

令和元年7月3日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18306

研究課題名(和文) 低放射化材料の変態超塑性変形を応用した成形技術開発研究

研究課題名(英文) Transformation super plasticity deformation of reduced activation ferritic / martensitic steel

研究代表者

能登 裕之 (Noto, Hiroyuki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：50733739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、核融合炉部材として期待されている低放射化フェライト鋼(JLF-1鋼)の難加工性を克服するため、これまで加工技術としてほとんど展開されてこなかった変態超塑性変形を活用した革新的な加工技術を提案した。これまでJLF-1鋼に変態超塑性を適用した例はなかったが、本研究で初めて低放射化フェライト鋼という先進材料においても変態超塑性による低荷重において巨視的な変形が生じることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回得られたJLF-1鋼による巨視的な伸びの成果は、新しく開発された低放射化フェライト鋼という先進材料においても変態超塑性が発現することを確かめた知見である。また、本研究は、これまで結びつきの少なかった「核融合・原子力材料分野」と「超塑性分野」を融合させたものであり、核融合炉・原子炉用エネルギー材料研究の発展に貢献できたと考えている。

研究成果の概要(英文)：Reduced Activation Ferritic/Martensitic (RAFM) steel is a promising candidate for the blanket structural materials of fusion reactors. One of the key issues in the use of RAFM for the blanket is its low workability. As a solution of this issue, innovative processing technology based on the transformation super plasticity (TSP) was proposed. In general, TSP is known as high temperature creep deformation which is induced by phase transformation. In this study, tensile tests under constant load were carried out with cyclic temperature variation for a RAFM steel to investigate the effect of cyclic temperature variations on elongation. The result of the tensile test under constant load for the RAFM steel with cyclic temperature variations exhibited a macro-elongation to 172%. The results of the tensile tests with varying loads showed the possibility of reducing the necessary time and enhancing the controllability for the formation of RAFM steel products using TSP.

研究分野：金属材料

キーワード：変態超塑性 低放射化フェライト鋼

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究では、核融合炉候補材として耐熱性、耐照射性を兼ね備えた「低放射化フェライト鋼」の革新的成形技術に着目した。低放射化フェライト鋼とは、一般的なマルテンサイト系フェライト鋼の添加元素を変更することにより核融合・核分裂エネルギー分野への応用を見込み、開発研究が進められてきた次世代の鋼である。

2. 研究の目的

(1) 背景でも示したように、核融合炉候補材として期待されている低放射化フェライト鋼であるが、その一方で、その降伏点の高さゆえに製造後、非常に加工しにくく、その難加工性が、実際の核融合炉を作る上で問題となることが予想されている。本研究では、この難加工性という課題に注目した。その課題を克服するための研究として、この金属に対し、変態超塑性という一般的には扱われない極めて珍しい変形モードを応用した革新的超塑性成形が適用できる可能性があることに着想を得た。超塑性成形は一般的に、低荷重で高延性が発現することから、設計猶予を広げることのできる技術として工業分野で知られている。

(2) 一方で今回扱う変態超塑性は意図的に急速な温度変化を与えることにより相変態を起こし、高温クリープを短時間で且つ連続的に起こすことにより誘起するという特殊な変形機構を持つ。この変態超塑性変形は、これまで一部の従来型の合金および鉄鋼材料において発現することが確認されているが、本研究で対象とする低放射化フェライト鋼ではこれまで一度も適用されたことがなかった。そこで本研究では、新しく超塑性を適用する際に行われる引っ張り試験を低放射化フェライト鋼に対し適用し、変態超塑性の発現の有無を調査することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、低放射化フェライト鋼として、「JLF-1 鋼」を用いた。変態超塑性変形のためには、相変態（この材料は 800~1000 の温度域内に存在）を必要とするため、この材料を一定荷重の一軸引張に供しながら、スライド式の加熱炉により、繰り返し急速加熱・冷却（800-1000）を施した。懸垂する荷重は、当該温度域においてほとんど変形しない程度に設定した（初期荷重：1.74kg/mm²）。この懸垂荷重は変形を効果的に制御できる可能性があり、初期荷重の実験以降に 0.87~3.47 kg/mm² へと変更し、伸びに与える影響を調査した。（図 1）

(2) この伸びを調査するにあたり最も重要となるのが、試験片ゲージ部のみの変形の確保である。ゲージ部とは変形した長さを試験後に計測する部分のことであり、伸びの割合を算出するためには、ゲージ部以外の変形を防ぐ必要がある。そこで本試験では専用の肩部受けによる引っ張り試験クランプ治具を製作した。この治具には熱電対を通す穴も設けており試験片の温度計測を可能とした。（図 2）

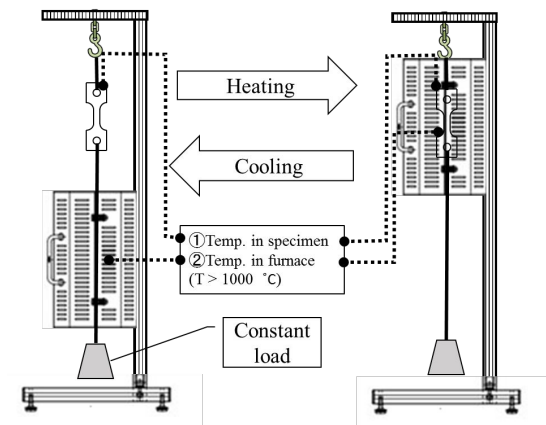


図 1、一定荷重・熱変動引張試験装置

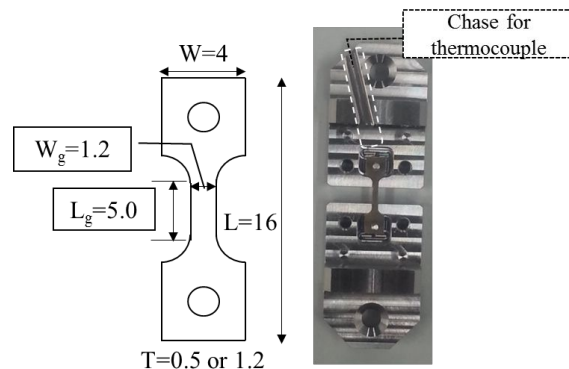


図 2、引張試験のためのクランプ治具

4. 研究成果

(1) この一定荷重熱変動を 70 サイクル近く繰り返した結果、170% 超える巨視的な伸びを示し破断した。一方で、比較として行った熱変動を与えない試験では、伸びが 20% 前後と、JLF-1 鋼本来の伸びに留まった。これは、サイクル熱変動が巨視的な伸びを誘起したことを示している。（図 3）

(2) この巨視的な伸びは、最終的な破断後の破面形状にも影響を与えた。その破断面は、極めて高延性時に発生するチゼルポイント型形状を形成しており、一般的な JLF-1 鋼の破面とは大きく異なっていた。（図 4）

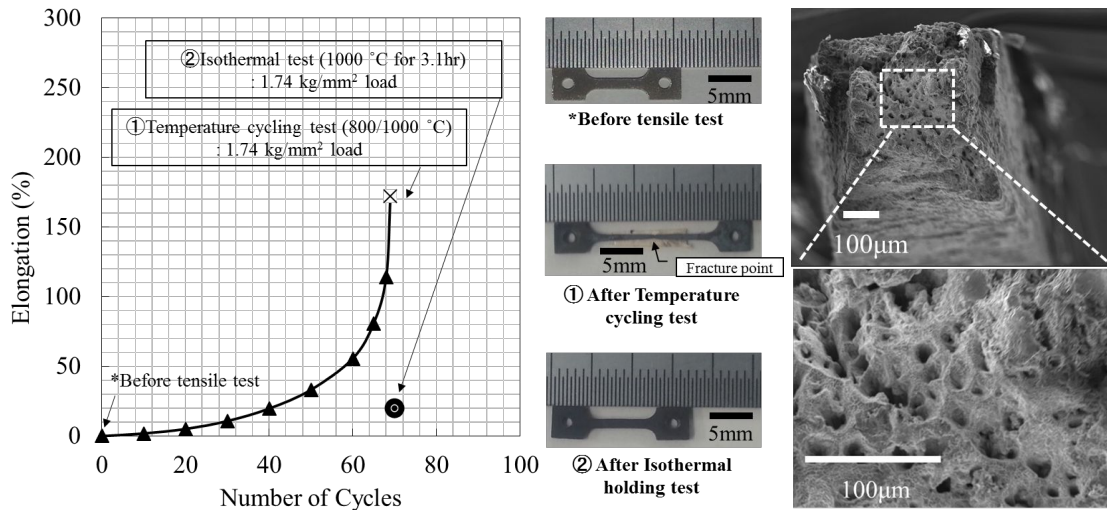


図 3、JLF-1 鋼における熱変動が伸びに与える影響

図 4、破断伸び 170% の破面

(3) また、初期の懸垂荷重 (1.74kg/mm²)の結果をもとに、荷重を変化させる試験も試みた。その結果、荷重が高い試験 (3.47kg/mm²)では急速に変形が進んだことが起因し、初期試験ほどの高延性には至らなかった。しかし、サイクル開始直後に、巨視的変形が誘起しにくい変態超塑性にとっては、重要な知見であった。一方で荷重が低い試験 (0.87kg/mm²)では、試験時間は長時間化したものの徐々に変形は進行し、最終的に初期試験に匹敵する高延性を得た。ここで着目すべき点は初期試験では最終熱変動で急速に変形が進行し、急激な破断につながったのに対し、荷重が低い試験ではこの最終サイクルの変形が緩やかであった点である。これは「変形を制御する」という点では、非常に重要な知見である。そこでこの二つの知見をもとに新たな展開として、

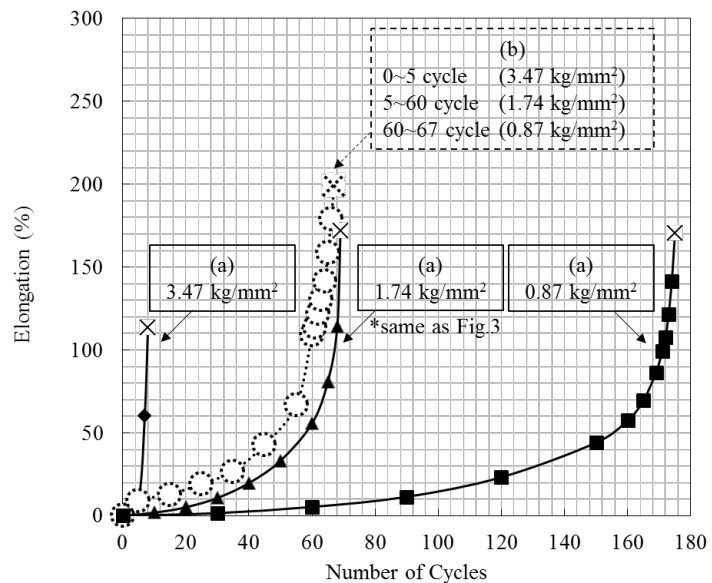


図 5、JLF-1 鋼における懸垂荷重の変化が伸びに与える影響。(a)0.87,1.74,3.47kg/mm²それぞれの荷重による試験、(b)0.87 1.74 3.47kg/mm²に荷重を多段階に変化させた試験。

として、サイクル開始時には荷重を高く設定し、そして破断にいたるまでに多段階で、懸垂荷重を低くするといった試験を試みた。これにより、199%という更なる巨視的な伸びを得ることに成功した。この手法は、荷重による変形の制御が可能であることを示しており、加えて、成形中の大気曝露時間を短縮することも可能とした。(図 5)

(4) このように成形技術を見越した引張試験を行ったが、変形前後の組織が異なっているのは、本材料の使用条件を満たせない。この理由として、低放射化フェライト鋼は、耐熱・耐放射線を目的とし、組織制御がなされた材料だからである。つまり元の組織を変化させることなく変形させることが重要となる。そこで変形を誘起した引張試験先端部と変形を起こさないつかみ部を比較した。この結果、変形前後ではともに、結晶粒径に異方性のないマルテンサイト組織が観察された。これは、相変態を急激にサイクルする本試験が低放射フェライト鋼の後熱処理 (N-T 処理) と同じ働きをしたためと考えられる。(図 6)

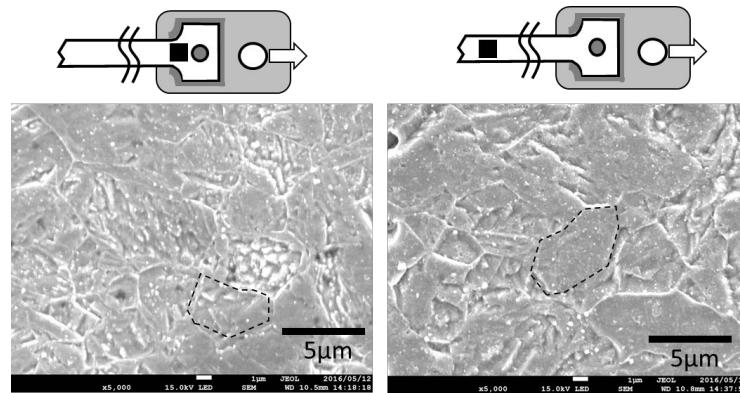


図 6、熱変動サイクル試験における変形の有無が組織(エッチング後)に与える影響
(左：変形なし部分の組織、右：変形あり部分の組織)

(5) これらの結果は、低放射化フェライト鋼という先進材料においても変態超塑性変形が適用できることを示唆した成果であり、その知見は変態超塑性成形に向けた次のステップとして期待される「変態超塑性モードの低荷重圧縮」にフィードバックできると期待している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

①能登 裕之、菱沼 良光、室賀健夫、Transformation super plasticity deformation of reduced activation ferritic / martensitic steel、Fusion Engineering and Design、査読有 (accept)

〔学会発表〕(計 1 件)

①能登 裕之、菱沼 良光、室賀健夫、低放射化フェライト鋼における変態超塑性変形、日本金属学会 2016 年秋期(第 159 回)講演大会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

〔その他〕特になし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。