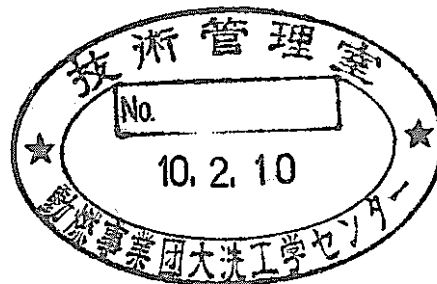


炉内中性子検出器照射試験装置の基本設計

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年6月



株式会社 東 芝

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1997年6月

炉内中性子検出器照射試験装置の基本設計

荻原 栄*、 小川 不二雄*
白川 利久*、 小泉 賢三**
泉 幹雄***

要旨

FBR実証炉では、広域系中性子検出器を炉内の高温ナトリウム中で使用することを想定しており、高感度で高温下においても安定した作動特性を有する信頼性の高い広域系中性子検出器を開発する必要がある。これまで広域系中性子検出器として、従来の核分裂計数管の高感度化、耐高温性向上を目指した開発が進められており、試作、試験を通じて基本特性を確認する炉外試験が終了している。しかしながら、広域系中性子検出器の健全性確認のためには照射温度及び積算照射等の実証炉実機の使用条件を模擬した照射試験による検証が不可欠である。

本検討では、実証炉用広域系中性子検出器照射試験装置の基本設計として、照射試験装置の構造強度設計、流力振動設計、遮へい設計を行った。また照射試験装置の設置方法、据え付け方法、炉上部の設置上の取り合い及び計測系について検討を行った。

構造強度設計では、第3種管を適用して構造評価を行い、十分に基準を満足し、余裕のある設計となっている結果が得られた。また、強度計算を実施し、設計応力は、第1種管相当の評価でも、十分に余裕のある結果が得られた。さらに流力振動に対する健全性評価を行い、案内管先端部の細い部分についてもASME Code Section III Appendix Nの評価で同期振動領域の回避ができること、またこの時の応力振幅も設計疲労限以下であり十分に余裕のある結果が得られた。遮へい設計については、照射試験装置の遮へい計算を原子炉の運転中と停止中について行い、いずれの場合も回転プラグ上部ピット室での線量は目標線量を十分に下回る結果が得られた。

本報告書は、(株)東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約に基づいて実施した業務の成果である。

契約番号 ; 081C0110

事業団担当課 ; 大洗工学センター 実験炉部技術課

事業団担当者 ; 青山卓史

*) (株)東芝 磯子エンジニアリングセンター 動力炉開発部

***) (株)東芝 京浜事業所 原子炉機器部

****) (株)東芝 原子力技術研究所 電子応用システム担当

一方照射試験装置の設置についても検討を実施し、しゃへいプラグ上面でのCRDの作業性を考慮した寸法とした。また据え付け、撤去については既設の特性試験キャスクを用いて行う手順を検討した。計測系については、照射試験装置の電気計測制御システム及びリファレンス検出器について検討を行い、リファレンス検出器として、オンラインの小型Y線検出器を選定した。

目次

要旨

目次

図表リスト

1. はじめに	1
2. 照射試験装置の基本設計	2
2. 1 構造強度設計	2
2. 1. 1 中性子検出器照射試験装置構造設計	2
2. 1. 2 規格計算書	12
2. 1. 3 中性子検出器照射試験装置の強度計算書	29
2. 2 流力振動設計	61
2. 2. 1 緒言	61
2. 2. 2 設計条件	61
2. 2. 3 設計疲労限	61
2. 2. 4 計算箇所	61
2. 2. 5 計算	62
2. 2. 6 評価	64
2. 3 遮へい設計	74
2. 3. 1 設計条件及び計算条件	74
2. 3. 2 中性子検出器照射試験装置の主要形状	75
2. 3. 3 計算	75
2. 3. 4 評価	77
2. 3. 5 照射装置周辺部のリークの状況	95
2. 4 中性子検出器加熱装置の設置及び交換方法の検討	97
2. 4. 1 装置の設置方法について	97
2. 4. 2 使用途中での交換方法について	97
3. 照射試験装置の取り合い検討	98
3. 1 据え付け・撤去の取り合い検討	98
3. 1. 1 概要	98
3. 1. 2 据え付け取り合い検討	98
3. 1. 3 撤去取り合い検討	100

3. 2 炉上部の取り合い検討	106
3. 2. 1 CRD 駆動部との干渉検討	106
3. 2. 2 炉心上部機構上面との取り合い	106
3. 3 計測系検討	110
3. 3. 1 中性子計測系の検討	110
3. 3. 2 電気制御設備検討	113
3. 3. 3 リファレンス用検出器の検討	114
4. まとめ	133

謝辞

表リスト

- 表2. 1-1 中性子検出器照射試験装置の設計仕様
- 表2. 1-2 ケーブル仕様一覧表
- 表2. 1-3 中性子検出器照射試験装置の応力評価（第一種管での評価）
- 表2. 1-4 熱サイクル時に対する評価
- 表2. 1-5 プラスト圧に対する評価
- 表2. 1-6 インパルスに対する評価
- 表2. 2-1 流力振動に対する健全性評価（1）
- 表2. 2-2 流力振動に対する健全性評価（2）
- 表2. 3-1 中性子源（3列）
- 表2. 3-2 1次冷却材Na中2次γ線源（3列）
- 表2. 3-3（1/2）カバーガス中FPγ線源強度
- 表2. 3-3（2/2）1次Na冷却材中FPγ線源強度
- 表2. 3-4（1/3）運転中FPからのγ線源
- 表2. 3-4（2/3）運転中Na22, 24からのγ線源
- 表2. 3-4（3/3）運転中Ar41, Ne23からのγ線源
- 表2. 3-5 運転中中性子リーク
- 表2. 3-6 運転中1次Na冷却材中からの2次γ線リーク
- 表2. 3-7（1/7） 運転中γ線源毎のγ線束
- 表2. 3-7（2/7） 運転中1次Na冷却材液面からのFPによるγ線リーク
- 表2. 3-7（3/7） 運転中1次Na冷却材液面からのNa24によるγ線リーク
- 表2. 3-7（4/7） 運転中カバーガス中Ar41, Ne23（回転プラグ下）によるγ線リーク
- 表2. 3-7（5/7） 運転中カバーガス中FP（回転プラグ下）によるγ線リーク
- 表2. 3-7（6/7） 運転中1次Na冷却材中検出器先端からのFPによるγ線リーク
- 表2. 3-7（7/7） 運転中1次Na冷却材中検出器先端からのNa24によるγ線リーク
- 表2. 3-8 停止中1次Na冷却材中からの2次γ線リーク
- 表2. 3-9（1/2） 運転中線量率計算結果
- 表2. 3-9（2/2） 停止中線量率計算結果
- 表2. 3-10 回転プラグと照射装置間隙間からのリーク
- 表3. 3-1 測定項目一覧と試験装置
- 表3. 3-2 炉心第3列検出器設置位置付近での中性子束及びγ線束計算結果
- 表3. 3-3 主な炉内中性子検出器の照射試験時の出力予測と仕様（100%出力時、試験体中心）

表 3. 3 - 4 主な炉内 γ 線検出器の仕様と照射試験時の出力予測 (100%出力、試験体中心)

図リスト

- 図2. 1-1 原子炉の圧力バウンダリ境界図
- 図2. 1-2 常陽 炉内中性子検出器照射試験装置組立手順図 (1/3)
- 図2. 1-3 組立手順図 (2/3)
- 図2. 1-4 組立手順図 (3/3)
- 図2. 1-5 案内管(上)の規格計算箇所
- 図2. 1-6 内管の規格計算箇所
- 図2. 1-7 延長管シール部の規格計算箇所
- 図2. 1-8 中性子検出器照射試験装置応力評価点
- 図2. 2-1 中性子検出器照射試験装置流力振動検討図
- 図2. 2-2 モデル図
- 図2. 2-3 振動モード図
- 図2. 2-4 計算結果と回避領域の位置関係
- 図2. 3-1 主要形状図
- 図3. 1-1 常陽 炉内中性子検出器照射試験装置キャスク内収納状態図
- 図3. 1-2 常陽 炉内中性子検出器照射試験装置取扱機収納状態図
- 図3. 1-3 常陽 炉内中性子検出器照射試験装置ハンドリングキャップ詳細図
- 図3. 1-4 装荷手順図
- 図3. 1-5 取り出し手順図
- 図3. 2-1 平面配置図
- 図3. 2-2 炉内NISとCRD駆動部の位置関係図
- 図3. 2-3 炉心上部機構との取合い図
- 図3. 3-1 測定装置の構成図
- 図3. 3-2 電気計測制御設備のシステム構成
- 図3. 3-3 原子炉出力における検出器位置に対する中性子検出器(RS-C6-0201-278)の出力予測値
- 図3. 3-4 原子炉出力における検出器位置に対するγ線検出器(WL-24275)の出力予測値
- 図3. 3-5 原子炉出力における検出器位置に対するγ線検出器(LPRM 改良)の出力予測値
- 図1 全体組立図
- 図1' 全体組立図
- 図2 案内管先端部詳細図
- 図2' 案内管先端部詳細図
- 図3 案内管上部ケーブル引廻し図
- 図4 回転プラグ廻り詳細図

1. はじめに

FBR実証炉では、広域系中性子検出器を炉容器内の高温ナトリウム中で使用することが想定されており、高感度で高温・高放射線条件下においても安定した信頼性の高い作動特性が要求されている。このため、中性子検出器を炉容器内で使用するための健全性評価においては、検出器設置位置における環境条件を模擬した照射試験が不可欠となる。

本報告書では、この照射試験を「常陽」で実施する際に必要となる照射試験装置の基本設計を実施する。照射場所として制御棒予備孔（3B3）を選定した場合の照射試験装置の構造強度計算、流力振動計算及び遮へい計算を実施し、照射試験装置の健全性を確認する。また照射試験装置の据え付け方法、炉上部での取り合い及び計装系の検討を行うものである。

2. 照射試験装置の基本設計

2.1 構造強度設計

2.1.1 中性子検出器照射試験装置構造設計

(1) 構造設計

中性子検出器を1体組み込み（東芝型）照射する試験装置の全体図を図—1に示す。また、各部の詳細図（先端部、ケーブル引き回しおよび回転プラグ廻り）を図—2～4にそれぞれ示す。

本体案内管外径寸法は、炉心上部機構の据付孔（ $\phi 152$ ）に入るように $\phi 150$ mmのパイプ形状である。また、先端部は挿入性を考慮してテーパ状（ $\phi 86$ ）としている。このテーパ状をした先端部に中性子検出器を組み込み保持する内管（回転プラグ部からつながっている）との間に絶縁体を挟み組み立てている。

中性子検出器を包んでいる内管の外面には電気ヒータ（ $1\text{ kW} \times 3$ 本）を巻き付けており、中性子検出器を約 650°C まで昇温するようにしており、温度制御は中性子検出器外面で測定している。また、中性子検出器と内管との間隙部には、ガンマ線検出器を1本挿入している。

内管の外側と案内管内壁間および内管内には、ナトリウム温度測定の熱電対等のケーブルが配置されており、これらのケーブルの合計は表2. 1-2に示すように12本組み込まれている。

案内管と内管の間にはヒーターからの発生する熱の上部への対流防止のため、ピストンリングを設けて防止している。

中性子検出器等から出たケーブル類は、内管の内部（ナトリウム温度測定の熱電対を除く）を通り、上部の生体しゃへい部で周方向に引き回しストリーミングの防止を行っており、回転プラグ上面付近で二次バウンダリー部を貫通する（図—2参照）。この部分は、中性子検出器の先端の端末部（BNCコネクタ処理部）が通過できるように回転プラグ上面付近の内管内のしゃへい体に約 $\phi 29$ の孔（中性子検出器が通過する部分のみ）をあけ通している。他のケーブルについては、引き回し後に端末処理を行うために小さな孔に通している。この二次バウンダリー部のケーブルのシールにコンプレッション・シーリング（商品名：コナックス）を用いる計画である。

回転プラグ上から出たケーブルは上部ハウジング内でMIケーブルからソフトケーブルにつなが変えている。上部ハウジング上面には、ケーブル類が二次バウンダリー部を貫通させるためにハーメチックシールコネクタ（日立原町製、使用実績あり）を用いて取り出している。（図—4参照）

なお、炉心上部機構整流格子の流力振動防止のために、案内管先端部をスカート状の支持構造にして、整流格子内面に当て、炉心上部機構整流格子および案内管の流力振動防止

のための支持構造設計については、次期詳細設計で検討する必要がある。

表 2. 1 - 1 に中性子検出器照射試験装置の設計仕様を示す。

(2) 原子炉圧力バウンダリーの考え方

中性子検出器照射試験装置の実際の原子炉の圧力バウンダリーは、案内管（上）から案内管先端の熱電対ウエルまでであるが、設工認申請時の原子炉の圧力バウンダリーの境界を図2. 1-1に示す。図で分かるように、回転プラグ付近のシール部を第3種管の範囲とした。このうちシール部（特に熱電対等のシース線が貫通している部分のエポキシ等のシール部）については、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（MITI501号）の第1条1項の条文より適用除外と考える。

第1条1項の条文は以下の通り

(2) 非金属であつて、機器の一部を形成しているが、その機器の漏洩防止、監視等のために必要なもので、かつ、非金属でないと用をなさないもの（例：ゴム、ガラス（別表第1に解説されているので注意されたし）、合成樹脂（ガラスと同様）等）

なお、常陽での本実施例は、UPR、INTAおよびCRD上部案内管等で用いられており、UPRの場合は、構造図にも上記、合成樹脂（エポキシ）が表示されており問題ないと考える。

表2. 1-1 中性子検出器照射試験装置の設計仕様

項 目		設 計 条 件	
プラント 条 件	原子炉熱出力		140 MW
	一次冷却Na温度	原子炉出口	500℃
		原子炉入口	350℃
中 性 子 検 出 器 照 射 試 験 装 置	機 器 種 別		第3種管
	設計温度	Na接液部	550℃ (500℃)
		回転プラグ上面	150℃ (34℃)
		回転プラグ内	150℃~550℃
	設計圧力	内 圧	1.0 kgf/cm ² (0.3 kgf/cm ²)
		外 圧	1.0 kgf/cm ² (100mmAq)
	耐 震 条 件		Aクラス
	しゃへい設計線量当量率	運 転 中	320 μSv/hの1/10
		炉停止1時間後	20 μSv/hの1/10
	装 荷 位 置		3B3 (制御棒予備孔)
	ヒータ加熱条件		最大650℃で24時間運転
	試験装置取扱機	装置据付	特性試験用キャスク
		装置撤去	制御棒上部案内管取扱機
	軸方向取合寸法	炉心上部機構上面	GL-3136mm (運 転 中)
			GL-3116mm (燃料交換中)
炉心上部機構下面		GL-9460mm (運 転 中)	
		GL-9440mm (燃料交換中)	
燃料頂部		GL-9490mm	

注1) : ()内は運転中を示す。

表2. 1-2 ケーブル仕様一覧表

No.	ケーブル名	線径	本数	備考
1	中性子検出器	5.0	1	先端部にコネクタ処理あり(φ23)
2	ガンマ検出器	5.0	1	先端部にコネクタ処理あり(φ23)
3	炉心出口温度計	3.2	1	熱電対 ^{注2}
4	中性子検出器加熱用	3.2	3	熱電対 ^{注2}
5		3	6	ヒータ(3本×2) ^{注2}

注2) 中性子検出器およびガンマ検出器以外はシースケーブルの状態引き回し、最終的に端末処理を行う。

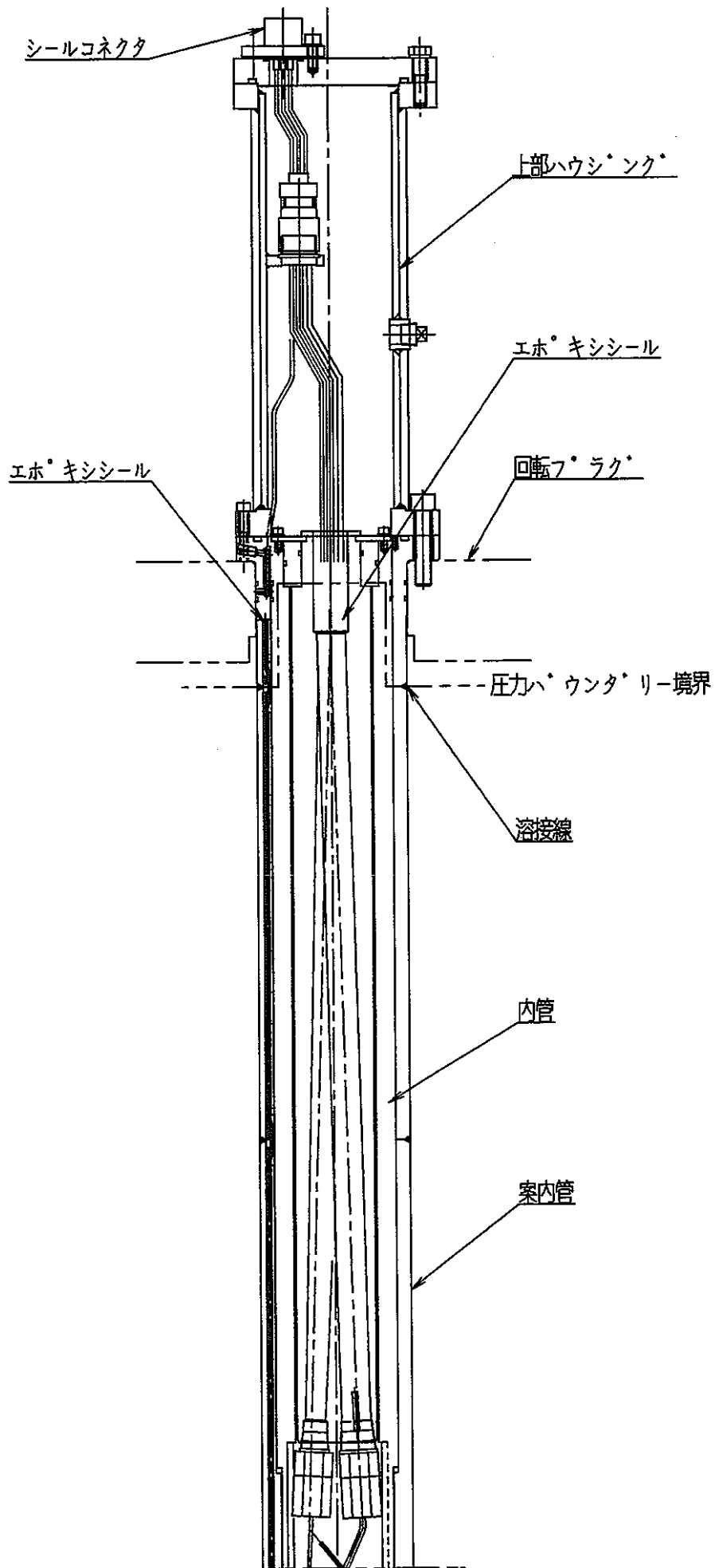


図2. 1-1 原子炉の圧力バウンダリー境界図

(3) 組立手順

中性子検出器加熱装置の組立手順を図 2. 1 - 2 ~ 4 に示す。組立手順を図を用いて説明する。

- イ) 管の中性子検出器より上側を管理区域外で組み立てる。このときに案内管部および内管先端部の熱電対のみ組み込んでおく。
- ロ) 案内管部を組み立て場所（管理区域）で内管の挿入作業ができるように縦置きする。
- ハ) 内管先端に中性子検出器を絶縁体を介して組み込み、ガンマ検出器、熱電対およびヒーターを組み込む。
- ニ) ケーブル類の引き回しを行い、内管部を組み立てる。
- ホ) 内管部を吊り込み、案内管内に挿入する。この時、案内管先端部の熱電対を引き回しながら行う。
- ヘ) 案内管と内管の組立作業を完了させる。
- ト) MI ケーブルからソフトケーブルへの繋ぎ作業を行い、上部案内筒を組み込み、先端部にキャノンプラグを取り付ける。
- チ) 上部案内筒の上側に装荷用ハンドリングキャップを取り付ける。
- リ) 特性試験用簡易キャスクに収納し、炉上部に据え付けボルト締めを行う。
- ヌ) 炉上部に据付後、キャノンプラグからハーメチックシールコネクター部間を組み立てる。
- ル) 電気試験および漏洩試験を行う。

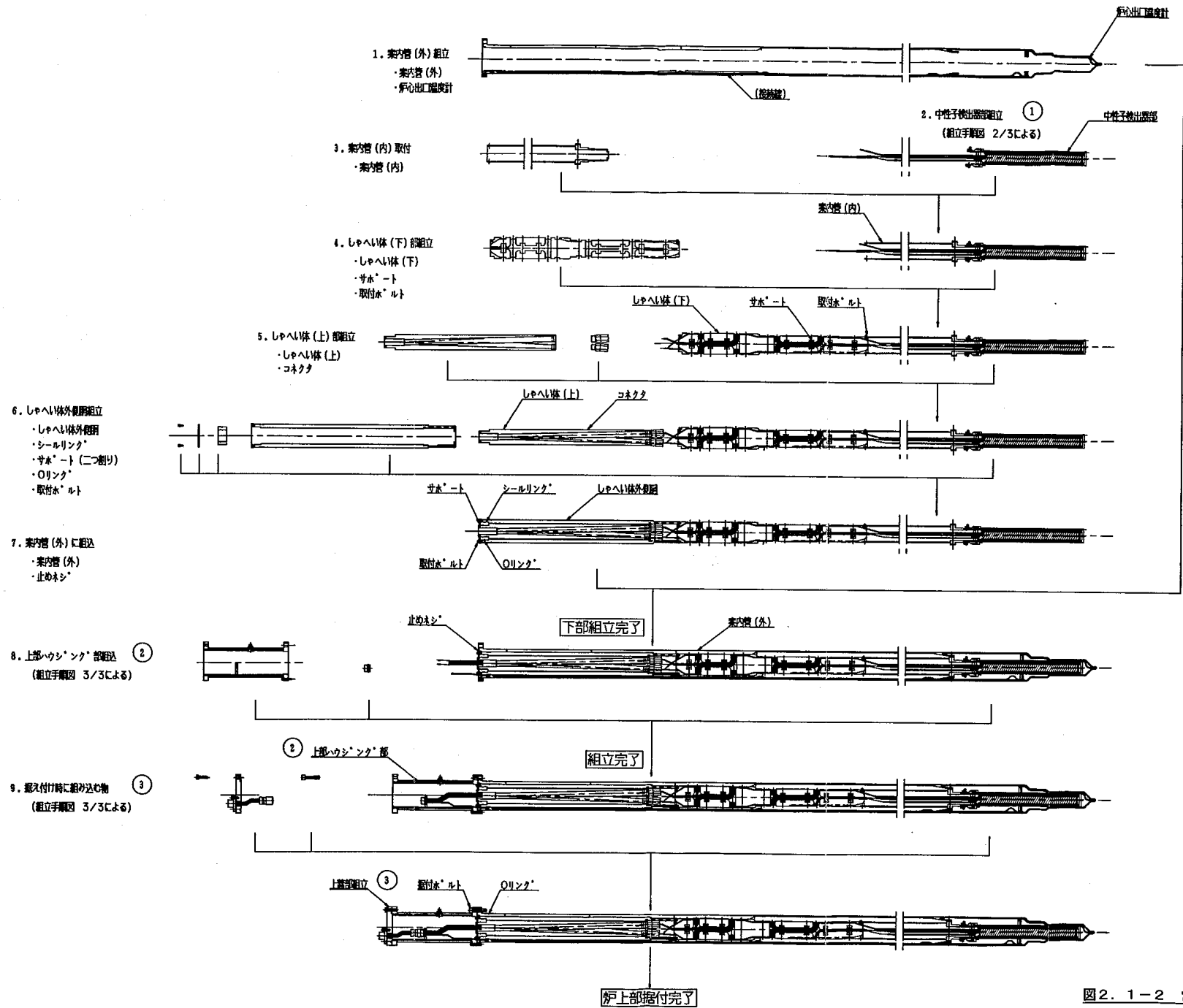
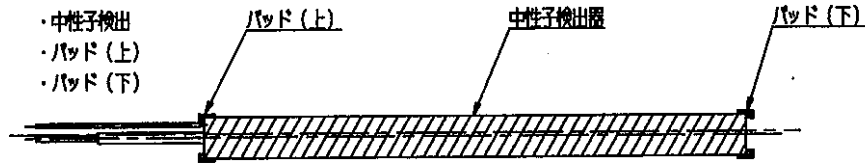


図 2. 1-2 常陽 炉内中性子検出器照射試験装置
組立手順図 (1/3)

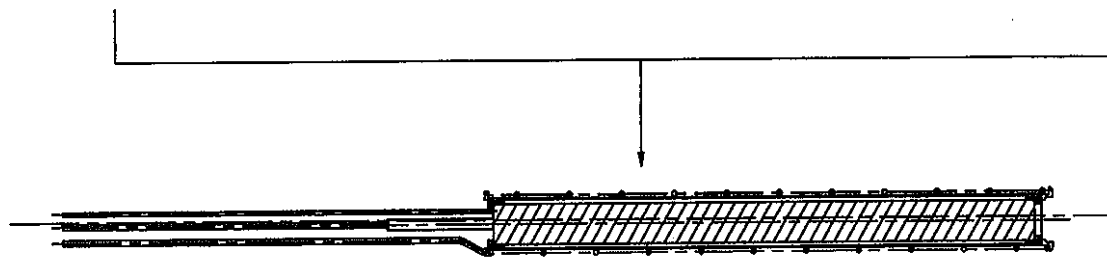
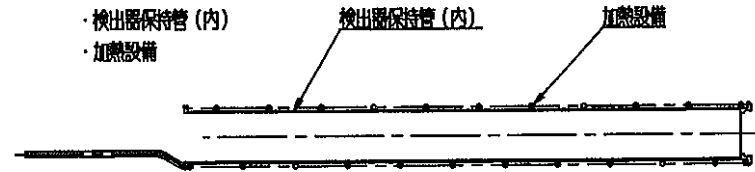
2.1 中性子検出器の組立

- ・中性子検出
- ・パッド(上)
- ・パッド(下)



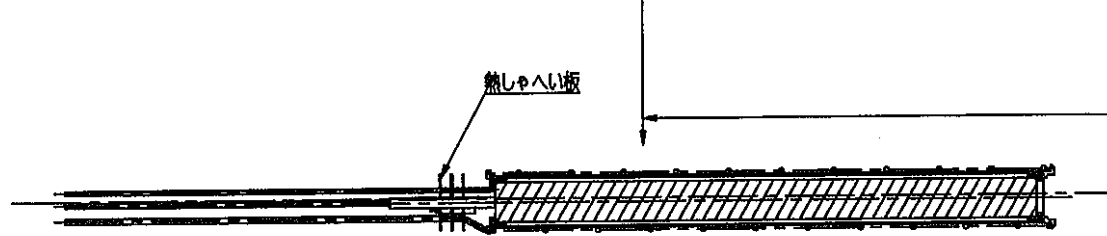
2.2 検出器保持管の組立

- ・検出器保持管(内)
- ・加熱設備

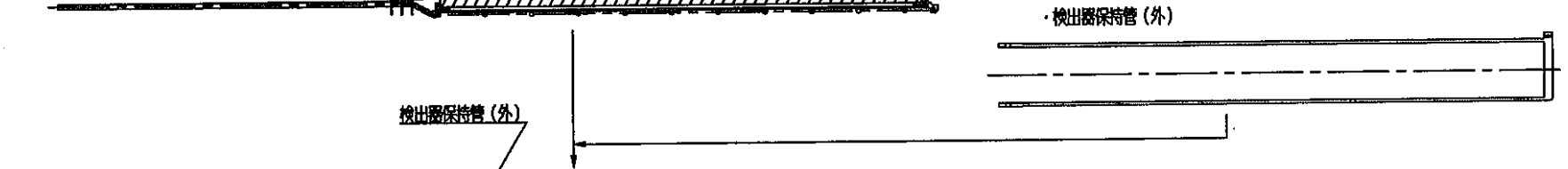


2.3 熱しゃへい板の組込

- ・熱しゃへい板

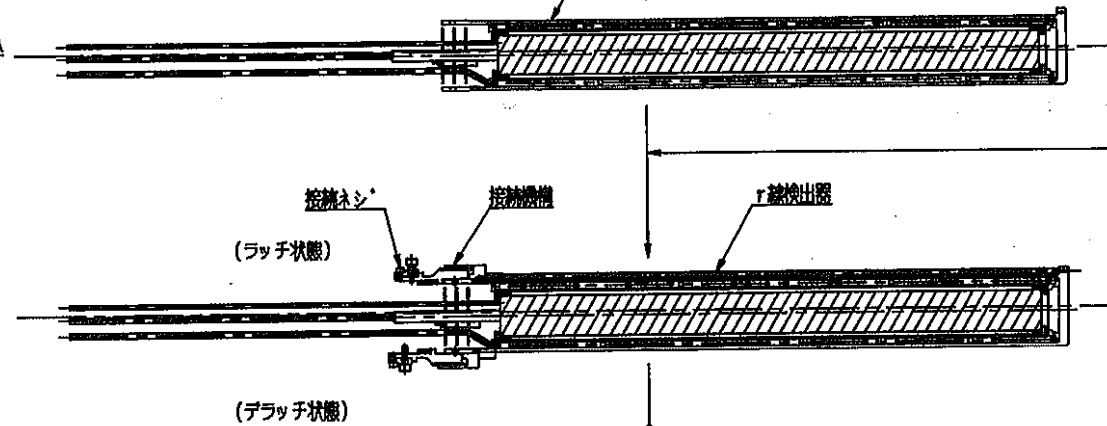


2.4 検出器保持管(外)の組込



2.5 その他の部品の組込

- ・r線検出器
- ・接続機構



組立完了 ①

図 2. 1-3 組立手順図 (2/3)

8.2 上蓋部組立

- ・上蓋
- ・取付ホルト
- ・シールコネクタ
- ・Oリング
- ・ストレートフック
- ・ケーブルクランプ

8.1 上部ハウジング部の取付

- ・上部ハウジング
- ・固定ホルト
- ・フック
- ・Oリング
- ・レセプタクル
- ・シャヘイ体

11

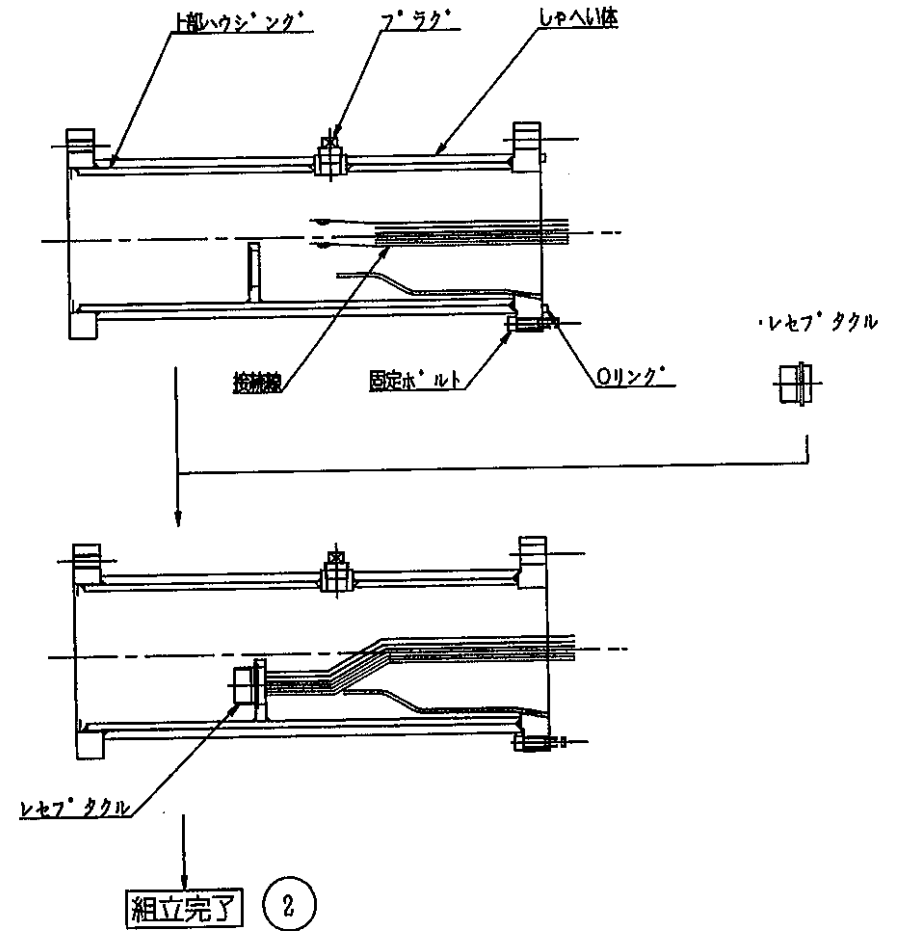
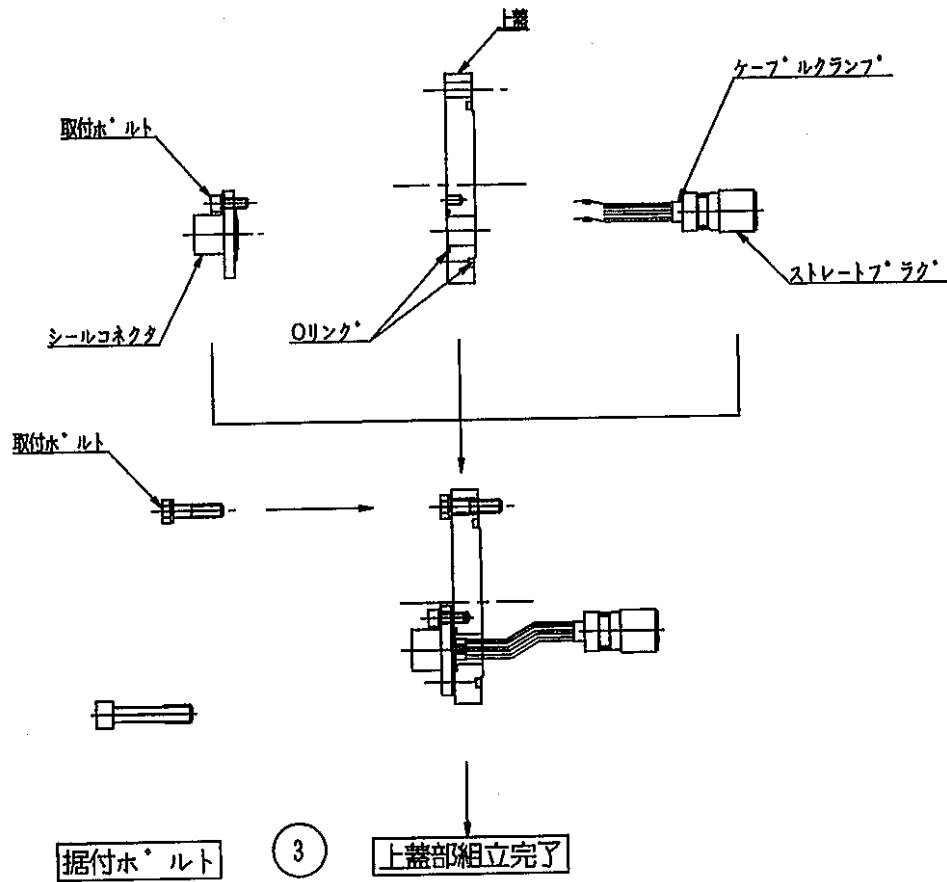


図2. 1-4 組立手順図 (3/3)

2.1.2 規格計算書

(1) 概要

本計算書は、中性子検出器照射試験装置の規格計算結果を示すものである。なお、中性子検出器照射試験装置の規格計算は、通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（以下「通商産業省告示第501号」という。）を準用している。

中性子検出器照射試験装置は、総理府令第74号「試験研究の用に供する原子炉等の溶接の技術基準に関する総理府令」を適用して第3種管とする。

(2) 荷重条件

(a) 最高使用圧力

案内管	1. 0 kg/cm ² (内圧)
	1. 0 kg/cm ² (外圧)
内 管	1. 0 kg/cm ² (内圧)
	1. 0 kg/cm ² (外圧)
延長管	1. 0 kg/cm ² (内圧)
	1. 0 kg/cm ² (外圧)

(b) 最高使用温度

案内管 (回転プラグ上面付近)	150℃ (内圧)
	150℃ (外圧)
内 管 (回転プラグ上面付近)	150℃ (内圧)
	150℃ (外圧)
延長管 (回転プラグ上面付近)	150℃ (内圧)
	150℃ (外圧)

(3) 許容応力

第3種管の許容応力は「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針の7項より求めた。許容応力一覧表を添付資料-1に示す。

(4) 規格計算箇所

規格計算箇所を図2. 1-5～図2. 1-7に示す。

案内管（上）規格計算箇所

No.	名称	章 項
①	案内管（上）	(5)(a)、(6)(a)

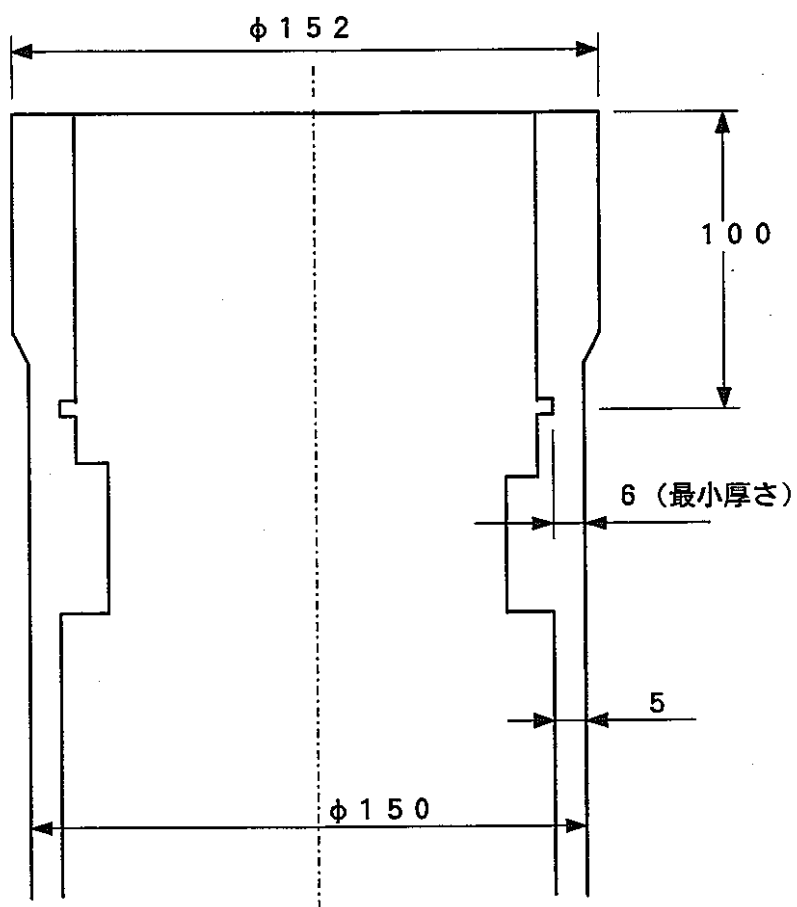


図2. 1-5 案内管（上）の規格計算箇所

内管の規格計算箇所

No.	名 称	章 項
②	延 長 管	(5)(b)、(6)(b)

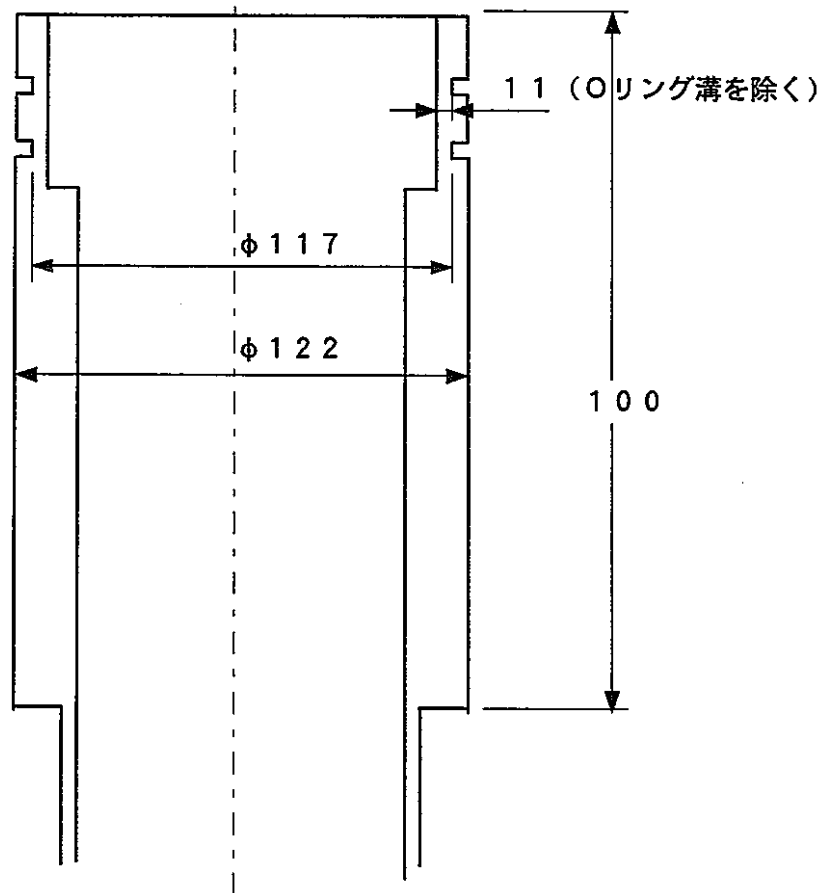


図2. 1-6 内管の規格計算箇所

延長管規格計算箇所

No.	名 称	章 項
③	延長管	(5)(c), (6)(c)

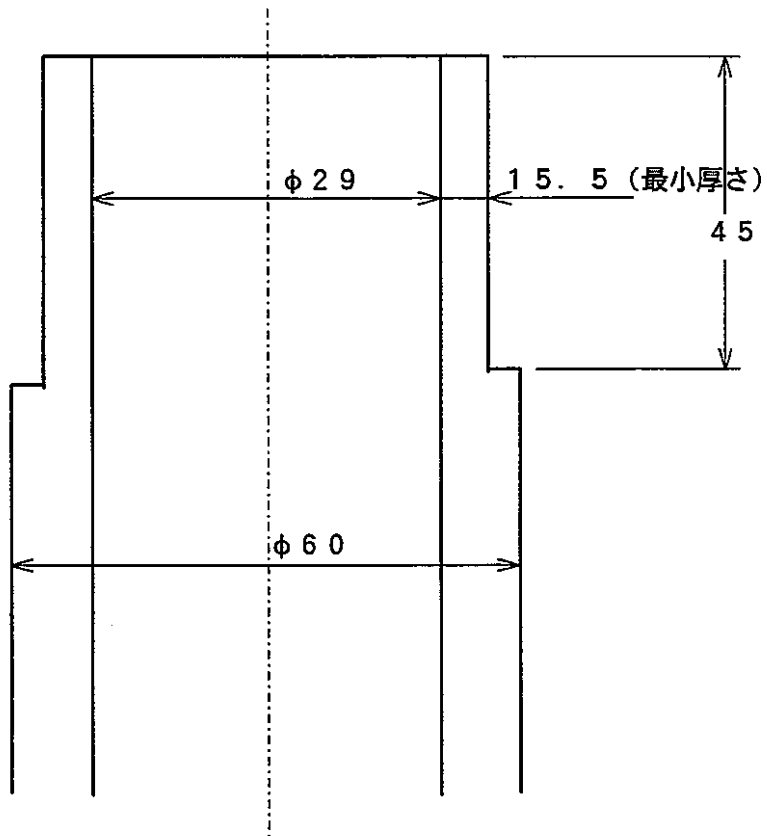


図 2. 1 - 7 延長管シール部の規格計算箇所

(5) 強度計算

以下に中性子検出器照射試験装置の第三種管に該当する部分の規格計算を示す。

(a) 案内管(上)の厚さの計算

案内管(上)の必要厚さを「通商産業省告示第501号」第58条第1項により行う。

イ) 第1号 : 内面に圧力を受ける管

以下に示す式により内面に圧力を受ける管の必要厚さを計算する。

$$t_1 = \frac{PD_o}{200S\eta + 0.8P}$$

ロ) 第2号 : 外面に圧力を受ける管

以下に示す式により外面に圧力を受ける管の必要厚さを計算する。

$$t_2 = \frac{3P_e D_o}{4B}$$

使用材料		SUS316
最高使用圧力	内圧 P (kg/cm ²)	1.0
	外圧 P _e (kg/cm ²)	1.0
最高使用温度	内圧時 (°C)	150
	外圧時 (°C)	150
管の外径 D _o (m)		152.0
許容引張応力 S (kg/mm ²)		10.2
継手効率 η		1.00
必要厚さ t ₁ (mm)		0.08
B (別図第14より求めた値)		300
必要厚さ t ₂ (mm)		0.38
t ₁ , t ₂ の大きい値 (mm)		0.38
呼び厚さ t _{s0} (mm)		15.0
最小厚さ t _s (mm)		5.0
t _s ≥ t よって十分である		

外圧計算時 L/D_o = 0.657 (100/152)

Bは添付資料-2より板厚を仮定しながら求めた。(B = 300)

(b) 内管の厚さの計算

内管の必要厚さを「通商産業省告示第501号」第58条第1項により行う。

イ) 第1号 : 内面に圧力を受ける管

以下に示す式により内面に圧力を受ける管の必要厚さを計算する。

$$t_1 = \frac{PD_o}{200S\eta + 0.8P}$$

ロ) 第2号 : 外面に圧力を受ける管

以下に示す式により外面に圧力を受ける管の必要厚さを計算する。

$$t_2 = \frac{3P_e D_o}{4B}$$

使用材料		SUS316
最高使用圧力	内圧 P (kg/cm ²)	1.0
	外圧 P _e (kg/cm ²)	1.0
最高使用温度	内圧時 (°C)	150
	外圧時 (°C)	150
管の外径 D _o (m)		117.0
許容引張応力 S (kg/mm ²)		10.2
継手効率 η		1.00
必要厚さ t ₁ (m)		0.06
B (別図第14より求めた値)		280
必要厚さ t ₂ (m)		0.31
t ₁ , t ₂ の大きい値 (mm)		0.31
呼び厚さ t _{s0} (m)		11.0
最小厚さ t _s (mm)		10.5
t _s ≥ t よって十分である		

外圧計算時 L/D_o = 0.85 (100/117)

Bは添付資料-2より板厚を仮定しながら求めた。(B = 280)

(c) 延長管の厚さの計算

延長管の必要厚さを「通商産業省告示第501号」第58条第1項により行う。

イ) 第1号 : 内面に圧力を受ける管

以下に示す式により内面に圧力を受ける管の必要厚さを計算する。

$$t_1 = \frac{PD_o}{200S\eta + 0.8P}$$

ロ) 第2号 : 外面に圧力を受ける管

以下に示す式により外面に圧力を受ける管の必要厚さを計算する。

$$t_2 = \frac{3P_e D_o}{4B}$$

使用材料		SUS316
最高使用圧力	内圧 P (kg/cm ²)	1.0
	外圧 P _e (kg/cm ²)	1.0
最高使用温度	内圧時 (°C)	150
	外圧時 (°C)	150
管の外径 D _o (m)		60.0
許容引張応力 S (kg/mm ²)		10.2
継手効率 η		1.00
必要厚さ t ₁ (m)		0.03
B (別図第14より求めた値)		280
必要厚さ t ₂ (m)		0.16
t ₁ , t ₂ の大きい値 (mm)		0.16
呼び厚さ t _{s0} (m)		15.5
最小厚さ t _s (mm)		14.5
t _s ≥ t よって十分である		

外圧計算時 L/D_o = 0.75 (45/60)

Bは添付資料-2より板厚を仮定しながら求めた。(B = 280)

(6) 応力計算

(a) 案内管(上)の応力計算

案内管(上)の応力計算は、「通商産業省告示第501号」第56条第1項により行う。

イ) 第1号 : 最高使用圧力および機械的荷重(長期的荷重に限る)による1次応力

$$S(イ) = \frac{PD_o}{400t} + \frac{0.75i_1Ma}{Z}$$

ロ) 第1号 : 短期的荷重を含む1次応力

$$S(ロ) = \frac{P_m D_o}{400t} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

ハ) 第2号イ : 運転状態Ⅰおよび運転状態Ⅱにおける1次および2次応力

$$S_n(イ) = \frac{PD_o}{400t} + \frac{0.75i_1M_a + i_2M_c}{Z}$$

ニ) 第2号ロ : 運転状態Ⅰおよび運転状態Ⅱにおける1次および2次応力
(短期的荷重を含む)

$$S_n(ロ) = \frac{P_m D_o}{400t} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b) + i_2M_c}{Z}$$

ホ) 第2号ハ : 許容応力

$$S_a(ハ) = 125fS_c + (1 + 0.25f)Sh$$

ヘ) 第2号ニ : 許容応力

$$S_a(ニ) = 125fS_c + (12 + 0.25f)Sh$$

最高使用温度 P (kg/cm ²)	1. 0	最高使用温度 (°C)	150
内面に受ける最高の圧力	P _m (kg/cm ²)		1. 1 注3
長期機械荷重によるモーメント	M _a (kg-mm)		1. 038×10 ⁴ 注4
短期機械荷重によるモーメント	M _b (kg-mm)		—
熱による支持点の変位及び熱膨張によるモーメント	M _c (kg-mm)		—
管の外径 D _o (mm)	150. 0	管の厚さ t (mm)	6
管の断面係数	Z (mm ³)		9. 39×10 ⁴
応力係数 i ₁	1. 33	応力係数 i ₂	1. 0
内圧応力 S _p = $\frac{PD_o}{400t}$ (kg/mm ²)	0. 07	S _{pm} = $\frac{P_m D_o}{400t}$ (kg/mm ²)	0. 07
長期機械荷重応力 SM _a = $\frac{0.75i_1 M_a}{Z}$ (kg/mm ²)			0. 12
短期機械荷重応力 SM _b = $\frac{0.75i_1 M_b}{Z}$ (kg/mm ²)			—
二次応力 SM _c = $\frac{i_2 M_c}{Z}$ (kg/mm ²)			—
許容応力低減係数 f			1. 0
室温における許容応力 S _c (kg/mm ²)			10. 5 注5
使用温度における許容応力 S _h (kg/mm ²)			10. 2 注5
応力の計算値 (kg/mm ²)			許容応力 (kg/mm ²)
S (イ) = S _p + SM _a = 0. 19			S = 10. 2
S (ロ) = S _{pm} + SM _a + SM _b = 0. 19			1. 2 S = 12. 2
S _n (イ) = S _p + SM _a + SM _c = 0. 19			S _a (ハ) = 25. 8
S _n (ロ) = S _{pm} + SM _a + SM _b + SM _c = 0. 19			S _a (ニ) = 27. 9
よって十分である。			

注3) : 安全弁があるとして P_m = 1. 1 P とした。(1. 1 × 1)

注4) : 自重を 300 kg と仮定して引張応力を曲げモーメントに換算した。

$$M_a = \frac{300}{\frac{\pi}{4}(150^2 - 138^2)} \times 9.39 \times 10^4$$

$$= 1.038 \times 10^4 \text{ (kg mm)}$$

注5) : 添付資料-1による。

(b) 内管の応力計算

内管の応力計算は、「通商産業省告示第501号」第56条第1項により行う。

イ) 第1号 : 最高使用圧力および機械的荷重(長期的荷重に限る)による1次応力

$$S(\text{イ}) = \frac{PD_o}{400t} + \frac{0.75i_1M_a}{Z}$$

ロ) 第1号 : 短期的荷重を含む1次応力

$$S(\text{ロ}) = \frac{P_m D_o}{400t} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

ハ) 第2号イ : 運転状態Ⅰ及び運転状態Ⅱにおける1次および2次応力

$$S_n(\text{イ}) = \frac{PD_o}{400t} + \frac{0.75i_1M_a + i_2M_c}{Z}$$

ニ) 第2号ロ : 運転状態Ⅰおよび運転状態Ⅱにおける1次および2次応力
(短期的荷重を含む)

$$S_n(\text{ロ}) = \frac{P_m D_o}{400t} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b) + i_2M_c}{Z}$$

ホ) 第2号ハ : 許容応力

$$S_a(\text{ハ}) = 125fS_c + (1 + 0.25f)Sh$$

ヘ) 第2号ニ : 許容応力

$$S_a(\text{ニ}) = 125fS_c + (1.2 + 0.25f)Sh$$

最高使用温度 P (kg/cm ²)	1. 0	最高使用温度 (°C)	150
内面に受ける最高の圧力	P _m (kg/cm ²)		1. 1 注6
長期機械荷重によるモーメント	M _a (kg-mm)		3. 64 × 10 ³ 注7
短期機械荷重によるモーメント	M _b (kg-mm)		-
熱による支持点の変位及び熱膨張によるモーメント	M _c (kg-mm)		-
管の外径 D _o (mm)	117. 0	管の厚さ t (mm)	11. 0
管の断面係数	Z (mm ³)		8. 89 × 10 ⁴
応力係数 i ₁	1. 33	応力係数 i ₂	1. 0
内圧応力 S _p = $\frac{PD_o}{400t}$ (kg/mm ²)	0. 03	S _{pm} = $\frac{P_m D_o}{400t}$ (kg/mm ²)	0. 03
長期機械荷重応力 SM _a = $\frac{0.75i_1 M_a}{Z}$ (kg/mm ²)			0. 05
短期機械荷重応力 SM _b = $\frac{0.75i_1 M_b}{Z}$ (kg/mm ²)			-
二次応力 SM _c = $\frac{i_2 M_c}{Z}$ (kg/mm ²)			-
許容応力低減係数 f			1. 0
室温における許容応力 S _c (kg/mm ²)			10. 5 注8
使用温度における許容応力 S _h (kg/mm ²)			10. 2 注8
応力の計算値 (kg/mm ²)			許容応力 (kg/mm ²)
S (イ) = S _p + SM _a	= 0. 08	S	= 10. 2
S (ロ) = S _{pm} + SM _a + SM _b	= 0. 08	1. 2 S	= 12. 2
S n (イ) = S _p + SM _a + SM _c	= 0. 08	S _a (ハ)	= 25. 8
S n (ロ) = S _{pm} + SM _a + SM _b + SM _c	= 0. 08	S _a (ニ)	= 27. 9
よって十分である。			

注6) : 安全弁があるとして P_m = 1. 1 P とした。(1. 1 × 1)

注7) : 自重を 150 kg と仮定して引張応力を曲げモーメントに換算した。

$$\begin{aligned}
 M_a &= \frac{150}{\frac{\pi}{4}(117^2 - 95^2)} \times 8.89 \times 10^4 \\
 &= 3.64 \times 10^3 \text{ (kg mm)}
 \end{aligned}$$

注8) : 添付資料-1による。

(c) 延長管の応力計算

延長管の応力計算は、「通商産業省告示第501号」第56条第1項により行う。

イ) 第1号 : 最高使用圧力および機械的荷重(長期的荷重に限る)による1次応力

$$S(\text{イ}) = \frac{PD_o}{400t} + \frac{0.75i_1M_a}{Z}$$

ロ) 第1号 : 短期的荷重を含む1次応力

$$S(\text{ロ}) = \frac{P_m D_o}{400t} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b)}{Z}$$

ハ) 第2号イ : 運転状態Ⅰおよび運転状態Ⅱにおける1次および2次応力

$$S_n(\text{イ}) = \frac{PD_o}{400t} + \frac{0.75i_1M_a + i_2M_c}{Z}$$

ニ) 第2号ロ : 運転状態Ⅰおよび運転状態Ⅱにおける1次および2次応力
(短期的荷重を含む)

$$S_n(\text{ロ}) = \frac{P_m D_o}{400t} + \frac{0.75i_1(M_a + M_b) + i_2M_c}{Z}$$

ホ) 第2号ハ : 許容応力

$$S_a(\text{ハ}) = 125fS_c + (1 + 0.25f)Sh$$

ヘ) 第2号ニ : 許容応力

$$S_a(\text{ニ}) = 125fS_c + (12 + 0.25f)Sh$$

最高使用温度 P (kg/cm ²)	1. 0	最高使用温度 (°C)	150
内面に受ける最高の圧力	P _m (kg/cm ²)		1. 1 注9
長期機械荷重によるモーメント	M _a (kg-mm)		4. 64 × 10 ⁴ 注10
短期機械荷重によるモーメント	M _b (kg-mm)		—
熱による支持点の変位及び熱膨張によるモーメント	M _c (kg-mm)		—
管の外径 D _o (mm)	60. 0	管の厚さ t (mm)	15. 5
管の断面係数	Z (mm ³)		2. 01 × 10 ⁴
応力係数 i ₁	1. 33	応力係数 i ₂	1. 0
内圧応力 S _p = $\frac{PD_o}{400t}$ (kg/mm ²)	0. 01	S _{pm} = $\frac{P_m D_o}{400t}$ (kg/mm ²)	0. 01
長期機械荷重応力 SM _a = $\frac{0.75i_1 M_a}{Z}$ (kg/mm ²)			0. 03
短期機械荷重応力 SM _b = $\frac{0.75i_1 M_b}{Z}$ (kg/mm ²)			—
二次応力 SM _c = $\frac{i_2 M_c}{Z}$ (kg/mm ²)			—
許容応力低減係数 f			1. 0
室温における許容応力 S _c (kg/mm ²)			10. 5 注11
使用温度における許容応力 S _h (kg/mm ²)			10. 2 注11
応力の計算値 (kg/mm ²)			許容応力 (kg/mm ²)
S (イ) = S _p + SM _a = 0. 04			S = 10. 2
S (ロ) = S _{pm} + SM _a + SM _b = 0. 04			1. 2 S = 12. 2
S n (イ) = S _p + SM _a + SM _c = 0. 04			S _a (ハ) = 25. 8
S n (ロ) = S _{pm} + SM _a + SM _b + SM _c = 0. 04			S _a (ニ) = 27. 9
よって十分である。			

注9) : 安全弁があるとして P_m = 1. 1 P とした。(1. 1 × 1)

注10) : 自重を 50 kg と仮定して引張応力を曲げモーメントに換算した。

$$M_a = \frac{50}{\frac{\pi}{4}(60^2 - 29^2)} \times 2.01 \times 10^4$$

$$= 464 \text{ (kg mm)}$$

注11) : 添付資料-1による。

(7) 計算結果のまとめ

耐圧強度計算を実施した結果、必要厚さの計算についての基準を満足している。また、応力も許容応力に対し十分低い値になっている。

計算結果の概要を以下に示す。

計算箇所	必要厚さ (mm)	最小厚さ (mm)
案内管(上)	0.38	5.0
内管	0.31	10.5
延長管	0.16	14.5

温度	-30~ 40	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
温度による引張強さ×1/3 注12	14.1	14.1	14.1	14.1	13.5	12.8	12.1	11.6	11.3	11.0	10.8	10.6
温度による引張強さ (上記値×3)	42.3	42.3	42.3	42.3	40.5	38.4	36.3	34.8	33.9	33.0	32.4	31.8
引張強さによる許容応力 (bより)	10.5	10.5	10.5	10.5	10.1	9.6	9.0	8.7	8.4	8.2	8.1	7.9
温度による降伏強さ 注13	21.0	19.1	18.0	16.4	15.2	14.2	13.5	12.9	12.5	12.3	12.1	11.9
温度による降伏強さ×5/8	13.1	11.9	11.2	10.2	9.5	8.8	8.4	8.0	7.8	7.6	7.5	7.4
許容応力 注14	10.5	10.5	10.5	10.2	9.5	8.8	8.4	8.0	7.8	7.6	7.5	7.4

第3種管の許容応力の求め方：「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針8項による。

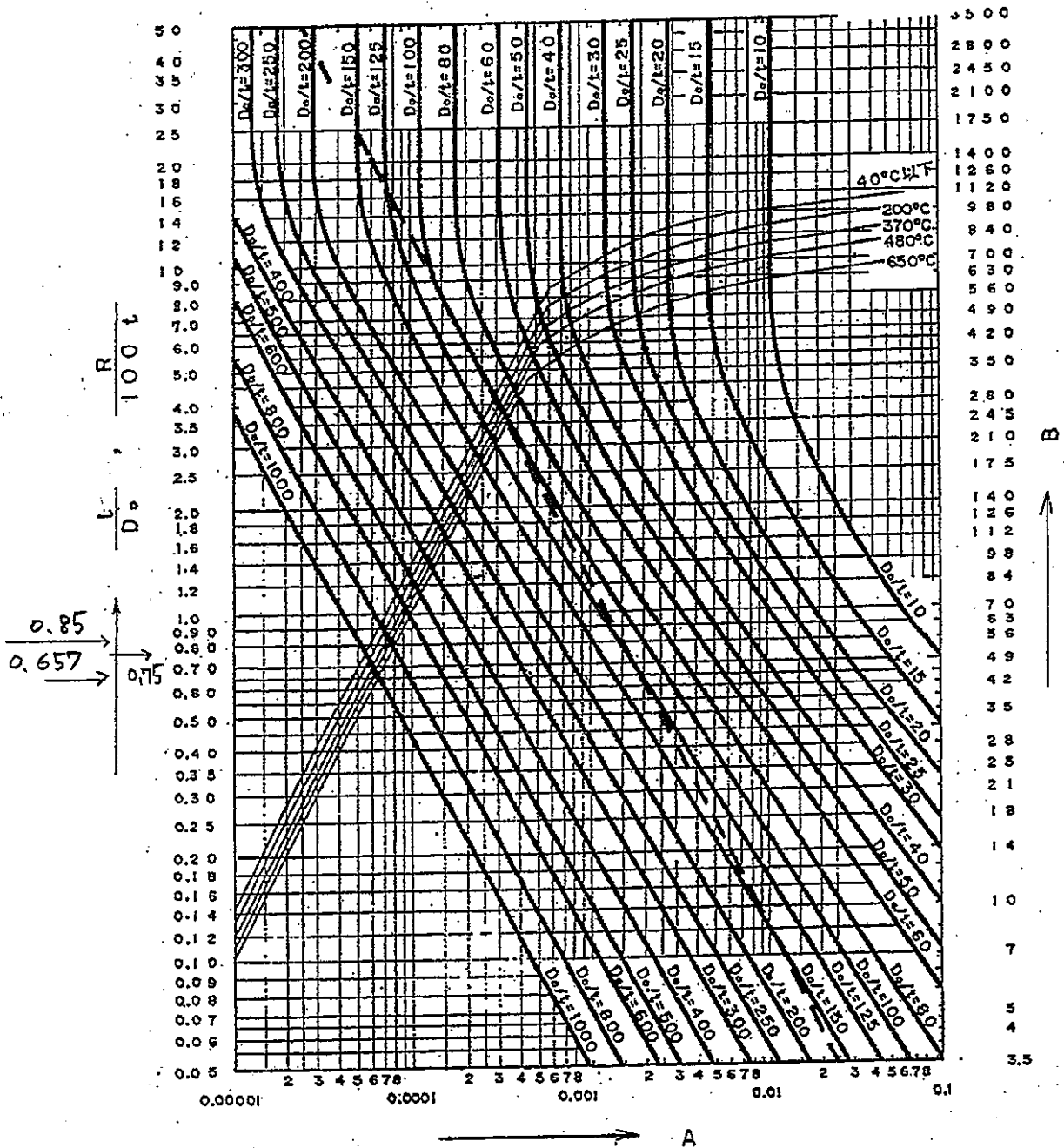
- a. 室温での引張強さの1/4
- b. 高温での引張強さの1/4
- c. 室温での降伏強さの5/8
- d. 高温での降伏強さの5/8
- e. オーステナイトステンレス鋼の場合は、降伏点の90%を、ただし室温での降伏点の5/8を越えないこと。

注12)：「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針図付3.5 "NaのSUS32の引張強さに及ぼす影響" による。

注13)：「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針表付1.1 "SUS32の降伏強さ" による。

注14)：高温での引張強さの1/4と高温での降伏強さの5/8のいずれかの小さい値。および降伏点の90%を越えないこと。

添付資料 - 2 別図第14 ステンレス鋼 (SUS 316, SUS 321 及び SUS 347)



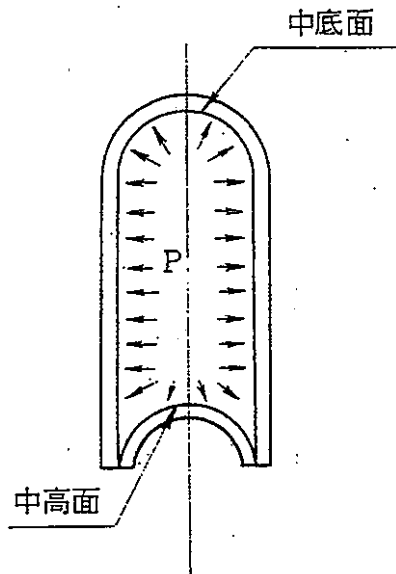
添付資料-3

3-2 中底面と中高面(第23条第2項)

質 問

中底面、中高面の意味はどうか。

回 答



中底面とは、図の上部鏡板に内圧がかかる面をいい、中高面とは、下部鏡板に内圧がかかる面をいう。

しかし、下部鏡板の場合は、内圧がかかっているにもかかわらず、鏡板に関してはいわゆる外圧がかかっているのと同じ状態となる。

従って、告示ではこれらを区別するために、中底面、中高面という用語を用いている。

出典：発電用原子力設備に関する構造等の技術基準
質疑応答集（63年改定版）

2.13 中性子検出器照射試験装置の強度計算書

(1) 緒言

本計算書は、中性子検出器照射試験装置の強度計算に関するものである。

応力評価は、

- (a) 上部ハウジング (図2. 1-8 A点)
- (b) 案内管 (図2. 1-8 B点)
- (c) 案内管先端部 (図2. 1-8 C点)
- (d) 熱電対ウェル部 (図2. 1-8 D点)
- (e) 本体据付ボルト (図2. 1-8 E点)
- (f) 上部ハウジング取付ボルト (図2. 1-8 F点)

について行った。応力評価点は、図2. 1-8に示す◎点である。

計算はJIS B 8273「圧力容器のボルト締めフランジ」(1993年改訂)等に基づいて行った。

なお、計算に考慮した荷重は、

- (a) 死荷重
- (b) 内圧及び外圧
- (c) 地震荷重
- (d) 熱荷重及び熱サイクル時の荷重
- (e) 再臨界事故による荷重

である。

(2) 設計条件

(a) 使用材料

管 材	JIS G 3459	SUS316TP
	JIS G 3459	SUS304TP
棒 材	JIS G 4303	SUS316
	JIS G 4303	SUS304
その他	JIS G 4105	3種 SCM435

(b) 温 度

単位：℃

場 所	設 計 温 度	運 転 温 度
案内管先端	550	500
ナトリウム液面より下側	550	500
ナトリウム液面～ 回転プラグ下面	150～550	～500
回転プラグ上面	130	34
炉上部ピット室	65	—

(c) 荷重

イ) 圧力(設計圧力)

① 設計圧力

上部ハウジング	内 圧	1. 0 kgf/cm ²
	外 圧	1. 0 kgf/cm ² (系内真空引き時)
案内管	内 圧	1. 0 kgf/cm ²

② 再臨界事故時

インパルス	$I_t = 0. 5 \text{ kgf}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$
プラスト圧	$p_a = 1. 5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

ロ) 地震荷重

水平加速度	$\alpha_h = 0. 794 \text{ g}$
垂直加速度	$\alpha_v = 0. 36 \text{ g}$

ハ) 死荷重

上部ハウジング	$W_1 = 30 \text{ kgf}$
案内管(含内蔵物)	$W_2 = 300 \text{ kgf}$
案内管先端部死荷重	$W_3 = 50 \text{ kgf}$

ニ) 機械荷重

① ボルト締付力

据付ボルト及び上部ハウジング取付ボルト(M16) $F = 10770 \text{ kgf}$ 注15

(注15) : ボルト1本当り $0. 15 \sigma_y$ の締付力を与える。

$$F = \frac{\pi}{4} \times 13.8^2 \times 80 \times 0.15 = 1795 \text{ kg} / \text{本}$$
$$= 10770 \text{ kgf}$$

木) 熱荷重

① 熱サイクル条件

A 通常状態

現象	熱サイクル条件		温度変化率 (°C/h r)	温度条件 (°C)
	回数 ^{注16}			
通常運転起動	1 2 5		5 0	1次ナトリウム ホットレグ 500-250
通常運転停止	1 2 5		5 0	
スクラム (制御棒一斉 挿入を含む) 後起動	2 5 0		5 0	

B 異常状態

現象	熱サイクル条件		温度変化率 (°C/sec)	継続時間 (sec)
	回数 ^{注16}			
制御棒一斉挿入	9 0		- 8 3	2 5
その他のスクラム (シャットダウン)	7 8			
中性子束高	2 0			
電源喪失	5 0		- 6 4	4 7

C 緊急状態

現象	熱サイクル条件		1次系ホットレグ (°C)
	回数 ^{注16}		
1次系1ループポンプスティック	5		5 0 2
1ループ1次2次同時ポンプトリップ	2		
2次系1ループポンプスティック	5		5 0 0
主冷却系ブロウ1ループ全数停止	2		5 0 3

D 損傷状態

現象	熱サイクル条件		温度変化率 (°C/sec)	継続時間 (sec)
	回数 ^{注16}			
1次系1ループポンプスティック および2次系他ループ破断	1		3. 6	3 4

(注16) : “「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針” より

$\frac{NIS設計寿命10年}{常陽寿命20年} = 0.5$: NISの熱サイクル回数は、常陽の0.5倍とする。

へ) 設計応力強さ

材 料	運転時間	-30~	100℃	150℃	500℃	550℃
		40℃				
SUS316 注17	S _m (s)	14.1	14.1	14.1	10.8	9.3
	S _m (t)	14.1	14.1	14.1	10.8	10.5
SUS304 注17	S _m (s)	14.1	14.1	14.0	10.2	7.8
	S _m (t)	14.1	14.1	14.0	10.2	9.7
SCM435 注18		26.7	23.3	22.2	-	-

ト) 材料の腐れ代

設計においてはナトリウムの効果を考慮^{注19}して、以下に示す腐れ代を採用した。

ナトリウムに接触する面に対して0.1 mm

① 一般腐食

$$a_G = C_o N_o + C_R N_R$$

ここに

a_G : 一般腐食による腐れ代 (mm)

C_o : 出力運転時の腐食率 550℃, 15ppm O₂ 1×10^{-2} (mm/year)

C_R : 停止時の腐食率 400℃, 50ppm O₂ 7×10^{-4} (mm/year)

N_o : 出力運転時間 7.5 (year)

N_R : ナトリウム注入後の停止時間 2.5 (year)

以上より

$$a_G = 0.1 \text{ mm}$$

② 局部腐食

局部腐食は、つぎの理由で考慮しない。

I) 中性子検出器照射試験装置は取換可能な機器である。

II) 微小破損による貫通孔ができて機能におよぼす影響が軽微である。

注17) : SUS316、SUS304は、「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針の第1種容器による。(4項参照)

注18) : SCM435は通商産業省告示501号別表2による。

注19) : 腐れ代の検討(「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針の9項による。)

(4) 計 算

(a) 使用記号

A : 断面積	(mm ²)
a : 曲げモーメントアーム長	(mm)
B : 内 径	(mm)
b : 幅	(mm)
C : ボルトピッチ円径	(mm)
D : 外 径	(mm)
E _b : ボルトのインパルスによるエネルギー吸収量	(kgf-mm)
E _t : インパルスによるエネルギー	(kgf-mm)
e : 偏心量	(mm)
F : 外 力	(kgf)
f : 係 数	(-)
G : ガasket径 (オーリング径)	(mm)
g ₁ : フランジハブ内厚 (= g o)	(mm)
H : フランジに作用する荷重	(kgf)
h : 高 さ	(mm)
I _t : インパルス	(kgf-sec/cm ²)
L : 係 数	(-)
ℓ : 長さ	(mm)
M : モーメント	(kgf-mm)
m : 質 量	(kgf-sec ² /cm)
P ₁ : 内 圧	(kgf/cm ²)
P ₂ : 外 圧	(kgf/cm ²)
P _B : プラスト圧	(kgf/cm ²)
Q : 係 数	(-)
r : 管の平均半径	(mm)
T : 係 数	(-)
T _r : トルク	(kgf-mm)
t : 厚 さ	(mm)
W : 荷重 (重量)	(kgf)
特につぎのように定める。	
W ₁ : 上部ハウジング死荷重	3 0 kgf
W ₂ : (案内管+内管) 死荷重	3 0 0 kgf
W ₃ : 案内管先端部死荷重 (kg)	5 0 kgf
Y : 係 数	(-)
Z : 断面係数	(mm ³)
α : 熱膨張係数	(1/°C)

a_G :腐れ代	(mm)
a_h :水平地震加速度	(g)
a_v :垂直地震加速度	(g)
β :係 数	(-)
θ :温 度	(°C)
ν :ポアソン比	(-)
ψ :温度勾配	(°C/mm)
σ :引張, 圧縮あるいは曲げ応力	(kgf/mm ²)
τ :せん断応力	(kgf/mm ²)
ε :歪	(-)
η :溶接効率	(-)
サフィックス	
b:曲 げ	
m:膜	
ℓ :軸方向	
t:接線方向	
r:半径方向	

(3) 形状・主要寸法及び応力評価点

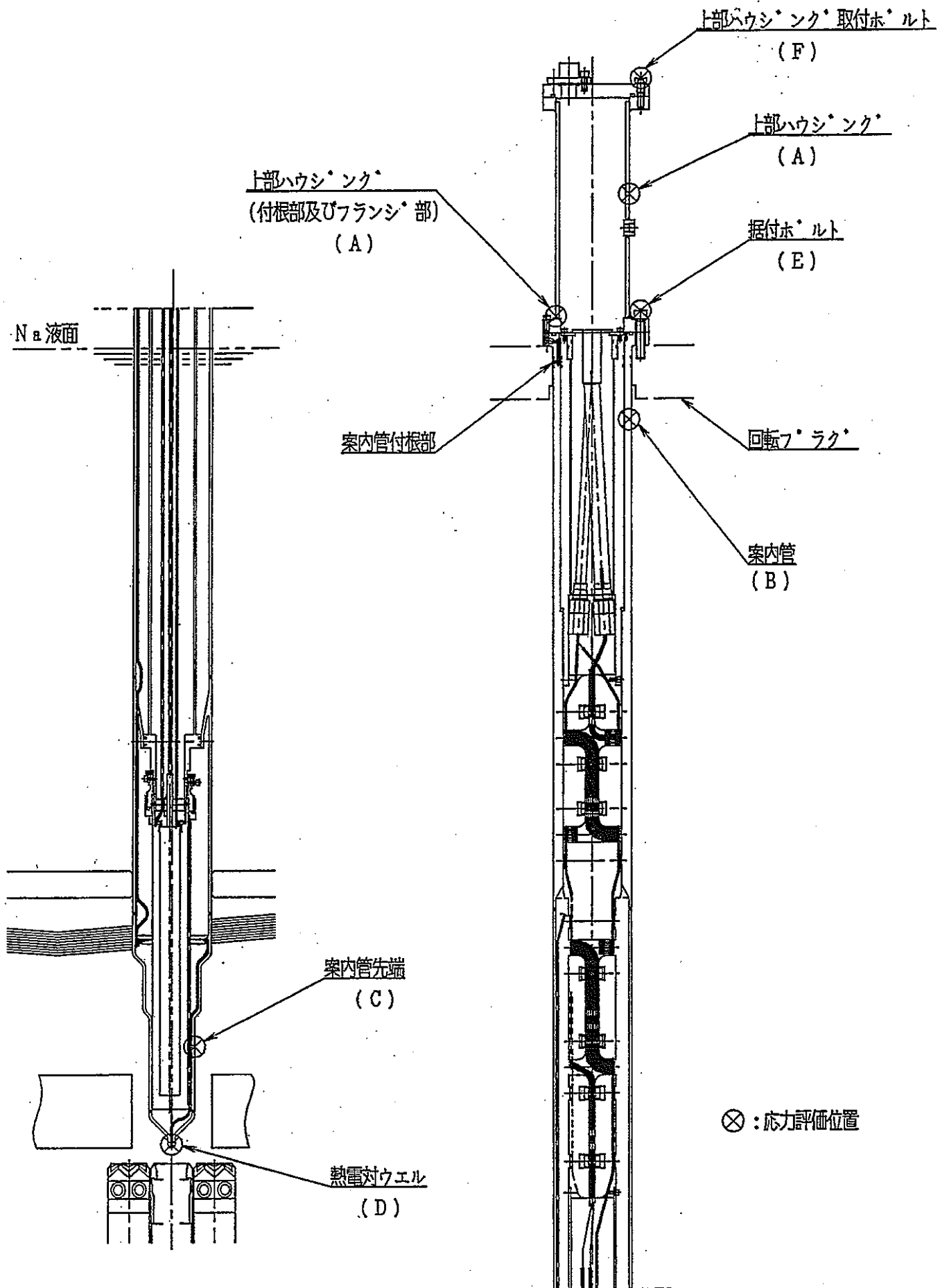


図2. 1-8 中性子検出器照射試験装置応力評価点

(b) 上部ハウジング (図2. 1-8 A点) (材質: SUS304)

(イ) 死荷重による応力 (ハウジング付根部の応力 (圧縮応力))

$$\sigma_t = \frac{W_1}{A}$$

$$= 0.02 \text{ kgf/mm}^2$$

$$W_1 = 30 \text{ kg}$$

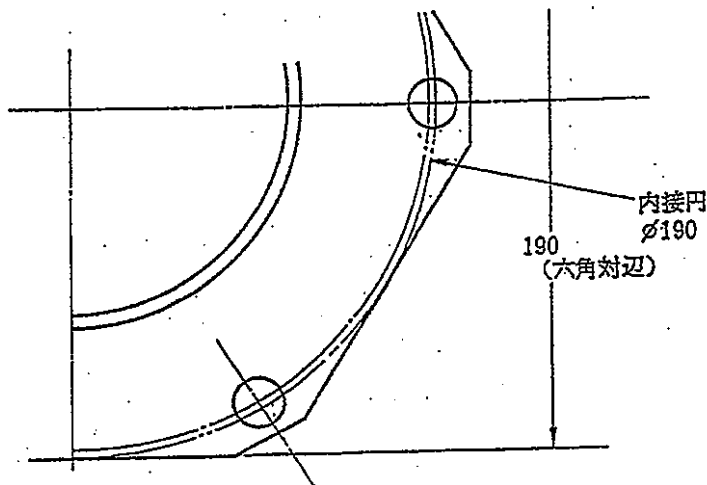
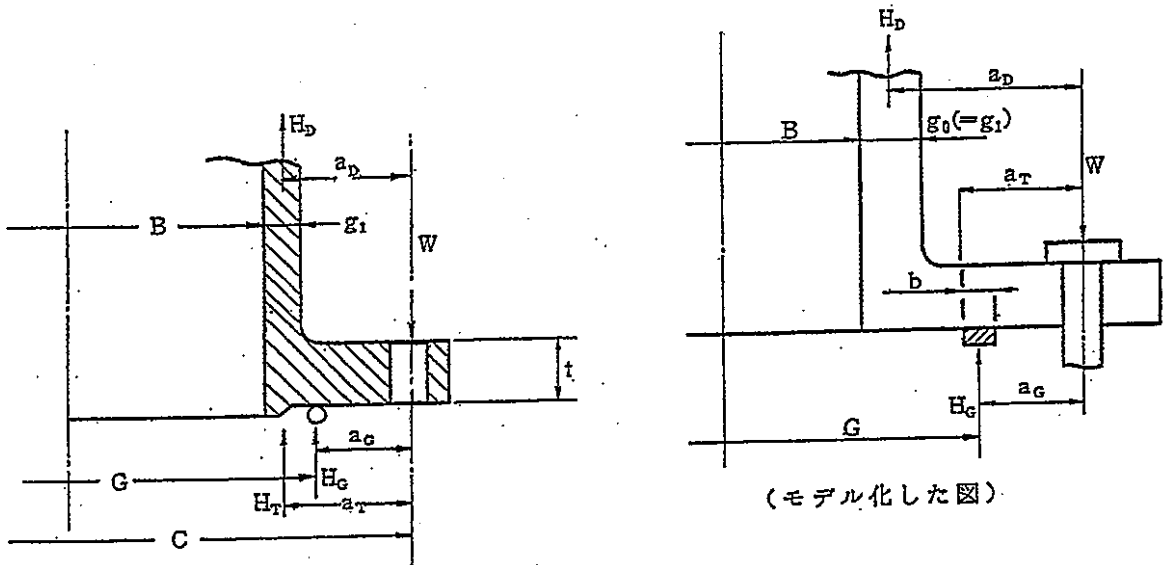
$$A = \frac{\pi}{4} (139.8^2 - 126.6^2)$$

$$= 2761 \text{ mm}^2$$

ロ) 内圧による応力

以下の計算は、JIS B 8273「圧力容器のボルト締めフランジ」(1993年改訂)によって行った。

① フランジ部の応力



ここで

$$B = 126.6 \text{ mm}$$

$$C = 184 \text{ mm}$$

$$G = 147.5 \text{ mm}$$

$$g_0 = g_1 = 6.6 \text{ mm}$$

$$t = 25 \text{ mm}$$

実際のフランジは、上図実線のように六角形をしているので計算を簡単にするため2点鎖線のような円輪と仮定して計算する。

I) ハブの軸方向応力

$$\sigma_t = \frac{fM}{Lg_1^2 B}$$

$$= 0.33 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8273 3.5 (2) 項による)

$$H_D = \frac{\pi}{400} B^2 P_1 = 126 \text{ kgf}$$

$$H_T = H - H_D = 45 \text{ kgf}$$

$$\text{(ただし } H = \frac{\pi}{400} G^2 P_1 = 171 \text{ kgf)}$$

$$H_G = W_0 - H$$

$$= W_{m1} - H$$

$$= H - H \text{ (ゴムの場合)}$$

$$= 0 \text{ kgf}$$

II) フランジの半径方向応力

$$\sigma_r = \frac{(1.33te+1)M}{Lt^2 B}$$

$$= 0.05 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8273 3.5 (2) 項による)

$f=1$ (「圧力容器のボルト締めフランジ」の図2による。以下図とあるのは同様である。)

$$M = (H_D \times a_D) + (H_G \times a_G)$$

$$+ (H_T \times a_T)$$

$$= 4257 \text{ kgf-mm}$$

$$\text{ここで } H_D = 126 \text{ kgf}$$

$$H_G = 0 \text{ kgf}$$

$$H_T = 45 \text{ kgf}$$

$$a_D = 25.4 \text{ mm}$$

$$a_G = 18.25 \text{ mm}$$

$$a_T = 23.475 \text{ mm}$$

$$L = \frac{te+1}{T} + \frac{t^3}{d}$$

$$= 2.3$$

$$\text{ここで } t = 25 \text{ mm}$$

$$e = 0.0315 \text{ mm}^{-1}$$

$$T = 1.71 \text{ mm (図7参照)}$$

$$\left(K = \frac{190}{126.6} = 1.5 \text{ より} \right)$$

$$d = 1.246 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$g_1 = 6.6 \text{ mm}$$

$$B = 126.6 \text{ mm}$$

$$C = 184 \text{ mm}$$

$$G = 147.5 \text{ mm}$$

$$P_1 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A = 190 \text{ mm (内接円とする)}$$

$$t = 25 \text{ mm}$$

$$e = 0.0315 \text{ mm}^{-1}$$

$$M = 4257 \text{ kgf-mm}$$

$$L = 2.3$$

$$B = 129 \text{ mm}$$

III) フランジの周方向応力

$$\sigma_t = \frac{YM}{t^2 B} - Q\sigma_r$$

$$= 0.14 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B 8273 3.5 (2) 項による)

$$Y = 4.95 \text{ (図7参照)}$$

$$M = 4257 \text{ kgf-mm}$$

$$t = 25 \text{ mm}$$

$$B = 126.6 \text{ mm}$$

$$Q = 2.6 \text{ (図7参照)}$$

$$\sigma_r = 0.05 \text{ kgf/mm}^2$$

② 胴部 (ハウジング付根部) の応力 (引張応力)

$$\sigma_t = \frac{P_1}{200\eta} \left[\frac{B}{g_0} + 1.2 \right]$$

$$= 0.11 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B 8271 3.2.1 (1) (a) による)

$$P_1 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$B = 126.6 \text{ mm}$$

$$g_0 = 6.6 \text{ mm}$$

$$\eta = 1$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_t}{2}$$

$$= 0.06 \text{ kgf/mm}^2$$

ハ) 地震荷重による応力

① 垂直震度による圧縮応力

$$\sigma_v = \pm \frac{F_v}{A}$$

$$= \pm 0.01 \text{ kgf/mm}^2$$

$$F_v = \alpha_v W_1$$

$$= 10.8 \text{ kgf}$$

$$\alpha_v = 0.36 g$$

$$W_1 = 30 \text{ kgf}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (139.8^2 - 126.6^2)$$

$$= 2761 \text{ mm}^2$$

② 水平震度による曲げ応力

$$\sigma_H = \pm \frac{F_H a_G}{Z}$$

$$= \pm 0.07 \text{ kgf/mm}^2$$

$$F_H = \alpha_h W_1$$

$$= 23.82 \text{ kgf}$$

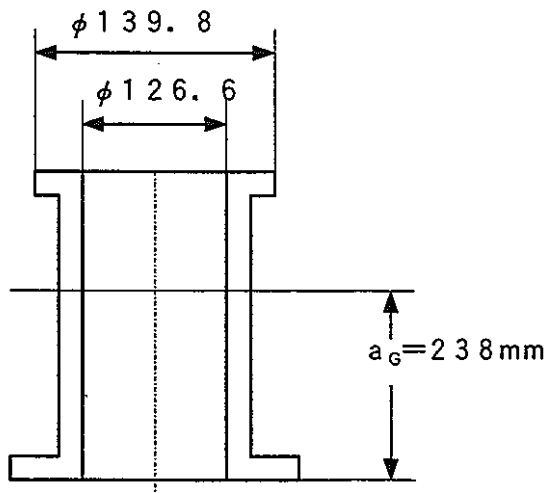
$$\alpha_h = 0.794 g$$

$$a_G = 238 \text{ mm}$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{(139.8^4 - 126.6^4)}{139.8}$$

$$= 8.78 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

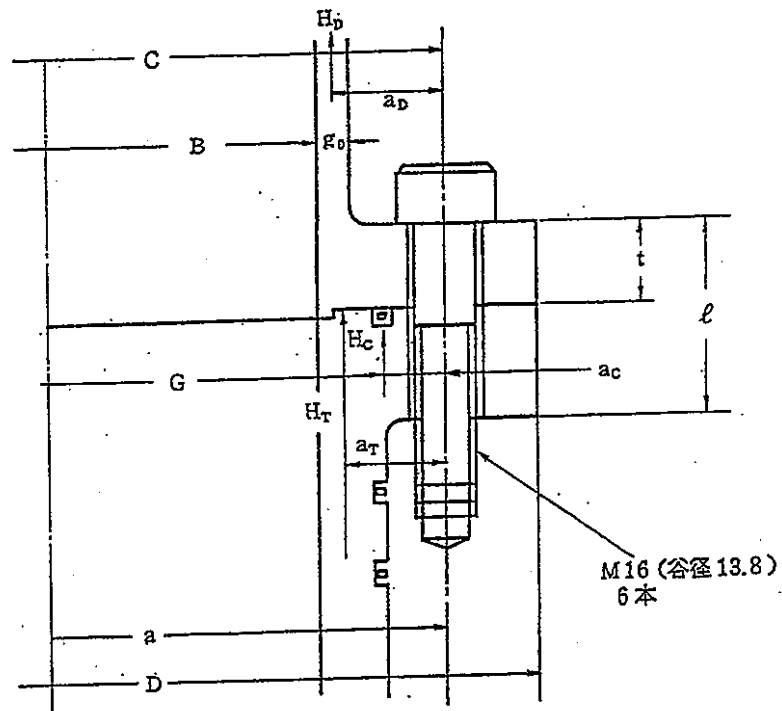
$$W_1 = 30 \text{ kgf}$$



(二) 再臨界事故時による応力 (ブラスト圧 15 kgf/cm^2)

ただし

- $C = 184 \text{ mm}$
- $B = 126.6 \text{ mm}$
- $G = 147.5 \text{ mm}$
- $a_T = 23.475 \text{ mm}$
- $a_G = 18.25 \text{ mm}$
- $a_D = 25.4 \text{ mm}$
- $D = 190 \text{ mm}$



再臨界事故時にはOリングシール径 (図-G寸法) 内にブラスト圧として 15 kgf/cm^2 を受けるとして、フランジを (b) 項におけると同様の形状に仮定して計算する。

計算は J I S B 8 2 7 3 「圧力容器のボルト締めフランジ」 (1993年改訂) に基づいて行った。

① ハブ軸方向応力

$$\sigma_t = \frac{fM}{Lg_1^2 B}$$

$$= 5.04 \text{ kgf/mm}^2$$

(J I S B 8 2 7 3 3.5 (2) 項による)

② フランジ半径方向応力

$$\sigma_r = \frac{(133te+1)M}{Lt^2 B}$$

$$= 0.72 \text{ kgf/mm}^2$$

(J I S B 8 2 7 3 3.5 (2) 項による)

③ フランジ周方向応力

$$\sigma_t = \frac{YM}{t^2 B} - Q\sigma_r$$

$$= 2.13 \text{ kgf/mm}^2$$

(J I S B 8 2 7 3 3.5 (2) 項による)

$$M = (H_D \times a_D) + (H_C \times a_C) + (H_T \times a_T)$$

$$= (1889 \times 25.4) + (0 \times 18.25) + (675 \times 23.475)$$

$$= 63830 \text{ kgf-mm}$$

$$H_D = \frac{\pi}{400} B^2 P_B = 1889 \text{ kgf}$$

$$H = \frac{\pi}{400} G^2 P_B = 2564 \text{ kgf}$$

$$H_T = H - H_D = 675 \text{ kgf}$$

$$H_C = W = 0$$

$$Q = 2.6$$

$$\sigma_r = 0.72 \text{ kgf/mm}^2$$

(c) 案内胴付根部 (図 2. 1-8、B 点) (材質: SUS 316)

(イ) 死荷重による応力

① 胴の一次膜応力

$$\sigma_t = \frac{W_2}{A}$$

$$= 0.06 \text{ kgf/mm}^2$$

$$W_2 = 300 \text{ kg}$$

$$A = \frac{\pi}{4}(147^2 - 122^2)$$

$$= 5281 \text{ mm}^2$$

② 胴の一次曲げ応力

不静定モーメント M_0 は、

$$M_0 = \frac{\frac{M}{\pi d_2}}{1 + \frac{(1+h\beta)h\beta}{2+h\beta} + \frac{2(1-\nu^2)}{(2+h\beta)d_2\beta} \left(\frac{h}{h_1}\right)^3 \ell_n \left(\frac{D_o}{d}\right)}$$

$$= 8.60 \text{ kgf-mm}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{6M_0}{h_1^2}$$

$$= 0.23 \text{ kgf/mm}^2$$

JIS B 2210~17-1963 解説

(管フランジ (一体形) の応力計算式による)

$$M = W_2 \times a_1 = 7050 \text{ kgf-mm}$$

$$W_2 = 300 \text{ kgf}$$

$$a_1 = 23.5 \text{ mm}$$

$$d_2 = 137 \text{ mm}$$

$$h = 25 \text{ mm}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{12(1-\nu^2)}{d_2^2 h_1^2}} = 0.041$$

$$\nu = 0.3$$

$$h_1 = 15 \text{ mm}$$

$$D_o = 190 \text{ mm}$$

$$d = 122 \text{ mm}$$

(ロ) 内圧による応力

① 胴の応力

$$\sigma_t = \frac{P_1}{200\eta} \left[\frac{B}{g_o} + 12 \right]$$

$$= 0.06 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B 8271 3.2.1 (1) (a) より)

$$\sigma_t = \frac{\sigma_t}{2}$$

$$= 0.03 \text{ kgf/mm}^2$$

$$P_1 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$$

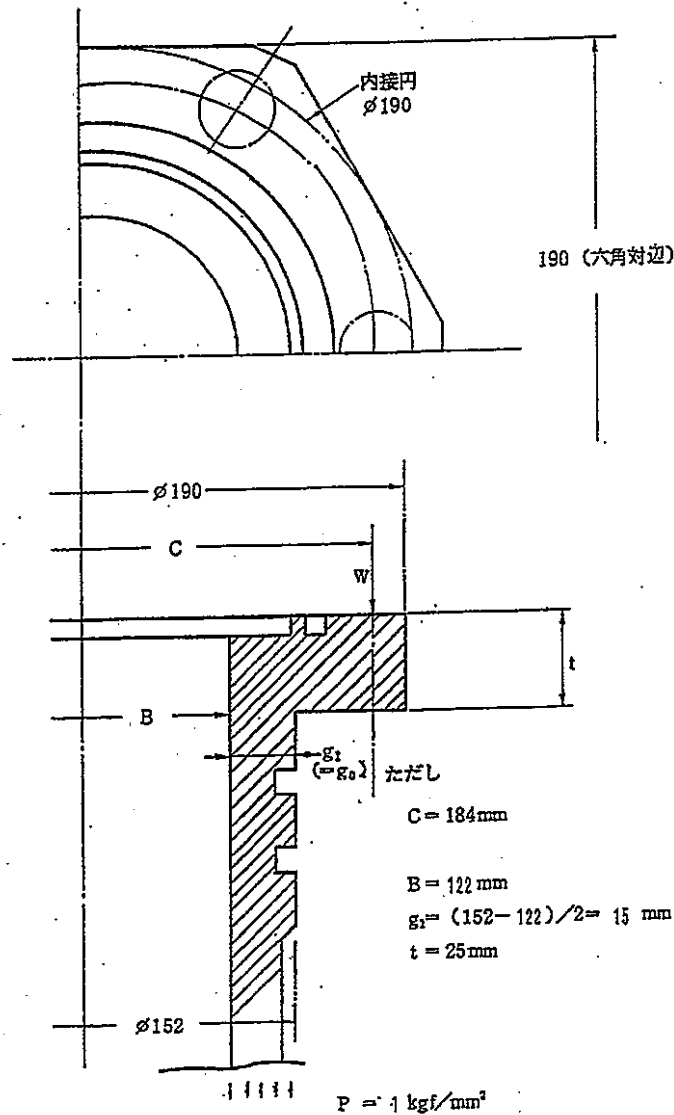
$$B = 122 \text{ mm}$$

$$g_o = 12.5 \text{ mm}$$

$$\eta = 1$$

② フランジの応力

以下の計算は、JIS B 8 2 7 3 「圧力容器のボルト締めフランジ」 (1993年改訂) によって行った。



1) フランジの軸方向応力

$$\sigma_t = \frac{fM}{Lg_1^2 B}$$

$$= 0.06 \text{ kgf/cm}^2$$

(JIS B 8 2 7 3 3.5 (2) 項による)

$$f = 1$$

$$M = \frac{C - (B + g_1)}{2} \times \left(\frac{P_1}{100} \right) \times A$$

$$= 1.518 \times 10^3 \text{ kgf-cm}$$

$$C = 184 \text{ mm}$$

$$B = 122 \text{ mm}$$

$$g_1 = 15 \text{ mm}$$

$$P_1 = 1 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (プラスト圧)}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (152^2 - 122^2)$$

$$= 6456 \text{ mm}^2$$

$$L = \frac{te+1}{T} + \frac{t^3}{d}$$

$$= 1.07$$

ここで $t = 25 \text{ mm}$

$$e = 0.022 \text{ mm}^{-1}$$

$$T = 1.71$$

$$\left(K = \frac{184}{122} = 151 \text{ より} \right)$$

$$d = 9.39 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

II) フランジの半径方向応力

$$\sigma_r = \frac{(1.33te+1)M}{Lt^2B}$$

$$= 0.04 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8273 3.5 (2) 項による)

$$t = 25 \text{ mm}$$

$$e = 0.022 \text{ mm}^{-1}$$

$$M = 1.518 \times 10^3 \text{ kgf-mm}$$

$$L = 1.07$$

$$B = 122 \text{ mm}$$

III) フランジの周方向応力

$$\sigma_t = \frac{YM}{t^2B} - Q\sigma_r$$

$$= 0.01 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8273 3.5 (2) 項による)

$$Y = 4.88$$

$$M = 1.518 \times 10^3 \text{ kgf-mm}$$

$$t = 25 \text{ mm}$$

$$B = 122 \text{ mm}$$

$$Q = 2.56$$

(ハ) 据付誤差による応力

中性子検出器照射試験装置取付孔の内径 ($\phi 152 \text{ mm}$) と案内管部最大径 ($\phi 150 \text{ mm}$) の差により案内管付根部で最大 2 mm 偏心する。

- ① 偏心による曲げモーメント (一端固定の片持はりと仮定する)

$$M = \frac{3Ee\ell}{\ell^2}$$
$$= 1.709 \times 10^4 \text{ kgf}\cdot\text{mm}$$

(機械工学便覧〔改訂第6版〕第23表による)

- ② 偏心による曲げ応力

$$\sigma_{bz} = \pm \frac{M}{Z}$$
$$= 0.22 \text{ kgf}/\text{mm}^2$$

$$E = 1.9 \times 10^4 \text{ kgf}/\text{mm}^2$$

(150°C における値)

$$I = \frac{\pi}{64} (150^4 - 140^4)$$

$$= 5.993 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$e = 2 \text{ mm}$$

$$\ell = 6324 \text{ mm}$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{(150^4 - 140^4)}{150}$$

$$= 7.99 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

(二) 地震時による応力

① 水平方向地震力による応力

炉心上部機構の地震時による最大変位は、炉心上部機構下端で2.0 mmである。案内管は、炉心上部機構下端と0.5 mmのギャップで支えられているため、その最大変位量は高々2.5 mmである。従って、案内管が2.5 mm変位したときの案内胴付根部の応力を求める。

荷重条件を等分布荷重と考えると最大応力は次式で与えられる。(一端固定の等分布荷重のはりと仮定する)

$$\sigma_{bt} = \pm \frac{4Ee}{\ell^2} \left(\frac{I}{Z} \right)$$
$$= \pm 0.36 \text{ kgf/mm}^2$$

(機械工学便覧〔改訂第6版〕第23表による)

$$E = 1.9 \times 10^5 \text{ kgf/mm}^2$$

(150°Cにおける値)

$$e = 2.5 \text{ mm (偏心量)}$$

$$\ell = 6324 \text{ mm}$$

$$\frac{I}{Z} = \frac{\frac{\pi}{64}(150^2 - 140^2)}{\frac{\pi}{32} \times \frac{(150^4 - 140^4)}{150}} = 7.5 \text{ mm}$$

② 垂直方向地震による応力

一次膜応力を生じ次式で表さる。

$$\sigma_{mt} = \pm \frac{\alpha_v W_2}{A}$$
$$= \pm 0.05 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\alpha_v = 0.36 \text{ g}$$

$$W_2 = 300 \text{ kgf}$$

$$A = \frac{\pi}{4}(150^2 - 140^2)$$
$$= 2277 \text{ mm}^2$$

(木) 熱荷重による応力

熱応力は、半径方向温度差によるものと軸方向温度差によるものがあるが半径方向温度差はほとんど0であり、内部発熱も小さいためこれによる熱応力は無視し、軸方向温度差によるもののみ計算する。

軸方向温度分布により生ずる案内管付根部の応力は次式で与えられる。(一端固定、一端自由)

$$\sigma_t = \pm 0.353 E \alpha \varphi \sqrt{r h}$$

$$= \pm 0.56 \text{ kgf/mm}^2$$

(機械工学便覧〔改訂第6版〕4-102による)

$$E = 1.9 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$$

(150°Cにおける値)

$$\alpha = 17.05 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

$$\varphi = \frac{\theta_1 - \theta_0}{\ell} = 0.157 \text{ }^\circ\text{C/mm}$$

$$\theta_1 = 500 \text{ }^\circ\text{C}^{\text{注20}}$$

$$\theta_0 = 34 \text{ }^\circ\text{C}^{\text{注20}}$$

$$\ell = 2964 \text{ mm}^{\text{注20}}$$

(GL3136~GL6100)

$$r = \frac{150 + 122}{4} = 68 \text{ mm}$$

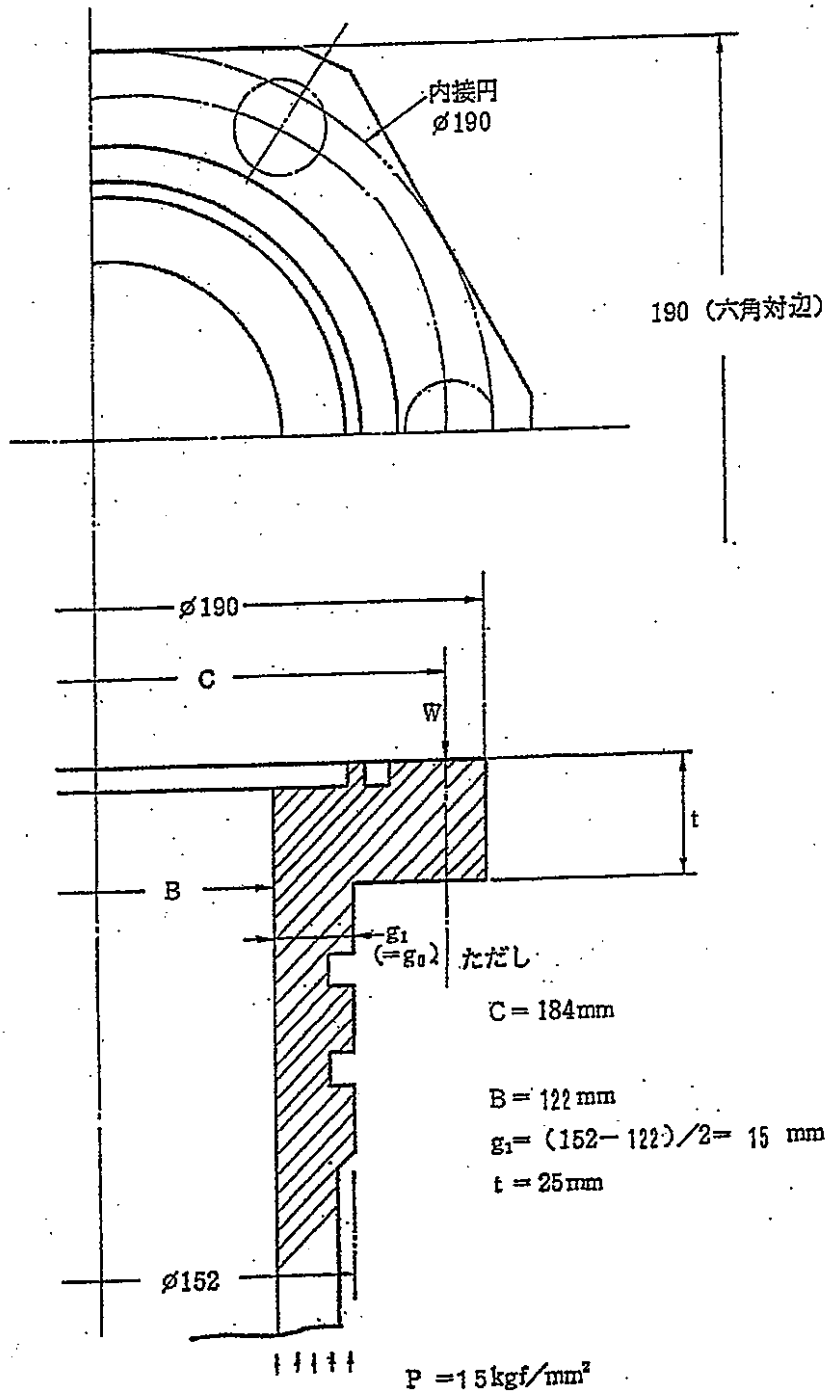
$$h = \frac{150 - 122}{2} = 14 \text{ mm}$$

注20) : 案内管のナトリウム液面部温度は原子炉出口温度500°Cに等しく、案内管付根部はしゃへいプラグ上面温度34°Cに等しいものとし、その間は直線状温度分布と仮定する。また、式中の ℓ は案内管付根部からナトリウム液面までの距離を示す。

(ハ) 再臨界事故時の応力 (プラスト圧 15 kgf/cm^2)

再臨界事故時には下図に示すように上部案内管にプラスト圧として 15 kgf/cm^2 が作用するものとし、フランジ形状は下図の2点鎖線のような円輪と仮定して計算する。

計算は「圧力容器のボルト締めフランジ」(1993年改訂)に基づいて行なう。



① ハブの軸方向応力

$$\sigma_t = \frac{fM}{Lg_1^2 B}$$

$$= 0.78 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8273 3.5 (2) 項による)

② フランジ半径方向応力

$$\sigma_r = \frac{(1.33te+1)M}{Lt^2 B}$$

$$= 0.49 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8273 3.5 (2) 項による)

③ フランジ周方向応力

$$\sigma_t = \frac{YM}{t^2 B} - Q\sigma_r$$

$$= 0.21 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8273 3.5 (2) 項による)

$$f=1$$

$$M = \frac{C - (B + g_1)}{2} \times \left(\frac{P_B}{100} \right) \times A$$

$$= 2.276 \times 10^4 \text{ kgf-mm}$$

$$C = 184 \text{ mm}$$

$$B = 122 \text{ mm}$$

$$g_1 = 15 \text{ mm}$$

$$P_B = 15 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (プラスチック)}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (152^2 - 122^2)$$

$$= 6456 \text{ mm}^2$$

$$L = \frac{te+1}{T} + \frac{t^3}{d}$$

$$= 1.07$$

ここで $t = 25 \text{ mm}$

$$e = 0.022 \text{ mm}^{-1}$$

$$T = 1.71$$

$$\left(K = \frac{184}{122} = 1.51 \text{ より} \right)$$

$$d = 9.39 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$t = 25 \text{ mm}$$

$$e = 0.022 \text{ mm}^{-1}$$

$$M = 2.276 \times 10^4 \text{ kgf-mm}$$

$$L = 1.07$$

$$B = 122 \text{ mm}$$

$$Y = 4.88$$

$$M = 2.276 \times 10^4 \text{ kgf-mm}$$

$$t = 25 \text{ mm}$$

$$B = 122 \text{ mm}$$

$$Q = 2.56$$

(d) 案内管先端部 (図 2. 1-8 C点) (材質: SUS316)

(イ) 死荷重による応力

$$\sigma_t = \frac{W_3}{A}$$

$$= 0.04 \text{ kgf/mm}^2$$

$$W_3 = 50 \text{ kg}$$

$$A = \frac{\pi}{4}(86^2 - 76^2)$$

$$= 1272 \text{ mm}^2$$

(ロ) 内圧による応力

$$\sigma_t = \frac{P_1}{200\eta} \left[\frac{B}{g_0} + 1.2 \right]$$

$$= 0.09 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8271 3.2.1 (1) (a) による)

$$P_1 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$B = 76 \text{ mm}$$

$$g_0 = 5 \text{ mm}$$

$$\eta = 1$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_t}{2}$$

$$= 0.05 \text{ kgf/mm}^2$$

(ハ) 地震時荷重による応力

地震時、案内管部は炉心上部機構内に保持され案内管先端部には強制変位がほとんど生じないため水平方向の応力は発生しない。垂直地震荷重による応力について評価する。

$$\sigma_{mt} = \pm \frac{\alpha_v W_3}{A}$$

$$= \pm 0.02 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\alpha_v = 0.36 \text{ g}$$

$$W_3 = 50 \text{ kg}$$

$$A = \frac{\pi}{4}(86^2 - 76^2)$$

$$= 1272 \text{ mm}^2$$

(ニ) 熱衝撃による応力

① 調整棒一斉挿入時の熱衝撃による応力 (概算値)

$$\sigma_{Tb} = \frac{2}{3} \times \frac{E \alpha_T \Delta T}{(1-\nu)}$$

$$= 14.6 \text{ kgf/mm}^2$$

(原子力プラントの構造設計 [東大出版] P90による)

$$E = 1.58 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$$

(at 550°C)

$$\alpha_T = 2.03 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

(瞬間熱膨張係数 at 550°C)

$$\Delta T = 47.7^\circ\text{C}$$

(UPRと同様と仮定する)

$$\nu = 0.3$$

② 電源喪失時の熱衝撃による応力 (概算値)

$$\sigma_{tb} = \frac{2}{3} \times \frac{E\alpha_T\Delta T}{(1-\nu)}$$
$$= 10.8 \text{ kgf/mm}^2$$

(原子カプラントの構造設計 [東大出版] P90による)

$$E = 1.47 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$$

(at 650°C)

$$\alpha_T = 2.08 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

(瞬間熱膨張係数 at 650°C)

$$\Delta T = 36.8^\circ\text{C}$$

(UPRと同様と仮定する)

$$\nu = 0.3$$

(ホ) ナトリウムの流体振動による応力

2. 2項に詳細を示す。

$$\sigma_b = 3.50 \text{ kgf/mm}^2$$

(e) ウエル先端部 (図2. 1-8 D点) (材質: SUS316)

(イ) 死荷重による応力

$$\sigma_t = \frac{W}{A}$$

$$\doteq 0 \text{ kgf/mm}^2$$

$$W \doteq 0 \text{ kg (自重は殆どない)}$$

$$A = \frac{\pi}{4}(135^2 - 35^2)$$

$$= 133.5 \text{ mm}^2$$

(ロ) 内圧による応力

$$\sigma_t = \frac{P_1}{200\eta} \left[\frac{B}{g_0} + 1.2 \right]$$

$$= 0.01 \text{ kgf/mm}^2$$

(JIS B8271 3.2.1 (1) (a) による)

$$\sigma_t = \frac{\sigma_t}{2}$$

$$= 0.01 \text{ kgf/mm}^2$$

$$P_1 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$B = 3.5 \text{ mm}$$

$$g_0 = 5 \text{ mm}$$

$$\eta = 1$$

(ハ) 地震時荷重による応力

地震時、案内管部は炉心上部機構内に保持され案内管先端部には強制変位がほとんど生じないため水平方向の応力は発生しない。垂直地震荷重による応力について評価する。

$$\sigma_{mt} = \pm \frac{\alpha_v W_3}{A}$$

$$\doteq 0 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\alpha_v = 0.36 \text{ g}$$

$$W \doteq 0 \text{ kgf}$$

$$A = \frac{\pi}{4}(135^2 - 35^2)$$

$$= 133.5 \text{ mm}^2$$

(二) 熱衝撃による応力

① 調整棒一斉挿入時の熱衝撃による応力 (概算値)

$$\sigma_{Tb} = \frac{2}{3} \times \frac{E\alpha_T \Delta T}{(1-\nu)}$$

$$= 1.23 \text{ kgf/mm}^2$$

$$E = 1.58 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$$

$$(at 550^\circ\text{C})$$

$$\alpha_T = 2.03 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

(原子力プラントの構造設計 [東大出版] P90による)

(瞬間熱膨張係数 at 550°C)

$$\Delta T = 4^\circ\text{C}$$

(UPRと同様と仮定する)

$$\nu = 0.3$$

② 電源喪失時の熱衝撃による応力 (概算値)

$$\sigma_{Tb} = \frac{2}{3} \times \frac{E\alpha_T\Delta T}{(1-\nu)}$$
$$= 0.88 \text{ kgf/mm}^2$$

(原子力プラントの構造設計 [東大出版] P90による)

$$E = 1.47 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$$

(at 650°C)

$$\alpha_T = 2.08 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

(瞬間熱膨張係数 at 650°C)

$$\Delta T = 3^\circ\text{C}$$

(UPRと同様と仮定する)

$$\nu = 0.3$$

(ホ) ナトリウムの流体振動による応力

2.2項に詳細を示す。

$$\sigma_b = 0.01 \text{ kgf/mm}^2$$

(f) 本体据付ボルト (図2. 1-8 E点) (材質: SCM435)

(イ) 内圧による応力

$$\sigma = \frac{F_1 + F_2}{A_b}$$

$$= 12.2 \text{ kgf/mm}^2$$

$$F_1 = \frac{\pi}{400} G^2 P_1 = 170.9 \text{ kgf}$$

$$G = 147.5 \text{ mm}$$

$$P_1 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$F_2 = 10770 \text{ kgf}$$

(初期締め付け力を考慮した値)

$$A_b = \frac{\pi}{4} \times 13.82^2 \times 6 \text{ (本)}$$

$$= 897 \text{ mm}^2$$

(ロ) 地震荷重による応力 (水平震度による引張応力)

$$\sigma = \frac{1}{\frac{n}{2} \times \frac{\pi}{4} D_b^2} \times \frac{M}{\frac{D_m}{2}}$$

$$= 0.19 \text{ kgf/mm}^2$$

(基礎 機械設計 (全) (工学図書) P94による)

$$D_b = 13.8 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ 本}$$

$$M = a_g \times F_H$$

$$= 6.67 \times 10^3 \text{ kgf-mm}$$

$$a_g = 280 \text{ mm}$$

(上部ハウジングの重心高さ)

$$F_H = \alpha_h W_1 = 23.82 \text{ kgf-mm}$$

$$\alpha_h = 0.794 \text{ g}$$

$$W_1 = 30 \text{ kgf}$$

$$D_m = 184 \text{ mm}$$

(ハ) 再臨界事故時による応力

① インパルス対する検討

再臨界事故時にインパルスが案内管外径内に作用した場合、据付ボルトの伸びによって、そのインパルスを吸収できるかどうか検討する。

1) 再臨界事故時エネルギーを受けもつ質量

$$m = \frac{W_1 + W_2}{g}$$

$$= 0.34 \text{ kgfsec}^2/\text{cm}$$

$$W_1 = 30 \text{ kgf}$$

$$W_2 = 300 \text{ kgf}$$

$$g = 980 \text{ cm/sec}^2$$

II) インパルスによるエネルギー

インパルスを受ける面積として中性子検出器照射試験装置のOリングシール面より内側の面積をとると総インパルスは

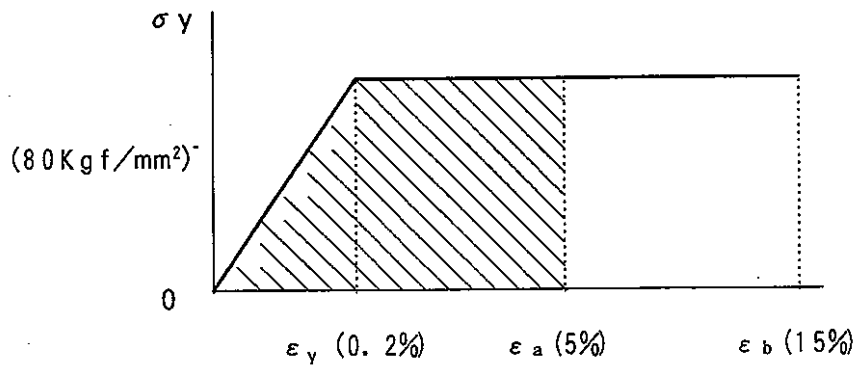
$$E_t = \frac{I t^2 A_1^2}{2000m}$$

$$= 1.21 \times 10^5 \text{ kgf} \cdot \text{mm}$$

$I_t = 0.5 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2$
$A_1 = \frac{\pi}{4} \times 152^2 = 18146 \text{ mm}^2$
$m = 0.34 \text{ kgf sec}^2 / \text{cm}$

III) ボルトのインパルスによるエネルギー吸収計算に際し、次の仮定をたてる。

1. ボルトは完全弾塑性体とみなす。
2. 降伏応力 (σ_y) および破断ひずみは、規格値(JISG4105)を使用する。
3. 許容ひずみ (ϵ_a) は破断ひずみ (ϵ_b) の1/3とする。



ボルトの吸収エネルギーは、

$$E_b = A_b \ell n \left[\frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y + \sigma_y (\epsilon_a - \epsilon_y) \right]$$

$$= 1.58 \times 10^5 \text{ kgf} \cdot \text{mm}$$

$A_b = \frac{\pi}{4} \times 13.8^2 = 150 \text{ mm}^2$
$\ell = 45 \text{ mm}$
$n = 6 \text{ 本}$
$\sigma_y = 80 \text{ kgf} / \text{mm}^2$
$\epsilon_y = 0.002$
$\epsilon_a = 0.05$
$\epsilon_b = 0.15$

(評価)

以上により、 $E_b < E_t$ であるため、ボルトはその伸びによって十分にインパルスエネルギーを吸収できる。

② プラスト圧による応力（引張応力）

$$\sigma = \frac{P_B A_1}{100nA_b}$$
$$= 3.03 \text{ kgf/mm}^2$$

$$P_B = 15 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A_1 = 18146 \text{ mm}^2$$

$$n = 6 \text{ 本}$$

$$A_b = 150 \text{ mm}^2$$

ボルト降伏強さは 80 kgf/mm^2 であるから 十分耐えることができる。

(g) 上部ハウジング取付ボルト (図2. 1-8 F点) (材質: SCM435)

(イ) 内圧による応力

$$\sigma = \frac{F_1 + F_2}{A_b}$$
$$= 12.2 \text{ kgf/mm}^2$$

$$F_1 = \frac{\pi}{400} G^2 P = 170.9 \text{ kgf}$$

$$G = 147.5 \text{ mm}$$

$$P = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$F_2 = 10770 \text{ kgf}$$

(初期締め付け力を考慮した値)

$$A_b = \frac{\pi}{4} \times 13.8^2 \times 6 \text{ (本)}$$

$$= 897 \text{ mm}^2$$

(ロ) 地震荷重による応力

地震時の応力は殆ど受けない。

$$\sigma \doteq 0 \text{ kgf/mm}^2$$

(5) 応力評価

(a) 通常運転時および地震時荷重に対する応力評価

(4) 項で求めた各荷重による応力評価の結果を表 2. 1-3 に示す。
結果は、許容応力範囲内にあり、十分安全である。

表2. 1-3 中性子検出器照射試験装置の応力評価（第一種管での評価）

応力評価点		計算値	一次応力										二次応力		一次応力 + 二次応力	注22 3 S _m (t)	
			一次膜応力					注22 S _m (s)	一次曲げ応力				一次膜応力 + 一次曲げ応力	注23 K S _m (s)			熱荷重
			自重	内圧	外圧	地震	合計		自重	据付誤差	地震	合計					
上部フランジ	フランジ	σ _t	-	0.33	-	-	0.33	14.0	-	-	-	-	0.33	21.0	-	0.33	42.0
		σ _c	-	0.14	-	-	0.14		-	-	-	-	0.14	21.0	-	0.14	42.0
	胴部	σ _t	0.02	0.06	-	±0.01	0.09		-	-	±0.07	0.07	0.16	21.0	-	0.16	42.0
		σ _c	-	0.11	-	-	0.11		-	-	-	-	0.11	21.0	-	0.11	42.0
案内管	フランジ	σ _t	-	0.06	-	-	0.06	14.1	0.23	-	-	-	0.29	21.1	-	0.29	42.3
		σ _c	-	0.01	-	-	0.01		-	-	-	-	0.01	21.1	-	0.01	42.3
	胴部	σ _t	0.06	0.03	-	0.05	0.14		-	0.22	0.36	0.58	0.72	21.1	0.56	1.28	42.3
		σ _c	-	0.06	-	-	0.06		-	-	-	-	0.06	21.1	-	0.06	42.3
案内管先端部		σ _t	0.04	0.05	-	0.02	0.11	9.3	-	-	-	3.50 ^{注24}	3.61	13.7	-	3.61	31.5
熱電対ウエル部		σ _t	0	0.01	-	0	0.01	9.3	-	-	-	0.01 ^{注24}	0.02	13.7	-	0.02	31.5
本体据付ボルト		σ _t	-	12.2	-	0.19	12.39	23.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
上部ハウジング取付ボルト		σ _t	-	12.2	-	0	12.2	23.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注21) : 「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針の第1種管の応力強さの制限は「第1種容器に従って行ってもよい」とされているため第1種容器で行う。(同指針15ページ注1参照)

注22) : S_m (s) は2. 2. 3. 6項を参照。

注23) : K = 15 ただし T < T_c …… T_c = 1000° F (538°C)

$$K = \left[15 - \left(\frac{T - T_c}{200} \right) \left(0.17 + 0.33 \frac{P_m}{S_m(s)} \right) \right] \text{ ただし } (T_c + 200 > T > T_c) \quad T = 1022° \text{ F } (550°C)$$

部 位	K
上部フランジ	1.5
案内管付根部	1.5
案内管先端	1.48
熱電対ウエル部	1.48

注24) : ナトリウムによる流体振動の応力を一次曲げ応力に加えた。

(b) 通常運転時に対するクリープ強度評価

中性子検出器照射試験装置の案内管先端部についてクリープ強度の評価を行う。案内管先端部では、通常運転時 0.09 kg f/mm^2 ^{注25} の応力が作用するので、この応力に対するクリープ寿命分数和を次式によって求める。

$$U = \frac{T}{T_r}$$

$$= \frac{72000}{3 \times 10^5}$$

$$= 0.24$$

U : クリープ寿命分数和

T : 炉内滞在時間 (hr)

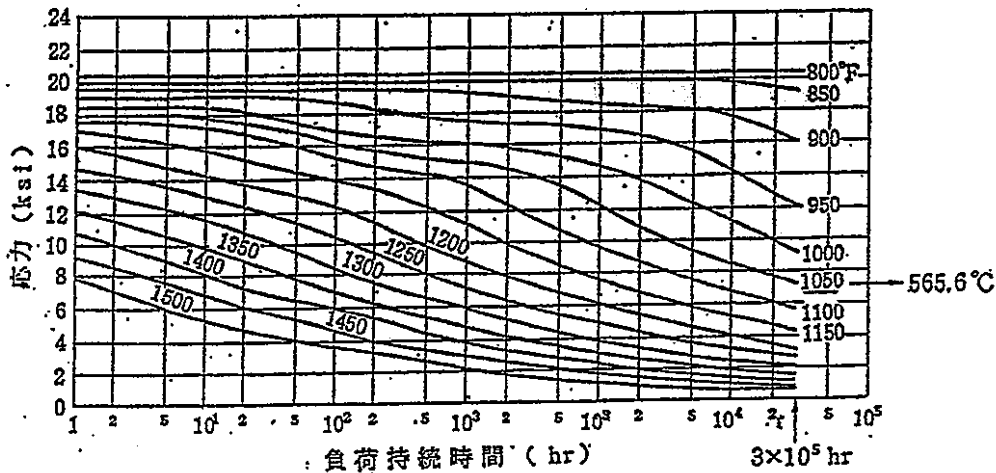
$$= 24 \text{ hr/日} \times 60 \text{ 日/cy} \times 5 \text{ cy/年} \times 10$$

$$= 72000 \text{ hr}$$

T_r : クリープ破断時間 (hr)

$$= 3 \times 10^5 \text{ hr} \text{ ^{注26}}$$

上記計算結果、クリープ寿命分数和 (U) = 0.24 となり、U=1.0 以下であるので案内管先端部はクリープに対し十分な強度を有する。



注25) : 表-1の案内管先端部における一次膜応力である。

注26) : ASME code case N47-17のSUSのSt曲線による。

(c) 熱サイクル時に対する疲労評価

中性子検出器照射試験装置の案内管先端部について熱サイクル時に対する疲労評価を行う。

案内管先端部では、熱サイクル時の応力計算値 14.6kgf/mm² (調整棒一斉挿入等による熱衝撃応力) 及び 10.8 kgf/mm² (電源喪失による熱衝撃応力) について疲労解析を行う。

熱衝撃応力は、等価な完全両振りの応力振幅でないため、修正 good man 法により、 σ_{ea} (等価応力振幅) を次式にて求め、

$$\sigma_{ea} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}} \quad (\text{但し } \sigma_{max} < \sigma_u >$$

ここで

σ_{ea} : 等価応力振幅

σ_a : 応力振幅 (熱衝撃応力値の 1/2 の値)

σ_m : 平均応力 (熱衝撃応力値の 1/2 の値)

σ_u : 引張応力 (650℃における値) = 15.6 kgf/mm²

設計疲労曲線より許容繰返し数を求める。表 2-4 に整理結果を示す。

表 2. 1-4 熱サイクル時に対する評価

評価位置	熱サイクル現象	負荷される回数 n_i	熱衝撃 応力 (kgf/mm ²)	振 幅 σ_{ea} (kgf/mm ²)	許 容 繰り返回数 N_i	n_i/N_i
案内管 先端部	調整棒一斉 挿入他	188	14.6	13.72	>10 ⁶	2×10 ⁻⁶
	電源喪失	50	10.8	8.25	>10 ⁶	2×10 ⁻⁶

上表により、累積係数 (D) は、

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = 2 \times 10^{-6} + 2 \times 10^{-6} = 4 \times 10^{-6}$$

となり、D < 1.0 であるため、案内管先端部は十分な強度を有する。

(d) 再臨界事故時の応力評価

(4) 項で求めた再臨界事故時の応力および応力評価の結果を表2. 1-5, 2. 1-6に示す。結果は、許容応力範囲内であり、十分安全である。

(イ) プラスト圧に対する評価

表2. 1-5 プラスト圧に対する評価

応力評価点		計算値 (kgf/mm ²)	材 質	許容応力 (kgf/mm ²)
名 称	図2. 1-8 の記号			
上部ハウジング付根 およびフランジ	A	$\sigma_L=5.04$ $\sigma_r=0.72$ $\sigma_t=2.13$	SUS316	21.0 注27
案内管付根部	B	$\sigma_L=0.78$ $\sigma_r=0.49$ $\sigma_t=0.21$	SUS316	21.0 注27
据付ボルト	E	$\sigma=3.03$	SCM435	80.0 注27

(ロ) インパルスに体する評価

表2. 1-6 インパルスに対する評価

応力評価点		インパルスによる エネルギー (kgf-mm)	ボルトが吸収できる エネルギー (kgf-mm)	評 価
名 称	図2. 1-8 の記号			
据付ボルト	E	$E_T=1.21 \times 10^5$	$E_b=1.58 \times 10^5$	$E_b > E_T$

注27) : 許容応力としては常温における最小降伏強さを用いた。

2.2 流力振動設計

2.2.1 緒言

本計算書は、中性子検出器照射試験装置の案内管の流力振動の検討に関するものである。
振動評価は、

- (1) 案内管先端部 (図2. 2-1 A点)
- (2) 熱電対ウエル部 (図2. 2-1 B点)

について行った。応力評価点は、図2. 2-1に示す⊗点である。

計算は「もんじゅ熱電対温度計ウエルの構造設計方針」(暫定案)およびASME Code Section III Appendix Nにより行った。

2.2.2 設計条件

- (1) 炉内圧力：0. 01 kgf/cm²
- (2) 温度：500℃
- (3) Na流速…案内管側面 : 添付資料-4 参照
熱電対ウエル部：4 m/sec

2.2.3 設計疲労限： σ_F

単位：kgf/mm²

温度	500℃	550℃
SUS316	6.3	5.9

出典：「もんじゅ熱電対温度計ウエルの構造設計方針」(暫定案)表1(a)によった。

2.2.4 計算箇所

流力振動の評価位置を図2. 2-1に示す。

2.2.5 計算

(1) 案内管の固有値解析

(a) 固有値解析条件

イ) 温度：ナトリウム中 : 500℃

アルゴンガス中 : 250℃

ロ) 解析モデル

図2. 2-2に示すはり要素で行う。端末条件は、回転プラグ部を固定支持、炉心上部機構下部に差し込まれている部分を回転支持として行う。なお、ナトリウムの流れが案内管に当たっている部分を先端から400mmの間とした。

ハ) 計算コード

SAP (有限要素法) のはりモデルで行った。

(b) 固有値解析結果

イ) 振動モード

上記モデルで解析した結果の各次数の振動モードを図2. 2-3に示す。

ロ) 各次数の固有値

上記モデルで解析した結果を以下に示す。

振動モード次数	固有振動数 Hz
1 次	10.8
2 次	36.3
3 次	72.3
4 次	116.5
5 次	140.1

(2) 同期振動領域の回避の検討

案内管部の渦放出による揚力方向および抗力方向の同期振動を回避あるいは抑制するために、次の (a)、(b) または (c) のいずれかの制限を満足しなければならない。

(a) 条件 (1) : 揚力方向および抗力方向の同期振動の回避

$V_r < 1$: 無次元流速

ただし

$$V_r = \frac{V}{f_n D_o}$$

V : ウエル (案内管) まわりの

平均流速 m/sec

D_o : ウエル (案内管) の最小断面
直径 mm

f_n : ウエル (案内管) の n 次振動モード
の振動数

(b) 条件 (2) : 揚力方向および抗力方向振動の抑制

$C_n > 6.4$: 換算減衰

ただし

$$C_n = \frac{4\pi\xi_n M_n}{\rho \int_{L_c} D^2(x) \phi_n^2(x) dx}$$

ρ : 流体の質量密度

D(x) : ウエル (案内管) の外径
(軸方向 x に変化)

ξ_n : 大気中で測定された n 次振動モードに
対する臨界減衰比

M_n : ウエルの n 次モードに対する一般化質量

(c) 条件 (3) : 揚力方向を回避と抗力方向の振動の抑制

$V_r < 3.3$ かつ $C_n > 1.2$

上記計算式により案内管先端部および熱電対ウエル部の定格流速時の計算結果を表 2. 2-1 および表 2. 2-2 に示す。また、図 2. 2-4 に前記計算結果と回避領域のどの位置にいるかを示す。

(3) 流力振動による応力振幅

流力振動による応力振幅を表 2. 2-1 および表 2. 2-2 に示す。いずれも SUS 316 の設計疲労限 (2. 2. 3 項) 以下であり十分安全である。

2.2.6 評価

流力振動の検討の結果、ASME Code Section III Appendix N の評価で同期振動領域の回避ができる。また、この時の応力振幅も設計疲労限以下であり問題ない。

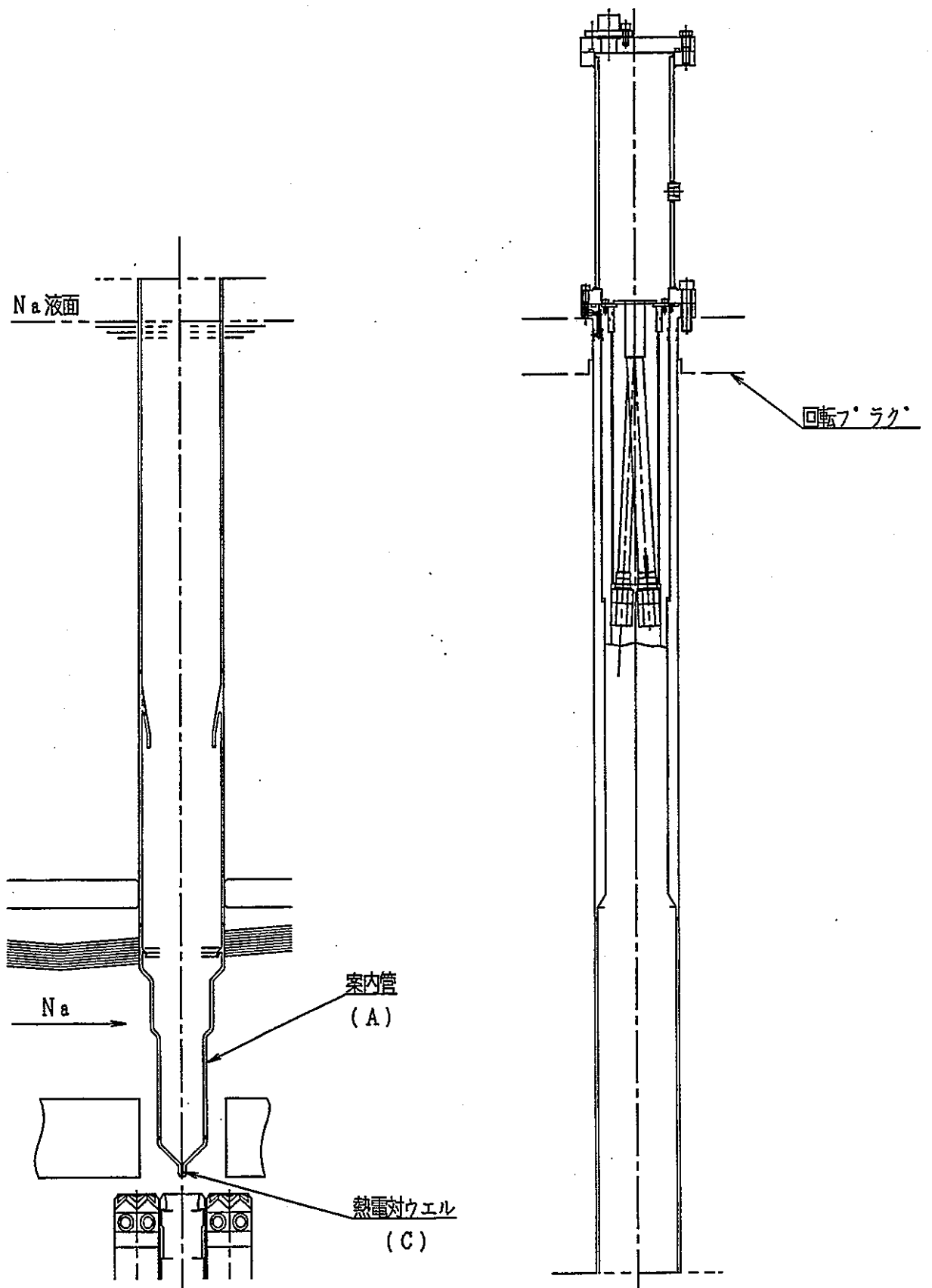
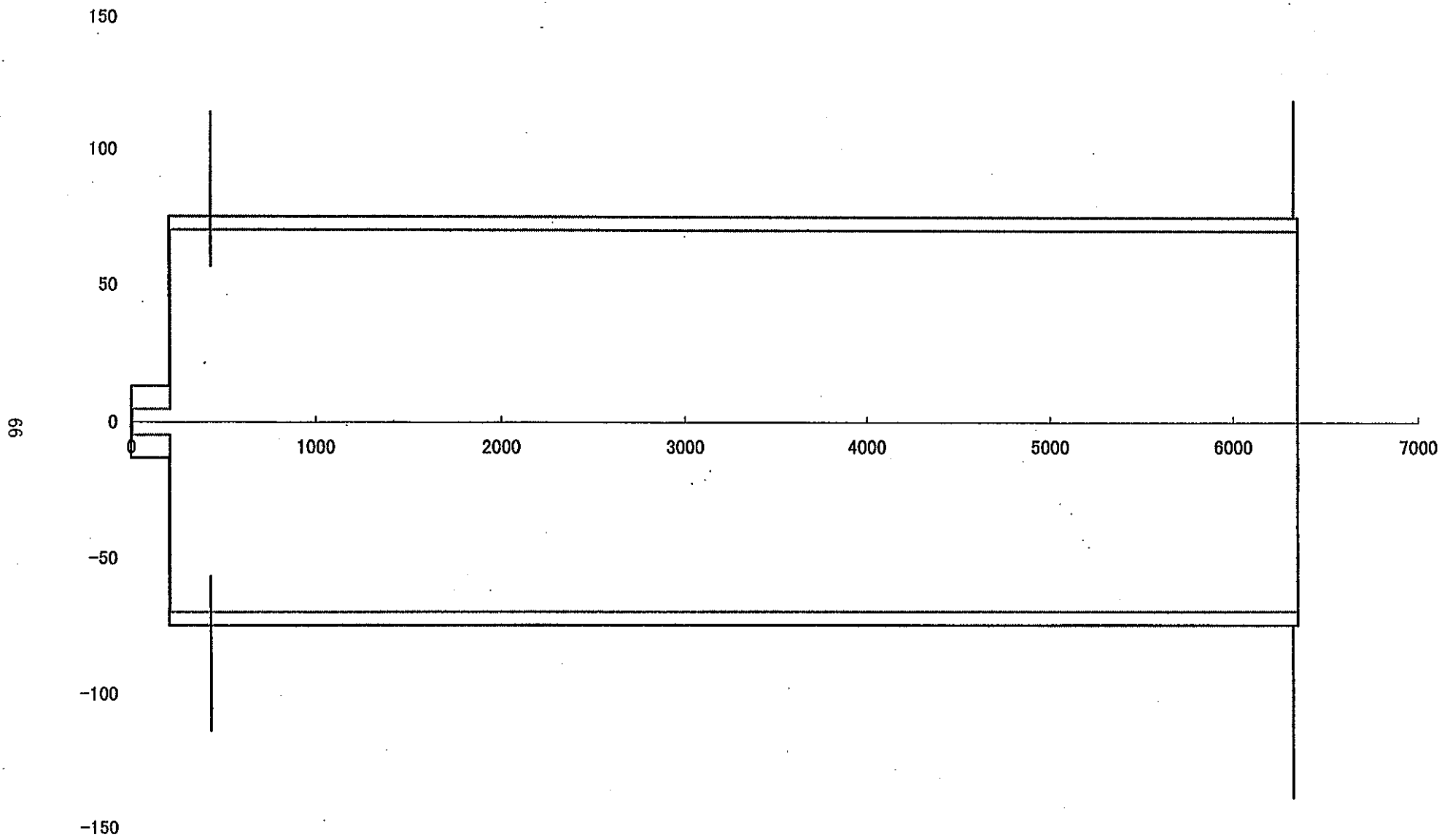


図2. 2-1 中性子検出器照射試験装置流力振動検討図



66

図 2. 2-2 モデル図

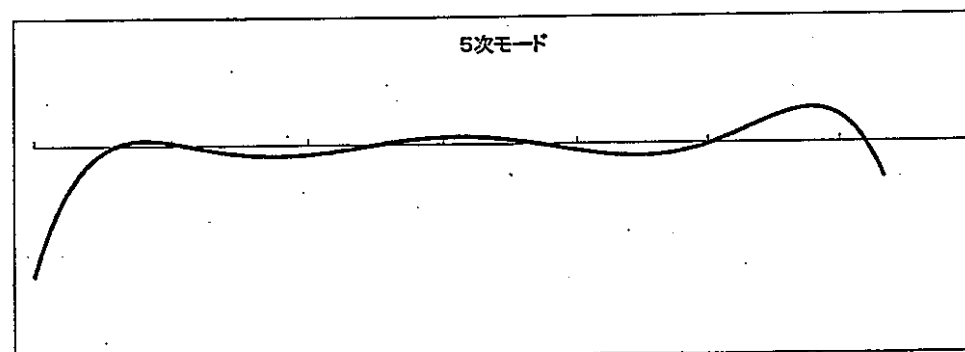
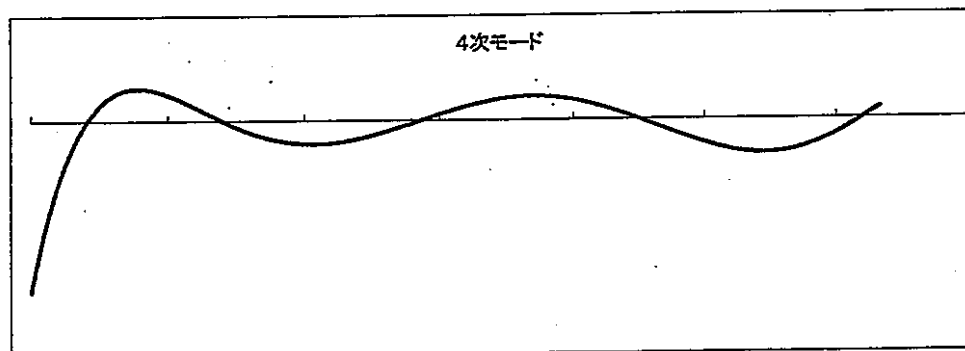
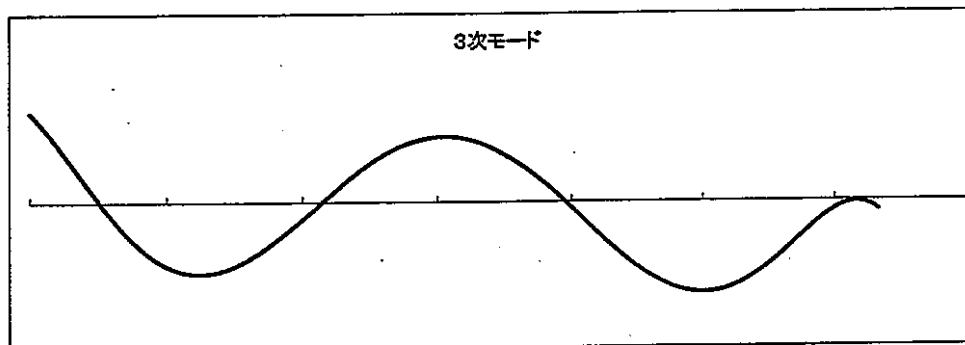
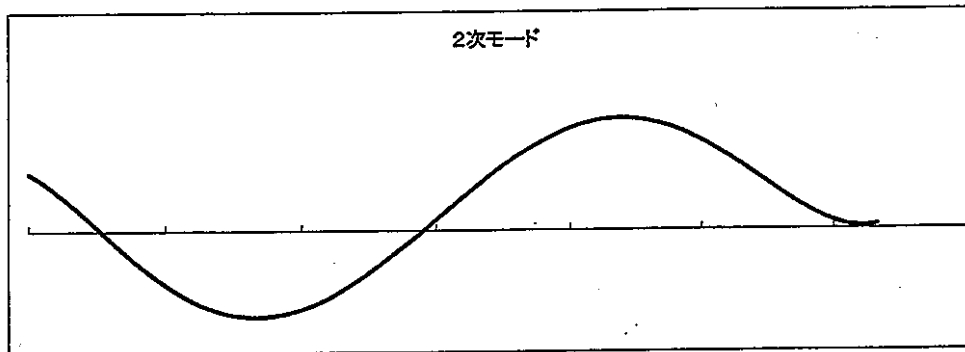
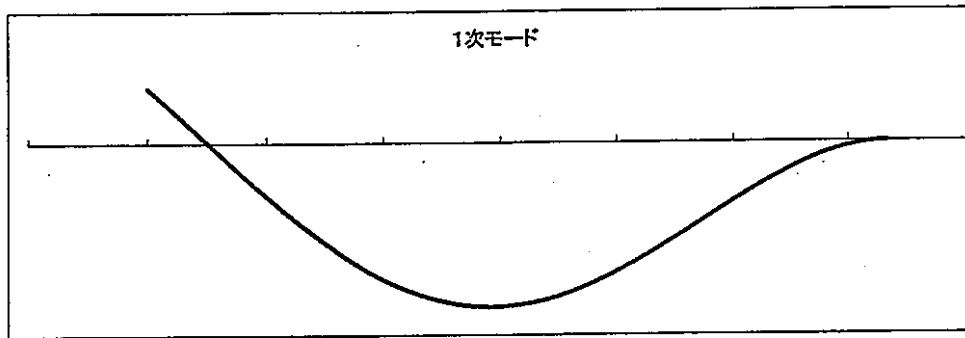


図2. 2-3 振動モード図

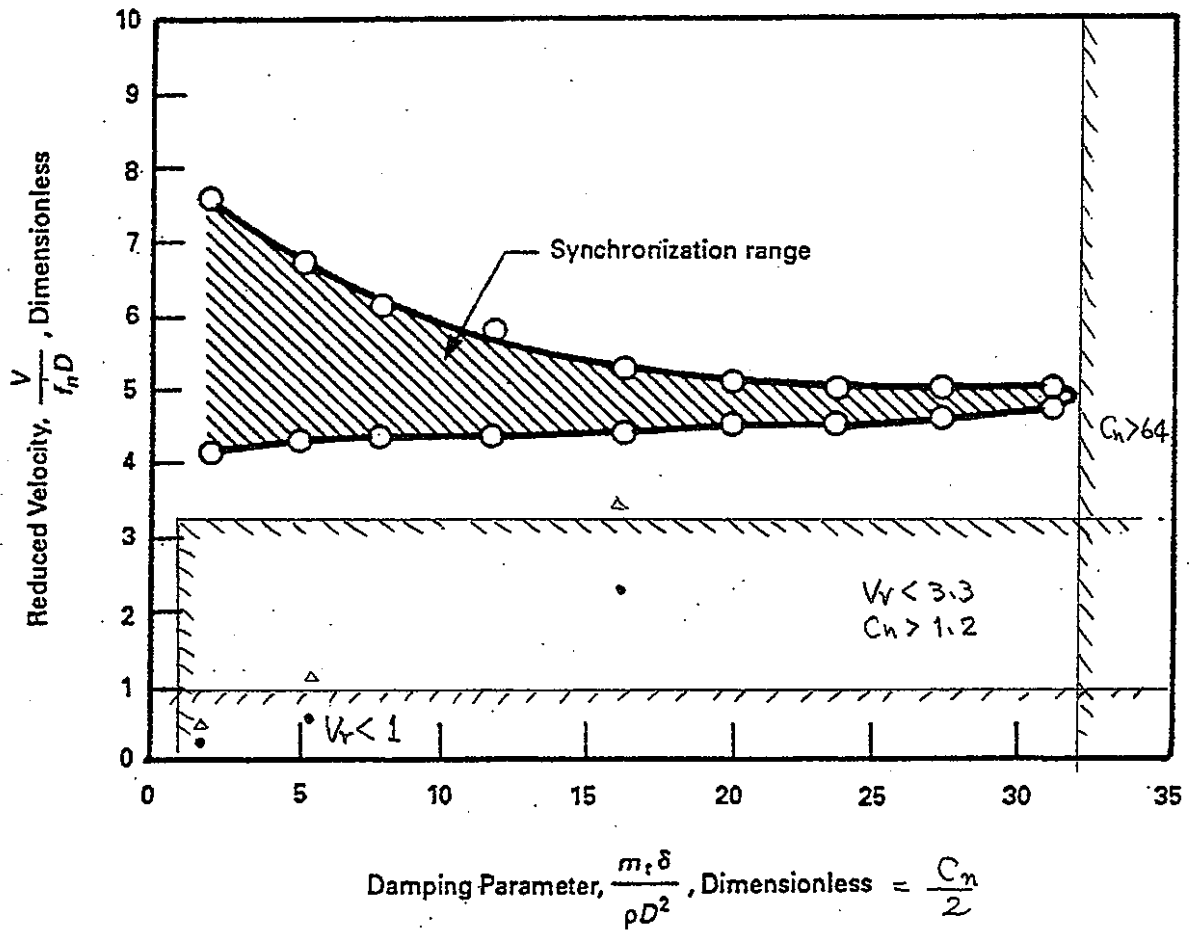


FIG. N-1323-1 SYNCHRONIZATION OF THE VORTEX SHEDDING FREQUENCY AND THE TUBE NATURAL FREQUENCY FOR A SINGLE, FLEXIBLY-MOUNTED CIRCULAR CYLINDER. SYNCHRONIZATION OCCURS WITHIN THE SHADED REGION. (REF. 106)

図 2. 2-4 計算結果と回避領域の位置関係

表 2. 2-1 流力振動に対する健全性評価 (1)

機器名	中性子検出器照射試験装置
部品名	案内管

温度	500℃
圧力	- kg/cm ²
流速	下記
流体	ナトリウム

渦励起・乱流励起振動評価結果 (評価方法: ASME Sec III Ap. N1300)

振動モード	無次元流速	換算減衰率	固有振動数	渦放出周波数	応力振幅	設計疲労限	同期振動領域の回避			応力の制限	評価
							条件 (1)	条件 (2)	条件 (3)		
	Vr	Cn	fn	fs	$K\sigma_v$	σ_F	Vr < 1	Cn > 64	Vr < 3.3 Cn > 1.2		
1次	1.29	32.91	10.79	3.49	3.50	6.3	-	-	○	○	良
2次	0.64	10.58	36.28	5.76			○	-	○		
3次	0.50	4.23	72.30	9.06			○	-	○		
4次	0.44	1.26	116.46	12.79			○	-	○		
5次	0.10	2.01	140.01	3.50			○	-	○		

(備考・構造図等)

振動モード	等価流速 (m/sec)
1次	1.20
2次	1.98
3次	3.11
4次	4.40
5次	1.20

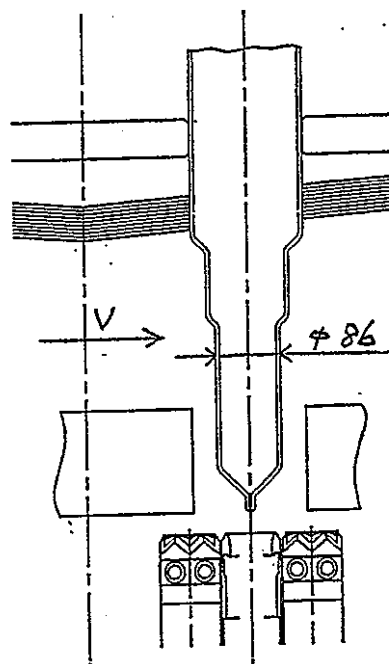


表 2. 2-2 流力振動に対する健全性評価 (2)

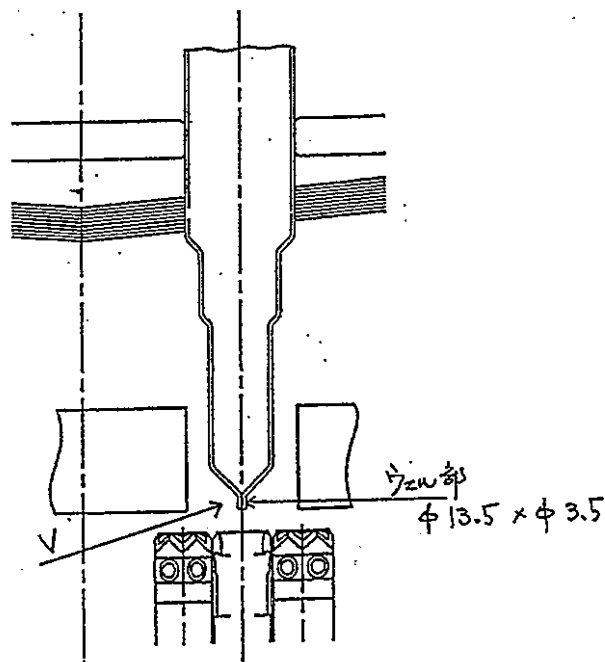
機器名	中性子検出器照射試験装置
部品名	案内管ウエル部

温度	500℃
圧力	- kg/cm ²
流速	4 m/sec
流体	ナトリウム

渦励起・乱流励起振動評価結果 (評価方法: ASME Sec III Ap. N1300)

振動モード	無次元流速	換算減衰率	固有振動数	渦放出周波数	応力振幅	設計疲労限	同期振動領域の回避			応力振の幅制限	評価
							条件 (1)	条件 (2)	条件 (3)		
	Vr	Cn	fn	fs	$K\sigma_v$	σ_F	Vr < 1	Cn > 64	Vr < 3.3 Cn > 1.2		
1次	0.02	4419	16366	62.2	0.01	6.3	○	○	○	○	良
2次	0.01	128.5	58856				○	○	○		
3次	0.01	36.5	116479				○	—	○		
4次	0.01	18.7	168795				○	—	○		
5次	0.01	11.5	220206				○	—	○		

(備考・構造図等)



1. 目的

本資料は、中性子検出器照射試験装置のカルマン渦による振動検討のために案内管先端部に当たるナトリウム流速の等価流速を求めたものである。

2. 関連資料

- 1) 技-9-28: 炉内中性子検出器照射試験装置の流力振動計算用データの支給(動燃団殿発行)
- 2) ASME Code Section III Appendix N1300 (N-1331)

3. 計算方法(等価流速)

動燃団殿発行の技術課メモ(関連資料1)より、炉心上部機構から燃料頂部付近までに冷却材流速の系方向(1, 3, 5列の軸方向)の分布に大きな勾配がある。このためASME Code Section III Appendix N1300 (N-1331)の方法により固有振動数解析で得られた振動モード形状関数と冷却材の系方向成分より等価流速を求める。

$$\text{等価流速} = \sqrt{\frac{\int_0^{L_e} \phi_n(z)^2 V(z)^2 dz}{\int_0^L \phi_n(z)^2 dz}}$$

$\phi_n(z)$: 案内管のn次モードの振動モード形状関数

$V(z)$: 案内管に当たる冷却材の径方向成分

表2.2-3および図2.2-5を参照

4. 計算結果

各次数に対する等価流速を下記に示す。

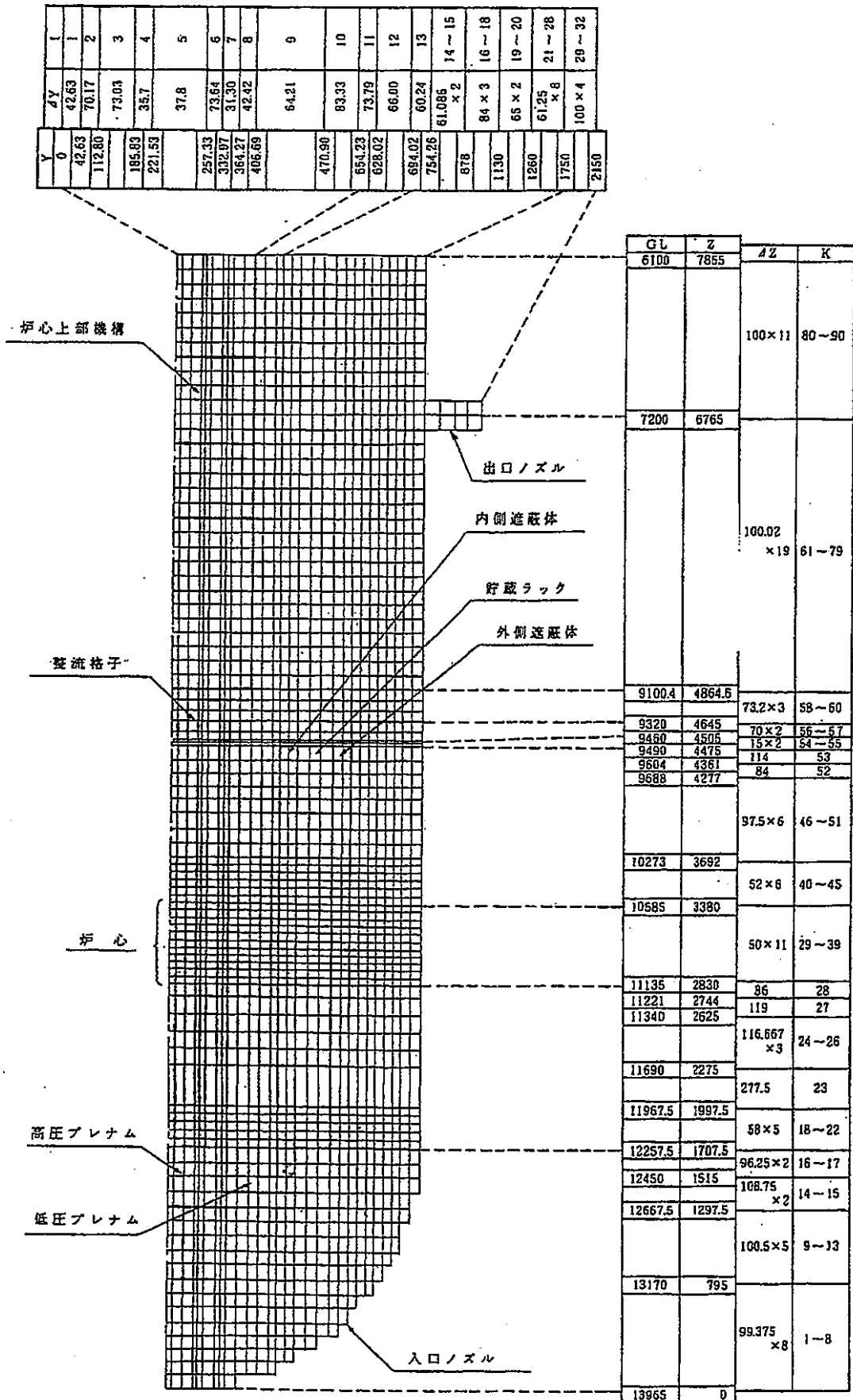
振動モード次数	固有振動数 (Hz)	等価流速 (m/sec)
1 次	10.8	1.20
2 次	36.3	1.98
3 次	72.3	3.11
4 次	116.5	4.40
5 次	140.1	1.20

冷却材流量の径方向成分データ

(単位：m/s)

	第3列相当位置	第5列相当位置
	$l=4$	$l=8$
K=90	-1.7521E-03	-1.8557E-03
89	-1.0005E-03	-1.1430E-03
88	-3.6885E-04	-5.7867E-04
87	1.5378E-04	5.6181E-07
86	6.0754E-04	5.7402E-04
85	1.0063E-03	1.1681E-03
84	1.3520E-03	1.8343E-03
83	-1.5466E-03	-1.7509E-03
82	-8.1911E-04	-9.9506E-04
81	-1.7015E-04	-2.7800E-04
80	3.8757E-04	3.6241E-04
79	8.7690E-04	3.6241E-04
78	1.2707E-03	9.8929E-04
77	-1.4970E-03	-1.6742E-03
76	-6.5092E-04	-8.5791E-04
75	9.0761E-05	-1.9665E-05
74	7.4587E-04	8.5937E-04
73	1.3107E-03	1.6932E-03
72	-1.5003E-03	-1.6675E-03
71	-6.8645E-04	-8.6926E-04
70	7.6170E-05	-2.3306E-05
69	7.5809E-04	8.4785E-04
68	1.3523E-03	1.7125E-03
67	-2.7618E-03	-2.6192E-03
66	-2.5294E-03	-2.6382E-03
65	-1.9891E-03	-2.4332E-03
64	-9.1603E-04	-1.6410E-03
63	5.6305E-04	1.9043E-04
62	2.4860E-03	2.8368E-03
61	5.1480E-03	6.3049E-03
60	2.0942E+00	3.0729E+00
59	1.2635E+00	1.7684E+00
58	6.1993E-01	7.1264E-01
57	0.0000E+00	0.0000E+00
56	0.0000E+00	0.0000E+00
55	-3.9178E-01	-1.4570E-01
54	0.0000E+00	-3.5484E-01
53	0.0000E+00	0.0000E+00

冷却材流量の径方向成分データの各ノード番号と実機の位置との対応



2.3 遮へい設計

遮へい設計の対象とする設備は、2.1章で記載している中性子検出器照射試験装置とする。

2.3.1 設計条件および計算条件

(1) 設計線量率

本装置内を通過する放射線については、回転プラグ上面ピット室 GL-3136mm の位置において下記の値を設計目標とする。

1) 通常運転時 320 μ Sv/h 以下 (C区域相当)

2) 炉停止1時間後 20 μ Sv/h 以下 (A区域相当)

設計目標：上記設計線量率の1/10。リークについてはこの100倍。

(2) 線源

(a) 通常運転時

通常運転時の中性子及びガンマ線の線源を以下に示す。

イ) 中性子

中性子については、中性子検出器照射試験装置が設置される計画の第3列(3B3)の制御棒予備孔位置における3列炉内中性子検出器照射試験装置孔での値(表2.3-1)とした。

ロ) ガンマ線

ガンマ線については、以下の通りとした。

①一次Na冷却材中(炉心からの2次 γ 線)

3列炉内中性子検出器照射試験装置孔。(表2.3-2)

②カバーガス中核分裂生成物(以下F. P. と略す)からの寄与。(表2.3-3(1/2))

③一次Na冷却材中F. P. からの寄与。(表2.3-3(2/2))

④カバーガス中Ar 41、Ne 23、Na 24, 22からの寄与。(表2.3-4(2/3), (3/3))

(b) 炉停止後1時間

炉停止1時間後の中性子及びガンマ線の線源を以下に示す。

イ) 中性子

炉停止後の中性子束はほとんどゼロとなり、寄与が十分小さい為無視する。

ロ) ガンマ線

ガンマ線については以下の通りとする。

①一次Na冷却材中(炉心からの2次 γ 線)

3列炉内中性子検出器照射試験装置孔。(表2.3-2)

②カバーガス中F. P. からの寄与。(1時間の減衰無視。運転中値で代替)

③一次Na冷却材中F. P. からの寄与。(1時間の減衰無視。運転中値で代替)

④カバーガス中Ar 41、Ne 23、Na 24, 22からの寄与。(1時間の減衰無視)

運転中値で代替)

2.3.2 中性子検出器照射試験装置の主要形状

本照射装置のしゃへい計算のためにモデル化した主要形状を図 2.3-1 に示す。なお、遮蔽体は案内管（内）と一体となっている。ケーブルはその遮蔽体の外周囲を這わせているので、そのケーブル部分の上下は案内管（内）の SUS により十分遮蔽されるため放射線のリークは生じないとした。

床板と本装置外管との間は Oリングで閉じられている。

2.3.3 計算

評価点の線量率 D は、線源表面の線量率 D_0 から表 2.3-5 に示す円筒ダクトまたは円環ダクトのストリーミングの式を使って求める。 D_0 は線束 Φ に変換係数を乗じることによって求める。なお、 Φ の代わりに単位体積当たりの線源強度 S_v が与えられた場合は、表 2.3-4(1/3) に示す簡易式により Φ を求める。

(1) 各種線源から線量率への変換

中性子線量率（単位： $\mu\text{Sv/h}$ ）は、動燃殿より支給していただいた中性子束データ（技-8-158）（単位： $\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$ ）に表 2.3-1 に示す変換係数を乗じて求めた。

1次 Na 冷却材中の 2次 γ 線量率は、動燃殿より支給していただいた運転中 2次 γ 線束に、Na 24 の主たる γ 線エネルギー 2.74MeV 近辺での変換係数を表 2.3-2 に示すように乗じて求めた。停止後 1 h の値は「常陽」での運転中と停止後 1 h での γ 線束の実測比を乗じて求めた。

1次 Na 冷却材中 F. P. からの寄与は、動燃殿より支給していただいた γ 線強度データ（技-9-61 改 1）を表 2.3-3 に示すように 7 群に分けた（これは、後にでてくる線束から線量率への変換が容易になるからである）。1次冷却材単位体積当たりの体積線源強度 S_v に変換する為に Na 密度を乗じた。 S_v から線束への変換は表 2.3-4(1/3) に示す式で 7 群毎の線束 Φ に変換した。 Φ から線源線量率への変換は変換係数を乗じて群毎の線量率を計算し、この和をとって線源表面の線量率 D_0 とした。

1次 Na 冷却材の放射化による Na 24 からの γ 線については、表 2.3-4(2/3) のように 1次 Na 冷却材中の Na 24 の放射能濃度（動燃殿より支給）に γ 放出割合を乗じて S_v を求めた。次に、 S_v から表 2.3-4(1/3) に示す式で Φ を求めた。最後に、 Φ に変換係数を乗じてエネルギー群毎の線量率 $\mu\text{Sv/h}$ を求め、この和を線源表面の線量率 D_0 とした。

カバーガス中 Ar41, Ne23 ガスによる寄与は表 2.3-4(1/3) に示す式 1 で回転プラグ下面での Φ を求め、変換係数を乗じて線量率とした。

カバーガス中 FP ガスによる寄与は表 2.3-4(1/3) に示す式 1 で回転プラグ下面での Φ を求め、変換係数を乗じて線量率とした。

(2) 原子炉運転中のリーク線量率

計算手法を表 2.3-5 に示す。円筒ダクトからのリークの場合は式 1 を使い、円環からのリークの場合は式 2 を使う。リークのない無垢の遮蔽体の場合には、SUS304 であれば 21cm で 1 桁減衰するとしている。円筒または円環上部に無垢の遮蔽体がある場合はダクトの減衰率と無垢の遮蔽体の厚さによる減衰率との積とする。

オフセット付き円環ダクトのリークの場合は 1 番目のダクトの減衰率と 2 番目のダクトの減衰率との積に 2 番目がオフセットになっている効果として 2 分の 1 を乗じる。

その他、ケーブルの銅による減衰効果は無しとした。

(a) 中性子

表 2.3-5 に計算結果を示す。

ルート①からのリークを述べる。検出器先端にある線源からでた中性子は、下部の案内管（外）と案内管（内）との広い円環をリークして式 2 で減衰する。次に、案内管（外）上部内側突起 63cm で 3 桁減衰する。更に、案内管（内）上部外側突起 105cm で 5 桁減衰する。

この時、案内管（外）内側突起部と案内管（内）上部内面との間にある隙間、案内管（内）上部外側突起部と案内管（外）内面との間にある隙間には突起部と同じ材料があるとした。この隙間からのリークは次のように評価した。

ルート①にある隙間からのリークを述べる。検出器先端にある線源からでた中性子は、案内管（外）と案内管（内）との円環を通過して、案内管（外）内側突起部と案内管（内）上部内面との円環隙間をリークして式 2 で減衰する。これが 1 番目のダクトとなる。更に、案内管（内）上部外側突起部と案内管（外）内面との円環隙間をリークして式 2 で減衰する。これはオフセットになった 2 番目のダクトであることから減衰率に 2 分の 1 を乗じる。

ここで、隙間部からのリークをダブルカウントしている突起部と同じ材料の遮蔽体で減衰する分については、ルート①の主たる円環面積よりも十分小さいことと、保守側であることから無視した。

ルート②からのリークを述べる。検出器先端にある線源からでた中性子は、下部の案内管（内）円筒をリークして式 1 で減衰する。次に、案内管（内）と一体となっている無垢の遮蔽 42+63+63cm で 8 桁減衰する。

(b) γ 線

表 2.3-6 に 2 次 γ 計算結果を示す。減衰ルートは中性子の場合と同じである。

表 2.3-7 に Na 24、F. P.、カバーガス Ar 41、Ne 23 の寄与の計算結果を示す。Na 24、F. P. については検出器先端部と Na 液面からの両方を評価した。カバーガス中では Ar 41、Ne 23、F. P. それぞれからの寄与を回転プラグ下面からとした。

(3) 原子炉停止中のリーク線量率

中性子の寄与はない。炉心からの γ 線の計算結果を 表 2.3-8 に示す。

Na 24、F. P.、カバーガスAr 41、Ne 23の寄与は、減衰時間が短いので表 2.3-7 に示す運転中の値と同じとした。

2.3.4 評価

計算結果を表 2.3-9 に示す。

原子炉運転中の線量率は $9.7 \mu\text{Sv/h}$ となり、目標線量率である $32 \mu\text{Sv/h}$ を満たしている。ただしストリーミング分の目標線量率 $3200 \mu\text{Sv/h}$ からは3桁近く低い値となった。

原子炉停止後1時間のリーク線量率は $0.015 \mu\text{Sv/h}$ になり、目標線量率 $2 \mu\text{Sv/h}$ を十分に満足する値となった。またストリーミング分の目標線量率 $200 \mu\text{Sv/h}$ にたいしては5桁近く低い値となった。

表2. 3-1 中性子源 (3列)

エネルギー 群 NO	変換係数 $\mu\text{Sv/h} /$ $\text{n/cm}^2\text{s}$	検出器先端		Na液面		遮蔽プラグ下面	
		#104 1394.3mm $\text{n/cm}^2\text{s}$	$\mu\text{Sv/h}$	#177 4715.0 $\text{n/cm}^2\text{s}$	$\mu\text{Sv/h}$	#190 5377.5 $\text{n/cm}^2\text{s}$	$\mu\text{Sv/h}$
1	3.133	2.61E+08	818251876	3.06E+01	9.59E+01	2.84E+01	8.89E+01
2	2.83	7.98E+08	2.259E+09	1.23E+02	3.48E+02	1.45E+02	4.10E+02
3	2.665	3.79E+09	1.011E+10	5.53E+02	1.47E+03	7.73E+02	2.06E+03
4	2.568	1.67E+10	4.296E+10	3.00E+03	7.69E+03	4.54E+03	1.17E+04
5	2.381	4.09E+10	9.734E+10	1.07E+04	2.55E+04	2.00E+04	4.77E+04
6	1.964	1.36E+11	2.667E+11	2.94E+04	5.78E+04	4.87E+04	9.56E+04
7	1.417	4.09E+11	5.794E+11	7.35E+04	1.04E+05	1.20E+05	1.70E+05
8	0.9559	5.76E+11	5.51E+11	1.80E+05	1.72E+05	2.72E+05	2.60E+05
9	0.5308	1.52E+12	8.047E+11	9.26E+05	4.91E+05	1.43E+06	7.58E+05
10	0.2162	1.64E+12	3.554E+11	2.25E+06	4.86E+05	2.97E+06	6.43E+05
11	0.08729	1.29E+12	1.123E+11	2.94E+06	2.56E+05	3.61E+06	3.15E+05
12	0.05697	6.39E+11	3.643E+10	2.34E+06	1.33E+05	3.94E+06	2.25E+05
13	0.04942	8.22E+11	4.063E+10	4.09E+06	2.02E+05	5.11E+06	2.52E+05
14	0.04531	1.34E+12	6.092E+10	6.93E+06	3.14E+05	7.75E+06	3.51E+05
15	0.04817	9.53E+11	4.591E+10	7.63E+06	3.68E+05	7.82E+06	3.77E+05
16	0.05209	9.59E+11	4.993E+10	1.68E+07	8.73E+05	1.59E+07	8.26E+05
17	0.05964	6.09E+11	3.635E+10	3.00E+07	1.79E+06	2.70E+07	1.61E+06
18	0.06798	3.86E+11	2.627E+10	4.27E+07	2.90E+06	3.65E+07	2.48E+06
19	0.07572	1.96E+11	1.487E+10	4.27E+07	3.23E+06	3.52E+07	2.67E+06
20	0.07959	5.97E+10	4.754E+09	2.30E+07	1.83E+06	1.84E+07	1.47E+06
21	0.05626	1.19E+10	6.68E+08	1.32E+07	7.45E+05	1.12E+07	6.29E+05
和		1.16E+13	3.14E+12	1.96E+08	1.40E+07	1.77E+08	1.32E+07

表2. 3-2 1次冷却材Na中2次 γ 線源(3列)

エネルギー		変換係数
群No	MeV	$\mu\text{Sv/h} / \text{n/cm}^2\text{s}$
1	14.8	9.68E-02
2	8.5	6.47E-02
3	5.3	4.71E-02
4	3.2	3.49E-02
5	2.1	2.40E-02
6	1.04	1.29E-02
7	0.400	3.43E-03

	エネルギー	変換係数	検出器先端		Na液面	
	MeV	$\mu\text{Sv/h} / \text{n/cm}^2\text{s}$	#104 1394.3mm		#177 4715.0	
			$\text{n/cm}^2\text{s}$	$\mu\text{Sv/h}$	$\text{n/cm}^2\text{s}$	$\mu\text{Sv/h}$
運転中	(3.2)	(0.0349)	1.04E+12	3.63E+10	1.24E+08	4.33E+06
停止中	(3.2)	(0.0349)	1.46E+07	5.08E+05	1.74E+03	6.06E+01

運転中：全ガンマ線束($\text{n/cm}^2\text{s}$)のみ既知。変換係数は中央の群No4の数値を使用。

停止中：運転中の値 $\times 1.4\text{E-}5$

表2. 3-3 (1/2) カバーガス中FP γ 線源強度

エネルギー		γ 線強度
群No	MeV	Sv $\gamma/cm^3 \cdot s$
1	14 ⁻⁸ 計	0.00E+00
2	8 ⁻⁵ 計	1.09E+06
3	5 ⁻³ 計	1.65E+07
4	3 ⁻² 計	2.85E+07
		1.72E+08
		2.01E+08
5	2 ⁻¹ 計	1.65E+08
		1.34E+08
		2.99E+08
6	1 ^{-0.4} 計	2.93E+08
		2.15E+08
		5.08E+08
7	0.4 ^{-0.0} 計	1.05E+09
		1.59E+08
		2.46E+08
		2.30E+08
		3.21E+08
		1.49E+08
		1.08E+09
3.24E+09		

表2. 3-3 (2/2) 1次Na冷却材中FP γ 線源強度

エネルギー		γ 線強度	
群No	MeV	$\gamma/g \cdot s$	Sv $\gamma/cm^3 \cdot s$
1	14 ⁻⁸ 計	5.67E+00	4.72E+00
2	8 ⁻⁵ 計	2.44E+04	2.30E+06
		2.74E+06	
		2.76E+06	
3	5 ⁻³ 計	5.72E+06	4.77E+06
4	3 ⁻² 計	1.17E+07	2.77E+07
		2.16E+07	
		3.33E+07	
5	2 ⁻¹ 計	5.16E+07	1.74E+08
		1.57E+08	
		2.09E+08	
6	1 ^{-0.4} 計	2.88E+08	5.98E+08
		2.64E+08	
		1.66E+08	
7	0.4 ^{-0.0} 計	7.18E+08	3.11E+09
		2.30E+09	
		1.46E+08	
		1.49E+08	
		1.27E+08	
		1.22E+08	
		1.61E+08	
7.28E+08			

Na密度
0.83312g/cc
at 500° C

表2. 3-4 (1/3) 運転中FPからのγ線源

群 番号	エネルギー MeV	変換係数 μSv/h / γ/cm ² s	液体		Na液面		液体中検出器先端		ガス Sv	上部空間(プラグ下)	
			Sv	γ/cm ² s	式2Φ	μSv/h	式3Φ	μSv/h		γ/cm ² s	式1Φ
1	14.8	9.68E-02	4.72E+00	6.06E+02	5.86E+01	1.21E+03	1.17E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
2	8.5	6.47E-02	2.30E+06	2.95E+08	1.91E+07	5.90E+08	3.82E+07	1.09E+06	7.17E+07	4.64E+06	
3	5.3	4.71E-02	4.77E+06	6.12E+08	2.88E+07	1.22E+09	5.76E+07	1.65E+07	1.08E+09	5.10E+07	
4	3.2	3.49E-02	2.77E+07	3.55E+09	1.24E+08	7.11E+09	2.48E+08	2.01E+08	1.32E+10	4.62E+08	
5	2.1	2.40E-02	1.74E+08	2.23E+10	5.35E+08	4.46E+10	1.07E+09	2.99E+08	1.97E+10	4.71E+08	
6	1.04	1.29E-02	5.98E+08	7.67E+10	9.89E+08	1.53E+11	1.98E+09	5.08E+08	3.34E+10	4.30E+08	
7	0.400	3.43E-03	3.11E+09	3.99E+11	1.37E+09	7.98E+11	2.74E+09	3.24E+09	2.13E+11	7.31E+08	
(線源線量率D0) 和			3.92E+09	5.03E+11	2.89E+09	1.01E+12	5.78E+09	4.27E+09	2.80E+11	2.09E+09	

以下の式の出典：竹内著 放射線遮蔽設計計算の入門・基礎講座

式1 $\Phi = Sv \times H/2 \times [\ln\{ 1+(R/H)^2 \} / 2 + R/H \times \arctan(H/R)] = Sv \times 65.74$

Φ：円柱体線源。線源内物質の吸収係数小さく無視できる場合。円柱頂部軸上の線束。(n/cm².s)

Sv：体線源。(γ/cm²) H：円柱高さ。上部空間幅。6100-5460mm=64cm R：伊容器内面半径。3.6m/2=180cm。

式2 $\Phi = B(\mu s \times H, \alpha, \beta) \times Sv / (2 \times \mu s) \times [1 - E_2(\mu s \times H)] < B(\mu s \times H, \alpha, \beta) \times Sv / (2 \times \mu s) = (1+0.019 \times 339) \times Sv / 0.058$

Φ：平板有限厚さ体線源の表面上の線束。(n/cm².s)

E2(μs×H)：第2種誤差関数

B(μs×H, α, β=1)：ビルドアップ係数。=1+(α-1)×μs×H=1+(1.65-1)×0.029×H (Naの9MeVαは約1.65。竹内著 放射線遮蔽計算の理論と実際)

Sv：体線源。(γ/cm²) H：厚さ。燃料頂部からNa液面。9490-6100mm=339cm

μs：線源含有物質Naの線減衰係数。0.0348×0.83312=0.029 (at3MeV)

式3 $\Phi = B(\mu s \times H/2, \alpha, \beta) \times Sv / (2 \times \mu s) \times [2 \times G(\mu s \times H/2, \mu s \times R)] < B(\mu s \times H/2, \alpha, \beta) \times Sv / (2 \times \mu s) \times 2 = (1+0.019 \times 339) \times Sv / 0.058 \times 2$

Φ：円柱体線源の円柱中心部の線束。(n/cm².s)

G(a, b)：∫₀^bF(arctan(a/x), x)dx F(b, a)：第1種正割積分：∫₀^bexp[-a×sec(y)]dy

Sv：体線源。(γ/cm²) H：燃料頂部からNa液面高さの2倍。2×(9490-6100mm)=2×339cm

μs：線源含有物質Naの線減衰係数。0.0348×0.83312=0.029 (at3MeV)

表2. 3-4 (2/3) 運転中Na22, 24からのγ線源

群 番号	エネルギー MeV	変換係数 μSv/h / h/cm ² *s	核 種	放射能濃度 Bq/cc	γエネルギー MeV	γ放出割合 —	Sv h/cm ² *s	液体中検出器先端		Na液面	
								式4Φ	μSv/h	式2Φ	μSv/h
1	14.8	9.68E-02	無	ゼロ	—	—	—	ゼロ	ゼロ	ゼロ	ゼロ
2	8.5	6.47E-02	無	ゼロ	—	—	—	ゼロ	ゼロ	ゼロ	ゼロ
3	5.3	4.71E-02	Na24	1.33E+09	3.87E+00	8.00E-04	1.07E+06	2.74E+08	1.29E+07	1.37E+08	6.44E+06
4	3.2	3.49E-02	Na24	1.33E+09	2.75E+00	9.99E-01	1.33E+09	3.42E+11	1.19E+10	1.71E+11	5.97E+09
			Na24	1.33E+09	1.37E+00	9.99E-01	1.33E+09	—	—	—	—
			Na22	1.67E+04	1.27E+00	9.99E-01	1.67E+04	—	—	—	—
5	2.1	2.40E-02	計	—	—	—	1.33E+09	3.41E+11	8.18E+09	1.71E+11	4.09E+09
6	1.0.4	1.29E-02	Na22	1.67E+04	5.11E-01	1.81E+00	3.03E+04	7.76E+06	1.00E+05	3.88E+06	5.00E+04
7	0.4 0.0	3.43E-03	無	ゼロ	—	—	—	ゼロ	ゼロ	ゼロ	ゼロ
和								6.82E+11	2.01E+10	3.41E+11	9.09E+09

表2. 3-4 (3/3) 運転中Ar41, Ne23からのγ線源

群 番号	エネルギー MeV	変換係数 μSv/h / h/cm ² *s	核 種	放射能濃度 Bq/cc	γエネルギー MeV	γ放出割合 —	Sv h/cm ² *s	ガイド管・外管隙間	
								式3Φ	μSv/h
1	14.8	9.68E-02	無	ゼロ	—	—	—	ゼロ	ゼロ
2	8.5	6.47E-02	無	ゼロ	—	—	—	ゼロ	ゼロ
3	5.3	4.71E-02	無	ゼロ	—	—	—	ゼロ	ゼロ
4	3.2	3.49E-02	Ne23	7.10E+07	2.08E+00	1.00E-03	7.10E+04	7.57E+02	2.64E+01
			Ar41	2.10E+04	1.68E+00	5.00E-04	1.05E+01	—	—
			Ar41	2.10E+04	1.29E+00	9.92E-01	2.08E+04	—	—
			Ne23	7.10E+07	1.64E+00	9.50E-03	6.75E+05	—	—
5	2.1	2.40E-02	計	—	—	—	6.96E+06	7.42E+04	1.78E+03
6	1.0.4	1.29E-02	Ne23	7.10E+07	4.40E-01	3.30E-01	2.34E+07	2.50E+05	3.22E+03
7	0.4 0.0	3.43E-03	無	ゼロ	—	—	—	ゼロ	ゼロ
和								3.24E+05	5.02E+03

式の番号は、表2.3-4(1/3)参照

表 2. 3-5 運転中中性子リーク

ルート	式	r in(cm)	r out(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	632.4-168	63+105	1.66E-4*1E-8=1.66E-12	1/2*3.14E12	2.72E+00
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	464.4+63	0	7.12E-07		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	1/2 * 6.64E-6		
隙間計						7.12E-7 * 0.5 * 6.64E-6=2.36E-12	1/2*3.14E12	3.71E+00
ルート②	1	-	R9=4.055	359.4	52.5+63+63	6.36E-4 * 3.2E-9= 2.04E-12	1/2*3.14E12	3.20E+00

計 9.63

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (rout/Z)^2$

円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times rout^2 - rin^2) \times \text{acos}(rin/rout) - rin \times \text{SQR}(rout^2 - rin^2)] / (\pi \times Z^2)$

D0 : 線源表面の線量率(μ Sv/h)

C : ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2

rin : 円環内側半径 (cm) rout:円環外側半径または円筒半径 (cm)

Z : 円環または円筒長さ (cm) acos : arccos

物質通過による減衰率

中性子 : SUS304 ---21cm/1桁

γ : SUS304 ---8.2cm/1桁

表2. 3-6 運転中1次Na冷却材中からの2次γ線リーク

ルート	式	rin(cm)	rout(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	632.4-168=464.4	63+105	$3.32E-5 * 3.3E-21 = 1.08E-25$	1/2*3.63E10	1.96E-15
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	464.4+63=527.4	0	1.42E-07		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	1/2 * 1.33E-6		
隙間計						$1.42E-7 * 0.5 * 1.33E-6 = 9.44E-14$	1/2*3.63E10	1.72E-03
ルート②	1	-	R9=4.055	359.4	52.5+63+63	$1.27E-4 * 1.7E-22 = 2.17E-26$	1/2*3.63E10	3.93E-16

計 1.72E-3

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (rout/Z)^2$

円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times rout^2 - rin^2) \times \text{acos}(rin/rout) - rin \times \text{SQR}(rout^2 - rin^2)] / (\pi \times Z^2)$

D0: 線源表面の線量率(μSv/h)

C: ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2

rin: 円環内側半径(cm) rout: 円環外側半径または円筒半径(cm)

Z: 円環または円筒長さ(cm) acos: arccos

物質通過による減衰率

中性子: SUS304---21cm/1桁

γ: SUS304---8.2cm/1桁

表2. 3-7 (1/7) 運転中 γ 線源毎の γ 線束

線源名	Sv(μ /cm ² ・s)	場所	D0(μ Sv/h)	D(μ Sv/h)
Ar, Neガス	表2. 3-4(3/3)	回転プラグ下	3. 10E+07	2. 61E-02
FPガス	表2. 3-4(3/3)	回転プラグ下	2. 09E+09	1. 76E+00
液体F P	表2. 3-4(1/3)	検出器先端	1/2*5. 78E09	3. 12E-14
Na24	表2. 3-4(2/3)	検出器先端	1/2*2. 01E10	1. 09E-13
液体F P	表2. 3-4(1/3)	N a液面	2. 89E+09	1. 47E-01
Na24	表2. 3-4(2/3)	N a液面	9. 09E+09	4. 61E-01

式の出典及び番号は、表2. 3-4(1/3)に記載してある。

表 2. 3-7 (2/7) 運転中1次Na冷却材液面からのFPによるγ線リーク

ルート	式	rin(cm)	rouT(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	464.4-336=128.4	63+105	$4.34E-4 * 3.3E-21=1.43E-24$	2.89E+09	4.13E-15
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	64.4-336+63=191.4	0	1.08E-06		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	$1/2 * 1.33E-6$		
隙間計						$1.08E-6 * 0.5 * 1.33E-6 = 7.18E-13$	2.89E+09	2.07E-03
ルート②	1	-	R9=4.055	348.9-336=12.9	52.5+63+63=178.5	$0.091 * 1.7E-22 = 1.5E-21$	2.89E+09	4.40E-12
								計 2.07E-3

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (r_{out}/Z)^2$

円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times r_{out}^2 - r_{in}^2) \times \text{acos}(r_{in}/r_{out}) - r_{in} \times \text{SQR}(r_{out}^2 - r_{in}^2)] / (\pi \times Z^2)$

D0: 線源表面の線量率(μ Sv/h)

C: ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2

rin: 円環内側半径(cm) rout: 円環外側半径または円筒半径(cm)

Z: 円環または円筒長さ(cm) acos: arccos

物質通過による減衰率

中性子: SUS304---21cm/1桁

γ: SUS304---8.2cm/1桁

表2. 3-7 (3/7) 運転中1次Na冷却材液面からのNa24によるγ線リーク

ルート	式	r in(cm)	r out(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	464.4-336=128.4	63+105	$4.34E-4 * 3.3E-21=1.43E-24$	9.09E+09	1.42-14
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	64.4-336+63=191.4	0	1.08E-06		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	$1/2 * 1.33E-6$		
隙間計						$1.08E-6*0.5*1.33E-6=7.18E-13$	9.09E+09	6.53E-03
ルート②	1	-	R9=4.055	348.9-336=12.9	52.5+63+63=178.5	$0.091 * 1.7E-22 = 1.5E-21$	9.09E+09	1.36E-11

計 6.53E-3

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (rout/Z)^2$

円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times rout^2 - rin^2) \times \text{acos}(rin/rout) - rin \times \text{SQR}(rout^2 - rin^2)] / (\pi \times Z^2)$

D0:線源氏表面の線量率(μ Sv/h)

C:ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2

rin:円環内側半径(cm) rout:円環外側半径または円筒半径(cm)

Z:円環または円筒長さ(cm) acos:arccos

物質通過による減衰率

中性子: SUS304---21cm/1桁

γ: SUS304---8.2cm/1桁

表2. 3-7 (4/7) 運転中カバーガス中Ar 41, Ne 23 (回転プラグ下) によるγ線リーク

ルート	式	r in(cm)	r out(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	546.0-913.6-105-63=64.4	63+105	$1.73-3 * 3.3E-21=5.63E-24$	3.10E+07	1.75E-16
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	64.4+63=127.4	0	2.44E-06		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	$1/2 * 1.33E-8$		
隙間計						$2.44E-6 * 0.5 * 1.33E-6=1.62E-12$	3.10E+07	5.02E-05
ルート②	1	-	R9=4.055	0	64.4+63=127.4	2.90E-16	3.10E+07	8.99E-09

計 5.02E-5

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (r_{out}/Z)^2$

円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times r_{out}^2 - r_{in}^2) \times \text{acos}(r_{in}/r_{out}) - r_{in} \times \text{SQR}(r_{out}^2 - r_{in}^2)] / (\pi \times Z^2)$

D0: 線源表面の線量率(μSv/h)

C: ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2

r in: 円環内側半径 r out: 円環外側半径または円筒半径 (cm)

Z: 円環または円筒, acos: arccos

物質通過による減衰率

中性子: SUS304---21cm/1桁

γ: SUS304---8.2cm/1桁

表2. 3-7 (5/7) 運転中カバーガス中FP (回転プラグ下) によるγ線リーク

ルート	式	r in(cm)	r out(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	546.0-313.6-105-63=64.4	63+105	$1.73 \cdot 3 \cdot 3.3E-21=5.63E-24$	2.09E+09	1.17E-14
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	64.4+63=127.4	0	2.44E-06		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	$1/2 \cdot 1.33E-8$		
隙間計						$2.44E-6 \cdot 0.5 \cdot 1.33E-6=1.62E-12$	2.09E+09	3.39E-03
ルート②	1	-	R9=4.055	464.4-348.9=12.9	0	2.90E-16	2.09E+09	6.06E-07

計3.39E-3

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (r_{out}/Z)^2$
 円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times r_{out}^2 - r_{in}^2) \times \text{acos}(r_{in}/r_{out}) - r_{in} \times \text{SQR}(r_{out}^2 - r_{in}^2)] / (\pi \times Z^2)$
 D0: 線源表面の線量率(μ Sv/h)
 C: ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2
 r in: 円環内側半径 r out: 円環外側半径または円筒半径 (cm)
 Z: 円環または円筒, acos: arccos

物質通過による減衰率

中性子: SUS304---21cm/1桁
 γ: SUS304---8.2cm/1桁

表 2. 3-7 (6/7) 運転中1次Na冷却材中検出器先端からのFPによるγ線リーク

ルート	式	rin(cm)	rouT(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	632.4-168=464.4	63+105	$3.32E-5 * 3.3E-21 = 1.08E-25$	2.89E+09	1.50E-15
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	464.4+63=527.4	0	1.42E-07		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	$1/2 * 1.33E-6$		
隙間計						$1.42E-7 * 0.5 * 1.33E-6 = 9.44E-14$	2.89E+09	1.31E-03
ルート②	1	-	R9=4.055	359.4	52.5+63+63	$1.27E-4 * 1.7E-22 = 2.17E-26$	2.89E+09	3.00E-16

計 1.31E-3

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (r_{out}/Z)^2$
 円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times r_{out}^2 - r_{in}^2) \times \text{acos}(r_{in}/r_{out}) - r_{in} \times \text{SQR}(r_{out}^2 - r_{in}^2)] / (\pi \times Z^2)$
 D0: 線源表面の線量率(μ Sv/h)
 C: ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2
 rin: 円環内側半径 (cm) rout: 円環外側半径または円筒半径 (cm)
 Z: 円環または円筒長さ (cm) acos: arccos

物質通過による減衰率
 中性子: SUS304---21cm/1桁
 γ: SUS304---8.2cm/1桁

表 2. 3-7 (7/7) 運転中1次Na冷却材中検出器先端からのNa24によるγ線リーク

ルート	式	r in(cm)	r out(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	632.4-168=464.4	63+105	$3.32E-5 * 3.3E-21 = 1.08E-25$	1.01E+10	1.09E-15
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	464.4+63=527.4	0	1.42E-07		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	$1/2 * 1.33E-6$		
隙間計						$1.42E-7 * 0.5 * 1.33E-6 = 9.44E-14$	1.01E+10	9.53E-04
ルート②	1	-	R9=4.055	359.4	52.5+63+63	$1.27E-4 * 1.7E-22 = 2.17E-26$	1.01E+10	2.19E-16

計 9.53E-4

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (r_{out}/Z)^2$

円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times r_{out}^2 - r_{in}^2) \times \text{acos}(r_{in}/r_{out}) - r_{in} \times \text{SQR}(r_{out}^2 - r_{in}^2)] / (\pi \times Z^2)$

D0:線源表面の線量率(μSv/h)

C:ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2

r in:円環内側半径(cm) r out:円環外側半径または円筒半径(cm)

Z:円環または円筒長さ(cm) acos:arccos

物質通過による減衰率

中性子: SUS304---21cm/1桁

γ: SUS304---8.2cm/1桁

表2. 3-8 停止中1次Na冷却材中からの2次γ線リーク

ルート	式	r in(cm)	r out(cm)	Z(cm)	通過遮蔽体長	減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)
ルート①	2	R8=4.455	R5=6.1	632.4-168	63+105	$3.32E-5 * 3.3E-21 = 1.08E-25$	1/2*5.08E5	2.75E-20
下隙間	2	R2=5.55	R6=5.6	464.4+63	0	1.42E-07		
上隙間オフセット	2	R1=6.075	R5=6.1	105	0	1/2 * 1.33E-6		
隙間計						$1.42E-7 * 0.5 * 1.33E-6 = 9.44E-14$	1/2*5.08E5	2.40E-08
ルート②	1	-	R9=4.055	359.4	52.5+63+63	$1.27E-4 * 1.7E-22 = 2.17E-26$	1/2*5.08E5	5.51E-21

計 2.40E-8

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (r_{out}/Z)^2$

円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times r_{out}^2 - r_{in}^2) \times \text{acos}(r_{in}/r_{out}) - r_{in} \times \text{SQR}(r_{out}^2 - r_{in}^2)] / (\pi \times Z^2)$

D0: 線源表面の線量率(μSv/h)

C: ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2

r in: 円環内側半径(cm) r out: 円環外側半径または円筒半径(cm)

Z: 円環または円筒長さ(cm) acos: arccos

物質通過による減衰率

中性子: SUS304---21cm/1桁

γ: SUS304---8.2cm/1桁

表 2. 3-9 (1/2) 運転中線量率計算結果

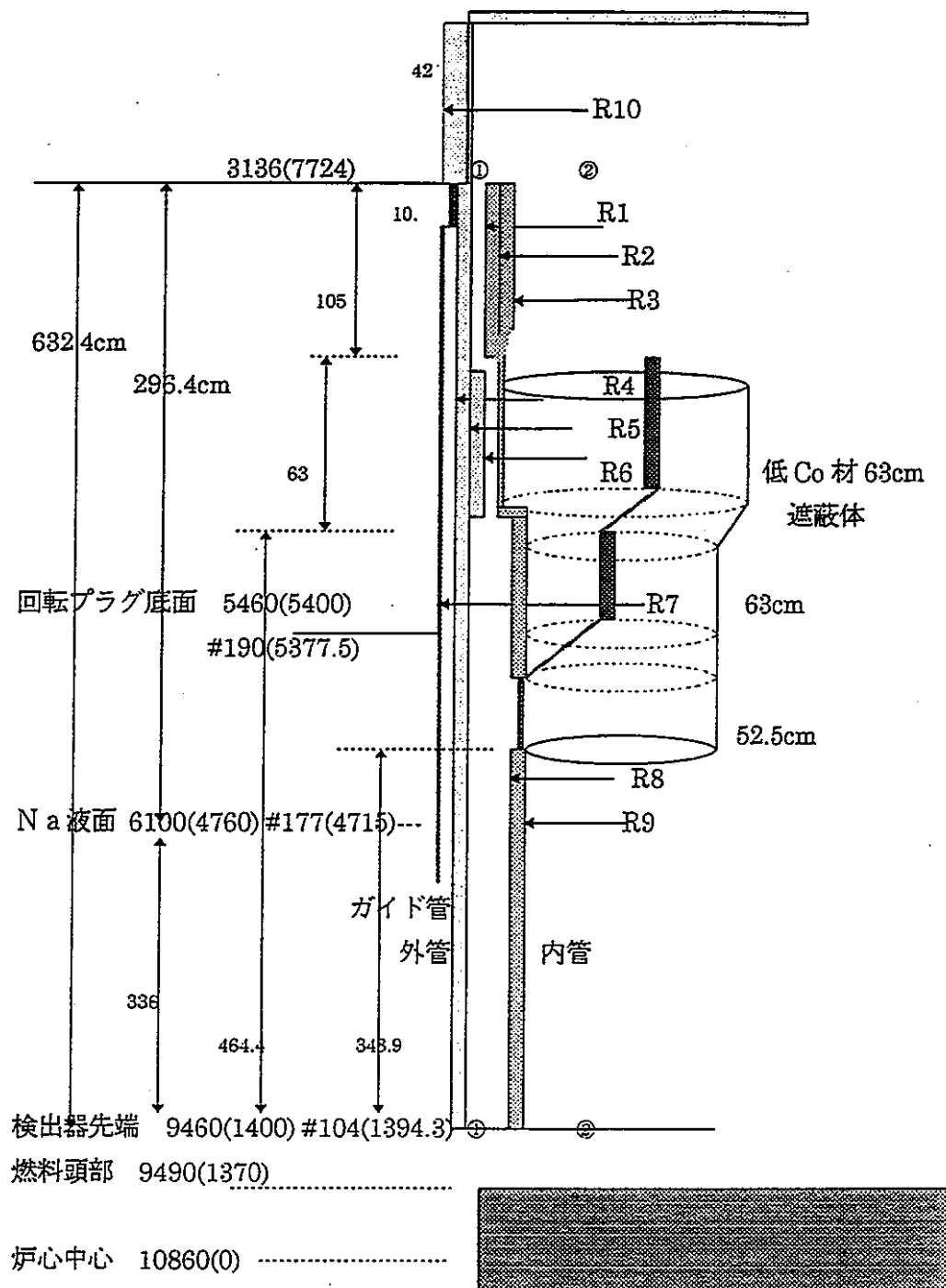
単位：μSv/h

放射線種類	中性子		2次γ					
	1次冷却材中 検出器先端	1次冷却材中 検出器先端	1次冷却材中 検出器先端の F. P.	1次冷却材液 面のF. P.	1次冷却材 中検出器先 端のNa24	1次冷却材液 面のNa24	カバーガス中 のAr41, Ne23	カバーガス中 のF. P.
線量率	9.63	1.72E-03	1.31E-03	2.07E-03	9.53E-04	6.53E-03	5.02E-05	3.93E-03

表 2. 3-9 (2/2) 停止中線量率計算結果

単位：μSv/h

放射線種類	中性子		2次γ					
	1次冷却材中 検出器先端	1次冷却材中 検出器先端	1次冷却材中 検出器先端の F. P.	1次冷却材液 面のF. P.	1次冷却材 中検出器先 端のNa24	1次冷却材液 面のNa24	カバーガス中 のAr41, Ne23	カバーガス中 のF. P.
線量率	ゼロ	2.40E-08	1.31E-03	2.07E-03	9.53E-04	6.53E-03	5.02E-05	3.93E-03



- R1 : 内管外凸半径=121.5/2mm=6.075cm R2 : 内管外半径=111/2mm=5.55cm
 R3 : 内管内半径=80/2=4.0 R4 : 外管外半径=15/2=7.5 R5 : 外管内半径=122/2=6.1
 R6 : 外管内凸半径=112/2=5.6 R7 : 回転プラグ付帯ガイド管半径=7.5+0.26=7.76
 R8 : 下内管外半径=89.1/2=4.455 R9 : 下内管内半径=81.1/2=4.055
 R10 : 外管被覆管半径=7.8

図 2. 3 - 1 主要形状図

2.3.5 照射装置周辺部のリーク状況

回転プラグと本照射装置との間には隙間がある。これについても評価を実施した。結果を表 2.3-10 に示す。表 2.3-10 から分かるように、ハウジングに付帯している被覆の遮へいにより線量率は約 $5 \mu\text{Sv/H}$ と充分低く押さえられている。

なお計算は以下のように行った。

1 次 Na 冷却材表面からの中性子の線量率は、表 2.3-1 の#177 の欄の値を使用した。この中性子は回転プラグと本装置外管との間をストリーミングしてプラグ床下に至る。その減衰率は式 2 で求めた。次に、この中性子は床の厚さ 10cm で 0.33 減衰する。これがノミナル値 D である。なお、Oリング部分の回転プラグと本照射装置とには 0.0063cm の隙間があるが、式 2 で評価するには十分小さい値であるため隙間はないとした。

ハウジングは被覆されていて 42cm あり、これは中性子の減衰率として 2 桁の効果がある。この効果を考慮した結果が D1 である。

表 2. 3-10 回転プラグと照射装置間隙間からのリーク

線源と位置	式	r in(cm)	r out(cm)	Z(cm)	減衰率	床10cm減衰率	D0(μSv/h)	D(μSv/h)	ハウジング被覆遮蔽42cm減衰率	D1(μSv/h)
1次冷却材液面での中性子	2	R4=7.5	R7=7.76	296.4-10=286	3.356E-5	3.30E-01	1.40E+07	1.55E+02	1.00E-02	4.70E+00
1次冷却材液面Na24からのγ	2	R4=7.5	R7=7.76	296.4-10=286	6.71E-6	6.00E-02	9.09E+09	3.60E+03	7.55E-06	4.53E-01
1次冷却材液面F.P.からのγ	2	R4=7.5	R7=7.76	296.4-10=286	6.71E-06	6.00E-02	2.89E+09	1.16E+02	7.55E-06	1.47E-02
カバーガス中F.P.からのγ	2	R4=7.5	R7=7.76	546-313.6-10=222.4	1.11E-05	6.00E-02	2.09E+09	1.39E+03	7.55E-06	1.75E-01
カバーガス中Ar41, Ne24からのγ	2	R4=7.5	R7=7.76	546-313.6-10=222.4	1.11E-05	6.00E-02	3.10E+07	2.06E+01	7.55E-06	2.60E-04

円筒ダクト 式1 $D = D0 \times (C/2) \times (rout/Z)^2$

円環ダクト 式2 $D = D0 \times (C/2) \times [(2 \times rout^2 - rin^2) \times \text{acos}(rin/rout) - rin \times \text{SQR}(rout^2 - rin^2)] / (\pi \times Z^2)$

D0: 線源表面の線量率(μ Sv/h)

C: ウェイト係数 中性子=10 ガンマ=2

rin: 円環内側半径 (cm)

Z: 円環または円筒長さ (cm)

rout: 円環外側半径または円筒半径 (cm)

acos: arccos

物質通過による減衰率

中性子: SUS304---21cm/1桁

γ: SUS304---8.2cm/1桁

2.4 中性子検出器加熱装置の設置及び交換方法の検討

2.4.1 装置の設置方法について

中性子検出器加熱装置の設置（炉外での組立および炉上部での装荷作業）については3. 1項で説明する。

2.4.2 使用途中での交換方法について

炉内中性子検出器照射試験装置は、案内管と中性子検出器を収納している内管とが分離できる様に組み立てているため、照射試験装置の故障時（ヒータの断線等）の交換時には、内管（中性子検出器を保持している部品）のみ空気雰囲気中で引抜き（治具等が必要）案内管を炉内に残すことが可能である。この時。案内管内のしゃへいが無くなるためしゃへいを行うプラグ等を挿入する必要がある。また、この作業時には、空気雰囲気中で作業が可能である。上記作業で以下の取合を確認する必要がある。

- 1) 内管引抜治具（つかみ方法）
- 2) 取り外し時の隣接CRDとの作業性確認
- 3) 装荷プラグの形状・しゃへい

3. 照射試験装置の取り合い検討

3.1 据え付け・撤去の取り合い検討

3.1.1 概要

本資料は、炉内中性子検出器照射試験装置の常陽での据え付け・撤去作業について検討したものである。炉上部への据え付け作業は、動燃団殿所掌の特性試験キャスク（補助キャスク）を使用して行い、取り出しについてはCRD上部案内管の取り外しで用いる上部案内管取扱機を用いて行う。これらの状態を図3. 1-1および図3. 1-2に示す。また、装荷・脱荷時に上部ハウジング上端に取り付けるハンドリングキャップの構造を図3. 1-3に示す。

3.1.2 据え付け取り合い検討

炉内中性子検出器照射試験装置の炉上部への据え付け手順を以下に示す。また、手順の流れ図を図3. 1-4に示す。

①中性子検出器照射試験装置組立施設で案内管の点検を行う。：縦置き組立装置との取り合い確認要

（Oリング点検、グリース塗布および異物あるいは内蔵物有無の確認）

②上部ハウジング上端に装荷・脱荷専用のハンドリングキャップを取り付ける。

（ハンドリングキャップの取付方位に注意する）

③専用の輸送箱入れ、トレーラに載せメンテナンス建屋に運搬する。

④トレーラから降ろし、メンテナンス台車に搭載し、メンテナンス建屋から原子炉建屋へ移送する。

⑤原子炉建屋内で起立させ、機器ピット内機器収納管へ据え付ける。

（炉上部据付時の据付フランジ部ガイド・キー方位確認）

⑥特性試験用キャスクを機器ピットへ据え付ける。

⑦電動グリッパ操作で、中性子検出器照射試験装置を特性試験用キャスク内へ収納する。

⑧特性試験用キャスクを炉上部ピット蓋上へ移送し、上部案内管取扱機固定ドアバルブ上へアダプタフランジを介して据え付ける。

⑨アルゴンガス系配管を接続後、ガス置換およびリーク・チェック後特性試験用キャスク内を加圧する。（アルゴンガスのブローダウン準備）

⑩特性試験用キャスク・ドアバルブ、上部案内管取扱機固定ドアバルブおよび案内筒ドアバルブを開きアルゴンガスでブローダウンしながら、グリッパ操作装置の延長管を順次組み立て挿入する。

⑪特性試験用キャスクの覗き窓から、中性子検出器照射試験装置案内管据え付けフランジ部ガイドキーの方位を確認し、全挿入する。なお、全挿入位置確認は、クレーン・ロードセル荷重指示値、グリッパ操作装置の延長管挿入寸法およびアルゴンガスのブローダウン流量により行う。

⑫グリッパの爪を閉じハンドリングキャップから切り離し、グリッパのみ引き上げる。

- ⑬特性試験用キャスク等を取り外す。
- ⑭中性子検出器照射試験装置案内管据え付けフランジのボルト締めを行う。(6—M16穴付きボルト)
- ⑮上部ハウジング上端にシールコネクタ付きのフランジを取り付ける。この時、上部ハウジング内のキャノンプラグを接続する。
- ⑯ガス系、電気配線を接続する。：相手側の取り合い仕様確認要
- ⑰シール部の漏洩試験および電気試験(絶縁抵抗、導通試験)を行う。

据え付け完了

3.1.3 撤去取り合い検討

炉内中性子検出器照射試験装置の炉上部での撤去作業手順を以下に示す。また、手順の流れ図を図3.1-5に示す。

- ①ガス系配管および電気配線を外す。
- ②上部ハウジング上端のシールコネクタ付きのフランジを外し、この部分にハンドリングキャップ（図3.1-3）を取り付ける。
- ③中性子検出器照射試験装置案内管据え付けフランジのボルトを緩める。（6-M16穴付きボルト）
- ④炉上部ピット蓋上に上部案内管取扱機の固定ドアバルブまでを据え付ける。
- ⑤回転プラグを旋回して取扱機取扱対象位置へ位置決めを行い停止させる。（回転プラグは、ジャッキアップ状態で停止）
- ⑥案内筒および案内筒ドアバルブを据え付ける。
- ⑦案内筒にアルゴンガス系配管を接続し、ガス置換およびリークチェックを行う。
- ⑧上部案内管取扱機本体および支持パイプを据え付ける。
- ⑨上部案内管取扱機本体内を加圧する。（アルゴンガスのブローダウン準備）
- ⑩上部案内管取扱機本体用ドアバルブ、上部案内管取扱機固定ドアバルブおよび案内筒ドアバルブを開き、アルゴンガスでブローダウンしながら、グリップ操作装置の延長管を順次組み立て挿入する。
- ⑪グリップ着地位置で延長管にグリップ操作部を組み立て、ハンドル操作でグリップの爪を開閉し、ハンドリングキャップを掴む。なお、グリップの着地確認は延長管の挿入寸法で行う。：特性試験用カスクと荷重取り合い確認要
- ⑫装荷と逆の手順で延長管を引き抜き、中性子検出器照射試験装置を上部案内管取扱機本体内に収納する。なお、収納位置の確認は延長管の引抜き寸法で行う。
- ⑬上部案内管取扱機本体用ドアバルブ、上部案内管取扱機固定ドアバルブおよび案内筒ドアバルブを閉じてアルゴンガスのブローダウンを停止する。
- ⑭支持パイプおよび上部案内管取扱機本体を取り外す。
- ⑮上部案内管取扱機を転倒させ、メンテナンス台車に載せて運び出す。

撤去完了

関連図書

- ①常陽取扱説明書（系統番号78A）：上部案内管取扱機
- ②常陽特性試験取扱説明書：炉心上部機構内機器取扱装置
（E-8685105）
- ③常陽MK-II：延長管引き上げ工具改造

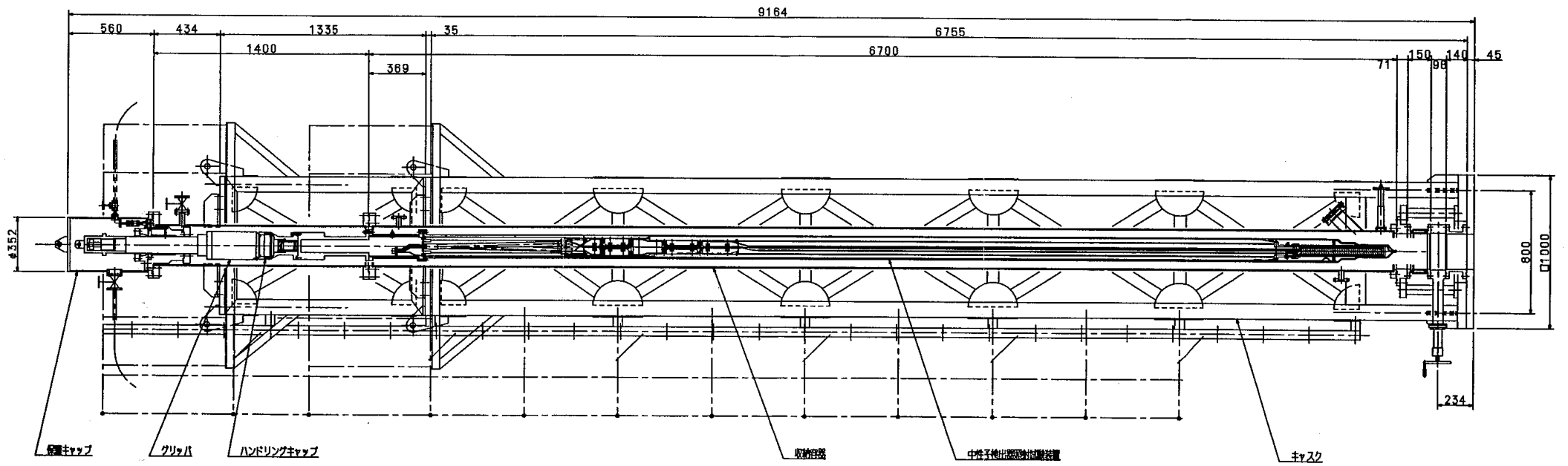


図3. 1-1 常陽 炉内中性子検出器照射試験装置
キャスク内収納状態図

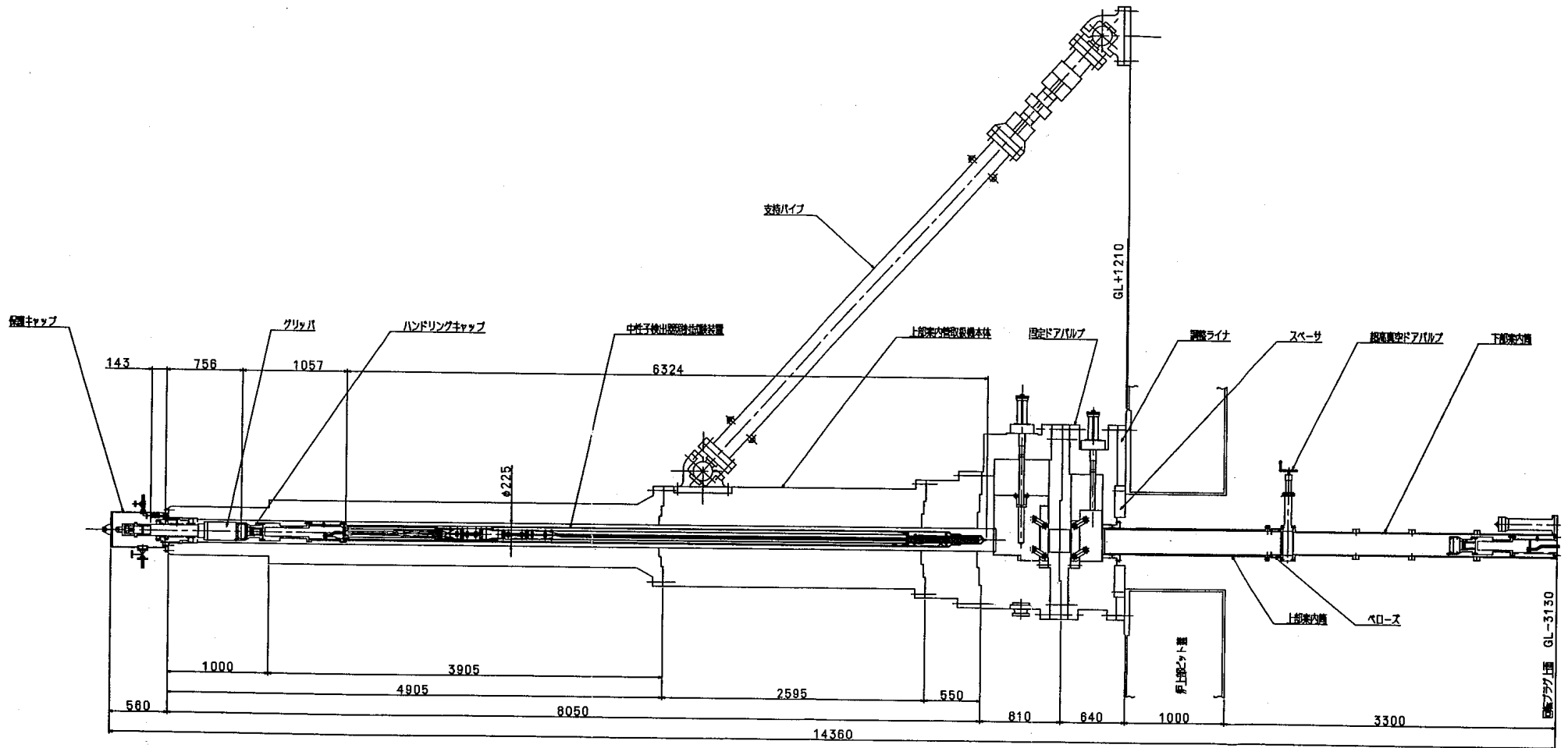


図3. 1-2 常陽 炉内中性子検出器照射試験装置
 取扱機収納状態図

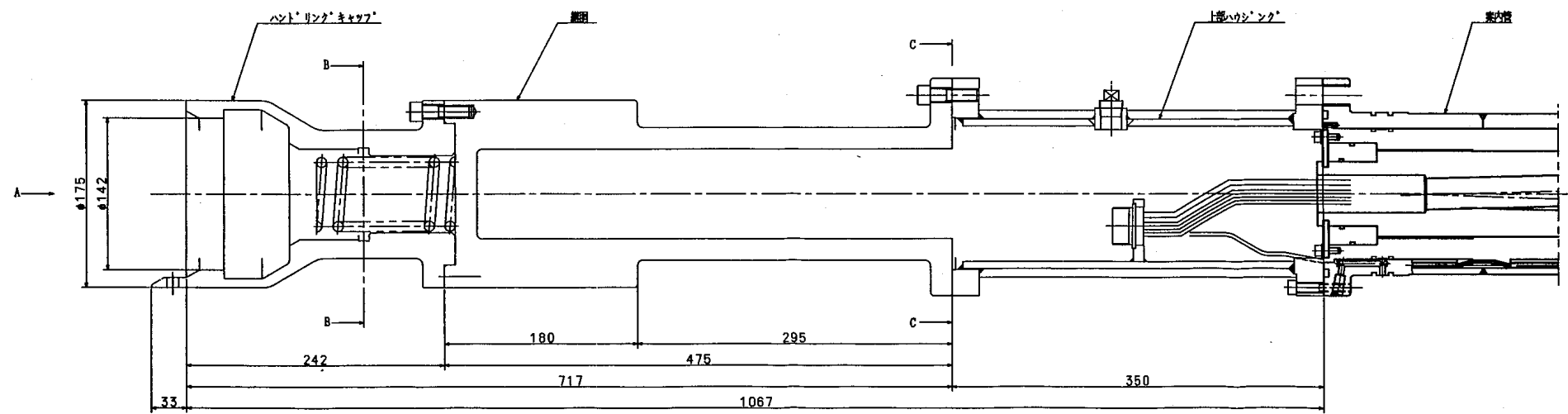
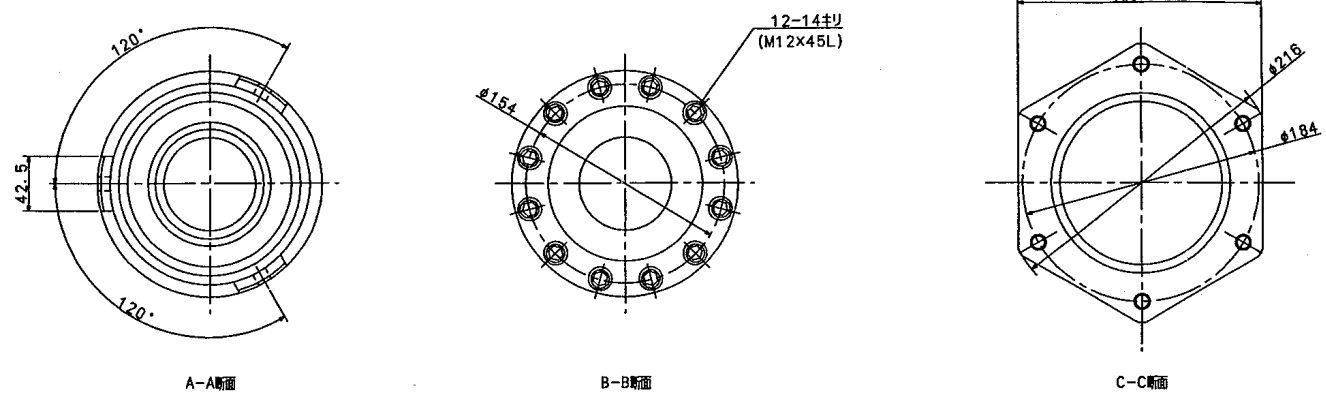


図 3. 1-3 常陽 炉内中性子検出器照射試験装置
ハンドリングキャップ詳細図

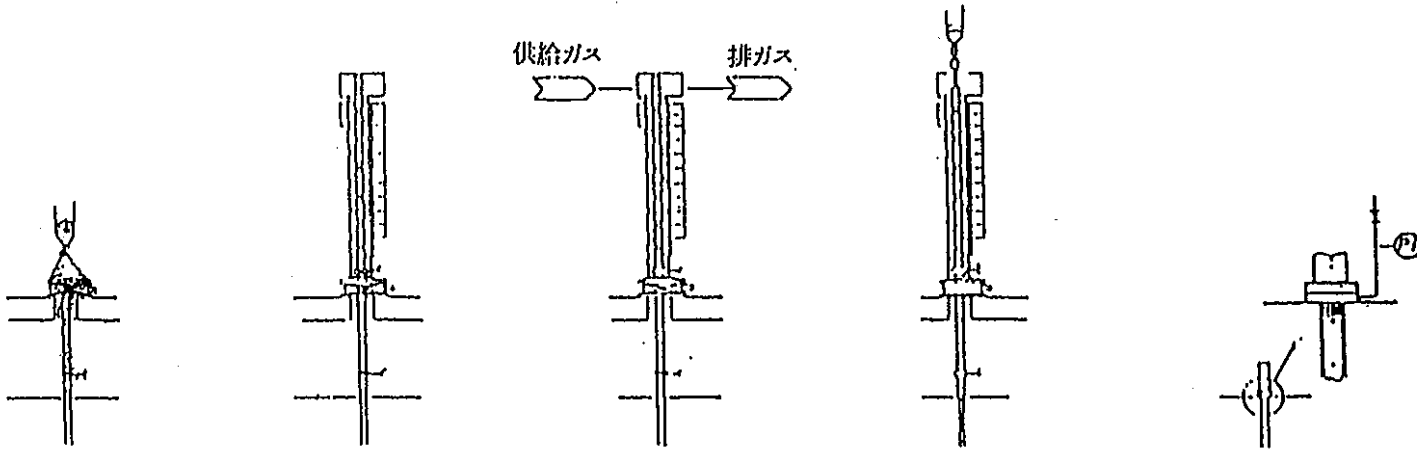
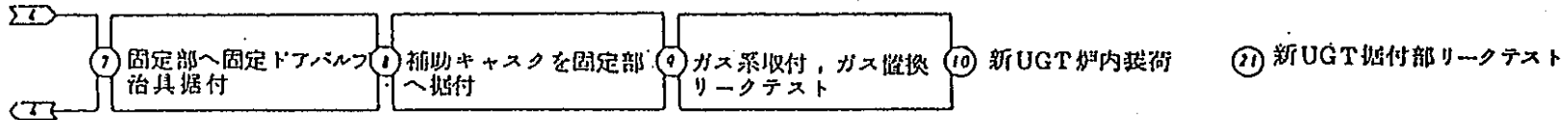
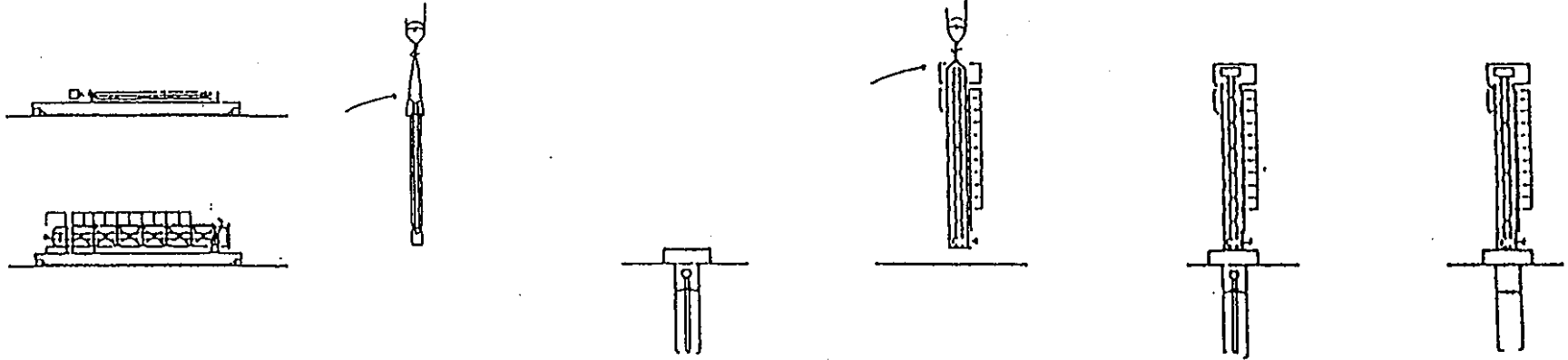
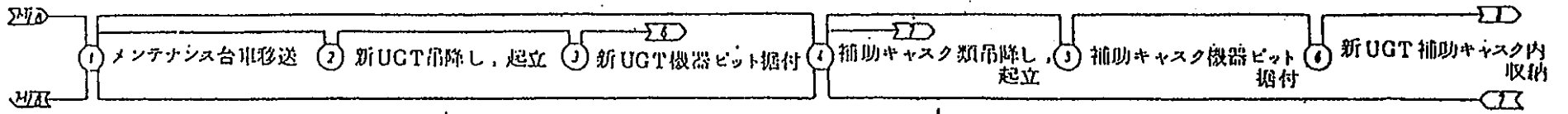


図3.1-4 装荷手順図

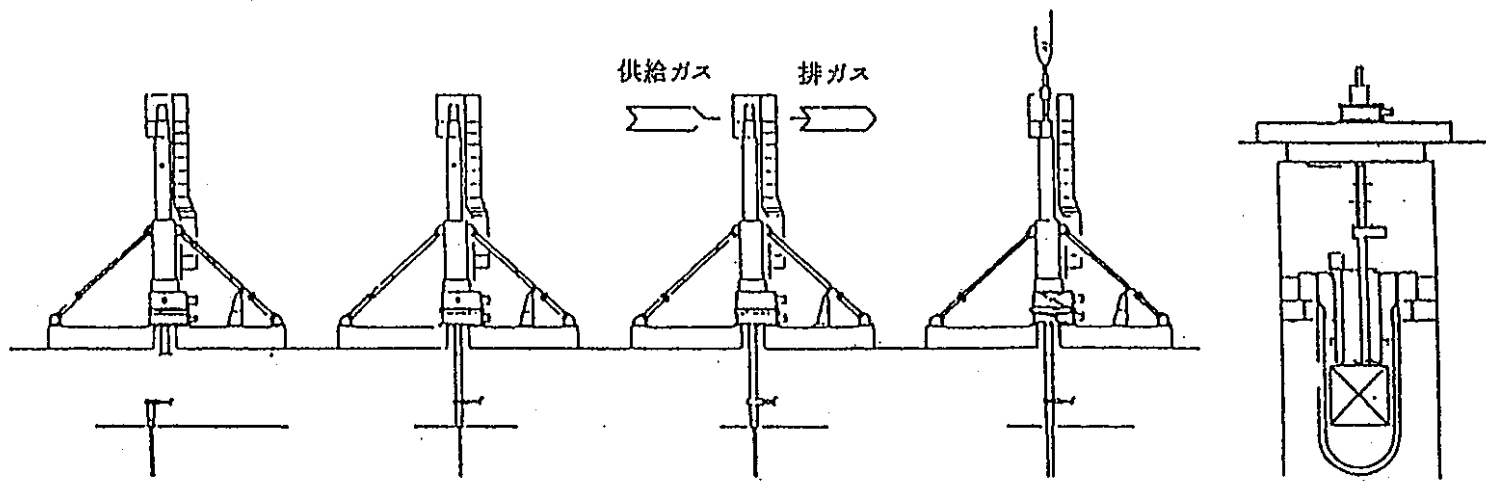
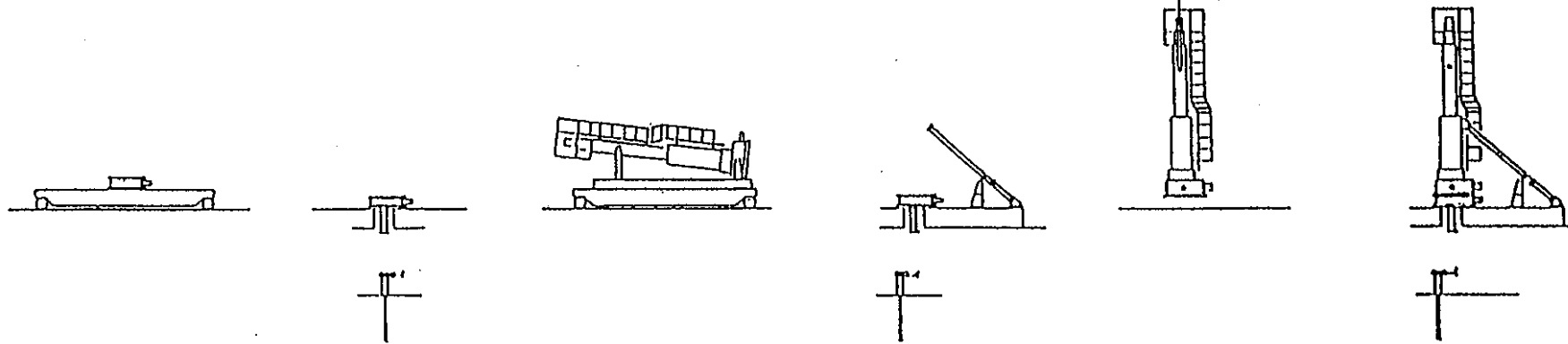
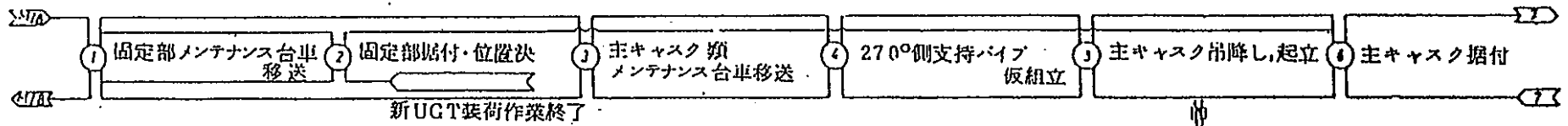


図 3. 1-5 取り出し手順図

3.2 炉上部の取り合い検討

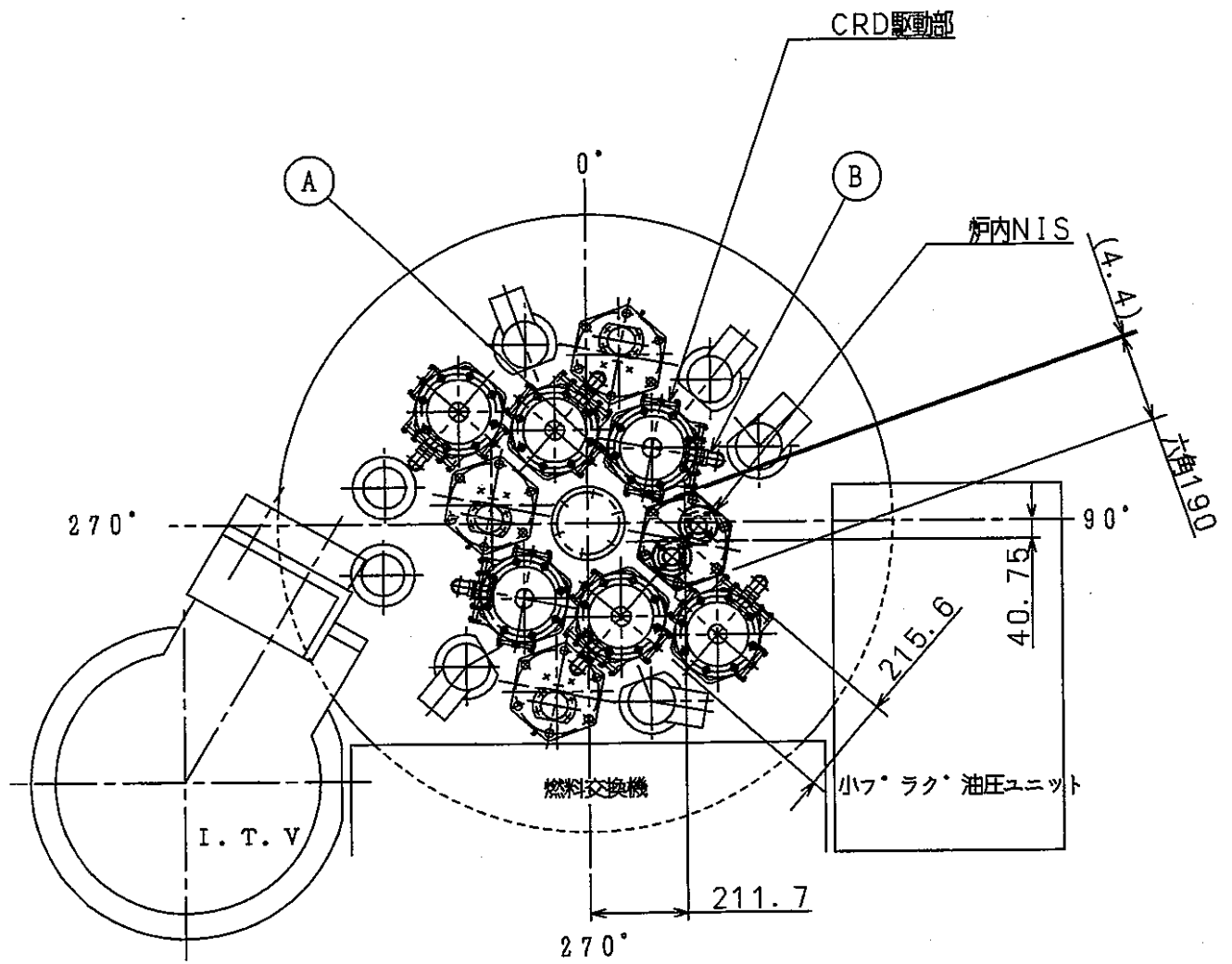
3.2.1 CRD駆動部との干渉検討

炉心上部機構の3B3位置に中性子検出器照射試験装置を据え付けた時の平面配置を図3.2-1に示す。隣接のCRD駆動部の窓の方向を変えることにより、CRDと中性子検出器照射試験装置間が最小約4.4mm以上離れており作業性には問題ない。

また、高さ方向の取り合いを図3.2-2に示す。図に示す通り点検窓の位置は、中性子検出器照射試験装置上部ハウジング上面より大幅に上方向にずらしているため特に問題はない。

3.2.2 炉心上部機構上面との取り合い

中性子検出器照射試験装置を据え付ける炉心上部機構据え付け穴との取り合いについては、案内管の取り合い寸法をCRD上部案内管と同一寸法としているため特に問題ない。(図3.2-3参照)



() 寸法はCRDとの最小間隙寸法を示します。

図3. 2-1 平面配置図

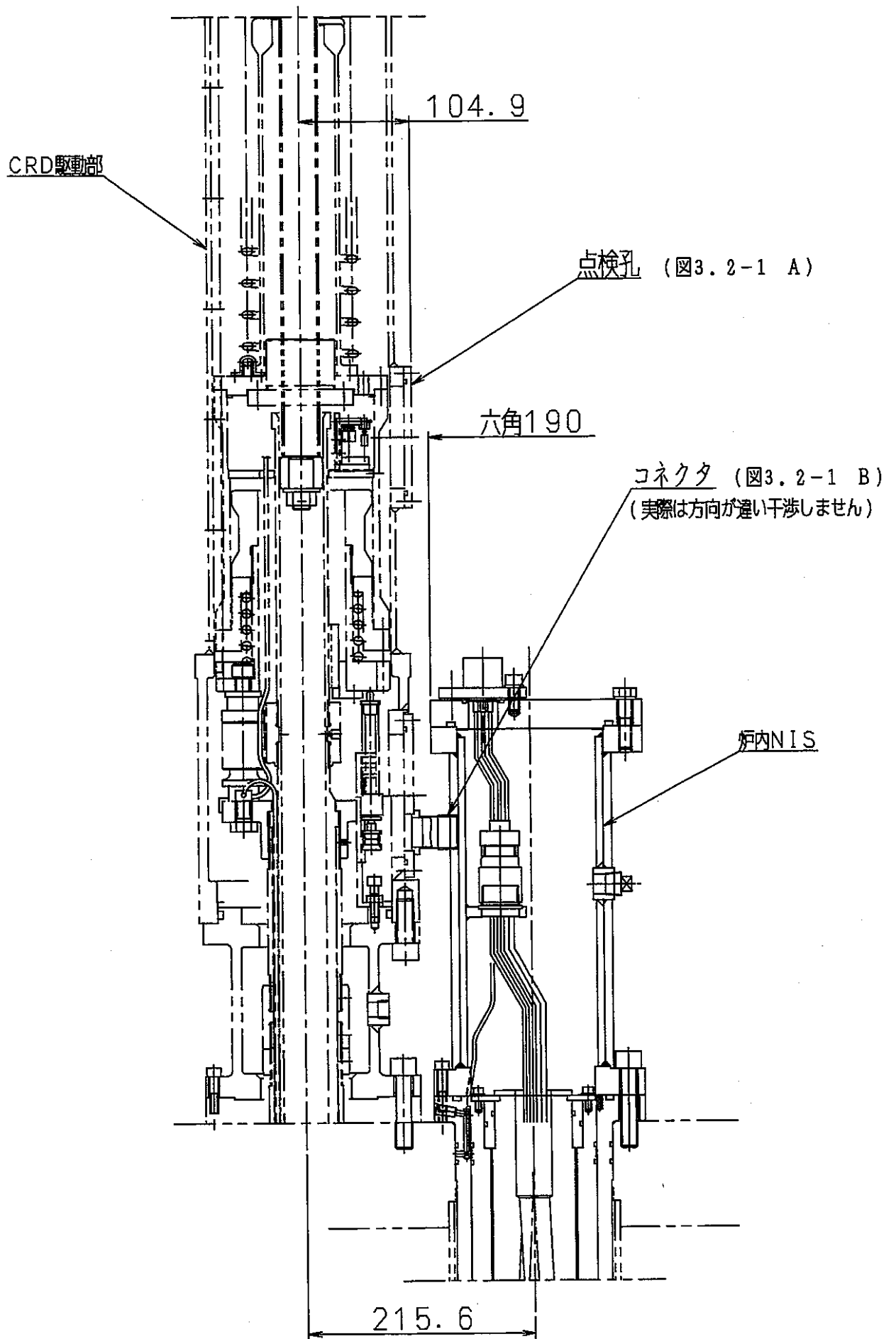
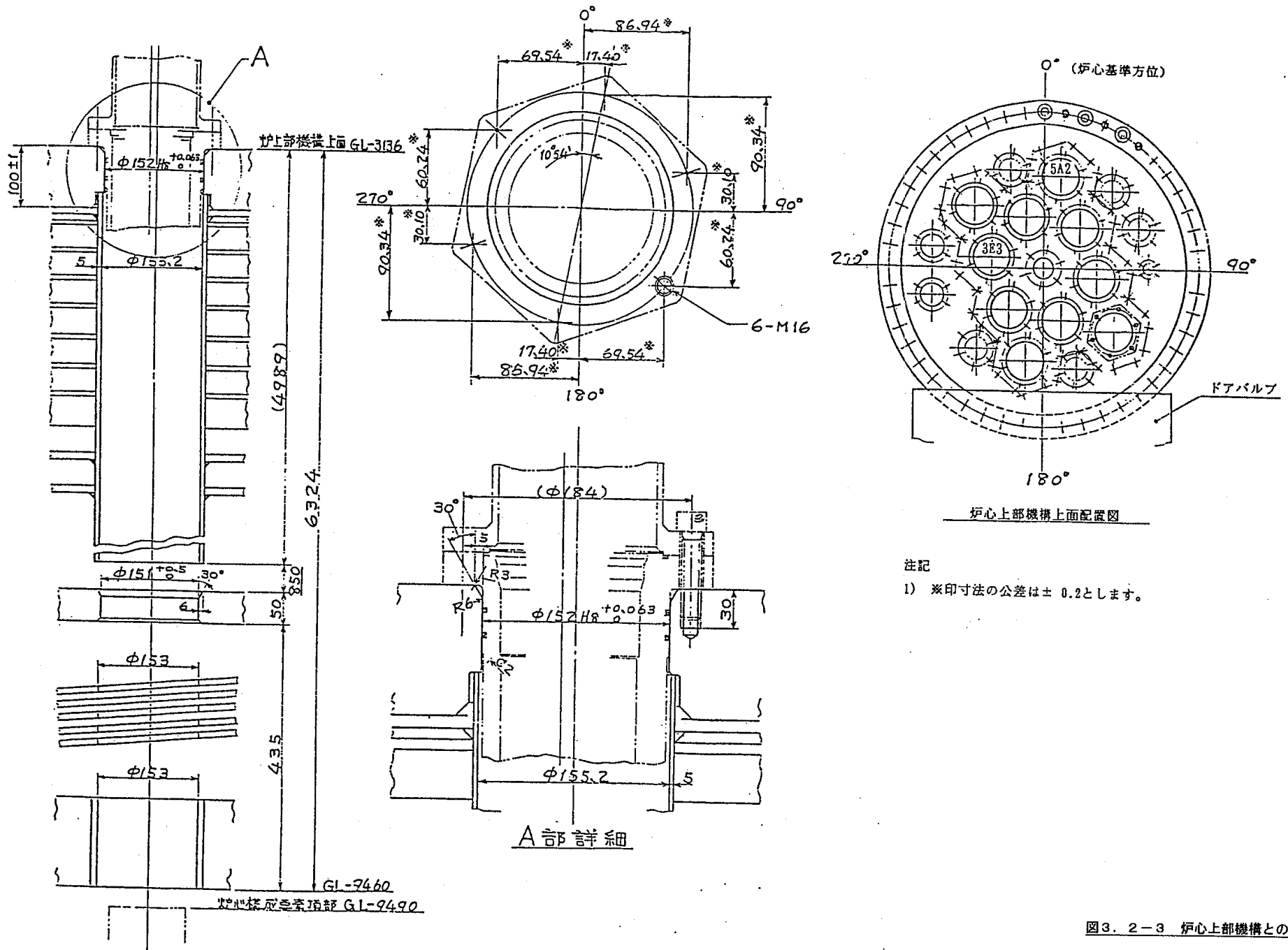


図3.2-2 炉内NISとCRD駆動部の位置関係図



注記

1) *印寸法の公差は ± 0.2 とします。

図3. 2-3 炉心上部機構との取合い図

3.3 計測系検討

照射試験装置に関わる電気・計測制御系について以下で検討する。

3.3.1 中性子計測系の検討

(1) 性能試験項目の検討

照射試験における試験項目を表 3.3-1 に原子炉運転に従って示す。これらの項目について以下に詳細を検討する。

①照射試験前

検出器、ケーブルの接続の確認として、MIケーブルコネクタ部、前置増幅器入力コネクタ部で、絶縁抵抗、静電容量の測定を行う。また、設置状況を確認するため、照射装置とMIケーブル外被間の絶縁抵抗（静電容量）を測定する。

次に、停止時のバックグラウンドレベルの評価のため、前置増幅器出力の波形および波高分布特性を測定する。特に、ヒータの電源を入れた場合のノイズレベルを確認し、ノイズレベルによりフェライトコアの挿入等の対策を実施する。

②照射試験時

広域系中性子検出器の特性として、(ア)前置増幅器出力パルス波形、(イ)波高分布特性、(ウ)パルスプラトー特性、(エ)キャンベルプラトー特性、(オ)キャンベル計測とパルス計測のオーバーラップを含めた出力直線性、(カ)連続出力監視(感度劣化評価)、(キ)直流プラトー特性(絶縁抵抗)を確認する。測定する原子炉出力レベルは、(ア)、(イ)、(ウ)の項目はパルス計数の統計精度を考慮すると計数率が 1×10^4 cps 程度となるレベルで、(エ)の測定はキャンベル領域に出力が移行した後(1×10^7 cps 相当)の出力レベルである。表 3.3-2 に動燃殿より入手した各エネルギー群データ(文献 3.3-1)における検出器設置位置(第3列)近傍の100%出力時の熱中性子束強度および γ 線強度を示す。この値と検出器の感度(0.15cps/nv)より、計数率が前記のレベルになる原子炉出力は、それぞれ約 1.1×10^{-3} %出力、1.1%出力付近であることが予測できる。

(オ)の出力直線性の測定は、原子炉立ち上げ時および立ち下げ時にキャンベル出力指示値、計数率指示値および電源電流指示値を随時記録し、評価する。(計測性確認) この測定は、2~4点/1桁出力間隔程度で、オーバーラップ領域ではそれより細かくするが、実際の原子炉起動方法と計測タイミングとの調整により今後決めていく。

(カ)の連続出力監視では、100%原子炉出力でキャンベル出力が中性子束に比例する値を示すため(キャンベル領域)、キャンベル出力を連続して監視する。この値と原子炉出力または照射試験装置内に設けたりファレンス検出器の出力比より、検出器の感度低下の割合を確認する。(感度低下確認)

(キ)の直流プラトー特性は、絶縁抵抗の低下割合を確認するために、連続監視中に数回測定をおこなう。直流出力は前置増幅器の消費電流の監視、または、

照射試験中前置増幅器の入力ケーブルを切り離し、微小電流計で測定を行う。

③中間停止時

前記①項目と同じ測定を行い、照射による劣化等がないかの確認を行う。

④照射サイクル最終時(事故後監視計装確認)

事故後監視計装(PAM)の性能を確認するために、照射試験終了間際に機能の使命期間である1日間650℃に加熱し、検出器特性の測定を行う。測定項目は、②と同じとする。

(2)試験装置

広域系中性子検出器の出力特性を評価するために、試験体出力計測装置としては主にパルス計測およびキャンベル計測が可能な広域系中性子モニタを用い、パルス波形観測、絶縁抵抗および容量測定には、それぞれオシロスコープ、微小電流計+高圧電源、容量計を用いる。以下にこれらの構成・配置についての検討する。

①計測装置構成とデータ処理

図 3.3-1 に広域系中性子モニタの構成を示す。照射試験装置内の検出器のMIケーブルは、ソフトケーブルにつながれ、前置増幅器に接続される。前置増幅器は、3本のケーブルでメインの信号処理装置につながれている。これらは、信号パルスを伝送する信号同軸ケーブル、検出器へ印加する高圧を伝送する高圧同軸ケーブル、および、プリアンプの+/-2.4Vおよび校正制御用信号を伝送する低圧ケーブルである。信号処理装置では、前置増幅器で増幅された信号をパルス計数処理、キャンベル処理し、中性子束に変換し、表示画面に結果を表示する。パルス計数処理は、前置増幅器出力を再度パルス増幅し波高弁別装置によって、ある波高以上のパルス数を計測し、中性子束に換算する。また、キャンベル計測は、前置増幅器出力をゲインの異なる3つの増幅器で増幅し、周波数帯域約100k~400kHzのバンドパスフィルタ処理を行い、その揺らぎのパワーを計測することにより中性子束強度に換算する。また、この中性子束の連続監視にほかに、随時、パルス波高分布特性、パルスプラトー特性、キャンベルプラトー特性を実行することができる。

信号処理装置の処理結果は、RS232Cを用いたシリアル伝送によってパソコンに伝送し、パソコン上でデータの保存、過去のデータとの比較、評価を行う。

また、出力の連続監視は信号処理装置のアナログ出力をレコーダー等で連続記録し評価を行う。通常、アナログ出力はパルス計測値、キャンベル計測値を100ms間隔で出力する。このときの最大周波数は、サンプリング定理より $1/100\text{ms}/2=5\text{Hz}$ となる。また、キャンベル出力をデジタル化する前に直接出力するように改良することによりキャンベル出力の測定帯域を広域化可能である。つまり、通常のキャンベル出力段の時定数である10msの設定では16Hzまで、時

定数を2msに高速化した場合は約79Hzまでの信号を減衰3dB以内で監視可能である。

②設置位置とケーブル配線

検出器の出力信号は約7mの検出器MIケーブル、次いで同軸ソフトケーブル約15mを通過して格納容器内操作床に仮設置した前置増幅器に入り、その出力は同軸ケーブルで同じ操作床に設置した信号処理装置で処理する。MIケーブルに接続する同軸ケーブルは、MIケーブルと同じ特性インピーダンスを有するものとし、例えば50Ωの場合、型式5D2Wを用いる。前置増幅器と信号処理装置間の信号伝送同軸ケーブル、高圧伝送同軸ケーブル、低圧ケーブルは、使用する前置増幅器仕様のS-4、RG62および低圧ケーブルには専用ケーブルを使用する。

また、ノイズ対策としては、信号処理装置の電源ラインにノイズカットトランスを挿入し、また、プリアンプ/検出器間の信号ケーブルにフェライトコアを挿入し、ノイズ低減をはかる。その他、ケーブルへのシールドの追加および絶縁処置は、装置設置後ノイズレベルを確認しながら実施する。

引用文献

文献 3.3-1 技-7-157 MK-III炉心の中性子束・ γ 線束データの支給

3.3.2 電気制御設備検討

中性子検出器照射試験装置の電気計測制御設備のシステム構成を図 3.3-2 に示す。基本的に中性子検出器照射試験装置の監視と制御は監視制御ユニットによって行う。従って試験用中性子検出器、 γ 線検出器及び熱電対の信号は、プリアンプと信号処理装置を経た後で、監視制御ユニット P C S 盤に入り、監視制御ユニット O I S 盤の C R T で監視する。またヒータの制御は、熱電対の信号を制御用信号とし、ヒータへ供給する電力をヒータ電力調整制御盤で制御する。電力制御はできるだけ中性子検出器へのノイズの影響を少なくするため、サイリスタは用いず I V R により行う。

以下に各盤の機能を記載する。

(1) 監視制御 O I S (Operational Interface Station) 盤

中性子検出器照射試験装置の運転、監視は本盤で行う。本盤は C R T 1 面構成とするが、万一 C R T がダウンし、さらにヒータの電力調整機能が加熱した場合でも、温度が監視できるように指示計を設け、電源を切れるスイッチを設置する。

本盤は下位の監視制御ユニット P C S 盤とはプロセス制御用 L A N で接続する。

(2) 監視制御 P C S (Process Control Station) 盤

本盤は P I / O ユニット及びメインユニットで構成する。P I / O ユニットでは運転監視・操作に必要な全ての信号の入出力を行う。またメインユニットではヒータの制御機能を有している。ヒータの制御は P I 制御としてできるだけ設定値に対して制御幅を小さくできるようにする。

(3) ヒータ電力調整制御盤

本盤は監視制御 P C S 盤からの制御信号に基づきヒータへ供給する電力の調整を行う I V R 等を収納する。

3.3.3 リファレンス用検出器の検討

照射中性子束レベルは常陽本設の出力モニタを用いて相対的な評価は可能であると考えられるが、より正確な値を評価するため、リファレンス用小型放射線検出器の適用を検討する。リファレンス用検出器としては、耐高温仕様であること、炉内に挿入できる小型なものであることが求められる。以下に、各メーカーのカタログに記載されている検出器について、リファレンス用検出器としての適用性の検討を行った。

(1) 中性子検出器

表 3.3-3 に主な炉内小型中性子検出器の仕様を示す。SRNM検出器はBWR用起動領域中性子検出器でパルス計測、キャンベル計測を行うものである。LPRM、RS-C6-0201-278、WL-24132 はいずれも炉内用小型電流型核分裂電離箱で、SPND は自己出力型中性子検出器である。

いずれの検出器も本試験装置の使用温度よりメーカーの保証使用温度の方が低い。

表 3.3-3 には、試験体中央の横に検出器を設置したと仮定した場合の各検出器の出力を感度より計算した結果も併記し示す。なお、中性子束は表 3.3-2 に示した原子炉出力100%時の計算値を用いた。

この出力予測値より、まず SPND は nA 以下の微小な出力のため、通常の計測器のノイズレベルであり使用できないことがわかる。また、電流型核分裂電離箱の計測下限は、電圧印加による絶縁材でのリーク電流で決まる。ここで、絶縁材の材料がアルミナで、アルミナの500℃での熱伝導率が 1×10^{11} (Ω -cm)、絶縁材を内径 1.6mm、外径 4.2mm で、検出器の絶縁にこの絶縁材が4個用いられていると仮定すると、100V 印加時のリーク電流は 1×10^{-7} (A)程度と見積もられる。このリーク電流値は、いずれも電流型電離箱の予想出力とほぼ同じレベルであり、ケーブルにおけるリーク電流がさらに加わることを考えた場合、中性子による出力電流のみを計測することはカタログどうり困難であることが予測される。

一方、パルス/キャンベル計測を行うSRNMは、直流電流を計測しないためリーク電流の影響を受けにくいですが、設計温度より高く放電等による誤動作が起こらないことを試験等で確認し、改良していく必要がある。

(2) ガンマ線検出器

表 3.3-4 に主な炉内用ガンマ線の仕様と原子炉 100%出力時に試験体中央にガンマ線検出器を設置した場合の各検出器の出力予測値を示す。LPRM 改良は、BWR 用局部出力領域中性子 LPRM 検出器のガンマ線感度を、封入ガス等を変更し高感度化したもので、常温でのみ実績がある。WL-23228、WL-24275 は W.H. 社の炉内用ガンマ線電離箱で、SP ガンマ D は自己出力型ガンマ線検出器である。ガンマサーモメータは、ガンマ線発熱を熱電対で測定するもので、以下の式から求めた感度を記載している。

$$U = S_e \times \rho \times w \times L^2 / (2 \times k)$$

但し

U : 測定信号 (μV)

S e : Seebeck 係数 ($40 \mu V/^{\circ}C$)

w : ガンマ線発熱量 (W/g)

但し $w = 4.6 \times \rho (g/cm^3) \times \text{ガンマ}(R/h) \times 10^{-9}$

L : 封入ガス検出器の半分長 (30 cm)

k : ステンレスの熱伝導率 ($0.184 W/^{\circ}C-cm$)

ρ : ステンレス鋼の密度 ($8.03 g/cm^3$)

WL-23228, WL-24275 は前記のように 500 $^{\circ}C$ では検出器絶縁体のリーク電流が約 $1 \times 10^{-7} A$ となるため、それより出力が低く使用できない。SP γ D は、3mの検出器長でも出力電流が 3.3nA 程度であり測定は困難と考えられる。ガンマサーモメータは、検出器長さ半分を 30 cmとしても、表に示すように 3nV 程度の出力であり、測定は困難である。

一方、ガンマ線感度を高めた LPRM 改良検出器は、検出器のリーク電流のみ比較した場合、約 2桁出力が大きい結果となっているが、現状の 2重同軸 M I ケーブルの設計でケーブル部でのリーク電流が検出器部のリーク電流の約 10倍と仮定した場合でも 1桁ほど出力が大きいことが予想される。よって、実際の適用に際しては、温度試験によりリーク電流特性を測定し、リーク電流が大きい場合には、温度の低い場所に配置するか、M I ケーブルを 3重同軸ケーブル+ガードリング

に設計変更したものを開発する必要がある。

以上、ガンマ線検出器の適用に関しては、感度的にはLPRM改良型で計測可能であるが、高温時のリーク電流特性の把握、および、リーク電流が大きい場合には対策として、3重同軸ケーブル等の設計変更を実施し、性能を確認していく必要があることがわかった。

(3) 低出力範囲でのリファレンス検出器の適用性検討

前項の検討により、全出力時にリファレンス用検出器として使用できるものは、メーカーのカタログ製品からは適当なものはなく、製品の仕様変更、改良を行っていく必要があることが分かった。以下では温度の低い低出力レベルのみを監視するケースについて検討を行った。

原子炉出口の冷却材温度は、0 MWで350℃、140 MWで500℃となる。よって、各検出器の保証温度である400℃に冷却材が加熱される原子炉出力は、約47 MW（33%出力）となる。

まず、33%出力時での中性子検出器の適用性を検討する。図3.3-3に表3.3-3の中で最も感度が高いRS-C6-0201-278の場合について、各原子炉での設置位置に対する出力予測値を示す。検出器のリーク電流は、アルミナの比抵抗が400℃で 1×10^{12} (Ω-m)であるので前記と同じ仮定から検出器部でのリーク電流は約 1×10^{-8} となり、同軸ケーブルを用いている中性子検出器については、ケーブルでのリーク電流を考慮し約10倍とし、図中に併記した。33%原子炉出力の検出器出力は試験検出器の先端である150 cm位置に設置した場合でもリーク電流値とほぼ同じレベルとなり、本試験への適用は難しいと考えられる。

次に、ガンマ線検出器について検討する。図3.3-4に表3.3-4の400℃仕様の中で最も感度が高いWL-24275について、各原子炉での設置位置に対する出力予測値を示す。150 cm位置でリーク電流の約1.5倍の出力となる。よって、実際の適用に際しては温度試験を実施し、リーク電流値の測定・評価を行うことで測定できる可能性のあるものとする。また、図3.3-4にLPRMを改良したガンマ線検出器の出力予測を示す。信号ケーブルが中性子検出器と同じ同軸ケーブルであるため、その部分のリークによりリーク電流が約 1×10^{-7} としても、十分大きな出力が期待できるが、常温のみの実績しかないため、今後適用性を試験・評価す

ることが必要である。

以上、リファレンス用センサの適用性の検討を行った。中性子検出器およびガンマ線検出器とも、試験装置での線束レベルが低く十分な出力を得られる市販のものにはないことがわかった。

ただし、冷却材が400℃となるまでの低出力レベルでは、3重同軸ケーブルを採用しているガンマ線検出器(WL-24275)が適用できる可能性がある。また、感度の高いLPRM改良型のガンマ線検出器も出力信号レベルでは十分測定できる範囲であるが、常温での実績しかなく今後試験・評価して、適用性を検討していく。

なお、本検討の構造設計では、両センサの形状に大きな差異がないため、メーカー保証範囲内にあるWL-24275を適用することとする。

表 3. 3-1 測定項目一覧と試験装置

試験タイミング	試験項目	試験装置
①試験前	(ア)検出器健全性の確認(絶縁抵抗、静電容量測定) (イ)接地状況確認(浮遊容量、接地絶縁抵抗の測定) (ウ)前置増幅器の出力波形観測(バックグラウンドノイズ波形確認) (エ)パルス波高分布特性(ノイズレベル確認)	絶縁&容量測定器 同上 オシロスコープ 広域系モニタ
②照射試験時 (立ち上げ、 立ち下げ時含む)	(ア)前置増幅器の出力波形観測(パルス出力領域時[立ち上げ時]) (イ)パルス波高分布特性(パルス出力領域時[立ち上げ時]) (ウ)パルスプラトー特性(パルス出力領域時[立ち上げ時]) (エ)キャンベルプラトー特性(キャンベル出力領域時) (オ)出力直線性(原子炉立ち上げ、立ち下げ時) (カ)連続出力監視(キャンベル領域[フル出力時]) (キ)直流プラトー特性(キャンベル領域[フル出力時])	広域系モニタ 同上 同上 同上 同上 同上 絶縁測定器
③中間停止時	(ア)検出器健全性の確認(絶縁抵抗、静電容量測定) (イ)接地状況確認(浮遊容量、接地絶縁抵抗の測定) (ウ)前置増幅器の出力波形観測(バックグラウンドノイズ波形確認) (エ)絶縁&容量測定器④パルス波高分布特性(ノイズレベル確認)	絶縁&容量測定器 同上 オシロスコープ 広域系モニタ
④事故後監視計装 確認時	(ア)前置増幅器の出力波形観測(パルス出力領域時[立ち下げ時]) (イ)パルス波高分布特性(パルス出力領域時[立ち下げ時]) (ウ)パルスプラトー特性(パルス出力領域時[立ち下げ時]) (エ)キャンベルプラトー特性(キャンベル出力領域時) (オ)出力直線性(原子炉立ち上げ、停止時) (カ)連続出力監視(キャンベル領域[フル出力時]) (キ)直流プラトー特性(キャンベル領域[フル出力時])	広域系モニタ 同上 同上 同上 同上 同上 絶縁測定器

表3. 3-2 炉心第3列検出器設置位置付近での中性子束及びγ線束計算結果

炉心中心からの距離 [試験体位置] (cm)	熱中性子束 (21群) (n/cm ² /s)	ガンマ線束	
		(γ/cm ² /s)	(R/h) #1
143	1.13E+10	9.20E+11	2.37E+06
147	1.07E+10	8.18E+11	2.10E+06
# 150	1.00E+10	7.34E+11	1.89E+06
# 154	9.30E+09	6.41E+11	1.65E+06
# 162	7.72E+09	4.93E+11	1.27E+06
# 170(#2)	5.90E+09	3.75E+11	9.63E+05
# 178	3.58E+09	2.34E+11	6.02E+05
# 183	4.16E+09	1.39E+11	3.57E+05
# 192	6.41E+09	1.01E+11	2.60E+05
# 197	6.83E+09	9.48E+10	2.44E+05
202	7.08E+09	8.99E+10	2.31E+05

#1) $1(R/h) = 3.9e5 (\gamma/cm^2/s)$

#2) 電極中心 (センサ先端から215mm)を照射線量とする。

表3. 3-3 主な炉内中性子検出器の照射試験時の出力予測と仕様（100%出力時、試験体中心）

	メーカー	半径(mm)	検出部長さ(mm)	中性子感度	予想出力	設計温度
SRNM	東芝製品	φ13.8	200	1.63E-03 (cps/nv)	9.60E+06 (cps)	450 (°C)
LPRM	東芝製品	φ6	80	2.00E-17 (A/nv)	1.18E-07 (A)	302 (°C)
RS-C6-0201-278	GE-R/S製品	φ6.48	52.4	3.00E-17 (A/nv)	1.77E-07 (A)	340 (°C)
WL-24132	WH製品	φ4.78	56.1	5.60E-18 (A/nv)	3.30E-08 (A)	400 (°C)
SPND(V)	Scandpower製品	φ1.0	3050	1.40E-20 (A/nv)	8.25E-11 (A)	400 (°C)
HTTR用インコアモニタ	東芝開発品	φ10.5	135	1.80E-17 (A/nv)	1.06E-07 (A)	800 (°C)

照射中性子束レベル：5.90E+09 (nv)

表3. 3-4 主な炉内γ線検出器の仕様と照射試験時の出力予測（100%出力、試験体中心）

	メーカー	半径(mm)	長さ(mm)	γ線感度	予測出力	設計温度	ガードリング
LPRM改良	東芝製品	φ6	80	1.40E-11 (A/R/h)	1.35E-05 (A)	常温	なし
WL-23228	W. H. 製品	φ4.7	45.8	1.00E-14 (A/R/h)	9.63E-09 (A)	400 °C	なし
WL-24275	W. H. 製品	φ4.78	54.1	2.00E-14 (A/R/h)	1.93E-08 (A)	400 °C	○
SPγD(Pt)	Scandpower製品	φ1.58	406	5.80E-16 (A/R/h)	5.59E-10 (A)	400 °C	なし
		φ1.0	3050	4.20E-15 (A/R/h)	4.04E-09 (A)	400 °C	なし
γサーモメータ	DeltaM社特注	—	300	3.61E-09 (μV/(R/h))	0.00348 (μV)	—	—

γ線レベル： 9.63E+05 (R/hr)

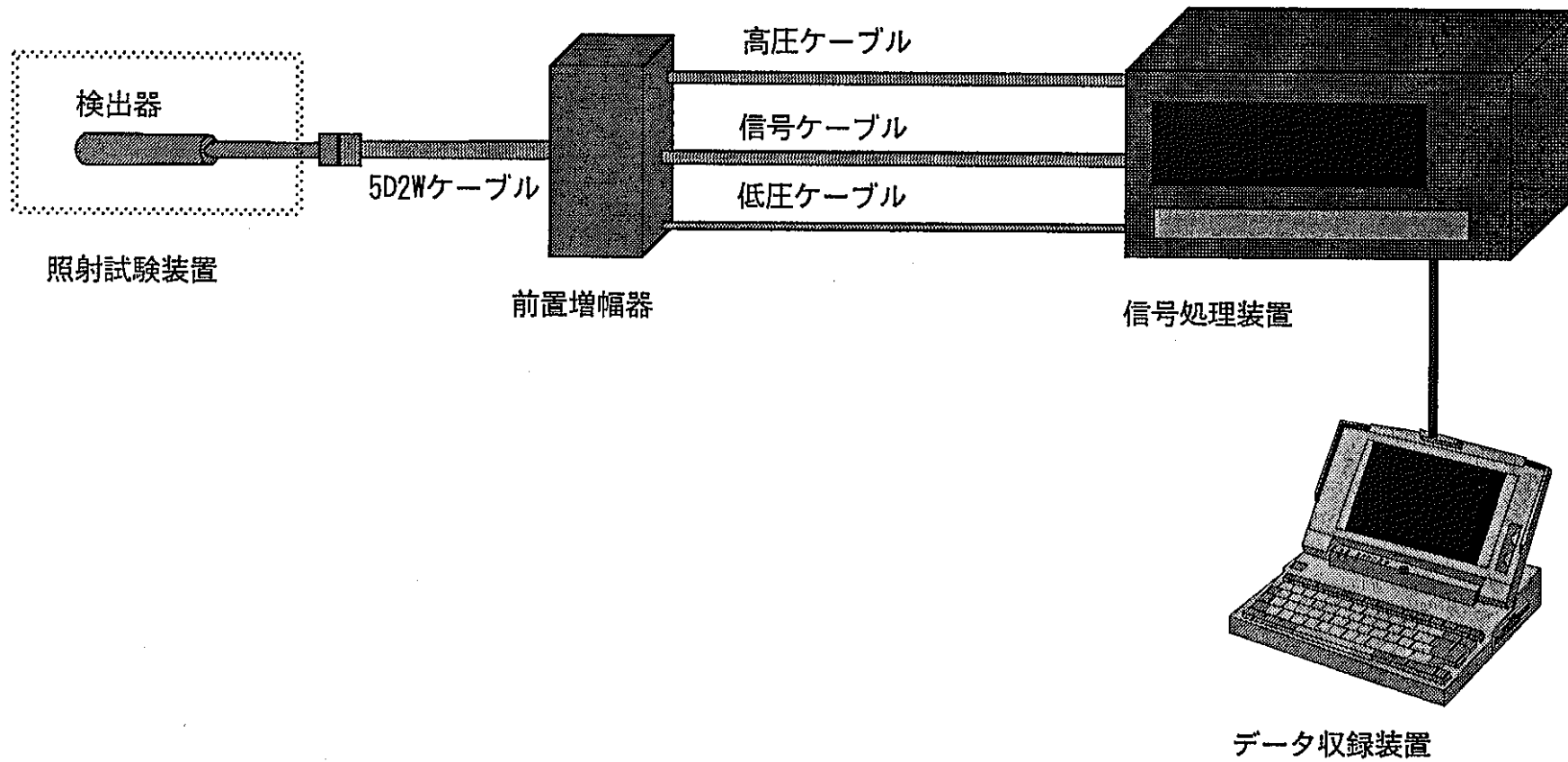


図 3. 3 - 1 測定装置の構成図

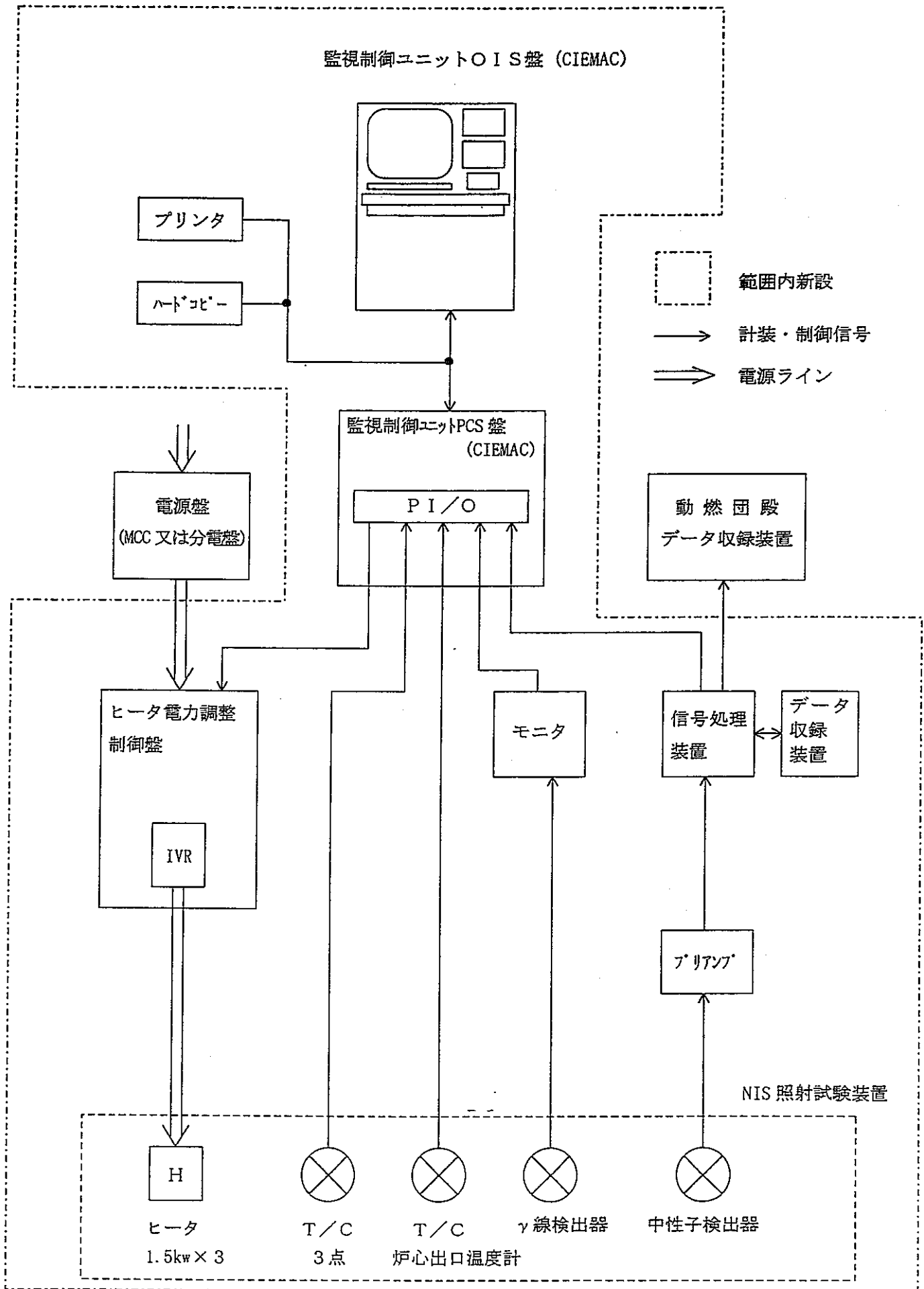


図3. 3-2 電気計測制御設備のシステム構成

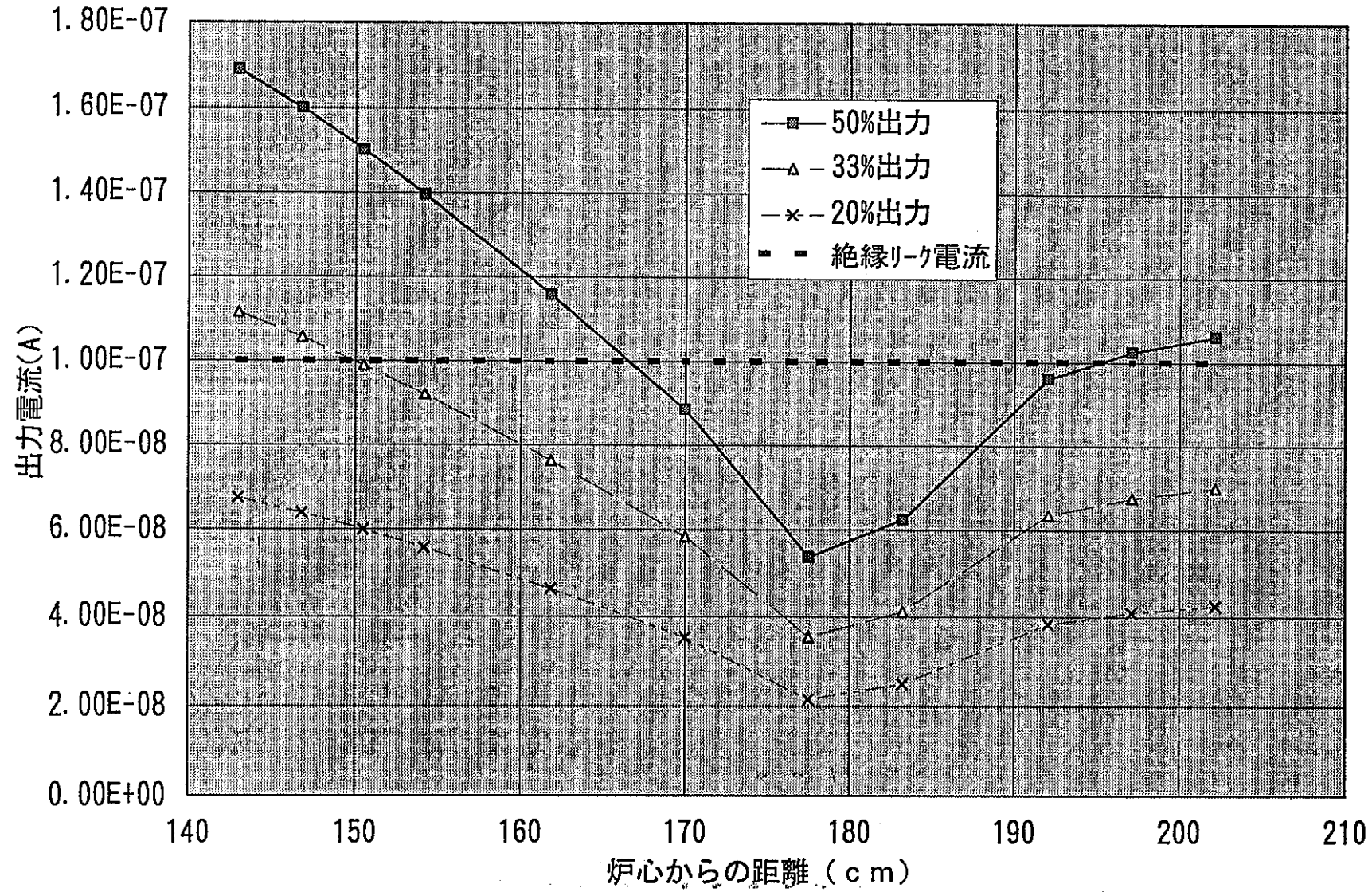


図3. 3-3 原子炉出力における検出器位置に対する中性子検出器(RS-C6-0201-278)の出力予測値

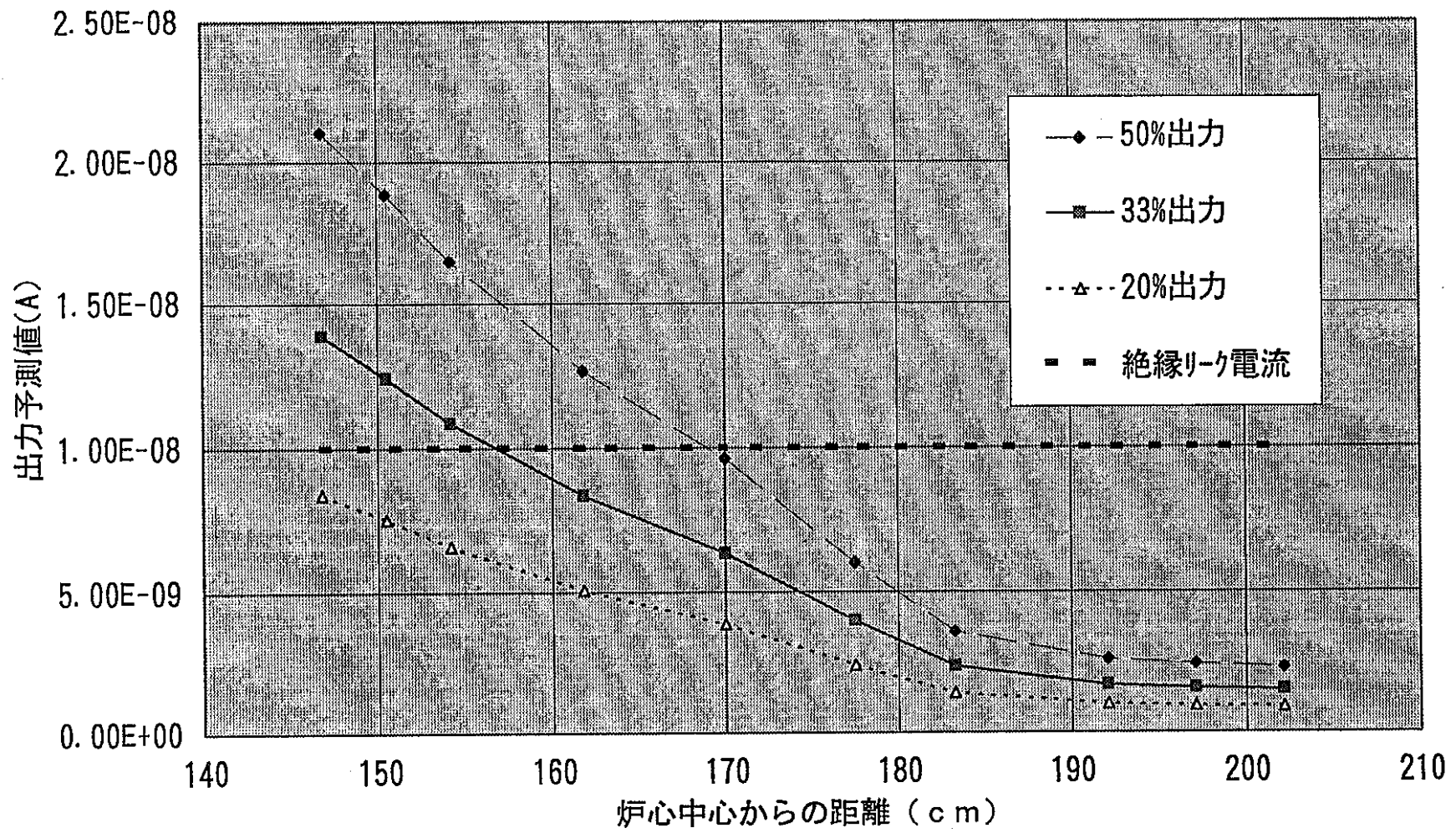


図3. 3-4 原子炉出力における検出器位置に対する γ 線検出器(WL-24275)の出力予測値

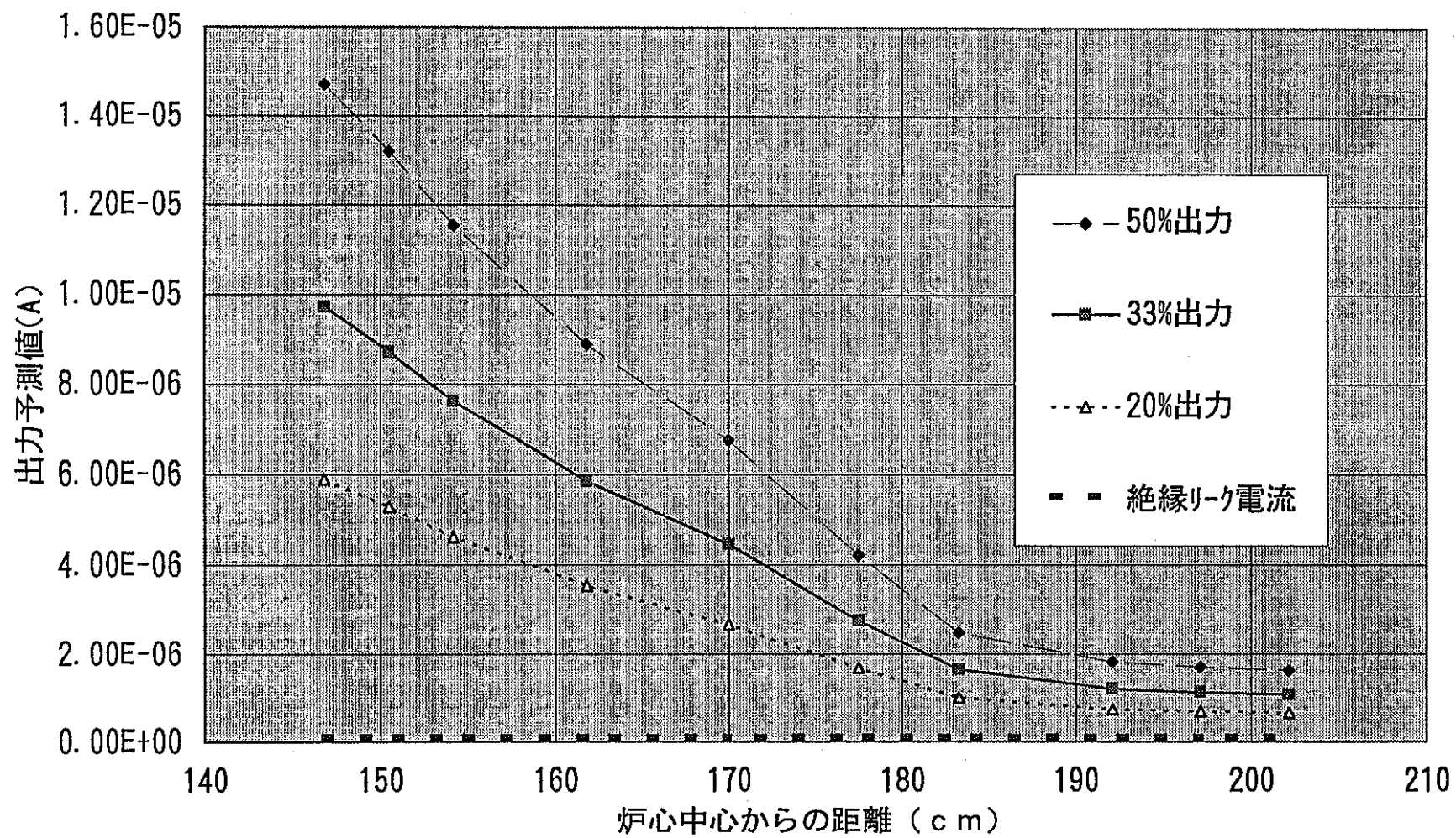


図3. 3-5 原子炉出力における検出器位置に対するγ線検出器(LPRM改良)の出力予測値

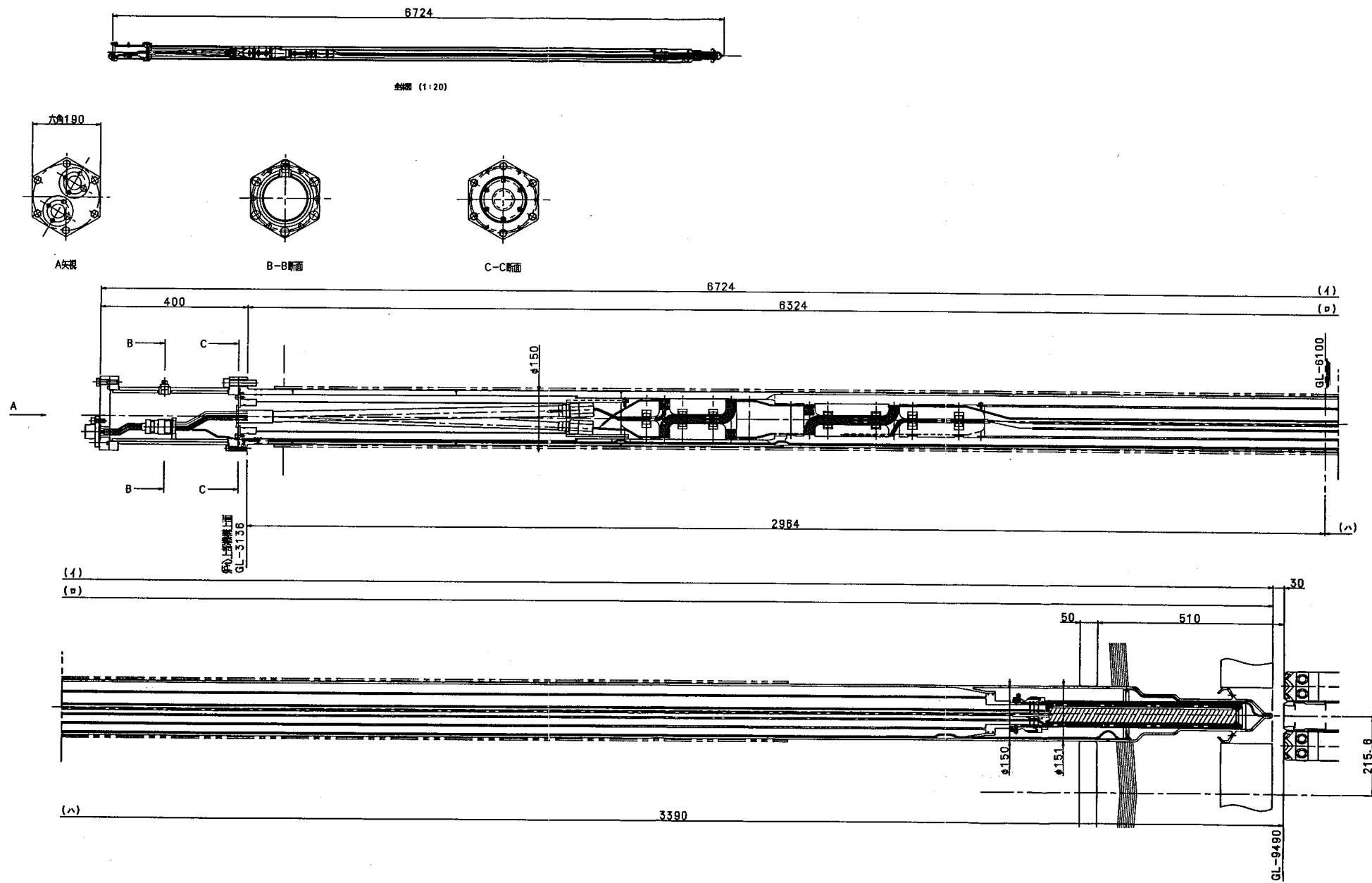


图1' 全体組立図

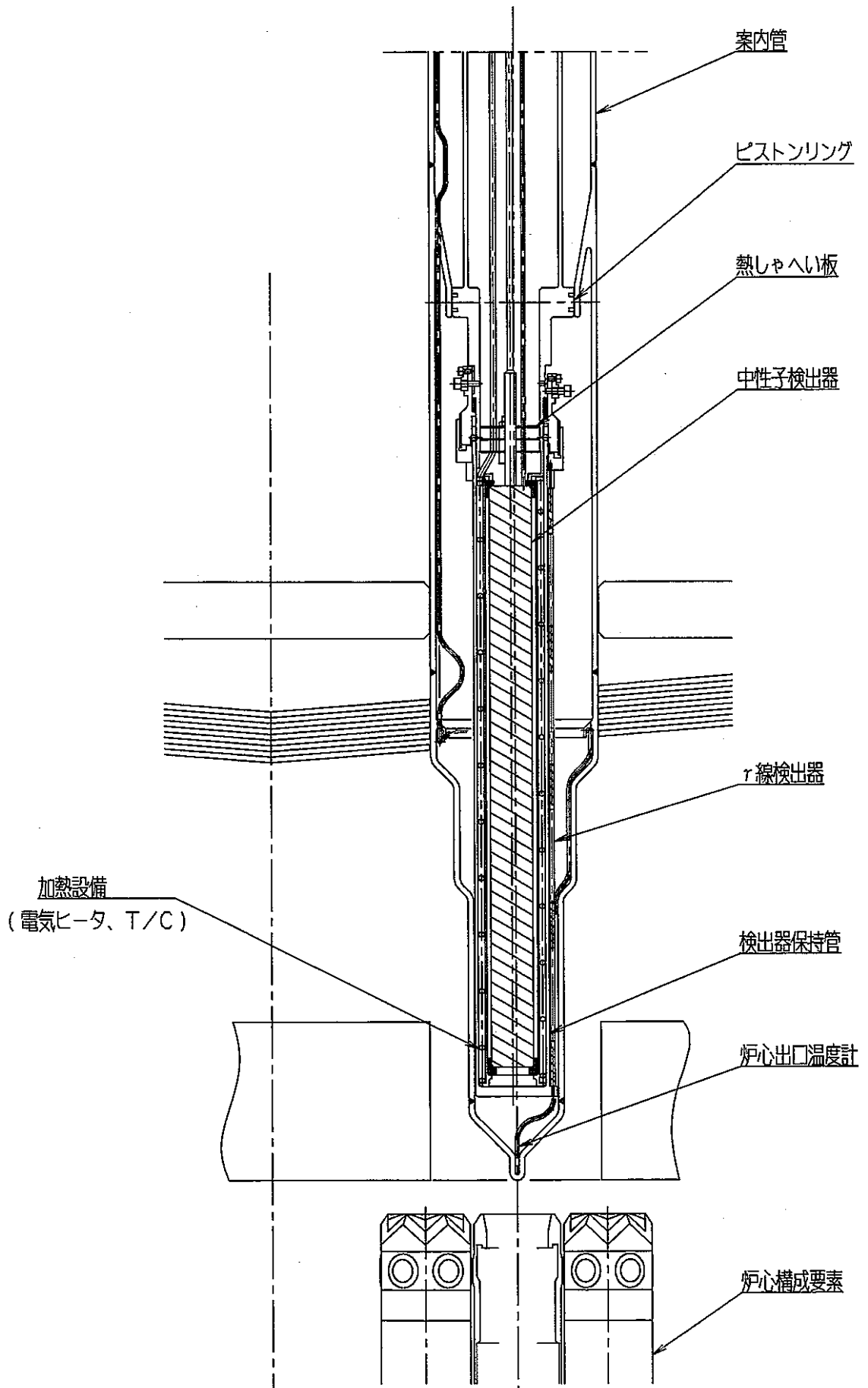


図2 案内管先端部詳細図

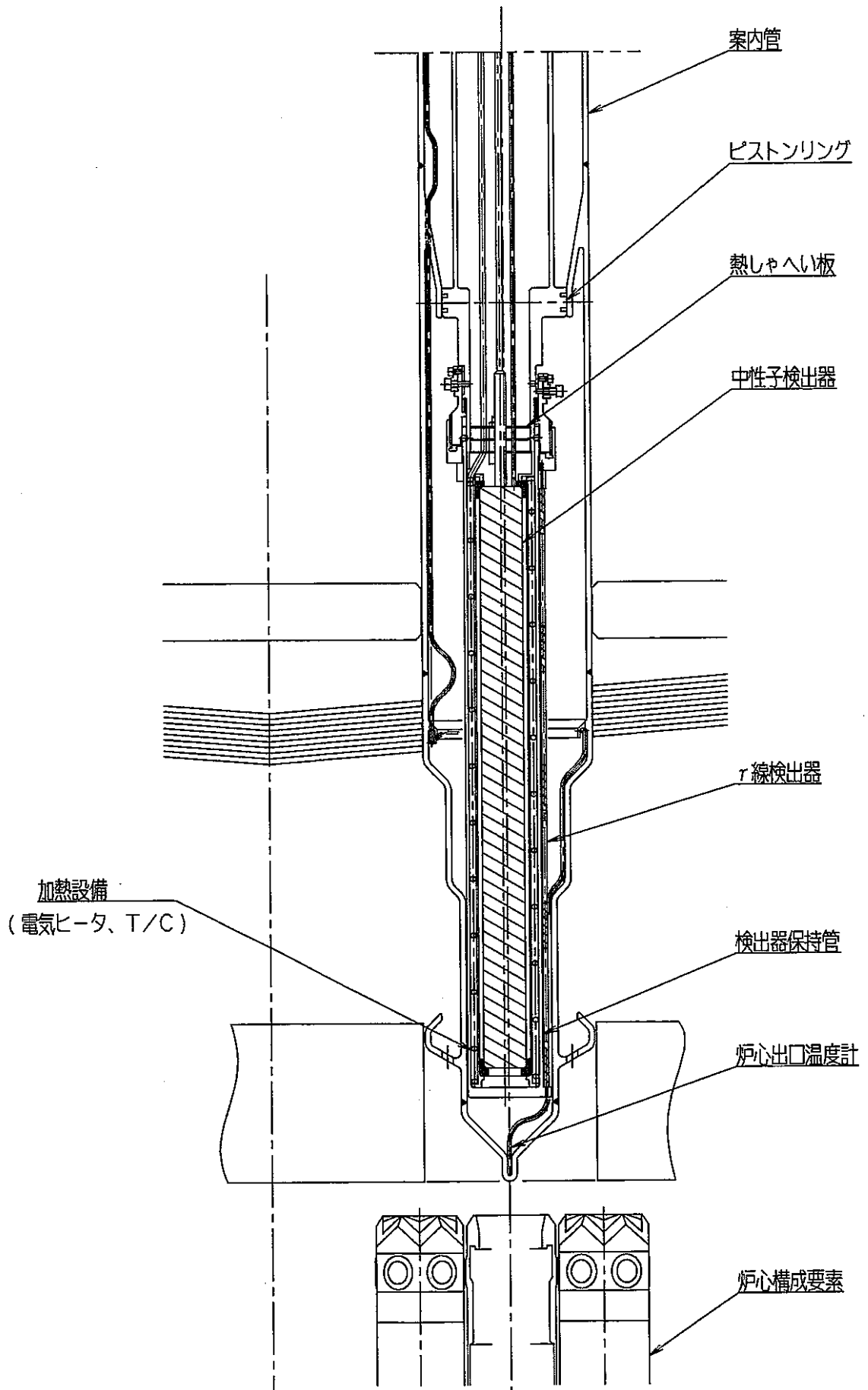


図2' 案内管先端部詳細図

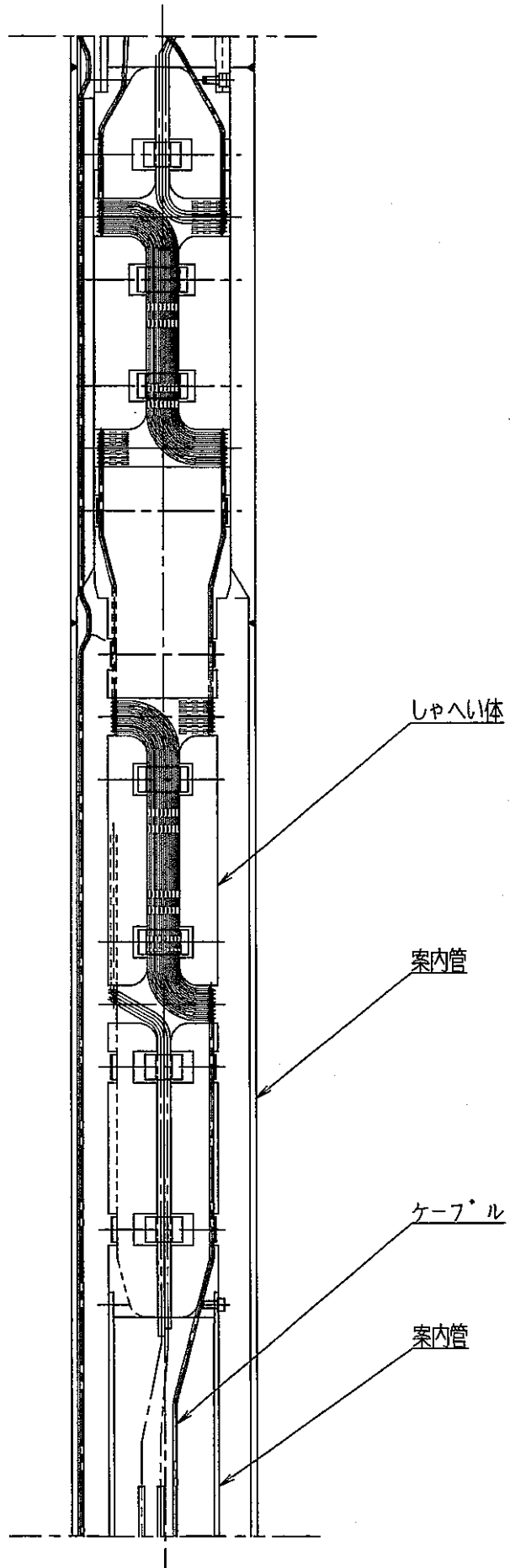


図3 案内管上部ケーブル引廻し図

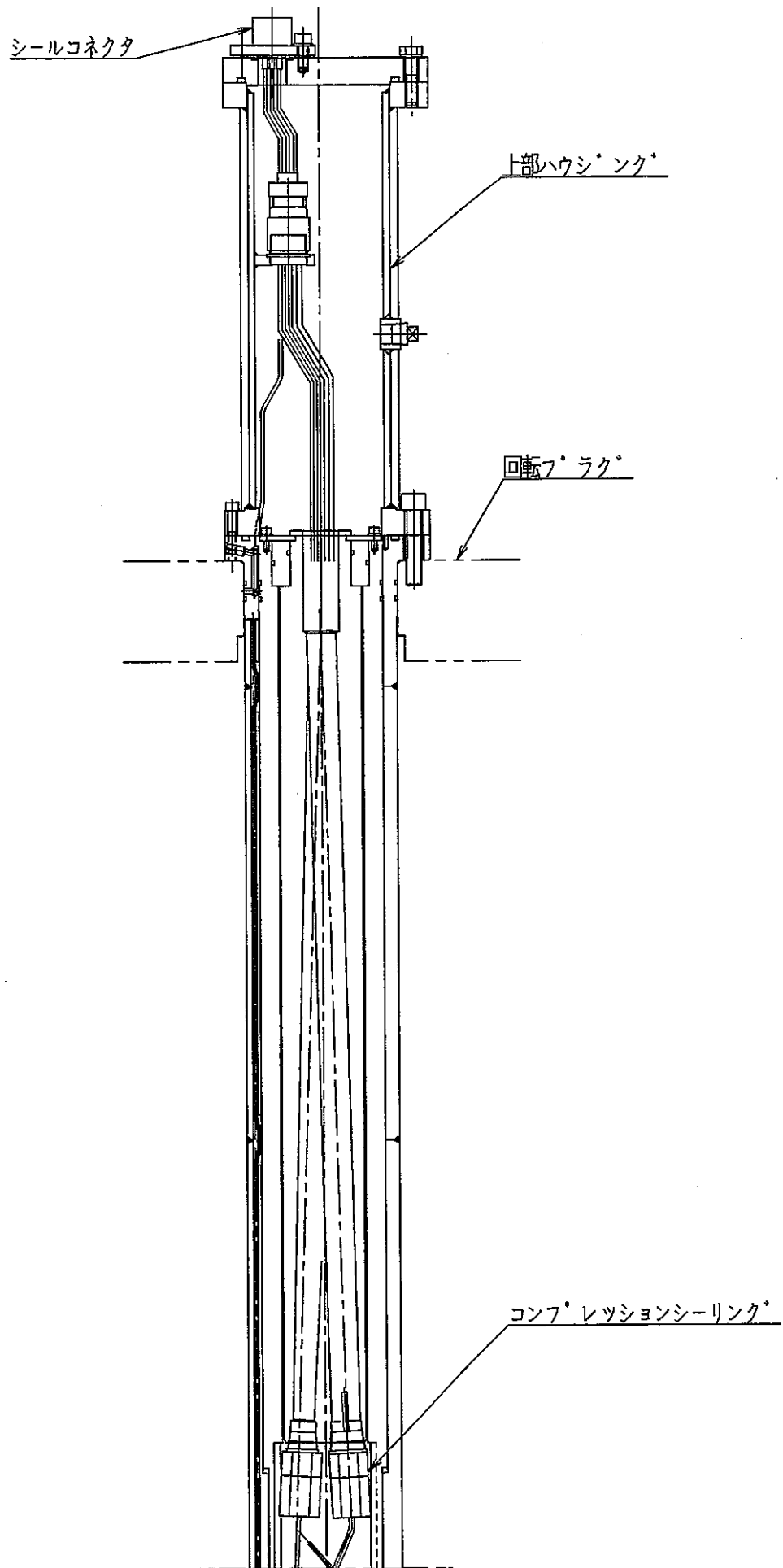


図4 回転プラグ廻り詳細図

4. まとめ

FBR実証炉用広域系中性子検出器の照射試験を「常陽」で実施する場合の照射試験装置の基本設計として、構造強度計算、流力振動計算及び遮へい計算により照射試験装置の健全性を確認した。また照射試験装置の設置、交換、据え付け、撤去方法についても検討を行った。

照射試験装置は、第3種管を適用して規格計算を実施したが、板厚は十分に基準値を満足した結果となっている。また応力計算についても許容応力に対して十分に低い値となっている。強度計算は各種の荷重に対して行い、設計応力強さを第1種管相当で評価しても十分に余裕のある結果が得られた。流力振動についても案内管の先端部、熱電対ウェル部の細い部分に対して評価を行い、ASME Code Section III Appendix Nの評価で同期振動領域の回避ができ、またこの時の応力振幅も設計疲労限以下となり問題のないことが分かった。遮へい設計では、手計算ではあるが、設計目標値に対して2桁近くの余裕のある低い結果が得られた。

照射試験装置の据え付け、撤去は動燃殿の特性試験キャスクを使用することで検討を実施した。中性子検出器の信号の処理、照射試験装置のヒータコントロール等は格納容器の電気ペネトレーションを通らずにすむようオペフロにおいて行うものとした。

謝 辞

本検討を実施するにあたり、検討の円滑な推進のためご尽力頂き、また貴重な御意見等によりご指導頂きました動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター実験炉部技術課青山卓史副主研殿はじめ技術課の関係者各位並びに揃政敏副主研殿はじめ照射課の関係者に謝意を表し、厚くお礼申し上げます。