

SUS304 鋼におけるクリープ歪と強磁性相の生成

Formation of ferromagnetic phase in SUS304 steel
by strain energy stored during creep test

名古屋大学大学院工学研究科	白木 厚寛	Atsuhiko SHIRAKI
名古屋大学大学院工学研究科	塚田 祐貴	Yuhki TSUKADA
名古屋大学工学部	村田 純教	Yoshinori MURATA
名古屋大学工学部	森永 正彦	Masahiko MORINAGA
日本原子力研究開発機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA
物質・材料研究機構	小山 敏幸	Toshiyuki KOYAMA

This study demonstrates the mechanism of $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation in creep test on the basis of the energy of the system. The experimental result shows that the strain energy around $M_{23}C_6$ carbide becomes very high due to dislocations stored during creep. As a result, the system free energy in the local region near the carbide increases with increasing creep time but it decreases by the formation of ferromagnetic α phase.

Keywords: creep, strain, dislocation, transformation

1. 緒言

原子カプラントでは、原子炉用構造材料として SUS304 や SUS316 といったオーステナイト系ステンレス鋼が使用されている。このような鋼は 500~650°C におけるクリープ試験により強磁性相 (α 相) が析出することが知られている[1]。また、これらのクリープ試験温度は加工誘起変態温度 (Md) より高いため、クリープ中に加工誘起変態が生じて強磁性相が生成したとは考えにくく、その変態機構は不明な点が多い。しかし、強磁性相はクリープ試験片の応力部 (ゲージ部) にもみ析出していることから、クリープ歪が強磁性相の生成に寄与していることは明らかである。このことから、強磁性相の析出を定量的に予測することによって材料の損傷の評価につながるものが将来的には期待されている。

この現象を理解するためには、組織自体のエネルギーの変化を明らかにすることが有効であると考えられる。そこで本研究では、SUS304 鋼のクリープ試験条件による組織自由エネルギーの変化を計算することにより、強磁性相の生成を評価することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 試験片

本研究では SUS304 鋼のクリープ試験材を使用した。その化学組成を Table.1 に示す。クリープ試験は 500~

650°C、58.8~196MPa の範囲で行った。

Table 1 chemical composition of SUS304 steel

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe
SUS304 (mass%)	0.05	0.6	0.87	8.94	18.59	balance

2.2 組織自由エネルギー評価

組織自由エネルギーは以下に示す(1)式で表される。

$$G_{\text{sys}} = G_0 + E_{\text{surf}} + E_{\text{str}} \quad (1)$$

ここで、 G_{sys} は組織自由エネルギー、 G_0 は化学的自由エネルギー、 E_{surf} は界面エネルギー、 E_{str} は弾性歪エネルギーである。

化学的自由エネルギーの計算には副格子モデルを用い、析出相として α 相、 $M_{23}C_6$ 、および σ 相を考慮した。析出相の体積率変化は抽出残渣により測定した値を用いた。

一方、界面エネルギーの計算には、析出相として $M_{23}C_6$ および σ 相を考慮し、以下の(2)式を用いた。

$$E_{\text{surf}} = A \cdot \gamma_s \cdot V_m \quad (2)$$

A : 全界面積、 γ_s : 界面エネルギー密度、 V_m : モル体積

連絡先:白木厚寛、〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町、名古屋大学大学院工学研究科、電話: 052-789-5342、e-mail:shiraki@silky.numse.ac.jp

弾性歪エネルギーの評価には析出及び転位と析出物間の相互作用による歪、転位自身の持っている歪を考慮した。まず、析出及び転位と析出物間の相互作用による歪に関しては先頭転位と析出物間の母相領域について以下の(3)式を用いて評価をした。

$$E_{\text{str}} = \frac{1}{2} \int C_{ijkl} (\epsilon_{ij}^c + \epsilon_{ij}^A) (\epsilon_{kl}^c + \epsilon_{kl}^A) dr \quad (3)$$

ここで、 C_{ijkl} は弾性定数、 ϵ^c は内部応力による歪、 ϵ^A は外部応力による歪である。

次に転位密度 ρ を測定し、それを基に転位自身の持つ歪として蓄積された歪エネルギーを評価した。全体的な領域での転位密度については XRD を用いて測定し、 $M_{23}C_6$ 周辺の局所的な領域については TEM 観察から得られた組織をメッシュ法により解析して求めた。求めた転位密度 ρ から弾性歪エネルギーを以下の(4)式より計算した。

$$E_{\text{str}} = \left[\frac{\mu b^2}{4\pi} \ln \left(\frac{R_c}{r_0} \right) \right] \cdot \rho \quad (4)$$

ここで、 μ は剛性率、 b はバーガースベクトルの大きさであり、 $r_0=5b$ および $R_c=10^4 \times b$ とした。

局所的な領域における弾性歪エネルギーの値を破断時間で規格化した時間に対してプロットした結果を Fig.1 に示す。局所的な領域における弾性歪エネルギーは約 19J/mol であり、これは全体的な領域における値 (2.3J/mol) に比べて極めて大きい値であった。

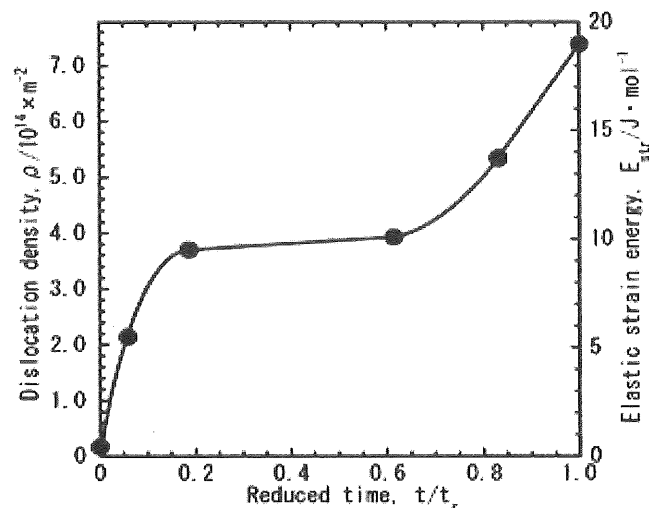


Fig.1 Strain energy near $M_{23}C_6$ carbide

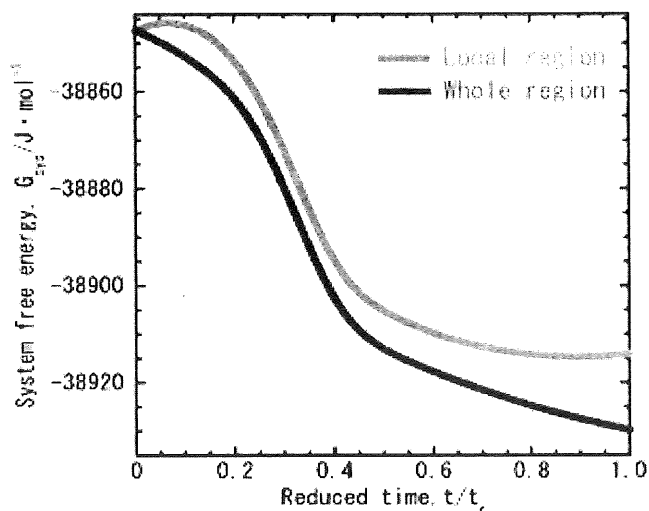


Fig.2 Change of system free energy

以上の計算により算出した組織自由エネルギー変化を Fig.2 に示す。Fig.2 から全体的な領域における組織自由エネルギーはクリープの進行とともに減少しているのがわかる。一方、局所的な領域における組織自由エネルギーはクリープ初期において増加する領域が見られる。このようなエネルギー的に不安定な状態が強磁性相析出の駆動力となっていると考えられる。

3. 結言

- 1) 強磁性相は弾性歪エネルギーの増加により析出する。
- 2) 転位自身の歪エネルギーは $M_{23}C_6$ 炭化物析出に伴う歪や炭化物-転位相互作用によるエネルギーに比べ極めて大きい。
- 3) 化学的自由エネルギーは強磁性相の析出により大幅に低下する。
- 4) 局所的には弾性歪エネルギーの増加により、組織自由エネルギーが増加する領域があり、そのようなエネルギー的に不安定な領域から強磁性相が析出すると考えられる。

参考文献

- [1] 永江勇二、青砥紀身：材料、54(2005),116-12.