JAEA-Testing 2013-004



# 「ふげん」 燃料被覆管を用いた人工海水浸漬試験及び 強度特性評価

Immersion Test in Artificial Water and Evaluation of Strength Property on Fuel Cladding Tubes Irradiated in Fugen Nuclear Power Plant

> 山県 一郎 林長宏 益子 真一 佐々木 新治 井上 賢紀 山下 真一郎 前田 宏治

Ichiro YAMAGATA, Takehiro HAYASHI, Shinichi MASHIKO, Shinji SASAKI Masaki INOUE, Shinichiro YAMASHITA and Koji MAEDA

> 大洗研究開発センター 福島燃料材料試験部

Fukushima Fuels and Materials Department Oarai Research and Development Center November 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2013

## 「ふげん」燃料被覆管を用いた人工海水浸漬試験及び強度特性評価

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 福島燃料材料試験部 山県 一郎、林 長宏、益子 真一\*、佐々木 新治、井上 賢紀、 山下 真一郎<sup>+</sup>、前田 宏治

(2013年7月8日 受理)

東日本大震災に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故においては、1~4 号機の使用 済燃料プールに保管されていた使用済燃料は、瓦礫が落下・混入し、特に 2~4 号機では海水 が注入される等、通常の運転時ではあり得ない環境に晒された。使用済燃料プール中の燃料集 合体の健全性や、使用済燃料プールから共用プールに移送された後の長期間保管における健全 性の評価に資するため、新型転換炉「ふげん」にて使用されたジルカロイ・2 燃料被覆管を用い、 使用済燃料プールの模擬水として 2 倍に希釈した人工海水を用いた、液温 80℃、浸漬時間約 336 時間の浸漬試験を実施した。得られた主な結果は以下の通りであり、本試験条件において 照射済みジルカロイ・2 燃料被覆管への人工海水浸漬による機械的特性への影響はなく、顕著な 腐食も生じないことが確認された。

- (1)浸漬前後の試料表面の外観に明確な変化は見られず、試料外表面近傍の酸化層等においても明確な変化は見られず、浸漬試験による顕著な表面腐食の進行はない。
- (2)引張強さ及び破断伸びは浸漬前後で有意な変化はなく、浸漬試験による機械的特性へ有意な影響はない。
- (3)照射済み試料を遠隔操作で浸漬試験及び引張試験を行うための手法を確立した。

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

- + 大洗研福島技術開発特別チーム
- \* E&E テクノサービス

#### JAEA-Testing 2013-004

# Immersion Test in Artificial Water and Evaluation of Strength Property on Fuel Cladding Tubes Irradiated in Fugen Nuclear Power Plant

Ichiro YAMAGATA, Takehiro HAYASHI, Shinichi MASHIKO<sup>\*</sup>, Shinji SASAKI, Masaki INOUE, Shinichiro YAMASHITA <sup>+</sup> and Koji MAEDA

> Fukushima Fuels and Materials Department, Oarai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

> > (Received July 8, 2013)

In the accident of the Fukushima Daiichi nuclear power plant of Tokyo Electric Power Co. accompanying the Great East Japan Earthquake, fuel assemblies kept in the spent fuel pool of reactor units 1-4, were exposed to the inconceivable environment such as falling and mixing of rubble, especially seawater were injected into unit 2-4. In order to contribute to the evaluation the integrity of the fuel assemblies in spent fuel pools, and in the long-term storage after transported to the common storage pool, the immersion tests were performed using Zircaloy-2 fuel cladding tubes irradiated in the advanced thermal reactor Fugen. The immersion liquid was prepared with doubling dilution of artificial seawater as assuming the situation of the spent fuel pool, and the test conditions were at 80 °C of liquid temperature and about 336 hours of immersion time. The obtained main results were as follows and indicated Zircaloy-2 cladding tubes had no significant corrosion and no influence on mechanical property by immersion tests with artificial seawater conditions of this work.

- (1) There was no definite change on surface appearance and microstructure such as oxide layer at the near surface before and after immersion test. Therefore, there is no significant increasing in surface corrosion by immersion test.
- (2) Tensile strengths and elongations of samples had no significant change before and after immersion tests, and mechanical property was not affected by immersion test.
- (3) The remote control technique was established for performing immersion test and tensile test on irradiated samples.

Keywords: Zircaloy-2, Fuel Cladding Tube, Neutron Irradiation, Seawater, Immersion Test, Tensile Test, Advanced Thermal Reactor

<sup>+</sup> Fukushima Project Team

<sup>\*</sup> E&E Techno Service Co., Ltd.

# 目 次

1. 緒言	1
2. 試験方法	<b>2</b>
2.1 供試材	<b>2</b>
2.2 浸漬試験方法	<b>2</b>
2.2.1 浸漬条件	<b>2</b>
2.2.2 浸漬試験用治具	<b>2</b>
2.2.3 浸漬試験方法の検討	3
2.3 組織観察及び重量測定方法	4
2.4 リング引張試験片試料調製方法	4
2.4.1 ジルカロイ被覆管からのリング引張試験片採取	4
2.4.2 引張試験片試料調製技術の確立	<b>5</b>
<b>2.5</b> リング引張試験方法	<b>5</b>
3. 試験結果及び考察	6
3.1 浸漬試験実施結果	6
3.2 浸漬試験前後の組織観察結果	6
3.3 浸漬前後の重量変化	6
3.4 リング引張試験による強度特性	<b>7</b>
3.5 人工海水浸漬による腐食挙動及び強度特性変化	$\overline{7}$
4. 結言	$\overline{7}$
謝辞	8
参考文献	8

# Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	<b>2</b>
2.1 Testing Materials	<b>2</b>
2.2 Immersion Test Procedure	2
2.2.1 Immersion Test Condition	2
2.2.2 Immersion Test Jig	2
2.2.3 Immersion Test Method	3
2.3 Microstructure Observation and Weight Measurement Method	4
2.4 Sample Preparation for Ring Tensile Test	4
2.4.1 Cutting Ring Tensile Samples from Zircaloy Cladding Tube	4
2.4.2 Establishment Sample Preparation Method for Ring Tensile Test	<b>5</b>
2.5 Method of Ring Tensile Test	<b>5</b>
3. Results and Discussion	6
3.1 Immersion Test Results	6
3.2 Microstructures before and after Immersion Tests	6
3.3 Weight Variations before and after Immersion Tests	6
3.4 Tensile Properties by Ring Tensile Test Results	<b>7</b>
3.5 Corrosion Behavior and Tensile Properties Variations after Immersion Tests	
with Artificial Seawater	7
4. Summary	7
Acknowledgements	8
References	8

## 表リスト

Table 1	ジルカロイ-2燃料被覆管の化学組成及び製造条件	10
Table 2	供試材の照射情報	10
Table 3	人工海水の化学成分	11
Table 4	リング引張試験条件	11
Table 5	浸漬液の液性測定結果	12
Table 6	浸漬前後のジルカロイ-2 被覆管の重量変化	12

## 図リスト

Fig.1 脱ミート (燃料除去) 前後の被覆管外観	13
Fig. 2 ペイント塗布による内面保護の問題点	13
Fig. 3 被覆管内面保護治具及び治具取付状態断面模式図	14
Fig. 4 浸漬試験における技術的課題	14
Fig. 5 浸漬試験用ガラス器具の構造及び改良点	15
Fig. 6 リング引張試験片採取時におけるバリの発生	15
Fig. 7 保護チューブを取り付けた状態での試料切断	16
Fig. 8 リング引張試験片切断直後の端面模式図	16
Fig. 9 リング引張試験片の端面研磨治具及び研磨方法	16
Fig. 10 引張試驗治具	17
Fig. 11 リング引張試験片取付状況	17
Fig. 12 照射材を用いた浸漬試験実施状況	18
Fig. 13 浸漬試験前後の被覆管外観	18
Fig. 14 照射材の浸漬前後断面組織	
Fig. 15 照射材の浸漬試験前後断面組織(拡大)	20
Fig. 16 リング引張試験における代表的な応力・ひずみ曲線	20
Fig. 17 照射材のリング引張試験後外観観察結果の代表例	21
Fig. 18 照射材のリング引張試験後の破断面	21
Fig. 19 ジルカロイ・2 被覆管の浸漬前後における 0.2%耐力	22
Fig. 20 ジルカロイ-2 燃料被覆管の浸漬前後における引張強さ	22
Fig. 21 ジルカロイ-2 燃料被覆管の浸漬前後における一様伸び	23
Fig. 22 ジルカロイ-2 燃料被覆管の浸漬前後における破断伸び	23

This is a blank page.

#### 1. 緒言

東日本大震災に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所(以下、「福島第一原子力発電所」 という。)の事故においては、1~4 号機の使用済燃料プールに保管されていた使用済燃料は、 海水注入や瓦礫の落下・混入等、通常の運転時ではあり得ない環境に晒されており、瓦礫落下 時の接触による燃料集合体の機械的な損傷、海水成分である塩化物イオンによる被覆管をはじ めとする構成材料の腐食への影響が懸念される。これらの影響による使用済燃料プール中の燃 料集合体の健全性、また使用済燃料プールから共用プールに移送された後の使用済燃料集合体 の長期間の保管における健全性(長期健全性)の評価は極めて重要である。このため、政府・ 東京電力(株)により、実際の事故を経験した使用済燃料等を用いて確認する試験計画等を含め て、使用済燃料プールから取出した燃料集合体の長期健全性評価技術を開発するための研究開 発プロジェクト(以下、「国プロ」という)が実施されている<sup>1)</sup>。

使用済燃料集合体は、福島第一原子力発電所 1~4 号機の廃止措置に向けた作業において、 デブリ取出しに先立ち、使用済燃料プールからの取出しを平成25年11月から開始し、そのほ とんどを共用プールに移送し、長期保管する計画 <sup>1)</sup>とされていることから、事故直後の使用済 燃料プールへの海水注入の影響に対し、可能な限り早期に参考となる知見を取得することは、 使用済燃料プール中の燃料集合体の健全性を評価する上で重要な課題である。このため、使用 済燃料プール環境を模擬した体系において試験を行い、先ずは燃料バウンダリーとなる燃料被 覆管の健全性評価に資する知見を取得することを、国プロにおいて日本原子力研究開発機構(以 下、「原子力機構」という)が担当することとなっている「長期健全性に係る基礎試験」の枠で 原子力機構が主体的に実施していくこととなった。本試験の実施においては照射材を用いた試 験を行うこととしたが、これは原子炉の運転に伴い被覆管内部には照射欠陥の導入や水素化物 が形成し、外面には酸化物層が形成されているなど、非照射材とは大きく異なる状態となって おり、これらの海水による腐食特性や強度特性への影響が考えられるためである。このため、 震災後の施設復旧や適切な照射済み試験片の保有等の点において、事故後の早い時期にこのよ うな試験を実施可能であった、原子力機構大洗研究開発センターの燃料材料試験施設において、 新型転換炉「ふげん」で照射されたジルカロイ・2 被覆管試料を用いて海水注入の影響を評価す るための試験を実施した。新型転換炉「ふげん」は、福島第一原子力発電所の沸騰水型軽水炉 (BWR)と炉型は異なるものの、冷却材はBWRと同様に軽水を沸騰状態で運転していること

から腐食環境が近いと考えられ、平成 23 年度当時において照射材を用いた腐食試験及び強度 試験を実施し、早期にデータ提供が可能であるという観点から最も妥当な供試材であった。

本報告では、新型転換炉「ふげん」にて使用されたジルカロイ-2燃料被覆管を用い、使用済 燃料プールの模擬水として人工海水を用いた浸漬液での浸漬試験を実施し、海水浸漬によるジ ルカロイの腐食挙動を確認するとともに強度特性の評価を行った結果について述べる。また、 本試験の実施にあたっては、過去に実施経験のないホットセル内での海水浸漬試験となるため、 試験用治具の設計製作及び非照射材を用いたコールド環境でのモックアップ作業を含めた試験 方法の確立が必須であったことから、この試験方法確立についての記載を詳細に行った。

#### 2. 試験方法

2.1 供試材

新型転換炉「ふげん」で照射された E09 燃料集合体から、ジルカロイ・2 燃料被覆管が用いら れている燃料要素(要素番号 M-7 及び M-10、燃焼度 44~44.8 GWd/t)より供試材を採取し た(以下、「照射材」という)。化学成分及び照射情報等を Table 1、Table 2 にそれぞれ示す。 比較のために照射材と製造ロットが同じ製造予備材(以下、「非照射材」という)も試験に供し た。また、E09 燃料集合体について、全照射期間中の定格出力運転時における冷却材温度は、 炉心入口で 274℃、炉心出口で 284℃であった<sup>4)</sup>。

照射材は、燃料ピンを切断したままの状態で内部に燃料が詰まっている状態であったため、 燃料の除去(脱ミート)及び内面研磨を行った。脱ミート前後の外観を Fig.1 に示す。

2.2 浸漬試験方法

#### 2.2.1 浸漬条件

浸漬試験条件については、公開情報から得られる使用済燃料プールに海水が注入された当時 の状況を参考に設定した。まず、浸漬時間については、内閣官房に設置された「東京電力福島 原子力発電所における事故調査・検証委員会」が平成23年12月26日に出した中間報告書<sup>30</sup> によれば、2号機から4号機の使用済燃料プールについて海水が注入されており、その期間は 各機で差はあるが、最長でも10日間程度であった。そこで、浸漬時間については若干の裕度 を見て14日間(336時間)を目標に行うこととした。また、浸漬液については実海水を用い た場合、海水の採取箇所や採取時期によって成分が変わり、材料の腐食挙動を把握しづらくな る恐れがあることから、本試験では成分が明らかとなっている人工海水を用いて基礎的な材料 腐食挙動を確認することとした。海水の濃度や温度については、平成23年12月2日に東京電 力から発表された「福島原子力事故調査 中間報告書」<sup>30</sup>によれば、4号機の使用済燃料プール の水位変動が最も大きく、海水注入時では満水時の半分程度となっていた。そこで、使用済燃 料プールの水位が半分になったところに海水を注入したと仮定して、人工海水の2倍希釈の溶 液を浸漬液として設定した。浸漬温度については、上記中間報告において、使用済燃料プール の水温が各機差はあるが70~90℃と評価されていることから、80℃で代表することとした。

#### 2.2.2 浸漬試験用治具

燃料との反応相が生じている可能性のある被覆管内表面が浸漬液により腐食した場合、浸漬 試験後の強度試験に影響を及ぼす恐れがあるため、被覆管は燃料棒と同様に外表面のみが浸漬 液と接触するよう、内表面の保護が必要となる。通常の材料試験において試料表面を保護する 手法としては、樹脂の注入やペイント等の塗布が簡便であるが、非照射材試料を用いたコール ドモックアップ試験を実施したところ、樹脂の注入については浸漬試験後に完全に樹脂を除去 するのが困難であり、後に強度試験を行うには適していないことが明らかとなった。一方、ホッ トセル内での作業を想定した場合、被覆管内面に遠隔で一様にペイントを塗布することも技術 的に難しく、さらには塗料と試料との間の隙間に浸漬液が浸入して「隙間腐食」が発生する恐 れがあり、適用するのは難しいことが明らかとなった(Fig. 2)。他の方法について検討を行っ た結果、「被覆管の両端にゴム栓を付ける」考え方を基に内面保護治具(特許出願中)を考案し た。治具は、異種金属接触腐食の防止並びに耐熱性、耐薬品性の観点から PPS(ポリフェニレ ンサルファイド)樹脂及びシリコーンゴムを用いて製作しており、シリコーンゴム製パッキン を取り付けた PPS樹脂製軸棒を被覆管試料内に挿入し、両端から PPS樹脂製ネジを締め付け てシリコーンパッキンを押し潰すことで被覆管試料の両端を密栓し、浸漬液の浸入を防ぐ構造 とした(Fig. 3 右側模式図参照)。本治具については、人工海水を用いて浸漬試験のモックアッ プを行ったところ、当初は内面に浸漬液がわずかに浸入してしまったが、パッキンの取り付け 位置を樹脂製ワッシャーで調整し、樹脂製ネジを十分に締め付けることで浸漬液が浸入しない ようにすることが可能となった。

### 2.2.3 浸漬試験方法の検討

ビーカーに浸漬液を入れて本試験の液温条件(80℃)に加熱した場合、浸漬液中の水分が蒸 発することにより、塩素イオン濃度、pH 等の液性が時間とともに変化してしまうため、試験 条件を維持することが困難であると推測された。また、浸漬液をビーカーで加熱した場合、自 然対流により中央付近ではほぼ均一の温度となることをモックアップ試験により確認していた が、ビーカーの底付近についてはホットプレートが近いため、平均的な液温よりも高くなって いる。その中に試料を入れた場合、ビーカーの底に近い試料面では、他の部分と試料温度や液 温等の温度条件が異なるため腐食の偏りが生じる恐れがあり、浸漬後の評価に影響を及ぼす可 能性があった(Fig. 4)。

浸漬液の蒸発を抑制するためには、ビーカー等の浸漬容器に蓋を付けて密閉するのが簡便で あるが、水蒸気による容器内の圧力上昇やそれに伴う浸漬液の噴きこぼれ等が懸念されるため、 昼夜連続運転での浸漬試験には安全上適さない。さらには、福島第一原子力発電所の使用済燃 料プールは解放状態になっており、この環境を模擬する観点でも密閉系での試験は適当でない と考えられる。そこで、浸漬液の蒸発による減少を抑えつつ、容器内の圧力上昇を防ぐため、 分離型フラスコ(セパラブルフラスコ)に市販のトラップ球と冷却器(ガラス管)を組み合わ せた構造とし、水蒸気を冷却・凝縮させて浸漬液に戻るようにした(Fig. 5)。また、燃料プー ル内での燃料被覆管の保管状態を考慮し、被覆管試料を浸漬液中央付近で直立状態に保つよう な治具をアクリルで作製したが、モックアップ試験を実施したところ、浸漬液の対流や熱膨張 により試料の固定が緩んでしまい、試料が試験途中で斜めになってしまった。試料を安定して 浸漬液中に保持する方法として、フラスコの上部(トラップ球)から吊下げる方法を検討し、 被覆管の腐食に影響を及ぼさない材質のアクリル樹脂及びナイロン製の釣り糸を用いて製作し た。これら試験器具を用いたコールド環境でのモックアップ試験により、浸漬液からの水分蒸 発による液性変化が少ない状態で安定した浸漬試験が行えることを確認し、ホットセル内に搬 入して遠隔でのモックアップ試験を実施したが、ホットセル内の負圧環境や換気による風量が 大きいこと等により、予想以上に浸漬液の減少が大きくなっていた(減少量:約 30 ml/日)。 そこで、急遽冷却管の先端に開閉可能な蓋を取り付け、水蒸気の蒸発を抑制しつつ圧力が解放 されるような対策を講じた(Fig.5右上参照)。その結果、浸漬液の減少量は対策前の1/6程度 となり、昼夜運転状態でも数日に1回精製水を10ml程度補給すれば十分な状態になったため、 ホットセル内での浸漬試験が実施可能となった。

浸漬液の量については、浸漬液量(ml)を浸漬試験片の表面積(cm<sup>2</sup>)で除した値を比液量 (ml/cm<sup>2</sup>あるいは cc/ cm<sup>2</sup>)といい、金属材料などの腐食防食試験では一般的にこれを 20 以上 で実施している。本試験で用いる標準仕様のジルカロイ・2 被覆管の外径は φ 14.5 mm であり、 長さ 35 mm 試験片の場合は、外表面の面積は約 15.9 cm<sup>2</sup> (≒1.45 (cm) ×3.5 (cm) ×3.14) となるため、比液量 20 以上とするには、浸漬液量としては 318 ml 以上が必要となる。さらに、 浸漬試験中の水分蒸発による塩化物イオン等の溶質物質濃度の変化(濃化)による影響を極力 抑えることを考慮すれば、さらにそれ以上の浸漬液量が必要となるため、本試験での浸漬液量 は、裕度を見て 500 ml (フラスコ容量)で行なうこととした。

また、浸漬液調製用の人工海水として、金属腐食試験用アクアマリン(八洲薬品株式会社製) を用いた(化学成分をTable 3 に示す)。まず、規定量である 20 Lの人工海水を調製した後、 精製水で 2 倍に希釈して試験に供した。浸漬液の液性については、非照射材の浸漬前後におい て、塩化物イオン濃度、pH 及び溶存酸素濃度等を測定し、それらの変化データを取得するこ ととした。

#### 2.3 組織観察及び重量測定方法

照射材については、浸漬試験前後の外観について、ホットセルのペリスコープにて観察を行い、試料断面の金相試験については照射燃料集合体試験施設に試料を輸送して実施することとした。

浸漬前後の試料重量については、ホットセル内に電子天秤(最小秤量10 µg)を搬入して実施した。測定方法は、試験片を精製水で2回超音波洗浄を行い、十分乾燥させた後、電子天秤で小数第5位(10µg単位)までの秤量を3回実施した。その結果、測定値が平均値±100µg以上のばらつきがある時は、電子天秤の内蔵分銅で校正を行った後再測定を行い、最大、最小値を除いた測定値の平均値を算出した。

#### 2.4 リング引張試験片試料調製方法

2.4.1 ジルカロイ被覆管からのリング引張試験片採取

本試験では、浸漬試験を実施した後にリング引張試験片を加工した。限られた照射済み試料 から多くの試験片を採取するために、被覆管を輪切りにすることでリング引張試験片を採取す ることとした。リング引張試験片の採取は、回転砥石を用いた精密切断機を使用するが、切断 の最終段階で試験片が切断刃から逃げることで、加工精度の低下やバリが生じると共に、試料 に傷をつけてしまい、試験に大きな影響が生じる可能性がある(Fig. 6)。肉厚が約 0.5 mm と 薄肉の高速炉用燃料被覆管試料では試験に影響するようなバリは発生しにくいが、今回試験に 供したふげんのジルカロイ・2 燃料被覆管は肉厚約 0.9 mm では、引張試験に影響を及ぼしかね ないバリの発生が懸念された。これを克服するため、試験片を拘束するアクリル製の保護チュー ブを外側に設ける事で、切断最終段階でも試験片がずれることなく切断ができるよう改善した。 これにより、照射材についてマニプレータによる遠隔操作においても、切断面に強度試験に影響するような有意なバリや傷を発生させずに試験片を採取することが可能となった(Fig. 7)。

2.4.2 引張試験片試料調製技術の確立

微小なリング引張試験片を用いた強度試験において、マニプレータによる遠隔操作での試料 調製では、加工精度を上げることが非常に困難であるため、寸法のばらつきが生じ、試験の再 現性に懸念があった。また、切断したリング引張試験片の断面には微細な凹凸が多数あり、こ れが引張試験時の破壊の起点となることで、試験結果にばらつきを生じる可能性が予想された (Fig. 8)。一般的な照射後試験では、照射前に精密加工した試験片を照射する、あるいは試験 数を多くすることで試験精度を確保していたが、本試験では供することのできる試料長さに制 限があるため、試料サイズを極力小さくして試験数を稼ぐとともに、再現性の高いデータが取 得可能な試験片サイズ及び調製方法の検討が必要であった。

そこで、最初に非照射材を用いたモックアップ引張試験を行い、再現性を確保するために必要な試験片のサイズを確認したところ、 $\phi$ 14.5×幅3.0 mmの試験片が加工調製できればよいことが分かった。そこで、マニプレータによる遠隔操作でも容易に試験片厚さを精度良く調製(研磨)できる端面研磨治具を考案、製作した。Fig.9に治具の断面図と研磨作業の様子を示すが、研磨手順についても、1回の研磨で目標の3 mmに仕上げるのではなく、初期切断寸法を幅3.2 mm 程度とし、治具にリング試験片をはめ込む深さを4段階に変えた治具を用意し、順次適用することで、最終的に試験片厚さ3.00 mmの試料を精度良く調製できる手順を確立した。

2.5 リング引張試験方法

リング引張試験のひずみ速度は、通常のゲージ部付きの試験片の場合は、ゲージ長さに対し て 0.5%/min.一定速度としている。しかし、本試験の輪切り形状のリング試験片についてはゲー ジ部を遠隔で加工することが困難であり、便宜的にリング内径(12.7 mm)をゲージ長さとし て算出したひずみ速度をそのまま引張試験速度として用いるのは適切ではないと考えられる。 一般に室温における引張試験はひずみ速度の影響を受けにくいが、ひずみ速度が大きくなると 強度が上昇する傾向がある<sup>5</sup>。そこで、非照射材を用いて 0.1 mm/min(リング内径 12.7 mm を ゲージ長さとした場合 0.8%/min に相当)から 1 mm/min(同 8%/min に相当)まで引張速度を 変えて室温での予備試験を行ったところ、この引張速度の範囲において強度や伸びに有意な変 化はなく、強度特性の引張速度の影響が小さいことが確認された。本試験では、照射硬化によ る引張方向以外の曲がりによる破断を予防する観点から、引張速度は、試験可能な範囲で遅く (0.1 mm/min)設定することとした。

引張試験装置については、照射材は照射材料試験施設の被覆管試験セル内に設置されている 島津製作所社製 AG-50kND 型の引張試験機を用いて、非照射材については、コールド試験室 Iにあるインテスコ社製引張試験機により実施した。なお、非照射材については上記セル内の 引張試験機でも試験を行い、試験機間で強度特性に差が生じないことを確認することとした。 試験条件等を Table 4 に示す。リング引張試験は Fig. 10 に示す治具を用いて実施した。リン グ試験片を治具に取り付けた状況を Fig. 11 に示す。

引張試験結果については、チャート紙の荷重-変位曲線から、0.2%耐力、引張強さ、一様伸び、破断伸びを算出した。0.2%耐力及び引張強さについては、非照射材については公称断面積(5.40 mm<sup>2</sup>)、照射材については試料厚さをマイクロメータ(最小目盛 0.01 mm)、試料長さをノギス(最小目盛 0.02 mm)を用いて測定して算出した断面積を用いて評価した。なお、本試験における一様伸び、破断伸びについては、試料公称内径(12.7 mm)をゲージ部長さ(G.L.)と仮定し、変位量/G.L.×100(%)を伸び値として算出したものである。

#### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 浸漬試験実施結果

浸漬試験に供した2倍希釈人工海水の液性測定結果をTable 5 に示すが、非照射材の浸漬試 験については浸漬後の測定結果も併せて示した。水素イオン濃度(pH)については、浸漬試験 前の7.98から浸漬後はほぼ中性の7.06 まで低下したが、塩分濃度及び溶存酸素濃度について は浸漬前後の変化はほとんど見られなかった。浸漬時間の実績は、照射材が336時間、非照射 材が335時間であり、浸漬温度は80±2℃の範囲であった。浸漬液については、非照射材の試 験では発生した水蒸気がフラスコやトラップ球の内表面で凝結する程度で浸漬液量の減少はほ とんど見られなかった。一方、ホットセル内での照射材の浸漬試験においては、試験装置内で 水蒸気が凝結してはいるものの、徐々に浸漬液量が減少したため、概ね2日おきに約15 mlの 精製水を注水して液量変化を抑えた。浸漬試験の実施状況をFig.12 に示す。

#### 3.2 浸漬試験前後の組織観察結果

浸漬前後の外観観察結果を Fig. 13 に示す。外観上は局所的な腐食は見られず、浸漬前と同 等の状態であった。また、照射材の浸漬材と未浸漬材のそれぞれから切り出した試料の断面組 織写真を Fig. 14 に示す。被覆管の縦断面及び横断面いずれも浸漬前後において明確な差は認 められず、浸漬試験による組織変化は無かったと考えられる。Fig. 15 に表面近傍の酸化物層に 着目して拡大した写真を示すが、未浸漬材と浸漬材において酸化物層の厚さや母相との界面に 明確な変化は見られず、腐食の進行はないと考えられる。

3.3 浸漬前後の重量変化

浸漬前後の重量測定結果を Table 6 に示す。照射材、非照射材ともに浸漬試験後において重量増加が見られた。重量増加の原因については現在のところ明らかとなっておらず、表面での酸化層生成や人工海水成分の付着の影響等が推測されるが、上記 3.2 項で述べたように浸漬前後における外観や断面組織に大きな変化が認められていないことから、明確な腐食発生を示すほどの変化量ではないと考えられる。

3.4 リング引張試験による強度特性

リング引張試験における代表的な応力・ひずみ曲線を Fig. 16 に示す。照射材は非照射材に対 して照射硬化により強度が高く、伸びが小さくなる傾向が見られた。この傾向は照射材一般に みられる現象である <sup>7),8)</sup>。非照射材については、弾性領域の傾きにばらつきが生じているが、 引張強さや伸びの評価には影響しない。また、照射材に着目してみると、未浸漬材と浸漬材の 応力・ひずみ曲線はほぼ同じ形状となっており、浸漬試験による強度特性への影響はないと考え られる。

引張試験後の試料外観について代表的なものを Fig. 17 に示したが、未浸漬材、浸漬材共に 引張試験治具の境目となる試料の中央部で破断しており、破断部周辺がくびれて十分に伸びて いることが確認されていることから、リング引張試験は正常に行われていると判断できる。さ らに、リング引張試験後の破断面の代表例を Fig. 18 に示すが、いずれも延性的な破面を示し ており、水素化物で剥離したと思われる黒いコントラスト部分の周辺においても延性的な破面 となっており、破壊の起点となる様子も見られていない。

引張特性について、本試験で得られたデータを Fig. 19~Fig. 22 に示すが、強度の指標となる 0.2%耐力や引張強さにおいては、照射材、非照射材ともに浸漬試験による有意な変化は見られなかった。また、一様伸び、破断伸びについても浸漬試験前後で変化が見られず、これらの 結果から浸漬試験による有意な強度特性変化はないと評価される。

3.5 人工海水浸漬による腐食挙動及び強度特性変化

以上の結果を基にジルカロイ・2 燃料被覆管の人工海水浸漬による腐食挙動について評価す ると、浸漬によって外観及び試料断面の組織に明確な変化は認められておらず、リング引張試 験による強度特性も有意な変化が認められてない。これらのことから、本試験の浸漬条件、す なわち人工海水 2 倍希釈、液温 80℃における 336 時間の浸漬試験では、ジルカロイ・2 燃料被 覆管の腐食挙動及び強度特性に有意な変化は生じないと評価される。これは、比較として実施 した非照射材の 335 時間浸漬試験でも浸漬前後において有意な変化は見られておらず、照射材 と一致した傾向が得られており、ジルカロイ・2 燃料被覆管が人工海水に対して優れた耐食性を 示していることが確認された。

## 4. 結言

使用済燃料プールに保管されている燃料集合体の長期健全性評価に資するため、本試験では 新型転換炉「ふげん」にて使用された照射済みジルカロイ・2燃料被覆管を用いて、人工海水2 倍希釈濃度、液温80℃、336時間での浸漬試験及び浸漬前後のリング引張試験を実施し、以下 の結果を得た。

(1)浸漬前後の外観観察において、表面組織に明確な変化は見られず、試料断面の組織観察 結果についても試料外表面近傍の酸化層等に明確な変化は見られなかったため、浸漬試 験による顕著な表面腐食の進行はない。

(2)引張試験結果について、引張強さ及び破断伸びは浸漬前後で有意な変化はなく、浸漬試 験による機械的特性へ有意な影響はない。

(3)照射済み試料を遠隔操作で浸漬試験及び引張試験を行うための手法を確立した。

以上より、本試験条件では、照射済みジルカロイ・2 燃料被覆管は人工海水浸漬により腐食挙動や機械的特性に変化は生じないことが確認された。本試験結果については、海水が注入された使用済燃料プールの燃料集合体の健全性に関する事故後早期の確認試験結果として大きな意義がある。また、本試験を通じて確立したホットセル環境における遠隔での浸漬試験手法については、今後の試験研究の基盤となるものである。

燃料集合体の長期的な健全性評価のためには、今後実海水を用いた浸漬試験や、異種金属接 触部や隙間部など腐食を加速させる条件での浸漬試験等、系統的な試験データの取得と腐食挙 動のメカニズムを含めた検討が必要となるが、本試験結果及び試験技術はこれらの試験を実施 する上で役立つと期待される。

#### 謝 辞

本試験の実施にあたっては、大洗研究開発センター福島燃料材料試験部の材料試験課員を始 めとした福島燃料材料試験部の皆様にご協力いただきました。また、試験条件の妥当性評価や 試験結果の検討においては、原科研福島技術開発特別チームの皆様と議論させていただくとと もに貴重なご意見をいただきました。関係者の皆様に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 東京電力(株)福島第一原子力発電所 1~4 号機の廃止措置等に向けた研究開発計画について, available from http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/111221\_01f.pdf (accessed 2013-06-14).
- 2) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 中間報告書, available from http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/post-1.html (accessed 2013-06-14).
- 3) 福島原子力事故調查 中間報告書(平成 23 年 11 月 2 東京電力(株)発行), available from http://www.tepco.co.jp/cc/press/11120203-j.html (accessed 2013-06-14).
- 4) 生澤佳久他,"「ふげん」照射用ガドリニア燃料集合体の照射後試験報告書(I)燃料集合体 試験・燃料要素非破壊試験(技術報告)", JNC-TN8410 2003-004, 2003.

- 5) 日本材料学会, "金属材料強度試験便覧, 養賢堂, 1977, pp.117-118.
- 6) 長谷川正義他, "原子炉材料ハンドブック", 日刊工業新聞社, 1977, p.526.
- 7) 石野栞, "照射損傷", 東京大学出版会, 1979, pp.202-206.
- 8) 日本金属学会, "原子力材料", 社団法人日本金属学会, 1989, pp.101-115.

	被覆管主成分(wt%)			熱処理条件			
製造時ロット No.	Sn	Fe	Cr	Ni	熱処理 温度 (℃)	熱処理 時間 (h)	冷間 加工度(%)
S7889	1.44-1.53	0.15 - 0.17	0.11-0.12	0.05	515	2	66.0
規格値	1.20-1.70	0.07-0.20	0.05-0.15	0.03-0.08	-	-	-

Table 1 ジルカロイ-2 燃料被覆管の化学組成及び製造条件 4)

Table 2 供試材の照射情報<sup>4)</sup>

集合体名	要素番号	被覆管製造 ロット番号	試料 No. (脱ミート後 試料 No.)	試料長さ (mm)	照射期間 (照射サイクル)	燃焼度 (GWd/t)
E09	M-7	I-7 S7889	XH13219 (XH13T00)	71.0	1990/6/5 $\sim 1997/1/13$	44.0
	M-10		XH14215 (XH14T00)	83.9	(第 16~第 25 サイクル)	44.8

Table 3 人工海水の化学成分

成 分	重量 (g) *1
塩化マグネシウム (6水塩)	222.23
塩化カルシウム(2水塩)	30.70
塩化ストロンチウム (6水塩)	0.85
塩化カリウム	13.89
炭酸水素ナトリウム	4.02
臭化カリウム	2.01
ホウ酸	0.54
フッ化ナトリウム	0.06
塩化ナトリウム	490.68
硫酸ナトリウム (無水)	81.88

(人工海水「アクアマリン」説明書より引用)

\*1 20L 調製時の含有量。

Table 4 リング引張試験条件

		外径 : 14.5 mm, 内径 : 12.7 mm
1 試験片	⇒→ 瞬 止	肉厚 : 0.9 mm
	長さ :3 mm	
		ゲージ長さ:試験片内径(12.7 mm)とする。
2 試験条件		試験温度 : 常温
		試験速度 : 0.1 mm / min 一定
3 試験機	被覆管試験セル引張試験機(島津製作所社製 AG-50kND 型)	
	武駛機	コールド試験室 I 引張試験機(INTESCO 社製)
		(1)照射材(未浸漬):5本
		(2)照射材(人工海水浸漬後):5本
4	試験本数	(3)非照射材(未浸漬):10本
		(上記2種の試験機でそれぞれ5本ずつ)
		(4)非照射材(人工海水浸漬後):5本
		引張強さ、耐力、全伸び
5	取得データ	応力・歪み線図
		外観写真

## Table 5 浸漬液の液性測定結果

	人工海水濃度	水素イオン指数	塩分濃度	溶存酸素濃度(DO)	
	[%]	$(pH)^{*1}$	$[\%]^{*2}$	$[ppm]^{*1}$	
浸漬液		7.00	1.09	C 00	
調製後	~0	1.98	1.65	6.99	
非照射材	50				
335 h	(2 信布水)	7.06	1.68	7.03	
浸漬後					

\*1:HORIBA 社製 pH/DO METER D-55 にて測定(水温約 20℃)。

\*2:HORIBA 社製 CONDMETER DS-52 にて測定。

## Table 6 浸漬前後のジルカロイ・2 被覆管の重量変化

	重量(g)*1		重量変化量	表面積	浸漬時間
	試験前	試験後	$(g)^{*2}$	$(cm^2)$	(h)
「ふげん」 照射材 (ホット試験)	8.25942	8.26201	0.00259	15.5	336
非照射材 (コールド試験)	7.57730	7.57760	0.00030	13.7	335

\*1:(株)A&D 社製 GR-202 (最小秤量 10 µg)にて測定。

\*2:(試験後重量) - (浸漬前重量)で算出。



Fig.1 脱ミート(燃料除去)前後の被覆管外観



Fig. 2 ペイント塗布による内面保護の問題点



Fig.3 被覆管内面保護治具及び治具取付状態断面模式図



Fig. 4 浸漬試験における技術的課題



Fig. 5 浸漬試験用ガラス器具の構造及び改良点



Fig. 6 リング引張試験片採取時におけるバリの発生



Fig.7 保護チューブを取り付けた状態での試料切断



Fig. 8 リング引張試験片切断直後の端面模式図



研磨作業

Fig. 9 リング引張試験片の端面研磨治具及び研磨方法

## JAEA-Testing 2013-004



Fig. 10 引張試験治具



Fig. 11 リング引張試験片取付状況



Fig. 12 照射材を用いた浸漬試験実施状況



浸漬前(照射まま材)

浸漬試験後 (人工海水2倍希釈、80 ℃×336 h)



## JAEA-Testing 2013-004



 $200 \ \mu m$ 

Fig. 14 照射材の浸漬前後断面組織



Fig. 15 照射材の浸漬試験前後断面組織(拡大)



\*リング試験片の内径(12.7 mm)をゲージ長さとして評価した。

Fig. 16 リング引張試験における代表的な応力・ひずみ曲線



Fig. 17 照射材のリング引張試験後外観観察結果の代表例



Fig. 18 照射材のリング引張試験後の破断面



Fig. 19 ジルカロイ-2 被覆管の浸漬前後における 0.2%耐力



Fig. 20 ジルカロイ-2 燃料被覆管の浸漬前後における引張強さ



Fig. 21 ジルカロイ-2 燃料被覆管の浸漬前後における一様伸び



Fig. 22 ジルカロイ-2燃料被覆管の浸漬前後における破断伸び

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本ì	単位		
盔半里	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	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表2. 基本甲位を用	いて表されるSI組立単位	立の例		
和辛雪	SI 基本単位			
和立里	名称	記号		
面 積平	方メートル	$m^2$		
体 積立	法メートル	$m^3$		
速さ,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 数每	メートル	m <sup>-1</sup>		
密度,質量密度キ	ログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>		
面積密度キ	ログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>		
比 体 積立	方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /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 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モ	ル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>		
質量濃度キ	ログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>		
輝 度力	ンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$		
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (	数字の) 1	1		
比透磁率(b)	数字の) 1	1		
(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度				
(substance concentration) kt Fith Z				

(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

			SI 租立单位	
組立量	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
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m -1
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷,電気量	クーロン	С		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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Βα		s <sup>-1</sup>
吸収線量 比エネルギー分与				~
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>
線量当量,周辺線量当量,方向	2 ( (g)	Su	Ulta	2 o <sup>-2</sup>
性線量当量, 個人線量当量		50	o/kg	m s
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(カタール) kat [s<sup>1</sup> 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 ュ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。
 (a)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)へルツは周崩現象についてのみ、ペラレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレ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。
 (d)かけ性核種の放射能(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

	S	[ 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
誘 電 率	シファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ミヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> e <sup>-1</sup> mol

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m		
$10^{15}$	ペタ	Р	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ		
$10^{12}$	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n		
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р		
$10^{6}$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^{3}$	+ 1	k	10 <sup>-18</sup>	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z		
$10^{1}$	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	v		

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	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	٥	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1t=10^{3}$ kg		

## 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される剱値が美缺的に待られるもの					
名称言		記号	SI 単位で表される数値		
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダ	N	ŀ	$\sim$	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	$\sim$	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の形法はいかおはない
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	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 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	$\operatorname{St}$	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>·1</sup>			
(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 尾	<b>禹さないその他の単位の例</b>
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	ン	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ	:	$\sim$	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	II.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートルネ	系カラ:	ット		1メートル系カラット=200 mg=2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています