



酸化物分散強化型フェライト鋼の硝酸溶解特性評価

－マルテンサイト系 9Cr-ODS 鋼の評価－

Dissolutions of Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steels
in Various Nitric Acid Solutions
- Martensitic 9Cr-ODS Steels -

井上 賢紀 池内 宏知 竹内 正行 小山 真一
須藤 光雄

Masaki INOUE, Hiroto IKEUCHI, Masayuki TAKEUCHI, Shinichi KOYAMA
and Mitsuo SUTO

次世代原子力システム研究開発部門
燃料材料技術開発ユニット

Fast Reactor Fuels and Materials Technology Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

March 2012

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

酸化物分散強化型フェライト鋼の硝酸溶解特性評価
- マルテンサイト系 9Cr-ODS 鋼の評価 -

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 燃料材料技術開発ユニット

井上 賢紀、池内 宏知⁺¹、竹内 正行⁺¹、小山 真一⁺²、須藤 光雄^{*1}

(2011 年 12 月 22 日 受理)

先進湿式法再処理システムにおける燃料溶解には硝酸水溶液が適用されるため、高速増殖炉サイクル実用化段階の燃料被覆管の基準材料であるマルテンサイト系酸化物分散強化型フェライト鋼「9Cr-ODS 鋼」の硝酸溶解特性を評価した。

9Cr-ODS 鋼はクロム濃度が比較的低いため、溶解速度の抑制には高濃度硝酸あるいは溶存金属イオンによる不働態皮膜の安定化効果が必要であることがわかった。また、連続溶解槽のなかでは、剪断片と接触する硝酸水溶液のなかの硝酸濃度と溶存金属イオン濃度が連続的に変化しており、不働態皮膜の安定化効果が持続する傾向があることがわかった。

大洗研究開発センター（駐在）：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+1 次世代原子力システム研究開発部門 再処理技術開発ユニット

+2 大洗研究開発センター 燃料材料試験部

※1 技術開発協力員（大洗研究開発センター 燃料材料試験部）

**Dissolutions of Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steels in Various Nitric Acid
Solutions
-Martensitic 9Cr-ODS Steels-**

Masaki INOUE, Hirotomo IKEUCHI⁺¹, Masayuki TAKEUCHI⁺¹,
Shinichi KOYAMA ⁺² and Mitsuo SUTO^{※1}

Fast Reactor Fuels and Materials Technology Development Unit,
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashi ibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 22, 2011)

Corrosion resistance of fuel pin cladding tube materials is one of the most important properties to design advanced aqueous reprocessing process. The martensitic oxide dispersion strengthened ferritic steel, named as "9Cr-ODS" steel, is the primary candidate material for high burnup fuel pin cladding tube in fast reactor cycle system.

Because 9Cr-ODS steel contains lower chromium than stainless steels, oxidizing species such as high nitric acid concentrations and metallic ions need to reduce its corrosion rate. In nitric acid medium in contact with 9Cr-ODS steel, both nitric acid and metallic ions concentrations gradually change and stabilize protective passive layer effectively in rotary drum type continuous dissolvers.

Keywords: Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steel, Fast Reactor Cycle, Fuel Pin Cladding Tube, Corrosion Resistance, Passivity, Reprocessing, PUREX Process, Nitric Acid Solution, Metallic Ion, Corrosion Potential

+1 Advanced Reprocessing Technology Development Unit, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

+2 Fuels and Materials Department, Oarai Research and Development Center

※1 Collaborating Engineer (Fuels and Materials Department, Oarai Research and Development Center)

目次

1. 序論	1
1.1 使用済燃料の再処理	1
1.2 技術課題	2
1.3 目的	2
2. 試験方法	3
2.1 供試材	3
2.2 浸漬溶解試験	3
2.3 電気化学試験	5
3. 試験結果と考察	6
3.1 9Cr-ODS 鋼の硝酸溶解特性	6
3.2 高クロム系 ODS 鋼と比較材料の硝酸溶解特性	8
3.3 モデル合金の硝酸溶解特性	8
4. 溶解工程における硝酸溶解特性評価	10
4.1 連続溶解槽における溶解速度の上限値の予備的検討	10
4.2 ハル洗浄槽における溶解速度の上限値の予備的検討	10
5. 化学成分等の見直しによる硝酸溶解特性の改善方策の検討	11
5.1 9Cr-ODS 鋼の改良	11
5.2 12Cr-ODS 鋼への転換	12
6. 結論	13
謝辞	14
参考資料・参考文献	15

Contents

1. Introduction----- 1

 1.1 Reprocessing Methods----- 1

 1.2 Technical Issues----- 2

 1.3 Objectives----- 2

2. Experimental Procedure----- 3

 2.1 Specimens----- 3

 2.2 Immersion Tests----- 3

 2.3 Electrochemical Tests----- 5

3. Results and Discussion----- 6

 3.1 Corrosion Behavior of 9Cr-ODS Steels----- 6

 3.2 Corrosion Behavior of High Chromium ODS Steels and Stainless Steels----- 8

 3.3 Corrosion Behavior of Model Alloys----- 8

4. Applicability for Advanced Aqueous Reprocessing System----- 10

 4.1 Estimation of Corrosion Rate in Continuous Dissolvers----- 10

 4.2 Estimation of Corrosion Rate in Hull Rinsing----- 10

5. Modifications of Alloying Designs----- 11

 5.1 9Cr-ODS Steels----- 11

 5.2 12Cr-ODS Steels----- 12

6. Conclusions----- 13

Acknowledgements----- 14

References----- 15

表リスト

表 1.1	ODS 鋼の材料仕様：化学成分・金相・最終熱処理・加工	16
表 1.2	各種炉心材料の材料仕様：化学成分・金相・最終熱処理・加工	17
表 2.1	供試材の基本仕様：9Cr-ODS 鋼	18
表 2.2	供試材の化学分析値 (mass%)：9Cr-ODS 鋼	19
表 2.3	供試材の基本仕様：9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼	20
表 2.4	供試材の化学分析値 (mass%)：9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼	21
表 2.5	比較試料 (PNC-FMS と PNC316) の材料仕様：化学成分・冷間加工度・最終熱処理	22
表 2.6	供試材の基本仕様：3 元系モデル合金と 5 元系モデル合金	23
表 2.7	供試材の化学分析値 (mass%)：モデル合金	24
表 2.8	溶解試験と電気化学試験の試験マトリックス：9Cr-ODS 鋼	25
表 2.9	溶解試験と電気化学試験の試験マトリックス：9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼	26
表 2.10	溶解試験と電気化学試験の試験マトリックス：モデル合金	27
表 2.11	連続溶解槽における遊離硝酸濃度と溶存金属濃度の解析例	28
表 2.12	模擬溶解液の調整	28
表 2.13	溶解試験終了後における実溶解液の分析結果	29
表 3.1	純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M11)	30
表 3.2	純硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼相当 (Mm13)	31
表 3.3	純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (Mm14)	32
表 3.4	純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (ML15B)	32
表 3.5(1)	純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M16 その 1)	33
表 3.5(2)	純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M16 その 2)	34
表 3.6(1)	純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (Mm16T その 1)	35
表 3.6(2)	純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (Mm16T その 2)	36
表 3.7	純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M16M 素管、M16A 被覆管、M16B 被覆管)	37
表 3.8	純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼相当 (KB22)	38
表 3.9	純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (MPT3)	38
表 3.10	純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M19 素管)	39
表 3.11(1)	純硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M19L その 1)	40
表 3.11(2)	純硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M19L その 2)	41
表 3.12(1)	純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (Mm19L その 1)	42
表 3.12(2)	純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (Mm19L その 2)	43
表 3.13	純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼相当 (9CN(No.1))	43
表 3.14	9Cr-ODS 鋼の硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液における溶解速度データ	44

表 3.15 9Cr-ODS 鋼の硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液における溶解速度データ（浸漬時間依存性データ）	45
表 3.16 9Cr-ODS 鋼・12Cr-ODS 鋼・5 元系モデル合金の純硝酸水溶液における腐食電位測定結果：30℃	46
表 3.17 9Cr-ODS 鋼のなかの M19L の純硝酸水溶液と模擬溶解液における腐食電位測定結果	47
表 3.18 硝酸水溶液の溶液電位の測定結果	48
表 3.19(1) 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼改良試作材（その 1）	49
表 3.19(2) 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼改良試作材（その 2）	50
表 3.19(3) 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼改良試作材（その 3）	51
表 3.19(4) 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼改良試作材（その 4）	52
表 3.20 純硝酸水溶液への溶解速度：12Cr-ODS 鋼	52
表 3.21(1) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：PNC-FMS（19FK その 1）	53
表 3.21(2) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：PNC-FMS（19FK その 2）	54
表 3.22(1) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：PNC316（LK051 その 1）	55
表 3.22(2) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：PNC316（LK051 その 2）	56
表 3.23 9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼の硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液における溶解速度データ（mm/y）	57
表 3.24 PNC-FMS と PNC316 の硝酸水溶液と模擬溶解液における溶解速度データ（浸漬時間依存性データ）	58
表 3.25 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 1	59
表 3.26 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 2	60
表 3.27 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 3	61
表 3.28 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 4	62
表 3.29 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 5	63
表 3.30 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 6	64
表 3.31 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 7	65
表 3.32 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 8	66
表 3.33 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 9	67
表 3.34 硝酸水溶液への溶解速度：モデル合金その 10	68
表 3.35 3 元系モデル合金の純硝酸水溶液と模擬溶解液における溶解速度データ（mm/y）	69
表 3.36 3 元系モデル合金の純硝酸水溶液と模擬溶解液における腐食電位測定結果	70
表 3.37 3 元系モデル合金と 5 元系モデル合金の純硝酸水溶液と模擬溶解液における溶解速度データ（mm/y）	71
表 4.1 連続溶解槽において剪断片に接触する硝酸水溶液の溶液電位の予想	72
表 4.2 各種被覆管材料（母材＝製造まま材）に対する連続溶解槽における溶解速度の期待値	73
表 5.1 9Cr-ODS 鋼の実効クロム濃度に及ぼすチタン、過剰酸素、炭素、窒素の効果	74

図リスト

図 1.1	燃料集合体と燃料ピンの概略構造	75
図 1.2	先進湿式再処理プロセス (抜粋)	75
図 1.3	連続溶解槽内でのせん断片および溶液の流れ	76
図 2.1	浸漬溶解試験の模式図と試験状況	77
図 2.2	電気化学試験に使用した試料と装置	77
図 3.1	9Cr-ODS 鋼の純硝酸水溶液への浸漬前後の外観と横断面光学顕微鏡組織の例	78
図 3.2	9Cr-ODS 鋼の純硝酸水溶液における溶解速度に及ぼす硝酸濃度の影響 (温度 95°C)	78
図 3.3	9Cr-ODS 鋼の純硝酸水溶液における溶解速度に及ぼすクロム濃度の影響 (温度 95°C、硝酸濃度 3.5mol/L、浸漬時間 ≤ 1hr)	79
図 3.4	9Cr-ODS 鋼の模擬溶解液と実溶解液における溶解速度 (温度 95°C、浸漬時間 4hr)	79
図 3.5	9Cr-ODS 鋼の純硝酸水溶液における溶解速度に及ぼす浸漬時間の影響 (温度 95°C、硝酸濃度 3.5mol/L)	80
図 3.6	9Cr-ODS 鋼 (KB22 と M16A) の純硝酸水溶液における溶解速度に及ぼす焼き戻し温度の影響 (温度 95°C、硝酸濃度 3.5mol/L)	80
図 3.7	9Cr-ODS 鋼 : M11 の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	81
図 3.8	9Cr-ODS 鋼 : Mm13 の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	81
図 3.9	9Cr-ODS 鋼 : Mm14 の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	82
図 3.10	9Cr-ODS 鋼 : ML15B の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	82
図 3.11	9Cr-ODS 鋼 : Mm16T の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	83
図 3.12	9Cr-ODS 鋼 : M16M の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	83
図 3.13	9Cr-ODS 鋼 : M16A の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	84
図 3.14	9Cr-ODS 鋼 : M16B の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	84
図 3.15	9Cr-ODS 鋼 : KB22 の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	85
図 3.16	9Cr-ODS 鋼 : MPT3 の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	85
図 3.17	9Cr-ODS 鋼 : M19L 被覆管の分極曲線 (温度 30°C、1mol/L 純硝酸水溶液)	86
図 3.18	9Cr-ODS 鋼 : M19L 被覆管の分極曲線 (温度 30°C、2mol/L 純硝酸水溶液)	86
図 3.19	9Cr-ODS 鋼 : M19L 熱間押出棒の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	87
図 3.20	9Cr-ODS 鋼 : M19L 被覆管 (4 回冷間圧延) の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	87
図 3.21	9Cr-ODS 鋼 : M19L 被覆管の分極曲線 (温度 30°C、溶液 5mol/L 純硝酸水溶液)	88
図 3.22	9Cr-ODS 鋼 : M19L 被覆管の分極曲線 (温度 30°C、溶液 8mol/L 純硝酸水溶液)	88
図 3.23	9Cr-ODS 鋼 : 9CN/No.1 の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	89
図 3.24	9Cr-ODS 鋼 : M19L 熱間押出棒の分極曲線 (温度 60°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	89

図 3.25 9Cr-ODS 鋼 : M19L 熱間押出棒の分極曲線 (温度 90°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	90
図 3.26 9Cr-ODS 鋼 : M19L 熱間押出棒の分極曲線 (温度 95°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液と高濃度模擬溶解液 A)	90
図 3.27 9Cr-ODS 鋼 : M19L 熱間押出棒の分極曲線 (温度 95°C、5mol/L 純硝酸水溶液)	91
図 3.28 9Cr-ODS 鋼 : M19L 熱間押出棒の分極曲線 (温度 95°C、8mol/L 純硝酸水溶液と中濃度模擬溶解液 B)	91
図 3.29 9Cr-ODS 鋼 : M19L 熱間押出棒の分極曲線 (温度 95°C、10mol/L 純硝酸水溶液と低濃度模擬溶解液 C)	92
図 3.30 9Cr-ODS 鋼 : M19L 熱間押出棒の分極曲線 (温度 95°C、12mol/L 純硝酸水溶液)	92
図 3.31 9Cr-ODS 鋼 (M19L) の純硝酸水溶液における腐食電位と硝酸濃度との関係 (温度 95°C)	93
図 3.32 9Cr-ODS 鋼 : M19L 中間製品 1CR の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	93
図 3.33 9Cr-ODS 鋼 : M19L 中間製品 2CR の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	94
図 3.34 9Cr-ODS 鋼 : M19L 中間製品 3CR の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	94
図 3.35 不働態化と分極曲線との関係	95
図 3.36 9Cr-ODS 鋼改良試作材の純硝酸水溶液における溶解速度 (温度 95°C、浸漬時間 4hr)	95
図 3.37 12Cr-ODS 鋼 : F14 の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	96
図 3.38 3 元系モデル合金の純硝酸水溶液における溶解速度 (温度 95°C、浸漬時間 4hr)	96
図 3.39 3 元系モデル合金 : 9Cr-0Ni の分極曲線 (温度 95°C、10mol/L 純硝酸水溶液と低濃度模擬溶解液 C)	97
図 3.40 3 元系モデル合金 : 6Cr-0Ni の分極曲線 (温度 95°C、10mol/L 純硝酸水溶液と低濃度模擬溶解液 C)	97
図 3.41 3 元系モデル合金 : 4Cr-0Ni の分極曲線 (温度 95°C、10mol/L 純硝酸水溶液と低濃度模擬溶解液 C)	98
図 3.42 9Cr-ODS 鋼と 3 元系モデル合金の溶解速度と腐食電位との関係 (温度 95°C)	98
図 3.43 5 元系モデル合金 : 9Cr-0.13C-0.00Ti の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	99
図 3.44 5 元系モデル合金 : 9Cr-0.13C-0.10Ti の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	99
図 3.45 5 元系モデル合金 : 9Cr-0.13C-0.20Ti の分極曲線 (温度 30°C、3.5mol/L 純硝酸水溶液)	100

1. 序論

1.1 使用済燃料の再処理

1.1.1 FaCT 主概念における燃料種類と炉心構成材料

高速増殖炉サイクル実用化研究開発プロジェクト（以下、FaCT と略す）では、「酸化物燃料（以下、燃料と略す）」と「先進湿式再処理」の組み合わせが主概念として採用されている¹⁾²⁾。先進湿式再処理における燃料溶解には、従来の湿式再処理プロセス（PUREX）と同様、硝酸水溶液が適用される。したがって、燃料ピン構成材料（被覆管、端栓、ラッピングワイヤ、スリーブ管、中間端栓中子等）の硝酸溶解特性に留意が必要になる。

FaCT における炉心燃料集合体の概略構造¹⁾を図 1.1 に示す。燃料ピンの被覆管と上部下部端栓には酸化物分散強化型フェライト鋼（以下、ODS 鋼と略す）が採用されている。ODS 鋼には表 1.1 のように 9Cr-ODS 鋼（マルテンサイト系）と 12Cr-ODS 鋼（再結晶フェライト系）の 2 種類がある³⁾。FaCT は前者を基準材料に採用している。ラッピングワイヤには、高強度フェライト/マルテンサイト鋼（以下、PNC-FMS と略す）が採用されている。なお、炉心燃料集合体とブランケット燃料集合体の構成材料は共通である。

1.1.2 先進湿式再処理²⁾

再処理工場に輸送された使用済燃料集合体は、前処理工程においてラッパ管が除去された後、燃料ピンは 10mm 程度に短尺剪断される。燃料ピン剪断片（以下、剪断片と略す）は連続溶解槽に投入され、内包する炉心燃料とブランケット燃料の溶解のために滞留し、溶け残った被覆管はハルとして回収される（図 1.2）。ハルはハル洗浄槽に送られ、付着している燃料成分が溶解回収される。

図 1.3 のように、連続溶解槽における剪断片投入口は燃料溶解液の回収部付近、ハル回収部は硝酸溶液の供給口付近にある。連続溶解槽は回転ドラム式と呼ばれ、投入された剪断片は硝酸水溶液と向流接触ながら、ハル回収部に向かって一定速度で移動する。供給される純硝酸水溶液の濃度は 12mol/L 程度である。一方、回収される溶解液の硝酸濃度は 3.5mol/L 程度に低下するが、500gHM/L 程度の高濃度の金属イオン（ウラン、プルトニウム、核分裂生成物等）を溶存する。液温は 95°C、滞留時間は 4 時間が想定されている。

ハル洗浄槽の詳細構造は設計検討中である。洗浄には純硝酸水溶液が使用されると予想されるが、硝酸濃度、槽内の滞留時間、液温等の詳細は検討段階にある。なお、ハル洗浄後の硝酸水溶液の取扱方法としては、連続溶解槽への供給、清澄工程への混合等が検討されている。

1.1.3 燃料ピン構成材料が過大に溶解した場合の再処理プロセスへの影響

溶解液のなかの被覆管やラッピングワイヤに由来する溶出成分は、再処理プロセスの搭槽類を構成するステンレス鋼からの溶出成分（鉄、クロム、ニッケル等）と渾然一体となり、最終的には高レベル放射性廃液に移行する。被覆管やラッピングワイヤの溶解量が過大になると、高レベル放射性廃液量が増量し、ガラス固化体発生量の増大の懸念が生じる。

溶解液のなかの被覆管構成成分の濃度が増大すると、個別プロセス（溶解、清澄、晶析、抽出、マイナーアクチニド分離等）の成立性に懸念が生じる可能性がある。例えば、除染係数の低下による中間製品の不純物濃度の増大、分配係数の変化、スラッジ発生（増量）等の可能性がある。成立性に問題が出る場合、個別プロセスの改良、被覆管構成成分の分離回収プロセスの追加等が必要になり、再処理システムの経済性に大きく影響する。

1.2 技術課題

1.2.1 材料条件

高速実験炉「常陽」や高速増殖原型炉「もんじゅ」の運転用燃料の被覆管にはオーステナイト系ステンレス鋼が現状採用されている（表 1.2）⁴⁵⁾。また、PNC-FMS も表 1.2 のようにステンレス鋼に分類される濃度のクロムを含有する⁶⁾。

一方、9Cr-ODS 鋼の現行化学成分仕様におけるクロム濃度の範囲は 8.6～9.4mass%、ノミナルの値は 9.0mass%と規定されている³⁾。クロム濃度が 11mass%未満の非ステンレス鋼と再処理プロセスとの組み合わせは従来想定されておらず、9Cr-ODS 鋼の硝酸溶解特性の試験評価が必要である。硝酸溶解特性の観点からは、9Cr-ODS 鋼の優れた製造性と強度特性を維持しながらクロム濃度を高めに変更する高クロム系 ODS 鋼が選択肢になりうる。また、12Cr-ODS 鋼は、高クロム系 ODS 鋼でもあり、9Cr-ODS 鋼と並行して開発が進んでおり、有望な選択肢になる可能性がある。

1.2.2 溶液条件

先進湿式再処理は、溶解工程から払い出す溶解液のなかの遊離硝酸濃度を 4mol/L 程度に保ちながら高濃度溶解（500gHM/L 程度）を実現するため、供給する純硝酸水溶液の濃度を 12mol/L 程度に高めている。また、溶解液のなかのプルトニウム、ルテニウム（核分裂生成物）はステンレス鋼の溶解速度を増大させる元素として知られている。高濃度溶解を指向すると、それらの元素が従来よりも高濃度に含まれることになる。一方、連続溶解槽における液温は、構成材料の腐食を抑制するため、95℃に低減されている。

9Cr-ODS 鋼に限らずクロム含有鋼の硝酸溶解特性は、クロムを主成分とする不動態皮膜の生成とその安定性に強く依存する。したがって、材料条件だけでなく、硝酸濃度、溶存金属イオンの種類と濃度、温度等の溶液条件に着目した試験評価が必要である。

1.3 目的

9Cr-ODS 鋼の硝酸水溶液における溶解挙動を実験的に把握し、溶解工程における被覆管の溶解量とそれによる溶解液中の被覆管構成成分濃度（鉄、クロム等）の評価に資することを目的とする。ただし、今回の評価は、被覆管の母材（製造まま材）の硝酸溶解特性を対象とし、炉内使用による変化、工程要因（切り粉、擦過）等の検討は今後の課題とする。

- ① 9Cr-ODS 鋼、高クロム系 ODS 鋼等を供試材とし、純硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液における浸漬溶解試験と電気化学試験に基づき、溶解速度に及ぼす硝酸濃度・溶存金属イオン・浸漬時間の影響を評価する。
- ② クロム、チタン等の添加量をパラメータにしたモデル合金等の試験データも取得とし、硝酸溶解特性に及ぼす実効的なクロム濃度の影響を把握する。
- ③ 連続溶解槽の想定条件を前提に溶解速度上限値を試算する。
- ④ 化学成分の見直しによる 9Cr-ODS 鋼の溶解速度抑制方を提案する。

2. 試験方法

2.1 供試材

2.1.1 9Cr-ODS 鋼

9Cr-ODS 鋼の被覆管と棒材の計 13 ロットを対象にした。表 2.1 に基本仕様、表 2.2 に化学分析結果をまとめて示す。また、一部ロット (M16M と KB22) に対しては、実効クロム濃度の影響の検討のため、焼き戻し温度を 600~800°C の範囲で変化させた試料も調製した。さらに、M19L に対しては、製管加工の影響の検討のため、熱間押出直後と 1~3 回冷間加工後の中間製品状態 (それぞれ、熱間押出棒、中間製品 1CR、中間製品 2CR、中間製品 3CR と呼称) の試料も採取した。

2.1.2 高クロム系 ODS 鋼と比較材料

9Cr-ODS 鋼のノミナルのクロム濃度を現行の 9mass% から 9.5mass% と 10mass% に高めた 9Cr-ODS 鋼改良試作材 (棒材) を 10 ロット製作した。さらに、12Cr-ODS 鋼 (被覆管) の F13 と F14 の 2 ロットも供試材とした。

9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼について、表 2.3 に基本仕様、表 2.4 に化学分析結果をまとめて示す。

ラッピングワイヤに使用される高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) に加え、「常陽」MK-II 炉心と「もんじゅ」の燃料被覆管である SUS316 相当鋼 (PNC316) を比較材料とした。PNC-FMS は鋳塊からの圧延によって板に加工した。また、PNC316 は丸棒材 (直径 22mm) を原料とした。表 2.5 に化学成分、冷間加工度、最終熱処理等の製造条件をまとめて示す。

2.1.3 モデル合金

9Cr-ODS 鋼には、マルテンサイト変態導入のための炭素や酸化物粒子の微細化のためのチタンが添加されており、実効的なクロム濃度 (以下、実効クロム濃度と略す) に影響していると考えられる。そこで、硝酸溶解特性に及ぼす実効クロム濃度の影響を把握するため、クロム、炭素、チタンの濃度をパラメータとするモデル合金 (15 ロット) を使用した。

モデル合金には 2 種類あり、一つは Fe-Cr-2W の 3 元系フェライト鋼であり、もう一つは Fe-9Cr-2W-0.13C-Ti の 5 元系マルテンサイト鋼である。タングステン濃度は 2mass% に固定した。表 2.6 に基本仕様、表 2.7 に化学分析結果をまとめて示す。

3 元系合金はクロム濃度を 2~12mass% の範囲で変化させた。クロム濃度の影響を直接的に把握するため、炭素とチタンは添加しなかった。5 元系合金は、クロム濃度と炭素濃度をそれぞれ 9mass% と 0.13mass% に固定し、チタン濃度を 0~0.2mass% の範囲で変化させた。

モデル合金は、約 200g のボタンインゴットをアーク溶解し、厚さ約 4mm×幅約 60mm×長さ約 125mm に熱間圧延した後、1050°C×1hr×急冷の焼ならし熱処理を施した。また、5 元系合金はマルテンサイト系であるため、780°C×1hr×水冷の焼き戻し処理も施した。

2.2 浸漬溶解試験

2.2.1 試験マトリックス

供試材 (試料)、水溶液の組成、温度、時間の組み合わせを表 2.8~表 2.10 にまとめて示す。

液温と浸漬時間は連続溶解槽の運転条件を参考とし、95℃と4時間の組み合わせを標準にした。また、一部試験は温度と時間もパラメータとした。

2.2.2 溶液：純硝酸水溶液、模擬溶解液、実溶解液

純硝酸水溶液は、溶解特性に及ぼす硝酸濃度の影響等を検討するため、1、2、3.5、5、8、10、12mol/Lの7種類とした。

模擬溶解液は、連続溶解槽における溶液条件を考慮して調整した。剪断片に接触する硝酸水溶液は、溶存金属イオンは次第に薄く、遊離硝酸濃度は逆に濃くなり、連続的に変化するため、解析コードが整備されている⁷⁾。連続溶解槽における溶存金属イオンと遊離硝酸の濃度変化の予測解析例を表2.11に示す。表2.11と図1.3のように、連続溶解槽は8ステージあり、溶存金属イオンは最初の5ステージで500gHM/Lから数十gHM/L程度に薄くなり、最後の3ステージはほぼ供給された12mol/Lの純硝酸水溶液に近くなる。そこで、模擬溶解液は、第1ステージ、第2ステージ、第3ステージをそれぞれ模擬した高濃度、中濃度、低濃度の3種類を調整した。実溶解液には多数種類の元素が含まれており、ステンレス鋼の溶解速度への影響の大きな元素のなかから適切な元素を溶存金属イオンとして選択し、濃度を設定する必要がある。過去の試験例によると、アクチノイド元素のなかで最も影響の大きなプルトニウムには酸化還元電位の近いバナジウム、核分裂生成物のなかで最も影響が大きなルテニウムが選定されている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。



バナジウム濃度は、過去にバナジウム濃度とプルトニウム濃度との影響度を比較した経験⁸⁾をもとにモル比で4分の1になるように設定した。また、ルテニウム濃度は、リサイクル機器試験施設の設計基準燃料に基づく「ORIGEN-2」計算値をもとに設定した。表2.12に模擬溶解液の調合割合をまとめて示す。

実溶解液は、「常陽」MK-III炉心燃料の溶解液（遊離硝酸濃度：4.8mol/L、溶存金属イオン濃度：264gHM/L）を使用した。溶解試験後の実溶解液の分析結果を表2.13に示す。

2.2.3 試験方法

試料はガラスフラスコ中央に配置し、フラスコ底部を常時攪拌した状態で浸漬した（図2.1）。溶液の温度はフラスコに挿入した温度計を監視し、所定温度の2℃以内に維持した。

純硝酸水溶液と模擬溶解液への浸漬試験における比液量は、試料の溶解による酸濃度変化の影響を抑制するために20cm³/cm²以上にした。

実溶解液への浸漬試験は実機環境に近い0.5cm³/cm²程度にした。また、実溶解液への浸漬後に8mol/Lの純硝酸水溶液への再浸漬（4時間）を追加し、不動態皮膜の安定性を観察した。

試料は、被覆管から調整する場合は長さ20～30mm程度に切断した後に半割りあるいは輪切りの状態とした。また、棒材から調整する場合は円板の状態とした。さらに、板材から採取する場合は、縦20mm×横30mm×厚さ約3mmを標準にした。

浸漬溶解試験の前に#400以上の研磨紙による研磨仕上げを施し、表面状態を調整した。ただし、一部試料は、研磨処理は施さず、受け入れままとした。

浸漬による溶解速度（mm/y）は浸漬前後の重量変化、試料表面積、密度等をもとに(2-1)式か

ら算出した。

$$\text{溶解速度} = \frac{365 \times 24 \times 1000 \times (W_B - W_A)}{\rho S t} \quad (2-1)$$

- W_B : 浸漬前重量 (g)
 W_A : 浸漬後重量 (g)
 ρ : 試料の密度 (g/cm^3) (9Cr-ODS 鋼 : 7.83g/cm^3)
 S : 試料の全表面積 (mm^2)
 t : 浸漬時間 (hr)

浸漬溶解試験のなかの実溶液を使用する試験は、東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所の高レベル放射性物質研究施設のホットセル内で行った。

2.3 電気化学試験

2.3.1 試験マトリックス

腐食電位測定とアノード分極曲線取得は、表 2.8～表 2.10に示す供試材・溶液・温度の組み合わせに対して行った。

なお、純硝酸水溶液 6 種類 (1、3.5、5、8、10、12mol/L) と模擬溶解液 3 種類に対し、95℃における溶液電位を測定した。電極には白金を使用し、浸漬電位を 10 分間にわたって測定した。

2.3.2 試料調整

試料は、浸漬試験用と同様の方法により採取した。なお、板材から採取する場合は、縦約 15mm×横約 20mm を標準にした。

試料の両面を湿式研磨 (#600) した後、φ1.5mm のターミナルエナメル銅線を半田付けした。測定面を再び湿式研磨 (#600) し、アルコール洗浄後に乾燥した。測定面積約 1cm²を残して裏面・外周・半田接続部をシリコンシーラント (信越化学工業株式会社製 KE45T) を用いて絶縁被覆し、試料電極とした。

2.3.3 電位測定とアノード分極曲線の取得

腐食電位と分極特性の測定は、約 200mL の試験溶液を注入した電気化学的特性の測定用ガラスセル中で行った。ポテンショスタット (東方技研株式会社製) と電気学的特性測定ソフトをロードしたコンピューターを用いて腐食電位と分極特性を測定した (図 2.2)。なお、参照電極には飽和カロメルを使用した。

試料電極を試験セルに浸漬後、直ちに腐食電位の測定を開始した。ただし、30～90℃における腐食電位は 1 分間の浸漬では不動態皮膜が十分生成しないため、分極曲線から読み取ることにした。一方、95℃における腐食電位は、定常状態到達までの時間が短いため、電極の浸漬後 51～60 秒の測定値を算術平均した値を用いた。腐食電位の測定を終了した後、直ちに腐食電位から約 300mV 卑な電位からアノード方向に 50mV/min の電位掃引速度で 1200mV(SCE)までの範囲において分極特性の測定を行った。電位の掃引速度は 30℃では 30mV/min、95℃では 50mV/min に上昇させて表面被覆シリコンシーラントの酸化分解を回避した。なお、2 試料による繰り返し測定を行った。

試験溶液の温度はヒータルブオイルを注入した恒温槽の温度を±2℃以内に制御した。

3. 試験結果と考察

3.1 9Cr-ODS 鋼の硝酸溶解特性

3.1.1 9Cr-ODS 鋼の浸漬溶解特性

3.1.1.1 純硝酸水溶液における溶解速度（硝酸濃度の影響）

表 3.1～表 3.13 に 9Cr-ODS 鋼 13 ロットの純硝酸水溶液における溶解速度データ（表面仕上げ、温度、浸漬時間、溶液等の情報を含む）をロット毎に示す。

浸漬溶解試験に供した試料の外観は、浸漬前は全て金属光沢であった。一方、浸漬後は、活性溶解（溶解速度 $> 100\text{mm/y}$ ）の場合は金属光沢を呈し、安定溶解（溶解速度 $< 100\text{mm/y}$ ）の場合は黒褐色への変色が生じていた（図 3.1）。変色は不働態皮膜の形成に対応すると考えられる。浸漬溶解試験後試料の横断面の光学顕微鏡組織観察によると、溶解は均一に進行しており、全面腐食に類する挙動を呈していた（図 3.1）。

9Cr-ODS 鋼の被覆管 7 ロット（Mm13、Mm14、M16、M16A、Mm16T、M19L、Mm19L）の純硝酸水溶液（温度： 95°C ）における溶解速度は、図 3.2 に示すように、硝酸濃度が高くなるほど低下する傾向がある。

表 3.14 は、表 3.1～表 3.13 の溶解速度データを一覧にして示す。以下、表 3.14 をもとにロット間依存性を考察する。

9Cr-ODS 鋼の 3.5mol/L の純硝酸水溶液への溶解速度には顕著なロット依存性があり、数千 mm/y の活性溶解を示すロットと数十 mm/y の安定溶解を示すロットがある。図 3.3 のように、9mass%程度を境として、比較的低クロム濃度のロット（例、Mm13、Mm14、M16A）は数千 mm/y レベルの活性溶解を示すが、比較的高クロム濃度のロット（例、M19L、9CN）は数～数十 mm/y の安定溶解を示す。

次に、硝酸濃度が 8mol/L になると、活性溶解を示すロットはなくなることがわかる。4 時間浸漬後の溶解速度は $4\sim 30\text{mm/y}$ の範囲にあるが、6 ロット（Mm13、Mm14、M16、Mm16T、M19L、Mm19L）に対する平均値は 15mm/y 、標準偏差は 7mm/y であり、ばらつきは大きいと言える。

さらに、硝酸濃度が 12mol/L になると、4 時間浸漬後の溶解速度は $5\sim 20\text{mm/y}$ の範囲の範囲にあり、5 ロット（Mm14、M16、Mm16T、M19L、Mm19L）に対する平均値は 8mm/y 、標準偏差は 2mm/y であり、ばらつきは小さくなっている。

以上のように、硝酸濃度を 8mol/L 以上に高めれば、現行の 9Cr-ODS 鋼の化学成分仕様でも純硝酸水溶液のなかでは不働態化が安定して生じる傾向がある。

3.1.1.2 模擬溶解液と実溶解液における溶解速度（溶存金属イオンの影響）

表 3.2（Mm13）、表 3.3（Mm14）、表 3.5（M16）、表 3.6（Mm16T）、表 3.11（M19L）、表 3.12（Mm19L）に模擬溶解液と実溶解液における溶解速度データを追記する。また、9Cr-ODS 鋼被覆管 6 ロット（M19L、Mm13、Mm14、M16、Mm16T、Mm19L）の模擬溶解液と実溶解液への溶解速度を図 3.4 に示す。

図 3.4 のように、ロット差は非常に小さく、4 時間浸漬後の溶解速度はいずれも数 mm/y 程度の安定溶解を示す。同じ硝酸濃度の純硝酸水溶液よりも顕著な溶解速度の低下が生じており、溶存金属イオンに強力な不働態化の促進作用が認められる。さらに、実溶解液における 9Cr-ODS 鋼被覆管 2 ロット（M19L と Mm13）の溶解速度は模擬溶解液と同様に 1mm/y 程度である。

表 3.2 と表 3.11 のように、実溶解液に浸漬した試料を 8mol/L の純硝酸水溶液に再度浸漬しても活性溶解の発生はなく、最初から純硝酸水溶液に浸漬した場合よりも溶解速度が低下しており、溶存金属イオンによって安定な不動態皮膜が生成していることを示唆している。

以上のように、9Cr-ODS 鋼のようなフェライト系鋼には溶存金属イオンによる不動態化の促進効果が顕著に働き、溶解速度は大きく低下することがわかる。

3.1.1.3 溶解速度に及ぼす浸漬時間の影響

M16・Mm16T・Mm19L の 3 ロットの溶解速度の浸漬時間への依存性について、表 3.15 と図 3.5 に示す。図 3.5 のように、溶解速度には浸漬時間への依存性があり、浸漬時間が長くなるほど溶解速度が低下する。

9Cr-ODS 鋼における不動態皮膜の安定にはある程度の時間を要するため、連続溶解槽における溶解量を評価する場合は浸漬時間への依存性を適切に考慮する必要がある。

3.1.1.4 溶解速度に及ぼす焼き戻し温度の影響

9Cr-ODS 鋼の棒材の M16M と KB22 に対し、焼き戻し温度を 600～800℃ の範囲でパラメータとして溶解速度を測定した結果を表 3.7 と表 3.8 に追記する。

図 3.6 のように、1 時間浸漬後の溶解速度は、焼き戻し温度が高くなるほど増大する傾向がある。一方、24 時間浸漬後の溶解速度は焼き戻し温度への依存性がなくなっている。9Cr-ODS 鋼の場合、焼き戻し温度が高くなると炭化物の析出量が増大し、実効クロム濃度の低下によって浸漬初期の不動態皮膜の生成が遅れるが、不動態皮膜が生成した後は有意な差にはならないようである。

3.1.2 9Cr-ODS 鋼の電気化学特性

3.1.2.1 腐食電位と分極曲線

図 3.7～図 3.17 に 9Cr-ODS 鋼の 30℃ の 3.5mol/L 純硝酸水溶液における分極曲線を示す。また、M19L について、5 種類 (1、2、3.5、5、8mol/L) の純硝酸水溶液と 3 種類 (高濃度、中濃度、低濃度) の模擬溶解液に温度 (30、60、90、95℃) を組み合わせた分極曲線を図 3.18～図 3.30 に示す。また、表 3.16 に 9Cr-ODS 鋼の 30℃ における腐食電位をまとめて示す。そして、表 3.17 に 9Cr-ODS 鋼のなかの M19L の腐食電位をまとめて示す。さらに、表 3.18 に溶液電位の測定値を示す。

M19L の腐食電位をみると、表 3.17 にまとめたように、模擬溶解液では純硝酸水溶液に対する溶存金属イオンの添加によって 200～300mV(SCE) のレベルで上昇している。同様の腐食電位の増大は、図 3.26・図 3.28・図 3.29 の溶存金属イオンの添加の有無による分極曲線を比較しても明らかである。

図 3.31 は、M19L の腐食電位の純硝酸水溶液における硝酸濃度への依存性を示す。硝酸濃度が 8mol/L から 12mol/L の範囲では 95℃ における腐食電位は 720～760mV(SCE) のレベルで変化がほとんどない。この現象は、表 3.18 のように溶液電位には飽和傾向が認められないことから、カソード反応への硝酸イオンの拡散供給が溶解速度を律速するようになり、酸濃度への依存性が現れなくなっている可能性がある。

図 3.32～図 3.34 に M19L の熱間押出棒・中間製品 1CR・中間製品 2CR・中間製品 3CR・被覆管の 3.5mol/L 純硝酸水溶液 (30℃) における分極曲線を示す。表 3.14 と表 3.16 に追記した

ように、腐食電位に及ぼす加工の影響は認められず、溶解速度への影響もないと考えられる。

3.1.2.2 溶解速度と電気化学特性の相関

表 3.16 のように、30℃の腐食電位と 95℃における溶解速度あるいは活性溶解の有無には、よい相関がある。例えば、3.5mol/L の純硝酸水溶液の場合、30℃においてマイナスの腐食電位 (SCE) を示すロット (Mm13 と Mm14) は 95℃においては活性溶解が観察されるが、プラスの腐食電位 (SCE) を示すロット (Mm16T、M19L) には活性溶解は観察されていない。

9Cr-ODS 鋼の純硝酸水溶液への溶解速度が硝酸濃度あるいは溶存金属イオン濃度の増加によって抑制される理由は、表 3.18 のように溶液の酸化力 (電位) が高くなることによって、図 3.35 に模式的に示すように電気化学的狀態が活性態域から不働態域に遷移する (不働態化が促進される) ためと考えられる。なお、活性溶解が発生したロットのなかでも一部の試料は安定溶解を示すことがあるのは、図 3.35 のように部分カソード分極曲線が 3 点で交わっており、不安定ながら、有効な不働態皮膜が生成する場合があるためである。

3.2 高クロム系 ODS 鋼と比較材料の硝酸溶解特性

3.1.1 高クロム系 ODS 鋼と比較材料の浸漬溶解特性

表 3.19～表 3.22 にそれぞれ 9Cr-ODS 鋼改良試作材、12Cr-ODS 鋼、PNC-FMS、PNC316 の純硝酸水溶液と模擬溶解液における溶解速度データ (ロット、表面仕上げ、温度、浸漬時間、溶液等の情報を含む) を示す。

図 3.36 は、9Cr-ODS 鋼改良試作材の溶解速度に及ぼすクロム濃度の影響を整理した結果であり、クロム濃度の増大とともに溶解速度の低下が明確になっており、硝酸溶解特性の改善にはクロム濃度の増大が有効であることが確認できる。

表 3.23 と表 3.24 は、高クロム系 ODS 鋼と比較材料の溶解速度に及ぼす浸漬時間への影響を整理した結果である。クロム濃度が 9.5～10mass% の 9Cr-ODS 鋼改良試作材は、9Cr-ODS 鋼の場合と同様に浸漬時間が 1 時間から 4 時間に延びると有意な溶解速度の低下が見られる。一方、比較材料には浸漬時間への影響は認められない。比較材料はクロム濃度が 11mass% よりも高いため、不働態皮膜が早期に安定化するためと考えられる。したがって、12Cr-ODS 鋼は、クロム濃度が PNC-FMS よりも高く、早期の不働態皮膜の安定化と溶解速度の低減が期待できる。

3.2.2 12Cr-ODS 鋼の電気化学試験結果

図 3.37 の 12Cr-ODS 鋼 (F14) の 30℃の 3.5mol/L 純硝酸水溶液における分極曲線をみると、不働態化が安定して生じていることがわかる。また、表 3.16 に付記したように、腐食電位は高く、95℃においても活性溶解が発生する可能性はないと言える。

3.3 モデル合金の硝酸溶解特性

3.3.1 モデル合金の浸漬溶解速度

表 3.25～表 3.33 に 3 元系モデル合金、表 3.34 に 5 元系モデル合金の純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度データ (ロット、表面仕上げ、温度、浸漬時間、溶液、溶解速度) を示す。

3 元系モデル合金の純硝酸水溶液への溶解速度を表 3.35 と図 3.38 にまとめて示す。表 3.35 の

ように、Fe-8Cr-2W 合金と Fe-9Cr-2W 合金は 3.5mol/L の純硝酸水溶液でも活性溶解を示さず、9Cr-ODS 鋼よりも耐食性に優れている。9Cr-ODS 鋼は同じクロム濃度の 3 元系モデル合金よりも溶解速度が大きくなっており、実効クロム濃度の低下が生じていると考えられる。

また、表 3.35 のように、クロム濃度が 11mass%未満のロットは硝酸濃度が高くなるほど溶解速度は減少するが、11mass%を超えると傾向が逆になることがわかる。11mass%を超えると過不動態域に入ることを示唆するが、溶解速度は十分に低く、クロム濃度の増量は 9Cr-ODS 鋼の硝酸溶解特性の改善に有効であることが確認できる。

3.3.2 モデル合金の電気化学特性

図 3.39～図 3.41 に 3 元系モデル合金のなかの Fe-9Cr、Fe-6Cr、Fe-4Cr の 4 ロットに対し、純硝酸水溶液 1 種類 (10mol/L) と模擬溶解液 1 種類 (低濃度 : C) の組み合わせによる分極曲線を示す。また、表 3.36 には腐食電位を示す。なお、測定温度は 95°C である。

図 3.42 は純硝酸水溶液と模擬溶解液に対し、腐食電位と溶解速度を整理した結果であり、両者には非常によい対応がある。

図 3.43～図 3.45 に 5 元系モデル合金 (マルテンサイト鋼 : 9Cr-0.13C-0.00～0.20Ti) の分極曲線を示す。チタン濃度を増量すると、表 3.16 に追記するように腐食電位が上昇し、表 3.37 のように溶解速度は低下しており、実効クロム濃度の増大による耐食性の向上に有効に働いていることがわかる。

4. 溶解工程における硝酸溶解特性評価

4.1 連続溶解槽における溶解速度の上限値の予備的検討

剪断片が連続溶解槽のなかで接触する硝酸水溶液の溶液電位は、表 4.1 に整理したように、連続的に上昇（990→1160mVSCE）すると考えられる。つまり、接触する硝酸水溶液の酸化力は次第に強くなり、不働態化の促進効果が継続的に発揮されると考えられる。

第1～第3ステージにおける溶存金属イオン濃度は高く、第1ステージ模擬の模擬溶解液 A における 30 分浸漬後の溶解速度の平均値と標準偏差は、表 3.15 の M16・Mm16T・Mm19L の 3 ロットのデータにより、それぞれ 3.9mm/y と 0.1mm/y であり、溶解速度は 5mm/y が上限と期待できる。

第4ステージ以降は溶存金属イオン濃度が急激に低くなり、11～12mol/L の純硝酸水溶液に近くなる。また、第1～第3ステージの浸漬の間に安定な不働態皮膜の形成が期待できる。第4～第8ステージにおける溶解速度は、表 3.14 をみると、12mol/L の純硝酸水溶液における4時間浸漬後の平均値 8mm/y に 2 σ 相当の 4mm/y を加えた 12mm/y よりも大きくなることはないと思予想できる（表 4.2）。

以上を積算すると、連続溶解槽の想定運転条件における 9Cr-ODS 鋼の溶解速度（連続溶解槽内滞留時間中の平均値）の上限値は 10mm/y と予想できる。ちなみに、前処理工程における燃料ピンの剪断長さは、燃料領域は 10mm 程度、プレナム領域は 60mm 程度である。被覆管全長は上下端栓も含む値として 2700mm、剪断片数は 10mm 長さの 270 個とし、重量は 457g、表面積は剪断片の内面、外面、両端面を想定すると、溶解速度 10mm/y において4時間浸漬した場合の被覆管一本あたりの溶解量は約 6.3g、全重量比率は約 1.4%になる。

また、比較材料の溶解速度（連続溶解槽滞在中の平均値）は、PNC-FMS は 2mm/y 未満、PNC316 は 1mm/y 未満に留まる可能性が高い（表 4.2）。

なお、上記結果は、母材（＝製造まま材＝未照射）の硝酸溶解試験データに基づく予測である。今後、剪断や溶解槽内での揺動・回転操作により発生する切り粉（表面積の増大）、炉内使用等の溶解速度への影響因子について検討を加え、上限値の評価精度を高めていくことが必要である。

4.2 ハル洗浄槽における溶解速度の上限値の予備的検討

硝酸濃度が高くなると不働態化が安定する傾向があるため、活性溶解を回避するためには硝酸濃度を高めるのが有効である。Mm13 を例にとると、硝酸濃度が 3.5mol/L の条件では、95℃では数千 mm/y レベルの活性溶解を示し、温度を 60℃まで低減しても溶解速度は 20mm/y 程度である（表 3.2）。つまり、活性溶解を示すロットは温度を低減しても溶解速度は大きい傾向がある。したがって、ハル洗浄槽の運転条件は、活性溶解の発生を回避するため、8mol/L 以上の純硝酸水溶液の適用が望まれる。

連続溶解槽から回収されたハルの表面には、第8ステージの 12mol/L の高濃度（純）硝酸水溶液との接触による不働態皮膜が生成しており、溶解速度を軽減する効果が残留すると予想できる。ハル洗浄に 12mol/L の純硝酸水溶液を適用し、温度を連続溶解槽と同じ 95℃までに設定すれば、ハル洗浄槽における溶解速度は 12mm/y よりも大きくなることはないと思予想できる。

5. 化学成分等の見直しによる硝酸溶解特性の改善方策の検討

5.1 9Cr-ODS 鋼の改良

5.1.1 低濃度純硝酸水溶液における溶解速度のロット差の原因

9Cr-ODS 鋼のなかのチタンは、過剰酸素と結合し、酸化イットリウムとの複合酸化物 ($Y_2Ti_2O_7 = Y_2O_3 + 2TiO_2$, $Y_2TiO_5 = Y_2O_3 + TiO_2$) を形成すると考えられる。残ったチタンは窒素や炭素と結合し、窒化物 (TiN) と炭化物 (TiC) を形成すると考えられる。このプロセスは、熱間固化過程において収束し、残存した炭素は、焼きならしのときにオーステナイト相に固溶し、焼き戻し過程で炭化物として析出すると考えられる。炭化物としては $M_{23}C_6$ が想定でき、残存した窒素はクロム窒化物 (Cr_2N) を形成し、やはり実効クロム濃度を下げる方向に働くと考えられる。

$M_{23}C_6$ は、鉄、クロム、タングステン等による複合炭化物であり、通常のクロム濃度は 70mol% 程度である。そこで、下記の 2 式により、実効クロム濃度を試算する。炭化物 ($M_{23}C_6$) のなかの金属元素のうちのクロムが 70% ($M=0.7Cr$) と仮定し、実効クロム濃度は(5-1)式で計算する。

$$\langle Cr(Effective) \rangle = \langle Cr \rangle - \frac{23}{6} \left(\langle C \rangle + \langle N \rangle + \frac{\langle Ex.O \rangle}{2} - \langle Ti \rangle \right) \times 0.7 \quad (5-1)$$

なお、(5-1)式のなかの記号は下記のとおりである。

$\langle Cr(Effective) \rangle$:	実効クロム濃度 (mol%)
$\langle Cr \rangle$:	クロム濃度 (mol%)
$\langle C \rangle$:	炭素濃度 (mol%)
$\langle N \rangle$:	窒素濃度 (mol%)
$\langle Ex.O \rangle$:	過剰酸素濃度 (mol%)
$\langle Ti \rangle$:	チタン濃度 (mol%)

表 5.1 は 9Cr-ODS 鋼の 12 ロットに対して実効クロム濃度を計算した結果であり、実効クロム濃度と硝酸溶解特性の良否には相関があることがわかる。3.5mol/L の純硝酸水溶液の場合、3 元系モデル合金の結果からわかるように、実効クロム濃度が 6mass% と 8mass% の間に活性溶解への遷移がある。同様に、9Cr-ODS 鋼を低濃度硝酸水溶液に浸漬すると、クロム、炭素、チタン等の濃度の組み合わせによって実効クロム濃度が変化し、実効クロム濃度のわずかな違いで活性溶解を示すロットと示さないロットに分かれると考えられる。

5.1.2 合金設計の見直し

合金元素の影響に関する知見をもとに、9Cr-ODS 鋼の現行の化学成分仕様 (表 1.1) に対し、実効クロム濃度の確保の観点からの見直し案を検討しておく。

9Cr-ODS 鋼の化学成分仕様では仮にチタン濃度を上限値にしても炭素や窒素を全て炭窒化物として固定することはできず、炭素と窒素によるクロムの消費が不可避免的に起きる。例えば、Mm13 は過剰酸素濃度が高く、チタンとの原子比が 2 近くになっており、チタンは全て酸化物となり、全ての炭素と窒素がクロムの消費に回る計算になる。9Cr-ODS 鋼ではチタンがイットリウムとの複合酸化物の形成に消費されており、マルテンサイト変態導入のための炭素がクロムを主成分とする炭化物を形成した結果として実効クロム濃度が低下し、耐食性を悪化させていると考えられる。

硝酸溶解特性の観点からは、9Cr-ODS 鋼の製造性・強度特性・耐照射性への影響を最小限にししながら、実効クロム濃度を増量することが望ましい。特に、9Cr-ODS 鋼の優れた製造性と強度特

性はクロム、チタン、炭素、過剰酸素、タングステン等の合金元素のバランスによって決まり、最適化を図る必要がある。

3元系モデル合金の溶解速度に及ぼすクロム濃度依存性からも明らかのように、最も有効な改善の手段は、クロム濃度の増量である。M19L (9Cr-ODS 鋼：クロム濃度約 9.2mass%)、M1 (9Cr-ODS 鋼改良試作材：クロム濃度約 10.0mass%)、M7 (9Cr-ODS 鋼改良試作材：クロム濃度約 9.6mass%)の 12mol/L 純硝酸水溶液における溶解速度はそれぞれ約 6mm/y、約 2mm/y、約 1mm/y である。現行の 9Cr-ODS 鋼の化学成分仕様を高クロム濃度側に拡張できれば、連続溶解槽において想定すべき溶解速度を抑制できる可能性がある(表 4.1)。図 3.36 の 9Cr-ODS 鋼改良試作材の純硝酸水溶液への溶解速度をみると、3.5mol/L における活性溶解の発生はなく、8mol/L では 10mm/y 程度(4時間浸漬)、12mol/L では 5mm/y 以下(4時間浸漬)に低下する傾向がある。現時点ではばらつきの把握が十分ではないが、クロム濃度を現行の化学成分仕様範囲を超える増量は有効である。ただし、表 3.14 と表 3.22 のように、9Cr-ODS 鋼と 9Cr-ODS 鋼改良試作材の溶解速度は、浸漬開始後 1 時間は 4 時間後よりも大きく、安定な不働態皮膜の形成に時間を要することがわかる。高クロム濃度の PNC-FMS と PNC316 は浸漬時間依存性が小さく、早期に安定な不働態皮膜が形成される。したがって、クロム濃度は 11mass% 以上に高めるのが最善である。

表 3.34 に示したように、チタン濃度をパラメータにした 5 元系モデル合金の 30℃における腐食電位をみると、チタン濃度の増大とともに腐食電位が上昇している。9Cr-ODS 鋼の現行の化学成分仕様のままでもチタン濃度の増量は有効な手段である。

窒素は合金元素ではなく不純物であり、上限値が 0.07mass% に設定されている。チタンやクロムとの窒化物形成 (TiN、Cr₂N) による実効クロム濃度の低下を抑制するため、実績値を考慮し、0.01mass% 以下に抑えることを提案する。

5.2 12Cr-ODS 鋼への転換

12Cr-ODS 鋼はフェライト系であるためにもともとクロム濃度とチタン濃度が比較的高く、炭素濃度も低いため、9Cr-ODS 鋼よりも実効クロム濃度が高い。しかも、12Cr-ODS 鋼の炭素濃度は原料粉末と機械的合金化過程において混入する不純物の炭素に対応した規定であり、強度特性の観点からの合金元素ではないため、低減してもよい。

12Cr-ODS 鋼の溶解試験データは現状乏しいが、Fe-9~12Cr-2W の 4 種類の 3 元系モデル合金と PNC-FMS の試験データ(表 3.20、表 3.34) が参考になる。3 元系モデル合金をみると、模擬溶解液への溶解速度は 9Cr-ODS 鋼と同等であるが、純硝酸水溶液への耐食性に顕著に優れている。純硝酸水溶液に対しては、3.5mol/L 程度の低濃度においても不働態化が安定して発現しており、溶解速度の絶対値も小さい。硝酸溶解特性の観点からは、9Cr-ODS 鋼よりも 12Cr-ODS 鋼を選定した方がよいと言える。表 4.1 に付記したように、連続溶解槽における溶解速度としては、PNC-FMS と同等の 2mm/y 未満が期待できそうである。

6. 結論

9Cr-ODS 鋼の純硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液への溶解特性を浸漬溶解試験と電気化学試験の組み合わせによって評価した。特に、連続溶解槽の想定条件を対象とし、95℃と4時間の浸漬後の溶解速度をもとに硝酸濃度と溶存金属イオンの影響を評価した。

9Cr-ODS 鋼の純硝酸水溶液への溶解速度は硝酸濃度が高くなるほど低下し、酸化力の増大による不動態化の促進効果が顕著に現れることがわかった。9Cr-ODS 鋼の溶解速度は、3.5mol/Lの純硝酸水溶液に対しては顕著なロット依存性があり、数千mm/yの活性溶解を示すロットと数十mm/yの安定溶解を示すロットがあった。硝酸濃度が大きくなるとロット差は縮小した。8mol/L程度になると溶解速度は5~30mm/yのレベルとなり、活性溶解を示すロットはなくなった。さらに、12mol/L程度になると、10~20mm/yのレベルになった。

9Cr-ODS 鋼の模擬溶解液に対する溶解速度のロット差は非常に小さく、試験対象3ロットは全て数mm/y程度の安定溶解を示した。さらに、実溶解液における9Cr-ODS 鋼被覆管2ロットの溶解速度は模擬溶解液と同様に1mm/y程度であった。溶存金属イオンによる不動態化の促進効果が顕著に現れ、溶解速度は大きく低下した。

9Cr-ODS 鋼はクロム濃度が比較的低いため、溶解速度の抑制には高濃度硝酸あるいは溶存金属イオンによる不動態皮膜の安定化効果が必要であることがわかった。

また、連続溶解槽のなかでは剪断片と接触する硝酸水溶液のなかの硝酸濃度と溶存金属イオン濃度が連続的に変化しており、不動態皮膜の安定化効果が持続する傾向があることがわかった。

9Cr-ODS 鋼が比較的低濃度の純硝酸水溶液における溶解速度に顕著なロット差が生じる原因について、モデル合金を組み合わせで調査した。実際、3.5mol/Lの純硝酸水溶液において活性溶解を示すロットのクロム濃度は化学成分仕様範囲のなかでも低い側にあった。Fe-9Cr-2W-0.13C-Ti系の5元系モデル合金の腐食電位を測定したところ、チタン濃度を増量すると腐食電位が上昇し、実効クロム濃度の増大による耐食性の向上に有効に働いていた。9Cr-ODS 鋼では、チタンがイットリウムとの複合酸化物の形成に優先的に消費され、マルテンサイト変態導入のための炭素がチタン炭化物ではなく、クロムを主成分とする炭化物を形成する傾向が強くなり、ロットによるチタン、酸化イットリウム、過剰酸素、窒素等の濃度の組み合わせによって実効クロム濃度に変化し、ロット差の原因になると考えられた。

謝辞

硝酸溶解試験の実施にあたっては、東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所サイクル工学試験部の試験第1課と試験第2課、大洗研究開発センター燃料材料試験部燃料試験課の各位に多大な御協力をいただきました。

浸漬試験結果と電気化学試験結果の検討にあたっては、原子力基礎工学研究部門燃料・材料工学ユニット防食材料技術開発グループの山本正弘グループリーダーと上野文義サブリーダーにアドバイスをいただきました。

再処理システム適合性の評価にあたっては、再処理技術開発ユニットの小山智造ユニット長、同ユニット湿式再処理技術開発グループの鷺谷忠博グループリーダー、再処理設計・技術実証ユニットプラント設計グループの紙谷正仁研究員からアドバイスをいただきました。

9Cr-ODS 鋼における化学成分の影響については、燃料材料開発グループの皆藤威二研究副主幹と大塚智史研究副主幹からアドバイスをいただきました。

参考資料・参考文献

- 1) “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ II 技術検討書-(1)原子炉プラントシステム-”、JAEA-Research 2006-042 (2006).
- 2) “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ II 技術検討書-(2)燃料サイクルシステム-”、JAEA-Research 2006-043 (2006).
- 3) 皆藤威二、水田俊治、上羽智之、大塚智史、鶴飼重治、“ODS フェライト鋼被覆管の材料強度基準（暫定案）”、JNC TN9400 2005-015 (2005).
- 4) 立石嘉徳、柚原俊一、柴原格、伊藤正彦、野村茂雄、佐藤義則、吉田英一、鹿倉栄、“高速炉炉心材料用改良 SUS316 ステンレス鋼の開発”、日本原子力学会誌、Vol.30、No.11、P.1005-1019 (1988).
- 5) 鹿倉栄、鶴飼重治、佐藤義則、原田誠、小山真一、伊藤卓志、野村茂雄、柴原格、“高速炉炉心材料用改良オーステナイト銅の開発”、日本原子力学会誌、Vol.36、No.5、P.441-455 (1994).
- 6) 鹿倉栄、野村茂雄、鶴飼重治、瀬下一郎、加納洋一、桑島幸夫、伊藤卓志、葛木浩一、藤田利夫、“高速炉炉心材料としての高強度フェライト/マルテンサイト鋼の開発”、日本原子力学会誌、Vol.33、No.12、P.115-1170 (1991).
- 7) Sano, Y., Katsurai, K., Washiya, T., Koizumi, T., Matsumoto, S., "Development of Simulation Code for FBR Spent Fuel Dissolution with Rotary Drum Type Continuous Dissolver", Proceedings of 19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-19), Chiba, Japan, 2011, ICONE19-43317 in CD-ROM.
- 8) 武田誠一郎、小泉務、永井崇之、竹内正行、加藤利弘、川野邊一則、藤咲和彦、根本健志、“再処理溶液中における各種金属材料の耐食性”、JNC TN8400 2002-007 (2001).
- 9) 原子力基礎工学研究部門、“再処理プロセス・化学ハンドブック第2版”、JAEA-Review 2008-037 (2008).
- 10) Fauvet, P., Balbaud, F., Robin, R., Tran, Q.-T., Mugnier, A., Espinoux, D., "Corrosion mechanisms of austenitic stainless steels in nitric media used in reprocessing plants," Journal of Nuclear Materials, Vol.375, P.52-64 (2008).

表 1.1.1 ODS 鋼の材料仕様：化学成分・金相・最終熱処理・加工

大項目	小項目	9Cr-ODS 鋼 [ノミナル]	12Cr-ODS 鋼 [ノミナル]
化学成分 mass%	C	0.11~0.15 [0.13]	0.01~0.05 [0.03]
	Si	≤0.20	≤0.20
	Mn	≤0.20	≤0.20
	P	≤0.02	≤0.02
	S	≤0.02	≤0.02
	Ni	≤0.20	≤0.20
	Cr	8.6~9.4 [9.0]	11.6~12.4 [12.0]
	Mo	-	-
	W	1.8~2.2 [2.0]	1.8~2.2 [2.0]
	Ti	0.20~0.35 [0.20]	0.24~0.28 [0.26]
	V	-	-
	Nb	-	-
	Y ₂ O ₃	0.33~0.37 [0.35]	0.20~0.26 [0.23]
	Ex.O	0.04~0.10 [0.07]	0.04~0.09 [0.07]
	N	≤0.07	≤0.07
	Ar	≤0.007	≤0.007
	B	-	-
Co	-	-	
Cu	-	-	
As	-	-	
Al	-	-	
金相	結晶粒度	-	-
	焼きならし	1050°C×60 分	-
最終熱処理	焼き戻し	780~800°C×60 分	-
	再結晶	-	*1 (1050°C×60 分)
加工	最終冷間加工	-	-

*1：再結晶熱処理＝再結晶粒度等が所期レベルに収まるように調整（0内は目安値）

表 1.2 各種炉心材料の材料仕様：化学成分・金相・最終熱処理・加工

大項目	小項目	PNC-FMS*2 [ノミナル]	PNC316 [目標値]	PNC1520 [ノミナル]
化学成分 mass%	C	0.09~0.15 [0.12]	0.040~0.080 [0.06]	0.040~0.080 [0.06]
	Si	≦0.10	0.40~1.00 [0.70]	0.60~1.00 [0.80]
	Mn	0.40~0.80 [0.60]	1.40~2.00 [1.7]	1.40~2.00 [1.7]
	P	≦0.030	0.015~0.040 [0.025]	0.015~0.040 [0.025]
	S	≦0.030	≦0.010	≦0.010
	Ni	0.20~0.60 [0.40]	13.00~14.00 [上限]	19.50~21.50 [20]
	Cr	10.0~12.0 [11.0]	16.00~18.00 [下限]	13.50~15.50 [15]
	Mo	0.30~0.70 [0.50]	2.00~3.00 [2.5]	2.00~3.00 [2.5]
	W	1.70~2.30 [2.0]	-	-
	Ti	-	0.05~0.10 [上限]	0.15~0.35 [0.25]
	V	0.15~0.25 [0.20]	≦0.20	≦0.20
	Nb	0.020~0.080 [0.05]	0.05~0.10 [上限]	0.05~0.15 [0.10]
	Y ₂ O ₃	-	-	-
	O	-	≦0.0040	≦0.0040
	N	0.030~0.070 [0.05]	≦0.010	≦0.010
	Ar	-	-	-
	B	-	0.0020~0.0060 [0.0040]	0.0020~0.0060 [0.0040]
	Co	-	≦0.05	≦0.05
	Cu	-	≦0.20	≦0.20
	As	-	≦0.030	≦0.030
Al	-	≦0.050	≦0.050	
金相	結晶粒度	ASTM E-112 No.7 以上	ASTM No.6~9 [7.5~8.5]	ASTM No.6~9 [7.5~8.5]
最終熱処理	溶体化処理/焼きならし	1100°C×10分*1	≧1040°C*1	1100°C×1分 (≧1040°C) *1
	焼き戻し 再結晶	780°C×60分	-	-
加工	最終冷間加工	不可	20±3%	20±3%

*1：最終熱処理＝製品の結晶粒度等が所期値に収まるように調整、*2：被覆管仕様

表 2.1 供試材の基本仕様：9Cr-ODS 鋼

整理番号	鋼種	ロット名	原料粉末種別	試料形態	外径 mm	内径 mm	焼きならし	焼き戻し
1	9Cr-ODS 鋼	M11	A	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
2	9Cr-ODS 鋼相当*1	Mm13	M	被覆管	6.9	6.1	1050°C×1hr	800°C×1hr
3	9Cr-ODS 鋼	Mm14	M	被覆管	6.9	6.1	1050°C×1hr	800°C×1hr
4	9Cr-ODS 鋼	ML15B	M	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
5	9Cr-ODS 鋼	M16	A	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
6	9Cr-ODS 鋼	Mm16T	M	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
7-1	9Cr-ODS 鋼	M16M	A	棒	20	0	1050°C×1hr	780°C×1hr
7-2	9Cr-ODS 鋼	M16A	A	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
7-3	9Cr-ODS 鋼	M16B	A	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
8	9Cr-ODS 鋼相当*2	KB22	M	棒	12	0	1050°C×1hr	600°C×1hr
9	9Cr-ODS 鋼	MPT3	A	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
10	9Cr-ODS 鋼	M19	A	棒	20	0	1050°C×1hr	780°C×1hr
11-1	9Cr-ODS 鋼	M19L	A	棒	47	19	1050°C×1hr	780°C×1hr
11-2	9Cr-ODS 鋼	M19L	A	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
12	9Cr-ODS 鋼	Mm19L	M	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr
13	9Cr-ODS 鋼相当*3	9CN(No.1)	M	被覆管	8.5	7.5	1050°C×1hr	780°C×1hr

M：プレミックス、A：プレアロイ

*1：化学成分の一部（過剰酸素）が現行の 9Cr-ODS 鋼の材料仕様の規格範囲外

*2：焼き戻し温度が現行の 9Cr-ODS 鋼の材料仕様の規格範囲外

*3：化学成分の一部（ニッケルと過剰酸素）が現行の 9Cr-ODS 鋼の材料仕様の規格範囲外

表 2.2 供試材の化学分析値 (mass%) : 9Cr-ODS 鋼

ロット	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y ₂ O ₃ *1	Ex.O*2	N	Ar
M11	0.12	0.05	0.044	0.002	0.002	0.023	9.02	1.94	0.21	0.34	0.097	0.011	0.0026
	0.13	0.05	0.044	0.002	0.002	0.021	9.00	1.95	0.20	0.37	0.062	0.013	0.0025
M11 (追加分析)	0.14	-	-	-	-	-	8.83	1.96	0.20	0.356	0.074	0.01	-
	0.14	-	-	-	-	-	8.86	2.02	0.20	0.368	0.066	0.01	-
Mm13*4	0.14	<0.005	<0.01	0.001	0.003	0.01	8.83	1.95	0.21	0.343	0.137	0.0095	0.0054
	0.13	<0.005	<0.01	0.001	0.003	0.01	8.82	1.94	0.20	0.343	0.137	0.0092	0.0054
Mm14	0.14	0.007	<0.01	<0.005	0.003	0.01	8.84	1.97	0.20	0.343	0.097	0.013	0.0052
	0.14	0.010	<0.01	<0.005	0.003	0.01	8.83	1.97	0.20	0.356	0.094	0.012	0.0050
ML15B	0.14	<0.005	<0.01	<0.005	0.003	0.01	9.02	1.99	0.21	0.356	0.094	0.015	0.0043
	0.14	<0.005	<0.01	<0.005	0.003	0.01	9.03	1.99	0.22	0.356	0.094	0.0058	0.0042
M16	0.14	0.048	0.05	<0.005	0.003	0.06	8.60	1.95	0.23	0.356	0.064	0.017	0.004
	0.14	0.048	0.05	<0.005	0.004	0.06	8.67	1.96	0.23	0.343	0.067	0.017	0.004
Mm16T	0.14	<0.005	<0.01	<0.005	0.002	0.01	9.01	1.99	0.31	0.356	0.094	0.007	0.004
	0.14	<0.005	<0.01	<0.005	0.002	0.01	9.03	2.00	0.31	0.356	0.104	0.008	0.004
M16M	0.14	0.06	0.04	<0.005	0.003	0.02	8.90	2.00	0.20	0.343	0.067	0.02	0.003
M16A/M16B	0.14	0.06	0.04	<0.005	0.003	0.02	8.80	2.00	0.20	0.343	0.067	0.02	0.003
KB22*6	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.001	<0.01	9.09	1.99	0.21	0.36	0.10	0.019	0.005
MPT3	0.13	0.08	0.12	<0.005	0.006	0.04	9.00	1.95	0.28	0.36	0.094	0.014	0.005
M19*3	0.14	0.06	0.098	<0.005	0.005	0.029	9.22	1.97	0.23	0.356	0.086	0.011	0.0044
M19L	0.14	0.06	0.09	<0.005	0.005	0.03	9.16	2.01	0.22	0.356	0.084	0.011	0.0049
	0.14	0.06	0.09	<0.005	0.005	0.03	9.16	2.01	0.22	0.356	0.084	0.011	0.0049
Mm19L	0.14	0.05	0.05	<0.005	0.001	<0.01	8.89	2.02	0.21	0.343	0.097	0.005	0.0052
	0.14	0.05	0.05	<0.005	0.001	<0.01	8.88	2.02	0.20	0.343	0.097	0.006	0.0051
9CN(No.1)*5	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.003	0.53	9.2	2.0	0.30	0.36	0.11	0.011	0.005

*1 : Y₂O₃=1.27Y、*2 : Ex.O=Total O-0.27Y、*3 : 被覆管用素管分析結果の平均値

*4 : 過剰酸素=規格範囲外、*5 : ニッケル、過剰酸素=規格範囲外、*6 : 焼き戻し温度=規格範囲外

表 2.3 供試材の基本仕様：9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼

整理番号	鋼種	ロット名	C mass%	Cr mass%	W mass%	Ti mass%	Ni mass%	Y ₂ O ₃ mass%	Ex.O mass%	原料粉末 種別	試料形態
14	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M1	0.13	10	1.5	0.22	0	0.35	0.07	M	棒*1
15	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M2	0.13	10	1.0	0.22	0	0.35	0.07	M	棒*1
16	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M3	0.13	10	1.5	0.22	0.4	0.35	0.07	M	棒*1
17	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M4	0.13	10	1.0	0.22	0.4	0.35	0.07	M	棒*1
18	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M5	0.13	10	1.5	0.22	0	0.30	0.07	M	棒*1
19	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M6	0.13	10	1.5	0.22	0	0.25	0.07	M	棒*1
20	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M7	0.13	9.5	1.5	0.22	0	0.35	0.07	M	棒*1
21	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M8	0.13	9.5	1.0	0.22	0	0.35	0.07	M	棒*1
22	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M9	0.13	9.5	1.5	0.22	0.4	0.35	0.07	M	棒*1
23	9Cr-ODS 鋼改良試作材	M10	0.13	9.5	1.5	0.22	0	0.30	0.07	M	棒*1
24	12Cr-ODS 鋼	F13	0.03	12	2.0	0.26	0	0.23	0.07	A	被覆管*2
25	12Cr-ODS 鋼	F14	0.03	12	2.0	0.26	0	0.23	0.07	A	被覆管*2

M：プレミックス、A：プレアロイ

*1：焼きならし+焼き戻し

*2：最終熱処理

表 2.4 供試材の化学分析値 (mass%) : 9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼

ロット	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y ₂ O ₃ *1	Ex.O*2	N	Ar
M1	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	0.01	10.00	1.42	0.21	0.33	0.097	0.004	0.005
M2	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	<0.01	10.12	1.01	0.21	0.34	0.099	0.012	0.006
M3	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	0.33	10.03	1.44	0.21	0.34	0.089	0.003	0.005
M4	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	0.36	10.11	1.03	0.21	0.34	0.090	0.003	0.005
M5	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	0.05	10.05	1.43	0.21	0.30	0.088	0.004	0.005
M6	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	0.01	10.02	1.46	0.20	0.25	0.084	0.003	0.005
M7	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	<0.01	9.51	1.48	0.21	0.33	0.096	0.004	0.005
M8	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	<0.01	9.55	1.04	0.21	0.34	0.100	0.013	0.005
M9	0.14	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	0.32	9.54	1.43	0.20	0.34	0.093	0.005	0.006
M10	0.13	<0.01	<0.01	<0.005	0.002	0.04	9.55	1.47	0.20	0.30	0.085	0.005	0.005
F13*3	0.04	0.045	0.07	0.005	0.003	0.04	11.51	1.90	0.26	0.229	0.061	0.010	0.0057
	0.05	0.045	0.07	0.006	0.003	0.04	11.56	1.91	0.27	0.229	0.071	0.010	0.0057
	0.04	0.045	0.07	0.005	0.003	0.03	11.58	1.91	0.27	0.229	0.061	0.009	0.0056
F14*3	0.04	0.045	0.07	0.006	0.003	0.03	11.72	1.90	0.27	0.229	0.071	0.009	0.0056
	0.042	0.050	0.08	0.005	0.004	0.08	11.34	1.89	0.25	0.229	0.061	0.011	0.0044
	0.044	0.052	0.09	0.005	0.004	0.08	11.39	1.87	0.26	0.229	0.050	0.010	0.0045

*1 : Y₂O₃=1.27Y、*2 : Ex.O=Total O-0.27Y、*3 : 素管分析値

表 2.5 比較試料 (PNC-FMS と PNC316) の材料仕様：化学成分・冷間加工度・最終熱処理

	ロット名	PNC-FMS 19FK03	PNC316 LT051
	C	0.13	0.063
	Si	0.07	0.85
	Mn	0.67	1.75
	P	<0.005	0.033
	S	0.0021	0.002
	Ni	0.54	13.90
	Cr	10.38	16.54
	Mo	0.40	2.55
	W	1.80	-
	Ti	-	0.086
	V	0.19	0.02
	Nb	0.059	0.077
	O	-	0.0010
	N	0.064	0.0049
	B	-	0.0046
	Co	-	0.014
	Cu	-	0.03
	As	-	0.001
	Al	-	0.024
金相	結晶粒度	-	ND
最終熱処理	溶体化処理/焼きならし	1100°C×10分	1100°C×5分
	焼き戻し	780°C×60分	-
加工	再結晶	-	-
	最終冷間加工	-	19%

表 2.6 供試材の基本仕様：3元系モデル合金と5元系モデル合金

整理番号	鋼種	ロット名	Cr mass%	Ni mass%	W mass%	C mass%	Ti mass%	原料種別	試料形態	状態
26	3元系モデル合金	12Cr-0Ni	12	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
27	3元系モデル合金	11Cr-0Ni	11	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
28	3元系モデル合金	10Cr-0Ni	10	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
29	3元系モデル合金	9Cr-0Ni	9	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
30	3元系モデル合金	8Cr-0Ni	8	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
31	3元系モデル合金	6Cr-0Ni	6	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
32	3元系モデル合金	5Cr-0Ni	5	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
33	3元系モデル合金	4Cr-0Ni	4	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
34	3元系モデル合金	2Cr-0Ni	2	0	2	0	0	溶解铸造	板	N*1
35	5元系モデル合金	9Cr-0.13C-0.00Ti	9	0	2	0.13	0	溶解铸造	板	NT*2
36	5元系モデル合金	9Cr-0.13C-0.10Ti	9	0	2	0.13	0.10	溶解铸造	板	NT*2
37	5元系モデル合金	9Cr-0.13C-0.20Ti	9	0	2	0.13	0.20	溶解铸造	板	NT*2

N*1：焼きならし (1050°C×1hr×空冷)

NT*2：焼きならし (1050°C×1hr×水冷) →焼き戻し (780°C×1hr×水冷)

表 2.7 供試材の化学分析値 (mass%) : モデル合金

ロット	C	Si	Mn	P	S	N	O	Ti	Cr	Ni	W
12Cr-0Ni	<0.001	0.004	<0.002	<0.002	0.0035	0.0022	0.0515	<0.002	11.68	<0.002	2.01
	<0.001	0.008	<0.002	<0.002	0.0036	0.0015	0.0694	<0.002	11.67	<0.002	1.95
11Cr-0Ni	<0.001	0.006	<0.002	<0.002	0.0031	0.0024	0.0501	<0.002	10.76	<0.002	2.01
	<0.001	0.006	<0.002	<0.002	0.0036	0.0025	0.0695	<0.002	10.71	<0.002	1.94
10Cr-0Ni	<0.001	0.005	<0.002	<0.002	0.0029	0.0024	0.0489	<0.002	9.80	<0.002	2.01
	<0.001	0.004	<0.002	<0.002	0.0028	0.0040	0.0626	<0.002	9.77	<0.002	1.94
9Cr-0Ni	<0.001	0.002	<0.002	<0.002	0.0030	0.0027	0.0502	<0.002	8.83	<0.002	2.00
	<0.001	0.002	<0.002	<0.002	0.0028	0.0032	0.0728	<0.002	8.75	<0.002	1.89
8Cr-0Ni	<0.001	0.002	<0.002	<0.002	0.0028	0.0019	0.0482	<0.002	7.83	<0.002	1.96
	<0.001	0.003	0.002	<0.002	0.0024	0.0020	0.0624	<0.002	7.77	<0.002	1.91
6Cr-0Ni	<0.001	0.004	<0.002	<0.002	0.0019	0.0030	0.0380	<0.002	5.93	<0.002	1.97
	<0.001	0.003	<0.002	<0.002	0.0019	0.0028	0.0683	<0.002	5.78	<0.002	1.89
5Cr-0Ni	0.0014	-	-	-	-	0.0040	0.0043	<0.002	4.98	-	1.99
	0.0016	-	-	-	-	0.0023	0.0056	<0.002	5.00	-	2.00
4Cr-0Ni	<0.001	0.003	<0.002	<0.002	0.0019	0.0010	0.0702	<0.002	3.84	<0.002	1.95
	<0.001	0.003	<0.002	<0.002	0.0016	0.0013	0.0608	<0.002	3.88	<0.002	1.95
2Cr-0Ni	0.001	0.004	<0.002	<0.002	0.0013	0.0014	0.0600	<0.002	1.94	<0.002	1.99
	0.001	<0.002	<0.002	<0.002	0.0012	0.0013	0.0510	<0.002	1.92	<0.002	1.96
9Cr-0.13C-0.00Ti	0.094	0.010	0.002	0.004	0.0017	0.0016	<0.001	0.004	8.88	-	1.97
	0.071	-	-	-	-	0.0031	0.0045	<0.002	8.99	-	1.95
9Cr-0.13C-0.10Ti	0.071	-	-	-	-	0.0035	0.0038	<0.002	9.05	-	2.02
	0.10	0.012	<0.002	0.006	0.0018	0.0013	<0.001	0.086	8.97	-	1.98
9Cr-0.13C-0.20Ti	0.093	-	-	-	-	0.0037	0.0050	0.089	9.13	-	2.02
	0.093	-	-	-	-	0.0038	0.0042	0.086	9.05	-	2.03
9Cr-0.13C-0.20Ti	0.10	0.006	<0.002	0.003	0.0017	0.0013	<0.001	0.16	9.00	-	1.98
	0.095	-	-	-	-	0.0035	0.0063	0.17	9.02	-	2.04
0.092	-	-	-	-	-	0.0035	0.0072	0.19	9.04	-	2.06

表 2.8 溶解試験と電気化学試験の試験マトリックス：9Cr-ODS 鋼

ロット名	試料形態	状態	純硝酸水溶液									模擬溶解液			実溶解液		
			1M	2M	3.5M	5M	8M	10M	12M	高	中	低					
M11	被覆管	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mm13	被覆管	-	○	○	○▲	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○
Mm14	被覆管	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mm16T	被覆管	「常陽」材料照射	-	-	○▲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
ML15B	被覆管	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M16	被覆管	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
M16M	棒	600°C,700°C,800°C	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	棒	780°C	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M16A	被覆管	-	-	-	○▲	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-
M16B	被覆管	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KB22	棒	600°C	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	棒	700°C,780°C,800°C	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPT3	被覆管	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M19(No.54)	棒	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	熱間押出棒	-	▲	▲	○▲△	▲△	▲△	▲△	▲△	▲△	△	△	△	△	△	△	-
	中間製品 1CR*1	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M19L	中間製品 2CR*2	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	中間製品 3CR*3	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	被覆管	-	○	○	○▲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Mm19L	被覆管	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9CN(No.1)	被覆管	-	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

○：浸漬@95°C、△：電気化学@95°C、▲：電気化学@30°C、60°C、90°C (60°Cと90°CはM19Lのみ)

高：高濃度模擬溶解液、中：中濃度模擬溶解液、低：低濃度模擬溶解液、実溶解液：「常陽」MK-III 照射済燃料

*1：素管（棒）に冷間加工を1回施した中間製品

*2：素管（棒）に冷間加工を2回施した中間製品

*3：素管（棒）に冷間加工を3回施した中間製品

表 2.9 溶解試験と電気化学試験の試験マトリックス：9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼

ロット名	試料形態	状態	純硝酸水溶液										模擬溶解液			実溶解液	
			1M	2M	3.5M	5M	8M	10M	12M	高	中	低					
M1	棒	-	-	-	○	-	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-
M2	棒	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3	棒	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M4	棒	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M5	棒	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M6	棒	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M7	棒	-	○	○	○	○	-	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-
M8	棒	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M9	棒	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M10	棒	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F13	被覆管	-	-	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F14	被覆管	-	-	○▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

○：浸漬@95°C、△：電気化学試験@95°C、▲：電気化学試験@30°C

高：高濃度模擬溶解液、中：中濃度模擬溶解液、低：低濃度模擬溶解液、実溶解液：「常陽」MK-III 照射済燃料

表 2.10 溶解試験と電気化学試験の試験マトリックス：モデル合金

ロット名	試料形態	状態	純硝酸水溶液									模擬溶解液			実溶解液	
			1M	2M	3.5M	5M	8M	10M	12M	高	中	低				
12Cr-0Ni	板	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
11Cr-0Ni	板	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
10Cr-0Ni	板	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
9Cr-0Ni	板	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○△	○	○	○	○△	-
8Cr-0Ni	板	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
6Cr-0Ni	板	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○△	○	○	○	○△	-
5Cr-0Ni	板	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	-
4Cr-0Ni	板	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○△	○	○	○	○△	-
2Cr-0Ni	板	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
9Cr-0.13C-0.00Ti	板	-	-	-	○▲	-	-	-	-	○	○	○	-	-	-	-
9Cr-0.13C-0.10Ti	板	-	-	-	○▲	-	-	-	-	○	○	○	-	-	-	-
9Cr-0.13C-0.20Ti	板	-	-	-	○▲	-	-	-	-	○	○	○	-	-	-	-

○：浸漬@95°C、△：電気化学試験@95°C、▲：電気化学試験@30°C

高：高濃度模擬溶解液、中：中濃度模擬溶解液、低：低濃度模擬溶解液、実溶解液：「常陽」MK-III 照射済燃料

表 2.11 連続溶解槽における遊離硝酸濃度と溶存金属濃度の解析例

ステージ	平均遊離	平均溶存	備考
	硝酸濃度	金属濃度	
	mol/L	gHM/L	
1	4.2	502	溶解液排出側、高濃度模擬溶解液：A
2	8.8	221	中濃度模擬溶解液：B
3	10.6	99	低濃度模擬溶解液：C
4	11.4	44	
5	11.7	20	
6	11.9	9	
7	≒12	4	
8	≒12	2	硝酸供給側

計算条件

供給硝酸水溶液における遊離硝酸濃度：12mol/L

計算ツール：連続溶解シミュレーションコード

溶解反応式： $MO_2 + 4HNO_3 \Rightarrow MO_2(NO_3)_2 + 2NO_2 + 2H_2O$

表 2.12 模擬溶解液の調整

	濃度	模擬溶解液：A	模擬溶解液：B	模擬溶解液：C
		高濃度	中濃度	低濃度
想定ステージ	-	ステージ1	ステージ2	ステージ3
	-	約 500gHM/L	約 200gHM/L	約 100gHM/L
遊離 HNO ₃ 濃度	mol/L	3.5	8	10
V	g/L	4.4	1.76	0.88
	mol/L	8.6×10^{-2}	3.5×10^{-2}	1.7×10^{-2}
Ru	g/L	2.54	1.02	0.51
	mol/L	2.5×10^{-2}	1.0×10^{-2}	5.0×10^{-3}

V：原子番号=23、原子量=50.942

Ru：原子番号=44、原子量=101.07

市販の硝酸バナジウムと硝酸ルテニウムの硝酸塩試薬を使用

表 2.13 溶解試験終了後における実溶解液の分析結果

種別	成分	濃度	濃度
			mol/L
重金属	U	204 g/L	0.86
	Pu	60 g/L	0.25
酸	H ⁺	4.8 mol/L	4.8
γ 核種	⁹⁵ Nb	3.75×10 ⁶ Bq/mL	2.7×10 ⁻⁸
	¹⁰⁶ Ru	2.46×10 ⁸ Bq/mL	1.9×10 ⁻⁵
	¹²⁵ Sb	9.76×10 ⁷ Bq/mL	2.0×10 ⁻⁵
	¹³⁴ Cs	1.09×10 ⁸ Bq/mL	1.7×10 ⁻⁵
	¹³⁷ Cs	1.22×10 ⁹ Bq/mL	2.8×10 ⁻³
	¹⁴⁴ Ce	1.86×10 ⁹ Bq/mL	1.1×10 ⁻⁴
	¹⁴⁴ Pr	1.86×10 ⁹ Bq/mL	4.6×10 ⁻⁹
	¹⁵⁴ Eu	1.43×10 ⁷ Bq/mL	9.3×10 ⁻⁶
	¹⁵⁵ Eu	1.03×10 ⁸ Bq/mL	3.7×10 ⁻⁵
金属元素	Ni	8.6×10 ¹ µg/mL	1.5×10 ⁻³
	Mo	6.1×10 ² µg/mL	6.4×10 ⁻³
	Fe	2.8×10 ² µg/mL	5.0×10 ⁻³
	Cr	7.3×10 ¹ µg/mL	1.4×10 ⁻³
	Ce	1.1×10 ³ µg/mL	7.9×10 ⁻³
	Ru	9.6×10 ¹ µg/mL	9.5×10 ⁻⁴
	Tc	1.3×10 ² µg/mL	1.3×10 ⁻³
	Zr	1.1×10 ³ µg/mL	1.2×10 ⁻²
	Rh	7.8×10 ¹ µg/mL	7.6×10 ⁻⁴
	Pd	5.6×10 ² µg/mL	5.3×10 ⁻³

表 3.1 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M11)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
L	M11	#400	95	1	3.5	-	51.3
L-2	M11	#400	95	48	3.5	-	4.2
L-3	M11	#400	95	48	3.5	-	3.6
L-4	M11	#400	95	48	3.5	-	3.3

表 3.2 純硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼相当 (Mm13)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
-	Mm13	まま	95	0.1	1	-	2700
-	Mm13	まま	95	0.1	1	-	2800
A-7	Mm13	#400	95	0.1	2	-	3727.1
A-8	Mm13	#400	95	0.1	2	-	3608.1
A-9	Mm13	#400	95	0.1	2	-	3558.5
-	Mm13	まま	40	4	3.5	-	7.3
-	Mm13	まま	40	4	3.5	-	6.0
-	Mm13	まま	40	100	3.5	-	1.8
-	Mm13	まま	40	100	3.5	-	1.7
-	Mm13	まま	60	4	3.5	-	18.6
-	Mm13	まま	60	4	3.5	-	19.5
-	Mm13	まま	95	0.05	3.5	-	6400
-	Mm13	まま	95	0.05	3.5	-	6500
A	Mm13	#400	95	0.4	3.5	-	2679.5
A-4	Mm13	#400	95	0.1	3.5	-	4194.5
A-5	Mm13	#400	95	0.1	3.5	-	3869.4
A-6	Mm13	#400	95	0.1	3.5	-	2843.3
A-10	Mm13	#400	95	0.1	5	-	90.9
A-11	Mm13	#400	95	0.1	5	-	96.7
A-12	Mm13	#400	95	0.1	5	-	99.8
-	Mm13	まま	95	4	8	-	5.0
-	Mm13	まま	95	4	8	-	9.3
-	Mm13	まま	95	4	8	-	7.4
-	Mm13	まま	100	6	8	-	7.3
-	Mm13	まま	沸点	6	8	-	17
-	Mm13	まま	40	100	3.5	A	0.01
-	Mm13	まま	40	100	3.5	A	0.01
-	Mm13	まま	40	100	3.5	A	0.01
-	Mm13	まま	60	100	3.5	A	0.06
-	Mm13	まま	60	100	3.5	A	0.06
-	Mm13	まま	95	100	3.5	A	0.82
-	Mm13	まま	95	100	3.5	A	0.85
-	Mm13	まま	95	100	3.5	A	0.84
RUN1	Mm13	#400→#600	95	4	4.8	実	1.3
RUN3	Mm13	RUN1 後再浸漬	95	4	8	-	3.2

A：高濃度模擬溶解液、実：実溶解液＝「常陽」MK-III 照射済燃料

表 3.3 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (Mm14)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
-	Mm14	まま	95	0.05	3.5	-	2600
-	Mm14	まま	95	0.06	3.5	-	5000
-	Mm14	まま	95	0.05	3.5	-	4700
7	Mm14	#600	95	4	8	-	21.63
8	Mm14	#600	95	4	8	-	25.64
PM1	Mm14	まま	95	4	8	-	15.2
-	Mm14	まま	95	6.1	8	-	7.6
-	Mm14	まま	95	6	8	-	8.3
-	Mm14	まま	95	6	8	-	6.6
PM1	Mm14	まま	95	8	8	-	11.1
PM1	Mm14	まま	95	12	8	-	9.1
9	Mm14	#600	95	4	10	-	12.78
10	Mm14	#600	95	4	10	-	17.75
11	Mm14	#600	95	4	12	-	9.56
12	Mm14	#600	95	4	12	-	10.56
1	Mm14	#600	95	4	3.5	A	0.92
2	Mm14	#600	95	4	3.5	A	1.04
3	Mm14	#600	95	4	8	B	2.21
4	Mm14	#600	95	4	8	B	2.25
5	Mm14	#600	95	4	10	C	2.13
6	Mm14	#600	95	4	10	C	2.13

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.4 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (ML15B)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
J	ML15B	#400	95	1	3.5	-	60.6
J-2	ML15B	#400	95	48	3.5	-	1.1
J-3	ML15B	#400	95	48	3.5	-	28.2
J-4	ML15B	#400	95	48	3.5	-	1.0

表 3.5(1) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼（M16 その1）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
19-1	M16	#400	60	4	3.5	-	2.9
19-2	M16	#400	60	4	3.5	-	3.5
19-3	M16	#400	60	4	3.5	-	1.6
①1-1	M16	#400	95	4	3.5	-	19.8
①1-2	M16	#400	95	4	3.5	-	18.5
①1-3	M16	#400	95	4	3.5	-	17.5
④1-1	M16	#400	95	4	5	-	18.6
④1-2	M16	#400	95	4	5	-	19.1
④1-3	M16	#400	95	4	5	-	21.3
20-1	M16	#400	60	4	8	-	1.3
20-2	M16	#400	60	4	8	-	1.0
20-3	M16	#400	60	4	8	-	1.1
⑦1-1	M16	#400	95	0.5	8	-	19.3
⑦1-2	M16	#400	95	0.5	8	-	21.9
⑦1-3	M16	#400	95	0.5	8	-	23.4
⑧1-1	M16	#400	95	1	8	-	15.3
⑧1-2	M16	#400	95	1	8	-	15.1
⑧1-3	M16	#400	95	1	8	-	17.5
⑨1-1	M16	#400	95	4	8	-	16.9
⑨1-2	M16	#400	95	4	8	-	14.9
⑨1-3	M16	#400	95	4	8	-	17.3
⑩1-1	M16	#400	95	4	10	-	10.7
⑩1-2	M16	#400	95	4	10	-	9.7
⑩1-3	M16	#400	95	4	10	-	12.5
21-1	M16	#400	60	4	12	-	0.36
21-2	M16	#400	60	4	12	-	0.68
21-3	M16	#400	60	4	12	-	0.43
⑪1-1	M16	#400	95	0.5	12	-	8.1
⑪1-2	M16	#400	95	0.5	12	-	10.1
⑪1-3	M16	#400	95	0.5	12	-	8.7
⑫1-1	M16	#400	95	1	12	-	13.9
⑫1-2	M16	#400	95	1	12	-	13.7
⑫1-3	M16	#400	95	1	12	-	15.3
⑬1-1	M16	#400	95	4	12	-	6.1
⑬1-2	M16	#400	95	4	12	-	6.8
⑬1-3	M16	#400	95	4	12	-	7.1

表 3.5(2) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (M16 その2)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 °C	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
⑭1-1	M16	#400	95	0.5	3.5	A	3.7
⑭1-2	M16	#400	95	0.5	3.5	A	4.0
⑭1-3	M16	#400	95	0.5	3.5	A	4.0
⑮1-1	M16	#400	95	4	3.5	A	1.1
⑮1-2	M16	#400	95	4	3.5	A	0.94
⑮1-3	M16	#400	95	4	3.5	A	0.94
⑯1-1	M16	#400	95	4	8	B	1.5
⑯1-2	M16	#400	95	4	8	B	1.8
⑯1-3	M16	#400	95	4	8	B	1.3
⑰1-1	M16	#400	95	4	10	C	1.9
⑰1-2	M16	#400	95	4	10	C	1.8
⑰1-3	M16	#400	95	4	10	C	1.8

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.6(1) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼（Mm16T その1）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
22-1	Mm16T	#400	60	4	3.5	-	7.4
22-2	Mm16T	#400	60	4	3.5	-	6.6
22-3	Mm16T	#400	60	4	3.5	-	6.6
D	Mm16T	#400	95	1	3.5	-	28.0
②2-1	Mm16T	#400	95	4	3.5	-	20.1
②2-2	Mm16T	#400	95	4	3.5	-	18.3
②2-3	Mm16T	#400	95	4	3.5	-	18.9
D-1	Mm16T	#400	95	48	3.5	-	3.0
D-2	Mm16T	#400	95	48	3.5	-	3.6
D-3	Mm16T	#400	95	48	3.5	-	2.7
-	Mm16T	まま	95	100	3.5	-	2.0
-	Mm16T	まま	95	100	3.5	-	1.3
-	Mm16T	まま	95	100	3.5	-	1.3
⑤2-1	Mm16T	#400	95	4	5	-	18.6
⑤2-2	Mm16T	#400	95	4	5	-	19.1
⑤2-3	Mm16T	#400	95	4	5	-	21.3
23-1	Mm16T	#400	60	4	8	-	0.40
23-2	Mm16T	#400	60	4	8	-	0.72
23-3	Mm16T	#400	60	4	8	-	0.58
⑦2-1	Mm16T	#400	95	0.5	8	-	15.6
⑦2-2	Mm16T	#400	95	0.5	8	-	13.5
⑦2-3	Mm16T	#400	95	0.5	8	-	10.7
⑧2-1	Mm16T	#400	95	1	8	-	18.0
⑧2-2	Mm16T	#400	95	1	8	-	17.1
⑧2-3	Mm16T	#400	95	1	8	-	18.8
⑨2-1	Mm16T	#400	95	4	8	-	11.2
⑨2-2	Mm16T	#400	95	4	8	-	11.6
⑨2-3	Mm16T	#400	95	4	8	-	11.4
⑩2-1	Mm16T	#400	95	4	10	-	10.9
⑩2-2	Mm16T	#400	95	4	10	-	9.6
⑩2-3	Mm16T	#400	95	4	10	-	10.2

表 3.6(2) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼（Mm16T その2）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 °C	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
24-2	Mm16T	#400	60	4	12	-	0.23
24-2	Mm16T	#400	60	4	12	-	0.33
24-3	Mm16T	#400	60	4	12	-	0.33
⑪2-1	Mm16T	#400	95	0.5	12	-	6.1
⑪2-2	Mm16T	#400	95	0.5	12	-	5.8
⑪2-3	Mm16T	#400	95	0.5	12	-	6.9
⑫2-1	Mm16T	#400	95	1	12	-	9.8
⑫2-2	Mm16T	#400	95	1	12	-	9.5
⑫2-3	Mm16T	#400	95	1	12	-	9.4
⑬2-1	Mm16T	#400	95	4	12	-	5.6
⑬2-2	Mm16T	#400	95	4	12	-	5.9
⑬2-3	Mm16T	#400	95	4	12	-	10.7
⑭2-1	Mm16T	#400	95	0.5	3.5	A	3.7
⑭2-2	Mm16T	#400	95	0.5	3.5	A	4.0
⑭2-3	Mm16T	#400	95	0.5	3.5	A	3.7
⑮2-1	Mm16T	#400	95	4	3.5	A	0.90
⑮2-2	Mm16T	#400	95	4	3.5	A	0.72
⑮2-3	Mm16T	#400	95	4	3.5	A	0.58
⑯2-1	Mm16T	#400	95	4	8	B	1.3
⑯2-2	Mm16T	#400	95	4	8	B	1.3
⑯2-3	Mm16T	#400	95	4	8	B	1.3
⑰2-1	Mm16T	#400	95	4	10	C	1.8
⑰2-2	Mm16T	#400	95	4	10	C	2.0
⑰2-3	Mm16T	#400	95	4	10	C	1.7

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.7 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼（M16M 素管、M16A 被覆管、M16B 被覆管）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
G	M16M-600℃	#400	95	1	3.5	-	48.4
G600-1	M16M-600℃	#400	95	24	3.5	-	11.2
G600-2	M16M-600℃	#400	95	24	3.5	-	6.1
G600-3	M16M-600℃	#400	95	24	3.5	-	6.7
G	M16M-700℃	#400	95	1	3.5	-	112.8
G700-1	M16M-700℃	#400	95	24	3.5	-	4.1
G700-2	M16M-700℃	#400	95	24	3.5	-	6.6
G700-3	M16M-700℃	#400	95	24	3.5	-	6.0
G	M16M-780℃	#400	95	1	3.5	-	96.7
G780-1	M16M-780℃	#400	95	24	3.5	-	5.6
G780-2	M16M-780℃	#400	95	24	3.5	-	4.0
G780-3	M16M-780℃	#400	95	24	3.5	-	5.3
G	M16M-800℃	#400	95	1	3.5	-	139.5
G800-1	M16M-800℃	#400	95	24	3.5	-	5.5
G800-2	M16M-800℃	#400	95	24	3.5	-	6.2
G800-3	M16M-800℃	#400	95	24	3.5	-	5.9
C	M16A	#400	95	0.1	3.5	-	7237.7
C-1	M16A	#400	95	0.1	3.5	-	7367.3
C-2	M16A	#400	95	0.1	3.5	-	7366.0
C-3	M16A	#400	95	0.1	3.5	-	7295.7
C	M16A	まま	95	1	3.5	-	40.2
-	M16A	まま	95	4	3.5	-	9.1
-	M16A	まま	95	4	3.5	-	4.0
-	M16A	まま	95	4	3.5	-	8.3
-	M16A	まま	95	4	3.5	-	17.2
-	M16A	まま	95	50	8	-	5.1
-	M16A	まま	95	50	8	-	4.7
M-1①	M16B	#400	95	0.1	3.5	-	263.3
M-1②	M16B	#400	95	4	3.5	-	13.6
M-1③	M16B	#400	95	4	3.5	-	11.3
M-1④	M16B	#400	95	4	3.5	-	20.0
M-1②	M16B	#400	95	48	3.5	-	4.8
M-1③	M16B	#400	95	48	3.5	-	6.6
M-1④	M16B	#400	95	48	3.5	-	5.1

M16A 被覆管 (C) の素管=M16M (G)

表 3.8 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼相当（KB22）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
F	KB22-600℃	#400	95	1	3.5	-	44.0
F	KB22-600℃	まま	95	4	3.5	-	1.7
F600-1	KB22-600℃	#400	95	24	3.5	-	6.4
F600-2	KB22-600℃	#400	95	24	3.5	-	5.2
F600-3	KB22-600℃	#400	95	24	3.5	-	6.0
F	KB22-700℃	#400	95	1	3.5	-	60.7
F700-1	KB22-700℃	#400	95	24	3.5	-	5.8
F700-2	KB22-700℃	#400	95	24	3.5	-	5.6
F700-3	KB22-700℃	#400	95	24	3.5	-	5.7
F	KB22-780℃	#400	95	1	3.5	-	68.5
F780-1	KB22-780℃	#400	95	24	3.5	-	6.4
F780-2	KB22-780℃	#400	95	24	3.5	-	7.1
F780-3	KB22-780℃	#400	95	24	3.5	-	5.5
F	KB22-800℃	#400	95	1	3.5	-	61.6
F800-1	KB22-800℃	#400	95	24	3.5	-	5.2
F800-2	KB22-800℃	#400	95	24	3.5	-	7.6
F800-3	KB22-800℃	#400	95	24	3.5	-	5.6

表 3.9 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼（MPT3）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
P-1①	MPT3	#400	95	1	3.5	-	49.9
P-1②	MPT3	#400	95	4	3.5	-	18.3
P-1③	MPT3	#400	95	4	3.5	-	19.8
P-1④	MPT3	#400	95	4	3.5	-	19.4
P-1②	MPT3	#400	95	48	3.5	-	5.4
P-1③	MPT3	#400	95	48	3.5	-	5.8
P-1④	MPT3	#400	95	48	3.5	-	5.2

表 3.10 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼（M19 素管）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
R①	M19(No.54)	#400	95	1	3.5	-	32.2
R②	M19(No.54)	#400	95	4	3.5	-	25.1
R③	M19(No.54)	#400	95	4	3.5	-	23.7
R④	M19(No.54)	#400	95	4	3.5	-	23.9
R②	M19(No.54)	#400	95	48	3.5	-	6.0
R③	M19(No.54)	#400	95	48	3.5	-	4.6
R④	M19(No.54)	#400	95	48	3.5	-	5.2

表 3.11(1) 純硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼
(M19L その1)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
N-1②	M19L 被覆管	#400	95	1	1	-	841.3
N-1⑥	M19L 被覆管	#400	95	1	1	-	926.6
N-1⑦	M19L 被覆管	#400	95	1	1	-	902.6
N-1⑧	M19L 被覆管	#400	95	1	1	-	950.4
N-1③	M19L 被覆管	#400	95	1	2	-	150.6
N-1⑨	M19L 被覆管	#400	95	4	2	-	25.9
N-1⑩	M19L 被覆管	#400	95	4	2	-	25.3
N-1⑪	M19L 被覆管	#400	95	4	2	-	38.6
N-1⑨	M19L 被覆管	#400	95	48	2	-	2.6
N-1⑩	M19L 被覆管	#400	95	48	2	-	2.5
N-1⑪	M19L 被覆管	#400	95	48	2	-	3.6
M	M19L 熱間押出棒	#400	95	1	3.5	-	34.8
N-1①	M19L 被覆管	#400	95	1	3.5	-	32.3
N-1⑫	M19L 被覆管	#400	95	4	3.5	-	20.8
N-2①	M19L 被覆管	#400	95	4	3.5	-	21.9
N-2②	M19L 被覆管	#400	95	4	3.5	-	17.3
M-2	M19L 熱間押出棒	#400	95	48	3.5	-	3.4
M-3	M19L 熱間押出棒	#400	95	48	3.5	-	3.4
M-4	M19L 熱間押出棒	#400	95	48	3.5	-	3.4
N-1⑫	M19L 被覆管	#400	95	48	3.5	-	4.7
N-2①	M19L 被覆管	#400	95	48	3.5	-	5.3
N-2②	M19L 被覆管	#400	95	48	3.5	-	4.4
N-1④	M19L 被覆管	#400	95	1	5	-	30.7
N-2③	M19L 被覆管	#400	95	4	5	-	16.4
N-2④	M19L 被覆管	#400	95	4	5	-	17.0
N-2⑤	M19L 被覆管	#400	95	4	5	-	18.1
N-2③	M19L 被覆管	#400	95	48	5	-	5.5
N-2④	M19L 被覆管	#400	95	48	5	-	5.9
N-2⑤	M19L 被覆管	#400	95	48	5	-	5.0

表 3.11(2) 純硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼
(M19L その 2)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
N-1⑤	M19L 被覆管	#400	95	1	8	-	8.1
N-2⑧	M19L 被覆管	#400	95	4	8	-	9.3
N-2⑨	M19L 被覆管	#400	95	4	8	-	9.7
N-2⑩	M19L 被覆管	#400	95	4	8	-	13.3
	M19L 被覆管	#400	95	4	8	-	9.85
	M19L 被覆管	#400	95	4	8	-	9.34
N-2⑧	M19L 被覆管	#400	95	48	8	-	4.6
N-2⑨	M19L 被覆管	#400	95	48	8	-	5.1
N-2⑩	M19L 被覆管	#400	95	48	8	-	6.0
	M19L 被覆管	#400	95	4	10	-	4.62
	M19L 被覆管	#400	95	4	10	-	10.83
	M19L 被覆管	#400	95	4	12	-	5.77
	M19L 被覆管	#400	95	4	12	-	5.87
	M19L 被覆管	#400	95	4	3.5	A	0.84
	M19L 被覆管	#400	95	4	3.5	A	0.84
	M19L 被覆管	#400	95	4	8	B	2.26
	M19L 被覆管	#400	95	4	8	B	2.12
	M19L 被覆管	#400	95	4	10	C	2.19
	M19L 被覆管	#400	95	4	10	C	2.19
RUN2	M19L 被覆管	#400→#600	95	4	4.8	実	1.2
RUN2'	M19L 被覆管	RUN2 後再浸漬	95	40	4.8	実	1.4
RUN4	M19L 被覆管	RUN2'後再浸漬	95	4	8	-	2.5

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

実：実溶解液＝「常陽」MK-III 照射済燃料

表 3.12(1) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼（Mm19L その1）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
25-1	Mm19L	#400	60	4	3.5	-	7.6
25-2	Mm19L	#400	60	4	3.5	-	5.4
25-3	Mm19L	#400	60	4	3.5	-	9.5
2-2①	Mm19L	#400	95	1	3.5	-	49.9
③3-1	Mm19L	#400	95	4	3.5	-	23.3
③3-2	Mm19L	#400	95	4	3.5	-	19.3
③3-3	Mm19L	#400	95	4	3.5	-	25.3
2-2②	Mm19L	#400	95	4	3.5	-	12.3
2-2③	Mm19L	#400	95	4	3.5	-	14.7
2-2④	Mm19L	#400	95	4	3.5	-	17.7
2-2②	Mm19L	#400	95	48	3.5	-	3.7
2-2③	Mm19L	#400	95	48	3.5	-	4.8
2-2④	Mm19L	#400	95	48	3.5	-	4.7
⑥3-1	Mm19L	#400	95	4	5	-	26.6
⑥3-2	Mm19L	#400	95	4	5	-	26.3
⑥3-3	Mm19L	#400	95	4	5	-	15.0
26-1	Mm19L	#400	60	4	8	-	1.8
26-2	Mm19L	#400	60	4	8	-	1.3
26-3	Mm19L	#400	60	4	8	-	1.6
⑦3-1	Mm19L	#400	95	0.5	8	-	25.4
⑦3-2	Mm19L	#400	95	0.5	8	-	27.4
⑦3-3	Mm19L	#400	95	0.5	8	-	26.0
⑧3-1	Mm19L	#400	95	1	8	-	28.7
⑧3-2	Mm19L	#400	95	1	8	-	28.6
⑧3-3	Mm19L	#400	95	1	8	-	24.6
⑨3-1	Mm19L	#400	95	4	8	-	23.8
⑨3-2	Mm19L	#400	95	4	8	-	20.5
⑨3-3	Mm19L	#400	95	4	8	-	23.2
⑩3-1	Mm19L	#400	95	4	10	-	17.5
⑩3-2	Mm19L	#400	95	4	10	-	23.1
⑩3-3	Mm19L	#400	95	4	10	-	20.1

表 3.12(2) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼 (Mm19L その2)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 °C	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
27-1	Mm19L	#400	60	4	12	-	1.3
27-2	Mm19L	#400	60	4	12	-	1.2
27-3	Mm19L	#400	60	4	12	-	1.0
⑪3-1	Mm19L	#400	95	0.5	12	-	17.4
⑪3-2	Mm19L	#400	95	0.5	12	-	11.6
⑪3-3	Mm19L	#400	95	0.5	12	-	13.1
⑫3-1	Mm19L	#400	95	1	12	-	15.8
⑫3-2	Mm19L	#400	95	1	12	-	13.9
⑫3-3	Mm19L	#400	95	1	12	-	13.7
⑬3-1	Mm19L	#400	95	4	12	-	10.7
⑬3-2	Mm19L	#400	95	4	12	-	8.7
⑬3-3	Mm19L	#400	95	4	12	-	9.2
⑭3-1	Mm19L	#400	95	0.5	3.5	A	4.3
⑭3-2	Mm19L	#400	95	0.5	3.5	A	4.0
⑭3-3	Mm19L	#400	95	0.5	3.5	A	3.8
⑮3-1	Mm19L	#400	95	4	3.5	A	1.1
⑮3-2	Mm19L	#400	95	4	3.5	A	1.1
⑮3-3	Mm19L	#400	95	4	3.5	A	1.1
⑯3-1	Mm19L	#400	95	4	8	B	1.3
⑯3-2	Mm19L	#400	95	4	8	B	1.2
⑯3-3	Mm19L	#400	95	4	8	B	1.2
⑰3-1	Mm19L	#400	95	4	10	C	1.8
⑰3-2	Mm19L	#400	95	4	10	C	1.8
⑰3-3	Mm19L	#400	95	4	10	C	1.8

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.13 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼相当 (9CN(No.1))

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 °C	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
K	9CN(No.1)	#400	95	1	3.5	-	33.3
K-2	9CN(No.1)	#400	95	48	3.5	-	3.5
K-3	9CN(No.1)	#400	95	48	3.5	-	3.7
K-4	9CN(No.1)	#400	95	48	3.5	-	3.5

表 3.14 9Cr-ODS 鋼の硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液における溶解速度データ

液種	硝酸濃度 mol/L	ロット名 単位	M19L mm/y	Mm14 mm/y	Mm13 mm/y	M16 mm/y	Mm16T mm/y	Mm19L mm/y	平均値 mm/y	標準偏差 1σ mm/y	
純硝酸 水溶液	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3.5	-	20.0	3400	×	18.6	19.1	22.6	-	-	
	5	-	17.2	-	95.8	19.7	21.1	26.0	-	-	
	8	-	9.6	23.6	7.2	16.4	11.4	22.5	15	7	
	10	-	7.7	15.3	-	11.0	10.2	20.2	13	5	
	12	-	5.8	10.1	-	6.7	5.7	9.5	8	2	
	3.5	A	0.84	0.98	0.84	1.0	0.73	1.1	0.9	0.1	
	8	B	2.2	2.2	-	1.5	1.3	1.2	1.7	0.5	
	10	C	2.2	2.1	-	1.8	1.8	1.8	1.9	0.2	
	4.8	264gHM/L	1.2	-	1.3	-	-	-	-	1.3	-
	実溶解液										

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液
 溶液温度=95°C、浸漬時間=標準4時間（100mm/y程度超の試験の浸漬時間は5分～30分）
 浸漬前後の重量変化をもとに溶解速度に換算（3試料平均値）

×：活性溶解（急激な発泡と試験溶液の変色）を呈し、溶解速度の定量不可

表 3.15 9Cr-ODS 鋼の硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液における溶解速度データ（浸漬時間依存性データ）

液種	硝酸濃度 mol/L	M16		Mm16T		Mm16T		Mm16T		Mm19L		Mm19L	
		30min mm/y	60min mm/y	4hr mm/y	30min mm/y	60min mm/y	4hr mm/y	30min mm/y	60min mm/y	30min mm/y	60min mm/y	4hr mm/y	
純硝酸 水溶液	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3.5	-	-	18.6	-	-	19.1	-	-	-	-	-	22.6
	5	-	-	19.7	-	-	21.1	-	-	-	-	-	26.0
	8	21.5	16.0	16.4	13.3	18.0	11.4	26.3	27.3	22.5	20.2	-	-
	10	-	-	11.0	-	-	10.2	-	-	-	-	-	-
	12	-	9.0	6.7	6.3	9.6	5.7	14.0	14.5	9.5	-	-	-
模擬 溶解液	3.5	A	3.9	1.0	3.8	-	0.73	-	-	-	-	-	1.1
	8	B	-	1.5	-	-	1.3	-	-	-	-	-	1.2
	10	C	-	1.8	-	-	1.8	-	-	-	-	-	1.8
実溶解液	4.8	264gHM/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液
 溶液温度 = 95°C

浸漬前後の重量変化をもとに溶解速度に換算（3 試料平均値）

表 3.16 9Cr-ODS 鋼・12Cr-ODS 鋼・5 元系モデル合金の純硝酸水溶液における腐食電位測定結果：30℃

ロット名	クロム濃度		チタン濃度		硝酸濃度	温度 ℃	分極曲線から求めた腐食電位		活性溶解の観察*
	mass%	mass%	mass%	mass%			試験 1 mV(SCE)	試験 2 mV(SCE)	
M11	9.01	0.21	0.21	0.21	3.5	30	-84,-15,458	452	無
Mm13	8.83	0.21	0.21	0.21	3.5	30	-105	-92	有
Mm14	8.84	0.20	0.20	0.20	3.5	30	-110	-112,11	有
ML15B	9.03	0.22	0.22	0.22	3.5	30	384,431	-102,-16,209	無
Mm16T	9.02	0.31	0.31	0.31	3.5	30	488	471	無
M16M	8.90	0.20	0.20	0.20	3.5	30	-105,8,453	-129,955	有
M16A	8.90	0.20	0.20	0.20	3.5	30	197	438	有
M16B	8.90	0.20	0.20	0.20	3.5	30	210	240	無
KB22	9.09	0.21	0.21	0.21	3.5	30	-134,169,523	-128,158,537	無
MPT3	9.00	0.28	0.28	0.28	3.5	30	163	149	無
M19L (熱間押出棒)	9.16	0.22	0.22	0.22	1	30	-115	-116	-
M19L (熱間押出棒)	9.16	0.22	0.22	0.22	2	30	-70,-7,159,214	-56,28,122,188,208	-
M19L (熱間押出棒)	9.16	0.22	0.22	0.22	3.5	30	473	473	無
M19L (中間製品 1CR)	9.16	0.22	0.22	0.22	3.5	30	472	499	無
M19L (中間製品 2CR)	9.16	0.22	0.22	0.22	3.5	30	531	536	無
M19L (中間製品 3CR)	9.16	0.22	0.22	0.22	3.5	30	489	540	無
M19L (熱間押出棒)	9.16	0.22	0.22	0.22	3.5	30	277	287	無
M19L (熱間押出棒)	9.16	0.22	0.22	0.22	5	30	8,102,410	4,35,56,118,452	-
M19L (熱間押出棒)	9.16	0.22	0.22	0.22	8	30	714	648	-
9CN	9.2	0.30	0.30	0.30	3.5	30	477	476	無
F14	11.4	0.26	0.26	0.26	3.5	30	435	479	無
9Cr-0.13C-0.00Ti	8.88	0.004	0.004	0.004	3.5	30	278	313	-
9Cr-0.13C-0.10Ti	8.97	0.086	0.086	0.086	3.5	30	332	444	-
9Cr-0.13C-0.20Ti	9.00	0.16	0.16	0.16	3.5	30	444	493	-

*：浸漬条件=95℃×純硝酸水溶液 3.5mol/L、100mm/y 以上の溶解速度が観察された場合は「有」と判定

表 3.17 9Cr-ODS 鋼のなかの M19L の純硝酸水溶液と模擬溶解液における腐食電位測定結果

ロット名	状態/形状	クロム濃度	チタン濃度	硝酸濃度	溶存金属	温度	試験 1	腐食電位
		mass%	mass%	mol/L	イオン種	°C	mV(SCE)	試験 2
M19L	被覆管製品	9.16	0.22	1	-	30	-115	-116
M19L	被覆管製品	9.16	0.22	2	-	30	-70,-7,159,214	-56,28,122,188,208
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	3.5	-	30	473	473
M19L	中間製品 1CR	9.16	0.22	3.5	-	30	472	499
M19L	中間製品 2CR	9.16	0.22	3.5	-	30	531	536
M19L	中間製品 3CR	9.16	0.22	3.5	-	30	489	540
M19L	被覆管製品	9.16	0.22	3.5	-	30	277	287
M19L	被覆管製品	9.16	0.22	3.5	-	60	50,119,590	44,112,616
M19L	被覆管製品	9.16	0.22	3.5	-	90	514	139,467
M19L	被覆管製品	9.16	0.22	3.5	-	95	634	640
M19L	被覆管製品	9.16	0.22	5	-	30	8,102,410	4,35,56,118,452
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	5	-	95	639	663
M19L	被覆管製品	9.16	0.22	8	-	30	714	648
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	8	-	95	756	735
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	10	-	95	722	724
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	12	-	95	726	734
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	3.5	A	95	895	881
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	8	B	95	937	892
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	10	C	95	929	914

A : 高濃度模擬溶解液、B : 中濃度模擬溶解液、C : 低濃度模擬溶解液

30°C、60°C、90°C : 分極曲線から読み取り

95°C : 1 分浸漬後 (51~60 秒) の浸漬電位の平均値

表 3.18 硝酸水溶液の溶液電位の測定結果

溶液種	遊離硝酸濃度	V 濃度	Ru 濃度	溶液電位
	mol/L	mol/L	mol/L	mV(SCE)
純硝酸水溶液	1	-	-	941
	3.5	-	-	976
	5	-	-	985
	8	-	-	1004
	10	-	-	1066
	12	-	-	1157
高濃度模擬溶液：A	3.5	8.6×10^{-2}	2.5×10^{-2}	992
中濃度模擬溶液：B	8	3.5×10^{-2}	1.0×10^{-2}	1038
低濃度模擬溶液：C	10	1.7×10^{-2}	5.0×10^{-3}	1093

温度：95°C、浸漬時間：10分、電極：白金

表 3.19(1) 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼改良試作材（その1）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
⑤-1	M1	#400	95	1	3.5	-	21.8
⑤-2	M1	#400	95	1	3.5	-	16.7
⑤-3	M1	#400	95	1	3.5	-	19.9
⑤-1	M1	#400	95	4	3.5	-	11.8
⑤-2	M1	#400	95	4	3.5	-	12.5
⑤-3	M1	#400	95	4	3.5	-	13.2
f-1	M1	#400	95	1	8	-	8.4
f-2	M1	#400	95	1	8	-	10.7
f-3	M1	#400	95	1	8	-	7.0
f-1	M1	#400	95	4	8	-	10.6
f-2	M1	#400	95	4	8	-	12.8
f-3	M1	#400	95	4	8	-	11.1
f-4	M1	#400	95	1	12	-	1.1
f-5	M1	#400	95	1	12	-	1.1
f-6	M1	#400	95	1	12	-	1.1
f-4	M1	#400	95	4	12	-	2.1
f-5	M1	#400	95	4	12	-	1.6
f-6	M1	#400	95	4	12	-	1.7
a-1	M2	#400	95	1	3.5	-	53.2
a-2	M2	#400	95	1	3.5	-	57.5
a-3	M2	#400	95	1	3.5	-	71.4
a-1	M2	#400	95	4	3.5	-	23.0
a-2	M2	#400	95	4	3.5	-	27.0
a-3	M2	#400	95	4	3.5	-	27.5
b-1	M3	#400	95	1	3.5	-	25.1
b-2	M3	#400	95	1	3.5	-	19.3
b-3	M3	#400	95	1	3.5	-	20.9
b-1	M3	#400	95	4	3.5	-	14.2
b-2	M3	#400	95	4	3.5	-	13.0
b-3	M3	#400	95	4	3.5	-	13.4
c-1	M4	#400	95	1	3.5	-	20.6
c-2	M4	#400	95	1	3.5	-	17.9
c-3	M4	#400	95	1	3.5	-	16.2
c-1	M4	#400	95	4	3.5	-	13.2
c-2	M4	#400	95	4	3.5	-	12.3
c-3	M4	#400	95	4	3.5	-	11.7

表 3.19(2) 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼改良試作材（その2）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
d-1	M5	#400	95	1	3.5	-	23.3
d-2	M5	#400	95	1	3.5	-	18.2
d-3	M5	#400	95	1	3.5	-	23.6
d-1	M5	#400	95	4	3.5	-	14.5
d-2	M5	#400	95	4	3.5	-	13.2
d-3	M5	#400	95	4	3.5	-	14.8
e-1	M6	#400	95	1	3.5	-	24.2
e-2	M6	#400	95	1	3.5	-	22.5
e-3	M6	#400	95	1	3.5	-	21.9
e-1	M6	#400	95	4	3.5	-	15.0
e-2	M6	#400	95	4	3.5	-	14.3
e-3	M6	#400	95	4	3.5	-	13.8

表 3.19(3) 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼改良試作材（その3）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
①-4	M7	#400	95	1	1	-	847.4
①-5	M7	#400	95	1	1	-	847.2
①-6	M7	#400	95	1	1	-	907.4
①-4	M7	#400	95	4	1	-	509.1
①-5	M7	#400	95	4	1	-	211.9
①-6	M7	#400	95	4	1	-	530.8
①-7	M7	#400	95	1	2	-	168.2
①-8	M7	#400	95	1	2	-	1889.7
①-9	M7	#400	95	1	2	-	255.1
①-7	M7	#400	95	4	2	-	42.1
①-8	M7	#400	95	4	2	-	472.5
①-9	M7	#400	95	4	2	-	63.8
①-1	M7	#400	95	1	3.5	-	40.7
①-2	M7	#400	95	1	3.5	-	33.7
①-3	M7	#400	95	1	3.5	-	42.9
①-1	M7	#400	95	4	3.5	-	22.6
①-2	M7	#400	95	4	3.5	-	21.7
①-3	M7	#400	95	4	3.5	-	22.4
①-10	M7	#400	95	1	5	-	30.4
①-11	M7	#400	95	1	5	-	25.1
①-12	M7	#400	95	1	5	-	27.6
①-10	M7	#400	95	4	5	-	19.0
①-11	M7	#400	95	4	5	-	18.8
①-12	M7	#400	95	4	5	-	22.3
①-13	M7	#400	95	1	8	-	2.2
①-14	M7	#400	95	1	8	-	1.1
①-15	M7	#400	95	1	8	-	0.8
①-13	M7	#400	95	4	8	-	10.6
①-14	M7	#400	95	4	8	-	3.4
①-15	M7	#400	95	4	8	-	2.0
g-1	M7	#400	95	1	12	-	1.1
g-2	M7	#400	95	1	12	-	1.1
g-3	M7	#400	95	1	12	-	1.4
g-1	M7	#400	95	4	12	-	4.0
g-2	M7	#400	95	4	12	-	3.9
g-3	M7	#400	95	4	12	-	3.5

表 3.19(4) 純硝酸水溶液への溶解速度：9Cr-ODS 鋼改良試作材（その4）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
②-1	M8	#400	95	1	3.5	-	62.9
②-2	M8	#400	95	1	3.5	-	52.2
②-3	M8	#400	95	1	3.5	-	60.9
②-1	M8	#400	95	4	3.5	-	29.1
②-2	M8	#400	95	4	3.5	-	31.1
②-3	M8	#400	95	4	3.5	-	29.8
③-1	M9	#400	95	1	3.5	-	28.4
③-2	M9	#400	95	1	3.5	-	33.3
③-3	M9	#400	95	1	3.5	-	26.8
③-1	M9	#400	95	4	3.5	-	19.5
③-2	M9	#400	95	4	3.5	-	19.2
③-3	M9	#400	95	4	3.5	-	17.5
④-1	M10	#400	95	1	3.5	-	37.4
④-2	M10	#400	95	1	3.5	-	40.2
④-3	M10	#400	95	1	3.5	-	40.1
④-1	M10	#400	95	4	3.5	-	22.4
④-2	M10	#400	95	4	3.5	-	21.3
④-3	M10	#400	95	4	3.5	-	27.5

表 3.20 純硝酸水溶液への溶解速度：12Cr-ODS 鋼

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
-	F13	まま	95	100	3.5	-	0.46
-	F13	まま	95	24	8	-	0.37
-	F13	まま	100	6	8	-	0.47
-	F13	まま	沸点	6	8	-	1.3
E	F14	#400	95	1	3.5	-	3.4
-	F14	まま	95	100	3.5	-	0.44
-	F14	まま	95	100	3.5	-	0.45
E-1	F14	#400	95	100	3.5	-	0.5
E-2	F14	#400	95	100	3.5	-	0.4
E-3	F14	#400	95	100	3.5	-	0.4

表 3.21(1) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：PNC-FMS（19FK その1）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
①	19FK03	#400	95	4	1	-	24.5
①	19FK03	#400	95	4	1	-	39.8
①	19FK03	#400	95	4	1	-	36.2
②	19FK03	#400	95	4	2	-	6.5
②	19FK03	#400	95	4	2	-	4.2
②	19FK03	#400	95	4	2	-	8.4
⑬	19FK03	#400	60	4	3.5	-	0.21
⑬	19FK03	#400	60	4	3.5	-	0.18
⑬	19FK03	#400	60	4	3.5	-	0.23
③	19FK03	#400	95	4	3.5	-	2.3
③	19FK03	#400	95	4	3.5	-	2.0
③	19FK03	#400	95	4	3.5	-	1.7
④	19FK03	#400	95	4	5	-	1.5
④	19FK03	#400	95	4	5	-	1.4
④	19FK03	#400	95	4	5	-	1.3
⑰	19FK03	#400	60	4	8	-	0.05
⑰	19FK03	#400	60	4	8	-	0.07
⑰	19FK03	#400	60	4	8	-	0.03
⑤	19FK03	#400	95	0.5	8	-	1.2
⑤	19FK03	#400	95	0.5	8	-	1.1
⑤	19FK03	#400	95	0.5	8	-	0.92
⑥	19FK03	#400	95	1	8	-	0.73
⑥	19FK03	#400	95	1	8	-	0.92
⑥	19FK03	#400	95	1	8	-	0.72
⑦	19FK03	#400	95	4	8	-	1.2
⑦	19FK03	#400	95	4	8	-	1.1
⑦	19FK03	#400	95	4	8	-	1.1

表 3.21(2) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：PNC-FMS（19FK その2）

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
⑧	19FK03	#400	95	4	10	-	1.1
⑧	19FK03	#400	95	4	10	-	1.2
⑧	19FK03	#400	95	4	10	-	1.2
⑱	19FK03	#400	60	4	12	-	0.07
⑱	19FK03	#400	60	4	12	-	0.05
⑱	19FK03	#400	60	4	12	-	0.05
⑨	19FK03	#400	95	0.5	12	-	0.92
⑨	19FK03	#400	95	0.5	12	-	0.92
⑨	19FK03	#400	95	0.5	12	-	0.92
⑩	19FK03	#400	95	1	12	-	0.59
⑩	19FK03	#400	95	1	12	-	0.66
⑩	19FK03	#400	95	1	12	-	0.72
⑪	19FK03	#400	95	4	12	-	1.2
⑪	19FK03	#400	95	4	12	-	1.2
⑪	19FK03	#400	95	4	12	-	1.1
⑫	19FK03	#400	95	0.5	3.5	A	0.92
⑫	19FK03	#400	95	0.5	3.5	A	0.79
⑫	19FK03	#400	95	0.5	3.5	A	1.1
⑬	19FK03	#400	95	4	3.5	A	1.1
⑬	19FK03	#400	95	4	3.5	A	1.1
⑬	19FK03	#400	95	4	3.5	A	1.1
⑭	19FK03	#400	95	4	8	B	1.1
⑭	19FK03	#400	95	4	8	B	1.2
⑭	19FK03	#400	95	4	8	B	1.1
⑮	19FK03	#400	95	4	10	C	0.86
⑮	19FK03	#400	95	4	10	C	0.86
⑮	19FK03	#400	95	4	10	C	0.87

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.22(1) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：PNC316 (LK051 その1)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
①	LK051	#400	95	4	1	-	0.00
①	LK051	#400	95	4	1	-	0.03
①	LK051	#400	95	4	1	-	0.03
②	LK051	#400	95	4	2	-	0.00
②	LK051	#400	95	4	2	-	0.03
②	LK051	#400	95	4	2	-	0.00
⑬	LK051	#400	60	4	3.5	-	0.23
⑬	LK051	#400	60	4	3.5	-	0.23
⑬	LK051	#400	60	4	3.5	-	0.23
③	LK051	#400	95	4	3.5	-	0.03
③	LK051	#400	95	4	3.5	-	0.06
③	LK051	#400	95	4	3.5	-	0.06
④	LK051	#400	95	4	5	-	0.03
④	LK051	#400	95	4	5	-	0.06
④	LK051	#400	95	4	5	-	0.03
⑰	LK051	#400	60	4	8	-	0.20
⑰	LK051	#400	60	4	8	-	0.23
⑰	LK051	#400	60	4	8	-	0.26
⑤	LK051	#400	95	0.5	8	-	0.138
⑤	LK051	#400	95	0.5	8	-	0.069
⑤	LK051	#400	95	0.5	8	-	0.092
⑥	LK051	#400	95	1	8	-	0.11
⑥	LK051	#400	95	1	8	-	0.23
⑥	LK051	#400	95	1	8	-	0.00
⑦	LK051	#400	95	4	8	-	0.06
⑦	LK051	#400	95	4	8	-	0.06
⑦	LK051	#400	95	4	8	-	0.06

表 3.22(2) 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：PNC316 (LK051 その2)

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
⑧	LK051	#400	95	4	10	-	0.03
⑧	LK051	#400	95	4	10	-	0.03
⑧	LK051	#400	95	4	10	-	0.06
⑱	LK051	#400	60	4	12	-	0.17
⑱	LK051	#400	60	4	12	-	0.17
⑱	LK051	#400	60	4	12	-	0.20
⑨	LK051	#400	95	0.5	12	-	0.046
⑨	LK051	#400	95	0.5	12	-	0.046
⑨	LK051	#400	95	0.5	12	-	0.023
⑩	LK051	#400	95	1	12	-	0.23
⑩	LK051	#400	95	1	12	-	0.46
⑩	LK051	#400	95	1	12	-	0.34
⑪	LK051	#400	95	4	12	-	0.09
⑪	LK051	#400	95	4	12	-	0.12
⑪	LK051	#400	95	4	12	-	0.11
⑫	LK051	#400	95	0.5	3.5	A	0.367
⑫	LK051	#400	95	0.5	3.5	A	0.345
⑫	LK051	#400	95	0.5	3.5	A	0.299
⑬	LK051	#400	95	4	3.5	A	0.29
⑬	LK051	#400	95	4	3.5	A	0.23
⑬	LK051	#400	95	4	3.5	A	0.32
⑭	LK051	#400	95	4	8	B	0.63
⑭	LK051	#400	95	4	8	B	0.55
⑭	LK051	#400	95	4	8	B	0.69
⑮	LK051	#400	95	4	10	C	0.46
⑮	LK051	#400	95	4	10	C	0.40
⑮	LK051	#400	95	4	10	C	0.49

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.23 9Cr-ODS 鋼改良試作材と 12Cr-ODS 鋼の硝酸水溶液・模擬溶解液・実溶解液における溶解速度データ (mm/y)

液種	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	浸漬時間 hr	ロット名	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	F14		
純硝酸 水溶液	1	-	1	Cr	10	10	10	10	10	10	9.5	9.5	9.5	9.5	12		
			4	W	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.5	1.5	1.0	1.5	1.5	2		
	2	-	1	Ti	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.26	
			4	Ni	0	0	0.4	0.4	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0
	3.5	-	-	1	Y ₂ O ₃	0.35	0.35	0.35	0.35	0.30	0.25	0.35	0.35	0.35	0.30	0.23	
				4													
				1													
				4													
	5	-	-	1		19.5	64.0	21.8	18.2	21.7	22.9	39.1	58.7	29.5	39.2	3.4	
				4		12.5	25.8	13.5	12.4	14.2	14.4	22.2	30.0	18.7	23.7	-	
	8	-	-	1		-	-	-	-	-	-	27.7	-	-	-	-	
				4		-	-	-	-	-	-	-	20.0	-	-	-	-
10	-	-	1		8.7	-	-	-	-	-	1.4	-	-	-	-		
			4		11.5	-	-	-	-	-	5.3	-	-	-	-	-	
12	-	-	1		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			4		1.1	-	-	-	-	-	1.2	-	-	-	-	-	
模擬 溶解液	3.5	A	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	8	B	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	10	C	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
実溶解液	4.8	264gHM/L	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

A : 高濃度模擬溶解液、B : 中濃度模擬溶解液、C : 低濃度模擬溶解液、溶液温度=95°C、3 試料平均値

表 3.24 PNC-FMS と PNC316 の硝酸水溶液と模擬溶解液における溶解速度データ（浸漬時間依存性データ）

		銅種	PNC316	PNC316	PNC316	PNC-FMS	PNC-FMS	PNC-FMS
		ロット名	LK051	LK051	LK051	19FK03	19FK03	19FK03
		浸漬時間	30min	60min	4hr	30min	60min	4hr
		単位	mm/y	mm/y	mm/y	mm/y	mm/y	mm/y
液種	硝酸濃度	溶存金属	-	-	-	-	-	-
	mol/L	イオン種	-	-	-	-	-	-
純硝酸 水溶液	1	-	-	-	0.02	-	-	33.5
	2	-	-	-	0.01	-	-	6.4
	3.5	-	-	-	0.04	-	-	2.0
	5	-	-	-	0.04	-	-	1.4
	8	-	0.08	0.11	0.06	1.1	0.79	1.1
	10	-	-	-	0.04	-	-	1.2
	12	-	0.15	0.34	0.11	0.92	0.66	1.2
	3.5	A	0.38	-	0.28	0.92	-	1.1
模擬 溶解液	8	B	-	-	0.62	-	-	1.1
	10	C	-	-	0.45	-	-	0.86
	4.8	264gHM/L	-	-	-	-	-	-

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.25 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 1

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
	12Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	92.12
	12Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	75.02
	12Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	65.02
	12Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	0.27
	12Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	0.26
	12Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	0.32
	12Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	0.27
	12Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	0.28
	12Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	0.25
	12Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	0.30
	12Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	0.47
	12Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	0.47
	12Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	0.58
	12Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	0.47
	12Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	0.47
	12Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	0.56
	12Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	0.63
	12Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	0.54
	12Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.52
	12Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.47
	12Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.41
	12Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.53
	12Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.44
	12Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.40
	12Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	1.77
	12Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	1.96
	12Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	1.83

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.26 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その2

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
	11Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	75.63
	11Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	72.68
	11Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	75.56
	11Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	1.10
	11Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	1.32
	11Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	1.25
	11Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	0.85
	11Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	0.87
	11Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	1.01
	11Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	0.86
	11Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	0.69
	11Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	1.03
	11Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	1.04
	11Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	0.93
	11Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	1.03
	11Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	0.86
	11Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	0.82
	11Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	0.86
	11Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.54
	11Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.50
	11Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.54
	11Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.62
	11Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.38
	11Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.62
	11Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	2.13
	11Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	2.03
	11Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	2.20

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.27 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その3

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
	10Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	56.02
	10Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	77.69
	10Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	135.14
	10Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	2.20
	10Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	3.46
	10Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	3.24
	10Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	3.60
	10Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	3.65
	10Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	3.86
	10Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	2.05
	10Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	1.80
	10Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	1.84
	10Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	1.70
	10Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	1.63
	10Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	1.52
	10Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	1.76
	10Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	1.65
	10Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	1.88
	10Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.90
	10Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.82
	10Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	0.84
	10Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.98
	10Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	2.26
	10Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.34
	10Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	2.18
	10Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	2.18
	10Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	2.14

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

表 3.28 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その4

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
	9Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	9Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	9Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	9Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	3.26
	9Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	2.80
	9Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	2.33
	9Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	3.81
	9Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	1.35
	9Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	1.38
	9Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	2.48
	9Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	2.34
	9Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	1.75
	9Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	3.12
	9Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	2.74
	9Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	2.16
	9Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	2.89
	9Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	2.67
	9Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	2.56
	9Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	1.32
	9Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	1.29
	9Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	1.21
	9Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.60
	9Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.88
	9Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.64
	9Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	2.54
	9Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	3.36
	9Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	3.15

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

×：活性溶解のため溶解速度の定量困難（溶解速度>>100mm/y）

表 3.29 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その5

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
	8Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	8Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	8Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	8Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	8.71
	8Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	6.32
	8Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	7.56
	8Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	3.37
	8Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	3.45
	8Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	9.63
	8Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	5.27
	8Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	4.69
	8Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	5.91
	8Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	3.06
	8Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	2.45
	8Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	2.51
	8Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	3.26
	8Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	4.57
	8Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	3.03
	8Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	1.12
	8Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	1.12
	8Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	1.34
	8Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	2.46
	8Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	1.86
	8Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	3.79
	8Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	3.21
	8Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	4.89
	8Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	4.81

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

×：活性溶解のため溶解速度の定量困難（溶解速度>>100mm/y）

表 3.30 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その6

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
	6Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	6Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	6Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	6Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	6Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	6Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	6Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	68.71
	6Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	64.83
	6Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	62.68
	6Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	12.22
	6Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	12.43
	6Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	8.74
	6Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	6.05
	6Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	7.86
	6Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	7.22
	6Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	7.52
	6Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	7.41
	6Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	8.31
	6Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	1.38
	6Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	1.17
	6Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	3.69
	6Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	2.98
	6Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	2.85
	6Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	3.06
	6Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	5.43
	6Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	4.94
	6Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	5.63

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

×：活性溶解のため溶解速度の定量困難（溶解速度>>100mm/y）

表 3.31 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その7

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
1-1	5Cr-0Ni	#400	95	数分	8	-	×
1-2	5Cr-0Ni	#400	95	数分	8	-	×
1-3	5Cr-0Ni	#400	95	数分	8	-	×
2-1	5Cr-0Ni	#400	95	4	10	-	29.76
2-2	5Cr-0Ni	#400	95	4	10	-	27.31
2-3	5Cr-0Ni	#400	95	4	10	-	22.59
3-1	5Cr-0Ni	#400	95	4	12	-	19.38
3-2	5Cr-0Ni	#400	95	4	12	-	22.89
3-3	5Cr-0Ni	#400	95	4	12	-	21.10
4-1	5Cr-0Ni	#400	95	数分	3.5	A	×
4-2	5Cr-0Ni	#400	95	数分	3.5	A	×
4-3	5Cr-0Ni	#400	95	数分	3.5	A	×
5-1	5Cr-0Ni	#400	95	4	8	B	3.85
5-2	5Cr-0Ni	#400	95	4	8	B	3.84
5-3	5Cr-0Ni	#400	95	4	8	B	4.01
6-1	5Cr-0Ni	#400	95	4	10	C	4.54
6-2	5Cr-0Ni	#400	95	4	10	C	4.49
6-3	5Cr-0Ni	#400	95	4	10	C	4.33

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

×：活性溶解のため溶解速度の定量困難（溶解速度>>100mm/y）

表 3.32 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その 8

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
	4Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	56.94
	4Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	49.69
	4Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	67.24
	4Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	25.37
	4Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	23.34
	4Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	23.85
	4Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	23.76
	4Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	20.58
	4Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	25.77
	4Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	×
	4Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	6.38
	4Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	5.93
	4Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	5.97
	4Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	8.56
	4Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	11.80
	4Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	11.08

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

×：活性溶解のため溶解速度の定量困難（溶解速度>>100mm/y）

表 3.33 純硝酸水溶液と模擬溶解液への溶解速度：モデル合金その9

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
	2Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	1	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	5	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	8	-	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	49.43
	2Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	47.53
	2Cr-0Ni	#600	95	4	10	-	53.60
	2Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	51.83
	2Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	46.60
	2Cr-0Ni	#600	95	4	12	-	55.13
	2Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	3.5	A	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	8	B	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	×
	2Cr-0Ni	#600	95	4	10	C	×

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液

×：活性溶解のため溶解速度の定量困難（溶解速度>>100mm/y）

表 3.34 硝酸水溶液への溶解速度：モデル合金その10

試料 番号	ロット	表面 仕上げ	温度 ℃	時間 hr	硝酸濃度 mol/L	溶存金属 イオン種	溶解速度 mm/y
22-1	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	3.5	-	196.5
22-2	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	3.5	-	132.6
22-3	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	3.5	-	120.6
7-1	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	8	-	41.14
7-2	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	8	-	33.49
7-3	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	8	-	94.40
8-1	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	10	-	8.38
8-2	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	10	-	7.52
8-3	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	10	-	7.86
9-1	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	12	-	6.73
9-2	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	12	-	5.05
9-3	9Cr-0.13C-0.00Ti	#400	95	4	12	-	3.71
23-1	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	3.5	-	21.46
23-2	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	3.5	-	16.60
23-3	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	3.5	-	16.34
10-1	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	8	-	18.28
10-2	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	8	-	16.23
10-3	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	8	-	13.54
11-1	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	10	-	5.96
11-2	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	10	-	5.06
11-3	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	10	-	7.77
12-1	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	12	-	5.40
12-2	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	12	-	5.66
12-3	9Cr-0.13C-0.10Ti	#400	95	4	12	-	5.04
24-1	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	3.5	-	16.31
24-2	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	3.5	-	15.39
24-3	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	3.5	-	12.00
13-1	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	8	-	4.22
13-2	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	8	-	3.89
13-3	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	8	-	5.07
14-1	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	10	-	1.84
14-2	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	10	-	1.95
14-3	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	10	-	1.84
15-1	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	12	-	1.72
15-2	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	12	-	2.00
15-3	9Cr-0.13C-0.20Ti	#400	95	4	12	-	1.96

表 3.35 3 元系モデル合金の純硝酸水溶液と模擬溶解液における溶解速度データ (mm/y)

液種	硝酸濃度 mol/L	Cr	12Cr	11Cr	10Cr	9Cr	8Cr	6Cr	5Cr	4Cr	2Cr
		Ni 溶存金属 イオン種	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni
純硝酸 水溶液	1	-	77.4	74.6	89.6	×	×	×	-	×	×
	3.5	-	0.3	1.2	3.0	2.8	7.5	×	-	×	×
	5	-	0.3	0.9	3.7	2.2	5.5	65.4	-	×	×
	8	-	0.4	0.9	1.9	2.2	5.3	11.1	×	58.0	×
	10	-	0.5	1.0	1.6	2.7	2.7	7.0	26.6	24.2	50.2
	12	-	0.6	0.8	1.8	2.7	2.7	3.6	21.1	23.4	51.2
模擬 溶解液	3.5	A	0.5	0.5	0.9	1.3	1.2	2.1	×	×	×
	8	B	1.5	1.5	1.9	1.7	2.7	3.0	3.9	6.1	×
	10	C	1.9	2.1	2.2	3.0	4.3	5.3	4.5	10.5	×

A：高濃度模擬溶解液、B：中濃度模擬溶解液、C：低濃度模擬溶解液
 溶液温度=95°C、浸漬時間=標準4時間(100mm/y程度超の試験の浸漬時間は数分~30分)
 浸漬前後の重量変化をもとに溶解速度に換算(3試料平均値)

×：活性溶解(急激な発泡と試験溶液の変色)を呈し、溶解速度の定量不可

表 3.36 3 元系モデル合金の純硝酸水溶液と模擬溶解液における腐食電位測定結果

ロット名	形状	クロム濃度		チタン濃度		硝酸濃度	溶存金属 イオン種	温度 ℃	腐食電位		
		mass%	mass%	mass%	mass%				試験 1 mV(SCE)	試験 2 mV(SCE)	平均値 mV(SCE)
Fe-9Cr	板	9	0	0	10	-	-	95	837	824	831
Fe-6Cr	板	6	0	0	10	-	-	95	780	775	778
Fe-4Cr	板	4	0	0	10	-	-	95	663	753	708
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	0.22	10	-	-	95	722	724	723
Fe-9Cr	板	9	0	0	10	C	-	95	923	922	923
Fe-6Cr	板	6	0	0	10	C	-	95	865	860	863
Fe-4Cr	板	4	0	0	10	C	-	95	828	800	814
M19L	熱間押出棒	9.16	0.22	0.22	10	C	-	95	929	914	922

C : 低濃度模擬溶解液

表 3.37 3 元系モデル合金と 5 元系モデル合金の純硝酸水溶液と模擬溶解液における溶解速度データ (mm/y)

液種	硝酸濃度 mol/L	Cr		9Cr		9Cr		9Cr	
		Cr	Ni	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni	0Ni
純硝酸 水溶液	1	-	-	×	-	-	-	-	-
	3.5	-	-	2.8	×	18.1	14.6	-	-
	5	-	-	2.2	-	-	-	-	-
	8	-	-	2.2	56.3	16.0	4.4	-	-
	10	-	-	2.7	7.9	6.3	1.9	-	-
	12	-	-	2.7	5.2	5.4	1.9	-	-
模擬 溶解液	3.5	A	1.3	-	-	-	-	-	-
	8	B	1.7	-	-	-	-	-	-
	10	C	3.0	-	-	-	-	-	-

A : 高濃度模擬溶解液、B : 中濃度模擬溶解液、C : 低濃度模擬溶解液
 溶液温度 = 95°C、浸漬時間 = 標準 4 時間 (100mm/y 程度超の試験の浸漬時間は数分~30 分)
 浸漬前後の重量変化をもとに溶解速度に換算 (3 試料平均値)

× : 活性溶解 (急激な発泡と試験溶液の変色) を呈し、溶解速度の定量不可

表 4.1 連続溶解槽において剪断片に接触する硝酸水溶液の溶液電位の予想

連続溶解槽 ステージ	遊離硝酸平均濃度* mol/L	溶存金属平均濃度* gHM/L	相当する溶液条件	溶液電位 mV(SCE)
1	4.2	502	高濃度模擬溶液：A	992
2	8.8	221	中濃度模擬溶液：B	1038
3	10.6	99	低濃度模擬溶液：C	1093
4	11.4	44	12mol/L 純硝酸水溶液	~1157
5	11.7	20	12mol/L 純硝酸水溶液	1157
6	11.9	9	12mol/L 純硝酸水溶液	1157
7	≒12	4	12mol/L 純硝酸水溶液	1157
8	≒12	2	12mol/L 純硝酸水溶液	1157

*：シミュレーション解析値

表 4.2 各種被覆管材料（母材＝製造まま材）に対する連続溶解槽における溶解速度の期待値

連続溶解槽	遊離硝酸平均濃度*	溶存金属平均濃度*	溶解速度期待値	9Cr-ODS 鋼 (10Cr 系)	9Cr-ODS 鋼改良試作材 (10Cr 系)	12Cr-ODS 鋼*	PNC-FMS	PNC316
ステージ	mol/L	gHM/L	mm/y	mm/y	mm/y	mm/y	mm/y	mm/y
1	4.2	502	<5	<3	<2	<2	<2	<1
2	8.8	221	<5	<3	<2	<2	<2	<1
3	10.6	99	<5	<3	<2	<2	<2	<1
4	11.4	44	<12	<5	<2	<2	<2	<1
5	11.7	20	<12	<5	<2	<2	<2	<1
6	11.9	9	<12	<5	<2	<2	<2	<1
7	≒12	4	<12	<5	<2	<2	<2	<1
8	≒12	2	<12	<5	<2	<2	<2	<1
		平均値	<9.4	<4.3	<2	<2	<2	<1
		上限値 (期待値) ***	↓	↓	↓	↓	↓	↓
			10	5	2	2	2	1

* : シミュレーション解析値

** : 12Cr-ODS 鋼は詳細な試験データがないが、クロム濃度から PNC-FMS と同等の溶解速度を示すことが期待できる

*** : 滞留時間 4 時間に対する値

表 5.1 9Cr-ODS 鋼の実効クロム濃度に及ぼすチタン、過剰酸素、炭素、窒素の効果

ロット名	Cr mass%	Ti mass%	Ex.O mass%	N mass%	C mass%	実効 Cr 濃度		溶解特性	
						試験値	アノード分極曲線 活性溶解ピーク	浸漬溶解 活性溶解有無	
M11	9.010	0.205	0.080	0.012	0.125	7.69☆	×	○	
M11 (追加分析)	8.845	0.200	0.070	0.010	0.140	7.40☆	×	×	
Mm13	8.825	0.205	0.137	0.009	0.135	7.16☆	×	×	
Mm14	8.835	0.200	0.096	0.013	0.140	7.25☆	×	×	
ML15B	9.030	0.220	0.094	0.006	0.140	7.58☆	×	×	
M16	8.635	0.230	0.066	0.017	0.140	7.22☆	-	○	
Mm16T	9.020	0.310	0.099	0.008	0.140	7.79★	○	○	
M16M/M16A/M16B	8.850	0.200	0.067	0.020	0.140	7.31☆	×	×	
KB22	9.090	0.210	0.100	0.019	0.140	7.45☆	×	○	
MPT3	9.000	0.280	0.094	0.014	0.130	7.76★	○	○	
M19L	9.160	0.220	0.080	0.010	0.140	7.73★	○	○	
Mm19L	8.885	0.205	0.097	0.006	0.140	7.38☆	-	○	
9CN	9.200	0.300	0.110	0.011	0.140	7.86★	○	○	

○：アノード分極曲線 (30°C、硝酸濃度 3.5mol/L) に活性溶解ピーク無、浸漬溶解試験時の活性溶解 (溶解速度 > 100mm/y) 無
 ×：アノード分極曲線 (30°C、硝酸濃度 3.5mol/L) に活性溶解ピーク有、浸漬溶解試験時の活性溶解 (溶解速度 > 100mm/y) 有

★：実効クロム濃度試験値 > 7.70mass% ☆：実効クロム濃度試験値 < 7.70mass%

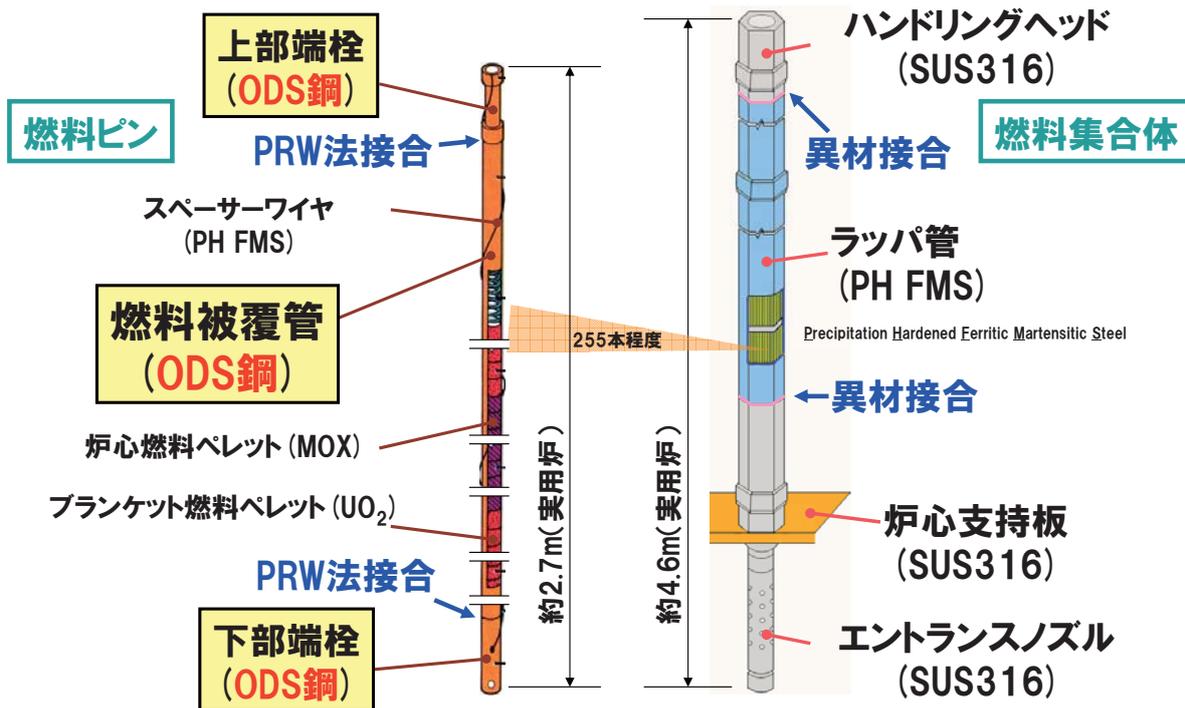


図1.1 燃料集合体と燃料ピンの概略構造

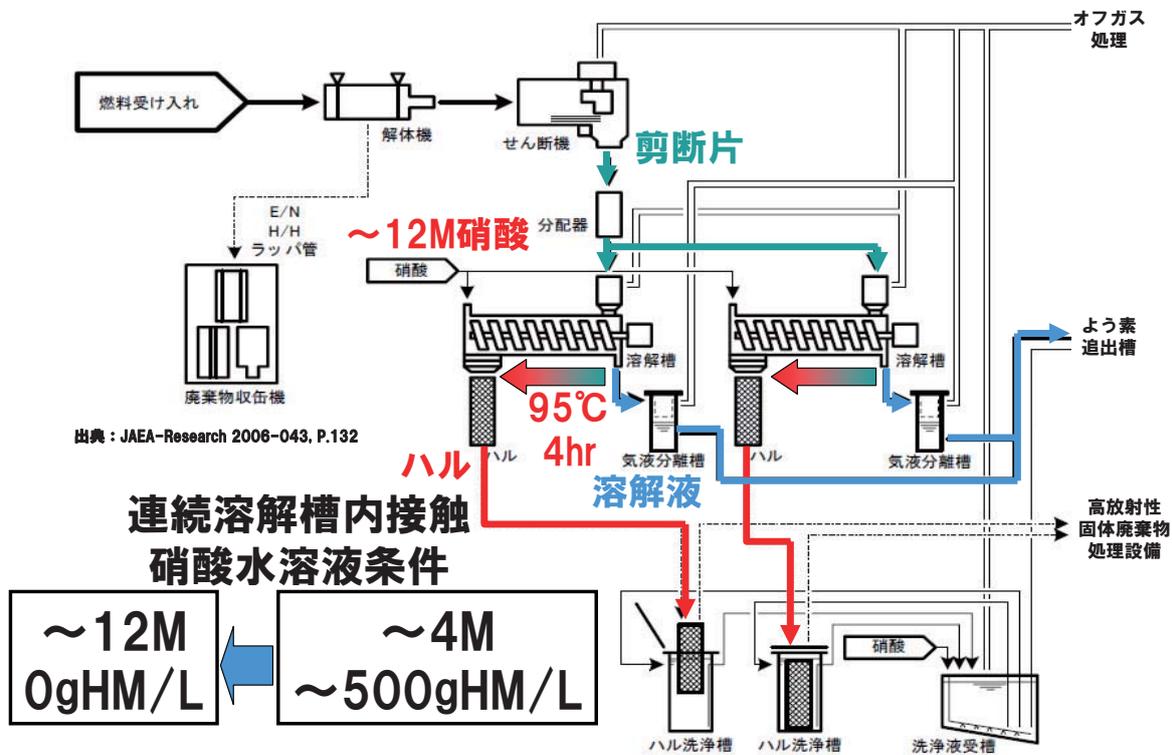


図1.2 先進湿式再処理プロセス (抜粋)

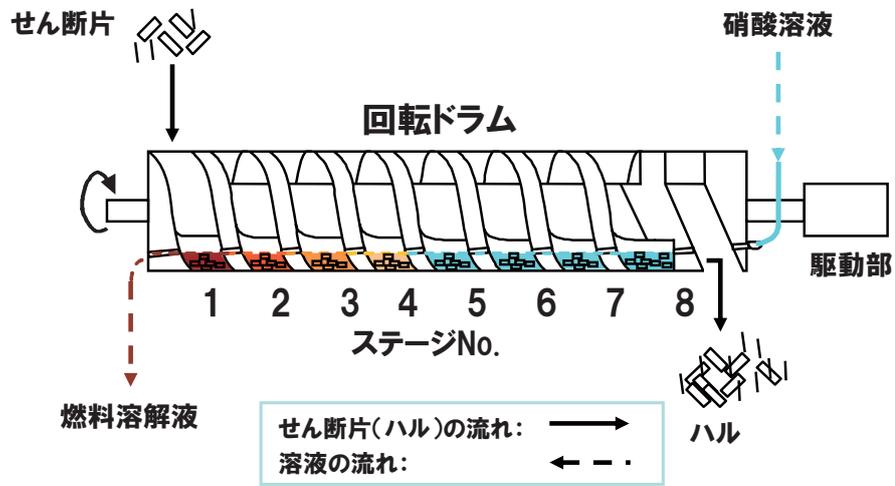


図1.3 連続溶解槽内でのせん断片および溶液の流れ

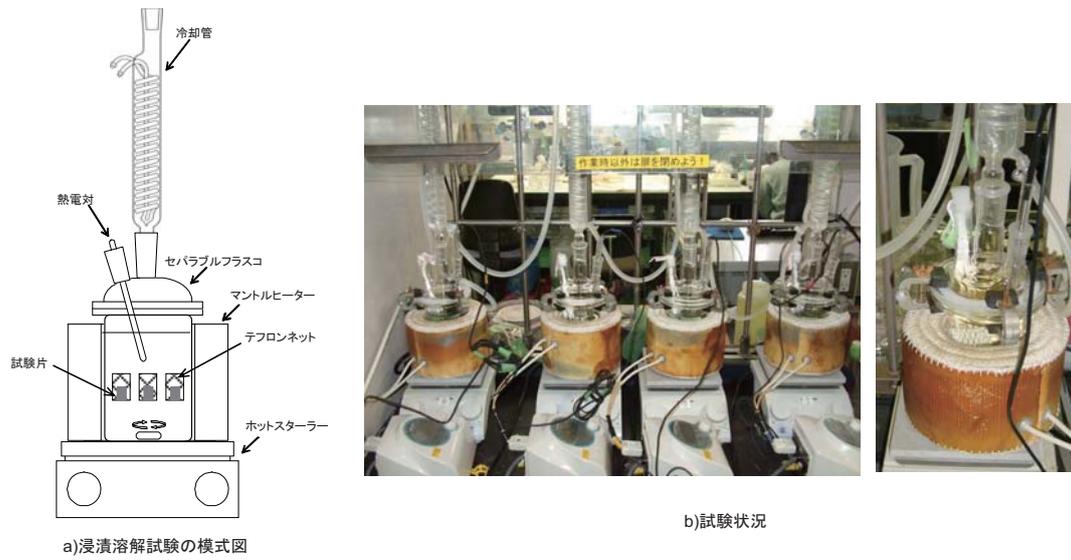


図2.1 浸漬溶解試験の模式図と試験状況

電気化学試験用電極試料



ガラスセル



試験装置群外観



図2.2 電気化学試験に使用した試料と装置

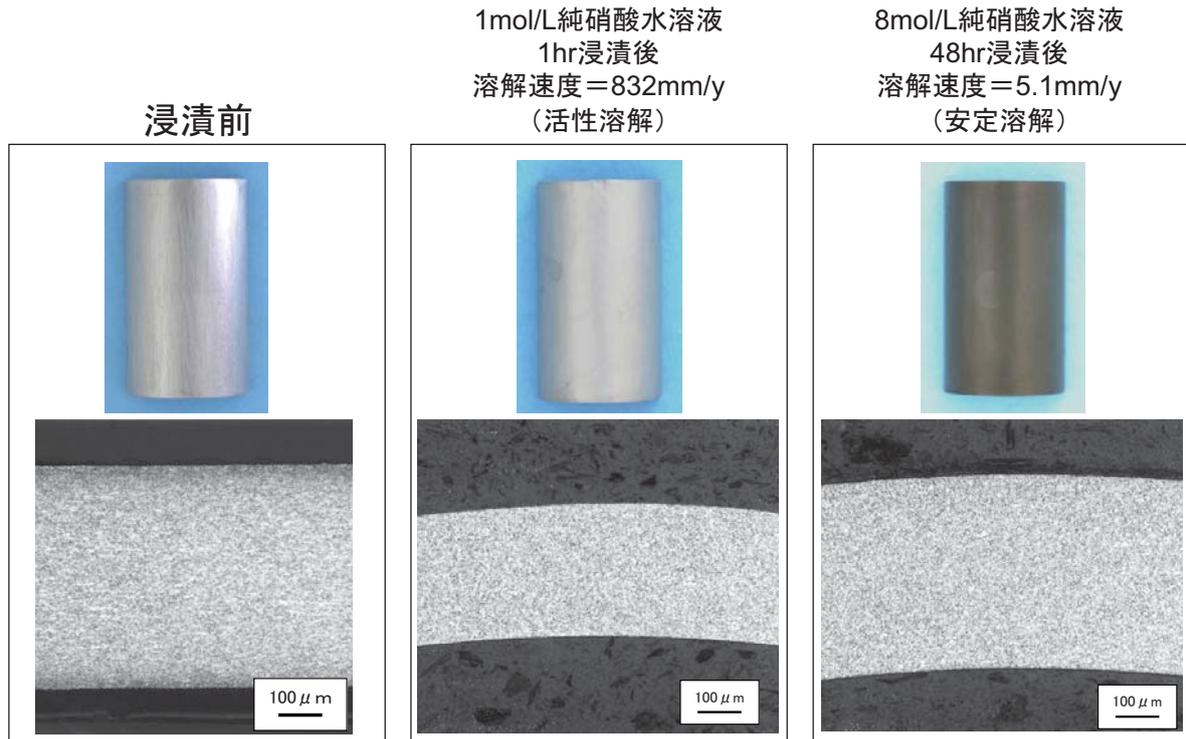


図3.1 9Cr-ODS鋼の純硝酸水溶液への浸漬前後の外観と横断面光学顕微鏡組織の例 (M19L被覆管)

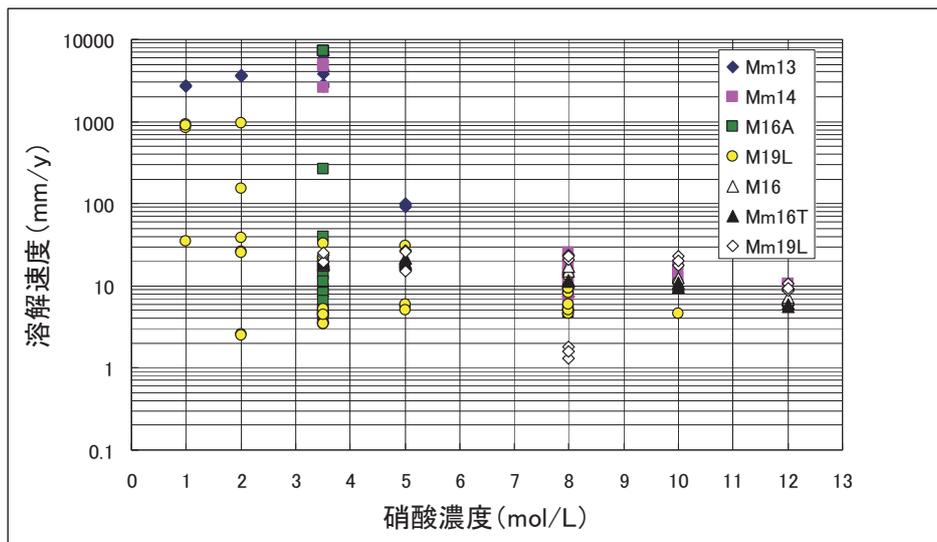


図3.2 9Cr-ODS鋼の純硝酸水溶液における溶解速度に及ぼす硝酸濃度の影響 (温度95°C)

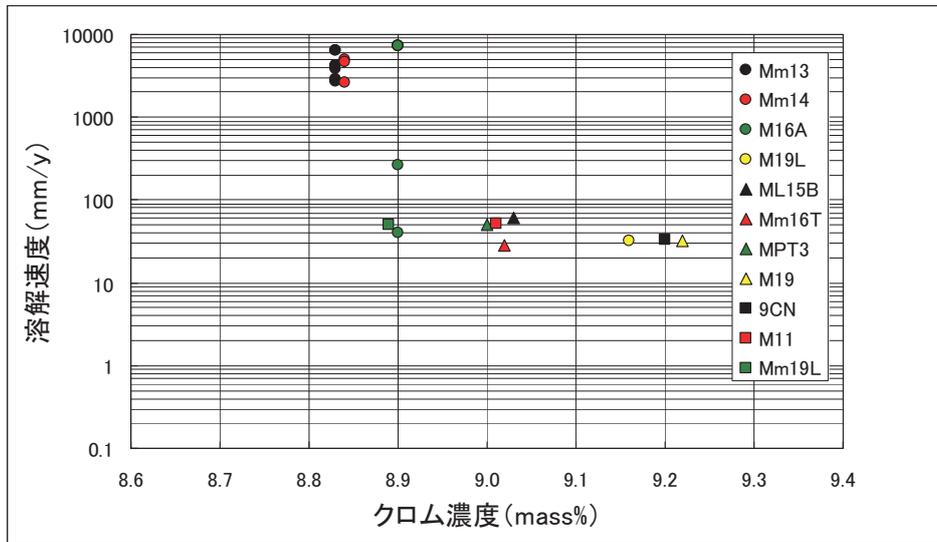


図3.3 9Cr-ODS鋼の純硝酸水溶液における溶解速度に及ぼすクロム濃度の影響 (温度95°C、硝酸濃度3.5mol/L、浸漬時間 \leq 1hr)

A: 高濃度模擬溶解液: 3.5mol/L + 4.4gV/L + 2.54gRu/L
 B: 中濃度模擬溶解液: 8mol/L + 1.76gV/L + 1.02gRu/L
 C: 低濃度模擬溶解液: 10mol/L + 0.88gV/L + 0.51gRu/L

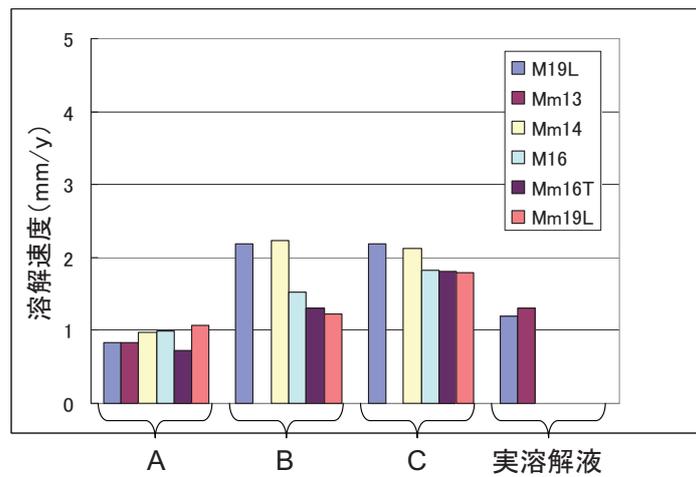


図3.4 9Cr-ODS鋼の模擬溶解液と実溶解液における溶解速度 (温度95°C、浸漬時間4hr)

Mm13とMm14は活性溶解が継続するため、試料が全量溶解してしまい、1hr超の試験データは取得できない
 M16Aは活性溶解を示す試料と示さない試料があるため、長時間側のデータもあり

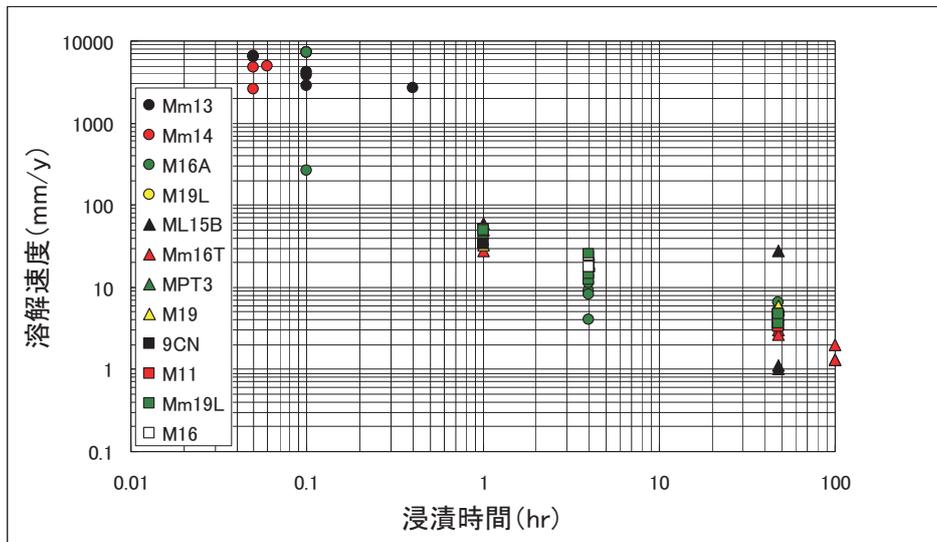


図3.5 9Cr-ODS鋼の純硝酸水溶液における溶解速度に及ぼす浸漬時間の影響 (温度95°C、硝酸濃度3.5mol/L)

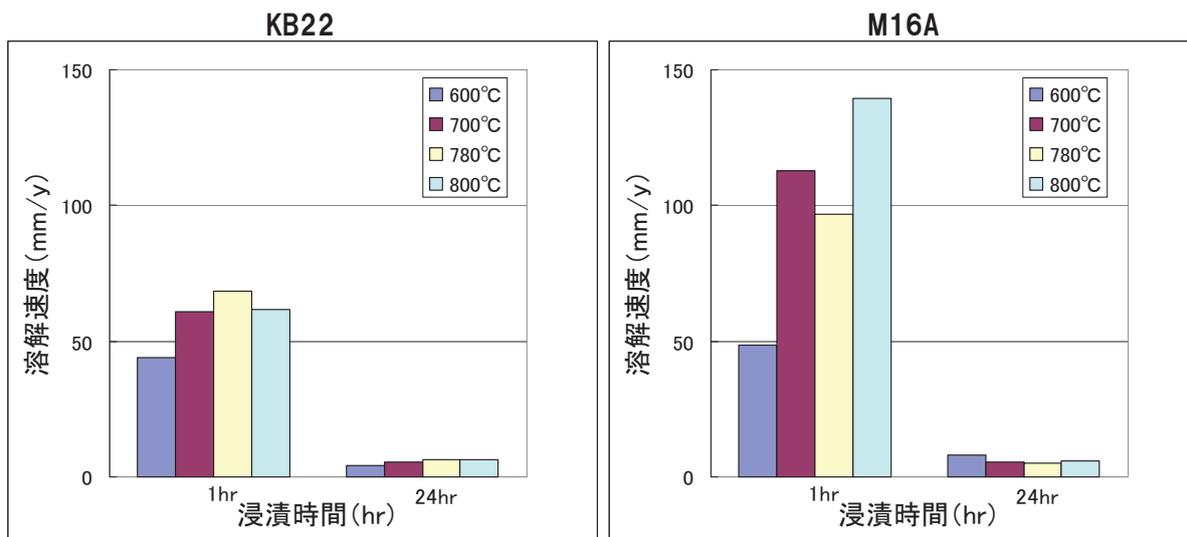


図3.6 9Cr-ODS鋼 (KB22とM16A) の純硝酸水溶液における溶解速度に及ぼす焼き戻し温度の影響 (温度95°C、硝酸濃度3.5mol/L)

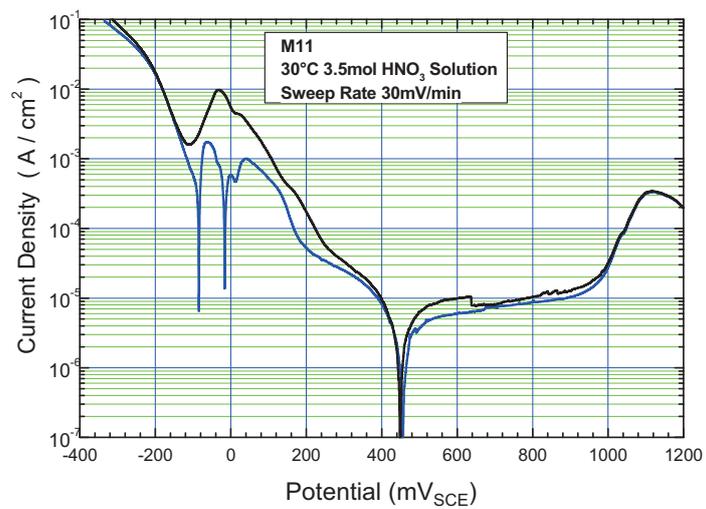


図3.7 9Cr-ODS鋼：M11の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

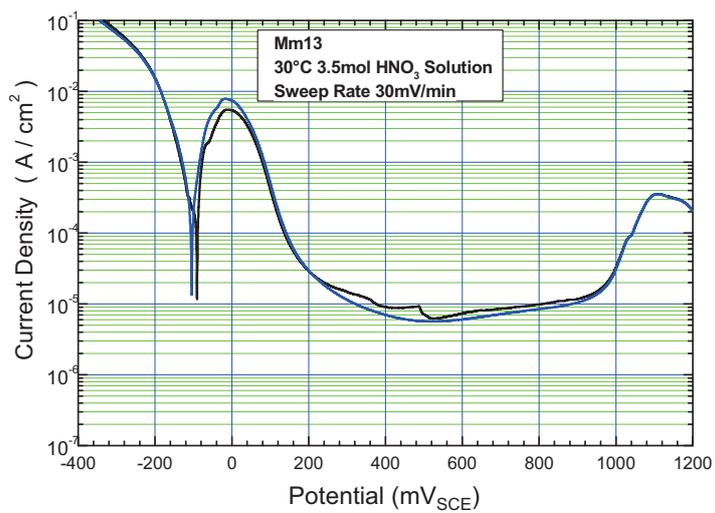


図3.8 9Cr-ODS鋼：Mm13の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

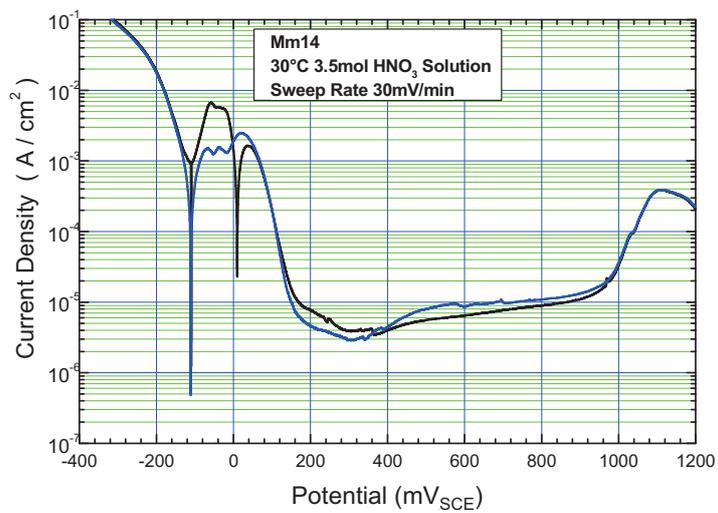


図3.9 9Cr-ODS鋼：Mm14の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

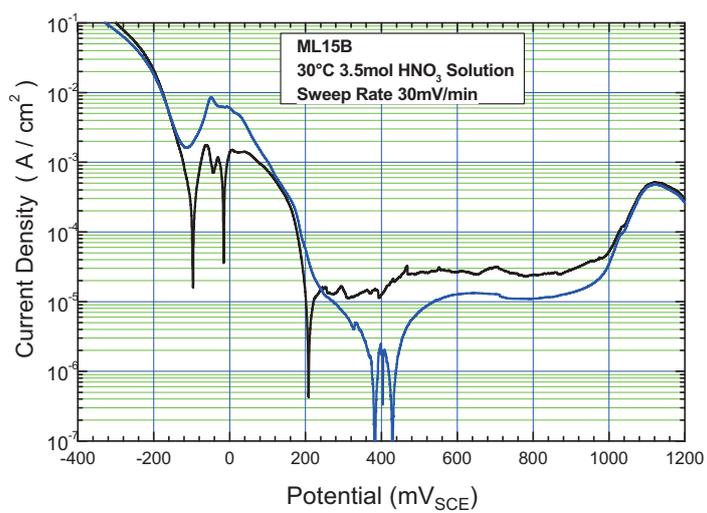


図3.10 9Cr-ODS鋼：ML15Bの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

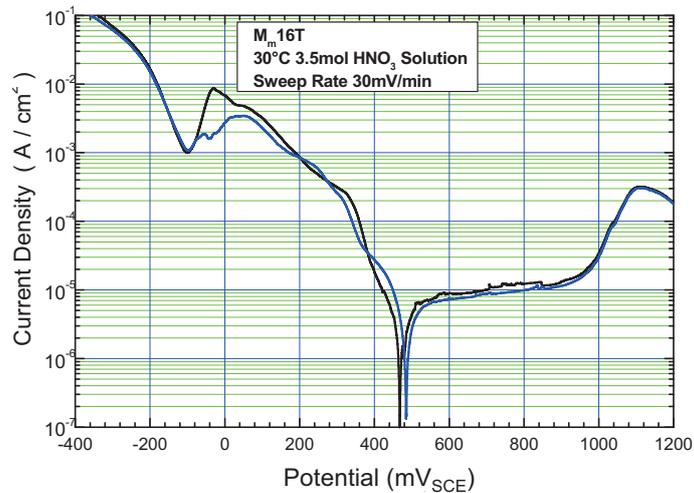


図3.11 9Cr-ODS鋼：Mm16Tの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

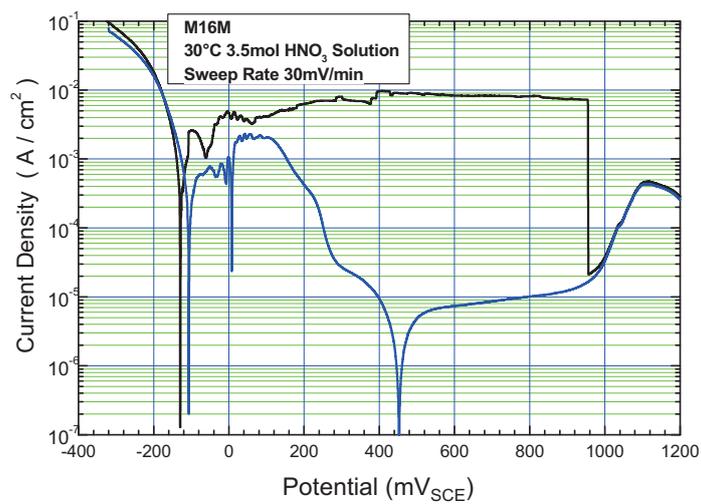


図3.12 9Cr-ODS鋼：M16Mの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

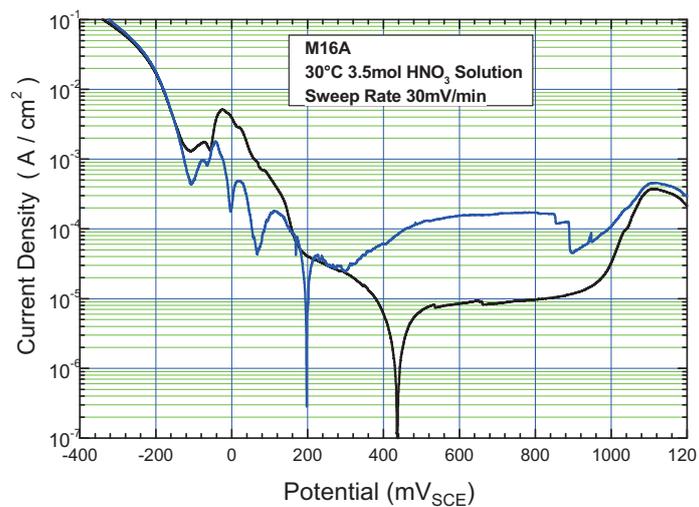


図3.13 9Cr-ODS鋼：M16Aの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

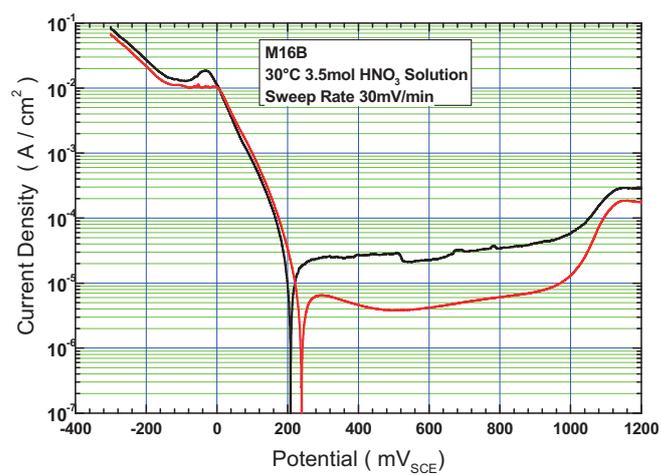


図3.14 9Cr-ODS鋼：M16Bの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

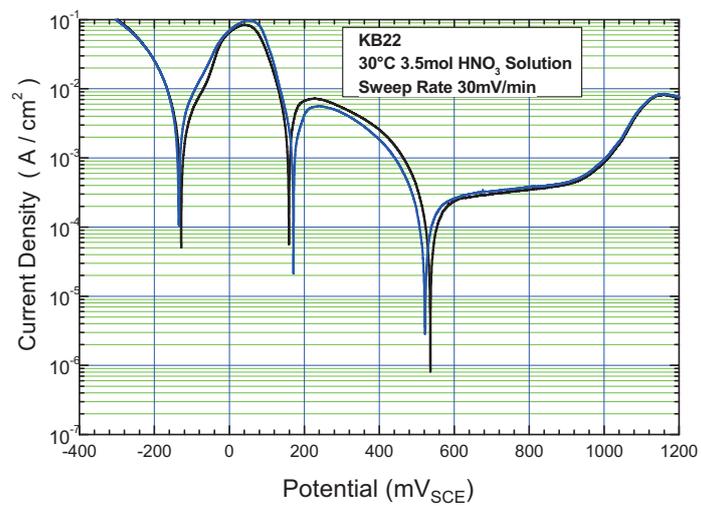


図3.15 9Cr-ODS鋼：KB22の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

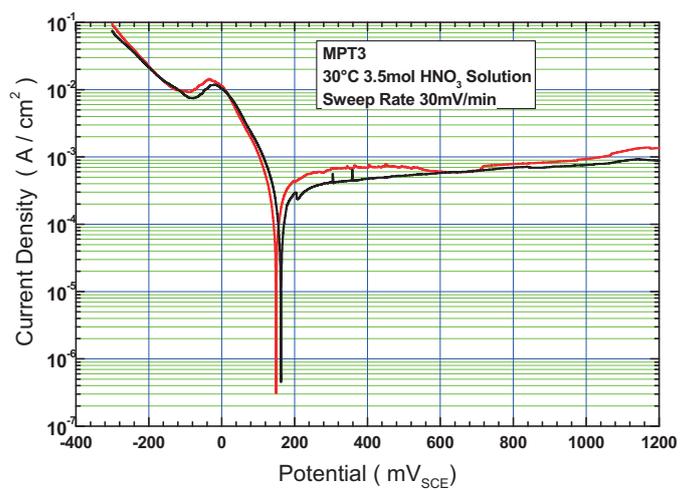


図3.16 9Cr-ODS鋼：MPT3の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

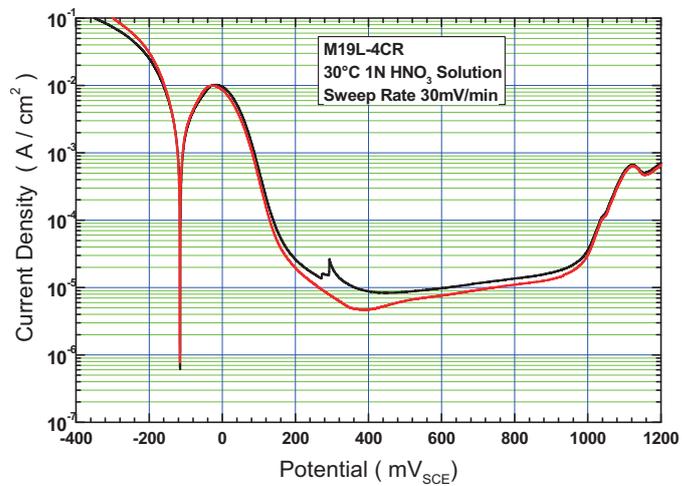


図3.17 9Cr-ODS鋼：M19L被覆管の分極曲線
(温度30°C、1mol/L純硝酸水溶液)

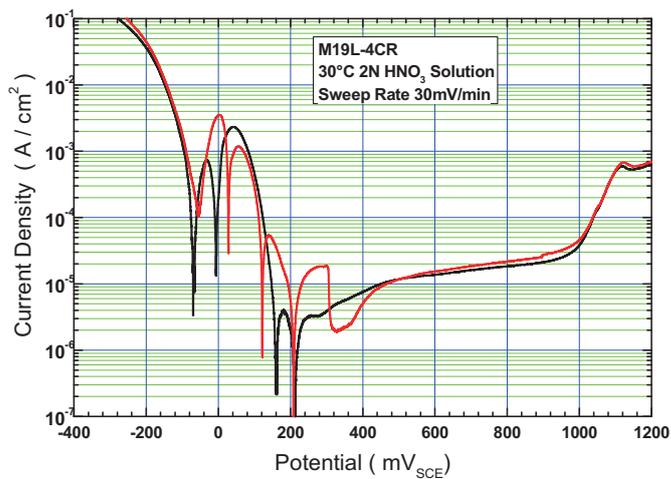


図3.18 9Cr-ODS鋼：M19L被覆管の分極曲線
(温度30°C、2mol/L純硝酸水溶液)

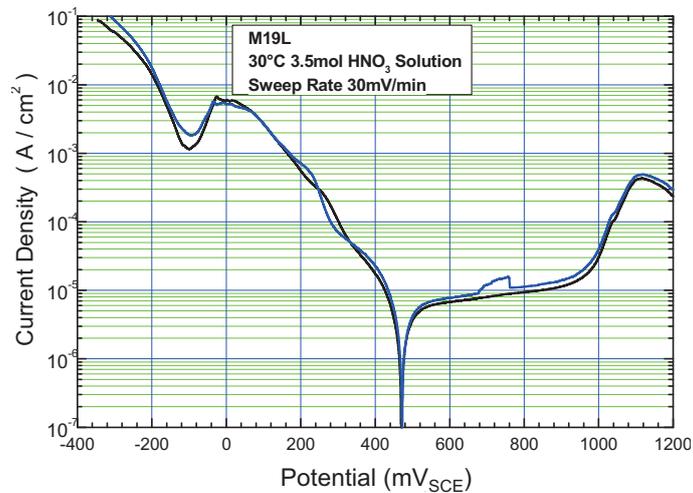


図3.19 9Cr-ODS鋼：M19L熱間押出棒の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

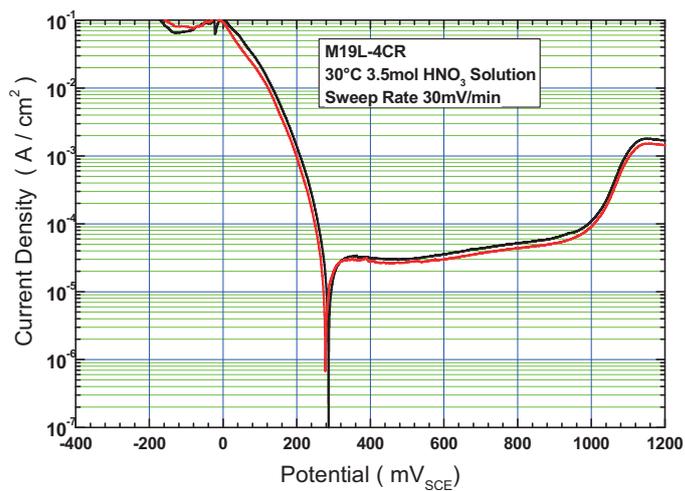


図3.20 9Cr-ODS鋼：M19L被覆管（4回冷間圧延）の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

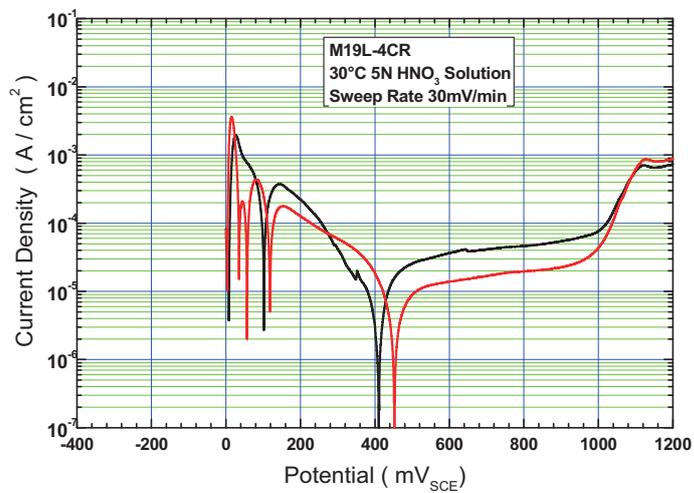


図3.21 9Cr-ODS鋼：M19L被覆管の分極曲線
(温度30°C、5mol/L純硝酸水溶液)

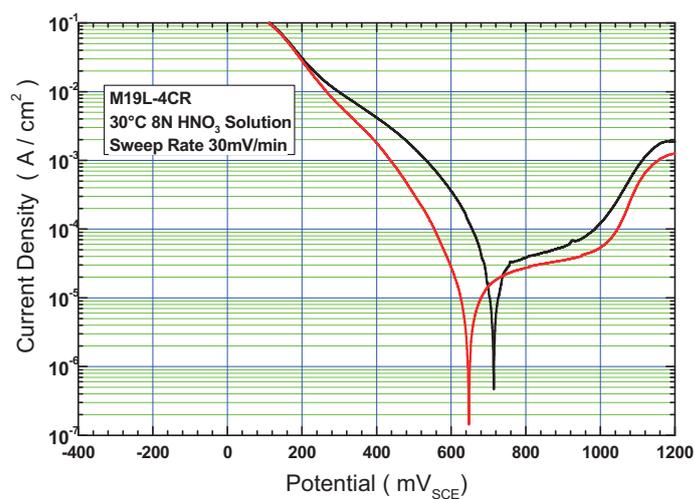


図3.22 9Cr-ODS鋼：M19L被覆管の分極曲線
(温度30°C、8mol/L純硝酸水溶液)

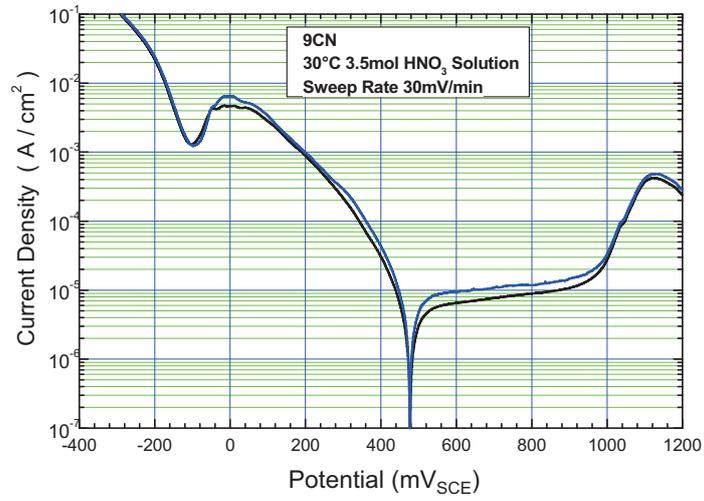


図3.23 9Cr-ODS鋼：9CN/No. 1の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

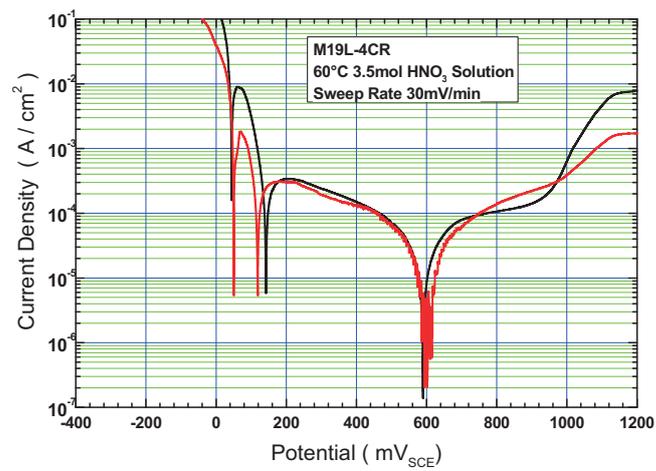


図3.24 9Cr-ODS鋼：M19L熱間押出棒の分極曲線
(温度60°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

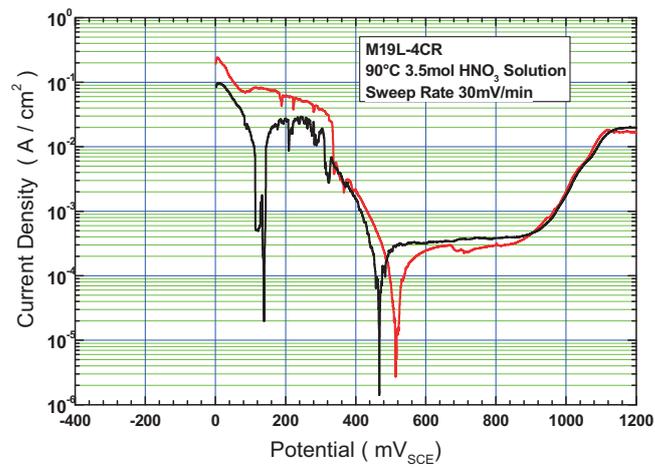


図3.25 9Cr-ODS鋼：M19L熱間押出棒の分極曲線
(温度90°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

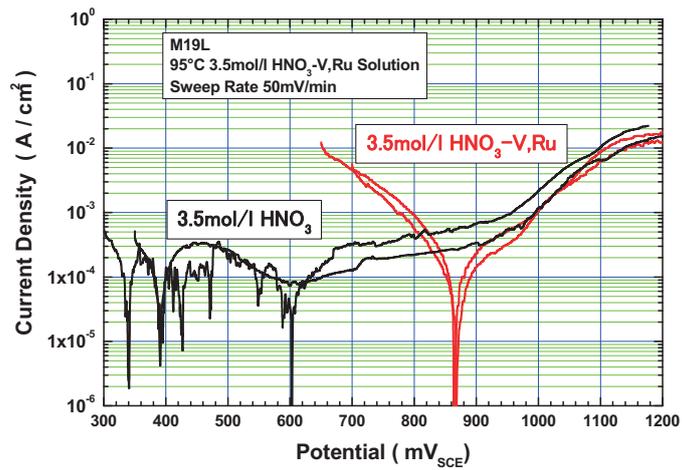


図3.26 9Cr-ODS鋼：M19L熱間押出棒の分極曲線（温度95°C）
黒線：3.5mol/L純硝酸水溶液
赤線：高濃度模擬溶解液A

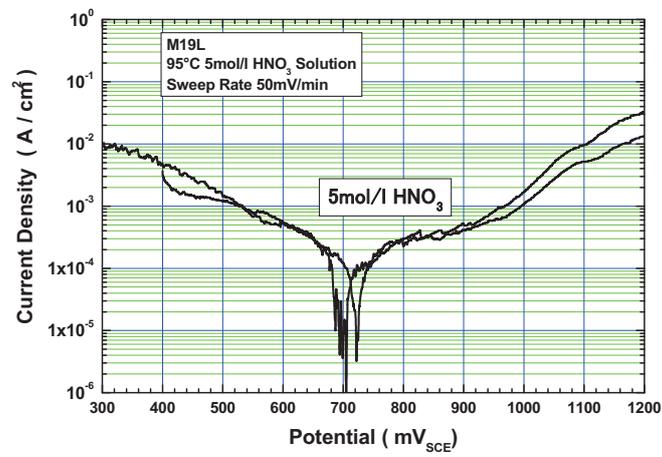


図3.27 9Cr-ODS鋼：M19L熱間押出棒の分極曲線
(温度95°C、5mol/L純硝酸水溶液)

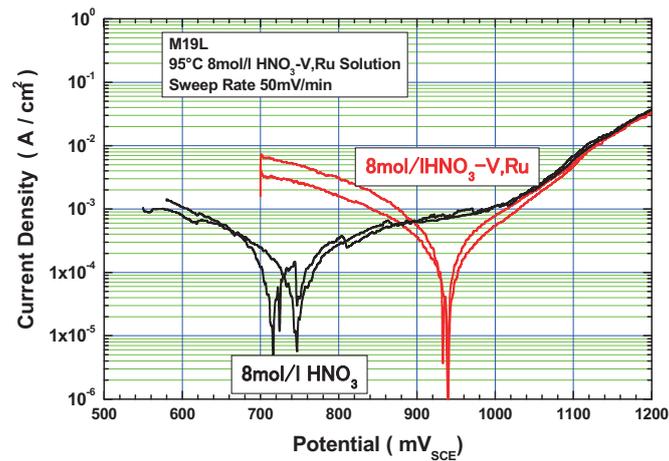


図3.28 9Cr-ODS鋼：M19L熱間押出棒の分極曲線（温度95°C）
黒線：8mol/L純硝酸水溶液
赤線：中濃度模擬溶解液B

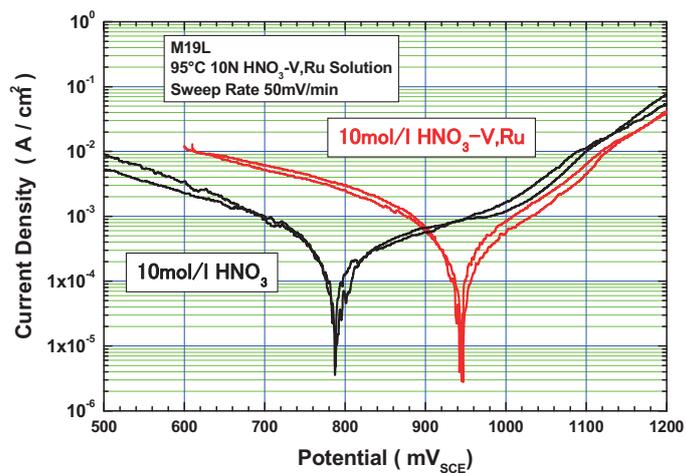


図3.29 9Cr-ODS鋼：M19L熱間押出棒の分極曲線（温度95℃）
 黒線：10mol/L純硝酸水溶液
 赤線：低濃度模擬溶解液C

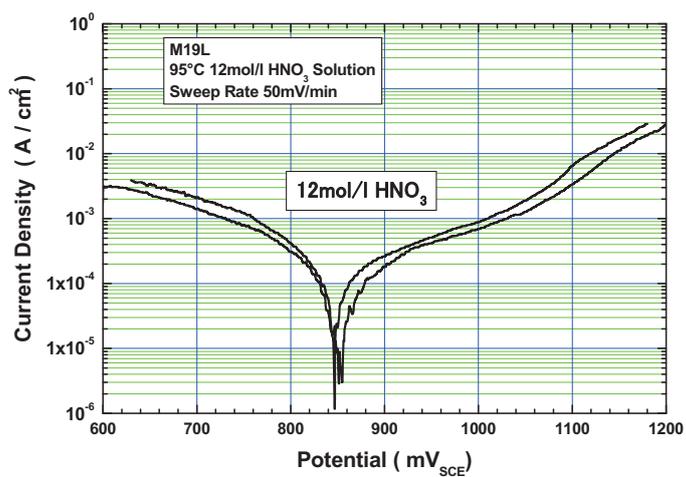


図3.30 9Cr-ODS鋼：M19L熱間押出棒の分極曲線
 （温度95℃、12mol/L純硝酸水溶液）

A: 高濃度模擬溶解液: 3.5mol/L+4.4gV/L+2.54gRu/L
 B: 中濃度模擬溶解液: 8mol/L+1.76gV/L+1.02gRu/L
 C: 低濃度模擬溶解液: 10mol/L+0.88gV/L+0.51gRu/L

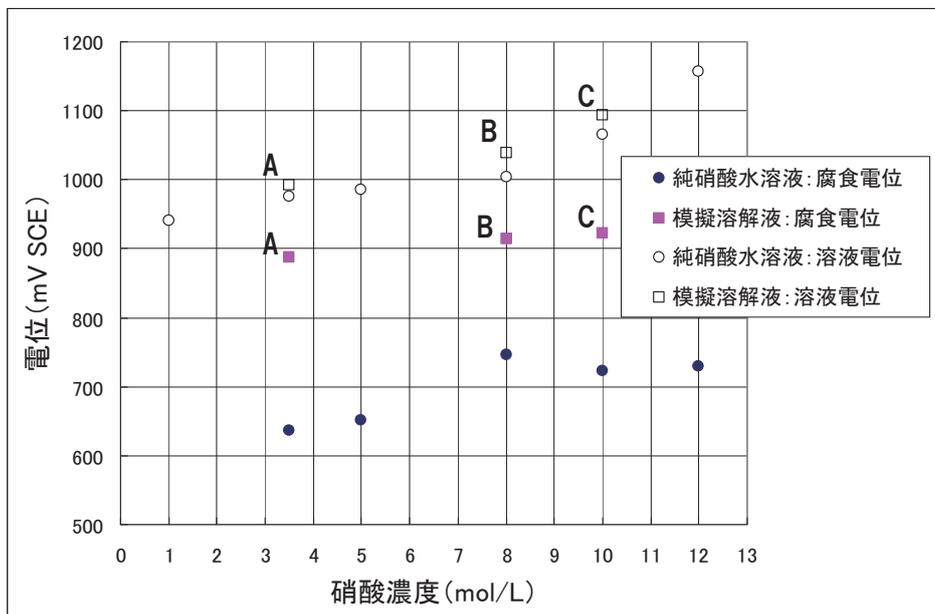


図3.31 9Cr-ODS鋼 (M19L) の純硝酸水溶液における腐食電位と硝酸濃度との関係 (温度95°C)

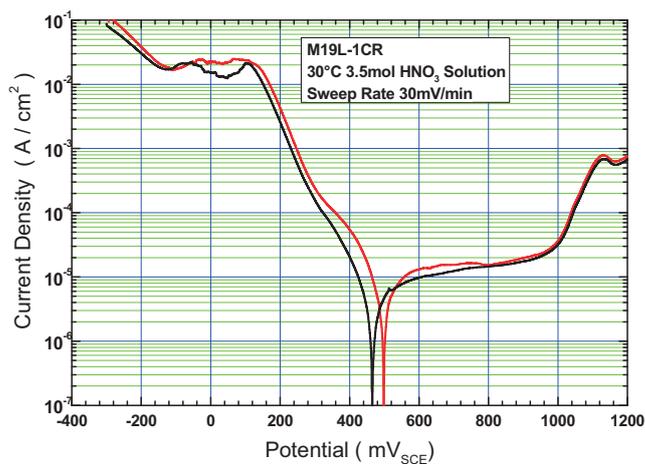


図3.32 9Cr-ODS鋼: M19L中間製品1CRの分極曲線 (温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

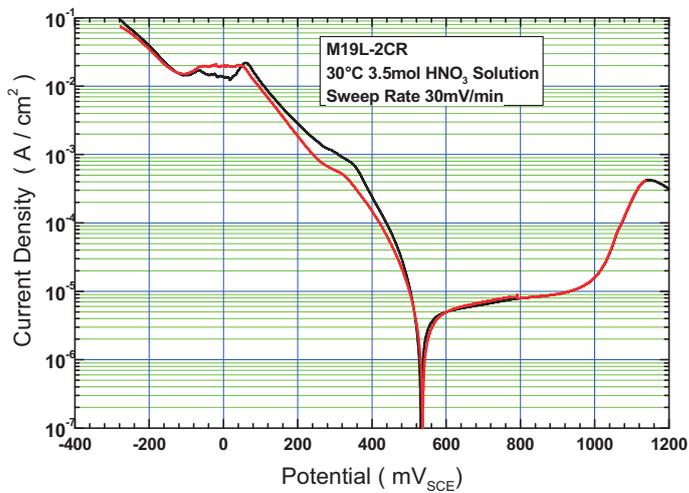


図3.33 9Cr-ODS鋼：M19L中間製品2CRの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

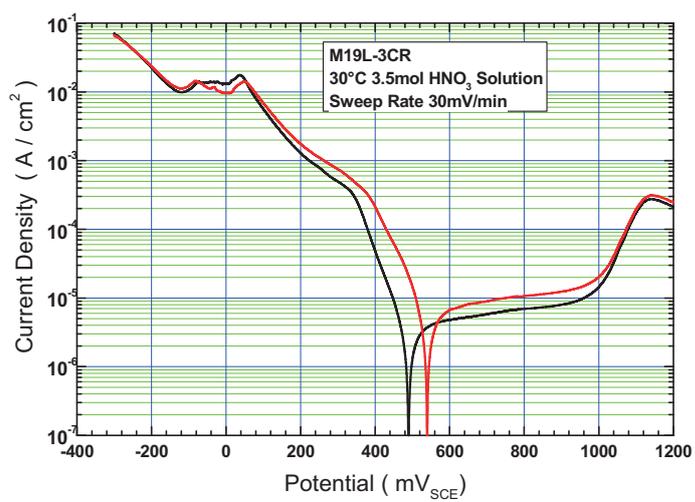
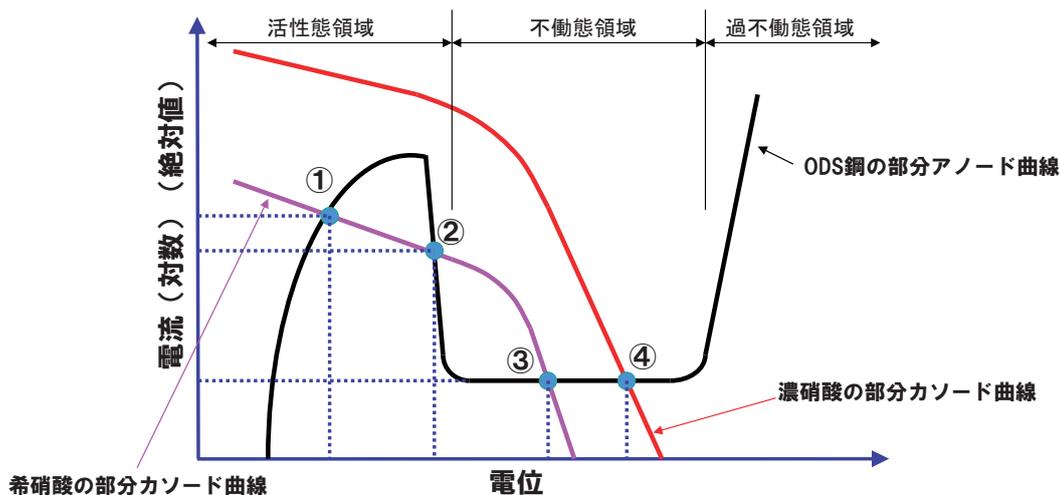


図3.34 9Cr-ODS鋼：M19L中間製品3CRの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)



★部分アノード曲線と部分カソード曲線の交点が腐食電位と腐食電流(溶解速度)を与える。

★希硝酸の場合

- ・交点は①②③の3点ある。
- ・腐食電位は不動態領域だけでなく活性領域にも存在し、不動態皮膜は安定に存在できない(ときに活性溶解を示す)。

★濃硝酸の場合

- ・交点は④の1点のみである。
- ・腐食電位は不動態領域のみにあるため、不動態皮膜は安定する(優れた耐食性を示す)。

★溶存金属イオン(酸化性)の濃度が増大すると、硝酸濃度の上昇と類似した効果が出る

図3.35 不動態化と分極曲線との関係

M1~M6:10Cr系、M7~M10:9.5Cr系

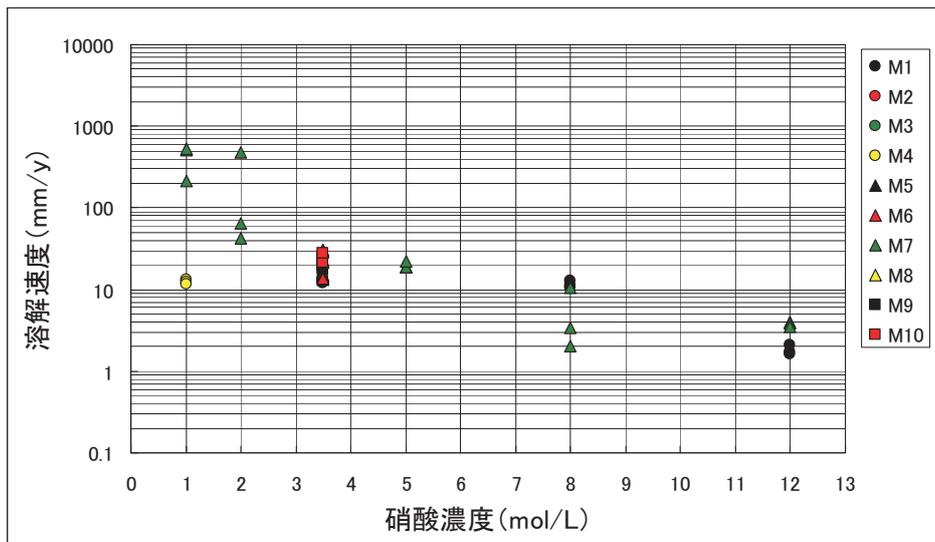


図3.36 9Cr-ODS鋼改良試作材の純硝酸水溶液における溶解速度 (温度95°C、浸漬時間4hr)

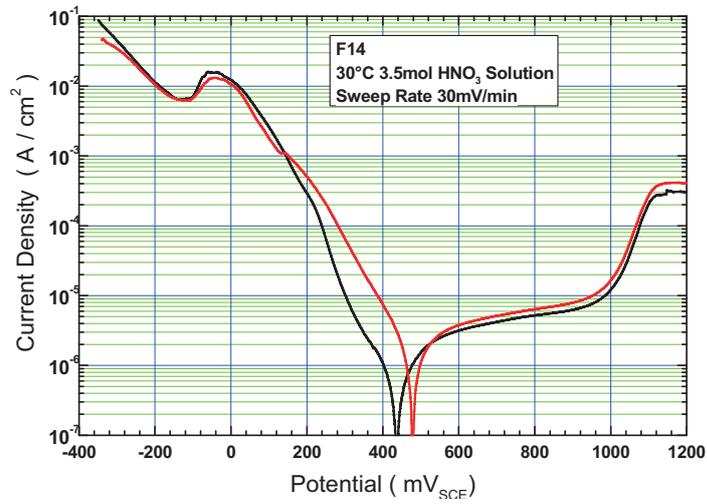


図3.37 12Cr-ODS鋼 : F14の分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

活性溶解(>>100mm/y)を示したデータ点(作図のため1000mm/yに統一)

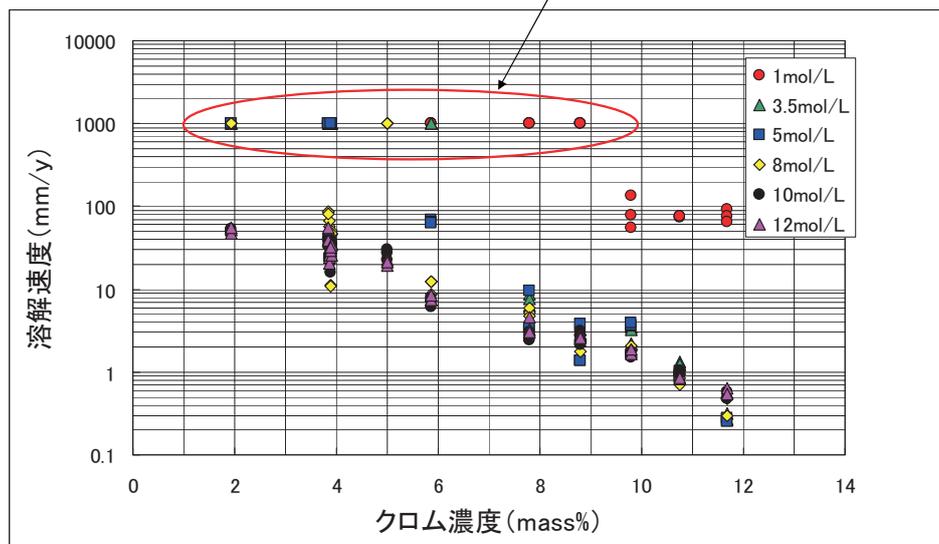


図3.38 3元系モデル合金の純硝酸水溶液における溶解速度
(温度95°C、浸漬時間4hr)

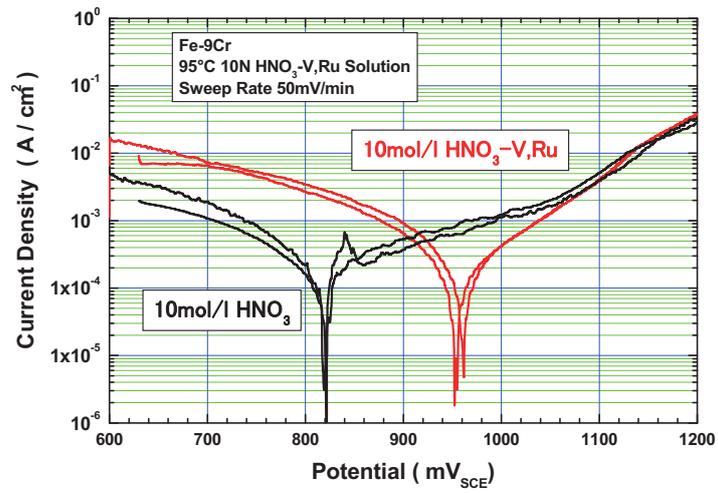


図3.39 3元モデル合金：9Cr-0Niの分極曲線（温度95℃）
 黒線：10mol/L純硝酸水溶液
 赤線：低濃度模擬溶解液C

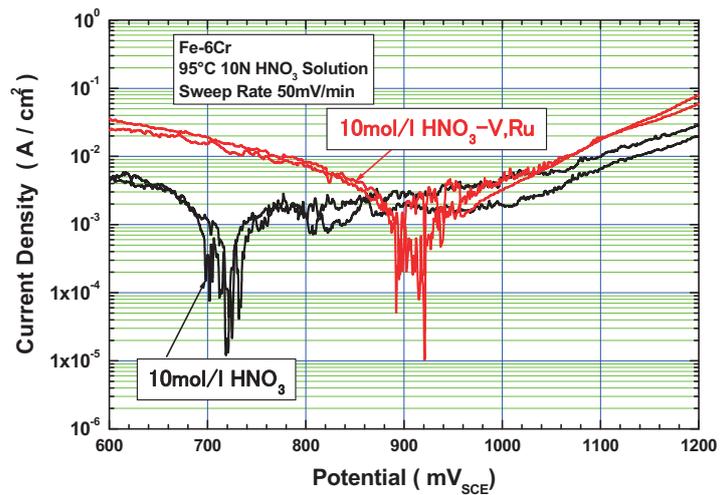


図3.40 3元モデル合金：6Cr-0Niの分極曲線（温度95℃）
 黒線：10mol/L純硝酸水溶液
 赤線：低濃度模擬溶解液C

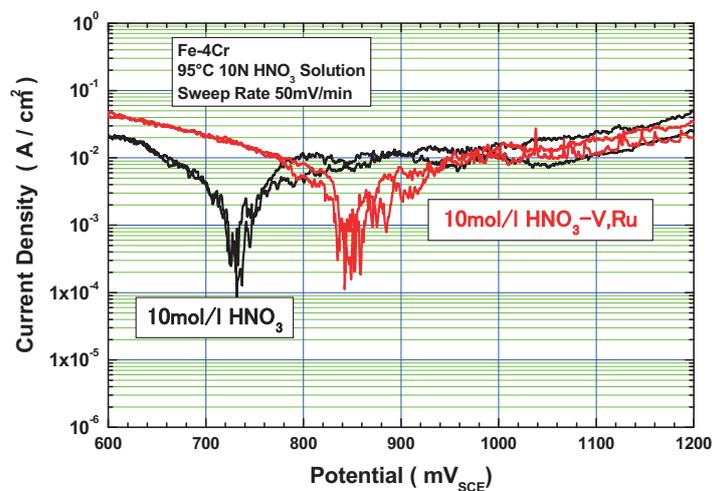


図3.41 3元系モデル合金：4Cr-0Niの分極曲線（温度95°C）
 黒線：10mol/L純硝酸水溶液
 赤線：低濃度模擬溶解液C

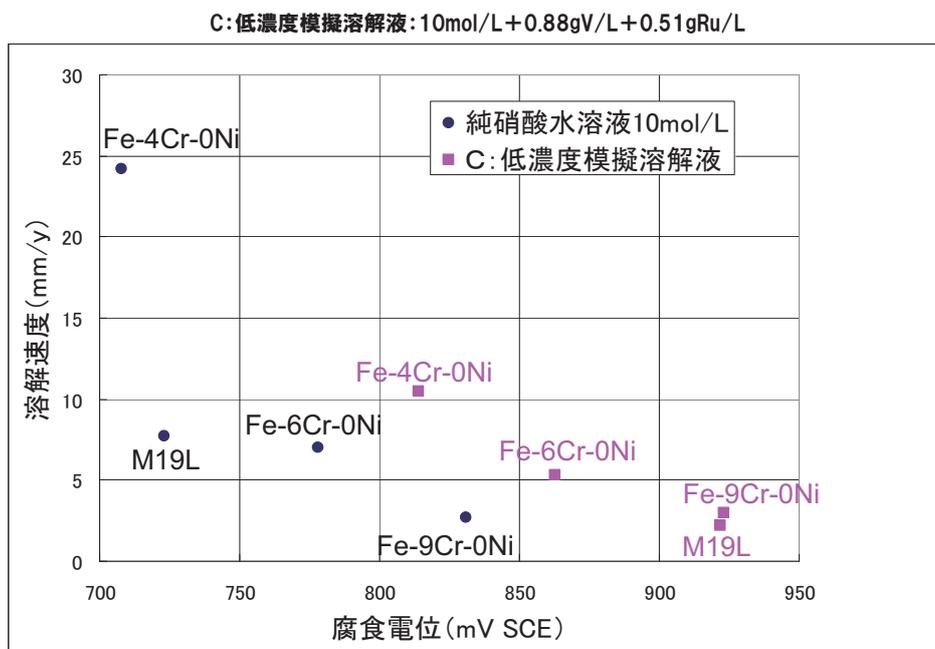


図3.42 9Cr-ODS鋼と3元系モデル合金の溶解速度と腐食電位との関係（温度95°C）

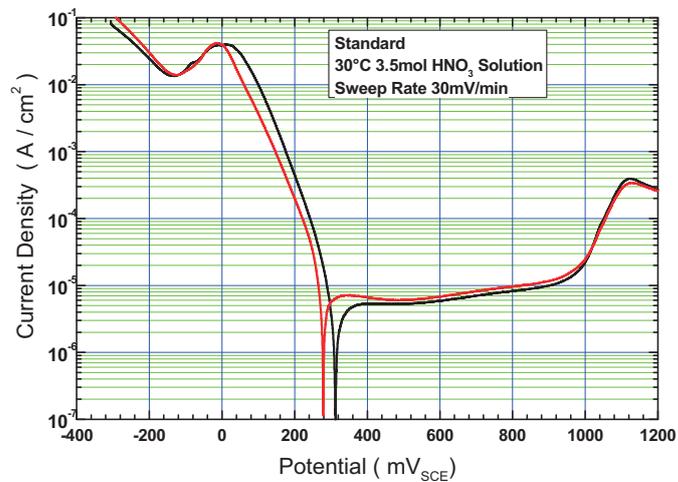


図3.43 5元系モデル合金：9Cr-0.13C-0.00Tiの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

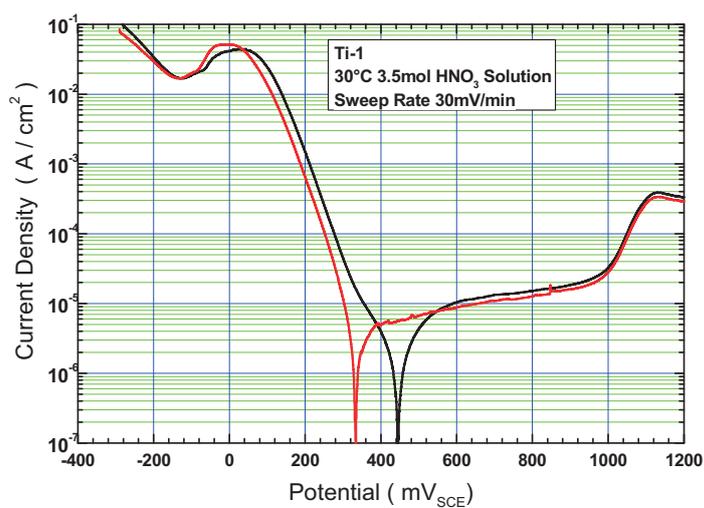


図3.44 5元系モデル合金：9Cr-0.13C-0.10Tiの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

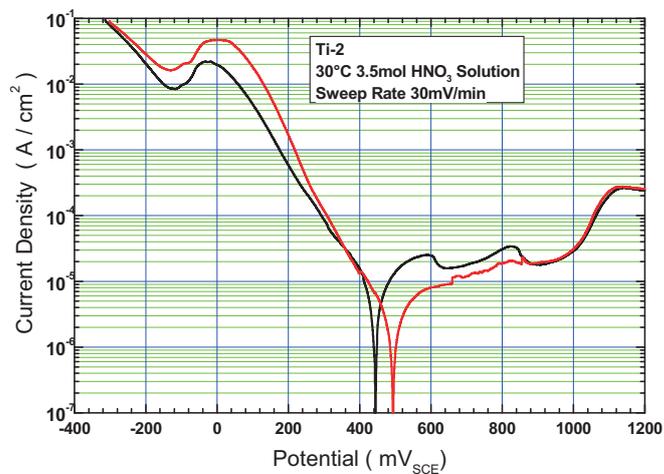


図3.45 5元系モデル合金：9Cr-0.13C-0.20Tiの分極曲線
(温度30°C、3.5mol/L純硝酸水溶液)

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷、電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧)、起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度、放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量、エン트로ピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量、比エン트로ピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエン트로ピー、モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	ジュール毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクタ	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min = 60s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t = 10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV = 1.602 176 53(14) × 10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da = 1.660 538 86(28) × 10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u = 1 Da
天文単位	ua	1 ua = 1.495 978 706 91(6) × 10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar = 0.1 MPa = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg = 133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 100 pm = 10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M = 1852 m
バイン	b	1 b = 100 fm ² = (10 ¹² cm) ² = 10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P = 1 dyn s cm ⁻² = 0.1 Pa s
ストークス	St	1 St = 1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd cm ⁻² = 10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph = 1 cd sr cm ⁻² = 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1 cm s ⁻² = 10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1 G cm ² = 10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G = 1 Mx cm ⁻² = 10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci = 3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ = 1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 200 mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal = 4.1858 J (「15°C」カロリ)、4.1868 J (「IT」カロリ)、4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

