

直流500 kV交直変換システムの開発

—紀伊水道直流送電設備—

Development of 500 kV DC Converter System

上田 純 Jun Ueda

山極時生 Tokio Yamagiwa

石田俊彦 Toshihiko Ishida

吉栖立格 Tatsunori Yoshizumi



阿南・紀北両変換所の完成イメージ

平成12年(2000年)の運転開始に向けて着々と工事が進んでいる。

電源の遠隔化に伴う長距離送電, 系統の拡大に伴う短絡容量の増大などの課題に対する一つの解として, 直流送電技術の導入事例が増加の傾向にある。このような背景の下, 紀伊水道直流送電プロジェクトが関西電力株式会社, 四国電力株式会社, および電源開発株式会社によって計画され, 2000年7月の運転開始に向けて推進されている。

このプロジェクトは, 橘湾火力発電所の発電電力を阿南変換所と紀北変換所間で送電するものである。最終的には直流の500 kV送電線に昇圧され, 完成すれば世界最

大級の直流送電設備となる。

日立製作所は, これまでわが国のすべての直流送電プロジェクトに参画してきた実績を基に, 今回, このプロジェクト向けの直流500 kV変換用機器と変換システム制御・保護装置を, 上記の3電力会社と共同で開発した。

これらの機器・装置には, 高電圧大容量のサイリスタバルブ, 高信頼性・高耐環境性の直流ガス絶縁開閉装置, および高速・高信頼度の制御装置が含まれ, それぞれに新技術が取り入れられている。

1. はじめに

紀伊水道直流送電設備の最終の主回路構成を図1に示す。定格は、直流±500 kV, 2,800 A, 2,800 MWと世界最大級である。

直流送電設備は、変換用変圧器、サイリスタバルブ、直流リアクトル、直流開閉器類、調相設備、高調波フィルタ、制御・保護装置などで構成している。

ここでは、紀伊水道直流送電プロジェクト向けに開発した世界最大級の光直接点弧サイリスタを用いたサイリスタバルブ、世界初の直流ガス絶縁開閉装置、および基幹系統用高信頼度制御装置の開発について述べる。

2. サイリスタバルブ

サイリスタバルブは、交流・直流の変換を行う変換所の中心機器である。3相ブリッジ接続したサイリスタバルブを2段直列に接続した回路構成となっている¹⁾。

2.1 8 kV 3,500 A光直接点弧サイリスタ素子

コンパクトでかつ低損失の大容量サイリスタバルブを実現するためには、サイリスタ素子の高電圧大容量化が必須となる。そのためには、トレードオフの関係にあるオン電圧とターンオフ時間、素子耐圧とオン電圧を同時に改善することが必要となる。シリコンウェーハの不純物拡散プロセスのくふうやウェーハ面積を有効に活用できる端面構造の開発などにより、この改善を実現することができた。今回開発した素子の外観を図2に、主要仕



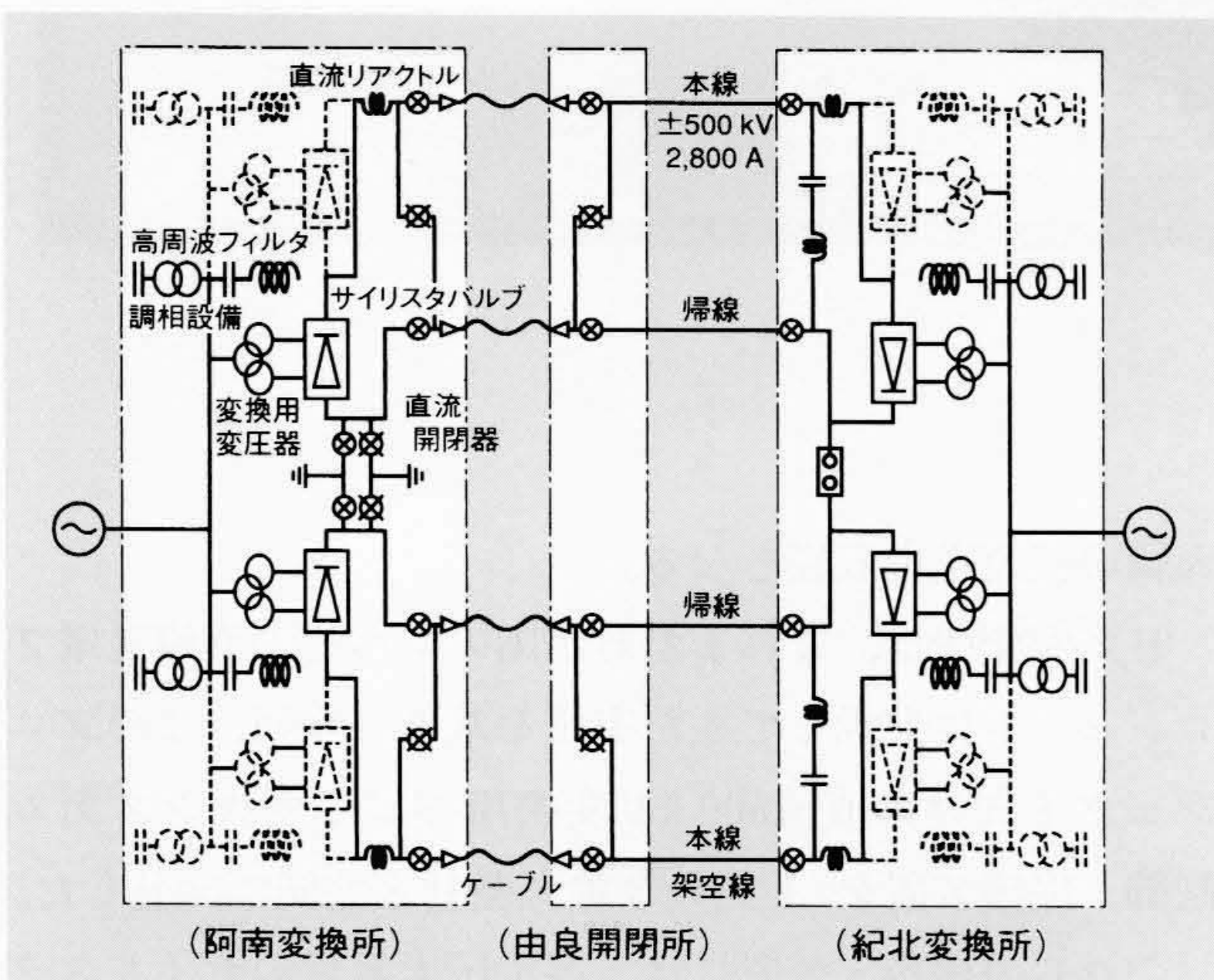
図2 8 kV 3,500 A光直接点弧サイリスタ素子

直径6インチ(約150 mm)のシリコンウェーハを使用した、世界最大級のサイリスタ素子である。

表1 サイリスタ素子の主要仕様比較

従来の5インチ素子と比較して大幅な大容量化を図っている。

項目	サイリスタ素子 5インチ素子 6 kV 2,500 A	6インチ素子 8 kV 3,500 A
ピーク繰り返しオフ電圧	6,000 V	8,000 V
ピーク繰り返し逆電圧	6,000 V	8,000 V
ピーク非繰り返し逆電圧	6,600 V	8,800 V
最大オン電圧	2.2 V	2.9 V
遅れ時間	標準 5 μs	標準 5 μs
ターンオフ時間	400 μs	400 μs
臨界オン電流上昇率	300 A/μs	300 A/μs
臨界オフ電圧上昇率	2,250 V/μs	3,000 V/μs
電流サージブロック耐量	28 kA	43 kA



注：点線は、±500kV増設時の設備を示す。

図1 紀伊水道直流送電設備の主回路構成

最終的には、直流±500 kV, 2,800 A, 2,800 MWと世界最大級の設備となる。

様を従来素子と比較したものを表1にそれぞれ示す。

なお、この素子は、関西電力株式会社東大阪変電所に設置されたSVC(Static Var Compensator)に組み込まれ、1年間の長期性能確認試験によって性能の確認が行われた。

2.2 直流500 kVサイリスタバルブ

2.2.1 コンパクト化

前記の高電圧大容量サイリスタ素子の採用に加え、1アーム当たり6モジュールとし、1相(4アーム)を6段構造とすることにより、大幅なコンパクト化を実現した。従来実績の8段積みのもものと今回開発のものとの比較を表2に示す。直流250 kVベースで比較して、「体積/容量」比で50%ものコンパクト化を実現した。

2.2.2 低損失化

素子の損失はオン電圧に比例する。オン電圧は従来の

表2 サイリスタバルブの寸法比較

1相(4アーム)を8段積みから6段積みにより、大幅なコンパクト化を実現した。

バルブ項目	従来実績バルブ (北海道一本州連系III期)	新規開発バルブ
直流電圧	250 kV	250 kV
変換容量	300 MW	700 MW
寸法	幅4.6×奥行3.2×高さ11.0(m)	幅5.2×奥行3.8×高さ9.54(m)
体積/容量	100%	50%

素子に比較して大きくなっているが、素子の大容量化によってバルブとしての使用素子数が大幅に低減したため、バルブの損失を従来の0.38%から0.32%に、約16%低減することができた。

2.2.3 プロトタイプの試作

サイリスタバルブの実用性を検証するため、サイリスタモジュールと、このモジュールを組み込んだプロトタイプバルブを試作し、各種検証試験を実施した。

(1) サイリスタモジュール

試作したモジュールの外観を図3に示す。光直接点弧サイリスタを用いることと、サイリスタ、アノードリアクトル、およびスナバ抵抗器を水冷とすることにより、部品点数の少ないコンパクトなモジュールに仕上げることができた。

試作したモジュールに対し、絶縁試験、ターンオン・ターンオフ動作試験、温度上昇試験、加振試験などを実施し、所期の性能を持つことを確認した。

(2) プロトタイプバルブ

試作したプロトタイプバルブの外観を図4に示す。プ

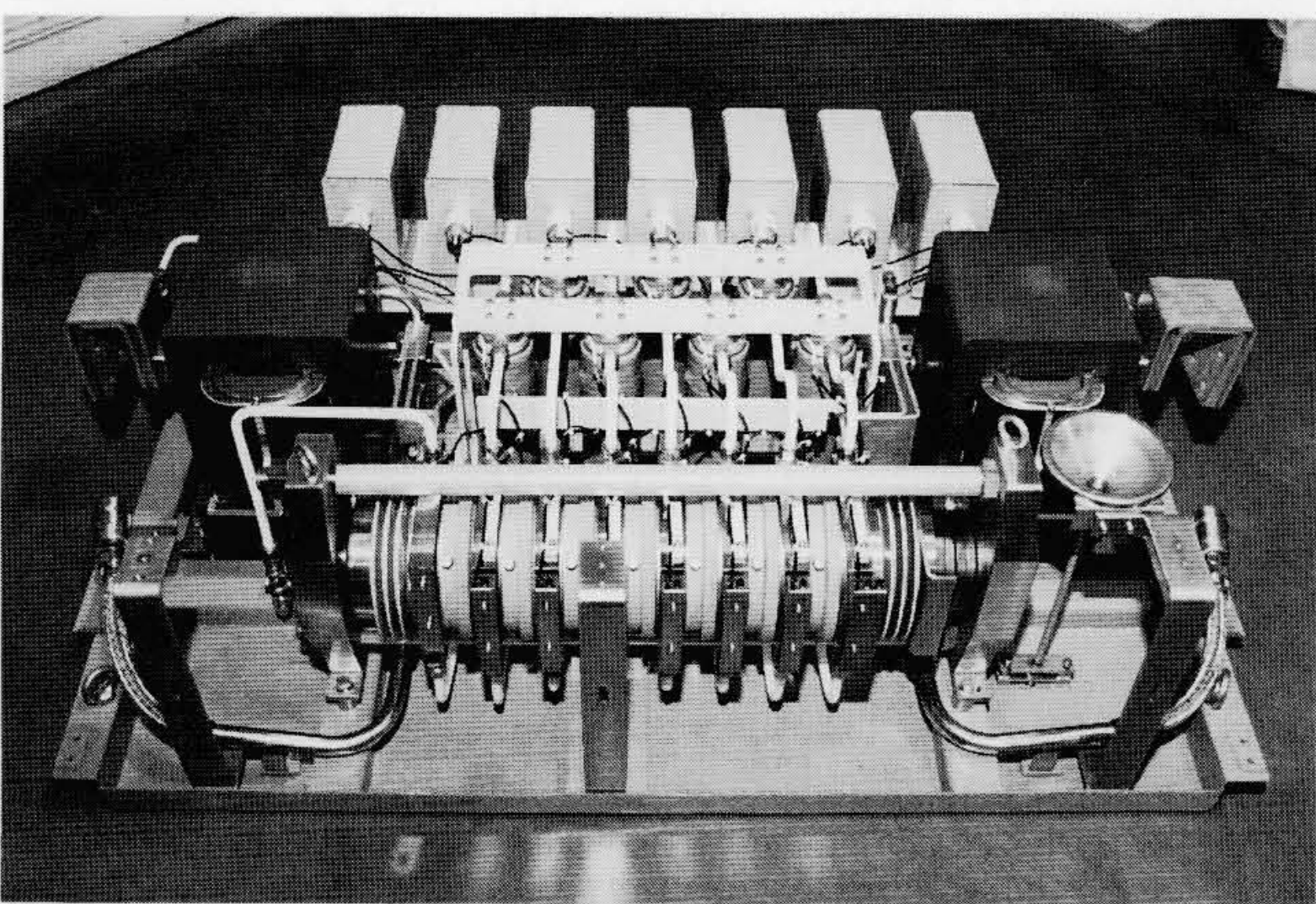


図3 試作モジュールの外観

水冷による部品の小型化と適正配置により、コンパクトなモジュールとした。

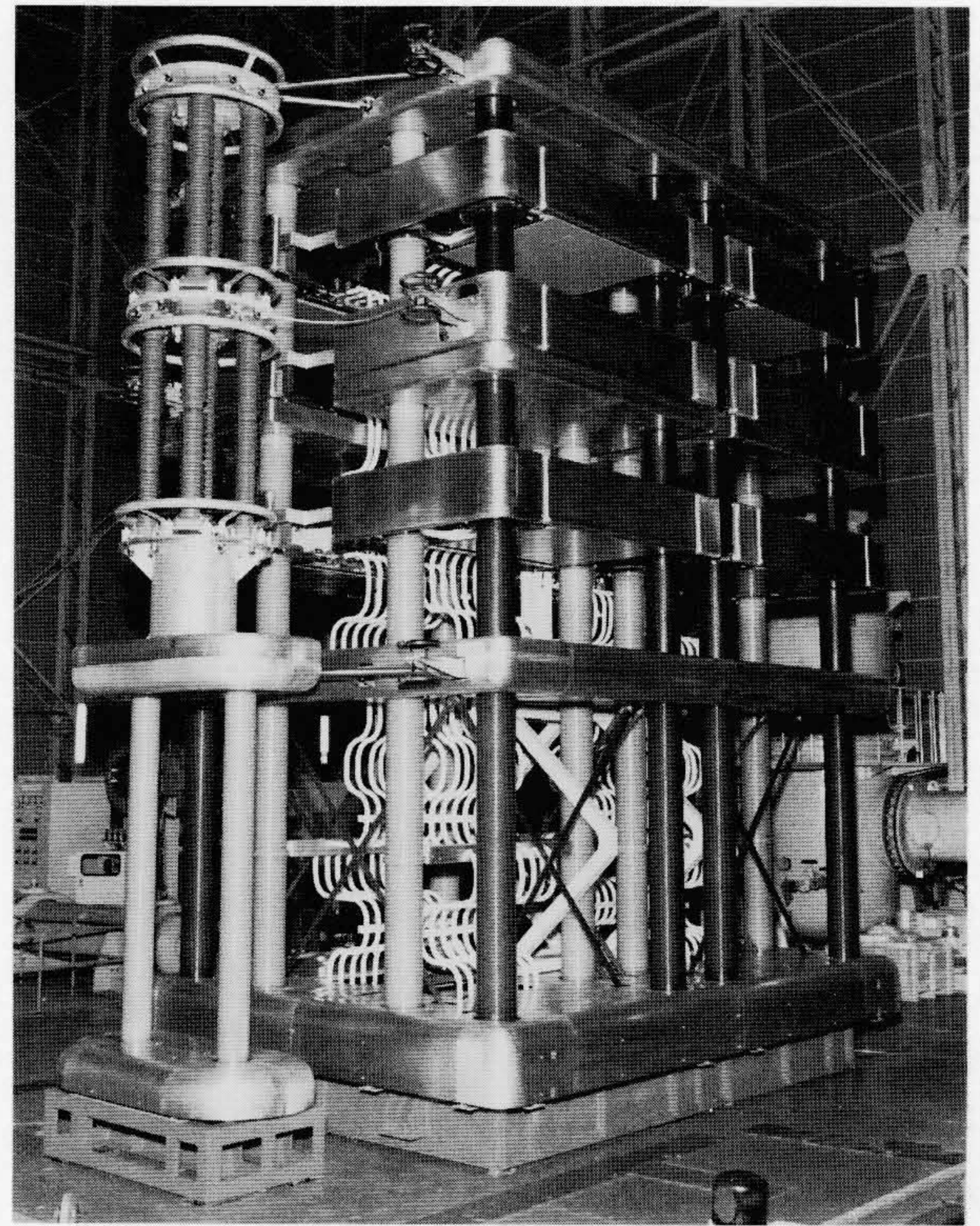


図4 プロトタイプバルブの外観

最終仕様(第2期)を想定し、直流250 kVの絶縁架台の上に2アームを積層している。

プロトタイプバルブは、実規模4アーム積層バルブの $\frac{1}{2}$ 規模となる2アーム積層構造とし、最終仕様の直流500 kVを考慮して、直流250 kVの絶縁架台に載せた構造とした。

試作したプロトタイプバルブに対して、絶縁試験、冷却水流量バランス試験などを実施し、所期の性能を持つことを確認した。

3. 直流ガス絶縁開閉装置(直流GIS)

塩害対策とコンパクト化の要求にこたえるため、直流ガス絶縁開閉装置を世界で初めて開発した²⁾。今回開発した直流GIS(Gas-Insulated Switchgear)の基本仕様を表3に示す。主要構成機器である母線と断路器の技術開発について以下に述べる。

3.1 母線

3.1.1 導体・シース部

金属異物混入防止を徹底するとともに、万一の混入に対しても、金属異物を無害化する構造としている(図5参照)。導体内の金属異物は、直流の印加電圧が高くなるとシースと導体の間を往復運動(クロッシング)し、そのあるものは導体側にとどまり(ファイアフライ)、インパルス侵入時の耐電圧特性を大幅に低下させることが知られ

表3 直流GISの基本仕様

交流GISと異なり、単一極性耐圧試験とは別に極性反転耐圧試験がある。

項目	仕様
定格電圧	DC 500 kV
定格電流 (過負荷電流)	2,800 A (3,500 A—30 min)
定格耐電圧	
雷インパルス	±1,300 kV
開閉インパルス	±1,175 kV
直流	± 900 kV(1 min)
商用周波	645 kVr.m.s.(5 min)
極性反転	± 625 kV

注：略語説明 r.m.s.(root-mean-square)

ている。その対策として、母線中央に金属異物の落とし穴とでも言うべきパーティクルトラップ、その上部に導体表面付近の電界を緩和して金属異物を落とし込むガード電極、さらに、母線導体にテーパを設けて金属異物を母線中央部に追い込むパーティクルドライバを設けた。これらにより、万一混入、浮上した金属異物もパーティクルトラップ内に移されて、絶縁的に無害化されることになる³⁾。

3.1.2 絶縁スパーサ

交流電圧や雷インパルス電圧印加時のスパーサの電位分布は、比誘電率に支配された分布となる。これに対し、直流電圧印加時の電位分布は抵抗率に支配される。直流GISでは、直流耐電圧だけでなく、雷インパルス耐電圧も考慮する必要があるため、これに用いるスパーサは、直流電界と交流電界を同時に満足する形状にしなければならない。また、清浄時の絶縁耐力はスパーサの表面電界の最大値に、金属異物付着時は沿面方向の電界に、ス

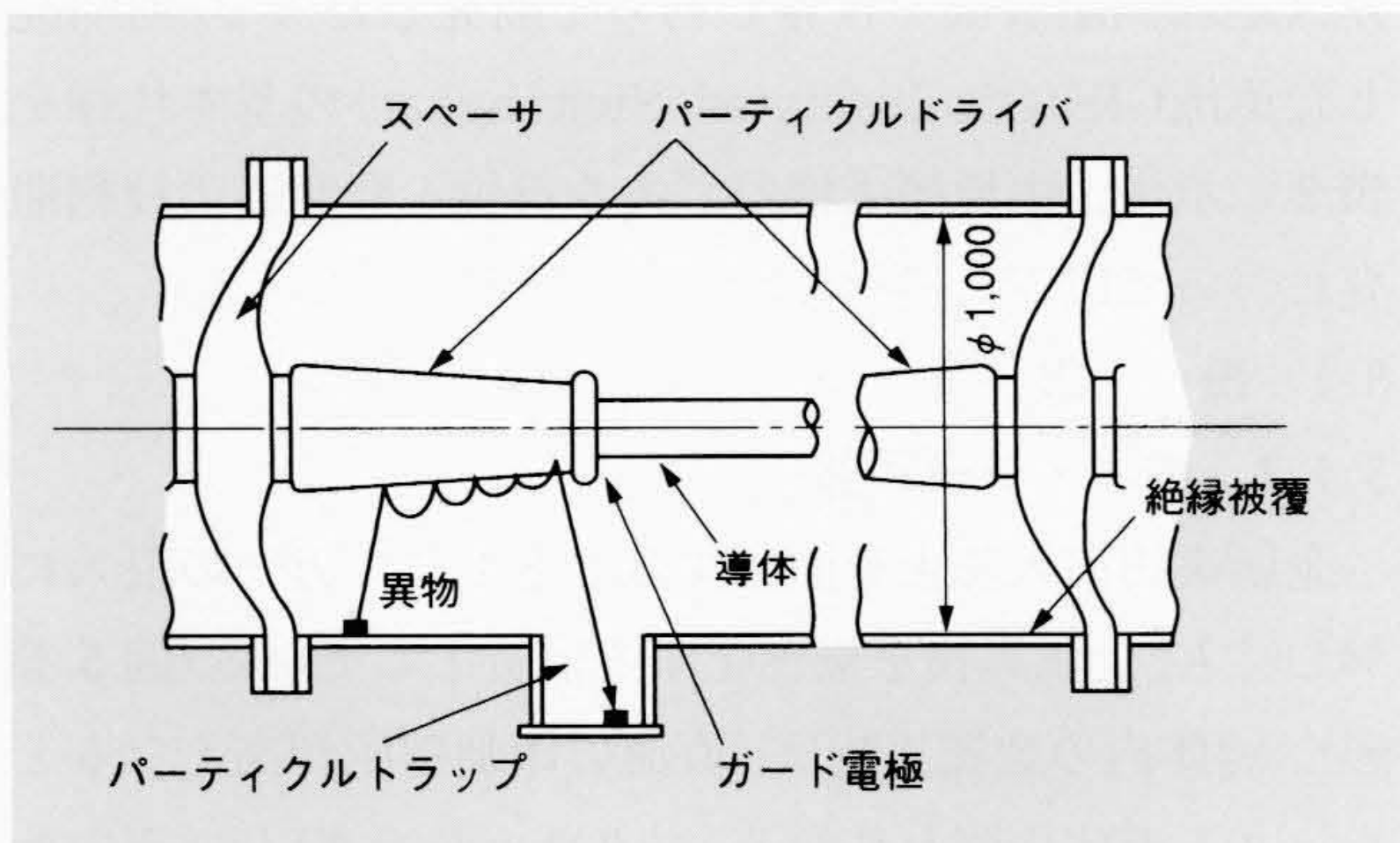


図5 直流GIS母線の基本構造

母線内に金属異物が万一混入しても、無害化する構造としている。

表4 各種スパーサの耐電圧特性の比較

直流GIS用スパーサとしては、セミコーン形がバランスの良い耐電圧特性を示す。

スパーサ形状	ディスク形	セミコーン形	コーン形
スパーサ形状図			
直流耐電圧	○	○	○
雷インパルス耐電圧	◎	○	△
金属異物付着時の直流耐電圧	△	○	◎
総合評価	△	○	△

注：記号説明 ◎(優), ○(良), △(可)

パーサ表面の帯電は沿直方向の電界にそれぞれ支配されるため、これらすべての条件を満足する形状にする必要がある⁴⁾。そのため、電界解析を繰り返し、最もバランスの良いセミコーン形のスパーサを開発した(表4参照)。

3.2 断路器

異物の混入・発生防止や無害化を基本として、母線と同様の技術を採用するとともに、機構部を装置下部に配置した構造とした(図6参照)。また、万一混入、発生した異物に対しては、タンク下部の電界を緩和することにより、異物の浮上抑制を図っている。

一方、直流特有の電位分布(抵抗分布)となる絶縁操作ロッド部は、インパルス耐電圧(静電容量分布)も考慮し、操作ロッド形状と可動側シールド形状の最適化を図り、電界を緩和させて耐圧の向上を実現した。

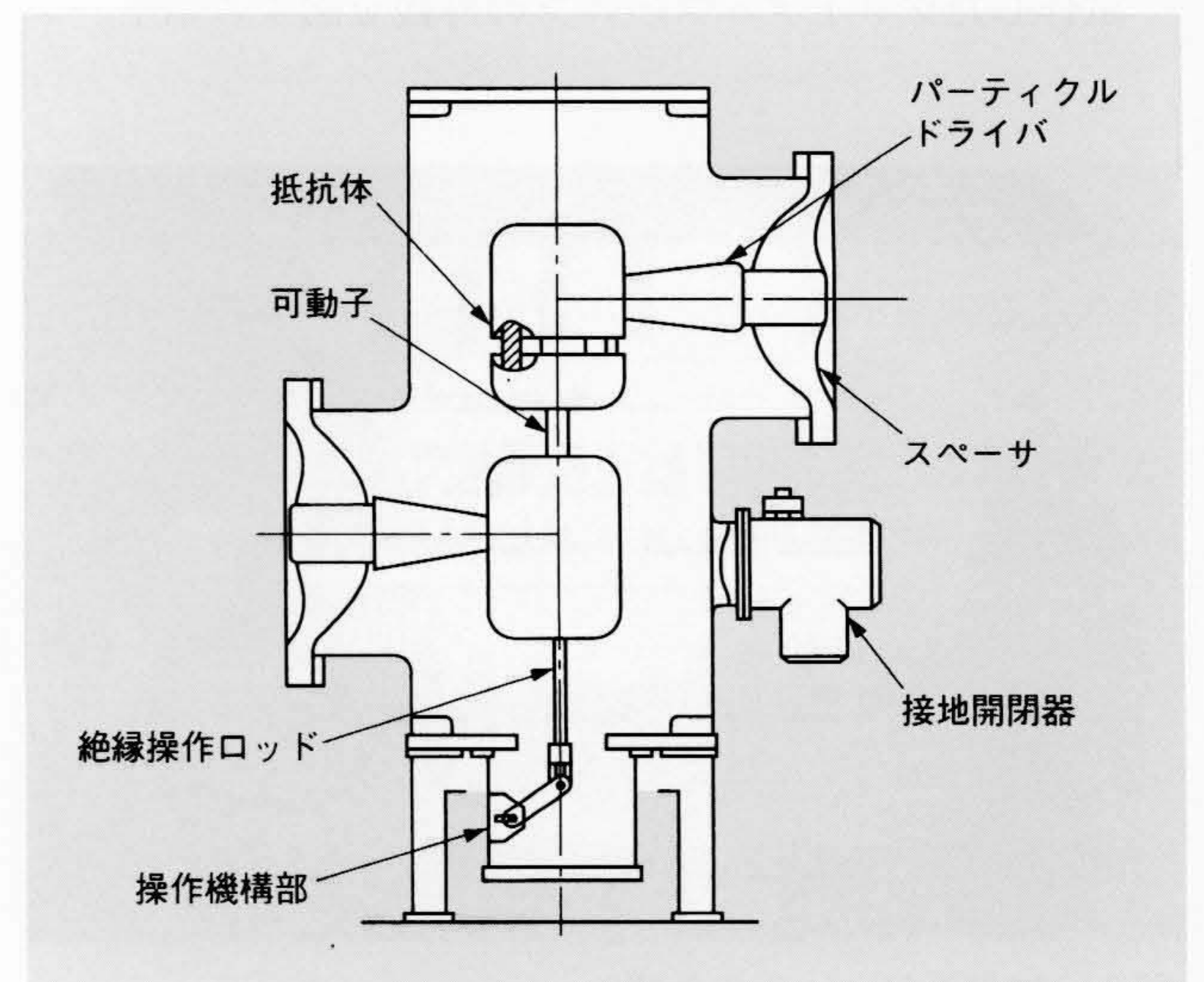


図6 直流GIS断路器の基本構造

急峻(しゅん)波サージ抑制のための抵抗投入方式を試作した。

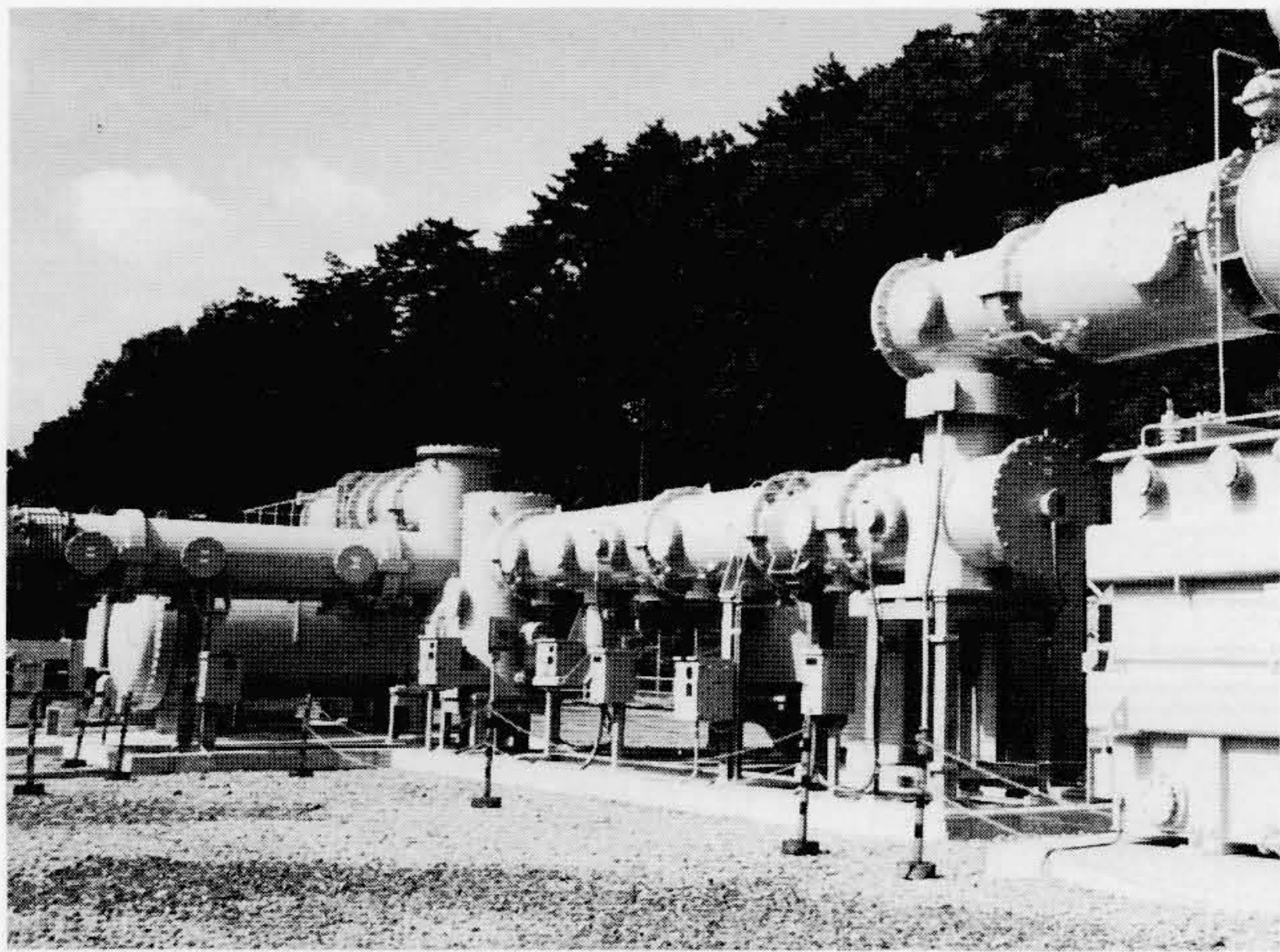


図7 長期課電試験中のプロトタイプ直流GIS
1年間の長期課電試験を実施し、所期の性能を持っていることを確認した。

3.3 プロトタイプのフィールド試験

上記の新技术を適用したプロトタイプを製作し、関西電力株式会社山崎試験センターで、1年間の長期課電試験(極性反転試験, 異物混入試験, 断路器投入試験を含む。)を実施した。さらに、このプロトタイプを工場に持ち帰り、長期課電試験後の絶縁性能試験と雷インパルス電圧による破壊試験を実施し、当初の性能を持っていることを確認した。長期課電試験中の直流GISを図7に示す。

4. 制御装置

直流送電システムの運転性能は、制御装置の性能に負うところが大きい。今回は、直流制御のいっそうの高速化・高精度化に加え、交流に匹敵するロバスト(頑強)性を持たせることを目標に、新しい制御方式を開発した。

4.1 運転継続制御

交流システムの事故などで交流電圧が低下すると、連続転流失敗によって逆変換器は運転不能となる。従来方式では変換器をいったん停止し、事故除去後に再起動する方式を採用してきたため、事故発生前の直流電力に戻すには約200 msを要した。今回は、新たに開発した実余裕角検出による高精度制御と、事故前同期位相記憶による高速同期引き込みにより、その時間を70 ms程度に短縮するとともに、事故期間中でもある程度の送電が可能となった。その概要を模式的に表5に示す。

これまで、直流送電は高速な潮流制御が可能な反面、ロバスト性の面が課題とされてきたが、これにより、その課題に対して、一つの解を示すことができた。

表5 運転継続制御による効果

運転継続制御により、交流並みのロバスト性を実現した。

	従来技術	新規技術
交流電圧		
直流電力		

注：略語説明 P.U. (Per Unit)

4.2 電力動揺抑制制御

紀伊水道直流送電設備は、交流基幹系系統とハイブリッド系を構成している。交流電力に動揺が発生した場合、動揺をすばやく検出して直流電力を変調することにより、交流電力の動揺を減衰させることができる。各種の解析により、両変換所端の周波数偏差に比例して直流電力を制御する方式を開発し、その効果を解析とシミュレータ試験で確認した。電力動揺抑制制御無しの場合と有りの場合のデジタル解析の波形の例を図8に示す。この制御により、交流システムの電力動揺を抑制できていることがわかる。

直流系の高速制御性を積極的に活用するこの制御により、系統全体の安定性の向上が図れることとなった。

4.3 発電機軸ねじれ抑制制御

発電機近傍に直流送電系統が接続される場合、直流変換所では電力一定制御が行われるため、系統の条件によっては相互作用で軸ねじれ共振(SSR)の発生が懸念される⁵⁾。

このSSR現象は、何らかの原因で系統にじょう乱が発生し、発電機の角速度が増減し、直流制御系の応答特性で直流電力が振動を助長するように変動することによって生じる。したがって、発電機の軸ねじれ振動を検出して直流電力を制御することにより、軸ねじれ振動を抑制することができる。軸ねじれ振動を検出する手段として変換所交流母線周波数を選定した。その制御ブロックを図9に示す。

この制御装置を試作し、電力系統シミュレータ(全デジタルタイプ)と結合してシミュレータ試験を実施し、試作装置が軸ねじれ振動を有効に抑制することを確認した。

この制御も、直流の高速制御性を積極的に活用した事例と言える。

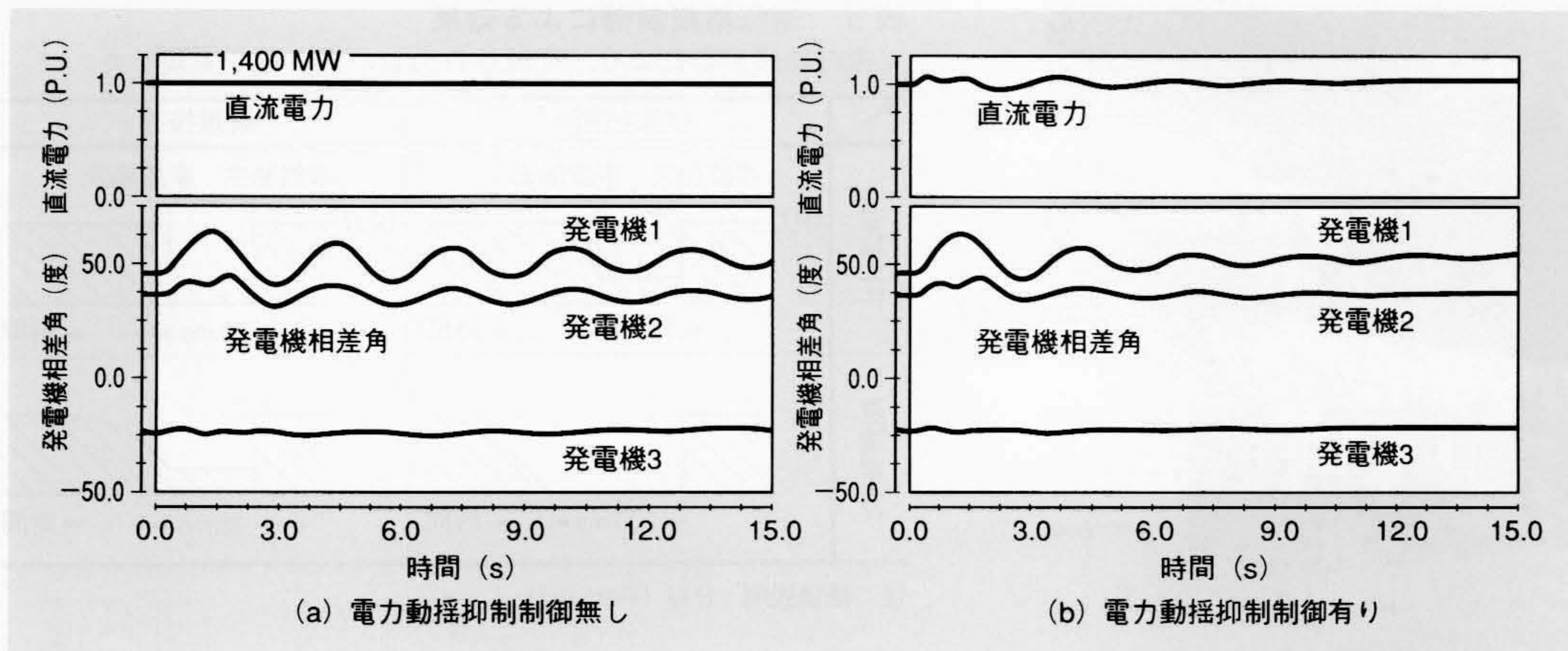
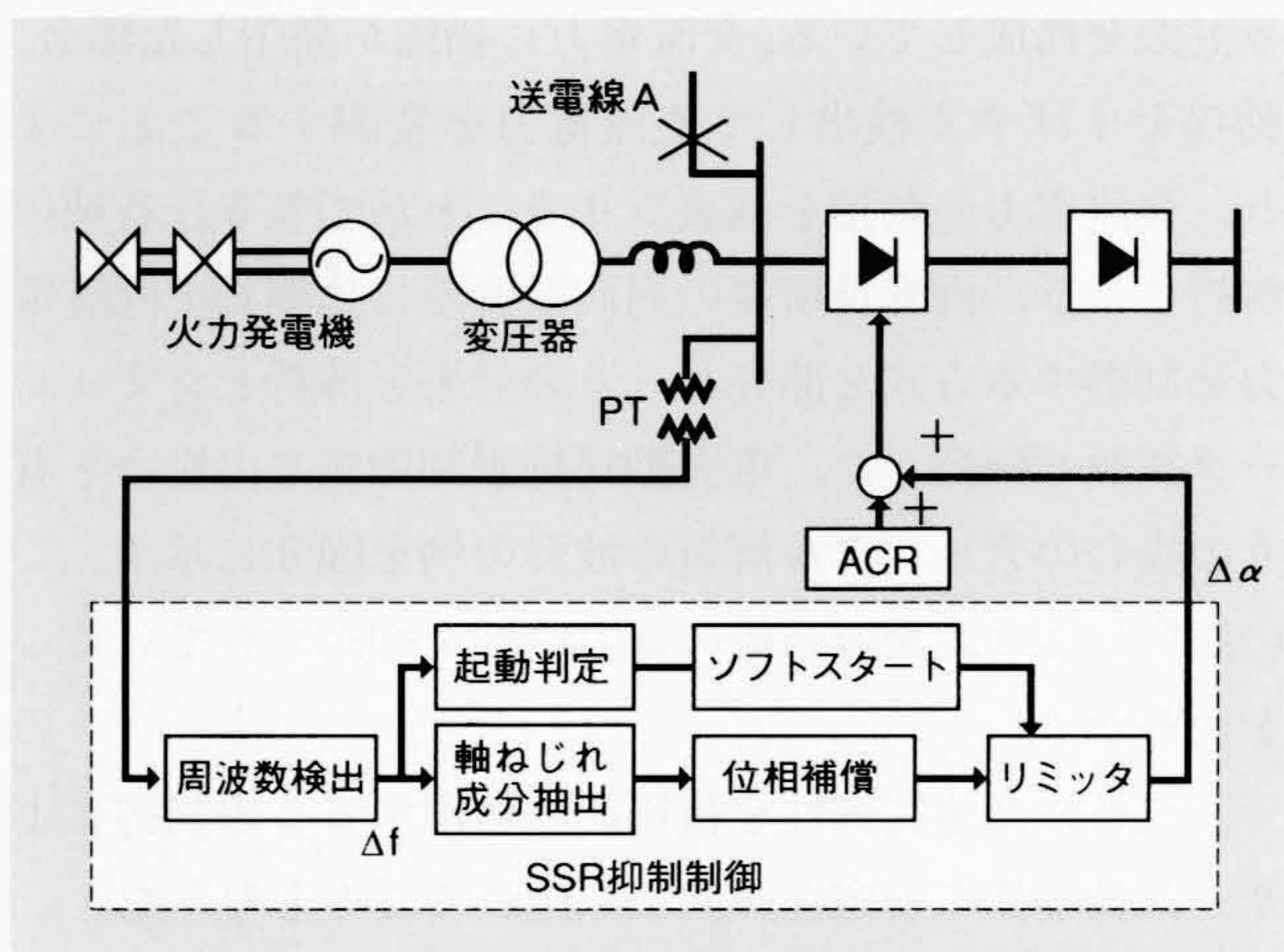


図8 電力動揺抑制制御の効果解析例

電源脱落時の解析例を示す。電力動揺抑制制御で直流電力を制御することにより、動揺を約60%に低減している。



注：略語説明 PT(Potential Transformer), ACR(Automatic Current Regulator)

図9 SSR抑制制御ブロック図

電圧信号から周波数を検出し、軸ねじれ振動成分が設定値以上になると、SSR抑制制御が起動する。

5. おわりに

ここでは、紀伊水道直流送電プロジェクトの主要機器向けに開発した新技術について述べた。

今回、直流500 kV機器と、基幹系統用直流制御・保護装置の開発・試作・試験を通じて、世界最大級の直流送電システムに対する十分な実用化の見通しを得た。

今後は、この設備を予定どおり完成させるとともに、信頼性を維持しながら、さらに経済性、保守性に優れた技術開発を行い、直流送電システムの普及促進に努める考えである。

終わりに、今回の直流送電設備開発に際しては、各電力会社の関係各位からご指導いただいた。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

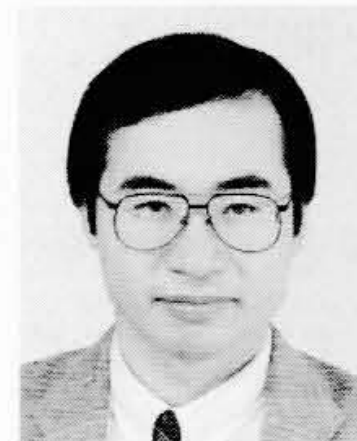
- 1) 吉田, 外: 500 kV大容量サイリスタバルブの開発, 平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会
- 2) 竹治, 外: 直流ガス絶縁開閉装置(GIS)の開発, 平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会
- 3) 長谷川, 外: 直流GIS母線における対異物絶縁高信頼化, 平成7年電気学会全国大会
- 4) 長谷川, 外: 直流GIS用スペーサの絶縁特性, 平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会
- 5) 村上, 外: 直流送電における発電機軸ねじれ抑制制御のシミュレータ試験検証 その2, 平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会

執筆者紹介



上田 純

1982年日立製作所入社, 電力事業部 電力情報制御技術本部 系統制御技術部 所属
現在, 系統連系・安定化システムの取りまとめに従事
E-mail: j_ueda@power.hitachi.co.jp



石田俊彦

1983年日立製作所入社, 国分工場 送変電システム設計部 所属
現在, 電力用半導体電力変換装置の設計・開発に従事
電気学会会員
E-mail: t_ishida@cm.hitachi.hitachi.co.jp



山極時生

1971年日立製作所入社, 国分工場 ガス絶縁開閉装置部 所属
現在, ガス絶縁開閉装置の開発に従事
工学博士
電気学会会員, IEEE会員
E-mail: t-yamagiwa@cm.kokubu.hitachi.co.jp



吉栖立格

1980年日立製作所入社, 国分工場 送変電システム設計部 所属
現在, 系統連系・安定化システム制御保護装置の設計・開発に従事
電気学会会員
E-mail: t-yoshizumi@cm.kokubu.hitachi.co.jp