

# SF<sub>6</sub>ガス絶縁中性点接地抵抗器

SF<sub>6</sub> Gas Insulated Neutral Grounding Resistor

根尾 定紀<sup>※</sup>  
Sadanori Neo  
矢野 純一<sup>※</sup>  
Jun-ichi Yano

## 1 まえがき

六フッ化イオウ (SF<sub>6</sub>) ガスは、その優れた絶縁特性、消弧特性により、SF<sub>6</sub>ガス絶縁開閉装置等に多くの使用実績があり、変電設備の密閉化、縮小化に大きな効果をあげ、今後ますます利用は増大するものと考えられる。

このような情勢の中にあって、変電所構成機器の一つである中性点接地抵抗器 (NGR) においても据付面積の縮小化、充電部のいんべい化による安全性の向上のため、ガス絶縁化の必要性が生じ、77/√3 kV、400Aのガス絶縁NGRの開発を行った。

## 2仕様

表1に主な仕様、図1と図2は今回開発した装置、図3はその内部構造、図4は従来の気中絶縁式 NGR を示す。

表1 /仕様

Tab. 1/Specification

|         |                  |   |
|---------|------------------|---|
| 定格電圧    | 77/√3 kV         |   |
| 定格電流・時間 | 400A、15S         |   |
| 抵抗値     | 111Ω (於20℃)      |   |
| 常時零相電流  | 5 A              |   |
| 抵抗体温度上昇 | 450℃             |   |
| 試験電圧    | 中性点側             | 雷インパルス400kV、商用周波70kV                              |
|         | 接地側              | 商用周波 70kV   |
| ガス圧力    | 外側タンク            | SF <sub>6</sub> ガス0.5kgf/cm <sup>2</sup> ・g(於20℃) |
|         | 内側タンク            | CO <sub>2</sub> ガス0.6kgf/cm <sup>2</sup> ・g(於20℃) |
| 周温      | 40℃              |   |
| 重量      | 11000kg          |   |
| 寸法      | 3600×2000×3330mm |   |

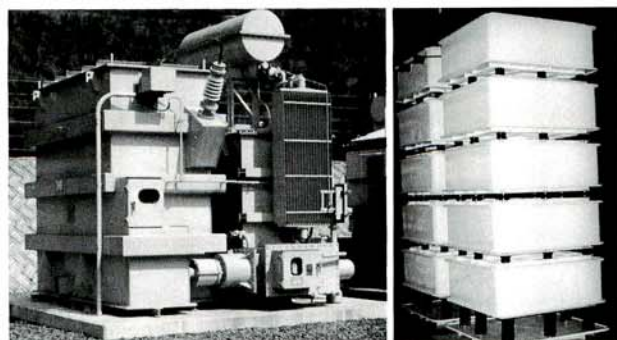


図1 / 開発品 (右側：接地変圧器) 図3 / 内部構造

Fig. 1/Developed NGR  
(right: grounding transformer)

Fig. 3/Inner  
construction

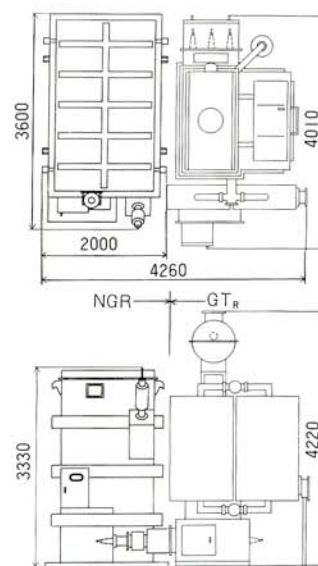


図2 / 開発品 (右側：接地変圧器)

Fig. 2/Developed NGR (right: grounding transformer)

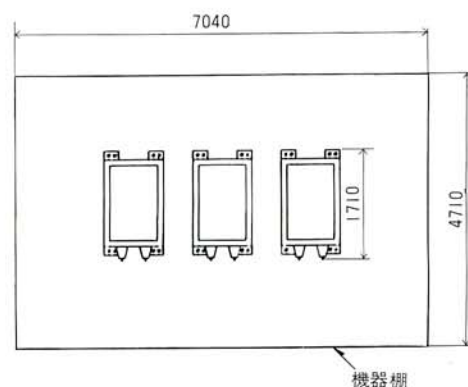


図4 / 従来の気中絶縁NGR

Fig. 4/Usual air insulated NGR

### 3 冷却方式の比較検討

ガス絶縁NGRの開発に際して、特に考慮すべき事項は絶縁及び冷却についてであり、絶縁については既存の技術で対応できるが、冷却については、新たな観点より研究を行う必要がある。

冷却上の問題点として

- (1) 77/√3 kV、400AのNGRに15秒間電流を通电したとき、約64000kcalの熱量が抵抗体より発生する。この熱による温度上昇及び圧力上昇を適切な値に抑制すること。
- (2) SF<sub>6</sub>ガスの熱伝達率は、同一条件下で比較すると、絶縁油の1/3、空気の2倍であるので、絶縁油を使用したNGRと比較すると冷却が非常に難しいこと。
- (3) NGRとして具備すべき条件として、再通电迄に前回の地絡通電による発生熱の処理が完了していること。

以上の3項目を考慮して、自然冷却方式、断熱材モールド方式及び蓄熱徐冷方式について縮小モデルを製作し、各種試験を行った。

その結果を以下に示す。

#### 3.1 自然冷却方式

SF<sub>6</sub>ガスを密閉したタンク内に抵抗体を入れた構造で、冷却は自然対流に期待する。抵抗体に発生した熱は自然対流、熱放射によりSF<sub>6</sub>ガス中に移動する。そのためケース内温度、即ちSF<sub>6</sub>ガス温度は通电後、即最高温度に達し、その後ケース外壁から放熱により冷却が行われる。タンク圧力はSF<sub>6</sub>ガス温度に依存するので通电終了後短時間で最高になり、その後急速に減少する(図6参照)。しかし、この方式は抵抗体とSF<sub>6</sub>ガスが直接接触しているため、抵抗体温度が260°Cを越えるとSF<sub>6</sub>ガスの熱分解が急速に進み、絶縁物を腐食させるふっ化水素(HF)ガスの発生量が急激に増大する(図7参照)。そのため抵抗体温度をSF<sub>6</sub>ガス熱分解温度以下(260°C)にする必要が生じ、電流密度を下げる必要があるため抵抗体の容積が大きくなり、コンパクト化に反する。また、通电直後の温度上昇が大きいので、ガス圧力上昇が大きく、タンクを強固にする必要がある。有利な点として通电後の圧力、温度の減少率が大きいことがあげられる。

#### 3.2 断熱材モールド方式

この方式の狙いは抵抗体をセラミックファイバーの断熱材でモールドして、一時的にモールド内に発生熱を蓄積し、時間経過と共に熱伝導率の大きいアルミナ層から外部に熱を放出することである。縮小モデルを製作し、試験した結果、図6に示すように必要以上にモールド部に抵抗体の熱が蓄積され、その結果、ケース内温度が最高温度に達するのに長時間要し、したがって冷却も長時

間を必要とする欠点を有する。

#### 3.3 蓄熱徐冷方式

抵抗体を耐熱特性の良いセラミックファイバの断熱材で周回して、断熱材の内外は気体層をもうける構造とする。図6に示す温度特性、圧力特性に関する試験結果から次のことが判明した。

##### (1) 冷却特性

抵抗体より発生した熱を一時的にセラミックファイバの断熱材の内側に蓄積する。その場合の蓄熱は断熱材と断熱材に覆われた気体層を媒体としている。そのため内側タンク全体の急激な温度上昇がなく平坦化された特性をもつ。

##### (2) 圧力特性

SF<sub>6</sub>ガスの温度上昇が抑制される結果、圧力上昇も緩和されるのでタンクの必要強度が軽減される利点がある。

##### (3) 抵抗体温度特性

抵抗体温度上昇が自然冷却、断熱材モールド方式より高くなっている。その理由として、この2方式の場合にはSF<sub>6</sub>ガス、断熱材モールドの熱容量が大きいいため抵抗体発生熱を吸収するが、蓄熱徐冷の場合は気体層に限られ、熱容量が小さいからである。

この蓄熱徐冷方式は抵抗体が内側タンクの内に収納された2重タンク方式であるのでSF<sub>6</sub>ガスが高温部に直接接触することなく、熱による分解ガス発生のおそれもない。従って抵抗体の温度を高くとれるので、電流密度を大きくして、NGRの寸法、重量の低減を図ることが出来る。

以上の3方式を比較し、NGRの機能、コンパクト化を重視して蓄熱徐冷方式を採用した。

実器に、この蓄熱徐冷方式を採用する場合は、NGRの全抵抗体を10分割し、1/10の抵抗体を断熱材で周回してCO<sub>2</sub>封入の内側タンクに収納する。更にその内側タンクを2列5段に段積して、外側タンクに収納し、絶縁のためのSF<sub>6</sub>ガスを充填している(図5参照)。

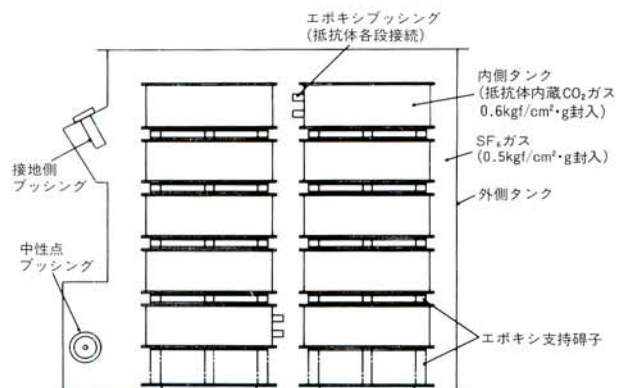

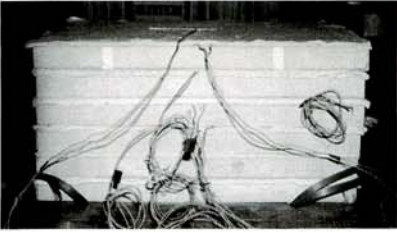

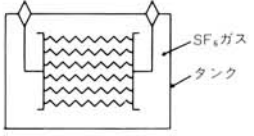
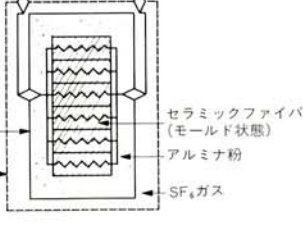
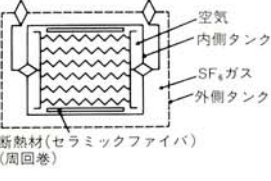


図5/内部構造図

Fig. 5/Inner construction

表2 / 冷却方式検討比較

Tab. 2 / Comparison of cooling method

|         |                    | I. 自然冷却方式   |  | II. 断熱材モールド方式(A、B)   |    |                  | III. 蓄熱徐冷方式   |                    |    |                         |               |
|---------|--------------------|---|--|--|----|------------------|---|--------------------|----|-------------------------|---------------|
| 構造<br>図 |                    |  |  |  |    |                  |  |                    |    |                         |               |
|         |                    |  |  |  |    |                  |  |                    |    |                         |               |
| 使用材料    | 特性                 | 材料  | SF <sub>6</sub> ガス<br>(0.5kg/cm <sup>2</sup> g時) | 特性   | 材料 | アルミナ<br>(AL-170) | セラミック<br>ファイバ<br>(F-13)   | 特性                 | 材料 | セラミック<br>ファイバ<br>(カオウル) | 気体層<br>(空気)   |
|         | 熱伝導率 (kcal/m・h・°C) |   | 0.0117   | 熱伝導率 (kcal/m・h・°C)   |    | 64.8 但し結晶系       | 0.13  | 熱伝導率 (kcal/m・h・°C) |    | 0.058                   | 0.0221        |
|         | 比熱 (cal/g・°C)      |   | 0.154  | 比熱 (cal/g・°C)  |    | 0.18( // )       | —   | 比熱 (cal/g・°C)      |    |                         | 0.248-0.252   |
|         | 密度 (g/ℓ)           |   | 9.25(20°C)                                       | 密度 (g/cm <sup>3</sup> )  |    | 軽装 1.1<br>重装 1.8 | 0.78  | 密度                 |    | 0.16g/cm <sup>3</sup>   | 1.21g/ℓ(20°C) |

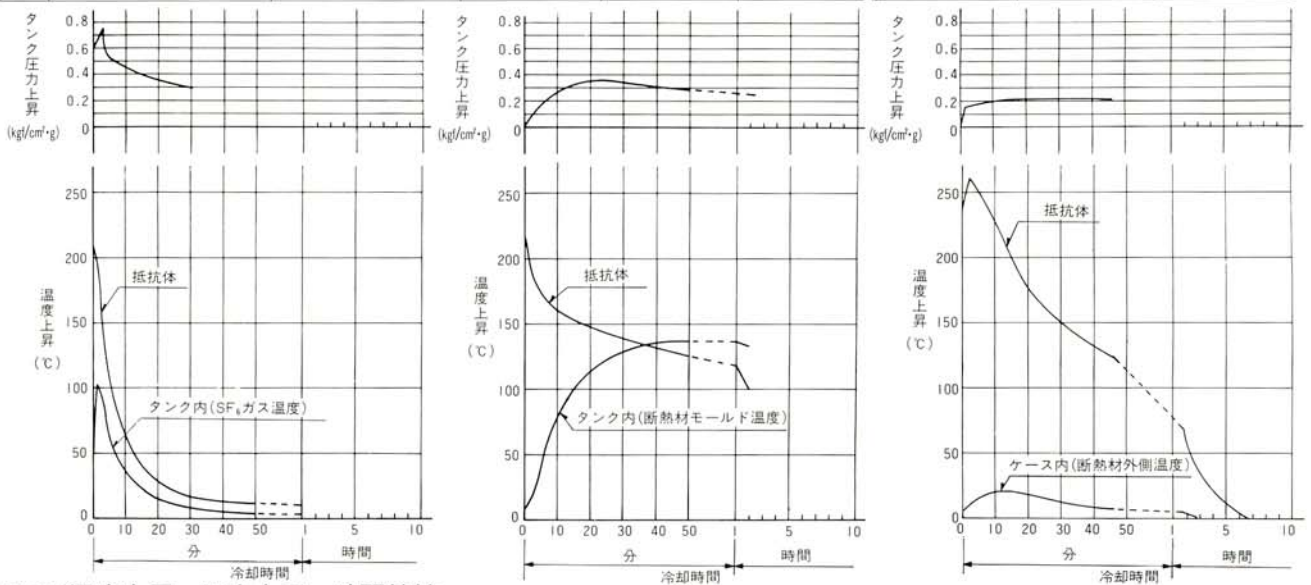


図6 / 温度上昇、圧力上昇—時間特性

Fig. 6 Characteristic between temperature rise, pressure rise and cooling time

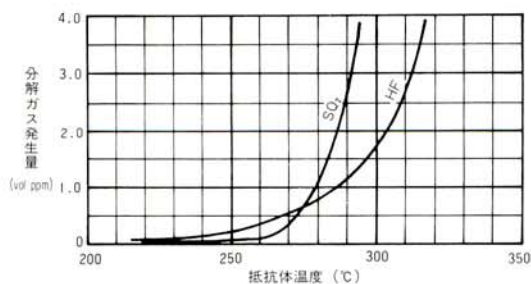


図7 / 抵抗体温度と分解ガス発生量の関係

Fig. 7 Characteristic between resistance temperature and decomposition gas quantity

なお、抵抗体として、鉄80%、クロム15%、アルミニウム4%その他から成るフェライト系特殊鋼を使用する。この材料は温度係数が小さく、高温耐食性に優れ、また機械強度が大きい特長を有する。

## 4 実器の温度上昇・圧力上昇試験

この試験の目的は地絡電流通電時の抵抗体発熱による使用材料の温度上昇とタンク圧力上昇の確認である。特に本器は主絶縁に使用しているSF<sub>6</sub>ガスの熱分解を防止するとともに、タンク圧力上昇を軽減させる目的で二重タンクの蓄熱徐冷方式を採用しているため、通電試験により温度上昇値と圧力上昇値を測定し、性能の検証を行った。ここで、開発品は400A定格であるので、400A定格の完成品にて通電試験を実施することが望ましいが、供試器として使用した完成品はフィールド試験場所の都合で200A定格としたので、次の手順より400A定格の完成品の検証を行った。

### (1) 200A、400A 定格の1/10分割モデルの通電試験

図8に示す1/10分割モデルの通電試験により、内側タンク間の熱干渉がない場合の温度上昇、圧力上昇を求めた。

### (2) 200A、フィールド試験用器の通電試験（完成品）

全抵抗体に定格電流を定格時間通電することは、大容量の試験設備を必要とするため内側タンクの1段分（抵抗値は完成品の1/10）ずつ順次通電し、200A完成品の温度上昇、圧力上昇を求めた。

本器は10分割段積の蓄熱徐冷方式を採用しており、各分割単位の伝熱時定数が長いため、分割単位毎に順次通電しても、温度上昇、圧力上昇とも完成品の全体通電とほぼ等価となる（図9参照）。

### (3) 400A 完成品の温度上昇、圧力上昇の算出

各部の温度上昇、圧力上昇は、抵抗体への供給熱エネルギーに依存するので(1)、(2)の測定結果と供給エネルギーの関係より求めた。

(1)、(2)、(3)より求めた400A完成品の温度上昇値、圧力上昇値を表3に、その時間経過を図10に示す。あわせて、表3の中に使用材料の許容温度とタンクの許容圧力を示す。

表3 / 400A 完成品の温度上昇及びガス圧力と許容値

Tab. 3 / Temperature rise and pressure rise of 400A NGR

|                 | 温度上昇 (°C) |               |                  |                 | 材料許容温度 (°C)    |           |                |
|-----------------|-----------|---------------|------------------|-----------------|----------------|-----------|----------------|
|                 | (1)<br>周温 | (2)<br>零相 5 A | (3)<br>400A, 15S | (1)+(2)<br>+(3) | 材 質            | 使用温度      | 限界温度           |
| 抵抗体             | 40        | 68            | 356              | 464             | ステンレス<br>特殊鋼   | 900       | 1490<br>(溶解温度) |
| 抵抗体支持磚子         | 40        | 68            | 356              | 464             | ジルコン           | 800       | 1400           |
| 断熱材             | 40        | 61            | 308              | 409             | セラミック<br>ファイバー | 1260      | 1760           |
| エポキシ貫通<br>プッシング | 40        | 10            | 11+69<br>※1 ※2   | 130             | エポキシ           | 150<br>※3 | —              |
| エポキシ支持<br>磚子    | 40        | 10            | 69               | 119             | エポキシ           | 150<br>※3 | —              |

※1：通電による温度上昇 ※2：SF<sub>6</sub>ガス温度上昇 ※3：耐熱温度

|         | 圧 力 (kgf/cm <sup>2</sup> ・g) |                          |                |             | タンク<br>許容圧力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ・g) |
|---------|------------------------------|--------------------------|----------------|-------------|---|
|         | 40°C<br>周温時                  | (1)<br>零相 5 A (2)<br>通電時 | 15S (3)<br>通電後 | (1)+(2)+(3) |   |
| 内側タンク圧力 | 0.10                         | 0.12                     | 0.51           | 0.73        | 1.6                                     |
| 外側タンク圧力 | 0.60                         | 0.02                     | 0.17           | 0.79        | 1.2                                     |

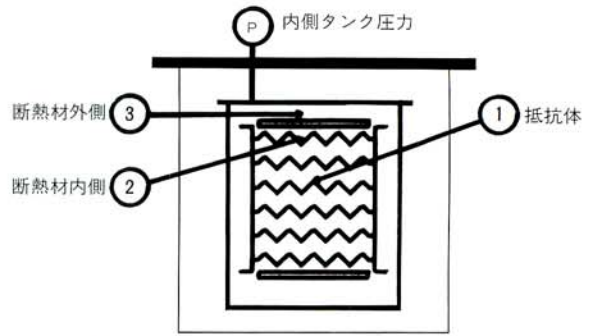


図8 / 1/10分割モデル

Fig. 8 / 1/10 Division model

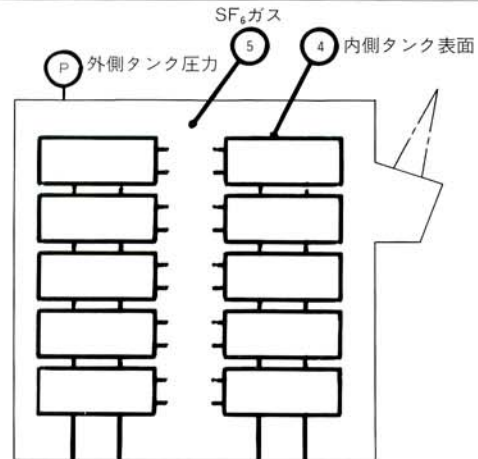


図9 / フィールド試験用器 (完成品)

Fig. 9 / Field testing NGR (finished goods)

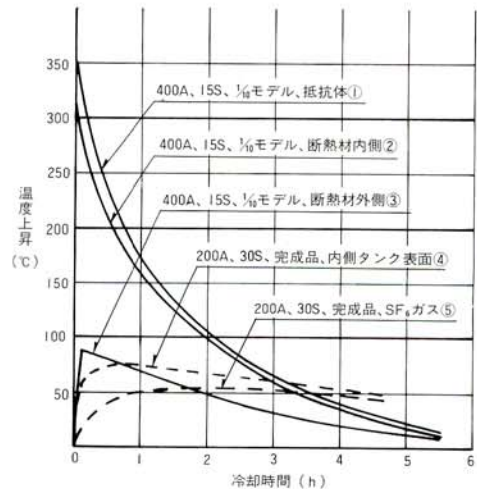
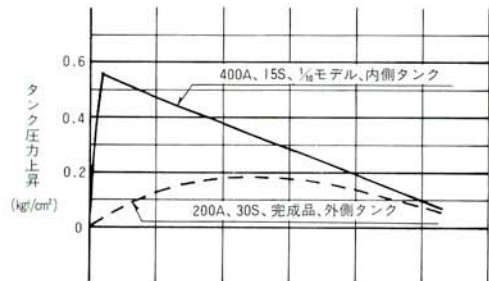


図10 / タンク圧力上昇、温度上昇特性

Fig. 10 / Characteristic between temperature rise, pressure rise and cooling time

## 5 絶縁

中性点側に雷インパルス400kVが印加された場合の各部の電圧分担は中性点側で最高400kVで接地側に向けてリニアに低減する。外側タンクと内側タンク間の絶縁は、SF<sub>6</sub>ガス(0.5kgf/cm<sup>2</sup>・g)で行い、その間の絶縁は図11を参考にして行っている。

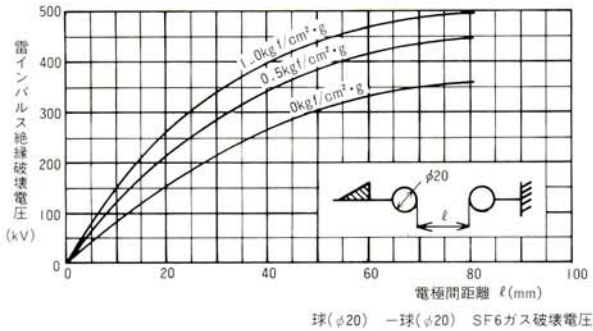


図11/SF<sub>6</sub>ガス雷インパルス絶縁破壊電圧特性

Fig. 11/Characteristic of SF<sub>6</sub> gas impulse break down voltage

## 6 フィールド試験

- 1) 試験場所 中部電力(株) 北岐阜変電所(岐阜支店)
- 2) 供試器仕様 定格電圧 77/√3 kV  
定格電流 200 A  
定格時間 15秒

フィールド試験用器は、開発器と同じ400A 定格とすべきであるが、試験場所が200A 接地系であること、フィールドでの試験効果等を勘案し、200A で実施した。

### 3) 試験結果

昭和59年6月11日から昭和59年11月6日までの間、実系統にて運転し、下記のデータを得た。

フィールド試験中の地絡回数は31回あり、地絡電流、通電時間は最大で150A、124サイクルであったが、温度上昇、ガス圧力とも許容値以下であった。またフィールド試験を実施し、気密試験、水分測定及び輸送時の加速度測定においても、特に異常は認められなかった(表4 参照)。

表4/フィールド試験結果

Tab. 4/Field test result

| 項 目                     | 測 定 結 果                                     |                                |
|-------------------------|---|--------------------------------|
| 地 絡 電 流 の 測 定           | <p style="text-align: center;">地絡時間及び回数</p> |                                |
| 地絡電流通電時の圧力及び温度の測定       | SF <sub>6</sub> ガス圧力                        | 0.6kgf/cm <sup>2</sup> ・g (最高) |
|                         | SF <sub>6</sub> ガス温度                        | 60℃ (最高)                       |
| 気 密 試 験                 |   | 0 ppm (規定値 1%/年以下)             |
| 輸 送 試 験<br>(工場←→北岐阜S/S) | 上下方向  | 0.75G                          |
|                         | 前後方向  | 1.0G (管理値 2G以下)                |
|                         | 左右方向  | 0.5G                           |
| 水 分 測 定                 |   | 72vol ppm                      |

## 7 耐震強度の検証

フィールド試験終了後、耐震強度検証のため電力中央研究所（我孫子事業部）において耐震試験を実施した。

本器は外観上タンク形であるが、内部構造は碍子形機器と同様であるところから、JEAG5003 (1980) 碍子形機器の耐震規定値を適用した。この規定値によれば、0.3G 正弦3波加振に対して安全率1.2以上であるが、本器は建物内に設置される可能性があるので2階に設置する場合を考慮して、0.5G 正弦3波に耐えることを確認した。

供試器として、フィールド試験用器 (200A 定格) を使用したので、400A 定格品の耐震強度については、この加振試験結果をもとに、NASTRANプログラムを使用して計算により求めた。その結果を表5に示す。

表5 / 200A フィールド試験器耐震試験結果と 400A 定格器の計算結果

Tab. 5/Earthquake proof test result of 200A field test NGR and calculation result of 400A rated NGR

|                         | 200A フィールド<br>試験器耐震試験 | 400A 定格器<br>計 算 | JEAG5003<br>規定値 |
|-------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| 共振周波数                   |                       |                 |                 |
| 長辺(Hz)                  | 12.2                  | 11.7            |                 |
| 短辺(Hz)                  | 11.9                  | —               |                 |
| 0.5G 正弦3波加振時の内側タンク最大加速度 |                       |                 |                 |
| 長辺(G)                   | 4.0                   | 4.3             |                 |
| 短辺(G)                   | 3.8                   | —               |                 |
| 0.5G 正弦3波加振時の使用材料の安全率   | 5.6                   | 5.2             | 1.2             |

## 8 まとめ

SF<sub>6</sub>ガス絶縁NGRの開発に当たり、蓄熱徐冷方式を考案し、以後1/6分割モデルにて基礎試験を行い、その結果に基づいてフィールド試験器を製作した。そのフィールド試験器を約半年間、多雷地区の中部電力(株)、北岐卓変電所に設置し31回の地絡があったが異常なく動作した。

フィールド試験後、耐震試験を電力中央研究所にて実施し、0.5G 正弦3波に耐えることを確認した。

以上の結果、従来の中絶絶縁NGRと比較すると、

- ① 敷地面積が21%に縮小
- ② 全装可搬が可能
- ③ 耐震強度に優れている
- ④ 充電部の密閉化
- ⑤ メンテナンス・フリー

等の利点があるガス絶縁NGRを開発し、2ヵ所の変電所(中部電力(株)：犬山変、幸田変)で採用された。

## 昭和59年度に公開された愛知出願( I )

### ● 特許

| 公開番号      | 名 称                  | 発 明 者          | 共同出願人       |
|-----------|----------------------|----------------|-------------|
| 59-15756  | 電気湯沸装置               | 山本 修           | 東陶機器株       |
| 59-25205  | 変圧器ケースの製造方法          | 升野 清俊          | 愛知金属工業株     |
| 59-29409  | 負荷時タップ切換装置           | 森 鉄夫           |             |
| 59-51088  | 電気缶切機                | 山本 修<br>法月仙一郎  |             |
| 59-55106  | 自走型噴気深耕機             | 山本 修<br>平塚 保博  | 岩谷産業株       |
| 59-12501  | 自走型噴気深耕機の噴気式深耕装置支持装置 | 山本 修<br>平塚 保博  | 岩谷産業株       |
| 59-74095  | 電気缶切機                | 山本 修<br>法月仙一郎  |             |
| 59-79515  | 変圧器鉄心の製造方法           | 矢後 克二          | 中部電力株       |
| 59-90911  | 巻鉄心およびその製造方法         | 矢後 克二<br>関 晃   | 中部電力株       |
| 59-124115 | 巻鉄心変圧器の製作方法          | 広江 成致<br>河村 良二 |             |
| 59-124114 | 直流大電流変成装置            | 佐藤 徹           |             |
| 59-159690 | ブラシレス直流電動機の回転子位置検出方法 | 太田 久義<br>渡辺 誠  | アイチーエマソン電機株 |

| 公開番号      | 名 称                  | 発 明 者          | 共同出願人            |
|-----------|----------------------|----------------|------------------|
| 59-160693 | 廃魚の洋上処理装置            | 新井 允之          | 名古屋精工株<br>株名村造船所 |
| 59-174490 | 電気缶切装置               | 山本 修<br>平塚 保博  |                  |
| 59-165984 | ブラシレス直流電動機の回転子位置検出装置 | 太田 久義<br>岡本 隆生 | アイチーエマソン電機株      |
| 59-172957 | 巻鉄心の製造方法             | 矢後 克二<br>廻間 正樹 | 中部電力株            |
| 59-172991 | ブラシレス直流電動機の回転子位置検出装置 | 太田 久義<br>高嶋 修  | アイチーエマソン電機株      |
| 59-176573 | 乾燥装置                 | 岡田太一郎          |                  |
| 59-189518 | 負荷時タップ切換装置の切換開閉器     | 加藤 和宏          |                  |
| 59-195085 | 乾燥装置                 | 岡田太一郎<br>伊藤 利行 |                  |
| 59-201672 | 位相制御装置               | 佐藤 徹           |                  |
| 59-221283 | 電気缶切機                | 山本 修<br>法月仙一郎  |                  |