

ブランケットの高性能化に向けた先進鉄鋼材料の開発 Advanced Ferritic Steels for High-Performance Fusion Blanket Systems

木村晃彦¹、笠田竜太¹、長谷川晃²、野上修平²、岸本弘達³
Akihiko Kimura¹, Ryuta Kasada¹, Akira Hasegawa², Shuhei Nogami², Hirotsu Kishimoto³

¹京都大学エネルギー理工学研究所、²東北大学大学院工学研究科、³室蘭工業大学工学部

¹Institute of Advanced Energy, Kyoto University, ²Graduate School of Engineering, Tohoku University, ³Dept. of Engineering, Muroran Institute of Technology

1. はじめに

低放射化フェライト (RAF) 鋼は、材料性能、データベース、製造性および価格等の観点から、ブランケット構造材料の第一候補とされ、現在世界各極で開発が進められているITER-TBMの構造材料に指定されている[1]。また、DEMO炉への適用に向け、日欧協力の下、核融合エネルギーの早期実現を目指す幅広い取り組み；Broader Approach (BA) 活動においても主要な構造材料として、その研究が全国規模のネットワーク型共同研究として着々と進められている[2]。一方、先進ブランケット用には、バナジウム(V)合金や炭化ケイ素複合材料が検討されている。さらに、近年、RAF鋼に微細な酸化物粒子を分散させた酸化物分散強化 (ODS) 鋼の研究開発が世界各国で実施されている[3]。

ODS鋼は、微細な酸化物粒子を高密度に均一分散させることで、高温における高強度が付与されており[4]、RAF鋼の使用上限温度が550℃とされているのに対し、ODS鋼では750℃での使用の可能性が期待されている。さらに、クロム濃度が14 wt%を超えたODS鋼では、RAF鋼に比べ高温での耐食性が格段に優れており、ブランケットの長寿命化に大きく貢献する[5]。ODS鋼の特徴の中で、核融合炉材料として最も好ましい点は、RAF鋼に比べ、照射損傷やヘリウム脆化に対する耐性が極めて優れている点である[6-8]。

本講演では、まず、ODS鋼の優れた特性をRAF鋼と比較しながら紹介し、先進ブランケットの高性能化への寄与について検討する。次に、RAF鋼の強度および破壊特性に及ぼす弾き出し損傷およびヘリウムの影響について、従来から我々が実施してきた研究の成果をまとめると共に、ODS鋼において観察されている、照射脆化およびヘリウム脆化に対する極めて優れ

た耐性を紹介し、そのメカニズムおよびメカニズムに基づいた耐照射脆性付与のための材料開発指針を示す。

2. 先進鉄鋼材料の照射脆化

代表的なRAF鋼であるF82H鋼やJLF-1鋼は、8-9%のCrを含むマルテンサイト鋼であり、高密度の転位や安定な炭化物からなるマルテンサイト組織を有している。転位や炭化物は点欠陥の消滅サイトとなり、照射脆化などの原因となる点欠陥集合体の成長を抑制し、耐照射性を高めるとされている。RAF鋼の照射硬化量がオーステナイト鋼やV合金に比べて小さいのは、形成される照射欠陥量が少ないことによる。

ODS鋼は、図1に示すように、通常フェライト鋼に直径が数nmの微細な酸化物粒子を高密度に分散させた鋼であり、粒子と母相の界面には整合ひずみが存在し、照射欠陥の消滅サイトとして働くため、照射欠陥集合体が形成され難く、照射影響が抑制されると考えられる[9]。

ナノスケールの高密度の酸化物粒子の存在により、ODS鋼ではRAF鋼に見られない特異な現象が現れる[10]。RAF鋼とODS鋼の中性子照

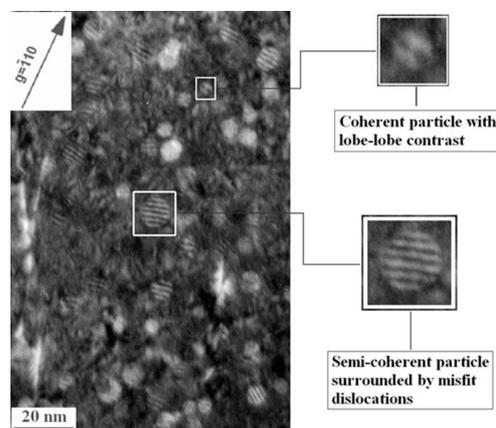


図1：ODS鋼中の酸化物粒子

射後の全伸びと照射による全伸びの低下量を照射温度に対してプロットすると、二つの鋼には明瞭な差が見られ、RAF鋼では照射温度の低下は全伸びの低下を招くが、ODS鋼では伸びの低下が見られず、いずれの温度においても、十分な伸びが観察されている[11]。すなわち、ODS鋼では、いわゆる照射脆化が見られず、優れた耐照射性を示している。

3. 核変換He脆化に対する耐性

弾き出し損傷による照射硬化や脆化が10数dpaで飽和するのにに対し、核変換ヘリウム量は照射量の増大とともに増え続けるため、ヘリウム脆化は飽和しない。構造材料のヘリウム脆化がブランケットの寿命を決定すると推測されている所以である。

RAF鋼は、オーステナイト鋼に比べ、照射脆化の度合いやスウェリングが小さいなど、耐照射性に優れている。ヘリウム脆化についても数atppmのヘリウムで発現するオーステナイト鋼に比べ、RAF鋼は600 atppmでもヘリウム脆化を示さず、ヘリウムに対する耐性は格段に優れている[12]。しかし、イオン注入実験によれば、ヘリウム濃度が900 atppmを超えると、激しい粒界脆化の生じることが報告されており、RAF鋼では、60 dpa (ヘリウム生成速度: 15 atppm/dpa) 程度の照射により、顕著なヘリウム脆化の発現することが懸念されている。図2に示すように、1000 atppmのヘリウムをサイクロトロンにより500°Cで注入すると、RAF鋼 (F82H) は、破壊様式がへき開破壊から粒界破壊に変化し、延性脆性遷移温度 (DBTT) が100°C近くも上昇し、靱性が劣化する。一方、ODS鋼 (14Cr-ODSS) のDBTTは全く変化せず、ODS鋼はヘリウム脆

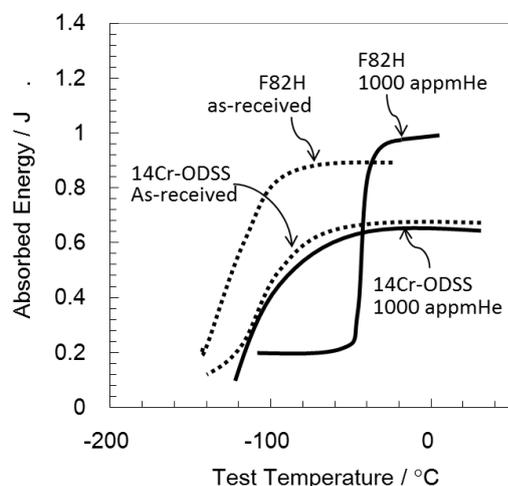


図2 : ODS鋼の耐ヘリウム脆化特性

化に対し極めて高い耐性を示すことが確認されている[13]。

4. 耐照射性機構

高分解能電子顕微鏡観察から、ODS鋼の優れた耐照射性は、高密度に分散された酸化物粒子によるものであることが判明している。RAF鋼において観察されている照射に伴う引張伸びの低下 (照射脆化) は、照射による不均一変形の促進で説明されており、ODS鋼においては酸化物粒子が不均一変形を促進することで伸びの低下が抑制されたと考えられる[12]。ヘリウム脆化の抑制も高密度の酸化物粒子の分散によるもので、酸化物粒子と母相の界面がヘリウム原子の捕獲サイトとして働き、ヘリウム脆化の原因となる粒界におけるヘリウムバブルの成長を抑制するためと考えられる[7]。

5. ブランケットの高効率化

DEMO炉以降の高効率ブランケットの実現には、構造材料の高性能化は不可欠であり、RAF鋼単独での適用は困難である。類似の鉄鋼材料であるRAF鋼とODS鋼のカップリングにより、単独では満たしえない材料要件を互いに補填することで、現実的な高効率ブランケットの製作が可能になる。ブランケットの第一壁や内部の核熱上昇部ならびに腐食性に富む冷却材とのバウンダリーにODS鋼を用いることで、RAF鋼の性能の上限で決められていたブランケットの熱効率や寿命が大幅に増大する。冷却材の温度は150°Cの上昇が期待され、耐食性から見た寿命は、数十倍に増大すると推測される。

6. まとめ

本研究は、RAF鋼とODS鋼の併用が現実的な高性能ブランケットの製造に効果的であり、今後、RAF鋼とODS鋼の接合技術開発が重要となることを示している。

References

- [1] 高津英幸、核融合研究作業部会 (2006.10.25)
- [2] T. Nishitani, SOFT2012 (2012.9.28)
- [3] For example, IAEA-CRP on ODS steels R&D
- [4] S.Ukai et al., J. Nucl. Sci. Technol.,34[3], 256 (1997).
- [5] A. Kimura et al., ISBN: 4-901332-01-5, p.1198 (2003).
- [6] H.S. Cho et al., J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 239.
- [7] K. Yutani et al., J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 423.
- [8] H. Kishimoto et al., J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 179.
- [9] A. Kimura et al., J. Nucl. Mater. 417 (2011) 176.
- [10] A. Kimura et al., J. Nucl. Sci. & Tech. 44(3)(2007) 323
- [11] H.S. Cho et al., J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 239
- [12] A. Kimura et al., J. Nucl. Mater. 307-311 (2002) 521
- [13] A. Hasegawa et al., J. Nucl. Mater. 386-388(2009)241