JAEA-Technology 2012-022



結晶方位解析装置付遠隔操作型 電子プローブマイクロアナライザの開発

Development of Remote Controlled Electron Probe Micro Analyzer with Crystal Orientation Analyzer

> 本田 順一 松井 寛樹 原田 晃男 小畑 裕希 冨田 健

Junichi HONDA, Hiroki MATSUI, Akio HARADA, Hiroki OBATA and Takeshi TOMITA

東海研究開発センター 原子力科学研究所 ホット試験施設管理部

Department of Hot Laboratories and Facilities Nuclear Science Research Institute Tokai Research and Development Center

July 2012

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, 2012

JAEA-Technology 2012-022

結晶方位解析装置付遠隔操作型電子プローブマイクロアナライザの開発

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所 ホット試験施設管理部

本田 順一・松井 寛樹・原田 晃男・小畑 裕希・冨田 健

(2012年5月14日受理)

我が国において発電コスト及び放射性廃棄物の低減を目的とした軽水炉燃料の高度利 用が進められている。電力事業者は、更なる高燃焼度化、高出力化に対応するための改 良型燃料の開発を進めてきており、国は、これら改良型燃料の申請に係る安全規制を行 う上で必要とされる安全基準、指針等を整備するために、常に最新の技術的知見を蓄積 することが重要となる。日本原子力研究開発機構では、被覆管材料の微細組織の違いが 事故時の燃料挙動に及ぼす影響を簡便かつ定量的に把握、評価するために結晶方位解析 装置付遠隔操作型電子プローブマイクロアナライザを開発した。本装置は、高放射性物 質を対象試料として使用するため、遠隔操作型とし、原子力科学研究所 燃料試験施設 に開発・設置した。設置する施設の規制及び放射性物質取扱上の観点から耐震性及び放 射性物質の閉じ込め機能を考慮した構造とした。本報告書は、照射後試験装置として開 発した結晶方位解析装置付遠隔操作型電子プローブマイクロアナライザの仕様と、その 特性試験結果をまとめたものである。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

JAEA-Technology 2012-022

Development of Remote Controlled Electron Probe Micro Analyzer with Crystal Orientation Analyzer

Junichi HONDA, Hiroki MATSUI, Akio HARADA, Hiroki OBATA and Takeshi TOMITA

Department of Hot Laboratories and Facilities Nuclear Science Research Institute Tokai Research and Development Center Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 14, 2012)

The advanced utilization of Light Water Reactor (LWR) fuel is progressed in Japan to save the power generating cost and the volume of nuclear wastes. The electric power companies have continued the approach to the burnup extension and to rise up the thermal power increase of the commercial fuel. The government should be accumulating the detailed information on the newest technologies to make the regulations and guidelines for the safety of the advanced nuclear fuels. The remote controlled Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) attached with crystal orientation analyzer has been developed in Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to study the fuel behavior of the high burnup fuels under the accident condition. The effects of the cladding microstructure on the fuel behavior will be evaluated more conveniently and quantitatively by this EPMA. The commercial model of EPMA has been modified to have the performance of airtight and earthquake resistant in compliance with the safety regulation by the government for handling the high radioactive elements. This paper describes the specifications of EPMA which were speciallised for post irradiation examination and the test results of the cold mock-up to confirm their performances and reliabilities.

Keywords: Remote Control, Electron Probe Micro Analyzer, Crystal Orientation Analyzer, Post Irradiation Examination, High Burn-up Fuel

目次

1.	はじめ	k	1
2.	装置設	計概念	1
3.	装置仕	様・改造部	2
3	.1 イン	イナーボックス	2
3	.2 装置	置本体	2
	3.2.1	電子光学 (EOS)・光学顕微鏡 (OM)	3
	3.2.2	試料ステージ	4
	3.2.3	波長分散型X線分光器(WDS)	5
	3.2.4	電子検出器	5
	3.2.5	真空排気系	5
	3.2.6	結晶方位解析装置(EBSD)	6
	3.2.7	その他	6
3	.3 耐加	、 このでは、 のでは、 のでは、 のでは、 のでは、 のでは、 のでは、 のでは、	7
4.	特性試	験	7
4	.1 試料	¥	7
4	.2 試料	>装着	7
4	.3 試験	魚条件	7
	4.3.1	試料観察	7
	4.3.2	WDS 分析	8
	4.3.3	EBSD	8
4	.4 試懸	() () () () () () () () () () () () () (8
	4.4.1	試料観察結果	8
	4.4.2	WDS 分析結果	8
	4.4.3	EBSD 結果	8
5.	まとめ		8
謝話	辛		9
参考	今文献		9
付銀	表 安全	評価	23

Contents

1.	Introduction 1					
2.	Design Concepts 1					
3.	Specifications • Alteration					
3	.1 Inr	ner Box	2			
3	.2 Ma	in Unit	2			
	3.2.1	EOS · OM	3			
	3.2.2	Specimen Stage	4			
	3.2.3	WDS	5			
	3.2.4	Electron Detector	5			
	3.2.5	Exhaust System	5			
	3.2.6	EBSD	6			
	3.2.7	Others	6			
3	.3 Sei	smic Analyses	7			
4.	Chara	cterization	7			
4	.1 Spe	ecimens test	7			
4	.2 Ins	stallation of Specimens	7			
4	.3 Tes	sts Condition	$\overline{7}$			
	4.3.1	SEI · BEI Observation	7			
	4.3.2	WDS Analysis	8			
	4.3.3	EBSD	8			
4	.4 Tes	t Result	8			
	4.4.1	Viewing Condition of Specimens Result	8			
	4.4.2	WDS Analysis Result	8			
	4.4.3	EBSD Result	8			
5.	5. Summary					
Acknowledgement						
Ref	References					
App	appendix Safety Evaluation 23					

1. はじめに

我が国において発電用軽水炉のさらなる安全性向上及び放射性廃棄物の低減等を目的 とした燃料の利用及び開発が進められている。発電用軽水炉燃料に係る安全規制を行う ために、国として常に最新の技術的知見を取得、蓄積することが重要である。

(独)日本原子力研究開発機構では、発電用軽水炉で照射された燃料を対象とした反応 度事故模擬実験(RIA 試験)を原子炉安全性研究炉(NSRR)において、RIA 試験前後の燃 料に関する照射後試験及び冷却材喪失事故模擬実験(LOCA 試験)を燃料試験施設にお いてそれぞれ実施し、発電用軽水炉燃料の事故時挙動に関するデータ及び知見を取得し てきている。炉内長期使用に伴う燃料材料の微細組織変化及び近年開発が進められてい る燃料材料における微細組織変化が燃料の事故時挙動に及ぼす影響について評価を進め るため、後方散乱電子回折法(EBSD)による結晶方位解析が可能な遠隔操作型電子プ ローブマイクロアナライザ(以下「EBSD 付遠隔操作型 EPMA」という。)を照射後試 験用に開発し、燃料試験施設の鉛セル内に設置した。本報告は、EBSD 付遠隔操作型 EPMA に関する設計、仕様及び鉛セル内設置後の特性試験結果についてまとめたもので ある。

2. 装置設計概念

本装置本体は、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)及び結晶方位解析装置から 構成されている。EPMAは、非常に細く収束された電子ビーム(電子プローブ)を試料 の表面に照射し、その部分から発生する特性X線の波長や強度、二次電子並びに反射電 子の量等を測定、画像化することによって、試料の形状の他、構成元素の種類、含有量 及びこれらの分布状態を多角的に調べる装置であり、試料を破壊することなく、試料表 面の極めて微小な領域から広い領域までの観察及び元素分析ができる特徴を有する⁽¹⁾ ⁽²⁾。EPMAに付加した結晶方位解析装置により、後方散乱電子の回折パターン(いわゆ る菊池パターン)を測定、解析することで、多結晶材料を構成する個々の結晶粒の形状 や方位、構成物質を解析することができる⁽³⁾。

本装置の分析対象物が放射性物質であることから、操作者に対する放射線被ばく防護 及び放射性物質の外部への漏洩を考慮しなければならない。そこで放射線に対し十分な しゃへい能力を有し、かつ、負圧管理された環境が整備され、高放射性物質を安全に取 り扱うことのできる燃料試験施設に装置を設置することとした。

燃料試験施設内には、しゃへい体がコンクリートで構成された大型のセル8基及び鉛 により構成された小型のセル5基がある。さらに、コンクリートセルのうち2基並びに 鉛セルのうち2基は、 α 核種を安全に取り扱うことのできる環境を有している。そこで EBSD 付遠隔操作型 EPMA は、取り扱う試料の大きさと将来 Pu 系燃料の分析にも対応 できるよう考慮し、 α 核種対応の $\alpha \gamma$ 鉛 No.1 セル(1.5m×1.8m×2m)に設置するこ ととし、設置する施設の規制及び放射性物質取扱い上の対応を考慮し、以下の点を装置 設計の基本概念とした。

・装置が地震等により容易に転倒し、設備等を破壊することの無いよう耐震上の安全(耐

震 B クラス)を確保すること。

- ・放射性物質が外部へ漏洩することのない閉じ込め機能を有していること。
- ・基本操作は遠隔で行えること。
- ・セル内への搬出入及びメンテナンス性を考慮し、装置本体はできるだけコンパクトであること。

3. 装置仕様·改造部

本装置の概略図を Fig.1 に示す。本装置は大きく分けてインナーボックスと装置本体からなる。以下にそれぞれの詳細な仕様・改造部を記述する。

3.1 インナーボックス

装置本体部は、αγ鉛 No.1 セルに設置し、隣接するコンクリートセルからの試料移送機構(セル間移送台車)をインナーボックス内に設置することで機密を保持し、α核種のセル外への漏えいを防止できる構造とした。インナーボックスの外観を Photo.1 に示す。

主な仕様

- 1) 主要構造材は、錆の発生防止のため SUS304 で製作し、放射性物質が付着した際の汚染除去の容易さを考慮して表面を鏡面仕上げとした。
- 2) 給排気系配管取付ポート、装置真空排気系排出ポート、トングブーツ取付ポート、 負圧モニタ配管取付ポート、装置本体・インナーボックス内メンテナンス用グロー ブポート及び扉、排気フィルター、観察窓、採光窓を備えた。
- 3) セル内搬入及び設置が容易で、装置の試料交換室が支障なく開閉でき、かつ、メンテナンスの際、人が作業するスペースを考慮した上で、十分な容積を確保できる形状とした。
- 4) インナーボックスの負圧維持管理上、装置を真空引きした際、ロータリーポンプの排気がインナーボックス内へ排気され、負圧下限値(-49Pa)を下回ることのないような構造とした。
- 5) セル内床面にインナーボックスを固定するプレートを溶接し、インナーボックス とプレートをボルトで固定することにより、核燃料使用施設の規制に基づく耐震上 の安全性(耐震 B クラス)を確保した。
- 6) 核燃料物質の閉じ込め機能保証のため、空気漏洩率が当該施設の基準(4Vol%/day 以下)を満足するような構造とした。
- 7) インナーボックスと装置の取付方法は、インナーボックス側、装置側共に金属製のフランジを設けネオプレン製の蛇腹で固定することにより、装置とインナーボックス間の気密を確保するとともにインナーボックスから装置へ伝わる振動を取り除く構造とした。

3.2 装置本体

装置本体は、市販の EPMA をベースとし、 α γ 鉛 No.1 セルへの設置に際し、所定の

性能を維持するための以下の検討及び改造を行った。基本仕様を Table1 に示す。

- 3.2.1 電子光学 (EOS) · 光学顕微鏡 (OM)
- 1) 電子銃高圧ケーブル、電子光学系接続ケーブル OM ランプケーブルの延長

装置本体がセル内に、操作盤がセル外(操作室側)と、距離が離れて設置される ため、それぞれのケーブルを15m 延長した。ケーブル延長に伴い以下の対策を講じ た。

- ・電子銃高圧ケーブル延長対策 ケーブル延長による高圧の降下が確認されたが、GUN バイアス設定値を高め にすること、フィラメント最大加熱コードを 180 から 190 に上げることで対処 した。
- ・電子光学系接続ケーブル延長対策
 軸合わせの補正回路にノイズが乗ったため、電子光学系基板内に組み込まれた
 フィルタ回路のコンデンサ容量を大きくした。
- ・OM ランプケーブル延長対策 電圧降下により OM 像がやや暗くなったため、カメラ側のゲイン設定を初期値 より高めに設定することで対処した。

操作盤の外観を Photo.2-1 に示す。

- 2) 対物絞りの遠隔操作化 標準型では鏡筒部脇に設置され、手動で調整する対物絞り切り換え・微調整操作 を、セル外から電動にて容易に遠隔操作ができるものとした。具体的には、モータ 一駆動による絞り機構、制御/ドライバ基板、操作用ソフト(GUI)を新規作製する ことにより、操作盤から操作できるようにした。操作盤を Photo.2-1 に、遠隔操作 型対物絞りを Photo.2-2 に示す。
- 3) OM ユニットの移設 標準では本体架台下に設置されている OM ユニットを、放射線の影響及びメンテ ナンス性を考慮しセル外の接続ボックスに移設した。接続ボックスの外観を Photo.2-1 に示す。
- 4) 電子工学系対物レンズ水冷配管の延長 対物レンズは鏡筒と共にセル内へ設置されているため、対物レンズの水冷配管を 12m 延長した。また配管の延長に伴い、漏水センサを取り付けた。
- 5) OM アダプタ・鏡像対応カメラの採用

標準構成品であるリレーレンズ及び OM カメラではインナーボックスと干渉する ため、角度を 90°反転させるアダプタと反転させたことで鏡像となった像を、鏡像 反転機能付 OM カメラを用い補正した。鏡像反転機能付 OM カメラを Photo.2-3 に 示す。

6) OM 保護ガラスのメンテナンス性改善

OM 保護ガラスについては、分析試験の際に試料から発生するガスが付着することによって曇るため、一定期間ごとに交換する必要があるが、標準では試料ステージを引き抜いて交換しなければならない。そこで、狭いセル内の空間でも容易に交

換できるよう、WDSの空ポートから交換をできるようにした。

7) 鏡筒・レンズケーブル等のジャンクション化

ベースプレート上に両側共に着脱可能なジャンクションボックスを設けることで、 セル内搬入時のケーブル取り回しを容易にすると共に、当該部品が故障した際の交 換を容易にした。ジャンクションボックスを Photo.2-4 に示す。

8) 反射対物レンズ位置合わせ調整の簡略化

OM 保護ガラス交換後の反射対物レンズ位置合わせにおいて、調整が容易にできるよう、WDS の空きポート側からアクセスできる構造とした。反射対物レンズ位置合わせ機構を Photo.2-5 に示す。

3.2.2 試料ステージ

1) 試料交換室インジケータの移設

試料交換室に設置されている室内の状況を確認するインジケータを、放射線の影響を考慮しセル外へ設置した。設置場所については、セル内の状況を確認しながら 試料交換を行えるよう、セル窓の近傍とした。試料交換室インジケータを Photo.2-6 に示す。

試料交換機構の遠隔操作対応

試料ホルダへの試料の着脱、試料交換室の開閉操作、試料交換棒(試料交換室~ 試料室間の移動)の一連の操作を、セル付属のトングの単純な二つの動作(押す・ 引く)の組み合わせで、行えるようにした。遠隔操作型試料交換機構を Photo.2-7 に示す。

3) 試料ホルダの遠隔操作対応

当施設での照射後試験において通常用いる試料埋込管寸法が φ 32mm×H25mm であるため、試料ホルダの形状は φ 32mm×H20~25mm を装着可能とした。また EBSD での分析の際、試料を 70°傾けるため、EPMA 及び EBSD それぞれの分析に 応じた装着位置 2 箇所を、一つの試料ホルダに設けた。標準試料は、19 個の試料が 取り付けできる構造とした。遠隔操作型試料ホルダを Photo.2-8 に示す。

4) 試料ステージのリミット設定

放射性物質を分析する際、γ線によるバックグラウンド(BG)を低減する目的か ら WDS 内に鉛製の BG 低減シールドを取り付けた。そこで試料ホルダとの干渉を 防止するため、試料ステージにリミットスイッチを設けた。

5) 試料交換室の奥行き短縮

インナーボックス及び装置本体を狭い空間のセル内へ設置することにより装置の メンテナンス性が損なわれることから、試料交換室の奥行方向を短縮し、メンテナ ンス性の向上を図った。

6) インナーボックスへの接続対応

インナーボックスを試料ステージ側へ取り付けるため、試料ステージの引き抜き ガイドを含む接続フランジ及びシール部を設けた。接続フランジを Photo.2-9 に示 す。

7) 試料室の下部側伸長

試料ステージにインナーボックスの接続フランジを設けるため、試料室の高さ方 向を伸長し、接続フランジ取付スペースを設けた。

8) 試料ステージケーブルの延長

試料ステージ用及びセンサ用ケーブル等をセル外の操作盤へ接続するために 15m 延長した。ケーブル延長によって、試料ステージ基準点を検出する際の抵抗値 に影響が表れたため、基準点検出時に正規の抵抗値になるように抵抗値を予めオフ セットした。その他、特に影響はなかった。

9) 試料ステージの緊急時手動操作対応

試料ステージが遠隔操作で制御できなくなった際、試料が装置本体から取り出せ なくなることを回避するためにセル付属のトングで試料ステージを操作し、試料の 取り出しが可能となるよう、ステージ移動用モーター軸に手動回転用のレバーを取 り付けた。試料ステージ手動回転レバーを Photo.2-10 に示す。

3.2.3 波長分散型X線分光器(WDS)

1) WDS内BG低減シールド設置

分析対象試料が放射性物質であるため、試料からの放射線が WDS の比例計数管 内のガスを電離し、分析時のバックグラウンドが上昇する。そこでバックグラウン ドの上昇を抑えるため、試料室内及び WDS の各部にしゃへい用シールドを設けた。 WDS 内 BG 低減シールドを Photo.2-11 に示す。

ケーブル延長

駆動モータ、リミットスイッチ及びプリアンプケーブルをセル外の操作盤へ接続 するために 15m 延長した。ケーブル延長による影響はなかった。

- 3.2.4 電子検出器
- 静電偏向板、反射電子検出器及び二次電子検出器のメンテナンス性改善 標準品ではケーブルが一体であるため、検出器等が故障した際、一体のケーブル まで取り外すために、故障以外の部分も分解する必要があった。そこで、ケーブル 途中にコネクタを設けることで修理作業の簡素化を図った。
- 2) ケーブルの延長

静電偏向板及び反射電子検出器のケーブルをセル外の操作盤に接続するためそ れぞれ 3.5m 及び 3m からいずれも 15m へ延長した。それぞれのケーブル延長によ る影響はなかった。

3) 反射電子検出器のメンテナンス性改善

標準では試料ステージを引き抜いて交換するが、OM 保護ガラスと同様に、空きの WDS ポートから交換できるようにした。

- 3.2.5 真空排気系
- 1) TMP 取付位置の変更

標準型では架台下の内部に設置されている TMP をメンテナンス性向上のために 架台脇に設置した。TMP 取付位置の外観を Photo.2-11 に示す。 2) イオンポンプの取付位置の変更・大容量化・水冷化

夏場のセル内環境温度上昇に伴い、装置の高真空度維持が困難となることが予想 される。これを予防するための対策として、イオンポンプを 20L から 30L の容量 に増大、さらにイオンポンプ周囲に漏水センサ付水冷ジャケットを取り付けた。イ オンポンプ取付位置の外観を Photo.2-12 に、水冷ジャケット取付後の外観を Photo.2-13 に示す。

- 3) 排気系配管の変更 標準の排気系配管は真空用ゴムホースであることから、経年劣化防止のため、 SUS 製のフレキシブル配管に変更した。
- 4) 電子銃室・試料室の大気リークへの変更 標準品での窒素ガスボンベによるリークでは電子銃及び試料室が陽圧となるため 放射性物質が装置より漏洩する可能性がある。そこで大気からリークできるよう、 5µm フィルタ付リークバルブを取り付けた。また、標準品では試料室下部側からリ ークするようになっていたが、系内ゴミ等の浮遊を防止するために試料室上部側と した。電子銃室・試料室リーク経路を Photo.2-14 に示す。
- 5) 本体架台下の配管経路変更 装置のメンテナンス性向上のために、架台下の配管経路を変更した。

3.2.6 結晶方位解析装置(EBSD)

- ケーブルの延長 カメラケーブルをセル外の操作盤に接続するためモーター電源ケーブル 3m 及び カメラ電源ケーブル 2m から 15m へ延長した。ケーブル延長による影響はなかった。
- 2) カメラ保護用鉛ガラス取付 試料からの放射線による影響を低減するため、スクリーンと CCD 素子間のスペ ースに鉛ガラスを取り付けた。
- ベローズ保護用カバー取付 装置をメンテナンスする際、不用意にベローズ部を破損させないよう、ベローズ 部の保護カバーを設けた。

3.2.7 その他

1) 本体架台の寸法縮小・転倒防止対応

装置をメンテナンスする際、セル内へ人が立ち入るスペースを確保するために架 台寸法を縮小した。また、セル内床面に架台を固定するプレートを溶接し、架台と プレートをボルトで固定することにより核燃料使用施設の規制に基づく耐震上の 安全性(耐震 B クラス)を確保した。

- 2) 鏡筒部ベースプレート脱落保護 架台上の鏡筒部ベースプレートが、地震の際にコイルマウントから脱落するのを 防止するため、ストッパーを取り付けた。
- 3) 試料室内観察カメラ 試料交換は遠隔操作で行うことから、試料が試料室へ確実にセットしたことを目

視により確認できるよう、試料室内観察カメラを WDS の空ポートを利用し取り付けた(Photo.2-15)。

4) 鏡筒保守用チェーンブロックの設置

鏡筒部を分離してメンテナンスする際、安全で確実な保持ができるよう、本体架 台に鏡筒部保守専用のチェーンブロックを設置した。なおチェーンブロック及び支 柱は、必要時のみ取り付けて使用する。

3.3 耐震評価

αγ鉛 No.1 セル床面にベースプレートを溶接し、インナーボックス及び装置本体 をボルトで固定する。耐震 B クラスを満足させるため水平震度 0.36 に耐えられるように ベースプレート、インナーボックス及び装置本体の材質、ボルト径等について耐震評価 を行った。その結果、インナーボックス及び装置本体をベースプレート(SS400)に SUS304 の固定ボルト(M12×4本)によってそれぞれ固定することで十分な耐震強度が得られ、地 震により移動・転倒することはない。参考資料を付録に示す。

4. 特性試験

電子顕微鏡本体は、メーカーでの製作後、メーカーによる出荷前の総合的な機能及 び性能検査を経てαγ鉛セル内に設置したが、当施設での使用環境(振動、磁場等) においての性能確認を行う必要がある。そこで、コールド試料を用いた特性試験を実 施し、電子顕微鏡及び結晶方位解析装置の所定の性能が確保されていること、並びに 付属のインナーボックス、装置本体の操作性等について確認した。

4.1 試料

特性試験に用いた試料を Photo.3-1 に示す。二次電子像及び反射電子像においては、 標準試料である金蒸着試料を用い、WDS での点分析では標準試料の SUS304 を、線 分析及び面分析は標準試料の Si を、EBSD は SUS316 試料をそれぞれ用いた。

SUS316 試料は表面の加工ひずみを取り除くため、通常のミクロ組織試験の試料前 処理と同様に、SiC 研磨紙の#1200、#2400、#4000 で粗研磨を、3µm 及び 1µm のダ イヤモンドペーストで精研磨を、最終仕上げではコロイダルシリカを用いた化学的機 械研磨を行い、真鍮製の試料ホルダにドータイトを塗布し試料を固定した。

4.2 試料装着

試料ホルダへの試料装着から試料室への搬入まで一連の動作をセル付属のトングを 用いてセル外より円滑に操作できることを確認した。これら一連の動作は、試料室内 カメラにより目視確認することができた。

- 4.3 試験条件
 - 4.3.1 試料観察

二次電子像及び反射電子像の組成像で観察、撮影を行った。撮影時の加速電圧は

30kV、WD(Working Distance)は11.0mm であった。

4.3.2 WDS 分析

WDS による点分析、線分析、面分析を行った。点分析試験は加速電圧 20kV、照射 電流 50nA で、線分析及び面分析試験は加速電圧 20kV、照射電流 12nA の条件で実施 した。

4.3.3 EBSD

EBSD は、加速電圧 20kV、照射電流 3nA の条件で実施した。

4.4 試験結果

4.4.1 試料観察結果

Photo.3-2 に金蒸着試料の二次電子像及び反射電子像を示す。この試料においては、 倍率 10 万倍まで鮮明な映像を得ることができ、nm オーダーの粒子まで観察すること ができた。

4.4.2 WDS 分析結果

Fig.2-1 に **SUS304** の点分析試験結果を示す。試料の主な成分元素である **Fe**、**Cr**、**Ni** を検出することができた。

Fig.2-2 に標準試料 Si 及び Cu の線分析を、Fig2-3 に面分析試験結果を示す。

分析元素は、Si 及び Si を保持する真鍮パイプの組成元素 Cu とした。標準試料である Si が線分析及び面分析結果から確認できた。また、真鍮パイプ内の Cu での分析強度分布からは、α相、β相及び析出物が確認できた。

これらの結果から、WDS による分析が正常に実施できることを確認した。

4.4.3 EBSD 結果

Fig.3 に SUS316 の菊池パターン及び結晶方位マップを示す。この結果から EBSD が正常に機能動作することが確認できた。

5. まとめ

ホットセル環境に対応させた EBSD 付遠隔操作型 EPMA を開発した。本装置はイン ナーボックスと装置本体から構成され、市販の装置に改造を施した後、ホットセル内に 設置された。設置にあたっては、耐震計算を実施してインナーボックス及び装置本体の 耐震上の安全を確保するとともに、インナーボックスの気密検査を実施して所定の閉じ 込め機構を確保した。また、装置の省スペース化によってセル内でのメンテナンス性を 向上させた。

標準試料等を用いた特性試験(高倍率(約10万倍)での観察、WDS分析及びEBSD)に より、ホットセル設置後も所定の性能が得られていることを確認した。

以上のことから、本装置は高い安全性及び遠隔操作性並びに優れた性能を有している

ことが確認された。今後、照射された燃料等の観察、分析において有力なツールになる と期待される。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、有益な助言をホット試験施設管理部 金澤浩之技術副 主幹から、また安全研究センター 燃料安全研究グループ 天谷政樹研究主幹には、本 装置の開発・製作にご協力を頂きました。以上、記して謝意を示します。

参考文献

- 1)日本表面科学会、電子プローブ・マイクロアナライザ、1998
- 2)日本電子、EPMA・表面分析ユーザーズミーティング資料

「EPMA 分析の留意点(コーティング技術)」、1996

3) 鈴木清一、EBSD 読本 OIM を使用するにあたって、2009

■EPMA (電子プローブマイクロアナライザ)						
分析元素範囲	: 5B ~ 92U 及び 94Pu					
X線分光器	:波長分散型 X 線分光器(WDS)2 基					
	:XCE 形 X 線分光器(LDE2/TAPJ)×1					
	:H形X線分光器(LIFHS/PETHS)×1					
試料寸法	: $\phi 32$ mm $ imes$ H20 \sim 25mm					
分析領域	: 32 mm $\times 100$ mm					
試料ステージ最大駆動	」速度 : 3.6mm/sec					
加速電圧	: 0.2~30kV(0.1kV ステップ)					
照射電流	: 1pA \sim 10 μ A					
照射電流安定度	$\pm 0.05\%/h, \pm 0.3\%/12h$					
二次電子像分解能	: 6nm (WD11mm,30kV)					
反射電子像	: 組成像、凹凸像					
観察倍率	$: \times 40 \sim 100,000 $ (WD11mm)					
走查像解像度	: 最大 1,280×960(リアルタイム表示時)					
	最大 5,120×3,840(ファイル記録時)					
オペレーティングシス	テム : WindowsXP Professional*					
	(*Windows はマイクロソフト社の登録商標です。)					
ソフトウェア	: 定性分析、スタンダードレス定量分析、					
	定量分析検量線分析、線分析、面分析、					
	連続自動分析、複合マップ分析、EPMA 操作、初期					
	設定、ファイル検索					
■EBSD(結晶方位解析装	置)					
検出器本体 :	スロースキャンカメラシステム					
CCD 素子保護対策 :	蛍光スクリーン-レンズ間に鉛濃度 50%ガラス					
	を組み込み					
パターン取込立体角:	70°					
駆動方式 :	モーター駆動(検出位置と退避位置を移動)					
測定スピード :	120 点/sec					
空間分解能 :	1ピクセル以下で粒界の確認ができること					

Table1 EBSD 付遠隔操作型 EPMA の性能及び仕様

ソフトウェア : OIM Data Collection、OIM Analysis



Fig.1 EBSD 付遠隔操作型 EPMA 概略図



Fig.2-1 点分析試験結果



Fig.2-2 線分析試験結果



Fig.2-3 面分析結果



菊池パターン



結晶方位マップ

Fig.3 菊池パターン及び結晶方位マップ



Photo.1 インナーボックス外観写真



Photo.2-1 操作盤及び接続ボックス



Photo.2-2 遠隔操作型対物絞り



Photo.2-3 鏡像反転機能付 OM カメラ



Photo.2-4 ジャンクションボックス



Photo.2-5 反射対物レンズ位置合わせ機構



Photo.2-6 試料交換室インジケータ



Photo.2-7 遠隔操作型試料交換機構



Photo.2-8 遠隔操作型試料ホルダ



Photo.2-9 接続フランジ



Photo.2-10 試料ステージ手動回転レバー



シールド拡大

Photo.2-11 WDS 内 BG 低減シールド

シールド拡大

JAEA-Technology 2012-022



Photo.2-12 TMP、イオンポンプ及びチェーンブロック取付位置



Photo.2-13 イオンポンプ水冷ジャケット取付後



Photo.2-14 電子銃室・試料室リーク経路



Photo.2-15 試料室内観察カメラ



Photo.3-1 試料外観写真



Photo.3-2 金蒸着試料の二次電子像及び反射電子像

付録 安全評価

1. 電子プローブマイクロアナライザに関する耐震評価

燃料試験施設 $\alpha \gamma$ 鉛 No.1 セル内に設置する電子プローブマイクロアナライザに関する耐震強度計算及び評価を行った。

電子プローブマイクロアナライザは、αγ鉛 No.1 セル内の床面ベースプレート (SS400) に SUS304 固定ボルト(M12×4 本)により固定される。耐震計算は、水平震 度 0.36 で評価を行った結果、十分な耐震強度を有しており、地震により電子プロー ブマイクロアナライザが移動・転倒することはない。

- 1.1 計算条件
 - (1) 計算は、耐震 B クラス機器として水平震度 0.36 で行う。
 - (2) 機器の重量は、重心に集中したものとする。
 - (3) 地震力は、水平方向から作用するものとする。
 - (4) 部材の材質及び許容応力値を TableA.1 に示す。

ゼロ ナナ	材質	許容引張応力	許容せん断応
目にな		${ m f_t}\left[{ m MPa} ight]$	力 fs [MPa]
固定ボルト	SUS304	102	78

TableA.1 部材の材質及び許容応力

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = \frac{205}{1.5\sqrt{3}} = 78.9 \approx 78 \text{ [MPa]}$$

- fs : 許容せん断応力 [MPa]
- F :材料の設計降伏点または、材料の設計引張強さを 0.7

倍した小さい方の値[MPa]

許容応力値は、社団法人日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規 格」より算出した。



重量	W = 6174 [N]
重心高さ	$L_1 \!=\! 675 \; [mm]$
重心位置	$L_2 = 141 \ [mm]$
水平地震力	$P_{H} = 0.36 \times 6174 = 2222.6 \approx 2223$ [N]
固定ボルト軸断面積	$A_B = 113 \ [mm^2] M12$

1.2 電子プローブマイクロアナライザに関する固有振動数

固有振動数 fn の計算は、一層建物の水平振動モデルとして固有振動数を評価した。

$$\approx 4.7 \times 10^{-3}$$
 [sec] ≈ 1170523 [N/mm]

	Т	:固有周期 [sec]
	W	:重量 [N]
	k	:ばね定数 [N/mm]
	g	: 重力加速度 [mm/sec ²]
	n	: 脚柱本数
	Е	:脚柱縦弾性係数 [MPa]
	Ι	:脚柱断面二次モーメント [mm4]
	ι	:脚柱長さ [mm]
となり、	固有振動	助数 fn は

$$fn = \frac{1}{T} = \frac{1}{4.7 \times 10^{-3}} = 212.8 \approx 212$$
 [Hz]
fn : 固有振動数 [Hz]
T : 固有周期 [sec]
となり、20 [Hz] 以上であるので剛体である。
よって、静解析を行う。

 1.3 電子プローブマイクロアナライザの固定ボルトに関する強度計算
 電子プローブマイクロアナライザの転倒モーメント Me 及び復元モーメント Re は $Me = P_{\rm H} \times L_1 = 2223 \times 675 = 1500525 \approx 1501 ~ \left[kN \cdot mm \right]$

 $\text{Re} = W \times L_2 = 6174 \times 141 = 870534 \approx 870 \text{[kN} \cdot \text{mm]}$

となり、Re<Me となり転倒するため固定ボルトには、せん断応力と引張応力が 作用する。よって、せん断応力と引張応力に関して評価する。

固定ボルトに作用するせん断応力τは

$$Fs = \frac{P_H}{n_B} = \frac{2223}{4} = 555.8 \approx 556 \text{ [N]}$$
Fs : せん断力 [N]
P_H : 水平地震力 [N]
n_B : ボルト本数
$$\tau = \frac{Fs}{A_B} = \frac{556}{113} = 4.9 \approx 5 \text{ [MPa]}$$

$$\tau : せん断応力 [MPa]$$
Fs : せん断力 [N]
A_B : 固定ボルトの軸断面積 [mm²]
となる。
よって

 $\tau = 5 \ \left[MPa \right] \quad < \quad f_s = 78 \ \left[MPa \right]$

となり、固定ボルトに作用するせん断応力 t は許容せん断応力 fs より小さい。

また、固定ボルトに作用する引張応力σは $Rb = \frac{P_{H} \times L_{1} - W \times L_{2}}{L \times n_{t}} = \frac{2223 \times 675 - 6174 \times 141}{375 \times 2} = 840 \text{ [N]}$ Rb : 引張力 [N] PH :水平地震力 [N] L_1 : 重心高さ [mm] : 重心位置 [mm] L_2 L :ボルトスパン [mm] : 引張を受ける片側のボルト数 n_t $\sigma = \frac{Rb}{A_B} = \frac{840}{113} = 7.4 \approx 8 \text{ [MPa]}$:引張応力 [MPa] σ :引張力 [N] Rb : 固定ボルトの軸断面積 [mm²] Ав となる。

なお、せん断力と引張力を同時に受けるボルトの許容引張応力 fts は、次のいずれか小さい方の値とする。

• $f_{ts} = 1.4f_t - 1.6\tau = 1.4 \times 102 - 1.6 \times 5 = 134.8$ [MPa]

• $f_{ts} = f_t = 102$ [MPa]

fts : せん断力と引張力を同時に受けるボルトの

許容引張応力 [MPa]

- ft : ボルトの許容引張応力 [MPa]
- τ : せん断応力 [MPa]

よって、ftsは102 [MPa]となることから

 $\sigma = 8 [MPa] < f_{ts} = 102 [MPa]$

となり、固定ボルトに作用する引張応力 o は、せん断力と引張力を同時に受ける ボルトの許容引張応力 ftsより小さい。以上のことから、固定ボルトは十分な強 度を有している。

1.4 まとめ

水平震度 0.36 で評価を行った結果、十分な耐震強度を有しており、地震によ り電子プローブマイクロアナライザが移動・転倒することはない。

2. インナーボックスに関する耐震評価

燃料試験施設 $\alpha \gamma$ 鉛 No.1 セル内に設置するインナーボックスに関する耐震強度計算及び評価を行った。

インナーボックスは、αγ鉛 No.1 セル内の床面ベースプレート(SS400)に SUS304 固定ボルト(M12×4本)により固定される。耐震計算は、水平震度 0.36 で評 価を行った結果、十分な耐震強度を有しており、地震によりインナーボックスが移 動・転倒することはない。

- 2.1 計算条件
 - (1) 計算は、耐震 B クラス機器として水平震度 0.36 で行う。
 - (2) 機器の重量は、重心に集中したものとする。
 - (3) 地震力は、水平方向から作用するものとする。
 - (4) 部材の材質及び許容応力値は、TableA.2のとおり。

40 ++	材質	許容引張応力	許容せん断応			
市り1月		f_t [MPa]	力 fs [MPa]			
固定ボルト	SUS304	102	78			

TableA.2 部材の材質及び許容応力

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} = \frac{205}{1.5\sqrt{3}} = 78.9 \approx 78[MPa]$$

 f_s :許容せん断応力 [MPa]
F :材料の設計降伏点または、材料の設計引張強
さを 0.7 倍した小さい方の値[MPa]

許容応力値は、社団法人日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設 規格」より算出した。





2.2 インナーボックスに関する固有振動数

固有振動数 fn の計算は、一層建物の水平振動モデルとして固有振動数を評価 した。なお、バネ定数 k は、段付片持梁モデルとした。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k \times g}}$$
$$= 2\pi \sqrt{\frac{1740}{7636.3 \times 9806}}$$
$$= 0.0303$$
$$\approx 3.1 \times 10^{-2} \text{ [sec]}$$

$$k = \frac{1}{\frac{(i_1 + i_2)^3 - i_2^3}{n \times 12 \times E \times I_1} + \frac{t_2^3}{n \times 12 \times E \times I_2}}$$
$$= \frac{1}{\frac{(425 + 141)^3 - 141^3}{4 \times 12 \times 193000 \times 208492} + \frac{141^3}{4 \times 12 \times 193000 \times 7854}}$$

= 7636.3 [N / mm]

- W : 重量 [N]
- k : ばね定数 [N/mm]
- g : 重力加速度 [mm/sec²]
- n :本数
- E : 縦弾性係数 [MPa]
- I1:脚柱断面二次モーメント [mm4]
- I2 : 高さ調整用脚柱断面二次モーメント [mm⁴]
- 11 :脚柱長さ [mm]
- 12 : 高さ調整用脚柱長さ [mm]

となり、固有振動数 fn は

fn =
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{3.1 \times 10^{-2}} = 33.0 \approx 33$$
 [Hz]

- fn : 固有振動数 [Hz]
- T : 固有周期 [sec]

となり、20 [Hz] 以上であるので剛体である。よって、静解析を行う。

2.3 インナーボックスの固定ボルトに関する強度計算 インナーボックスの転倒モーメント Me 及び復元モーメント Re は

 $Me = P_H \times L_1 = 627 \times 927 = 581229 \approx 582 [kN \cdot mm]$

 $Re = W \times L_2 = 1740 \times 98.3 = 171042 \approx 171 [kN \cdot mm]$

となり、Re<Me となり転倒するため固定ボルトには、せん断応力と引張応力が 作用する。よって、せん断応力と引張応力に関して評価する。 固定ボルトに作用するせん断応力τは

$$Fs = \frac{P_{H}}{n_{B}} = \frac{627}{4} = 156.8 \approx 157 \text{ [N]}$$

$$Fs : せん断力 \text{ [N]}$$

$$P_{H} : 水平地震力 \text{ [N]}$$

$$n_{B} : ボルト本数$$

$$\tau = \frac{Fs}{A_{B}} = \frac{157}{113} = 1.4 \approx 2 \text{ [MPa]}$$

$$\tau : せん断応力 \text{ [MPa]}$$

$$Fs : せん断力 \text{ [N]}$$

$$A_{B} : 固定ボルトの軸断面積 \text{ [mm2]}$$
となる。

 $\tau=2 \ \left[MPa\right] \quad < \quad f_s=78 \ \left[MPa\right]$

となり、固定ボルトに作用するせん断応力τは許容せん断応力fsより小さい。

また、固定ボルトに作用する引張応力σは

 $Rb = \frac{P_{\rm H} \times L_1 - W \times L_2}{L \times n_{\rm t}} = \frac{627 \times 927 - 1740 \times 98.3}{210 \times 2} = 976.6 \approx 977 \text{ [N]}$ Rb : 引張力 [N] P_H :水平地震力 [N] \mathbf{L}_1 : 重心高さ[mm] L₂ :重心位置 [mm] L ・ボルトスパン [s :ボルトスパン [mm] L : 引張を受ける片側のボルト数 n_t $\sigma = \frac{\text{Rb}}{\text{A}_{\text{B}}} = \frac{977}{113} = 8.6 \approx 9 \text{ [MPa]}$: 引張応力 [MPa] σ Rb :引張力 [N] : 固定ボルトの軸断面積 [mm²] A_{B} となる。

なお、せん断力と引張力を同時に受けるボルトの許容引張応力 fts は、次のいず れか小さい方の値とする。

• $f_{ts} = 1.4f_t - 1.6\tau = 1.4 \times 102 - 1.6 \times 2 = 139.6$ [MPa]

 $\cdot \mathbf{f}_{ts} = \mathbf{f}_t = 102 \text{ [MPa]}$

 fts
 : せん断力と引張力を同時に受けるボルトの許容引張応力

 [MPa]

ft : ボルトの許容引張応力 [MPa]

τ : せん断応力 [MPa]

よって、 f_{ts} は 102 [MPa]となることから

 $\sigma = 9 [MPa] < f_{ts} = 102 [MPa]$

となり、固定ボルトに作用する引張応力 σ は、せん断力と引張力を同時に受け るボルトの許容引張応力 ftsより小さい。以上のことから、固定ボルトは十分な 強度を有している。

2.4 まとめ

水平震度 0.36 で評価を行った結果、十分な耐震強度を有しており、地震によりインナーボックスが移動・転倒することはない。

3. 電子プローブマイクロアナライザに関する溶接部の強度評価

燃料試験施設 α γ 鉛 No.1 セル内に設置する電子プローブマイクロアナライザ用ベ ースプレートの溶接部に関する強度計算及び評価を行った。

電子プローブマイクロアナライザ用ベースプレート(SS400)は、αγ鉛 No.1 セル 内の既設ライナーにすみ肉溶接にて固定される。水平震度 0.36で評価を行った結果、 十分な強度を有しており溶接部が破損しないことから、地震により電子プローブマイ クロアナライザが移動・転倒することはない。

3.1 計算条件

- (1) 計算は、耐震 B クラス機器として水平震度 0.36 で行う。
- (2) 機器の重量は、重心に集中したものとする。
- (3) 地震力は、水平方向から作用するものとする。
- (4) 部材の材質及び許容応力値は、TableA.3のとおり。

TableA.3 部材の材質及び許容応力

部材	材質	許容引張応力 ft [MPa]	許容せん断応 力 f _s [MPa]
溶接部	SS400	73	94

許容応力値は、社団法人日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」より 算出した。 (F=245、許容せん断応力 F/1.5√3 、許容引張応力 F×0.45/1.5
 許容引張応力に関しては、溶接部なので 0.45 倍している。)



総重量	W = 7144 [N]
重心高さ	$L_1 = 607 \ [mm]$
重心位置	$L_2 = 277 \; [mm]$
水平地震力	$P_{H} = 0.36 \times 7144 = 2571.8 \approx 2572$ [N]
溶接部断面	$A_B = 318 \ [mm^2]$
積	溶接のど厚 3.18 [mm]×溶接長さ 100
	[mm]

3.2 電子プローブマイクロアナライザ用ベースプレートの溶接部に関する強度計算 転倒モーメント Me 及び復元モーメント Re を求める。

 $Me = P_{H} \times L_{1} = 2572 \times 607 = 1561204 \approx 1562 \text{ [kN} \cdot \text{mm]}$

 $Re = W \times L_2 = 7144 \times 277 = 1978888 \approx 1978 [kN \cdot mm]$

となり、Re>Meとなり転倒しないため、溶接部(のど断面)には、水平地震力 PHが作用し、のど断面に対して垂直方向の力 Ft(引張力)と水平方向の力 Fs(せん断力)を求めると

 $Ft = P_H \times \sin \theta = 2572 \times \sin 45^\circ = 1818.7 \approx 1819 \text{ [N]}$

 $Fs = P_H \times \cos \theta = 2572 \times \cos 45^\circ = 1818.7 \approx 1819 \text{ [N]}$

Ft: 引張力 [N]Fs: せん断力 [N]

となる。
溶接部に作用する引張応力
$$\sigma$$
 と、せん断応力 τ を求めると
 $\sigma = \frac{Ft}{A_B} = \frac{1819}{318} = 5.7 \approx 6 \text{ [MPa]}$
 $\tau = \frac{Fs}{A_B} = \frac{1819}{318} = 5.7 \approx 6 \text{ [MPa]}$
 $\sigma : 引張応力 \text{ [MPa]}$
 $\tau : せん断応力 \text{ [MPa]}$
Ft : 引張力 [N]
Fs : せん断力 [N]
AB : 溶接部のど断面積 [mm²]

よって

 $\sigma = 6 [MPa] < f_{ts} = 73 [MPa]$

 $\tau = 6 [MPa] < f_s = 94 [MPa]$

となり、溶接部に作用する引張応力 σ とせん断応力 τ は、それぞれの許容応力よ り小さい。以上のことから、溶接部は十分な強度を有している。 なお、せん断力と引張力を同時に受ける許容引張応力 fts は、次のいずれか小さ い方の値とする。

• $f_{ts} = 1.4 f_t - 1.6 \tau = 1.4 \times 73 - 1.6 \times 6 = 92.6$ [MPa]

• $f_{ts} = f_t = 73$ [MPa]

fts : せん断力と引張力を同時に受ける許容引張応力[MPa]

- ft : 許容引張応力 [MPa]
- τ : せん断応力 [MPa]

よって、ftsは73 [MPa]とした。

3.3 まとめ

水平震度 0.36 で評価を行った結果、溶接部は十分な強度を有しており、地震 により電子プローブマイクロアナライザが移動・転倒することはない。 4. インナーボックスに関する溶接強度評価

燃料試験施設 $\alpha \gamma$ 鉛 No.1 セル内に設置するインナーボックス用ベースプレートの 溶接部に関する強度計算及び評価を行った。

インナーボック用ベースプレート(SS400)は、 $\alpha \gamma$ 鉛 No.1 セル内の既設ライナー にすみ肉溶接にて固定される。水平震度 0.36 で評価を行った結果、十分な強度を有 しており溶接部が破損しないことから、地震によりインナーボックスが移動・転倒す ることはない。

4.1 計算条件

(1) 計算は、耐震 B クラス機器として水平震度 0.36 で行う。

- (2)機器の重量は、重心に集中したものとする。
- (3) 地震力は、水平方向から作用するものとする。
- (4) 部材の材質及び許容応力値は、TableA.4のとおり。

TableA.4 部材の材質及び許容応力

部材	材質	許容引張応力 f _t [MPa]	許容せん断応 力 f _s [MPa]
溶接部	SS400	73	94

許容応力値は、社団法人日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」より 算出した。

(F=245、許容せん断応力 $\frac{F}{1.5\sqrt{3}}$ 、許容引張応力 $\frac{F \times 0.45}{1.5}$

許容引張応力に関しては、溶接部なので 0.45 倍している。)



溶接部断面積 A_B=318 [mm²] 溶接のど厚 3.1 [mm]×溶接長さ 100 [mm]

4.2 インナーボックス用ベースプレートに関する溶接部の強度計算 転倒モーメント Me 及び復元モーメント Re を求める。

 $Me = P_H \times L_1 = 955 \times 629 = 600695 \approx 601 [kN \cdot mm]$

$$\text{Re} = \text{W} \times \text{L}_2 = 2652 \times 200 = 530400 \approx 530 \text{[kN} \cdot \text{mm]}$$

となり、Re<Meとなることから、溶接部(のど断面)には、引抜力 Rbと水平 地震力 PHを合成した力 Pが作用し、のど断面に対して垂直方向の力 Ft(引張力) と水平方向の力 Fs(せん断力)を求めると

 $Rb = \frac{P_{\rm H} \times L_1 - W \times L_2}{L} = \frac{955 \times 629 - 2652 \times 200}{410} = 171.5 \approx 172 \text{ [N]}$:引抜力 [N] Rb $P_{\rm H}$:水平地震力 [N] L_1 : 重心 [mm] : 重心位置 [mm] Y 🛉 L_2 L : スパン [mm] Rb $P = \sqrt{P_{H}^{2} + 172^{2}} = \sqrt{955^{2} + 172^{2}} = 970.4 \approx 971$ [N] $Ft = P \times \sin \theta = 971 \times \sin 34.8^{\circ} = 554.2 \approx 555$ [N] 溶接部 $Fs = P \times \cos \theta = 971 \times \cos 34.8^{\circ} = 797.3 \approx 798$ [N] Р : 合成力 [N] :引張力 [N] \mathbf{Ft} \mathbf{Fs} : せん断力 [N] となる。 溶接部に作用する引張応力σと、せん断応力τを求めると $\sigma = \frac{\text{Ft}}{\text{A}_{\text{P}}} = \frac{555}{318} = 1.7 \approx 2 \text{ [MPa]}$ $\tau = \frac{Fs}{A_{B}} = \frac{798}{318} = 2.5 \approx 3 \text{ [MPa]}$ σ : 引張応力 [MPa] : せん断応力 [MPa] τ :引張力 [N] \mathbf{Ft} : せん断力 [N] \mathbf{Fs} : 溶接部のど断面積 [mm²] AB

$$\sigma = 2[MPa] < f_{ts} = 73 [MPa]$$

 $\tau = 3[MPa] < f_s = 94 [MPa]$

となり、溶接部に作用する引張応力 σ とせん断応力 τ は、それぞれの許容応力よ り小さい。以上のことから、溶接部は十分な強度を有している。 なお、せん断力と引張力を同時に受ける許容引張応力 fts は、次のいずれか小さ い方の値とする。

•
$$f_{ts} = 1.4f_t - 1.6\tau = 1.4 \times 73 - 1.6 \times 3 = 97.4$$
 [MPa]

 $\cdot f_{ts} = f_t = 73$ [MPa]

fts : せん断力と引張力を同時に受ける許容引張応力 [MPa]

ft : 許容引張応力 [MPa]

τ : せん断応力 [MPa]

よって、ftsは73 [MPa]とした。

4.3 まとめ

水平震度 0.36 で評価を行った結果、溶接部は十分な強度を有しており、地 震によりインナーボックスが移動・転倒することはない。 This is a blank page.

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本単位		
基个里	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	Α	
熱力学温度	ケルビン	Κ	
物質量	モル	mol	
光 度	カンデラ	cd	

	100			
组立量		SI 基本単位		
和立里		名称	記号	
面	積	平方メートル	m ²	
体	積五	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	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	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg	
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	A/m^2	
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m	
量濃度 ^(a) ,濃	度日	モル毎立方メートル	mol/m ³	

第一の「濃度」での「海」で「シートル」 mol/m³ 量濃度にの、濃度モル毎立方メートル mol/m³ 量濃度キログラム毎立法メートル g^{\dagger} かンデラ毎平方メートル cd/m^2 折率(b^{\dagger} (数字の) 1 1 透磁率(b^{\dagger} (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(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

	SI 組立単位					
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		
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	Ν		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	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 扩	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$		
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$		
磁床	(ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$		
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 ^(e)	°C		K		
光 束	[ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd		
照良	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd		
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,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²		
カーマ		C, j	0/11g	111 0		
線量当量,周辺線量当量,方向 地線量当量,個人線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 s^2$		
融 表 活 州	カタール	kat		e ⁻¹ mol		
RX 215 10 1		nat		5 1101		

(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

(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。
 (o)剤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、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、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、しばしば認った用語で"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. S.	I 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 ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ^{'3}
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 ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 卒	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
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 ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	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 ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	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	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	с			
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m			
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ			
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р			
10^{6}	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f			
10^{3}	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	а			
10^{2}	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z			
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У			

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	۰	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 ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
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

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 オ	゛ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=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	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa		
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa		
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m		
海		里	М	1 M=1852m		
バ		\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²		
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s		
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は		
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。		
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 AC44 (* [X1])		

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				
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルフ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx				
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$				
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹				
(。) 2 元 系のCCC単位 系しCIでけ直接比較できないため 年早 [△						

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 属	属さないその他の単位の例
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラッ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	Ц		IJ	_	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)
ŝ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています