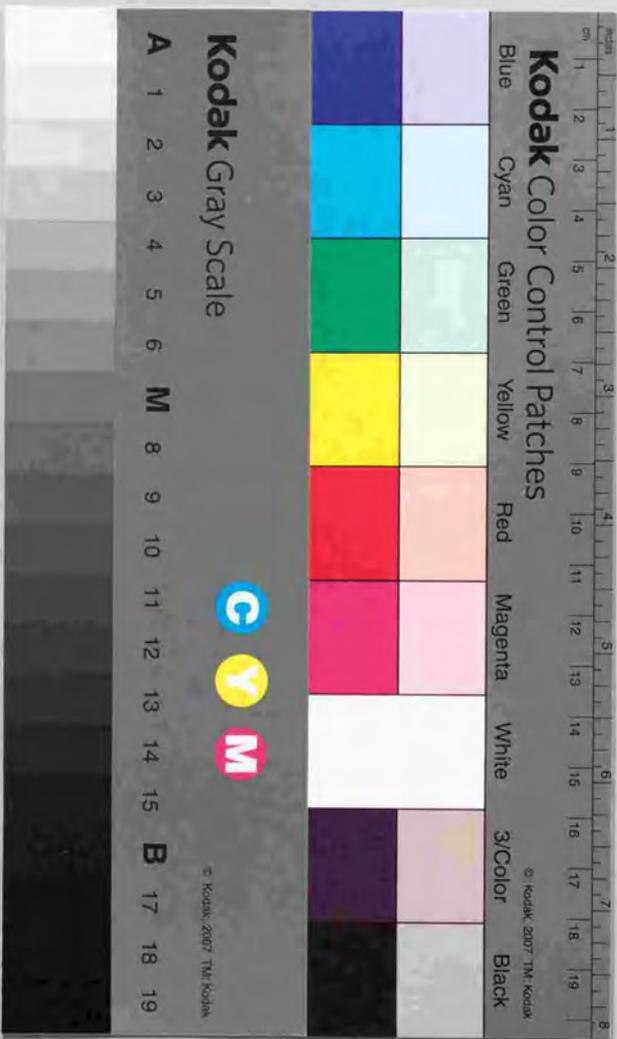


SF₆ガス絶縁変圧器の大容量化に関する研究

1998年

戸田克敏



①

SF₆ガス絶縁変圧器の大容量化に関する研究

戸田克敏

目 次

	頁
第1章 序論	
1.1 まえがき	1
1.2 ガス絶縁変圧器の概要	2
1.3 ガス絶縁変圧器の開発の経緯	8
1.4 本研究の目的と内容	12
第1章の文献	15
第2章 セパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の 電気・磁気および冷却特性	
2.1 まえがき	17
2.2 巻線の渦電流特性	19
2.3 口出しの電流分布	26
2.4 PETフィルム単体の熱劣化試験	30
2.5 シート巻線の熱劣化試験	32
2.6 シート巻線内部の熱伝導特性	36
2.7 冷却パネル内部の液流制御と流速測定	38
2.8 冷却性能総合検証	40
2.8.1 モデル概要	
2.8.2 試験結果	
2.9 プロトタイプ器	43
2.10 まとめ	46
第2章の文献	47

	頁
第3章 セパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の絶縁特性	
3.1 まえがき	49
3.2 ターン間絶縁	50
3.2.1 ターン間絶縁特性	
3.2.2 ターン間の複合的なストレスに対する絶縁特性	
3.3 巻線端部絶縁特性	56
3.3.1 巻線支えおよび高圧シールド	
3.3.2 テフロンホース絶縁	
3.4 主間隙絶縁特性	59
3.5 流動帯電	62
3.5.1 パーフロロカーボンの帯電特性	
3.5.2 流動帯電検証試験	
3.6 実規模モデルおよびプロトタイプ器による絶縁性能検証	65
3.7 まとめ	68
第3章の文献	69
第4章 ガス冷却式ガス絶縁変圧器の冷却および絶縁特性	
4.1 まえがき	71
4.2 巻線冷却モデル	74
4.2.1 モデルの概要	
4.2.2 試験結果	
4.3 熱流体数値解析	78

	頁
4.4 ターン間絶縁モデル	82
4.4.1 供試モデルと処理条件	
4.4.2 試験方法	
4.4.3 試験結果と考察	
4.5 セクション間絶縁モデル	84
4.5.1 供試モデルと処理条件	
4.5.2 セクション間モデル試験	
4.6 O号器による冷却および絶縁性能の検証試験	86
4.7 まとめ	90
第4章の文献	92
第5章 ガス絶縁変圧器の絶縁材料の熱劣化と発生ガス特性	
5.1 まえがき	93
5.2 PETフィルムとプレスボードの熱劣化と発生ガス試験	
5.2.1 試料準備	94
5.2.2 材料物性の測定とガス分析	96
5.2.3 長時間加熱の結果と検討	98
5.2.4 短時間加熱の結果と検討	103
5.2.5 絶縁診断への応用	106
5.3 まとめ	108
第5章の文献	109

	頁
第6章 ガス絶縁変圧器の現状と将来展望	
6.1 ガス絶縁変圧器の現状	…… 111
6.2 ガス絶縁変圧器の将来展望	…… 118
第6章の文献	…… 120
第7章 結論	…… 121
謝辞	…… 125
本研究に関して発表した論文	…… 127

第1章 序論

1.1 まえがき

大都市部での電力需要は、人口の集中、経済活動の集中などのため増加の一途をたどり、過密化した都市部に変電所や受配電設備が設置されるようになってきている。また、東京、大阪、名古屋など特に人口集中の著しい地域においては、超高圧級の地下変電所が数多く運用され、さらに500kV級の大容量地下変電所も建設されるようになってきている。これらの設備に用いられる機器においては、用地難からコンパクト性が求められると同時に、防災面での考慮が必要となる。

一方、山間部や水源の近くに設置される発・変電所においては、環境問題の重要性が高まる中で、絶縁油の流出による環境破壊を防止したいという要求が有る。油入変圧器には大量の絶縁油が使用されるため、油入変圧器に代わる環境調和性の高い変圧器が求められている。

このような状況の中で、不燃性、防爆性を特長とするガス絶縁変圧器は、ビルの地下や屋内に設置される受配電設備を中心に広く用いられるようになってきている。たとえば、国内向けのガス絶縁変圧器の生産台数は、1980年代前半は年間10台程度であったが、1980年代後半には年間100台を超えるほどに急増している。⁽¹⁾ これらのガス絶縁変圧器は、容量が数十MVA以下で基本的に油入変圧器の絶縁油をSF₆ガスに置き換えた構造をしている。

一方、超高圧級の地下変電所に使用される300MVA級の大容量変圧器は、上記の方式ではSF₆ガスの冷却能力が低いので実現できないとされたため、様々な方式が開発された。最初に開発をリードしたのは米国であり、1970年代後半にDOE（エネルギー庁）およびEPRIが米国の重電メーカーと共同で液冷却式のガス絶縁変圧器の研究開発を進めた。わが国でも1970年代以降のGIS（ガス絶縁開閉装置）の目覚まし

い発展を受けて、大容量地下変電所を変圧器も含めて全ガス化したいとの要望が強くなり、1980年代後半から大容量ガス絶縁変圧器の開発が進められた。

大容量ガス絶縁変圧器の開発には、絶縁、冷却、電気・磁気、材料など様々な課題があり、幅広い研究開発が必要である。本論文はそれらの中でセパレート形液冷却式の開発研究およびガス冷却式の大容量ガス絶縁変圧器の開発研究の内容をまとめたものである。

1.2 ガス絶縁変圧器の概要

図1.1は小容量ガス絶縁変圧器の構造図の一例である。ガス絶縁変圧器は絶縁被覆銅線を巻回した巻線、けい素鋼板を積層した鉄心、タンク、クーラ、ブロー等から構成され、冷却の方法によって送ガス風冷式、送ガス水冷式、自冷式等に分類される。送ガス風冷式の場合、風冷式のクーラにより冷却されたガスは、ブローによりタンク下部に導入され巻線および鉄心の内部を流れる。そのガスは巻線および鉄心を冷却して熱くなり、タンク上部で集められクーラに戻され冷却される。自冷式の場合、ガスは巻線および鉄心から熱を奪い、浮力により循環して放熱器で冷やされる。

ガス絶縁変圧器のガス圧力は、最高使用圧力が0.196MPa.g (2.0kgf/cm².g)以上となるとタンクが第2種圧力容器としての規制を受けるため、運転中の温度上昇によるガス圧力増加を考慮して、定格ガス圧力(20℃のときの圧力)を0.11~0.14MPa.gに選ぶのが一般的である。⁽¹⁾

この構造は、油入変圧器の油をガスに置き換えたような単純な構造であり、容量の小さいガス絶縁変圧器に広く用いられている。しかし、SF₆ガスの冷却能力が絶縁油に比べ大幅に低いため、大容量器には適さないと考えられていた。

注；本論文の単位系はMKSA単位とするが、圧力については下記の単位を併用する。

- ◇ 変圧器全体の圧力や変圧器の圧力を模擬した試験条件については、変圧器規格JEC-2200に従いゲージ圧を用いる。絶対圧力と区別するため後ろにgを表示する。[例；0.14MPa.g]
- ◇ 圧力容器に関するものは、圧力容器の構造規格がkgf/cm².gを用いているため、括弧の中に併記する。[例；0.196MPa.g (2.0kgf/cm².g)]
- ◇ 上記以外は、MKSA単位とする。[例；0.4MPa, 10Pa]

図1.2は本論文の2章、3章で開発研究の内容を述べるセパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の構造図の一例である。巻線、鉄心、タンク、クーラ、ポンプ等から構成されるのは、油入変圧器あるいは一般的なガス絶縁変圧器と同様であるが、下記の点が構造的に大きく異なる。

- 巻線の導体に幅広のアルミシートを用い、PET (ポリエチレンテレフタレート) フィルムをアルミシートと一緒に巻き込んでターン間絶縁とする。
- 巻線および鉄心の内部にステンレス製の冷却パネルを巻き込み、冷媒としてハーフロロカーボン (Perfluorocarbon: 分子式C₈F₁₈OあるいはC₈F₁₆) を流して冷却を行なう。
- タンクの内部には絶縁媒体としてSF₆ガスを封入する。SF₆ガスの絶縁特性を良くするために、定格ガス圧力を0.4MPa.gに高めている。このため変圧器のタンクは図1.2に示すように断面が円形の第2種圧力容器タンクとなっている。
- 冷却パネルの出入口にはテフロン製のホースを取り付け、外部に設けられたクーラへ冷媒を循環させる。冷媒は、SF₆ガスとセパレートされている。両者の圧力バランスを保つために、同圧器が設けられる。この方式は冷却を液で行なうことにより、ガス絶縁変圧器の弱点である冷却効率を高め大容量化を可能にしている。

液冷却式のガス絶縁変圧器としては、この他にも図1.3に示す液流下式、図1.4に示す複合絶縁液浸式などがある。⁽¹⁾ いずれもハーフロロカーボン液を冷却に用いて、冷却効率を高め大容量化を可能にしているものである。

図1. 5は本論文の4章で開発研究の内容を述べるガス冷却式の大容量ガス絶縁変圧器の断面図の一例である。絶縁被覆銅線を巻回した巻線、けい素鋼板を積層した鉄心、タンク、クーラ、ブロー等から構成されるのは一般的なガス絶縁変圧器と同様であるが、大容量化に対応するため下記の点が異なる。

- SF₆ガスの冷却および絶縁特性を良くするために、定格ガス圧力を0.4MPa.gに高めている。このため変圧器のタンクは図1. 5に示すように断面が円形の第2種圧力容器タンクとなっている。
- 巻線のターン間絶縁には、一般的なガス絶縁変圧器に用いられるPET（耐熱クラスE）に比べて耐熱温度の高い絶縁フィルムを使用する。

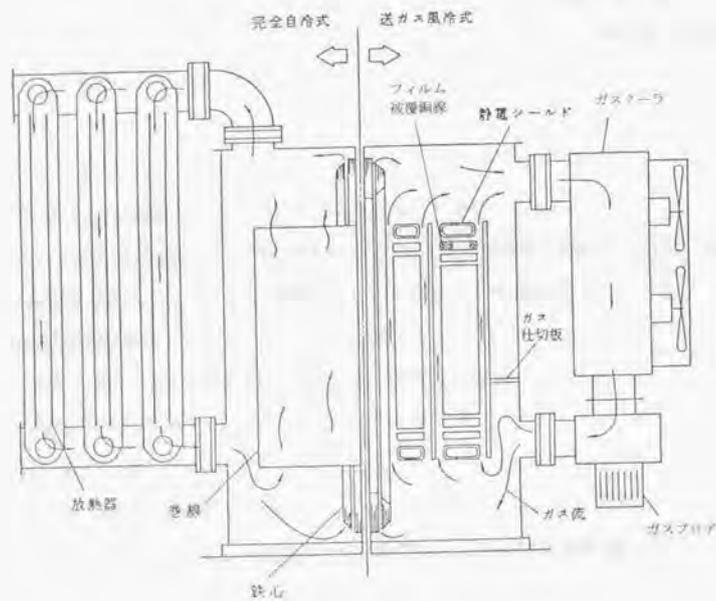
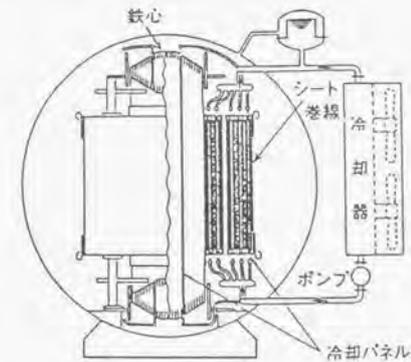
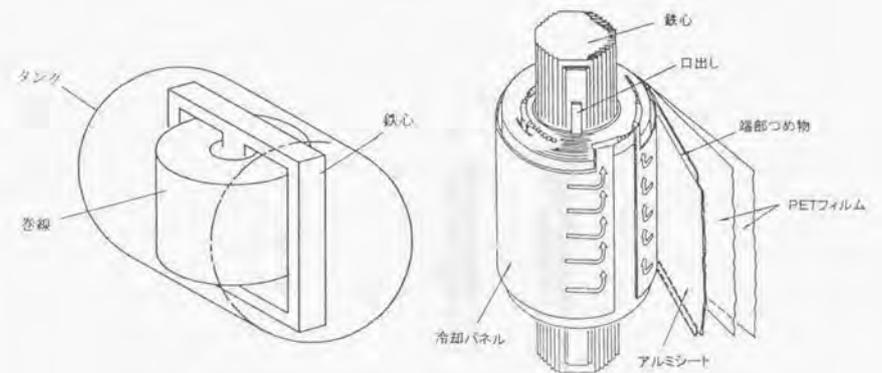


図1. 1 ガス絶縁変圧器の断面構造



断面構造



中身とタンクの配置

巻線構造

図1. 2 セハレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の構造

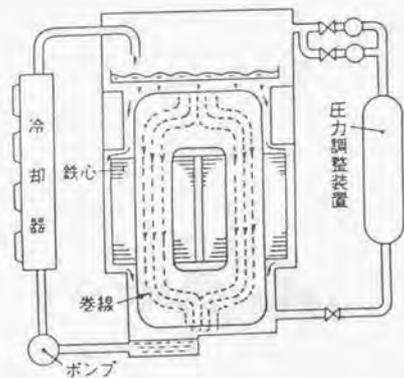


図1. 3 液流下式ガス絶縁変圧器の断面構造

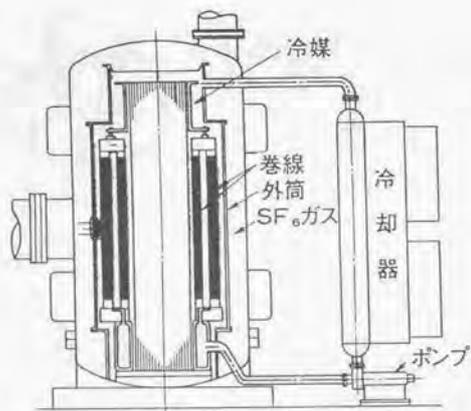
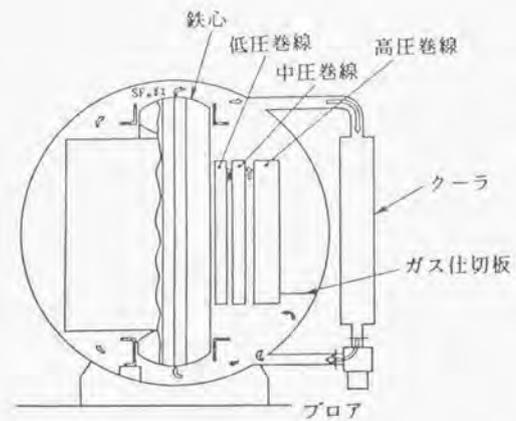
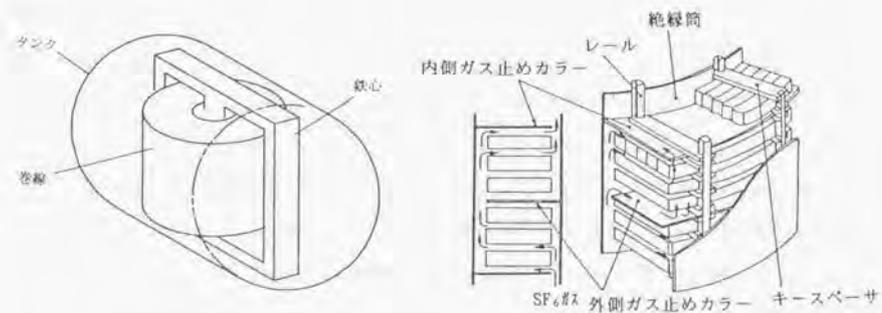


図1. 4 複合絶縁液浸式ガス絶縁変圧器の断面構造



断面構造



中身とタンクの配置

巻線構造

図1. 5 ガス冷却式大容量ガス絶縁変圧器の構造

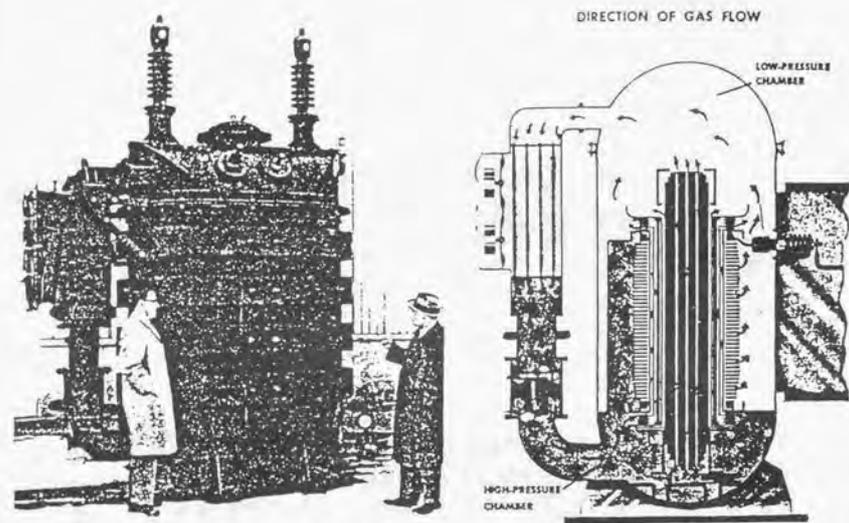


図1.7 1000kVAプロトタイプと概念構造図

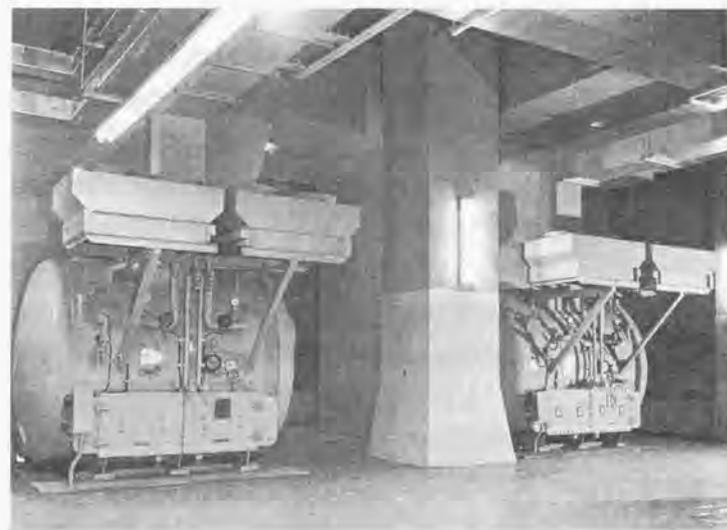


図1.8 69kV, 3000kVAわが国初のガス絶縁変圧器の外観写真

大容量のガス絶縁変圧器についても、最初に開発をリードしたのは米国である。1976年から1986年にかけてDOE（エネルギー庁）とGE社の共同で、345 kV、400 MVA級を目指しセパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の研究開発が進められた。^{(7) (8)} 1978年から1980年にかけては、EPRIとWH社が共同で液冷却式のガス絶縁変圧器の研究開発を進めた。⁽⁹⁾ しかしいずれの研究も製品化までにはいたらなかった。

わが国でも1970年代以降のGISの目覚ましい発展を受けて、大容量地下変電所を変圧器も含めて全ガス化したいとの要望が強くなり、1980年代に入ってから大容量ガス絶縁変圧器の開発が進められた。米国と同様にガス冷却式では冷却が難しいと考え、当初は液冷却式の開発が進められ、1989年にセパレート形液冷却式154 kV、200 MVAが製作されたのに引き続き⁽¹⁰⁾、1991年には液流下形液冷却式およびセパレート形液冷却式の275 kV、300 MVAが実用化された。^{(11) (12)} また、合成油入変圧器に分類されるものではあるが、鉄心、巻線をパーフロカーボンの中に浸けた複合絶縁液浸形の275 kV、250 MVA級変圧器も同時期に開発されている。⁽¹³⁾

1980年代の後半からはガス冷却式で大容量を目指す開発が進められた。液冷却式はパーフロカーボン液とガスの両方を使うため構造がやや複雑になるという問題があった。液冷却式に比べてガス冷却式は構造が単純であることから、製作コストの低減や信頼性の確保の点で有利となる可能性が有る。ガス冷却式では1994年に275 kV、300 MVAが実用化された。⁽¹⁴⁾

1.4 本研究の目的と内容

本研究は、不燃性、防爆性という優れた特長を持つガス絶縁変圧器を大容量化することを目的としている。1.2節でも述べたが、ガス絶縁変圧器にはいくつかの方式があ

るが、本論文ではセパレート形液冷却式とガス冷却式の開発研究を中心に述べる。第2章以降に述べる研究内容は略次のとおりである。

第2章では、セパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の電気・磁気および冷却特性について述べている。セパレート形液冷却式のアルミシート巻線では、巻線の上下端部や口出しに大きな電流集中を生じ電気・磁気設計および冷却設計上のポイントとなるが、これについて実験および解析で明らかにした。また、電流集中を低減する方法についても考察した。アルミシート巻線の冷却設計に関しては、ポリエステルフィルム単体の熱劣化試験およびシート巻線の熱劣化試験により、変圧器中で使われる絶縁フィルムの実用的な耐熱寿命を明らかにし設計温度の指針を導いた。また、巻線内部の熱の伝導、冷却パネル内の冷媒の流れ、巻線全体としての温度上昇について実験的、解析的に明らかにした。

第3章では、セパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の絶縁特性について述べている。シート巻線という特殊な巻線に対して、ターン間、巻線端部、主間隙など各部位の絶縁強度を明らかにしている。また、プロトタイプ器により長期的な絶縁信頼性についても調査した。

第4章では、ガス冷却式ガス絶縁変圧器の冷却特性および絶縁特性について述べている。ガス冷却式では、巻線に発生する熱をガスによりいかに冷却するかがポイントになる。従来難しいとされていたガス冷却式による大容量化を実現するために、解析や実験によって巻線内部のガスの流れや熱の伝達特性を明らかにした。また、ターン間、セクション間、巻線端部、主間隙など各部位の絶縁強度を明らかにし、絶縁設計の指針を導いた。さらに、実際の変圧器を用いて冷却および絶縁試験を行い、性能を確認した。

第5章では、ガス絶縁変圧器に使われる絶縁材料の熱劣化特性および熱分解生成物の調査を行い、絶縁材料の熱劣化特性と運転中や異常時に発生する熱分解生成物を明らかにした。

第6章では、ガス絶縁変圧器技術の現状と将来の技術展望について述べた。

ガス絶縁変圧器は急速な大容量化と高電圧化を遂げ今日にいたっている。本研究の成果は、このガス絶縁変圧器の進歩に貢献したことにある。液冷却式の開発、そしてより単純な構造で大容量器を目指したガス冷却式の着想と開発という流れの中で、絶縁、冷却、材料などの基本的な構造を決定するにあたっての重要な指針を与えている。

しかし、ガス絶縁変圧器はまだ発展途上の技術といえる。今後の不断の研究により更にコンパクトで信頼性が高く低価格のガス絶縁変圧器を作り出すことが出来ると確信している。

第1章の文献

- (1) 電気学会技術報告 第459号:「不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向」, (1993)
- (2) G. Camilli: "Gas-Insulated Transformer", General Electric Review, May-July, p. 41 (1956)
- (3) G. Camilli: "Gas-Insulated Power Transformers", AIEE Trans. Paper, 375 (1960)
- (4) P. Narbut et al.: "Vaporization Cooling for Power Transformers", AIEE Trans. Paper, 59 (1959)
- (5) 杉山, 他:「SF₆ガス絶縁変圧器」, 東芝レビュー, 22, No. 12, p. 1390 (1967)
- (6) 戸川, 他:「6.6 kV-10 MVAガス絶縁変圧器」, 1980年電学全大, No. 574
- (7) J. R. Morris II et al.: "A New Concept for a Compressed Gas-Insulated Power Transformer", IEEE Pub. 79 CH-1399-5 PWR, p. 178 (1979)
- (8) W. J. McNutt et al.: "Technology Development for Advanced Concepts in Gas-Insulated Power Transformers", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-101, p. 2171 (1982)
- (9) EPRI Report EL-1430, Research Project, 930-1, Final Report, June (1980)
- (10) 川田, 他:「世界最大容量200 MVAガス絶縁変圧器」, 東芝レビュー, 44, No. 11, p. 917 (1989)
- (11) H. Muramoto, et al.: "Development and Application of the 275kV-300MVA Separate-Cooling/Sheet-Winding Gas-Insulated Transformer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, No. 2, p. 888 (1992)
- (12) 長谷川, 他:「275 kV液冷却式ガス絶縁変圧器の開発」, 電学論B, 110, p. 999 (1990)
- (13) 和田, 他:「高電圧大容量変圧器の技術動向」, 日立評論, 70, No. 8, p. 69 (1988)
- (14) 高橋, 他:「大容量ガス絶縁変圧器の開発」, 電学論B, 115, p. 346 (1995)

第2章 セパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の 電気・磁気および冷却特性

2.1 まえがき

Morrisらの先駆的な研究からセパレート形液冷却式概念が生まれた。⁽¹⁾この方式は、図1.2に示すように、巻線の導体にアルミシートを用い、高分子フィルムをアルミシートと一緒に巻き込んで巻線を形成するものである。シート巻線は導体間のキャパシタンスが大きいため、インパルス電圧に対する電位分布が良く（初期電位分布が導体間のキャパシタンスの分圧で決まるため、ほぼ均等になる）、絶縁上有利な巻線である。巻線および鉄心には冷却パネルを巻き込み、不燃性の液体冷媒を流して冷却を行う。これにより図1.3や図1.4に示す他の液冷却式の変圧器に比べて高価な冷媒の使用量を削減できるという長所も有る。

冷媒としては様々な材料が考えられるが、沸点が100℃以上であること（使用温度範囲で液体であること）、絶縁性が高いこと、不活性であることという条件からパーフロロカーボン（Perfluorocarbon；分子式 $C_nF_{2n+2}O$ あるいは C_nF_{2n} ）を選定した。パーフロロカーボンはオゾン層破壊に影響の有る塩素基を含んでいないため、環境問題の観点からも有利である。コイル絶縁用の高分子フィルムとしては様々な材料があるが、安価で電氣的、機械的な性能が良く入手性も良いことから、図1.1に示した一般のガス絶縁変圧器と同様にPET（ポリエチレンテレフタレート）フィルムを採用した。

セパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器を実現するためには、以下に述べるいくつかの課題が有る。

第一の課題は、シート導体上下端部への渦電流の集中である。アルミシート巻線においては、シート導体上下端部への渦電流の集中により損失増加が生じ、結果として熱的な問題が生じることが報告されている。⁽¹⁾McNuttらはこの点について解析的な検討

を加え、133MVA単巻変圧器において最大で平均電流密度の約7倍の電流集中を起し冷却設計上解決が必要であると指摘しているが⁽²⁾、その対策までは明らかにしていない。アルミシート巻線の大容量化を図るためには、この課題の解決が必要であり、2.2節において、下記により解決を図った。

- (1) 渦電流集中をモデル実験により確認する。
- (2) 解析と比較し、解析手法の妥当性を確認する。
- (3) 電流集中を低減する方策を見出す。

口出しについても大きな渦電流の集中を生じるため、電流分布と過熱防止策について検討を加える必要が有る。2.3節において解析による検討を加え、対策を明らかにした。

第二の課題は巻線の許容温度である。巻線の冷却設計を行なうためには、まず巻線に使用される絶縁材料の熱劣化特性を明らかにし、巻線の許容温度を決める必要がある。ガス絶縁変圧器ではコイル絶縁に高分子フィルム材料が使われることが多い。⁽³⁾特にPETは安価で電氣的、機械的な性能が良く入手性も良いことからガス絶縁変圧器の被覆絶縁材料に広く使われている。SF₆ガスが化学的にも物理的にも安定であることから、ガス絶縁変圧器の熱的な寿命は、主にコイル絶縁用の高分子フィルムの熱的な寿命に大きく依存すると考えられる。PETフィルムは耐熱クラスEであり、大気中における機械的強度半減時間は120℃で2万時間以上であることが知られている。また、PETフィルムの加水分解劣化を調査したデータや乾燥状態でのSF₆中での劣化を調査したデータはあるが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、SF₆ガス中で実際の使用状態を想定してこれら材料の熱劣化特性を調査した報告例はない。⁽⁶⁾2.4節ではガス絶縁変圧器に使われるPETフィルムのSF₆ガス中における熱劣化特性を調査した結果について述べる。ガス絶縁変圧器では、ガス中の水分量は500ppmで管理されているため、この状態を模擬した実験を行った。このデータはセパレート形液冷却式だけでなくガス冷却式のガス絶縁変圧器にも応用できるデータとなる。

シート巻線においては、PETフィルムがアルミシートの間にはさみこまれるため、開空間に比べて水分の除去が難しくなる。水分が存在するとPETフィルムの熱的寿命は加水分解により短くなるため、巻線の製作段階で水分管理を行う必要や、場合によって許容温度を下げる必要がある。水分管理レベルを変えて製作したシート巻線モデルにより熱劣化試験を行い劣化特性を調査し、必要な管理レベルを明らかにした。

第三の課題は、巻線の温度を求める方法を確立することである。このためには、発生した熱が冷却パネルに伝わるまでの特性、すなわち巻線内部の熱伝導特性を明らかにする必要がある。アルミおよびPET単体の熱伝導率は既知であるが、それらの積層体としてのSF₆ガス中における熱伝導率を明らかにする必要がある。2.6節に示すモデルを製作して積層体の熱伝導率を測定した。

第四の課題は、設計温度を許容温度以下に効率よく収めるために冷却パネル内部の液の流れを設計し、その上で設計通り液が流れていることを確認することである。特に、冷却パネル内部の液道は厚さ1mmと狭く、製作時の寸法誤差や変形によって流量が大きな影響を受けるため、2.7節に示すように実際にパネルを製作して液の流れを確認した。

それらのデータを総合して、実規模冷却モデルおよびプロトタイプを設計、製作し、冷却試験を行ないセパレート形液冷却式の冷却性能を総合的に確認した。セパレート形液冷却式で大容量器が実現できることを実証した。

2.2. 巻線の渦電流特性

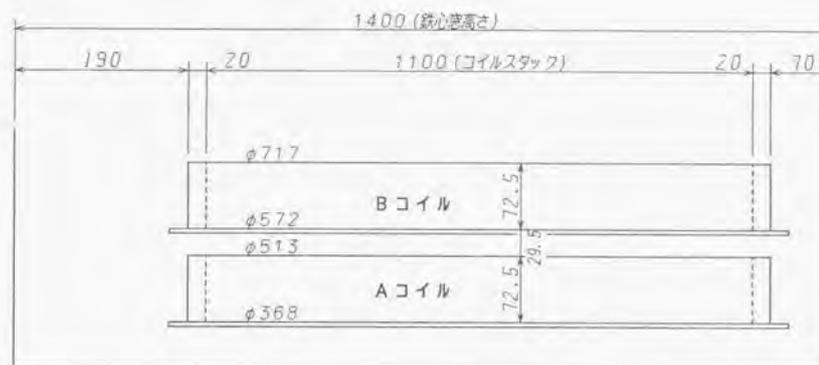
図2.1および表2.1にシート巻線の渦電流を測定するためのモデルの形状と諸元を示す。モデルは220mm×220mmの角形断面の鉄心に、各70ターンのアルミシート巻線を同心配置した。電流の測定は2点間の電位差の測定結果から求めた。測定点の

先端はアルミシートに半田付けした。測定線には、巻線内部の漏れ磁束の影響を受けないようにするためペアとなる2点毎にツイスト線を使用した。

図2. 2に測定結果を解析結果と対比して示す。解析にはFEMによる磁束と渦電流の解析コード⁽⁴⁾を用いて下記のメッシュ分割により解析した。

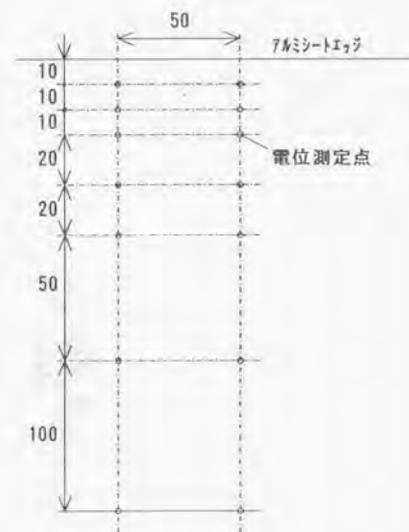
- (1) 上下の対称性を利用して、上半分のみを解析範囲とする。
- (2) 軸対称場とする。
- (3) 巻線は高さ方向に10分割し、渦電流の集中する端部はさらに10分割する。(合計19分割)
- (4) アルミシートの厚さ方向は、1ターン毎に分割する。(ターン数が多く、計算機の容量が不足の場合には複数ターンをまとめる。)

測定と計算が良く合うこと、内側巻線の内側および外側巻線の外側のシート端部で渦電流の電流集中が大きいことが確認された。電流集中倍数は最大約5倍で、McNuttらの報告約7倍に比べて小さいが、モデルの容量が1200kVAと小さいことによると考えられる。これは、図2. 3の磁束分布に示すように、導体の中に磁束が入ろうとするとそれを打ち消そうとする渦電流が流れるのと同様に、巻線の漏れ磁束が半径方向に曲がろうとするのを、シート導体いっぱい広がった大きな渦電流(図2. 6参照)が流れることによって打ち消しているため、渦電流の発生は巻線の漏れ磁束量が大きくなる大容量器程大きくなるからである。



鉄心(220×220)

モデルの形状



電位の測定点

図2. 1 渦電流測定モデルの形状

表 2. 1 渦電流測定モデルの諸元

	A (内側) コイル	B (外側) コイル
容量 (kVA)	1200	1200
電圧 (V)	1000	1000
電流 (A)	1200	1200
巻回数	70	70
アルシート導体寸法 (mm)	10.9×81100	10.9×81100
コイル内径 (mm)	368	572
コイル外径 (mm)	512	716
導体質量 (kg)	259	379

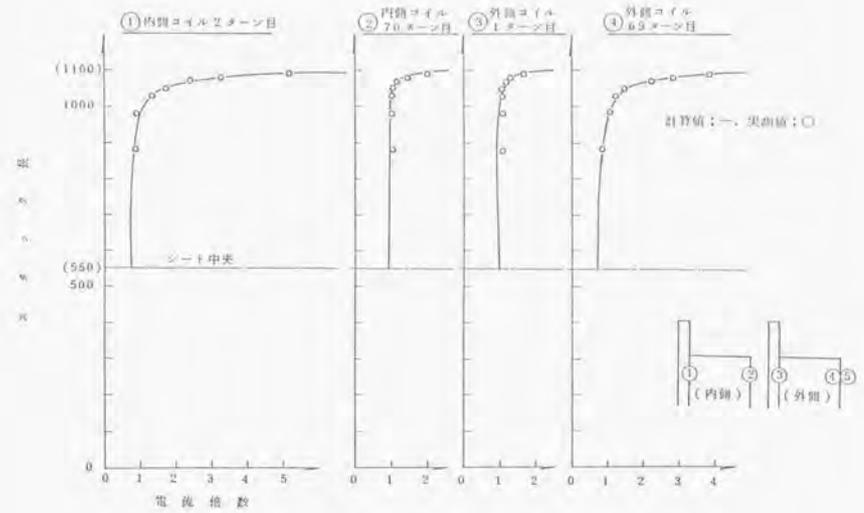
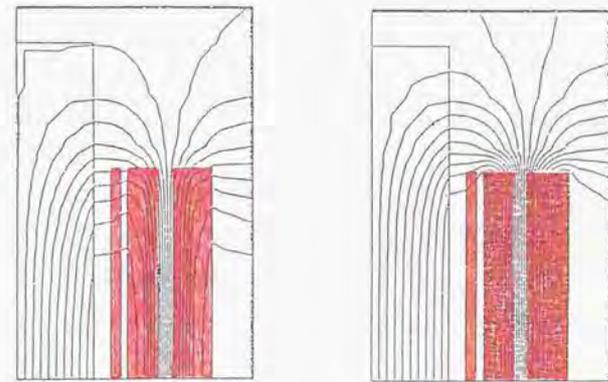


図 2. 2 渦電流測定結果と計算値の比較



(a) 従来形巻線

(b) シート巻線

図 2. 3 漏れ磁束分布

セパレート形液冷却式で大容量器を実現するためには、上記渦電流およびそれによって発生する渦電流損失を低減することが非常に重要になる。

以下に述べる3つの構造によってこれらの低減をはかった。

(1) 磁気シールド

巻線の上下端部から必要な絶縁距離をとった位置にけい素銅板を積層した磁気シールドを配置し、この磁気シールドを介して巻線の漏れ磁束を鉄心に誘導する。磁気シールドによって巻線端部の漏れ磁束の半径方向への曲がりが減るため、渦電流も少なくなり損失も低減できる。図2. 4に磁気シールドによる渦電流損失低減効果を示す。変圧器の巻線は高電圧がかかるため、接地構造物との間に電圧に応じた絶縁距離が必要になる。絶縁上許容できる範囲で、巻線との距離をできるだけ小さくすることが渦電流損失を低減するために重要であることがわかる。

(2) 巻線高さ差付き配置

一般に変圧器には高電圧の巻線と低電圧の巻線があるが、絶縁階級の低い低電圧巻線のシートの幅を高電圧巻線よりも大きくして磁気シールドに近づける構造とする。単相、50Hz、50MVA、275kV/66kV器で試算した例を表2. 2に示す。表2. 2②に示すように渦電流損失が約20%低減する。

(3) 2重同心配置

高圧巻線を2分割し低圧巻線の内側と外側に配置する。一つの主間隙あたりの漏れ磁束量が減るため、表2. 2③に示すように渦電流損失が75%に低減する。これらの渦電流損失低減策を合わせると、表2. 2④に示すように渦電流損失が約40%低減する。表中に275kV、50MVA器の磁束分布を示した。巻線から出た漏れ磁束を磁気シールドが吸い上げ鉄心に戻しているのがわかる。

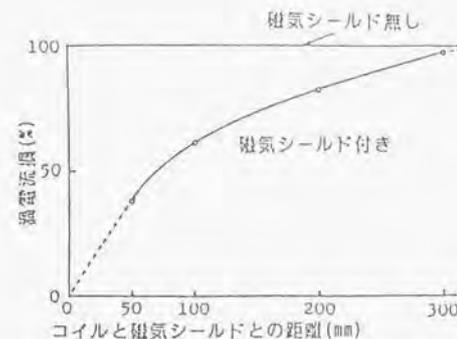


図2. 4 磁気シールドによる渦電流損失低減効果

表2. 2 巻線配置による損失低減

		①	②	③	④
巻線配置				2重同心配置 	
コイルと磁気シールドとの距離 (%)	L ₁	100	67	100	67
	L ₂	100	100	100	100
抵抗損に対する渦電流損失の割合 (%)		100	83	75	63

2.3 口出しの電流分布

シート巻線巻き始め、巻き終わりには電流の出入り口となる口出しが取り付けられる。口出し部分には、

- (1) 幅の広いシート導体から口出しの平角状導体（銅バー）に負荷電流が流れ込む際に、接合部で電流集中が生じる。
- (2) 2.2節で述べた巻線端部での半径方向磁束が口出しにも入射するため、口出しに大きな渦電流損失が発生する。

という問題がある。

図2.5の計算モデルによる口出しとシート導体の電流分布をFEM⁽⁶⁾により解析した。シート導体を平面に展開したモデルとし、2.2節の巻線渦電流解析と同様にアルミシートの端部を密にメッシュ分割した。結果を図2.6に示す。図2.6(a)は負荷電流分布である。図2.6(b)は負荷電流と、渦電流の内、負荷電流と同位相成分（実数部）、図2.6(c)は渦電流の虚数部を示す。口出しとシートの接合部には、負荷電流と渦電流の重畳により電流が集中することがわかる。

発生損失を抑え加熱を防止するために、図2.7に示すように口出しの外部に引き出す部分を平角絶縁銅線で細分化し、細分化した銅線を鎖交磁束がキャンセルするように転位し、かつ鎖交する磁束量に応じて口出しの長さを長くする構造を採用した。巻線端部での半径方向磁束により生じる渦電流が、鎖交磁束が減ることおよび循環経路が長くなり抵抗が増えることにより減るため、発生損失の集中が緩和される。例えば図2.7の構成では、転位を1段実施しているため鎖交磁束が $1/2$ になり、渦電流もほぼ $1/2$ になる。口出しの長さを2倍とすれば抵抗が2倍となり、渦電流はほぼ $1/2$ になる。（巻線から離れた部分にも漏れ磁束が存在するため、厳密には $1/2$ にならないが、巻線近傍の磁束に比べて小さいので影響は少ない。）発生損失密度はこれらの積の2乗であるので、発生損失を約 $1/16$ と大幅に緩和できる。

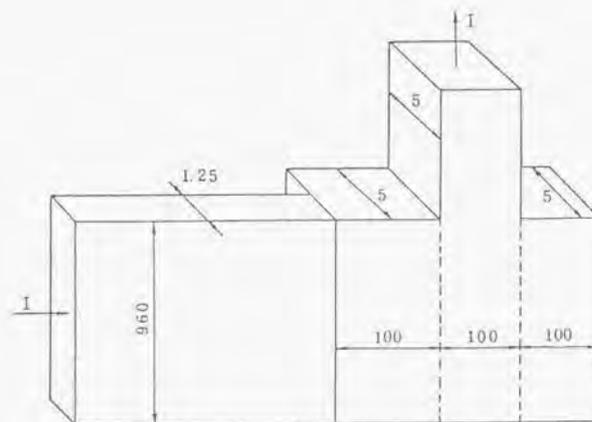


図2.5 口出し電流分布解析モデル



(a) 負荷電流分布



(b) 負荷電流+渦電流分布 (実数部)



(c) 渦電流分布 (虚数部)

図2.6 口出しとシートの電流分布

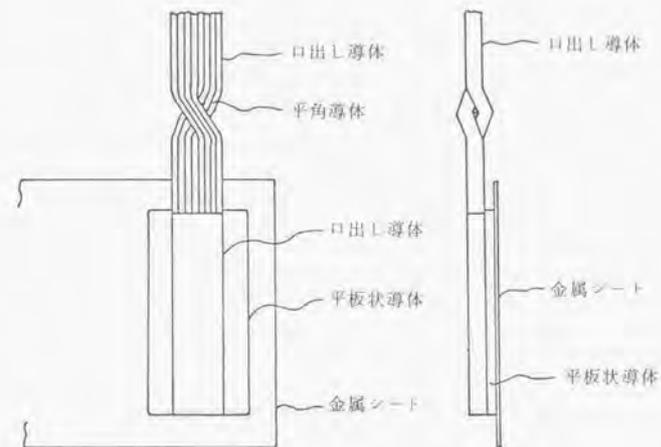


図2.7 口出しの構造

2.4 PETフィルム単体の熱劣化試験

SF₆ガス中でのPETフィルム（耐熱クラスE、機械的強度半減時間120℃で2万時間以上）の熱劣化特性について調査した。加熱温度を120℃、140℃、160℃の3種類とし、それぞれ水分量500ppm（変圧器中の水分管理レベル）、水分無し（30ppm以下）について加速劣化試験を実施し、引っ張り強度を測定した。引っ張り強度は、JIS C2318「電気用ポリエステルフィルム」に準じて、島津製オートグラフを用いて測定した。

結果を図2.8に示す。PETフィルムの寿命を引っ張り強度50%低下までの時間とすると、絶対温度の逆数と寿命の対数が直線に乗っており、絶縁材料の熱劣化寿命と温度の関係を表すアレニウスの式⁽⁷⁾が成り立っていることが分かる。変圧器の管理レベルである水分量500ppmでもPETはSF₆中120℃で2万時間以上の寿命を有することがわかった。

また、図2.8によれば、約6Kの温度上昇で寿命が半減している。これは、セルローズ／絶縁油系の寿命半減温度とほぼ同じである。変圧器規格JEC-2200ではセルローズ／絶縁油系の絶縁材料（耐熱クラスA、最高使用温度105℃）に対して95℃の連続運転で30年程度の寿命が期待できるとしている。PET/SF₆系の変圧器の運転実績はまだ少ないため、寿命を推定することは難しいが、JEC-2200と同様の考え方を適用するとPET（耐熱クラスE、最高使用温度120℃）／SF₆系の変圧器は110℃の連続運転で30年程度の寿命が期待できる。

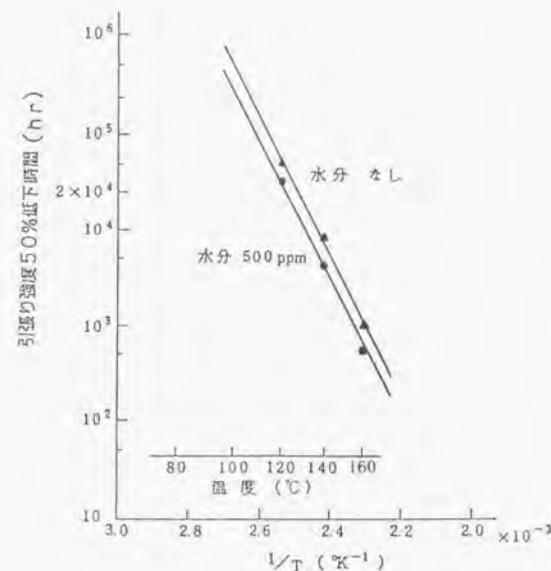


図2.8 PETのSF₆ガス中での熱劣化特性

2.5 シート巻線の熱劣化試験

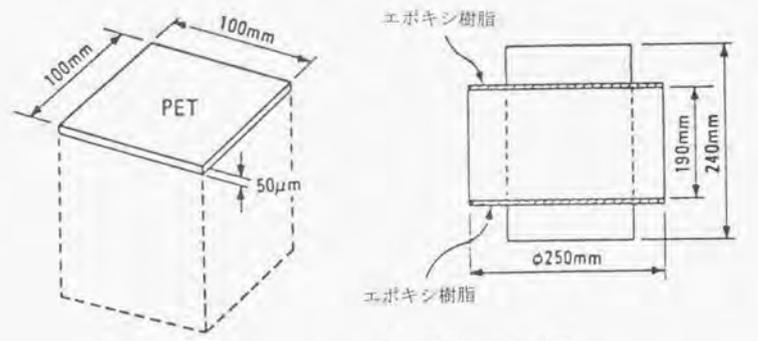
シート巻線においては、PETフィルムがアルミシートの間にはさみこまれるため、開空間に比べて水分の除去が難しくなる。水分が存在するとPETフィルムの熱的寿命は加水分解により短くなるため、巻線の製作段階で水分管理を行う必要や、場合によって許容温度を下げる必要がある。水分管理レベルを変えて製作したシート巻線モデルにより熱劣化試験を行い劣化特性を調査し、必要な管理レベルを明らかにした。

図2.9に巻線モデルを示す。厚さ50 μ m、幅190mmの耐熱PET（耐熱クラスB）2枚を0.2mmのアルミシートと重ねて150ターン巻き、水分のやり取りをなくすため両側をエポキシレジンで封じる。PETフィルムとしては、相対湿度35%で保管したものと60%で保管したものをを用いた。また、比較のため乾燥した100mm角のフィルム単体も試験した。フィルムの特性は簡単のため破裂強度を測定した。（引っ張り強度に比べて寿命が短く測定される。）破裂強度は、JIS P8112「紙および板紙のミュールン低圧型試験機による破裂強さ試験方法」に準じて測定した。

図2.10に140°Cで劣化させたモデルの試験結果を示す。グラフは破裂強度の初期値（1.32MPa）に対する残率で示した。相対湿度35%で保管したPETで巻いたモデルに比べ（カーブb）、相対湿度60%で保管したモデル（カーブc）の劣化が早いことがわかる。PETは加水分解で劣化が促進されることが知られているが¹⁰、それを裏付ける結果になっている。一方、相対湿度35%で保管したPETで巻いたモデル（カーブb）と乾燥試験片（カーブa）を比べると、当初の劣化はカーブbの方が大きいですが、1週間後（A点）から2週間後（B点）までの傾きを見るとほぼ同じであることがわかる。これは、PETに吸着されていた水分がほぼ最初の1週間で加水分解に消費され、それ以降は乾燥状態と同じに推移するものと考えられる。

相対湿度35%で保管したPETで巻いたモデルと乾燥状態で保管したPETで巻いたモデルでの破裂強度50%低下で評価した寿命特性について図2.11に示す。破裂強度50%低下で評価した寿命において、相対湿度35%で保管したPETの方がやや

低下しているがその差はわずかである。相対湿度35%で保管したPETの乾燥PETに対する寿命低下量は、2.4節のモデルで水分量500ppmの場合の低下量と同等レベルである。シート巻線は一度製作された後は水分の進入が難しい構造になっていることを考えると、巻線の製作段階で相対湿度を35%以下に管理すれば問題無いと考えられる。



巻き回数：150回
 1シート厚さ：200μm
 PET厚さ：50μm×2枚
 (a) 乾燥試料 (b), (c) シート巻線熱劣化モデル

図2.9 シート巻線熱劣化モデル

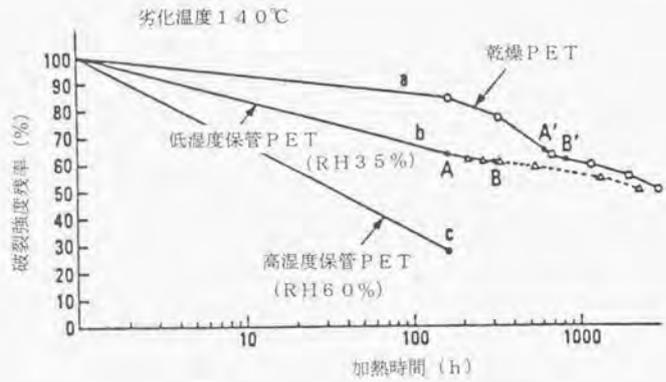


図2.10 PETフィルムの熱劣化特性

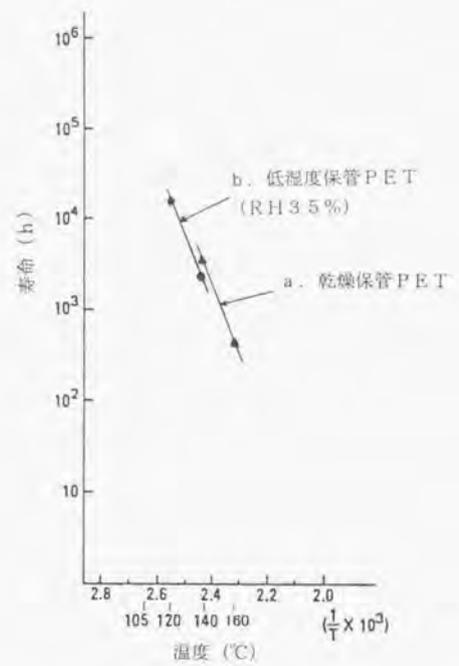


図2.11 シート巻線におけるPETフィルムの寿命特性

2.6 シート巻線内部の熱伝導特性

シート巻線内部で発生する熱は、アルミシート、PETフィルムおよびその間に存在する微小なSF₆ガスギャップの積層体を介して冷却パネルへと伝えられる。この熱の流れおよび温度分布を解析する上で、積層方向の熱伝導率を把握することが重要である。(軸方向および円周方向の熱伝導に関しては、それぞれの材料固有の熱伝導率を適用することで問題無い。) 積層方向の熱伝導特性を把握するため、モデルによる熱伝導の特性調査試験を実施した。

モデルは145×145×0.2mmのアルミシートと145×145×0.025mmのPETフィルム2枚を15層重ねたもので、温度差から等価的な熱伝導率 λ_e を求めた。図2.12に測定結果を示す。SF₆ガス圧力の影響は小さく、面圧を増すと熱伝導率が増加する。シート巻線の巻き付け面圧を0.1~0.2MPaとすると、 λ_e/λ_0 は0.65になる。等価的な熱伝導率 λ_e を下式で定義すると、微小なSF₆ガスギャップの熱抵抗R_cは λ_e/λ_0 が0.65の場合約0.0002m²・°C/Wである。

$$\lambda_e = \frac{\delta_A + \delta_F}{\frac{\delta_A}{\lambda_A} + \frac{\delta_F}{\lambda_F} + R_c} \quad (2-1)$$

δ_A : アルミシートの厚さ (m)

δ_F : PETフィルムの厚さ (m)

λ_A : アルミの熱伝導率 (W/m²・°C)

λ_F : PETの熱伝導率 (W/m²・°C)

λ_0 : 理想状態の巻線内部熱伝導率 (R_c=0の場合)

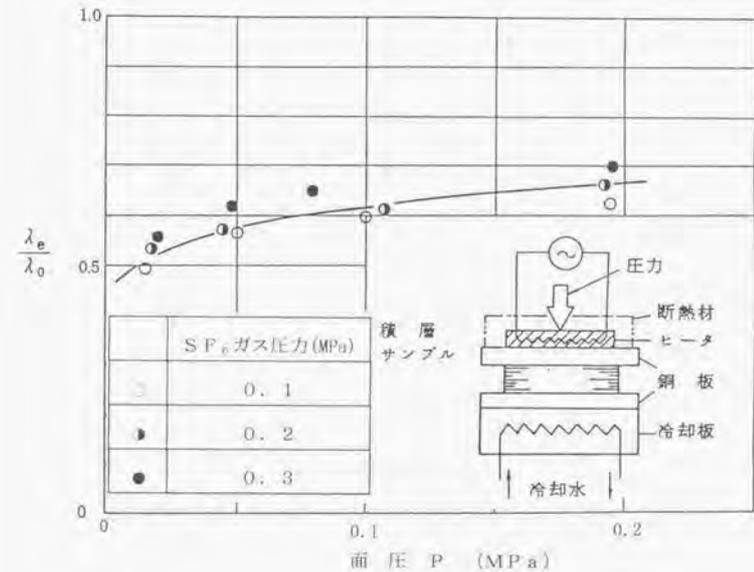


図2.12 アルミシート/PETフィルム積層体の熱伝導率

2.7 冷却パネル内部の液流制御と流速測定

2. 2節で述べたように巻線の発生損失は上下端部に集中するため、巻線用冷却パネルも上下端部ほど良く冷えるように設計するのが合理的である。このため、図2. 13に示すように、冷却パネル内部のリブスペーサの位置（並べかた）を変えることにより、巻線の軸方向の損失密度に応じて流速を調整する。すなわち、巻線の損失密度の高い上下端部では、端部から約10%の範囲で、リブスペーサの傾斜角 Q_e を中央部の傾斜角 Q_c よりも約2倍大きく取り、液が多く流れるようにしている。

冷却パネルの液が流れる流路の幅は1mmと非常に小さいため、わずかなつぶれが生じても液の流れに影響が出る可能性がある。そのため、実際に冷却パネルを製作し、その冷却パネル内部の流速分布が設計通りになっているかを調べた。

流速の測定方法としては、超音波流速計、2点間の差圧から求める方法等が考えられるが、流路が1mmと小さく一定でないため誤差が多いことが懸念された。冷却パネルの板が1mm厚さの薄いステンレス板で有ることに着目し、冷却パネル外表面温度の変化を赤外線温度分布測定装置で観測し流速を求めることとした。試験はまず冷却パネル内部に冷水より温度が2℃高い温水を充填し、つぎに入口側から冷水を流しながら冷却パネル外表面の温度の変化を赤外線温度分布測定装置で観測した。図2. 14の測定写真から、実器冷却パネル内部の液の流れが、上下端部ほど速くなっていることが分かる。図2. 13中には、流路の粘性抵抗や曲りの抵抗を考慮した流れの回路網計算⁽⁸⁾で求めた流速を矢印の長さで示す。図2. 14の測定写真と、図2. 13に矢印の長さで示した流速の計算結果の傾向は一致することがわかる。

注:まず、流路の各部分の流量、流速を与え、各部分の圧力損失を計算する。圧力損失としては、摩擦損失、拡大・縮小損失、分岐・合流損失があり、媒質の物性値、流路の寸法および流速から求められる。⁽⁹⁾そして、入り口から出口までのどの流路においても、設定した圧力損失に等しくなるように、各部の流量を変化させながら繰り返し計

算を行う。本計算では、すべての流路の圧力損失が、設定した圧力損失に対して0.01%以下の誤差になるまで繰り返し計算を行っている。

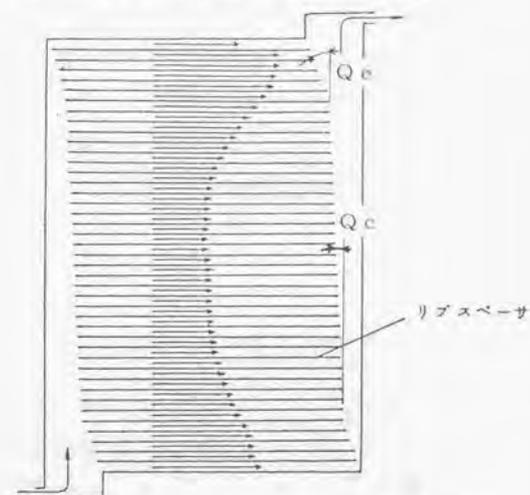


図2. 13 冷却パネル内のスペーサ配置と流量分布

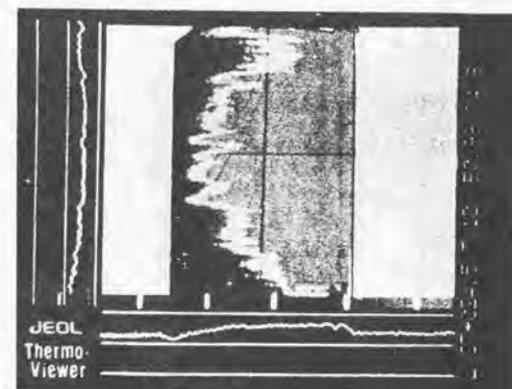


図2. 14 流量分布の測定

2.8 冷却性能総合検証

2.8.1 モデル概要

基礎研究の成果を元にして実規模モデルを設計、製作して総合的な冷却性能検証を行った。表2.3に実規模冷却モデルの定格と試験項目を示す。また、外観写真を図2.15に示す。定格電圧22kVおよび6.6kVのシート巻線を3脚鉄心の中央脚に巻いた構造である。試験は全て空気中で行なった。

2.8.2 試験結果

巻線温度試験時の巻線内温度分布を図2.16に示す。測定点は、最も温度の高くなる低圧巻線の最内側ターンと最内側冷却パネルおよび冷媒出入口温度である。巻線内部の温度分布は、2.2節で述べたFEMによる渦電流損失プログラムにより求めた損失を、2.4節で述べた巻線の等価熱伝導率を用いてFEMによる熱伝導解析コード⁽⁹⁾により解析した。熱伝導解析は2次元軸対称とし、メッシュの分割は渦電流解析のメッシュに合わせた。但し、アルミシートとPETフィルムの積層体を異方性の熱伝導率を持つ物質として扱い、積層方向は2.6節で求めた熱伝導率、高さ方向はアルミとPETを並列においた熱伝導率とした。温度の測定は、巻線内部に埋めこんだ熱電対により行なった。

計算値と測定値は良く合っていた。冷媒と巻線の最高温度点の温度差は約40℃であり、この内の約半分が巻線内部の熱伝導による温度差であり、残りの半分が冷媒と冷却パネルの熱伝達による温度差である。

表2.3 実規模冷却モデルの定格と試験項目

定 格	・ 容 量	単相 8MVA
	・ 周波数	50Hz
	・ 一次電圧	22kV
	・ 二次電圧	6.6kV
	・ %IZ	10.5%
試験項目	・ 変圧比、巻線抵抗、極性、%IZなどの基本特性チェック	
	・ 冷却パネルの冷媒分流量	
	・ 巻線温度上昇試験	



図2.15 実規模冷却モデルの外観

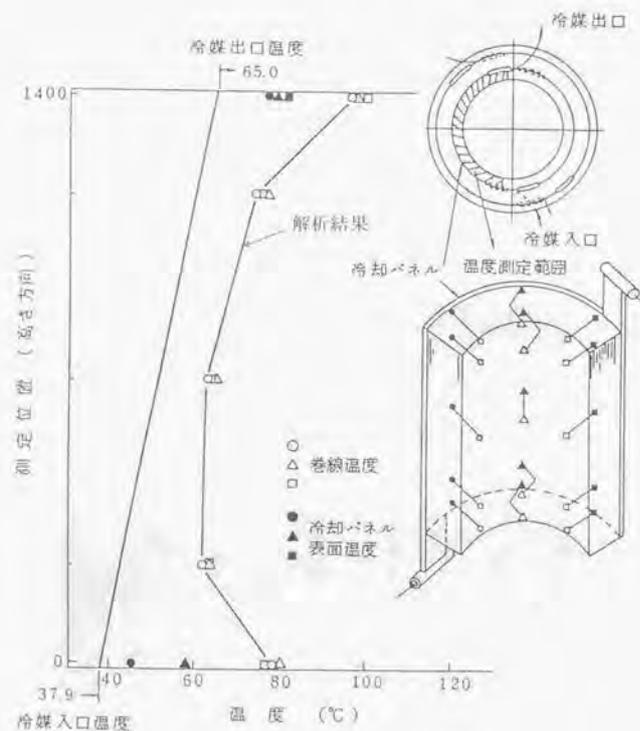


図2.16 巻線内部温度分布 (解析と試験結果の比較)

2.9 プロトタイプ器

以上に述べた基礎研究および実規模モデルの結果をふまえ、3章で述べる絶縁面の研究成果を加味してプロトタイプ器を設計、製作した。定格および諸元を表2.4に、組立完成後の外観写真を図2.17に示す。中身は、図2.18に示すように、実規模冷却モデルと同様シート巻線を3脚鉄心の中央脚に巻いた構造である。

プロトタイプ器においては、セパレート形液冷却式で新規要素が最も多い冷却性能について詳細な検証を実施した。通常変圧器は中身を露出した状態では通電はできないが、セパレート形液冷却式では中身の冷却が別にできるため、気中で中身を組み立てた状態でヒートラン試験を実施できる。気中での100%負荷ヒートラン試験で下記に示す測定を行ない、冷却性能を確認した。

- 巻線損失
- 各冷却パネルへの冷媒の分流 (超音波流量計)
- 冷媒の温度上昇 (熱電対)
- 巻線の平均温度上昇 (抵抗法)
- 巻線の最高点温度上昇 (光ファイバ温度センサ)
- 口出しの温度上昇 (熱電対)
- クランプ等金属構造物の温度上昇 (熱電対、サーモビュア)
- クランプ等金属構造物への漏れ磁束入射量 (サーチコイル)

表2.5に試験結果を示す。また、図2.18にサーモビュアで測定した中身の温度分布を示す。

熱電対およびサーモビュアの測定から異常なローカルヒートがないことを確認した。クランプや鉄心の当板への漏れ磁束入射量は1.4 mTと低いレベルであり、磁気シールドによる磁束制御が良好であることが確認された。冷媒の流量、巻線の平均温度は設計値 (計算値) に対する誤差は最大約15%であった。温度設計上最も重要なアルミシート端部の最高点温度上昇の誤差は約5%であった。

表2.4 プロトタイプ器の定格と諸元

冷却方式	送液風冷式
容量	50MVA
相数	単相
周波数	50Hz
一次電圧	275/√3kV
二次電圧	66/√3kV
%IZ	8.5%
絶縁階級	一次 200号 二次 60号
定格ガス圧力	0.4MPa.g (20℃)
寸法	W6.7× L7.25× H5.45m
総質量	70ton



図2.17 プロトタイプ器の外観

表2.5 ヒートラン試験結果

%IZ	8.49%
負荷損失 (75℃)	128.1kW
冷媒最高温度上昇	32K
ガス最高温度上昇	29.5K
冷媒に対する巻線温度上昇	一次 25.0K 二次 26.5K
局部過熱	なし

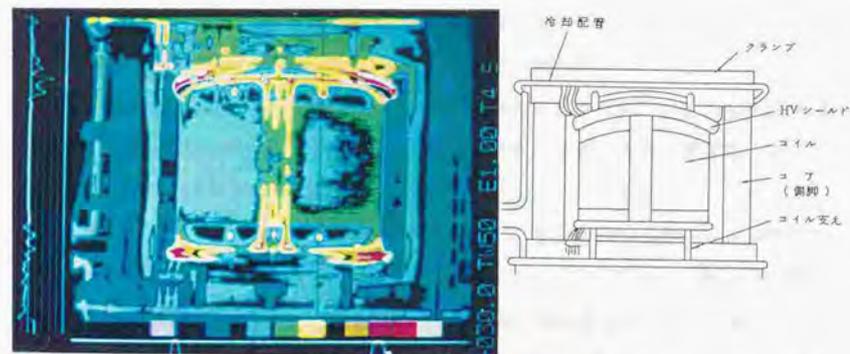


図2.18 中身の温度分布

2.10 まとめ

セパレート形液冷却式の電気・磁気特性や冷却特性に関してモデルの試験や解析を実施し、以下の結果を得た。

1. アルミシート巻線においては、シート導体上下端部への渦電流の集中により損失増加が生じる。シート巻線端部の渦電流集中をモデルにより実測するとともに、解析の妥当性を確認し、解析手法を確立した。
2. 大容量器になるほど渦電流損失の比率が増加し、冷却設計上問題になるが、
 - 磁気シールドを巻線の上下端部から必要な絶縁距離をとった位置に配置する。
 - 絶縁階級の低い低電圧巻線のシートの幅を高電圧巻線よりも大きくして磁気シールドに近づける巻線高さ差付き配置とする。
 - 高圧巻線を2分割し低圧巻線の内側と外側に配置する2重同心配置とする。などにより渦電流損失が約40%低減することを明らかにした。
3. 口出しについても大きな電流集中を生じるため、解析によって電流分布について検討を加え、外部に引き出す部分を平角絶縁銅線で細分化し、細分化した銅線を転位し、かつ磁束量に応じて長さを長くするという加熱防止策を明らかにした。
4. PETフィルムの寿命として引っ張り強度50%低下までの時間とすると、変圧器の管理レベルである水分量500ppmでもPETはSF₆ガス中120℃で2万時間以上の寿命を有することがわかった。
5. PET(耐熱クラスE, 最高使用温度120℃) / SF₆系の変圧器は110℃の連続運転で30年程度の寿命が期待できる。
6. シート巻線においては、PETフィルムがアルミシートの間にはさみこまれるため、開空間に比べて水分の除去が難しくなる。水分管理レベルを変えて製作したシート巻線モデルにより熱劣化試験を行い劣化特性を調査した。破裂強度50%低下で評価した寿命において、相対湿度35%で保管したPETは乾燥状態で保管したPETよりもやや低下があるが、その差はわずかである。

7. アルミ、PET、ガスの積層物となるシート巻線の積層方向の熱伝導率を実験的に明らかにした。
8. 巻線の冷却パネルを製作し、液の流速分布を冷却パネル外表面温度の変化を赤外線温度分布測定装置で観測することにより測定した。損失密度の大きい上下端部で多く流れる設計通りになっていることを確認した。
9. それらのデータを総合して、実規模の冷却モデルおよびプロトタイプを製作し、冷却試験を行ないセパレート形液冷却式の冷却性能を総合的に確認した。セパレート形液冷却式で大容量器が実現できることを実証した。

第2章の文献

- (1) J. R. Morris II et al. : "A New Concept for a Compressed Gas-Insulated Power Transformer", IEEE Pub. 79 CH-1399-5 PWR, p.178(1979)
- (2) W. J. McNult et al. : "Technology Development for Advanced Concepts in Gas-Insulated Power Transformers", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-101, p.2171(1982)
- (3) 電気学会技術報告 第459号:「不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向」, (1993)
- (4) 向山, 他:「ガス絶縁変圧器の各種内部異常による主要な分解生成物」, 電学論B, 111巻, 第12号, p.1335(1991)
- (5) 小林, 他:「ガス絶縁変圧器の内部異常診断」, 電気学会静止器研究会資料, SA-91-71, (1991)
- (6) S. Isaka et al. : "Finite Element Analysis of Eddy Currents in Transformer Parallel Conductors", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-104, p.2731(1985)
- (7) 電気学会技術報告 1部, 第143号:「油入変圧器運転指針」(1986)
- (8) 日本機械学会 技術資料:「管路・ダクトの流体抵抗」, 日本機械学会(1979)
- (9) E. L. Wilson. : "SAP-A General Structural Analysis Program", SESM Report 70-20, Dept. of Civil Engineering, University of California(1971)

第3章 セパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器の 絶縁特性

3.1 まえがき

セパレート形液冷却式ガス絶縁変圧器は、シート巻線という大容量変圧器としては特殊な巻線を用いている。シート巻線は導体間のキャパシタンスが大きいため、インパルス電圧に対する電位分布が良く（初期電位分布が導体間のキャパシタンスの分圧で決まるため、ほぼ均等になる。）、絶縁上有利な巻線である。しかし、絶縁設計のためにはターン間、巻線端部、主間隙、絶縁ホースなど各部位の絶縁強度を明らかにする必要がある。

第一の課題はターン間絶縁である。ターン間は、PETフィルムの固体絶縁にSF₆ガスが介在した複合絶縁系である。PETフィルム単体あるいはSF₆ガス単独の絶縁特性は知られているが、このような複合系については絶縁特性を調査する必要がある。シートの平面部分だけでなく、エッジの部分が絶縁上の弱点になる可能性もあるため、3.2節においてシート巻線を模擬したモデルを製作して、絶縁特性を調査した。部分放電は絶縁破壊に比べて低い電圧で起き、繰り返しの放電によってPETフィルムが劣化、損傷し、絶縁破壊にいたる可能性やHF等の腐食性の強い弗化物を生成して金属を腐食させる可能性があるため、長時間の部分放電開始特性についても調査した。

McNuttらはターン間絶縁において固体異物による絶縁耐力の低下について指摘している。¹⁾シート巻線は薄いフィルムで絶縁しているのであるから、固体異物ばかりでなく絶縁フィルムそのものの欠陥や系統での運転中に受ける熱ストレスや短絡機械力の影響についても評価しておく必要がある。3.3節において、小型のシート巻線モデルにより、欠陥や熱や機械的なストレスがターン間絶縁の信頼性に与える影響について調査した。

第二の課題は、巻線の端部絶縁強度の確認である。巻線端部の絶縁はSF₆ガスの破壊電界で決まるため、端部に配置される巻線支えや冷却パネルのヘッダーの形状を破壊電界に対して裕度を持つように決めればよい。3.3節のモデル試験によって実用的な寸法で絶縁強度が確保できることを確認した。冷媒を流すためのテフロンホースに関しては、ガス側、液側それぞれに絶縁物の浴面ができる。この浴面絶縁は実用的な寸法で問題無いことを、内部にパーフロカーボン液を入れたモデル試験によって確認した。

第三の課題は、巻線端部や主間隙に取り付けられる電界緩和用静電シールド構造の決定である。変圧器巻線の絶縁は、GISの様な準平等電界で構成できず、いたるところにくさび状の微小なガスギャップが存在する構造になる。この場合、単なる電界計算では形状の最適化はできず、実際に即した形状で破壊電圧を求め構造を決める必要がある。巻線端部および主間隙の電界を緩和するために用いられる静電シールドについて、3.4節に示すモデル試験を行い、構造を決定した。

第四の課題は、流動帯電特性である。油入変圧器で問題が生じたのと同様に、パーフロカーボン液が流れることによってテフロンホースが帯電したり、冷却パネルで発生した電荷が巻線に帯電して、静電気放電を起こし絶縁破壊にいたる可能性がある。

3.5節において、パーフロカーボン液そのものの帯電特性と巻線全体としてみた帯電特性について調査した。

以上の基礎的な絶縁特性に基づいて、実規模絶縁モデルおよびプロトタイプ器を製作し、変圧器としての総合的な絶縁性能を確認した。

3.2 ターン間絶縁

3.2.1 ターン間絶縁特性

ターン間絶縁についての基礎的な特性を把握するため、図3.1に示す巻線の1ターンを模擬したモデルによって部分放電開始特性、破壊特性を調査した。モデルは2枚の

アルミシートの上に25μmのPETフィルムを2枚はさんだ構成とした。

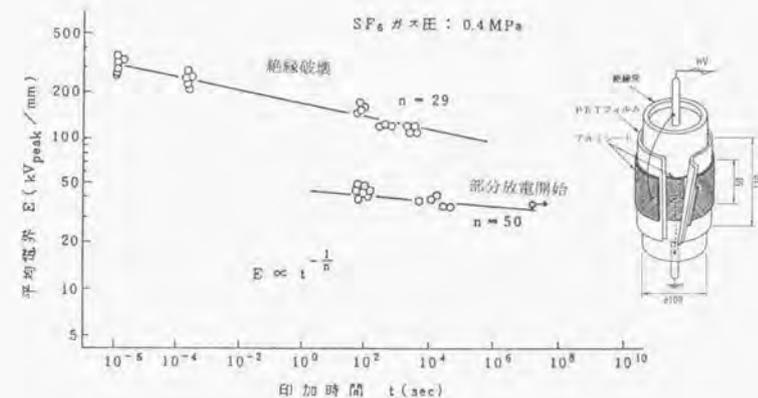


図3.1 ターン間絶縁のv-t特性

図3. 1に部分放電開始電界、破壊電界について $v-t$ カーブを求めた結果を示す。破壊はアルミシートのエッジ部だけでなく一般部でも生じた。破壊電界は、交流1分間、10分間および1時間破壊電界のピーク値と雷インパルスおよび開閉サージ破壊電界をプロットして結んだ。部分放電開始電界は、交流1分間および長時間領域のデータをプロットし、回帰直線で結んだ。

275kV、300MVA級変圧器の高圧巻線の巻回数は約650ターンであり、L1WV（雷インパルス試験電圧）が1050kVとするとターン間にかかる雷インパルスストレスは約32kV/mmとなる。破壊電界に対する裕度は、約10倍であることがわかる。

部分放電開始電界の $v-t$ カーブは、AC長時間領域で回帰直線を求めると下式であらわされる。（ $v-t$ の傾きは $n=50$ である。）

$$E = 43.4 \times t^{-1/50} \quad (3-1)$$

この直線で30年後の部分放電開始電界を推定すると、28.7kV_{peak}/mmとなるが、275kV、300MVA級変圧器の運転時のターン間ストレス4kV_{peak}/mmに対して十分な裕度が有ることがわかる。

3.2.2 ターン間の複合的なストレスに対する絶縁特性

絶縁フィルムそのものの欠陥の影響や、系統での運転中に受ける熱ストレスや短絡機械力の影響について評価するため、図3. 2に示す小形の巻線モデルにより以下の手順および条件で試験を行なった。

(1) 試験の手順

〔乾燥処理〕：製作時の乾燥処理を模擬

100℃、1日間

↓

〔模擬インパルス試験〕：工場雷インパルス試験を模擬

試験電圧：460kV（3.1kV/ターン）、1回印加

波 形：+1×2μs

巻線のインダクタンスが約4mHと小さいため、1G（インパルス電圧発生装置）の制約から波尾長を2μsとした。破壊はほとんどが電圧の波高値で決まるため、通常の雷インパルス試験とほぼ等価と考えられる。

↓

〔短絡機械力を印加〕：運転時に加わる短絡機械力を模擬（275kV、300

MVA級変圧器の巻線が短絡時に受ける応力を電気協同研究油入変圧器の短絡強度にしたがって計算し、面圧に換算した。）

面圧：2.4MPa、30回

↓

〔模擬インパルス試験〕：上記短絡試験で影響がでるかを確認する。

試験電圧：460kV（3.1kV/ターン）、1回印加

波 形：+1×2μs

↓

〔30年運転相当の熱劣化〕：フィルムに30年運転相当の熱劣化を与える。

140℃、5日間加熱

↓

〔模擬インパルス試験〕：上記熱劣化試験で影響がでるかを確認する。

試験電圧：460kV（3.1kV/ターン）、1回印加

波 形：+1×2μs

↓

[短絡機械力を印加] : 熱劣化させた状態で短絡機械力を加える。

面圧 ; 2.4 MPa, 30回

↓

[模擬インパルス試験] : 30年運転相当の熱劣化させた状態で短絡機械力を加えた場合の影響が出るかを確認する。

試験電圧 ; 460 kV (3.1 kV/ターン), 1回印加

波 形 ; +1 × 2 μs

(2) モデルの状態

ターン間絶縁に欠陥のないものと2ターン共破れの有るものの2種類。

それぞれにつき1個ずつ試験を実施した。

試験結果を表3.1に示す。PETフィルムに欠陥があると工場雷インパルス試験を模擬したインパルス試験で破壊するが、欠陥がない場合、系統での運転中に受ける熱ストレスや短絡機械力に対しても問題ない結果であった。変圧器の出荷前に工場において雷インパルス耐電圧試験を実施することにより、フィルムの欠陥のスクリーニングができること、この試験に合格すれば運転中に受ける熱劣化や短絡機械力に対しても裕度があることが確認された。

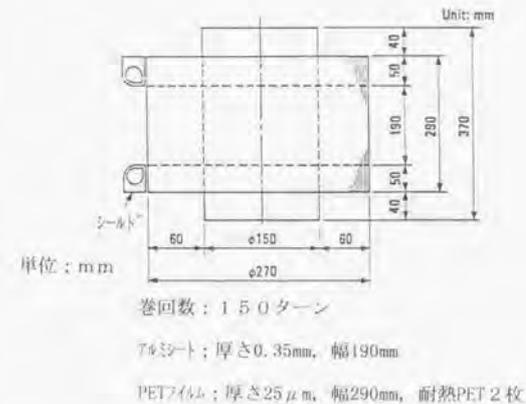


図3.2 ターン間複合ストレスモデル

表3.1 ターン間複合ストレスモデル試験結果

印加ストレス	模擬したストレス	試験結果	
		2ターン共フィルム破れあり	フィルム破れ無し
乾燥100℃, 1日間 + 模擬インパルス試験	製作時の乾燥処理+ 工場試験の影響	×	○
短絡機械力を印加後 模擬インパルス試験	運転時の短絡機械力 の影響	—	○
加熱140℃, 5日後模擬 インパルス試験	30年運転相当の熱 劣化の影響	—	○
短絡機械力を印加後 模擬インパルス試験	熱劣化+短絡機械力 の影響	—	○

× ; BD
○ ; BDなし

3.3 巻線端部絶縁特性

3.3.1 巻線支えおよび高圧シールド

巻線端部の絶縁はSF₆ガスの破壊電界で決まるため、端部に配置される巻線支えや冷却パネルのヘッダーの形状を破壊電界に対して裕度を持つように決めればよい。これらの支配要因の影響を電界計算により検討し、一例として図3.3に示す電界分布の形状とした。計算は高速表面電荷法を用いた電界解析コードHSSSMを用いた。⁽²⁾ ストレスの高い高圧シールド表面および冷却パネルヘッダー表面でも雷インパルス試験電圧1050kV印加時に20kV/mmであり、放電開始ストレス45kV/mm (SF₆ガス圧力0.4MPa.g)⁽³⁾ に対して十分な余裕が有る。図3.4に示した絶縁モデルによってその絶縁強度を検証したところ、SF₆ガス圧力0.25MPa.gにおいて雷インパルス試験電圧1050kVに耐えることが確かめられた。

3.3.2 テフロンホース絶縁

巻線端部の冷却パネルヘッダーとマニホールドを連結し、冷却パネル内へ冷媒を流すためのテフロンホースには、巻線の対地電圧が加わる。テフロンホースは、内側は冷媒であるパーフロロカーボン、外側はSF₆ガスと接することになり、対地電圧に対するテフロンホースの沿面絶縁が問題になる。テフロンホースの絶縁強度を検証するため図3.5に示す電極構成で耐電圧試験を実施した。テフロンホース内部にはパーフロロカーボンを封入した。

試験はSF₆ガス圧力0.25MPa.gにおいて正、負雷インパルス電圧および交流電圧を印加した。電極間ギャップ長が100mmにおいてインパルス電圧では正、負極性共に1365kV、交流電圧では600kV_{r.m.s}に耐えた。

テフロンホースの長さは実用的には少なくとも500mm以上になるので、テフロンホース絶縁は十分な裕度が有る。

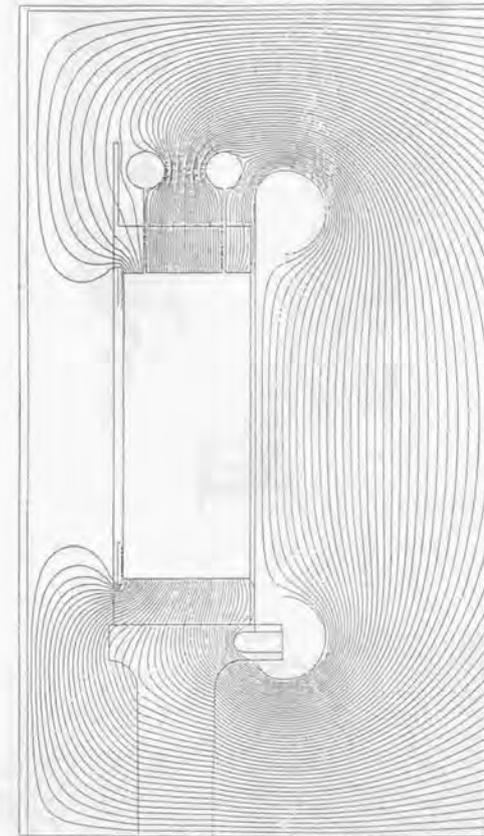


図3.3 巻線端部電界分布



図3.4 絶縁モデル

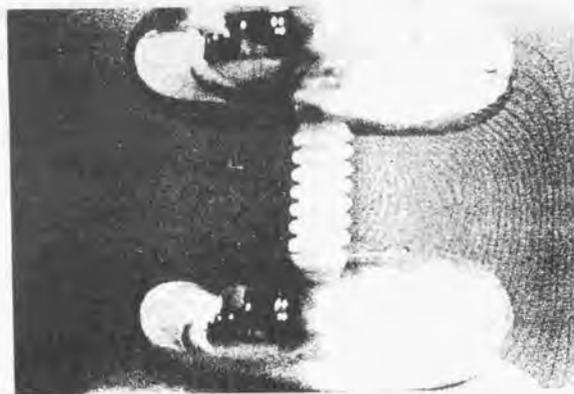


図3.5 テフロンホース絶縁試験

3.4 主間隙絶縁特性

図3.6に巻線主間隙および端部の絶縁構成と主間隙静电シールドの構造例を示す。主間隙にはアルミシートエッジの電界を緩和するために静电シールドが取り付けられる。静电シールドは、破壊電界のばらつきを小さくするために電位面をPETで被覆した構造とするのが一般的である。この構造では、PET被覆界面の曲率部にくさび状の微小なガスギャップが存在することになり、電界集中によって絶縁上の弱点となり易い。

これを改善するために、図3.6に示すようにPB（プレスボード）または形状に合わせて成形したTPPE（熱可塑性エラストマ）の詰め物を取り付けその外側をPETでさらに絶縁する構造を検討した。いずれの構造もPET被覆界面の曲率部に微小なガスギャップが存在することになり、比誘電率が3.0とPETよりも低いPBが有利か、比誘電率が4.5と高くなりSF₆ガス側にかかる電界が高くなってもくさびギャップをできるだけ埋める形状に成形したTPPEが有利かモデル実験により確かめた。TPPEはシールドの曲率に合わせた形に成形することが可能で、柔らかいため密着性も良いという特徴も有る。

図3.7に示すように、接地電極の上にPBを詰め物としたシールド（モデル1）およびTPPEを詰め物としたシールド（モデル2）を置いたモデルによりガス圧力を変えながら雷インパルス絶縁試験を行い、両者の特性を比較した。

ガス圧力と破壊電圧の関係を図3.8に示す。2つのモデルとも、破壊電圧はガス圧力のほぼ0.6~0.7乗に比例している。また、モデル2のほうがモデル1より約1.2倍破壊電圧が高く、PET被覆の曲率部にできる微小ギャップが小さくなる方が、耐圧を向上させる効果が高いことを示している。以上の結果より、モデル2のシールド構造を採用することとした。また、高压巻線外側のシールドについても、同様の構造を採用することとした。

このモデルの結果は、被覆電極系におけるSF₆ガスの破壊電界はギャップ長が小さい領域では初期電子供給の不足からバッシュエンカーブで決まる理論破壊電界よりも高く

なるということで説明がつけられている。⁽⁴⁾

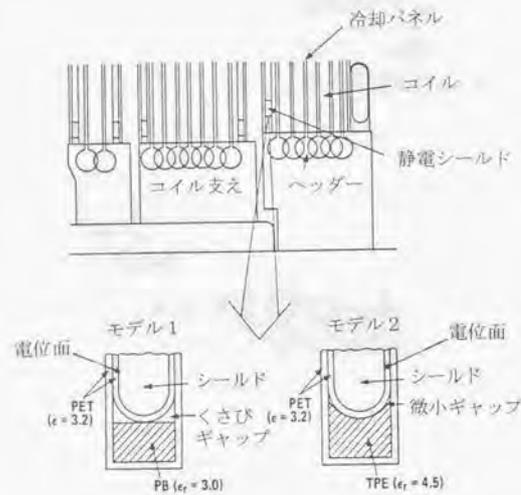


図3.6 巻線主間隙および端部の絶縁構成と主間隙静電シールドの構造

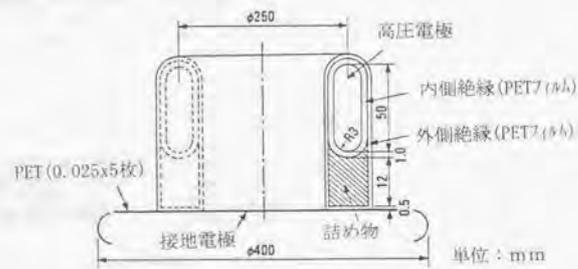


図3.7 静電シールド絶縁モデル

モデル	1	2
断面形状		
材 料	PB	TPE
比誘電率	3.0	4.5

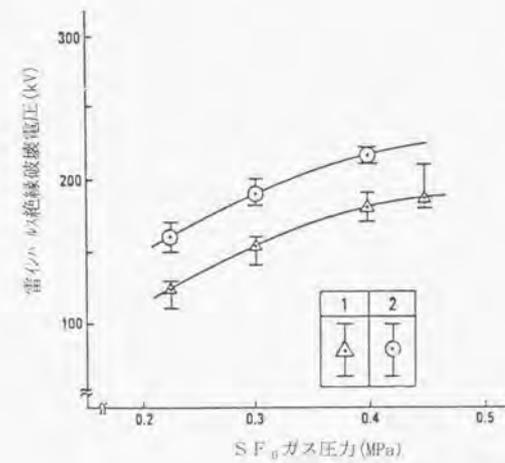


図3.8 絶縁破壊電圧特性

3.5 流動帯電

油入変圧器でも問題となったように、パーフロカーボンを流すことにより流動帯電が問題となる可能性が有る。以下に示す試験により流動帯電について検証した。

3.5.1 パーフロカーボンの帯電特性

静止状態および流動状態におけるパーフロカーボン (FX-3300, 3M社製) の帯電特性を図3.9の試験装置で測定した。電位Vは、入力インピーダンス $10^{15}\Omega$ 以上の静電電圧計で測定した。電荷量Qは、既知の静電容量 C_1 、 C_2 から $Q=CV$ の関係より求めた。流動状態の測定においては、パーフロカーボンを流すパイプの材質としてステンレスまたはテフロン (PFA) を用いた。パーフロカーボンはステンレスパイプの中を流れた場合負に、テフロンパイプの中を流れた場合正に帯電することが確認された。表3.2に静止状態およびステンレスパイプの中を流れた場合の帯電量を示す。帯電度 (帯電電荷密度) は流動状態でも $10\mu\text{C}/\text{m}^3$ 以下であった。

3.5.2 流動帯電検証試験

275kV、3.00MV A器を用いて下記の条件で流動帯電の検証試験を実施した。

- 鉄心は励磁無しおよび110%励磁状態とする。
- ポンプは定格運転と予備も含めて全台運転して冷媒の流量を定格の113%にする条件。
- 試験時間は励磁無し、ポンプ定格運転で6時間、110%励磁、定格の113%流量で24時間。
- ERAメータ (コロナの電荷量と発生位相を測定する装置) とコロナマイクによるコロナの測定 (図3.10) と巻線の中性点漏れ電流および冷媒の流動状態での帯電度 (帯電電荷量) を測定。

表3.3に巻線の中性点漏れ電流測定結果を示す。流動帯電の結果として出てくる中

性点漏れ電流は、 $0.001\mu\text{A}$ であり油入変圧器と比べて2桁以上小さかった。

図3.11に冷媒の帯電度の変化を示す。帯電度は $10\mu\text{C}/\text{m}^3$ 以下で、清浄な絶縁油の帯電度⁽⁵⁾と同程度以下であることが確認された。

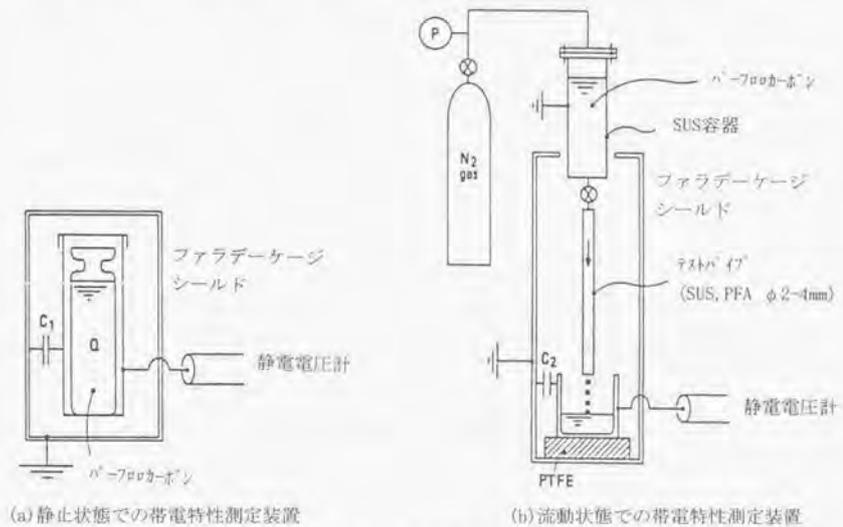


図3.9 流動帯電測定装置

表3.2 パーフロカーボンの流動帯電特性

	静止状態	流動状態 (流速: $2\text{m}/\text{s}$)
帯電電荷密度 ($\mu\text{C}/\text{m}^3$)	-0.4 ~ -0.2	-1.0 ~ -8

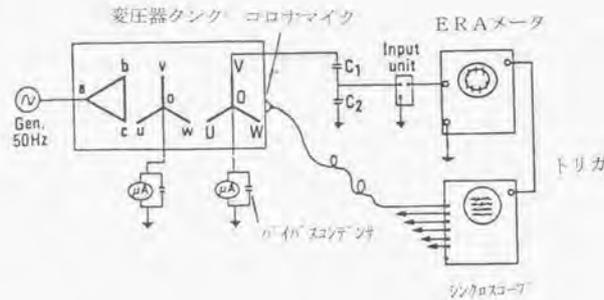


図3.10 流動帯電試験時の測定回路

表3.3 中性点漏れ電流測定結果

流速	励磁率/時間	漏れ電流	
		高圧巻線	中圧巻線
100%	0E*/6h	<0.001μA	<0.001μA
113%	1.1E*/24h	<0.001μA	<0.001μA

* ; Eは規程運転電圧を示す。1.0E=275√3kV

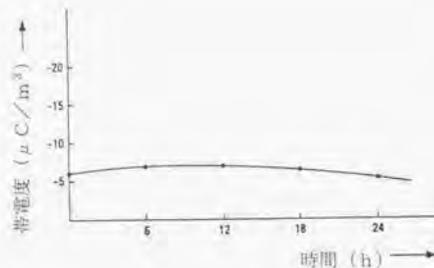


図3.11 パーフロカーボンの帯電度の変化

3.6 実規模モデルおよびプロトタイプ器による絶縁性能検証

基礎研究の結果に基づき実規模絶縁モデルを製作し、セパレート形液冷却式の絶縁性能を検証した。表3.4に定格、諸元を、図3.12に外観写真を示す。

定格ガス圧力は絶縁耐力を高めるために0.4MPa.gとした。ターン間絶縁には、基礎モデルで十分な絶縁耐力を有することを確認した25μmのPETフィルム2枚を用いた。冷却用の冷媒は使用していないが、絶縁構成を模擬するためヘッダーおよびテフロンホースを取り付けた。

完成したモデルは、変圧器規格であるJEC-2200に規定されている交流および雷インパルス耐電圧試験を全てクリアした。(試験電圧は表3.4に記載、交流誘導耐電圧試験で部分放電はバックグラウンド以下。) また、雷インパルスおよび交流誘導耐電圧試験において、120%試験電圧までの過電圧試験を実施し良好な結果を得た。

最後に、2.7節にも述べたようにプロトタイプ器を製作し、冷却関係の試験のほか絶縁試験を実施した。表3.5に絶縁試験の結果を示す。

工場試験終了後、工場内の屋外課電場で3ヶ月間の長期課電を実施した。課電電圧は規程運転電圧の1.2倍である。図3.13に長期課電の試験姿を示す。

ターン間絶縁の基礎モデルの試験結果より、ターン間絶縁のv-tの傾きはn=5.0以上と非常にフラットであることがわかっている。n=5.0として、系統最高運転電圧287.5kVで30年間の運転が、規程運転電圧の1.2倍の課電試験でどの程度の期間と等価であるかを求めると、下記となる。

$$\begin{aligned}
 t^{-1 \times 5.0} &= (30 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60)^{-1 \times 5.0} \times \frac{275 \times 1.2}{287.5} \\
 &= 9.6 \times 10^{-5} \text{ sec} \\
 &\approx 11 \text{ 日間} \quad \dots (3-1)
 \end{aligned}$$

表 3. 4 絶縁モデルの定格と諸元

定格容量	45/3MVA相当		
定格電圧	1次	200/√3 kV	
	2次	66/√3 kV	
試験電圧	1次 AC	460kV	LIWV 1050kV
	2次 AC	140kV	LIWV 350kV
寸法	W4.2×L6.0×H8.7 (m)		
総質量	50ton		



図 3. 12 絶縁モデルの外観

表 3. 5 プロトタイプ器絶縁試験結果

雷インパルス試験	一次	200号接地試験	良
	二次	200号接地試験	良
	二次	200号非接地試験	良
交流耐電圧試験 (加圧)	一次	185kV1分	良
	二次	140kV1分	良
交流耐電圧試験 (誘導)	460kV 30秒		良
長時間交流耐電圧試験	1.5E* 1時間		良

* ; Eは常規運転電圧を示す。1.0E=275√3kV



図 3. 13 プロトタイプ器の長期課電試験姿

従って、セパレート式ガス絶縁変圧器の最も重要なポイントであるターン間絶縁については常規運転電圧の1.2倍で11日間の課電試験で十分な検証が可能である。余裕を見て3ヶ月間の課電試験を行い良好な結果を得た。

3.7 まとめ

セパレート形液冷却式の絶縁特性に関してモデルの試験や解析を実施し、以下の結果を得た。

1. $25\mu\text{m}$ のPETフィルム2枚構成のターン間絶縁について、モデルにより基礎的な特性を把握した。部分放電開始電界の $v-t$ カーブから30年後の部分放電開始電界を推定すると、 $28.7\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ となり、 27.5kV 、 300MVA 級変圧器の運転時のターン間ストレス $4\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ に対して十分な裕度がある。
2. 絶縁フィルムそのものの欠陥の影響や、系統での運転中に受ける熱ストレスや短絡機械力の影響について、小形の巻線モデルにより評価した。PETフィルムに欠陥があると雷インパルス試験で破壊するが、欠陥がない場合、系統での運転中に受ける熱ストレスや短絡機械力に対しても問題ない。
3. 巻線支え、高圧シールドおよびテフロンホース等巻線端部の絶縁耐力を確認した。
4. TPB（熱可塑性エラストマ）の詰め物を取り付けた静電シールドは、PB（プレスボード）の詰め物を取り付けた静電シールドより詰め物と電位面の間にできる微小ガスギャップが小さくなるため約1.2倍破壊電圧が高い。
5. パーフロロカーボンはステンレスパイプの中を流れた場合負に、テフロンパイプの中を流れた場合正に帯電する。 27.5kV 、 300MVA 器を用いて流動帯電の検証試験を実施した結果、巻線中性点の漏れ電流は $0.001\mu\text{A}$ で油入変圧器と比

べて非常に小さいことを確認した。パーフロロカーボンの帯電度は $10\mu\text{C}/\text{m}^2$ 以下で、清浄な絶縁油並以下であることを確認した。

6. 実規模絶縁モデルおよびプロトタイプ器を製作し、セパレート形液冷却式の絶縁性能を検証した。
7. プロトタイプ器を用いて3ヶ月間の長期課電を実施し良好な結果を得た。

第3章の文献

- (1) W.J. McNitt et al. : "Technology Development for Advanced Concepts in Gas-Insulated Power Transformers", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-101, p. 2171 (1982)
- (2) 里, 他 : 「高速表面電荷法」, 電学論A, 101, p. 455 (1981)
- (3) A. Pedersen : "Criteria for Spark Breakdown in Sulfer Hexafluoride", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-89, p. 2043 (1970)
- (4) T. Ishii et al. : "Insulating Characteristics of Small SF6 Gas Gaps under Lightning Voltage", 6th International Symposium on Gaseous Dielectrics, p. 49 (1990)
- (5) 月岡, 他 : 「鈹油系絶縁油の組成と流動帯電特性」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EMI-91 (1980)

第4章 ガス冷却式ガス絶縁変圧器の冷却および絶縁特性

4.1 まえがき

容量が60MVA程度以上の大容量器では、ガスの冷却性能が油入変圧器における絶縁油に比べて劣るため、ガス冷却式の適用は困難と考えられていた。^{(1) (2)}

このため、2、3章で述べたように冷却媒体として不燃性で冷却性能の高いパーフルオロカーボンを用い、絶縁をSF₆ガスで行うセパレート形液冷却式をはじめとした各種の液冷却式のガス絶縁変圧器が開発された。^{(3) (4) (5)}

液冷却式はいずれの方式もガスと液の両方を使うため構造が複雑になる。また、セパレート形液冷却式の場合、大容量になるほど巻線端部の渦電流損失が大きくなることと、巻線の積層方向に熱を逃す構造のため高電圧になるほど巻線のターン数が増え冷却が難しくなるという問題がある。このため、電圧では275kV級、容量では300MVA級が限界で、それ以上の大容量、高電圧は難しい。

それに比べてガス冷却式は、油入変圧器と同様に構造が単純であることや、小容量のガス絶縁変圧器ですでに一般的に用いられている実績のある構造であること、低電圧、小容量から高電圧、大容量までほぼ同じような構造に出来ることから、ガス冷却式により大容量ガス絶縁変圧器が実現できればより望ましいと考えられる。

液冷却式の開発が始められた1970年代後半にくらべて、1980年代後半では絶縁材料技術が進歩し、耐熱性の高いフィルム材料が容易に入手できるようになった。また、計算機の性能向上とソフトウェア技術の進歩により、流体解析技術が飛躍的に進歩し、乱流や渦のある流れの場を詳細に把握できるようになった。筆者はこれらの技術進歩に着目し、大容量器をガス冷却式で実現できることを見出した。そしてその実現のために必要な冷却面、絶縁面の研究開発を行った。

表4. 1に示すように、従来の小容量のガス絶縁変圧器に用いられているガス圧力0. 125MPa・gでは、SF₆ガスは絶縁油に比べて熱容量が約1/200と大幅に小さい。この差が、ガス冷却式では大容量器の実現が難しいと考えられていた最大の理由である。

表4. 1 熱容量の比較

	絶縁油	SF ₆ 0. 125MPa・g	SF ₆ 0. 4MPa・g
比熱(J/g/K)	1. 89	0. 61	0. 62
密度(kg/m ³)	890	1. 4	3. 2
熱容量比	200	1	2. 4

*熱容量 \propto 比熱 \times 密度

筆者は、この熱容量の差を以下の方法によって克服できることを見出した。

まず、表4. 1に示すようにガス圧力を例えば0. 4MPa・gに高めて、熱容量を増やし冷却特性を改善することである。ガス圧力を高めると、熱容量が2. 4倍増えると同時に、熱伝達率も熱容量にほぼ比例して増加する。しかし、実際の巻線は凹凸や曲りがあり複雑な形状をしているため、変圧器の冷却設計のためには、実際の巻線形状に則して冷却特性を求めておく必要がある。そのため、4. 2節に示すようにガス圧0. 4MPa・gにおけるガス流量や熱流束をパラメータとしたSF₆ガスの巻線冷却特性を実験的に求めた。

第二は巻線内部のガス流路構成最適化である。ガス流路構成を最適化し、大量のガスを均一に流すことにより、冷却特性を改善することができる。ガスは絶縁油に比べて粘性が小さい。このため、狭い空間でも流れやすいという特長があり、絶縁油に比べ10倍以上のガスをブローを用いて循環させることが可能である。また、巻線内部の流速を上げ、乱流を促進させて熱伝達率を向上させることも可能である。一方、出入り口や曲

りの圧力損失が流量を決めるため、流れのアンバランスやよどみが起きやすいという欠点がある。絶縁物の劣化は最高点温度で決まるため、流れを最適化して均一に冷えるようにする必要がある。そのため、4. 3節に示すように熱流体数値解析を用いてガス流路構成の検討を行った。解析の適用にあたっては、モデルによる冷却実験と解析を比較し、ガス絶縁変圧器巻線としての解析精度を確認した。その上で、巻線の冷却特性を向上させる流路構成最適化の指針を与えた。

第三の方法は、耐熱絶縁材料の適用である。冷却性能の悪さを補うため、耐熱性の高い絶縁材料を適用し、巻線の温度上昇限度を高める。高分子絶縁材料の技術進歩は目覚しく、耐熱クラスB(耐熱温度130℃)の耐熱PET、耐熱クラスF(耐熱温度155℃)のPEN(ポリエチレンナフタレート)やPPS(ポリフェニレンサルファイド)、耐熱クラスHの芳香族ポリアミド等の絶縁材料が安定して入手できるようになった。本論文では、2. 5節に示した最も安価で、電気的、機械的強度に優れ、安定して入手できる耐熱PETを適用して検討を行った。

ガス絶縁変圧器の巻線間あるいは巻線と大地の絶縁は、基本的にはSF₆ガスの破壊電界に裕度を持たせて設計すれば良い。しかし、巻線内部は絶縁フィルムとSF₆ガスの複合絶縁構成のため、導体間あるいは導体と絶縁物間のくさび状ガスギャップに電界が集中する事になり、絶縁特性を決める。このようなくさび状ガスギャップの破壊電界は、初期電子供給の不足からバッシュェンカーブで決まる理論破壊電界よりも高くなるということが指摘されており⁽⁷⁾、絶縁設計のためには実際の形状に則して絶縁特性を求めておく必要がある。大容量のガス絶縁変圧器は従来のガス絶縁変圧器に比べてガス圧力を高めているため、4. 4および4. 5節に示すように高ガス圧(0. 4MPa・g)のSF₆を封入した条件で巻線のターン間絶縁特性および巻線のセクション間絶縁特性を実験的に求めた。

また、275kV、300MVA器の一相分(0号器)を設計・製作し、大容量ガス絶縁変圧器の冷却性能、絶縁性能および信頼性を検証した。ガス冷却式で大容量器の実

現が可能であることを実証した。

4.2 巻線冷却モデル

4.2.1 モデルの概要

図4.1に高ガス圧力における巻線冷却特性を調査するためのモデルの構造と寸法を示す。巻線は外径 $\phi 1000$ mm、高さ1450 mmで、幅145 mm、高さ15 mmの円板コイルを72段積み重ねた構造である。通電中に巻線から発生する熱はタンク内でSF₆ガスに伝達され、暖められたガスはタンク上方よりブローアを通り、クーラの上方に流入する。クーラによってガスが冷却され、再びタンク下部に戻る構造となっている。ガス流量の制御はガス流量調整弁を用いた。

図4.2に巻線構造を示す。巻線は円板巻線で下部より取り入れられたSF₆ガスはガス止めカラーにぶつかり、コイルの内側と外側をジグザグに流れ上方にぬける構成となっている。巻線のターン間絶縁には、油入変圧器に用いられる絶縁紙（耐熱クラスA）や小容量のガス絶縁変圧器に用いられるPET（耐熱クラスE）に比べて耐熱温度の高い耐熱クラスBのPETを使用した。試験は、ガス圧力0.4 MPa・gの条件で実施した。

図4.3に試験回路を示す。通電には、直流電源を用いた。巻線の電圧と電流から巻線抵抗を求め、銅の抵抗の温度係数から換算して巻線平均温度を求めた（抵抗法）。また、熱電対を取付け、巻線各部の温度を測定した。ガス流量と熱流束（巻線の発生熱量を円板巻線の冷却表面積で除した単位面積当たりの通過熱量。）をパラメータとして試験を実施した。

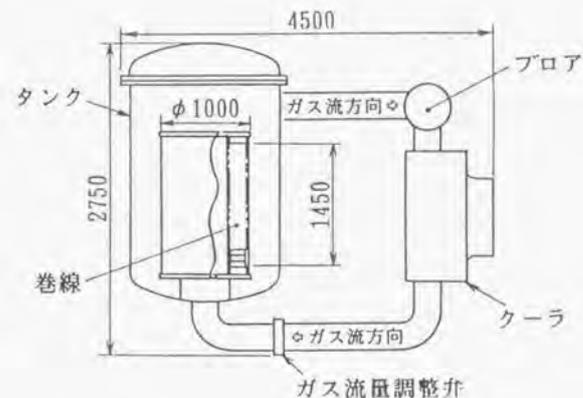


図4.1 巻線冷却モデル

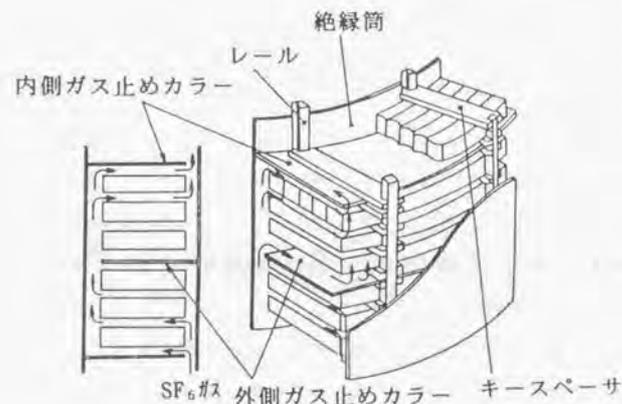


図4.2 巻線構造

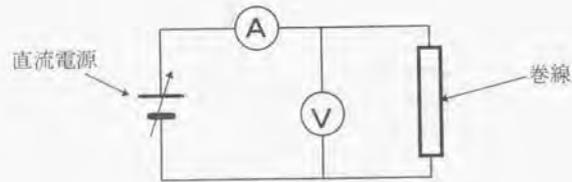


図4.3 試験回路

4.2.2 試験結果

図4.4にガス流量の変化に対する巻線平均温度上昇（抵抗法）の測定値を両対数グラフにプロットした図を示す。ガス流量が大きくなるほど、巻線平均温度上昇は低くなっており、巻線平均温度上昇 ΔT_c とガス流量 Q には、次のような関係式が成り立っていることがわかる。

$$\Delta T_c = \alpha \times Q^{-0.88} \quad (\alpha \text{ は定数}) \dots\dots\dots (4-1)$$

ガス強制冷却の熱伝達率は流速（流量）の0.8乗に比例するとされている。⁽¹⁾本モデルの結果はそれに比べると流速依存性が小さいが、後述のように巻線の一部に逆流や流速の遅い部分があり典型的な乱流熱伝達から外れてくること、絶縁被覆の温度上昇分がバイアスとしてきていくことが考えられる。なお、水平ガス道の平均流速（アンバランスを考慮せずすべて均等に流れたと仮定した流速）はガス流量が $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$ の場合で 2 m/s である。

図4.5に巻線から発生する熱流束に対する巻線平均温度上昇の測定値を両対数グラフにプロットした図を示す。巻線から発生する熱流束が大きくなると、巻線平均温度上昇も高くなり、巻線平均温度上昇 ΔT_c と巻線から発生する熱流束 W には、次のような関係式が成り立っていることがわかる。

$$\Delta T_c = \beta \times W^{0.83} \quad (\beta \text{ は定数}) \dots\dots\dots (4-2)$$

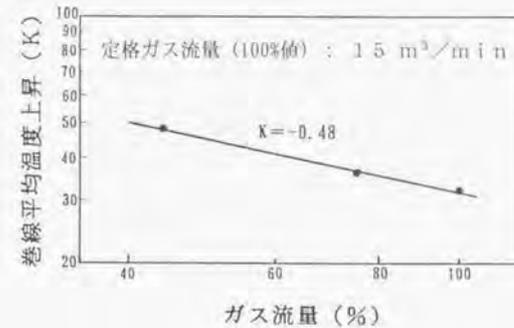


図4.4 ガス流量特性

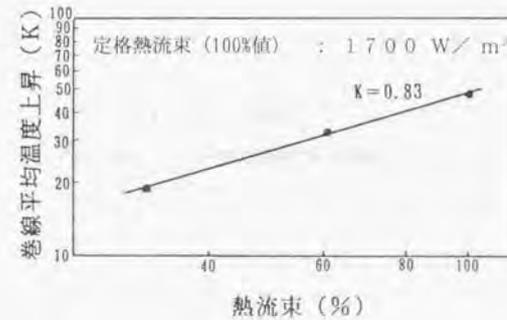


図4.5 熱流束特性

4.3 熱流体数値解析

熱流体の場合、ナビエ・ストークスの式と連続の式が基本的に成立する。これらの式および境界条件から、差分法（SMAC法：流体解析手法の一つである、Marker and Cell法を改良した方法。）による定常状態での熱流体数値解析を行った。また、乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデル（乱流モデルの一つ。運動エネルギーと散逸率から乱流粘性を評価する方法。）を用いた。⁽⁸⁾さらに、変圧器巻線中の SF_6 ガスの流れを渦の状態まで模擬して正確に解析した例はないため、メッシュ幅を SF_6 ガスの乱流の長さスケール約0.2mmに合わせて解析を行った。

図4.6に巻線内の流速、温度および圧力に関する熱流体解析結果を示す。図4.6は、ガス流速を矢印の向きと長さで示している。ガスの流速は、ガス止めカラー下の水平ガス道では速く、逆にガス止めカラー上に近い水平ガス道では遅い。また、ガス止めカラーのすぐ上では、出口から入り口に向かって逆流している様子が観察される。ガス止めカラーの上のガス道でガスが逆流する場合は、文献(7)にも実験結果として報告されている。本解析では、乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを用いさらにメッシュ幅を乱流の長さスケール約0.2mmに合わせたことにより、流れの中に発生する渦や逆流現象まで含めて詳細に解析で求めることができた。

図4.7に4.2節に示すモデルでの巻線内の温度分布（入り口ガス温度に対する巻線温度上昇）を示す。温度は約100点の熱電対を巻線に埋め込み測定した。温度の解析値は、ガスの流速から求めた界面での熱伝達率から、巻線セクションの熱流束一定として、近傍のガス温度に対する温度上昇値を求めた。巻線セクション内部の熱伝導は、本解析では考慮できないので、幅方向の中央（A、B、C点の位置）を代表点として温度を求めた。

A、B、C点における巻線の温度の実測値の平均と解析値は良く一致している。最下端セクションの温度が最も高かったが、ガスの流速がガス止めカラー上に近い水平ガス道で遅いあるいは逆流していることを示している。各セクションにおける半径方向の温

度差は2K以下で、ガスの下流側が高かった。各セクションにおける円周方向の温度差は2K以下であった。これらの結果より、本解析をガス絶縁変圧器巻線のガス流と温度の解析に適用する上での精度が確認された。

熱流体解析は、巻線内の温度分布およびガス流形態を解明する上できわめて有効である。また、これに基づいて巻線内部の流路構成を最適化することができる。解析により検討した結果、下記の知見が得られた。

- (1) 巻線の圧力損失は、9.5%以上が垂直ダクトのガス止めカラー折流部および垂直ダクトと水平ダクトの曲がり部で発生する。
- (2) 水平ダクトの粘性による圧力損失は小さいため無視できる。
- (3) ガス止めカラー間の水平ダクト寸法の合計が垂直ダクトの寸法を超えると逆流やよどみが発生する。

逆流をなくし流れを均一にするには上記の(3)の条件を満足する事が必要である。そのためには、(a) 巻線の垂直ダクト寸法を大きくする。(b) 水平ダクト寸法を小さくする。(c) ガス止めカラー間のセクション数を少なくする。といった方策が考えられる。

一方、ガス止めカラー間のセクション数を少なくするとガス止めカラーの枚数が増え、(1)の条件から巻線の圧力損失が増え、ガス流量が減ることになる。ガス流量が減ると温度上昇が増加するため、ガス止めカラー間のセクション数を少なくすることはかえって逆効果になる可能性もある。巻線の垂直ダクト寸法を大きくすることは、圧力損失低減と流量増加に効果がある。水平ダクト寸法を小さくすることは、粘性が小さいため流量には大きな影響を与えない。

以上の検討により、以下に示す巻線冷却設計最適化の指針が得られた。

- (1) 巻線の垂直ダクト寸法を大きくする。
- (2) 絶縁の許す範囲で水平ダクト寸法を小さくする。
- (3) 巻線の大きさ、ブローの能力等を考慮し、解析を用いてガス止めカラーの取付位置を最適な位置に選定する。

以上の研究により、高ガス圧における巻線冷却特性を把握することおよびガスの流れと温度の解析手法を確立し、巻線内部の流路構成を最適化することが可能になった。なお、ガスの流れに関しては、流れを決める物性値であるレイノルズ数をガスと合わせた水流による可視化モデル実験も行われており、同様の結果が確認されている。⁽⁹⁾

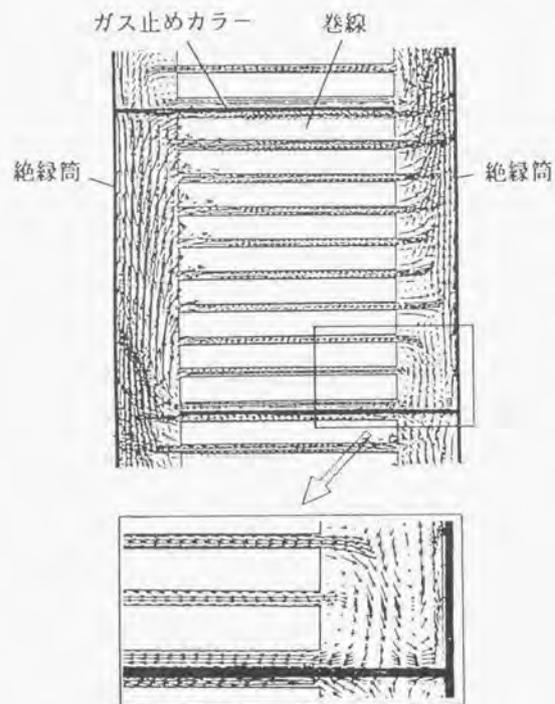


図4. 6 巻線内ガス流速ベクトル図

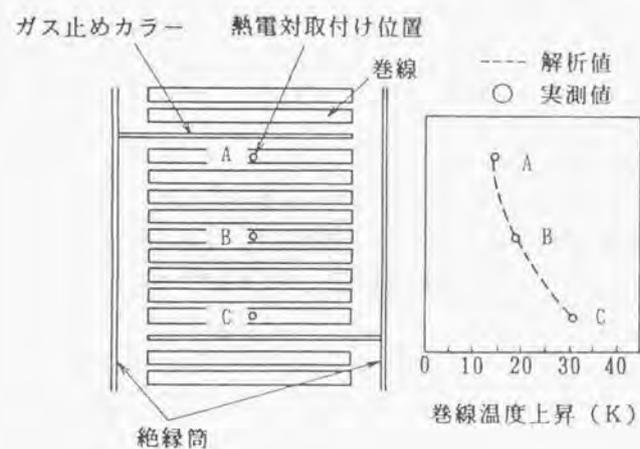


図4. 7 巻線内温度分布

4.4 ターン間絶縁モデル

4.4.1 供試モデルと処理条件

図4.8にターン間モデル形状を示す。モデルは、平角銅線の上にフィルムを巻回し、所定の絶縁厚にした絶縁平角線を5本組み合わせたものを絶縁スペーサで挟んだものである。

モデルは、90°Cで72時間の加熱乾燥をしたのち、10Pa以下の圧力でSF₆ガスを封入して試験に用いた。モデルの個数は、1試験条件5～10個である。

4.4.2 試験方法

雷インパルス(+1, 2/50μs)電圧を印加し部分放電開始電圧を求めた。5本組の各銅線の交互に電圧を印加し、他の各銅線は接地した。試験は予想されるインパルス部分放電開始電圧の約50%から1～2kVステップで電圧を上昇させるステップアップ法によった。インパルス部分放電は銅線の接地側に貫通型の高周波CTを取り付け、電流法のバランス法を用いて測定した。⁽¹⁾⁽²⁾この方法で、電流パルスを時間積分して放電電荷を求めた結果、200pC以上のものから測定できた。

4.4.3 試験結果と考察

図4.9にSF₆ガス圧0.4MPa・gでのターン間モデルの平均インパルス部分放電開始電圧を示す。なお縦軸は、図4.11に示す分圧ありの部分放電開始電圧の飽和電圧を100%として基準化している。部分放電開始電圧は絶縁被覆厚が厚くなるほど上昇する。部分放電発生時には、イメージインテンシファイア使用による観察の結果、ターン間のクサビ部分により生じていると思われる発光が観測された。また、部分放電は電圧のほぼピークで生じた。部分放電開始電圧のばらつきは、標準偏差で3～5%であった。

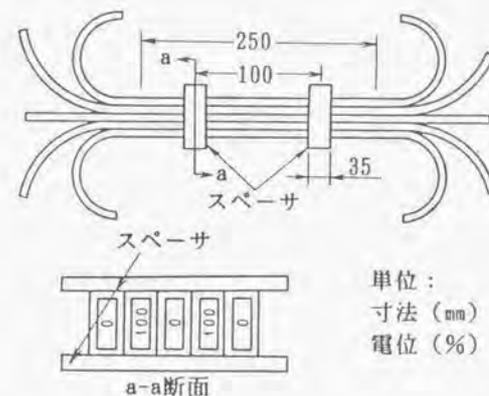


図4.8 ターン間モデルの形状

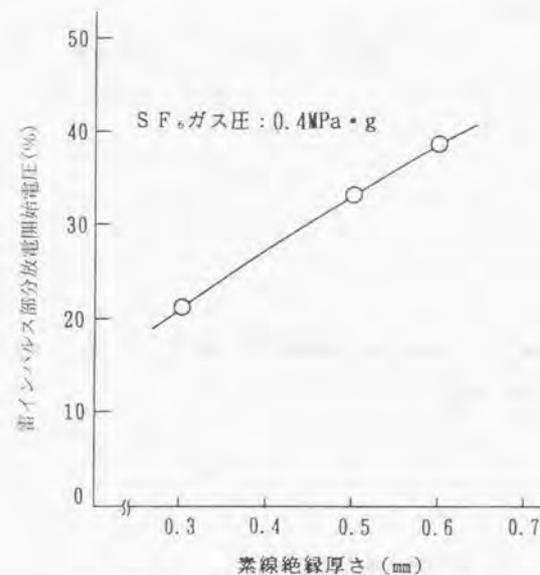


図4.9 ターン間モデルの試験結果

4.5 セクション間絶縁モデル

4.5.1 供試モデルと処理条件

図4.10にセクション間モデルの断面図を示す。モデルは、図4.8のターン間モデルを2組、絶縁スペーサを介して抱き合わせたものである。絶縁スペーサの厚さがセクション間のガス道を構成する。

モデルは、90℃で72時間の加熱乾燥をしたのち、10Pa以下の圧力でSF₆ガスを封入して試験に用いた。モデルの個数は、1試験条件5～10個である。

4.5.2 セクション間モデル試験

セクション間モデルでは、2種類の電圧印加方法によって試験した。1つは、片側5本の銅線を一括して電圧を加え、対向する5本の銅線を接地する方式である（今後この方式を分圧なしという）。他の1つは、ハイセルキャップ円板巻線（電氣的に離れたターンを入り組ませて巻いた巻線。サージに対する電位分布が良好で、高電圧の巻線に用いられる。）のセクション内の電圧分担を模擬したもので、コンデンサ分圧器で分圧した図4.10のような電圧をモデルの各銅線に印加する方式（今後分圧ありという）である。この場合、ターン間にはセクション間最大電圧の1/3の電圧が加わる。

印加電圧は雷インパルス（+1.2/50μs）電圧とし、予想されるインパルス部分放電開始電圧の約50%から10kVステップで上昇させるステップアップ法によった。インパルス部分放電はターン間モデルの試験と同じ電流法のバランス法を用いて測定した。

図4.11にSF₆ガス圧0.4MPa・g、素線絶縁厚さ0.5mmでのセクション間モデルの結果を示す。分圧なしの場合、セクション間距離（絶縁スペーサ厚さ）が広がるほど破壊電圧が上昇している。そして、セクション間1.3mmで部分放電が観測され、他のセクション間では部分放電を観測することなく破壊した。

分圧ありの場合、部分放電開始電圧はセクション間1.3mmでは、分圧なしの結果

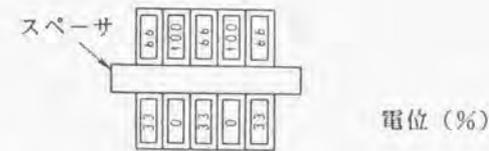


図4.10 セクション間モデルの断面図と電圧印加方法

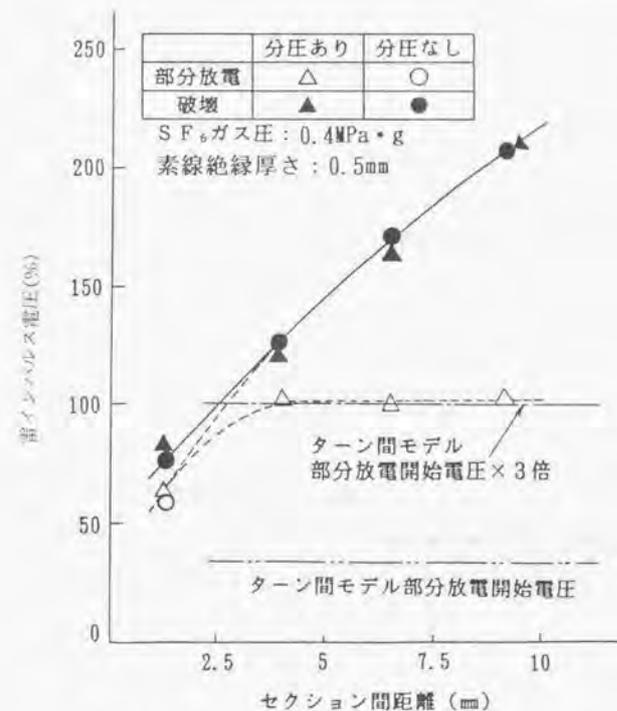


図4.11 セクション間モデルの試験結果

とほぼ一致し、セクション間4mm以上では上昇せず、飽和特性を示している。このように、部分放電開始電圧が飽和傾向を示すのは、飽和領域においては、ターン間から部分放電が発生しているためである。このことはセクション間モデルの部分放電開始電圧の1/3が図4.9のターン間モデルの部分放電開始電圧と一致していることからわかる。また、部分放電開始電圧におけるターン間くさび部の電界は、ターン間モデルとセクション間モデルで一致しており、電界面からも上記のことが確かめられた。一方、セクション間距離が短い場合は、セクション間のガスギャップが破壊するが絶縁被覆が存在するため全路破壊に至らず、部分放電になるものと考えられる。破壊電圧は分圧あり、なしともほとんど差がなく、セクション間距離の増加とともに上昇している。これは破壊が、セクション間のガス道の破壊によって決まっていることを示している。

これらの試験結果から、大容量ガス絶縁変圧器の絶縁設計のための、素線絶縁厚さとセクション間距離の最適な関係を求める指針が得られた。これに基づいて、大容量ガス絶縁変圧器の絶縁設計を行った。

4.6 O号器による冷却および絶縁性能の検証試験

大容量ガス絶縁変圧器の性能および信頼性を最終的に検証するために、上記冷却および絶縁の研究成果に基づき275kV、300MVA器の一相分(O号器)を設計・製作した。表4.2に定格を、図4.12に外観写真を示す。

O号器は冷却絶縁に関する試験として以下の試験を実施し、全ての試験において良好な結果を得た。負荷損失は1次-2次間で518.9kW、無負荷損失は40.0kWと同定格の油入変圧器と同等であった。

(1) JEC-2200に規定される変圧器の性能検証試験。(変圧比、抵抗、絶縁抵抗、誘電体損失角等、変圧器の基本性能を確認する。)

(2) 定格負荷で通電して温度を上げ12時間通電した後、通電を停止して温度を下げるシーケンスを30サイクル繰り返すヒートサイクル試験。(負荷変動や気温の変動により生ずるヒートサイクルで冷却的な問題が生じないか確認する。)試験の前後で巻線温度上昇の変化がないことを確認した。また、ヒートサイクル試験終了後、長時間交流耐電圧試験を実施し、部分放電の発生がないことを確認した。

(3) 表4.2に示す変圧器の絶縁耐力試験。(変圧器の基本絶縁性能を確認する。)

(4) 試験電圧の1.4倍の電圧まで印加した雷インパルス過電圧絶縁試験。(絶縁設計の精度、および製作上のばらつきを含めた絶縁裕度を確認する。)

(5) ガスプロアを運転してガスが循環した状態での雷インパルス耐電圧試験。(実器はガスが流動した状態で使われるため、ガス流動状態での絶縁性能を確認する。)

(6) 巻線漏れ電流やコロナを測定しながらガスを循環させる流動帯電試験。(高圧力のSF₆ガスを流動させても、流動帯電の問題がないことを確認する。ガスの流動では帯電はほとんど生じないが、絶縁物の屑等の異物があるとガス流に乗った粉体が絶縁物に衝突することになり帯電が起きる可能性がある。⁽¹¹⁾)

表4.2 仕様

形式	屋内用送ガス水冷式单相ガス絶縁変圧器	
定格ガス圧	0.4MPa・g	
定格電圧	一次	275/√3kV
	二次	66/√3kV
	三次	21kV
定格容量	一次	100MVA
	二次	100MVA
	三次	30MVA
インピーダンス	2.2%	
試験電圧	一次	AC; 249kV-332kV-249kV LIWV; 950kV
	二次	AC; 140kV LIWV; 350kV
	三次	AC; 50kV LIWV; 150kV



図4.12 275kV, 300MVA0号器

4.7 まとめ

1. ガス圧力を高める。ガス流路構成を最適化し大量のガスを均一に流すおよび耐熱性の高い絶縁材料を適用し巻線の温度上昇限度を高めることにより、ガス冷却式で大容量器が実現可能であることを見出した。
2. ガス圧0、4MPa・gにおけるガス流量や熱流束をパラメータとしたSF₆ガスの巻線冷却特性を実験的に求めた。
3. 熱流体数値解析により巻線内部のガス流および温度分布を解析した結果と実験結果は良く一致した。熱流体数値解析の、ガス絶縁変圧器巻線冷却解析における精度を確認した。
4. 解析により検討した結果、逆流をなくし流れを均一にするためには巻線の垂直ダクト寸法を大きくする、水平ダクト寸法を小さくする、ガス止めカラー間のセクション数を少なくすることが有効であることがわかった。
5. SF₆ガス圧0、4MPa・gでのターン間絶縁のインパルス部分放電開始電圧をモデルの試験によって求めた。
6. SF₆ガス圧0、4MPa・g、素線絶縁厚さ0、5mmでのセクション間絶縁の部分放電開始電圧および破壊電圧をモデルの試験によって求めた。破壊電圧はセクション間のガス道の破壊によって決まっているため、分圧あり、なしともほとんど差がなく、セクション間距離の増加とともに上昇する。部分放電開始電圧は、分圧ありの場合、セクション間4mm以上ではターン間から部分放電が発生するため飽和特性を示す。分圧なしの場合、セクション間1、3mmで部分放電が観測され、それ以上では部分放電を観測することなく破壊した。
7. 以上の結果は、素線絶縁厚さ0、5mmのハイセルキャップ巻線ではセクション間距離を4mm以上にする必要が無いことを示している。大容量ガス絶縁変圧器の絶縁設計のための、素線絶縁厚さとセクション間距離の最適な関係を求める指針が得られた。
8. 275kV、300MVA器の一相分（0号器）を設計・製作した。通電性能や冷却に関する試験を実施し、全ての試験において良好な結果を得た。ガス冷却式で大容量器が実現できることを実証した。
9. 0号器を用いて絶縁性能を確認した。
10. 流動帯電試験を実施し、高圧力のSF₆ガスを高流速で流動させても絶縁上の問題がないことを確認した。

第4章の文献

- (1) 電気学会技術報告, 第459号: 「不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向」(1993)
- (2) 前田, 玉置: 「ガス絶縁変圧器の開発動向」, 電学誌, 106, No. 6, p. 28(1986)
- (3) H. Muramoto, et al.: "Development and Application of the 275kV-300MVA Separate-Cooling/Sheet-Winding Gas-Insulated Transformer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, No. 2, p. 888(1992)
- (4) 長谷川, 他: 「275kV液冷却式ガス絶縁変圧器の開発」, 電学論B, 110, p. 999(1990)
- (5) 和田, 他: 「高電圧大容量変圧器の技術動向」, 日立評論, 70, No. 8, p. 69(1988)
- (6) 熊坂, 他: 「ガス絶縁変圧器における巻線内の流速分布」, 電学論D, 110, p. 1219(1990)
- (7) 乾, 他: 「SF₆ガス中くさびギャップにおける部分放電特性」, 電学論A, 110, p. 126(1990)
- (8) D. Biswas, et al.: "Calculation of Transitional Boundary Layers with an Improved Low-Reynolds-Number Version of the k-ε Turbulence Model", ASME J. of Turbomachinery, Vol. 116, No. 4, p. 89(1994)
- (9) M. Nakadate, et al.: "Gas Cooling Performance in Disc Winding of Large-Capacity Gas-Insulated Transformer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 2, p. 903(1996)
- (10) A. Inui, et al.: "Dielectric Characteristics of Static Shield for Coil-End of Gas-Insulated Transformer", IEEE Trans. EI, vol. 27, No. 3, p. 572(1992)
- (11) 乾, 他: 「SF₆ガスの流動による絶縁物の帯電現象」, 電学論B, 118, p. 563(1998)

第5章 ガス絶縁変圧器の絶縁材料の熱劣化と発生ガス特性

5.1 まえがき

油入変圧器では、運転中の変圧器の異常診断に油中ガス分析が一般的に用いられ、変圧器の運転および保守の指針として役立てられている。また、最近では油中ガス分析による劣化診断や余寿命診断の研究も進んでいる。⁽¹⁾ ガス絶縁変圧器においても異常および劣化をどのように検知するかは変圧器を運転、保守する上で非常に重要であり、SF₆ガス中の400℃の金属過熱でSO₂、F⁻イオン等が発生すること、230℃、290℃のPETの過熱でCO₂、CO、CH₄等が発生しCO₂の発生量が多いこと、放電ではSO₂F₂が多く発生すること、アークではSF₄の発生が多いこと等、先駆的研究成果が報告されている。⁽²⁾⁽³⁾しかし、異常診断、劣化診断は、異常の検知だけでなく、検知されたガスから異常の部位、異常の種類、過熱温度、絶縁劣化の程度等を判定し変圧器内部を診断する事を求められるため、多様な現象を検知、判断するためにはさらなるデータの集積と分析が必要である。

ガス絶縁変圧器では主たる絶縁材料として、コイル絶縁用のPETのほかに油入変圧器に伝統的に使われてきたプレスボードが使われることが多い。本章では、PETおよびプレスボードのSF₆ガス中における過熱に焦点を絞り、これらの材料から発生する分解ガスと温度の関係および発生ガス量と材料劣化の関係について詳細に調査した結果と、得られたデータがどのように絶縁診断に利用できるかを述べる。

5.2 PETフィルムとプレスボードの熱劣化と発生ガス試験

SF₆ガス中での絶縁材料の熱劣化特性を知るために長時間加熱と、絶縁材料から発生する特徴的なガスを知るために高温短時間加熱の二通りの加熱を行った。

5.2.1 試料準備

(1) 長時間加熱試料 (熱劣化特性用試料)

表5.1に示すPET (ポリエチレンテレフタレート) とプレスボードを試料として使った。厚さはPETフィルムが50 μ m、プレスボードが2mmで各々を20mm \times 100mmに裁断し電気炉中で1昼夜100 $^{\circ}$ Cで乾燥した。乾燥した試料は図5.1に示すステンレス容器に各々試料を個別にセットし、封じた後50Pa以下の減圧下で105 $^{\circ}$ Cで2時間の乾燥を行った。続いて大気圧のSF₆を充填した後電気炉中で長時間の加熱劣化を行った。加熱温度は110 $^{\circ}$ C、120 $^{\circ}$ C、130 $^{\circ}$ C、150 $^{\circ}$ C、180 $^{\circ}$ C、200 $^{\circ}$ C、220 $^{\circ}$ C、250 $^{\circ}$ Cである。一定時間経過後絶縁材料から発生したガスを分析するとともに、試料を取り出し、絶縁材料の特性を測定した。

(2) 短時間加熱試料 (発生分解ガス調査用試料)

PETフィルム、プレスボード約20gを3mm角にしたものを準備、50Pa以下の減圧下で2時間60 $^{\circ}$ Cで乾燥した。

表5.1 試料の一般特性

項目	材料	PET フィルム	プレスボード
厚さ	mm	0.05	2.0
密度	kg/m ³	1.39 \times 10 ³	1.1~1.2 \times 10 ³
引張り強さ	MPa	221	131
伸び	%	150	9.3
破裂強度	MPa	132	—
ガラス転移転	$^{\circ}$ C	79	—
比誘電率		2.7	3.6
体積抵抗率	Ω m	>1 \times 10 ¹⁴	>1 \times 10 ¹⁵
絶縁破壊強度	kV/mm	>150	>2.0

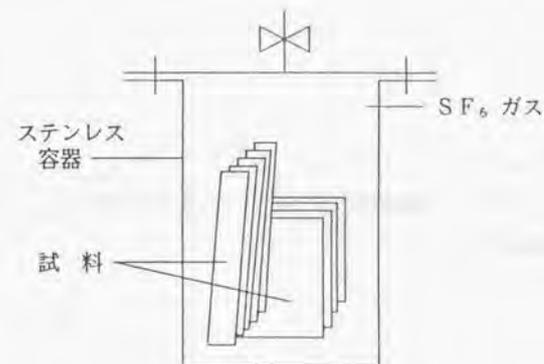


図5.1 試料容器

5.2.2 材料物性の測定とガス分析

(1) 長時間加熱劣化品の測定

絶縁材料については、PETフィルム引っ張り強度の変化とプレスボードの寿命の目安となる平均重合度の変化を測定した。引っ張り強度は引っ張り試験機で平均重合度はJEM-1455（変圧器用絶縁紙の平均重合度測定方法-1990年）に規定された方法によった。

SF₆ガスの分解生成物と絶縁材料から発生する一酸化炭素（CO）、二酸化炭素（CO₂）及び他の有機ガスについてガスクロマトグラフを使って分析した。有機ガスについては一部検知管を使った。

(2) 短時間加熱による発生ガスの分析

短時間加熱による熱分解装置を図5.2に示す。5.2.1(2)により処理された試料をガラス管内に挿入し、管内を窒素置換した後、管の両端のバルブA、Cを閉鎖する。ここでSF₆ではなく窒素を使用するのは、SF₆熱分解ガスによる装置への悪影響を避けて、あくまで有機物の分解のみを検出するためである。次に恒温槽の温度を上げ、試料の温度が所定の温度に到達してから30分保持した後、所定温度を保持したままA、C部を開放してA部から窒素ガスを導入して分解生成物を捕集した。生成物のうち高沸点成分についてはB部（冷却部）に、低沸点成分についてはD部（採気瓶）にそれぞれ捕集した。これらの捕集した生成物をガスクロマトグラフ（GC）及びガスクロマトグラフ/質量分析計（GC/MS）により分析した。

加熱温度は180℃、200℃、250℃、300℃で加熱時間は30分とした。表5.2に分析対象ガスを示す。

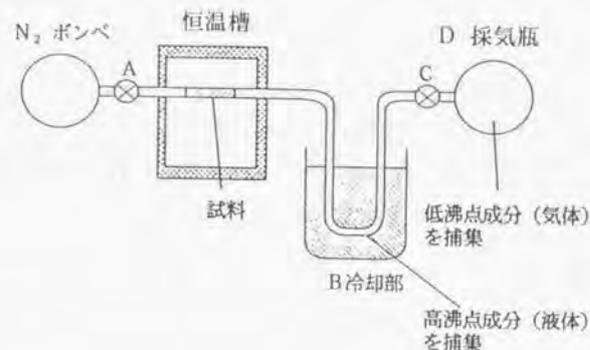


図5.2 熱分解装置

表5.2 分析対象ガス

熱分解条件	GC	GC/MS	分析対象ガス
180℃×30分	○	○	全ての有機物の熱分解生成物
200℃×30分	○	—	H ₂ , CO, CO ₂ , C ₁ ~4の炭化水素類、アセトアルデヒド、アセトン、メチルエチルケトン、メチルイソブチルケトン、アクロレイン、フルフラール
250℃×30分	○	—	メチルイソブチルケトン、アクロレイン、フルフラール
300℃×30分	○	○	全ての有機物の熱分解生成物

5.2.3 長時間加熱の結果と検討

図5. 3に加熱温度130℃から200℃までのPETフィルムの引っ張り強さの変化を、図5. 4に同じく加熱温度130℃から200℃までのプレスボードの平均重合度の変化を示す。PETフィルムの引っ張り強さは温度上昇、加熱時間とともに低下する。130℃では低下は緩やかであるが、150℃以上では急速に低下する。150℃で6ヶ月の加熱で引っ張り強さは初期値の20%以下にもなる。

プレスボードの平均重合度も加熱温度と加熱時間とともに低下する。耐熱性はPETフィルムより低いため低下は速く、130℃では2ヶ月で、150℃では2週間で初期値の50%にまで低下する。180℃では50%になるのはわずか1日である。

PETフィルム、プレスボードどちらからも表5. 3に示すように、CO、CO₂及びアセトアルデヒドといったガスが発生することがGCにより確認された。図5. 5、図5. 6にPET及びプレスボードから発生する単位質量当たりのガス発生量を示す。ガス発生量は加熱時間及び加熱温度とともに増加する。同じ温度で比較するとプレスボードからの総発生量はPETフィルムからの総発生量の10倍以上である。またどちらの絶縁材料の場合にもアセトアルデヒドの発生量はCO及びCO₂の発生量に比べて少ない。しかし全体に占める割合は温度とともに増加する。特にPETフィルムの場合、温度が高くなると、(CO+CO₂)の発生量とアセトアルデヒドの発生量が近くなる。

SF₆の分解生成物として150℃以上でSO₂が検出された。鉄系の金属との共存で、ある程度的高温でSO₂が生成されるという報告例⁽²⁾と一致する。

図5. 7に単位時間、絶縁材料単位質量当たりのガス発生量の温度依存性を示す。前述の通り、プレスボードからのガス発生量がPETフィルムからの発生量より多いこと、アセトアルデヒドの発生量は全体に比べて少ないが、全体に対する比が温度上昇とともに増加すること、温度上昇により発生量が増加することなどが定量的に把握できる。

図5. 8および図5. 9に、PETフィルムの引っ張り強さ残率と(CO+CO₂)発生量の関係、プレスボードの平均重合度残率と(CO+CO₂)発生量の関係を示す。絶縁材料の特性低下とガス発生量の間にはよい相関があることがわかる。逆にガス発生

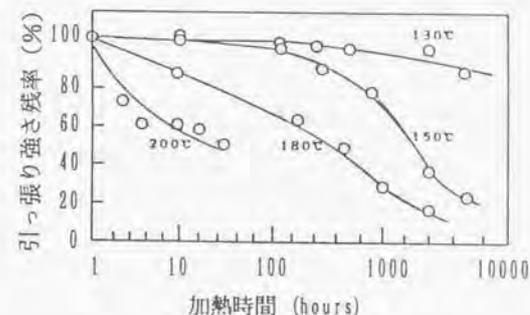


図5. 3 PETフィルムの引っ張り強さの変化

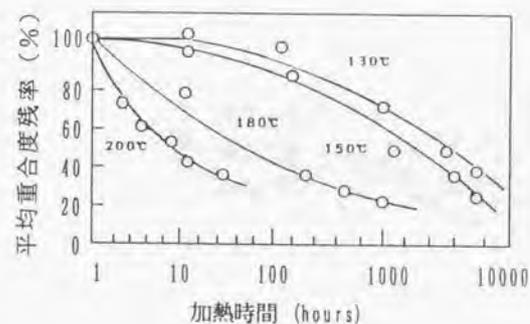


図5. 4 プレスボードの平均重合度の変化

表5.3 検出ガス

温度範囲	検出ガス
110℃-150℃	CO, CO ₂ アセトアルデヒド
150℃-250℃	CO, CO ₂ , SO ₂ アセトアルデヒド

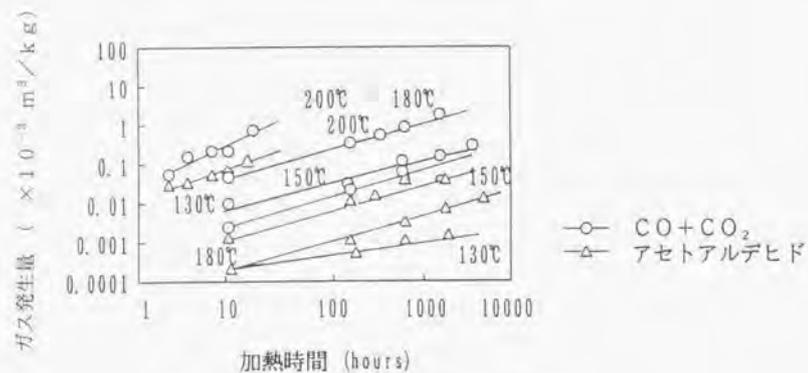


図5.5 PETフィルムからのガス発生量

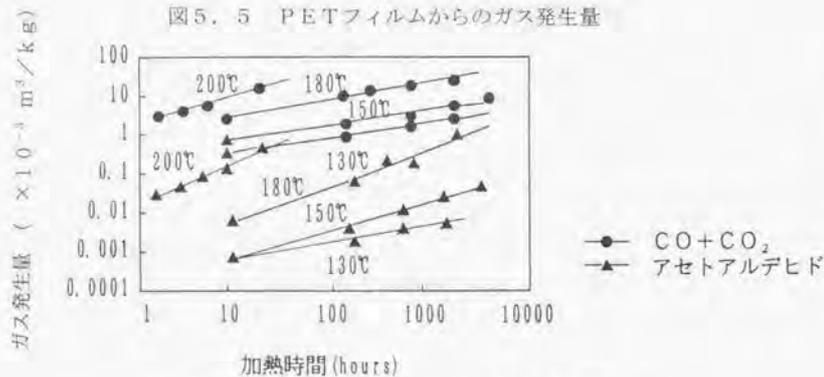


図5.6 プレスボードからのガス発生量

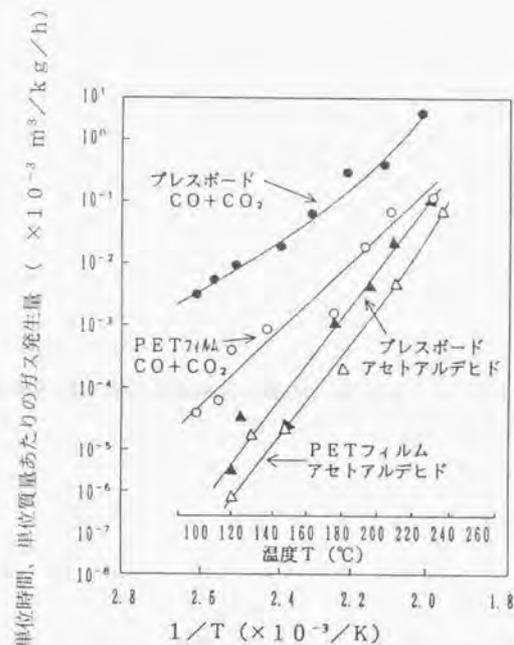


図5.7 単位時間・単位質量当たりのガス発生量の温度依存性

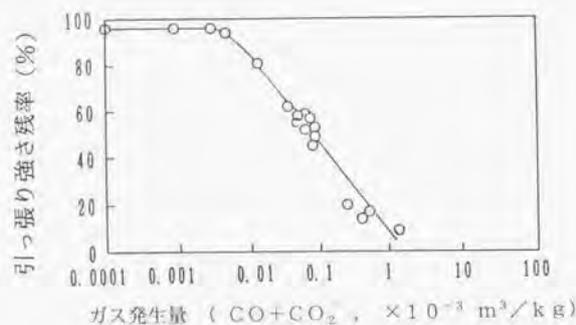


図5.8 PETフィルムの引っ張り強さ残率とガス発生量の関係

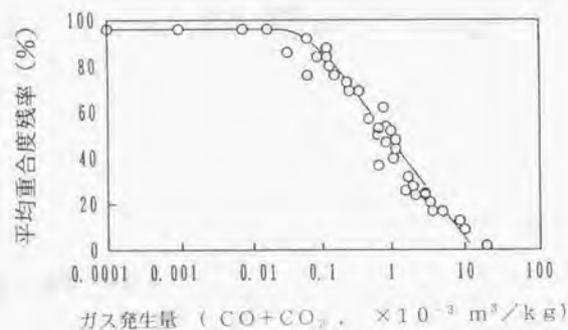


図5.9 プレスボードの平均重合度残率とガス発生量の関係

量がわかれば絶縁材料の劣化の程度がわかることになる。PETフィルムの引っ張り強さ残率及び、プレスボードの平均重合度残率が50%になる時のガス発生量はそれぞれ $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 及び $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ である。

油入変圧器では絶縁紙の特性低下と $(\text{CO} + \text{CO}_2)$ 発生量の間により相関があることが知られているが、SF₆ガス絶縁変圧器においても同様な現象がみられることが明らかになった。また、紙系の絶縁物であるプレスボードだけでなく、PETフィルムについても同様の相関性が得られたことは、興味深い。

5.2.4 短時間加熱の結果と検討

表5.4にGC及びGC/MSでの分析結果を示す。PETフィルムの場合200℃までは主成分はCO₂、アセトアルデヒドであるが、250℃からは僅かながらCH₄、C₂H₄、C₂H₆などの炭化水素が検出された。

一方プレスボードの場合は、180℃ではPETフィルムと同様な成分のほかメチルアルコールが検出された。250℃になるとCO、CO₂が最も多く、次いでアセトアルデヒド、メチルエチルケトン、フルフラール、CH₄からC₃H₈までの各種の炭化水素が検出された。300℃では発生量が急増するとともに、CO、CO₂以外に各種炭化水素、酢酸メチル、アルデヒド類、ケトン類、フラン化合物、フルフラール類などが検出された。フルフラールは沸点が高い(162℃)ため高沸点成分から多く検出された。プレスボードは耐熱性が低いために、ガス発生量がPETよりも多いとともに発生ガスの種類も多い。200℃までは両者ともほぼ同じ成分が発生するが、250℃より高くなるとプレスボードからケトン類の他、フラン、フルフラールおよびその誘導体といった特徴的な成分が加わる。

プレスボードから発生する $(\text{CO} + \text{CO}_2)$ はPETからの発生量の10倍以上であることはすでに述べたが、この実験でもわかるように250℃、300℃では100倍以上にもなる。アセトアルデヒドの発生量もプレスボードは多く、1.5~4.4倍である。

表5. 4 熱分解生成物

単位: $\mu\text{g/g}$

	PETフィルム				プレスボード			
	180℃	200℃	250℃	300℃	180℃	200℃	250℃	300℃
H ₂	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.8
CO	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	27	1000	1200
CO ₂	<0.1	1.3	7.8	54	0.3	390	2200	3000
H ₂ O	400	-	-	470	21000	-	-	2500
CH ₄	<0.1	<0.1	<0.1	1.0	<0.1	1.0	0.6	39
C ₂ H ₄	ND	ND	0.2	1.5	ND	<0.1	0.5	20
C ₂ H ₆	ND	ND	<0.2	0.1	ND	-	0.1	8.7
C ₃ H ₈	ND	ND	ND	ND	ND	-	0.8	16
C ₄ H ₁₀	ND	ND	ND	ND	ND	-	-	2.5
アセトアルデヒド	<1.0	1.3	9.8	32	<1.0	2.9	16	140
プロピオンアルデヒド	ND	-	-	ND	ND	-	-	62
メチルエチルケトン (MEX)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.7	13
その他のケトン類	ND	-	-	ND	ND	-	-	39
アルコール類	ND	-	-	ND	<1.0	-	-	2500
フラン	ND	-	-	ND	ND	-	-	280
メチルフラン	ND	-	-	ND	ND	-	-	340
フルフラール	ND	-	-	ND	ND	-	59	6482
メチルフルフラール	ND	-	-	ND	ND	-	-	1500
ヒドロキシメチル フルフラール	ND	-	-	ND	ND	-	-	3900
エチレンジグリコールア アセテート	ND	-	-	ND	ND	-	-	790
酢酸メチル	ND	-	-	ND	ND	-	-	1300

ND: Not Detected

油入変圧器では絶縁紙及びプレスボードを構成するセルロースの劣化により生成されるフルフラールの量を、劣化診断の指標として使えないのかという研究がなされている⁽¹⁾。フルフラールは沸点が高いために液体として絶縁油中に含まれるが、抽出して液体クロマトグラフにより分析する。今回の実験では発生したガスを冷却して液化して得られた成分のGC/MSによる分析で検出されたものである。抽出方法に差はあるもののガス中からもフルフラールが検出されることは興味深い。

5.2.5 絶縁診断への応用

今回の実験で各温度で絶縁材料の劣化による検出された生成物は表5.5のとおりとなる。

特徴として、250℃を超えるとプレスボードからケトン類、フラン、フルフラール等が発生すること、量的な面では温度が高くなると発生量が多くなること、プレスボードからの発生量が多いこと、特にPETフィルムの場合温度が高くなるとアセトアルデヒドの発生量がCO、CO₂に近づくこと、相関関係ではプレスボード、PET共に材料の特性低下とCO、CO₂の発生量の間により相関があることである。

これらのことから絶縁診断には次のように利用される。

(1) 正常運転

正常運転による劣化によりガス発生があるので、変圧器内の温度分布から正常運転時のガス発生量を予測しておくか、実運転でのガス発生量をデータベースとして作成しておく。

(2) 過熱による異常

正常運転での発生量より多量のガスが発生すれば異常と判断される。さらに前述の通り絶縁材料及び温度によるガス発生の特徴と変圧器内部の設計情報から、異常部位、温度などを推定できる。

(3) 放電による異常

放電の異常があったとき、有機物が関与しない場合にはSF₆の分解生成物であるSOF₂、SO₂F₂が異常のインジケータになり、更に放電に有機物がかかわればCF₄が加わる。この場合絶縁材料は熱的にも異常になるわけであり、加熱による異常で絶縁材料から発生するガスがインジケータとなる。

表5.5 SF₆中の絶縁材料からの発生ガス

温 度	SF ₆ 中のPET からの発生ガス	SF ₆ 中のプレスボード からの発生ガス
110℃-150℃	CO ₂ 、アセトアルデヒド	CO ₂ 、アセトアルデヒド
150℃-180℃	CO ₂ 、アセトアルデヒド、SO ₂	CO ₂ 、アセトアルデヒド、SO ₂
180℃-200℃	CO ₂ 、アセトアルデヒド、SO ₂	CO、CO ₂ 、アセトアルデヒド、SO ₂ 、アルコール
200℃-250℃	CO ₂ 、アセトアルデヒド、SO ₂	CO、CO ₂ 、アセトアルデヒド、SO ₂ 、アルコール
250℃-	CO ₂ 、アセトアルデヒド、SO ₂ 炭化水素	CO、CO ₂ 、アセトアルデヒド、SO ₂ 、炭化水素 ケトン、フラン、フルフラール、酢酸メチル アルコール

5.3 まとめ

ガス絶縁変圧器に使われるPETおよびプレスボードのSF₆ガス中における熱劣化特性と、これらの材料から発生する分解ガスについて調査した。得られた結果の概要はつぎの通りである。

1. PET, プレスボードの両材料とも熱劣化によりCO, CO₂, アセトアルデヒドなどが発生し, その大半はCO, CO₂である。
2. アセトアルデヒドの発生量全体に対する比は加熱温度の上昇とともに増加し, 特にPETフィルムの場合CO, CO₂に近づく。
3. プレスボードからのガス発生量はPETフィルムからの発生量よりも多い。
4. 250℃, 300℃といった高い温度ではプレスボードからケトン類, フラン, フルフラール等の独特のガスが発生する。
5. 熱劣化による絶縁材料の特性の変化はPET, プレスボード共に劣化によるガス発生量と良い相関がある。
6. 温度, 材料の違いなどでガス発生の様子は特徴があり, 絶縁診断の資料として役立つ。

第5章の文献

- (1) 張替, 後藤, 太田, 月岡: 「フルフラールによる油入変圧器の経年劣化診断の研究」, 電学論A, 112, p. 589(1990)
- (2) F. Y. Chu: "SF₆ Decomposition in Gas Insulated Equipment", IEEE Trans. on EI., Vol. EI-21, No. 5, p. 693(1986)
- (3) 向山, 他: 「ガス絶縁変圧器の各種内部異常による主要な分解生成物」, 電学論B, 111 巻, 第12号, p. 1335(1991)

第6章 ガス絶縁変圧器の現状と将来展望

6.1 ガス絶縁変圧器の現状

ガス絶縁変圧器は不燃性、防爆性というユーザーからの要請に応え、小容量から大容量まで広く用いられるようになってきている。製作容量、台数共に年々増加しており、1996年度にはわが国で893台、延べ2493MVAが製作されている。新設の275kV以下の地下変電所用変圧器にはガス絶縁変圧器が採用される場合が多くなっている。

大容量器としては、1989年に図6.1に示す東京電力旭変電所向けセパレート形液冷却式154kV、200MVA器が製作されたのに引き続き、1991年には関西電力枚方変電所向け液流下式275kV、300MVA器および東京電力新坂戸変電所向けセパレート形液冷却式275kV、300MVA器が製作された。また、1994年には東京電力東新宿変電所向けガス冷却式275kV、300MVAが実用化された。1998年3月までに分路リアクトルを含めると15台以上が運転に入っており、そのうち約2/3がガス冷却式で多数を占めている。構造の単純さがユーザーに受け入れられやすいものと考えられる。なお、セパレート形液冷却式は、より優れたガス冷却式が開発されたため製造中止となっている。

以下に、現在までに開発・実用化されている技術について簡単に述べる。

(1) 地下変電所の縮小化・階高低減

油入変圧器に比べてコンサベータが不要、スベーサを介してGISと直結可能な要因により、変圧器の設置容積が大幅に縮小化した。図6.2に1996年製地下変電所用275kV、300MVAガス冷却式ガス絶縁変圧器の外観を示す。また、図6.3に1986年製の地下変電所用275kV、300MVA油入変圧器と比較して寸法、諸元を示す。ガス絶縁変圧器の方が容積で20%、質量で25%と大幅に縮小化している。変圧器室の階高は、構造や現地工事の合理化なども合わ

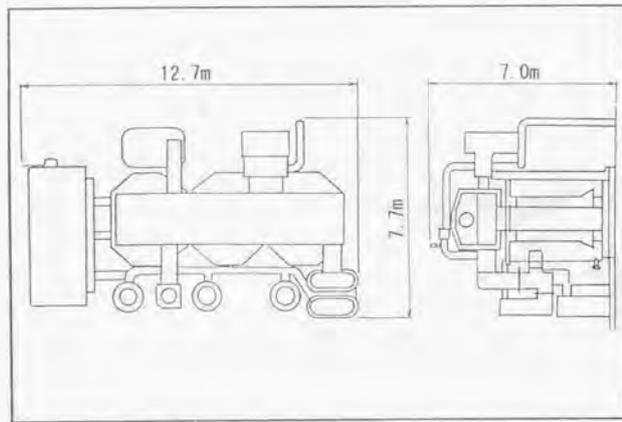
せると9mから6.5mへと大幅に低減し、変電所建設コストの削減に寄与している。



図6.1 154kV, 200MVAガス絶縁変圧器
(セパレート形液液冷却式)



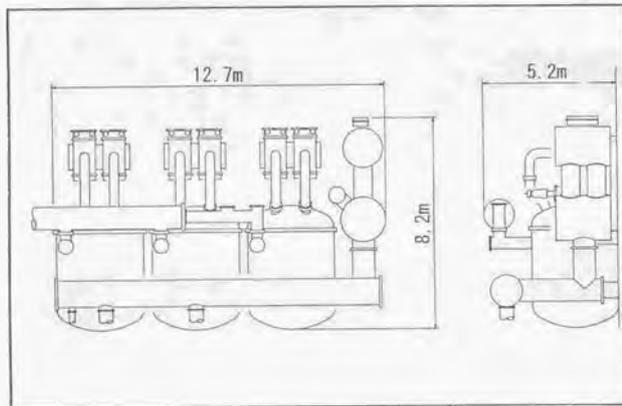
図6.2 275kV, 300MVAガス絶縁変圧器



275kV-300MVA 油入変圧器



総質量 : Δ 25%
設置容積 : Δ 20%



275kV-300MVAガス絶縁変圧器

図6.3 275kV, 300MVA油入変圧器とガス絶縁変圧器の比較

(2) 分路リアクトル

ガス冷却式の275kV, 150MVA分路リアクトルが1995年に完成し、実用運転にはいつている。大容量の分路リアクトルは、ギャップ付きラジアル鉄心に巻線を巻いた構造が一般的である。ガス冷却式は構造が単純なため、ガス絶縁変圧器と同様にガス絶縁分路リアクトルにも応用可能である。高ガス圧のSF₆ガスにより巻線と鉄心を強制冷却とすることでガス絶縁分路リアクトルが実現でき、ガス絶縁変圧器と同様のメリットが得られる。図6.4に構造概念を、図6.5に地下変電所用275kV, 150MVA器の外観写真を、図6.6に外形寸法、諸元を示す。地下変電所用油入分路リアクトルに対して容積で50%、質量で30%と大幅に小形化し、地下変電所のコンパクト化とコスト低減に寄与している。

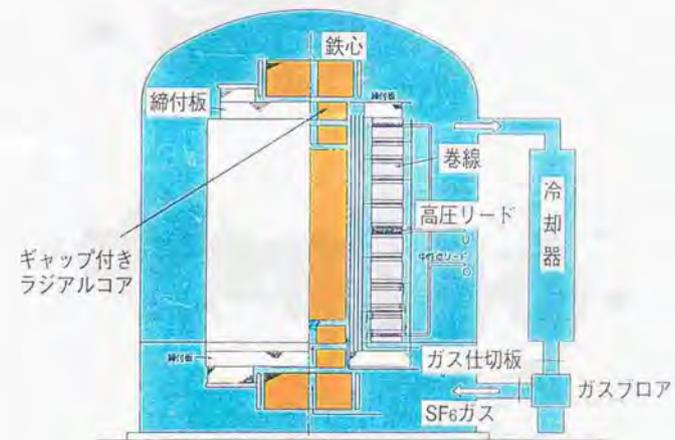
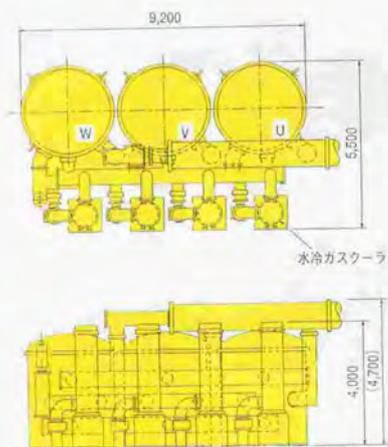


図6.4 ガス絶縁分路リアクトルの構造概念



図6.5 275kV, 150MVAガス絶縁分路リアクトルの外観写真



質 量	93%
設置面積	86%
設置容積	50%

油入リアクトル比

図6.6 ガス絶縁分路リアクトルの寸法、諸元

(3) 500kVガス絶縁変圧器

500kV器の開発が進められている。1998年現在実用化にはいたっていないが、図6.7に示すプロトタイプ器による性能検証などがすすめられている。⁽¹⁾



図6.7 500kVプロトタイプ器

6.2 ガス絶縁変圧器の将来展望

ガス絶縁変圧器はユーザーから高電圧化、大容量化、高信頼性化、保守性・経済性の向上などの様々な要請を受けている。これに応えるため実フィールドでの運転経験を蓄積し、さらに絶縁、冷却、材料、構造、機械強度等の様々な研究開発を続けている。これらの成果が結実し、防災性向上と変電所容積の縮小化という観点から、地下変電所に適用される変圧器の多くはガス絶縁変圧器になるであろう。また、ガス絶縁変圧器は将来さらに以下に述べるような多様な発展をしていくであろう。

- (1) 高電圧化、大容量化はますます進むと考えられる。500kV器についてはプロトタイプ器による性能検証などがすすめられているが、大都市部への500kV系統導入が進むにつれて、基幹系統の送電を担う500kV、1500MVA級のガス絶縁変圧器が実現するであろう。
- (2) 大容量器においては、現在は液冷却式とガス冷却式が混在して用いられている。しかし、構造が単純なガス冷却式がより広く用いられるようになるであろう。
- (3) ガス冷却式では大容量から小容量まで構造が同じであることから、大容量器で開発した先端技術を小容量器に応用するというような技術の融通性が高い。275kVや500kVで開発された技術を適用して低電圧器の縮小化、合理化がいっそう進むであろう。
- (4) コンパクト性の追求ということでは、同じガス機器であるGISとの複合化が進められるであろう。ガス絶縁変圧器やGIS単体の縮小化が進むにつれて、ガス絶縁変圧器のタンクとGISを一体化し、輸送も一体で送るいわばユニット式ガス絶縁変電所というようなものが出現するであろう。これにより、現地での据付工事期間の短縮と変電所の縮小化を図ることができる。このユニット式ガス絶縁変電所は、変電所の新設および増設のみならず、変電所事故時の非常用移動電源設備として使用することも考えられる。

(5) 大都市での変電所の用地難はますます加速され、更にコンパクトな変圧器が求められるようになる。また、重量物輸送はますます困難になっていくであろう。これらに対応するため、油入変圧器では、鉄心、コイル、タンク等を別々に輸送し現地で再組立する変圧器が開発され、輸送問題の解消と据え付けスペースの縮小化を図っている。ガス絶縁変圧器においても同じような要求が出てくると考えられ、分解輸送+現地組立形のガス絶縁変圧器が開発されるであろう。

- (6) 地下変電所用ばかりでなく、屋外用のガス絶縁変圧器が大容量器まで開発されるであろう。市街地に近い変電所では土地の有効利用の観点から、変電所面積の縮小化が求められている。また、緑地を切り開いて造成を行う変電所でも環境保全という観点から、変電所面積の縮小化がより強く求められるようになるであろう。

油入変圧器の場合、変圧器の類焼防止のため防火壁を設けたり、変圧器どうしの間隔を開けたりすることが必要になる。ガス絶縁変圧器を適用することにより、類焼防止対策が不要になり、変圧器のユニット間寸法を縮小し変電所面積を縮小することが可能になる。また、防火壁の省略や防油堤の省略も可能になる。これらは、ガス絶縁変圧器適用のメリットになるであろう。

屋外用ガス絶縁変圧器の実用化のためには、特に冷却器に関して、絶縁油に比べて劣る冷却性能を克服する技術の開発が不可欠である。熱交換器の縮小化技術が一層進むであろう。

- (7) 東アジア地域を中心として、海外での需要が増えるであろう。ガス絶縁変圧器は日本において大きく発展した技術である。国土が狭く人口の密集した都市が多いということがその最大の理由であろう。東アジア地域での電力需要の伸びは著しい。都市部への人口集中から、日本と同様に地下変電所や屋内式の変電所を建設することが不可欠になるであろう。このような場合にガス絶縁変圧器の適用が有効になると考えられる。

第6章の文献

- (1) 鈴木, 他: 「500kVガス絶縁変圧器の開発」, 1996年電学全大, No.1183

第7章 結論

不燃性、防爆性を特長とするガス絶縁変圧器は、ビルの地下や屋内に設置される受配電設備を中心に広く用いられるようになってきている。これらのガス絶縁変圧器は、容量が数十MVA以下で基本的に油入変圧器の絶縁油をSF₆ガスに置き換えた構造をしている。

一方、超高压級の地下変電所に使用される300MVA級の大容量変圧器は、上記の方式ではSF₆ガスの冷却能力が低いので実現できないとされていた。そのため、不燃性の冷媒を使用した液冷却式のガス絶縁変圧器の研究開発が米国やわが国で進められた。

液冷却式としてはいくつかの種類があるがセパレート形液冷却式は、巻線の導体にアルミシートを用い、高分子フィルムをアルミシートと一緒に巻き込んで巻線を形成し、巻線および鉄心に冷却パネルを巻き込み、不燃性の液体冷媒を流して冷却を行う方式である。この方式は、インパルス電圧に対する電位分布が良く、高価な冷媒の使用量を削減できるという特長を持っている。この概念は米国のMorrisらが考案したものであるが、実現のためには多くの課題の解決が必要であり、実用化の域に達しないまま研究が中断していた。これに対して、我々は課題を整理し、モデルによる試験や解析およびプロトタイプ製作、試験を行い以下の結果を得た。

1. シート導体上下端部へ集中する渦電流を解析する手法（上下端部のメッシュ分割を細かくする）を確立した。また、巻線の渦電流損失を約40%低減する実用的な方法を明らかにした。
2. 巻線絶縁材料のPETフィルムは、水分量500ppm（変圧器としての水分管理値）のSF₆中で120℃2万時間以上の寿命を有する。変圧器規格JEC-2200と同様の考え方を適用すると110℃の連続運転で30年程度の寿命が期待できる。
3. シート巻線モデルの熱劣化特性試験から、材料の保管と巻線段階で相対湿度35%以下に管理すれば良い。

4. アルミシートおよびPETフィルムを積層した巻線では、温度計算のためには積層体の SF_6 ガス中における熱伝導率が必要である。モデルを製作して積層体の熱伝導率を測定した結果、素材の熱伝導率の約65%になることを明らかにした。
5. ターン間の部分放電開始電界の $v-t$ カーブは、AC長時間領域で回帰直線を求めると $E = 43.4 \times t^{-1/50}$ で表される。30年後の部分放電開始電界を推定すると、 $28.7 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ で、運転時のターン間ストレスに対して十分な裕度がある。
6. 小型のシート巻線モデルにより評価した結果、PETフィルムに欠陥があると工場雷インパルス試験で破壊するが、欠陥がない場合、系統での運転中に受ける熱ストレスや短絡機械力に対しても問題ない。
7. 変圧器巻線の絶縁は、多数のくさび状の微小なガスギャップが存在する構造になる。モデル実験により確かめた結果、巻線端部や主間隙の耐電圧を向上させるためには、電界緩和用静電シールドの詰め物として、密着性が良く、くさびギャップを埋める形状に成形できるTPEを用いるのが有利である。
8. ハーフロカーボン液の流動によって巻線が帯電し、静電気放電を起こし絶縁破壊に至る可能性があるため、流動帯電特性について調査した。巻線の中性点漏れ電流は、 $0.001 \mu\text{A}$ であり油入変圧器と比べて2桁以上小さい。
9. 実用器と同等のプロトタイプを製作して冷却および絶縁性能を検証した。結果は所要性能を満足しており、セパレート形液冷却式の実現性を実証した。

一方、セパレート形液冷却式は、大容量器ほど巻線端部の渦電流損失が大きくなることと、巻線の積層方向に熱を逃す構造のため高電圧になるほど巻線のターン数が増え冷却が難しくなるという問題がある。このため、電圧では275kV級、容量では300MVA級が限界で、それ以上の大容量、高電圧は難しいと考えられる。

液冷却式の開発が始められた当初に比べて、1980年代後半では耐熱性の高いフィルム材料が容易に入手できるようになった。また、熱流体解析技術が飛躍的に進歩し、

乱流や渦のある流れの場を詳細に把握できるようになった。筆者はこれらの技術進歩に着目し、①ガス圧力を高める、②ガス流路構成を最適化し大量のガスを均一に流す、③耐熱性の高い絶縁材料を適用し巻線の温度上昇限度を高めることにより大容量器をガス冷却式で実現できることを見出した。そしてその実現のために必要な冷却面、絶縁面の研究開発を行い以下の結果を得た。

1. 凹凸や曲りがあり複雑な形状をしている実際の巻線の、ガス圧 $0.4 \text{ MPa} \cdot \text{g}$ における SF_6 ガス冷却特性を実験的に明らかにした。
2. ガスは絶縁油に比べて粘性が小さく出入り口や曲りの圧力損失が流量を決めるため、流れのアンバランスが起きやすいという欠点がある。熱流体数値解析により巻線内部のガス流および温度分布を解析した結果、巻線冷却モデルの温度試験結果と良く一致した。熱流体数値解析の、ガス絶縁変圧器巻線冷却解析における精度を確認した。
3. 解析により検討した結果、逆流をなくし流れを均一にするためには巻線の垂直ダクト寸法を大きくする、水平ダクト寸法を小さくする、ガス止めカラー間のセクション数を少なくすることが有効であることがわかった。
4. SF_6 ガス圧 $0.4 \text{ MPa} \cdot \text{g}$ でのターン間絶縁、セクション間絶縁の部分放電開始電圧および破壊電圧をモデル試験によって求めた。部分放電開始電圧は、高圧巻線に用いられるハイセルキャップ巻線を模擬したモデルの場合、素線絶縁厚さ 0.5 mm でセクション間 4 mm 以上ではターン間から部分放電が発生するため飽和特性を示す。この結果は、セクション間距離を 4 mm 以上にする必要が無いことを示している。素線絶縁厚さとセクション間距離の最適な関係を求める指針が得られた。
5. 275 kV 、 300 MVA 器の一相分(0号器)を設計・製作した。通電性能や冷却に関する試験を実施し、全ての試験において良好な結果を得た。ガス冷却式で大容量器が実現できることを実証した。

ガス絶縁変圧器を運転、保守する上で、異常および劣化をどのように検知するかは重要である。ガス絶縁変圧器の主たる絶縁材料として使われるPETおよびプレスボードの、SF₆ガス中における過熱に焦点を絞り、これらの材料から発生する分解ガスと材料そのものの劣化について詳細に調査し、下記結果が得られた。

1. PET、プレスボードとも熱劣化によりCO、CO₂、アセトアルデヒドなどが発生し、その大半はCO、CO₂である。アセトアルデヒドの発生量全体に対する比は加熱温度の上昇とともに増加し、特にPETフィルムの場合CO、CO₂に近づく。
2. 250℃、300℃といった高い温度ではプレスボードからケトン類、フラン、フルフラール等の独特のガスが発生する。
3. 熱劣化による絶縁材料の特性の変化はPET、プレスボード共に劣化によるガス発生量と良い相関がある。
4. 温度、材料の違いなどでガス発生の様子は特徴があり、絶縁診断に役立てられる。

ガス絶縁変圧器は不燃性、防爆性というユーザーからの要請に応え、広く用いられるようになってきている。本研究の成果として、1989年に東京電力旭変電所向けセパレート形液冷却式154kV、200MVA器が製作された。また、1994年には東京電力東新宿変電所向けガス冷却式275kV、300MVAが実用化された。1998年3月までに分路リアクトルを含めるとわが国全体で15台以上の大容量器が運転に入っており、そのうち約2/3がガス冷却式になっている。ガス絶縁変圧器はまだ発展途上の技術といえる。今後の不断の研究により更にコンパクトで信頼性が高く低価格のガス絶縁変圧器を作り出すことが出来ると確信している。

謝 辞

本論文をまとめるあたり、論文の構成や内容についての懇切丁寧なご指導やげましを賜りました東京大学生産技術研究所教授 石井勝先生に深く感謝の意を表します。論文の作成に当たって有益なご助言とご指導をいただきました東京大学工学部教授 桂井誠先生、同教授 小田哲治先生、同教授 日高邦彦先生、同助教授 大崎博之先生に感謝の意を表します。また、研究の過程において有益なご指導と激励をいただいた芝浦工業大学教授 河村達雄先生に感謝の意を表します。

本研究は(株)東芝の浜川崎工場変圧器部の開発研究として行われました。論文の作成を許可され有益なご助言をいただきました(株)東芝 浜川崎工場工場長 吉田民憲氏、電力・産業システム技術開発センター技監(元浜川崎工場副工場長) 小林伸光氏、浜川崎工場工場長代理 池田久利博士、浜川崎工場技監 矢成敏行博士、変圧器部長 林賢一氏、変圧器部主幹 池田正己博士、同 市川元保氏に心より感謝致します。

ガス絶縁変圧器の研究開発に際して、その方向性を与えてくださり種々の励ましやご助言をいただいた(株)東芝 エネルギー事業本部統括技師長 柳父悟博士、電力事業部長 尾崎康夫氏、エネルギー事業本部主席技監 毛受新一博士、常州東芝変圧器有限公司 総経理 小島剛氏(元浜川崎工場変圧器部長)、浜川崎工場開閉装置部長 村山康文氏に深く感謝致します。また、研究にご協力頂きご指導やご助言をいただいた浜川崎工場変圧器部開発設計グループ、電力・産業システム技術開発センター、研究開発センターおよび電力変電技術部の方々に厚く感謝致します。

本研究に関して発表した論文

2, 3章

- H. Muramoto, T. Yamazaki, T. Oshi, K. Uehara, K. Toda, M. Ikeda, S. Yanabu :
"Development and Application of the 275kV-300MVA Separate-Cooling/Sheet-Winding Gas-Insulated Transformer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, No. 2, p. 888 (1992)

4章

- 高橋英二、田中晃司、戸田克敏、池田正己、寺西常治、稲葉正明、毛受新一 :
「大容量ガス絶縁変圧器の開発」、電気学会論文誌B, Vol. 115-B, No. 4, p. 346 (1995)
- E. Takahashi, K. Tanaka, K. Toda, M. Ikeda, T. Teranishi, M. Inaba, T. Yanari :
"Development of Large-Capacity Gas-Insulated Transformer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 2, p. 895 (1996)

5章

- 戸田克敏、池田正己、石岡康昭、毛受新一 : 「ガス絶縁変圧器の絶縁材料の熱劣化特性」、電気学会論文誌B, Vol. 115-B, No. 4, p. 353 (1995)

