

パッファ形ガスしゃ断器による 2サイクルしゃ断の技術

Achievement of 2-cycle Interruption by Puffer Type Gas Circuit Breakers

This article describes the technical background to the achievement of 2-cycle interruption by puffer type SF₆ gas circuit breakers. In recent years through extensive research on arc interruption, various new techniques such as synchronized axial blasting were developed making it possible to reduce the arcing time by puffer type gas circuit breakers to less than 1.1 cycles. To cut the opening time further down to less than 15 milliseconds (0.9 cycle on 60 Hz) we studied the trip mechanism, air inlet valve, delay time and mass of components of the operating mechanism. As a result, we completed a prototype pneumatic operating mechanism which in the tests showed an opening time of 2-cycle interruption. A new line of 2-cycle gas circuit breakers will be described in the separate article.

平沢邦夫*	Kunio Hirasawa
吉岡芳夫**	Yoshio Yoshioka
樫村勝一*	Katsuichi Kashimura
竹内 守*	Mamoru Takeuchi
中野清蔵***	Seizô Nakano
椿 徹***	Tôru Tsubaki
山崎精二****	Seiji Yamazaki

Ⅰ 緒 言

超高圧送電系統においては、過渡安定度の向上と良質の電力供給、さらに系統信頼度の向上を図るため、定格しゃ断時間2サイクルの高信頼度の超高圧大容量しゃ断器が要求されている。

空気しゃ断器や二重圧力形ガスしゃ断器による2サイクルしゃ断の技術は、長年月にわたる研究開発を通じてすでに確立され、それぞれ多くの使用実績を有しているのに対し、単一圧力パッファ形ガスしゃ断器の場合、その超高圧・大容量化をめざして開発を推進した結果⁽¹⁾、しゃ断容量の点では上記2種類のしゃ断器と比肩するほどになったが、しゃ断時間は3サイクルが限界であった。

しかしながら、パッファ形ガスしゃ断器は、構造が簡単で、圧縮機やガスヒータなどの付属装置が不要というすぐれた長所を有しており、しゃ断時間を2サイクルに短縮することができれば、構造上の特長と実用上の性能とがバランスした超高圧用しゃ断器となること必定である。

日立製作所では、ガスしゃ断開発の当初から、パッファ形ガスしゃ断器の2サイクル化は必要欠くことのできないものと考え、徹底的にその開発研究を進めてきた。その結果、別稿⁽²⁾に紹介する240/300kV 40kA 2サイクルパッファ形ガスしゃ断器をこのほど完成した。

ここでは、上記製品化を可能にした2サイクルしゃ断技術の背景と概要について紹介する。

Ⅱ 技術的課題の展望

2.1 開極時間とアーク時間の協調

しゃ断器のしゃ断時間とは、開極時間とアーク時間との和をいう。改訂された交流しゃ断器の規格(JEC-181)には、定格電圧240kV以上の超高圧しゃ断器に対して、定格しゃ断時間の標準値として従来の3サイクルのほかに2サイクルが新たに追加された。60Hz系統で2サイクルは33.3msに相当

する。しかし、開極時間とアーク時間の値は規格化されていない。その理由は、アーク時間がしゃ断器の種類(消弧方式)としゃ断条件によって異なるからである。

既開発の2サイクルしゃ断器(空気しゃ断器や二重圧力形ガスしゃ断器)のアーク時間は、最も過酷なしゃ断条件のもとでも0.6サイクル以下と短く、したがって開極時間を1.4サイクル以下とすれば、2サイクルしゃ断が可能であった。

一方、パッファ形ガスしゃ断器は、パッファ シリンダを圧縮しながら高圧吹付ガスを発生するのでアーク時間が長く、2サイクルしゃ断のためには、開極時間とアーク時間の合理的な協調ということが技術的課題である。

このことは、パッファ形ガスしゃ断器の消弧原理と密接に関係している。

図1は、パッファ形ガスしゃ断器のしゃ断部構造と消弧原理を図説したものである。可動接触子部分は、主接触子とアーク接触子とから成り、しゃ断動作の場合、まず主接触子が離れ、しばらくしてワイプ構造のアーク接触子が離れる。可動部分の主接触子、アーク接触子および絶縁ノズルはパッファ シリンダに取り付けられ、パッファ シリンダは図示されていない絶縁操作ロッドを介して操作器の操作ピストンに連結されている。しゃ断指令によりパッファ シリンダが図1(b)のように右方に駆動されると、シリンダ内のSF₆ガスが圧縮され、圧縮されたガスはノズルを通して左方に、また一部はアーク接触子およびパッファ シリンダの中空軸の内部を通過して右方に排気される。このとき可動接触子と固定接触子の間に発生したアークは、2方向のガス吹付けを受けて消弧される。

このように、パッファ形ガスしゃ断器は操作力によって吹付圧力を発生させる方式なので、従来の2サイクルしゃ断器とは異なり接点开離の瞬時から強力なガス吹付けが得られない欠点がある。すなわち、開離しただけでは電流をしゃ断す

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立研究所 工学博士 *** 日立製作所国分工場 **** 日立製作所国分工場 工学博士

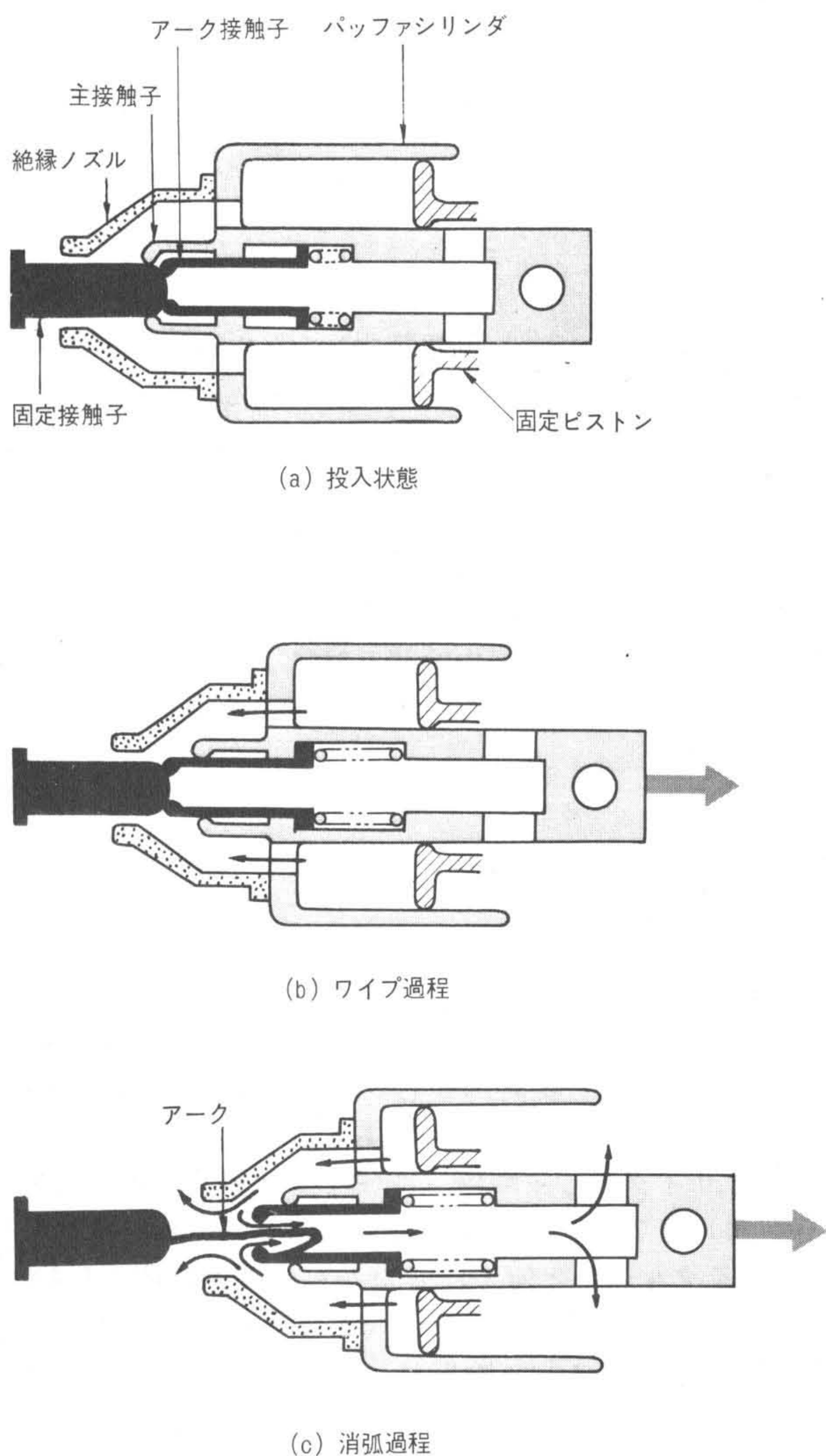


図1 パッファ形ガスしゃ断器の消弧原理 パッファ シリンダによってSF₆ガスを圧縮し、圧縮されたガスを絶縁ノズルを通してアークに吹き付けて消弧する。

Fig. 1 Arc Interruption by Puffer Type Gas Circuit Breaker

ることはできず、パッファ シリンダ内の圧力が十分高い値になってかつ可動接触子と固定接触子の開離距離が所定値に達してはじめて消弧性能が得られる。

しゃ断性能に関する広範囲な研究から、接点動作と吹付開始位置を同期させた新しい技術（軸方向同期吹付⁽¹⁾）によってパッファ形ガスしゃ断器のアーク時間を1.1サイクル以下に収めることが可能になり、これにより2サイクルしゃ断を達成するためのしゃ断動作時間配分を図2のように設定した。参考のために従来の2サイクル二重圧力形ガスしゃ断器の実績値も併記してある。

本図から明らかなように、2サイクル パッファ形ガスしゃ断器を開発するためには、ワイプ時間 T_2 およびアーク時間 T_3 が長いので操作部が受持つ可動接触子動作までの時間 T_1 を8ms以下にしなければならない。

2.2 15ms開極のための課題

一般にしゃ断器の開極時間は、図2に示したように次の部分動作時間の和である。

(1) 引はずし時間

しゃ断器が外部から与えられた電氣的信号（しゃ断指令）を操作部の初段可動部品の機械的運動に変換するのに要する時間

(2) 力の増幅時間

しゃ断器の可動部分を駆動し、かつ所期のしゃ断性能を発揮するのに十分な大きさの操作力まで力を増幅するのに要する時間

(3) 操作系の遅れ時間

操作系、すなわち操作ピストンと可動接触子を連結し、操作力をしゃ断部に伝達する絶縁操作ロッドやリンク機構などの連結部で費やされるむだ時間

(4) ワイプ時間

可動接触子が十分な開離速度を得、かつパッファ シリンダ内の圧力が十分上昇するまで通電状態を保持している時間

以上、四つの部分動作時間は、それぞれ異なる技術内容に対応している。詳細は3.に述べるが、15ms開極実現のための課題は、構成部分の耐久力や動作信頼性をそこなうことなく、これら動作時間を最短にすることにあるといえる。

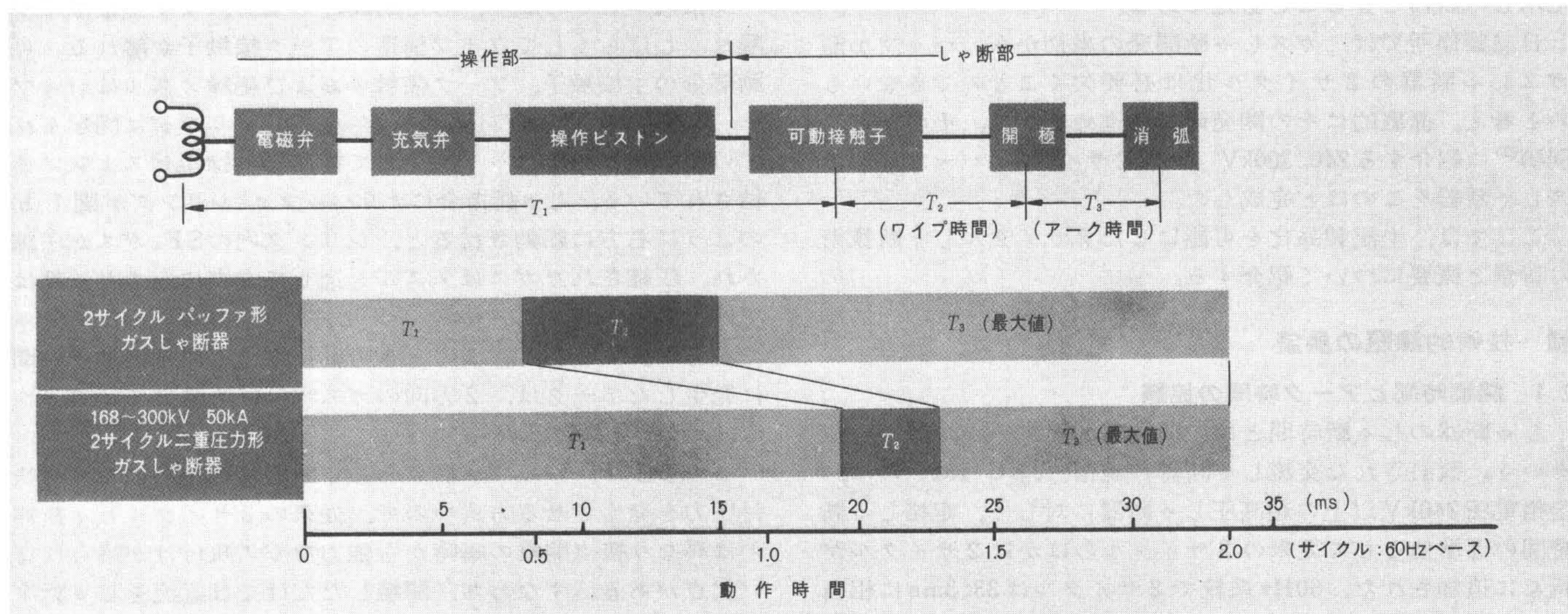


図2 しゃ断動作の時間配分 パッファ形ガスしゃ断器の2サイクル化のためには、操作部の受け持つ時間 T_1 を従来の半分以下にして、開極時間を15msにする必要がある。

Fig. 2 Operation Time Allotment in 2-cycles Gas Circuit Breaker

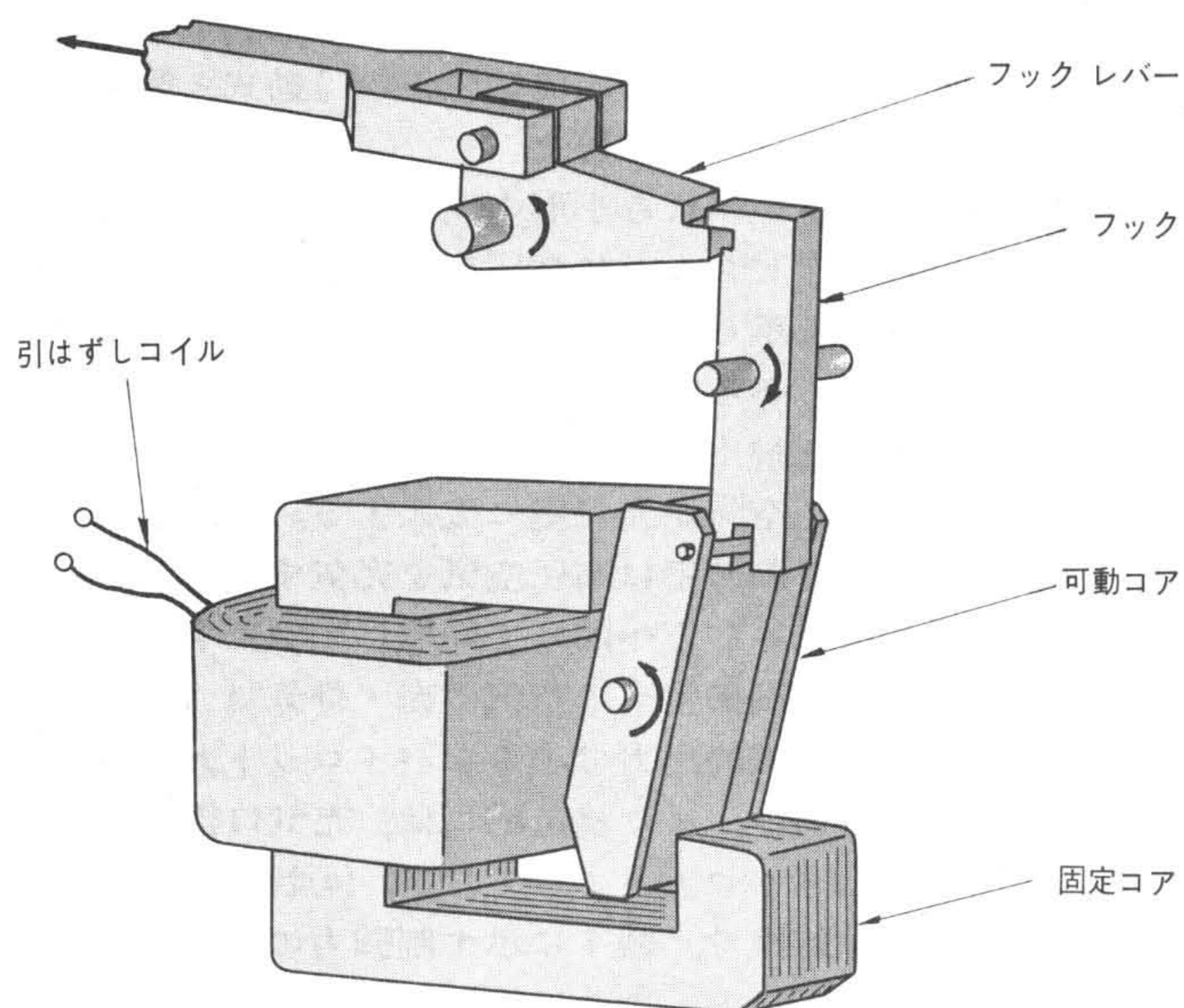


図3 マグネット フック式引はずし機構 引はずし電流により可動コアを吸引しフックの掛合をはずす。

Fig. 3 Trip Mechanism Using Magnet and Latch

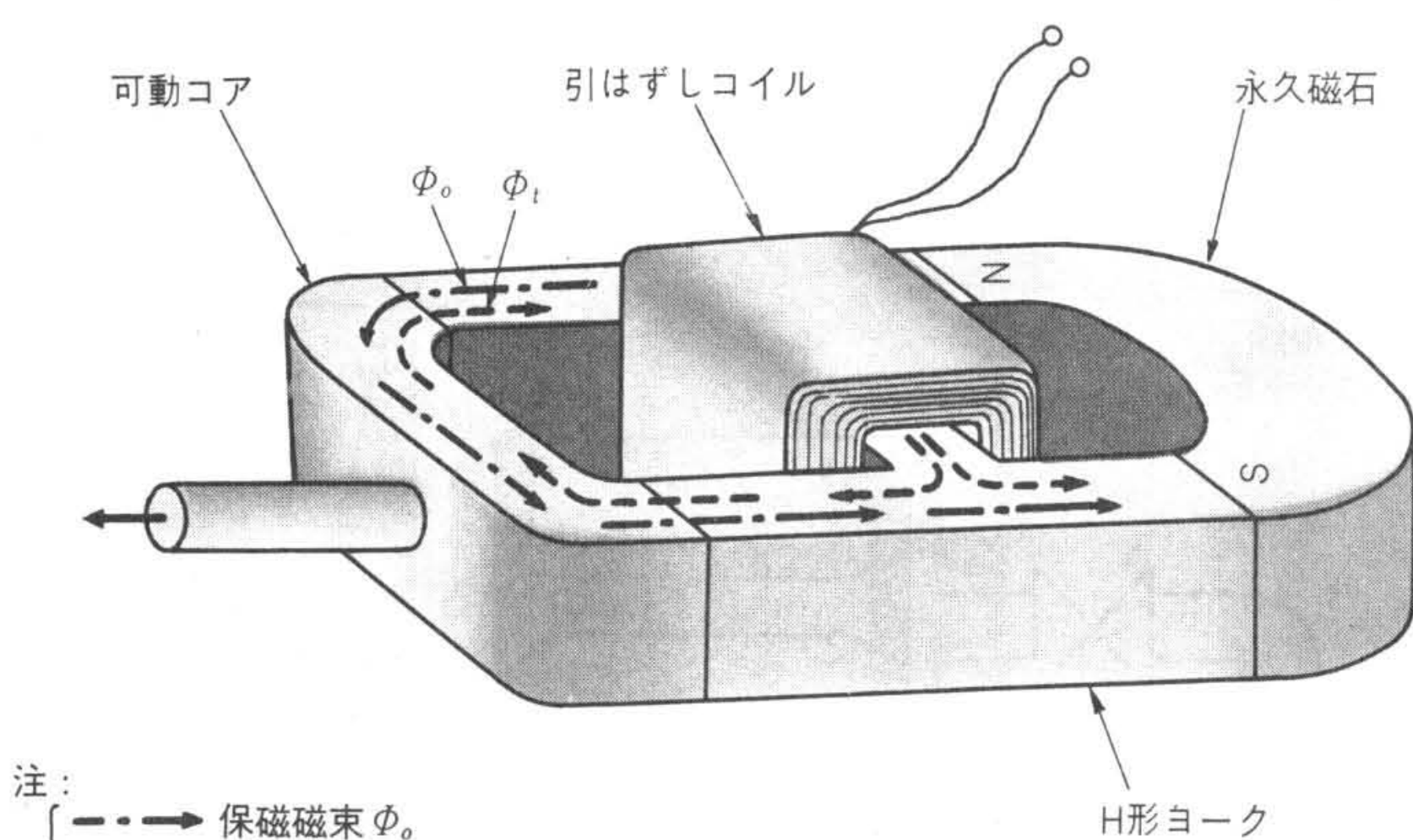


図4 磁束シフト式引はずし機構 永久磁石の発生する保持磁束 Φ_0 によって可動コアを吸引保持しておき、引はずし電流によって打消し磁束 Φ_t を発生させて、可動コアを釈放する。

Fig. 4 Trip Mechanism Using Magnetic Flux Shift

2.3 開発の基本思想

開発にあたっては、交流しゃ断器の標準規格JEC-181および電力用規格B-112の諸規定に準拠したほか、系統信頼度の向上、保守点検の省力化など、使用者の便を第一義として構成部品の使用実績と部品点数の低減に最大の重点をおき、いたずらに技術の新規性や高度性を追うことのないよう留意した。

3 開極時間短縮へのアプローチ

3.1 引はずし機構

しゃ断指令を受け、これを操作器の初段可動部品の運動に変換する機構であり、規定の電氣的入力(引はずし制御電流)のもとで、最短の引はずし時間と最大の機械的出力を得ることが課題である。

このため、従来の引はずし機構を徹底的に検討した結果、

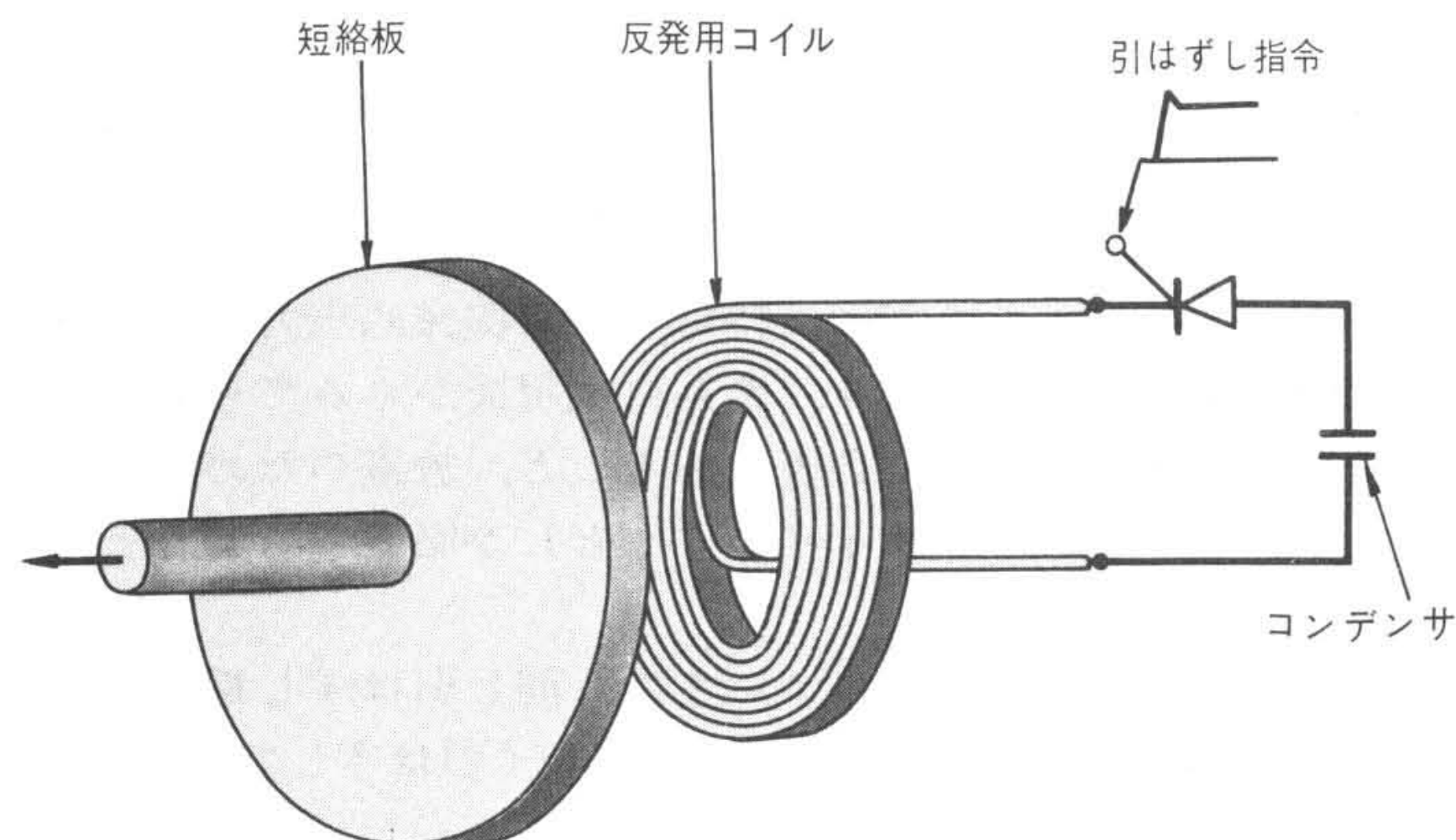


図5 電磁反発式引はずし機構 コンデンサにたくわえておいた電荷を反発用コイルに瞬時に放電し、短絡板を駆動する。

Fig. 5 Trip Mechanism Using Electromagnetic Repulsion

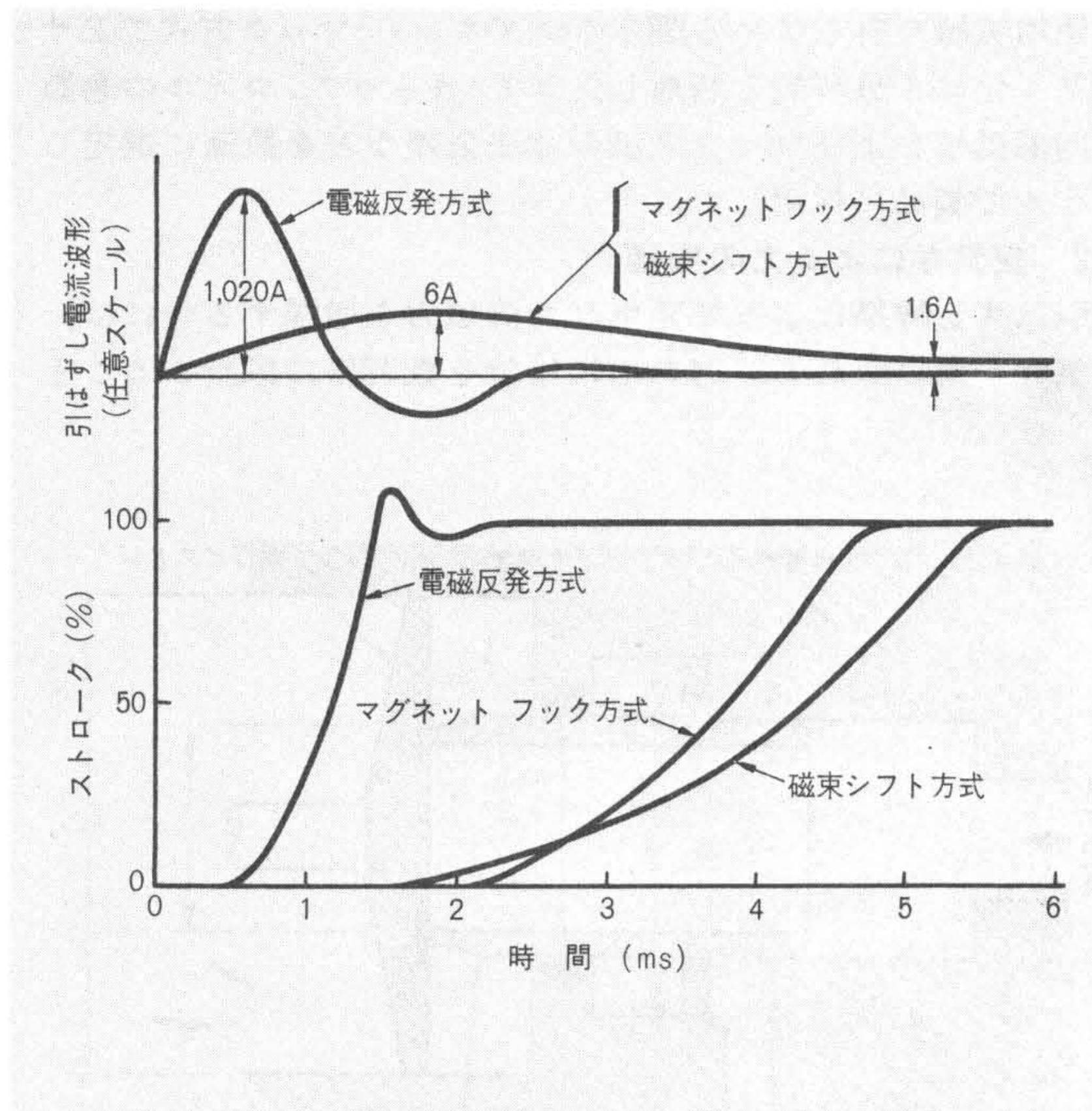


図6 引はずし動作性能の比較 引はずし時間は電磁反発方式が最短であるが、引はずし電流は100倍以上必要である。マグネット フック方式で2サイクルパッファは十分可能である。

Fig. 6 Comparison of Tripping Performances

高速動作に適したものとして、図3～図5に原理を示すマグネット フック方式、磁束シフト方式および電磁反発方式の3種類を取りあげ、いずれについても、数値計算による動作解析および試作による実験的検討を行なった。

図3は引はずしコイルの発生する磁束により可動コアを吸引し、フックの掛合をはずす方式で、しゃ断器の分野では最も一般的で実績も多くある。図4は、永久磁石によって可動コアを吸引保持しておき、引はずしコイルによってこの保持磁束を打ち消してコアを釈放する方式で、類似品は電鉄用直流高速度しゃ断器で使用されている。また、図5は、コンデンサにたくわえておいた電荷を反発用コイルに瞬時に放電し、短絡板に誘起される誘導電流との間に発生する電磁反発力によって短絡板を動かす方式である。

図6は、これら3方式の引はずし動作を比較して示したものである。実験は同じ負荷、同じストローク長のもとで、そ

れぞれの方式に適した引はずしコイル巻数、引はずし電流を選んで行なった。本図からわかるように、動作時間（引はずし時間）は図5の電磁反発方式が最も短く0.5msで、図3および図4の方式の約 $\frac{1}{4}$ になっている。しかし、電気→機械のエネルギー変換効率という点からみると逆に電磁反発方式が最も劣っていて、この方式は特に大きな機械的出力を必要とする場合にのみ有効であり、さらに実用面からみても常時コンデンサを充電しておく必要があること、放電のための投入スイッチ（ギャップやサイリスタなど）が必要であることなど不利な点が多い。

一方、磁束シフト方式については、同じ引はずし電流値でマグネット フック方式よりもわずかに速く引はずしているが、保持力との関係で可動コアの軽量化がむずかしいこと、超高压しゃ断器用としては動作信頼性についていっそうの実績を踏む必要があることなど、なお研究の余地がある。

この結果、最もオーソドックスでかつ空気しゃ断器で多くの使用実績を有している図3のマグネット フック方式で2サイクル化は十分可能と判断し、コア ギャップ、コイルの巻数と内部抵抗およびフック機構の寸法公差などを最適に選定したうえで製品に採用した。

3.2 空気弁による力の増幅

引はずし機構によって発生した機械力を増幅するのには、空気弁が用いられる。力の増幅倍数を数百倍に設計すること

ができ、かつきわめて短時間の動作が可能だからである。

空気しゃ断器を開発してきた経験をもとに、数十種類に及ぶ空気弁構造を検討しかつ高速化ならびに信頼性向上のための簡素化を図った結果、図7の円筒摺動式と図8の二重弁座式の二つの基本構造を得た。

図7および図8は、いずれも小形の充気弁を駆動することによって、次段の操作ピストンに高压空気を作用させる場合について具体的構造を示したものであるが、その他の場合にも種々の変形が可能である。まず図7の構造では、(a)の状態では制御室の高压空気を排出すると、(b)に示すように充気弁は図示左方へ開いて高压空気が充気室に流入する。また図8の構造では、(a)の状態では制御室に高压空気を充気すると、(b)に示すように充気弁は図示右方へ開いて同様に充気室を充気する。いずれの場合も、制御室への空気の充・排気は、3.1で述べた引はずし機構の機械的出力で小さなパイロット弁を動作させて行なうものである。また構造的には、充気口径 d_1 に対して気密口径 d_2 をわずかに大きくしておき、(a)状態での気密を保持しているのが特徴で、表1に示す制御力の必要最小値は非常に小さくて済む一方、力の増幅倍数は大きくとれる。

これら基本充気弁の動作は、高压空気の充・排気特性⁽³⁾と運動方程式を連立させた電子計算機による数値解析によって検討した結果を試作試験によって実験的に確認し、さらに(1)制御室と充気室のデッド ボリューム、(2)制御力の最大最小比

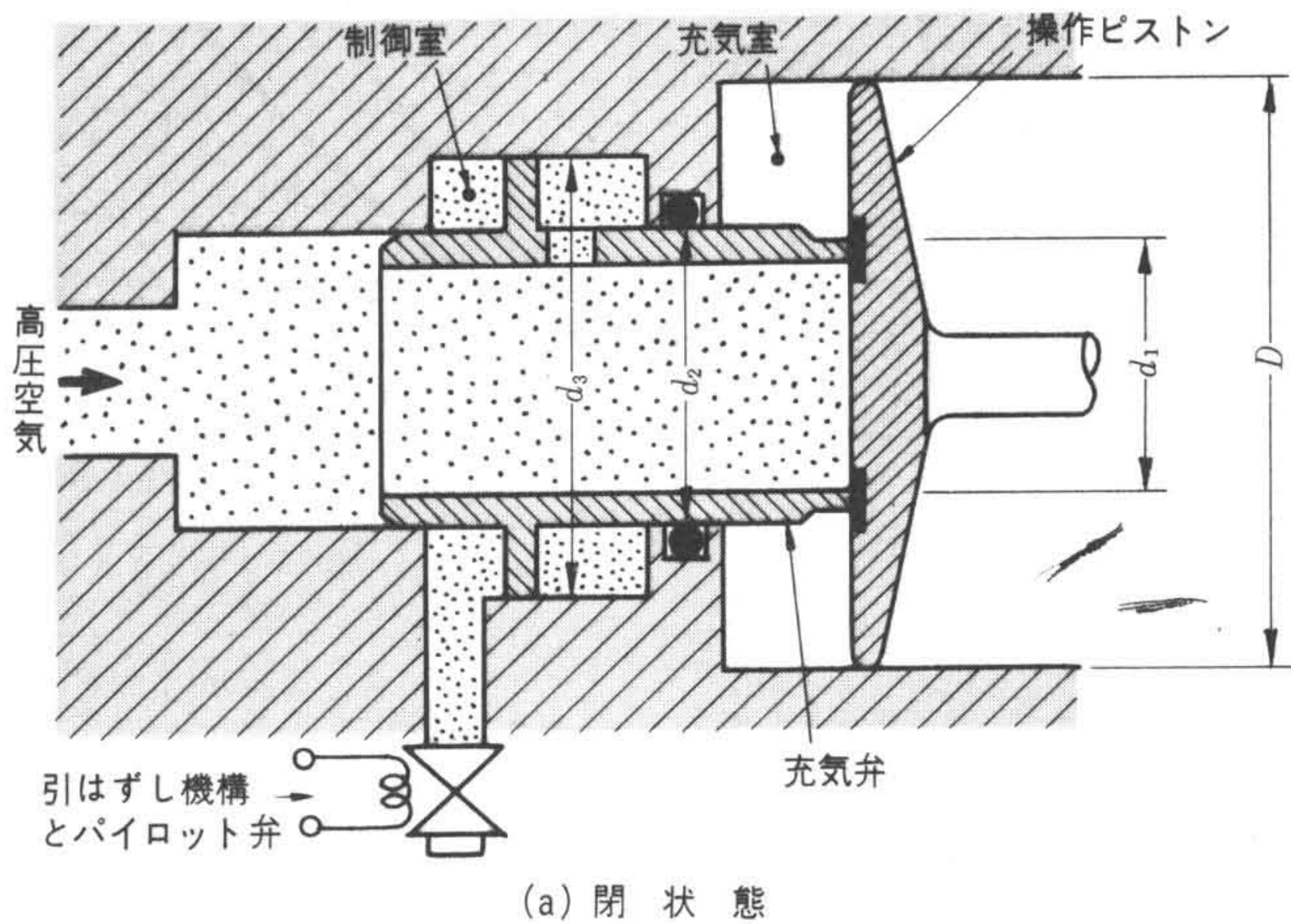


図7 円筒摺動式充気弁 パイロット弁により制御室の高压空気を排気すると充気弁は左方に開いて充気室が充気され、操作ピストンが右方に動作する。

Fig. 7 Sliding Cylinder Type Air Inlet Valve

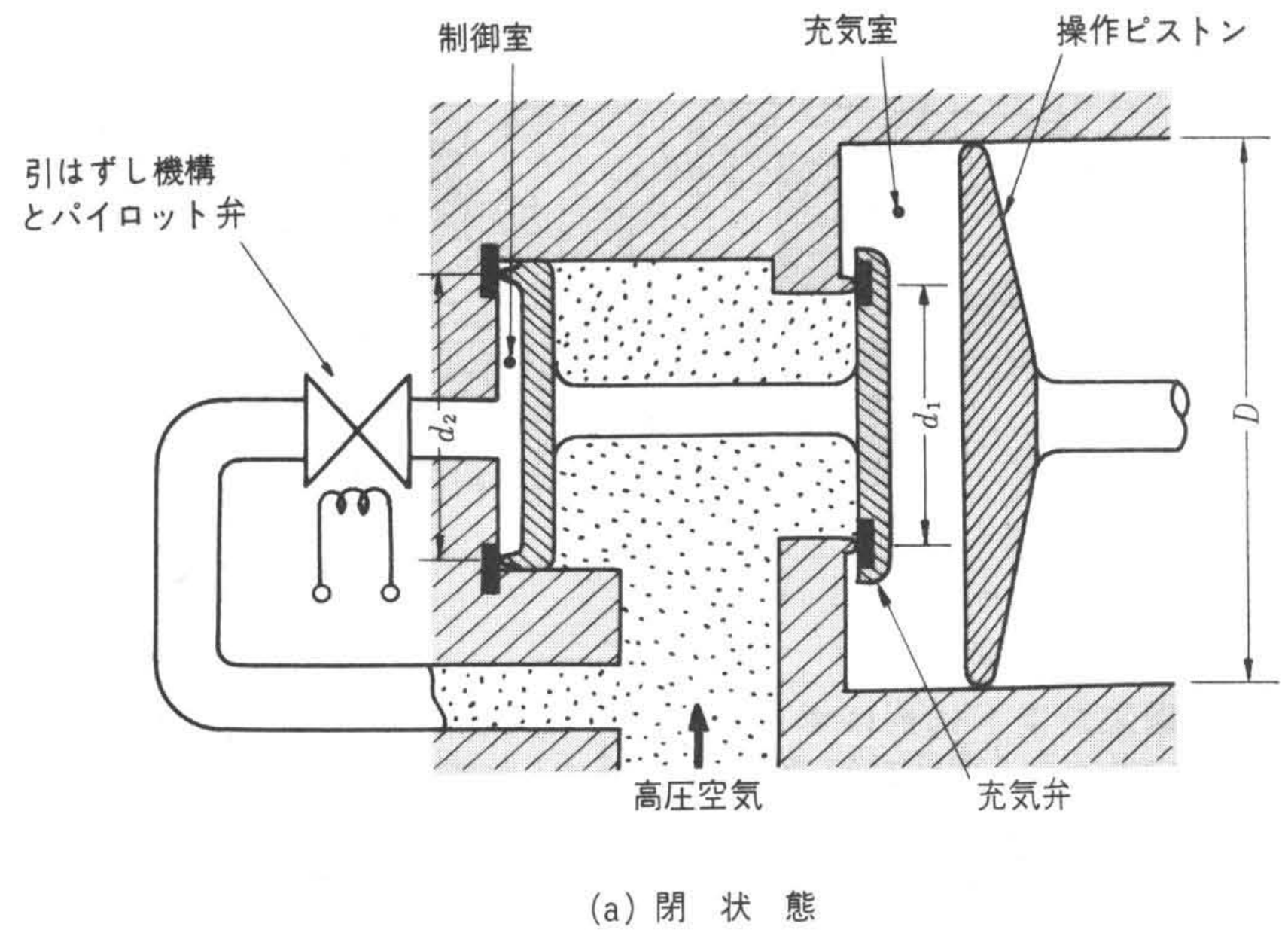


図8 二重弁座式充気弁 パイロット弁により制御室に高压空気を充気すると、充気弁は右方に開いて充気室が充気され操作ピストンが右方に動作する。

Fig. 8 Double Seat Type Air Inlet Valve

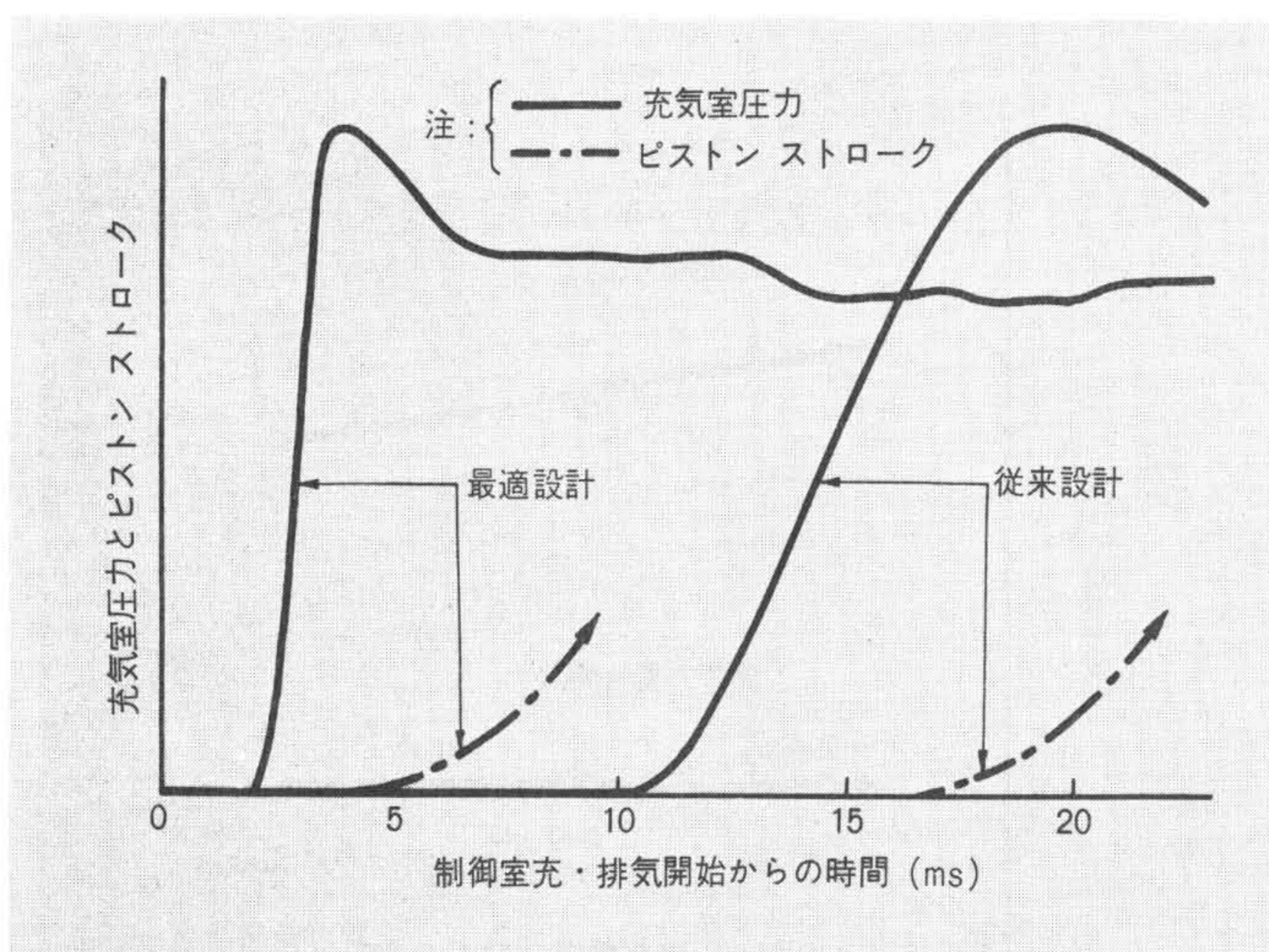


図9 充気弁動作オシログラム例 最適設計により、充気弁の動作時間を従来製品の1/6に短縮することができる。

Fig. 9 Oscillogram of Opening Operation of Air Inlet Valve

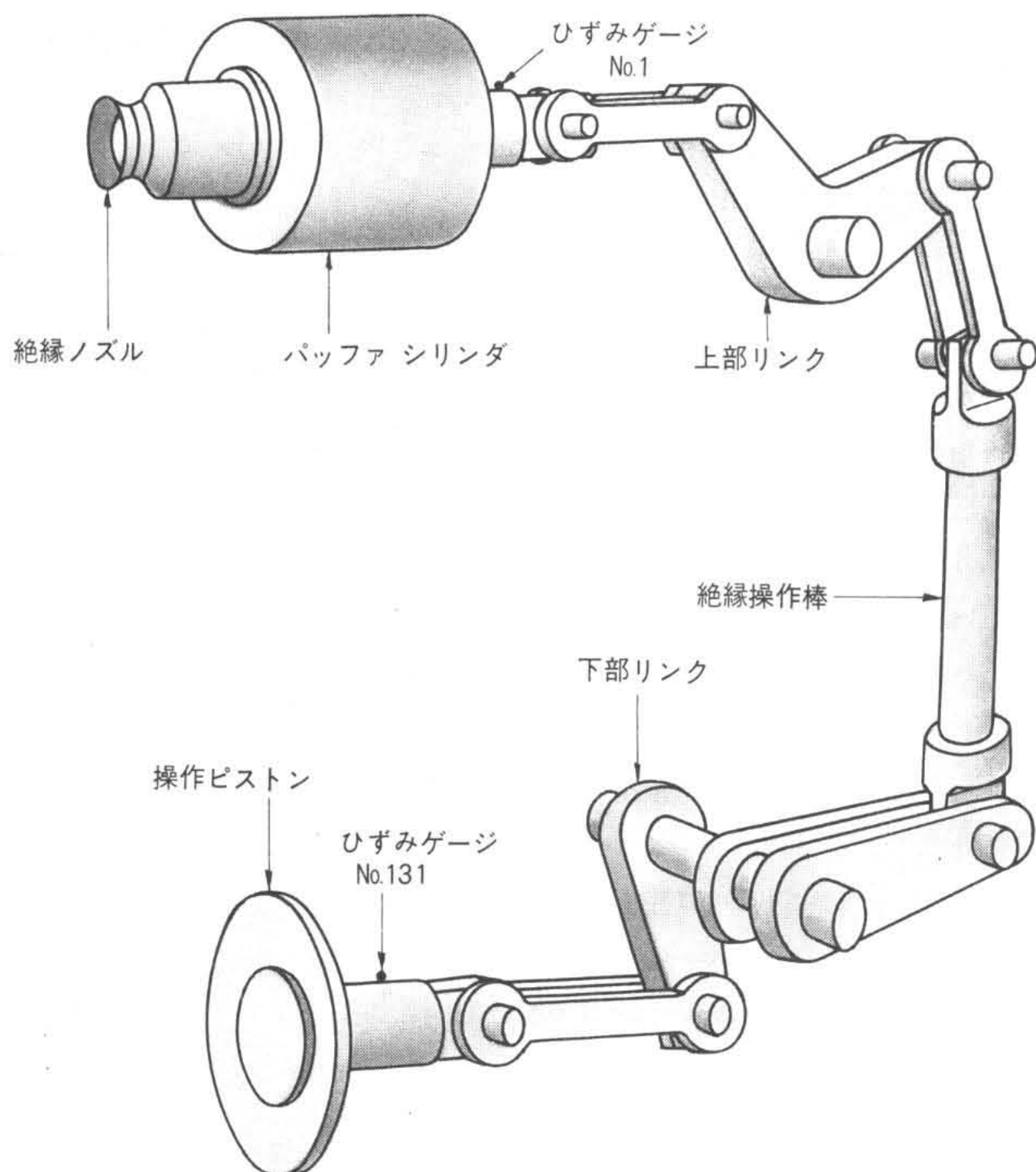


図10 パッファ形ガスしゃ断器の操作系 操作系各部品に150枚に及ぶひずみゲージをはり付けて、動的応力の測定が行なわれた。

Fig. 10 Operating Mechanism of Puffer Type Gas Circuit Breaker

表I 基本充気弁の力関係 開制御力の必要最小値 F_1 を小さく、かつ力の増幅倍数を大きくとれるので高速操作に適している。

Table I Force Relationship of Basic Type Air Inlet Valve

開制御力の必要最小値 F_1	$\frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \cdot p$
開制御力の到達最大値 F_2	$\frac{\pi}{4} (d_3^2 - d_2^2) \cdot p$ * $\frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot p$ **
力の増幅倍数	D^2/d_1^2

注： p は操作圧力，*は円筒摺動式，**は二重弁座式

F_2/F_1 , (3)充気口径 d_1 などの最適値を選定して高速化を図った。

図9は、結果の一例を示すものである。既開発超高压しゃ断器に用いられている充気弁の動作と比較して、操作ピストン動作開始までの時間は1/6に短縮されており、最適設計の効果が著しい。

また、動作時間の点では、円筒摺動式と二重弁座式には差がなく、いずれの充気弁も2サイクルパッファ形ガスしゃ断器に適用しうるものである。

3.3 操作系の遅れ時間

図10は、パッファ形ガスしゃ断器の操作系、すなわち操作ピストンから可動接触子に至る可動部分を示すものである。操作系の全長は2m以上に達する。このように長大な可動部品の連結体においては、その一端の操作ピストンに作用した力が他端の可動接触子に伝達されるまでには、ある時間が費やされる。パッファ形ガスしゃ断器にとって、この遅れ時間を極小にすることは、重要かつ新しい技術的課題であった。

この問題については、実規模のモデルしゃ断器により、操作系における動的ひずみ波形の克明な観測を通じて遅れ時間の実態を把(は)握することから着手した。測定結果の一例は図11および図12に示すとおりである。この結果から、どの部品または部品の連結部においてどの程度の時間遅れが発生しているかがわかり、これをもとに、部品の材質、構造および寸法公差などが、最小遅れ時間の観点から見直された。

なお、この遅れ時間の算定に用いた図11の動的ひずみ波形は、部品の疲労試験における負荷条件の決定やしゃ断動作の数値解析における実験的裏付けとしても活用されている。

3.4 ワイブ時間

ワイブ時間はいわば可動部の加速に要する時間であり、操作力と可動部の質量が与えられれば、運動方程式から決まる。リンク機構の倍力特性の選び方によって、多少のワイブ時間短縮効果が認められたが、結局最良の対策は可動部の軽量化にある。これについては、静的にはもちろん、動的にも有限要素法などを適用した応力解析をもとに、機械的耐久性能をそこなうことなく操作系各部品の小形化と部品点数の低減に努めた。

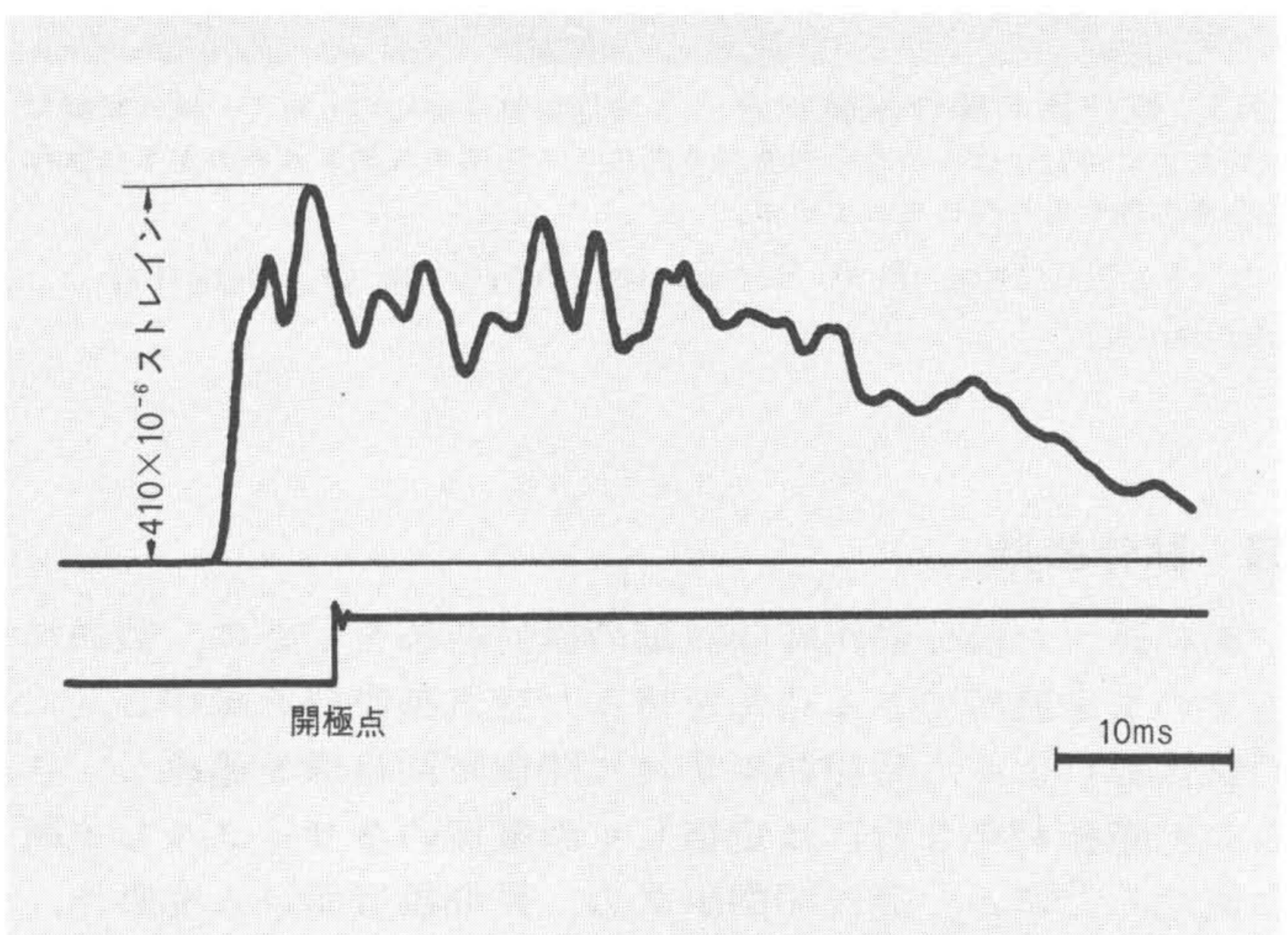


図11 動的ひずみ波形オシログラム 操作系の各部にはり付けたひずみゲージの抵抗変化をオシログラフで記録し、遅れ時間や過渡応力値などを算出して、最適設計を行なう。

Fig. 11 Oscillogram of Dynamic Strain in Opening Operation

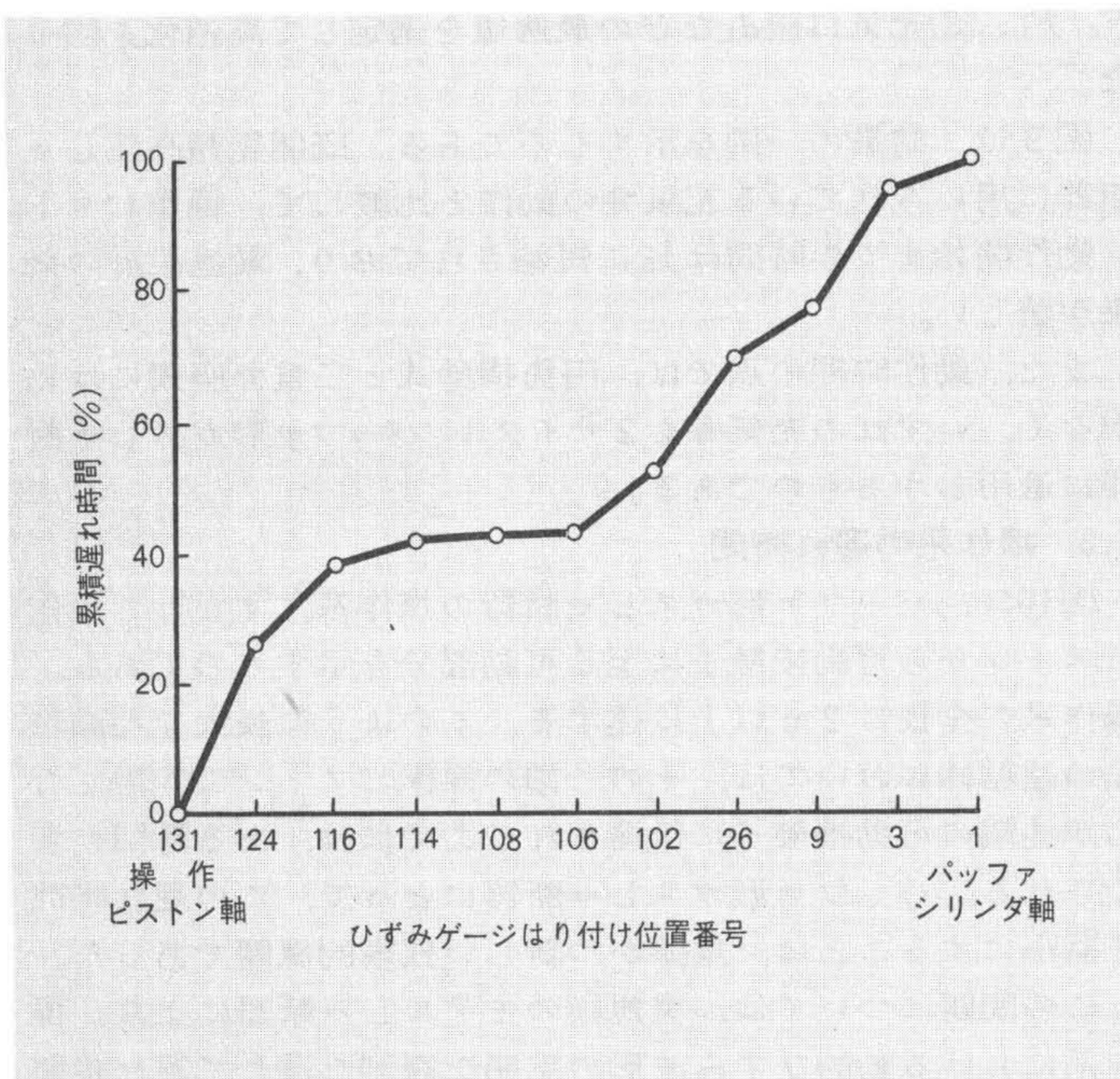


図12 操作系における遅れ時間の累積分布 操作系各部の軸応力発生時刻を求めることにより、どの部品または部品の連結部でどの程度の遅れ時間が発生しているかがわかる。

Fig. 12 Cumulation of Delay Times in Operating Mechanism

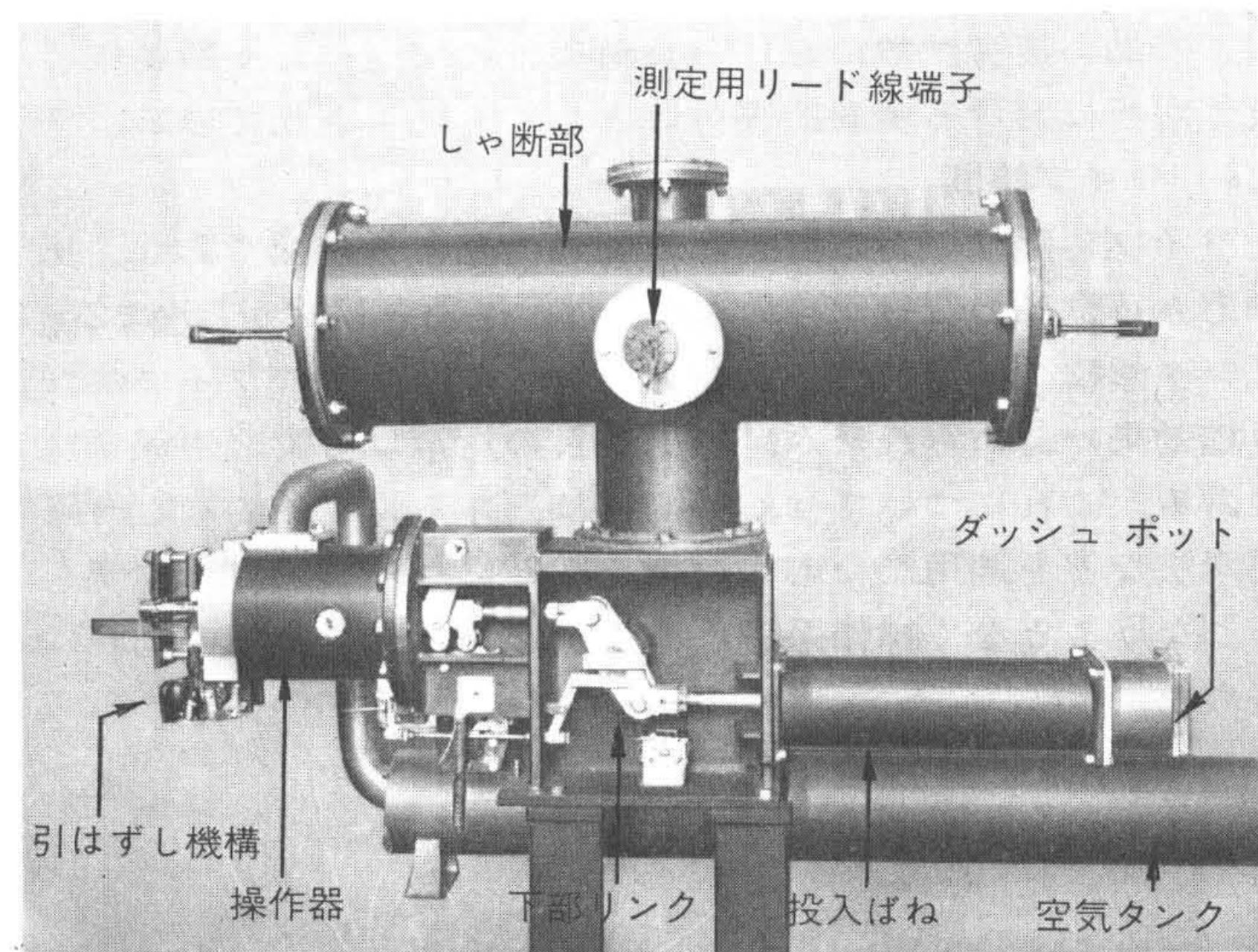


図13 試作器の操作試験状況 本図は試作当初のもので、操作試験だけのために特別に作られた小形タンク内にしゃ断部が収納されその左下に試作空気操作器が取り付けられている。

Fig. 13 Operation Test Set-up for Prototype of Operating Mechanism

4 試作結果

3.に述べた部分動作時間短縮の検討結果をもとに、製品にもそのまま適用できる諸元を持った空気操作器を試作し、この試作器により、昭和46年7月に開極時間目標を達成し、さらに、昭和47年2月には定格しゃ断電流の2サイクルしゃ断に成功したほか、連続開閉耐久力、長期放置希ひん度動作、低温ならび高温動作など動作信頼性に関する過酷試験を実施したのちに製品化を行なった。しゃ断部は、300kV 40kA 3サイクル パッファ形ガスしゃ断器としてすでに開発していたので、これをそのまま共用する方針をとった。

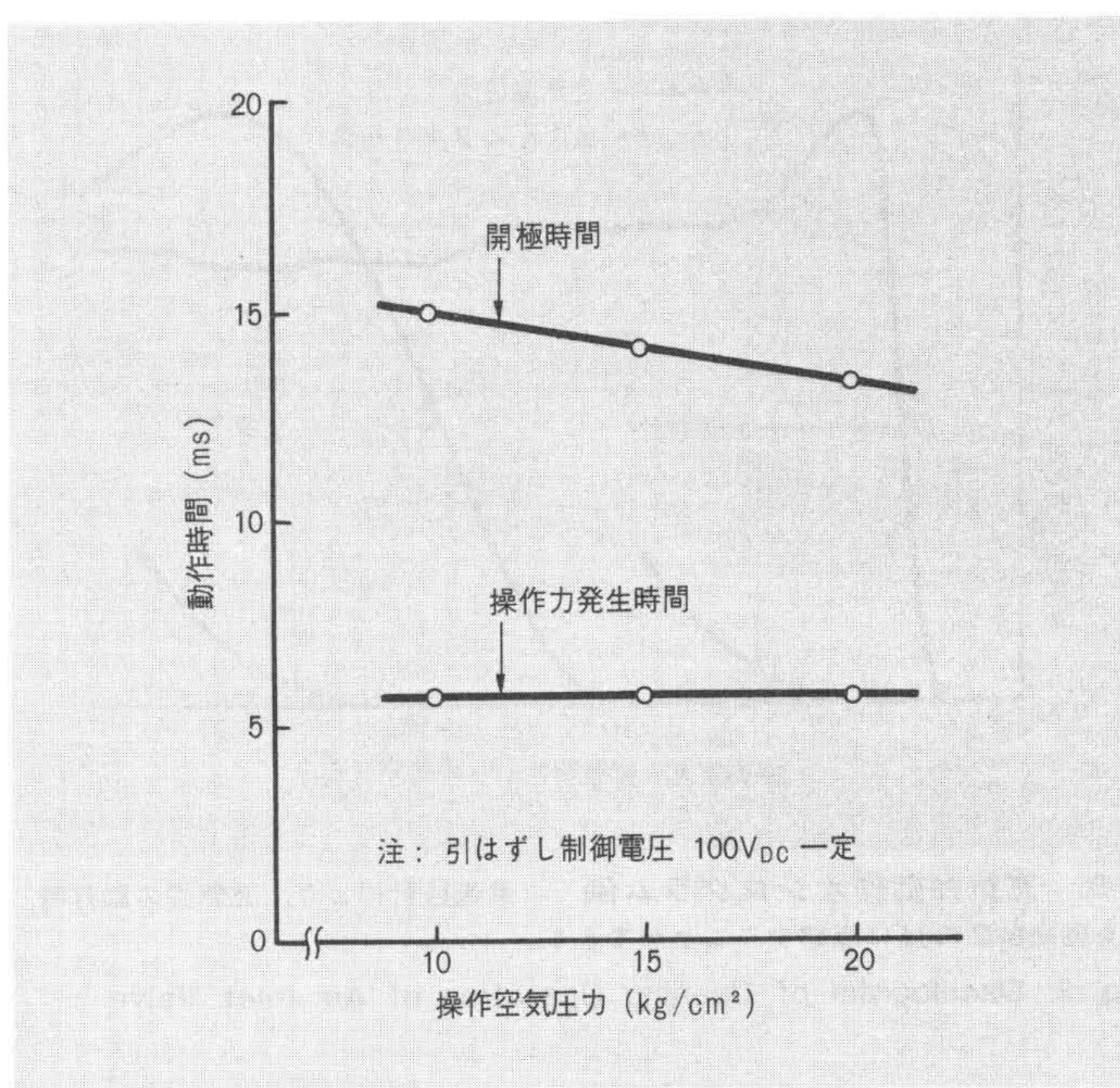


図14 試作器の動作時間特性 操作空気圧力が変わっても、操作力が発生するまでの時間は変わらず、可動部の加速に要する時間が変わるだけである。

Fig. 14 Operating Time Characteristics of Prototype of Pneumatic Operating Mechanism

試作器は、図7の円筒摺動式充気弁を基本としたものおよび図8の二重弁座式充気弁を基本としたものの2種を製作し、いずれによっても目標を達成したが、構造が簡単であるという利点から後者を製品に採用することとした。

図13は、試作当初の操作試験状況を示すものである。試験の便宜上、操作試験のためだけに特別に作られた小形のタンク内にしゃ断部を収納し、これに試作操作器を取り付けて種種の動作試験を行なった。

図14は、試験結果の一例として、操作空気圧力が試作器の動作時間に及ぼす影響を示すものである。本図からわかるとおり、定格操作空気圧力15kg/cm²において、開極時間は15ms以下を満足しており、かつ操作力発生までの時間は圧力の影響を全く受けない安定動作が確認された。なお、しゃ断試験結果については別稿⁽²⁾において述べることにする。

5 結 言

以上、パッファ形ガスしゃ断器による2サイクルしゃ断の技術的背景と、製品化に先だつ新しい空気操作器の研究・試作結果について概要を述べた。

構造の簡単な2サイクルパッファ形ガスしゃ断器が開発されたことにより、超高压送電システムの信頼度向上ならびに保守点検の省力化がいっそう促進されるであろう。

終わりに臨み本研究開発にご指導いただいた日立製作所桑山技師長ほか多数の各位に深く謝意を表する。

参考文献

- (1) 中野，椿，石川，後藤：「大容量単一圧力パッファ形ガスしゃ断器の開発」日立評論 54, 1071 (昭47-12)
- (2) 中野，椿，平沢ほか：「300kV 40kA 2サイクルパッファ形ガスしゃ断器」日立評論 55, 975 (昭48-10)
- (3) 高砂，平沢，吉岡：「空気およびSF₆ガスの充排気特性の理論計算」昭44電学四連大 No. 754