

# F レジン/R 絶縁

## F-resin/R Insulation

藤井尚義\* Takayoshi Fujii · 石井勇次\* Yuhji Ishii · 南松太郎\*\* Matsutaroh Minami · 佐々木洋敏\*\* Hirotohi Sasaki  
前田昌男\*\* Masao Maeda

### I. まえがき

大形の高圧発電機絶縁には、絶縁処理により大別すると、コイルに絶縁処理後樹脂を真空含浸する真空含浸絶縁方式と、プリプレグテープあるいはシートを用いてヒートプレスするレジンリッチ絶縁方式とがある。

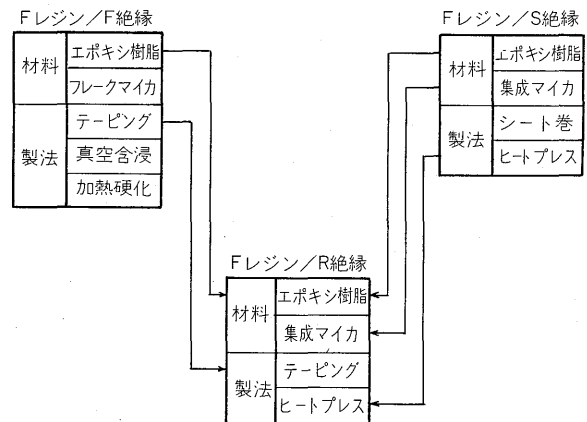
真空含浸方式は、当社では業界に先がけてFレジン絶縁と称して昭和33年から実用化し、主にパーコイルに適用され、安定した品質と高信頼性により好評を得て、Fレジン/F絶縁として今日に至っている。

一方レジンリッチ絶縁としては、スタビラスチック絶縁として、昭和42年から実用化し、亀甲形コイルに適用され、Fレジン/S絶縁として今日に至っている。しかし、このFレジン/S絶縁はスロット部が平巻き方式であり、大形のパーコイル絶縁としては適用にやや難点がある。大形パーコイルの絶縁には、作業性、品質の安定性から考えて、テーピング方式が向いており、大形パーコイルにはテーピングの絶縁方式を採用する必要がある。このたび開発したFレジン/R絶縁はこのレジンリッチ絶縁方式で、プリプレグテープを成形したコイルに巻き付けたのち、加熱加圧成形する方式である。この方式は含浸工程がなくなるため、含浸に付随する作業が不要となり、また製造に必要な装置も簡単で済み、更に樹脂のむだが多く、使用熱量も少なくて済みなど、省資源、省エネルギー形の方式である。以下、Fレジン/R絶縁の製造方法、評価試験結果などの紹介をし、各位の参考に供したい。

### II. 絶縁構成、製作方法

Fレジン/R絶縁は、長年の実績のあるFレジン/F絶縁及びFレジン/S絶縁の利点を取り入れた絶縁構成となっている。第1図にその構成をFレジン/F絶縁、Fレジン/S絶縁と対比して示す。

Fレジン/R絶縁のマイカには、テーピングの作業性及び樹脂の浸透性の良い集成マイカを採用し、絶縁層形成にはヒートプレスにより加熱加圧成形する方式を採用している。製作方法は次のごとくである。成形したコイルにセミキュア状のエポキシ集成マイカテープをスロット部、エンド部連続に所定回数巻き付け、その後プレス



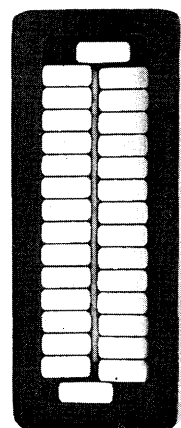
第1図 Fレジン絶縁の構成

Fig. 1. Constitution of F-resin insulation

にセットし、予熱する。テープ中の樹脂が溶融した後圧力を加え、成形硬化する。絶縁構成及び製法の特長は次のとおりである。

- (1) 使用樹脂はあらかじめテープに含まれているので樹脂のむだが多く、また加熱もプレスと同時に進められるので、乾燥炉による方法に比べエネルギーが少なく済み、省資源・省エネルギー形である。
- (2) 真空含浸方式に比べ、含浸工程がなくなり工程が短縮できる。また作業環境が向上する。
- (3) 含浸方式に比べ装置の管理が容易となるので、品質がより一層安定する。

第2図にFレジン/R絶縁の断面を示した。



第2図 Fレジン/R絶縁コイル断面

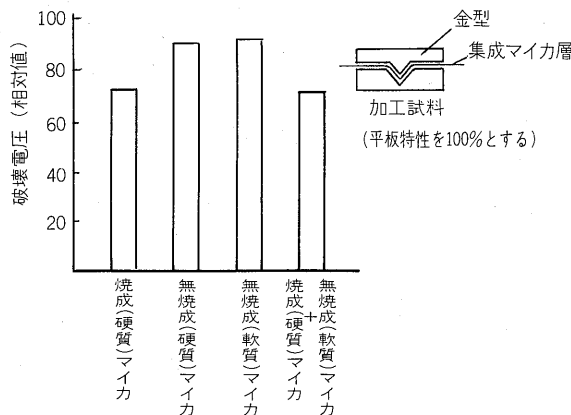
Fig. 2. Cross section of F-resin/R insulation coil

III. 材料特性

1. 集成マイカテープ

Fレジン/R絶縁に使用されているテープは、ガラス基材と集成マイカをエポキシ樹脂にてセミキュア状に処理したもので、これらの材料構成の選定には、コイル製造作業性、絶縁特性を考慮した幅広い検討を行った。

一般にマイカは、軟質、硬質の二通りのタイプがあり、集成マイカには、その製法上から、マイカを700~800℃の高温で加熱し、マイカの結晶水を取り、化学的あるいは機械的に粉碎し、抄造する焼成タイプと、水ジェット法により粉碎する無焼成タイプの2種類がある。焼成タイプは、マイカの熱分解温度近くまで加熱するため、無焼成タイプよりマイカ箔のサイズは小さくなっており、樹脂の浸透性、機械加工性は無焼成タイプの方が良好である。第3図に各種集成マイカの加工特性として、集成マイカシート積層板の破壊電圧を、図のごとき形状と平板状とを比較して示した。



第3図 集成マイカの加工特性  
Fig. 3. Cut through resistance of integrated mica papers

本絶縁のテープには、テープ製造性、及びテーピング後、加熱成形時におけるコイル導体角部特性低下を考慮し、無焼成タイプを使用している。

接着樹脂としては、耐熱性F種で高温特性が良好で、コイル導体、及び絶縁層間の接着力の熱安定性が優れていること、テープの貯蔵安定性が良いことが不可欠で、このため各種エポキシ樹脂と硬化剤の検討を行い、ノボラック系エポキシ樹脂を主体に、硬化剤として特殊な変成をした潜在性硬化剤を用いたテープを開発した。

2. 絶縁層の特性

1) 一般特性

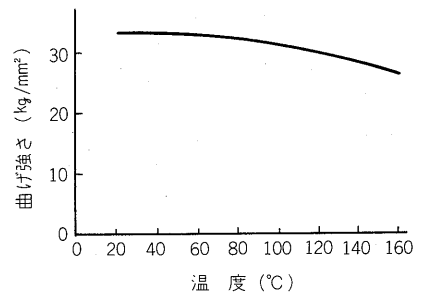
実際のコイル製造と同一条件にて製造した絶縁層の機械的・物理的特性を第1表に示す。また、曲げ強さ、破壊電圧の温度特性を第4図、第5図に示したが、いずれも高温特性は良好である。

2) 耐熱性

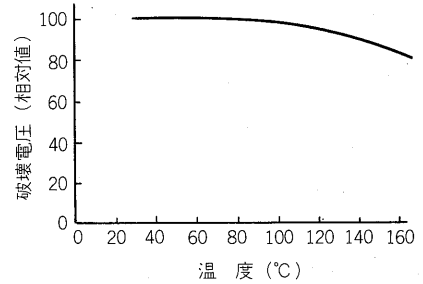
第1表 絶縁層の特性

Table 1. Various properties of coil insulating layers

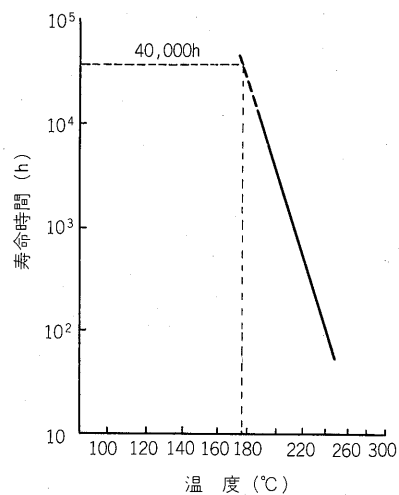
項目	特性
曲げ強さ(25℃)	33 (kg/mm <sup>2</sup> )
曲げ弾性係数(25℃)	3,800 (kg/mm <sup>2</sup> )
引張り強さ(25℃)	24.6 (kg/mm <sup>2</sup> )
熱膨張係数	1.0×10 <sup>-5</sup> (1/℃)
熱伝導率	2.2 (Kcal/m·h·℃)



第4図 絶縁層の曲げ強さ—温度特性  
Fig. 4. Flexural strength vs. temperature characteristics of coil insulating layers

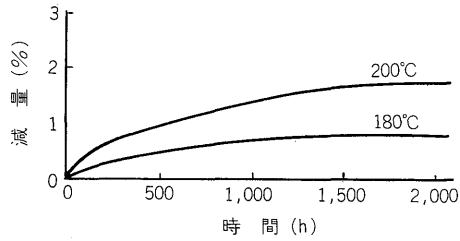


第5図 絶縁層の破壊電圧—温度特性  
Fig. 5. Dielectric strength vs. temperature characteristics of coil insulating layers

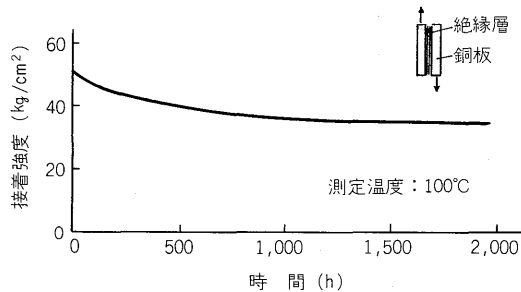


第6図 絶縁層の寿命時間と温度の関係  
Fig. 6. Life temperature relationship of coil insulating layers

絶縁層の耐熱性の一例として、第6図に、加熱による曲げ強さが初期値より30%低下した時間を寿命とした時間と温度の関係を示した。これによると、40,000時間を



第7図 加熱減量の経時変化  
Fig. 7. Change of weight loss of insulating layers by thermal aging



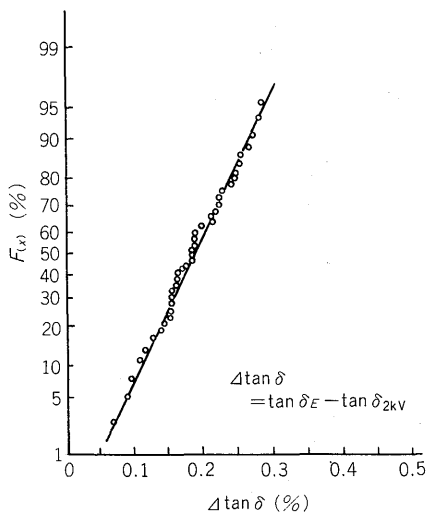
第8図 加熱による接着強度の経時変化  
Fig. 8. Change of adhesive strength of insulating layers by thermal aging

寿命とした場合の耐熱温度は175℃であり、絶縁層はF種として十分な耐熱性を有している。実際のコイル絶縁層では、長時間加熱された場合の安定性、始動、停止などの機械的・熱的応力に対して十分な耐力を有することが必要である。

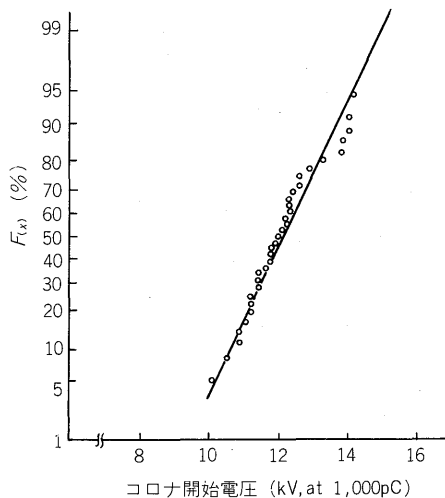
第7図に絶縁層の加熱減量特性を示す。また第8図に30×40(mm)の銅板に集成マイカテープをはさみ、加熱加圧硬化させたものを、180℃にて加熱した場合の100℃における絶縁層の接着力の経時変化を示す。これにより高温における熱安定性が優れていることがわかる。

#### IV. Fレジン/R絶縁コイルの特性

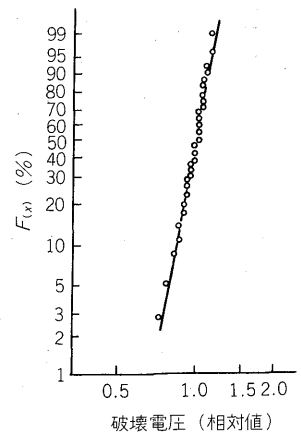
##### 1. 一般特性



第11図  $\Delta \tan \delta$  の分布  
Fig. 11. Distribution of  $\Delta \tan \delta$



第12図 コロナ開始電圧の分布  
Fig. 12. Distribution of corona starting voltage (at 1,000 pC)



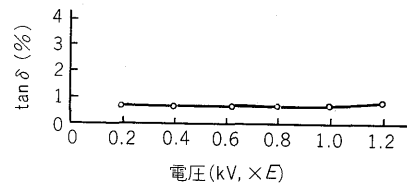
第13図 破壊電圧のワイブル分布  
Fig. 13. Weibull distribution of breakdown voltage

Fレジン/R絶縁コイルの  $\tan \delta$ -電圧特性、 $\tan \delta$ -温度特性をそれぞれ第9図及び第10図に示す。また、 $\Delta \tan \delta$  (定格電圧における値と2kVにおける値の差)の分布を第11図に示す。

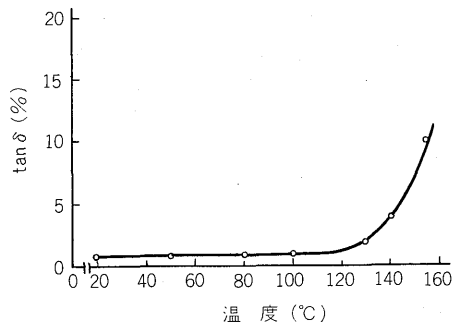
電圧上昇による  $\tan \delta$  値の上昇はわずかであり、定格電圧まで平坦である。このことから絶縁層はち密であり、ボイドが非常に少なく、 $\Delta \tan \delta$  の分布から  $\tan \delta$ -電圧特性のばらつきが小さいことがわかる。

Fレジン/R絶縁コイルのコロナ開始電圧(10<sup>-9</sup>C)の分布を第12図に示すが、このことから、絶縁層のボイドが少ないことを裏付けており、常規対地電圧では、コロナの発生がないことを確認している。

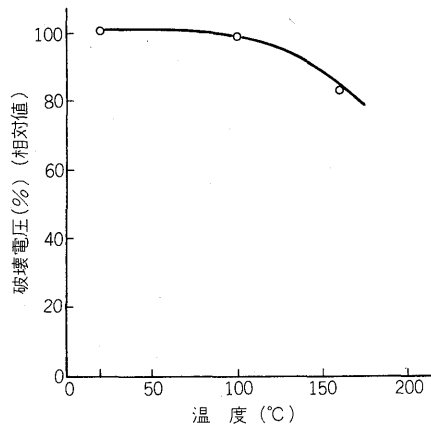
高電圧絶縁として重要な絶縁破壊電圧値は、従来のFレジン/F絶縁と同等である。絶縁破壊電圧値の分布及



第9図  $\tan \delta$ -電圧特性  
Fig. 9.  $\tan \delta$  vs. voltage characteristics of coil



第10図  $\tan \delta$ -温度特性  
Fig. 10.  $\tan \delta$  vs. temperature characteristics



第 14 図 破壊電圧の温度特性  
Fig. 14. Breakdown voltage vs. temperature of model coil

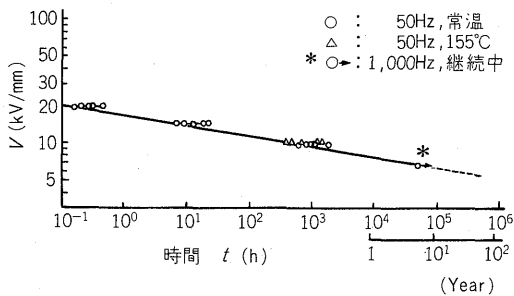
び破壊電圧の温度特性を第13図, 第14図に示したが, 破壊電圧値はばらつきが小さく, また温度上昇による破壊電圧の低下もわずかである。

2. 長時間課電寿命特性 (V-t 特性)

絶縁層の電気的な寿命を予測するデータとして, 長時間課電寿命特性 (いわゆる V-t 特性) は有効である。

Fレジン / R絶縁コイルの V-t 特性を第15図に示す。

試験は, 高電界 (10 kV/mm 以上) では商用周波数を用いたが, 低電界では試験の加速を行うため 1,000 Hz を用いた。



第 15 図 V-t 特性  
Fig. 15. V-t characteristics curve of model coil

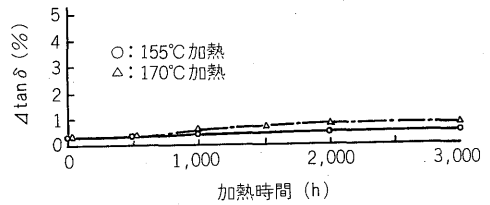
一般に V-t 特性は両対数表示で直線となることが知られており, この直線関係 ( $t = kV^{-n}$ ,  $t$ : 寿命,  $V$ : 印加電圧,  $k, n$ : 定数) を利用し, 使用電界での寿命予測が行われる。低電界では直線は長寿命側に折れ曲がるので, 直線を延長しての寿命予測は安全側にある。

試験の結果から,  $n=10$  となり, 図から明らかなように, 常用電界では, 問題にならないほど寿命が長いことがわかる。

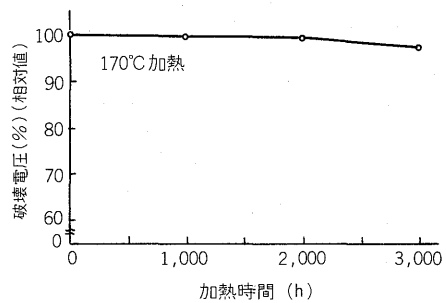
実際の運転条件を考慮して, 絶縁層温度が 155°C の場合 (電界と温度の複合劣化) の特性も求めたが, 温度による差異はみられなかった。

3. 熱安定性

コイルの熱安定性も寿命を支配する重要な特性の一つ



第 16 図 高温加熱による  $\Delta \tan \delta$  の変化  
Fig. 16. Variation of  $\Delta \tan \delta$  due to high temperature heating



第 17 図 高温加熱による破壊電圧の変化  
Fig. 17. Variation of breakdown voltage due to high temperature heating

である。

Fレジン / R絶縁の 155°C, 170°C の長期加熱による  $\Delta \tan \delta$  及び破壊電圧の変化をそれぞれ第16図, 及び第17図に示す。

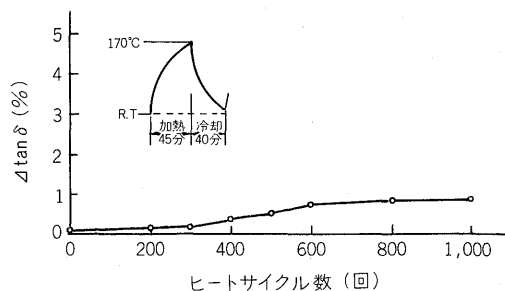
$\Delta \tan \delta$  は加熱時間により, 若干上昇するが寸法変化はほとんどなく, 絶縁層に膨れなどは生じない。170°C 加熱による 3,000 時間後の破壊電圧の低下は, 初期値の 5% 前後にすぎなかった。

4. 耐ヒートサイクル性

絶縁層の熱的な特性として, 熱安定性と同様にヒートサイクルによる特性確認は必要である。ヒートサイクル試験は, 素線絶縁と絶縁層との間, あるいは絶縁層内部で亀裂やボイドが生じないかどうか確認する方法である。

Fレジン / R絶縁の耐ヒートサイクル性の一例を第18図に示す。

試験はコイルを模擬スロットに入れずフリーな状態とし, 導体を通電加熱により 170°C まで上昇させ, 冷却はファンによる強制冷却の方法 (85分/サイクル) で行った。



第 18 図 ヒートサイクルによる  $\Delta \tan \delta$  の変化  
Fig. 18. Variation of  $\Delta \tan \delta$  due to heat cycles

前述の試験結果とあわせ、Fレジン/R絶縁の熱安定性、耐ヒートサイクル性は優れており、F種絶縁として十分適用できるものである。

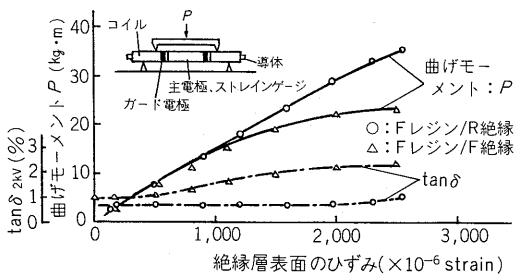
5. 機械的特性

コイルは機械の組立て時や運転時に、電気的、熱的な荷重と同時に機械的な荷重を受ける。特に短絡時にコイル間に生ずる機械的応力や、始動、停止あるいは電磁振動による繰返しの応力が重要であり、これらの応力に対し、絶縁層の機械的強度を把握することが、機械の信頼性をより向上させるために必要である。

1) 静的曲げ応力試験

第19図に4点支持で、コイルに荷重をかけながら、絶縁層表面に発生するひずみと電気的特性を測定した例を示す。

長年の実績を持つエポキシ樹脂含浸コイル（Fレジン/F絶縁）と比較して、Fレジン/R絶縁は大きな荷重に耐え、 $\tan\delta$ も破断点近くまで変化がない。

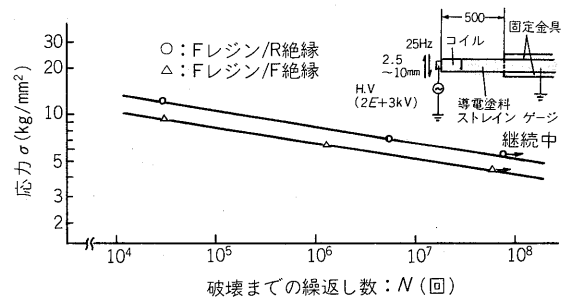


第19図 静的曲げ特性  
Fig. 19. Static bending characteristics

2) 繰返し疲労試験

片持ちばりの方法でコイルの先端に2.5~10mmの両振りの振幅( $\sigma$ )を与え、25Hzの振動で、絶縁層が機械的に破壊するまでの振動数(N)を求めた。破壊の検出は電気的に行い、耐圧試験の電圧(2E+3kV)をある一定の間隔で印加した。

第20図にその結果を示すが、破壊強度の1/2のストレスでも $10^7$ 回以上の繰返し応力に耐え、また従来のFレジン/F絶縁と比較してもその特性を上回っている。



第20図 動的曲げ特性  
Fig. 20. Dynamic bending characteristics

V. あとがき

Fレジン/R絶縁はレジンリッチ方式であり、含浸方式に比べ製作方法上で種々の利点を有している。特性上は含浸方式の絶縁Fレジン/Fに比べ優るとも劣らない特性であることが確認されている。今後は本絶縁方式の利点を有効に活用できるように、適用の拡大を図っていく所存である。

発明の紹介

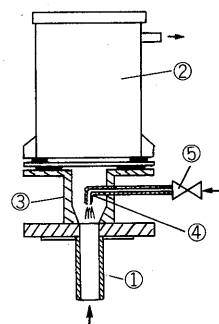
ガス抽出器

(実用新案登録 第1112952号)

排ガス成分測定などのため、被測定系からサンプルガスを抽出する際、ガスに含まれるじんあいなどが分析計に侵入するのを防ぐためにフィルタを設けておき、このフィルタを適宜交換若しくは清掃する必要がある。このため、従来は抽出管とフィルタ室の間にしゃ断バルブを設けておき、フィルタの交換や清掃の際バルブを閉じるようにしていたが、バルブは高温ガスに触れることが多いので耐熱性の考慮が必要で、しかもダストの付着により動作不良を起こしやすい欠点があった。

この考慮によれば、図示のように測定ガスの抽出管①とフィルタ室②との間の導管③内に先端のノズル口を抽出管の方へ向けた噴射管④を導入しておき、フィルタの交換や清掃時にはバルブ⑤を開けてノズル口から空気等のガスを噴出させることにより、抽出管からフ

ィルタ室に流れる抽出ガスの流れをしゃ断する。これによって、従来のように高価なしゃ断バルブを使用する必要がなくなり、それによるトラブルのおそれもなくなるほか、ノズル口から噴射される空気流により、抽出管の内壁に付着しているダストを吹き飛ばすことができる副次効果が得られる。





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。