

光直接点弧サイリスタバルブの開発

Development of Light-Triggered Thyristor Valves

近年、直流送電・異周波連系に使用されるサイリスタバルブはますます大容量化する傾向にあり、その高信頼度化、コンパクト化及び保守の簡素化の要請が高まっている。この要請にこたえるため、従来から光直接点弧サイリスタ素子(以下、光サイリスタと略す。)のサイリスタバルブへの適用が検討されてきた。光サイリスタの使用により、部品点数の大幅な低減とノイズ耐量の向上が図れ、高信頼度化、コンパクト化及び保守の簡素化が可能となる。

今回、電源開発株式会社と日立製作所の共同研究により、光サイリスタCLP1500A40(4,000V, 1,500A)を使用した125kV, 1,800Aの水冷式光サイリスタバルブを開発した。このバルブは部品点数を従来の15%、重量を65%、体積を60%と大幅に小形・改良されたものとなっており、工場試験後、電源開発株式会社佐久間周波数変換所で昭和58年12月から昭和60年2月まで実系統試験を実施して良好な結果を得、光サイリスタバルブ実用化の見通しが得られた。日立製作所では、更に将来の大容量直流送電に向けて、世界最大容量の光サイリスタ4,000V, 3,000Aを開発し、これを使用した500kV用光サイリスタバルブの開発も行なっている。

柏崎 博* Hiroshi Kashiwazaki

田中 主税* Chikara Tanaka

小田井恒吾* Shingo Odai

1 緒 言

サイリスタバルブについては、昭和52年12月に東京電力株式会社新信濃変電所で油絶縁油冷式サイリスタバルブを開発し、次いで昭和54年12月に電源開発株式会社北海道本州間直流連系設備で光間接点弧空気絶縁風冷式サイリスタバルブを実用化した。更に、昭和56年12月から昭和58年12月にかけて、電源開発株式会社佐久間周波数変換所で空気絶縁水冷式サイリスタバルブ1アームの実系統試験を行ない、水冷式サイリスタバルブの実用性能の検証を行なった。今回更に主回路に光サイリスタを用いた水冷式光直接点弧サイリスタバルブを開発した。

図1に従来の電気サイリスタバルブ(光間接点弧方式)と光サイリスタバルブ(光直接点弧方式)の点弧方式の比較を示す。同図に示すように光サイリスタバルブでは、主回路電位部の光サイリスタにライトガイドを直結するだけでよく、従来必要であったパルス増幅回路及び同回路用の電源が不要となる。これにより、容積で60%、電気部品点数で約15%程度の低減ができ、信頼性の向上、コンパクト化が可能である。

今回、光サイリスタバルブの主要部品である光サイリスタ、高出力LED(Light Emitted Diode)、ライトガイドとともに制御保護方式の開発を行ない、CLP1500A40形光サイリスタ(4,000V, 1,500A)を使用した125kV, 1,800A空気絶縁水冷式光サイリスタバルブを実用化した。また世界に先駆けて電源開発株式会社佐久間周波数変換所で既設の水銀バルブ1アームと置き換え、実系統での長期信頼性検証試験を実施した。

本稿は、上記光サイリスタバルブの開発について述べるとともに、将来の大容量・高電圧直流送電用光サイリスタバルブの開発状況について紹介する。

	電気サイリスタバルブ(光間接)	光サイリスタバルブ
点弧方式		
モジュール構成		
部品	約500	約100

注: 略語説明 Ax(アノードリアクトル)

図1 光サイリスタによるサイリスタバルブ小形化の例 従来のサイリスタバルブに比べて容積で60%、部品数で15%程度に低減可能である。

* 日立製作所日立工場

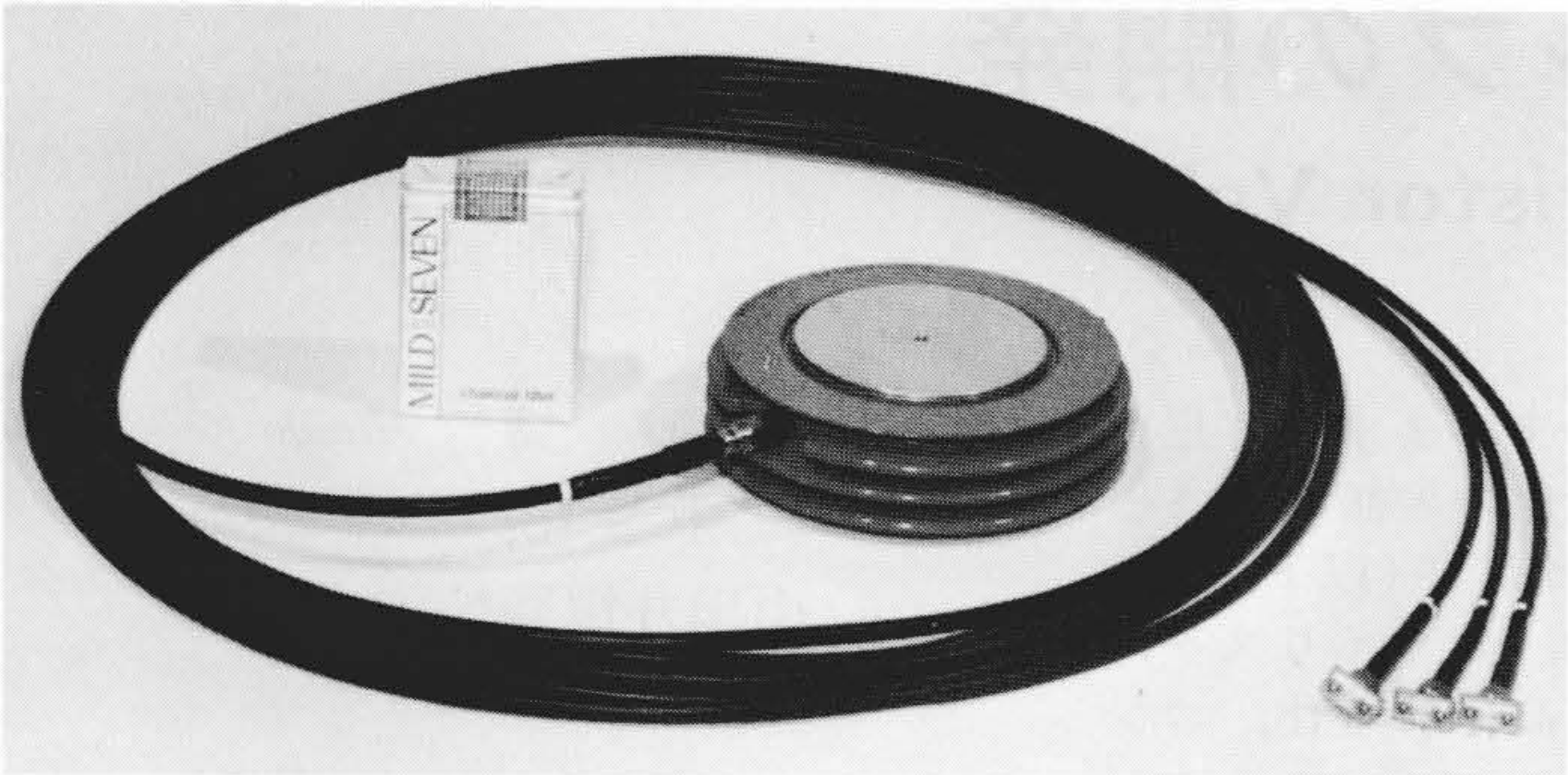


図2 CLP1500A40形光直接点弧サイリスタ CLP1500A形光サイリスタの外観を示す。素子には、駆動用の発光ダイオード及びライトガイドが接続されている。

表1 CLP1500A40形の定格・特性表 世界で最初に量産された光直接点弧サイリスタ素子である。

項 目	記 号	CLP1500A40
繰返しせん頭オフ電圧	V_{DRM}	4,000V
繰返しせん頭逆電圧	V_{RRM}	4,000V
非繰返しせん頭逆電圧	V_{RSM}	4,400V
定格平均オン電流	$I_T(AV)$	1,500A
非繰返しサージオン電流	I_{TSM}	30,000A
臨界オン電流上昇率	di/dt	250A/ μ s
動作接合温度	T_j	-25~125℃
圧 接 力	—	5,000kg
最大オン電圧	V_{TM}	2.35V($I_{TM}=4,500A$)
最小点弧光入力	P_{LT}	10mW
ターンオンタイム	t_{gt}	5.0 μ s Typ.
ターンオフタイム	t_q	250 μ s Max.
臨界オフ電圧上昇率	dv/dt	1,500V/ μ s
熱 抵 抗	$R_{\theta-C}$	0.015℃/W

2 光サイリスタ

高電圧直流送電・水冷式光直接点弧サイリスタバルブ用として、世界で初めてCLP1500A40形 4,000V、1,500A大容量光サイリスタ(図2)を開発し、その量産化に成功した。

2.1 素子構造

光サイリスタでは、従来の電気信号で駆動する素子と異なり、ゲートトリガ信号の光エネルギーが電気点弧エネルギーの数十分の一といった非常に微弱な光信号で直接駆動させなければならない。したがって、光サイリスタの開発に当たっては、 dv/dt 耐量や di/dt 耐量といったサイリスタの主要な特性を犠牲にすることなく、素子の光点弧感度をいかに高くすることができかが重要な課題である。

CLP1500Aには、 p_B 層を覆った n_E 層に光を照射することにより光点弧感度と dv/dt 耐量のトレードオフの改善を図り、日立製作所独自のH形3段増幅ゲート電極構造(図3)を適用

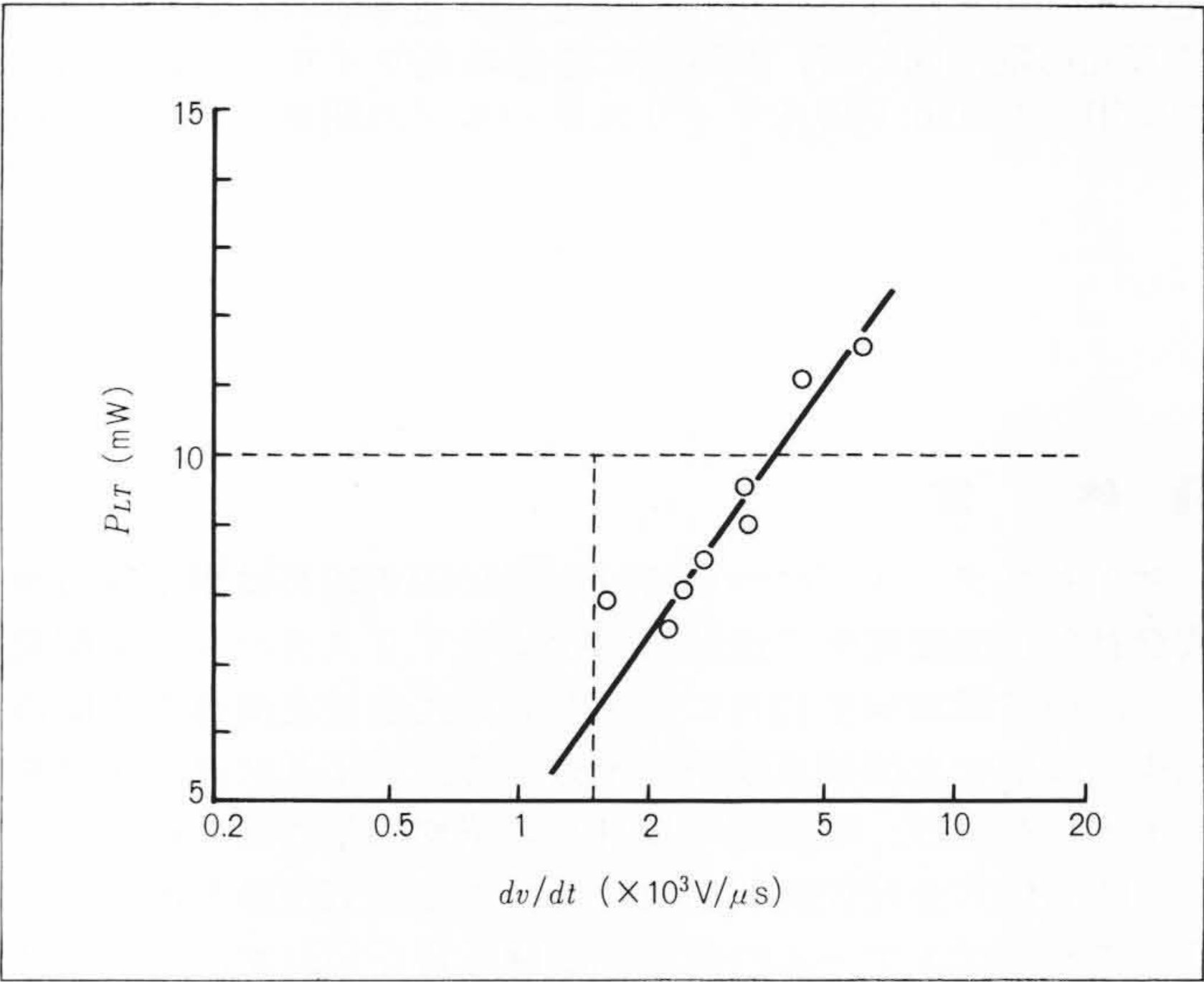


図4 最小点弧光入力と dv/dt 耐量 高光感度受光部構造の採用によって、トレードオフの協調が非常に良くなっている。

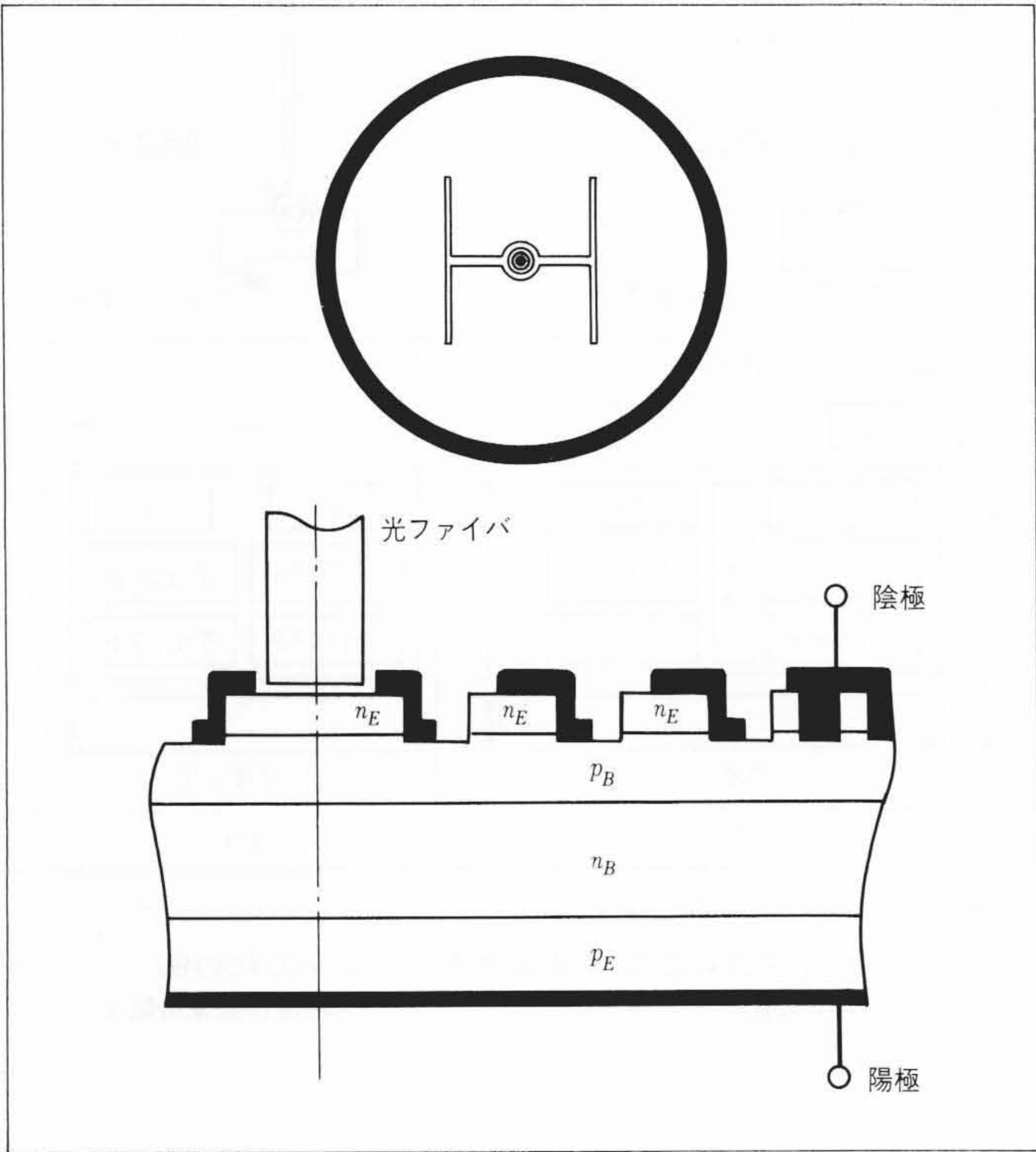


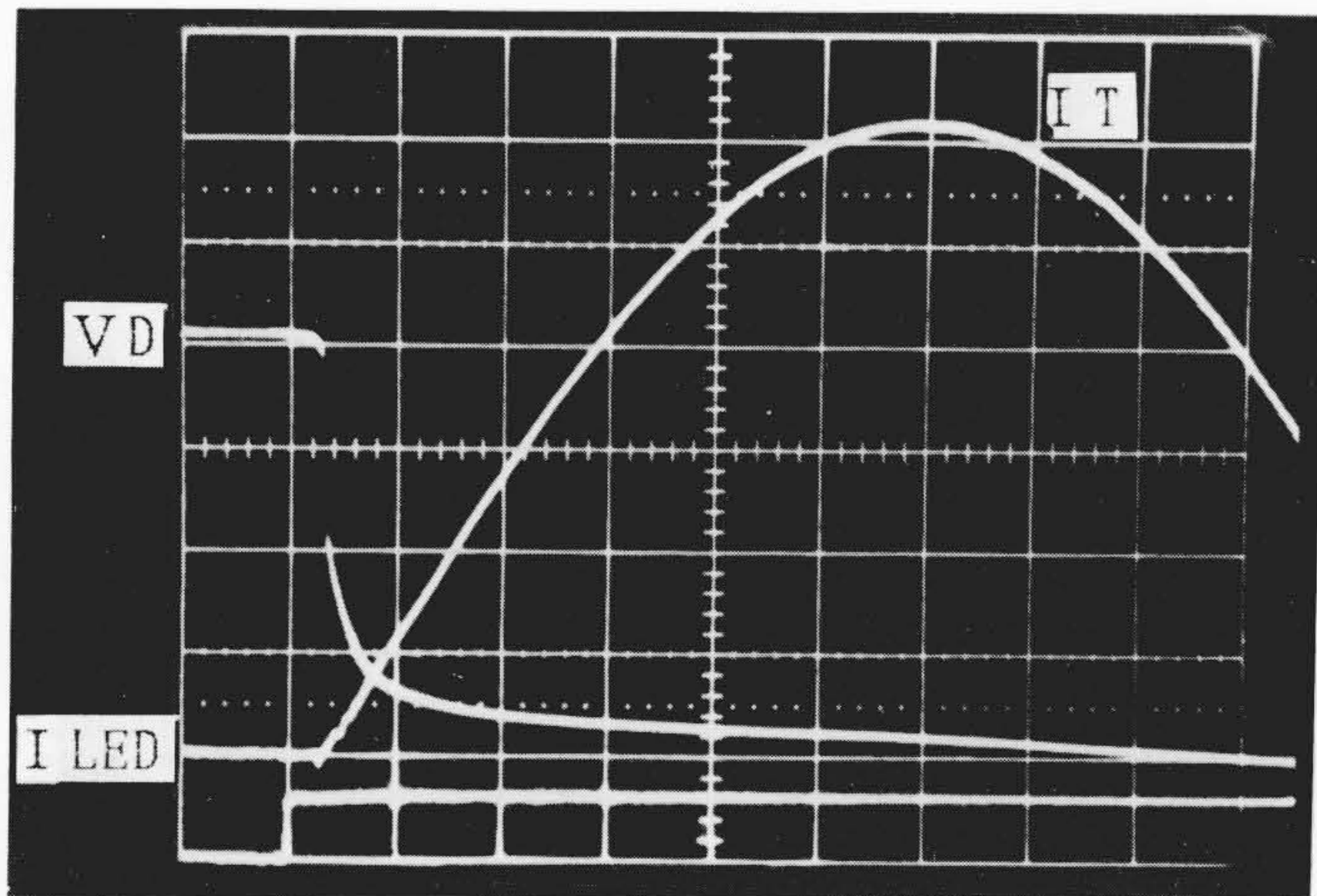
図3 CLP1500Aのゲート構造 日立製作所独自のH形3段増幅ゲート構造を示す。高光感度で、かつ dv/dt 耐量、 di/dt 耐量の良い構造である。

して、高い di/dt 耐量が得られている。
更に、パッケージ側壁から光信号を導入する方式を開発して、取扱いの容易性及びスタックの小形化を図るとともに、光導入部入口からシリコンペレット受光部まで約80%以上の高い光伝送効率を得られる光ファイバを内蔵したパッケージ構造としている。その素子仕様を表1に示す。

2.2 素子特性

図4に光点弧感度と dv/dt 耐量のトレードオフの関係を示す。高光感度受光部構造を採用したことにより、最小点弧光入力は10mW以下、 dv/dt 耐量は接合温度125℃、オフ電圧4,000Vのとき1,500V/ μ s以上というトレードオフとして非常に良い協調が得られている。更に、増幅ゲート構造を適用して高い di/dt 耐量が得られた。図5は接合温度125℃、光入力80mW、オフ電圧2,000Vからスイッチングさせたときのターンオン特性を示しており、電流ピーク3,000Aまで立ち上がらせたとき250A/ μ s以上の高い di/dt 耐量があることを確認した。

一方、直流送電用サイリスタバルブでは、100個程度素子を直列接続して使用するため、素子間のターンオンタイム、特にディレイタイムのばらつきを最小限にする必要がある。図6に、素子をターンオンさせるときのターンオンタイムとディレイタイムのゲートオーバドライブ率(=光入力 P_{in} /最小



注：縦軸(I_T :500A/div, V_D :500V/div, I_{LED} :1A/div)
(2 μ s/div)

図5 ターンオン時の電圧-電流波形 増幅ゲート構造の採用によって、250A/ μ s以上の高い di/dt 耐量を得られている。

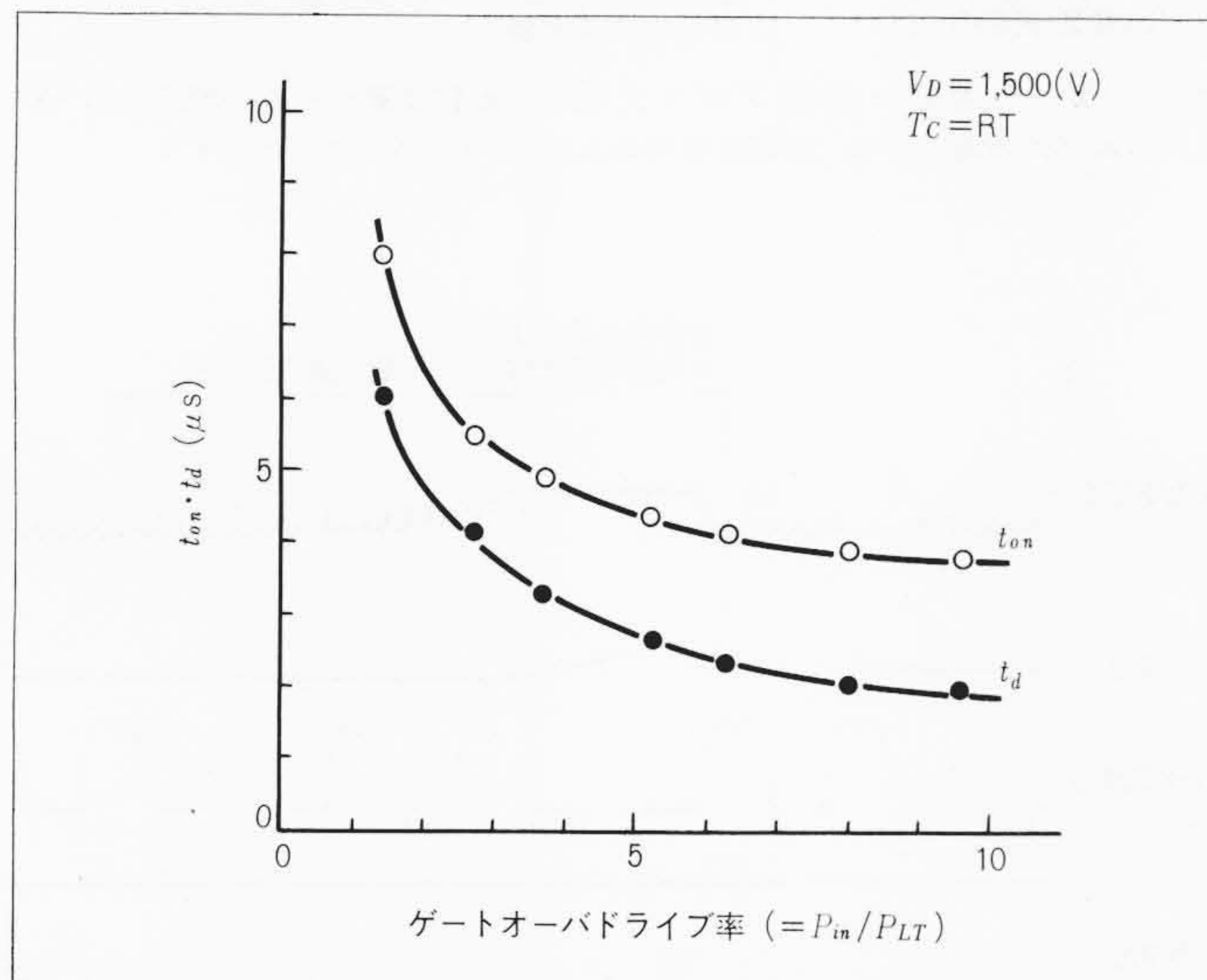


図6 ターンオンタイム、ディレイタイムの光入力依存性 CLP1500Aは、約6～7倍のオーバドライブ率で t_{on} 、 t_d がほぼ一定に飽和する。

点弧光入力 P_{LT})に対する依存性を示す。CLP1500Aでは、これらはゲートオーバドライブ率が約6～7でほぼ一定に飽和している。

3 光点弧系

光サイリスタ点弧用の光源として、GaAlAs系の高出力LEDを開発した。LEDのチップ断面構造を図7に示す。この構造の特徴は、発光部と同じGaAlAsの光透過層をドーム状に加工することによって、高い光取出し効率を達成できることである。接合は、DH(ダブルヘテロ)接合構造のため、内部量子効率が向上し、従来のSH(シングルヘテロ)接合構造に比べて1.5倍から2倍の光出力が得られた。また、発光部の面積を従来の2倍にすることによって、光出力1W(パルス)を達成することができた^{1),2)}。

光点弧系の構成を図8に示すが、信頼性を向上させるため、LED側は3分岐とし、LEDが1個故障した場合にも光サイリスタに十分な光量が確保され、運転に支障のない設計としている(同図参照)。

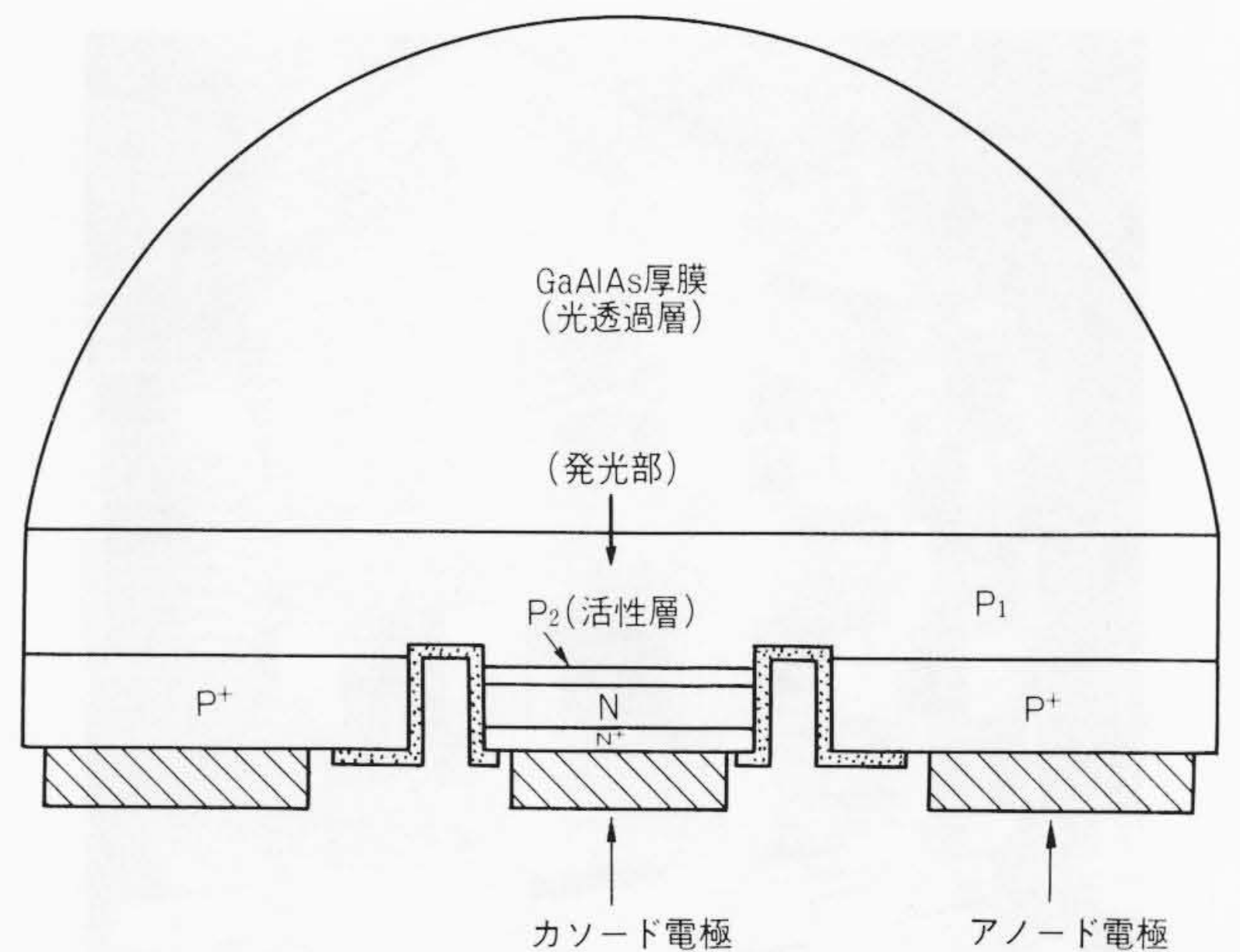


図7 高出力LEDチップ断面構造 光サイリスタ点弧用光源として開発した高出力LEDのチップの断面構造を示す。

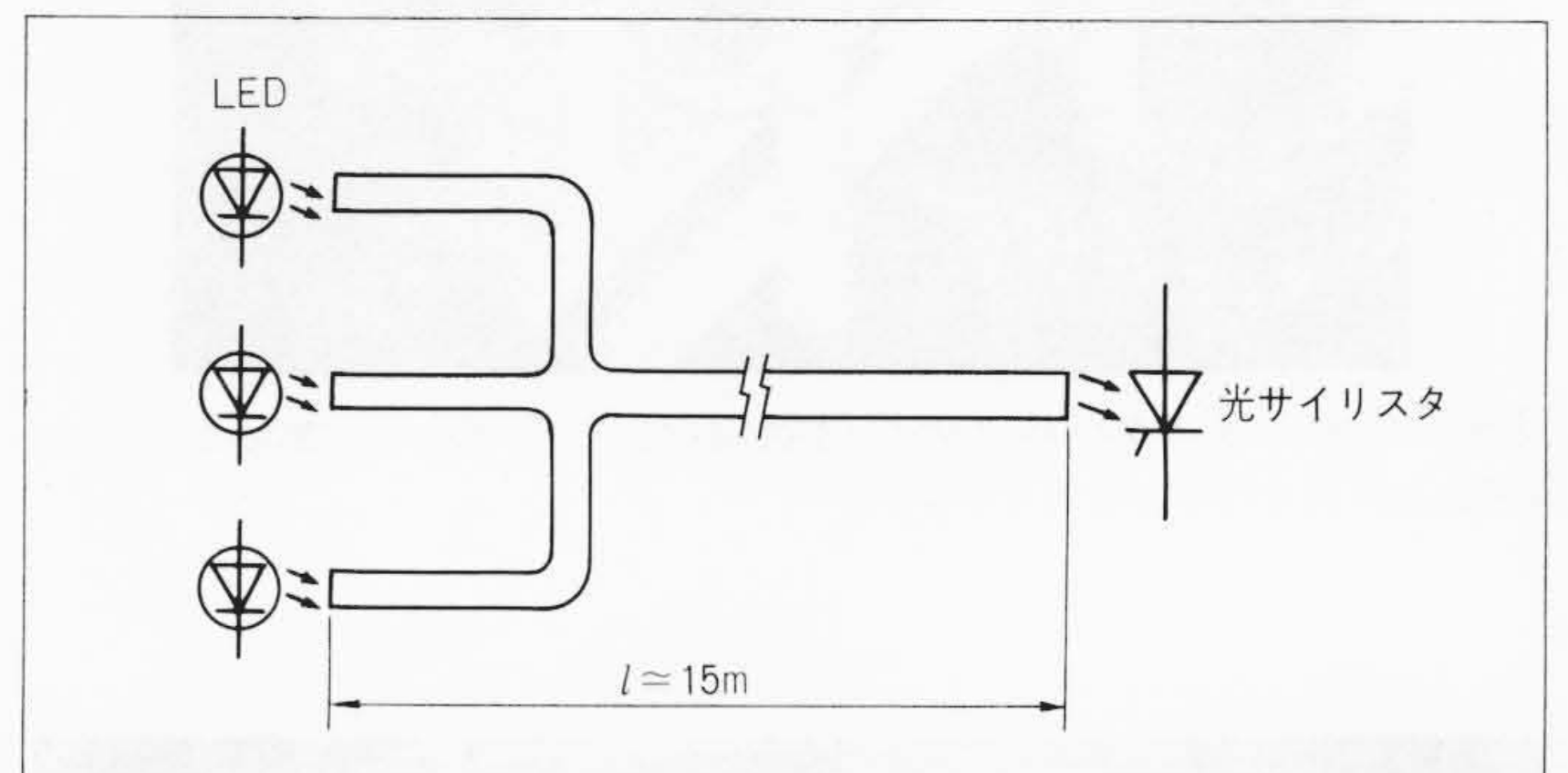


図8 光点弧系の構成 高信頼度化のため、3分岐とした光点弧系の構成を示す。

また、光伝送効率向上のため、広角口角のライトガイドを開発した。

4 光サイリスタバルブ

今回開発した光サイリスタバルブの仕様を表2に、その据付状況を図9に、モジュール内部構造を図10に示す。

光サイリスタバルブは、光サイリスタ6個を直列接続した光サイリスタモジュールを17個直列接続して構成される。以下に、光サイリスタバルブの概要について述べる。

表2 光サイリスタバルブの仕様 今回、佐久間FC用に開発した光サイリスタバルブの仕様である。ゲート点弧には、光直接点弧方式を採用している。

項 目		仕 様
1. 定 格	(1)容 量	225MW(三相ブリッジ結線)
	(2)直 流 電 圧	125kV
	(3)直 流 電 流	1,800A
	(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)定 格 交 流 電 圧	108.3kV
2. バルブ端子間絶縁	交 流 耐 電 圧	195kV(15秒間)
	直 流 耐 電 圧	±200kV(各1分間)
	雷インパルス及び開閉インパルス	±370kV
3. 主回路	(1)使用サイリスタ素子	CLP1500A40(4,000V, 1,500A)
	(2)素 子 構 成	102直列×1並列
	(3)ゲート点弧方式	光直接点弧方式
	(4)事 故 電 流 遮 断	アーム短絡を1サイクル・ゲートブロック可能
	(5)冷 却 方 式	水冷式

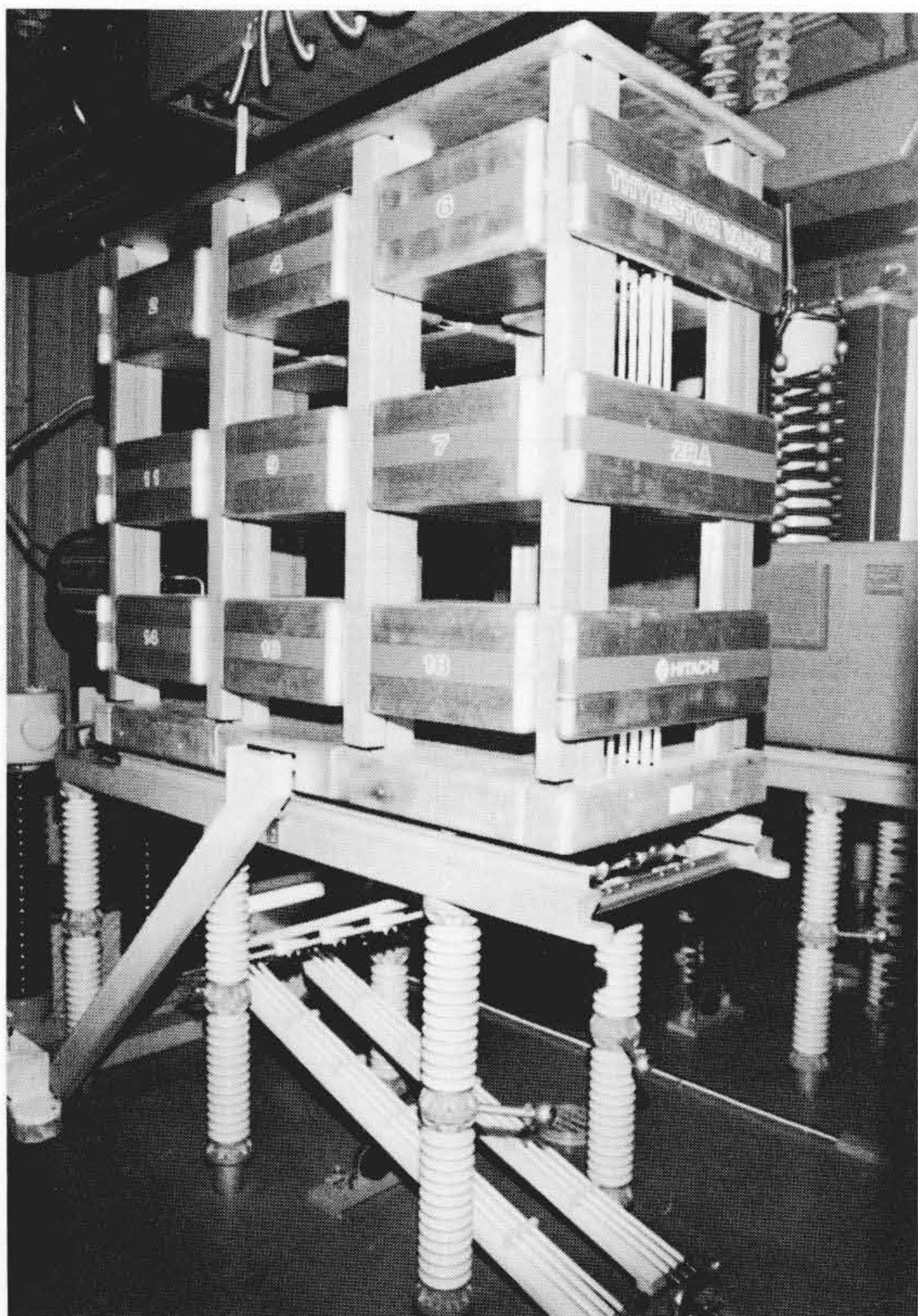


図9 光サイリスタバルブの据付状況(佐久間FC) 直流125kV用絶縁架台上に据え付けた状況を示す。

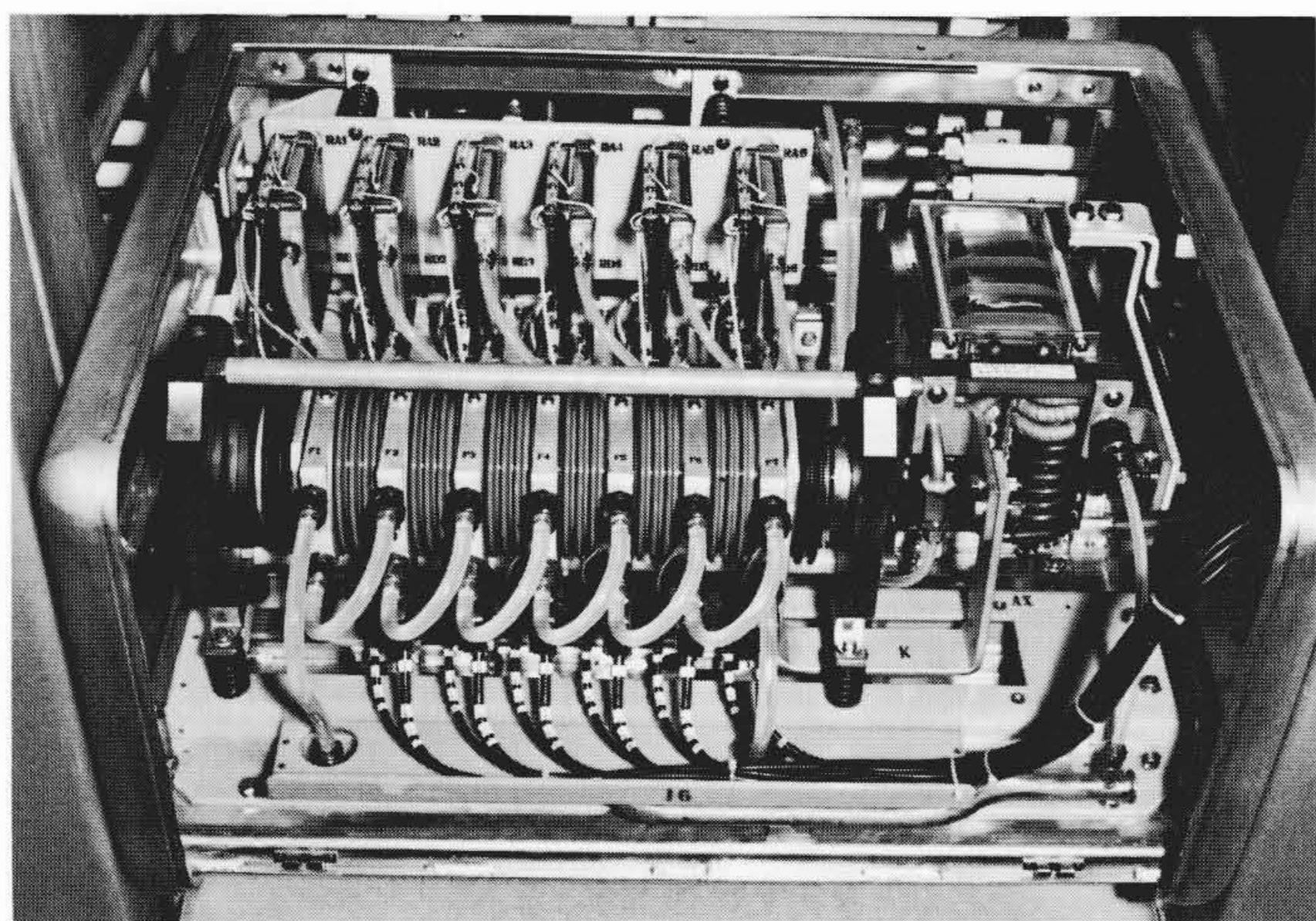
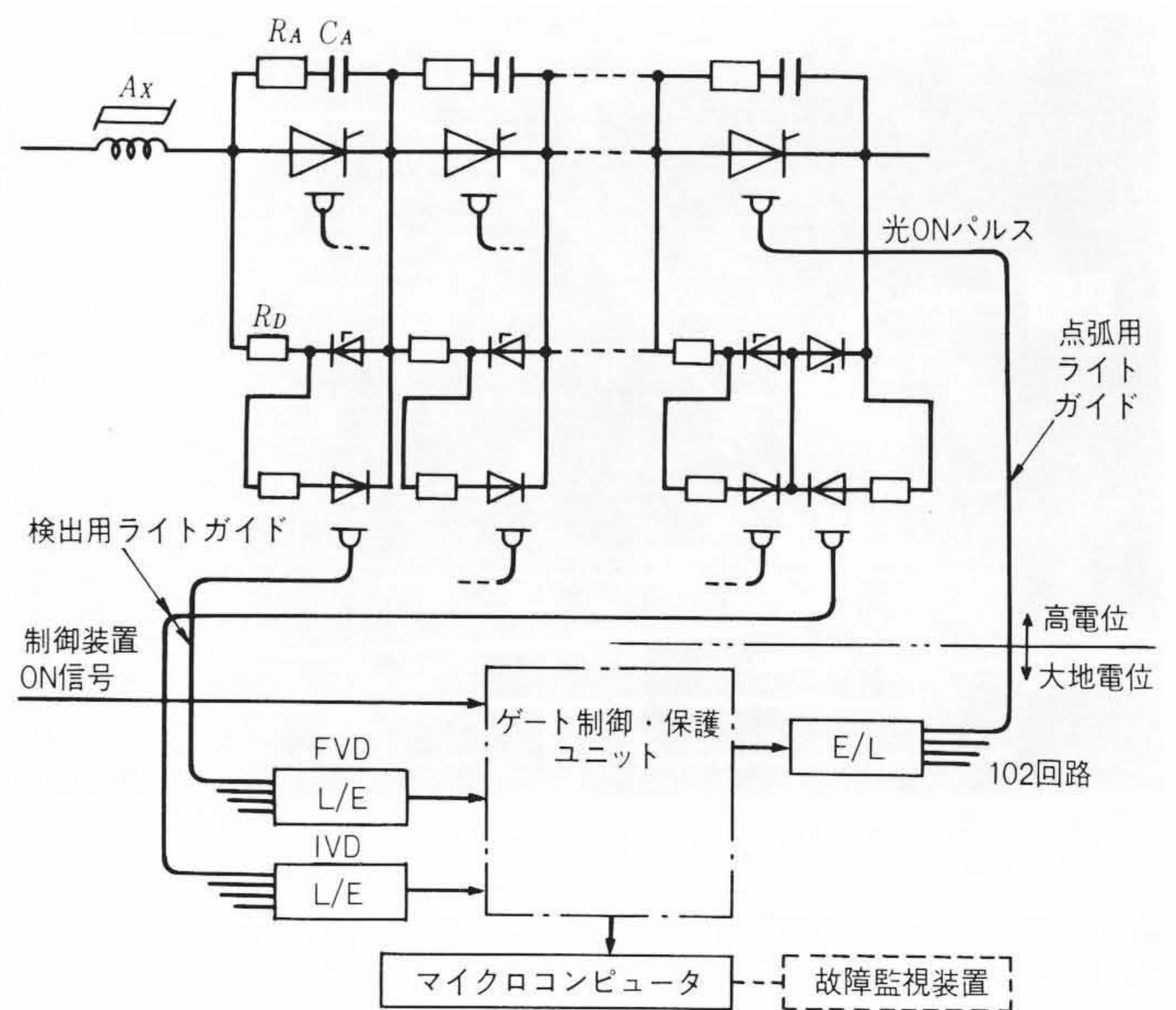


図10 光サイリスタモジュール内部 光サイリスタと水冷フィンが交互になった6直列のスタックがあり、その手前にライトガイドが布設されている。

4.1 ゲート制御・保護

光サイリスタバルブのゲート制御・保護ブロック図を図11に示す。この制御保護系には、(1) 通常運転、(2) 電流断続、(3) 転流余裕角不足の各モードに応じたONパルス出力が要求される。このため、素子順電圧を検出し、順電圧検出と制御装置からのON信号とのAND条件によりONパルスを出力する方式としている。これにより、通常運転及び電流断続時のONパルスを出力することができる。また、モジュールごとに素子逆電圧を検出し、検出時間が不足した場合には、転流余裕角不足による部分的なターンオフから光サイリスタを保護するための強制点弧ONパルスを出力する方式としている。図



注：略語説明

Ax(アノードリアクトル) RA(A~K間抵抗器) CA(A~K間コンデンサ)
RD(分圧抵抗器) FVD(順電圧検出器) IVD(逆電圧検出器)
E/L(電気-光変換器部) L/E(光-電気変換器)

図11 ゲート制御・保護ブロック図 制御装置からのON信号とサイリスタバルブの順電圧信号、逆電圧信号を入力し、ONパルスを出力する。

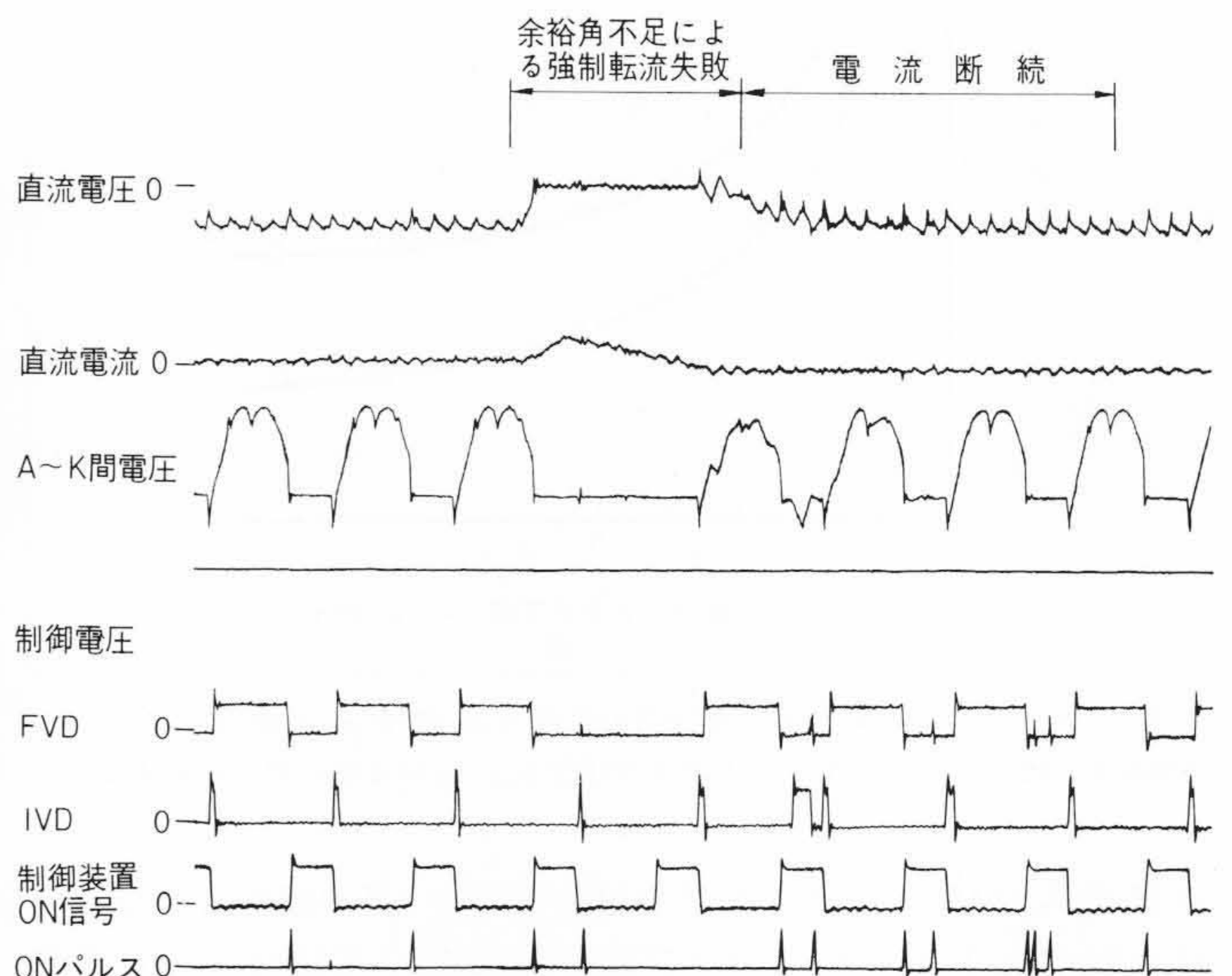
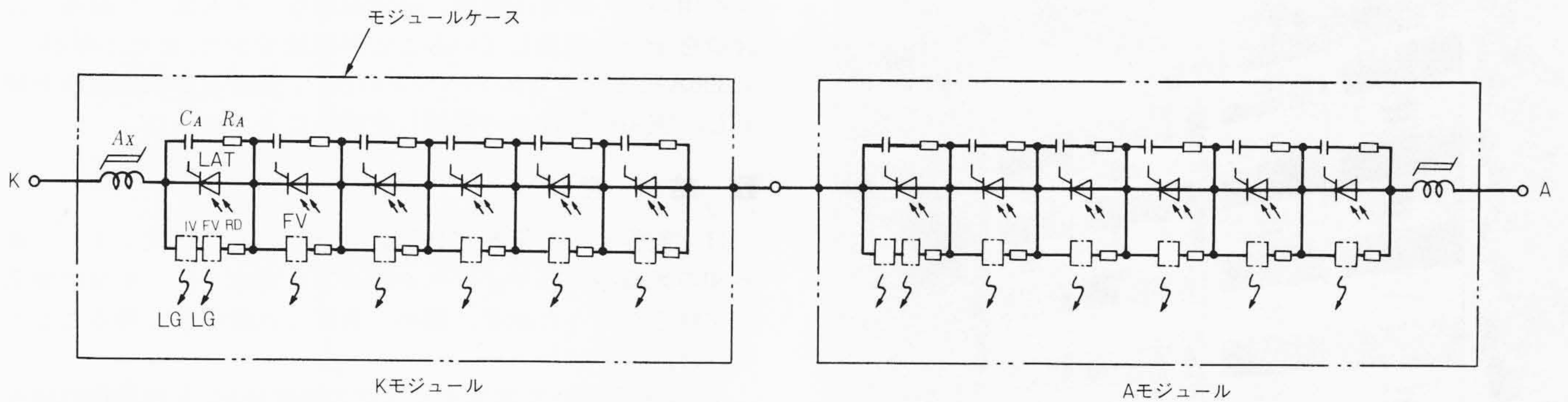


図12 Back to Back試験、転流失敗及び電流断続のオシログラム Back to Back試験装置に、光サイリスタバルブの1モジュールを組み込んで行った試験波形を示す。

12に今回開発したゲート制御装置と、光サイリスタバルブの1モジュールをBack to Back試験装置に組み込んで実施した試験結果を示す。また、マイクロプロセッサを用いた光サイリスタ故障監視も行ない、光サイリスタバルブの保守性を大きく向上させている。

4.2 光サイリスタバルブ本体

開発した光サイリスタバルブでは、素子102個を直列接続して使用している。図13に示すように6個のサイリスタに交流分圧回路、直流分圧回路などが付属してモジュールが構成され、このモジュール17個を直列接続してバルブ主回路が構成されている。光サイリスタバルブの構成電気部品は、主回路



注：略語説明 LAT(光サイリスタ)，IV(逆電圧検出ユニット)，FV(順電圧検出ユニット)，LG(ライトガイド)

図13 光サイリスタバルブモジュール結線図 光サイリスタバルブモジュール内部の結線を示す。

部品以外にはFV，IV(順，逆電圧検出器)だけであり，電気部品数は従来の電気サイリスタバルブの約15%に減じ，バルブを簡素で信頼性の高いものとしている。

サイリスタの直列数は，インパルス試験電圧370kVに対するサイリスタの電圧分担不平衡及び余裕を考慮して決定された。また，冷却効率の良い水冷方式の採用により，1並列で定格電流1,800Aを得ることができ，サイリスタバルブのアーム短絡電流の1サイクルゲート遮断が可能である。

5 実系統試験

光サイリスタバルブは，耐電圧，電圧分担，低圧通電，運転動作試験，冷却系耐水圧，冷却性能試験などを実施し，性能確認後，電源開発株式会社佐久間周波数変換所で水銀整流器1台と置き換え，調整試験の後，実系統に併入して昭和58年12月から60年2月まで運転し，その間なんら不具合もなく極めて良好な運転結果が得られた。

6 今後の動向

サイリスタバルブは大容量化の傾向にあり，装置の小形・軽量化，高信頼度化を図るために，光サイリスタの大電流化，高耐圧化及び高性能化が求められている。日立製作所では，既に，4,000V，3,000Aの大容量光サイリスタCLP3000A40を実用化しており，更に，素子数の低減を図って耐圧8,000V級以上の素子の開発を行なっている。また，素子に過電圧が印加された場合，安全にターンオンすることができるいわゆる過電圧保護機能を内蔵する光サイリスタ(V_{BO} フリーサイリスタ)についても検討を進めている。

サイリスタバルブとしては4,000V，3,000A光サイリスタを使用した空気絶縁水冷式光サイリスタバルブを通商産業省重要技術研究開発費補助金を受けて開発しており，将来の500kV級直流送電に向けてバルブの小形化，信頼性向上及び保守の簡素化の見通しを得た。以下に，本バルブの設計と製作及び試験結果について述べる。

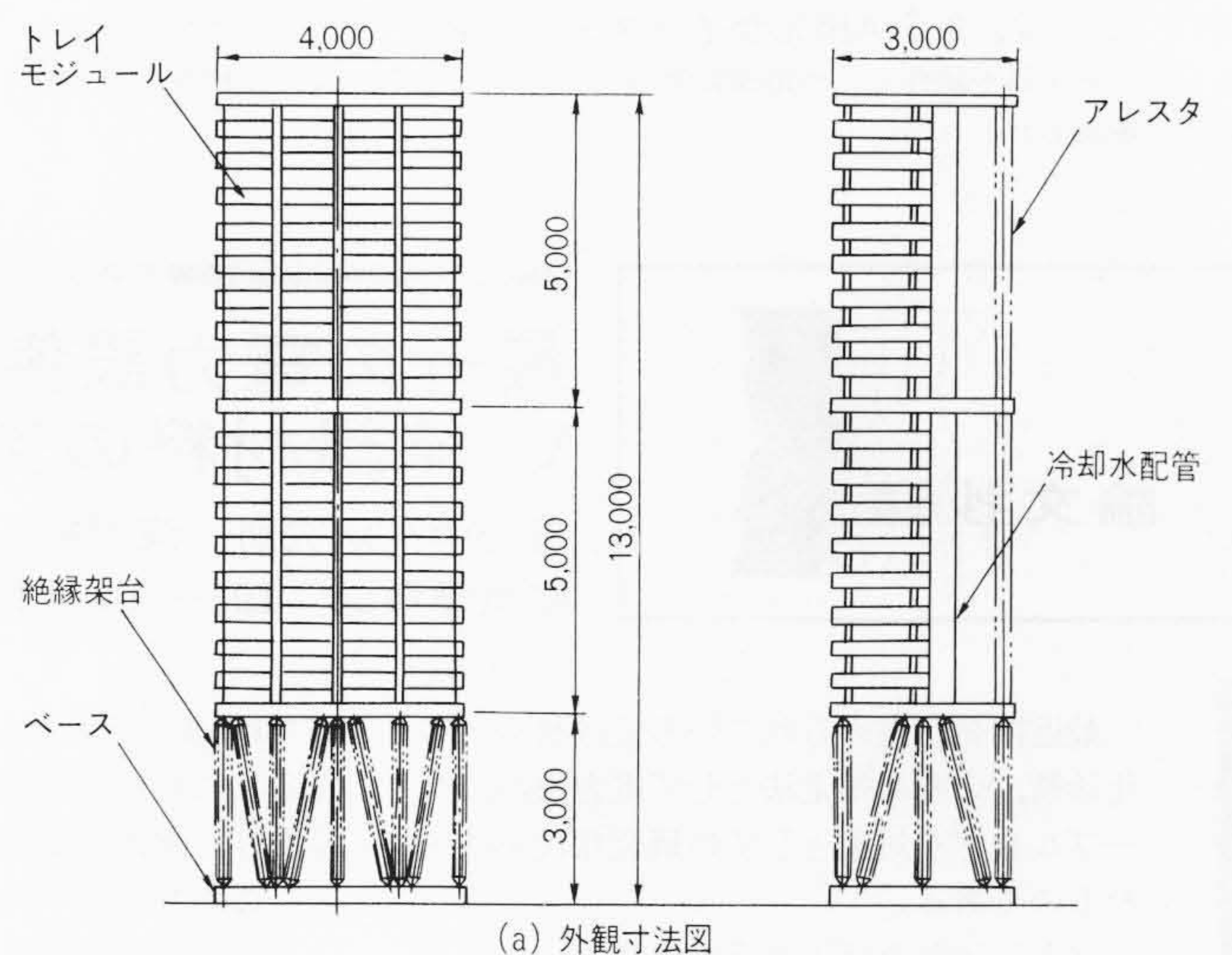
6.1 設計

将来の500kV級直流送電を想定し，図14(a)に示す500kV，3,300A，1,650MWのサイリスタバルブを設計した。サイリスタバルブの絶縁・冷却方式は，保守の簡素化と大容量化に適した空気絶縁・水冷方式を採用した。また，サイリスタ直列数を低減するため，バルブ端子間保護用に高性能化したギャップ無し酸化亜鉛避雷器を採用した。これらの仕様に基づいて設計したバルブを，同図(b)に示す。このバルブは二重バルブとしており，据付面積を小さくするとともに耐震性を考慮

した構造となっている。500kV，3,300A，1,650MWの変換器は，同図の高圧側バルブ3台と，対地絶縁を低減した低圧側バルブ3台で構成される。また，ゲート制御装置は三重化した高信頼度のものとしており，1系，又は2系の故障に対して運転継続可能である。運転を継続したまま制御系故障復旧の可能なオンラインメンテナンス方式も採用している。

6.2 製作及び試験結果

以上の設計に基づき，図14に示すバルブの $\frac{1}{4}$ モデルを製作した。製作したバルブモデルを図15に示す。このバルブモデ



(b) 仕様

項目		仕様
1. 定格	(1) 容量	1,650MW
	(2) 直流電圧	500kV
	(3) 直流電流	3,300A
	(4) 定格	100%連続
	(5) 結線方式	12パルスブリッジ
	(6) 定格交流電圧	216kV
2. 絶縁	(1) 交流耐電圧	355kV
	(2) 直流耐電圧	±400kV
	(3) 雷インパルス及び開閉インパルス	±690kV
3. 主回路	(1) 使用サイリスタ素子	CLP3,000A40
	(2) 素子構成	180直列×1並列
	(3) ゲート点弧方式	光直接点弧方式
	(4) 事故電流遮断	アーム短絡を1サイクル・ゲートブロック可
	(5) 冷却方式	水冷式

図14 500kV，3.3kA級光直接点弧サイリスタバルブ 将来の高電圧・大容量直流送電用サイリスタバルブの概念設計に基づく外観図と仕様を示す。

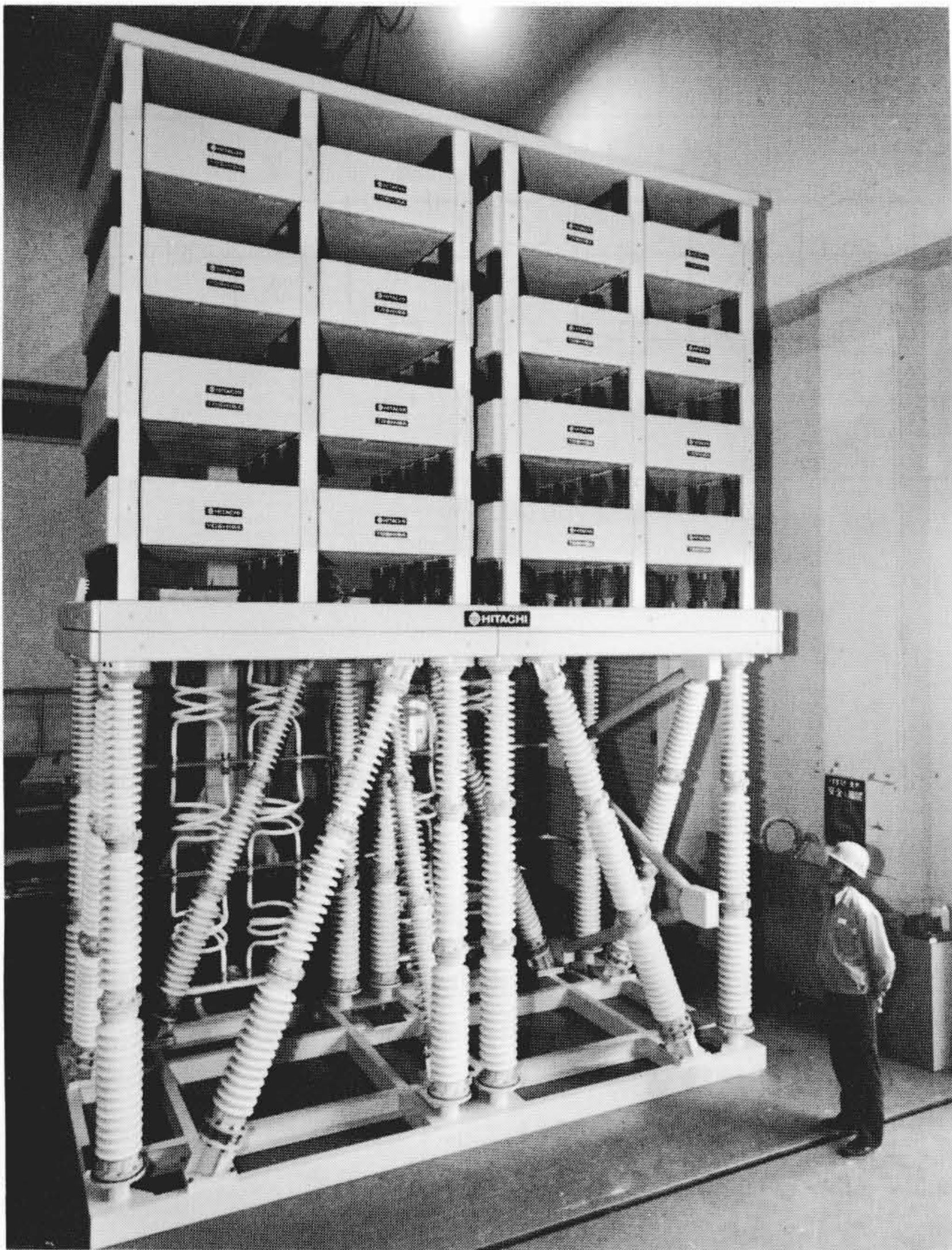


図15 500kV, 3.3kA級光サイリスタバルブモデル 定格電圧をよにしたモデル器を試作し、性能確認試験を行なった結果、設計仕様を満足することを確認した。

ルを用いて、耐電圧試験、通電試験などを実施した結果、設計値を十分に満足していることが確認できた。また、500kV, 3,300A級光サイリスタバルブの設計、製造及び検査技術確立し、実用機製作への見通しを得ることができた。

7 結 言

日立製作所では電源開発株式会社との共同研究により、世界初の光直接点弧サイリスタバルブを完成し、1年余の実系統試験を行なった結果、極めて良好な試験結果を得ることができた。

また、引き続き光サイリスタの高電圧化、大容量化の研究を進めており、500kV, 3,300A級高電圧・大容量直流送電用サイリスタバルブの開発についてもほぼ見通しをつけることができた。これらの実績、研究成果を基に、直流送電の特質が理解され、今後その適用が拡大してゆくことを期待している。

終わりに、終始御指導いただいた電源開発株式会社を始め各電力会社の関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) T. Kano, et al.: Development of Light-Triggered Thyristor Valve for HVDC Transmission, IPEC-Tokyo '83
- 2) T. Kano, et al.: Development of Key Components for the Light Triggered Thyristor Valve, Hitachi Review Vol.32, No.2 (1983)
- 3) 三瓶, 外: 直流送電用水冷式光直接点弧サイリスタバルブの開発, 昭和59年電気学会全国大会, 450(昭59-3)
- 4) T. Kidahashi, et al.: Operational Experience of Light-Triggered Thyristor Valves at Sakuma Frequency Converter Station, CIGRE SC14(1984)

論文抄録

最近の電力設備診断技術の開発動向 V. 絶縁材料の劣化診断技術

電力中央研究所 深川裕正・日立製作所 奥山賢一
電気学会誌 105—1, 18~22 (昭60-1)

最近開発が進められている絶縁材料の劣化診断、余寿命推定法として電力機器、ケーブルなどを対象としての研究状況を述べたものである。

油と絶縁紙を使用する電力機器の代表としては変圧器を取り上げており、油の劣化は大気遮断方式の採用によりほとんど起こらないのに対し、絶縁紙を対象とすると熱、水分、酸素などにより酸化劣化を生ずる。これにより、重合度の減少や引張り強度の低下などが現われる。このことから酸化劣化によって発生する $\text{CO}_2 + \text{CO}$ を測定することで劣化の程度を推定しようとする余寿命判定法が提案されている。これは $\text{CO}_2 + \text{CO}$ 生成量と平均重合度残率の関係、更に平均重合度残率と引張り強度残率との関係を示すデータを基にして、生成量がある一定値に達すると引張り強度も所定値まで低下し、したがって、寿命に達したと判断しようとするものである。

超高压OFケーブルでは絶縁体が熱劣化

して $\tan \delta$ が増大するとケーブルは温度上昇する。これにより、更に熱劣化条件が厳しくなり、熱的不安定になって熱破壊を生ずる。このことから $\tan \delta$ が一つの指標となるので、実際に運転されているケーブルについて $\tan \delta$ や運転中の温度を正確に測定することにより、運転時間とその温度、 $\tan \delta$ 値をグラフ化し、それを基にして寿命点を推定するもので、負荷変動がある場合は1日の劣化量から等価劣化温度を算出して寿命を推定する。

マイカ・レジンを用いている回転機ではいろいろな量が絶縁特性の診断用として測定され、利用されているが、その中で $\tan \delta$ の変化率と静電容量増加率の和と、1サイクル当たり1個以上安定して発生する部分放電電荷の最大値を広帯域法で測定した値の間にはある相関があることを利用し、劣化形態とその状況を比較的によくみることのできるグラフを作ることができる。これにより、上述の値を定期的に測定することで

劣化傾向、その進行速度などに関するデータが得られ、余寿命判定の有力手段とされている。

架橋ポリエチレンについては、これを用いたCVケーブルでの水トリリー劣化に関する研究が進められている。これは $\tan \delta$ 、直流漏れ電流、体積抵抗、逆吸収電流、残留電圧などと破壊電圧との関係から絶縁診断に利用されている。

ケーブル線路はそれぞれ使用されている状況も異なり、製造条件、構造も厳密な意味で同一とは限らないことから、多数の線路を一つの集合と考え、ストレス—強度モデルの考え方を導入し、現場で実測された $\tan \delta$ とか直流漏れ電流などの経年特性と、これらと絶縁破壊特性との関係を用いて余寿命を推定する。この場合、その線路の重要度、冗長度などに応じて信頼度を設定する必要があり、信頼度を高くすると余寿命は短く評価されることになる。