U.D.C. 621.314.63.027.812.5.048.82

125kV 1,200A油浸形サイリスタ バルブの開発

Development of 125kV 1,200A Oil-immersed Thyristor Valve

尾形文夫* *Fumio Ogata*
吉田 甫* *Hajime Yoshida*
吉田 至* *Itaru Yoshida*
天野比佐雄** *Hisao Amano*
堤 泰行** *Yasuyuki Tsutsumi*
磯貝時男** *Tokio Isogai*
池本徳郎*** *Norio Ikemoto*

A 125 kV 1,200A outdoor-service oil-immersed thyristor valve has been developed, which consists of 120 thyristors of Type CA02 4,000V 800A connected in series. In interior circuitry this new thyristor valve is identical with the air-cooled one which was introduced in the previous issue. It is now undergoing a long-term field operating test at the Sakuma Thyristor Converter Testing Station in combination with the existing air-cooled valves.

1 緒 言

パワーエレクトロニクスの言葉に代表されるように最近の半導体応用機器の電力変換部門への応用は，刮(かつ)目に値するものがある。日立製作所ではすでに37.5MW(125kV300A)の周波数変換装置[1]を開発し,その実用化試験が電源開発株式会社佐久間サイリスタ変換装置試験所にて電力会社，電力関係研究所およびメーカーの緊密な協力のもとに行なわれ，所期の目的を達成したことが確認されている。しかしながら電力変換装置としては，容量的にも小さいこと，絶縁上でもより安定な油浸形が望まれていることなどにより，今回 150MW（125kV 1,200A）油浸油冷形サイリスタ バルブ(以下油浸形バルブと略す）を開発した。

本油浸形バルブは，現在世界最大級の出力を有するCA02形(4,000V 800A）サイリスタを直列に接続し，ゲートの点弧方式を，風冷形サイリスタ バルブと同じ，電磁結合方式とし，ゲートパルス発生装置をタンク外に設け保守点検に便利な構成とした。またタンク電位を大地電位として，構造的にも耐震性，妨害電磁波の抑制に有利な方式とした。

本バルブは，既納の風冷形サイリスタ バルブと組み合わせて試験されるため，回路定数的に一部変更が行なわれ，前記佐久間サイリスタ変換器試験所にて，屋外に設置され信頼度実証試験に供せられている。

本バルブの開発により，さらに大容量の周波数変換所や長距離直流送電の実現が期待され，電力系統の安定度および信頼度向上に役だつものと思われる。

2 油浸形サイリスタ バルブ

2.1 サイリスタ バルブの最近の動向

昭和45年4月，ゴットランド(スウェーデン)の変換所にサイリスタ バルブが増設されて以来，それ以後のHVDC (High Voltage Direct Current) 計画は，ほとんど従来の水銀整流器に代わり，サイリスタ バルブによって行なわれている。しかしながら，このサイリスタ バルブも絶縁方式上から，世界各国では大きく二分されていて，

(1) 空気絶縁方式
(2) 油浸絶縁方式

の2種類の実用化が図られている。日立製作所においても昭和45年に完成したバルブは(1)の方式であり，今回開発した方式は(2)の方式によるものである。この両者はそれぞれ特徴があり，

(a) 経済性（バルブ自体，土地，建屋）
(b) 保守性
(c) 予備品
(d) 公害（騒音，ラジオノイズなど）

の諸項目について，それぞれの変換所に応じて比較検討され使い分けされるべきものである。

日立製作所の場合，両方式ともサイリスタ点弧方式は同一原理に基づくものであり，異なるのは絶縁と冷却方法のみである。

2.2 油浸形サイリスタ バルブの特長

今回開発した油浸形サイリスタ バルブは，次のような特長をもっている。

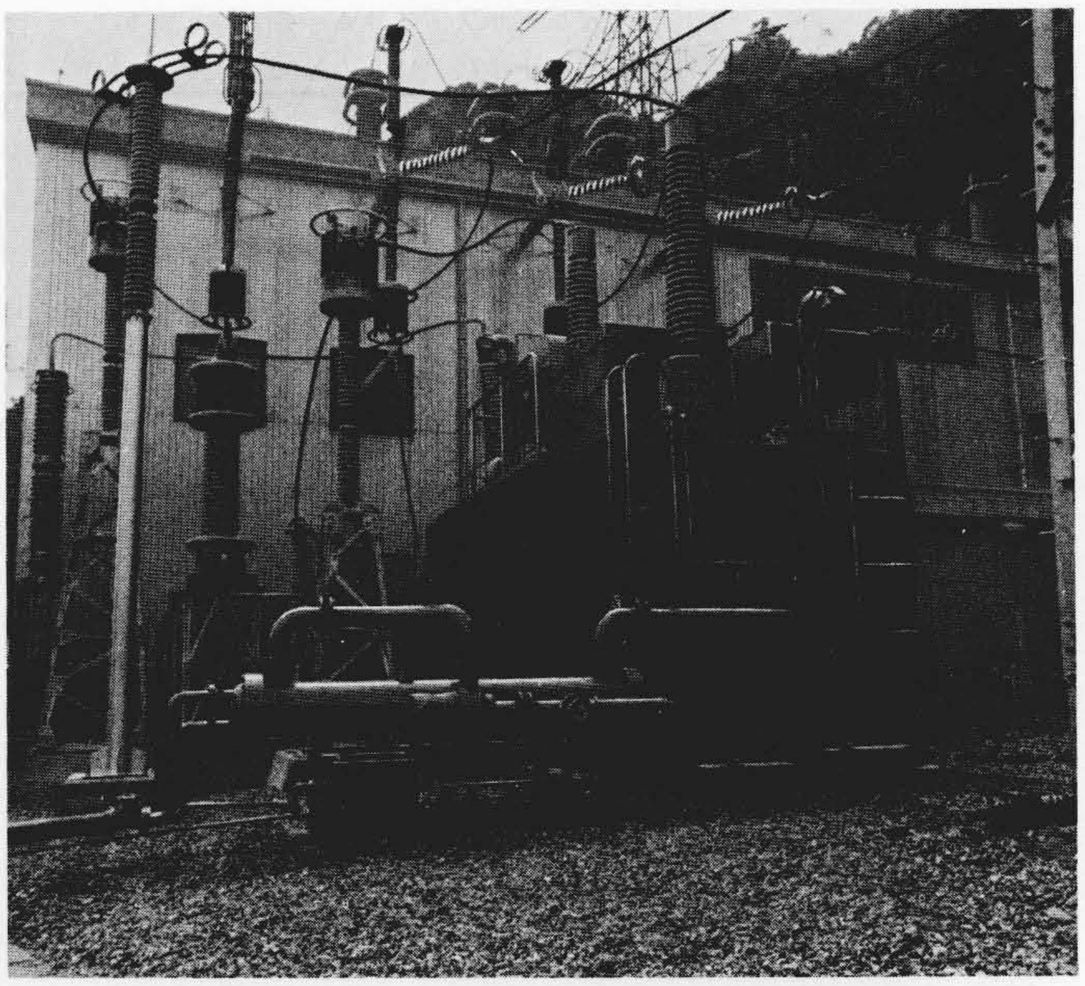

図1 油浸形サイリスタ バルブ(125kV 1,200A) 4kV 800Aのサイリスタが，120個直列接続されている。

Fig. 1 External View of 125kV 1,200A Oil-immersed Thyristor Valve

*日立製作所日立工場 **日立製作所日立研究所 ***日立製作所国分工場

(1)　CA02形(4,000V　800A)サイリスタを使用し，直列数を大幅に減少させた。
(2)　タンク接地方式とし，高電位部を内蔵したため，安全である。
(3)　同上のため，耐震性，ラジオ ノイズに対しても有利である。
(4)　ゲート点弧回路は，タンク外に設置し，保守・点検を容易にした。
(5)　絶縁は油と油浸紙による複合絶縁構造とし，交流および直流に対するそれぞれの絶縁特性を最大に生かした。
(6)　CT形ゲート トランス は，エポキシ モールドによる固体絶縁とし，さらに耐震性を考慮して，特殊な支持方法を採用した。
(7)　冷却は騒音が少なく，かつ効率の良い送油水冷式とした。
などであるが，これらは今後の油浸形バルブの基本となる項目である。

表1　油浸形バルブ仕様　世界最大級のサイリスタCA02(4kV-800A)を直列接続した油浸形サイリスタ バルブの仕様を示す。

Table 1　Specifications on Oil-immersed Thyristor Valve

項番	項目	仕様	
1	定格出力	150MW	三相ブリッジ結線にて
2	定格直流電圧	125kV	
3	定格直流電流	1,200A	
4	素子構成		
	素子形式	CA02	
	素子耐圧	4kV	
	素子平均電流	800A	
	直列数	120	
	並列数	1	
5	ゲート点弧方式	電磁結合CT形	
6	冷却方式	送油水冷式	
7	絶縁		
	A－K間	AC　230kV　3～5秒	
		DC　225kV　30分	
		開閉サージ±400kV　各1ショット	
		コロナ試験　160kV　30分	
	対アース間	AC　230kV　1分	
		DC　225kV　30分	
		開閉サージ±400kV　各1ショット	
		インパルス±400kV　各1ショット	
		コロナ試験　160kV　30分	

2.3　油浸形バルブの仕様

今日開発した油浸形バルブの仕様は**表1**に，また外観は**図1**に示すとおりである。仕様上，特に留意した点は，素子の利用率を上げるため，CDF (Current Design Factor)＝2とし，冷却フィンの熱抵抗を大幅に下げたことである。このため，冷却フィンには内部貫流形を採用した。このように電流利用率を上げると素子接合温度が高くなるため短絡電流耐量が減少するので，たとえば接地側にも直流リアクトルを分割そう入したりする工夫が必要である。もちろん転流失敗のように，直流リアクトルを通して流れる電流に対しては十分余裕がある。ゲート操作のみですべて短絡電流をしゃ断するには，CDF＝4程度の設計をする必要がある。

2.4　電気回路

表1に示したようにサイリスタの直列数は120，並列数は1である。分圧回路は**図2**に示すように抵抗，コンデンサおよびリアクトルによる標準的なもので定常分圧，過渡分圧とも十分余裕のある値を持っている。油浸形バルブの場合，特に対地浮遊容量が増加する傾向にある。このため，急峻（しゅん）な波形を有する電圧が加わった場合に，印加端近くのモジュールに過電圧が加わるおそれがあるため，補償容量をモジュールごとにそう入した。風冷バルブと異なる点は，浮遊容量が直接対アース間とステージとの間に入る点である。**図3**はコンピュータによって得られたインパルス分担と実測値との比較を示すものである。

本図に見られるごくわずかの差は実測時の測定線の影響と思われる。補償容量は一般には大きいほどインパルス分担は良い方向に向かうが，一方ではバルブA～K間の浮遊容量が増加したのと同様になり，ターンオン，ターンオフ時の過渡振動に悪影響を及ぼすので，バルブダンピング回路と協調を

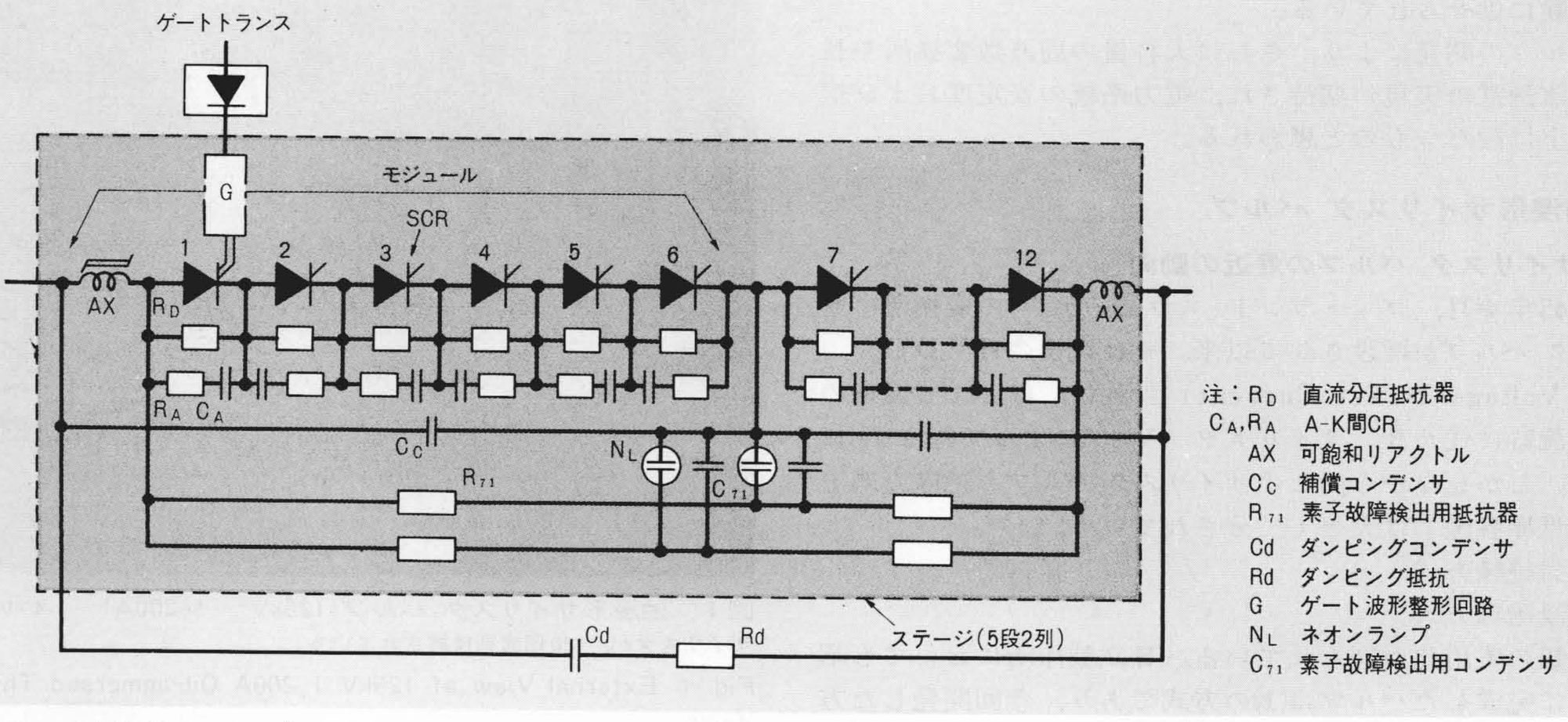

図2　バルブ内部結線図　6^Sスタックとリアクトルより成るモジュールを2個，1ステージに収容し，1バルブは10ステージより成る。

Fig. 2　Internal Connections of Thyristor Valve

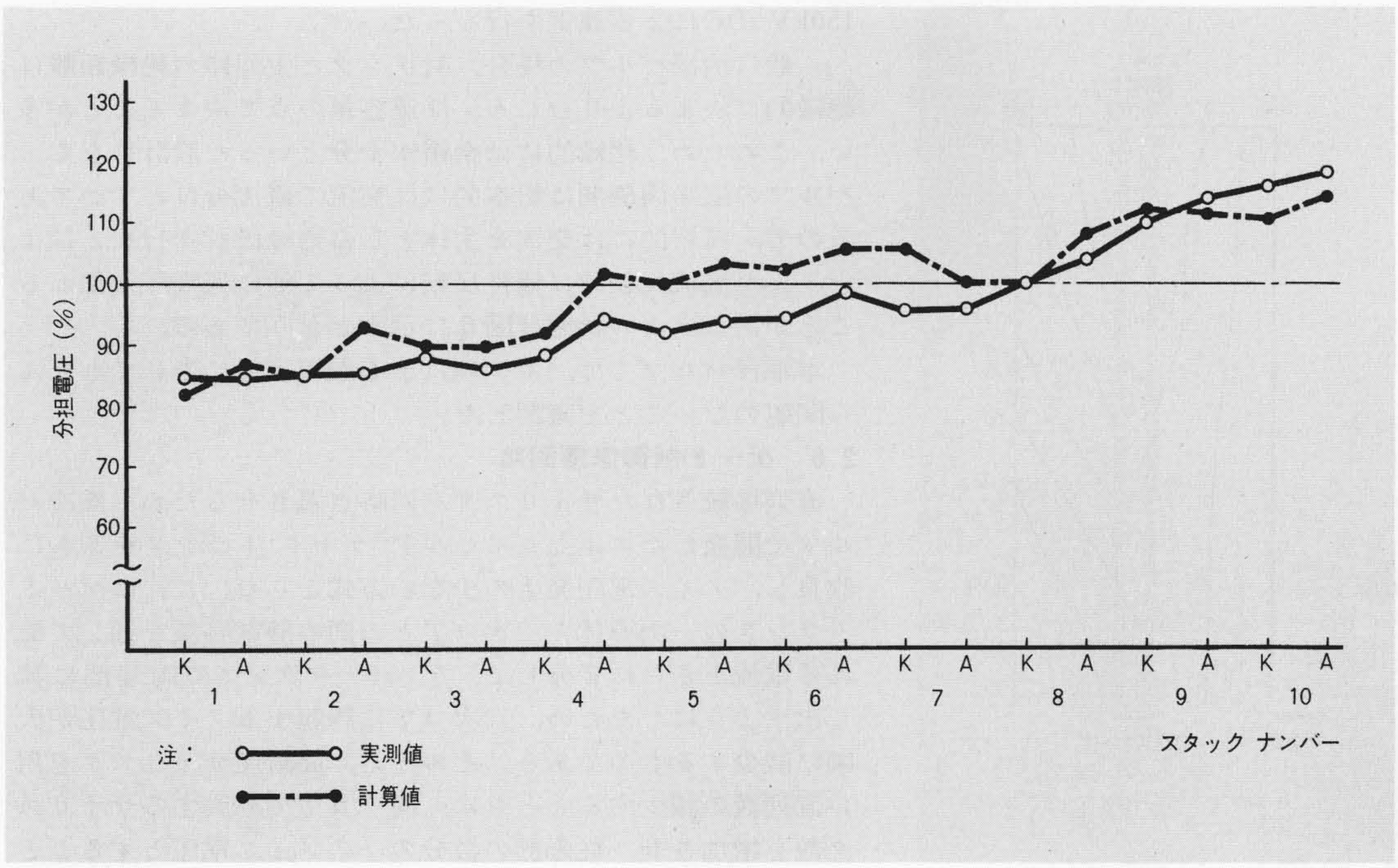

図3　スタック インパルス分担　バルブ陽極側にインパルス電圧を印加したときのサイリスタ スタック分担電圧で，バルブ陰極側は接地してある。

Fig. 3 Impulse Voltage Sharing of Thyristor Stacks

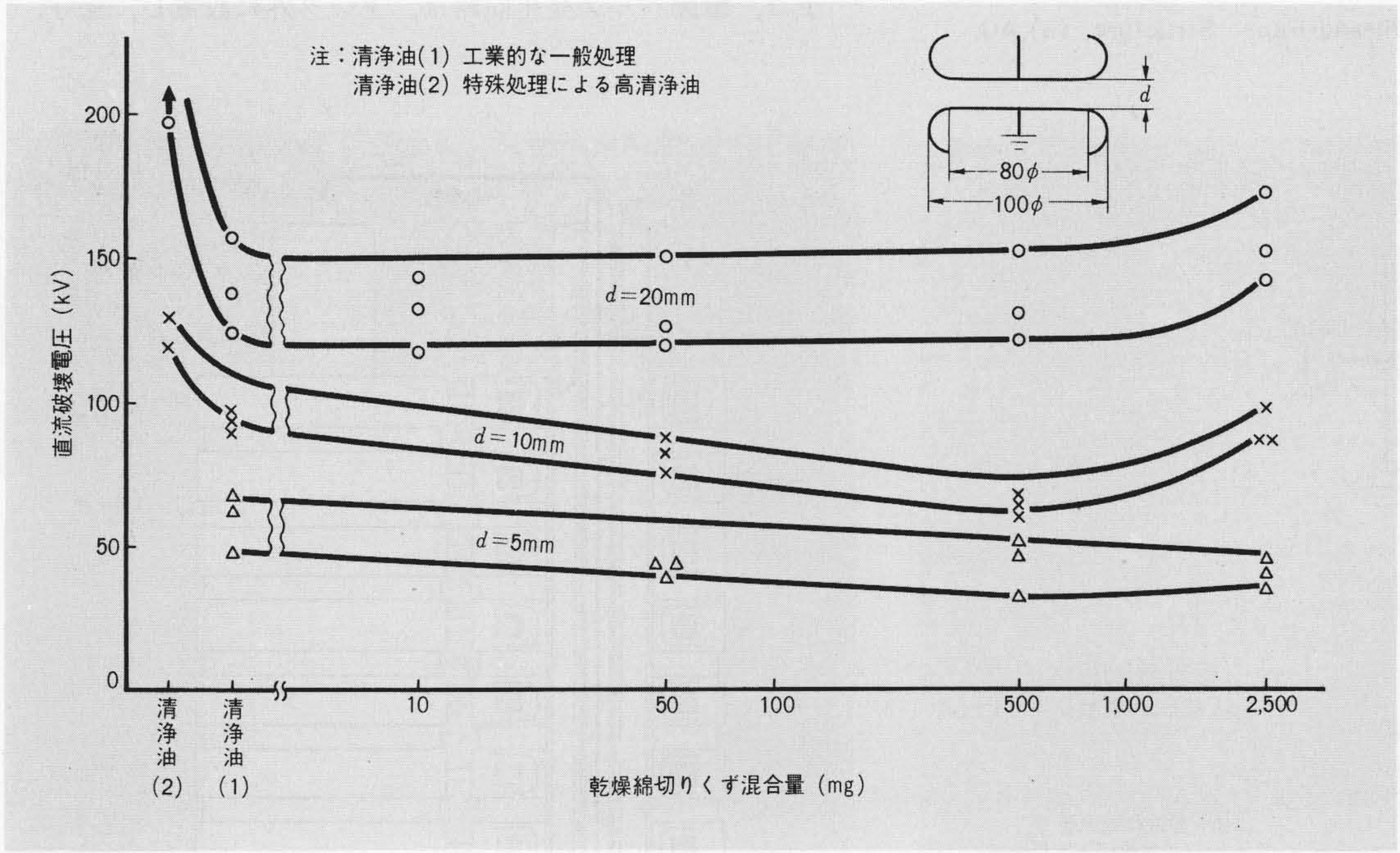

図4　乾燥綿切りくず混合による油の直流破壊電圧の変化(油量30 l)　乾燥綿のような不純物が，トランス油中にはいると，油の耐圧が急激に下がる。

Fig. 4 DC Breakdown Voltage of Oil with Impurity (Cotton Pieces)

保った値としなければならない。

アノード リアクトルおよびカソード リアクトルは，各ステージごとにそう入してあり，浮遊容量からの突入電源の防止とともにターンオン時の過渡振動も抑制している。このためリアクトルのインダクタンスを増加することは，ターンオン時の過渡振動周波数を下げるため，サイリスタにとって好ましいばかりでなく，ラジオ ノイズ抑制にも有効である。しかしながら，一方，損失も増加するので可飽和形を採用して，サイリスタ スイッチング時間程度では飽和しない（電圧・時間積）を持たせ，損失の増加を防止している。

2.5 絶　縁

油浸バルブは対アース間では，交流，直流の重畳した波形が印加される。このため交流に対しても，直流に対しても十分な絶縁を行なう必要がある。一般にトランス油で代表される鉱物油は交流に対して，絶縁耐力は優秀であるが，直流に対しては，特に汚損された場合，**図4**に示すように極端に耐圧が下がることがある。一方，油浸紙は直流に対して優秀な絶縁能力を有する。この両者の特長を生かし，交流分圧は容量分圧，直流分圧は抵抗分圧することを考慮して，両者の併用による複合絶縁構造とした。**図5**はコンピュータによる交流および直流の電界解析結果の一例を示したものであり，両者の電界分布の特長をよく表わしている。すなわち直流の場合，油浸紙に電界が集中して油の電界を弱める構造となっている。本油浸バルブの試作に先だち，複合絶縁モデルを製作し，150kV DCによって3個月の長期課電を行ない設計の妥当性を確認した後，本油浸バルブに対しても連続1週間の，

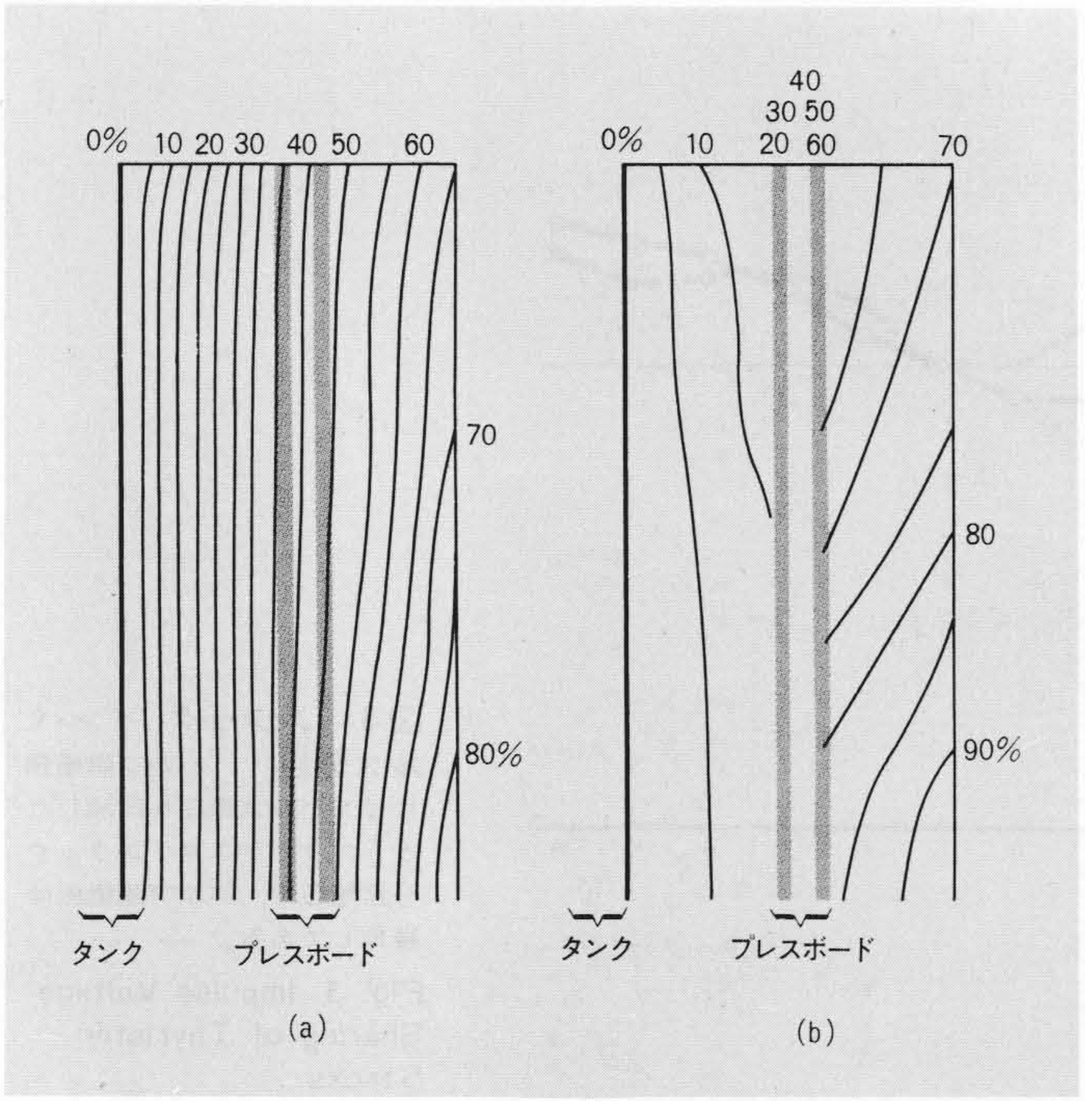

図5　電界解析結果(交流)(a)および電界解析結果(直流)(b)の一例
交流では油内をほぼ一様に電気力線が分布し，直流では抵抗の高いプレスボードに集中していることがわかる。背後電極は図中では省略してある。

Fig. 5 Field Mappings on Oil-and-Paper Structure, (a) AC, (b) DC

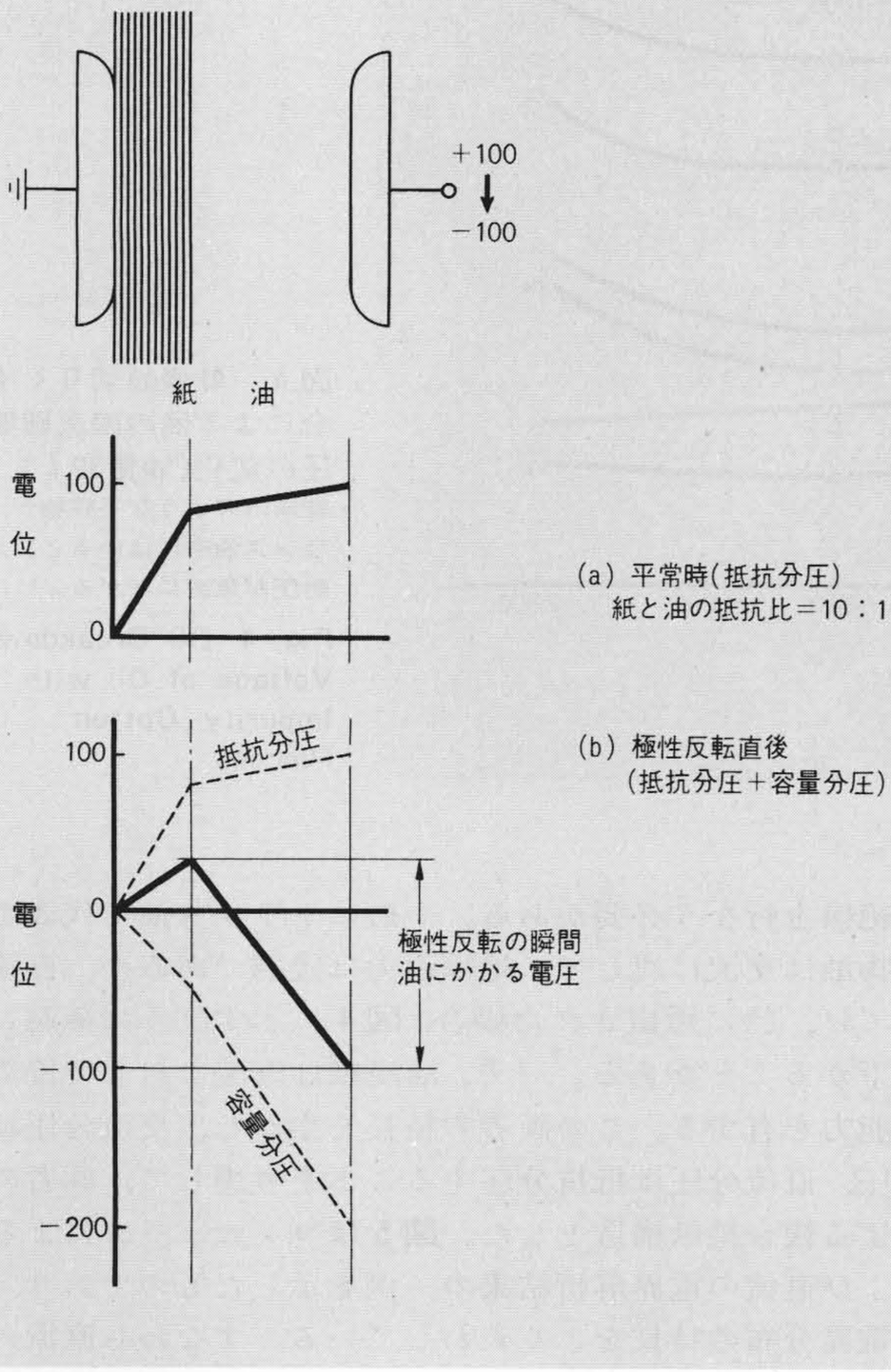

図6　極性反転時の電位分布　直流の電圧が反転されると，瞬間的に油がかなりの電圧を持つことがわかる。

Fig. 6 Potential Distribution in Oil-and-Paper Insulation Structure at Polarity Reversal

150kV DCによる課電を行なった。

一般に油浸バルブの場合，対タンクと主回路の絶縁距離は絶縁的に決まるよりむしろ，浮遊容量の点で決まることが多い，このため，絶縁的には余裕が十分といった設計になる。バルブの陰陽両極間は根本的には交流で直流分はわずかであるので，実用的には交流を主体とした絶縁設計を行なえばよい。また潮流反転時に極性反転によって油に過電圧が加わることがある。この状態は**図6**に示すとおりである。

本油浸バルブでは，モデルによる潮流反転に際してもなんら問題のないことを確認した。

2.6　ゲート制御保護回路

直列接続されたサイリスタを同時点弧させるため，風冷バルブで開発したエポキシモールド ゲート トランスをさらに改良し，ノイズ電圧発生の少ない方式とした。これはゲート トランスの一次導体と二次コアとの間の静電容量を通して流れる電流をさらに2分して，ゲート トランスの両端部に流し出すようにしたため，二次コアに誘起するノイズ電圧が大幅に減少するものである。そのうえ，高耐圧サイリスタを用い直列数の減少するとともに，同一コアで駆動するサイリスタ数を増加させ，従来形の数分の一のノイズ電圧とすることができた。**図7**は油浸形バルブのゲート トランスを示すものである。

また，駆動パルス発生回路は，タンク外に設置し，保守，

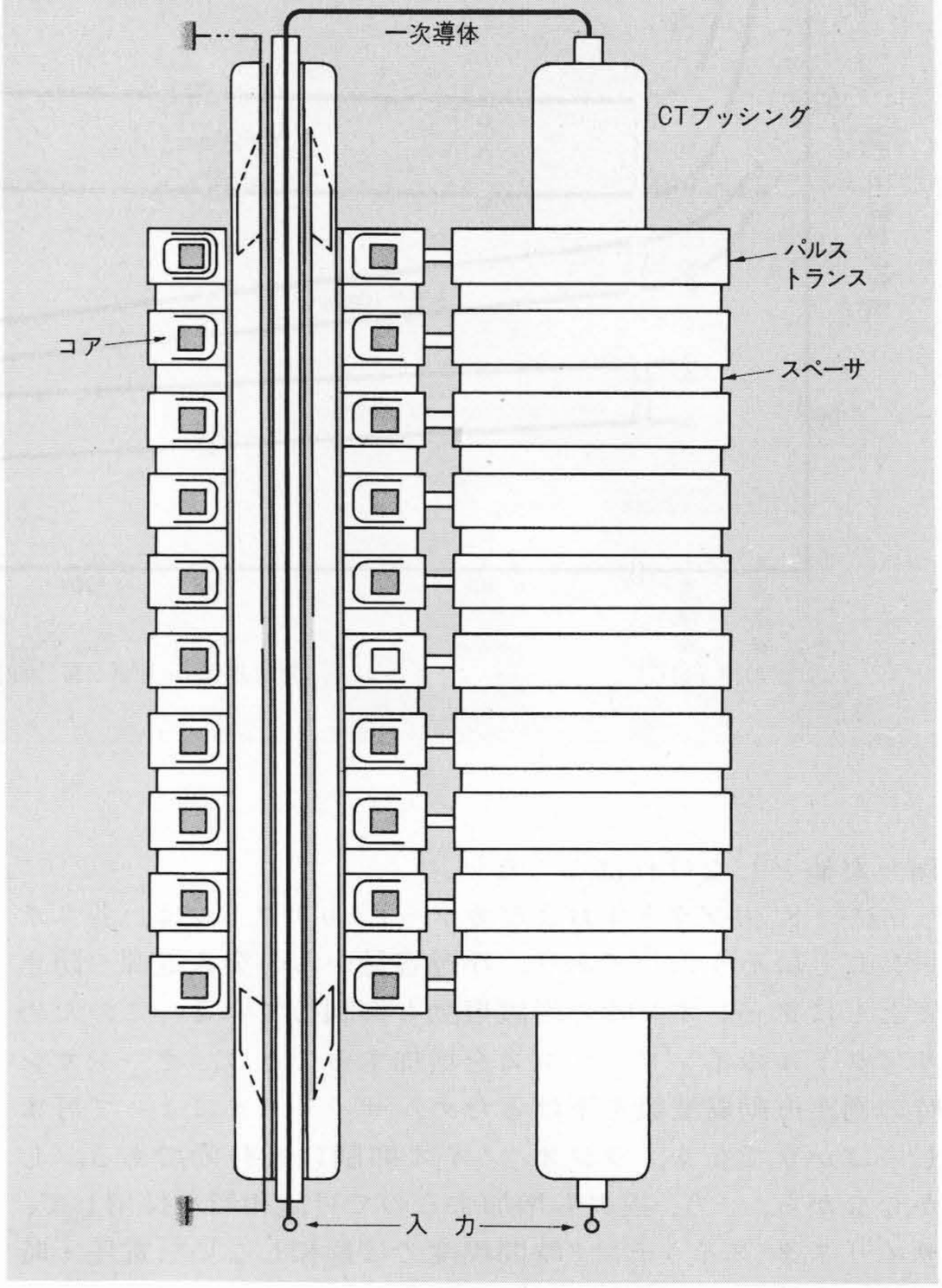

図7　油浸形ゲート トランス　エポキシ固体絶縁を用いてコンパクトにまとめた油浸バルブ用ゲート トランスを示す。

Fig. 7 Gate Transformer for Oil-immersed Thyristor Valve

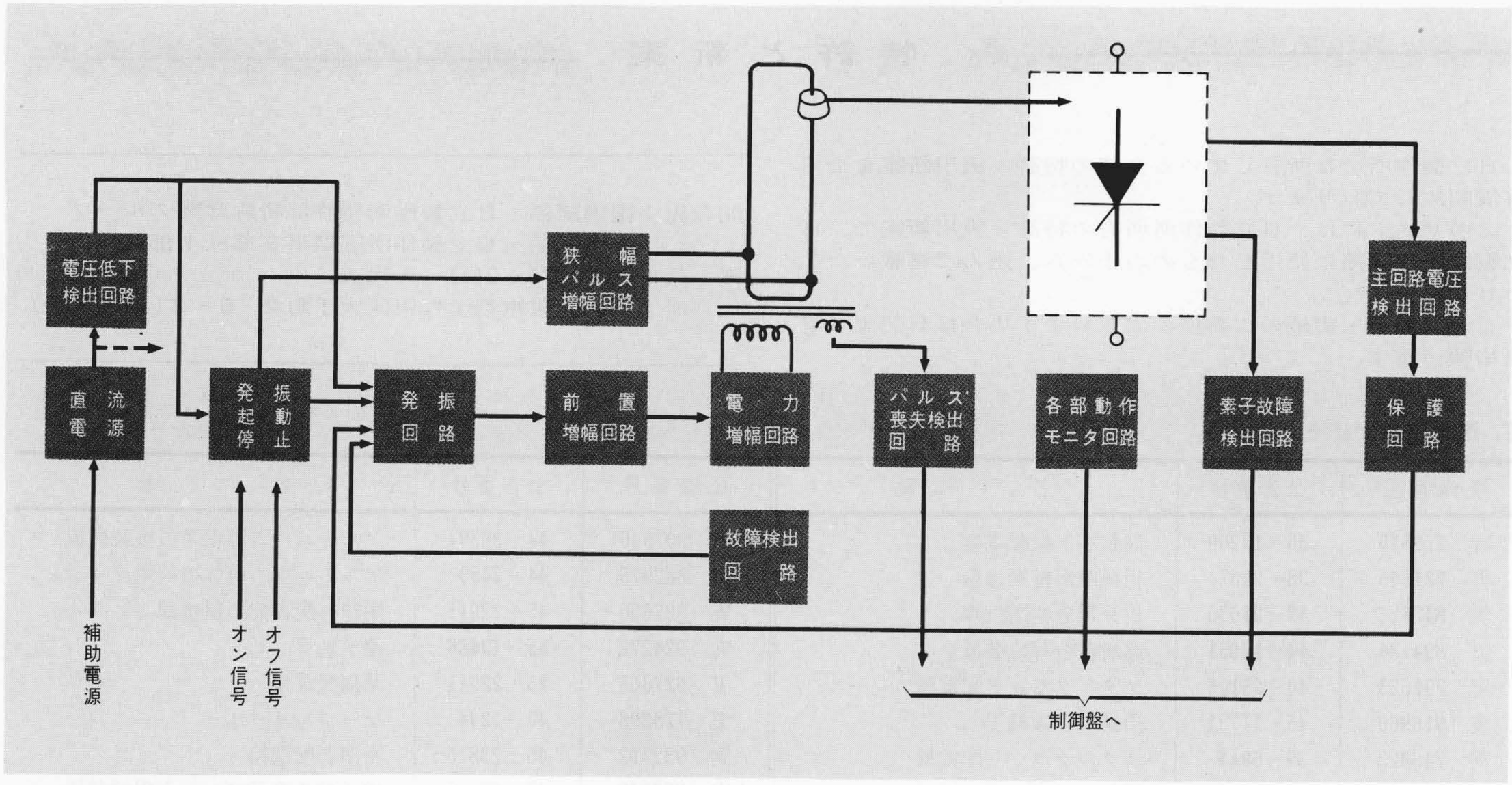

図8　ゲート回路ブロックダイヤグラム　　ICを大幅に使用し，冗長系で構成したゲートアンプ回路で，タンク外に設置され，保守点検に便利な構造となっている。

Fig. 8 Blockdiagram of Gate Circuits

点検の便宜を図るとともに，ＩＣ（高密度集積回路）を用いて多重化し，信頼度の向上を図った。基本回路は風冷バルブと同一であるが，信頼度上の見地より，論理回路を一部変更し回路の安定化を図った。**図8**はゲート回路のブロック ダイヤグラムを示すものである。逆電圧検出信号には発光ダイオードを用い，光信号をライト ガイドにより低圧部に導き，フォト トランジスタにより，光電変換を行なう方式とするとともに，信頼度を考慮して多重系とした。万一，検出系が劣化した場合には低圧部にて予備へ切り換えできるように構成してある。

3　バルブの信頼度

サイリスタ バルブは数多くの部品によって構成されているため，各部品の信頼度はもちろんのこと，バルブ全体としての信頼度が問題になる。サイリスタ バルブの信頼度の計算手法は種々考えられるが，ここでは電気学会直流送電専門委員会が採用したモンテ カルロ法による方法[3]を試みた。

図9は計算結果の一例を示すものである。バルブ ダンピング回路の接続方法は，一部分の劣化に伴うストレスの加わり方が異なるため，多少その信頼度にも影響を及ぼす。この結果より油浸バルブは，電力機器としては，かなり信頼度の良いものと考えることができる。

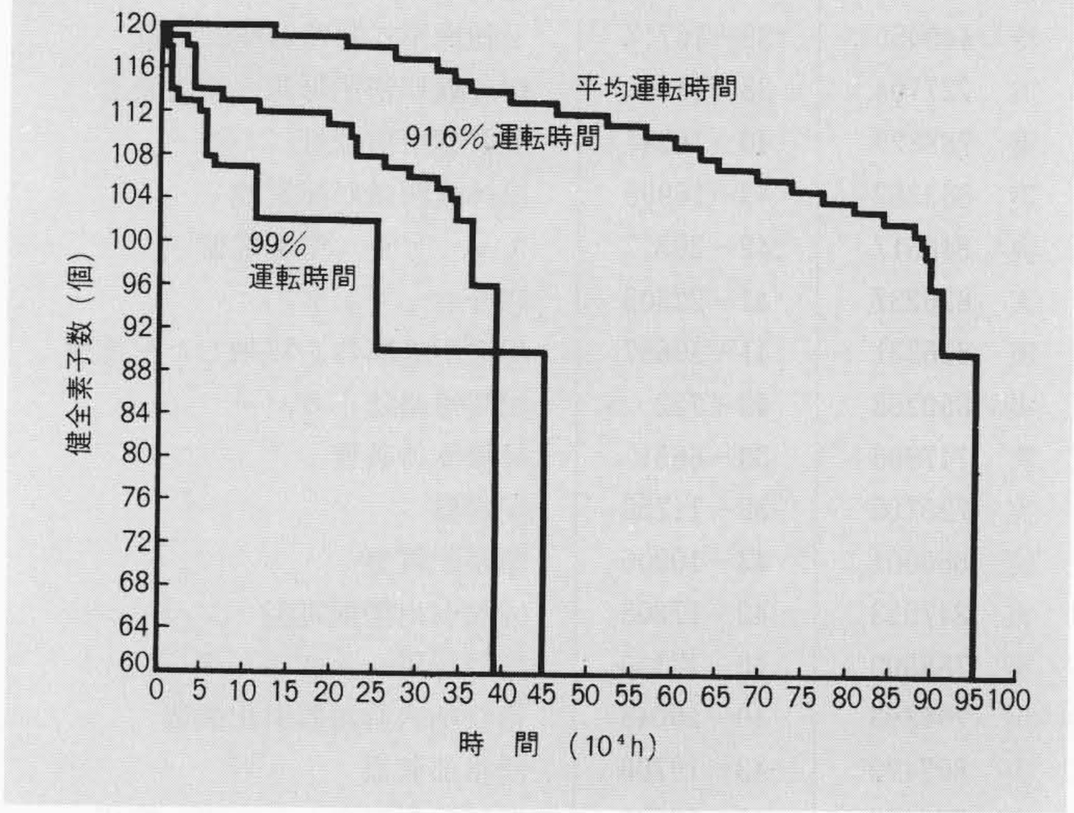

図9　油浸バルブの運転時間特性　　モンテ カルロ法によって計算した素子故障数と運転時間の関係を示している。

Fig. 9 Characteristics of Failure of Cells vs Operating Hours

4　結　　言

今回開発した油浸形バルブの基本構成と特性を中心に紹介した。また計算上では電力機器としてもその信頼度はかなりのものが期待できる。現在，実器は電源開発株式会社佐久間サイリスタ試験所にて，既存風冷バルブと組み合わせて信頼度実証試験に供せられており，現在までのところ期待どおりの結果を得ている。なお本器の開発は，通産省重要技術研究開発費補助金を得て行なわれたもので，ここに関係各位に対し深く謝意を表わす次第である。

参考文献

(1) 川上，尾形，ほか，「125kV, 37.5MW高電圧サイリスタ　バルブの関発」，日立評論 **53**，396（昭46-4）
(2) 磯貝，福士，ほか，「高電圧油浸バルブ用ＣＴ型電磁ゲートパルストランスの開発」，昭和48年電気学会全国大会論文集，783
(3) Y. Sekine, T. Sakurai, "Availability Analysis of HVDC Thyristor Valve" CIGRE SC 14, April, 1973