

酸化物分散強化鋼(ODS鋼)による核融合炉ブランケットの高温化

リ ナン フェン
李 艶 芬・室 賀 健 夫

核融合炉のブランケットは、熱エネルギーを取り出し、燃料を増殖する重要な機器です。その構造強度を維持するために、高温で十分な強度を有し、中性子の照射を受けても特性が大きく劣化せず、短時間で誘導放射能が減衰する(低放射化特性)材料開発について紹介します。これまで、誘導放射能の高い元素を取り除いた鉄鋼材(低放射化フェライト鋼:Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel, RAFM鋼)がブランケットの候補合金として開発され、特性試験が進められてきました。しかし、発電プラント効率を上げるためにブランケットは高温で運転する方が望ましいのですが、RAFM鋼は使用温度が550°Cを超えると急激に強度が低下し、高温化の障害となっていました。

RAFM鋼の使用温度の限界を決めるのは、低い荷重でも高温長時間で変形が進む「熱クリープ」現象です。RAFM鋼の熱クリープを抑えるため、さまざまな熱処理や機械加工条件を変えた試験が行われてきましたが、その改良の余地は限られています。これに対して、RAFM鋼の中にナノサイズ(1ミリメートルの10万~100万分の1)

の微小な酸化物粒子(ナノ粒子)を高い密度で分散することにより、硬度を上げ変形しにくいよう改良した鋼材(酸化物分散強化鋼:Oxide Dispersion Strengthened Steel, ODS鋼)の試作研究が進みつつあり、将来の高効率ブランケット構造材の候補として期待されています。

これまでのRAFM鋼は、鉄に9%程度のクロム(Cr)と1~2%程度のタングステン(W)等を加えたものですが、ODS鋼としては、同様の組成のもの、クロムを15%程度まで上げてさらに硬度を上げたものが検討されています。

核融合科学研究所では、京都大学や北海道大学などと共同で、2009年に9%クロムを含むODS鋼(9Cr-ODS鋼)を製作し、高温引張り強度と熱クリープ変形の評価を進めています。

一般の鉄鋼材は原料を溶解することによって作りますが、ODS鋼は、図1に示すようなメカニカルアロイング(MA)法という方法を用います。これは、①0.2-0.3mmの鉄、クロム等の原料粉末に、ナノサイズのイットリア(Y₂O₃)という酸化物粒子を混ぜ、②硬いボールを含んだ回転容器で混合成粉し、③キャプセルに詰めて高温

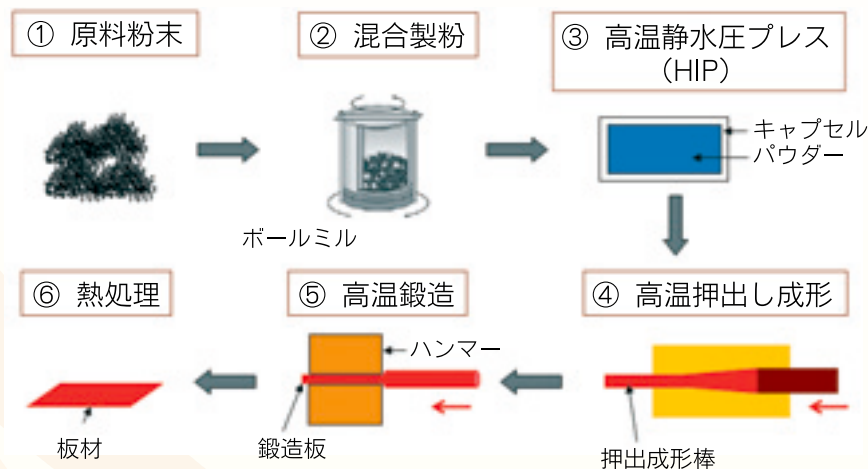


図1 酸化物分散強化鋼のメカニカルアロイング(MA)法による製作手順

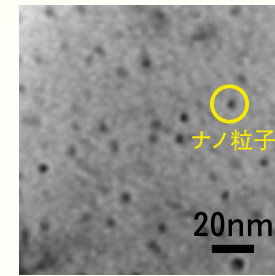


図2 9Cr-ODS鋼の電子顕微鏡による微細組織。イットリアのナノサイズ粒子が分散している。(1nmは、1ミリメートルの100万分の1の長さ)

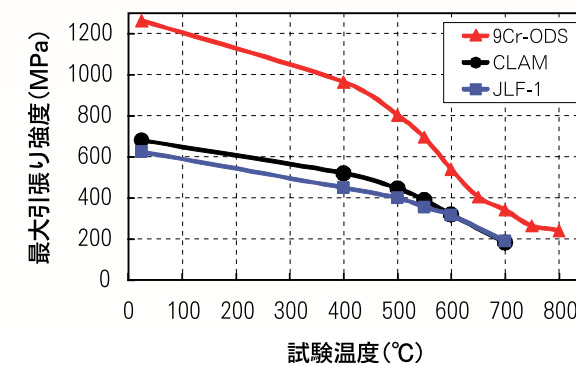


図3 9Cr-ODS鋼とRAFM鋼(CLAMおよびJLF-1)の最大引張り強度の試験温度依存性。MPaは圧力、応力の単位で、1MPaはほぼ10気圧に相当する。

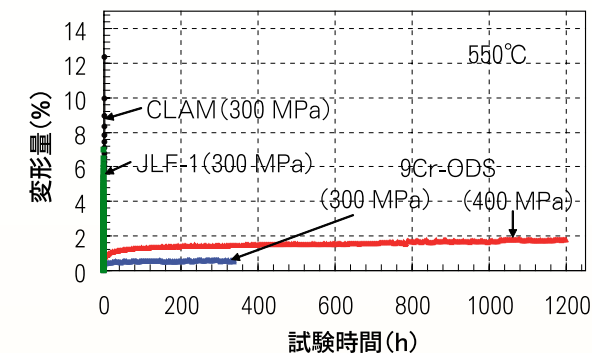


図4 9Cr-ODS鋼とRAFM鋼(CLAMおよびJLF-1)の550°C、300MPaまたは400MPaの荷重における熱クリープ変形

で静水圧プレス(Hot Isostatic Press, HIP)焼結し、④高温押し出し成形、⑤高温ハンマー成形(鍛造)を行い、⑥最終熱処理を施す方法です。これにより、材料中にナノ粒子が高い密度で一様に分散されます。図2は電子顕微鏡で見た9Cr-ODS鋼の微細組織で、ナノ粒子が一面に分散している様子が分かります。

この材料の高温引張り特性と熱クリープ特性をRAFM鋼の候補材のJLF-1(日本の大学の協力により開発したFe-9Cr-2W鋼)、CLAM(中国のFe-9Cr-1.5W鋼)と比較しました。図3は、引張り試験で得られる最大引張り強度(UTS)の試験温度依存性を示します。設計に依存しますが、一般にブランケット構造材としては、UTSは300-400MPa(3000-4000気圧)が必要とされています。図3より、その強度を満たす温度限界は、RAFM鋼に比べ、9Cr-ODS鋼は100-150°C高温になることが分かります。

熱クリープ変形を求めた試験結果の例を図4に示します。550°C、300MPa(3000気圧)の荷重で、RAFMは急速に変形し、破断に至りますが、9Cr-ODS鋼は300-400MPaの荷重で、長時間にわたって1~2%程度の変形に収まります。温度と荷重を系統的に変化させた実験結果の解析により、熱クリープの観点からも、9Cr-ODS鋼は、RAFM鋼より100-150°C高温まで使用できることが明らかになっています。図4では、9Cr-ODS鋼は、破断前に試験を終了しています。

このように、ODS鋼の利用によりブランケットの高温化の可能性が高まることが分かりました。ODS鋼には、大量製造技術開発、強度特性の異方性の改善などの課題があり、当面はブランケット構造体全部をODS鋼で作るよりも、温度の高い一部分をRAFM鋼に代えて使うことにより使用温度を高めることが主に検討されています。ODS鋼は、現在、高速炉の燃料被覆管材としての研究開発も行われています。これ等との技術協力による効率的な研究開発を進めていくことが大切です。

なお、ナノ粒子分散による高温強度と耐熱クリープ特性の向上は、低放射化バナジウム合金においても可能で、核融合科学研究所では、イットリア、炭化チタンや炭化シリコン等の粒子分散による強化研究を、東北大学、愛媛大学、中国西南物理研究院等との共同研究で進めています。

(李 艶芬:核融合システム研究系 COE研究員)
(室賀健夫:核融合システム研究系 研究主幹 教授)