

委託研究「FeCrAl-ODS鋼のスマールパンチクリープ試験技術の開発」 (研究開発テーマ：放射線・放射線場を用いた材料科学技術の開発) 研究成果報告概要

研究開発の概要

(研究実施期間) 令和2年度～令和3年度

(目的)

事故耐性燃料被覆管・核融合炉液体ブランケット・鉛冷却高速炉(加速器駆動変換炉)の炉心材として注目されているFeCrAl-ODS鋼は、中性子照射環境での評価を行うにあたり、放射化された試験片の減容のために試験片の小型化が重要である。本研究はFeCrAl-ODS鋼の試験片サイズを従来のSS-J試験片の1/2以下にするスマールパンチクリープ試験において、幅広い温度範囲で単軸クリープ試験との互換性を見出すことを目的とした。

(必要性)

安全な原子力発電や高レベル放射性廃棄物の減容は、カーボンニュートラル社会に原子力発電が貢献するための喫緊の課題である。FeCrAl-ODS鋼はこれらの課題を解決する材料として開発され、既に国外での中性子照射実験が始まっている。しかし、中性子照射後のアルミニウムの誘導放射能が高いため、照射後試験片の取扱いは困難である。試験片の小型化のためにスマールパンチクリープ試験手法の確立が必要である。

(新規性)

本研究で取り扱ったFeCrAl-ODS鋼のうち、ODSフェライト鋼については、スマールパンチクリープ試験を取り扱った研究が全世界でも数件しか存在しない。数少ない実施例は全て熱間押出材をそのまま再結晶熱処理したものであり、これらの集合組織は、実用において使用される材料の集合組織とは大きく異なる。本研究では、燃料被覆管の加工を想定し、同様の条件で冷間圧延・再結晶熱処理を施したODSフェライト鋼の板材を、世界で初めてスマールパンチクリープ試験に供した。

(独創性)

冷間圧延・再結晶熱処理加工後のODSフェライト鋼は、圧延方向に著しく伸展した結晶粒を有するため、スマールパンチクリープ試験と単軸クリープ試験の互換性を得るにあたって、結晶粒のアスペクト比を考慮する必要がある。従来の研究は長軸方向の単軸クリープ試験を比較対象としていたが、燃料被覆管の応力方向は短軸方向であるため、本研究では短軸方向に応力がかかるリングクリープ試験結果との互換性を評価することにした。

(有用性)

本研究で使用したフェライト系のFeCrAl-ODS鋼は、耐酸化性・耐照射特性に優れる上に、優れた強度によってジルカロイの1/2の薄さを実現することで中性子経済の問題を克服し、わが国における既存の軽水炉に装荷可能な設計で材料を作製できる。新規開発材のオーステナイト系FeCrAl-ODS鋼は、次世代の非磁性原子炉材料として加速器駆動変換炉などへの適用が期待できる。これらの中性子照射材の評価手法を確立することは材料の実用化を早め、原子炉の安全性を確保することに繋がる。

研究成果

単軸クリープ試験の実績があるFeCrAl-ODSフェライト鋼を用いて、従来のリングクリープ試験データと比較し易い700°Cを含む、500°C~1000°Cの幅広い温度範囲でSPC試験を行い、単軸クリープ-スモールパンチクリープ(SPC)試験間の連続性を検討した。図1に示すように、冷間圧延・再結晶熱処理後の板材を3mmφのディスク状に打ち抜き、厚さ0.25mmまで鏡面研磨したものを使用した。圧延のND方向から1mmの窒化ケイ素球を置き、荷重を加えた。

SPC試験カーブの一例を図2に示す。FeCrAl-ODSフェライト鋼は、殆どの試験片において2段階の定常クリープ領域が見られた。このように2段階のクリープが見られるのは、先行研究より、試験片の変形部を取り巻くように円形のクラックが発生するときであると言われている。本研究において第2定常クリープ領域が発生する直後の試験片を確認することはできなかったが、同様の現象が発生した可能性が示唆される。SPC試験後の破面SEM観察から、いずれの荷重においても破面はディンプル状であった。これは試験片が延性破壊をしたことを示唆している。

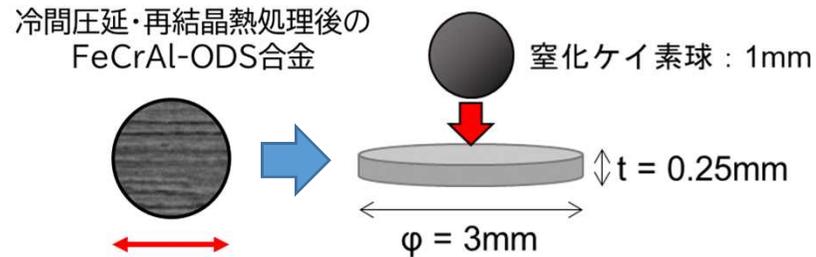


図1 SPC試験の試験片と荷重方向の模式図

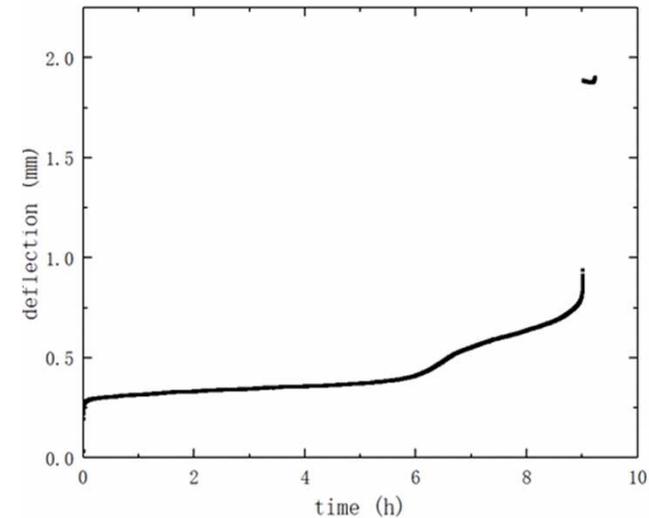


図2 SPC試験カーブの一例(荷重: 7kg)

研究成果

SPC試験から、Monkman-Grant則が成立することを確認し、SPC・単軸クリープのMonkman-Grant則を対応させることで、SPC試験の変位速度を歪速度へ変換した。また、CEN Workshopの推奨評価式による荷重-応力の変換を行った。図3にSPC試験と単軸クリープ試験の応力-Larson-Millar parameter (LMP)の関係を示す。LMP≒30辺りを境にして、LMPプロットの傾きが2種類存在することを確認した。図4にMonkman-Grant則とCEN Workshopの推奨評価式からひずみ-応力に変換した後のSPC試験の最小ひずみ速度の対数と応力の対数の関係を示す。それぞれの近似線に記された数字は傾きから得られるもので、クリープの変形機構を見るための指標である。傾きが約3~5の部分は転位クリープで、それよりも大きな傾きは転位すべりで変形したことを意味する。これらのグラフの傾きが変化する応力は、先行研究の同じ材料の降伏応力の辺りに対応していることから、転位クリープから転位すべりへの移行は、降伏応力を超えたために起きたものであるといえる。転位クリープから転位すべりへの移行は、図3の傾きが変化するLMP≒30の辺りに対応している。

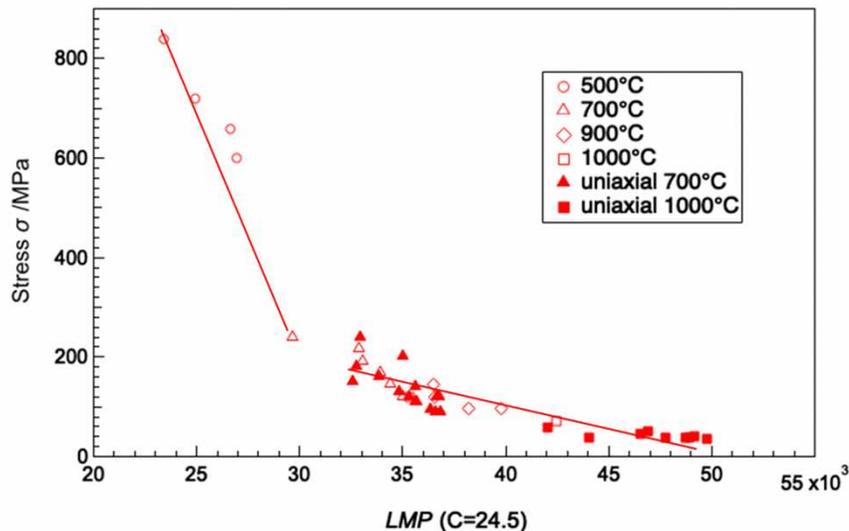


図3 SPC試験と単軸クリープ試験の応力-LMPの関係

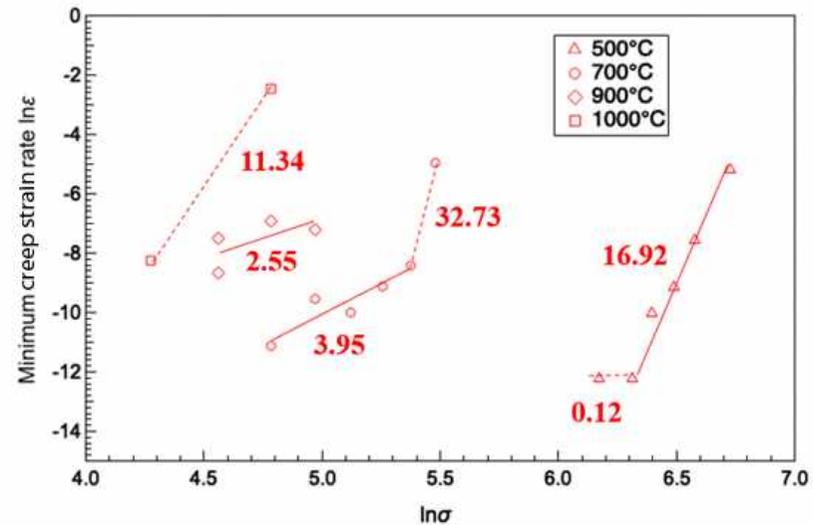


図4 SPC試験の最小ひずみ速度と応力の関係

研究成果

加速器駆動変換システム(ADS)等の高温強度が求められる構造材の候補として、新たに設計したオーステナイト系FeCrAl-ODS鋼のクリープ特性を500°Cにおいて調べた。開発中のオーステナイト系ODS鋼の強度特性は、非ODS鋼よりも著しく高いものの、高温クリープ特性は依然として劣ることがわかった。図5, 6に試験後の試験片の概観を示す。試験片の破損状態から、開発材は試験温度において脆性であることが示唆された。

本研究のSPC試験荷重にCEN Workshopの推奨評価式による荷重-応力の変換を行い、LMPプロットによってSUS 316SSの単軸クリープ試験結果と比較した。非ODS-5Al鋼のクリープ特性はSUS 316SSのものに近いことがわかった。破面観察からは粒界破断が確認されており、これは図5, 6に示される試験片の概観とも一致する。元素分析の結果、結晶粒界へのAl窒化物の濃化が見られ、これが高温クリープ特性を減じている原因と考えられる。今後、ODSオーステナイト鋼のクリープ特性はMAプロセスの改善による向上が期待される。

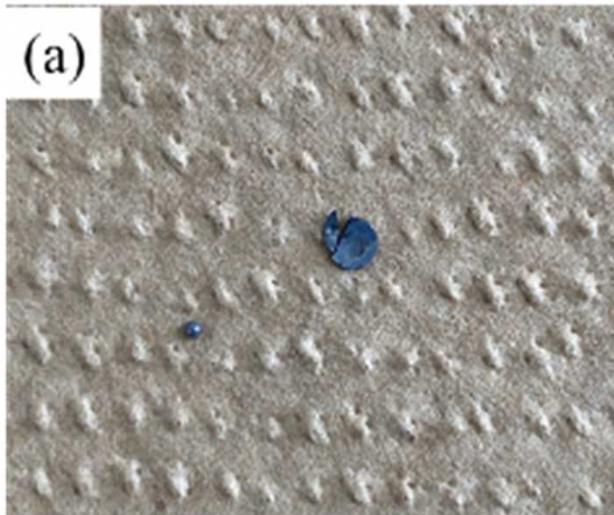


図5 SPC試験後のオーステナイト系FeCrAl-ODS試料(18kgf試験後)

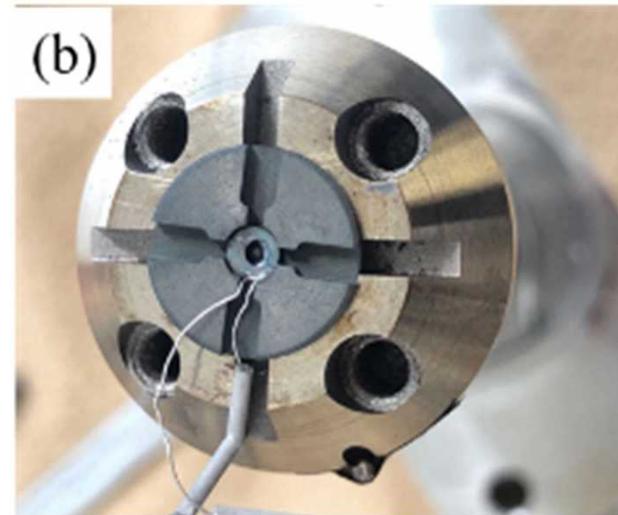


図6 SPC試験後のオーステナイト系FeCrAl-ODS試料(25kgf試験後)

研究発表

1. 2021年3月16日、オンライン、日本金属学会2021年春期(第168回)大会、“Study on creep behaviors of Fe-Mn-Cr-Al-C austenitic steels by small punch creep test”
2. 2021年3月18日、オンライン、日本原子力学会2021年春の年会、「アルミ含有鋼の開発とその核融合応用 (6) 液体金属環境への適用に向けたAl含有高MnオーステナイトODS鋼の開発」
3. 2021年9月17日、オンライン、日本金属学会2021年秋期(第169回)大会、“The effect of recrystallization on the mechanical properties of ODS Fe-Mn-Cr-Al-C austenitic steels.”
4. 2021年9月17日、オンライン、日本金属学会2021年秋期(第169回)大会、「FeCrAl-ODSフェライト合金のSPC-単軸クリープ試験互換性評価」
5. 2021年10月28日、オンライン、20th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-20)、“Study on creep behaviors of Fe-Mn-Cr-Al-C austenitic steels by small punch creep test”
6. 2022年3月15日、オンライン、日本金属学会2022年春期(第170回)大会、「FeCrAl-ODS合金のスモールパンチクリープ試験によるクリープ特性評価」

研究会等の開催

なし。

発表論文

1. “Corrosion behavior of Al-added high Mn austenitic steels in molten lead bismuth eutectic with saturated and low oxygen concentrations at 450 °C”, Corrosion Science 175 (2020) 108864 (2020年7月10日), H. Wang, H. Yu, S. Kondo, N. Okubo, R. Kasada.

青森県内への波及効果

本研究では、フェライト系のODS鋼と新規開発材であるオーステナイト系のODS鋼の両方を試験に供した。本研究によってCr, Alを添加した耐食性の材料(フェライト・オーステナイトの両方)や、加工後の異方性を持つ結晶からなる材料等、多様な材料のスモールパンチクリープ試験技術の実績が蓄積されることで、発電設備や耐火性を必要とする建築板金等の寿命評価における継続した強度調査手法の確立にも貢献する。