

在来線電車用長寿命VCBの開発



松本 隆**



市原 良和*

交直流電車に搭載している真空遮断器（VCB）は指定保全ごとに真空バルブを交換している。そこで、効率的なメンテナンスをめざすために装置保全まで真空バルブの交換を不要とすることを目標に真空バルブの長寿命化の開発を行った。その対策として①ペローズ山数増加（19山から23山へ）②真空バルブ筒の変更（ガラスからセラミックスへ）③接点材質の変更（Cu-Co系からCu-Cr系へ）を行ったVCBを試作し、無負荷連続開閉試験と有負荷連続開閉試験を実施した。その結果、真空バルブは真空圧力の変化、ペローズのたわみ、電極摩耗などにおいて異常がなく、4万回動作可能であることを確認した。また、VCB機構部はすべての割りピンをハードロックナット化することで4万回動作可能になることを確認した。

●キーワード：交直流電車、真空遮断器（VCB）、ペローズ、セラミック、連続開閉試験

1. はじめに

交流電車や交直流電車に搭載している真空遮断器（Vacuum Circuit Breaker：以下VCB）は、主回路の開閉を行う開閉器の役割を持ち、さらに故障が生じた場合の過電流を遮断する機能も有している。図1にVCB外観を示す。特に交直流セクションを頻繁に通過する常磐線の車両に搭載されているVCBは、年間約6000回開閉動作を行っており、そのVCBの中に組み込まれている真空バルブを指定保全（開閉動作約20,000回、2～3年）ごとに交換している。図2に真空バルブを示す。指定保全ではVCB機構部の分解調査は実施しないため、VCBは真空バルブの交換のみを目的に分解している。そこで、効率的なメンテナンスをめざすため、装置保全（開閉動作約40,000回、4～6年）までVCBの交換を不要とすることを目標に、真空バルブの長寿命化の開発を行うこととした。開発の対象はVCB全体とするが、機構部は可能な限りそのままとして、真空バルブを中心に長寿命化することとした。

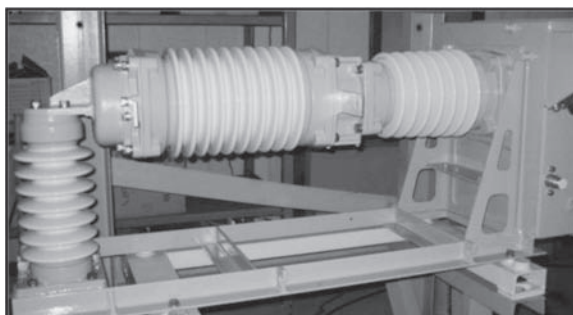


図1 VCB本体

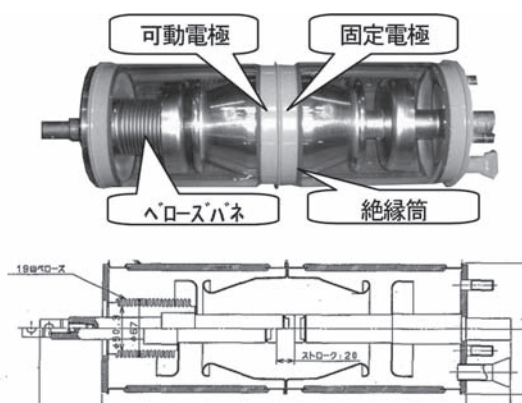


図2 現在の真空バルブ

2. 現行品の劣化要因分析

開発するにあたり、まずは現在の真空バルブの寿命を左右する各構成部品について、劣化要因などを分析することで弱点箇所を明確にした。具体的には、多く開閉動作をした真空バルブを分解し劣化要素を調査した。そこで、実際に現車で使用した真空バルブと現車で使用後さらに無負荷で開閉動作させた真空バルブを調査対象とした。

調査は3本を対象に行い、そのうち2本は6万回以上開閉動作（現車で約2万回、その後4万回以上動作）をさせて真空不良と判定されたものを選定した。また残り1本は2万回未満（現車動作のみ）の良品を選定した。

真空不良と判定された2本のバルブはいずれも真空漏れを起こしていたので、まずはその原因を調査した。

はじめに開閉動作の際に真空バルブで唯一急激な伸縮動作をするペローズ部のX線透視観察・断面組織調査を実施した。その結果を図3に示す。X線透視観察より真空漏れのため内部が大気圧であるためペローズが垂れて見えるもの

の、山ピッチは正常と判断できた。また断面観察の結果、ベローズ肉厚寸法は変化が無く、欠陥は認められなかった。このことから今回の真空漏れの原因はいずれもベローズ部にあるのではなく他の部位にあると判明した。ただし、急激な伸縮動作のためベローズ山部には大きな応力が繰り返し発生していると考えられることから、動作回数を多くしても耐えられるようにするため、本開発ではベローズの対策についても検討することとした。

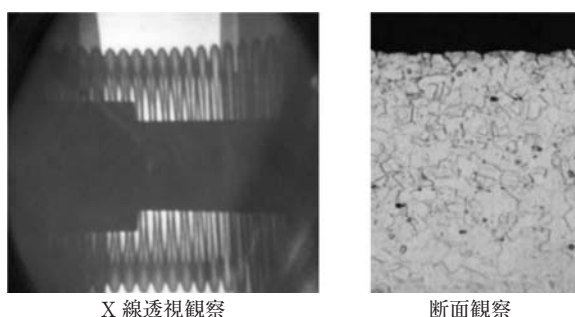


図3 ベローズ部のX線透視・断面組織

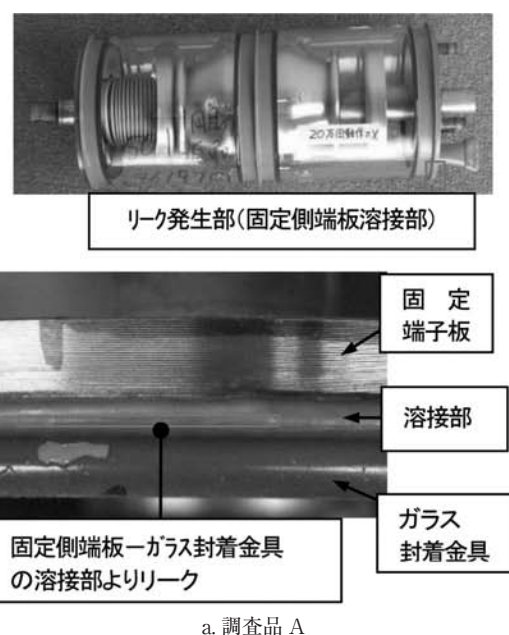
2本ともベローズ以外で真空漏れを起こしているということから、他の部位を調査した結果、いずれも真空バルブの筒で異常を発見した。その結果を図4に示す。1本（調査品A）は、固定側端子板部でリークが発生したことがわかった。固定側端子板部の径方向に沿って約7mmのクラックが発生しており、破面調査結果を見るとストライエーションパターン（疲労破面）の様相を呈しており、亀裂は真空側から大気側に向かっていくことがわかった。もう1本（調査品B）には、銅パイプの内径面に結晶粒界に沿ったクラックが発見された。こちらも調査品Aと同様にストライエーションパターン（疲労破面）の様相を呈していたが、こちらの亀裂は逆に大気側から真空側に向かっていく。これらの結果から、リーク原因はどちらも多数開閉による金属疲労であり、真空バルブの長寿命化のためには、ベローズ対策以外に溶接部および排気管を有しない真空容器構造への変更を検討する必要があることがわかった。

3. 長寿命化に伴う真空バルブと機構部の検討

3.1 ベローズの検討

真空バルブ単体での長寿命化の方法として、開閉動作でベローズに生じる応力負荷を低減させる方法がある。そのために、現行品のベローズの山数（19山）に対して、山数を増やし23山とすることとした。

現行品と長寿命品（開発品）のベローズ特性の比較表を表1に示す。山数を増やすことで使用総応力は12%程度緩和、耐久回数は2倍程度に増加する。このため開閉動作



a. 調査品 A



b. 調査品 B

図4 真空バルブ容器リーク発生箇所調査

による機械的寿命については、現状の倍の回数の目標の4万回を達成することができるベローズになると考える。ただし、これは計算値であるため実際のベローズ製作時の熱影響および開閉時の衝撃の影響を考慮しておらず、実機での検証

表1 現行品と長寿命品のベローズ比較表

	現状品 (19山)	長寿命品 (23山)
使用総応力	858.5N/mm ² (100%)	753.8N/mm ² (88%)
圧力一定耐久回数	611924回 (100%)	1335311回 (218%)
内圧耐力	0.2145MPa (100%)	0.1622MPa (76%)

が必要である。

一方、耐内圧力は24%ほど低下し、開閉動作時のねじりに対する余裕度が低下することがわかった。そのため可動軸は円軸から六角軸とし、可動ホルダーは「ベローズねじり防止ガイド」付の構造とした。

3.2 筒構造の検討

2項の劣化要因分析から、真空バルブの長寿命化には溶接部と吸気管を有しない構造が有効であることがわかった。そこでガラス筒から、金属とのろう付性に優れ、吸気管を持たないセラミック筒を採用することとした。

3.3 電極材質の検討

セラミック筒の採用に伴い、製造法に変更が生じる。ガラス筒の場合、排気管方式となるため溶接後に真空抜き作業をすることになる。それに対し、セラミック筒は炉中封止方式となるため真空炉中でろう付けと同時に真空封止することになる。

この炉中封止方式の実施のため、製造時に高温下に電極をさらす必要が生じる。このため電極材質の変更が必要となる。そこで、ガラス筒ではCu-Co系であったのに対し、セラミック筒とする今回は、耐熱性に優れたCu-Cr系を採用した。Cu-Cr系電極は新幹線用VCBで実績があるが、新幹線と在来線用では主変圧器やケーブルなどが異なることからサージ特性が変わるため、在来線用主変圧器・ケーブルを対象に開閉サージ試験を実施した。その結果、長寿命品（Cu-Cr系）の開閉サージ最大値は現状品（Cu-Co系）の90%程度と小さくなることが確認でき、電極材の変更は主変圧器の絶縁性能に影響を与えないことがわかった。

以上の検討結果を図5に示す。

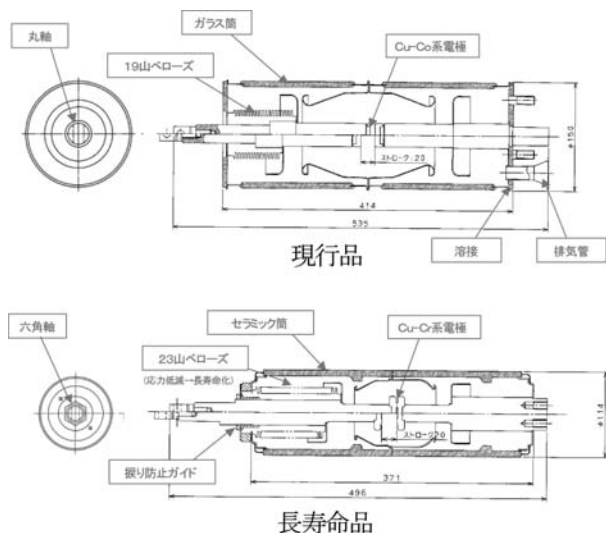


図5 現行品と長寿命品の構造比較

3.4 互換性のある構造検討

現行のVCB本体と互換性を有するために、①極間ストロークについては、変更した場合、機構部に大きな変更が生じてしまうため、現行品の20mmを維持することにした。②固定金具部の基本構造についても、現行品のVCBと同様な構造としたが、一方で固定ホルダ端板を追加しワイプ調整作業が簡易になるように工夫した。③端子金具のバルブ受金具は、バルブ可動端保持金具をガイドする構造に変更した。

3.5 機構部の検討

無負荷開閉動作させたVCBの機構部を調査したところ、各リンクを締結しているピンが脱落しないために使用している割りピンやリセットばねについて、開閉時の衝撃が大きい箇所のあるものがいくつか折損しているのを発見した。そこで、これらの折損対策が必要であることがわかった。

この対策として、特に開閉時の衝撃の大きい以下の3ヶ所を実施した。（図6）

①バルブ連結ピン用割りピン

②40リンクピン用割りピン

→耐振動・衝撃に優れた「ハードロックナット構造」へ

③74リンク用リセットばね

→ストップ金具の強度を向上のため板厚を増大

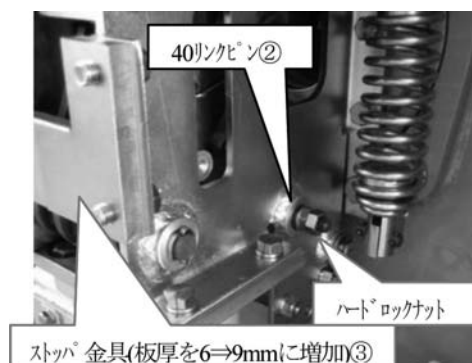


図6 VCB機構部における各種対策

4. 性能確認試験

真空バルブの各部位に対して検討した結果を反映し長寿命真空バルブ（図7）を試作した。

この試作した真空バルブに対し、以下の性能確認試験を

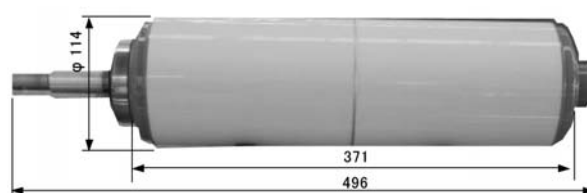


図7 長寿命真空バルブ

実施した。

- ①無負荷連続開閉試験（機械的な寿命を確認する試験）
- ②有負荷連続開閉試験（電氣的な寿命を確認する試験）

4.1 無負荷連続開閉試験

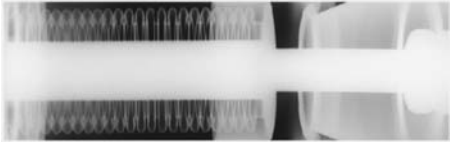
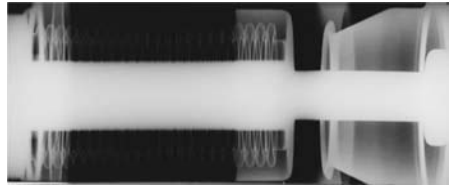
無負荷連続開閉試験は各機械部分の耐久性を検証する試験として、無通電状態で開閉操作を連続して行う試験である。本試験では開閉寿命4万回の検証を実施した。

試験条件としては、2台のVCBを用いて試験を実施し、開閉動作に必要な操作圧力と操作電力は定格値を採用した。試験回数は開閉寿命4万回動作に対し、限界試験を意図して3倍の12万回まで動作させることとした。また、試験の途中には各特性調査や外観検査を行い健全性を確認した。その項目は、①開閉ストローク寸法、②開閉特性、③主回路抵抗特性、④最小動作特性、⑤商用周波数耐電圧、⑥絶縁抵抗測定、⑦外観検査（機構部、真空バルブ）とした。

その結果、各測定項目において管理値内であり、十分に4万回開閉動作が可能であることがわかった。試験後の真空バルブの検査結果を表2に示す。ベローズの変形、真空圧力などの異常は認められなかった。

一方で、機構部の外観検査の結果、対策箇所では割りピンやリセットばねの折損は無く、「ハードロックナット」構造などにより折損の問題を解消できることを確認できたことから、VCBのすべての割りピンに対して対策することで「割りピンレス化」を実現にすることとした。

表2 無負荷連続開閉試験結果

項目	結果
	ベローズのたわみ進展が無いことを確認
X線検査	
	(a) 開閉試験前
X線検査	
	(b) 12万回開閉試験後 真空バルブのX線検査結果
真空圧力	測定値 判定値 $7.6 \times 10^{-6} \text{Pa} < 6.7 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 判定「良」

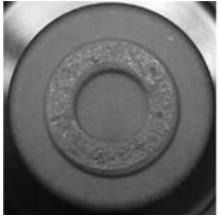
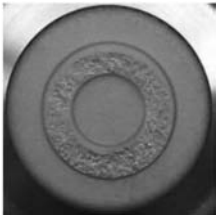
4.2 有負荷連続開閉試験

有負荷連続開閉試験は真空バルブの電氣的な寿命を検証する試験として、主回路に電流を通電して開閉操作を連続して行う試験である。本試験でも開閉寿命4万回の検証を実施した。

試験条件としては、1台のVCBを用いて試験を実施し、負荷電流として定格値より大きな電流値390Aを通電した。また開閉動作に必要な操作圧力と操作電力は、定格値を採用した。試験回数は電氣的な検証であるため4万回まで動作させることとした。無負荷連続開閉試験と同様に、試験の途中には各特性調査や外観検査を行い健全性を確認した。その項目は、①寸法測定、②開閉特性、③主回路抵抗特性、④商用周波数耐電圧とした。

その結果、有負荷連続開閉試験でも、各測定項目において管理値内であり十分に4万回開閉動作が可能であることがわかった。試験後の真空バルブの検査結果を表3に示す。電極消耗量、真空圧力などの異常は認められなかった。

表3 有負荷連続開閉試験結果

項目	結果
外観検査	部品破壊・異常な変形なし
	  可動側 固定側 電極表面観察
全長測定	試験前 496.5mm → 試験後 495.8mm 変化量 -0.7mm > -1.0mm (判定値) 判定「良」
真空圧力	測定値 判定値 $5.3 \times 10^{-6} \text{Pa} < 6.7 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 判定「良」

5. おわりに

以上のように、装置保全（開閉動作約40,000回）まで真空バルブの交換を不要とする既存のVCBと互換性のある長寿命VCBを開発し、各連続開閉試験より4万回動作可能であることを確認した。今後は段階的な現車搭載を計画していきたいと考えている。