

1710 在来線電車用長寿命VCBの開発

松本 隆 (JR 東日本)

正 [電] ○市原 良和 (JR 東日本)

正 [電] 中武 直也 (日立製作所)

Development of the longer operating life VCB for trains

takashi MATSUMOTO, JR-east Co. 1-6-5,yoyogi, shibuya-ku, tokyo City

Yoshikazu ICHIHARA, JR-east Co.

Naoya NAKATAKE, Hitachi Co.

For very large number of switching VCB, a part of the Electric railway vehicles for both AC and DC, the maintenance of the VCB is performed according to the life of the vacuum valve. The vacuum valve is integrated in the VCB.

Aim of reasonable maintenance, in this study, I have developed a long-life vacuum valve. Together to review the internal mechanical weakness VCB, I made improvements.

Keywords : Durability

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ます。写真 1 に VCB の外観を示します。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) ごとに交換しています。写真 2 に真空バルブを示します。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

分解しています。そこで、効率的なメンテナンスを目指すため装置保全 (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ました。開発の対象は VCB 全体としますが、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ました。

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、劣化要因等を分析することで弱点箇所を明確にしました。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ました。そこで、実際に現車で使用した品や現車で使用後さらに無負荷で開閉動作させた品を調査対象としました。

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ました。また残り 1 本は 2 万回未満 (現車動作のみ) の良品としました。

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ましたので、その原因を調査しました。

まず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ベローズ部の X 線透視観察・断面組織調査を実施しました。その結果を写真 3 に示します。X 線透視観察より真空漏れのため大気圧となっているため垂れて見えるものの、山ピッチは正常と判断できました。また断面観察の結果、ベローズ肉厚寸法は変化が無く、欠陥は認められませんでした。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ました。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ため、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ました。

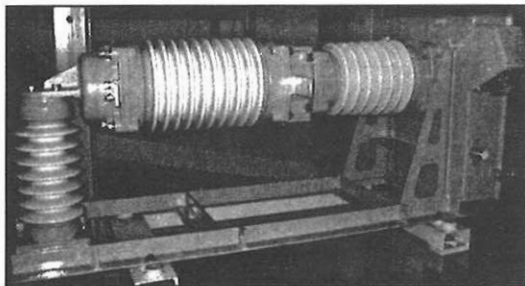


写真 - 1 VCB 本体

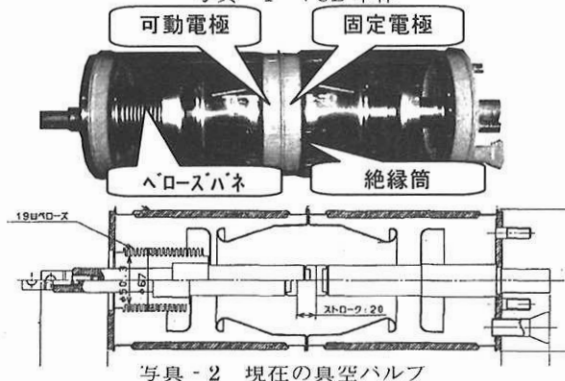
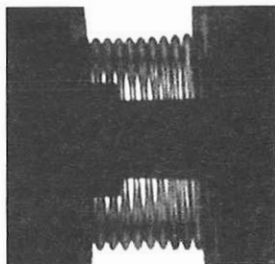
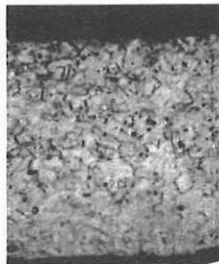


写真 - 2 現在の真空バルブ



X線透視観察



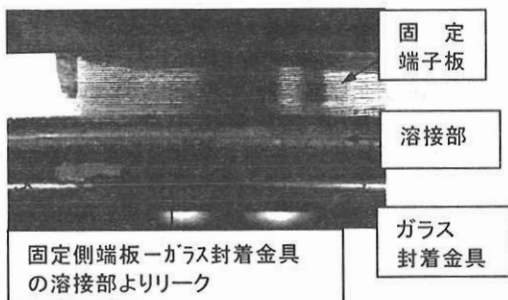
断面観察

写真-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ました。その結果を写真4に示します。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りました。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



リーク発生部(固定側端板溶接)

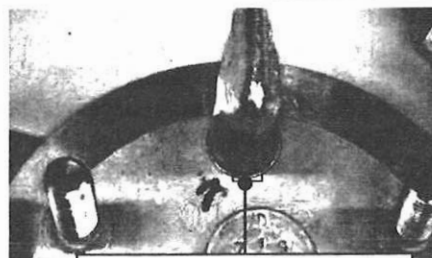


固定側端板-ガラス封着金具の溶接部よりリーク

a. 調査品 A



リーク発生部(排気管ろう付)



排気管ろう付部よりリーク

b. 調査品 B

写真-4 真空バルブ容器リーク発生箇所調査

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ることがわかりました。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ました。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)の様相を呈していましたが、こちらの亀裂は逆に大気側から真空側に向かっていました。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りました。

3. 長寿命真空バルブと長寿命化に伴う機構部の検討

(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ため、現行品のベローズの山数(19山)に対して、山数を増やし23山とすることとしました。

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に示します。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倍程度に増加します。このため開閉動作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ったと考えられます。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、実機での検証が必要です。

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りました。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」付の構造としました。

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	858.5 N/mm ² (100%)	753.8 N/mm ² (88%)
圧力一定耐久回数	611924 回 (100%)	1335311 回 (218%)
耐内圧力	0.2145 MPa (100%)	0.1622 MPa (76%)

(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りました。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化を採用することとしました。

(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ます。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ります。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ります。

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ます。このため電極材質の変更が必要となります。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Cr-Cu系を採用しました。Cr-Cu系電極は新幹線用VCBで実績がありますが、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ました。その結果、長寿命品(Cr-Cu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りました。

以上の検討結果を図1に示します。

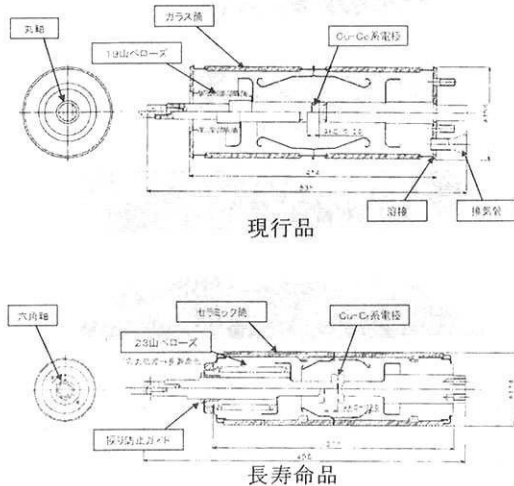


図-1 現行品と長寿命品の構造比較

(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を維持することになりました。②固定金具部の基本構造についても、現行品のVCBと同様な構造としましたが、一方で固定ホルダ端板を追加しワイブ調整作業が簡易になるように工夫しました。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ました。

(5) 機構部の検討

無負荷連続開動作させた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ものはいくつか折損しているのを発見しました。そこで、これらの折損対策が必要であることがわかりました。

この対策として、特に開閉時の衝撃の大きい以下の3箇所に実施しました。(写真5)

- ① バルブ連結ピン用割りピン
- ② 40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
- ③ 74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

5. 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を試作しました。写真6に示します。

この試作した真空バルブに対し、以下の性能確認試験を実施しました。

- 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(電気的な寿命を確認する試験)

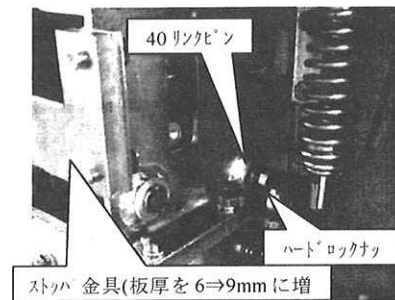


写真-5 各種対策

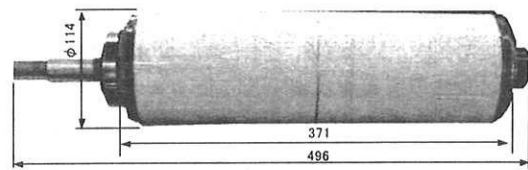


写真-6 長寿命真空バルブ

(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す。本試験では開閉寿命4万回の検証を実施しました。

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ました。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ました。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ました。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)としました。

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りました。試験後の真空バルブの検査結果を表2に示します。ペローズの変形、真空圧力などの異常は認められませんでした。

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」構造等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ました。

(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気的な寿命を検証する試験として、主回路に電流を通电して開閉操作を連続して行う試験です。本試験でも開閉寿命4万回の検証を実施しました。

試験条件としては、1 台の V C B を用いて試験を実施し、負荷電流として 390 A を通電しました。また開閉動作に必要な操作圧力と操作電力は、定格値を採用しました。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ました。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ました。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ました。

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りました。試験後の真空バルブの検査結果を表 3 に示します。電極消耗量、真空圧力などの異常は認められませんでした。

6. 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 V C B と互換性のある長寿命 V C B を開発し、無負荷連続開閉試験と有負荷連続開閉試験を実施して、開発した真空バルブが機械的・電氣的な開閉寿命 4 万回に対して問題ないことを確認しました。また、V C B 機構部の割りピンやリセットばね折損の問題は、ハードロックナット構造化等により解消できることを確認しました。

現在、実用化に向けて長寿命 V C B を現車に搭載し、継続して検証・評価を行っています。

表-2 無負荷連続開閉試験結果

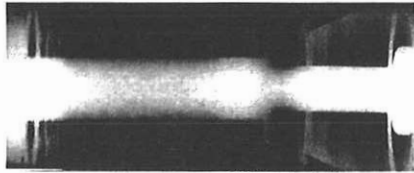
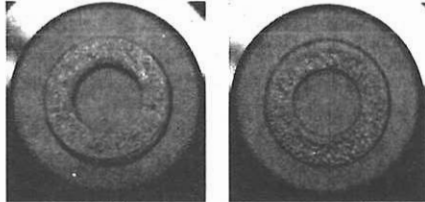
項目	結果
X線検査	ベローズのたわみ進展が無いことを確認 
	(a) 開閉試験前  (b) 12 万回開閉試験後 真空バルブの X 線検査結果
真空圧力	測定値 判定値 $7.6 \times 10^{-6} \text{ Pa} < 6.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 判定 「良」

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 $-0.7 \text{ mm} > -1.0 \text{ mm}$ (判定値) 判定 「良」
真空圧力	測定値 判定値 $5.3 \times 10^{-4} \text{ Pa} < 6.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 判定 「良」