



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	9Cr-0DSフェライト/マルテンサイト鋼燃料被覆管の開発
Author(s)	鵜飼, 重治; 皆藤, 威二; 大塚, 智史 他
Citation	まてりあ, 45(1), 48-50 https://doi.org/10.2320/materia.45.48
Issue Date	2006-01-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/76412
Type	journal article
File Information	Materia 45(1) 48.pdf



9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼 燃料被覆管の開発

鵜飼 重治^{*1)} 皆藤 威二^{*2)} 大塚 智史^{*2)}
藤原 優行^{**} 小林 十思美^{***}

1. はじめに

HT9等のフェライト系耐熱鋼は格段に優れた中性子照射損傷抵抗性を有していることから、原子力の高速炉分野において燃焼度 200 GWd/t の高燃焼度燃料の被覆管材料としてこれまで使用されてきた。しかし、フェライト系はオーステナイト系の耐熱鋼に比べて高温強度が劣ることから、その使用温度は 873 K 以下に制限されている。この課題を克服して高速炉の高効率運転を実現すべく、照射損傷抵抗性に優れたフェライト鋼中に Y_2O_3 粒子を分散してその高温強度を向上させた酸化物分散強化型 (Oxide Dispersion Strengthened) フェライト鋼の開発がこれまで行われてきた。しかし金属粉末と Y_2O_3 粉末のメカニカルアロイング (MA) 処理粉末を固化成形した ODS フェライト鋼は硬くて脆い難加工性材料であることから、固化成形体からの冷間圧延による被覆管への製管はこれまで不可能であった。これに対して著者らは、その組織制御技術を独自に開発することにより、世界で初めて冷間圧延による被覆管製造を可能にするとともに、酸化物粒子のナノ制御技術を開発して、フェライト系耐熱鋼管としては世界最高の高温強度を有する 9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管を実用化した⁽¹⁾。

2. 組織制御技術開発

(1) ナノ・メゾ組織制御技術の開発

著者らは MA 中に Y_2O_3 粒子は分解して母相に強制固溶状態になった後、約 1273 K 以上の焼鈍過程で酸化物粒子として微細析出することを発見し、特に Ti を同時添加すると複合酸化物 $Y_2Ti_2O_7$ (Y_2O_3 -2TiO₂) が 2 nm 程度のサイズで超微細析出することを明らかにした⁽²⁾。開発した鋼種の基本成分は 9Cr-0.13C-0.2Ti-2W-0.35 Y_2O_3 として、複合酸化物粒子形成のために Ti を添加するとともに、 α/γ 変態による組織制御を積極的に利用するためマルテンサイト系とした。また固溶強化元素として W を 2 mass% 添加した。

9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼の固化成形体の 1323 K 焼きならし・1053 K 焼き戻し熱処理後の組織を図 1 に示す。その組織は SEM 写真で黄色く見える残留 α 相とその周りのフェライト/マルテンサイト相から構成されている。残留 α 相は熱力学的解析から、1423 K での固化成形時に析出した複合酸化物粒子のピンニング効果によって変態 γ 相の成長が抑制され、未変態の α 相のまま存在した組織が焼きならし・焼き戻し熱処理においてもそのまま残留したも

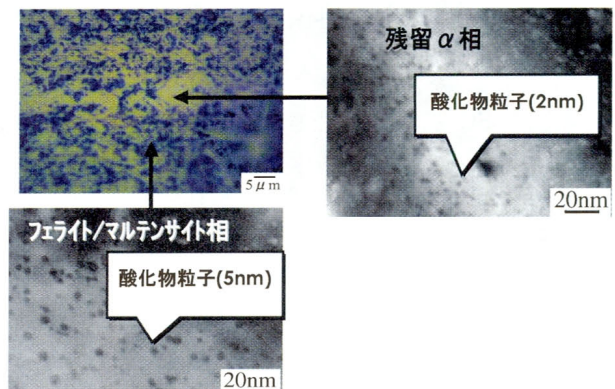


図 1 9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼の焼きならし・焼き戻し熱処理後の組織。

* 独立行政法人日本原子力研究開発機構
次世代原子力システム研究開発部門核燃料工学グループ：
1) グループリーダー 2) 研究員

** 株式会社コベルコ科研受託研究事業部：主席研究員

*** 住友金属テクノロジー株式会社関西事業部技術部：次長
Development of 9Cr-ODS Ferritic-Martensitic Steels for Fuel
Cladding; Shigeharu Ukai*, Takeji Kaito*, Satoshi Ohtsuka*,
Masayuki Fujiwara**, Toshimi Kobayashi*** (*Japan Atomic
Energy Agency, **KOBELCO Research Institute INC.,
***Sumitomo Metal Technology INC.)

2005年10月25日受理

のである⁽¹⁾。この残留 α 相内では、図1に示すように、複合酸化物粒子が緻密に2 nm サイズで超微細化するため、クリープ強度が大幅に向上する⁽³⁾。この残留 α 相の生成は鋼中の酸素量に支配されることを明らかにして⁽⁴⁾、9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼における母相の α/γ 変態によるメゾスケール組織制御技術と複合酸化物粒子の固溶・析出を利用したナノスケール制御技術を独自に開発した。

(2) ピルガー圧延・熱処理技術の開発

作製した9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の連続冷却変態線図(CCT 線図)を図2に示す。残留 α 相を含むため、その旧 γ 粒径は5 μm と極端に小さく、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態のノーズは酸化物粒子を含まない通常の9Cr溶解材に比べてはるかに高冷却速度側に張り出している特徴がある。このCCT 線図に基づき、ピルガー圧延機を用いた50%冷間圧延の途中で行う中間熱処理では、 γ 域で1323 K $\times$ 30分保持後、冷却速度を100 K/hの炉冷処理(FC)として α 相にすることにより、加工硬化した組織を軟化させることに成功した⁽⁵⁾。4回の冷間圧延とその後の熱処理を繰返して被覆管に加工する途中の硬さ変化を図3に示す。被覆管硬さはピルガ

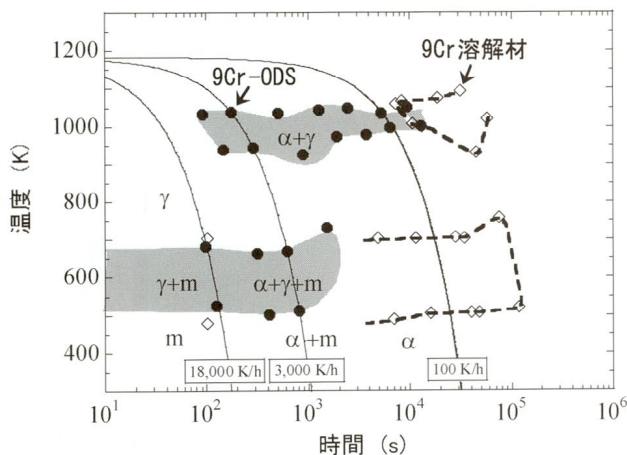


図2 9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管の連続冷却変態線図(CCT 線図)：破線は通常の9Cr溶解材。

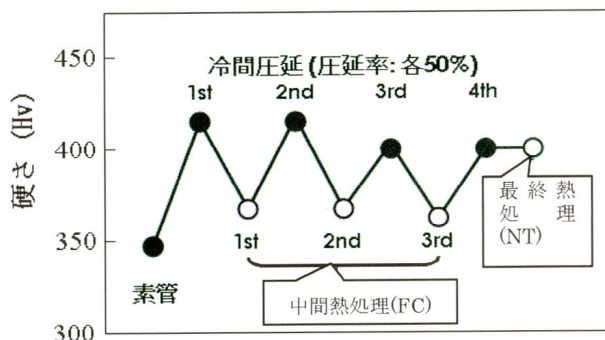


図3 圧延途中の硬さ変化： γ 相からのFC(炉冷)を利用した中間熱処理により、十分な硬さにまで軟化される。最終NT熱処理(焼きならし・焼き戻し)。

ー圧延を継続して実施可能なビッカース硬さ400HV以下に再現性よく軟化されていることが分かる。所定の寸法まで圧延加工した後、圧延方向に伸長した結晶粒を等軸化するとともに靱性を確保するため、最終熱処理として焼きならし(1323 K $\times$ 1時間, AC)と焼き戻し(1073 K $\times$ 1時間, AC)を施す。実機製造ラインにおけるACの冷却速度は約3000 K/hであるため、図2に示したCCT 線図より、被覆管製品は残留 α 相を含むフェライト/マルテンサイト組織である。

(3) 高温強度特性

製造した9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管製品の923 K, 973 K, 1023 Kにおけるクリープ強度をすでに実用化されている通常の溶解材であるHT9(フェライト系耐熱鋼)、および高速増殖原型炉「もんじゅ」の被覆管であるPNC316(オーステナイト系耐熱鋼)と比較して図4に示す⁽⁵⁾。組織制御した9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管は、フェライト系耐熱鋼管としては世界最高のクリープ強度を示す。また、応力-破断時間の傾きが小さいため、燃料被覆管に要求される120 MPa以下の周応力条件では、その破断時間はPNC316をも凌駕していることが分かる。またリング引張試験で得られた周方向一様伸びを図5に

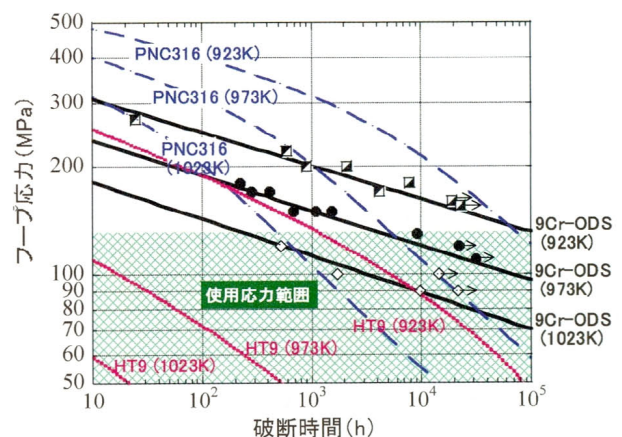


図4 9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼のクリープ強度とHT9, PNC316との比較：矢印は試験継続中を示す。

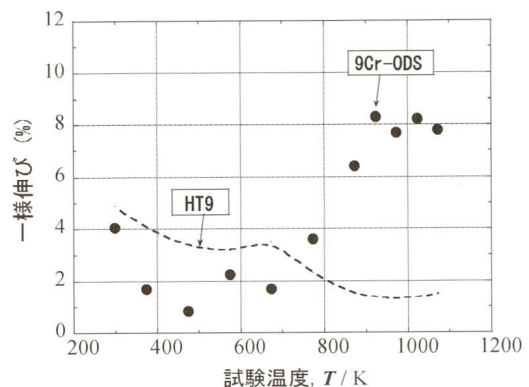


図5 9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼とHT9の一様伸びの比較。

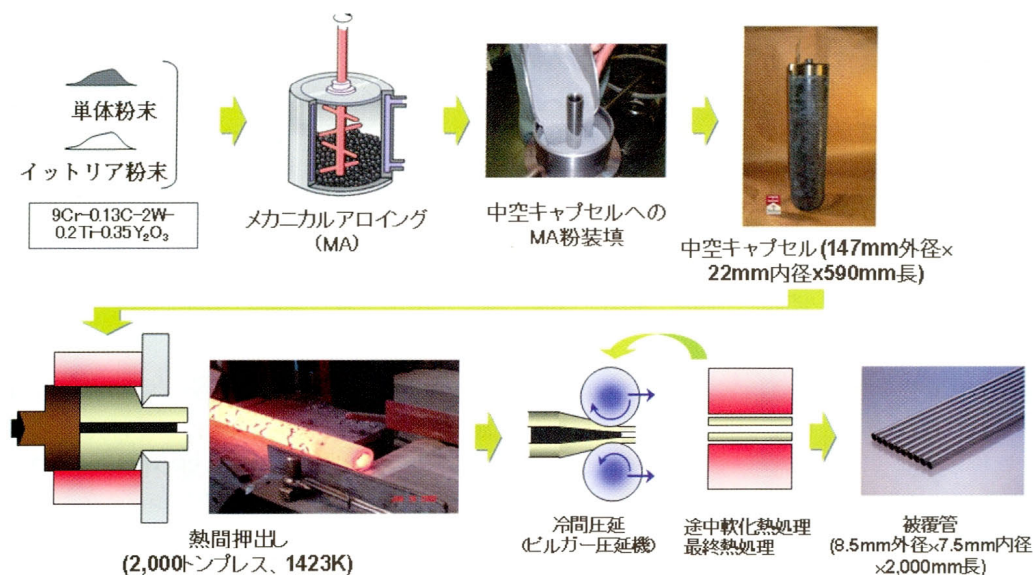


図6 9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管製品の実用化製造プロセス。

示す⁽⁵⁾。9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管製品の引張り延性は使用温度である 673 K 以上において極めて優れていることが分かる。これは、ナノ酸化物粒子によって転位の回復が抑制され、加工硬化が持続するためである。

3. 実用化製造プロセス

寸法が外径 8.5 mm、肉厚 0.5 mm で 2 m 長さの高速炉燃料被覆管を製造するために開発した一連の実用化製造プロセスを図 6 に示す。10 kg バッチのアトライターボールミルを用いて、単体金属粉末と Y_2O_3 粉末を 48 時間 MA 処理する。それらを軟鋼中空キャプセルに封入し 673 K×0.1 Pa で脱気した後、1,423 K での熱間押出しにより固化成形する。このようにして製造した外径 32 mm、内径 21 mm、長さ 4 m の大型中空素管から、通常のステンレス鋼管と同様に 2 ロール型のピルガー圧延機を用いて、途中に炉冷軟化熱処理を施しながら 1 回の圧延率が 50% の冷間圧延を 4 回繰り返して、実機被覆管製品を製造する⁽⁶⁾。この技術は、軽水炉用ジルカロイ被覆管の製造プロセスと比較しても遜色ないレベルである。

4. 実用化状況

9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管製品の端栓との接合技術と検査技術を開発し⁽⁷⁾、製造した燃料ピンをロシアの高速実験炉 BOR-60 で 50 GWd/t まで照射した⁽⁸⁾。

また、9Cr-ODS フェライト/マルテンサイト鋼被覆管製品の照射による影響を評価して⁽⁹⁾、材料強度基準とそのデータベースを整備し、国より高速実験炉「常陽」での使用許可をすでに取得している。今後は高速増殖原型炉「もんじゅ」の燃料被覆管として、使用される計画である⁽⁶⁾。

5. 特 許

本技術に関しては、特許3073981号、第3171185号、第3467740号をはじめ国内外合わせて特許20件を出願済である。

文 献

- (1) 鶴飼重治, 大塚智史: まてりあ, **44**(2005), 749-756.
- (2) 奥田隆成, 鶴飼重治, 宮原一哉: まてりあ, **39**(1999), 954.
- (3) S. Ohtsuka, S. Ukai, M. Fujiwara, T. Kaito and T. Narita: Materials Transaction, **46**(2005), 487-492.
- (4) S. Ohtsuka, S. Ukai, M. Fujiwara, T. Kaito and T. Narita: J. Nucl. Mater., **329-333**(2004), 372-376.
- (5) S. Ukai, T. Kaito, S. Ohtsuka, T. Narita, M. Fujiwara and T. Kobayashi: ISIJ International, **43**(2003), 2038-2045.
- (6) T. Kaito, S. Ukai, S. Ohtsuka and T. Narita: Proc. Global 2005, Tsukuba, Japan, Oct. 9-13, (2005), Paper No. 196.
- (7) S. Seki, K. Hirako, S. Kono, Y. Kihara, T. Kaito and S. Ukai: J. Nucl. Mater., **329-333**(2004), 1534-1538.
- (8) S. Ukai, T. Kaito, M. Seki, A. A. Mayorshin and O. V. Shishalov: J. Nucl. Sci. Technol., **42**(2005), 109-122.
- (9) Y. Yoshitake, Y. Abe, N. Akasaka, S. Ohtsuka, S. Ukai and A. Kimura: J. Nucl. Mater., **329-333**(2004), 342-346.