

# 「発展的研究計画スタート支援」(2022年度分) 報告書

- 氏名 : 能登 裕之  
所属ユニット : 超高流速協奏材料ユニット  
研究テーマ : 変態超塑性を応用した革新的成形法の創生

## 1. 研究の目的・意義

低放射化フェライト鋼は、優れた耐熱性と耐放射線特性を持つ核融合炉ブランケット用先進材料であるが、その機械的特性により、非常に硬く、「難加工性」が懸念されている。本課題では、これまでの加工法とは一線を画する「変態超塑性」を利用した革新的な加工技術を提案した。この革新的提案は核融合工学分野だけではなく、様々な先進材料の加工に苦心する工学分野への波及を狙ったものである。また本研究は「①引張(先行研究)」→「②圧縮試験(本課題)」→「③複合変形試験(本課題)」によって進行することを目的としており、本課題は、②③応用段階の検証という先進的なステップの調査といえる。

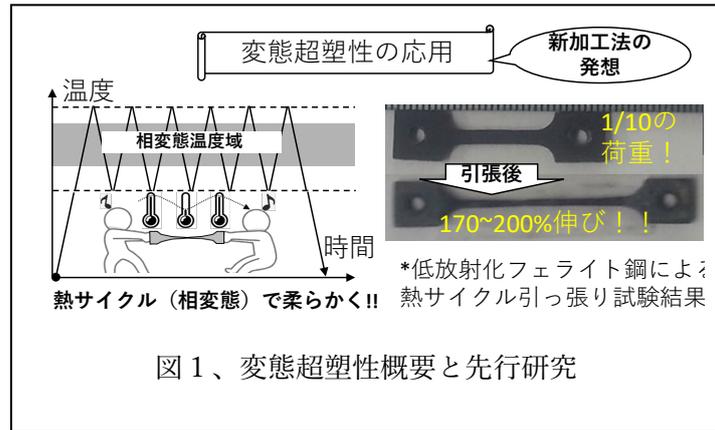


図1、変態超塑性概要と先行研究

## 2. これまでの研究成果および進捗状況、今年度の研究計画

- 進捗状況(変更理由): 2022年7月時点での本課題採択後、即時、「圧縮・複合試験両仕様特殊治具」を金属技研株式会社と協議を開始した。しかし、12月に入ってなお技術的な課題が解決しなかったため、計画を大幅に変更することを決定した。
- 進捗状況(変更後の方向性): そこで変更に当たり、当初の申請で購入予定であった多目的高温炉の受託実験による使用(富士電波工業株式会社: 2023年8月まで)により圧縮変形にフォーカスを当てた研究を行うこととした。加えて、金属技研株式会社では、内圧試験体による複合試験のみに焦点を当てた研究(金属技研株式会社: 2024年1月まで)にシフトすることとした。(図2)
- 研究成果(富士電波工業株式会社における圧縮の試験準備完了): 上記のように多目的高温炉(ハイマルチ5000)による受託実験24回分の契約が完了し、本課題の主テーマである”相変態熱サイクルが圧縮変形の優位性に与える影響”に

ついて調査を開始した。また、これに付随し、相変態を有する材料である炭化ケイ素による高性能焼結も行う予定である。このように様々基材に対応する実験の準備を完了できた点は非常に大きな成果であると考えており、「変態超塑性を応用した革新的成形法の創生」というテーマの多用途化という観点で、さらなる発展成果が期待できる準備状況であるといえる。(図2-a)

- 研究成果(金属技研株式会社における複合変形の試験準備)：現在当初の使用予定の炉を変更し、実際の超塑性変形用の大型炉において急速熱変動をかけるためのセッティングをしている。完了後内圧試験体を用いた7回分の受託実験を行う予定である(図2-b)。これによりこれまで困難であった“急速熱変動”による等方加圧負荷が可能となり、新しいSPF技術の開拓が期待される。



(a)ハイマルチ 5000 富士電波工業株式会社

(b)SPF 試験装置 金属技研株式会社

図2、今後の研究に使用する装置

- 研究成果(補足的な組織観察による成果)：変態超塑性を理解し、応用段階に至るためには、実際に用いる材料(この場合には RAFM 鋼)の変態超塑性前後の組織観察が重要出ると考えた。そのため本テーマをより学術的に深めるため、変態超塑性前後のナノ組織を透過型電子顕微鏡にて解析した  
その結果、変形前(JLF-1 製造後の母材)においては、過去の先行研究通り、M23C6 粒子(113nm 程度)とそれよりも小さいサイズの Mx 粒子(29nm 程度)がラス境界に認められた。その一方で変形後(熱サイクルと一定荷重を負荷し変態超塑性を示した変形領域)においては、M23C6 炭化物はほとんど見られず、若干の粗大化した Mx 粒子(42nm 程度)が観察された。また変形後のラス境界には、スリップステップと呼ばれる変形帯が確認できた。この変態超塑性中(熱サイクル中)に凍結された組織であることを考慮すると、高温クリープ変形の連続とされる変態超塑性において、特に結晶粒内の異相(この場合はラス境界)で連続変形が起こったと考えられる。今年度は、この結果をもとにさらに解析を深め、来年度開催され

る核融合材料において最も規模が大きいといわれる核融合炉材料国際会議 (ICFRM-20) および国際原子力機構主催の核融合エネルギー会議 ‘IAEA-FE C2023’ に参加・発表を予定している。また、その成果は、上記学会プロシーディングスやフルペーパーによる論文投稿を予定している。

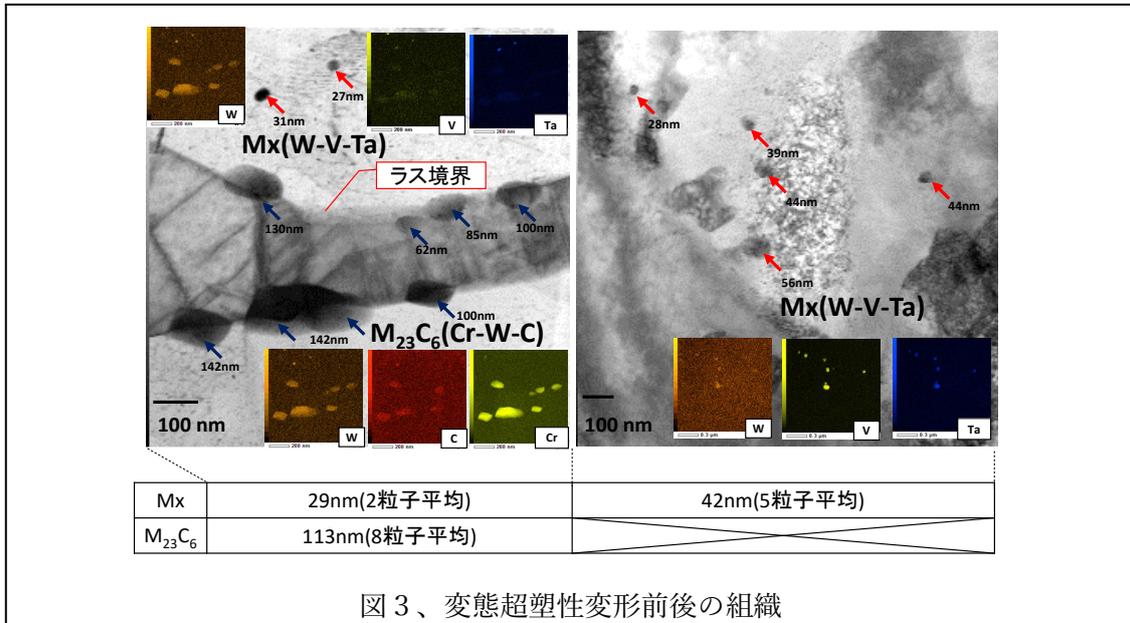


図 3、変態超塑性変形前後の組織

### 3. 支援を受けた金額及び主な用途

- 3-1 支援を受けた金額は 600 万円であり、当初すべて金属技研株式会社による高温圧縮試験用耐熱治具を検討していたが、技術的に困難であることが判明し、使用用途 2 方面に分けた。
- 3-2 主な用途
  - A) 金属技研株式会社 (300 万) : 変態超塑性を産業的な応用に発展させるため、等方加圧による複合変形試験のための役務費用とした。(全 7 回試験)
  - B) 富士電波工業株式会社 (300 万) : 変態超塑性モードが圧縮変形に及ぼす影響を調査するための役務費用とした。(全 24 回試験)

### 4. これまでの客観的成果とそれぞれの項目の今年度の予定

4. 1 共著を含む投稿論文、著書
 

(著者名、論文名、出版社、accepted date)

  - IAEA-FE C2023 プロシーディングス論文 Nuclear Fusion へ投稿予定
4. 2 国際・国内学会等での発表
 

(発表者、タイトル、会議名、招待講演・口頭・ポスターの区分)

- 21st International Conference on Fusion Reactor Material (ICFRM-21), 22-27 October 2023,” Large deformation processing of Reduced Activation Ferritic/Martensitic steels using transformation super plasticity” poster
- 29th IAEA Fusion Energy Conference - 2023 (FEC 2023), 16-21 October 2023, “Application of transformation super plasticity for reduced activation ferritic / martensitic steel” poster

#### 4. 3 科研費や他の外部資金への応募・獲得結果(直接経費の配分額)

及び今年度の応募予定

(科研費は年度、種目、不採択の場合は評価値)

- 民間共同研究(金属技研株式会社):低放射化フェライト鋼におけるサイクル熱処理が変形応力に及び変形率に与える影響に関する研究(～令和6年3月)

#### 4. 4 特許等

なし

#### 4. 5 その他、成果として報告すべきもの(あれば)

現在、富士電波工業株式会社で行っている温度サイクル圧縮試験では、主に低放射化フェライト鋼(RAFM 鋼)を対象に行っている。その対象キーワードは“低荷重で圧縮変形できる”という点を難加工性材料である RAFM 鋼に適用することにより設計自由度を向上させるという思想に基づいている。そのキーワードより派生した新たな研究として SiC への適用を検討している。この炭化ケイ素(SiC)は核融合分野のみならず航空機分野でも注目を集め、同時に相変態を 2000 度付近で示す一方で、SiC はバインダー等の使用しない条件で高密度・高純度焼結が難しいことでも知られている。そこで本技法を応用する発展型研究に帰着した。現在、富士電波工業株式会社と試験を協議中であり 6 月下旬をめどにファーストライを開始する予定である。このように本課題は RAFM 鋼のみならず、様々な基材(ベース材料のこと)の材料加工(変形や焼結)に応用可能であり、工学的発展の期待できる研究であるといえる。

以上