

第 8 章 デブリ模擬体調製設備の整備及び燃料の調達計画の策定

8.1 デブリ模擬体の調製設備の整備

8.1.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉の臨界実験で用いるデブリ模擬体を調製するための設備機器の設計を行う。

(2) 概要

デブリ模擬体調製設備は、NUCEF のバックエンド研究施設の分析室(I)に設置された 2 台の既存グローブボックス（以下「GB」という。）に整備する予定である。デブリ模擬体を調製する主要機器（粉碎混合機、圧縮成型機、焼結炉）について GB 内スペース及び作業性などを考慮し架台設計、全体配置設計及び、その他の内装機器（ペレット収納庫、作業台など）の詳細設計を行った。また、これらの機器設置後の GB 全体の耐震評価を行った。さらに、デブリ模擬体調製設備の機器として、原料粉末の粒度調製等に用いる粉碎機、焼結炉の冷却水循環装置を購入した。

8.1.2 成果報告

(1) 実施内容

① デブリ模擬体調製設備の整備

デブリ模擬体調製設備は、バックエンド研究施設の分析室(I)に設置されている 2 台の既存 GB に整備する予定である。デブリ模擬体調製設備の構成は、GB 内に設置する主要機器と内装機器、GB 外に設置する焼結炉制御盤、電源盤、ユーティリティー装置等である。設備の主要装置（粉碎混合機、圧縮成型機、焼結炉本体）の仕様はおおよそ確定しており、2 台の GB 内に収まるように、主要機器の架台設計、据え付け時の配置設計を行う。また、これら機器設置後の設計において、GB 全体の耐震評価を行う。なお、設計に際して、表 8.1-1 及び 2 に示す機器の仕様を考慮した。

② デブリ模擬体調製設備の機器購入

デブリ模擬体調製設備の機器として、原料粉末の粒度調製等に用いる粉碎混合機、焼結炉の冷却水循環装置を購入する。

表 8.1-1 主要機器仕様

(1) 粉碎混合機	装置型式	フリッチュ・ジャパン株式会社製 P-5/4
	本体重量	約 120kg
	本体サイズ	670(W) × 580(D) × 570(H) mm
	設置方法	GB 内専用架台及び固定ボルト
(2) 焼結炉本体	最高温度	1800℃ (常用温度 1700℃、850℃)
	試料	φ8×H10 mm (焼成数 90 個)
	設置方法	GB 内専用架台及び固定ボルト
(3) 圧縮成型機	圧縮方法	油圧ポンプ式
	圧縮強度	300MPa 以上
	設置方法	GB 内専用架台及び固定ボルト

表 8.1-2 内装機器仕様

(1) 原料粉末 収納台	収納容量	ウラン粉末 1kg 程度に小分けされた容器 (約 500cc) を 5 個以上収納できる容量
	設置方法	GB 内専用架台及び固定ボルト
(2) ペレット 収納庫	収納容量	ペレット (φ8×H10) を個々に識別可能な状態で 200 個以上収納できる容量 (ペレット収納皿を設置したまま保管できる形状とする。)
	設置方法	GB 内専用架台及び固定ボルト
	取扱い方法	GB バッグイン・バッグアウト作業が可能な形状
(3) ペレット 収納皿	収納容量	ペレット (φ8×H10) を個々に識別可能な状態で 30 個以上収納できる容量 (ペレット収納庫に保管できる形状とする。)
	取扱い方法	GB バッグイン・バッグアウト作業が可能な形状
(4) 内装機器配置 用作業台	作業台 サイズ	主要機器に干渉せず、粉末取扱作業時の作業スペースを確保し、上記内装機器等を取り扱える形状

(2) 検討結果

① デブリ模擬体調製設備の整備

1) 機器及び配置設計

バックエンド研究施設に設置された 2 台の GB 内に収まる形状、作業性及び安全などを考慮し、各機器の設計及び配置を検討した。デブリ模擬体調製設備の全体配置図及び機器概要を図 8.1-1～8 に示す。

i) 粉碎混合機

(用途) 原料粉末を粉碎し粒度を調整する機器

(配置場所) GB1 に設置

(作業性への考慮)

- ・開閉カバーが干渉しない位置に配置し、作業時の取り扱いが容易なように機器の下部にリニアモーションガイド（以下「LM ガイド」という。）を設け、前後に可動できるように設置した。

ii) 焼結炉

(用途) グリーンペレットを焼結する機器

(配置場所) GB1 に設置

(作業性への考慮)

- ・作業時の取り扱いを容易にするため機器の下部に LM ガイドを設け、前後に可動できるように設置した。

(安全性への考慮)

- ・焼結炉の発熱体制御温度が警報設定値以上になったとき、発熱体への電源供給を自動遮断し、過熱を防止する設計とした。
- ・焼結炉のチャンバー壁温度が警報設定値以上になったとき、チャンバー過熱保護のため、発熱体への電源供給を自動遮断する設計とした。
- ・焼結炉へ供給する冷却水が停止したとき、発熱体への電源供給を自動遮断し過熱を防止する設計とした。
- ・焼結炉チャンバー内のガス圧が警報設定値以上になったとき、自動排気弁の開放と発熱体への電源供給を自動で遮断し過加圧を防止する設計とした。
- ・焼結炉チャンバーへ供給するガスが停止したとき、自動排気弁の開放と発熱体への電源供給を自動で遮断する設計とした。

iii) 圧縮成型機

(用途) 原料粉末をグリーンペレットに圧縮成形する機器

(配置場所) GB2 に設置

(作業性へ考慮事項)

- ・圧縮成形する作業では、1 サイクル分を自動成型できるようにシーケンス制御などを採用し、作業の手間を最小化する設計とした。
- ・圧縮成形時のプレス圧力、保持時間等をパラメータに設定できるように設計した。

(安全性への考慮)

- ・プレス巻き込まれ防止のため、作業スペースにエリアセンサーを設置し、起動中にエリアセンサーで検知されると機器が停止する設計とした。
- ・成型機作業時に人為的誤動作を防止するため、GB 内のスイッチボタンを同時に押さなければ成型機が起動しないようにダブルスイッチを採用した。

iv) 真空ポンプ

(用途) 焼結炉の炉内を真空にする機器

(配置場所) GB1 に設置

(考慮事項)

- ・焼結炉と同一の GB 内で他の機器と干渉しない位置に設置した。

v) 冷却水循環装置

(用途) 焼結炉使用時に GB 内の温度上昇を抑えるための冷却水を循環する装置

(配置場所) GB 外の空きスペースに設置

(考慮事項)

- ・ GB に収まらない機器のため、GB 外のスペースに設置した。

vi) 原料粉末収納台

(用途) 原料粉末を入れた小分けの容器を仮置する台

(配置場所) GB1 及び 2

(考慮事項)

- ・ 原料粉末の小分けの容器が収まる形状にし、原料粉末の取り扱い作業を行う作業台に配置した。GB1 では 5 個の容器、GB2 では 2 個の容器を収納可能。
- ・ 取り扱い作業を考慮し両 GB に配置した。

vii) ペレット収納庫

(用途) ペレットを個々に識別可能な状態で収納できる容器

(考慮事項)

- ・ ペレット収納皿に設置したまま保管できる構造とし、ペレット収納皿を最大 5 個収納 (ペレットは最大 165 個) できるように設計した。
- ・ GB ダブルカバーポートからの搬出入を可能にするため、搬出容器(キャニスター)に収納可能な大きさとし、取り出し易いように取手を付けた。

viii) ペレット収納皿

(用途) ペレットを個々に 30 個以上収納できる容量

(考慮事項)

- ・ ペレット収納庫に収まる形状とした。
- ・ 収納皿に 2 種類のペレットを置いても、搬送時の取り扱いなどでペレットが混ざらないように、個々が仕切られている構造とした。
- ・ ペレット搬送時の飛散防止のため、カバー (蓋) を装着できるように設計した。

ix) 作業台

(用途) 原料粉末、ペレットなどの取扱作業及び秤量を行う台

(配置場所) GB1 及び 2

(考慮事項)

- ・ 両 GB に作業性を考慮して設置する。
- ・ 原料粉末及びペレットを取り扱う場所には、飛散防止のためカバーを取り付ける設計とした。

x) 搬送台

(用途) GB 内のペレット収納皿等の搬送作業を容易にする台

(配置場所) GB1 及び 2

(考慮事項)

- ・ GB 内の各機器へのペレット収納皿の移動作業を考慮して、GB 内長手方向の搬送を容易にする搬送台を設置する。
- ・ GB 上部に搬送台用のレールを設けて各機器との干渉を避け、搬送が可能な設計とした。

2) 耐震評価

耐震評価として、各機器の架台据え付けボルトに加わる応力を評価した。また、両 GB のデブリ模擬体調製機器配置後の設計を考慮し、耐震 C クラス相当の条件に対し、耐震評価を行った。

②デブリ模擬体調製設備の機器購入

本年度は、デブリ模擬体調製設備の機器として以下に示す 2 品目を購入した。

1) デブリ模擬体調製用粉砕混合機 (図 8.1-9 参照)

本体型式	フリッチュ・ジャパン株式会社製 P-5/4
本体寸法及び重量	本体重量：約 120kg
	本体サイズ：約 670(W)×約 580(D)×約 580(H) mm
機器性能	粉砕可能な試料の大きさ：10 mm 角まで
	最終粒度：乾式で 1 μm、湿式で 0.1 μm
	最高モーター回転数：2400RPM
容器及びボール仕様	粉砕容器：フリッチュジャパン(株)ジルコニア製 250 ml
	粉砕ボール：フリッチュジャパン(株)ジルコニア製 φ20mm

2) 焼結炉用冷却水循環装置 (図 8.1-10 参照)

本体型式	オリオン DC インバータチラー RKE3750B-V-G1
本体寸法及び重量	本体重量：約 200kg (水槽空状態)
	本体サイズ：約 720 (W)×約 752 (D)×約 1410 (H) mm
機器性能	冷却水設定温度範囲：3～35℃
	冷却水使用流量範囲：15～60 L/min

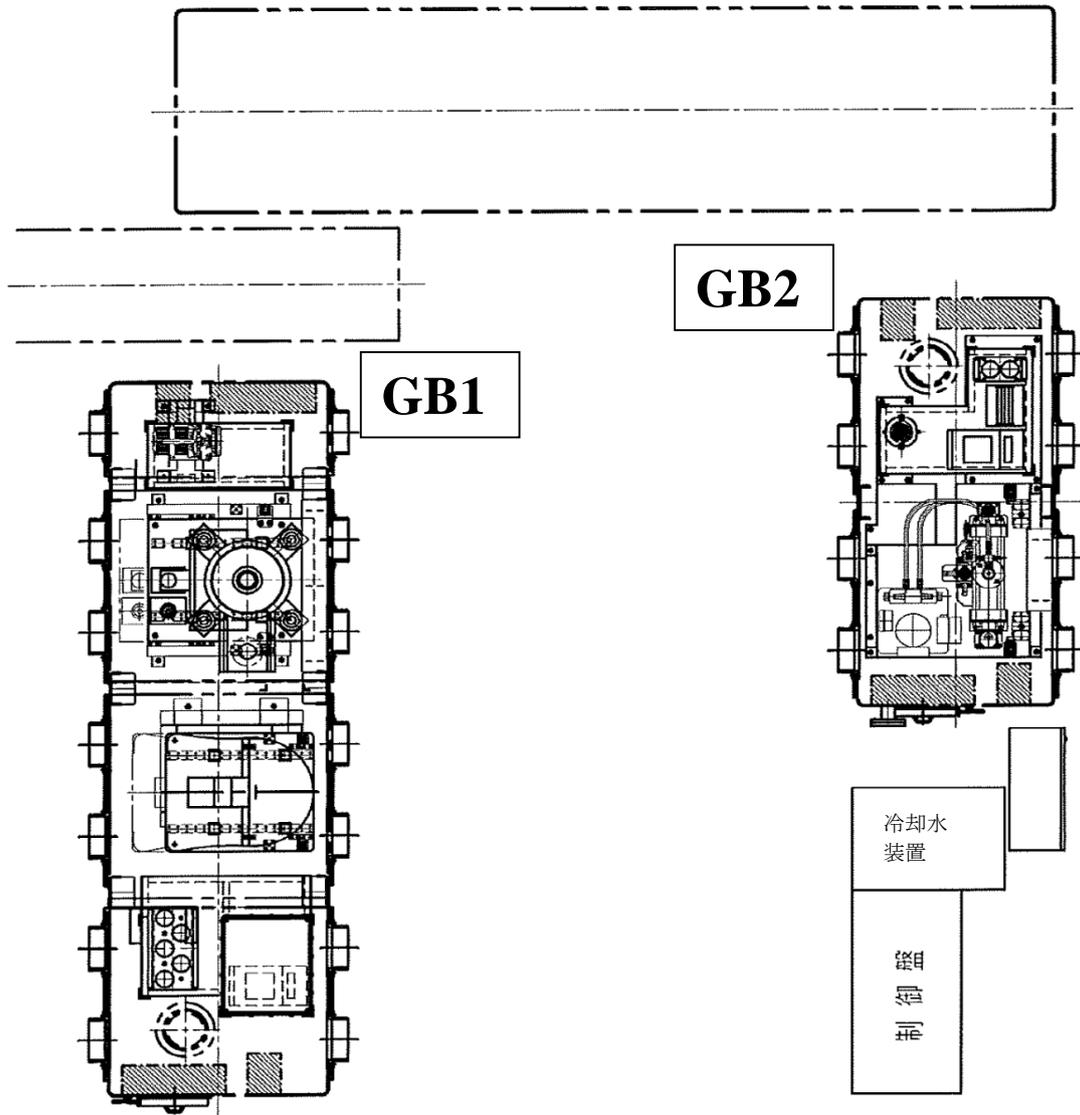


図 8.1-1 デブリ模擬体調製設備全体配置

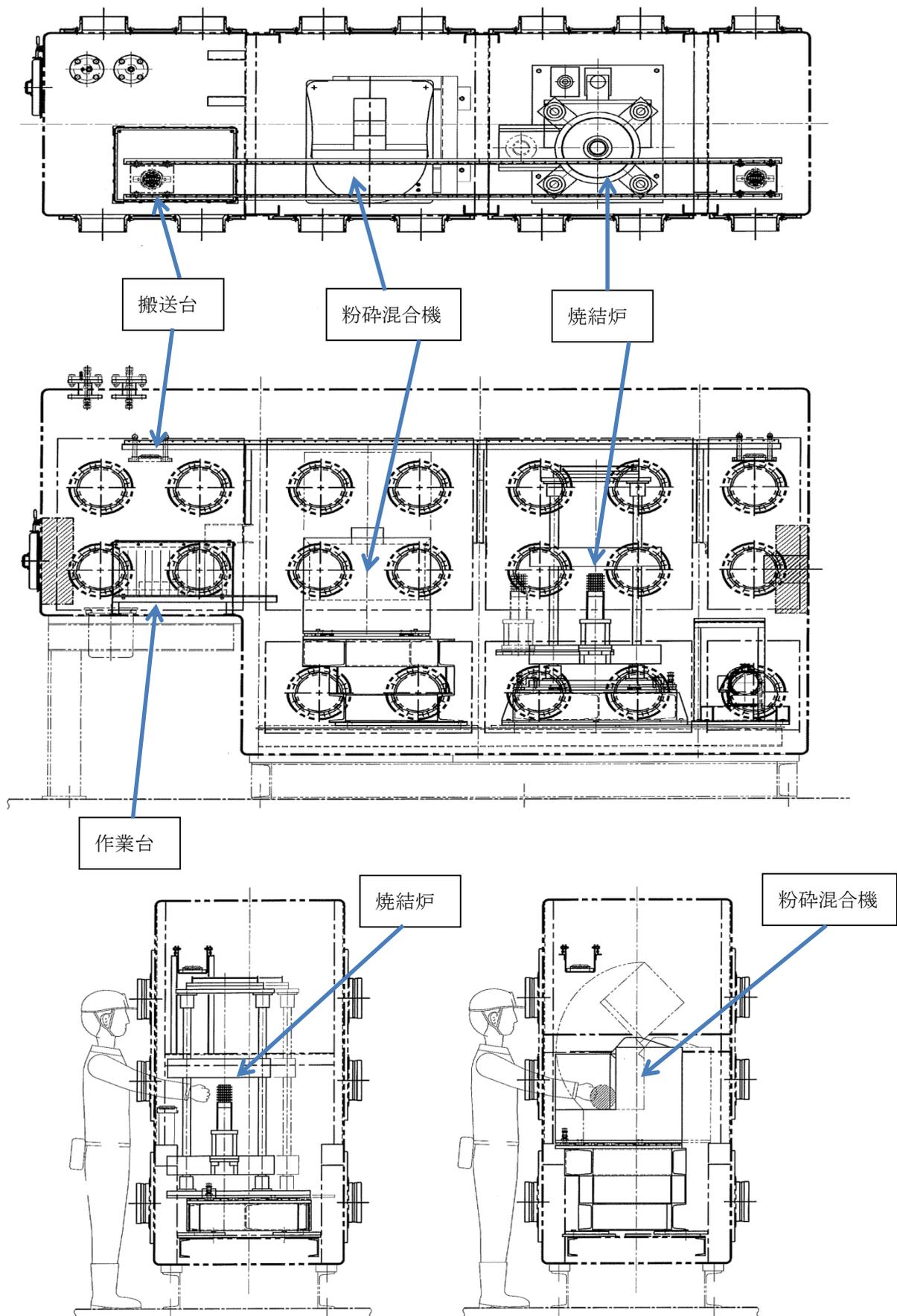


图 8.1-2 GB 1 全体概要

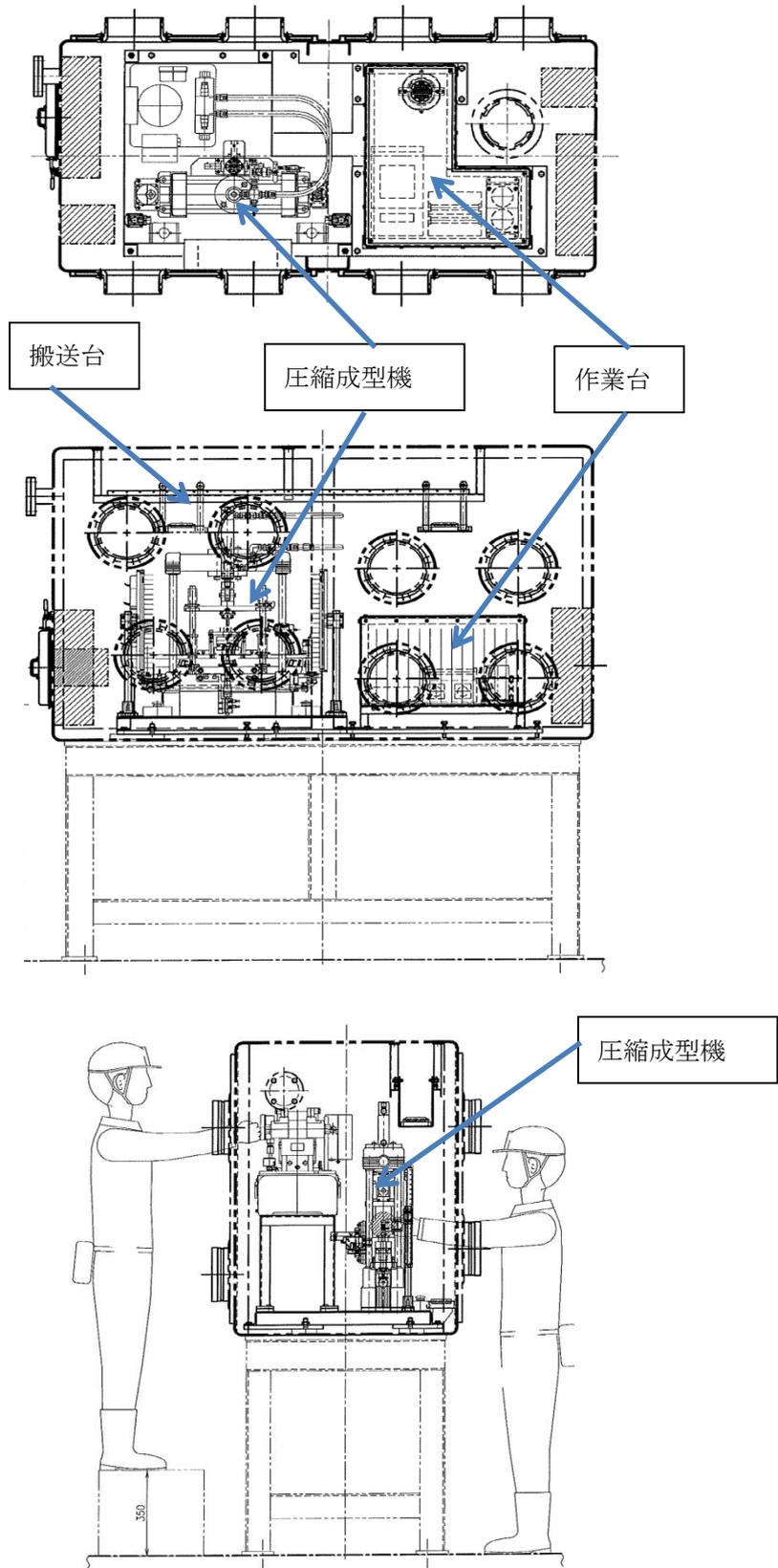


图 8.1-3 GB 2 全体概要

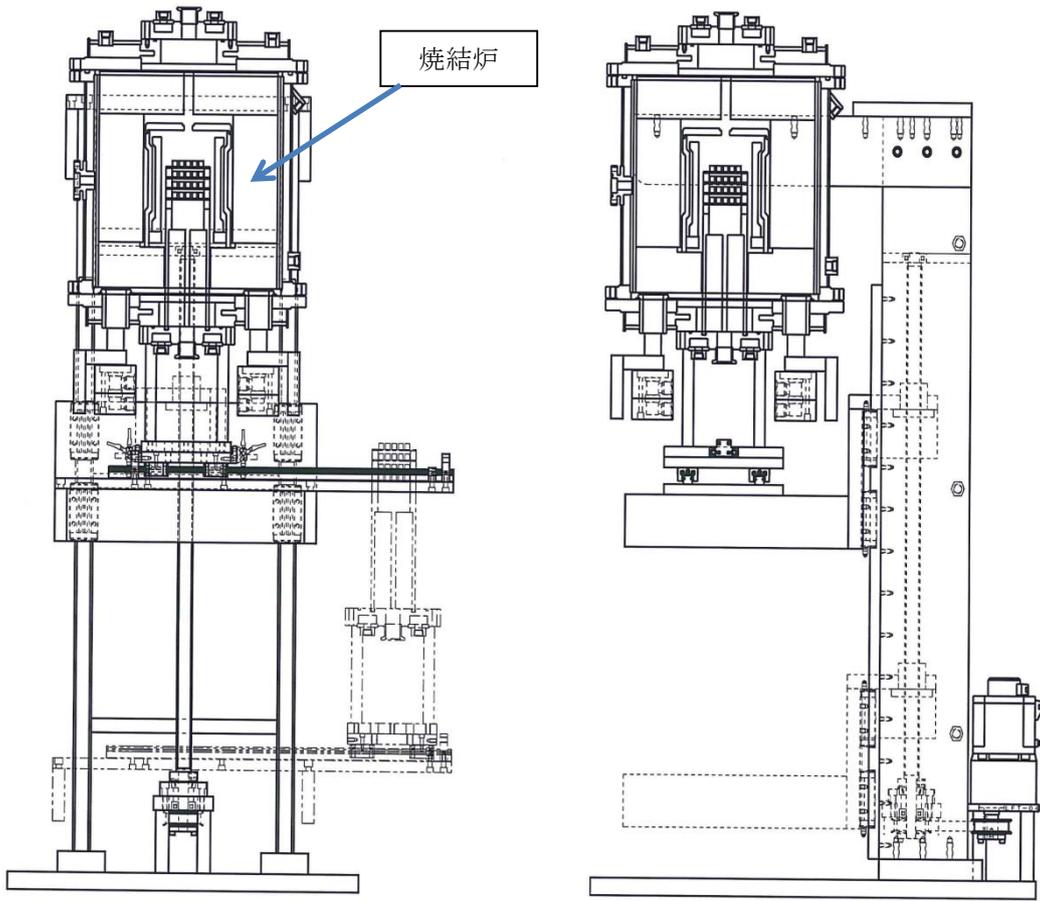


図 8.1-4 焼結炉概要

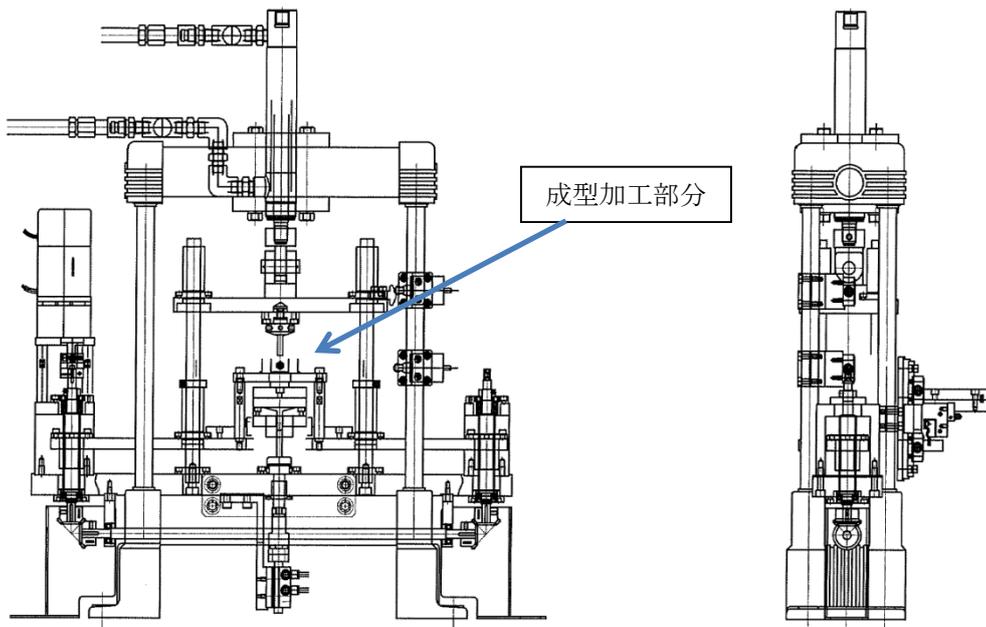


図 8.1-5 圧縮成形機概要

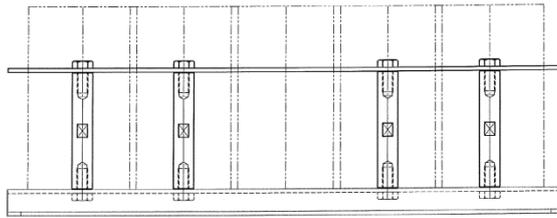
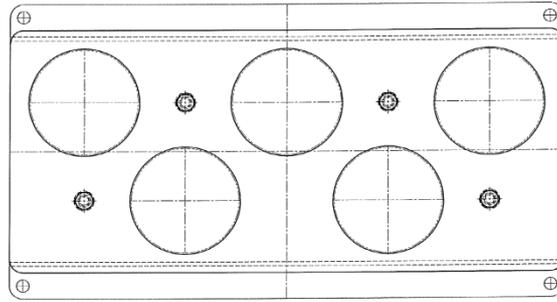


図 8.1-6 原料粉末収納台

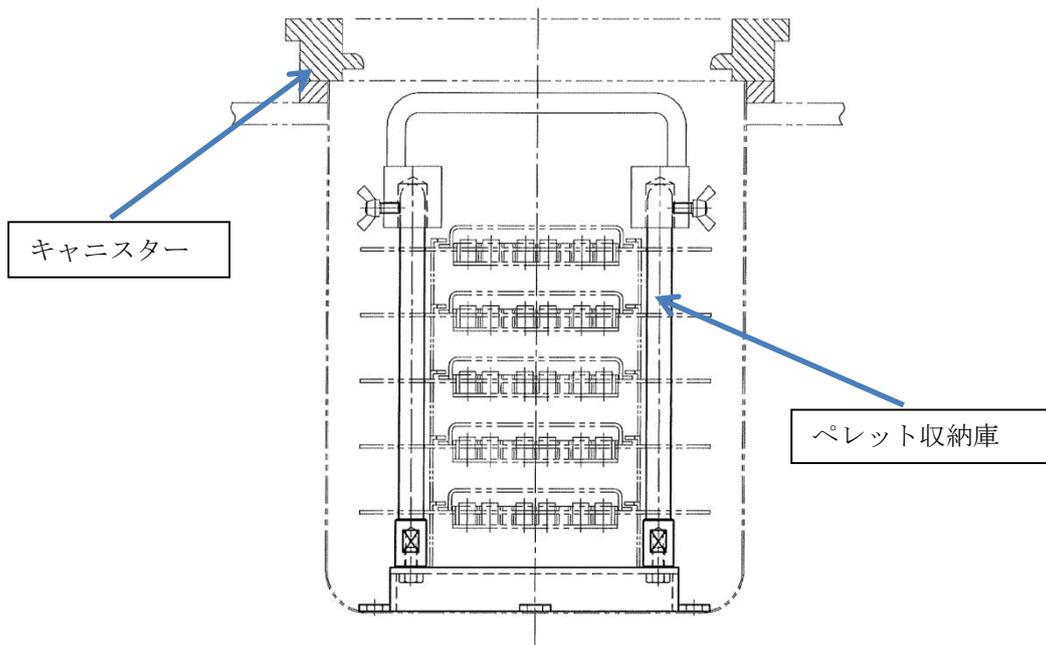


図 8.1-7 ペレット収納庫

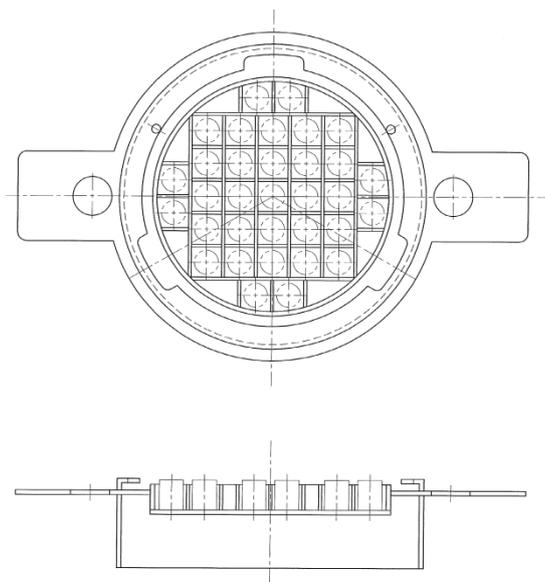


図 8.1-8 ペレット収納皿



図 8.1-9 粉碎混合機



图 8.1-10 冷却水循环装置

8.1.3 まとめ

バックエンド研究施設の分析室(I)に設置されている 2 台のデブリ模擬体調製設備用グローブボックス (GB) に設置する主要機器 (粉碎混合機、圧縮成型機、焼結炉) などの配置設計を行った。また、GB の内装機器 (ペレット収納庫、作業台等) の設計を完了した。さらに、デブリ模擬体調製設備の機器として、粉碎混合機及び焼結炉用冷却水循環装置を購入した。平成 27 年度以降に、これらの機器の購入及び設置に必要な架台の製作、据え付け工事などを進めていく予定である。

8.2 棒状燃料及び燃料粉末の調達検討

8.2.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉の臨界実験に用いる棒状燃料及びデブリ模擬体の原料について核燃料物質（ウラン）の調達計画を策定する。

(2) 概要

燃料（棒状燃料及びデブリ模擬体の原料）調達について、原料ウランの調達、製造、輸送及び諸手続きなどの必要な作業項目に対して、国内外の実績を考慮し、いくつかの調達ルートを検討した。その中で現実的なケースを絞り、期間、予算及び各調達ルートの懸案事項を踏まえ、次年度以降の調達方法を検討した。

8.2.2 成果報告

(1) 実施内容

調達する棒状燃料及びデブリ模擬体原料粉末の仕様を表 8.2-1~4、図 8.2-1 に示す。本仕様は、既存の STACY 棒状燃料と同一としている。

① 燃料調達計画の作業項目検討

燃料調達に必要な作業項目を検討した。主な検討項目を下記に示す。

- ・原料ウランの調達及び調整
- ・原料ウランのペレット成型及び棒状燃料の製造
- ・輸送容器の調達及び輸送方法
- ・各工程に必要な諸手続き
- ・燃料調達を円滑に実施するための各項目の実施順序整理

② 各工程の費用・期間の検討

各工程の開始時期、所要期間、必要経費の見積りを検討した。なお、各工程に必要な許認可の取得及び輸送時期の変更等などによる不確定因子も考慮し検討した。

③ 複数の計画の検討

原料ウランの調達、燃料調整及び棒状燃料加工など、選択肢としては、それぞれ国内外のメーカーが考えられるため、下記の調達ケースについて検討を行った。

- (ケース A) 国外で原料を調達、調整、加工を行う場合。
- (ケース B) 国外で原料を調達、調整、国内で加工を行う場合。
- (ケース C) 国外で原料を調達、国内で調整、加工を行う場合。
- (ケース D) 国内で原料を調達、調整、加工を行う場合。

表 8.2-1 調達燃料種類及び量

棒状燃料	500本
粉末燃料	40kgU

表 8.2-2(1/3) 濃縮UO₂粉末

同位体	U235 = 4.98%* U234 ≤ 500ppm/Utotal U236 ≤ 500ppm/Utotal
ウラン含有量	> 87.4%
O/U比	2.05+0.05
湿度	< 0.3%
TAP密度	> 1.5g/cm ³
比表面積	1.8<比表面積<3 m ² /g

*：既存の STACY 棒状燃料と同一濃縮度。

表 8.2-2(2/3) 不純物 (ppm/Utotal)

Ag	≤ 1	Cu	≤ 25	Pb	≤ 25
Al	≤ 25	F	≤ 25	Si	≤ 100
Bi	≤ 10	Fe	≤ 100	Sn	≤ 25
C	≤ 50	Mg	≤ 25	Ti	≤ 50
Ca	≤ 50	Mn	≤ 25	Th	≤ 10
Cl	≤ 50	Mo	≤ 50	W	≤ 50
Cr	≤ 25	Ni	≤ 50		
Cd	≤ 1	Li	≤ 2		

表 8.2-2(3/3) ボロン等量 (ppm/Utotal)

B	≤ 1.0	Gd	≤ 0.5
Dy	≤ 0.05	Sm	≤ 0.5
Eu	≤ 0.5	Li	≤ 0.5

ASTMによる係数を考慮したボロン当量合計 ≤ 4ppm

表 8.2-3(1/2) ペレット特性

材 料	焼結UO ₂ ペレット 95%TD
濃 縮 度	5%未満 (プラントの濃縮限度) 希望公称値 4.98%
直 径	8.179-8.204mm (公称値 8.19mm)
高 さ	12.19-14.73mm (公称値 13.46mm)

表 8.2-3(2/2) UO₂ペレット化学特性

ウラン含有量	> 87.7%	
O / U 比	2.000±0.010	
不純物含有量	ボロン当量	< 2ppm
	不純物含有量合計	< 1000ppm
	ボロン	< 1.0ppm
	カドミウム	< 1.0ppm
	カーボン	< 500ppm
	ケイ素	< 300ppm
	アルミニウム	< 100ppm
	カルシウム	< 100ppm
リチウム	< 2.0ppm	

※次の元素についても分析が行われる : Ni、Mg、Co、Fe、Cu、Mo、V、
Cr、Pb、Ag、N、Mn

表 8.2-4(1/6) 棒状燃料被覆管

材 料	Zr-4
外 径	9.460-9.535mm (公称値 9.50mm)
内 径	8.320-8.395mm (公称値 8.36mm)
肉 厚	0.57mm (公称値)

表 8.2-4(2/6) 上部/下部端栓

材 料	Zr-4
高 さ	14.68mm

表 8.2-4(3/6) 充填気体

気 体	ヘリウム 10kg/cm ²
-----	---------------------------

表 8.2-4(4/6) スプリング

材 料	A I S I 3 0 2
外 径	7. 7 5 – 8. 0 5 mm (公称値 8. 0 mm)
線 径	1. 4 2 – 1. 4 7 mm

表 8.2-4(5/6) 核分裂性コラム (燃料部)

長 さ	1 4 2 0 ± 5. 0 mm (図 8.2-1 参照)
-----	--------------------------------

表 8.2-4(6/6) 棒状燃料長さ

長 さ	1 4 9 5 ± 1. 0 mm (図 8.2-1 参照)
-----	--------------------------------

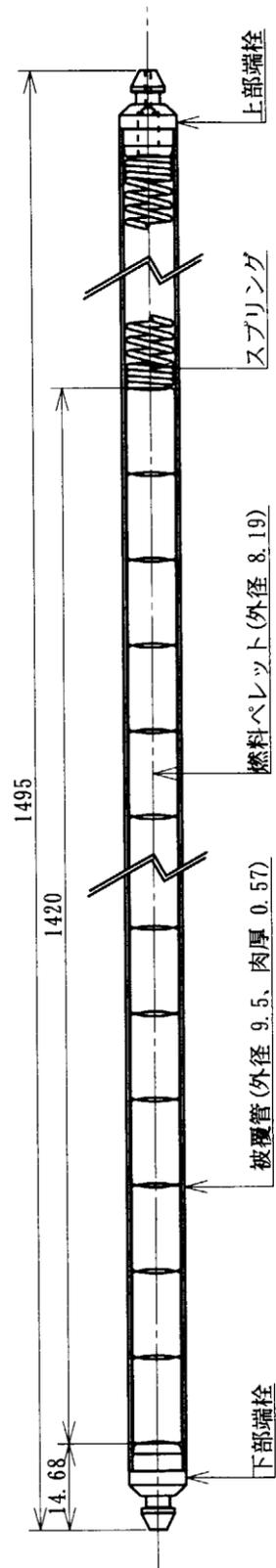


図 8.2-1 棒状燃料構造

(2) 調査結果

① 予備検討

臨界試験に必要な棒状燃料及びデブリ模擬体の原料の調達計画策定にあたり、予備検討として、原料粉末の入手、加工及び輸送の実績を踏まえて、下記に示す調達ケースから現実的な調達ケースの絞り込みを行った。

(ケース A) 国外で原料を調達、調整、加工を行う場合。

(ケース B) 国外で原料を調達、調整、国内で加工を行う場合。

(ケース C) 国外で原料を調達、国内で調整、加工を行う場合。

(ケース D) 国内で原料を調達、調整、加工を行う場合。

予備検討の結果、現実的調達方法としては、ケース A 及び B が選定された。

ケース C、D が選定から外れる理由を以下にまとめる。

(ケース C) 国外で原料を調達、国内で調整、加工を行う場合の問題点：

国内で濃縮度の調整を行う場合は、六ヶ所濃縮工場が考えられる。海外から六ヶ所濃縮工場へ原料を輸送する際は専用船での輸送となるため、今回のような少量の輸送においては海上輸送費が割高となってしまう。また、濃縮価格についても、国内では国外事業者と比較して価格競争力が低く、割高となるため、費用の観点から現実的な調達ケースからは対象外となる。

(ケース D) 国内で原料を調達、調整、加工を行う場合の問題点：

国内では、原料を調達することはできない。ウラン燃料の在庫として国内電力会社名義の UO_2 粉末もしくは UF_6 の形状で保管されているものがあるが、5%濃縮度に近い今回の仕様を満たすものは存在しない。

以上から、ケース A 及び B の調達ケースに対して調達計画の策定を行った。

② 国外で原料を調達、調整、加工を行う場合の計画 (ケース A)

1) 調達先の検討

海外で調達するケースについての可否を調査するにあたって、4ヶ国について照会を行った。各加工メーカーが調達の可否を検討する際の決め手となる点は下記3点であった。

- ・燃料におけるウラン 235 の濃縮度
- ・発注数量
- ・競争入札案件

調査の結果、本濃縮度において検討可能との回答を得られたのは 1ヶ国の加工メーカーのみであった。以下に理由をまとめる。

(ウラン 235 の濃縮度) :

今回の燃料仕様は加圧水型軽水炉 (PWR) で使用されているものに近いため技術的に困難はないものの、ウラン 235 の濃縮度が 4.98% と高く、各加工メーカーの施設許認可制限 5% に近いため、製造誤差の範囲において 5% を超えるおそれがあることから、対応可能となるメーカー限定される。

(その他の理由) :

仮に濃縮度を若干下げる形でウラン 235 の濃縮度の問題点をクリアする場合でも、今回の発注数量は 500 本と少量であり、数万本単位で取引を行っている国外加工メーカーにおいては、本調達のために施設内の工程を組み直すことは非効率でコストが上昇などの理由から検討が難しい。

よって、全ての工程を海外で実施する調達計画の作成については、検討可能と回答が得られたサプライヤからの調達を想定して検討した。

2) 調達計画の策定

上記の海外加工メーカーの調査より検討可能と回答が得られたサプライヤからの調達を想定して調達内容の確認及び計画策定を作成した。

i) 原料ウランの調達

原料ウランの調達は可能である。契約の際に親会社の承認が必要となり約 2 ヶ月を要する。

ii) 原料ウランの調整並びに試験・検査等及び結果の報告

濃縮度は 4.98% のウランになるように調整可能である。契約後、濃縮ウラン粉末の調整期間は約 4 ヶ月を要する。

iii) 原料ウランによるペレット成型並びに試験・検査等及び結果の報告

濃縮ウランのペレット成型加工は、調達仕様に基づき設計された技術仕様に基づいて実施され、期間は技術仕様承認後、約 3 ヶ月を要する。

iv) 棒状燃料に用いる被覆管等の調達

被覆管材料及び端栓材料は、サプライヤで使用しているジルカロイ合金との回答であった。機構仕様はジルカロイ-4 であり、材料が異なっている。また、端栓長さなども機構仕様と若干異なっている。材料は、ジルカロイ-4 の被覆管を支給すれば製造は可能であり、端栓長さなども検討可能であるとの回答を得ている。

v) 棒状燃料の被覆管封入並びに試験・検査等及び結果の報告

棒状燃料の被覆管製造は調達仕様に基づき設計された技術仕様に基づいて行われる。期間は技術仕様承認後、約 6 ヶ月を要する。

vi) 輸送容器の調達

ペレット及びウラン粉末の輸送に使用される輸送容器と棒状燃料に使用される輸送容器は異なるものとなる。今回調達するウラン燃料は全て濃縮度が 5%未満であることから、国内加工メーカーが所有する軽水炉燃料用輸送容器の貸与されることを前提に検討を進めたところ、下記の様な容器が候補案となる。

・ペレット、ウラン粉末輸送容器

国内加工メーカーA 社が所有するペレット、ウラン粉末の輸送容器。輸送ルートで通過する諸外国のバリデーションを既に取得している。

・棒状燃料輸送容器

国内加工メーカーA 社が所有する燃料集合体の輸送容器が候補となる。今回の棒状燃料は、同社認可済の収納物と異なるため、容器の所有者である同社と協力して原子力規制庁への容器の補正申請を依頼する必要がある。申請から許認可を得るまでの期間は、現在国内の審査が再稼働に関連した案件が多数あるため、認可までの期間が読めない状況である。補正申請完了後に英文証明を取得し、輸送ルートで通過する諸外国でのバリデーション取得が必要となる。

vii) 納入場所への輸送業務等

・輸送形態

核分裂性輸送物は現行法規において輸送許容放射性物質等に該当しないことから、航空輸送を行うことはできず、調達する燃料の輸送は海上輸送及び陸上輸送にて行うこととなる。放射性物質の輸送を請け負う船会社は数年前と比較し減少傾向にあり、2011年の震災以降は貨物全体量の減少に拍車がかかっている状況である。

現状、定期コンテナ船における AF 型輸送物の日本への直行便の輸入航路は米国しかないため、米国以外の国から輸入を行う場合には、リスクを伴う他国での積替え輸送又は高額な専用船での輸送に絞られる。よって、現実的なルートとして、定期コンテナ船を使用する米国経由のルートによる検討を行った。

・輸送ルート

海外工場→(陸上輸送)→海外港から搬出→(コンテナ船)→米国→(コンテナ船)→東京→(陸上輸送)→JAEA

なお、現時点で輸送可能な船会社においても、航路や寄港地の変更が行われるため、輸送を行う前に再度検討を行う必要がある。

viii) 核物質防護、保障措置、計量管理、核燃料調達、輸送等に係る諸手続き

・核物質防護

今回の調達計画における棒状燃料、粉末燃料ならびにウランペレットは濃縮ウランに該当し、その濃縮度ならびに数量は「天然ウランの比率を超え 10%未満、10kg 以上」に該当するため、防護特定燃料物質の区分 III に該当する。

- ・ 保障措置

防護特定燃料物質の区分 III に定められた保障措置を実施する。

- ・ 計量管理

核燃料物質受払計画等報告書、核燃料物質輸入実施計画書、核燃料物質受入報告書の提出を行う。

- ・ 輸送区分

今回の調達計画における棒状燃料、粉末燃料並びにウランペレットは、A 型核分裂性輸送物（以下 AF 型輸送物という）に該当する。

主な手続きを表 8.2-5 に示す。

3) 調達計画の工程

燃料調達計画の工程案を表 8.2-6 に示す。

4) 調達費用の見積

上記ケース A の調達計画の見積について調査を実施した。

表 8.2-5 輸送手続き（海外加工調達方法）

手続の名称	手続先	手続名義者	書類作成者	手続実施者
【輸送物】				
核燃料輸送物設計承認申請	原子力規制庁 原子力規制部 安全規制管理官			輸送容器所有者
核燃料輸送物設計承認英文証明願	原子力規制庁 原子力規制部 安全規制管理官			輸送容器所有者
容器承認申請	原子力規制庁 原子力規制部 安全規制管理官			輸送容器所有者
車両運搬確認申請書	原子力規制庁 原子力規制部 安全規制管理官			輸送容器所有者
【海上輸送】				
放射性輸送物運送計画書安全確認申請	国土交通省 海事局 検査測度課（関東運輸局に提出）	船長		船会社
放射性物質等運送届	第二管区海上保安本部 航行安全課	船長		船会社
【港湾荷役】				
危険品・有害物事前連絡表	港湾労働災害防止協会	日通+NIC		日本通運
危険物荷役許可申請	東京海上保安部 航行安全課（京浜港長）			ターミナル運営会社
核燃料物質等の貯蔵取扱届出	深川消防署			ターミナル運営会社
危険貨物蔵置許可申請	深川消防署			ターミナル運営会社
入港届	東京税関本関/京浜港長(東京海上保安部長) 東京入国管理事務所/東京検疫所			船長(船会社)
【陸上輸送】				
固縛解析検討結果報告	国土交通省 自動車交通局 技術安全部 環境課			JAEA+輸送会社
核燃料物質等運搬届出書(東京/埼玉/千葉/茨城の4都県分)	警視庁生活安全部生活環境課(=東京都公安委員会)			JAEA+輸送会社
【核物質防護措置】				
取決めの締結確認申請	原子力規制庁 原子力防災課 核物質防護室			JAEA
核燃料物質について講じられる防護措置に関する確認申請	経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 原子力政策課			JAEA
核物質防護措置に関する計画書	本船船長			JAEA
【国際規制物質】				
核燃料物質受払計画等報告書	原子力規制庁 放射線対策・保障措置課 保障措置室			JAEA
核燃料物質輸入実施計画書	原子力規制庁 放射線対策・保障措置課 保障措置室			JAEA
国際規制物質使用届出書	原子力規制庁 放射線対策・保障措置課 保障措置室			JAEA
【保険】				
原子力輸送賠償責任保険	日本原子力保険プール			JAEA
原子力損害賠償補償契約	文部科学省 研究開発局 原子力課	JAEA	原子力保険プール	JAEA
貨物保険	損害保険会社			JAEA
【ライセンス】				
輸入承認申請（I/L申請）	経済産業省 貿易経済協力局 貿易管理部 貿易審査課			JAEA
【通関】				
他所蔵置許可申請	横浜税関 鹿島税関支署 日 立出張所			輸送会社
外国貨物運送申告	東京税関本関			輸送会社
輸入申告	横浜税関 鹿島税関支署 日 立出張所	JAEA		輸送会社

表 8.2-6 全体工程表 (海外加工調達方法)

	2015年度		2016年度		2017年度		2018年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
燃料仕様協議	■							
燃料調達締結	■	■						
UO2 粉末製造			■	■				
UO2粉末製造立会い検査				■				
UO2 ペレット 製造				■	■			
UO2ペレット 製造検査					■	■		
棒状燃料製造					■	■		
棒状燃料製造検査						■	■	
棒状燃料輸送容器関連承認手続			■	■	■	■		
UO2粉末容器の日本の輸出許可取得				■	■	■		
棒状燃料容器の日本の輸出許可取得				■	■	■		
空容器輸送(UO2粉末容器、棒状燃料容器)					■	■		
発送前検査						■	■	
海外での燃料輸出許可取得 *							■	■
日本での燃料輸入承認取得							■	■
燃料輸送							■	■

(注記)

* : この項目は許認可及び輸送など期間に不確定要因が含まれるものを示している。

③ 国外で原料を調達、調整、国内で加工を行う場合の計画（ケース B）

1) 調達先の検討

本調達方法は、国内の燃料加工メーカーが国内電力会社向けの成型加工を実施する際に行われる調達方法である。国内の加工メーカーも国外メーカーと同様に施設の許認可はウラン 235 濃縮度が 5%未満であり、今回の仕様の濃縮度では許認可上の濃縮度を超える可能性がある。ただし、濃縮度仕様を下げたものにおいては、今回の発注数量や競争入札となる条件において検討可能であるとの調査回答が得られた。このため、検討可能な国内加工メーカーからの調達を想定した計画を策定した。

2) 調達計画の策定

i) 調達計画検討時の前提条件

燃料の加工に際しては、国内加工メーカーが現在原子力規制委員会へ申請中である新規規制基準に対応した加工事業変更許可が取得されていることが前提となる。また、一部の工程に関しては、事業申請書の記載を変更する必要がある、現在申請中の加工事業変更許可申請、若しくは申請の許可後に変更申請をすることが必要となる。

したがって、国内の審査状況によっては、加工工程の遅延が生じること、適合性審査結果によっては、実施が不可となる可能性がある。また、輸送容器の補正申請に関しても、国内の審査状況によって工程の遅延など不確定因子が考えられる。

ii) 原料ウランの調達

原料ウランは系列の親会社から調達が可能であり、契約後約 6 ヶ月後に調達される。

iii) 原料ウランの調整並びに試験・検査等及び結果の報告

今回の燃料仕様であるウラン濃縮度 4.98%は、国内加工メーカーで取扱うことのできる 5%未満である。しかし、ウラン転換メーカーの製造後、濃縮度検査結果と国内加工メーカーの粉末受入時検査結果に差異が生じ、濃縮度 5%を超える可能性があるため、施設間での差異を考慮しウラン濃縮度を若干低下させた仕様となる。

濃縮ウラン粉末となるまでの期間は約 1 ヶ月を要する。

iv) 原料ウランによるペレット成型並びに試験・検査等及び結果の報告

濃縮ウランのペレット成型加工は調達仕様に基づいて行われ、期間は工程により前後するが約 1.5 ヶ月を要する。

v) 棒状燃料に用いる被覆管等の調達

被覆管の調達は、国内軽水炉用被覆管の製造実績がある国内メーカーより行う、燃料加工メーカーへの納入は、契約後 4 ヶ月を要する。

vi) 棒状燃料の被覆管封入並びに試験・検査等及び結果の報告

棒状燃料の製造から検査までの期間は約 1.5 ヶ月を要する。

vii) 輸送容器の調達

ペレット、ウラン粉末に使用される輸送容器と棒状燃料に使用される輸送容器は異なるものとなる。今回調達するウラン燃料は5%未満であるため、経済性及び効率性を考慮し、国内加工メーカーが所有する輸送容器が貸与されることを前提に検討した。

・ペレット、ウラン粉末輸送容器

同社が所有するペレット、ウラン粉末の輸送容器。輸送ルートで通過する諸外国のバリデーションを既に取り得している。

・棒状燃料輸送容器

同社が所有する燃料集合体の輸送容器。今回の棒状燃料は、同社許可済の燃料集合体と異なるため、容器の所有者である同社に原子力規制庁への容器の補正申請を依頼する必要がある。申請から許認可を得るまでの期間は、現在国内の審査が再稼働に関連した案件が多数あるため、認可までの期間が読めない状況である。

viii) 納入場所への輸送業務等

・輸送形態

核分裂性輸送物は現行法規において輸送許容放射性物質等に該当しないことから、航空輸送を行うことはできず、調達する燃料の輸送は海上輸送及び陸上輸送にて行うこととなる。放射性物質の輸送を請け負う船会社は数年前と比較し減少傾向にあり、2011年の震災以降は貨物全体量の減少に拍車がかかっている状況である。

現状、定期コンテナ船におけるAF型輸送物の日本への直行便の輸入航路は米国しかないため、米国以外の国から輸入を行う場合には、リスクを伴う他国での積替え輸送又は高額な専用船での輸送に絞られる。よって、現実的なルートとして、定期コンテナ船を使用する米国経由のルートを検討した。なお、一部は定期コンテナ船がないため、専用船による輸送となる結果であった。

・ウラン粉末輸送ルート

海外工場→(陸上輸送)→海外港から搬出→(専用船)→米国→(コンテナ船)→東京→(トレーラー輸送)→国内加工メーカー

・棒状燃料輸送ルート

国内加工メーカー→(トレーラー輸送)→JAEA

ix) 核物質防護、保障措置、計量管理、核燃料調達、輸送等に係る諸手続き

・核物質防護

今回の調達計画における棒状燃料、粉末燃料ならびにウランペレットは濃縮ウランに該当し、その濃縮度ならびに数量は「天然ウランの比率を超え10%未満、10kg以上」に該当するため、防護特定燃料物質の区分Ⅲに該当する。

・保障措置

防護特定燃料物質の区分Ⅲに定められた保障措置を実施する。

・計量管理

核燃料物質受払計画等報告書、核燃料物質輸入実施計画書、核燃料物質受入報告書の提出を行う。

・輸送区分

今回の調達計画における棒状燃料、粉末燃料並びにウランペレットは、A型核分裂性輸送物（以下AF型輸送物という）に該当する。

主な手続きを表8.2-7に示す。

3) 調達計画の工程

燃料調達計画の工程案を表8.2-8に示す。

4) 調達費用の見積り

上記ケースBの調達計画の見積についても調査を実施した。

表 8.2-7 輸送手続き（国内加工調達方法）

手続の名称	手続先	手続名義者	書類作成者	手続実施者
【輸送物】				
核燃料輸送物設計承認申請	原子力規制庁 原子力規制部 安全規制管理官			輸送容器所有者
核燃料輸送物設計承認英文証明願	原子力規制庁 原子力規制部 安全規制管理官			輸送容器所有者
容器承認申請	原子力規制庁 原子力規制部 安全規制管理官			輸送容器所有者
車両運搬確認申請書	原子力規制庁 原子力規制部 安全規制管理官			輸送容器所有者
【海上輸送】				
放射性輸送物運送計画書安全確認申請	国土交通省 海事局 検査測度課（関東運輸局に提出）		船長	船会社
放射性物質等運送届	第三管区海上保安本部 航行安全課		船長	船会社
【港湾荷役】				
危険品・有害物事前連絡表	港湾労働災害防止協会			輸送会社
危険物荷役許可申請	東京海上保安部 航行安全課（京浜港長）			ターミナル運営会社
核燃料物質等の貯蔵取扱届出	深川消防署			ターミナル運営会社
危険貨物蔵置許可申請	深川消防署			ターミナル運営会社
入港届	東京税関本関/京浜港長（東京海上保安部長） 東京入国管理事務所/東京検疫所			船長（船会社）
【陸上輸送】				
固縛解析検討結果報告	国土交通省 自動車交通局 技術安全部 環境課			JAEA + 輸送会社
核燃料物質等運搬届出書（東京/埼玉/千葉/茨城の4都県分）	警視庁生活安全部生活環境課（=東京都公安委員会）			JAEA + 輸送会社
【核物質防護措置】				
取決めの締結確認申請	原子力規制庁 原子力防災課 核物質防護室			JAEA
核燃料物質について講じられる防護措置に関する確認申請	経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 原子力政策課			JAEA
核物質防護措置に関する計画書	本船船長			JAEA
【国際規制物質】				
核燃料物質受払計画等報告書	原子力規制庁 放射線対策・保障措置課 保障措置室			JAEA
核燃料物質輸入実施計画書	原子力規制庁 放射線対策・保障措置課 保障措置室			JAEA
国際規制物質使用届出書	原子力規制庁 放射線対策・保障措置課 保障措置室			JAEA
【保険】				
原子力輸送賠償責任保険	日本原子力保険プール			JAEA
原子力損害賠償補償契約	文部科学省 研究開発局 原子力課	JAEA	原子力保険プール	JAEA
貨物保険	損害保険会社			JAEA
【ライセンス】				
輸入承認申請（I/L申請）	経済産業省 貿易経済協力局 貿易管理部 貿易審査課	JAEA	業者	業者
【通関】				
他所蔵置許可申請	横浜税関 鹿島税関支署 日立出張所			輸送会社
外国貨物運送申告	東京税関本関			輸送会社
輸入申告	横浜税関 鹿島税関支署 日立出張所	JAEA		輸送会社

表 8.2-8 全体工程表（国内加工調達方法）

	2015年度		2016年度		2017年度		2018年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
加工事業認可※	[Timeline bar from start of 2015 to start of 2017]							
粉末調達締結		[Timeline bar]						
粉末調達			[Timeline bar]					
UO2 粉末濃縮・製造				[Timeline bar]				
UO2粉末製造立会い検査(海外)					[Timeline bar]			
成型加工契約						[Timeline bar]		
被覆管調達契約						[Timeline bar]		
海外輸送準備					[Timeline bar]			
燃料輸送関連許可手続き					[Timeline bar]			
固縛解析					[Timeline bar]			
空容器輸送(UO2 粉末容器)					[Timeline bar]			
UO2粉末輸送					[Timeline bar]			
成型加工準備					[Timeline bar]			
UO2 ペレット 製造						[Timeline bar]		
UO2ペレット 製造検査							[Timeline bar]	
棒状燃料製造							[Timeline bar]	
棒状燃料製造検査							[Timeline bar]	
国内での燃料輸送							[Timeline bar]	
棒状燃料輸送容器の設計承認取得※				[Timeline bar]				

(注記)

※：この項目は許認可及び輸送など期間に不確定要因が含まれるものを示している。

④ 調達先の検討

STACY 更新炉の臨界実験で使用する棒状燃料は、最大で 900 本を予定しており既存の棒状燃料 400 本と同一仕様で 500 本の調達を検討した。本調査で試験用の少数本の燃料調達が検討可能であるとの結果が得られた海外加工メーカー（ケース A）及び、国内加工メーカー（ケース B）について、燃料仕様、調達に必要な許認可取得の有無、輸送による費用など、調査結果で判明した主な内容を下記にまとめる。

1) 海外加工メーカー

- ・ウラン濃縮度は、STACY 仕様の 4.98wt% で製造可能
- ・その他の仕様として、被覆管及び端栓の材料は海外加工メーカーが使用しているジルカロイ合金であり、機構仕様のジルカロイ-4 と異なる。
- ・被覆管などを指定する場合は、JAEA からジルカロイ-4 を支給すれば製造可能である。
- ・許認可取得：国内加工メーカー所有の輸送容器を貸与した場合でも、STACY 棒状燃料使用のために国内変更認可及び海外バリデーション取得が必要となる。
- ・燃料輸送：海外加工メーカーから輸送ルートは定期コンテナ船を使用でき、輸送コストを抑えられる。

2) 国内加工メーカー

- ・ウラン濃縮度が上限の 5wt% を超えないよう、若干低下させた仕様であれば可能である。
- ・その他の仕様として、被覆管及び端栓の材料は、ジルカロイ-4 で調達が可能である。
- ・許認可関連：国内加工メーカーでは、新規規制基準への適合認可取得が必要であり、更に STACY 棒状燃料の製造については、その燃料のために一部変更申請及び認可が必要となる。認可取得まで約 2 年を想定しているが、遅れた場合は調達期間が延びる可能性がある。
- ・許認可取得：新規規制基準の事業許可、STACY 棒状燃料のための一部変更許可、輸送容器について、STACY 棒状燃料使用のための国内変更認可が必要。
- ・原料ウランの調達は、系列親会社の海外工場からとなる。
- ・燃料輸送：原料ウランの輸送ルートの一部で、定期コンテナ船による搬送手段がないため、一部ルートで専用船による搬送が必要となり、コストがかかる。
- ・海外加工メーカーと比較した場合、現時点では調達費用が高くなる。

以上を踏まえると、海外加工メーカーからの調達計画の方が、工程への不確定要因が少なく、調達コストの点から選定される候補と考えられる。

また、調査の結果より、新規に調達する 500 本は既存 400 本と若干仕様が異なる又は、同一仕様で製造しても製造ロットが異なるため公差の範囲内ではばらつきが生じる。臨界実験の精度の点からは、900 本の棒状燃料はできる限りばらつきの少ない同一製造ロットの製品であることが望ましく、既存の棒状燃料の仕様に縛られずに新規に 900 本を調達した方がよりメリットがあるとも考えられる。よって、調達先を選定後、調達条件を見直した場合に、工程及び調達コストなどへの影響を確認しながら、調達契約の詳細を詰めていく予定である。

8.2.3 まとめ

STACY 更新炉の臨界実験で使用する棒状燃料 500 本（既存の STACY 棒状燃料と同一仕様）及びデブリ模擬体の原料ウラン調達に関して国内外を含めて調査を行った。調査の結果、ウラン濃縮度 4.98 wt% を満足する調達先は海外加工メーカー 1 社であり、国内加工メーカーでは濃縮度を若干低下させる必要があることがわかった。また、海外加工メーカーでは、メーカーが使用している被覆管材料がジルカロイ-4 とは異なるため、ジルカロイ-4 を使用する場合は別途支給することが必要であることがわかった。調達計画として、製品納入までに必要な許認可の有無、並びに、燃料輸送ルートの検討及び費用などを調査した。両調達計画を比較すると、許認可取得に関連する工程への不確定要因や調達コストの点から海外加工メーカーからの調達方法が有利であると考えられる。

また、本年度の調査に際して、既存燃料と同一仕様を想定して検討したが、新規に作成する棒状燃料は全く同一の製品ではなく、既存 400 本とは若干の差異が生じることは避けられない。STACY 更新炉の臨界実験の実験精度の観点からは、900 本の棒状燃料はできる限りばらつきの少ない製品（同一製造ロットなど）であることが望ましいため、調達先を選定後、既存の棒状燃料の仕様に縛られずに新規に 900 本を調達するケースなども含めて、工程及び調達コストなどへの影響を確認しながら、調達契約の詳細を詰めていく予定である。

第9章 モックアップ装置を用いた STACY 更新炉の設計検証

本章では、「モックアップ装置を用いた STACY 更新炉の設計検証」として、9.1 節「安全板加振試験」、9.2 節「水位計測試験装置」について報告する。

9.1 安全板加振試験

9.1.1 概要

(1) 目的

STACY 更新炉の製作に先立ち、原子炉の異常時に緊急停止させるための重要な装置である安全板装置の耐震性能の検証を目的として、安全板加振試験により以下の確認及び評価を行う。

- ① STACY の耐震性能として、地震時に安全板が所定時間内（1.5 s 以内）に落下することを確認する。
- ② 安全板が所定の機能を有する限界相対変位（評価上の許容値）を把握する。なお、限界まで加振できない場合は、所定の機能を有する最大相対変位データを取得する。

STACY 更新炉の許認可では、地震時に安全板が所定時間内に挿入されること等、動的機能が維持されることを評価する必要がある。また、安全板の落下性能に関する許認可上の対応としては、耐震解析に基づく応答加速度や安全板部と格子板部の相対変位による評価が考えられる。このため、本試験は、許認可での耐震解析において動的機能維持を評価するための応答加速度や相対変位量に関するデータを取得する。

(2) 概要

安全板装置は、STACY 更新炉が異常状態となった場合に原子炉を緊急停止（スクラム）させるための装置であり、自然災害を含めた緊急時に正常に機能しなければならない。想定される大地震（震度 6 弱）においても安全板装置の性能が失われないことを確認するため安全板加振試験を行う。

安全板装置は、主要構造として安全板と安全板駆動装置で構成され、炉心タンク上部に設置する。安全板は、中性子吸収材であるカドミウムをステンレスの薄板で被覆した板状のものであり、安全板駆動装置は、安全板を炉心タンクの上部につり上げるための装置である。安全板は、原子炉の運転中、安全板駆動装置の電磁石吸着により炉心タンク上部につり上げられ、待機状態となる。その後、何らかの事象により原子炉が異常状態となった場合に、安全板駆動装置の電磁石電源が切断されることで安全板が炉心タンク内に自由落下し、原子炉を停止させる。

安全板加振試験を実施するにあたり、実機と同規模の安全板加振試験装置を製作し、試験装置に模擬地震波により加振を行い、地震発生中の安全板装置の性能（安全板が所定時間内に落下）を確認した。試験装置の加振には、防災科学技術研究所（つくば市）の大型耐震実験施設の振動台を利用した。

(3) 実施内容

実施内容は、以下のとおりである。

① 安全板加振試験装置の製作

主に以下の機器から構成される安全板加振試験装置を製作した。

- ・安全板駆動装置
- ・炉心タンク
- ・格子板ユニット
- ・模擬燃料ピン及びガイドピン
- ・架台
- ・操作盤

② 安全板加振試験の実施

試験計画を立案し、安全板加振試験を実施した。本加振試験での試験実施項目と、各試験で取得したデータは以下のとおりである。下記内容について表 9.1.1-1 に示す。

1) 振動特性試験

本試験では、正弦波掃引により試験装置の固有振動数及び変形モードを確認した。本結果に基づき、地震波加振試験で使用する正弦波の入力振動数及び安全板落下が厳しくなる変形モードを選定した。

2) 地震波特性試験

本試験では、実機想定加速度レベル及び想定を超えた加速度レベルの模擬地震波での加振により、試験装置の振動挙動を確認した。本結果に基づき、炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位が大きくなる時刻 3 点を選定し、地震波加振試験での安全板の落下時刻を設定した。

3) 地震波加振試験

本試験では、模擬地震波加振中にスクラム条件 (25 gal) 時、加速度ピーク時及び相対変位ピーク時に安全板を落下させ、所定時間内 (1.5 s 以内) に安全板が落下することを確認した (地震波加振試験)。また、必要に応じ、正弦波加振を行い、炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位による落下時間への影響を把握した (限界加振試験)。

4) 励磁 OFF 確認試験

安全板は電磁石 (電磁ホルダ) により炉心上部に保持される。電磁ホルダは、「消磁」 (消磁電流により残留吸着力を低減) により保持を解除する。一方、実機においては、外部電源喪失等の異常時に安全板が落下できるように、電源断により安全板を落下させる必要がある。

この要求を満足することを確認するために、アマチュア部に非磁性体 (SUS304) を挿入した体系に変更して落下時間を計測した。なお、上記 3) の地震波加振試験では、加振時の安全板の落下時間の計測が目的のため、通常の「消磁」により安全板を落下させた。

5) 保持状態確認試験

安全板は電源断により落下する必要があるため、残留吸着力の影響を低減するには、保持力が低い方が有利である。しかし、保持力を低下させた場合には、落下信号とは無関係に落下する可能性がある。安全上は、いつ落下しても問題はないが、実験中に意味なく落下することは実験データの取得の点から望ましくない。このため、本試験では、励磁 OFF 確認試験とは逆に、電磁ホルダによりどの程度の地震まで保持力が維持できるかを確認した。

③ 加振試験結果の整理・評価

安全板加振試験の結果について、試験結果の整理を行うとともに、実機性能等について評価を行った。本加振試験の全体評価フローを図 9.1.1-1 に示す。

表 9.1.1-1 試験実施項目及び取得データ

No.	試験の種類	目的	取得データ (注1)	備考
1	振動特性試験	①正弦波掃引により試験装置の固有振動数及び変形モードを確認する。 ②地震波加振試験で使用する正弦波の入力振動数及び安全板落下に厳しい変形モードを選定する。	①固有振動数 (強軸方向) ②固有振動数 (弱軸方向) ③試験装置の変形モード	
2	地震波特性試験	①模擬地震波での加振により、模擬地震波に対する試験装置の振動挙動を確認する。 ②炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位が大きくなる時刻 3 点を選定し、地震波加振試験での安全板の落下時刻を設定する。	①安全板駆動装置の応答加速度 ②試験装置各部の応答加速度 ③炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位 -炉心タンクの変位 -安全板駆動装置の変位	
3	地震波加振試験	①模擬地震波での加振により、スクラム条件時、加速度ピーク時及び相対変位ピーク時に安全板を落下させ、所定時間内 (1.5 s 以内) に安全板が落下することを確認する。 ②必要に応じ、正弦波加振を行い、落下時間に対する炉心タンクと安全板駆動装置の限界相対変位等のデータを取得する。	①安全板駆動装置の応答加速度 ②試験装置各部の応答加速度 ③炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位 -炉心タンクの変位 -安全板駆動装置の変位 ④安全板の落下時間 -消磁～下限センサ ON -上限センサ OFF～下限センサ ON	
4	励磁 OFF 確認試験	①実機要求である電源断により、安全板が確実に落下することを確認する。 ②電源断での安全板の落下に必要な構造対応に関するデータを取得する。	①安全板駆動装置の応答加速度 ②試験装置各部の応答加速度 ③炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位 -炉心タンクの変位 -安全板駆動装置の変位 ④安全板の落下時間 -電源断～下限センサ ON -上限センサ OFF～下限センサ ON	
5	保持状態確認試験	①電磁ホルダによりどの程度の地震まで保持力が維持できるかを確認する。 (安全上の要求はなく、設計データとしてのデータ取得)	①安全板駆動装置の応答加速度 ②試験装置各部の応答加速度 ③炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位 -炉心タンクの変位 -安全板駆動装置の変位	

注 1) 加振試験データとして、1)応答加速度、2)応答変位、3)ひずみ、4)落下時間を取得するが、そのうち、性能評価に必要と考えられる項目のみ記載した。

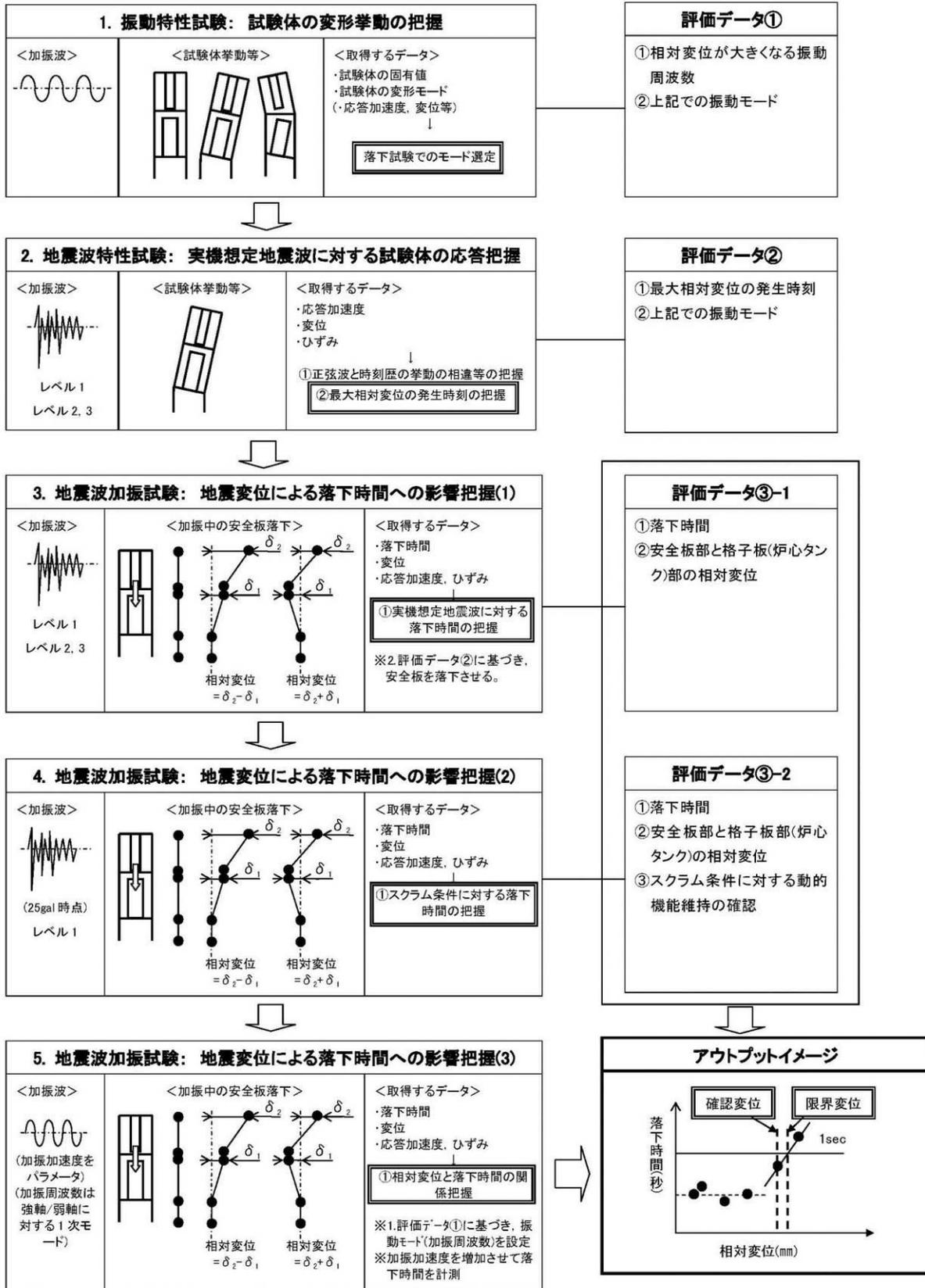


図 9.1.1-1 安全板加振試験評価フロー

(4) 実施工程

実施工程の概要を表 9.1.1-2 に示す。また、安全板加振試験は、試験期間を 2 回に分けて実施した。安全板加振試験の工程（実績）を表 9.1.1-3 に示す。

- ・ 第 1 回加振試験

平成 26 年 11 月 4 日（火）～11 月 28 日（金）

（試験期間：18 日間、加振日数：11 日）

- ・ 第 2 回加振試験

平成 27 年 1 月 19 日（月）～ 2 月 6 日（金）

（試験期間：15 日間、加振日数：9 日）

表 9.1.1.1-2 全体工程

	2014 年												2015 年		
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月				
試験計画及び試験装置の設計															
試験体製作															
試験準備															
加振試験															
評価・まとめ															

表 9.1.1-3 第 1 回加振試験 試験工程表 (実績) (1/2)

	試験条件	2014年																														備考
		11月																														
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	歴日			
		火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	曜日			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	試験日数		
1	試験準備 ・試験体据付け、配線等 ・センサー設置、校正等																															
2	試験の実施																															
	・加振試験 (弱軸方向) ①加振方向:弱軸 ②水位:空、満水又は50cm ③加振加速度:地震波、正弦波 ④落下時刻:7点																													▼:加振実施日		
	・段取り替え (弱軸→強軸)																															
2	・加振試験 (強軸方向) ①加振方向:強軸 ②水位:空、満水又は50cm ③加振加速度:地震波、正弦波 ④落下時刻:7点																													▼:加振実施日		
	・段取り替え (強軸→弱軸)																															
3	片付け																															

表 9.1.1-3 第 2 回加振試験 試験工程表 (実績) (2/2)

	試験条件	2015年															備考												
		1月										2月																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2		3	4	5	6	歴日							
		月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月		火	水	木	金	曜日							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	試験日数														
1	試験準備 ・試験体据付け、配線等 ・センサー設置、チェック等																												
2	試験の実施																												
	・加振試験 (強軸方向) ①加振方向:強軸 ②水位:空、50cm、満水 ③加振加速度:地震波、正弦波 ④落下時刻:6点																												▼:加振実施日
	・段取り替え (強軸→弱軸)																												
2	・加振試験 (弱軸方向) ①加振方向:弱軸 ②水位:空、50cm、満水 ③加振加速度:地震波、正弦波 ④落下時刻:5点																												▼:加振実施日
	・段取り替え (弱軸→強軸)																												
3	片付け																												

(5) 実施体制

安全板加振試験は、原子力機構監督の下、富士電機株式会社が供試体の製作及び振動台への設置、データの取得を行った。また、防災科学技術研究所 大型耐震実験施設の振動台は、原子力機構が契約（施設貸与）を行い利用した。試験体制図を図 9.1.1-2 に示す。

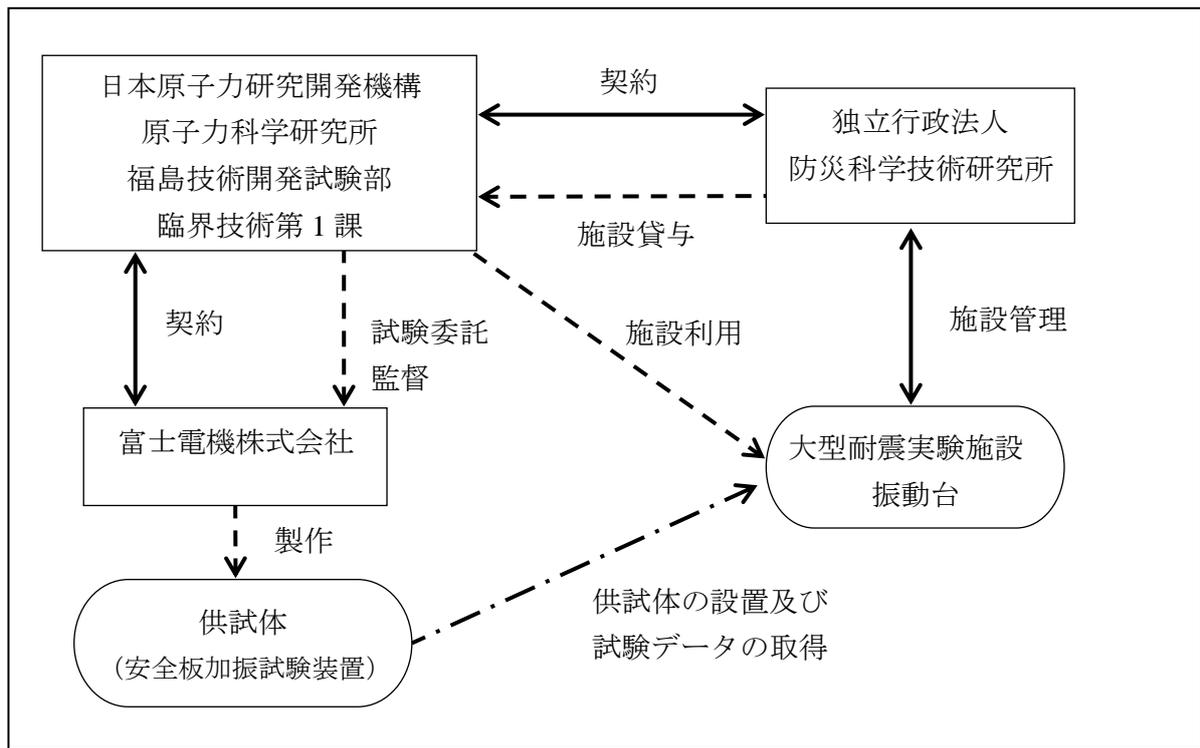


図 9.1.1-2 試験体制図

9.1.2 安全板加振試験装置の製作及び試験設備

安全板加振試験装置について、製作仕様を以下に示す。

(1) 安全板加振試験装置の製作

① 加振試験装置の主要仕様と構造

加振試験装置の主要仕様と構造は、以下のとおりである。

1) 試験装置架台

i) 設計方針

試験装置架台の設計方針は、以下のとおりである。

- ・安全板駆動装置の支持架台は、炉心タンクに対して安全板駆動装置の相対変位が得られるように、試験装置架台本体よりも剛性を下げた。また、安全板駆動装置の強軸方向（試験装置の剛性が高い(変位し難い) 方向、加振方向に対して安全板面が平行）と弱軸方向（試験装置の剛性が低い(変位し易い) 方向、加振方向に対して安全板面が垂直）で、独立した変形モードが得られるように、強軸と弱軸で剛性の異なる溝型鋼を使用することとした。
- ・炉心タンクを設置する下部架台は、極力剛性が高くなるようにし、安全板駆動装置部に変位が生じるようにした。
- ・炉心タンクは試験装置架台と底部のみで取合う構造とし、安全板駆動装置と炉心タンクが独立した挙動となるようにした。

ii) 主要仕様

試験装置架台の主要仕様は、以下のとおりである。試験装置架台の構造図を図 9.1.2-1 に示す。

・試験装置架台

- ・材質 : 炭素鋼 (SS400)
- ・主要構成部材 : H200×200×8×12、H150×150×7×10、
H100×100×6×8、L75×75×9

・安全板駆動装置支持架台

- ・材質 : 炭素鋼 (SS400)
- ・主要構成部材 : C75×40×5

2) 炉心タンク

i) 設計方針

炉心タンクの設計方針は、以下のとおりである。

- ・炉心タンクは、スロッシング等による安全板の落下時間への影響等を考慮して、実機同等の寸法とした。ただし、材質は炭素鋼（実機はステンレス鋼）とした。

- ・安全板の落下に対し定盤ユニットの影響はないため、試験装置では合理化したが、格子板ユニットの支持が実機同様となるように構造を設定した（炉心タンク底面に振れ止め防止のための振れ止めピンを設置）。
- ・炉心タンクと格子板ユニットの接続は、実機同様の条件となるように設定した（支持方法が同様となるようにし、構造は合理化）。

ii) 主要仕様

炉心タンクの主要仕様は、以下のとおりである。炉心タンクの構造図を図 9.1.2-2 に示す。

- ・主要寸法 : 内径 1800 mm、高さ 1847 mm、板厚 9 mm
- ・材質 : 炭素鋼 (SS400)
- ・排水配管サイズ : 40A (排水時間 : 約 2 時間程度)

3) 格子板ユニット、ガイドピン及び模擬燃料ピン

i) 設計方針

格子板ユニット、ガイドピン及び模擬燃料ピンの設計方針は、以下のとおりである。

- ・格子板ユニットは、安全板落下に必要な範囲のみ模擬するものとした。
- ・ガイドピン及び模擬燃料ピンの配列ピッチは、安全板の落下時間への影響があるため、実機構造を踏襲した。また、格子板（上段、中段、下段）の配置間隔は実機構造を踏襲した。
- ・格子板ユニットの上端及び下端の支持は、実機同等となるようにした。
- ・模擬燃料ピンは、内部に鉛を設置して、燃料ピン自体の剛性を実機程度としつつ、極力、実機重量に近づけることとした。

ii) 主要仕様

格子板ユニット、ガイドピン及び模擬燃料ピンの主要仕様は、以下のとおりである。

格子板ユニット、ガイドピン及び模擬燃料ピンの構造図を図 9.1.2-3 に示す。

・格子板ユニット

- 材質 : ステンレス鋼 (SUS304)
- スリット幅 : 3.7 mm
- 格子間ピッチ : 12.7 mm
- 設置数 : 3 枚 (上段、中段、下段)

・ガイドピン

- 主要寸法 : $\phi 10.8$ mm×長さ約 1500 mm
- 材質 : ステンレス鋼 (SUS304)
- 本数 : 4 本

・模擬燃料ピン

- 主要寸法 : $\phi 9.5$ mm×長さ 1529 mm
- 材質 : ステンレス鋼 (SUS304) (内部に鉛を設置)
- 本数 : 30 本 (15 本×2 列)

4) 安全板駆動装置

i) 設計方針

安全板及び安全板駆動装置の設計方針は、以下のとおりである。

- ・安全板及び安全板駆動装置は、実機同様の構造とするものとした。
- ・本試験において必要な計測項目は以下のとおりであり、これらを計測できるセンサを配置した。

電磁ホルダ上限/下限センサ

安全板上限/下限センサ

ii) 主要仕様

安全板及び安全板駆動装置の主要仕様は、以下のとおりである。安全板及び安全板駆動装置の構造図を図 9.1.2-4 に示す。

・安全板

外形寸法 : 幅 270 mm×長さ 1730 mm

厚さ : 1.5 mm

(被覆材:t0.5 mm×2 枚、カドミウム:0.5 mm×1 枚の 3 層構造)

材質 :

－被覆材 : SUS304 (幅 270 mm×長さ 1730 mm×厚さ 0.5 mm)

－Cd 収納プレート : SUS304 (幅 270 mm×長さ 1730 mm×厚さ 0.5 mm)

－中性子吸収材 : カドミウム (幅 250 mm×長さ 360 mm×厚さ 0.5 mm)

・安全板駆動装置

ガイドレール、ガイドフレーム

材質 : アルミニウム合金等

電磁ホルダ

型式 : (本体) KE-6B (カネテック製)

(整流器) RH-M105B (カネテック製)

寸法 : 外径φ60 mm、高さ 60 mm

吸着力 : 最大 1080 N

緩衝材 : ショックアブソーバ

型式 : WS-M1.0 (エアプレジョン製)

ストローク : 約 25 mm

5) 昇降駆動装置

i) 設計方針

昇降駆動装置の設計方針は、以下のとおりである。

- ・昇降駆動装置については、実機構造を踏襲するものとした。

ii) 主要仕様

昇降駆動装置の主要仕様は、以下のとおりである。昇降駆動装置の構造図を図 9.1.2-5 に示す。

電磁石及び安全板の昇降速度 : 約 40 mm/s (ワイヤーロープ巻上げ)

昇降ストローク : 1400 mm 以上 (最下限までのストローク)

6) 計測架台

i) 設計方針

計測架台の設計方針は、以下のとおりである。

- ・加振試験時の計測について、変位測定の不動点として計測架台を設置した。計測架台は、試験装置架台に対し十分な剛性を有する構造とした。
- ・変位計測位置は、安全板上部（試験架台）、安全板中部、安全板下部の3点及び炉心タンク上部/下部の計5点とし、各位置に変位計を設置できる構造とした。
- ・使用する変位計は、焦点距離 500 mm (+500、-250 mm) であるため、計測架台からアーム (750 mm) を出して変位計を設置した。

ii) 主要仕様

計測架台の主要仕様は、以下のとおりである。計測架台の構造図を図 9.1.2-6 に示す。

材質	: 炭素鋼 (SS400)
主要構成部材	: H250×250×9×14、□250×250×12

7) 操作盤

操作盤については、実機を考慮して加振試験で必要となる機能を持たせて設計することとした。図 9.1.2.1-7 に運転フロー、図 9.1.2-8 に配線系統図、図 9.1.2-9 に展開接続図を示す。また、図 9.1.2-10 に盤面図を示す。

② 試験装置の製作

製作した加振試験装置を、図 9.1.2-11～17 に示す。

安全板については、過去の安全板落下耐久試験で使用した安全板を使用している。(STACY 更新炉の供用期間中に発生する地震に対して落下性能の維持を想定するため)

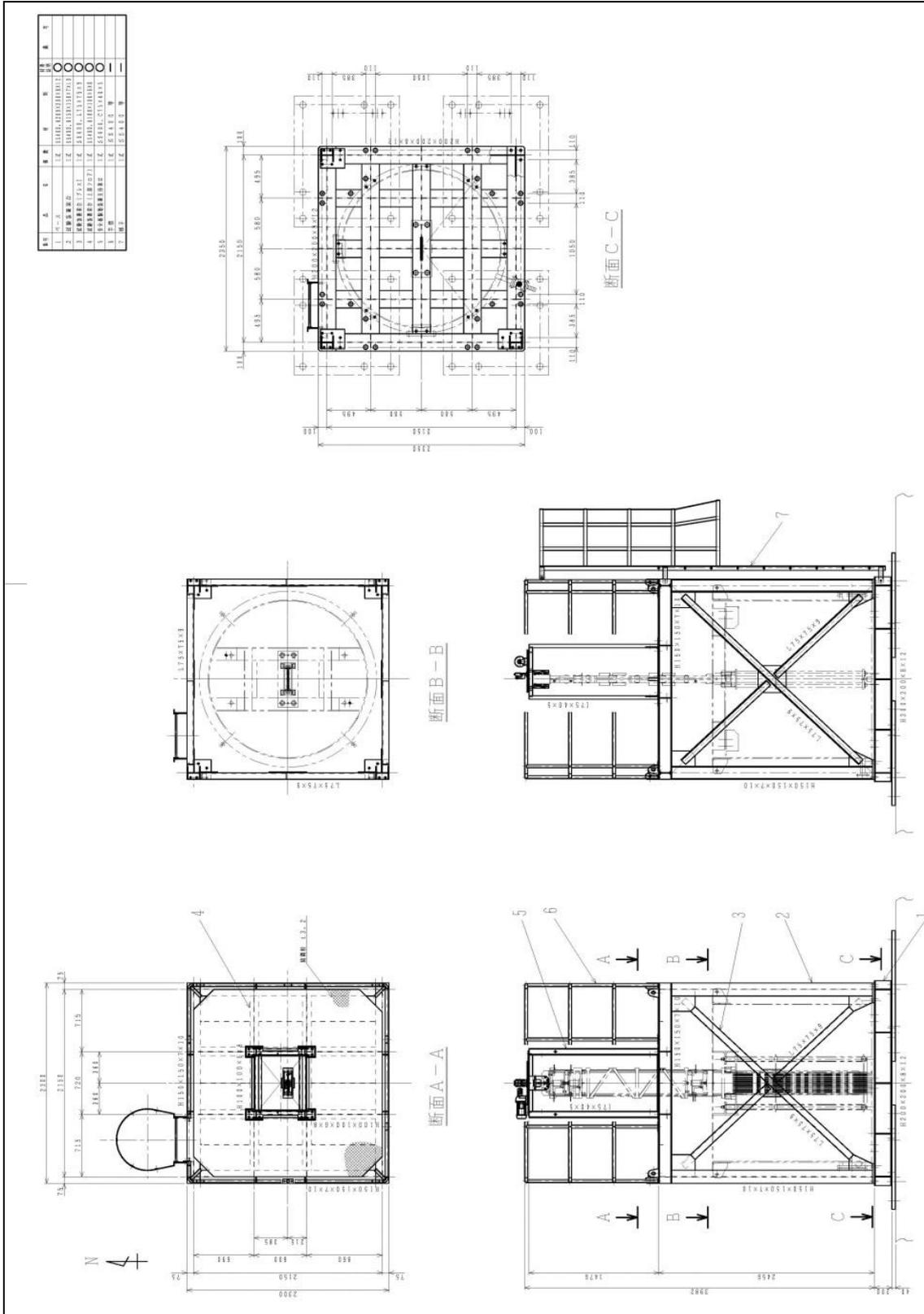


図 9.1.2-1 試験装置架台の構造図

材料	規格	数量	単位	備考
1. 鋼板	1. 20200	1	張	
2. 鋼管	2. 20200	1	本	
3. 鋼管	3. 20200	1	本	
4. 鋼管	4. 20200	1	本	
5. 鋼管	5. 20200	1	本	
6. 鋼管	6. 20200	1	本	
7. 鋼管	7. 20200	1	本	
8. 鋼管	8. 20200	1	本	
9. 鋼管	9. 20200	1	本	
10. 鋼管	10. 20200	1	本	
11. 鋼管	11. 20200	1	本	
12. 鋼管	12. 20200	1	本	
13. 鋼管	13. 20200	1	本	
14. 鋼管	14. 20200	1	本	
15. 鋼管	15. 20200	1	本	
16. 鋼管	16. 20200	1	本	
17. 鋼管	17. 20200	1	本	
18. 鋼管	18. 20200	1	本	
19. 鋼管	19. 20200	1	本	
20. 鋼管	20. 20200	1	本	
21. 鋼管	21. 20200	1	本	
22. 鋼管	22. 20200	1	本	
23. 鋼管	23. 20200	1	本	
24. 鋼管	24. 20200	1	本	
25. 鋼管	25. 20200	1	本	
26. 鋼管	26. 20200	1	本	
27. 鋼管	27. 20200	1	本	
28. 鋼管	28. 20200	1	本	
29. 鋼管	29. 20200	1	本	
30. 鋼管	30. 20200	1	本	
31. 鋼管	31. 20200	1	本	
32. 鋼管	32. 20200	1	本	
33. 鋼管	33. 20200	1	本	
34. 鋼管	34. 20200	1	本	
35. 鋼管	35. 20200	1	本	
36. 鋼管	36. 20200	1	本	
37. 鋼管	37. 20200	1	本	
38. 鋼管	38. 20200	1	本	
39. 鋼管	39. 20200	1	本	
40. 鋼管	40. 20200	1	本	
41. 鋼管	41. 20200	1	本	
42. 鋼管	42. 20200	1	本	
43. 鋼管	43. 20200	1	本	
44. 鋼管	44. 20200	1	本	
45. 鋼管	45. 20200	1	本	
46. 鋼管	46. 20200	1	本	
47. 鋼管	47. 20200	1	本	
48. 鋼管	48. 20200	1	本	
49. 鋼管	49. 20200	1	本	
50. 鋼管	50. 20200	1	本	
51. 鋼管	51. 20200	1	本	
52. 鋼管	52. 20200	1	本	
53. 鋼管	53. 20200	1	本	
54. 鋼管	54. 20200	1	本	
55. 鋼管	55. 20200	1	本	
56. 鋼管	56. 20200	1	本	
57. 鋼管	57. 20200	1	本	
58. 鋼管	58. 20200	1	本	
59. 鋼管	59. 20200	1	本	
60. 鋼管	60. 20200	1	本	
61. 鋼管	61. 20200	1	本	
62. 鋼管	62. 20200	1	本	
63. 鋼管	63. 20200	1	本	
64. 鋼管	64. 20200	1	本	
65. 鋼管	65. 20200	1	本	
66. 鋼管	66. 20200	1	本	
67. 鋼管	67. 20200	1	本	
68. 鋼管	68. 20200	1	本	
69. 鋼管	69. 20200	1	本	
70. 鋼管	70. 20200	1	本	
71. 鋼管	71. 20200	1	本	
72. 鋼管	72. 20200	1	本	
73. 鋼管	73. 20200	1	本	
74. 鋼管	74. 20200	1	本	
75. 鋼管	75. 20200	1	本	
76. 鋼管	76. 20200	1	本	
77. 鋼管	77. 20200	1	本	
78. 鋼管	78. 20200	1	本	
79. 鋼管	79. 20200	1	本	
80. 鋼管	80. 20200	1	本	
81. 鋼管	81. 20200	1	本	
82. 鋼管	82. 20200	1	本	
83. 鋼管	83. 20200	1	本	
84. 鋼管	84. 20200	1	本	
85. 鋼管	85. 20200	1	本	
86. 鋼管	86. 20200	1	本	
87. 鋼管	87. 20200	1	本	
88. 鋼管	88. 20200	1	本	
89. 鋼管	89. 20200	1	本	
90. 鋼管	90. 20200	1	本	
91. 鋼管	91. 20200	1	本	
92. 鋼管	92. 20200	1	本	
93. 鋼管	93. 20200	1	本	
94. 鋼管	94. 20200	1	本	
95. 鋼管	95. 20200	1	本	
96. 鋼管	96. 20200	1	本	
97. 鋼管	97. 20200	1	本	
98. 鋼管	98. 20200	1	本	
99. 鋼管	99. 20200	1	本	
100. 鋼管	100. 20200	1	本	

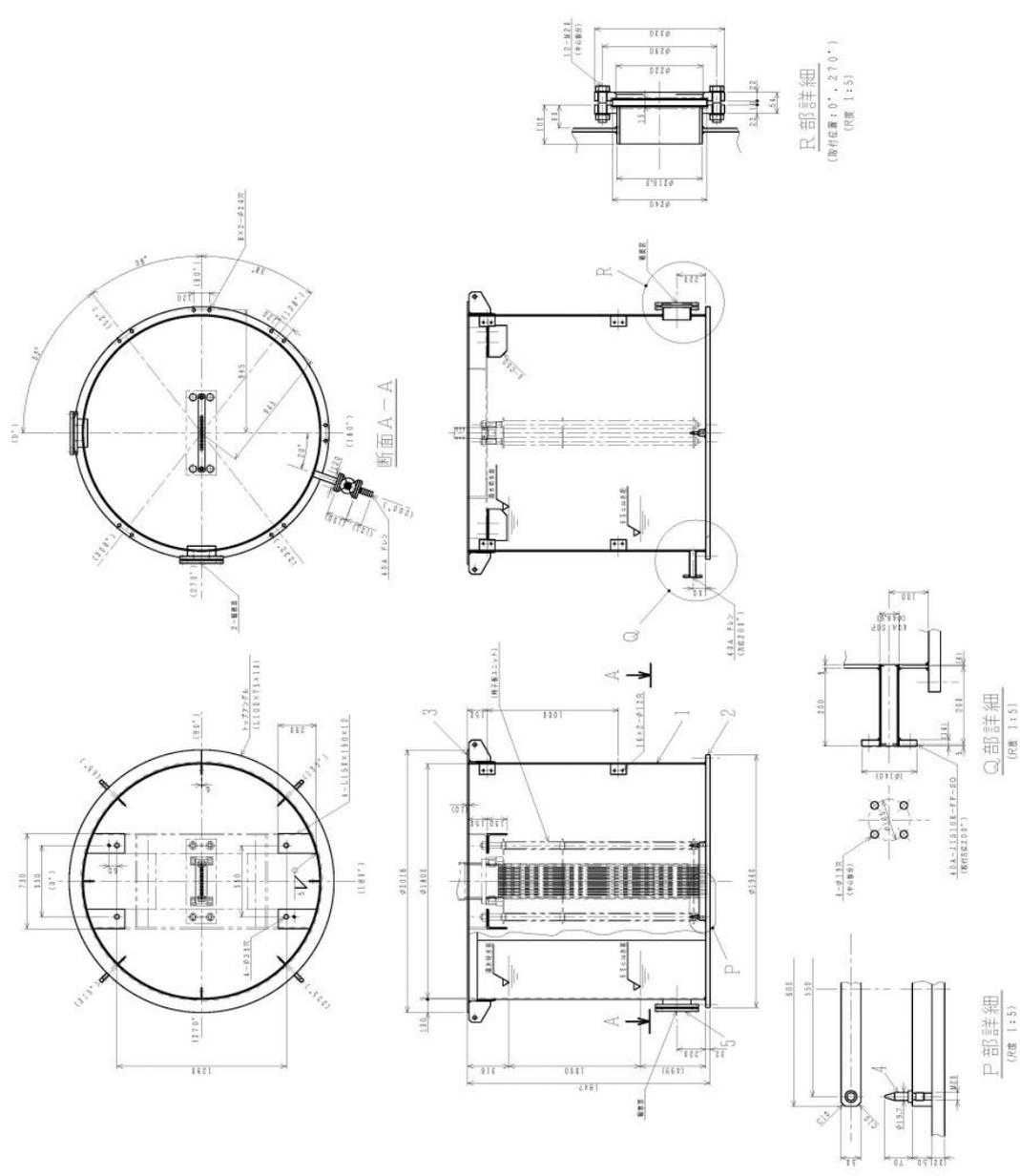


図 9.1.2-2 炉心タンクの構造図

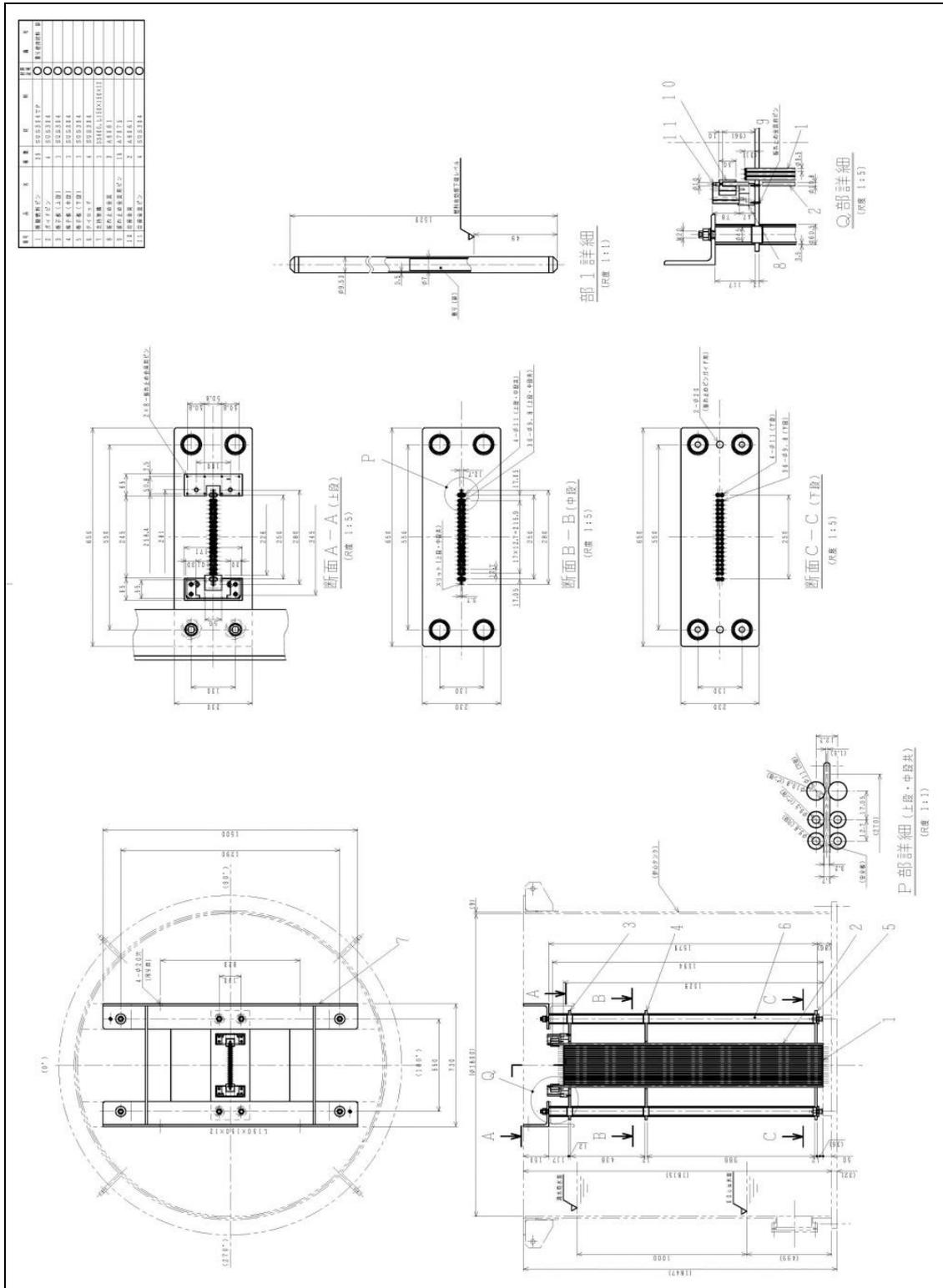


図 9.1.2-3 格子板ユニット、ガイドピン及び模擬燃料ピンの構造図

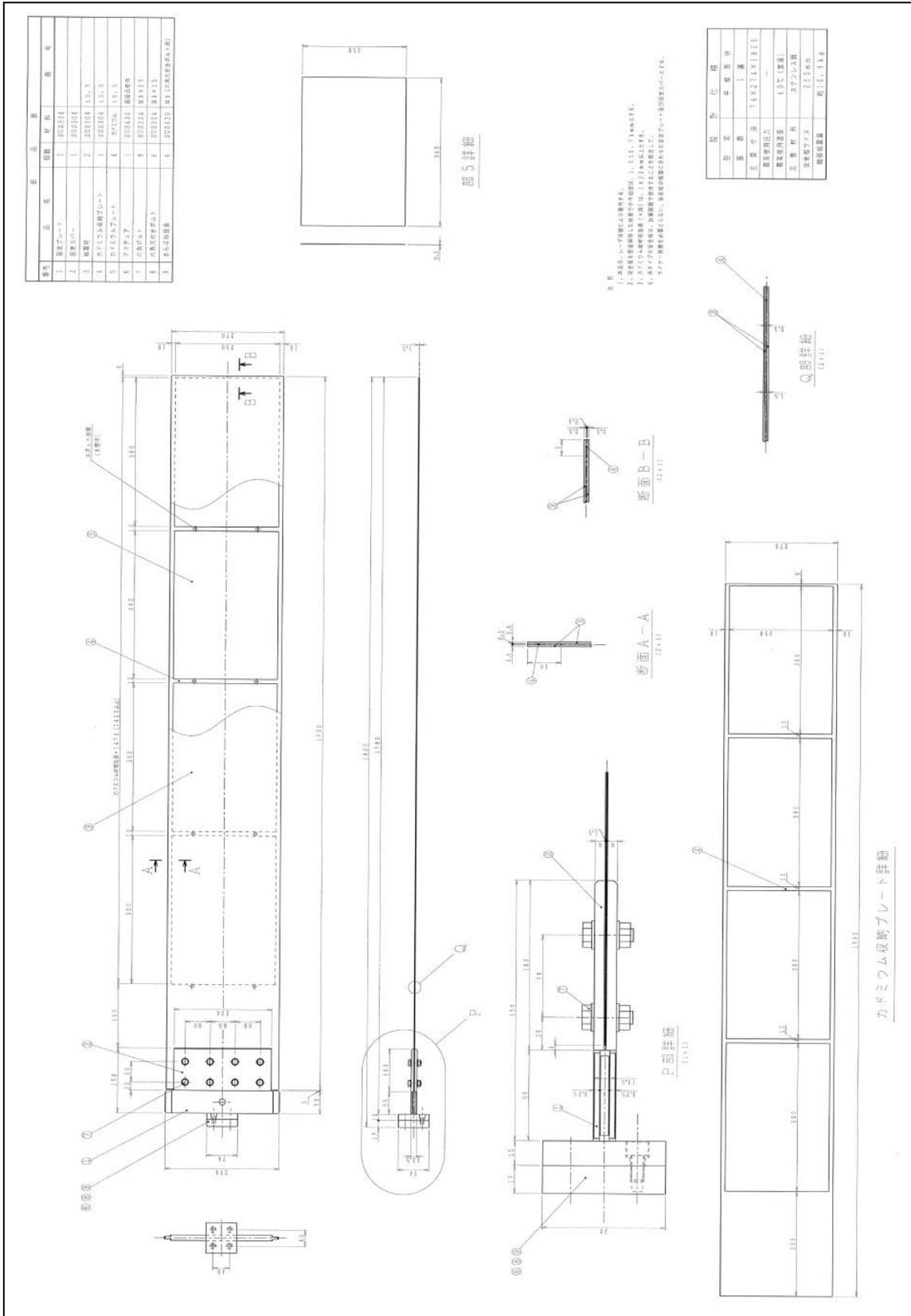


図 9.1.2-4 (1/2) 安全板及び安全板駆動装置の構造図：安全板

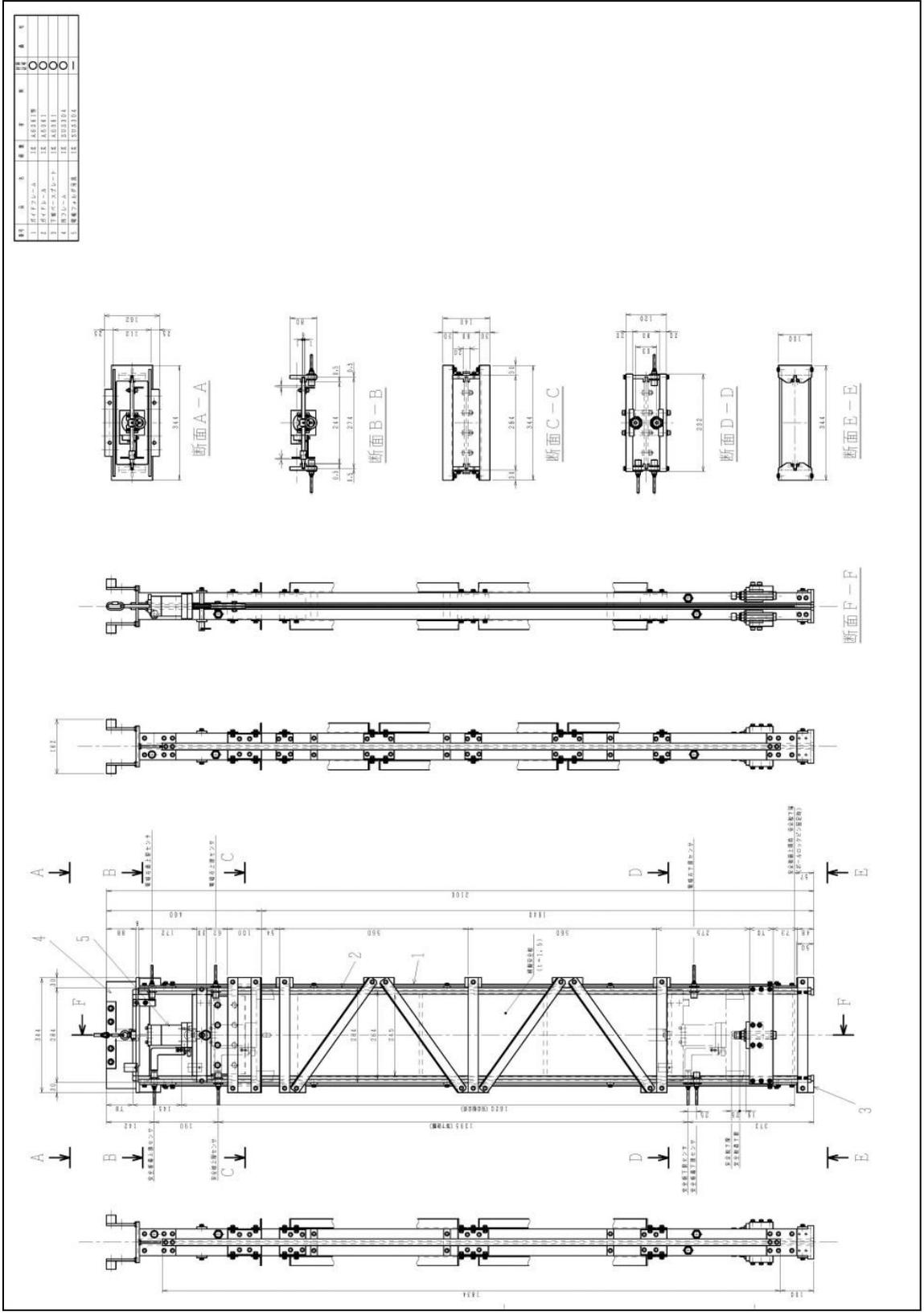


図 9.1.2.4 (2/2) 安全板及び安全板駆動装置の構造図： 安全板駆動装置

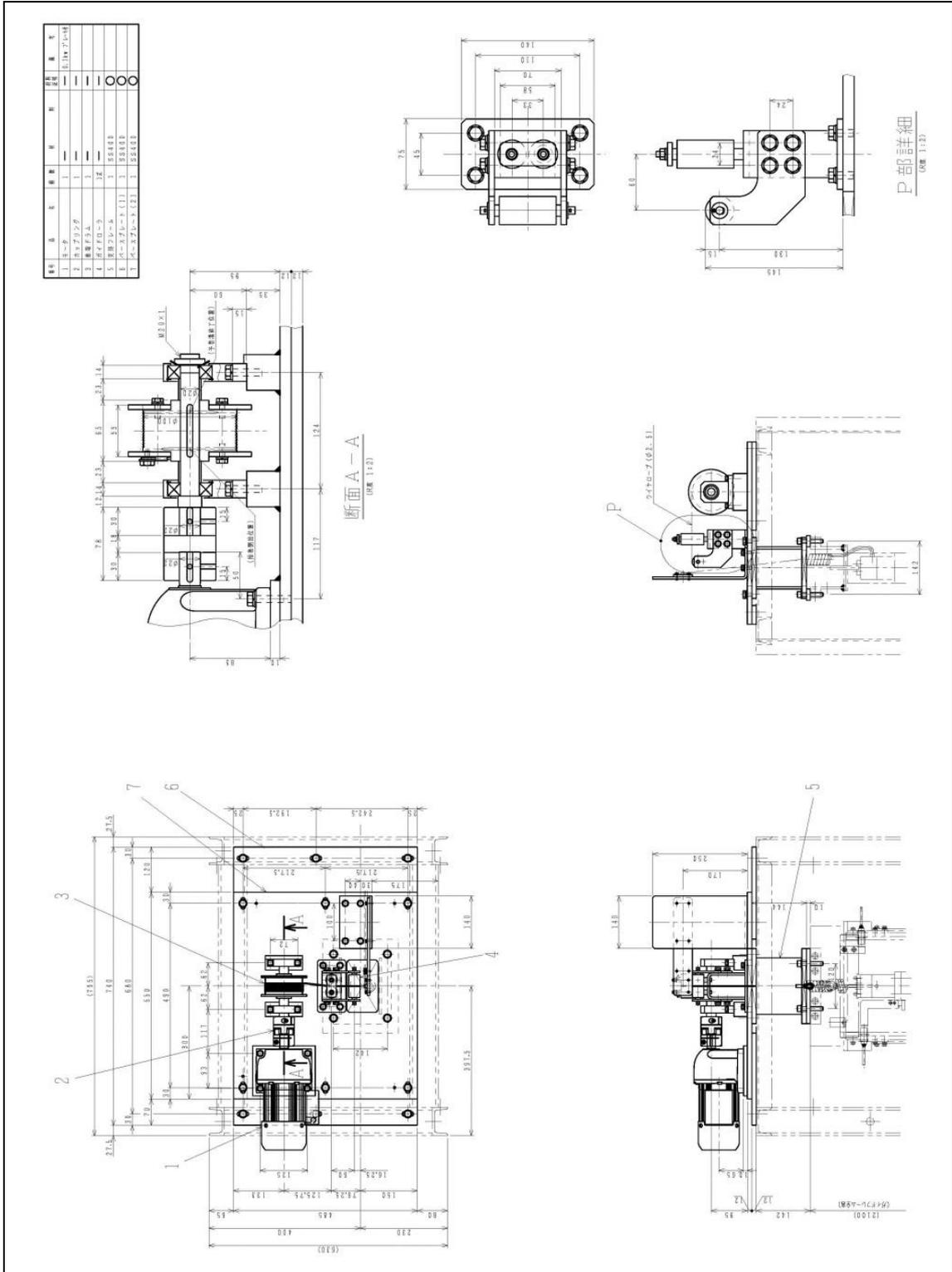


図 9.1.2-5 昇降駆動装置の構造図

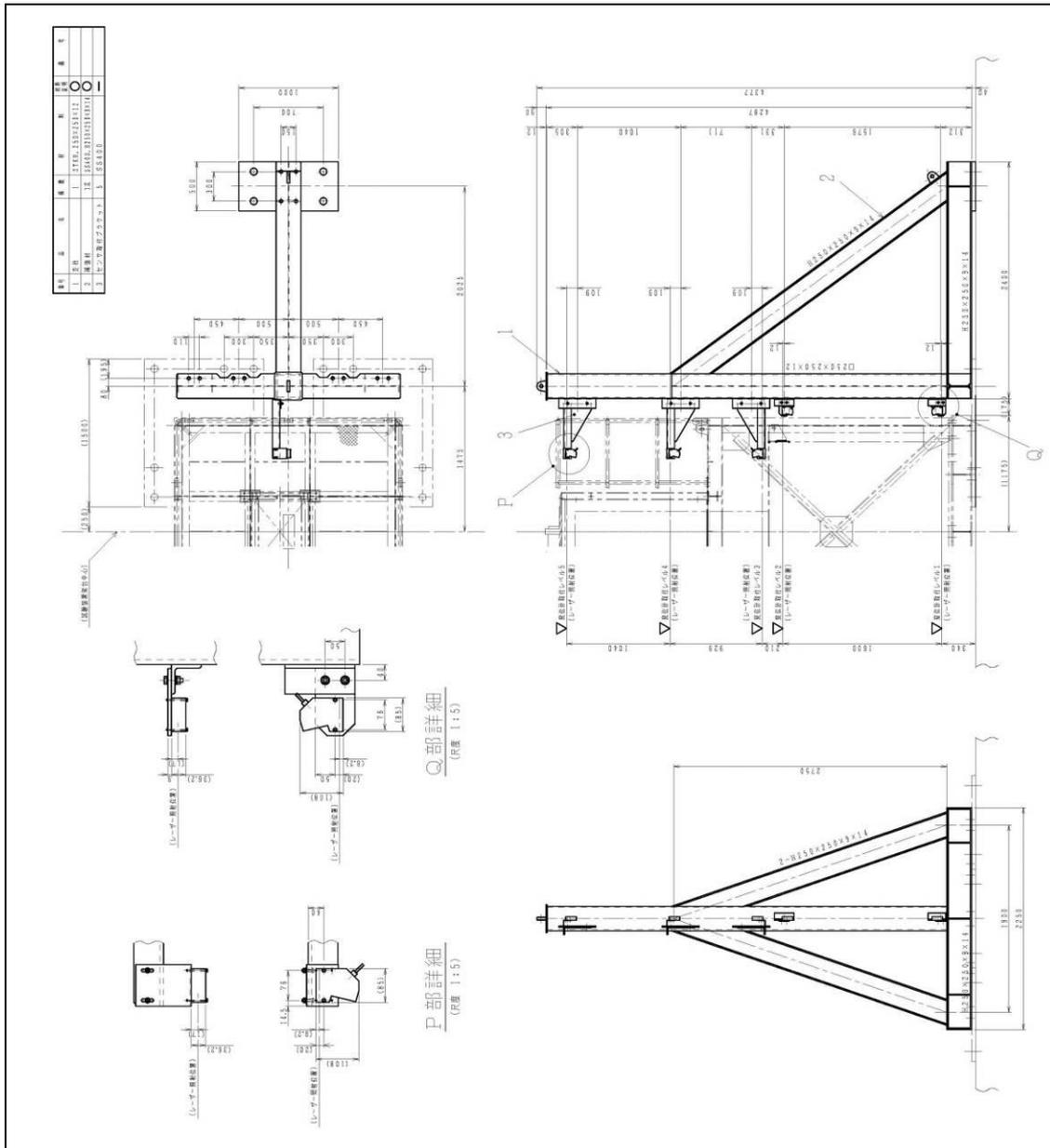


図 9.1.2-6 計測架台の構造図

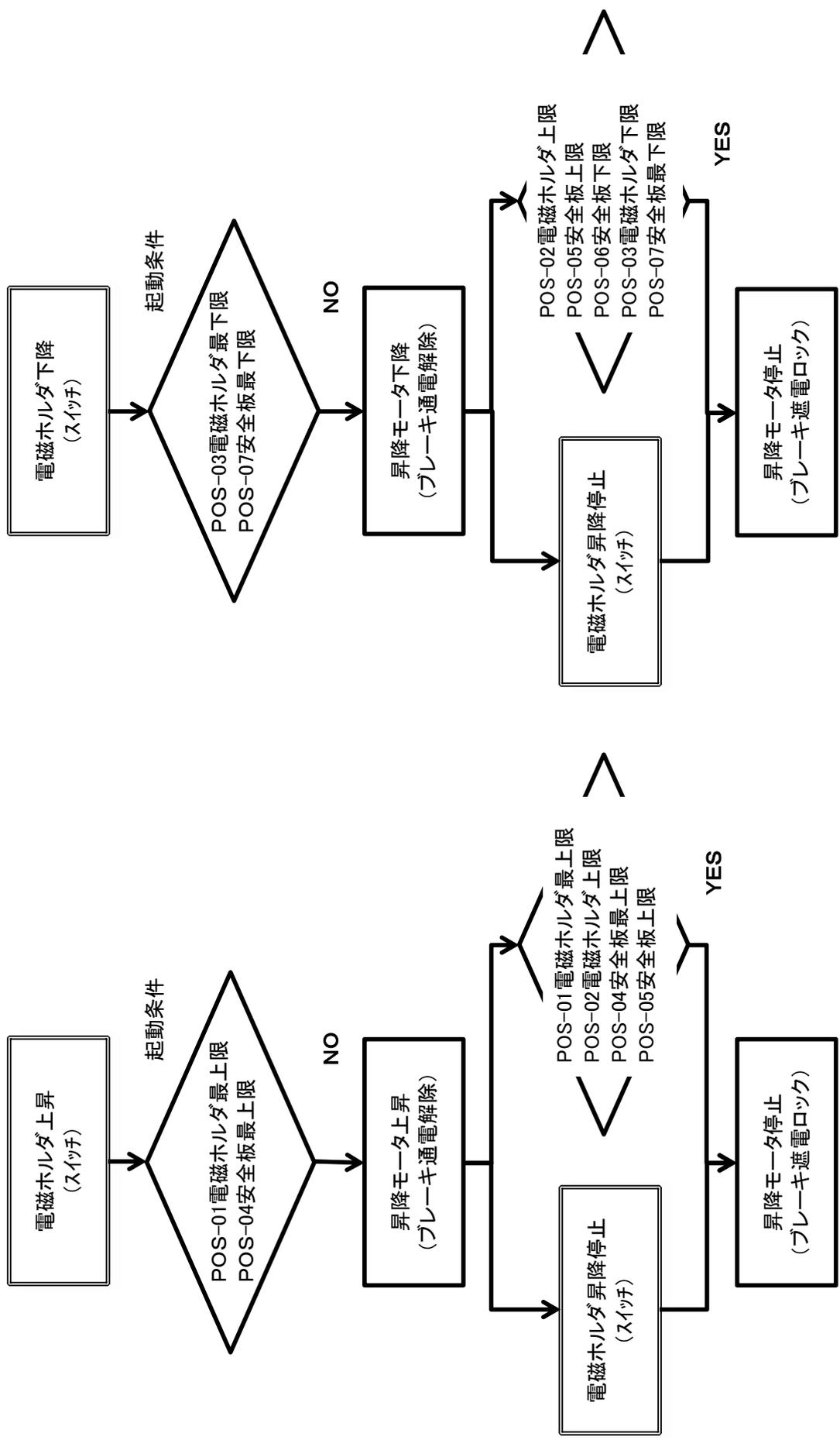


図 9.1.2-7 安全板の運転フロー

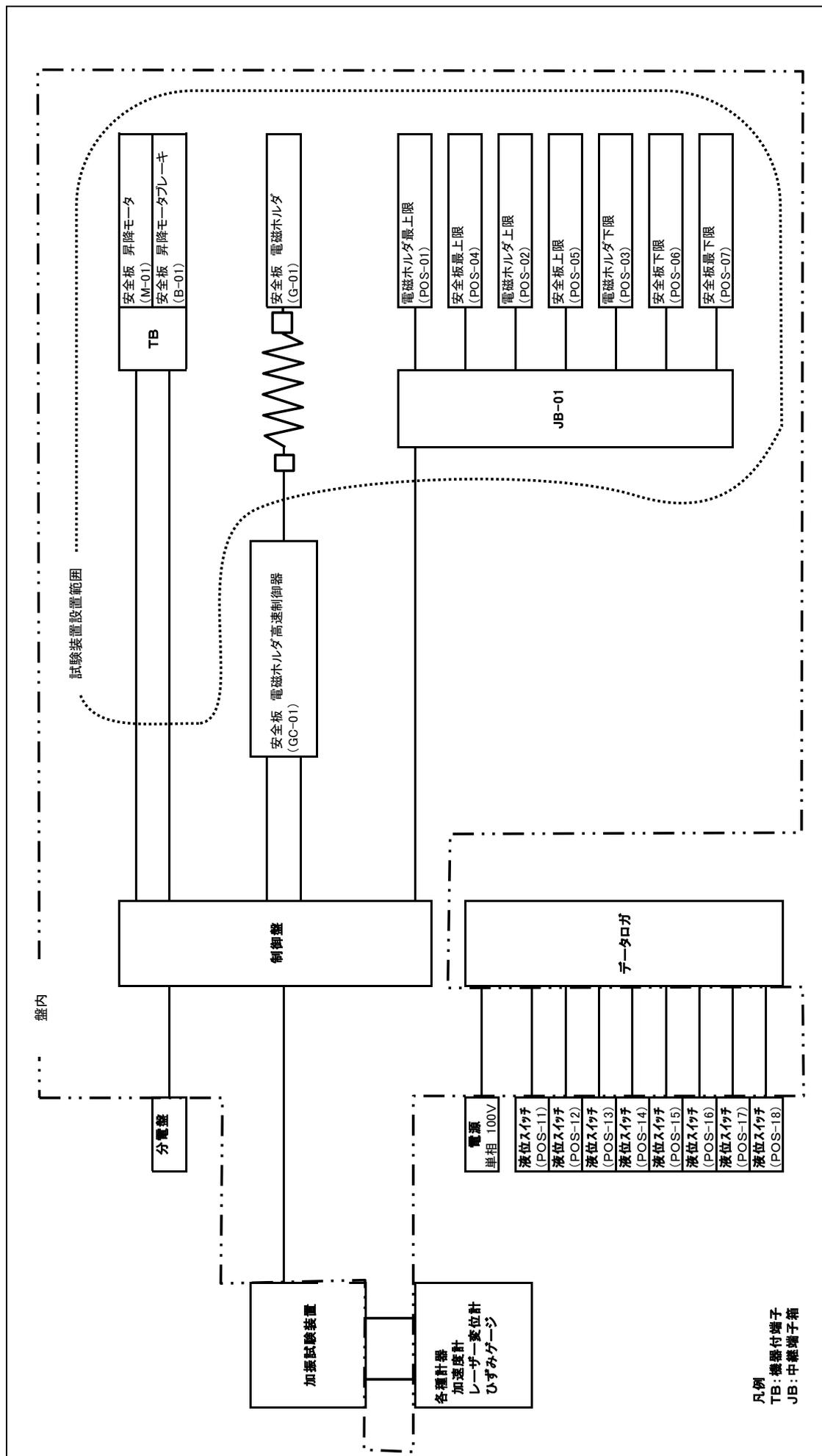
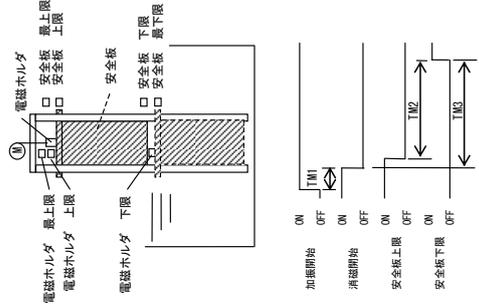
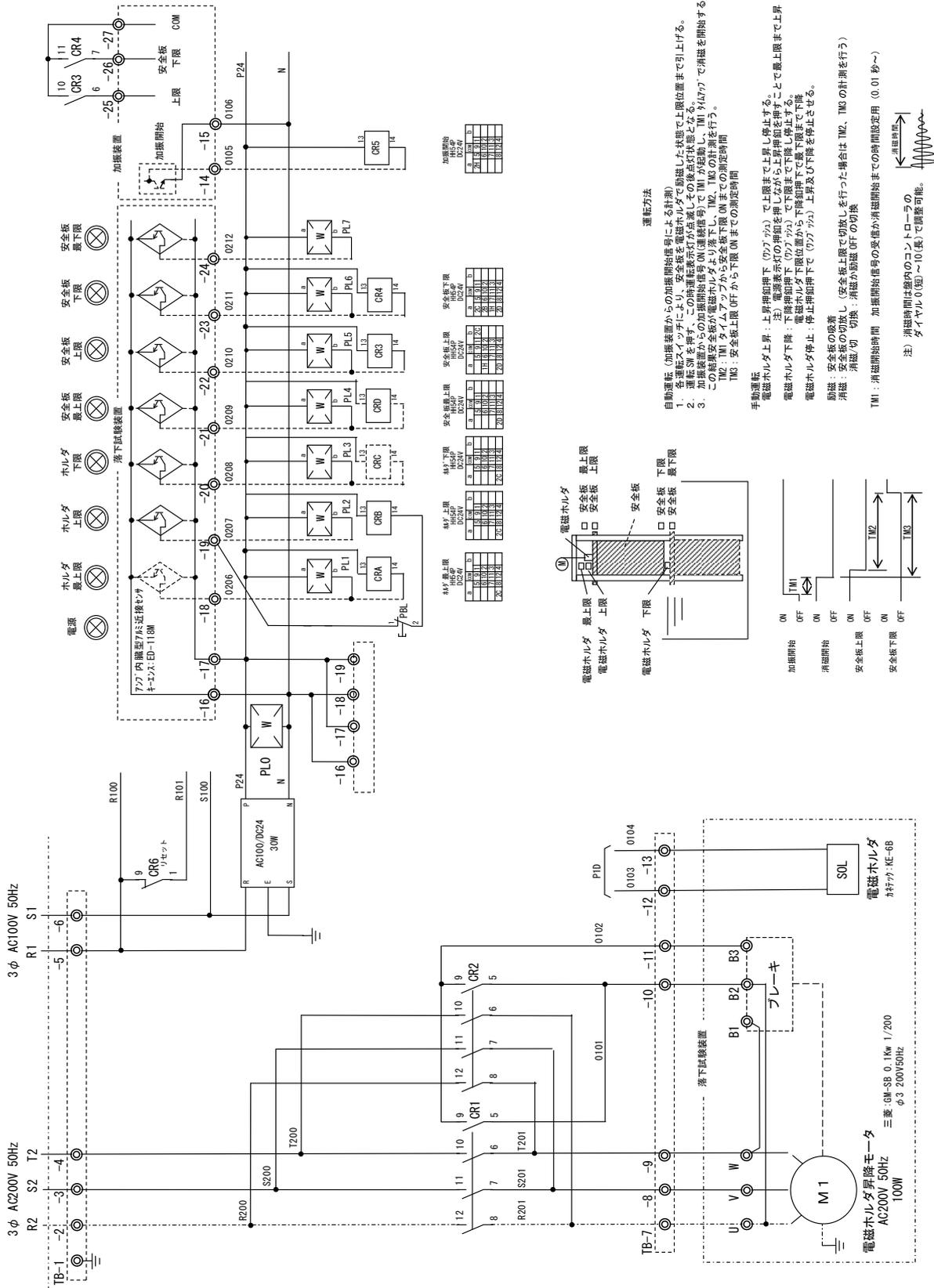


図 9.1.2-8 操作盤の配線系統図



運転方法

自動運転 (加振装置からの加振開始信号による計測)

- 各運転スイッチにより、安全板を電磁ホルダで動員した状態で上限位置まで上げる。
- 運転スイッチを押す、この時運転指示灯が点滅しその時点状態となる。
- 加振装置からの加振開始信号 (M1 運転信号) で TM1 が起動し、TM1 が動作し、TM1 が動作して消磁を開始する。

この動作を繰り返す。

TM1: TM1 タイムアップから安全板下限 (ON) までの測定時間
 TM2: 安全板上限 OFF から下限 (ON) までの測定時間

手動運転

電磁ホルダ上昇: 上昇押印押下 (アップ/ダウン) で上限まで上昇し停止する。
 注) 電源表示灯の押印を押しながら上昇押印を押すことで上限まで上昇
 電磁ホルダ下降: 下降押印押下 (アップ/ダウン) で下限まで下降し停止する。
 注) 電源表示灯の押印を押しながら下降押印を押すことで下限まで下降
 電磁ホルダ停止: 停止押印押下 (アップ/ダウン) 上昇及び下降を停止させる。

動員: 安全板の吸着
 消磁: 安全板の切戻し (安全板上限で切戻しを行なった場合は TM2、TM3 の計測を行う)
 消磁: 消磁/切戻し (安全板上限で切戻しを行なった場合は TM2、TM3 の計測を行う)

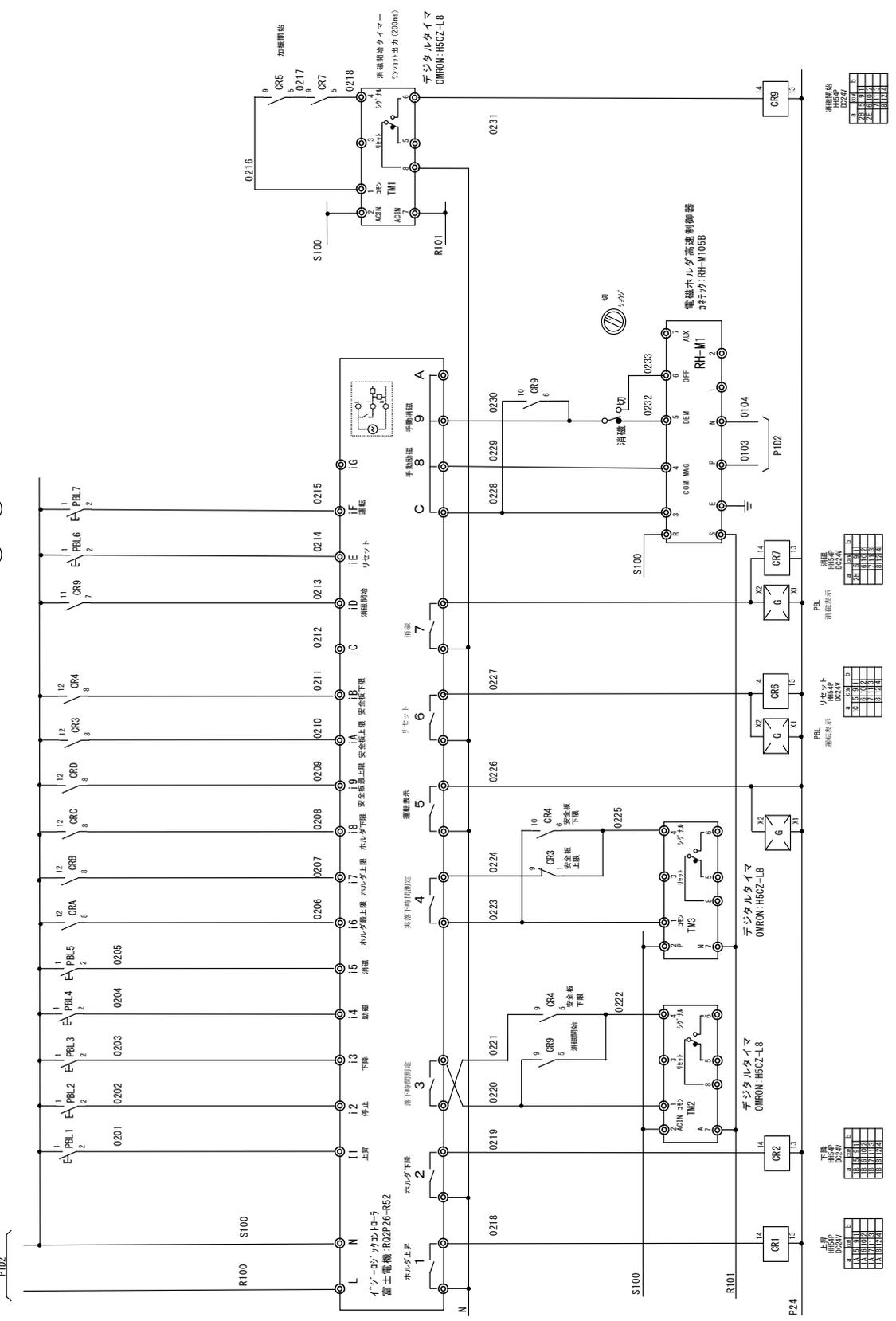
TM1: 消磁開始時間 加振開始信号の受信が消磁開始までの時間設定用 (0.01 秒) ~
 TM2: 安全板上限 OFF から下限 (ON) までの測定時間
 TM3: 安全板下限 ON から下限 (ON) までの測定時間

注) 消磁時間は強内のコンローラのダイヤル (0 短) ~ 10 (長) で調整可能。

図 9.1.2-9(1) 操作盤の展開接続図 (1/2)

リセット 運転

上昇 停止 下降 動磁 消磁



消磁	RH-M1	1	2
動磁	RH-M1	3	4
停止	RH-M1	5	6
下降	RH-M1	7	8
上昇	RH-M1	9	10

リセット	CR6	1	2
消磁表示	CR6	3	4
運転表示	CR6	5	6
リセット	CR7	7	8
消磁表示	CR7	9	10
運転表示	CR7	11	12

リセット	CR3	1	2
消磁表示	CR3	3	4
運転表示	CR3	5	6
リセット	CR4	7	8
消磁表示	CR4	9	10
運転表示	CR4	11	12

下降	CR2	1	2
動磁	CR2	3	4
停止	CR2	5	6
上昇	CR2	7	8
消磁	CR2	9	10
動磁	CR2	11	12
停止	CR2	13	14
上昇	CR2	15	16

上昇	CR1	1	2
動磁	CR1	3	4
停止	CR1	5	6
下降	CR1	7	8
消磁	CR1	9	10
動磁	CR1	11	12
停止	CR1	13	14
下降	CR1	15	16

図 9.1.2-9(2) 操作盤の展開接続図 (2/2)

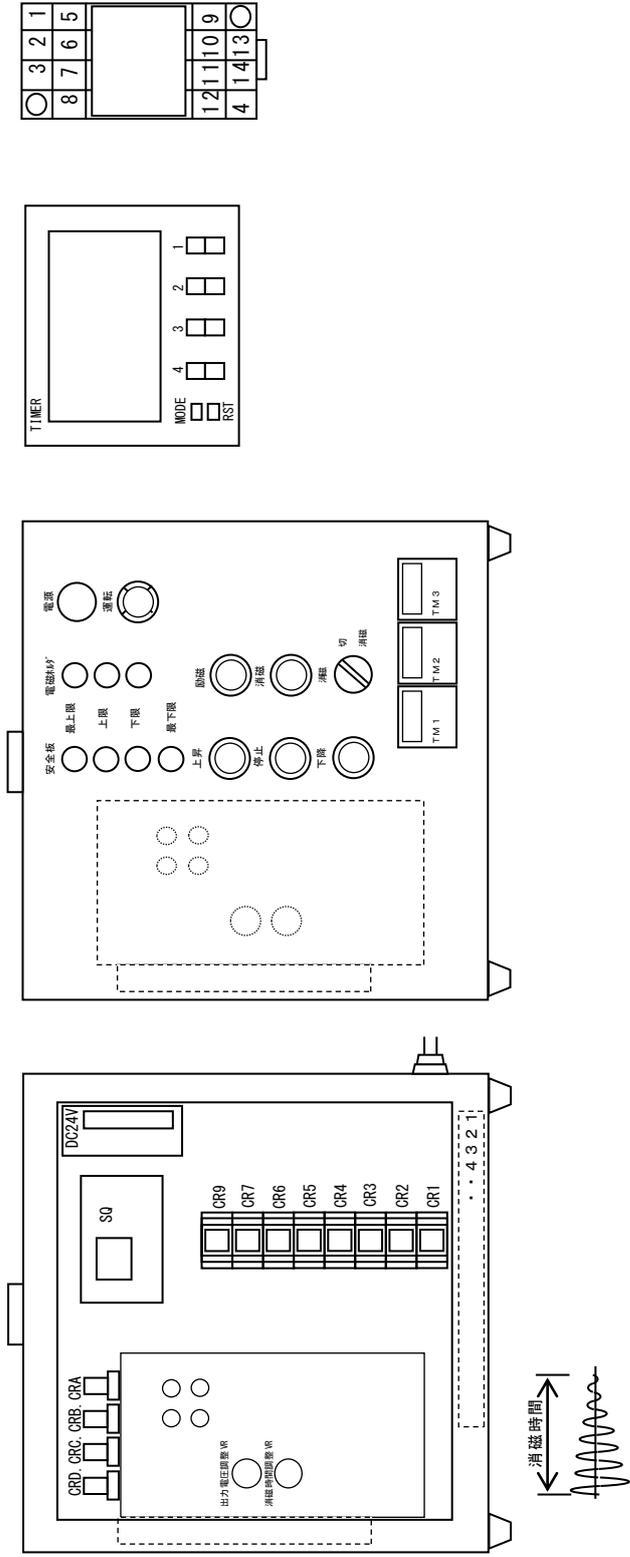


図 9.1.2.1-10 操作盤の盤面図



図 9.1.2-11 加振試験装置の全体外観

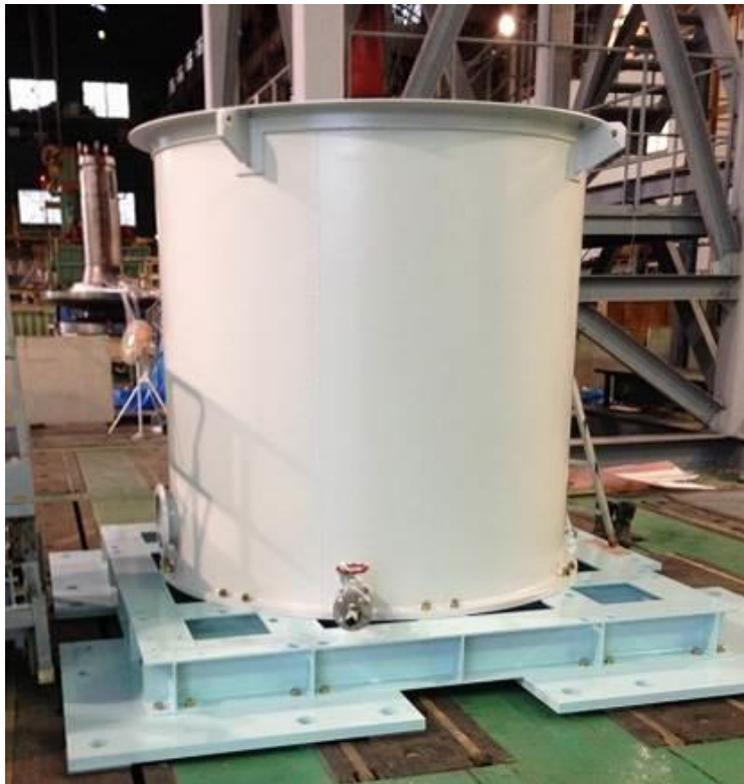


図 9.1.2-12 炉心タンクの外観



図 9.1.2-13 格子板ユニット及び模擬燃料ピンの外観

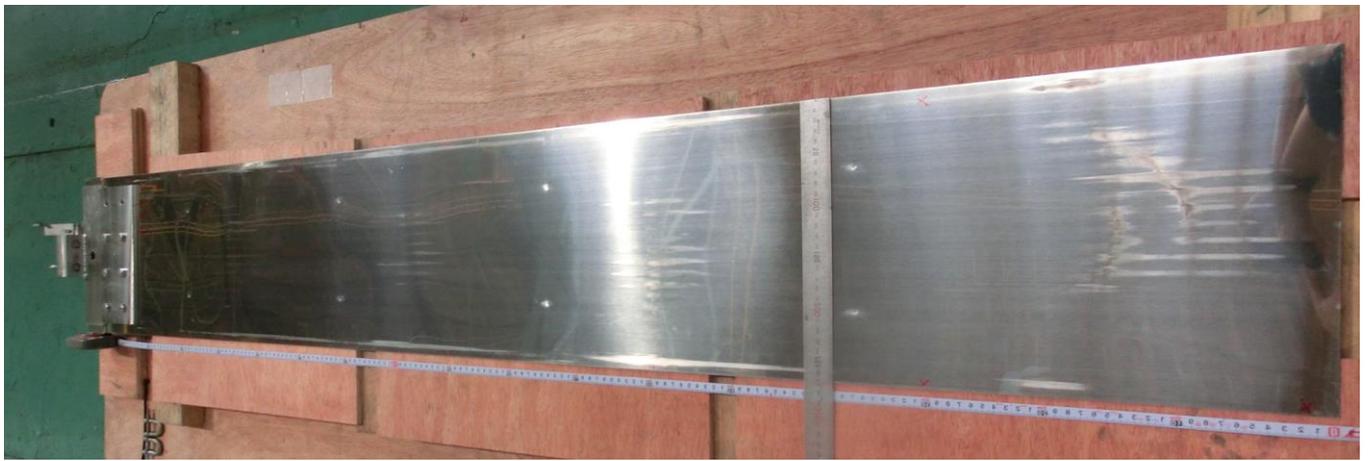
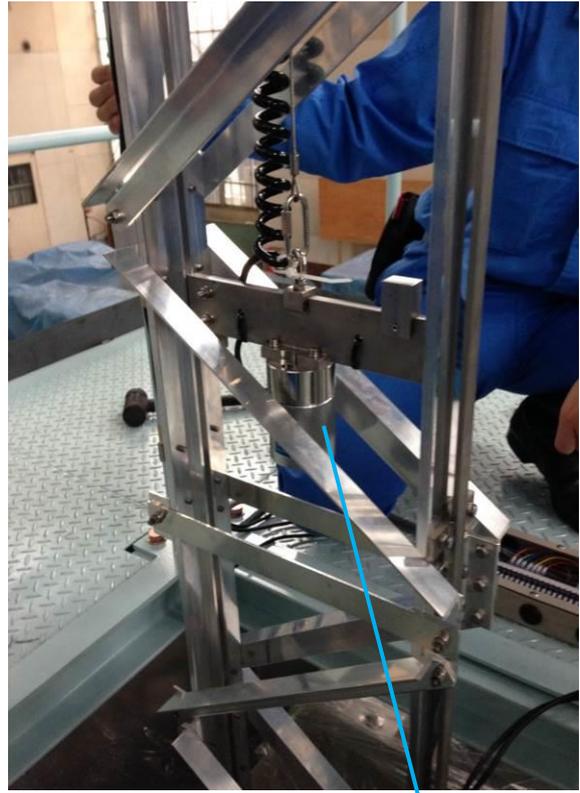
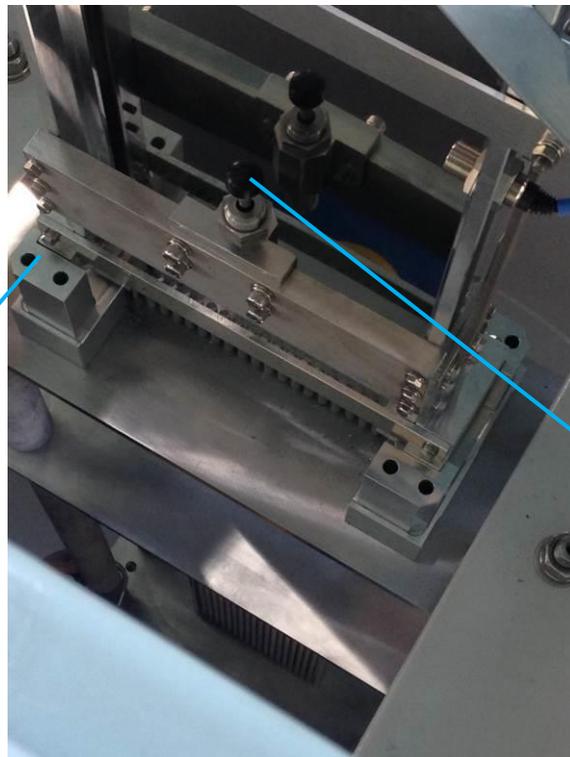


図 9.1.2-14 安全板の外観



電磁ホルダ

振れ止め金具



ショックアブソーバ

図 9.1.2-15 安全板駆動装置の外観



図 9.1.2-16 昇降駆動装置の外観



図 9.1.2-17 操作盤の外観

(2) 試験設備

本試験の実施場所は以下のとおりであり、使用した振動台の主要仕様を表 9.1.2-1 に、振動台の全体外観を図 9.1.2-18 に示す。また、振動台の主要寸法を図 9.1.2-19 に示す。

- ・試験実施場所： (独) 防災科学技術研究所 (つくば本所) 大型耐震実験施設

表 9.1.2-1 振動台の主要仕様

(出展： (独) 防災科学技術研究所ホームページ (http://www.bosai.go.jp/shisetsu/taishin/top.html))

項目	仕様	備考
振動台サイズ	14.5 m×15 m	
最大搭載質量	500 ton	
加振装置	電気油圧サーボ方式	
加振方向	水平一方向	
加振制御	変位制御	
加振機出力	3600 kN (=900 kN×4)	
加振波形	正弦波、不規則波、地震波	
加振能力	<p>< 振動台限界性能図 ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・最大加速度： 5 m/s² (500 t)、9.4 m/s² (200 t) ・最大速度： 1 m/s ・最大振幅： ±220 mm ・加振周波数範囲： DC～50 Hz 	



図 9.1.2-18 振動台の全体外観

(3) 試験装置の耐震予備解析

9.1.2 (1)項に示した試験装置について、以下の確認を目的として予備解析を実施した。

- ・ 模擬地震波（入力地震波）で加振可能な最大入力加速度
- ・ 駆動装置架台の応答加速度及び応答変位
- ・ 駆動装置架台の1次固有振動数

① 予備解析

予備解析結果を以下に示す。

1) 解析モデル

解析モデルを図 9.1.2-20 に示す。解析モデルの概要は以下のとおりである。

- ・ 形鋼は、はり要素とし、炉心タンクはシェル要素でモデル化した。
- ・ 梯子、手すり、駆動装置及び安全板駆動装置（ガイドフレーム）は、付加質量としてモデル化した。
- ・ 炉心タンク内の水は、満水時の質量を炉心タンク側面に等分布で付加した。
- ・ 各構成機器については、設計重量の10%の余裕を見込んで付加質量を設定した。

2) 評価用地震力

評価に使用した地震力を図 9.1.2-21 に示す。

図 9.1.2-21 に示す床応答スペクトルは、NUCEF_3F_EW_NODE4 の床応答スペクトル（拡幅、減衰定数 1%）である。本床応答スペクトルの選定理由は、以下のとおりである。

- ・ NUCEF_3F_NODE4 の床応答スペクトルは、EW 方向が NS 方向を包絡するため、厳しい側の EW 方向を使用した。
- ・ 試験装置は、駆動装置架台部に変位を生じさせ、安全板駆動装置と炉心タンクに相対変位を生じさせる設計としており、駆動装置架台は溶接構造物であるため、床応答スペクトルは減衰定数 1%のものを使用した。
- ・ 炉心タンクや安全板駆動装置が設置される炉室は、NUCEF 建家の 1~3F にまたがっている。実機では、架台が壁等から支持されることを想定して、上層階の 3F に相当する NODE4 の応答スペクトルを使用した。

図 9.1.2-21 に当該フロアの応答（時刻歴波）を示す。本解析で使用した床応答スペクトルは、時刻歴波の最大加速度で約 562 gal に対応する。

3) 解析結果

固有値解析結果を図 9.1.2-22 に、スペクトル解析結果を図 9.1.2-23 に示す。結果の概要は以下のとおりである。

- ・ 試験装置の固有振動数は、弱軸方向が 1 次モードで 7.3 Hz、強軸方向が 3 次モードで 12.7 Hz となった。
- ・ 駆動装置架台上部での応答加速度及び応答変位は、以下の結果となった。
 - 弱軸方向 : (応答加速度) 約 0.97 G、(応答変位) 約 7.6 mm
 - 強軸方向 : (応答加速度) 約 1.65 G、(応答変位) 約 1.5 mm
- ・ 発生応力は弱軸方向で最大約 100 MPa、強軸方向で最大約 36 MPa である。

② 予備解析に基づく加振限界の検討

上記①での予備解析はスペクトル解析によるものであるが、加振試験では時刻歴波での加振を行う。上記①で使用した床応答スペクトルは、最大加速度約 562 gal の時刻歴波に基づくものであるため、以下では上記①の解析結果が最大加速度 562 gal の時刻歴波に対応するものとして検討を行った。

解析結果に基づき、加振レベルの検討結果を表 9.1.2-2 に示す。主な結果は以下のとおりである。

1) 弱軸方向

駆動装置架台の発生応力により、模擬地震波での最大加振は以下のとおりである。

- ・最大入力加速度 : 1136 gal (562 gal に対し、約 2 倍)
- ・最大応答変位 : 約 15.3 mm
- ・最大発生応力 : 約 200 MPa (許容応力 245 MPa)

なお、上記では、最大発生応力は許容値に対して余裕を見込んで設定しているが、最大発生応力を許容値まで許容した場合は、約 1400 gal 程度まで加振が可能である。

2) 強軸方向

振動台の速度制限により、模擬地震波での最大加振は以下のとおりである。

- ・最大入力加速度 : 1821 gal (562 gal に対し、約 3.2 倍)
- ・最大変位 : 約 4.7 mm (スリットの長手方向余裕 5 mm 以下)
- ・最大応力 : 約 117MPa

なお、強軸方向では、最大発生応力は許容値に対して十分余裕があるため、振動台の性能制限までの加振が可能である。

③ 加振試験での加振レベル

上記 2) の検討結果により、加振試験での加振レベルは、以下にて計画した。

1) 強軸方向

- ・レベル 1 : 実機地震波に相当する最大加速度 562 gal
- ・レベル 3 : 振動台性能等の制限による最大加振

2) 弱軸方向

- ・レベル 1 : 実機地震波に相当する最大加速度 562 gal
- ・レベル 2 : 最大発生応力を考慮した最大加振で、最大加速度 1136 gal

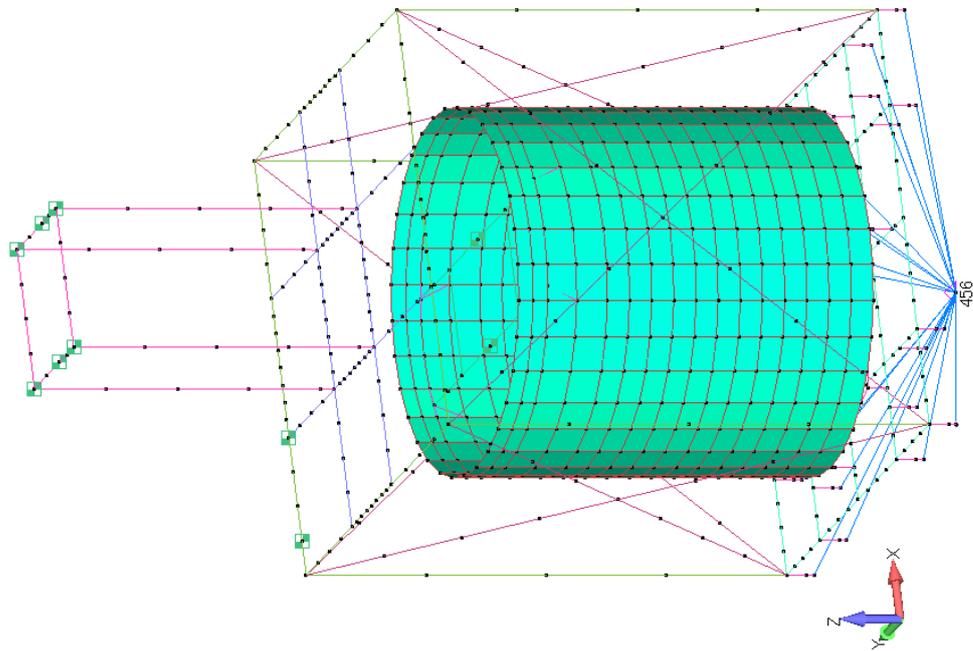
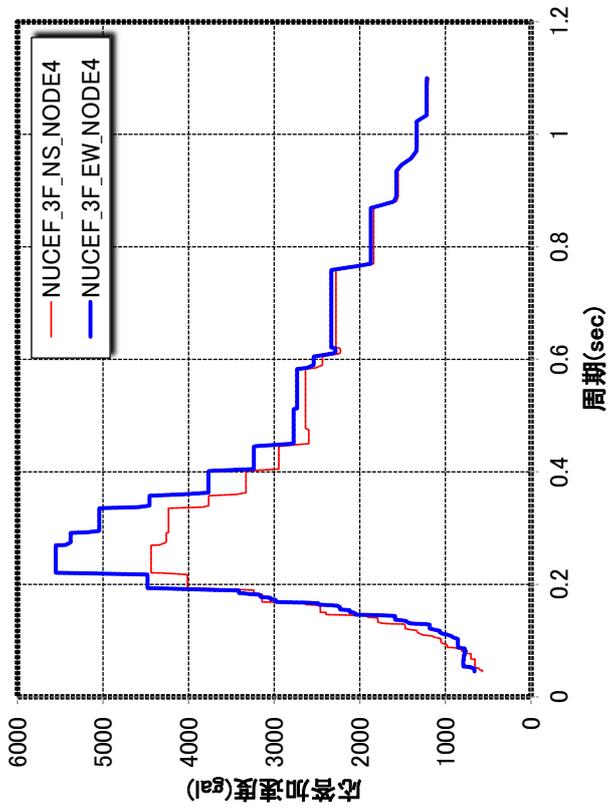
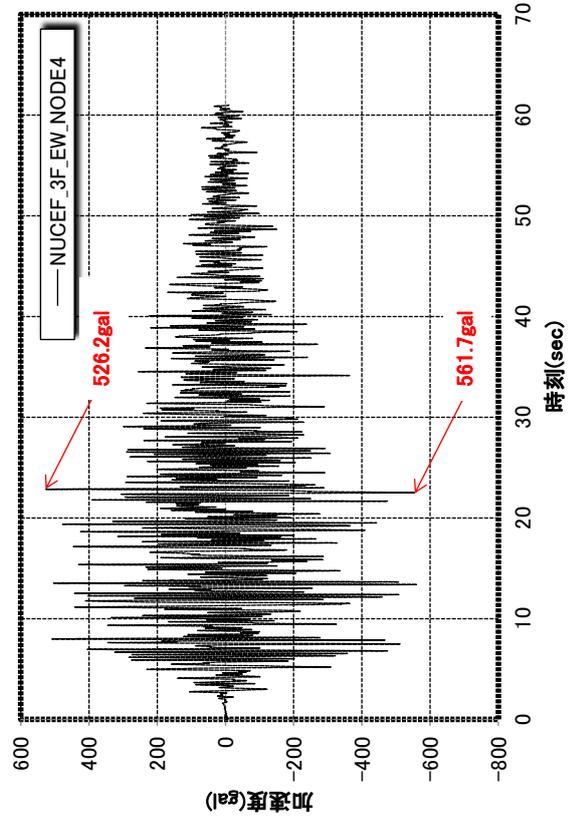


図 9.1.2-20 解析モデル

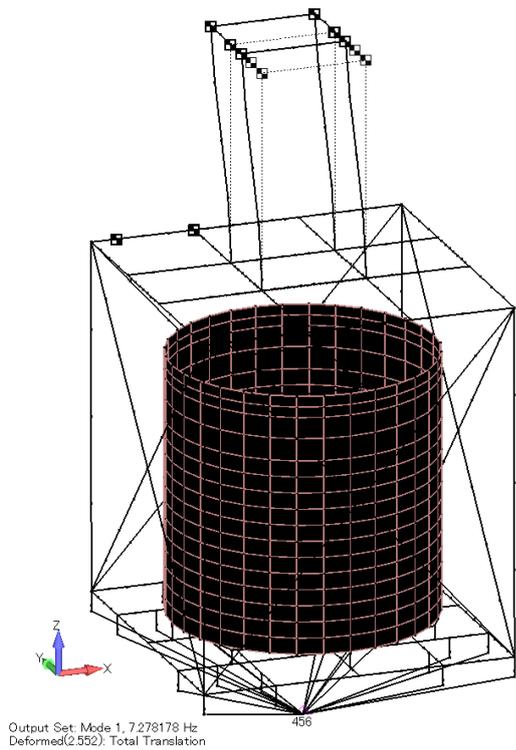


＜床応答スペクトル＞

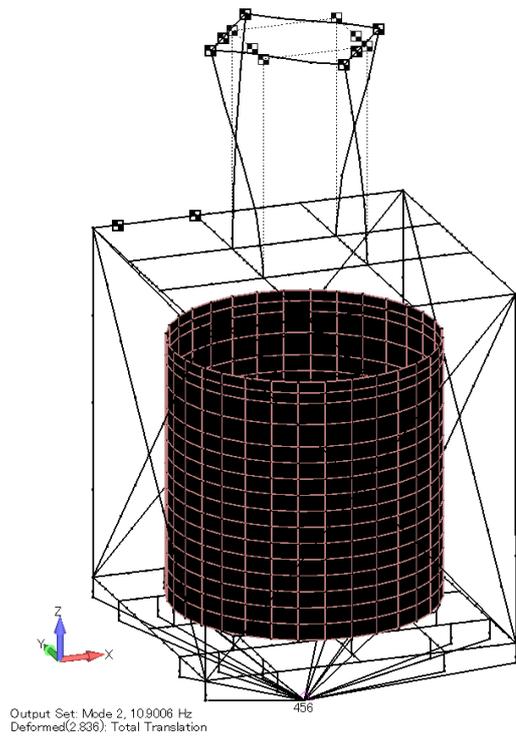


＜時刻歴波＞

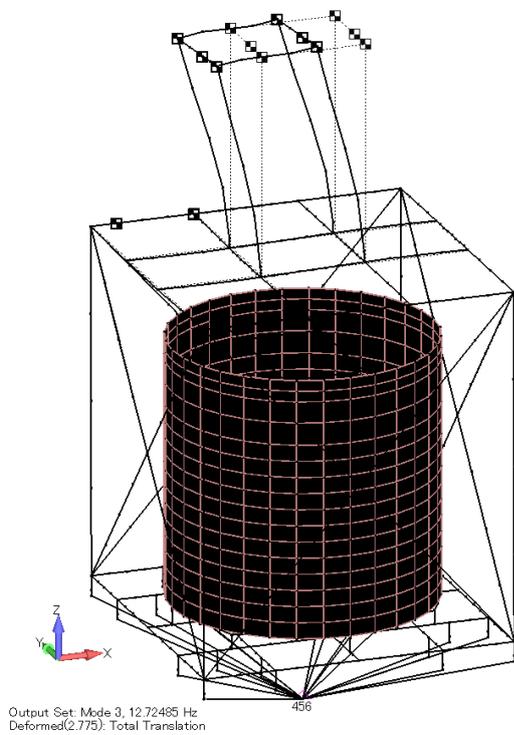
図 9.1.2-21 使用した地震力



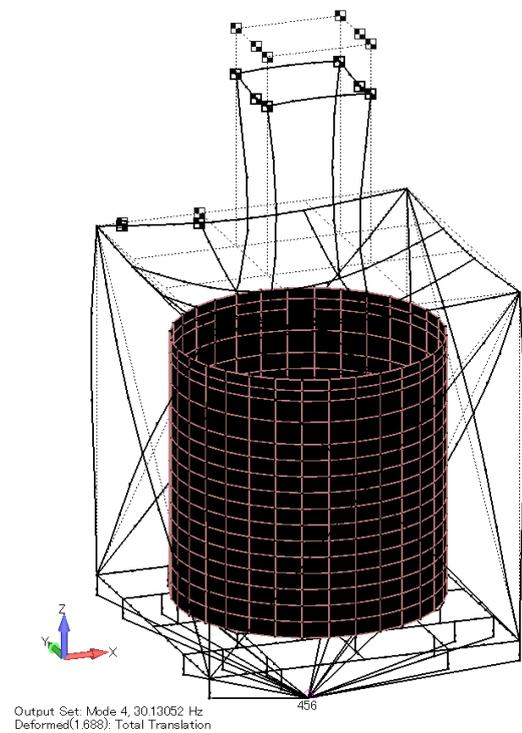
<1次モード:7.3Hz>



<2次モード:10.9Hz>



<3次モード:12.7Hz>



<4次モード:30.1Hz>

図 9.1.2-22 固有値解析結果

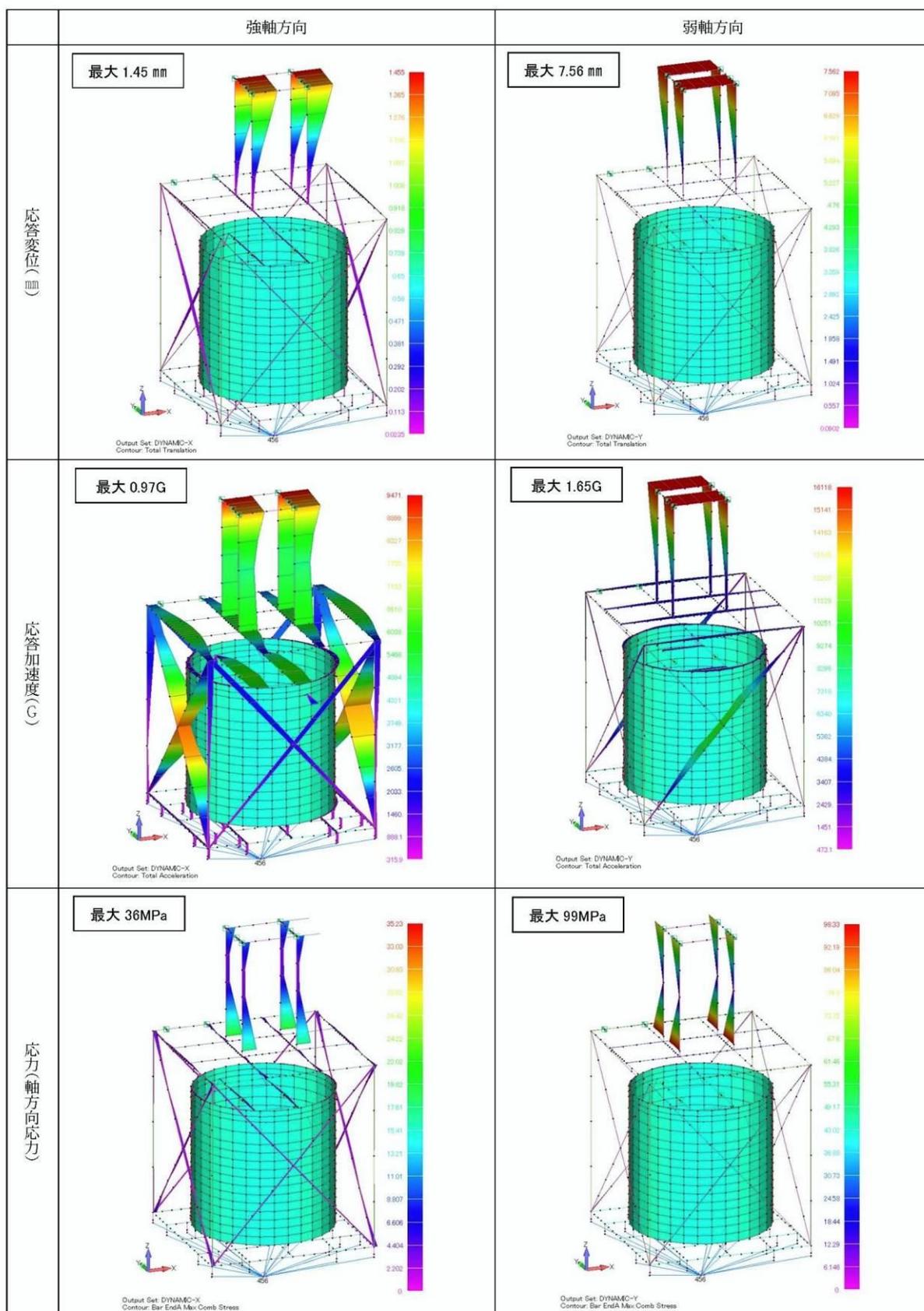


図 9.1.2-23 スペクトル解析結果

表 9.1.2-2 加振レベルの検討

	レベル 1		レベル 2	
	強軸方向	弱軸方向	強軸方向	弱軸方向
最大応答変位 (mm)	1.45	7.56	4.7	15.3 (18.7)
最大応力 (MPa)	36	99	117	200 (245)
許容応力 (MPa)	245	245	245	245
許容応力比	6.80	2.47	2.09	1.22 (1.00)
入力加速度 (gal) (ピーク加速度)	562	562	1,821 (振動台制限)	1,136 (1391)
限界加速度 (gal) (ピーク加速度)	1,960 (振動台制限)	1,388	—	—

※レベル 2、弱軸方向の()内の数値は、最大応力を許容値 245MPa まで許容した場合の値を示す。

9.1.3 試験内容及び試験条件

本試験での試験内容及び試験条件を以下に示す。

(1) 試験内容

本加振試験での試験内容は、以下のとおりである。

① 振動特性試験

本試験では、試験装置固有の変形モード等を確認するために、正弦波掃引により試験装置の固有振動数及び変形モードを確認した。試験では、正弦波加振において加振周波数を変化させ、試験装置各部の応答加速度を測定することにより、試験装置の固有振動数及び変形モードを測定した。

② 地震波特性試験

本試験では、実機想定加速度レベル及び想定を超えた加速度レベルの模擬地震波での加振を行い、試験装置各部に生じる応答加速度、応答変位及びひずみを計測することにより、模擬地震波に対する試験装置の振動挙動を確認した。本結果に基づき、炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位が大きくなる時刻 3 点を選定し、地震波加振試験での安全板の落下時刻を設定した。

③ 地震波加振試験

本試験では、模擬地震波加振中にスクラム条件 (25 gal) 時、加速度ピーク時及び相対変位ピーク時に安全板を落下させ、所定時間内 (1.5 s 以内) に安全板が落下することを確認した (地震波加振試験)。加振試験では、加振加速度及び落下させるタイミングのほか、炉心タンク内水位等をパラメータとした。

なお、本試験では、安全板の落下は電磁石を消磁することによって実施した。また、当初計画では、必要に応じ共振加振による加振 (限界加振試験) を行うこととしていたが、模擬地震波にて十分な応答加速度及び炉心タンクと安全板駆動装置の相対変位が得られたため、模擬地震波のみでの加振とした。

④ 励磁 OFF 確認試験

電磁ホルダは、一般的には「消磁」(消磁電流により残留吸着力を低減)により保持を解除するが、実機では、外部電源喪失等の異常時に安全板が落下できるように、電源断により安全板を落下させる必要がある。上記③の試験では、落下時間の確認が目的のため、「消磁」による落下としたが、ここでは上記要求を満足することを確認するために、アマチュア部に非磁性体 (SUS304) を挿入した体系に変更して落下時間を計測した。本試験では、加振レベルのほか、挿入する非磁性体厚さと電磁ホルダの保持力をパラメータとした。

⑤ 保持状態確認試験

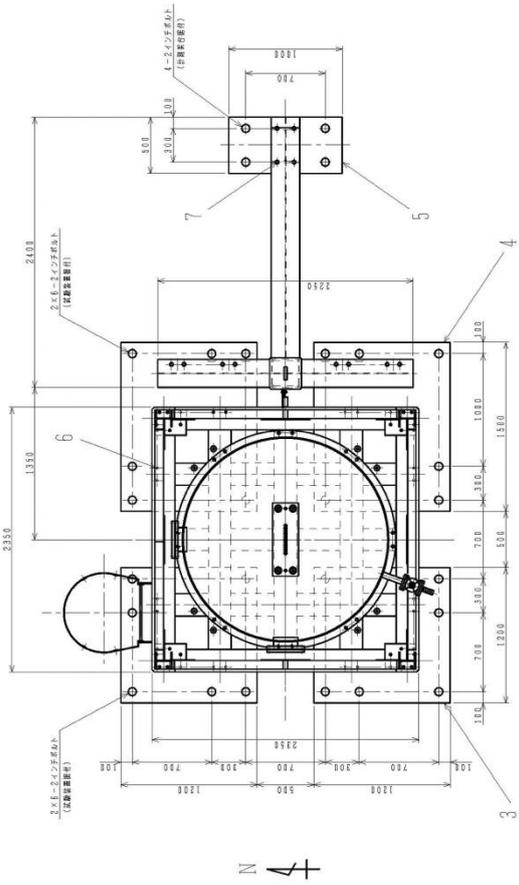
上記④の試験では、残留吸着力の影響を低減するために、低い保持力が有利となるが、保持力を低下させた場合には、落下信号とは無関係に落下する可能性がある。安全上は、いつ落下しても問題はないが、実験中に意味なく落下することは望ましくないため、本試験では、励磁 OFF 確認試験とは逆に、電磁ホルダによりどの程度の地震まで保持力が維持できるかを確認した。

(2) 試験体系

試験装置架台及び計測架台を振動台上に設置して実施した。

加振試験の試験体系を図 9.1.3-1 に、試験装置全体の外観を図 9.1.3-2 に示す。また、計測システム構成を図 9.1.3-3 に示す。

番号	品名	仕様	数量	単位	備註
1	圧縮機	2543R、5083E18	1	台	〇〇〇〇〇
2	圧縮機	55400	1	台	〇〇〇〇〇
3	圧縮機	55400、140	2	台	〇〇〇〇〇
4	圧縮機	55400、140	2	台	〇〇〇〇〇
5	圧縮機	55400、140	1	台	〇〇〇〇〇
6	圧縮機	55400	1	台	〇〇〇〇〇
7	圧縮機	55400	1	台	〇〇〇〇〇



断面A-A

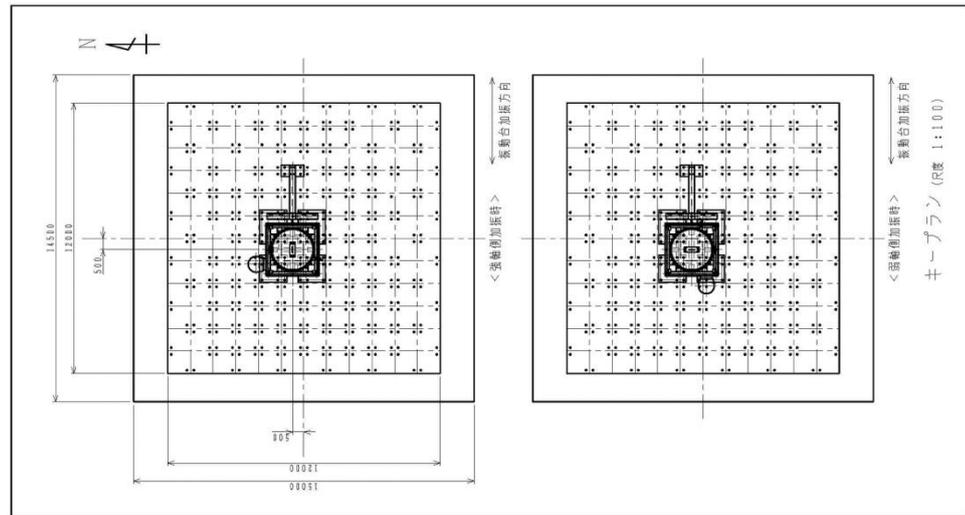
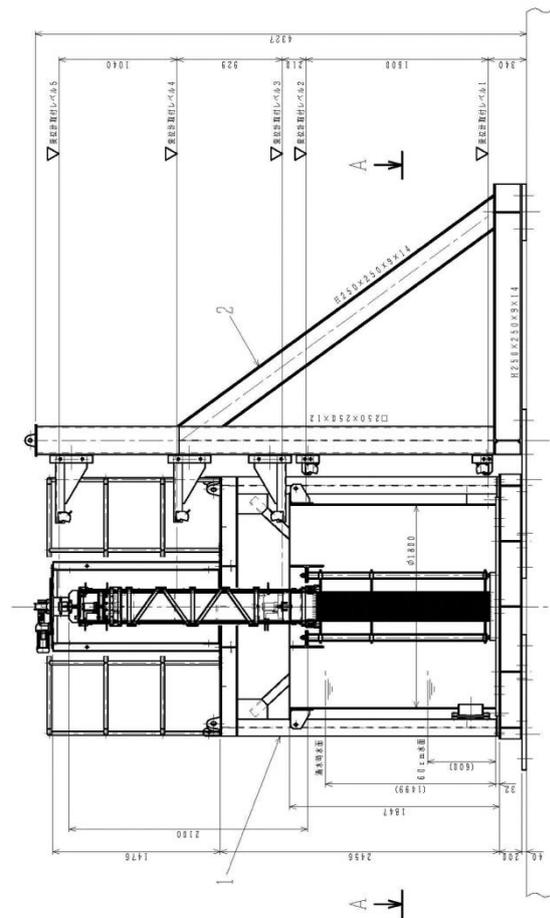
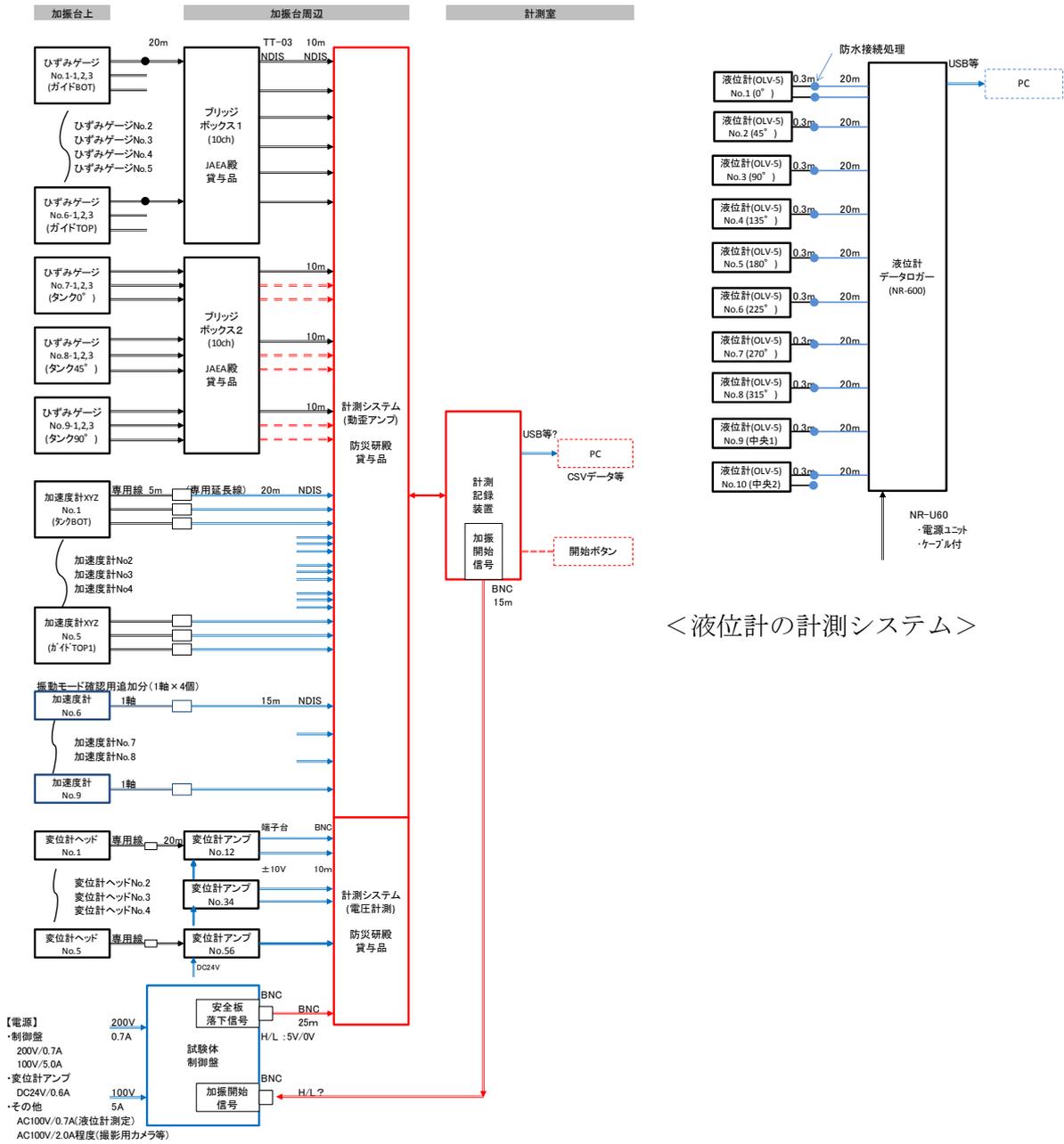


図 9.1.3-1 加振試験の全体体系図



図 9.1.3-2 振動台に設置した試験装置の全体外観



<全体計測システム構成>

<液位計の計測システム>

図 9.1.3-3 加振試験における計測システム構成

(3) 試験条件

9.1.3 (1)の各加振試験について、試験条件は以下のとおりである。

① 振動特性試験

振動特性試験での試験条件は、以下のとおりである。

1) 入力地震波

入力地震波は以下のとおりとした。

- ・入力地震波 : 正弦波
- ・スイープ範囲 : 0.3~30 Hz
- ・スイープ速度 : 0.1 Hz/s
- ・入力加速度 : 25 gal

入力加速度については、共振状態等を確認した上で設定した。なお、9.1.2 (3)項での予備解析結果により、試験装置の一次固有振動数は8~10 Hz程度である。

2) 加振方向

加振方向は、強軸方向及び弱軸方向とした。なお、使用した振動台は加振方向が一方向であるため、試験装置の段取り替え（方向転換）を行って加振した。

3) 炉心タンク内水位

炉心タンク内の水位は、空、炉心タンク底面から50 cm、満水（炉心タンク底面から150 cm）の3パターンとした。炉心タンク内の水位の設定根拠は、以下のとおりである。

i) 要求仕様

炉心タンク水位に関する要求仕様は、以下のとおりである。

- ・空（炉心タンク内に水を入れない）
- ・60 cm（実機での最低臨界水位として設定、定盤から40 cm）
- ・満水（実機での最大臨界水位として設定、定盤から140 cm）

ii) 実機の水位状態と加振試験での対応

実機の水位と加振試験での対応を図9.1.3-4に示す。

a) 満水時

本試験では、実機相当の水位を用いた加振試験により、安全板の落下性能を確認することとしている。この際、安全板と水面との相対関係を実機相当にしておくことが望ましく、実機水面位置と安全板待機時及び落下時の位置関係を合わせることにした。

この結果、加振試験体系では、炉心タンク底面から1500 mm（厳密には1499 mm）を満水レベルとした。なお、実機と試験体構造では、定盤部の構造が異なるが、水位については、下段格子板上面から1 mmの位置を燃料有効長下端として寸法設定しているため、実機と同様である。

b) 60 cm 水位時

60cm 水位についても、上記 a)と同様に、燃料有効長下端からの距離が 40 cm となるように試験体系での水位を設定した。最低臨界水位の状態を想定した場合に、棒状燃料、格子板及び安全板の位置関係は実機同様となっている。

なお、スロッシングの観点では、液面高さが高い方がスロッシング振動数は低くなるが、実機では定盤が大きく、実機と試験装置での炉心タンク下部構造の違いの影響は小さいと考えられる。

4) 安全板の待機位置

安全板落下時には、上限待機位置で大きな相対変位が生じていることが厳しい条件となる。このため、安全板上限待機位置での固有振動数を把握することが必要となり、安全板の待機位置は上限位置とした。なお、本試験では安全板の落下は行っていない。

② 地震波特性試験

地震波特性試験での試験条件は以下のとおりである。

1) 入力地震波

入力地震波は、以下により設定した。

なお、下記の詳細については、模擬地震波設定のため、事前に試験加振を実施して決定している。

i) ベースとする地震波

ベースとする地震波は、以下の理由により NUCEF_3 階_EW 方向とした。

- ・実機の設置フロアは NUCEF2 階であるが、架台等を壁から支持する可能性があり、図 9.1.3-5 に示すように、上層階となる NUCEF3 階の時刻歴波でのピーク加速度が大きい。
- ・NS 方向と EW 方向では、EW 方向の方がピーク加速度が大きい。

その他、一次固有振動数への効果も考えられるが、試験装置は実機構造とは異なるため、固有値に基づく選定はせず、より大きな変位が得られるピーク加速度の大きさに選定した。

ii) 入力地震波

ベースとする地震波に対し、振動台の特性である 1)最大変位、2)最大速度及び 3)最大加速度を考慮し、低周波成分をカット（振動台周辺への振動障害を防止するため）して入力地震波を作成した。入力地震波の策定手順は以下のとおりである（図 9.1.3-6 参照）。

- ・NUCEF_3 階_EW 方向の地震波を 3.3 倍する
（試験加振のために、最大加振を想定して設定）
 - ・2.2Hz までの低周波成分をカットする（ハイパス処理）
 - ・ハイパス処理後の地震波の最大加速度が 562 gal（NUCEF_3 階_EW 方向の地震波の最大加速度）となるように倍率で調整
- 上記により作成した地震波を図 9.1.3-7 に示す。この地震波を入力地震波とした。

iii) 加振レベル

加振レベルは、以下の3パターンで設定した。上記b.で設定した入力地震波を用い、以下の加振レベルに対応する加速度が得られるよう、振動台側で制限加速度を設定した。なお、試験加振の結果により、入力加速度に対しオーバシュートが生じるため、オーバシュートを考慮して加振加速度を設定した。

下記の各地震波について、図9.1.3-8に示す。

- ・レベル1： 実機想定加速度レベルの模擬地震波とし、最大加速度562 galとした。なお、オーバシュート分を考慮して、実際の入力最大加速度は509 galとした。
- ・レベル2： 弱軸方向の実機想定を超えた最大加振加速度として設定し、予備解析結果に基づき最大加速度1136 galとした。なお、オーバシュート分を考慮して、実際の入力最大加速度は913 galとした。
- ・レベル3： 強軸方向の実機想定を超えた最大加振加速度として設定し、最大加速度1400galとした。なお、オーバシュート分を考慮して、実際の入力最大加速度は1050 galとした。

2) 加振方向

加振方向は、強軸方向及び弱軸方向とした。なお、使用する振動台は加振方向が一方向であるため、試験装置の段取り替え（方向転換）を行って加振した。

3) 炉心タンク内水位

炉心タンク内の水位は、空、炉心タンク底面から50cm、満水（炉心タンク底面から150cm）の3パターンとした。なお、水位設定の設定根拠は、振動特性試験と同様である。

4) 安全板の待機位置

安全板の待機位置は、振動特性試験と同様に安全板上限位置とした。なお、本試験では安全板の落下は行っていない。

③ 地震波加振試験

地震波加振試験での試験条件は以下のとおりである。

1) 入力地震波

入力地震波は、地震波特性試験と同様であり、加振レベルはレベル1～3の3パターンとした。

2) 加振方向

加振方向は、強軸方向及び弱軸方向とした。なお、使用する振動台は加振方向が一方向であるため、試験装置の段取り替え（方向転換）を行って加振した。

3) 炉心タンク内水位

炉心タンク内の水位は、安全板の落下時間に対しては、空及び満水にて炉心タンク内の水の影響が確認できるため、空及び満水（炉心タンク底面から 150 cm）の 2 パターンとした。

4) 安全板の落下時刻

模擬地震波入力時の安全板の落下時刻は、以下の 7 種類とした。なお、各落下時刻については、地震波特性試験結果に基づき設定しており、詳細は、試験結果と合わせて 9.1.4 (2)項に示す。

- ・実機のスクラム条件である 25 gal に達した時刻
- ・地震波の加速度が大きい時刻 A
- ・地震波の加速度が大きい時刻 B
- ・地震波の加速度が大きい時刻 C
- ・地震波特性試験において、相対変位が大きくなった時刻 D
- ・地震波特性試験において、相対変位が大きくなった時刻 E
- ・地震波特性試験において、相対変位が大きくなった時刻 F

上記において、スクラム条件については、実機では炉下室（B1F）に地震計が設置され、本地震計で 25 gal を検出した時点で、スクラム（安全板落下）となるため、B1F の時刻歴波において 25 gal に達する時刻を落下時刻とした。

④ 励磁 OFF 確認試験

励磁 OFF 確認試験での試験条件は以下のとおりである。

1) 入力地震波

入力地震波は、地震波特性試験で作成した模擬地震波のうち、レベル 2 とした。本試験では、電磁ホルダの電源 OFF により安全板を落下させ、消磁を行わなくても所定の落下時間内に落下することを確認するために、実機想定を上回る加速度での加振とした。

2) 加振方向

加振方向は、弱軸方向とした。落下時間に対しては、炉心タンク内の水の影響等により弱軸方向での落下の方が厳しいと考えられるため、弱軸方向での加振とした。

3) 炉心タンク内水位

炉心タンク内水位は、満水（炉心タンク底面から 150 cm）とした。落下時間に対しては、炉心タンク内の水の影響が生じる満水時が厳しいと考えられるため、満水での加振とした。

4) 安全板の落下時刻

落下時刻は、安全板の落下時間に対して、最も厳しい条件と考えられるレベル 2 の相対変位第 1 位時刻である 26.02 s とした。詳細は、9.1.4 (2)項に試験結果に示す。

5) 非磁性体厚さ

本試験体では、電源断のみで安全板が落下するように、アマチュア部に非磁性体を挿入した体系に変更した。この際、実機での非磁性体厚さを設定できるように、非磁性体厚さをパラメータとした。

非磁性体はステンレス鋼 (SUS304 鋼) とし、0.3、0.5 及び 1 mm の 3 種類を対象とした。なお、0.5 mm を実機想定厚さとし、薄い場合と厚い場合に対してもデータを取得することとした。

6) 調整ダイヤル

本試験装置で使用した電磁ホルダ整流器は、励磁電流値の調整により電磁ホルダの保持力の調整が可能である。励磁電流は、電圧調整ダイヤルにより 0~10 (最大保持力) までの設定が可能である。励磁電流値により残留保持力の影響が異なると考えられるため、電圧調整ダイヤルの設定値をパラメータとした。

励磁電流値が小さい場合 (ダイヤル 3 未満) では、保持が困難であることから、電圧調整ダイヤルは 3、5、7、10 の 4 点とした。なお、ダイヤル 10 は上限値のため設計値としては想定していないが、誤操作等を考慮した場合に、励磁 OFF の落下が最も厳しくなるため、考慮するものとした。

⑤ 保持状態確認試験

保持状態確認試験での試験条件は、以下のとおりである。なお、本試験では安全板が落下しないことを確認することが目的のため、炉心タンク内水位の設定は不要であるが、試験手順等の関係上、炉心タンク内水位は満水の条件で加振した。また、同様に、安全板の落下時刻についても設定しないものとした。

1) 入力地震波

入力地震波は、地震波特性試験で作成した模擬地震波のうち、レベル 2 とした。本試験では、地震に対する電磁ホルダの保持力を確認することを目的としているため、実機想定を上回る加速度での加振とした。

2) 加振方向

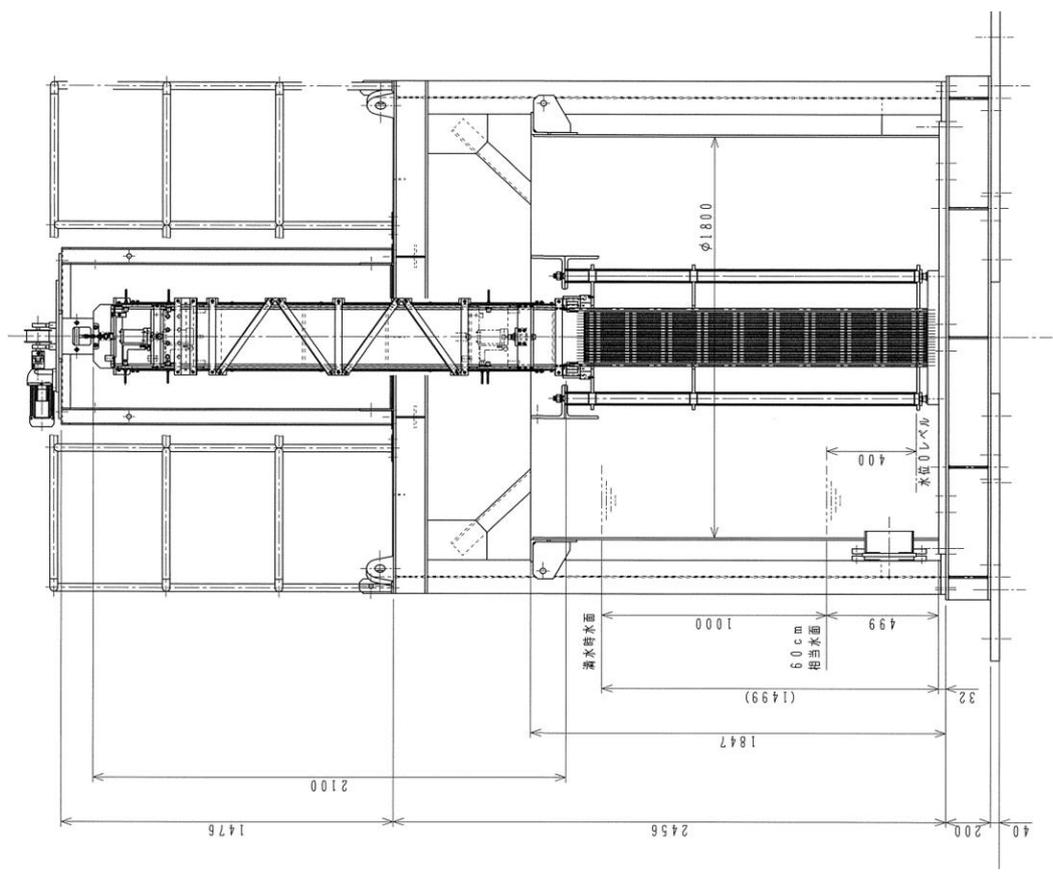
加振方向は、弱軸方向とした。電磁ホルダの保持力については、強軸方向と弱軸方向の加振方向による影響はないと考えられるため、弱軸方向の加振で代表させることとした。

3) 非磁性体厚さ

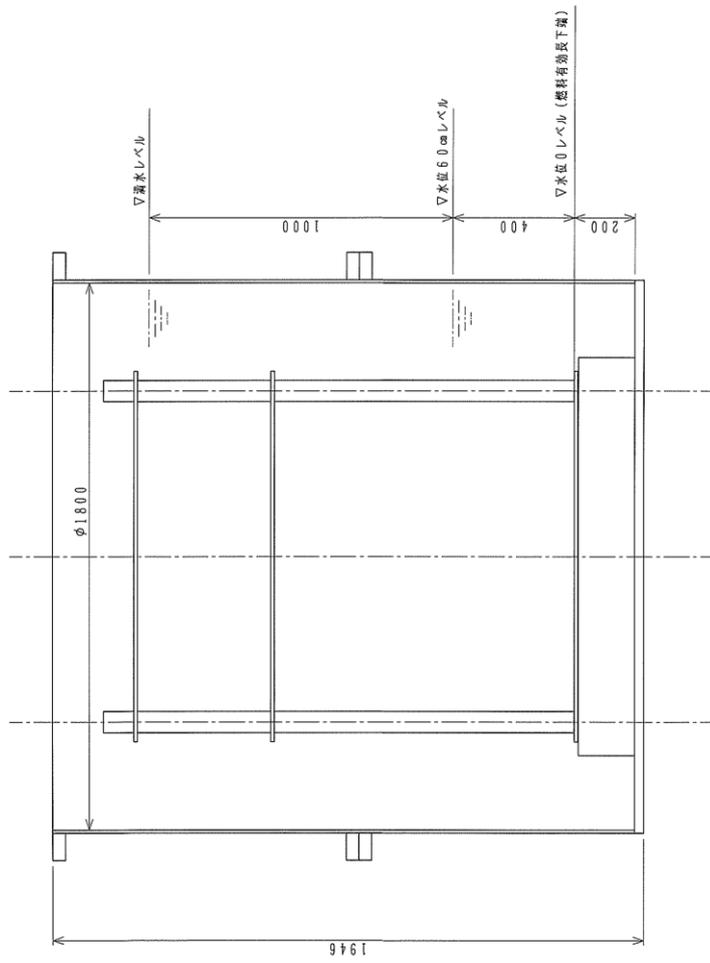
9.1.3 (3) ④項と同様に非磁性体厚さをパラメータとしたが、本試験体では厚さが厚い方が、励磁による保持力が低下し厳しい条件となるため、0.5 mm 及び 1 mm を使用することとした。

4) 調整ダイヤル

調整ダイヤルについては、試験結果にて後述するように、非磁性体厚さに係らずダイヤル3では吸着できなかったため、ダイヤル5及び7の設定とした。

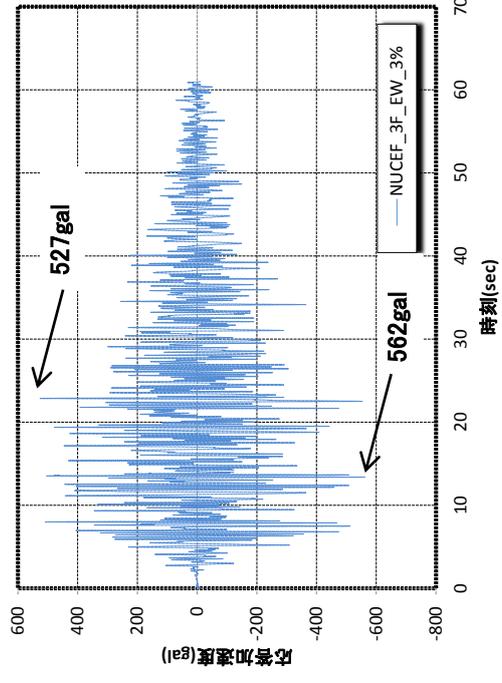
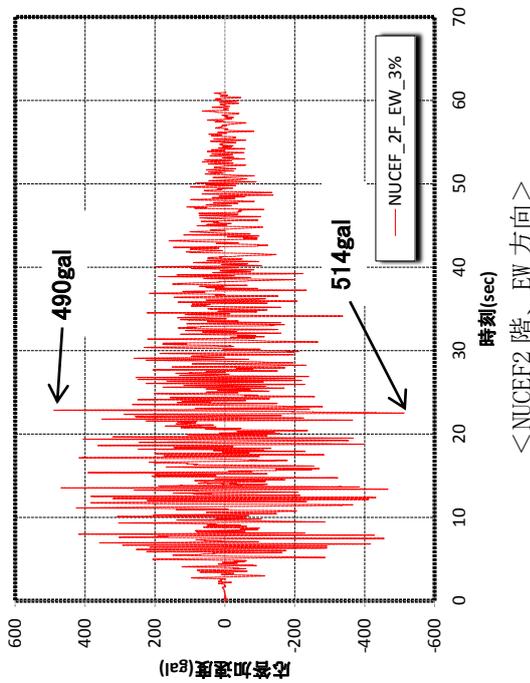
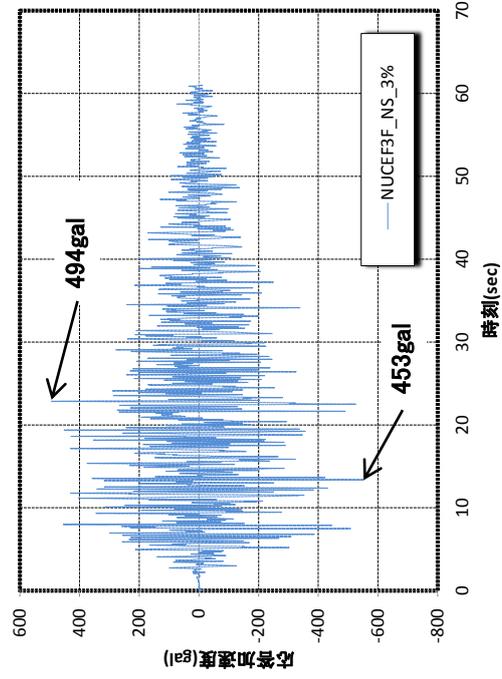
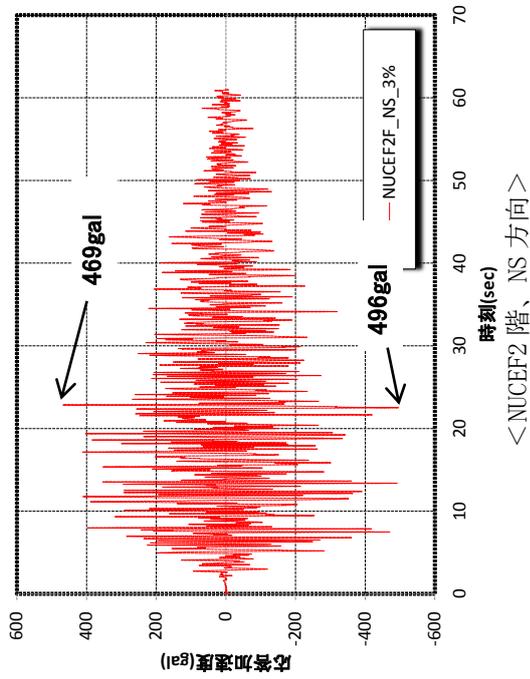


<試験装置>



<実機>

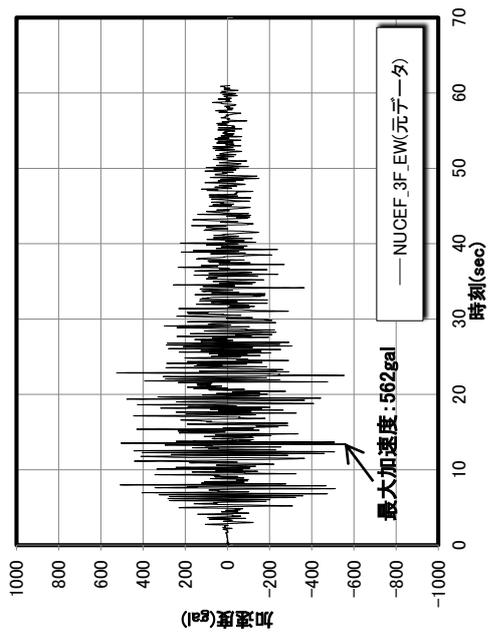
図 9.1.3-4 実機及び試験装置での炉心タンク内水位



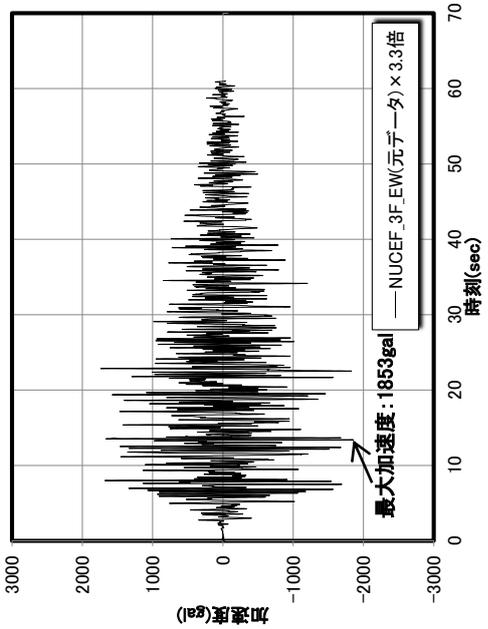
<NUCEF3 階、NS 方向>

<NUCEF3 階、EW 方向>

図 9.1.3-5 NUCEF での入力地震波：ベースとする地震波

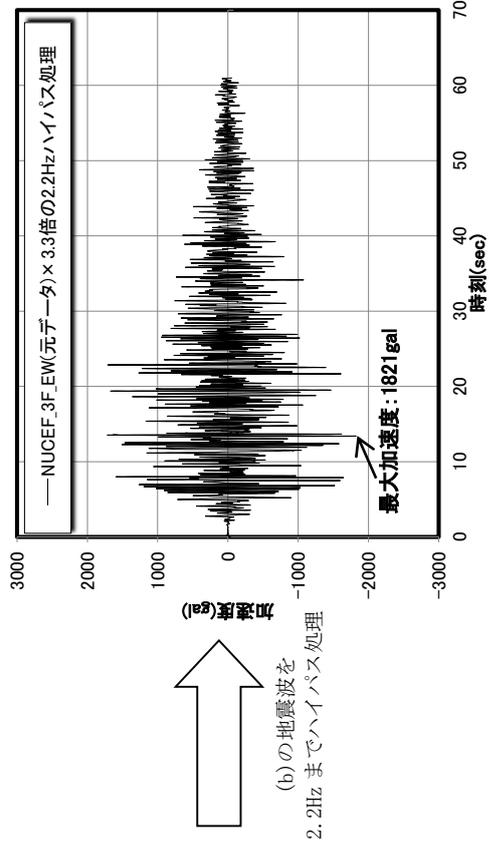


(a)の地震波を
3.3倍



(a) NUCEF_3F_EWの地震波 (元データ)

(b) NUCEF_3F_EWの地震波 (元データ) × 3.3倍

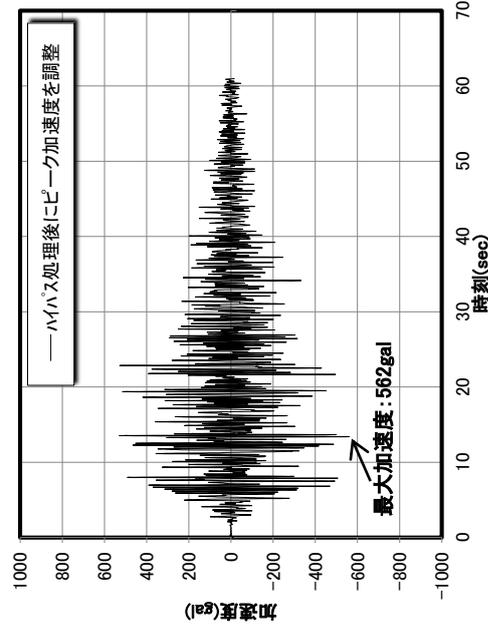


(b)の地震波を
2.2Hzまでハイパス処理

(c)の地震波のピーク
加速度を調整

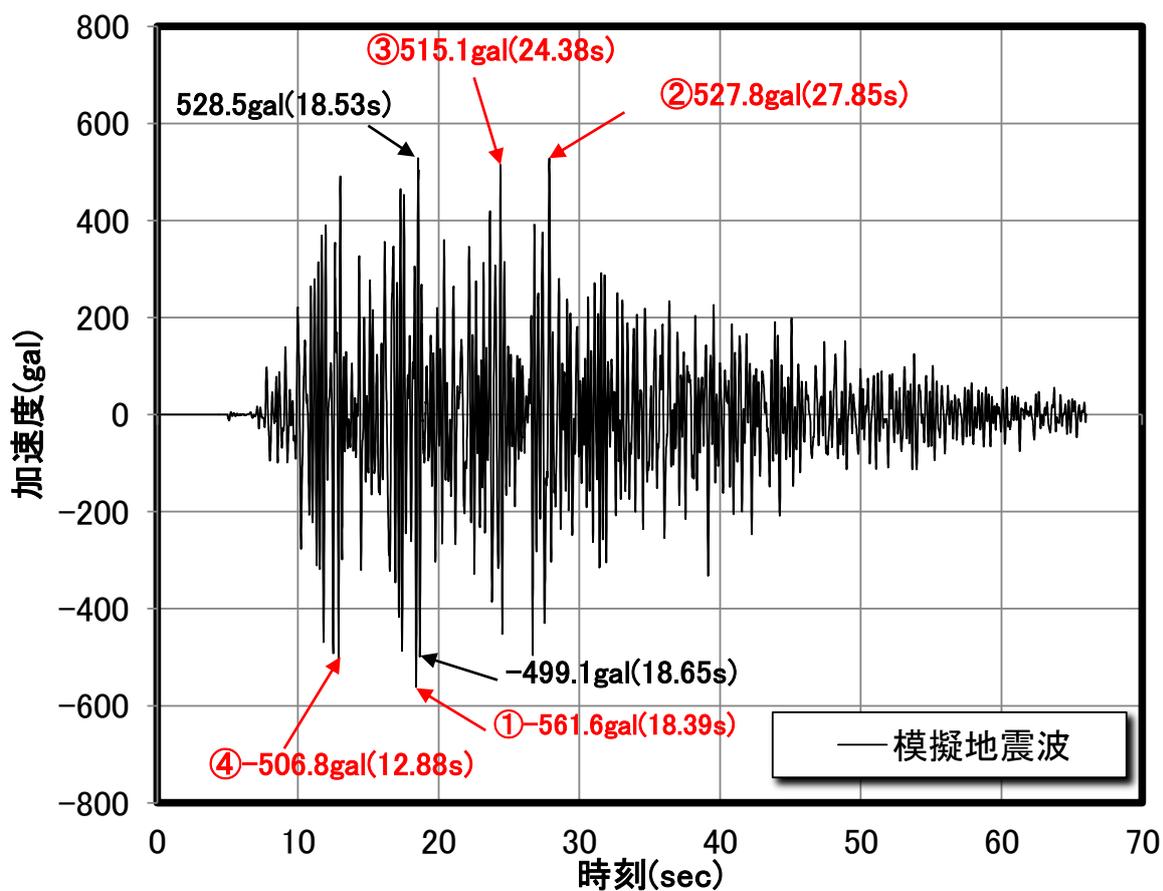
(c)地震波 × 1821gal / 562gal

(c) 2.2Hzまでのハイパス処理



(d) ピーク加速度の調整

図 9.1.3-6 入力地震波の作成手順

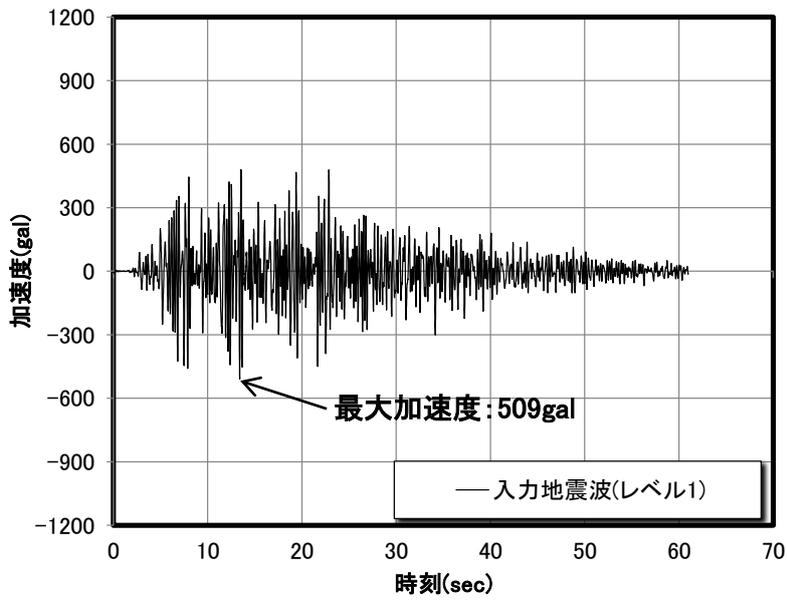


入力地震波の加速度上位4点

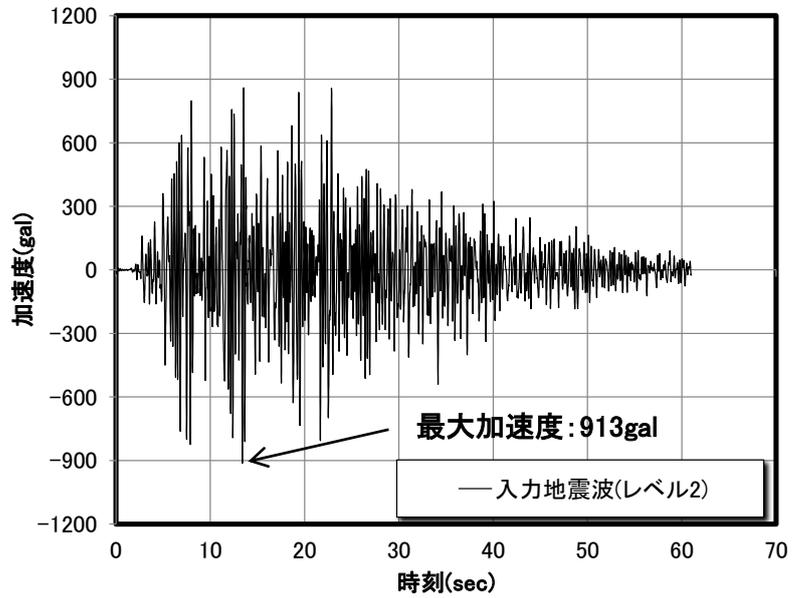
加速度上位	発生時刻 (s)	加速度 (gal)
第1位	18.39	-561.6
第2位	27.85	527.8
第3位	24.38	515.1
第4位	12.88	-506.8

※時刻の近接する 18.39 s、18.53 s 及び 18.65 s の3点は、最も加速度の大きい 18.39 s を選定した。

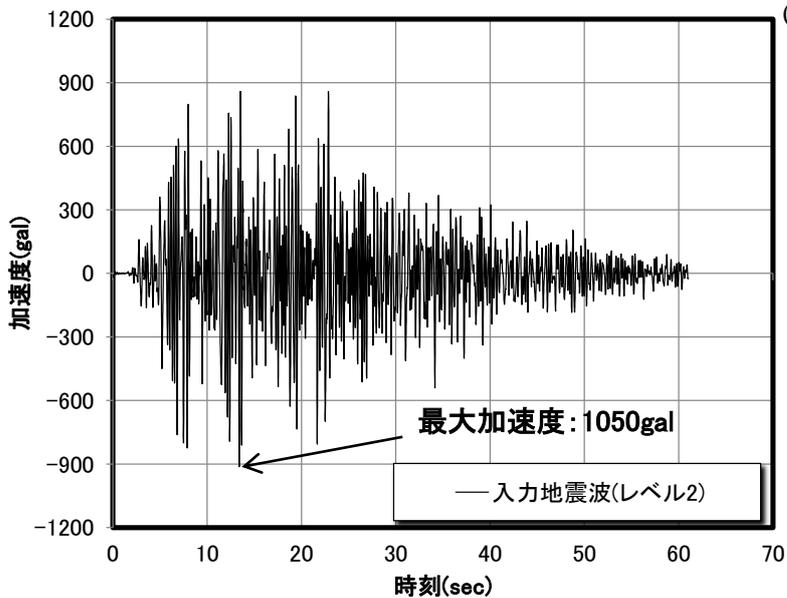
図 9.1.3-7 ベースとする入力地震波の設定結果



(a) レベル 1 : 最大加速度 509 gal



(b) レベル 2 : 最大加速度 913 gal



(c) レベル 3 : 最大加速度 1050 gal

図 9.1.3-8 各加振レベルの入力地震波

(4) 試験ケース

加振試験（第1回）及び加振試験（第2回）での実施した試験ケース一覧を表 9.1.3-1 に示す。加振ケースの設定では、9.1.3 (3)項に示した試験条件に基づくとともに、後述する加振試験（第1回）の試験結果を踏まえ、以下の観点を考慮した。

- ・強軸方向のデータ拡充
当初計画では、落下時間に対して弱軸方向の方が厳しいと考えていたが、加振方向による落下時間への影響を評価できるように、強軸方向も同様の加振ケースを設定することとした。
- ・加振レベルに対するデータの拡充
模擬地震波については、加振レベルをレベル 1、2、3 の 3 段階で実施しているが、データの連続性等の確認のため、各レベルの中間レベルとなる加振レベルを追加することとした。
- ・弱軸方向の加振レベルの拡大
詳細は別途試験結果に示すものとするが、弱軸方向の加振では当初計画に対し、試験体強度に余裕があることが確認できたため、弱軸方向に対してもレベル 3（入力ピーク加速度 1050 gal）を実施することとした。
- ・データの再確認のための加振
加振試験（第1回）において、他データと異なる傾向の見られる加振については、データ再確認を目的として、再度加振することとした。

(5) 計測項目

加振試験では、以下の項目を測定した。各センサの配置（計測位置）を図 9.1.3-9 に示す。また、各センサの取付け状態（代表例）を図 9.1.3-10 に示す。

① 応答加速度

試験装置各部に加速度計（3 軸）を設置し、加振時の応答加速度を測定した。加速度計は、安全板駆動装置の上部、中部及び下部の 3 か所に設置するとともに、炉心タンクの上部及び下部に設置した。また、参考データとして、安全板駆動装置の上部及び中部、試験装置架台の上面 2 箇所（箇所）に加速度計（1 軸）を設置し、各部の変形モード監視することとした。なお、加振方向は安全板強軸方向及び弱軸方向の 2 方向であるが、3 軸センサであるため、計測位置は同一箇所とした。

振動台上には、加速度計（3 軸）を設置し、入力地震波に対して実際の加振加速度を計測した。

② 応答変位

応答変位は、安全板駆動装置と炉心タンクの相対変位が確認できるように、安全板駆動装置の上部、中部、下部及び炉心タンク上部、下部の 5 点を計測した。各部の変位は、試験装置外に設置した計測架台を基準として計測した。

③ 部材のひずみ

加振中に過大な変形等が生じていないことを監視するために、安全板駆動装置、炉心タンク、試験架台及び駆動装置架台について、ひずみゲージを設置した。ひずみゲージは 3 軸であるが、部材に対しては 1 方向（軸方向）のみ監視可能であるため 1 軸のみの使用とした。ただし、加振方向によってひずみゲージの取付け位置は使い分けることとした。

④ 安全板の落下時間

安全板の落下時間は、下記の 2 種類について、制御盤に設置したタイマにより計測した。

- ・電磁ホルダ消磁（または電源 OFF） → 安全板下限センサ ON
- ・安全板上限センサ OFF → 安全板下限センサ ON

⑤ 炉心タンク水位

炉心タンク内側の円周方向に 8 か所、炉心タンク中央部に 2 か所の計 10 か所に液位計を設置して、炉心タンクの水位を確認した。液位計の設置高さは、液位計の ON-OFF が切り替わる位置を、以下のとおり設定した。なお、液位計は、液面までの距離により検出性が異なるため、加振試験（1 回目）と加振試験（2 回目）で設置位置を変更することとした。

・加振試験（第 1 回）： 液面から 20 mm

・加振試験（第 2 回）： 液面から 10 mm

炉心タンク水位については、炉心タンク底面から 50 cm 及び満水（炉心タンク底面から 150 cm）の 2 パターンがあるため、水位に応じて上記の距離となるように液位計位置を変更した。

表 9.1.3-1 加振試験での試験ケース一覧 (1/4)

(a) 振動特性試験

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体厚さ(mm)	電圧調整ダイヤル	炉心タンク内水位	加振波	加速度レベル	安全板落下時刻	液位計
振動特性試験	加振試験(第1回)	安全板強軸方向	1-1	—	10	空	掃引波 (0.3-30Hz, 0.1Hz/sec)	25gal	落下なし	20
			1-2	—	10	50cm		30gal	落下なし	20
			1-3	—	10	150cm		25gal	落下なし	20
		安全板弱軸方向	1-4	—	10	空		25gal	落下なし	20
			1-5	—	10	50cm		25gal	落下なし	20
			1-6	—	10	150cm		25gal	落下なし	20

(b) 地震波特性試験

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体厚さ(mm)	電圧調整ダイヤル	炉心タンク内水位	加振波	加速度レベル	安全板落下時刻	液位計	
地震波特性試験	加振試験(第1回)	安全板強軸方向	2-1	—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク7509gal)	落下なし	20	
			2-2	—	10	空		レベル3 (入力ピーク1050gal)	落下なし	20	
			2-3	—	10	50cm		レベル1 (入力ピーク7509gal)	落下なし	20	
			2-4	—	10	50cm		レベル3 (入力ピーク1050gal)	落下なし	20	
			加振試験(第2回)	5-N1	—	10		150cm	レベル0.5相当 (入力ピーク250gal)	落下なし	10
				加振試験(第1回)	2-5	—		10	150cm	レベル1 (入力ピーク7509gal)	落下なし
	加振試験(第2回)	5-N2	—		10	150cm		レベル1.4相当 (入力ピーク700gal)	落下なし	10	
		加振試験(第1回)	安全板弱軸方向	2-6	—	10		150cm	レベル3 (入力ピーク1050gal)	落下なし	20
	2-7			—	10	空		レベル1 (入力ピーク7509gal)	落下なし	20	
	2-8			—	10	空		レベル2 (入力ピーク913gal)	落下なし	20	
	2-9			—	10	50cm		レベル1 (入力ピーク7509gal)	落下なし	20	
	加振試験(第2回)			2-10	—	10		50cm	レベル2 (入力ピーク913gal)	落下なし	20
				2-11	—	10		150cm	レベル1 (入力ピーク7509gal)	落下なし	20
	加振試験(第2回)		2-12	—	10	150cm		レベル2 (入力ピーク913gal)	落下なし	20	
6-N1			—	10	150cm	レベル3 (入力ピーク1050gal)	落下なし	10			

表 9.1.3-1 加振試験での試験ケース一覧 (2/4)

(c) 地震波加振試験：弱軸方向

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体 厚さ(mm)	電圧調整 ダイヤル	炉心タンク内 水位	加振波	加速度レベル	安全板 落下時刻	液位計		
地震波加振試験	加振試験 (第1回)	安全板 弱軸方向	3-1	—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク750ggal)	スクラム条件	20		
			3-2	—	10				スクラム条件	20		
			3-3	—	10				加速度 第1位時刻	20		
			3-4	—	10				加速度 第2位時刻	20		
			3-5	—	10				加速度 第3位時刻	20		
			3-6	—	10				相対変位 第1位時刻	20		
	加振試験 (第2回)		3-6(2)	—	10	相対変位 第1位時刻	10					
			加振試験 (第1回)	3-7	—	10	相対変位 第2位時刻	20				
	3-8			—	10	相対変位 第3位時刻	20					
	加振試験 (第1回)		加振試験 (第1回)	3-N1	—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913ggal)	スクラム条件	20	
				3-9	—	10				相対変位 第1位時刻	20	
				3-10	—	10				相対変位 第1位時刻	20	
				3-11	—	10				相対変位 第2位時刻	20	
			加振試験 (第2回)	3-11(2)	—	10				相対変位 第2位時刻	10	
			加振試験 (第1回)	3-12	—	10				相対変位 第2位時刻	20	
	加振試験 (第2回)		加振試験 (第1回)	3-13	—	10	相対変位 第3位時刻	20				
				3-13(2)	—	10	相対変位 第3位時刻	10				
	加振試験 (第1回)		加振試験 (第1回)	3-14	—	10	相対変位 第3位時刻	20				
		加振試験 (第2回)		3-8B	—	10	相対変位 第4位時刻	10				
	加振試験 (第1回)	加振試験 (第1回)	3-15	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク750ggal)	スクラム条件	20		
			3-16	—	10				スクラム条件	20		
			3-17	—	10				加速度 第1位時刻	20		
			3-18	—	10				加速度 第2位時刻	20		
			3-19	—	10				加速度 第3位時刻	20		
			加振試験 (第2回)	3-19(2)	—				10	加速度 第3位時刻	10	
				加振試験 (第1回)	3-20				—	10	相対変位 第1位時刻	20
			3-21		—				10	相対変位 第2位時刻	20	
			加振試験 (第2回)	加振試験 (第2回)	3-22				—	10	相対変位 第3位時刻	20
					6-5				—	10	相対変位 第4位時刻	10
	加振試験 (第1回)	加振試験 (第1回)	3-23	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913ggal)	相対変位 第1位時刻	20		
			3-24	—	10				相対変位 第1位時刻	20		
			3-25	—	10				相対変位 第2位時刻	20		
3-26			—	10	相対変位 第2位時刻				20			
3-27			—	10	相対変位 第3位時刻				20			
加振試験 (第2回)			3-27(2)	—	10				相対変位 第3位時刻	10		
加振試験 (第1回)	加振試験 (第1回)	3-28	—	10	相対変位 第3位時刻	20						
		6-1	—	10	相対変位 第3位時刻	10						
加振試験 (第1回)	加振試験 (第1回)	3-N2	—	10	加速度積算の最大	20						
		加振試験 (第2回)	6-2	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050ggal)	相対変位 第1位時刻	10		
6-3	—		10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050ggal)	相対変位 第2位時刻	10				
6-4	—		10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050ggal)	相対変位 第3位時刻	10				
6-6	—		10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	300ggal (入力ピーク250ggal)	相対変位 第1位時刻	10				
6-7	—		10			800ggal (入力ピーク700ggal)	相対変位 第1位時刻	10				

表 9.1.3-1 加振試験での試験ケース一覧 (3/4)

(d) 地震波加振試験：強軸方向

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体 厚さ(mm)	電圧調整 ダイヤル	炉心タンク内 水位	加振波	加速度レベル	安全板 落下時刻	液位計
地震波加振試験	加振試験 (第1回)	安全板 強軸方向	3-29	—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク509gal)	スクラム条件	20
	加振試験 (第2回)		5-1	—	10				加速度第1位時刻	10
			5-2	—	10				加速度第2位時刻	10
			5-3	—	10				加速度第3位時刻	10
			5-4	—	10				相対変位第1位時刻	10
			5-5	—	10				相対変位第2位時刻	10
			5-6	—	10				相対変位第3位時刻	10
	5-N3		—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1.4相当 (入力ピーク700gal)	相対変位第1位時刻	10	
	加振試験 (第1回)		3-30	—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050gal)	相対変位 第1位時刻	20
	加振試験 (第2回)		5-7	—	10				相対変位第2位時刻	10
			5-8	—	10				相対変位第3位時刻	10
	加振試験 (第1回)		3-31	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク509gal)	スクラム条件	20
	加振試験 (第2回)		5-9	—	10				加速度第1位時刻	10
			5-10	—	10				加速度第2位時刻	10
		5-11	—	10	加速度第3位時刻				10	
	加振試験 (第1回)	3-N3	—	10	相対変位 第1位時刻				20	
	加振試験 (第2回)	5-12	—	10	相対変位第2位時刻				10	
		5-13	—	10	相対変位第3位時刻				10	
	加振試験 (第1回)	3-N4	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913gal)	加速度 第1位時刻	20	
	加振試験 (第1回)	3-32	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050gal)	相対変位 第1位時刻	20	
加振試験 (第2回)	5-14	—	10	相対変位第2位時刻				10		
	5-15	—	10	相対変位第3位時刻				10		
	5-16	—	10	レベル0.5相当 (入力ピーク250gal)			相対変位第1位時刻	10		
	5-17	—	10	レベル1.4相当 (入力ピーク700gal)			相対変位第1位時刻	10		

表 9.1.3-1 加振試験での試験ケース一覧 (4/4)

(e) 励磁 OFF 確認試験 (保持状態確認試験兼用)

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体厚さ(mm)	電圧調整ダイヤル	炉心タンク内水位	加振波	加速度レベル	安全板落下時刻	液位計	備考
励磁OFF確認試験 保持状態確認試験	加振試験 (第2回)	安全板 弱軸方向	7-1	0.3	3	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913gal)	—	—	ダイヤル3で保持不可のため、 取りやめ
			7-2	0.3	5				相対変位第1位時刻	10	
			7-3	0.3	7				相対変位第1位時刻	10	
			7-4	0.5	10				18秒付近	10	
			7-5	0.5	5				相対変位第1位時刻 (加速度第1位時刻以降)	10	
			7-6	0.5	7				相対変位第1位時刻	10	
			7-7	0.5	10				相対変位第1位時刻	10	
地震波加振試験	加振試験 (第1回)	安全板 弱軸方向	3-23	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913gal)	相対変位 第1位時刻	20	同一条件での比較データとして記載
			3-24	—	10				相対変位 第1位時刻	20	同一条件での比較データとして記載

(f) 保持状態確認試験

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体厚さ(mm)	電圧調整ダイヤル	炉心タンク内水位	加振波	加速度レベル	安全板落下時刻	液位計	備考
保持状態確認試験	加振試験 (第2回)	安全板 弱軸方向	8-1	1	7	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913gal)	落下なし	10	
追加試験 2-6			8-N1	0.5	5	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913gal)	落下なし	10	

入力Ch (動ひずみ アンプ)	センサ 番号	方向	計測器	型式(メーカー)	取付位置	備考
Ch1	A1	X軸	加速度計 (3軸)	AS-10TG (共和電業)	安全板駆動装置上部 (駆動装置架上上部)	強軸方向
Ch2		Y軸				弱軸方向
Ch3		Z軸				鉛直方向
Ch4	A2	X軸	加速度計 (3軸)	AS-10TG (共和電業)	安全板駆動装置中部	強軸方向
Ch5		Y軸				弱軸方向
Ch6		Z軸				鉛直方向
Ch7	A3	X軸	加速度計 (3軸)	AS-10TG (共和電業)	安全板駆動装置下部	強軸方向
Ch8		Y軸				弱軸方向
Ch9		Z軸				鉛直方向
Ch10	A4	X軸	加速度計 (3軸)	AS-10TG (共和電業)	炉心タンク上部	強軸方向
Ch11		Y軸				弱軸方向
Ch12		Z軸				鉛直方向
Ch13	A5	X軸	加速度計 (3軸)	AS-10TG (共和電業)	炉心タンク下部	強軸方向
Ch14		Y軸				弱軸方向
Ch15		Z軸				鉛直方向
Ch16	A6	Y軸	加速度計 (1軸)	AS-10GB (共和電業)	安全板駆動装置上部 (駆動装置架上上部)	弱軸方向
Ch17	A7	Y軸	加速度計 (1軸)	AS-10GB (共和電業)	安全板駆動装置中部	弱軸方向
Ch18	A8	X軸	加速度計 (1軸)	AS-10GB (共和電業)	試験装置架上上部	強軸方向
Ch19	A9	Y軸	加速度計 (1軸)	AS-10GB (共和電業)	試験装置架上上部	弱軸方向
Ch29	A10	X軸	加速度計 (3軸)	AS-10TG (共和電業)	振動台	強軸方向
Ch30		Y軸				弱軸方向
Ch31		Z軸				鉛直方向

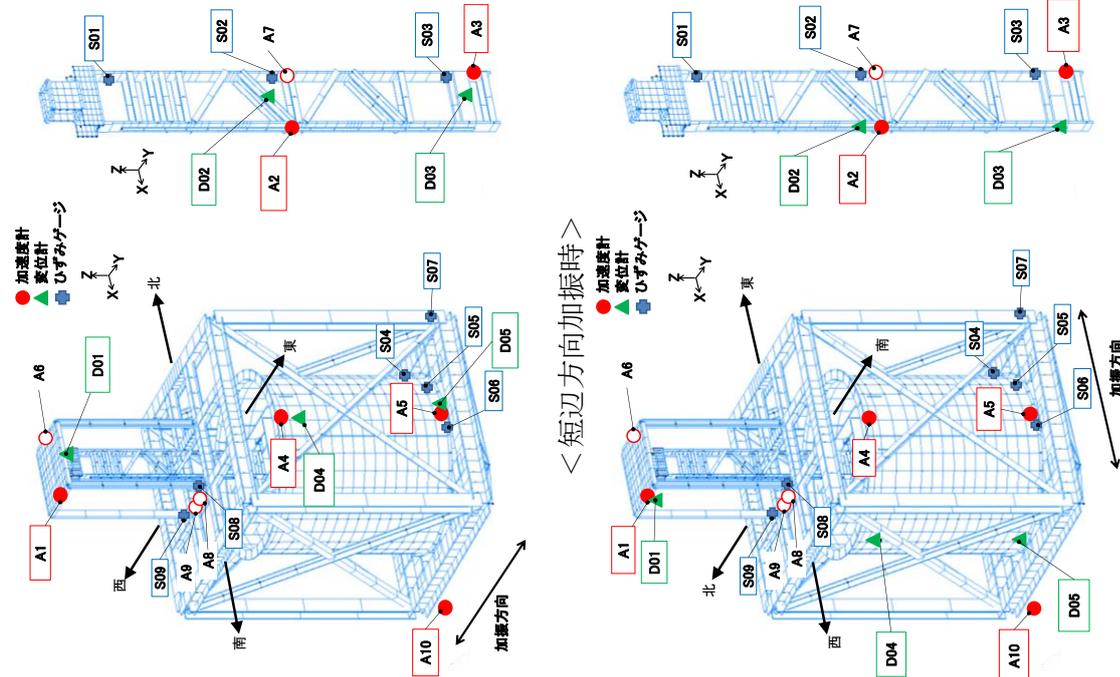
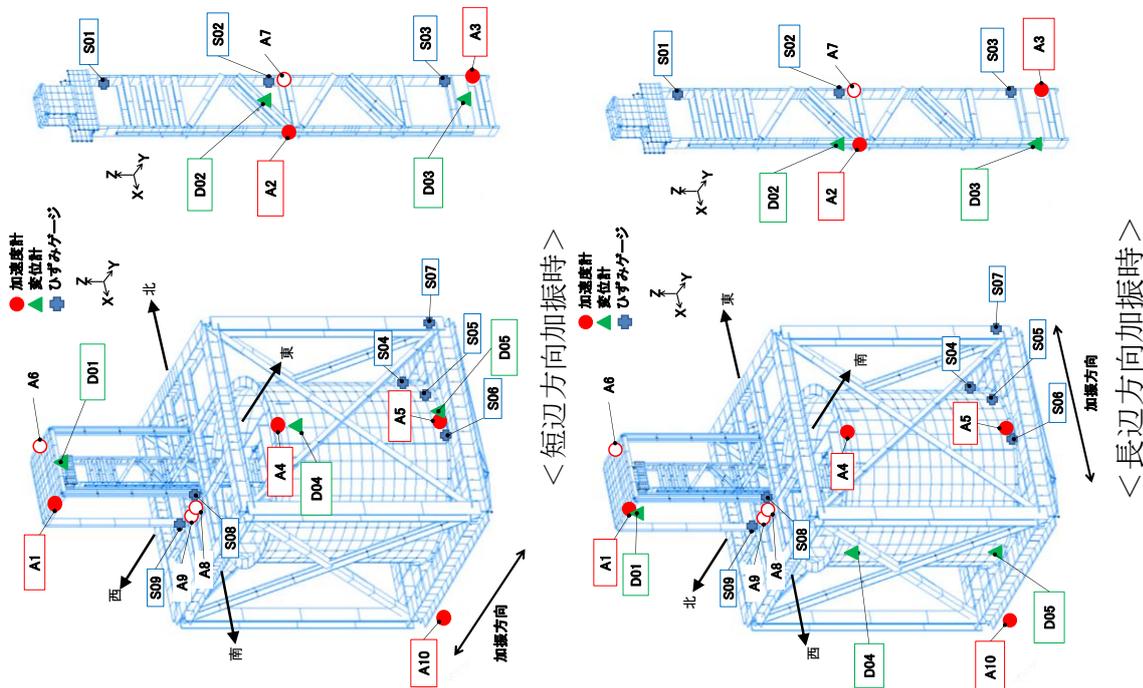


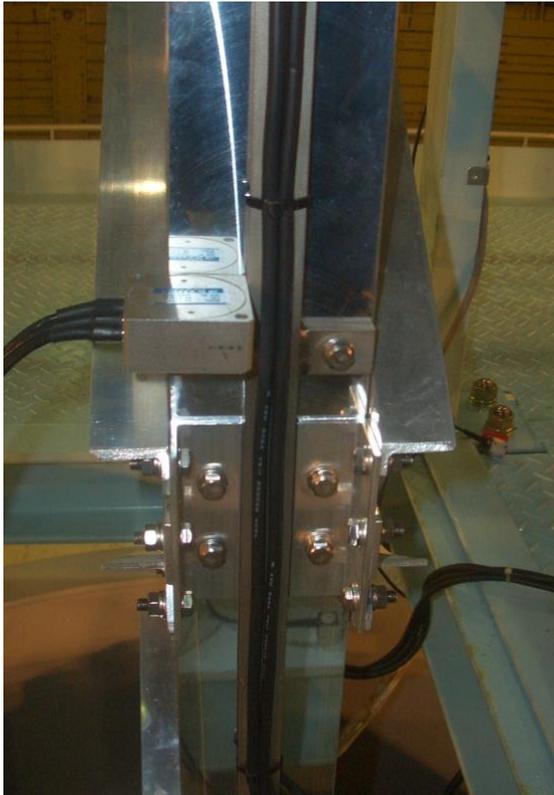
図 9.1.3-9 (1/2) センサ配置図及びセンサ番号図：加速度計

入力Ch (動ひずみ アンプ)	センサ 番号	方向	計測器	型式(メーカー)	取付位置	備考
Ch20	S01	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-23 (共和電業)	安全板駆動装置 上部	アルミ貼付用
Ch21	S02	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-23 (共和電業)	安全板駆動装置 中部	アルミ貼付用
Ch22	S03	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-23 (共和電業)	安全板駆動装置 下部	アルミ貼付用
Ch23	S04	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-11 (共和電業)	炉心タンク(下部:0°)	鉄貼付用
Ch24	S05	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-11 (共和電業)	炉心タンク(下部:45°)	鉄貼付用
Ch25	S06	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-11 (共和電業)	炉心タンク(下部:90°)	鉄貼付用
Ch26	S07	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-11 (共和電業)	試験装置架台(下部)	鉄貼付用
Ch27	S08	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-11 (共和電業)	駆動装置架台(下部)	鉄貼付用
Ch28	S09	—	ひずみ計	KFW-5-120-D17-11 (共和電業)	駆動装置架台(下部)	鉄貼付用
Ch33	D01	—	変位計	LK-G500 (キーエンス)	安全板駆動装置 上部 (駆動装置架台 上部)	加振方向
Ch34	D02	—	変位計	LK-G505 (キーエンス)	安全板駆動装置 中部	加振方向
Ch35	D03	—	変位計	LK-G505 (キーエンス)	安全板駆動装置 下部	加振方向
Ch36	D04	—	変位計	LK-G505 (キーエンス)	炉心タンク 上部	加振方向
Ch37	D05	—	変位計	LK-G505 (キーエンス)	炉心タンク 下部	加振方向

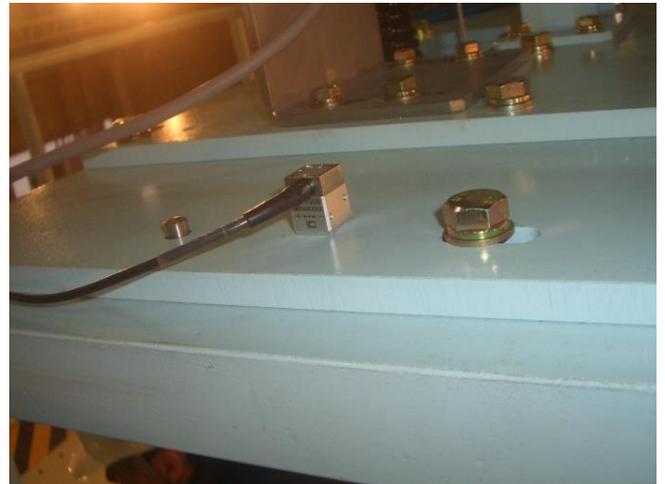


センサ配置図及びひずみゲージ

図 9.1.3-9 (2/2)



(a) 加速度計 A2 の取付状態



(b) 加速度計 A6 の取付状態



(c) 加速度計 A5 の取付状態

図 9.1.3-10 (1/3) 各センサの取付状態 (代表例) : 加速度計



(a) 変位計 D1 の取付状態

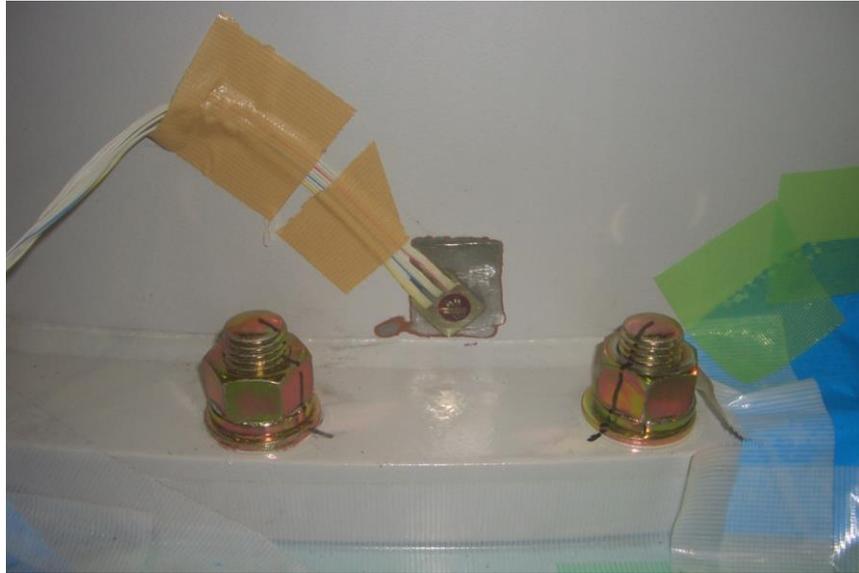


(b) 変位計 D2 の取付状態



(c) 変位計 D3 の取付状態

図 9.1.3-10 (2/3) 各センサの取付状態 (代表例) : 変位計



(a) ひずみゲージ S06 の取付状態

図 9.1.3-10 (3/3) 各センサの取付状態 (代表例) : ひずみゲージ

9.1.4 加振試験結果

9.1.3 節の試験条件に基づき実施した加振試験結果を以下に示す。

(1) 振動特性試験

振動特性試験により、試験装置の固有振動数について得られた結果は以下のとおりである。下記の結果は、予備解析で得られた固有振動数とおおむね一致しており、試験装置が想定した挙動を示すことを確認した。

① 強軸方向

強軸方向の固有値測定結果を図 9.1.4-1 に示す。図 9.1.4-1 では、代表ケースとして炉心タンク水位は空（試験ケース 1-1）の結果を示した。

固有値確認結果は、以下のとおりである。

- ・安全板駆動装置（上部）の強軸方向の変位について、固有振動数は約 11.3 Hz となった。予備解析結果では、強軸方向の固有振動数は約 12.7 Hz であり、おおむね一致する結果となった。

② 弱軸方向

弱軸方向の固有値測定結果を図 9.1.4-2 に示す。

弱軸方向については、炉心タンク水位の影響を見るため、代表ケースとして炉心タンク水位 50 cm（試験ケース 1-5）及び満水（試験ケース 1-6）を示した。

固有値確認結果は以下のとおりである。

- ・安全板駆動装置（上部）の弱軸方向の変位について、固有振動数は約 7.4Hz（50 cm 水位）、7.5 Hz（満水）となった。予備解析結果では、強軸方向の固有振動数は約 7.3Hz であり、おおむね一致する結果となった。
- ・炉心タンク水位については、50 cm 水位と満水で固有振動数に大きな影響はなく、水位による試験装置の挙動への影響は小さいことを確認した。

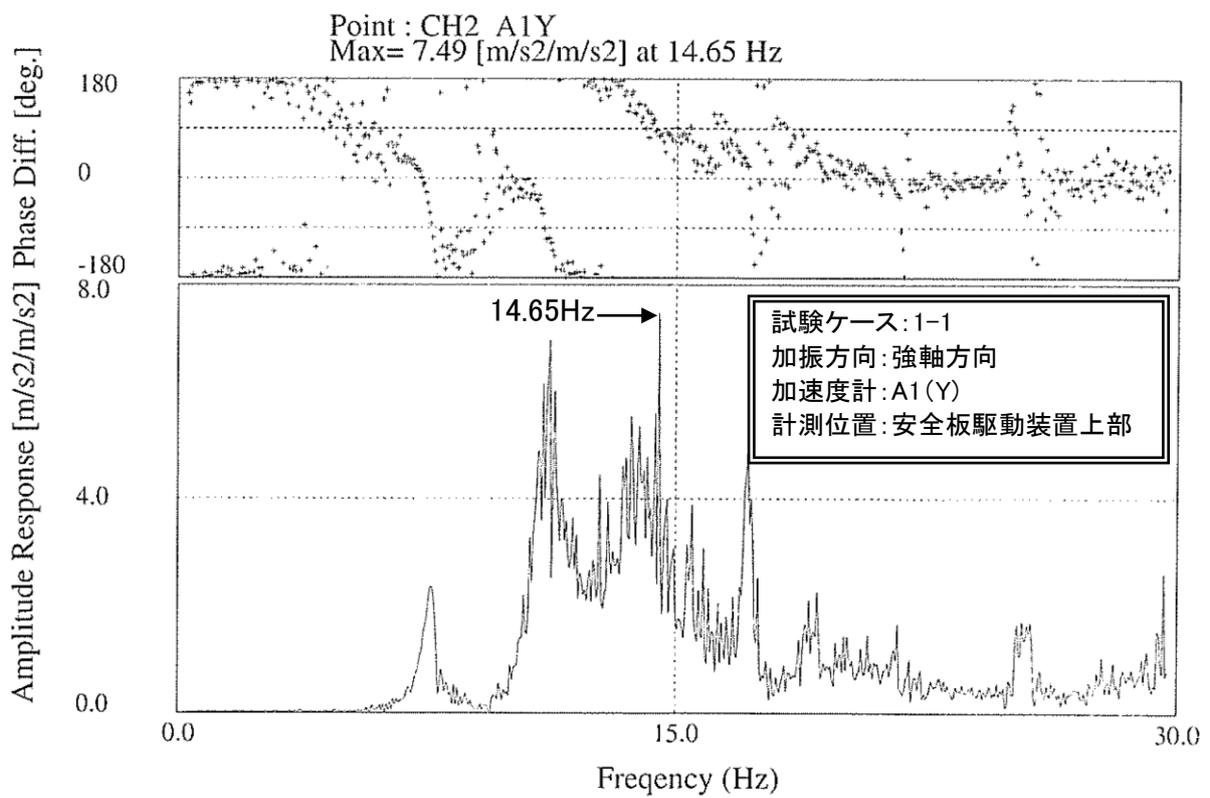
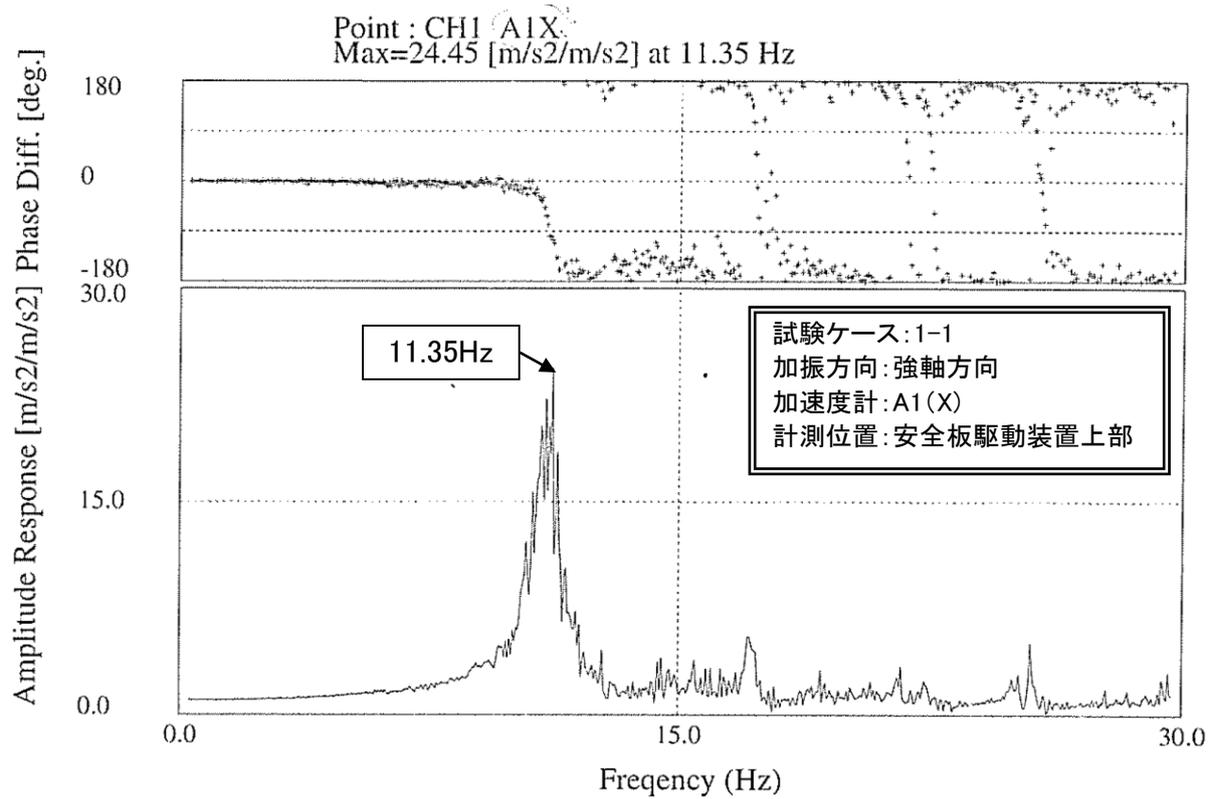


図 9.1.4-1 固有値測定結果：試験ケース 1-1（強軸方向、炉心タンク水位：空）

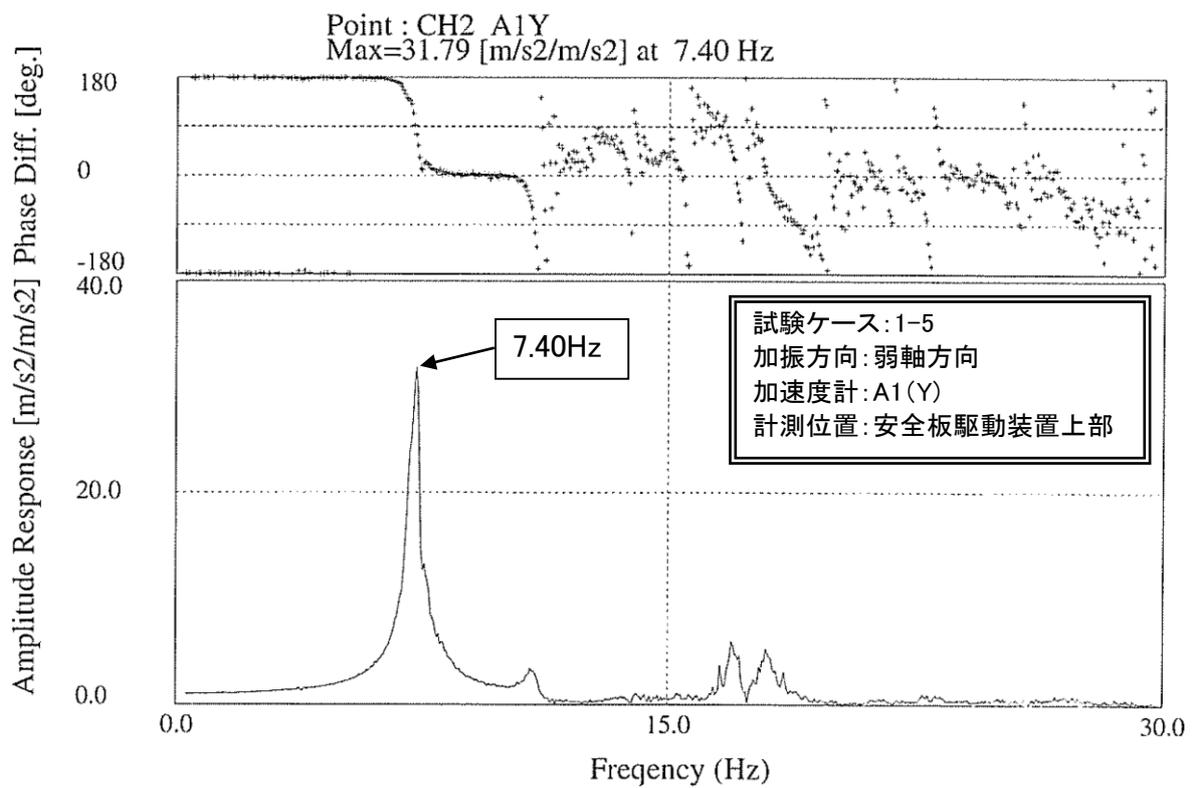
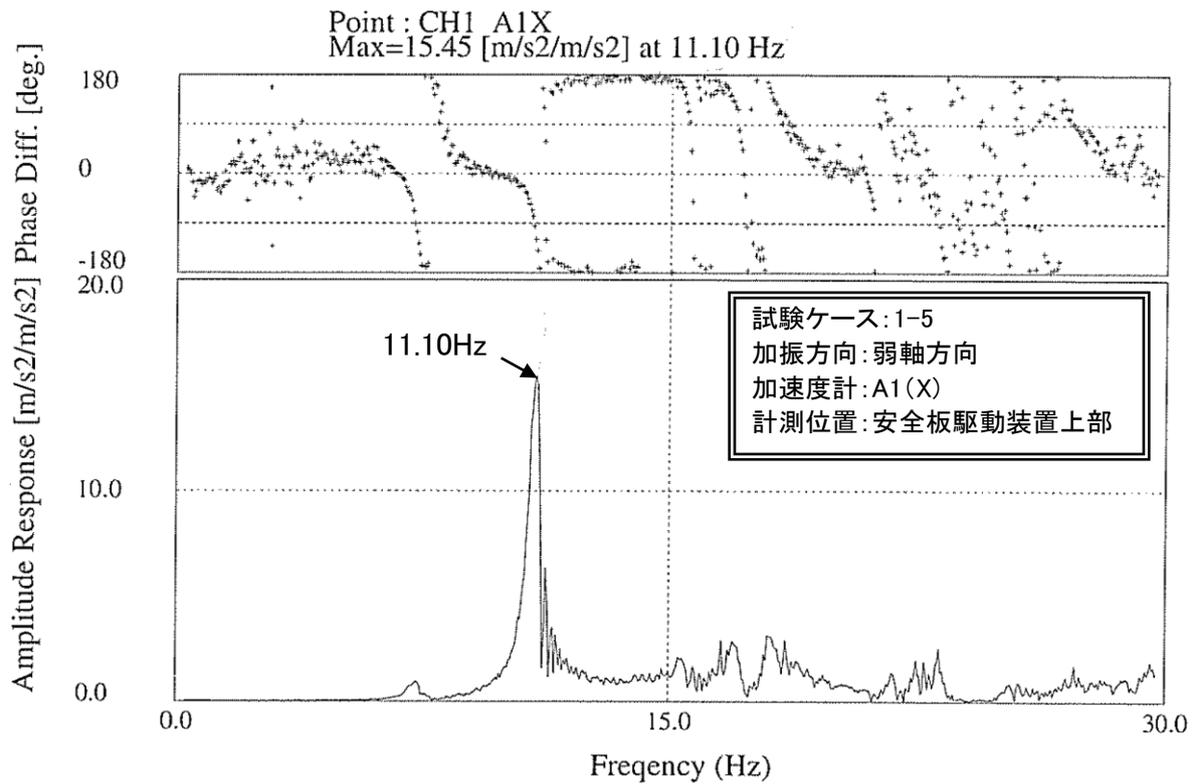


図 9.1.4-2 (1/2) 固有値測定結果: 試験ケース 1-1 (弱軸方向、50cm 水位)

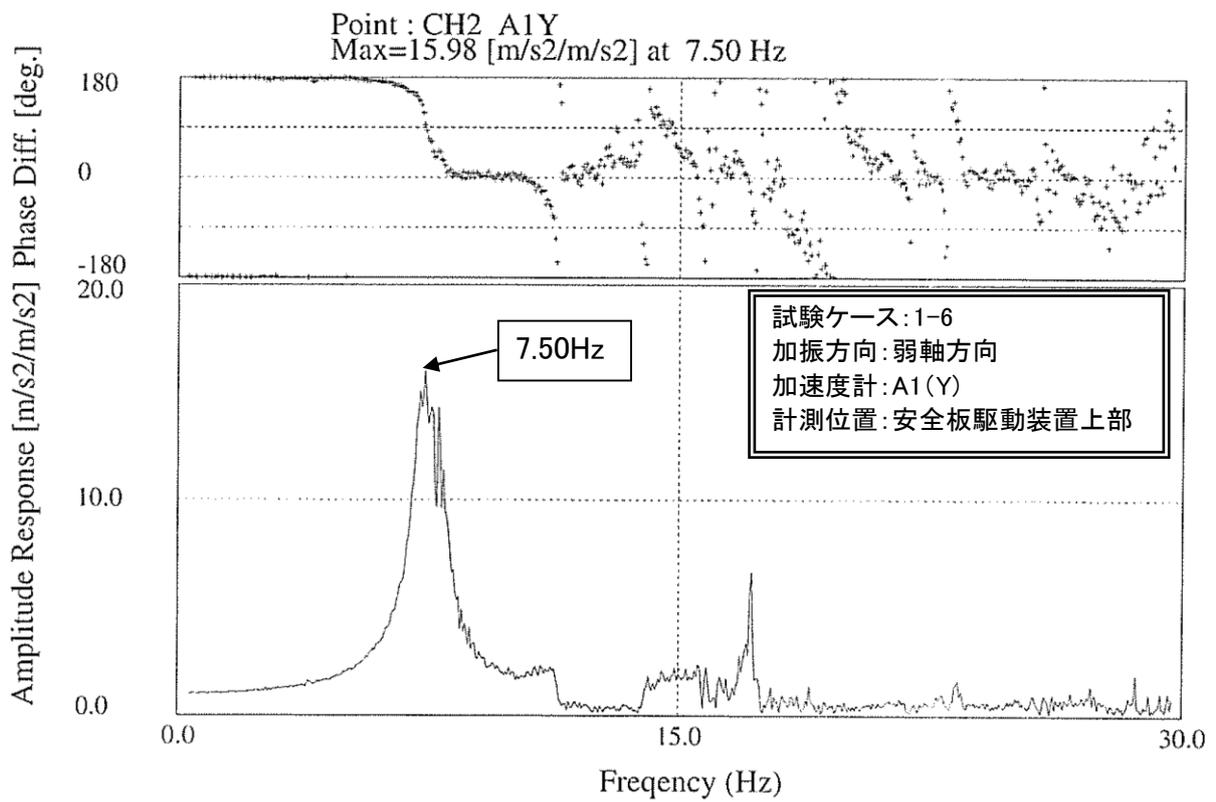
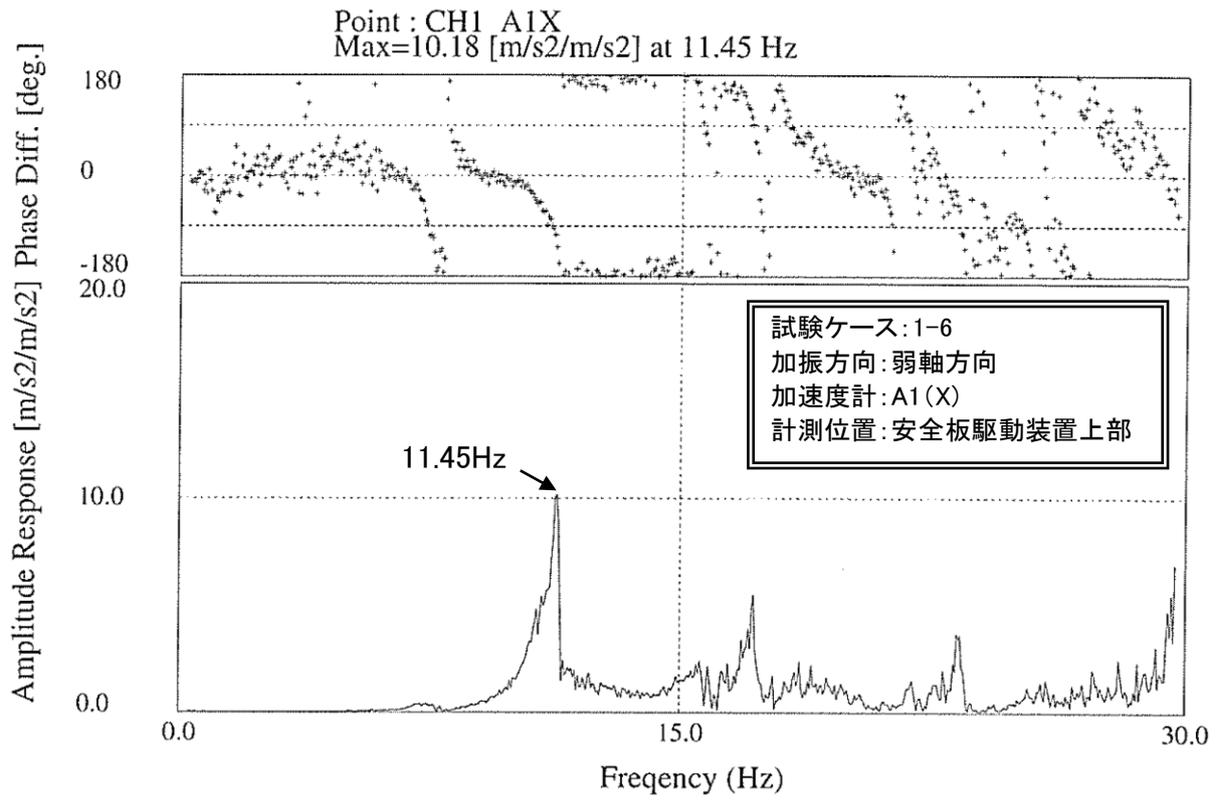


図 9.1.4-2 (2/2) 固有値測定結果: 試験ケース 1-6 (弱軸方向、満水)

(2) 地震波特性試験

地震波特性試験では、実機想定 of 模擬地震波にて加振を行い、試験体の振動挙動の確認を行うとともに、実加振での入力加速度及び相対変位の測定を行い、地震波加振試験での安全板の落下時刻を設定した。

地震波特性試験の試験結果は、以下のとおりである。

① 試験体の振動挙動

地震波特性試験において得られた試験体の変形挙動を、図 9.1.4-3~4 に示す。

図 9.1.4-3~4 は、表 9.1.4-1 に示す目標ピーク発生時刻の挙動を示したものである。

試験体挙動に関する試験結果は、以下のとおりであり、強軸方向及び弱軸方向とも、予備解析等で想定したとおりの変形挙動を示すことを確認した。

1) 強軸方向加振

- ・強軸方向加振では、炉心タンクに対し、安全板駆動装置上部が強軸方向に変形しており、予備解析等により想定したとおりの変形挙動を示すことが確認できた。強軸方向への変形量（相対変位）は、レベル 1 で最大 2.09 mm、レベル 3 で最大 6.2 mm であった。相対変位についても、予備解析より多少小さくはなっているが、ほぼ予定の変位が得られることを確認した。

なお、予備解析は振幅後の床応答スペクトルを使用したスペクトル解析で評価を行っているが、実加振では時刻歴波を用いることから、固有振動数のずれ等により解析より変位等は小さくなる。

- ・加速度最大時刻と相対変位最大時刻では、変形挙動に大きな違いはなく、いずれの場合でも、炉心タンクに対して安全板駆動装置上部が変位する結果となった。
- ・炉心タンクの水位については、空の場合と満水の場合で発生する相対変位に大きな差はなく、安全板駆動装置部の変形に対し炉心タンク内水位の影響はほとんどないことを確認した。

2) 弱軸方向加振

- ・弱軸方向加振においても、炉心タンクに対し、安全板駆動装置上部が弱軸方向に変形しており、予備解析等により想定したとおりの変形挙動を示すことが確認できた。弱軸方向への変形量（相対変位）は、レベル 1 で最大 5.61mm、レベル 2 で最大 12.3 mm であった。相対変位についても、予備解析より多少小さくはなっているが、ほぼ予定の変位が得られることを確認した。

なお、予備解析では、最大相対変位を約 15 mm と想定していたが、強軸方向の場合と同様に、振幅後の床応答スペクトルを使用したスペクトル解析での評価と時刻歴波による実加振の差によるものである。

- ・加速度最大時刻と相対変位最大時刻では、変形挙動に大きな違いはなく、いずれの場合でも、炉心タンクに対して安全板駆動装置上部が変位する結果となった。
- ・炉心タンクの水位については、空の場合と満水の場合で発生する相対変位に大きな差はなく、安全板駆動装置部の変形に対し炉心タンク内水位の影響はほとんどないことを確認した。

② 安全板落下時刻の設定

①の結果により、試験装置の挙動は、おおむね想定どおりであることが確認できたため、本試験結果に基づき、地震波加振試験での安全板の落下時刻を設定した。

1) スクラム条件での落下時刻

スクラム条件に対しては、地震波の加速度ピーク時刻等ではなく、実機運用を想定した落下時刻の設定となる。スクラム条件での落下時刻については、以下のとおりとした。

i) 実機での運用等

実機では、図 9.1.4-5 に示すように、炉下室（B1F）に地震計が設置され、本地震計で 25 gal を検出した時点で、スクラム（安全板落下）となる。

地震時の時刻歴波について、安全板は炉室に設置され、炉室は 1F～3F にまたがっており、安全板が設置される架台は建家壁から支持される。実機に対する建家の耐震計算モデル及び適用するフロアは図 9.1.4-6 に示すとおりである。

- ・安全板：設置室の最上階となる 3F（NODE4）を適用
- ・地震計：B1F（NODE1）あるいは 1F（NODE2）の時刻歴波のうち、25 gal 到達の早い方

ii) 加振試験での試験条件

上記の実機運用を考慮して、安全板の落下時刻は以下のとおりとした。

- ・スクラム条件である 25gal については、NODE1 及び NODE2 の時刻歴波で早く到達する時間で設定した。図 9.1.4-7 に示すように、NODE1 で 7.66 s 時点で約 30gal となるため、本時刻を 25 gal 到達時点の時刻とした。
- ・25 gal 検出後の消磁信号までの時間は無視できる程度であるため、25 gal 到達時刻を消磁信号の時刻とした。
- ・消磁信号後、実機で想定される加速度が得られるように、模擬地震波データの加速度を調整した（この際、オーバシュート分は考慮する）。

iii) スクラム条件での落下時刻

スクラム条件での落下時刻の設定について、図 9.1.4-7 に示す。

- ・スクラム条件での落下時刻については、7.66 s（B1F での加速度が 25 gal を超える時刻（2.66s）に、0 加速度入力の 5 s を加えた時刻）とした。
- ・実機想定の時時刻歴波において、7.66s から安全板の落下時間である 0.63 s 以内の最大加速度は約 123 gal であるが、2.2 Hz カットした模擬地震波データでの最大加速度は約 95 gal である。したがって、実機想定 of 123 gal が得られるように、模擬地震波データを 1.3 倍（=123/95）し、オーバシュート量（1.12 倍想定）を考慮して、模擬地震波データを 1.16 倍（=1.3/1.12）して使用した。

2) スクラム条件以外での落下時刻

スクラム条件以外については、入力加速度の最大時刻あるいは相対変位の最大時刻等で落下時刻を設定した。

i) 落下時刻の設定方法の概要

地震波特性試験の試験結果に基づく落下時刻の設定の概要は以下のとおりである。また、模式図を図 9.1.4-8 に示す。

- ・入力加速度のピークに該当する落下時刻については、図 9.1.3-7 に示す入力地震波の上位 3 位までを想定して時刻を設定した。なお、実加振では、ピーク位置にずれが生じるため、目標とする加速度ピークが確実に安全板の落下時間内に合致するように変位計測値等を利用して落下時刻を設定した。
- ・相対変位のピークに該当する落下時刻については、地震波特性試験結果に基づき炉心タンクと安全板駆動装置（ガイドフレーム）上部の相対変位を評価した上で、目標とする相対変位のピーク時刻を設定した。また、実加振での対応については上記①と同様とした。
- ・落下時刻の設定においては、製作段階での試験装置の単体作動試験結果により、安全板の落下時間は、1)電磁石消磁～安全板下限センサ ON : 0.63 s、2)安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON : 0.5 s を想定し、安全板落下中に目標とする加速度あるいは相対変位のピークが含まれるように設定した。

ii) スクラム条件以外での落下時刻

上記 i)の方法を用い、地震波特性試験により、入力加速度及び炉心タンクと安全板駆動装置（上部）の相対変位の上位ピーク発生時刻に対し、安全板の落下時刻を設定した結果を、表 9.1.4-1 に示す。

表 9.1.4-1 に示す時刻の定義は以下のとおりである。

- ・目標ピーク発生時刻：入力地震波の時刻歴において安全板を落下させる対象の
加速度ピーク時刻

- ・落下設定時刻：実際に安全板を落下させるためのタイマ設定時刻

落下時刻の設定に際して、同一試験条件における近接時刻では、同じ変形となる可能性が高いため、加速度が高くなる時刻同士、または相対変位が大きくなる時刻同士が近接しないよう落下時刻を設定した。

加速度が上位となる時刻及び相対変位が上位となる時刻は、ほぼ全てのケースで 13 s、19 s、25 s 及び 28 s 近傍の 4 つの時間帯となった。

表 9.1.4-1 地震波特性試験により決定した安全板落下時刻

試験ケース	試験条件			順位	振動台の加速度 (A10Y)				安全板(上部)の相対変位 (D01-D04)				アラーム発信時刻 (sec)
	加振方向	加振レベル	炉心タンク内水位		ピーク値 (gal)	目標ピーク発生時刻 (sec)	落下設定時間 (sec)	適応する試験ケース	ピーク値 (mm)	目標ピーク発生時刻 (sec)	落下設定時間 (sec)	適応する試験ケース	
2-1	強軸	レベル1 (509gal)	0cm	第1位	582	18.78	15.87	CASE 5-1	-2.08	18.82	15.90	CASE 5-4 *1	2.51
				第2位	558	24.64	21.72	CASE 5-2	-2.05	13.29	10.37	CASE 5-5 *1	
				第3位	555	13.25	10.34	CASE 5-3	-1.99	24.67	21.76	CASE 5-6 *1	
2-2	強軸	レベル3 (1050gal)	0cm	第1位	-	-	-	-	-6.17	13.28	11.32	CASE 3-30	1.56
				第2位	-	-	-	-	-5.66	18.80	16.76	CASE 5-7	
				第3位	-	-	-	-	-5.16	28.12	26.08	CASE 5-8	
2-5	強軸	レベル1 (509gal)	150cm	第1位	572	18.79	15.96	CASE 5-9	2.20	13.30	10.47	CASE3-31	2.43
				第2位	556	24.65	21.62	CASE 5-10	2.19	18.83	16.00	CASE 5-12 *1	
				第3位	552	13.26	10.43	CASE 5-11	2.04	24.68	21.85	CASE 5-13 *1	
2-6	強軸	レベル3 (1050gal)	150cm	第1位	-	-	-	-	-6.37	13.70	11.23	CASE 3-32	1.99
				第2位	-	-	-	-	-5.88	19.22	16.75	CASE 5-14	
				第3位	-	-	-	-	-5.30	28.54	26.07	CASE 5-15	
2-7	弱軸	レベル1 (509gal)	0cm	第1位	573	19.17	15.99	CASE 3-3	-5.30	28.53	25.33	CASE 3-6	2.8
				第2位	549	25.02	21.84	CASE 3-4	-4.89	25.06	21.86	CASE 3-7 *1	
				第3位	548	13.63	10.45	CASE 3-5	4.80	27.35	24.17	CASE3-8(1) *2	
				第4位	537	28.49	-	-	-4.36	17.95	14.74	CASE 3-8(2) *3	
2-8	弱軸	レベル2 (913gal)	0cm	第1位	1188	19.18	-	-	-11.84	28.57	26.10	CASE 3-9 CASE 3-10	2.09
				第2位	1124	25.04	-	-	-9.63	25.09	22.62	CASE 3-11 CASE 3-12	
				第3位	1111	28.50	-	-	-9.61	17.96	15.49	CASE 3-13 CASE 3-14	
2-11	弱軸	レベル1 (509gal)	150cm	第1位	579	19.18	15.93	CASE 3-17	-5.61	28.56	25.31	CASE 3-20	2.87
				第2位	562	13.65	10.40	CASE 3-18	5.35	27.36	24.11	CASE 3-21 *2	
				第3位	561	25.03	21.78	CASE 3-19	-5.15	25.07	21.82	CASE 3-22 *1	
				第4位	-	-	-	-	-4.49	17.96	14.71	CASE 6-5 *3	
2-12	弱軸	レベル2 (913gal)	150cm	第1位	-	-	-	-	-12.27	28.57	26.02	CASE 3-23 CASE 3-24 CASE 7-2 CASE 7-3 (CASE 7-4) *4 CASE 7-5 CASE 7-6 CASE 7-7	2.12
				第2位	-	-	-	-	11.10	28.22	25.72	CASE 3-25 *2 CASE 3-26 *2	
				第3位	-	-	-	-	-9.97	17.96	15.41	CASE 3-27 CASE 3-28	
				第4位	-	-	-	-	9.95	25.17	22.62	CASE 6-1 *3	
5-N1	強軸	レベル0.5相当 (250gal)	150cm	第1位	-	-	-	-	-0.89	18.75	16.03	CASE5-16 CASE6-6	2.34
				第2位	-	-	-	-	-0.88	24.61	-	-	
				第3位	-	-	-	-	-0.81	28.07	-	-	
5-N2	強軸	レベル1.4相当 (700gal)	150cm	第1位	-	-	-	-	-3.20	13.23	10.91	CASE5-17 CASE6-7	1.89
				第2位	-	-	-	-	-3.18	18.76	-	-	
				第3位	-	-	-	-	-2.87	24.61	-	-	
6-N1	弱軸	レベル3 (1050gal)	150cm	第1位	-	-	-	-	-15.24	28.56	26.17	CASE 6-2	1.91
				第2位	-	-	-	-	12.09	13.56	11.17	CASE 6-3	
				第3位	-	-	-	-	11.34	32.11	29.72	CASE 6-4	

*1・・・加速度と同時刻のため実施省略
 *2・・・第1回加振試験にて実施済だが、上位時刻と近接しているため、第2回加振試験で再取得
 *3・・・第2回加振試験にて再取得分
 *4・・・試験ケース7-4は、スロッシングの影響が大きい18秒付近で落下させることとした

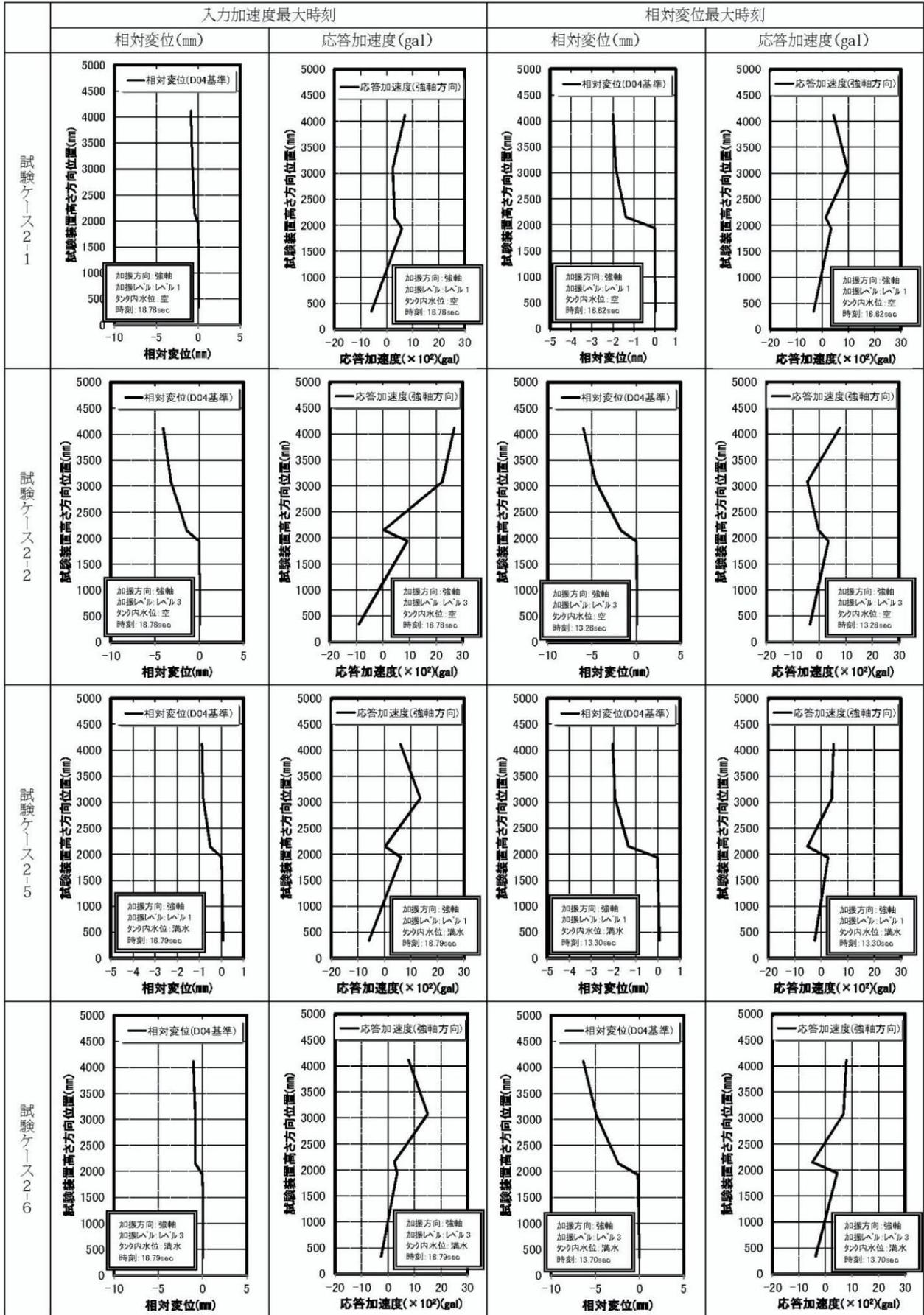


図 9.1.4-3 地震波特性試験結果： 試験装置の変形状態図（強軸加振時）

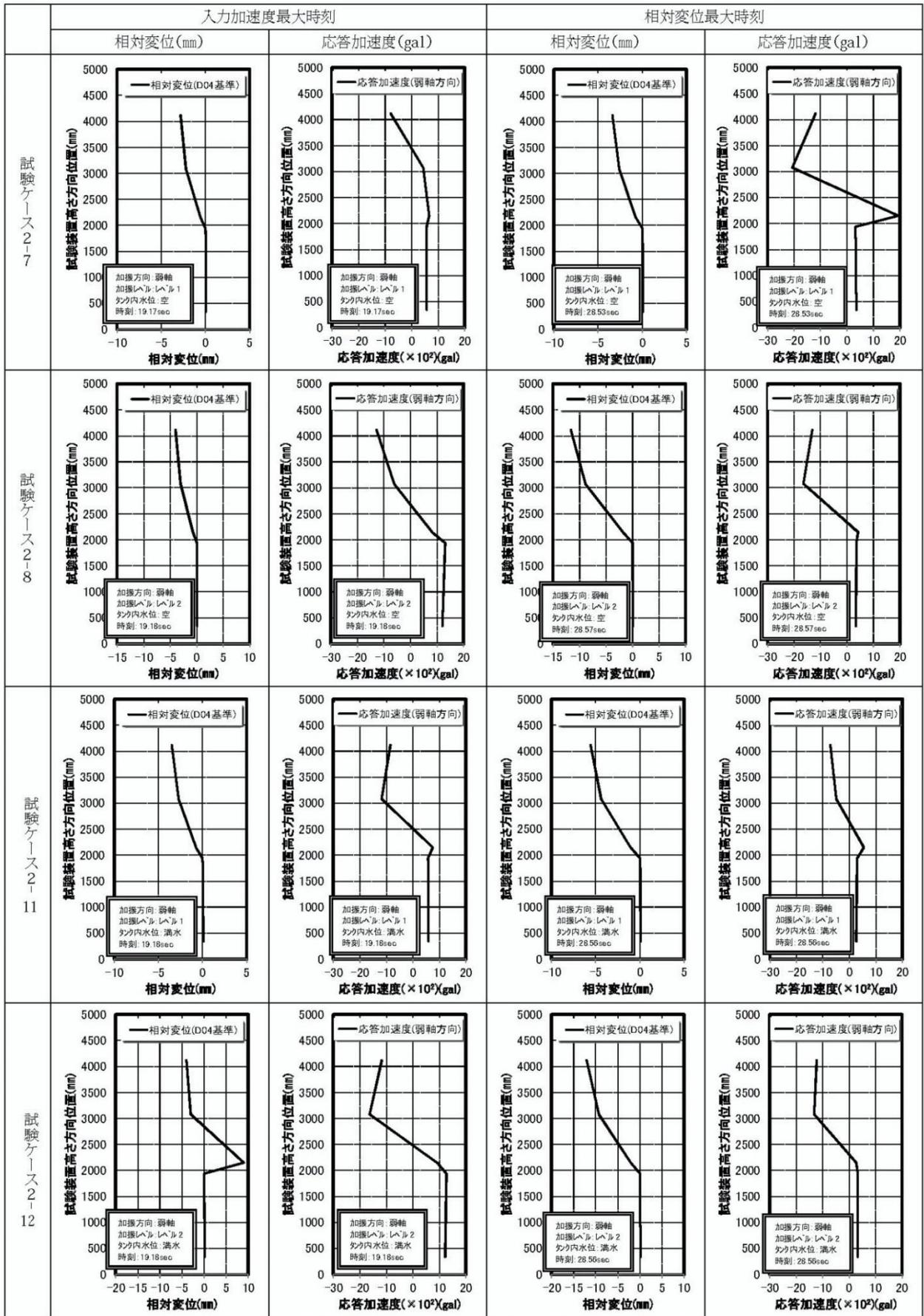
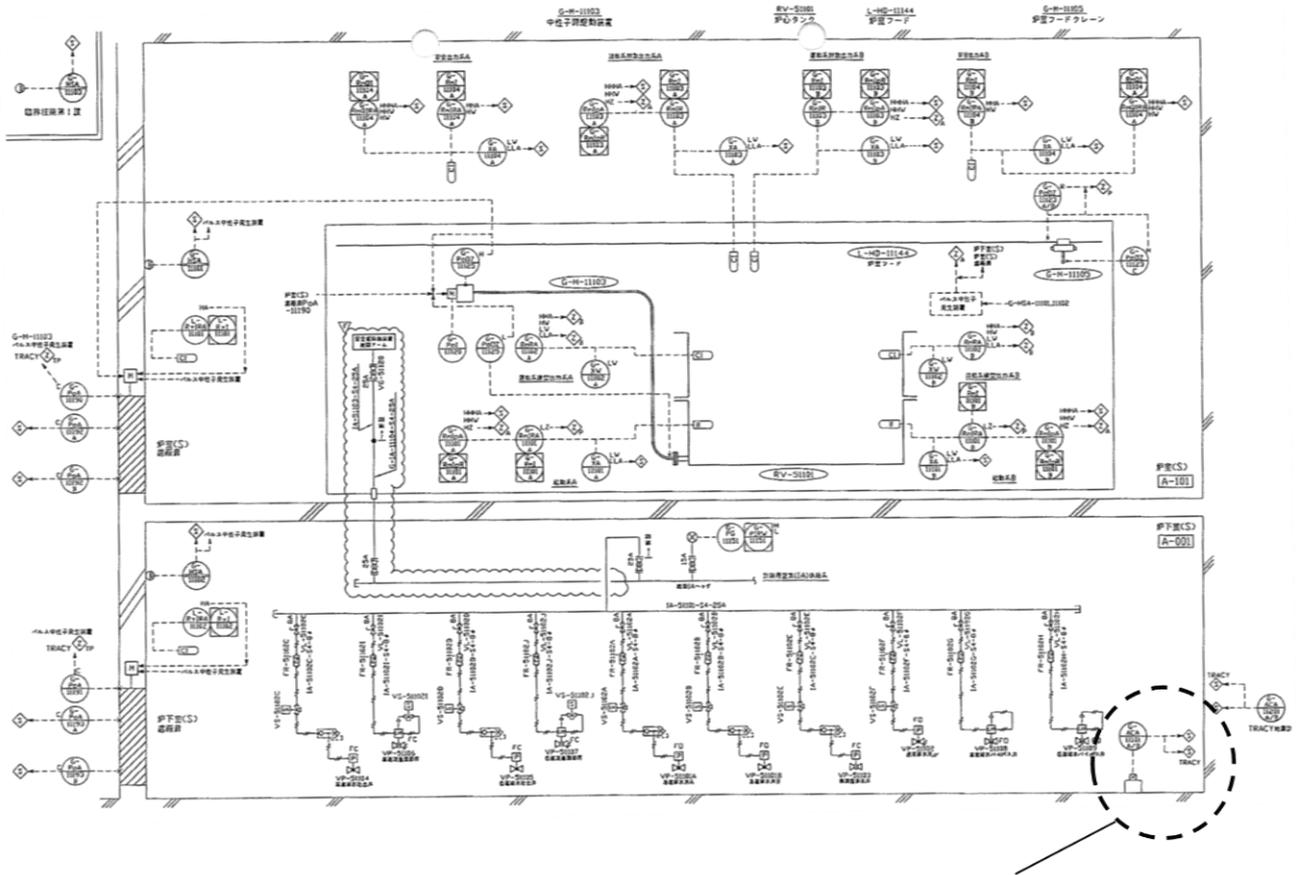


図 9.1.4-4 地震波特性試験結果： 試験装置の変形状態図（弱軸加振時）



炉下室(地震計設置):B1F

図 9.1.4-5 実機での地震計の設置場所

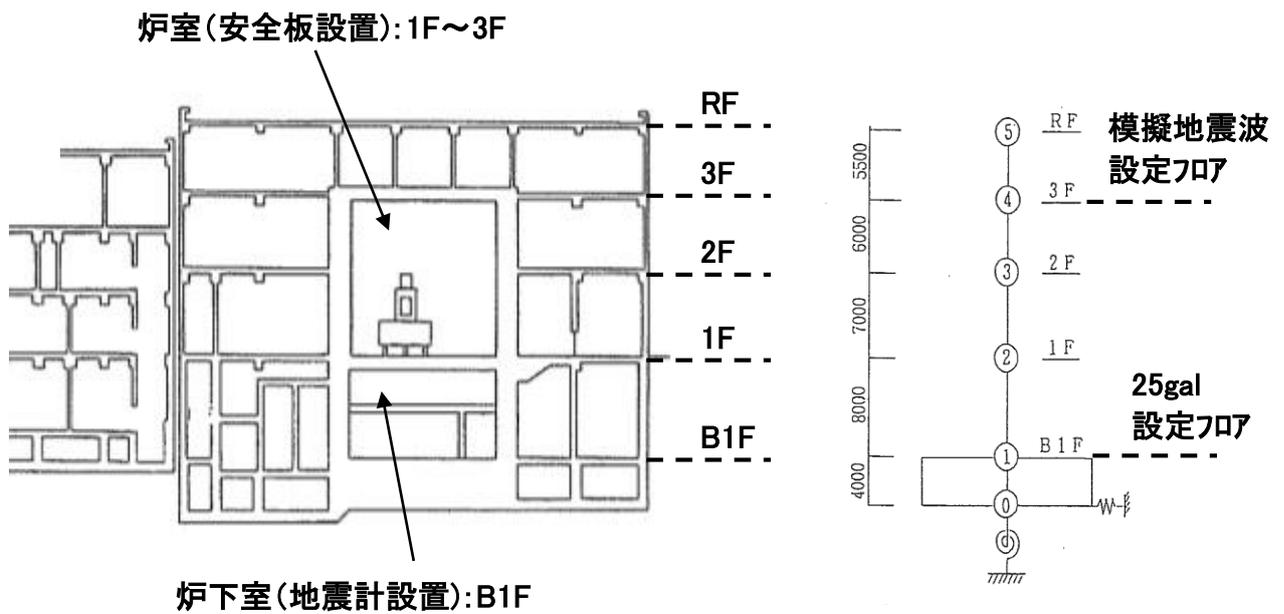


図 9.1.4-6 適用地震力のフロアの選定

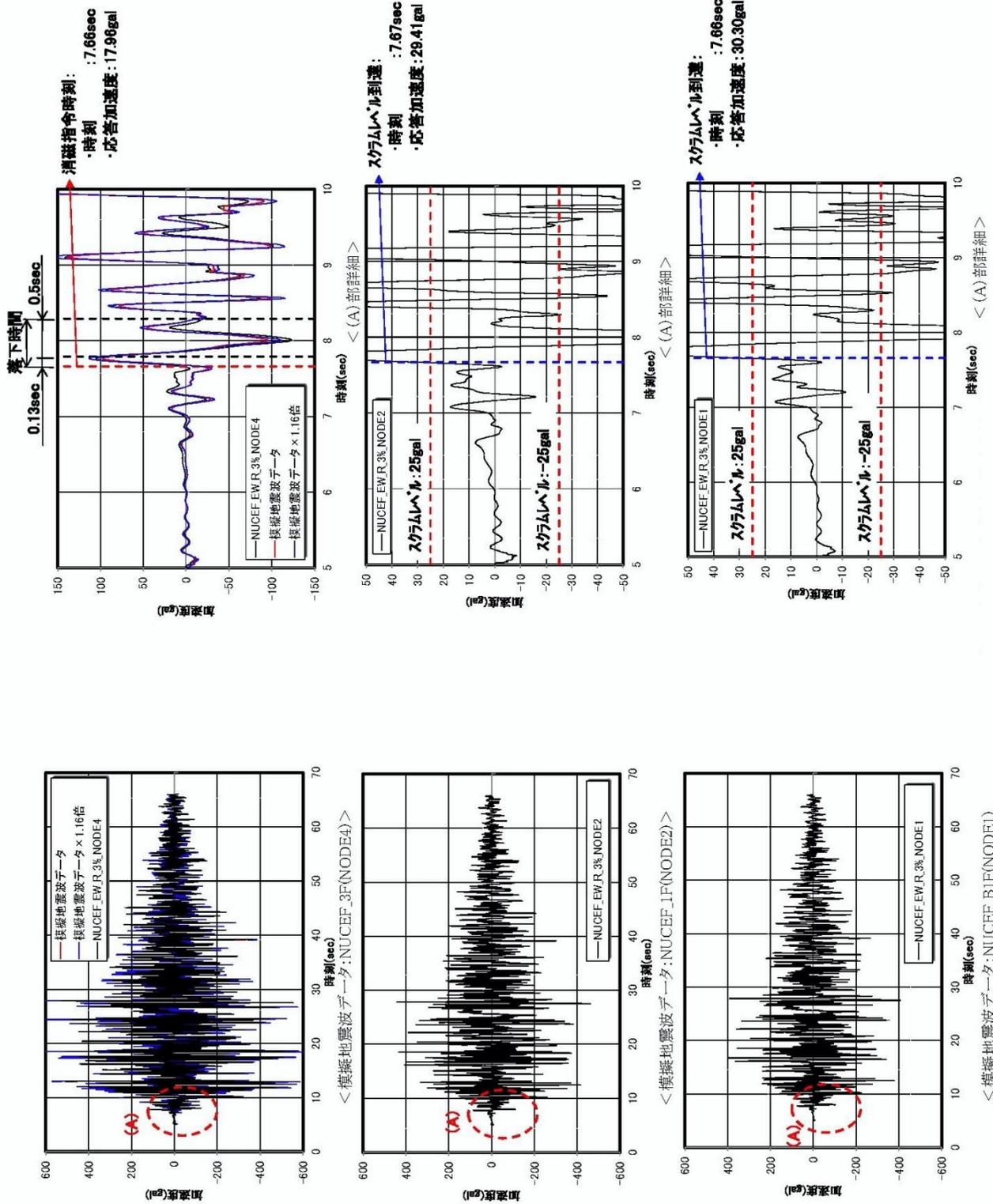
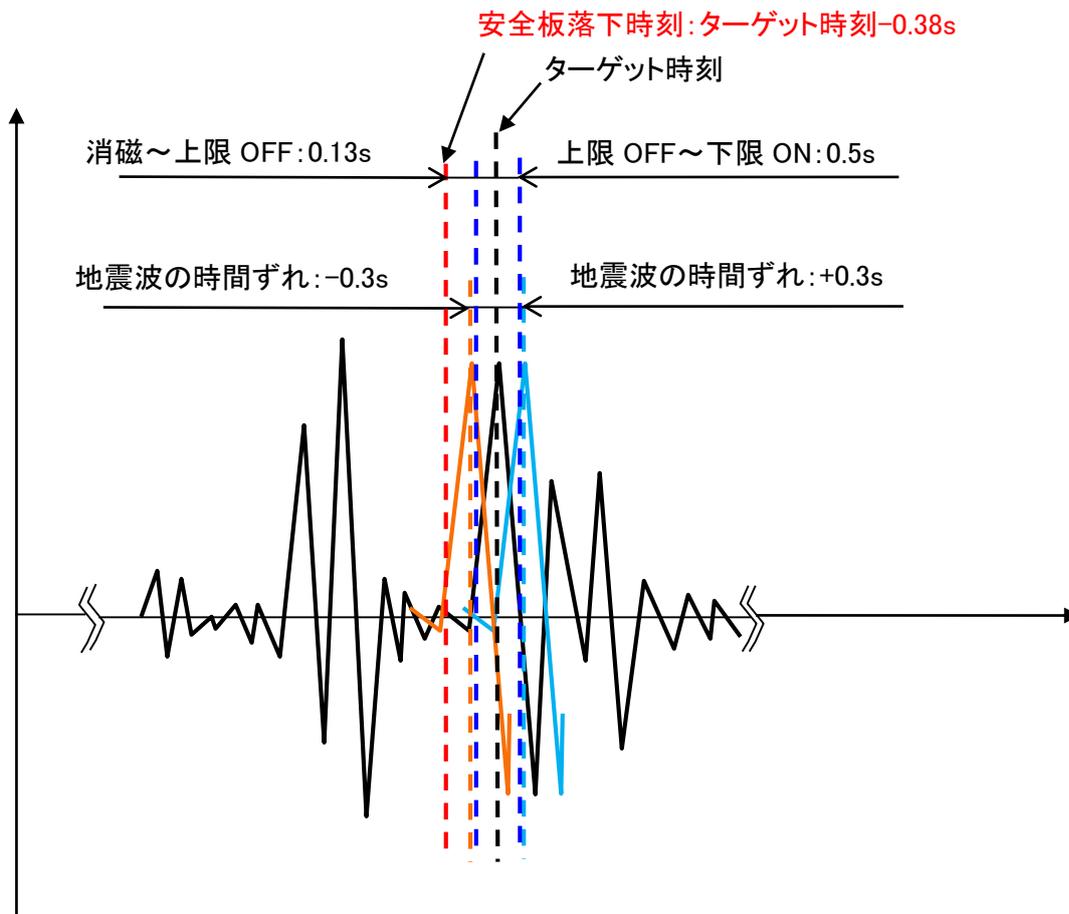


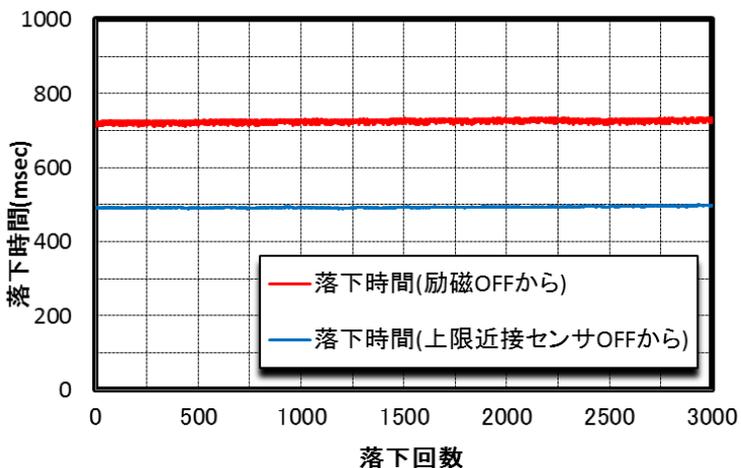
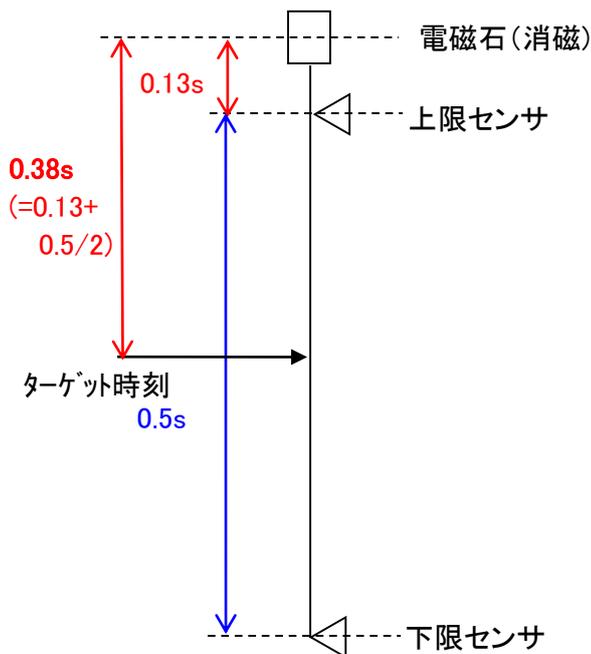
図 9.1.4.7 スクラム条件での安全板の落下時刻の設定



＜安全板落下時刻設定の概念＞

＜単体作動試験結果＞

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
①落下時間 (励磁 OFF から)	0.63	0.64	0.62	0.63	0.63
②落下時間 (上限センサ OFF から)	0.50	0.50	0.50	0.51	0.50



＜安全板落下時間＞

- (過去に実施した落下耐久試験結果から抜粋)
- ・ガイドピン間隔 12.7mm、スリット幅 3.7mm
 - ・板厚 1.5mm(実機構造ベース)

図 9.1.4-8 安全板落下時刻の設定方法 (模式図)

(3) 地震波加振試験

地震波加振試験の試験結果を以下に示す。

地震波加振試験の試験結果（代表例）を、図 9.1.4-9~16 に示す。また、各試験ケースでの安全板落下時間を表 9.1.4-2 及び図 9.1.4-17 に示す。

① 試験結果

試験結果は、以下のとおりである。

1) 落下時間の測定結果

- ・スクラム条件での加振試験結果により、安全板の落下時間は 0.6~0.7 s であり、スクラム条件下で要求仕様である 1.5 s 以内に落下することが確認できた。
- ・実機想定地震波（レベル 1）での加振試験結果により、安全板の落下時間は 0.6~0.8 s であり、実機想定地震波に対し、要求仕様である 1.5 s 以内に落下することが確認できた。
- ・実機想定地震を上回る地震波（レベル 2 及びレベル 3）に対しても、一部、落下時間の増加は見られるが、要求仕様である 1.5s 以内に落下することが確認できた。
- ・安全板駆動装置に発生する炉心タンクとの相対変位は、おおむね以下のとおりとなった。

強軸方向：（レベル 1） 最大約 2 mm、（レベル 3） 最大約 5 mm

弱軸方向：（レベル 1） 最大約 5 mm、（レベル 2） 最大約 12 mm

（レベル 3） 最大約 15 mm

- ・安全板駆動装置に発生する最大応答加速度は、図 9.1.4-17 に示すとおりである。安全板駆動装置（上部）は試験装置架台に固定しているため、最大でも 3~4 G 程度であるが、中部及び下部は水平の振れ止めのみのため、上部に比べ大きな応答加速度が発生している。

2) 各種条件の影響

本試験では、各種パラメータを試験条件としており、これらの影響は以下のとおりとなった。

- ・炉心タンク水位については、空と満水を比較した場合、満水の方が落下時間は 0.2 s 程度大きくなった。また、空の場合は、応答加速度に対する落下時間のばらつきは比較的小さいが、満水の場合には、試験ケース毎の落下時間のばらつきが大きくなる結果となった。満水の場合には、炉心タンク内の水の影響により、落下時間が増加するとともに、落下時の炉心タンク内の水の状態によってばらつきが大きくなったと考えられる。
- ・加振レベルに対しては、加振レベルの増加（各部の応答加速度の増加）に伴い、落下時間が増加する結果となった。安全板駆動装置では、上部、中部及び下部の 3 点で応答加速度を測定しているが、いずれの位置でも傾向は同様であった。上記の結果と合わせ、加速度の増加に伴って、ガイドピン及び模擬燃料ピンへの押付けが生じるとともに、炉心タンク内の水圧により落下時間が増加すると考えられる。
- ・加振方向に対しては、強軸及び弱軸とも、応答加速度で整理した場合ほぼ同様の傾向であり、加振方向による落下時間の相違は小さいと考えられる。

- ・安全板の落下時刻については、加速度ピーク時及び炉心タンクとの相対変位ピーク時に対し計6時刻を実施しているが、落下時刻による傾向の違いはなく、安全板落下時の応答加速度にほぼ比例する傾向であることが確認できた。

3) 安全板の落下時間に対する評価パラメータ

実機評価では、耐震計算等に基づき、安全板の落下性能を評価することが想定されるため、本試験結果に基づき、安全板の落下時間に対する評価パラメータを以下に検討した。図9.1.4-18に、落下時間と相対変位の関係を整理した結果を示す。

安全板の落下時間に対する評価パラメータについては、以下のように考えられる。

- ・本試験装置では、駆動装置架台部は溝形鋼で、強軸と弱軸を有する部材を用いている。図9.1.4-18に示すように、相対変位で整理した場合、部材の剛性の違いにより、強軸方向は少ない相対変位で安全板の落下時間が大きくなる傾向にある。この相対変位は、実機架台の剛性では異なる結果となり、架台剛性によって結果が異なることになるため、相対変位での評価は適切ではない。
- ・応答加速度で整理した場合は、安全板や安全板駆動装置自体に作用するものであり、架台形状等には依存しない。実際に、試験結果を整理した結果、応答加速度に対しては強軸方向も弱軸方向も同様の結果となっている。
- ・上記により、実機評価においては、安全板駆動装置に発生する応答加速度をパラメータとして整理することが適切である。なお、試験結果で得られた安全板駆動装置部の最大応答加速度に基づき、9.1.6項にて実機評価における限界加速度を評価した。
- ・応答加速度について、安全板駆動装置の中部や下部で大きな応答加速度が発生するが、耐震計算では評価が困難であることから、安全板駆動装置（上部）の応答加速度で評価することが適切である。

表 9.1.4-2 地震波加振試験の試験ケースと落下時間（弱軸方向）（1/2）

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体厚さ(mm)	電圧調整ダイヤル	炉心タンク内水位	加振波	加速度レベル	安全板落下時刻	液位計	目視ビーク発生時刻(sec)	落下時間(sec)			備考
												設定	T1	T2	
地震波加振試験	加振試験(第1回)	安全板弱軸方向	3-1	—	10	空	模擬地震波(時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク750gal)	スクラム条件	20	8.31	5.15	0.64	0.51	
			3-2	—	10				スクラム条件	20	8.31	5.46	0.63	0.51	
			3-3	—	10				加速度 第1位時刻	20	19.17	15.99	0.68	0.55	
			3-4	—	10				加速度 第2位時刻	20	25.02	21.84	0.67	0.53	
			3-5	—	10				加速度 第3位時刻	20	13.63	10.45	0.67	0.54	
			3-6	—	10				相対変位 第1位時刻	20	28.53	25.35	0.69	0.56	
	加振試験(第2回)		3-6(2)	—	10				相対変位 第1位時刻	10	28.53	25.33	0.72	0.59	試験ケース3-6のデータ再確認
	加振試験(第1回)		3-7	—	10				相対変位 第2位時刻	20	—	—	—	—	試験ケース「3-4」と同時刻のため、実施省略
			3-8	—	10				相対変位 第3位時刻	20	27.35	24.17	0.63	0.51	
	加振試験(第1回)		3-N1	—	10	空	模擬地震波(時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913gal)	スクラム条件	20	8.31	6.17	0.65	0.51	地震波加振試験
			3-9	—	10				相対変位 第1位時刻	20	28.57	26.10	0.76	0.62	
			3-10	—	10				相対変位 第1位時刻	20	28.57	26.10	0.75	0.61	
			3-11	—	10				相対変位 第2位時刻	20	25.09	22.62	0.69	0.55	
	加振試験(第2回)		3-11(2)	—	10				相対変位 第2位時刻	10	25.09	22.57	0.73	0.59	試験ケース3-11のデータ再確認
	加振試験(第1回)		3-12	—	10				相対変位 第2位時刻	20	25.09	22.62	0.68	0.56	
			3-13	—	10	相対変位 第3位時刻	20	17.96	15.49	0.71	0.57				
			3-13(2)	—	10	相対変位 第3位時刻	10	17.96	15.44	0.76	0.62	試験ケース3-13のデータ再確認			
	加振試験(第1回)		3-14	—	10	相対変位 第3位時刻	20	17.96	15.49	0.71	0.58				
	加振試験(第2回)		3-8B	—	10	相対変位 第4位時刻	10	17.95	14.74	0.7	0.56	試験ケース3-8は、上位時刻と近接のため、別時刻で再試験			
			3-15	—	10	150cm	模擬地震波(時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク750gal)	スクラム条件	20	8.31	5.46	0.64	0.53	
			3-16	—	10				スクラム条件	20	8.31	5.46	0.65	0.53	
			3-17	—	10				加速度 第1位時刻	20	19.18	15.93	0.73	0.60	
			3-18	—	10				加速度 第2位時刻	20	13.65	10.40	0.70	0.58	
			3-19	—	10				加速度 第3位時刻	20	25.03	21.78	0.69	0.57	
	加振試験(第2回)		3-19(2)	—	10				加速度 第3位時刻	10	25.07	21.78	0.78	0.64	試験ケース3-19のデータ再確認
			3-20	—	10	相対変位 第1位時刻	20	28.56	25.31	0.72	0.58				
	加振試験(第1回)		3-21	—	10	相対変位 第2位時刻	20	27.36	24.11	0.70	0.57				
			3-22	—	10	相対変位 第3位時刻	20	—	—	—	—	試験ケース「3-19」と同時刻のため、実施省略			
	加振試験(第2回)		6-5	—	10	相対変位 第4位時刻	10	17.96	14.71	0.79	0.65	試験ケース3-21は、上位時刻と近接のため、別時刻で再試験			
			3-23	—	10	150cm	模擬地震波(時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913gal)	相対変位 第1位時刻	20	28.57	26.07	0.82	0.70	
			3-24	—	10				相対変位 第1位時刻	20	28.57	26.07	0.83	0.70	
			3-25	—	10				相対変位 第2位時刻	20	28.22	25.72	0.82	0.69	
			3-26	—	10				相対変位 第2位時刻	20	28.22	25.42	0.83	0.70	
			3-27	—	10				相対変位 第3位時刻	20	17.96	15.46	0.90	0.76	
	加振試験(第2回)		3-27(2)	—	10				相対変位 第3位時刻	10	17.96	15.41	1.24	1.1	試験ケース3-27のデータ再確認
	加振試験(第1回)		3-28	—	10	相対変位 第3位時刻	20	17.96	15.46	0.91	0.77				
	加振試験(第2回)		6-1	—	10	相対変位 第3位時刻	10	25.17	22.62	0.92	0.78	試験ケース3-25、26は、上位時刻と近接のため、別時刻で再試験			
	加振試験(第1回)		3-N2	—	10	加速度積算の最大	20	19.81	16.61	0.89	0.74				
			6-2	—	10	150cm	模擬地震波(時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050gal)	相対変位 第1位時刻	10	28.56	26.17	1.16	0.99	スロッシング確認試験も兼用
			6-3	—	10	150cm	模擬地震波(時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050gal)	相対変位 第2位時刻	10	13.56	11.17	1.09	0.94	スロッシング確認試験も兼用
			6-4	—	10	150cm	模擬地震波(時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050gal)	相対変位 第3位時刻	10	32.11	29.72	1.12	0.98	スロッシング確認試験も兼用
			6-6	—	10	150cm	模擬地震波(時刻歴波)	300gal (入力ピーク250gal)	相対変位 第1位時刻	10	18.75	16.03	0.73	0.6	
		6-7	—	10	150cm	模擬地震波(時刻歴波)	800gal (入力ピーク700gal)	相対変位 第1位時刻	10	13.23	10.91	0.8	0.67		

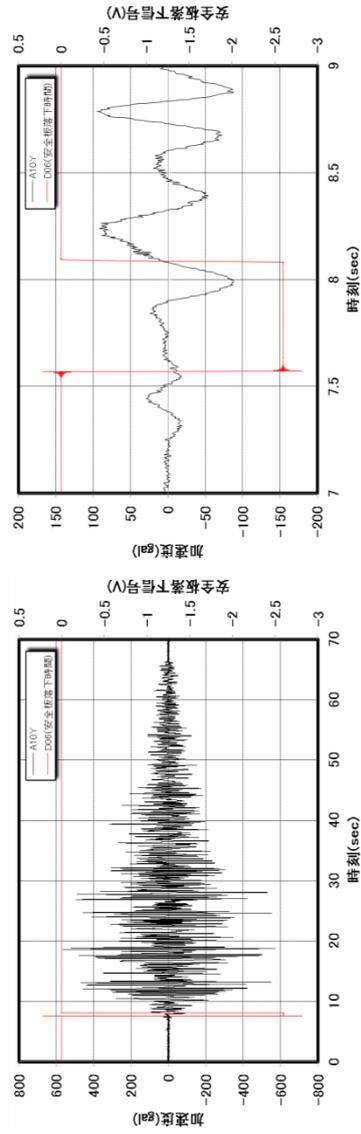
表 9.1.4-2 地震波加振試験の試験ケースと落下時間（強軸方向）（2/2）

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体 厚さ(mm)	電圧調整 ダイヤル	炉心シグ内 水位	加振波	加速度レベル	安全板 落下時刻	液位計	目標ビーク発 生時刻 (sec)	落下時間(sec)			備 考
												設定	T1	T2	
地震波加振試験	加振試験 (第1回)	安全板 強軸方向	3-29	—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク950gal)	スクラム条件	20	8.31	5.46	0.64	0.53	
	加振試験 (第2回)		5-1	—	10				加速度第1位時刻	10	18.78	15.88	0.67	0.53	
			5-2	—	10				加速度第2位時刻	10	24.64	21.72	0.69	0.54	
			5-3	—	10				加速度第3位時刻	10	13.25	10.34	0.68	0.55	
			5-4	—	10				相対変位第1位時刻	10	—	—	—	—	試験ケース「5-1」と同時刻のため、実施省略
			5-5	—	10				相対変位第2位時刻	10	—	—	—	—	試験ケース「5-3」と同時刻のため、実施省略
			5-6	—	10				相対変位第3位時刻	10	—	—	—	—	試験ケース「5-2」と同時刻のため、実施省略
	加振試験 (第1回)		5-N3	—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1.4相当 (入力ピーク700gal)	相対変位第1位時刻	10	13.23	10.91	0.75	0.61	
	加振試験 (第2回)		3-30	—	10	空	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050gal)	相対変位第1位時刻	20	13.28	11.32	0.84	0.71	
	加振試験 (第2回)		5-7	—	10				相対変位第2位時刻	10	18.80	16.76	0.77	0.64	
			5-8	—	10				相対変位第3位時刻	10	28.12	26.08	0.75	0.62	
	加振試験 (第1回)		3-31	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル1 (入力ピーク950gal)	スクラム条件	20	8.31	5.46	0.67	0.54	
	加振試験 (第2回)		5-9	—	10				加速度第1位時刻	10	18.79	15.96	0.72	0.59	スロッシング確認試験も兼用
			5-10	—	10				加速度第2位時刻	10	24.65	21.62	0.71	0.57	スロッシング確認試験も兼用
	加振試験 (第1回)	5-11	—	10	加速度第3位時刻				10	13.26	10.43	0.71	0.59	スロッシング確認試験も兼用	
		3-N3	—	10	相対変位第1位時刻				20	19.18	15.98	0.71	0.58		
		加振試験 (第2回)	5-12	—	10				相対変位第2位時刻	10	—	—	—	—	試験ケース「5-9」と同時刻のため、実施省略
	5-13		—	10	相対変位第3位時刻				10	—	—	—	—	試験ケース「5-10」と同時刻のため、実施省略	
	加振試験 (第1回)	3-N4	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク913gal)	加速度第1位時刻	20	19.88	16.68	0.76	0.64		
	加振試験 (第1回)	3-32	—	10	150cm	模擬地震波 (時刻歴波)	レベル3 (入力ピーク1050gal)	相対変位第1位時刻	20	13.70	11.23	0.89	0.75		
加振試験 (第2回)	5-14	—	10	相対変位第2位時刻				10	19.22	16.75	0.87	0.74	スロッシング確認試験も兼用		
	5-15	—	10	相対変位第3位時刻				10	28.54	26.07	0.78	0.66	スロッシング確認試験も兼用		
	加振試験 (第2回)	5-16	—	10			レベル0.5相当 (入力ピーク250gal)	相対変位第1位時刻	10	18.75	16.03	0.67	0.55		
		5-17	—	10			レベル1.4相当 (入力ピーク700gal)	相対変位第1位時刻	10	13.23	10.91	0.77	0.65		

1. 試験条件

- ①加振ケース : 3-1
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル1、入力ピーク加速度 509 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 0 cm
- ⑤安全板落下時刻 : スクラム条件

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

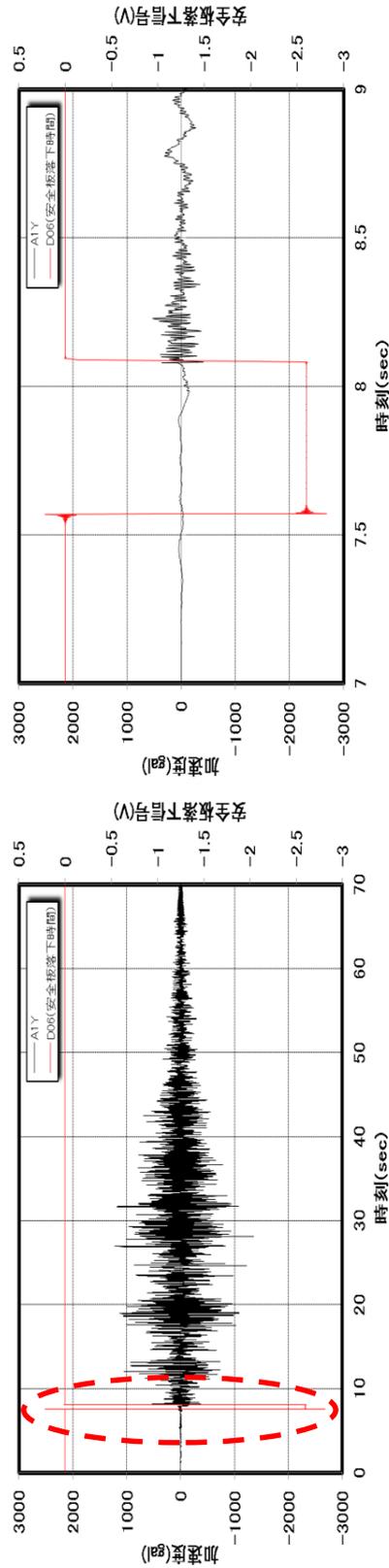


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	0.64
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.51

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



<応答加速度全体>

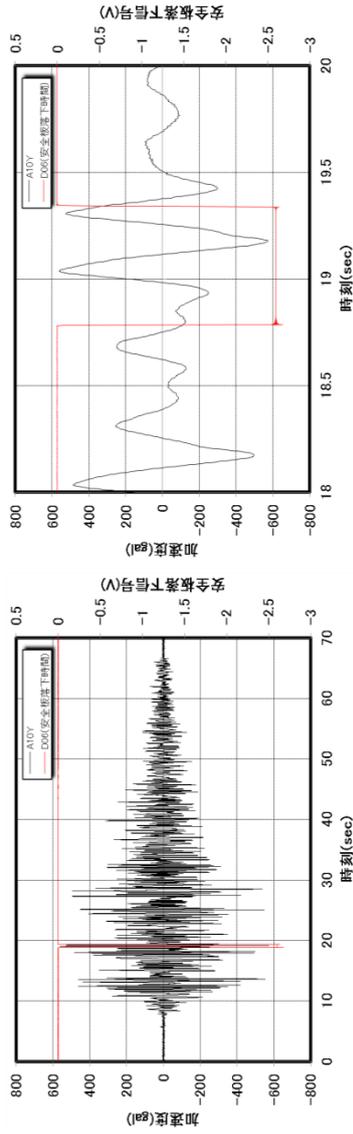
<破線部詳細>

図 9.1.4-9 加振試験結果 (試験ケース 3-1)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 3-3
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル1、入力ピーク加速度 509 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 0cm
- ⑤安全板落下時刻 : 加速度第1位

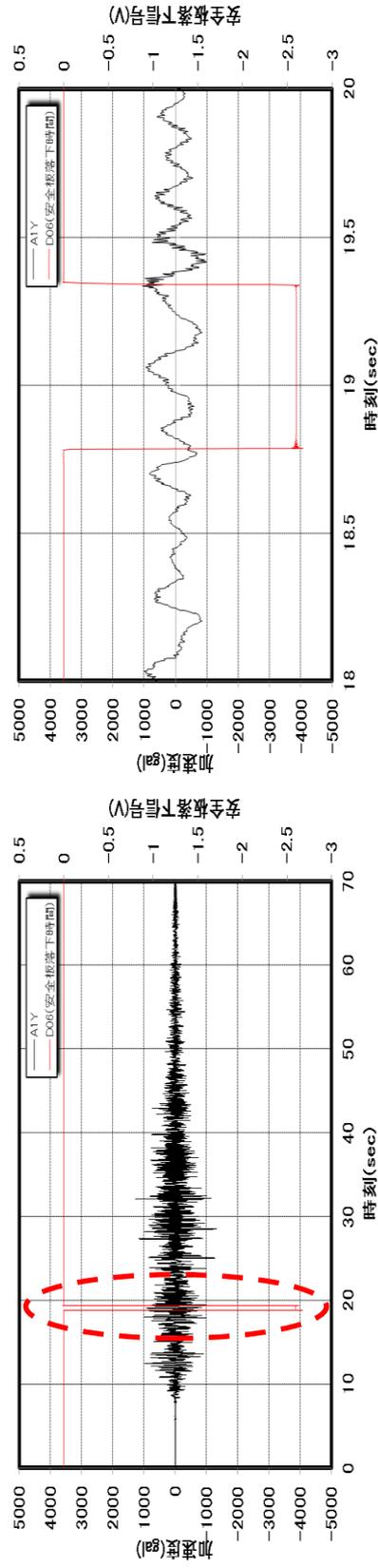
2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻



3. 試験結果

落下時間		試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON		0.68
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON		0.55

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



< 応答加速度全体 >

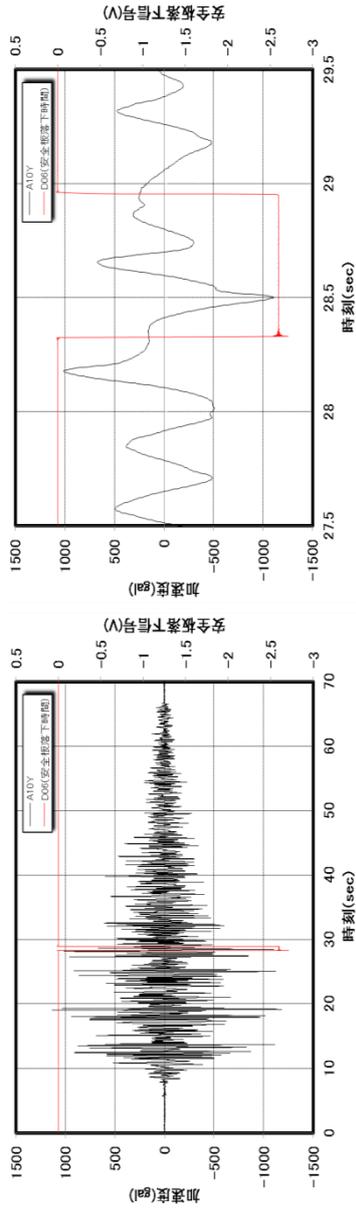
< 破線部詳細 >

図 9.1.4-10 加振試験結果 (試験ケース 3-3)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 3-9
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル2、入力ピーク加速度 913 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 0 cm
- ⑤安全板落下時刻 : 相対変位第1位

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

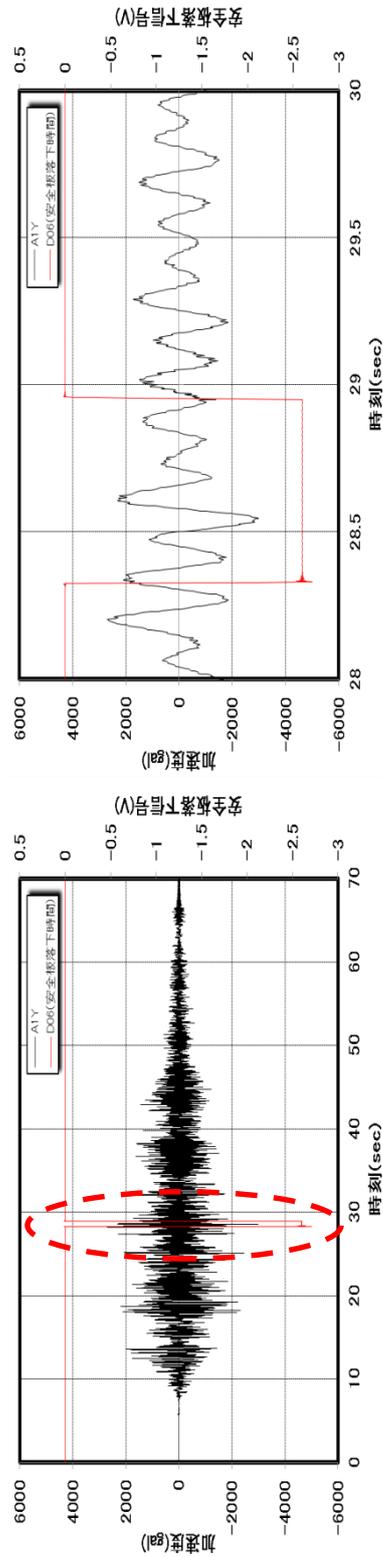


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	0.76
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.62

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



< 応答加速度全体 >

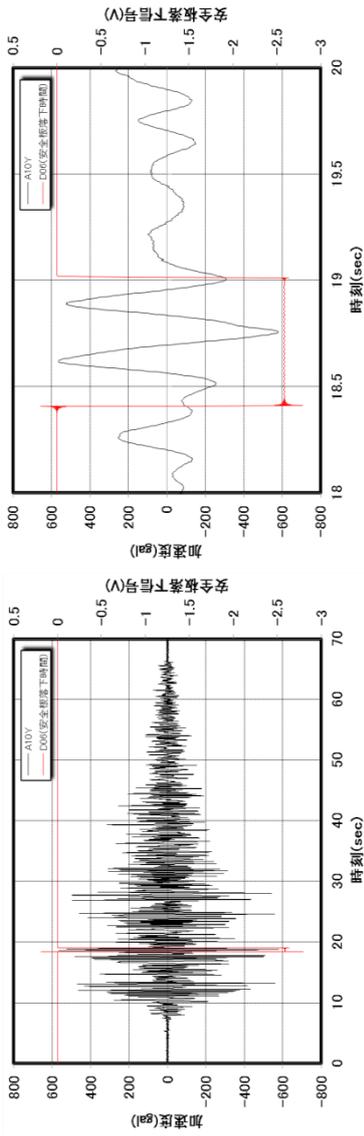
< 破線部詳細 >

図 9.1.4-11 加振試験結果 (試験ケース 3-9)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 3-17
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル1、入力ピーク加速度 509 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 150 cm
- ⑤安全板落下時刻 : 加速度第1位

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

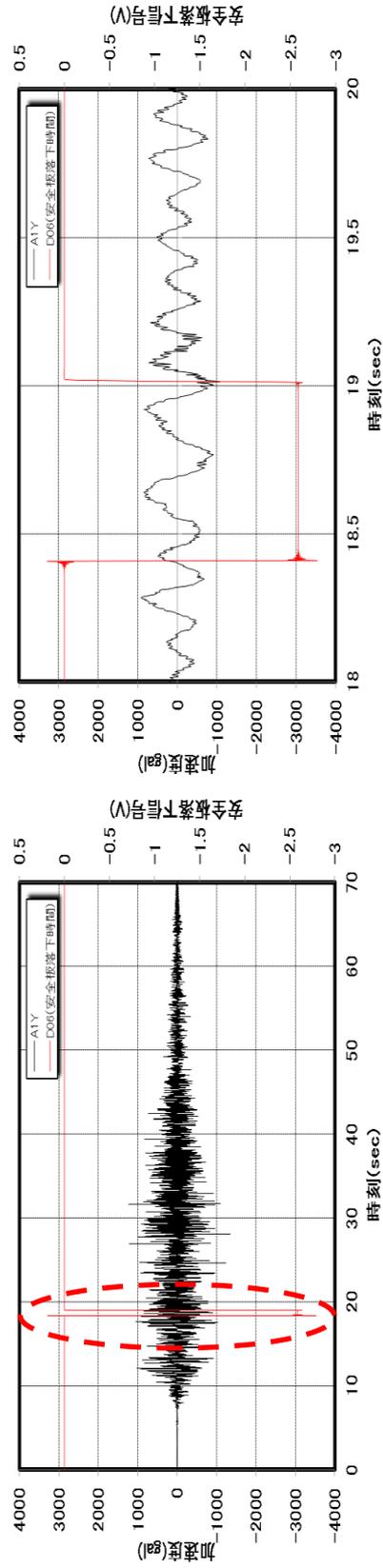


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	0.73
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.60

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



< 応答加速度全体 >

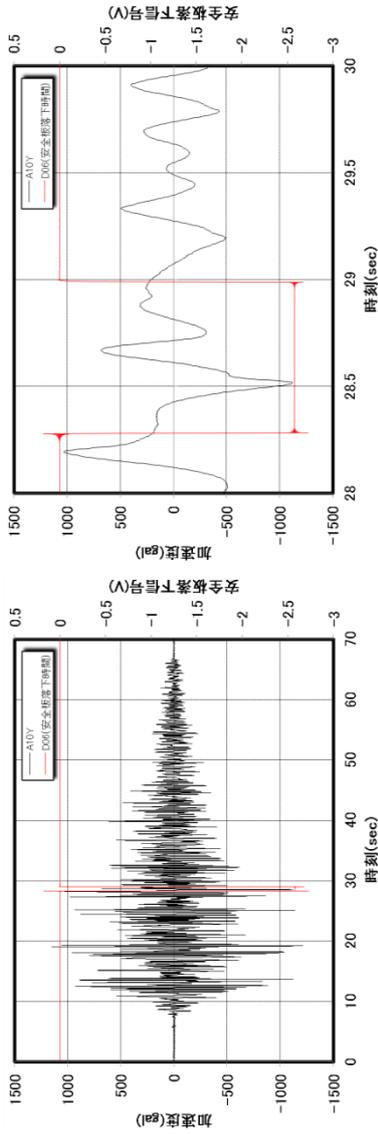
< 破線部詳細 >

図 9.1.4-12 加振試験結果 (試験ケース 3-17)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 3-23
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル2、入力ピーク加速度 913 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 150 cm
- ⑤安全板落下時刻 : 相対変位第1位

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

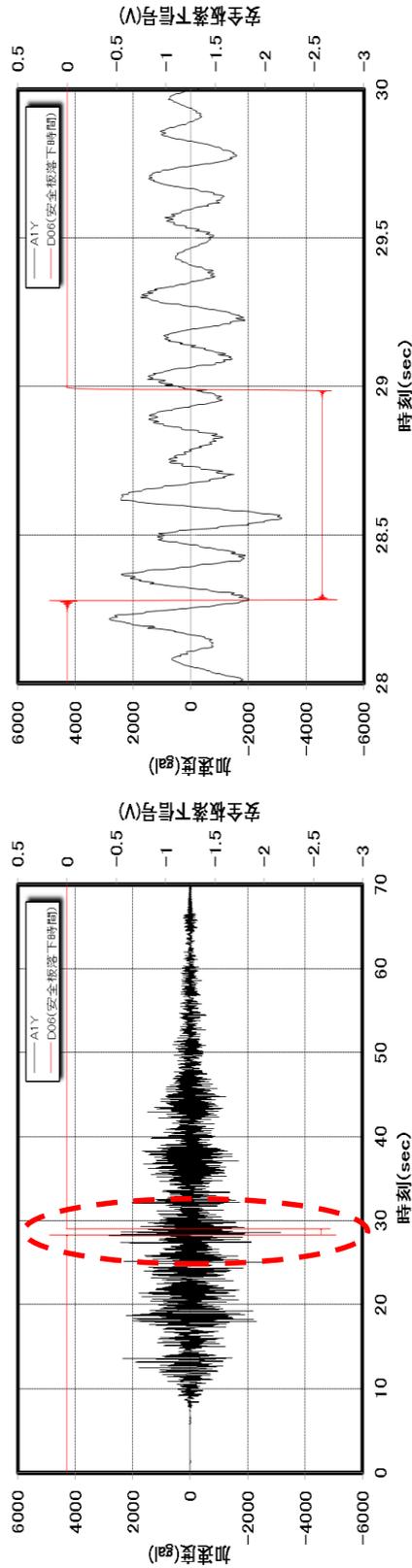


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	0.82
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.70

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



< 応答加速度全体 >

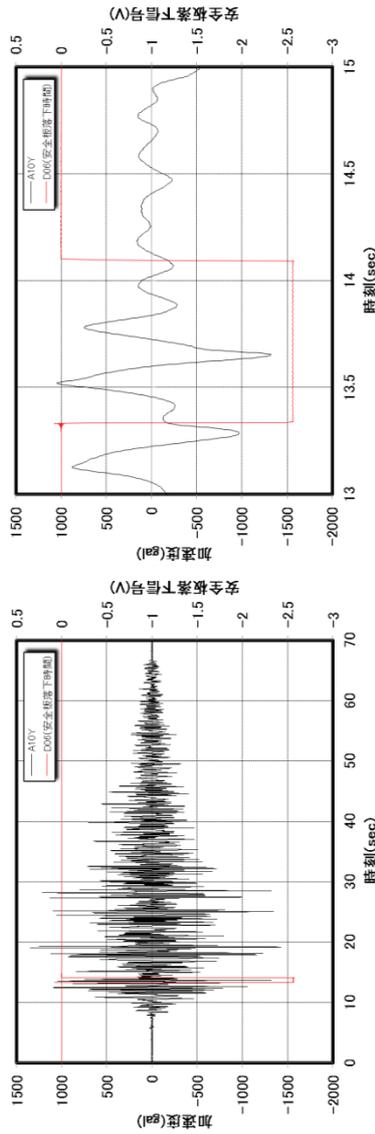
< 破線部詳細 >

図 9.1.4-13 加振試験結果 (試験ケース 3-23)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 3-32
- ②加振方向 : 強軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル3、入力ピーク加速度 1050gal)
- ④炉心タンク内水位 : 150cm
- ⑤安全板落下時刻 : 相対変位第1位

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

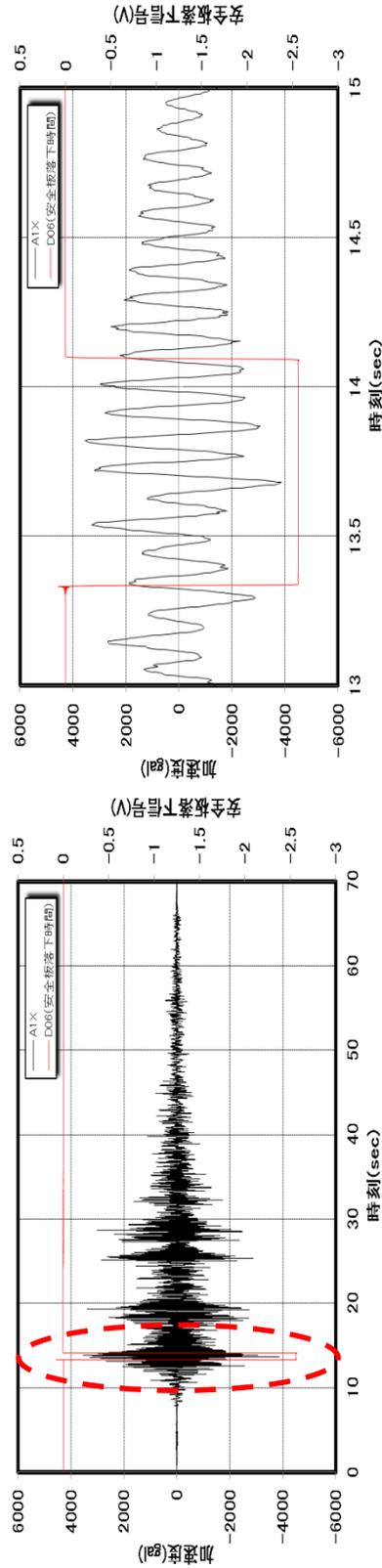


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	0.89
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.75

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



< 応答加速度全体 >

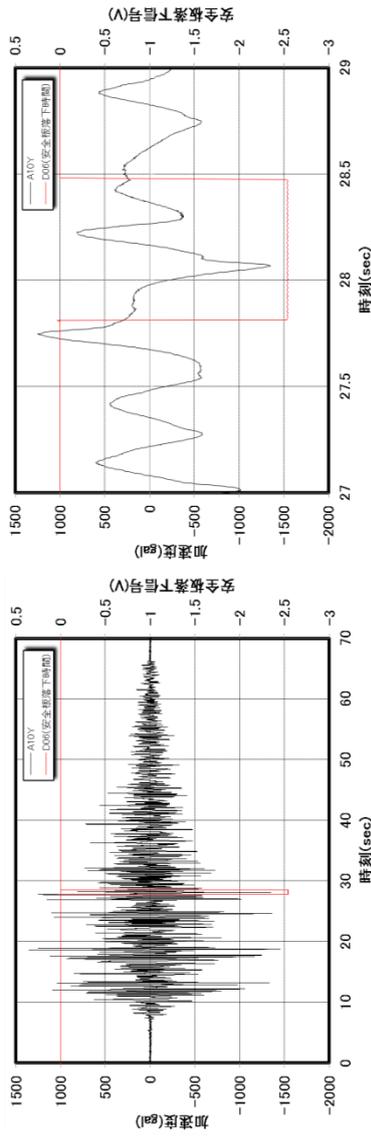
< 破線部詳細 >

図 9.1.4-14 加振試験結果 (試験ケース 3-32)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 5-15
- ②加振方向 : 強軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル3、入力ピーク加速度 1050gal)
- ④炉心タンク内水位 : 150 cm
- ⑤安全板落下時刻 : 加速度第3位

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

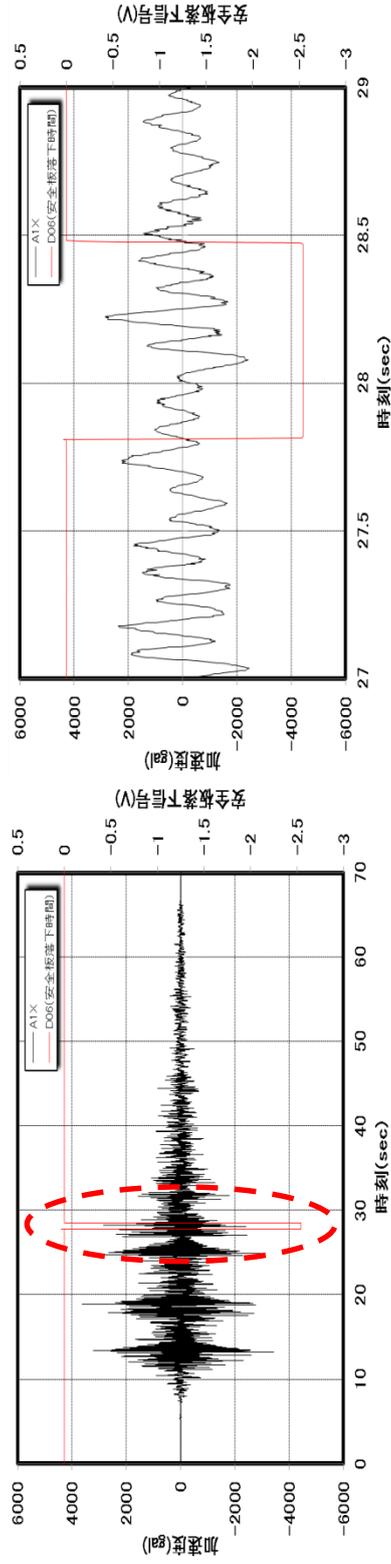


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	0.78
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.66

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1X) の応答加速度



＜応答加速度全体＞

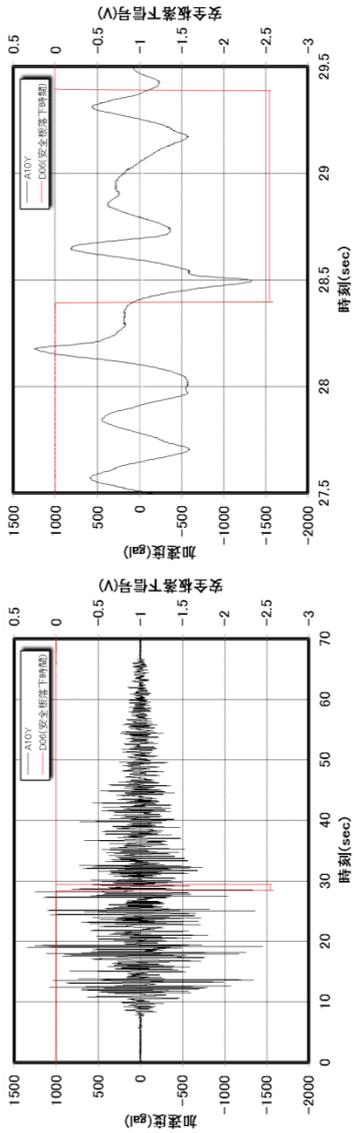
＜破線部詳細＞

図 9.1.4-15 加振試験結果 (試験ケース 5-15)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 6-2
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル3、入力ピーク加速度 1050 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 150 cm
- ⑤安全板落下時刻 : 相対変位第1位

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

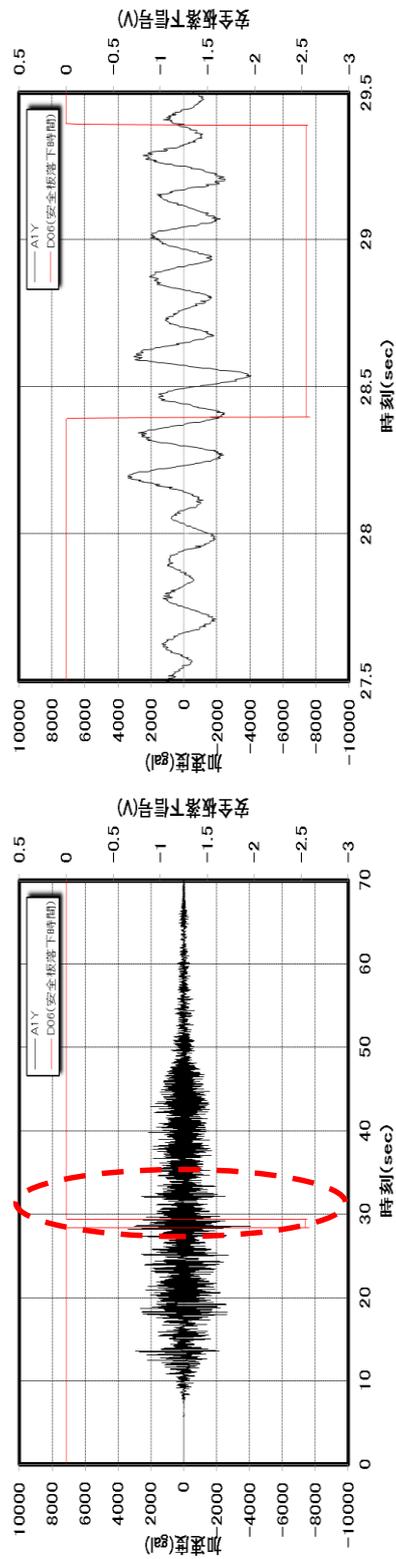


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	1.16
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.99

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



< 応答加速度全体 >

< 破線部詳細 >

図 9.1.4-16 加振試験結果 (試験ケース 6-2)

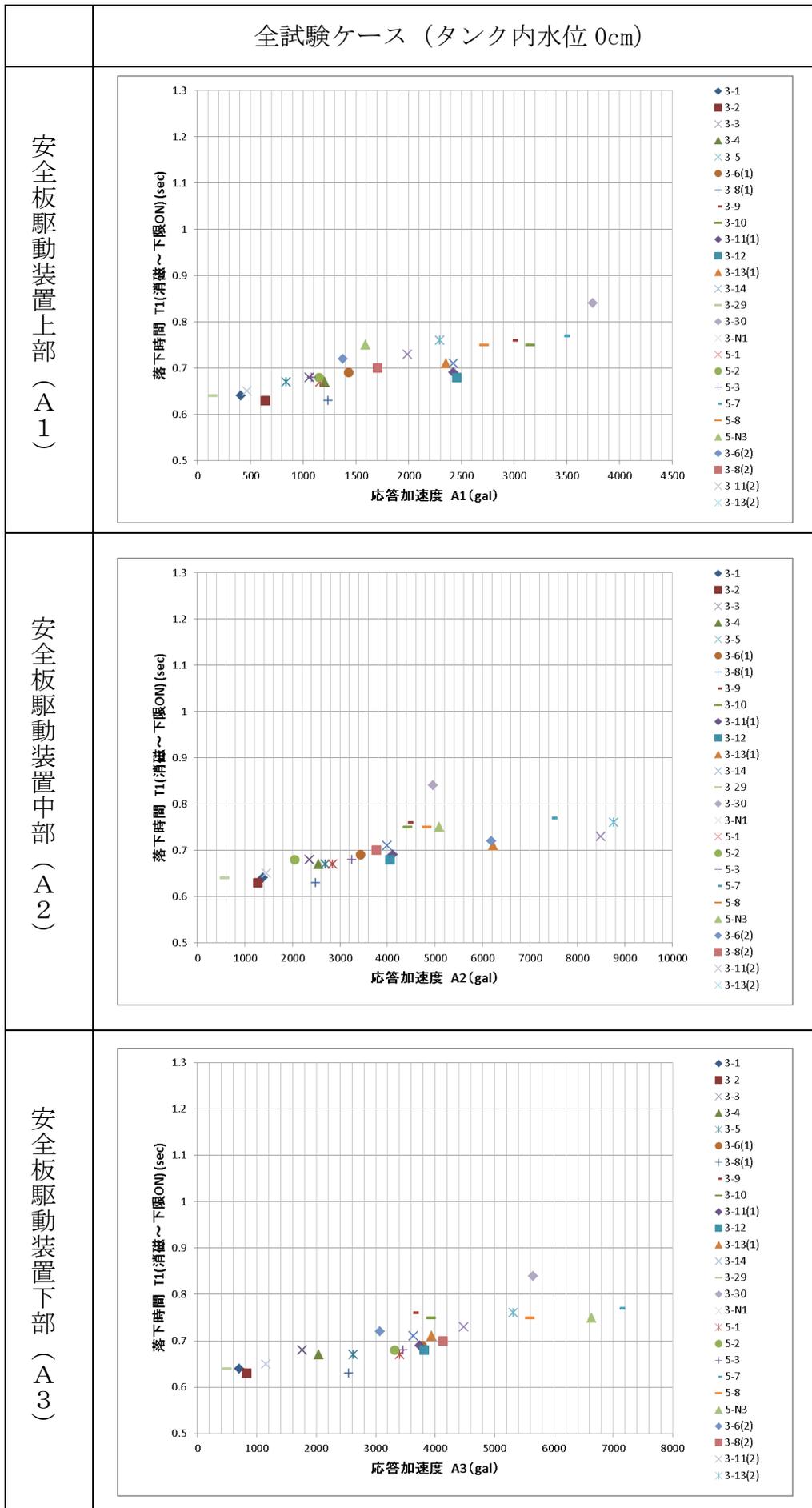
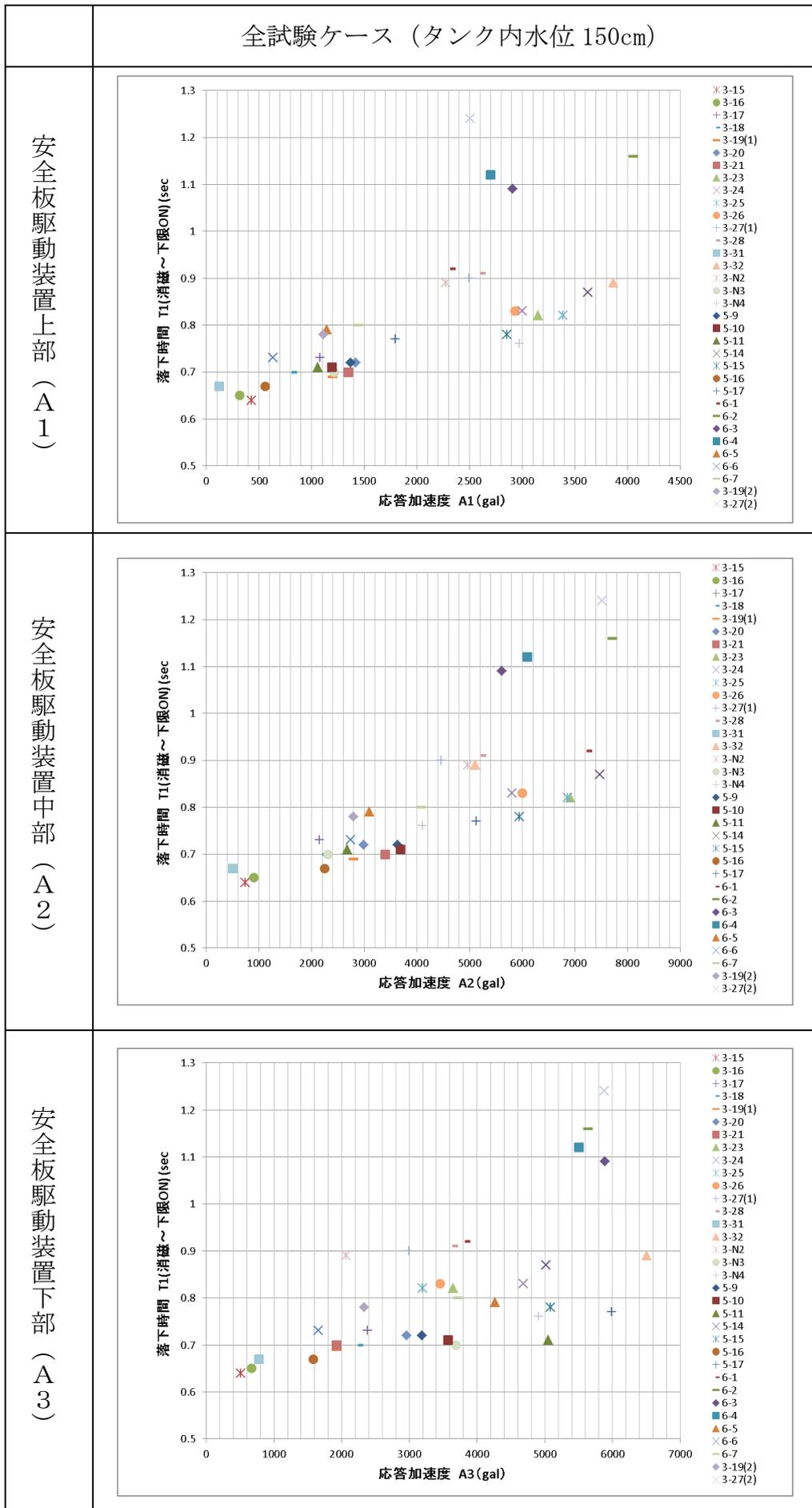


図 9.1.4-17 安全板の落下時間と各応答加速度関係（炉心タンク内水位 0 cm） (1/2)



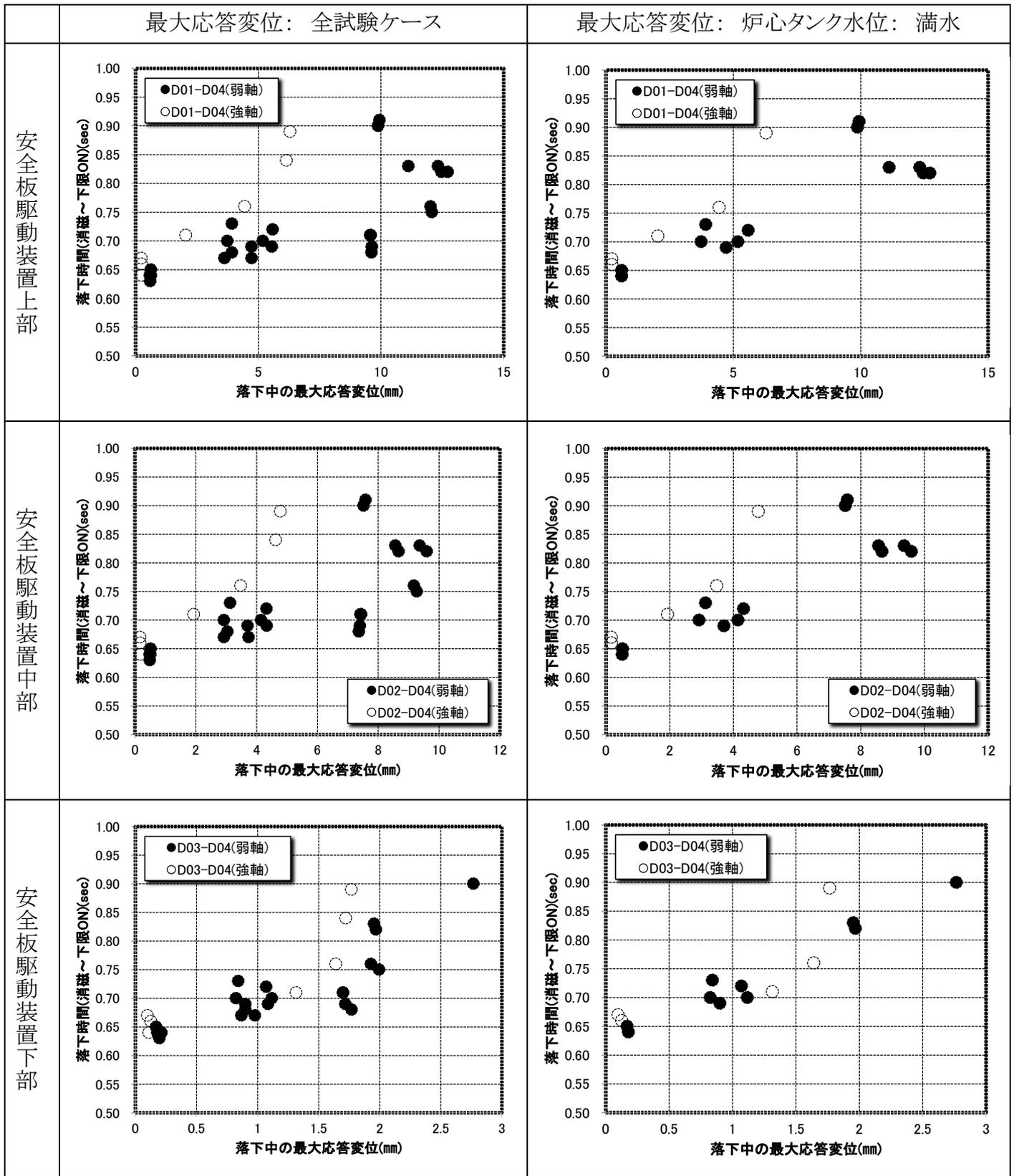


図 9.1.4-18 安全板の落下時間と各部の相対変位の関係 (1/2)

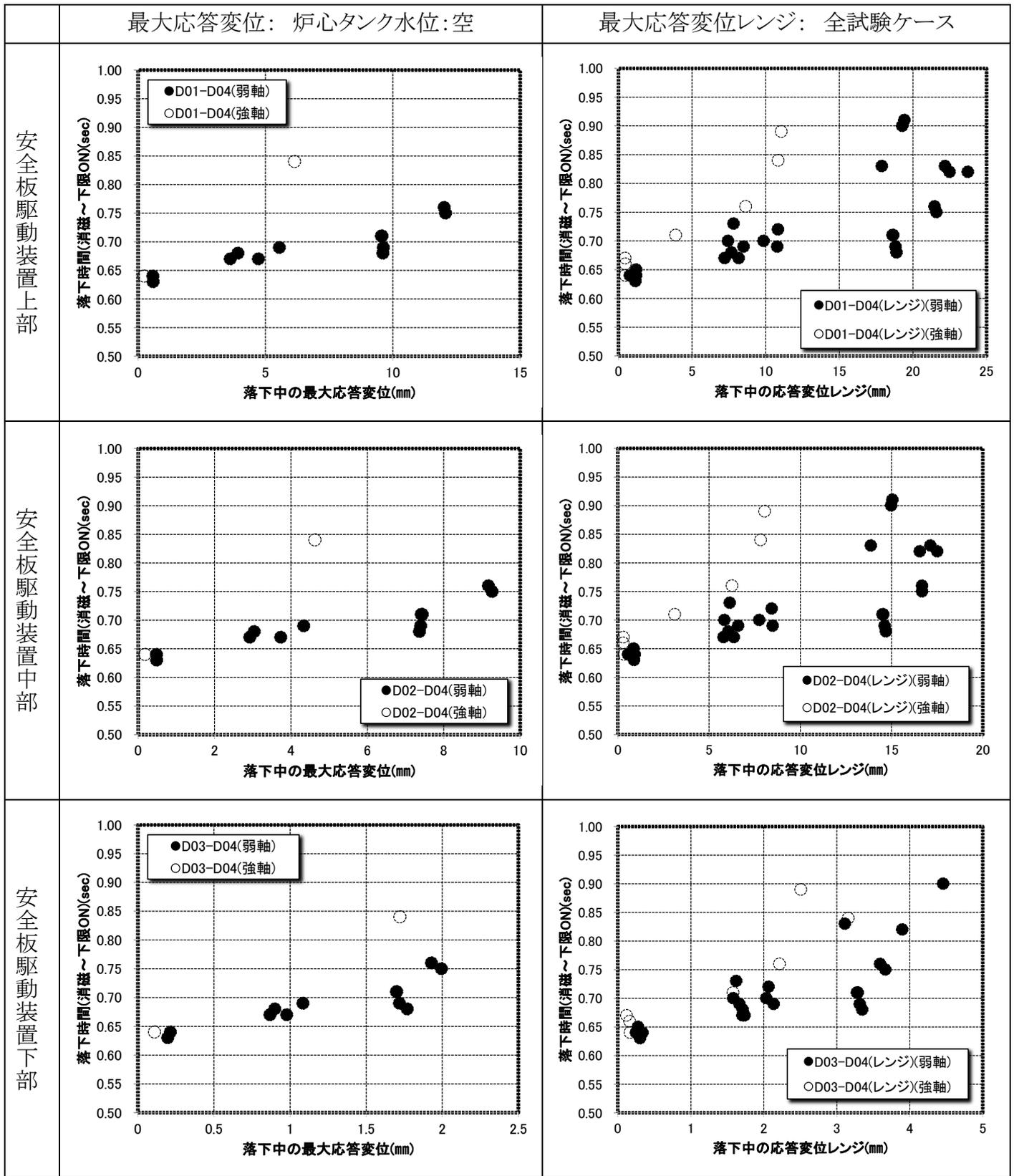


図 9.1.4-18 安全板の落下時間と各部の相対変位の関係 (2/2)

(4) 励磁 OFF 確認試験

励磁 OFF 確認試験の試験結果（代表例）を、図 9.1.4-19~20 に示す。また、各試験ケースでの安全板落下時間を表 9.1.4-3 及び図 9.1.4-21 に示す。

① 非磁性体厚さの影響

非磁性体厚さ 0.3 mm と 0.5 mm では、電圧調整ダイヤル 10 の場合を除き、落下時間に大きな差は見られず、両者とも落下時間（電流断⇒下限 ON）で約 1 s、落下時間（上限 OFF⇒下限 ON）で 0.85~0.9 s となった。これらの結果は、いずれも落下時間の制限値を満足する結果である。

非磁性体を用いない試験結果（試験ケース 3-23 及び 3-24）と比較すると、本試験での落下時間は増加する傾向であった（試験ケース 3-23 及び 3-24：落下時間 0.83s）。これについては、以下の要因によるものであり、非磁性体を用いたことによるものではない。

- ・落下時間の測定結果により、電源断～上限センサ OFF までの時間を比較すると、非磁性体を用いない場合と同等であった（図 9.1.4-21(c)）。非磁性体による落下時間の増加がある場合には、電源断～上限センサ OFF までの時間が長くなるため、非磁性体による影響はないと言える。
- ・加振しない状態での落下時間を比較すると、表 9.1.4-4 に示すように非磁性体の有無にかかわらず、ほぼ一定の値となっており、非磁性体による落下時間への影響はないと言える。
- ・上限センサ OFF～下限センサ ON までの時間が、試験ケース 7-2~7の方が試験ケース 3-23~24 より長く、落下後の時間が増加していることが要因である。これらについては、落下時刻の相違や後述する安全板のひずみの影響によるものと考えられる。

② 電圧調整ダイヤルの影響

電圧調整ダイヤルに対しては、落下時間の大きな違いはなく、電磁ホルダの保持力による励磁 OFF 時での落下時間への影響は小さい。なお、非磁性体厚さ 0.3 mm において、電圧調整ダイヤル 10（電圧最大値）の場合に落下時間（電流断⇒下限 ON）が大きくなっているが、これは上記①に示した要因と同じである。

電圧調整ダイヤル 3 の場合は、非磁性体厚さ 0.3 mm 及び 0.5 mm とも、初期の吸着が安定せず、安全板の昇降ができない状態であった。本結果により、電磁ホルダの保持力は小さすぎないことが望ましく、本試験で使用した整流器 RM-M105B では設定「5」程度が適切である。

表 9.1.4-3 励磁 OFF 確認試験の試験ケース一覧

試験項目	実施時期	加振方向	加振ケース	非磁性体厚さ(mm)	電圧調整ダイヤル	炉心タンク内水位	加振波	加速度レベル	安全板落下時刻	液位計	目標ピーク発生時刻(sec)	落下時間(sec)		備考				
												設定	T1		T2			
励磁OFF確認試験 保持状態確認試験	加振試験 (第2回)	安全板 弱軸方向	7-1	0.3	3	150cm	構築地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク91.3gal)	—	—	—	—	—	—	ダイヤル3で保持不可のため、 取りやめ			
			7-2	0.3	5											26.02	0.96	0.86
			7-3	0.3	7											26.02	0.98	0.86
			7-4	0.5	10											15.41	1.23	1.11
			7-5	0.5	5											26.02	0.99	0.88
			7-6	0.5	7											26.02	1	0.89
			7-7	0.5	10											26.02	1.07	0.95
地震波加振試験	加振試験 (第1回)	安全板 弱軸方向	3-23	—	10	150cm	構築地震波 (時刻歴波)	レベル2 (入力ピーク91.3gal)	相対変位 第1位時刻	20	26.57	26.07	0.82	0.70	同一条件での比較データとして記載			
			3-24	—	10											相対変位 第1位時刻	20	26.57

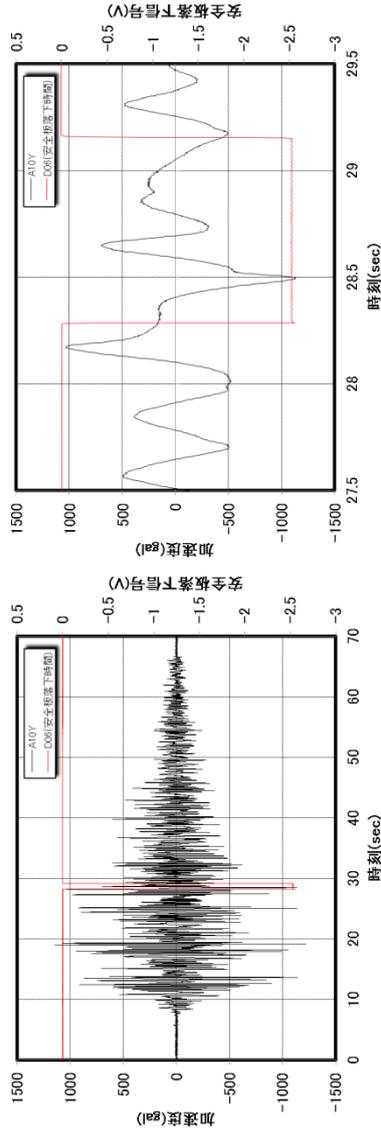
表 9.1.4-4 無加振時の落下時間の比較

No.	非磁性体 厚さ (mm)	電圧調整 ダイヤル	落下時間 (s) (電源断→下限 ON)	落下時間 (s) (電源断→下限 ON)	備考
0 (製作時)	—	10	0.63	0.50	消磁あり
1	0.3	3	—	—	吸着せず
2		5	0.63	0.54	電源断 (消磁なし)
3		7	0.64	0.54	
4		10	0.63	0.54	
5	0.5	3	—	—	吸着せず
6		5	0.65	0.54	電源断 (消磁なし)
7		7	0.65	0.54	
8		10	0.67	0.53	

1. 試験条件

- ①加振ケース : 7-2
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル2、入力ピーク加速度913 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 150 cm
- ⑤安全板落下時刻 : 相対変位第1位
- ⑥落下 : 電源 OFF による落下
- ⑦非磁性体 : 厚さ0.3 mm / 電圧強さ[5]

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

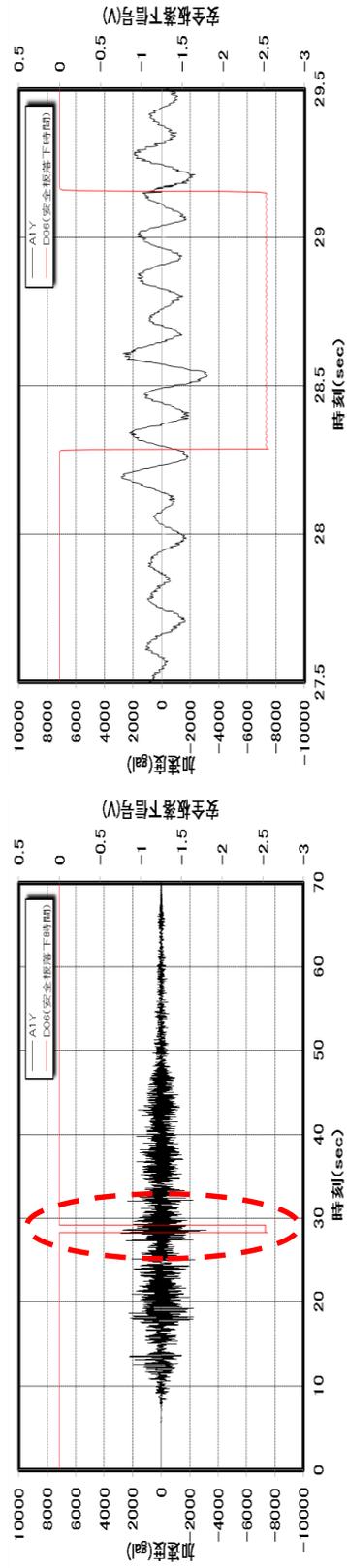


3. 試験結果

(1)安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	0.96
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.86

(2) 安全板駆動装置 (上部) (AIY) の応答加速度



< 応答加速度全体 >

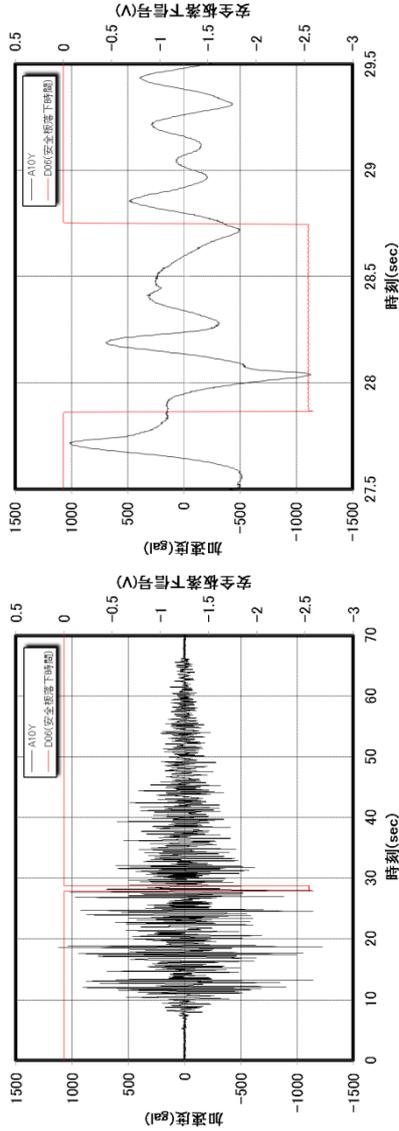
< 破線部詳細 >

図 9.1.4-19 加振試験結果 (試験ケース 7-2)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 7-5
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル2、入力ピーク加速度913 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 150 cm
- ⑤安全板落下時刻 : 相対変位第1位
- ⑥落下 : 電源 OFF による落下
- ⑦非磁性体 : 厚さ0.5 mm / 電圧強さ[5]

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

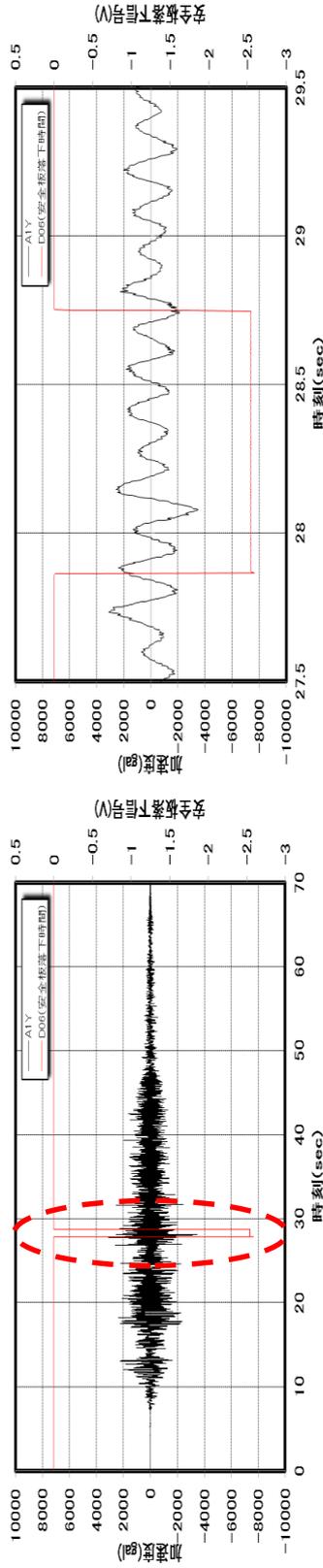


3. 試験結果

(1)安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	0.99
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	0.88

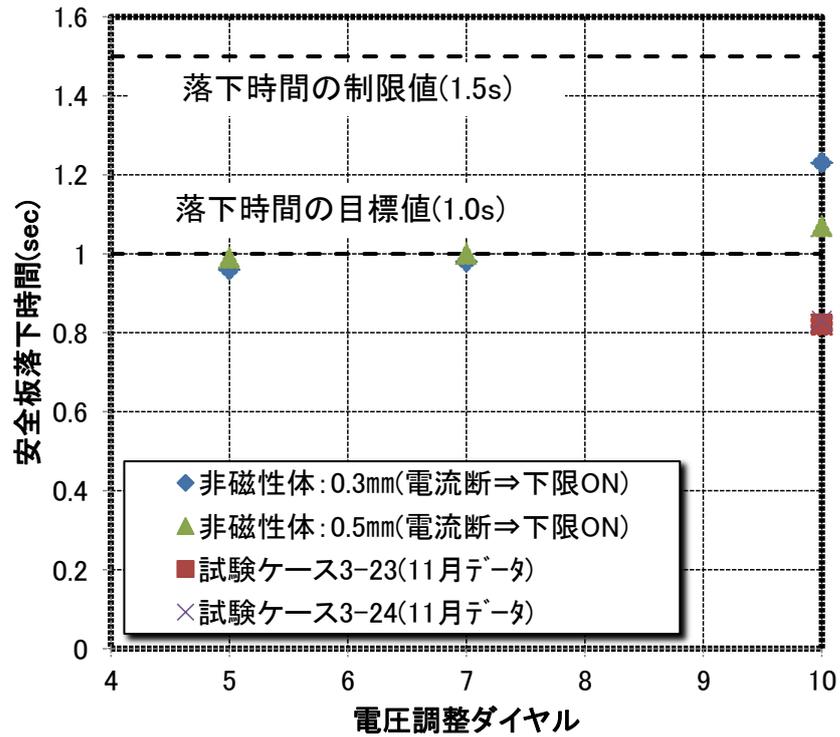
(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



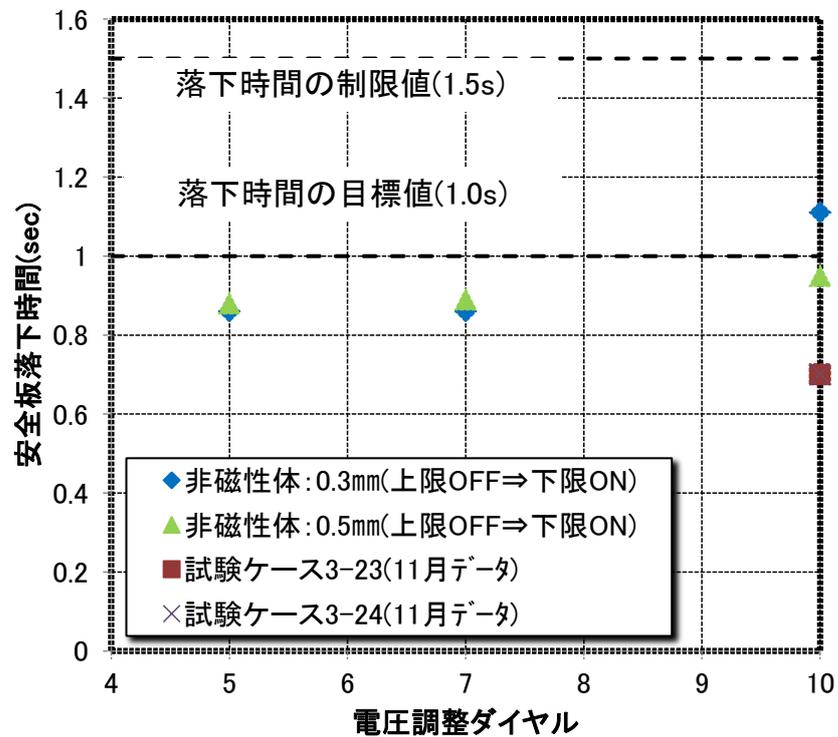
< 応答加速度全体 >

< 破線部詳細 >

図 9.1.4-20 加振試験結果 (試験ケース 7-5)

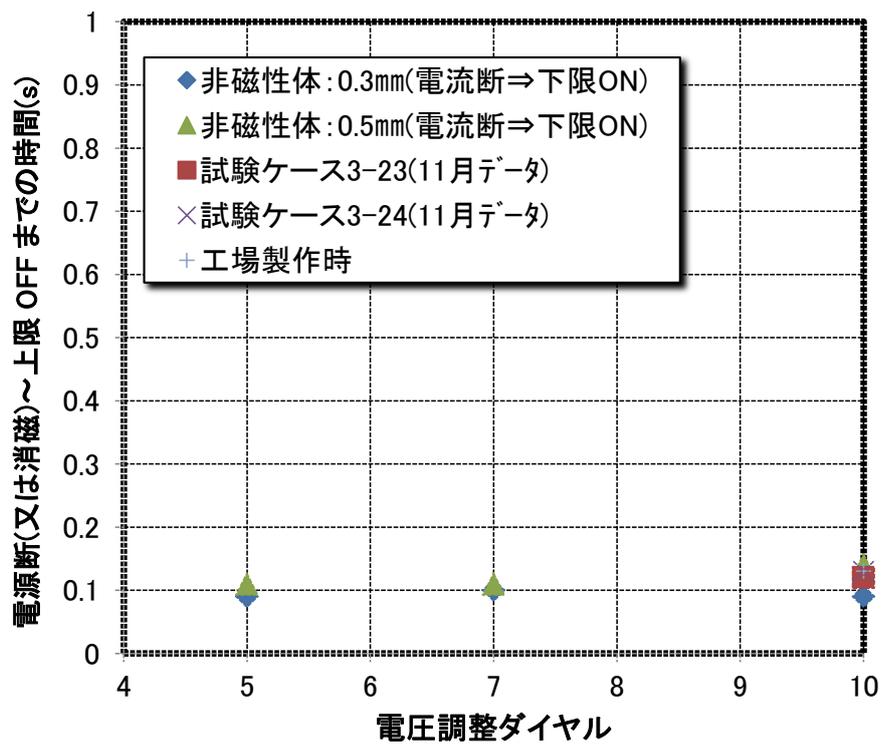


(a) 落下時間 (電流断 ⇒ 下限 ON)



(b) 落下時間 (上限 OFF ⇒ 下限 ON)

図 9.1.4-21 励磁 OFF 確認試験での落下時間 (1/2)



(c) 落下時間（電流断（又は消磁）⇒上限 OFF）

図 9.1.4-21 励磁 OFF 確認試験での落下時間（2/2）

(5) 保持状態確認試験

保持状態確認試験の試験結果を、図 9.1.4-22～23 に示す。

試験ケース 8-1（非磁性体厚さ 1 mm、電圧調整ダイヤル 7）では、加振のみ（落下信号なし）で安全板が落下する結果となった。この際、落下直前での最大応答加速度は、次のとおりであった。

- ・安全板上部で約 2000 gal
- ・安全板中段で約 6000 gal
- ・安全板下端で約 5000 gal

試験ケース 8-N1（非磁性体厚さ 0.5 mm、電圧調整ダイヤル 5）では、加振中の自然落下は生じず、上限位置での保持状態を維持した。この際、各部の最大応答加速度は、次のとおりであった。

- ・安全板上部で約 2500 gal
- ・安全板中段で約 8000 gal
- ・安全板下端で約 6000 gal

9.1.4 (4)項に示した励磁 OFF 確認試験（試験ケース 7-2～7）では、相対変位第 1 位時刻（目標ピーク時刻 28.57 s）で安全板を落下させているが、入力地震波の最大加速度は約 18 s 近傍である。この時刻での安全板駆動装置各部の応答加速度は、上記の試験ケース 8-N1 と同様である。

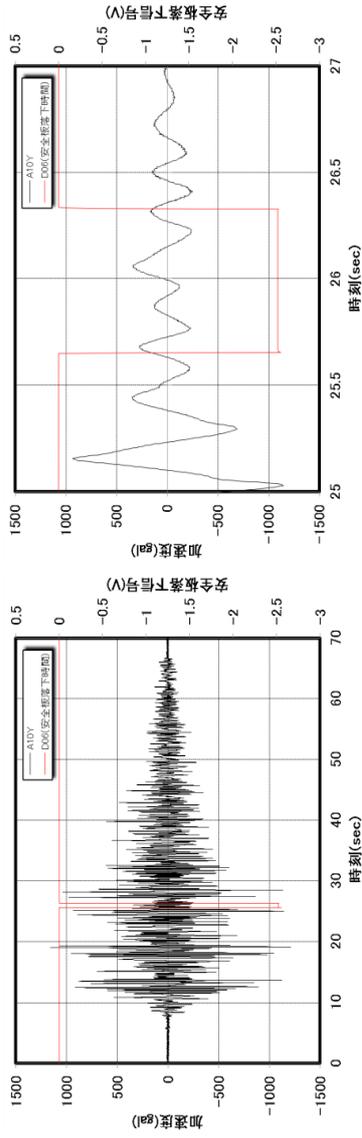
この条件では、加振のみでの落下は生じておらず、上限位置での保持状態を維持した。上記により、保持状態として以下を確認した。

- ・非磁性体厚さ 0.3 mm 及び 0.5 mm では、実機想定を上回る地震力に対しても、保持状態を維持することを確認した。
- ・非磁性体厚さが 1 mm の場合には、加振力が大きい場合に安全板が落下するが、実機を上回る地震力に対してのみであり、実機想定地震力に対しては保持状態を維持することを確認した。

1. 試験条件

- ①加振ケース : 8-1
 - ②加振方向 : 弱軸方向
 - ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル 2、入力ピーク加速度 913 gal)
 - ④炉心タンク内水位 : 150 cm
 - ⑤安全板落下時刻 : 落下なし※
 - ⑥非磁性体 : 厚さ 1.0 mm / 電圧強さ [7]
- ※試験結果では、加振により落下

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

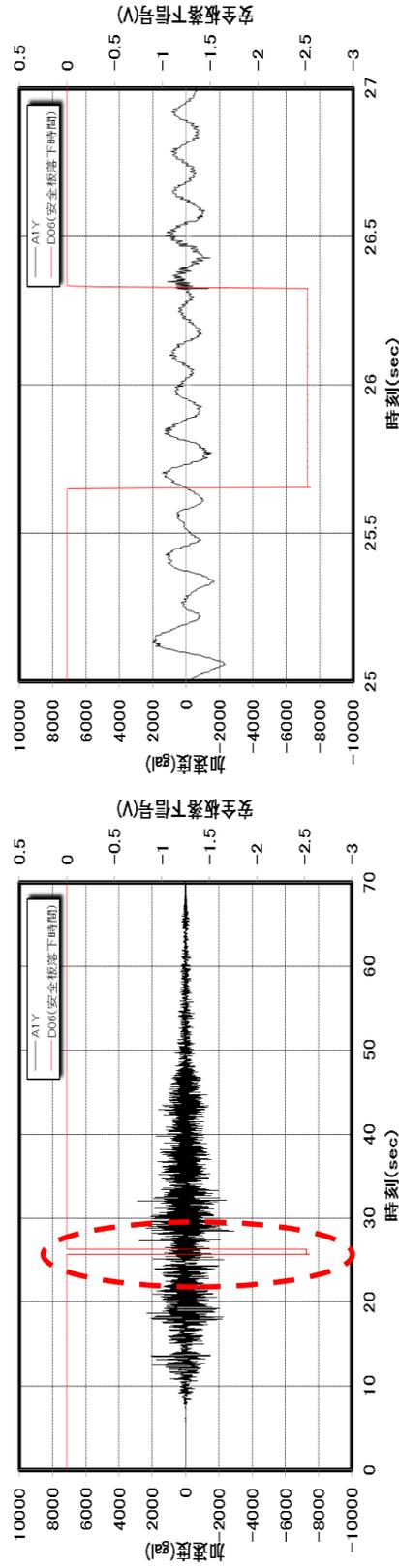


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON~安全板下限センサ ON	—
安全板上限センサ OFF~安全板下限センサ ON	1.20

(2) 安全板駆動装置 (上部) (A1Y) の応答加速度



※加振による自然落下

< 応答加速度全体 >

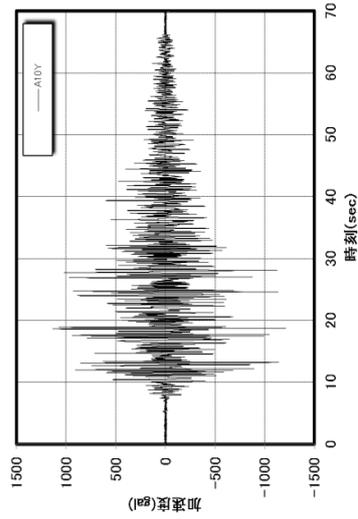
< 破線部詳細 >

図 9.1.4-22 加振試験結果 (試験ケース 8-1)

1. 試験条件

- ①加振ケース : 8-N1
- ②加振方向 : 弱軸方向
- ③入力地震波 : 模擬地震波
(レベル2、入力ピーク加速度 913 gal)
- ④炉心タンク内水位 : 150 cm
- ⑤安全板落下時刻 : 落下なし
- ⑥非磁性体 : 厚さ 0.5 mm / 電圧強さ [5]

2. 振動台入力加速度及び安全板落下時刻

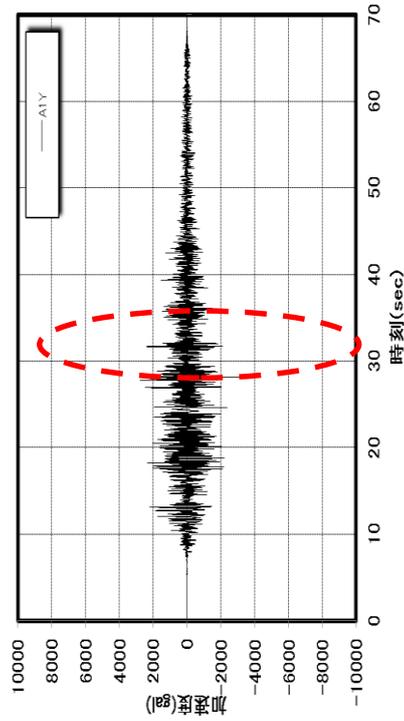


3. 試験結果

(1) 安全板落下時間

落下時間	試験結果 (s)
消磁 ON～安全板下限センサ ON	—
安全板上限センサ OFF～安全板下限センサ ON	—

(2) 安全板駆動装置 (上部) (AIY) の応答加速度



< 応答加速度全体 >

※加振による自然落下なし

図 9.1.4-23 加振試験結果 (試験ケース 8-N1)

9.1.5 加振試験後の試験装置の確認

9.1.4 項では加振試験結果を示したが、本項では、加振試験後に試験体各部の状態を確認した結果を示す。

(1) 安全板の平坦度測定

第1回と第2回の加振試験において、同一の試験条件で落下時間が0.2 s程度遅くなる結果が見られた。要因の一つとして、加振に伴い安全板にゆがみ等が生じている可能性が考えられたため、安全板の平坦度測定を実施した。

① 測定方法

安全板の平坦度は、安全板の製作段階でも測定を行っている。測定方法は、製作段階と同様の方法によるものとし、安全板を定盤上に設置し、定盤面からの高さ(18測定点)を表面及び裏面に対して測定した。

② 測定結果

平坦度測定の結果について、以下に示す。

1) 製作時

製作時における安全板の平坦度の測定結果を、図9.1.5-1に示す。

製作時では、安全板の板厚1.5 mm(設計値)に対して、最大ゆがみは約1.8 mm(± 0.15 mm相当)であった。落下性能の観点から、安全板の製作公差(許容値)を 1.5 ± 0.75 mmとしており、製作段階では許容値を満足する結果となっていた。

ゆがみの状態は、図9.1.5-1に示すように、主にレーザ溶接した部分に変形しており、溶接変形によるものである。

2) 加振試験後の安全板

加振試験終了後における安全板の平坦度の測定結果を、図9.1.5-2に示す。

加振試験終了後では、安全板の最大ゆがみは約3.6 mmの結果となった。安全板板厚(設計値)が1.5 mmであることから、板厚に対する公差は 1.5 ± 1.05 mmに相当する。なお、加振試験に用いた安全板は、過去に落下耐久試験を実施しているが、耐久試験後の平坦度測定は行っていないことから、正確には、製作直後と落下耐久試験及び加振試験後の測定結果の比較となる。

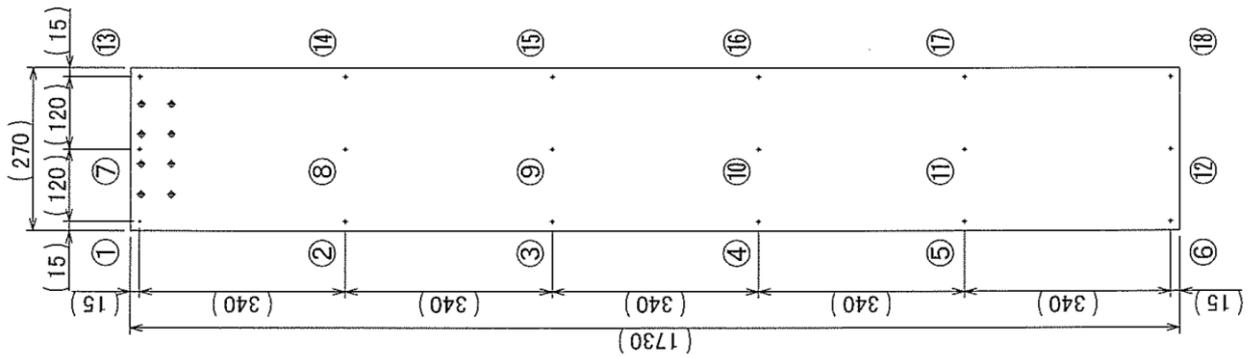
安全板の製作公差(許容値)は、現時点では 1.5 ± 0.75 mmとしており、測定結果はこの公差を超える結果であった。

ゆがみの状態は、図9.1.5-2に示すように、安全板全体にゆがみが生じる状態となっており、製作時よりゆがみが増加していることが確認された。

③ 安全板の落下時間への影響

過去に実施した安全板性能試験(加振しない状態で落下性能を確認する試験)では、板厚を3.5 mm以上(製作精度の低下に相当)とした場合に、落下時間が増加する結果が得られている。

加振試験後の測定結果は、板厚に置き換えると 3.6 mm に相当するものであり、過去の性能試験結果に基づけば、落下時間が増加する要因になり得ると考えられる。



	測定結果 (mm)	
	表面	裏面
①	1.49	1.48
②	1.50	1.45
③	1.49	1.45
④	1.46	1.48
⑤	1.49	1.51
⑥	1.55	1.57
⑦	1.54	1.54
⑧	1.49	1.49
⑨	1.49	1.48
⑩	1.47	1.62
⑪	1.50	1.48
⑫	1.82	1.69
⑬	1.47	1.48
⑭	1.47	1.49
⑮	1.50	1.50
⑯	1.47	1.46
⑰	1.51	1.53
⑱	1.57	1.67
最大	1.82	

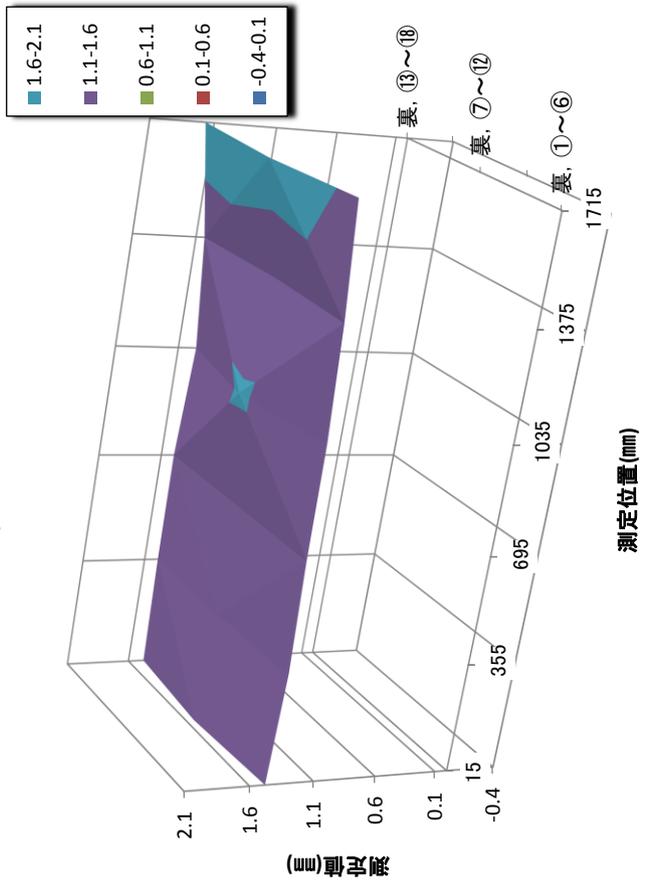
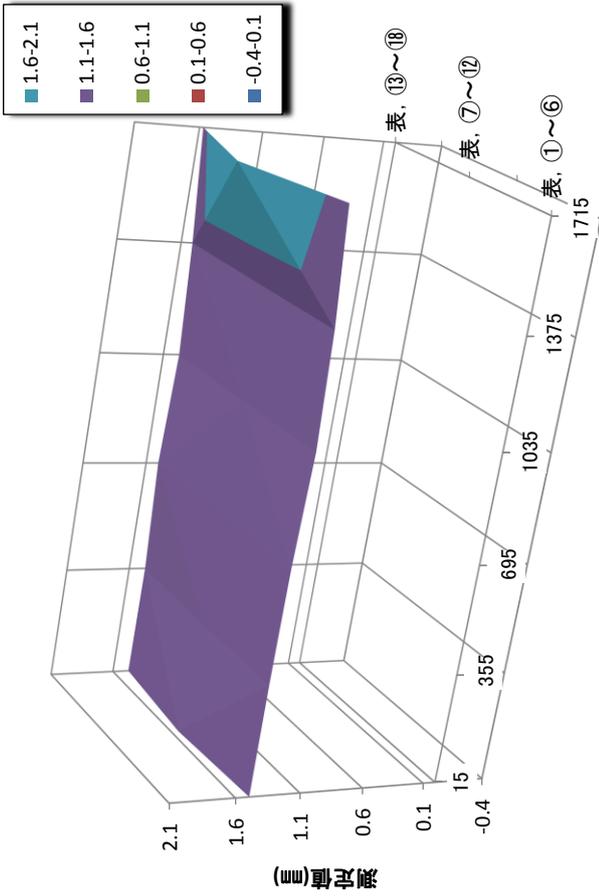
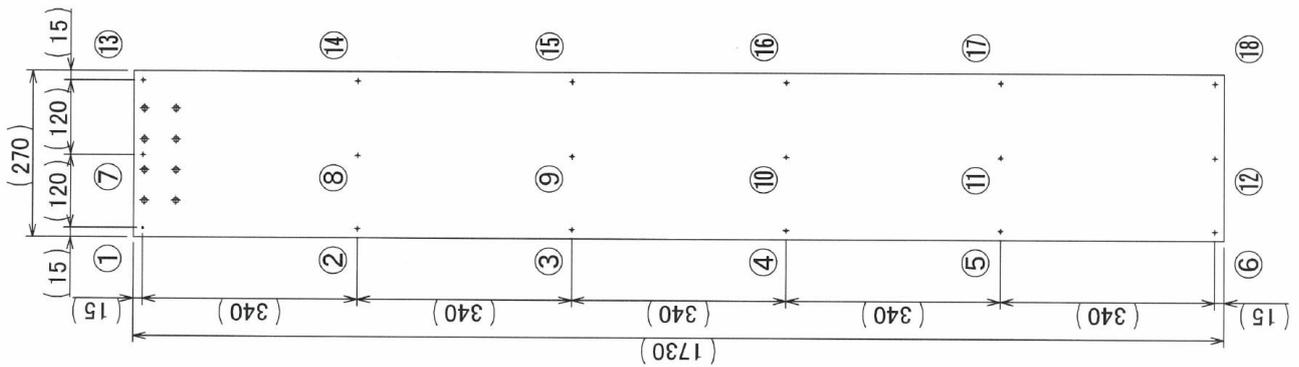
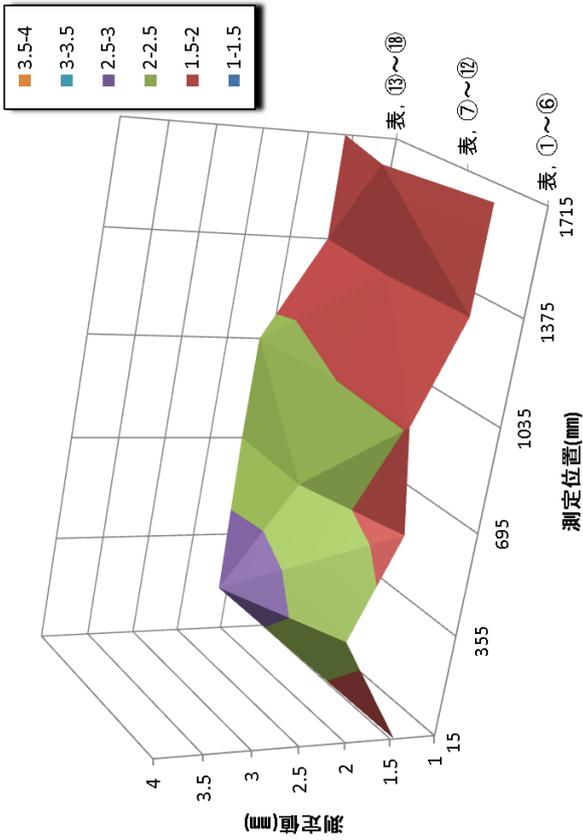


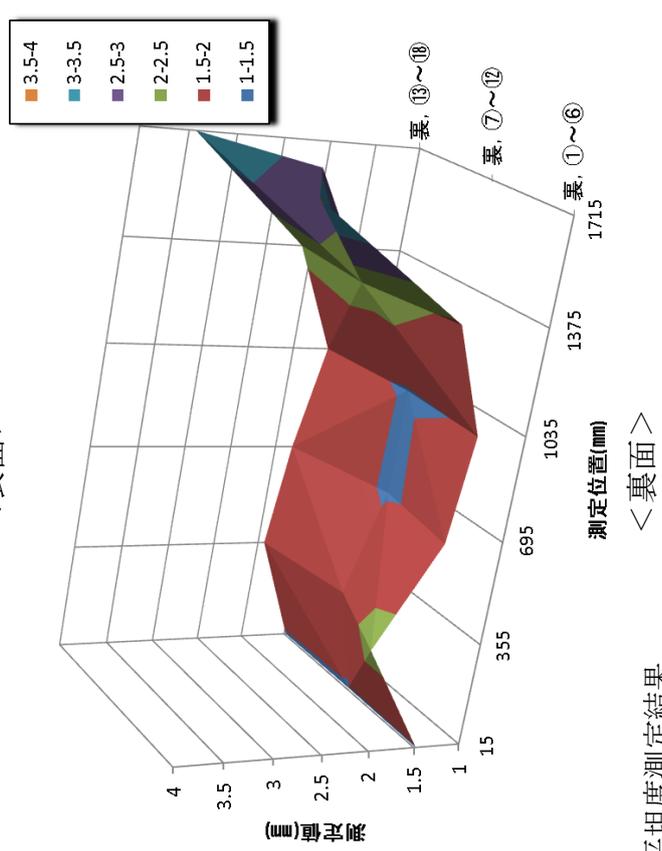
図 9.1.5-1 製作時の平坦度測定結果



	測定結果	
	表面	裏面
①	1.46	1.48
②	2.21	2.19
③	1.81	1.63
④	1.99	1.52
⑤	1.59	1.93
⑥	1.58	3.56
⑦	1.47	1.47
⑧	2.87	1.75
⑨	2.20	1.46
⑩	2.00	1.47
⑪	1.67	2.19
⑫	1.95	2.81
⑬	1.46	1.48
⑭	2.04	1.93
⑮	2.14	1.81
⑯	2.14	1.61
⑰	1.57	2.11
⑱	1.59	3.43
最大	3.56	



<表面>



<裏面>

図 9.1.5-2 加振試験終了後の平坦度測定結果

(2) 試験装置各部の状態確認

加振試験後の試験装置各部について、傷の有無等の外観を目視確認した結果を以下に示す。

① 安全板

加振試験後の安全板の外観を、図 9.1.5-3 に示す。また、参考として、加振試験前の安全板の表面状態を図 9.1.5-4 に示す。

1) 全体外観

加振試験前後での傷の状態等を比較すると以下のとおりであり、加振時の炉心タンク内の水の圧力等により安全板がガイドピン及び模擬燃料ピンに押し付けられていたと考えられる。この結果は、9.1.5 (1) ②項に示した平坦度の低下にもつながると考えられる。

- ・加振試験前：安全板の傷は、表面及び裏面ともスポット溶接を行った箇所が中心であり、全体としては大きな傷は見られない。
- ・加振試験後：安全板全長にわたって擦り傷が発生しており、加振試験前になかった擦り傷が生じている。擦り傷は表面及び裏面ともほぼ同様である。

2) 傷の発生状況

安全板の傷の発生状況は以下のとおりである。

i) 表面

- ・安全板とガイドピンとの擦り傷は、加振試験前と大きな違いはなく、安全板両端部よりおおむね 10 mm の位置を中心に、ほぼ全長にわたって発生している。
- ・安全板と燃料ピンとの擦り傷は、安全板全長にわたって発生している。この擦り傷は、箇所により濃淡があり、特に擦り傷の濃い位置は、スポット溶接位置に相当する以下の位置であり、加振試験前の傷の発生位置と同様である。

安全板上端部から約 650 mm

安全板上端部から約 1030 mm

安全板上端部から約 1470 mm

ii) 裏面

- ・安全板とガイドピンとの擦り傷は、加振試験前と大きな違いはなく、安全板両端部よりおおむね 10 mm の位置を中心に、ほぼ全長にわたって発生している。
- ・安全板と燃料ピンとの擦り傷は、安全板全長にわたって発生している。この擦り傷は、箇所により濃淡があり、特に擦り傷の濃い位置は、スポット溶接位置より多少上方に相当する以下の位置であり、加振試験前の傷の発生位置と同様である。

安全板上端部から約 550 mm の位置

安全板上端部から約 900 mm の位置

安全板上端部から約 1300 mm の位置

3) 安全板落下時の状況検討

安全板と格子板、ガイドピン及び模擬燃料ピンとのすき間の関係を図 9.1.5-5 に示す。

図 9.1.5-5 及び 9.1.5 (1)項の平坦度及び傷の状態から、安全板の落下状況は以下であると考えられる。

- ・図 9.1.5-5 に示すように、ガイドピンの最大間隔は 2.1 mm である。これに対し、安全板の平坦度は、初期：最大ゆがみ約 1.8 mm、加振試験後：最大ゆがみ約 3.6 mm であ

るため、加振試験によるゆがみの増加に伴い落下抵抗が増加したと考えられる。この結果、加振試験（第2回）において、落下時間が増加する結果が見られたと考えられる。

- ・炉心タンク内に水がある条件では、スロッシングの影響により、安全板はガイドピン及び模擬燃料ピンに押し付けられる状態が考えられ、特に、水圧を受けやすい弱軸方向の加振で顕著と考えられる。加振試験（第2回）では、炉心タンク内満水での弱軸方向加振において落下時間の増加が見られ、強軸方向での増加は見られていない。落下時間の増加については、安全板の平坦度の低下に加え、加振時の横方向への水圧の影響も一因であると考えられる。

② 模擬燃料ピン

模擬燃料ピンの外観を図9.1.5-6に示す。模擬燃料ピン側では、加振試験後においても大きな傷は見られなかった。安全板の傷の状態からは、模擬燃料ピンとの接触はあるものの、有害な傷が発生する状態には至らないことを確認した。

③ 安全板駆動装置（ガイドフレーム）

安全板駆動装置（ガイドフレーム）の外観を、図9.1.5-7に示す。ガイドレールの内側（溝部）には全長にわたって、擦り傷が認められた。この傷は、安全板落下時のほか、上限位置への吊り上げ時に発生したものである。

安全板側がステンレス鋼（SUS304）製であるのに対し、ガイドフレームはアルミ製であり、ガイドフレーム側に傷が発生しやすくなっているが、安全板の落下性能に影響を及ぼすような傷は見受けられなかった。

④ 格子板

格子板（上段、中段及び下段）の外観を、図9.1.5-8に示す。格子板（上段、中段及び下段）に外観上の目立った傷は見られなかった。

⑤ その他（ショックアブソーバ、位置決めブロック）

ショックアブソーバ、位置決めブロックの外観を、図9.1.5-9に示す。これらに外観上の目立った傷は見られなかった。ショックアブソーバについては、上端のゴム部にも有害な傷、変形等は見られなかった。

安全板		
表面	裏面	
全体		
上段		
中段		
下段		

図 9.1.5-3 加振試験後の安全板の外観 (1/3)

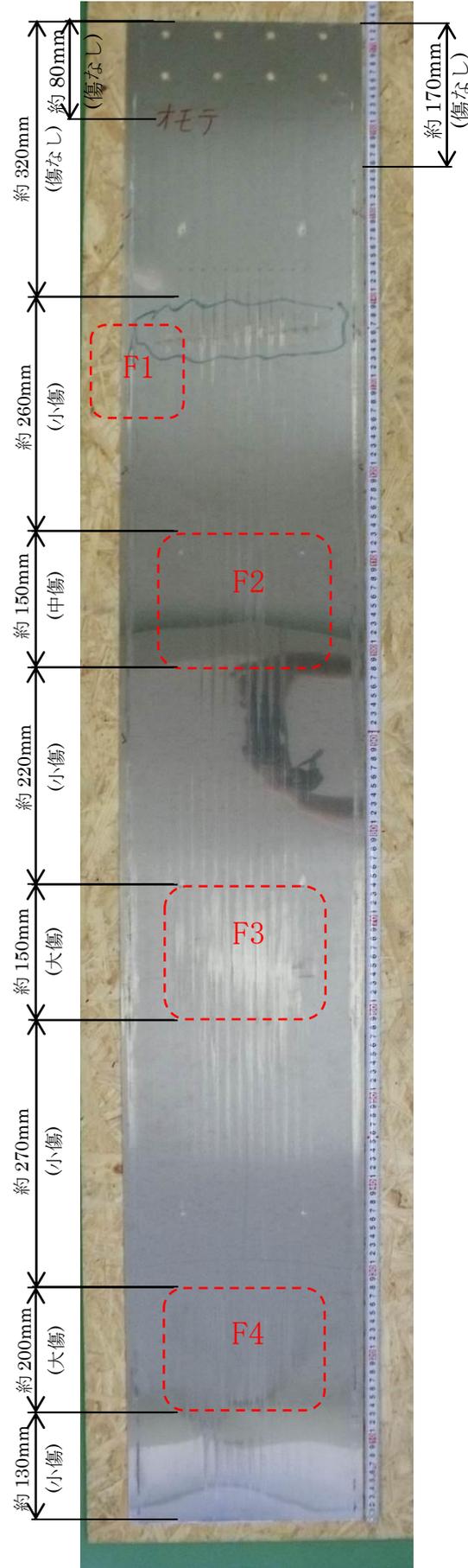
	安全板（表面）全体表面	安全板（表面）局部傷
安全板（表面）の傷の発生状況	 <p> 約 320mm (傷なし) 約 80mm (傷なし) 約 170mm (傷なし) 約 260mm (小傷) F1 約 150mm (中傷) F2 約 220mm (小傷) 約 150mm (大傷) F3 約 270mm (小傷) 約 200mm (大傷) F4 約 130mm (小傷) </p>	 <p> 約 11mm F1 F2 F3 F4 </p>

図 9.1.5-3 加振試験後の安全板の外観 (2/3)

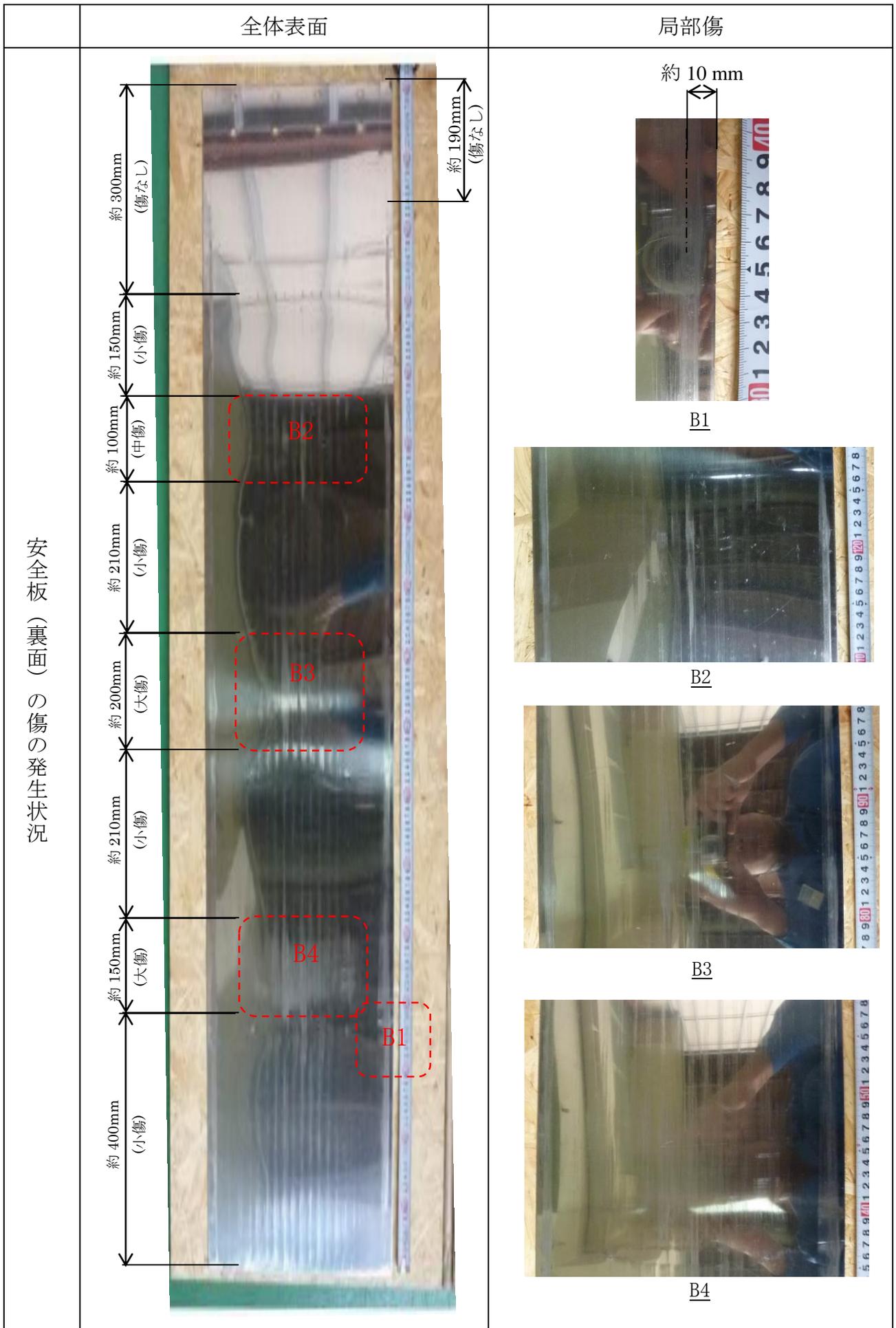


図 9.1.5-3 加振試験後の安全板の外観 (3/3)

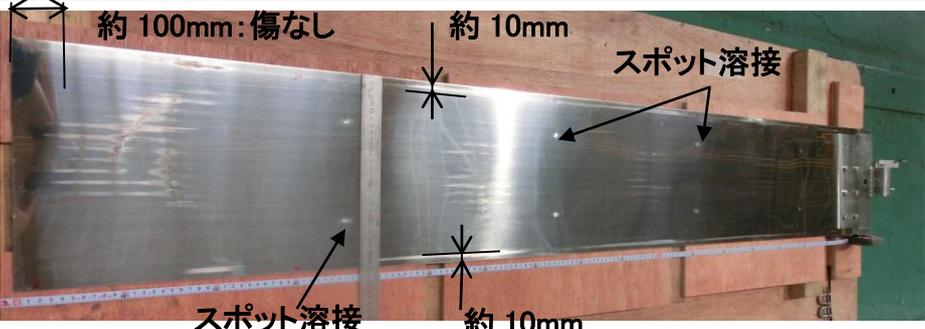
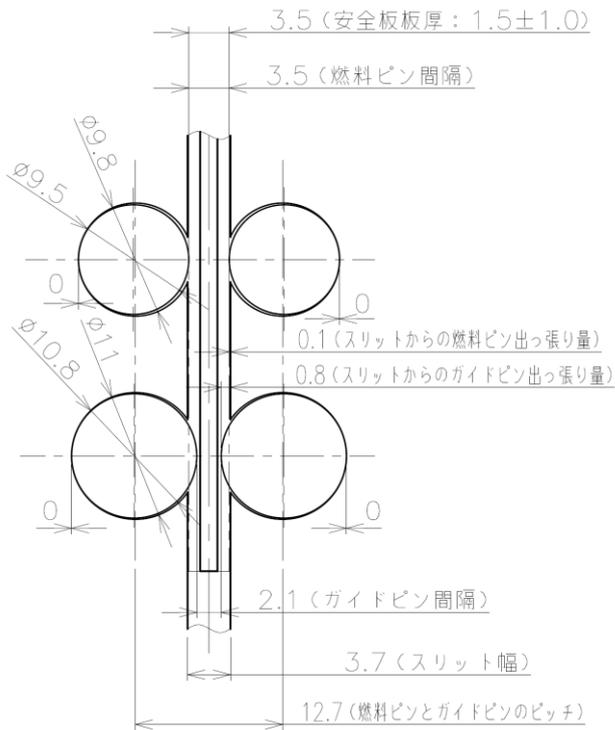
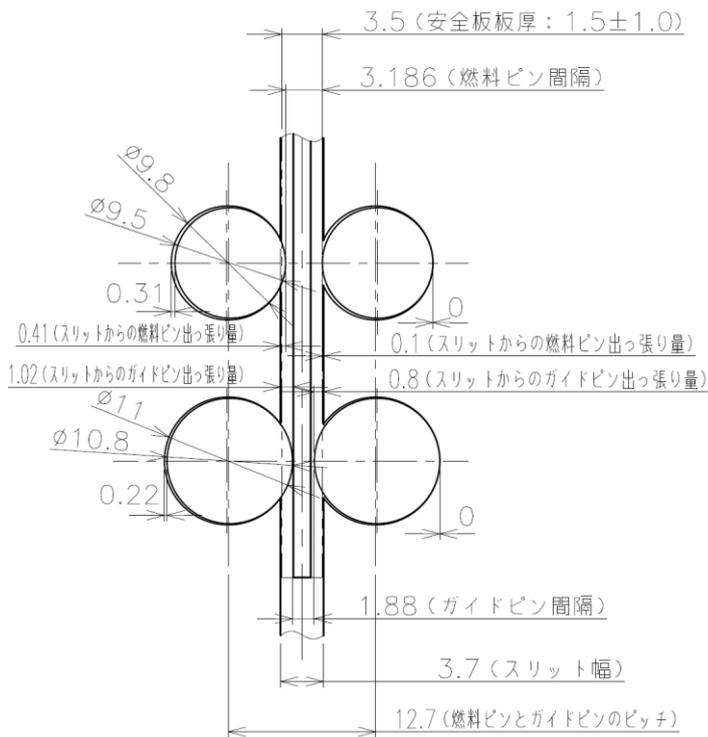
表面	 <p>約 100mm:傷なし</p> <p>約 10mm</p> <p>スポット溶接</p> <p>スポット溶接</p> <p>約 10mm</p>
裏面	 <p>スポット溶接</p> <p>スポット溶接</p>
局部傷	—
傷の概要	<p>①ガイドピンとの接触による傷は断続的な傷となっている。</p> <p>②模擬燃料ピンとの接触傷が見られ、表面ではスポット溶接部の上部に、裏面ではスポット溶接部の下部に生じている。</p>
落下状態の推測	<p>①傷の発生状況からは、安全板はガイドピンに沿って落下していると考えられる。</p> <p>②模擬燃料ピンとの接触は表面傷であり、落下性能等に影響を及ぼすものではなく、スポット溶接により生じたひずみにより接触が生じたものと推測する。</p>

図 9.1.5-4 加振試験前の安全板の表面状態（過去に実施した落下耐久試験後の状態）



(a) ガイドピン及び燃料ピンが最大逃げの場合



(b) ガイドピン及び燃料ピンの片側が最大寄りの場合

図 9.1.5-5 安全板とスリット部の位置関係



図 9.1.5-6 加振試験後の模擬燃料ピンの外観

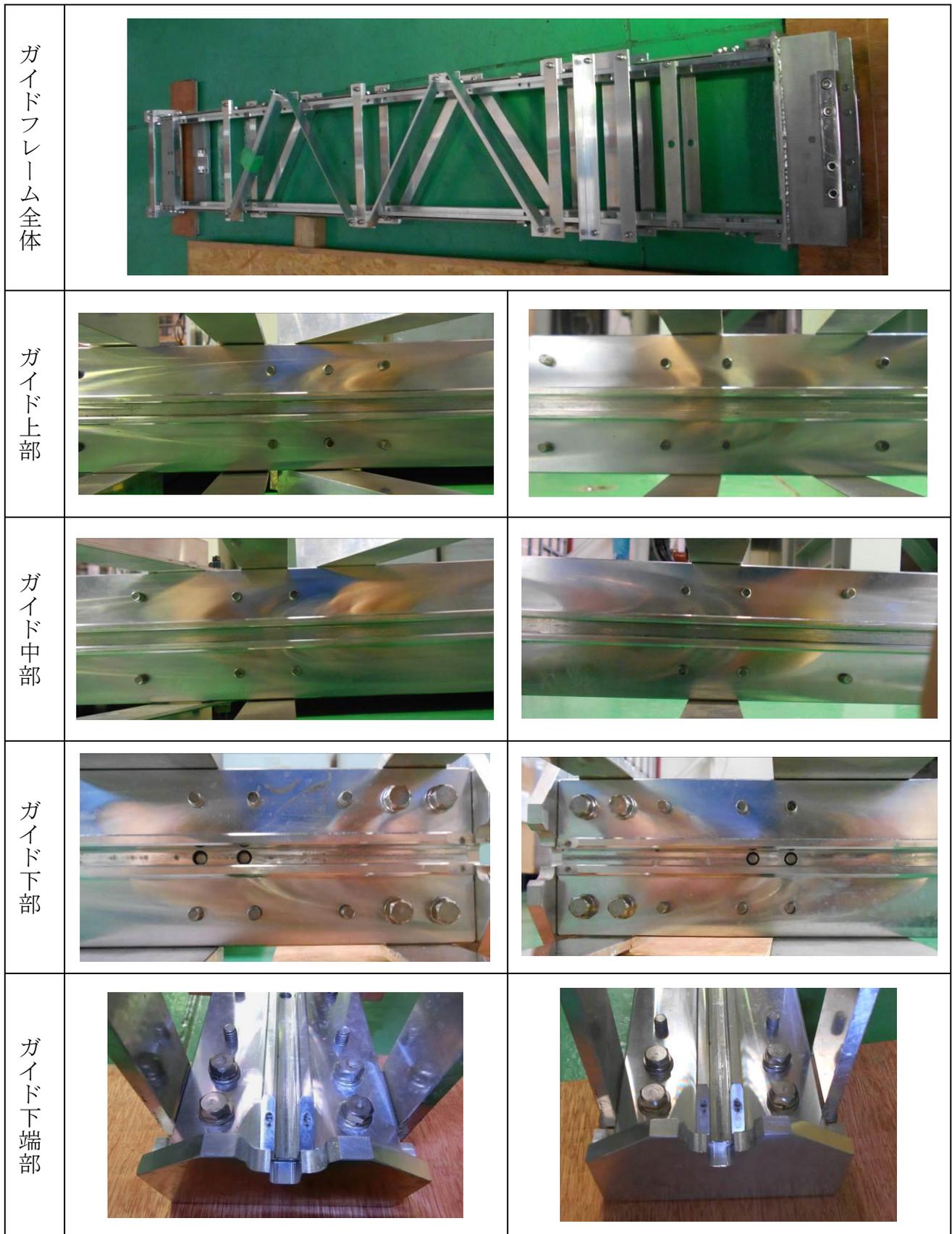


図 9.1.5-7 加振試験後の安全板駆動装置（ガイドフレーム）の外観

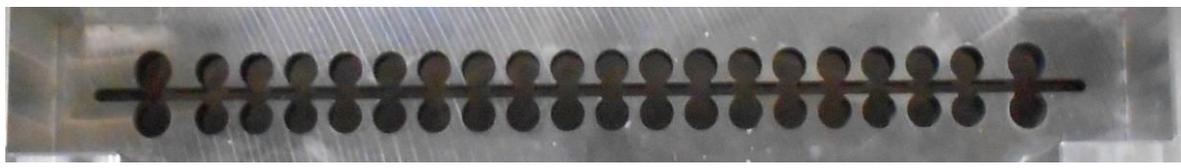
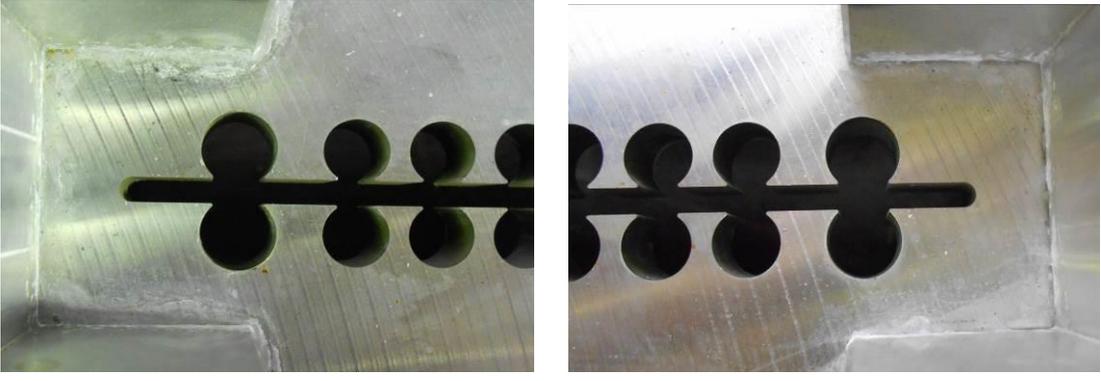
格子板（上段）	
全体外観	
スリット部	
スリット端部詳細	

図 9.1.5-8 (1/3) 加振試験後の格子板（上段）の外観

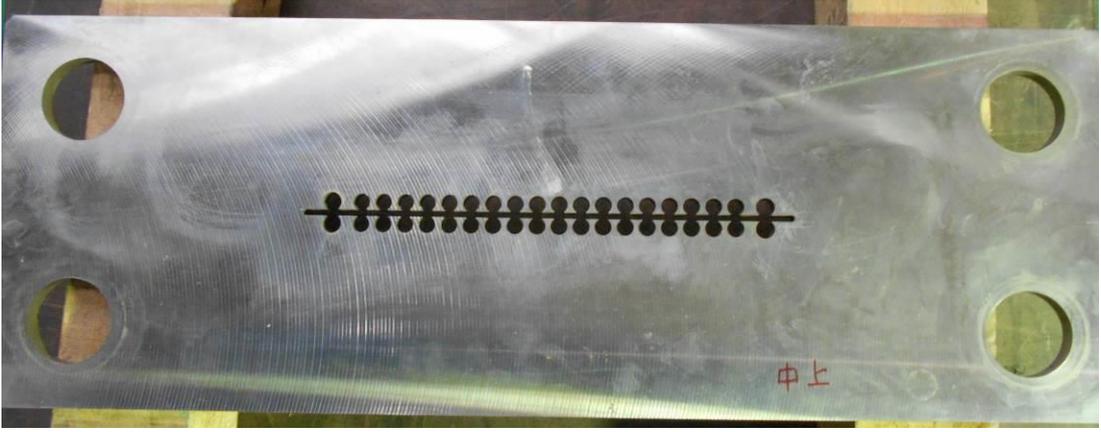
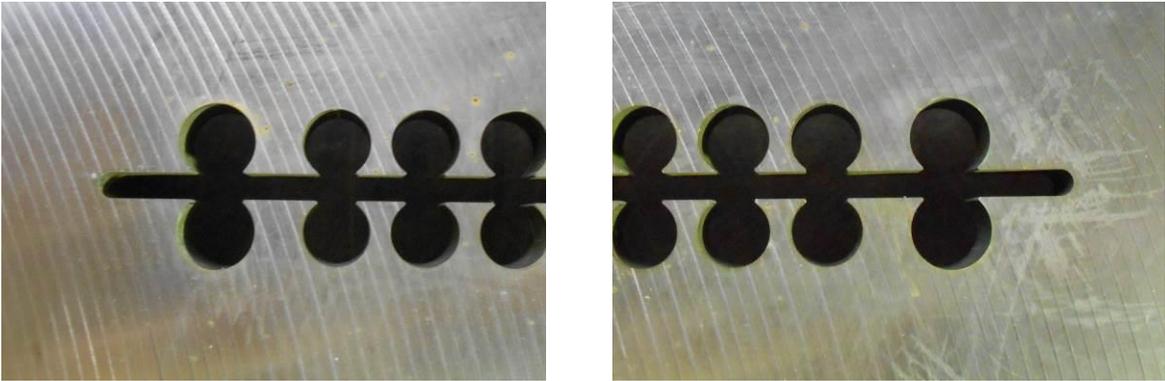
	格子板（中段）
全体外観	
スリット部	
スリット端部詳細	

図 9.1.5-8 (2/3) 加振試験後の格子板（中段）の外観

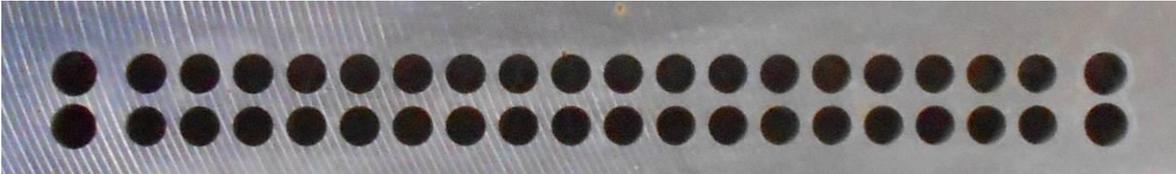
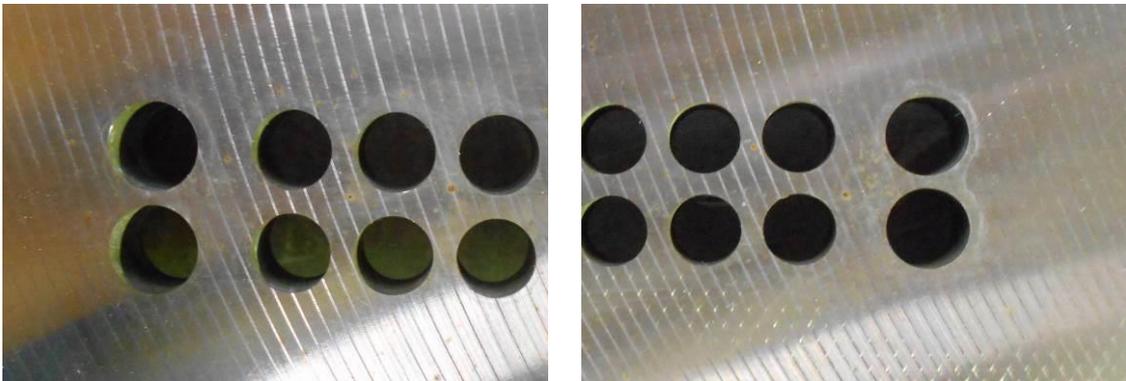
	格子板（下段）
全体外観	
スリット部	
スリット端部詳細	

図 9.1.5-8 (3/3) 加振試験後の格子板（下段）の外観



(a) 位置決めブロック



(b) ショックアブソーバ

図 9.1.5-9 ショックアブソーバ、位置決めブロックの外観

9.1.6 実機性能評価と実機構造への反映事項

加振試験結果に基づく、実機性能評価と実機構造への反映事項を以下に示す。

(1) 加振試験結果に基づく実機性能評価

加振試験結果に基づき、実機性能として以下が確認できた。なお、下記について、実機要求仕様と合わせて表 9.1.6-1 にまとめた。

a) 実機では、炉下室に設置した地震計が 25 gal を検出した時点でスクラム信号が発信され安全板が落下される。実機想定地震波において炉下室で 25 gal に達する時点での落下試験を行った結果、安全板の落下時間は 0.65 s (消磁～下限センサ ON) 程度であり、要求仕様である 1.5 s 以内を満足することを確認した。

本結果により、実機のスクラム条件では、確実に安全板が落下できることを確認した。

b) 地震波加振試験により、実機で想定する地震以上の加振に対して、以下のとおり安全板は確実に落下することを確認した。

- ・実機相当の地震波 (レベル 1、最大加速度 562 gal) に対し、安全板の落下時間は 0.7~0.8 s (消磁～下限センサ ON) 程度であり、要求仕様である 1.5 s 以内を満足することを確認した。

- ・下記の結果により、現状での実機想定地震波の約 2.5 倍の地震力に対して、安全板の落下時間は要求仕様である 1.5 s 以内を満足することを確認した。

- 実機相当地震を上回る地震波 (レベル 2、最大加速度 1136 gal) に対し、安全板のゆがみの増加を考慮しても、安全板の落下時間は 0.8~1.0 s (消磁～下限センサ ON) 程度である。本地震波は実機想定地震の約 2 倍の地震力であり、現状想定 of 2 倍程度の地震波に対しても要求仕様を満足できる見通しである。

- 実機相当地震を上回る地震波 (レベル 3、最大加速度 1400 gal) に対し、安全板のゆがみの増加を考慮しても、安全板の落下時間は 1.0~1.25 s (消磁～下限センサ ON) 程度である。本地震波は実機想定地震の約 2.5 倍の地震力であり、現状想定 of 2.5 倍程度の地震波に対しても要求仕様を満足できる見通しである。

- 本加振試験で得られた安全板の落下中の安全板駆動装置 (上部) で応答加速度は、以下のとおりであり、下記応答加速度までは安全板の落下時間は要求仕様を満足すると言える。

(強軸方向) 3867 gal (3.94 G)

(弱軸方向) 4056 gal (4.13 G)

- 本試験で確認された安全板のゆがみの増加について、本試験では実機を上回る地震力にて繰返し加振を実施している。実機では本試験より地震力が小さいこと及び基準地震動 Ss 相当の地震の発生頻度を考慮すると、実機では大幅なゆがみの増加は発生しないと考えられる。加振試験 (第 2 回) の後半の試験データを除外した場合、安全板の落下時間は 1.0 s (消磁～下限センサ ON) 以下程度と言える。

- ・安全板の落下に対して、非磁性体の追加を行うことで、電源断により確実に落下することを確認した。この結果により、許認可での要求仕様となる電源断で安全板が落下することを確認した。

表 9.1.6-1 加振試験結果に基づく実機性能評価結果

	要求仕様	加振試験結果 (概要)	実機性能評価	
1	炉下室に設置した地震計が 25 gal を検出した時点で、安全板が 1.5 s 以内に落下できること	<ul style="list-style-type: none"> ・実機想定地震波において、炉下室で 25 gal に達する時点での落下試験結果により、安全板の落下時間が 0.65 s (消磁～下限センサ ON) 程度であった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・スクラム条件で、安全板の落下時間は要求仕様を満足 	○
2	実機で想定される地震に対して、安全板が 1.5 s 以内に落下できること	<ul style="list-style-type: none"> ・実機相当の地震波 (レベル 1、最大加速度 562 gal) に対し、安全板の落下時間は 0.7～0.8 s (消磁～下限センサ ON) 程度 ・実機相当地震を上回る地震波 (レベル 2、最大加速度 1136 gal) に対し、落下時間は 0.8～1.0 s 程度 ・実機相当地震を上回る地震波 (レベル 3、最大加速度 1400 gal) に対し、落下時間は 1.0～1.25 s 程度 ・安全板のゆがみによる落下時間の増加があるが、加振試験 (第 2 回) の後半の試験データ以外では、落下時間は 1.0 s 以下程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震時に安全板の落下時間は要求仕様を満足 ・要求仕様 1.5 s 以内に対し、設計目標値 1.0 s 以内をおおむね満足 ・地震力に対しては、実機想定約 2.5 倍までの要求仕様を満足 	○
3	外部電源喪失等を考慮して、安全板は電源断により確実に落下できること	<ul style="list-style-type: none"> ・非磁性体の追加を行うことで、電源断 (消磁なし) により確実に落下 	<ul style="list-style-type: none"> ・電源断 (消磁なし) での落下要求を満足 	○

(2) 実機構造への反映事項

本加振試験の結果に基づく、実機構造への反映事項は以下のとおりである。

① 安全板の落下時間に対する限界応答加速度

本加振試験の結果では、実施した全ケースについて安全板の落下時間は 1.5 s (消磁又は電源断～下限センサ ON) 以内であることが確認できた。一方、設計での目標落下時間は 1.0 s としており、一部の試験ケースでは 1.0 s を超える結果となった。

本加振試験の結果で得られた、安全板の落下時間内に安全板駆動装置 (上部) に発生する応答加速度の最大値は、図 9.1.6-1 に示すとおりであり、本結果に基づき落下時間の要求を満足する限界応答加速度は以下となる。

- ・許認可制限 1.5 s に対する限界応答加速度： 3800 gal (=3.87 G)
- ・設計目標 1.0 s に対する限界応答加速度： 3300 gal (=3.36 G)

実機設計において耐震計算を実施することになるが、本試験結果を基に応答加速度で整理することを想定している。また、応答加速度についても安全板駆動装置の中段や下段等も考えられるが、耐震計算上でこれらの応答加速度は評価困難であるため、耐震計算での評価とも整合しやすい安全板駆動装置 (上部) の応答加速度で設定する。

② 電源断に対する実機での構造対応

アマチュア部を直接電磁ホルダで保持した場合、残留吸着力により電源断としても安全板が落下しないことが確認されている。このため、本試験では、電源断に対する対応として、アマチュアと安全板の間に非磁性体を挿入して落下試験を実施している。

本試験結果に基づき、アマチュア部に非磁性体を挿入することで、電源断 (消磁なし) で安全板が落下可能であることを確認しており、実機構造には以下を反映する。

- ・非磁性体厚さ： 0.5 mm
- ・非磁性体材質： SUS304

	落下時間の仕様	最大応答加速度 (計測値) (gal)		最大応答加速度 (gal)	限界応答加速度 (gal) *
		加振試験 (第1回)	加振試験 (第2回)		
強軸方向	1.5 s 以内	3867	3624	3867 (3.94 G)	3800 (3.87 G)
弱軸方向		3388	4056	4056 (4.13 G)	
強軸方向	1.0 s 以内 (設計目標)	3867	3624	3867 (3.94 G)	3300 (3.36 G)
弱軸方向		3388	3205	3388 (3.45 G)	

*)限界応答加速度は、得られた最大応答加速度を丸めて設定した。

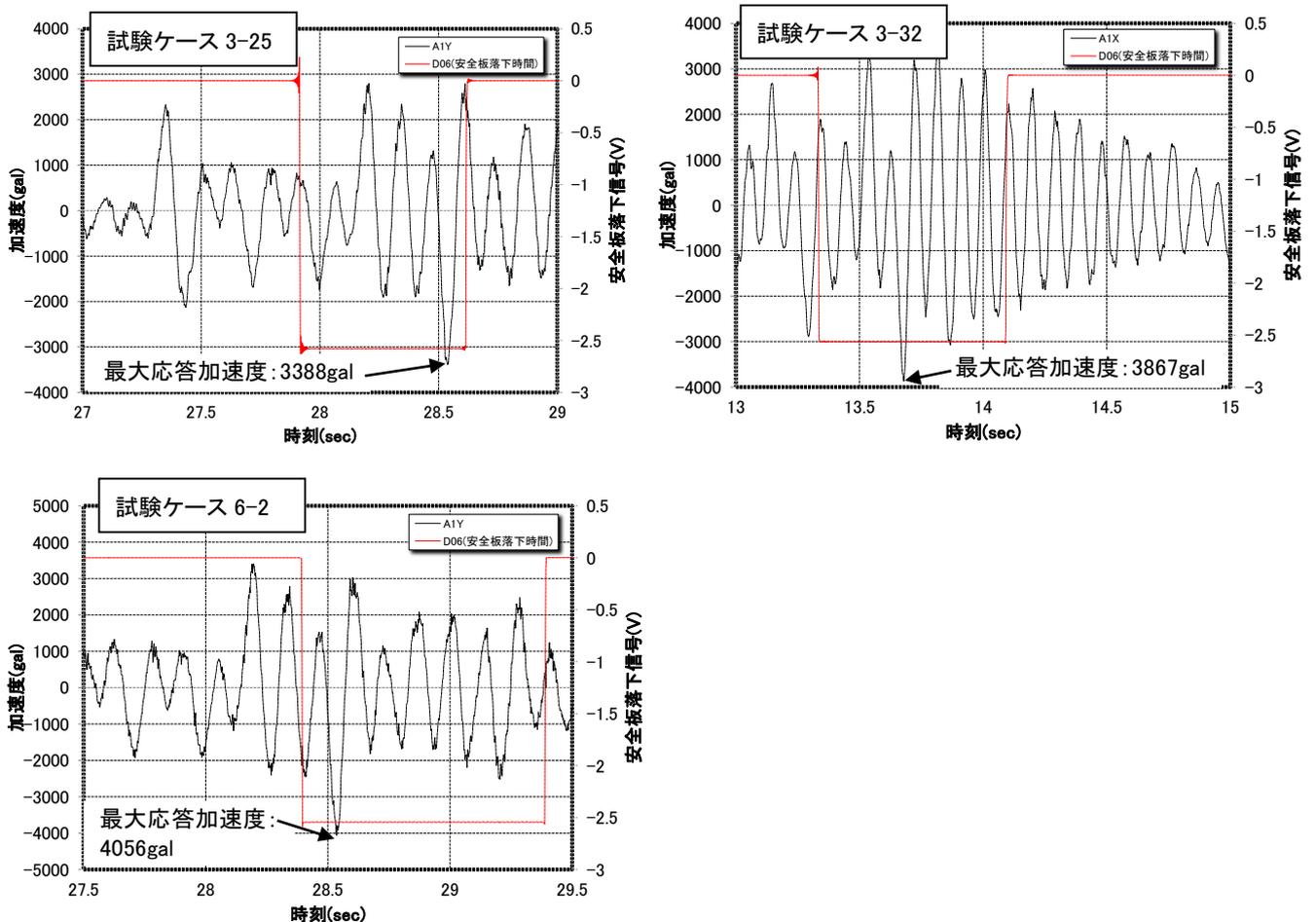


図 9.1.6-1 安全板の落下時間中に安全板駆動装置 (上部) に生じる最大応答加速度のまとめ

9.1.7 まとめ

STACY 更新炉の異常時に緊急停止させる装置である安全板装置の耐震性能を検証するため、安全板加振試験装置を製作し、防災科学技術研究所大型耐震実験施設の振動台において安全板加振試験を実施した。

本試験により得られた結果及び実機設計への反映事項は以下のとおりである。

- ・実機のスクラム条件（地震加速度 25 gal 検知時）に対し、安全板が 1.5 s 以内に落下できることを確認した。
- ・想定される地震（実機想定地震条件：最大地震加速度約 560 gal）に対し、安全板が 1.5 s 以内に落下できることを確認した。また、実機想定地震の約 2.5 倍（最大地震加速度約 1400 gal）においても安全板の落下性能が失われないことを確認した。
- ・安全板の落下時間 1.5 s に対する安全板駆動装置上部の限界応答加速度は 3800 gal（3.87 G）、落下時間 1.0 s に対する安全板駆動装置上部の限界応答加速度は 3300 gal（3.36 G）となることを確認した。
- ・外部電源喪失を想定した安全板の落下性能に対し、電磁石とアマチュア部に非磁性体（SUS304、板厚 0.5 mm）を追加することにより性能を満足することを確認し、実機設計に反映した。

9.2 水位計測試験装置の検討

本節では、STACY 更新炉の炉心タンクの水位計の計測精度を確認するために必要な試験の検討及びモックアップ試験装置の設計について報告する。また、当該水位計の安全機能が失われた場合のバックアップ装置であるオーバーフロー管の設計検討について付録 9.2.A1 に示す。

9.2.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉は、炉心タンクの水位を調整することにより反応度を制御する原子炉であるため、水位制御性能が非常に重要である。特に、STACY 更新炉では、使用する軽水の温度を上昇させる試験を計画しているため、昇温による水位制御装置の計測精度への影響を正確に把握しておく必要がある。このため、炉心タンク水位を制御する装置である最大給水制限スイッチ及び給水停止スイッチ（以下「炉心タンク水位計」という）の計測精度に与える熱影響の検証方法の検討を行う。

(2) 概要

STACY 更新炉の水位制御装置である炉心タンク水位計の駆動軸は、計測範囲の長さ（1400 mm 以上）から、熱膨張による精度への影響が無視できない。このため、炉心タンク水位計の計測精度に与える熱影響の検証に必要な事項として以下の 2 つの検討を実施した。

- ・炉心タンク水位計基本構造の検討

炉心タンク水位計の構造を検討し、熱影響の軽減（目標 1.0 mm 以下）を図る。また、検討結果を実機設計に反映し、成立性を確認する。なお、炉心タンク水位計の構造は、最大給水制限スイッチと給水停止スイッチではほぼ同様であるが、熱影響が大きい（計測範囲が広い）最大給水制限スイッチを代表機器として検討する。

- ・モックアップ試験装置の設計及び試験計画の立案

炉心タンク水位計の計測精度に与える熱影響を検証するためのモックアップ試験装置を設計するとともに試験計画を立案する。

9.2.2 成果報告

(1) 炉心タンク水位計基本構造の検討

炉心タンク水位計は、炉心タンク水面を検知するための水面検知器、下端部にその水面検知器を備えたスイッチロッド及びスイッチロッドを上下駆動するためのボールネジ等で構成される。このボールネジ及びスイッチロッドが昇温されることで熱膨張により伸びが生じ、水位計測に影響を及ぼすおそれがある。このため、熱膨張の影響を小さくする炉心タンク水位計構造の検討を行った。

① ボールネジの固定位置の検討

炉心タンク水位計のスイッチロッドは下端に水面検知器を備えるので上端を固定・支持して上下動させるため、熱膨張は下方向に生じる。ボールネジの固定位置を現行

STACY の水位計と同様に、「上端固定・下端支持」とした場合、ボールネジの熱膨張も下向きに生じるため、スイッチロッドの熱膨張に加算されることになる。一方、ボールネジ固定位置を「下端固定・上端支持」に変更した場合、ボールネジの熱膨張が上方向となるので、スイッチロッドの下方向への熱膨張と相殺されることにより、熱影響を低減できる可能性がある。

下端固定・上端支持とした場合の構造概念を図 9.2-1 に示す。

1) 温度影響の比較評価

炉心タンク水位計のボールネジを上端固定、下端固定とした場合の熱影響について比較評価する。評価は、実機水位計の寸法関係の計画値を用い、スイッチロッド、ボールネジとも一様に 50℃ 上昇 (20℃→70℃) したと仮定して、水面検知器 (フロートスイッチ) の昇温前後の変位量を比較することで行う。評価条件及び評価結果の詳細を、表 9.2-1 に示す。評価結果の概要は以下のとおりである。

- ・フロートスイッチは、ボールネジの固定位置に関係なく、初期設定位置よりも下方に移動する。このため、実際は設定した給水制限位置よりも低い水位で検出される。(安全側の移動)
- ・ケーシングは熱影響を受けないと仮定した場合、熱影響によるフロートスイッチの変位量は以下となり、ボールネジを「下端固定」とした場合の方が 1.9 mm 小さくなる。

ボールネジ上端固定：2.2~3.1 mm

ボールネジ下端固定：0.3~1.2 mm

なお、ケーシングも一様に昇温し熱影響を受けると仮定すると、ボールネジ上端固定の結果はボールネジ下端固定の結果と同じとなる。

- ・熱影響による変位量は、炉心タンク水位計の設定位置が低い (水位が低い) 程大きくなる。

2) 水位計の基本構造の変更

前項までの結果から、ボールネジを「下端固定・上端支持」に変更することで、上端固定の場合に比べて熱影響が小さくなることを確認した。したがって、本構造案を炉心タンク水位計の基本構造として採用する。

② ボールネジ、スイッチロッドの材質の検討

前項のボールネジの固定位置の検討では、ボールネジとスイッチロッドの材質を SUS304 に想定し、熱膨張係数を 17.3×10^{-6} と設定した。この場合、ボールネジを下端固定とした場合でもフロートスイッチの変位量は最大 1.2 mm となり、熱影響低減目標値である 1.0 mm 以下を満足しない。このため、熱膨張係数の小さな他の材質の検討及び選定を行った。

材質の選定では、熱膨張係数の他に耐食性、耐摩耗性、コスト、使用実績を含め総合的に判断した。

1) 検討した材質と主な特徴

対象とした材質とそれぞれの主な特徴を以下に示す。

- ・SUS304、SUS316 (オーステナイト系ステンレス鋼)

加工性及び耐食性に優れるが、熱膨張係数が大きく、フロートスイッチの変位量が目標を満足しないため、水位計での使用には適さない。

- ・SUS630 (析出硬化系ステンレス鋼)

熱膨張係数が小さいためフロートスイッチの変位量としては目標を満足するが、ネジ加工する場合にはコストが高くなる。また、ボールネジメーカーでの使用実績が乏しいため、ボールネジの材質としては適さない。耐食性はオーステナイト系ステンレス鋼と比べると若干劣る。

- ・ SUS440C (マルテンサイト系ステンレス鋼)

熱膨張係数が小さいためフロートスイッチの変位量としては目標を満足するが、他のステンレス鋼と比べて炭素含有量が多いため、耐食性が若干劣る。

- ・ 炭素鋼+表面処理

熱膨張係数が小さく、フロートスイッチの変位量は目標を満足する。表面処理によりマルテンサイト系ステンレス鋼と同等以上の耐食性が確保される。メーカー標準品であるため、コストダウンが図れるとともに使用実績は豊富。

2) 材質毎の熱影響の比較評価

ボールネジおよびスイッチロッドにこれらの材質を使用した場合の熱影響（水温+50℃におけるフロートスイッチ変位量）を比較評価した。評価結果を表 9.2-2 に、計算の詳細を表 9.2-3 に示す。

ケース 1～ケース 5 は、ボールネジとスイッチロッドを同じ材質としたケースである。SUS304 (ケース 1) と SUS316 (ケース 2) は熱膨張係数が大きいいため、臨界水位 (Llim) が低い場合に目標である 1.0 mm を超えてしまうが、その他の材質 (SUS630、SUS440C、炭素鋼) では 1.0 mm 以下を満足する結果となった。

ケース 6～ケース 9 は、スイッチロッドの材質を SUS630 とし、ボールネジの材質を残りの材質 (SUS304、SUS316、SUS440C、炭素鋼) としたケースである。ケース 6 (ボールネジを SUS304)、及びケース 7 (ボールネジを SUS316) ではフロートスイッチの変位量は 1.0 mm 以内となるが、臨界水位が低い場合にマイナス側 (上方向) に移動するため、非安全側の移動となるため採用できない。ケース 8 (ボールネジを SUS440C)、ケース 9 (ボールネジを炭素鋼) としたケースでは、マイナス側とならずに 1.0 mm 以内を満足する結果となった。

3) 材質選定結果

材質毎に耐食性、耐摩耗性、製造コスト、ボールネジとしての実績等を含めて検討し、選定した結果を表 9.2-4 に示す。

熱影響の観点から SUS304 と SUS316 を除外すると、SUS630、SUS440C、炭素鋼+表面処理のいずれかの選択となる。SUS630 はボールネジのような加工を行う場合には製造コストがかかり、さらにボールネジメーカーでの実績が乏しいため、ボールネジとしての採用は難しい。しかし、材質としては、熱膨張係数が低いこと、耐食性に問題がないことから、スイッチロッドには適した材質である。また、炭素鋼+表面処理した材質では、炭素鋼とは言え、表面処理されることでマルテンサイト系ステンレス鋼と同等以上の耐食性がある。ボールネジに用いる場合、直接水面に触れるものではないため耐食性は問題視されない。さらに、メーカー標準品であるためコストを低くできる利点があることから、ボールネジの材質に適していると判断した。

以上の検討から、スイッチロッドには SUS630、ボールネジには炭素鋼+表面処理の材質を採用することで熱影響目標値 (1.0 mm 以下) を満足した炉心タンク水位計とできる

見通しが得られた。検討結果から実機設計に反映した炉心タンク水位計（最大給水制限スイッチ）の構造図を図 9.2-2 に示す。

表 9.2-1 ボールネジ固定方法の変更による熱膨張量の比較

	ボールネジ上端固定	ボールネジ下端固定
評価モデル		
各長さ	L1:1800mm L2:2200mm Lrod:2200mm Llim:400~1450mm Lb:L1+L2-Lrod-Llim	L1:1800mm L2:-mm Lrod:2200mm Llim:400~1450mm Lb:Lrod+Llim-L1
熱膨張係数	(SUS304) $\alpha = 17.3 \times 10^{-6}$	同左
熱膨張量	$\Delta L_b = L_b \times \alpha \times \Delta T$ $\Delta L_{rod} = L_{rod} \times \alpha \times \Delta T$ $\Delta H = \Delta L_b + \Delta L_{rod}$ ケーシングも熱膨張すると仮定する場合、 $\Delta L_2 = L_2 \times \alpha \times \Delta T$ $\Delta H = \Delta L_b + \Delta L_{rod} - L_2$	$\Delta L_b = L_b \times \alpha \times \Delta T$ $\Delta L_{rod} = L_{rod} \times \alpha \times \Delta T$ $\Delta H = \Delta L_{rod} - \Delta L_b$
評価結果 (スイッチのズレ)	ケーシングは熱膨張しないと仮定した場合 Llim=400mm の時 $\Delta H = 3.1\text{mm}$ Llim=1450mm の時 $\Delta H = 2.2\text{mm}$ ケーシングも熱膨張すると仮定した場合 Llim=400mm の時 $\Delta H = 1.2\text{mm}$ Llim=1450mm の時 $\Delta H = 0.3\text{mm}$	ケーシングの熱膨張の有無に拘らず以下 Llim=400mm の時 $\Delta H = 1.2\text{mm}$ Llim=1450mm の時 $\Delta H = 0.3\text{mm}$

表 9.2-2 材質によるフロートスイッチ変位量の評価結果

	材質		フロートスイッチの 変位量[mm]	判定
	ホールネジ ^①	スイッチロッド ^②		
ケース 1	SUS304	SUS304	0.30～1.21	×目標を満足しない
ケース 2	SUS316	SUS316	0.28～1.12	×目標を満足しない
ケース 3	SUS630	SUS630	0.21～0.83	○目標を満足する
ケース 4	SUS440C	SUS440C	0.18～0.71	○目標を満足する
ケース 5	炭素鋼	炭素鋼	0.21～0.84	○目標を満足する
ケース 6	SUS304	SUS630	-0.29～0.62	×±1.0 mm 以内であるが、マックス側（非安全側）となることがあるため NG
ケース 7	SUS316	SUS630	-0.17～0.67	×±1.0 mm 以内であるが、マックス側（非安全側）となることがあるため NG
ケース 8	SUS440C	SUS630	0.37～0.90	○目標を満足する
ケース 9	炭素鋼	SUS630	0.20～0.83	○目標を満足する

表 9.2-3 (1/2) 材質によるフロートスイッチ変位量計算の詳細

ボールネジ、スイッチロッドの材質と熱影響の検討

$\Delta T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$

ケース1 ホールネジ SUS304 スwitchロッド SUS304

L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
ΔT	50	50	50	50	50	50	50
α_{rod}	1.73E-05						
α_b	1.73E-05						
Δl_{rod}	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
ΔL_b	0.69	0.87	1.04	1.21	1.38	1.56	1.60
$\Delta H = \Delta l_{rod} - \Delta L_b$	1.21	1.04	0.87	0.69	0.52	0.35	0.30

平均熱膨張係数 (0~100°C)

材質	α	備考
SUS304	1.73E-05	
SUS316	1.60E-05	
SUS630	1.19E-05	シリコイラボHP
SUS440C	1.02E-05	シリコイラボHP
炭素鋼	1.20E-05	

ケース2 ホールネジ SUS316 スwitchロッド SUS316

L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
ΔT	50	50	50	50	50	50	50
α_{rod}	1.60E-05						
α_b	1.60E-05						
Δl_{rod}	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
ΔL_b	0.64	0.80	0.96	1.12	1.28	1.44	1.48
$\Delta H = \Delta l_{rod} - \Delta L_b$	1.12	0.96	0.80	0.64	0.48	0.32	0.28

ケース3 ホールネジ SUS630 スwitchロッド SUS630

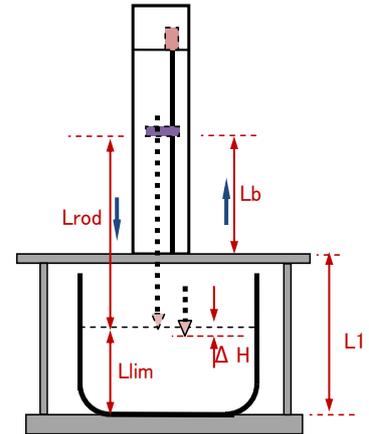
L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
ΔT	50	50	50	50	50	50	50
α_{rod}	1.19E-05						
α_b	1.19E-05						
Δl_{rod}	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
ΔL_b	0.48	0.60	0.71	0.83	0.95	1.07	1.10
$\Delta H = \Delta l_{rod} - \Delta L_b$	0.83	0.71	0.60	0.48	0.36	0.24	0.21

ケース4 ホールネジ SUS440C スwitchロッド SUS440C

L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
ΔT	50	50	50	50	50	50	50
α_{rod}	1.02E-05						
α_b	1.02E-05						
Δl_{rod}	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
ΔL_b	0.41	0.51	0.61	0.71	0.82	0.92	0.94
$\Delta H = \Delta l_{rod} - \Delta L_b$	0.71	0.61	0.51	0.41	0.31	0.20	0.18

ケース5 ホールネジ 炭素鋼 スwitchロッド 炭素鋼

L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
ΔT	50	50	50	50	50	50	50
α_{rod}	1.20E-05						
α_b	1.20E-05						
Δl_{rod}	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
ΔL_b	0.48	0.60	0.72	0.84	0.96	1.08	1.11
$\Delta H = \Delta l_{rod} - \Delta L_b$	0.84	0.72	0.60	0.48	0.36	0.24	0.21



<測定手順>

- ①フロートスイッチを炉心タンの底面まで下降させ、「ゼロ点検出機構」によりゼロ位置を検出する。
- ②フロートスイッチを制限水位 (Llim) まで上昇させる。(これ以降、スイッチは移動させない)
- ③炉心タンクに温水を供給する。
- ④温水が制限水位に到達した場合、フロートスイッチが検知する。

<目標精度>

温水が供給されてホールネジとスイッチロッドが熱膨張することによる、フロートスイッチの位置スレ量(ΔH)が0~1.0mmとなること。

表 9.2-3 (2/2) 材質によるフロートスイッチ変位量計算の詳細

ケース6 ホールネジ SUS304 スイッチロッド SUS630

L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
Δ T	50	50	50	50	50	50	50
α rod	1.19E-05						
α b	1.73E-05						
Δ lrod	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
Δ Lb	0.69	0.87	1.04	1.21	1.38	1.56	1.60
Δ H=Δ lrod-Δ Lb	0.62	0.44	0.27	0.10	-0.08	-0.25	-0.29

ケース7 ホールネジ SUS316 スイッチロッド SUS630

L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
Δ T	50	50	50	50	50	50	50
α rod	1.19E-05						
α b	1.60E-05						
Δ lrod	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
Δ Lb	0.64	0.80	0.96	1.12	1.28	1.44	1.48
Δ H=Δ lrod-Δ Lb	0.67	0.51	0.35	0.19	0.03	-0.13	-0.17

ケース8 ホールネジ SUS440C スイッチロッド SUS630

L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
Δ T	50	50	50	50	50	50	50
α rod	1.19E-05						
α b	1.02E-05						
Δ lrod	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
Δ Lb	0.41	0.51	0.61	0.71	0.82	0.92	0.94
Δ H=Δ lrod-Δ Lb	0.90	0.80	0.70	0.60	0.49	0.39	0.37

ケース9 ホールネジ 炭素鋼 スイッチロッド SUS630

L1	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Lrod	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Llim	400	600	800	1000	1200	1400	1450
Lb	800	1000	1200	1400	1600	1800	1850
Δ T	50	50	50	50	50	50	50
α rod	1.19E-05						
α b	1.20E-05						
Δ lrod	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
Δ Lb	0.48	0.60	0.72	0.84	0.96	1.08	1.11
Δ H=Δ lrod-Δ Lb	0.83	0.71	0.59	0.47	0.35	0.23	0.20

表 9.2-4 ボールネジ、スイッチロッド用材質候補の性能比較

	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$)	耐食性	耐摩 耗性	製造 コス ト	ボールネジ 実績	採用
SUS304	\times (17.3)	◎	○	○	○	—
SUS316	\times (16.0)	◎	○	○	○	—
SUS630	◎ (11.9)	○	◎	△	△	スイッチロッド
SUS440C	◎ (10.2)	○	◎	△	○	—
炭素鋼 +表面処理	◎ (12.0)	○	○	○	○	ボールネジ

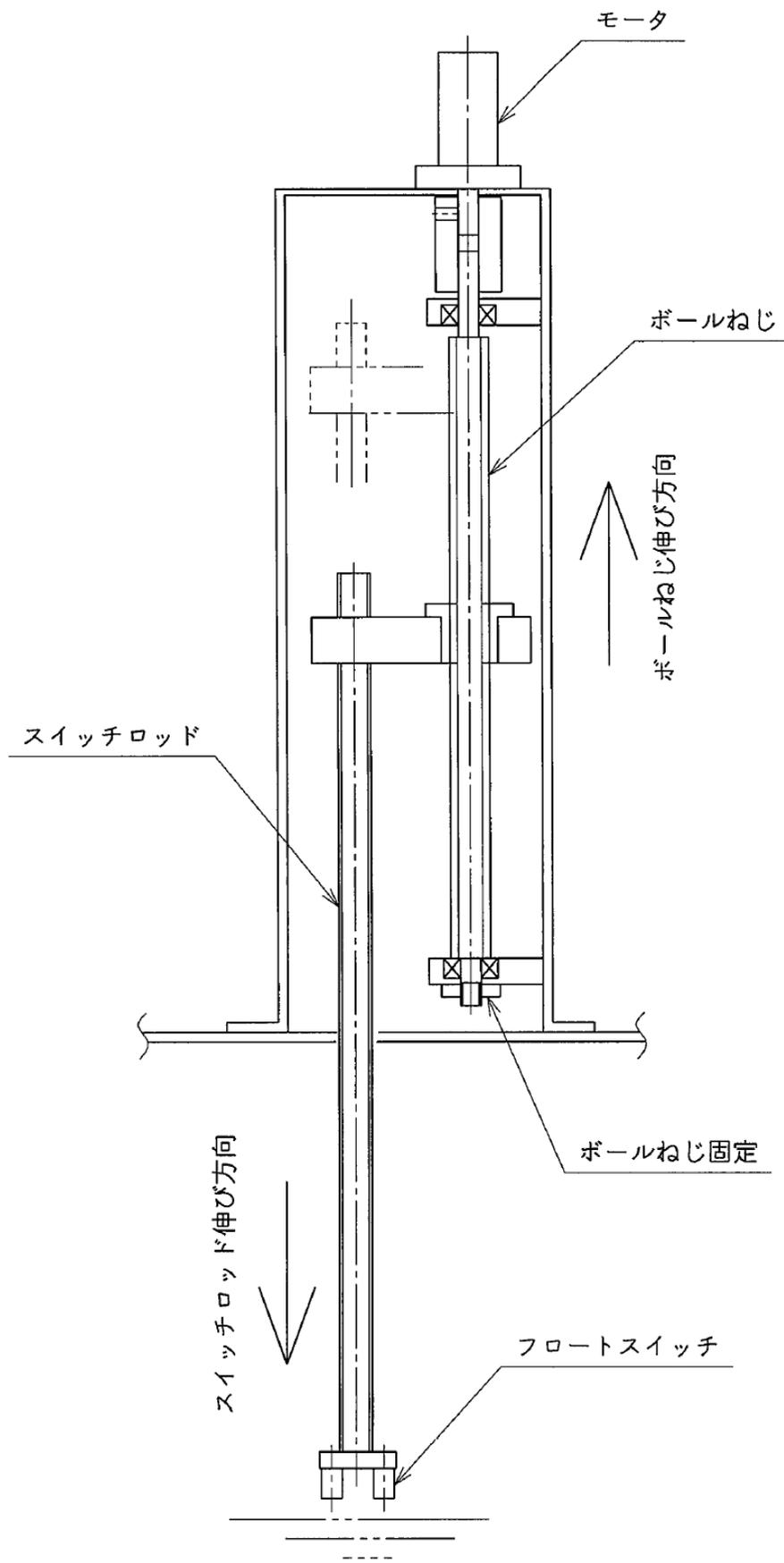
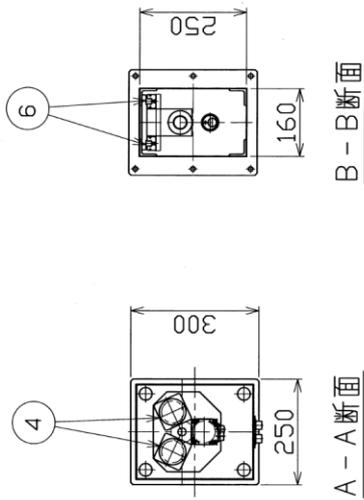
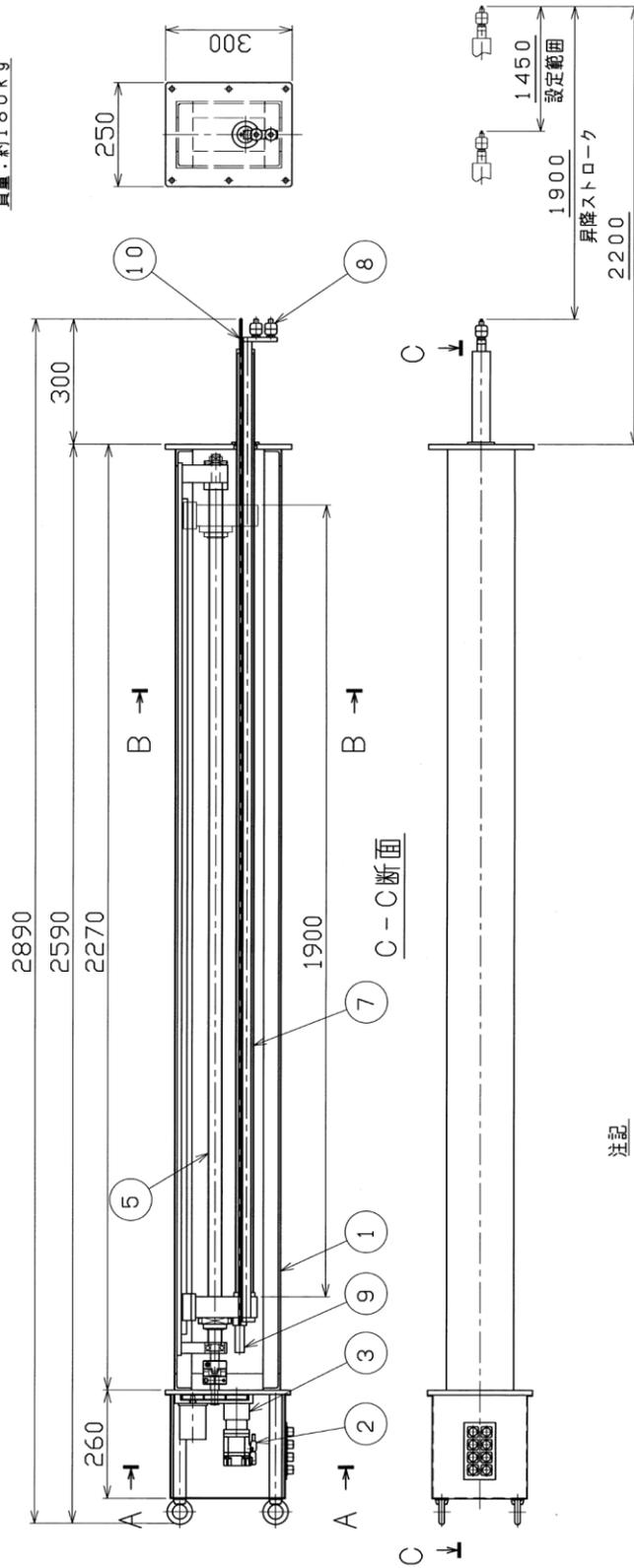


図 9.2-1 ネジ軸を下端固定・上端支持とした場合の構造概念

10	ゼロ点検出棒	1	SUS304		
9	差動トランス	1			
8	フロートスイッチ	2			
7	スイッチロッド	1	材質:SUS304 ハウジング:SUS304		
6	LMガイド	2	放射線+マグキ		
5	ボールねじ	1	放射線+マグキ		
4	アブソーバ	2			
3	減速機	1			
2	ACサーボモータ	1	AC200V 200W		
1	ハウジング	1	SUS304		
品番	品名	員数	材質/型式	備考	



備考
質量:約180kg



注記
1. 本図は計画図のため、設計進捗により変更の可能性がります。

最大給水制限スイッチ 計画図

図 9.2-2 最大給水制限スイッチの構造図

(2) モックアップ試験装置の設計及び試験計画

前項で設計検討した熱影響の低減を図った炉心タンク水位計の性能を検証するため、モックアップ試験装置を設計する。また、モックアップ試験計画を立案する。

① モックアップ試験装置の設計

モックアップ試験装置の構造案として、図 9.2-3 (案 1)、図 9.2-4 (案 2) を検討した。いずれも熱風発生機を用いて装置の温度を上昇させ、スイッチの変位量を計測する。「案 1」は水位計のケーシングを模擬して架台の高さレベルにケーシングの底蓋を設け、空間を 2 つに分離している。この場合、ケーシングの中に直接温風が入ることはないので、実機の水位計に近い状況を再現すると考えられるが、周囲の環境も含め、完全に実機の状態を模擬することはできない。一方、「案 2」は装置全体の温度が一様に上昇するため熱膨張量は安全側に大きく評価できるが、実際の状態（おそらく軸方向に温度分布が生じる）を把握することはできない。このため、以下の点を考慮し、試験装置の構造を設定することとした。

- ・「案 1」と「案 2」の両方の状態を試験できるようにする。
- ・レーザー測長器（基準器）は、熱影響を受けないようハウジングの外に設置し、床側からフロートスイッチまでの距離を計測する。
- ・スイッチロッドとボールネジは、高さ方向の温度の違いが測定できるようにする。ただし、ボールネジには温度素子を貼りつけることができないため、ボールネジの横に同じ素材の模擬ロッドを設置し、温度を計測する。

以上を考慮し、設計したモックアップ試験装置の構造概念を図 9.2-5 及び図 9.2-6 に示す。

図 9.2-5 は、下部ハウジングだけに温風が送られる状態を示したものである。これにより、スイッチロッドが水位計ハウジングの下部から下に出た部分が主に加熱され、実機の状態に近い状況を把握することが可能である。図 9.2-6 は、下部ハウジングから水位計ハウジングをつなぐダクトを追加することにより、装置全体を一様な温度に加熱した状態を把握することができる。このほか、モックアップ試験装置の主な仕様を以下に示す。

- ・ボールネジは下端部が架台に固定され、上端は上方向に熱膨張を逃がすよう支持
- ・ボールネジの材質は「炭素鋼＋表面処理」、スイッチロッドの材質は SUS630
- ・ボールネジ上部には AC サーボモータを取付け、実機同様にスイッチロッドが昇降可能
- ・スイッチロッドの下端にリミットスイッチを設置
- ・スイッチロッドの下端に「高さ測定用ブロック」を取付け、高さ測定用ブロックの端部をケーシングから露出させる（高さ測定ブロックが移動できるよう、ケーシングにスリット状の隙間を空けておく。不要な隙間はテープ等でシールする。）
- ・レーザー測長器は、床側から上方向にレーザーを発し、高さ測定用ブロックまでの距離を測定。常温時と温度上昇時に、床面から高さ測定ブロックまでの高さ（ L_a ）を測定することにより、スイッチの変位量を測定
- ・スイッチロッド、ボールネジ模擬ロッドには熱電対（上中下 3 点程度）を取付け、温度を計測

以上を踏まえて設計したモックアップ試験装置の機器構造図を図 9.2-7 に示す。

② モックアップ試験計画

計画したモックアップ試験手順等について以下に示す。

1) 試験パラメータ

Llim (想定水位) : 400~1450 mm (スイッチロッドのストロークは 1900 mm)

Twt (水温) : 室温 (20 °C) ~80 °C

2) 計測項目

計測項目は以下の 2 種類とする。

- ・各部温度 (環境温度 T_{rm} 、ケーシング内雰囲気温度 T_{ar} 、構造物表面温度を適宜測定 T_{st})
- ・床面から高さ測定ブロックまでの高さ L_a (室温時と昇温時の高さの差がフロートスイッチの変位量となる)

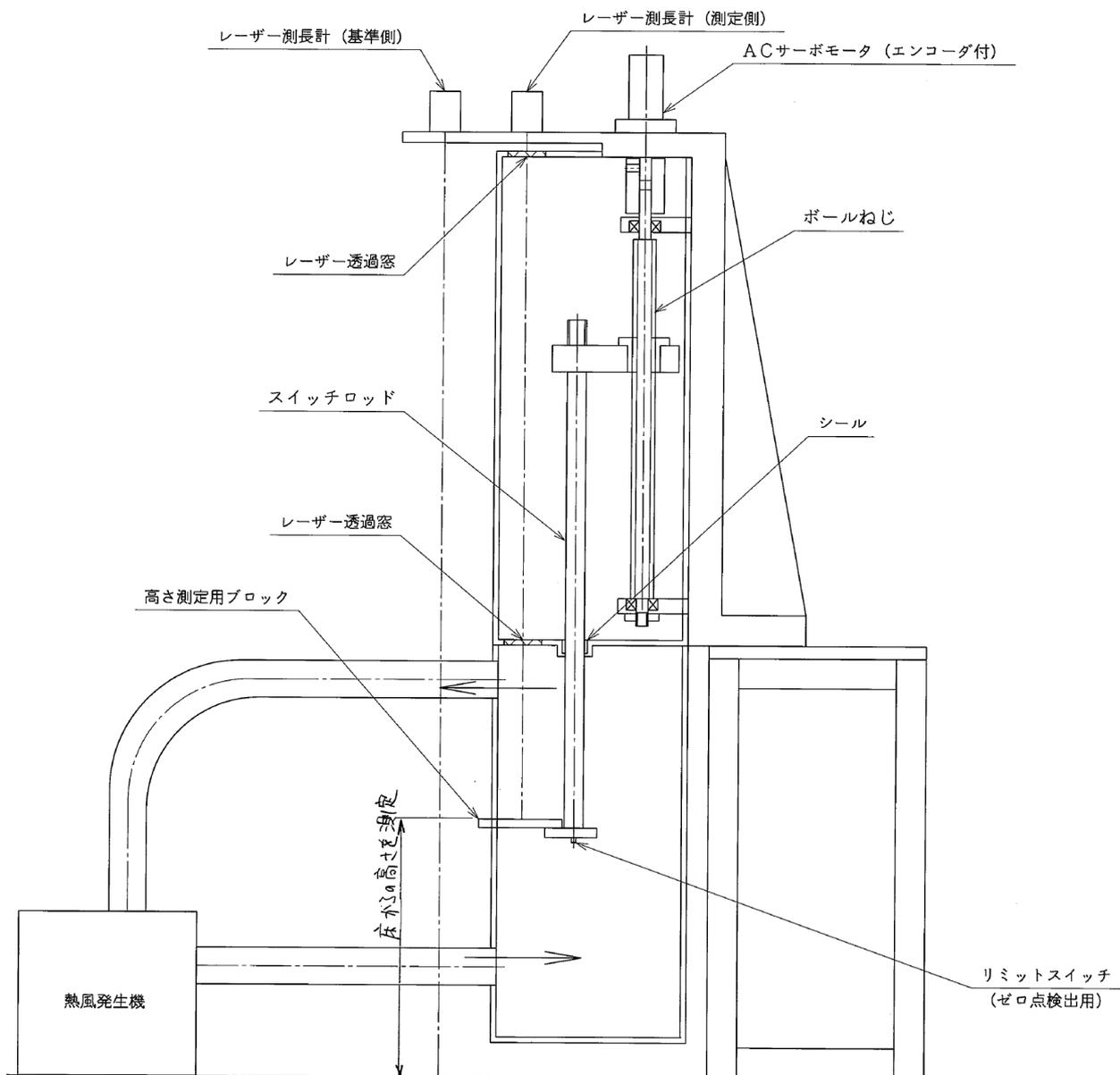
3) 試験手順

以下にモックアップ試験手順を示す。各手順におけるモックアップ装置の状態を図 9.2-8 に示す。

- i) 温風発生機が停止している状態 (室温) で各部温度を記録する。〈状態 1〉
- ii) スwitchロッドを下降し、リミットスイッチにて底面を検知する。〈状態 1〉
- iii) スwitchロッドを試験高さ (Llim) まで上昇させる。〈状態 2〉
- iv) 高さ H_1 を測定・記録する。〈状態 3〉
- v) 温風発生機を起動し、各部の測定温度が試験温度 (Twt) に到達したことを確認する。
〈状態 4〉 (温風発生機の出力を調整し、各部温度を安定させる)
- vi) 各部温度、高さ H_2 を測定・記録する。〈状態 5〉
- vii) 温風発生機を用いて、次の測定温度まで加熱する。
- viii) iv)~vi)の手順を $Twt=80\text{ °C}$ になるまで繰り返す。
- ix) 温風発生機を停止し、装置全体を室温に戻す。
- x) 想定水位を変えて i)から ix)を繰り返す。

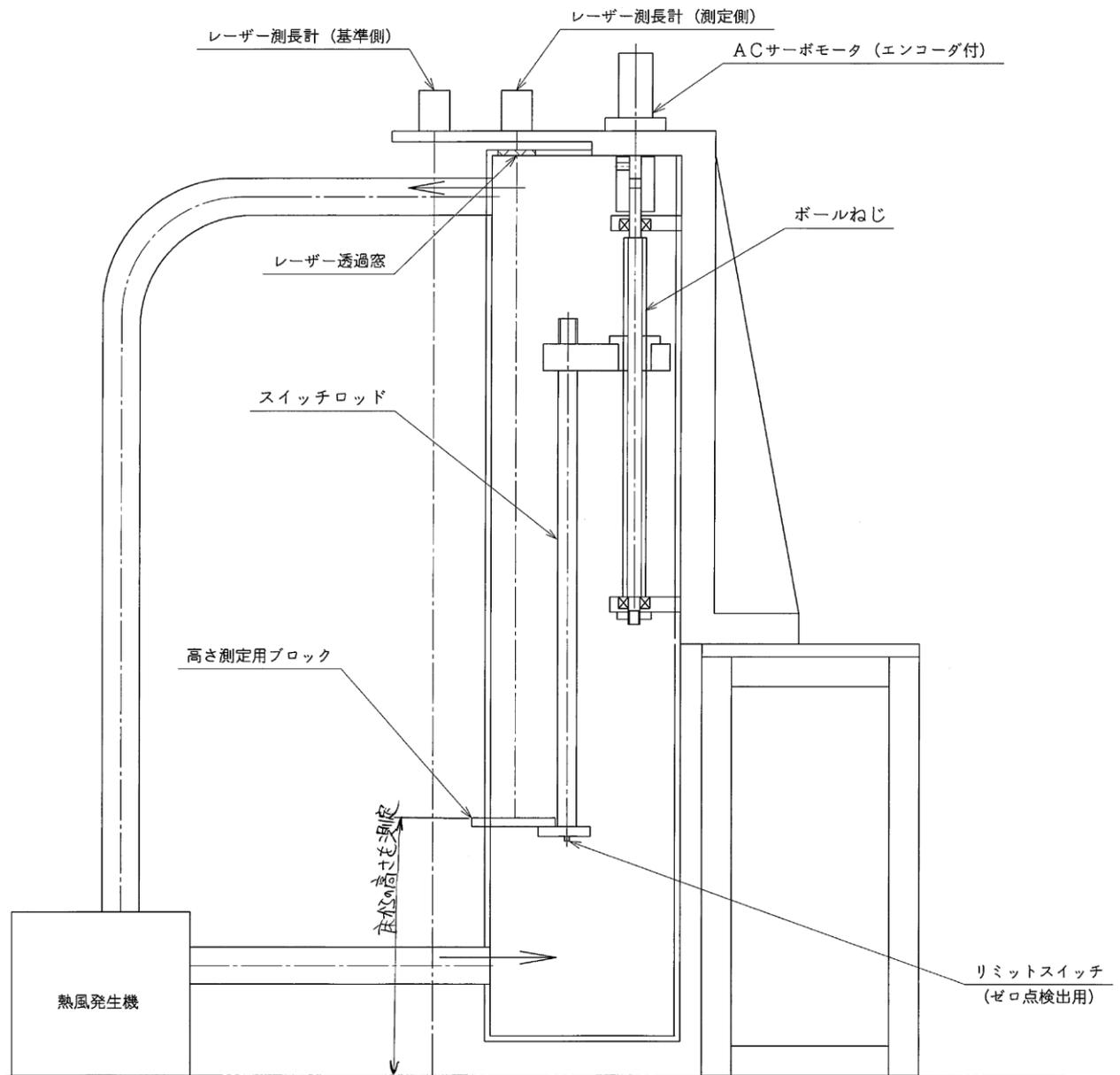
4) 評価方法

モックアップ試験の評価にあたっては、想定水位 400~1450 mm、試験温度範囲 20~70 °C の試験条件において高さ測定ブロックの室温状態からの変位量が 1.0 mm 以下となることを確認する。また、フロートスイッチの変位量が 1.0 mm を超える場合には、補正方法の検討を行う。(必要に応じて追加試験を実施する。)



注) レーザー測長計については、有効性等を勘案の上、必要に応じて使用する。

図 9.2-3 水位計モックアップ試験装置候補案 (案 1)



注) レーザー測長計については、有効性等を勘案の上、必要に応じて使用する。

図 9.2-4 水位計モックアップ試験装置候補案 (案 2)

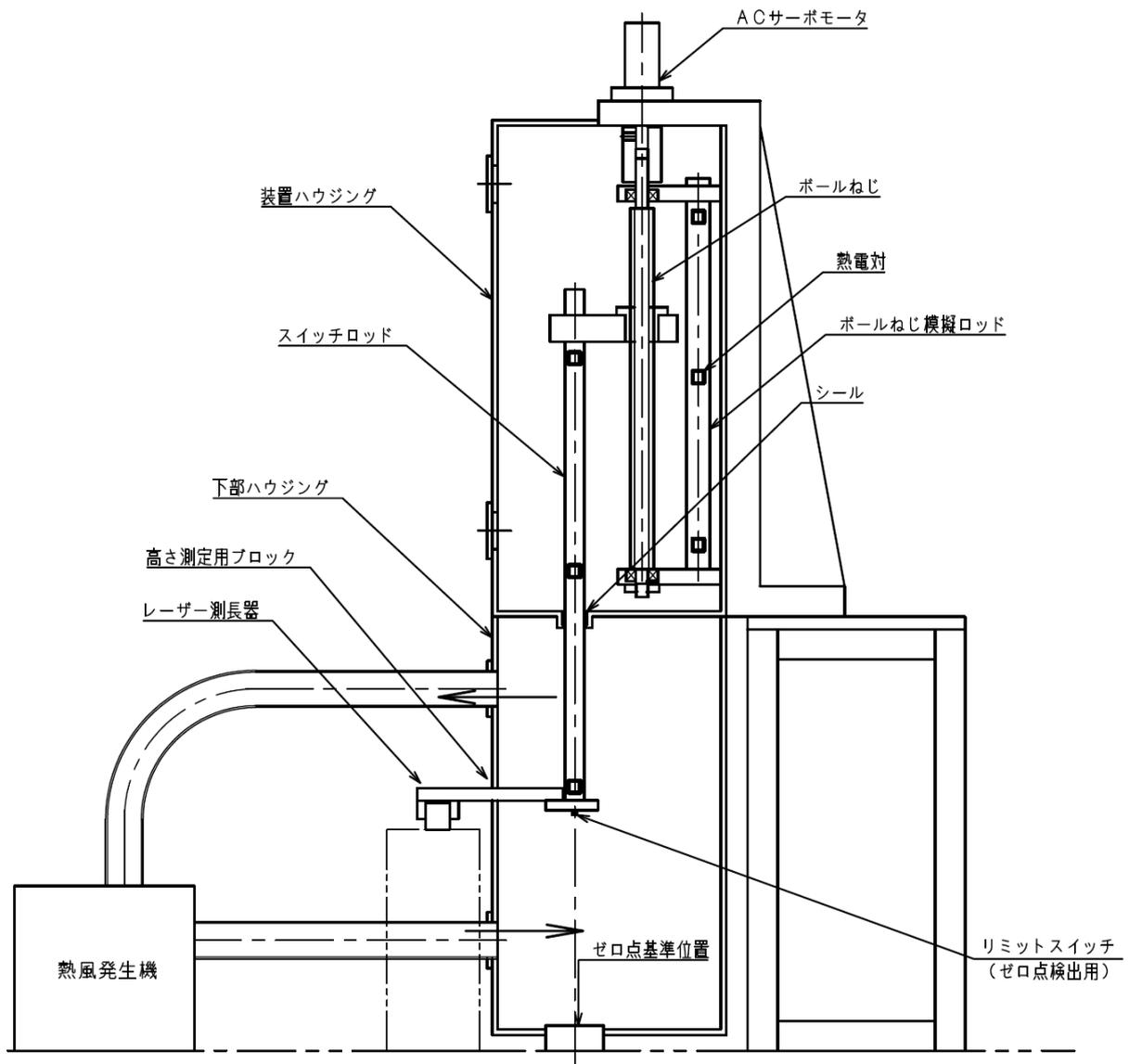


図 9.2-5 モックアップ試験装置構造概念 (下部ハウジング加熱時)

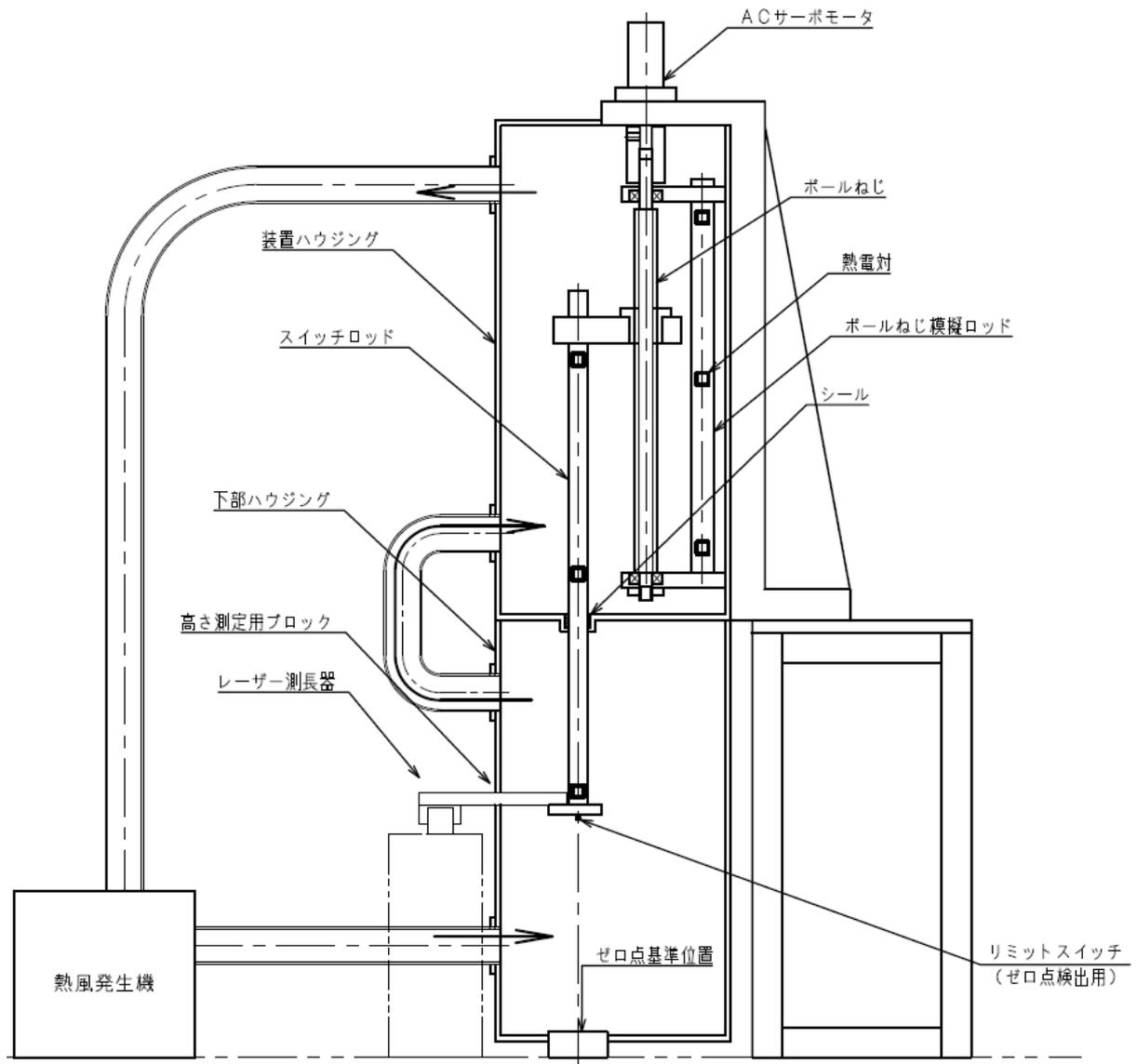
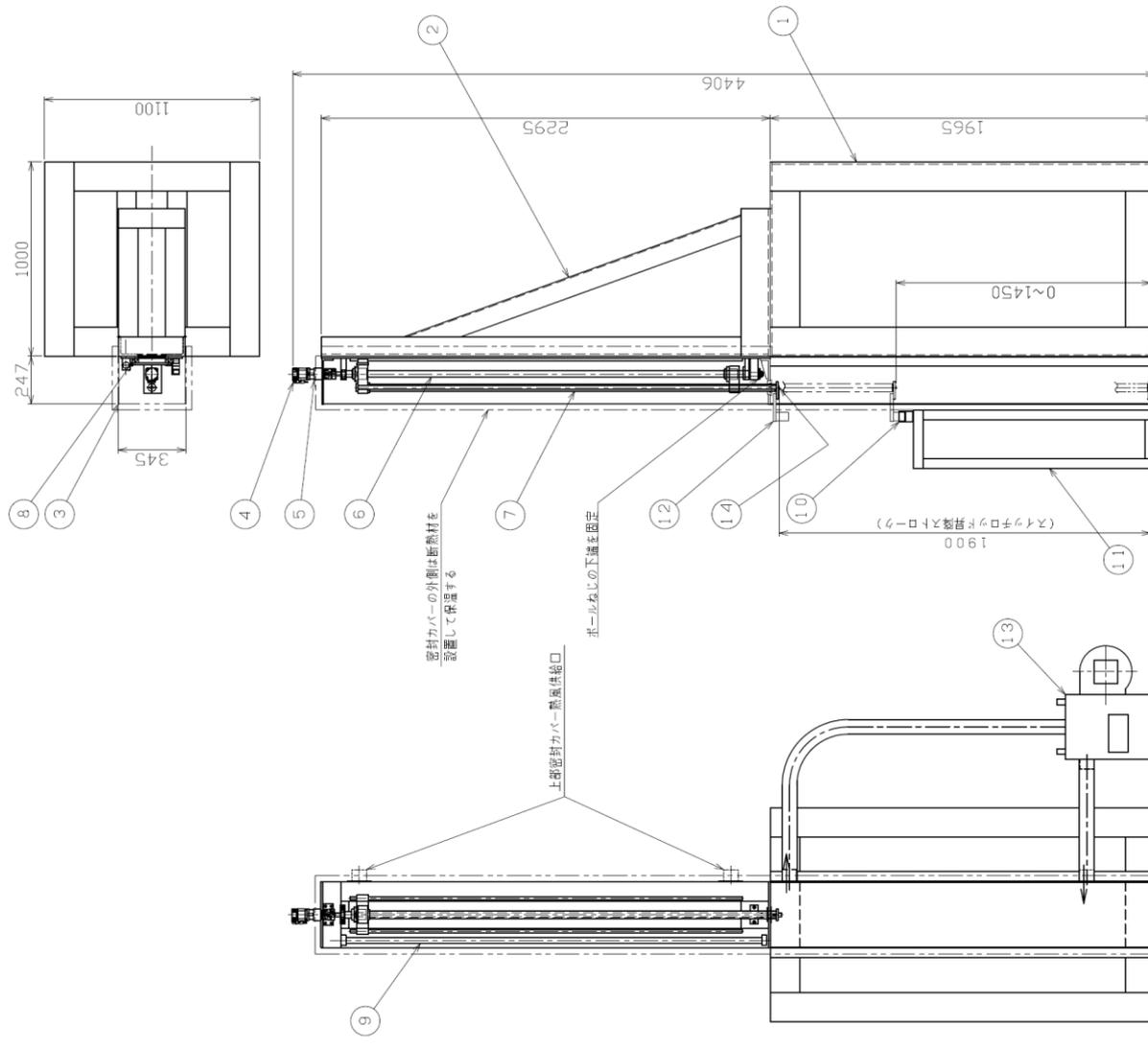


図 9.2-6 モックアップ試験装置構造概念 (下部ハウジング+装置ハウジング加熱時)

図 9.2-7 モックアップ試験装置の機器構造図



品番	品名	数量	材質/型式	備考
1	ベース架台	1	SS400	
2	昇降部フレーム	1	SS400	
3	密封カバー	1	SS400	
4	ACサーボモータ	1	AC200V 200W	
5	減速機	1		
6	ボールねじ	1	仕様+メッキ	
7	スイッチロッド	1	材質: SUS304 径: 2φ	
8	LMガイド	2	仕様+メッキ	
9	温度測定用ロッド	1	仕様+メッキ	
10	レーザー測長器	1		
11	レーザー測長器設置架台	1		
12	高さ測定用ブロック	1	SUS304	
13	熱風発生機	1	ヒートポンプ: 5kW	
14	マイクロスイッチ	1		ゼロ点検出用

試験設備仕様

1. 試験目的・・・本試験では、温度変化がスイッチロッド先端の位置に与える影響を評価することを目的としています。

2. 昇降駆動部

- (1) 駆動源：ACサーボモータ
- (2) 昇降ストローク：1900mm
- (3) 昇降速度：0~3000mm/min

3. 空気の加熱

- (1) #13の熱風発生機で加熱した空気を密封カバー内に送り込むことにより、スイッチロッド、ボールねじを加熱します。(密封カバーの外側には保温断熱材を設置します。)

(2) 試験温度：常温~70℃

(3) 温度測定方法：熱電対(以下の箇所に貼付)

- ①#7 スwitchロッドの外表面
- ②#9 温度測定ロッドの外表面

注記

1. 本図は平面図のため、設計進捗により変更の可能性が有ります。

STACY更新炉水位計

モックアップ試験設備 概略構造図

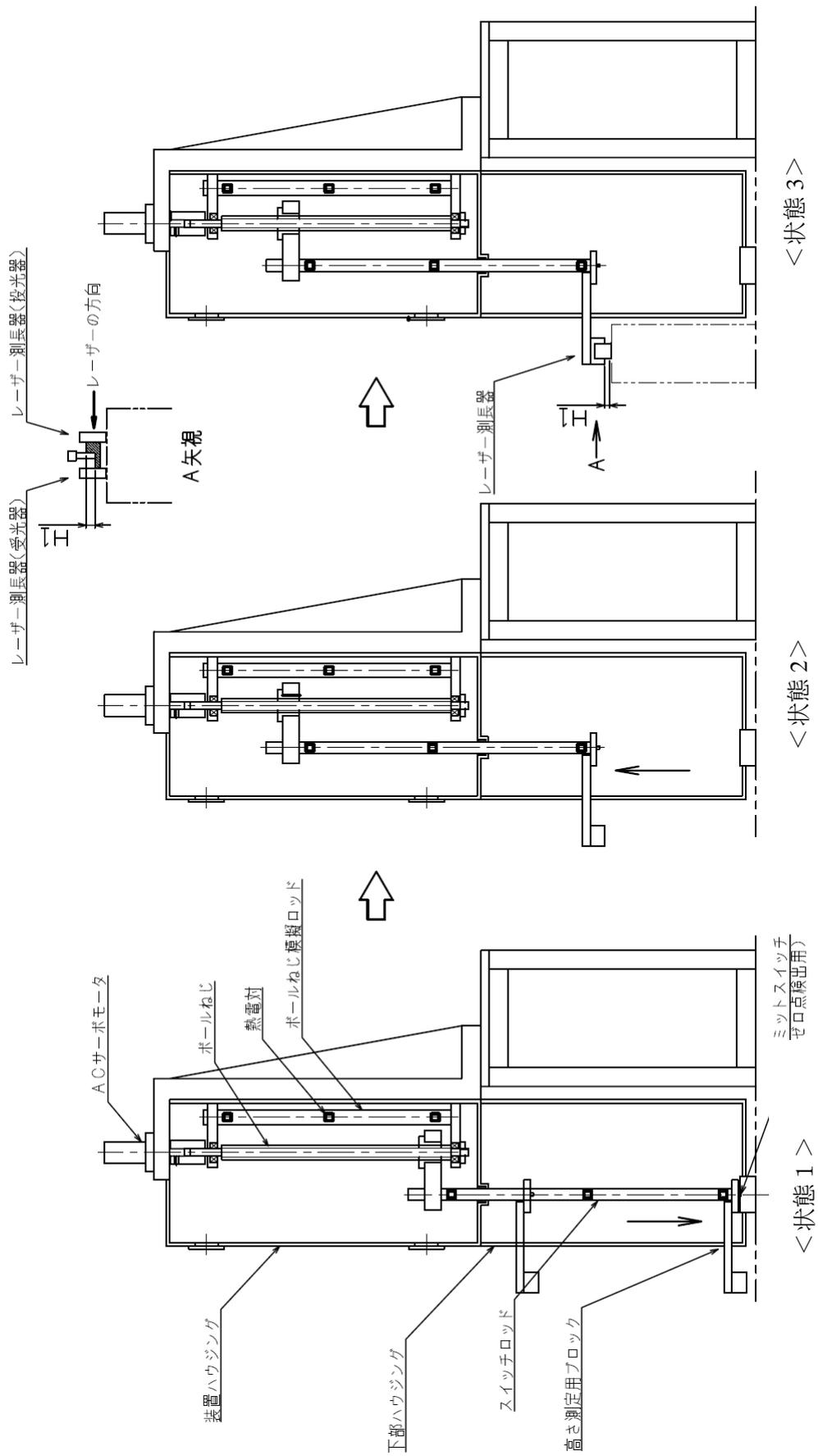


図 9.2-8 (1/2) モックアップ試験の手順

9.2.3 まとめ

STACY 更新炉は、炉心タンクの水位を調整することにより反応度を制御する原子炉であるため、水位制御性能が非常に重要である。特に、STACY 更新炉では、使用する軽水の温度を上昇させる試験を計画しているため、昇温による水位計測精度への影響を正確に把握しておく必要がある。本件は、炉心タンク水位計の熱影響の低減化を図った実機の基本構造の検討及び実際の熱影響を検証するためのモックアップ試験装置の設計及び試験計画の立案を行ったものである。

基本構造の検討では、駆動軸の固定端の変更及び使用材料の最適化を図ることにより、STACY 更新炉の最大使用温度である 70 °C までの範囲で熱影響を 1.0 mm 以下にできる見通しを得た。また、モックアップ試験装置の設計では、実機水位計の熱影響が検証できる装置の設計及び試験計画を立案した。

これらの設計検討により STACY 更新炉の水位制御が安全かつ高精度となる見通しが得られた。

Appendix 9.2.A1 (付録) オーバーフロー管の設計検討

9.2.A1.1 目的及び概要

(1) 目的

STACY 更新炉は、炉心タンク内水位の制御により反応度を制御する原子炉である。余剰反応度は、装荷する燃料の量ではなく、最高水位の制限によって定まる。このため、信頼性の高い水位検知及びこれと連動して排水する機構を多重に設けることにより、余剰反応度を担保する。なお、給水も連動して停止するが、仮に停止しなくても排水流量は給水流量より大きくなるように設計される。さらに、給水と排水は動力の喪失に対してフェイルセーフ動作する。以上が STACY 更新炉の余剰反応度制限の設計基準である。

本節では、それでもなおこれらの機構が全て働かない、つまり、排水不可かつ給水継続というような設計基準を超えた事態を仮想した場合のバックアップとして、炉心タンクから水をオーバーフローさせて水位を制限する自主保安制御機構（以下「オーバーフロー管」という。）の実現性を検討する。

(2) 概要

まず、配管圧損に着目した計算及び実現性のある装置規模を考慮して、オーバーフロー管の口径を 150A 程度と想定した。しかし、モックアップ試験の結果から、その口径では排水流量が十分でないことが確認された。このため、大口径化を基本方針とする一方、配置、耐震性等の設計上の工夫、及び給水流量制限等の運用対応を総合的に検討し、実現性のあるオーバーフロー管口径の要求仕様を求めた。

9.2.A1.2 成果報告

(1) 検討条件

① 水位検出装置の機能と位置関係

STACY 更新炉の水位検出装置とそれぞれの機能を以下に示す。

給水停止スイッチ：水面が目標水位（臨界水位）に達したことを検出し給水を停止する。

排水開始スイッチ：給水停止スイッチの上方+7 mm に設定され、給水停止スイッチの故障等で水面上昇を検出した場合に排水を開始する。

最大給水制限スイッチ：排水開始スイッチの上方（最大過剰反応度 0.8 ドル相当レベル；水位 1 mm あたりの反応度が最大となる臨界水位 400 mm の条件では排水開始スイッチの上方+6 mm）に設定され、排水開始スイッチ等の故障で水面上昇を検出した場合に原子炉をスクラムする。

これらの装置は、多重性及び独立性を確保した設計となっている。上述の臨界水位 400 mm での各水位検出装置の位置関係を図 9.2.A1-1 に示す。

② オーバーフロー管の要求性能

オーバーフロー管は、前記の水位検出装置の安全機構がすべて働かず水面上昇が継続すると言う仮想的な条件において、炉心タンクから溢水させることで水位の上昇を抑えるもので、以下の性能が要求される。

- 1) 給水流量（最大 150 L/min）に対して、最大給水制限水位（臨界水位 400+7+6 mm）の近傍で水位の上昇を制限できる排水能力を有すること
- 2) 通常状態で溢水が起こらないよう、排水開始スイッチの設定水位に到達する前に溢水が開始されないこと

③ オーバーフロー管のモックアップ試験結果

これまでのモックアップ試験の結果、本検討の条件として得られた知見を以下に示す（これまでの試験の構成を図 9.2.A1-2 に、主な結果を表 9.2.A1-1 に示す）。

- ・「表面張力水位」はオーバーフロー管の口径によらず、5 mm 程度である。

ここで、表面張力水位の定義は下記のとおり。

オーバーフロー管の上端レベルを「基準水位」と定義する。炉心タンクに水を徐々に供給したとき、基準水位に達してもしばらくは表面張力の影響で溢水が開始されない。さらに給水し、オーバーフロー管から水が溢れ出すときの基準水位とタンク水位との差を表面張力水位とする。（図 9.2.A1-3 を参照）

- ・給水流量 150 L/min のとき、以下の近似式により口径に対する「水位上昇量」を予測することができる。

$$Y = -0.1173X + 38.16$$

Y：水位上昇量[mm]、X：オーバーフロー管の口径[mm]

ここで、水位上昇量の定義は下記のとおり。

炉心タンクへ一定流量で給水を継続し、オーバーフロー管から溢水している状態で、給水量と排水量が平衡して炉心タンクの水位が一定となった状態での基準水位とタンク水位の差を「水位上昇量」とする。（図 9.2.A1-3 を参照）

(2) 設計検討結果

検討条件①で示した図 9.2.A1-1 に示す水位検出装置の位置関係において、要求性能を満たすオーバーフロー管口径を検討した。

排水停止スイッチレベルに達するまで水が溢れ出さないよう、表面張力水位（5 mm）を考慮してオーバーフロー管上端レベルを設定した場合の各水位検出装置との高さ関係を図 9.2.A1-4 に示す。検討条件②の要求を満たす排水能力が得られるのは、仮に水位上昇制限を同図のとおり 413 mm とした場合、オーバーフロー管の上端レベルとの差は

11 mm になる。このとき、オーバーフロー管の口径を検討条件③の近似式より求めると $\phi 232$ mm となる。

この評価結果に余裕を見込んで、オーバーフロー管の口径を 250A として検討した構造図を図 9.2.A1-5 に示す。

表 9.2.A1-1 オーバーフロー管の性能試験結果

オーバーフロー管口径	表面張力 (mm)	給水流量毎の水位上昇量(mm)			
		25 L/min	50 L/min	100 L/min	150 L/min
100A	4.0	6.7	10.1	16.9	26.4
200A	4.8	7.0	8.4	11.7	14.7

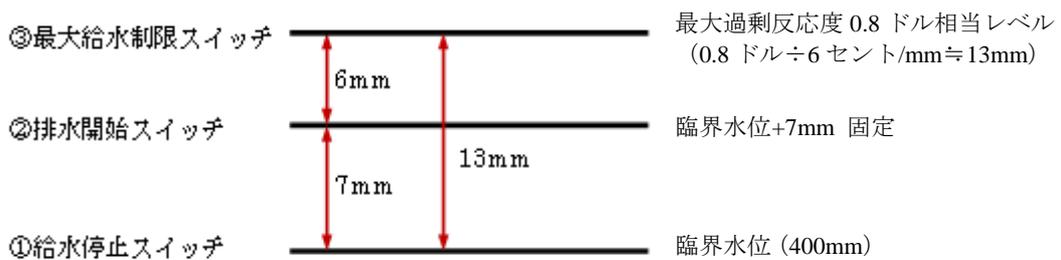


図 9.2.A1-1 水位 1 mm あたりの反応度が最大となる臨界水位 400 mm の場合の給水停止スイッチ、排水開始スイッチ、最大給水制限スイッチの位置関係

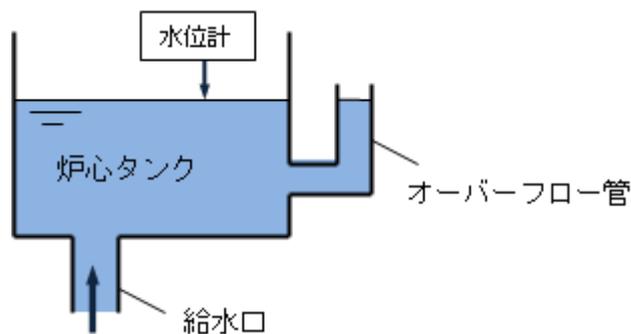


図 9.2.A1-2 オーバーフロー管試験構成

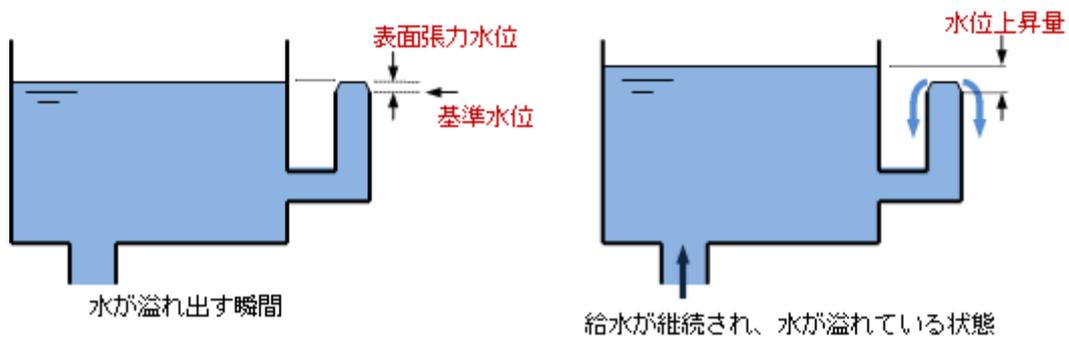


図 9.2.A1-3 表面張力水位、水位上昇量説明図

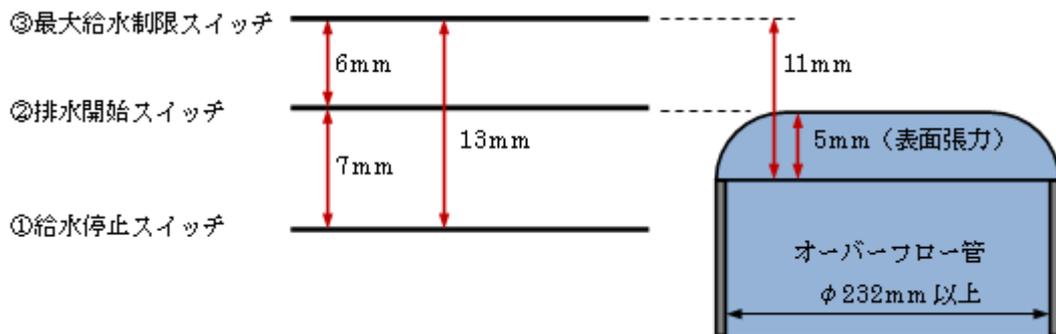


図 9.2.A1-4 水位 1 mm あたりの反応度が最大となる臨界水位 400 mm の場合の各スイッチ設定位置とオーバーフロー管の位置関係 (排水開始スイッチの水位まで溢水が開始されない条件)

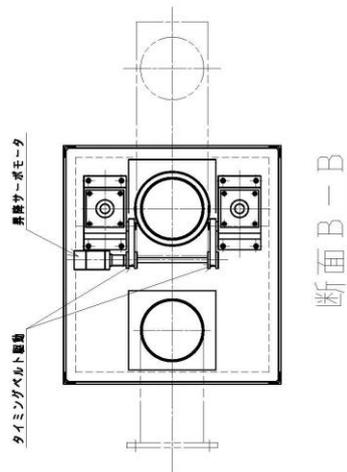
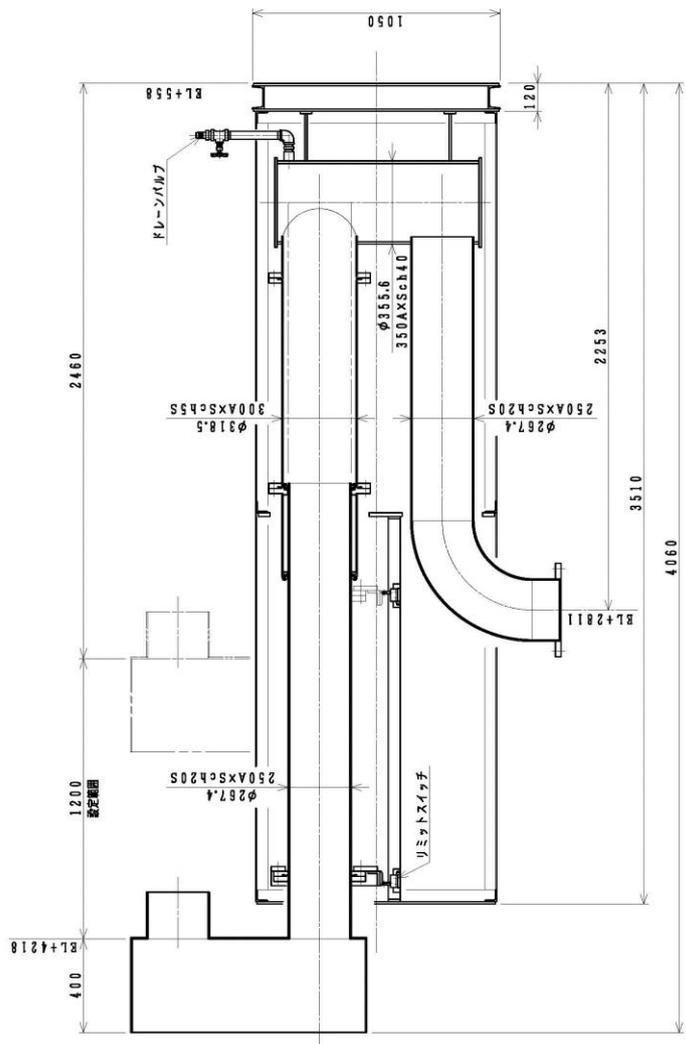
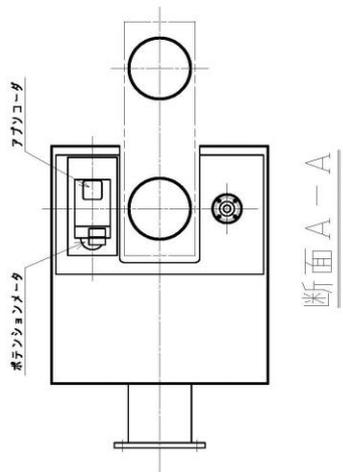
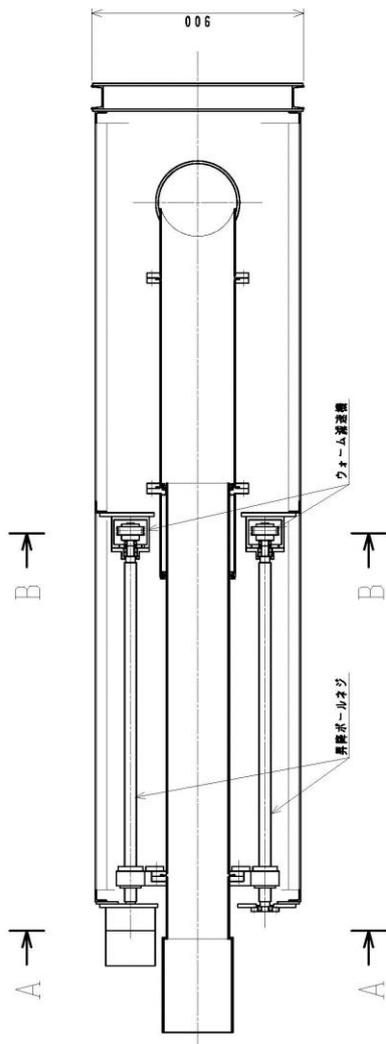


図 9.2.A1-5 オーバーフロー管構造図 (250A)

9.2.A1.3 まとめ

STACY 更新炉の水位制御に関し、多重性及び独立性並びにフェイルセーフ機構を考慮した信頼性の高い機器を導入するが、それでもなおこれらの機構が全て働かない、つまり、排水不可かつ給水継続というような設計基準を超えた事態を仮想した場合のバックアップとして、炉心タンクに給水した減速材を溢流させるオーバーフロー管の実現性を検討した。

検討の結果、STACY 更新炉の給水性能条件下においては、オーバーフロー管の口径として 250A 以上が必要であることが明らかとなった。この要求仕様（口径）を前提に構造検討も行ったが、機器が大型となり、機器配置上の制限や耐震設計の観点からコスト増が避けられない。このように大型化・コスト増となるオーバーフロー管の導入の必要性については、自主保安としての費用対効果の観点から総合的に評価・判断する。

第 10 章 デブリ模擬体分析設備の整備

10.1 分析の構想・計画

10.1.1 分析項目の調査

STACY 更新炉によるデブリ模擬体を用いた臨界実験に必要な分析項目について調査を実施した。調査結果を表 10-1 に示す。主要な分析項目として、デブリ模擬体中のウラン量及び同位体組成、構造材模擬材、中性子毒物等を抽出した。

表 10-1 分析項目一覧

分析項目
ウラン同位体組成
ウラン量
構造材模擬材
中性子毒物
不純物元素
核分裂生成物 (γ線放出核種)
含水量
ウラン/酸素比
ペレット密度

10.1.2 分析手法の調査

前項の分析項目調査結果を踏まえ、デブリ模擬体の分析手法の選定に資するため、燃料ペレット加工等を実施している複数の事業者を訪問し、分析項目、方法、装置、精度や試料取扱いにおける留意点等について調査した。また、文献調査¹⁻¹⁰⁾を実施した。

(1) 国外事業者の調査

英国国立原子力研究所（セラフィールド）及びベルギー原子力研究センター（モル）について、燃料ペレット等の分析を実施している施設を中心に現地調査を行った。

① 英国国立原子力研究所（セラフィールド）

事業所内の施設のうち、Chemical Separation Area の High active facility (B229) を中心に視察し、情報を収集した。当該施設は、Sellafield MOX Plant (SMP)、Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP)、マグノックス炉等からの高レベル試料の分析を実施しており、多様な分析装置及び分析手法を採用している。デブリ模擬体の分析に関連する主要な分析項目と、それに対応する分析装置又は分析手法は次のとおりである。

U 同位体組成は、表面電離型質量分析装置又は多重検出器付 ICP 質量分析装置を採用している。U 量は、同位体希釈法による表面電離型質量分析装置又は多重検出器付 ICP 質量分析装置を主として、また、ICP 質量分析装置や滴定装置等も採用している。当該施設では、多重検出器付 ICP 質量分析装置の試料導入部分をフード内に設置した改造を施した装置を有しており、この装置での同位体希釈法による U 及び Pu 量の分析は、従来から幅広く使用されている同法による表面電離型質量分析装置での分析に比べ、化学分離及び測定時間の短縮、コスト削減等の優位性があることを確認した。

構造材模擬材、中性子毒物、不純物元素に該当する元素濃度分析には、主として ICP 発光分光分析装置、ICP 質量分析装置等を採用している。

放射能分析について、 γ 線放出核種には γ 線スペクトロメーターを、 α 線放出核種には α 線スペクトロメーターを採用している。さらに、ウラン/酸素比には酸化重量法を、ペレット密度には容量及び重量測定法を採用している。

MOX 試料をはじめとする各試料の取扱いにおいては、当該施設は試料受入から各測定までを試料の放射能レベルに応じて区分し、それぞれの区分を移動する際の放射能及び汚染管理を行っていた。これは、安全管理だけでなく、試料の相互汚染を防止し、分析精度を高めるためにも重要であることを確認した。

② ベルギー原子力研究センター（モル）

当該研究所は、ARIANE、MALIBU、REGAL 等、欧州を中心とした使用済燃料の分析（照射後試験：PIE）のプログラムに参画し、燃焼度測定や試料中の核種組成分析を実施するなど、活発な活動を行っている。本調査では、化学分析を実施する施設及びセル施設である Laboratory for High and Medium level Activity（LHMA）を視察し、情報を収集した。

主要な測定対象である使用済燃料試料は、LHMA で切断し、溶解、融解、マイクロ波又は加圧分解等の前処理操作を実施したのち、グローブボックス及びフードを有している化学分析を実施する施設へ移動される。当該施設には、主要装置として、ICP 発光分光分析装置、高速液体クロマトグラフィー、質量分析装置（ICP 質量分析装置、表面電離型質量分析装置）、 α 及び γ 線スペクトロメーター、液体シンチレーションカウンター等が設置されており、アクチノイド（U、Pu、Am、Np、Cm）、ランタノイド（Ce、Nd、Sm、Pm、Gd、Eu 等）、FP 核種（Mo、Tc、Ru、Rh、Ag、Sr 等）等、極めて多様な核種の分析に対応していた。PIE を例としたこれらの分析精度（ 2σ ）は、Pu 及び U の同位体組成について、表面電離型質量分析装置：～2%（ ^{234}U 及び ^{238}Pu を除く）、燃焼度測定における Nd 同位体について、表面電離型質量分析装置：～1%（ ^{142}Nd を除く）、FP 核種について、ICP 質量分析装置：～20%、 γ 線放出核種である ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 等について、 γ 線スペクトロメーター：～10%程度であった。

(2) 調査結果

今回実施した調査から、デブリ模擬体の分析に採用する分析手法について、現在分析設備で採用している分析手法から流用できる手法や装置等が多数存在することが分かった。また、

新規に整備すべき手法、装置等の見通しを得ることができ、今後計画しているデブリ模擬体分析への対応に資する情報を入手することができた。さらに、デブリ模擬体分析に必要な前処理として、ペレットの切断、粉末化及び溶解についても各種手法の情報を得ることができた。

分析手法の調査結果について、試料前処理に関する情報も含め表 10-2 に示す。

表 10-2 分析手法調査結果 (1/2)

分析項目	分析手法	使用分析装置	分析精度	分析設備に 既存/新規
ウラン同位体組成	イオン交換法、抽出クロマトグラフ法等による化学分離後、測定	表面電離型質量分析装置	±0.1%	既存
ウラン量	①イオン交換法、抽出クロマトグラフ法等による化学分離後、同位体希釈法による測定 ②酸化還元滴定法による測定	①表面電離型質量分析装置 ②電位差滴定装置	±0.3%	既存
構造材模擬材	イオン交換法、抽出クロマトグラフ法等による化学分離後、外部標準法（検量線法）による測定	①ICP 質量分析装置 ②ICP 発光分光分析装置	±5%	既存
中性子毒物	イオン交換法、抽出クロマトグラフ法等による化学分離後、①同位体希釈法、②外部標準法（検量線法）による測定	①②ICP 質量分析装置 ②ICP 発光分光分析装置	①：±3% ②：±5%	既存
不純物元素	イオン交換法、抽出クロマトグラフ法等による化学分離後、外部標準法（検量線法）による測定	ICP 発光分光分析装置	±10%	既存
核分裂生成物 (γ 線放出核種)	γ 線スペクトロメトリー	γ 線スペクトロメーター	±10%	既存
含水量	カールフィッシャー電量滴定法に基づく測定	カールフィッシャー水分計	±10%	新規

表 10-2 分析手法調査結果 (2/2)

分析項目	分析手法	使用分析装置	分析精度	分析設備に 既存/新規	
ウラン/酸素比	酸化重量法 空气中で 850±20°C に強熱して八酸化三ウランに変換し、強熱前後の重量から算出	①電子天秤及び電気炉 ②熱重量分析装置	< ±1%	新規	
	酸素測定法 黒鉛るつぼ中で試料を加熱融解し、CO 又は CO ₂ として赤外線検出器で測定	酸素測定装置	±3%	新規	
	ポーラログラフイー リン酸で加熱溶解したウラン (VI) をポーラログラフイーにより定量することにより算出	ポーラログラフ	±1%	新規	
ペレット密度	アルキメデス法に基づく液浸法	分析天秤 (液浸法対応仕様)	±3%	新規	
	定容積膨張法によるガスピクノメトリー	ガスピクノメーター	±10%	新規	
	レーザー測長による寸法測定と電子天秤による重量測定併用	レーザー測長器及び分析天秤	< ±1%	新規	
試料前処理	試料切断	右記治具により縦又は横方向に切断	—	新規	
	粉末化	右記治具により切断試料又は粉碎試料を粉末化			
	試料溶解	混酸 (硝酸+塩酸) - 加圧溶解法			加圧溶解容器及び加熱炉
		混酸 (硝酸+塩酸) - マイクロ波加熱溶解法			加圧溶解容器及びマイクロ波加熱装置
	アルカリ融解法	溶解容器 (るつぼ等) 及び加熱炉			

10.2 分析設備の設計方針

前項の分析手法調査結果を踏まえ、既存の分析設備への分析手法の採用について検討した。その結果、新規に整備すべき手法、装置等に対応できる作業場所が不足することが分かった。

以下に現在の状況について詳述する。

既存の分析設備は、分析室 (I) から (IV) までの 4 部屋に区画されており、許可上の区分として、分析室 (I) は原子炉施設である STACY 施設及び TRACY 施設の共用、分析室 (II) から (IV) は同じく原子炉施設である STACY 施設及び TRACY 施設の共用であるとともに、核燃料使用施設であるバックエンド研究施設との共用設備となっている。デブリ模擬体は核燃料使用施設にて取り扱われる燃料であることから、この試料の分析を行うことができる現在の設備は、核燃料使用施設の許可を得ている分析室 (II) から (IV) となる。表 10-2 に示したとおり、デブリ模擬体の分析には多様な分析装置と広範な作業場所が必要となる。分析室 (I) は、多数のグローブボックス、フード、分析装置を有するが、現行許可においてデブリ模擬体を取り扱うことはできない。

このため、分析室 (I) においてもデブリ模擬体分析を実施できるよう、核燃料使用施設として整備することについて、その可否を含めて検討した。検討の結果、以下の対応によって原子炉施設から核燃料使用施設に許可区分を変更することで、核燃料使用施設としてデブリ模擬体の分析に対応することが可能となる見通しを得た。

- (1) 現在原子炉施設 (STACY 施設及び TRACY 施設の共用) 専用設備である分析室 (I) を原子炉施設の許可から取り下げたのち、分析試料 (原子炉燃料) を受払いする装置等を分析室 (I) から撤去するとともに、他設備と接続する系統を遮断する措置を実施することにより、原子炉施設から隔離する。
- (2) 核燃料使用施設 (バックエンド研究施設) の許可に追加し、核燃料使用施設への対応工事を実施する。

図 10-1 に分析設備の許可区分変更概要を示す。

これらから、分析設備の設計方針として、分析設備のうち分析室 (I) について、原子炉施設から核燃料使用施設への許可区分変更を行い、デブリ模擬体の分析を実施するための設備・装置を整備することとした。

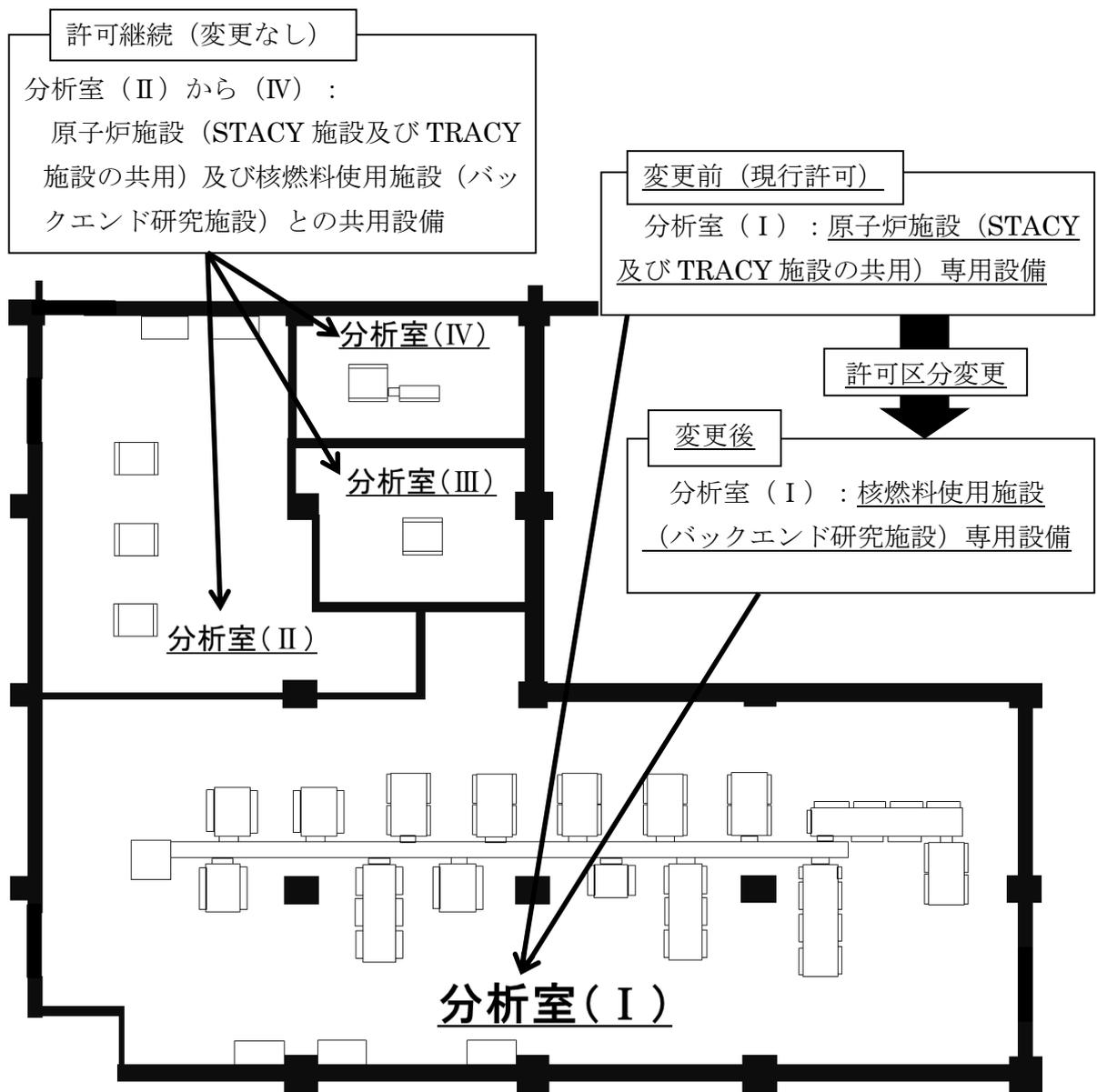


図 10-1 分析設備の許可区分変更概要

10.3 分析設備の設計及び製作（購入）

分析室（I）においてデブリ模擬体の分析を実施するため、放射線モニタリング設備の分析室（I）への設置に向けた設計及び一部製作を実施した。また、デブリ模擬体の分析に必要な各種分析装置のうち、水分測定装置及び乾式自動密度計を購入した。

10.3.1 分析設備の放射線モニタリング設備に関する設計及び製作

(1) 放射線モニタリング設備の概要

分析室（I）の許可区分を原子炉施設から核燃料使用施設に変更することに伴い、分析室（I）で使用しているグローブボックス及びフード排気系の通常時及び事故時の核燃料物質放出量の把握を目的として、分析室（I）のグローブボックス及びフードの排気系に放射線モニタリング設備を設置する。本設備は、分析室（I）内のグローブボックス及びフード排気系ダクトから必要に応じ排出気体を吸引し、可搬型ダストモニタにより吸引した排出気体の放射線レベルの測定を行うものである。放射線モニタリング設備は、以下から構成される。

- ① 分析室（I）内のグローブボックス及びフード排気系ダクトとの接続部を始点として NUCEF 実験棟内に敷設する配管
- ② 配管終点部に設置する可搬型ダストモニタとの接続部
- ③ 放射線モニタリング設備を閉止するボールバルブ
- ④ 配管サポート等、その他一式
- ⑤ 可搬型ダストモニタ

(2) 放射線モニタリング設備の設計

放射線モニタリング設備の設置に向け、当該設備の設計を実施した。当該設備の設計にあたっては、既設の放射線モニタリング設備の設置例を参考に、以下に示す各項目を検討し、その結果を設計に反映した。

- ① 分析室（I）内のグローブボックス及びフード排気系ダクトとの接続部を始点として NUCEF 実験棟内に敷設する配管について
 - 1) グローブボックス及びフード排気系ダクトとの接続方式
 - 2) 配管敷設及び施工方法
- ② 配管終点部に設置する可搬型ダストモニタとの接続方式及び設置位置について
- ③ 放射線モニタリング設備を閉止するボールバルブの設置位置について
- ④ 配管サポート等、その他一式について
 - 1) 耐震評価実施に基づく配管サポート位置の設定
 - 2) 測定用排出気体の吸引方法
 - 3) 測定に供した排出気体の排気方法

設計の結果として、敷設配管経路は NUCEF 実験棟 B の 2 階に位置する分析室 (I) から階段室等を経由し、NUCEF 実験棟 B 地階に位置する排気機械室までとした。可搬型ダストモニタによる吸引空気の放射線レベル測定は、排気機械室で行うこととした。また、放射線モニタリング設備の設置のための施工方法、必要な購入器材一式等についても設計の結果として得られた。図 10-2 ～図 10-4 に配管系統図を、表 10-3 に購入品リストを示す。

放射線モニタリング設備の設計は全て完了した。

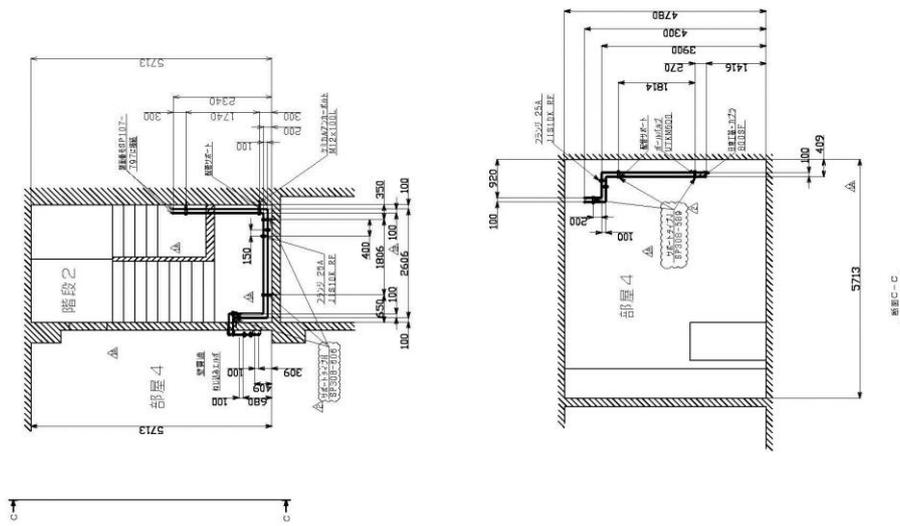


図 10-4 放射線モニタリング設備の配管系統図 (地階)

表 10-3 放射線モニタリング設備の購入品リスト (1/2)

購入品リスト (1/2)

名称 : 放射線モニタリング設備の設計・製作

No.	品名	メーカー名	型式・仕様	主要材質	数量	単位	備考
1	フレキシブル・チューブ	-	25A×950L、両端RI [®]	SUS304	1	本	平成26年度購入済み
2	フレキシブル・チューブ	-	25A×1220L、両端RI [®]	SUS304	1	本	同上
3	ボールバルブ	KITZ	UTKM 呼び径25A (1B)	SUS304	2	個	同上
4	カブラ・ソケット	日東工器株	800SF	SUS304	4	個	同上
5	カブラ・ブラグ	日東工器株	800PF	SUS304	4	個	平成26年度購入済み
6	パイプ	-	25A×Sch20s×4m	SUS304TPA	26 ^{※1}	本	
7	エルボ	-	25A×sch20s	SUS304	45	個	
8	片ニップル	-	25A×50L	SUS304	26	本	
9	フランジ	-	25A JIS10K RF	SUS304	60	枚	
10	パッキン	-	25A JIS10K RF	CR	30	枚	
11	M16×55Lボルト・ナット	-	M16×55L	ステンレス	120	組	
12	ソケット	-	25A	SUS304	6	個	
13	ねじ込みエルボ	-	25A	SUS304	4	個	
14	六角短ニップル	-	25A	SUS304	1	本	
15	Uボルト・ナット	-	25A	ステンレス	79	組	
16	ケミカルアンカー	-	M12×100L	-	94	本	
17	アンカーボルト・ナット	-	M12×130L	ステンレス	94	組	
18	サポートタイプA	-	-	SS400	2	組	
19	サポートタイプB	-	-	SS400	1	組	
20	サポートタイプC	-	-	SS400	2	組	

注記 1. ※印数は購入単位での数値を示す。製作数は購入したパイプを切断した数量 (85本)。

表 10-3 放射線モニタリング設備の購入品リスト (2/2)

購入品リスト (2/2)

名称 : 放射線モニタリング設備の設計・製作

No.	品名	メーカー名	型式・仕様	主要材質	数量	単位	備考
21	サポートタイプD	-	-	SS400	1	組	
22	サポートタイプE	-	-	SS400	5	組	
23	サポートタイプF	-	-	SS400	3	組	
24	サポートタイプG	-	-	SS400	3	組	
25	サポートタイプH	-	-	SS400	20	組	
26	サポートタイプJ	-	-	SS400	3	組	
27	サポートタイプK	-	-	SS400	1	組	
28	サポートタイプL	-	-	SS400	1	組	
29	サポートタイプM	-	-	SS400	1	組	
30	-以下余白-						
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							
38							
39							
40							

(3) 放射線モニタリング設備の製作（平成 26 年度製作範囲）

前項で設計した放射線モニタリング設備について、設計結果に基づき、一部製作を実施した。製作範囲を以下に記載するとともに、製作品を図 10-5 に示す。

- ① グローブボックス及びフード排気系ダクトとの接続部
- ② 配管終点部に設置する可搬型ダストモニタとの接続部
- ③ 放射線モニタリング設備を閉止するボールバルブ



図 10-5 放射線モニタリング設備の平成 26 年度製作品

10.3.2 分析装置の購入

(1) 水分測定装置

本装置は、測定原理にカールフィッシャー電量法を採用した装置である。平成 26 年度は測定装置本体、電解セル、スターラ、水分気化装置等を購入した。図 10-6 に、購入した水分測定装置を示す。

(2) 乾式自動密度計

本装置は、測定原理にピクノメトリーを採用した装置である。平成 26 年度は装置本体、制御装置、その他付属品を購入した。図 10-7 に、購入した乾式自動密度計を示す。



図 10-6 水分測定装置



図 10-7 乾式自動密度計

参考文献

- 1) 二酸化ウランの分析、JAERI-4053、日本原子力研究所 (1971).
- 2) ISO 7097-1, *Nuclear fuel technology - Determination of uranium in solutions, uranium hexafluoride and solids - part 1 : Iron(II) reduction/potassium dichromate oxidation titrimetric method*, ISO, Geneva (2004).
- 3) 小森卓二、同位体希釈法、分析化学、11、7
- 4) ISO 7476, *Nuclear fuel technology - Determination of uranium in uranyl nitrate solutions of nuclear grade quality - Gravimetric method*, ISO, Geneva (2003).
- 5) S.Usuda, N.Kohno, *Anion-Exchange Separation of Nd and the Transplutonium Elements in Spent Nuclear Fuels for Burn-up Determination*, Separation Sci. Technol., 23(10&11), pp.1119-1131 (1988).
- 6) ISO 8299, *Nuclear fuel technology - Determination of the isotopic and elemental uranium and plutonium concentrations of nuclear materials in nitric acid solutions by thermal-ionization mass spectrometry*, ISO, Geneva (2005).
- 7) 小野澤淳、他、ワンズスルー型微小試料密度測定装置の開発、JAERI-Tech 2004-061、日本原子力研究所 (2004).
- 8) 半田宗雄、他、発光分光分析法による核燃料中の金属不純物元素の定量の現状 (調査報告書)、JAERI-M 90-015、日本原子力研究所 (1990).
- 9) 本岡隆文、他、使用済燃料の溶解と溶解液の調製法の選定、JAERI-Tech 2001-023、日本原子力研究所 (2001).
- 10) 中原嘉則、他、軽水炉使用済燃料の燃焼度クレジットに関する技術開発、JAERI-Tech 2000-071、日本原子力研究所 (2000).

第Ⅴ編 専門家の意見聴取

第 11 章 福島燃料デブリ臨界評価研究専門部会

専門家から意見を聴取する会合を「福島燃料デブリ臨界評価研究専門部会」として組織し、計画どおり、京都大学の中島健教授が部会長に、並びに名古屋大学の遠藤知弘助教、東京都市大学の村松健特任教授、及び大阪大学の黒崎健准教授が専門委員に就いた。平成 26 年 7 月と平成 27 年 2 月に会合を持ち、それぞれ、本事業の計画と成果について議論した。

いずれの会合も、事務局である JAEA 事業担当者から説明し、部会長及び専門委員と質疑応答する形で進めた。また、原子力規制庁（規制庁）の本事業担当者及び 1F 規制担当者もオブザーバーとして参加した。

本章はこれらの会合の議事録を転載したものである。

11.1 第 1 回会合

11.1.1 開催状況

(1) 日時及び場所

平成 26 年 7 月 4 日 10:00～12:00

富国生命ビル 19F 日本原子力研究開発機構 東京事務所 第 5 会議室

(2) 出席者（敬称略）

中島（健）部会長、村松専門委員、黒崎専門委員（欠席）遠藤専門委員

事務局 JAEA 事業担当者 外池、山根、曾野、梅田、船田、鎌田

オブザーバー原子力規制庁 安藤、小林（容）、金城、加藤、中島（鐵）、酒井

オブザーバー JAEA 三好、内山

(3) 配布資料

資料 1-1 委員名簿

資料 1-2 福島第一原子力発電所燃料デブリに係る現状理解

資料 1-3 原子力規制庁受託「平成 26 年度東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備」事業・提案書（抜粋）

資料 1-4 同事業・臨界マップの整備について

資料 1-5 同事業・リスク評価手法の開発について

11.1.2 議題及び質疑応答（Q：質問、C：コメント、A：回答）

(1) 背景説明

資料 1-2 に基づいて、JAEA から本事業の背景として、臨界管理の観点で、福島第一原子力発電所（1F）燃料デブリに係る現状理解を説明した。

Q（中島部会長）未臨界担保に必要なホウ素濃度は、5% よりも低い ^{235}U 濃縮度でも評価しているか？

- A 4.4% や 4% でも評価している。反応度が最大となる燃焼燃料（約 14 GWd/t）は ^{235}U 濃縮度 4% に相当するが、このとき、必要なホウ素濃度は 10,000 ppm 程度である。
- Q（黒崎専門委員）スリーマイル島原子力発電所 2 号機事故（TMI-2）ではホウ素を用いて未臨界を担保できたのか？
- A 冷却水中ホウ素濃度だけが管理パラメータであった。必要な下限濃度を 4,350 ppm と定め、取出工程で厳重に濃度を管理した。
- C（中島部会長）TMI-2 はもともと PWR でケミカル・シムとしてホウ素を使っていた。事故を経ても圧力容器は健全でホウ素を含む冷却水を保持できた。1F の場合、格納容器が大きく、同じ方法を採用にしても膨大な量のホウ素が必要である。
- Q（黒崎専門委員）示された減速材燃料体積比 (V_m/V_f) の範囲はどのように決まったのか？
- A 無限増倍率が 1 を超え、臨界管理が必要な範囲である。
- Q（黒崎専門委員）実際の燃料デブリの V_m/V_f はどれぐらいか？
- A 観察が必要である。単純な形状の粒の積み上げであれば、 V_m/V_f は小さく、臨界になりにくい。取り出し時にかき回すと、 V_m/V_f は大幅に変化する。
- Q（中島部会長）MCCI 生成物の V_m/V_f はどれぐらいか？
- A 今年度調査予定である。KIT 模擬実験では、細かい穴が分布する場合、大きな穴が偏在する場合などがある。
- C（村松専門委員）異なる直径の球が積みあがる場合、いびつな形状の粒が積みあがる場合、 V_m/V_f はより小さくなるのが一般的である。燃料デブリの V_m/V_f を推定するモデルを検討すべきである。 V_m/V_f をパラメータにしたグラフを示す場合に、モデルから導かれる V_m/V_f を表示するとよい。
- C（JAEA）MCCI 生成物は、空隙が生じた状態で固定化されており、モデルだけでは V_m/V_f を決められない。
- C（村松専門委員）他にも、炉心で燃料が溶け残っているような状況も想定し、臨界になり得る条件は網羅的に列挙しておくべきである。

(2) 原子力規制庁受託「平成 26 年度東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備」事業の計画

資料 1-3 に基づいて本事業の全体計画を、資料 1-4 に基づいて本事業のうち臨界マップの整備について計画を説明した。説明には、MCCI 生成物の臨界特性解析、臨界マップのデータを格納するデータベースシステムの整備、及び臨界マップを検証する臨界実験の計画が含まれる。

Q（中島部会長）全体計画の 1F 廃炉工程との整合はどうか？

A 臨界マップの解析ベースの整備は平成 28 年度、これに基づく臨界リスク評価手法整備は平成 29 年度を目途とする。これらは、平成 30 年度ごろの燃料デブリ取出工法「許可」申請に間に合わせる。取出にかかる「設工認」は平成 32 年度ごろで、これまでに、リスク評価手法を詳細化する。

Q（中島部会長）燃料デブリ試料採取に際してどう対応するか？

A もし規制庁より分析の委託があった場合には対応できるような準備を進める。

- Q (中島部会長) 臨界マップの仕上がりイメージは臨界ハンドブックデータ集のようなものか？ パラメータの数が膨大にならないか？
- A 燃料デブリの臨界特性を特徴づけられる合理的な数のパラメータを選びたい。もし集合体平均組成が使えるなら、 ^{235}U 残留濃縮度は燃焼度と 1 対 1 対応で結びつけてしまう等の方法が考えられる。
- Q (中島部会長) 今年は MCCI 生成物をやるとして、臨界マップ全体ができるのはいつごろか？ 解析ケース数は十分か？
- A 年度ごとに解析対象範囲を広げ臨界マップを拡充する。計算ケース数が比較的少なく飛び飛びのデータになるが、データベースシステムができれば解析を自動化し、データを稠密化する。
- Q (中島部会長) 何故 MCCI 生成物に最初に取り組むのか？ 取出しの順序からすると最後ではないか？
- A 組成からみて臨界の可能性がより高いものから実施している。現状において冠水していることも考慮している。
- Q (黒崎専門委員) 臨界マップはどう読むべきか？
- A 臨界になる条件 (黄線)、無限増倍率が 1 (1 未満の組成なら臨界になり得ない) となる条件 (青線) は、客観的に解析で求まる。この上に、各号機ごとに異なる燃料デブリの分布が示されることになろう。黄線と青線で囲まれた三角が未臨界状態である。
- Q (黒崎専門委員) 安全裕度を見込んで保守的に黄線と青線を引けばよいのでは？
- A 安全裕度を取りすぎると、未臨界を担保できる管理の範囲が小さくなりすぎる。組成やジオメトリの管理が確立できる「バウンディング・アプローチ」の場合はそれでも良いが、1Fのように管理できない場合、臨界になる可能性やそのリスクを評価する場合、黄線と青線は定量的に正確でなければならない。
- C (黒崎専門委員) このマップ上の燃料デブリの分布、緑の領域の分布を、事業者や JAEA がそれぞれどう評価するか重要なポイントで議論すべきである。
- Q (中島部会長) 燃料デブリのサンプリング・分析ができたとして、その代表性はどうか？ 結局全部燃料デブリを取出さないと臨界マップ上の分布は不明なままでは？
- A 何点かサンプルを採取してから、マップ上の分布を議論することになろう。少数のサンプルの分析結果だけで「バウンディング・アプローチ」に移行することはできないし、臨界マップをその判断に用いることも意図していない。採れた燃料デブリごとに臨界性を見極め、工程を進める際の判断に用いることを意図している。
- Q (中島部会長) MCCI 生成物の解析を進める上で、核データの完備状況はどうか？
- A 現時点では大きな問題はないと考えている。
- C (中島部会長) 臨界実験を提案するなら核データの問題点を明らかにしておくべきである。
- C (中島部会長) STACY 更新炉の実験炉心の燃料デブリ臨界特性の再現性はどうか？
- A 燃料棒と材料棒を用いる場合は、その非均質性の効果が生じるが、 V_m/V_f の小さい水の少ない条件では非均質効果も小さくなるという計算結果が得られている。燃料デブリ性状の詳細な再現はデブリ模擬体を用いて行う。STACY 更新炉ではデブリ模擬体の反応度値測定も予定しており、正の温度反応度係数も許容される。フランス IRSN とも協力する計画である。

Q (中島部会長) 国内大学と連携しないか？

A 今年度は予定していないが、来年度以降はあり得る。

資料 1-5 に基づいて本事業のうちリスク評価手法の開発について計画を説明した。

Q (黒崎専門委員) 成果物のイメージはどんなものか？ 受益者は誰か？

A まず、リスク評価にコンセンサスが得られるよう「考え方」を提示し、次にこれに基づく方程式やソフトウェア等「手法」を整備する。さらに、その手法の実施に必要な情報を管理する「ツール」を用意する。これらを 1 つにパッケージ化する。ただ、1F 現場の具体的な情報を入力する方法はまた別問題であり、当面、方法論の提供に力点を置く。実際に使っていただくのは規制庁である。しかし、核燃料物質取扱全般に用途は広げられる。

Q (黒崎専門委員) どんなものが出来上がり、どのように使われるのか？

A 状態管理データベースには、1F のその時々状況、計画されている工程・工法の情報が格納され、1F のリスク評価・判断に使ってもらうことがスコープである。中島部会長の ATOMOS 記事にあるように、燃料デブリ取出で臨界リスクが下がることの確認、他のリスクとの比較等に資する。リスク比較には統一した「指標」が必要である。

C (金城室長) 臨界マップの赤線、環境影響を生じる条件を明らかにすることがエッセンスではないか？ しかしその方法論が明確でない。

A 詳細な検討を行った上で、中性子実効増倍率の尤もらしい値や最大値を求め、それに対応した影響（核分裂数等）を評価する。その値があらかじめ設定した限度に達するような条件を明確にする作業が、赤線を引くことに相当する。赤線の条件をどのような物理量で示すかも課題である。環境影響として公衆被ばくの限度、作業員影響、直達線線量、短半減期核種影響等が候補だが、選ばなければならない。

C (金城室長) 規制の観点では、環境影響・公衆被ばくが指標であることは明確である。現状、敷地境界線量を用いており、その観点で赤線を引いてもらうことが必須である。

Q (黒崎専門委員) 臨界の定義は炉物理的に厳密であるべきか？ 臨界となっても環境影響を生じないこともあるのか？

A 臨界マップの黄線が炉物理的な意味の臨界である。赤線が環境影響を生じるという観点で、社会的な事象ないし規制要件的な意味での臨界である。炉物理的に臨界となっても有意な影響を与えないまま終わることは有り得る。また、そうなるよう、緩和策を工学的に準備しておく必要がある。

C (村松専門委員) 臨界となる黄線、環境影響がでる赤線、この間の幅つまり裕度が重要である。この裕度の範囲で臨界を止められるか、そのメカニズムを明らかにしておくべきである。臨界事故は、例えば NRC では、作業員影響の観点で重要視されている。総核分裂数から作業員被ばく線量へ換算する係数があればイメージしやすい。その上で、環境影響は距離だけを考慮して評価してもよい。

Q (中島部会長) 事業者から工程について情報や提案が入れば、このツールを使って規制庁が判断することになるだろうが、状態管理データベースの情報の確度・精度はどうか？ そ

れによって必要な裕度レベルは大幅に変わる。燃料デブリ性状の均一・不均一を完全に網羅的に取り扱えるか？

- A 現状について情報が入ればその都度データベースの内容を更新・改善する。核分裂性物質の移動パスの可能性があると、例えば冷却水ループの変更等はその都度このツールを適用すべきである。臨界の可能性有無の判断のときは極力保守的な組成分布モデルを用いるが、臨界可能性ありとなった後の評価は、現実的なモデルを使ってもよいと思われる。しかし、現実的なモデルを採用した経緯は記録されるべきである。
- C (中島部会長) タイトなスケジュールの計画であり、リスク評価の他の研究グループにも加わってもらわなければならない。
- C (村松専門委員) このリスク評価手法整備の計画は、本質的に従来の核燃料サイクル施設の臨界リスク評価手法整備の方法論に則っており、妥当である。ただし、異常状態の定義が異なっていること、つまり、普段の状態が不確かという点、及び、核燃料物質の性状を示すパラメータも非常に不確かな点がポイントである。また、リスク評価手法整備は、モデルプラントを想定して実際に評価を試行錯誤して行いながら進め、結果として確立された方法論が残るものである。本事業でも生の 1F 情報を取入れて自身で評価することに注力されたい。

(3) 福島第一原子力発電所燃料デブリ臨界管理について

規制庁東京電力福島第一原子力発電所事故対策室を代表して金城室長から以下のコメントがあった。

- C (金城室長) 汚染水については、現場の日々の対策には追われるものの、長期的な方向性が出てきた。対策まで具体的に議論できていないものは地震・津波で、事業者が宿題を出している。最後に残っているのが燃料デブリ、臨界である。事業者が宿題すら出していない。燃料デブリ取出しに向けて宿題を出すべき項目は、具体的に、この 1 年で示して欲しい。現状でもすぐに必要なものは、いつでも提言して欲しい。

(4) その他

公式には、第 2 回会合を第 4 四半期に開催することを計画しているが、部会長・専門委員には必要に応じてご説明する。規制庁で必要が生じた場合には、臨時に会合を持つ可能性もある。

本事業の成果を外部発表することは、契約書の「バイドール条項」により可能である。秋の学会で発表予定は無いが、春の学会の発表は未定である。

11.2 第2回会合

11.2.1 開催状況

(1) 日時及び場所

平成27年2月25日 13:30～17:30

富国生命ビル19F 日本原子力研究開発機構 東京事務所 第5会議室

(2) 出席者（敬称略）

中島（健） 部会長、遠藤専門委員、村松専門委員、黒崎専門委員

事務局 JAEA 事業担当者 外池、山根、曾野、深谷、上野

オブザーバー原子力規制庁 安藤、小林（容）、加藤、中島（鐵）、酒井

オブザーバーJAEA 内山

(3) 配布資料

資料 2-1 前回議事録案

資料 2-2 原子力規制庁受託「平成26年度東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備」事業・報告第I編 はじめに

資料 2-3 同事業・報告第II編 臨界マップの整備

資料 2-4 同事業・報告第III編 臨界リスク評価手法の整備

資料 2-5 同事業・報告第IV編 STACY 更新炉の整備

11.2.2 議題及び質疑応答（Q：質問、C：コメント、A：回答）

(1) 前回議事録確認

資料 2-1 に基づいて、前回会合の議事録案を確認した。本会合では特にコメントは無かったが、委員に議事録案を電子メールで送付し、1週間を目途にして、さらに確認して頂くこととした。

(2) 原子力規制庁受託「平成26年度東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備」事業の報告

資料 2-2 に基づいて、JAEA から本事業の背景、目的、基本方針、及び8カ年全体計画を説明した。その中における平成26年度事業の位置づけ、及び事業内容の概要を述べた。

資料 2-3 に基づいて、本事業のうち臨界マップの整備に関して、MCCI 生成物の臨界特性解析、及び臨界マップのデータを格納するデータベースシステムの整備の成果を説明した。

C（中島部会長）MCCI 生成物がとり得る性状範囲について、報告書には文献調査の成果も記載すること。

A 拝承。

C (中島部会長) 計算を網羅的に行うのは良いが、その結果の中のどこに MCCI 生成物がとり得る性状範囲が位置づけられるのか? 文献や KIT 実験の調査で得られる知見に基づいて示すべきである。

C (黒崎委員) KIT 実験の模擬 MCCI 生成物の写真からでも、空孔率は推定できるのではないか?

A 拝承。

C (遠藤委員) 水 (M) と燃料デブリ・MCCI 生成物 (F) の非均質体系のモデル化において、格子構造の違い、M 中に F 球を配列させるか F 中に M 球を配列させるかの違い、について反応度差を評価し、臨界マップに載せる計算の格子構造モデルをどのような理由で選んだのか明らかにしておくべきである。

A 拝承。

Q (遠藤委員) 臨界マップデータベースの運用は公開されるのか?

A システムはネットワーク上に構築されるので潜在的には公開できる。実際にはどうかは運用開始段階において規制庁との相談になる。

資料 2-4 に基づいて、本事業のうちリスク評価手法の開発に関して、成果を説明した。

C (村松委員) 軽水炉では多くの PRA の実績がある。サイクル施設は変数が多く難しい。1F リスク評価は「設計された施設」ではなく「どうなっているかわからない施設」が対象である。リスク評価の 3 ファクターとされるシナリオ、可能性、影響のうち、1F ではシナリオの分析が最重要のはずだが、1F で事業者が提案している対応策にはシナリオの分析の説明がない。リスク評価は「事業者は網羅的」に「研究者は代表例」を実施するのが常だが、今回は、研究者も網羅的にやるべきで、そこが難しい。その点では、マトリックスで進めるのが良い。

シナリオ分析にはトップダウンとボトムアップの 2 つのアプローチがある。トップダウンは、原理からスタートするので分類しやすい。しかし、その原理に該当するプロセス変化・操作をすべて見られるかわからない。逆にボトムアップでは、現場で行われる操作をすべて網羅していくので、漏れはない。よって、トップダウンとボトムアップの両方のアプローチをすることが重要である。このアプローチのためには事業者と密接に連携すべきである。規制庁は、事業者と距離を置くのではなく、密接に連携して情報を得るべきである。その上で評価は独立にやって比較すれば良い。

可能性評価では事象がたくさんあると大変だが、事象のパターンによる分類とスクリーニングにより効率化する。影響評価もスクリーニングにより裾切りして効率化する。SA コードのアウトプットを活用して分類・スクリーニングすれば良い。

C (JAEA) 独自の過酷事故 (SA) コード解析結果ならアクセスできるのだが、東電の MAAP の結果にはアクセスできない。「最も有り得そうな」解析結果の例が公表されているが、その背後にある解析結果のバリエーションを活用できるようにならないものか。

C (規制庁) 規制庁 (旧 JNES) でも JAEA でも SA 解析・検証の研究開発はやっているの、個別に解析する能力は持ちつつある。

- C (村松委員) その解析能力は活用すべき。様々な条件で解析して得られた結果のバリエーションを使うべき。
- C (中島部会長) 網羅的にやるべきことは理解するが、今後、具体的な事例も採りあげて紹介・説明されることを期待している。

資料 2-5 に基づいて、本事業のうち STACY 更新に関して、成果を説明した。

- Q (遠藤委員) デブリ模擬体の調製では、どのような材料を混ぜるのか？
- A コンクリート、鉄などである。
- Q (遠藤委員) 気泡はどうやって模擬するのか？ 調製した模擬体の仕上がり具合は、例えば気泡の量等、どのように分析・確認するのか？
- A 中性子には透明なアルミニウムを入れた上で、アルミニウム量を測ることになる。ポリエチレン球をプレスして入れるなどの方法もある。あるいは、全炉心模擬実験で、燃料と構造材を非均質に配列して実験を行うことも検討している。 V_m/V_f が小さい条件では非均質効果は小さいという予備解析結果を得ている。
- Q (中島部会長) デブリ模擬体試料の反応度価値測定の精度はどれぐらいか？
- A 絶対値としては液位差法でセント単位の反応度価値は測れる。さらに一定で試料を出し入れして逆動特性解析をする場合には、時間をかければ 0.1 セント単位でも測定できると考えている。
- C (中島部会長) 燃料調達先は、品質保証体制も含めて慎重に選択すべきである。
- Q (黒崎委員) 中速中性子体系に近い条件で、安全板のカドミウムの吸収効果は十分か？
- A 十分に効果があるとことを解析で評価している。
- Q (黒崎委員) 燃料棒の具体的なイメージはどんなものか？
- A 燃料棒を 1 本ずつ取扱う。炉心へ挿入できる最大量は 900 本である。それぞれの燃料棒は被覆管も有しており、燃料調達は被覆管も込みである。
- Q (黒崎委員) デブリ模擬体の調製能力はどれぐらいか？
- A ペレットで月産 300 個程度を計画している。
- Q (黒崎委員) 材料学的な分析項目が挙げられていないが良いのか？
- A 核特性の評価に必要な分析項目に絞っている。基本的に体積当たりの元素・核種ごとのモル濃度が分かれば良い。
- Q (黒崎委員) 様々な物質を混ぜるとペレット調製が難しいこともあると想像される。本当に調製できるか？
- A 平成 25 年度に調査研究として、燃料メーカーで試作している。引き続き燃料メーカーと協力していきたい。
- Q (黒崎委員) 酸素ウラン (O/U) 比の測定は、通常の酸化物燃料でも難しいもので、デブリ模擬体だと一層苦勞するであろう。これも燃料メーカーとの協力が必要である。
- A 拝承。検討中である。
- Q (中島部会長) 感度解析で設定した格子間隔で実際に設計するのか？ V_m/V_f はどれぐらいになっているか？
- A 格子間隔 1.15 cm で V_m/V_f はほぼ 1 である。格子間隔 2.55 cm で $V_m/V_f=11$ である。

Q (中島部会長) 軽水炉実験はフランスならカダラッシュで実施しているが? 格子間隔が狭いところで不確かさは既存装置に比べてどうか?

A IRSN と協力しているので、バルデュックの Apparatus B を主に参考になっている。Apparatus B に遜色ない不確かさが実現できる目途が得られている。

Q (中島部会長) STACY 更新の許認可の状況はどうか?

A 平成 26 年度中に申請できるものと考えている。

(3) 福島第一原子力発電所燃料デブリ臨界管理について

規制庁より第 31 回 1F 監視委員会で燃料デブリ臨界監視について議論があった旨紹介があった。

(4) その他

JAEA より、部会長及び専門委員には、平成 27 年度も引き続きご意見を賜りたい旨お願いした。専門委員から STACY を見学したい旨ご希望が表明されたので、平成 27 年度の初回の専門部会を JAEA 原子力科学研究所で開催することを計画する。

第 VI 編 まとめ

第 12 章 平成 26 年度の成果

12.1 臨界マップの整備

MCCI 模擬実験に係る文献を調査したところ、MCCI によるコンクリート浸食及び熔融燃料からの放射性物質放出の状況を明らかにする文献を多く見出したが、MCCI 生成物の組成を分析したものが見当たらなかった。臨界管理の観点で MCCI 生成物組成を詳細に検討する取組みは JAEA において実施されている。ドイツ KIT を訪問し、研究者と議論するとともに、MCCI 模擬実験の生成物を観察した。この結果、MCCI 生成物の酸化物相はコンクリートと熔融燃料の均質な混合物だが、その混合割合を限定するものは無いと考えられる。MCCI 生成物の空孔率については MCCI 模擬実験生成物の空孔率が参考になると思われるが、1F 事故に当てはめる際の代表性については慎重な検討が必要である。

これらの知見に基づき、MCCI 生成物を燃料とコンクリートの均質混合物とし、MCCI 生成物球とそれを取り巻く水の非均質なモデルを構築し、臨界特性を解析した。主なパラメータは、燃料組成、MCCI 生成物中のコンクリート体積割合、及び水と MCCI 生成物の体積比である。無限増倍率、臨界体積等を連続エネルギーモンテカルロコード MVP 及び核データライブラリ JENDL-4.0 を用いて求めた。さらに、標準核計算コードシステム SRAC と JENDL-4.0 を用いて、無限増倍率が 1 となる水中のホウ素濃度を求めた。これらのデータは臨界マップの一部を成すものである。さらに別の性状条件の解析あるいは既存解析結果を稠密する解析を省力化するため、及び実際の燃料デブリ性状を解析結果に照合して迅速に臨界特性を判断できるようにするため、データベースシステムの概念設計を行った。

12.2 臨界リスク評価手法の整備

再臨界リスクを評価する上で考慮すべき事象を検討するため、燃料デブリの臨界リスク評価における 3 つの課題として、臨界に対する対策の有効性の確認、正常ではない状態からの臨界発生確率の評価、及び燃料デブリの臨界影響評価を提示した。これらの課題を解決するために起因事象の明確化と網羅的な検討が必要であることを示し、燃料デブリの臨界リスク評価の手順を提案した。手順は、1) 時間・空間的な検討対象の区画化、2) 各区画の中で臨界管理因子ごとに関連する起因事象の想定、3) 中性子無限増倍率・実効増倍率の評価、及び 4) 発生確率および影響の評価とリスクの定量化、の 4 ステップから成る。ステップ 1 と 2 を実践する有効な方法として臨界リスク評価マトリックスを作成し、再臨界リスクを評価する上で考慮すべき事象の検討を行い、今後の課題等を提示した。

リスク評価の実施にあたって必要な技術について検討し、これを支援するツールの概念設計を行った。上記手順のステップ 1 と 2 を円滑に実施するため、データベースを用いたシステムの機能について検討した。ステップ 3 と 4 を実施する上で必要な数値計算技術と支援ツールとして要求される機能を検討し、その機能を実現する既存の技術を例示した。

12.3 臨界実験による臨界マップ検証

STACY 更新炉の原子炉本体の整備のため、平成 26 年度は (1) 更新整備工程計画の検討、(2) 臨界実験炉心の基本設計、(3) 可動装荷物駆動装置の基本設計、及び (4) 炉室フード水密化の検討を実施した。(1) では更新炉の整備に必要な主要作業の内容と所要期間を整理し、クリティカルパスを明確にした整備工程表を作成した。(2) ではデブリ模擬臨界実験を行う基本炉心を 3 種類選定し、感度解析によって当該実験が国際的にみて優秀な精度が確保できる見通しを得た。本設計にあたっては、仏国放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN) を訪問し、解析手法、解析対象パラメータについての知見を取り入れた。(3) ではデブリ模擬体を炉心に挿入するために使用する可動装荷物駆動装置の基本設計を行い、構造を具体化するとともに機器仕様を詳細化した。(4) では更新炉の炉心が津波に水没することを防ぐための炉室フード水密化の設計検討を行い、想定される津波に対して防水性能が確保できる見通しを得た。

デブリ模擬体調製設備について、ペレット収納庫、作業台等の設計を完了するとともに粉碎混合機及び焼結炉用冷却水循環装置を購入した。また、更新炉のドライバ燃料について、国内外からの調達ルート进行调查し、各ルートに付随する条件をあきらかにするとともに、調達費用を見積った。

STACY 更新炉の機器の性能を確認するためのモックアップ試験として、原子炉停止装置である安全板の加振試験を 2 回実施し、地震による加振を受けても安全板が確実に挿入されることを確認した。また反応度制御に使用する水位計の温度影響を確認するためのモックアップ装置の設計及びモックアップ試験計画を立案した。

デブリ模擬体分析設備として、幅広い組成を持つデブリ模擬体の分析に対応するための分析項目及び手法を検討し、基本設計を実施した。本設計にあたり、海外の燃料ペレット加工事業者等を訪問し、分析・測定的项目、方法、装置及び精度を調査した。また、放射線モニタリング設備の一部機器を製作するとともに、水分測定装置及び乾式自動密度計を購入した。

12.4 専門家の意見聴取

臨界管理、リスク評価及び燃料材料の専門家 4 名で「福島燃料デブリ臨界評価研究専門部会」を組織し、2 回の会合を持った。1 回目の会合では本事業の計画を、2 回目の会合で本事業の成果を検討・議論した。これらの会合には原子力規制庁からもオブザーバーが参加し、コメントしている。

主要な意見として、臨界リスク評価では様々なシナリオを検討しなければならないが、個々のシナリオは具体的でなければならない、というものがある。この具体性は評価に用いる臨界特性データにも求められる。つまり、想像される燃料デブリ性状を網羅するように臨界マップを整備する一方で、燃料デブリ性状のより現実的な可能性を絞り込み臨界マップ上に示すことを急ぐべきとされた。臨界リスク評価の目的は環境影響評価であることも明確に示された。例えば敷地境界線量がリスクを示す指標となり得る。その上でシナリオ分析に必要な情報は事業者が最も豊富に持つはずなので、情報の提供を受けるべく連携すべき、とされた。

12.5 提言

燃料デブリの臨界による公衆被ばくは基準値を超えてはならない。また、そのリスクはできる限り低減する必要がある。現在の長期維持管理状態における臨界リスクを低減するために、臨界のシナリオを想定し、対策と有効性の検討を早急に行う必要がある。5.4 節に示したように、いずれのシナリオにおいても臨界の終息条件が自明ではないので、何らかの対策によって終息を図る必要がある。

まずは事業者が 5.3 節の方法により起因事象と終息条件（すなわちシナリオ）を想定し、それぞれのシナリオについて、ホウ素投入等の方法が有効であることを確認するとともに、有効ではなかった場合にどのような代替手段があるのかを併せて検討しておく必要がある。また、それらの事業者による検討結果を規制行政も共有し、それぞれの専門的見地から起因事象の網羅性、シナリオの妥当性、対策の有効性を検討すべきである。

第 13 章 今後の計画

13.1 全体計画

平成 26 年度事業は前節までに述べたように計画通りに完了した。予算等、本事業を取巻く外部環境に大きな変化は見られない。一方、1F 廃炉工程が修正され、燃料デブリ取出しが号機によって当初計画よりも遅れるとされている。しかしながら規制支援の観点では、1F 廃炉工程の修正に関わらず、1F 廃炉工程に余裕を持って本事業成果を提供することが望ましい。

したがって、1.2 節で述べた事業の目的、1.3 節に掲げた事業の基本方針、及び 2.1 節に示した全体計画は修正を要しない。

ただし、事業を図 13-1 に示すとおりに再編する。「燃料デブリ臨界リスク評価基準整備」は、臨界マップの整備そのものであり、この内容に特化する。一方、この基準を用いてリスクを評価する手法の整備は、その目的が環境影響評価であることから、新たに「環境影響評価手法の整備」の課題を設ける。臨界実験による臨界マップの検証実験も、リスク評価基準の検証と位置付け、「臨界実験による臨界リスク評価基準の検証」と称する。

事業内訳	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
(1) 燃料デブリ 臨界リスク 評価基準 整備	← 臨界量計算・不確かさ解析 →		★臨界マップ作成	← 臨界マップの稠密化(高精度化) →				
			← 高燃焼度燃焼燃料の核種組成分析 及び燃焼計算コードの検証 →		← 臨界制限量計算(質量・寸法・濃度等) →			
					← 実デブリ試料分析及び臨界特性評価 →			
(2) 環境影響 評価手法の 整備	← 臨界リスク評価(解析ベース) →			★臨界リスク評価手法 (解析ベース)提案	★臨界リスク評価手法 (実験検証ベース)提案		← 臨界リスク評価(実験検証ベース) →	
(3) 臨界実験 による 臨界リスク 評価基準の 検証	○臨界実験装置 ← 設計・製作・据付 →		← モックアップ試験 →		← 燃料調達 →	★初臨界	← 臨界試験 →	
	○デブリ模擬体調製設備 ← 設計・製作・据付・検査 →		← コールド試験 →		← デブリ模擬体調製 →			
	○デブリ模擬体分析設備 ← 設計・製作・据付・検査 →		← デブリ模擬体分析 →					

図 13-1 再編した事業全体のスケジュール (計画)

13.2 平成 27 年度計画

再編した全体計画の第 2 年度として、平成 27 年度事業を以下のとおり計画する。

(1) 燃料デブリ臨界リスク評価基準整備

- ① 密度、ウラン含有率、水分含有率、非均質性等のパラメータを変化させ、臨界計算コード等を用いて臨界特性を系統的に解析することにより、平成 26 年度事業で整備を開始した臨界リスク評価基準に鉄を含有した燃料デブリの情報を追加する。
- ② 上記①の臨界リスク評価基準の情報を格納するデータベース機能、及び燃料デブリ性状が新たに判明した際に臨界解析を行う機能を統合したシステムの整備を進める。

(2) 環境影響評価手法の整備

- ① 燃料デブリ取出しに向けた準備作業及び取出し作業を想定した臨界リスク評価を支援するツールを試作する。試作したツールを用いて典型的な事象について臨界リスク評価を試みる。精度と効率の面から、放射性物質環境放出、作業被ばく等の評価の技術課題を検討する。
- ② 臨界リスク評価手法、評価結果の反映方法等について、国際会議への参加、海外研究機関訪問等により調査する。

(3) 臨界実験による臨界リスク評価基準の検証

- ① 臨界リスク評価基準の検証実験に用いる臨界実験装置について、燃料デブリの取り得る性状範囲を参考に検討した実験炉心構成及び平成 26 年度事業のモックアップ試験に基づき、装置の設計を詳細化し、装置の製作ほか必要な工事を進める。この設計・製作・工事では、実験目的を達するための性能、並びに装置及び実験の安全の確保を考慮する。
- ② 本事業で実施する実験が、国際的水準で評価しても優秀な精度を確保できるように、実験計画・設計・施工管理手法に関する知見を保有する欧米の研究機関を訪問、又は国際会議・プロジェクト等に参加し、調査及び意見交換を実施する。
- ③ 臨界実験に用いるデブリ模擬体の調製設備及び分析設備について、既存加工施設における燃料ペレット製作、デブリ模擬体試作等のプロセス条件を参考にした設計を詳細化し、設備の製作ほか必要な工事を進める。
- ④ 臨界実験に用いる燃料（燃料デブリ模擬体及びドライバ燃料）について、平成 26 年度事業の調査結果を参考に調達計画の最適化を図り、原料の調達に着手する。
- ⑤ 臨界実験装置の性能（安全性能を含む）確保のため、反応度制御に用いる給排水系スイッチ類等事前確認が必要な機器類の精度・性能保証等に係るモックアップ試験を実施する。

(4) 専門家の意見聴取

本事業の実施にあたっては、燃料デブリや臨界管理等の専門家（4 人程度）と意見交換を 2 回程度行い、妥当性を確認しながら進める。

