

しゃ断器の信頼性向上

Improvement of Reliability for Power Circuit Breakers

The power circuit breaker is an electro-mechanical system structure which plays a vital role of protecting main equipment in the fast growing power systems of today. Since it should operate under mixed service conditions and perform only intermittently, its reliability program should be formulated with the following considerations:

- (1) Practice of design review based on field data.
- (2) Check of parts life and tolerance of performance characteristics in the qualification test.
- (3) Product quality control such as grading control and process control sheet control. Approval system for purchased parts and check of their quality.
- (4) Reliability test. (Besides type tests, field check techniques should be considered.)
- (5) Assurance test. (The test should also cover screening of initial failure potential besides standard test items.)

山崎精二* Seiji Yamazaki

河合義夫** Yoshio Kawai

中野清蔵** Seizo Nakano

塩野繁男** Shigeo Shiono

1 緒言

電力系統の増大に伴い、しゃ断器はますます高電圧大容量化へ向かう傾向にある。その反面、用地難などの問題から、機器の超小形化が要求されている。電力系統が増大すると、機器の故障による停電事故は社会に深刻な影響を与えるので、安定した良質の電力を供給するために系統には高い信頼性が要求される。その中で、系統自体の保護を受け持つしゃ断器は特に重要で、MTBF(平均故障間隔)、保守点検間隔について高い水準が求められる。

一方、工業製品としてしゃ断器はかなり特異な性格をもち、前記の要求を実現するには種々なくふうを必要とする。以下に、72~500kV級のガスしゃ断器(GCB)、空気しゃ断器(ABB)を中心とした信頼性プログラムの概要について紹介する。

2 しゃ断器の信頼性の問題点

しゃ断器は、構造的には電気-機械系に属するが、動作が通常の機械と異なり間欠的で一種の待機系であるために、その信頼性問題はかなり特異なものがある。

2.1 動作、使用条件および環境

- (1) 長期間静止し、開または閉の状態に組み入れられる(静的な状態の保持)。
 - (2) 不時の動作信号で、負荷または故障電流の開閉を確実にこなうこと(動的な瞬時動作の実行)。
- 以上のような異なる動作が要求される。

電力用しゃ断器は用途により動作頻度が異なり、電力用コンデンサの開閉では1日数回の開閉であり、送電線用、母線連絡用しゃ断器では1ヶ月に1回、極端なものでは5年間に1回しか動作しない例がある。図1⁽¹⁾は、わが国の300kVしゃ断器210台についての最大操作間隔の調査結果で、約25%は90~120日間は動作していない。しゃ断器はこのような多頻

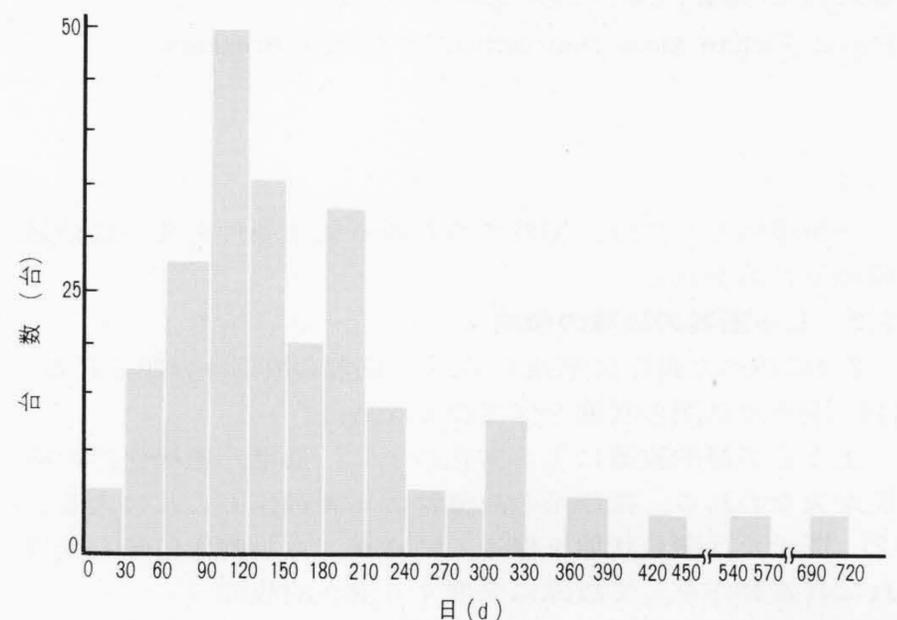


図1 300kVしゃ断器の最大操作間隔 わが国の300kVしゃ断器210台について最大操作間隔を調査した結果を示す(約25%は90~120日間は動作していないことを示している)。(電力中央研究所送電機能特別委員会, 550kV送電委員会, しゃ断器専門委員会「500kVしゃ断器の実用性能」(昭45-3))

Fig. 1 Maximum Operation Interval of 300kV Circuit Breakers

度、希頻度いずれの使用条件においても確実な動作が要求される。

系統の過渡安定度から、しゃ断器は事故電流をできるだけ速くしゃ断することが好ましい。たとえば、定格電圧550kV、定格しゃ断電流50kAのしゃ断器では、動作信号が与えられてから0.022秒以内で接触子が開離する必要がある、また高速度で動作する多数のしゃ断ユニットの動作時間のばらつきは、0.001~0.002秒以下に管理しなければならない。これら一連の高速度動作時に各部に発生する応力は、衝撃力に近似して

* 日立製作所国分工場 工学博士 ** 日立製作所国分工場

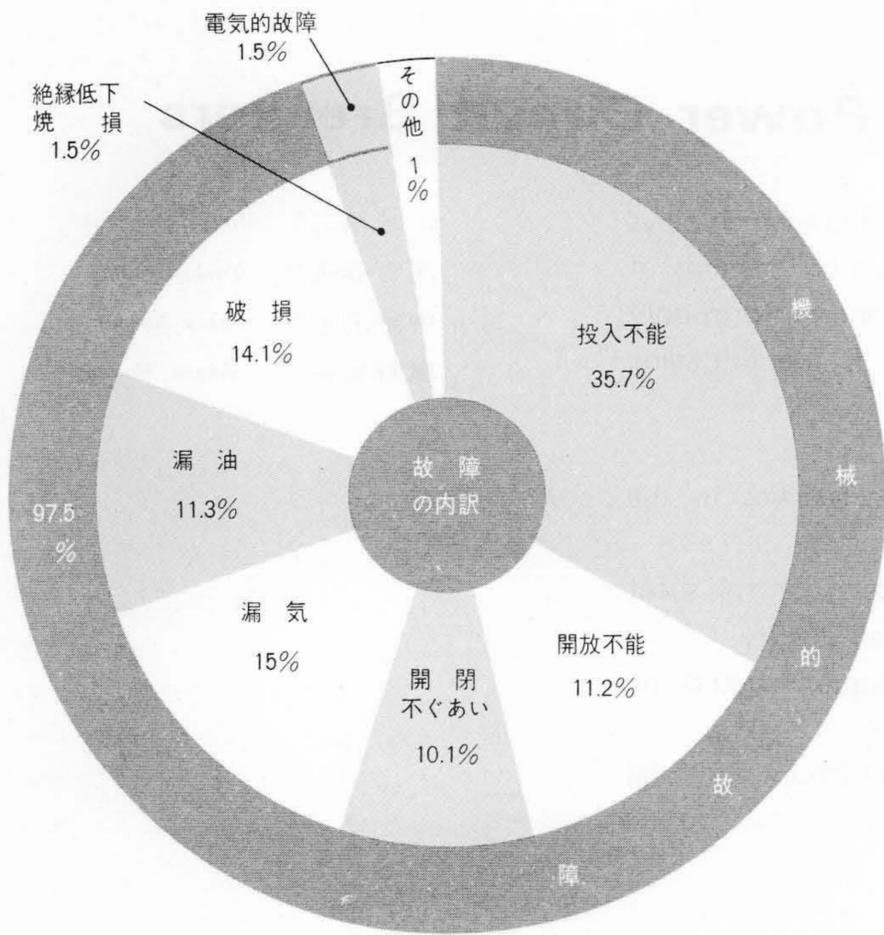


図2 しゃ断器の故障内容分析 しゃ断器の故障を発生様相別にまとめ図示したもので、しゃ断器の故障の大半は機械的な故障が占めている。(電気協同研究第29巻第1号第3-4表(昭48-8))

Fig. 2 Failure Mode Distribution of Circuit Breakers

いる。

使用環境としては、屋外であらゆる気象条件あるいは地域環境下におかれる。

2.2 しゃ断器の故障の傾向

2.1に述べた動作に関連して、しゃ断器の故障は分類される。

(1) 開または閉の状態を保てなくなる。

主として静的放置による劣化により、通電、絶縁保持の機能が失われる。操作系の故障による誤動作もこれに入る。

(2) 開または閉の状態を保っているが、もし動作信号を受ければ異常動作をして故障に発展する潜在的故障。

動作信号のないかぎり正常と評価される。一般にこの状態は点検によって発見され、発見の時期をもって発生と記録されるが実際はいつ発生したかは明らかでない。

(3) 動作信号を受けて動作中に故障メカニズムが発展し、故障となるもの。

もし、動作信号までに点検がなければ、(2)は(3)として記録される。故障記録を解析する場合、この事情を考慮しなければならない。

図2⁽²⁾は、わが国で公表されたしゃ断器の故障内容の構成を示すものである。すなわち、しゃ断器の故障モードの97.5%が機械的動作の異常によるものであることを示している。投入不能、開放不能および、開閉不ぐあい(計57%)の大部分は、機構またはバルブ系の固渋および操作回路の接点故障から成るものと考えられる。これらの一部は、しゃ断不能などに発展するが、絶縁劣化などの電氣的故障(1.5%)を加えても、システムの電氣的機能に重大な変化を引き起こすのは全体の10%以下に過ぎず、大部分の故障は日常の開閉操作または点検監視のときに発見され、大きな故障に発展する前に処理されている。

このように故障の系統に与える影響は大別して二つに分け

られ、点検、監視の密度がこの分別に関与する。

図3⁽³⁾は公表されたしゃ断器の点検後、故障発生までの間隔ごとの発生記録を示すものである。機種によって多少の差はあるが、いずれも点検後1年以内までに故障の50%が発生している。これらは初期故障形に属しており、操作器の動作不良、漏洩および部品の破損などに起因している。

2.3 しゃ断器の成り立ちの特異点

(1) 多種少量生産であること。

定格電圧72~550kV、定格しゃ断電流20~50kA範囲のしゃ断器では、しゃ断器規格(JEC-181)によると176種類の標準定格を定めている。一方、しゃ断器は、消弧方式の変遷が激しく、油しゃ断器から空気しゃ断器、さらにはガスしゃ断器へと発展しており、フィールドにおける稼働機種も多種に上っている。もし、信頼性試験やフィールドデータが、異なる定格間で適用できない構成になっていけば、多機種の信頼性試験を限られた人員、装置、時間で行なわねばならず、1機種当たりの試験密度が低くなり、フィールドデータ(台数×時間)も不十分なものとなる。特に高い信頼性を要求される高電圧大容量の製品は、生産台数が少ないのでフィールドデータの不足を招く。そこで、構造の共通ユニット化によって異なる

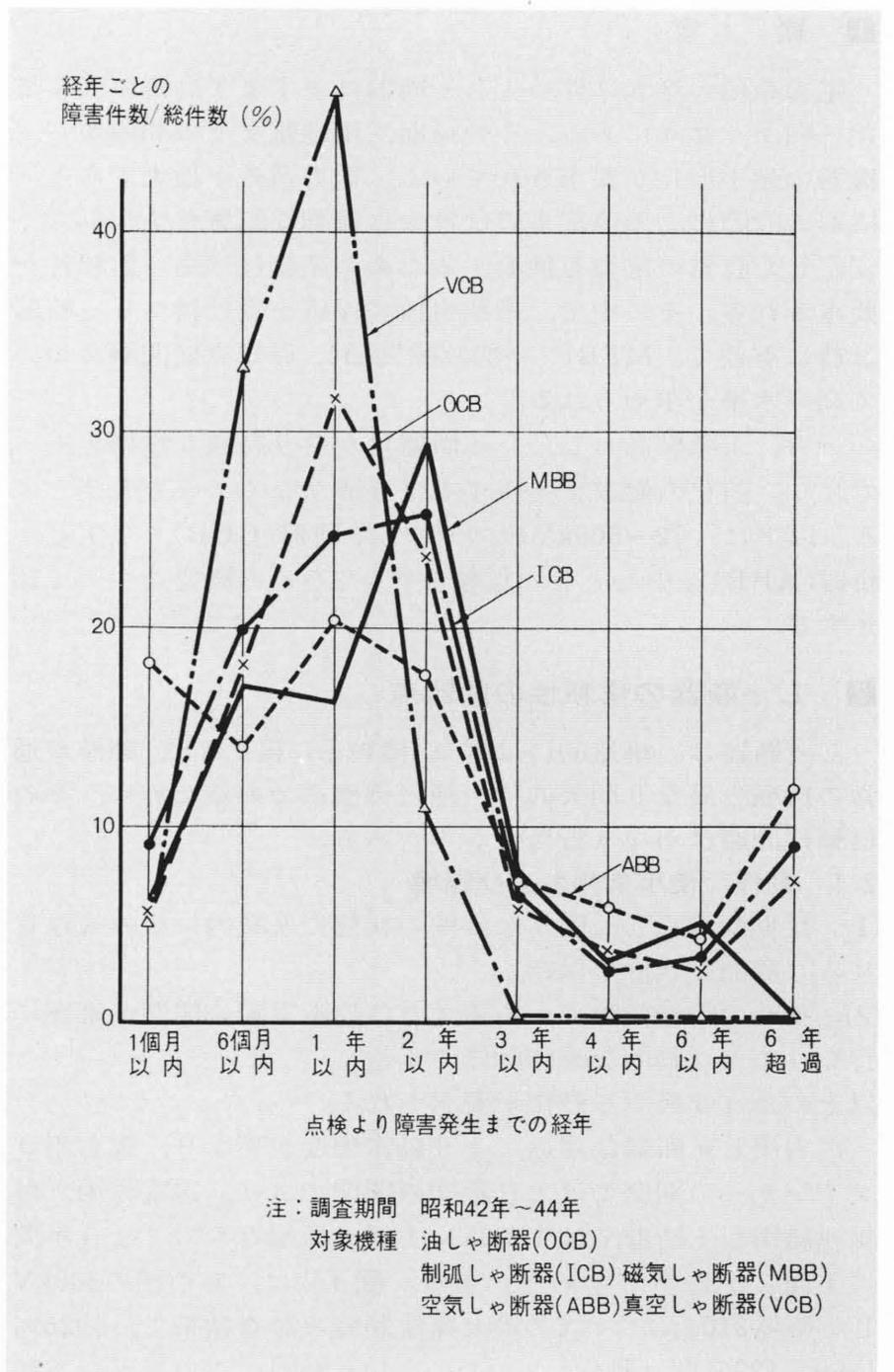


図3 故障発生までの推移 前回点検時より故障発生までの推移をしゃ断器の機種別に図示したもので、しゃ断器故障の50%以上は1年以内に発生している。(電気協同研究第29巻第1号第3-4図(昭48-8))

Fig. 3 Intervals between Check and Failure of Circuit Breakers

定格機種間でデータの流用を可能にし、多数生産される中容量機種のフィールドデータを大容量機種に適用するくふうが必要となる。

(2) 気密構造

空気しゃ断器、ガスしゃ断器とも操作は流体またはばねの併用によっており、フィールドデータにおいても気密不良の占有率が少なくない。ガスしゃ断器では、ガス漏れはきわめて厳しく管理されねばならない。すなわち、気密に関与する部分の設計および品質管理(作業管理を含む)は、周到な注意の下に行なわれねばならない。

3 しゃ断器の信頼性プログラム

2.の各項で述べた要件を背景として、しゃ断器の開発、製造および保証を含む信頼性プログラムが作られる。3.においては、その中の二、三の要点について述べる。

3.1 信頼度目標

現在、ほぼ一般的に認められているしゃ断器の信頼性に関する指数としては、下記があげられる。

- (1) 機構構造の摩耗性寿命：開閉回数10,000回
- (2) しゃ断部接触子の摩耗性寿命：
 - (a) 交換および手入れすることなく定格しゃ断電流を10回以上開閉できること。
 - (b) 交換および手入れすることなく定格負荷電流を500~1,000回(定格電流により異なる)以上開閉できること。
- (3) しゃ断器全体としての寿命：補修を行ないつつ20年。
- (4) 気密構造の劣化：
 - (a) 空気操作系……圧力低下換算3%/12時間以下
 - (b) ガス気密系……圧力低下換算3%/1年以下

(b) ガス気密系……圧力低下換算3%/1年以下

(5) 保全性：定期点検周期4~6年

MTBFは、現在、メーカー、ユーザーの協力のもとに、フィールドの実績を積み上げている段階である。

3.2 設計における信頼性の作り込み

3.2.1 デザイン レビュー

製品計画から図面完成までの間のいくつかの段階で、広く各分野の専門家の知識を結集して製品の信頼性、生産性、保全性、輸送などについて潜在的な問題点にまで及び事前検討を行ない、結果を設計図面に反映する方法、すなわちデザインレビュー(以下、DRと略す)を実施している。FMEA/FMECA(Failure Mode, Effect and Criticality Analysis)による事故波及度の検討をはじめ、製品仕様、設計ドキュメント、設計図面、開発段階で行なった各種の検討試験(開発試験)結果の吟味および評価、生産開始前に実施すべき信頼性試験計画、生産性、コストなどを組織的に広範囲な角度から検討を行なう。DRにおいて特に重要な点は、フィールドにおける稼動実績が明らかな製品あるいは部品の設計データをもとにして新設計品を比較検討することである。できるだけ豊富なデータを整理し、速やかに製品へフィードバックすることがDRの効果を高める。決められた様式で、各しゃ断器の全体性能および構造細部の設計諸元およびフィールドの実績データをコンピュータにインプットし、必要に応じ容易に取り出し、対比できるようにしDR時に豊富なデータによる質の高い検討を行なう。吟味のための設計ドキュメントの一例を図4に示す。

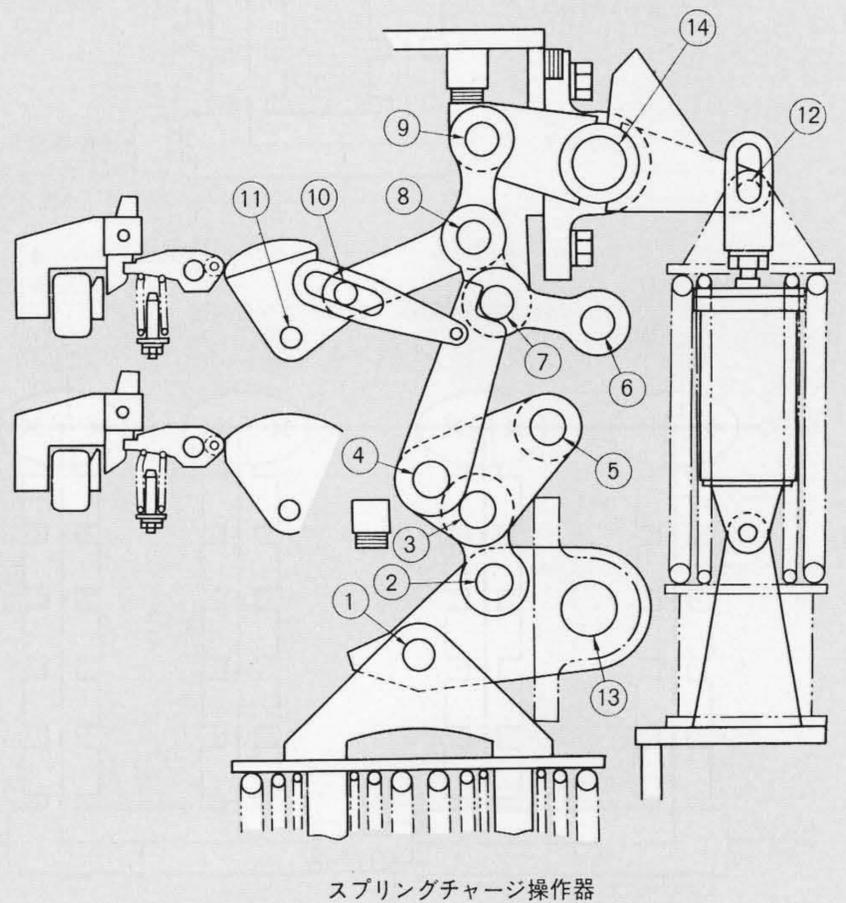
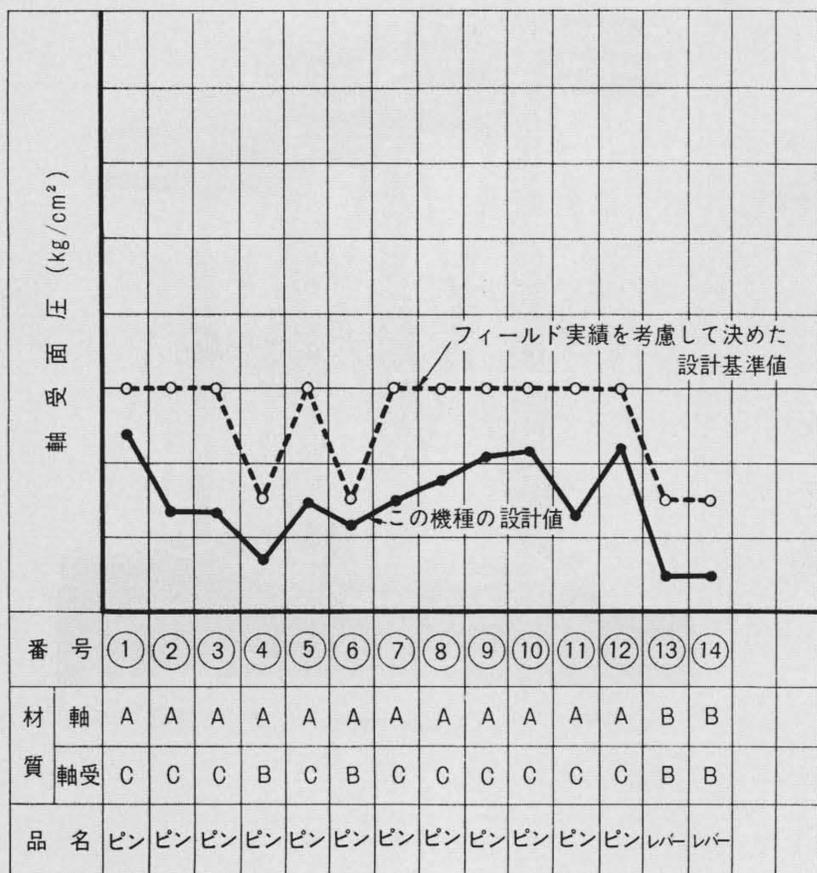


図4 操作器の連結ピンの軸受圧を吟味するための設計ドキュメントの一例 スプリングチャージ操作器の各部の連結ピンの面圧について、フィールド実績を考慮して決めた設計基準値と設計値を対比し比較検討できるようにした設計管理図である。

Fig. 4 Example of Design Quality Control Chart

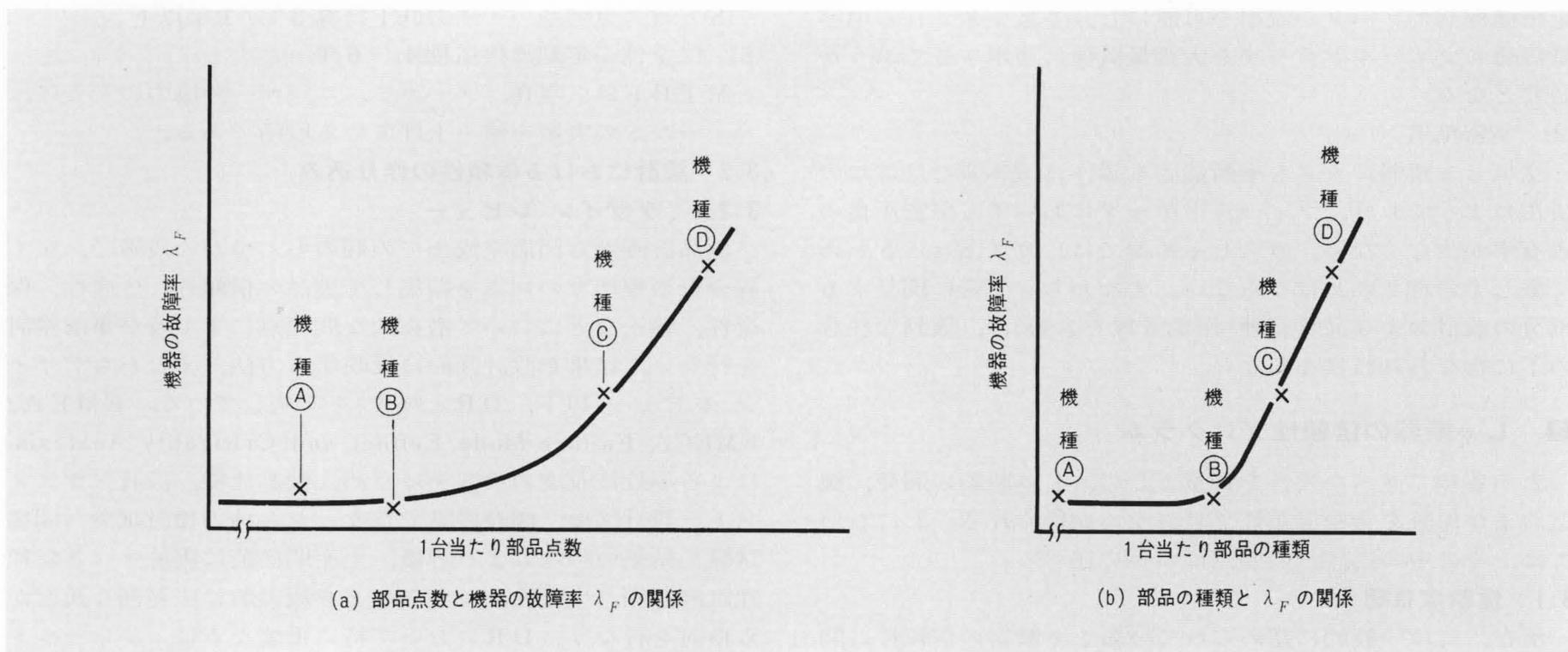


図5 部品点数と機器の故障率 λ_F の関係および部品の種類と機器の故障率 λ_F の関係
 本図(a)は、しゃ断器の構成部品点数と故障率の関係を図示したもので、部品点数がある値までは故障発生率はほぼ一定であるが、この値を超えると故障発生率が急激に増加する。(b)は、しゃ断器の構成部品の種類と故障率の関係を図示したもので、部品の種類がある値までは故障発生率はほぼ一定であるが、この値を超えると故障発生率が急激に増加する。

Fig. 5 Relation of Failure Rate to the Number of Parts and Relation of Failure Rate to the Number and Kind of Parts

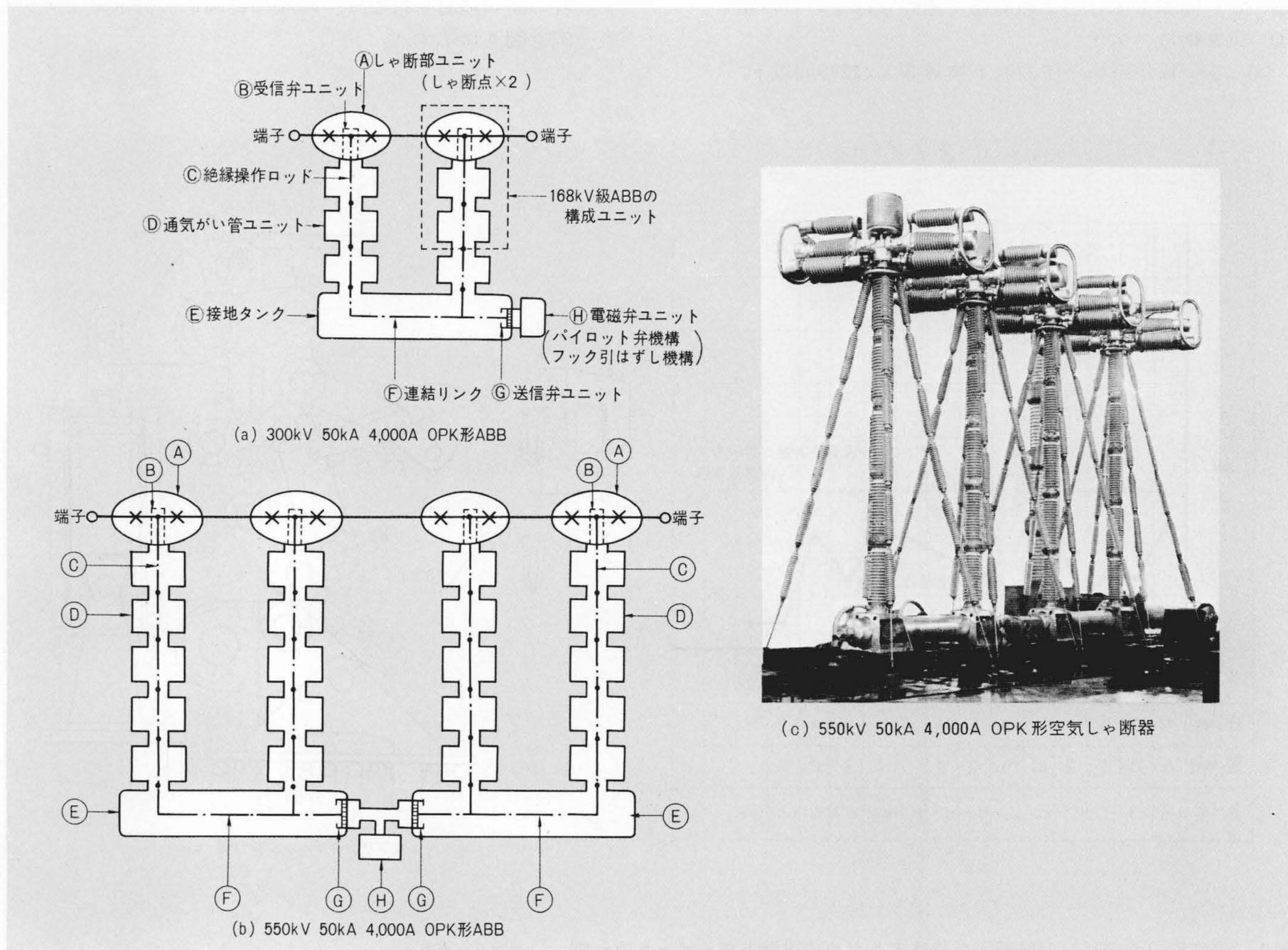


図6 OPK形空気しゃ断器(ABB)のユニット構成 フィールド実績の多い168~300kV定格のしゃ断部ユニットおよび操作系ユニットが積み上げられて550kV定格のしゃ断器が成り立っている。

Fig. 6 Unit Systems of OPK Type Air Circuit Breakers

3.2.2 ユニット構成の共用化

しゃ断器の構成部品点数および部品の種類と機器の故障率の関係を調査した結果の一例は図5に示すとおりである。部品点数および種類がある値まで故障率はほぼ一定で、この値を超えると故障率が急激に増加する傾向を示している。多種少量生産品であるしゃ断器の信頼性を向上させるためには、構成部品数を必要最小限まで低減し、さらに、同一技術で製作された共通部分を積み上げて、部品の共用化、標準化を図ることが肝要である。このため、製品開発時、全シリーズを見渡した構造、すなわちユニット構成が必要であり、ユニットの共用化および部品の共用化を初期のDRの段階で検討し開発方針を決めている。ある定格のユニットは、標準化されたコンポーネント、たとえば、しゃ断部、送信弁、受信弁、電磁弁などが組み合わされる。

コンポーネントは単体で試験の後、ユニットとしてさらに試験され、次いで全組立が行なわれる。図6は、定格電圧550kV、定格しゃ断電流50kA、定格電流4,000A空気しゃ断器と定格電圧300kV、定格しゃ断電流50kA、定格電流4,000A空気しゃ断器との構成を比較して示したものである。フィールド実績の多い168~300kV定格のしゃ断部ユニットおよび操作系ユニットが積み上げられて550kV定格のしゃ断器が成り立っていることが分かる。さらに、空気しゃ断器のパイロット弁機構あるいはフック引はずし機構などの重要なコンポーネントは、他の種類のしゃ断器、たとえばガスしゃ断器とも共用化され、製品群全体としての種類を減らすことによる信頼性の向上を図っている。

3.3 開発試験

設計条件に対する裕度の検証を、ユニット、コンポーネントおよび全組立について行なっている（開発試験と称する）。開発試験の内容は、材料、製造公差および使用中に生じ得る変形の影響、環境ストレスの強度、性能への影響、電気ストレスに対する裕度、動作時における各部分の応力測定およびしゃ断、投入性能の裕度、各部寿命などの検証である。

一例として、応力の吟味について述べる。

しゃ断器の高速動作のため、衝撃による応力の決定および材料の特性からの寿命の判断が重要である。有限要素法による応力計算、光弾性によるシミュレーション、応力塗料による応力分布測定、ひずみ計による応力測定、大応力低サイクル疲労試験、衝撃寿命試験などの結果を対照して設計裕度の検討を行なう。

他の一例として、公差の吟味について述べる。

構成部品は、製作公差、温度による膨張収縮、使用による摩耗、変形などが積み重なり、寸法が変化する。これらの変動の合計に、さらに裕度を加えた値の偏差をもつサンプルを製作し、組み合わせ状態における動作が所要の範囲に収まるかどうかを確認する。

図7は、コンポーネントテスト実施の一例を示すものである。

3.4 製造品質管理

3.4.1 格付け管理

流体操作のしゃ断器では、漏洩が故障の大きな部分を占める。これに関与する部品としての、パッキン、バルブシート部分の仕上げ状態は、故障発生と強い相関があり厳重な管理を要することが知られている。その他、主性能に関連する部品類は完全な品質管理を要する。

しゃ断器を構成する部品を三つの重要度段階に分け、適当とする管理密度を当てはめ、格付けA(重要度の高いもの)の

ものは、有資格者による加工作業の指定、専門仕上職場(図8参照)の指定、空調防塵室における組立の指定、材料および部品の二重検査、後述するPC(以下、プロセスコントロールを略す)システムの適用などが行なわれる(この考え方は購入品にも適用される)。

3.4.2 PCシートの活用

格付けAの部品で、さらに厳格な加工精度、仕上げ荒さを要するものにはPC方式を適用している。このシートは作業の指示、注意が記載されているほか、工程別に加工全ピースについて、作業者が自ら加工後測定を行ない、図面と対照して結果を確認し、記入署名(部品検査は別途行なわれる)を行ない、作業の確実を期するものである。この方法によれば、個人単位の作業の責任を明確にし、かつ作業ミスを非常に少なくすることができる。

組立工程では、ユニット、コンポーネント作業にこの方法

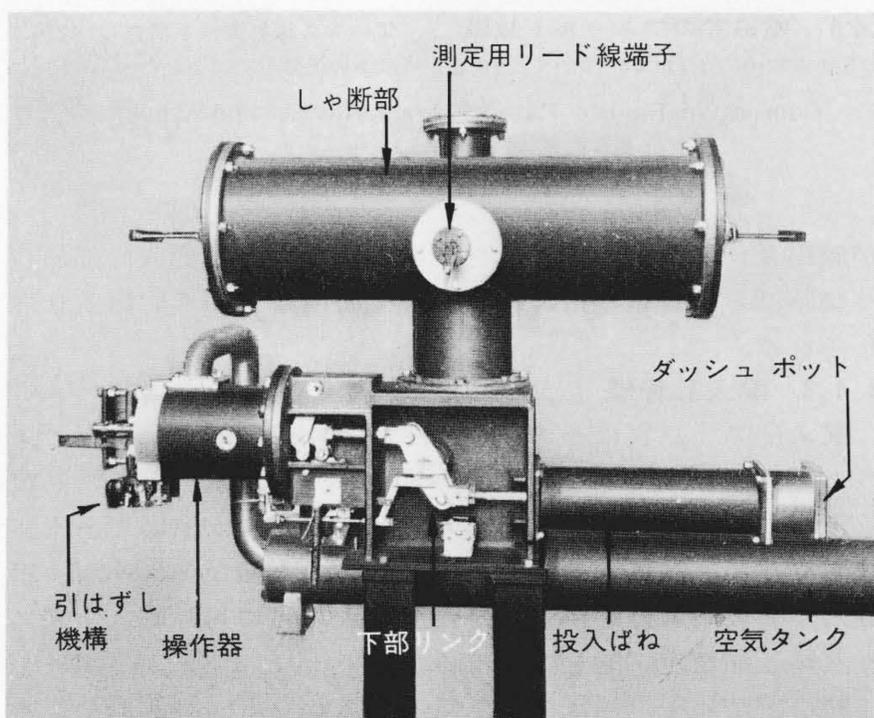


図7 コンポーネント試験状況 300kV 50kA 2サイクルパuffers形ガスしゃ断器の操作器のコンポーネント試験状況を示す。

Fig. 7 Example of Component Tests for Operating Mechanism



図8 重要部品仕上専門職場 重要部品仕上専門職場を示すもので、有資格者による重要部品仕上専門職場を設けて、作業不良の徹底的排除を図っている。

Fig. 8 Special Finishing Workshop of Important Parts

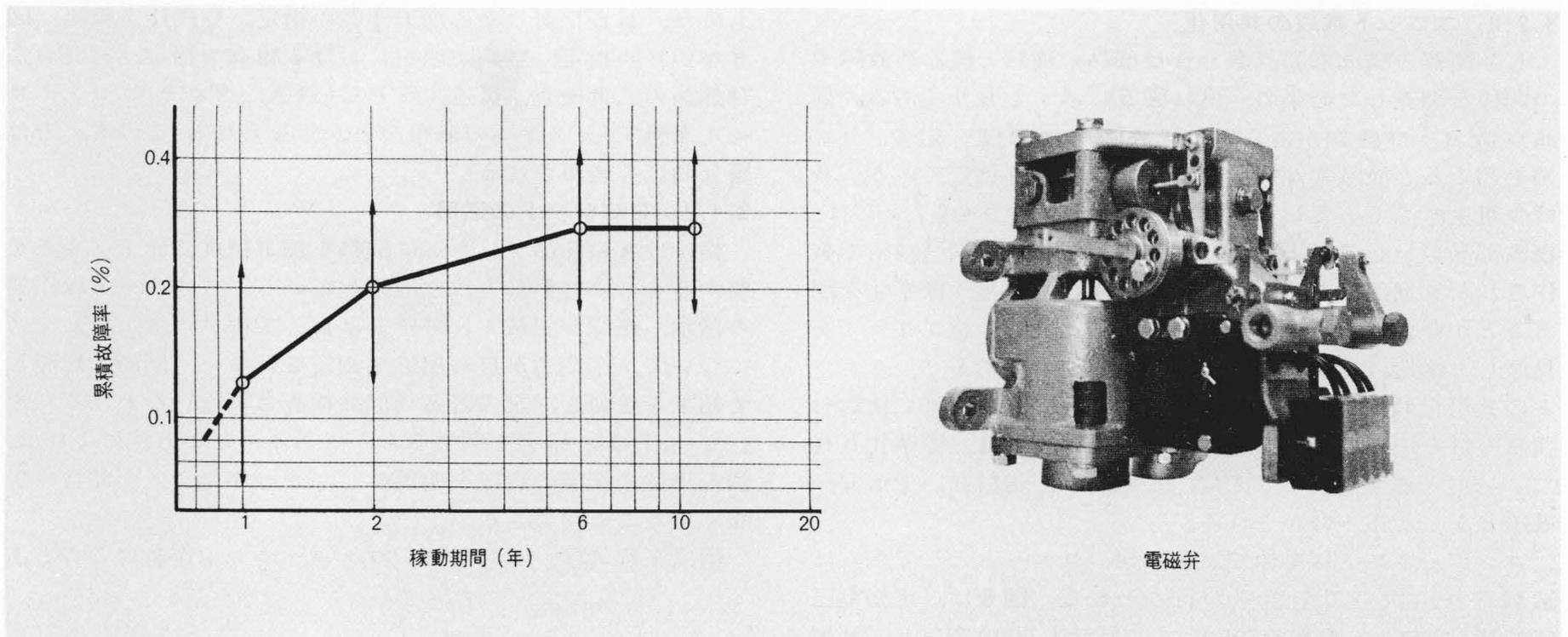


図9 電磁弁のフィールド故障 電磁弁の稼動実績を調査し、故障率を分析した図。故障発生率は約 $4.5 \times 10^{-8}/h$ (11年について、60%信頼水準の上限)。

Fig. Cumulative Failure Rate of Magnetic Driving Valve

が適用され、所定のチェックリストに基づき、受入れ部品の外観確認および組立後の確認が上記と同じ要領で記録され保存される。

3.4.3 購入品管理

購入部品の品質はそのメーカーの品質管理能力に依存し、当方が直接介入できない訳であるから、一定水準以上の品質管理能力のあるメーカーを選定し発注するのが原則である。技術レベル、品質管理能力、生産能力、実績などに基づく審査によって購入先を撰定し、新規購入品目に対し購入仕様による購入品認定試験を実施する。

特に、がい子、絶縁材料、気密ガスケット、計測器などの重要な部品に使用される購入部品の認定基準を制定するにあたっては、当該特性のばらつきのほか、機器の使用環境を考慮した高低温試験、ヒートサイクル試験、塵埃試験、振動試験、氷結試験などについて機器の設計条件に対して十分な裕度を考慮している。

定期的に購入先の点数制による品質管理状況の監査を行ない、また、納入品に対し一定期間ごとに抜き取りで認定試験項目の一部を実施し、認定条件維持の確認を行なっている。

3.5 信頼性試験

形式認定試験の外に各種の使用および環境条件に対し、多項目の信頼性試験を行なっている。寿命特性の判定として10,000回以上の連続開閉試験により摩耗特性の判定を行なう。また、限られた日数で希頻度、長期課電放置の状態を検証するにはくふうを要する。

一例として、しゃ断器全体に対し1,000Hzの高電圧を印加し、50/60Hzの場合に対し加速し絶縁性を検証している。これと併行して、製品化後も引き続き、実用状態と等価の長期課電試験を実施し確認を行なっている。

3.6 納入品に対する保証試験

3.5で述べた各項の検証を経て、しゃ断器の形式認定が行なわれる。

次に、出荷されるしゃ断器に対しては潜在的初期故障の除去を目的として、JEC-181に規定された受入試験項目の外に次の保証試験を行なう。

(1) コンポーネントに対する限度環境下の全台数動作試験

あらかじめ、開発試験において潜在的初期故障の要因がまぎれ込んだ場合、どのような環境条件の組合せにおいて、最も敏感に兆候が発現するかを知っておき、この条件で全台数テストし、初期故障の要因を検出する。この方法は、また希頻度放置において初めて発現する故障要因を有効に検出する。

(2) 組立しゃ断器の動作試験

普通環境で、全台数200回程度の繰返し動作を行なう。これによって、動作回数により誘発される潜在的初期故障はほとんど完全に検出される。

これらの方法によって、希頻度使用および多頻度使用の双方によって誘発される初期故障要因は、十分検証され据付後の安定した運転状態が得られる。

一例として、これらプログラムによって出荷されたしゃ断器の電磁弁(図9)のフィールド故障率(11年について、60%信頼水準の上限)は $4.5 \times 10^{-8}/h$ が得られている。

4 結 言

しゃ断器の使用条件および環境に対し、バランスのとれた信頼性プログラムと豊富なフィールドデータの活用が、しゃ断器の信頼性活動に必要であり、特に、有効なフィールドデータの入手についてユーザーの絶大なご協力をお願いする次第である。

参考文献

- (1) 電力中央研究所送電機能特別委員会、500kV送電委員会、しゃ断器専門委員会：「500kVしゃ断器の実用性能」500kV送電に関する研究報告その7 35、(昭45-3)
- (2) 電気協同研究会、変電機器保守基準専門委員会：「変電機器の保守基準」電気協同研究第29巻第1号22、24 (昭48-8)
- (3) 日科技連信頼性機械工業委員会：「FMEA/FMECAの解説」(昭48-2)
- (4) 平沢、吉岡、櫻村、竹内、中野、椿、山崎：「パッファ形ガスしゃ断器による2サイクルしゃ断技術」日立評論 57、974 (昭48-10)