

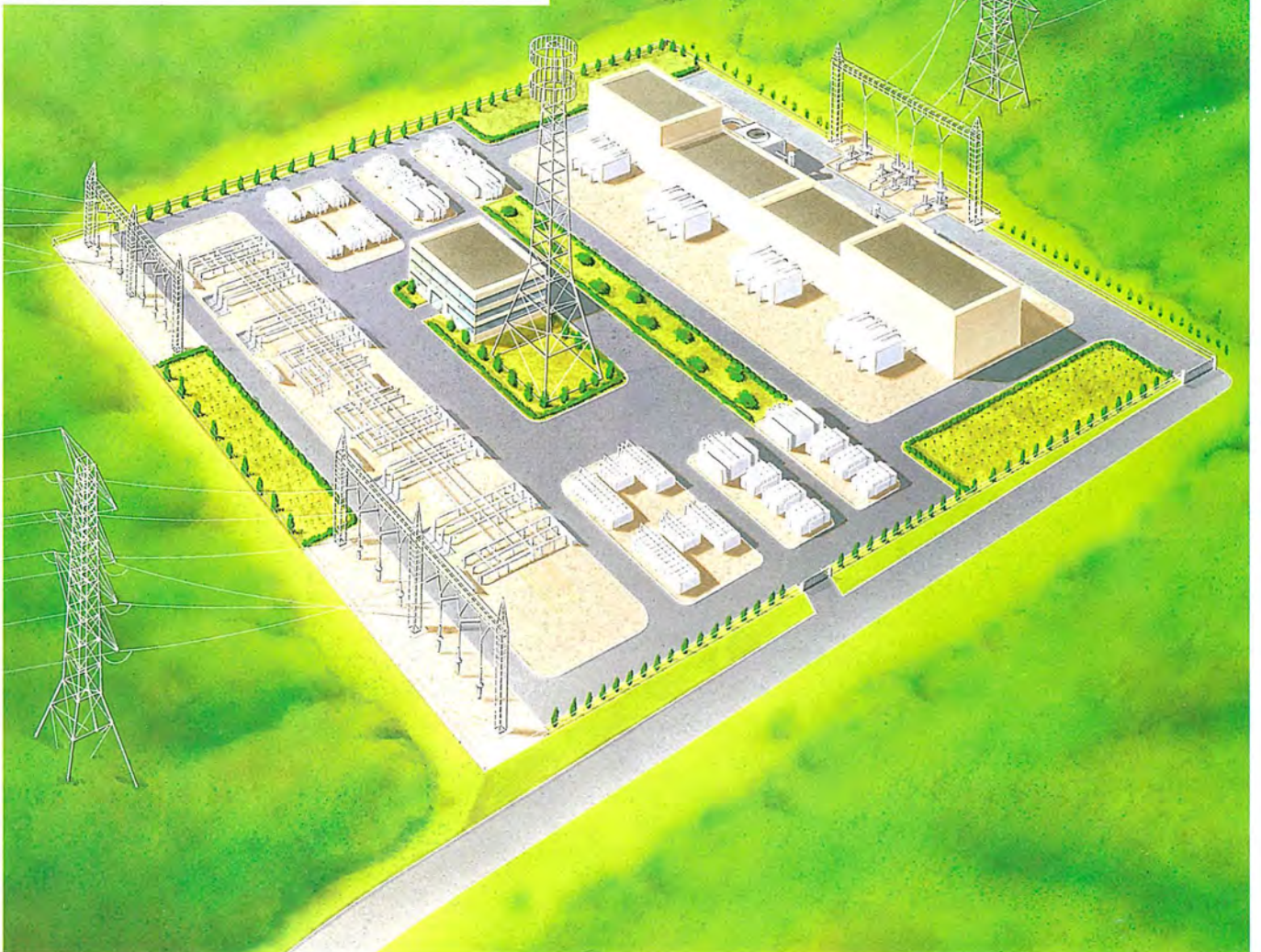
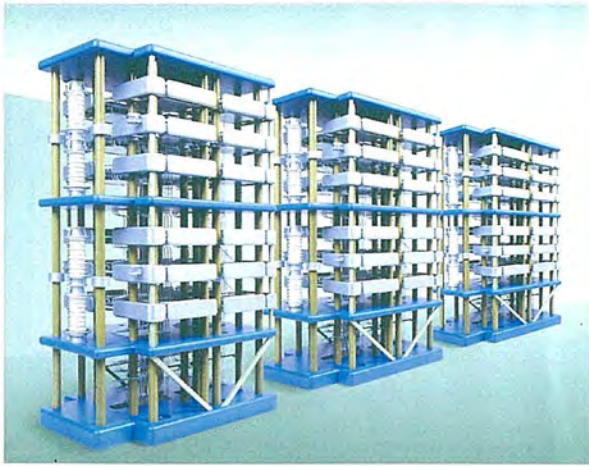
# MITSUBISHI

## 三菱電機技報

Vol.70 No.5

特集 “直流送電技術”

'96 5



## 特集 “直流送電技術”

### 目 次

#### 特集論文

直流送電の動向と技術開発 .....	1
伊吹恒二	
交直変換所のシステム設計 .....	5
長谷川泰三・山地幸司・三瓶雅俊・多田一彦・安田 賢・石黒富士雄	
500kV高電圧大容量サイリスタバルブの開発 .....	13
吉田良男・廣瀬昌弘・色川裕之・山本吉彦・竹田正俊	
光直接点弧サイリスタの開発 .....	21
林田 弘・西尾 徹・伊佐治 弘・中川 勉・山元正則・佐藤克己	
±500kV直流GISの開発 .....	25
吉田良男・高畑浩二・畑野雅幸・高塚桂三・土江 瑛	
直流送電用変圧器・リアクトルの開発 .....	33
吉田良男・杉原 洋・畑野雅幸・光庵豊一・尾上達也・細川 登	
直流送電システムの制御・保護方式の開発 .....	41
佐藤雅一・村上弘明・本庄暢之・林 成男・玉井伸三・土岐直寛	
直流送電用機器・装置の開発検証試験 .....	49
吉田良男・佐藤雅一・橋本隆輝・色川裕之・竹内 博・尾上達也・内藤初彦	
磁気駆動シミュレーションとその直流遮断器への応用 .....	59
堀之内克彦・中山 靖・笹尾博之	

#### 普通論文

日本原子力研究所向けJFT-2Mトroidal電源用 フライホイール付き直流発電機 .....	64
谷 孝志・中西悠二・堀田 剛・河瀬千春・大藪 勲・岸本 健	
SNAネットワークとインタネットワーク環境の統合 .....	69
安田秀朗・井出 剛・河村祐二・鈴木賢太	
超解像技術 .....	74
加門和也・中江彰宏・埴 哲郎・宮崎順二	
ATMネットワーク対応高画質MPEG2コーデックの実用化 .....	80
堀井裕児・三尾武史・松崎一博・服部伸一・山田浩利・安田吉男	

#### 特許と新案

「熱伝達装置」「液面検知回路」 .....	89
「電磁接触器」 .....	90

#### スポットライト

3V動作高速FIFOメモリシリーズ M66280FP/M66281FP/M66282FP .....	85
モノクロSTN対応操作パネルコントローラ M66270FP .....	86
光直接点弧サイリスタのシリーズ化 .....	87
発電プラント総合管理システム “MELJC-500” .....	88
自動検針システム .....	91
小型指紋照合装置 .....	92
光サイリスタ点弧用高出力半導体レーザ .....	93
三菱クライアント・サーバコンピュータ apricot FT8000 .....	94
三菱モバイルコンピュータ “AMITY SP” .....	(表3)

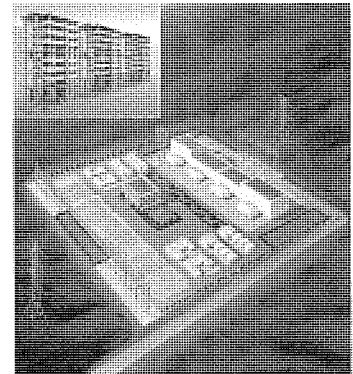
#### 表紙

##### 交直変換所及びサイリスタバルブ

直流技術は、長距離送電、広域連系などの電力系統の要求にこたえる手段として、交流と相互に補完するために適用されるケースが多い。

三菱電機㈱では、このような背景の下、大容量直流送電システムに適用可能な直流送電用機器・装置(ガス絶縁開閉装置、サイリスタバルブ、変圧器、制御保護装置など)の開発を進めてきた。

表紙は、直流送電システムの中核であり直流送電線の両端に建設される交直変換所の完成イメージ図、及び交直変換機能の心臓部であり、電力用のサイリスタ素子で構成されるサイリスタバルブの完成イメージ図を表す。



三菱電機技報に掲載の技術論文では、国際単位“SI”〔SI第2段階(換算値方式)を基本〕を使用しています。ただし、保安上、安全上等の理由で、従来単位を使用している場合があります。

# アブストラクト

<p><b>直流送電の動向と技術開発</b> 伊吹恒二 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.1～4 (1996)</p> <p>電力系統においては、交流は、電圧の昇降が容易なことなどの特長を持っているため、送配電の基盤を形成している。しかし、電源の遠隔化に伴う長距離送電、電力融通のための広域連系、供給電力の拡大に伴う短絡容量の増加等の電力系統の問題に対し、直流は交流に比べて多くの利点を持っているため、直流技術適用の事例が増加している。</p> <p>この論文では、電力系統における直流の役割、直流送電の適用例、直流用機器・装置の開発計画の概要を述べる。</p>	<p><b>直流送電用変圧器・リアクトルの開発</b> 吉田良男・杉原 洋・畑野雅幸・光庵豊一・尾上達也・細川 登 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.33～40 (1996)</p> <p>直流500kV送電に用いられる変換用変圧器と直流リアクトルについて、コンパクト化、ひいては低損失化に大きく寄与する絶縁技術を中心に開発を推進した。</p> <p>絶縁を構成する材料（絶縁油、絶縁紙）単体の直流絶縁特性の確認、複合絶縁を構成する際の絶縁物の最適な構成比率の検討と確認を踏まえ、実規模の絶縁構成モデルを製作し、直流耐電圧を始めとする一連の耐電圧性能があることを検証した。</p>
<p><b>交直変換所のシステム設計</b> 長谷川泰三・山地幸司・三瓶雅俊・多田一彦・安田 賢・石黒富士雄 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.5～12 (1996)</p> <p>交直変換所のシステム設計手順と設計内容を取り上げ、設計に必要な要求仕様や系統条件、全体として協調や考慮が必要な検討項目、及び最適化が必要な各種パラメータを述べ、またシステム解析については解析例を交えて解析内容を述べる。</p> <p>大容量交直変換所のシステム設計では、対策も含めた広範囲の検討と、膨大な量のシステム解析が必要となる。</p>	<p><b>直流送電システムの制御・保護方式の開発</b> 佐藤雅一・村上弘明・本庄暢之・林 成男・玉井伸三・土岐直寛 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.41～48 (1996)</p> <p>交流系統の事故中及び事故回復直後で交流電圧が不平衡又は高調波電圧ひずみ大きいときでも電力変換運転が可能な変換器制御方式を開発し、この変換器制御方式を前提として系統制御能力を高めることにより、送電信頼度を向上させ得る発電機との協調制御方式を開発した。</p> <p>この方式の開発・評価は、デジタルシミュレーションで実施し、同時にアナログシミュレータと組み合わせる制御装置を試作して試験を行い、実系統に適用可能であることを検証した。</p>
<p><b>500kV高電圧大容量サイリスタバルブの開発</b> 吉田良男・廣瀬昌弘・色川裕之・山本吉彦・竹田正俊 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.13～20 (1996)</p> <p>直流送電システムの大容量化に対応するため、定格±500kV 2,800Aのサイリスタバルブを開発した。</p> <p>サイリスタバルブは、空気絶縁・純水冷却方式で、4アーム積層タイプである。大口徑(6インチ)光直接点弧サイリスタの適用、モジュールの6段積み構造の採用等により、高信頼度・小型・低損失の高電圧大容量サイリスタバルブを実現した。</p>	<p><b>直流送電用機器・装置の開発検証試験</b> 吉田良男・佐藤雅一・橋本隆輝・色川裕之・竹内 博・尾上達也・内藤初彦 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.49～58 (1996)</p> <p>直流500kV送電は、21世紀初頭の運用開始を目指し、直流送電用機器・装置の開発が進められている。本稿では、関西電力(株)山崎実験センターに据え付け、電圧加速試験に供している直流ガス絶縁開閉装置及び変換用変圧器・直流リアクトル供試器の試験内容・状況、及び直流送電制御におけるアルゴリズムの妥当性確認のため制御装置と組み合わせたリアルタイム電力系統シミュレータの検証試験結果について述べる。</p>
<p><b>光直接点弧サイリスタの開発</b> 林田 弘・西尾 徹・伊佐治 弘・中川 勉・山元正則・佐藤克己 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.21～24 (1996)</p> <p>直流送電用サイリスタバルブの小型軽量化・高性能化の要求にこたえるため、6インチウェーハを用いて世界最大容量の8,000V/3,600A光直接点弧サイリスタ(LTT)を開発した。このLTTは、受光部構造、ゲート及びエミッタ構造に新たな設計技術を採用し、<math>dv/dt</math>耐量、<math>di/dt</math>耐量、光感度を改善するとともに、ウェーハプロセスの高純度化及び局所ライフタイム制御の最適化を図り、低損失化を実現している。</p>	<p><b>磁気駆動シミュレーションとその直流遮断器への応用</b> 堀之内克彦・中山 靖・笹尾博之 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.59～63 (1996)</p> <p>磁気駆動シミュレーションは、磁力によって駆動されるアークの時間的に変化する三次元形状を解析するためのものである。アークを、周囲の磁界から電磁力を受けて動く微小な電流要素の連なりとして表現している。</p> <p>このシミュレーション手法を磁気駆動技術を用いた自動転流方式の直流遮断器に応用することにより、自励振動電流の発生、振幅の拡大、そして遮断に至る様子をシミュレートできる。</p>
<p><b>±500kV直流GISの開発</b> 吉田良男・高畑浩二・畑野雅幸・高塚桂三・土江 瑛 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.25～32 (1996)</p> <p>交直変換所における直流開閉装置として、±500kV直流ガス絶縁開閉装置(直流GIS)の開発を進めてきた。</p> <p>開発に当たっては、導電性異物のファイアフライ現象、絶縁物表面の帯電現象など直流課電固有有事象の対策に加えて、直流GIS構成機器の開発仕様の検討・設計、及び単体・組合せ試験を行い良好な結果を得た。</p> <p>なお、この装置は21世紀初頭の運用開始が計画されている。</p>	<p><b>日本原子力研究所向けJFT-2Mトロイダル電源用 フライホイール付き直流発電機</b> 谷 孝志・中西悠二・堀田 剛・河瀬千春・大藪 勲・岸本 健 三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.64～68 (1996)</p> <p>JFT-2Mトロイダル磁場コイル電源用として世界最大容量の直流発電機を完成した。定格は総出力51,300kW、電圧2,700V、電流19,000A、回転速度225/460r/minである。トロイダル磁場は直流磁場のため、直流機を採用することにより、交流機に比べてシステム全体がシンプルで占有面積が小さくなるメリットがある。製作には①整流解析技術、②機械強度解析技術、③絶縁技術、を総合した技術力を駆使した。</p>

# Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 33~40 (1996)

## Transformer and Reactor Development for DC Power-Transmission Systems

by Yoshio Yoshida, Hiroshi Sugihara, Masayuki Hatano, Toyokazu Koan, Tatsuya Due & Noboru Hosokawa

Mitsubishi Electric has cooperated in the joint development of insulation technologies for transformers and reactors that will be used in 500kV DC power-transmission systems. The authors examined the DC insulation performance of the main component (oil and paper), investigated the optimum construction ratio of these materials, and then constructed full-scale models. DC voltage capability and other insulation performance parameters were successfully tested. The improved insulation reduces equipment size and contributes to low power loss.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 1~4 (1996)

## Trends in the Development and Application of DC Power-Transmission Systems

by Koji Ibuki

The application of DC power-transmission systems is of practical importance for long-distance and large-capacity power transmission. These systems particularly favorable for transmission over submarine cable systems due to the low-loss characteristics as compared to AC systems. They have also become important in the interconnection of wide-area power networks. This article introduces the role of DC power-transmission systems, and outlines development activities and application plans for DC power-transmission technology at Mitsubishi Electric.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 41~48 (1996)

## Control and Protection Technologies for DC Power-Transmission Systems

by Masakazu Sato, Hiroaki Murakami, Nobuyuki Honjo, Shigeo Hayashi, Shinzo Tamai & Naohiro Toki

Mitsubishi Electric has cooperated in the joint development of a converter control system that can cope with harmonics or unbalanced AC voltages present during and immediately after AC power-system faults. The system improves the performance of network control equipment and works in concert with generator control to increase power transmission reliability. Digital simulations were used to develop and test the system, and an analog simulator was constructed for testing a prototype control unit. The control equipment proved ready for practical service.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 5~12 (1996)

## System Design of an HVDC Converter Station

by Taizo Hasegawa, Koji Yamaji, Masatoshi Sanpei, Kazuhiko Tada, Satoshi Yasuda & Fujio Ishiguro

The article reports on system design procedures for DC converter stations, design specifications and network conditions essential for appropriate system-level behavior, and optimization of various parameters. System analysis examples are also presented. The design of a high-capacity AC/DC converter system requires far-ranging studies and extensive simulation analysis. Experience gained through the DC converter system design will contribute to the design of future DC power-transmission systems.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 49~58 (1996)

## Verification and Testing of DC Power-Transmission Equipment

by Yoshio Yoshida, Masakazu Sato, Takateru Hashimoto, Hiroyuki Irokawa, Hiroshi Takeuchi, Tatsuya Due & Hatsuhiko Naito

Mitsubishi Electric is cooperating in the joint development of 500kV DC power-transmission equipment, and practical applications are planned for early in the next decade. The article reports on accelerated voltage testing of DC gas-insulated switchgear and tests on a transformer and DC reactor for AC/DC conversion. The authors conducted verification testing using a realtime power grid simulator designed to test the suitability of various DC transmission control algorithms.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 13~20 (1996)

## Development of a 500kV High-Voltage, High-Capacity Thyristor Valve

by Yoshio Yoshida, Masahiro Hirose, Hiroyuki Irokawa, Yoshihiko Yamamoto & Masatoshi Takeda

Mitsubishi Electric has cooperated in the joint development of a thyristor valve rated at 500kV and 2,800A for enhancing the capacity of DC power-transmission systems. The four-arm laminated valve is insulated by air, water-cooled and utilizes 6in. light-triggered thyristors. Basically designed to achieve low loss and high reliability, the valve is planned for application in the submarine-cable DC power-transmission project between Kansai and Shikoku.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 59~63 (1996)

## Magnetic Drive Simulation and its Application to DC Circuit Breakers

by Katsuhiko Horinouchi, Yasushi Nakayama & Hiroyuki Sasao

Three-dimensional magnetic drive simulation was used to analyze the changes of a magnetically driven arc over time. The arc was represented as a chain of small electric-current elements in space driven by the magnetic field. This simulation was used to design a DC circuit breaker employing self-commutation, and provides useful analysis of the generation of self-excited oscillation currents, current amplitude magnification and other phenomena persisting until the arc is extinguished.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 21~24 (1996)

## Development of a Light-Triggered Thyristor

by Hiroshi Hayashida, Toru Nishio, Hiroshi Isaji, Tsutomu Nakagawa, Masanori Yamamoto & Katsumi Sato

Mitsubishi Electric has cooperated in the joint development of the world's largest capacity light-triggered thyristor, rated at 8kV and 3.6kA, for use in thyristor valves for DC transmission systems. Based on a six-inch wafer, the device features new structures for the light-sensitive area and gate-emitters that improve  $dv/dt$  and  $di/dt$  capability and light sensitivity. Low loss is achieved through a high-purity wafer process and optimized carrier lifetime control.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 64~96 (1996)

## World's Largest DC Flywheel Generator for the Toroidal Field Power Supply of JAERI's JFT-2M Tokamak Nuclear Fusion Reactor

by Takashi Tani, Yuji Nakanishi, Tsuyoshi Horita, Chiharu Kawase, Isao Oyabu & Takeshi Kishimoto

Mitsubishi Electric has delivered the world's largest DC generator for the toroidal field coil power supply of the JFT-2M Tokamak at the Japan Atomic Energy Research Institute. The unit rotates at 225 or 460rpm, providing a maximum rated output of 2,700V, 19,000A and 51.3MW. The toroidal field is a DC field, so use of a DC generator permits a simpler design consuming less floor space than an AC drive system. The generator was manufactured following extensive studies on commutation, mechanical strength and insulation.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 25~32 (1996)

## Development of 500kV DC Gas-Insulated Switchgear

by Yoshio Yoshida, Koji Takahata, Masayuki Hatano, Keizo Takatsuka & Ei Tsuchie

Mitsubishi Electric has been cooperating in the joint development of 500kV DC gas-insulated switchgear for DC switching in AC/DC conversion stations. The development team investigated basic specifications for the switchgear, solved DC problems such as charge accumulation on insulator surfaces and the "fire-fly" phenomenon caused by conducting particles, and then assembled and tested a prototype device. Plans call for the first production units to be completed early in the next decade.

# アブストラクト

<p><b>SNAネットワークとインターネットワーク環境の統合</b>          安田秀朗・井出 剛・河村祐二・鈴木賢太          三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.69～73 (1996)</p> <p>米国シスコ社のNCIS (Native Client Interface Architecture) 技術を実装したIBM3270端末エミュレータapricotNET “NCIA3270”を開発した。</p> <p>この製品では、SNAデータを事実上の業界標準プロトコルであるTCP/IPのデータフレームにカプセリングし、独自のクライアント/サーバモデルにより、SNAネットワークの資産継承とオープンかつ柔軟なTCP/IPバックボーンへの移行と統合を図ることができる。</p>	<p><b>ATMネットワーク対応</b>  <b>高画質MPEG2コーデックの実用化</b>          堀井裕児・三尾武史・松崎一博・服部伸一・山田浩利・安田吉男          三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.80～84 (1996)</p> <p>ISO/IEC, ITU-Tなどで標準化された符号化・多重化規格であるMPEG 2ビデオ/オーディオ/システムの三規格に準拠し、ATMネットワークに直結可能なビデオコーデック (符号化伝送装置) を実用化した。高度な信号処理/適応符号化制御技術等を基本開発要素としたこのコーデックにより、放送業務にも適用可能な高画質・高機能なデジタル映像伝送とMPEG over ATMの基本技術を確立した。</p>
<p><b>超解像技術</b>          加門和也・中江彰宏・埜 哲郎・宮崎順二          三菱電機技報 Vol.70・No.5・p.74～79 (1996)</p> <p>LSI製造技術に必要な光転写技術の精度向上を図るため、超解像技術を開発している。光学系の光源面・マスク面・ひとみ(瞳)面等にシフトやフィルタを導入することで、解像力や焦点深度が倍増する方法を開発し、実証した。これらの技術は純粋に光学の問題であり、量産適用が予定されているエキシマレーザや将来のX線露光を含め、高解像力を必要とする技術には広く利用できる。</p>	

# Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 80-84 (1996)

## Implementation of a High-Quality MPEG2 Codec for ATM Network Applications

by Yuji Horii, Takeshi Mio, Kazuhiro Matsuzaki, Shin'ichi Hattori, Hirotohi Yamada & Yoshio Yasuda

Mitsubishi Electric has manufactured an MPEG2 video codec that can be connected directly to an ATM network. The codec complies with the MPEG2 video, audio and system standards defined by ISO/IEC, ITU-T and other standards organizations. The codec, which features advanced signal processing, adaptive coding technology and technology for MPEG over ATM transmissions, enables the transmission of high-quality digital video signals with excellent functionality.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 69-73 (1996)

## Integration of an SNA Network to a TCP/IP Network Environment

by Hideaki Yasuda, Tsuyoshi Ide, Yuji Kawamura & Kenta Suzuki

Mitsubishi Electric has developed "apricotNET NCIA3270," an IBM3270 terminal emulator that incorporates the Native Client Interface Architecture (NCIA) standard developed by Cisco Systems. This product encapsulates the SNA data in TCP/IP data frames, creating interoperability between legacy SNA networks and TCP/IP backbones.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 70, No. 5, pp. 74-79 (1996)

## Development of Super-Resolution Technology for the Photolithography Process

by Kazuya Kamon, Akihiro Nakae, Tetsuro Hanawa & Junji Miyazaki

Mitsubishi Electric is developing super-resolution technology that promises to increase the process latitude of photolithography. The authors double the resolution or focal depth of an optical system by introducing phase shifters or special filters for the light source, mask or pupil. These purely optical techniques can be applied to excimer laser systems currently used in mass production as well as future X-ray lithography systems.

# 直流送電の動向と技術開発

伊吹恒二\*

## 1. ま え が き

大容量電源の遠隔化に伴う長距離大電力送電、電力融通のための電力会社間連系、供給系統の拡大に伴う短絡容量の増大など各種の電力系統の問題に対して、直流技術導入の事例が増加している。この直流技術に関しては、我が国を含む世界の各地で、既に多くの直流送電・直流連系設備が運転されて実績を上げている。このような直流技術適用事例の増加と並行して、交直変換機能の心臓部であるサイリスタや制御保護装置の電子部品の進歩に伴って、直流システムに求められる信頼性・経済性がより高度なものとなりつつある。

このような背景の下、国内においても世界最大級の大容量直流送電が計画されており、これに先立って関西電力(株)、四国電力(株)、電源開発(株)及び三菱電機(株)は共同で、直流送電用の各種機器と制御装置の開発を進めてきたので、その開発の目標、開発の経緯、各種の試験についての概要を述べる。

## 2. 電力系統における交流と直流の役割

現在、世界の電力系統においては、発電から最終の電力利用までの電圧の昇降が容易なことなどの基本特性を満たしている交流が、送配電の基盤を形成している。

このような交流系統であるが、電力需要の増加につれて、次のような限界があることが認識されている。①電力系統の拡大によって大きなループが形成される場合など、潮流の制御に制約が生じる。②電源立地の遠隔化に伴い、送電線距離も増大し、系統のじょう(擾)乱に対する安定度が低下する傾向にある。③系統連系によって電力送電容量を増大させる場合、短絡容量の増加が遮断器の遮断容量を上回るケ

ースも現れる。④無効電力によって送電線に流れる電流が大きくなるなどの交流独自の問題を無視することができない。

一方、直流系統は、表1に示すとおりの特長を持っている。直流の適用については、非同期運転が可能、無効電力の問題からの解放などの直流の基本的特性に加えて、元来、高速な制御に依存することを前提とするものである。このことから、高速な潮流制御が可能であり、短絡容量を増加させることなく広域連系を実現できるという特性を生かして、交流系統の特性を補完するという役割を担うことができる。電力系統の容量拡大に伴って、これらの対策が必要な地点も多くなっており、今後一層、直流関連技術の採用の機会が多くなるものと思われる。このような特長を生かしたプロジェクトの事例を、表1の中に併せて示した。

また、同じようにサイリスタによって無効電力を制御する技術の活用としては、静止形無効電力補償装置(Static Var Compensator: SVC)などもあり、交流の特性と相補うための適用も今後更に拡大していくものと考えられている。

## 3. 直流送電の適用

1954年にスウェーデン(本土)とゴットランド島の間に世界初の本格的直流送電(100 kV, 20 MW)が開始されて以来、約40年が経過している。その間、長距離大容量架空送電線、海底ケーブル送電、周波数変換設備、非同期連系設備などとして直流技術が適用されている。

現在、既に世界中で約50のプロジェクト、約39,000 MWの直流設備が運転中であり、建設中・計画中の設備を含めると合計約60プロジェクト、約55,000 MWに達している。国内においては、既に3箇所の周波数変換設備及び送

表1. 直流送電の適用分野と採用理由

適用分野(プロジェクト例)	採用理由
長距離大電力送電 (イタイプ, ネルソンリバー, パシフィックインタータイ)	● 鉄塔が小型にでき、送電線建設費が交流に比べて安価である。 ● 送電安定度の問題がなく、送電容量を大きくとれる。
海底ケーブル送電 (英仏連系, 北本連系, ゴットランド, フェノスカン)	● 充電電流補償の必要がない。 ● ケーブルの熱容量分を通電できるため、ケーブルサイズを小さくできる。
非同期連系 (デュルンロール, シャトーゲイ, ハイゲート, エッツェンリヒト, 佐久間FC, 新信濃FC)	● 異周波連系 ● 安定度問題や短絡容量増加など同期連系が困難な場合の交流系統間連系 ● 迅速な潮流制御

\*伊丹製作所参与(DCシステム統轄)(工博)

電設備が運転中である。これら国内の直流設備と海外の代表的なプロジェクトを図1に示す<sup>(1)</sup>。

国内の電力設備の長期計画に関しては、中央電力協議会が1994年に策定した今後10年間の電力系統計画によれば、電力の広域運営のために、659万kWの電源の開発を背景に、広域融通電力を1993年度実績に対して倍増して838万kWとする計画を打ち出している。これを実現させるため、系統整備の中で500kV以上の送電線を2,760km建設することによって同50%増しの8,650kmに、500kV以上の変電設備容量が40%増しで21,369万kVAに増設することが盛り込まれている。また、需給変動に弾力的に対応するために、±250kV大容量直流連系を始め、直流関連設備として南福光のBTB (Back-to-back) 設備、東清水の周波数変換所などが既に計画中の設備として含められており、図にはこれらを含めて示されている。また、同計画では交流500

kVの関西-中国新連系線の計画も盛り込まれるなど、今後の広域電力運用がより鮮明に示されている<sup>(2)</sup>。このように、今後の電力系統の中においては直流技術の重要性が増してきていることが理解される。

国内外の直流の全設備容量の年ごとの推移を図2に示す<sup>(1)</sup>。この間、変換装置は水銀バルブからサイリスタバルブへの大きな技術変革があり、1極当たりの容量も20MWから1,575MWになるなど各種の進歩があった。さらに、1987年サコイにおける3端子送電など、制御面でも新たな技術が付加されてきた。

また、電力系統の中での直流設備の役割も徐々に変化している。すなわち、用途から見ても当初は送電用としての適用が進められたが、1972年のイールリバーを始めとして、潮流制御、非同期連系を目的としたBTB設備としての適用も増加している。これらのプロジェクトの中から、特に技術的

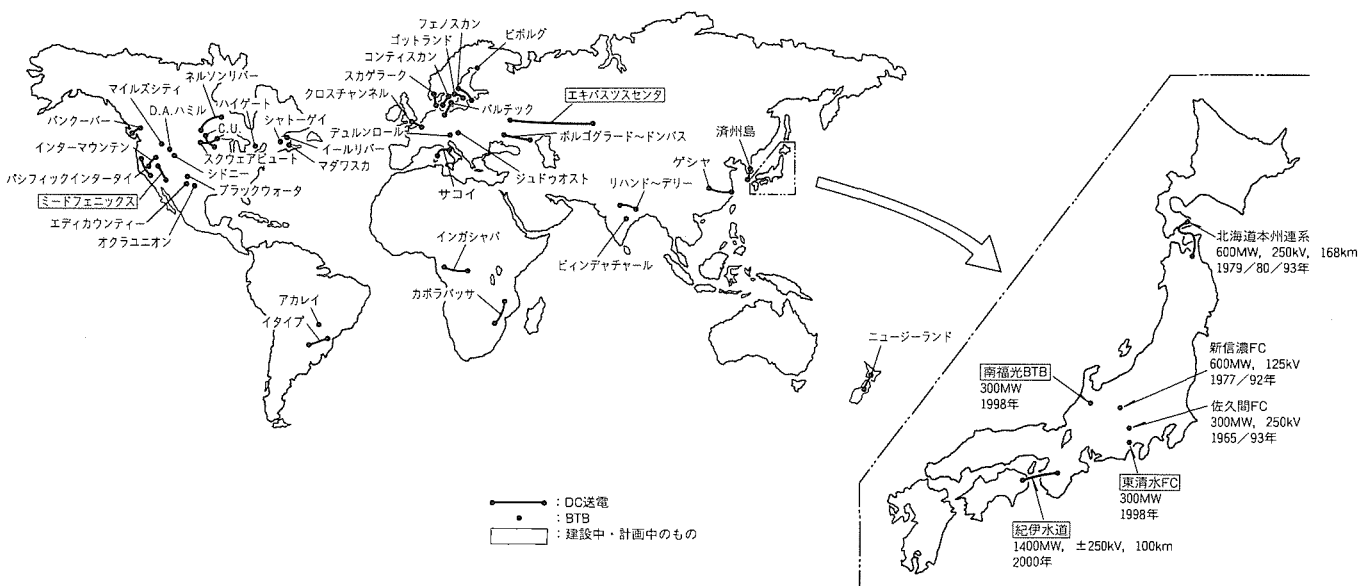


図1. 世界及び日本における直流プロジェクト

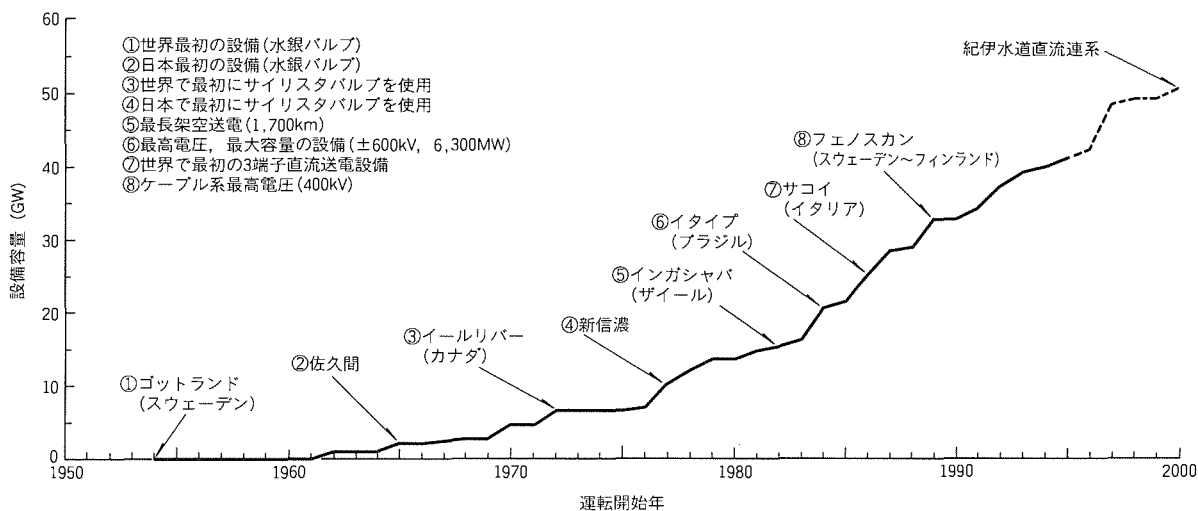


図2. 直流設備の容量の増加



表 2. 代表的な直流プロジェクト

プロジェクト名	定格容量* (MW)	定格電圧* (kV×回線数)	送電距離(km)			運転開始年	バルブ形式	備 考
			架空線	ケーブル	合計			
運転実績のあるプロジェクト								
ゴットランド (スウェーデン)	30 260	±150 150×2	0 0	96 98	96 98	1954/70 1983/87	水銀 サイリスタ	世界初の本格的直流ケーブル送電 (1986年以降停止)
クロスチャンネル (イギリス～フランス)	160 2,000	±100 ±270×2	0 0	65 70	65 70	1961 1986	水銀 サイリスタ	海底ケーブル送電(1984年以降停止)
ホルゴグラード～ドンバス (ソ連)	720	±400	470	0	470	1962～1965	水銀	±400kV長距離架空線送電
コンティスカン (スウェーデン～デンマーク)	250 300	250 285	95 62	85 87	180 149	1965 1988	水銀 サイリスタ	海水帰路方式
佐久間(日本)	300	125×2 250	— —	— —	— —	1965 1993	水銀 サイリスタ	異周波連系 (取替)
サコイ(イタリア)	300/50	200	292	121	413	1967/87/92	水銀,サイリスタ	多端子送電
パシフィックインタータイ (アメリカ)	2,000 1,100	±500 ±500	1,362 1,362	0 0	1,362 1,362	1970/84 1989	水銀 サイリスタ	±500kV, 3,100MWで電圧, 容量の記録更新
イールリバー(カナダ)	320	80×2	—	—	—	1972	サイリスタ	世界で最初にサイリスタバルブ使用, 非同期連系
新信濃(日本)	300 300	125×2 125	— —	— —	— —	1977 1992	サイリスタ サイリスタ	異周波連系
北海道～本州(日本)	600	+250 -250	124 124	44 44	168 168	1979/80 1993	サイリスタ サイリスタ	非同期連系 海底ケーブル送電
イタイブ(ブラジル)	6,300	±600	783	0	783	1985/88	サイリスタ	±600kV, 6,300MWで電圧, 容量の記録更新
国内のプロジェクト計画								
東清水	300	125	—	—	—	1998	サイリスタ	異周波連系
南福光	300	125	—	—	—	1998	サイリスタ	非同期連系
紀伊水道直流連系 I 期	1,400	±250	50	50	100	2000	サイリスタ	海底ケーブル送電, 潮流制御

\*: 増設後の定格値

な節目となるプロジェクトを表 2 に示す<sup>(3)</sup>。

国内においては、先に述べた±250 kVの連系の構想を更に発展させて、2000年以降の電力需要の増大に対応する送電容量3,000 MW級の直流送電が検討されている。このために、電圧を±250 kVから次のステップとして±500 kVに昇圧することにより、送電容量を段階的に増強する手段が論議されている。また、この連系に関しては、送電の信頼性の確保及び他の施設への弊害の除去という観点から、導体帰路方式の適用を考慮する必要がある。このような±500 kV直流送電システムの基本構成例を図 3 に示す<sup>(4)(5)</sup>。

#### 4. 直流送電用機器・装置の開発

当社は、図 4 に示すように、早くから直流送電技術を手掛け、サイリスタ定格の増加に呼応して、サイリスタバルブ、直流 GIS などの開発を進めてきた。1980～1985年には、関西電力(株)との共同研究による125 kV直流設備の開発、1982～1985年には通産省の補助金を得て±500 kV直流GISの研究開発を行ってきた。また、変換用変圧器については、佐久間周波数変換所への納入などの実機の経験を持っている。このほか、電力用半導体の低損失化や避雷器の高性能化等の要素技術開発も継続的に実施してきた。さらに、サイリスタで交流系統の無効電力の調整を行う静止形無効電力

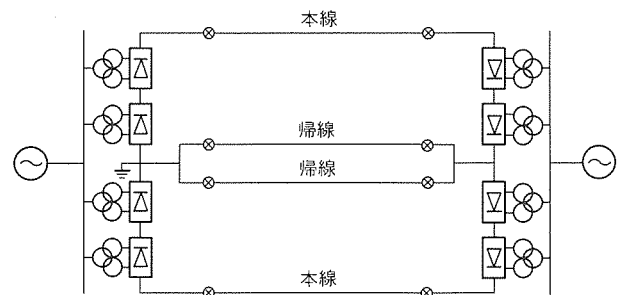


図 3. ±500kV直流送電システムの基本構成例

発生装置 (Static Var Generator: SVG) については、関西電力(株)との共同研究などによって開発を進め、154 kV, ±80 MVA の SVG が実系統で稼働している。

当社の直流送電用機器・装置の開発スケジュール (図 4) に示すように、今後国内において必要とされる 500 kV 大容量直流送電にも適用可能なサイリスタバルブ、直流 GIS、変換用変圧器、制御保護装置などの開発を進めており、これらの機器・装置の開発ポイントを表 3 に示す。これらの機器・装置は、要素技術の検討を経てプロトモデルの製作・試験を通じて開発が進められたものであり、その共通する開発理念としては、“高い信頼性”であり、“長期実用性を考慮した絶縁・通電性能と低ロス化”の努力である。特に、高信頼性

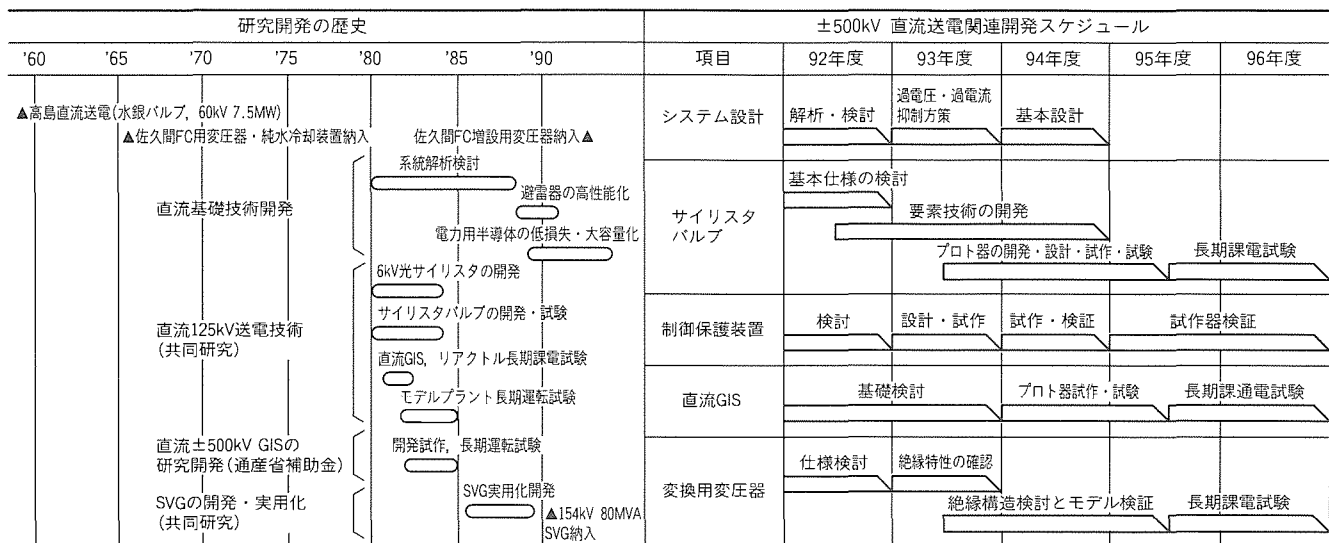


図4. 研究開発の歴史及び今後の開発スケジュール

表3. 直流送電用機器・装置の開発ポイント

機器・装置	サイリスタバルブ	直流GIS	変換用変圧器	制御保護装置
開発ポイント	世界最大容量の光直接点弧サイリスタの採用による小型化・高信頼度化	耐圧劣化の原因となる導電性異物の防止対策による絶縁信頼性の向上	絶縁構造の改良による小型化	交流系事故時の影響を最小限に抑える運転制御

を確認するために、各機器の長期性能は無論であるが、制御装置のシミュレータによる応動試験を入念に行うなどの配慮をしている。

5. 今後の課題

従来、国内において運用されてきた直流連系設備に加えて、大容量の本格的な直流送電の計画も進められている。今回開発した直流技術の詳細は、この特集の各論文で紹介するとおり、モデルによる長期性能検証試験を通じての実用性能検証を経て更に実用化開発を進めていく。特に、当社としては直流シミュレータ設備、バルブ検証設備などの充実を図りつつ、開発段階での万全の性能検証を行って、各機器技術を確立させる計画である。

また、直流送電の一層の高性能化・連系強化における直流技術の適用拡大を目指し、高性能交直変換器を実現するために、自己消弧形素子、自励式変換器の開発も進めている。これらの開発により、今後、直流技術の活用による電力システムの柔軟性の拡大、広域連系に向けての動きが更に推進されると思われる。

6. むすび

以上、大容量直流送電の実用化に向けて進められている開発の概要を述べたが、この特集で、一連の共同研究によって達成された各種要素機器の開発の詳細を紹介する。

参考文献

- (1) 直流送電適用技術調査委員会：直流送電の現況と適用技術，電気学会技術報告，II部，No.346（1990-8）
- (2) 電気新聞，1994年4月8日
- (3) 堀内 進：最近の直流送電の技術進歩と適用，電気学会全国大会（1995）
- (4) 河田謙一：大容量直流送電への適用，電気学会全国大会（1995）
- (5) Sekine, Y., Kato, S., Motoki, T., Ito, S. : Kii Channel HVDC Link between Shikoku and Kansai Electric Power Companies by Submarine Cables, Symposium Tokyo 1995, CIGRE (1995)

# 交直変換所のシステム設計

長谷川泰三\* 多田一彦+  
 山地幸司\*\* 安田 賢+  
 三瓶雅俊\*\*\* 石黒富士雄\*\*

## 1. ま え が き

直流送電システムが各種系統条件の下で所定の機能を発揮できるように、交直変換所を構築する必要がある。そのため、連系する交流系統を含めたシステム解析を行い、交直変換所機器の仕様や制御保護システムの性能・特性等を要求機能が満足されるように設定するとともに、信頼性・保守性・経済性の面からも協調のとれた交直変換所とする必要がある。

基幹系統に適用する大容量の直流送電システムでは、連系される交流系統への影響も大きいため、システム設計の検討内容は広範囲になるとともに種々の課題に対する対応策の検討が必要となる場合が多い。

ここでは交直変換所のシステム設計手順と設計内容について述べ、この中でも特に重要なシステム解析について具体例を紹介する。

## 2. システム設計手順と設計内容

### 2.1 設計手順

計画した直流送電システムをどのような系統条件でどのような運転をさせるかという基本的要求を満たすように設計が進められ、その過程で交直変換所の構築に必要な仕様や各種の設計情報が得られる。これらの設計は、相互に関連する事項を協調させながら進める必要がある。設計値は、性能面ばかりでなく信頼性や経済性の面からも評価が加えられ、見直しが必要な場合には再調整が行われる。相互に関連する事項が複雑に絡んでいるため、検討が前後したり、設計値やパラメータの見直しが行われる。このような設計の手順を概略示すと、図1のようになる<sup>(1)</sup>。

### 2.2 設計内容

図1に示す設計手順の各ステップにおける設計内容について、具体的な検討項目を取り上げて説明する。なお、システム解析については3章で詳しく述べる。

#### 2.2.1 システムの要求仕様

直流送電システムの基本的要求事項を、明確にする必要がある。このためには容量・信頼度・損失等といった仕様とともに、常時・異常時の運転方法や連系する交流系統条件等を設定する必要がある。

##### (1) 送電容量, 信頼度

将来の需要増, 電源開発計画, 関連送電系統によって送電容量が決められる。直流送電システム内で、この送電容量を

規定するところは整流器側の直流リアクトルの出口が一般的であるが、送電側や受電側の交流系統連系点とする場合もある。将来、送電容量が増加される場合には、設備増設を考慮しておく必要がある。

信頼度については、例えば双極送電システムの場合、交流・直流主回路機器の単一事故で双極停止とならないこと、また、設備の稼働率としては、年間2日間程度の保守を考慮して、アベイラビリティの目標を99%以上とする場合がある。

##### (2) 所要運転機能

起動停止や通常運転機能とともに、特殊運転機能が要求される場合がある。特殊運転としては、過負荷、無効電力調整、低減電圧運転などがある。交流系統との協調制御として、電力動揺抑制、緊急電力応援、周波数制御、交流系事故時の運転継続、単独発電機との協調制御などがある。

##### (3) 変換所の設置環境条件

変換所が設置される地点の外気温や湿度といった気象条件、塩害の程度、耐震条件、ラジオ放送電界強度、騒音レベル、冷却水の確保、輸送限界等の条件を設定する。

##### (4) 交流系統条件

この条件は変換装置の運転に直接影響するため、運転性能との関連から大変重要である。電圧変動、電圧不平衡、電圧

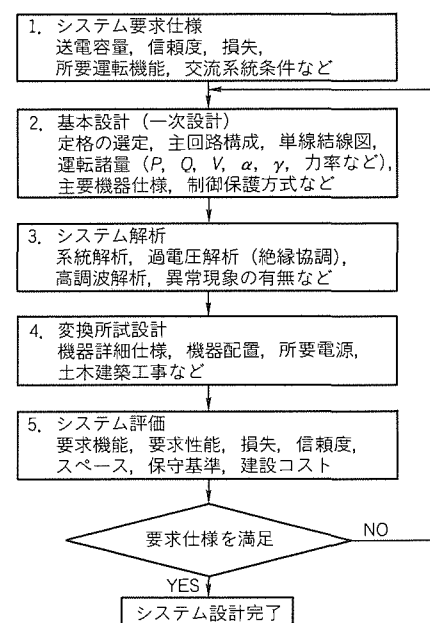


図1. システム設定手順

ひずみ率, 周波数変動, 短絡容量, 系統残留高調波等は定常運転特性の評価に, 許容短時間過電圧は過渡的な運転性能の評価に必要である。このほか, 系統のインピーダンスマップもシステム解析に用いる。

(5) 直流系統条件

架空線がある場合には, 誘導障害の面から許容流出高調波電流が設定される。また, 直流送電線路をモデル化してシステム解析に用いるため, 架空線鉄塔の導体配置やケーブルの絶縁層の構造等が必要である。

2.2.2 基本設計

システムの要求仕様に基づいて, 交直変換所の主回路構成, 主要機器の定格値等の概略仕様, 制御方式等を設定する。

(1) 直流電圧・電流

直流電圧及び直流電流は, 要求される送電容量に対して送電損失を含めた全体コストが最小になるように選定する。このため各種直流電圧に対してシステム設計を行い, 全体コストを求めて直流電圧に対する全体コストの傾向から望ましい直流電圧を設定するが, コスト以外に信頼性, 送電線を含めた環境面なども総合的に評価して最終的に直流電圧を選定する。

(2) 主回路構成

直流回路は, 正極と負極の双極と帰路導体の中性線で通常構成される。この場合, 極は独立構成とし, 一方の極の事故などが他極に影響を与えないような配慮が必要となる。国内ではパイプライン等への電食防止のため, 帰路線が中性線として設けられる。交流回路については, 交流フィルタや調相設備の設置が必要になる。ここでは, 直流回路の設計において考慮すべき点について述べる。

- (a) 中性線の接地箇所をどこにするかは, 設置箇所の違いによる発生過電圧値等を考慮する。
- (b) 非接地端には, 帰路線事故時の保護用に, 帰線強制消弧装置 (MRTB) を設置する。
- (c) 事故時の復旧に時間のかかる直流線路用ケーブルにつ

いては, 予備ケーブルの設置を考慮する。

(d) 直流架空線がある場合には, 誘導障害防止のため, 直流フィルタの設置を考慮する。

(e) 増設が計画されている場合には, 電圧増設が電流増設かを検討し, 最初の工事範囲を設定する必要がある。

(3) 運転諸量

機器の損失やパラメータの製作誤差を考慮した変換装置の特性式を用いて, 各種運転条件における各部の運転諸量 (有効電力, 無効電力, 直流電圧・電流, 制御角など) を求めることができる。例えば, 定格運転時の運転諸量を用いて構成機器の定格を設定することができる。

整流器運転中の変換装置の直流等価回路を図2に示す。三相ブリッジを  $n$  個直列接続した変換装置の内部直流電圧  $E_d$  は変圧器, バルブ及び直流リアクトルによる直流電圧降下分だけ電圧が低減され, 送電電圧  $E_{d1}$  となる。このような一部運転諸量の関係式を次に示す。

変換装置の内部直流電圧  $E_d$  は,

$$E_d = n \cdot E_{d0} - n \cdot I_d \cdot 3X / \pi \quad \dots\dots\dots (1)$$

送電端の直流電圧  $E_{d1}$  は,

$$E_{d1} = E_d - \{n \cdot (R_{TR} + R_V) + R_{DCL}\} I_d \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{変換用変圧器の定格容量} = \sqrt{2} E_1 \cdot I_d \quad \dots\dots\dots (3)$$

(4) 主要機器の一次設計

要求仕様, 定格値, 運転諸量, 電圧・電流耐量や運転特性等に基づいて主要機器の一次設計を実施する。この場合検討が必要とされる機器定数やパラメータ等について述べる。

(a) サイリスタバルブ

適用素子と直列数, スナバ等の回路定数, 過電流耐量など

(b) 変換用変圧器

定格容量・電圧, インピーダンス, タップ範囲, 損失など

(c) 直流リアクトル

直流電流断続限界, 事故電流抑制, 直流回路の共振周波数を考慮したインダクタンス値及びその線形領域など

(d) 直流開閉装置

回路構成と配置, 断路器・バイパススイッチ等の機器の責務, 電圧・電流変成器の配置と特性, 保守方法など

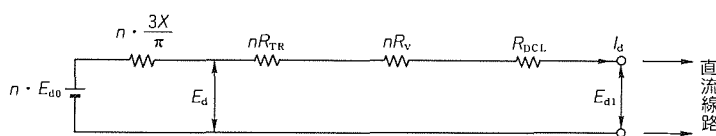
(e) 直流避雷器

配置箇所, 定格電圧, 保護特性と動作責務など

(f) 交流・直流フィルタ

発生高調波電圧・電流, 起誘導等価妨害電流, 系統周波数変動, 系統残留高調波, 交流側低次分路の要否など

(5) 制御保護方式



- 1ブリッジの無負荷直流電圧:  $E_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_1 \cos \alpha$
- 変換用変圧器1台の漏れリアクタンス電圧降下:  $\frac{3X}{\pi} I_d$
- ただし,  $E_1$  : 変換用変圧器直流巻線線間電圧 (rms)
- $\alpha$  : 制御角
- $I_d$  : 直流電流
- $X$  : 変換用変圧器の漏れリアクタンス
- $R_{TR}$  : 変換用変圧器の直流電圧降下寄与分抵抗
- $R_V$  : ブリッジの直流電圧降下寄与分抵抗
- $R_{DCL}$  : 直流リアクトルの直流電圧降下寄与分抵抗

図2. 整流器運転中の変換器の直流等価回路

(a) 制御方式

直流送電システムの運転性能に大きな影響を与える制御システムは、系統制御と変換器制御に分けられて階層構成がとられる。系統制御は、変換所の系統上の位置付け、要求機能から適用する制御方式が決まる。変換器制御には、基本制御である定電流制御・定電圧制御・定余裕角制御が用いられ、付加制御として転流失敗防止のための $\beta$ 進め制御・VDCOL制御・運転継続制御等が通常用いられる。個々の制御は、安定性と性能を満足するとともに、各種制御方式間で干渉が起きないように制御定数等を選定する。

(b) 保護方式

直流線路保護、変換所構内直流保護、交流回路保護、機器保護、インバータ負荷遮断・ルート断時のような保護等の区分と、重故障・中故障といった故障種別に応じた保護連動を考慮する必要がある。過電圧や過電流の抑制を目的とした保護方式は、主検出と事故検出の組合せや多重化構成の検討とともに、計測装置から制御・保護装置、ゲート制御まで含めた性能や信頼性を評価して保護協調を図る必要がある。

2.2.3 システム解析と解析ツール

直流送電システムが定常状態で安定して運転できること、及び異常状態で定められた運転ができることを確認したり、各種パラメータを変化させてシステムの最適化を図るためにシステム解析を行う。基本設計において設定した機器仕様や制御保護方式等を組み込み、直流系統だけでなく、接続される交流系統も含めた解析を実施する。これらの解析は、完備されたデジタルプログラムやアナログシミュレータによって今では高精度で迅速に実施することができる。

解析は、マイクロ秒のサージ現象から分オダの周波数変動まで広範囲の時間帯の現象を扱うため、用途に応じた解析ツールの活用が必要となる。デジタルプログラムでは、現象を詳細に把握しようとすれば計算のステップを小さくする必要があるため、長時間の現象には多くの計算時間がかかる。

一方、アナログシミュレータは、長時間の現象にも活用できるし、モデル回路要素の損失を補償して実システムと同様な損失分として実現象を忠実に模擬できるようになってきた。表1に、代表的な解析項目と解析ツールを示す。

表1. 解析項目と解析ツール

種別	解析項目	解析ツール
定常解析	潮流計算	潮流計算プログラム
	高調波発生・分布計算	高調波解析プログラム
過渡解析	過渡安定度	交直連系系統安定度解析プログラム
	過電圧・過電流	EMTP, シミュレータ
異常現象	軸系低周波負制動現象	固有値, EMTP, シミュレータ
	電圧不安定現象	電圧安定度解析プログラム
	高調波不安定現象	固有値, EMTP, シミュレータ
信頼度	バルブ運転可能時間	モンテカルロシミュレーション

2.2.4 変換所試設計とシステム評価

(1) 変換所試設計

所定の運転性能が得られる直流送電システムの各種適正パラメータを基に変換所の全般設計を行い、構築される変換所を評価する必要がある。主要な設計項目としては次のようなものがある。

- (a) 単線結線図と所内電源回路
- (b) 機器・装置詳細仕様と機器・装置配置
- (c) 耐震, 耐汚損, 防災, 騒音対策, ラジオノイズ対策
- (d) バルブホール仕様・空調管理, 冷却水の確保と処理
- (e) 絶縁協調, 機器試験電圧と試験方法
- (f) 保守・点検方法, 予備品
- (g) 変換所建設工程・総合試験計画

(2) システム評価

試設計した変換所が要求仕様を満足するかどうかを評価し、満足できない場合には基本設計の見直しを行い、要求仕様を満足するまでシステム設計を繰り返して実施する必要がある。システムの主要な評価項目としては次のようなものがある。

- (a) 要求機能・性能
- (b) 所要スペース, 設置環境の影響
- (c) 変換所損失
- (d) 信頼度, 保守基準
- (e) 変換所建設コスト

3. システム解析

交直連系系統を含むシステム全体の絶縁協調や、直流系統と交流系統間の相互作用を把握するための各種系統解析について以下に述べる。

3.1 過電圧・過電流解析

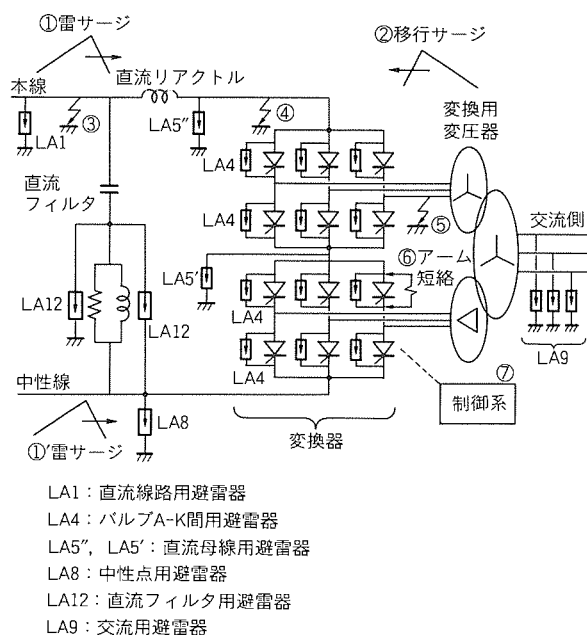


図3. 交直変換所における避雷器配置例

過電圧・過電流解析は、絶縁協調、避雷器の処理エネルギー、機器の過電圧過電流耐量を検討するために行う解析であり、瞬時値ベースの解析を行う必要がある。解析ツールとしては、主回路と制御回路が同時に模擬できるEMTP (Electro-Magnetic Transients Program) を用いるのが現在の主流である。

過渡的な過電圧を抑制するために直流系に設置する避雷器には、直流線路(本線)用、中性線用、直流母線用、バルブA-K間用、直流フィルタ用などV-I特性の異なる各種の避雷器が必要である。交直変換所における避雷器配置の例を図3に示す。

3.1.1 直流系統事故

直流系統で検討すべき事故時の過電圧について、概要を述べる。

(1) 雷サージ(図3の①, ①', ②)

変換所への雷サージ侵入は、直流架空線路から侵入する場合と交流母線側から変換用変圧器を介して移行する場合がある。解析としては、数ミリ秒以下の現象を取り扱うため、直流制御系の模擬は行わず、従来の交流変電所での雷サージ解析を踏襲した手法を用いる。従来の交流系統の雷サージ解析と異なる特徴は次のとおりである。

- (a) 直流架空線は絶縁レベルの低い中性線が本線より上方に配置され、架空地線(GW)の役割を果たすとともに、本線逆せん(閃)絡時には中性線も逆閃絡する。
- (b) 本線侵入サージは、直流リアクトルでブロックされる。
- (c) 変換所侵入サージ電圧波形は、直流フィルタ、サージキャパシタなどによって波尾の長い開閉サージ性の波形となる。

雷サージによる過電圧は比較的大きく、機器の雷インパルス耐電圧値(LIWV)、開閉インパルス耐電圧値(SI WV)

に及ぼす影響は大きい。

(2) 直流線路事故(図3の③)

直流系統が双極運転時に本線で地絡事故が発生すると、事故極の電圧低下に伴って中性線及び健全極に静電誘導や電磁誘導による過渡振動電圧が重畳するが、過電圧レベルは比較的低い。直流線路にケーブルを含む場合には、事故極の電圧が事故前の運転電圧から逆極性に变化する逆振れ幅も評価する必要がある。

(3) 変換所構内事故(図3の④, ⑤, ⑥)

構内での地絡時には、直流母線又は変換用変圧器直流巻線回路の対地キャパシタンスが放電する時間領域においてバルブA-K間に印加される急しゅん(峻)波サージ電圧の検討が必要である。

なお、アーム短絡は過電流責務の中で最も厳しい事故であり、その過電流波形は変換用変圧器の二相短絡電流となるため、変換用変圧器の漏れインピーダンスはサイリスタ素子の過電流耐量と協調をとるよう選定される。

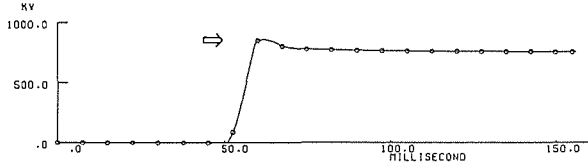
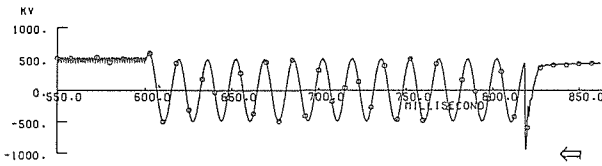
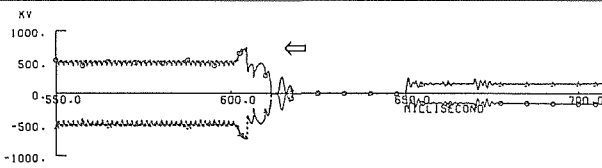
(4) 制御系事故(図3の⑦)

単一の制御系故障では発生せず、非常に希頻度と考えられる制御系の事故として、全電圧起動、インバータゲートブロック、インバータ負荷遮断がある。これらの事故は、過電圧レベルや避雷器の処理エネルギーが比較的大きくなる。EMTPを用いた過電圧解析波形例を表2に示す。

3.1.2 交流系統事故

交流系統事故時に直流系統が運転継続できる場合には、変換器の無効電力消費が継続されるため、進相容量(調相設備、交流フィルタ)の余剰による過電圧値は大きくならない。しかし、交流系過電圧の評価としては、過酷サイドとして交流系統事故に伴って直流系が停止する場合も想定しておく必要がある。

表2. 制御系事故時の過電圧波形例

事故	制御系異常内容	波形例(INV側直流母線電圧波形)
全電圧起動	起動時にINV側がバイパスペアせず、REC側が全電圧で起動する。	
インバータゲートブロック	INV側がゲートシフト又はバイパスペアせず、ゲートブロックする。	
インバータ負荷遮断	INV側は、交流系が負荷遮断する前にバイパスペアしない。	

(1) 過電圧発生メカニズム

(a) 多頻度事故

2回線使用中の交流系統で多頻度事故(1LG, 2LG, 3LG)が除去された後、交流系の過電圧は、変換所交流母線電圧が最も高くなる。この過電圧の発生メカニズムは、図4に示すフェランチ現象による過電圧と、図5に示すように事故クリア後の変換用及び調相用変圧器の励磁突入による電流が交流系統のインピーダンスに流れ込むことによる過電圧が複合して発生するものと考えられる。変圧器の飽和電流には低次高調波成分が多いため、交流系統の周波数-インピーダンス( $f-z$ )特性の反共振点がこの次数付近にあると過電圧が大きくなる。

(b) 希頻度事故

次に事故除去後に変換所からみて交流母系統側が欠相状

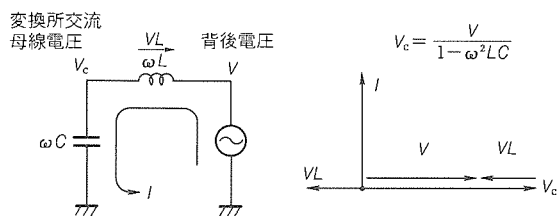


図4. フェランチ現象の説明

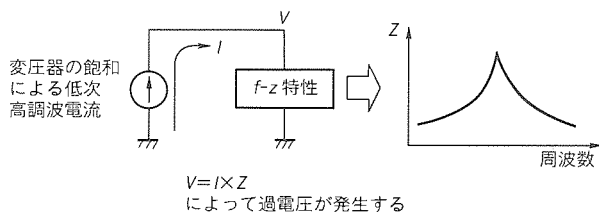
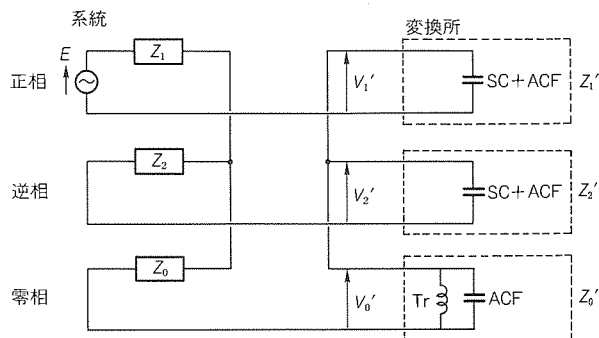


図5.  $f-z$ 特性と過電圧

態となる場合については、図6に示す対称座標法の等価回路によって評価でき、定常過電圧倍数  $K$  は次式(4)で表せる。



ただし、  
 $Z_1, Z_2, Z_0$ : 系統側の正, 逆, 零相インピーダンス  
 $Z_1', Z_2', Z_0'$ : 変換所側の正, 逆, 零相インピーダンス

図6. 同相1LG-1LO時の等価回路

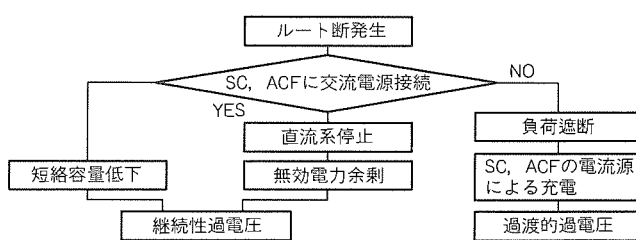
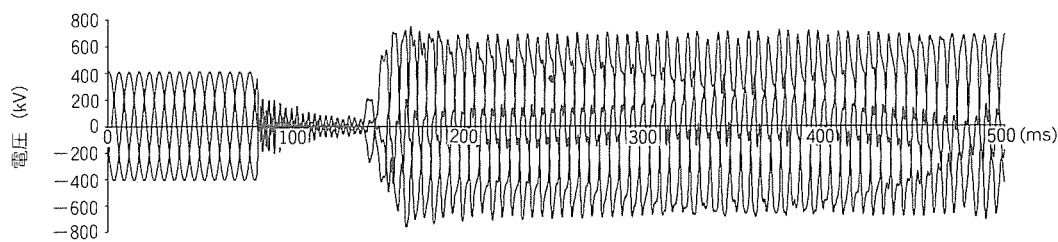
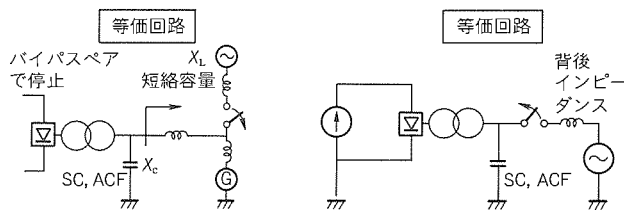
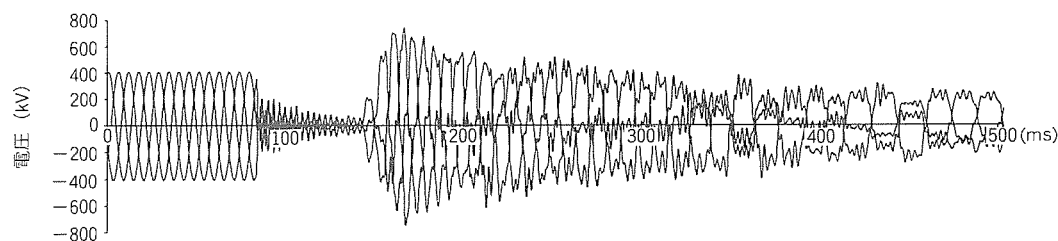


図7. ルート断時の過電圧発生メカニズム



(a) 対策なし



(b) 対策あり

図8. 過電圧抑制対策例

$$K = \frac{Z_1' - Z_0'}{Z_1 + Z_1' + 2(Z_0 + Z_0')} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $Z_1, Z_0$ : 交流系統側の正相, 零相インピーダンス

$Z_1', Z_0'$ : 変換所側の正相, 零相インピーダンス

また、交流系統でルート断が発生したときの過電圧発生メカニズムを図7に示す。変換所に交流系統が接続されない場合はインバータ負荷遮断現象となるが、ルート断後に変換所が弱小交流系統につながる場合はフェランチ現象で継続性過電圧が激しくなる。

(2) 過電圧抑制対策

交流系統事故時に直流系が停止する過酷ケースの瞬時過電圧は交流系に設置する避雷器によって抑制するが、継続性過電圧に対しては抑制策を検討する必要がある。対策の一つとして、直流電流を変換器でバイパスさせた後に変換所と弱小交流系統を切り離すことが過電圧抑制に有効である。図8に、交流母系統ルート断時の弱小交流系統切離しによる過電圧の低減効果の例を示す。

3.2 交直連系系統の動特性解析

交直連系系統における動特性解析では、各種制御系を含む系の安定性や、各種じょう(擾)乱(地絡・短絡故障, 電源脱落, 負荷脱落, 線路開閉, 機器開閉, 負荷変動など)に伴っ

て発生する系統の動的な振る舞いを検討する。

3.2.1 安定度解析

直流系統の応動が大規模交流系統の安定度に与える影響や、交流系統の安定度を向上するための直流系統の制御方法などを検討するものである。

交直変換器の容量が大きくなるにつれ、直流系統の応動が、広域連系系統に大きな影響を与えるようになる。交流系統を詳細にモデル化するとともに、直流系統の変換器動作は実効値ベースで、直流回路は集中定数回路の微分方程式でモデル化して、長時間の現象を解析する必要がある。

(1) 直流運転継続による電力高速回復

基幹系統用の直流送電においては、交流系統事故で直流系統が一時停止するのを防止することが重要である。従来の直流送電は、交流系統事故によって変換所母線電圧が0.6 pu程度に低下すると直流の運転をいったん停止し、200~500ms後に再起動していた。交流系統事故時にも直流の運転を継続し、事故除去後は元の送電電力に高速に回復する制御を行うと、交流系統の安定度が大幅に向上する。

(2) パワーモジュレーション (PM) 制御

直流送電は一定の電力を送電するように運転されているが、その電力を高速に制御できることを応用して、連系交流系統の特性を向上するためのいろいろな制御を行うことが可能となる。図9に示す広域連系の交流・直流系統では、長周期の

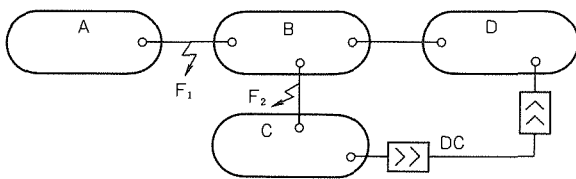


図9. 検討対象系統の例

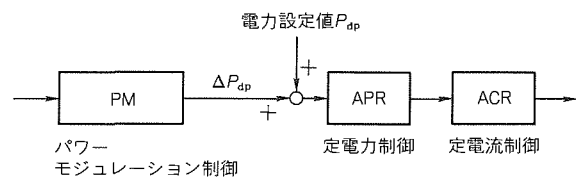
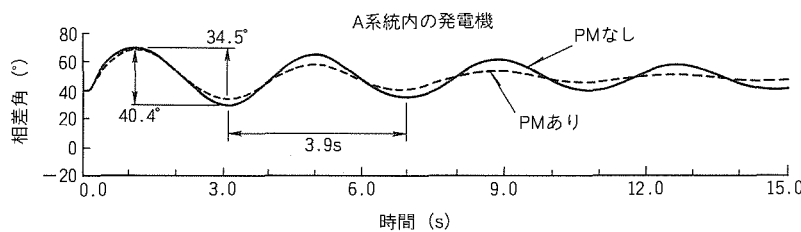
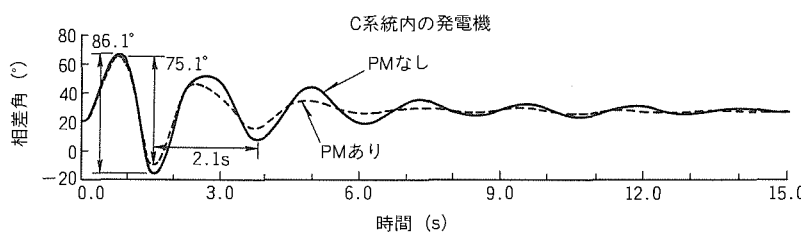


図10. パワーモジュレーション制御系



(a) F1点三相短絡-除去時の相边角動揺



(b) F2点三相短絡-除去時の相边角動揺

図11. 電力動揺のダンピング改善例



安定度が低下することが懸念されていたが、直流送電電力の指令に図10のパワーモジュレーション制御を採用することにより、安定度を改善できる<sup>(2)</sup>。図11に、電力動揺のダンピング改善例を示す。

### 3.2.2 周波数変動解析

広域連系系統が交流と直流で連系されている状態から交流の連系が切れた後の周波数変動と、その改善方法の検討や、大電源を直流で単独に送電する場合の送電端周波数制御方法の検討などを行うものである。

この解析では、タービンの調速機能や負荷の周波数特性を詳細にモデル化する必要があるが、基本的には安定度解析と同じモデルと手法で行われる。

#### (1) 緊急周波数改善制御

図9の広域連系系統でC-B間又はB-D間の連系が切れると、分断された両系統に電力需給のアンバランスが発生し、大きな周波数変動が生じる。直流電力を高速に調整して、この周波数変動を改善することができる。両系統の周波数偏差に応じて緊急に直流電力の設定値を変更して制御する例を図12に示す。

#### (2) 直流単独送電系統の周波数制御

直流単独送電系統では、発電機と受電側交流系統との間に同期化力が働かない。このため、電力を安定して送ることが難しい。交流送電と同じ同期化力とダンピング力を得るためには、図13に示す直流周波数制御(DC-AFR)が有効である<sup>(3)</sup>。この制御系は、周波数偏差を入力して比例・積分制御で直流送電電力指令を与えるものである。図14に逆変換器側交流系統事故時の直流電力の応動を示したが、あたかも交流で連系されたのと同じ動きをして、安定に収束している。

### 3.3 不安定現象解析

大容量直流送電系統における代表的な不安定現象として、タービン・発電機軸系の低周波負制動現象、電圧不安定現象、

及び高調波不安定現象がある。ここでは、これらの現象の発生メカニズム、解析方法、及び解析例を簡単に紹介する。

#### 3.3.1 軸系低周波負制動現象解析

何らかの原因によって発生したタービン・発電機軸系のねじれ振動のうち、低次の固有振動(数Hzから20~30Hz)の減衰が直流送電の制御系との相互作用によって悪化し、持続又は拡大する現象である。

アメリカのスクエアピュート直流送電系統において系統試験中に初めて経験されたが、発生メカニズムの解明、抑制対策の研究が進み、安定化対策が確立している。順変換器側でタービン発電機の負荷に占める変換器負荷の割合が大きい場合に問題になることがある。

タービン・発電機の軸系を複数の慣性体とバネとダンピング要素で表して、瞬時値でシミュレーション解析する方法と、実効値をベースにした固有値解析による方法がある。

#### 3.3.2 電圧不安定現象解析

電圧不安定現象は、逆変換器側の交流系統において変換所母線から見た短絡容量比が小さく、逆変換器が定余角制御モードで運転されている場合に問題となり、逆変換器特性によって変換所母線電圧の維持が困難となる現象である。

瞬時値でシミュレーション解析する方法と、実効値をベースにした固有値解析による方法がある。

#### 3.3.3 高調波不安定現象解析

高調波不安定現象は、変換所から見た交流系統のインピーダンス(フィルタと調相用コンデンサを含んだインピーダン

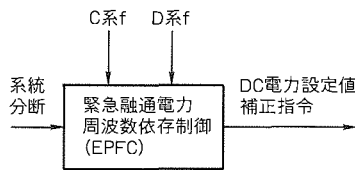


図12. 緊急周波数改善制御の例

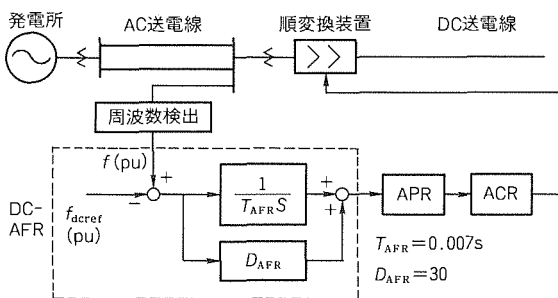


図13. 直流による周波数制御系の例

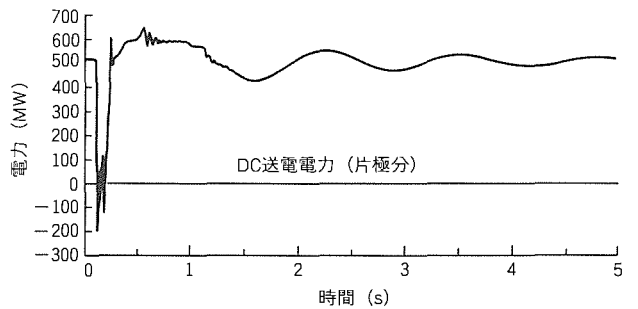


図14. 周波数制御系の応動例

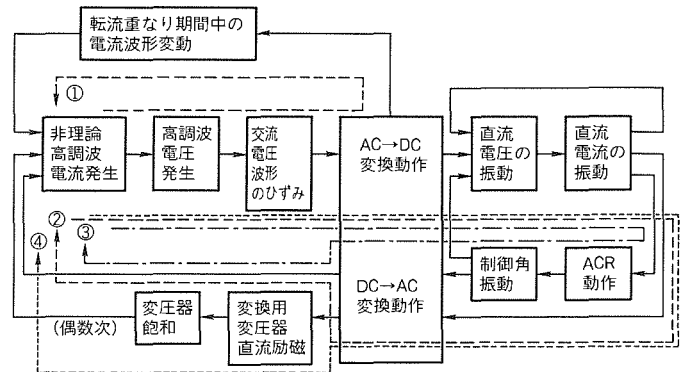


図15. 高調波不安定現象発生メカニズム

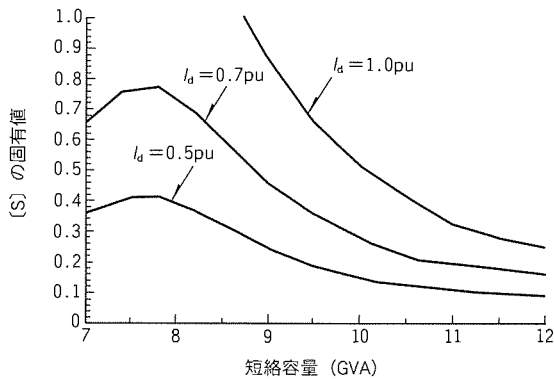


図16. 高調波不安定現象の固有値解析例

ス) が大きい場合に問題となる。交流システムのインピーダンスが大きいと、変換器の制御角のバラツキや交流電圧のひずみによって発生する非理論高調波電流が交流電圧のひずみを増大させ、そのひずみが更に非理論高調波電流を拡大していく現象である。

広義には、図15のループ①～④による拡大現象が考えられている。しかし、直流回路には十分大きな平滑リアクトルが設置されていること、直流回路の直列共振周波数は基本周波数から十分離れていること等から、たとえ交流電圧がひずんでも、ループ②～④を通して交流ひずみ電流となって帰還する量は小さいと考えられる。

瞬時値ベースのシミュレーションで行う解析方法と、変換器から発生した高調波電流が交流電圧をひずませて、その電圧を変換した結果で高調波電流がどう変化するかを固有値解析で求める方法がある<sup>(4)</sup>。固有値解析では、一巡ループのゲインが1を超えると不安定と考える。

固有値法による解析例を図16に示す。この結果によれば、定格直流電流では交流システムの短絡容量が9 GVA以下になると不安定になる可能性がある。

### 3.4 高調波解析

この解析には、発生高調波量を求める解析と、発生量を基にした系統流出高調波による電圧ひずみ率を求める解析がある。

#### (1) 発生高調波量

変換器が発生する高調波は、交流側には電流源、直流側には電圧源として出てくる。変換器運転時の各部の電圧・電流波形をフーリエ変換して高調波量を求める。変換用変圧器の交流電流からは交流側高調波電流が、直流出力電圧からは直

流側高調波電圧が計算できる。この場合、系統の逆相電圧、サイリスタバルブの点弧角バラツキ、変換用変圧器のインピーダンスや変圧比の相間バラツキ等を考慮して、理論高調波だけでなく非理論高調波も計算する。

#### (2) 系統電圧ひずみ率

変換器を高調波電流源としてフィルタや交流システムの周波数特性を考慮した回路網を用いて、高調波電流分布及び各部の高調波電圧を計算して系統の電圧ひずみ率が求まる。

この電圧ひずみ率が許容値内に入るよう、必要なフィルタ次数、容量、Q値等を選定する必要がある。近年、系統の5次高調波含有率が増加する傾向にあることから、5次高調波フィルタの設置が考慮される場合が多い。

## 4. む す び

交直変換所のシステム設計について、設計手順と全体として協調や考慮が必要な検討項目について述べた。また、システム解析については、具体的解析例を交えて内容を示した。解析ツールは用途に応じて各種整備されており、直流送電の計画段階から活用できる状況にある。

実際の直流送電プロジェクトにおけるシステム設計の経験から、大容量交直変換所のシステム設計においては、対策も含め、広範囲の検討とシステム解析のボリュームは膨大な量となる。これらのシステム設計を通して蓄積された知見は今後のプロジェクトに役立つものであり、交直変換所のシステム設計技術は確立したと言える。

## 参 考 文 献

- (1) 花村 信, 片岡直昭: 交直連系技術の課題と対応策, 平成3年電気学会全国大会シンポジウム, S. 14-1 (1991)
- (2) 松野克彦, 山地幸司, 鈴木昭男, 石黒富士雄, 徳原克久: 直流系パワーモジュレーション制御による交流系統安定化制御, 電気学会全国大会, No. 1429 (1995)
- (3) 東 正樹, 川原明人, 加藤和男, 石黒富士雄, 上田 広: 直流単独送電の発電機との協調制御, 電気学会全国大会, No. 1413 (1995)
- (4) 福山直人, 匂坂 靖, 禰里勝義, 関根泰次: 直流単独送電系統の高調波安定度解析, 電気学会論文B, 107, No. 6, 291～298 (1987)

# 500kV高電圧大容量サイリスタバルブの開発

吉田良男\* 山本吉彦+  
 廣瀬昌弘\*\* 竹田正俊++  
 色川裕之\*\*\*

## 1. ま え が き

直流送電システムの大容量化に対応するため、関西電力(株)、四国電力(株)、電源開発(株)及び三菱電機(株)は共同研究を実施して、定格±500kV 2,800Aの空気絶縁・純水冷却方式、4アーム積層形サイリスタバルブ(以下“バルブ”という。)を開発した。

直流送電システムの主要機器であるバルブは、高信頼度・小型・低損失であることが要求される。高電圧大容量化に伴って一般に機器は大型となるが、新開発の大口径(6インチ)光直接点弧サイリスタ(以下“光サイリスタ”という。)を適用すること、バルブを構成するモジュール(サイリスタとその周辺の電気回路部品をユニット化したもの。)の6段積み構造を採用すること等により、小型化を実現した。また、併せて高信頼度化、低損失化も図った。

ここでは、製作したバルブ(以下“プロトバルブ”という。)とモジュールの概要、高信頼度・小型・低損失を目指したサイリスタバルブの技術開発内容及び検証試験結果について述べる。

## 2. 試 作 概 要

表1に、バルブの開発目標を示す。この開発目標に対するバルブ設計の妥当性を検証するため、プロトバルブとモジュールを試作した。

表1. サイリスタバルブの開発目標

項目	仕様	
構造	屋内気中絶縁4アーム積層形	
冷却方式	純水水冷式	
定格	直流電圧	500kV(対地250kV)
	直流電流	2,800A(過負荷時3,500A)
耐震条件	0.3G共振正弦三波 安全率1.0以上 実地震波 安全率2.0以上	
バルブ高さ	12m以下	
使用サイリスタ素子	8kV-3.5kA級サイリスタ素子(6") 光直接点弧方式	
耐電圧 (雷インパルス)	A-K間絶縁	311kV(制限電圧270kV 2kA)
	低圧側対地絶縁	750kV
	高圧側対地絶縁	1,300kV
バルブ電力損失	0.35%以下(補機損含まず。)	
バルブホール 内の環境条件	温度	: 5~40℃
	湿度	: 70%RH以下
	クリーン度	: クラス100,000
	汚損度	: 0.01mg/cm <sup>2</sup>

### 2.1 プロトバルブ

プロトバルブの外観を図1に示す。バルブの基本設計について以下に述べる。

各アームは、定格DC125kVで、光サイリスタ(定格8kV, 3,600A)の数が40個(40直列×1並列)であり、既設の北海道-本州直流連系設備のバルブ(アーム定格DC125kV, サイリスタ定格6kV, サイリスタの構成54直列×1並列)に比べてサイリスタの数が74%に低減されている。なお、40個のサイリスタのうち2個は冗長サイリスタで、偶発故障によるバルブの信頼度の低下を防止するために設けたものである。

各アームの40個のサイリスタは、6個ないし7個ごとにスナバ抵抗、スナバコンデンサの周辺の回路部品とともに6台のモジュールに分割して収納した。

4アーム全体で24台のモジュールとなるが、これを一平面に4台設置し、高さ方向に6段に積み上げたバルブ構造(6段積み構造という。)とした。この構造は、他の4段積みや8段積みの構造と比較検討した結果、交流側・直流側架線の結線や保守上も問題なく、バルブが最も小さくなるので採用したものである。これらのモジュールを図2に示すように

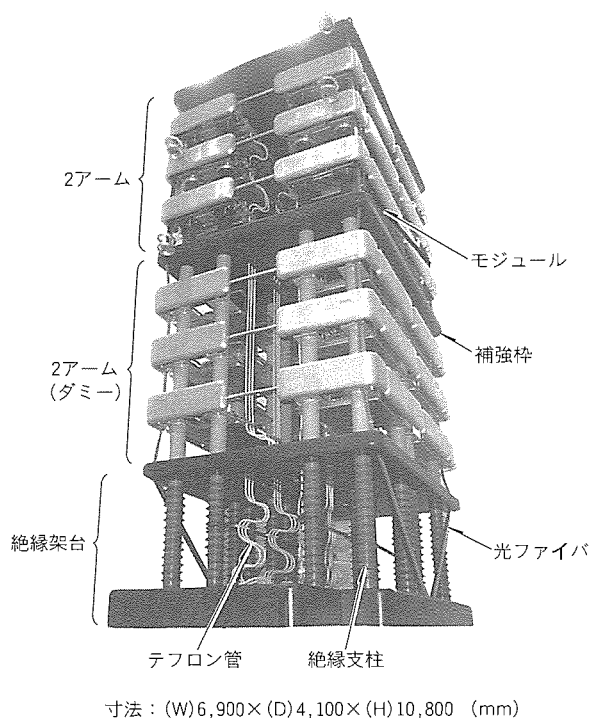


図1. プロトバルブの外観

ら(螺)旋状に接続して、バルブの電気回路を構成した。

各々のモジュールは大口径(外径260mm, 内径220mm)のFRP製絶縁支柱4本で絶縁支持し、モジュール3段(2アーム)ごとに補強枠と絶縁支柱の両端部に設けた金属フランジを締結することにより、所要の耐震性能を確保した。また、過電圧に対して各アームを保護するA-K間避雷器は、バルブ組込み形とし、機械的にバルブで支持することにより、A-K間避雷器の耐震設計の合理化を図った。

サイリスタ、抵抗、アノードリアクトルといった電気部品の発熱を冷却するため、冷却効率の高い純水冷却方式を採用し、テフロン管を用いて、大地電位の地上と高電位のモジュール間の絶縁を確保しながら冷却水を供給する方式とした。一方、電気部品の総発熱量の5%程度が空気へ放熱されるので、モジュール周囲温度の上昇を抑制するため、バルブの下部から冷却風を吹き出す設計とした。

2.2 モジュール

開発モジュールは、小型・軽量アノードリアクトルの適用、水冷抵抗器の大容量化による使用本数の低減、モジュール形態に合った薄形構造コンデンサの適用、小型・軽量サイリスタスタック(サイリスタと冷却フィンを交互に重ね合わせて圧接したもの。)の適用等により、小型・軽量化を達成した。

また、このモジュールは、電気回路部品がすべてモジュールに組み込まれており、モジュール単位で管理・保守ができるという特長がある。さらに、サイリスタスタックについて

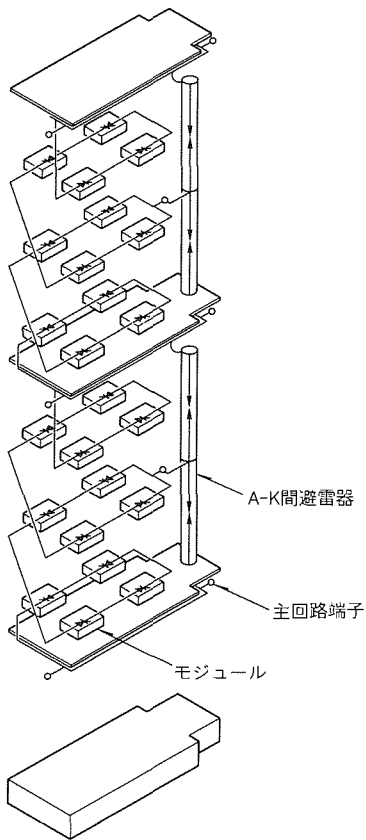


図2. サイリスタバルブの電気回路構成

は、サイリスタ単体での交換も可能な構造とした。

図3及び図4に、8kV 3,600Aの光サイリスタを7個収納したモジュールの外観及び回路構成を示す。

モジュールの前面にサイリスタスタック、その後方に水冷抵抗器とコンデンサからなるスナバ回路、スナバコンデンサの両端にアノードリアクトルをそれぞれ配置した。

モジュールの部品のうち、発熱部品であるサイリスタ、水冷抵抗器、及びアノードリアクトルのコイルを、純水で冷却する方式とした。モジュールの冷却水配管とバルブ本体の冷却水配管の接続には、保守時に冷却水を漏らさずにモジュールの着脱ができるようにセルフシーリングカップラを用いた。

光サイリスタへの点弧パルス及び光サイリスタの電圧信号は、図4に示すように、高電圧に対する絶縁が容易な光ファイバケーブルで伝送する方式とした。

3. 技術開発

高信頼度・小型・低損失の高電圧大容量サイリスタバルブの実現を目指すため、図5に示す技術開発を行った。以下に、各技術開発項目の詳細について述べる。

3.1 絶縁技術

空気絶縁の構成要素である気中ギャップと絶縁物の沿面に

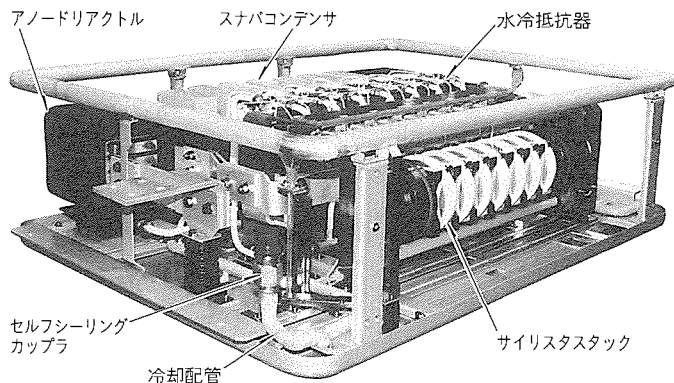


図3. 試作モジュールの外観

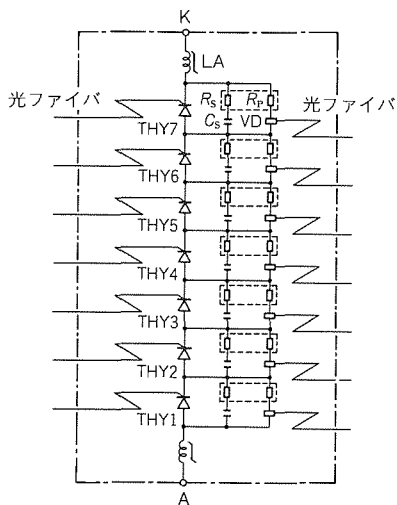


図4. 試作モジュールの回路構成及び仕様

定格電圧	DC 21.9kV
定格電流	DC 2,800A
素子定格	8kV 3,600A
素子構成	7直列1並列
絶縁方式	屋内空気絶縁
冷却方式	純水冷却
モジュール構成部品	光サイリスタ THY
	水冷抵抗器 (1S)
	{ スナバ抵抗器 $R_s$ } { 直流分圧抵抗器 $R_p$ }
	スナバコンデンサ $C_s$
	アノードリアクトル LA
	電圧検出ユニット VD

ついでその長さを最小とするため、絶縁基礎試験を実施してこれらの絶縁特性を把握した。また、万一の漏水時の絶縁性能評価試験を実施した。

### 3.1.1 気中ギャップ

気中ギャップの絶縁特性はその形状に依存することから、バルブ内各部の気中ギャップの絶縁特性を把握するため、実際のバルブの気中ギャップ形状を模擬した試験装置を用いて絶縁基礎試験を実施した。

この試験結果(図6)を基に、放電ばらつき及び絶縁裕度を考慮して、絶縁架台部、アーム部の所要の気中ギャップ長を決定した。

### 3.1.2 絶縁物沿面

バルブに使用するFRP、テフロン管、光ファイバの絶縁物について、バルブの汚損仕様値 $0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ <sup>(1)</sup>を考慮して、基礎絶縁試験<sup>(2)</sup>と各絶縁物の課電寿命特性を把握す

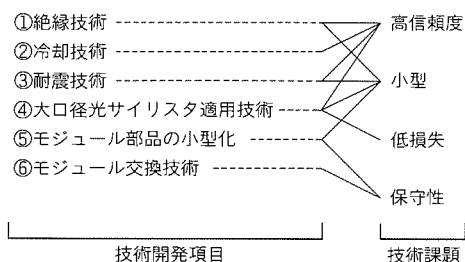
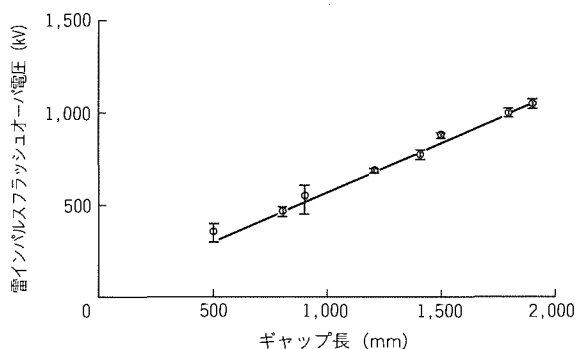
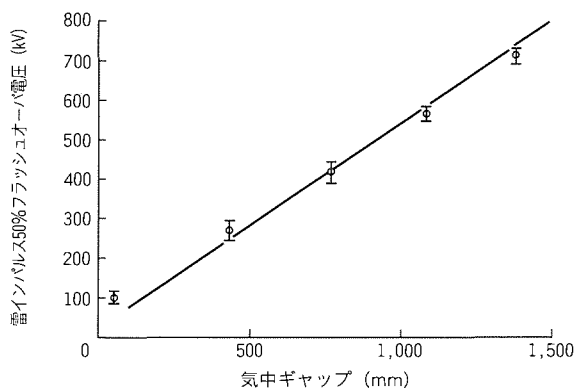


図5. サイリスタバルブの技術開発項目



(a) アーム



(b) 絶縁架台

図6. 気中ギャップの絶縁試験結果

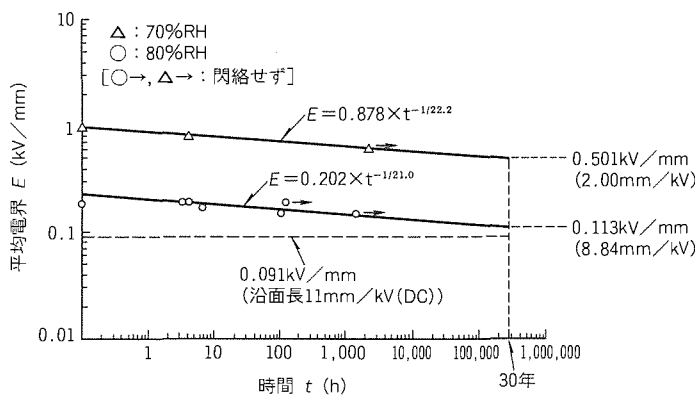
るための  $V-t$  試験を実施した。

$V-t$  試験の結果(図7)から、30年間(想定機器使用期間)課電寿命を確保できるように、各絶縁物の所要沿面長をいづれも $11\text{mm}/\text{kV}$ (DC)とした。

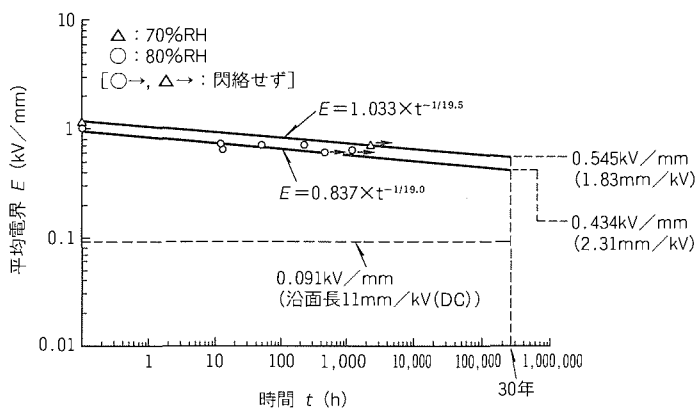
なお、 $V-t$  試験における絶縁物の汚損度は、絶縁性能を保証する観点から、汚損仕様値の3倍の $0.03\text{mg}/\text{cm}^2$ とした。

### 3.1.3 漏水時の絶縁

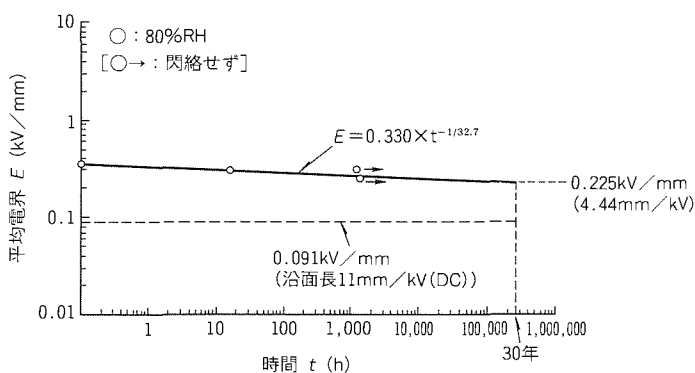
万一の漏水を想定し、FRP、テフロン管、光ファイバの注水絶縁試験(図8)を行い、漏水で絶縁物がぬ(濡)れた場



(a) FRP



(b) テフロン管



(c) 光ファイバ

図7.  $V-t$  試験結果

合のバルブの絶縁性能を把握した。なお、この場合、漏水で濡れた外側の浴面絶縁性能を検証すればよいことから、テフロン管は純水が入っていない状態で試験を行った。

### 3.2 冷却技術

#### 3.2.1 流電腐食対策

大地電位の地上と高電位のモジュールに供給される純水の間には高電圧が印加されるので、漏れ電流が流れる。この漏れ電流によってテフロン管の継ぎ手が腐食する現象（“流電腐食”という。）があることから、流電腐食試験（図9）を実施し、腐食量と漏れ電流値の関係を明らかにした<sup>(9)</sup>。

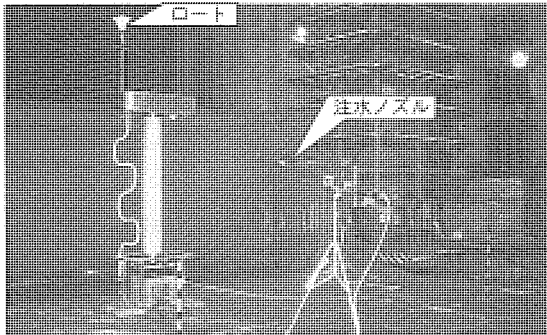


図8. 注水絶縁試験

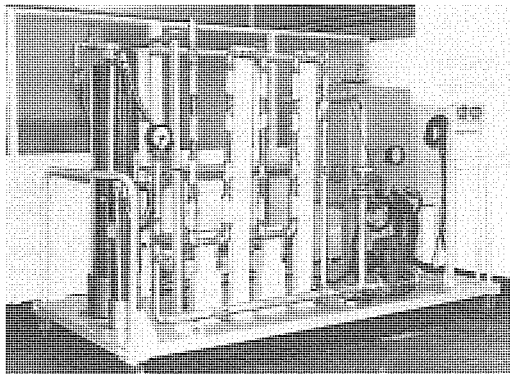


図9. 流電腐食試験

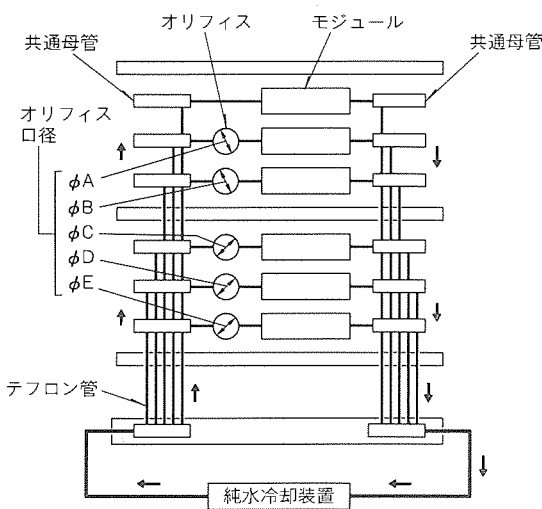


図10. サイリスタバルブ冷却配管系の構成

この試験結果を基に、流電腐食を抑制するため、漏れ電流をテフロン管1本当たり3.5mA以下に抑制できるよう、純水の導電率の管理値を0.3 $\mu$ S/cm (25 $^{\circ}$ C換算値)とした。

#### 3.2.2 冷却配管系へのオリフィスの適用

バルブの冷却配管系の構成はモジュール並列冷却で、効率良く冷却するために、各モジュールに均等に純水を供給する必要がある。一方、バルブはモジュール6段積み構成であり、各段のモジュールには揚程差があるので、このままでは各モジュール純水の供給量が不均一となる。

このため、図10に示すように、冷却配管系へオリフィスを適用することとし、冷却配管流路解析を実施して、各モジュールに設計流量82 $l$ /minの純水が均等に供給されるよう、各段のオリフィスの口径を決定した。

### 3.3 耐震技術

大口径(外径260mm、内径220mm)のFRP製絶縁支柱(両端金属フランジ付き)の機械強度試験を実施し(図11)、その機械強度を評価するとともに、安全率の評価基準を確立した。また、実規模のバルブ部分モデルの耐震試験(図12)を実施して、固有振動数や減衰定数等の諸データを取得し、バルブの耐震性能を評価するための解析技術を確立

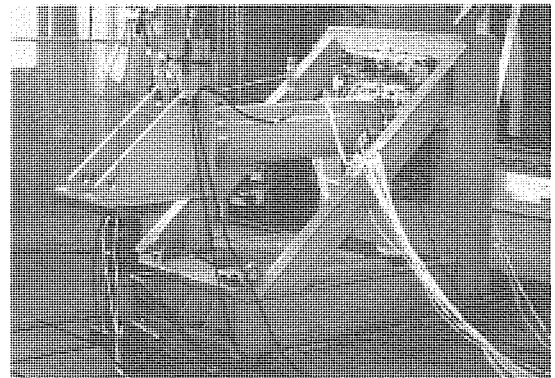


図11. 絶縁支柱の機械強度試験

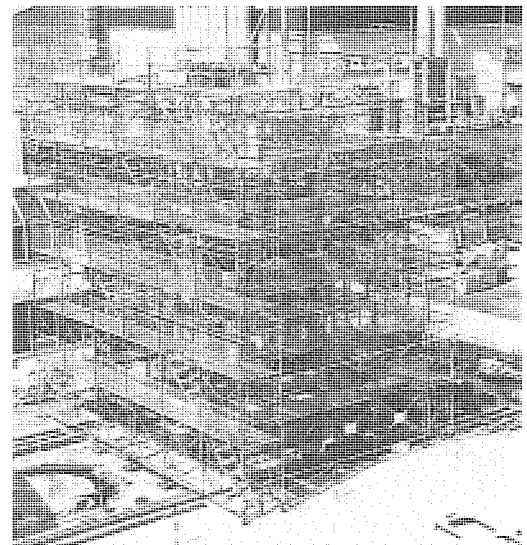


図12. バルブ部分モデルの耐震試験

した。

### 3.4 大口径光サイリスタ適用技術

#### 3.4.1 光点弧系

光サイリスタにおける点弧系では点弧光源を二重化するため、図13に示すように、光サイリスタ内部光信号伝送路として設けられたライトガイドに、二つの点弧光源出力を光ファイバケーブルで個別に伝送して供給する構造とした。

光サイリスタ点弧光源に要求される基本的な要件は、

- 発光波長がシリコン分光感度特性ピーク域に一致すること。
- 光ファイバケーブルと高効率かつ容易に接続できること。
- 大出力であること。
- 高信頼度であること。

であるが、LD (Laser Diode) は、表2に示すように、従来のLEDに比べて優れた特長があり、下記の長寿命化開発で良好な結果が得られたことから、上記の要件を満たすものとして採用した。

LD長寿命化開発内容は次のとおりである。

- (1) 高品質の結晶が成長できる有機金属気相成長法を用いて単一量子井戸構造を実現し、従来のダブルヘテロ構造のものに比べて、光出力を得るしきい値電流と所要発光量を得るための動作電流をそれぞれ50%と40%低減した。
- (2) 発光パターンの均一化のため、発光領域を5分割したアレー構造を採用した。これにより、単一の発光領域のものに比べて寿命を1.5倍とした。

#### 3.4.2 シミュレーションによる電気回路定数の最適化

電子回路シミュレータ SPICE を用いて、バルブの構成単位であるモジュールをモデル化し、変換動作のシミュレーションを行った。このシミュレーションでバルブの動特性を把握することにより、電気回路定数を最適化した<sup>(4)</sup>。

シミュレーションに用いた個々のサイリスタはターンオン

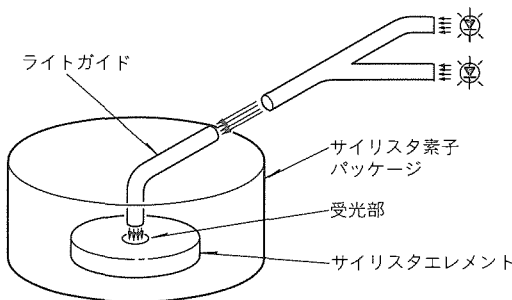


図13. 光点弧系

表2. LDとLEDの対比表

	発光出力の監視	ファイバとの結合効率(%)	駆動電流(A)	ファイバ
L D	容易	大(80)	小(0.7)	単心
L E D	困難	小(25)	大(6)	バンドル

特性やターンオフ時の逆回復特性が制御可能なモデルで、サイリスタの製造上生じる特性ばらつきを考慮することができ

る。一例として、ターンオフに関するシミュレーション結果とモジュール試験結果を図14に示す。シミュレーションでの各サイリスタのターンオフ時のピーク電圧と転流振動倍数(バルブ転流時に発生する逆方向の振動電圧  $V_p$  と電源電圧  $V$  との比。)は、試験結果とよく一致した。このことから、シミュレーションでサイリスタの分圧特性及び転流振動倍数を把握できることが分かった。

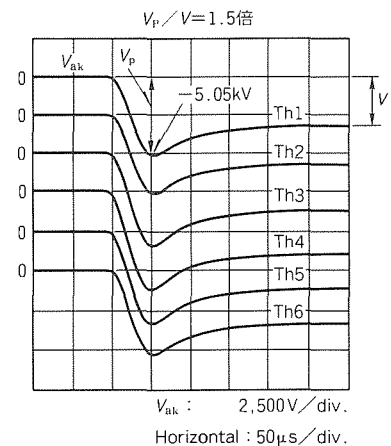
スナバ回路定数選定のため、6相変換器で転流振動のシミュレーションした結果を図15に示す。スナバ回路定数は、このシミュレーション結果に損失最小化等の条件を考慮して最適な定数を選定した。

### 3.5 サイリスタ周辺部品の開発

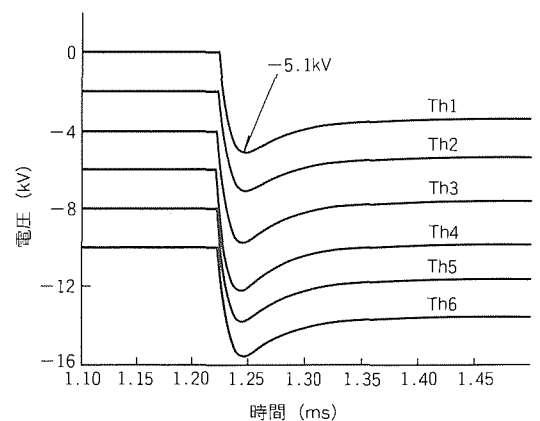
#### (1) アノードリアクトル (図16(a))

高周波特性の良い鉄心材料を採用することにより、大口径光サイリスタの特性に適合したインダクタンス特性を持ち、低騒音、かつ小型・軽量のリアクトルを開発した。

#### (2) サイリスタスタック (図16(b))



(a) モジュール試験



(b) シミュレーション解析

図14. ターンオフに関する試験とシミュレーション

6インチの大口径光サイリスタを均一に圧接し、冷却効率の良い薄形冷却フィンを採用した小型・軽量のサイリスタスタックを開発した。また、このサイリスタスタックはサイリスタ単体の交換が可能な構造とし、保守の容易化を図った。

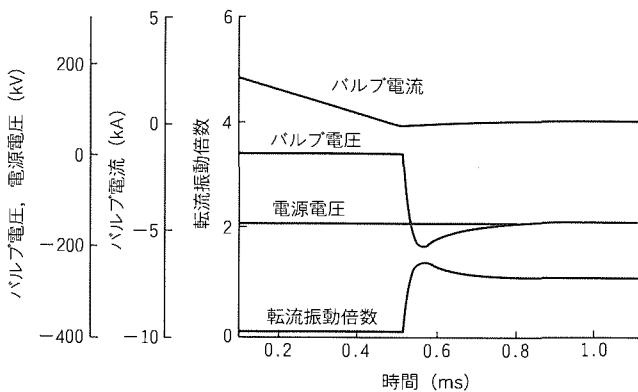
(3) 水冷抵抗器 (図 16(c))

スナバ抵抗と分圧抵抗の一体化及び抵抗器単体の大容量化により、使用抵抗器本数を低減し、抵抗器がモジュール内で占有する面積と質量を低減した。

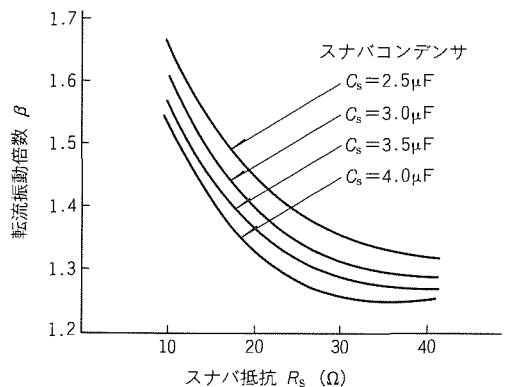
3.6 モジュール交換技術

電気回路部品の万一の故障を想定し、地上約 10 m の高さにある最上段モジュールで電気回路部品の故障が発生しても予備モジュールと交換して保守できるよう、モジュール保守用リフト (図 17) を開発した。

4. 開発試験



(a) 転流振動シミュレーション波形



(b) 転流振動倍数特性

図15. 6相変換器の転流振動シミュレーション結果

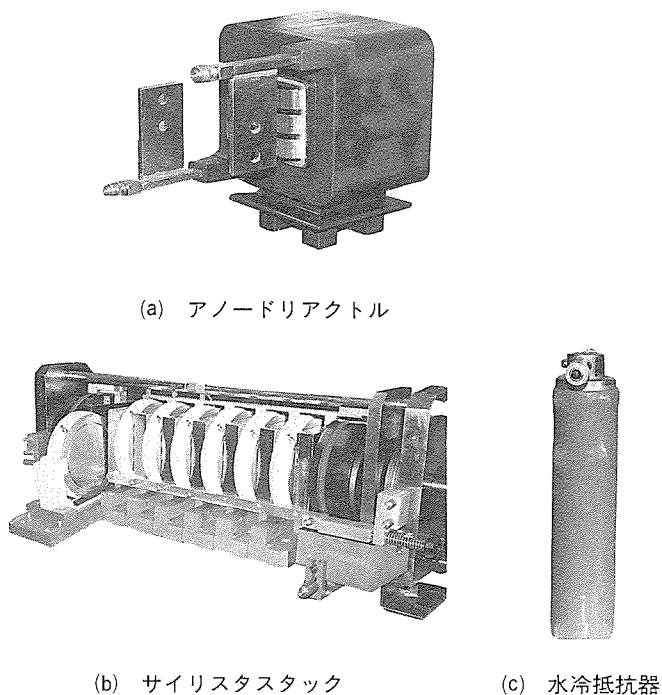


図16. サイリスタ周辺部品

4.1 プロトバルブ

国内外でサイリスタバルブの試験規格として広く用いられている IEC 規格 (IEC Publication 700-1981) に準拠して、絶縁試験、スイッチング試験、冷却性能試験等を実施し、プロトバルブが所期の性能を持つことを検証した。

4.1.1 絶縁試験

アーム、絶縁架台及び4重バルブ (4アーム+絶縁架台一括) について、表 3 に示す絶縁試験を実施して良好な結果を得た。また、インパルス印加時にモジュール間の分圧測定を実施するとともに解析を行い、浮遊容量に起因する分圧ばらつきに対してアノードリアクトルがインパルス電圧を阻止することから、サイリスタが保護されることを確認した。参考として、波形  $1.2\mu\text{s} \times 50\mu\text{s}$ 、波高値 250 kV の雷インパルス印加時のモジュール電圧の分圧ばらつきを図 18 に示す。

4.1.2 スwitching試験



図17. モジュール保守用リフト



表 3. 絶縁試験項目

		アーム	絶縁架台	4重バルブ
A C	短時間	197kV <sub>rms</sub> , 15秒	395kV <sub>rms</sub> , 1分	—
	長時間	141kV <sub>rms</sub> , 30分	—	—
D C	短時間	±200kV, 1分	—	—
	長時間	±150kV, 30分	±375kV, 30分	±650kV, 30分
インパルス	開閉	±311kV, 3回	±650kV, 3回	—
	雷	±311kV, 3回	±750kV, 3回	—
	急しゅん(峻)波	±304kV, 3回	—	—

表 4. スwitching試験項目

試験項目
① $\alpha_{max}$ 試験: $E=137kV$ , $I_p=3,500A$ ( $\alpha=40^\circ$ )
② $\gamma_{min}$ 試験: $E=9.3kV$ , $I_p=110A$ ( $\gamma=19^\circ$ )
③ $\gamma_{min}$ 試験: $E=58kV$ , $I_p=3,100A$ ( $\gamma=19^\circ$ )
④ 電圧検出回路特性試験
⑤ 最小点弧電圧測定試験
⑥ アレスタ動作中のターンオン試験

表 5. 振動特性試験結果

項目	測定値	基礎データによる解析値
固有振動数(Hz)	3.4	3.4
減衰定数(%)	1.7	1.5

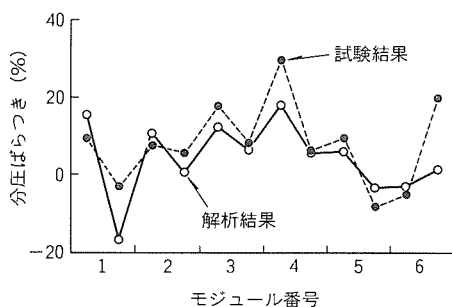


図18. モジュール分圧ばらつき

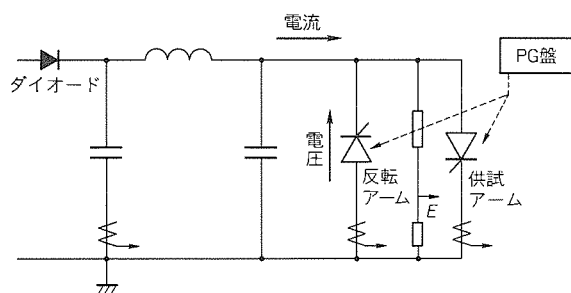
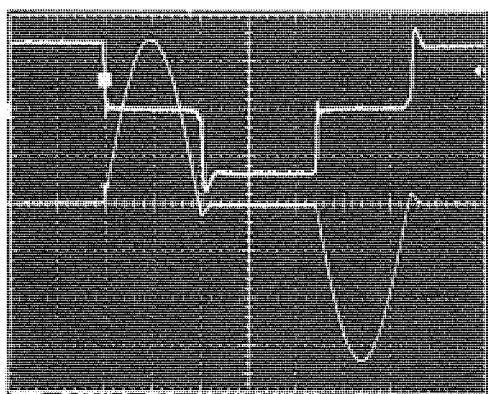


図19.  $\alpha_{max}$ 試験回路



時間 (1ms/div.)  
(電圧: 100kV/div., 電流: 1kA/div.)

図20.  $\alpha_{max}$ 試験時電圧・電流波形

表 4 に示すスitching試験を実施し、バルブのターンオン及びターンオフ性能を検証した。

実施した試験のうち、一例として、 $\alpha_{max}$  試験の試験回路を図 19 に、バルブ電圧・電流波形を図 20 に示す。ターンオフ時のモジュールの分担電圧のばらつきは均等分圧に対して

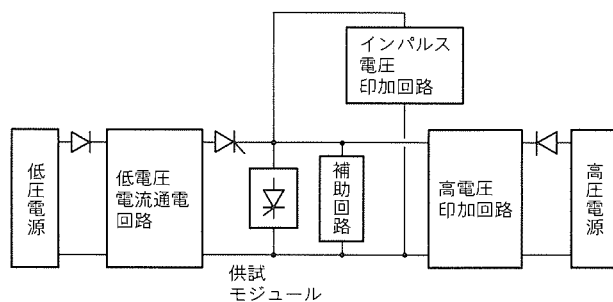


図21. 波形合成試験回路

最大7% (設計値10%)、転流振動倍数は1.3 (設計値1.35) で良好であった。

#### 4.1.3 冷却性能試験

プロトバルブを連続スitching動作させて実機相当の損失を発生させ、バルブ内部の空気温度を測定した。試験結果は解析結果とよく一致し、モジュール周囲の空気温度を許容温度上限値の40℃以下とするめどが得られた。また、モジュールへの冷却水の分流状態を測定した結果、オリフィスの装着によって分流ばらつきを目標値の±3%以下に抑制できることが分かった。

#### 4.1.4 構造関連試験

振動特性試験と組立作業性試験の二つの試験を行った。

振動特性試験において、プロトバルブを起振機で加振して解析値と比較した結果、表 5 に示すように、振動特性の測定値と解析値はほぼ一致し、解析の妥当性が検証できた。この成果を踏まえて実機サイリスタバルブについて解析を行い、目標とした耐震性能 (表 1) を満足できることを確認した。

また、組立作業性試験において、工場及び現地でのバルブの組立作業とモジュール保守リフトによるモジュール交換作業を試験し、基本的に問題ないことを確認した。

### 4.2 モジュール

#### 4.2.1 波形合成試験回路

モジュールのスitching試験を実施するため、波形合成試験回路 (図 21) を開発した。この試験回路は、60 Hz での

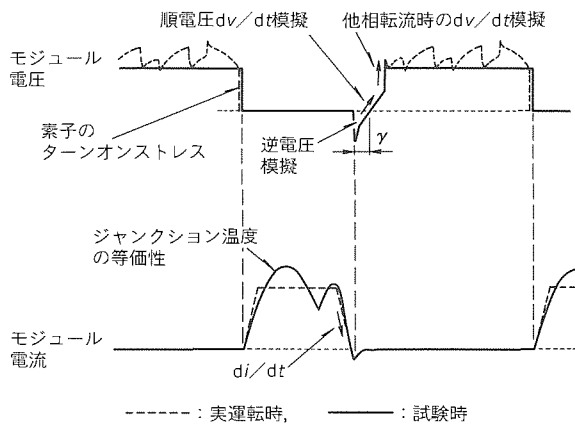


図22. モジュール電圧・電流 ( $\gamma_{min}$ 試験)

表6.  $\gamma_{min}$ 試験における等価性評価

項目	評価
ターンオン電圧	点弧角 ( $\gamma+u$ ) 相当の電圧に調整可能
ターンオフ電圧	最小逆電圧 ( $\gamma$ ) 相当の電圧に調整可能
ターンオフ時 $di/dt$	逆電圧, 試験回路インピーダンスによって等価にできる。
順方向 $dv/dt$	試験回路インピーダンス調整で等価にできる。
通電電流	波形は異なるが, 実効値を等価にできる。
ジャンクション温度	通電電流の調整によって等価にできる。

表7. モジュール試験項目

試験項目	検証項目
①耐電圧試験 (AC, DC, インパルス)	絶縁性能
②繰返しスイッチング試験	電圧・電流耐量 ( $\alpha_{max}, \alpha_{min}, \gamma_{min}, \alpha=90^\circ$ )
③最大電圧からのターンオン試験	開閉インパルス印加状態からのターンオン
④電流サージブロック試験	アーム短絡時の過電流に対する耐量
⑤温度上昇試験	冷却性能
⑥電流断続試験	電流断続に対する保護機能
⑦余裕角不足保護試験	余裕角不足に対する保護機能
⑧耐震試験	機械強度
⑨漏水試験	万一の漏水時の絶縁性能

繰返しスイッチング試験 ( $\alpha_{max}, \alpha_{min}, \gamma_{min}, \alpha=90^\circ$ ), 非繰返しターンオン試験, 電流断続試験, サイリスタのフォワードリカバリ期間中のインパルス電圧印加試験等のスイッチング試験が実施可能で, 表6及び図22に一例を示すように, 実運転時と等価なストレスがモジュールに印加できるものである。

#### 4.2.2 モジュール試験結果

試作モジュールに対して, 表7に示す各種試験を実施し, すべて良好な結果が得られ, 実用化に問題ないことが分かった。

一例として, 図23に,  $\gamma_{min}$ 試験を実施したときのサイリスタ電圧とモジュール電流波形を示す。この試験で, 最小余

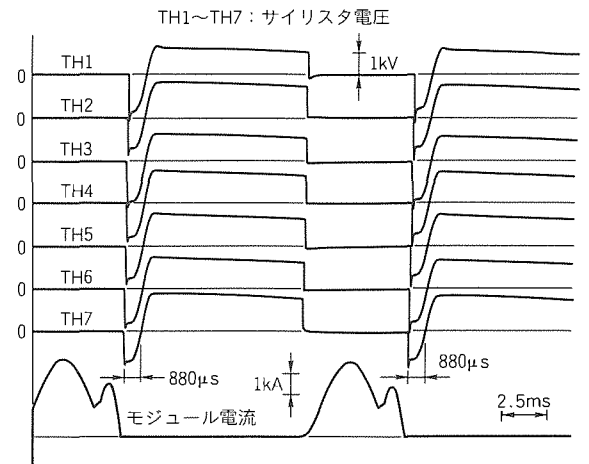


図23.  $\gamma_{min}$ 試験時電圧・電流波形

裕角の運転状態で転流失敗が発生しないことを確認した。

## 5. むすび

高電圧大容量化に対応した絶縁・冷却・耐震の技術開発や大口径光サイリスタの適用技術開発を実施して, プロトバルブ及びモジュールを試作試験した。

その結果, 高信頼度・小型・低損失のサイリスタバルブを実現することができた。

## 参考文献

- (1) 山田正人, 廣瀬昌弘, 色川裕之, 山内四郎, 山本 律, 樗木博一: サイリスタバルブ絶縁物表面の汚損量評価, 平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.376, 349~350 (1995)
- (2) 吉田良男, 浅野勝則, 山地幸司, 廣瀬昌弘, 色川裕之, 牧野芳範, 木村俊則, 中西幸一郎: 汚損絶縁の高湿度の下における沿面放電, 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.431, 450~451 (1994)
- (3) 山田正人, 廣瀬昌弘, 色川裕之, 山内四郎, 瓦井久勝: 脱イオン冷却水系金属継手の流電腐食, 平成7年電気学会全国大会, No.1379, 6-260~261 (1995)
- (4) 長谷川泰三, 浅野勝則, 山地幸司, 廣瀬昌弘, 色川裕之, 牧野芳範, 岡山秀夫, 宮下武司, 竹田正俊: CAEによるサイリスタバルブの回路解析及び最適設計手法の開発, 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.48, 281~286 (1994)

# 光直接点弧サイリスタの開発

林田 弘\* 中川 勉\*\*  
西尾 徹\* 山元正則\*\*  
伊佐治 弘\*\* 佐藤克己\*\*

## 1. ま え が き

年々増大する電力需要とそれを賄うための電源立地の遠隔化・大規模化に伴い、安定した電力供給の確保の観点から、電力系統の広域的な運営の必要性が高くなりつつある。電力系統の広域的運営に際して発生する系統上の諸問題を解決する有効な手段として、高圧直流送電が考えられ、その実用化が進められている。

直流送電用サイリスタバルブには、光信号で直接大容量のパワーを制御でき、駆動回路と主回路の電氣的絶縁が容易で、耐ノイズ性に優れ、制御系の簡素化ができ、システムの高信頼度化が図れるというメリットを持つ光直接点弧サイリスタ(以下“LTT”という。)が適用される。

現在、耐圧6kV、電流容量2.5kAの4インチLTTを用いた125kV、300MW級の直流送電用サイリスタバルブが実用化しているが、将来の基幹送電技術として、500kV、3,000MW級の大容量直流送電の実現に向けてバルブの開発が進められており、これに伴い、LTTにはより一層の高耐圧化・大電流化・低損失化が求められる。

今回、直流送電用サイリスタバルブを始めとする高電圧変換装置を対象として、6インチウェーハを用い、耐圧8,000V、電流容量3,600A、最小光トリガパワー8mW以下という世界最大の容量を持つ高耐圧大容量低損失LTT(形名: FT 4000 FU-160)を開発したので、その製造技術、構造、電気特性について述べる。図1に、FT 4000 FU-160の外観を示す。

## 2. 素子設計

### 2.1 高耐圧化と大容量化

pエミッタ( $p_E$ )層、nベース( $n_B$ )層、pベース( $p_B$ )層、及びnエミッタ( $n_E$ )層からなるサイリスタの高耐圧化を図るには、 $n_B$ 層の比抵抗を上げ、かつ $n_B$ 層の幅を大きくし、電界強度を緩和する必要がある。しかしながら $n_B$ 層幅の増加は、オン電圧( $V_{TM}$ )、逆回復電荷( $Q_{rr}$ )、及び高温時の漏れ電流が増加し悪化させること、また、ターンオン損失が増加して許容オン電流上昇率( $di/dt$ 耐量)を減少させることなど、サイリスタ諸特性の低下を招く。

一方、大電流化のためにサイリスタを構成するウェーハを大口径化することが必要であるが、大口径化するほど、ウェーハ面内で均一深さでかつ均一濃度の接合を、また、均一な

少数キャリアライフタイム分布を形成することが困難になり、大口径化してもそれに見合った電流容量の増加が図れなくなる。

サイリスタでは、 $Q_{rr}$ と順方向の漏れ電流が $p_E-n_B$ 接合( $J_1$ )近傍の $n_B$ 層の少数キャリアライフタイムで、また、逆方向の漏れ電流が $n_B-p_B$ 接合( $J_2$ )近傍の $n_B$ 層の少数キャリアライフタイムで決定され、共に、ライフタイムが短いほど低減改善される。

一方、 $V_{TM}$ は、 $n_B$ 層全域の少数キャリアライフタイムの影響を受け、ライフタイムが長いほど低減改善される。したがって、 $V_{TM}$ と $Q_{rr}$ 及び漏れ電流のトレードオフを改善するためには、図2に示すキャリアライフタイム分布を実現することが必要となる。

しかしながら、従来の $p_E$ 層及び $p_B$ 層形成法である横型拡散炉を用いたガリウム熱拡散では、不純物ソースに含まれる微量な重金属がガリウムと同時にウェーハに拡散して、 $n_B$ 層をなすシリコンウェーハ未拡散部のライフタイムは著しく低下する。また、横型拡散炉特有のウェーハ面内温度差の影響を受け、面内分布は不均一になる。さらに、従来のライフタイム制御技術は、金や白金等の重金属を拡散したり電子線を照射することでシリコンウェーハ全体のライフタイムを制御するもので、図に示すウェーハの深さ方向の少数キャリアライフタイム分布の実現は困難であった。したがって、 $V_{TM}$ と $Q_{rr}$ 及び漏れ電流のトレードオフの改善には限界があった。

今回開発した素子では、ドーズ量の制御で容易に任意の不純物濃度を高精度で得ることができるボロン注入と、ウェーハ面内の温度差を軽減できる縦型拡散炉による拡散を、 $p_E$ 層及び $p_B$ 層形成に採用した。これにより、6インチウェーハ面内全域で、均一深さでかつ均一濃度の接合と、均一な少数キャリアライフタイム分布を実現した。これに加えて、ウェーハ処理治具及び材料の徹底したメタルフリー化・高純度化を図り、ウェーハへの重金属汚染を極力防止するとともに、ウェーハ内部の重金属を吸い出して排除するゲッターリングプロセスを強化最適化し、 $n_B$ 層の均一化と長ライフタイムを実現した。ライフタイム制御においては、照射エネルギーを制御することでウェーハの厚み方向のライフタイムを任意に制御できるプロトン照射技術を採用し、 $n_B$ 層のライフタイムを局所的に制御した。

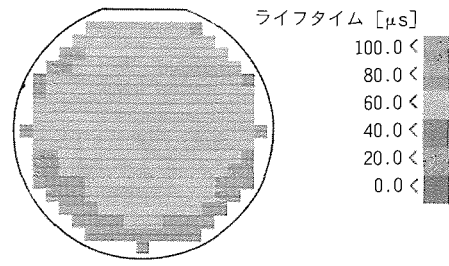
図3(a)に従来の接合形成技術でp層を形成した場合のウェー

一ハ (4インチウェーハ) ライフタイム分布を、図(b)に今回採用した接合形成技術でp層を形成した場合のウェーハ (6インチウェーハ) ライフタイム分布を、図(c)にプロトン照射によるライフタイム制御後のウェーハ (6インチウェーハ) ライフタイム分布を示す。

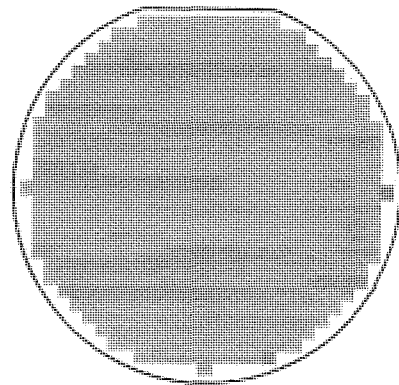
### 2.2 di/dt 耐量の改善

一般に大口径サイリスタでは、ターンオン領域を短い時間でウェーハ全域に広げるため、主サイリスタのゲート/エミッタ周縁長を大きくした増幅ゲート構造 (数個の微小補助サイリスタを直列接続) が用いられる。一方、ゲート/エミッタ周縁長が大きくなるにつれ、その周縁を均一にしかも一斉にターンオンさせるために必要な電流も大きくなる。ターンオン時にサイリスタに流れる初期電流は、ゲート/エミッタ周縁部がターンオンするまでは、補助サイリスタに集中する傾向がある。高耐圧素子ほどターンオン時の電圧が高くなり、スナバ回路からの放電電流も大きくなるため、大口径高耐圧素子ほど、電流集中が顕著で  $di/dt$  耐量が低下する。

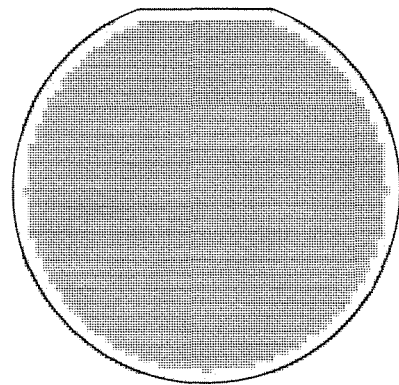
この問題を解決するため、ウェーハ中央部に同心円状に補助サイリスタを3個直列配置していた従来のゲート構造から、電流集中を軽減しかつ電流を十分に供給して主サイリスタが



(a) 従来の4インチウェーハ



(b) 新製造技術を採用した6インチウェーハ



(c) ライフタイム制御後の6インチウェーハ

図3. ウェーハ面内の少数キャリアライフタイムの分布

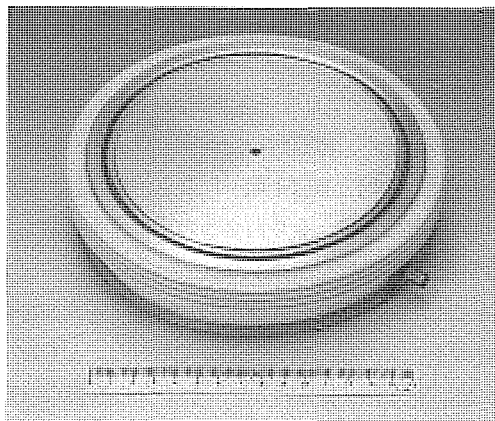


図1. FT4000FU-I60の外観

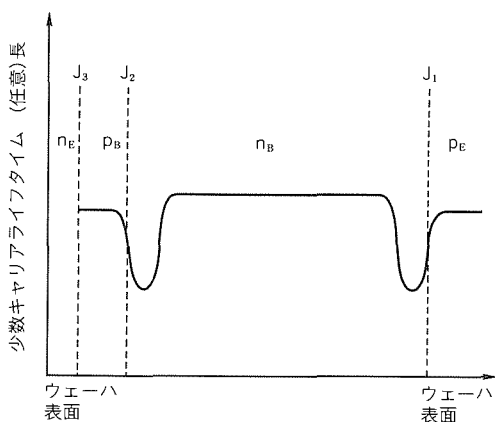


図2. ウェーハの深さ方向の少数キャリアライフタイムの分布

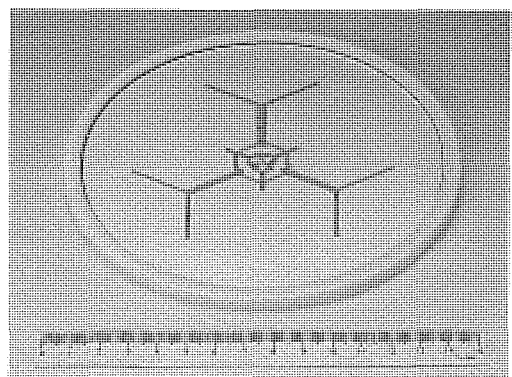


図4. ゲート/カソードエミッタパターンの外観

速やかにターンオンするよう、10個の補助サイリスタをウェーハ面内に点在化し、直並列に組み合わせた“エミッタ逆バイアス多点増幅ゲート構造”を新規開発した。新規開発したLTTのゲート/カソードエミッタパターンの外観を図4に示す。

図5は、従来のゲート構造のLTTと、今回開発したエミッタ逆バイアス多点増幅ゲート構造を採用したLTTの4,000Vから $di/dt=200\text{A}/\mu\text{s}$ でターンオンさせたときのオン電流( $I_T$ )及びアノード-カソード間の電圧( $V_D$ )波形である。

図から、新規開発したゲート構造は、 $I_T$ が上昇している期間の $V_D$ 値が低くなっていることが分かる。この結果、ターンオン損失の低減改善と $di/dt$ 耐量の大幅な改善を実現した。

### 3. 特性と定格

2章に述べた製造技術と設計技術を採用して開発したFT4000FU-160の主な特性の代表例を表1に示す。

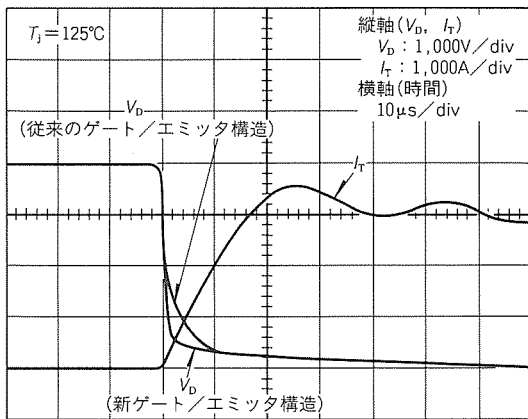


図5. 従来ゲート/エミッタ構造及び新ゲート/エミッタ構造のターンオン時の電流-電圧波形

表1. FT4000FU-160の主な特性

項目	記号	特性値	単位
繰返しオフ電圧	$V_{DRM}$	8,000	V
非繰返しオフ電圧	$V_{DSM}$	8,800	V
繰返し逆電圧	$V_{RRM}$	8,800	V
非繰返し逆電圧	$V_{RSM}$	8,800	V
平均オン電流	$I_{T(av)}$	3,600	A
オン電流上昇率	$di/dt$	200	A/ $\mu\text{s}$
オン電圧	$V_{TM}$	2.8(4,000A)	V
オフ電圧上昇率	$dv/dt$	2,300	V/ $\mu\text{s}$
光点弧感度	$P_{LT}$	8.0	mW
ターンオン時間	$t_{gt}$	10.0	$\mu\text{s}$
ターンオン遅れ時間	$t_d$	3.0	$\mu\text{s}$
ターンオフ時間	$t_q$	400	$\mu\text{s}$
電流サージブロック耐量	$I_{TSM}$	43	kA
熱抵抗	$R_{th(j-f)}$	0.004	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$

### 3.1 電圧阻止特性

定格繰返しオフ電圧は8,000Vである。接合温度( $T_j$ )が125 $^{\circ}\text{C}$ における電圧阻止時の電圧-電流波形の例を図6に示す。

### 3.2 $di/dt$ 耐量

非繰返しオフ電圧が8,800Vであるにもかかわらず、新規開発したエミッタ逆バイアス多点増幅ゲート構造の採用により、 $V_D=8,800\text{V}$ から $di/dt=200\text{A}/\mu\text{s}$ でのターンオンを実現している。その電流-電圧波形の一例を図7に示す。

### 3.3 光点弧感度と $dv/dt$ 耐量

光点弧感度は、室温、 $V_D=6\text{V}$ の条件下で8mW(波長: $\lambda=860\text{nm}$ )以下が実現し、しかも $dv/dt$ 耐量は $T_j=125^{\circ}\text{C}$ 、 $V_D=8,800\text{V}$ の条件下で2,300V/ $\mu\text{s}$ 以上を実現している。

### 3.4 電流サージブロック耐量

システムに短絡事故が発生したとき事故電流をサイリスタで遮断しなければならないが、この遮断能力を示す特性が電流サージブロック耐量であり、サージ電流通電直後の電圧阻止能力を示すものである。

図8に、FT4000FU-160の電流サージブロック耐量評価時の電圧-電流波形の一例を示す。先に述べたライフタイ

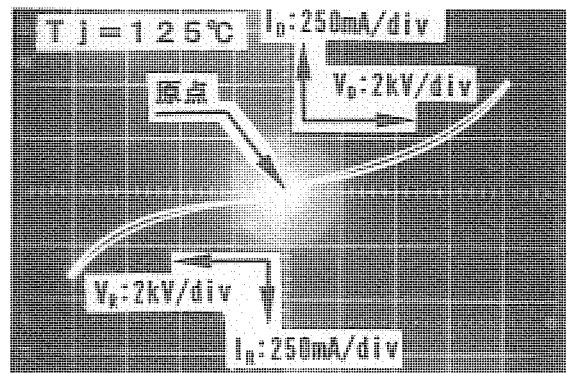


図6. 電圧阻止特性

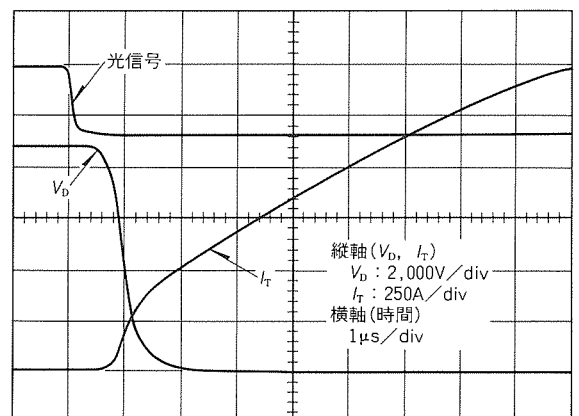


図7. ターンオン波形例

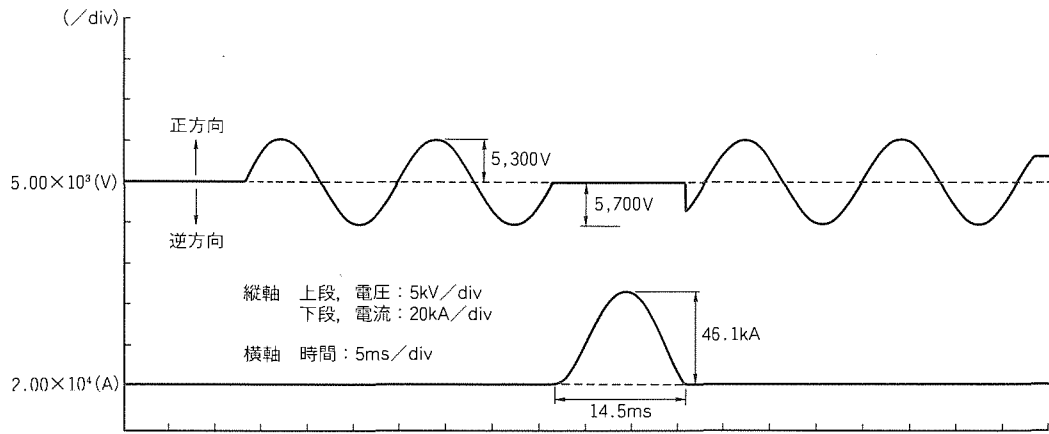


図 8. 電流サージブロック耐量評価時の電圧, 電流波形例

ム制御技術改善による低オン電圧の実現が、通電損失を低減し、接合温度の上昇を抑制するため、ピーク値 46 kA、通電時間 14.5 ms のサージ電流を通電した直後でも 5,300 V 以上の電圧阻止能力を実現している。

#### 4. む す び

今回開発した高耐圧大容量光直接点弧サイリスタ (FT

4000 FU-160) の製造技術・設計技術と特性定格を中心に述べた。FT 4000 FU-160 は、現在実用レベルにある 4 インチ級光直接点弧サイリスタに比べて 2 倍以上の制御容量を持つことから、直流送電バルブを始めとする超高圧電力変換装置の分野で高信頼度化・低損失化・小型軽量化をもたらし、特に今後の 500 kV 級直流送電用サイリスタバルブの開発に貢献できるものとする。



物捕そく(捉)装置を設けて、課電開始前のコンディショニングによる異物捕捉と課電中に発生した異物の捕捉、などの方策を講じている。

(2) 絶縁スペーサの帯電抑制

絶縁スペーサに適用される固体絶縁物は、直流課電と導電性異物や電極上の微小突起の重畳によって電離された電荷が絶縁物表面に蓄積する帯電現象が発生し、直流の極性反転で絶縁性能が低下する場合がある。この対策として、①絶縁スペーサ形状を、主に高電圧導体からの電気力線が絶縁スペーサと交鎖しにくい浅いセミコン形状とする、②電界放出抑制の観点で、電極側の誘電体被覆を実施する、などを図っている。

(3) 直流用高性能素子の開発

直流成分を多く含む直流避雷器に現有の交流用素子を使用すると、特性の変化によって寿命は約1/10に短縮される。

直流用素子開発に当たっては、小電流域(数mA以下)と大電流域(数kA)のV-I特性改善が課題である。この対策として素子の添加物及び焼成時間の見直しを行い、保護特性の向上を図っている。

(4) 直流開閉器用ガス遮断器の開発

直流遮断器は交流と異なり、電流零点がないために転流回路を必要とし、従来は高いアーク電圧確保のために空気遮断器が適用されてきた。この空気遮断器は、現在主流となっているSF<sub>6</sub>ガス遮断器に比べて接触子の耐久性が劣ることや、圧縮空気を用いるための点検周期が短い、などの課題があった。この対策として、パuffa形ガス遮断器でも消弧室の改

善によって直流遮断器として適用が可能であることを確認した。

3. 直流GISの適用技術と設計・構造

3.1 直流母線と絶縁スペーサ

±500kV直流母線の主要定格は表1の直流GISの主要定格と同じで、内部構造を図3に示す。

(1) 母線寸法諸元の決定

±500kV直流母線寸法諸元の決定要因は、絶縁・通電性能のうち絶縁性能が支配的で、かつ混入導電性異物の影響が顕著である。このため交流GISと同様に、所定異物として直径0.2mm、長さ3mmの直線アルミ線の混入を想定した絶縁設計とした。

図4に±500kV直流母線の寸法諸元選定例を示しており、所定の異物がファイアフライ状態でもLIWV 1,300kVに耐える条件(曲線(a))と、異物が運転電圧で起立・浮上しない条件(曲線(b))とでタンク径の1,000mmを選定した。

この設計によれば、所定の異物が万一タンク内に混入したり発生しても定常の運転電圧下では平伏状態にあるが、系統過電圧、コイル状などの非直線異物、タンク底面に1Gを超える機器振動の伝達などが存在すると、異物はファイアフライ状態に至る可能性がある。

この対策として絶縁スペーサ近傍のタンク側と高圧電極側に異物捕捉装置を設けコンディショニング中のクロッシング誘発状態の異物を両側の捕捉電極で捕捉した。また、ファイアフライ状態の異物は、高電圧側捕捉装置近傍の低電界部を移動するときに、導体表面上で微小振動が維持できずに落下し、タンク側の異物捕捉装置で捕捉される(図5)。

(2) 絶縁スペーサの形状

図6は抵抗分圧状態での絶縁スペーサの電気力線分布図であり、図(a)は今回開発した直流用、図(b)は比較のための交

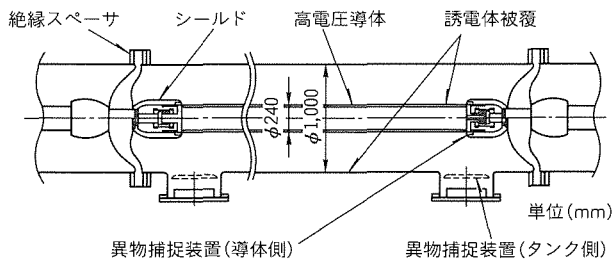


図3. ±500kV直流母線の内部構造

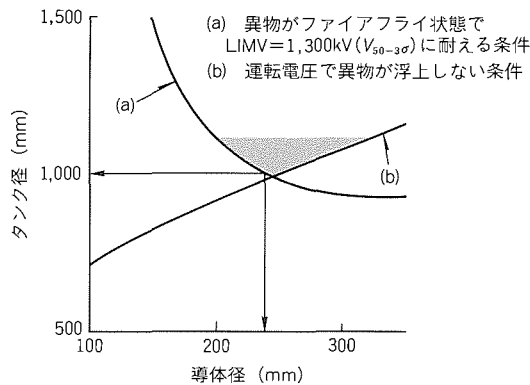
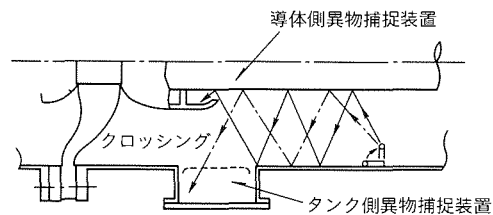
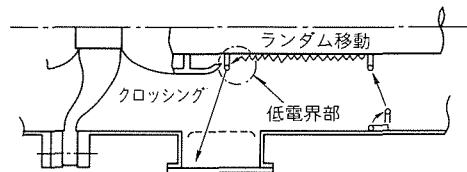


図4. ±500kV直流母線諸元の選定



(a) コンディショニングでの異物捕捉



(b) 運転状態での異物捕捉

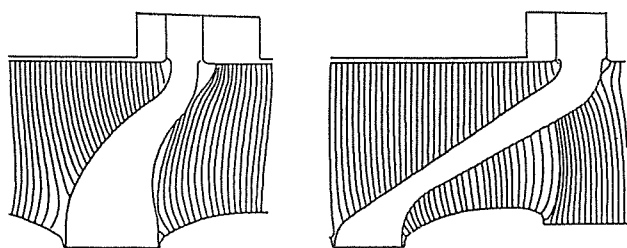
図5. 異物捕捉概念



流用を示している。直流用スペーサは交流用に比べて円すい部の開口角を大きくし、電界強度の高い課電側の電気力線がスペーサ表面への入射を抑制することでスペーサ表面の電荷が蓄積しにくい形状としている。また、常時の直流課電状態でスペーサの半径方向の抵抗分布を均一にするために、スペーサの各半径方向の等断面積化を図り、高電圧導体側ほど厚肉となるスペーサ形状とした<sup>(1)</sup>。

(3) 検証試験

直流課電固有の直流耐電圧試験・極性反転試験等の絶縁性能確認試験を主体にして機械・熱的特性試験を実施し、良好な結果を得た。また限界試験の一環として、所定の異物(直径0.2mm、長さ3mmアルミ線)を高圧側導体のファイアフライ状態及び絶縁物沿面の最大電界部に付着させた状態でせん(閃)絡試験を行い、耐電圧下限値( $V_{50-3\sigma}$ )はLIWV 1,300kV以上と良好であることを確認した。



(a) 直流用絶縁スペーサ (b) 交流用絶縁スペーサ

図6. 絶縁スペーサの電気力線分布図

3.2 直流線路用避雷器

表2に直流線路用避雷器の主要定格を示す。

(1) 直流用酸化亜鉛素子の開発

直流用酸化亜鉛素子の開発成果を、通産省の補助金による“±500kV級ガス絶縁直流開閉装置の研究試作”(1985年)で開発した素子と比較して表3に示す。

酸化亜鉛素子の基本特性であるV-I特性の非直線性、課電寿命、放電耐量の各特性は、一般に一方を改善すると他方に悪影響を及ぼすトレードオフの関係にある。このため今回の素子開発に当たっては、直流課電寿命を十分に配慮しながら保護特性を向上するため、素子添加物及び焼成時間の最適化など製造プロセス上のトレードオフ関係の改善によって所定の特性を満足した。

(2) 避雷器の基本構造

図7に直流線路用避雷器の内部構造を示す。酸化亜鉛素子3並列121直列は、6ユニットに分割された素子柱間に収納

表2. 直流線路用避雷器(LL特性)の主要定格

項目	仕様
連続使用電圧	直流 ±500kV
公称放電電流	10kA
雷インパルス制限電圧(上限値, 波高値)	945kV at 10kA
エネルギー責務	8.5MJ

表3. 直流用酸化亜鉛素子の開発

避雷器/素子の開発課題	素子製造上の改善策	避雷器の開発成果
(1)課電寿命の確保 ●課電寿命特性の確認	添加物及び焼成パターンの最適化を図った。	避雷器の課電寿命30年以上を確認
(2)保護特性の向上 ●V-I特性の向上	大電流域(数kA領域)と小電流域(数mA以下)のV-I特性の改善のため、添加物及び焼成時間の最適化を図った。	制限電圧17%低減
(3)素子並列数の低減 ●大口径化	大口径化による単位体積当たりのエネルギー耐量の低下を防止するため、焼成時間の最適化によって電流分布の均一性向上を図った。	素子並列数の低減4並列⇒3並列
(4)コンパクト化 ●高低抗化	ZnO粒径の微細化のため、添加物の配合及び焼成温度の最適化を図った。	避雷器の高さ15%低減

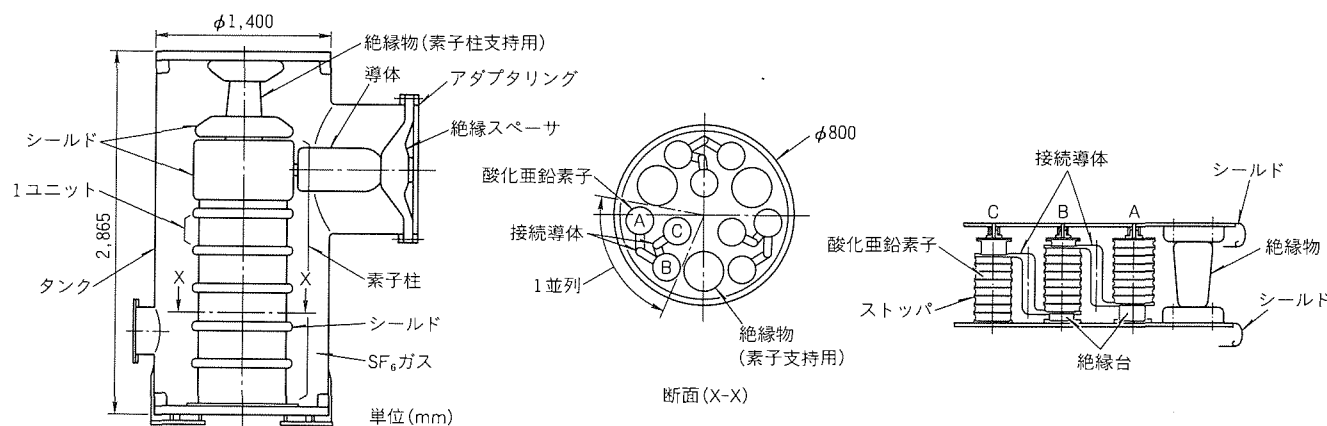


図7. 直流線路用避雷器の構造

表 4. 安定性評価試験(直流避雷器の30年の責務処理性能を検証する試験)

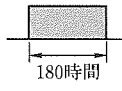
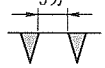
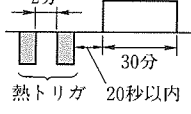
区分	第 1 区分	第 2 区分	第 3 区分
目的	課電劣化模擬の試験	サージ劣化模擬の試験	熱安定性試験
試験パターン	連続課電  ● 周囲温度95°Cの恒温槽で実施	雷インパルス電流  ● 65kA (4/10μs) 2回	連続課電  ● 熱トリガ 8.5MJ 2回 ● 供試器の熱的等価性考慮
結果	漏れ電流は一定で増加傾向は認められず良好。	素子のフラッシュオーバーや破損はなく良好。	素子の漏れ電流、温度は減少傾向を示し、熱安定性が確認された。

表 5. 直流断路器, 接地開閉器の主要電流開閉責務

項目	仕様	
断 路 器	残留電荷放電 (線路開閉用)	開放電流 100mA 残留電圧 125kV
	ループ電流開閉 (バルブバイパス用)	開放電流 2,800A 回復電圧 1V
	充電電流開閉 (バルブ開閉用)	開放電流 1A 回復電圧(ピーク) 70kV
接 地 開 閉 器	残留電荷放電 (線路用)	放電キャパシタンス 20μF 残留電圧 125kV

表 6. 投入過電圧値と抵抗値の関係

(AK間避雷器あり, アノードリアクトル5mH)

抵抗値	抵抗なし	1,000Ω	許容値
アノードリアクトル端子間電圧	507kV	99kV	480kV
バルブ端子間電圧上昇率	131kV/μs	30.3kV/μs	約91kV/μs

3.3.1 断路器, 接地開閉器

断路器と接地開閉器の定格は表 1 の直流 GIS の主要定格と同じであり, 表 5 に電流開閉責務を示す。

(1) 抵抗付き断路器

バルブ開閉用断路器は, 投入過電圧とバルブ端子間電圧上昇率をサイリスタバルブの許容レベルまで低減する手段として抵抗挿入の必要性を検討した。図 8 にバルブ開閉用断路器の系統上の配置と運用例を, 表 6 に投入抵抗有無のときの投入過電圧解析結果を示す。1,000Ω抵抗を付加することによって端子間過電圧, 上昇率共に約 30%まで抑制され, サイリスタバルブ許容値内であることを解析に加えて検証試験でも確認した<sup>(3)</sup>。

(2) 異物対策

断路器と接地開閉器の絶縁設計は基本的に母線設計と同様で, 所定異物として直径 0.2mm, 長さ 3mm のアルミ線混入を想定した。これらの機器は可動・固定電極内に通電用しゅう(摺)動接触部があるため金属発生の可能性があり, 以下の対策を講じた。

- タンク内は垂直配置とし, かつ, タンク底面電界を所定の異物の平伏電界以下とする。
- 絶縁操作軸を可動コンタクトより上部とし, 異物落下の影響を排除する。また, 可動コンタクト外周にはリップ付きダストパッキンを設置するとともに, 可動・固定電極下方は閉そく(塞)構造として異物落下防止を図る。
- 通電摺動部の銀メッキには潤滑材添加の分散メッキ法を採用して低摩擦係数化を図るとともに, 異物発生抑制を行う。

(3) 基本構造

バルブ開閉用(抵抗付き)断路器の内部構造を図 9 に示す。

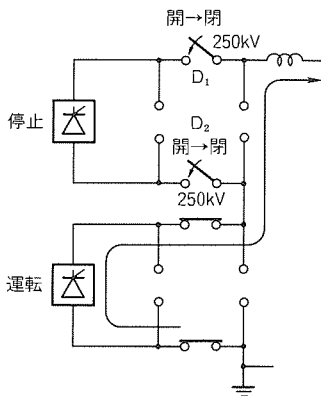


図 8. バルブ開閉用断路器(D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>)の系統上配置

している。素子は, 電氣的に 3 並列に接続され, 配置上は素子柱の高さ低減のために 3 柱ジグザグの 9 柱並列設置としている。

(3) 検証試験

避雷器がフィールドで 30 年間に遭遇する課電劣化・サージ劣化・熱安定性を短期的に検証する手段として, UHV 送電特別委員会(1985年)で決定した安定性評価試験方法に基づいて実施した。この試験条件・結果は表 4 に示すとおりで, 良好で十分な実用性能があることを確認した<sup>(2)</sup>。

3.3 直流開閉器

交直変換所で適用される開閉器には, 断路器・接地開閉器・遮断器で構成される MRTB, NCB, バイパススイッチがある。

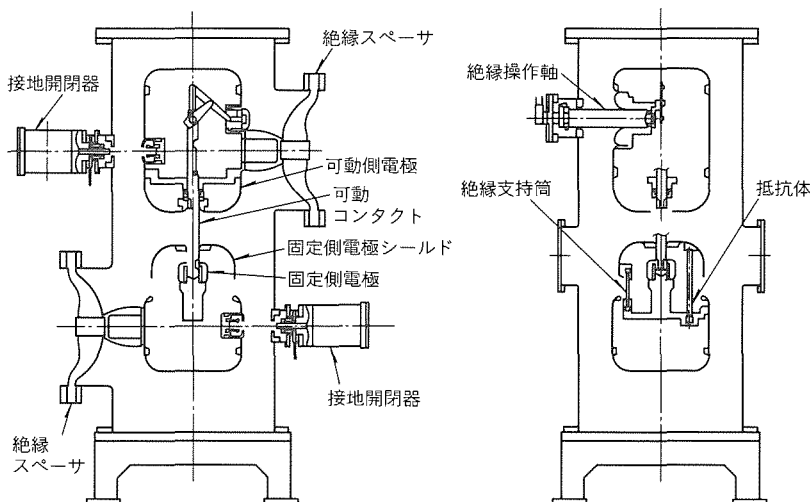


図9. バルブ開閉用(抵抗付き)断路器の内部構造

基本構成は交流用550kV器と同様に可動・固定電極を絶縁スペーサで支持して全体構成を簡素化するとともに、絶縁操作軸は回転駆動形として機器の低層化を図り、一体正立輸送を可能とした。

(4) 検証試験

断路器と接地開閉器の性能検証のため、絶縁性能試験・多数回開閉試験・電流開閉試験等を実施して良好な結果を得た。断路器に課せられる充電電流・ループ電流・残留電圧の各遮断試験ではアークはシールド内遮断とし、200回の試験後においても耐弧メタルの損傷は極めて軽微であることを確認した。

また、断路器、接地開閉器の $10^4$ 回連続開閉試験後においても、摺動接触子等による金属異物の発生は数mgと微量で、かつ95%以上は可動・固定シールド内に収まり、タンク底面への落下が抑制されていることを検証した。

3.3.2 直流遮断器

帰線用遮断器(MRTB, NCB)及びバイパススイッチの主要定格を表7に示す。

(1) 遮断器の責務と遮断方式

帰線用遮断器及びバイパススイッチの直流課電回路上の責務概念を表8に示す。

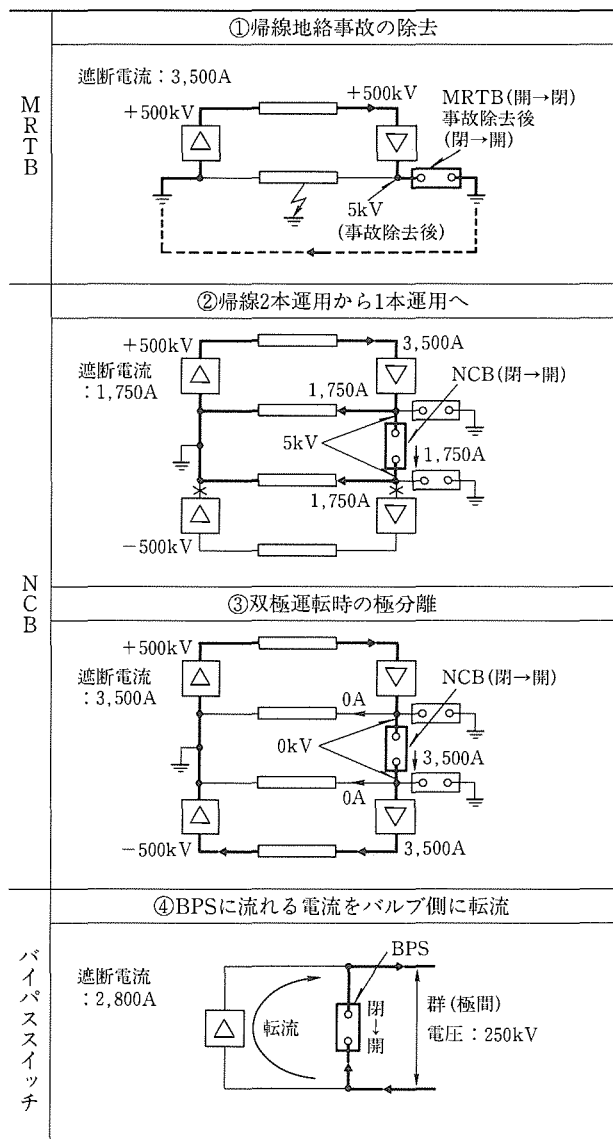
MRTBは、帰線の地絡事故時に投入動作による事故部の地絡電流をいったんMRTBに転流し、気中部で事故電流が消滅した後に遮断(帰線への転流)を行う。NCBは、帰線2本運用から1本運用切換え及び双極運転から極分離への切換えに適用される。またバイパススイッチは、変換器群個別起動時に定格電流をバイパスペア状態のバルブへ転流させる機能を持っている。

転流方式の選定に当たっては、限流・強制・自励の各転流方式について検討した。その結果、帰線用遮断器の遮断(転流)は、線路のインダクタンスが大きいため限流方式による自励転流が困難であり、遮断方式として遮断部に並列にキャ

表7. 直流遮断器の主要定格

機器	主格事項	仕様	
帰線用	定格電圧	±10kV	
	定格電流	3,500A	
	定格転流電流	3,500A	
	定格短時間耐電流	20kA 2秒	
	定格耐電圧	雷インパルス	400kV
		開閉インパルス	350kV
適用周波		160kVrms 1分	
動作責務	MRTB=C-O3回 NCB=C-O2回		
バイパススイッチ	定格電流	2,800A	
	定格転流電流	2,800A	
	定格短時間耐電流	20kA 2秒	
	定格転流時間	50ms以下	
	動作責務	C-O-C	

表8. 直流用遮断器の回路上の責務



パシタとインダクタンスを接続した自励転流方式を採用した。また、バイパススイッチの遮断方式は、交流用2点切りガス

遮断器の遮断部の長ストローク化、ノズル径の小スロート化による長アーク時間遮断域の確保等で限流転流方式の採用が可能であることを確認した<sup>(4)</sup>。

(2) 基本構造

帰線用遮断器のうち、MRTBの基本構成を図10に示す。

遮断器は、交流用500kV2点切り相当品の1点を遮断部、他の1点を分離開閉器として同時操作を行い、転流直後に分離開閉器によって転流回路の引離しが可能な構成としている。

なお、バイパススイッチの基本構成は、交流用2点切りガス遮断器と同様で、消弧室部を前述の帰線用遮断器と同様に高アーク電圧・低アーク時定数発生の方策を講じることで対処できる。

(3) 検証試験

直流遮断器の性能検証のため、絶縁性能試験・多数回開閉試験・遮断試験等を実施し、良好な結果を得た。図11に、直流電流3,500Aを遮断した際の電圧・電流実測波形を示す。

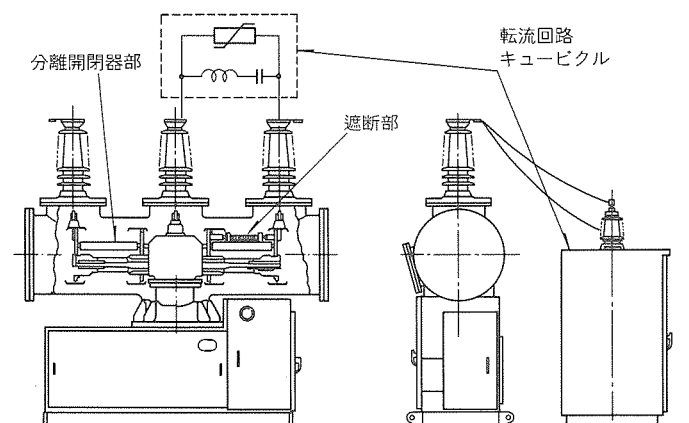


図10. MRTBの基本構成

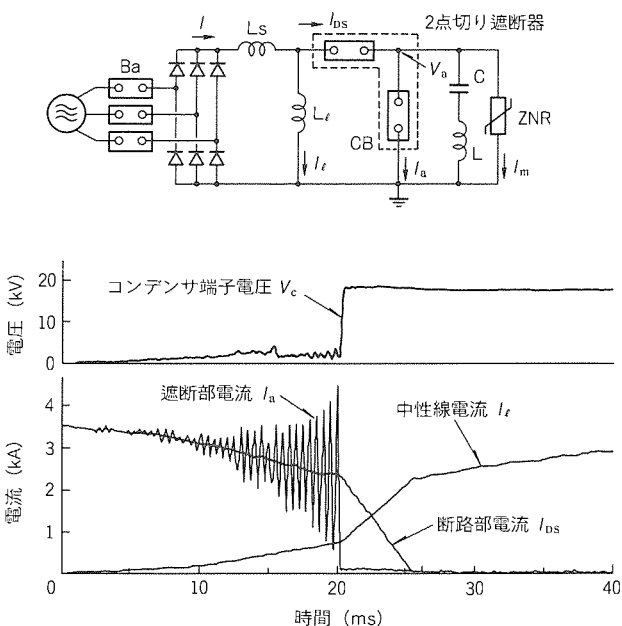


図11. MRTBによる3,500A遮断の電流、電圧の実測例

また、帰線用遮断器については転流失敗時を想定し、開極時の電流3,500Aのアークを200msの間継続した後、支障なく再開路することを確認するとともに耐弧メタル等の損傷も軽減でき十分な実用性能があることを確認した。

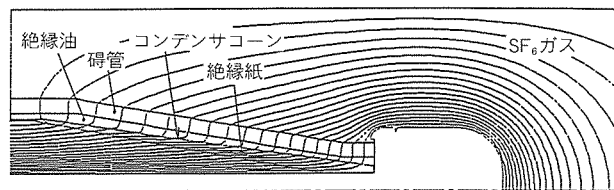
3.4 直流ブッシング(油浸紙コンデンサ形)

直流ブッシングは交流ブッシングに比べて汚損の影響を強く受けるために適用環境に配慮する必要がある。また、電位分布は絶縁物の誘電率ではなく体積抵抗率で決定されるが、絶縁物は一般に大きな負の温度係数があるため温度分布が電位分布に与える影響を考慮する必要があること、などがよく知られている。汚損が耐電圧性能に与える影響についても、技術的にもほぼ確立されているため、今回の直流ブッシングの開発に当たっては絶縁物の温度変化による電界への影響を主に検討した。

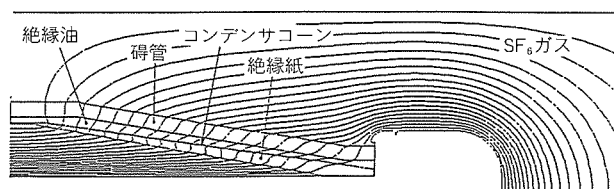
温度条件としては、温度上昇試験結果などを参考にして、①25°C均一、②75°C均一、③中心導体部75°C、コンデンサコーン表面部45°Cの3ケースを選定し、絶縁距離の短い下部側について解析を行った。その結果、ブッシングを構成する絶縁物では、がい(碍)管の体積抵抗率が絶縁油絶縁紙の体積抵抗率に比べて $1/10^2 \sim 1/10^5$ 程度小さく、沿面の最大電界が主に碍管部の電位分布で決定されるため、温度変化による絶縁性能への影響は数%と無視できるレベルであることを確認した。

直流ブッシングの構成は交流用油浸紙コンデンサ形ブッシングと同様である。図12に、前述のケース②の75°C均一における解析例を示す。

耐電圧試験は、温度変化による絶縁性能への影響が小さいことから、常温で実施した。その結果、AC, DC, インパルス耐電圧及び極性反転試験において20%以上の裕度を持つことを確認した。



(a) 直流定常時



(b) 極性反転時

図12. ケース②(75°C均一)における下部側(SF<sub>6</sub>ガス中)の電界分布(例)

### 3.5 直流変流器 (DC-CT)

変流器は、交流系統においては巻線形の変流器が適用されているが、これをそのまま直流電流の計測に用いると鉄心が飽和してしまうため、この飽和を補償するための方式が必要となる。この方式には、二次側から電流を供給することによって鉄心中の磁束を打ち消すように構成したゼロフラックス方式や可飽和リアクトル方式、また、電流の形成する磁界を直接検出するホール素子方式や磁気光学素子利用方式がある。今回のDC-CTに要求される定格事項を表9に示すが、この所要性能及び小型・軽量化を考慮してゼロフラックス方式を選定した。

#### (1) 直流変流器の基本構成

ゼロフラックス方式CD-CTの回路構成を図13に示す。

コイル部は、一次電流による磁界を検出するための補助巻線Na1、鉄心T1のほかに、補助巻線Na2、Na3、鉄心T2、T3から構成され、近傍磁界の影響を防ぐため、これら全体を磁気シールドケース内に収納して、その上に二次巻線Nsが巻回している。そしてコイル部の直流GIS側への装着は、信頼性・据付け性・事故時の対応性等の面から、外装方式を選定した。

検証試験のうち基本性能である誤差は、 $0.1 I_n \sim 2 I_n$  ( $I_n$ : 定格電流)の範囲において、当該電流の1%以下を十分満足した。また、周波数特性・応答速度・過電流試験等においても仕様を満足する良好な結果を得た。

### 3.6 直流計器用変圧器 (DC-PT)

計器用変圧器は、交流系統においては巻線形計器用変圧器やコンデンサ形計器用変圧器が適用されてきたが、これらの方式では直流を測定することができないため、直流電圧を精度良く測定できる方式として広く適用されている抵抗分圧方式を選定した。

今回のDC-PTに要求される定格事項を表10に、回路構成を図14に示す。一次電圧を抵抗体R1、R2によって分圧し、分圧比を確保するため、R2の出力信号を高入力インピーダンスの変換装置で受けた後に二次電圧として出力するように構成している。そして、抵抗体には電圧特性及び温度特性の優れた素子を適用し、一次電圧の変化や実使用状態における抵抗体の温度上昇を考慮しても定格の誤差仕様を満足するようにした。

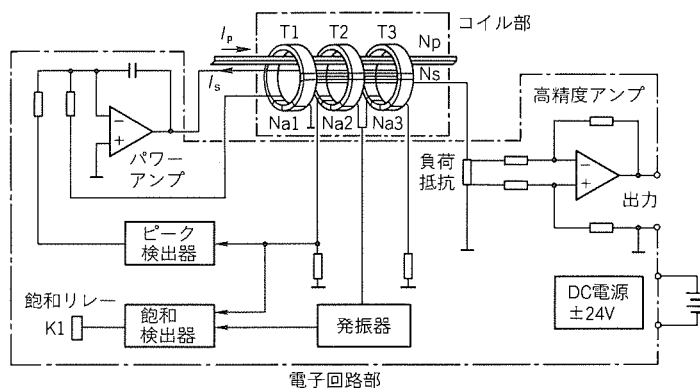
検証試験のうち基本性能である誤差は、 $0.05 V_n \sim 1.5 V_n$  ( $V_n$ : 定格電圧)の範囲において、当該電圧の1%以下を満足した。また、周波数特性・応答速度・雷インパルスを含む耐電圧試験等においても仕様を満足する良好な結果が得られた。

### 4. 組合せ試験

前述の機器単体の基本・実用性能試験のほか、組合せ状

表9. DC-CT定格事項

定格一次電流	DC±2,800A
変成化	2,800A/3V
誤差精度	±1%以下 ( $0.1 I_n \sim 2 I_n$ , $I_n=2,800A$ )
周波数特性	DC~1kHz (-3dB)
過負荷電流	DC±3,500A, 30分間
過電流	20kA 2秒
応答速度	1ms以下



- $I_p$ : 一次電流
- $I_s$ : 二次電流
- $N_p$ : 一次導体
- $N_s$ : 二次巻線
- Na1: 補助巻線(一次電流による磁界の検出)
- Na2: 補助巻線(残留磁束の大きさ, 方向の検出)
- Na3: 補助巻線(発振器の影響除去)
- T1, T2, T3: 鉄心

図13. DC-CT回路構成

表10. DC-PT定格事項

定格電圧	DC±500kV
変成比	受信部出力
誤差精度	±1%以下 ( $0.05 V_n \sim 1.5 V_n$ , $V_n = \pm 500kV$ )
周波数特性	DC~1kHz (-3dB以内)
応答速度	1ms以下

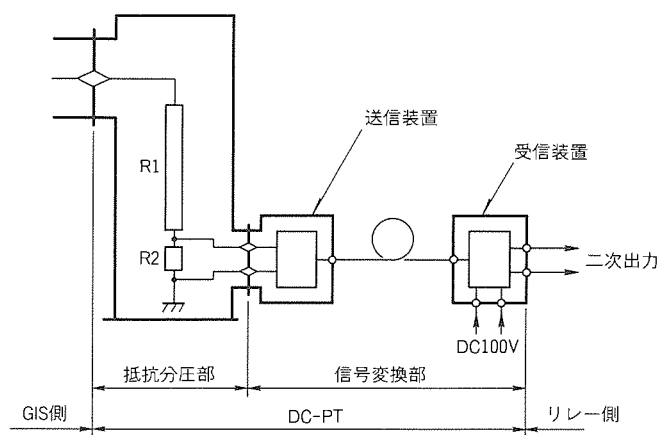


図14. DC-PT回路構成

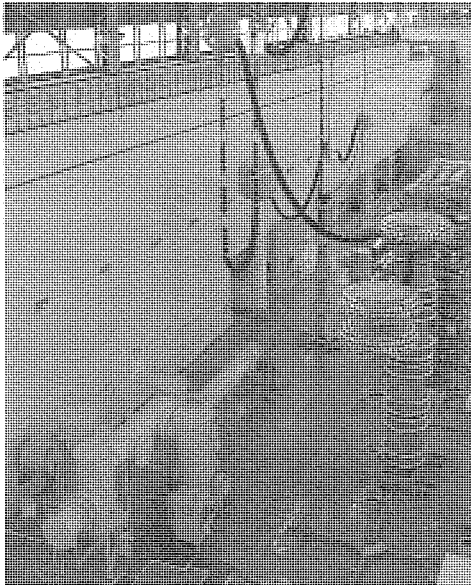


図15. ±500kV直流GISの耐電圧試験状況

態で温度上昇試験・耐電圧試験などを実施した。

(1) 温度上昇試験

直流通電による温度上昇試験は、交流通電に比べて①漏れ磁束による渦電流損がない、②導体の表皮効果がない、③タンク・接地系を含む循環電流がない等のため、通電容量にかかわらず磁性体のタンク材料選定が可能で、発生損失も2/3程度に低減される。

母線、断路器、プッシング、変流器、NCBを組み合わせた温度上昇試験結果では、±500 kV 設計部位が電界設計で機器諸元を決定するため、導体、タンク共に温度上昇限度に対し1/4以下、またLIWV 400 kV絶縁設計を行ったNCBは適正な裕度を持って規格値内であることを確認した。

(2) 耐電圧試験、その他の組合せ試験

組合せ状態で耐電圧試験・開閉試験・シーケンス試験などの電気・機械・実用性能試験を実施し、所定の基本・実用性能があることを確認した。組合せ状態での耐電圧試験状況を図15に示す。

(3) 長期信頼性確認試験

今回開発した±500 kV 直流機器は、長期的な絶縁性能検証を主目的に、1年間にわたる長期課電試験(1.25 pu 課電, 1 pu=500 kV)を関西電力(株)山崎実験センターで継続実施中である。

この試験では、電圧加速による30年間相当以上の耐電圧性能確認に加えて輸送・組立管理、耐環境性など実用性能確認を目的としており、試験終了後には絶縁裕度確認のため絶縁破壊試験を計画している(山崎実験センターでの試験内容はこの特集の“直流送電用機器・装置の開発検証試験”に掲載)。

5. むすび

±500 kV 直流 GIS の技術課題、各構成の特長と検証結果について述べた。

今後は、今回の開発で得られた知見・成果を基に継続中の長期信頼性検証試験のデータを反映し、21世紀初頭の運用開始に向けた信頼性の高い製品化を目指していく考えである。

参考文献

- (1) 長谷川泰三, 山地幸司, 三瓶雅俊, 羽場洋之, 竹内 博, 土江 瑛: 直流 GIS 母線の開発, 平成 7 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 574 (1995)
- (2) 長谷川泰三, 山地幸司, 畑野雅俊, 江頭 努, 濱 光紀, 西木 亨, 清水淳一: ±500kV 直流線路用避雷器の開発, 平成 7 年電気学会全国大会, No. 1437 (1995)
- (3) 吉田良男, 橋本隆輝, 三瓶雅俊, 竹内 博, 羽場洋之, 土江 瑛: 直流 GIS 用断路器の開発(その 1), 平成 7 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 577 (1995)
- (4) 竹治直昭, 山地幸司, 畑野雅俊, 森山貴旨, 米沢 毅, 浜野末信: 直流遮断器の自励転流特性の検討(II), 平成 7 年電気学会全国大会, No. 1415 (1995)

# 直流送電用変圧器・リアクトルの開発

吉田良男\* 光庵豊一+  
 杉原 洋\*\* 尾上達也+  
 畑野雅幸\*\*\* 細川 登+

## 1. ま え が き

現在、日本における直流送電に関する実績は、直流 250 kV、送電容量 600 MW である。広域連系を念頭に置いた基幹システムの整備に直流送電を採用していくには、送電電力の大容量化が不可欠であり、大容量化を図るために直流高電圧 (500 kV) の機器が必要である。

このような背景の下、主要機器である変換用変圧器と直流リアクトルについても、直流 500 kV 送電の実現のために機器の絶縁技術の確立、低損失、省スペース、低コスト及び高信頼度の機器を目指した開発を実施した。

なかでも、絶縁の改善は、コンパクト化・低損失化に大きく寄与するため、DC 500 kV に対応した直流絶縁技術の確立が中心課題であると考え、これを推進した。

ここに、直流 500 kV 化のために推進した絶縁技術開発と、この成果である機器のコンパクト化・低損失化への寄与について述べる。

## 2. 開 発 目 標

±500 kV 送電を想定した直流送電システムのスケルトンを図 1 に示す。また、この開発が対象とした変換用変圧器・直流リアクトルの仕様を表 1 に示す。

## 3. 直 流 絶 縁 の 特 徴

変換用変圧器及び直流リアクトルでは、交流系統用の変圧器やリアクトルに比べて絶縁上、表 2 の特殊性があるため、十分な配慮が必要である。

## 4. 直 流 絶 縁 開 発

直流送電に関する研究開発は昭和 55 ~ 57 年度に実施した経緯があり、絶縁に関しては次の内容を実施し、DC 125 kV、300 MW 級の直流技術は確立している。

(1) 絶縁油と油浸紙の直流耐電圧、直流抵

抗率などの基礎絶縁特性の把握

- (2) 絶縁物の抵抗率・誘電率を考慮した直流過渡電界解析ソフトウェアの開発
- (3) ±125 kV 級実絶縁構造の直流耐電圧・極性反転模擬試験による検証
- (4) ±125 kV 系統用機器による長期課電試験・全電流通電試験による総合検証

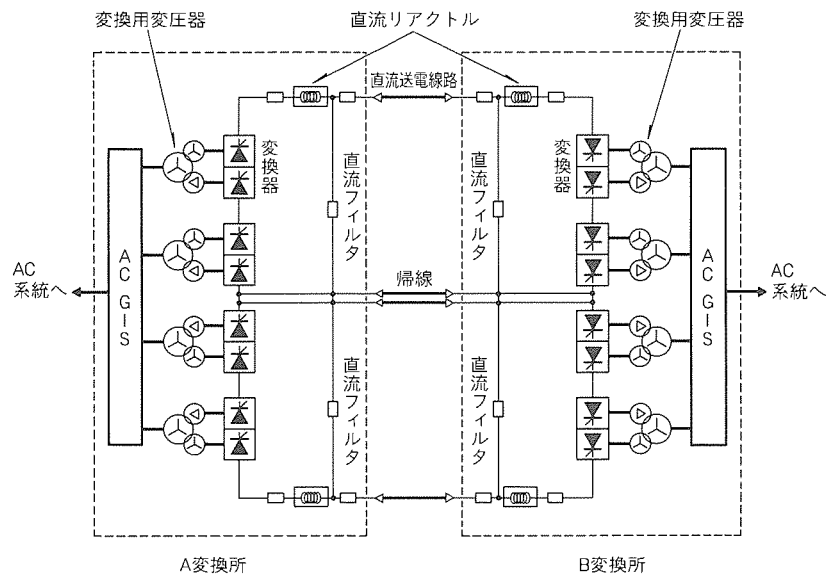


図 1. DC500kV 3,000MW級 直流送電系統

表 1. 変換用変圧器・直流リアクトルの目標仕様

機 器		変換用変圧器	直流リアクトル	
電 圧		500/110/110kV	DC500kV	
電 流		—	DC2,800A	
容 量		872/436/436MVA	—	
インピーダンス		16%	1H (ヘンリー)	
絶 縁	交流側	雷インパルス耐電圧	1,300kV	
		交流耐電圧	645kV 5分	
	直流側	雷インパルス耐電圧	1,300kV	1,300kV (対地, 極間とも)
		開閉インパルス耐電圧	1,175kV	1,300kV (対地, 極間とも)
		交流耐電圧	645kV 5分	645kV 5分
		直流耐電圧	±750kV	±750kV
	直流極性反転耐電圧	±595kV	±625kV	
損 失		0.3%以下 (872MVAベース)	0.15%以下 (双極2,800MWベース)	

表 2. 変換用変圧器・直流リアクトルの絶縁上の特殊性

	変換用変圧器	直流リアクトル
絶縁上の特殊性	<ul style="list-style-type: none"> <li>●バルブ側は全絶縁となる</li> <li>●バルブ側巻線には常時直流高電圧が加わる。また、極性反転によって電圧の極性が変わる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●巻線は全絶縁となる</li> <li>●巻線には常時直流高電圧が加わる。また、極性反転によって電圧の極性が変わる。</li> </ul>
現象の特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 絶縁物の電圧分担が、定常状態では抵抗率比で決定される。</li> <li>(2) 絶縁物の抵抗率には、温度依存性、電界依存性がある。</li> <li>(3) 極性反転時に電荷が瞬時に移動できないため、電圧分担の急激な変化を生じる。</li> </ul>	

表 3. 絶縁開発のステップと内容

ステップ	項目	内容
1	基礎絶縁開発	1.1 基礎絶縁特性 現在の油処理技術における材料単体の絶縁基礎データ(絶縁油・絶縁紙の抵抗率, 絶縁油のV-t特性, 絶縁紙の直流耐電圧)の確認 1.2 複合絶縁特性 上記1.1のデータを基にした複合絶縁構造の最適化(油とプレスボードの最適構成比率)
2	要素モデル検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>●上記成果を反映させて直流高電圧の絶縁構造を必要とする機器要素部(直流巻線部, リード及びブッシングシールド部)の実規模要素モデルを製作し, 性能を検証(油-気中ブッシングを含む。)</li> </ul>
3	実規模試作検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>●実規模モデル検証 各要素部(直流巻線部, リード及びブッシングシールド部, 油-気中ブッシング)を組み合わせた総合的な絶縁性能を検証</li> </ul>

今回は電圧が500 kVと4倍になるため、絶縁距離は飛躍的に増大する。そこで、絶縁距離の増大を抑えるため、高電圧の直流送電用機器に対応した直流絶縁技術開発として表3のステップで進めた。

以下に、各ステップにおける開発の内容を示す。

#### 4.1 基礎絶縁開発

##### 4.1.1 基礎絶縁特性試験

絶縁油・油浸紙などの材料単体の直流基礎絶縁特性については、過去にデータを取得している<sup>(1)</sup>。今回改めてデータを再確認する背景には、近年の製造技術の改善、すなわち、組立環境のクリーン化がある。クリーン化(最終的には油中じんあい(塵埃)の低減)によって、絶縁性能が改善されることは交流では確認している<sup>(2)</sup>。直流の場合も同様に改善が期待できるため、最近の製造環境下での材料特性として測定したものである。

##### (1) 油ギャップのV-t特性

図2に油ギャップの直流V-t特性を示す。図から、クリーン化により、直流においても50%破壊電圧が向上していることが分かる。例えば1分値の比較では、約30%の向上である。このほか、参考のため、同一条件での交流V-t特性も測定した。破壊電圧の直流と交流の関係は当時と変わらず、直流破壊電圧は交流(実効値)よりも低く、1分値の比較では約0.9倍であった。

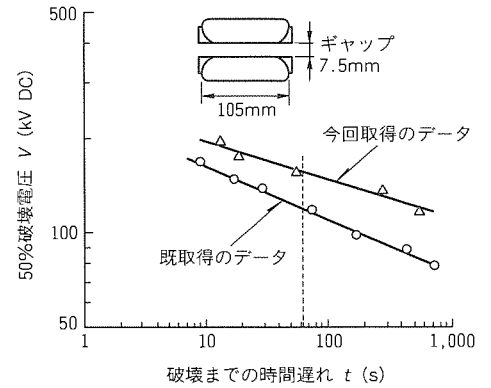


図 2. 油ギャップの直流V-t特性

##### (2) 油浸紙の直流耐電圧

油浸紙(プレスボード, クラフト紙)について直流耐電圧試験を行った。油浸紙については、既取得のデータと変わりなく、次のとおりであった。

(a) 油浸紙の直流耐圧は交流(実効値)よりも高く、プレスボードの場合は5~6倍、クラフト紙の場合は約3倍であった。

(b) 0.2~0.8mm厚さの油浸紙では、直流破壊電界強度は変わらなかった。

##### (3) 絶縁油及び油浸プレスボードの直流抵抗

絶縁油及び油浸プレスボードの直流抵抗を測定した。直流抵抗は、既取得のデータよりも総じて高い結果となった。この結果もクリーン化による特性である。

##### 4.1.2 複合絶縁特性

変圧器と直流リアクトルの絶縁は、絶縁油と油浸紙で構成される複合絶縁が用いられる。交流系統用の変圧器のように巻線に加わる電圧が交流の場合には、電圧分担は各絶縁物の誘電率で決定されるが、直流送電用のように直流電圧が加わる場合には、電圧分担は各絶縁物の抵抗率で決定される。さらに、極性反転時では反転前の電圧分担は抵抗率で決定されており、反転直後の電圧分担は反転前の分担電圧に誘電率で決定される電圧の重畳がある。

一方、基礎絶縁特性の項で述べたように絶縁紙と油では耐電圧性能に差があるので、直流送電用巻線機器の絶縁は、種々の電圧に対して最も合理的な構造を考える必要がある。ここでは、複合絶縁の基礎的な検討内容を述べる。

##### (1) 複合絶縁における絶縁構成比率

全絶縁距離を油と油浸紙(プレスボード)にいかに関与すれば交流・直流さらには極性反転等の電圧に対してバランスのとれた絶縁性能になるかについて概略検討した。図3はこの命題に対する一つの指標を与えるものである。この図は次のようにして求めたものである。



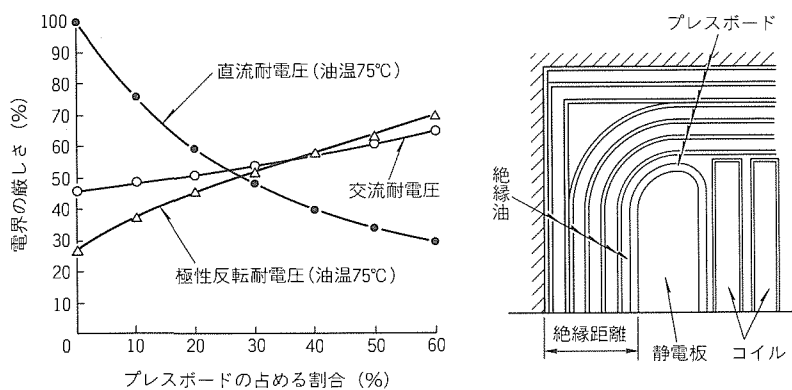


図3. 複合絶縁の絶縁構成と絶縁油の厳しさ

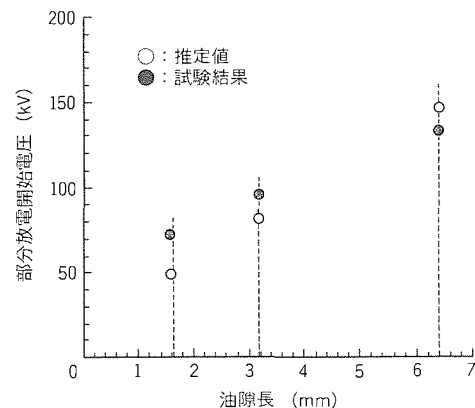


図5. 複合絶縁モデルの交流部分放電特性

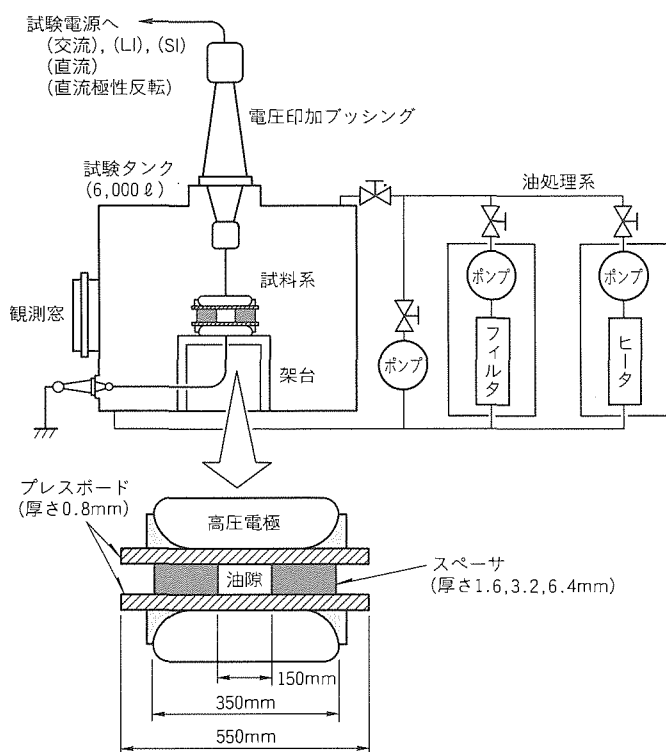


図4. 複合絶縁の耐電圧試験系

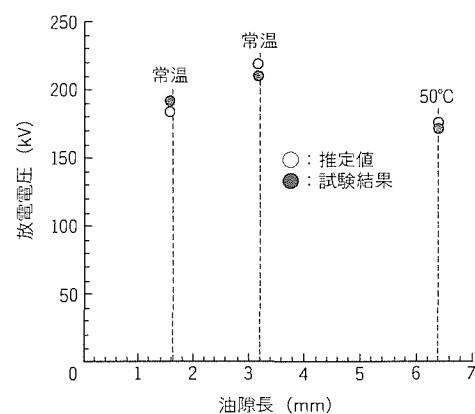


図6. 複合絶縁モデルの直流耐電圧特性

前述のとおり、複合絶縁では全絶縁距離に占めるプレスボードの割合を約30%にすると、種々の耐電圧に対する絶縁油の厳しさのバランスがとれた構成になる。これを踏まえ、プレスボードの占める割合が20～50%の範囲で複合絶縁を構成し、各種電圧に対する絶縁検証試験を実施した。

試験系構成を図4に示す。この試験から得られた種々の電圧に対する結果を以下に示す。

- (a) 絶縁距離を仮定し、プレスボードの占める割合を変えて表1の各種電圧を加える。
- (b) 複合絶縁の絶縁強度は一般に絶縁油で決まるため、絶縁油に加わる電界を基礎絶縁特性試験結果の絶縁油許容電界で除し、各々の厳しさと評価する。全絶縁距離を油で充てん(填)した場合の直流耐電圧に対する厳しさを正規化する。

なお、油の絶縁耐力は油げき(隙)長にも依存する性質があるが、ここでは、大略を把握する目的から、これを無視している。

図から、全絶縁距離に占めるプレスボードの割合が約30%であれば、各種耐電圧に対して厳しさのバランスがとれた絶縁構成となることが分かる。

(2) 複合絶縁モデルの絶縁特性試験

(a) 交流耐電圧試験

図5に交流部分放電特性を示す。電圧の上昇は5分間ステップアップによった。推定電圧は交流  $V-t$  特性の5分値による(油隙長7.5mm)。油隙長が短い領域では推定電圧の方が低く、長い領域では高くなる傾向にあるが、これは油の持つ部分放電開始電圧の油隙長依存性によるものと解釈できる。

(b) 直流耐電圧試験

図6に直流耐電圧特性を示す。直流の場合は印加電圧を60分ホールドし、破壊が生じなければ次の電圧ステップに上昇させた。この場合、電圧の上昇による交流性電圧の重量があること、また温度が低い場合は、電極の電圧は設定電圧になっても絶縁物の分担電圧が定常状態に達するまでに時間を要することなどに注意して試験するとともに、

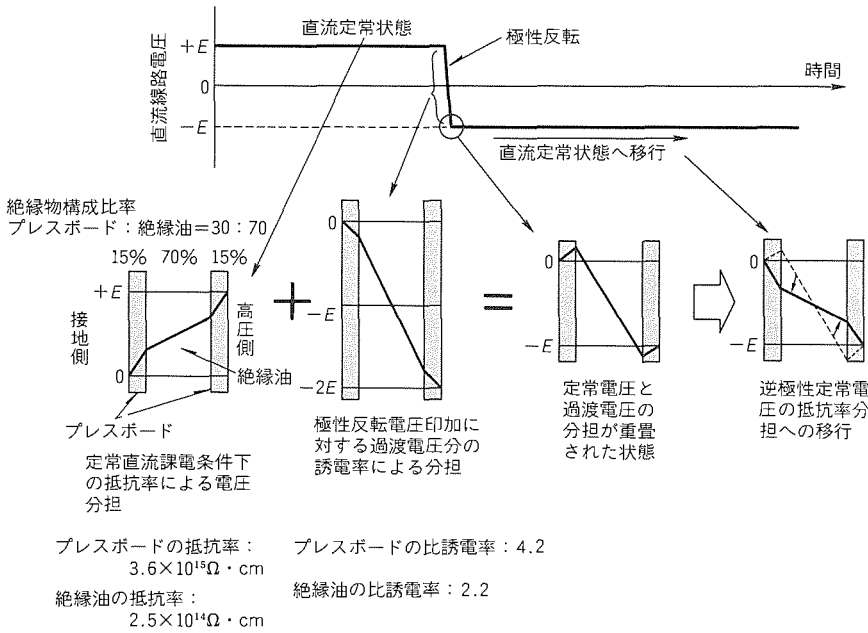


図7. 極性反転時の絶縁物の分担電圧変化

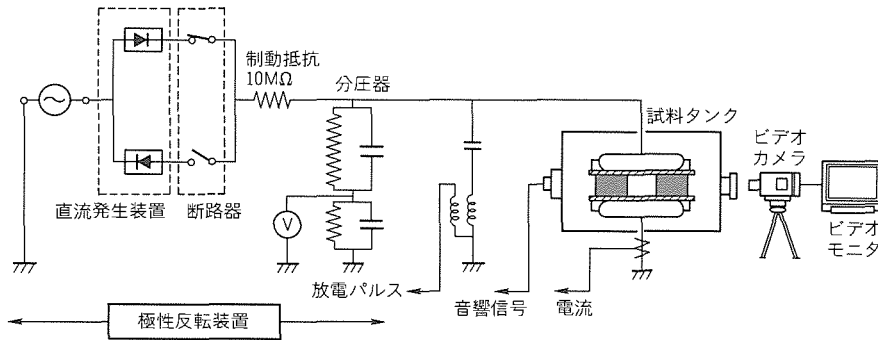


図8. 極性反転試験回路

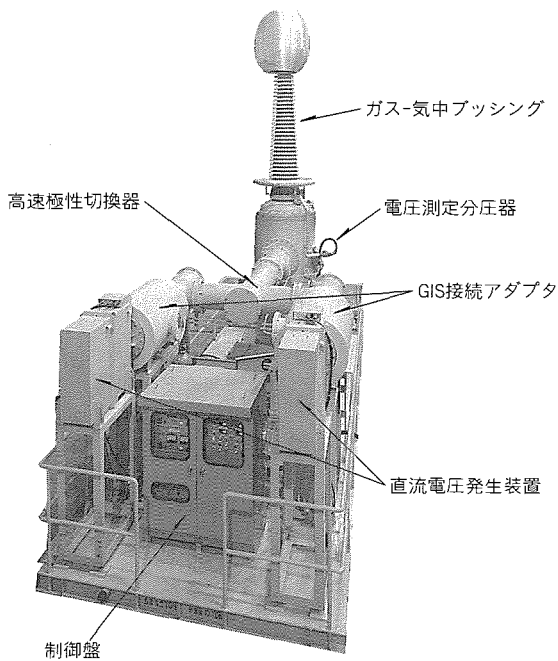


図9. 製作した極性反転試験装置

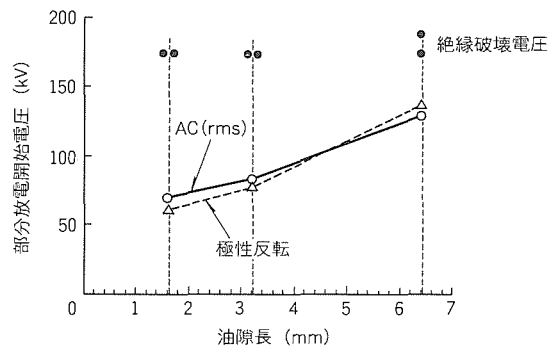


図10. 極性反転の部分放電開始電圧

結果を評価する必要がある。油隙長6.4 mmの場合は温度を上げ、分担電圧が定常に達する時間を短くしたものである。以上の直流試験に特有な現象を評価すると、推定電圧と試験値はよく一致した。

(c) 極性反転耐電圧試験

直流送電では、送電電力の方向変更は電圧の極性反転によってなされる。このとき、変換用変圧器の直流側巻線や直流リアクトルには、加わる電圧の急激な変化がある。反転の時間は約0.5秒程度とされており、この間に加わる電圧の極性が+500 kVから-500 kVに変わる。図7は極性反転時の複合絶縁系の電圧分担の変化を示したものである。このような現象に対する複合絶縁系の耐電圧を検証した。

図8には極性反転試験の回路を、図9にはこの試験のために特別に製作した極性反転装置を示す。

試験の結果を図10に示す。図には、比較のために交流の部分放電発生電圧も併せて示す。

図から、極性反転においては、油隙長が短いほど（絶縁距離に占めるプレスボードの比率が大きいほど）同一電圧の交流実効値より低い値で部分放電が発生することが分かる。図はまた、耐電圧試験方法に対する一つの指標も与えるものである。実製品の極性反転試験となると、試験電圧が高いため、装置自身が非常に大がかりなものになる。これを、交流系統用機器の耐電圧試験として、部分放電検出

表4. 基礎絶縁開発の成果と反映の内容

	基礎絶縁開発の要点	設計の反映
基礎絶縁特性	● クリーン化による絶縁油の特性が30%向上	● 絶縁油の耐電圧30%向上を反映し絶縁距離を従来設計から15%低減する。
複合絶縁の絶縁物構成比率	● 絶縁物構成比率としては30%前後が適切	● 絶縁物構成比率を30%前後で設計
設計の妥当性	● 各種絶縁構成比率において、複合絶縁としての性能を確認	● 実絶縁構成における各部の電界を解析して確認する。

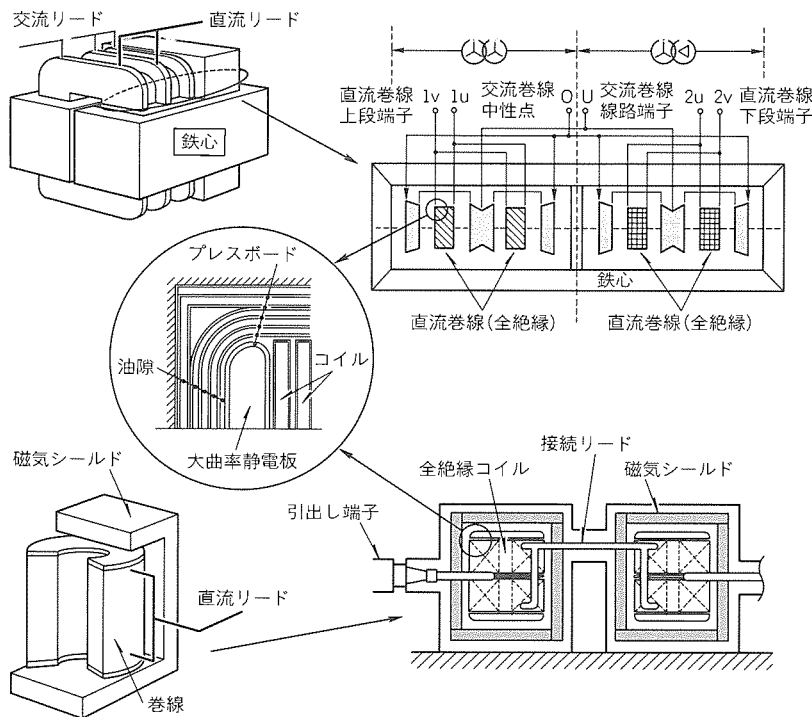


図11. 巻線絶縁モデルの検証の対象

方法も確立された交流試験で代替できれば都合がよい。極性反転耐電圧試験を交流で行うとすれば、例えば絶縁距離に占めるプレスボードの比率が33%程度(図における油隙長3.2mm)であれば、検証に要する等価な交流電圧は極性反転電圧の1.03倍となることが図から分かる。

#### 4.2 要素モデル検証

前節で、絶縁材料の基礎特性、複合絶縁の各種電圧に対する絶縁特性を確認し把握した。ここでは、これらを基にして直流高電圧絶縁を要する機器各部の要素(直流巻線部、リード及びブッシングシールド部)について絶縁設計を行い、実絶縁構造で性能を検証した内容を述べる。

##### 4.2.1 絶縁構成の設計

巻線・リード等の主要絶縁部分の設計検討に当たっては、基礎絶縁開発で得られた成果を反映した。その成果と反映した内容は表4のとおりである。

##### 4.2.2 巻線絶縁モデル

巻線絶縁モデルが検証の対象とする部位は、図11に示すように、変換用変圧器の直流巻線端部と直流リアクトルの巻線端部である。

図12には、これら巻線端部の絶縁設計をし、電界解析を行った結果を等電位

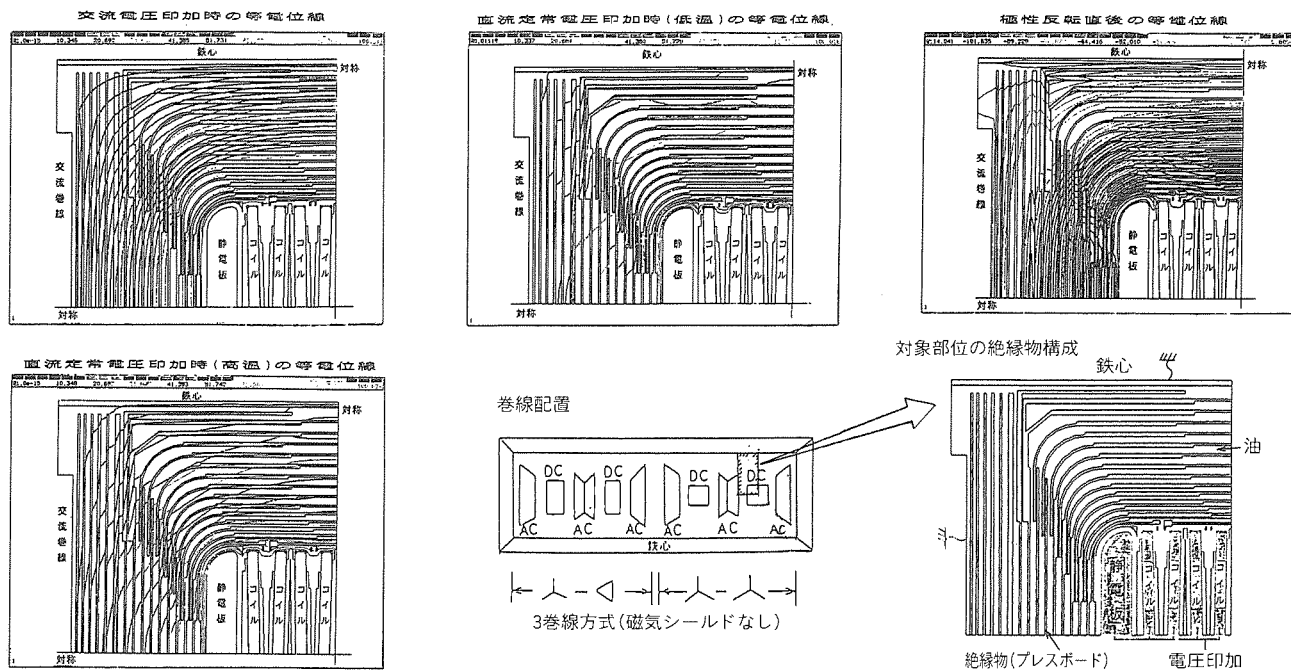


図12. 巻線絶縁モデルの電界

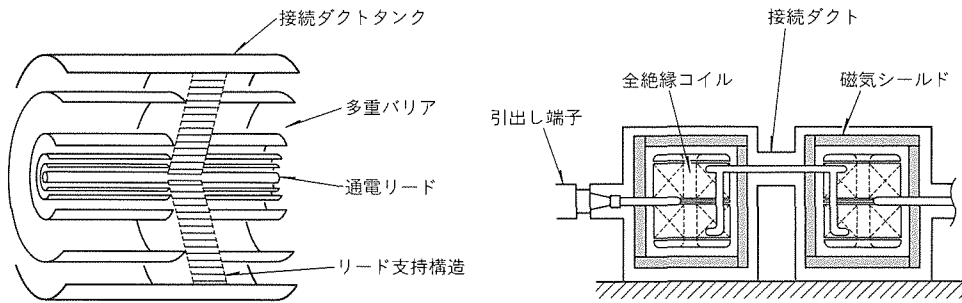


図13. 直流リアクトルのタンク間接続構造

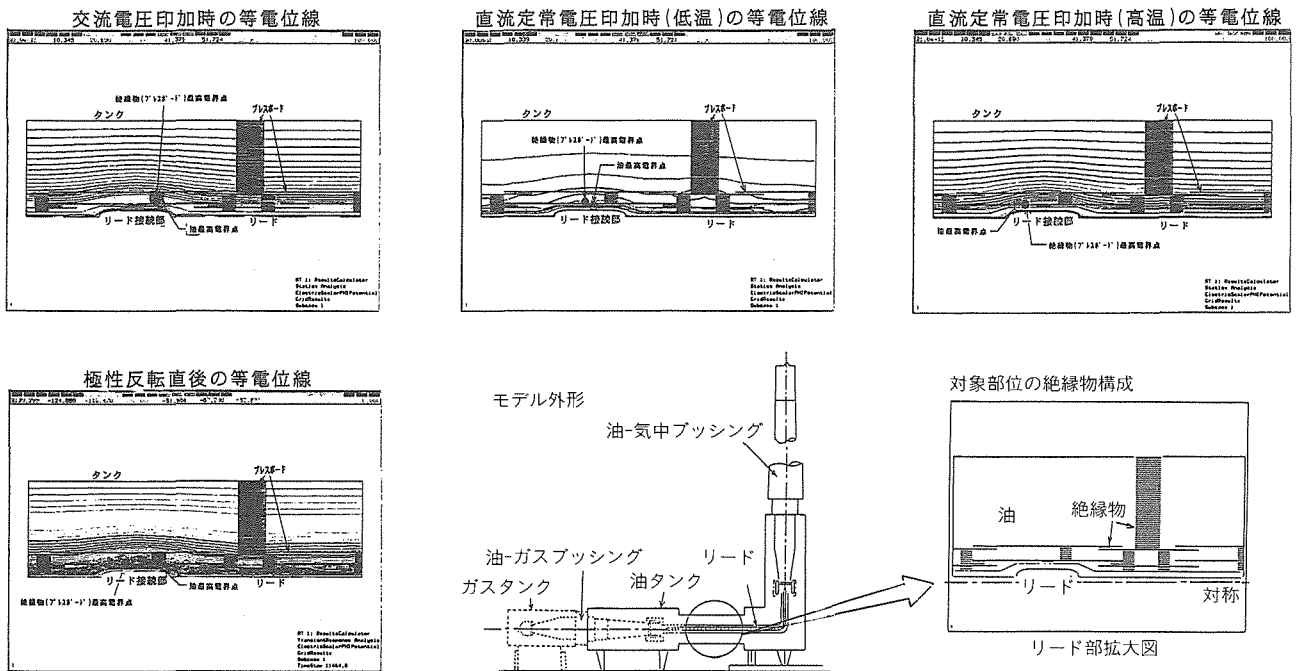


図14. リード，ブッシングシールド部の電界

表 5. 絶縁モデルの検証試験結果

モデル		巻線絶縁モデル		リード及び ブッシングシールドモデル
試験項目と電圧	設計電圧	#1	#2	
試験項目	設計電圧	#1	#2	設計電圧をクリアすることを確認
交流耐圧	745kV 1分			
雷インパルス	1,425kV			
開閉インパルス	1,175kV			
直流耐圧	±750kV 60分			設計電圧をクリアすることを確認
極性反転	+625kV ↓ -625kV	—		
過電圧試験	交流耐電圧	1.45TV* 部分放電発生	1.40TV 部分放電なし	1.35TV 部分放電発生
	直流耐電圧	1.30TV 部分放電なし	1.30TV 部分放電なし	1.35TV 部分放電なし

\* TV : Test Voltage

線図で示す。直流に対しては電界はプレスボードに集中し、交流、極性反転直後の場合は電界は油隙に集中している特徴的な現象が分かる。

4.2.3 リード及びブッシングシールドモデル

リード及びブッシングシールドモデルで検証の対象とする部位は、直流リアクトルを例にすると、図13に示すように、タンク間接続リード部、ブッシングの油中シールド部分である。図14には、これら巻線端部の絶縁設計をし、電界解析を行った結果を等電位線図で示す。

4.2.4 絶縁検証結果

試験はまず、設計電圧をクリアすることを一通り確認した。いずれも良好な結果である。その後、交流と直流について更なる過電圧試験を実施し、設計の妥当性を確認した。これらの試験結果を表5に示す。なお、表に示す設計電圧はモデル設計時点で想定された電圧である。

4.3 実規模試作検証

要素モデルによって、巻線部分、リード及びブッシングシ

表 6. 試験電圧, 検証の対象部位, 要素モデルの反映

試験電圧	検証の対象部位
雷インパルス : 1,300kV	変換用変圧器の対象部位 ①直流巻線の交流巻線に面する端部 ②直流巻線の鉄心に面する端部 ③直流巻線のリード引出し部
開閉インパルス : 1,300kV	
直 流 : ±750kV 60分	
交 流 : 559kV (1.5E) 30分	直流リアクトルの対象部位 ①軸方向の磁気シールドに面する端部 ②径方向の磁気シールドに面する端部 ③巻線のリード引出し部 ④リードの曲がり, 分岐部 ⑤ブッシングシールド部
↓ 645kV ( $\sqrt{3}E$ ) 5分	
↓ 559kV (1.5E) 30分	
直流極性反転 : ±625kV 2時間	①と②の部分の絶縁距離を要素モデルに対して15%低減する。
↓ 625kV 30分	

要素モデルの試験結果反映

●要素モデルの巻線絶縁モデルは#1, #2共に1.4×745kV 5分間, 部分放電がなく, 試験電圧の645kV 5分に対して1.6倍以上の絶縁裕度があるため, 検証の対象部位の①と②の部分の絶縁距離を要素モデルに対して15%低減する。

ールド部分をそれぞれ単独で絶縁性能検証をした。また, これらを組み合わせ, 全体として実構成に近い形での総合的な検証も行った。

試験電圧, 検証の対象部位, 要素モデルの反映など, 一連の仕様は表6のとおりである。また, これらの仕様を織り込んだモデルの基本構造を図15に示す。なお, モデルの外形は図16のとおりである。

絶縁試験検証の結果はすべて良好であった。

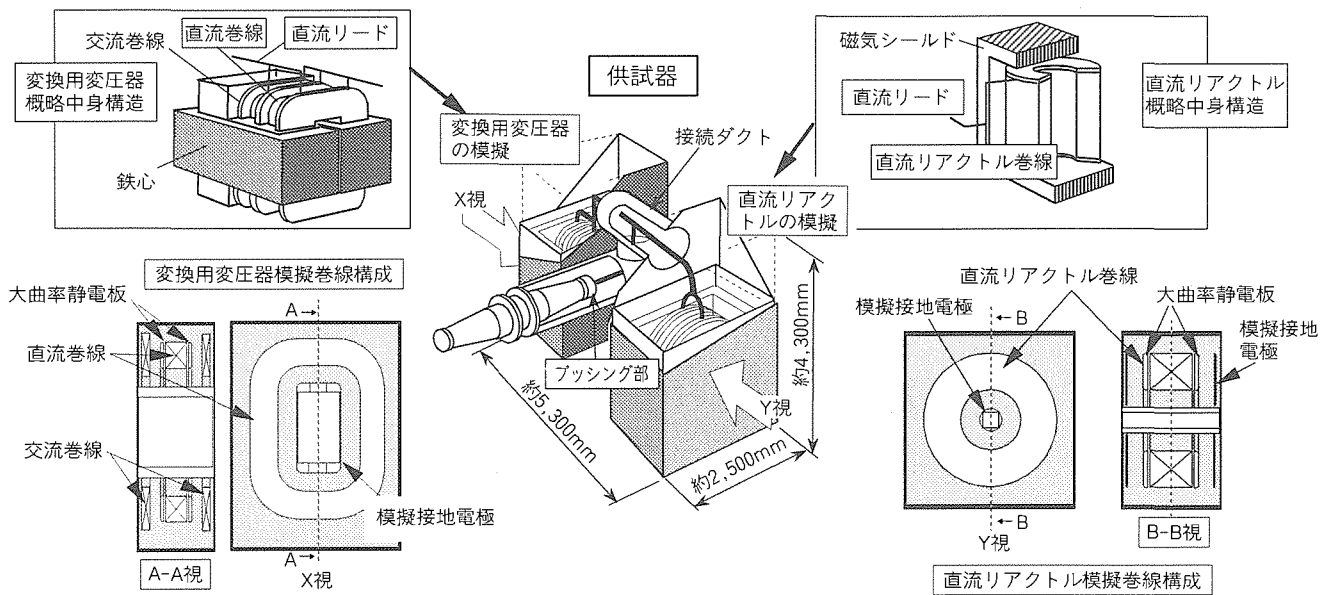


図15. 総合絶縁モデルの基本構造

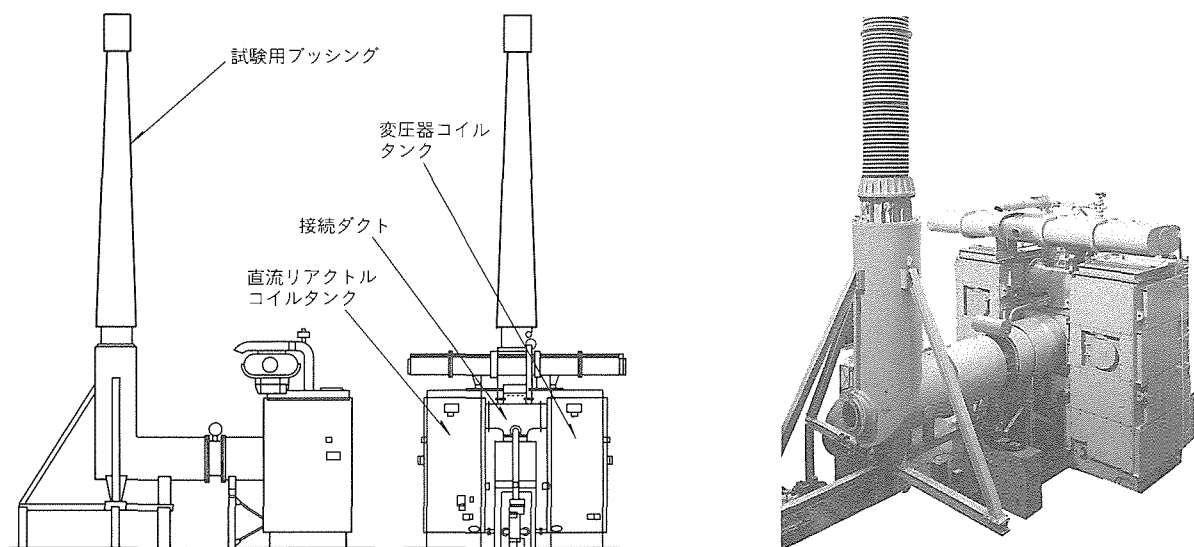
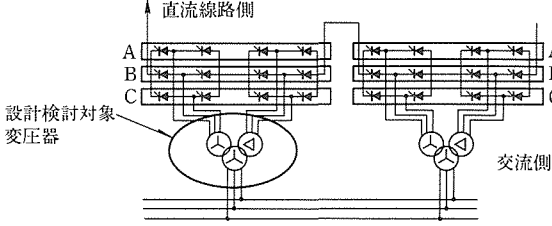
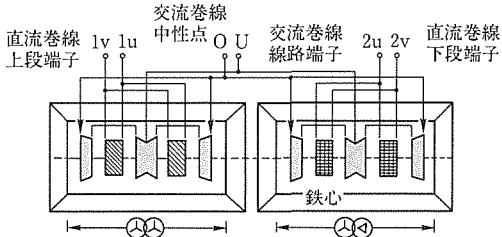


図16. 総合絶縁モデルの外形

表 7. 研究成果反映設計

	今回までの全研究成果反映設計	
設計仕様	形式	: 6分割特別三相(コイル4H-L構成)×1
	容量	: 872MVA/436MVA/436MVA
	電圧	: 500kV/110kV/110kV
	結線	: 星形/星形/三角形
	%インピーダンス	: 16%(436MVAベース)
	騒音	: 70dB(A)
	輸送制限	: 170トン(鉄道輸送) <sup>(注1)</sup>
スケルトン		
巻線配置		
据付け寸法・総質量 <sup>(注2)</sup>	(W)23.6×(D)17.8×(H)10.8 (m)	1,110トン
最大輸送寸法・質量	(W)3.1×(L)4.5×(H)4.1 (m)	135トン
損失 <sup>(注3)</sup>	3,070kW	

(注1) 設計条件として、分割輸送(組立輸送)を設定。

分解輸送(CGPA)の場合は、更にコンパクト化が可能

(注2) 機器最外寸法を示す。

(D寸法は機器全面とバルブホール壁間距離)

(注3) 損失は、フィールド運転時

(INV運転での直流偏磁、高調波損失を含む損失)

## 5. むすび

以上、500 kV 直流送電に用いられる変換用変圧器・直流リアクトルにとって中心課題であった DC 500 kV に対応した絶縁構造について、最終的な総合絶縁検証モデルで一連の絶縁検証を終了し、技術を確立できた。総合絶縁検証モデルは、関西電力(株)山崎実験センターで1995年10月から1年の予定で長期絶縁性能の検証に入っている。これに関してはこの特集の別稿に述べてある。

この開発により、開発着手前に想定した絶縁距離を低減できることが検証された。変換用変圧器を例に設計を行うと、大きさ、損失などは表7のとおりである。

## 参考文献

- (1) 川越英二, 今滝満政, 東植良旺, 本田義勝, 光庵豊一: ガス絶縁交直変換所用機器 三菱電機技報, 57, No.10, 681~689 (1983)
- (2) 塩野克己, 岸 章夫, 石川清之, 青野一郎: 組立環境クリーン化による変圧器絶縁性能の向上, 平成3年電気学会全国大会, 920 (1991)
- (3) 岡部成光, 大野高宏, 賤満英一, 岸 章夫, 青野一郎, 細川 登: 外鉄形変圧器絶縁モデルの交流 V-t 特性とインパルス V-n 特性, 電気学会論文誌, 115-B, No. 4, 394~400 (1995)

# 直流送電システムの 制御・保護方式の開発

佐藤雅一\* 林 成男+  
村上弘明\*\* 玉井伸三++  
本庄暢之\*\*\* 土岐直寛+++

## 1. ま え が き

パワーエレクトロニクス技術の進展は著しく、この特集の別稿で紹介されているように、世界最大容量の光サイリスタを用いたサイリスタバルブが開発されている。一方、制御・保護の分野においても、マイクロプロセッサの長足な進歩により、その高い演算能力を利用した新しいタイプの制御・保護方式が提唱されている。

このたび、関西電力(株)、四国電力(株)、電源開発(株)及び三菱電機(株)は、直流送電システムの運転信頼度を向上させる制御方式の共同研究を行い、新しい変換器の制御方式を開発し、シミュレーション及び試作装置によって検証を行った。

以下に、開発した高信頼度変換器運転方式<sup>(1)~(4)</sup>を中心に、直流送電の制御・保護方式の開発動向を述べる。

なお、試作装置による試験はこの特集の別稿に譲っており、併せて参照願いたい。

## 2. 制御・保護システムの概要

### 2.1 システム構成

双極直流送電システムの制御・保護システムの概略構成を図1に示す。制御システムは、バルブ点弧制御部(PG盤)、変換器制御部、及び親制御部に大きく分類することができる。また、保護システムは、直流線路保護と、変換器保護を中心とする変換所構内保護に分類することができる。各々の主な

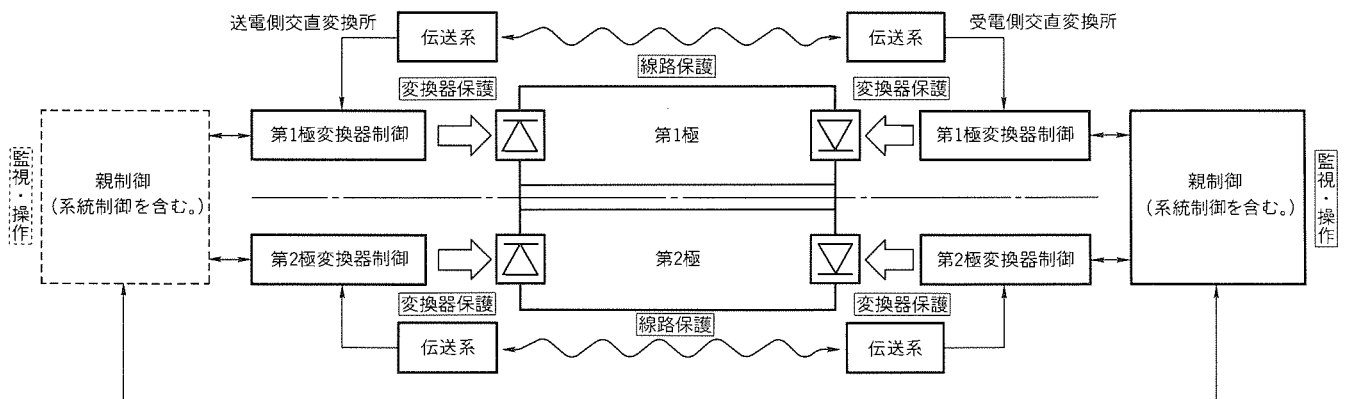


図1. 制御・保護システムの構成

表1. 制御・保護機能

階層	バルブ	変換器制御		親制御	
主な機能	交直変換	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 直流電圧・電流制御</li> <li>● 起動停止シーケンス制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 同極相手端との協調制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各極への電力配分制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 直流を用いた交流系統の安定化制御</li> </ul>
制御の構成		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 定電圧制御 (AVR)</li> <li>● 定電流制御 (ACR)</li> <li>● 余裕角制御 (AγR)</li> <li>● 点弧位相制御</li> <li>● 点弧角指令値</li> <li>● 起動停止シーケンス制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電圧・電流指令値</li> <li>● 起動停止時の相手端との協調制御</li> <li>● 変換器の運転状態信号</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各極への電力指令値</li> <li>● 電力配分制御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電力指令値</li> <li>● 電力動揺抑制制御</li> <li>● 発電機単独時の周波数制御</li> </ul>
保護内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>● サイリスタ阻止</li> <li>● 過電圧保護</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● アーム短絡保護</li> <li>● 転流失敗保護</li> <li>● 過電流保護</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 保護連動協調</li> <li>● 直流線路保護</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電力動揺抑制制御</li> <li>● 発電機単独時の周波数制御 (交直ハイブリッド, 電力関連系)</li> </ul>

\*関西電力(株) \*\*四国電力(株) \*\*\*電源開発(株)

+三菱電機(株)制御製作所 ++同産業システム研究所 +++同電力情報システム技術センター

る機能を表1に示す。

## 2.2 制御・保護機能

変換器制御部は、直流系の運転状態を決定する直流電圧と直流電流の制御を主機能としており、所望の制御を達成するように、サイリスタバルブを点弧する点弧タイミングパルスをバルブ点弧制御部へ出力する。通常、送電側の変換器が直流電流の制御を、受電側の変換器が直流電圧の制御を受け持つて、送電電力を制御する。バルブ点弧制御部は、多数のサイリスタ素子を直列接続して構成したサイリスタバルブアーム中のサイリスタ素子が、一斉にオン/オフするようにゲート制御を行うものである。また、親制御部は、極間の電力配分制御及び系統制御など、変換器制御部に電力指令値を出力して所望の制御を達成する。

一方、保護においては、従来の機械式遮断器よりもはるかに速い電流遮断能力があるサイリスタ変換器が存在すること、また、遮断器を開放する際は直流電流遮断の発生がないように変換器制御と協調をとった保護方式が要求されるなど、従来の電力用交流機器の保護とは、要求される機能・性能が異なる。

## 3. 高信頼度運転制御方式

これまで国内で適用されてきた直流送電設備(周波数変換設備を含む)においては、交流系統に事故が発生して変換器の電力変換動作が正常に動作できない場合は、いったん運転を停止し、事故復旧後に系統の電圧ひずみが収まるのを待ってから運転を再開(再起動)する方法を採っていた。しかし、大容量の直流送電設備では、変換器の運転を停止すると無効電力バランスが崩れて事故回復後に系統電圧が著しく過大になることがあり、電圧上昇を抑制するためには、高調波フィルタ又はシャントキャパシタ(SC)等の無効電力供給機器を系統から切り離す必要が生じるため、交流系統事故回復後の変換器の運転再開が一層遅くなることが懸念される。系統事故が回復しても直ちに送電が再開できないと電力系統の信頼度を低下させることとなるため、交流系統事故が発生しても変換器の運転を継続し、事故回復後直ちに元の運転状態に復帰して運転を継続できるシステムが求められていた。

以下に、直流送電システムの運転信頼度を高めるために開発した交流系統事故時の変換器運転継続制御と、発電機との協調制御について述べる。

### 3.1 交流系統事故時の運転継続制御

バルブの転流動作を交流系統電圧に依存する他励式変換器は、系統電圧が変動したときにサイリスタバルブの転流余裕角が不足となって転流失敗が発生し、電力変換が不能となることがある。これに対して制御装置は、必要最小限の余裕角を確保する余裕角制御(A $\gamma$ R)を一般的に備えており、正常時は余裕角が大きくなり過ぎて力率を悪化させることもなく、かつ、交流電圧が変動しても必要な余裕角を確保して転流失

敗を起こさないようになっている。しかし従来のA $\gamma$ Rは、ゆっくりとした交流電圧の変動には追従するものの、急しゅん(峻)な交流系統電圧の変化又は交流系統電圧が高調波を大量に含む場合は適正に余裕角を確保する制御が行えなかったため、交流系統事故時には運転を停止せざるを得なかった。交流系統事故時に変換器の運転継続を行うには、交流系統電圧が低下した状態又は高調波を大量に含んだ状態においても、サイリスタバルブの必要最小限の転流余裕角を確保できる高速なA $\gamma$ Rが必要となる。

A $\gamma$ Rには、サイリスタバルブの転流後の余裕角を測定してそれを基に制御する閉ループA $\gamma$ R方式と、系統電圧などから転流余裕角が確保できる制御角を演算して制御を行う開ループ方式が考えられるが、制御の高速性及び安定性に優れた開ループ方式を基本とし、系統電圧不平衡、高調波電圧ひずみ等に対して変換器運転が可能となる新方式の開ループA $\gamma$ R方式を開発した。

図2は、変換器制御部の構成を示したものである。定電流制御(ACR)、定電圧制御(AVR)、A $\gamma$ Rの何れかが選択制御されるように構成されており、変換器が逆変換器運転(直流電力を交流電力に変換)時は定電圧制御が有効になるように設定されているが、サイリスタの転流後の余裕角が設定値を下回るような交流電圧低下などが発生すると、余裕角制御が有効になって制御角を進め、転流失敗を防止するように動作する。

サイリスタの転流動作に関与するのは直流電流と転流電圧であり、直流電流は容易に検出できるので、転流電圧の基本波振幅・位相・高調波成分が検出できれば、余裕角が確保できるサイリスタの点弧制御角を正確に予測することが可能である。

図3に、電圧振幅成分検出器の構成を示すが、過渡的な三相間の不平衡状態に対処するため、個々のバルブに対する転

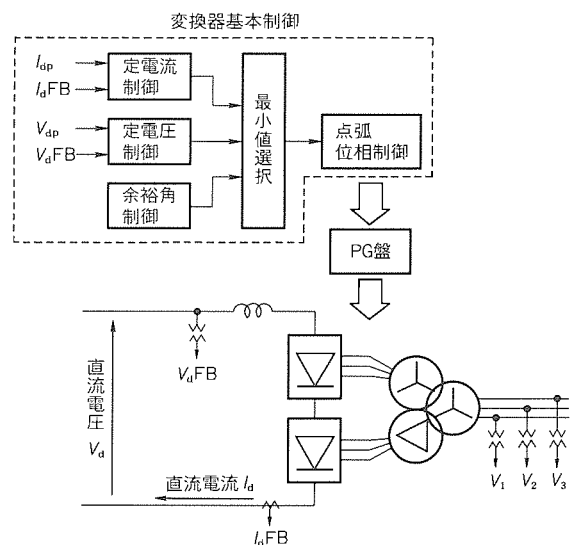
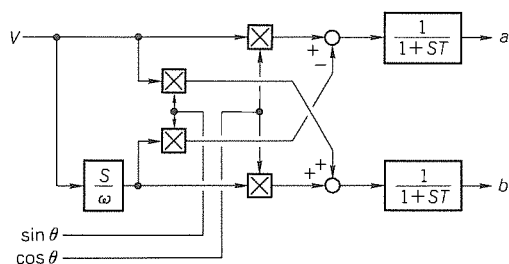
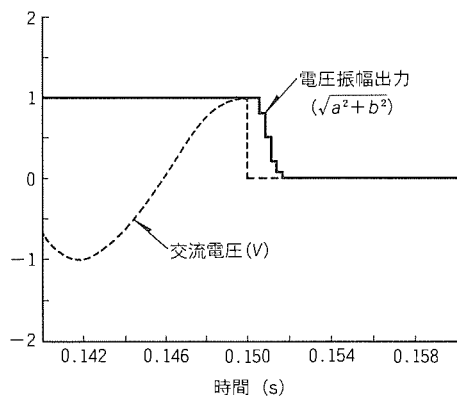


図2. 変換器制御部の構成





(a) ブロック図



(b) 過渡応答

図 3. 振幅成分検出器の構成と過渡応答

流電圧の振幅成分を検出する方式としている。転流電圧の振幅値を検出するため、入力交流電圧の微分演算による90°進み信号と入力電圧信号から、座標変換の要領で基準信号  $\sin\theta$ ,  $\cos\theta$  と同相な振幅成分  $a$ ,  $b$  を演算する。なお、基準信号  $\sin\theta$ ,  $\cos\theta$  は、バルブの点弧位相制御の基準である系統交流電圧に同期したPLL回路から得ている。また、微分演算によって増幅される高調波の影響を緩和するため、ローパスフィルタを通して振幅成分を出力する。図中に示した過渡応答は、7.5周期(約0.35ms)で演算する振幅成分検出器に入力される交流電圧が突然零になったときの振幅成分検出器の出力であり、交流電圧の急変を2ms以内に検出可能である。

この電圧振幅成分検出器を用いた開ループ  $A\gamma R$  方式の構成を図4に示す。制御ブロックは、基本波に関する制御角演算部、高調波に対する補正角演算部、及び系統電圧低下直後のみ動作する演算型  $\beta$  進めの三つに分かれる。このうち、基本波に関する  $A\gamma R$  と高調波に対する制御角補正は、それぞれのバルブの転流電圧(12相変換器の場合、6種類)ごとに制御角を演算し、それらの中の最小値を選択して出力する。一方、演算型  $\beta$  進めは、転流電圧絶対値の最小値を用いて制御角を演算する。

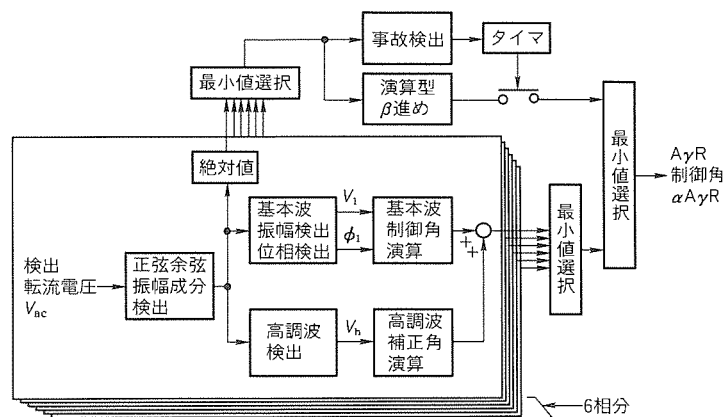


図 4. 開ループ  $A\gamma R$  方式の構成

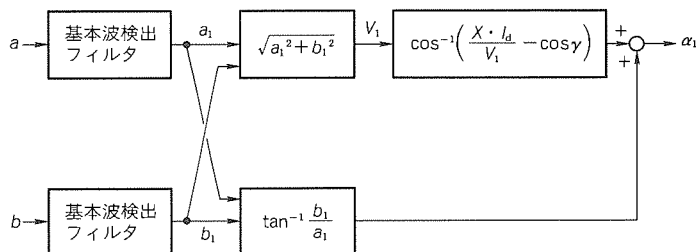


図 5. 基本波による  $A\gamma R$  ブロック図

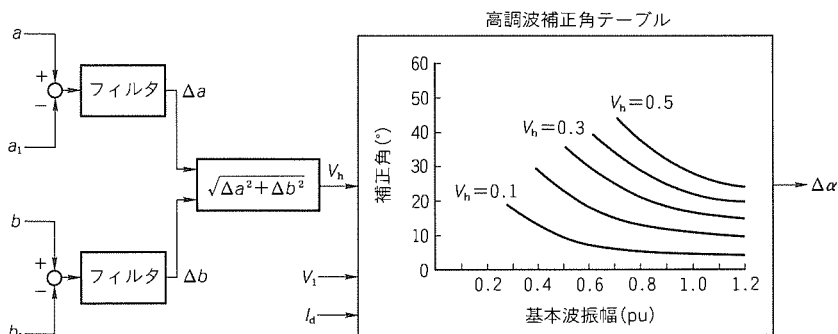


図 6. 高調波による制御角補正ブロック図

図5に、基本波電圧による  $A\gamma R$  ブロックの詳細を示す。二つの振幅成分それぞれに高調波を取り除くフィルタを通して基本波成分のみを取り出す。それらの絶対値から基本波電圧による制御角の関係をj用いて制御角  $\alpha$  を計算し、基準位相からの位相ずれを補正して出力する。

交流電圧に何らかの理由で高調波ひずみが発生すると、その位相関係によっては基本波電圧で演算される制御角  $\alpha$  では余裕角が不足する場合がある。振幅成分検出値  $a$ ,  $b$  には高調波成分も含まれており、図6に示すように、基本波成分を取り除いて高調波成分の大きさを検出し、あらかじめ計算されたテーブルを参照して、高調波が重畳した場合でも余裕角が確保できる制御角となるように補正をかける方式とした。テーブル作成においては、転流に最も大きく影響する2次高調波が転流時の逆バイアス電圧を最小にするような位相で重

畳される場合を想定して計算したものを使用している。

交流送電線の地絡事故等で急に系統電圧が低下した場合、なるべく制御角を速く進めて転流失敗を防ぎ、変換器の運転継続を図る必要がある。しかし、図5、図6に示す経路は内部にフィルタを含むため、正確な演算結果が出力されるまでに1サイクル(16.7ms)程度の時間を要する。その間転流失敗が継続するおそれがあり、極力速く転流失敗を防止する制御角とするため、電圧低下直後の一定期間、高速に制御角

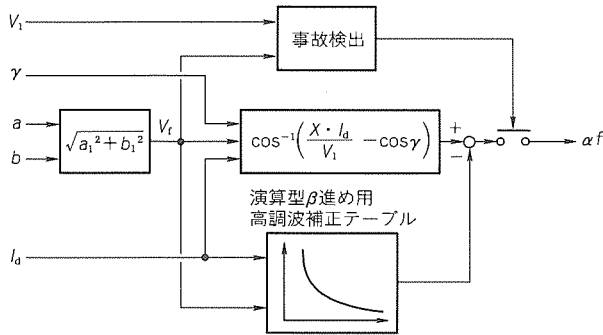


図7. 演算型β進めの構成

を進める演算型β進めを付加している。このブロック図を図7に示すが、図3の電圧振幅出力が一定レベル以下になったことを検知して、演算型β進めブロック中の出力スイッチをオンにする。演算型β進めのブロックは時間遅れを生じるフィルタを持たないので、系統電圧低下から2ms程度で制御することができる。演算型β進め演算は基本波・高調波に分離しない電圧振幅の瞬時値を用いるのでAγRとしては正確さを欠くため、1サイクル期間で出力スイッチをオフにする。

図8に、受電側変換所至近端での交流系統3LG-3LO事故時の運転継続制御のデジタルシミュレーション例を示す。演算型β進めによって事故発生後2ms程度で制御角を90°まで進めている。また、事故回復後は交流電圧波形が大きくひずんでいるにもかかわらず、転流失敗することなく直ちに送電電力が立ち上がっており、交流母線電圧には問題となるレベルの過電圧は発生しておらず、この方式の交流系統事故時運転継続制御の有効性を示している。

### 3.2 直流系低次調波振動の抑制制御

変換所の近くで発生した交流系統事故を除去した直後に交

流電圧が低次高調波でひずむことがあり、これが変換器動作を通して直流系統に侵入し、直流の電圧・電流・電力の大きな脈動となって現れる場合がある。脈動の発生メカニズムを図9に示す。

大容量の変換所では、変換所から見たAC系インピーダンスの並列共振点が第2次調波周波数に近づいてくると、及び事故除去時の変圧器インラッシュ電流に偶数次(特に2次)成分が多く含まれることから、特に交流系統の2次電圧ひずみによって、直流系には基本周波数の脈動が生じることになる。この脈動成分はインラッシュ電流の減衰に伴って低減していくが、直流電力の品質面からは早期に減衰させる方がよく、何らかの対策を講じることを必要とする。対策としては、2次調波フィルタ等で交流系統の2次インピーダンスを小さくする、又は変換器に脈動を抑制する制御機能を付加する方法が考えられ、経済性と対策の必要度合いから後者が得策となる。図10に、脈動抑制機能を変換器制御に付加したときの制御ブロック図を示す。変換器を流れる直流電流を検出し、基本周波数の脈動成分を中心に応答するハイパ

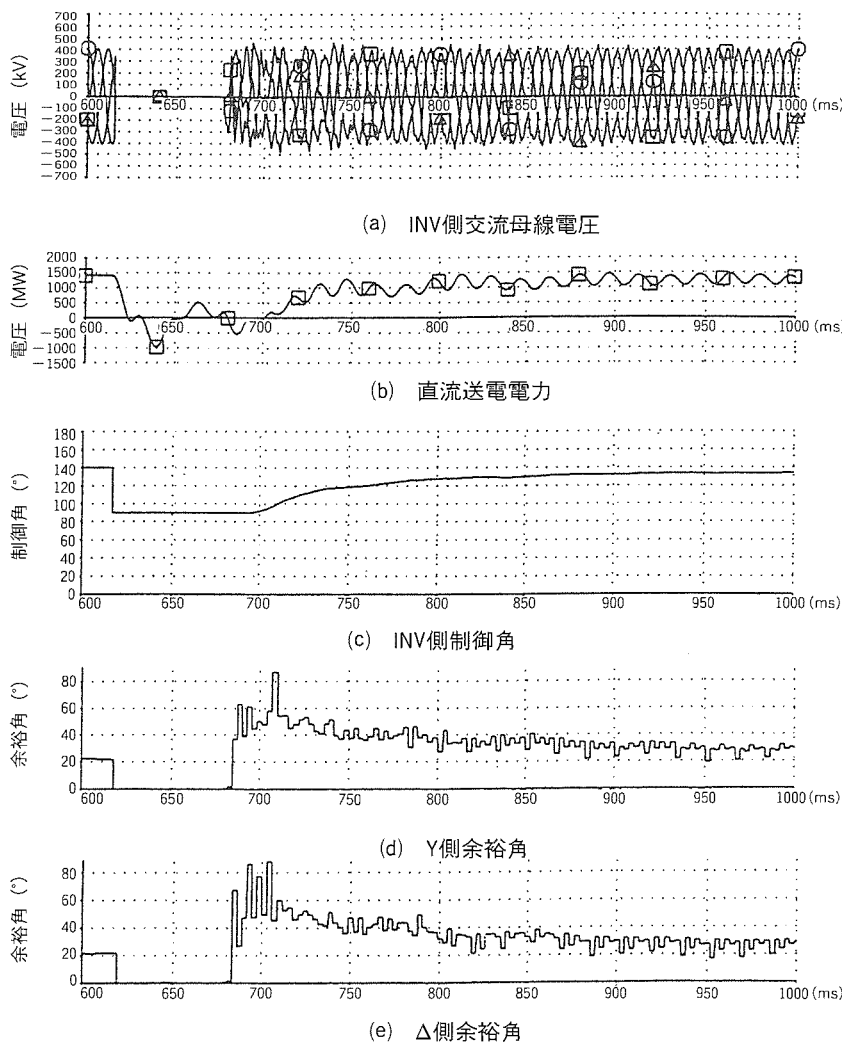


図8. 運転継続シミュレーション解析例

スフィルタで処理された点弧角変調量 $\Delta\alpha$ を通常の変換器制御角指令値に加算して位相制御回路の入力とすることにより、直流系の電圧・電流・電力脈動を抑制する。

図11に、系統事故時のシミュレーション結果を示す。脈動抑制制御がない場合に比較して直流電圧・直流電流・直流電力の脈動成分が少なくなっており、交流系統電圧ひずみも速く減衰している。

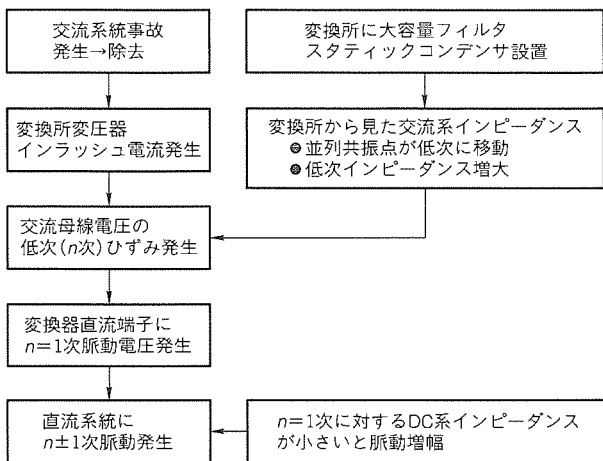


図9. 直流系脈動発生メカニズム

### 3.3. 発電機との協調制御

交流送電系統では、タービンの出力と発電機の出力は交流系統の同期化力によって一致し、発電機の周波数は系統の周波数に一致している。ところが、発電機出力を直流単独送電で交流系統に送電する場合は同期化力が存在せず、タービンの出力と発電機の出力(=直流送電電力)とは一致しない。タービンガバナはこの不一致を解消するように動作しようとするが、応答速度が遅く、発電機の周波数変動が大きくなる。

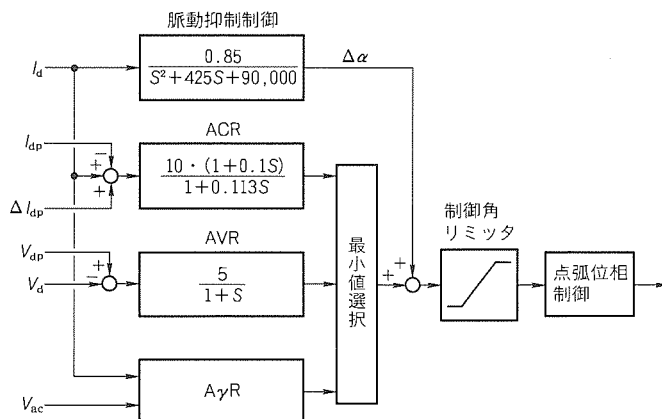
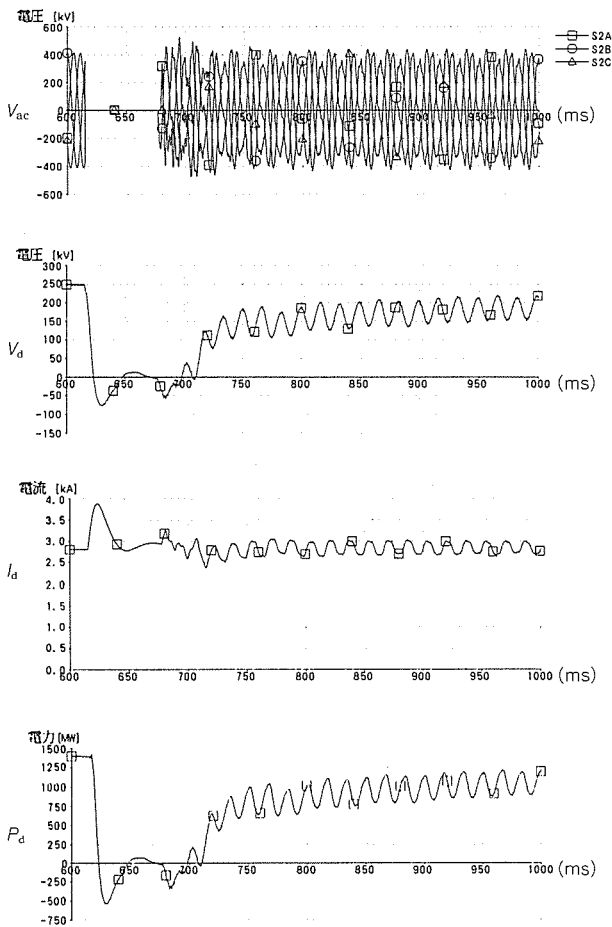
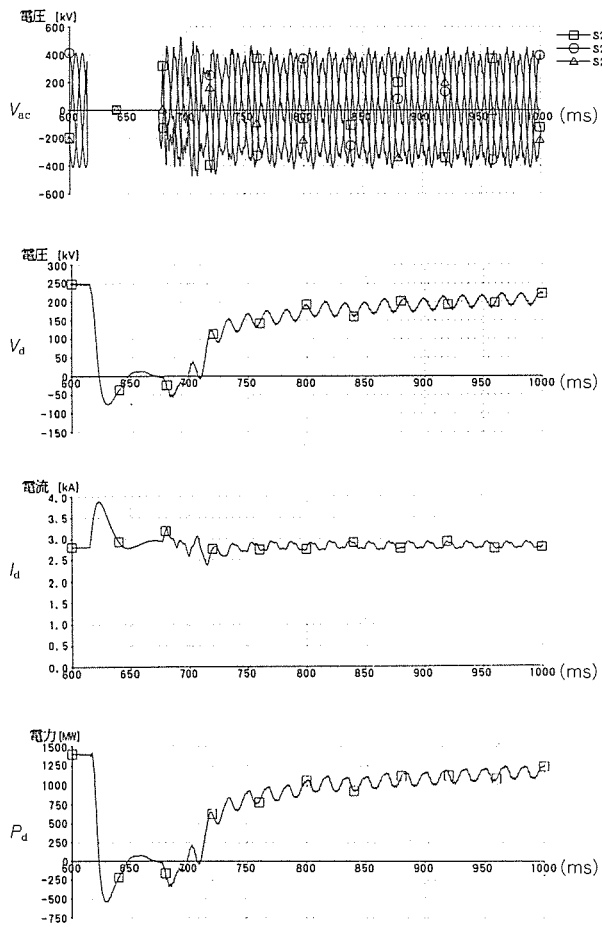


図10. 脈動抑制機能を入れた変換器制御



(a) 脈動抑制制御なし



(b) 脈動抑制制御あり

図11. 脈動抑制制御シミュレーション結果

これに対し、下記項目を考慮した発電機との協調制御方式の検討・開発を行っている。

- 特別な改造を加えることなく、従来のタービン発電機を使用できること
- 周波数変動を許容値内に抑えて、発電機の安定運転を継続可能とする
- 発電所との情報伝送を基本的に必要としない

図12に、発電機との協調制御ブロックを示す。送電端変換所母線の周波数を検出して、基準周波数との偏差に比例する出力と積分出力との和に応じて直流電力を調整することにより、発電機の回転数を一定に保って運転する(AFR)。図に示す協調制御運転中に、交流系統又は直流系統で事故が発生したときの応答を調べた。変換器制御は前項に述べた交流系事故時の運転継続制御を行うことを前提としている。その解析の一例を図13に示す。事故後の電力動揺を素早く抑制している。

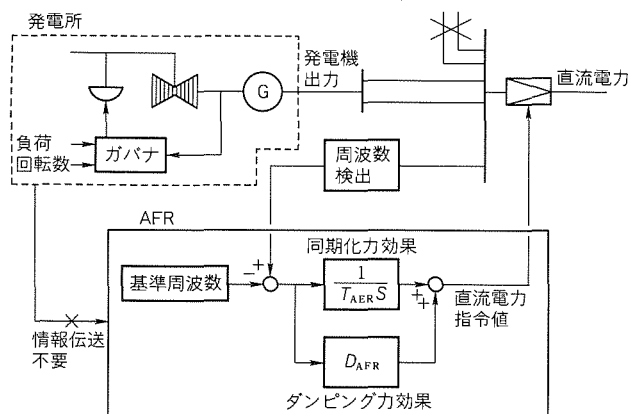
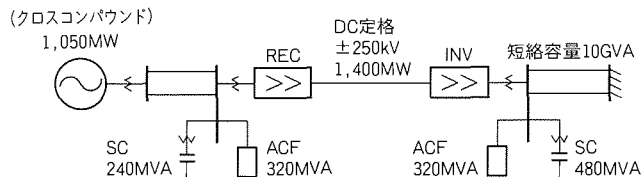


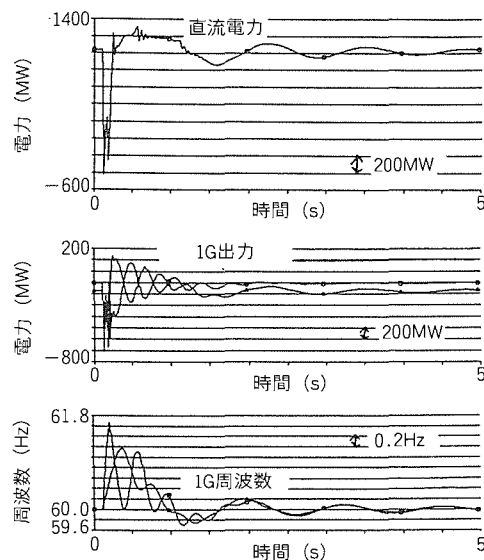
図12. 発電機との協調制御

#### 4. 直流送電用制御・保護装置

交流系統の保護装置には32ビットCPUを適用した演算周期30°のデジタルリレーが導入されているが、直流送電用の制御・保護装置用にはサイリスタのオン/オフ制御のために交流系統の保護リレーよりも高速のCPUが要求される。



(a) 解析系統



(b) INV側交流系事故時の動作シミュレーション結果

図13. 直流単独送電時の系統事故解析例

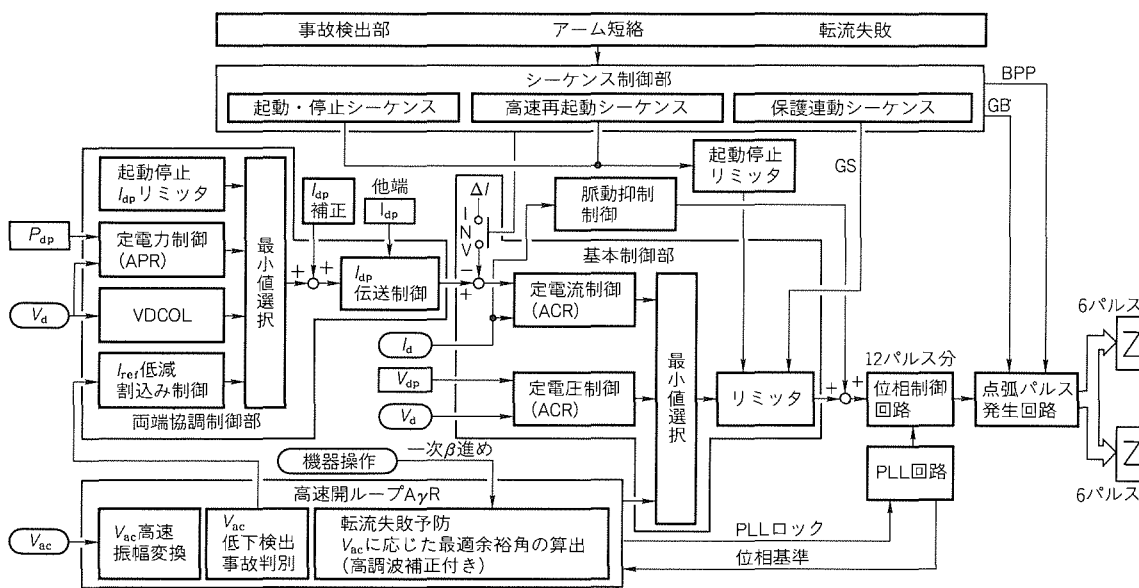


図14. 検証用変換器制御装置の機能ブロック図

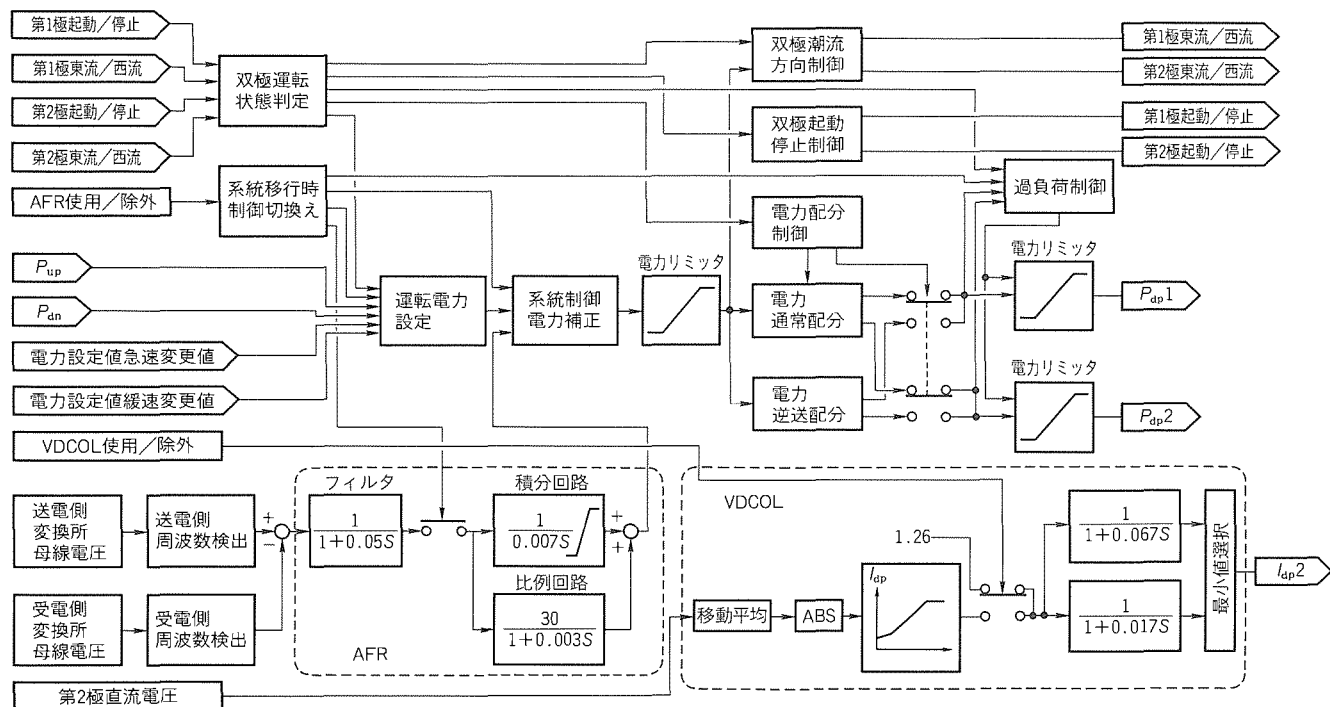


図15. 検証用発電機単独運転制御装置の機能ブロック図

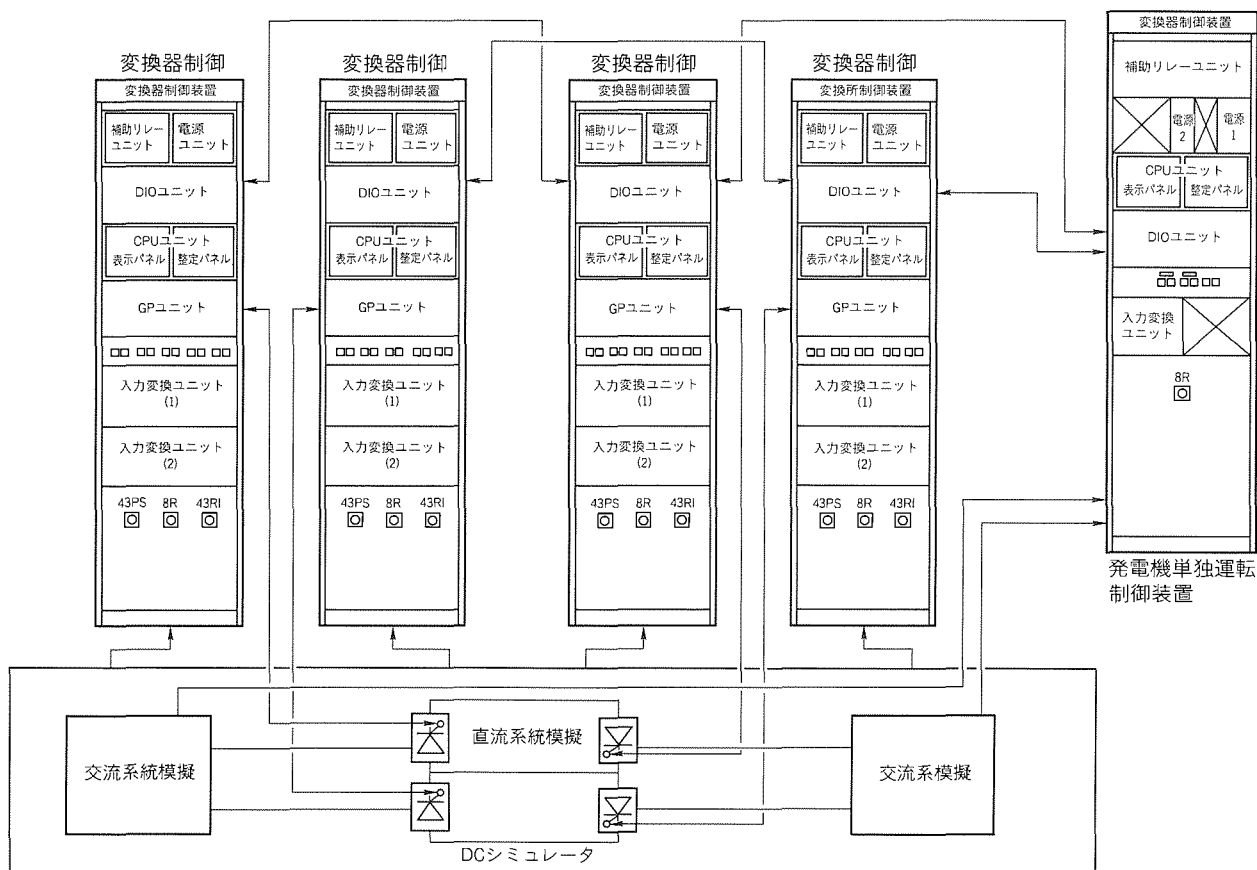


図16. DCシミュレータと検証装置の組合せ構成

前述の新たに開発した制御方式の検証用試作装置はデジタルリレー用のCPU基板を用いており、図14に機能ブロックを示した検証用変換器制御装置は、高速化のために複数の

CPUに制御演算を分散させることによって演算周期7.5μsを達成している。一方、図15に機能ブロック図を示した検証用発電機単独運転制御装置は、変換器制御装置ほどの高速性

は要求されないので、演算周期 30°で制御を実行している。  
DCシミュレータと検証装置の組合せ構成を図 16 に示す。

## 5. むすび

直流送電用に開発した制御・保護技術について述べた。

直流送電の送電信頼度を向上させる新たな運転制御方式を開発し、デジタルシミュレーションで確認するとともに、検証装置を試作して高性能DCシミュレータ上で多数の各種事故を含む試験を実施した結果、新制御方式の性能を確認できただけでなく、実システムへの適用に対して十分な見通しを得ることができた。

## 参考文献

(1) 佐藤雅一, 山地幸司, 関田昌弘, 玉井伸三, 藤井俊行,

土岐直寛, 林 成男: 交流系事故時の直流送電運転継続制御, 平成 7 年電気学会全国大会講演論文集, 6-348 ~ 349 (1995)

(2) 野林正盛, 宮本喜弘, 北野 悟, 石黒富士雄, 林 成男: 交流系事故時に直流系統に励起する低次調波振動の抑制対策, 平成 7 年電気学会全国大会講演論文集, 6-314 ~ 315 (1995)

(3) 東 正樹, 川原昭人, 加藤和男, 石黒富士雄, 上田 広: 直流単独送電の発電機との協調制御, 平成 7 年電気学会全国大会講演論文集, 6-317 ~ 318 (1995)

(4) 松野克彦, 山地幸司, 鈴木昭男, 石黒富士雄, 徳原克久: 直流系パワーモジュレーション制御による交流系統安定化制御, 平成 7 年電気学会全国大会講演論文集, 6-346 ~ 347 (1995)



# 直流送電用機器・装置の 開発検証試験

吉田良男\* 色川裕之\*\*\* 内藤初彦+++  
佐藤雅一\* 竹内 博+  
橋本隆輝\*\* 尾上達也++

## 1. ま え が き

直流 500 kV 送電用機器は、大容量直流送電の実現に向けて開発が進められており、交直変換所機器として、直流 GIS (Gas Insulated Switchgear: ガス絶縁開閉装置) 及び変換用変圧器・直流リアクトルは、基本性能の検証試験を工場で良好に完了し、1995年10月から関西電力(株)山崎実験センターにおいて長期性能確認試験を開始した。

一方、直流系統の制御方式の評価・検証のために制御装置を試作し、電力系統シミュレータと組み合わせて試験を実施した結果、制御のアルゴリズムの妥当性を確認したので、これらを合わせて述べる。

直流 GIS は、従来から多用されている SF<sub>6</sub> ガス絶縁方式の交流 GIS と同様に、高信頼性・縮小性・保守の省力性等の長所があり、交直変換所の開閉装置として今後の適用拡大が予想される。

直流 500 kV 用の直流 GIS は世界的にも例がないため、開発に当たっては特に直流に対する絶縁性能の確保を主体に、基礎・要素モデルの試作から着手した。そして、直流 500 kV のプロトモデルを試作し、各種検証試験を良好に終了したので、長期にわたる絶縁性能を確認するために長期性能確認試験を実施中である。

交直変換設備には、変換器とともに変換器への電圧変成を行う変換用変圧器と、直流脈動分の平滑化や軽負荷時の電流断続防止のための直流リアクトルが置かれる。これらの巻線機器には、冷却や絶縁特性の優れた油入複合絶縁構造が適用され、直流 500 kV 送電用として開発してきた絶縁構成は、各種の工場耐電圧試験において良好な結果を得ている。

一方、季節の温度変化による影響や、絶縁に対する長期の課電による低破壊確率現象の確認は、実使用の観点から肝要である。今回の検証は、巻線機器の実規模絶縁モデルに実器の運転期間相当の課電を実施し、これら長期の絶縁性能を確認するものである。

直流送電制御系の動作は、系統に発生する高調波等の影響を受ける。このため、その検証には、制御装置と直流系統及び交流系統で構成される電力系統とを組み合わせ検証す

る必要がある。今回、開発した発電機協調制御及び運転継続制御等のアルゴリズムの有効性を検証するため、制御装置を試作し、リアルタイム電力系統シミュレータと組み合わせ検証試験を実施した。検証に用いたシミュレータ装置及び検証試験結果について述べる。

## 2. 直流送電用機器の長期性能確認試験

### 2.1 長期性能確認試験の概要

今回の研究で開発した直流用各機器に対して、基本性能の検証を行うとともに、長期にわたる絶縁の信頼性検証を行う。このために、開発した直流 GIS 及び変換用変圧器・リアクトル各機器の信頼性検証モデルを山崎実験センターに据え付け、電圧加速による長期信頼性の検証が計画された。試作した直流 GIS のプロトモデルと変換用変圧器・直流リアクトルの総合絶縁モデルが、工場試験後据付けられ、現在長期性能確認試験を実施中である。

### 2.2 直流 GIS

直流 GIS 開発の一環として各構成機器のプロトモデルを試作し、各種性能検証を実施して良好な結果を得ている。

そして、この開発の最終段階として、長期的な絶縁性能の検証を主目的に、1年間にわたる長期課電試験を継続中である。これにより、下記の3項目について検証を行う。

- (1) 長期課電による絶縁性能維持の確認  
加速劣化(過電圧条件)による30年相当の検証を行う。
- (2) 周辺環境(温度・湿度)変化による絶縁性能維持の確認  
屋外環境での四季を通じた検証を行う。
- (3) 絶縁設計の裕度確認  
長期課電後に工場に持ち帰り、破壊試験によって確認を行う。

表 1. 直流GISの定格事項

項 目	仕 様	
定 格 電 圧	500kV	
定 格 耐 電 圧	雷インパルス	1,300kV
	開閉インパルス	1,175kV
	DC	±750kV 2時間 → ±900kV 1分間 → ±750kV 2時間
	AC	559kV <sub>rms</sub> 30分間 → 645kV <sub>rms</sub> 5分間 → 559kV <sub>rms</sub> 30分間
	極性反転	±625kV 2時間 → (1分) → ∓625kV 30分
定 格 電 流	2,800A	
短時間過負荷	3,500A (30分)	
定格短時間耐電流	20kA, 2秒	

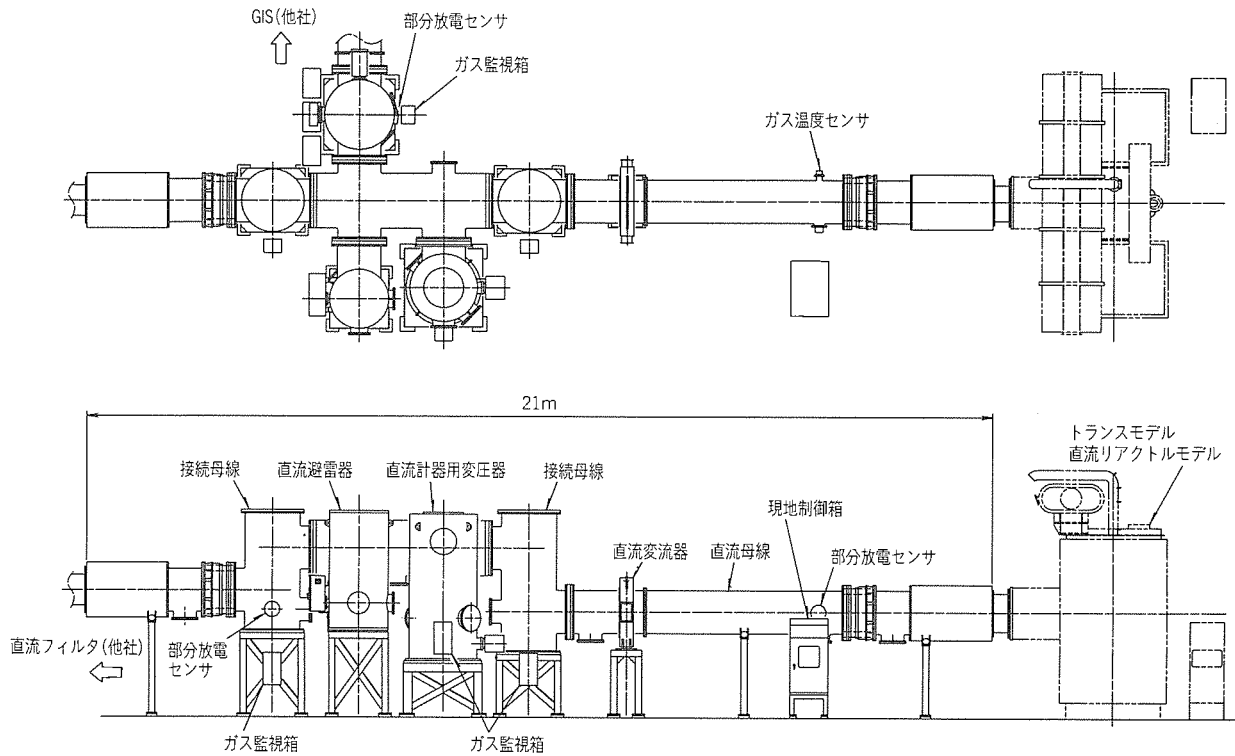


図 1. 直流GIS供試器の構成

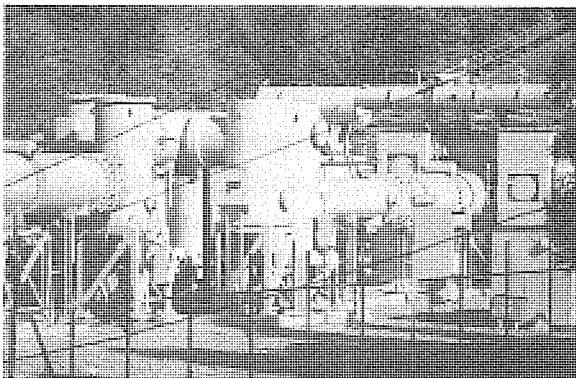


図 2. 直流GISの長期性能確認試験実施状況 (関西電力㈱山崎実験センター)

### 2.2.1 供試器の構成

長期性能確認試験に供した直流 GIS の構成機器は、直流母線、直流避雷器、直流断路器 (接地開閉器を含む。)、直流計器用変圧器、及び直流変流器である。さらに、長期健全性を確認するための記録装置を付加することで、供試器の状況や故障情報の遠隔監視を可能とした。表 1 に、直流 GIS の共通的な定格事項を示す。また、供試器の構成を図 1 に、現地の長期性能確認試験実施状況を図 2 に示す。

他社供試器 (直流 GIS、直流フィルタ) とは GIS 母線又はガス・油ブッシングで接続され、一括課電される。主回路課電用の高圧直流電源も、ガス絶縁方式として直結されているため、課電設備側にも高圧充電部が露出せず、安定した供試形態を実現できた。

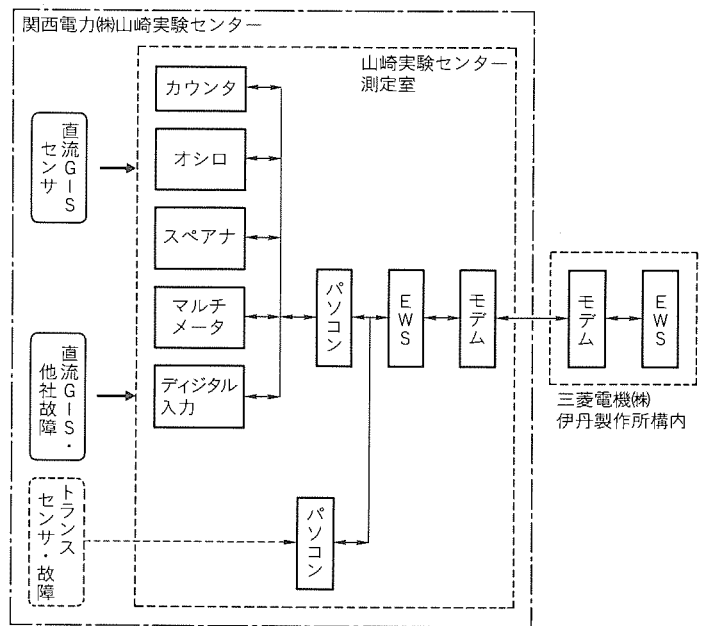


図 3. システム構成

### 2.2.2 試験項目

直流 GIS を構成する供試器は、工場で精密受入れ相当の試験を実施し、初期性能を確認した後に出荷・据付けを実施した。

試験電圧を  $1.25E$  (625 kV) に設定し、1 年間の課電によって 30 年間相当以上の耐電圧性能を検証する予定である (電圧指数:  $n = 20$ )。また、今回適用された直流 GIS の記録装置の構成を図 3 に示す。このシステムは 24 時間連続運



転され、計測項目ごとに設定された計測間隔でデータの取込みを行い、長期的なトレンドを記録する。このシステムに使用された各種構成機器を表2に示す。これらの測定システムのデータを集録し、実機の監視システム設計に反映する。

以下に監視・測定項目を示す(括弧内はセンサ数)。

- 課電電圧(1), 充電電流(1)
- 外気温(1), タンク温度(1)
- ガス圧力(1/1ガス区分)
- 部分放電(4), 直流避雷器漏れ電流(1)
- 直流計器用変圧器二次電圧(1)
- 故障接点(1/1故障接点)

以下、長期試験に際しての性能確認事項を、機器ごとに示す。

また、山崎実験センターでの試験項目及び工場持ち帰り後

の試験項目をそれぞれ表3及び表4に示す。表5には、長期性能確認試験の概略スケジュールを示す。

(1) 直流母線

直流ガス絶縁母線の開発に際しては、絶縁耐力確保のための絶縁物の帯電抑制や金属異物対策などが、直流特有の技術課題である。そのための配慮として、絶縁スペーサのセミコーン形状の採用、及び電極コーティングと異物捕そく(捉)装置の配置を行っており、これら絶縁設計の妥当性を確認する。

(2) 直流避雷器

定格電圧500kVの直流避雷器は、LL特性という非常に低い保護レベルを実現しており、試験電圧625kVは素子の電圧ストレスが過大となるため、その適正化のために素子枚数を増加して対応した。酸化亜鉛形避雷器の劣化は、避雷器

表2. 記録装置の構成機器と機能

構成機器		機能
E W S		データの表示・伝送・保存, 各社故障情報の統括監視
パソコン(直流GIS, トランス)		データの収集・保存
汎用計測器	オシロスコープ	設定条件下での部分放電波形の測定
	スペクトラムアナライザ	設定条件下での部分放電波形スペクトルデータの測定
	マルチメータ	直流GISセンサデータの測定

表3. 山崎実験センターでの試験項目

No.	試験項目	目的	方法・手順
1-1	一般特性試験	1. 組立て状況の健全性確認 2. 長期課電後の特性変化の確認	1. 直流電流を通電し、電圧降下法で主回路抵抗を測定 2. 各シール部のガス漏れを蓄積法で測定 3. 長期課電前後のガス中水分量を測定 4. 各耐圧試験前後に絶縁抵抗を測定
1-2	コンディショニング試験	1. 直流電圧を印加し、GIS組立て後のコンディショニング試験として実施 2. 輸送及び現地組立て据付け後の健全性の確認 3. 長期課電前の健全性の確認	1. DC電圧を所定の印加パターンで印加
1-3	直流耐電圧試験	1. 長期課電前に輸送及び現地組立て据付け後の健全性を確認 2. 長期課電終了時に実施する極性反転試験後に耐電圧性能を確認	1. 主回路にDC 625kV(1.25E)を10分間印加、正極と負極について実施
1-4	長期課電試験	1. 長期間の課電性能の確認	1. 主回路-大地間に625kV(1.25E)のDC電圧を負極性6か月、正極性6か月の計12か月印加
1-5	極性反転試験	1. 極性反転における絶縁性能の確認	1. DC 500kV(1.0E)を2時間印加後直ちに、逆極性のDC 500kV(1.0E)を2時間印加 2. 長期課電試験中間の極性を変える時、及び長期課電試験終了時に実施
1-6	清浄度確認試験	1. 長期課電後に、特に有害な異物が発生していないことを確認	1. 供試器の解体直後にタンク底面に存在する異物を採取分析

の抵抗分漏れ電流の増加として現れるが、酸化亜鉛素子はセラミックコンデンサ材料並みの誘電率を持つので、電圧にリップルがあれば、多くの容量性電流を漏れ電流に含んでしまう。このためフィルタで抵抗分漏れ電流のみを取り出して劣化検出の精度向上を達成した。

(3) 直流断路器・接地開閉器

直流断路器・接地開閉器の開発に際しては、絶縁耐力確保のための金属異物対策が直流特有の技術課題である。

可動側・固定側電極とも金属接触子によるしゅう(摺)動

部が存在し、金属異物が発生し得るので、想定する異物が存在してもせん(閃)絡に対して裕度を持つことに加え、タンク底面を浮上電界値以下として異物浮上を抑制した。

(4) 直流計器用変圧器

直流計器用変圧器は一次電圧を抵抗体によって分圧し、二次電圧を計測する方式であるため、温度特性及び電圧特性に高精度な抵抗素子を適用した。しかし、抵抗体は抵抗素子と絶縁支持物で構成されるため、絶縁支持物の抵抗値の経年変化が問題ないことを確認する必要がある。また、過負荷運転

表4. 工場持帰り後の試験項目

No.	試験項目	目的	方法・手順
2-1	一般特性試験	1. 再組立て時の健全性確認	1. 直流電流を通電し、電圧降下法で主回路抵抗を測定
2-2	清浄度確認試験	1. 長期課電後に、特に有害な異物が発生していないことを確認 (解体部分の母線等は長期課電試験終了時に現地で実施)	1. 供試器のタンク底面に存在する異物を採取分析
2-3	商用周波耐電圧試験	1. 長期課電後の商用周波耐電圧性能の確認	1. 主回路-大地間に559kV(30分), 645kV(5分), 559kV(30分)のAC電圧を印加 2. 上記試験の559kVにおける部分放電電荷量を測定
2-4	直流耐電圧試験	1. 長期課電後の直流耐電圧性能の確認	1. 主回路-大地間・750kV(2時間), 900kV(1分間), 750kV(2時間)のDC電圧を正極性と負極性の1回印加
2-5	雷インパルス耐電圧試験	1. 長期課電後の雷インパルス耐電圧性能の確認	1. 主回路-大地間1,300kV(1.2/50μs)の雷インパルス電圧を正・負各3回印加
2-6	開閉インパルス耐電圧試験	1. 長期課電後の開閉インパルス耐電圧性能の確認	1. 主回路-大地間1,175kV(250/2,500μs)の開閉インパルス電圧を正・負各3回印加
2-7	極性反転試験	1. 長期課電後の極性反転における絶縁性能の確認	1. 主回路-大地間625kV(2時間)印加後1,175kV(250/2,500μs)の逆極性開閉インパルスを3回印加(正極性と負極性の2回実施)
2-8	断路器・接地開閉器特性試験	1. 希頻度開閉時の特性確認	1. 長期課電試験前と後での開閉特性を比較
2-9	避雷器特性試験	1. 避雷器長期寿命・実用性能の検証	1. 規定電流を流したときの課電電圧を測定
	漏れ電流試験		1. 測定電圧を印加したときの漏れ電流を測定
2-10	計器用変圧器特性試験	1. 計器用変圧器長期寿命・実用性能の検証	1. 課電電圧と二次出力電圧を比較し、誤差を確認
	漏れ電流試験		1. 規定電圧を印加したときの漏れ電流を確認
2-11	変流器特性試験	1. 変流器長期寿命・実用性能の検証	1. 数ターンの模擬一次回路を形成し、通電電流と二次出力電圧を比較して誤差を確認

表5. 長期性能確認試験の概略スケジュール

	1995年				1996年											
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
供試器搬入, 据付け	△															
コンディショニング試験		△														
耐電圧試験			△													
課電試験(負極)					-1.25E (-625kV)											
極性反転試験(負→正)									△							
課電試験(正極)										1.25E (625kV)						
極性反転試験(正→負)																△
耐電圧試験																△
余寿命試験(工場)																

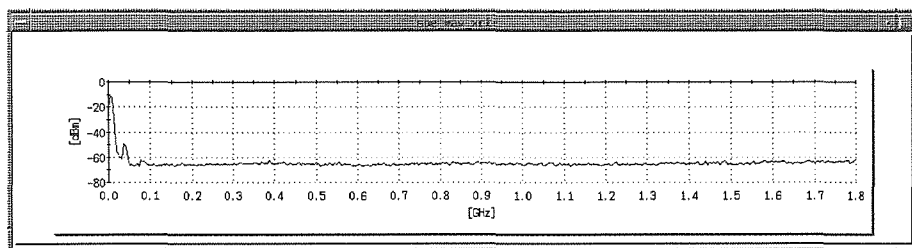


図4. スペクトラムアナライザ測定波形

表6. 直流線路用避雷器の漏れ電流測定結果

測定時点	据付け時	据付け1か月後
抵抗分漏れ電流	36 $\mu$ A	30 $\mu$ A
印加電圧	-625kV	-626kV
温度	19 $^{\circ}$ C	6 $^{\circ}$ C
漏れ電流オシロ ch2 : 全漏れ電流 50 $\mu$ A/div. ch1 : 直流分電流 10 $\mu$ A/div. 時間軸: 5ms/div.		

表7. 直流計器用変圧器の二次電圧測定結果

測定時点	据付け時	据付け1か月後
印加電圧	-625kV	-625kV
出力電圧 (直流計器用変圧器の表示値)	-626kV	-626kV

による抵抗の温度上昇が誤差に与える影響、及び長期的抵抗値変化の測定も行う。

### (5) 直流変流器

直流変流器は、二次側から一次電流と逆極性の電流を供給するゼロフラックス方式を採用しており、長期にわたる精度の安定度が必要である。長期試験では一次電流の通電は行っていないものの、GISと組み合わせて実環境下に置くことによって、電子回路の連続作動条件下での安定性や、耐候性及び試験終了後の特性変化について評価を行う。

#### 2.2.3 試験結果とまとめ

これらの直流送電機器は、'95年10月から長期課電を開始した。現在までの間、異常を示す部分放電はなく、各構成機器の状態を含め、良好な特性が維持されている。

##### (1) 記録装置による部分放電検出

部分放電については、内部電極形センサで検出した信号に統計処理を行い、必要に応じて波形データ及びスペクトルデータを収集可能である。現地で部分放電の発生は見られなかった。図4は、バックグラウンドノイズのスペクトラムアナライザ測定波形の例である。

##### (2) 直流避雷器漏れ電流

表6に、避雷器の漏れ電流の測定結果を示す。全漏れ電流

は、課電電圧のリップル(1kHz, 2.6%)の影響により、直流分を持つ振動性電流となる。抵抗分漏れ電流30 $\mu$ Aは、据付け時と比較して増加なく、良好であることが分かる。

##### (3) 直流計器用変圧器二次電圧

表7に、直流計器用変圧器の二次電圧の測定結果を示す。誤差は、仕様値(1%)間に収まっており、据付け後もデータに変化がないことから、良好であることが分かる。

今後、四季を経過する'96年9月まで課電を継続し、その後、初期特性確認項目に対応した測定及び各種耐電圧試験を実施する。さらに、絶縁の限界性能を確認し、最終的にこれらを総合した長期性能に関するデータを得る予定である。

### 2.3 変換用変圧器・直流リアクトル

高電圧・大容量の変換用変圧器や直流リアクトルには、絶縁及び冷却特性の良好な絶縁油とプレスボードによる複合絶縁構造が適用される。この構造については過去に材料特性などの基礎特性を確認している。

一方、清浄度の高い材料の使用、じんあい(塵埃)管理の行き届いた作業環境での組立て、及び高度な絶縁油のフィルタ処理技術の適用など、その後、絶縁製作レベルの向上がなされている。このような背景の下、今回の開発に当たり、第1ステップとして下記のように、あらためて基礎特性を確認した。

- 直流課電時の電圧分担を決定する絶縁物の抵抗率に関し、温度等のパラメータを変化させた特性の確認
- 向上した製作技術を適用した複合絶縁モデルに対する種々の耐電圧性能の確認

また、第2ステップとして、以下のことを実施した。

- 上記で確認した基礎特性を基に、電界解析による絶縁構成の検討
- 実規模の要素モデルを製作し、直流耐圧や極性反転耐圧等、いわゆる直流機器に課せられる工場試験の耐電圧特性を検証し、期待した絶縁性能を持つことの確認
- 一方、実使用における長期の課電運転を前提とすると、
- 絶縁のV-I特性として、課電が長期に及ぶに従い、発生確率の低い部分放電現象が確認されるようになること。
- 直流課電では、構成絶縁物の抵抗率比で電圧分担が決まるが、絶縁物の抵抗率は温度によって変化するため、

例えば、四季の温度変化に伴う電圧分担の変化があること。

など、絶縁の長期信頼性上考慮すべき項目がある。

そこで、現在、第3のステップとして、上記項目を確認するため、長期の実使用に相当する課電試験を実規模の総合絶縁モデルに対して実施している。

以下にその内容を述べる。

### 2.3.1 供試器の構成

#### (1) 供試器の仕様

供試器は、DC 500 kV に適用する変換用変圧器及び直流リアクトルの主要絶縁構成部分を実規模で構成したものであり、その仕様は表 8 のとおりである。

#### (2) 供試器の構造概要

変換用変圧器には、高電圧・大容量器として実績があり、変換用変圧器としても多くの利点がある外鉄形を使用する。また、直流リアクトルは、外部磁界を低減する磁気シールド

表 8. 供試器の仕様

定格電圧	DC±500kV	
結線図		
	直流	±750kV 60分
絶縁強度  (工場出荷時に実施する耐電圧試験に相当する供試器の設計絶縁強度)	雷インパルス	1,300kV
	開閉インパルス	1,300kV
	交流	559kV 30分
		↓
		645kV 5分
		↓
	559kV 30分	
	極性反転	±625kV 2時間 (1分以内)
		↓
		±625kV 30分

付きとし、インダクタンスの直線性を確保するため空心形構造とする。

供試器は、これら双方の構造について検証するために、変換用変圧器と直流リアクトルの巻線部を備えるほか、リード部及び引出し端子となるブッシング部を備え、総合絶縁モデルとなっている。また、検証対象となる部位については、寸法的にも実器相当の構成としている。なお、この供試器の構造概要を図 5 に示す。

#### (3) 長期性能検証のための構成

長期性能検証の実施のための供試器では、

- 供試器温度を実器運転状態相当の温度とするためのヒーティング装置
- 長期課電検証中の供試器状態のデータを継続的に取得するための各種センサ及びデータ処理装置

を具備している。

表 9 は、上記各種取付けセンサの一覧を、また図 6 は、ヒータ及び各種センサの配置を示したものである。なお、データ処理装置は近接する監視室に置かれ、供試器とデータ処理装置間のデータ伝送は、外部ノイズに影響されない光ファイバを用いている。図 7 は、監視室内に置かれたデータ処理装置の外観である。

### 2.3.2 試験項目

供試器に対する試験は、大きく分けて三つのフェーズとなり、その内容は表 10 に示すとおりである。

なお、図 8 はこのうち長期課電時の供試器の状況を示したものである。

### 2.3.3 試験結果とまとめ

供試器は、表 8 に示す絶縁強度があることを初期特性として確認後、'95年10月から長期課電に移行し、季節的要因による温度変化を受けながら課電を継続中である。

長期課電では、現在まで異常を示す部分放電はなく、漏れ

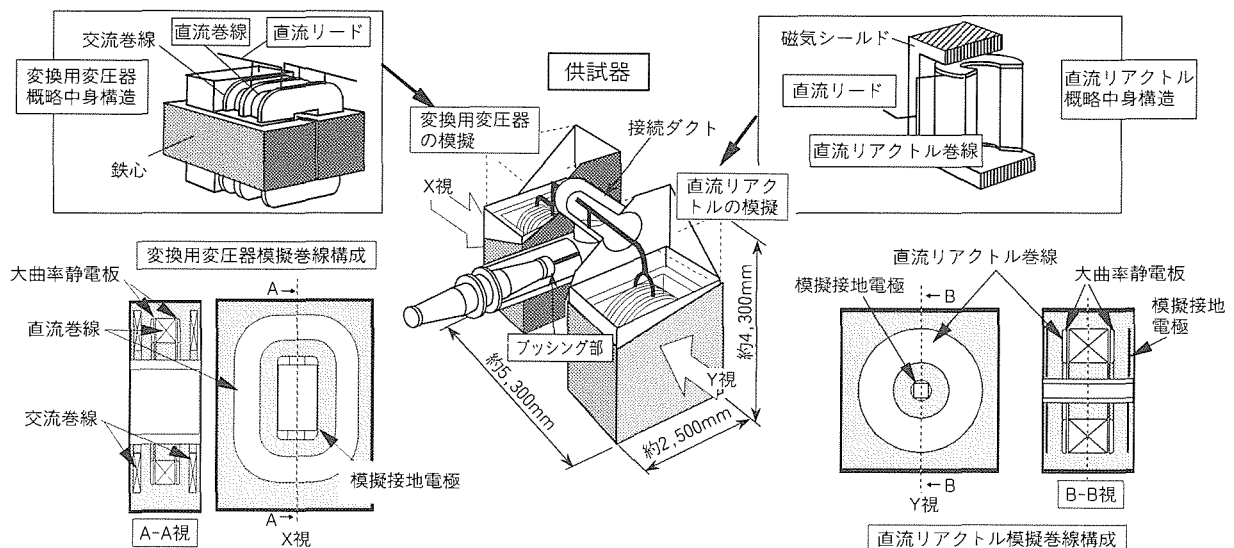


図 5. 供試器の構造概要

表9. 取付けセンサー一覧

センサ項目	部分放電電流センサ	油中超音波マイク	漏れ電流センサ	油温度センサ
個数	2個	4個	2個	2個
目的	接地側電極に流入する部分放電による高周波電流の測定	部分放電の発生に伴って生じる部分放電音の測定	絶縁抵抗の特性の変化を示す漏れ電流の測定	試験条件としての供試器温度の測定

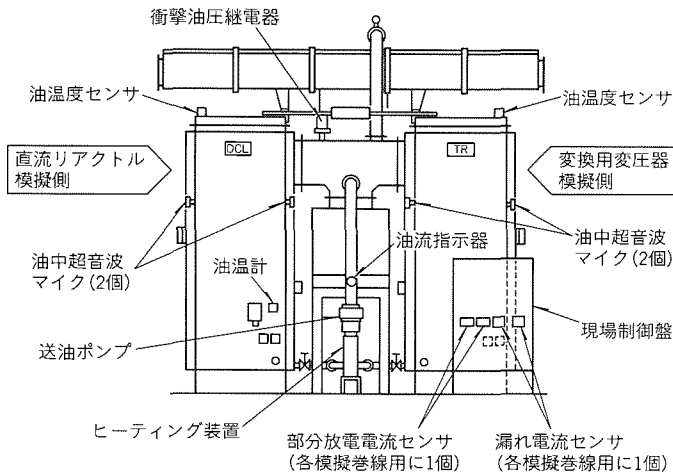
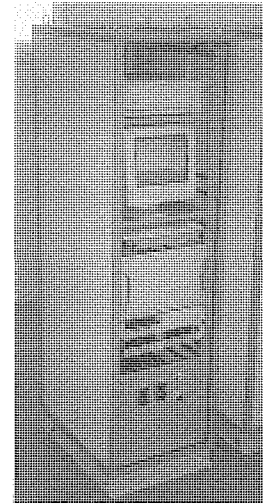


図6. ヒーティング装置及びセンサ配置



各データ処理装置は、各種センサからのデータの格納機能のほか、1日の特性変化や、検証開始時点からの動向をグラフ化して表示する端末機能、更に上位の記録装置へのデータ伝送のインタフェース機能も保有する。

図7. データ処理装置の外観

表10. 試験内容と項目

フェーズ	試験目的	試験項目・内容
初期特性の確認 (製作及び 据付け完了時)	適用材料固有の特性ばらつきや、製作公差に起因する供試器固有の特性値の確認	絶縁抵抗測定、漏れ電流測定、tanδ、静電容量測定、絶縁油特性・油中ガス分析
	製作中又は据付け工事中万一の不具合による異常がなく、設計期待どおりの性能があることの確認	製作完了時、絶縁強度を確認する各種耐電圧試験を実施、また、現地据付け後、DC耐電圧試験を実施
	ヒータやセンサ等の周辺機器の動作確認	センサ出力確認試験 温度上昇試験
課電時の特性確認 (長期課電時)	過電圧(DC500kV×1.25)印加による加速試験条件の継続に加え、実運転で想定される極性反転操作も取り入れた状況下での特性変動の確認	漏れ電流測定 部分放電測定 絶縁油特性・油中ガス分析
課電完了後の特性確認 (長期課電完了後)	課電試験開始時の初期特性からの変化確認	ヒータの温度上昇試験を除く上記初期特性確認フェーズの試験を実施
	実使用期間に相当する長期課電実施後の限界性能の確認	供試器に過電圧を印加し、耐電圧の限界値を確認

電流も、問題となる変動のない良好な特性が維持されている。今後、四季を経過する'96年9月まで課電を継続し、その後、初期特性確認項目に対応した測定及び各種耐電圧試験を実施する。

また、最終的に供試器に対して絶縁の限界性能を確認し、総合的な長期信頼性に関するデータを得る計画である。

### 3. 制御保護装置のリアルタイム電力システムシミュレータによる検証試験

#### 3.1 試験装置の概要

##### 3.1.1 リアルタイム電力システムシミュレータ

このシミュレータは、直流系統を含んだ大規模電力システムの種々の現象をリアルタイムに解析できるアナログ素子、ディ

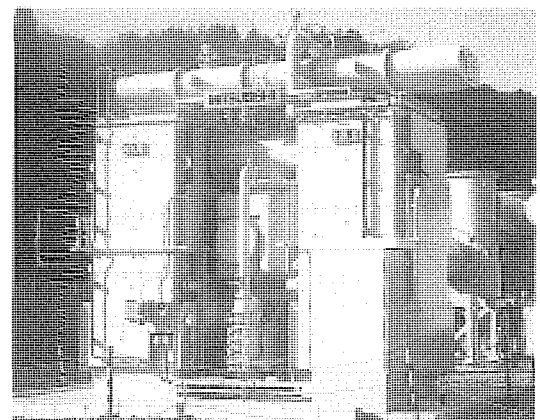


図8. 長期課電時の供試器の状況

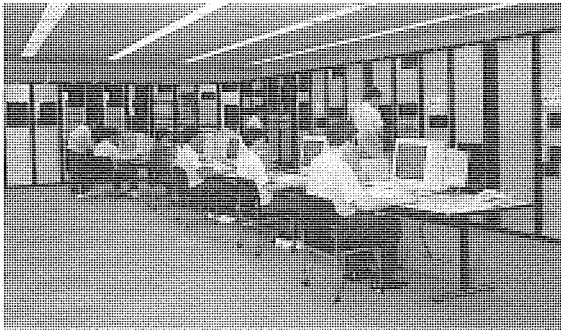


図9. リアルタイム電力システムシミュレータ

表11. シミュレータの主な仕様

電圧	100V(線間電圧)	
電流	153mA	
インピーダンス	377Ω(1H, 60Hz)	
インピーダンス比	実系統と1:1	
発電機モデル	6機	パークモデル演算方式(デジタルモデル) クロスコンパウンド機, タンデム機, 水力機, AVR, ガバナ等の制御機能付き
変圧器モデル	25台	可飽和変圧器, リニア変圧器の組合せによる 励磁特性を模擬
送電線モデル	26ユニット	L, C, Rによるπ型等価回路 ねん(燃)架・非燃架系に対応可能
HVDCモデル	8台	他励式12相変換器 サイリスタのターンオフ時間設定可能 負性抵抗による抵抗分補償
その他	アレスタ, フィルタ, 遮断器モデル, 負荷モデルほか	

表12. シミュレータの特長

高いモデル精度	<ul style="list-style-type: none"> <li>各モデルの諸特性を詳細に模擬</li> <li>フレキシブルな系統構成</li> <li>電子回路による抵抗補償用負性抵抗を採用</li> <li>ブロック図入力方式によるモデル・制御特性の変更(System Build)</li> </ul>
充実したマンマシンインタフェース	<ul style="list-style-type: none"> <li>EWS上のアニメーションパネルを使った設定操作</li> <li>データベースを使用したシミュレータモデル定数の計算</li> <li>瞬時値処理, 各種演算処理, 統計処理機能を持ったデータ収集装置</li> </ul>
シミュレーション効率化	<ul style="list-style-type: none"> <li>実制御・保護装置を接続し検証できる外部機器インタフェース</li> <li>自動試験用シミュレータ制御機能</li> </ul>

デジタル素子を用いたハイブリッド型のシミュレータである。図9にシミュレータの外観を、また表11, 表12に主な仕様、特長をそれぞれ示す。

このシミュレータを用いて今回開発した制御装置の検証試験を実施し、設計どおり正常に動作していることを確認した。図10に検証試験で使用した系統を示し、図11にこの系統の周波数特性( $f-Z$ 特性)を示す。図11の結果はデジタルシミュレーション(EMTP)の結果ともよく一致している。

HVDC変換所周辺を詳細に模擬し、変換所より遠い系統は等価回路に集約した。また、直流系統の解析に大きな影響を与える直流回路内の抵抗分については負性抵抗要素で補正した。

### 3.1.2 制御装置

今回試作した単独送電及び発電機協調制御装置のブロック図を図12に示す。この制御装置はAPRや今回開発したAFR等で構成される。図に示すブロックをi386のマルチCPU構成で実現している。

図13に、運転継続制御装置のブロック図を示す。この制御装置は直流電流制御(ACR), 直流電圧制御(AVR)及び今回開発した余裕角制御(A $\gamma$ R)で構成される。

図14に、今回開発した余裕角制御方式のブロック図を示す(詳細は、この特集号の「直流送電システムの制御・保護方式の開発」を参照)。図13, 図14に示す制御ブロックを32ビット汎用CPU及びDSPのマルチCPU構成で実現している。図15に、実際に試作した制御装置の外観を示す。

### 3.2 試験結果

試作制御装置とシミュレータを用いて、図10に示す試験回路で前述の制御ブロックの検証を実施した。以下に試験結果を述べる。

#### (1) 単独送電の事故時協調制御試験

図16に、単独送電の事故時協調制御の試験

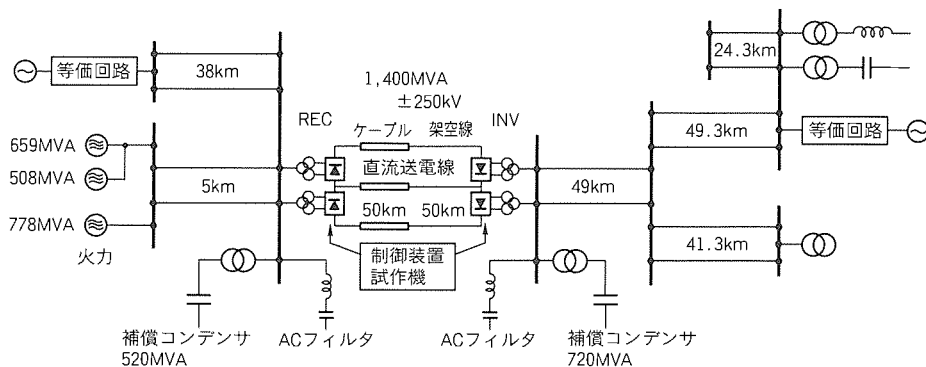
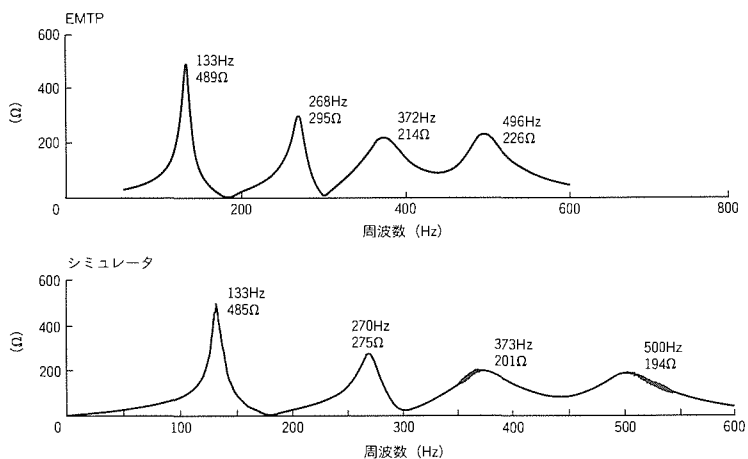
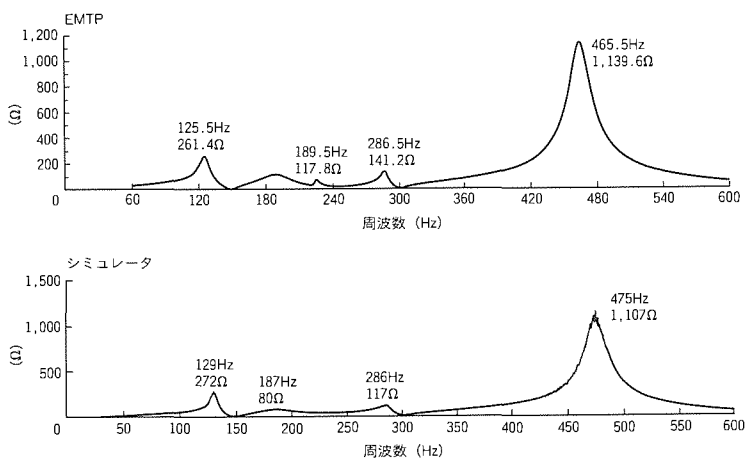


図10. モデル系統図



(a) 逆変換側交流系統



(b) 順変換側交流系統

図11. 周波数特性 (f-Z特性)

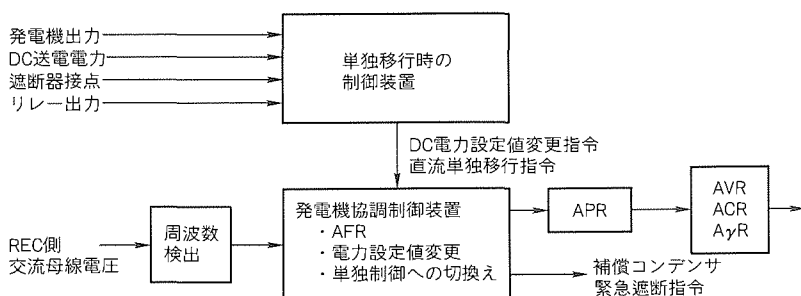


図12. 試作装置の概念図

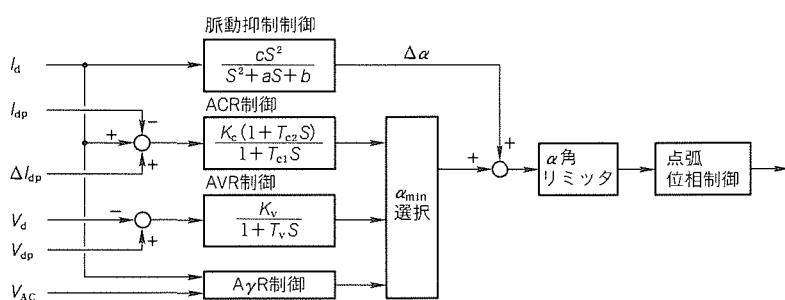


図13. 直流制御方式の構成

結果を示す。AFRの動作によって周波数を一定に保つように直流電力が調整され、直流系の安定な運転が継続されている。

(2) 単独移行時の協調制御試験

単独移行時の協調制御の試験結果を図17に示す。AFR切換えにより、安定に運転継続されていることが分かる。

(3) 運転継続制御試験

図18に、3LG残留電圧0、事故期間4サイクルの試験結果を示す。この事故ケースの場合も事故除去後、余裕角が確保され、転流失敗することなく約180msで事故前の90%送電電力まで回復している。

3.3 シミュレータの特長

シミュレータ試験の結果、デジタルシミュレーションと比較して次の特長があることが分かった。

(1) 長時間のシミュレーションに対しては、デジタルではシミュレーションに長時間を要するのに対して、今回のものは短時間でシミュレーションが可能であり効率が良い(シミュレーション時間1/100以下)。

(2) ハードウェアのつなぎ込みが容易であり、実機レベルの制御・保護装置の試験が容易に実行できる。

3.4 試験結果のまとめ

上述したように、各試験においていずれの場合も制御装置は正常に動作しており、各アルゴリズムの妥当性を検証することができた。

4. むすび

(1) 直流 GIS

長期試験に供した直流GISのプロトモデルは、絶縁の異常や有害異物の運動を示す部分放電は観測されておらず、また、直流計器用変圧器の二次電圧出力値及び直流避雷器の漏れ電流値も正常範囲にあり、良好に課電検証を続行中である。

さらに、長期課電終了後には、機器の残存性能検証試験を実施して限界性能評価を行った上で、製品設計へ反映していく予定である。

(2) 変換器用変圧器・直流リアクトル

巻線機器の実規模絶縁モデルは、絶縁の異常を示す部分放電や、温度特性のある絶縁の漏れ電流の値にも異常はなく、良好な課電検証を継続している。

今後は、課電終了後の限界性能試験の結果も

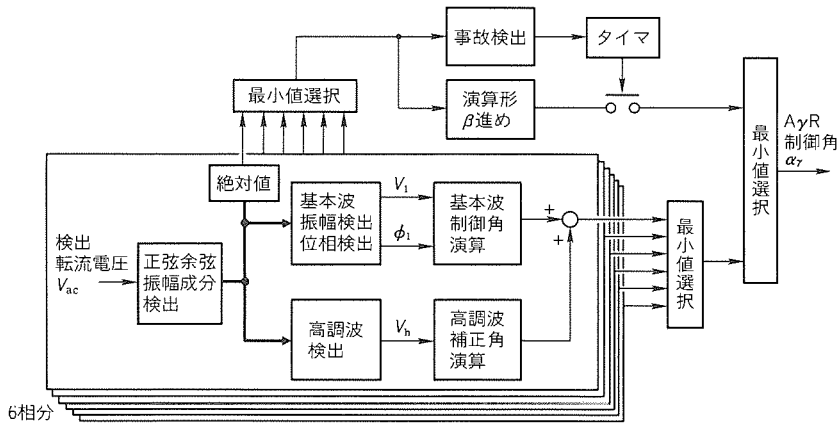


図14. 開ループAγR方式の構成

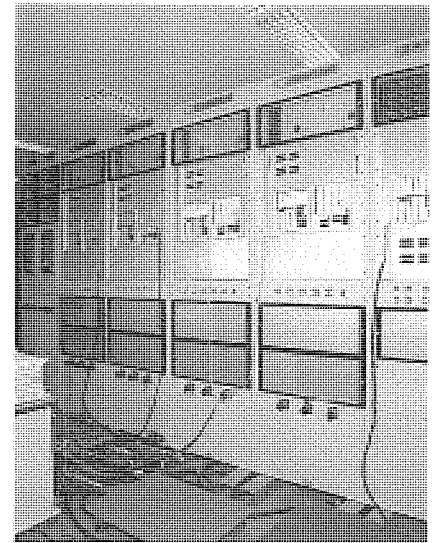


図15. 制御装置の外観

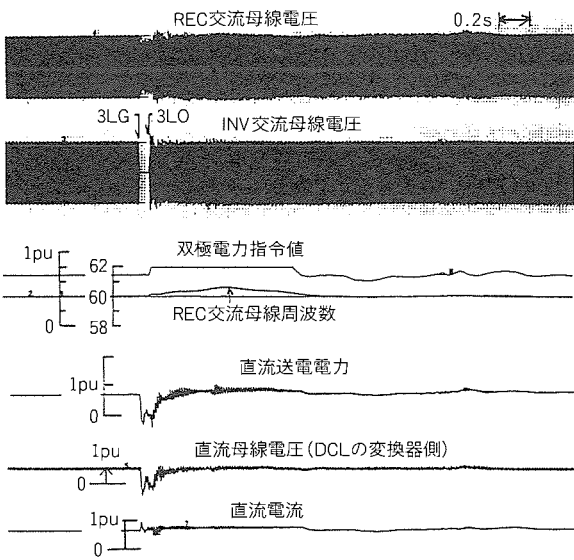


図16. INV側交流系事故試験の結果

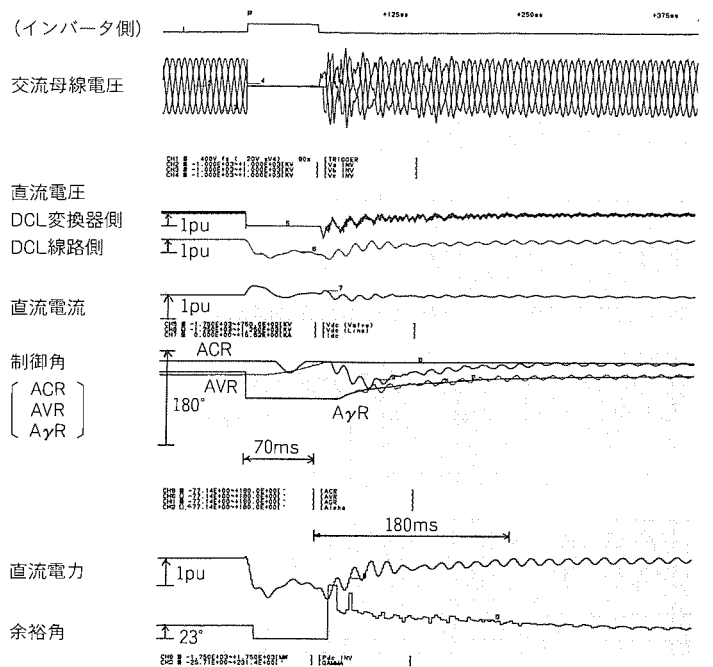


図18. 試験結果(3LG-3LO残留電圧0pu)

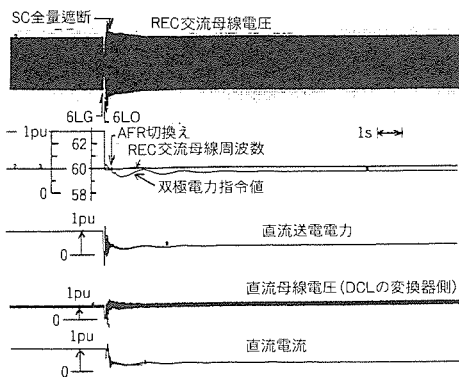
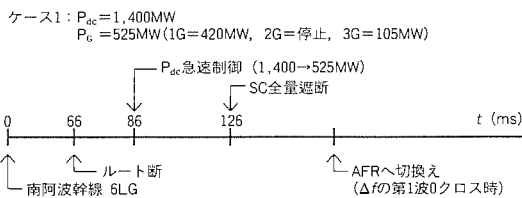


図17. 単独移行試験の結果

含め、これら一連の長期性能検証で得られたデータを、十分な信頼性を持つ製品設計に反映していく予定である。

(3) リアルタイム電力システムシミュレータ

電力システムのモデル化及び制御系動作の妥当性が、デジタルシミュレータによる結果と電力システムシミュレータの結果の比較から確認できた。このことから、今回導入したシミュレータが直流送電制御系の検証に有効であることが実証された。

今後、試験結果を実機設計に反映するとともに、実機試験にシミュレータを効率良く利用できるように、シミュレータの機能を充実整備していく予定である。



# 磁気駆動シミュレーションとその直流遮断器への応用

堀之内克彦\*  
中山 靖\*\*  
笹尾博之\*

## 1. ま え が き

磁力によってアークを駆動するという技術は、遮断器や断路器のような電力機器に対して広く利用されている<sup>(1)~(4)</sup>。この技術は、消弧能力を向上させるのに有益である。磁気駆動シミュレーションはそのような目的に供するために開発されたもので、ガス中アークの三次元形状が時間的に変化する様子を解析することができる。本稿では、この磁気駆動シミュレーションの手法について述べ<sup>(5) (6)</sup>、次にそれを直流遮断器に適用した場合の例を示す<sup>(7)</sup>。

直流送電系統には線路保護などの目的で直流遮断器が用いられる。例えば、帰路線保護遮断器(MRTB)という直流遮断器は、帰路線で地絡が起きた場合に、定常状態へ回復させるために用いられる。回復時に直流電流を遮断する必要がある。一般に電流の遮断は、遮断器が開極したときに極間にアークが発生し、電流が零になるときにそのアークが消弧されることによって完了する。交流電流では半サイクルごとに電流が零になるが、直流電流ではそのようなことはない。したがって、零になる点(電流零点)を作る必要がある。この電流零点を作る方法として、直流遮断器には強制転流方式・自励転流方式・減流方式という3方式がある。このうち自励転流方式は、直流電流に電気振動を発生させて零点を作り遮断する方式である。自励転流方式の直流遮断器では、通常の遮断器にコンデンサとリアクトルを並列に接続した形態をしている。以下で“遮断器”といった場合は通常の遮断器を示

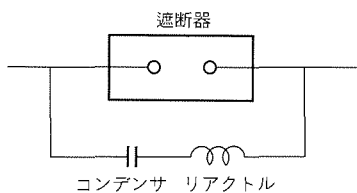


図1. 直流遮断器

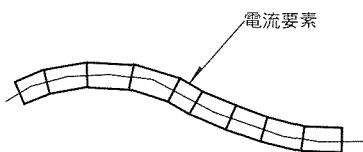


図2. アークのモデル

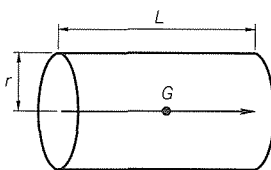


図3. 電流要素

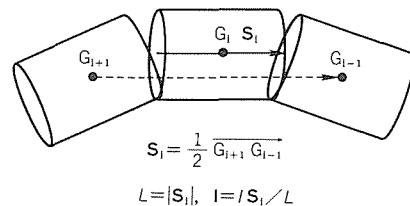


図4. 電流要素ベクトル

し、“直流遮断器”といった場合はコンデンサとリアクトルを並列に接続した一組のものを指すこととする(図1)。

## 2. 磁気駆動シミュレーション

前述したように、通電中に遮断器を開極すると、極間にはアークが発生する。アークはプラズマの一種である。特にガス遮断器においては、遮断器外部から注入された電気エネルギーによって、SF<sub>6</sub>などの絶縁消弧媒質が電離した状態になっている。アークはこのような状態のイオンや電子の流れであり、ガス空間中に形成された電流経路であると言える。電流路であるがゆえに、周囲の磁界によってその形状が変化する。すなわち、磁石などによって作られた磁界から力を受けて駆動され、形状を変化させる。また、電流路であるアークはそれ自身で周囲に磁界を発生させるが、その磁界によってもまた形状が変化する。磁気駆動シミュレーションは、このような特性を持つガス中のアークの形状や挙動の時間的な変化を求めるために考案されたものである。電流を外部から与えることによって刻々と変化するアーク長などを求めることができる。

この章では、まず、このような電流路であるアークの三次元形状を表現するモデルについて述べ、次に、アークが受ける力について述べる。そして、その力で駆動されたときに得る速度によるアーク形状の時間的な変化を求める方法について説明する。最後に、アークの持つ重要な特性である短絡という現象をいかに表現するかを述べる。

### 2.1 アークモデル

磁気駆動シミュレーションでは、アークは、図2に示すように、一連のビーズのような微小な円柱形電流要素の連なりであると仮定している。図3に電流要素の一つを示す。それぞれの要素の位置は、重心によって代表される。要素の向きは、図4に示すように、前後の要素の位置から決められる。すなわち、i番目の要素の向きは、i+1番目の要素の位置

$$S_i = \frac{1}{2} \overline{G_{i+1} G_{i-1}}$$

$$L = |S_i|, \quad l = |S_i| / L$$

$G_{i+1}$  から  $i-1$  番目の要素の位置  $G_{i-1}$  に向かう次式のようなベクトルに平行であるとする。

$$S_i = \frac{1}{2} \overrightarrow{G_{i+1}G_{i-1}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

要素の長さ  $L$  は  $S_i$  の大きさに等しい。要素の長さがある決められた長さ以上になると、その要素を二つに切断する。こうすることにより、極間距離が広がるにつれてアーク長が伸びることを少ない誤差で表現できる。

電流は要素の中心を流れていると仮定しており、電流ベクトル  $I$  は  $S_i$  と同じであるとして、

$$I = IS_i / L \quad \dots\dots\dots (2)$$

とする。

### 2.2 アークが受ける力

アークモデルを構成するそれぞれの電流要素は二つの力を受けるものとする。その一つは要素を駆動する力である電磁力すなわちローレンツ力であり、もう一つは駆動を押しとどめようとする力学的力すなわち抗力である。

ローレンツ力は、磁界中にある電流が受ける力である。それぞれの電流要素の位置における磁界  $B$  は、2種類の磁界の重ね合わせである。一つは磁石など外部からの印加磁界  $B_x$ 、もう一つは他の電流要素が作る磁界  $B_c$  である。 $B_c$  はビオ・サバールの法則から計算できる。こうして得られた磁界  $B (=B_x+B_c)$  から受けるローレンツ力は、単位長当たりについて、

$$F_b = I \times B \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる (図5)。電流要素はこの  $F_b$  という力によって駆動される。

抗力は、アークが動くときに周囲のガスから受ける力である。一般にアークの中心は、陽光柱と呼ばれている高い温度を持つ強電離状態となっている。アークがローレンツ力などの駆動力を受けて周囲の電気的に中性なガス中を押し進むと、前方から後方へアークを取り巻く流れが生じる (図6)。このような流れは、静止粘性流体中を剛体円柱が移動するときに円柱の周りを取り巻く流れが起きることに似ている。そこで近似的に、電流要素を剛体円柱として取り扱うことができると考える。粘性流体中を動く円柱は移動方向と逆向きの抗力を受けるが (図7)、流体力学によれば、単位長当たりの抗力は次のように表される。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho S u^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $u$  は円柱の速度、 $\rho$  は流体の密度である。 $S$  は円柱の代表面積で、単位長に対しては直径  $d$  に等しい。 $C_D$  は抗力係数であり、これは、形状、位置、レイノルズ数に依存している。比較的大きなレイノルズ数に対しては抗力係数はほぼ定数と考えてよい。レイノルズ数  $R_e$  は速度  $u$ 、円柱に対しては直径  $d$  で

あるような代表的長さ  $l$ 、及び動粘性率  $\nu$  を用いて、

$$R_e = ul / \nu \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。

### 2.3 移動速度とアークの挙動

前節の抗力は摩擦力と同様で、電流要素が駆動されるとすぐに受ける力である。したがって、駆動力すなわちローレンツ力  $F_b$  は抗力  $D$  とほとんど釣り合っていると考えられ (図8)、 $F_b$  と  $D$  をそれぞれ  $F_b$  と  $D$  の大きさであるとする、

$$F_b = D \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。

抗力  $D$  は式(4)及び式(5)により速度  $u$  の関数である。したがって、式(3)、式(4)及び式(5)を式(6)に代入することによってできる速度  $u$  に関する非線形方程式を解くことによって、要素の速度を求めることができる。この速度をもって電流要素は移動するとする。

すべての電流要素に対してこのように移動速度が計算される。時間ステップごとにこの速度を計算していく。このように各電流要素が時間ステップごとに動くことによって、アーク全体の形状や挙動の時間的変化を求めることができる (図9)。

### 2.4 短絡現象

短絡現象を表現する方法は容易である。図10(a)のように、

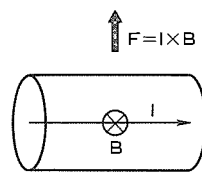


図5. ローレンツ力  $F_b$

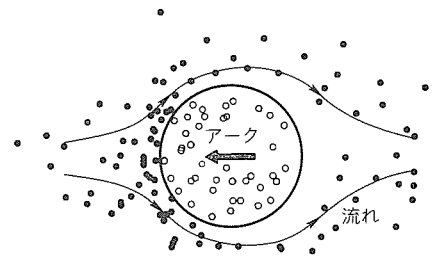


図6. アークを取り巻く流れ

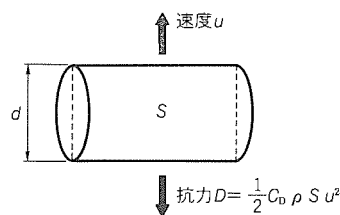


図7. 抗力  $D$

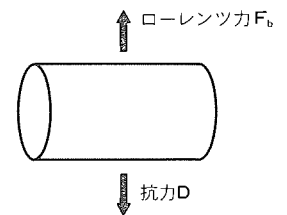
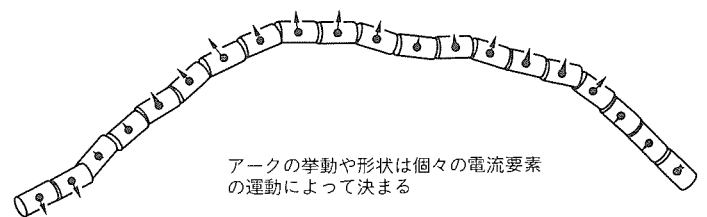


図8. 2力の釣り合い ( $F_b = D$ )



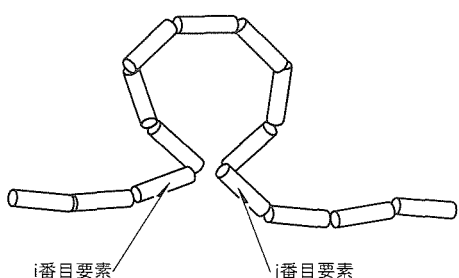
アークの挙動や形状は個々の電流要素の運動によって決まる

図9. アークの挙動

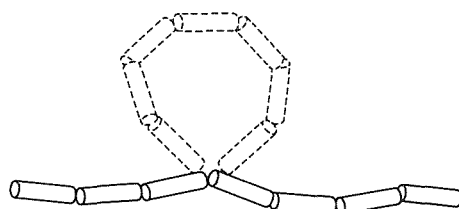
i番目の要素がj番目の要素に非常に近づいたと仮定する。両方の要素間の距離 $G_i, G_j$ がある距離例えば要素の直径 $d$ よりも短くなっているとす。そのとき、 $i+1$ 番目から $j-1$ 番目の要素を切り取り、 $i$ 番目と $j$ 番目の要素をつなぐ(図10(b))。こうすることにより、短絡現象を表現することができると思われる。

### 3. 直流遮断器への応用例

前章で述べた磁気駆動シミュレーションを用いて、自励転流方式の直流遮断器が直流電流を遮断する様子を示す。ここでは、遮断器として実験用のモデル遮断器を対象とした場合の計算例を示す。モデル遮断器は図11のような軸対象円筒形状の消弧室を持っており、固定側コンタクト及び可動側コンタクトの両側に、アークを磁気駆動するためのリング状の永久磁石を配置している。可動側の磁石は、コンタクトとともに移動する。また、二つの磁石によって両側コンタクト間にミラー磁界と称される分布の磁界を形成している。ミラー磁界は、軸に垂直な方向にアークを駆動しやすい磁界分布で



(a) 要素の接近



(b) 短絡

図10. 短絡現象

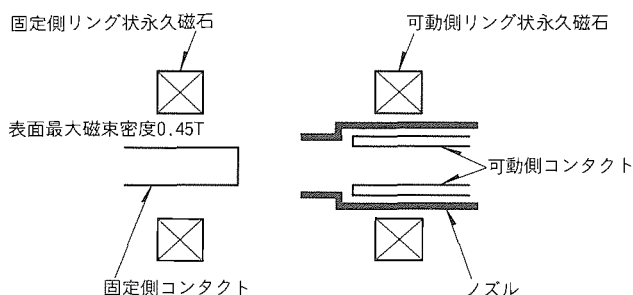


図11. モデル遮断器の消弧室

ある。

1章で述べたように、自励転流方式の直流遮断器は、図1の形態をしている。遮断器が開極すると、アークの持つ負抵抗特性とリアクトル及びコンデンサの共振特性とによって電気振動が発生する。アークの負抵抗特性は、遮断器それぞれによって異なっている。ここでは、実験によって求めた特性を用いることにする。モデル遮断器の外部から強制的に電流の変化を与えて、電流に対する電圧の依存性を実験によって調べた特性を図12に示す。ただし、このときは図11に描かれている二つの永久磁石を取り外し、磁気駆動の効果がない状態での特性を示している。この実験によって得られた特性を平均化すると、アーク長 $s$ に対して、

$$V = (6,270 + 1,009,000/I) s \quad \dots\dots\dots (7)$$

という式が得られる。この式は、電流が増加すると電圧が減少するというアークの負抵抗特性をよく表している。磁気駆動がない場合はこの負抵抗特性曲線を用いるが、磁気駆動を行った場合にはその効果はアーク長 $s$ によって表される。すなわち、磁界によってアークが駆動され、そのときのアーク長の変化がこの負抵抗特性に影響を与えると仮定している。

次に、この計算例で用いた直流遮断器の回路図を図13に示す。コンデンサは $10 \mu\text{F}$ で、リアクトルは $415 \mu\text{H}$ である。全体の計算の流れは図14に示すようになっており、まず、アーク電流を磁気駆動シミュレーションに与える。そして得られたアーク長に対して式(7)を適用し、アーク電圧を求める。この電圧を用いて回路計算を行う。回路計算には、電力

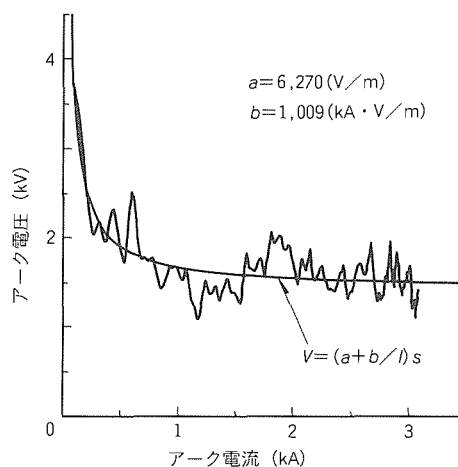


図12. アークの負抵抗特性

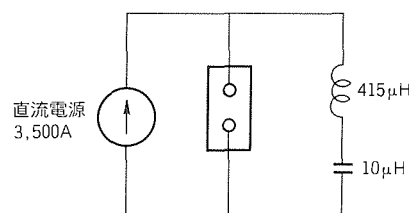


図13. 計算した直流遮断器の回路

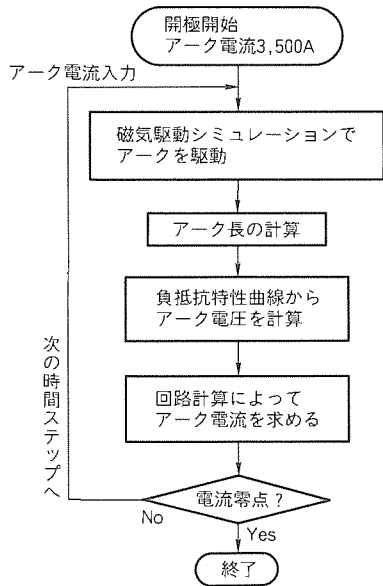


図14. 計算の手順

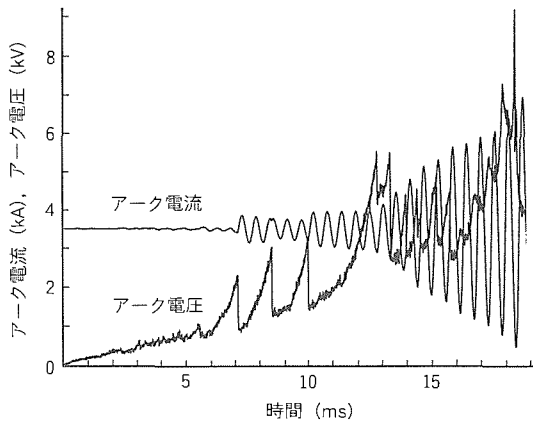
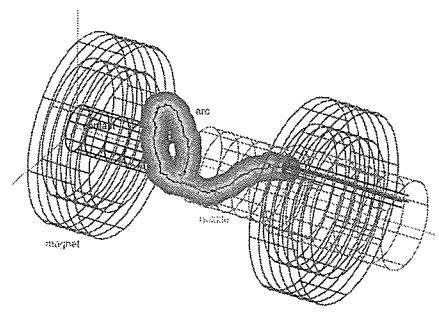


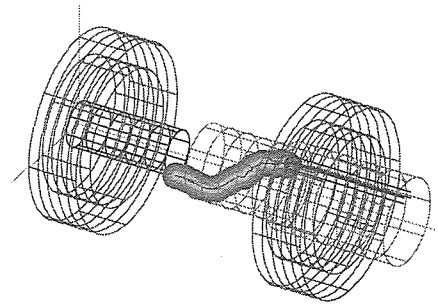
図15. アーク電流とアーク電圧の時間変化

機器の過渡回路計算によく用いられるプログラム EMTP に採用されている手法と同じ陰的積分手法を用いて、数値的に安定した計算が行われるようにする。回路計算によって得られたアーク電流を、再びシミュレーションの入力とする。この繰り返し計算を逐次続けていくことで時間的发展を求める。

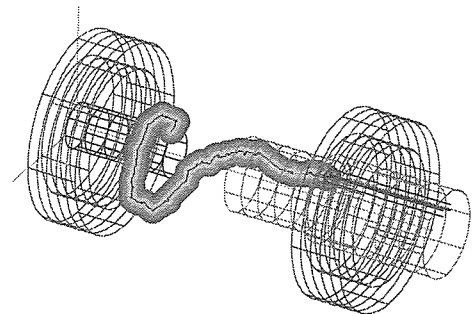
このようにして、遮断器の開極開始から直流電流の遮断に至るまでをシミュレートした。その結果得られたアーク電流とアーク電圧の時間変化を図15に示す。初めは小さい振動が次第に増大し、電流の零点が現れ遮断されている。詳細に見ると、電流の振幅が階段状に変化している点がある。その時刻での電圧の変化を見ると、急激に減少していることが分かる。この時刻においてアークが短絡しているものと考えられる。そこで、その時刻の前後におけるアーク形状の変化をしてみることにする。図16に、短絡を起していると思われる時刻  $t = 7.2 \text{ ms}$ 、 $10 \text{ ms}$  前後での形状の変化を示す。この図から、明らかにアークが短絡を起していることが分かる。しかも、大きなループを形成した後の短絡である。



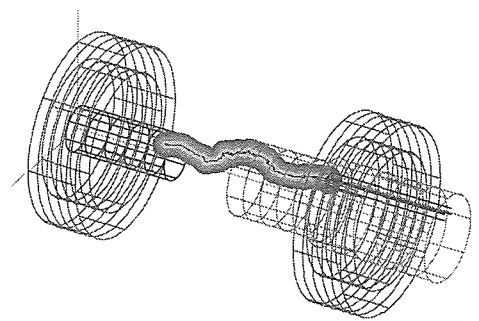
(a)  $t = 7.14 \text{ ms}$



(b)  $t = 7.25 \text{ ms}$



(c)  $t = 9.98 \text{ ms}$



(d)  $t = 10.1 \text{ ms}$

図16. アークの短絡の様子

また、 $t = 5.7 \text{ ms}$  からアーク電圧がのこぎり波状に急上昇し、その後、短絡を起こすという現象が現れる。これは、図17から分かるように、この時刻において、固定側コンタクトの先端がノズル口から出ている。したがって、この時刻以後はノズルに制限されないフリーなアークの状態になることが分かる。フリーなアークは、磁石による磁界によって磁

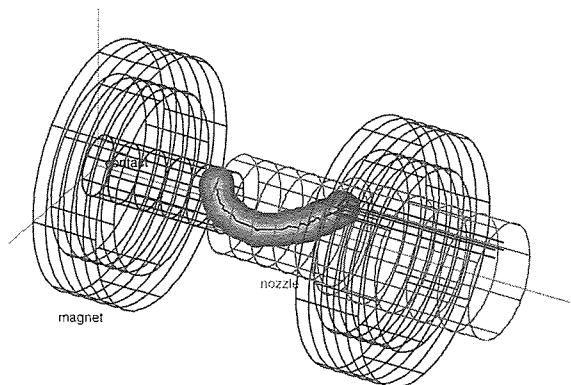


図17. アーク電圧がのこぎり波状になり始める時刻の様子 ( $t=5.7\text{ms}$ )

気駆動されることにより、大きなループを形成しやすくなる。それが短絡することによって前述のように急激な電圧の減少をもたらす、電流の振幅拡大を促進することとなる。低い電流値のところ(約1kA以下)では式(7)の接線の傾きは大きい。したがって、大きな負抵抗特性によって拡大率が大きくなる。電流の振幅の増大によってこの領域の電流値をとるようになると、更に速やかに遮断に至ることが可能となる。

#### 4. む す び

磁力によって駆動されるガス中のアークの挙動や形状をシミュレートする磁気駆動シミュレーションと、それを直流遮断器に応用した例について述べた。

磁気駆動シミュレーションでは、アークは微小な剛体の円柱形電流要素の連なりであるというモデルを仮定している。そして、それぞれの電流要素は、磁界からのローレンツ力と周囲のガスからの抗力を受ける。アークの挙動は、それぞれの要素の位置や運動によって決められる。

最後に、自励転流方式直流遮断器の遮断過程を、磁気駆動シミュレーションを用いて求めた。その結果、磁気駆動され

たアークがループを形成し、それによって生じる短絡が、自励振動の増大を促進することが分かった。

#### 参 考 文 献

- (1) Hamano, S., Sasao, H., Wada, Y., Hasegawa, H., Kobayashi, N.: Development of a Magnet-assisted Autopuffer GCB, IEEE Trans. on Power Delivery, PD-5, No.3, 1355 (1990)
- (2) Langeac, D.G, Barrault, M.R.: Optical Diagnostics in the Design and Development of Rotary Autoexpansion SF<sub>6</sub> Circuit Breakers, J. Phys.D: Appl.Phys., 20, 602~607 (1987)
- (3) Mori, T., Koyama, K., Okubo, H., Masuda, S.: A New Interruption Method for Low-Voltage, Small-Capacity, Air-Break Contactors, IEEE Trans.on Industry Applications, 27, No.1, 161~165 (1991)
- (4) 浜野末信, 堀之内克彦, 笹尾博之, 香山治彦, 日高幹雄, 吉積敏昭: 軸方向ガス流中にあるアークの磁界による駆動特性(II), 平成5年電気学会電力エネルギー部門大会論文集 (1993)
- (5) 堀之内克彦, 中山 靖, 香山治彦, 笹尾博之: ガス中アークの磁気駆動シミュレーション, 電気学会, 開閉保護・高電圧合同研究会資料, SP-94-43, HV-94-32 (1994)
- (6) 堀之内克彦, 中山 靖, 香山治彦, 笹尾博之: ガス中アークの磁気駆動シミュレーション(2), 電気学会, 放電研究会資料, ED-95-161 (1994)
- (7) 竹治直昭, 高畑浩二, 畑野雅幸, 堀之内克彦, 中山靖, 新田悦雄, 笹尾博之: 直流遮断器のアーク磁気駆動シミュレーション, 平成7年電気学会電力エネルギー部門大会論文集 (1995)

# 日本原子力研究所向けJFT-2 Mトロイダル電源用 フライホイール付き直流発電機

谷 孝志\* 中西悠二\*\* 堀田 剛\*\* 河瀬千春\*\* 大藪 勲\*\*\* 岸本 健\*\*\*

## 1. ま え が き

JFT-2 M (高性能トカマク開発試験装置)用トロイダル磁場コイル電源を開発した。この設備は総出力 51,300 kW で、直流機分野では世界最大容量である。回転機械において従来の記録を越えるには電氣的・機械的技術進歩が必ず(須)であるが、この装置を完成するに当たり各種技術を開発・検証したので概要を述べる。

トロイダル磁場は直流磁場であり、直流電源を必要とするため、システム全体がシンプルで占有面積も少ない直流機電源システムを採用した。交流機システムも検討したが交流機では交流から直流への電力変換が必要であり、直流磁場を必要とするトロイダル電源には適していなかった。

本稿では、電源システムの検討・設計計画から現地運転までについて、直流発電機を主体にまとめた。

## 2. 核 融 合

核融合とは、水素・重水素・三重水素などの軽い元素の原子核同士が反応してヘリウムなどに融合することであり、このときに大きなエネルギーを発生する。我々が毎日のように見ている太陽も、水素を燃料とした核融合反応であることはよく知られている。地球上ではこの燃料になる重水素は海水中に無尽蔵にあるため、核融合のエネルギーが実用化されれば人類は恒久のエネルギーを確保できる。

地球上で核融合を実現しそのエネルギーを利用するには、

1億度以上の燃料(プラズマ)を容器内に閉じ込め、制御することが必要である。核融合の研究は約30年前から行われ、様々なアイデアが試みられてきたが、現在、最も性能の良いのがトカマク形と呼ばれる方式である。トカマク形では変圧器の原理を利用して一次巻線に相当するポロイダルコイルに磁場を発生させ、二次巻線に相当するドーナツ状の容器にプラズマ電流を発生させる。一方、容器の壁にプラズマが接触しないように、トロイダル磁場と呼ばれる強い磁場でプラズマを閉じ込める。この実験装置としてJFT-2 Mは1983年に完成し、その構造は図1のとおりである。

このたび、より高エネルギー磁場が必要となったため、電源のパワーアップがなされた。本稿で述べる発電機は、この電源装置に用いられるものである。

## 3. 発電機の概要

この大容量直流機による直流発電システムは、トカマク形核融合プラズマ実験装置の主磁場であるトロイダル磁場の直流電源を得るためのシステムとして開発されたものである。今回必要とされたエネルギーは、210 MJで1秒間以上持続してエネルギーを放出することが要求された。また、今回は既設電源のパワーアップのためのリプレースであり、設置スペースが限定され、システムとしても構造としても最小となる構成が求められた。

そこで起動とエネルギーの蓄積のためには電動機として運転し、エネルギー放出時には発電機として運転することで本体の共用化を行い、効率運用を図った。また、高エネルギーを短時間に放出するため、フライホイール付きの発電機とした。この運転方式を図2に示す。

## 4. 発電方式の検討

この電源システムを検討するに当たり、直流発電機と交流発電機の2種類のシステムを検討し、交流機については円筒形交流発電機と突極形交流発電機の二つの方式を考慮した。

直流機は発電電動機とし、フライホイールにエネルギー

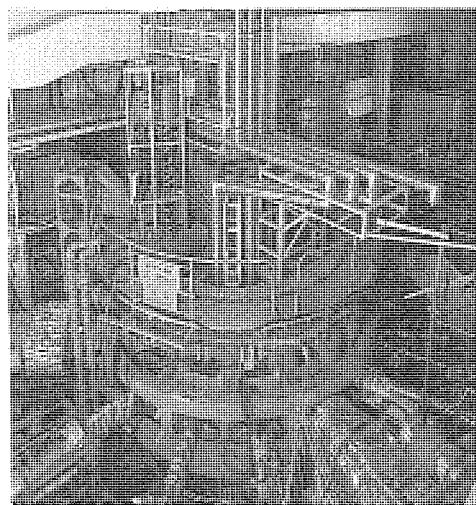


図1. JFT-2M高性能トカマク開発試験装置

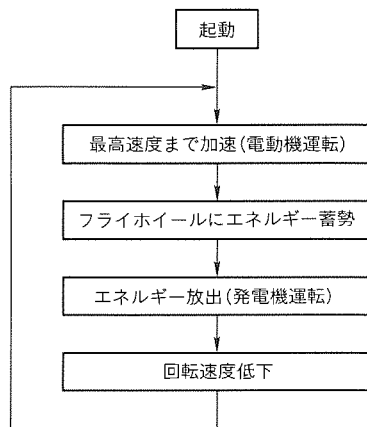


図2. 運転方式

方式	直流発電機	円筒形交流発電機	突極形交流発電機
システム構成			
仕様	51,300kW 225/460r/min	51,300kW 2,100/3,000r/min	51,300kW 630/900r/min
占有面積	73m <sup>2</sup>	105m <sup>2</sup>	90m <sup>2</sup>
特長	直接直流出力が得られるため出力トランスと整流器が不要であり、コンパクトなシステムである。	総質量が最も軽く基礎工事が有利。占有面積が最も大きい。	総質量が軽く基礎工事が有利。占有面積が大きい。

図3. 発電方式の検討

を蓄勢するときは電動機とし、エネルギーを放出するときは発電機として作用するようにした。

交流機では、フライホイールにエネルギーを蓄勢するときは誘導電動機を使用し、エネルギーを放出するときは別個の同期発電機を使用する M-G 電源システムを検討した。交流機システムは、円筒形、突極形とも交流から直流に変換するのに出力トランスと整流器が必要なため、全システムの占有面積が大きくなる。

図3に発電機のシステム構成、占有面積、特長を示す。この結果から、発電システムとして最も占有面積の少ない直流発電システムを採用した。

### 5. 仕様の決定

直流機の仕様決定に当たり、図4の手順で決定した。

基本仕様は210 MJ、19 kA、2,700 V、1sであるが、このエネルギーは、電流の立上げ及び立下げを含めて定格51,300 kWに相当する。直流機の製作限界から4×12,825 kWとした。最高回転速度は回転子の機械的強度から460 r/minとし、フライホイールの蓄勢エネルギーから基底回転速度を225 r/minとした。

このとき、発電機の角速度は次式のとおりである。

$$\omega_1 = 2\pi \cdot (460/60) = 48.17 \text{ (rad/s)} \quad \dots\dots (1)$$

$$\omega_2 = 2\pi \cdot (225/60) = 23.56 \text{ (rad/s)} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 $\omega_1$  : 460 r/minのときの角速度

$\omega_2$  : 225 r/minのときの角速度

基底回転速度225 r/minから最高回転速度460 r/minの間に蓄勢すべきエネルギーは次式で表される。

$$1/2 \cdot J \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2) = 210 \times 10^6 \text{ (J)} \quad \dots\dots (3)$$

これからフライホイール及び発電機回転子の総慣性モーメント: Jを237,922 kg・m<sup>2</sup>とした。

電源回路は、図5に示すとおり、駆動用サイリスタ電源1,965 kW 1台、発電用界磁サイリスタ電源2台、トロイダルコイルの構成とした。

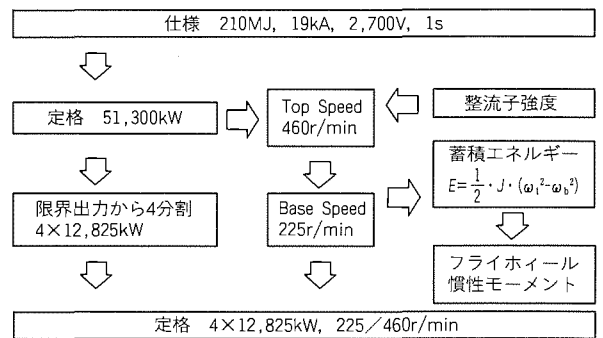


図4. 仕様の決定

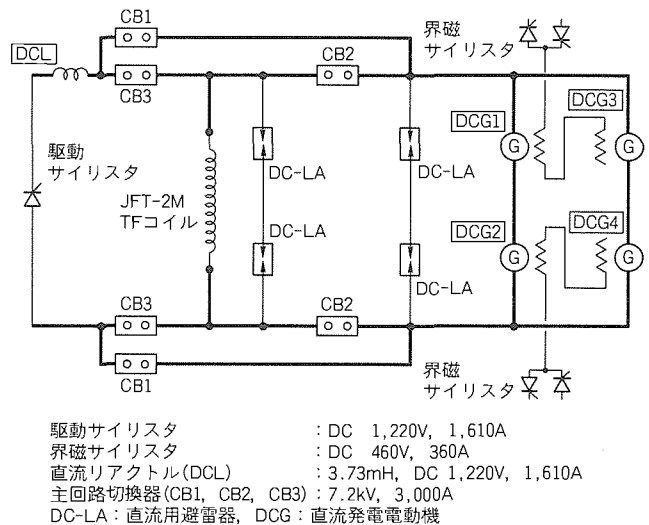


図5. 電源構成

### 6. 構成

発電電動機を直流機で製作する場合、4台をタンDEM結合する構成を採用することが必要である。また、本機は既設の建屋内に設置されるために全長の制約があり、さらに、輸送を容易にするため分割したときに各分割部の質量を軽減するという課題があった。これらの条件を満たすために配慮した

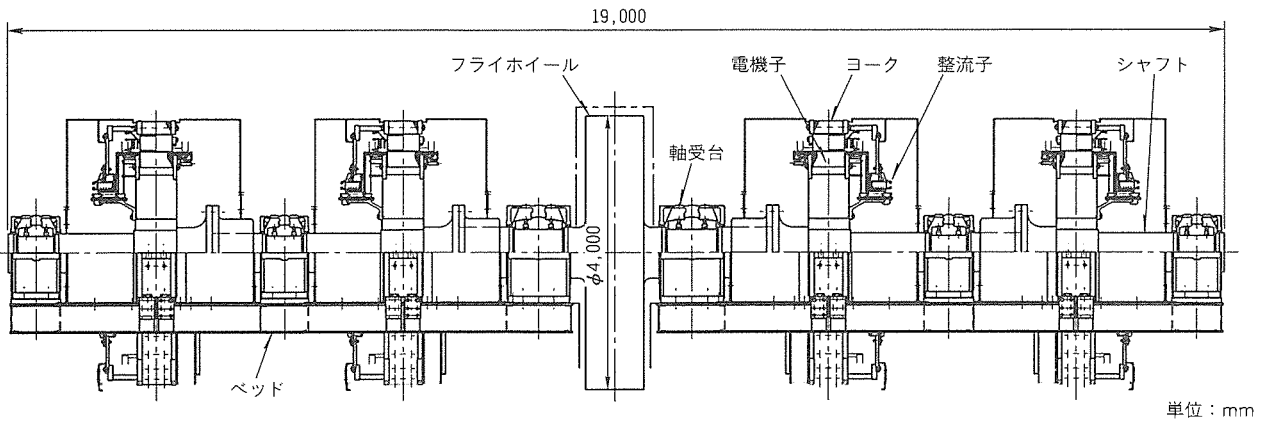


図 6. タンデム構成

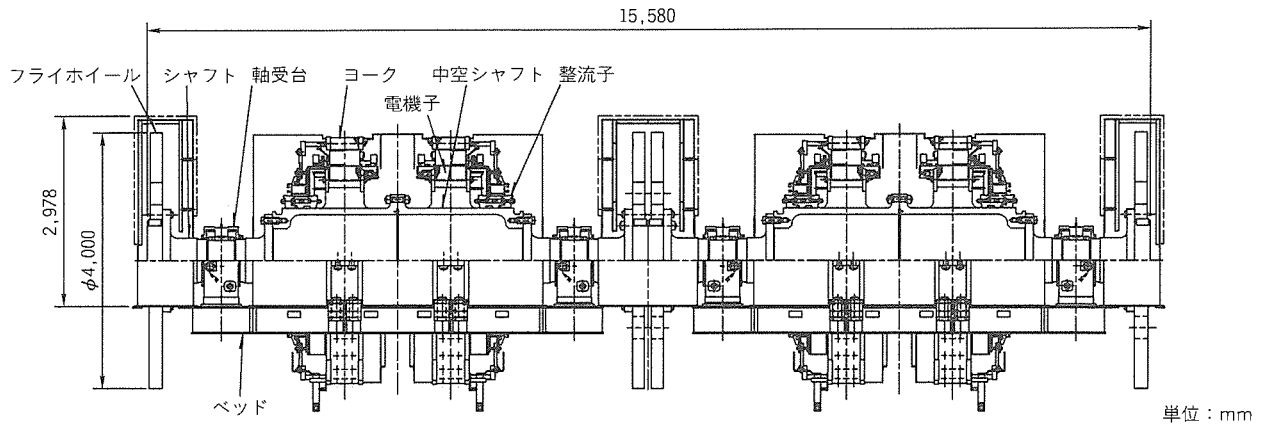


図 7. 二重電機子構成

事項を以下に述べる。

(1) 二重電機子×2結合の採用

実績のあるタンデム結合方式では、図6のように中央に鍛造製の大型フライホイールを据え、その左右に各2台ずつ直流機をタンデム結合に配置したものとなる。この場合、全長19m、全質量 $410 \times 10^3$ kg、使用軸受6台、最大輸送質量 $120 \times 10^3$ kg、陸送最大高さ4mとなる。

この構成ではフライホイール部分に基礎荷重が集中し、基礎工事が難しくなること、全長が長くなり既設建屋には入らないこと、輸送が海上輸送となり大掛かりになること、等の問題が考えられる。

そこで、軸受台を4台にして全長を短縮し、さらにフライホイールも4分割して最大質量の軽量化を図り、基礎荷重の分散、全長の短縮、陸送化を可能にした。この構成を図7及び図8に示す。各直流機はそれぞれ2台1組ずつの二重電機子結合とし、これをさらに直列結合する構成となっている。各々の二重電機子は中央部で分割可能とし、リーマボルトで結合した。

以上の構成とした結果、全長15.6m、全質量 $353 \times 10^3$ kg、使用軸受4台、最大輸送ピース質量 $26 \times 10^3$ kg、陸送最大高さ3.5mとすることができた。

(2) 電機子とフライホイール部の分割

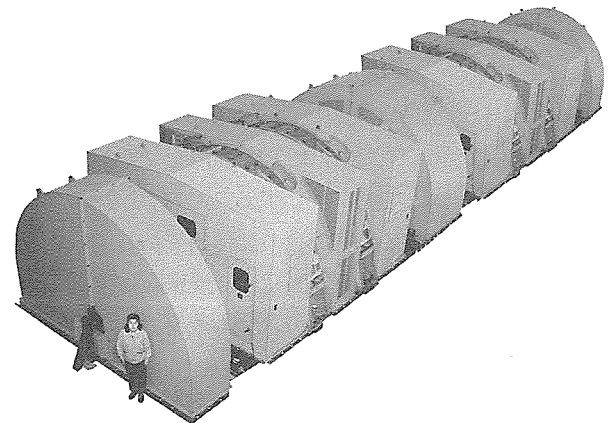


図 8. フライホイール付き直流発電機の外観

陸上輸送を可能とするためには、単一最大質量を $30 \times 10^3$ kg以下の制限内に入れる必要がある。このため、電機子部とフライホイール部を分割可能とし、リーマボルトで結合する構造として単体の質量を低減した。

(3) フライホイール

陸上輸送の条件としては、重さ制限のほか、3.5m以内の高さ制限がある。フライホイールは同じ重さであれば外径が大きいほど大きな慣性モーメントが得られるため、可能な限り大きな外径寸法とすることにした。このため専用斜め輸送架台を用意して輸送時にはフライホイールを傾けることによ



り、高さ制限以内に格納することが可能な最大外径寸法として4mが確保できた。構造は一枚物の円盤として各電機子のシャフトに焼ばめし、軸受けに対してはオーバハンク支持構造としている。また内周部に円孔を設けて重さ軽減を図り、陸上輸送上の重さ制限に対応した。

#### (4) 互換性

4台とも互換性のある構造とし、製品の共用化と輸送の合理性を追求した。

#### (5) 電機子シャフトの軽量化と剛性アップ

フライホイール側への慣性モーメントの分担を軽減するために電機子の慣性モーメントを増加し、また電機子自身の輸送制限を満たすための軽量化、さらには二重電機子を支えるシャフトの剛性アップ、という一見矛盾する目的を達成させるため、シャフト部は直径を可能な限り太くして、電機子スパイダ部分と一体化し、さらに中空シャフトとすることで、軽量化と慣性モーメント増加と剛性アップを成立させた。

#### (6) 軸受の軽量化

装置全体のコンパクト化・軽量化のため、軸受と軸受台の軸方向寸法を短縮した。これを実現するために受圧面の局所的高温部を解析し、給油量の適正化を図るとともに、高圧オイルリフトを使用して軸受の高面圧化を図った。

### 7. 運転シミュレーション

運転パターンの分析、運転中の電氣的・機械的応答の把握のため、微分方程式数値解析によってシミュレーションを実施した。

図9は運転パターンを示したものであるが、起動時は電圧制御によって直流機を電動機運転し、回転速度を0から待機速度(最高460 r/min)まで加速する。その後、界磁制御によって発電機の電圧を制御し、電力を放出する。

負荷運転中のシミュレーション結果を図10に示す。整流の難易度は(電流×回転速度)で表されるが、発電中どこで整流条件が厳しくなるかを検討した。

### 8. 直流機技術検討

#### (1) 整流

直流機で高速大容量を実現するには、整流解析技術が必要である。図11に示したとおり、リアクタンス電圧と整流磁束の検討を実施した。良好な整流を得るにはリアクタンス電圧の形状と整流磁束分布の形状を一致させる必要があり、この解析を基にして最適設計を行った。また、大容量機は補極磁束回路の磁気飽和が発生しないようにする必要があるため、図12に示したフラクスマッピングによって磁場解析し、各部

の磁束密度を確認して設計した。

#### (2) 機械強度

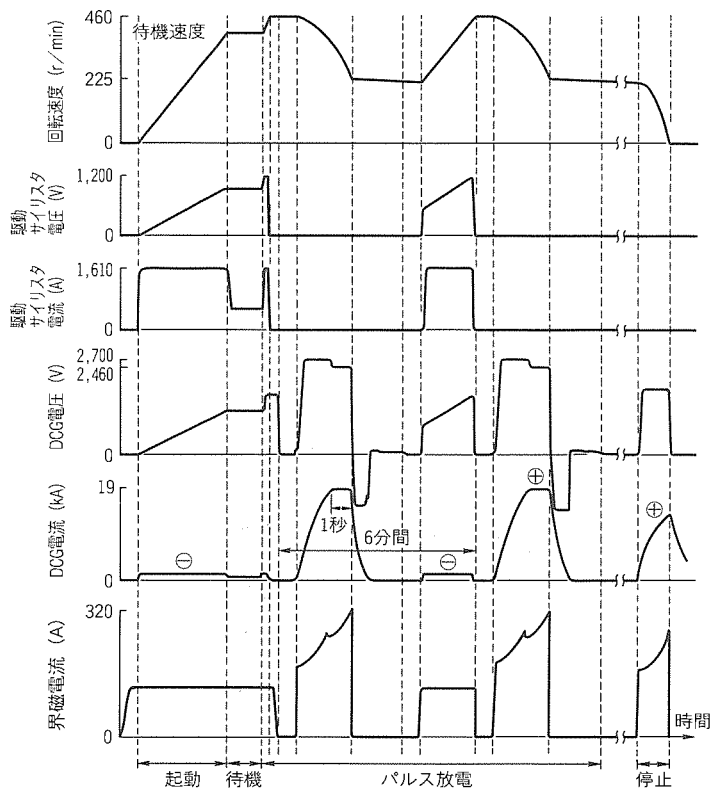


図9. 運転パターン

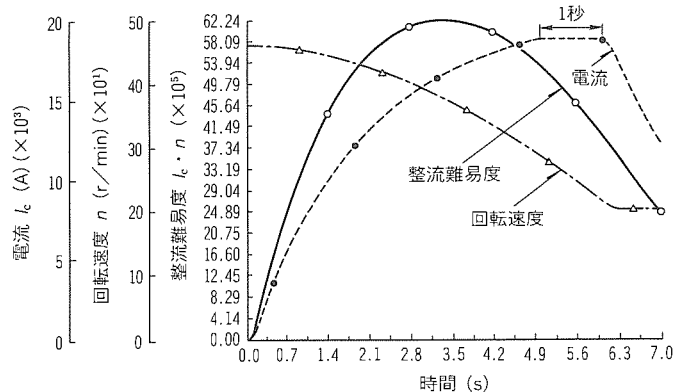


図10. シミュレーション結果

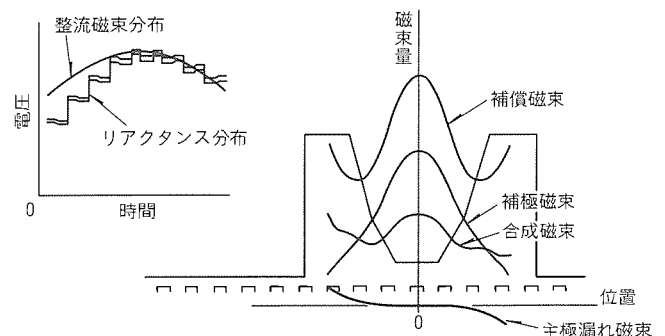


図11. 整流解析

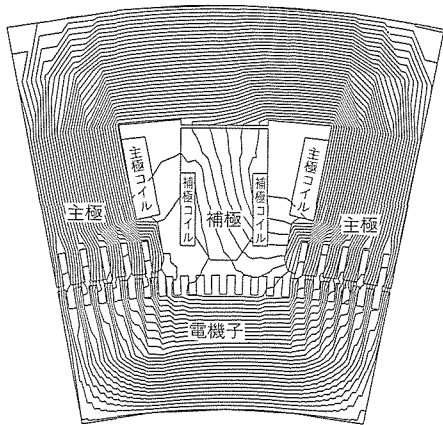


図12. フラックスマッピング

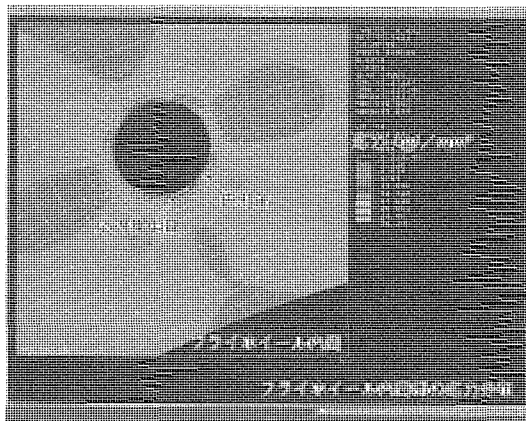


図13. フライホイール強度解析

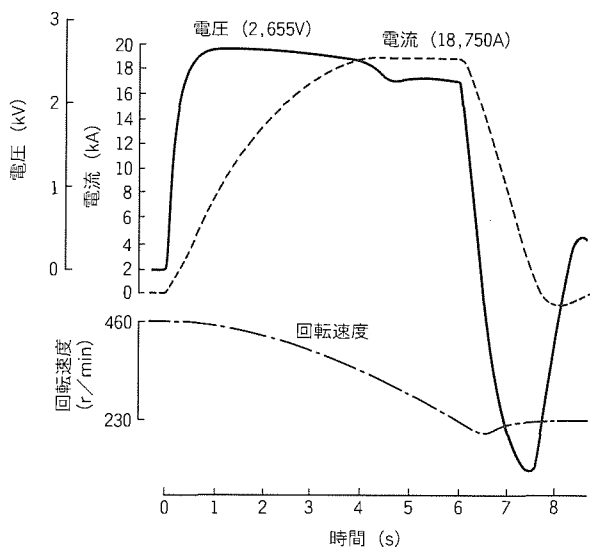


図14. 現地運転チャート

フライホイールは、必要な慣性モーメントを得るため外径を可能な限り大きくとり、かつ内周部に円孔を設けて軽量化を図っている。

一方、最大 460 r/min の回転速度に耐えるため、フライホイールとシャフトの間には十分な焼ばめ代を持たせている。このため、起動停止に伴い、フライホイールの内周部には焼ばめ面圧と遠心力による繰返し応力が発生する。さらに、フライホイール内周部に設けられた孔部近傍では応力集中が生じる。フライホイールの強度解析は有限要素法で行った。解析結果の例を図 13 に示す。

この結果を基に、繰返し回数に対する十分な安全率を持った疲労強度とするよう、寸法・形状を最適化してフライホイールの構造を決定した。

## 9. 現地運転

現地で運転し、所定の 210 MJ のエネルギー放出ができることを確認した。図 14 に現地運転チャートを示した。この図では、460 r/min からエネルギーを放出し、最大電流 18,750 A のフラットトップ電流を約 1.0 s 維持し、エネルギー放出後、230 r/min に減速される例である。電圧は 460 r/min から立ち上げ、フォーシング電圧 2,655 V を印加したものである。

## 10. むすび

この電源設備は直流発電機として 51,300 kW の容量で、世界最大容量である。各種の技術を駆使して最大容量の開発に当たった。

最近、直流機に代わって交流可変速機が増加してきたが、直流機にはその得意とする分野があり、今後もこのような分野での直流機適用拡大を図っていきたい。

## 参考文献

- (1) 丸山信昭, 浅越泰男, 河村寿三, 木村好男, 菅波拓也: 電車線電力蓄蔵におけるフライホイールの応用, 三菱電機技報, 55, No.7, 494~496 (1981)
- (2) 河村寿三: 電力貯蔵方式における省エネルギー, エネルギー・資源, 3, No.4, 30~35 (1982)
- (3) 木村好男, 河村寿三, 星野吉信, 浅越泰男, 丸山信昭: フライホイール式エネルギー蓄積装置の電力変電所への応用, 計測と制御, 20, No.3, 104~109 (1981)
- (4) 中西悠二, 堀田 剛, 河瀬千春, 谷 孝志: 大容量直流発電機の開発, 電気関係学会東海支部連合大会, No.202, 101 (1995)
- (5) 中西悠二, 岸本 健, 河瀬千春, 堀田 剛, 谷 孝志: フライホイール付発電電動機の開発, 電気学会回転機研究会, RM-95-108, 77~85 (1995-10)
- (6) 中西悠二, 堀田 剛, 河瀬千春, 谷 孝志: 大容量直流発電機の開発, 大韓民国電気学会 (1995-12)

# SNAネットワークとインターネットワーク環境の統合

安田秀朗\* 井手 剛\* 河村祐二\* 鈴木賢太\*\*

## 1. ま え が き

昨今のLAN (Local Area Network)の急速な普及により、基幹業務の端末もLAN化が進み、新たな情報手段としての電子メールや世界の情報ネットワークであるインタネットへのアクセス等が盛んに行われている。これらのネットワークは、オープンな環境下での実質的な標準プロトコルであるTCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol)を採用している。実際にも、LANベンダ各社ともにTCP/IP対応ソフトウェア製品を自社LANボードに標準で付属しているほどである。

一方、従来の基幹業務はIBMホストコンピュータ(以下“ホスト”という。)を主とした専用のネットワーク(以下“SNA<sup>(注1)</sup>ネットワーク”という。)で構築されており、従来のホスト関連資産を活用しながら電子メール等も使いたいという要求が多くなってきた。すなわち、両者のネットワークを統合することで、コストパフォーマンスの向上やネットワーク管理の簡易化を図り、効率の良いネットワーク構築を行いたいとの要求である。

この論文では、このようなSNAネットワークとインターネットワークとの統合を図る上での課題について述べ、その解決策として三菱電機(株)(以下“当社”という。)と米国シスコ社とで共同開発したIBMホストの端末エミュレーションを行う端末エミュレータ製品であるapricotNET“NCIA 3270”(以下“NCIA 3270”という。)を紹介する。また、これを用いたシステム構築例についても提示する。

## 2. 各ネットワークの現状

ここでは、インターネットワークとSNAネットワークそれぞれの現状について示す<sup>(1)</sup>。

### 2.1 インタネットワークとは

ネットワークとは、あるコンピュータと別のコンピュータを物理的に接続することである。例えば、ホストと端末をSDLC<sup>(注2)</sup>回線で接続する場合、これがネットワークとなる。また、端末側でNetWare<sup>(注3)</sup>を用いてファイル、プリンタの共有を行うようなLAN環境もネットワークである。

インターネットワークとは、あるネットワークと別のネットワークとを接続したネットワークのことで、例えば図1に示したようなものである。図では、ホストと端末をトークンリングで接続したネットワークと、電子メールを構築したイーサネット<sup>(注4)</sup>LANのネットワークとをルータを使用して接続している。インターネットワークとは、このネットワーク全体のことを指す。ただし、近年では冒頭で述べたインタネットが一般的になっており、これがインターネットワークの代名詞ともなりつつある。

このようなネットワークでは、どちらのネットワークでもその設定を変更する必要がないこと(可搬性)が要求される。

(注1) “SNA”は、米国IBM社の提唱するネットワークの構築方式である。

(注2) “SDLC”は、米国IBM社の提唱するネットワーク接続方式である。

(注3) “NetWare”は、米国Novell, Inc.の米国における登録商標である。

(注4) “イーサネット”は、米国Xerox Corp.の商標である。

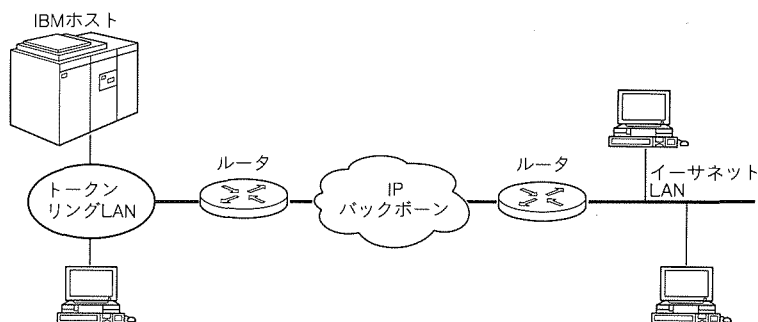


図1. インタネットワーク

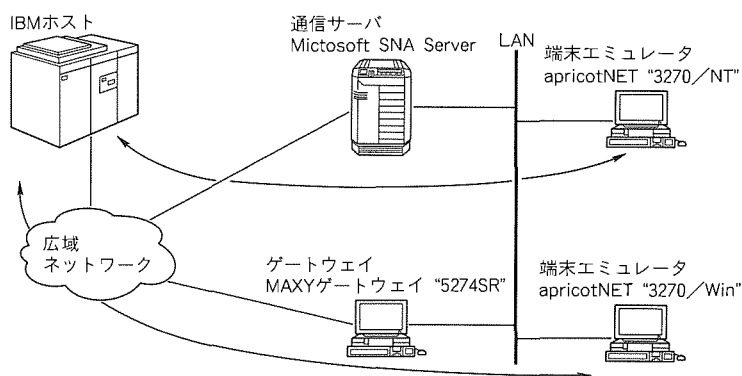


図2. 三菱電機製品を用いた代表的なSNAネットワーク

## 2.2 SNA ネットワークの現状

ホストと端末を1対1で接続してきた初期のSNAネットワークから、現在では以下の二つの形態が主流となっている(図2)。

### (1) 通信サーバによる接続

通信サーバを導入し、ホストとその拠点間を一つの回線でまとめ、その下にクライアントを配置する形態である。当社においては、米国Microsoft社のMicrosoft SNA Serverを通信サーバとし、その配下に当社製端末エミュレータであるapricotNET“3270/NT”(以下“3270/NT”という。)を導入したネットワークがこれに当たる。

### (2) ゲートウェイによる接続

通信サーバの代わりにゲートウェイを設置する形態である。当社では、MAXYゲートウェイ“5274SR”の下に当社製端末エミュレータであるapricotNET“3270/Win”(以下“3270/Win”という。)を導入したネットワークである。

これらネットワーク構成において、ホスト端末機能以外に、例えばLANを用いて電子メールシステムを構築すれば資産の有効活用が図れ、ネットワークの効率良い運用となる。このとき、1台の端末でホスト端末機能と同時にほかの業務(例えば電子メール等)を同時に行えることが要求される。

## 3. ネットワークの統合における課題

例えば図1で電子メールを使用している端末で端末エミュレータを動作させる場合、電子メール用のTCP/IPデータとエミュレータ用のSNAデータ(DLC(Data Link Control)接続)の二つのデータを共存させる必要がある。すると、複雑なルータの設定を新たに行ったり、又は端末側の伝送プロトコルが二つ必要なためにメモリ等の端末側リソース(資源)が不足して機器増設を行う必要があるといった問題が生じる。

この課題の解決のためには伝送プロトコルを統合する必要があるが、ここではTCP/IPへの統合を考える。その理由は次のとおりである。

- (1) オープンな環境であり、標準化機関で仕様が決まっている。
- (2) 大多数のベンダがサポートしている。
- (3) OS(Operating System)や機種に依存しない唯一のプロトコルである。

現在、TCP/IPに統合化する方式として、TN 3270という手順を利用する方法と、Microsoft SNA Serverのような通信サーバを導入する方法の二つがある。以下、それぞれの場合の特徴を示す。

### 3.1 TN3270を用いた場合

“TN 3270”とは、TELNET 3270手順とも呼ばれ、RFC<sup>(注5)</sup>で規定されているものであ

る。この手順は、TCP/IPでのRFC推奨プロトコルの一つであるTELNETを利用して、ホストと端末間でのSNAデータの授受を行うことを目的としている。この手順に従い、現在では多くのベンダからTN 3270クライアントが提供されている。TN 3270を用いた場合、次のような長所と短所がある(図3)。

#### (1) 長所

- (a) 伝送プロトコルがTCP/IPに統一されるため、ネットワーク内機器のOSや機種などに影響されないオープンなネットワークとなり、ルータ等を用いて柔軟なネットワーク構築が可能となる。
- (b) 伝送プロトコル実装に対応する端末側のリソース量が軽減され、メモリ容量等の効率運用が可能となる。
- (c) TCP/IPプロトコルでサポートされるダイヤルアップ接続等が利用可能となる。これにより、例えば端末1台といった小規模店舗へのLAN敷設の必要がなくなり、効率的なネットワーク展開が可能となる。

#### (2) 短所

- (a) システムによっては表示機能での制限(端末画面上でエラー表示ができない等)、又はプリンタエミュレーションができないという制限が発生する場合があります、システム運用上の問題が生じてホスト資産の移行ができなくなる。
- (b) TN 3270ゲートウェイ(又は同等機能を実装した通信サーバ等)が必要となるため、この導入に伴うネットワーク上の伝送損失が発生する。
- (c) TN 3270ゲートウェイ(又は同等機能を実装した通信サーバ等)を新規に導入する必要がある。

### 3.2 通信サーバを用いた場合

Microsoft SNA Server等の通信サーバを用いた場合、次のような長所と短所がある(図4)。

#### (1) 長所

- (a) 従来ホスト上ですべて賅っていた端末定義にかかわるリソースを通信サーバで一部吸収することができるので、
- (注5) “RFC”は、Request for Commentsの略で、インターネット上での仕事に関する文書、新しいプロトコルや改良したプロトコルの提案、TCP/IPプロトコル標準すべてを扱った技術文書類をいう(米国)。

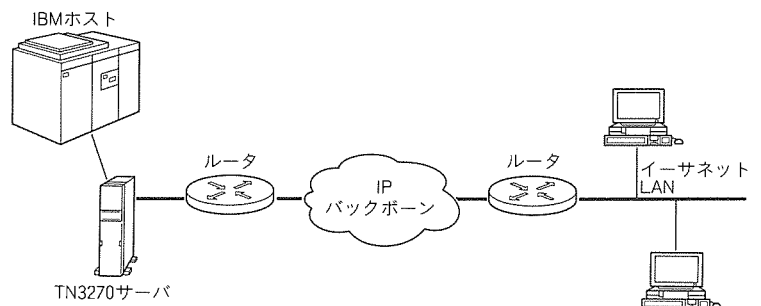


図3. TN3270ネットワーク

ネットワーク上の負荷分散が可能となる。

(b) 通信サーバを追加することで、この配下に接続される端末システムは一つのネットワークを構成することとなり、インターネットワークに影響を与えないネットワークの拡張が可能となる。

(2) 短所

(a) 通信サーバを導入することにより、この通信サーバをサーバとするシステム管理が新たに必要となり、管理者の任命やシステム運用形態の見直し等が発生する。

(b) パソコン主体の分散環境構築となるので、ある程度のホスト側設定と通信サーバの環境構築や運用技術が要求されるが、それらは一般的には容易ではない。したがって、導入前の教育や継続した対応のための体制整備が必要である。

(c) 端末側には LU (Logical Unit) のみ存在するので、ホスト主導のネットワーク管理の対象が通信サーバのみとなり、システム全体にわたる管理ができない。

このように現在考えられるネットワークでは幾つかの課題があり、最善の解決策が提供されていなかった。

今回、これら課題を解決し、また従来の SNA システムの資産を継承しつつ TCP/IP プロトコルを用いてインターネットワークとの統合を図る目的で、新しい端末エミュレータである NCIA 3270 を開発した。この端末エミュレータは NCIA (Native Client Interface Architecture) <sup>(注6)</sup> という新しいアーキテクチャを採用した製品である。

以下、NCIA プロトコル及びその応用例として、この製品を用いたシステム例について述べる。

4. NCIA プロトコル

本章では、NCIA プロトコルに関する説明と NCIA 3270 における実現方法について述べる。

4.1 概要

NCIA は米国シスコ社のインターネットワーク オペレーティングシステム (IOS) <sup>(注7)</sup> ソフトウェアの機能の一つであり、SNA ホストから端末までのインターネットワークの統合を図ることを目的としたものである。具体的には、PPP (Point to Point Protocol) やイーサネット LAN、又はトークンリング LAN で米国シスコ社製ルータを介して接続されたホスト-端末ネットワークにおいて、SNA データをル

ータ経由で TCP/IP にカプセル化する技術である (図 5)。実現に当たっては、米国シスコ社独自のクライアント/サーバモデルを採用している。

4.2 NCIA クライアント/サーバモデル

NCIA サーバ (以下“サーバ”という。) 機能は米国シスコ社製ルータ上で実現され、NCIA クライアント (以下“クライアント”という。) 機能は端末上で実現される。サーバの主な機能は、①クライアントとの間で TCP セッションを確立する、②米国シスコ社製ルータ上の他のソフトウェアモジ

(注 6) “NCIA” は、米国 Cisco 社の提唱する方式である。

(注 7) “IOS” は、米国 Cisco 社の登録商標である。

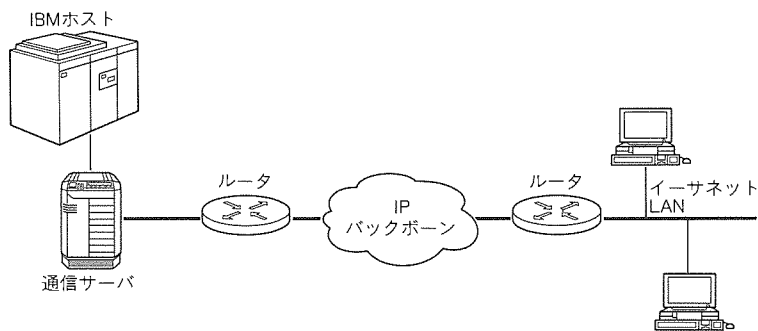


図 4. 通信サーバを用いたネットワーク

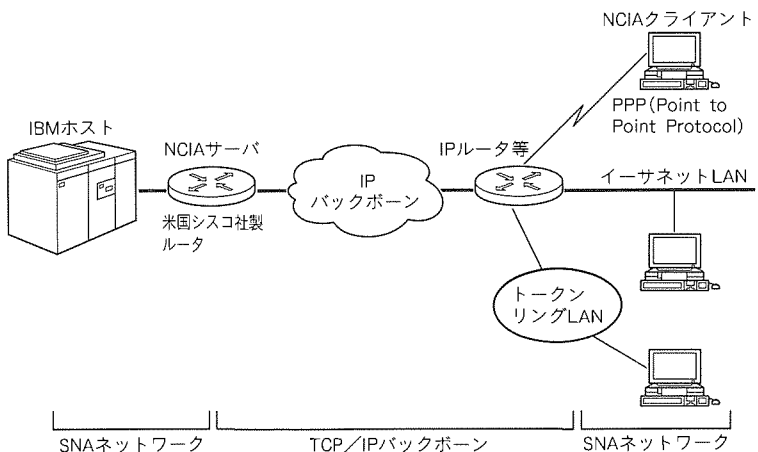


図 5. NCIA システムの構成概要

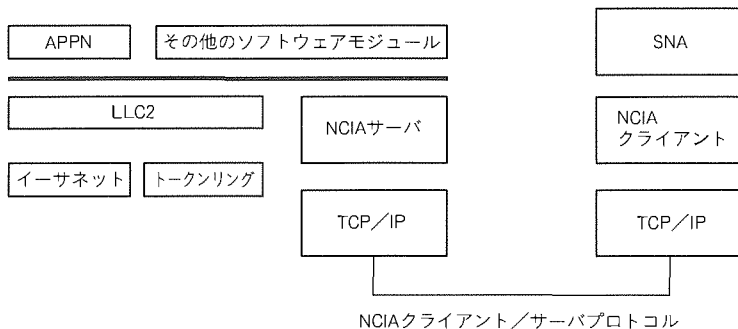


図 6. NCIA クライアント/サーバモデル

ユーザを介してクライアント/ホストからのデータの送受信を行うことである。後者では、クライアントはサーバのみを意識してSNAデータの通信を行っていけばよい(図6)。

#### (1) TCPセッション

NCIAでは、特別に設計されたクライアント-サーバ間プロトコルを使用している。このプロトコルの目的は以下の二つである。

##### (a) 基本セッションの確立

NCIAによる通信に先立ち、サーキット(通信路)を確立してデータの通信を行うための基本セッションを確立する。代表的な基本セッションフローを図7に示す。

##### (b) サーキット(通信路)の確立

基本セッション確立後、クライアントとサーバ間のサーキット(通信路)を確立する。また、サーバはクライアント-サーバ間及びサーバ-ホスト間でエンド ツー エンドのサーキット(通信路)を確立する機能を持つ。

#### (2) ホストとの通信

サーバは、米国シスコ社ルータ内で他のソフトウェアモジュール(DLCスイッチ機構等)を介してホストとの通信を行う。

### 4.3 NCIA3270における実現方法

今回開発したNCIA 3270は、NCIAクライアント機能を通信手順部として実装したMicrosoft Windows 95、及びWindows NT 3.51<sup>(注8)</sup>上で動作する端末エミュレータである。この製品のソフトウェア構造を図8に示す。NCIAプロトコル制御部は、Windows環境におけるTCP/IPソフトウェアインタフェースであるWinSock(32ビット)インタフェースを介して、NCIAプロトコルに基づいたTCP/IP通信を行う。

### 5. システム例

NCIA 3270を使用した企業ホストシステムの例を図9に示す。

このシステムの要件は、本社ホストと全国の各支店の端末を高速デジタル回線を介してTCP/IPでネットワークに接続することである。このシステムは各支店ごとにルータと交換機がTCP/IP通信を実現するように設置されており、実現案検討に当たっては設備の新規購入や設定変更等を極小化するような配慮が必要である。当該

(注8) "Microsoft Windows 95" "Windows NT" は、米国Microsoft Corp.の商標である。

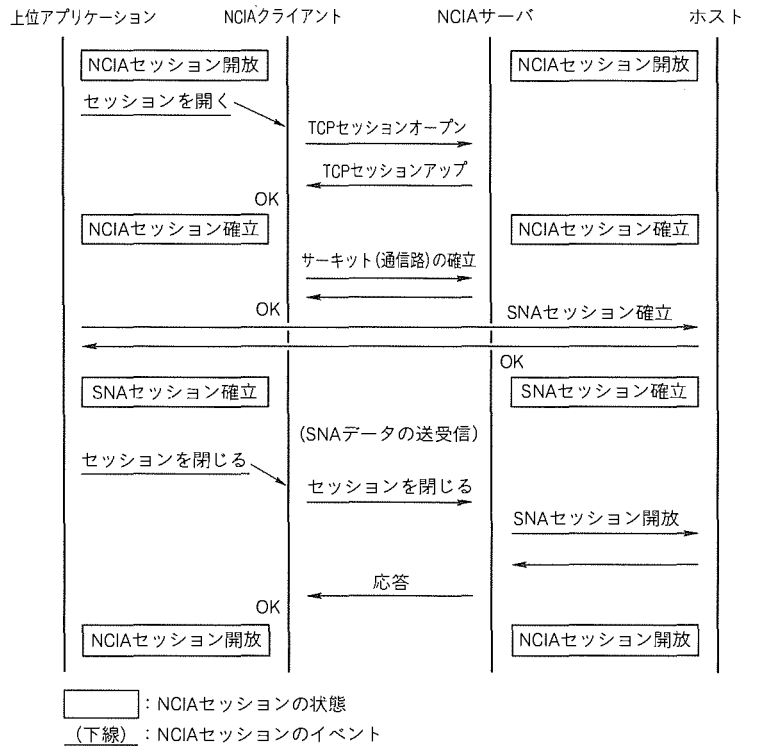


図7. 代表的なNCIA基本セッションフロー

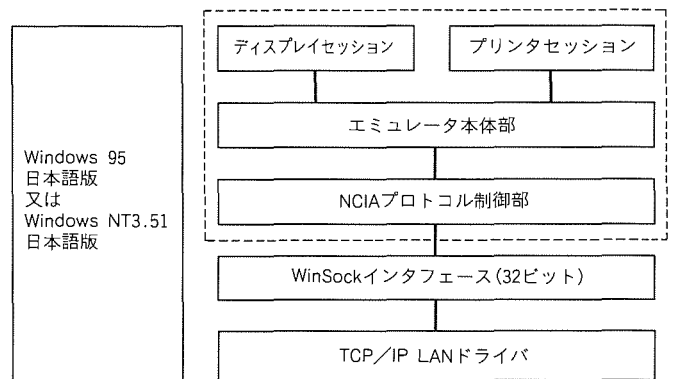


図8. NCIA3270ソフトウェア構造(破線部分が今回開発部分)

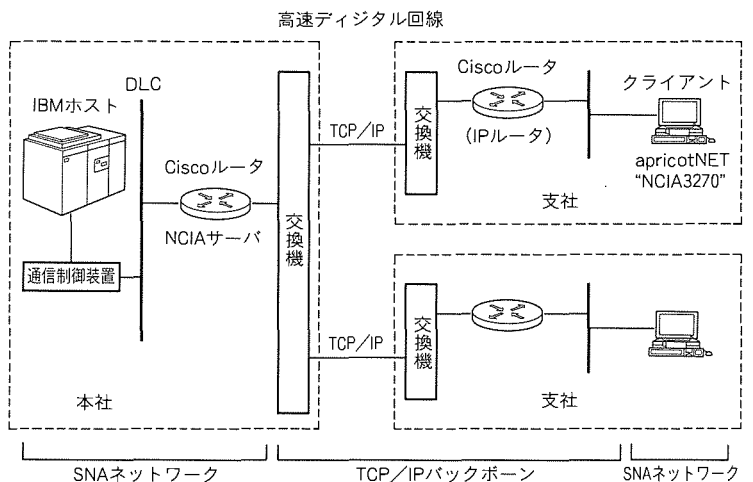


図9. NCIA3270を用いたシステム構成例

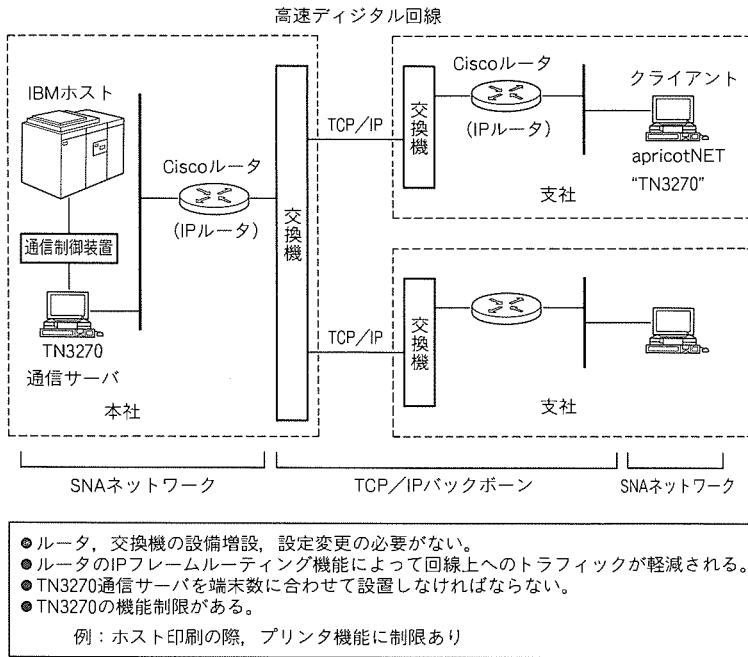


図10. TN3270を用いたシステム構成

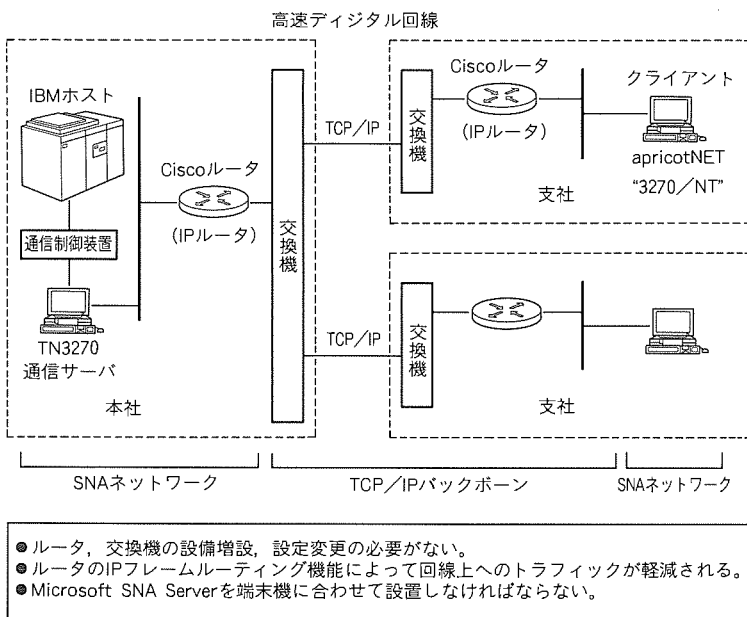


図11. Microsoft SNA Server(通信サーバ)と3270/NTを用いたシステム構成

要件実現のため、NCIA 3270を用いたシステム以外に、3章で述べたように以下の二つの案が考えられる。

- (1) TN 3270通信サーバ+TN 3270 (図10)
- (2) Microsoft SNA Server (通信サーバ) + 3270/NT (図11)

図中に上記のそれぞれの特徴を示す。TN 3270及び通信サーバを採用する際の一般的な長所、短所については3章で述べたが、一部再掲する。

図9のシステムを採用することにより、上記2案の課題の解決及びTCP/IPプロトコルに統一することによるメリットを享受でき、システム要件を満足できる。

## 6. むすび

今後、企業におけるネットワークはテクノロジーの進歩に合わせてますます複雑化する。ここで紹介したapricotNET“NCIA 3270”を製品化することにより、SNAネットワークとインタネットワークを統合するための、従来のネットワークでの長所だけをすべて生かした最良の解決策を提供できたと考える。この製品がネットワーク管理者の負担を少しでも軽くできれば幸いである。

ここで実現したインタネットワークの統合で、現在のSNAネットワークを更に進んだAPPNやATMなどのネットワークに発展させることが、将来的にはシスコ社ルータでのサポートによって実現される。

最後に、御指導、御協力いただいた関係各位に感謝する。

## 参考文献

- (1) 日本シスコシステムズ(株):プロダクト解説-IBMインターネットワーク

# 超解像技術

加門和也\* 中江彰宏\* 埜 哲郎\*\* 宮崎順二\*

## 1. ま え が き

LSIの高集積化に対応するため、リソグラフィ技術では、水銀ランプのg線、i線からKrFエキシマ、ArFエキシマ、X線へと続く露光の短波長化の流れと、位相シフト法<sup>(1)~(3)</sup>、変形照明法<sup>(4)(5)</sup>、ひとみ(瞳)フィルタ法<sup>(6)~(8)</sup>を始めとする超解像技術の開発によって解像力や焦点深度(DOF)を改善することで、リソグラフィ技術の延命や、世代交代の円滑化を図る流れとがある。

露光の短波長化は汎用性は高いが、設備コストが高い。逆に、超解像技術は汎用性は低い、設備コストが安い。汎用性が高く設備コストが安い技術が求められるので、これら二つの流れは相互に補完的な関係にあり、短波長化のみ又は超解像技術のみの開発だけでは不十分であり、いずれかに偏った開発では10年で約1/5という急速なデザインルールの微細化に伴う要求に対応できず、LSIの高集積化のトレンドは破たん(綻)する可能性すらある。露光装置自体はステップメーカーが開発を担当しているので、当社では超解像技術の開発に取り組んでいる。

本稿では、超解像技術の開発状況について述べる。

## 2. 部分コヒーレント結像理論

レイリーによると、ステップの最小解像力( $R$ )は、レンズの開口数( $N_A$ )、露光波長( $\lambda$ )、プロセス定数( $k_1$ )を用いて次のように与えられる。

$$R = k_1 \cdot \lambda \div N_A \dots\dots\dots (1)$$

一方、DOFは、プロセス定数( $k_2$ )を用いて、次のように与えられる。

$$DOF = k_2 \cdot \lambda \div N_A^2 \dots\dots\dots (2)$$

したがって、解像力とDOFを同時に改善するには、式(2)で $N_A$ が2乗になっていることに注意すると、 $N_A$ も $\lambda$ も小さくするとよい。例えば、4MDRAMでは、 $N_A = 0.54$ 、g線(436nm)だったが、16MDRAMでは、 $N_A = 0.5$ 、i線(365nm)といった具合である。このままでは、64MDRAMはKrFエキシマ(248nm)、256MDRAMはArFエキシマ(193nm)を採用せざるを得ない。しかし、KrFやArFエキシマはまだ開発途上のプロセスであり、解決すべき問題も多く残っている。特に、コストの問題は大きいので、前世代のステップやプロセスの延命策は最重要の課題である。

部分コヒーレント結像理論では、光学像は図1の上部に示した式で求められる。この式はステップ光学系自体を記述している、図の下部に示した光学系と対比させるとその意味がよく分かる。まず水銀ランプ等の光源から発した光は、フライアイレンズへ導入され、100個程度の領域に分割される。フライアイレンズの出口では光源像が形成されており、ここに紙を置くと小さい水銀ランプがたくさん並んで見える。すなわち、ここに2次光源面が形成されている。また、各点光源はすべてマスク全面を照明するので、ステップでは、1次光源にムラがあっても平均化効果によって1%程度の照度均一性が達成されている。この平均化効果は、式中の $\Sigma$ で表現されている。 $F$ はマスクパターンのフーリエ像、 $K$ は瞳関数である。これらを瞳面上で積分し、2乗するとウェーハ上の光学像が求まる。

## 3. 超解像技術

光学では、レイリー限界を超えて高い解像力や広いDOFを得るために光学系の瞳面や結像面にフィルタやシフトを形成する技術を、一般に超解像技術という。ステップの図を用いて整理すると、図2のようになる。

光源面で変形照明法、マスク面で位相シフト法、瞳面で瞳フィルタ法、さらには、変形照明法+位相シフト法、変形照明法+瞳フィルタ法などの組合せで、更に大きな改善効果を得るものもある。それぞれの技術は、更に小さく分類されている。

## 4. 位相シフト法

位相シフト法は、フォトマスク上に光の位相をずらすためのシフトを部分的に形成する方法(図3)で、透過振幅が従

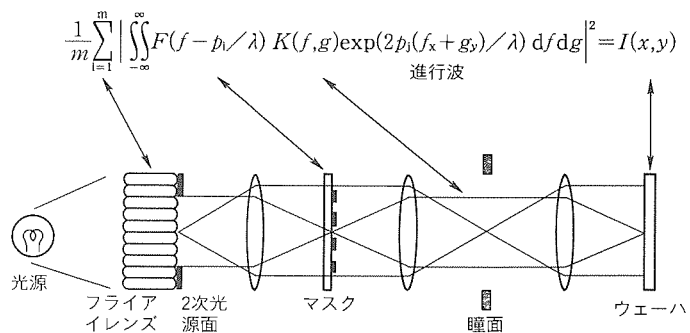


図1. 部分コヒーレント結像理論



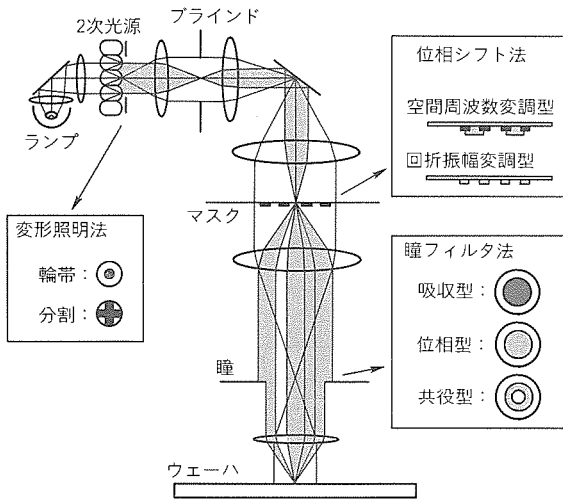


図 2. 投影露光装置と超解像技術

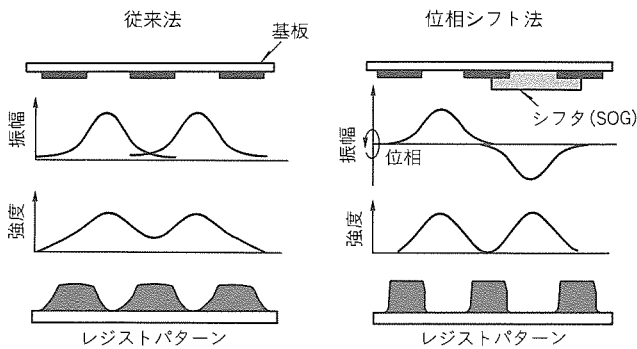


図 3. 位相シフト法の原理

来1と0のみだったものに加えて-1の領域をも導入する方法である。この位相反転部分をうまく配置すると、回折によって広がった光学像のすそ(裾)を隣り合うパターン同士で相殺できる。その結果、光学像の明暗が鮮明となり、コントラストが改善される。光の透過部分の一つ置きにシフトを形成するレベンソン型の場合、位相シフト法の改善効果は最大限に発揮され、解像力やDOFは通常法に比べて2倍になる。

一方、レベンソン型には、配線パターンの端や周期性の崩れる位置に、不要なブリッジがかかるという問題点もあった。そこで当社では、図4のように、中間位相(90°)シフトを配線パターンの端や周期性の崩れる位置に形成することで、位相ギャップが緩和されブリッジの問題が解消する方法を開発した。図の左に示すマスクパターンによる光学像の計算結果を図の右に示す。90°シフトのない方には不要なブリッジがかかっており配線パターンとしては使用できないが、90°シフトを形成した方は良好に分離できており十分使用に耐え得る。ここでは、i線で0.3μm L/S (Lime and Space)を解像できており、64 MDRA Mの製造に十分な性能を持っている。また、周期性の乏しいコンタクトホール系では、ハーフトーンマスクやエッジ強調型等が適用できる。

位相シフト法の問題点としては、マスクの製造精度が従来

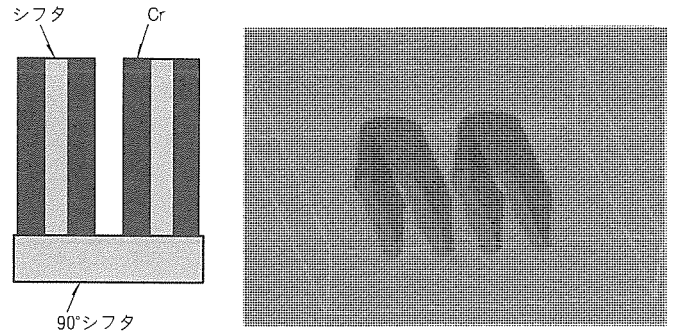


図 4. 中間位相シフトを用いた計算結果

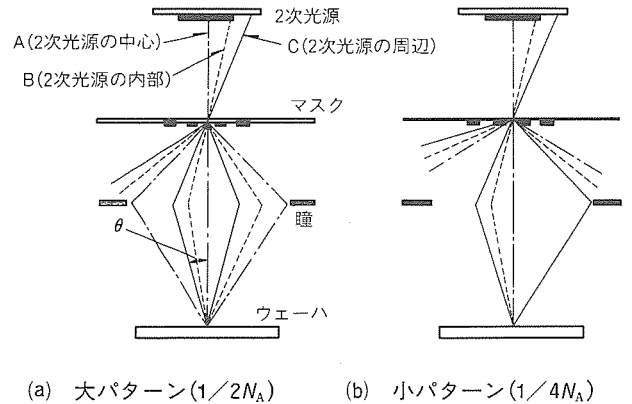


図 5. 変形照明法の原理

にも増して要求されること、マスク製造コストが上昇すること、パターン設計時に位相関係を考慮することが必要である点などが挙げられる。

### 5. 変形照明法

マスク製造の難しい位相シフト法に並ぶ技術として、当社では、世界で初めて変形照明法を開発した。光源面からの光は、マスクで回折され、瞳面で光源像を形成する。図5の全光線は通常照明法、実線のみは変形照明法の場合をそれぞれ示している。これらのうち、瞳を通過したものが結像に寄与できる。図の光Aの回折光は瞳の周辺部分を通過するので、入射角が大きくDOFを小さくする。そこで、2次光源の中央付近を遮へいし、DOFの劣化する成分をなくすと、実効上の入射角が小さくなり、光学像のDOFを拡大できる。我々は、このプロセスに、Photolithography Enhanced by Modified Exposureを略してPHOENEXと名づけた。

図6の左は、輪帯照明法を用いたときのコントラスト(ベストフォーカス)のパターン依存性を示す。微細パターンのコントラストは、遮光幅σを増すにつれて改善している。しかし、大パターンのコントラストは、わずかに劣化している。図の右は、DOFのパターン依存性を示す。DOFは、遮光幅σを増すにつれて改善している。特に、サブハーフミクロン領域で大きな改善効果が見られている。

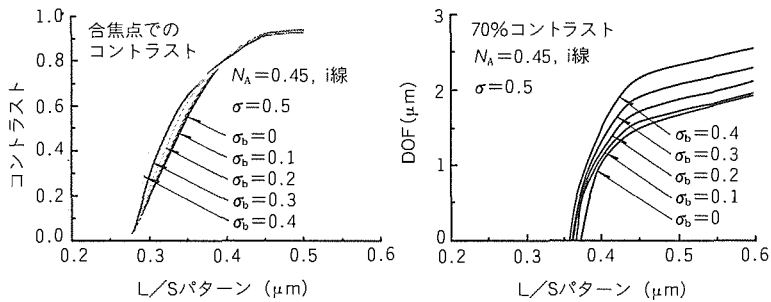


図6. 輪帯照明法の計算結果

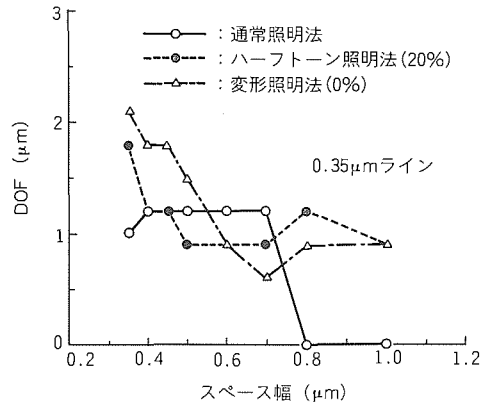


図9. 光源形状によるDOFの挙動

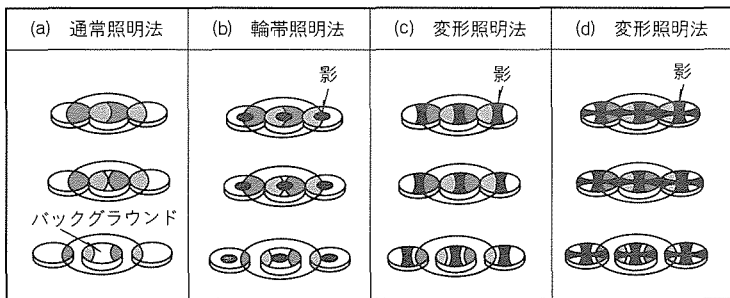


図7. 瞳面上の光源像の挙動

照明形状	通常照明	輪帯照明	ハーフトーン照明	4分割照明
露光パワー (mJ/cm <sup>2</sup> )	578	490	254	217
均一性 (%)	1.21	2.67	3.76	6.02

図10. 露光パワーと照度均一性

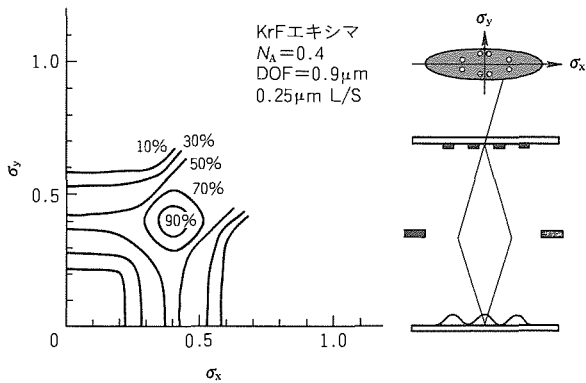


図8. 光源位置によるコントラスト分布

この様子を、瞳面上の光源像を利用して述べる。図7の大きな円は瞳を、小さい円は0, ±1次の光源の像を示している。網掛け部は結像に寄与する部分を、黒は遮光部分を、白は結像せずバックグラウンドになる部分を示している。0.3 μm L/S程度の小さい繰返しパターンの場合、図の下のように回折光は広がり、バックグラウンド成分(白)が多く導入される。そこで、輪帯照明を適用し、中央付近のバックグラウンド成分を取り除くと、コントラストを改善できる。しかし、円形の遮光パターンのみではその両側にまだ多くのバックグラウンド成分が残っているので、これも遮光すれば更にコントラストが改善される。実際には、縦横に様々なパターンが存在するので、図の(c)(d)のように、十字型や糸巻型に遮光パターンを形成するとよい。

図8右のステップの略図において、2次光源面上のある点から出射した光が、ウェーハ面上で結像したときのコントラ

ストを2次光源面上にプロットして図のマップを作成している。なお光源は像シフトが起こらないよう、また、縦横のパターンに対応できるように4回対称に配置しているので、第1象限だけを示している。計算条件は、λは248 nm, N<sub>A</sub>は0.5, フォーカスは0.9 μm, 0.25 μm L/Sを対象にしている。

さて、このコントラスト分布には、1 μm程度デフォーカスしても90%コントラストを与える領域が存在する。ここが、PHOENEXが理想的に成立する条件である。汎用性を拡大させるため、光学特性を劣化させない範囲で可能な限り広い光源を与えるには、等高線に囲まれた領域を光源として導入すればよい。また、コントラストの低い領域を半透明(ハーフトーン照明)にしてもよい。

図9は、種々の寸法のパターンに対応するDOFを示している。PHOENEXにより、サブハーフミクロン領域ではDOFが拡大されている。さらに、サブミクロン領域では、通常照明法で見られていたDOFが全く確保できない領域(光近接効果による)でも、十分なDOFが確保されている。

各種光源形状で得られる露光パワーと照度ムラを図10に示す。ハーフトーン照明を使用した場合は、変形照明法の欠点であった露光パワーと照度均一性の劣化も緩和されている。4分割の場合と比べると、露光パワーで2割増し、照度均一性は、6%台が3%台にまで回復している。これは、メッシュ部分の光を導入することで、平均化効果が増していること

に起因する。

## 6. 変形照明法+位相シフト法

当社では、変形照明法と位相シフト法を組み合わせると一層大きく改善される場合もあることを世界で初めて見出した。回折振幅変調型位相シフト法を用いた場合の様子を、再び瞳面上の光源の像を利用して考察してみる。図11の小さい円の大きさは、回折光の振幅を示している。0.3 $\mu\text{mL}/\text{S}$ 程度の小さい繰返しパターンでは、図の下のように回折光は広がり、片側の回折光しか利用できない。そのため、通常マスクでは0次光が大きく、1次光とのアンバランスのためコントラストが劣化していた。そこで、シフト遮光型位相シフト法を使うと、図の右のように、1次光成分を大きくすること

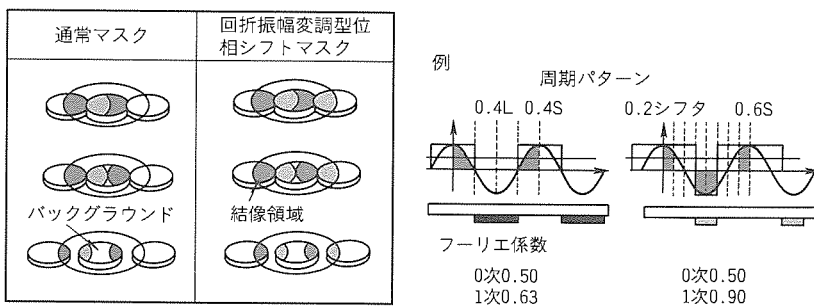


図11. 瞳面上の光源像の挙動

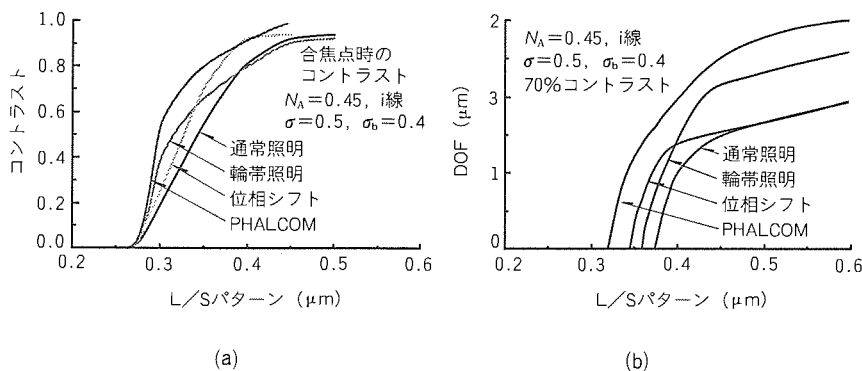


図12. PHALCOMの計算結果

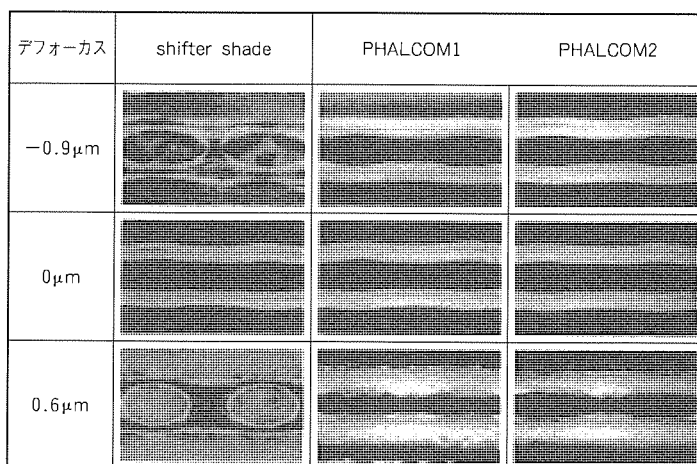


図13. PHALCOMによるワード線パターンの実験結果

で、0次と1次光成分のバランスをとり、コントラストを改善できる。さらに、PHOENEXを加えると、遮光部分が0次光の中央のバックグラウンド成分をカットして、コントラストを向上させ、瞳の周辺部分のDOFを劣化させる成分をカットしている。

これらをまとめると、

- (1) PHOENEXを用いると、限界DOFが拡大する。バックグラウンドが除去されるのでコントラストは向上するが、0次と1次光の振幅がアンバランスとなる。
- (2) シフト遮光型位相シフト法は、0次と1次光の振幅の比をパターンの大きさに応じて調整する。

このように、PHOENEXとシフト遮光型位相シフト法は、互いに助け合う関係にある。我々は、このプロセスを

Phase Shift Lithography Combined with Modified Illuminationを略して PHALCOMと名付けた。

PHALCOMの計算結果を図12(a)に示す。小さいパターンのコントラストが位相シフトだけの場合よりも更に改善されていることが分かる。バックグラウンド成分を輪帯照明がカットしたためである。輪帯照明によって限界DOFを拡大し、シフト遮光型位相シフト法によってコントラストを向上させると、70%コントラストを超える領域が増えるので、図12(b)に示すようにDOFは拡大する。

$N_A$  (0.45) が小さくても位相シフト法を使うと、64 MDRAM相当のワード線

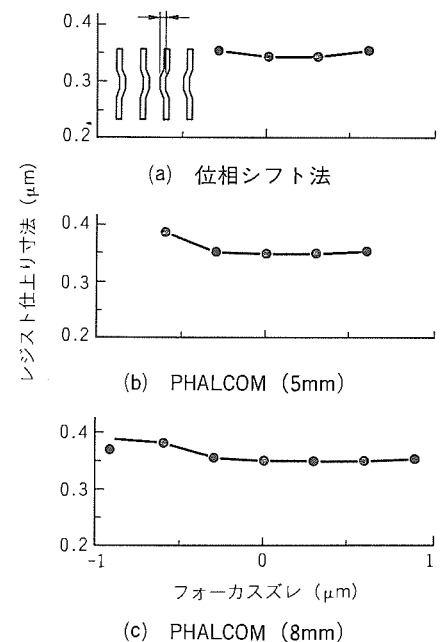


図14. ワード線のフォーカス依存性

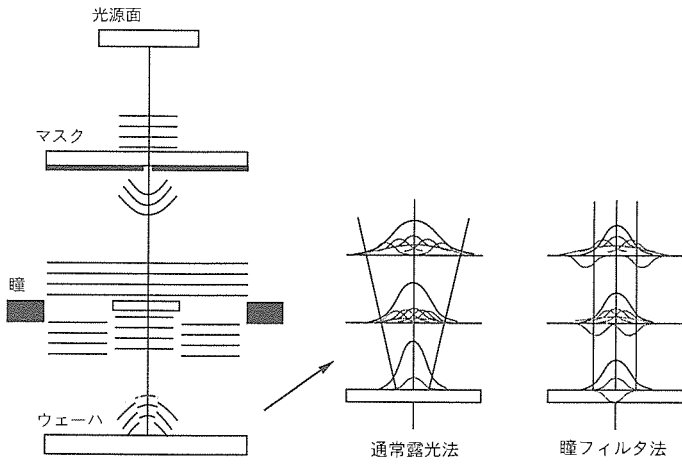


図15. 瞳フィルタ法の原理

を形成することはできる(図13)。しかし、 $-0.9\mu\text{m}$ デフォーカスすると、パターンの劣化は激しい。ここで、PHALCOMを導入して遮光幅を拡大するにつれ、パターンが改善されている。マイナスのデフォーカス側は既に実用領域に入っているし、プラス側も不十分ながら、位相シフト法のみには比べれば大きな改善効果が見られる。

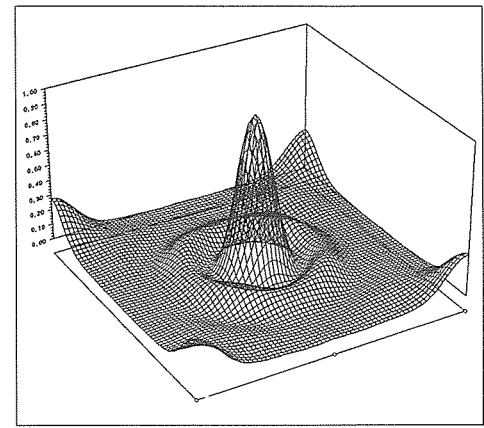
図14に、ワード線のフォーカス依存性を示す。図(a)は位相シフト法のみであり、図(b)(c)は、PHALCOMによる測定結果である。ワード線のDOF(寸法の10%の変動)は、位相シフト法のみでは $0.9\mu\text{m}$ だが、PHALCOMを適用すると $1.8\mu\text{m}$ 確保できる。PHALCOMを適用すると、DOFは約2倍に拡大される。

### 7. 瞳フィルタ法

当社で発明した位相型瞳フィルタ法の原理を紹介する。図15左において、光源からの光がマスク上のコンタクトホールに入射すると、光が回折される。次に回折光が、瞳面上の位相フィルタによって、 $\pi$ だけ位相がシフトする。この状態でウェーハ上へ像を結ぶ。

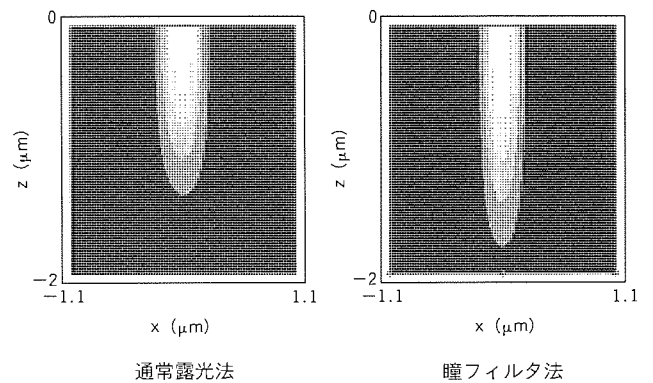
図の右において、ウェーハ上では $N_A$ で決まる集束角で光が集束するから、通常法の場合では、デフォーカスすると像が劣化する。ところが瞳フィルタ法の場合では、外側の光が反転しているから、これが光学像のすそ(裾)を打ち消す。最終的に得られる光学像は、DOFが飛躍的に拡大している。厳密に言うと、さらに位相ずれがあるので、サイドローブ等が発生する。

図16(a)は、瞳フィルタ法をコンタクトホールに適用した計算結果である。ベストフォーカスでの二次元光学像だが、周囲にサイドローブが発生している。また、打ち消し合う成分があるので、光強度は落ちている。しかし、図(a)の断面をとりフォーカス方向にスキャンすると、通常法では、光学像は図(b)左のようにどんどん劣化していくのに対して、瞳フィルタ法では図(b)右のように非常に高いフォーカス安定



瞳フィルタ法

(a) X-Y二次元光学像



(b) X-Z二次元光学像

図16. 瞳フィルタ法の計算結果

性を示している。瞳フィルタ法を適用すると、微細なコンタクトホールなら約2倍のDOFを確保できる。

問題点としては、スループットが落ちることに対して有効な解決策がないこと、サイドローブが大きいこと、近接効果が大きいこと、大きいパターンを同時に形成できないことなどが挙げられる。

### 8. むすび

LSIデバイスの世代交代に伴い、要求される解像力のレベルはますます高くなっている。さらに、量産では月産何百万個も作るので、実力が要求レベルを上回る必要がある。一般的に転写技術の立上りは急しゅん(峻)だが、飽和するのでやがて実力が要求レベルに達しなくなる。そのため、当社は解像力やDOFを飛躍的に改善できる超解像技術を開発した。

超解像技術を飽和した前世代の露光技術に適用すると、その延命効果が得られる。また、開発途上の次世代の露光技術に超解像技術を適用すると、早くからノウハウを蓄積できるため、新技術の立上げが加速される。超解像技術をこのように使うことで、転写技術の世代交代に伴う装置面・プロセス

面の大改訂等の障壁が緩和され、円滑に転写技術の世代交代を進められる。

つまり、超解像技術は、光露光技術の限界を追求するために不可欠な技術である。今後の課題としては、汎用性の高い超解像技術<sup>(9)(10)</sup>を開発し、実用化する必要がある。

#### 参 考 文 献

- (1) Shibuya, M. : Japan Patent 62052 (1982).
- (2) Levenson, M.D., Viswanathan, N.S., Simpson, R.A. : Improving Resolution in Photolithography with a Phase - Shifting Mask, IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, 1828 ~ 1836 (1982)
- (3) Kamon, K., Miyamoto, T., Myoi, Y., Nagata, H., Kotani, N., Tanaka, M. : Photolithography System Using a Combination of Modified Illumination and Phase Shift Mask, Jpn. J. Appl. Phys., 31, 4131 ~ 4136 (1992)
- (4) Kamon, K., Miyamoto, T., Myoi, Y., Nagata, H., Tanaka, M., Horie, K. : Photolithography System Using Annular Illumination, Jpn. J. Appl. Phys., 30, 3021 ~ 3029 (1991)
- (5) Kamon, K., Miyamoto, T., Myoi, Y., Nagata, H., Tanaka, M. : Photolithography System Using Modified Illumination, Jpn. J. Appl. Phys., 32, 239 ~ 243 (1993)
- (6) Fukuda, H., Terasawa, T., Okazaki, S. : Spatial Filtering for Depth of Focus and Resolution Enhancement in Optical Lithography, J. Vac. Sci. & Technol., B9, No.6, 3133 ~ 3116 (1991)
- (7) Fukuda, H., Yamanaka, R. : A New Pupil Filter for Annular Illumination in Optical Lithography, Jpn. J. Appl. Phys., 31, Part 1, 4126 ~ 4130 (1992)
- (8) Fukada, H., Kobayashi, Y., Hama, K., Tawa, T., Okazaki, S. : Evaluation of Pupil Filtering Effect in High -  $N_A$  i - line Lens, Jpn. J. Appl. Phys., 32, Part 1, 5845 ~ 5849 (1993)
- (9) Kamon, K., Miyamoto, T., Myoi, Y., Wakamiya, W., Nagata, H., Tanaka, M. : Proposal of a Next - Generation Super Resolution Technique, Jpn. J. Appl. Phys., 33, 6848 ~ 6854 (1994)
- (10) Kamon, K., Wakamiya, W., Nagata, Morizumi, K., Miyamoto, T., Myoi, Y., Tanaka, M. : Optical Proximity Correction for Super Resolution Technique, SPIE, 2512, Photomask and X-Ray Mask Technology II, 491 ~ 502 (1995)



# ATMネットワーク対応高画質MPEG2 コーデックの実用化

堀井裕児\* 三尾武史\* 松崎一博\* 服部伸一\* 山田浩利\* 安田吉男\*\*

## 1. ま え が き

広帯域マルチメディア通信の情報符号化技術であるMPEG2 (Moving Picture Experts Group Phase 2) が、ISO/IEC, ITU-Tなどの国際標準化団体によって標準化・勧告化された。これを受け、MPEG2を利用した映像符号化伝送装置の研究開発及びそれらを用いた実験が盛んに行われている。

当社では、いち早くISO/IEC, ITU-Tなどについて積極的な標準化活動に取り組み、通信・放送分野の、主にプロフェッショナルユースをターゲットとしたMPEG2準拠の高画質デジタル映像伝送システムの研究開発を行ってきた。その成果は、衛星を利用した放送局向けSNG (Satellite News Gathering) システム<sup>(1)</sup>や防災用映像伝送システムなどの実用化に生かされている。

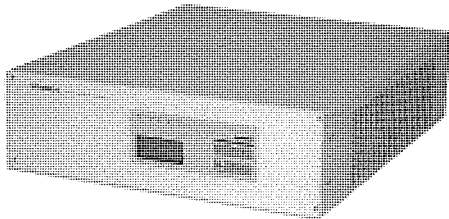


図1. ATMネットワーク対応MPEG2コーデック

一方、広帯域伝送の基盤技術としてATM (Asynchronous Transfer Mode) 関連技術が、ITU-T, ATMフォーラムなどによって標準化・勧告化された。これを受け、国際電信電話(株)と共同でMPEG2コーデックのATMネットワーク対応システムの開発・実用化を行ったので概要を述べる(図1)。

## 2. 国際標準化動向

放送・通信・蓄積分野等の種々のアプリケーションを包含する汎用ビデオ符号化方式 (ISO/IEC 13818-2, ITU-T H.262, 以下“MPEG2ビデオ”という。), 及び汎用メディア多重・同期再生方式 (ISO/IEC 13818-1, ITU-T H.222.0, 以下“MPEG2システム”という。)<sup>(2)</sup>が1994年末から'95年にかけてISOとITU-Tの共通テキスト形式として制定された。'96年中ごろには、図2のようなプロトコル構成を規定したB-ISDNオーディオビジュアル通信システム勧告H.310がITU-Tで成立する予定である。

H.310勧告化の過程で、ハードウェアによる相互接続実験が'95年9月から10月の期間に実施され、MPEG2システム/ビデオ, ISO/IEC 11172-3 (以下“MPEG1オーディオ”という。), 及びITU-T勧告H.222.1, 同I.363.1, 同I.363.5, 同I.361, 同I.432が検証された。また、'95年10月末にはOLU (On-Line University) における多地

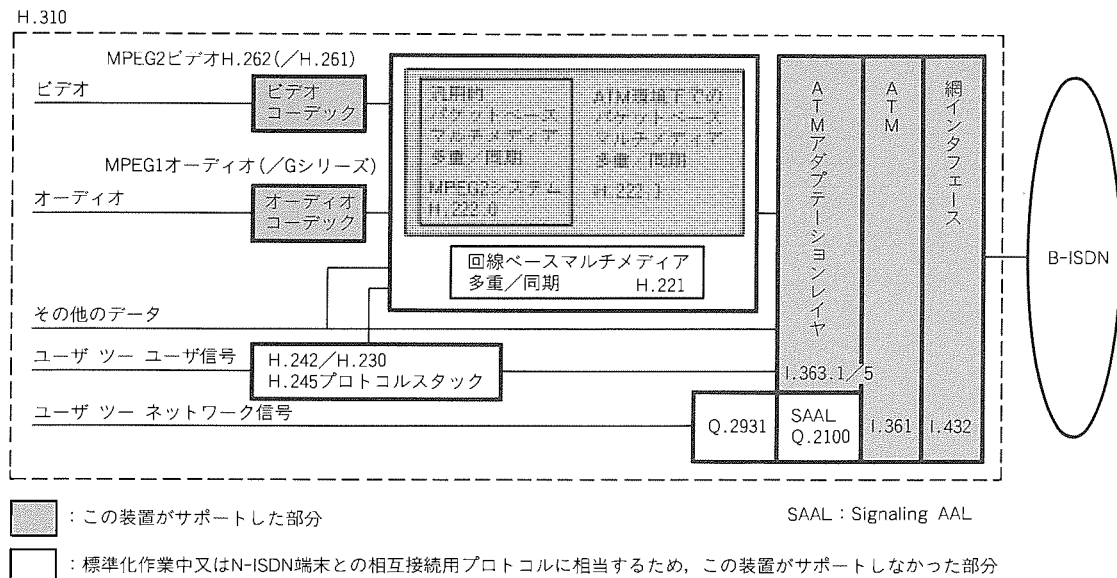


図2. ITU-T勧告H.310の規定範囲とこの装置の構成

点大学間の遠隔講義実験が行われた。

本稿で紹介するコーデックは両実験に供され、動作の安定性と他社端末との相互接続性が確認されている。

### 3. システムの概要

#### 3.1 システム構成

このコーデックはエンコーダとデコーダの二つの装置で構成した。図3にシステム構成を示す。エンコーダで入力された映像/音声信号は、それぞれビデオ/オーディオエンコーダで符号化される。各符号化データストリームはシステム処理部(多重部)で、その他の付加データとともにパケット多重化したトランスポートストリーム(TS)に変換される。

TSは、ATMアダプテーションレイヤ(AAL)処理部でATMアダプテーション送信処理を施された後ATMセル化され、ATMインタフェース部で回線クロックに同期してネットワークに出力される。デコーダでATMインタフェース部によって受信したセルは、AAL処理部でATMア

ダプテーション受信処理を施されTSを再生成する。TSはシステム処理部(分離部)で各メディアに対応した符号化データストリームに分離され、各ストリームはビデオ/オーディオデコーダで復号される。

#### 3.2 諸元

このコーデックの諸元を表1に示す。このコーデックの特長は、MPEG2で規定されたビデオ/オーディオ/システムの3規格すべてに準拠するほか、色信号の再現性に優れ、放送業務には必ず(須)となる4:2:2のクロマ(色差信号)フォーマットの採用や、高度な信号処理技術と適応符号化制御技術の適用によって高画質なデジタル映像伝送を実現している点などが挙げられる。

### 4. ATM インタフェース

#### 4.1 物理レイヤ/ATMレイヤ

このシステムのATMインタフェースは、ATMフォーラムUNI及びITU-T I.432の国際標準に準拠している。

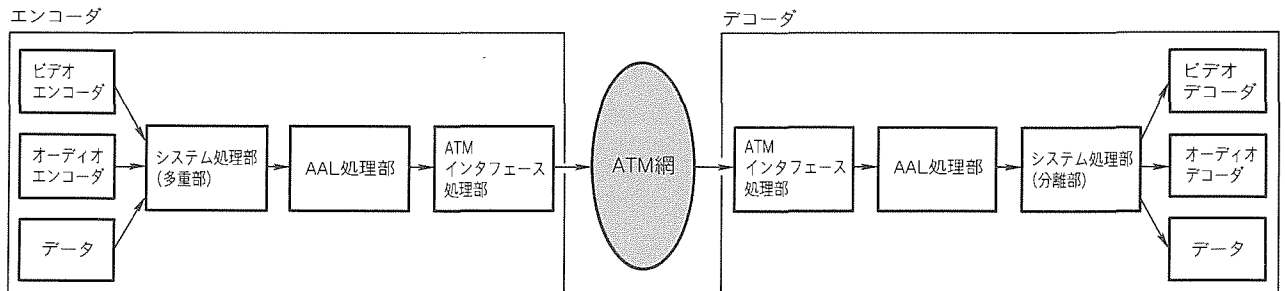


図3. コーデックの内部構成

表1. コーデックの諸元

項目	仕様内容	
ビデオ	入出力信号	アナログ : コンポーネント/コンポジット デジタル: SMPTE 259Mシリアルコンポーネント (いずれも13.5MHz画素サンプル, NTSC)
	ピクチャ構造	フィールドストラクチャ/フレームストラクチャ
	クロマフォーマット	4:2:0/4:2:2
	符号化方式	ISO/IEC 13818-2, ITU-T H.262(MPEG2ビデオ)
オーディオ	符号化方式	ISO/IEC 11172-3(MPEG1オーディオ) レイヤ2(ステレオモード)
	符号化速度	256kbps/384kbps
メディア多重	方式	ISO/IEC 13818-1, ITU-T H.222.0(MPEG2システム) トランスポートストリーム多重
AAL	タイプ	AALタイプ1/タイプ5
	誤り訂正処理 (セル損失・バイト誤り)	・当社独自方式/I.363ロングインターリーブ方式(AAL1) ・CRCチェックによるCPCS-PDU廃棄(AAL5)
	タイミング回復	網クロック同期、又は適応クロックによる回復
ATMレイヤ	VPI/VCI	即値入力可
	CLP	0/1設定可
	コネクション	PVC
物理レイヤ	回線種別	155.52Mbps ATM UNI (SONET/SDH)
	適用ファイバ/コネクタ	シングルモード型光ファイバケーブル/F04形単心光ファイバコネクタ

(1) 物理レイヤ

現在、155.52 Mbpsの伝送速度を持つ物理レイヤの規格としては、北米で主に採用されているSONET (STS-3c)と国際標準のSDH (STM-1)の二つが存在し、このコーデックはいずれの規格にも対応可能である。

(2) ATMレイヤ

ATM網では、論理多重された個々のチャンネルを識別するためにVPI/VCI (Virtual Path Identifier/Virtual Channel Identifier)を用いている。このコーデックは、送受信するATMセルのVPI/VCIに任意の値を設定可能である。送信側は設定されたVPI/VCI値を含んだATMセルヘッダの生成を行い、受信側では受信セルのHEC (Header Error Control) フィールドによってエラーチェック (1ビット誤りの訂正を含む)を行った後、VPI/VCI値によって受信セルのフィルタリングを実施する。また、送信側にはレートシェーパを搭載してピークセルレート (最小セル送信間隔)を一定値以内に抑える機能も備えており、網におけるセル廃棄の可能性やセル遅延変動を最小限に抑える

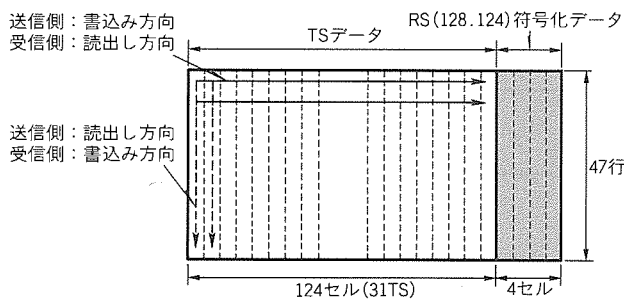


図4. ロングインタリーブ方式のマトリックス構成

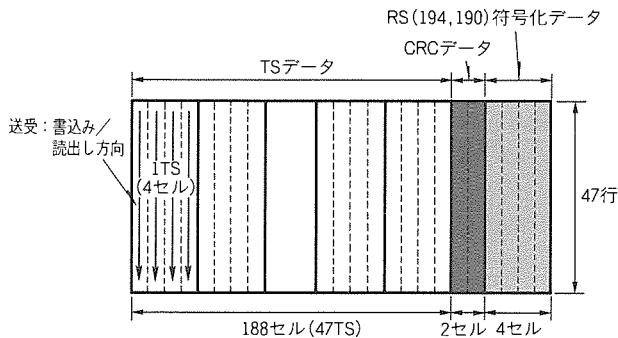


図5. 三菱独自方式のマトリックス構成

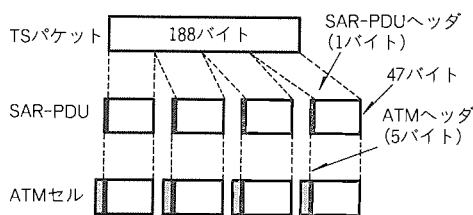


図6. AALタイプ1におけるマッピング

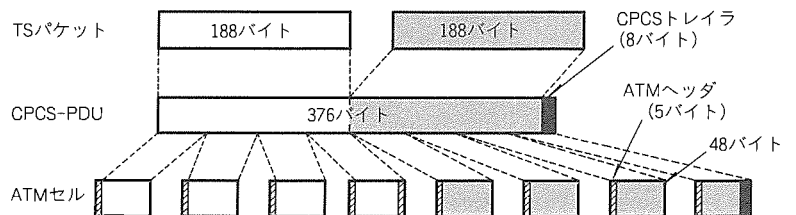


図7. AALタイプ5におけるマッピング

ことができる。

4.2 AAL

AALは勧告I.363に準拠し、タイプ1及び5の2種に対応する。いずれも基本処理として、平均レート制御、TSのセルへのマッピング、バッファを用いたセル遅延変動の吸収、セル損失/誤挿入/ランダムエラーに対する回復等を行う。以下に各タイプに固有な処理内容を記す。

(1) AALタイプ1

セル廃棄/誤挿入/ランダムエラー対策として、SAR-PDU (Segmentation And Reassembly-Protocol Data Unit) ヘッダ内のシーケンスカウントを用いたセル廃棄/誤挿入監視、及び切換えによって2方式のセルインタリーブを伴う誤り訂正処理を行う。すなわち、勧告I.363のオプションであるロングインタリーブ方式 (以下“I.363方式”という。)、当社独自方式<sup>(9)</sup>に対応している。各々のインタリーブマトリックスを図4、図5に示す。いずれも各列が一つのSAR-PDUペイロードになり、1マトリックス当たり4セルまでの損失、各行当たり2バイトまでのランダムバイト誤りを訂正可能である。両方式の主な相違はマトリックスサイズ、書込み/読出しの方向、TSに対するCRC (Cyclic Redundancy Check) 演算の有無である。

当社独自方式の特長は、TSパケットとATMセルの区切りを整合させることにより、誤り訂正能力以上のエラーが発生した場合でも、メディア復号動作への影響を最小限にとどめることが可能な点にある。

TSのセルへのマッピングは誤り訂正の実施/非実施、訂正手法によって異なり、誤り訂正非実施の基本モードでは、図6に示すように1TSを四つのSAR-PDUペイロードに分割し、SAR-PDUヘッダ、ATMヘッダを付加して4セルとする。また、勧告I.363のオプション機能である適応クロック法をサポートしており、互いに非同期的な複数網を経由した端末間の通信が可能である。

(2) AALタイプ5

セル廃棄/誤挿入/ランダムエラー対策としてCPCS-PDU (Common Part Convergence Sublayer-PDU) 単位でのCRC演算を行い、エラー発生時はCPCS-PDU単位で廃棄する。TSのセルへのマッピングはATMフォーラムの規格に準拠しており、図7に示すように2TSを1CPCS-PDUとした後、8SAR-PDUに分割し、ATMヘッダを付



加して8セルとする。

## 5. メディア多重化／分離

映像・音声・データのメディア多重化機能は、MPEG2システムに規定されているTS仕様に準拠する。図8に示すように、メディアごとの符号化データストリーム (Elementary Stream: ES) は、同期情報であるタイムスタンプ等を付加され、PES (Packetized Elementary Stream) と呼ばれる可変長パケットに分割される。

PESパケット長は個々のメディアによって異なる。例えば、映像の場合は1ピクチャの符号化データを1PESとして処理する。その後、個々のPESパケットは更に固定長のTSパケットに分割される。このTSパケットのフォーマットで複数のメディア及びプログラム管理情報 (PSI) が1本のTSとして多重され、トランスポートストリームが生成される。

また、エンコーダとデコーダとの間で27MHzのシステムクロックを一致させるために、エンコーダ側からクロックリファレンス情報 (PCR) を一定間隔 (100ms以下) で送出し、デコーダ側のPLL (Phase Locked Loop) でクロックの再生を行う。

さらに、デコーダにおける各メディア間の同期再生を実現

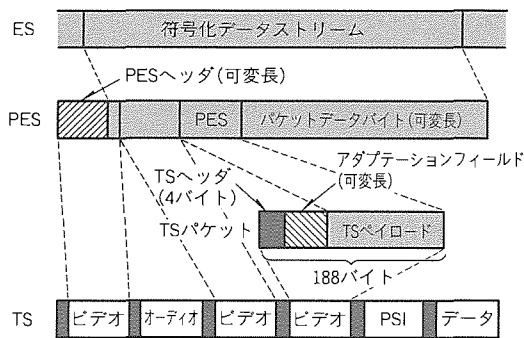


図8. MPEG2 TSによるメディア多重化

するため、PESヘッダ内に同期情報であるPTS (Presentation Time Stamp) を載せる。上記構成により、メディアの種類・数に左右されない柔軟なメディア多重化／分離と、精度の高いクロック再生、メディア間同期再生が実現される。

## 6. ビデオ符号化

ビデオ符号化方式は、MPEG2ビデオ規格に準拠するもので、基本的に動き補償予測と適応DCT (Discrete Cosine Transform) をベースとする。符号化・復号処理のLSI化によって装置の小型化を図っている。また、放送局など業務用の用途を想定し、4:2:2という色再現性の高い画像フォーマットに対応できる。図9にビデオ符号化部のブロック図を示す。図中の各ブロックの機能概要を以下に述べる。

### (1) 前処理部

入力画像信号のデジタルY/C (輝度/色差) 分離、符号化処理のフォーマットへの信号変換などを行う。また、符号化制御に用いるため、前フレームとの相関を算出する。

### (2) 動き補償予測部

動き補償予測は、フレーム予測、フィールド予測、デュアルプライム予測の探索を行い、最も予測誤差の小さい予測信号を選択する。さらに、Inter/Intra判定部が前記予測信号との差分を符号化するか、直接符号化するかを選択する。

### (3) 適応DCT部

予測誤差信号に対してフィールド又はフレームで適応的に二次元DCTを施し、空間周波数成分に変換する。一般にDCT変換係数の低周波側にエネルギーが集中することを利用して、伝送すべき情報を抽出する。

### (4) 適応量子化部

空間周波数成分に変換された信号を量子化する。量子化特性を切り換えることで、符号化情報量と画質の制御を行う。量子化特性の選択は、符号化制御部からベースとなる特性を指示し、さらに適応量子化部で被符号化画像の局所的な性質に応じて画質が最適となるように制御する。

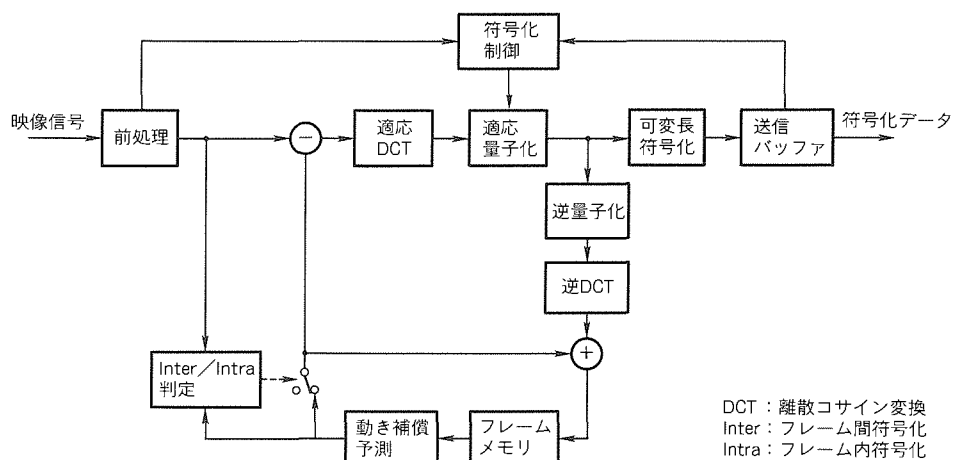


図9. ビデオ符号化部の機能ブロック

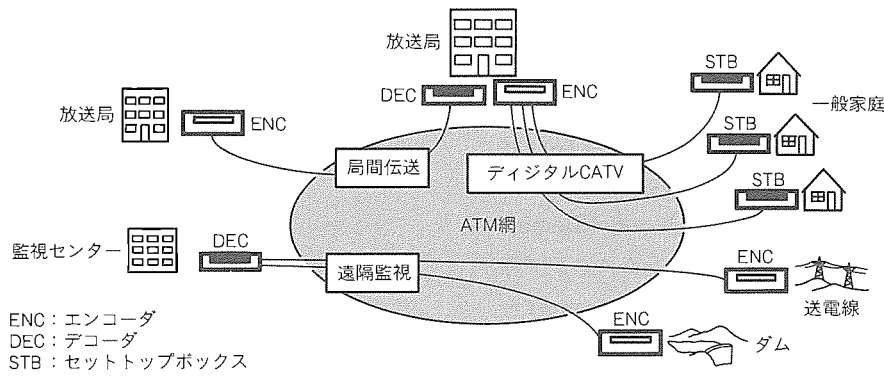


図10. MPEG2映像伝送システム

(5) 可変長符号化部

量子化されたデータ中の“0”の連続する個数と“0”でないデータの値との組合せによって、一つの符号を発生する二次元可変長符号化を行う。

(6) 送信バッファ

入力画像の絵柄に依存して発生量変動する符号化データを固定ビットレート伝送に適用するため、情報量の平滑化を行う。

(7) 符号化制御部

送信バッファ容量と発生符号量との関係が定められた条件を満足するように、発生符号量を制御する。基本的には、送信バッファ残量及び発生符号量とからのフィードバック制御並びに前処理部におけるフレーム相関の大小によるフィードフォワード制御を用いて量子化特性の選択を行っている。

(8) 逆量子化、逆DCT、フレームメモリ

逆量子化、逆DCTによって映像信号は復号され、復号映像信号はフレームメモリに記録される。フレームメモリに記録された復号映像信号は、次の予測信号として使用される。

7. 音声符号化

音声の符号化方式は、高音質・高能率なステレオオーディオ符号化方式であるISO/IEC標準のMPEG1オーディオレイヤ2に準拠している。MPEG1オーディオレイヤ2は、帯域分割符号化(32バンドサブバンドコーディング)、スケールファクタ、適当ビット割当てなどの各符号化方式を組み合わせることで聴覚心理的特性を利用した高能率圧縮の音声符号化を実現している。音声の符号化・復号処理、ES化処理などは、高速演算処理が可能なDSP(Digital

Signal Processor)を用いてファームウェアで実行する。

8. むすび

本稿では、通信・放送・蓄積系に共通に適用可能なMPEG2規格に準拠し、広帯域マルチメディア通信伝送に適したATMネットワークに直結可能な、ATMネットワーク対応高画質MPEG2コーデックの機能と実現方式について述べた。このコーデックを適用することによって、ATMネットワークを利用した放送局間中継伝送システム、デジタルCATVシステム及び監視システム等のプロフェッショナルユースの高画質・高機能デジタル映像伝送システムの構築を容易に行うことができる(図10)。

今後は、多様化するニーズに対応するため、様々な形でのコンピュータとの接続機能、蓄積配送機能、インタラクティブ通信機能などを開発し、DAVIC(Digital Audio-Visual Council)のシステムモデルをベースとした高度なデジタル映像通信システムの研究開発を展開していく所存である。

参考文献

- (1) 服部伸一, 田中浩一, 浅野研一, 浅井光太郎, 坂戸美朝 : 衛星利用放送品質コーデック, 三菱電機技報, 67, No.7, 655~660 (1993)
- (2) 吉村俊郎, 加藤嘉明: 特集MPEG3-4システム, テレビジョン学会誌, 49, No.4, 480~489 (1995)
- (3) 加藤嘉明, 松崎一博, 吉田英夫, 村上篤道: MPEG2ビットストリームのATM伝送における誤り訂正手法の検討, 第17回情報理論とその応用シンポジウム(SITA'94), T13-4, 501~504 (1994)

三菱電機では、デジタル画像処理に最適な電源電圧3V動作のFIFO(First In First Out)メモリシリーズを開発し量産中ですが、今回新たに3V動作の高速FIFOメモリシリーズM66280FP、M66281FP及びM66282FPをラインアップに加えました。

近年OA機器のデジタル化が進み、より高度な画像処理機能が求められています。そこで注目を集めているのが、画像情報を高速で記憶し出力するFIFOメモリです。

OA機器市場では、システムの低電圧化による消費電力低減、内部デバイスの高速化による高機能化の実現が課題となっています。これらの要求にこたえるキーデバイスがM66280FP/M66281FP/M66282FPです。

その特長を以下に示します。

#### 特長

##### (1) 業界初、3V動作でサイクルタイム25nsを実現

メモリセルにDRAM技術を用いながらも独自の回路技術と0.5 $\mu$ m CMOSプロセスの採用により、電源電圧3Vでサイクルタイム25nsという高速性が実現されました。

##### (2) 多彩なメモリ容量を準備

CCD(Charge-Coupled Device)イメージセンサの解像度とA3サイズ短辺1ライン297mmという長さにより、以下のメモリ容量を準備しました。

- 400dpi対応では、
  - 5,120ワード×8ビット(M66280FP)
  - 5,120ワード×8ビット×2回路品(M66281FP)
- 600dpi対応では、
  - 8,192ワード×8ビット(M66282FP)

##### (3) 低消費電力

電源電圧の3V化及び独自の低消費電力回路の採用により、低消費電力を実現しました。

##### (4) 書込み/読出し機能の独立

書込み端子と読出し端子が独立しているため、書込みと読出しの各動作がそれぞれ異なるサイクルで独立かつ非同期に行えます。また、メモリ内のデータが書き込まれた順に読み出されるため、画像処理に適した仕様となっております。

##### (5) パッケージ

基板実装の高密度化を考慮し、次のパッケージを採用しま

#### 主な仕様

	M66280FP	M66281FP	M66282FP
電源電圧		3.7-3.8V	
アクセス時間 (t <sub>min</sub> )		25ns	
アクセス時間 (t <sub>max</sub> )		18ns	
消費電流 (I <sub>max</sub> )	20mA	150mA	70mA
パッケージ	24P2Q	48P6S	24P2Q
	5.3mm×10.1mm SSOP	7mm×10mm QFP	5.3mm×10.1mm SSOP

SSOP : Shrink Small Outline Package

QFP : Quad Flat Package

した。

M66280FP=24P2Q(当社従来品パッケージ面積比 69%)

M66281FP=48P6S(当社従来品パッケージ面積比 56%)

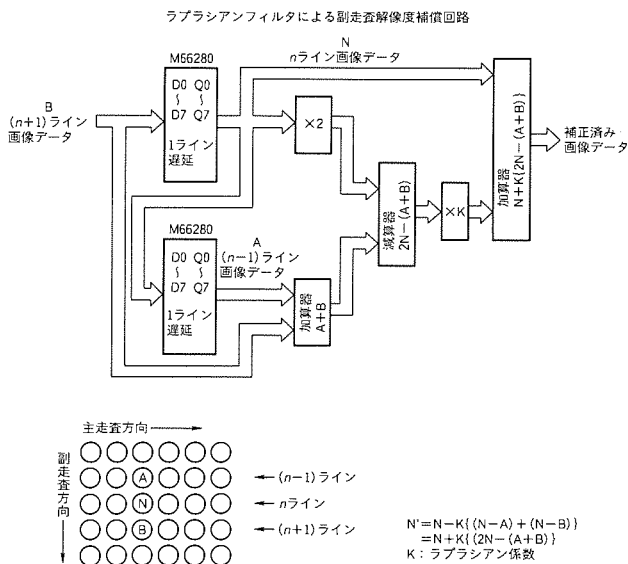
M66282FP=24P2Q(当社従来品パッケージ面積比 36%)

#### デジタルフィルタへの応用

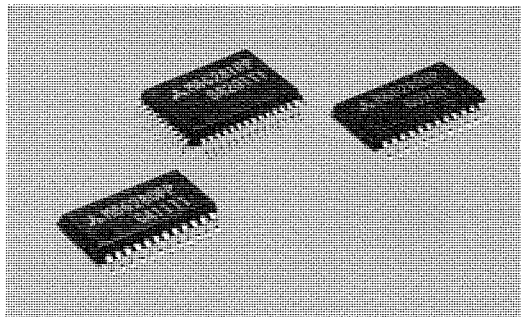
FIFOメモリは、デジタルPPCなどのOA機器において、CCDイメージセンサが原稿から読み取ったデータを記憶し、画像処理の必要に応じてデータを出力するメモリです。またFIFOメモリは、読取りデータの記憶用としてだけでなく、画像処理技術の一つであるデジタルフィルタへの適用が可能です。デジタルフィルタとは、当該ラインとその前後複数ラインのデータを比較し、読取りデータを加工する画像処理技術です。図にM66280FPを用いたデジタルフィルタの応用回路例を示します。この例ではM66280FPが2個使われていますが、M66281FPを用いて同じ回路を構成すれば1個で済みます。

#### 今後の展開

今後の当社の展開としては、OA機器分野の高速化・高機能化・低電圧化の要求にこたえるためFIFOメモリの更なる高速化・大容量化・低電圧化を推進して参ります。



#### デジタルフィルタの応用回路例



M66280FP/M66281FP/M66282FP外観

近年、OA機器・家電製品を中心に機器の表示・操作パネル部に小型液晶ディスプレイ(LCD)を搭載した製品開発が盛んに行われています。特にOA機器等の操作パネル用途としては、320×240ドットサイズ以下のLCDの普及率が非常に高くなっています。

従来LCDの表示制御回路は、専用コントローラと表示データ用メモリ(256Kビットクラスの汎用SRAMを外付け)で構成されていました。しかし、外付けメモリは必ずしも最適な容量とは言えず、ユーザ側からはLCDの表示に最適なメモリ内蔵型表示コントローラの開発が強く望まれています。

三菱電機ではお客様のご要望におこたえするため、320×240ドットサイズ以下のグラフィック表示専用ドットマトリックス型LCDの表示系コントロールに最適なVRAM(Video RAM)内蔵操作パネルコントローラM66270FPを製品化しました。表示コントローラと最適容量のVRAMの1チップ化により、部品点数の削減、トータルコストの低減が可能となります。以下にM66270FPの主な特長を示します。

#### 特長

##### (1) 表示可能なLCD

76,800ドット(320×240ドット相当)以下のモノクロSTN対応ドットマトリックス型LCDの表示が可能です。

最大表示デューティ：1/255

##### (2) 表示データ用メモリ内蔵

表示データ用メモリとして、最大320×240ドットLCD1画面分に相当する9,600バイトのVRAMを内蔵しています。

また、内蔵したVRAMのアドレスがすべて外部に開放されています。これによってVRAMのアドレスをMPU(Micro Processing Unit)のメモリ空間に割り付けることで、表示データすべてに対するMPUからの直接アドレッシングが可能となり、描画等の表示データ処理効率が向上します。

##### (3) MPU側とのインタフェース

8/16ビットMPU双方とのインタフェースが(切換え)可能です。また、WAIT出力端子付きです。

##### (4) MPUからVRAMへのアクセス調停回路内蔵

MPUとLCDへの相互アクセスに対し、LCD表示アクセスを優先させる調停回路(サイクルスチール方式)を内蔵しています。これによってMPUからVRAMへのアクセスをタイミングフリーで行うことができ、LCD側での表示画面の乱れ、ちらつき等を防止することができます。

##### (5) LCD側とのインタフェース

LCD表示データは4ビット並列で出力されます(UD<3:0>)。また、LCD制御信号としてCP, LP, FLM, Mの4本を出力します。

##### (6) LCD表示機能

グラフィック表示専用(キャラクタはグラフィックとして描画)であり、2値表示のみ(階調表示機能なし)です。

##### (7) モジュール内蔵型LCD対応の付加機能あり

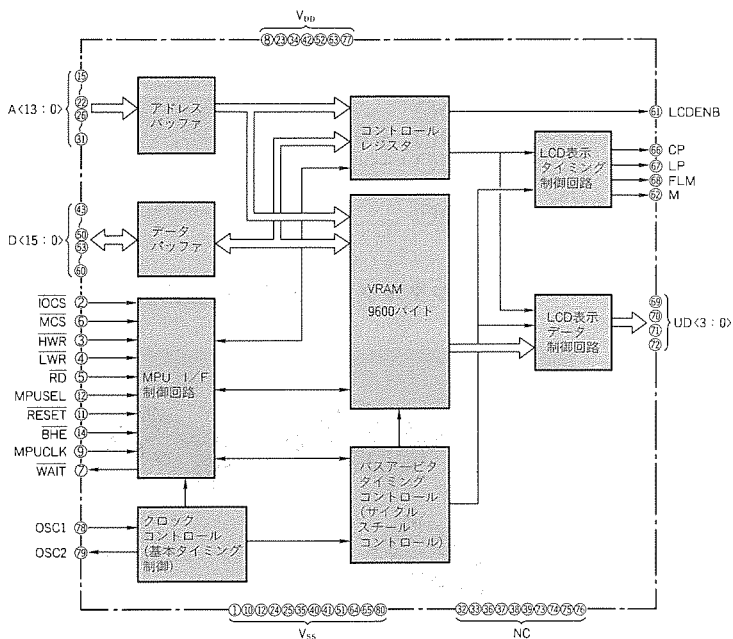
モジュール内蔵型LCD使用のユーザ向けに専用付加機能を備えています。この機能は、MPU側からのアクセスを付加機能専用I/Oレジスタを介して実行するもので、MPU側とのコネクタピン数を標準仕様時の40本から15本に抑制でき、基板配線数の低減に有効です。

##### (8) 5V単一電源電圧動作

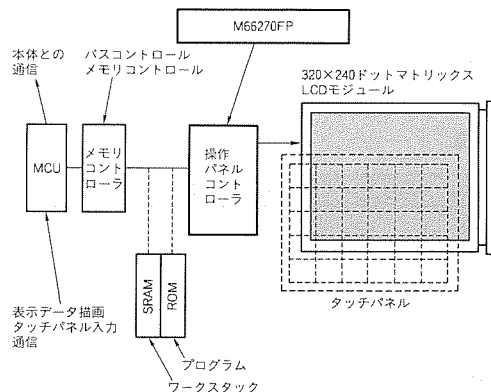
##### (9) パッケージは80ピン14mm×20mm QFP(80P6N-A)

#### 用途

この製品は、PPC, FAX, 多機能電話等のOA機器を始め、FA機器、家電製品等モノクロSTN-LCDを用いるアプリケーション全般に適用可能なLCD表示コントローラです。



ブロック図



応用回路例

# スポットライト

# 光直接点弧サイリスタのシリーズ化

高耐圧光直接点弧サイリスタは、光信号で直接、大容量のパワーを制御でき、従来のサイリスタに比べ、駆動回路と主回路の電氣的絶縁が容易で駆動回路の大幅な簡素化・高信頼度化をもたらすことから、多数のサイリスタを直列接続して高電圧を制御する直流送電システムや BTB (Back To Back) システムなど高電圧大容量電力変換システムのキーデバイスとして使用されています。

三菱電機では、これまで耐圧4kV から6kV、平均電流1,000Aから1,500Aの光直接点弧サイリスタ(LTT)を製品化してきましたが、このたび、これらの機器の大容量化・小型軽量化・高信頼度化ニーズにこたえるため、6インチウェーハを用い、従来製品の4倍以上の制御容量を持つ耐圧8,000V、電流量3,600Aの世界最大容量のLTTを開発しました。

## 新製品の特長

### (1) 高電圧阻止性能

急しゅん(峻)なオフ電圧の印加による誤点弧を抑制する機

能を付加し、オフ電圧上昇率( $dv/dt$ )が2,300V/ $\mu$ s以上であれば8,000Vまでの電圧が阻止可能です。

### (2) 高スイッチング性能

新たなゲート構造の開発・適用により、商用周波数動作時には4,000Vからオン電流上昇率( $di/dt$ ) 200A/ $\mu$ sのターンオンスイッチングが可能です。また、下限6Vから上限8,000Vまでとターンオンスイッチング可能な電圧の範囲を大幅に改善しています。

### (3) 高光感度

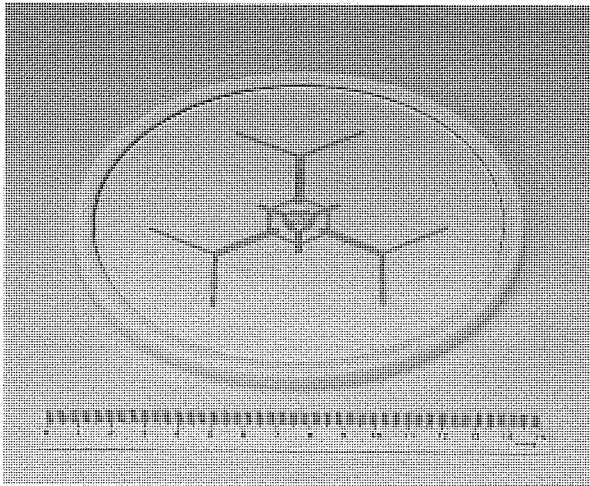
光信号を受けるウェーハの受光部構造を最適化して高光感度化を図るとともに、素子内光伝送系の最適設計により、光点弧感度を8mW以下に抑え、光源の長寿命化におこたえています。

### (4) 低損失

ウェーハプロセス中の汚染を極力排除したクリーンプロセスの確立とウェーハライフタイム制御に新たな局所ライフタイム制御技術を導入、オン電圧の低減改善を実現しています。

### (5) 低圧接力度

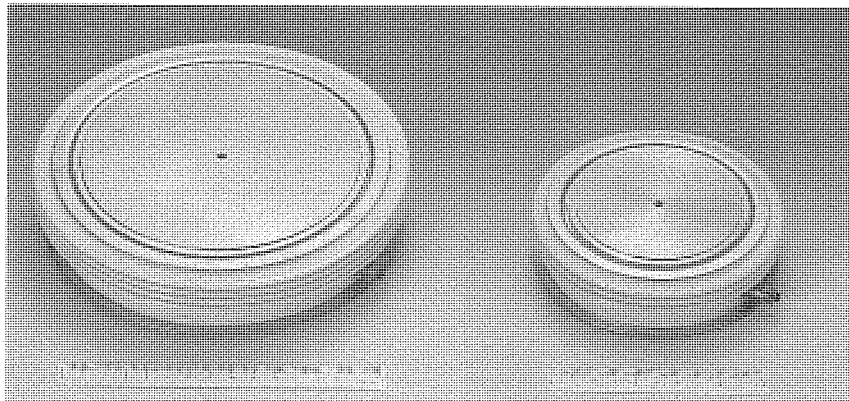
機器の小型・軽量化におこたえるために、パッケージングにデアロイ構造を採用し、4インチ級サイリスタと同等の圧接力度を実現しています。



8kV/3,600A LTTのベーシックエレメント

## シリーズの仕様(代表例)

機種	6kV/1,500A LTT	8kV/3,600A LTT
外形寸法	( $\phi$ )120×(H)35mm	( $\phi$ )183×(H)40mm
繰返しオフ電圧	6,000V	8,000V
繰返し差電圧	6,000V	8,800V
平均オン電流	1,500A	3,600A
オン電流上昇率	200A/ $\mu$ s	200A/ $\mu$ s
オン電圧	3.0V	2.8V
オフ電圧上昇率	2,000V/ $\mu$ s	2,500V/ $\mu$ s
光点弧感度	10.0mW	8.0mW
ターンオン時間	10.0 $\mu$ s	10.0 $\mu$ s
熱抵抗	0.010°C/W	0.004°C/W



8kV/3,600A LTT及び6kV/1,500A LTT

# 発電プラント総合管理システム

## スポットライト

## “MELJC-500”

1993年に電力系統管理システム“MELJC-100”を自家発電電力系統の管理・運用に特化したシステムとして発売しました。MELJC-500は、更にこのコンセプトを発展させ、ボイラ・タービン計装、電力系統制御、ガバナ制御、保安インタロックシステム及び管理までを包括する発電プラントの総合管理システムです。

### 特長

- 標準ハードウェアによるビルディングブロック方式
- ステーション間で自由にデータ交換ができる分散形グローバルデータベース
- 1秒間に16,000点の同報通信を行うシステムバス監視用として、さらに16,000点の通信を拡張可能  
(アナログデータでもデジタルデータでも可)
- 通信路は同軸、光ファイバいずれでも可。標準は冗長化構成
- 同一システムバスに254ステーション接続可
- カードレベルでの自己診断機能
- コントローラは、フローティング演算とロジックソルバを持つ32ビットマイクロプロセッサ。CPU部及び電源部は冗長化(標準)。0.01秒から30秒までのマルチスピードによるループ制御
- リモートI/Oと直結I/Oの混在が可能
- 専用ドライブカードの採用による危険分散(オプション)  
1 制御ループ/1ドライブカード  
(3AI、1AO、2DI、2DO/枚)  
2 補機(電動機・電動弁)/1ドライブカード  
(12DI、8DO/枚)
- 事故時の解析に必要な1msの分解能を持つイベント記録機能
- 発電プラント管理に必ず(須)の性能計算(プラント、ボイラ、タービンなど)、寿命消費計算(ボイラ、タービンなど)

### 適用

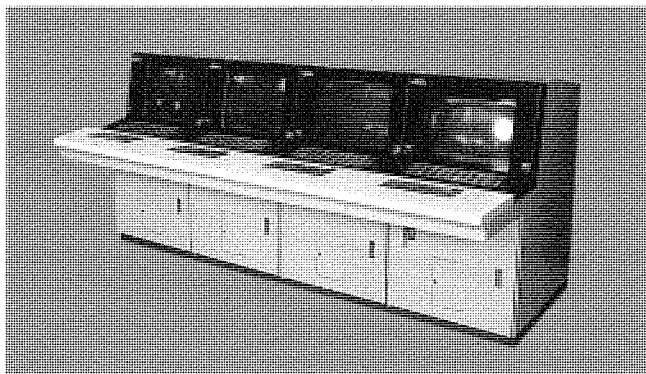
各種発電プラント(国内事業用火力を除く。)

発電所付帯設備

ユーティリティプラント

エネルギー最適運用

コゼネレーションシステム



MELJC-500 OPS

### オペレータステーション仕様

機 種		OPS650	OPS450
項 目			
ハードディスク装置		500Mバイト	
補助記憶装置		FD:1.44Mバイト(2HD) 光磁気ディスク(オプション)	
C	接続数	最大2台	1台
R	サイズ(インチ)	21	14, 20, 21
T	解像度(ドット)	1,472×1,152	736×576
表示色		30色	
タッチパネル		超音波式	
オペレーションキーボード		シートタイプ	
外部通信機能		Ethernet* 1ch(オプション)	
外部ビデオ表示入力 (ITVウィンドウ)		ウィンドウサイズ:3サイズ 映像トレンド機能	

\*1 “Ethernet” は、米国Xerox Corp.の商標である。

### 基本ソフトウェア仕様

機 種		OPS650	OPS450
項 目			
サポートタグ数		13,296点	5,024点
グラフィック画面数		512枚	64枚
ウィンドウ		512枚	64枚
アラームメッセージ		7,632点	2,880点
ガイダンスメッセージ		7,488点	2,816点
リアルタイムトレンド (期間:約56分~約28時間)		256点 周期:1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20, 30秒	
ヒストリカルトレンド (期間:2~5日)		7,488点	2,816点
		周期:1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20, 30, 60秒	
帳 票		60種類	45種類

### コントローラ仕様

メモリ	制御プログラム:288Kバイト データベース:122Kバイト
プログラム実行周期	10ms~30s 5種類
I/Oカード枚数	最大:96枚/CPU
I/Oカード種類	デジタル入力 デジタル出力 アナログ入力(各種信号) アナログ出力(各種信号) パルス入力 イベントレコーダ入力 その他各種

### データハイウェイ仕様

通信方式	トークンパッシング方式
最大通信点数	標準:16,000点 拡張時:32,000点
データ更新周期	100ms~1s
冗長化	可(二重系)



# 特許と新案

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 特許センター  
Tel(03)3218-2174

## 熱伝達装置 (特許 第1744186号, 特公平4-28993号)

発明者 大串哲朗, 村上政明

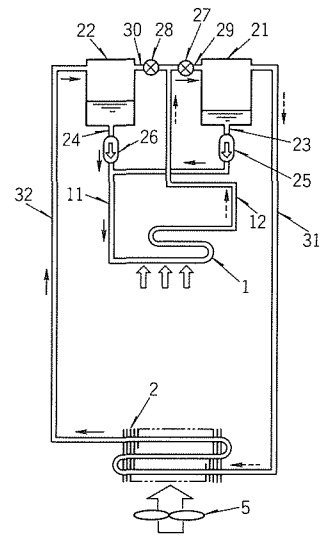
この発明は、機器の冷却や暖房装置などに利用され、管路内に封入した作動流体の液と蒸気との相変化を利用して、受熱部で吸収した熱を放熱部に熱輸送して放熱させるようにした極めて用途の広い熱伝達装置に関するものである。

従来のこの種の装置は、受熱部が放熱部の上部にある場合は受熱部から放熱部への熱輸送量が減少又は停止し、また、受熱部と放熱部との位置関係にかかわらず熱輸送に時間的脈動が生じる欠点があった。

この発明は上記の欠点にかんがみてなされたもので、実施例図に示すように二つのアキュムレータと開閉弁を使用している。開閉弁(27)を開、開閉弁(28)を閉としたとき、アキュムレータ(21)の液体は重力で逆止弁(25)を通過して受熱部(1)に流入し、熱を受けて蒸発する。蒸気は蒸気管(12)、開閉弁(27)及び配管(29)を通過して、アキュムレータ(21)に流入し気液分離した後、配管(31)を経て放熱部(1)に流れ、ここで冷却されて凝縮液化されるとともに熱を放出する。液化された液体は蒸気流に押し出されて配管(32)を通過してアキュムレータ(22)へ流入し、た(溜)まり込む。このとき、開閉弁(28)は閉になっているため、受熱部(1)から直接アキュムレータ(22)へ蒸気が流入

することがなく、受熱部(1)での蒸発熱量はすべて放熱部(2)へ流れる。次に、アキュムレータ(21)内の流量がある程度減少した時点で、開閉弁(27)(28)の開閉を切り換えると全く逆の蒸気流、液流が生じ、アキュムレータ(22)からの液は受熱部(1)で蒸発した後、放熱部(2)で放熱し、液化する。液化した液体はアキュムレータ(21)へ溜まり込む。

以上のようにアキュムレータを2個設け、開閉弁を切り換えることにより、受熱部と放熱部の位置に関係なく、受熱部から放熱部への熱輸送が連続的に行われるので、熱輸送の脈動がなく、熱輸送効率の良い装置が得られる。



## 液面検知回路 (特許 第1509800号, 特公昭63-56484号)

発明者 新井弘明, 佐藤康夫

この発明は、空気調和装置のドレン液面を検知するセンサとして、傍熱形サーミスタを用いた液面検知回路に関するものである。

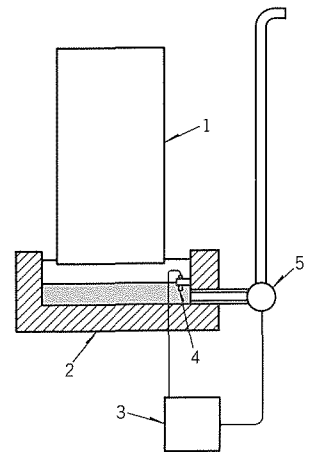
液面検知センサとして傍熱形サーミスタを用いれば、水中と空中との熱放散定数の違いにより、液面検知が可能であることはよく知られている。しかし、空気温度の変動を補償するためには、傍熱用ヒータ容量を大きくして、温度上昇を大きくとるか、周囲温度補償用サーミスタとの温度差によって制御する必要がある。そのため、消費電力が増大し、また制御回路構成が複雑になっていた。

この発明は、上記従来の欠点を改善するためになされたもので、この発明の液面検知回路が適用された空気調和装置のドレンポンプ制御装置の構成を図に示す。

熱交換器(1)で発生したドレンを、ドレンパン(2)に貯留し、液面検知センサ(4)と制御器(3)によってドレンポンプ(5)を

オン/オフ制御する。この構成で、傍熱形サーミスタの傍熱用ヒータを所定時間でオン/オフ設定し、傍熱用ヒータのオン直前の検知温度とオフ直前の検知温度とを比較し、温度差が所定値を超えていればドレンポンプをオフし、超えていなければドレンポンプをオンする制御を行う。

この発明により、複雑な制御回路構成を必要とせず、傍熱用ヒータによる消費電力を小さくすることが可能となる。





# 特許と新案\*\*\*

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 特許センター  
Tel(03)3218-2174

## 電磁接触器 (特許 第1564903号, 特公平1-43972号)

この発明は、電動機などの電路を開閉制御する電磁接触器に関するものである。

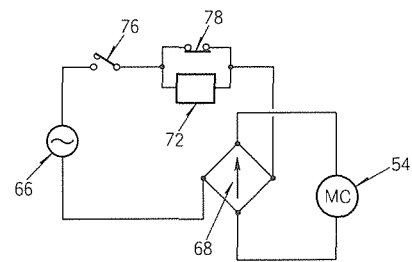
従来の電磁接触器は、固定接点と可動接点の開閉操作を行う操作コイルを備え、主回路投入時には、固定接点と可動接点を閉成する時期に操作コイルに加わる電圧を低くして、閉成完了後はその電圧を保つようにし、また、操作コイルへ加わる電圧が低下した際には、両接点が分離する時期に操作コイルに加わる電圧を高くするように構成されている。

このため、操作コイルに加わる電圧の切換え時期のわずかな誤差によって、固定接点と可動接点間に所定の接触圧力が得られず、両接点が溶着したり操作コイルを焼損する欠点があった。

この発明は、上記のような欠点を除去するためになされたもので、電磁接触器の主回路投入の際には、固定接点と可動接点が閉成した後に操作コイル(54)に加わる電圧を低くして、

閉成完了後はその電圧を維持し、また、操作コイル(54)へ加わる電圧が低下した際には両接点が分離した後に操作コイル(54)に加わる電圧を高くするように、いわゆるヒステリシス特性を持たせたものである。

以上のように構成することにより、固定接点と可動接点の閉成時はもちろん、操作コイル(54)へ加わる電圧が低下した場合も接点間にハンチング現象を生じさせることなく、したがって接点間の溶着が防止できる利点がある。



### <次号予定> 三菱電機技報 Vol.70 No.6 “変電所保護・制御・情報システム”

#### 特集論文

- 変電所保護・制御・情報システム特集に寄せて
- 電力系統の最近の課題と今後の技術動向
- 電力系統保護・制御・情報システムの技術展開
- 第二世代保護・制御装置の開発
- 第二世代送電線保護装置の開発
- 第二世代母線・変圧器保護装置の開発
- 第二世代リレー適用装置の実用化展開
- 変電所へのバーチャルリアリティ技術の適用
- 運転保守支援知識の整理・獲得手法

- 東北電力(株)向け大規模有人変電所の監視制御・運転支援システム

- 中部電力(株)向け無人変電所の監視制御・運転支援システム

#### 普通論文

- 東京電力(株)向けパーソナルシミュレータ
- インテリジェントネットワークサービス開発支援装置
- 高耐熱性プリント配線板
- 環境評価プレゼンテーション設備“体感ラボ”
- GX-70形72/84kV C-GIS
- 三菱電機ビルテクノサービス(株)納めトータルビル管理サービス支援システム
- 石油ガス化ファンヒータの臭気低減

#### 三菱電機技報編集委員

委員長 黒田 紀典  
委員 永田 讓蔵 下村 寛士  
永田 裕之 河内 浩明  
上杉 豪 内藤 明彦  
磯田 悟 山本 延夫  
畑谷 正雄 才田 敏和  
園田 克己 鳥取 浩  
幹事 小林 保雄  
5月号特集担当 伊吹 恒二

#### 三菱電機技報70巻5号

(無断転載を禁ず)

1996年5月22日 印刷

1996年5月25日 発行

編集兼発行人 小林 保雄  
印刷所 千葉県市川市塩浜三丁目12番地 (〒272-01)  
菱電印刷株式会社  
発行所 東京都港区新橋六丁目4番地9号  
北海ビル新橋 (〒105)  
三菱電機エンジニアリング株式会社内  
「三菱電機技報社」Tel. (03) 3437局2692  
発売元 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 (〒101)  
株式会社 オーム社  
Tel. (03) 3233局0641(代), 振替口座東京6-20018  
定価 1部721円(本体700円) 送料別



# スポットライト 自動検針システム

自動検針システムは、電力会社が毎月お客さまを訪問して電力メータの指針値を読み取っている作業を自動化するシステムです。現在では、検針業務が複雑な大口のお客さま、検針コストが高い検針困難地区(山間部等)、セキュリティを重視するオートロックマンション、空港などの特殊な地域を中心に、スポット的に導入が進められています。

このたび、関西新空港対応で関西電力(堺岸和田営業所に納入したシステム例を紹介いたします。このシステムは高速・高性能のエンジニアリングワークステーション(EWS)を駆使したシステムであり、“人にやさしいマンマシン”を目指してシステムを開発しました。

## 特長

### ●二重系システム

EWSを用い二重系システムで構成して、信頼性を高めています。

### ●検針スケジュールの設定

検針機能は定例検針と任意検針が可能です。また、事前スケジュールの設定も可能です。

### ●収集データの配信機能

検針データ等の収集データを、オンライン通信によって他のシステムへ転送できる配信機能があります。

### ●メータ交換時の対応

煩雑な処理が必要なメータの交換時には、専用画面によって旧メータと新メータのデータを容易に入力できます。

### ●やさしいマンマシン

CRT画面との対話操作で全機能が実行でき、難しい操作を排除しています。

## 今後の動向

今後は、大口のお客さま、オートロックマンション、屋内計量器の住宅、検針コストが高い山間部のお客さま等に対する検針業務の自動化ニーズに対応していく必要があります。

また、引っ越しの多い単身寮や学生寮の異動処理については時期が集中するので負担の大きい営業所が多く、このようなお客さま対応業務についても自動処理の導入・拡大の可能性ががあります。その場合、スポット的な導入から始まり、順次拡大していくものと思われます。



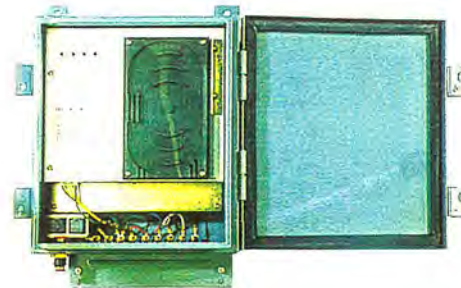
営業所コンピュータ



営業所コンピュータ画面例

## システム機能

データ収集	機能
	● 検針データ収集
	● ロードサーベイデータ収集
	● エラーチェック
	● 未収集データの再収集
	● 収集データ/お客さま上の管理
データ出力	機能
	● 検針データ一覧表
	● お客さま情報一覧表
	● フロッピーディスク (5インチ)
	● ロードサーベイデータ転送



お客さま光端末装置

# スポットライト 小型指紋照合装置

三菱小型指紋照合装置“FPR-200SP”は、ビルセキュリティにおいて、電算機室、データ保管室などの入退室管理のために、指紋照合によって個人判別をする機器です。

従来広く利用されているIDカードにあった“カードの出し入れが面倒”“カードを忘れたために部屋に入れない”などの不便さや、紛失カードの悪用、カードの偽造などの問題が解消されます。

## 性能及び仕様

### 性能

読取り判定時間	1秒以下
登録時間	約5秒
誤認識率	本人拒否率…0.1%以下
	他人受入率…0.1%以下

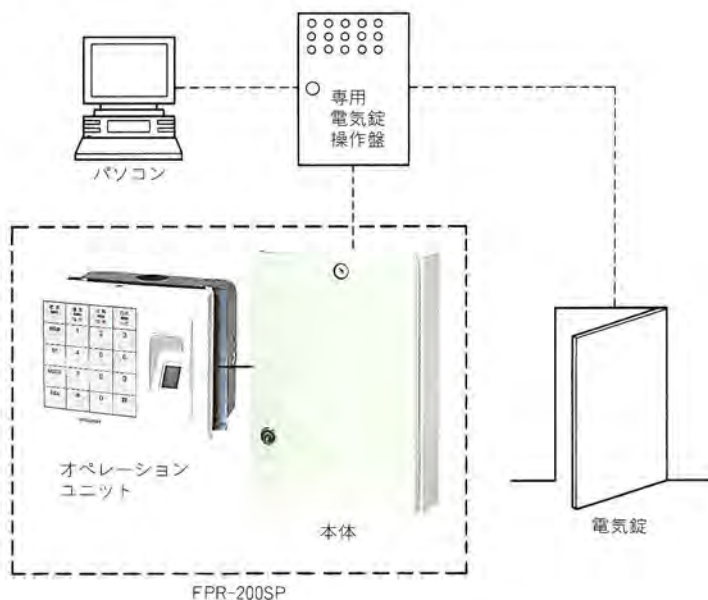
### 仕様

登録指数	200指
暗証番号	7けた以内
判定出力	無電圧a接点, DC50V/0.1A 1秒パルス
	OK判定1点
電源	AC100V±10%
	50/60Hz 30VA以下
停電時登録データ補償	累積停電時間 5年
オペレーションユニット ～本体間距離	最大100m
外形寸法	オペレーション ユニット (幅)150×(高さ)120×(露出厚さ)28 (mm)
	本体 (幅)200×(高さ)280×(厚さ)80 (mm)
質量	オペレーション ユニット 約0.5kg
	本体 約5kg
環境条件	周囲温度0～40℃
	周囲湿度85%RH以下



## 特長

- 指紋センサは、FOP(ファイバオプティックプレート)の採用により、大幅な小型化・低コスト化とメンテナンスフリーを実現
- オペレーションユニットはハガキサイズ、本体はA4サイズのコンパクト設計
- 指を置いてから照合完了まで、約1秒の高速判定
- 本人がNGとなることは1,000回に1回以下、他人をOKとすることは1,000人に1人以下の高照合精度
- パソコンを接続することにより、操作履歴の記録・印字などのデータ管理が可能



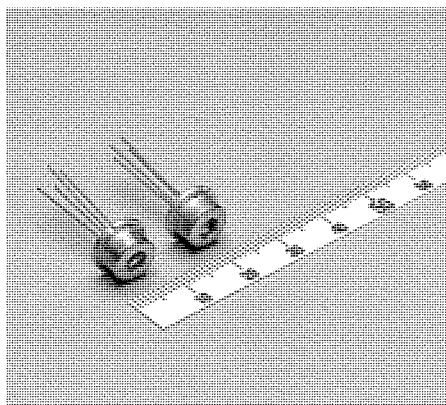
システム構成例

# スポットライト

# 光サイリスタ点弧用 高出力半導体レーザ

従来直流送電システムにおいては、高電圧(500kV以上)を制御する必要から絶縁が容易で電磁誘導のない光ファイバを用いて光で点弧するサイリスタバルブが注目され、発光ダイオード(LED)をその光源として用いるシステムが開発されてきました。

しかしながら、システムの小型・軽量化、消費電力の低減及びサイリスタバルブ設計の自由度向上等の点からいって、LEDよりも半導体レーザ(LD)を用いる方が有利ですが、寿命の点で課題があり実用化には至っていませんでした。そこで、高出力かつ長寿命であるLDを開発して、直流送電システムへの適用を可能にしました。



光サイリスタ点弧用LDの外観

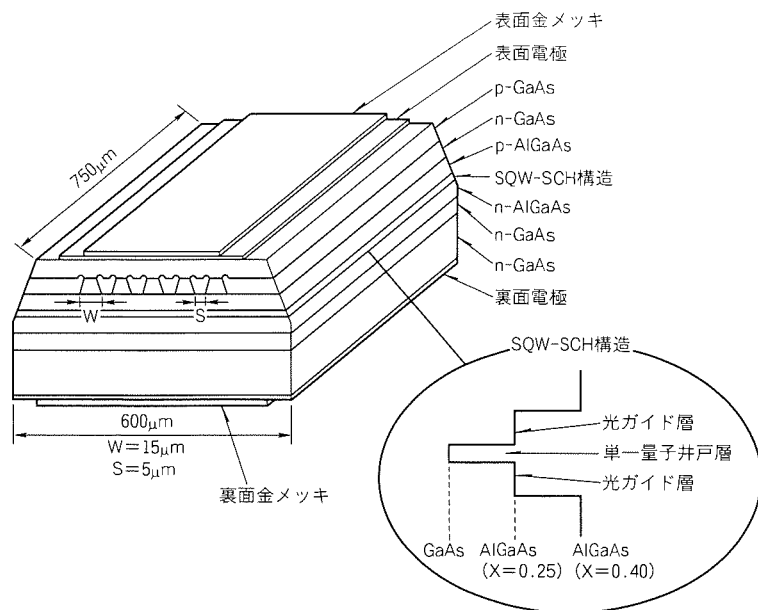


図1. 半導体レーザの構造

## 特長

### (1) しきい値電流及び動作電流の低減

このLDは、単一量子井戸(Single Quantum Well : SQW)活性層を光ガイド層で挟んだ構造(Separate Confinement Heterostructure : SCH)をしています(図1)。

有機金属気相成長法において高品質の結晶が成長できる最適条件を見だし、その上、超薄膜結晶層の界面急しゅん(峻)性及び不純物プロファイル制御性を向上させることによって良好なSQW構造を実現し、しきい値電流及び動作電流を低減しました(図2)。

### (2) 熱抵抗の低減

横幅及び共振器長をそれぞれ600 $\mu$ m、750 $\mu$ mとして、チップの大型化を図ることで熱抵抗を従来の2/3に低減し、活性層の温度上昇を約9 $^{\circ}$ C低減しました。

### (3) 信頼性向上

従来は幅が100 $\mu$ mの単一ストライプであったため、ストライプ両端付近の光強度が異常に強くなるという局在現象が生じ、動作電流の経時変化が大きかったのですが、発光領域を5分割したアレー構造(図1)を用いることで発光パターンの均一化を図り、動作電流の経時変化を2/3以下に抑えました。

以上の特長を持つLDにおいて、温度加速による寿命試験を2水準の光出力(250mW、525mW)で行い、実使用条件下での寿命30年以上を確認しました。

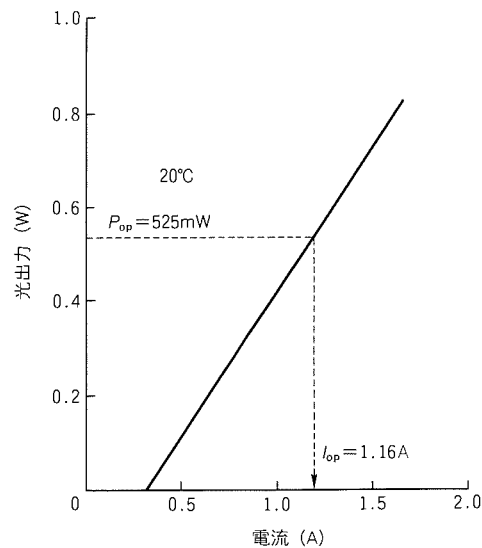


図2. 光出力-電流特性  
(共振器長 = 750  $\mu$ m)

## スポットライト

## apricot FT8000

部門サーバから基幹業務や大規模ネットワークへ、クライアント・サーバシステム構築のポイントは、システムのかなめとなるサーバの処理性能、信頼性、拡張性です。

FT8000はPentium Pro×8のマルチプロセッシングによる高速処理を始め、高信頼性・拡張性を実現する最新技術を結集して開発し、製品化した高性能サーバです。

三菱電機のシステム構築／運用／管理ミドルウェアとの組合せにより、オープンソリューションを提供します。

### 特長

#### 1. 性能と信頼性を追求したシステムアーキテクチャ

CPUにPentium Pro(200MHz)を搭載し、最新鋭のプロセッサによる高速処理に加え、モデル800は業界最先端の8CPUのマルチプロセッシングにより、オープンな世界では群を抜く高速処理環境を提供します。

528Mバイト/秒のシステムバス、PCIバス、SCSI-2と、I/Oバスを含めたシステム全体のスループットをフルに引き出すアーキテクチャを採用しています。

#### 2. RAID-5サポートの大容量ディスクシステム

装置本体内に44Gバイト、拡張架増設で最大228Gバイトの大容量ディスクシステムをサポートしています。

RAID制御装置はRAID-5をサポートしており、オンライン交換されたディスク装置へのデータ復元も自動実行します。

基幹業務やマルチメディアシステムなど大量のデータを扱い、信頼性を要求される業務にも余裕を持って対応できます。

#### 3. オンライン交換可能な冗長多重電源システム

モジュール構成の電源は、ハードウェア構成に合わせて増設と冗長構成が可能で、オンライン交換機能をサポート。

また、サーバ管理装置がモジュール構成の電源と標準内蔵の無停電電源装置(UPS)の状態監視をしており、拡張性を備えた高信頼な電源システムを提供します。

#### 4. 先進のサーバ管理装置

本体と独立したハードウェアが、サーバ内のハードウェアの監視・制御、エラー情報収集、指定端末への自動通報、電源の投入・切断を実行します。独立した電源で動作する専用プロセッサが、電源オフ状態でも遠隔保守をサポートします。

管理端末とサーバの接続には、ユーザ認証、コールバックなど、万全のセキュリティ環境を提供します。

自動運転スケジューラ(オプション)との連携により、スケジュールにしたがったサーバの電源投入・切断や、起動時のソフトウェア実行をサポートします。

#### 5. オープンプラットフォーム

オペレーティングシステムは、Windows NT ServerとUnixWareをサポートしており、オープンなプラットフォーム上で最適なアプリケーションソフトウェアとネットワークソリューションを選択できる環境を提供します。



apricot FT8000

### 仕様

機種名(モデル名)		モデル400	モデル800
CPU	CPU	Pentium Pro 200MHz	
	プロセッサ数	1/2/4	8
メモリー	キャッシュ	一次キャッシュ 16Kバイト、二次キャッシュ 256Kバイト	
	システムメモリー	—	4Mバイト
補助記憶装置	システムROM	512Kバイト	
	メインメモリー	32M-512Mバイト/1Gバイト	256M-1Gバイト
その他	ビデオRAM	2Mバイト	
	FDD	内蔵3.5インチ(1.44Mバイト/720Kバイト)×1 標準装備	
その他	HDD	2Gバイト/4Gバイト(最大228Gバイト)* 8Gバイト(最大228Gバイト)	
	RAID (オプション)	RAID-5	
その他	その他	4倍速CD-ROM装置を標準装備 4Gバイトストリーミングテープ装置 (オプション) を内蔵可能	
	ディスプレイ (オプション)	15インチ/17インチ高解像度カラーディスプレイ	
その他	キーボード (オプション)	JIS配列に準拠(106キー)	
その他	マウス (オプション)	PS/2マウス、2ボタン	
インタフェース	RS-232C	2ポート : Dサブ9ピン、ASYNC サーバ管理装置専用: 1ポートDサブ25ピン、ASYNC	
	プリンタ	1ポート: セントロニクス、Dサブ25ピン	
その他	ディスプレイ	アナログインタフェース、Dサブシリアル15ピン	
	キーボード	ミニDIN、6ピン	
その他	マウス	ミニDIN、6ピン	
	拡張スロット	PCI×2 (2)、PCI/EISA×5 (3)、EISA×3 (1) ( )内は1CPU機	
その他	規格	VCCI第1種	
電源	入力電源	AC100V±10%、周波数50/60Hz	
	消費電力	1CPU: 850W(最大)、2/4CPU: 900W(最大)、8CPU: 1,280W(最大)	
その他	エネルギー消費効率	1CPU: 230W、2CPU: 270W、4CPU: 350W、8CPU: 530W	
	無停電電源装置(UPS)	標準内蔵、バッテリー保持時間: 最大構成時 5分	
その他	環境条件	温度10~35℃、湿度20~80%RH(ただし結露をしないこと。)	
	外形寸法/質量	(W)450×(D)830×(H)700 (mm) 最大150kg	
その他	サポートOS	Windows NT Server Version 3.51日本語版 UnixWare 2J AS(又は次版)	

\* 1CPUモデルは最大44Gバイト  
\* Pentium® は米国Intel Corp.、PS/2® は米国IBM Corp.、Windows NT® は米国Microsoft Corp.、UnixWare® は米国The Santa Cruz Operation Inc.、PCI® はPeripheral Component Interconnect Association、apricot® は三菱電機の商標又は登録商標である。

# スポットライト

# 三菱モバイルコンピュータ “AMITY SP”

## 市場ニーズ

パソコンには、“オフィスだけでなく外出先でもオフィスレベルの情報処理機能を装備したい。”“データベースへアクセスしたい。”“オフィスのパソコンと同様な環境・操作性を実現したい。”という市場ニーズがあります。これらの市場ニーズにこたえて、Windowsを搭載した、携帯性・操作性に優れたペン入力可能なモバイルコンピュータ“AMITY SP”を発売しました。

## AMITY SPの特長

- (1) 業界クラス最小のペン入力可能なWindows搭載のカラー表示のモバイルコンピュータ
  - (a) A5ファイルサイズと超小型です。  
(幅)214×(奥行き)169×(厚さ)28 (mm)
  - (b) 質量は、わずか850gと非常に軽量です。
  - (c) VGA対応の7.5インチDSTNカラー液晶により、見やすい画面を提供します。
  - (d) 新開発のAMITYペンツール(プリインストール済み)により、ペン入力が容易です。
- (2) ワイヤレスコミュニケーションを実現
  - (a) デジタル携帯電話、電話回線を利用可能です。
    - PCカードタイプのFAXモデム(オプション)を使用すると、外出先からでも、インターネットへ接続し、WWW(World Wide Web)へのアクセス、パソコン通信やFAXの送受信が可能です。
    - 新開発のPENMAIL(プリインストール済み)と、cc:Mailモバイル、又はMicrosoft Mail Remote(別途購入)を使用すれば、外出先からメールの送受信が可能です。

- (b) 標準装備の赤外線通信インタフェースにより、パソコンとのデータ送受信や、外出先で携帯型プリンタへの出力が可能です。
- (3) オフィスでは、ドッキングステーション接続により、デスクトップWindowsクライアントに変身  
ドッキングステーション(オプション)にあらかじめネットワーク用PCカードを装着し、キーボードやプリンタなどを接続しておけば、AMITY SPを装着するだけで携帯型パソコンから(オプション)へ簡単に早変わりし、データベースサーバ、ファイルサーバ、メールサーバにアクセスできます。
- (4) 豊富なプリインストールソフトウェア
  - インタネットWWWブラウザ  
: WorldTALK,  
Internet Explorer(Windows 95タイプ)
  - パソコン通信ソフト  
: NIFTY Manager(NIFTY),  
GUIPPY(People)
  - FAX通信ソフト  
: 信乃助, WL,  
Microsoft FAX(Windows 95タイプ)
  - スケジュール管理ソフト  
: Lotus ORGANIZER2.1J
  - 路線検索ソフト: 乗換案内全国版
  - 住所検索ソフト: Post Manager
- (5) 業界最多のJIS第二水準の手書き認識文字  
JIS第一水準に加え、JIS第二水準のうち使用頻度の多い人名漢字の728文字をサポートしています。

## 主要仕様

項目	型名	M3011-A117	M3011-B117	M3011-B217	M3011-B234	M3011-B234C
C P U		Intel DX2-50	Intel DX4-75			
メインメモリ		8Mバイト		16Mバイト		
補助記憶装置	HDD	170Mバイト		340Mバイト		
ディスプレイ	表示方式	透過型DSTNカラーLCD(VGA, 7.5インチ), 輝度切換え可能				
	解像度, 表示色	640×480ドット, 256色標準(最大65,536色)				
入力装置	タブレット/スタイラスペン	電磁授受方式(コードレス), スタイラスペンにはバッテリー不要。				
赤外線通信機能		赤外線通信ポート標準装備(IrDA 1.0)				
PCカードスロット		【スロット標準装備(JEIDA 4.2/PCMCIA 2.1準拠, TYPEII×1)】				
インタフェース		外部FDD(シリアル×1), 外部ディスプレイ×1, 外部キーボード×1, 拡張コネクタ×1				
電 源	バッテリーの種類 個数	リチウムイオンバッテリー(7.2V, 1.350mAh), 標準で1本内蔵, 交換可能				
	バッテリー駆動時間(注)	1.2~3.5時間		0.9~3.0時間		
	ACアダプタ	AC100V±10%, 50/60Hz±1Hz				
プリインストールソフトウェア	OS	MS-DOS 6.2.2/V, MS Windows V3.1, MS Windows for Pen Computing 1.1, PUMA TranXit 2.1			MS Windows 95, Pen Services for Windows 95 V2.0, PUMA TranXit 2.1	
	アプリケーション	Peopleエントリパック, Guippy, WorldTalk, Nifty-Serveイントロパック, Nifty Manager, Internet Explorer(Windows 95用), Lotus Organizer R2.1J AMITYペンツール(AMITYメニュー, 手書きメモ, 手書き文字入力/簡易スクリーンキーボード (Windows3.1用), PENMAIL), 信乃助, WL, 乗換案内全国版, Post Manager				

注: 駆動時間は、ハードウェア構成や使用条件によって異なります。

注: “Windows”は、米国Microsoft Corp.、“Lotus Organizer”は、米国Lotus Development Corp.の商標です。その他、引用された会社名及び製品名は、各社の商標又は登録商標です。



AMITY SP本体



ドッキングステーションに  
AMITY SPとキーボードを接続