

高圧六フッ化硫黄ガス (SF₆) 中で使用する リレーのためのスクリーニング試験

Screening Test of Relays used under Pressurized Sulfur Hexafluoride(SF₆)

沓掛 健一 松田 誠 花島 進 小原 建治郎*

Kenichi KUTSUKAKE, Makoto MATSUDA, Susumu HANASHIMA
and Kenjiro OBARA*

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

January 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

高圧六フッ化硫黄ガス(SF₆)中で使用するリレーのための
スクリーニング試験

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
原子力科学研究所 研究炉加速器管理部
沓掛 健一・松田 誠・花島 進・小原 建治郎*

(2007年11月19日受理)

原子力科学研究所の東海タンデム加速器の高電圧端子内部に設置されている計測・制御装置は0.5MPaの六フッ化硫黄ガス(SF₆)中で運転される。本スクリーニング試験は、これらの装置に大電流を投入・遮断するためのリレーとして大気仕様のリレーの中から0.5MPaのSF₆ガス雰囲気でも使用可能なリレーを選ぶことを目的に実施した。

試験に供したリレーは機械式リレー(EMR)、マグネットコンタクター(MAG)、半導体リレー(SSR)、ハイブリッドリレー(HYB)の4種類である。測定項目はリレーの温度と試験前後の外観変化である。また、走査型電子顕微鏡(SEM)及びエックス線分析装置(EDS)による接点表面の観察と元素分析を行い接触不安定性の原因を推定した。

その結果、EMRとMAGの場合、操作コイルへの入力電圧・電流が正常であるにも関わらずSF₆の分解ガスと周辺金属材料との反応に起因する硫化物あるいはフッ化物により接触障害が生じた。一方、SSR、HYBについては大気仕様であるにも関わらず安定した動作を示し、0.5MPaのSF₆ガス環境下でも使用できることがわかった。

Screening Test of Relays used under Pressurized Sulfur Hexafluoride (SF₆)

Kenichi KUTSUKAKE, Makoto MATSUDA, Susumu HANASHIMA and Kenjiro OBARA*

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator, Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 19, 2007)

Many measurement and control devices inside of a high voltage terminal of the JAEA-Tokai tandem accelerator are operated under pressurized sulfur hexafluoride gas (SF₆) of 0.5MPa. This screening test has been carried out to select a relay, which is usable under the pressurized SF₆ for turn on and off a large current of the devices, from commercial relays used in the atmospheric condition.

Four kinds of relays were tested: electromechanical relay (EMR), magnet contactor (MAG), solid-state relay (SSR) and hybrid relay (HYB). Temperature and appearance changes of the relay were collected as measurement items. In addition, a reason of contact trouble of the relays was considered from the results of qualitative elementary analysis and observation of the contact surface using the EDS (energy-dispersive X-ray spectroscopy) and the SEM (scanning electron microscope).

As a result, the EMR and the MAG showed irregular contact in spite of input voltage and electric current had fed to an operational coil of the relay normally. It is caused by the sulfide or fluoride compounds, which were formed by chemical reaction between metals and sulfur or hydrogen fluoride due to dissociation of SF₆ in electric arcs. On the other hand, the performance of the SSR and the HYB is better than the EMR and the MAG, and it was found that these relays are available in the pressurized SF₆ of 0.5MPa in spite of the standard specification.

Keywords: Tandem Accelerator, Pressurized Sulfur Hexafluoride, Relay, Electric Arc, Silver Sulfide

* Nippon Advanced Technology Co., Ltd

目 次

1. 背景と目的	1
2. 試験内容	1
2.1 試験用リレーの仕様	1
2.1.1 小型汎用リレー	2
2.1.2 高感度コンタクター	2
2.1.3 ソリッドステート・コンタクター	3
2.1.4 ハイブリッド・パワーリレー	4
2.2 SF ₆ ガスの特性	4
2.3 試験方法	6
2.3.1 試験装置の概要	6
2.3.2 試験条件及び測定項目	6
3. 試験結果	11
3.1 小型汎用リレー	11
3.2 高感度コンタクター	17
3.3 ソリッドステート・コンタクター	21
3.4 ハイブリッド・パワーリレー	25
4. 試験後観察結果	31
4.1 小型汎用リレー	31
4.1.1 目視による外観観察	31
4.1.2 走査型電子顕微鏡 (SEM) と X 線分析装置 (EDS) による接点表面の観察及び元素分析	32
4.2 高感度コンタクター	38
4.2.1 目視による外観観察	38
4.2.2 走査型電子顕微鏡 (SEM) と X 線分析装置 (EDS) による接点表面の観察及び元素分析	38
5. 考 察	42
5.1 小型汎用リレー	42
5.2 高感度コンタクター	44
5.3 ソリッドステート・コンタクター	46
5.4 ハイブリッド・パワーリレー	47
6. まとめ	49
謝 辞	52
参考文献	52

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	1
2.1 Specifications of relays.....	1
2.1.1 Electromechanical relay.....	2
2.1.2 Magnetic contactor	2
2.1.3 Solid state relay.....	3
2.1.4 Hybrid relay	4
2.2 Properties of SF ₆	4
2.3 Testing method.....	6
2.3.1 Outline of testing equipment	6
2.3.2 Test conditions and measurement items.....	6
3. Test results.....	11
3.1 Electromechanical relay.....	11
3.2 Magnetic contactor	17
3.3 Solid state relay.....	21
3.4 Hybrid relay	25
4. Observation results after the test	31
4.1 Electromechanical relay.....	31
4.1.1 Appearance changes by visual inspection.....	31
4.1.2 Observation by SEM, and elemental analysis by EDS of contact surface.....	32
4.2 Magnetic contactor	38
4.2.1 Appearance changes by visual inspection.....	38
4.2.2 Observation by SEM, and elemental analysis by EDS of contact surface.....	38
5. Discussion	42
5.1 Electromechanical relay.....	42
5.2 Magnetic contactor	44
5.3 Solid state relay.....	46
5.4 Hybrid relay	47
6. Conclusion.....	49
Acknowledgement.....	52
References	52

1. 背景と目的

日本原子力研究開発機構（JAEA）・原子力科学研究所の東海タンデム加速器（以下、加速器）の高電圧端子内部には種々の機器、計測・制御装置（以下、装置）が設置されている¹⁾。これらの装置は、高電圧下での電気絶縁性の確保やアークの消弧対策として高電圧端子を収納する圧力タンクに加圧（0.5MPa）・充填された六フッ化硫黄ガス（SF₆ガス）中で運転される。従って、これらの装置に電源を投入・遮断するためのリレーには、0.5MPaの圧力やSF₆ガスの分解によって生成される各種分解生成物による影響を受けないよう密封形（ハーメチックシール形）のリレーを使用することが基本となるが、一方で電源容量や周波数（高電圧端子内装置に供給される電源周波数は基本的に400Hz）、形状寸法、入手方法、価格等の観点から国内外の製品を含め最適な仕様のリレーを容易に入手することが困難な場合がある。

上記観点から本スクリーニング試験は、仕様の選択範囲が広く、低価格で入手の容易な50/60Hz対応の非密封形（大気仕様）のリレーを対象に、当面の課題として0.5MPaのSF₆ガス雰囲気の中でこれらのリレーを作動させた時の雰囲気による影響を調べることを目的に実施した。

2. 試験内容

2.1 試験用リレーの仕様

試験には有接点リレー、無接点リレー、ハイブリッドリレーの中から、電氣的に3相200V対応で投入・遮断電流が10A程度、操作電圧がDC24V仕様のリレーを選択した。有接点リレーは電磁作用によって接点を機械的に開閉させるもので構造上、ヒンジ形、プランジャー形、リード形がある。無接点リレーはトライアック（triode AC switch、TRIAC）をはじめとする種々の電子部品で構成されたリレーで、電力の“入”“切”は電子回路にておこなう。また、ハイブリッドリレーは有接点リレーと無接点リレーそれぞれの長所を組み合わせたもので電力の“入”“切”は電子回路で、電力通電には可動接点を利用する。

本試験では、有接点リレーの中からヒンジ形の小型汎用リレー*とプランジャー形の高感度コンタクター*を、無接点リレーにはソリッドステート・コンタクター*、ハイブリッドリレーにはハイブリッド・パワーリレー*をそれぞれ採用した（*商品名）。

- ・小型汎用リレー : EMR** (electromechanical relay)
- ・高感度コンタクター : MAG** (magnetic contactor)
- ・ソリッドステート・コンタクター : SSR** (solid state relay)
- ・ハイブリッド・パワーリレー : HYB** (hybrid relay) (**便宜上の英文略称)

以下に各リレーの主な仕様を示す。

2.1.1 小型汎用リレー：EMR (electromechanical relay)

- 1) 型 式 : LY3-D、オムロン製
- 2) リレー (コイルサージ吸収用ダイオード形)
 - ・接点構成 : 3 極
 - ・接点材質 : 銀合金
 - ・接触抵抗 : 50mΩ 以下
 - ・定格負荷
 - 接点電圧の最大値 : AC 250V
 - 接点電流の最大値 : 10A
 - 接点構成 : 3 極 (3A、3B)
 - 最大開閉頻度 : 機械的 18,000 回/h (5 回/sec)
電氣的 1,800 回/h (1 回/2sec)
 - 機械的耐久性 : 5,000 万回以上 (開閉頻度 18,000 回/h)
 - 電氣的耐久性 : 20 万回以上 (開閉頻度 1,800 回/h)
- 3) 操作コイル
 - ・定格電圧 : DC24V
 - ・コイル抵抗 : 410Ω
 - ・動作電圧 : 定格電圧の 80%
- 4) 使用環境
 - ・温度/湿度 : -25°C ~ +40°C / 5~85%RH
- 5) 概略寸法・重量
 - ・寸 法 (mm) : タテ 27、ヨコ 30、高さ 35
 - ・重 量 (g) : 50

2.1.2 高感度コンタクター：MAG (magnetic contactor)

- 1) 型 式 : J7AN-E3、オムロン製
- 2) コンタクター
 - ・接点構成 : 4 極 (1 極は補助接点)
 - ・定格電流 : 15A
 - ・負荷容量 : 1.5kW8A (3φ200V 用モーター)、15A (抵抗負荷)
 - ・接点構成 : 4 極 (3A+1a (補助接点))
 - ・接点开閉頻度 : 1,800 回/h r (1 回/2 sec)
 - ・電氣的耐久性 : 100 万回 (JEM1038 による試験条件)
 - ・機械的耐久性 : 1,000 万回 (開閉頻度 1,800 回/h)

- ・接触抵抗 : 50mΩ以下
- 3) 操作コイル
 - ・定格電圧 : DC24V
 - ・コイル抵抗 : 731Ω
 - ・動作電圧 : 定格電圧の80%
- 4) 使用環境
 - ・温度/湿度 : -10℃～+55℃ / 35～85%RH
- 5) 概略寸法・重量
 - ・寸法 (mm) : タテ 50、ヨコ 50、高さ 70
 - ・重量 (g) : 200

2.1.3 ソリッドステート・コンタクター：SSR (solid state relay)

- 1) 型式 : G3J-211BL、オムロン製
- 2) リレー
 - ・接点構成 : 3極
 - ・定格使用電圧 : AC100～240V
 - ・負荷電圧範囲 : AC75～264V
 - ・定格負荷電流 : 11.1A (40℃)
 - ・動作時間 : 1ms以下
 - ・復帰時間 : 負荷電源の5/6サイクル+1ms以下
 - ・出力オン時電圧降下 : 1.6V (RMS)以下
 - ・漏れ電流 : 10mA以下 (AC200Vにて)
 - ・サージオン電流耐量 : 350A
 - ・絶縁抵抗 : 100MΩ以上 (DC500Vメガにて)
 - ・耐電圧 : AC2,500V 50/60Hz 1min
 - ・適用負荷 : AC100V～240V、11.1A (抵抗負荷の場合)
- 3) 操作コイル
 - ・定格電圧 : DC12～24V
 - ・使用電圧範囲 : DC9.6～28.8V
 - ・動作電圧 : DC9.6V以下
 - ・復帰電圧 : DC3.6V以上
- 4) 使用環境
 - ・温度/湿度 : -30℃～+60℃ / 45～85%RH
- 5) 概略寸法・重量

- ・寸法 (mm) : タテ 80、ヨコ 80、高さ 90 (ヒートシンクを含む)
- ・重量 (g) : 約 700

2.1.4 ハイブリッド・パワーリレー : HYB (hybrid relay)

- 1) 型式 : G9H-210S、オムロン製
- 2) リレー
 - ・接点構成 : 1 極
 - ・動作時間 : 10ms 以下
 - ・復帰時間 : 1/2 サイクル+10ms 以下
 - ・出力オン時電圧降下 : 1.6V (RMS) 以下 (10A にて)
 - ・漏れ電流 : 5mA 以下 (AC250V にて)
 - ・サージオン電流耐量 : 170A
 - ・温度上昇 : 50℃以下
 - ・絶縁抵抗 : 100MΩ 以上 (DC500V メガにて)
 - ・耐電圧 : AC2,000V 50/60Hz 1min
 - ・機械的耐久性 : 1,000 万回以上 (開閉頻度 18,000 回/h)
 - ・電氣的耐久性 : 1,000 万回以上 (抵抗負荷、開閉頻度 1,800 回/h)
 - ・定格負荷電圧 : AC100V~240V
 - ・負荷電流 : 50mA~10A (55℃にて)
- 3) 操作コイル
 - ・定格電圧 : DC24V
 - ・コイル抵抗 : 2,400 Ω
 - ・動作電圧 : DC19.2V 以下
- 4) 使用環境
 - ・温度/湿度 : -25℃~+60℃ / 35~85%RH
- 5) 概略寸法・重量
 - ・寸法 (mm) : タテ 27、ヨコ 20、高さ 35
 - ・重量 (g) : 約 25

2.2 SF₆ ガスの特性

SF₆ ガスが絶縁性ガスに使用される理由として次に示す特長があげられる。

- ・絶縁耐力が大きく (絶縁破壊強度は空気の 2 倍 (大気圧))、アークの消弧能力に優れる。
- ・空気、窒素の混入による絶縁特性に顕著な低下はない。
- ・化学的に安定で使用可能な温度領域が広い。

- ・総括熱伝達が大きいため冷却効果に優れる。

一方で、熱分解により有害なフッ素化合物の蒸気、硫黄酸化物を生成することが知られており、これによるリレーへの悪影響が懸念される。以下に SF₆ の物理的、化学的性質と共に主な特徴について述べる²⁾。

1) 物理的、化学的性質

・形 状	: 常温、常圧において気体
・色	: 無色
・臭い	: 無臭
・pH	: 非該当
・沸 点	: -64°Cで昇華する
・融 点	: -50.8°C
・引火点 (°C)	: なし
・発火点 (°C)	: なし
・爆発限界	: 下限 (%) なし、 上限 (%) なし
・蒸気圧 (MPa)	: 2.21 (20°C)
・密 度	: 飽和液体密度 1.91g/ml (-50°C)
・溶媒に対する溶解性	: 5.45ml/l H ₂ O (0.1MPa)
・その他	: 蒸気密度比 5.1 (空気=1)

2) 主な特徴

・安定性	: 室温では安定
・反応性	: ジシランと接触すると激しく爆発する。また、熱分解により有害なフッ素化合物の蒸気、硫黄酸化物を生成する
・有害性	: 加熱分解しなければ実際上は無毒。高濃度の気体は酸欠に注意を要する。液状 SF ₆ との接触では凍傷を起こす。 高温物体の表面又は裸火と接触した場合、毒性の強いフッ化水素酸、フッ素を含む気体及び硫黄酸化物を生じる。これにより気道を刺激し、肺気腫の危険が生じる
・物理的、化学的危険性	: 圧縮ないし液化不燃性の気体である。放置された液体は非常に速く気化する。気体を放出すると、急速に大量の冷たい雰囲気を生じ周囲に拡散する。その気体は空気よりも重く地表にとどまる

2.3 試験方法

リレーに接続される負荷は、一般的には抵抗負荷と誘導負荷に大別されるが、本スクリーニング試験では、入力電源は商用の3相 200V・50Hz、接続負荷は抵抗負荷（テープヒーター）とし試験の簡素化を図った。以下、試験装置の概要と測定項目について述べる。

2.3.1 試験装置の概要

Fig. 2.3.1 に試験装置の全体図を示す。試験体であるリレーはその都度ステンレス製の架台にネジ止め、あるいは専用のソケットに差し込み容量約 12ℓ のステンレス製試験用チャンバー (①) に収納した。リレーの電源、操作電圧、温度はそれぞれの導入端子 (②) を介して入出力、温度センサーには側温抵抗体を使用した。リレーには総容量 6kW のテープヒーター (③) を接続し、内作したパルス入力制御用ボード (⑤) から操作電圧 (DC24V) を所定の周期で入力した。入出力側それぞれの電圧・電流はアナログ式のメーター (④) にて測定、記録した。なお、操作電圧はオシロスコープ、温度はペンレコーダーにてそれぞれ監視、測定した。チャンバーへの SF₆ ガスの導入に際してはロータリーポンプ (⑧) にて大気を排出した後、SF₆ ガスボンベ (⑦) から圧力ゲージ (⑥) で監視しながら 0.5MPa まで SF₆ ガスを導入した。

Fig. 2.3.2～2.3.5 にチャンバーに挿入される前の EMR、MAG、SSR 及び HYB を示す。それぞれのリレーは 1 回の試験で 1 体ずつステンレス製の架台に取り付けたが、HYB の場合、接点構成が 1 極であるため、三相交流電源対応として 3 体のリレーを取り付けてある。また、EMR の最初の試験では参考のため、無通電状態のリレー 1 体を加えたため図中では 2 体となっている。Fig. 2.3.6 にパルス入力制御用ボードとパルス入力モニター用のオシロスコープ、タイマーを示す。ボード上段は 1 サイクル/64 秒、中段は 1 サイクル/1.62 秒の操作信号を出力し、操作時間はタイマーで設定される。Fig. 2.3.7 はモニターされた入力パルス波形を示す。なお EMR の試験では、1 サイクル/1 秒での試験も実施したが、信号発生器には WAVETEK MODEL 801 を使用した。

2.3.2 試験条件及び測定項目

試験は以下に示す試験条件の中から主に“雰囲気”と“接点開閉頻度”を組み合わせで行った。また予備試験の結果から、試験時のリレーの挙動はリレー本体の温度変化に顕著であることが分かったため、試験中はリレー本体の温度変化を中心に電圧/電流、チャンバー圧力について測定した。なお、温度はレコーダーに連続して記録したが、電圧/電流、チャンバー圧力については適宜、目視にて読み取り・記録した。また、試験後測定として EMR と MAG の接点表面の元素について定性分析を行った。

1) 試験条件

- | | |
|---------|--------------------------------------|
| ・ 雰囲気 | : 大気*または 0.5MPa の SF ₆ ガス |
| ・ 温度/湿度 | : 成り行き (制御なし) |
| ・ 電気負荷 | : 無負荷または抵抗負荷 (6kW) |

- ・接点開閉頻度 : 1 サイクル*/1 秒、1.62 秒、64 秒

*パルス入力ボードからの操作電圧 ON/OFF を 1 サイクルとした。

2) 測定項目

- ・入力側電圧/電流 : 1 相分を監視、記録
- ・出力側電圧/電流 : 1 相分を監視、記録
- ・温度 (リレー本体、周辺) : 合わせて 3 測定点以内を監視、記録
- ・チャンバー内部圧力 : 監視、記録
- ・試験後外観/表面観察 : 目視
カメラ (IXY DIGITAL 400、キヤノン製)
SEM (走査型電子顕微鏡 S-4300 日立製)
- ・接点表面元素分析 : EDS (X 線分析装置 EDAX-Poenix EDAX 製)

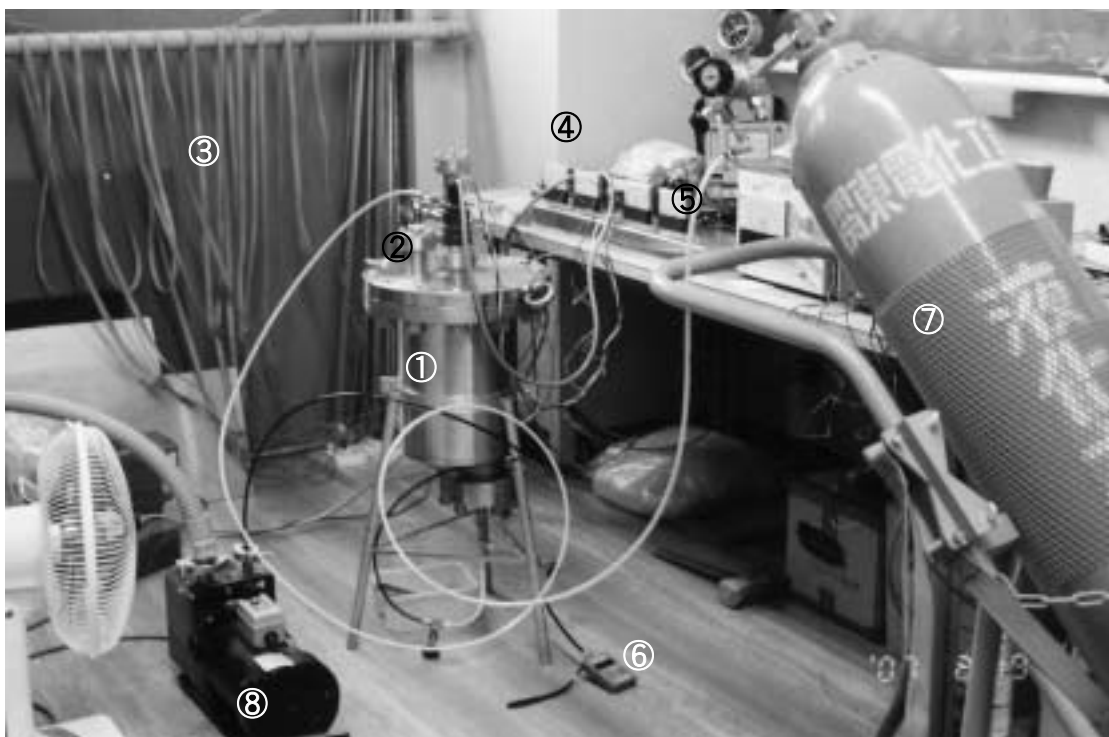


Fig. 2.3.1 Configuration of the test-stand for the screening test. 1. Test chamber; 2. Feed through; 3. Electric load (tape-heater); 4. Voltage and current meters; 5. Operation signal input board and measuring instruments; 6. Pressure gauge; 7. SF₆ gas cylinder; 8. Rotary pump.

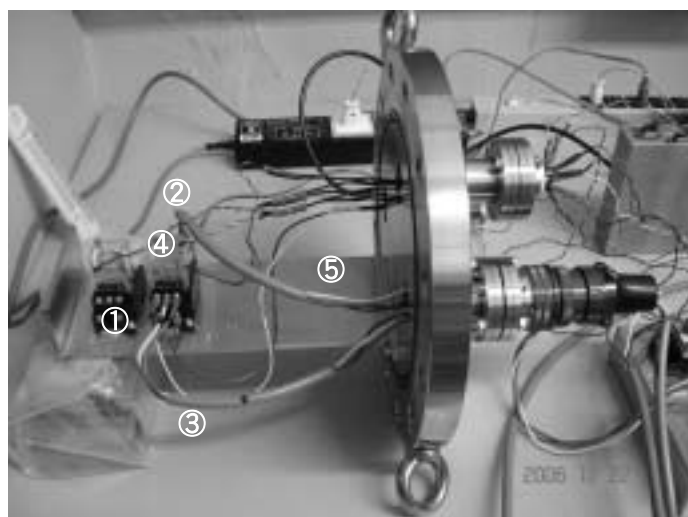


Fig. 2.3.2 EMR (electromechanical relay) installed on the test-stage. 1. EMR (LY3-D); 2. Power input cable; 3. Power output cable; 4. Resistance thermo sensor; 5. Fitting stage.

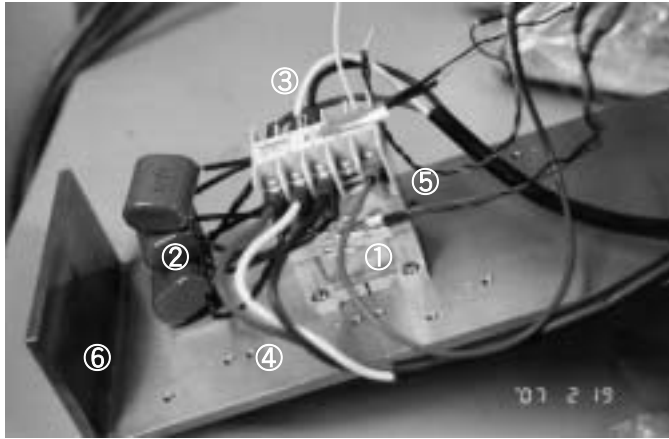


Fig. 2.3.3 MAG (magnetic contactor) installed on the test-stage. 1. MAG (J7AN-E3); 2. Snubber circuit (option). 3. Power input cable; 4. Power output cable; 5. Resistance thermo sensor; 6. Fitting stage.

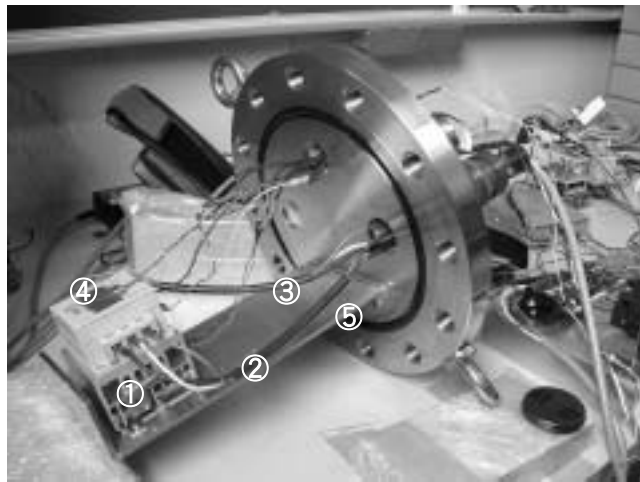


Fig. 2.3.4 SSR (solid state relay) installed on the test-stage. 1. SSR (G3J-211BL); 2. Power input cable; 3. Power output cable; 4. Resistance thermo sensor; 5. Fitting stage.

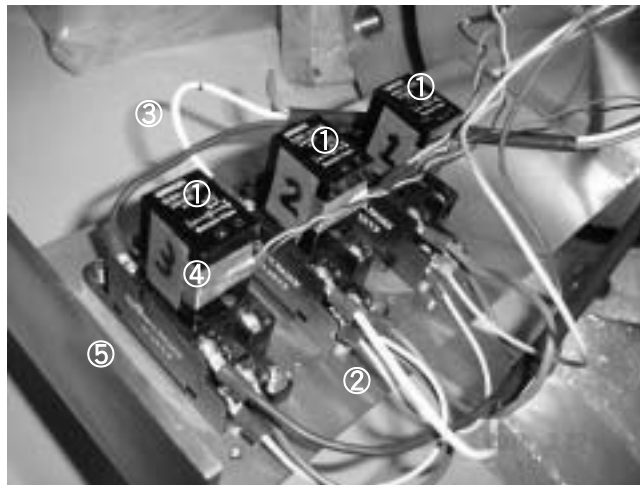


Fig. 2.3.5 HYB (hybrid relay) installed on the test-stage. 1. HYB (G9H-210S); 2. Power input cable; 3. Power output cable; 4. Resistance thermo sensor; 5. Fitting stage.

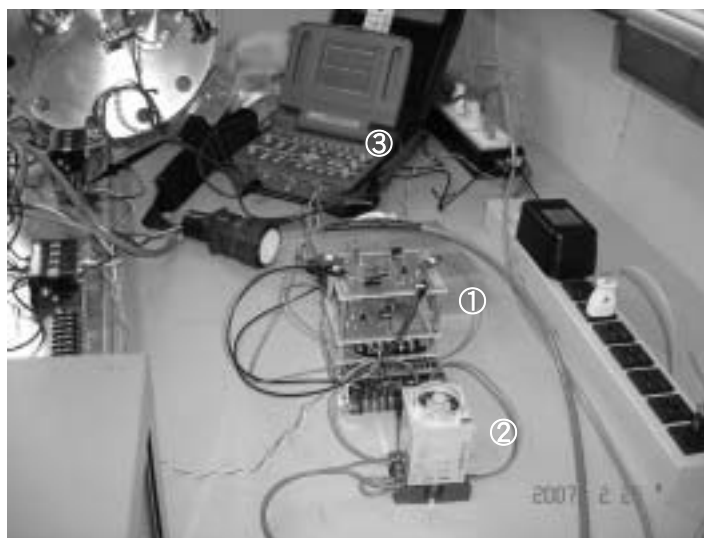


Fig. 2.3.6 Equipment of signal input board for operation signal. 1. Signal input board; 2. Timer; 3. Oscilloscope.

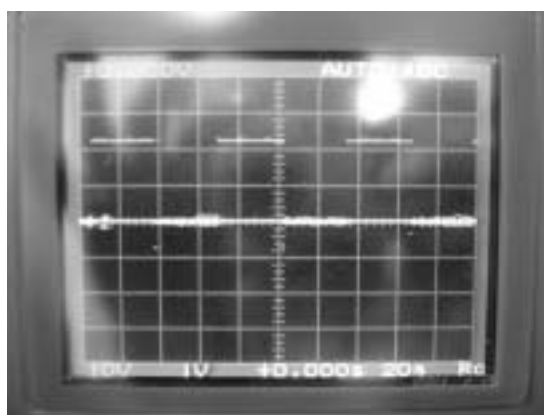
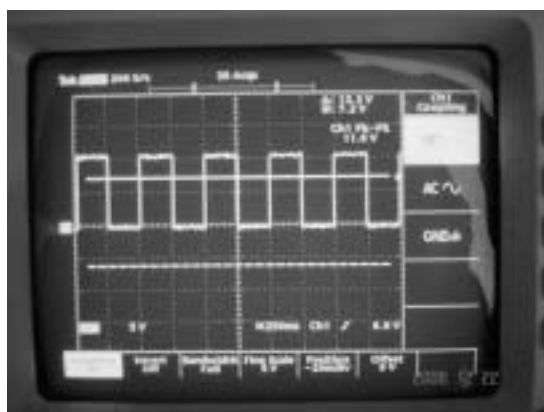


Fig. 2.3.7 Operation signal on the monitor display. Upper. 1cycle/sec; Lower. 1cycle/64sec.

3. 試験結果

3.1 小型汎用リレー

Table 3.1 に EMR の試験概要を示す。3 体のリレー (ID-No. 1、2、3) を使用し、主に“雰囲気”と“接点開閉頻度”の組合せを変えて試験、それぞれにステップ番号を付けた。ID-No. 1、No. 2 については試験装置の調整時にリレーを破損したため大気雰囲気のみでの 2 ステップの試験になったが、ID-No. 3 では大気、SF₆ ガス雰囲気での試験を合わせ 8 ステップまで実施した。以下、それぞれのリレーのステップ毎の結果について述べる。

1) 試験体：EMR ID-No. 1、ステップ 1、2 の結果

ステップ 1、2 ともに大気中での試験であるが、ステップ 1 はチャンバー外部、ステップ 2 はチャンバー内部で試験した。Fig. 3.1.1 に試験時のリレー本体の温度変化を示す。いずれのステップとも温度は 3 段階に分けて上昇していく。第一段階のわずかな上昇は雰囲気温度の影響、第二段階は入力電源の投入 (NFB (no-fuse breaker) の投入) による接点と操作コイルの各抵抗による加熱 (b 接点 (NC) モードで結線)、第三段階の急激な上昇は接点の繰返し開閉に伴うアーク放電による。繰返し開閉後の温度上昇は、チャンバー外部の場合 30 分後に 30°C、1 時間後には 32°C となりこの間の上昇分は約 10°C である。一方、チャンバー内部の場合は、30 分後には 35°C、1 時間後には 40°C を超え、上昇分は 20°C にもなる。両者の違いはリレーを取り巻く空間の大きさの違いによるもので、熱放散に制約があるチャンバー内部の方が外部に比べ高温になる。

2) 試験体：EMR ID-No. 2、ステップ 1、2 の結果

ID-No. 1 の追試として ID-No. 2 について ID-No. 1 と同じ条件で試験した。Fig. 3.1.2 に試験時の温度変化を示す。チャンバー外部での繰返し開閉時の温度上昇は、ID-No. 1 に比べ約 2°C 高いものの、他の領域については ID-No. 1 とほぼ同じである。

ID-No. 1、2 の結果から、本 EMR を b 接点モードで使用した場合の繰返し開閉時の温度上昇分はチャンバー内、外部でそれぞれ 10°C、18°C 程度であることがわかった。

3) 試験体：EMR ID-No. 3、ステップ 1 の結果

EMR ID-No. 3 については全 8 ステップの試験を実施した。Fig. 3.1.3 に温度変化を示す。3 段階に昇温する様相は基本的に ID-No. 1、No. 2 に同じである。接点の繰返し開閉時間を ID-No. 1、No. 2 より 2 時間長い 5 時間に設定、チャンバー内部での試験であったにもかかわらず、開閉終了時の温度は 32°C で ID-No. 1、No. 2 の結果に比べ約 10°C も低い。また、繰返し開閉によるリレー本体の温度上昇も 12.5°C で、ID-No. 1、No. 2 の 19°C、17°C に比べかなり低い。一方、NFB 投入による温度上昇は 7°C で、ID-No. 1、No. 2 の 7°C、6.5°C とほぼ同じである。この原因については温度センサ

一である測温抵抗体に何らかの問題があったと推測されるものの特定はできていない。

4) 試験体：EMR ID-No. 3、ステップ 2 の結果

ステップ 1 に引き続いて、0.5MPa の SF₆ 中で試験した。Fig. 3.1.4 に温度変化を示す。大気中試験に比べ、雰囲気温度による温度上昇がなく、また NFB の投入による温度上昇は ID-No. 1、No. 2、No. 3 (ステップ 1) の 5.5、6.3、5.5℃ に比べ 2.4℃ とかなり低い、繰返し開閉中は大気中 (ID-No. 3、ステップ 1) に比べ高めである。これは試験開始時の温度がステップ 1 に比べ約 10℃ 高いことによると考えられる。

開閉動作は、開始約 7 分後に開閉間隔が不規則になり、一時回復はするがその後も不規則な開閉を繰り返すため 2.5 時間後に手動にて停止した。この間、操作コイルへの電圧・電流は正常に入力されていた。これまでの経緯からみて開閉不調の原因に SF₆ ガスが影響していることは確実に考えられる。

5) 試験体：EMR ID-No. 3、ステップ 3 の結果

ステップ 2 での開閉不調が SF₆ ガスに起因していることを確認するため、再度、チャンバー内・大気雰囲気中で試験した (NFB 投入後、直ちにタイマーを ON にし、接点の開閉を開始)。Fig. 3.1.5 に温度変化の結果を示す。ステップ 1 (大気雰囲気) に比べ、接点开閉時のリレー本体温度は 3℃ 程度高く多少の変動はあるが不調は見られなかった。温度変動の原因としては、ステップ 2 で生じた接点の損傷による接触抵抗の増加が考えられる。結果としてはほぼ正常に繰返し開閉できたことから、ステップ 2 での不調は SF₆ ガスとリレーとの相互作用に起因するものと断定した。

6) 試験体：EMR ID-No. 3、ステップ 4 の結果

本ステップでは SF₆ ガスの冷却効果を高めることを目的に、リレー本体を覆っているプラスチックカバーの側面と上面の計 5 か所に直径 10mm の穴を加工し取り付けした。リレー本体はステップ 1 からの継続品で、これまでの接点総開閉数はおよそ 25,000 回である。以後、ステップ 8 まで本リレーを使用して試験を実施した。

チャンバー内部・大気雰囲気中で試験したときの温度変化を Fig. 3.1.6 に示す。NFB 投入と繰返し開閉領域での温度上昇分をステップ 1 の結果と比べると 1℃～1.5℃ 低い、このわずかな違いが穴の効果によるものなのかは分からない。接点の開閉に不調は生じなかった。

7) 試験体：EMR ID-No. 3、ステップ 5 の結果

ステップ 5 では 0.5MPa の SF₆ 雰囲気中で試験した。Fig. 3.1.7 に結果を示す。NFB 投入後の温度変化はステップ 2 に比べ 2℃ 程度低い。また、接点繰返し開閉の開始 10 分後に接点は開閉不調となりアークの発生が減少したためか、ステップ 2 の同領域の温度に比べ約 10℃ 低い。

8) 試験体：EMR ID-No. 3、ステップ6の結果

SF₆のガス圧を0.35MPaに下げた場合、及びSF₆から大気へと雰囲気を変えたときの接点の開閉挙動について試験した。Fig. 3.1.8に結果を示す。試験開始から5時間まではSF₆雰囲気、それ以降は大気雰囲気である。

SF₆雰囲気中での接点繰返し開閉はこれまでと同じく不調で、圧力を下げたことによる効果は認められなかった。その後、SF₆ガスの抜取りを開始するが、抜取りと共にリレー本体の温度は40℃近くまで上昇する（NFBは投入状態。チャンバーを開放していないためSF₆ガスは0.1MPa残存）。次にNFBの遮断により温度は急速に降下、更にチャンバーの大気開放で24℃近辺まで低下する。再度NFBを投入し、タイマーを1時間に設定し繰返し開閉を行う。リレー本体温度は36℃近くまで上昇するが接点は正常に動作した。

9) 試験体：EMR ID-No. 3、ステップ7の結果

ステップ6とは逆に大気からSF₆に雰囲気を変えたときの接点の開閉挙動について試験した。Fig. 3.1.9に結果を示す。NFB投入と同時にタイマーを1時間に設定し開閉試験を開始、正常に動作することを確認した。1時間後、NFBを遮断しチャンバーを真空排気、SF₆ガスを0.1MPa導入した状態で約3時間保持する。その後繰返し開閉試験を開始するが直後に不調になったため手動にて停止した。

10) 試験体：EMR ID-No. 3、ステップ8の結果

ステップ7の追試としてステップ8を実施した。Fig. 3.1.10に結果を示す。NFBを投入した状態で1時間保持、その後タイマーを1時間に設定し接点の繰返し開閉を開始、正常に動作していることを確認した。NFB遮断後、チャンバーを真空排気しSF₆ガスを0.1MPaまで導入する。再度NFBを投入し繰返し開閉を開始するが直後から不調となったため手動にて停止した。ステップ7と同様、大気雰囲気では正常動作が確認できたものの、0.1MPaのSF₆雰囲気中では不調であった。EMR ID-No. 3を使用し、全8ステップの試験を実施した（ステップ4～ステップ8は穴加工したプラスチックカバーを装着）。その結果、穴の有無にかかわらずSF₆雰囲気中での開閉試験ではいずれの場合も開閉動作は不調であった。

Table 3.1 Outline of the screening test of the electromechanical relay (LY3-D).

Relay	Test condition	Test step-1	Test step-2	Test step-3	Test step-4	Test step-5	Test step-6	Test step-7	Test step-8
EMR [ID-No.1]	Environment	Atm. (outside of the chamber) 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A						
	Electric load	1/1	1/1	@ The relay was broken under an adjustment of the test-stand; therefore could not be tested from that time.					
	Frequency of open and close (cycle/sec)	3	3	-	-	-	-	-	-
	Operation time (hr)	10,800	10,800	-	-	-	-	-	-
	Total number of open and close (cycle)	Fig. 3.1.1	Fig. 3.1.1	-	-	-	-	-	-
	Result of the temperature change (reference figure)								
EMR [ID-No.2]	Environment	Atm. (outside of the chamber) 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A	@ The relay was broken under an adjustment of the test-stand; therefore could not be tested from that time.					
	Electric load	1/1	1/1						
	Frequency of open and close (cycle/sec)	3	3	-	-	-	-	-	-
	Operation time (hr)	10,800	10,800	-	-	-	-	-	-
	Total number of open and close (cycle)	Fig. 3.1.2	Fig. 3.1.2	-	-	-	-	-	-
	Result of the temperature change (reference figure)								
EMR [ID-No.3]	Environment	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) ¹⁾ 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa ¹⁾ 3φ200V/3A	SF ₆ →Atm. ¹⁾ 3φ200V/3A	Atm.→SF ₆ ¹⁾ 3φ200V/3A	Atm.→SF ₆ ¹⁾ 3φ200V/3A
	Electric load	1/1	1/1	1/1	1/1.62	1/1.62	1/1.62	1/1.62	1/1.62
	Frequency of open and close (cycle/sec)	5	3	4.5	2	2.75	0.75→1.0	1.0→0.25	1.0→1.0
	Operation time (hr)	18,000	Irregularity ³⁾	16,200	4,444	Irregularity ³⁾	Irreg. ³⁾ →2,222	2,222→Irreg. ³⁾	2,222→Irreg. ³⁾
	Total number of open and close (cycle) ²⁾	Fig. 3.1.3	Fig. 3.1.4	Fig. 3.1.5	Fig. 3.1.6	Fig. 3.1.7	Fig. 3.1.8	Fig. 3.1.9	Fig. 3.1.10
	Result of the temperature change (reference figure)								

1) Five holes of 10mm in diameter were worked on the relay cover. 2) Regardless of turn on or off the electric load current. 3) Motion of the contacts are irregular

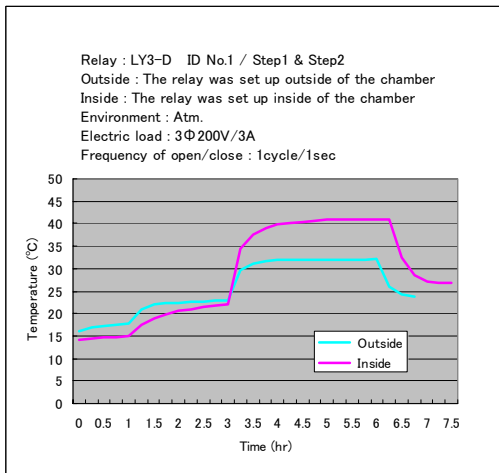


Fig. 3.1.1

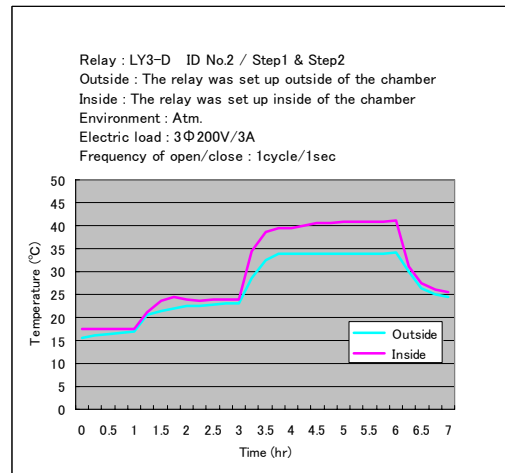


Fig. 3.1.2

Fig. 3.1.1 Temperature changes of the EMR inside (red line) and outside (blue line) of the chamber under the atmospheric pressure. ID No.1; Test step1 & 2. Fig. 3.1.2 Temperature changes of the EMR inside (red line) and outside (blue line) of the chamber under the atmospheric pressure. ID No.2; Test step1 & 2.

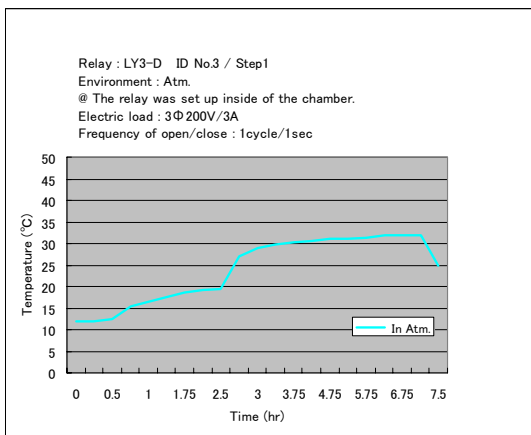


Fig. 3.1.3

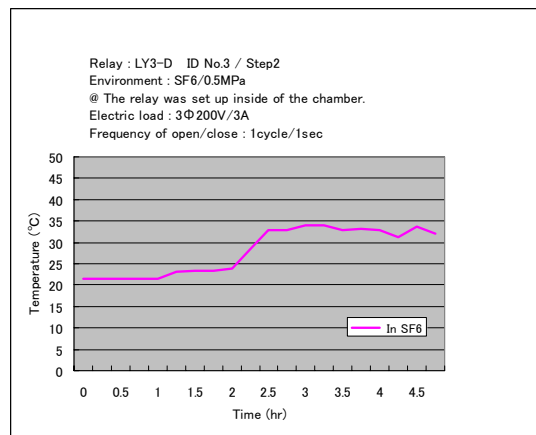


Fig. 3.1.4

Fig. 3.1.3 Temperature change of the EMR inside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.3; Test step1.

Fig. 3.1.4 Temperature change of the EMR inside of the chamber under SF₆ of 0.5MPa. ID No.3; Test step2.

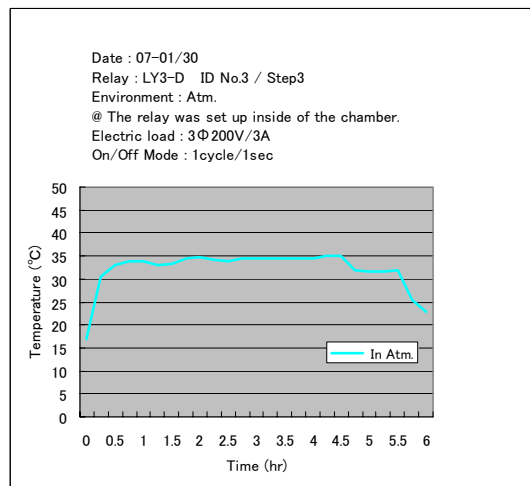


Fig. 3.1.5

Fig. 3.1.5 Temperature change of the EMR inside of the chamber under SF₆ of 0.5MPa. ID No.3; Test step3.

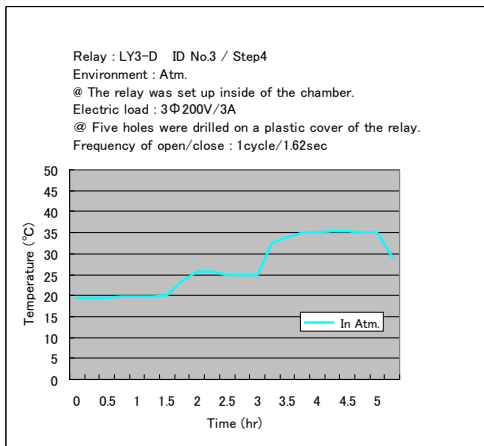


Fig. 3.1.6

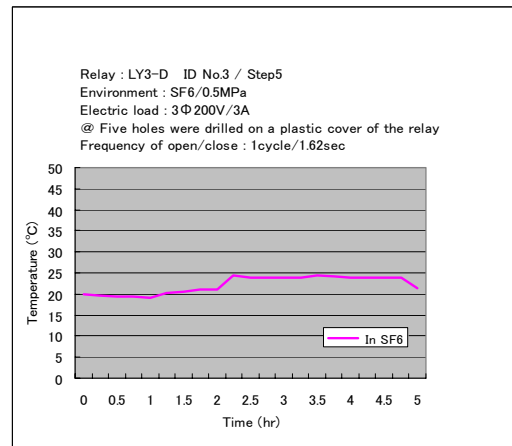


Fig. 3.1.7

Fig. 3.1.6 Temperature change of the EMR inside of the chamber under the atmospheric pressure. ID No.3; Test step4.

Fig. 3.1.7 Temperature change of the EMR under SF₆ of 0.5MPa. ID No.3; Test step5.

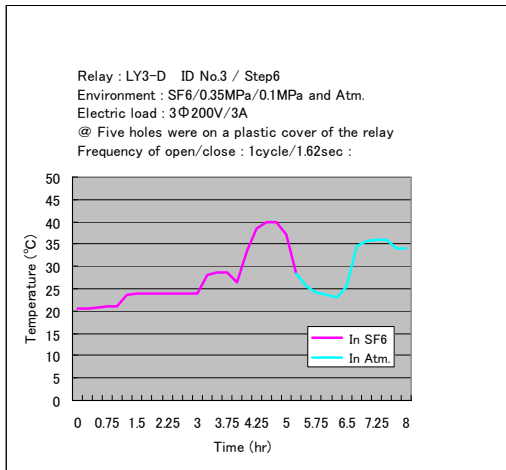


Fig. 3.1.8

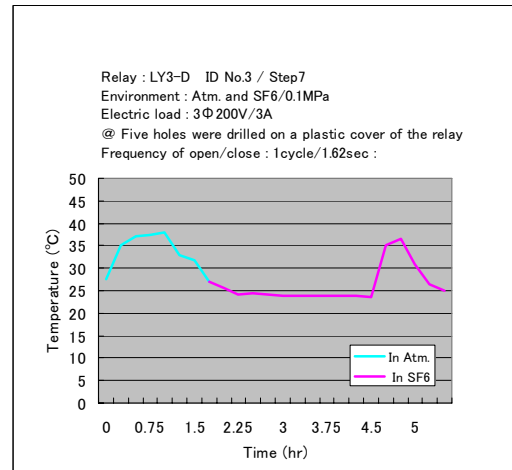


Fig. 3.1.9

Fig. 3.1.8 Temperature change of the EMR when the environment changed from SF₆ to the atmosphere. ID No.3; Test step6.

Fig. 3.1.9 Temperature change of the EMR when the environment changed from the atmosphere to SF₆. ID No.3; Test step7.

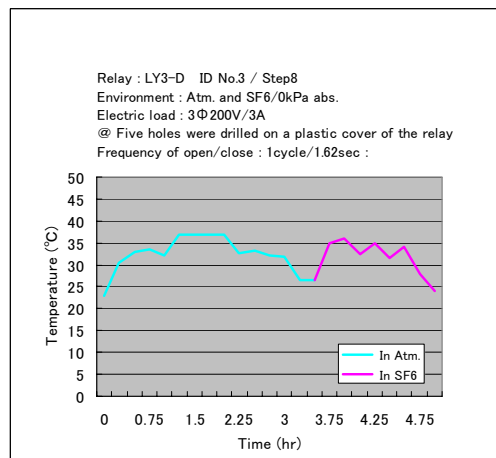


Fig. 3.1.10

Fig.3.1.10 Temperature change of the EMR when the environment changed from the atmosphere to SF₆. ID No.3; Test step8.

3.2 高感度コンタクター

Table 3.2にMAGの試験概要を示す。試験には3体のコンタクター（ID-No.1、2、3）を使用した。試験条件の設定・方法については基本的に小型汎用リレーの試験と同じであるが、ファンクションメータが不調になったため、“接点開閉頻度”1サイクル/1秒については実施していない。以下、それぞれのコンタクター（リレーに統一する）のステップ毎の結果について述べる。

1) 試験体：MAG ID-No.1、ステップ1の結果

チャンバー内部・大気雰囲気、接点開閉頻度1サイクル/1.62秒、開閉動作時間を3時間に設定し試験した。Fig. 3.2.1に結果を示す。本体温度と共に周辺温度も測定した。周辺温度の上昇が極めて緩やかであるのに比べリレー本体の温度上昇は急激で、開閉終了時には10℃程度高い結果を示した。これは、主に接点開閉時に発生するアーク放電からの入熱によると考えられるが制限温度である55℃には到らない。リレー本体温度は、動作開始3時間後には平衡に達する様相が見られ、電圧、電流値にも異常はなく正常に動作した。

2) 試験体：MAG ID-No.1、ステップ2の結果

雰囲気は0.5MPaのSF₆、接点開閉頻度、動作時間はステップ1と同じ条件で試験した。Fig. 3.2.2に結果を示す。開始数分以内に開閉に伴って発する機械音が小さくなりサイクルが不規則になり電流値が3Aを下回った。間もなく一時回復したが、その後この状態を繰り返し約20分後に電流値はゼロを示した。この間、操作コイルへの入力電圧、電流は正常で接点開閉の機械音は確認できた。動作開始後30分間の本体の温度上昇はステップ1の約6℃に対し9℃と高めである。動作が不調であることを確認し、開始2時間後に手動にて停止した。

3) 試験体：MAG ID-No.2、ステップ1の結果

チャンバー外部・大気雰囲気、接点開閉頻度はMAG ID-No.1と同様。開閉動作時間を1時間に設定し試験した。開閉時に発生するアーク放電を防止するため、とりあえずの措置としてスナバー回路（R=120Ω、C=0.1μF）を各接点に並列接続しその効果を調べた。Fig. 3.2.3に結果を示す。温度上昇は動作開始1時間後で2℃程度とかなり低い。リレーの構造上アーク発生の有無を外部から確認することはできないため、これがスナバー回路、あるいはチャンバー外部への設置のいずれによる影響かは判然としない。設定時間内の電圧、電流値に異常はなく正常に動作した。

4) 試験体：MAG ID-No.2、ステップ2の結果

ステップ1の大気中での試験に引き続き、0.5MPaのSF₆雰囲気中で試験した。接点開閉頻度、設定動作時間はステップ1と同じであるが負荷は加えずに接点の開閉を行った。Fig. 3.2.4に結果を示す。開始1時間後の温度上昇2.5℃は操作コイルからの発熱と考えられる。なお、開閉動

作が停止した後の周辺温度の上昇は温度センサー（側温抵抗体抵抗体）のトラブルに起因するものである。リレー自体に不具合は生じなかった。

5) 試験体：MAG ID-No. 2、ステップ 3 の結果

ステップ 2 の状態に 3 相 200V・3A の負荷を加え開閉試験を行った。Fig. 3.2.5 に結果を示す。開始直後に数回、電流計の指示が不安定となるが短時間で復帰。約 10 分後、3 相のうち、2 相分の電流値が 2.6A、他の 1 相は 0 を示した。また、操作コイルの動作（開閉の機械音）とメーター表示が同期しない。この状態がタイマーにより自動停止するまで続いた。

6) 試験体：MAG ID-No. 3、ステップ 1 の結果

リレーの耐久性は開閉頻度に大きく影響される。本ステップではこれまでに試験してきた開閉頻度の約 1/40 の頻度（1 サイクル/64 秒）とし、0.5MPa の SF₆ 雰囲気中で試験した。また、スナバー回路の抵抗とコンデンサそれぞれの値を R=120Ω→150Ω、C=0.1μF→2.2μF に変更した。Fig. 3.2.6 に結果を示す。開閉頻度が少ない分、MAG ID-No. 1、No. 2 に比べ温度上昇が小さく、また設定動作時間が 3 時間であるにも関わらず開閉動作、電圧・電流に異常は見られなかった。

7) 試験体：MAG ID-No. 3、ステップ 2 の結果

ステップ 1 の終了後、0.5MPa の SF₆ ガス中に 14 時間放置し、ステップ 1 と同じ条件で再度開閉試験を実施した（但し、設定開閉動作時間は 2 時間とした）。Fig. 3.2.7 に結果を示す。温度変化はステップ 1 に近似しているが、これは SF₆ ガス中に 14 時間放置したことでチャンバー内の状態が安定したことがその一因と考えられる。開閉動作、電圧・電流に異常はなく正常に動作した。

8) 試験体：MAG ID-No. 3、ステップ 3 の結果

ステップ 2 の終了 20 分後、接点开閉頻度を 1 サイクル/1.62 秒、開閉動作時間を 2 時間に設定し試験した。Fig. 3.2.8 に結果を示す。開始約 1 時間後、はじめに電流値が低下し、次に出力側の電圧が 100V まで降下、2 時間後、電圧/電流計は共にゼロを示した。この間、操作コイルへの電圧・電流は正常に入力されており、接点セグメント（補助接点を含む 4 接点の一つの単位となって上下に動作する）が上下するたびに発する機械音は確認できた。

Table 3.2 Outline of the screening test of the magnetic contactor (J7AN-E3).

Relay	Test condition	Test step-1	Test step-2	Test step-3
MAG [ID-No.1]	Environment	Atm. (inside of the chamber)	SF ₆ /0.5MPa	-
	Electric load	3φ200V/3A	3φ200V/3A	-
	Snubber circuit	-	-	-
	Frequency of open and close (cycle/sec)	1/1.62	1/1.62	-
	Operation time (hr)	3	2	-
	Total number of open and close (cycle)*	6,667	4,444	-
	Result of the temperature change (reference figure)	Fig. 3.2.1	Fig. 3.2.2	-
MAG [ID-No.2]	Environment	Atm. (outside of the chamber)	SF ₆ /0.5MPa	SF ₆ /0.5MPa
	Electric load	3φ200V/3A	-	3φ200V/3A
	Snubber circuit	R=120Ω C=0.1μF	R=120Ω C=0.1μF	R=120Ω C=0.1μF
	Frequency of open and close (cycle/sec)	1/1.62	1/1.62	1/1.62
	Operation time (hr)	1	1	1
	Total number of open and close (cycle)*	2,222	2,222	2,222
	Result of the temperature change (reference figure)	Fig. 3.2.3	Fig. 3.2.4	Fig. 3.2.5
MAG [ID-No.3]	Environment	SF ₆ /0.5MPa	SF ₆ /0.5MPa	SF ₆ /0.5MPa
	Electric load	3φ200V/3A	3φ200V/3A	3φ200V/3A
	Snubber circuit	R=150Ω C=2.2μF	R=150Ω C=2.2μF	R=150Ω C=2.2μF
	Frequency of open and close (cycle/sec)	1/64	1/64	1/1.62
	Operation time (hr)	3	2	2
	Total number of open and close (cycle)*	169	113	4,444
	Result of the temperature change (reference figure)	Fig. 3.2.6	Fig. 3.2.7	Fig. 3.2.8

* Regardless of turn on or off the electric load current.

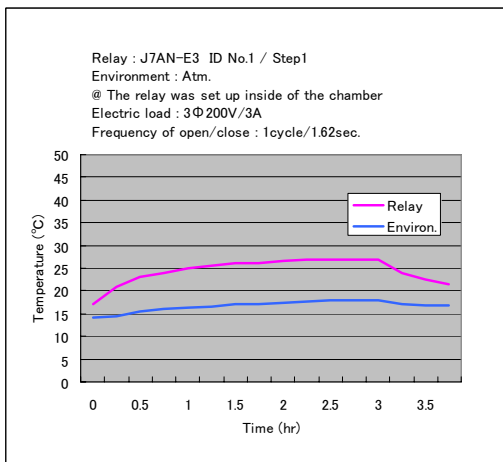


Fig. 3.2.1

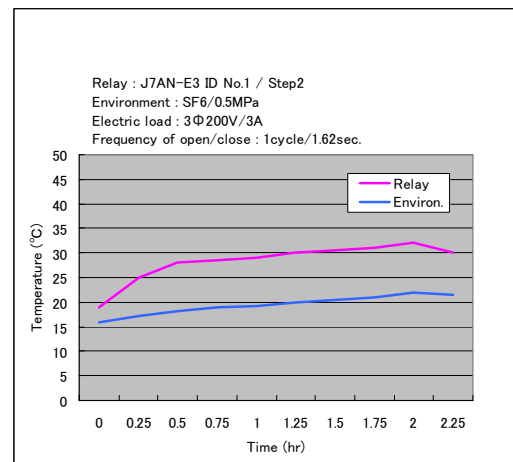


Fig. 3.2.2

Fig. 3.2.1 Temperature changes of the MAG (red line) and atmosphere (blue line) inside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.1; Test step1.

Fig. 3.2.2 Temperature changes of the MAG (red line) and atmosphere (blue line) inside of the chamber under SF₆ of 0.5MPa. ID No.1; Test step2.

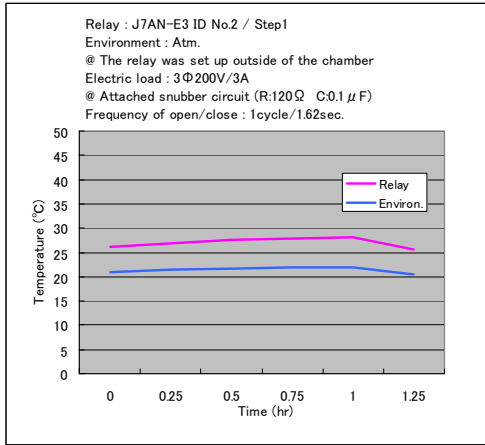


Fig. 3.2.3

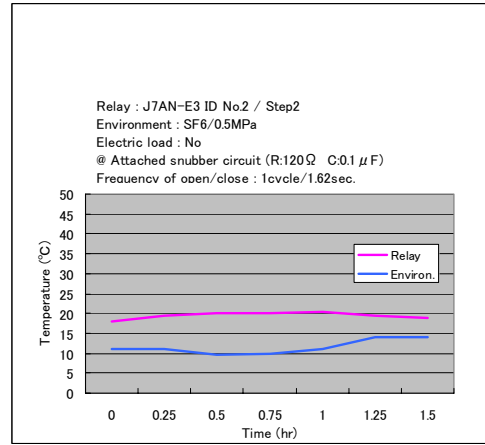


Fig. 3.2.4

Fig. 3.2.3 Temperature changes of the MAG (red line) with snubber circuits and atmosphere (blue line) inside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.2; Test step1. Fig. 3.2.4 Temperature changes of the MAG (red line) with snubber circuits and atmosphere (blue line) inside of the chamber under SF₆ of 0.5MPa. ID No.2; Test step2.

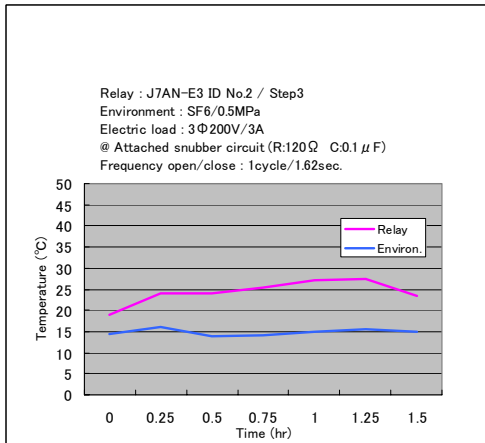


Fig. 3.2.5

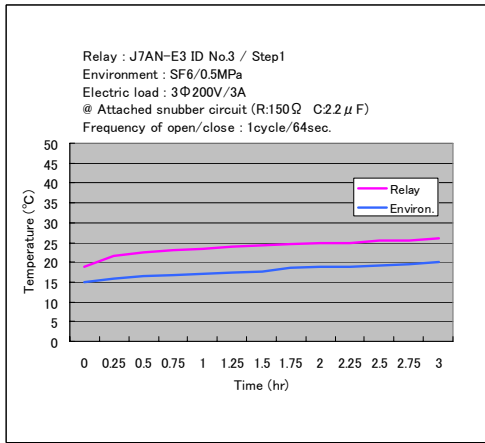


Fig. 3.2.6

Fig. 3.2.5 Temperature changes of the MAG (red line) with snubber circuits and atmosphere (blue line) inside of the chamber under SF₆ of 0.5MPa. ID No.2; Test step3. Fig. 3.2.6 Temperature changes of the MAG (red line) with snubber circuits and atmosphere (blue line) inside of the chamber under SF₆ of 0.5MPa. ID No.3; Test step1.

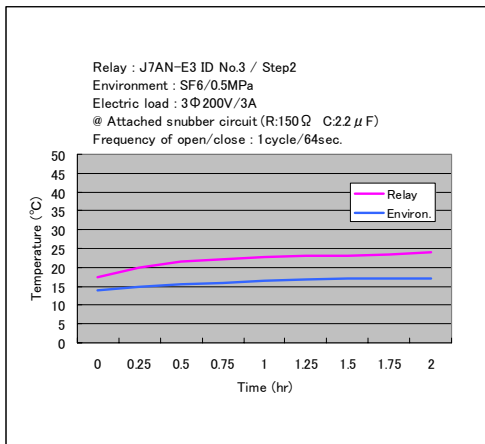


Fig. 3.2.7

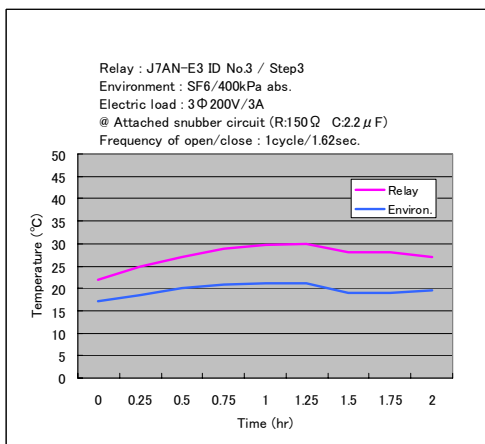


Fig. 3.2.8

Fig. 3.2.7 Temperature changes of the MAG (red line) with snubber circuits and atmosphere (blue line) inside of the chamber under SF₆ of 0.5MPa. ID No.3; Test step2. Fig. 3.2.8 Temperature changes of the MAG (red line) with snubber circuits and atmosphere (blue line) inside of the chamber under SF₆ of 0.5MPa. ID No.3; Test step3.

3.3 ソリッドステート・コンタクター

Table 3.3 に SSR の試験概要を示す。試験には 2 体のコンタクター (ID-No. 1、No. 2) を使用した。本コンタクターには機械的動作箇所がないため、小型汎用リレー (EMR) や高感度コンタクター (MAG) のような接点の開閉に伴う機械音を確認することはできない。試験条件の設定・方法については基本的に EMR、MAG の試験と同じであるが、“接点开閉頻度” 1 サイクル/1 秒については高感度コンタクターの試験に同じく実施していない。以下、それぞれのコンタクター (リレーに統一する) のステップ毎の結果について述べる。

1) 試験体：SSR ID-No. 1、ステップ 1 の結果

チャンバー外部・大気雰囲気、接点开閉頻度 1 サイクル/1.62 秒、開閉動作時間を 3 時間に設定し試験した。本リレーの外形寸法は、タテ、ヨコ各 80mm、高さ 90mm で、試験したリレーの中では最も大きく、全容積の約 1/2 はアルミニウム製のヒートシンクである。本体温度と共にヒートシンク部の温度も測定した。Fig. 3.3.1 に結果を示す。図中の青線 (淡色) はリレー本体部、赤線 (濃色) はヒートシンク部の温度を示す (以下、3.3 項では同じ)。ヒートシンク部の温度は開閉開始直後から比較的急激に上昇し、1.5 時間後には 35°C でほぼ平衡に達する。本体部の温度もこれに追従するが、ヒートシンク部に比べ 10°C 程度低めである。開閉動作の健全性は温度変化と電圧/電流計それぞれの指示値で確認することになるが、特段の異常は認められなかった。

2) 試験体：SSR ID-No. 1、ステップ 2 の結果

ステップ 1 の終了後、リレーをチャンバー内部に設置し、ステップ 1 と同じ条件で再度開閉試験を実施した。Fig. 3.3.2 に結果を示す。昇温傾向はステップ 1 に同じであるが、ステップ 1 に比べ温度が平衡に達するまでの時間は約 30 分長く、ヒートシンク部と本体部の温度は共に 5°C 程度高い。これはステップ 1 が解放された空間であるのに対し、ステップ 2 では閉ざされた空間 (チャンバー内容積約 12 リットル) での試験であることに起因する。ヒートシンクの効果により本体部の温度は 30°C 程度に保持されている。温度変化と電圧/電流計それぞれの指示値からみて開閉動作に異常は認められない。

3) 試験体：SSR ID-No. 1、ステップ 3 の結果

接点开閉頻度を 1 サイクル/1.62 秒とし、0.5MPa の SF₆ 雰囲気中で試験した。Fig. 3.3.3 に結果を示す。チャンバー外部・大気中で試験したステップ 1 に似た昇温傾向を示すが、平衡時の温度はチャンバー内部・大気雰囲気での試験、ステップ 2 に比べヒートシンク部で約 10°C、本体部で 5°C 程度それぞれ低い結果となった。これは SF₆ ガスの特長の一つである大きな総括熱伝達とそれによる冷却効果によるものと考えられる。EMR や MAG に見られた 0.5MPa の SF₆ 雰囲気中での不具合は生じなかった。

4) 試験体：SSR ID-No. 1、ステップ 4 の結果

接点开閉頻度の違いによる影響を調べるため、開閉頻度 1 サイクル/1.62 秒で試験したステップ 3 に続き、開閉頻度を 1 サイクル/64 秒とし、0.5MPa の SF₆ 雰囲気中で試験した。Fig. 3.3.4

に結果を示す。ステップ3の温度変化に比べヒートシンク部は同程度であるが、本体部についてはやや低く、これが開閉頻度の違いによる結果とも考えられる。いずれにしても、アーク放電とは無縁な半導体リレーの場合、開閉頻度の違いによる本体温度への影響は少ないと推測される。

5) 試験体：SSR ID-No. 2、ステップ1の結果

試験品であるSSRは市販の標準品であり品質にバラツキはないと考えられるが、試験データの信頼性を高めるため、他の1体（SSR ID-No. 2）についてSSR ID-No. 1と同様の試験を実施した。

チャンバー外部・大気中、接点开閉頻度1サイクル/1.62秒、開閉動作時間を3時間に設定し試験した。Fig. 3.3.5に結果を示す。昇温傾向はSSR ID-No. 1、ステップ1に似ていて、本体温度の上昇分も5~6℃とほぼ同じである（Fig. 3.3.1参照）。接点の開閉動作にも特段の異常は認められなかった。

6) 試験体：SSR ID-No. 2、ステップ2の結果

ステップ1の終了後、リレーをチャンバー内部に設置し、ステップ1と同条件で再度開閉試験を実施した。Fig. 3.3.6に結果を示す。昇温傾向、本体部の温度上昇分ともにSSR ID-No. 1、ステップ2の結果にほぼ同じで（Fig. 3.3.2参照）、接点の開閉動作にも異常は認められなかった。

7) 試験体：SSR ID-No. 2、ステップ3の結果

接点开閉頻度を1サイクル/1.62秒とし、0.5MPaのSF₆雰囲気中で試験した。Fig. 3.3.7に結果を示す。昇温傾向はSSR ID-No. 1のステップ3に似ているが本体部、ヒートシンク部の温度上昇分についてはSSR ID-No. 1のステップ3に比べ共に2℃程度低い。また、本体部とヒートシンク部それぞれの温度上昇分は3℃と5℃で、同じ試験条件でのSSR ID-No. 2、ステップ2の8℃と16℃に比べかなり低い結果を示した。先にも述べたがSF₆ガスの特長の一つである大きな総括熱伝達とそれによる冷却効果によるものと考えられる。EMRやMAGに見られたような0.5MPaのSF₆雰囲気での不具合は生じなかった。

8) 試験体：SSR ID-No. 2、ステップ4の結果

ステップ3に続き、開閉頻度を1サイクル/64秒とし、0.5MPaのSF₆雰囲気中で試験した。Fig. 3.3.8に結果を示す。開始直後の昇温勾配はステップ3と差異はないが、平衡温度に達するまでの時間については、ステップ3の場合、約1.5時間後に本体部21℃、ヒートシンク部30℃であるのに対し、本ステップでは3時間後でも本体部20℃、ヒートシンク部29℃近辺でまだ平衡には達していない。開閉頻度の違いによるものと推測される。ステップ3同様、0.5MPaのSF₆雰囲気での不具合は生じなかった。

Table 3.3 Outline of the screening test of the solid state relay (G3J-211BL).

Relay	Test condition	Test step-1	Test step-2	Test step-3	Test step-4
SSR [ID-No.1]	Environment	Atm. (outside of the chamber)	Atm. (inside of the chamber)	SF ₆ /0.5MPa	SF ₆ /0.5MPa
	Electric load	3φ200V/3A	3φ200V/3A	3φ200V/3A	3φ200V/3A
	Frequency of open and close (cycle/sec)	1/1.62	1/1.62	1/1.62	1/64
	Operation time (hr)	3	3	3	3
	Total number of open and close (cycle)	6,667	6,667	6,667	169
	Result of the temperature change (reference figure)	Fig. 3.3.1	Fig. 3.3.2	Fig. 3.3.3	Fig. 3.3.4
SSR [ID-No.2]	Environment	Atm. (outside of the chamber)	Atm. (inside of the chamber)	SF ₆ /0.5MPa	SF ₆ /0.5MPa
	Electric load	3φ200V/3A	3φ200V/3A	3φ200V/3A	3φ200V/3A
	Frequency of open and close (cycle/sec)	1/1.62	1/1.62	1/1.62	1/64
	Operation time (hr)	3	3	3	3
	Total number of open and close (cycle)	6,667	6,667	6,667	169
	Result of the temperature change (reference figure)	Fig. 3.3.5	Fig. 3.3.6	Fig. 3.3.7	Fig. 3.3.8

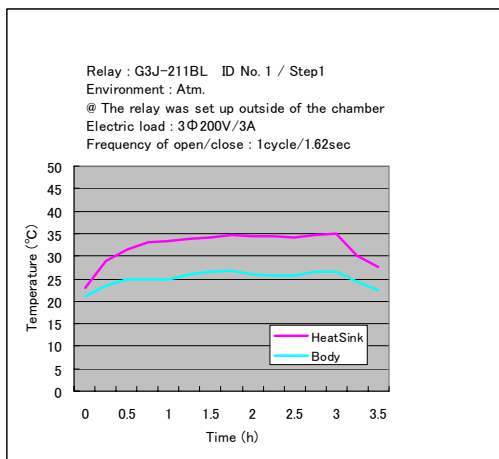


Fig. 3.3.1

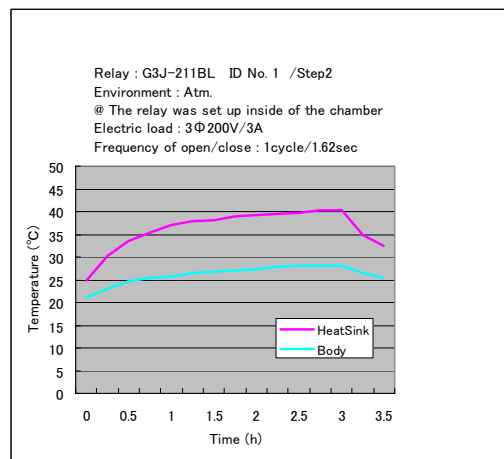


Fig. 3.3.2

Fig. 3.3.1 Temperature changes of the SSR body (blue line) and the heat sink (red line) outside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.1; Test step1.

Fig. 3.3.2 Temperature changes of the SSR body (blue line) and the heat sink (red line) inside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.1; Test step2.

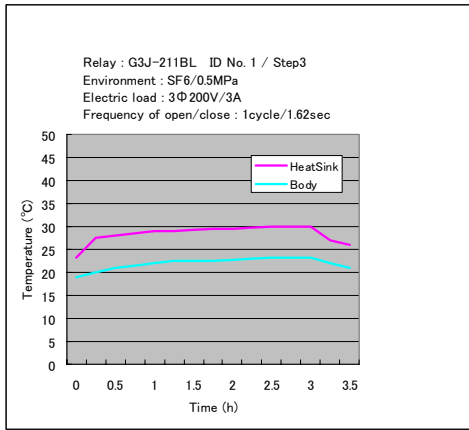


Fig. 3.3.3

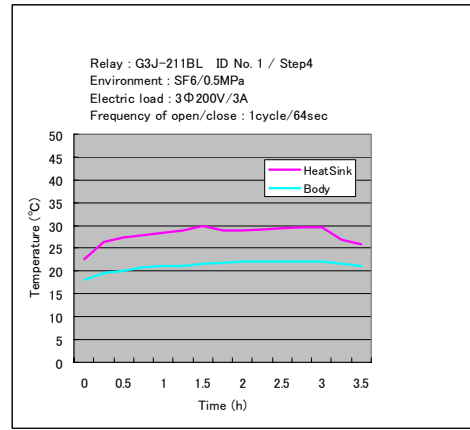


Fig. 3.3.4

Fig. 3.3.3 Temperature changes of the SSR body (blue line) and the heat sink (red line) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.1; Test step3; Frequency 1cycle/1.62sec. Fig. 3.3.4 Temperature changes of the SSR body (blue line) and the heat sink (red line) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.1; Test step4; Frequency 1cycle/64sec.

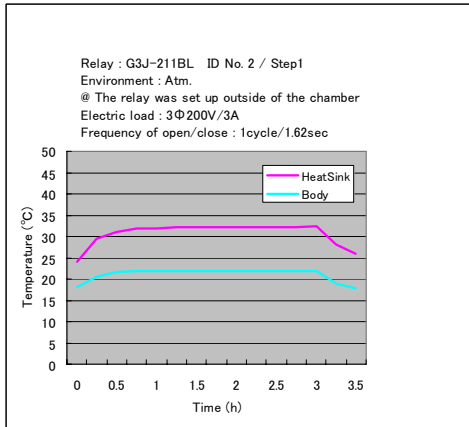


Fig. 3.3.5

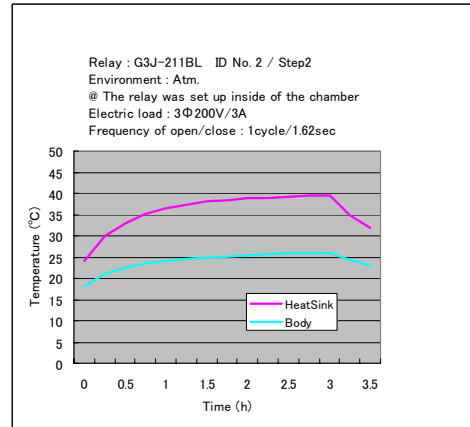


Fig. 3.3.6

Fig. 3.3.5 Temperature changes of the SSR body (blue line) and the heat sink (red line) outside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.2; Test step1. Fig. 3.3.6 Temperature changes of the SSR body (blue line) and the heat sink (red line) inside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.2; Test step2.

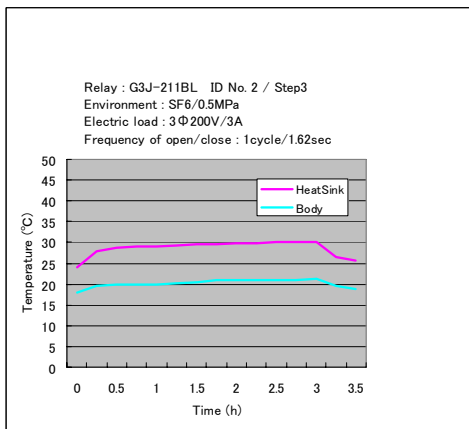


Fig. 3.3.7

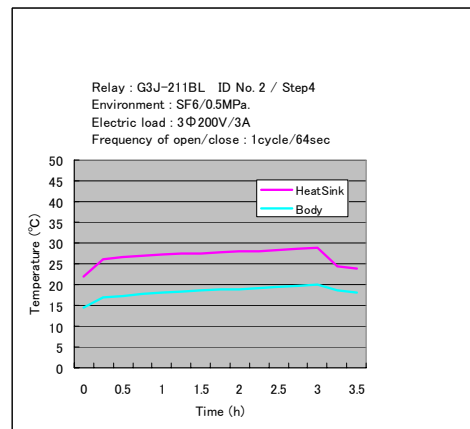


Fig. 3.3.8

Fig. 3.3.7 Temperature changes of the SSR body (blue line) and the heat sink (red line) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.2; Test step3; Frequency 1cycle/1.62sec. Fig. 3.3.8 Temperature changes of the SSR body (blue line) and the heat sink (red line) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.2; Test step4; Frequency 1cycle/64sec.

3.4 ハイブリッド・パワーリレー

Table 3.4 に HYB の試験概要を示す。試験には 6 体のリレー (ID-No. 1、2、3、4、5、6) を使用した。本リレーの接点構成は 1 極であるため、3 相電源・負荷に対応するためには 1 回の試験に 3 体のリレーが必要である。試験では、ID-No. 1、2、3 を第 1 ステージに、ID-No. 4、5、6 を第 2 ステージの試験に使用した。

HYB はこれまでに試験した小型汎用リレー (EMR) や高感度コンタクター (MAG) のような有接点リレーとソリッドステート・コンタクター (SSR) に代表される無接点リレーを組み合わせたリレーで、電力の“入”“切”は無接点、“電力通電”は有接点によるリレーである。以下、第 1、第 2 各ステージ (3 体を 1 単位として扱う) のステップ毎の結果について述べる。

1) 試験体 : HYB ID-No. 1、2、3 ステップ 1 の結果

チャンバー外部・大気雰囲気、接点開閉頻度 1 サイクル/64 秒、開閉動作時間を 2 時間に設定し試験した。Fig. 3.4.1 結果を示す。開閉動作開始と同時にリレー本体の温度は上昇し、およそ 15 分後 24°C 付近で平衡に達する。開閉前後の温度上昇分は、EMR の 17°C、MAG の 9°C に比べ、HYB の場合は No. 1、No. 3 共に約 4°C で極めて低い。No. 1 と No. 3 との間にわずかな温度差がみられるが個体差や測定システム上の誤差等によるものと推測される。開閉動作に不具合は生じなかった。

2) 試験体 : HYB ID-No. 1、2、3 ステップ 2 の結果

リレーをチャンバー内部に設置、大気雰囲気、接点開閉頻度 1 サイクル/64 秒、開閉動作時間を 3 時間に設定し試験した。Fig. 3.4.2 結果を示す。チャンバー外部での試験に比べ昇温勾配はやや高めであるが、チャンバー内部での試験であるにもかかわらず平衡時の温度は 26°C 程度で EMR の 40°C に比べればかなり低い。動作前後の温度上昇分は、No. 1 で 6°C、No. 3 で 7°C とチャンバー外部での試験に比べ 2~3°C 高い。ステップ 1 同様、開閉動作に不具合は生じなかった。

3) 試験体 : HYB ID-No. 1、2、3 ステップ 3 の結果

接点開閉頻度、開閉動作時間はステップ 2 と同様とし、0.5MPa の SF₆ 雰囲気中で試験した。Fig. 3.4.3 に結果を示す。繰り返し動作前後での温度上昇分は No. 1 で 1°C、No. 3 で 2.5°C と小さく、15 分程度で平衡に達する。また、平衡時の温度も No. 1 で 24°C、No. 3 で 22.5°C でステップ 2 (チャンバー内部・大気雰囲気) の結果に比べ低く、SF₆ ガスの冷却効果によるものと考えられる。開閉動作に何ら不具合は生じなかった。

4) 試験体 : HYB ID-No. 1、2、3 ステップ 4 の結果

接点開閉頻度をステップ 3 の 40 倍、1 サイクル/1.62 秒に設定し、0.5MPa の SF₆ 雰囲気中で試験した。Fig. 3.4.4 に結果を示す。ステップ 3 とは異なり、温度は動作開始直後から緩やかに上

昇を続け 3 時間程してようやく平衡する様子が見られる。原因としては、開閉頻度を高くしたことによる発熱の増加が考えられる。なお、これによる開閉動作への影響は生じなかった。

5) 試験体：HYB ID-No. 1、2、3 ステップ 5 の結果

これまでに適用された開閉頻度のうち、1 サイクル/秒や 1 サイクル/1.62 秒はリレーの耐久性を検証するための加速試験を目的として設定された頻度である。しかしながら実使用においては 0.5MPa の SF₆ 雰囲気中で、長時間(数十～数百時間)、接点閉状態で通電保持されると考えられる。このため、本ステップでは接点が SF₆ 雰囲気中でとりあえず約 4 時間、通電・閉状態に保持された場合のリレー本体の温度変化とその後の開閉動作への影響について試験した。Fig. 3.4.5 に結果を示す。

開始約 15 分後、温度は 23°C～24°C で平衡に達する。終了直前に操作電圧を 3 回“入”“切”し、接点の開閉に異常のないこと、また操作電圧 8V 近辺で接点が開くことを併せて確認した。なお、No. 1、No. 3 の温度上昇分はそれぞれ 1°C と 4°C でステップ 3 に近い結果を示した。

6) 試験体：HYB ID-No. 1、2、3 ステップ 6 の結果

ステップ 5 での影響を調べるため、ステップ 4 と同じ条件で試験した。Fig. 3.4.6 に結果を示す。繰返し動作前後の温度上昇は No. 1 が 3°C、No. 3 が 6°C で、温度変化と共にステップ 4 に近い結果となった。本ステップ終了時の接点総開閉数は約 14,000 回になったがリレーの開閉動作に異常は見られなかった。

7) 試験体：HYB ID-No. 1、2、3 ステップ 7 の結果

ステップ 5 の追試として本ステップを実施した。保持時間をステップ 5 より 1 時間長い 5 時間とした他はステップ 5 と同様の条件である。Fig. 3.4.7 に結果を示す。温度変化はステップ 5 に似た傾向を示し、開始約 15～30 分後、24°C で平衡に達する。No. 1、No. 3 の温度上昇分はそれぞれ 2.5°C と 7°C でステップ 5 の結果に比べ共に 2°C 程度高めである。終了直前に操作電圧を 3 回“入”“切”し、接点の開閉動作に異常のないことを確認した。

8) 試験体：HYB ID-No. 1、2、3 ステップ 8 の結果

ステップ 7 終了後、SF₆ ガスを抜き、チャンバーを真空排気して大気を導入、ステップ 2 と同様の環境条件で試験した。接点开閉頻度は 1 サイクル/1.62 秒、ステップ 2 の 40 倍に設定した。Fig. 3.4.8 に結果を示す。昇温傾向はステップ 2 に近く、温度上昇分は No. 1 では 6°C でステップ 2 と同じ、No. 3 では 2°C 高い 9°C でステップ 2 とそれほどの違いは見られなかった。

9) 試験体：HYB ID-No. 4、5、6 ステップ 1 の結果

既に述べたように、HYB を含め、本スクリーニング試験の対象となったリレーはすべて市販品で十分な使用実績を持つ製品である。従って、品質にバラツキはないと考えられるが試験データの信頼性を高めるため、他の3体（HYB ID-No. 4、5、6）について第2ステージの試験、4ステップを実施した。

チャンバー外部・大気中、接点開閉頻度 1 サイクル/1.62 秒、開閉動作時間を 3 時間に設定し試験した。Fig. 3.4.9 に結果を示す。昇温傾向は、接点開閉頻度を 1 サイクル/64 秒とした以外は本ステップと同じ環境条件で試験した第1ステージ、ステップ1の結果に似ている。開始前の温度を考慮すると温度上昇分についてもさほどの違いはない。

10) 試験体：HYB ID-No. 4、5、6 ステップ2の結果

チャンバー内部・大気中、接点開閉頻度 1 サイクル/1.62 秒、開閉動作時間を 3 時間に設定し試験した。Fig. 3.4.10 に結果を示す。第1ステージのステップ8は本ステップと同じ条件で試験している。両ステップの昇温傾向を比べると、ステップ8では開始3時間後でも平衡に達していないが、本ステップの場合、開始15分後には平衡に達している。平衡時の温度は開始前の温度を考慮しても第1ステージのステップ8の方がやや高いが、試験体が同一でないことに起因していると考えられる。開閉動作に何ら不具合は生じなかった。

11) 試験体：HYB ID-No. 4、5、6 ステップ3、ステップ4の結果

ステップ3の試験結果の再現性を確認するため、ステップ3と同様の条件にてステップ4を実施した。接点開閉頻度は 1 サイクル/1.62 秒、開閉動作時間は 3 時間に設定し、0.5MPa の SF₆ 雰囲気中で試験した。Fig. 3.4.11 と Fig. 3.4.12 にステップ3、ステップ4それぞれの結果を示す。昇温傾向はほぼ同じで、平衡時の温度はステップ4の方がステップ3に比べ1°C程度高めである。共に開閉動作に不具合は生じなかった。

Table 3.4 Outline of the screening test of the hybrid relay (G9H-210S).

Relay	Test condition	Test step-1	Test step-2	Test step-3	Test step-4	Test step-5	Test step-6	Test step-7	Test step-8
HYB* [ID-No.1] [ID-No.2] [ID-No.3]	Environment	Atm. (outside of the chamber) 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A
	Electric load	1/64	1/64	1/64	1/1.62	1/1.62	1/1.62	1/1.62	1/1.62
	Frequency of open and close (cycle/sec)	2	3	3	3	3	3	3	3
	Operation time (hr)	113	169	169	6,667	6,667	6,667	6,667	6,667
	Total number of open and close (cycle)	Fig. 3.4.1	Fig. 3.4.2	Fig. 3.4.3	Fig. 3.4.4	Fig. 3.4.5	Fig. 3.4.6	Fig. 3.4.7	Fig. 3.4.8
Result of the temperature change (reference figure)	Atm. (outside of the chamber) 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A
HYB* [ID-No.4] [ID-No.5] [ID-No.6]	Environment	Atm. (outside of the chamber) 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A
	Electric load	1/1.62	1/1.62	1/1.62	1/64	1/1.62	1/1.62	1/1.62	1/1.62
	Frequency of open and close (cycle/sec)	3	3	3	3	3	3	3	3
	Operation time (hr)	6,667	6,667	6,667	169	169	169	169	169
	Total number of open and close (cycle)	Fig. 3.4.9	Fig. 3.4.10	Fig. 3.4.11	Fig. 3.4.12	Fig. 3.4.12	Fig. 3.4.12	Fig. 3.4.12	Fig. 3.4.12
Result of the temperature change (reference figure)	Atm. (outside of the chamber) 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	SF ₆ /0.5MPa 3φ200V/3A	Atm. (inside of the chamber) 3φ200V/3A

* The number of contact is one pole; therefore three relays are necessary to use for three phases AC power.

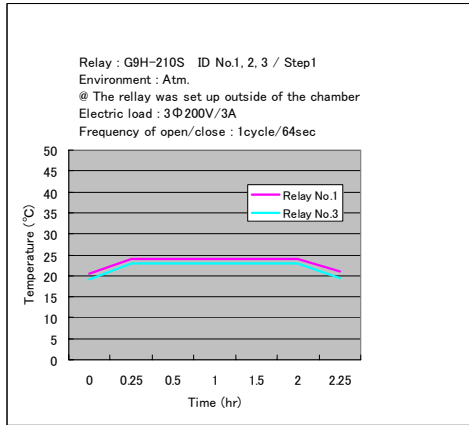


Fig. 3.4.1

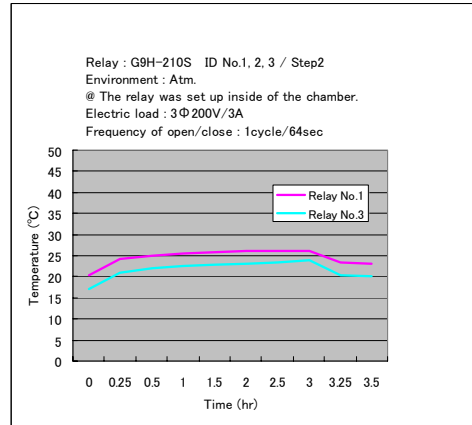


Fig. 3.4.2

Fig. 3.4.1 Temperature changes of the HYB bodys (Red. No.1; Blue. No.3) outside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.1,2,3; Test step1; Frequency 1cycle/64sec. Fig. 3.4.2 Temperature changes of the HYB bodys (Red. No.1; Blue. No.3) inside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.1,2,3; Test step2; Frequency 1cycle/64sec.

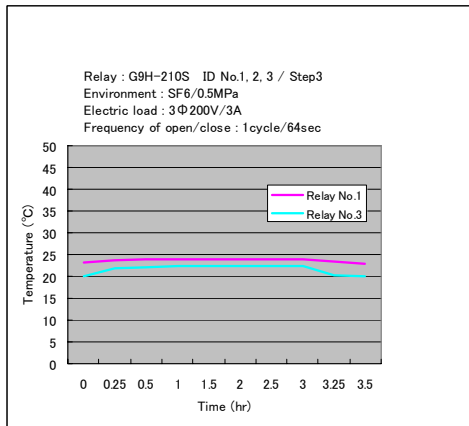


Fig. 3.4.3

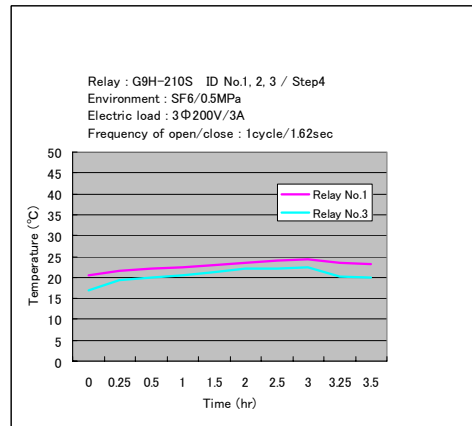


Fig. 3.4.4

Fig. 3.4.3 Temperature changes of the HYB bodys (Red. No.1; Blue. No.3) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.1,2,3; Test step3; Frequency 1cycle/64sec. Fig. 3.4.4 Temperature changes of the HYB bodys (Red. No.1; Blue. No.3) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.1,2,3; Test step4; Frequency 1cycle/1.62sec.

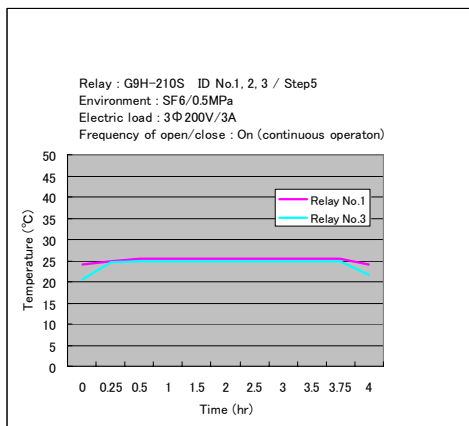


Fig. 3.4.5

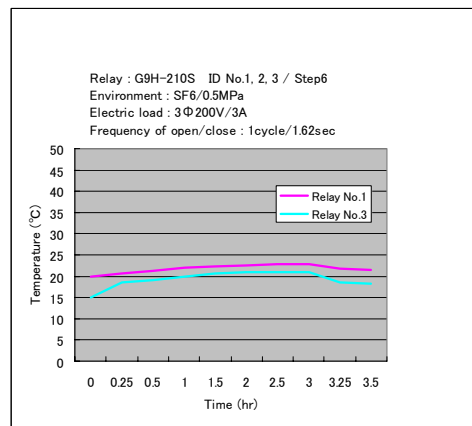


Fig. 3.4.6

Fig. 3.4.5 Temperature changes of the HYB bodys (Red. No.1; Blue. No.3) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.1,2,3; Test step5; Keep a contact at close. Fig. 3.4.6 Temperature changes of the HYB bodys (Red. No.1; Blue. No.3) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.1,2,3; Test step6; Frequency 1cycle/1.62sec.

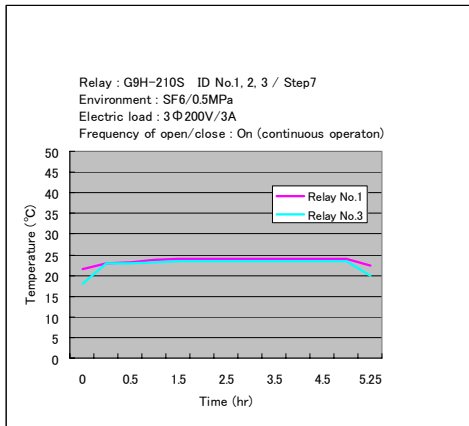


Fig. 3.4.7

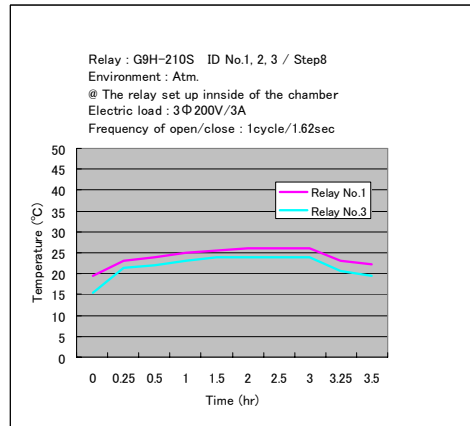


Fig. 3.4.8

Fig. 3.4.7 Temperature changes of the HYB bodies (Red. No.1; Blue. No.3) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.1,2,3; Test step7; Keep a contact at close. Fig. 3.4.8 Temperature changes of the HYB bodies (Red. No.1; Blue. No.3) inside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.1,2,3; Test step8; Frequency 1cycle/1.62sec.

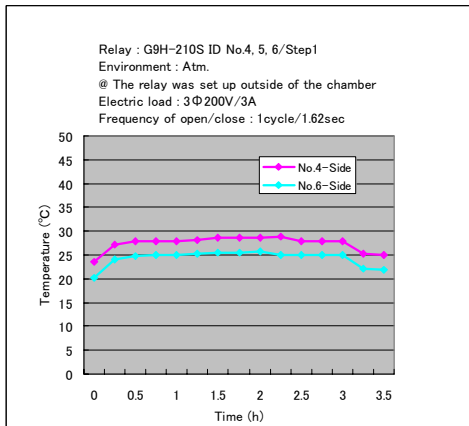


Fig. 3.4.9

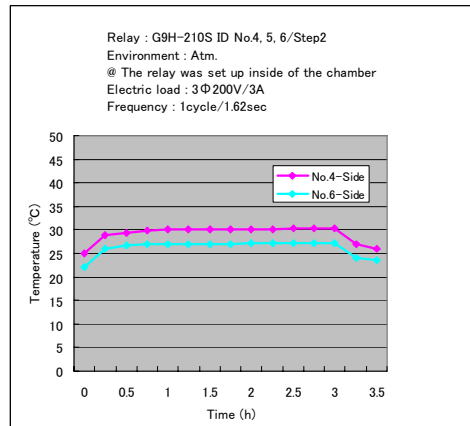


Fig. 3.4.10

Fig. 3.4.9 Temperature changes of the HYB bodies (Red. No.4; Blue. No.6) outside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.4,5,6; Test step1; Frequency 1cycle/1.62sec. Fig. 3.4.10 Temperature changes of the HYB bodies (Red. No.4; Blue. No.6) inside of the chamber under atmospheric pressure. ID No.4,5,6; Test step2; Frequency 1cycle/1.62sec.

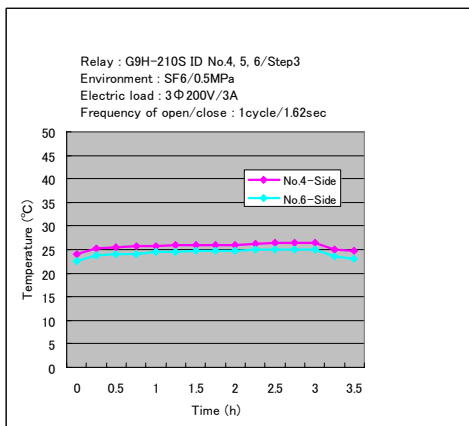


Fig. 3.4.11

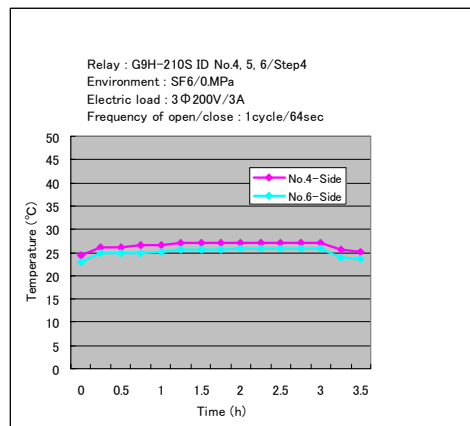


Fig. 3.4.12

Fig. 3.4.11 Temperature changes of the HYB bodies (Red. No.4; Blue. No.6) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.4,5,6; Test step3; Frequency 1cycle/1.62sec. Fig. 3.4.12 Temperature changes of the HYB bodies (Red. No.4; Blue. No.6) under SF₆ of 0.5MPa. ID No.4,5,6; Test step4; Frequency 1cycle/64sec.

4. 試験後観察結果

試験後観察は、SF₆ ガス雰囲気中の試験で開閉障害が見られた小型汎用リレー (EMR) と高感度コンタクター (MAG) を中心に実施した。ソリッドステート・コンタクター (SSR) とハイブリッド・パワーリレー (HYB) については、共に開閉障害が見られず動作も安定していたこと、また、SSR はその構造上分解が容易でないことからこれらのリレーについては実施しなかった。

試験後観察は分解できた範囲での 1) 目視による外観観察、2) 拡大鏡とデジタルカメラの組合せによる接点表面の拡大観察、3) 接点表面の走査型電子顕微鏡 (scanning electron microscope, SEM) による観察、4) エネルギー分散型 X 線分析装置 (energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS) を使用した接点表面の元素分析について実施した。以下に EMR と MAG それぞれの結果について述べる。

4.1 小型汎用リレー

4.1.1 目視による外観観察

Fig. 4.1.1 に EMR ID No. 3 のステップ 3 終了後の外観写真を示す。この時点での接点総開閉数は、開閉頻度 1 サイクル/秒で約 35,000 回である。図中 1 はリレー本体背面部で、リレーから飛散したとみられる黒色のダストがプラスチックカバー内に付着している。図中 2 は側面部で、接点近傍のカバー (左側) がアーク放電の影響により黒化している。図中 3 は図中 1 の反対側で接点部である (b 接点固定側裏面)。ダストの付着は見られないが下側が薄黒くなっている。図中 4 は図中 2 の反対側の側面で右下隅が黒化している。図中 5 はリレーの上部で特段の変化は見られない。以上から外観所見としては、繰返し開閉された接点近傍にアーク放電の影響による何らかの変化が生じていることがうかがえる。

ステップ 4 からステップ 8 では、既に述べた通り、リレー本体を効率的に SF₆ ガスに接触させることを目的に、カバーのみ標準品のカバーから穴付きカバー (直径 10mm の穴を上部と側面の計 5 箇所加工) に変えて試験した。Fig. 4.1.2 に外観写真を示す。

Fig. 4.1.3 にステップ 8 終了後の EMR ID No. 3 の外観写真を示す (専用ソケットに取り付けてある)。ステップ 1 からの通算接点総開閉数はおよそ 46,000 回で、開閉頻度 1 サイクル/秒と 1 サイクル/1.62 秒でのそれぞれの開閉数は 35,000 回と 11,000 回である。図中 1 は接点側、図中 2 は接点側、側面、上部の 3 箇所を示している。プラスチックカバー内部にはリレー本体から飛散した黒色のダストが付着している他、接点近傍は他の箇所に比べ著しく変色している。

Fig. 4.1.4 は試験架台上に落下、付着したダストである。接点开閉時に発生したアーク放電により、分解した SF₆ の成分 (例えば SF₄) が気中の水分や接点近傍の金属材料と反応し、フッ化物や硫化物を生成、ダストとなってプラスチックカバーの穴を通して落下したと推定される。なお、

ダストは拭き取りができないほど固着していた。

Fig. 4.1.5 に穴付きプラスチックカバーを取り外したステップ 8 終了後の EMR ID No. 3 の外観写真を示す。ヒンジ部 (①) に取り付けられた 3 枚の薄板先端の表裏に、直径 4mm の接点 (銀合金製) が装着されている (②)。これらの薄板は操作コイル (④) の励磁の有無により固定側接点 (③) の a、b 接点間を左右に動く (写真左側が b 接点 (または NC 接点)、右側が a 接点 (または NO 接点) として機能する)。

Fig. 4.1.6 に駆動側の 3 個の b 接点 (②) を示す。繰返し開閉により作動前の銀色が黒灰色に変色している。固定側の b 接点にも同様の変化が見られる。これらの接点表面は一様に荒れているが、後に述べる MAG の接点に見られるような窪みや突起は生じてはいない。

Fig. 4.1.7 は駆動側接点の裏面で a 接点として機能する。繰返し開閉はしていたが、通電されていないため銀合金の光沢がそのまま残っている。本接点と接触する固定側の接点 (③) についても同様である。④はヒンジ部の裏側と対面し、ヒンジに取り付けられた駆動側の接点を左右に動作させるための操作コイルで、中央の白い部分はコイルに挿入された鉄片である。

4.1.2 走査型電子顕微鏡 (SEM) と X 線分析装置 (EDS) による接点表面の観察及び元素分析 本観察に使用した機器の主仕様を以下に示す。

- ・拡大鏡とデジタルカメラ

型式及びメーカー : IXY DIGITAL 400 - キヤノン製

- ・走査型電子顕微鏡

型式及びメーカー : S-4300 - 日立製

加速電圧 : 17.0kV

- ・エネルギー分散型エックス線分析装置

型式及びメーカー : EDAX-Poenix - EDAX 製

加速電圧 : 17.0kV

検出器 : Det type/UTW+

分解能 : 135 (Mn の K α 線の半値幅)

時定数 : 35 μ sec

Fig. 4.1.8 はステップ 8 終了後の EMR ID No. 3 の駆動側 b 接点 3 個のうちの一つである。拡大鏡で約 5 倍に拡大しデジタルカメラで撮影した。外径 4mm、厚さ 1mm の銀合金の接点の周囲には試験によって接点表面から飛散したとみられる同色の堆積物が付着している。本 b 接点の裏面にある無通電の a 接点 (Fig. 4.1.10、銀合金の光沢が現存している) に比べ接点表面の腐食 (荒れ) が著しい。Fig. 4.1.9 はこの b 接点表面を SEM によって約 20 倍に拡大した写真である。表面全体がほぼ一様に荒れている様子がわかる。Fig. 4.1.11 は無通電 a 接点 (Fig. 4.1.10) の SEM 写

真で、腐食とは無縁の平滑な面が映し出されている。

Fig. 4.1.12～4.1.15 は EDS の特性X線スペクトル測定によって検出された接点表面の元素分析結果である。Fig. 4.1.12、Fig. 4.1.13 は Fig. 4.1.9 に示す a 接点全表面の銀 (Ag) と硫黄 (S) についてのそれぞれの面分析結果 (カラーマッピング)、また Fig. 4.1.14、Fig. 4.1.15 は Fig. 4.1.11 に示す b 接点全表面の銀 (Ag) と硫黄 (S) についてのそれぞれの面分析結果を示す。接点の構成元素である銀は a、b 両接点上に一様に分布しているが、a 接点の方が b 接点に比べやや密度が濃いように感じられる。また、SF₆ ガスの分解により生成したと考えられる硫黄も両接点上に付着している。

Fig. 4.1.16、Fig. 4.1.17 は接点のほぼ中央を横切る形でプローブを走査したときの元素分析結果である。Fig. 4.1.16 は Fig. 4.1.9 に示す a 接点の、また Fig. 4.1.17 は Fig. 4.1.11 に示す b 接点それぞれの全元素 (ホウ素からウラン) についての線分析結果を示す。測定時間が a 接点で 148 秒、b 接点で 136 秒である以外、他の測定条件は同じである。図中、横軸は元素から放出される特製 X 線のエネルギー、縦軸は検出カウント数 (強度)、フルスケールは共に 5,000 カウンツで、表面から数ミクロン深さの情報が得られる。銀を筆頭に、Cu、Al、Mg などが検出されている他、フッ素もわずかながら検出されている。a 接点と b 接点とでは表面形態、走査ラインともに異なるため定量性はなく試料間での強度比較はできない。また、分析手法上、化合物としての硫化銀 (Ag₂S) は分析できていないが、硫黄が検出されていることと変色した接点の色から硫化銀が生成されていると考えられる。

なお、駆動側の a、b 接点と接触する固定側の接点についても同様の観察、分析を実施したが駆動側接点とほぼ同様の結果であった。

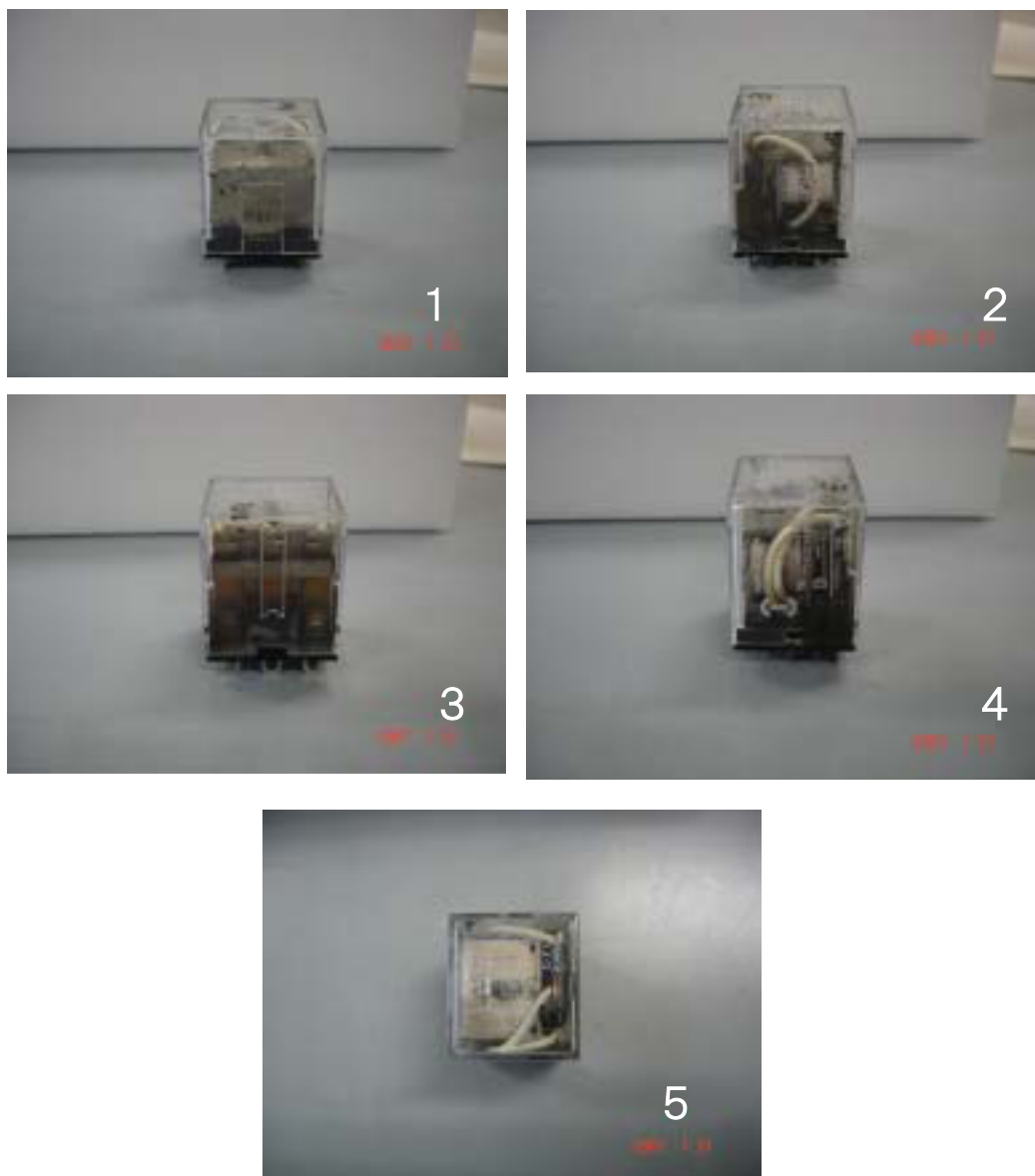


Fig. 4.1.1 Changes in appearance of the EMR (ID No. 3) after the test step 3. Environment. Atmosphere & SF₆ of 0.5MPa; Frequency 1cycle/sec; Total number of open/close 35,000. 1. Back side; 2. Side-1; 3. Front side; 4. Side-2; 5. Upper.



Fig. 4.1.2 Appearance of the EMR (ID No. 3) set up a plastic cover with five holes of 10mm in diameter. This EMR was used from the test step 4 to the test step 8.

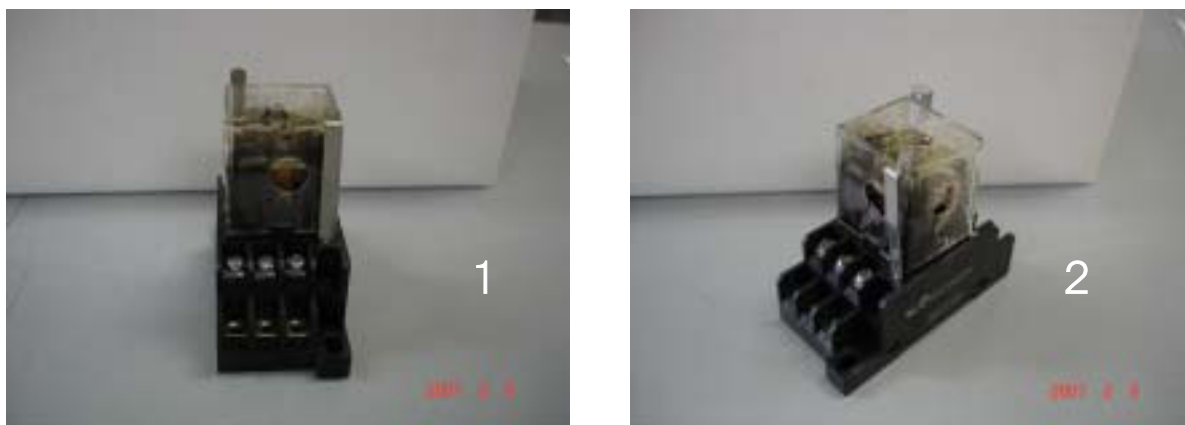


Fig. 4.1.3 Change in appearance of the EMR (ID No. 3) after the test step 8. Environment. Atmosphere & SF₆ of 0.5MPa; Frequency. 1cycle/sec & 1cycle/1.62sec; Total number of open/close 46,000. 1. Front side; 2. Side-1, Front side, Upper.

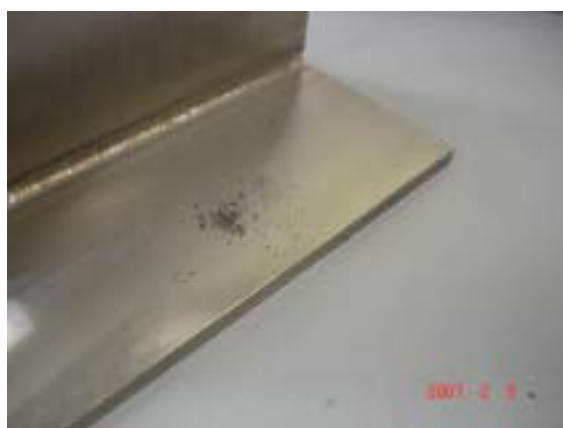


Fig. 4.1.4 Dust on the test-stage fallen from the EMR (ID No. 3) during the test step 4 to 8. The dust has strong fixation.



Fig. 4.1.5 Structure of the EMR (ID No. 3) without the plastic cover after the test step 8. 1. Hinge; 2. Contacts of moving side, three Ag alloy contacts of 4mm in diameter are attached on three thin Cu plates; 3. Contacts of fixed side; 4. Magnet coil.

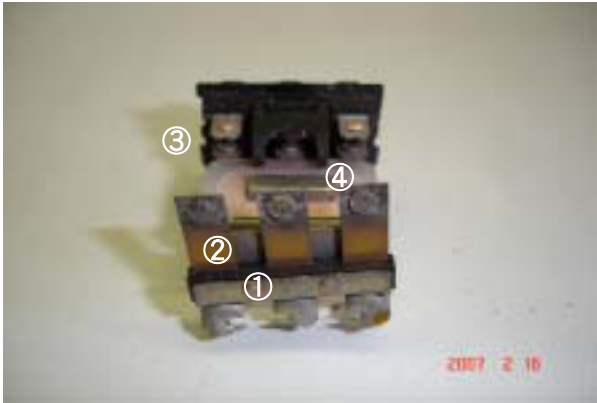


Fig. 4.1.6

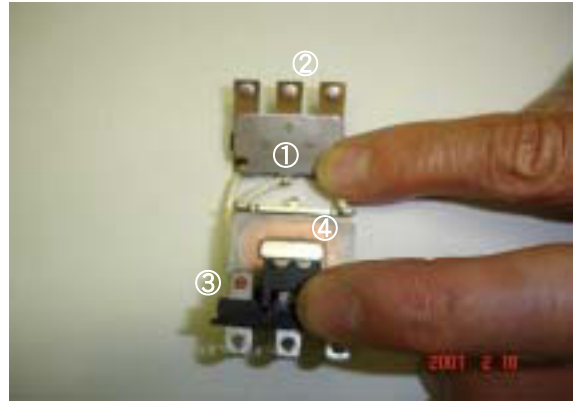


Fig. 4.1.7

Fig. 4.1.6 Change in appearance of the moving side NC-contacts of the EMR (ID No. 3) after the test step 8. 1. Environment. Atmosphere & SF₆ of 0.5MPa; Frequency. 1cycle/sec & 1cycle/1.62sec; Total number of open/close 46,000. 1. Hinge; 2. NC-contacts of moving side; 3. Contacts of fixed side; 4. Magnet coil. Fig. 4.1.7 Appearance changes of the moving side NO-contacts and fixed side contacts of the EMR (ID No. 3) after the test step 8. 1. Hinge; 2. NO-contacts of moving side; 3. Contacts of fixed side, upper. NO-contacts, lower. NC-contacts; 4. Magnet coil.



Fig. 4.1.8

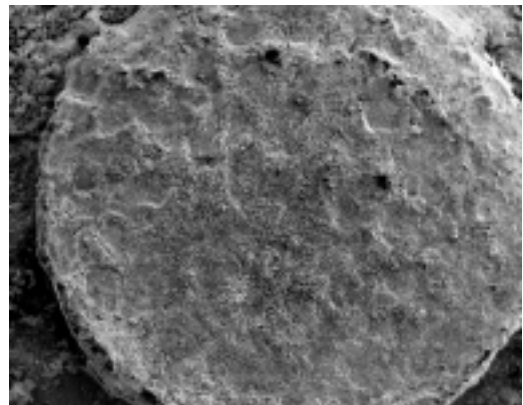


Fig. 4.1.9

Fig. 4.1.8 Closeup of the moving side NC-contact of the EMR (ID No. 3) after the test step 8. Diameter of the contact is 4mm. Fig. 4.1.9 Closeup of the same sample of figure 4.1.8 by SEM.



Fig. 4.1.10

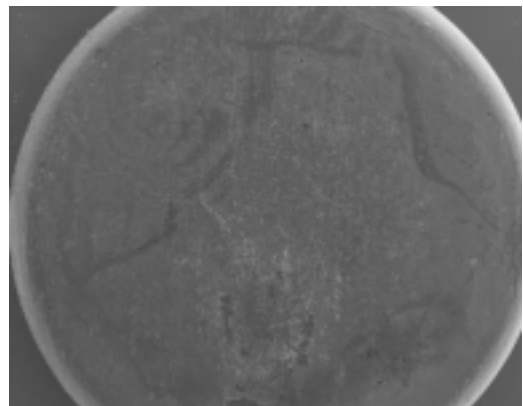


Fig. 4.1.11

Fig. 4.1.10 Closeup of the moving side NO-contact of the EMR (ID No. 3) after the test step 8. Diameter of the contact is 4mm. Fig. 4.1.11 Closeup of the same sample of figure 4.1.10 by SEM.

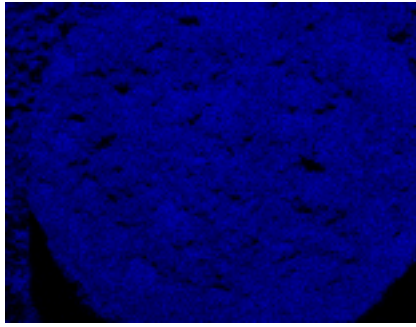


Fig. 4.1.12

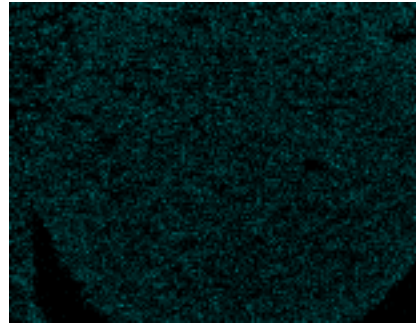


Fig. 4.1.13

Fig. 4.1.12 Qualitative elemental analysis of Ag on the contact surface represented the figure 4.1.9 by EDS.
 Fig. 4.1.13 Qualitative elemental analysis of S on the contact surface represented the figure 4.1.9 by EDS.

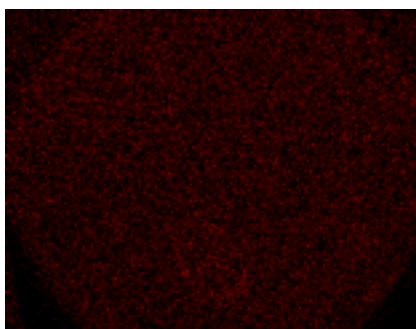


Fig. 4.1.14

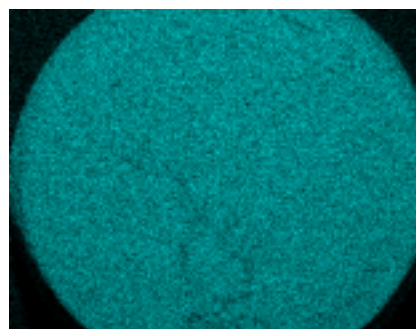


Fig. 4.1.15

Fig. 4.1.14 Qualitative elemental analysis of Ag on the contact surface represented the figure 4.1.11 by EDS.
 Fig. 4.1.15 Qualitative elemental analysis of S on the contact surface represented the figure 4.1.11 by EDS.

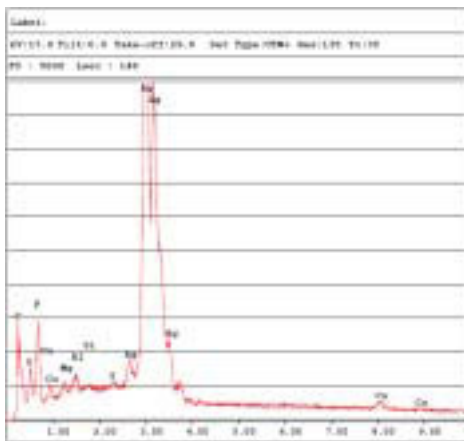


Fig. 4.1.16

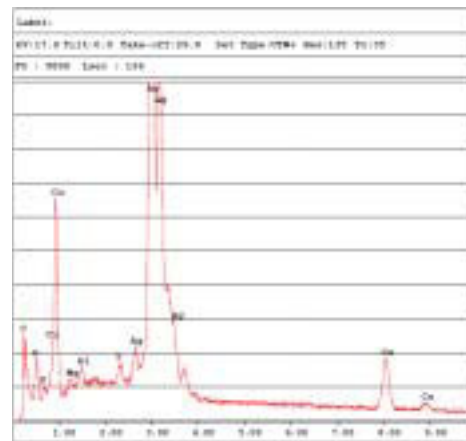


Fig. 4.1.17

Fig. 4.1.16 Elemental analysis of the contact surface represented the figure 4.1.9 by EDS. Horizontal line - Energy (keV);
 Vertical line - Number of count (Intensity, Full scale 5000); Measurement time - 148sec.

Fig. 4.1.17 Elemental analysis of the contact surface represented the figure 4.1.11 by EDS. Horizontal line - Energy (keV);
 Vertical line - Number of count (Intensity, Full scale 5000); Measurement time - 136sec.

@ Measurement conditions (common), Acceleration voltage. 17kV; Type of detector. Det type UTW+; Resolution power of detector. 135 (half-width of $K\alpha$ line of Mn); Time constant. 35 μ s; Take-off. 29.8deg..

4.2 高感度コンタクター

4.2.1 目視による外観観察

Fig. 4.2.1 に MAG ID No. 1 のステップ 2 終了後の固定側接点の外観写真を示す。左右のハウジングが組み合わさって 4 対の接点を構成する（接点番号：1-2、3-4、5-6、13-14）。これらの接点間をプランジャー式の駆動側接点が上下し、接点を開閉する仕組みになっている。なお、13-14 は補助接点で駆動側の補助接点と開閉接触はするが通電はしていない。この時点での接点総開閉数は、大気、SF₆ ガス環境下、開閉頻度 1 サイクル/1.62 秒で約 11,000 回である。

通電された接点（1-2、3-4、5-6）は通電前の白色（補助接点 13-14 参照）から黒灰色に変色し、表面はかなり荒れて中心に窪みが形成されている。この窪みと接触していた駆動側の接点には突起ができていて、多分に固定側接点から移着（転移）したものと推測される。因みに本事象は、先に試験したいずれの EMR にも見られなかった。この原因としては、MAG の接点外径は 3mm で EMR の 4mm に比べ小さいため、結果として MAG の方が EMR に比べ接点部の電流密度が高くなったことによると考えられる。

Fig. 4.2.2 に MAG ID No. 2 のステップ 3 終了後の分解外観写真を示す。①が 4 対の接点を持つプランジャー式の駆動側接点で、②の固定側接点の上部空間を上下して接点を開閉する。大気、SF₆ ガス環境下、開閉頻度 1 サイクル/1.62 秒での接点総開閉数は約 6,666 回（SF₆ ガス環境下、無通電状態での回数 2,222 回を含む）である。総開閉数は MAG ID No. 1 に比べ 4,000 回程度少ないが、外観所見は前述した MAG ID No. 1 と同様である。

4.2.2 走査型電子顕微鏡（SEM）と X 線分析装置（EDS）による接点表面の観察及び元素分析

MAG の場合と同様、観察に使用した機器の主仕様を以下に示す。

- ・拡大鏡とデジタルカメラ

型式及びメーカー : IXY DIGITAL 400 - キヤノン製

- ・走査型電子顕微鏡

型式及びメーカー : S-4300 - 日立製

加速電圧 : 17.0kV

- ・エネルギー分散型エックス線分析装置

型式及びメーカー : EDAX-Poenix - EDAX 製

加速電圧 : 17.0kV

検出器 : Det type/UTW+

分解能 : 135 (Mn の K α 線の半値幅)

時定数 : 35 μ sec

Fig. 4.2.3 はステップ 3 終了後の MAG ID No.2 の駆動側接点 3 個のうちの一つである（補助接点は除く）。拡大鏡で約 5 倍に拡大しデジタルカメラで撮影した。外径 3mm、厚さ 1mm の銀合金製の接点の周囲には接点表面から飛散したとみられる同色の堆積物が付着している。無通電の補助接点（Fig. 4.2.1 の接点番号 13、14 を参照）の平滑で銀白色の光沢に比べ接点表面の腐食（荒れ）が著しい。Fig. 4.2.4 は Fig. 4.2.3 の右側の接点表面を SEM によって約 20 倍に拡大した写真である。接点表面の一部が抉られ、その周辺が盛り上がっている。

Fig. 4.2.5 は Fig. 4.2.3 に示した駆動側の接点と接触していた固定側接点の全体図、Fig. 4.2.6 は 20 倍の拡大図である。接点の外周部を除く中心部は一様に浅く窪んでいる。

Fig. 4.2.7～4.2.10 は EDS の特性 X 線スペクトル測定によって検出された接点表面の元素分析結果（面分析：カラーマッピング）である。Fig. 4.2.7、Fig. 4.2.8 は Fig. 4.2.4 に示す駆動側接点表面の銀（Ag）と硫黄（S）、また Fig. 4.2.9、Fig. 4.2.10 は Fig. 4.2.6 に示す固定側接点表面の銀と硫黄それぞれの元素のカラーマッピングの結果を示す。接点の構成元素である銀については駆動側、固定側両接点上に一様に分布していて特段の違いは認められない。図中の黒い部分は表面の盛り上がり、あるいは窪みによる陰の部分と推定される。また、SF₆ ガスの分解により生成したと考えられる硫黄も両接点上に付着していて、所見としては銀に同じである。

Fig. 4.2.11、Fig. 4.2.12 は接点のほぼ中央を横切る形でプローブを走査したときの元素分析結果である。Fig. 4.2.11 は Fig. 4.2.4 に示す駆動側接点の、また Fig. 4.2.12 は Fig. 4.2.6 に示す固定側接点それぞれの全元素（ホウ素からウラン）についての線分析結果を示す。測定時間は駆動側接点が 307 秒、固定側接点が 139 秒である。図中、横軸は元素から放出される特性 X 線のエネルギー、縦軸は検出カウント数で駆動側、固定側各接点それぞれのフルスケールは 8,341 と 3,038 である。検出元素は EMR と同じであるが、MAG の場合、銅（Cu）の検出カウントが銀に比べて高い（駆動側接点）か、ほぼ同等（固定側接点）の結果となっている。また、EMR と同様、硫黄が検出されていることと接点の変色から硫化銀は生成されていると考えられる。

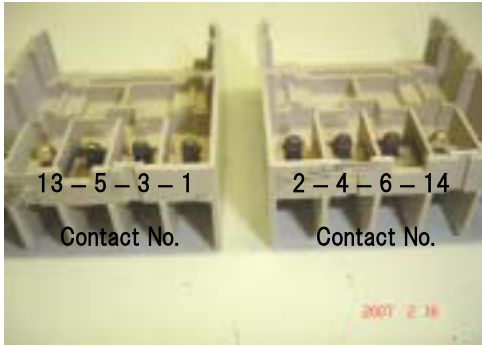


Fig. 4.2.1

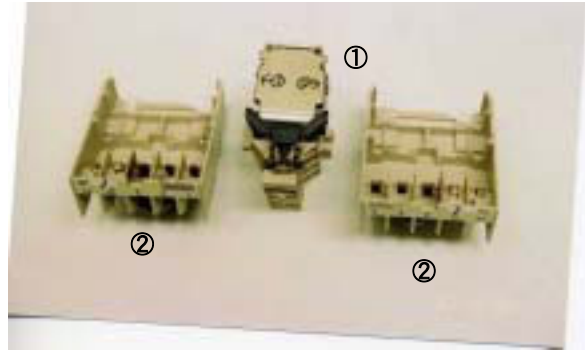


Fig. 4.2.2

Fig. 4.2.1 Changes in appearance of the fixing side contacts of the MAG (ID No.1) after the test step 2. Environment. Atmosphere & SF₆ of 0.5MPa; Frequency. 1cycle/1.62sec; Total number of open/close 11,111. Pairing No. of contacts. 1-2; 3-4; 5-6; 13-14 (auxiliary contact).

Fig. 4.2.2 Changes in appearance of the contacts of the MAG (ID No.2) after the test step 3. Environment. Atmosphere & SF₆ of 0.5MPa; Frequency. 1cycle/1.62sec; Total number of open/close 6,666. 1. Plunger typed moving side contact; 2. Fixing side contacts.



Fig. 4.2.3

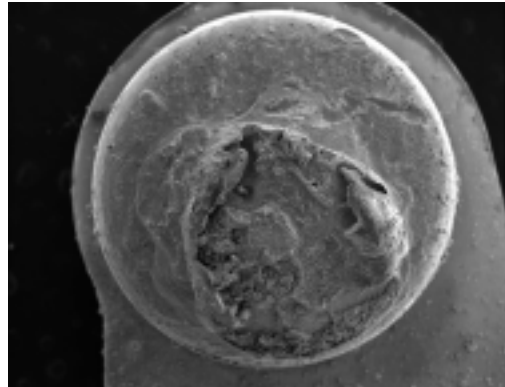


Fig. 4.2.4

Fig. 4.2.3 Closeup of the moving side contact of the MAG (ID No.2) after the test step 3. Diameter of the both contacts is 3mm, respectively.

Fig. 4.2.4 Closeup of the right side contact in the figure 4.2.3 by SEM.

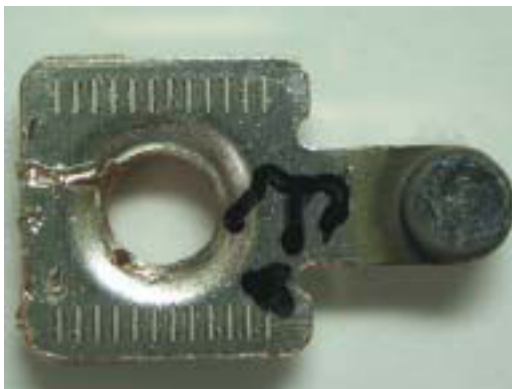


Fig. 4.2.5

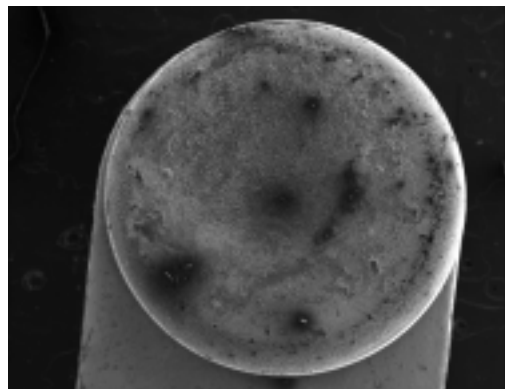


Fig. 4.2.6

Fig. 4.2.5 Closeup of the fixing side contact of the MAG (ID No.2) after the test step 3. Diameter of the contact is 3mm.

Fig. 4.2.6 Closeup of the same sample of figure 4.2.5 by SEM.

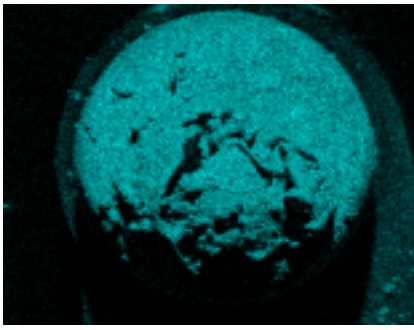


Fig. 4.2.7

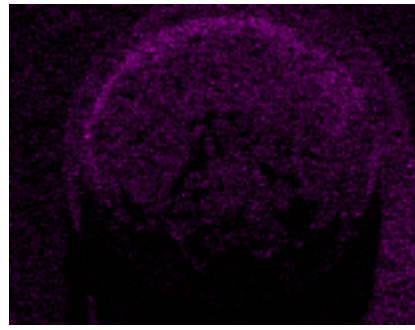


Fig. 4.2.8

Fig. 4.2.7 Qualitative elemental analysis of Ag on the contact surface represented the figure 4.2.4 by EDS.
 Fig. 4.2.8 Qualitative elemental analysis of S on the contact surface represented the figure 4.2.4 by EDS.

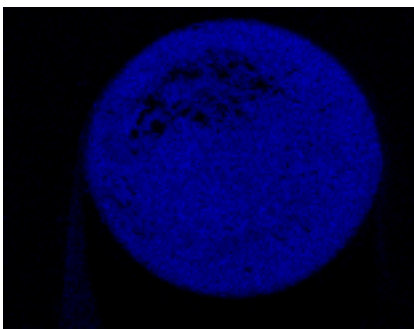


Fig. 4.2.9

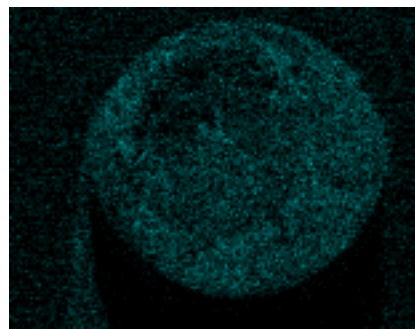


Fig. 4.2.10

Fig. 4.2.9 Qualitative elemental analysis of Ag on the contact surface represented the figure 4.2.6 by EDS.
 Fig. 4.2.10 Qualitative elemental analysis of S on the contact surface represented the figure 4.2.6 by EDS.

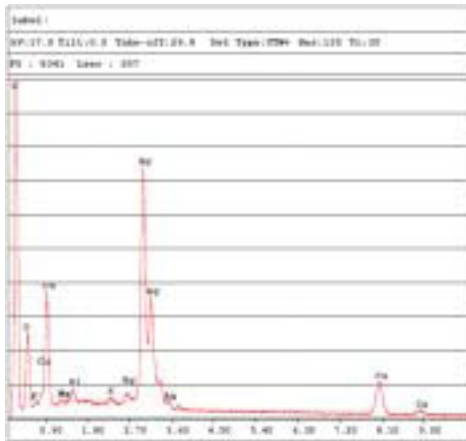


Fig. 4.2.11

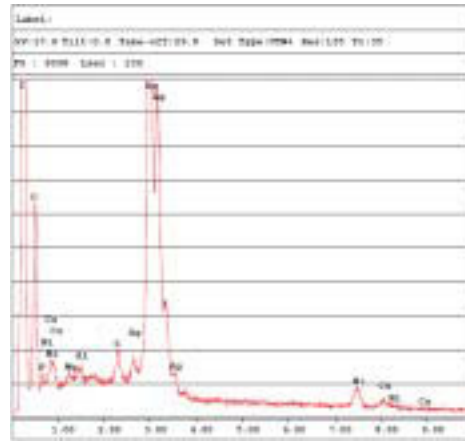


Fig. 4.2.12

Fig. 4.2.11 Elemental analysis of the contact surface represented the figure 4.2.4 by EDS. Horizontal line - Energy (kV); Vertical line - Number of count (Intensity, Full scale 8341); Measurement time - 307sec.
 Fig. 4.2.12 Elemental analysis of the contact surface represented the figure 4.2.6 by EDS. Horizontal line - Energy (kV); Vertical line - Number of count (Intensity, Full scale 3038); Measurement time - 139sec.
 @ Measurement conditions (common), Acceleration voltage. 17kV; Type of detector. Det type UTW+; Resolution power of detector. 135 (half-width of $K\alpha$ line of Mn); Time constant. 35 μ s; Take-off. 29.8deg..

5. 考 察

第3章の試験結果、第4章の試験後観察結果を基に、小型汎用リレー（EMR）、高感度コンタクター（MAG）、ソリッドステート・コンタクター（SSR）及びハイブリッド・パワーリレー（HYB）それぞれについて考察する。

5.1 小型汎用リレー

当初の予想通り、リレーの基本的な開閉挙動はリレーの本体温度をモニターすることで把握できることがわかった。EMRの場合、本体温度は(1)測定開始初期、(2)NFB投入後、(3)繰返し開閉時の3段階に分けて上昇する。(1)は周辺温度によるもので空調機等、外気温度の影響を受けやすいチャンバー外設置の方がチャンバー内設置に比べ顕著である。(2)はb接点結線で使用したためNFB投入と同時に通電が開始、接点抵抗の加熱によって温度が上昇する。(3)は短周期で繰り返す接点开閉時のアーク放電が急激な温度上昇の原因となっている。以下、試験条件毎の結果について述べる。

1) 大気雰囲気、チャンバー外とチャンバー内での試験

- ・接点繰返し開閉による温度上昇は、チャンバー外、チャンバー内共に開閉約1時間後には平衡に達する。
- ・平衡時の本体温度は周囲温度約20°Cの場合、チャンバー外で30°C、チャンバー内で40°C程度である。
- ・繰返し開閉時の本体温度上昇分は、おおよそチャンバー外で10°C、チャンバー内で18°Cであった。
- ・試験開閉頻度を加速試験の観点から仕様で定める電氣的最大開閉頻度の2倍（1サイクル/秒）としたが、特段の問題は生じなかった。

2) SF₆ガス雰囲気での試験

- ・操作コイルへの入力電圧、電流が正常であるにも関わらず、接点がb接点からa接点に開かない開閉障害が生じる。
- ・開閉障害が生じた後、雰囲気をSF₆ガスから大気に戻し再度試験すると正常な開閉を繰り返す。この状態を確認した後、再びSF₆ガス雰囲気で試験するとやはり開閉障害が起こる。
- ・SF₆ガスの圧力を0.35MPaと0.1MPaに減圧し試験したが、いずれの場合も0.5MPaでの試験と同様、開閉障害が発生し減圧の効果は確認できなかった。
- ・チャンバー内/大気雰囲気での試験に比べ、SF₆ガス雰囲気での試験ではリレー本体温度は数°C程度低い。SF₆ガスの冷却効果によると考えられる。

以上から大気雰囲気では正常な開閉動作を示すEMRもSF₆ガス雰囲気では動作開始数分後には

開閉障害を起こすことが分かった。この原因としては、一次的には接点开閉時に発生したアーク放電による SF₆ ガスからの S₂F₂ や SF₄ などの分解生成物の影響が考えられる (Fig. 5.1.1 の模式図を参照)。これらの分解生成物の一部は雰囲気中に残留する空気、水分、アーク近傍の構造材料と反応し低フッ化硫黄や金属フッ化物、硫化物などの二次反応生成物をつくる^{2), 3)}。

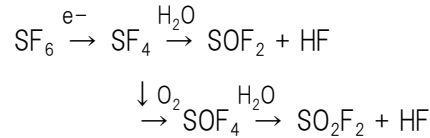


Fig. 5.1.1 Diagram of decomposition of sulfur hexafluoride (SF₆) by arc discharge³⁾.

この結果、接点表面の荒れ、硫化銀 (Ag₂S、EDS による接点表面の元素分析 (面分析 (Fig. 4.1.12)、線分析 (Fig. 4.1.16)) の結果、Ag はもとより、S も検出されている) などを生成し接点やその近傍に付着、接点の開閉障害を誘発したと考えられる。一方、Fig. 4.1.1~Fig. 4.1.3 に示すように、EMR のケース内部には黒色の粉体が飛散、付着している。通常、負荷開閉時にアーク放電を発生するリレーでは、有機ガスからの炭素、炭化銀などの粉体 (ブラックパウダー) の生成が知られているが、これに先の反応生成物が混入していると思われる。Fig. 4.1.4 はブラックパウダーの一部が試験体取付架台上に落下付着した様子を示しているが固着力が強い。

また、Fig. 4.1.5~Fig. 4.1.7 は試験後の駆動側、固定側各接点の状態を示すが、接点を含む周辺の黒灰色は観察できるが、接点上に転移 (放電あるいはジュール熱により、接点材料の一部が他方の接点に移動する現象で、この結果、一方に突起、もう一方には窪みができる) は見られない。

ところで、前述した SF₆ ガスの分解は電気的アークによるエネルギーを SF₆ ガスが吸収することによって起こり、分解したフラグメントのほとんどは再結合し元に戻ると考えられている。従って、放電の継続時間、すなわち開閉間隔を長くする (開閉頻度を低く設定する) ことはフラグメントの再結合を促し、SF₆ ガス中での開閉障害を回避するためには有効である。また、雰囲気中の空気成分、水分量の影響も大きいので SF₆ ガスの純度を上げることも重要である。

次に使用上の観点とは別に、SF₆ ガス中での開閉障害を回避するための EMR 自体の対策を考えてみる。先述したように、EMR の開閉障害のほとんどは接点が b 接点から a 接点に動作せず、感覚的には粘着しているように見受けられた。SEM による駆動側接点表面の観察では表面全体が一様に荒れている様子が映し出されていて (Fig. 4.1.9)、これと接触する固定側の接点表面も駆動側と似たような状態であった。結果、これらの荒れた接点同士の接触面にフッ化水素 (HF) が介在し粘着が派生したと推測される。一方、試験後の接点抵抗値は 0.2~0.6 Ω で試験前の 50mΩ に比べれば増加しているが、後述する MAG の 150~200 k Ω との比較ではかなり小さく、開閉が再開できれば (何らかの方法で接点を開閉できれば) 電気的導通上の問題はないと考えられる。

以下に示す(1)式は EMR の接点を左右に動作するための吸引力 (F) を表したものである⁴⁾。

$$F = (1/2\mu_0S) \cdot (NI/Re)^2 \quad (1)$$

R : コイル定数 μ_0 : 透磁率
 N : コイルの巻数 Re : 磁気回路ループの磁気抵抗
 I : コイル電流 S : 吸引面積
 F : 吸引力

操作コイルの鉄心と相対する鉄片 (ヒンジ部) の間隔 (g : アーマチュアギャップ) が広い場合 Re は近似的に

$$Re = g/\mu_0S \quad (2)$$

となり、(1) 式は次式で示される。

$$F = (\mu_0S/2) \cdot (NI/g)^2 \quad (3)$$

以上から SF₆ ガス雰囲気中で粘着した EMR の接点を再度開閉させる方策として、電気的にはコイル巻数を増やしコイル電流を高めること。構造的には吸引面積を増やし、アーマチュアギャップを小さくすることが考えられる。また、現状品の測定結果をもとに、多少の形状寸法を変更し、ヒンジ部の回転モーメントを小さくすることも方策の一つとして考えられる。具体的には、駆動側の接点取付け板は 3.4N 程度のコイルバネの力で b 接点側に接触している。この力はコイル鉄片の取付け板への作用点 (支点から 10mm の点) では 1.33N 程度である。従って、作用点を更に 5mm 程支点から遠ざければ必要な起磁力は小さくなるため、見掛け上は強い起磁力で接点を開閉することになる。

5.2 高感度コンタクター

MAG の本体温度は、接点が NO 接点 (a 接点) であるため EMR の場合とは異なり、3 段階に分けて (測定開始初期、NFB 投入後、繰返し開閉時) 上昇するようなことはない。また、接点の駆動方式はプランジャー式で、駆動側接点が固定側接点 (駆動、固定側共に 4 接点中、1 接点は補助接点) の上側に配置され上下に動作する (上方 : 接点开、下方 : 接点閉)。以下、試験条件毎の結果について述べる。

1) 大気雰囲気、チャンバー外とチャンバー内での試験

- ・チャンバー内での本体温度は接点繰返し開閉直後から上昇し、3 時間後には 27°C で平衡する様子が見られる。この間の温度上昇分は約 10°C で、同条件での EMR の上昇分、18°C に比べかなり低い。
- ・チャンバー外では繰返し開閉から約 30 分後には約 28°C で平衡に達し、温度上昇分は 2°C 程度である (スナバー回路を接続した状態での試験であるが、アーク放電の有無は

リレーの構造上確認できず、その効果については言及できない)。

2) SF₆ ガス雰囲気での試験

- ・開閉頻度を 1 サイクル/1.62 秒に設定した試験ではいずれの試験ステップでも開閉障害が起こる。
- ・開閉開始直後から電流値の指示が正常値である 3A から 2.8A、2.6A と小さくなり、1 時間後には 3 相すべての電流値がゼロとなった。この間、操作コイルへの電圧、電流は正常に輸入され、駆動側の上下する機械音はチャンバーの外から確認できた。
- ・開閉頻度を 1 サイクル/1.62 秒から 1 サイクル/64 秒に変更した 3 時間の繰返し開閉試験では異常なく動作した。
- ・その後 0.5MPa の SF₆ ガス中に 14 時間放置し、再度、開閉頻度 1 サイクル/64 秒で 2 時間の開閉試験を実施したが異常は認められなかった。
- ・再度、開閉頻度を 1 サイクル/1.62 秒に設定し試験を実施したが、開始約 70 分後に電流値が低下し始め、約 1 時間半後にはゼロとなった。以後、タイマーが自動的に停止するまでの間、操作コイルへの電圧、電流は正常に輸入され、駆動側の接点の上下する機械音はチャンバーの外から確認できた。
- ・試験後リレーの各端子間の抵抗値は試験前の 50mΩ に比べ、それぞれ 150 k Ω、200 k Ω、無限大とかなり増大した。

以上から、開閉頻度 1 サイクル/1.62 秒の場合には、EMR 同様、大気雰囲気での開閉障害は起こらないが、SF₆ ガス雰囲気では動作開始数分から数十分後には開閉障害を起こすことが分かった。一方、開閉頻度を 1 サイクル/64 秒に設定した場合は、2 ステップの試験結果ではあるが開閉障害は生じなかった (EMR では開閉頻度 1 サイクル/64 秒の試験を実施していないため考察できない)。これは 5.1 で述べたように、開閉頻度が少なくなったことで接点の開閉に伴うアーク放電の起こる時間間隔が長くなり (1 サイクル/1.62 秒の場合に比べ 40 倍)、SF₆ ガスの分解によって生じたフラグメントの再結合が容易な環境になるためと考えられる。

開閉障害の状態については、EMR では接点の粘着、MAG では駆動側接点が固定側接点と接触しているにも関わらず負荷電流が減少したことである。Fig. 4.2.1～Fig. 4.2.6 に示すように試験後の接点は、黒灰色に変色し、表面に突起あるいは窪みが形成され転移現象が生じている。Fig. 4.2.7～Fig. 4.2.12 は EDS による接点表面の元素分析結果であるが、面分析、線分析のいずれにも硫黄元素が認められることから硫化銀 (Ag₂S) の生成が推測される。また接点抵抗を測定した結果、MAG ID-No. 2 では 150 k Ω～180 k Ω、MAG ID-No. 3 では 150 k Ω～無限大を示した。EMR 同様、接点とその周辺の変色は MAG にも見られたが、MAG に特有な事象として転移現象や接点抵抗の増大があげられる。転移現象や接点抵抗の増大の原因としては、接点の外径が EMR の 4mm に対し MAG では 3mm と小さいこと、また推測であるが、接点材料の成分が必ずしも EMR と同一でないことが考えられる。結果として電気絶縁性を持つ Ag₂S の生成・付着、突起と窪みが境界抵抗を高

め負荷電流の減少を引き起こしたと推測される。また、以上のような接点状態であったにも関わらず、EMR のように接点が粘着を起こさなかったことは駆動側接点の駆動方式がプランジヤ式で、その駆動力にコイルと永久磁石を使用し吸引力を高めていることが理由として考えられる。以下に示す(4)式は駆動側接点を上下に動作するための吸引力 (F) を表したものである⁴⁾。

$$F = [((NI)^2/2) \cdot (\delta P_c / \delta x)] + [(NI) \cdot (\phi_0/P_m) \cdot (\delta P_{cm} / \delta x)] + [((\phi_0/P_m)/2) \cdot (\delta P_0 / \delta x)] \quad (4)$$

P_c : コイルからみたパーミアンス ϕ_0 : 永久磁石の磁束 N : コイルの巻数
 P_m : 永久磁石の内部パーミアンス P_0 : トータルパーミアンス I : コイル電流
 P_{cm} : コイルと永久磁石の相互パーミアンス x : コイルと永久磁石間のギャップ

吸引力は(4)式、第1項のコイルによる吸引力、第2項のコイルと永久磁石による吸引力、第3項の永久磁石による吸引力の合計になる。今回試験した MAG では接点の固着あるいは粘着は一度も確認されていないため、吸引力(駆動力)の観点からの改良等は必要ない。

アークによる分解生成物の生成を抑止することを目的にサージキラー(スナバー回路)を MAG ID-No. 2 では抵抗値: 120Ω / コンデンサ容量: 0.1μF、MAG ID-No. 3 では抵抗値: 150Ω / コンデンサ容量: 2.2μF をそれぞれ取り付けた。接点電流と接点電圧からみた抵抗値とコンデンサ容量の選定目安はそれぞれ 100Ω ~ 200Ω、1.5μF ~ 3μF であり⁴⁾、MAG ID-No. 2 の場合はコンデンサ容量は不足しているものの MAG ID-No. 3 の場合は規定範囲内である。しかしながら上述の通り、SF₆ガス中での開閉障害を回避することはできずその効果は確認できなかった。

一方、スナバー回路と周波数、すなわち R、C 直列回路のインピーダンス (Z) と周波数の関係については、例えば、R=200Ω、C=1.5μF とし、商用周波数 50Hz で使用したときの Z は約 2.1kΩ となるが、周波数を 400Hz としたときの Z は約 332Ω となり、50Hz の場合のインピーダンスの 1/6 に減少する。こうした状況でのサージキラーとしての効果、また漏れ電流への懸念については今後の検討課題である。

5.3 ソリッドステート・コンタクター

ソリッドステートリレーは半導体スイッチング素子を使用したリレーの総称で、フォトカプラーによって操作信号の入出力を行う。これにより EMR や MAG の機械式接点にみられたような開閉障害はなく、高速・高頻度の開閉が可能となっている。一方、出力半導体として本リレーで使用しているトライアック (triode AC switch、TRIAC) はその内部に残留電圧(出力オン電圧降下)があるため負荷電流が流れるとジュール熱を発生、リレー本体温度を上昇させるため放熱器が不可欠となる。本型式のリレーにおいても本体よりやや大きめのアルミニウム製の放熱器(タテ、ヨコ各 80mm、高さ 50mm、重さ 400g)が付いている。以下、試験条件毎の結果について述べるが、

温度はリレー本体温度で記述する。なお、いずれの試験においても放熱器の温度は本体温度に比べ 10°C～15°C程度高い結果を示した。

1) 大気雰囲気、チャンバー外とチャンバー内での試験

- ・チャンバー外での本体温度は接点繰返し開閉直後から上昇し、30分過ぎには 25°C前後で平衡する傾向が見られる。この間の温度上昇分は約 5°Cで、EMR、MAG に比べかなり低い。
- ・チャンバー内では平衡に達するまでの時間が長く、開閉開始 3 時間後でも平衡に達しない。温度上昇分は 7°C程度でチャンバー外に比べそれほどの違いはない。
- ・当然のことではあるが開閉音はなく、電流/電圧計の指示値に異常は認められなかった。

2) SF₆ ガス雰囲気での試験

- ・本体温度は接点繰返し開閉直後から上昇するが、15分～20分過ぎには平衡に達し、最高温度も大気雰囲気に比べ 5°C程度低い。温度上昇分は 3°C～5°Cの範囲で大気雰囲気に比べ大差はない。
- ・開閉頻度を 1 サイクル/1.62 秒と 1 サイクル/64 秒の二通りについて試験したが、平衡時の温度と温度上昇分は大気雰囲気に比べ共に 1°C～2°C低い程度で、開閉頻度の違いによる温度差は小さい。

SSR については試験後の分解点検は実施していないため、内部状態等については言及できないが、SF₆ ガス雰囲気での動作特性については、放熱器温度、リレー本体温度はそれぞれ 30°C、20°C程度と低く、開閉障害もなく EMR や MAG に比べ安定した動作を示すことが分かった。一方で半導体を使用していることによる製品間の特性のバラツキがあることを念頭に、実使用に際しては負荷条件や使用環境を考慮した確認試験を必要としている⁴⁾。具体的には、入力回路についてはパルス性、誘導性各ノイズ、入力条件では入力電圧のリップル、漏れ電流、開閉頻度、入力インピーダンスなどの項目、また、出力回路については SSR 出力側のノイズ・サージ対策などである。

5.4 ハイブリッド・パワーリレー

ハイブリッド・パワーリレーは、機械的動作を伴うエレクトロメカニカルリレー (electromechanical relay) とソリッドステートリレー (solid state relay) それぞれの長所を組み合わせたリレーである。Fig. 5.4.1、Fig. 5.4.2 に基本回路構成図及び HYB の外観写真を示す。以下に基本回路構成図に基づき動作原理を述べる。

・動作時シーケンス (X₂ 接点を閉じる)

- ① 入力 (操作) 電圧 on により
- ② リレー接点 X₁ が閉じる。これによりゲート電流が流れ
- ③ トライアック (TRIAC) が on になる。この後
- ④ X₂ 接点が閉じられ、負荷電流は X₂ 接点側とトライアック側を並列して流れるが、トライアック側のインピーダンスは接点抵抗に比べ高いためほとんどの負荷電流は X₂ 接

点側を流れる。

これにより、トライアックを使用しているにも関わらず“出力オン電圧降下”は無視できるためジュール加熱による発熱は極めて小さい。また復帰時を含め、 X_1 接点と X_2 接点は相互にわずかな時間遅れを持ち動作する機構になっている。

・復帰時シーケンス (X_2 接点を開く)

- ① 操作電圧 off により、 X_2 接点が開く
- ② このときトライアック側にも電流が流れているためアークは緩和される。
- ③ その後 X_1 接点が開となり、トライアックは off になる。

負荷側と接点側のサージはそれぞれバリスタとスナバ回路で保護する。また、トライアック保護のための熱ヒューズが装着されている。

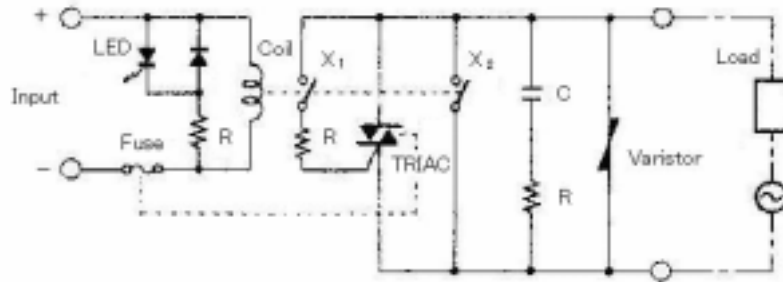


Fig. 5.4.1 Circuit composition of the hybrid relay⁵⁾.

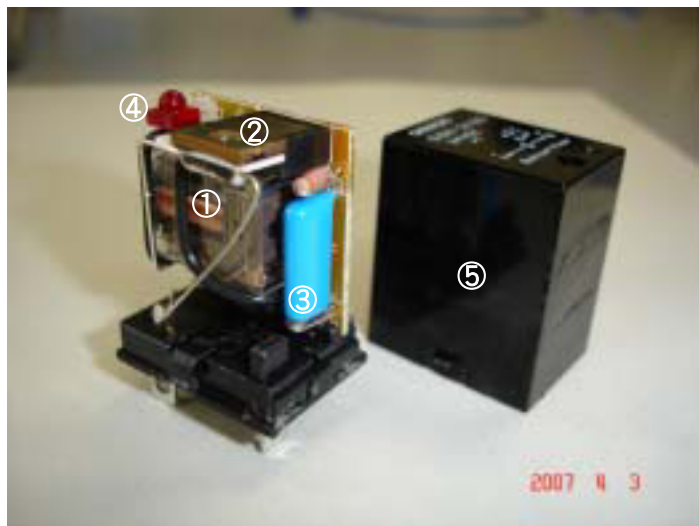


Fig. 5.4.2 Appearance of the HYB (27mm in width, 20mm in depth, 35mm in height). 1. Electromechanical relay; 2. TRIAC (triode AC switch); 3. Varistor; 4. LED (light-emitting diode); 5. Plastic cover.

以下、試験条件毎の結果について述べるが、温度は Fig. 3.4.1～Fig. 3.4.12 に示すように 3 体中、2 体の HYB について測定した。

1) 大気雰囲気、チャンバー外とチャンバー内での試験

- ・チャンバー外での本体温度は接点繰返し開閉直後から上昇し、15 分過ぎには 25℃前後で平衡する傾向が見られる。この間の温度上昇分は 2 体ともに約 5℃で、EMR、MAG に比べかなり低く SSR の本体温度と同程度である。
- ・チャンバー内では一度、平衡するがその後わずかずつ上昇する。2 体それぞれの 3 時間後の本体温度と温度上昇分は 24℃/7℃、26℃/6℃程度で SSR の本体温度と同程度である。
- ・昇温曲線はこれまでに試験した EMR、MAG、SSR に比べ直線的であり、開閉動作が安定していることを示している。

2) SF₆ ガス雰囲気での試験

- ・開閉頻度 1 サイクル/64 秒の時の温度上昇分は約 3℃で大気中の場合の 1/2 である。
- ・開閉頻度を 1 サイクル/64 秒から 1 サイクル/1.62 秒にした場合の温度上昇分は 5℃、6℃で 1 サイクル/64 秒時の約 2 倍になる。
- ・接点閉状態で連続通電（4 時間と 5 時間）した場合の本体温度は、開始 15～20 分後、25℃前後で平衡に達する。リレー間に温度差は小さく、また放置後の連続開閉にも問題は無い。

以上から HYB の平衡時の温度は、大気、SF₆ ガスいずれの雰囲気においても先に試験した EMR や MAG に比べ 5℃～10℃低く SSR の本体温度よりは 2、3℃高い。しかしながら SSR の場合は本体とは別にヒートシンクからの発熱が 30℃～40℃もある。また、SF₆ ガス中では SF₆ ガスの冷却効果により大気雰囲気時の試験に比べ総じて数℃低い結果を示した。

開閉頻度の違いによる温度差は 1 サイクル/64 秒の方が 1 サイクル/1.62 秒に比べ 3℃程度高い結果となった。わずかではあるがトライアックの“出力オン電圧降下”と負荷電流の積算による電力ロスの影響と考えられる。

ID-No. 1、2、3 の試験後 ID-No. 4、5、6 を使用して 4 ステップの試験をしたが、昇温傾向等に特段の違いはなく製品間の特性上のバラツキが小さいことを示している。試験終了後、本体のカバーを外し内部を点検したが Fig. 5.4.2 に示すように磨耗分等、ダストの飛散は見られなかった。

6. まとめ

本スクリーニング試験の目的は、大気仕様（標準仕様）の 4 種類のリレー、小型汎用リレー

(EMR) ; 高感度コンタクター (MAG) ; ソリッドステート・コンタクター (SSR) ; ハイブリッド・パワーリレー (HYB) を 0.5MPa の SF₆ ガス雰囲気中で作動させた時の温度変化や接点の開閉動作を調べると共に、同雰囲気での使用の可否に関する知見を得ることであった。Fig. 6.1 にそれぞれのリレーの試験結果から 0.5MPa の SF₆ ガス雰囲気中で試験したときの代表的な温度変化を示す。開閉頻度は EMR が 1 サイクル/秒、その他のリレーは 1 サイクル/1.62 秒である。また、SSR については本体温度で示している (ヒートシンク部は 40℃程度である)。図からもわかるように、SSR と HYB は共に温度変化が安定していて接点の開閉障害もなく同雰囲気での使用は可能と判断される。特に、HYB は開閉時の温度上昇が小さく動作が安定している。他方、有接点リレーである EMR と MAG ではアーク放電に起因する SF₆ ガスと接点(材料)との化学的・物理的反応による分解生成物や転位現象による開閉障害が顕著で温度上昇も大きく、0.5MPa の SF₆ ガス雰囲気中では使用できないと判断される。以下、それぞれのリレーについての結果を簡単にまとめる。

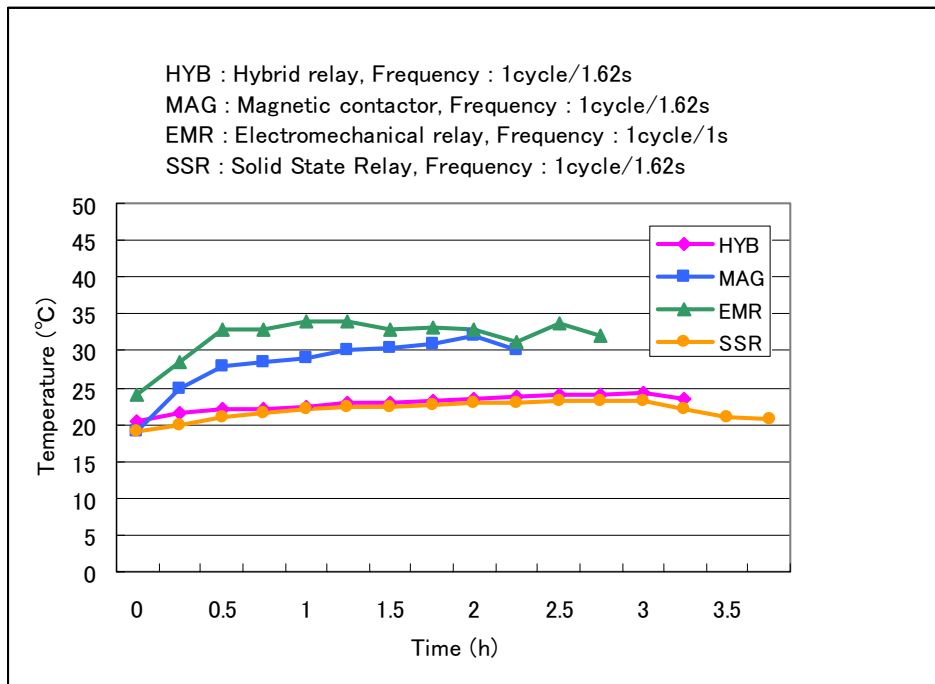


Fig. 6.1 Comparison of the temperature changes among four relays tested under SF₆ of 0.5MPa. HYB. Hybrid relay; MAG. Magnetic contactor; EMR. Electromechanical relay; SSR. Solid state relay.

1) 小型汎用リレー

- ・ SF₆ ガス雰囲気中では動作開始数分後に接点の開閉障害を起こすが、大気雰囲気に戻すと開閉動作、電気的導通共に正常に戻る。
- ・ 原因として、接点开閉時に発生したアーク放電による SF₆ ガスからの分解生成物と雰囲気中に残留する空気、水分、アーク近傍の構造材料との反応によって生成した低フッ化硫黄や金属フッ化物、硫化物などの接点表面への付着や荒れが考えられる。
- ・ 開閉障害が生じたときの接点は、感覚的には粘着しているような状態で試験後の接点抵抗値

は試験前の 50mΩ から 0.2~0.6Ω 程度に増加する。

- ・粘着した EMR の接点を再度開閉させる方策として、電氣的、構造的改良も考えられるが、開閉頻度が低い場合は SF₆ ガス雰囲気中でもある程度使用できると考えられる。

2) 高感度コンタクター

- ・SF₆ ガス雰囲気中では電流の指示値が次第に小さくなりやがてゼロとなるが、駆動側接点は操作コイルへの入力電圧/電流に追従し規則的に上下に動作している。
- ・開閉頻度を 1 サイクル/1.62 秒から 1 サイクル/64 秒にした場合開閉障害は生じなかった。この理由としては、開閉頻度が少なくなったことで接点の開閉に伴うアーク放電の起こる時間間隔が長くなり、SF₆ ガスの分解によって生じたフラグメント (S₂F₂、SF₄ など) の再結合が容易になったためと考えられる。
- ・試験後の各端子間の抵抗値は試験前の 50mΩ からそれぞれ数百 kΩ ~ 無限大に増加した。
- ・試験後の接点には転移現象が生じている。また電気絶縁性を持つ Ag₂S の付着が認められることから結果として、接点表面の境界抵抗が高くなり負荷電流の減少を引き起こしたと推測される。
- ・開閉障害軽減策として、現状の接点外径 3mm を大きくし接触部の集中抵抗を減らすこともひとつの方法と考える。

3) ソリッドステート・コンタクター

- ・本体温度上昇に比べヒートシンクの温度は 10°C~15°C 程度高く、発熱は半導体素子の“出力オン電圧降下”に起因する。
- ・開閉頻度の違いによる温度変化では 1 サイクル/1.62 秒の方が 1 サイクル/64 秒に比べ 2°C 程度高い。
- ・SF₆ ガス雰囲気中での開閉障害はなく、EMR や MAG に比べ安定した動作を示す。

4) ハイブリッド・パワーリレー

- ・平衡時の温度は、大気、SF₆ ガスいずれの雰囲気においても EMR や MAG に比べ 5°C~10°C 低く SSR の本体温度よりは 2、3°C 高い。
- ・開閉頻度の違いによる温度差は 1 サイクル/64 秒に比べ 1 サイクル/1.62 秒の場合で 3°C 程度高い。トライアックの“出力オン電圧降下”と負荷電流の積算による電力ロスの影響と考えられる。
- ・6 体の HYB について試験したが、結果に再現性があり製品間の特性上のバラツキが小さいことが確認できた。

また全体的な傾向として、リレー本体温度については SF₆ ガス雰囲気の方が大気雰囲気に比べ数°C 低く SF₆ ガスの冷却効果を裏付けた結果となっている。

以上、今回の試験結果から、標準仕様の SSR と HYB が 0.5MPa の SF₆ ガス雰囲気でも使用できることが確認できた。一方、国外品として 200V/400Hz 電源仕様のハーメチックシールタイプの

リレーも販売されているが、1体あたりの価格が数十万円で入手までの期間が数カ月を要するという事情を考慮した場合、低価格で入手の容易な国内標準品の適用についてはその使用方法（特に開閉頻度）を含め検討に値すると考える。なお、今回試験した商用周波数 50Hz とは別に 400Hz での特性試験については今後の課題である。

謝 辞

本スクリーニング試験の実施にあたり、多くのご支援を頂いた研究炉加速器管理部・竹内次長、ならびに加速器管理課・左高課長をはじめ加速器管理課の各位に心から感謝致します。

参考文献

- 1) E. Minehara : “THE JAERI TANDEM ACCELERATOR FACILITY” , Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. , A244, pp.13-19 (1986).
- 2) 旭ガラス(株) : “六フッ化硫黄”、U-0210-06 2004.06.17.
- 3) Honeywell Industrial Fluorines : “SF₆ Technical Reference” , (2000).
- 4) オムロン(株) : “リレーテクニカルガイド”、カタログ番号 SA00-0058、2005-6.
- 5) オムロン(株) : “ソリッドステート・リレーテクニカルガイド”、カタログ番号 SA00-206A、2005-6.

