

# アモルファス変圧器《第二報》

## Amorphous Metal Cored Transformers

柳沢 英一\*  
Eiichi Yanagisawa  
矢後 克二\*\*  
Katsuji Yago  
廣江 成致\*\*\*  
Shigetaka Hiroe  
廻間 正樹\*\*\*  
Masaki Kaima

It has been verified that amorphous metals are not subject to the effects of temperature, when used in a field of proper magnetic flux density, and the results of load testing over the past two years, executed using two 20kVA amorphous metal cored transformers, showed no perceptible effects on the no-load characteristics of the transformers.

Trial production of no-cut wound cored transformers was introduced in the previous report, and we have subsequently succeeded in producing 20kVA step-lap jointed wound cored transformers and confirmed their excellent characteristics. We have also attempted to build a 75kVA stacked cored transformer for application of amorphous metals to large-capacity power transformers.

Amorphous metal cored transformers are considered more economical than conventional silicon steel cored transformers if the price of amorphous metals is substantially reduced from the present rate, and further if the evaluation rate of the core loss becomes higher.

## 1 まえがき

アモルファス磁性材料は、その鉄損値が方向性けい素銅帯に比べて1/4以下と非常に小さいため、変圧器の鉄心に使用することにより、大きな省エネルギー効果が得られる。

一方、その採用に当っては解決すべき多くの問題点も存在する。そのため第一報で報告したように、焼鈍条件、加工条件等に関する基礎研究を行い、更に、単相20kVAの変圧器を試作することにより、設計・製作上の諸問題の解決に努めてきた。

今回は、引き続き実施した実器による長期負荷試験及びトロイダルコアによる熱安定性検証試験ならびにステップラップジョイント鉄心変圧器及び積鉄心変圧器の試作結果について報告し、併せてアモルファス変圧器の経済性についても考察する。

## 2 長期負荷試験

アモルファス磁性材料は非結晶質であるため、変圧器のように比較的高い温度で、長期間にわたり使用した場合には、エージングが進み特性の変化することも考えられる。これを検証するため、実器による2年間の負荷試験を実施した。

## 2.1 変圧器仕様

供試変圧器の仕様を表1に示す。

表1 / 供試変圧器の仕様

Tab. 1 / Specification of transformers

項目	1号器	2号器
形式	屋外油入自冷式	屋外油入自冷式
相数	単相	単相
周波数	60Hz	60Hz
容量	20kVA	20kVA
1次電圧	6600V(タップ5点)	6600V(タップ無)
2次電圧	210/105V	210/105V
設計磁束密度	1.3T	1.38T
無負荷損	21.0W	25.1W
負荷損	324W	306W

## 2.2 特性の温度依存性

基礎試験にて、トロイダルコアによる温度依存性を検証したが(第一報)、今回は長期負荷試験に先立ち実器についての温度依存性試験を行った。試験条件は、油温度30℃~100℃とした。

試験結果を図1に示す。

この試験結果から分るように、無負荷損は、磁束密度1.3Tではほとんど温度依存性はなく温度の上昇につれて

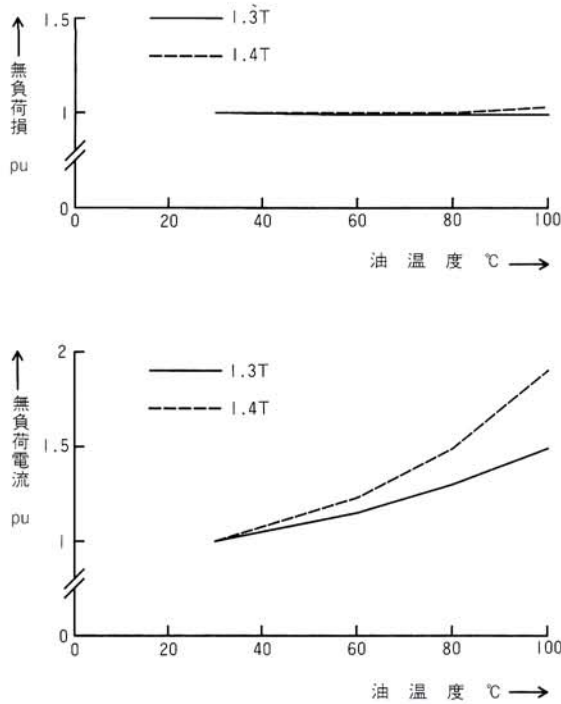


図1/温度と励磁特性  
Fig. 1/Relation between temperature and no-load loss, no-load current

若干減少する傾向であるが、1.4 Tになると温度の上昇と共に漸増する。また無負荷電流は、温度の上昇につれて増加し、かつ、この傾向は磁束密度の高い場合に特に著しい。しかし、図示しないが、特性値は温度が下がれば再び初期値に戻ることを確認しており、100℃以内の短期間加熱では特性劣化を生じていない。

### 2.3 負荷試験

通電は、表1の仕様の20kVA変圧器をそれぞれ別の変圧器との返還負荷にて行った。2台の内、1号器は外箱を断熱材で覆い、最高油温度が80~100℃となるように損失を供給した。また、2号器は図2に示すように24時間周期にて、0%、75%及び150%の負荷電流を供給した。

試験期間中の最高油温度及び周囲温度を図3に示す。また、期間中の無負荷損及び無負荷電流の初期値に対する変化を図4に示す。特性測定は、毎月一回通電を中止して油温を周温まで下げた後、定格電圧及び定格電圧の110%の電圧を印加して行った。

図4から分るように、無負荷損は、1号器では定格電圧印加時、10%過電圧印加時ともほとんど変化はないが2号器では10%過電圧印加時において温度(周温)依存性が顕著である。また、無負荷電流に関しては、1号器では定格電圧印加時の試験開始後3箇月までは安定した値であるが、その後80%程度に減少し、最終的には70%と

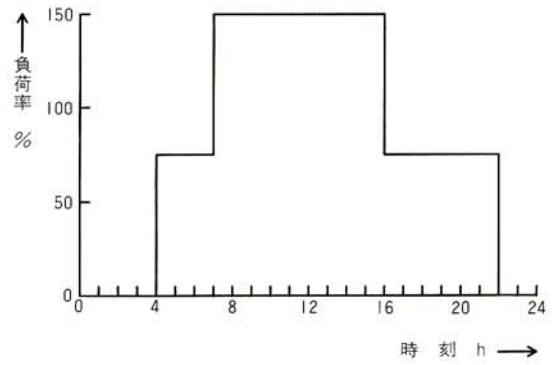


図2/2号器の日負荷パターン  
Fig. 2/Daily load curve of No.2 transformer

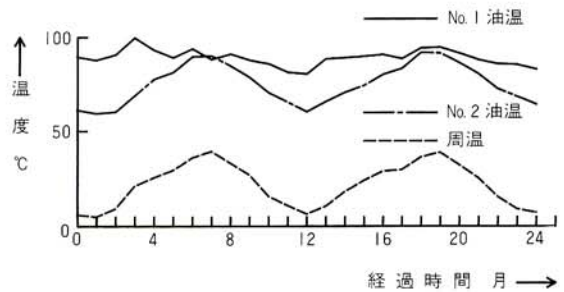


図3/試験中の変圧器最高油温度及び最高周囲温度  
Fig. 3/Max. oil and max. ambient temperature during load test

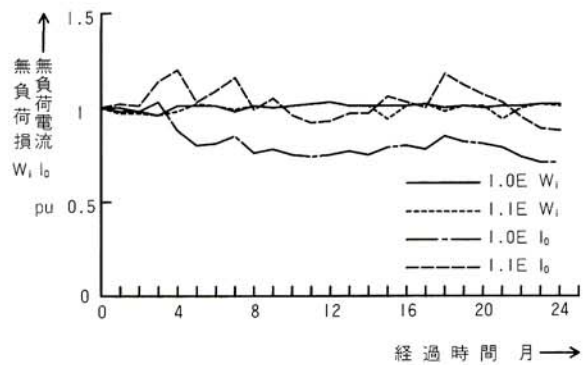


図4(a)/1号器の励磁特性変化  
Fig. 4(a)/Change of no-load characteristics of No.1 Tr. during load test

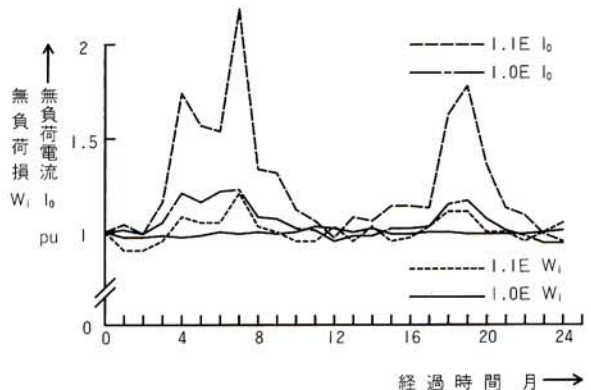


図4(b)/2号器の励磁特性変化  
Fig. 4(b)/Change of no-load characteristics of No.2 Tr. during load test

なっている。これについては今後検討する必要がある。1号器の10%過電圧印加時及び2号器の定格電圧印加時、10%過電圧印加時に、周温依存性が顕著に表れているのが認められる。2号器の変化が大きいのは、2号器の磁束密度が1号器に比べて若干高いため、温度の影響が大きく表れたものと考えられる。なお、初期値は、厳冬期(低油温時)における値である。

特性の変化が周温の変動に追従したものであること及び適正な磁束密度であれば変化が少ないことなどから、アモルファス磁性材料の熱劣化は生じていないと判断される。

以上の試験結果から、アモルファス磁性材料を変圧器鉄心として使用した場合には、無負荷特性(特に無負荷電流)の温度依存性が大きいいため、設計時の磁束密度を適当な値に選定するとともに、運転時には十分な温度管理を行う必要があると思われる。

### 3 熱安定性検証試験

実器による長期負荷試験と並行して、トロイダルコアによる熱安定性検証試験を実施した。

試料は、内径 $\phi 55 \times$ 幅 $50 \times$ 厚 $9 \text{ mm}$ のトロイダルコア3個を① $100^\circ\text{C}$ 油中 $1.3 \text{ T}$ にて連続励磁、② $100^\circ\text{C}$ 油中無励磁、③ $100^\circ\text{C}$ 気中無励磁の条件にて試験し、1箇月ごとに試験を中断して室温時の励磁特性を測定した。結果を図5に示す。この結果、試料を油中に浸漬した直後に、コア巻層間の残留気泡の影響と思われる特性変化が認め

られるがすぐ元の値に戻りその後は、各試料とも時間の経過に従って微増気味に推移している。気中の試料は増加傾向が他より大きい。

この試験は、現在20箇月余を経過したに過ぎず、結論を出すには未だ早いと思われる。今後の経過に注目して試験を続けたい。

## 4 ステップラップジョイント鉄心変圧器の試作

これまでに報告した試作器は、いずれもノーカット方式鉄心を採用している。この方式では鉄心の切断が不要であるが、反面、所要鋼帯幅種類の増加、円形断面のため形状占積率の低下による寸法大等の不利益が生じる。その上、基礎研究において判明したように、鉄心焼鈍時における融着の影響により、特性上も巻鉄心の特長を十分生かすことができない。

そこで、現行変圧器鉄心の標準方式であるステップラップジョイント方式鉄心について研究を行った。

事前研究として、巻板、切断及び焼鈍の各項目についての試験・検討を行い、満足すべき結果が得られたので、単相、 $60 \text{ Hz}$ 、 $20 \text{ kVA}$ 変圧器を試作した。試作変圧器の写真を図6に示す。また、特性試験結果を表2に示す。なお参考のため、ノーカット方式鉄心の場合の結果も並記した。

この結果から分るように、ステップラップジョイント方式は、ノーカット方式に比べて特性面その他において優れた点を有している。

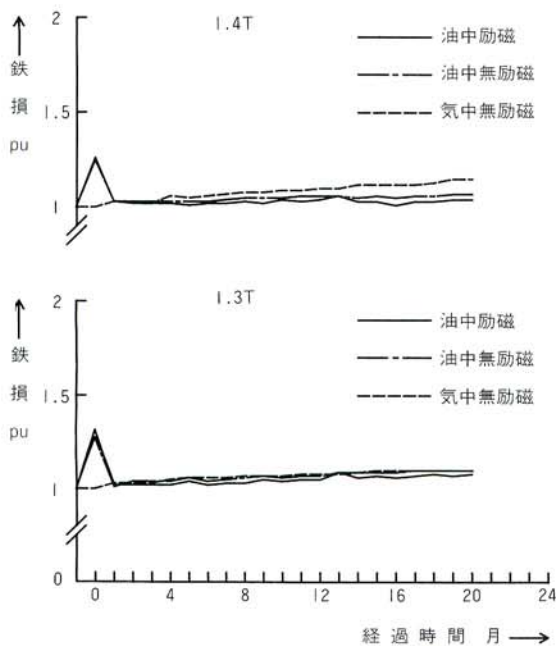


図5(a)/鉄損の変化  
Fig. 5(a)/Change of core loss of troidal core during aging test

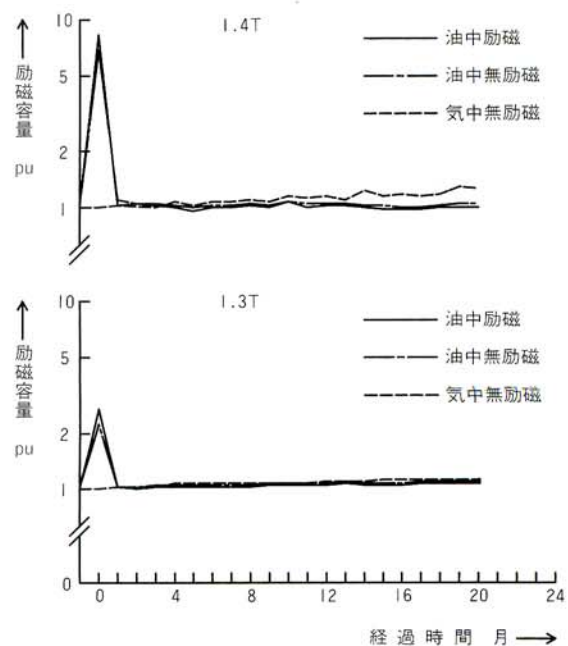


図5(b)/励磁容量の変化  
Fig. 5(b)/Change of exciting power of troidal core during aging test

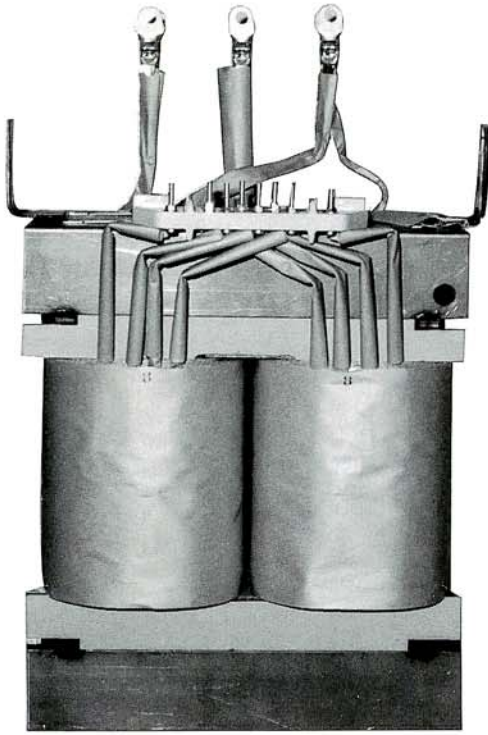


図6 / ステップラップジョイント巻鉄心20kVA変圧器  
Fig. 6/Step-lap jointed wound core type 20kVA Amorphous Transformer

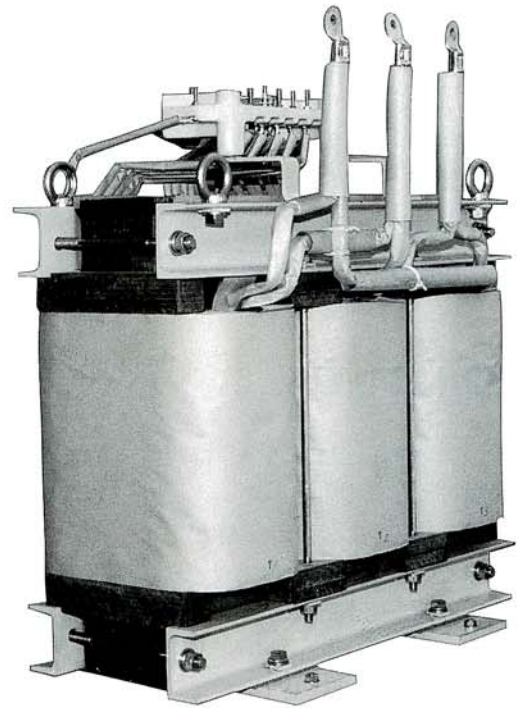


図7 / 積鉄心75kVA変圧器  
Fig. 7/Miter-jointed stacked core type 75kVA Amorphous Transformer

表2 / 寸法・総質量・油量及び特性試験結果  
Tab. 2/Dimensions, weights and test results

項目	ステップラップジョイント方式	ノーカット方式
幅 mm	605	625
奥行 mm	580	450
高さ mm	805	920
総質量 kg	194	200
油量 ℓ	52	50
無負荷電流 %	0.114	0.36
無負荷損 W	14.0	25.8
負荷損 W	275	263
インピーダンス電圧 V	148	153

表3 / 積鉄心変圧器の仕様  
Tab. 3/Specification of stacked core transformer

項目	仕様
形式	屋外油入自冷式
相数	3相
周波数	60Hz
容量	75kVA
1次電圧	6600V
2次電圧	210V

## 5 積鉄心変圧器の試作

これまでの試作変圧器は柱上変圧器を対象とし、すべて巻鉄心方式であったが、将来、アモルファス磁性材料を大容量変圧器に適用する場合には積鉄心方式を採用しなければならないので、積鉄心方式についての試作・検討を行った。試作にあたっては、事前に小形のモデル鉄心を製作して、切断方法、積層方法、鉄心締付方法、焼鈍方法（特に磁界印加方法）等について検討を行った。

試作器の鉄心形状は額縁形を採用し、アモルファス磁性材料素板を所定の形状に切断後、10枚を1組として積層を行った。図7に試作変圧器の写真を示す。また、表3に仕様、表4に寸法・総質量・油量及び特性試験結果を示す。なお、表4には現行の標準変圧器の特性も並記した。

表4 / 寸法・総質量・油量及び特性試験結果  
Tab. 4/Dimensions, weights and test results

項目	アモルファス積鉄心変圧器	現行標準変圧器
幅 mm	730	640
奥行 mm	480	520
高さ mm	1075	905
総質量 kg	450	295
油量 ℓ	85	63
無負荷電流 %	2.3	0.48
無負荷損 W	93	237
負荷損 W	1280	1285
インピーダンス電圧 %	3.27	2.6

現行の標準変圧器は巻鉄心構造のため、試作変圧器と単純に比較はできないが、無負荷損は40%以下に低減している。しかし、ビルディングファクター（無負荷損と素材鉄損の比）は、先に試作のステップラップ方式鉄心の約2倍となった。その原因としては、素材の偏厚による積層厚の不揃い、切断精度に起因する接合部の空隙、素材が薄いため差しコア不完全等が考えられるが、これらは今後の検討課題である。

## 6 経済性の検討

アモルファス磁性材料は、価格がけい素鋼帯に比べてかなり割高となっているので、これの採用に当たっては損失評価を加味することが必要となる。

変圧器の材料費を  $P_{mt}$ 、加工費を  $P_{mn}$ 、損失評価額を  $P_{wt}$  とすれば、総合価格  $P$  は、

$$P = P_{mt} + P_{mn} + P_{wt} \quad (\text{円})$$

ここで、

$$P_{mt} = P_c G_c + P_i G_i + P_a \quad (\text{円})$$

ただし、 $P_c$ ：巻線材料単価（円/kg）

$G_c$ ：巻線材料重量（kg）

$P_i$ ：鉄心材料単価（円/kg）

$G_i$ ：鉄心材料重量（kg）

$P_a$ ：外箱、付属品等価格（円）

$$P_{mn} = P_m (T_c G_c + T_i G_i + T_a) \quad (\text{円})$$

ただし、 $P_m$ ：加工費単価（円/h）

$T_c$ 、 $T_i$ 、 $T_a$ ：係数

$$P_{wt} = P_{wc} W_c + P_{wi} W_i \quad (\text{円})$$

ただし、 $P_{wc}$ ：負荷損評価額（円/W）

$W_c$ ：負荷損（W）

$P_{wi}$ ：無負荷損評価額（円/W）

$W_i$ ：無負荷損（W）

定格容量、電圧及び周波数が与えられ、かつ磁束密度を一定とした場合、上記の重量、損失は巻線1回当たりの電圧  $v$ 、電流密度  $J$  により次のように与えられる。

$$G_c = K_{cl} l_c / v J \quad (\text{kg})$$

$$W_c = K_{wc} l_c J / v \quad (\text{W})$$

$$G_i = K_{il} l_i v \quad (\text{kg})$$

$$W_i = K_{wi} l_i v \quad (\text{W})$$

ただし、 $K_c$ 、 $K_{wc}$ 、 $K_i$ 、 $K_{wi}$ ：定数

$l_c$ ：巻線平均長（m）

$l_i$ ：鉄心磁路長（m）

上式中の  $l_c$ 、 $l_i$  は巻線及び鉄心の寸法に関係するが、これらはインピーダンス電圧が与えられれば、 $v$  及び  $J$  から間接的に決定される。

即ち、最適設計を与える  $v$  及び  $J$  の値は、

$$\frac{\partial P}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial P}{\partial J} = 0$$

から求めることができる。

図8は、上式によりコンピュータを用いて20kVA変圧器についてシミュレーションを行った結果を、現行けい素鋼変圧器との比較で示しており、この直線の下側がアモルファス変圧器が有利となる範囲である。現在、米国における損失評価額は、3～5 \$/Wの地域が大半を占めており、この場合は、アモルファス磁性材料の単価が現在のけい素鋼帯と略同一価格にならないと有利とならない。しかし、損失評価額が高い地域における場合、あるいは今後の評価額の上昇、アモルファス磁性材料価格の低下などの場合にはアモルファス変圧器が有利となることも考えられる。

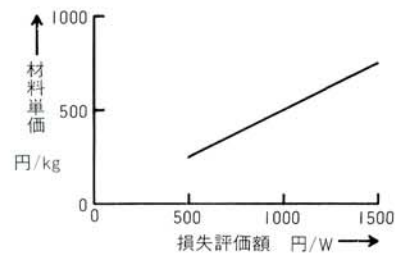


図8 / アモルファス変圧器の経済性

Fig. 8/ Cost-performance Calculation for 20kVA Transformer



図9 / 実負荷運転状況

Fig. 9/ 20kVA Amorphous Transformer in operation

## 7あとがき

アモルファス磁性材料に関する基礎研究、実器の試作及び長期熱安定性について検討した結果、実用上特に問題と思われる点は見当たらない。さらに長期信頼性検証のため、工場構内において20kVA変圧器を実負荷運転中である。図9にその状況の写真を示す。

次に、ステップラップジョイント鉄心、積鉄心変圧器の試作を行い、設計製作上の諸問題の解決を図った。なお、積鉄心変圧器に関しては、その後、アライド社よりパワーコアと称する数枚の薄帯を接着、焼鈍した製品が発表されており、今後はパワーコアを使用する方向になるものと考えられる。現在、パワーコアを使用した積鉄心の研究を実施中であり、これについては、別の機会に報告したい。

アモルファス変圧器の経済性に関しては、現状の価格では大きなメリットは期待できないが、将来、アモルファス磁性材料価格の大幅低減、損失評価額の上昇が実現すれば有望である。

最後に、アモルファス変圧器の研究・試作に当たり、御協力戴いた関係各位に対し深く感謝の意を表す。

## 昭和61年度上期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
61-14701	中性点接地抵抗装置	神谷 俊郎 内田 哲雄	
61-40934	局部洗浄装置付便器の制御装置	横山 武弘 平塚 保博 川地 孝 立松 聡	東陶機器(株)
61-51807	変圧器ケースおよびその塗装方法	奥村 顕治	
61-52194	同期モータの速度制御装置	佐藤 徹 安田 徹	
61-54613	リアクトル鉄心の積層方法および積層装置	廻間 正樹 氏家 憲一	

公開番号	名 称	発 明 者	共同出願人
61-102927	温風乾燥装置の温度制御装置	横山 武弘 平塚 保博 立松 聡 川地 孝	東陶機器(株)
61-102928	温風乾燥装置の温度制御装置	川地 孝 立松 聡 土本 僚一 岡本 隆生	東陶機器(株)
61-119231	暖房便座の温度制御装置	横山 武弘 川地 孝 立松 聡 安達 弘之	東陶機器(株)