U.D.C. 621.316.5.048.83.001.7

ガス絶縁開閉装置の技術動向

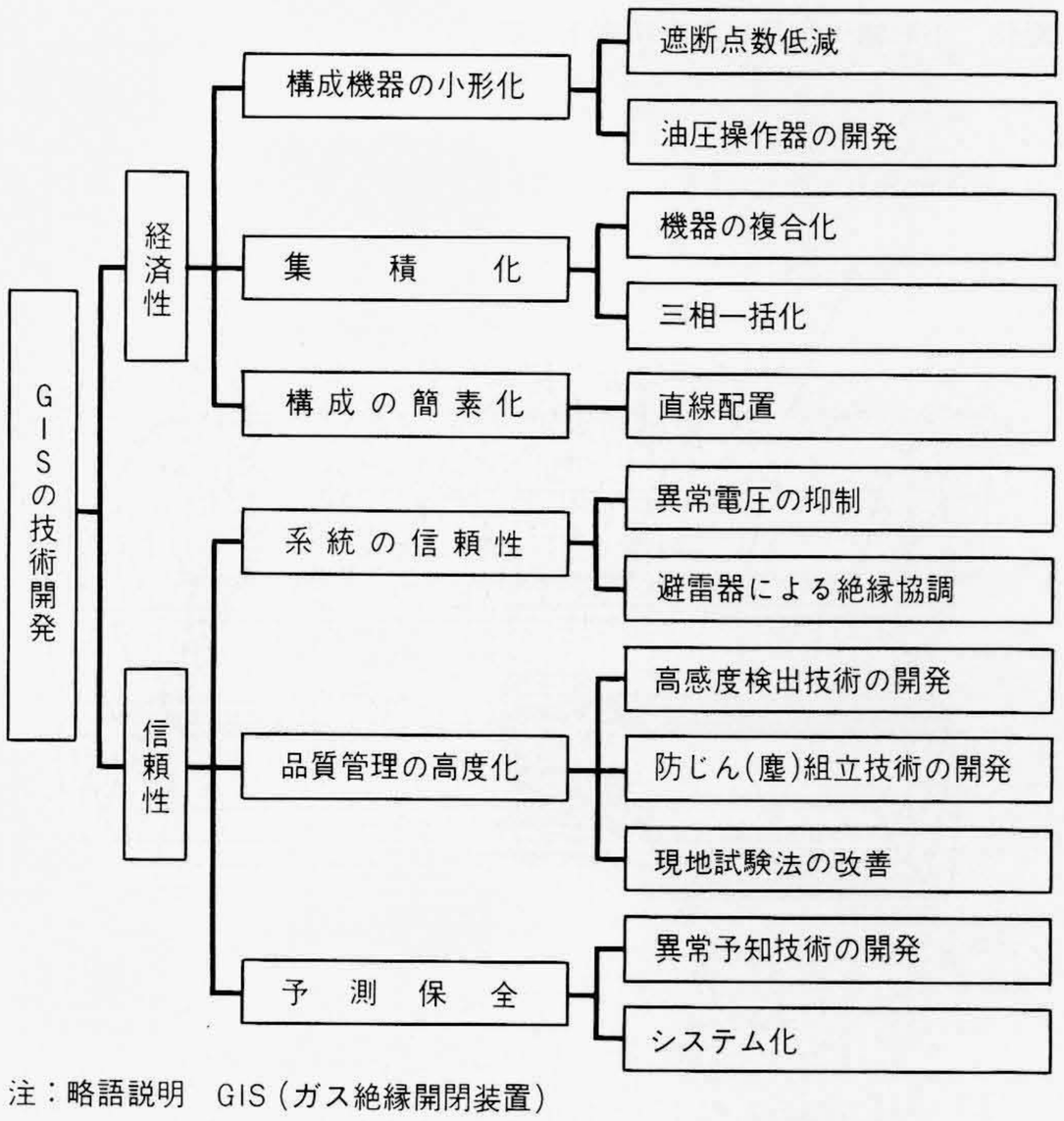
Trends of the Technology for Gas Insulated Switchgear

佐々木幸司* Kôji Sasaki
大門五郎* Gorô Daimon
山極時生* Tokio Yamagiwa
遠藤奎将** Fumihiro Endô

ガス絶縁開閉装置は，送変電設備の高電圧・大容量化及び変電所設備全体が縮小化される傾向の中で急速な技術進歩を遂げ，現在では高電圧開閉装置の主流となっている。また近年では，電力の質の向上も重要な課題となっており，ガス絶縁開閉装置の高信頼度化を含む各種の開発・改良が進められている。この内容としては，ガス絶縁開閉装置の高性能・小形縮小化を指向した経済性の追求と品質管理の高度化，予測保全技術を目指した信頼性の向上が中心課題となっている。具体的事例としてはガス絶縁開閉装置の各コンポーネントの高性能化による全三相一括化，遮断器の遮断点数の低減及びガス絶縁開閉装置内混入異物対策を中心とする高信頼度化がある。ここでは，最近の技術のうち開発の基礎となる解析測定技術，高信頼度化技術及び遮断器の高性能化・大容量化について紹介する。

1 緒　言

ガス絶縁開閉装置が昭和40年代の前半に実用化されて以来既に20年を経過し，現在では高電圧開閉装置の主流となっている。この間，多くの基礎技術や実用技術が確立されてきているが，今後も引き続きガス絶縁開閉装置の開発・改良が進むと考えられる。**図1**はこの動向を示したもので，経済性の追求と信頼性の向上が2本の柱となっている。経済性に関してはガス絶縁開閉装置の小形縮小化が基本であり，各種解析技術の高精度化によって遮断点数の低減，全三相一括化などが推進されている。一方，信頼性の向上に関してはガス絶縁開閉装置本体の信頼性向上はもちろんのこと，近年急速に進歩しているエレクトロニクス技術を用いた各種診断支援システムの導入も推進されている。以下，ガス絶縁開閉装置の最近の技術について紹介する。



注：略語説明　GIS（ガス絶縁開閉装置）

図1　ガス絶縁開閉装置の技術動向　ガス絶縁開閉装置の技術動向は，経済性の追求と信頼性の向上であり，機器の小形縮小化，電力の安定供給を目指した高信頼度化を指向している。

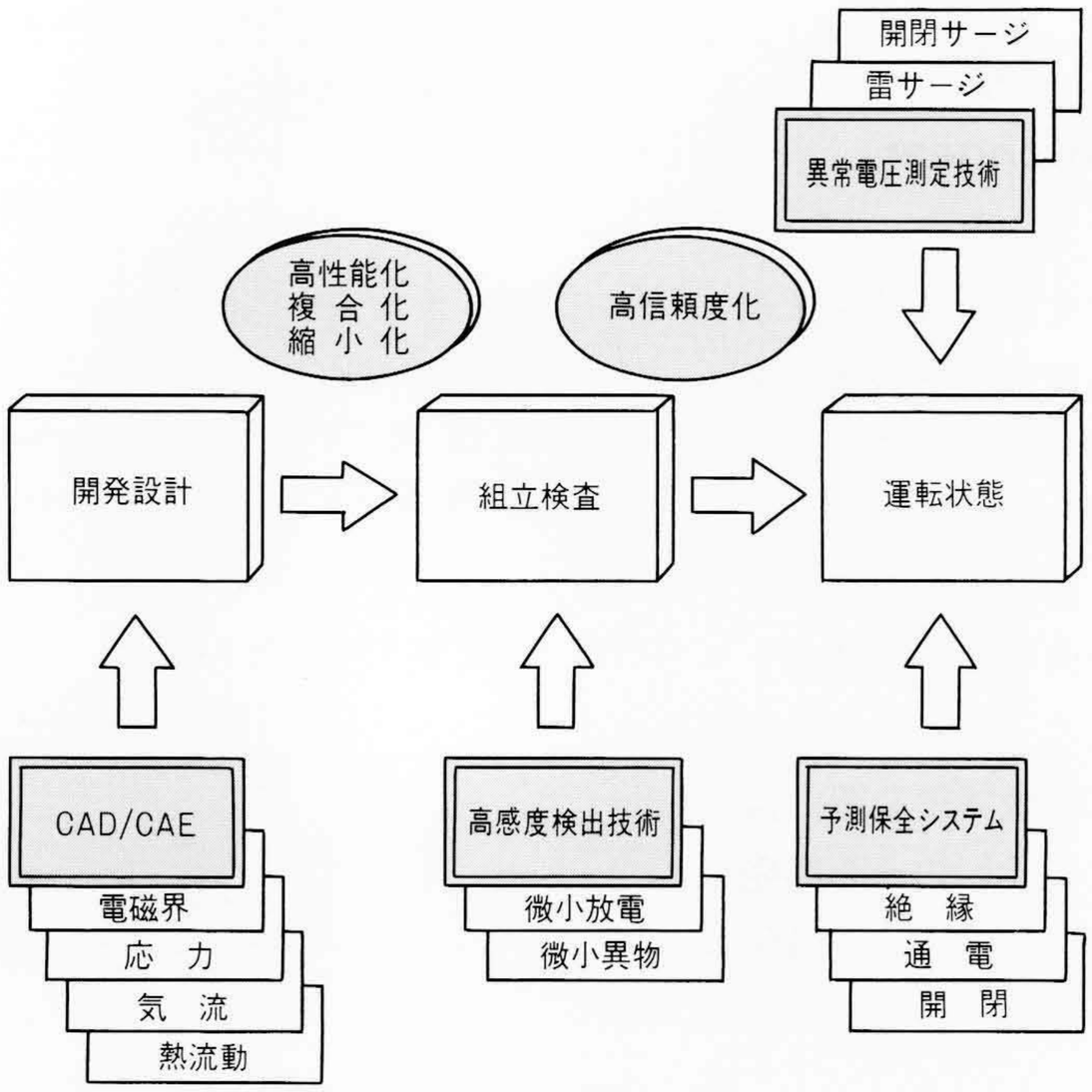
2 最近の解析，測定技術

ガス絶縁開閉装置の開発から運転状態までの間での最近の解析，検出及び測定技術を**図2**に示す。開発・設計段階では，各種のCAD（Computer Aided Design）/CAE（Computer Aided Engineering）の高精度化が進められており，ガス絶縁開閉装置の高性能化，複合化，縮小化などに貢献している。また，組立・検査の段階では，微小部分放電，微小異物などの高感度検出技術の開発が進められ，ガス絶縁開閉装置の高信頼度化に寄与している。これらの技術は運転状況下でのガス絶縁開閉装置の異常予知技術としても適用が進められている。一方，運転状況下のガス絶縁開閉装置に実際にどのような異常電圧が侵入するかを明確にすることも絶縁協調上重要な課題となっており，雷サージの観測などが進められている。以下に具体的な事例を紹介する。

2.1 3次元解析技術

図3はCAD/CAEで用いられている3次元解析技術の例を示したものであり，(a)電界解析，(b)熱流動解析の適用例で

* 日立製作所国分工場　** 日立製作所日立研究所



注：略語説明 CAD (Computer Aided Design)
CAE (Computer Aided Engineering)

図2 最近の解析，測定技術 最近では3次元解析，高感度検出，異常電圧測定及び異常予知検出技術が進歩し，ガス絶縁開閉装置の高性能化，小形縮小化及び高信頼度化に寄与している。

ある。

(a)の電界解析では無限空間が高精度で取り扱え，かつ入力方式の簡単な境界要素法[1]を採用し，複雑な構造への対応を図っている。このように非対称部分の高精度解析が可能となるため，全三相一括化，縮小化技術には欠かせない解析技術となっている。

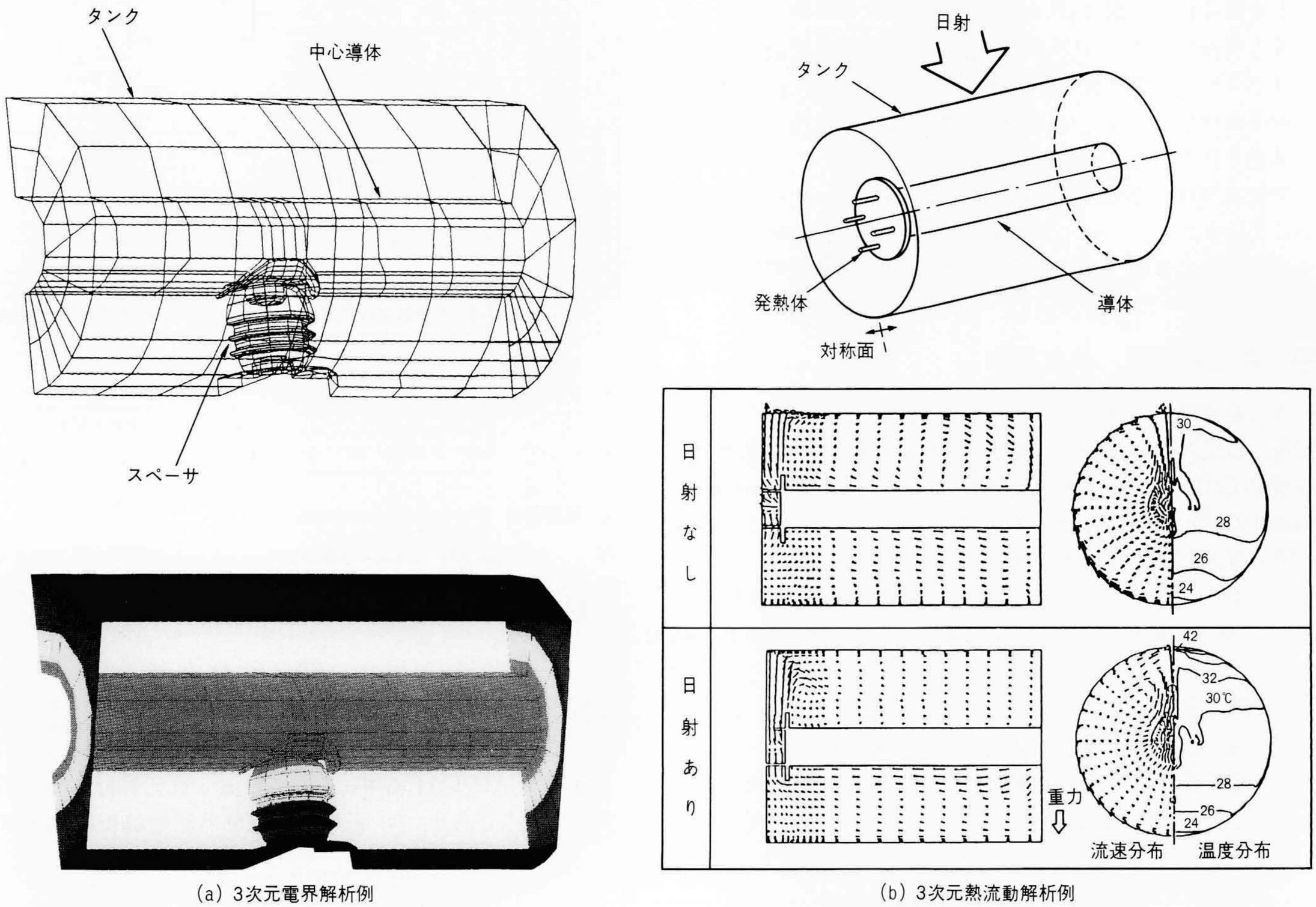
(b)の熱流動解析[2]は大電流通電時のガス絶縁開閉装置内の自然対流解析などに利用されている。本解析結果例に示すように，タンク外壁が日射を受けているような自然状況下を模擬した解析も可能になっている。

なお，気流解析技術に関しては**4**章でガス遮断器開発への応用例を述べる。

2.2 高感度検出技術

SF_6ガス絶縁は導電性異物に敏感なため，実際のガス絶縁開閉装置では導電性異物の発生しにくい構造の採用，徹底した異物除去が行われると同時に高度検出技術の適用によって絶縁信頼性が確保されている。混入防止技術に関しては後述するが，ここでは新たに開発した異物の高感度検出技術の概要について述べる。

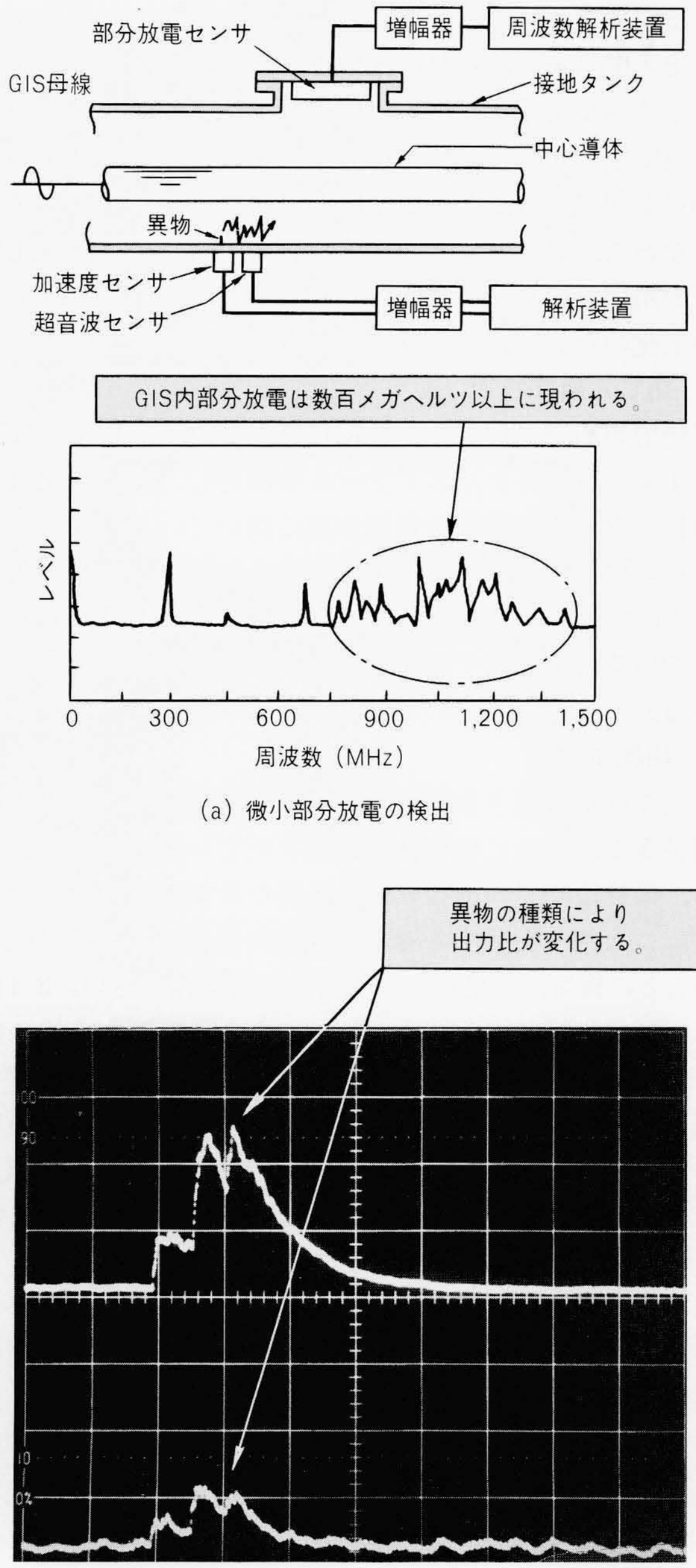
異物検出では部分放電と超音波を用いる方法が最も感度が良い。**図4**(a)はガス絶縁開閉装置内のポケット部に設けた特殊なセンサで部分放電を検出し，周波数解析することによって高感度，高精度化を実現したものである。図示のようにガ



(a) 3次元電界解析例

(b) 3次元熱流動解析例

図3 各種3次元解析例 3次元解析例として母線用スペーサの電界解析例，母線内異常発熱時の熱流動解析例を示す。



(a) 微小部分放電の検出

(b) 微小異物の検出

図4　ガス絶縁開閉装置内の微小部分放電，微小異物の検出技術
周波数解析を主体とした高感度検出技術であり，ガス絶縁開閉装置内部放電の高周波成分に着目した部分放電検出法，周波数帯域の異なるセンサ出力比により異物の識別を可能にした異物検出法である。

ス絶縁開閉装置内の部分放電が数百メガヘルツ以上の周波数帯域に現れることを利用し，外部ノイズとの弁別性の向上と高感度化(検出感度数ピコクーロン)を実現した。

図4(b)は，課電時の静電力によって浮遊する異物を音響的に検出する方法である。異物からの音響信号の低周波成分と高周波成分とでその伝搬特性が異なる性質を利用し，高感度化と高SN比化を実現している。本方式によれば，異物の識別もある程度可能である。

2.3　異常電圧測定技術

ガス絶縁開閉装置に侵入・発生する過電圧サージのうち，雷サージと断路器の開閉に伴って発生する波頭の急しゅんな高周波サージが過酷である。これらに対する絶縁協調設計は通常過渡現象解析によって行われているが，実際に系統に発生するサージ電圧波形を把握することも極めて重要である。このため，**図5**に示す雷サージ観測システムを開発し，実変電所で観測を行っている[3)]。このシステムでは高速メモリと低速メモリを具備し，雷サージの第1波及び多重雷撃の観測を可能にしている。今後このような観測データは，ガス絶縁開閉装置の絶縁協調技術の向上に反映される。

2.4　予測保全システム

前述した高感度検出技術を含め，絶縁，通電，開閉などの各種の高精度異常予知技術の検討が進められている。これらは，運転・保守支援も含めたエキスパートシステムの一翼となる予測保全システムとして実用化が進められている。

3　ガス絶縁開閉装置の高信頼度化技術

ガス絶縁開閉装置は密閉化とメンテナンスフリー化を取り入れたシステム製品であり，全装可搬となるように小形・軽量化が進められている。しかし，超高圧機器ともなると現地輸送のためには，ユニットに分割されることになる。このため現地据付作業ではできる限り限定された部位の作業となるよう設計構造的に配慮されている。一方，工場でいったん試験に合格したものが解体再組立されることになるため，工場内での組立と同等な作業環境及び手法で信頼性を確保することが必要である。

SF_6ガスの絶縁耐力は導電性異物に大きく影響されるため，ガス絶縁開閉装置内への導電性異物の混入を防止することが絶縁信頼性を向上する上で最も重要である。以下，ガス絶縁開閉装置内に導電性異物が混入した場合の絶縁特性，現地据付作業での防じん(塵)組立技術，信頼性確保のための絶縁試

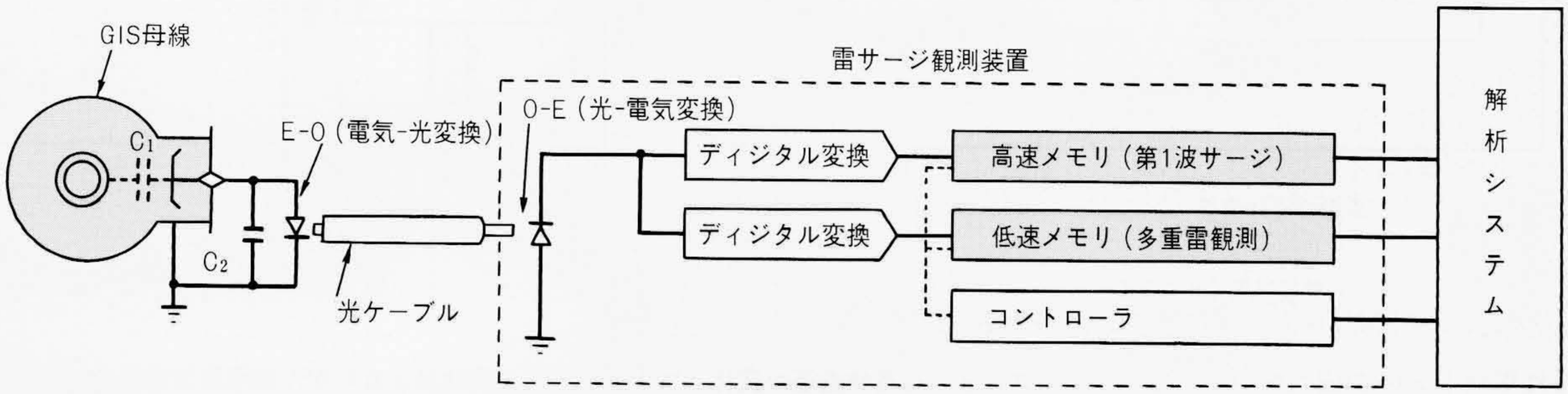


図5　雷サージ観測システム　雷サージ観測システムは，詳細波形観測用の高速メモリと多重雷撃状態観測用の低速メモリとで構成されている。

験法の改善について述べる。

3.1 導電性異物混入時の部分放電及び破壊特性

万一ガス絶縁開閉装置内に導電性異物が混入した場合，課電によって異物は静電力を受け浮上，落下を繰り返す。**図6**はこのような状況での部分放電特性の代表例を示したものである。放電電荷量は印加電圧，異物の形状及び異物の浮遊状態によって大きく変化する。特に，異物が導体部や絶縁物表面に付着すると，放電電荷量は浮遊している場合の数分の一以下に低下する。これらの部分放電は**2.2**節で述べた高感度検出技術を用いて検出することが可能となった。

図7は導電性異物が，導体部や絶縁物表面に付着した場合の破壊特性を示したものである[4]。異物の形状と印加電圧の種類によって，その絶縁強度は異なる。異物の直径が変化しても雷インパルス電圧の破壊電圧値はあまり変化しないが，商用周波電圧の場合には，部分放電による電界緩和効果のため異物径が細くなるほど破壊電圧が上昇する。

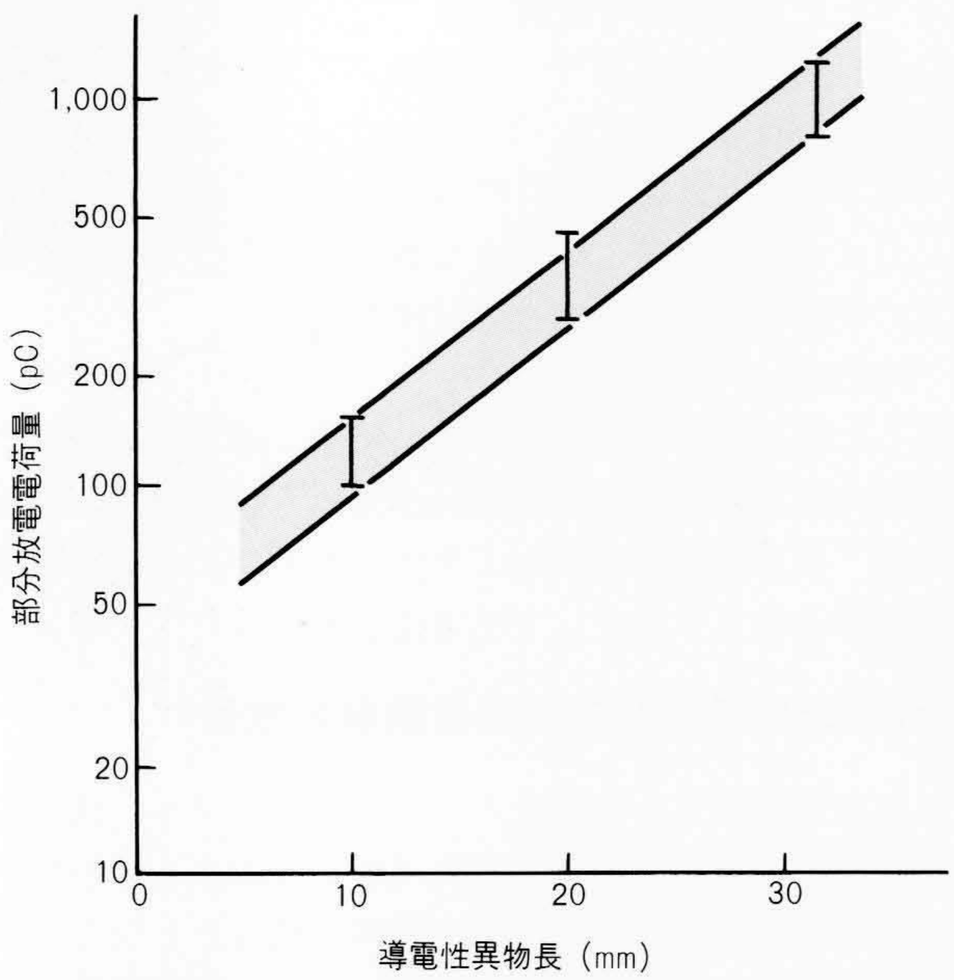


図6 導電性異物混入時の部分放電特性 ガス絶縁開閉装置内の異物は課電状況下で浮遊し，部分放電を発生する。浮遊状況下での最大放電電荷量は，異物長さが長くなるほど大きくなる。

すなわち，導電性異物の影響を確認するためには，比較的低い商用周波耐電圧試験だけでは十分とは言い難く，より高信頼度化のためには雷インパルス電圧での検証が望ましい。

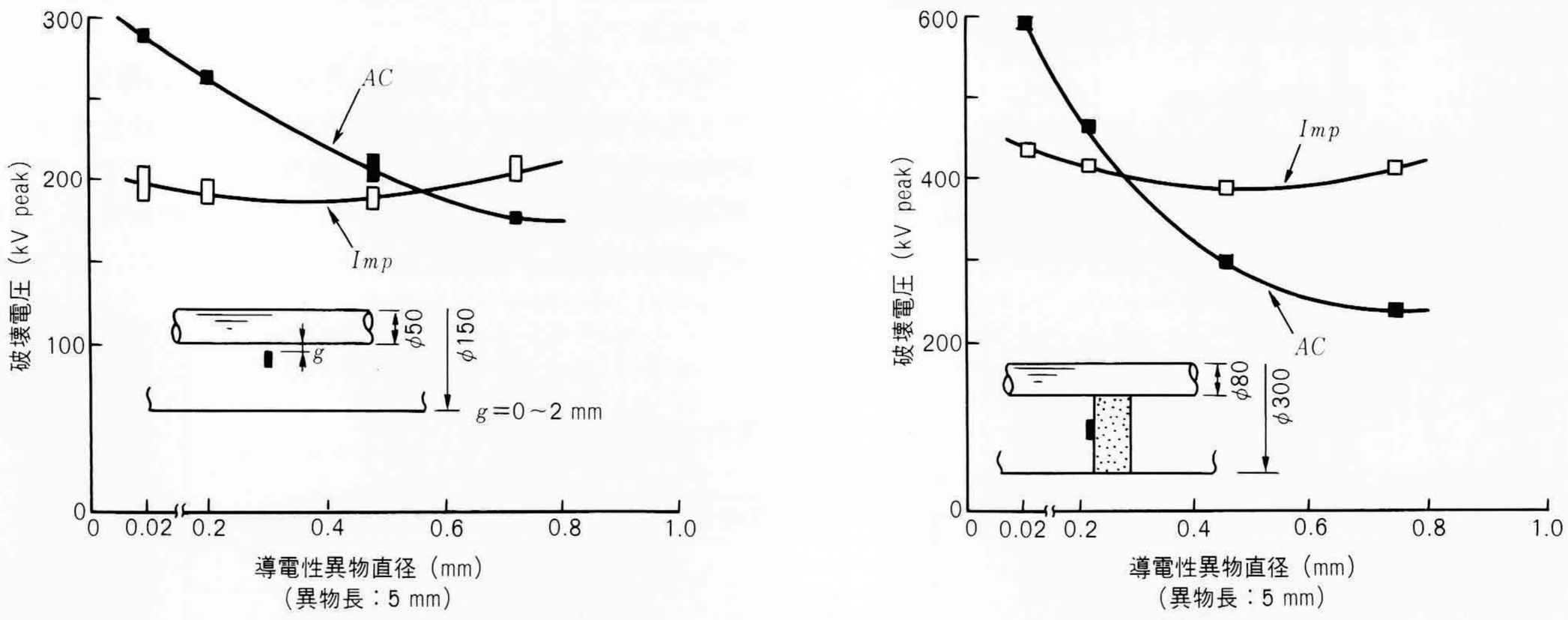
3.2 防じん組立技術

工場での組立と同等な作業環境確保のため，現地では**図8**に示すエアシェルタ，エアドームを開発し，特に現地組立時間の長くなる大形装置の現地作業に用いている。これらで，外気からのじんあいの侵入を排除するため，シェルタ及びドーム内の気圧を若干正圧としている。また，湿度，じんあい量についても工場内での防じん室と同等の作業環境を目指している。

3.3 絶縁試験法

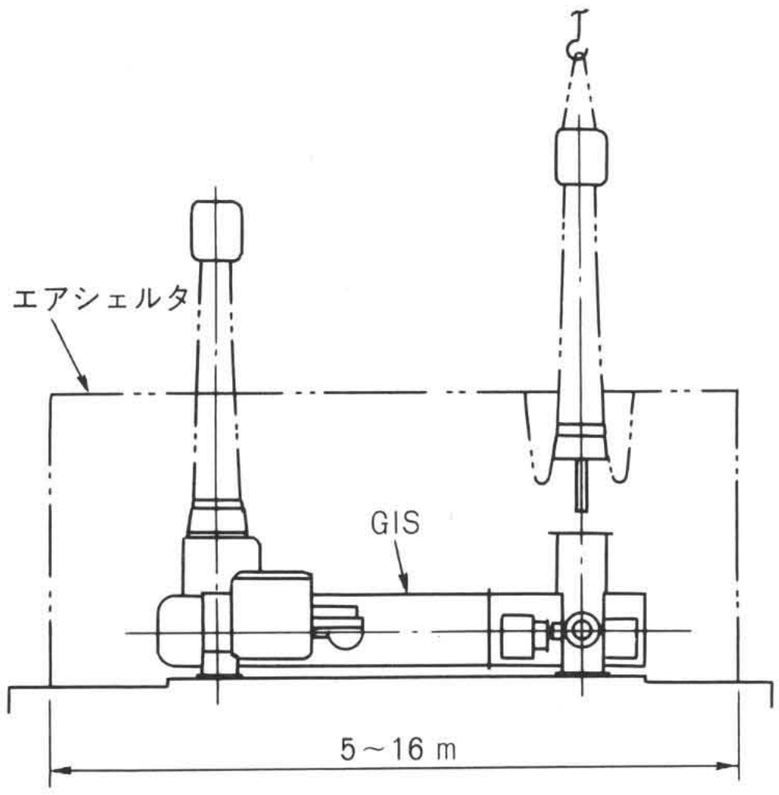
綿密な輸送管理と作業管理のもとに据付完了したガス絶縁開閉装置が，十分に信頼性が確保されていることを検証するため，最終段階での絶縁試験は重要な役割を持つ。特に，絶縁性能に大きく影響する導電性異物の残存による絶縁低下のないことの検証は，信頼性確保の面で意義は大きい。**3.1**節で述べた導電性異物混入時の諸特性をもとに，新しい絶縁試験法について検討した[5]。

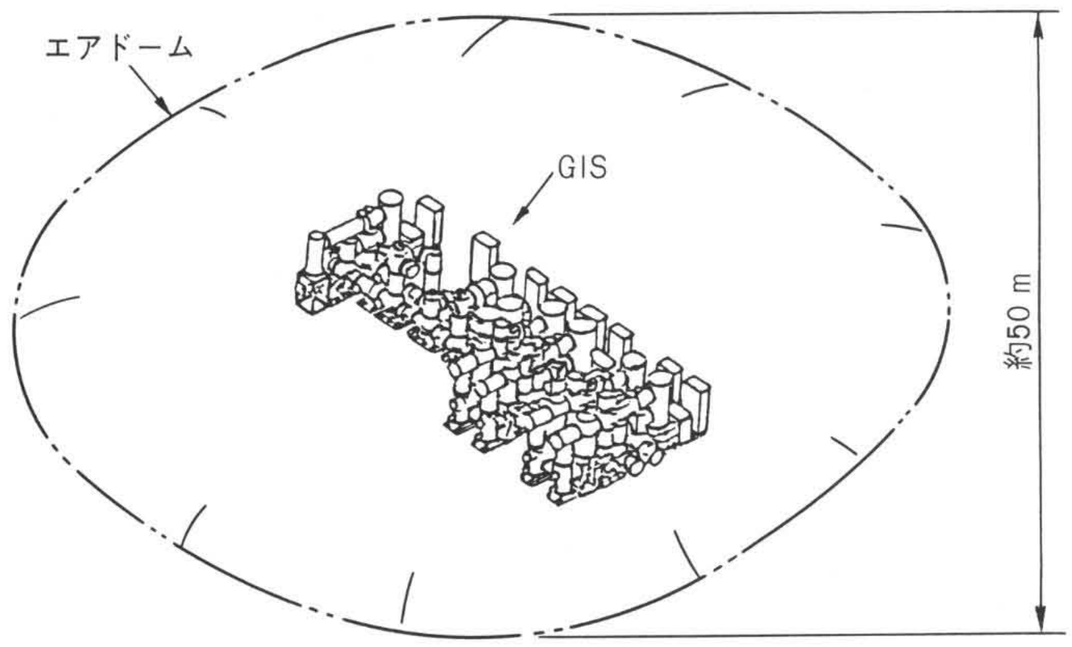
図9はこの新しい絶縁試験法(500 kV機器の例)について示したものである。異物の挙動に影響する商用周波電圧(*AC*)試験を先行して行い，前述した部分放電及び異物検出法を併用することによって高感度の検出を行う。その後インパルス試験を実施することによって，万一付着した異物に対しても高感度の検出を可能にしている。この方法は可搬式の共振形商用周波試験装置や振動インパルス試験装置の導入により比較的容易に実施できるようになってきた。**図10**は上記の方法を

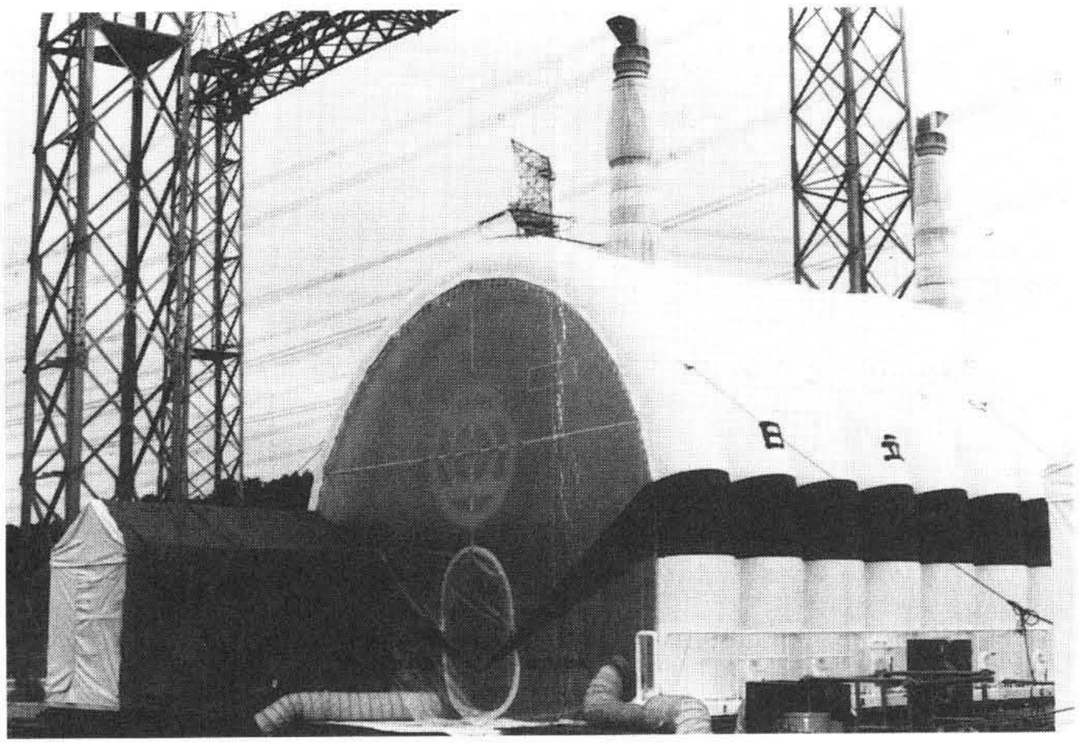


注：略語説明 *AC*(商用周波電圧)，*Imp*(雷インパルス電圧)

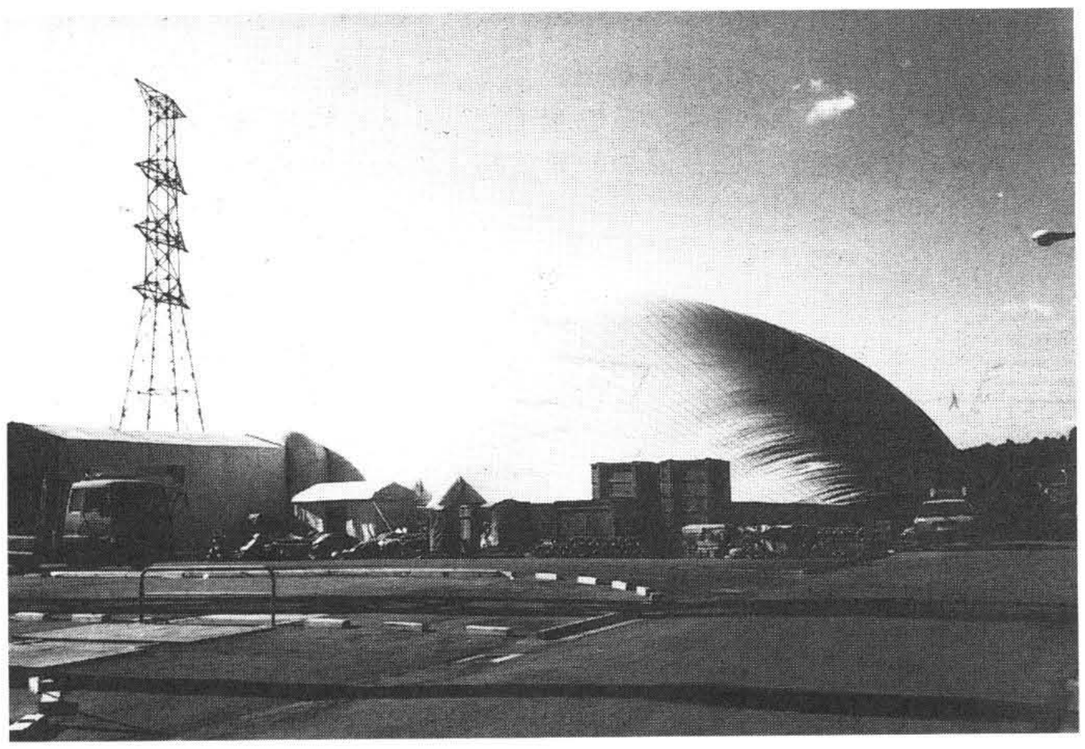
図7 導電性異物混入時の破壊特性 雷インパルス電圧では異物直径が変化しても破壊電圧の変化は少ないが，商用周波電圧では細径になるほど破壊電圧が上昇する。異物付着時には雷インパルス試験のほうが異物検出のうえで有効となる。





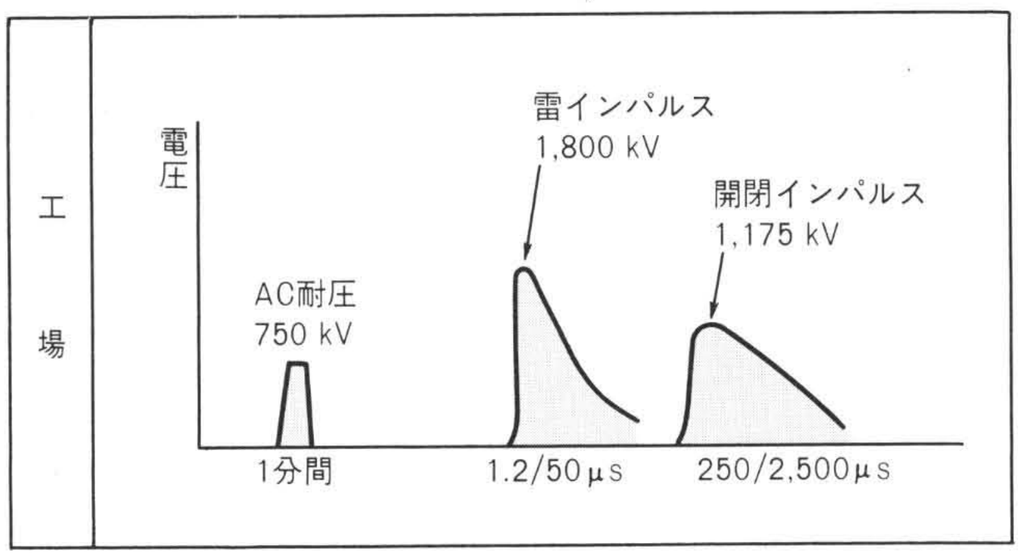


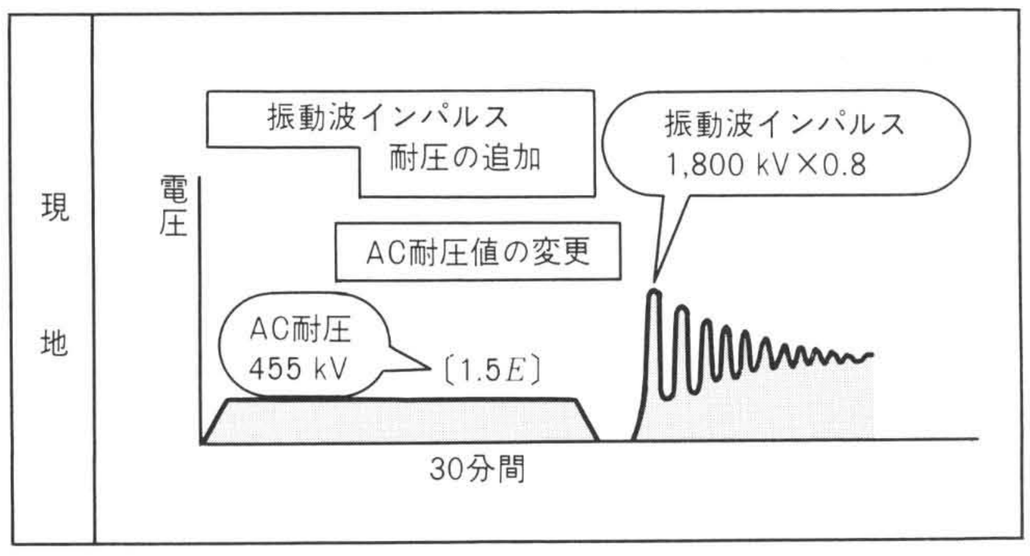
(a) エアシェルタの使用状況



(b) エアドームの使用状況

図8　現地据付け時の品質管理の強化　　エアシェルタ，エアドームを使用することによって，工場内での組立と同等な作業環境を目指している。





注：略語説明　E（常規対地電圧）

図9　新しい絶縁試験法（500 kV機器の例）　　試験順序の変更，現地でのインパルス試験の導入により，信頼性の向上を図っている。

550 kVガス絶縁開閉装置に適用した状況例である。

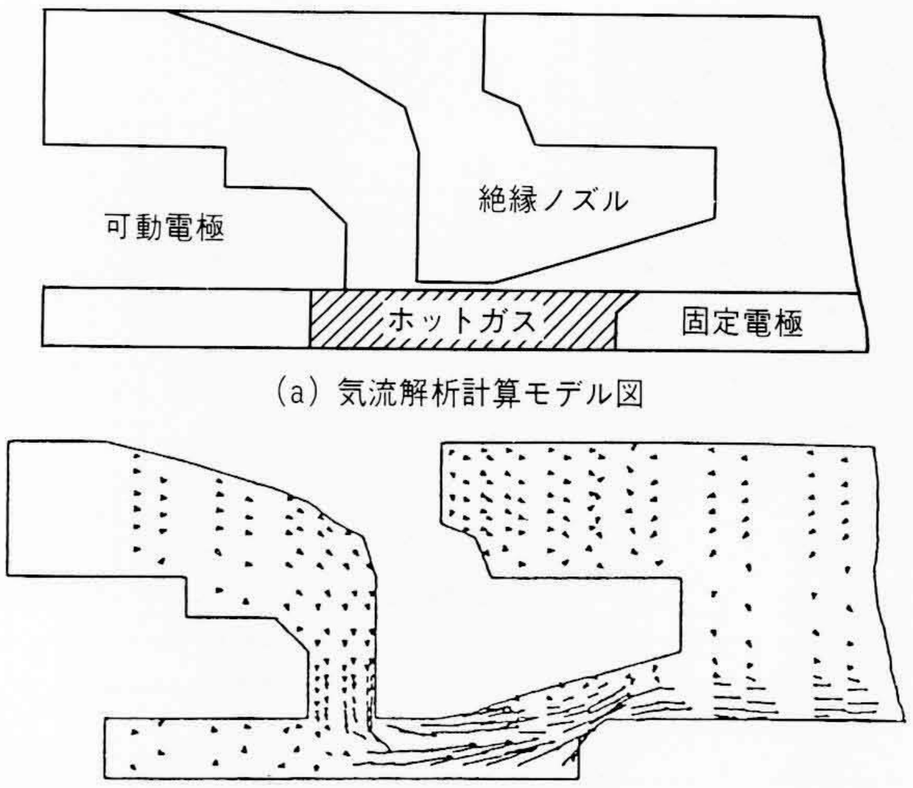
4　ガス遮断器の高性能化

ガス遮断器は昭和44年に1号器を納入以来，現在まで約8,000台を納入するに至り，**図11**に示すように定格電圧は84 kVから550 kVへ，遮断電流は25 kAから63 kAへと高電圧・大容量化が図られてきた。ガス遮断器の遮断性能は消弧室の改良と新絶縁材料の開発などによって飛躍的に向上し，ユニット電圧の究極の高電圧化を図ることができた。

4.1　低操作力・低騒音化

従来の有負荷動作解析，電界解析技術のほかに新たにアークを考慮した気流解析プログラムを開発し，**図12**に示す例のように消弧室内の圧力，密度及びガス流を解析することが可能になった。この結果，極間に発生したアーク熱をパッファ

図10 550 kVガス絶縁開閉装置の現地絶縁試験状況　可搬式の共振形交流耐電圧試験装置及び振動波インパルス試験装置を導入し，現地据付け後のガス絶縁開閉装置の絶縁信頼性の確認を実施している。



(a) 気流解析計算モデル図

(b) 気流解析計算結果例

図12 気流解析例　ガス遮断器の電流遮断時での消弧室内SF_6ガス流をコンピュータ解析した例を示す。

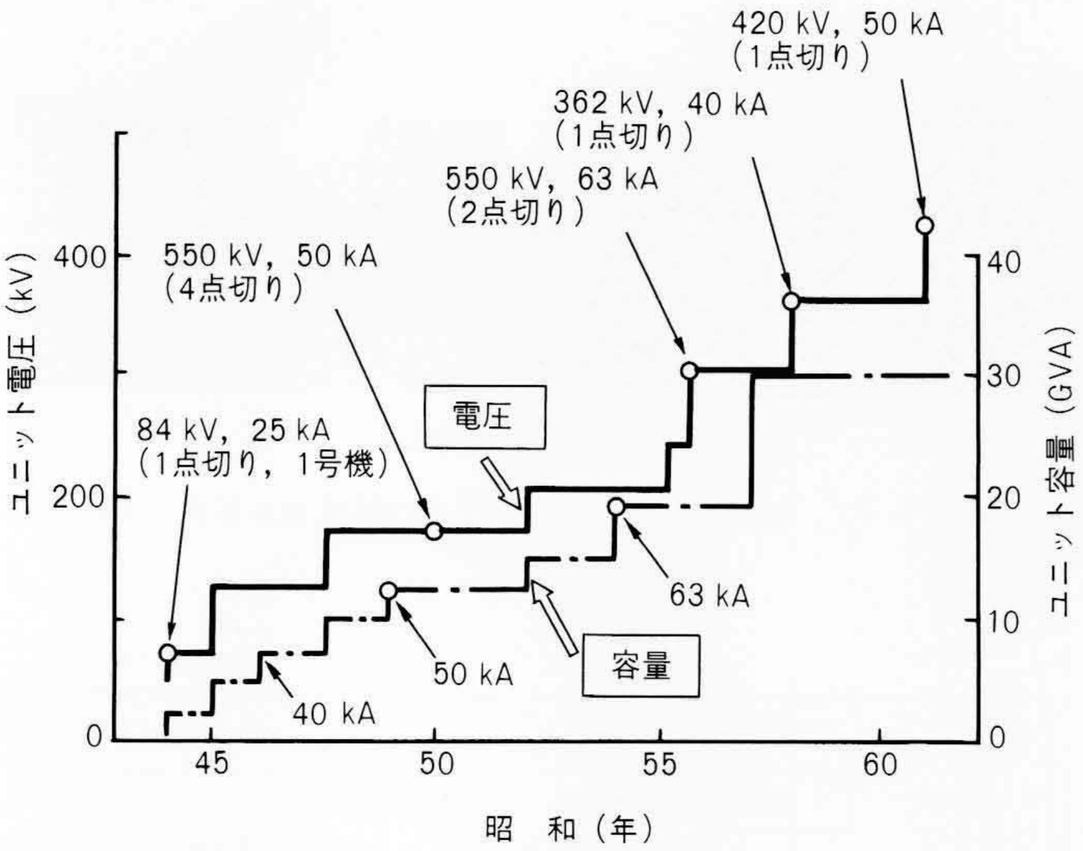


図11 ガス遮断器高電圧・大容量化の推移　ガス遮断器の一遮断点当たりのユニット電圧，ユニット容量の推移を示す。

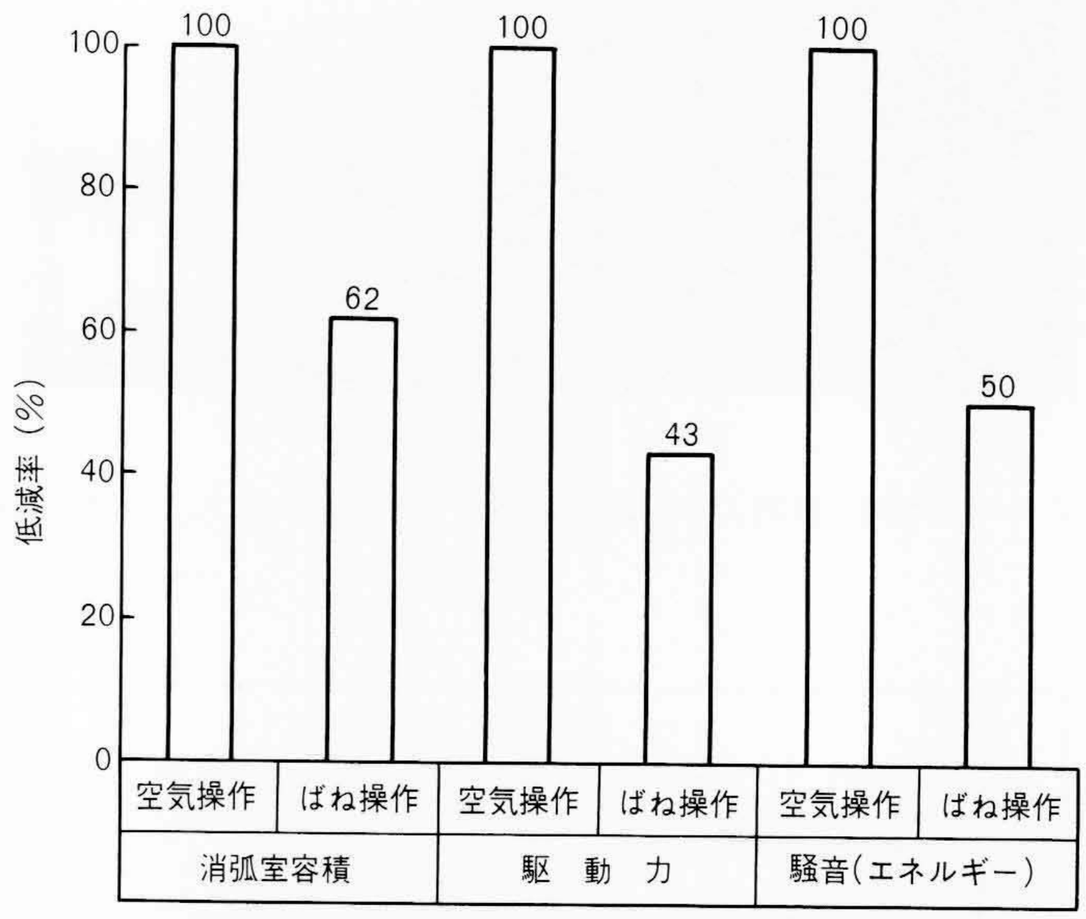


図13 84 kV，25 kAガス遮断器比較　従来形ガス遮断器(空気操作)と低操作力ガス遮断器(ばね操作)で，消弧室容積，駆動力及び騒音(エネルギー)の比較を示す。

圧力上昇によって有効に利用する低操作形消弧室が開発されている。

これにより操作力が大幅に低減され，低騒音形電動ばね操作方式のガス遮断器が製品化されている。84 kVでの操作力と騒音の低減例を**図13**に示す。

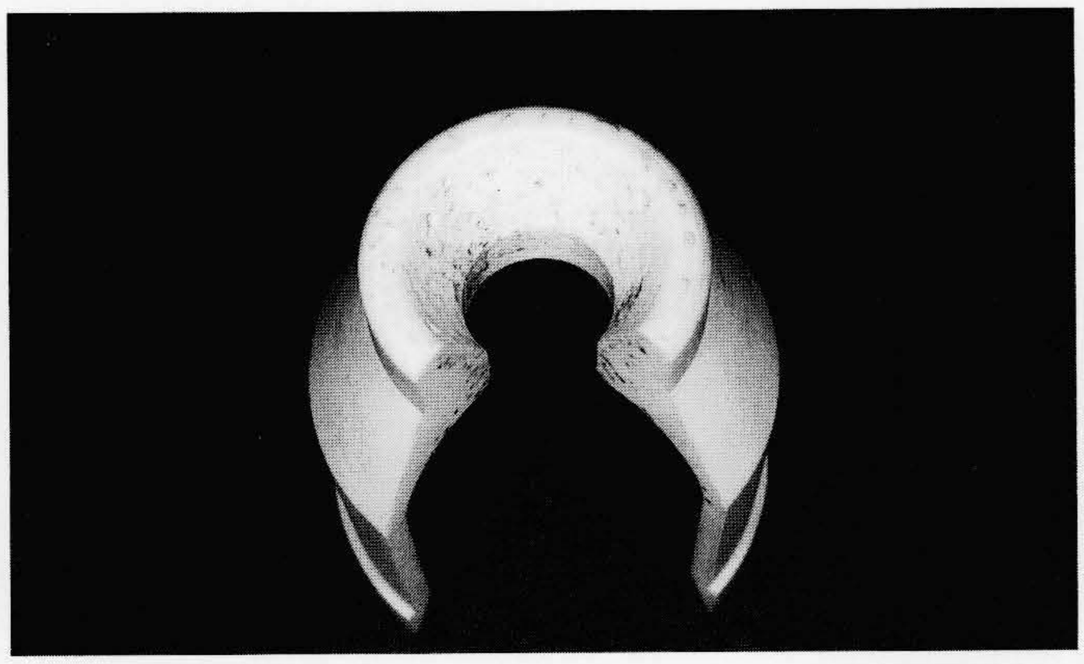
4.2 遮断点数の低減

一遮断点当たりの遮断容量の増大によって，高電圧・大容量のガス遮断器の遮断点数が低減され，550 kV，63 kA定格では4点から2点へ，420 kV，50 kA定格では2点から1点へと低減し製品化されている。

遮断点数の低減に伴い，進み小電流遮断時には十分に開極しないうちに従来の約2倍の高い電圧が加わるため，これに耐える遮断部構造にすることが必要である。気流解析と電界解析によるノズル形状の最適化のほかに，新絶縁材料を適用することによって所期の性能を達成した。**図14**(b)は新たに開発したニューセラミックノズルであり，当ノズルでは大電流遮断時のアーク熱と光による絶縁ノズルからの炭素の遊離を防止し，損傷と消耗を著しく軽減している。この結果，大電流遮断後の進み小電流遮断試験でも極めて優れた絶縁回復特性を持っていることが確認されている。

4.3 全三相一括化

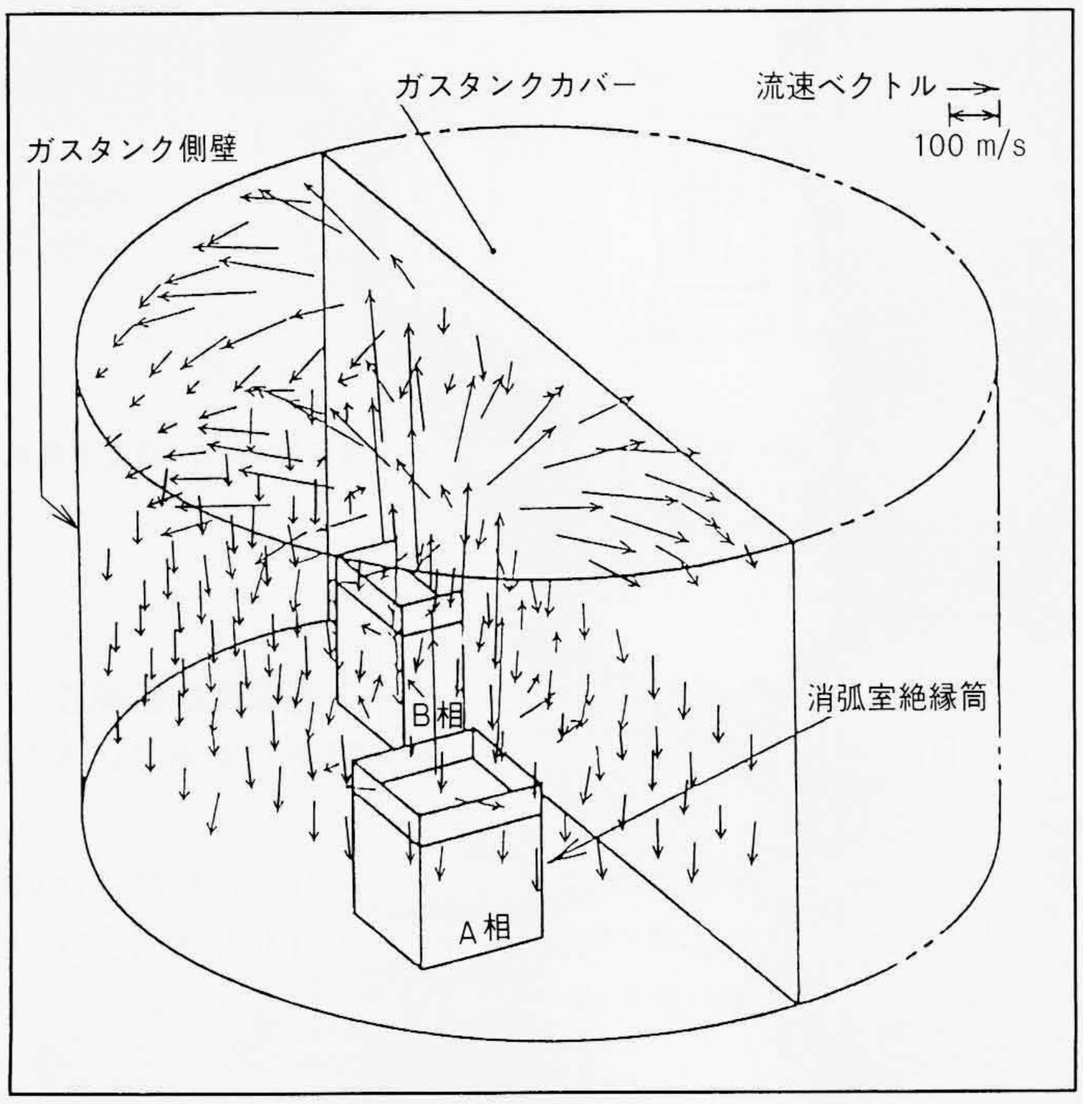
ガス遮断器の三相一括化はガス絶縁開閉装置の全三相一括化による据付面積の縮小，輸送寸法・質量の低減の一環として必要であるが，母線と異なり電流遮断時でのホットガス存在下での相間絶縁耐力の解析・検証が必要である。ホットガス存在下での相間絶縁耐力の解析には，3次元気流解析プログラムの開発が大きく貢献している[6]。**図15**に三相一括ガス遮



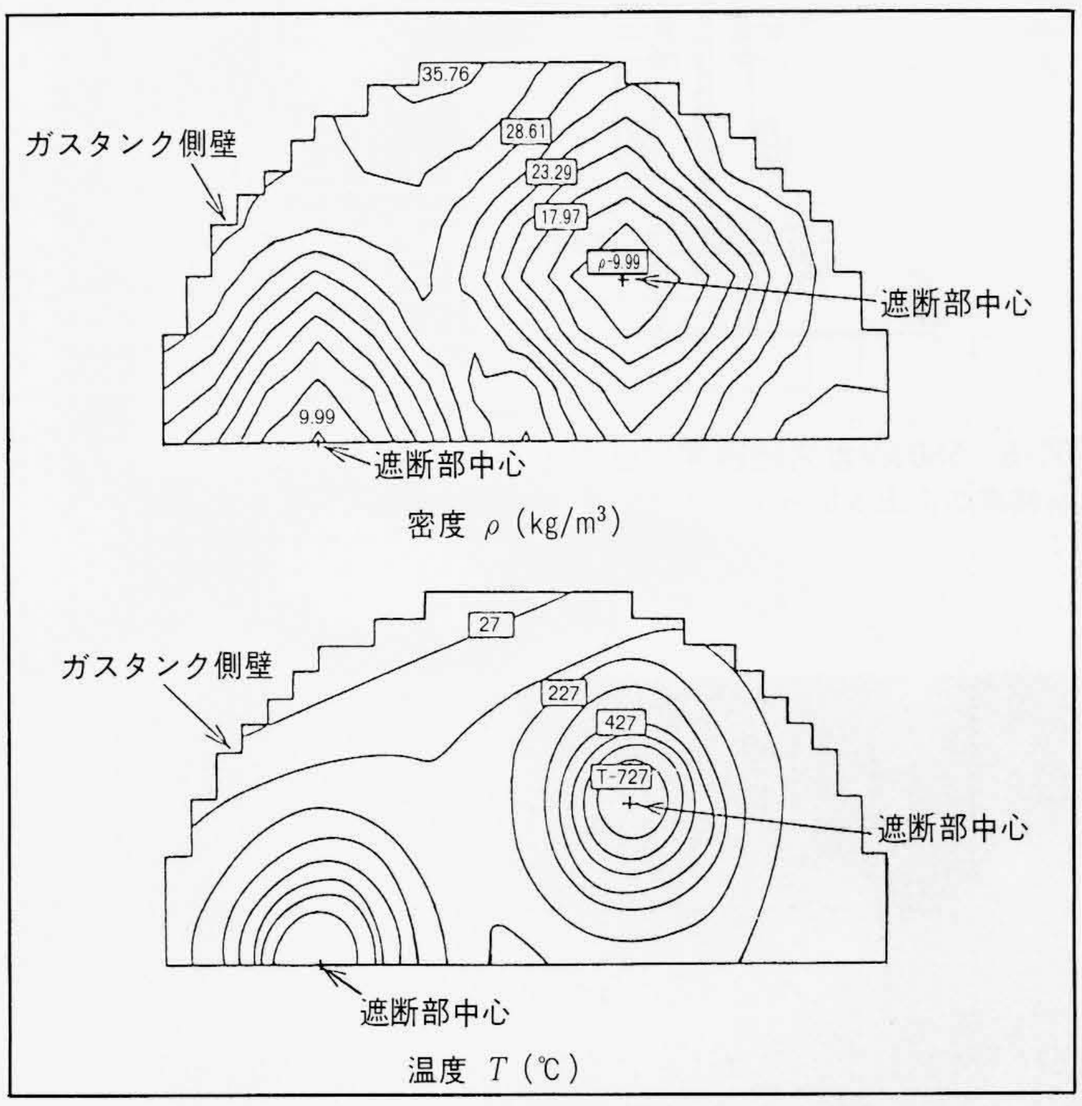
(a) 従来形ノズル

(b) ニューセラミック製ノズル

図14　大電流遮断後のノズル損傷状況　(a)従来形ノズルと(b)ニューセラミック製ノズルでの50 kA，10回遮断後の損傷状況を示す。(b)ではノズル表面への炭素の析出はない。



(a) ガス流分布



(b) ガス密度，温度分布

図15　三相一括形ガス遮断器の3次元気流解析　電流遮断時での三相一括形ガス遮断器の気流解析結果の一例を示す。(a)はガス流の分布を，(b)はガス密度及び温度分布を示す。

断器での気流解析例を示す。また，相間絶縁耐力を検証するため，電流遮断時に相間電圧を印加し，耐力を確認している。

現在，72 kVから300 kVまで全三相一括形ガス絶縁開閉装置のシリーズが完成している。

5　大容量ガス絶縁開閉装置

エアレス対応を図った一例として，大容量550 kVセミガス絶縁開閉装置の内部構造を**図16**に示す。遮断器，変流器，断路器，接地開閉器などを直線上に配置する直接配置構成を採用し，機器の配置を簡単化すると同時に，遮断器操作機構部の配置にも留意し，低重心化を達成し耐震性を向上させている。更に，大電力長距離送電線に対応した吸込形接地開閉器を新たに開発，実用化した。また，ガス絶縁開閉装置絶縁協調のかなめである避雷器は，保護レベルを従来の20%低減させた高性能酸化亜鉛形避雷器を新たに開発，実用化し絶縁信頼性の向上が図られている。

更に本機器は，低圧制御系への誘導サージを低減するために接地方式として多点接地方式を採用しており，接地系の誘導電流解析，温度上昇解析を実施するとともに，工場及び現地で三相通電試験が実施され，その解析精度が確認されている。工場内三相通電試験実施状況を**図17**に示す。なお，引き続きBIL(Basic Impulse Insulation Level)低減を考慮した三相一括母線を鋭意開発中である。

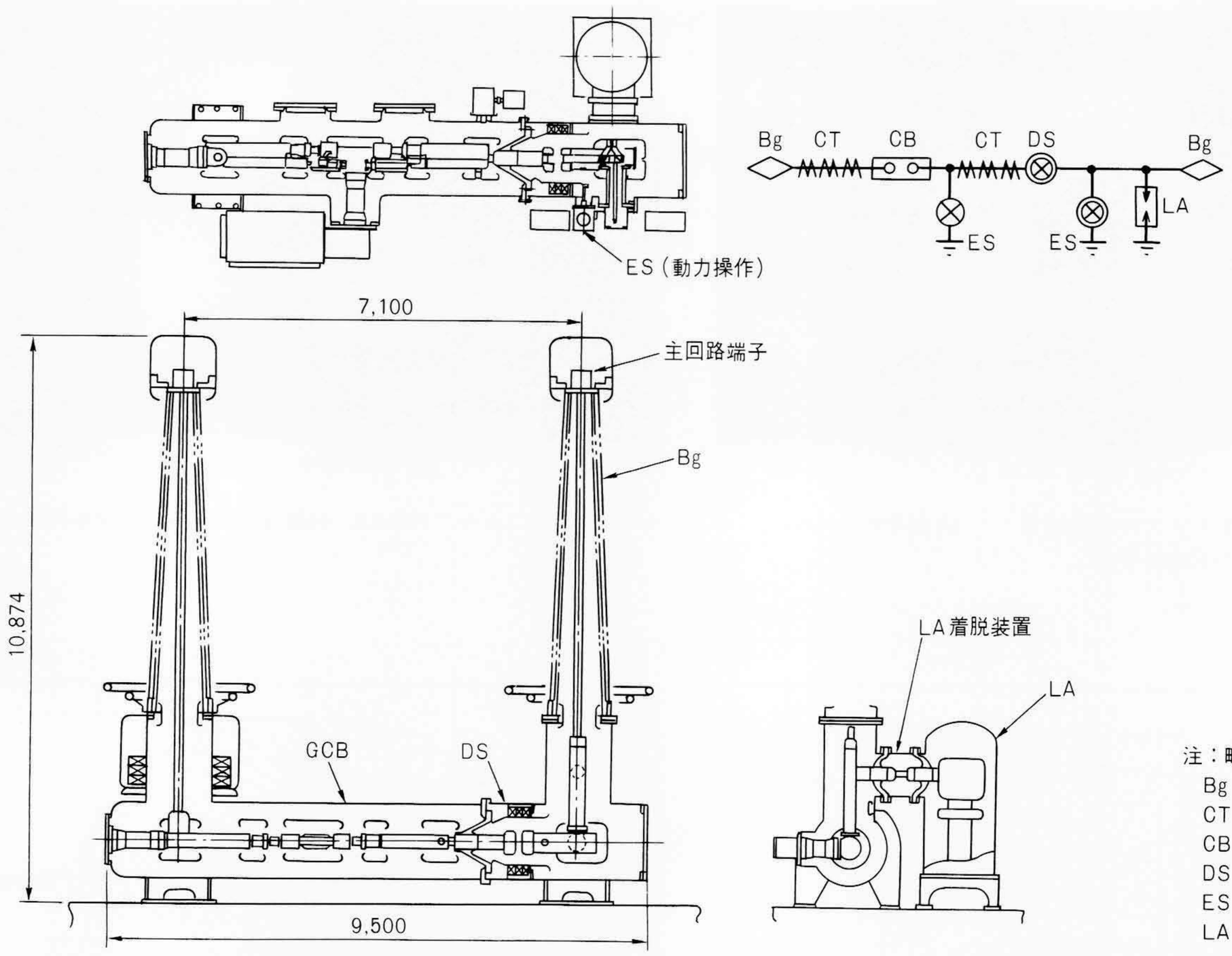


図16 550 kVガス絶縁開閉装置の三相通電試験状況　接地メッシュなど実使用状態を模擬した通電試験を実施し，誘導電流解析，温度上昇解析精度の向上を図っている。

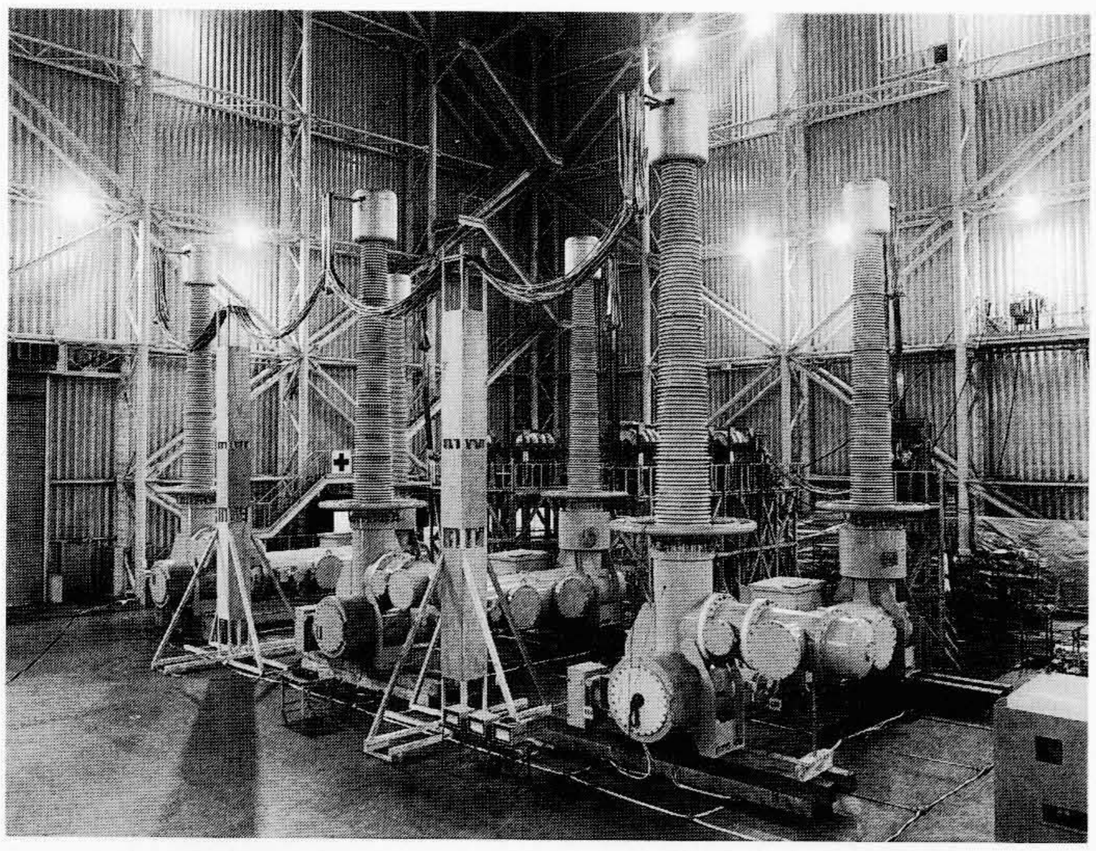


図17 直線配置構成550 kVガス絶縁開閉装置　遮断器，変流器，断路器，接地装置などを直線上に配置することにより機器配置の簡略化を図っている。

6 結　言

ガス絶縁開閉装置の最近の技術のうち，開発の基礎となる各種解析測定技術，ガス絶縁開閉装置内混入異物対策を中心とした高信頼度化技術，ガス遮断器の高性能大容量化技術について紹介した。今後も引き続き経済性の追求及び信頼性の向上を目指したガス絶縁開閉装置の研究開発を進めていきたいと考えている。

終わりに，本開発に当たり御指導，御助力をいただいた東京電力株式会社，中部電力株式会社及び九州電力株式会社の関係各位に対し深謝の意を表す次第である。

参考文献

1) 宇多村，外：境界要素法によるポテンシャル場の3次元解析，日立評論，**67**，6，471～476(昭60-6)
2) 山川，外：タンク型高速増殖炉原子炉主容器内の熱流動特性，日立評論，**67**，11，887～892(昭60-11)
この論文中に，3次元熱流動解析プログラムTHERVIS-Ⅲの概要が述べられている。
3) 土谷，外：ガス絶縁開閉装置用雷サージ観測装置の開発，昭和63年電気学会全国大会，No.1112(昭63-3)
4) F. Endo, et al.：Particle-Initiated Breakdown Characteristics and Reliability Improvement in SF_6 Gas Insulation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.PWRD-1, No.1, 58～64(Jan. 1986)
5) 北島，外：ガス絶縁開閉装置の現地試験法について，電気学会開閉保護装置研究会，資料No.SPD-88-3(昭63-1)
6) 筑紫，外：三相一括タンク形ガス遮断器の三次元ホットガス流解析，昭和62年電気学会全国大会，No.1307(昭62-4)