 M の機械強度試験前後の特性変動相対図

(測定条件)	初期値		199°C		230°C		259°C		295°C		337°C		360°C	
	個数	0	個数	0	個数	0	個数	0	個数	0	個数	0	個数	0
1.2V 出力電圧 (mA)	20													
4.5V ショート														
1.2V 出力電圧 (V)	15													
5.10V 出力電圧 (V)	10													
8V アース	3.0													
4.5V ショート	2.5													
1.2V 出力電圧 (V)	2.0													
5.10V 出力電圧 (V)	1.5													
8V アース	1.0													
4.5V ショート	0.9													
1.2V 出力電圧 (V)	0.8													
5.10V 出力電圧 (V)	0.7													
8V アース	0.6													
4.5V ショート	0.5													
1.2V 出力電圧 (V)	0.4													
5.10V 出力電圧 (V)	0.3													
8V アース	0.2													
4.5V ショート	0.15													
1.2V 出力電圧 (V)	0.1													
5.10V 出力電圧 (V)	0.05													
8V アース	0													
4.5V ショート	0													

図 12 LINEAR HA1103 M の高温ステップストレス試験による特性変動

48 時間ずつ放置したものである。品種は HA 1103 M である。360°C までは各特性とも非常に安定である。

5.2 リニヤ IC の信頼性データ

リニヤ形 IC の各信頼性データを図で示す。

図 13 は HA 1101 M の高温動作寿命試験の各特性の変動を示している。

図 14 は HA 1103 M の 200°C 放置の寿命試験データを示す。

図 15 は HA 1104 M の温度サイクル, 耐はんだ熱, 熱衝撃, MIL 耐湿のふん囲気試験をシリーズに実施したときの前後の特性変動を示す。

図 16 は HA 1103 M の自由落下, 遠心加速, 衝撃落下, 振動疲労の機械強度試験をシリーズに実施したときの前後の特性変動を示す。開発したリニヤ IC の信頼性データの一例を下記に述べる。

高温動作寿命試験 158 個, 高温放置寿命試験 237 個で致命的な不良がなく, 今後さらに大量長時間の寿命試験に期待される。

温度サイクル, 耐はんだ熱, 熱衝撃, ソルダビリティ, 煮沸また

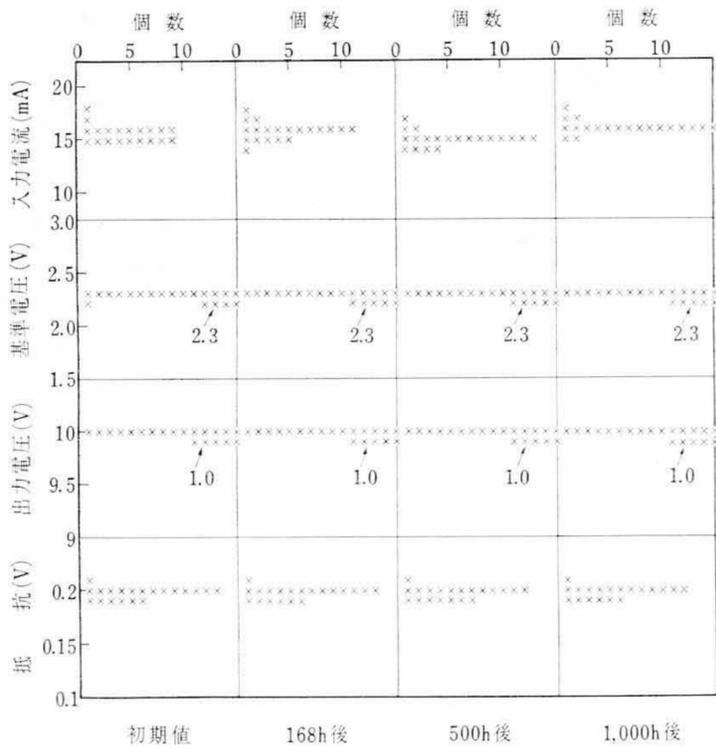


図13 LINEAR HA1101M の高温動作寿命試験

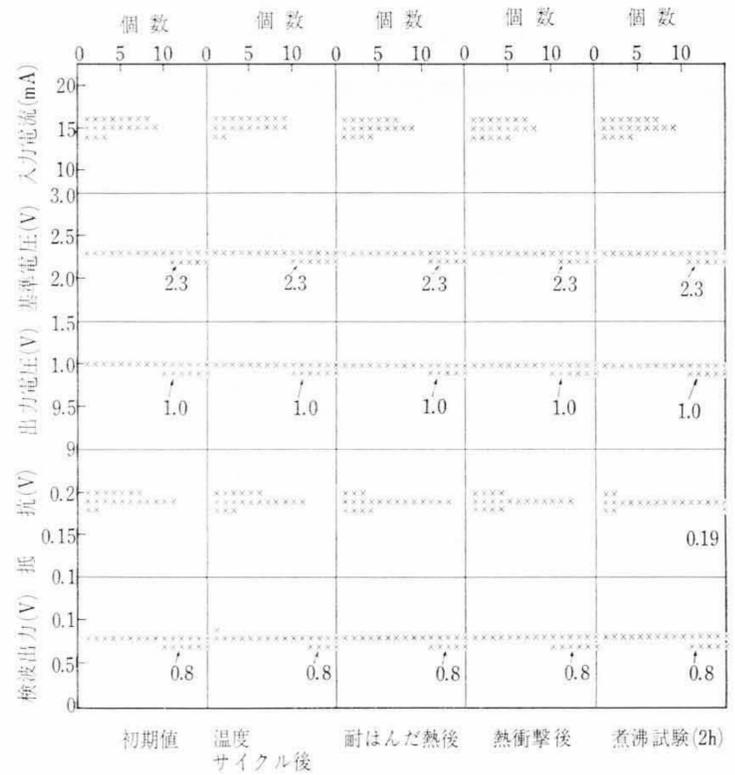


図15 LINEAR HA1104M のふん囲気試験

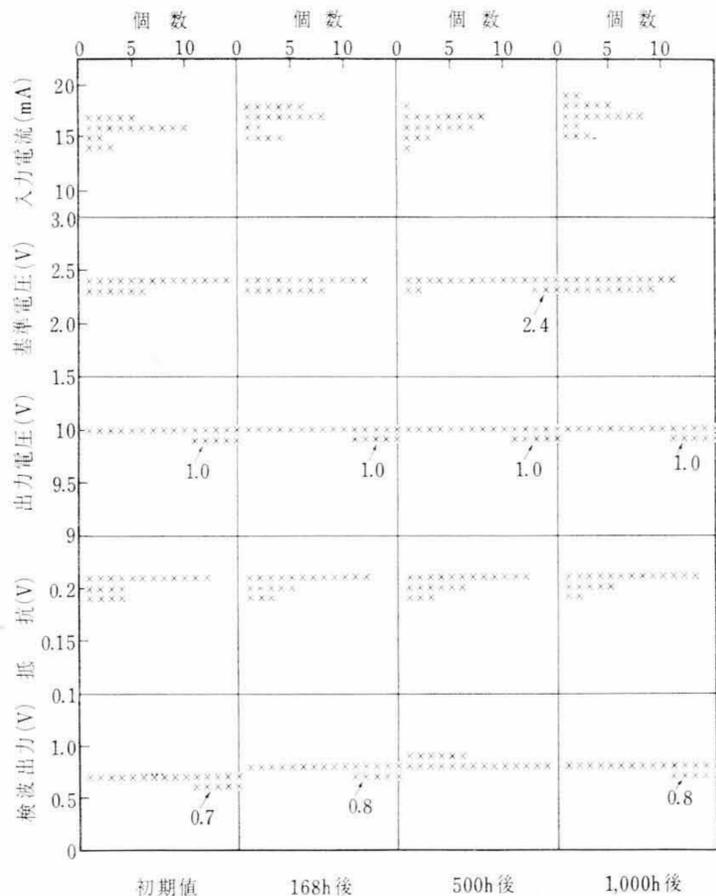


図14 LINEAR HA1103M の高温放置寿命試験

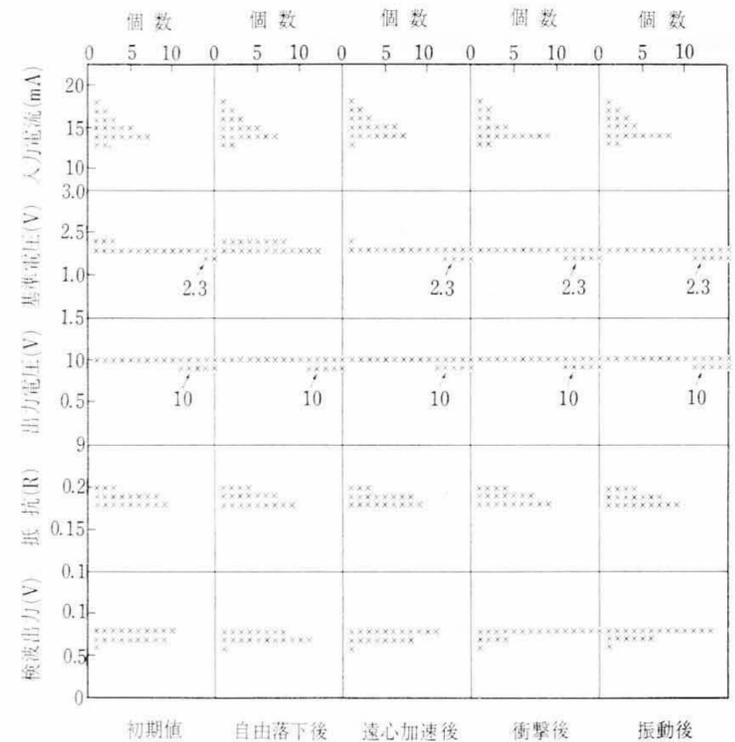


図16 LINEAR HA1103M 機械的強度試験

は MIL 耐湿試験を 420 個についてシリーズに実施したふん囲気試験で不良皆無という好成績を得ている。

また 368 個について、自由落下、遠心加速、衝撃落下、振動疲労試験をシリーズに行なった機械強度試験の例でも不良皆無で、トランジスタ、ダイオードなどの従来の半導体素子に比較してまさるとも劣らない好成績を得ている。

今後、フィールドデータでも十分な好成績が期待される。

6. DTL IC の信頼性

6.1 フラットパッケージの機械的強度

特に高信頼、軽量を要する DTL を特別に開発した。MOS、リニヤはともに JEDEC の TO-100 または TO-101 形で、トランジスタの TO-5 形のシステムの技術の上にならているので不安はないが、フラットパッケージは新しい技術によるものであるから検討を必要とする。

ここではフラットパッケージ自身のピン強度と強ストレスの機械

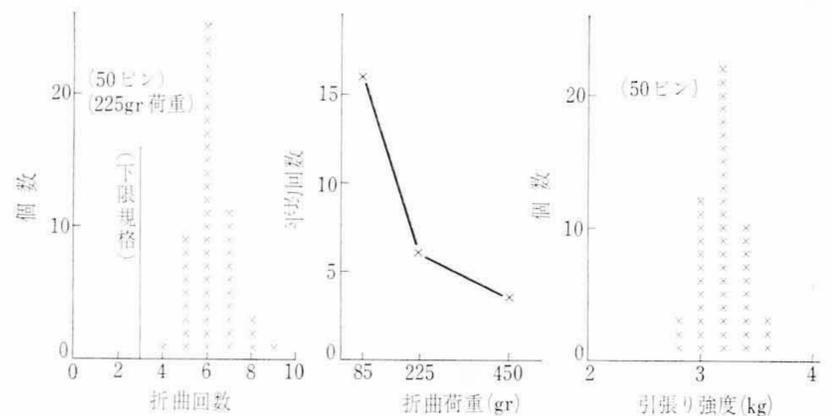


図17 DTL フラットパッケージ折曲強度と引張り強度

的強度試験について述べる。

図17に DTL 形に使用している JEDEC TO-86 形のフラットパッケージの折曲げ試験 (MIL-STD-750A 2036 方法) の分布と荷重依存性を示す。MIL 指定の 225 g, 3 回以上には十分耐える。折曲げは同一平面内 90 度往復を 1 回とする。

同図に端子の引張り強度の分布を示す。実際は全数引抜けずに切断した。

強ストレスの機械強度実験として衝撃落下 (6,000G 0.5 ms 100 回), 遠心加速 (50,000G 10 時間), 自由落下 (75 cm より, ガラス

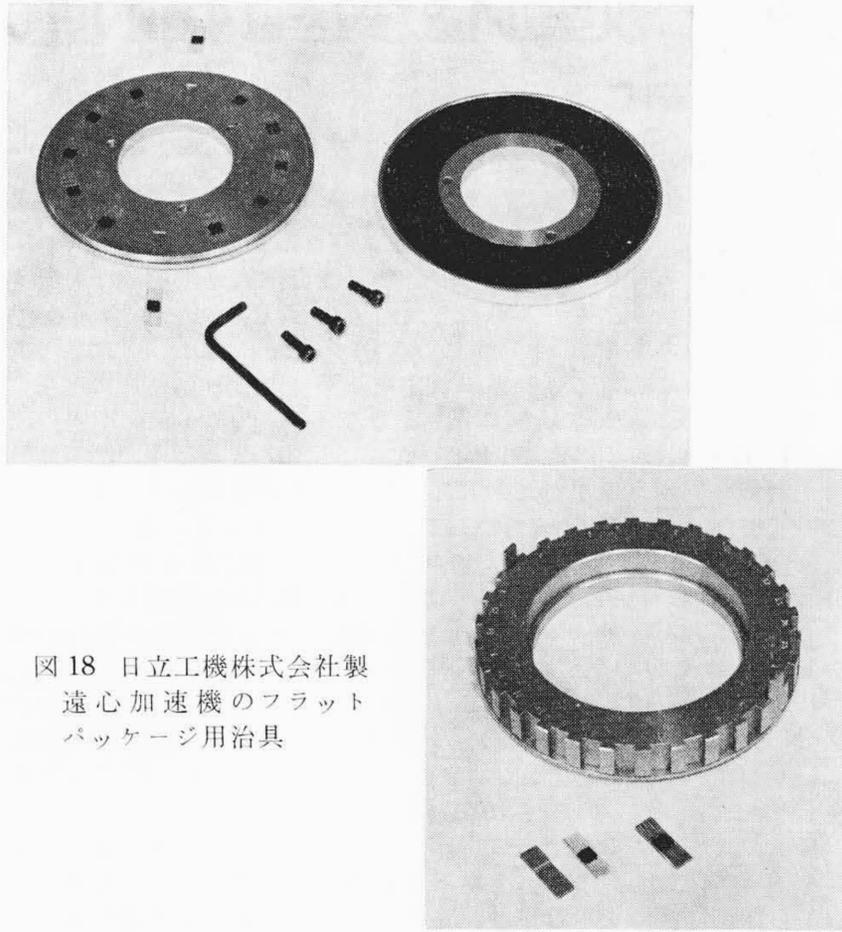


図 18 日立工機株式会社製
遠心加速機のフラット
パッケージ用治具

板上 100 回), 振動 (60 サイクル 50G 10 時間) をおのおの 100 個について行ない断線不良 0 という結果を得ている。IC 1 個あたりトランジスタに比べて約 5 倍のボンディング数を有することを考えると好成績である。本実験においては, IC 専用に日立工機株式会社に開発した 55P-2 形遠心加速装置を用いた。参考のためフラットパッケージ用加速部の治具の写真を図 18 にのせる。

6.2 DTL 形 IC の信頼性データ

図 19 は高温スイッチング動作 HD201F の寿命試験データを示す。

図 20 は HD 203F の高温放置寿命試験データを, 図 21 は HD202F の温度サイクル, 耐はんだ熱, 熱衝撃, MIL 耐湿試験をシリーズに実施したデータを示す。また図 22 は HD 204F の遠心加速, 衝撃落下, 振動疲労試験をシリーズに実施したデータを示す。

高温動作寿命試験 303 個, 高温放置寿命試験 396 個の例では致命的な不良は発生していない。

ふん開気試験としての温度サイクル, 耐はんだ熱, 熱衝撃ソルダビリティ, 煮沸または MIL 耐湿をシリーズに 283 個実施した例では不良 0 である。

機械的強度試験として遠心加速, 衝撃落下, 振動疲労試験を 226 個シリーズに行なったものでは致命不良が出ていない。

今後大量, 長時間の寿命試験, 大量の環境試験の実績を積み重ねていく必要がある。

7. 結 言

以上開発した MOS 形, リニヤ形, DTL 形 IC 強制寿命試験, 環境試験を行なった結果, 好成績を収めたことについて紹介したが, 今後さらに信頼度の飛躍的向上を目ざして進む所存である。

今後残された重要な問題として, 合理的な強制度をもった信頼性試験の開発, 不良のメカニズムの解析と改善, フィールドデータの収集と解析, 長期の寿命試験とその統計処理などが考えられる。

高信頼化が進むにつれ, その解析にはばく大な費用と時間の壁に立ちふさがれる宿命にあるが, 今後のその面の突破口を見つけることもきわめて重要な問題である。

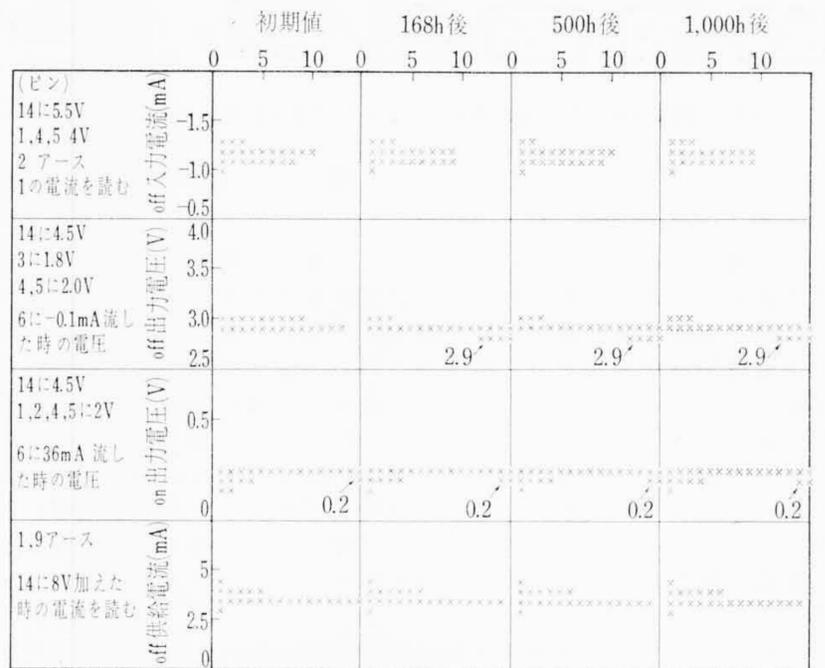


図 19 DTL HD 201F の高温スイッチング動作寿命試験

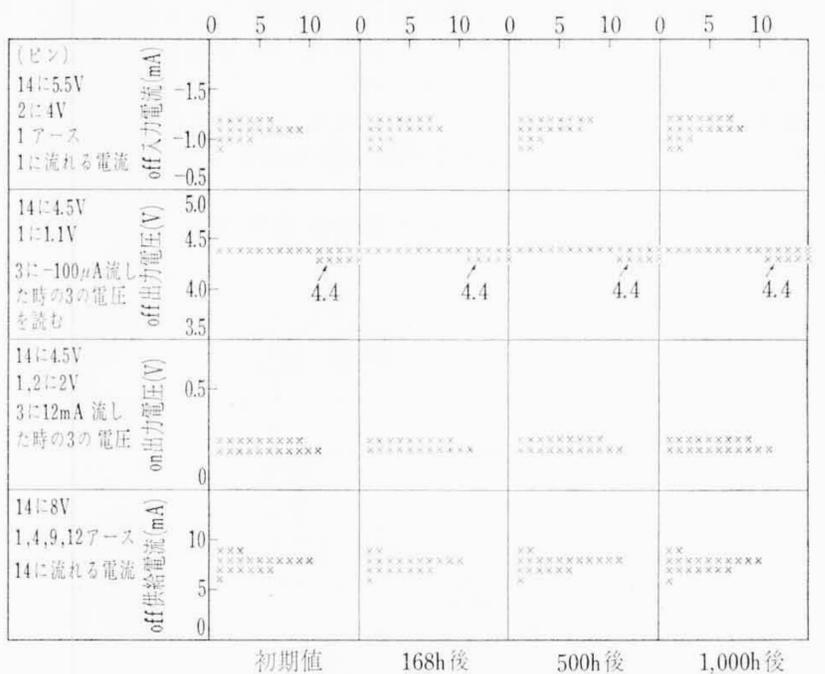


図 20 DTL HD 203F 高温放置寿命試験

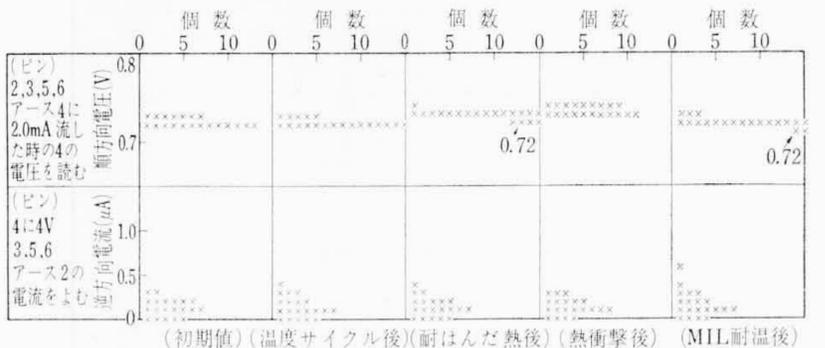


図 21 DTL HD 202F のふん開気試験データ

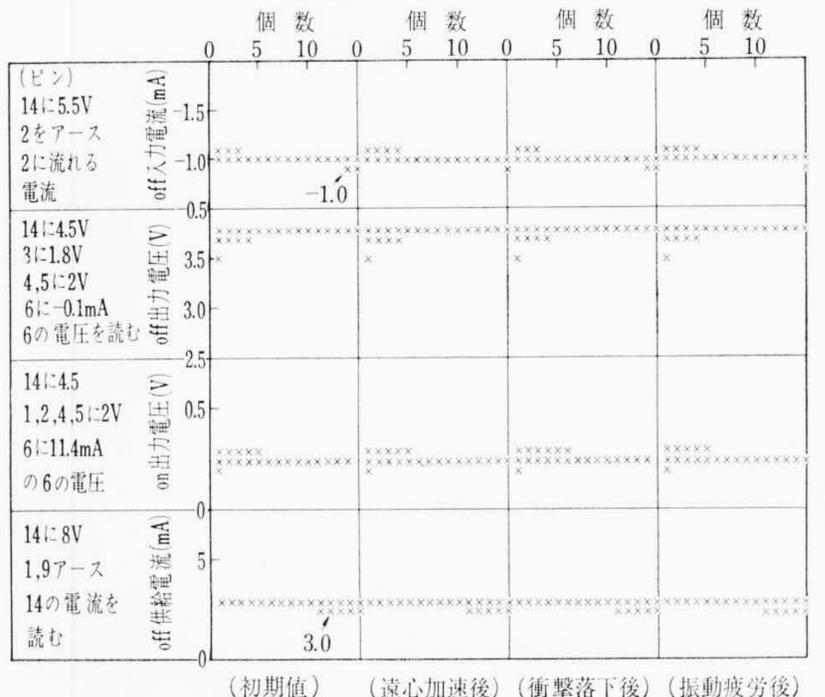


図 22 DTL HD 204F の機械強度試験データ



特許第480543号(特公昭41-2494号)

滝田 武夫・井上 浩・田中 富士彦

電圧および無効電力制御方式

この発明は電力系統の無効電力および電圧の昇降に自動的に対応する新方式であり、無効電力および電圧を常に所定範囲内に保持するために負荷時電圧調整付変圧器およびこれに関連する系統の特性改善用電力コンデンサ(分路リアクトル)を切換および着脱する操作を円滑合理的にするものである。従来この種の制御では一つの制御対象たとえばブロックに対し二つの指令、すなわち電圧検出器に反応する指令および無効電力検出器に反応する指令が独立に与えられるため系統のある条件のもとでは両者が相反した指令となり、制御にハンチングを生ずる可能性があった。このためその条件のときは装置を鎖錠し、制御をいったん中断せしめるような処理を行なっている。

これに対し、この発明では制御対象機器の特性を考慮し、電圧と無効電力によって表わされた座標を領域に区分し、該当する領域によって一つの制御信号を出し、電圧、無効電力のいかなる変動でもハンチングにわずらわされて制御動作を中断せざるを得ないという不都合はなく、円滑な制御を行ない、電圧、無効電力を常時所定範囲内にあるようにすることができる。

図1は本発明を適用した電力系統の単線図、図2は領域の区分を説明する図である。高圧側送受電線1の無効電力は91Pで検出され、タップおよびコンデンサ、リアクトルのような制御対象が判別される。低圧側母線3の電圧は電圧感度継電器58Pで検出され、タ

ップおよびコンデンサ、リアクトルのような制御対象が判別される。91, 58はそれぞれ91P, 58Pに対応する制御継電器でそれぞれ低感度になされており、これが動作したときは91P, 58Pにより判別された制御対象の制御が発動される。91P, 58P, 91, 58により電圧、無効電力によって表わされた座標が図2のように領域に区分される。原点ORを中心としてA, B, C, Dの領域は制御不要, E, F, G, Hの領域は58P, 91Pが動作, 58, 91が不動作の領域であって制御の判別だけが行なわれる。I, K, Sの領域およびL, J, Tの領域ではタップ制御が行なわれ、これがリミットに達するとSR投入およびSCが投入(SCが投入されているとこれを開放およびSRが投入されているとこれを開放)する。R, Qの領域もまた、まずタップ制御を優先する。M, Pの領域ではタップ制御がSCやSRの制御よりA, Dの領域にはいりやすいのでタップ制御が優先する。これがリミットに達しても、SC, SRはロックされ制御されない。O, Nの領域ではSCやSRの制御がタップ制御よりC, Bの領域にはいりやすいのでSCやSRの制御が優先する。これがリミットに達してもタップはロックされ制御されない。

以上のようにこの発明では電圧、無効電力によって表わされた座標を領域に区分し、これにもっとも適当した制御を行なうものであるから制御に渋滞をきたさず、常に電圧、無効電力を所望の値にすることができる利点がある。(福島)

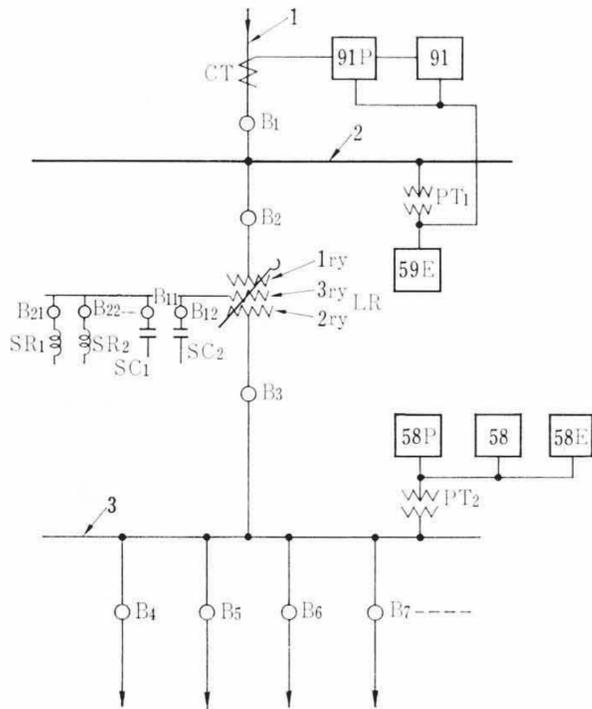


図 1

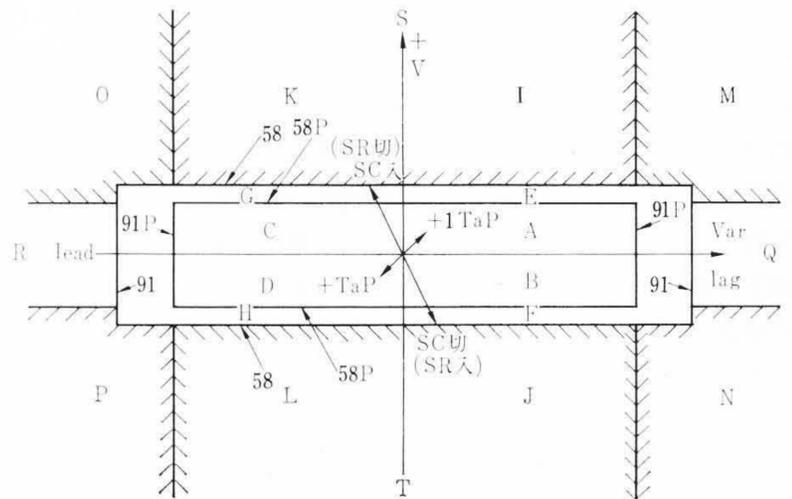


図 2