

# 長時間クリープ損傷を受けるオーステナイト系ステンレス鋼の磁気変化

Magnetic change in austenitic stainless steels subjected to long term creep damage

核燃料サイクル開発機構 永江 勇二 Yuji NAGAE Member  
核燃料サイクル開発機構 高屋 茂 Shigeru TAKAYA Member  
核燃料サイクル開発機構 青砥 紀身 Kazumi AOTO Member

To realize long-life fast breeder reactor (FBR) plants, it is important to develop a precise estimation method of metallurgical microstructure change before crack initiation. For estimating the metallurgical microstructure change related to degradation in commercial FBR plants, the change of magnetic property is focused on. Austenitic stainless steel is paramagnetic, but the magnetic flux density changes as creep damage at 773K or 823K. Finally, it is possible to detect the metallurgical microstructure change due to the degradation by magnetization.

**Keywords:** Flux-gate sensor, High temperature, Transformation, Paramagnetic material

## 1. 緒言

プラントの信頼性・安全性を向上させるために、これまで以上に信頼性の高い非破壊検出技術の開発が望まれている。現在までに開発されている非破壊検出手法には、超音波、放射線、渦電流などを用いたものがある[1]。しかし、これらはいずれもき裂発生後の損傷、つまりき裂を非破壊的に検出する方法である。プラントの信頼性・安全性を確保する上では、き裂発生以前からの損傷を検出する必要があると考える。これまでのところ、き裂発生以前の損傷を検出する技術は確立されていない。従って、き裂発生以前からの損傷を検出できるような非破壊検出技術法の開発が必要となる。

ここでは、高温構造材料として使用されている SUS304 鋼及び SUS316FR 鋼に着目する。本鋼はオーステナイト相を有しており、非磁性である。しかし、室温での引張損傷や疲労損傷により、磁性相であるマルテンサイトが生成すると報告がある[2-4]。さらに著者らは、923K のクリープ破断時間が 1000 時間程度の試験条件で、SUS304 鋼の磁気特性変化と金属組織変化との関連について検討してきた[6-8]。その結果、き裂発生以前のクリープ変形の初期から磁気特性変化を生じ、それは体心立方構造を有する強磁性相の生成と関連していることが分かった。

このような変化を、外部から非破壊的に磁気特性変化として検出することにより、き裂発生以前の損傷状

況を把握できる可能性があると考えられる。

しかし、これまでの研究報告は比較的短時間で、高速炉の使用温度域よりも高い温度でのクリープ損傷に伴う磁気特性変化に限られている。実機プラントの非破壊検出技術の開発においては、長時間クリープ損傷への適用性が問題となる。そこで、SUS304 鋼及び SUS316FR 鋼における長時間クリープ損傷の磁気特性変化について検討することとした。

## 2. 実験手法

### 2.1 試験片

本試験で使用した SUS304 鋼 (304SS) 及び SUS316FR 鋼 (316FR) の受入時の組成分析結果を Table 1 に示す。また、漏えい磁束密度の測定を行ったクリープ破断試験片の試験条件を、Table 2 に示す。

Table 1 Composition of 304SS and 316FR

(mass%)	C	N	Si	Mn
304SS	0.05	-	0.60	0.87
316FR	0.012	0.08	0.52	0.86
(mass%)	Ni	Cr	Mo	Fe
304SS	8.94	18.59	-	balance
316FR	10.6	16.6	2.14	balance

連絡先:永江勇二、〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田 4002、大洗工学センター、新材料研究グループ、電話: 029-267-4141、e-mail:nagae@oec.jnc.go.jp

測定に用いた試験片は、破断面から離れたつば部近傍から採取した。試料の大きさは、6mm×6mm×3mm

とした。Figure 1 に試料採取の模式図を示す。破断面からの距離は損傷の経時的な変化を示していると考えられる。つまり、破断面から一番離れたつば部近傍は損傷が破断面ほどは進行していない領域と考えられる。

304SS の場合には、受入時から強磁性体である  $\delta$  相が存在する。この  $\delta$  相は圧延によって圧延方向に伸ばされ、圧延面に垂直な方向にはつぶされている、いわゆる円板状の形状をしている。従って、切断の方向や着磁方向によっては漏えい磁束密度が異なる可能性がある。304SS の場合には切断方向を統一する必要があると考える。そこで、Figure 1 に示すように圧延面に平行な面が XY 面となるように切断した。一方、316FR には  $\delta$  相は観察されなかったため、任意の方向に切断した。

Table 2 Creep conditions

材料	温度, K	応力, MPa	破断時間, h
304SS	773	275	4,401
	773	216	34,562
316FR	823	324	986
	823	278	20,146

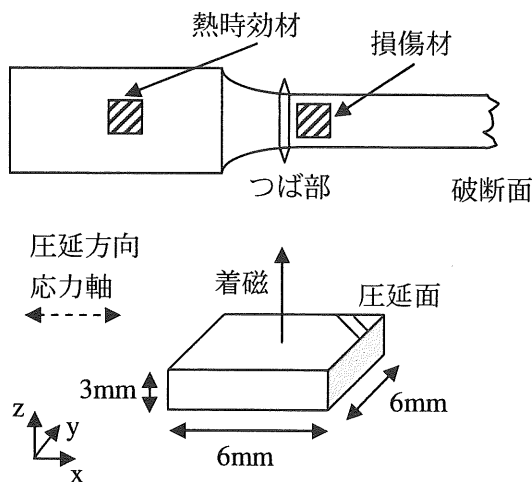


Figure 1 Preparation of samples

## 2.2 漏えい磁束密度測定

永久磁石を用いて試料の Z 軸方向に 0.3T で着磁した後、Z 軸方向の漏えい磁束密度測定を行った。漏えい磁束密度の測定には、島津製作所製のフラックスゲートセンサ[9]を用いた。リフトオフは 1mm とした。

クリープ損傷材との比較を行うために、同試験片の

ネジ部を無負荷材(熱時効材)として試験片を採取し、測定を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 受入材の漏えい磁束密度測定

まず、304SS と 316FR の受入時の漏えい磁束密度測定の結果を Figure 2(a)及び(b)に示す。

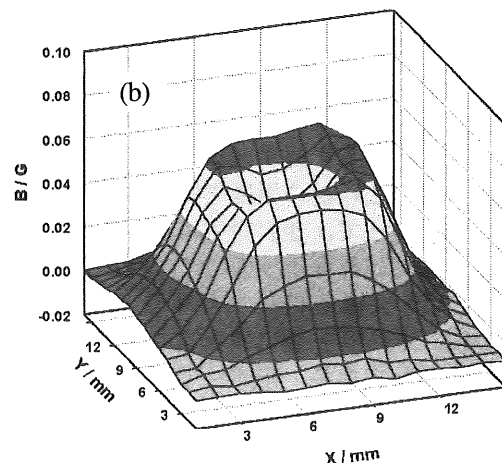
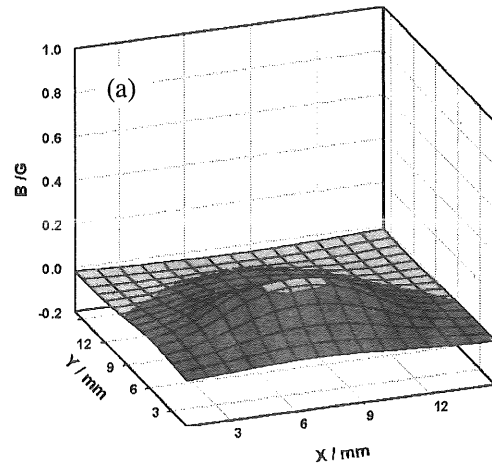


Figure 2 Leakage magnetic flux density for as-received materials: (a) 304SS and (b) 316FR

漏えい磁束密度のスケールが異なっていることに注意して両者を比較すると、304SS では  $\delta$  相の影響で、316FR と比較して受入時から漏えい磁束密度が大きいことが分かる。漏えい磁束密度の最大値は 0.2G であった。また、316FR では  $\delta$  相は観察されなかったが、僅かではあるが明らかな量の漏えい磁束密度が測定されている。最大値は 0.07G であった。

### 3.2 クリープ破断材の漏えい磁束密度測定

クリープ破断材と熱時効材の漏えい磁束密度測定結果の一例を、304SS については Figure 3 に、316FR については Figure 4 に示す。

304SS において熱時効材は、受入時の漏えい磁束密度分布と大きく変わることはなく、最大値は 0.2G であった。それと比較して、クリープ損傷材は漏えい磁束密度が増加していた。最大値は 0.9G であり、受入材や熱時効材と比較して、0.7G も増加していた。

一方、316FR においても熱時効材は、受入時の漏えい磁束密度分布と大きく変わることはなく、最大値は 0.07G であった。しかし、クリープ損傷を受けた場合は、漏えい磁束密度は増加していた。ただし、304SS で見られるように受入時と比較して 4~5 倍も増加することはなく、2~3 倍程度の増加（最大値は 0.17G）であった。

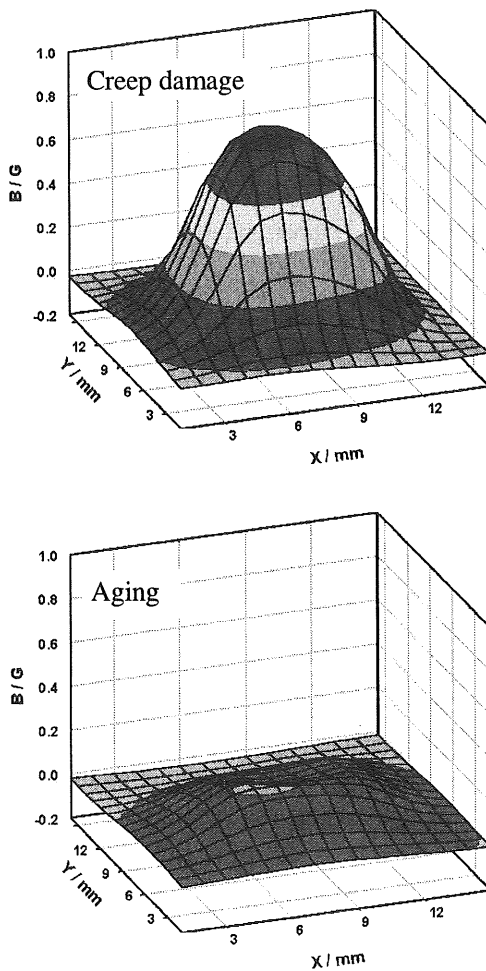


Figure 3 An example of leakage magnetic flux density in crept and aged 304SS (The time to rupture is 4,401 hours)

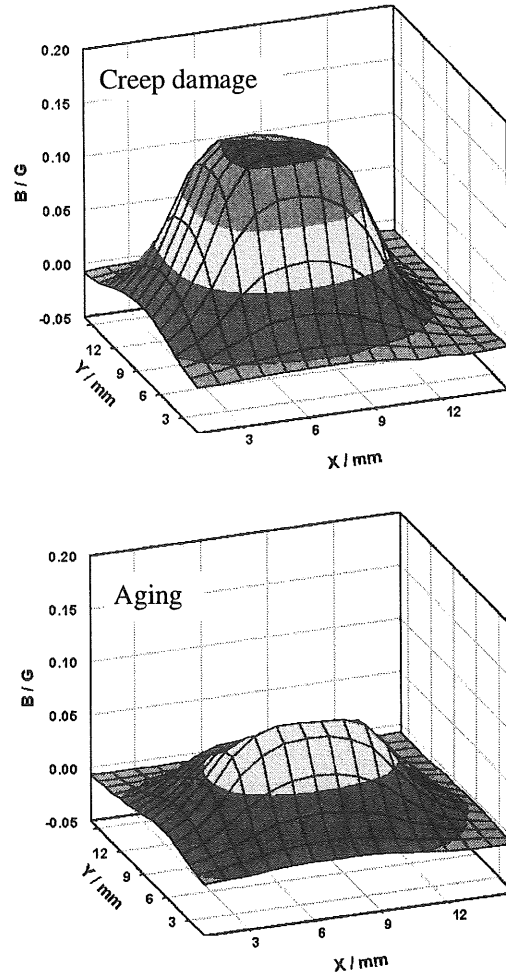


Figure 4 An example of leakage magnetic flux density in crept and aged 316FR (The time to rupture is 20,146 hours)

以上のように、いずれの素材においても、熱時効材の漏えい磁束密度の変化はほとんどなく、長時間クリープ破断材のそれは大きく変化することが分かった。そこで次に、クリープ破断時間と漏えい磁束密度の最大値の関係を Figure 5(a)及び(b)に示す。

10,000 時間を越えるようなクリープ破断時間を持つ試験片において、漏えい磁束密度が明らかに増加していることが分かる。漏えい磁束密度は、負荷を受けることによって大きく変化し、単に高温環境下に晒されるだけでは大きく変化しないと考えられる。304SS 及び 316FR のいずれの試験材においても、クリープ破断時間が短くなると、漏えい磁束密度の変化量は小さくなる傾向にある。これは、つば部近傍で破断面から離れているため大きな損傷を受けておらず、大きな変化が見られなかったことが考えられる。

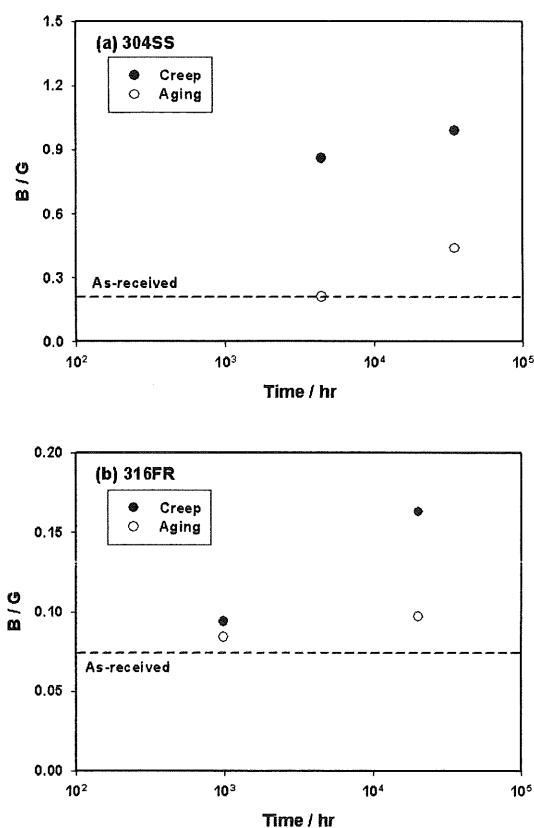


Figure 5 Maximum leakage magnetic flux density for crept or aged materials: (a) 304SS and (b) 316FR

### 3.3 漏えい磁束密度変化の要因

これまで、著者らは 923K でのクリープ損傷材[6-8]や疲労損傷材[10]の金属組織観察より、304SS の磁気変化の要因は、結晶構造変化であると報告してきた。304SS は、非磁性であるオーステナイト相が準安定相であるため、負荷を与えることにより、磁性を持つ相に変態することが考えられる。773K での 304SS の長時間クリープ破断材の磁気変化においても、これまでの報告同様、結晶構造変化によるものと考えられる。

また、304SS の長時間熱時効材で、漏えい磁束密度が増加しているように見える。この原因は、(1)773K 近傍では  $\alpha$  相が析出するため、(2)受入時から存在する  $\delta$  相の不均一分布により初期から漏えい磁束密度が高かったためのいずれかが考えられる。しかし、漏えい磁束密度の増加量は小さい。つまり、熱時効によって、漏えい磁束密度の大きな変化はないと考えられる。

一方、316FR は 304SS と比べてオーステナイト相が

安定ではあるが、厳しい損傷を受けることによりわずかな領域で変態することも考えられる。304SS 及び 316FR とも、金属組織観察を行って磁気変化の要因について明らかにする必要がある。

## 4. 結言

- 1) 高速炉の使用温度域において長時間クリープ損傷を受けた 304SS 及び 316FR の漏えい磁束密度を測定した結果、受入時及び熱時効材と比較して明らかに漏えい磁束密度が増加していた。特に、316FR は非磁性相であるオーステナイト相が安定にも係わらず、漏えい磁束密度が変化することが示された。
- 2) この結果より、実機プラントにおいても磁気変化に基づいて非破壊的に損傷を評価できる可能性があると考えられる。

## 参考文献

- [1] 例えば、(社)日本非破壊検査協会、「非破壊検査技術の保守検査への適用例—検査と材料評価—」, (2000) 49.
- [2] M.Bayerlein, H.-J.Christ and H.Mughrabi, Mater. Sci. Eng., A114, (1989) L11.
- [3] K.Aoto, Z.Chen, Y.Nagae and S.Kato, Proceedings of Relationship between Magnetic and Structural Properties, (2000) 125.
- [4] 日本 AEM 学会, 「電磁破壊力学を応用した劣化・損傷の非破壊評価技術に関する調査研究分科会報告書」, JSAEM-R-9803, (1999).
- [5] Y.Nagae and K.Aoto, Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 15, (2001/2002), 295.
- [6] 永江勇二, 青砥紀身, 日本 AEM 学会誌, 10, (2002), 360.
- [7] 青砥紀身, 永江勇二, U.Sudjadi, 阪本善彦, フォーラム保全学, 1, (2002), 37.
- [8] Y.Nagae, Mater.Sci.Eng., A387-389, (2003) 665.
- [9] 務中達也, 吉見健一, 中西博昭, 山田康晴, 飯島健二, 加納郁夫, 島津評論, 53, (1996) 75.
- [10] 高屋茂, 永江勇二, 第 14 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, (2005) 233.