

東京電力株式会社新信濃変電所納め

周波数変換装置用サイリスタバルブ

Thyristor Valves for Shin-Shinano Frequency Converting Station of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

このたび日立製作所は東京電力株式会社新信濃変電所に、東地域50Hzと西地域60Hzの異周波系統を連系する300MW周波数変換設備を納入した。この設備は高電圧・大容量サイリスタバルブを用いた我が国最初のものであり、1バルブにCA02-EA形サイリスタ素子(4,000V, 800A)を直列数120個、並列数2個を接続し、長期にわたる絶縁の安定性保持と信頼度向上のため油浸形バルブとした。サイリスタ素子は、ダイレクトパラレル接続の可能なフィンガ電圧の小さなゲート構造とした。サイリスタバルブは保守点検のため、自走車を用いて移動に便利のように鉄構架台上に設置されている。多数回にわたる顧客との打合せによる据付・保守基準の作成、及びこれに基づいた現地作業の実施により昭和52年12月の営業運転開始以来好調な運転が続けられている。

尾形 文夫* *Ogata Fumio*
 加納 孝* *Kanô Takashi*
 小島 勲* *Kojima Isao*
 長屋恒彦** *Nagaya Tsunehiko*

1 緒言

昭和45年ASEA社(スウェーデン)が、スウェーデン領ゴットランド島で50kV, 200Aのサイリスタ変換装置を実運用に入れて以来、サイリスタを用いた大容量直流送電設備が相次いで建設されてきた。日立製作所でも、昭和45年に、財団法人機械振興協会納めの125kV, 300Aサイリスタ変換装置を完成¹⁾し、電源開発株式会社佐久間サイリスタ変換装置試験所で我が国最初の高電圧サイリスタ変換装置の実系統試験を行なった。このあと引き続いて125kV, 1,200Aの油浸形サイリスタバルブを開発²⁾し、同試験所で種々の試験を実施してきた。

これらの試験を通じて得られた成果、製作技術を基に、東京電力株式会社新信濃変電所納めの125kV, 1,200A送油風冷式サイリスタバルブを製作した。このサイリスタバルブは、保守点検の便のため自走式移動台車を用いて移動できるように考慮されている。このサイリスタ変換装置は、据付後約1年にわたる調整・試験期間を経た後、昭和52年12月に営業運転を開始し、現在まで好調に運転を続けている。

2 サイリスタ素子

CA02形4,000V, 800A大容量サイリスタ(図1)は、特に直流送電用サイリスタバルブを対象に設計製作されたもので、単結晶接合径60mmを用い、世界で最初に量産化された4,000V高耐圧サイリスタである。表1にその仕様を示す。この素子は多数個が直列接続(120個)で使用されるとともに、2個ずつがいわゆるダイレクトパラレルに接続されるので、これらの点を重視して設計された。

2.1 高耐圧化設計

高電圧変換装置用には高耐圧素子が不可欠である。このため、日立製作所ではシリコン接合端面を Σ (シグマ)形状に端面整形するダブルポジティブベベル技術を開発した。この方法によれば、従来の2段ベベル構造に比べて4,000Vの高い順方向耐圧を得やすく、かつカソード面積を大きく確保でき

るためオン電圧損失が少ない。また、Pベースの不純物濃度を下げて高耐圧を得るために、拡散係数の大きいアルミニウム拡散法を開発実用化³⁾し、同時にオン電圧の増大を防ぐ高ライフタイムをも確保することができた。

以上の技術とともに、コンピュータによる解析設計手法(日立S-TAP)を開発し、最適な縦方向寸法、横方向寸法を採用することにより接合温度が125°C以上でも事故電流のゲートしゃ断が可能な素子が量産化された。



図1 CA02形サイリスタ 単結晶接合径60mmをもつCA02形サイリスタの外観を示す。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所国分工場

表1 大容量サイリスタCA02定格特性表 60mmシリコン単結晶を使用して、世界で最初に量産された4,000Vサイリスタ素子である。

項 目	記 号	CA02EA
繰返しせん頭オフ電圧	V_{DRM}	4,000V _p
繰返しせん頭逆電圧	V_{RRM}	4,000V _p
非繰返しせん頭逆電圧	V_{RSM}	4,000V _p
定格平均オン電流	$I_{T(AV)}$	800A
非繰返しサージオン電流	I_{TSM}	16,000A _p
臨界オン電流上昇率	di/dt	200A
ピークゲート電力	P_{GM}	20W _p
平均ゲート電力	$P_{G(AV)}$	4W
ピークゲート電流	I_{GFM}	4A _p
動作接合温度	T_j	-40~125°C
圧 接 力	-	1,500kg
最大オン電圧	V_{TM}	2.5V _p ($I_{TM}=2,500A_p$)
ゲートトリガ電圧	V_{GT}	2.5V _{DC}
ゲートトリガ電流	I_{GT}	300mA _{DC}
ターンオンタイム	t_{gt}	6.5μs Typ.
ターンオフタイム	t_q	400μs Max.
臨界オフ電圧上昇率	dV/dt	1,500V/μs
熱 抵 抗	RO_{j-c}	0.025°C/W

また、直列接続の電圧分担に影響する残留蓄積電荷やターンオフタイムは、最適なショートエミッタ構造と拡散工程のライフタイムの制御により所定値内に収めることができ、特に、ターンオフタイムは高耐圧・大容量素子ながら400μs以下が達成された。

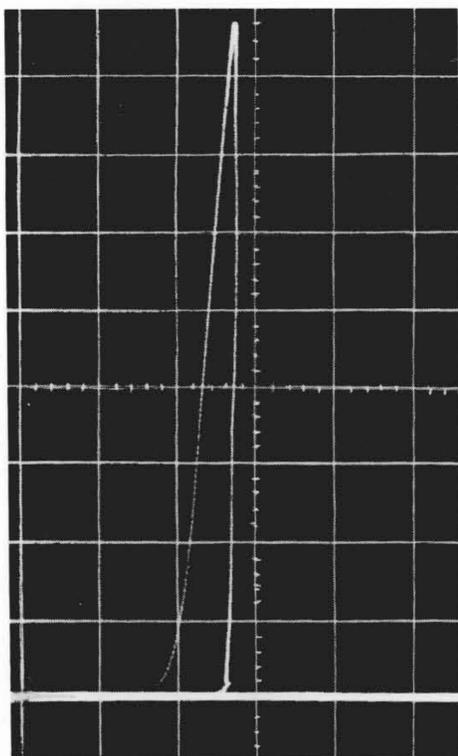
2.2 ダイレクトパラレル用素子特性

ダイレクトパラレル接続には、ターンオン特性、特にターンオン初期でのディレイタイムのばらつきが少なく、かつターンオン時の導通面積の広がりを出すフィンガ電圧の小さい

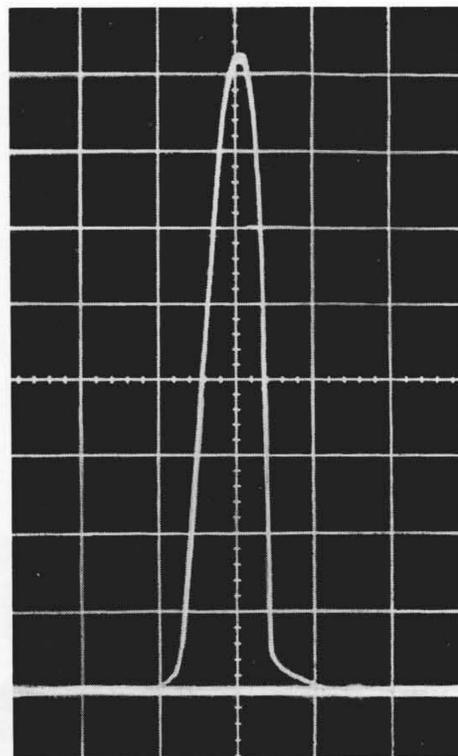
表2 変換装置仕様 変換装置及びこれに使用されるサイリスタバルブの主な仕様を示す。

項 目	仕 様
1. 定 格	(1) 容 量 150MW×2 (2) 直 流 電 圧 125kV (3) 直 流 電 流 1,200A×2 (4) 定 格 100%連続 (5) 定 格 周 波 数 60Hz (6) 結 線 方 式 三相ブリッジ (7) 冷 却 方 式 送油風冷 (8) 定 格 交 流 電 圧 110kV, 三相 (9) 直 流 電 圧 調 整 範 囲 +100%~-100% (10) 直 流 電 流 調 整 範 囲 10%~100% (11) 周 囲 温 度 -20°C~+40°C
2. 絶 縁	(1) 一 括 大 地 端 子 交 流 耐 電 圧 230kV, 1分間 交 流 コ ロ ナ 160kV, 30分間 直 流 耐 電 圧 ±225kV, 30分間 雷インパルス移行サージ及び開閉インパルス ±400kV (30~60)μs×(1,500~2,500)μs (2) バ ル ブ 端 子 間 交 流 耐 電 圧 230kV, 3~5秒間 交 流 コ ロ ナ 160kV, 30分間 直 流 耐 電 圧 ±225kV, 30分間 雷インパルス移行サージ及び開閉インパルス ±400kV (30~60)μs×(1,500~2,500)μs
3. 主 回 路	(1) 使 用 サ イ リ ス タ 素 子 CA02EA (2) 素 子 構 成 120S×2P×6A (3) ゲ ー ト 点 弧 方 式 電磁結合式ゲートパルス変圧器方式 (4) 事 故 電 流 し ゃ 断 アーム短絡を1サイクル・ゲートブロック可能
4. 耐 震 性	(1) 動 的 0.3G共振3波, 安全率2 (2) 静 的 0.5G

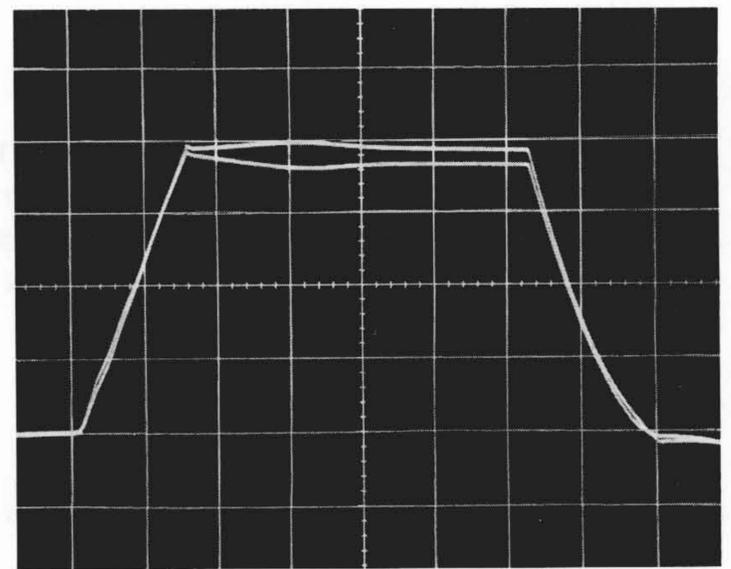
ことが要求される。CA02形サイリスタではダイレクトパラレル接続に最適な日立製作所独自のゲート構造を開発した。その結果、大容量素子としてはゲートトリガ電流レベルが50~



注：横軸=0.5V/div
縦軸=100A/div
図2 CA02形サイリスタのフィンガ電圧-電流特性 サイリスタが低電圧でターンオンする時のオン電圧のはね上がりを示し、フィンガ電圧はほとんど認められない。



注：横軸=0.5V/div
縦軸=100A/div
図3 従来ゲート構造素子のフィンガ電圧特性 ターンオン時にフィンガ電圧が見られる。



注：横軸=1ms/div
縦軸=150A/div
図4 CA02形サイリスタのダイレクトパラレル接続動作時の電流分担波形 この素子の場合の電流分担不平衡率は、約3.5%である。

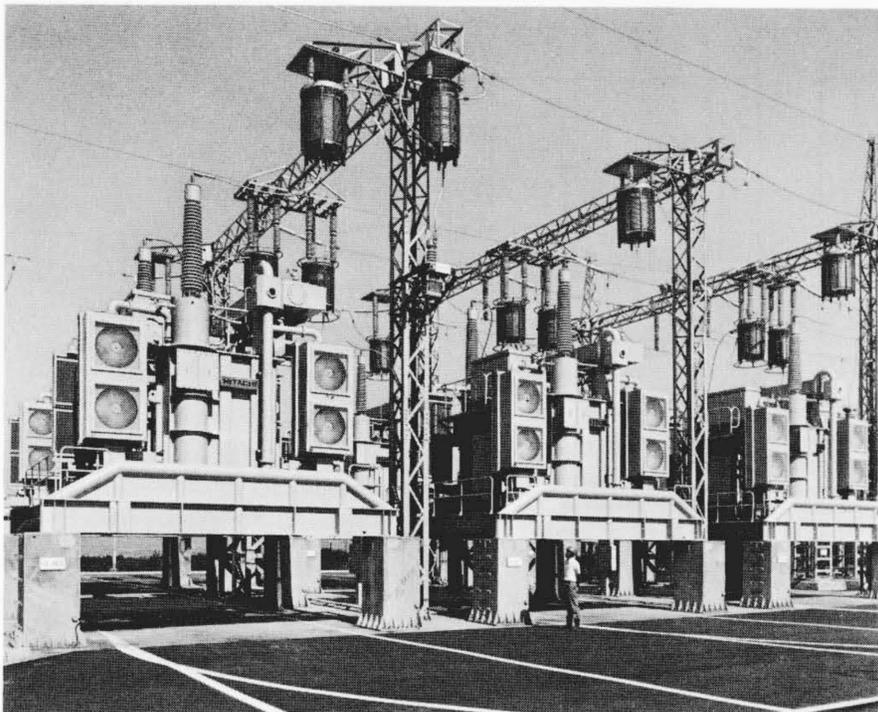


図5 運転を開始したサイリスタバルブ群 補修の便を考慮し、サイリスタバルブは鉄構架台上に据え付けられている。路面の白線はバルブ移動用自走車の走行ガイドである。

100mAと小さく、フィンが電圧の低い特性が得られた。図2にその電圧-電流特性を示す。図3に従来ゲート構造素子の特性を、また、図4にこの素子を2個ダイレクトパラレル接続した場合の電流分担の状況を示す。電流分担不平衡率は±10%以下に抑えられている。

3 サイリスタバルブ

今回製作したサイリスタバルブの仕様を表2に、またその

据付状況を図5に示す。次に、サイリスタバルブ(以下、バルブと略す)の概要について述べる。

3.1 主回路構成

バルブには、CA02-EA形サイリスタ(4,000V, 800A)を120個直列接続、2個並列接続して使用している。このサイリスタ群に交流分圧回路、直流分圧回路などが付属して主回路が構成される。図6にバルブの回路構成を示す。

サイリスタの直列数は、インパルス耐電圧試験値(400kV_p)に対するサイリスタの電圧分担の不平衡及び余裕を考慮して決定された。また、並列数は変換器の最大事故電流を1サイクルでゲートしゃ断する能力をもつように決定されている。サイリスタのダイレクトパラレル接続により、付属回路部品数の増加なしに高信頼度化が図られている。

バルブ主回路の構成単位はステージと呼ばれ、12直列、2並列接続されたサイリスタ、アノードリアクトル及び付属回路が収容されている。このステージを10個直列接続してバルブが構成される。

3.2 ゲート制御・保護

多数個直並列接続されたサイリスタを点弧する方式として、
 (1) 電磁結合式ゲートパルス変圧器を用いる方式
 (2) 点弧信号を光で高電位部へ伝送する方式
 が実用化されている。今回は油浸形バルブであることから保守の不要な電磁結合式ゲートパルス変圧器を用いた。

また、ゲートパルスは、サイリスタが通流している期間中、ゲートパルスを与える広幅パルス方式を採用した。

変換器制御装置から来るバルブの点弧指令を受けて、これを多数個直並列接続されたサイリスタを一斉に点弧するパルスに変換し、電磁結合式ゲートパルス変圧器の一次巻線に供給するゲート制御装置をバルブの上面と側面に設けた。また、

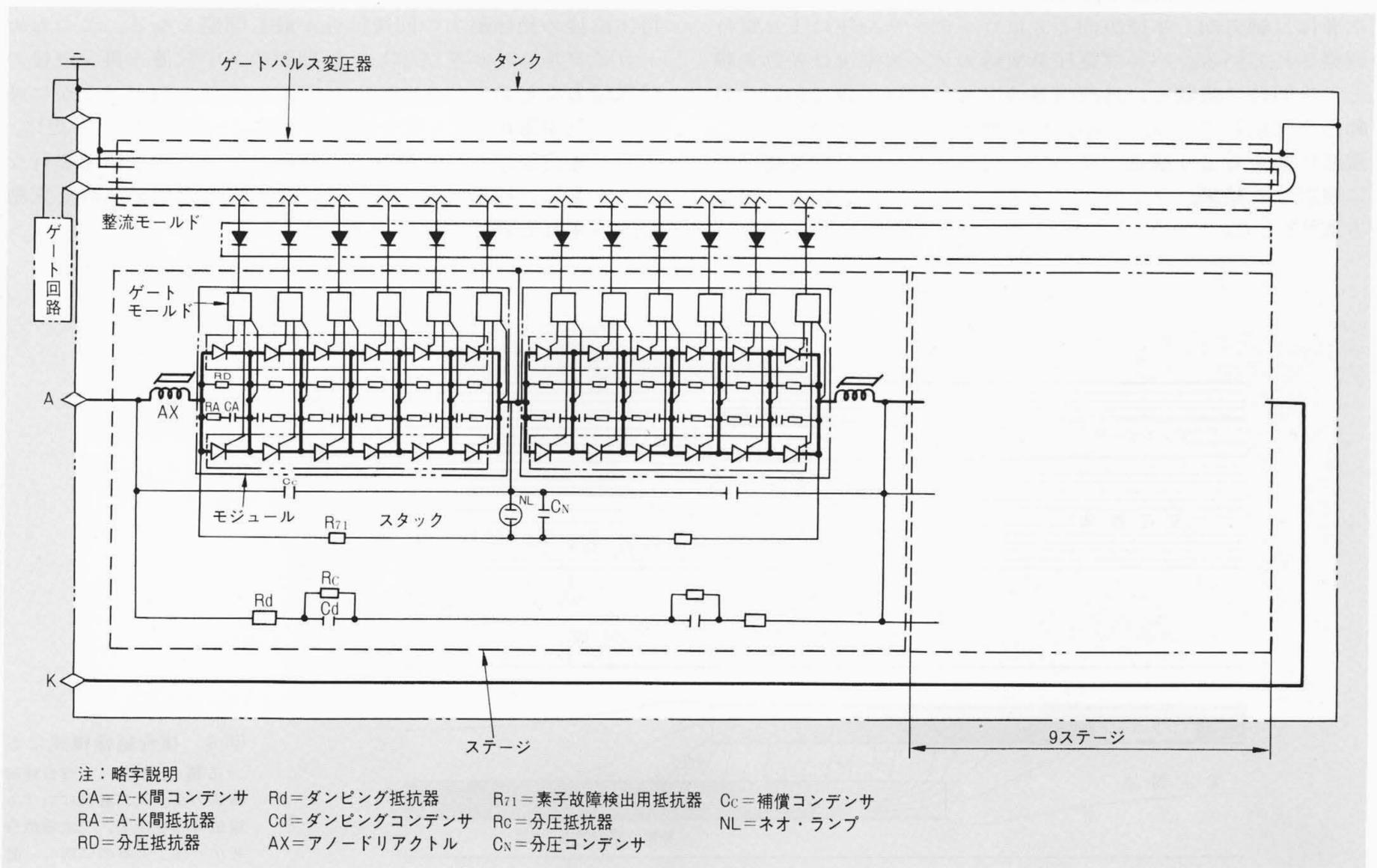


図6 サイリスタバルブ内部結線図 サイリスタバルブ内部の電気回路構成を示す。

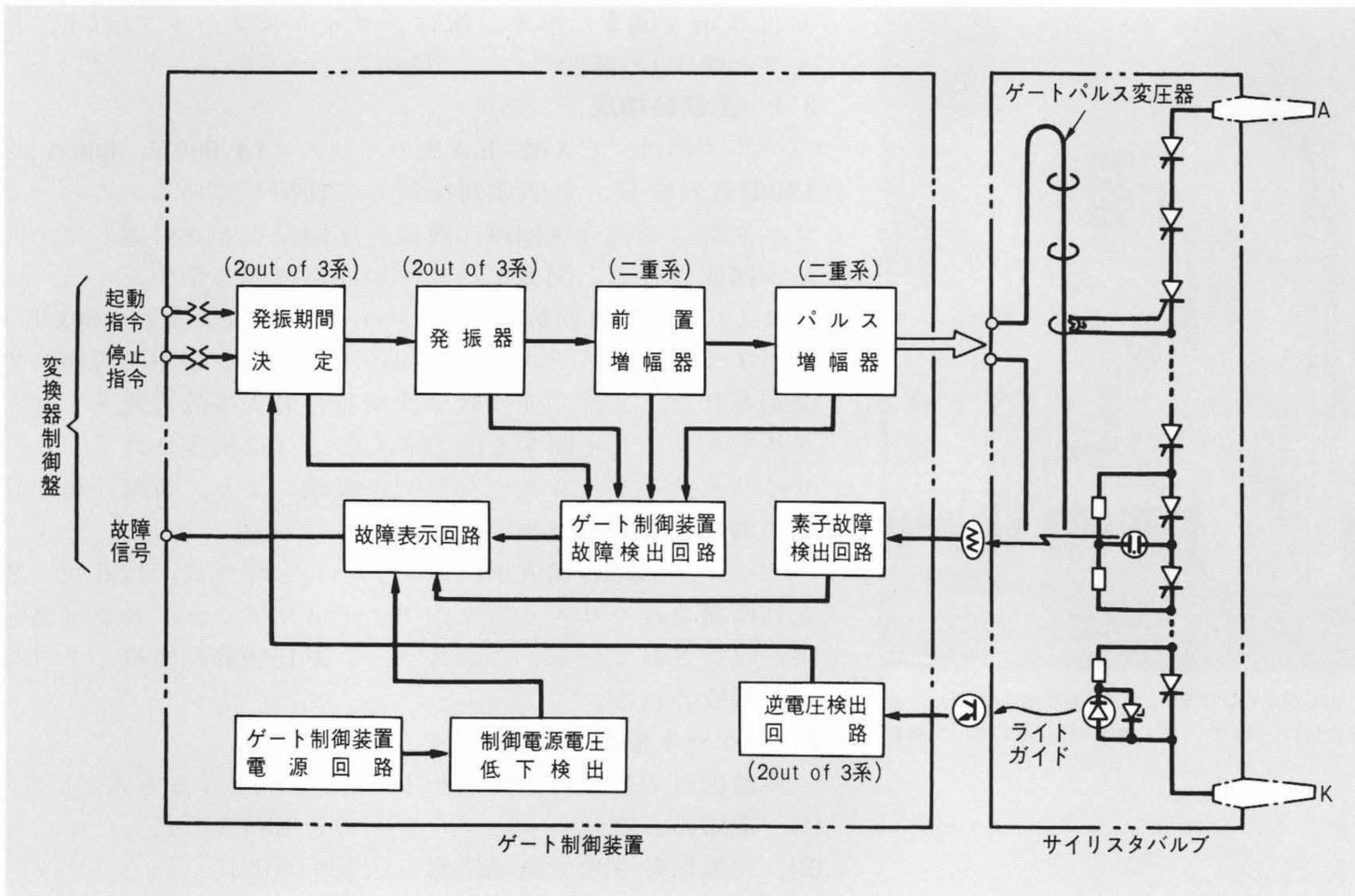


図7 ゲート制御装置構成ブロック図 ゲート制御装置の主要な部分は、2 out of 3系、又は二重系による冗長系として信頼度の向上を図っている。

ゲート制御装置は、バルブの故障検出機能及び保護機能をも備えている。図7にゲート制御装置の機能ブロック図を示す。

3.3 電磁結合式ゲートパルス変圧器

(1) 概略構造

バルブの点弧用として使用した電磁結合式ゲートパルス変圧器の基本構造及び原理は、先に電源開発株式会社佐久間サイリスタ変換装置試験所で使用したもの^{1),4),5)}と同じである。一次導体は軸方向、半径方向ともにコンデンサ分圧により電位調整されている。バルブ電圧急変時のノイズ電流は差動巻線と二次回路で吸収し、外部磁界の影響は補償巻線で相殺し誤動作を防止している。今回製作したゲートパルス変圧器は、量産に適するよう構造の簡易化と信頼性及び経済性を総合的に検討した結果、フェライトコア⁶⁾を鉄心とする全油浸絶縁方式⁵⁾とした。

(2) 試験結果

油浸紙絶縁の場合、エポキシモールドと比べ、(a)絶縁紙をテーピングするだけであり、材料の入手が容易で成型作業が不要、(b)モールドのように硬化収縮による圧縮力が鉄心に加わらぬため、応力緩衝層が不要で巻線作業が容易、(c)垂直に積み重ねる組立方法によりモールドと同程度に取扱いが容易などの利点があるが、内部点検などで気中露出された場合、再注油後の絶縁耐力の回復特性が最も問題となる。このためトロイダルコイルを試作し、長期間の気中放置—再含浸後の絶縁耐力などの変化を測定し、実際の条件に比べはるかに長い期間気中露出しても完全に回復することを確認した。更に、1台を先行製作し、点弧特性、絶縁性能の信頼性確認を行なうとともに、機械的にも輸送条件を模擬した振動試験を実施し、いずれも満足すべき結果を得た。

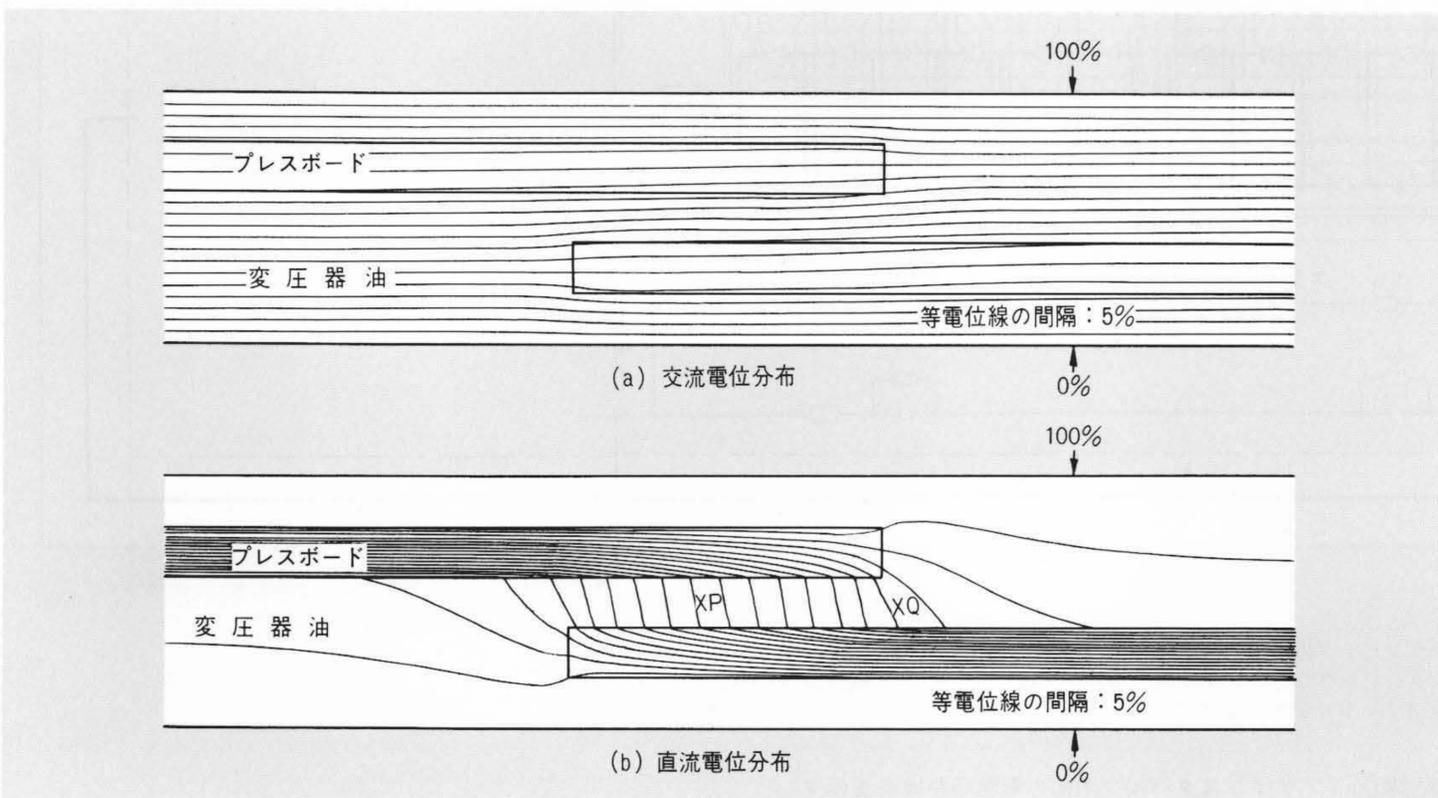


図8 複合絶縁構成における電位分布 複合絶縁構成の交流及び直流に対する電位分布を示す。交流電位分布が一様であるのに対し、直流電位分布は油浸紙に集中している。

3.4 絶 縁

バルブの主回路構成要素(ステージ)及びゲートパルス変圧器は接地された金属タンク内に収容され、その主絶縁には変圧器油と油浸紙から成る複合絶縁構成を採用している。複合絶縁構成の特徴は次に述べるようなものである。

(1) 絶縁破壊電界

変圧器油の直流破壊電圧は、交流の実効値破壊電圧にほぼ等しいのに対し、油浸紙の直流破壊電圧は高く交流波高値破壊電圧の2倍程度である。

(2) 電位分布

複合絶縁構造の電位分布は、

(a) 交流に対しては変圧器油と油浸紙の誘電率比(1:1.6程度)で決まる静電容量による電位分布である。

(b) 直流に対しては各々の体積抵抗比(1:10~100)による抵抗分圧となり、油浸紙が直流電圧のほとんどを分担する。という特徴がある。複合絶縁構造での交流及び直流の電位分布の一例を図8(a), (b)に示す。油浸紙は直流電圧を大部分分担するとともに、異物による万一の橋絡に対するバリアの役割をも果たす。また、油浸紙は図8に示すように必ずオーバーラップして配置され、そのオーバーラップ長及び油浸紙の端部厚さは、油中電界が変圧器油の直流に対する許容電界以下となるよう設定されている。

3.5 冷 却

バルブの冷却には送油風冷式を採用した。1台のバルブに4台のユニットクーラ及び送油ポンプを設け、このうち1台を予備機とする待機冗長系を構成している。

3.6 耐震強度

バルブ内部のステージ構造をラーメン骨組構造でモデル化し、汎用構造動特性解析プログラム“HISTDYN”を用いて共振周波数を求めた。共振周波数は22Hzであり、地震の卓越周波数範囲である10Hz以下を外れている。0.3G共振正弦3波で加振した場合の各部の変位応答の一例を図9に示す。また、バルブが設置される鉄鋼架台もその共振周波数が10Hzを超えるように設計されている。

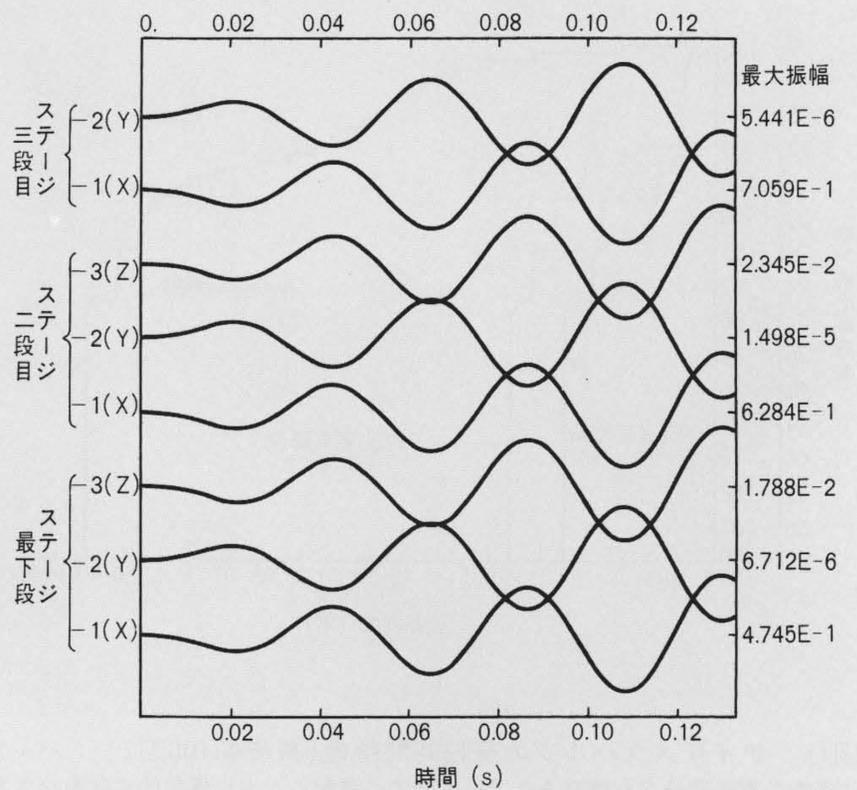
4 サイリスタバルブの据付・保守

4.1 据 付

バルブは工場で各種試験を終了した後、外装まわりを分解し油抜きして発送されるが、現地で再組立時製品として工場組立時と同等の品質水準を保つ必要がある。このため、顧客と十数回にわたり綿密な打合せ会議を行ない、図10に示すようなプロセス、管理項目を決定した。このような手法により現地での据付作業は極めて順調に進み、予定どおりの期間にすべての作業が終了した。

4.2 保 守

バルブには多数の電子部品が油中で使用されている。組込み前の部品の品質管理、組立後のチェックなど極めて厳重な品質管理体制をしいているが、なおそれでも偶発故障は避けにくい。そこで、運転時間の経過とともにサイリスタがどのように故障してゆくかをモンテカルロ法を用いて計算するとともに、片変換所の12バルブをどのような順序で内部点検すべきかのシミュレーションを行なった。図11に1バルブ内の素子が故障してゆく状況を、図12に12バルブにつき2年ごとに細密点検を行なった場合の素子の故障状況を示す。バルブは、11%未満の素子故障に対してはそのまま運転可能であるが、当分の間余裕をみて毎年点検を行ない、素子故障数の多いバルブから1年に1バルブずつ予備バルブと交換し、細密



注：正規化変位状態 アウトプットセット=1 正弦波 X方向 (0.3G 22.4Hz)

図9 サイリスタバルブの変位応答 0.3G共振正弦3波で加振した時のサイリスタバルブ内部の変位応答例を示す。

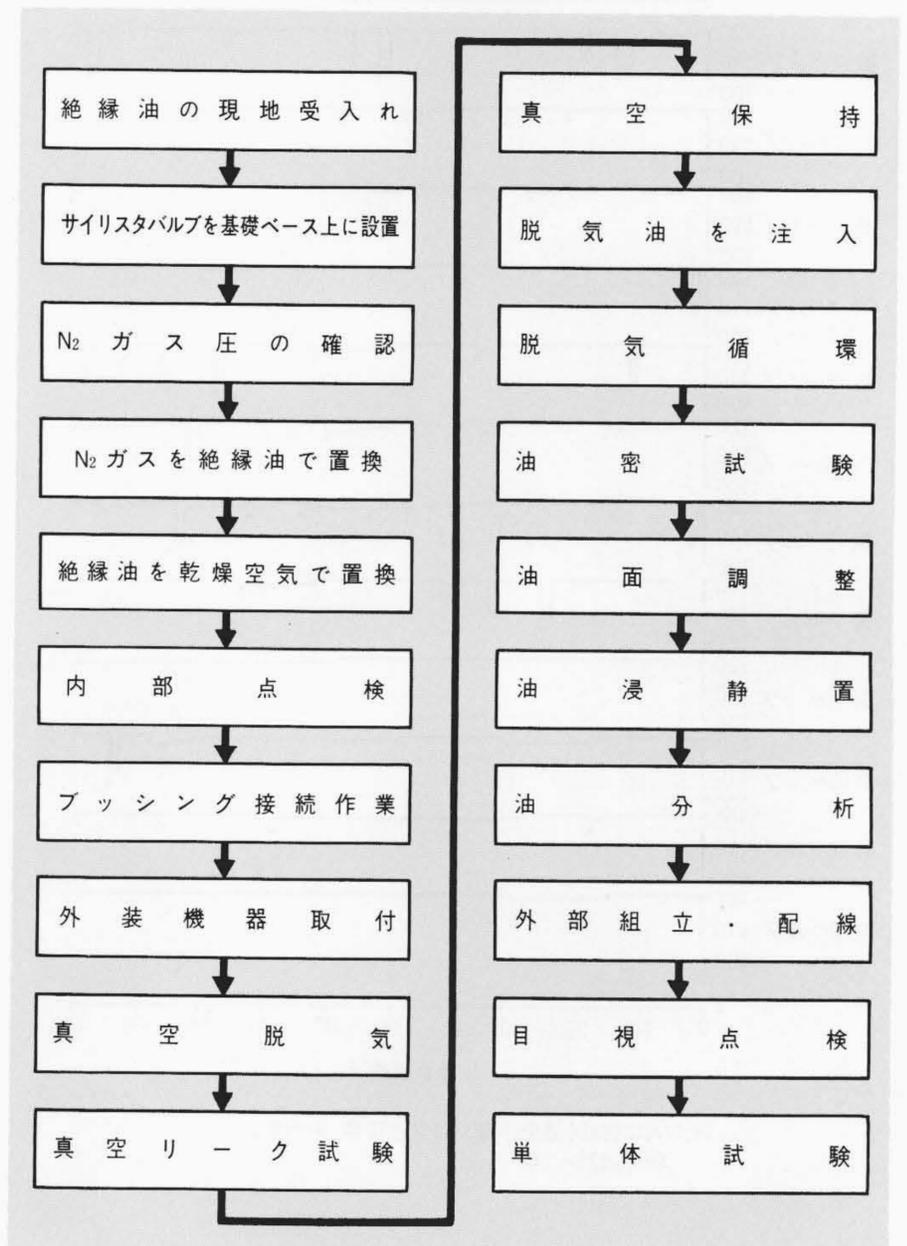


図10 サイリスタバルブの据付手順 サイリスタバルブを据え付ける手順と中間管理項目を示す。

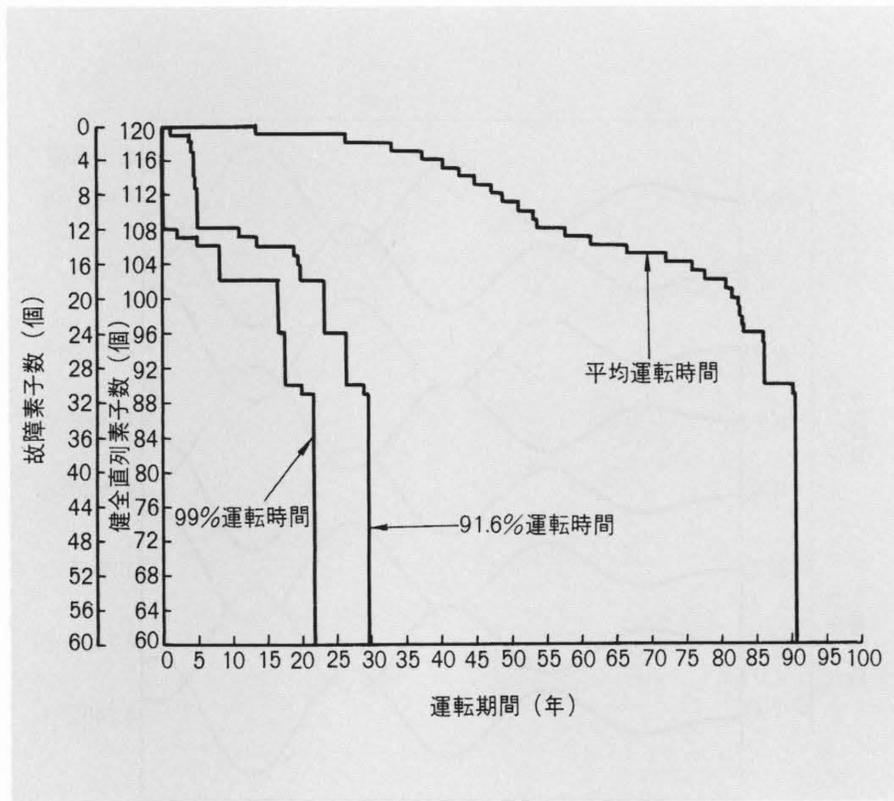


図11 サイリスタバルブの運転時間特性(負荷率100%) バルブは多数の電子部品から構成されているので、運転とともに偶発的に故障が生ずる。保修しない場合のバルブの故障素子数の時間特性を示したものである。

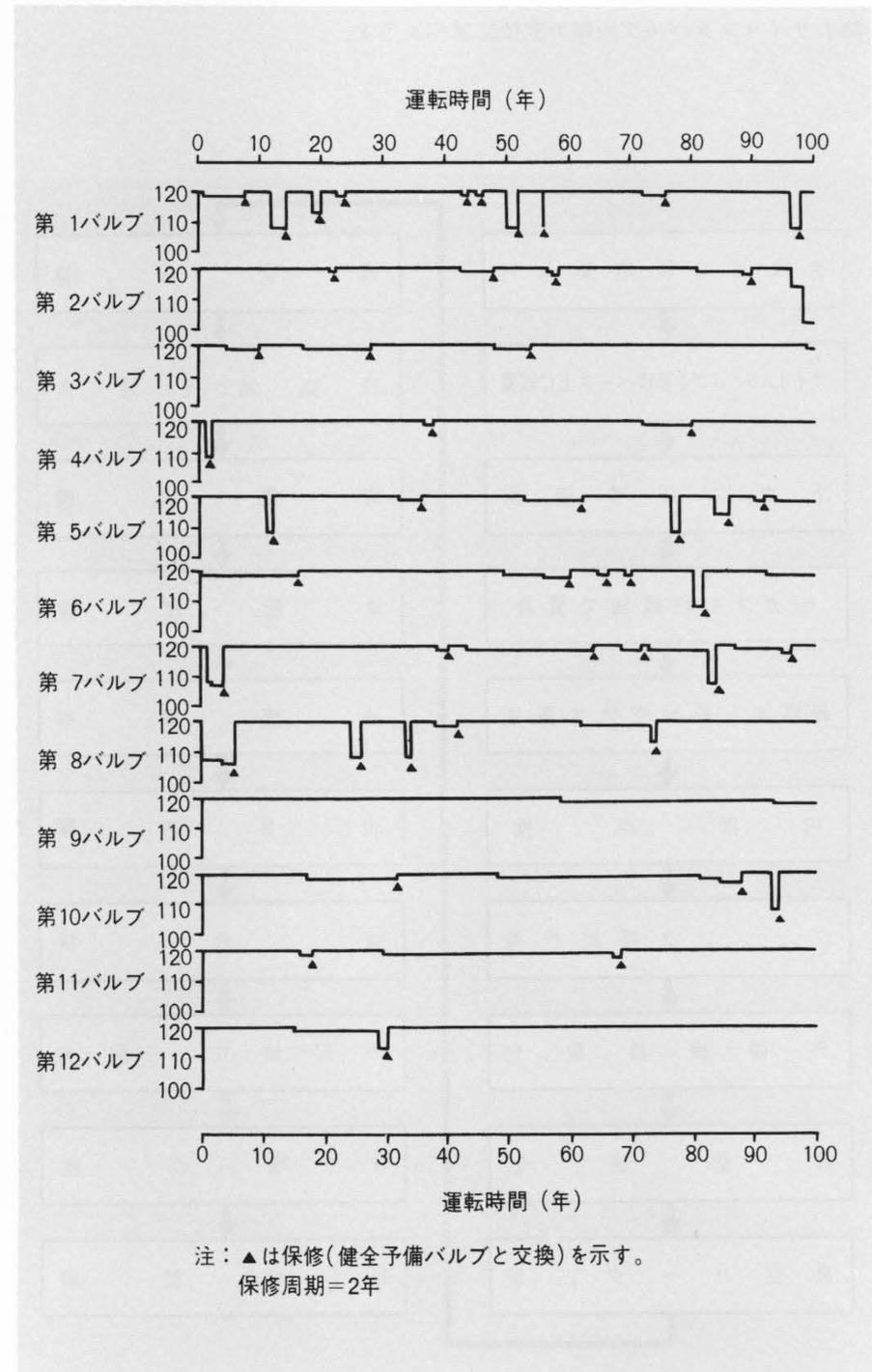


図12 各バルブの健全素子数の推移 12バルブの運転時間と故障推移を示したものである。モンテカルロ法によるシミュレーションによって求めた。

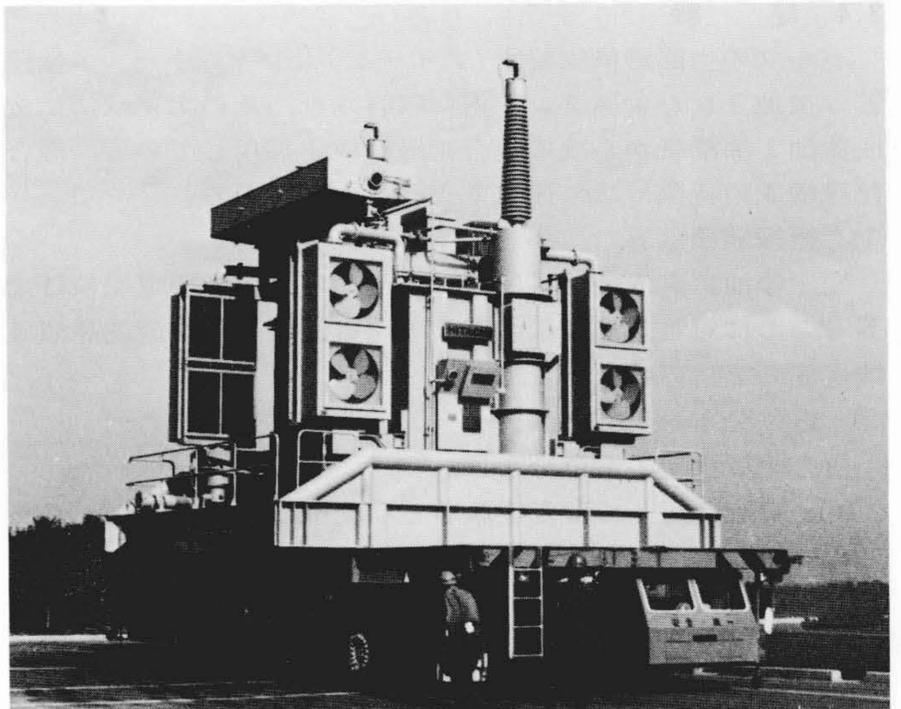


図13 自走車により構内を移動中のサイリスタバルブ 細密点検を要するサイリスタバルブと予備バルブを交換するため、自走車で移動する。

点検を行なうこととした。

このため、63tのバルブを簡単に移動させる手段が必要であり、各種の方法を検討したが最終的にバルブの交換時間が最も短い自走台車による方法を採用した。この方法によれば予備バルブとの交換時間は4時間程度で済むが、交換後各種の確認試験が必要であるため総合所要時間は10時間程度となる。図13に自走台車で移動中のバルブを示す。据付工事の予備試験で、この自走台車によるバルブ交換は極めてスムーズに行なえることが確認された。

5 結 言

日立製作所では、我が国最初の大容量油浸形サイリスタバルブを完成した。このバルブは屋外に設置され、12バルブで300MWの変換装置の片端を構成する。バルブには世界でも最高電圧級の素子CA02-EAを直並列接続して使用した。現地据付、保守方式の検討を顧客と合同で行ない、順調に運転開始に達することができた。

終わりに、このバルブの設計、製作、据付にわたって種々御指導をいただいた東京電力株式会社信濃工事事務所長安田正行氏をはじめとする関係各位、及び社内で協力を得た関係各位に対し厚く御礼申しあげる。

参考文献

- 1) 川上, ほか6名: 125kV, 37.5MW高電圧サイリスタバルブの開発, 日立評論, 53, 396 (昭46-4)
- 2) 尾形, ほか6名: 125kV, 1,200A油浸型サイリスタバルブの開発, 日立評論, 56, 227~231 (昭49-3)
- 3) K. Morita, et al.: Large-area High-voltage Thyristors for HVDC Converter, IEEE, International Electron Devices Meeting. (1977)
- 4) 池本, ほか5名: 125kV油浸サイリスタバルブ用電磁結合式ゲートパルス変圧器, 日立評論, 56, 531 (昭49-6)
- 5) 長屋, ほか4名: 油浸紙絶縁ゲートパルス変圧器, 昭和51年電気学会全国大会, 561 (昭51-4)
- 6) 長屋, ほか3名: 直流送電用大形フェライトコアの開発, 昭和51年電気学会全国大会 (昭51-4)
- 7) 高橋, ほか3名: 油浸絶縁物の直流沿面フラッシュオーバー特性 電気学会論文集, 53-A50 (昭53-8)