

革新的実用原子力技術開発
平成 14 年度成果報告書
(概要)

(研究題目)

軽水炉高燃焼度化のための炉心材料に
関する技術開発

平成 15 年 3 月 20 日

(研究代表者)

京 都 大 学
エネルギー理工学研究所
木 村 晃 彦

平成14年度 研究成果報告書（概要）

軽水炉高燃焼度化のための炉心材料に関する技術開発

1. はじめに

1.1. 背景

軽水炉の高燃焼度化は、ウラン資源の有効利用、使用済み燃料発生量の低減および燃料サイクル費の節約をもたらすことから、原子力エネルギーの高効率利用に欠かせない技術の一つである。軽水炉発電プラントを高効率に、しかも安全に運転するための重要な技術的課題の一つとして、高燃焼度化に対応した炉心材料の健全性確保が求められる。特に、炉心燃料被覆管が蒙る中性子照射量は高照射領域におよぶため、耐照射性能の向上は耐食性などの耐経年劣化特性と共に極めて重要な材料課題として位置づけられる。また、さらに発電効率の上昇を目指す超臨界水を用いたプラントにおける材料課題としては、超臨界圧水中における耐食性の向上に加えて十分な高温強度特性が要求されている。

現状の軽水炉炉心材料としては、ジルコニウム合金やオーステナイト鋼が採用されている。ジルコニウム合金は、中性子吸収能が小さい上に、応力腐食割れをおこさないことから優れた燃料被覆管としてこれまで使用されてきた。現状の軽水炉では、その材料特性にほとんど問題は無いが、軽水炉や新型炉の一層の高燃焼度化に対応するには、高温強度、照射脆化、耐食性、寸法安定性および耐水素脆性に課題があるとされている。また、オーステナイト鋼は水環境下における耐食性や加工性に優れた材料であるために、高燃焼度化のための新たな燃料被覆管としての利用に向けた開発研究が行われているが、高照射領域における照射脆化および照射誘起応力腐食割れなどの問題を抱えている。また、核的性質の観点からすると、主要な合金元素であるニッケルからの核変換ヘリウムによる粒界脆化の重畳することが懸念されていることおよび放射性廃棄物の量が多くなる等の本質的な問題も抱えている。これらを総合的に判断すると、軽水炉や超臨界圧水炉発電プラントの高燃焼度化においてはオーステナイト鋼を燃料被覆管として使用することの優位性には疑問が残る。

酸化物分散強化（以下 ODS）鋼は、材料組織が極めて複雑であり、照射欠陥を自らの複雑な組織に吸収することにより、照射損傷組織やヘリウム集合体の形成を抑制するため、オーステナイト鋼に比べ、はるかに耐照射性能および耐ヘリウム脆化特性に優れている。また、高温における材料組織（相）安定性にも優れており、高温でしかも

高照射領域まで耐える材料として着目され、核燃料サイクル開発機構（以下 JNC）と（株）コベルコ科研（以下コベルコ）において高速炉燃料被覆管用材料として、低放射化分散強化フェライト・マルテンサイト鋼（低放射化 ODS-F/M 鋼）が開発され、燃焼度 150GWD/t を目標とした材料要件をクリアし、既に実用化への見通しが立っている。また、フェライト・マルテンサイト系の鋼はオーステナイト鋼において問題になっている応力腐食割れが起こりにくいこと、スウェリングなどの照射下寸法安定性に優れていること、またオーステナイト鋼の主要元素である高放射化元素のニッケルを含まないことなどの優れた長所を持ち合わせている。特に、応力腐食割れ感受性が極めて低い点は、冷却水の水化学と材料挙動相互作用という複雑な問題を回避できる大きな利点である。このように、高速炉燃料被覆管用材料として開発された低放射化 ODS-F/M 鋼は、ジルコニウム合金やオーステナイト鋼に替わる優れた炉心材料としての期待が大きいが、水環境下での耐食性や耐水素脆性が要求されている軽水炉への応用に関しては検討が不十分である。

1.2. 目的

そこで本研究においては、高速炉燃料被覆管用に開発された低放射化 ODS-F/M 鋼を軽水炉用を使用するための技術開発を行うことを目的とする。

高速炉用に開発されてきた ODS 鋼を現行の軽水炉および将来の超臨界水を用いた新型原子炉に応用するための技術課題としては、

- 1) 高温高压水および超臨界圧水環境下における耐食性（耐腐食減肉）の向上
- 2) 水素脆性の評価と抑制方法の検討

が必要である。これらの課題を解決することにより、軽水炉発電プラントの高燃焼度化に対応しうる炉心材料の製造が可能となり、軽水炉ひいては超臨界圧水炉発電プラントの高効率・安全利用に資すると期待される。

2. 技術開発計画

2.1. 目標とする燃焼度

軽水炉の燃焼度は次第に増大し、我が国においては、現在、沸騰水型原子炉（BWR）では 55GWD/t に到達し、加圧水型原子炉（PWR）も 48GWD/t から BWR 相当の燃焼度を達成しようとしている。わが国の原子力エネルギー事情からすると、将来さらに燃焼度を高める必要があると考えられる。これまでの実証試験によると、55GWD/t 程度の燃焼度は現行のジルカロイ被覆管で賄えることが示されているが、60GWD/t 以上の高燃焼度

化の達成が必要となった場合の経年劣化や非常事態時の高温水蒸気の発生に伴う水素脆化の問題はジルカロイ被覆管に依存している限り、回避することは極めて困難であるといわざるを得ない。また、安全性の尤度を十分にとっておくことは、不測の事態における原子炉の安全維持および国民の安心感の増強に欠かせない。

本研究では、軽水炉における実用化を念頭に置き、近い将来における 60GWD/t 以上の高燃焼度運転が可能で、しかも安全性に高い尤度を持つ燃料被覆管の開発を行う。また、状況によっては、超臨界圧水炉への応用も検討する。

2.2 被覆管材料に対する要件

軽水炉高燃焼度化は、①ウラン濃縮度の上昇、②ホウ素価値の低下および③照射量の増大を伴う。その際の燃料被覆管材料に対する要件としては、1) 中性子吸収断面積が小さい、2) 耐照射脆化、3) 耐スウェリング性、4) 高クリープ特性、5) 耐食性（冷却水側）、6) 共存性（燃料側）、7) 水素脆性および 8) ヘリウム脆性があげられる。ジルコニウム合金やオーステナイト系鋼はフェライト系鋼に比べ、300℃程度の水環境下における耐食性に優れており、軽水炉炉心構造材料としての特性においてフェライト鋼を凌駕している。しかし、1.1. で述べたように、高燃焼度化に伴い、耐照射性能、耐食性および耐ヘリウム脆化特性の一層の向上が望まれており、特に、照射誘起応力腐食割れ（オーステナイト鋼）、水素脆化割れ（ジルコニウム合金）、スウェリングおよび照射脆化を引き起こしやすいオーステナイト鋼あるいはジルコニウム合金に替わる新たな燃料被覆管材料の開発が望まれている。その候補材料として ODS 鋼があげられる。

2.3 酸化物分散強化鋼（ODS 鋼）

ODS 鋼は、大量生産や溶接・接合の面では通常の鉄鋼材料のレベルに及ばない状況ではあるが、既に確立している現状の製鋼技術工業基盤の利用が可能であること、および現在生産されている鉄鋼材料の中では、総合的に判断すると最も優れた強度特性を有していることから、大型複雑構造体の要素体（特に強度が要求される箇所）として、将来の革新的な構造用鉄鋼材料に発展する高い可能性を持っており、高効率熱変換を目指す発電プラントへの適用がフランス、米国をはじめとする世界各国において検討されている。

ODS 鋼の利用により、軽水炉発電プラントの高燃焼度化が進み、さらに高効率で安全尤度の高いプラントの運転が可能になると期待される。

また、オーステナイト鋼の代わりに低放射化元素のみを成分元素とする低放射化フェライト・マルテンサイト系 ODS 鋼を使用することにより、低レベル廃棄物量は著しく低

減することから、今後、社会的にますます重要視される環境問題にも十分に対応できる。

ODS 鋼は、ナノオーダーのサイズを持つ微細な酸化物を分散させることにより高温強度特性および照射下相安定性を維持しており、鉄鋼材料の分野においていわゆるナノテクノロジーの実用化が達成された良い例を示している。将来的には、超臨界圧水発電プラント用燃料被覆管材料や核融合炉ブランケット構造材料への応用が期待されており、原子力用耐極限環境材料研究分野へと展開し、大いに発展していくと予測される。

オーステナイト鋼やジルコニウム合金とフェライト・マルテンサイト系 ODS 鋼の諸特性の比較を表 1 および図 2 に示す。

表 1：オーステナイト鋼(316SA)、ジルカロイ 2 および ODS-F/M 鋼の諸特性の比較

	諸特性	ODS-F/M 鋼	316-SA	ジルカロイ 2	
基盤工業	加工性	△	○	○	
	溶接・接合性	△	○	○	
	大量生産性	△	○	○	
非照射環境	常温強度特性	降伏応力 (MPa)	1000	250	350
		伸び (%)	5	40	30
	高温引張特性 700°C	降伏応力 (MPa)	300	150	100
		伸び (%)	10	20	40
	クリープ強度 (MPa)	700°C、1 万時間	120	80	-
		700°C、3 万時間	105	50	-
	破壊靱性	室温 (MPa/m ^{1/2})	?		-
	耐食性 (水環境)	室温	?	○	△
300°C		?	○	△	
共通	耐水素脆化	脆化に要する H 量	?	0.1%以上	100ppm
		発現する温度域	?	100°C以下	300°C以下
	耐ヘリウム脆化	脆化に要する He 量	?	数 ppm 以上	-
		発現する温度域	?	室温以上	-
照射環境	耐照射脆化 (450°C、10dpa)	照射硬化 (MPa)	無し	700	△
		伸びの減少	無し	1/3 に低下	△
	スウェリング量	450°C、10dpa	無し	数%	-
		420°C、100dpa	1%以下	15%	-
	耐照射誘起応力 腐食割れ	閾線量 (dpa)	?	0.1	-
		伸びの減少	?	1/6 に低下	-

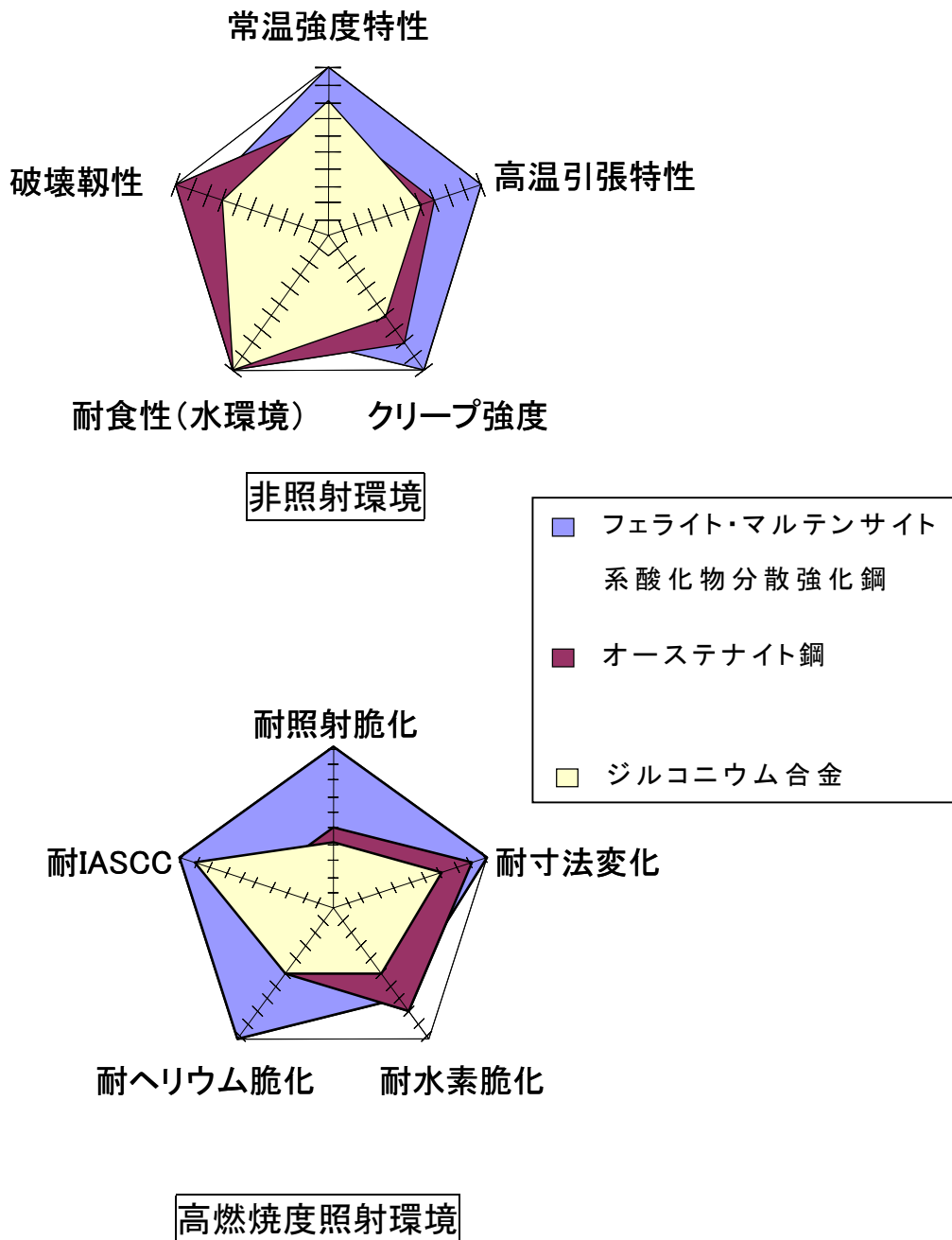


図1：オーステナイト鋼（SUS304）溶体化材、ジルカロイ2および低放射化 ODS-F/M 鋼の諸特性の比較図

2.4. 材料開発

2.4.1 高速炉燃料被覆管用 ODS 鋼の開発状況

JNC およびコベルコは、高速増殖炉の経済性および安全性の向上のため、炉心の高温化によるプラント熱効率の向上とともに、燃料の高燃焼度化（150GWd/t 以上）によるサイクルコストや廃棄物量の低減のため、高温強度および耐スウェリング特性に優れた低放射化 ODS-F/M 鋼の開発に着手し、高温かつ高照射量での高燃焼度化に要求される材料特性として最も重要な特性となっている 700℃でのクリープ破断強さ（120MPa、1 万時間）の達成に成功している。さらに重要な技術として、管材の製造技術がすでに完成しており、高強度材において問題となる加工性・製造性における課題はほとんど解決され、現在、材料開発の実証段階に進んでおり、既にロシアの高速炉を用いて照射下における材料健全性の調査研究が開始されている。

これまでに、耐照射性能に関しては、高速炉常陽を用いて中性子照射（15dpa）実験を行い、低放射化 9CrODS 鋼の優れた耐照射性能が確認されている。通常のフェライト鋼とは異なり、ODS 鋼においては脆化の原因となる Cr-rich 相や W-Laves 相の形成が照射によって顕著に促進されることはなく、照射下においてもマルテンサイト組織が極めて安定している。さらに、酸化物分散粒子はヘリウムや空孔の捕獲サイトとなるマルテンサイト組織の熱的安定性を維持することが示されており、ODS 鋼は耐ヘリウム脆化にも優れていることが容易に推察される。現状では、照射温度 700℃、照射量 15dpa、ヘリウム数百 appm までの範囲において、ODS 鋼の優れた耐照射性能と耐ヘリウム脆化特性を示唆する実験結果が確認されている。しかし、高温高压水や超臨界圧水などの水環境下における耐食性や応力腐食割れおよび水素脆化割れ感受性に及ぼす照射の影響に関する基礎データは皆無であり、照射下における耐食性向上のための技術開発は行われていない。

2.4.2 基本的開発指針

本計画では、これまでに高速炉燃料被覆管として開発されてきたフェライト・マルテンサイト系 ODS 鋼の耐食性や耐ヘリウム・水素脆化特性を先ず評価し、軽水炉燃料被覆管としての利用の限界と可能性を明らかにする。次に、従来の材料開発研究や照射効果研究成果として得られている基礎的知見に基づき、軽水炉高燃焼度炉心材料としての ODS 鋼の合金開発を進めていく。

開発指針としては、成分元素調整や組織の微細化（ナノ組織化）等の金相学的アプローチと表面改良技術を利用した表面組織制御法ならびに表面被覆法に基づき、軽水炉被覆管材料としての要件を満足するための材料開発を行う。

2.5. 長期的な技術開発計画

本計画は、7カ年計画とし、計画は以下の3段階とする。最初の2カ年は、本提案（フイージビリティスタディ分野）の中心となる部分で、ODS 鋼を軽水炉あるいは超臨界圧水炉炉心材料として使用する際に最重要課題となる高温高圧水および超臨界圧水環境下における耐食性について調査し、その可能性と限界を見極める「フイージビリティスタディ段階」、次に、実用化のための照射環境下および微量の水素やヘリウムが存在下における総合的な材料特性評価とそれに基づく材料の改良を行う「革新的技術開発段階」（3カ年）、最後に実環境あるいは模擬環境下における確認試験を行う「確認段階」（2カ年）を経て実用化に結びつける。

従来の研究からは、低放射化 ODS-F/M 鋼の高温強度特性やヘリウム効果に関する前向きな基礎的知見が得られているが、水環境下および水素ならびにヘリウムの存在下における耐食性の向上は、実用化に向けた枢要部の技術開発である。

各検討課題とそれぞれの課題の位置づけ、課題の解決方法、予想される成果のフローを図2に示す。

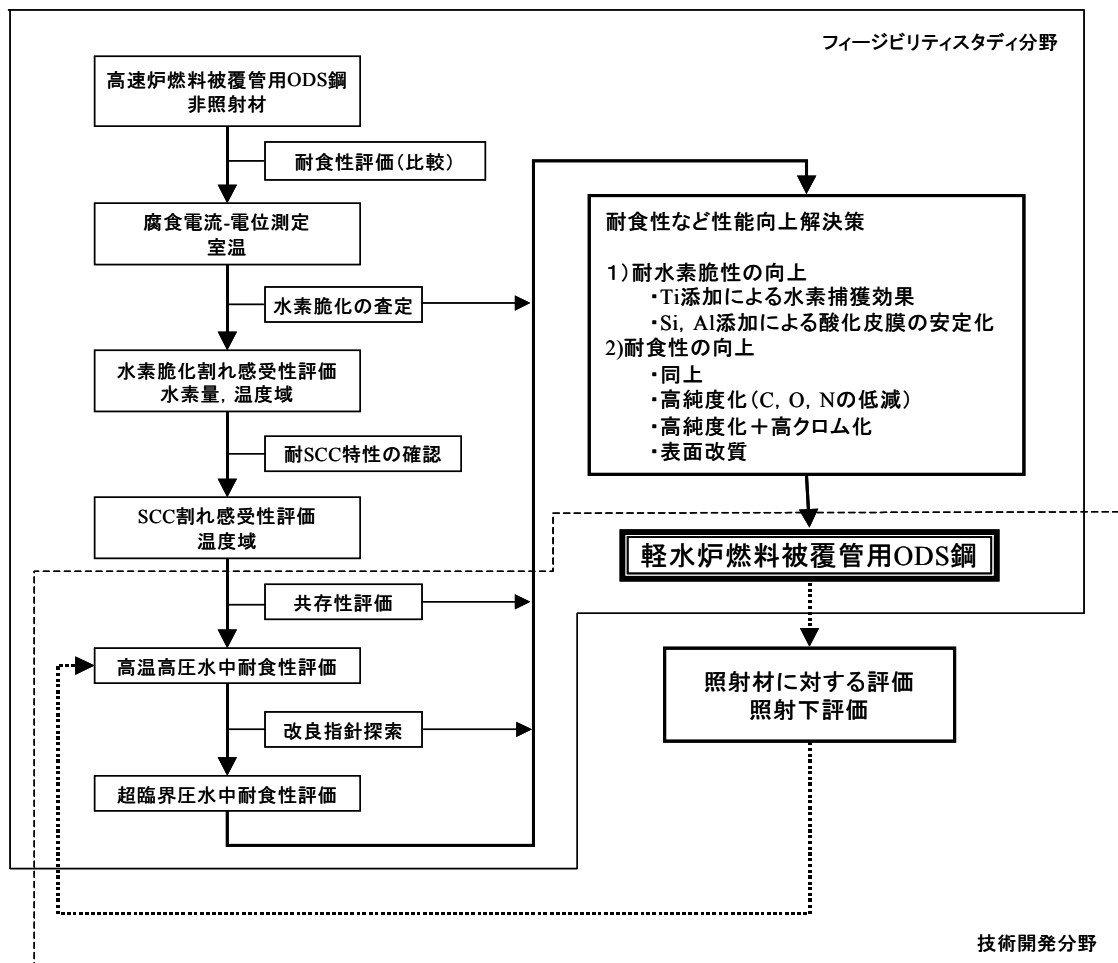


図2：課題解決（軽水炉燃料被覆管用 ODS 鋼の開発）までの研究の流れ図

2.6. 具体的実施計画

2.6.1. 高温高压水中および超臨界水中耐食性評価

高速炉燃料被覆管として開発された低放射化フェライト・マルテンサイト系 ODS 鋼の水環境下耐食性の評価を行う。耐食性の評価は、小型オートクレーブ（圧力容器）を用いて、腐食に伴う質量変化の測定および強度特性変化の測定により行う。予備試験として、腐食電流-分極曲線の測定を室温にて行う。応力腐食割れ感受性評価として低ひずみ速度試験を高温高压水中にて行う。耐食性の改善については、酸化皮膜の安定化、高純度化、高クロム化および表面改質などの方法を検討する。

2.6.2. 水素脆化

上記と同じ材料に陰極チャージ法を用いて水素を添加しあるいは添加しながら変形および破壊挙動を調べ、水素脆化の発現する臨界水素濃度を求める。水素脆化割れ抑制方法として Ti、Si、Al の添加効果について検討する。

2.6.3. ヘリウム脆性評価

上記と同じ材料を用いて、ヘリウムをイオン加速器にて注入し、硬さ変化や注入後のヘリウムの昇温脱離挙動を調べ、ヘリウム脆化の発現する臨界のヘリウム濃度を求める。

各課題の結果をそれぞれとりまとめたのち、個々の課題を同時に解決するかバランスを考慮した解決の方策を冶金学的に検討し、軽水炉用革新的実用炉心材料の開発指針を得る。

3. 平成 14 年度研究内容と成果の概要

初年度は既存の 9Cr-ODS 鋼および 12Cr-ODS 鋼の耐食性を評価するため、従来の耐食材料との比較を行った。評価方法として、

- 1) アノード分極曲線の測定（硫酸水溶液）
- 2) 高温高压水（および超臨界圧水）中腐食試験
- 3) 高温大気中酸化試験

の 3 つの試験を採用した。評価結果に基づき、耐食性の向上を目指した改良材の開発指針を検討し、改良材の試作を開始した。

また、次年度以降の改良材に対する評価対象となっている応力腐食割れ感受性評価試験装置の作製と水素脆化割れ感受性評価試験装置の概念設計に取り掛かった。

3.1. 材料

ODS 鋼として用いた材料は、フェライト系の 12Cr-ODS 鋼（1 種類）および Ti ならびにイットリア量を変えたマルテンサイト系 9Cr-ODS 鋼（3 種類）である。耐食性を比較するための従来材としては、フェライト・マルテンサイト鋼、ステンレス鋼、インコネルおよびハステロイを選択した。材料の詳細を表 2 に示す。

記号	名称	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Mo	W	V	Nb	Ti	Cu
①	12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y ₂ O ₃ 鋼	0.022	0.05	0.046	0.002	0.002	0.035	11.97	Bal.	—	2.02	—	—	0.30	—
②	9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y ₂ O ₃ 鋼	0.13	0.05	0.044	0.002	0.002	0.021	9.00	Bal.	—	1.95	—	—	0.20	—
③	9Cr-2W-0.2Ti鋼	0.13	0.006	0.01	0.005	0.003	0.02	9.11	Bal.	—	1.95	—	—	0.18	—
④	9Cr-2W-0.3Ti-0.45Y ₂ O ₃ 鋼	0.13	0.005	0.01	0.005	0.003	0.02	8.84	Bal.	—	1.91	—	—	0.29	—
⑤	FMS鋼	0.15	0.039	0.80	0.03	0.002	0.50	10.52	Bal.	0.40	1.81	0.20	0.049	—	—
⑥	SUS316鋼	0.05	0.72	1.01	0.03	0.003	10.21	17.23	Bal.	2.18	—	—	—	—	—
⑦	インコネル625合金	0.02	0.18	0.17	0.008	<0.01	61.51	21.65	3.64	9.0	—	—	3.45	0.23	—
⑧	ハステロイG-30合金	0.01	0.5	1.1	0.01	<0.01	Bal.	29.1	15.4	5.0	2.7	—	0.81	—	1.8

Co	Al	N	Y	Y ₂ O ₃	熱処理
—	—	0.010	0.19	0.24	1200°CANN
—	—	0.013	0.29	0.37	1050-780°CNT
—	—	0.017	—	—	1050-780°CNT
—	—	0.010	0.35	0.44	1050-780°CNT
—	—	0.072	—	—	1050-720°CNT
—	—	—	—	—	1100°CST
—	0.14	—	—	—	ANN
0.5	—	—	—	—	ANN

* ANN : Annealed (焼鈍)
 * NT : Normalized & Tempered (焼ならし・焼戻し処理)
 * ST : Solution Treated (溶体化処理)

表 2 : 腐食評価試験に用いた材料の組成

3.2. 腐食試験

3.2.1. アノード分極曲線

不働体皮膜形成挙動を比較するため、1 モル硫酸水溶液中でアノード分極曲線を測定した。溶液温度は 30.0°C、電位掃引速度は 20mV/min とした。通常のフェライト鋼についても合わせて評価した。その結果を図 3 に示す。ODS 鋼のアノード分極曲線は通常のフェライト鋼やマルテンサイト鋼とほぼ同様の挙動を示しており、ステンレス鋼に比べ不働体維持電流密度が高く、硫酸水溶液中での耐食性はステンレス鋼に劣っている。ステンレス鋼の耐食性は結晶粒サイズに依存することが知られており、結晶粒径が減少するにつれて耐食性も向上する。酸化物分散強化鋼の結晶粒径は 1 μm 程度と比較材料の中では最小であり、耐食性は良好であることが期待されたが、本実験では、ODS 鋼の場合、結晶粒径の微細化の効能は見えていない。結晶粒径が 1 μm 以下にまで減少したときの耐食性に関するデータはまだ得られていない。

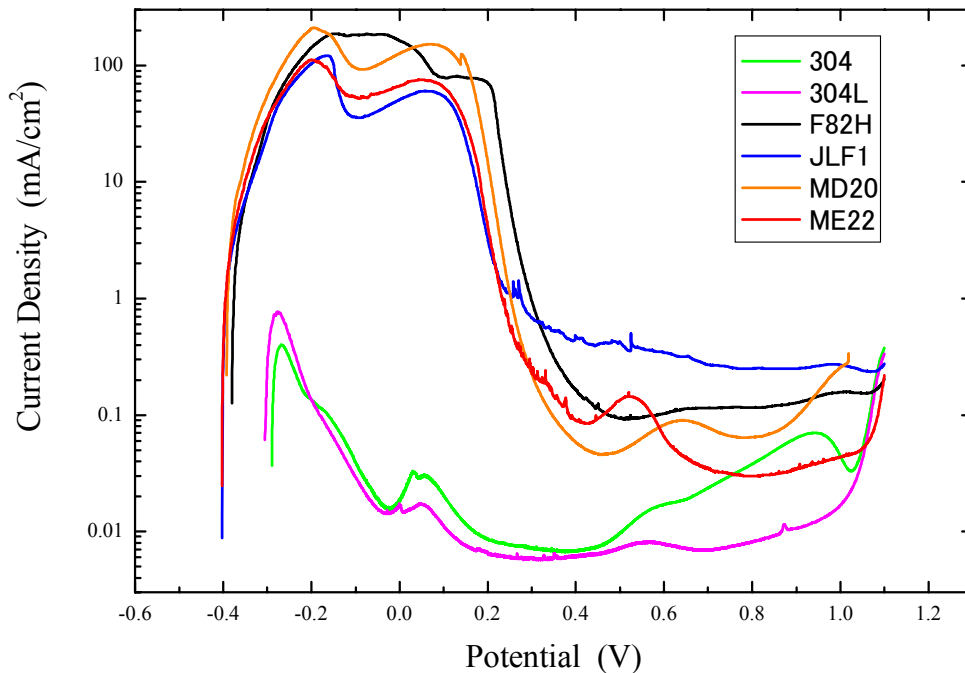


図 3：各種材料のアノード分極曲線（MD20、ME22 が ODS 鋼）

3.2.2. 高温高压水中腐食試験

高温高压水中における腐食試験を以下の条件で行った。

- 1) 試験温度：300°C、510°C
- 2) 圧力：8MPa、25MPa
- 3) 腐食時間：200、400、600 時間

・腐食増量： 510°C、25MPa の超臨界水中における酸化物分散強化鋼および通常のフェライト・マルテンサイト鋼の腐食増量分を図 4 に示す。また、比較のために行ったステンレス鋼、インコネルおよびハステロイについて図 5 に示す。

ODS 鋼の腐食増量は従来のフェライト・マルテンサイト鋼とほぼ同様の傾向を示し、600 時間で $2\text{mg}/\text{cm}^2$ の値を示している。これに対し、ステンレス鋼やニッケル合金は 600 時間における腐食増量は $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ であり、ODS 鋼に比べ約 20 分の 1 の小さな値に収まっている。実験データのまとめを表 3、表 4 および表 5 に示す。

・腐食深さ： 腐食試験後の試験片断面の組織観察を行い、表面酸化皮膜層の厚さを測定した。ODS 鋼の皮膜は3層からなり、第1表層は粗い酸化層、第2表層は白色で緻密な酸化皮膜、第3表層は黒色の酸化層からなっている。第3表層までの酸化膜の厚さは510°C、25MPa、600時間において約10 μ mであり、ステンレス鋼の1 μ m以下に比べ大きい値を示した。

・表面光沢： 各種材料の表面状態を光学顕微鏡で観察した。ODS 鋼の表面は赤みを帯びた酸化鉄の色を示していたが、ステンレス鋼は金属光沢を維持していた。

表3 試験片重量変化測定結果(200時間後)

鋼種	TP.No.	表面積 (cm ²)	試験片重量(g)			酸化増量 (mg/cm ²)
			試験前	200Hr後	重量変化	
12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y ₂ O ₃ 鋼	1-1	5.22	3.0974	3.1028	0.0055	1.05
9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y ₂ O ₃ 鋼	2-1	5.22	3.1028	3.1080	0.0052	1.00
9Cr-2W-0.2Ti鋼	3-1	5.22	3.1094	3.1152	0.0057	1.10
9Cr-2W-0.3Ti-0.45Y ₂ O ₃ 鋼	4-1	5.22	3.0891	3.0943	0.0053	1.01
FMS鋼	5-1	5.22	3.1049	3.1103	0.0055	1.05
SUS316鋼	6-1	5.23	3.1462	3.1465	0.0003	0.06
インコネル625合金	7-1	5.19	3.2649	3.2651	0.0002	0.04
ハステロイG-30合金	8-1	5.22	3.2454	3.2456	0.0002	0.04

表4 試験片重量変化測定結果(400時間後)

鋼種	TP.No.	表面積 (cm ²)	試験片重量(g)			酸化増量 (mg/cm ²)
			試験前	400Hr後	重量変化	
12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y ₂ O ₃ 鋼	1-2	5.22	3.0936	3.1015	0.0079	1.51
9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y ₂ O ₃ 鋼	2-2	5.22	3.1029	3.1100	0.0071	1.35
9Cr-2W-0.2Ti鋼	3-2	5.22	3.1093	3.1172	0.0079	1.52
9Cr-2W-0.3Ti-0.45Y ₂ O ₃ 鋼	4-2	5.22	3.0922	3.1001	0.0079	1.52
FMS鋼	5-2	5.22	3.1106	3.1186	0.0080	1.53
SUS316鋼	6-2	5.22	3.1465	3.1469	0.0004	0.07
インコネル625合金	7-2	5.19	3.2529	3.2532	0.0003	0.05
ハステロイG-30合金	8-2	5.23	3.2512	3.2515	0.0003	0.06

表5 試験片重量変化測定結果(600時間後)

鋼種	TP.No.	表面積 (cm ²)	試験片重量(g)			酸化増量 (mg/cm ²)
			試験前	600Hr後	重量変化	
12Cr-2W-0.26Ti-0.23Y ₂ O ₃ 鋼	1-3	5.22	3.0949	3.1062	0.0113	2.16
9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y ₂ O ₃ 鋼	2-3	5.22	3.1020	3.1128	0.0108	2.07
9Cr-2W-0.2Ti鋼	3-3	5.23	3.1063	3.1176	0.0113	2.16
9Cr-2W-0.3Ti-0.45Y ₂ O ₃ 鋼	4-3	5.22	3.0898	3.1013	0.0115	2.21
FMS鋼	5-3	5.22	3.1078	3.1189	0.0111	2.13
SUS316鋼	6-3	5.23	3.1462	3.1469	0.0007	0.13
インコネル625合金	7-3	5.19	3.2698	3.2703	0.0005	0.09
ハステロイG-30合金	8-3	5.22	3.2510	3.2515	0.0005	0.09

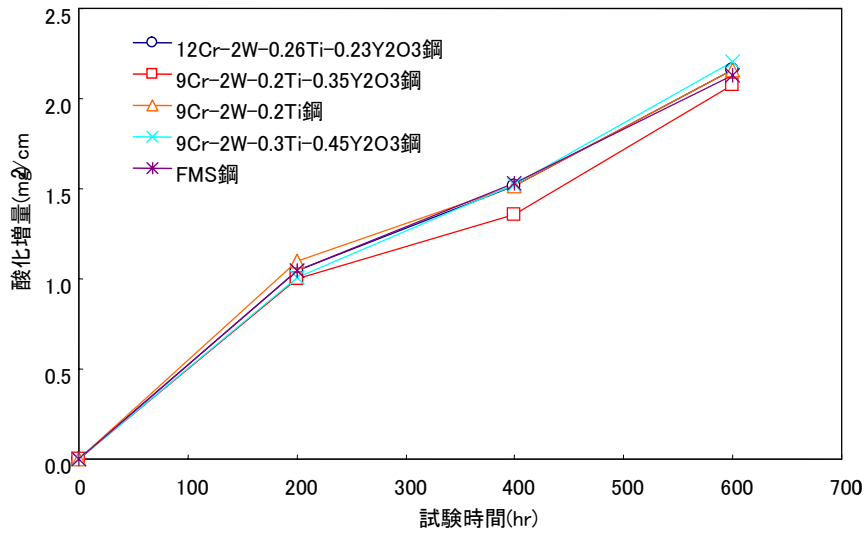


図4：超臨界水中における9Cr, 12Cr-ODS鋼の腐食増量 (mg/cm^2) の時間依存性。従来のフェライト・マルテンサイト鋼とほぼ同様の挙動を示している。

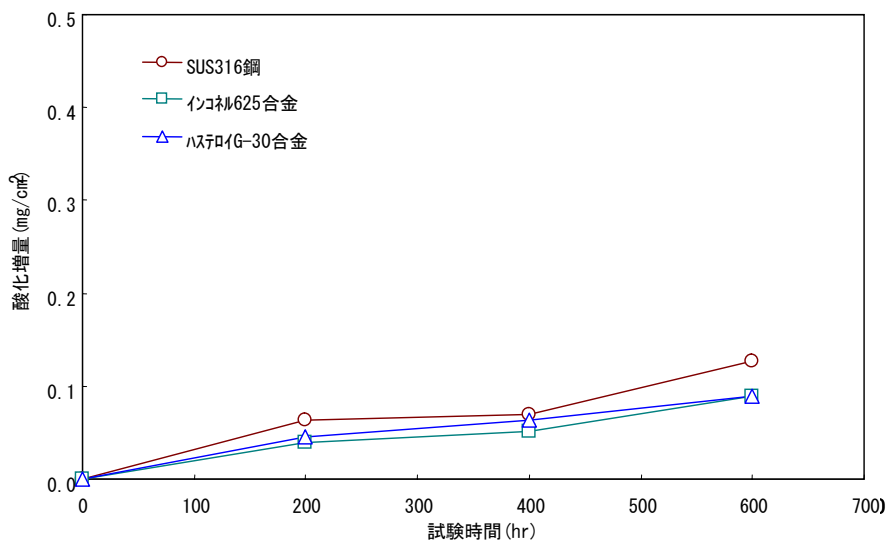


図5：超臨界水中における比較材の腐食増量 (mg/cm^2) の時間依存性。従来のフェライト・マルテンサイト鋼のほぼ1/20と小さい

得られた結果から、超臨界水（510℃、25MPa）中における ODS 鋼の耐食性は通常のフェライト・マルテンサイト鋼とほぼ同等であることがわかる。腐食増量は、ステンレス鋼の約 20 倍に匹敵している。図 6 は、腐食増量を比較した材料のクロム濃度に対してプロットした図であり、クロム濃度が 20%を超えると腐食増量が顕著に低下することを示している。

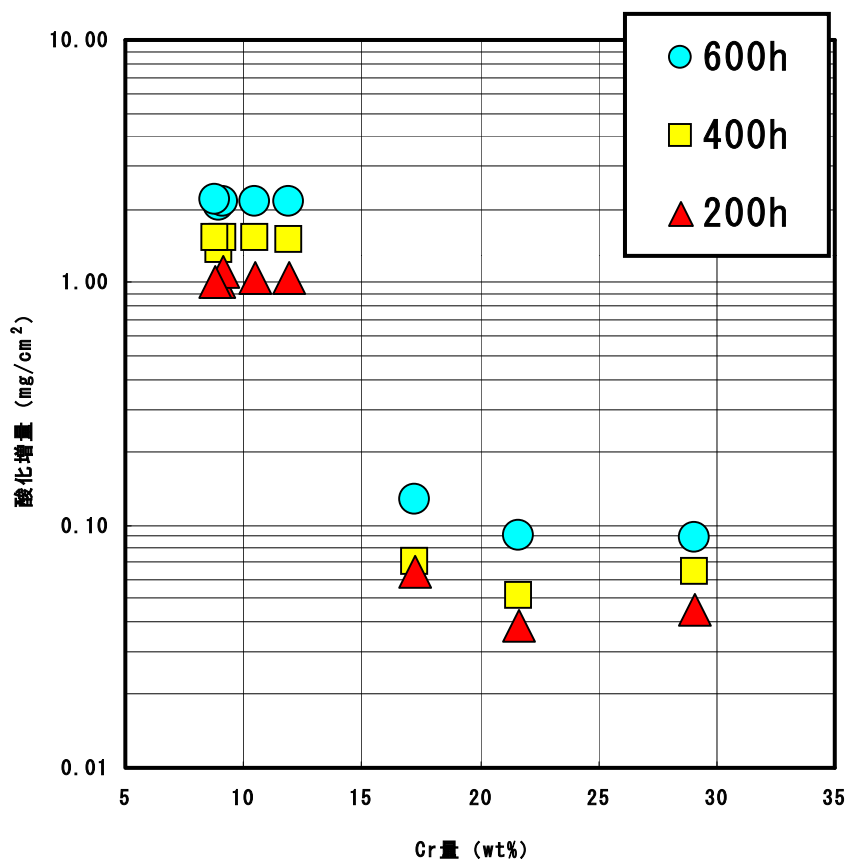


図 6 510℃、25MPa超臨界水中の腐食量とCr量の関係

3.2.3. 大気中における耐酸化性

700℃の大気中における酸化挙動を比較した結果、以上の結果とは異なる結果が得られている。すなわち、水環境下の腐食増量やアノード分極挙動の調査からは、9Cr、12Cr-ODS 鋼の耐食性はステンレス鋼に劣ることが判明した。しかし、700℃の大気中では 9Cr、12Cr-ODS 鋼の酸化速度はステンレス鋼に比べきわめて小さく、優れた耐酸化性を有することが判明している。

4. 今後の計画

4.1. 既存材料の耐食性評価

高燃焼度化に伴う材料要件のうち、耐食性に関連する以下の項目を調べ、既存の ODS 鋼の軽水炉高燃焼度燃料被覆管としての限界を明らかにする。実験結果に基づき、燃焼度を 60GWD/t 以上とした場合の被覆管材料としての要件を満足するための具体的な開発目標を設定する。

- 1) 腐食増量の時間依存性（腐食速度、予測）
- 2) 応力腐食割れ感受性評価
- 3) 水素脆化割れ感受性評価

4.2. 改良指針

設定された目標の達成のため、1) 合金設計、2) 製造プロセス、3) 表面改質の各手法に基づき、以下の項目について検討する。

- 1) 合金設計：合金元素濃度の影響
- 2) 製造プロセス：微細組織形状分布、結晶粒径
- 3) 表面改質：傾斜機能付与

4.3. 改良材料の耐食性評価

改良指針に基づき作製した改良材料の耐食性評価および強度特性評価試験を行う。強度特性評価試験として、以下の試験を行う。

- 1) 引張試験
- 2) 衝撃試験
- 3) クリープ試験

4.4. 判定基準の策定

各燃焼度レベルに対応した材料特性の要件と判定基準を策定し、既存材料および改良材料の高燃焼度被覆管としての適性を判定する。