



## 高温磁気センサの開発

### Development of High Temperature Magnetic Sensor

|             |      |                  |        |
|-------------|------|------------------|--------|
| 日本原子力研究開発機構 | 高屋 茂 | Shigeru TAKAYA   | Member |
| 日鉄住金テクノロジー  | 荒川 尚 | Hisashi ARAKAWA  |        |
| 日鉄住金テクノロジー  | 櫻田 理 | Satoshi KEYAKIDA | Member |

A magnetic sensor which can be applied to measurement at elevated temperature was newly developed. It is a kind of flux gate magnetic sensor. Permendur was employed for a magnetic core instead of Permalloy which is commonly used because Permendur has much higher Curie point, about 1000°C. Heat resistant ceramic coating Cu wires were used for coils. External magnetic field is detected by shift of peak position of differential permeability during induction of triangular excitation current. A magnetic core has race track shape with a fine part to make peak position more clear and increase detectability. The output of the developed sensor showed good linearity with external magnetic field even at 500°C. Furthermore, the durability of the sensor was discussed, and it was shown that decrease in coil performance after some operation at elevated temperature seems to be a critical issue.

**Keywords:** Flux Gate Sensor, Permendur, Differential Permeability, Heat Resistance, Oxidation

#### 1. 諸言

ナトリウム冷却高速増殖炉は、第4世代原子炉として現在、研究開発が進められている。主な特徴のひとつとしては、ナトリウムが高沸点流体であることから、原子炉冷却材の加圧が不要で、高温設計が可能であることが挙げられる。例えば、原型炉「もんじゅ」の場合、原子炉炉出口温度は529°C、原子炉入口温度は397°Cである[1]。原子力プラントの安全性及び経済性の向上のためには、材質劣化のモニタリングが有効であると期待されるが、ナトリウム冷却高速増殖炉の場合にはこのように使用環境が高温であることを考慮する必要がある。

材質劣化診断手法としては、超音波やX線を利用したもの等が提案されているが[2]、磁気特性が転位や局所的な化学組成変化等の材質劣化と密接に関係しており、非破壊・非接触での測定に適していることから磁気的手法も注目されている[3-6]。著者らもこれまでに、ナトリウム冷却高速増殖炉の主要構造材料である SUS304 や高速炉用 SUS316 (316FR 鋼) の磁気特性が、高温下での疲労損傷や中性子照射損傷の蓄積により変化することを明ら

かにしてきた[7, 8]。ただし、これらの研究はいずれも室温での磁気特性測定結果に基づくものである。実機プラントにおいてその場測定による劣化モニタリングを実現させるためには、高温下でも磁気特性が材質劣化と関連付けられることを確認する必要がある、そのためには約400°C以上の高温下で使用可能な磁気センサが必要となるが、現在、適用できる一般的な磁気センサは無い。そこで本研究では、フラックスゲートセンサの高温化について検討した。

フラックスゲートセンサを選択した理由としては、温度安定性に優れていること、ホールセンサやGMセンサに比べ感度が高い一方、より高感度であるSQUIDセンサのように液体窒素で冷却する必要がないこと、磁性コアと励磁用及び検出用コイルからなる比較的単純な構造で放射線環境下でも誤信号を出す懸念が小さいこと等が挙げられる[9]。なお、フラックスゲートセンサを用いた材質劣化モニタリングの方法については、例えば、熱時効や中性子照射損傷のように空間的にある程度様な材質劣化が予想される部位について代表数か所の磁束密度を測定し、磁気特性と材質劣化の相関関係から劣化の進行程度を予測したり、あるいは文献[7, 10, 11]のようにフラックスゲートセンサを走査して得られた磁束密度分布から材質劣化が進行している領域を推定すること等が考えられる。

連絡先:高屋 茂、〒311-1393 大洗町成田町4002 番地、  
(国) 日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門  
E-mail: takaya.shigeru@jaea.go.jp

本研究では、400~500℃で測定可能な磁気センサの開発を目標とし、磁性コア材料に、フラックスゲートセンサで一般的に用いられているパーマロイでなく、キュリー温度が約 1000℃と高いパーメンジュールを採用した磁気センサ素子を提案、製作し、高温での磁界検出特性を調べた。さらに、センサの耐久性に関する検討も行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 磁気センサ素子の製作

フラックスゲートセンサの一般的な検出原理は、軟磁性体が小さな磁界強度で急速に磁気飽和に至る特性を利用して、励磁コイルで磁性コアに交流磁界を印加しながら、外部磁界により磁性コアが飽和する位相や、磁気飽和させるために必要な励磁電流が変化することを検出するものである。そのため、フラックスゲートセンサの磁性コアには、高透磁率で、かつ保磁力が小さい材料が適しており、Fe-Ni 合金であるパーマロイが広く用いられている。

高温磁気センサでもパーマロイの利用が可能か検討するために、パーマロイの磁化曲線を振動試料型磁力計 (VSM) で測定し、最大磁界印加時 (約 400 kA/m) の磁化 (便宜的に「飽和磁化相当」と呼ぶ) の温度依存性を調べた例を Fig.1 に示す。測定温度は、室温から 400℃までである。飽和磁化相当は測定温度の上昇とともに減少し、300℃では室温の約半分まで低下する。測定温度が 400℃まで上昇すると、飽和磁化相当はさらに低下し、ほぼ常磁性状態になっていると思われる。このことから、パーマロイのキュリー温度は 300~400℃の間に存在すると考えられる。磁気センサとして機能する上限温度はキュリー温度よりもさらに低くなると予想されることから、磁性コアにパーマロイを用いたフラックスゲートセンサでは、本研究で対象とした 400℃以上での磁界測定は不可能であると判断される。そこで、本研究では、パーマロイと同じ軟磁性材用であり、キュリー温度が約 1000℃と高いパーメンジュールについて検討することとした。

Fig.2 に、パーメンジュールの飽和磁化相当の温度依存性を示す。VSM を使い、外部磁場一定 (約 400 kA/m) のまま測定温度を室温から 600℃まで変化させて磁化を測定した。500℃では、飽和磁化相当が室温に比べ 5%程度低下したものの温度上昇による急激な低下は認められなかった。

製作した磁気センサ素子の磁性コア形状を Fig.3 に示す。

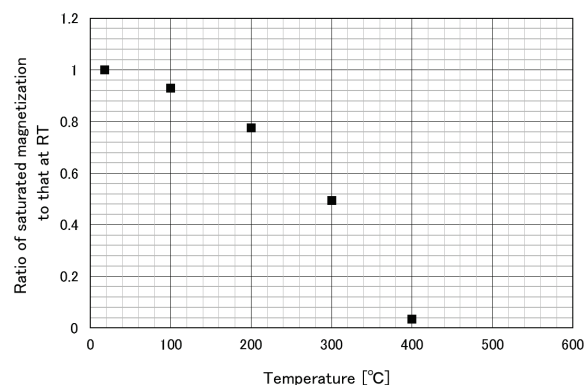


Fig. 1 Temperature dependency of equivalent saturated magnetization of Permalloy

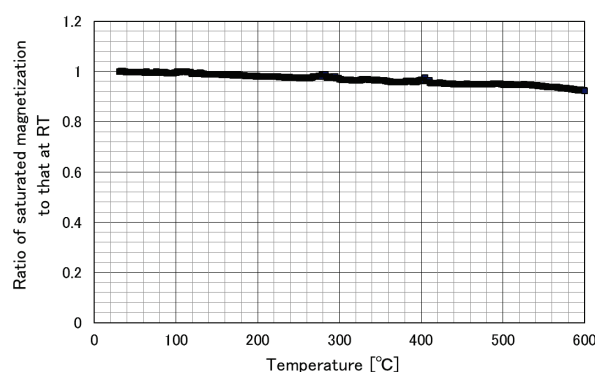


Fig. 2 Temperature dependency of equivalent saturated magnetization of Permendur

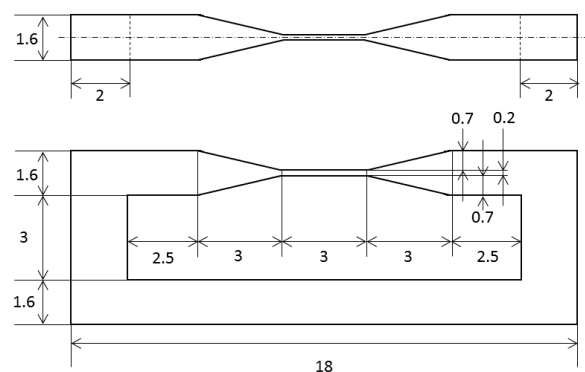


Fig. 3 Dimensions of a magnetic core of Permendur (mm)

磁性コア形状は、一般に円環あるいは柱状であることが多いが、本研究で Fig.3 に示す形状とした理由は、以下の通りである。まず、磁性コアの形状をループ状とすることにより、励磁コイル部で発生した磁束が効率よく検出コイル部に到達するとともに、磁性コア内で励磁電流による磁極が発生することがないようにした。また、磁性コアの形状を測定磁場方向に長くすることによって、外

部磁場により磁化された磁性コア内の磁極により生じる反磁場の影響を低減させた。なお、後述のとおり、本磁気センサでは、微分透磁率 ( $dB/dH$ ) のピーク位置を精度よく判定することが重要となるが、ピーク位置をより明確にするためにくびれ部を設けた。磁気コア材の加工後、加工歪みを除去するために真空中にて 850°C で 2 時間保持した後、炉冷することにより焼鈍を行った。その後、測定中の磁性コア材の酸化進行の抑制と、くびれ部の補強及びコイルとの絶縁強化のために、磁性コアをセラミックコーティングした。

Fig.4 に磁気センサ素子の概略図を示す。磁性コアの長辺部分に励磁用コイルと検出用コイルをそれぞれ 70 ターン及び 40 ターン巻いた。なお、くびれ部側を検出用コイルとした。コイルには、セラミックコーティングされた耐熱銅線 (直径: 約 0.3 mm、東京特殊電線製) を用いた。最後に、素子全体を再度セラミックコーティングした。

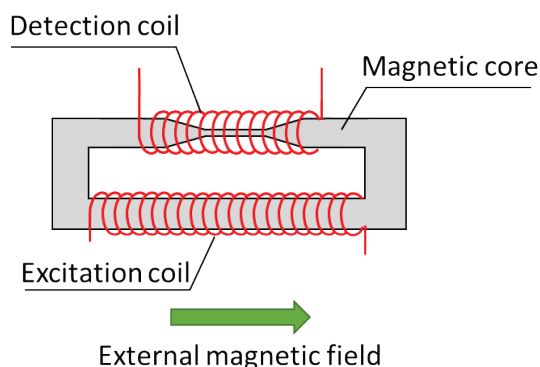


Fig. 4 Schematic of a magnetic sensor element of Permendur

## 2.2 検出原理

前述のとおり、フラックスゲートセンサの一般的な検出原理は、外部磁界により磁性コアが飽和する位相や、磁気飽和させるために必要な励磁電流が変化することを検出するものである。したがって、磁気飽和の判定が重要となる。Fig.5 に、室温におけるパーマロイとパーメンジュールの磁化曲線の比較を示す。この図から、本研究で磁性コア材料として採用したパーメンジュールは、通常使用されるパーマロイと比較して緩やかに磁気飽和に至ることから、磁気飽和の判定が困難であり、本特性に着目した従来の検出原理を適用できないことがわかる。そこで本研究では、微分透磁率 ( $dB/dH$ ) に着目した検出原理を採用した。微分透磁率の絶対値は、保磁力の位置

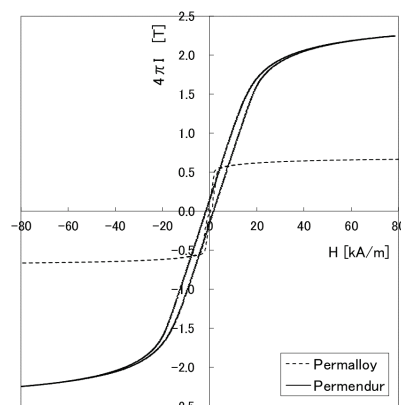


Fig. 5 Comparison of magnetic curves of Permalloy and Permendur

で最大となるが、これに対応して、Fig.6 に示すように検出コイルの誘導電圧も保磁力の位置でピークをもつ。パーメンジュールは、パーマロイに比べて微分透磁率の変化が緩やかであるため、誘導電圧のピークの判別も難しいが、本研究では、Fig.4 に示すように磁性コアの検出部にくびれを設けて励磁部よりも断面積を小さくすることにより、効率的に検出部を磁気飽和に至らせ、見かけの微分透磁率の変化を急峻にすることで、これを可能にした。外部磁界 ( $H_{ex}$ ) は、誘導電圧のピーク位置に基づき次の式で評価することができる。

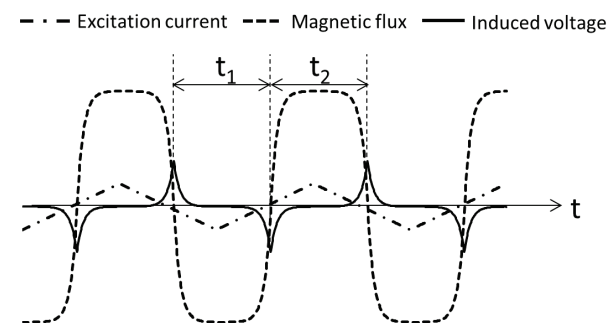
$$H_{ex} = C \frac{t_2 - t_1}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

ここで、 $C$  は定数であり、 $t_1$  と  $t_2$  は、Fig.6 に示す時間である。

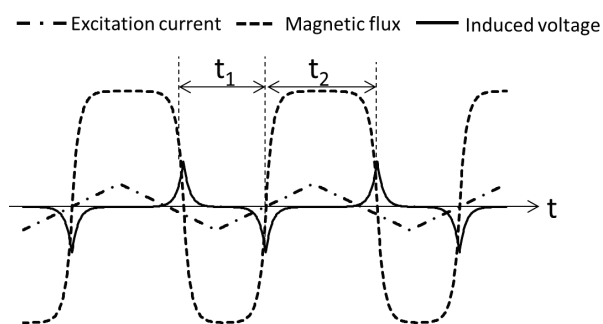
本研究では、励磁条件として、励磁電流波形を三角波、周波数を 150 Hz、電流値を 500 mA-p-p とした。励磁用コイルの長さが約 14 mm、巻き数が 70 ターンより、励磁部における最大磁場強度は約 2.5 kA/m であり、その時の磁束密度は、Fig.5 より 0.1 T 程度と推定される。これより、励磁部は飽和には至らないと考えられる。一方、くびれ部の断面積は、励磁部の 1/64 倍であるため、仮に磁束が漏れずにくびれ部まで到達したとすると、くびれ部での磁束密度は約 6.4 T となり、Fig.5 中で 80 kA/m 印加した場合の磁束密度を大きく超える。このことから、実際には、磁束の漏れがあると考えられるものの、くびれ部においてはおおそ飽和に至っていると考えられる。

なお、1 周期分のデータではノイズ等の影響が大きいため、256 周期分の積分波形をもとに評価した  $t_1$  と  $t_2$  を用いて(1)式に基づき外部磁場を求めた。さらにこれを 3 回繰

返し、その平均値を最終的な評価結果とした。



(a)  $H_{ex} = 0$



(b)  $H_{ex} > 0$

Fig. 6 Waveforms of excitation current, magnetic flux and induced voltage

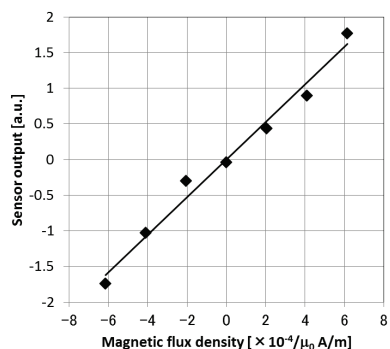
### 2.3 性能評価試験

製作した磁気センサ素子を加熱炉中に設置し、外部磁場を $\pm 6 \times 10^{-4} \mu_0$  A/mの範囲で変化させた場合の検出値の変化を取得した。ここで、 $\mu_0$ は真空中の透磁率である。外部磁場発生装置には、耐熱コイルを用いて製作したヘルムホルツコイルを用いた。なお、磁気センサの制御系については、加熱炉の外に設置した。測定温度は、室温、400、450、500°Cとした。

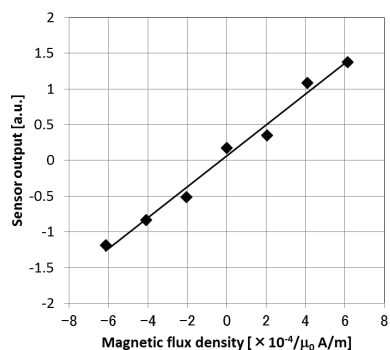
## 3. 実験結果

### 3.1 性能評価試験

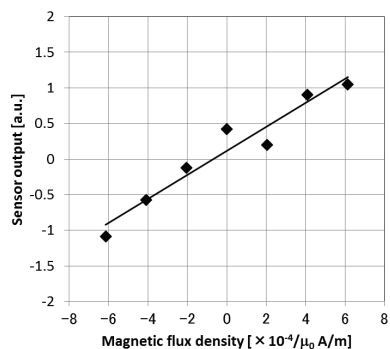
パーメンジュール製磁性コアを用いた磁気センサに関する性能評価試験結果を Fig.7 に示す。室温及び 400~500°Cのいずれの温度においても、 $\pm 6 \times 10^{-4} \mu_0$  A/mの評価範囲において外部磁場強度が増加するとともに検出値が単調に増加していることが分かる。Table 1 に、外部磁界



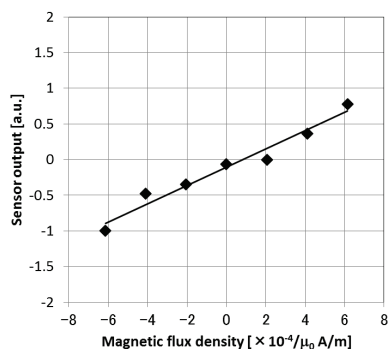
(a) RT



(b) 400°C



(c) 450°C



(d) 500°C

Fig. 7 Relationship between magnetic flux density and sensor output of a magnetic sensor using a Permendur magnetic core

強度と検出値の関係を1次式で近似した場合の傾き（本研究ではこれを感度と定義する）、決定係数、及び同近似式を用いて検出値から外部磁界を評価した場合の標準誤差を示す。決定係数はいずれの温度の場合でも高く、外部磁場強度と検出値の間に線形関係が成り立つことを確認することができる。感度については、500°Cでも  $0.13 / (10^{-4} \mu_0 \text{ A/m})$  の有意な感度を有していたが、温度とともに低下する傾向を示した。標準誤差は、いずれも  $0.16 \times 10^{-4} / \mu_0 \text{ A/m}$  前後であり、明確な温度依存性は示さなかった。

以上のように、製作したパーメンジュール性磁性コアを用いた磁気センサを用いて、500°Cの高温での磁界測定が可能であることを示した。

**Table 1 Temperature dependency of properties of a magnetic sensor using a Permendur magnetic core**

|  | RT   | 400°C | 450°C | 500°C |
|--|------|-------|-------|-------|
| Sensitivity<br>[ $/(10^{-4} \mu_0 \text{ A/m})$ ]          | 0.26 | 0.22  | 0.17  | 0.13  |
| Coefficient of determination                               | 0.98 | 0.99  | 0.94  | 0.96  |
| Standard error<br>[ $\times 10^{-4} / \mu_0 \text{ A/m}$ ] | 0.17 | 0.13  | 0.21  | 0.12  |

### 3.2 磁気センサの耐久性評価

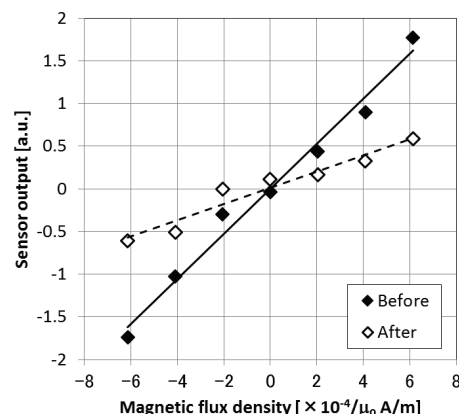
Table 1 では、磁気センサの感度について温度依存性が確認されたが、Fig.2 に示したように、パーメンジュールの場合、500°C程度では室温からの大幅な磁気特性変化は考えられない。したがって、性能評価試験中（約10時間）に磁気センサに何らかの性能劣化が生じた可能性が考えられる。そこで、高温での磁気センサ性能評価試験の後、再度室温での磁気センサ出力と外部磁界強度の関係を取得した。Fig.8 に性能評価試験前後での磁気センサ出力の比較を示す。性能試験評価後も外部磁界に対する応答性は維持していることが確認できたが、感度の低下が認められた。このことから、磁気センサに不可逆的な変化が起こっていることがわかる。そこで、磁気センサの構成要素である磁気コア材と耐熱コイルの性能評価試験前後での特性変化について検討した。

#### 3.2.1 磁気コア材

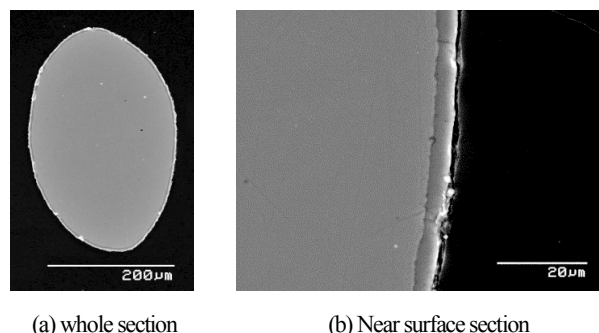
Fig.9 にパーメンジュール製磁性コアを用いた磁気センサの高温測定後のくびれ部断面観察結果を示す。表面に

厚さ  $5 \mu\text{m}$  程度のごく薄い皮膜が形成されていた。皮膜の剥離や皮膜内部の空隙等は見られず、ち密な構造であることがわかる。Fig.10 に皮膜部分についてSEM/EDSによりスポット元素分析を実施した結果を示す。パーメンジュールの基本構成元素である、Fe、Co、Vの他にOのピークが確認された。これにより、磁性コア表面に形成された皮膜が酸化物であることがわかった。以上から、高温測定時に磁性コア表面が酸化するものの、その量はわずかであることがわかった。

次に、このような酸化が磁気特性に与える影響を検討するために、パーメンジュールの大气中600°Cで20時間熱処理前後での磁化曲線を測定した。ここで、熱処理条件は、性能評価試験時の使用時間よりも十分長くなるように設定した。磁化曲線の測定は室温でVSMを用いて実施した。試験片寸法は、磁性コアの寸法を参考に  $7 \times 2 \times 0.2 \text{ mm}$  とした。結果をFig.11に示す。熱処理後に、飽和



**Fig. 8 Comparison of output of a magnetic sensor using Permendur core at RT between before and after a performance evaluation test.**



**Fig. 9 SEM image of cross-section of a neck portion of Permendur magnetic core after a performance evaluation test.**

磁化の低下が認められたものの、Fig.6 に示した検出原理に基づくと、飽和磁化の低下は、センサ性能には直接関係しない。直接関係する特性は、保磁力と、保磁力の位置での微分透磁率である。保磁力が変化すると、(1)式において  $C$  が変化するため、保磁力が変化する前の  $C$  を用いて評価すると誤差が生じる。また、保磁力の位置での微分透磁率が小さくなると、微分透磁率のピーク位置の判別が困難になり精度に影響する。Fig.11 で、熱処理前後の保磁力および保磁力の位置での磁化曲線の傾きの違いについてみてみると、いずれの特性についても顕著な差は見られなかった。以上より、高温測定中の酸化は磁気センサ特性の低下に有意な影響は与えていないと判断できる。

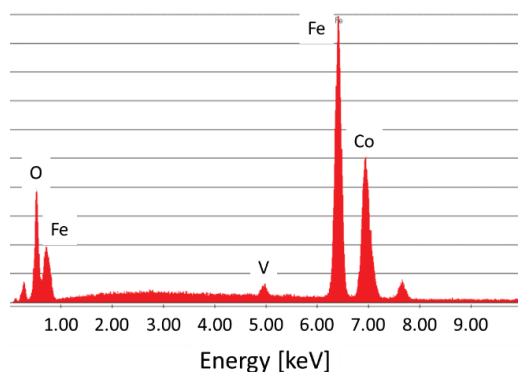


Fig. 10 SEM/EDS spot analysis result at surface film of Permendur magnetic core

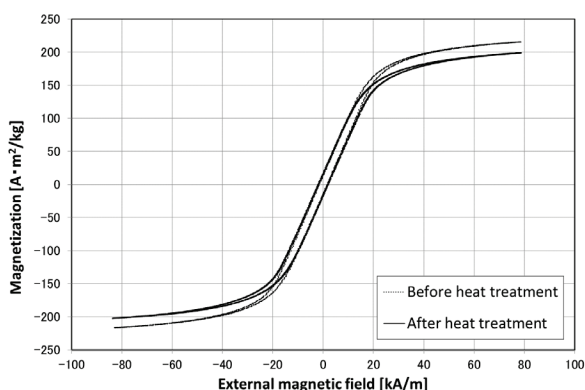


Fig. 11 Comparison of magnetic curves before and after heat treatment by 600°C for 20h

### 3.2.2 耐熱コイル

耐熱コイルは、セラミックコーティングされており、さらにセンサ素子もセラミックコーティングを行って

るが、性能評価試験後、セラミックコーティングのひび割れが一部で認められた。Fig.12 に性能評価試験後の磁気センサ素子の外観写真を示す。



Fig. 12 Photograph of a magnetic sensor element using Permendur magnetic core after a performance evaluation test

セラミックコーティングの損傷によるコイル性能の低下が予想されるため、励磁・検出各コイルの抵抗とインダクタンスの測定を行った。ここで、性能評価試験前に比較用の測定を実施していなかったため、初期値を次の式で推定した。

$$R = \frac{c\rho N}{A} \quad (2)$$

ここで、 $R$  は電気抵抗、 $c$  はコア断面周長、 $\rho$  は電気抵抗率、 $N$  はコイルの巻き数、 $A$  はコイル断面積である。単位長さの電気抵抗率 ( $\rho/A$ ) は、新材を用いて測定した結果、 $0.25 \Omega/m$  であった。

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} \quad (3)$$

ここで、 $L$  はインダクタンス、 $\mu$  はコア材料の透磁率、 $N$  はコイルの巻き数、 $S$  は磁気コア材の断面積、 $l$  はコイル部の長さである。コア材料の透磁率は、 $\mu=1910 \mu H/m$  と設定した。また、コイル部の長さは、励磁コイル 14 mm、検出コイル 3 mm とした。初期値の推定値と性能評価試験後の測定結果を Table 2 に示す。本結果より、励磁コイル及び検出コイルともに抵抗値が増大し、またインダクタンスは低下していると考えられることがわかった。検出コイルのインダクタンスが低下すると、センサ出力値が低下する。このようなコイル性能の低下が、不可逆的な磁気センサの性能低下を招いたと考えられる。なおインダクタンス低下の原因としては、コア材料の酸化に関する検討の結果から  $\mu$  及び  $S$  は大きく変化していないと

考えられるため、耐熱銅線のセラミックコーティングの一部剥離に伴う短絡（実効コイル巻き数の減少）が考えられる。現在市販されている耐熱銅線ではこの問題の回避は難しいと予想され、今後の課題として、耐熱コイルの耐久性向上策の検討が挙げられる。

**Table 2 Electric properties of excitation and detection coils**

|          | Excitation coil |              | Detection coil |              |
|----------|-----------------|--------------|----------------|--------------|
|          | Initial*        | After test** | Initial*       | After test** |
| $R$ [mΩ] | 111             | 354.2        | 8              | 136.0        |
| $L$ [μH] | 1700            | 110.95       | 41             | 11.46        |

\* Estimated by using eqs. (2) and (3)

\*\* Measured after a performance evaluation test

#### 4. 結言

400～500℃の高温で測定可能な磁気センサの開発を目的として、磁性コアに、フラックスゲートセンサで通常用いられるパーマロイではなく、高キュリー温度のパーメンジュールを採用したフラックスゲートセンサを製作した。パーメンジュールは、パーマロイと比較して緩やかに磁気飽和に至る特性を有していることから、一般的な磁気飽和に着目した検出原理でなく、微分透磁率の変化に着目した検出原理を採用するとともに、検出感度を高めるために、磁気コア形状をくびれ部を設けた矩形状とした。また、コイルには耐熱性を考慮しセラミックコーティングした耐熱銅線を用いた。

室温、400、450 及び 500℃での磁気センサの性能評価試験を行った結果、いずれの温度においても外部磁界強度と検出値の間に線形な相関があることが確認され、開発した磁気センサを用いて目標の 400～500℃での測定が可能であることを示した。

また、磁気センサの耐久性について調べるために、性能評価試験前後での室温での感度を比較したところ、性能評価試験後に感度の低下が認められた。その原因について検討した結果、耐熱コイル性能の低下が影響している可能性が高いことが示された。今後の課題として、耐熱コイルの耐久性向上が挙げられる。

#### 参考文献

- [1] 福原英夫: “「もんじゅ」の概要” 核燃料サイクル開発機構技術資料、PNC-TN21000 91-001 (1991).
- [2] 例えば, “特集 材料劣化診断”, 非破壊検査, Vol. 46, pp. 149-196 (1997).
- [3] 高橋正気: “磁気測定による疲労損傷評価の可能性”, まてりあ, Vol. 35, pp. 649-654 (1996).
- [4] Z. Chen, K. Aoto, S. Kato, Y. Nagae and K. Miya: “An experimental study on the correlation of natural magnetization and mechanical damages in an austenitic stainless steel”, Inter. J. Appl. Electromag. and Mech., Vol. 16, pp. 197-206 (2002).
- [5] 高屋茂, 根本義之, 内一哲哉, 樺田理: “漏えい磁束密度測定によるオーステナイト系ステンレス鋼の材料劣化診断”, 日本 AEM 学会誌, Vol.17, pp.156-161 (2009).
- [6] 安部正高, 松本英治: “漏洩磁束測定による金属材料の弾塑性変形評価”, 日本 AEM 学会誌, Vol. 21, pp. 240-247 (2013).
- [7] S. Takaya and Y. Nagae: “Magnetic Property Change of Type 304 Stainless Steel due to Accumulation of Fatigue Damage at Elevated Temperature”, Inter. J. Appl. Electromag. and Mech., Vol. 25, pp. 211-217 (2007).
- [8] S. Takaya, I. Yamagata, S. Ichikawa, Y. Nagae and K. Aoto: “Nondestructive Evaluation of Neutron Irradiation Damage on Type 316 Stainless Steel by Measurement of Magnetic Properties”, Inter. J. Appl. Electromag. and Mech., Vol. 33, pp. 1335-1342 (2010).
- [9] P. Ripka: “Review of fluxgate sensors”, Sensors and Actuators A, Vol. 33, pp. 129-141 (1992).
- [10] 吉見健一, 藤山陽一, 務中達也, 山田康晴, 中西博昭, 吉田多見男: “小型薄膜フラックスゲート磁気センサとその応用”, 島津評論, Vol. 56, pp. 19-28 (1999).
- [11] 永江勇二, 青砥紀身: “クリーブ損傷を受ける SUS304 鋼の磁気特性変化に及ぼす微視的組織変化”, 日本 AEM 学会誌, Vol. 10, pp. 360-365 (2002).

(平成 27 年 3 月 17 日)