

余裕深度処分環境におけるふげん圧力管
(Zr-2.5wt%Nb合金)の
腐食速度の評価(2)

－ 5ヶ年経過データによる長期腐食の考察－

Corrosion Test of Fugen Pressure Tube (Zr-2.5wt%Nb alloy)
under the Sub-surface Disposal Environment (2)

－ Examination of Long-term Corrosion Rate by 5 Years Keeping Sample－

菅谷 敏克 中谷 隆良 坂井 章浩

Toshikatsu SUGAYA, Takayoshi NAKATANI and Akihiro SAKAI

バックエンド研究開発部門
埋設事業センター

Radioactive Wastes Disposal Project Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

January 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2018

余裕深度処分環境におけるふげん圧力管 (Zr-2.5wt%Nb 合金) の腐食速度の評価(2)
—5 年経過データによる長期腐食の考察—

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門 埋設事業センター
菅谷 敏克、中谷 隆良、坂井 章浩

(2017 年 11 月 21 日受理)

日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）は、研究施設等廃棄物埋設事業の実施主体として、処分事業に取り組んでいるところである。JAEA から発生する研究施設等廃棄物の中には、第一期事業の範囲であるトレンチ処分及びピット処分のほか、中深度処分の対象となる廃棄物も含まれている。中深度処分対象廃棄物のうち、原子炉構造材である放射化金属廃棄物については、その処分環境下での核種溶出率が安全評価上の重要なパラメータであり、放射化金属廃棄物の核種溶出については、金属母材の腐食に伴って溶出することが示されているものの、ふげん圧力管に使用されているジルコニウム合金（以下、「Zr-2.5wt%Nb 合金」という。）については、処分環境下での腐食速度はこれまで確認されていない。

そのため、JAEA では平成 23 年度より、安全評価を行うために必要な核種溶出率の設定を目的に、Zr-2.5wt%Nb 合金に対してガス蓄積型腐食試験法を適用し、低温、低酸素およびアルカリ条件下で長期的な腐食速度を取得してきた。

本報では、長期的な腐食速度の把握を目的に、試験期間 5 年 (60 ヶ月) の腐食速度を取得し、試験期間 2 年 (24 ヶ月) 経過までの腐食速度と比較したところ、今回取得した試験期間 5 年 (60 ヶ月) の腐食速度は、試験期間 2 年 (24 ヶ月) までの結果同様、経過時間の $2/3$ 乗に比例するとした評価が適用できると考える。

Corrosion Test of Fugen Pressure Tube (Zr-2.5wt%Nb alloy)
under the Sub-surface Disposal Environment (2)
—Examination of Long-term Corrosion Rate by 5 Years Keeping Sample—

Toshikatsu SUGAYA, Takayoshi NAKATANI and Akihiro SAKAI

Radioactive Wastes Disposal Project Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 21, 2017)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is making preparations for the sub-surface disposal of own low level radioactive wastes. In order to carry out the disposal, it is necessary to confirm the safety of the disposal.

For activated metal waste which are the reactor structural materials classified as one of the subject wastes, the rate of nuclide elution under the disposal environment is an important parameter in evaluating the safety. According to the standard of the Atomic Energy Society of Japan (AESJ) on the sub-surface disposal system, nuclides in a metal matrix are shown to be released with corrosion congruently. However, the corrosion rate under the disposal environment is not reported about Zr-2.5wt%Nb alloy, which is used in the pressure tube of Fugen (ATR) and thus one of the activated metal wastes.

We planned the gas-accumulating type corrosion test on Zr-2.5wt%Nb alloy in order to obtain long-term corrosion rate under low temperature, low oxygen and alkaline conditions assuming the disposal environment. We have conducted the test from 2011.

A corrosion rate over a testing period of 5 years is acquired with the aim to grasp a long-term corrosion rate behavior in this report. This corrosion rate is compared with the same data that was previously acquired over a testing period of 2 years. As a result, it is confirmed that an evaluation method that is proportional to the minus cubic root of corrosion time squared can be applicable to the corrosion rate behavior acquired this time over a testing period of 5 years, which is the same result in evaluating the corrosion rate behavior acquired over a testing period of 2 years.

Keywords: Sub-surface Disposal, Activated Metal Wastes, Zr-2.5wt%Nb Alloy, Corrosion Rate, Low Oxygen, Alkaline

目次

1. 緒言	1
1.1 背景と目的	1
1.2 腐食速度の測定について	1
2. ガス蓄積型腐食試験アンブル	2
2.1 緒論	2
2.2 試験材	2
2.3 試験アンブルの製作	4
3. アンブルの開封、分析及び試験結果	5
3.1 緒論	5
3.2 試験条件	5
3.3 アンブルの開封、分析方法	6
3.4 試験結果	9
3.5 考察	20
4. まとめ	21
謝辞	21
参考文献	21

Contents

1. Preface.....	1
1.1 Background.....	1
1.2 About test of corrosion rate.....	1
2. Gas-accumulating type corrosion test ampule.....	2
2.1 Introduction.....	2
2.2 Materials and methods.....	2
2.3 Preparation of test ampule.....	4
3. Acquisition of corrosion rate and analysis.....	5
3.1 Introduction.....	5
3.2 Test conditions.....	5
3.3 Ampule opening and analysis methods.....	6
3.4 Results and discussion.....	9
3.5 Conclusion.....	20
4. Summary.....	21
Acknowledgement.....	21
References.....	21

図表リスト

表 2.2-1	圧力管の化学組成.....	2
表 3.2-1	ガス蓄積型腐食試験条件および分析項目一覧.....	6
表 3.4-1	Zr-2.5wt%Nb 合金の水素ガス発生量および水素ガス発生等価腐食速度	10
表 3.4-2	Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収量および水素吸収等価腐食速度	11
表 3.4-3	Zr-2.5wt%Nb 合金の等価腐食速度と水素吸収率	13
表 3.4-4	浸漬溶液の分析結果 (mg/L)	14
表 3.4-5	TEM 観察による酸化膜厚さ	17
図 2.2-1	圧力管 (試験供試材) の外観.....	3
図 2.2-2	試験片調製手順.....	3
図 2.3-1	ガス蓄積型腐食試験のアンプル製作概要 ²⁾	4
図 3.2-1	恒温水槽及びアンプルの保管状況.....	5
図 3.3-1	ガス蓄積型腐食試験のアンプル開封・分析概要.....	6
図 3.3-2	アンプル開封装置.....	7
図 3.4-1	Zr-2.5wt%Nb 合金の水素ガス発生量より求めた水素ガス発生等価腐食速度	10
図 3.4-2	Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収等価腐食速度	12
図 3.4-3	Zr-2.5wt%Nb 合金の等価腐食速度	13
図 3.4-4	Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収率	14
図 3.4-5	アンプル No.13 (pH12.5、30℃、60 ヶ月浸漬) の XPS 分析結果.....	15
図 3.4-6	アンプル No.13 (pH12.5、30℃、60 ヶ月浸漬) の GD-OES 分析結果.....	15
図 3.4-7	浸漬試験前後の Zr-2.5wt%Nb 合金試験片の外観	16
図 3.4-8	アンプル No.13 (pH12.5、30℃、60 ヶ月浸漬) 部位 1 の TEM 観察結果.....	18
図 3.4-9	アンプル No.13 (pH12.5、30℃、60 ヶ月浸漬) 部位 2 の TEM 観察、EDX 分析結果.....	19
図 3.4-10	Zr-2.5wt%Nb 合金の腐食厚さと経過時間の関係.....	20

This is a blank page.

1. 緒言

1.1 背景と目的

日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」）は、研究施設等廃棄物埋設事業の実施主体として、処分事業に取り組んでいるところである。JAEA から発生する研究施設等廃棄物の中には、第一期事業の範囲であるトレンチ処分及びピット処分のほか、中深度処分の対象となる廃棄物も含まれている。中深度処分対象廃棄物のうち、原子炉構造材である放射化金属廃棄物については、その処分環境下での核種溶出率が安全評価上の重要なパラメータとなる。放射化金属廃棄物の核種溶出については、「日本原子力学会標準 余裕深度処分の安全評価手法 (F012:2008)」(以下「学会標準」という。) ¹⁾ では、“金属母材の腐食に伴って溶出すると考えることができる”と示されているものの、ふげん圧力管に使用されているジルコニウム合金（以下、「Zr-2.5wt%Nb 合金」という。）については、処分環境下での腐食速度はこれまで確認されていない。

そのため、JAEA では平成 23 年度より、安全評価を行うために必要な核種溶出率の設定を目的に、Zr-2.5wt%Nb 合金に対してガス蓄積型腐食試験法を適用し、低温、低酸素およびアルカリ条件下で長期の腐食速度を取得してきた。

前報である「余裕深度処分環境におけるふげん圧力管 (Zr-2.5wt%Nb 合金) の腐食速度の評価」²⁾ では、試験片加工方法及び腐食試験成立条件の検討結果について報告するとともに、試験期間 2 ヶ年 (24 ヶ月) 経過までの腐食速度については、日本原子力学会和文論文誌「低温、低酸素及び高 pH 条件下における Zr-2.5wt%Nb 合金 (ふげん圧力管) の腐食速度の算出」³⁾ で報告してきた。

本報では、長期の腐食速度の把握を目的に、試験期間 5 ヶ年 (60 ヶ月) の試料から取得した腐食速度を報告する。また、前述した試験期間 2 ヶ年 (24 ヶ月) 経過までの腐食速度³⁾ を合わせて掲載した。

1.2 腐食速度の測定について

本件における核種溶出率の設定を目的とした Zr-2.5wt%Nb 合金の腐食速度の試験方法は、既往研究 ⁴⁾ で適用された水素ガス測定法のうち、実績の多いガス蓄積型腐食試験法を適用し、水素ガス発生量及び水素吸収量から等価腐食速度として算出する手法を用いた。

2. ガス蓄積型腐食試験アンブル

2.1 緒論

今回、開封・分析を行ったガス蓄積型腐食試験アンブルは、5年前（平成23年11月15日）に製作し、所定期間として60ヶ月、恒温水層で保持されたものである。試験材の調製方法およびアンブルの製作方法の概要を示す。

2.2 試験材

(1) 供試材（圧力管）

本試験の試験片作製に用いた圧力管は以下の通りである。化学組成を表2.2-1に、外観を図2.2-1に示す。

材質：Zr-2.5wt%Nb

サイズ： $\phi 126.4^{0D} - \phi 117.8^{1D} \times 500^1$ （肉厚4.3mm）（ここで、“1”は供試材としての寸法である）

表 2.2-1 圧力管の化学組成 ^{注1)}

元素	上部	中央部	下部
化学成分(重量%)			
酸素	0.119	0.124	0.125
ニオブ	2.67	2.64	2.64
ジルコニウム	残部	残部	残部
不純物最大値(重量%)			
アルミニウム	0.0049	0.0046	0.005
ほう素	<0.00002	<0.00002	<0.00002
カドミウム	<0.00002	<0.00002	<0.00002
炭素	0.011	0.011	0.011
クロム	0.0065	0.0064	0.006
コバルト	<0.001	<0.001	<0.001
銅	<0.0025	<0.0025	<0.0025
ハフニウム	0.003	0.0027	0.0026
水素	<0.0005	0.0006	0.0006
鉄	0.0553	0.0613	0.0651
鉛	<0.005	<0.005	<0.005
マグネシウム	<0.001	<0.001	<0.001
マンガン	<0.0025	<0.0025	<0.0025
モリブデン	<0.0025	<0.0025	<0.0025
ニッケル	<0.0035	<0.0035	<0.0035
窒素	0.0044	0.0051	0.0046
けい素	0.005	0.0049	0.0043
タンタル	<0.01	<0.01	<0.01
すず	0.0025	0.003	0.0025
チタン	<0.004	<0.004	<0.004
ウラニウム	0.0001	<0.00005	0.00009
タングステン	<0.0025	<0.0025	<0.0025
バナジウム	<0.0025	<0.0025	<0.0025

注1) ふげん圧力管のミルシートより（圧力管製作に用いたインゴットの上部、中央部、下部の分析値）

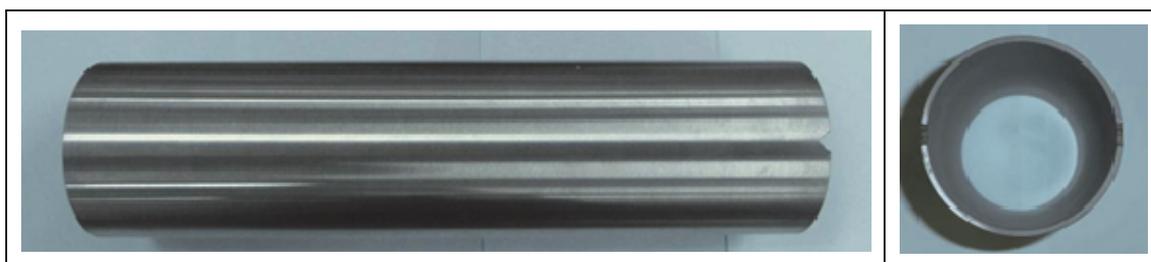


図 2.2-1 圧力管（試験供試材）の外観

(2) 試験片の調製

圧力管から試験片への調製は、以下の通り行った。

圧力管をプレス加工して平面にした後、厚さ 2.4mm になるまで圧延した。その後、冷間圧延 (①～⑤)、真空焼鈍を行い、厚さ 0.1mm の箔材を製作した後、#800 アルミナブラシ研磨を行った。水素ガス発生量確認用の試験片 (厚さ 0.1mm) は、3mm^w×90mm^lのサイズに切断した。水素吸収量確認用試験片は、研磨により厚さ約 0.05mm とした後、高真空焼鈍 (①、②)、#800 エメリー紙研磨を行い 3mm^w×50mm^lのサイズに切断した。なお、腐食に伴い生成する総水素発生量測定値の誤差を排除するため、試験片の初期水素吸収量が 10ppm 以下であることを確認した。これらの試験片はアセトン洗浄を行い、試験に供した。試験片調製手順を図 2.2-2 に示す。このとき、アンプル内の試験片は以下の通りとした。

アンプル容器内の試験片条件 (表面積 120cm²)

3mm^w×90mm^l×0.1mm^t : 21 枚

3mm^w×50mm^l×0.05mm^t : 2 枚 (水素吸収量測定用)

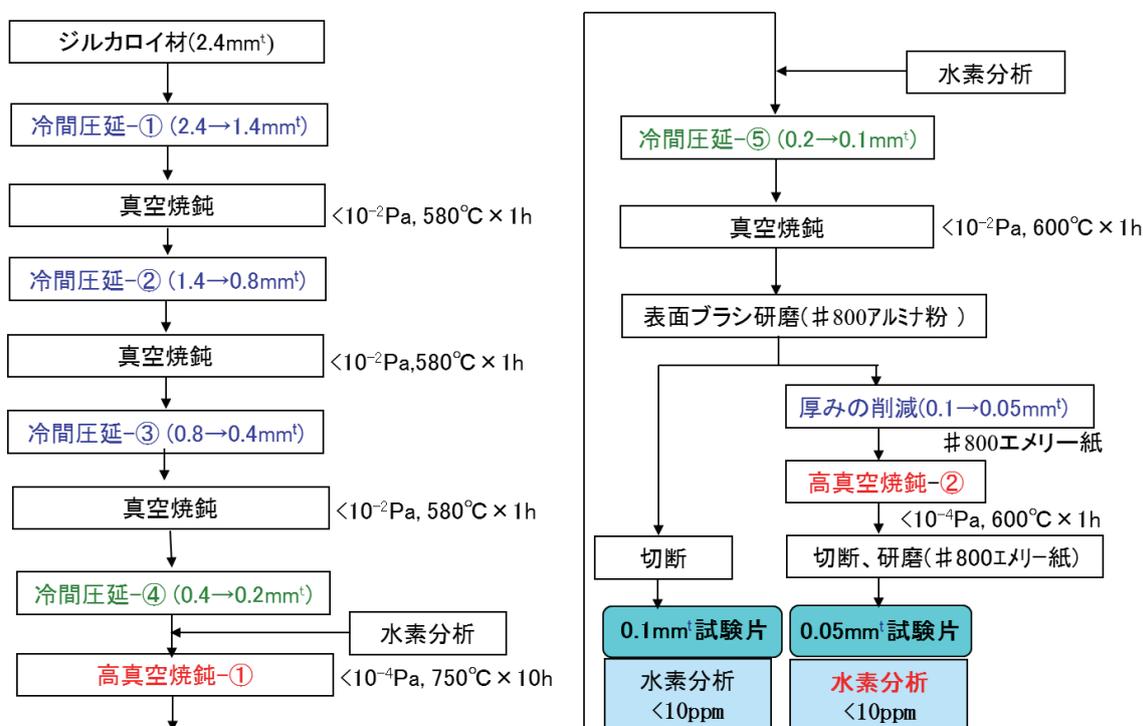


図 2.2-2 試験片調製手順

2.3 試験アンプルの製作

試験アンプルの製作は、ガス蓄積型腐食試験手順²⁾に準拠して以下の手順で行った。その概要を図 2.3-1 に示す。

- ① 試験片をアセトン内で超音波洗浄後、写真撮影および重量測定を行う。
- ② アンプル容器内に試験片を入れた後、コックを溶着し、雰囲気制御グローブボックス（窒素雰囲気、酸素濃度<0.1 vol. ppm）内に搬入する。
- ③ 試験溶液（イオン交換水に NaOH を添加し、pH12.5 および pH10 に調整した溶液）を調製し、試験開始前（試験片浸漬前）に雰囲気制御グローブボックス内のガスでバブリングして脱気する。
- ④ 脱気した試験溶液をアンプル内に入れ、減圧（-500mmHg）してコックを閉じる。
- ⑤ 雰囲気制御グローブボックス外に搬出し、バーナーでアンプル口を溶着して密閉容器とする。

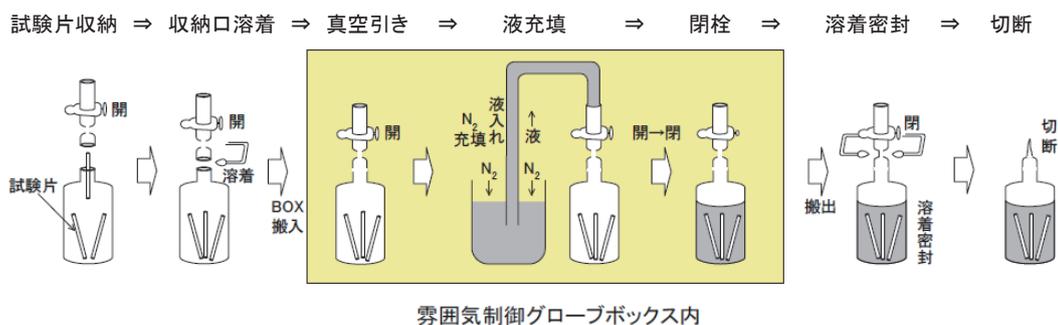


図 2.3-1 ガス蓄積型腐食試験のアンプル製作概要²⁾

3. アンプルの開封、分析及び試験結果

3.1 緒論

2章に示した方法で作製したアンプルのうち、本報では60ヶ月経過したアンプルを開封し、長期的な水素ガス発生量および水素吸収量の分析を行い、腐食速度を評価した。また、溶液分析および試験片の腐食により生成した皮膜分析を実施した。

3.2 試験条件

(1) アンプル保管状況

図 3.2-1 に恒温水槽の外観、恒温水槽の内部及びアンプルの保管状況を示す。

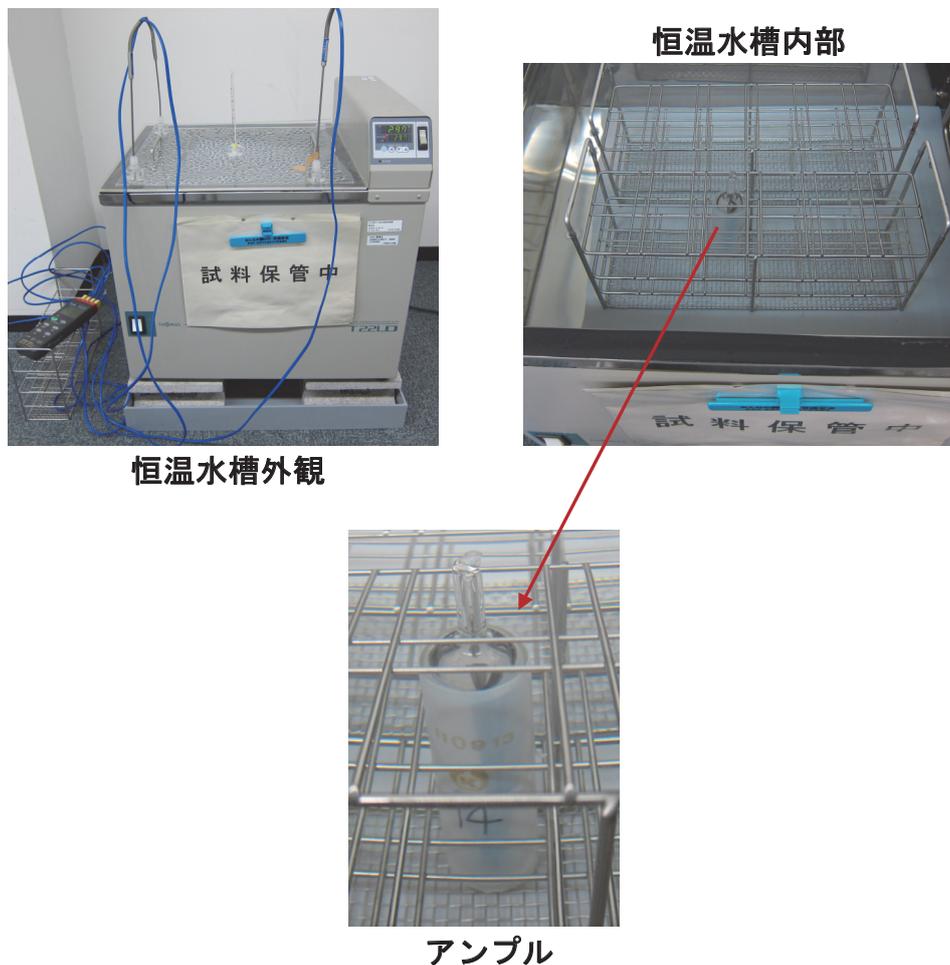


図 3.2-1 恒温水槽及びアンプルの保管状況

(2) 試験条件、分析項目

試験条件と分析項目の一覧を表 3.2-1 に示す。供試体毎の分析項目は○印で示す。

試験アンプルの内、30℃で60ヶ月保持されたアンプル (No.13) について開封し、水素ガス発生量及び水素吸収量の分析を実施した。また、溶液分析及び試験片の皮膜分析を実施した。

表 3.2-1 ガス蓄積型腐食試験条件および分析項目一覧

No.	供試材		溶液	pH (NaOH で調製)	温度 (°C)	雰囲気	期間 (ヶ月)	分析項目							備考
	表面積 (cm ²)	研磨						水素ガス 発生量	水素 吸収量	供試材 観察	溶液 分析	GD-OES	XPS	TEM	
1	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	1	○	○	○					H23 年度実施
2	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	3	○	○	○					H23 年度実施
3	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	6	○	○	○					H24 年度実施
4	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	12	○	○	○	○	○	○	○	H24 年度実施
5	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	12	○	○	○					H24 年度実施
6	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	12	○	○	○					H24 年度実施
7	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	24	○	○	○	○	○	○	○	H25 年度実施
8	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	24	○	○	○					H25 年度実施
9	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	24	○	○	○					H25 年度実施
10	120	有	休交換水	10.0	30	N ₂	6	○	○	○					H24 年度実施
11	120	有	休交換水	10.0	30	N ₂	12	○	○	○	○	○	○	○	H24 年度実施
12	120	有	休交換水	10.0	30	N ₂	24	○	○	○	○	○	○	○	H25 年度実施
13	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	60	○	○	○	○	○	○	○	H28 年度実施

3.3 アンプルの開封、分析方法

(1) 試験アンプルの開封・分析手順

アンプルの開封・分析手順は以下の通りとし、その概要を図 3.3-1 に示す。また、アンプル開封装置の外観を図 3.3-2 に示す。

- ① 所定期間経過後、ガスクロマトグラフを接続したアンプル開封装置内でアンプルを開封し、水素ガス濃度を分析する。
- ② 取り出した試験片は、純水で洗浄後乾燥し、写真撮影および重量測定を行う。
- ③ 吸収された水素量測定用試験片の水素濃度を不活性ガス溶融-ガスクロマトグラフ法を用いて分析する。
- ④ 皮膜分析用の試験片は真空保管し、各分析に供する。

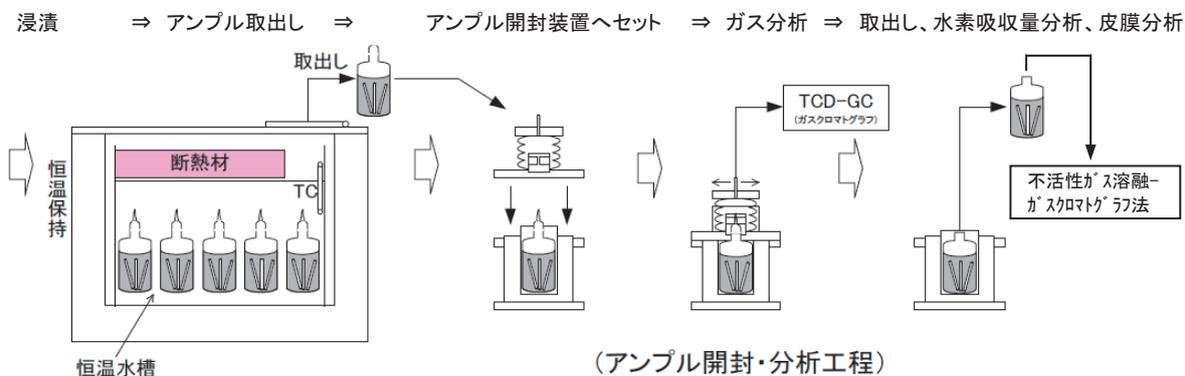


図 3.3-1 ガス蓄積型腐食試験のアンプル開封・分析概要



図 3.3-2 アンブル開封装置

(2) 水素ガス発生量分析

アンブル気相部の水素ガス濃度は、アンブル開封装置（図 3.3-2）の真空チャンバ（開封後の気相部容積 220mL）内でアンブルを開封し、真空チャンバのガスをガスサンプラーで採取（2mL）し、熱伝導度検出器付きガスクロマトグラフ（島津製作所製 GC-2014APT TCD-GC、分析精度±5ppm）を用いて分析した。

水素ガス発生量 V (mL) は、採取したガス中の水素ガス濃度 C ($\mu\text{L/L}$) とアンブル開封後の真空チャンバ内容積 V_c (0.22L、20°C) から下式により算出した。

$$V = 10^{-3} \times C \times V_c \times \frac{273}{293}$$

さらに、低酸素条件下におけるジルカロイの腐食反応（水素ガス発生）として(1)式を仮定し、気相に放出された水素ガス発生量から換算した腐食速度を水素ガス発生等価腐食速度として算出した。



この場合、水素ガス発生等価腐食速度 R_{gas} ($\mu\text{ m/y}$) は、気相中に放出された水素ガス発生量 V (mL) と下記の関係で示される。

$$R_{gas} = \frac{V \times 10^{-3} \times M \times 365}{2^* \times 22.4 \times S \times \rho \times T}$$

ここで、

M : ジルコニウムの原子量 (= 91.22)

S : 試験片表面積 (m^2)

- ρ : ジルコニウムの密度 (= 6.51g/cm³)⁵⁾
 T : 試験時間 (日)
 * : ジルコニウム 1 原子の腐食に対して生成する H₂ の分子数

(3) 水素吸収量分析

水素吸収量分析用の試験片 (3mm^w×50mm^l×0.05mm^t) 1 枚ごとの水素濃度を不活性ガス溶融-ガスクロマトグラフ (Leco 社製 RH40、分析精度±0.5ppm) を用いて分析し、水素吸収量を求めた (分析枚数は各サンプルで 2 枚とした)。

さらに、低酸素条件下におけるジルカロイの腐食反応 (水素吸収) として(2)式を仮定し、吸収された水素量から換算した腐食速度を水素吸収等価腐食速度として求めた。



この場合、水素吸収等価腐食速度 R_{abs} (μm/y) は、水素吸収濃度 C (mass ppm) と下記の関係で示される。

$$R_{abs} = \frac{C \times 10^{-6} \times W \times M \times 365}{4.03^{**} \times S \times \rho \times T}$$

ここで、

- M : ジルコニウムの原子量 (= 91.22)
 S : 試験片表面積 (m²)
 W : 試験片重量 (g)
 ρ : ジルコニウムの密度 (= 6.51g/cm³)⁵⁾
 T : 試験時間 (d)
 ** : ジルコニウム 1 原子の腐食に対して生成する H 原子の原子量の和

(4) 浸漬溶液の分析

浸漬溶液に対して、硝酸を加えて溶出成分を酸分解した後、ICP-質量分析装置 (パーキンエルマー社製 ELAN DRC-II) を用いて溶液中のジルコニウム (Zr)、すず (Sn)、鉄 (Fe)、クロム (Cr)、ニオブ (Nb) を分析した。

(5) 試験片の表面分析

① XPS 分析 (X 線光電子分光分析、X-ray Photoelectron Spectroscopy)

水素ガス発生量測定用の試験片 1 枚を用いて、XPS 分析を行った。アルゴンイオンでスパッタリングを行いながら、ジルコニウム (Zr)、酸素 (O)、ニオブ (Nb) (添加元素) 及び検出された元素について、深さ方向の濃度プロファイルを測定した。分析に使用した装置及び測定条件を以下に示す。

- ・装置 : Physical Electronics 社製 Quantera SXM 走査型 X 線光電子分光装置

- ・ X線源 : 単色化 Al $K\alpha$
- ・ X線出力 : 25.1W
- ・ X線ビーム径 : 200 μ m ϕ
- ・ スパッタ条件 : Ar⁺イオン、エネルギー1keV、領域 1×1mm

② GD-OES 分析（グロー放電発光分析、Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy）
 水素ガス発生量測定用の試験片 1 枚を用いて、GD-OES 分析を行った。ジルコニウム (Zr)、酸素 (O)、水素 (H) の強度プロファイルを測定し、酸化膜および母材中の水素の分布状況について評価した。分析に使用した装置及び測定条件を以下に示す。

- ・ 装置 : 堀場製作所製 GD-PROFILER2 型グロー放電発光表面分析装置
- ・ 放電電力 : 35W
- ・ Ar ガス圧 : 600Pa
- ・ 分析領域 : ϕ 4mm

③ 表面観察

取り出した試験片の目視による表面観察を行い、写真撮影を行った。

④ TEM（透過型電子顕微鏡、Transmission Electron Microscope）観察

水素ガス発生量測定用の試験片 1 枚を用いて、TEM 観察を行い、酸化膜の厚さを測定した。集束イオンビーム加工観察装置（FIB）を用いて皮膜断面の薄膜試料を作製し、透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて皮膜部の断面を観察した。皮膜と母材についてエネルギー分散型 X 線検出器（EDX）を用いて組成を確認した。分析に使用した装置および測定条件を以下に示す。

- ・ FIB 加工観察装置 : 日立製作所製 FB2000A 集束イオンビーム加工観察装置
- ・ 加速電圧 : 30kV
- ・ TEM 装置 : 日本電子製 JEM-2010F 電解放射型透過電子顕微鏡
日本電子製 JED-2300T EDX 分析装置
- ・ 加速電圧 : 200kV
- ・ ビーム径 : 約 1nm Φ （EDX 分析時）

3.4 試験結果

(1) 水素ガス発生量分析結果及び発生等価腐食速度

アンプル気相部の水素ガス濃度をガスクロマトグラフで分析し、水素ガス発生量を求めた。水素ガス発生量分析結果及び水素ガス発生等価腐食速度の算出結果を表 3.4-1 に示す。また、水素ガス発生等価腐食速度について、既往研究⁴⁾におけるジルカロイ-4 及びジルカロイ-2 のガス蓄積型腐食試験及びガスフロー型腐食試験と比較した結果を図 3.4-1 に示す。

図 3.4-1 から、Zr-2.5wt%Nb 合金の水素ガス発生等価腐食速度は、60 ヶ月（1826 日）までの試験において経時的に低下しており、24 ヶ月が 3.6E-4～4.7E-4 μ m/y に対し、60 ヶ月では

2.3E-4 $\mu\text{m/y}$ となった。また、傾向としては、24ヶ月（730日）までの試験結果及びジルカロイ-4及びジルカロイ-2のガス蓄積型、ガスフロー型の試験結果に対して顕著な差は認められなかった。

表 3.4-1 Zr-2.5wt%Nb 合金の水素ガス発生量および水素ガス発生等価腐食速度

No.	試験材		溶液	pH (NaOH で調整)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	試験 雰囲気	試験 期間 (d)	水素ガス 濃度 ($\mu\text{L/L}$)	水素ガス 発生量 (ml)	水素ガス 発生率 ($\text{ml/m}^2\cdot\text{y}$)	水素ガス 発生等価 腐食速度 ($\mu\text{m/y}$)	備考
	表面積 (cm^2)	研磨										
1	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	30	49	1.0E-2	1.0E+1	3.2E-3	H23年度実施
2	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	90	80	1.6E-2	5.6E+0	1.7E-3	"
3	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	180	93	1.9E-2	3.2E+0	1.0E-3	H24年度実施
4	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	373	129	2.6E-2	2.2E+0	6.7E-4	"
5	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	373	140	2.9E-2	2.3E+0	7.3E-4	"
6	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	373	109	2.2E-2	1.8E+0	5.7E-4	"
7	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	730	175	3.6E-2	1.5E+0	4.7E-4	H25年度実施
8	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	730	135	2.8E-2	1.2E+0	3.6E-4	"
9	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	730	143	2.9E-2	1.2E+0	3.8E-4	"
10	120	有	イオン交換水	10	30	N_2	180	107	2.2E-2	3.7E+0	1.2E-3	H24年度実施
11	120	有	イオン交換水	10	30	N_2	373	120	2.5E-2	2.0E+0	6.3E-4	"
12	120	有	イオン交換水	10	30	N_2	730	124	2.5E-2	1.1E+0	3.3E-4	H25年度実施
13	120	有	イオン交換水	12.5	30	N_2	1826	213	4.4E-2	7.3E-1	2.3E-4	H28年度実施

試験期間：30日=30 $^{\circ}\text{C}$ 保持30日、90日=30 $^{\circ}\text{C}$ 保持90日、180日=30 $^{\circ}\text{C}$ 保持180日

373日=30 $^{\circ}\text{C}$ 保持347日+室温保持26日、730日=30 $^{\circ}\text{C}$ 保持730日、1826日=30 $^{\circ}\text{C}$ 保持1826日

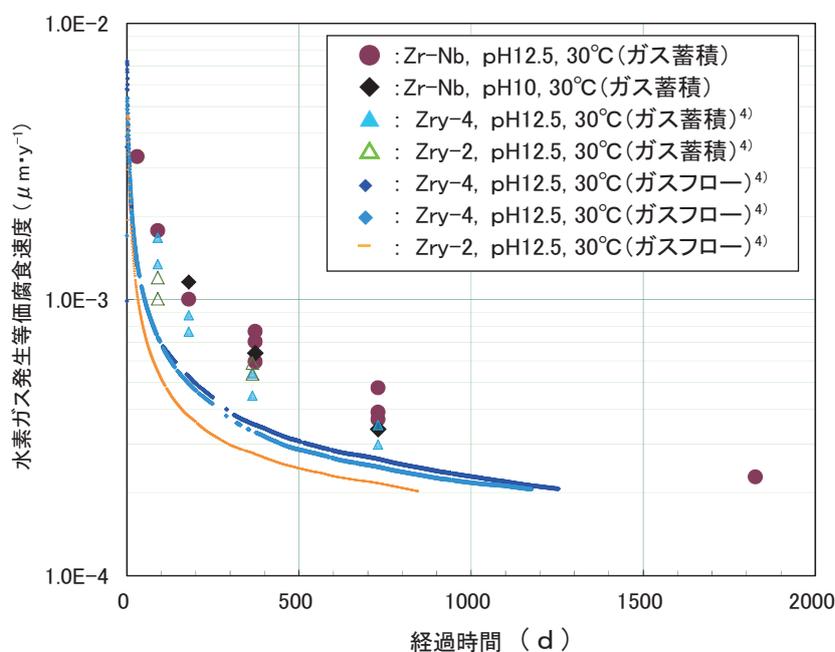


図 3.4-1 Zr-2.5wt%Nb 合金の水素ガス発生量より求めた水素ガス発生等価腐食速度

(2) 水素吸収量分析結果及び吸収等価腐食速度

Zr-2.5wt%Nb 合金試験片の水素吸収量分析結果及び水素吸収等価腐食速度の算出結果を表 3.4-2 に示す。また、水素吸収等価腐食速度について、既往研究⁴⁾におけるジルカロイ-4 及びジルカロイ-2 のガス蓄積型腐食試験及びガスフロー型腐食試験と比較した結果を図 3.4-2 に示す。図 3.4-2 から、Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収等価腐食速度は、60 ヶ月（1826 日）までの試験において経時的に低下しており、24 ヶ月が 3.0E-3~3.4E-3 μm/y に対し、60 ヶ月では 1.8E-3 μm/y となった。また、傾向としては、24 ヶ月（730 日）までの試験結果及びジルカロイ-4 及びジルカロイ-2 のガス蓄積型、ガスフロー型の試験結果に対して顕著な差は認められなかった。

表 3.4-2 Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収量および水素吸収等価腐食速度

No.	試験材		溶液	pH (NaOH で調整)	温度 (°C)	試験 雰囲気	試験 期間 (d)	試験片 重量 (g)	水素濃度 (ppm)		水素吸収 濃度 (ppm)	水素 吸収量 (g)	単位面積当たりの 水素吸収量 (g/cm ²)		水素吸収 等価腐食速度 (μm/y)		備考
	表面積 (cm ²)	研磨							試験前	試験後			測定値	平均	測定値	平均	
1	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	30	0.0683	6	9	3	2.0E-7	6.8E-8	5.8E-8	2.9E-2	2.4E-2	H23 年度 実施
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	30	0.0702	6	8	2	1.4E-7	4.7E-8		2.0E-2		
2	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	90	0.0629	6	10	4	2.5E-7	8.4E-8	9.7E-8	1.2E-2	1.4E-2	"
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	90	0.0661	6	11	5	3.3E-7	1.1E-7		1.6E-2		
3	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	180	0.0664	6	11	5	3.3E-7	1.1E-7	1.3E-7	7.8E-3	9.0E-3	H24 年度 実施
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	180	0.0615	6	13	7	4.3E-7	1.4E-7		1.0E-2		
4	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	373	0.0608	6	13	7	4.3E-7	1.4E-7	1.6E-7	4.8E-3	5.5E-3	"
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	373	0.0597	6	15	9	5.4E-7	1.8E-7		6.1E-3		
5	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	373	0.0631	6	13	7	4.4E-7	1.5E-7	1.5E-7	5.0E-3	5.2E-3	"
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	373	0.0602	6	14	8	4.8E-7	1.6E-7		5.5E-3		
6	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	373	0.0624	6	12	6	3.7E-7	1.2E-7	1.4E-7	4.2E-3	4.8E-3	"
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	373	0.0585	6	14	8	4.7E-7	1.6E-7		5.3E-3		
7	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	730	0.0596	6	15	9	5.4E-7	1.8E-7	2.0E-7	3.1E-3	3.4E-3	H25 年度 実施
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	730	0.0582	6	17	11	6.4E-7	2.1E-7		3.7E-3		
8	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	730	0.0602	6	14	8	4.8E-7	1.6E-7	1.7E-7	2.8E-3	3.0E-3	"
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	730	0.0608	6	15	9	5.5E-7	1.8E-7		3.2E-3		
9	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	730	0.0611	6	15	9	5.5E-7	1.8E-7	1.9E-7	3.2E-3	3.3E-3	"
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	730	0.0594	6	16	10	5.9E-7	2.0E-7		3.4E-3		
10	3	有	イオン交換水	10	30	N ₂	180	0.0639	6	12	6	3.8E-7	1.3E-7	9.8E-8	9.0E-3	6.9E-3	H24 年度 実施
	3	有	イオン交換水	10	30	N ₂	180	0.0676	6	9	3	2.0E-7	6.8E-8		4.8E-3		
11	3	有	イオン交換水	10	30	N ₂	373	0.0612	6	13	7	4.3E-7	1.4E-7	1.2E-7	4.9E-3	4.3E-3	"
	3	有	イオン交換水	10	30	N ₂	373	0.0643	6	11	5	3.2E-7	1.1E-7		3.6E-3		
12	3	有	イオン交換水	10	30	N ₂	730	0.0630	6	13	7	4.4E-7	1.5E-7	1.5E-7	2.6E-3	2.5E-3	H25 年度 実施
	3	有	イオン交換水	10	30	N ₂	730	0.0619	6	13	7	4.3E-7	1.4E-7		2.5E-3		
13	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	1826	0.0631	6	18	12	7.6E-7	2.5E-7	2.7E-7	1.8E-3	1.8E-3	H28 年度 実施
	3	有	イオン交換水	12.5	30	N ₂	1826	0.0645	6	19	13	8.4E-7	2.8E-7		1.9E-3		

試験期間：30 日=30°C 保持 30 日、90 日=30°C 保持 90 日、180 日=30°C 保持 180 日

373 日=30°C 保持 347 日+室温保持 26 日、730 日=30°C 保持 730 日、1826 日=30°C 保持 1826 日

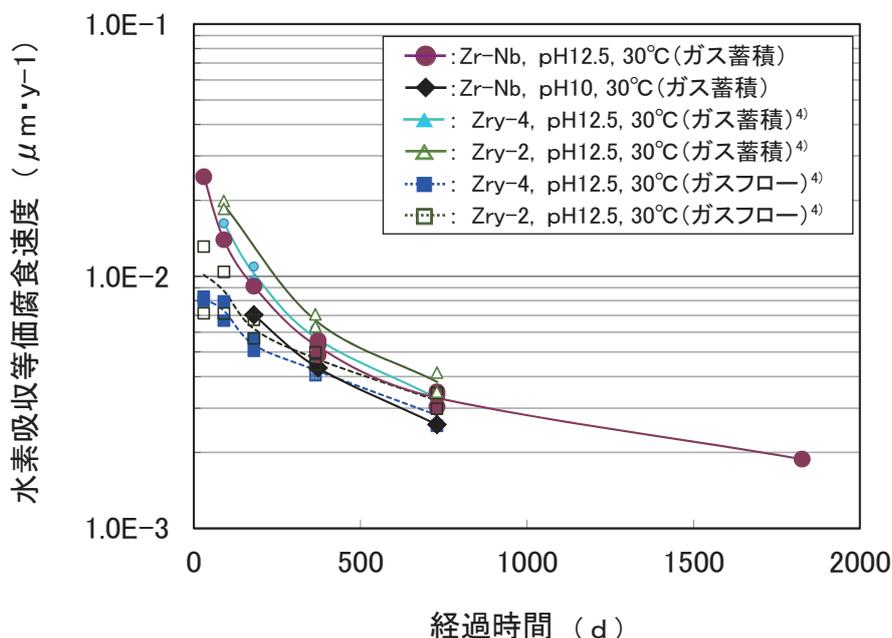


図 3.4-2 Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収等価腐食速度

(3) Zr-2.5wt%Nb 合金の等価腐食速度

水素ガス発生等価腐食速度と水素吸収等価腐食速度の和より求めたトータルの等価腐食速度である Zr-2.5wt%Nb 合金の等価腐食速度の結果及びトータルの等価腐食速度に対する水素吸収等価腐食速度の割合を水素吸収率として算出した結果を表 3.4-3 に示す。また、水素ガス発生等価腐食速度と水素吸収等価腐食速度の和より算出したトータルの等価腐食速度について、既往研究⁴⁾におけるジルカロイ-4 及びジルカロイ-2 のガス蓄積型腐食試験及びガスフロー型腐食試験と比較した結果を図 3.4-3 に示す。

図 3.4-3 から、Zr-2.5wt%Nb 合金の等価腐食速度は、60 ヶ月（1826 日）までの試験において経時的に低下しており、24 ヶ月が $3.3\text{E-}3 \sim 3.9\text{E-}3 \mu\text{m/y}$ に対し、60 ヶ月では $2.1\text{E-}3 \mu\text{m/y}$ となった。また、傾向としては、24 ヶ月（730 日）までの試験結果及びジルカロイ-4 及びジルカロイ-2 のガス蓄積型、ガスフロー型の試験結果に対して顕著な差は認められなかった。

(4) 水素吸収率

水素吸収率について、既往研究⁴⁾におけるジルカロイ-4 及びジルカロイ-2 のガス蓄積型腐食試験及びガスフロー型腐食試験と比較した結果を図 3.4-4 に示す。

Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収率は、24 ヶ月（730 日）までの試験においてジルカロイ-4 及びジルカロイ-2 に比べ少し低めに推移していた。また、60 ヶ月（1826 日）の Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収率は、24 ヶ月（730 日）までの試験とほぼ変わらなかった。

表 3.4-3 Zr-2.5wt%Nb 合金の等価腐食速度と水素吸収率

No.	試験材		溶液	pH (NaOH で調整)	温度 (°C)	試験 雰囲気	試験 期間 (d)	水素ガス 発生等価 腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$)	水素吸収 等価腐食 速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$)	Zr-2.5wt%Nb 合金 (ガス発生+ 水素吸収) 等価腐食 速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$)	水素 吸収率 (%)	備考
	表面積 (cm^2)	研磨										
1	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	30	3.2E-03	2.4E-02	2.8E-02	88	H23 年度実施
2	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	90	1.7E-03	1.4E-02	1.5E-02	89	"
3	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	180	1.0E-03	9.0E-03	1.0E-02	90	H24 年度実施
4	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	373	6.7E-04	5.5E-03	6.1E-03	89	"
5	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	373	7.3E-04	5.2E-03	6.0E-03	88	"
6	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	373	5.7E-04	4.8E-03	5.3E-03	89	"
7	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	730	4.7E-04	3.4E-03	3.9E-03	88	H25 年度実施
8	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	730	3.6E-04	3.0E-03	3.3E-03	89	"
9	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	730	3.8E-04	3.3E-03	3.7E-03	90	"
10	120	有	休交換水	10	30	N ₂	180	1.2E-03	6.9E-03	8.0E-03	86	H24 年度実施
11	120	有	休交換水	10	30	N ₂	373	6.3E-04	4.3E-03	4.9E-03	87	"
12	120	有	休交換水	10	30	N ₂	730	3.3E-04	2.5E-03	2.9E-03	88	H25 年度実施
13	120	有	休交換水	12.5	30	N ₂	1826	2.3E-04	1.8E-03	2.1E-03	89	H28 年度実施

試験期間：30 日=30°C保持 30 日、90 日=30°C保持 90 日、180 日=30°C保持 180 日、373 日=30°C保持 347 日+室温保持 26 日
730 日=30°C保持 730 日、1826 日=30°C保持 1826 日

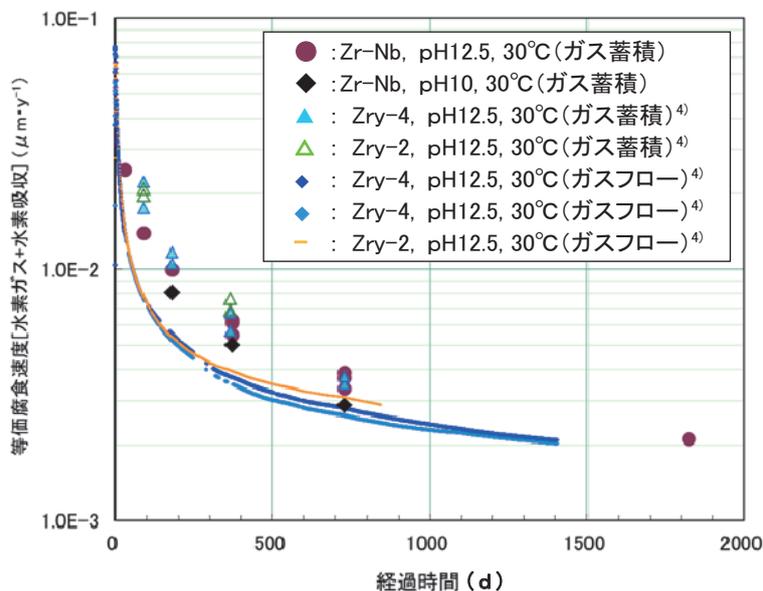


図 3.4-3 Zr-2.5wt%Nb 合金の等価腐食速度
[水素ガス発生等価腐食速度+水素吸収等価腐食速度]

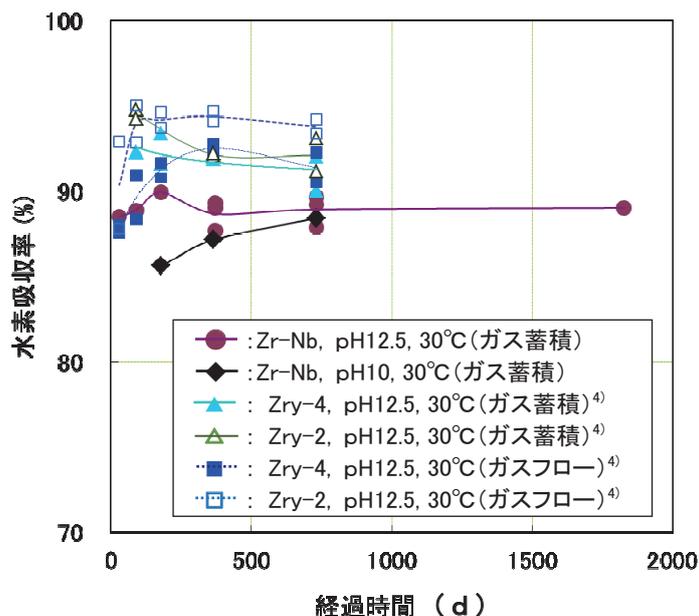


図 3.4-4 Zr-2.5wt%Nb 合金の水素吸収率

(5) 浸漬溶液の分析結果

浸漬溶液の溶出成分 (Zr, Sn, Fe, Cr, Nb) の分析結果を表 3.4-4 に示す。pH12.5 においてはジルコニウム (Zr) が検出されており、経時的に濃度が増加している。ジルコニウム (Zr) 以外の成分は検出されなかった。既往研究⁶⁾においてジルカロイ-4 を 50°C、pH12.5 の NaOH 水溶液に 12 ヶ月 (373 日) 浸漬した時の溶液中のジルコニウム (Zr) 濃度は 0.5mg/L であり、Zr-2.5%Nb 合金においても同じオーダーの溶出量となった。なお、pH10 ではジルコニウム (Zr) も検出されておらず、溶解度が小さいためと考えられた。

表 3.4-4 浸漬溶液の分析結果(mg/L)

	Zr	Sn	Fe	Cr	Nb	備考
No.4 (pH12.5、12 ヶ月)	0.13	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	H24 年度実施
No.7 (pH12.5、24 ヶ月)	0.15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	H25 年度実施
No.13 (pH12.5、60 ヶ月)	0.29	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	H28 年度実施
No.11 (pH10、12 ヶ月)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	H24 年度実施
No.12 (pH10、24 ヶ月)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	H25 年度実施

(6) 試験片の表面分析結果

① XPS 分析結果

試験片の XPS 分析結果を図 3.4-5 に示す。酸化膜厚さのばらつきや金属表面の凹凸の影響でデプスプロファイルの変化がなだらかなため、酸素 (O) の濃度が酸化膜部分の 1/2 の濃度となる部位を酸化膜と金属の界面として評価すると、約 30nm (SiO₂ 換算) となった。なお、図中の横軸の深さは、SiO₂ 換算の値で示しており、後述する TEM 観察による膜厚よりも大きな値となっている。

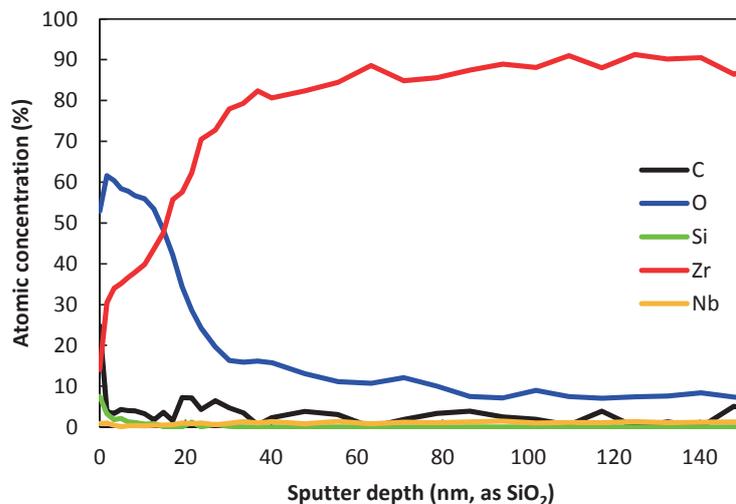


図 3.4-5 アンプル No.13 (pH12.5、30°C、60 ヶ月浸漬) の XPS 分析結果

② GD-OES 分析結果

試験片の GD-OES 分析結果を図 3.4-6 に示す。いずれも表面から水素 (H) および酸素 (O) の強度は低下しており、200nm (ジルコニウム (Zr) 換算) より深い部位ではほぼ一定の濃度となった。ただし、200nm (ジルコニウム (Zr) 換算) より深い部位の水素 (H) は強度が 10 以下でありバックグラウンドレベルと考えられる。酸化膜厚さはいずれも約 50nm (ジルコニウム (Zr) 換算) 程度である。なお、酸化膜のスパッタ速度が不明であることからジルコニウム (Zr) 換算としているため、後述の TEM 観察結果と比べ膜厚が大きな値となっている。これは、一般的に酸化物のスパッタ速度は金属よりも小さいため、金属のスパッタ速度で換算すると大きな値となることに起因していると考えられる。

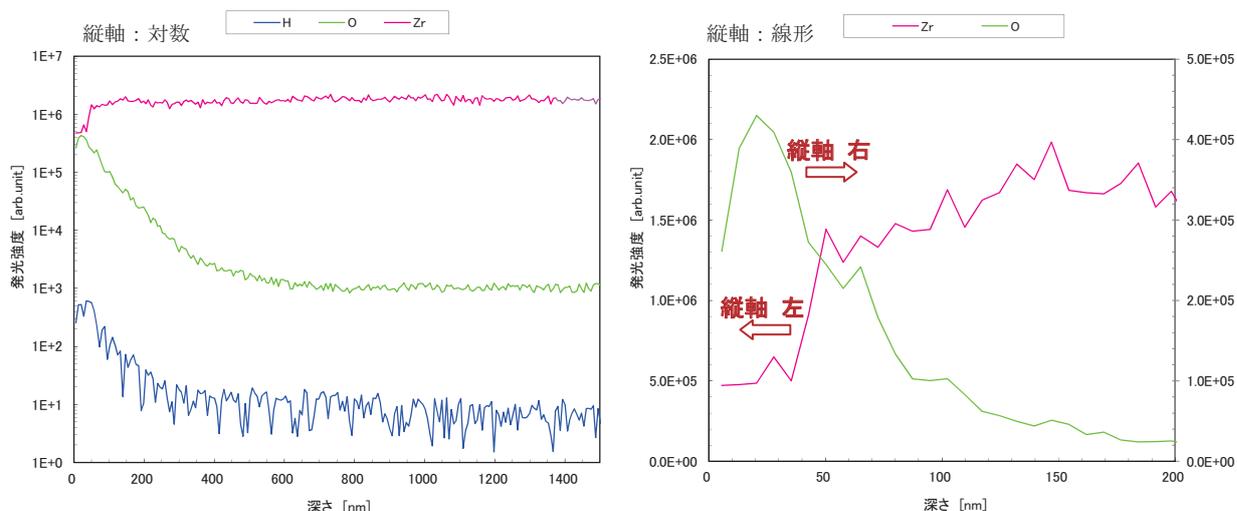


図 3.4-6 アンプル No.13 (pH12.5、30°C、60 ヶ月浸漬) の GD-OES 分析結果

③ 表面観察結果

取り出した試験片について、目視による表面観察を行い、写真撮影を行った。試験前後の試験片の外観を図 3.4-7 に示す。試験期間 60 ヶ月経過までの試験片の外観は試験前と顕著な差が認められなかった。

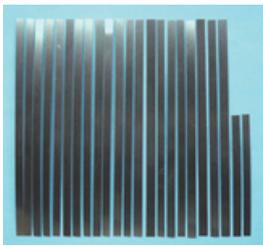
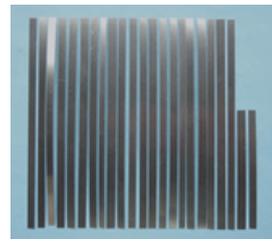
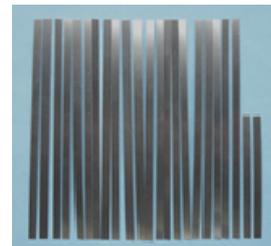
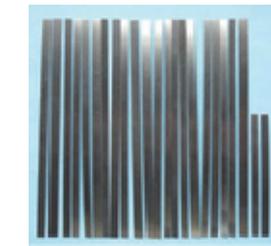
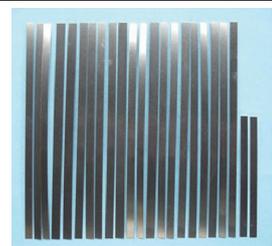
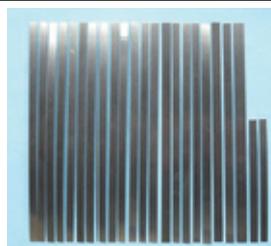
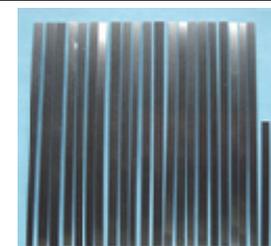
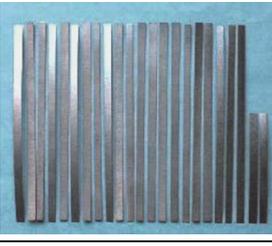
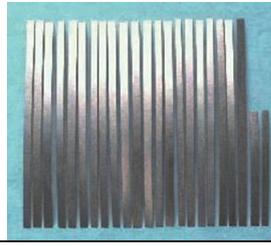
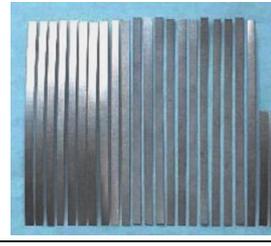
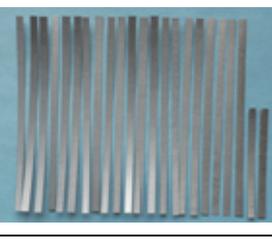
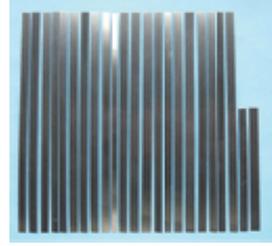
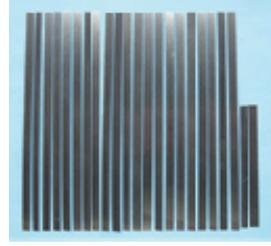
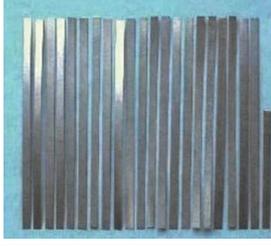
試験前試料	No.1 : pH12.5, 1 ヶ月	No.2 : pH12.5, 3 ヶ月	No.3 : pH12.5, 6 ヶ月
			
	No.4 : pH12.5, 12 ヶ月	No.5 : pH12.5, 12 ヶ月	No.6 : pH12.5, 12 ヶ月
			
	No.7 : pH12.5, 24 ヶ月	No.8 : pH12.5, 24 ヶ月	No.9 : pH12.5, 24 ヶ月
			
	No.13 : pH12.5, 60 ヶ月	—	—
		—	—
	No.10 : pH10, 6 ヶ月	No.11 : pH10, 12 ヶ月	No.12 : pH10, 24 ヶ月
			

図 3.4-7 浸漬試験前後の Zr-2.5wt%Nb 合金試験片の外観

④ TEM 観察結果

試験前試料および60ヶ月の試験片のTEM観察およびEDX分析結果を図3.4-8及び図3.4-9に示す。EDX分析で酸化膜の部位には酸素(O)が検出されているが、金属部分では酸素(O)が検出されていない。ここで、銅(Cu)は試料の保持に使用した銅メッシュによるものである。TEM像より求めた各試験片の酸化膜厚さを表3.4-5に示す。試験後の試験片の酸化膜厚さは試験前試料に比べて増加しており、60ヶ月後は9~10nm程度となった。

水素分析から求めた腐食深さは10nmであり、酸化膜厚さに換算すると12nm(ジルコニウム(Zr)の密度 6.52g/cm^3 、酸化膜の密度を $5.49\text{g/cm}^3[\text{m-ZrO}_2]$ と仮定)となり、TEM観察による膜厚よりわずかに大きめであるが、両者は同程度の値となった。既往研究⁴⁾においてジルカロイ-4を 50°C 、pH12.5のNaOH水溶液に60ヶ月浸漬した時の酸化膜厚さの増加は約15nmであり、温度影響を考慮するとZr-2.5%Nb合金においてもジルカロイ-4と同程度の膜厚増加と考えられる。

表 3.4-5 TEM 観察による酸化膜厚さ

	TEM 観察		水素分析換算 酸化膜厚	備考
	酸化膜厚	膜厚増加		
試験前試料	3~4nm	—	—	H24年度実施
No.4 (pH12.5,12ヶ月)	部位1:約9nm(6~12nm) 部位2:約7nm(6~8nm)	部位1:約5.5nm 部位2:約3.5nm	約7nm	H24年度実施
No.7 (pH12.5,24ヶ月)	部位1:約10nm(7~13nm) 部位2:約9nm(8~10nm)	部位1:約6.5nm 部位2:約5.5nm	約9nm	H25年度実施
No.13 (pH12.5,60ヶ月)	部位1:約12.5nm(10~15nm) 部位2:約13.5nm(11~16nm)	部位1:約9nm 部位2:約10nm	約12nm	H28年度実施
No.11 (pH10,12ヶ月)	部位1:約9nm(6~12nm) 部位2:約7nm(6~8nm)	部位1:約5.5nm 部位2:約3.5nm	約6nm	H24年度実施
No.12 (pH10,24ヶ月)	部位1:約10nm(8~12nm) 部位2:約9nm(6~12nm)	部位1:約6.5nm 部位2:約5.5nm	約7nm	H25年度実施

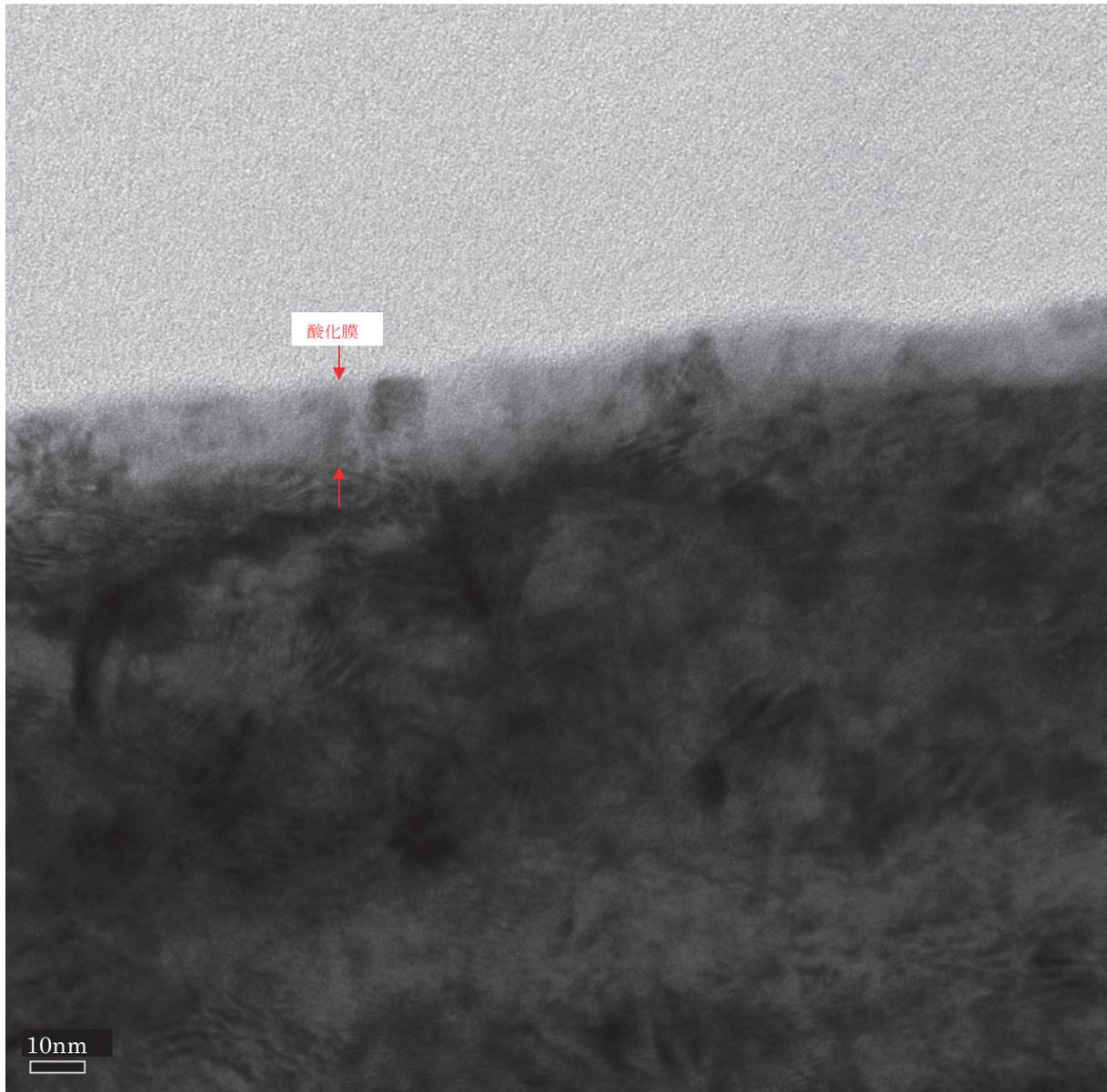


図 3.4-8 アンプル No.13 (pH12.5、30°C、60 ヶ月浸漬) 部位 1 の TEM 観察結果

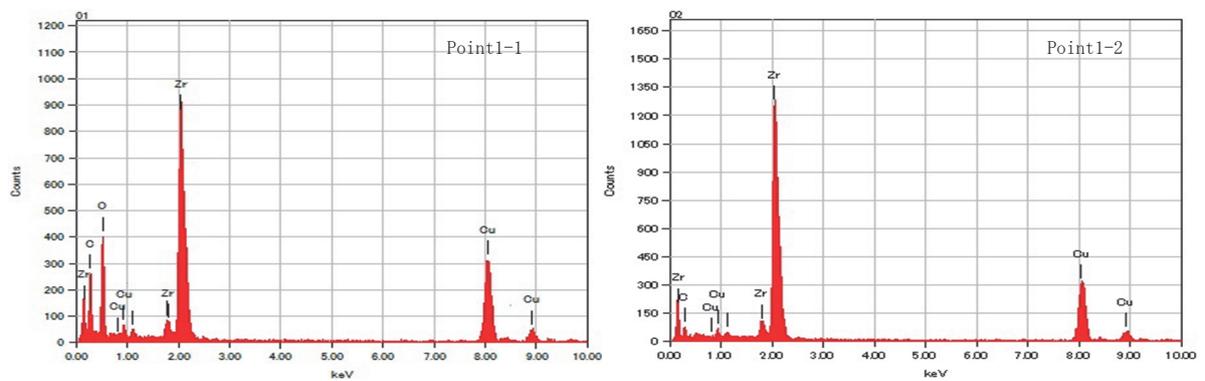
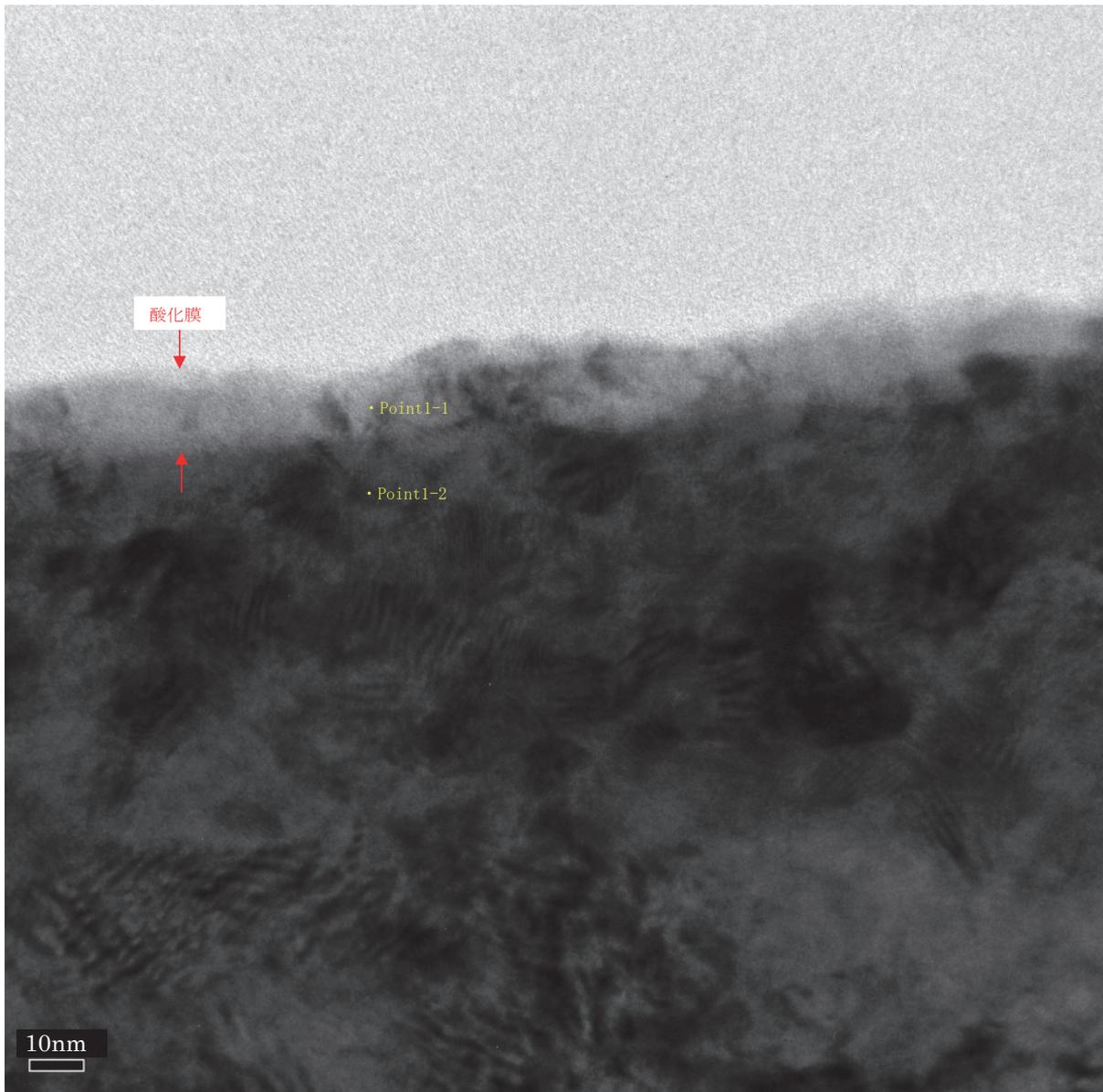


図 3.4-9 アンプル No.13 (pH12.5、30°C、60 ヶ月浸漬) 部位 2 の TEM 観察、EDX 分析結果

3.5 考察

Zr-2.5wt%Nb 合金の腐食速度を評価するため、ガス蓄積型腐食試験法を適用し、試験期間 1 カ月から 60 ヶ月までの腐食速度を評価してきた。

既往文献³⁾では、図 3.4-10 に示した Zr-2.5wt%Nb 合金の腐食速度から算出される腐食厚さと経過時間の関係について、試験期間 24 ヶ月までの結果を最小二乗法を用いてフィッティングしたところ、pH12.5 の条件で(1)式のように、経過時間の 1/3 乗に比例（決定係数 0.97）して腐食厚さが増加することが評価されている。

$$\Delta T_1 (t) = 5.9 \times 10^{-9} \times t^{0.35} \quad (1)$$

ここで、

$\Delta T_1 (t)$: 腐食厚さ (m)

t : 経過時間 (y)

さらに、(1)式を微分し、Zr-2.5wt%Nb 合金の腐食速度を経過時間の関数として(2)式を算出することで、Zr-2.5wt%Nb 合金の腐食速度は経過時間の $-2/3$ 乗に比例するものと評価されている。

$$\Delta R_1 (t) = 2.1 \times 10^{-9} \times t^{-0.65} \quad (2)$$

ここで、

$\Delta R_1 (t)$: 腐食速度 (m/y)

t : 経過時間 (y)

今回取得した試験期間 60 ヶ月の腐食速度から算出される腐食厚さの結果を図 3.4-10 にプロットした。図 3.4-10 から、今回取得した試験期間 60 ヶ月の腐食厚さは、試験期間 24 ヶ月までの相関関係に良く一致していることが確認できることから、今回取得した試験期間 60 ヶ月の腐食速度は、試験期間 24 ヶ月までと同様、経過時間の $-2/3$ 乗に比例するとした評価が適用できると考える。

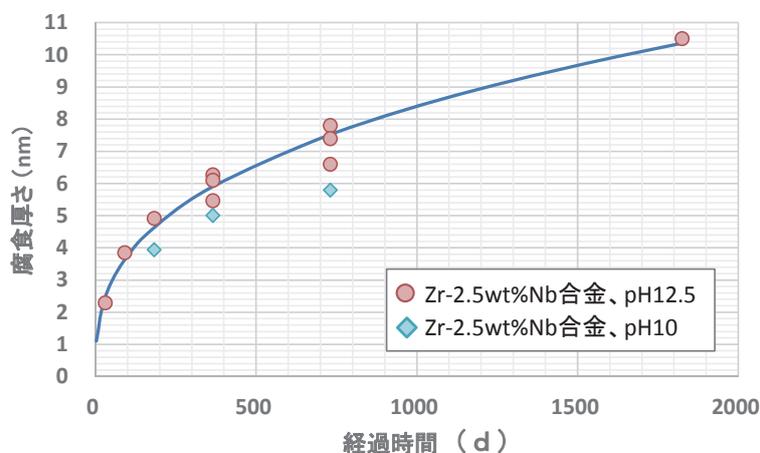


図 3.4-10 Zr-2.5wt%Nb 合金の腐食厚さと経過時間の関係

4. まとめ

安全評価を行うために必要な核種溶出率の設定を目的に、Zr-2.5wt%Nb 合金に対してガス蓄積型腐食試験法を適用し、低温、低酸素およびアルカリ条件下で長期的な腐食速度を取得してきた。

今回取得した試験期間 5 年（60 ヶ月）の腐食速度は、試験期間 2 年（24 ヶ月）までの結果同様、経過時間の $2/3$ 乗に比例するとした評価が適用できると考える。

今後は、処分後の長期の腐食速度予測の更なるデータの充実を図るため、試験期間 5 年（60 ヶ月）以上のデータを取得する予定である。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、貴重なご意見を頂いたバックエンド研究開発部門 原子炉廃止措置研究開発センター 技術開発部 片野好章氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 社団法人 日本原子力学会：日本原子力学会標準 余裕深度処分の安全評価手法：2008 (AESJ-SC-F012:2008)、2009年5月29日。
- 2) 酒谷圭一 他：余裕深度処分環境におけるふげん圧力管 (Zr-2.5wt%Nb 合金) の腐食速度の評価－試験片加工方法及び腐食試験成立条件の検討－、JAEA-Technology/2012-034, 2012,20p.
- 3) 酒谷圭一 他：低温, 低酸素及び高 pH 条件下における Zr-2.5wt%Nb 合金 (ふげん圧力管) の腐食速度の算出, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.14, No.4, 2015, pp.261-267.
- 4) (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等—放射化金属廃棄物中の C-14 の放出挙動評価—報告書 (第 3 分冊)、平成 25 年 3 月 (2013).
- 5) 岩波書店, 岩波 理化学辞典 第 5 版.
- 6) (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等—放射化金属廃棄物中の C-14 の放出挙動評価—報告書 (第 3 分冊)、平成 22 年 3 月 (2010).

This is a blank page.

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량	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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	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 ^(e)	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
光路長	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	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
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	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, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	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
電表面積	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
モルエントロピー, 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	クーロン毎キログラム	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	名称	記号	乗数	名称	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	ヘクト	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=60 s
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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) 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 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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm 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	
デシベル	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
エルグ	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 =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm 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=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 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=1cGy=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=0.2 g=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=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

