

D型照射リグの設計報告書
(技術報告書)

1999年6月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
してください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

D型照射リグの設計報告書

(技術報告)

岡本薫*、北村了一*、
三次岳志*、宮川俊一*

要 旨

本書は、高速実験炉「常陽」MK-Ⅲ炉心以降に使用する新型の燃料照射試験用オフライン照射リグであるD型照射燃料集合体（以下、D型照射リグと呼ぶ。）の開発についてまとめたものである。

D型照射リグは、燃料要素の再装荷能力、照射条件設定能力、既存照射リグとの燃料保持構造の互換性及び各種コンパートメントの装填能力を有しており、従来の照射リグに比べ継続照射試験時の取り扱い性能の向上、照射温度条件設定数の拡大、構造上の課題への対応を図っている。

D型照射リグは、内部に燃料要素を納める二重の円筒管（以下、コンパートメントと呼ぶ。）を最大18本装填することが可能なコンパートメント型照射リグである。D型照射リグには、B型照射リグで使用している γ 型コンパートメント（燃料要素装填数最大5本）及びD型照射リグ用に開発した δ 型コンパートメント（燃料要素装填数1本）の2種類を混在させ装填することが可能である。集合体内には、 γ 型コンパートメントを最大6本、 δ 型コンパートメントを最大18本装填可能である。また、コンパートメント毎に照射温度条件を設定可能なので、D型照射リグ1体で最大18の互いに異なる条件を設定することが可能であり、構造設計の妥当性及び要求性能を満たしていることを確認した。

* 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 照射管理課

Design of Uninstrumented Irradiation Subassembly Type-D (UNIS-D)

K.Okamoto* , R.Kitamura*
T.Mitsugi* , S.Miyakawa*

Abstract

In the needs of the fuel irradiation test in "Joyo" MK- III core, there have been required that the irradiation of high performance fuel at high liner heat rate to high burn-up range, or the irradiation of advanced fuel such as MA fuel and Vipac fuel.

In order to carry out these irradiation tests, newly designed irradiation subassembly is required with special features of;

- Capability of the re-assembling after post-irradiation examination, even if the number of fuel in the identical irradiation condition decreases because of intermediate inspection.
- Enhanced flexibility of the irradiation temperature setting (in the present, UNIS-B's has 6 cases on the maximum).
- Sufficient flexibility for the coolant flow distribution in the subassembly by extending variety of the flow rate setting.

UNIS-D is a fuel irradiation subassembly which has been developed from above viewpoints. It is a compartment loading type irradiation subassembly that is able to load maximum of 18 compartments. Two types of compartments γ -type and δ -type are prepared for UNIS-D. The sufficient consideration has also been made on the re-assembling. A γ -type is the same compartment as the existing UNIS-B's and a δ -type is the newly designed one for UNIS-D. Three to five fuel pins are loaded into a γ -type compartment and only one pin is loaded into a δ -type compartment. It is possible to carry out the irradiation test in a maximum of 18 test temperature conditions within a subassembly, since it has the sufficient flexibility for the coolant flow distribution.

As for the development of UNIS-D, we have finished the detailed structure design and the design verification by the water flow examination, which confirmed that the UNIS-D exceeded its required performances in use and that its structure design was satisfactory.

* Oarai Engineering Center (OEC), Irradiation Center, Irradiation and Administration Section

目 次

1	はじめに	1
2	設計条件	10
3	設計根拠	11
3.1	設計仕様	11
3.2	構造設計	20
3.2.1	集合体の構造	20
3.2.2	δ 型コンパートメントの構造	23
3.2.3	シュラウド管の構造	25
3.2.4	γ 型及び δ 型コンパートメント混在装填のための構造	27
3.2.5	細部構造	29
3.3	再装荷対応	44
3.3.1	組立・解体手順	44
3.3.2	再装荷向け細部構造	46
3.4	流動設計	51
3.4.1	流路設計	51
3.4.2	水流動試験	52
3.4.3	冷却材流量設定範囲	63
3.4.4	流量配分設計	65
3.5	熱設計	129
3.5.1	断熱構造	129
3.5.2	集合体内温度分布	130
3.5.3	コンパートメント群熱湾曲	131
3.6	流力振動	141
3.6.1	評価方法	141
3.6.2	水流動試験	142
3.6.3	評価結果	155
3.6.4	水流動試験結果に関する考察	158
3.7	RTCB試験対応	225

4	強度評価	226
4. 1	通常運転時及び異常な過渡変化時の強度評価	226
4. 1. 1	集合体外筒部の強度評価	226
4. 1. 2	タイロッドの強度評価	237
4. 1. 3	上部支持板の強度評価	238
4. 1. 4	コンパートメントの強度評価	241
4. 1. 5	コンパートメントベローズの強度評価	242
4. 2	輸送・取扱時の強度評価	281
4. 2. 1	コンパートメント内管の強度評価	281
4. 2. 2	タイロッドの強度評価	282
4. 2. 3	上部支持板の強度評価	283
4. 3	地震時の強度評価	290
4. 3. 1	概要	290
4. 3. 2	評価条件	290
4. 3. 3	評価結果	291
4. 4	その他の強度評価	294
4. 4. 1	タイロッドの軸方向伸び量	294
4. 4. 2	タイロッドのネジ部の強度評価	296
5	安全評価	302
5. 1	概要	302
5. 2	被覆管最高温度の計算方法	302
5. 3	評価結果	306
6	照射性能予測	315
6. 1	照射温度設定範囲	315
6. 2	モニタ設計	323
6. 2. 1	温度モニタ装填部	323
6. 2. 2	ドシメータ装填部	323
7	おわりに	331
8	今後の課題（作業）	332
8. 1	薄肉溶接部の強度確認	332
8. 2	製作公差の影響を受けにくいオリフィス構造の検討	332

8. 3	再装荷のための取扱試験	332
8. 4	ディンプル先端－燃料要素間のギャップの製作管理方法	332
9	謝辞	334
	参考文献	335

表リスト

表1-1	D型照射リグの開発工程	4
表1-2	現行の照射リグの特徴	5
表1-3	D型照射リグの特徴	6
表3.1-1	D型照射リグの主要目(1/2)	12
表3.1-1	D型照射リグの主要目(2/2)	13
表3.2-1	各種支持方式の比較	34
表3.4-1	試験条件(オリフィス圧力損失測定試験)	67
表3.4-2	試験条件(コンパートメント圧力損失測定試験)	68
表3.4-3	試験条件(漏洩流量測定試験)	69
表3.4-4	試験条件(集合体圧力損失測定試験)	70
表3.4-5	圧力損失係数の実験式(オリフィス圧力損失測定試験)	71
表3.4-6	圧力損失係数の実験式(コンパートメント圧力損失測定試験)	72
表3.4-7	球面座漏洩流量測定試験結果	73
表3.4-8	ネジ部漏洩流量測定試験結果	74
表3.4-9	圧力損失係数の実験式(集合体圧力損失測定試験)	75
表3.4-10	縮拡流係数	76
表3.4-11	照射試験計画中の(D1)の燃料要素仕様	77
表3.4-12	流量配分計算結果(コンパートメント、シュラウド管オリフィス径同一)	78
表3.4-13	流量配分計算結果(コンパートメントオリフィス径固定)	79
表3.6-1	振動特性試験の試験条件	162
表3.6-2	連続流水試験の試験条件	162
表3.6-3	卓越周波数	163
表3.6-4	振動特性試験結果	164
表3.6-5	試料ピン表面目視観察結果	165
表3.6-6	摩耗深さの算出	166
表3.6-7	ディンプル内径測定結果	167
表3.6-8	流力弾性振動の判定結果	168
表3.6-9	摩耗深さ測定結果(φ6.5mm-ギャップ0.2mm)	169
表3.6-10	摩耗深さ測定結果(φ8.5mm-ギャップ0.1mm)	170
表3.6-11	摩耗深さ測定結果(φ8.5mm-ギャップ0.2mm)	171
表4.1-1	SUS316の材料強度	244
表4.1-2	SUS316相当ステンレス鋼の材料強度	244
表4.1-3	集合体外筒部の応力評価結果(1/6)	245
表4.1-3	集合体外筒部の応力評価結果(2/6)	246

表4.1-3	集合体外筒部の応力評価結果(3/6)	247
表4.1-3	集合体外筒部の応力評価結果(4/6)	248
表4.1-3	集合体外筒部の応力評価結果(5/6)	249
表4.1-3	集合体外筒部の応力評価結果(6/6)	250
表4.1-4	集合体外筒部の応力評価結果(1/6)	251
表4.1-4	集合体外筒部の応力評価結果(2/6)	252
表4.1-4	集合体外筒部の応力評価結果(3/6)	253
表4.1-4	集合体外筒部の応力評価結果(4/6)	254
表4.1-4	集合体外筒部の応力評価結果(5/6)	255
表4.1-4	集合体外筒部の応力評価結果(6/6)	256
表4.1-5	集合体外筒部の応力評価結果(1/6)	257
表4.1-5	集合体外筒部の応力評価結果(2/6)	258
表4.1-5	集合体外筒部の応力評価結果(3/6)	259
表4.1-5	集合体外筒部の応力評価結果(4/6)	260
表4.1-5	集合体外筒部の応力評価結果(5/6)	261
表4.1-5	集合体外筒部の応力評価結果(6/6)	262
表4.1-6	集合体外筒部の応力評価結果(1/6)	263
表4.1-6	集合体外筒部の応力評価結果(2/6)	264
表4.1-6	集合体外筒部の応力評価結果(3/6)	265
表4.1-6	集合体外筒部の応力評価結果(4/6)	266
表4.1-6	集合体外筒部の応力評価結果(5/6)	267
表4.1-6	集合体外筒部の応力評価結果(6/6)	268
表4.1-7	集合体外筒部の応力評価結果(1/6)	269
表4.1-7	集合体外筒部の応力評価結果(2/6)	270
表4.1-7	集合体外筒部の応力評価結果(3/6)	271
表4.1-7	集合体外筒部の応力評価結果(4/6)	272
表4.1-7	集合体外筒部の応力評価結果(5/6)	273
表4.1-7	集合体外筒部の応力評価結果(6/6)	274
表4.1-8	コンパートメントの強度評価結果	275
表4.1-9	D型照射リグの一次応力の制限評価結果	276
表4.1-10	D型照射リグの座屈評価結果	276
表4.1-11	D型照射リグのひずみの制限評価結果	277
表4.1-12	D型照射リグのクリープ疲労損傷評価結果	277
表4.2-1	コンパートメントの許容座屈荷重の解析結果	286
表4.2-2	コンパートメントの座屈評価結果	286
表4.2-3	タイロッドの強度評価結果	286
表4.3-1	D型照射リグの地震時の応力評価結果(1/2)	292
表4.3-1	D型照射リグの地震時の応力評価結果(2/2)	293
表4.4-1	タイロッドの軸方向の伸び量評価結果	299
表4.4-2	タイロッドのネジ部の強度評価結果	299

表5-1	安全評価条件及び安全評価結果（出力上昇型事象） …	308
表5-2	安全評価条件及び安全評価結果（冷却材流量減少型事象）	309
表6.1-1	集合体構造に起因する冷却材流量設定誤差の算出方法 …	317
表6.1-2	集合体構造に起因する冷却材流量設定誤差（最大） ……	318

図リスト

図1-1	D型照射リグの鳥瞰図	7
図1-2	「常陽」で使用する燃料照射リグの構造	8
図1-3	「常陽」で使用する燃料照射リグの構造のバリエーション	9
図3.1-1	D型照射リグの構造図(集合体)	14
図3.1-2	D型照射リグの構造図(δ 型コンパートメント)	15
図3.1-3	D型照射リグの構造図(シュラウド管)	16
図3.1-4	D型照射リグの構造図(γ 型コンパートメント (4ピッチワイヤスプレッド型))	17
図3.1-5	D型照射リグの構造図(γ 型コンパートメント (4ピッチグリッドスプレッド型))	18
図3.1-6	D型照射リグの構造図(タイロッド)	19
図3.2-1	コンパートメント装填数と組合せ	35
図3.2-2	従来型と改良型のディンプル設計形状	36
図3.2-3	従来型ディンプルの形状写真	37
図3.2-4	改良型ディンプルの形状写真	38
図3.2-5	各種支持方式の比較	39
図3.2-6	コンパートメントオリフィスの構造	40
図3.2-7	コンパートメントベローズの構造	41
図3.2-8	TED収納具の構造	42
図3.2-9	下部ストレーナの構造	43
図3.3-1	組立手順(1/2)	48
図3.3-1	組立手順(2/2)	49
図3.3-2	コンパートメント下端部構造(基本設計時)	50
図3.3-3	コンパートメント下端部構造(シュラウド管落下防止 構造付き)	50
図3.4-1	冷却材流路モデル	80
図3.4-2	水流動試験体(集合体)	81
図3.4-3	水流動試験体(ダミーコンパートメント)	82
図3.4-4	水流動試験体(δ 型コンパートメント)	83
図3.4-5	水流動試験体(シュラウド管:燃料要素径 ϕ 8.5mm用)	84
図3.4-6	水流動試験体(シュラウド管:燃料要素径 ϕ 6.5mm用)	85
図3.4-7	水流動試験体(模擬燃料要素 外径: ϕ 8.5mm)	86
図3.4-8	水流動試験体(模擬燃料要素 外径: ϕ 6.5mm)	87
図3.4-9	試験装置の系統図	88
図3.4-10	オリフィス圧力損失測定用試験容器	89
図3.4-11	コンパートメント圧力損失測定用試験容器	90
図3.4-12	集合体圧力損失測定用試験容器	91
図3.4-13	水流動試験の測定系統図	92

図3.4-14	圧力損失測定位置（オリフィス圧力損失測定試験）	93
図3.4-15	圧力損失測定位置（コンパートメント圧力損失測定試験）	94
図3.4-16	流路接続図（コンパートメント漏洩流量測定試験）	95
図3.4-17	圧力損失測定位置（集合体圧力損失測定試験）	96
図3.4-18	圧力損失係数の評価位置	97
図3.4-19	オリフィス圧力損失測定試験結果(1)	98
図3.4-20	オリフィス圧力損失測定試験結果(2)	99
図3.4-21	各オリフィスの性能比較	100
図3.4-22	再現性確認試験結果(1)	101
図3.4-23	再現性確認試験結果(2)	102
図3.4-24	コンパートメント圧力損失測定試験結果(1)	103
図3.4-25	コンパートメント圧力損失測定試験結果(2)	104
図3.4-26	コンパートメント圧力損失測定試験結果(3)	105
図3.4-27	コンパートメント圧力損失測定試験結果(4)	106
図3.4-28	コンパートメント圧力損失測定試験結果(5)	107
図3.4-29	コンパートメント圧力損失係数実験式(1)	108
図3.4-30	コンパートメント圧力損失係数実験式(2)	109
図3.4-31	コンパートメント圧力損失係数実験式(3)	110
図3.4-32	コンパートメント圧力損失係数実験式(4)	111
図3.4-33	コンパートメント圧力損失係数実験式(5)	112
図3.4-34	球面座漏洩流量測定試験結果	113
図3.4-35	ネジ部漏洩流量測定試験結果	114
図3.4-36	集合体圧力損失測定試験結果(1)	115
図3.4-37	集合体圧力損失測定試験結果(2)	116
図3.4-38	集合体圧力損失測定試験結果(3)	117
図3.4-39	集合体圧力損失係数実験式	118
図3.4-40	エントランスノズルオリフィスでの縮流率と 集合体圧力損失特性の関係	119
図3.4-41	δ 型コンパートメントの流動特性 (ワイヤスヘ-サ型、燃料要素外径 ϕ 6.5mm)	120
図3.4-42	δ 型コンパートメントの流動特性 (ワイヤスヘ-サ型、燃料要素外径 ϕ 8.5mm)	121
図3.4-43	δ 型コンパートメントの流動特性 (シュラウト管型、燃料要素外径 ϕ 6.5mm)	122
図3.4-44	δ 型コンパートメントの流動特性 (シュラウト管型、燃料要素外径 ϕ 8.5mm)	123
図3.4-45	γ 型コンパートメントの燃料要素1本当たりの 流量設定範囲	124

図3.4-46	γ 型コンパートメントの燃料要素1本当たりの 流量設定範囲	125
図3.4-47	コンパートメント圧力損失と冷却材流量の関係	126
図3.4-48	コンパートメント部以外の圧力損失と冷却材流量の関係	127
図3.4-49	D型照射リグの圧力損失設定手順	128
図3.5-1	断熱層設定モデル	133
図3.5-2	熱損出計算モデル	134
図3.5-3	被覆管最高温度設定値と冷却材流量の関係 (コンパートメント温度400℃)	135
図3.5-4	被覆管最高温度設定値と冷却材流量の関係 (コンパートメント温度500℃)	135
図3.5-5	断熱層からの熱損出	136
図3.5-6	集合体内温度分布解析モデル	137
図3.5-7	集合体内温度分布解析結果	138
図3.5-8	各燃料要素の軸方向温度分布 (pin1~pin6)	139
図3.5-9	各燃料要素の軸方向温度分布 (pin7~pin12)	139
図3.5-10	各燃料要素の軸方向温度分布 (pin13~pin18)	140
図3.6-1	振動特性試験装置 (加速度計入り模擬試料ピン)	172
図3.6-2	振動特性試験装置 (シュラウド管)	173
図3.6-3	振動特性試験装置 (コンパートメント)	174
図3.6-4	振動特性試験装置 (試験容器)	175
図3.6-5	連続流水試験装置 (模擬試料ピン、 $\phi 6.5\text{mm}$)	176
図3.6-6	連続流水試験装置 (模擬試料ピン、 $\phi 8.5\text{mm}$)	177
図3.6-7	連続流水試験装置 (シュラウド管、模擬試料ピン径 $\phi 6.5\text{mm}$ 用)	178
図3.6-8	連続流水試験装置 (シュラウド管、模擬試料ピン径 $\phi 8.5\text{mm}$ 用)	179
図3.6-9	連続流水試験装置 (試験容器)	180
図3.6-10	流水試験系統図	181
図3.6-11	連続流水試験の系統図	182
図3.6-12	振動測定系統図	183
図3.6-13	摩耗深さ測定原理図	184
図3.6-14	振動特性試験結果(1)	185
図3.6-15	振動特性試験結果(2)	186
図3.6-16	振動特性試験結果(3)	187
図3.6-17	振動特性試験結果(4)	188
図3.6-18	振動特性試験結果(5)	189
図3.6-19	振動特性試験結果(6)	190
図3.6-20	振動特性試験結果(7)	191

図3.6-21	振動特性試験結果(8)	.....	192
図3.6-22	振動特性試験結果(9)	.....	193
図3.6-23	振動特性試験結果(10)	.....	194
図3.6-24	振動特性試験結果(11)	.....	195
図3.6-25	振動特性試験結果(12)	.....	196
図3.6-26	試験容器の加速度応答	.....	197
図3.6-27	運転履歴と摩耗観察	.....	198
図3.6-28	試料ピン表面観察結果(試験前)	.....	199
図3.6-29	試料ピン表面観察結果(1)	.....	200
図3.6-30	試料ピン表面観察結果(2)	.....	201
図3.6-31	試料ピン表面観察結果(3)	.....	202
図3.6-32	試料ピン表面観察結果(4)	.....	203
図3.6-33	試料ピン表面観察結果(5)	.....	204
図3.6-34	試料ピン表面観察結果(6)	.....	205
図3.6-35	試料ピン表面観察結果(7)	.....	206
図3.6-36	試料ピン表面観察結果(8)	.....	207
図3.6-37	試料ピン表面観察結果(9)	.....	208
図3.6-38	試料ピン表面観察結果(10)	.....	209
図3.6-39	試料ピン表面観察結果(11)	.....	210
図3.6-40	試料ピン表面観察結果(12)	.....	211
図3.6-41	試料ピン表面観察結果(13)	.....	212
図3.6-42	試料ピン表面観察結果(14)	.....	213
図3.6-43	試料ピン表面観察結果(15)	.....	214
図3.6-44	試料ピン表面観察結果(16)	.....	215
図3.6-45	カルマン渦との共振評価結果	.....	216
図3.6-46	試料ピン摩耗評価結果(ピン外径; 6.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から294mmのデインフル対応位置)	...	217
図3.6-47	試料ピン摩耗評価結果(ピン外径; 6.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から494mmのデインフル対応位置)	...	218
図3.6-48	試料ピン摩耗評価結果(ピン外径; 6.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から694mmのデインフル対応位置)	...	219
図3.6-49	試料ピン摩耗評価結果(ピン外径; 8.5mm, ギャップ; 0.1mm, 下から244mmのデインフル対応位置)	...	220
図3.6-50	試料ピン摩耗評価結果(ピン外径; 8.5mm, ギャップ; 0.1mm, 下から444mmのデインフル対応位置)	...	221
図3.6-51	試料ピン摩耗評価結果(ピン外径; 8.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から245mmのデインフル対応位置)	...	222
図3.6-52	試料ピン摩耗評価結果(ピン外径; 8.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から445mmのデインフル対応位置)	...	223

図3.6-53	試料ピン摩耗予測（ピン外径；6.5mm，ギャップ；0.2mm， 下から294mmのデインフル対応位置）	224
図4.1-1	上部支持板の詳細構造	278
図4.1-2	境界条件	279
図4.1-3	δ 型コンパートメントの解析モデル	280
図4.2-1	コンパートメントの座屈解析モデル	287
図4.2-2	コンパートメントの座屈モード	288
図4.2-3	タイロッドの解析モデル	289
図4.4-1	ハンドリングヘッドーラッパ管嵌合部構造	300
図4.4-2	タイロッドネジ部及びロックナットの構造	301
図5-1	一次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時のC型照射リグの 被覆管温度履歴（I～III型特殊燃料要素）	310
図5-2	一次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時のC型照射リグの 被覆管温度履歴（IV型特殊燃料要素）	311
図5-3	一次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時の被覆管温度 （I～III型特殊燃料要素、炭化物試験用要素、 窒化物試験用要素）	312
図5-4	一次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時の被覆管温度 （IV型特殊燃料要素）	313
図5-5	一次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時の集合体内冷却材流量	314
図6.1-1	被覆管最高温度（板厚中心）と冷却材流量の関係 （オーステナイト系ステンレス鋼）	319
図6.1-2	被覆管最高温度（板厚中心）と冷却材流量の関係 （フェライト系ステンレス鋼）	320
図6.1-3	冷却材流量設定誤差を含む被覆管最高温度と 冷却材流量の関係（オーステナイト系ステンレス鋼）	321
図6.1-4	冷却材流量設定誤差を含む被覆管最高温度と 冷却材流量の関係（フェライト系ステンレス鋼）	322
図6.2-1	TEDの構造	325
図6.2-2	ドシメータの構造	326
図6.2-3	温度モニタホルダーの構造	327
図6.2-4	TED温度モニタの装填位置	328
図6.2-5	フラックスモニタ管の構造	329
図6.2-6	フラックスモニタ管及びモニタの装填位置	330

1 はじめに

「常陽」MK-Ⅲ炉心における照射試験のニーズには、高線出力、高燃焼度燃料の開発、MA燃料やバイバック燃料などの先進燃料の開発があげられている。これらの照射試験の多くは、照射データの整備や挙動評価などを目的とした燃料要素単位の照射試験であるため、コンパートメントタイプの照射リグを用いて試験を行うことが適切である。

D型照射リグは、最大18本のコンパートメントで構成されたコンパートメント型照射リグである。コンパートメントとは、燃料要素の周囲をステンレス鋼製の管で囲み、内部に冷却材流路を有した照射リグの構成要素のことである。コンパートメントは、燃料要素の周方向及び軸方向の支持構造を有し、コンパートメント毎に設けた冷却材流量調整構造により燃料要素被覆管の照射温度を設定する機能を有する。D型照射リグに装填するコンパートメントは、従来のB型照射リグで使用している γ 型コンパートメント及び今回新たに開発した δ 型コンパートメントの2種類である。 γ 型コンパートメントは燃料要素を最大5本装填可能であり、 δ 型コンパートメントは燃料要素を1本のみ装填する構造である。D型照射リグ、 γ 型コンパートメント及び δ 型コンパートメントの構造を図1-1に示す。

D型照射リグは、以下の性能要件を満たすことを目標に開発を進めている。D型照射リグの開発工程を表1-1に示す。また、現行の照射リグ（A～C型照射リグ）とD型照射リグの特徴及び構造の比較を表1-2～表1-3及び図1-2～図1-3に示す。

(1) 燃料要素の再装荷能力

高燃焼度までの照射試験要求や今までに設計上の知見、手法が確立されていない先進燃料の開発を実現するためには、リグ部材の照射日数の制限や先進燃料の中間検査の必要性などから、燃料要素の再装荷が必要である。

(2) 照射条件設定能力

複数の照射条件で行う照射試験（以下、パラメータ照射試験と呼ぶ）及び複数の照射試験を同時に、かつ効率よく実施するため、同一集合体内で個々に照射条件が設定できるとともに外径や全長等が異なる仕様の燃料要素を装荷できることが必要である。

(3) 既存照射リグとの燃料要素保持構造の互換性

B型照射リグからの継続照射を行うため、既存の燃料要素を装荷できる構造寸法であることが必要である。

(4) 各種コンパートメントの装填能力

γ 型コンパートメントを用い実施する必要がある継続照射試験やRTCB試験等を行うため、多種のコンパートメントを混在できることが必要である。

なお、図1-2に示すようにパラメトリックな照射試験に用いるコンパートメントタイプの照射リグとしては、既にB型照射リグがある。しかし、今後の照射試験の多様化に対しB型照射リグで対応するには以下の課題があり十分とは言えない。そのため、これらの課題を踏まえD型照射リグの開発を進めた。

① 継続照射試験時の取扱い性能の向上

今後の照射試験では、高燃焼度(160,000MWd/t程度以上)の照射試験や今までに設計上の知見、手法などが確立されていない先進燃料の開発などのために、燃料要素の破壊検査を伴う継続照射試験(中間検査により照射途中のデータを取得する照射試験)の増加が予想される。

B型照射リグで破壊試験を伴う継続照射試験を行う場合、 γ 型コンパートメント1本に装填する燃料要素は、燃料要素被覆管の照射温度変化及び周方向温度差の発生を防止するため同一の照射条件の燃料要素を装填する必要がある。よって、再装荷の際には、コンパートメントを構成するのに必要な数の同一照射条件の燃料要素が無ければならず、同一照射条件の燃料要素の数が不足した場合には、新たに照射条件がほぼ同一な燃料要素を製作する必要がある。

D型照射リグは、 γ 型コンパートメントと δ 型コンパートメントを混在して装填するため、中間検査で破壊検査を行った場合でも照射中のものと同じ燃料要素を新たに製作する必要はなく継続照射試験が可能である。また、D型照射リグは、B型照射リグで生じる集合体内の冷却材流量配分計算の複雑さや照射後試験施設での組立性の課題を踏まえて流量配分設計の簡素化、部品の共通化や規格化を図っている。

② 照射温度条件設定数の拡大

照射試験で設定されるパラメータには、燃料要素の構造・組成や構造材料の組成・照射温度等様々である。これらのパラメータのうち、照射温度条件は、照射リグの構造により、同一集合体内で設定される数が制限される。多数の照射温度条件を設定する照射試験を効率良く実施するためには、同一集合体に多数の照射条件が設定できることが要求される。

コンパートメント型の照射リグでは、この要求を満足させるために、コンパートメント毎に任意に冷却材流量を設定可能としており、照射リグへのコンパートメントの最大装填数が同一集合体における照射温度条件の最大設定数となる。

現行の照射リグでの照射温度条件の最大設定数は、A型照射リグ及びC型照射リグが1ケース、B型照射リグが6ケースである。

D型照射リグは、コンパートメントの装填数が最大18本であるため、同一集合体内で最大18ケースの照射温度条件を設定することが可能である。これは、現行の最大であるB型照射リグの照射温度条件設定数の3倍となる。

③ 構造上の課題への対応

今後の照射試験では、先進燃料など仕様の異なる各種の燃料の照射が予定されている。そのためには、燃料要素仕様に合わせて燃料要素周方向保持方式（ワイヤスペーサ型、グリッドスペーサ型）や燃料要素装填本数の相違により異なる流動特性を持つコンパートメントを装荷する必要がある。B型照射リグにおいて同一集合体内で各種コンパートメントを混在させる場合、各コンパートメントの流動特性の差異を吸収するために燃料要素の流量設定範囲を絞ることで対応している。

D型照射リグは、B型照射リグと集合体内の冷却材流量配分構造が異なり、各種のコンパートメントの流動特性を同一にする機能を有するオリフィス及び流量調節を行うオリフィスをそれぞれ設置しており、流量設定範囲の拡大を図っている。このため、B型照射リグに比べ集合体内の冷却材流量配分に十分なフレキシビリティを有しており、各種コンパートメントの装填に対し柔軟に対応することが可能である。

表1-1 D型照射リグの開発工程

項目	工 程									
	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15
基本設計	■									
詳細設計		■	■							
実機設計						■				
試作		■								
水流動試験				■	■					
流力振動試験					■					
1号機製作 再組立							■	■	■	
照射試験										■
許認可					■	■	■			

表1-2 現行の照射リグの特徴

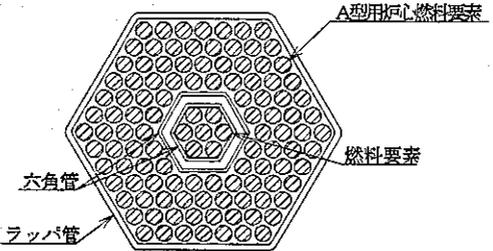
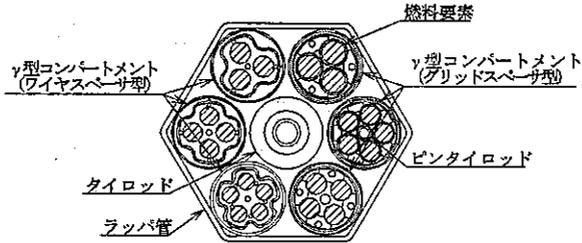
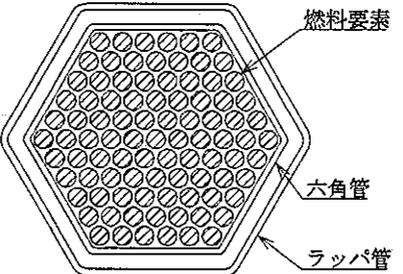
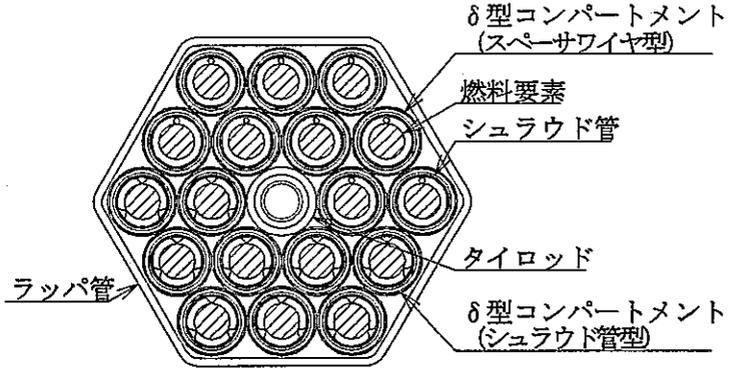
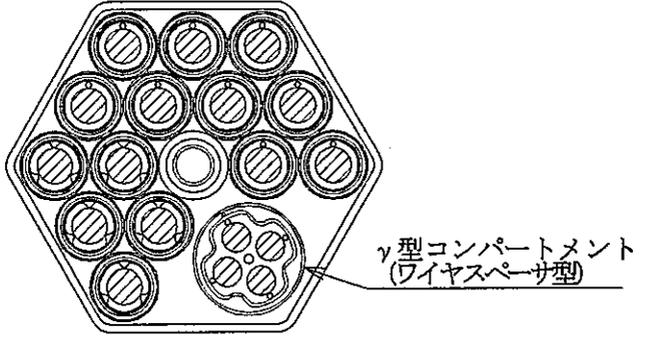
名称	構造	特徴	断面形状
A型	<ul style="list-style-type: none"> ・外形寸法は炉心燃料と同一 ・集合体中央部に六角管で試料部を設け、燃料要素束またはコンパートメント(α型またはβ型)を収納 	<ul style="list-style-type: none"> ・集合体内の燃料装荷量が多く、炉心特性への影響が小さい ・試料部で照射温度条件の設定が可能 	
B型	<ul style="list-style-type: none"> ・外形寸法は炉心燃料と同一 ・6本のγ型コンパートメント内に燃料要素束を収納 	<ul style="list-style-type: none"> ・ホットセル内での解体組立が可能 ・コンパートメント毎に照射温度条件の設定が可能 	
C型	<ul style="list-style-type: none"> ・外形寸法は炉心燃料と同一 ・二重六角管構造で内側六角管内に燃料要素束を収納 	<ul style="list-style-type: none"> ・多数の燃料要素を同一の条件で照射可能 	

表1-3 D型照射リグの特徴

構 造	断面形状
<ul style="list-style-type: none"> ・外形寸法は炉心燃料と同一 ・最大18本のδ型コンパートメント内に燃料要素を収納 ・δ型コンパートメント及びB型照射燃料集合体のγ型コンパートメントを混在して装填することが可能 	 <p style="text-align: center;">[δ型コンパートメント最大装填型]</p>
特 徴	
<ul style="list-style-type: none"> ・ホットセル内での解体・再組立が可能 ・コンパートメント毎に照射温度条件の設定が可能 ・多種多様な燃料要素仕様に対応 ・流路構造の簡素化による照射温度の精度向上 	 <p style="text-align: center;">[γ型コンパートメント混在型]</p>

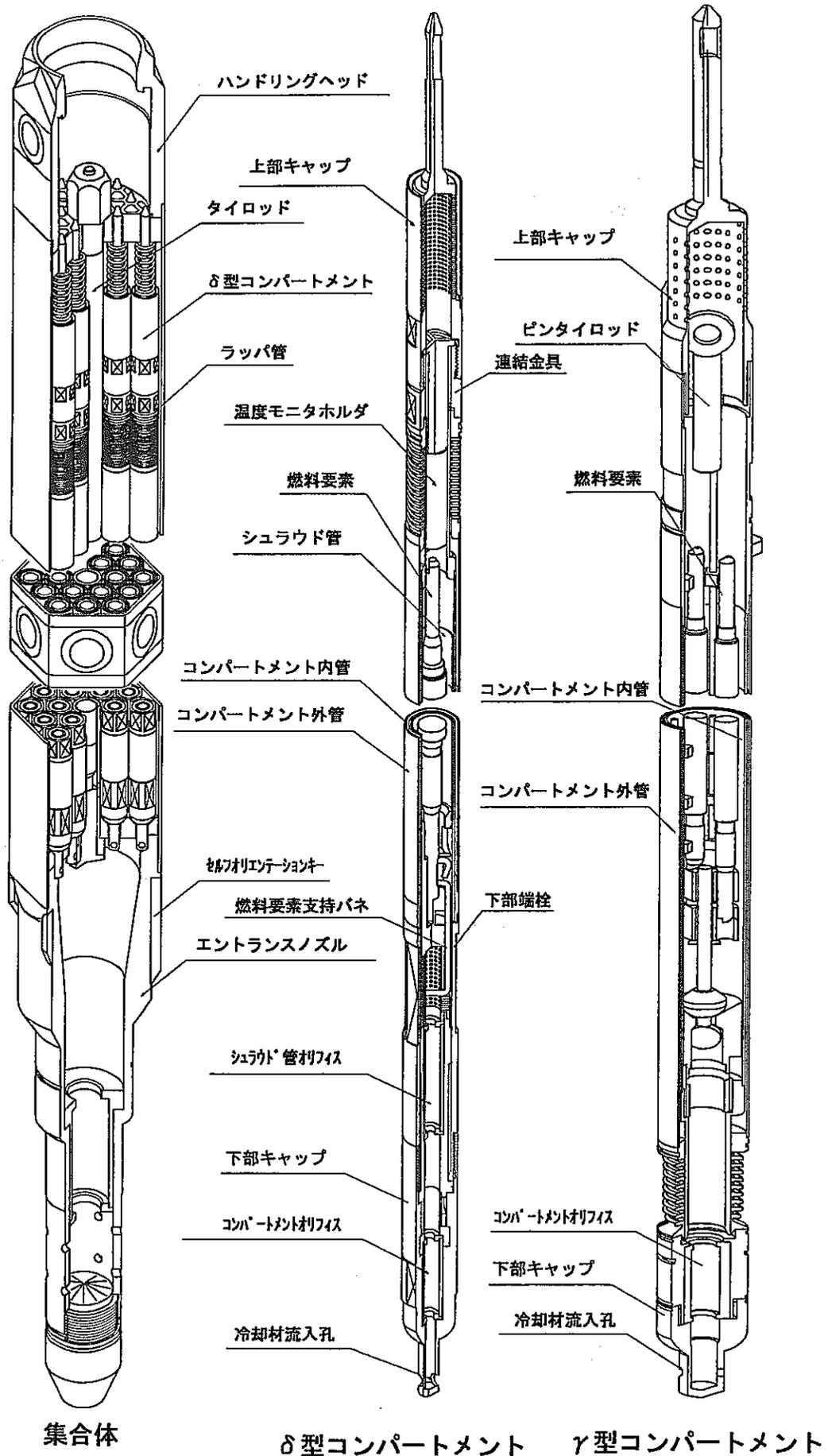


図1-1 D型照射リグの鳥瞰図

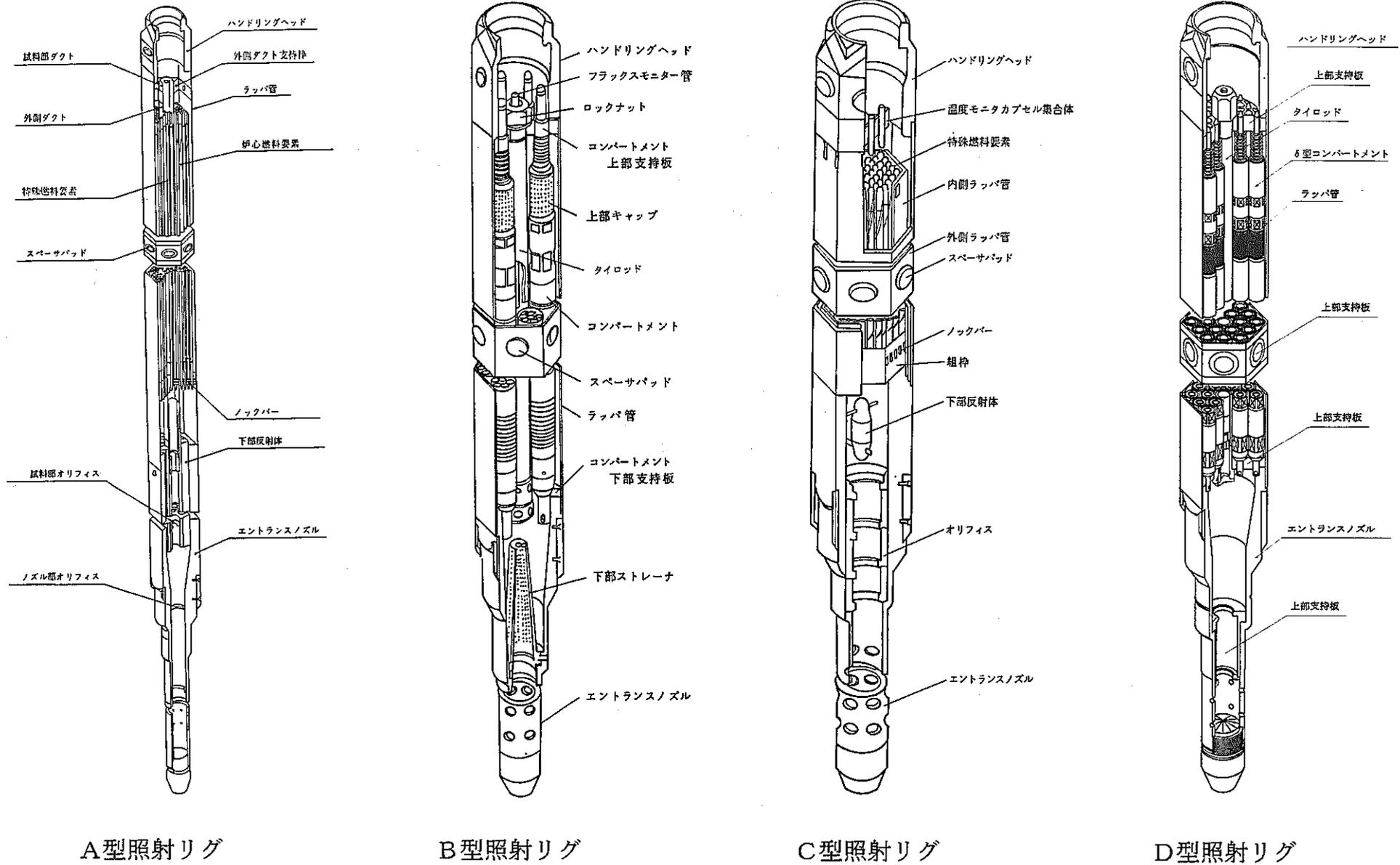


図1-2 「常陽」で使用する燃料照射リグの構造

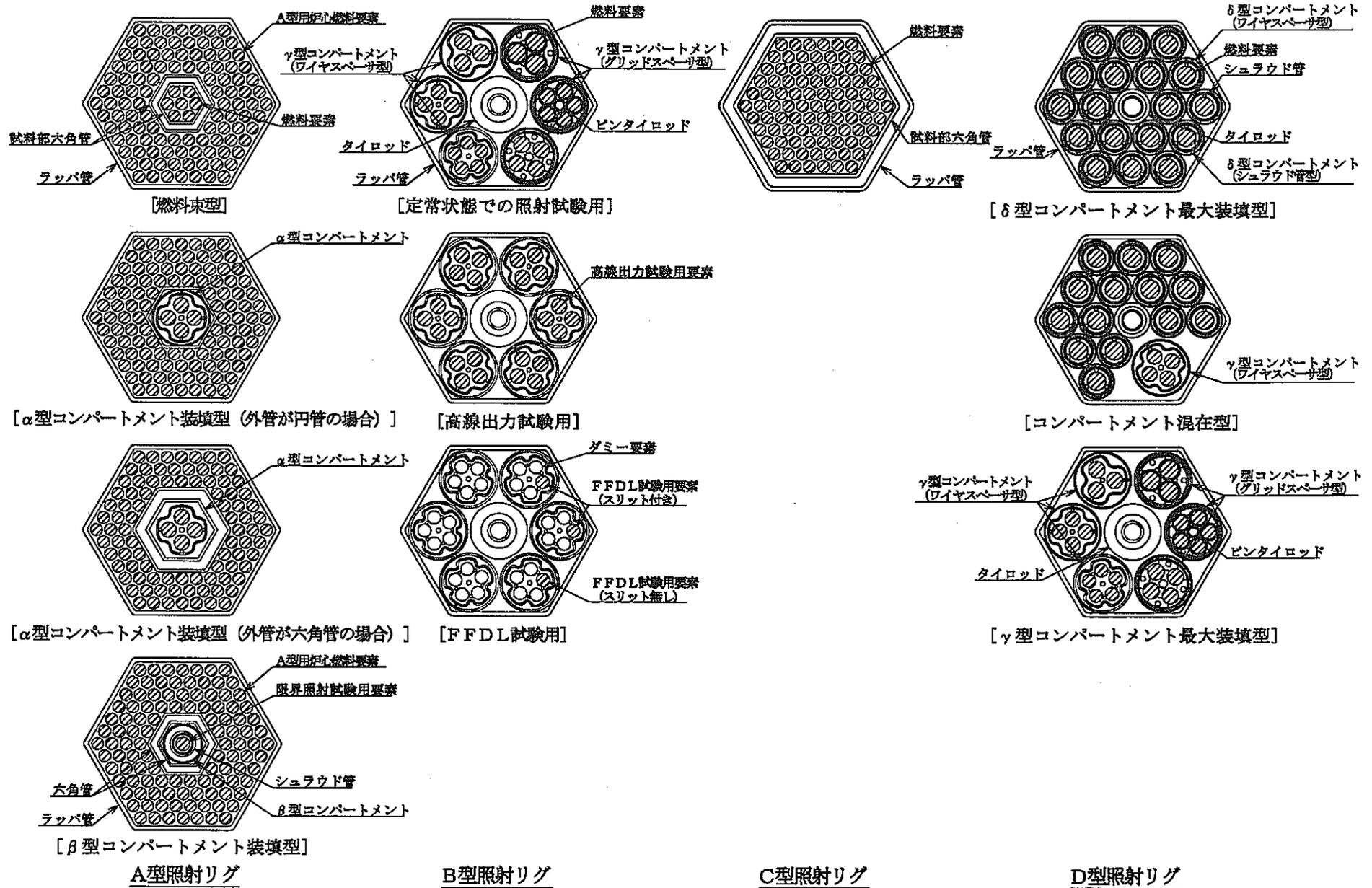


図1-3 「常陽」で使用する燃料照射リグの構造のバリエーション

2 設計条件

D型照射リグは、設置許可書^[1]に示されている従来の照射リグの機械設計方針及び熱設計方針にて、以下に示す設計条件を満足するよう設計する。

- (1) D型照射リグの外形寸法は、燃料交換機等による取扱い及び炉心への装荷のため、照射用炉心燃料集合体と同一とすること。
- (2) 隣接集合体との集合体出口冷却材温度差による炉心上部構造の疲労損傷を防止するため、集合体内に装填する燃料要素の発熱に基づく温度上昇が炉心燃料集合体の平均温度上昇と同等に抑えることが可能な集合体内冷却材流量を確保できる構造とすること。
- (3) 集合体の構造は、燃料要素の再装荷性を考慮し、ホットセル内で容易に解体・組立可能な構造とすること。
- (4) 燃料要素1本毎の照射温度条件設定が可能であること。
 - ① コンパートメント毎に異なる仕様の燃料要素を装填することが可能であること。
 - ② コンパートメント毎に冷却材流量を変えることが可能な流量調節機構を備える構造とすること。
- (5) コンパートメントの燃料要素保持構造は、燃料要素の継続照射を考慮し、各種の燃料要素に応じて径方向・軸方向に支持できる構造とすること。
- (6) コンパートメント毎に照射温度（最高温度）を測定するための温度モニタ及び集合体の中性子照射量を測定するためのドシメータを所定位置に装荷できる構造とすること。
- (7) B型照射リグで照射試験を行った燃料要素の継続照射に対応できること。
- (8) γ 型コンパートメントを集合体に装荷できること。
- (9) 限界照射試験（R T C B試験）等、将来的に多様化する照射ニーズを考慮した構造であること。

例えば、現在R T C B試験は、 γ 型コンパートメントを使用して実施することを計画しているが、将来的には限界照射試験用補助要素を使用しなくとも試験が可能となるよう、 δ 型コンパートメントで実施できるような構造対応を考慮すること。

3 設計根拠

3.1 設計仕様

2章の設計条件に基づきD型照射リグの設計仕様をまとめた。D型照射リグの主要目を表3.1-1に示す。また、D型照射リグの構造を図3.1-1～図3.1-6に示す。

表 3.1-1 D型照射リグの主要目 (1 / 2)

項 目	仕 様
燃料集合体当たりの コンパートメントの個数 γ 型コンパートメント δ 型コンパートメント	6～18本 最大 6本 最大18本
コンパートメント当たりの 燃料要素の個数 γ 型コンパートメント装填時 I、II、III及びIV型特殊燃料要素 I、II、III及びIV型限界照射試験 用要素 炭化物試験用要素 窒化物試験用要素 限界照射試験用補助要素 δ 型コンパートメント装填時 I、II、III及びIV型特殊燃料要素 炭化物試験用要素 窒化物試験用要素	最大 5本 最大 1本 最大 3本 最大 4本 最大 3本 1本 1本 1本
燃料集合体当たりの燃料要素の個数 I、II、III及びIV型特殊燃料要素 I、II、III及びIV型限界照射試験 用要素 炭化物試験用要素 窒化物試験用要素 限界照射試験用補助要素	最大30本 最大 6本 最大18本 最大24本 最大18本
γ 型コンパートメントの要素ピッチ 燃料要素間隔保持方式 γ 型コンパートメント装填時 δ 型コンパートメント装填時	6～11mm ワイヤスペーサ型 グリッドスペーサ型 シュラウド管型 ワイヤスペーサ型

表 3.1-1 D型照射リグの主要目 (2 / 2)

項 目	仕 様
集合体全長	約 297cm
γ型コンパートメント外管	
外 径	約 26.4mm
肉 厚	約 0.6mm
材 料	SUS316 相当ステンレス鋼
γ型コンパートメント内管	
内 径 (用管の場合)	約 22.4mm
肉 厚 (用管の場合)	約 0.6mm
材 料	SUS316 相当ステンレス鋼
δ型コンパートメント外管	
外 径	約 16.4mm
肉 厚	約 0.4mm
材 料	SUS316 相当ステンレス鋼
δ型コンパートメント内管	
内 径	約 12.8mm
肉 厚	約 0.5mm
材 料	SUS316 相当ステンレス鋼
ラッパ管	
六角外対辺長さ	約 78.5mm
材 料	SUS316 相当ステンレス鋼
その他の部品の材料	
タイロッド	SUS316 相当ステンレス鋼
シュラウド管	ステンレス鋼
ピンタイロッド	SUS316 相当ステンレス鋼

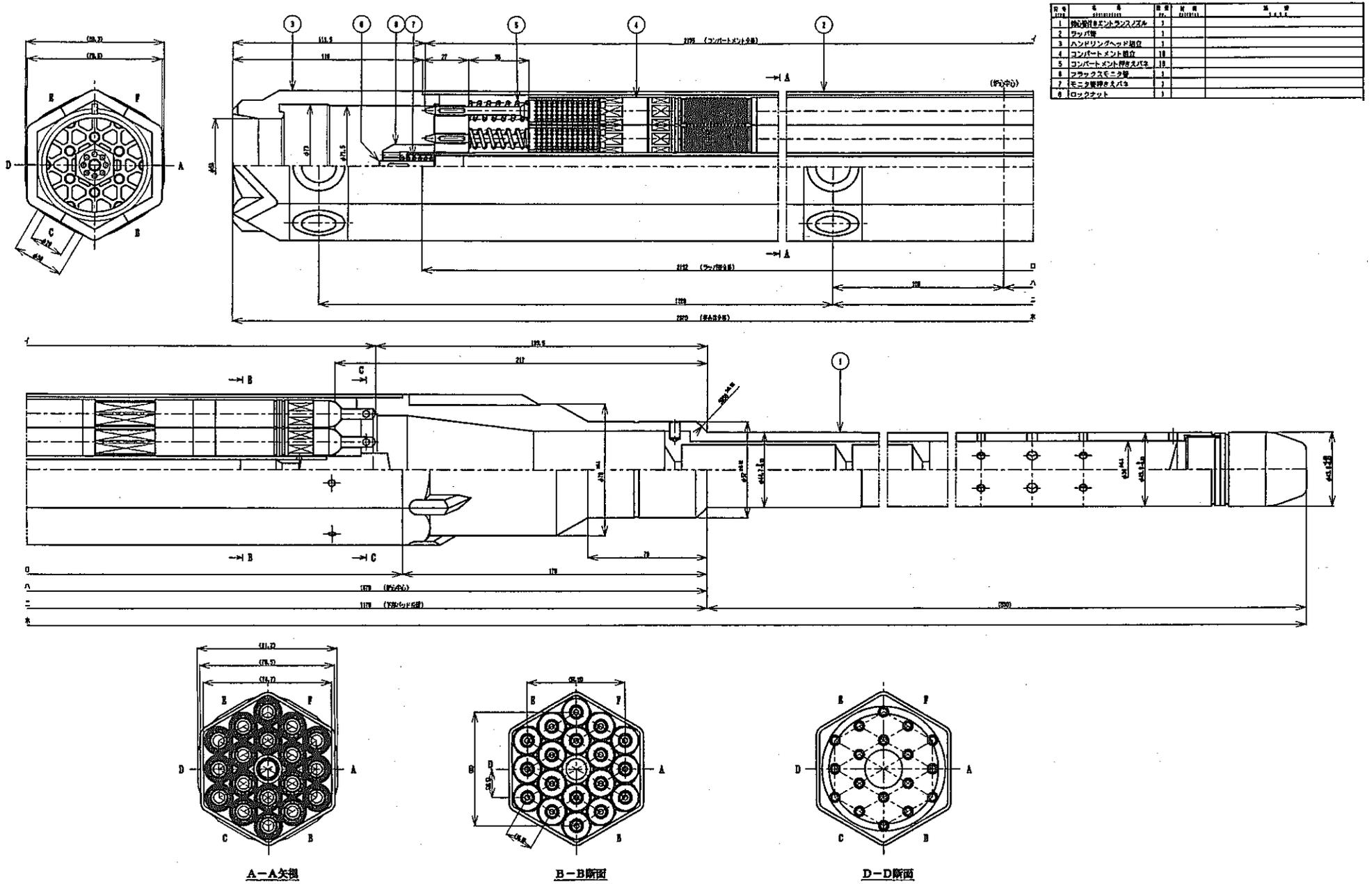
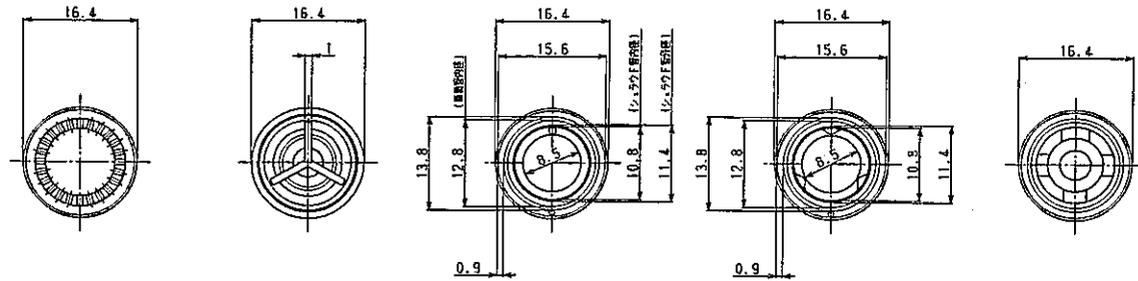
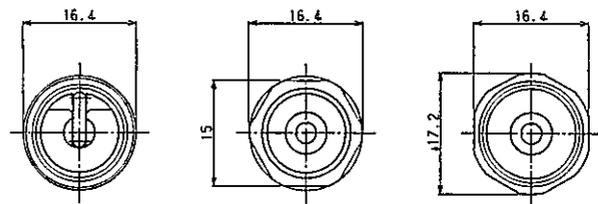
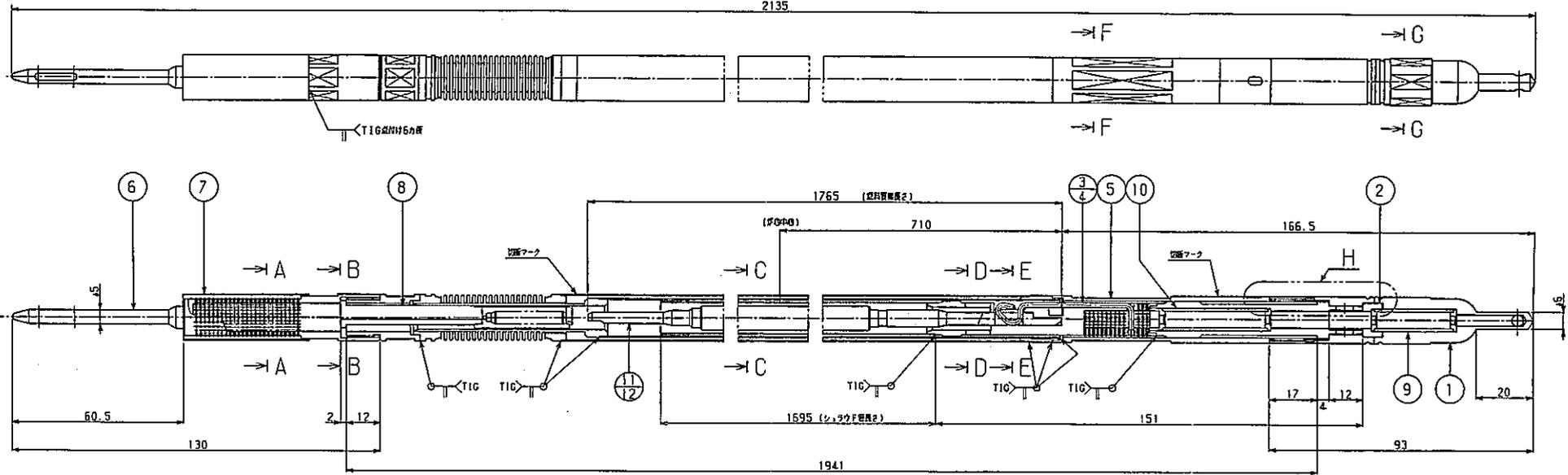


図 3.1-1 D型照射リグの構造図 (集合体)

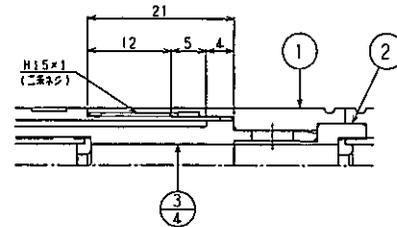


A-A断面 (S=2/1) B-B断面 (S=2/1) C-C断面 (S=2/1) C-C断面 (S=2/1) D-D断面 (S=2/1)
 (デンプル付とシェラド管支持部等)

図号 ITEM	名 DESCRIPTION	数量 QTY	材 MATERIAL	備 NOTE
1	流入管	1		
2	スリーブ	1		
3	シェラド管組立 (デンプル無し)	1		
4	シェラド管組立 (デンプル有り)	1		
5	断熱管組立	1		
6	上部ストレーナ	1		
7	エンクロージャ	1		
8	TEDQM組立	1		
9	オリフス(1)組立	1		
10	オリフス(2)組立	1		
11	空母管 (ワイヤ付)	1		
12	空母管 (ワイヤ無し)	1		



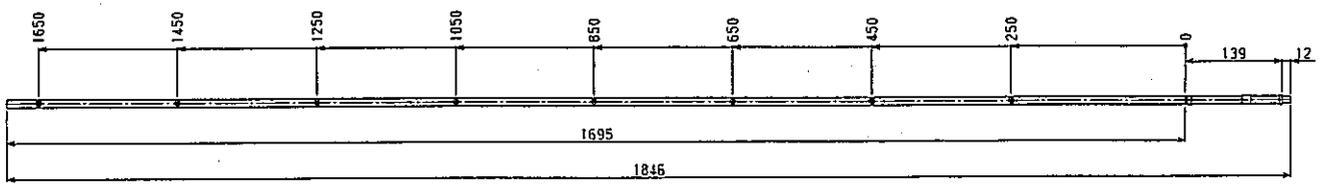
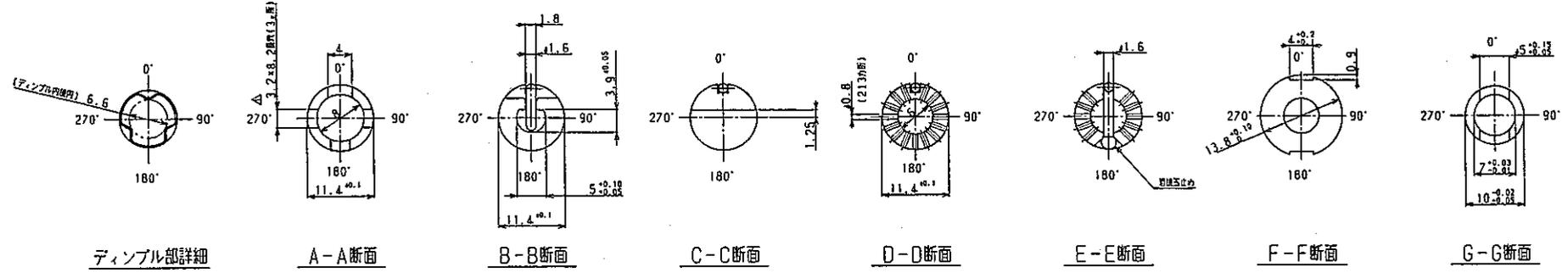
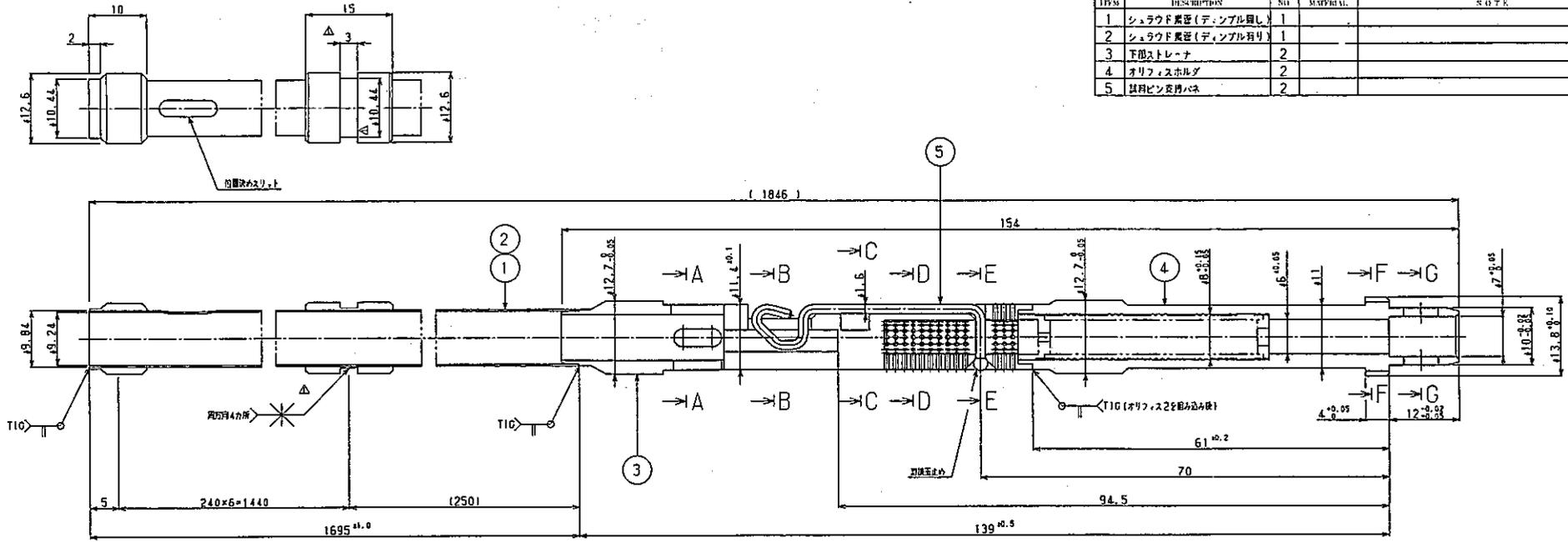
E-E断面 (S=2/1) F-F断面 (S=2/1) G-G断面 (S=2/1)



H部詳細 (S=2/1)

図 3.1-2 D型照射リグの構造図
 (δ型コンパートメント)

図号 ITEM	名 DESCRIPTION	数量 QTY	材料 MATERIAL	単位 UNIT
1	シュラウド管座(ディンブル用)	1		個
2	シュラウド管座(ディンブル用)	1		個
3	下部ストレーナ	2		個
4	オリフィスホルダ	2		個
5	材料ピン交換バネ	2		個



ディンブル設置位置 (S=1/5)

図 3.1-3 D型照射リグの構造図 (シュラウド管)

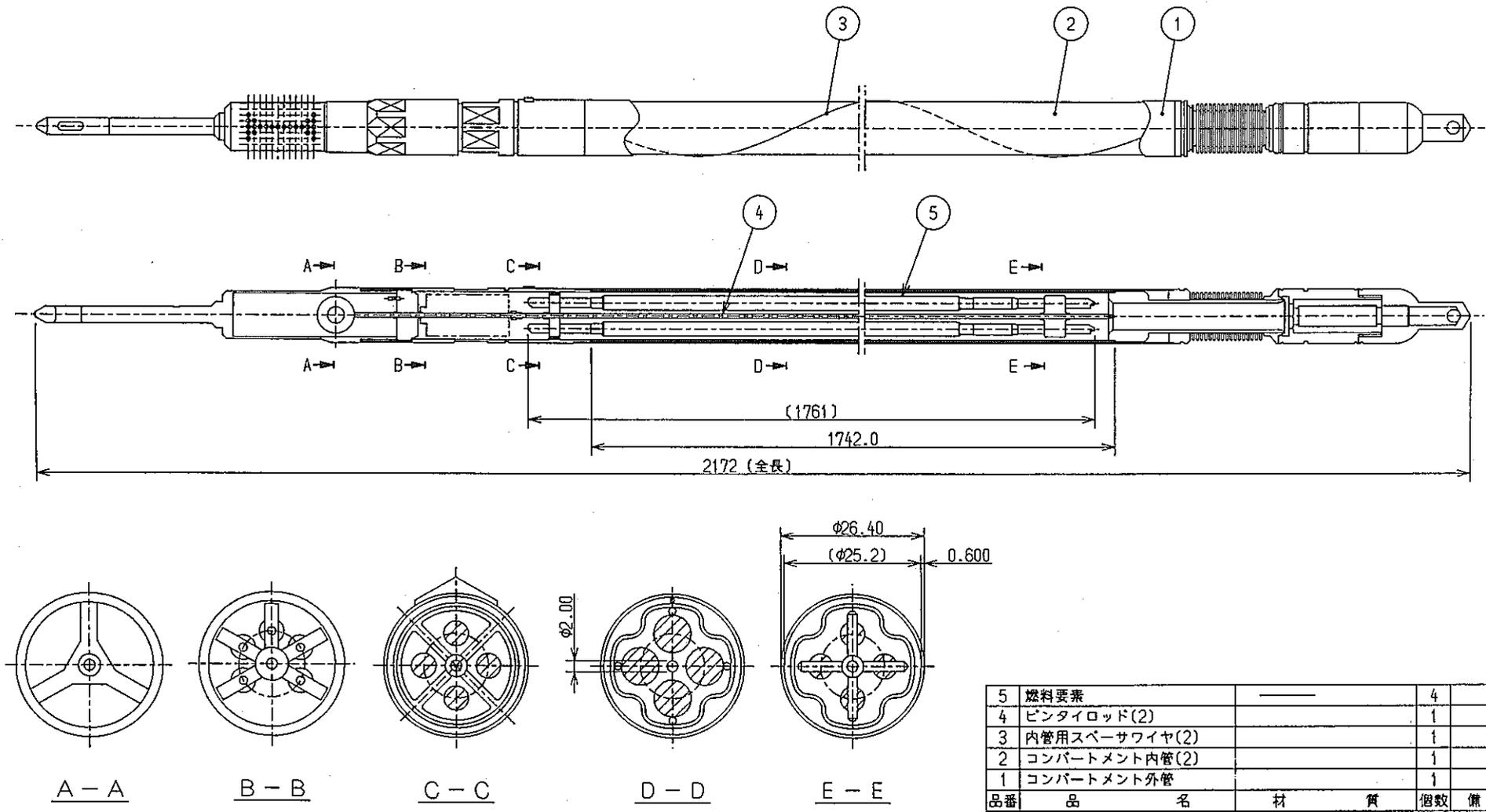


図 3.1-4 D型照射リグの構造図 (γ型コンパートメント (4ピンワイヤスペーサ型))

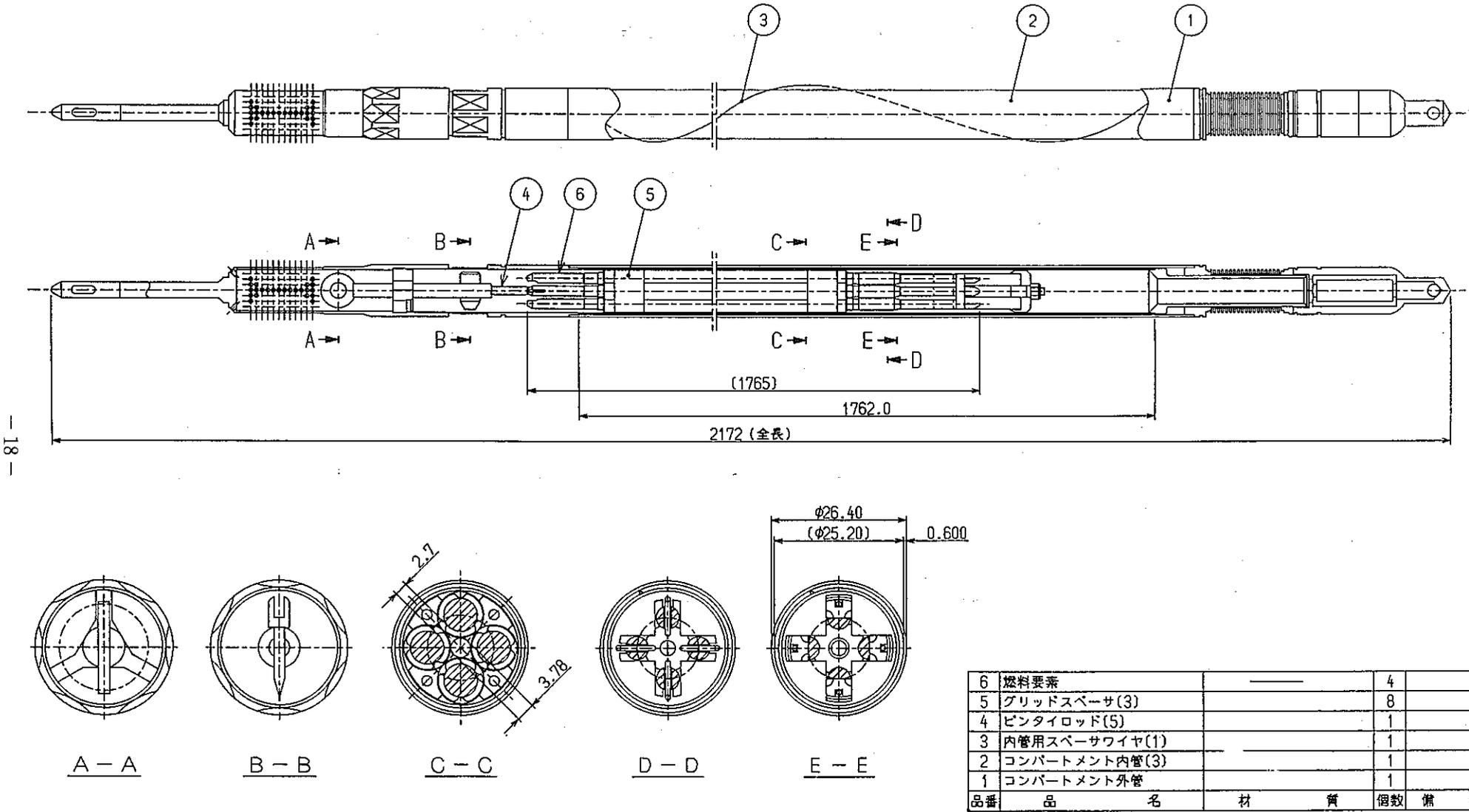


図 3.1-5 D型照射リグの構造図 (γ型コンパートメント (4ピン・グリッド・スペーサ型))

3.2 / ()

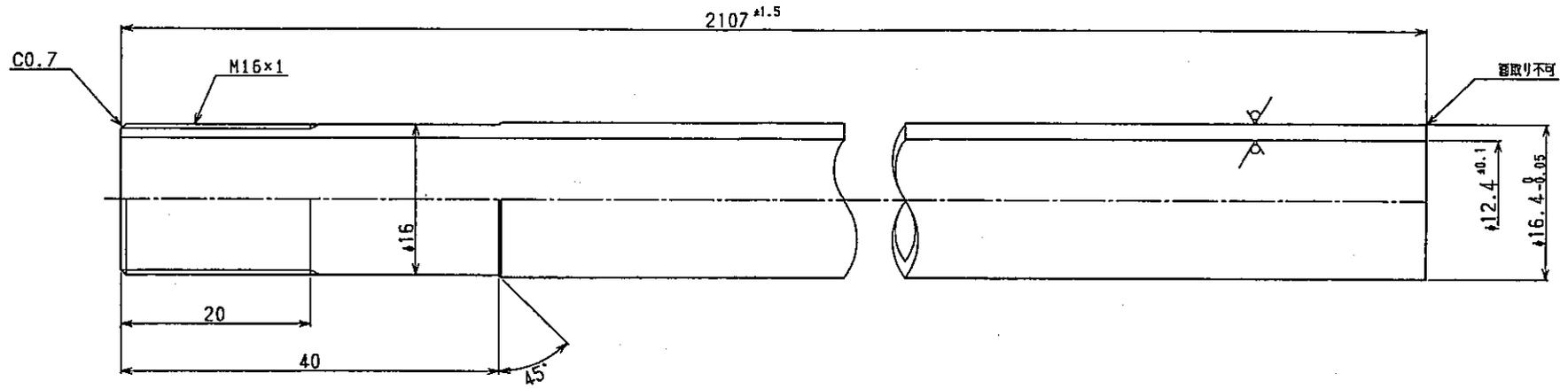


図 3.1-6 D型照射リグの構造図 (タイロッド)

3.2 構造設計

上記 3.1 項の設計条件に基づき D 型照射リグの主要部の構造を設定した。主要部として、集合体、 δ 型コンパートメント、シュラウド管、 γ 型コンパートメント及びタイロッドの構造を図 3.1-1～図 3.1-6 に示す。D 型照射リグは、最大 18 本のコンパートメントで構成されたコンパートメント型照射リグである。D 型照射リグの仕様の中で、設定範囲を有するのはコンパートメント装填本数、燃料要素装填本数、燃料要素仕様である。

コンパートメントの同一集合体内への装填本数は、 γ 型コンパートメントのみの装填、 δ 型コンパートメントのみの装填及び両方のコンパートメントを同一集合体内に混在して装填することが可能であるため、6～18 本である。

燃料要素の同一集合体への装填本数は、 γ 型コンパートメントに燃料要素 3～5 本、 δ 型コンパートメントに燃料要素 1 本を装填できるため、18 (δ 型コンパートメント最大)～30 本 (γ 型コンパートメント最大) を装填することが可能である。

D 型照射リグの構造対応が必要な燃料要素仕様項目は、燃料要素の種類、外径、長さ及びスペーサワイヤの有無である。以下に各項目について示す。

- ・燃料要素の種類は、I～IV 型特殊燃料集合体、I～IV 型限界照射試験用要素、炭化物試験用要素、窒化物試験用要素及び限界照射試験用補助要素である。このうち I～IV 型限界照射試験用要素及び限界照射試験用補助要素は、 γ 型コンパートメントにのみ装填可能である。
- ・燃料要素の外径は、 $\phi 5.4\sim 8.5\text{mm}$ であるが、スペーサワイヤ径またはシュラウド管のディンプル高さを調節することで更に D 型照射リグに装填可能な燃料要素の外径の範囲を拡大することが可能である。
- ・燃料要素の長さは、最長 2m である。
- ・スペーサワイヤについては、その有無を問わない。なお、 γ 型及び δ 型コンパートメントはともに、スペーサワイヤの有無に対応可能な構造を有している。

3.2.1 集合体の構造

(1) 概要

D 型照射リグ (δ 型コンパートメント装填型) の基本構造は、図

3.1-1 に示すようにハンドリングヘッド、ラッパ管、エントランスノズル、タイロッド、コンパートメント等で構成され、その外形寸法は炉心燃料集合体と同一である。ラッパ管の内側には、18本のコンパートメントが配置されている。各コンパートメントにはそれぞれ1本の燃料要素と照射温度確認用のTED温度モニタ^[2]が支持・収納されている。18本のコンパートメントバンドルの中心には1本のタイロッドがあり、内部にドシメータカプセル等が支持・収納されている。コンパートメントとタイロッドの構造を図3.1-2及び図3.1-6に示す。

以下にハンドリングヘッド、ラッパ管、エントランスノズル、タイロッド及びロックナットの基本構造について示す。

①ハンドリングヘッド

ハンドリングヘッドは集合体の頂部を形成し、燃料交換機等の燃料取扱機による原子炉への装荷・脱荷及び輸送時の取扱に必要な結合機器である。ハンドリングヘッドの外側面に設けたテーパ部とエントランスノズルに設置したセルフオリエンテーションキーは、炉心内での集合体の装荷方向を揃えるためのセルフオリエンテーション機構を形成する。本機構は集合体を燃料交換機により炉心内に装荷する際に、隣接集合体のセルフオリエンテーションキーとの接触で回転力を与え、装荷方向を揃えるガイドの機能を有する。

ハンドリングヘッドの下部は、上部支持板を溶接固定しロックナットによりタイロッド及びラッパ管に固定する。この上部支持板には、コンパートメントの上部キャップの配置を案内するコンパートメント支持孔、冷却材流路孔及びロックナットの廻り止め機構を設けている。

②ラッパ管

ラッパ管は、集合体の外形を構成する六角管である。ラッパ管上端部はハンドリングヘッド組立品の上部支持板に嵌合し、下端部はエントランスノズル六角部に溶接固定する。ラッパ管は、集合体内を独立した流路にすると共に、コンパートメントの外側拘束の機能を有する。ラッパ管外側の各面には、集合体が炉心内で隣接集合体と取り合うため及び熱湾曲の支点となるスペーサパッドを設けている。

③ エントランスノズル

エントランスノズルは、集合体の下部構造であり、炉心支持板との嵌合部を有する結合機器である。また、ラッパ管、タイロッドをエントランスノズル上部の下部支持板に溶接固定することで集合体の骨格を形成する。

エントランスノズルは、下部の冷却材流入孔により冷却材を集合体内に導入するとともに、炉心支持板の連結管に挿入し集合体を垂直方向に支持する機能を有する。なお、連結管との取合部は球面形状（球面座）をしており、連結管の円錐面に線接触することで、集合体外側への冷却材漏洩を抑える。

集合体内への冷却材流量調整は、エントランスノズル下端部側面の冷却材導入孔及び内部に設けたオリフィスで行う。

エントランスノズルの球面座の上には、セルフオリエンテーション機構を形成するため、六角形の対角部に1本のセルフオリエンテーションキーを設けている。

エントランスノズル上部は、下部支持板と溶接固定している。下部支持板は、コンパートメント支持孔でコンパートメント下部キャップと嵌合することによりコンパートメントを支持する。

コンパートメント支持孔は、90度のテーパ面を有しコンパートメント下部キャップの球面座と線接触し冷却材の漏洩・流入を防止する機能を有する。

④ タイロッド

タイロッドは、集合体構造を保つための結合機器である。タイロッド下端部は、コンパートメントの支持台となる下部支持板と溶接固定し、下部支持板をエントランスノズルに溶接することでエントランスノズルに固定する。タイロッド溶接部の上部には、冷却材ドレン孔を設置している。

タイロッド上端部はロックナットを介しハンドリングヘッドを固定する。

タイロッド内部には中性子照射量測定用のドシメータを装荷したフラックスモニタ管を収納する。また、タイロッド内部の冷却材はスタグナントな状態である。

⑤ ロックナット

ロックナットは、集合体構造を保つための結合機器である。ロ

ックナットはタイロッド最上部のネジ構造部に結合し、ハンドリングヘッドを固定する。このネジ固定により集合体は、ハンドリングヘッドからエントランスノズルまでの一体構造物として組み立てられる。ホットセル内でこのロックナットを解体し、ハンドリングヘッドを取り外すことにより、ラッパ管内部に装荷されたコンパートメントを上方に引き抜くことが可能となる。ロックナットは、ネジ部のかじりを防止するためにタイロッドと材質を変え、インコネル材を使用する。

(2) 構成部材及び使用材料

- ・ハンドリングヘッド
 - ハンドリングヘッド : SUS 316 ステンレス鋼
 - 上部支持板 : SUS 316 ステンレス鋼
- ・ラッパ管 : SUS 316 相当ステンレス鋼
- ・エントランスノズル
 - エントランスノズル : SUS 316 ステンレス鋼
 - 下部支持板 : SUS 316 ステンレス鋼
- ・ロックナット : Inconel 718
- ・タイロッド : SUS 316 相当ステンレス鋼

3.2.2 δ型コンパートメントの構造

(1) 概要

δ型コンパートメントは、外管、内管、上部キャップ及び下部キャップ等により構成される。コンパートメントの構造を図 3.1-2 に示す。

コンパートメント最下端部の冷却材流入部となる下部キャップは、冷却材の漏洩を防止する球面座構造を有し、エントランスノズル部の下部支持板に線接触により支持される。また、内部には、コンパートメント内に流入する冷却材流量を制御するコンパートメントオリフィスを装填する。さらに、下部キャップ上部には、組立・解体時に治具と取り合うための六角外径部及びコンパートメント外管との組み立て用雌ネジを有する。

コンパートメントオリフィスは、オリフィス管の上下端部にオリフィスを溶接固定した構造である。コンパートメントオリフィスは、コンパートメントに流入する冷却材流量を制御するため、下部キャップ内部に装填される。

コンパートメント円筒部は、コンパートメント外管及び内管の二重管で構成されており、照射試験中の燃料要素被覆管温度（照射温度）の設定値を確保するため外管及び内管の間に Ar ガスを封入した断熱層を設け、外管及び内管の熱膨張差を吸収するためベローズを上部に配置した構造である。また、長さ及び燃料スタック中心位置が異なる燃料要素に対応するため、コンパートメント下部の軸方向寸法に余裕を持たせる構造としている。コンパートメント円筒部の最下部には、下部キャップとの組み立てネジ部があり、ネジ部先端には、燃料要素の周方向位置を明確にするための突起を設けている。ネジ部は下部キャップとのかじりを防止するため、硬質クロムメッキ加工を施す。コンパートメント円筒部上部は、外管及び内管を繋ぐ連結金具、ベローズ及び上部キャップとの組み立てネジ部を有する。なお、コンパートメントが解体不能な状態となった場合、燃料要素を健全に取り出すため切断マークからコンパートメントを切断する。切断マークは、円筒部の上部（内装する燃料要素の上部端栓より上方位置）、下部（内装する燃料要素の下部端栓より下方位置）に設置した。

コンパートメントの最上部であり冷却材流出部となる上部キャップは、円筒部との組み立てネジ部、冷却材流出孔及びハンドリング用溝加工部等から構成される。また、冷却材流出孔外周部には、隣接コンパートメントとの冷却材出口の合流圧損を防止するためのエンクロージャー（整流筒）を設置し、冷却材がハンドリングヘッド方向へ流出する構造とした。なお、上部キャップは、ネジ部のかじりを防止するため、インコネル材を用いる。

エンクロージャーは、TIGスポット溶接で上部ストレーナに固定するため、上部ストレーナと同材料のインコネルを使用する。エンクロージャーと上部ストレーナ六角平面部の嵌合部ギャップは冷却材ドレン孔の機能を有する。

(2) 構成部材及び使用材料

・下部キャップ	:	SUS316ステンレス鋼
・コンパートメント		
下部端栓	:	SUS316ステンレス鋼
外管	:	SUS316相当ステンレス鋼
内管	:	SUS316相当ステンレス鋼
連結金具	:	SUS316ステンレス鋼

ベローズ	:	SUS316ステンレス鋼相当材
TED保持金具	:	SUS316ステンレス鋼
・上部キャップ	:	Inconel 718
・エンクロージャー	:	Inconel 718

(3) 製作上の問題点と対策

① コンパートメント円筒部の溶接設計

コンパートメント円筒部は薄肉管を溶接構造で組み立てたものであり、その溶接条件の設定には注意を要する。当初のコンパートメント設計では、薄肉管の突き合わせ溶接としていたが、試作段階で溶接条件の設定の困難さから構造変更を行った。特に不具合のあった箇所として、コンパートメント内管と下部端栓部の突き合わせ溶接構造があげられる。本構造は、当初肉厚 0.5mm の薄肉管材の突き合わせ溶接構造とした。しかし、薄肉材の完全突き合わせができないと一方だけが溶けてしまい融着せず、融着が出来ても完全溶け込みとすると裏ビードによる内径寸法の変化が生じる結果となった。また、嵌合部が無いいため大きな曲がりが発生する原因ともなり、曲がり発生後の矯正も二重管構造のため制限がある。このため、コンパートメント円筒部の溶接部の構造は、全て管端面で溶接する構造に変更した。

② エンクロージャーの溶接設計

当初、エンクロージャー端部を上部ストレーナ外側にTIG溶接する予定であった。しかし、本溶接部はエンクロージャーと上部ストレーナの熱容量差が大きく、薄肉のエンクロージャーだけが溶けてしまい融着しなかった。エンクロージャーはコンパートメントの主要強度部位ではないため、端面から約 3mm の点をスポット溶接で固定するものとし、エンクロージャーと上部キャップ間のギャップに Na のドレン機能を持たせた。

3.2.3 シュラウド管の構造

(1) 概要

シュラウド管は、オリフィスホルダー、下部ストレーナ、シュラウド素管等によって構成される。シュラウド管の構造を図 3.1-3 に示す。シュラウド管は、下端部にシュラウド管オリフィスを収納しシュラウド管内に流入する冷却材流量を制御する。また、シュラ

ウド管の構成部品は、コンパートメントからシュラウド管を引き抜くときのつかみ部となるメンテナンスホール、メンテナンスホールの流動抵抗を低減するスリーブ、燃料要素支持バネ、シュラウド管内部への冷却材流入路となる下部ストレーナ及び燃料要素外周の流路を形成するシュラウド素管である。

シュラウド管最下部のオリフィスホルダーには、ハンドリング用メンテナンスホールが加工されており、これを利用してシュラウド管をグリップしコンパートメントから下方に引き出す構造としている。また、コンパートメント円筒部下部端栓突起部との嵌め合いにより、燃料要素の周方向位置が確認できる溝を設けた。

スリーブは、オリフィスホルダーのメンテナンスホールによる冷却材の流動抵抗を低減する目的で設置しているが、コンパートメントハンドリング時の縦支持状態で落下しないようにスプリング機能を有する。

下部ストレーナは、シュラウド管オリフィスより流入した冷却材の燃料要素外周、即ちシュラウド管素管内部への流路になると共に、燃料要素を下方で支持するための支持バネを有する。

燃料要素支持バネは、線材を曲げ加工したもので燃料要素下部端栓角穴部に挿入され燃料要素の下端部を支持する。また、燃料要素挿入時の位置確認を行うため、支持バネ先端部に目視確認用の穴を設置している。

シュラウド素管は、燃料要素の外周の冷却材流路を形成するため、スペーサワイヤの有る燃料要素に対してはディンプルの無いシュラウド素管、スペーサワイヤの無い燃料要素に対してはディンプルの有るシュラウド素管を使用する。

(2) 構成部材及び使用材料

- ・スリーブ : Inconel 718
- ・オリフィスホルダー : SUS316ステンレス鋼
- ・シュラウド管オリフィス
 - オリフィス(上、下) : SUS316ステンレス鋼
 - オリフィス管 : SUS316ステンレス鋼
- ・下部ストレーナ : SUS316ステンレス鋼
- ・燃料要素支持バネ : Inconel X-750
- ・シュラウド素管 : SUS316ステンレス鋼
- ・リングスペーサ : SUS316ステンレス鋼

(3) 製作上の問題点と対策

① シュラウド管溶接設計

コンパートメントと同様にシュラウド管も薄肉管で構成しているため、溶接条件の設定には注意を要する。溶接構造に関しても、コンパートメント同様、当初の突き合わせ溶接構造を変更し、管端面での溶接構造とした。溶接構造上特に注意を要する箇所として、シュラウド管と下部ストレーナの溶接部がある。本溶接部は、シュラウド管肉厚が 0.3mm と極めて薄いため、低電流の TIG 溶接で試作を実施したが管側が大きく溶けてしまう危険性がある。特にシュラウド管と下部ストレーナとの嵌合部にギャップのある場合には結果が良くないため、実測によるシュラウド管寸法に現合した部材加工寸法と精度の確保が必要である。

② ディンプルの形状設計

ディンプル付きシュラウド管を製作する場合、シュラウド素管の 0.3mm の肉厚に 0.9mm～1.6mm の押し出し高さが必要となる。当初の設計では、ディンプルの肉厚変化が大きく、押し治具とシュラウド管の接触状況によりディンプルが破損することがあった。そのため、ディンプルの形状を変更し、肉厚変化の少ない形状とした。ディンプル設計の詳細については、3.2.6(1)に後述する。

3.2.4 γ 型及び δ 型コンパートメントの混在装填のための構造

D型照射リグでは、 γ 型及び δ 型コンパートメントを同一集合体内に混在して装填する。 γ 型コンパートメントと δ 型コンパートメントは、外形寸法や冷却材の流量調整構造が異なるため、混在装填時には、以下の γ 型コンパートメントの構造を用いる。

(1) γ 型コンパートメントと δ 型コンパートメント構造の相違

コンパートメントの外形寸法の相違点として、 γ 型コンパートメントは1本のコンパートメントに最大5本の燃料要素を装填するため、 δ 型コンパートメントに比べ太径である。 δ 型コンパートメントの外径 16.4mm に対し γ 型コンパートメントの外径は 22.4mm と約 1.4 倍である。そのため、 γ 型コンパートメントの1体の照射リグへの装填数は、従来のB型照射リグと同じ6本が最大となる。

冷却材の流量調整構造の相違点として、 γ 型コンパートメントでは、コンパートメント内の圧力損失及び冷却材流量を調整するオリ

フィスが2段であるが、 δ 型コンパートメントはより微細な調整を行うため4段である。

(2) コンパートメント装填本数

γ 型コンパートメントをD型照射リグに装填する場合、 γ 型コンパートメント1本を装填するためには、 δ 型コンパートメント3～4本を取り除く必要がある。 γ 型コンパートメントと δ 型コンパートメントの混在装填時の組み合わせを図3.2-1に示す。

(3) γ 型コンパートメント装填対応

γ 型コンパートメントの混在装荷用構造として、D型照射リグの基本仕様である18本バンドル構造に対して、以下の改造を加える。

① 上部及び下部支持板の構造

設計時に集合体内のコンパートメント装荷配置に合わせて上部及び下部支持板のコンパートメント支持孔の位置を変更する。また、下部支持板は、 γ 型コンパートメントの球面座に合わせて球面座受け部の大きさを変更する。

② コンパートメント内流量調整構造

γ 型コンパートメントと δ 型コンパートメントの圧力損失特性に与える構造上の相違点として、 γ 型コンパートメントは流路に接する構造材の表面積が多いため摩擦による圧力損失が高くなる。また、燃料要素を複数本装填するためコンパートメントを流れる冷却材流量が多く流速が速くなり、流路に接する構造材の摩擦や流路内の拡縮による圧力損失が高くなる。

これらの、コンパートメント内の流路構造の違いにより、 γ 型コンパートメントの方が δ 型コンパートメントに比べ流量調整用のオリフィスを除く構造の圧力損失が高い。そのため、集合体の冷却材流量配分設計では圧力損失の最も高くなる γ 型コンパートメントに合わせ他のコンパートメントの圧力損失を設定する。

ただし、現行の γ 型コンパートメントを複数装荷する場合、圧力損失特性の差が大きすぎて設計が成立しないことも考えられる。そのため、今後 γ 型コンパートメントの流量調節機構を改良し、 δ 型コンパートメントの流量調整機構と同様の構造とすることを計画している。

3.2.5 細部構造

(1) 燃料要素周方向保持方式

燃料要素周方向保持方式は、燃料要素とシュラウド管の冷却材流路を確保するとともに燃料要素の周方向を支持するための構造方式である。

燃料要素のスペーサワイヤの有無によらずコンパートメントに装填するため以下の検討を行った。

① スペーサワイヤの有る燃料要素

スペーサワイヤの有る燃料要素については、シュラウド管内径寸法をスペーサワイヤを含めた燃料要素外径寸法に合わせることで対応可能となる。

燃料要素とシュラウド管ギャップは、燃料要素の再装荷性を考慮し、試作により製作性を確認した結果、片側 0.05mm とし、シュラウド管内径寸法を燃料要素外径（スペーサワイヤ径を含む）より 0.1mm 大きく設定した。

② スペーサワイヤの無い燃料要素

スペーサワイヤの無い燃料要素については、シュラウド管内径とのギャップを確保し、燃料要素を支持する構造をシュラウド管側に設ける必要がある。

シュラウド管の燃料要素周方向支持構造としては、シュラウド管内側部にスペーサ、またはディンプルを設置する方法を検討した。

シュラウド管内側部に冷却材流路を確保したうえで、軸方向に一定間隔でスペーサを設置し、燃料要素を支持することは、シュラウド管内径が細いこともあり製作性の観点から困難である。従って、シュラウド管内側部にディンプル加工による突起を設定し、燃料要素を支持する構造（シュラウド管方式）を選択した。ディンプルはシュラウド管外側から内側に向けた押し出し構造とした。

シュラウド管方式の設計では、ディンプル内接円寸法をワイヤスペーサの有る燃料要素のギャップに合わせ、燃料要素外径より 0.1mm 大きくした。また、周方向ディンプル数は、ディンプル加工精度を考慮し 3 点とした。ディンプル形状は、最も単純な球状とし押し出し加工によりディンプル高さを出す設計とした。しかし、試作により製作性の確認をしたところ、この形状では肉厚変化が大きく、押し治具とシュラウド管の接触状況によってはディンプルが破損するケースがあった。そのため、ディンプルの形状を変更し、基

部曲率の大きなディンプルとし肉厚変化を小さくした。従来の設計形状と改良した設計形状を図 3. 2-2 に示す。また、両者の管断面形状写真と板厚部拡大写真を図 3. 2-3 及び図 3. 2-4 に示す。

(2) シュラウド管周方向支持方式

シュラウド管周方向支持方式は、シュラウド管とコンパートメント内管の内側で周方向を支持するための構造方式である。

シュラウド管外側は、積極的な冷却材流路では無いが、コンパートメント内管とのギャップを確保し、シュラウド管及び燃料要素をコンパートメント中心に維持する機能が必要である。シュラウド管方式による燃料要素周方向支持構造について、以下に示す各種方式を比較検討し、シュラウド管外側にスペーサパッドを設置する構造を選定した。各種支持方式の比較内容及び構造を表 3. 2-1 及び図 3. 2-5 に示す。

① ディンプル方式 (シュラウド管)

燃料要素周方向支持構造としてシュラウド管に設定した外側から内側へのディンプル加工と同様に、シュラウド管内側から外側に向けてのディンプル方式、またはバルジング方式が考えられる。ディンプル加工は、シュラウド管壁面に金型によるプレス加工を施すものであり、特に長さ 1700mm 余りのシュラウド管中間部においては内側から外側に向けての加工が機構的に難しく、技術的にも困難である。また、バルジング方式もシュラウド管内径が細くなるとバルジング加工の機構的寸法がとれず、油圧成型等を行わねばならず、工数的に不利となる。構造の概要を図 3. 2-5 (c) に示す。

② ディンプル方式 (コンパートメント内管)

ディンプル方式 (シュラウド管) と同様に、コンパートメント内管にディンプルを設定する方式が考えられる。しかし、コンパートメント内管がコンパートメントの軸方向構造の主要強度部材であることを考慮すると、座屈強度に影響を与えるディンプル加工は望ましくない。また、コンパートメント内管寸法は統一仕様であるため、各種シュラウド管に合わせたディンプル寸法が必要となり、肉厚が 0.5mm と厚いコンパートメント内管の塑性変形によるディンプル量の制限からも加工が難しいと考えられる。構造の概要を図 3. 2-5 (d) に示す。

③ ワイヤスペーサ方式

シュラウド管外側にコンパートメント内管とのギャップに合わ

せたスペーサワイヤを設置する方式が考えられる。しかし、シュラウド管肉厚が0.3mmと薄く、一定の張力を持ったスペーサワイヤを巻くことが難しいうえ、ワイヤ端末の処理構造を設定することが形状、寸法的に困難である。また、ディンプル方式（コンパートメント内管）と同様にシュラウド管寸法によっては、コンパートメント内管とのギャップ寸法が大きくなると、スペーサワイヤ径が太くなり、対応しきれない場合も考えられる。構造の概要を図 3. 2-5 (e) に示す。

④リングスペーサ方式

シュラウド管外側にコンパートメント内管とのギャップに合わせたスペーサリングを設置する方式が考えられる。コンパートメント内管とのギャップが積極的な冷却材流路ではなく、軸方向に断続的なスペーサリングを設けることは、機能上問題無い。また、リングスペーサ方式であれば、ギャップ寸法に合わせたリングの高さが設定可能であり、製作上も可能な構造である。そのため、シュラウド管周方向支持方式にはリングスペーサ方式を選択した。

スペーサリングの取り付けには、機械的な固定方法と溶接による固定方法が考えられるが、機械的固定法は、シュラウド管肉厚が薄いため構造設計が難しく、溶接による固定方法を選定した。溶接による固定もシュラウド管に与える熱影響を極力少なくし、シュラウド管の真直度を確保する目的でスポット溶接とした。スポット溶接の健全性については、今後検討が必要であるが、リングスペーサの溶接固定が外れても最下流（シュラウド管上端）のリングスペーサをTIG溶接とすることでリングスペーサがシュラウド管から外れることは防止される。

リングスペーサ方式の設計では、スペーサリングとコンパートメント内管とのギャップを取り出し時の冷却材ドレン性、再装荷時の組立性を考慮して0.1mmとした。また、スペーサリング形状は、製作性の観点から単純なリング形状とし、軸方向ピッチも若干広く240mmで7段とした。構造の概要を図 3. 2-5 (f) に示す。

(3)コンパートメント内管周方向支持方式

コンパートメント内管周方向支持方式は、コンパートメント外管と内管の間に設置した断熱層の間隔を一定に支持するための方式である。断熱層の間隔を一定に確保することは、照射温度条件を一定に保つという要求性能上重要である。断熱層の間隔の確保には、

シュラウド管周方向支持方式と同様に各種の方式が考えられる。ただし、断熱層は解体・再組立を考慮する必要は無いが、0.9mm というコンパートメント外管及び内管の間隔を保つ方式とすることが必要である。そのため、コンパートメント内管の支持方式は、燃料要素の製作等で実績のあるワイヤスペーサ方式を選定した。

ワイヤスペーサ方式の設計では、ワイヤ径をコンパートメント内管、外管の寸法精度を考慮し、0.8mm と設定し、軸方向ピッチをシュラウド管スペーサにほぼ合わせ、断熱層から 250mm とした。スペーサワイヤの端末はコンパートメント内管の上下部連結部で溶接固定する。構造の概要を図 3.2-5(g) に示す。

(4) コンパートメントオリフィス

① 概要

コンパートメントオリフィスは、コンパートメントに流入する冷却材流量を制御するため、下部キャップ内部に装填される。コンパートメントオリフィスは、オリフィス管の上下端にオリフィスを溶接固定したものである。コンパートメントオリフィスの構造を図 3.2-6 に示す。なお、オリフィス孔径は、オリフィス管内径の制約より、2~6mm の範囲で使用可能であるが、オリフィス孔径の製作精度を考慮すると設計上の実用的な使用範囲は、3~6mm である。

② 構成部材及び1号機の使用材料

- ・オリフィス（上、下） : SUS316ステンレス鋼
- ・オリフィス管 : SUS316ステンレス鋼

③ 製作上の問題点と対策

- ・オリフィス組立寸法の確保

オリフィスの試作では、設計寸法通りのオリフィス部品を使用し溶接により組み立てたが、その結果、組み立て後のオリフィスは溶接による寸法変化が生じ、軸方向寸法が短くなった。これより、コンパートメントオリフィスの製作では、オリフィス面を組立品の両端に設定せず、溶接組立後片側の端面部を加工する。

(5) コンパートメントベローズ

コンパートメントベローズの構造を図 3.2-7 に示す。コンパートメントベローズは、照射試験中の外管と内管の温度差による熱膨張

差を吸収するために外管に設置する。コンパートメントベローズは、スペーシング及び取扱性の観点から外管の上端部に設置する。コンパートメントベローズの上端部は、接続部品を介して内管と接続しており、下端部は外管と接続している。これにより、内管と外管の熱膨張差を吸収する。

(6) 熱膨張差温度モニタ (TED) 収納具

TED 収納具の構造を図 3.2-8 に示す。TED 収納具は、TED を収納するために使用する部品である。TED を保持し、冷却材の流れによって流されないために TED の周囲を囲むように管により支えている。管の上下部に扇形に空間を開けた端栓を取り付け、上部はコンパートメントとの嵌合部に接続するための柱を設けている。本収納具は、TED を組み込んだ後で上部端栓を点付け溶接によって取り付ける構造となっている。

(7) 下部ストレーナ

下部ストレーナの構造を図 3.2-9 に示す。下部ストレーナは、シュラウド管の燃料要素支持構造部を迂回する Na 流路を構成するために設けた構造である。冷却材は、シュラウド管オリフィスを通過後、一旦シュラウド管内からシュラウド管-コンパートメント内管の間に流れ、燃料要素支持構造部の孔部よりシュラウド管内に流れる流路を形成する。ストレーナは、冷却材の整流のため下部側に $\phi 0.8\text{mm}$ の冷却材流出孔を円周状に 213 個設置し、上部側に長楕円形の孔を周方向に 4 個設置した構造である。

表3.2-1 各種支持方式の比較

支持方式	構造概要	製作性	特徴
シュラウド管 デンプル方式	・シュラウド管の内側から外側へのデンプル(またはバルジング)設置	・薄肉シュラウド管自体への塑性変形加工は可能。 ・機械的なデンプル(バルジング)加工装置の構造的寸法が必要で、細径シュラウド管への対応困難。特にシュラウド管内面中央部への加工装置設置が困難。	・シュラウド管-コンパートメント内ギャップに対応したデンプル高さが必要 ・構造的に単純 ・製作難しい
コンパートメント内管 デンプル方式	・コンパートメント内管の外側から内側へのデンプル設置	・厚肉コンパートメント内管自体に塑性変形加工が必要でシュラウド管とのギャップに対応したデンプル高さが必要のため、デンプル形状と塑性変形量に制限	・シュラウド管-コンパートメント内ギャップに対応したデンプル高さが必要 ・デンプル形状と塑性変形量に制限 ・構造的に単純 ・コンパートメントの主要強度部材に塑性変形加工必要で座屈強度課題
シュラウド管 ワイヤスペーサ方式	・シュラウド管の外側にスペーサワイヤ設置	・シュラウド管上下にスペーサワイヤ固定構造が必要 ・コンパートメント内管とのギャップに対応したワイヤスペーサ径と張力が必要で、薄肉シュラウド管へのワイヤの巻き付けが困難	・シュラウド管-コンパートメント内ギャップに対応したワイヤ径が必要 ・スペーサワイヤ径と張力に制限があり、シュラウド管形状、真直度確保に課題 ・ワイヤ固定構造が必要で部品点数、組立工数増加
シュラウド管 リングスペーサ方式	・シュラウド管外側にスペーサリング設置	・溶接(または機械的)によるスペーサリング取り付け構造が必要	・シュラウド管-コンパートメント内ギャップに対応したスペーサ寸法が必要であるが対応は容易 ・スペーサ形状、取付位置に設計裕度が有り、フレッキング対応は容易 ・スペーサ固定構造必要で部品点数、組立工数が増加

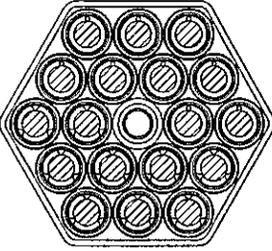
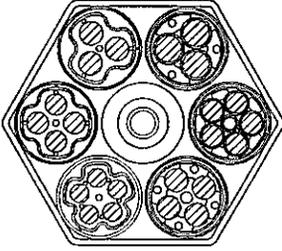
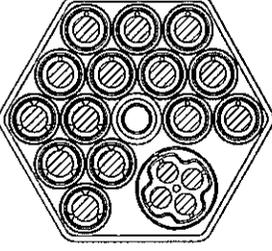
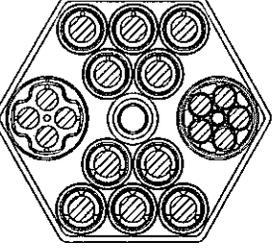
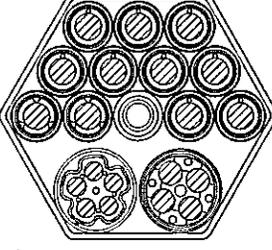
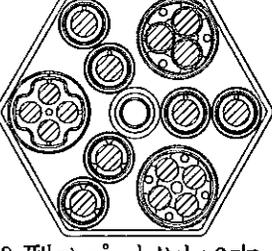
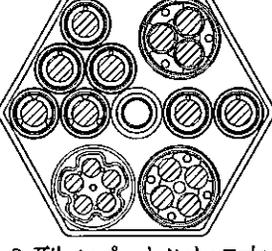
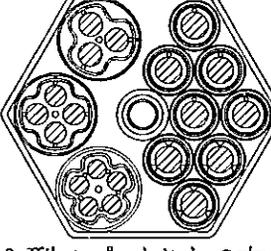
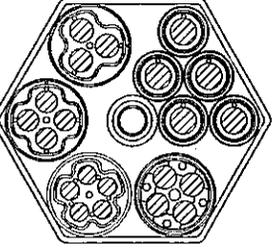
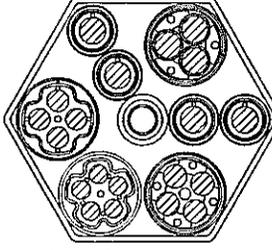
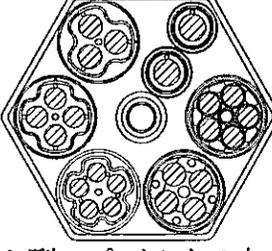
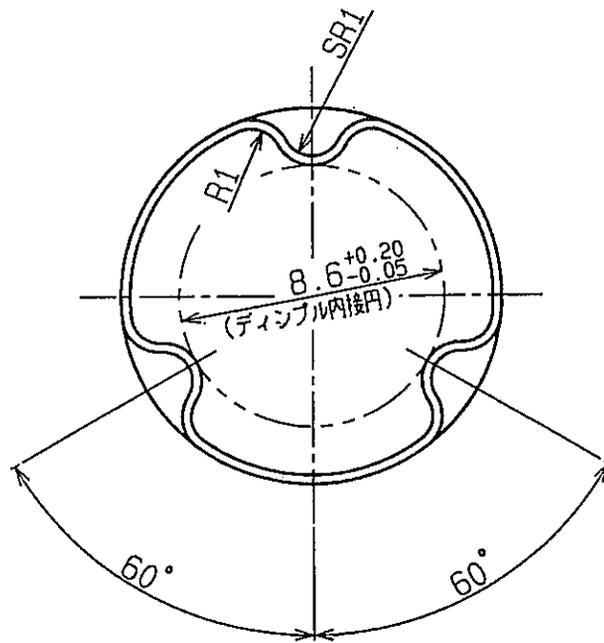
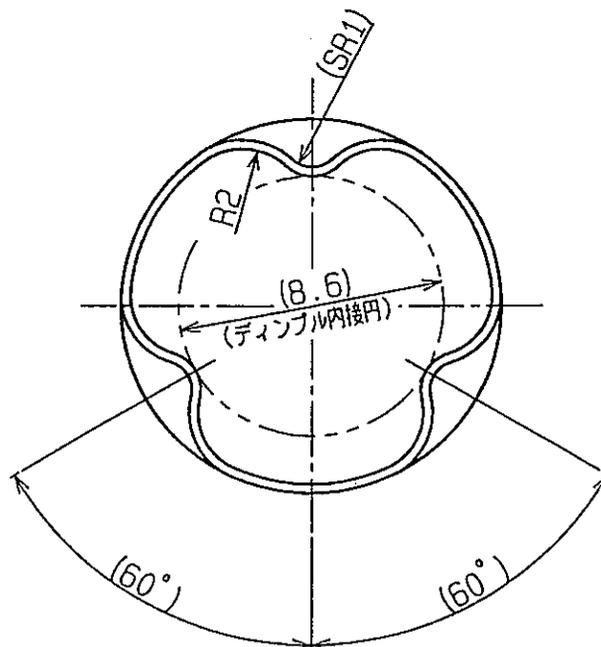
<p>δ 型コンパートメント 最大装填型</p> <p>(燃料要素 装填数： 18本)</p>		<p>γ 型コンパートメント 最大装填型</p> <p>(燃料要素 装填数： 18~30本)</p>	
<p>γ 型コンパートメント 1本装填</p> <p>(燃料要素 装填数： 17~19本)</p>	 <p>δ 型コンパートメント:14本</p>		
<p>γ 型コンパートメント 2本装填</p> <p>(燃料要素 装填数： 16~21本)</p>	 <p>δ 型コンパートメント:10本</p>  <p>δ 型コンパートメント:11本</p>		
<p>γ 型コンパートメント 3本装填</p> <p>(燃料要素 装填数： 15~23本)</p>	 <p>δ 型コンパートメント:6本</p>  <p>δ 型コンパートメント:7本</p>  <p>δ 型コンパートメント:8本</p>		
<p>γ 型コンパートメント 4本装填</p> <p>(燃料要素 装填数： 16~24本)</p>	 <p>δ 型コンパートメント:5本</p>  <p>δ 型コンパートメント:4本</p>		
<p>γ 型コンパートメント 5本装填</p> <p>(燃料要素 装填数： 17~27本)</p>	 <p>δ 型コンパートメント:2本</p>		

図3.2-1 コンパートメント装填数と組合せ

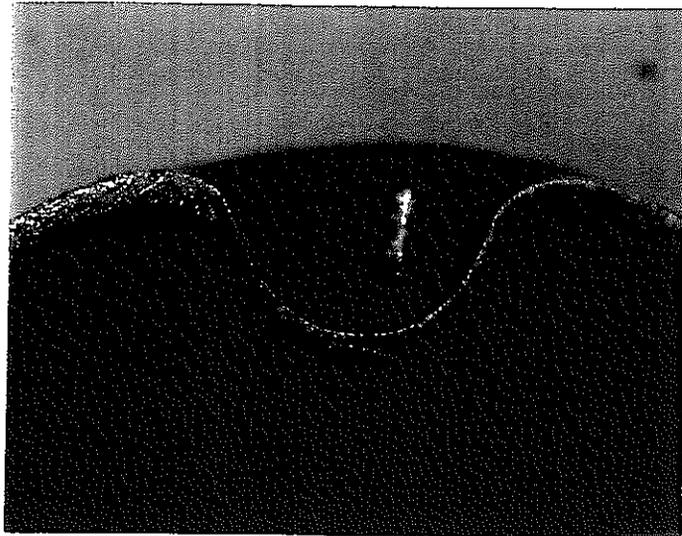


従来型ディンプル形状

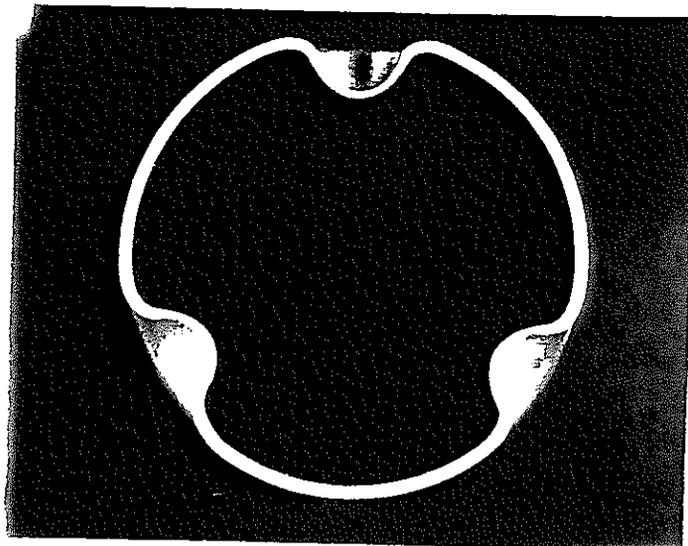


改良型ディンプル形状

図 3. 2-2 従来型と改良型のディンプル設計形状

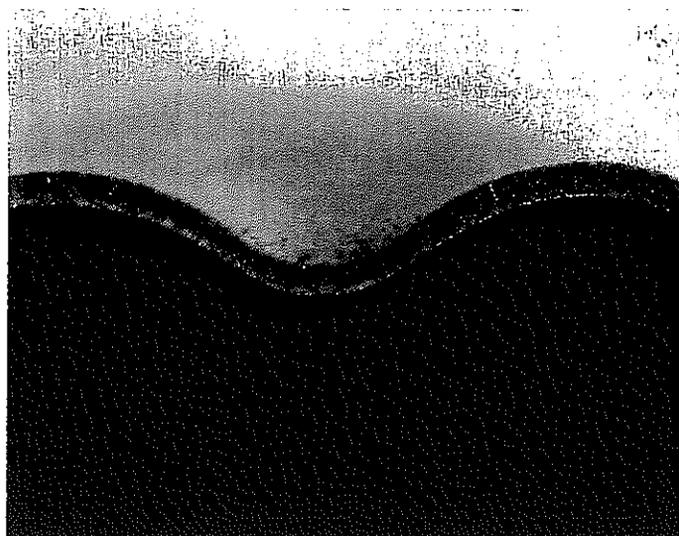


倍率：×15

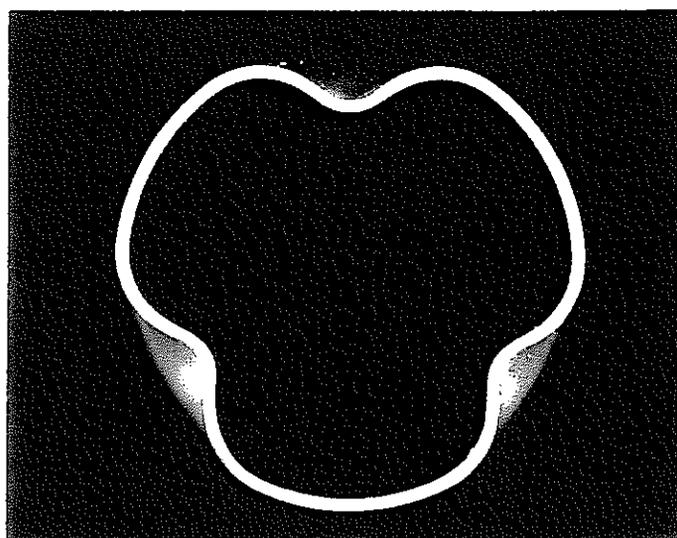


倍率：×5

図 3. 2-3 従来型ディンプルの形状写真



倍率：×15



倍率：×5

図 3.2-4 改良型ディンプルの形状写真

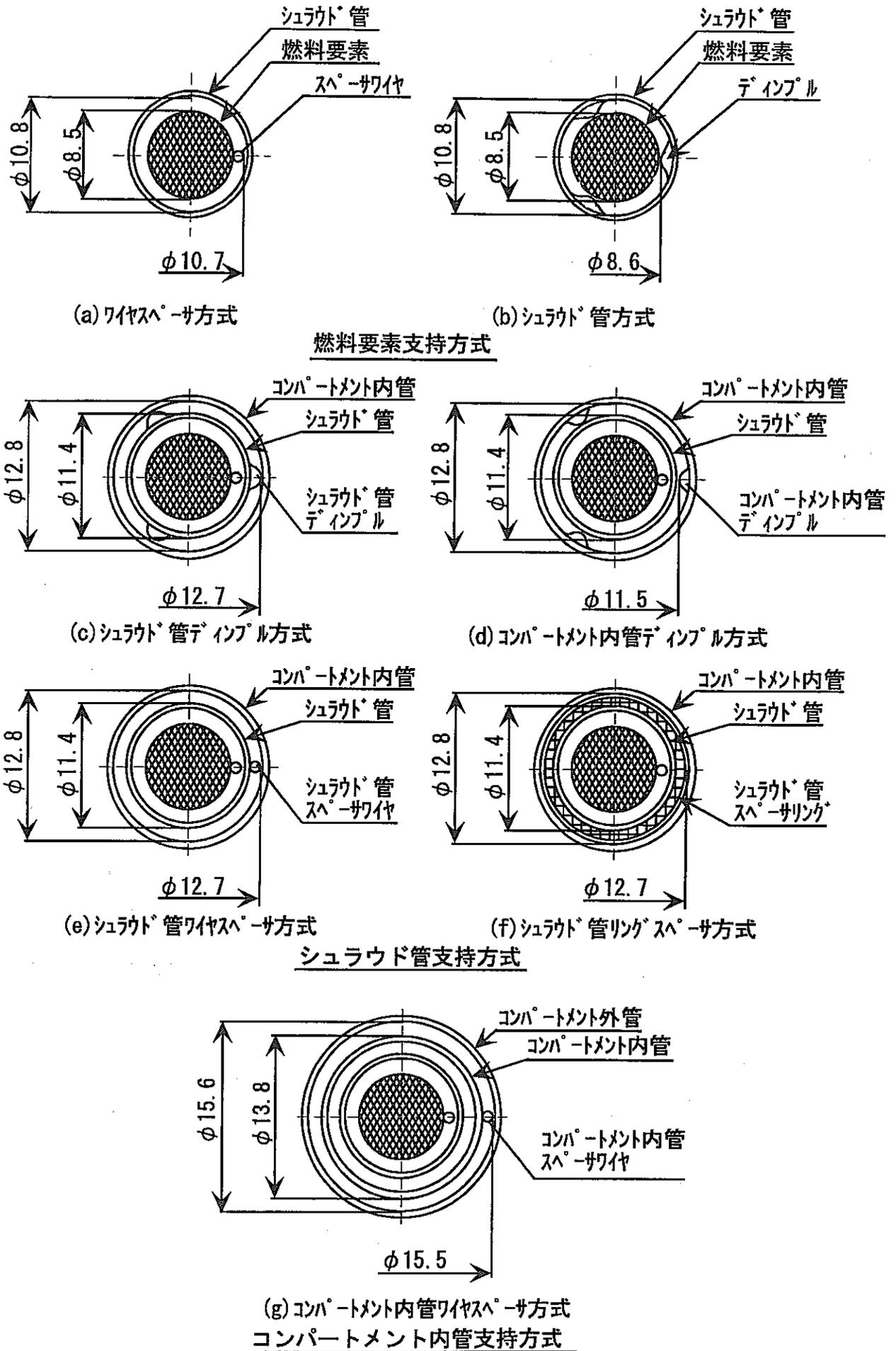
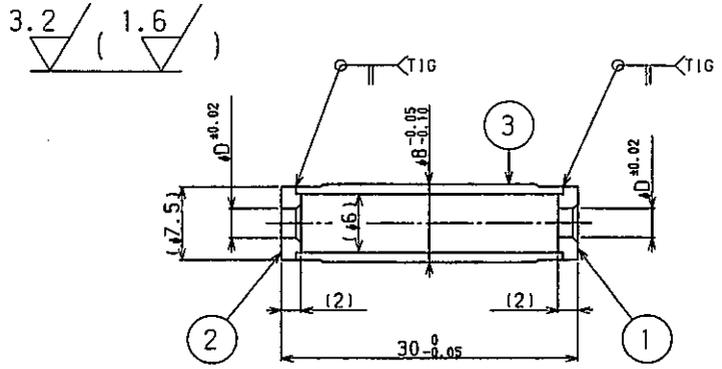
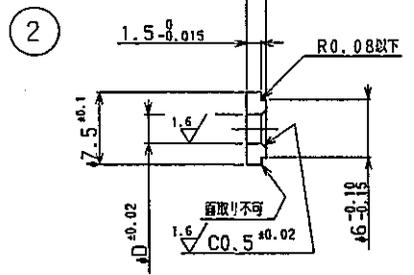
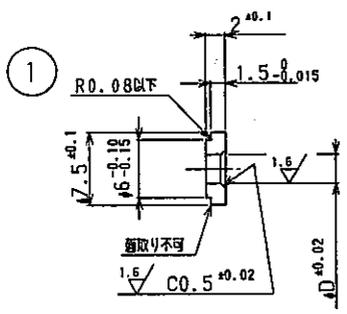
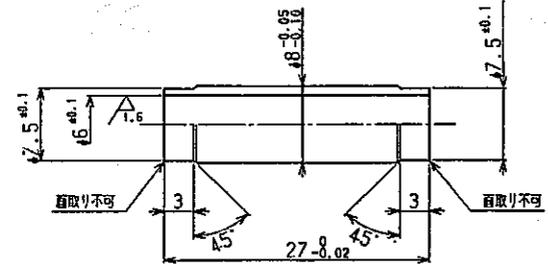


図3.2-5 各種支持方式の比較

符号 ITEM	名 DESCRIPTION	数 NO.	材 MATERIAL	摘 NOTE
1	オリフィス(1A)	3個		
2	オリフィス(1B)	3個		
3	オリフィス管(1)	3		



3

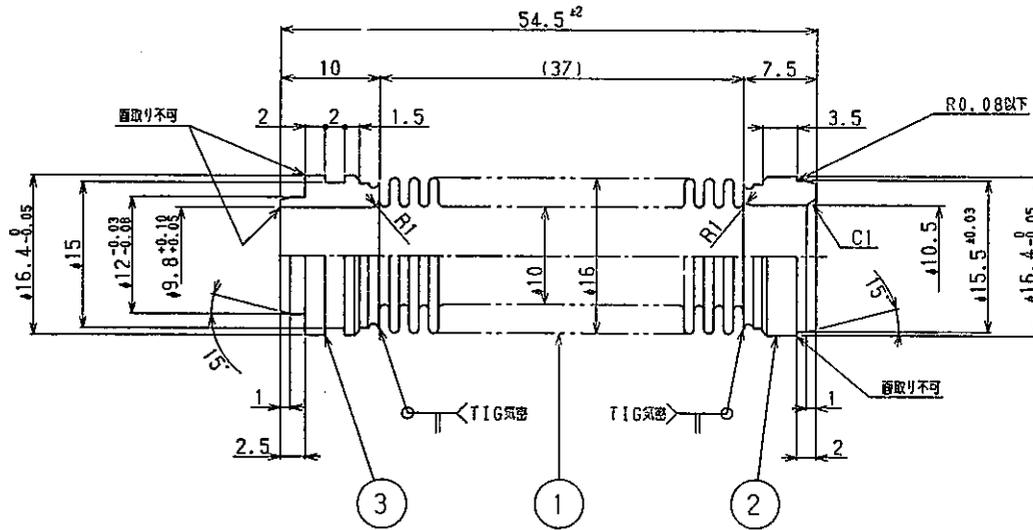


	D
TYPE-1	3 ± 0.02
TYPE-2	4 ± 0.02
TYPE-3	5 ± 0.02

図 3.2-6 コンパートメントオリフィスの構造

符号 ITEM	名 称 DESCRIPTION	数量 NO.	材 料 MATERIAL	摘 要 NOTE
1	ベローズ	1		
2	金具(下)	1		
3	金具(上)	1		

3.2 / (1.6 /)



ベローズ要目

器具使用温度	550°C
高温保持時間	300日
伸縮長さ	±3mm
内 径	φ10mm
山の長さ	3mm
板 厚	0.23mm
ピッチ	1.4mm
山 数	26山
バネ定数	4.167~4.348Kgf/mm

図 3.2-7 コンパートメントベローズの構造

符号 ITEM	名 称 DESCRIPTION	数 量 NO.	材 料 MATERIAL	備 考 NOTE
1	上部筒体	1		
2	下部筒体	1		
3	収納管	1		

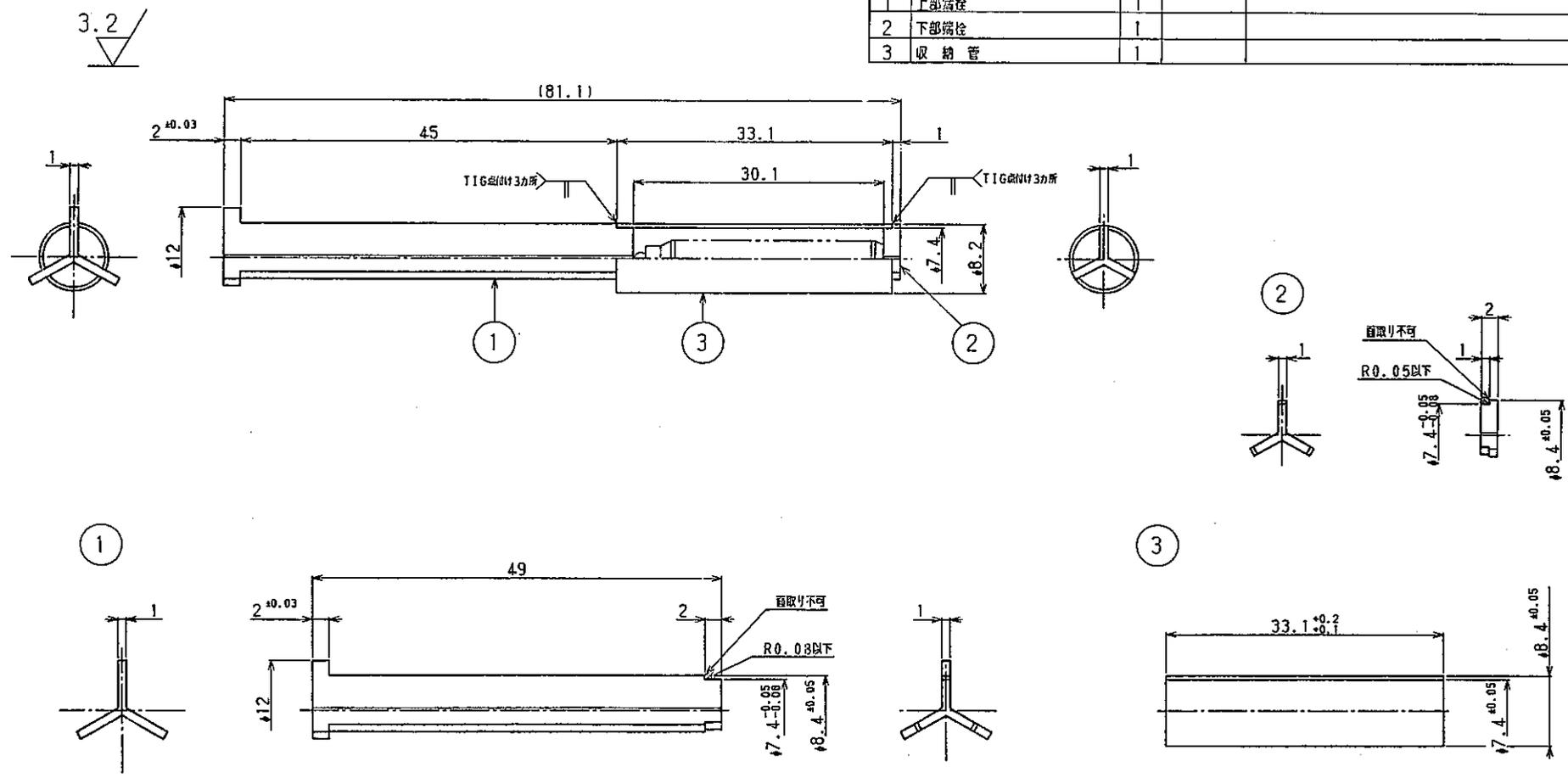


図 3.2-8 TED 収納具の構造

符号 ITEM	名称 DESCRIPTION	数量 NO.	材料 MATERIAL	摘要 NOTE
	下部ストレーナ(φ8.5用)	2		

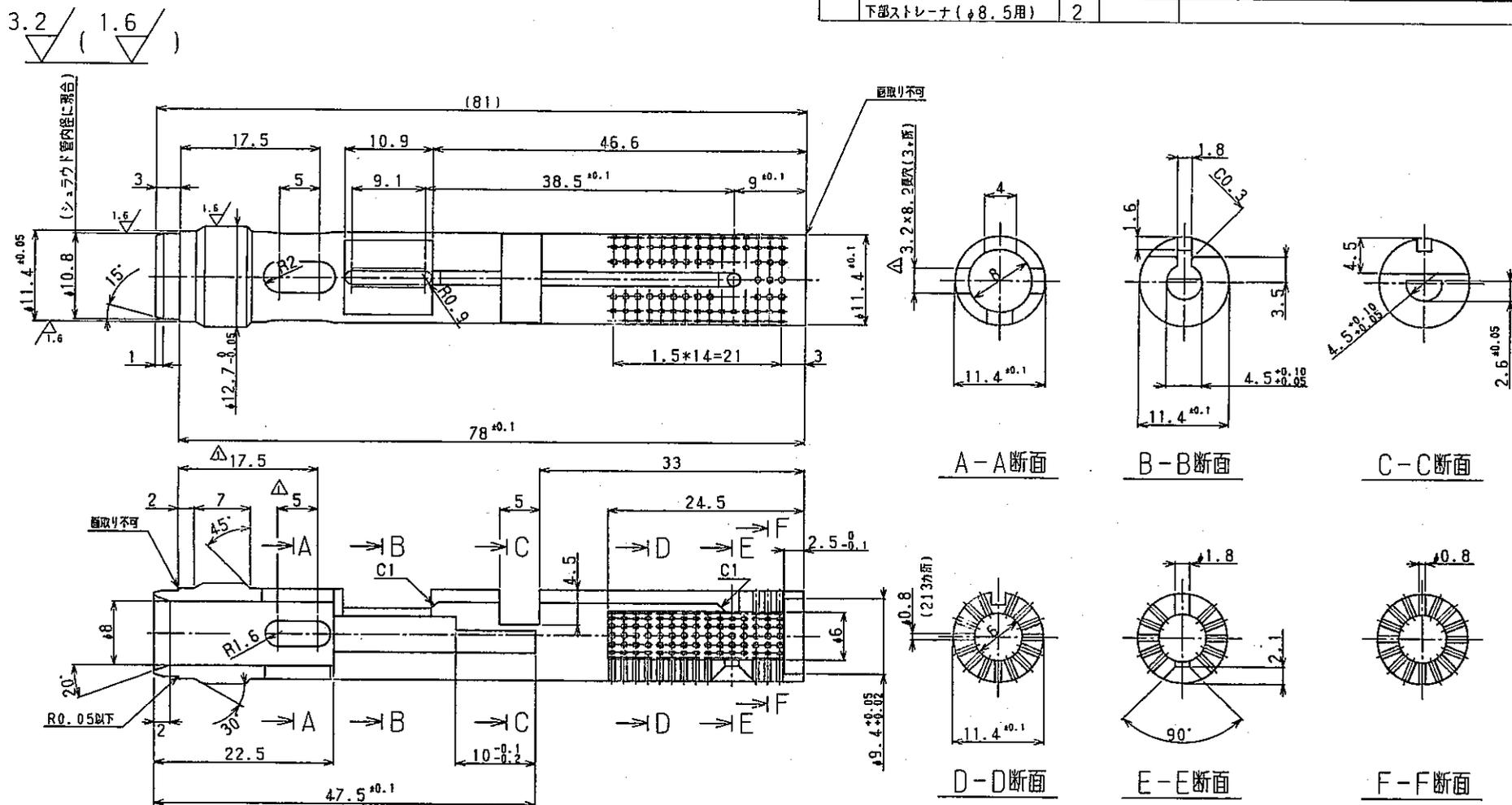


図 3.2-9 下部ストレーナの構造

3.3 再装荷対応

D型照射リグは、基本的な性能要件である継続照射時の組立を考慮して、ホットセル内での組立・解体性の向上を設計に取り入れている。ここでは、D型照射リグの組立・解体手順及び再装荷のための細部構造の設計について示す。

3.3.1 組立・解体手順

(1) 組立手順

① 燃料要素のシュラウド管内挿入 (図 3.3-1①)

燃料要素仕様に合致したシュラウド管を選定する。シュラウド管は、燃料要素外径、全長及びスペーサワイヤの有無により選択する。次に、燃料要素の上部端栓部をハンドリングし、下部端栓部平面加工部を下部ストレナー挿入孔に嵌め合うよう周方向位置を確認しシュラウド管内に挿入する。この時、燃料要素下部端栓ノックバー挿入用角孔部に燃料要素支持バネが完全に入るまで挿入する。

② シュラウド管のコンパートメント内挿入 (図 3.3-1②)

オリフィスホルダーに設けられたメンテナンスホールをハンドリングし、シュラウド管をコンパートメント最下部から挿入する。この時、コンパートメント下部端栓の周方向2ヶ所の位置決め用突起とオリフィスホルダー部の溝部が嵌め合うよう、周方向位置を調整しながら最後まで挿入する。(この周方向位置決めによりコンパートメント内での燃料要素の周方向位置が規定される。) 次に、オリフィスホルダーのメンテナンスホール位置にスリーブの分割面がでないよう周方向を調整し挿入する。

③ 下部キャップの取り付け (図 3.3-1③)

下部キャップ内にコンパートメントオリフィスを挿入した後、下部キャップ六角部を利用しコンパートメント下端のネジ部と下部キャップを組み立てる。

上部キャップについては、TED温度モニタを装荷したホルダーをコンパートメント上部端栓上方から挿入し、ネジ部を締めて固定する。なお、上部キャップの組立については、シュラウド管挿入前後のどちらでも良い。

④コンパートメントの集合体内挿入（図 3. 3-1④）

各コンパートメントをラッパ管－タイロッド付きエントランスノズル組立体内の所定の位置に装填する。この時、コンパートメント周方向位置を下部キャップ六角部の方向に合わせ規定する。この位置決めは、コンパートメント回転防止の機能も有する。

⑤ハンドリングヘッドの取り付け（図 3. 3-1⑤）

コンパートメント最上部にコンパートメント抑えバネを取り付け、上部支持板で抑え込むようにして、上部支持板付きハンドリングヘッドをラッパ管に取り付ける。

⑥ロックナットの取り付け（図 3. 3-1⑥）

ロックナット内に固定バネを挿入し、タイロッドの上端ネジ部に取り付ける。この際、上部支持板に設置したロックナットの廻り止めのロックピンにきちんと嵌まるまでロックナットを締める。なお、ロックピンは、バネにより上部支持板の面上に突き出ており、ロックナット下面のキー溝と嵌合することで廻り止めとして機能する。これにより集合体の組立は終了する。

(2) 解体手順

解体手順は、組立手順の逆に行う。

①ロックナットの取り外し（図 3. 3-1⑥）

ロックナットは、ロックピンを上方から押さえ上部支持板内に押し込みながら緩めることでタイロッドの上端ネジ部から取り外すことができる。

②ハンドリングヘッドの取り外し（図 3. 3-1⑤）

上部支持板付きハンドリングヘッドをラッパ管との嵌合部から上方に引き抜いた後、コンパートメント抑えバネを取り外す。

③コンパートメントの引き抜き（図 3. 3-1④）

コンパートメントの上部キャップの先端に設けたメンテナンスホールを利用し、コンパートメントをラッパ管－タイロッド付きエントランスノズル組立体から上方に引き抜く。

④下部キャップの取り外し（図 3.3-1③）

コンパートメント外管最下部の六角部を固定し、下部キャップのネジ部を緩め、取り外す。なお、下部キャップが Na 固着等の影響で取り外せない場合は、コンパートメント下部に設けた切断マークに沿ってコンパートメントを切断する。

⑤シュラウド管のコンパートメントからの引き抜き（図 3.3-1②）

シュラウド管オリフィスホルダー内に周方向分割のスプリング力で挿入されているスリーブを引き抜いた後、オリフィスホルダーに設けられた、メンテナンスホールを利用してシュラウド管をコンパートメントから下方に引き抜く。

⑥燃料要素の引き抜き（図 3.3-1①）

燃料要素支持バネを引き上げ、燃料要素をシュラウド管から上方に引き抜く。この時、燃料要素は、上部端栓部を直接ハンドリングする。

3.3.2 再装荷向け細部構造

(1)コンパートメント切断マークの設置

コンパートメントのネジ部が Na の固着等により解体不能な状態となった時、コンパートメントを切断して燃料要素を健全に取り出すため、コンパートメント円筒部の上部（内装する燃料要素の上部端栓より上方位置）、下部（シュラウド管オリフィス部）外周に切断位置を示すマーキングを設置する。切断マーク位置を図 3.1-2 に示す。

コンパートメント円筒部上部の切断マークは、継続照射試験の終了した燃料要素又は継続照射試験の必要がない燃料要素を取り出すときに使用する。コンパートメント円筒部下部の切断マークは、継続照射試験を必要とする燃料要素の場合に使用する。切断面にシュラウド管オリフィスが現れるので、オリフィス孔を利用してシュラウド管を下方へ引き抜く。

(2)コンパートメント解体時のシュラウド管落下防止構造

通常コンパートメントは上部キャップを上にして縦置き状態で解体する。解体は、下部キャップをはずしシュラウド管下部を専用治具で掴んで下方に引き抜く手順で行う。しかし、基本設計

時の構造（図 3.3-2）では、コンパートメントから下部キャップをはずした際に、コンパートメントにシュラウド管の機械的保持構造がなくコンパートメントとシュラウド管の接触摩擦力により保持することにしていたため、シュラウド管がコンパートメントから落下する事が考えられた。よって詳細設計では、シュラウド管の機械的保持構造として落下防止構造を設けた。本構造を図 3.3-3 に示す。本構造では、下部キャップ円筒部を2重に分割し、上部にシュラウド管の受け用の円筒管を設ける。下部キャップを引き抜く際に接触摩擦力が足りずシュラウド管が落下する場合、シュラウド管受け用の円筒管がシュラウド管の落下止めとなる。下部キャップをシュラウド管ごと下方に引き下げ、シュラウド管のつかみ孔がコンパートメント下端部から出てきたところで、つかみ孔に治具を挿入しシュラウド管をハンドリングする。

(3) コンパートメントのハンドリング

コンパートメントの取扱のために円筒部及び上下部キャップに六角部を設けた。コンパートメント円筒部の六角部は、シュラウド管及び上下部キャップの組立・解体の際にコンパートメント円筒部を固定するために掴み易くするためのものである。上下部キャップの六角部は、専用の六角レンチを使用しネジ止めするために設けた。各六角部の距離は、治具の挿入性や作業スペースを考慮して100mm以上離れた。

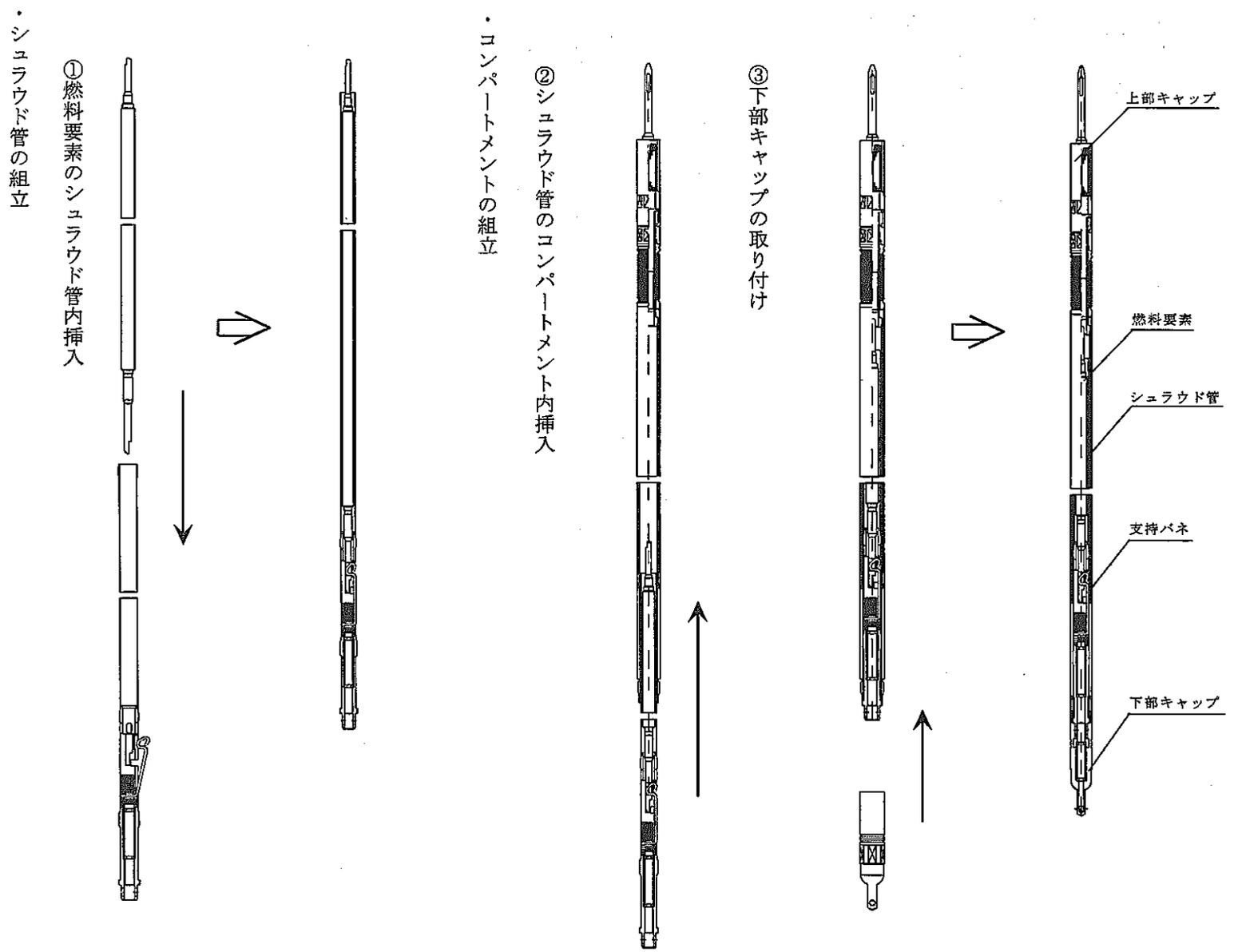
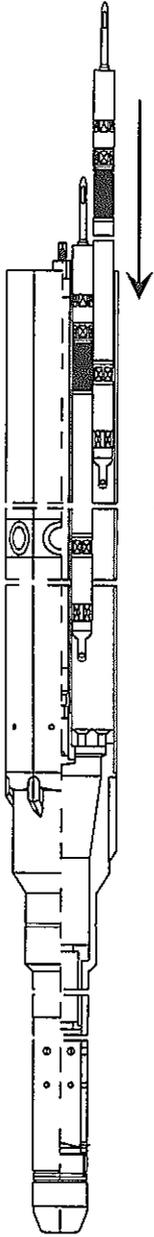


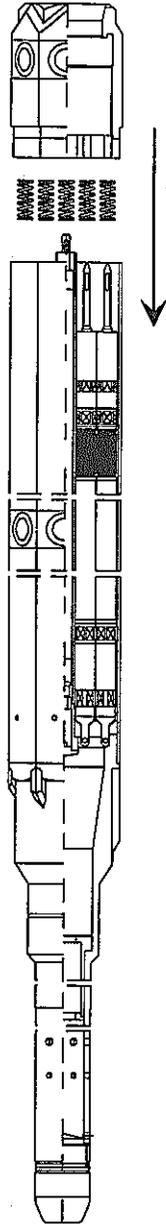
図3.3-1 組立手順 (1 / 2)

・集合体の組立

④ コンパートメントの集合体内挿入



⑤ ハンドリングヘッドの取り付け



⑥ ロックナットの取り付け

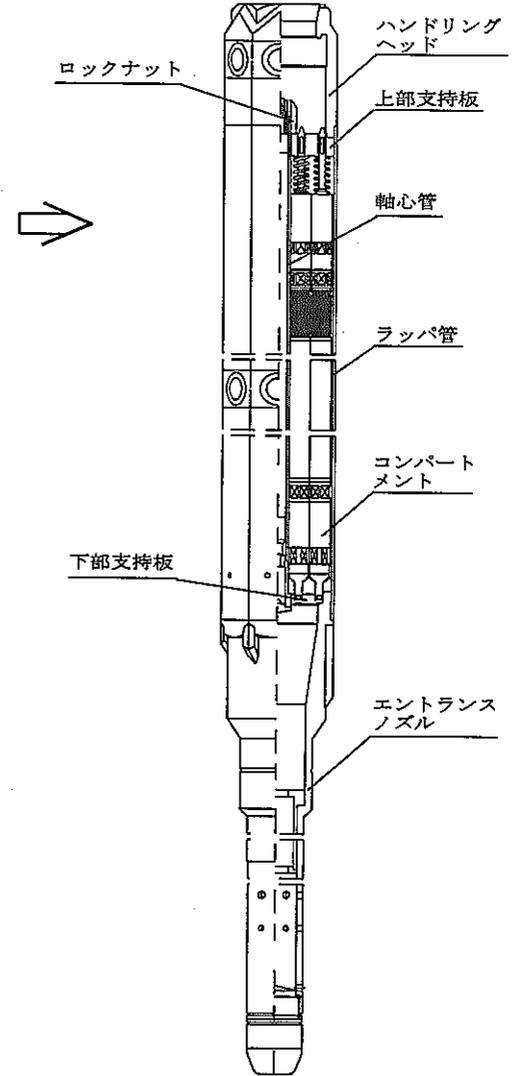
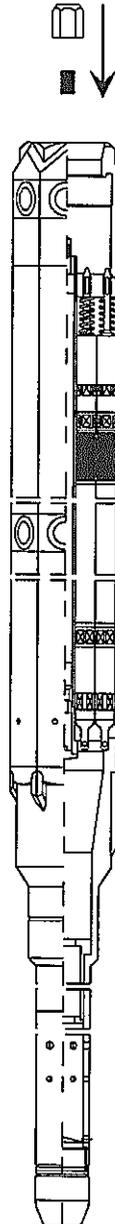


図3.3-1 組立手順 (2 / 2)

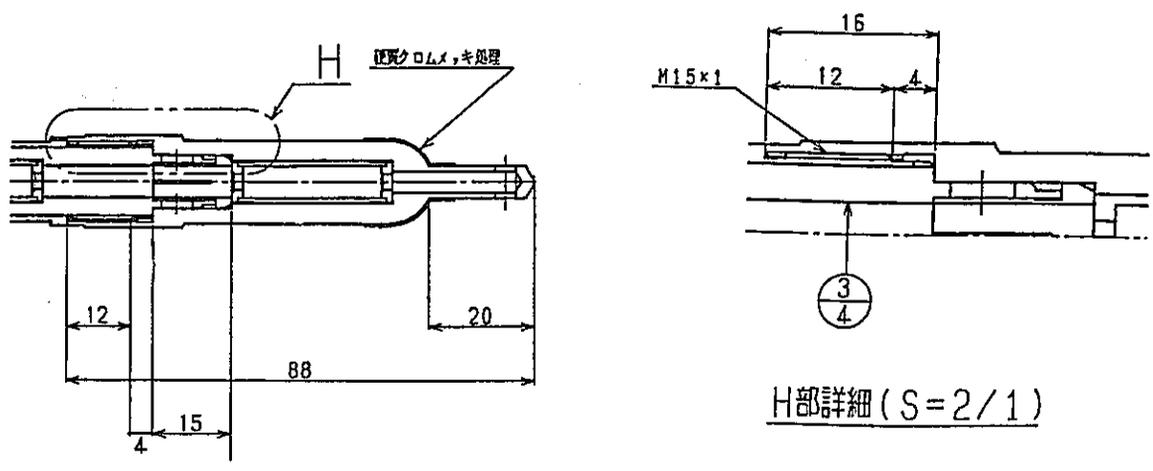


図 3.3-2 コンパートメント下端部構造 (基本設計時)

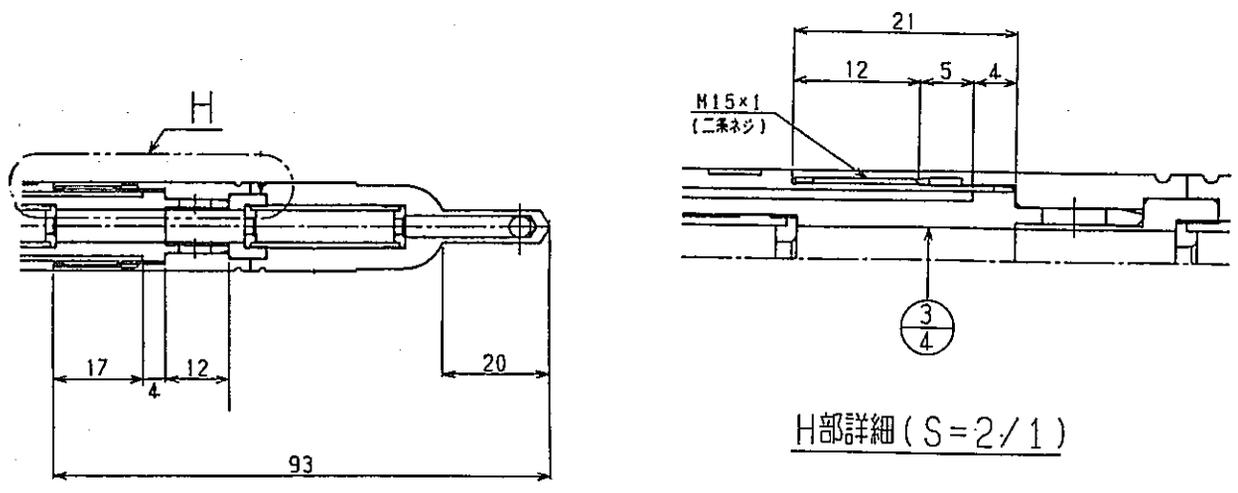


図 3.3-3 コンパートメント下端部構造 (シュラウド管落下防止構造付き)

3.4 流動設計

D型照射リグの流路構造で現行の照射リグと異なる特徴は、コンパートメント内の流量調節と圧力損失調節を行うオリフィスを4段とし、照射温度条件設定に関する余裕を拡大したことである。また、本流動設計が併せ持つ特徴に、コンパートメント外のコンパートメントバンドル部を流れるバイパス流量を削除したことがあげられる。これは、コンパートメントの外側の冷却材の流れをコンパートメント下部球面座からの漏洩流量のみとし、集合体を流れる冷却材流量を削減することで集合体出口冷却材温度の低下を防ぐだけでなく、炉心上部構造へのサーマルストライピングを抑制する効果を持つ。

3.4.1 流路設計

D型照射リグ流路設計に当たっての基本方針は、異なる流量を有する最大18本のコンパートメントを装填できること及び δ 型コンパートメントと γ 型コンパートメントを混在して装填できることである。そのためには、異なる種類のコンパートメントの流量特性を一定に近づける機能及びコンパートメントの流路を他のコンパートメントからの流路と干渉することなく独立に保つ必要がある。

異なる種類のコンパートメントの流量特性を一定に近づけるため、コンパートメント内の圧力損失配分は、管内の摩擦による圧力損失を低減し、オリフィスにより圧力損失を調整する。

隣接コンパートメントからの出口流量による圧力損失などの冷却材流れによる相互干渉を避けるため、集合体内の流路構造をバイパス流量を削除する等し極力簡略化しコンパートメントの流路を独立に保つこととした。

D型照射リグは、エントランスノズルオリフィス、コンパートメントオリフィス及びシュラウド管オリフィスで設定する圧力損失が集合体の全圧力損失の約85%であり、B型照射リグと同様にオリフィス部での圧力損失調整が主要な設定因子となる。

D型照射リグの流路モデルを図3.4-1に示す。D型照射リグでは、基本的にエントランスノズル、コンパートメント及びシュラウド管の3カ所に設けたオリフィスにより集合体及び各コンパートメントの流量を調整する。

エントランスノズルオリフィスは、2段のオリフィスで構成しており、集合体内への冷却材流量を炉心燃料集合体の約1割まで削減することが可能である。集合体内に流入した冷却材は、下部支持板

により 18 本の各コンパートメント内及びコンパートメント球面座からの漏洩流量に分かれる。各コンパートメントに分かれた冷却材は、コンパートメントオリフィス及びシュラウド管オリフィスを通過し、シュラウド管内へと流入する。

コンパートメントオリフィス及びシュラウド管オリフィスは、それぞれ 2 段のオリフィスで構成されており、コンパートメント内への冷却材流量の調節及びコンパートメント内の圧力損失の調節を行う機能を有する。

シュラウド管内を流れる冷却材は、燃料要素とシュラウド管の間の円環部を通過し、上部キャップのストレーナよりコンパートメント外へ流出する。コンパートメントから流出する冷却材が、他のコンパートメントからの流れや漏洩流量に干渉し複雑な合流による圧力損失を発生させないために、ストレーナの周囲にエンクロージャを設け冷却材がコンパートメントの上方に流れるようにしている。コンパートメントから流出した冷却材は、上部支持板の流路孔やハンドリングヘッドを通過し、集合体外へ流出する。

3.4.2 水流動試験

D 型照射リグの各部の流量及び圧力損失を確認するため、炉外水流動試験による圧力損失測定を行った。測定結果は、実験式にまとめ設計に反映する。

(1) 試験体と試験装置

① 試験体

試験体は、集合体内部の流路を実機と同じとしたが、外形は可能な箇所について簡略化した。簡略化に当たっては、水流動試験終了後に試験体を使用し実施する再組立のための取扱試験に供用することを考慮した。本試験に用いた集合体を図 3.4-2～図 3.4-8 に示す。

水流動試験体の特徴を以下に示す。オリフィスの水流動試験体は、オリフィスホルダー及びオリフィスのみ外形寸法、内径寸法を模擬して製作し、オリフィスホルダーはオリフィス圧力損失測定試験容器内に納めて試験に用いた。

コンパートメントの水流動試験体は、外形寸法、内径寸法とも実機を模擬した。

コンパートメントに装填する模擬燃料要素は、外径 2 種類、ワイヤ

スペーサの有り無しの4種類を使用し、内部構成要素を省略した。

集合体圧力損失測定用試験体は、集合体内の流路を模擬する。集合体圧力損失測定試験時に試験体内に装填するコンパートメントは、ダミーコンパートメントを使用した。ハンドリングヘッドは、集合体取扱及び集合体圧力損失を正確に模擬するため、内部形状、寸法を実機と同じ仕様とし、内部圧力測定用タップを設けた。ハンドリングヘッド外側面のセルフオリエンテーション機構の一部として機能するテーパ部は、集合体取扱及び集合体圧力損失に直接影響がないため簡略化した。ハンドリングヘッド及びラッパ管のパッド部は、集合体取扱及び集合体圧力損失に直接影響がないため簡略化した。ラッパ管の外側壁面部に集合体内圧力損失測定用タップを設けた。エントランスノズル部は、エントランスノズルオリフィスの孔径をパラメータとした集合体圧力損失測定試験を実施するためオリフィス部をネジ構造とした。また、セルフオリエンテーションキーは、集合体取扱及び集合体圧力損失に直接影響がないため簡略化した。ダミーコンパートメントは、集合体圧力損失測定に用いるため、外形寸法を模擬した。ダミーコンパートメントの内部圧力損失は、オリフィスを設けて模擬した。

②試験装置

試験装置の系統図を図 3.4-9 に示す。水流動試験体を接続する流水試験装置は、試験容器、循環ポンプ、タンク及び各種計装装置により構成する。循環流体は、循環ポンプから吐出された後、試験容器の下部より上部に向かって流れ、循環ポンプに戻る。循環流体の昇温は、タンク内に設置した電気ヒータとポンプの発生熱を利用した。試験容器の流量は循環ポンプの回転数制御及び試験容器出口部の流量調整弁の開度調整により行った。この2つの流量調整機構を併用することにより低流量から高流量まで安定した流量が得られる構造とした。また、試験容器の流量は試験容器入口部に設置した電磁流量計で測定した。

本試験では、各部の圧力損失測定試験毎に試験容器を試験ループに取り付けた。

オリフィス圧力損失測定用試験容器は、コンパートメント下部のオリフィス挿入部の寸法形状を模擬したオリフィスホルダー部にコンパートメントオリフィス入口部、出口部（シュラウド管オリフィス入口部を兼ねる）及びシュラウド管オリフィス出口部に圧力取

り出し部を設定したものである。オリフィス外部への冷却材漏洩を防止するため、それぞれのオリフィス外径部にOリングを使用している。オリフィス圧力損失測定用試験容器を図 3.4-10 に示す。

コンパートメント圧力損失測定用試験容器は、コンパートメント入口及び出口の圧力を測定するため、コンパートメント全長を流水配管内に収納し、下部キャップ上流部及び下部キャップ下流部に圧力取出し部を設定したものである。コンパートメントは、下部キャップ球面座を模擬下部支持板で支持し、上部キャップ部を模擬上部支持板でネジ固定する。また、冷却材の漏洩を防止するため、下部キャップ球面座上流部にはOリングを使用する。ただし、球面座からの漏洩試験の時にはOリングを外して試験を実施した。コンパートメント下部キャップ内部には、コンパートメントオリフィス、さらにシュラウド管下部には、シュラウド管オリフィスを設置し、それぞれ冷却材流量を制御する。なお、コンパートメント内部の各部の圧力損失をコンパートメント試験体を用いて測定することは、コンパートメントが多重管構造で構成されていることから困難である。そのため、オリフィス部とコンパートメント全体の圧力損失を測定し、実験式を基に各部の圧力損失係数を分離して算出した。コンパートメント圧力損失測定用試験容器を図 3.4-11 に示す。

集合体圧力損失測定用試験容器は、D型照射リグの集合体としての圧力損失を測定するための試験容器で、集合体入口、出口部に冷却材圧力取出し部を設定し、その圧力差を測定できるようにしたものである。集合体圧力損失測定用試験容器を図 3.4-12 に示す。

③計測装置

試験体あるいは、試験容器壁面の静圧タップでの圧力は樹脂製のチューブにより外部に引き出し、差圧伝送器に接続して電気信号に変換した。差圧伝送器からの出力は、水温測定用の熱電対出力、流量測定用の電磁流量計出力とともにデータロガに接続し、チャンネルを切り替えながらデジタル信号に変換し、パーソナルコンピュータに取り込んだ。図 3.4-13 に測定系統図を示す。なお、図は、集合体圧力損失測定試験の測定系統を示したものであるが、他の試験の測定系統も同じである。

(3) 試験条件

①オリフィス圧力損失測定試験

オリフィス圧力損失測定用試験容器を用いてオリフィス部の圧力損失係数を求めた。図 3.4-14 に圧力損失測定位置を示す。試験条件を表 3.4-1 に示す。

②コンパートメント圧力損失測定試験

コンパートメント試験体及び圧力測定用試験容器を用いて、コンパートメント単体の圧力損失係数を求めた。本試験では、コンパートメントの上下部の取り付け部にリングを取り付け漏洩がない状態で試験を実施した。図 3.4-15 に圧力損失測定位置を示す。試験条件を表 3.4-2 に示す。

③コンパートメント漏洩流量測定試験

上記②で使用した試験装置を用い漏洩流量測定試験を行った。なお、各部の漏洩流量が少なく測定装置に設置した流量計では測定できなかつたため、試験容器の中間部の圧カタップを開放し、圧カタップから流れる水量を一定時間メスシリンダーに溜めて流量を算出した。図 3.4-16 にコンパートメント漏洩流量測定試験時の流路の接続図を示す。漏洩流量測定は、コンパートメント下部球面座とコンパートメントネジ部についてそれぞれ実施した。試験条件を表 3.4-3 に示す。

④集合体圧力損失測定試験

集合体用試験体及び圧力損失測定用試験容器を用いて集合体の圧力損失係数を求めた。なお、コンパートメント部分の圧力損失を同等とするため集合体用試験体には、ダミーコンパートメントを 18 本装填し圧力損失を測定した。集合体下部球面座は、リングを取り付け漏洩を防止した。図 3.4-17 に圧力損失測定位置を示す。試験条件を表 3.4-4 に示す。

(4) 試験手順

試験手順の概略を以下に示す。

- ①試験装置を運転し、循環水を所定の温度に設定する。
- ②循環水の温度を確認した後、ポンプを停止し流れが停止した状態で計測点の零点の計測を行う。

③流量を所定の値に設定し安定したところで、計測を実施する。圧力損失データの測定タイミングは、1測定チャンネル当たり2秒のサンプリング間隔で50個のデータを取り込む。流量、温度についても同じタイミングで測定する。

④計画した条件での測定を終了した後、再度ポンプを停止し流れが停止した状態で零点の計測を行う。

(5) 試験結果の処理方法

試験で得られたデータは従来の照射リグと同様、以下の方法で処理を行った。

①試験で得られた圧力損失、流量及び温度は1測定条件で採取した50個のデータの平均値を用いた。

②上記平均値に対して、試験前後に実施した流量零における測定値を用い零点補正を行った。

③試験容器及び試験体の熱膨張による流路面積の補正は行わない。

④圧カタップ位置の流路が高圧側と低圧側で異なる位置の場合、動圧補正を行った。

⑤流路面積の算出には設計ノミナル値を用いた。

⑥流量と圧力損失の関係として得られた測定データは、以下に示す圧力損失係数(ζ)とレイノルズ数(Re)で整理し実験式を求めた。

図 3.4-18 に評価位置を示す。

$$\zeta = A \cdot Re^B$$

ここで、A及びBは未定定数であり、回帰分析によって決定した。なお、ζ及びReは一般式^[4]より以下の通り定義される。

$$\zeta = \frac{2g}{\rho V^2} \Delta P$$

ΔP : 圧力損失(kg/cm²)

ρ : 密度 (kg/sec²/m³)

V : 流速 (m/sec)

また、実験値の算出に用いた集合体各部の水力寸法及び実験値と実験式の差の評価式を以下に示す。

[流路面積]

・コンパートメント流調オリフィス $2.83 \times 10^{-5} \text{m}^2$

$$Re = \frac{V \cdot De}{\nu}$$

De : 水力等価直径(m)

ν : 動粘性係数 (m^2/sec)

・入口ノズル $8.04 \times 10^{-4} \text{m}^2$

[水力直径]

・コンパートメント流調オリフィス内径 $0.6 \times 10^{-2} \text{m}$

・入口ノズル内径 $3.2 \times 10^{-2} \text{m}$

[実験値と実験式の差の評価式]

$$\beta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i/X_i)^2}{n}} \times 100$$

V i : 実験値と実験式の残差

X i : 実験値

n : データ個数

(6) 試験結果

①オリフィス圧力損失測定試験

オリフィス管内流速（内径定義φ6mm）を基準として算出した圧力損失測定試験結果（圧力損失係数とレイノルズ数の関係）を図3.4-19及び図3.4-20に示す。また、コンパートメントオリフィスとシュラウド管オリフィスを組み合わせた（以下、オリフィス組立体と呼ぶ。）時の各ケース毎の圧力損失係数の実験式を表3.4-5に示す。図表中では、コンパートメントオリフィス孔径－シュラウド管オリフィス孔径の順でオリフィスの組み合わせを表した。

図から各オリフィスとも圧力損失係数はレイノルズ数に対する

依存性が弱い傾向となっている。これはオリフィスの流動抵抗の性質が形状損失支配的となっていることを示している。

本試験では、オリフィスを組み合わせて6種類の供試体について圧力損失を測定した。そこですべてのオリフィスに対してオリフィス部の面積比と圧力損失の関係を整理した。整理結果を図 3.4-21 に示す。ここでは、横軸はオリフィス組立体の面積比の積とした。また圧力損失係数は定格運転条件（温度 460℃、コンパートメント流量 51.7g/sec、 $Re=7\times 10^4$ ）での値とし、実験式より算出した。図より面積比が大きくなると圧力損失係数は小さくなる傾向を示す。圧力損失係数は、コンパートメントオリフィス孔径のグループ毎に一様な傾向を持っていることが判る。これは、オリフィスの設置距離が近いために流れが完全に回復する前に後段のオリフィスが設置され、全段の影響が全体の結果に影響するためであると考えられる。

実機の照射試験においては本図に基づいてコンパートメント流量に合わせたオリフィス設計する。

②コンパートメント圧力損失測定試験

コンパートメント圧力損失測定試験では試験の最初のステップとして、被覆管径 $\phi 6.5\text{mm}$ の試験体を用いて再現性の確認試験を行った。これは、コンパートメント圧力損失測定試験体はシール部が多く、そのために試験体の組み立て方次第で漏洩により試験の再現性が得られない可能性があると考えたからである。スペーサワイヤ付きと無しの場合の再現性確認試験の比較結果を図 3.4-22 及び図 3.4-23 に示す。1回目と2回目の試験の間に試験容器から試験体を取り出して再度組み込んでいるが、両試験結果は、ほぼ同等であり圧力損失測定試験の再現性が確認できた。

エントランスノズルオリフィス部流速（内径定義 $\phi 34\text{mm}$ ）を基準として算出した圧力損失測定試験結果（圧力損失係数とレイノルズ数の関係）を図 3.4-24～図 3.4-28 に示す。図よりダミーコンパートメントを除いてレイノルズ数 1×10^4 以下を境にしてレイノルズ数に対する圧力損失係数の傾向が異なる。つまり、レイノルズ数 1×10^4 以下ではレイノルズ数に対する依存性が大きく、 1×10^4 以上ではレイノルズ数に対する依存性が小さくなる。これは、 1×10^4 以下では流れが層流に遷移するため、管壁と流れの摩擦損失が大きくなり、圧力損失係数を増加させていると考えられる。一方、ダミ

ーコンパートメントでは、レイノルズ数の依存性に明確な変化が見られない。

これは、ダミーコンパートメント内には模擬燃料要素が入っていないため摩擦損失が少ないことが原因と考えられる。

レイノルズ数 1×10^4 以下の場合のコンパートメント内流量は最大でも 20g/sec 以下でありコンパートメントの使用範囲では無いことから、実験式の作成に当たっては、レイノルズ数 1×10^4 以上の実験値を用いた。実験値と実験式を図 3.4-29～図 3.4-33 に示す。また、表 3.4-6 に実験式、定格運転条件（温度 460°C 、コンパートメント流量 51.7g/sec 、 $Re=5 \times 10^4$ ）での圧力損失係数の推定値を示す。

③コンパートメント漏洩流量測定試験

a) 球面座からの漏れ

コンパートメント球面座からの漏洩流量測定試験の結果を表 3.4-7 及び図 3.4-34 に示す。球面座からの漏洩流量は付加圧力が 2kgf/cm^2 まで約 $2.3 \text{cm}^3/\text{min}$ (約 $0.04 \text{cm}^3/\text{sec}$) で一定である。付加圧力が 2kgf/cm^2 を超えると付加圧力の増大に伴って漏洩流量が増加する傾向が見られる。ここでの付加圧力は球面座の下側に付加された圧力であり、漏洩流量を排出した圧力タップは大気開放となっていることから、本試験で得られた漏洩流量は付加圧力相当の圧力損失がコンパートメントに作用したときの漏洩流量を示している。コンパートメントの圧力損失は最大でも 2kgf/cm^2 であり、その時の流量は最小でも約 58g/sec であることよりコンパートメント内流量に占める漏洩流量の割合は 0.1% 以下である。設計では流量誤差を最大 $\pm 3\%$ 見込んでいることから、漏洩流量による影響は無い。

b) ネジ部からの漏洩

ネジ部からの漏洩流量測定試験の結果を表 3.4-8 及び図 3.4-35 に示す。測定したネジ部の漏洩流量は、コンパートメント上下部の 2カ所のネジ部の合計である。ネジ部からの漏洩流量は、付加圧力の増加に伴い直線的に増加する傾向が見られ、また、実験値のばらつきは $\pm 20\%$ の範囲を持っている。コンパートメントの圧力損失の最大値 (2kgf/cm^2) での付加圧力を掛けた時の漏洩流量は、最大でも約 $15 \text{cm}^3/\text{min}$ であり、コンパートメント内流

量に占める漏洩流量の割合は 0.45%以下である。設計では流量誤差を最大±3%見込んでいることから、漏洩流量による影響は無い。

④集合体圧力損失測定試験

エントランスノズルオリフィス部流速（内径定義φ34mm）を基準として算出した圧力損失測定試験結果（圧力損失係数とレイノルズ数の関係）を図 3.4-36～図 3.4-38 に示す。図中には、集合体の圧力損失係数（図 3.4-17 の $\Delta P1 + \Delta P4$ より算出）とコンパートメント部分の圧力損失係数（図 3.4-15 の $\Delta P3$ より算出）を示す。集合体圧力損失測定試験ではコンパートメントを変えていないことから、コンパートメント部分で測定した圧力損失係数は各条件ともほぼ同等である。

実験値と実験式を図 3.4-39 に示す。集合体の圧力損失特性は試験を行ったレイノルズ数範囲の中ではレイノルズ数の依存性に大きな変化が見られなかったことから、実験式の作成には全ての実験値を用いた。表 3.4-9 に得られた実験式と定格運転条件（温度 460℃、集合体流量 930.8g/sec、 $Re=5 \times 10^4$ ）における推定値及び実験式と実験値の差を示す。

また、図 3.4-40 にエントランスノズルオリフィス部での縮流率と圧力損失係数の関係を示す。縮流率と圧力損失係数の間には一様な相関関係がみられ、本実験式を用いることにより集合体の圧力損失特性の調整が可能である。

(7) 水流動試験の冷却材流量の設定精度

①圧力損失係数実験式の誤差

水流動試験により求めた実験式がもつ誤差による冷却材流量の変化に伴う被覆管最高温度への影響を示す。なお、実験式の有する誤差は、実験式に対する実験値のばらつき及び測定器の精度とする。各々の実験値のばらつき及び測定器の精度を以下に示す。

- ・ 集合体圧力損失係数実験式に対する実験値のばらつき ±2.2%
- ・ コンパートメント圧力損失係数実験式に対する実験値のばらつき ±1.4%
- ・ 測定器の精度 ±2.0%

従って、圧力損失係数実験式が持つ誤差は、誤差伝ぱんの法則^[5]より二乗平均和をとって以下となる。

- ・ 集合体圧力損失係数実験式の誤差

$$\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{2.2^2+2.0^2} = 3.0\%$$

- ・ コンパートメント圧力損失係数実験式の誤差

$$\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{1.4^2+2.0^2} = 2.5\%$$

- ・ D型照射リグ圧力損失係数実験式の誤差

$$\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{3.0^2+2.5^2} = 4.0\%$$

となる。D型照射リグの冷却材流量に対して考慮すべき圧力損失係数の誤差としては、集合体エントランスノズル部及びコンパートメント圧力損失係数の二乗平均値が相当する。上記で求めたD型照射リグの圧力損失係数実験式の誤差は、集合体エントランスノズル部の誤差に加えてダミーコンパートメントによる誤差も含まれることから保守側に設定したものとなっている。

圧力損失係数の誤差による冷却材流量の変動幅は、圧力損失が圧力損失係数と流速の二乗の積に比例するので、圧力損失係数の誤差の平方根となる。従って、圧力損失係数の誤差による冷却材流量の変動幅は±2.0%となる。なお、被覆管温度は、冷却材流量に比例するため、冷却材流量の変動による被覆管温度の変動は、集合体下端から上部までの温度上昇に対して±2.0%の冷却材流量変動を掛けたものとなる。従って、被覆管温度の変動は±2.0%以内となる。

②コンパートメントオリフィスの製作公差による誤差

水流動試験結果よりコンパートメントオリフィスの製作公差による冷却材流量の変動範囲を算出した。

a) オリフィス孔径製作公差による影響

図 3.4-19 を基に圧力損失係数の変化が急峻であるシュラウドオリフィス及びコンパートメントオリフィスが 3mm と 3mm の組み合わせと 3mm と 4mm の組み合わせの間でオリフィス孔径の製作公差による流量への影響を推測した。各オリフィス径の公差は、+0mm、-0.1mm である。オリフィスの設計式を基に流量変動範囲を算出した結果、流量変動幅は±1.0%である。

なお、オリフィス孔径が 5mm の場合については圧力損失に対する孔径の変動の感度が小さく、製作公差内では圧力損失係数への影響はない。

b) オリフィス面取り製作公差による影響

面取り製作公差による圧力損失係数の変動幅を算出した^[6]。その結果、孔径 3mm のオリフィスについては面取り製作公差の影響はないが、孔径 5mm については圧力損失係数の変動幅は約±1.0%である。

オリフィスの面取り製作公差による影響は上記 a) と b) を重ね合わせたものであり、コンパートメント冷却材流量の変動幅は孔径 3mm 及び 5mm のオリフィスとも約±1.0%である。これより小孔径では孔径公差、大孔径では面取り公差支配的であり、その中間の孔径では両者の和となるが、 δ 型コンパートメントのオリフィスでは全体を通して±1.0%の変動幅を考慮すれば良いと考えられる。この冷却材流量の変動による被覆管温度への影響は①と同様に±1.0%以内となる。

ただし、 δ 型コンパートメントのオリフィス部及びバンドル部の製作公差による冷却材流量の誤差は約 3.2%を見込み 4.0%とする。

③冷却材流量の設定精度

D型照射リグの冷却材流量の精度は、上記①及び②で求めた誤差の二乗平均和となる。これを計算すると冷却材流量の設定精度は、±5.7%となる。

$$\sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{4.0^2 + 4.0^2} = 5.7\%$$

3.4.3 冷却材流量設定範囲

(1) δ 型コンパートメントの冷却材流量設定範囲

D型照射リグに δ 型コンパートメントを装填した場合の δ 型コンパートメントの冷却材流量設定範囲を求めた。流量設定範囲を求めるために、次の2ケースについて検討した。

① 同一コンパートメント仕様時

本ケースは、コンパートメントの仕様を全て同一にし、全てのコンパートメントに同じ冷却材流量を流す場合である。

水流動試験によって求めた集合体、コンパートメント及びオリフィスの圧力損失係数実験式を用い、冷却材流量設定範囲を求めた。 δ 型コンパートメントの流量設定範囲を図3.4-41～図3.4-44に示す。燃料要素1本当たりの流量の最小値は、圧力損失係数を大きくするため、エントランスノズルオリフィス、コンパートメントオリフィス及びシュラウド管オリフィスが最小径とした場合である。また、燃料要素1本当たりの流量の最大値は、圧力損失係数を小さくするため、エントランスノズルオリフィス、コンパートメントオリフィス及びシュラウド管オリフィスを設置しない場合である。

δ 型コンパートメントの冷却材流量設定範囲を以下に示す。

- ・ワイヤスペーサ型、燃料要素外径 $\phi 6.5\text{mm}$ ： 45～125g/sec
- ・ワイヤスペーサ型、燃料要素外径 $\phi 8.5\text{mm}$ ： 48～125g/sec
- ・シュラウド管型、燃料要素外径 $\phi 6.5\text{mm}$ ： 45～125g/sec
- ・シュラウド管型、燃料要素外径 $\phi 8.5\text{mm}$ ： 48～130g/sec

なお、参考として γ 型コンパートメント(グリッドスペーサ型、燃料要素：外径 $\phi 6.5\text{mm}$ 、4本装填時)をB型照射リグ及びD型照射リグに装填した場合の流量設定範囲を図3.4-45及び図3.4-46に示す。

② コンパートメント仕様をパラメータとした時

本ケースは、燃料要素保持方式の種類、燃料要素径、冷却材流量を可変とした場合である。本ケースの検討に当たっては、以下の3つの条件を設定した。

- ・ワイヤスペーサ型及びシュラウド管型を各1本以上使用する。
- ・燃料要素径 $\phi 6.5\text{mm}$ 及び $\phi 8.5\text{mm}$ 用シュラウド管各1本以上使用する。
- ・同一のコンパートメント圧損での冷却材最小流量及び最大流量を各1本以上流す。

上記条件を基に水流動試験によって求めた集合体、コンパートメント及びオリフィスの圧力損失係数実験式を用い、冷却材流量設定範囲を求めた。

δ 型コンパートメントの冷却材流量と圧力損失の関係を図 3.4-47 に示す。条件を満たすため圧力損失が最大となるのとして、ワイヤスペーサ型、燃料要素外径 $\phi 8.5\text{mm}$ 用シュラウド管を、圧力損失が最小となるものとしてシュラウド管型、燃料要素外径 $\phi 6.5\text{mm}$ 用シュラウド管の圧力損失係数実験式を使用した。また、コンパートメント部以外の冷却材流量と圧力損失の関係を図 3.4-48 に示す。コンパートメント部以外を流れる冷却材流量は、D型照射リグの流路構成より集合体内の冷却材全流量と等しくなる。圧力損失が最大となるのとして、エントランスノズルオリフィス径が最小、圧力損失が最小となるものとしてエントランスノズルオリフィス無しの圧力損失実験式を使用した。

両図中では、炉心圧力損失を 3200 g/cm^2 とし、コンパートメントの圧力損失を400(設定範囲の最小値)、1000(設定範囲の中間の代表)、2900(設定範囲の最大値) g/cm^2 とした場合の冷却材流量範囲を示す。

- ・ コンパートメント圧力損失： 400 g/cm^2
 コンパートメント1本当たりの冷却材流量　：　27～45g/sec
 集合体内冷却材流量　：　745～810g/sec
- ・ コンパートメント圧力損失： 1000 g/cm^2
 コンパートメント1本当たりの冷却材流量　：　45～75g/sec
 集合体内冷却材流量　：　810～1350g/sec
- ・ コンパートメント圧力損失： 2900 g/cm^2
 コンパートメント1本当たりの冷却材流量　：　75～135g/sec
 集合体内冷却材流量　：　1350～1650g/sec

従って、 δ 型コンパートメントの冷却材流量設定範囲は、27～

135g/sec となる。

(2) γ 型コンパートメントとの混在時の流量設定について

D型照射リグに γ 型コンパートメントと δ 型コンパートメントを混在させる場合の流量設定について以下に示す。

コンパートメント部の圧力損失は、コンパートメントの種類を問わずある一定の値となるよう設定される。そのため、 γ 型コンパートメントと δ 型コンパートメントを混在させた場合でも、設定された圧力損失となるよう、コンパートメントオリフィス及びエントランスノズルオリフィスを調整することにより、必要な冷却材流量を確保することができる。このため、混在時のオリフィス設計方法は、 δ 型コンパートメントのみの場合と同じである。

例えばグリッドスペーサ型の γ 型コンパートメント（燃料要素：外径 ϕ 6.5mm、4本装填）及びシュラウド管型の δ 型コンパートメント（燃料要素：外径 ϕ 6.5mm）を基に、混在した場合の流量設定範囲について以下に示す。

γ 型コンパートメントの流動特性及び δ 型コンパートメントの流動特性を図3.4-41及び図3.4-46に示す。図中の γ 型コンパートメントと δ 型コンパートメントの圧力損失が同じで流動特性が重なる範囲で流量配分バランスの設定が可能である。例えば、コンパートメント圧力損失が $1000\text{g}/\text{cm}^2$ の時、 γ 型コンパートメントは $32\sim 60\text{g}/\text{sec}$ 、 δ 型コンパートメントは、 $45\sim 75\text{g}/\text{sec}$ の流量範囲で設定可能である。

3.4.4 流量配分設計

(1) 流量配分設計方法

D型照射燃料集合体は、集合体内での圧力損失分担がエントランスノズル部、コンパートメント部及びエントランスノズル部と3つに別れており、炉内に装荷する際には各部の圧力損失の合計が炉心圧力損失と同じとなるように（炉内の炉心燃料集合体等へ影響を与えないように）集合体内の流量配分を行う。コンパートメント部を流れる全流量と集合体全流量がほぼ等しいことから、流量配分設計では、コンパートメント部の圧力損失を設定した後に、他の部の圧力損失を調整する。また、コンパートメント部の圧力損失は、コンパートメントが流路上並列であることから、各コンパートメントに必要な流量（燃料要素の照射温度条件から設定された流量）をオリフィスで調整し全てのコン

パートメントが一定の圧力損失となるように設定する。このコンパートメントの圧力損失の設定値は、コンパートメントの個数及び種類を問わない。D型照射リグの圧力損失設定手順を図 3.4-49 に示す。

(2) 計算例

D型照射リグ1号機(D1)で照射試験を計画している燃料要素を基に、流量配分計算を実施した。オリフィスの縮流係数^[3]を表 3.4-10 に示す。また、MK-Ⅲ炉心での炉心の圧力損失を水頭圧(0.24kg/cm²)を含めて3.16kg/cm²と仮定した。計算条件及び計算結果を表 3.4-11～表 3.4-13 に示す。コンパートメントオリフィス及びシュラウド管オリフィスの径を同一に設定した場合のオリフィス径算出結果を、表 3.4-12 に示す。コンパートメントオリフィスの径を固定し、シュラウド管オリフィス径のみ可変とした場合のオリフィス径算出結果を、表 3.4-13 に示す。

表3.4-1 試験条件（オリフィス圧力損失測定試験）

ケース	オリフィス孔径 mm		試験温度	試験流量 ※	評価内容
	コンパートメント	シユラウト管			
1	3	3	85	15～200g/s(20点)	・オリフィス圧力損失係数
2	3	4	85	15～200g/s(20点)	・オリフィス圧力損失係数
3	3	5	85	15～200g/s(20点)	・オリフィス圧力損失係数
4	4	4	85	15～200g/s(20点)	・オリフィス圧力損失係数
5	4	5	85	15～200g/s(20点)	・オリフィス圧力損失係数
6	5	5	85	15～200g/s(20点)	・オリフィス圧力損失係数
7	3	3	20～85 (20℃毎)	各温度20～120%(10点)	オリフィス圧力損失係数のレイノルズ数依存性
8	3	3.5	20～85 (20℃毎)	各温度20～120%(10点)	オリフィス圧力損失係数のレイノルズ数依存性
9	4	6	20～85 (20℃毎)	各温度20～120%(10点)	オリフィス圧力損失係数のレイノルズ数依存性

※圧力損失が所定の値を超えた場合には、最大流量を制限する。
ただし、流量の設定ピッチを調整することにより、測定点数は変えない。

表3.4-2 試験条件 (コンパートメント圧力損失測定試験)

ケース	被覆管径 mm	ワイヤ	オリフィス mm	試験温度	試験流量※	評価内容
1	6.5	無し	φ4-4	85	15~200g/s(20点)	コンパートメント圧力損失係数
2	6.5	有り	φ4-4	85	15~200g/s(20点)	コンパートメント圧力損失係数
3	8.5	無し	φ4-4	85	15~200g/s(20点)	コンパートメント圧力損失係数
4	8.5	有り	φ4-4	85	15~200g/s(20点)	コンパートメント圧力損失係数
5	8.5	無し	φ4-4	20~85 (20°C毎)	各温度15~200g/s(10点)	コンパートメント圧力損失係数のレイノルズ数依存性
6	8.5	有り	φ4-4	20~88 (20°C毎)	各温度15~200g/s(10点)	コンパートメント圧力損失係数のレイノルズ数依存性
7	ダミーコンパートメント		φ3-3	20~85 (20°C毎)	各温度15~200g/s(10点)	ダミーコンパートメント圧力損失係数のレイノルズ数依存性

※圧力損失が所定の値を超えた場合には、最大流量を制限する。
ただし、流量の設定ピッチを調整することにより、測定点数は変えない。

表3.4-3 試験条件（漏洩流量測定試験）

ケース	対象箇所	試験温度	付加圧力※	評価内容
1	球面座	25	0.4～3.0kg/cm ² (20点)	球面座からの漏洩流量
2	ネジ部	25	0.4～3.0kg/cm ² (20点)	コンパートメントネジ部からの漏洩流量

※冷却材に掛ける付加圧力。なお、付加圧力が0.2～0.4kg/cm²の時は漏洩流量が微少であったため測定不能であった。

表3. 4-4 試験条件（集合体圧力損失測定試験）

ケース	エントランス/ズルオリフィス径 mm	試験温度	試験流量 ※ (コンパートメント1本あたり)	評価内容
1	10	85	15~200g/s (20点)	集合体圧力損失係数
2	11	85	15~200g/s (20点)	集合体圧力損失係数
3	12	85	15~200g/s (20点)	集合体圧力損失係数
4	10	20~85 (20℃毎)	各温度20~120% (10点)	集合体圧力損失係数のレイノルズ数依存性

※圧力損失が所定の値を超えた場合には、最大流量を制限する。
ただし、流量の設定ピッチを調整することにより、測定点数は変えない。

表3.4-5 圧力損失係数の実験式（オリフィス圧力損失測定試験）

オリフィス組合せ	フィッティング式	Re=7×10 ⁴ における推定値
3-3	$\zeta = 52.816Re^{-0.0158}$	44.3
3-4	$\zeta = 33.835Re^{-0.02}$	27.1
3-5	$\zeta = 29.448Re^{-0.0207}$	23.4
4-4	$\zeta = 14.311Re^{-0.0352}$	9.7
4-5	$\zeta = 11.146Re^{-0.0302}$	8.0
5-5	$\zeta = 4.0625Re^0$	4.1
3-3.5	$\zeta = 45.803Re^{-0.0257}$	34.4
4-6	$\zeta = 10.735Re^{-0.0619}$	5.4

設定温度：85℃のデータを使用

表3. 4-6 圧力損失係数の実験式 (コンパートメント圧力損失測定試験)

被覆管径 mm	ワイヤー	フィッティング式	Re=5×10 ⁴ における推定値
φ6.5	無	$\zeta = 140.99Re^{-0.1302}$	34.5
φ6.5	有	$\zeta = 144.12Re^{-0.1352}$	33.4
φ8.5	無	$\zeta = 118.32Re^{-0.1153}$	34.0
φ8.5	有	$\zeta = 168.74Re^{-0.1430}$	35.9
ダミー	—	$\zeta = 61.133Re^{-0.0246}$	46.8

設定温度：85℃のデータを使用

表3. 4-7 球面座漏洩流量測定試験結果

圧力 (kgf/cm ²)	流量	
	(cm ³ /min)	(cm ³ /s)
0.2	測定不能	-
0.3	測定不能	-
0.4	2.00	0.0333
0.5	2.12	0.0353
0.6	2.30	0.0383
0.7	2.29	0.0382
0.8	2.35	0.0392
1.0	2.36	0.0393
1.2	2.37	0.0395
1.4	2.25	0.0375
1.5	2.33	0.0388
1.6	2.45	0.0408
1.7	2.38	0.0397
1.8	2.32	0.0387
2.0	2.36	0.0393
2.2	2.53	0.0422
2.4	2.89	0.0482
2.5	3.33	0.0555
2.6	3.13	0.0522
2.8	3.45	0.0575
2.9	3.60	0.0600
3.0	3.53	0.0588

表 3.4-8 ネジ部漏洩流量測定試験結果

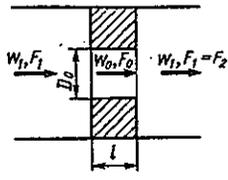
圧力 (kgf/cm ²)	流量	
	(cm ³ /min)	(cm ³ /s)
0.4	3.20	0.0533
0.5	4.00	0.0667
0.6	3.90	0.0650
0.7	4.10	0.0683
0.8	4.20	0.0700
1.0	5.00	0.0833
1.3	7.60	0.1267
1.4	8.20	0.1367
1.5	10.80	0.1800
1.6	11.50	0.1917
1.7	12.00	0.2000
1.8	12.30	0.2050
2.0	13.50	0.2250
2.3	14.00	0.2333
2.4	14.80	0.2467
2.5	14.50	0.2417
2.6	16.00	0.2667
2.8	15.50	0.2583
2.9	16.80	0.2800
3.0	16.70	0.2783

表3. 4-9 圧力損失係数の実験式 (集合体圧力損失測定試験)

エントランスノズルオリフィス mm	実験式	Re=5×10 ⁴ における推定値	実験式とデータの差 %
φ10	$\zeta = 696.29 \text{Re}^{0.0022}$	714.7	2.15
φ11	$\zeta = 545.12 \text{Re}^{-0.0036}$	522.4	1.37
φ12	$\zeta = 409.92 \text{Re}^{-0.0026}$	397.5	0.44

表 3.4-10 縮流係數

Thick-edged orifice ($l/D_h > 0.015$) in a straight tube (channel);
 $Re = w_0 D_h / \nu > 10^{3.13,14}$ Diagram 4-15



$$\zeta_1 = \frac{\Delta p}{\rho w_1^2 / 2} = \left[0.5 \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0.75} + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{1.375} + \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^2 + \lambda \frac{l}{D_h} \right] \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2,$$

where τ see the table below or graph a of Diagram 4-12 or

$$\tau = (2.4 - l) \times 10^{-\alpha h};$$

$$\varphi(\bar{l}) = 0.25 + 0.535 l^{-0.8} / (0.05 + l^{-0.8}), \text{ see Chapter 2.}$$

$$D_h = \frac{4F_0}{\Pi_0}$$

$$\bar{l} = l/D_h$$

$$\zeta_0 = 0.5 \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right) + \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + \tau \sqrt{1 - \frac{F_0}{F_1}} \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right); \text{ for } \lambda$$

Values of ζ_1 at $\lambda = 0.02$

At $\lambda = 0.02$ for the values of $\zeta_1 = f(l/D_h, F_0/F_1)$ see the graph

$\bar{l} = l/D_h$	τ	F_0/F_1																	
		0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00		
0	1.35	6915	1676	716	394	244	99.5	51.4	30.0	18.8	8.56	4.27	2.19	1.11	0.53	0.19	0		
0.2	1.22	6613	1602	684	376	233	95.0	49.0	28.6	18.0	8.17	4.08	2.09	1.07	0.51	0.19	0		
0.4	1.10	6227	1533	655	360	223	91.0	47.0	27.4	17.2	7.83	3.92	2.01	1.03	0.50	0.19	0.01		
0.6	0.84	5708	1382	591	324	201	81.9	42.3	24.6	15.5	7.04	3.53	1.82	0.94	0.46	0.18	0.01		
0.8	0.42	4695	1137	485	266	165	67.2	34.6	20.2	12.7	5.77	2.90	1.50	0.78	0.39	0.16	0.02		
1.0	0.24	4268	1033	441	242	150	61.0	31.4	18.3	11.5	5.24	2.64	1.37	0.72	0.37	0.16	0.02		
1.4	0.10	3948	956	408	224	139	56.4	29.1	17.0	10.7	4.86	2.45	1.29	0.68	0.36	0.16	0.03		
2.0	0.02	3783	916	391	215	133	54.1	27.9	16.3	10.2	4.68	2.38	1.26	0.68	0.36	0.17	0.04		
3.0	0	3783	916	391	215	133	54.3	28.0	16.4	10.3	4.75	2.43	1.30	0.71	0.39	0.20	0.06		
4.0	0	3833	929	397	218	135	55.2	28.6	16.7	10.6	4.82	2.51	1.35	0.75	0.42	0.22	0.08		
5.0	0	3883	941	402	221	137	56.0	29.0	17.0	10.8	5.00	2.59	1.41	0.79	0.45	0.24	0.10		
6.0	0	3933	954	408	224	139	56.9	29.6	17.4	11.0	5.12	2.67	1.46	0.83	0.48	0.27	0.12		
7.0	0	3983	966	413	227	141	57.8	30.0	17.7	11.2	5.25	2.75	1.52	0.87	0.51	0.29	0.14		
8.0	0	4033	979	419	231	143	58.7	30.6	18.0	11.4	5.38	2.83	1.57	0.91	0.54	0.32	0.16		
9.0	0	4083	991	424	234	145	59.6	31.0	18.3	11.6	5.50	2.91	1.63	0.95	0.58	0.34	0.18		
10.0	0	4133	1004	430	237	147	60.5	31.6	18.6	11.9	5.62	3.00	1.68	0.99	0.61	0.37	0.20		

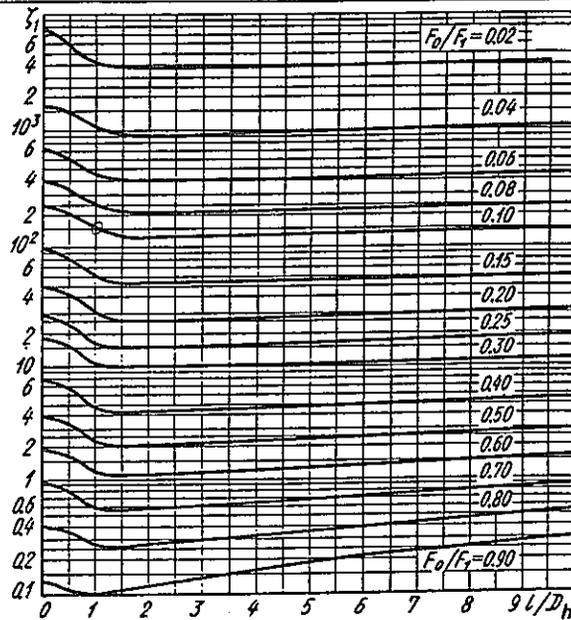


表3.4-11 照射試験計画中 (D1) の燃料要素仕様

ピン番号	燃料要素種類	被覆管 最高温度 (°C)	燃料要素仕様			
			線出力 (W/cm)	外径 (mm)	内径 (mm)	ペレット外径 (mm)
1	Ⅱ型	651	360	6.5	5.56	5.4
2	Ⅲ型	694	415	6.5	5.56	5.4
3	Ⅲ型	670	465	7.5	6.56	6.54
4	Ⅲ型	670	465	7.5	6.56	6.54
5	Ⅲ型	670	465	7.5	6.56	6.54
6	Ⅲ型	670	465	7.5	6.56	6.54
7	Ⅲ型	670	465	7.5	6.56	6.54
8	Ⅲ型	670	465	7.5	6.56	6.54
9	Ⅳ型	610	450	6.86	5.92	5.51
10	Ⅳ型	610	450	6.86	5.92	5.51
11	Ⅳ型	610	450	6.86	5.92	5.58
12	Ⅳ型	610	450	6.86	5.92	5.58
13	Ⅳ型	610	450	6.86	5.92	5.51
14	Ⅳ型	610	450	6.86	5.92	5.51
15	Ⅳ型	610	450	6.86	5.92	5.58
16	Ⅲ型	685	465	8.5	7.5	7.32
17	Ⅲ型	685	465	8.5	7.5	7.32
18	Ⅲ型	685	465	8.5	7.5	7.32

表3.4-12 流量配分計算結果 (コンパートメント、シュラウド管オリフィス径同一)

ピン番号	照射条件			流量配分計算結果		
	最大線出力 (W/cm)	被覆管最高温度 (°C)	必要流量 (g/sec)	オリフィス径 (mm)		コンパートメント 内流量 (g/sec)
				コンパートメント	シュラウド管	
1	360	651	41.36	3-3	3-3	41.15
2	415	694	44.68	3-3.4	3-3.4	44.44
3	465	670	49.39	3-5	3-5	49.39
4	465	670	49.35	3-5	3-5	49.39
5	465	670	49.25	3-5	3-5	49.38
6	465	670	41.2	3-3	3-3	41.15
7	465	670	41.11	3-3	3-3	41.15
8	465	670	41.15	3-3	3-3	41.15
9	450	610	61.93	4-5.9	4-5.9	61.93
10	450	610	61.86	4-5.9	4-5.9	61.92
11	450	610	62.18	4-5.9	4-5.9	61.94
12	450	610	62.07	4-5.9	4-5.9	61.94
13	450	610	61.96	4-5.9	4-5.9	61.93
14	450	610	61.82	4-5.9	4-5.9	61.92
15	450	610	62.25	4-5.9	4-5.9	61.95
16	465	685	46.38	3-3.8	3-3.8	46.34
17	465	685	46.41	3-3.8	3-3.8	46.35
18	465	685	46.43	3-3.8	3-3.8	46.35

表3.4-13 流量配分計算結果（コンパートメントオリフィス径固定）

ピン番号	照射条件			流量配分計算結果		
	最大線出力 (W/cm)	被覆管最高温度 (°C)	必要流量 (g/sec)	オリフィス径 (mm) コンパートメントシュラウド管	コンパートメント 内流量 (g/sec)	
1	360	651	41.36	4-4	3.41-3.41	41.36
2	415	694	44.68	4-4	3.59-3.59	44.68
3	465	670	49.39	4-4	3.86-3.86	49.39
4	465	670	49.35	4-4	3.86-3.86	49.35
5	465	670	49.25	4-4	3.85-3.85	49.25
6	465	670	41.2	4-4	3.46-3.46	41.2
7	465	670	41.11	4-4	3.45-3.45	41.1
8	465	670	41.15	4-4	3.46-3.46	41.15
9	450	610	61.93	4-4	4.6-4.6	61.93
10	450	610	61.86	4-4	4.6-4.6	61.86
11	450	610	62.18	4-4	4.62-4.62	62.18
12	450	610	62.07	4-4	4.61-4.61	62.07
13	450	610	61.96	4-4	4.6-4.6	61.96
14	450	610	61.82	4-4	4.59-4.59	61.82
15	450	610	62.25	4-4	4.62-4.62	62.25
16	465	685	46.38	4-4	3.85-3.85	46.38
17	465	685	46.41	4-4	3.85-3.85	46.41
18	465	685	46.43	4-4	3.85-3.85	46.43

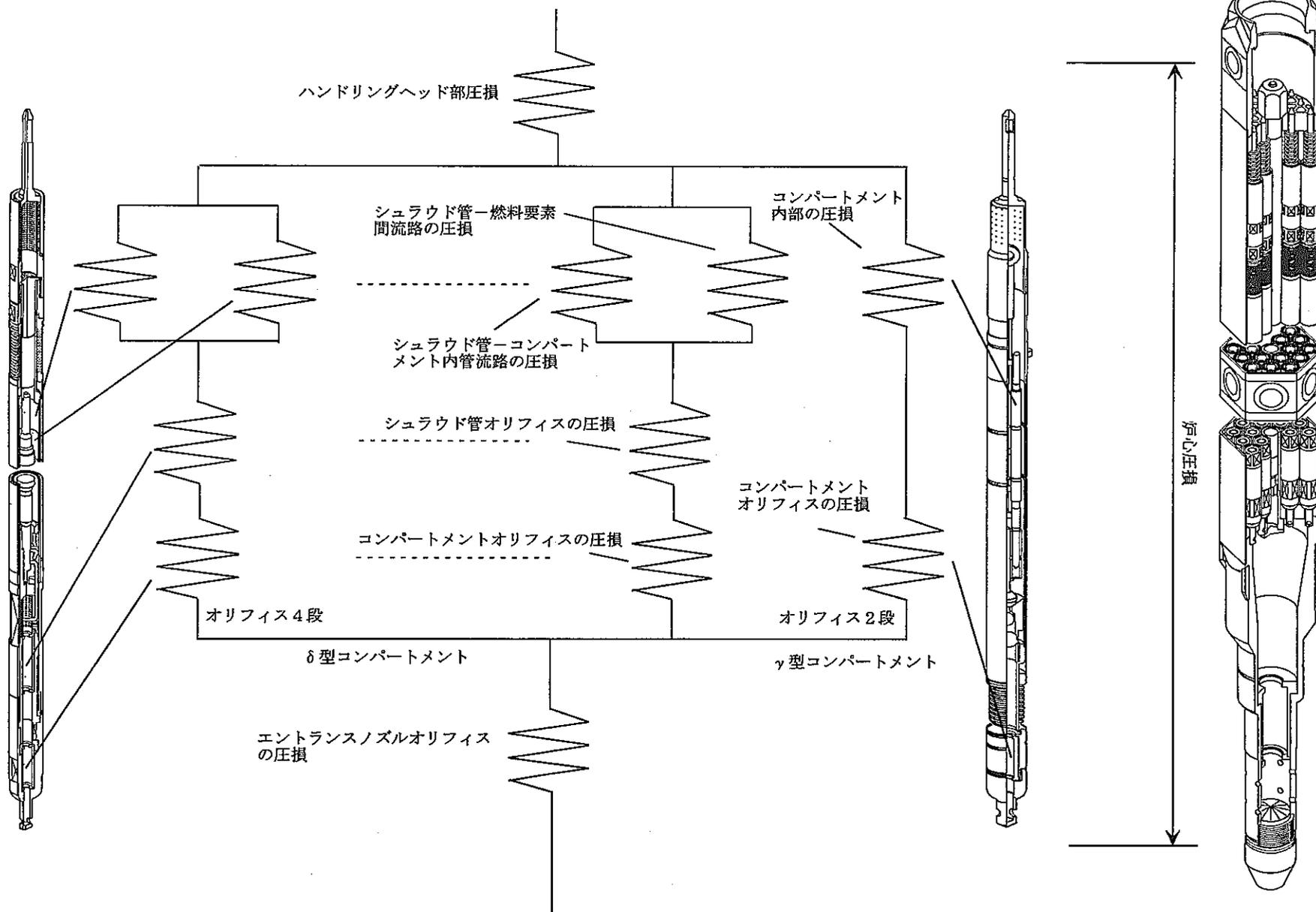


図3.4-1 冷却材流路モデル

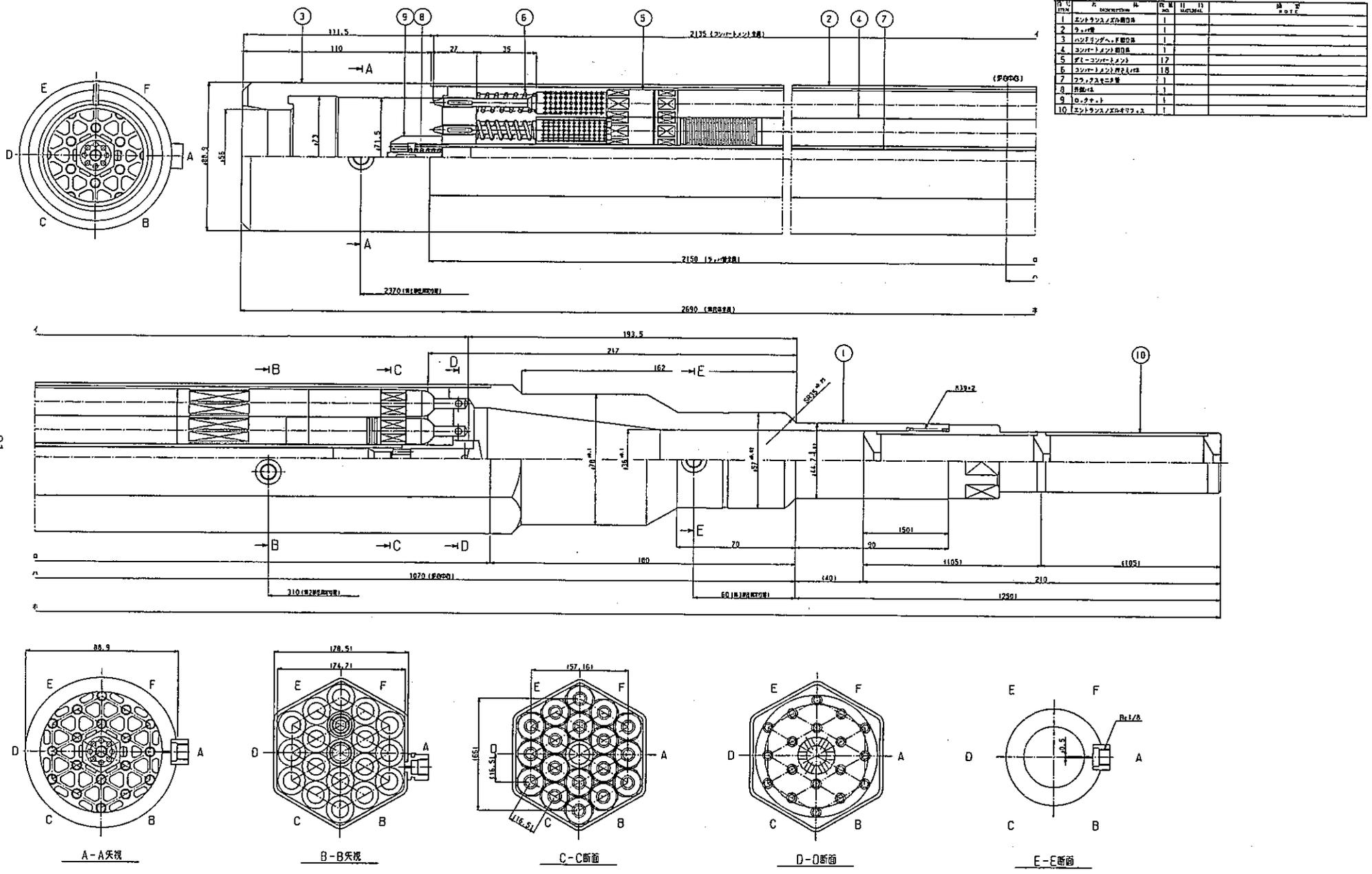
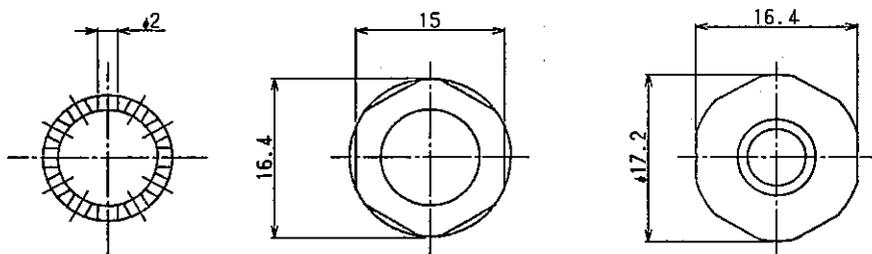


図 3.4-2 水流動試験体 (集合体)



A-A断面 (S=2/1) B-B断面 (S=2/1) C-C断面 (S=2/1)

符号 ITEM	名 DESCRIPTION	数量 NO.	材 料 MATERIAL	摘 要 NOTE
1	模擬流入管	1	SUS316	
2	模擬断熱管	1	SUS316	
3	模擬上部ストレーナ	1	SUS316	
4	模擬コンパートメントオリフィス	1	SUS316	

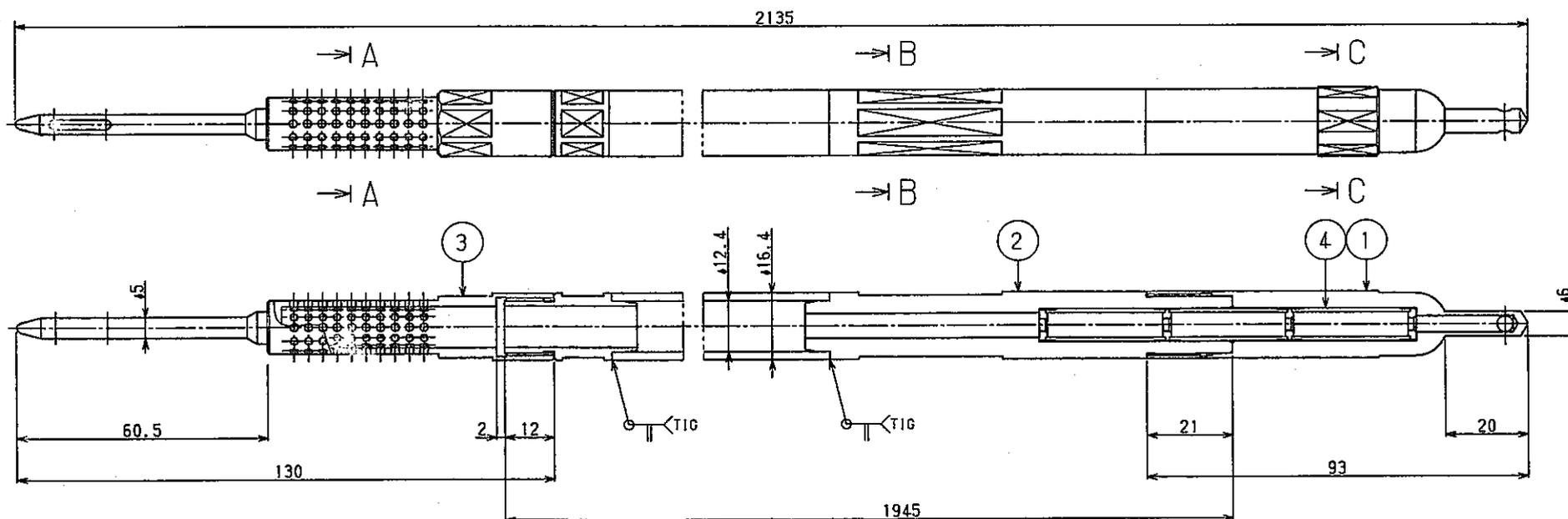
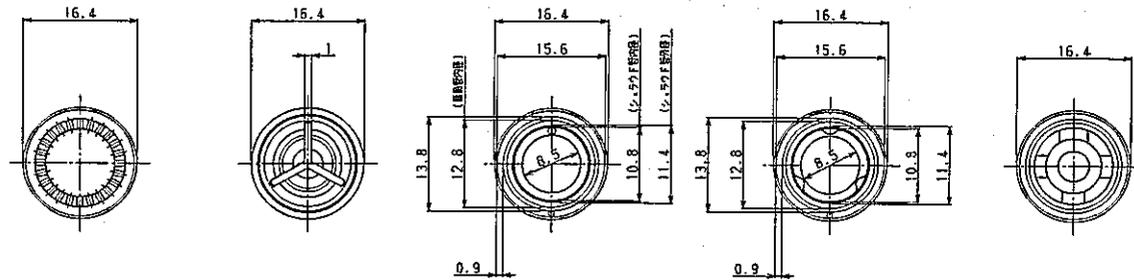
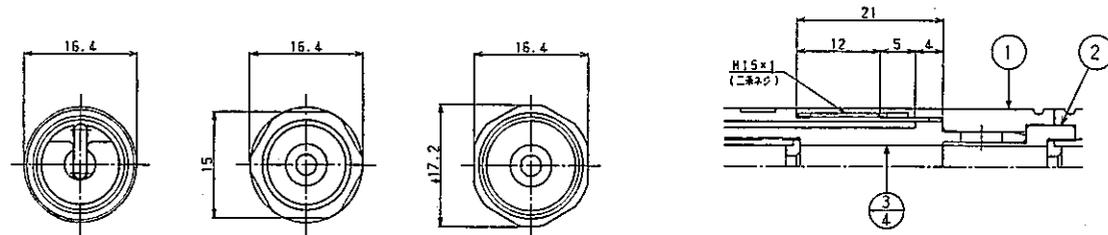
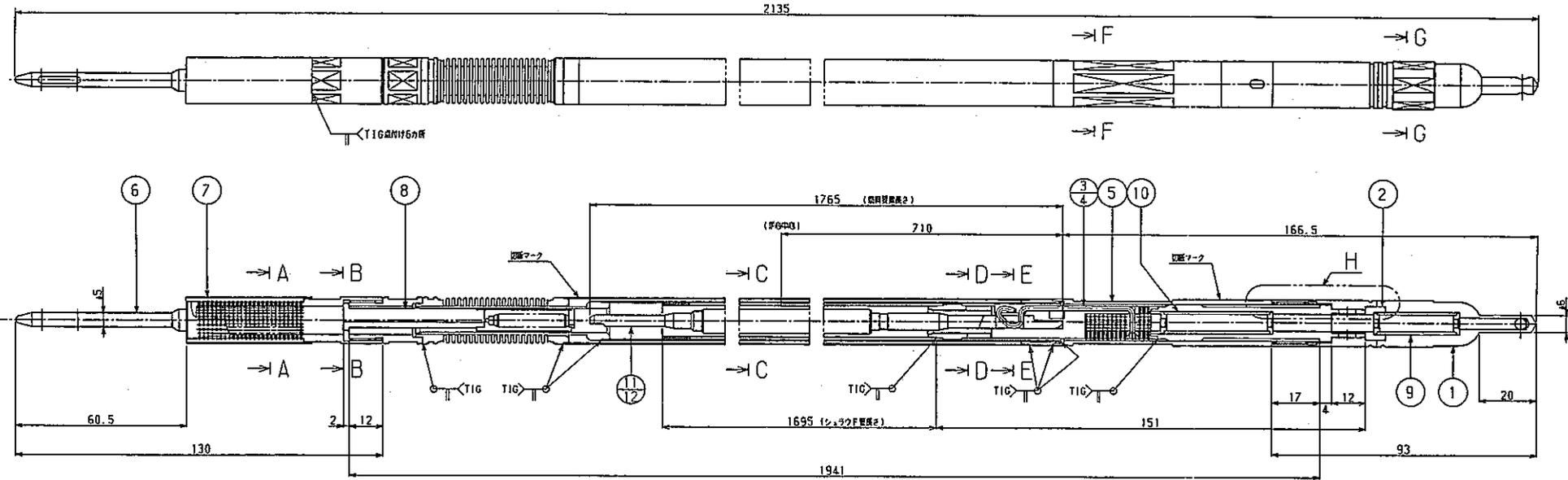


図 3. 4-3 水流動試験体 (ダミーコンパートメント)

ITEM	DESCRIPTION	QTY	MATERIAL	REMARKS
1	流入管	1	SUS316	
2	スリーブ	1	SUS316	
3	シムラフ管組立 (テンプル無し)	1	SUS316	
4	シムラフ管組立 (テンプル有り)	1	SUS316	
5	感熱管組立	1	SUS316	
6	上部ストレータ	1	SUS316	
7	エンクロージャ	1	SUS316	
8	TED感熱管組立	1	SUS316	
9	オリフィス(1)組立	1	SUS316	
10	オリフィス(2)組立	1	SUS316	
11	感熱管調整器 (ワイヤ有り)	1	SUS316	
12	感熱管調整器 (ワイヤ無し)	1	SUS316	



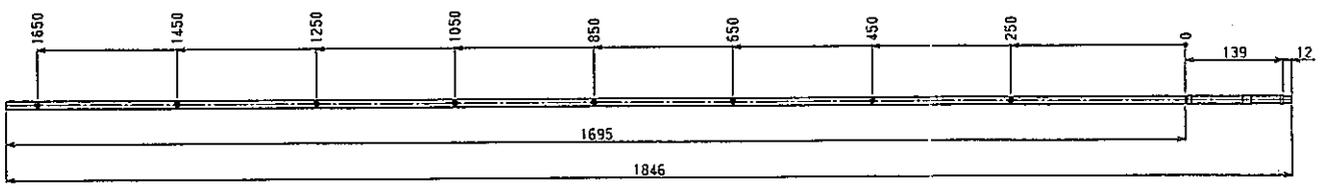
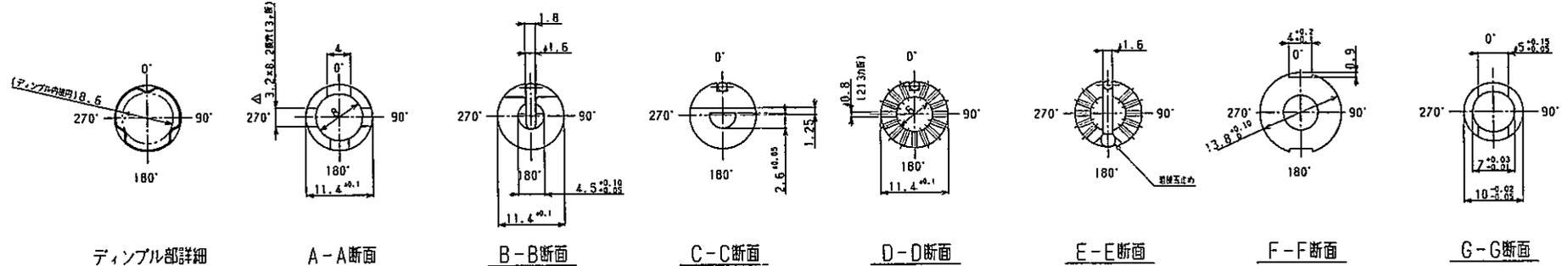
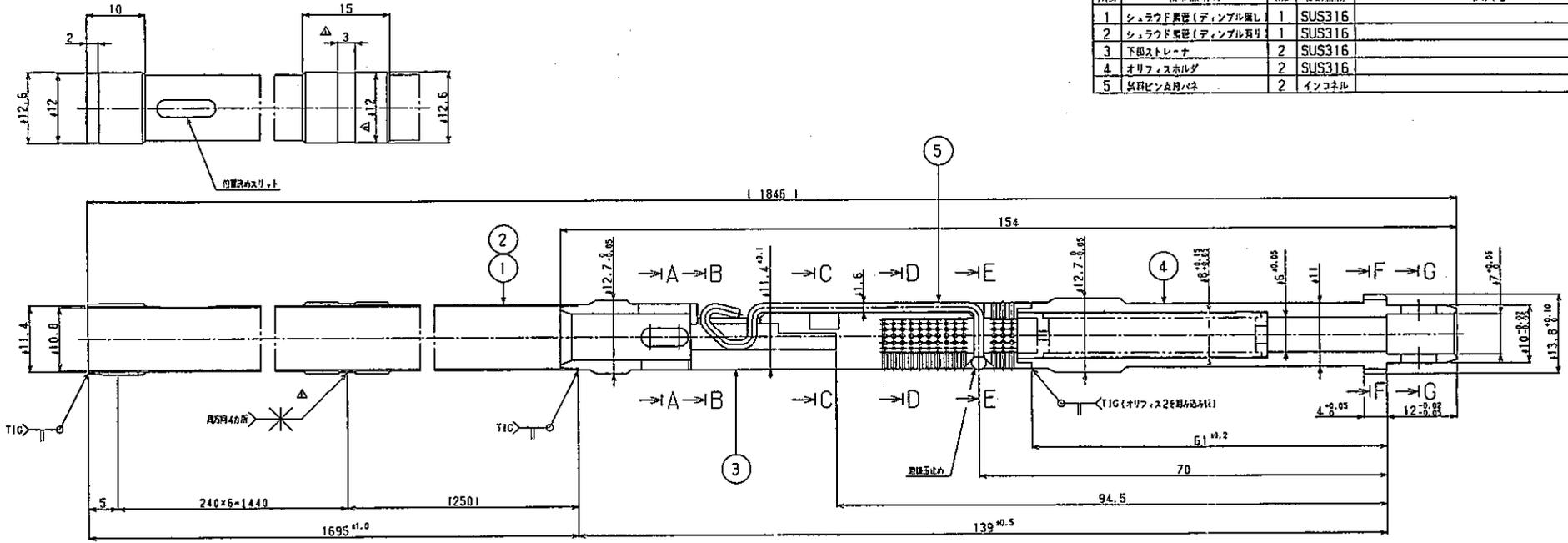
A-A断面 (S=2/1) B-B断面 (S=2/1) C-C断面 (S=2/1) C-C断面 (S=2/1) (テンプル付のシムラフ管取付時) D-D断面 (S=2/1)



E-E断面 (S=2/1) F-F断面 (S=2/1) G-G断面 (S=2/1) H部詳細 (S=2/1)

図 3.4-4 水流動試験体 (δ型コンパートメント)

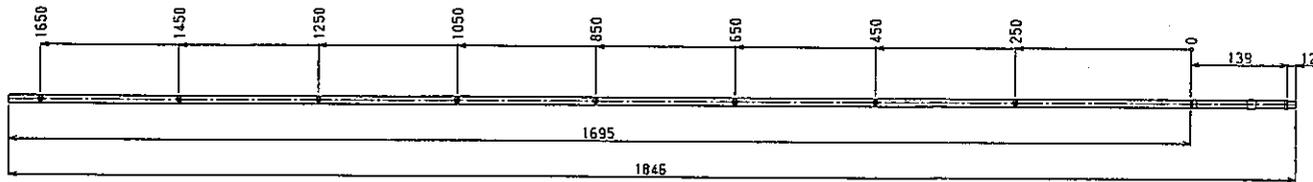
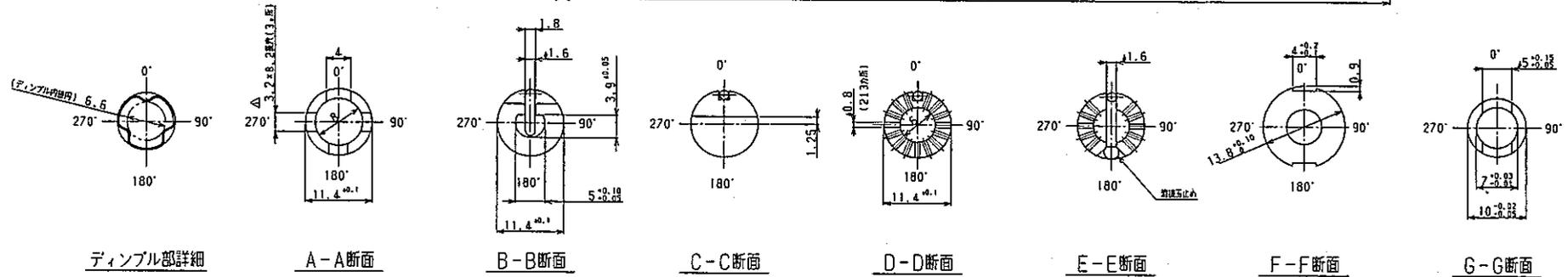
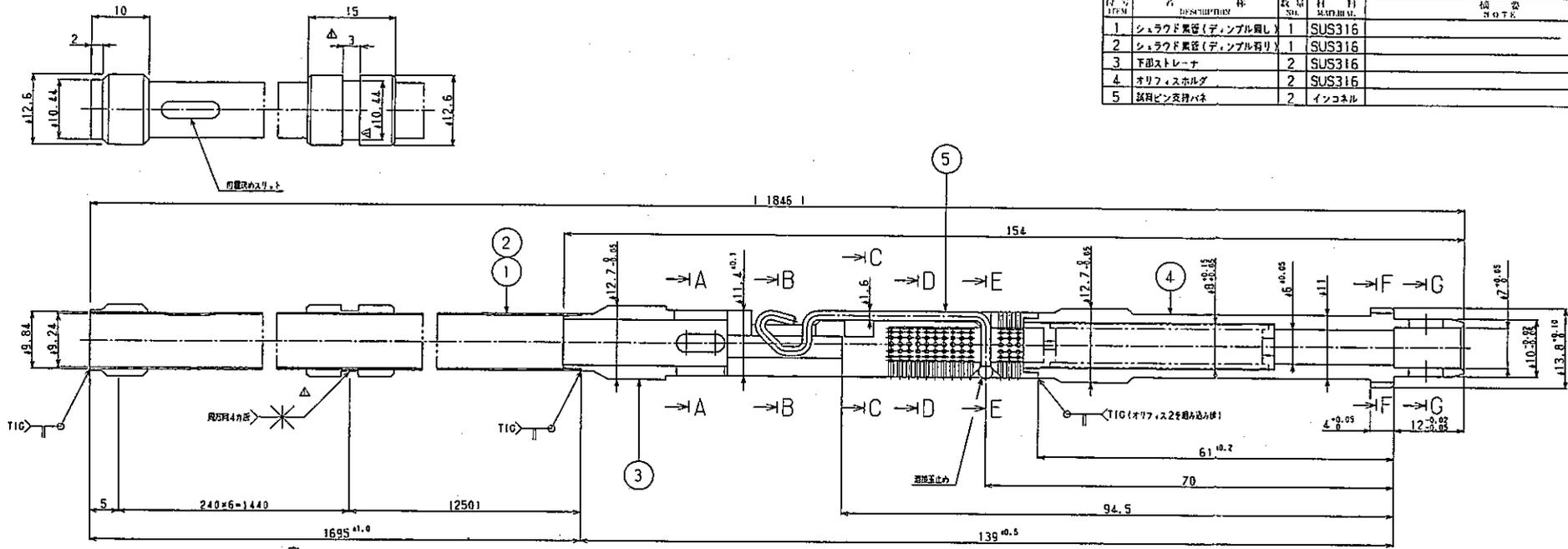
項目	名称	数量	材料	備考
1	シュラウド管 (デンプル無し)	1	SUS316	
2	シュラウド管 (デンプル有り)	1	SUS316	
3	下部ストレーナ	2	SUS316	
4	オリフスホルダ	2	SUS316	
5	燃料ピン支持バネ	2	インコネル	



デンプル設置位置 (S=1/5)

図 3.4-5 水流動試験体 (シュラウド管: 燃料要素径 φ8.5mm 用)

序号 ITEM	名 DESCRIPTION	数量 QTY	材料 MATERIAL	備 REMARK
1	シュラウド管等(ディンプル無し)	1	SUS316	
2	シュラウド管等(ディンプル有り)	1	SUS316	
3	下部ストレーナ	2	SUS316	
4	オリフィスホルダ	2	SUS316	
5	試料ピン支持バネ	2	インコネル	



ディンプル設置位置 (S=1/5)

図 3.4-6 水流動試験体 (シュラウド管 : 燃料要素径 $\phi 6.5$ mm 用)

符号 ITEM	名 称 DESCRIPTION	数量 NO.	材 料 MATERIAL	摘 要 NOTE
1	上部端栓 (φ8.5-1)	1	SUS316	
2	下部端栓 (φ8.5-1)	1	SUS316	
3	模擬被覆管 (φ8.5)	1	SUS316	
4	ラッピングワイヤ	1	SUS316	

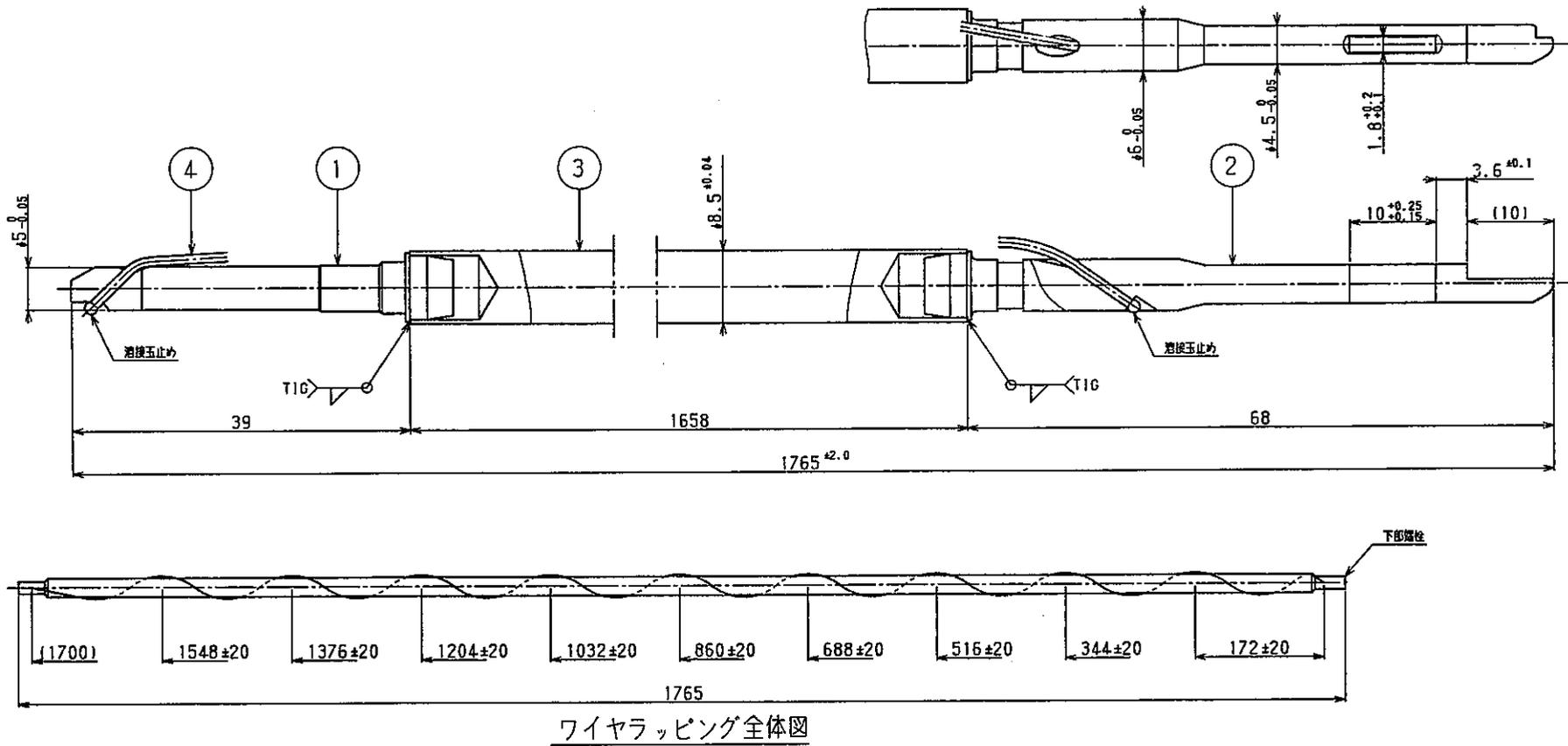


図 3.4-7 水流動試験体 (模擬燃料要素 外径: φ8.5mm)

符号 ITEM	名 DESCRIPTION	数量 NO.	材 料 MATERIAL.	摘 要 NOTE
1	上部磁栓 (φ6.5-1)	1	SUS316	
2	下部磁栓 (φ6.5-1)	1	SUS316	
3	模擬燃焼管 (φ6.5)	1	SUS316	
4	ラッピングワイヤ	1	SUS316	

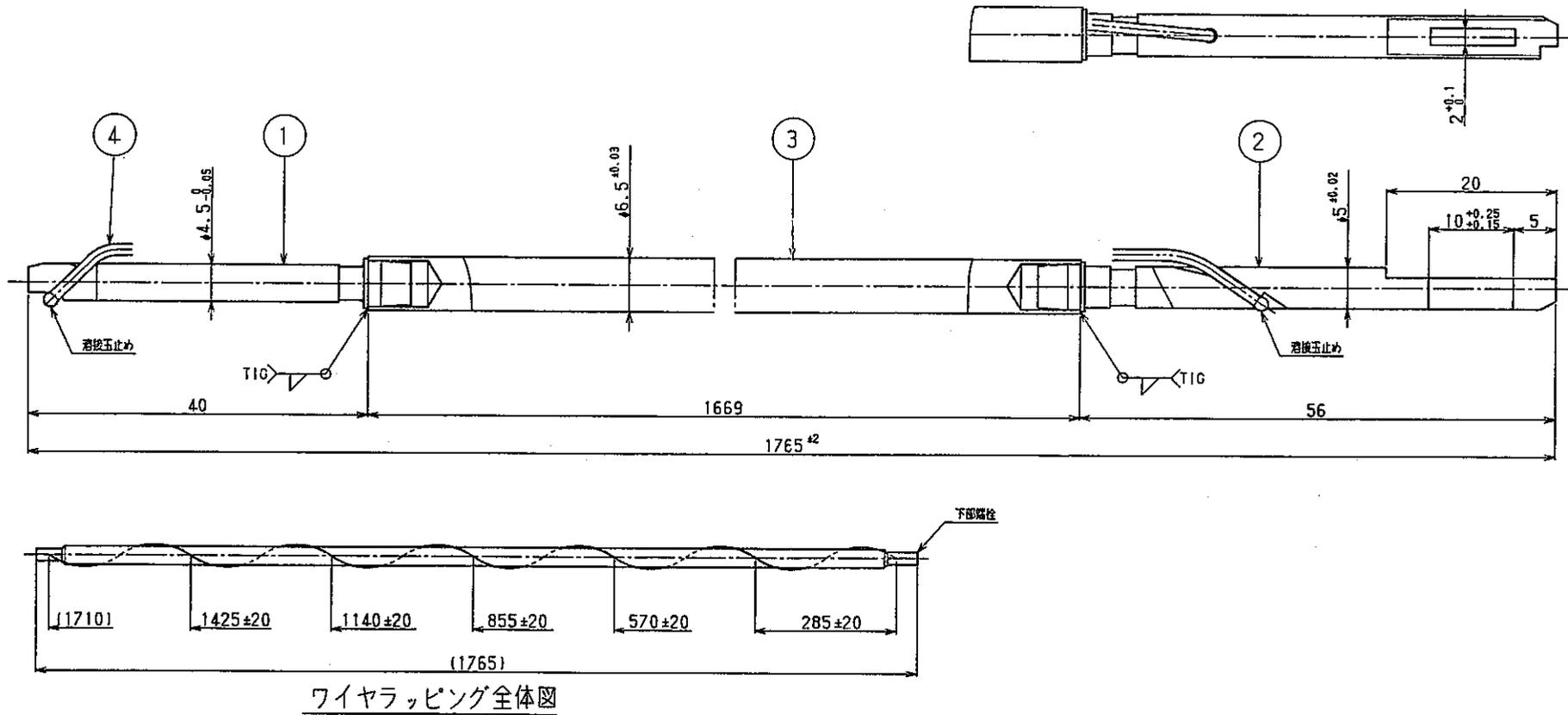


図 3.4-8 水流動試験体 (模擬燃料要素 外径: φ6.5mm)

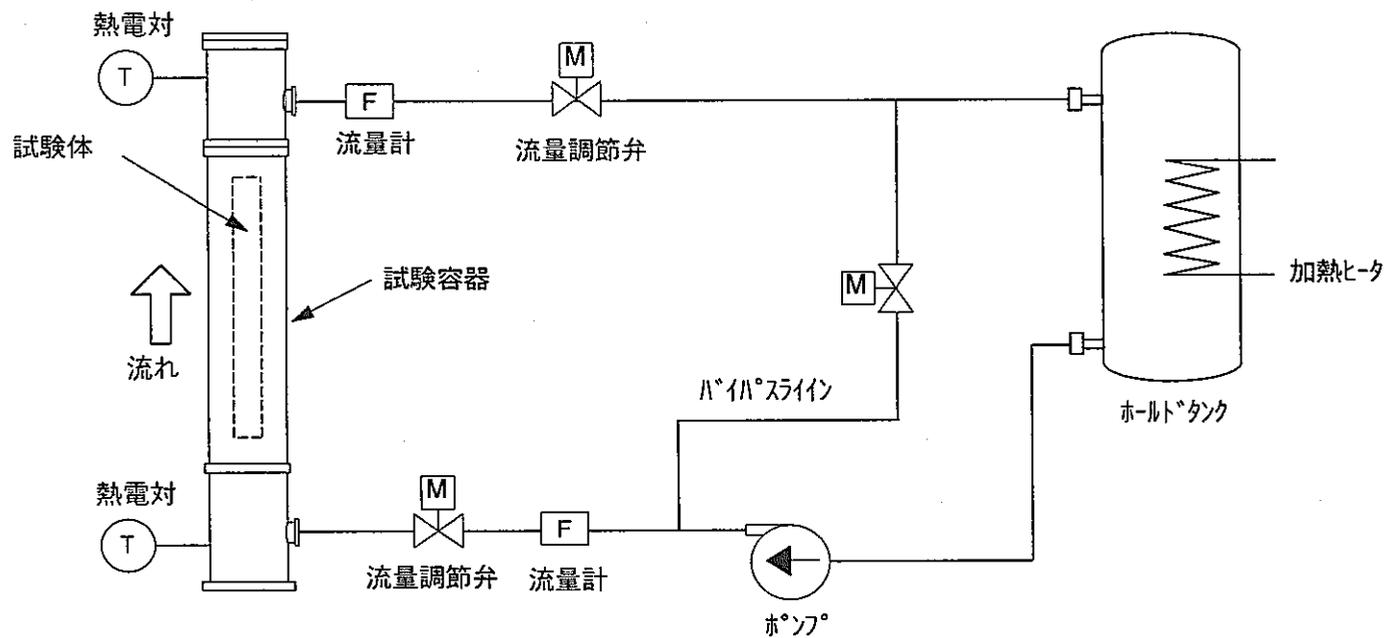


図 3.4-9 試験装置の系統図

項目 ITEM	名 DESCRIPTION	数量 QTY	単位 UNIT	材料 MATERIAL	備 注 NOTE
1	上流管	1		SUS304	SKA64181-3102
2	オリフィスホールド	1		SUS304	-3103
3	下流管	1		SUS304	-3104
4	Oリング	2		ニトリルゴム	PR
5	パッキン	2		キョフレン	OD7.5×106×1t
6	六角ナット	6		SUS304	H6×30L
7	六角ナット	6		SUS304	H6
8	オリフィス(1)用			SUS316L	
9	オリフィス(2)用			SUS316L	

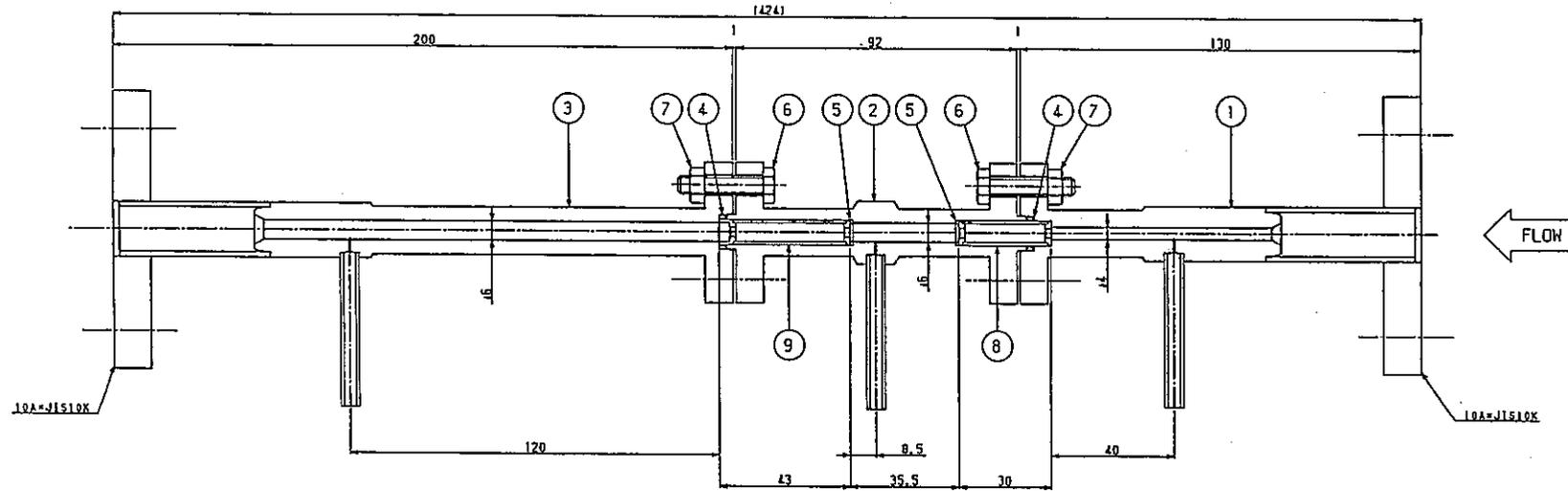


図 3.4-10 オリフィス圧力損失測定用試験容器

順 位	名 称	材 質	材 質 記号	備 考
1	下 部 管	SUS304		SKA6181-3105
2	中 部 管	SUS304		-3107
3	上 部 管	SUS304		-3108
4	下 部 管	SUS304		-3109
5	上 部 管	SUS304		-3110
6	バルブ(1)	ステンレス		-4111
7	O リング	ニッケル	P-6	
8	O リング	ニッケル	P-16	
9	バルブ(2)	ステン	20A-JIS10K 標準 1-2	
10	圧力計(1)	SUS304	N10=201	
11	圧力計(2)	SUS304	N12=601	
12	圧力計(3)	SUS304	N12	

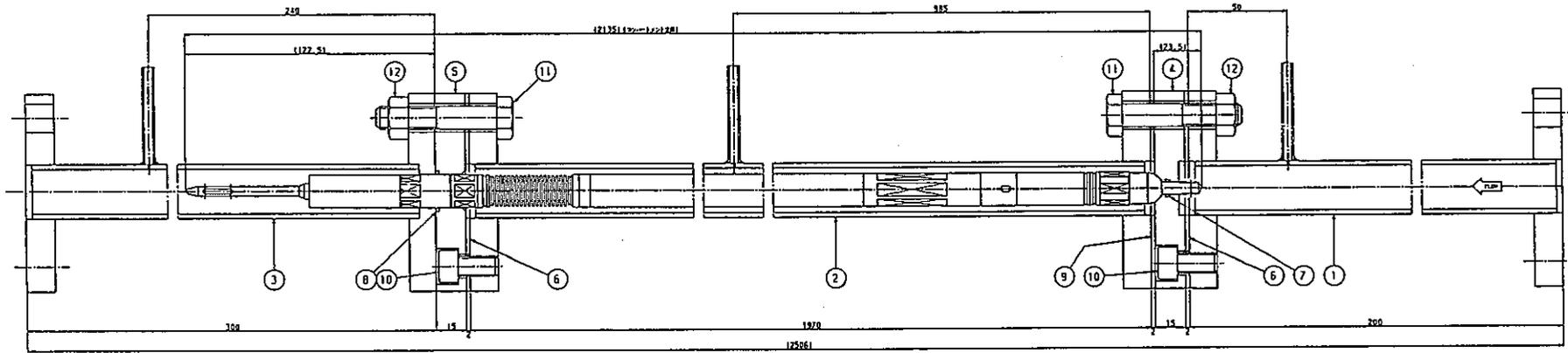


図 3.4-11 コンパートメント圧力損失測定用試験容器

№	品名	材質	数量	備註
1	ボルト	SUS304	1	
2	ナット	SUS304	1	
3	ワッシャー	SUS304	2	
4	圧入ピン	SUS304	2	H1=301 AA
5	圧入ピン	SUS304	2	H1=251
6	圧入ピン	SUS304	3	H2=221
7	圧入ピン	SUS304	3	H2=220
8	圧入ピン	SUS304	3	H1=215
9	圧入ピン	SUS304	2	H1=215
10	ワッシャー	SUS304	6	H1=215
11	ボルト	SUS304	1	H1=215

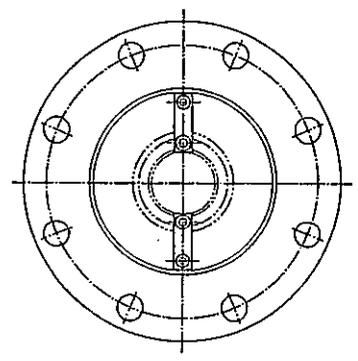
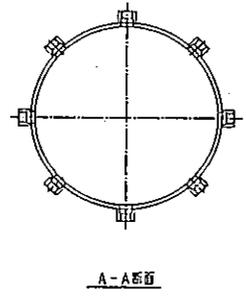
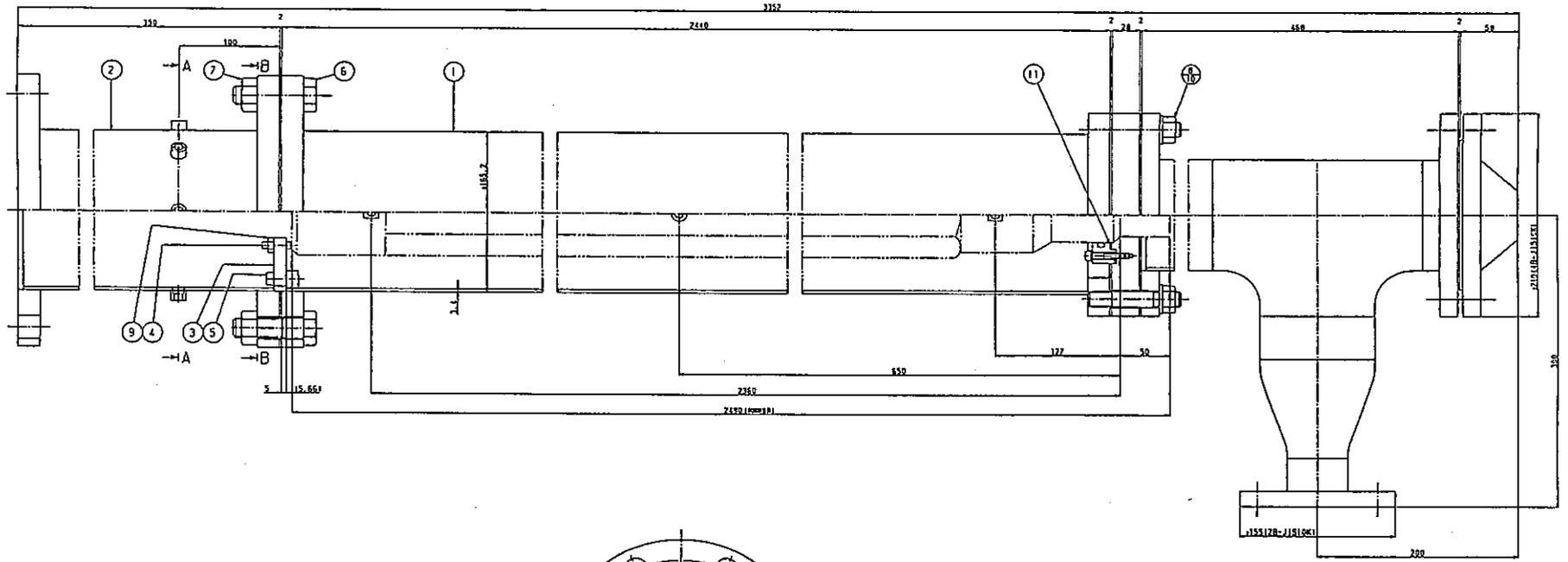


図 3.4-12 集合体圧力損失測定用試験容器

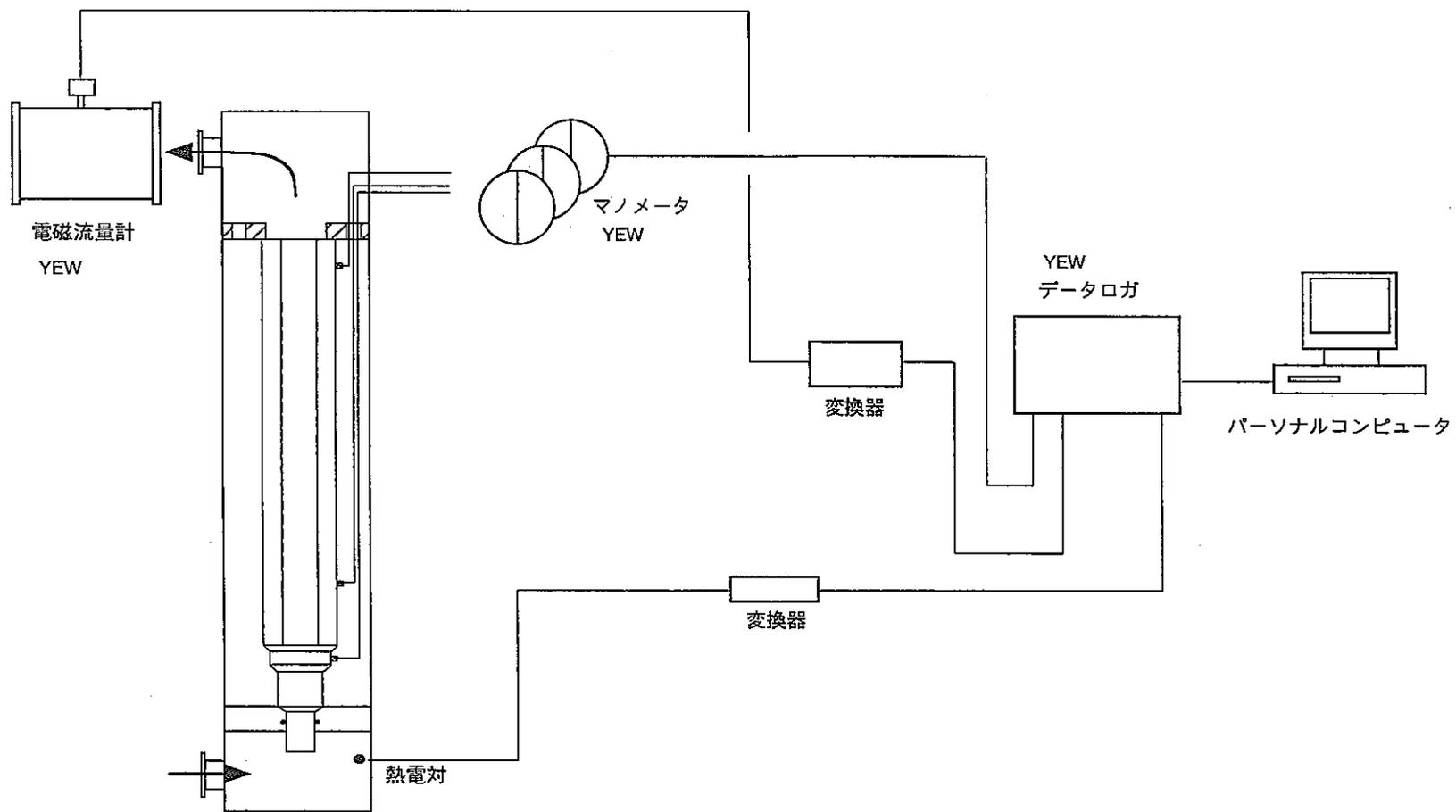


図 3.4-13 水流动試験の測定系統図

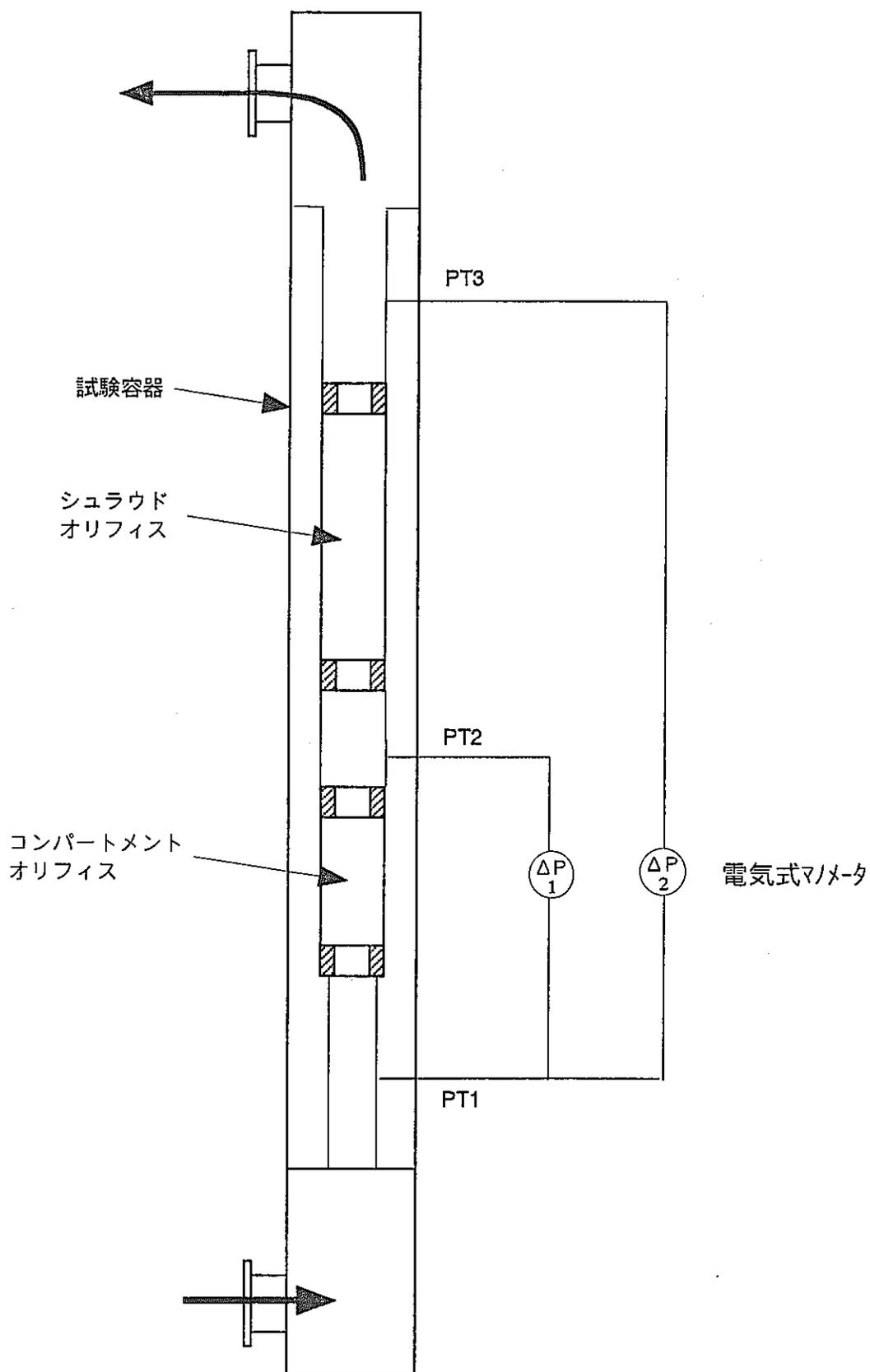


図 3. 4-14 圧力損失測定位置 (オリフィス圧力損失測定試験)

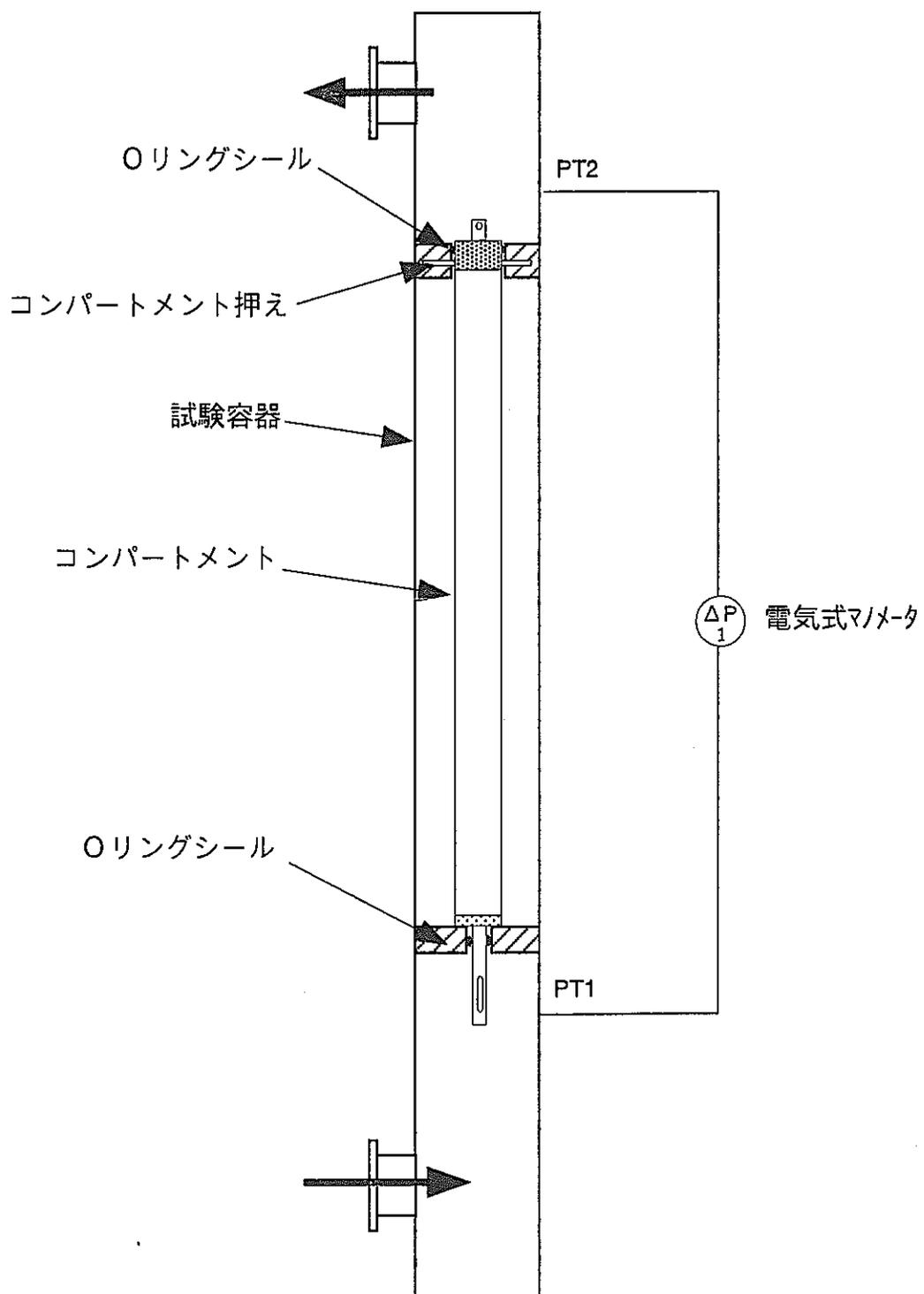
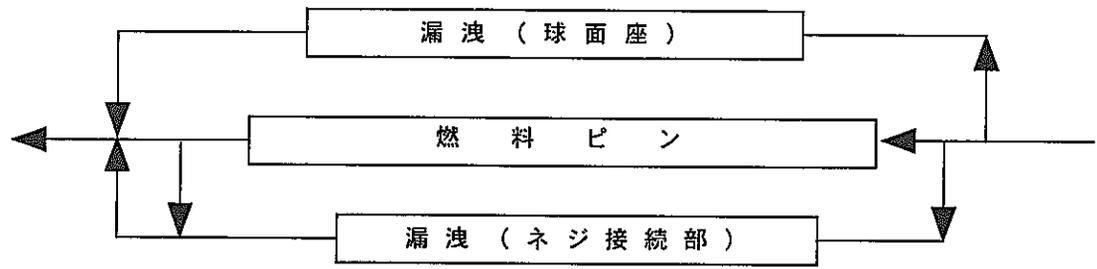
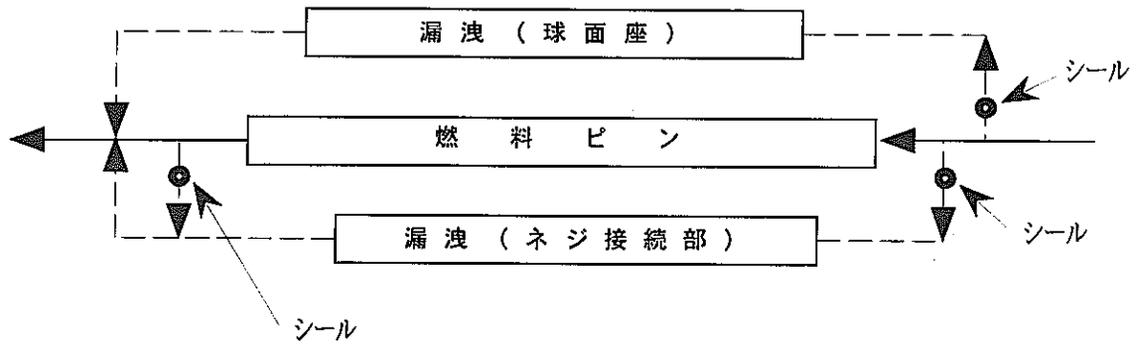


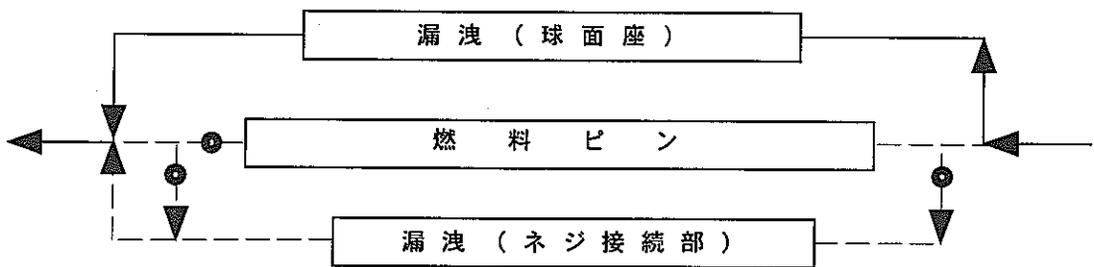
図 3.4-15 圧力損失測定位置 (コンパートメント圧力損失測定試験)



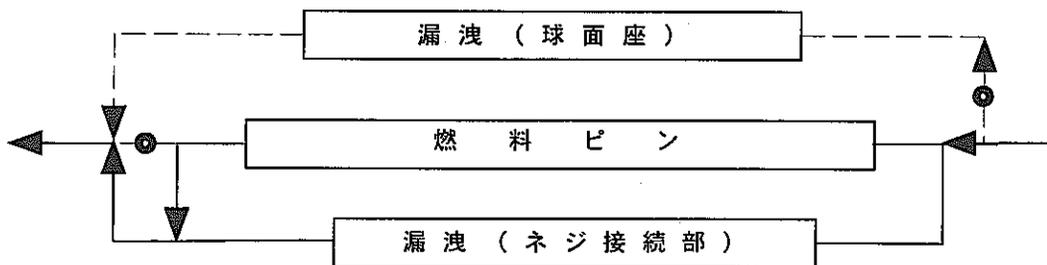
コンパートメントの流路



燃料ピンの流動抵抗測定時の流路



球面座からの漏洩流量測定時の流路



ネジ部からの漏洩流量測定時の流路

図3.4-16 流路接続図 (コンパートメント漏洩流量測定試験)

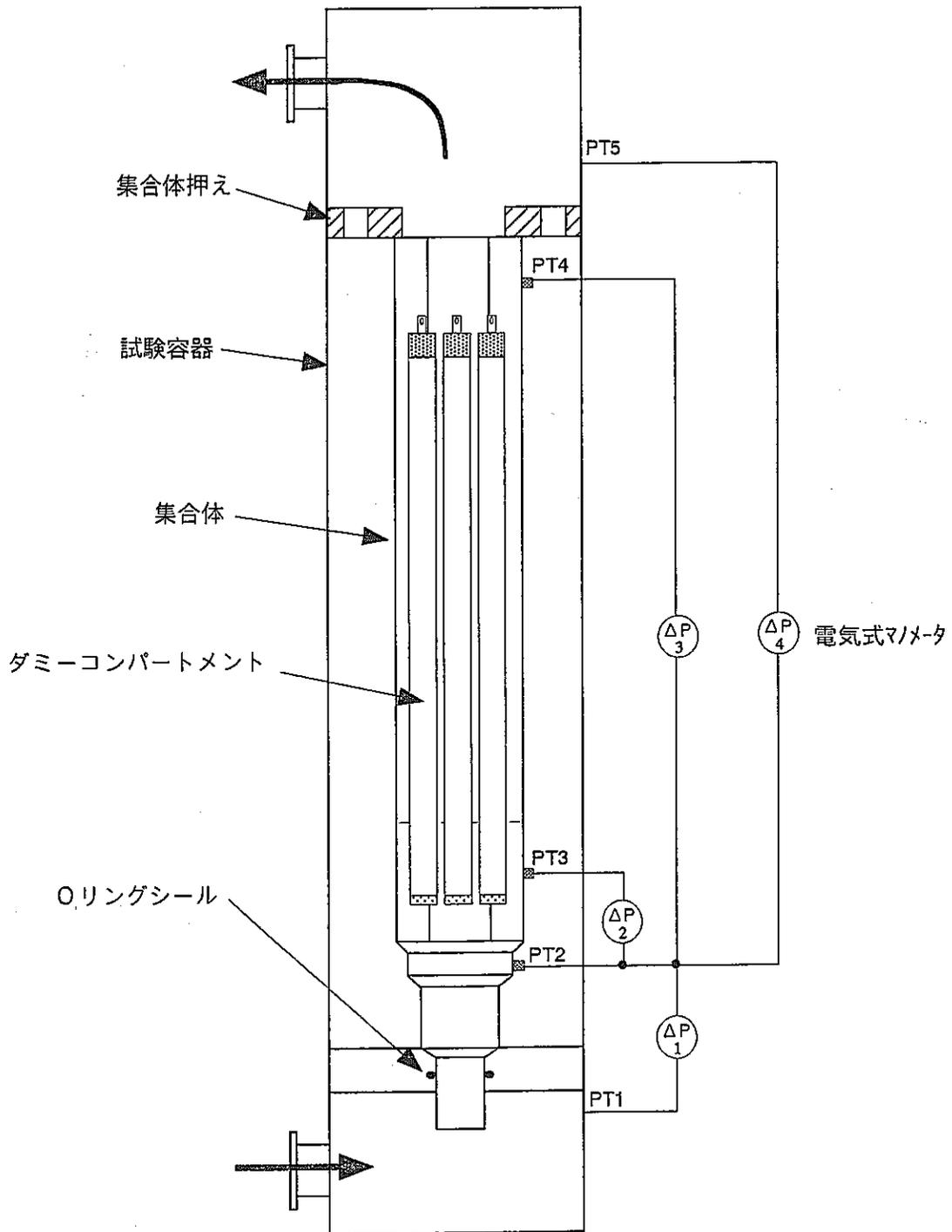


図 3.4-17 圧力損失測定位置 (集合体圧力損失測定試験)

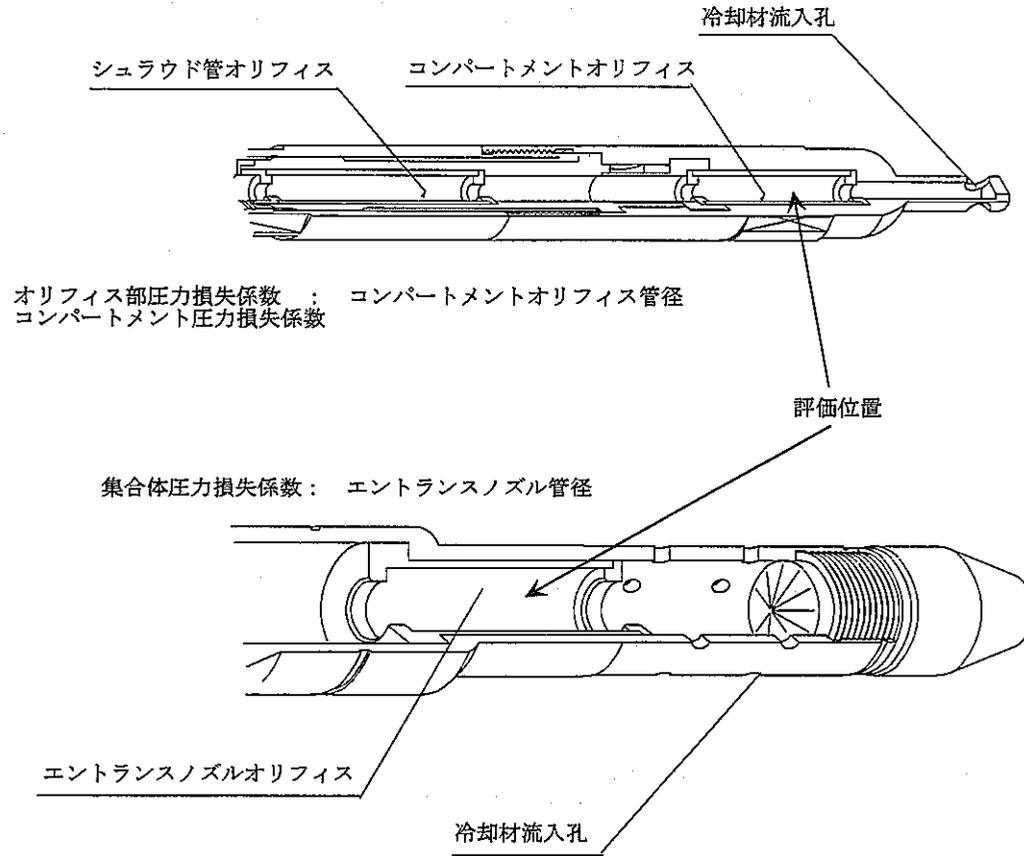


図3.4-18 圧力損失係数の評価位置

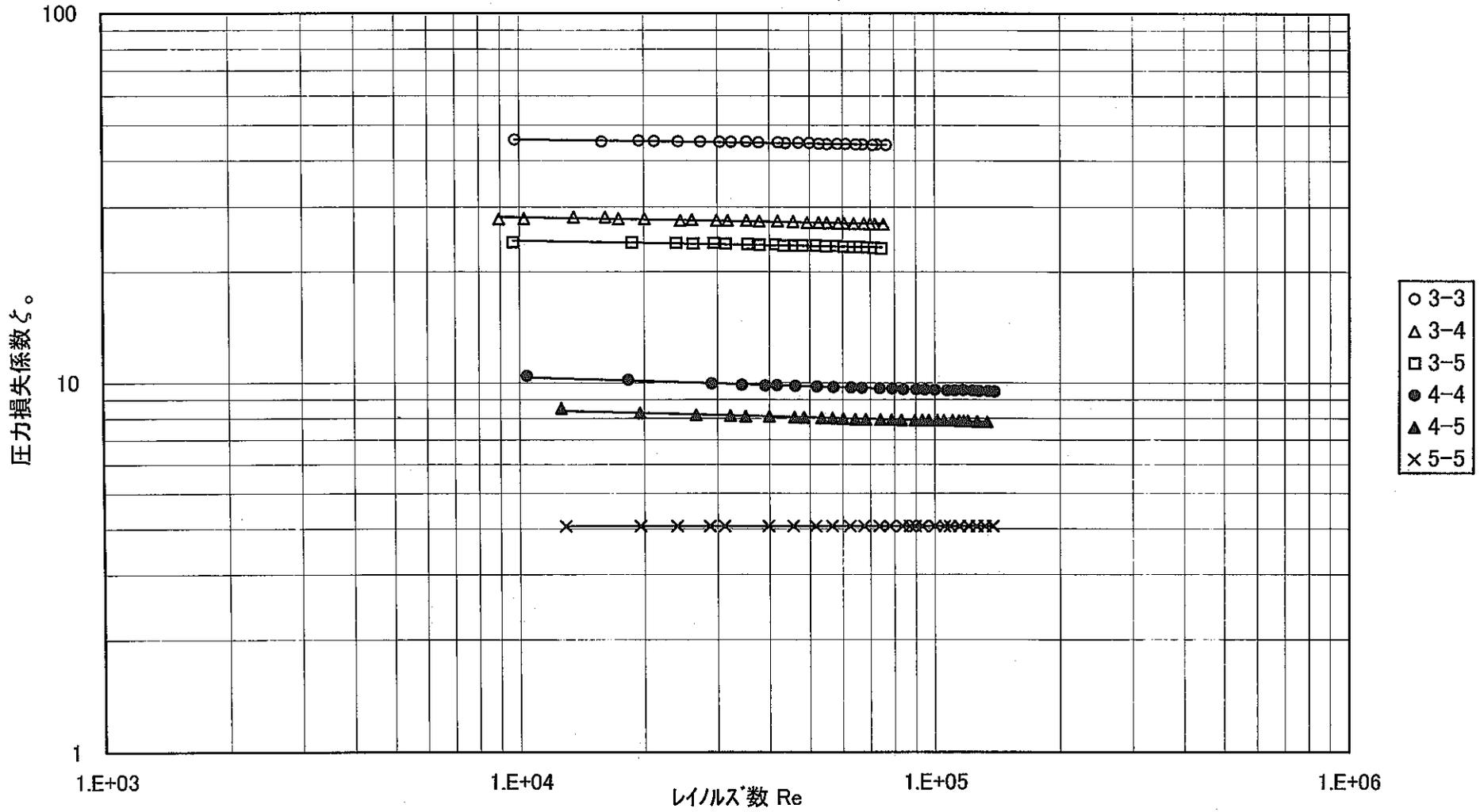


図3. 4-19 オリフィス圧力損失測定試験結果(1) (測定位置 ; PT1-3, 評価位置 ; オリフィス管内径 ϕ 6mm)

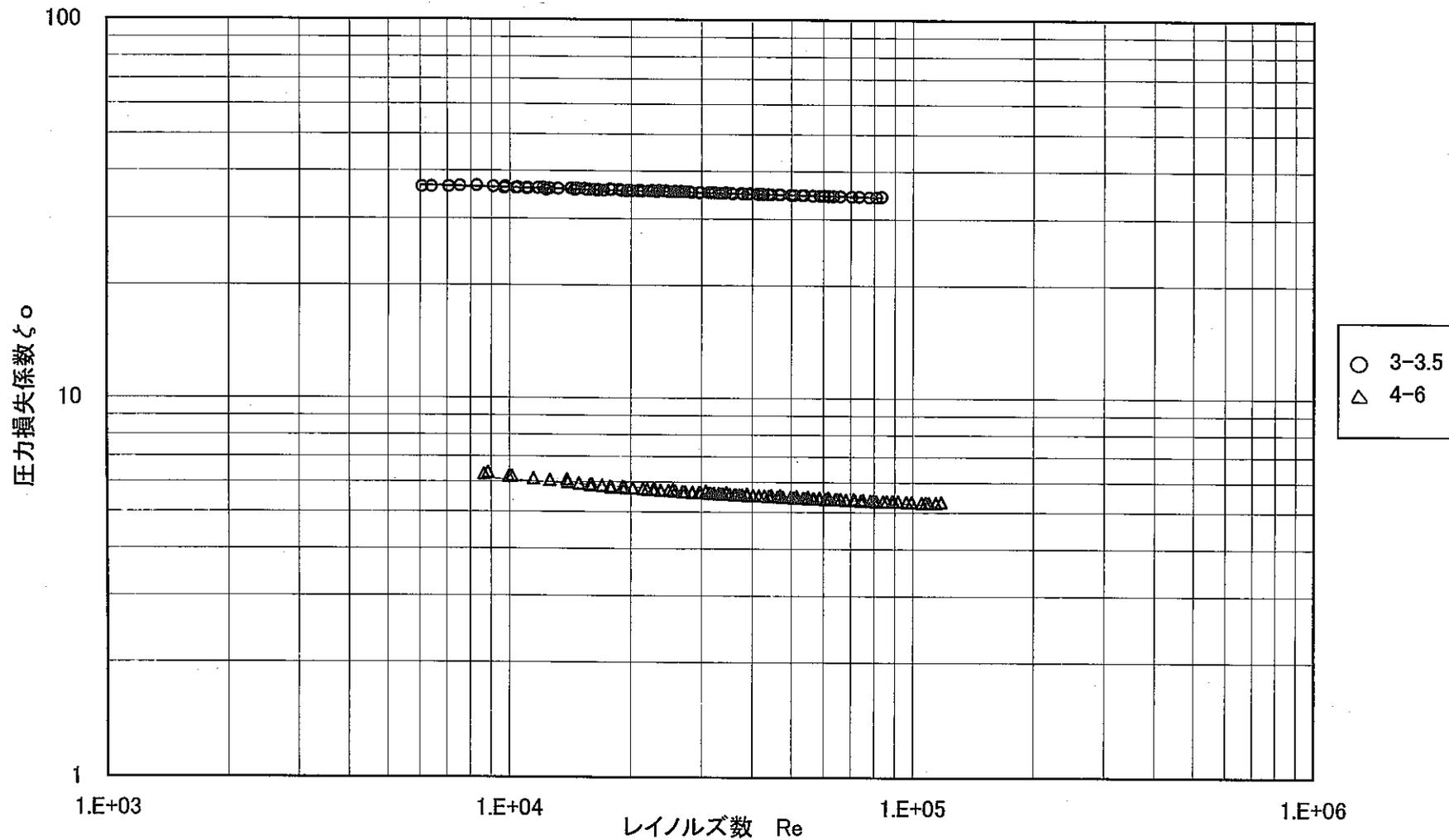


図3. 4-20 析アス圧力損失測定試験結果(2) (測定位置; PT1-3, 評価位置; 析アス管内径 ϕ 6mm)

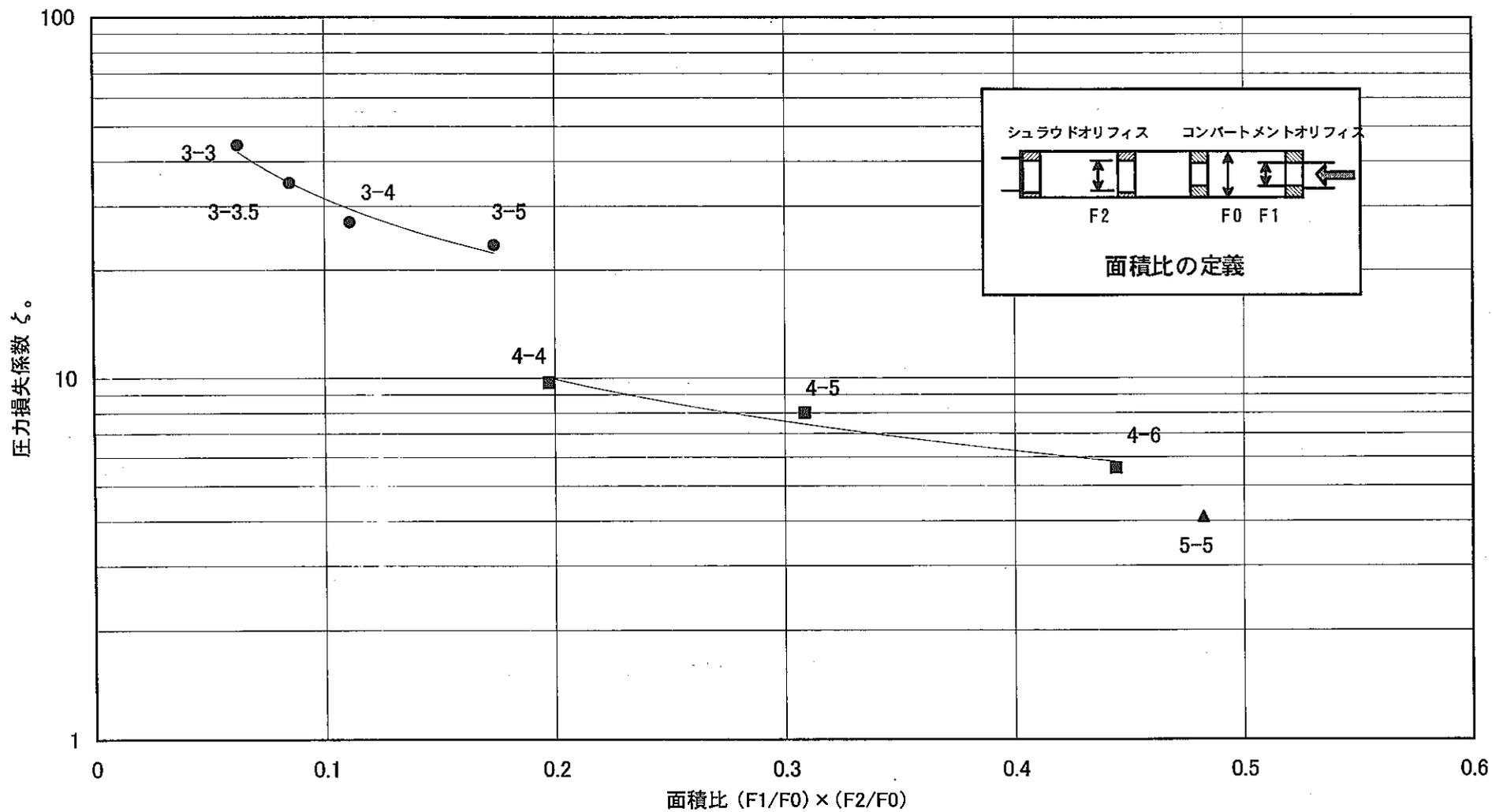


図3.4-21

各オリフィスの性能比較

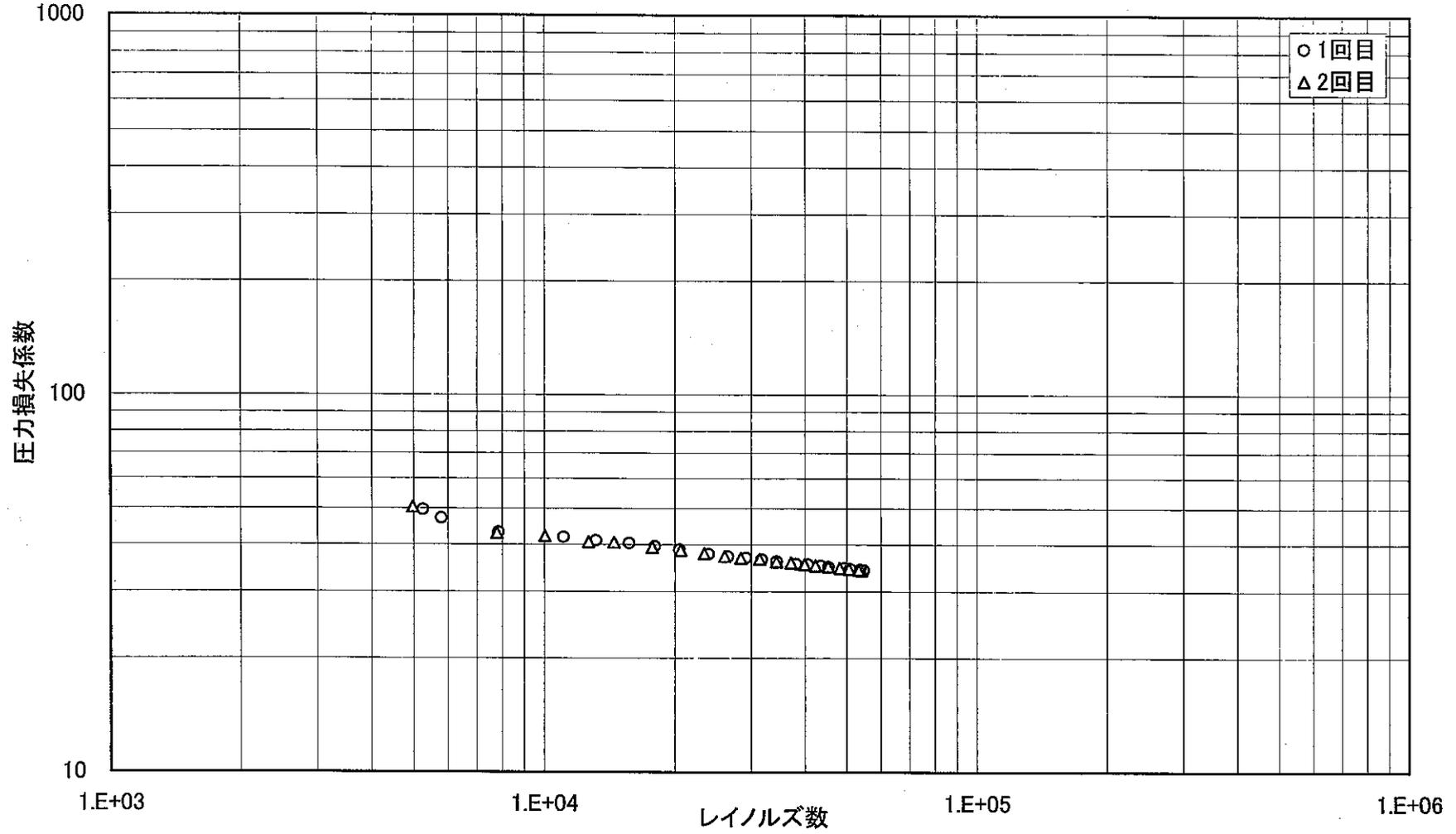


図 3.4-22 再現性確認試験結果 (1) 被覆管径φ6.5mm, シュラウド管型, 試験温度; 85℃

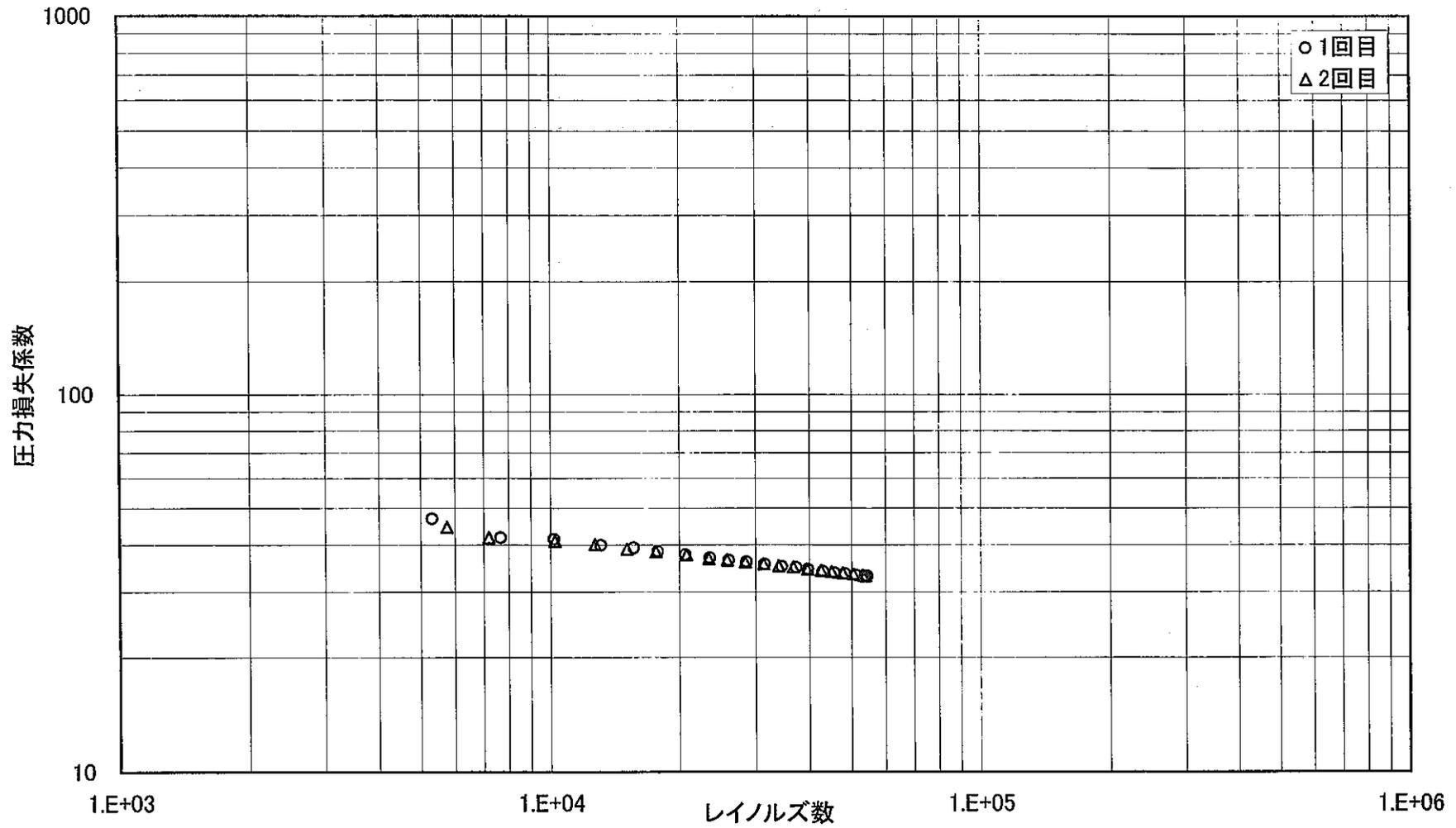


図 3.4-23 再現性確認試験結果 (2) 被覆管径; $\phi 6.5\text{mm}$; ワイヤメッシュ型; 試験温度; 85°C

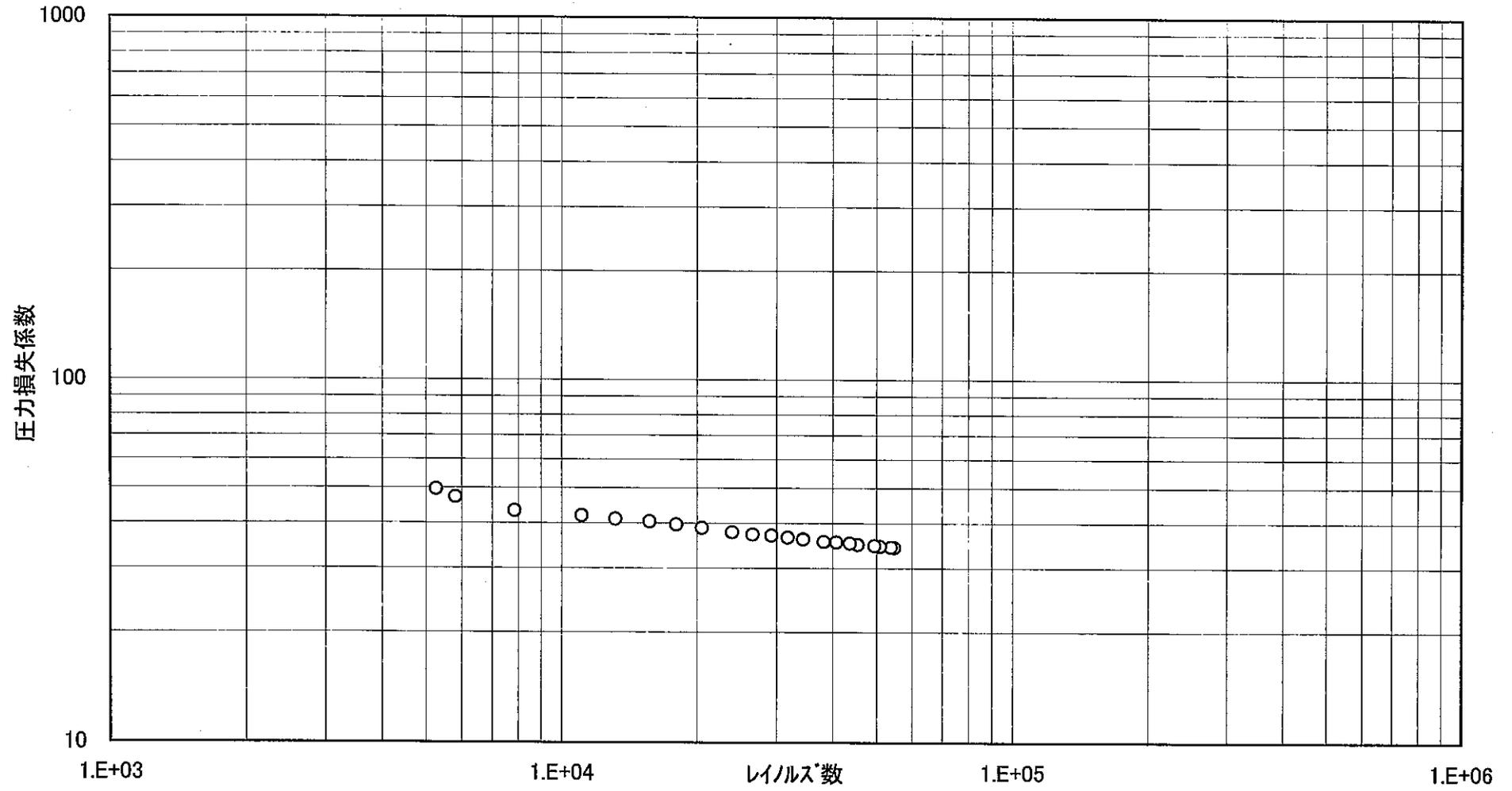


図 3.4-24 コンパ-トメント圧力損失測定試験結果(1) 被覆管径; φ6.5mm, シュラウド管型, 試験温度; 85℃

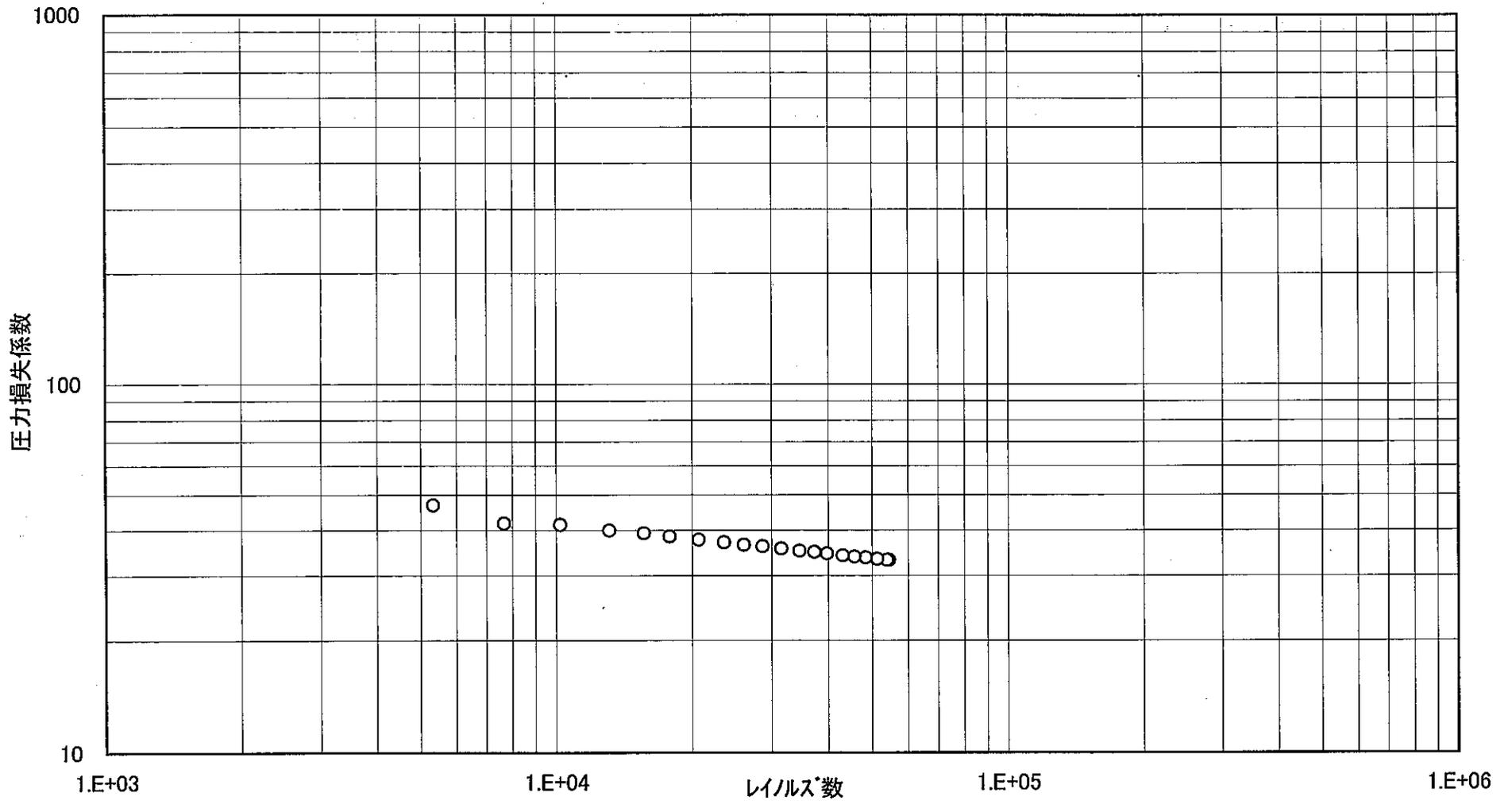


図 3.4-25 コンパクトメント圧力損失測定試験結果(2) 被覆管径; φ6.5mm, ワイヤメッシュ型, 試験温度; 85℃

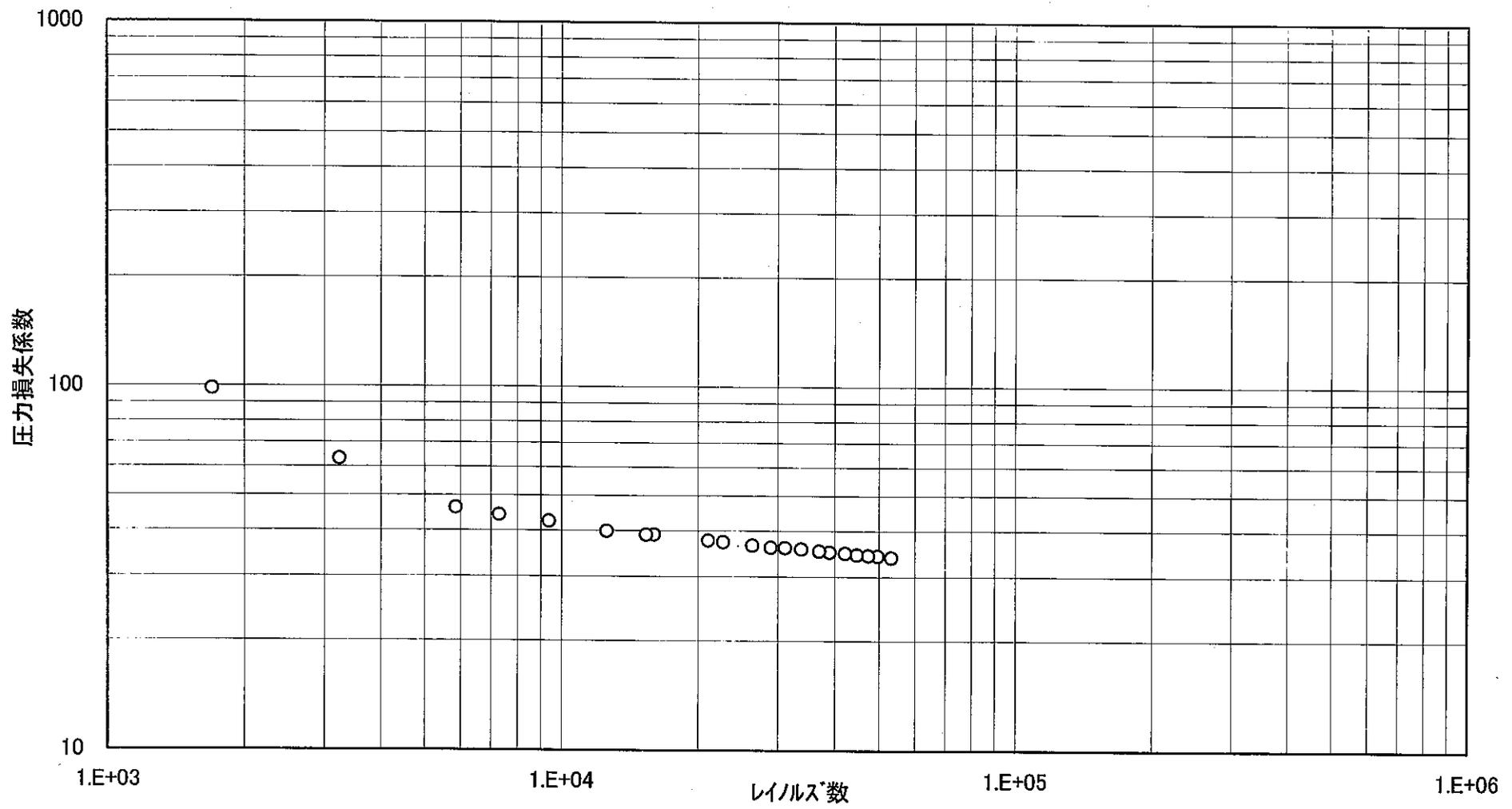


図 3.4-26 コンパ-トメント圧力損失測定試験結果(3) 被覆管径 ; φ8.5mm, シュラウド管型, 試験温度 ; 85℃

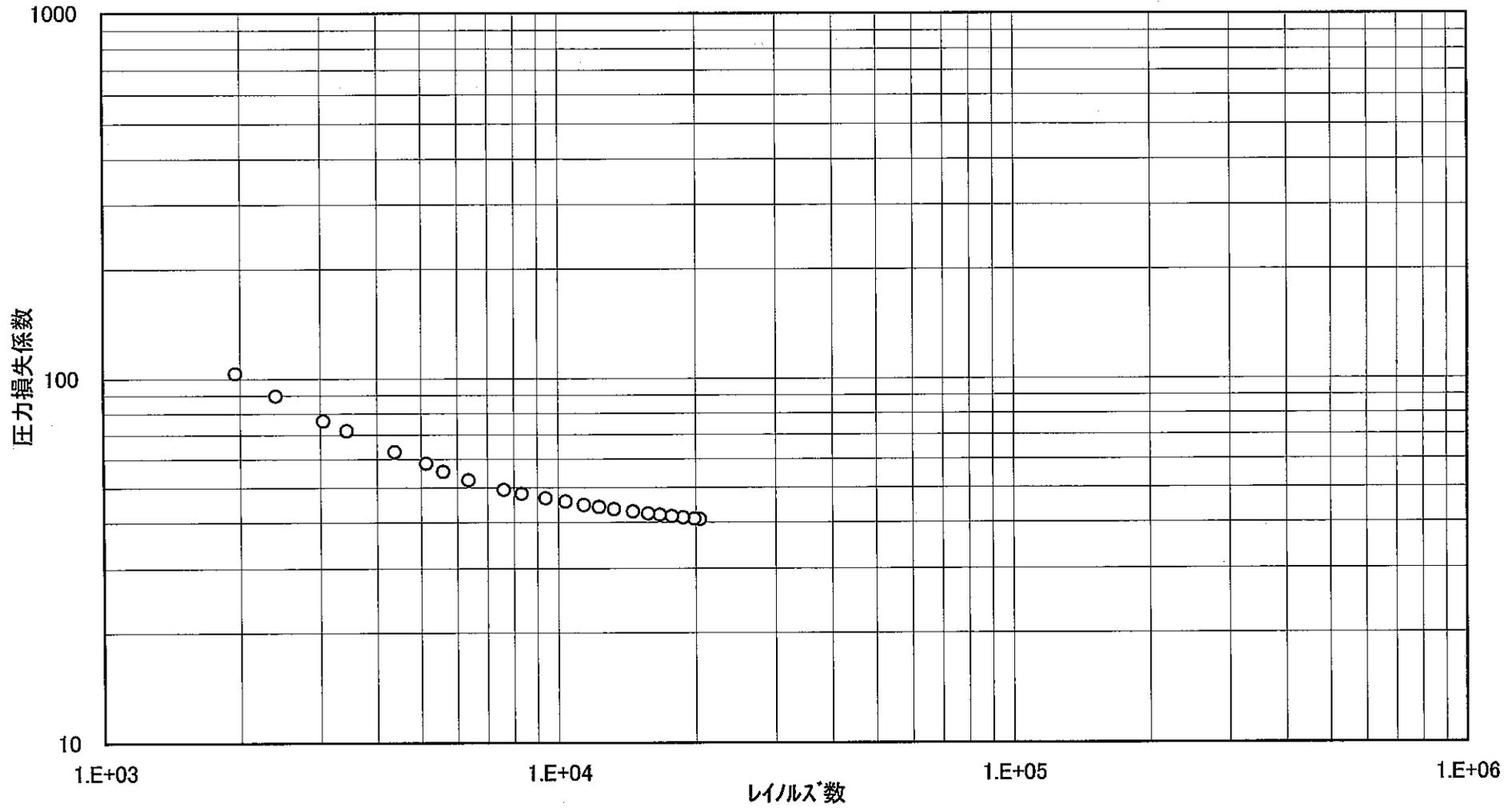


図 3.4-27 コパ-トント圧力損失測定試験結果(4) 被覆管径；φ8.5mm, ワイヤス[°]-サ型, 試験温度；20℃

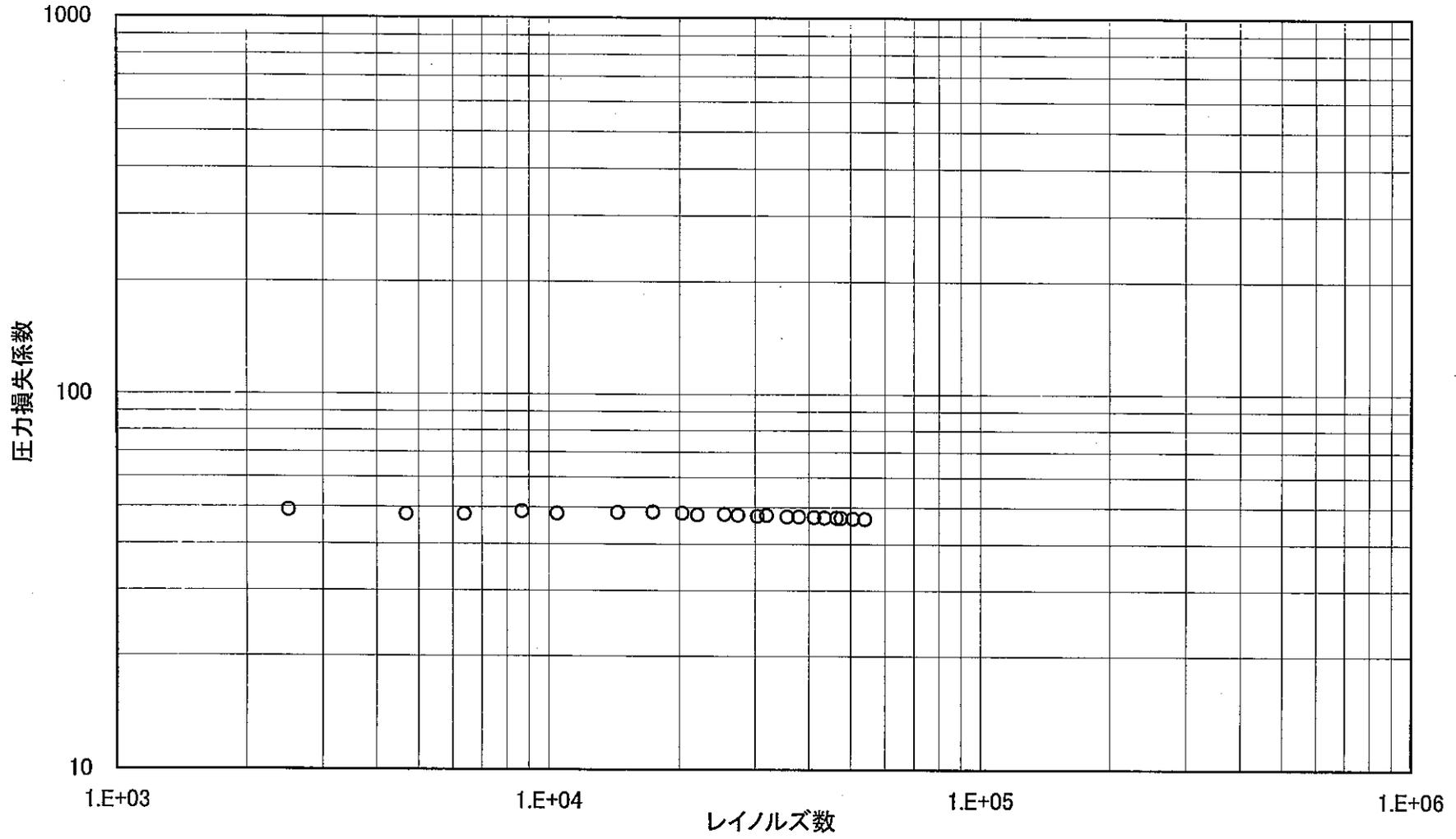


図 3.4-28 コンパ-トメント圧力損失測定試験結果(5) ダミ-コンパ-トメント, 試験温度; 85°C

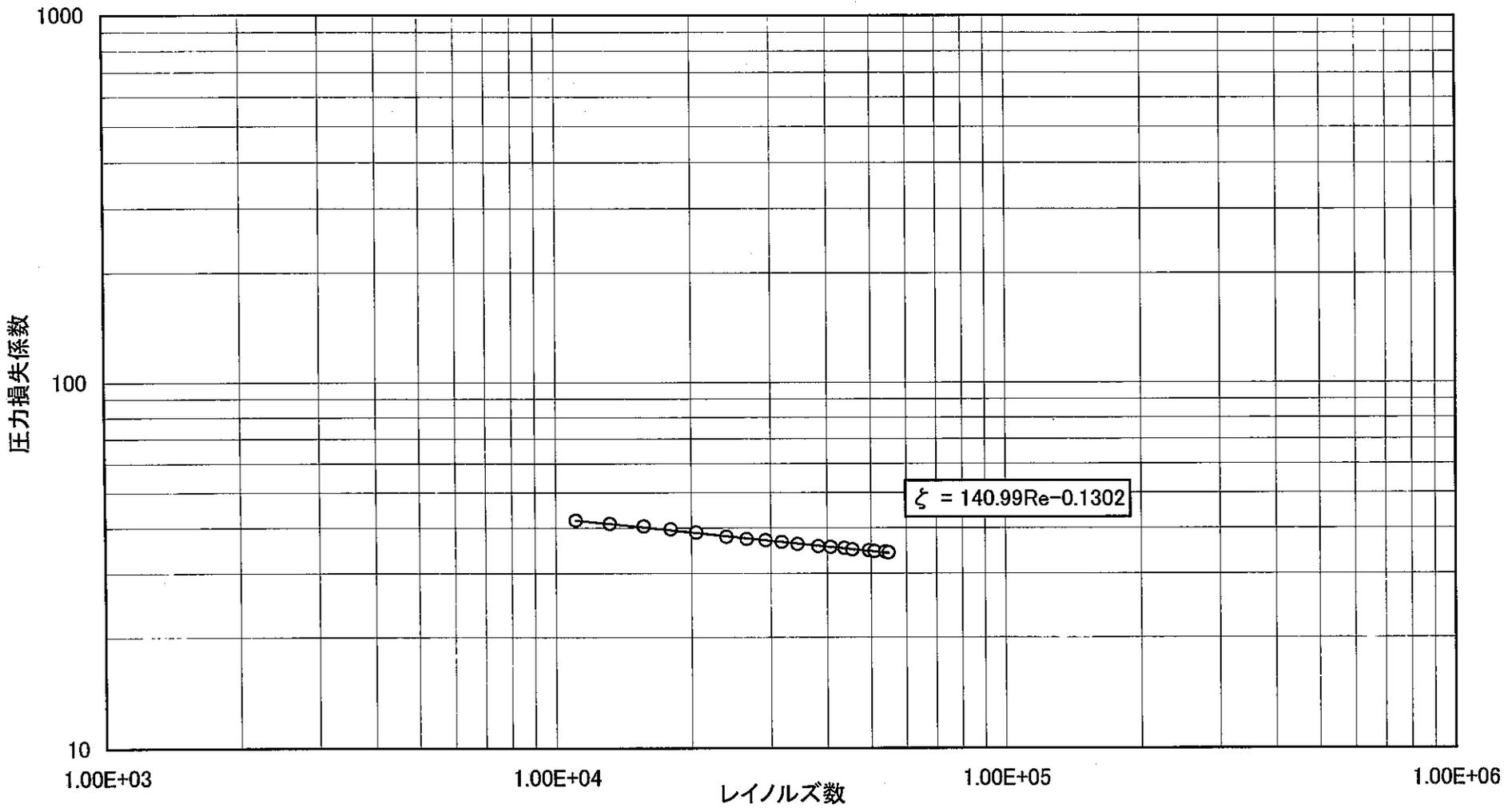


図3. 4-29 コンパートメント圧力損失係数実験式(1) (被覆管径; φ6. 5mm, シュラウド管型, 試験温度; 85℃)

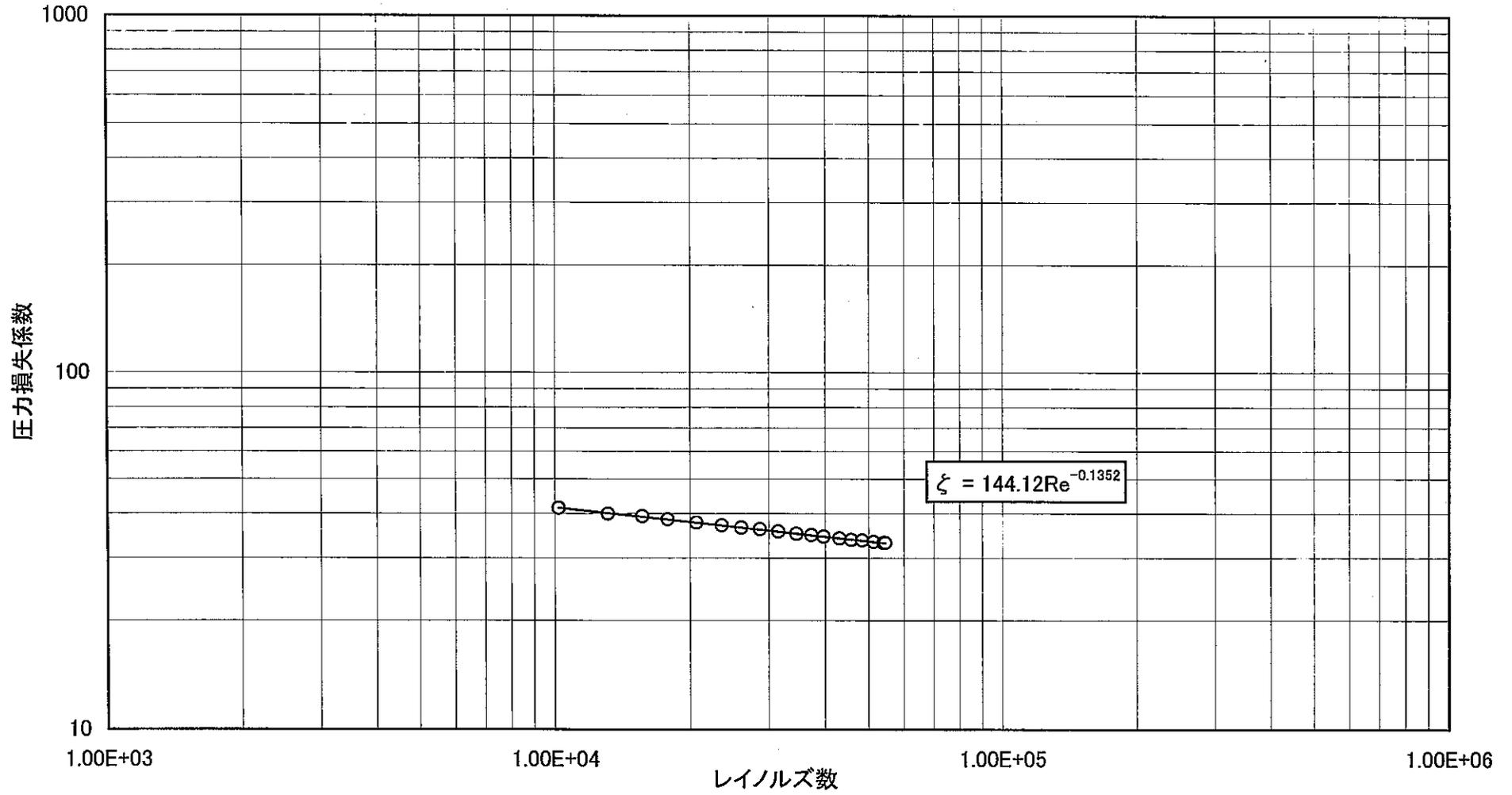


図3.4-30 コンパートメント圧力損失係数実験式(2) (被覆管径; φ6.5mm, ワイヤスP-サ型, 試験温度; 85℃)

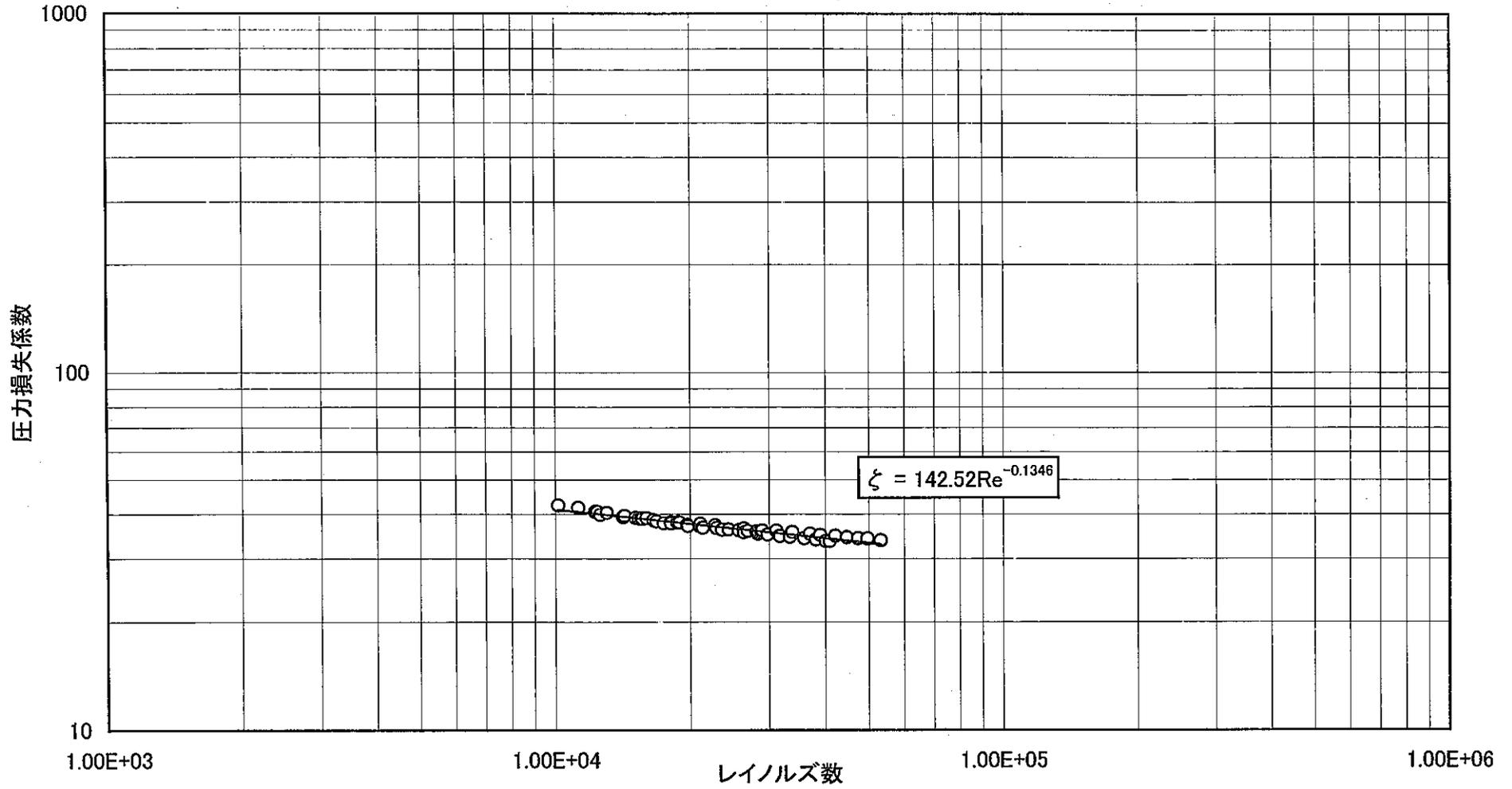


図3.4-31 コンパートメント圧力損失係数実験式(3) (被覆管径; φ8.5mm, シュラウド管型, 試験温度; 20-85℃)

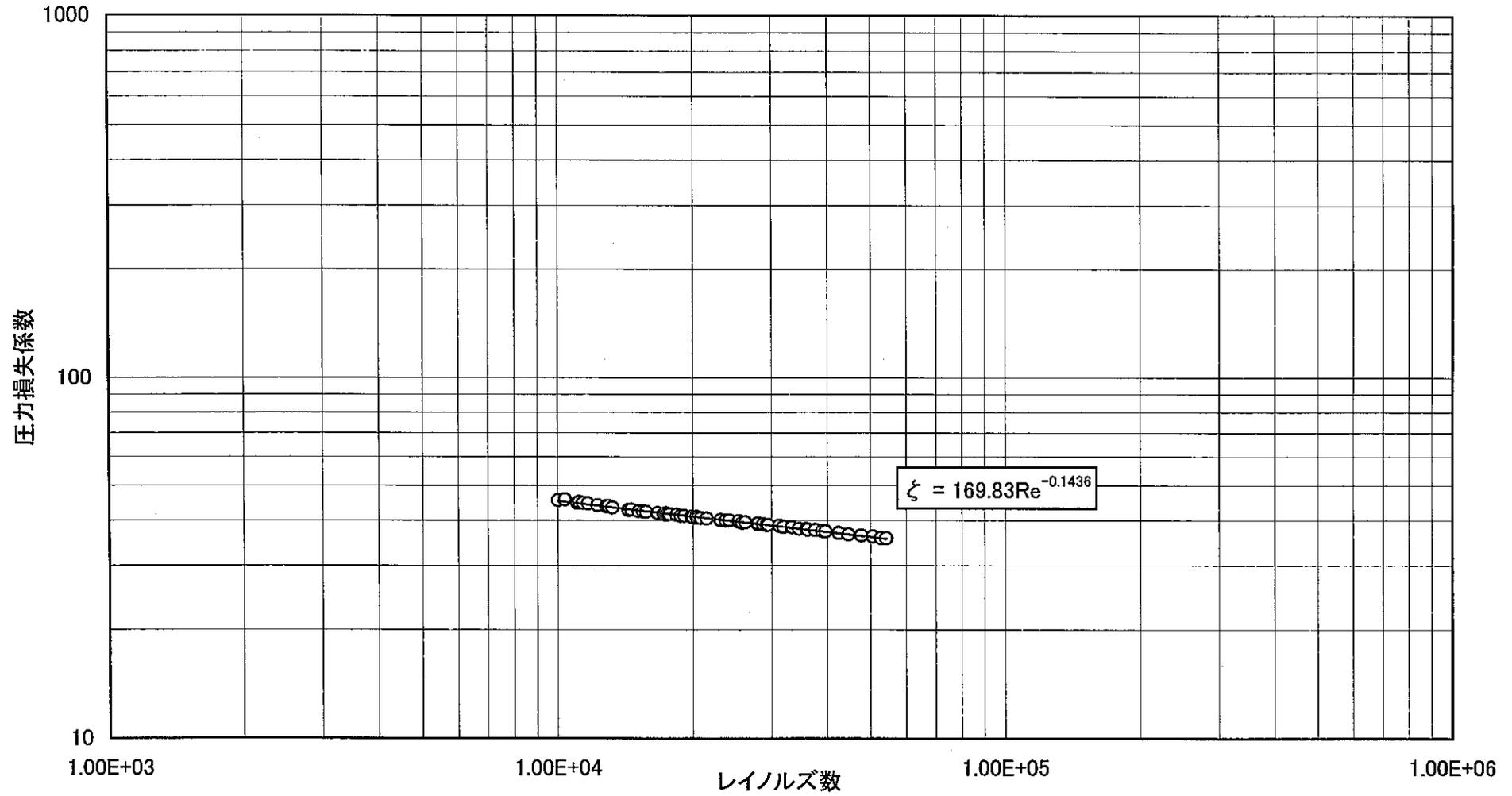


図3.4-32 コンパートメント圧力損失係数実験式(4) (被覆管径; φ8.5mm, ワイヤハ'-サ型, 試験温度; 20-85℃)

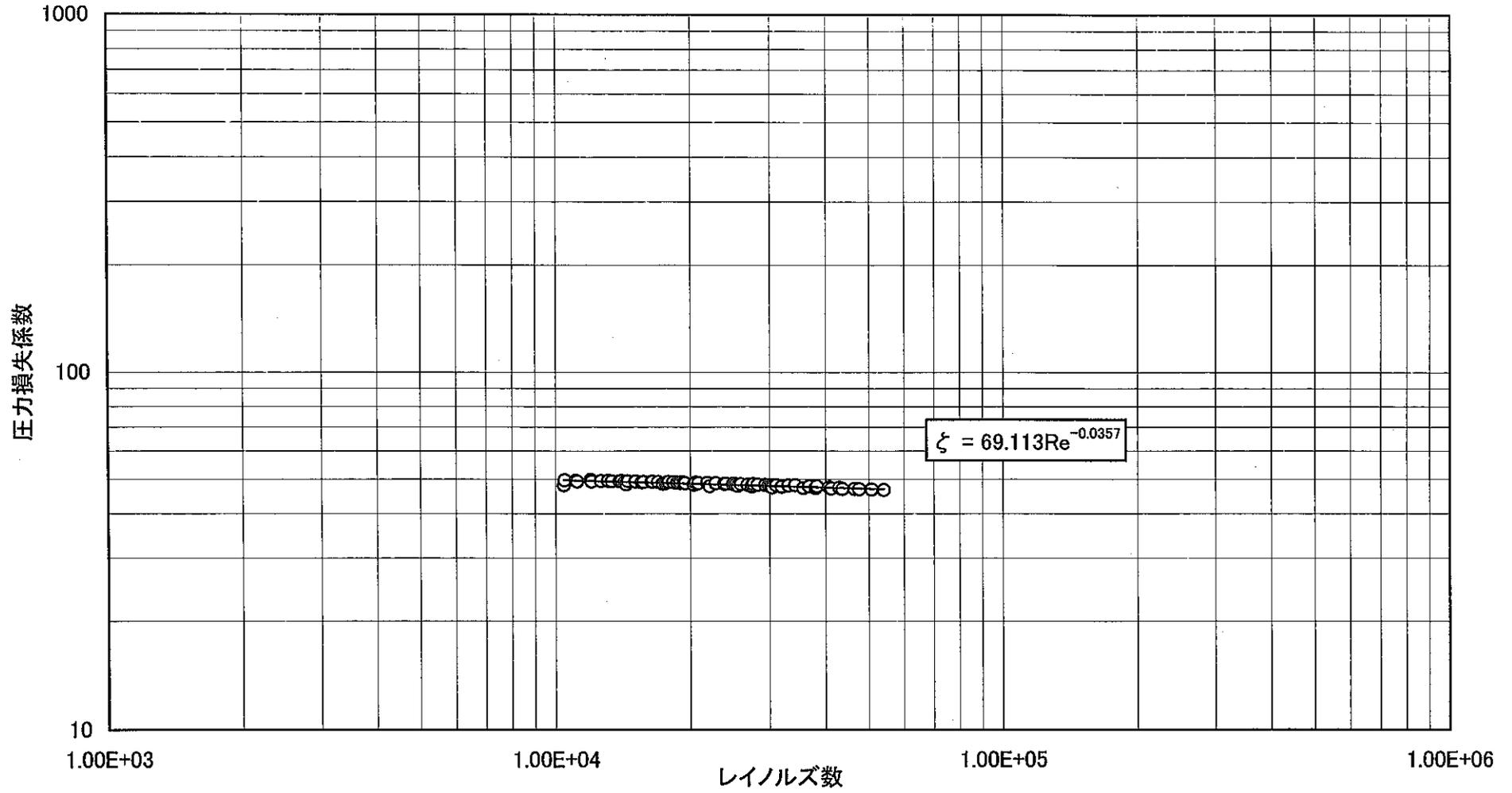


図 3.4-33 コンパ-トメント圧力損失係数実験式(5) (ダミ-コンパ-トメント, 試験温度; 20-85℃)

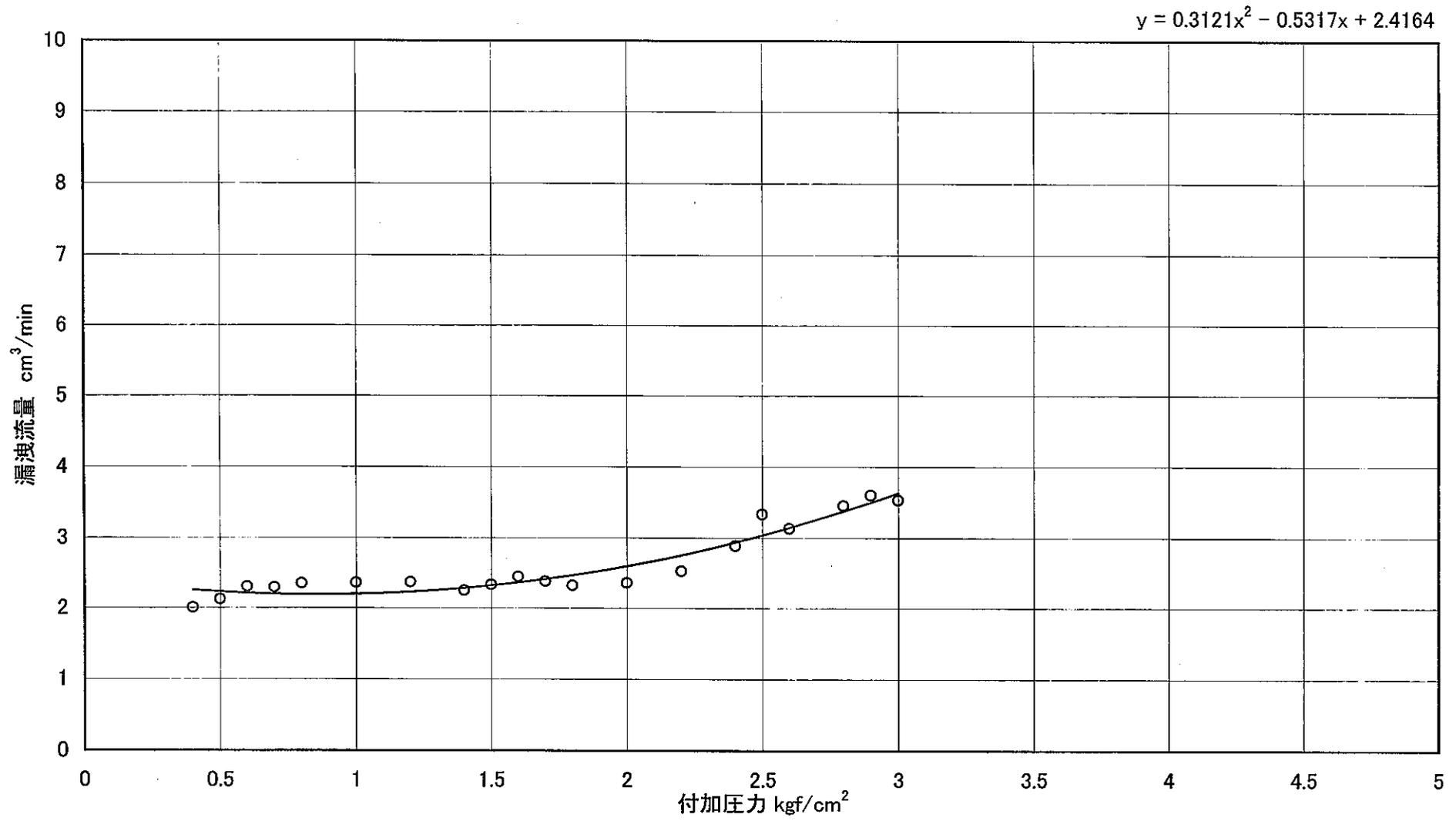


図3. 4-34 球面座漏洩流量測定試験結果

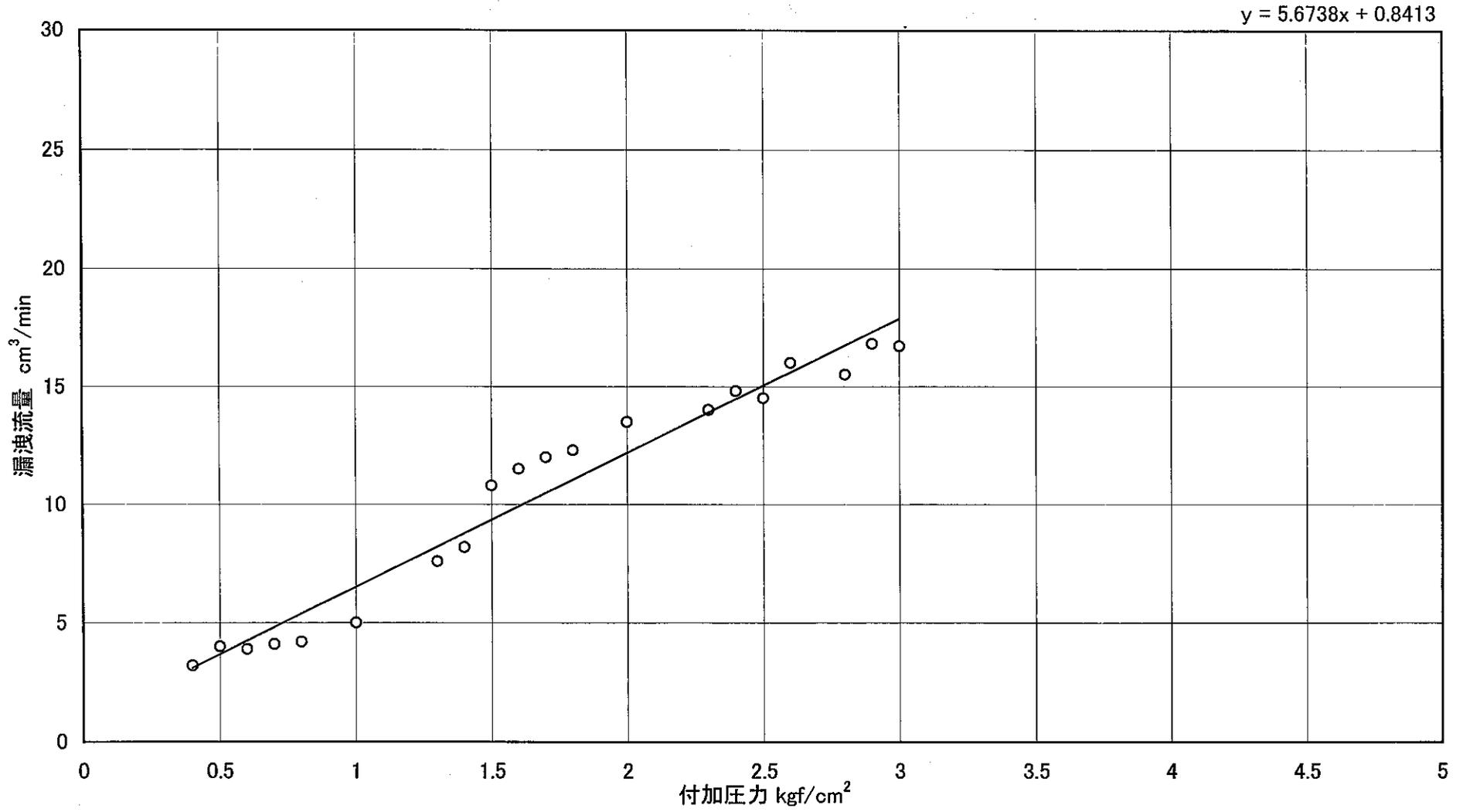


図3. 4-35 ネジ部漏洩流量測定試験結果

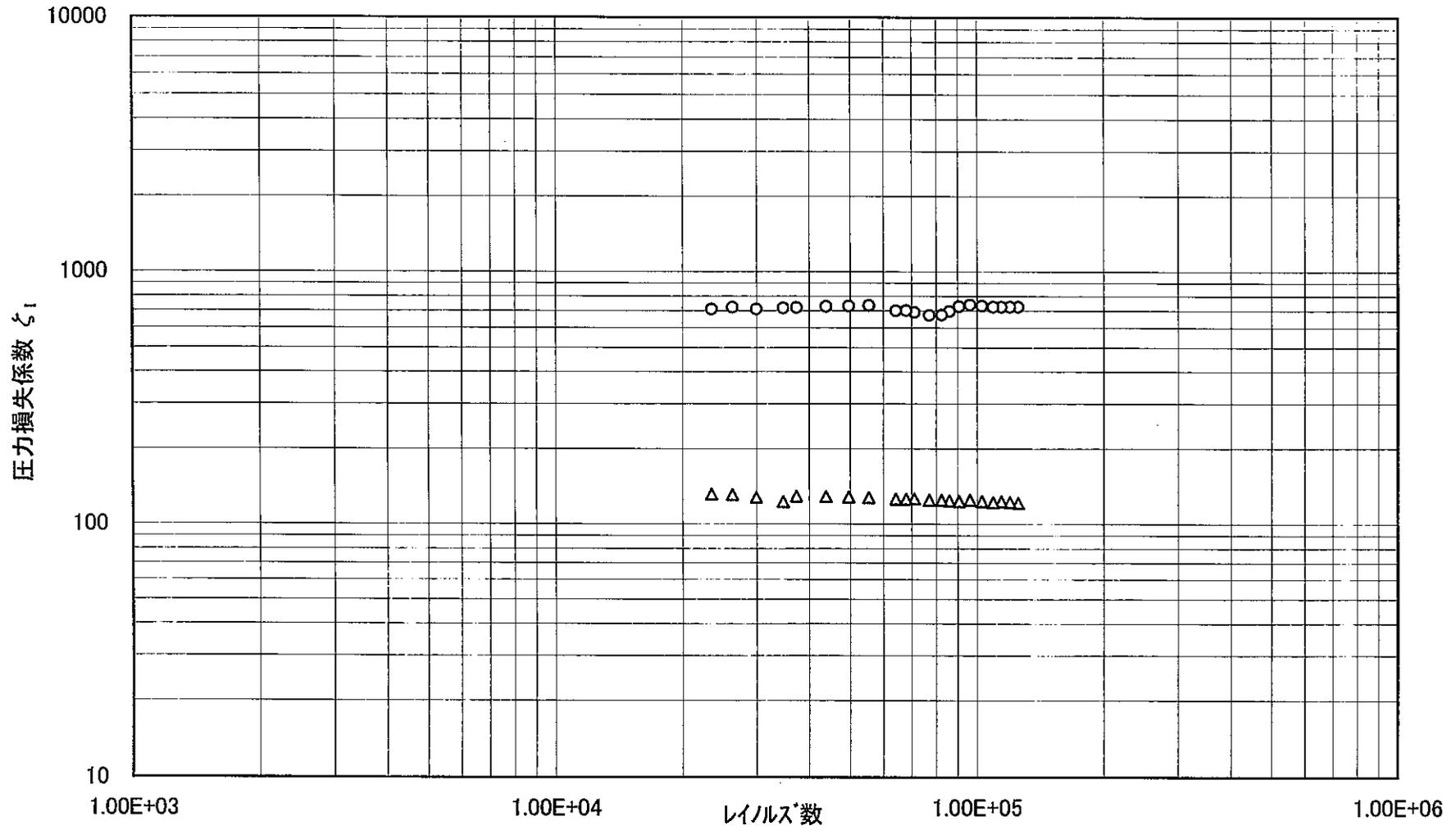


図 3.4-36 集合体圧力損失測定試験結果(1) (オリフィス; $\phi 10$, 測定温度; 85°C)

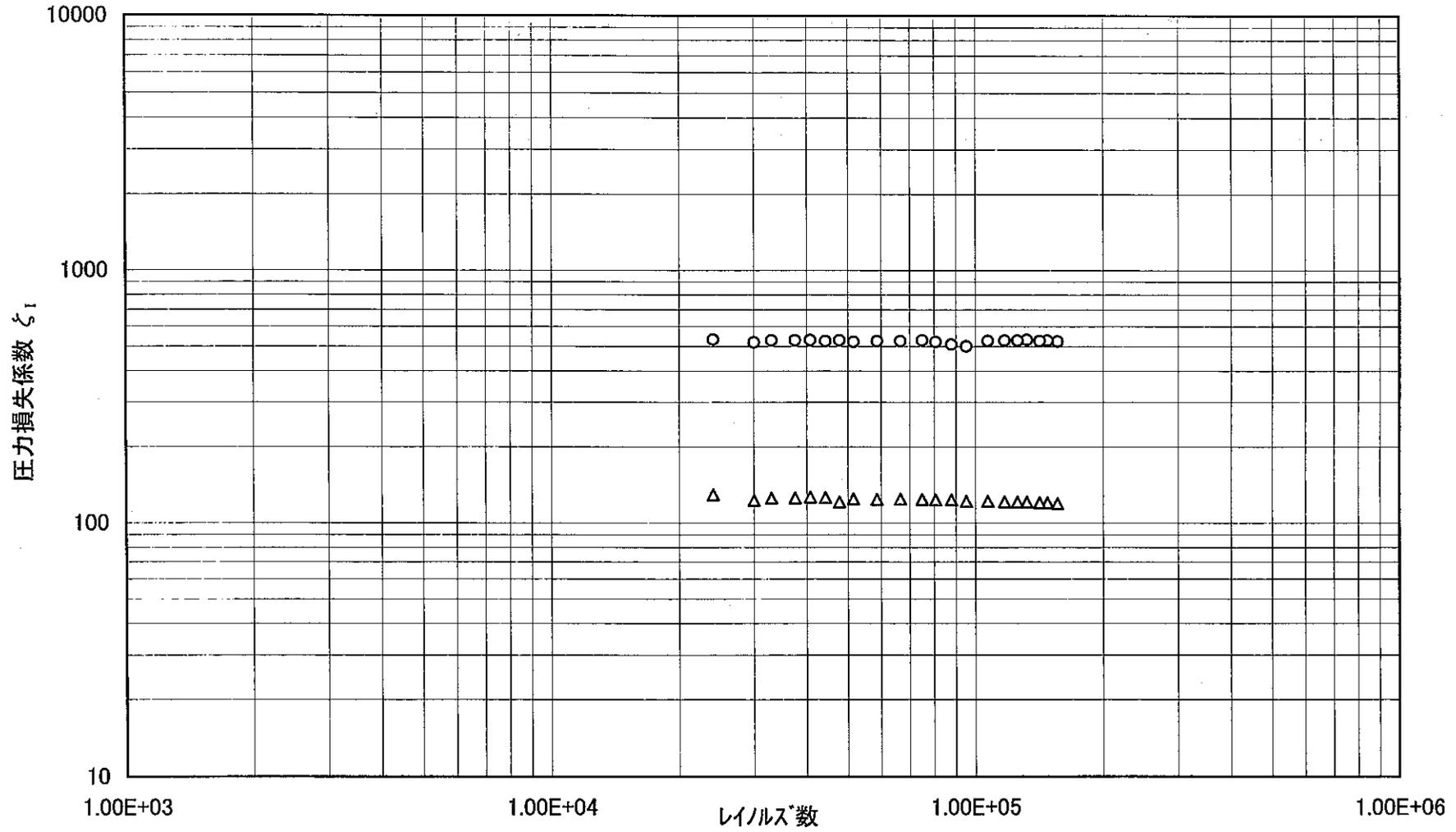


図3. 4-37 集合体圧力損失測定試験結果(2) (オリフィス：φ11, 設定温度；85℃)

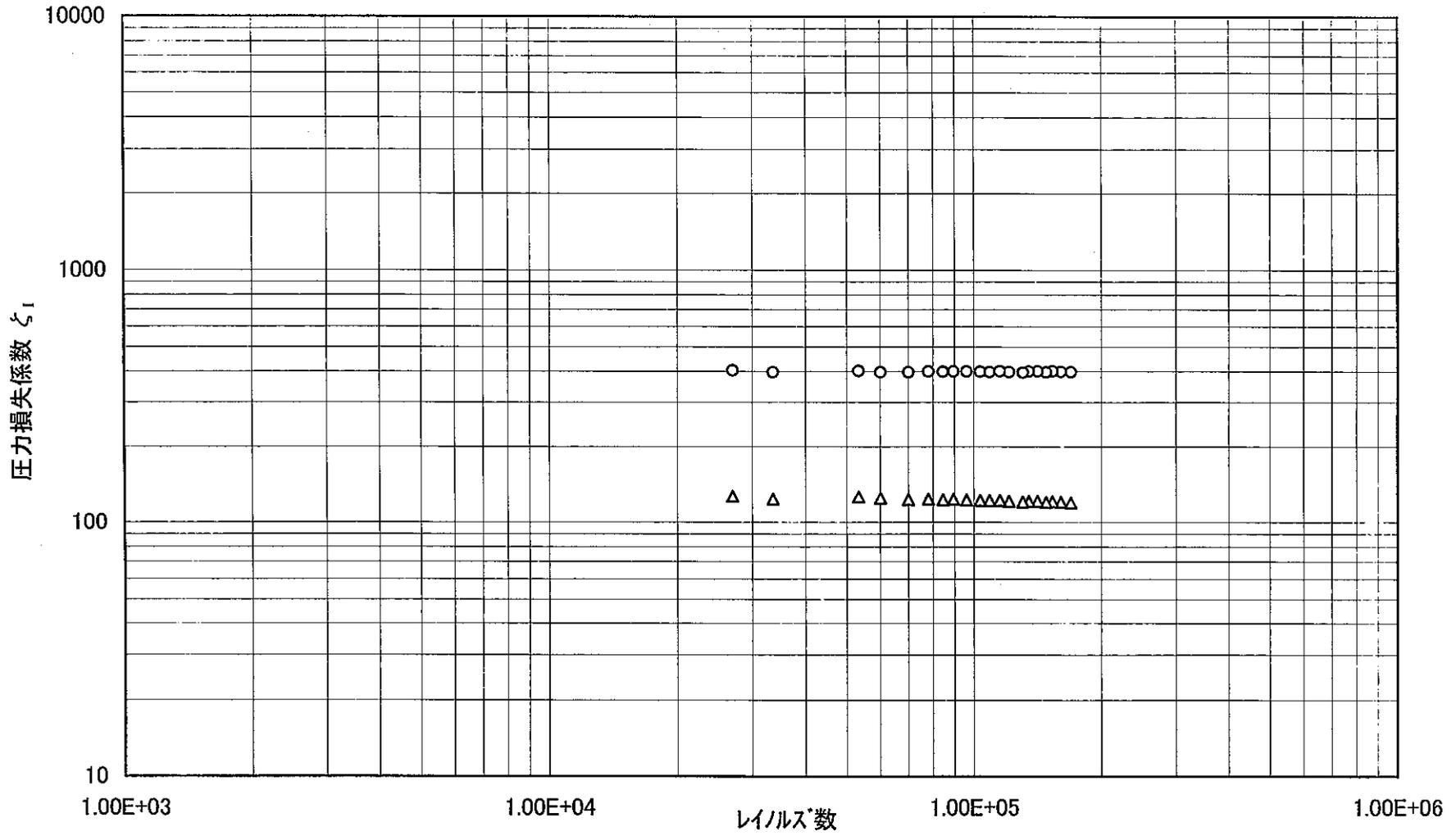


図3. 4-38 集合体圧力損失測定試験結果(3) (オリフィス; $\phi 11$, 設定温度; 85°C)

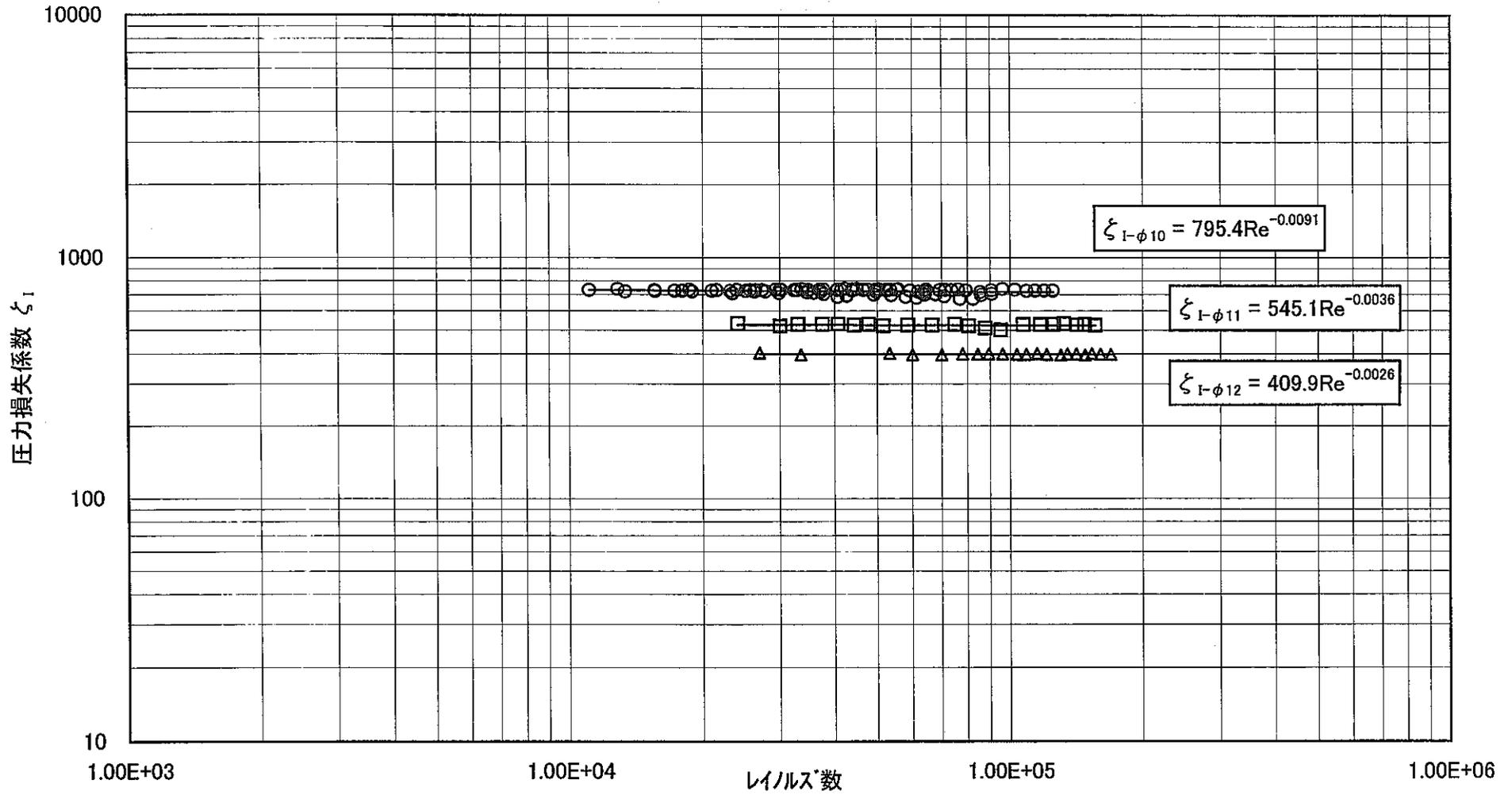


図3. 4-39 集合体圧力損失係数実験式 (測定位置; 集合体)

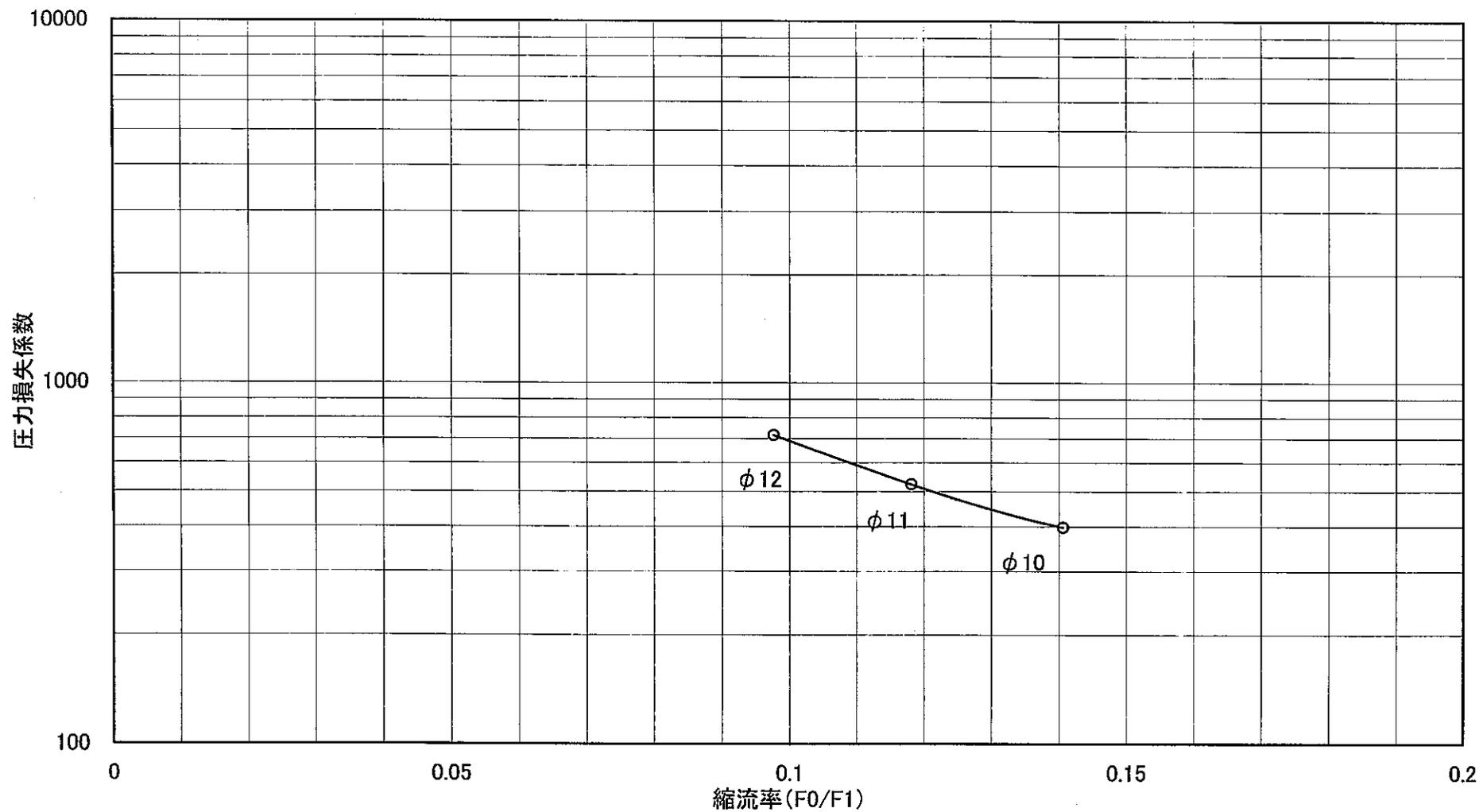


図3.4-40 エントランスノズルオリフィスでの縮流率と集合体圧力損失特性の関係

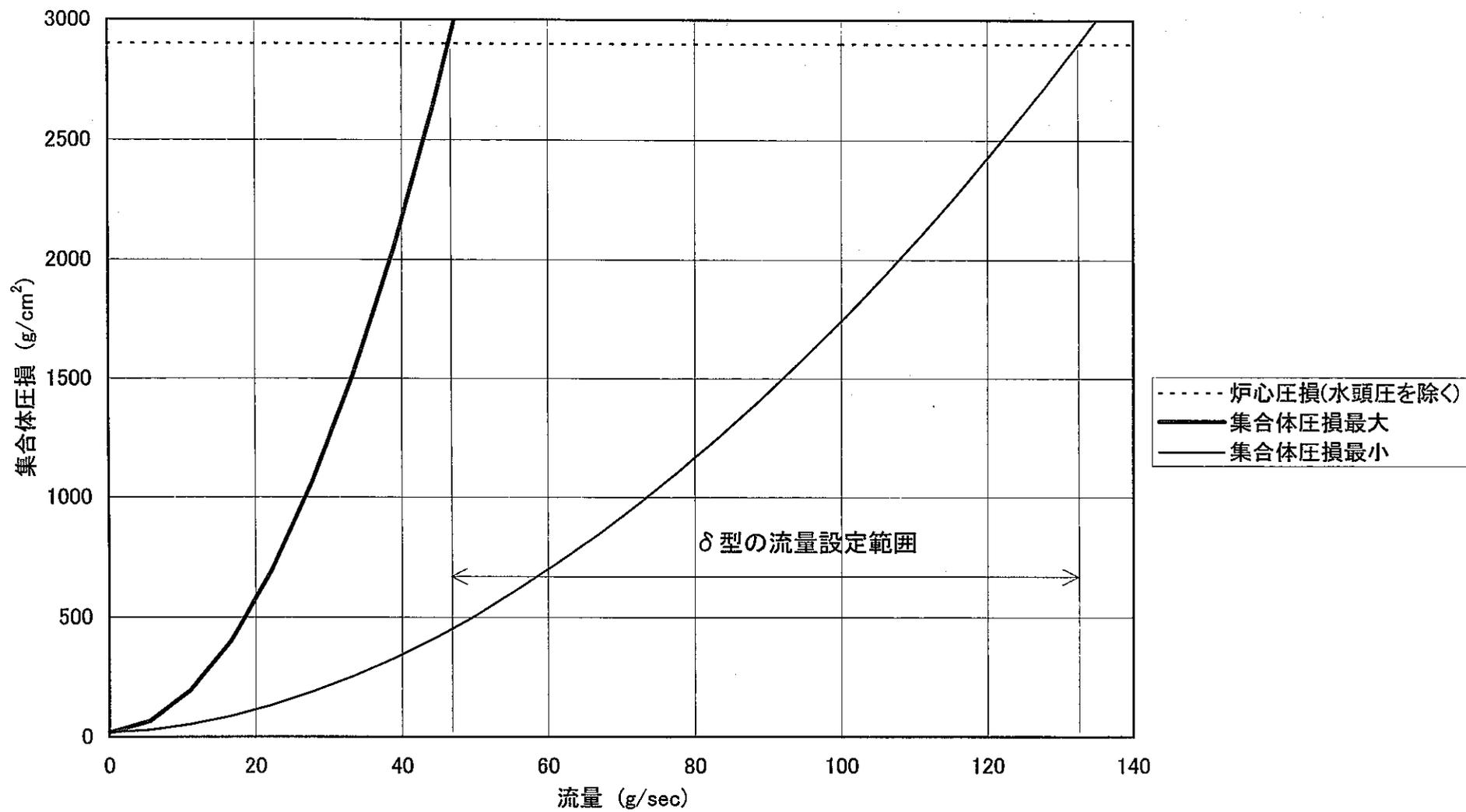


図3.4-41 δ型コンパートメントの流動特性 (ワイズパ[®]-サ型、燃料要素外径φ6.5mm)

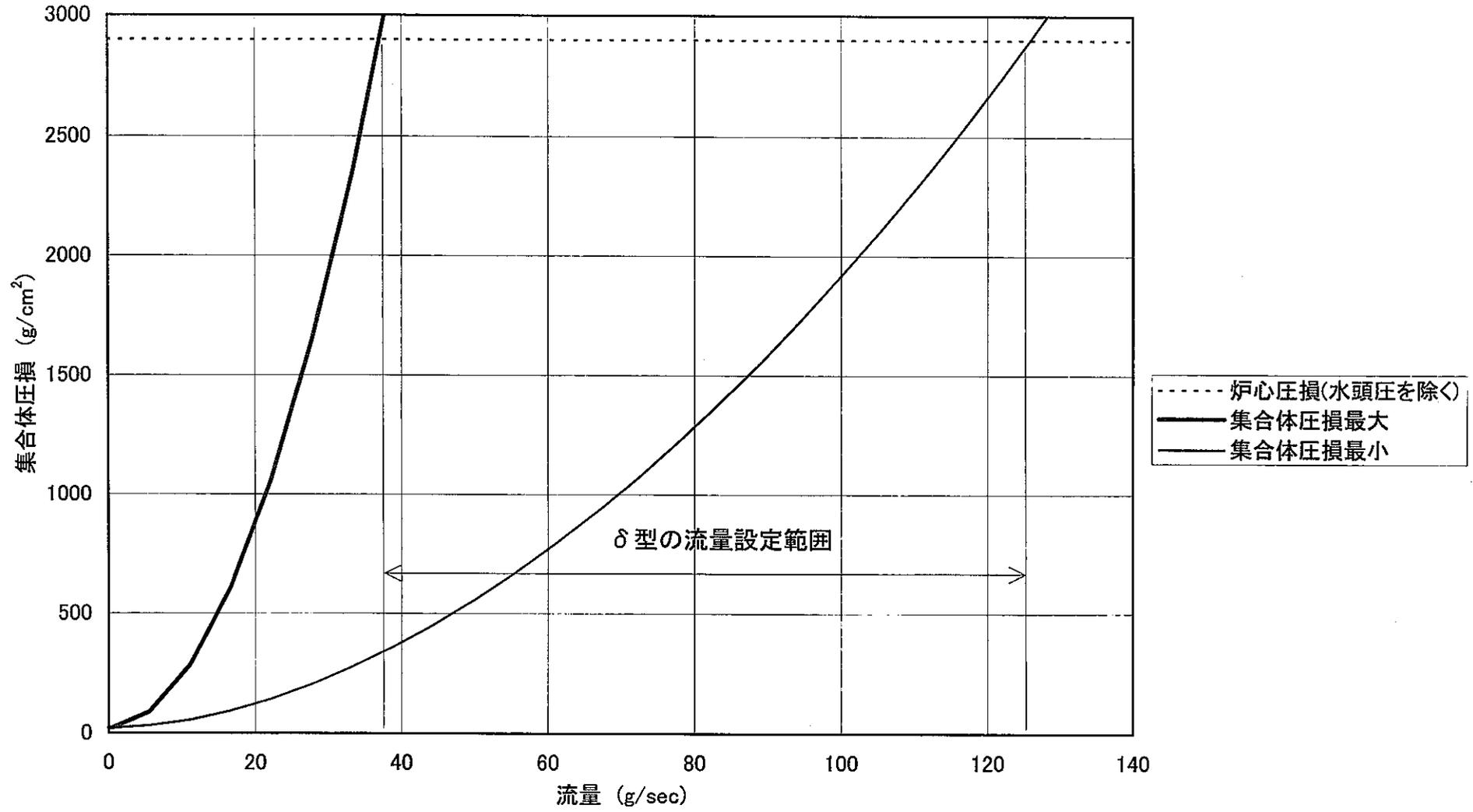


図3.4-42 δ型コンパートメントの流動特性 (ワイヤメッシュ型、燃料要素外径φ8.5mm)

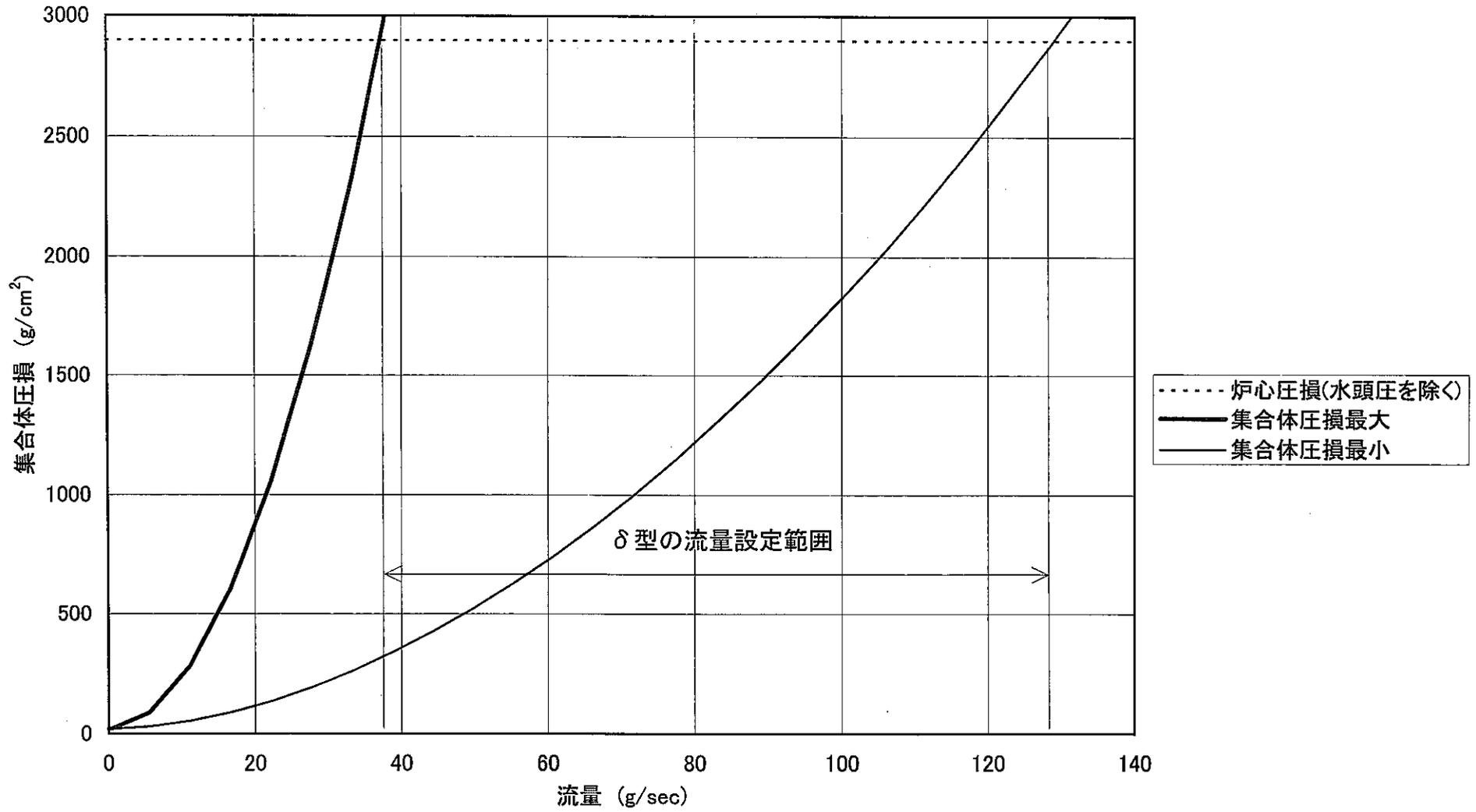


図3.4-43 δ型コンパートメントの流動特性 (シュラウド管型、燃料要素外径φ6.5mm)

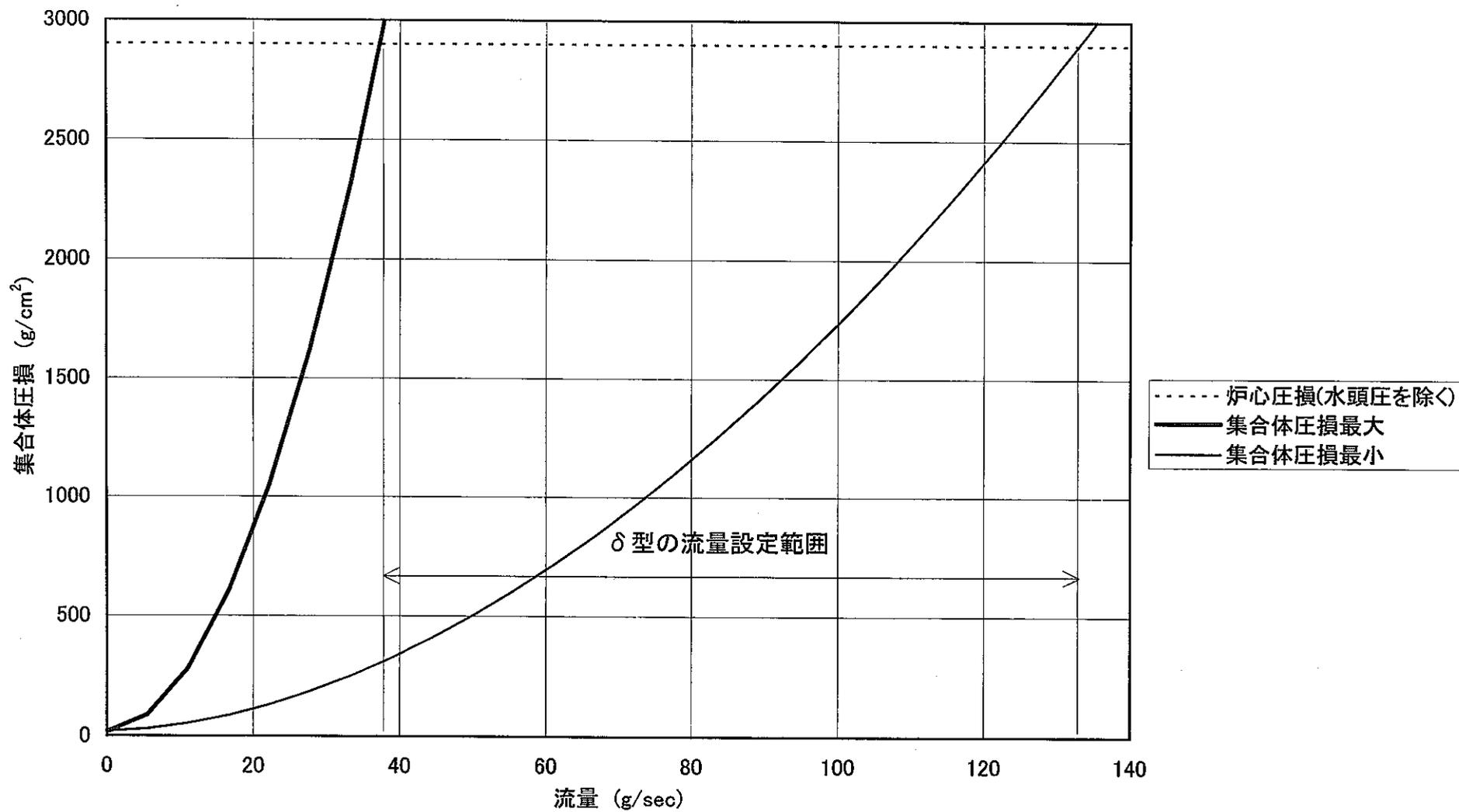


図3.4-44 δ型コンパートメントの流動特性 (シラド管型、燃料要素外径φ8.5mm)

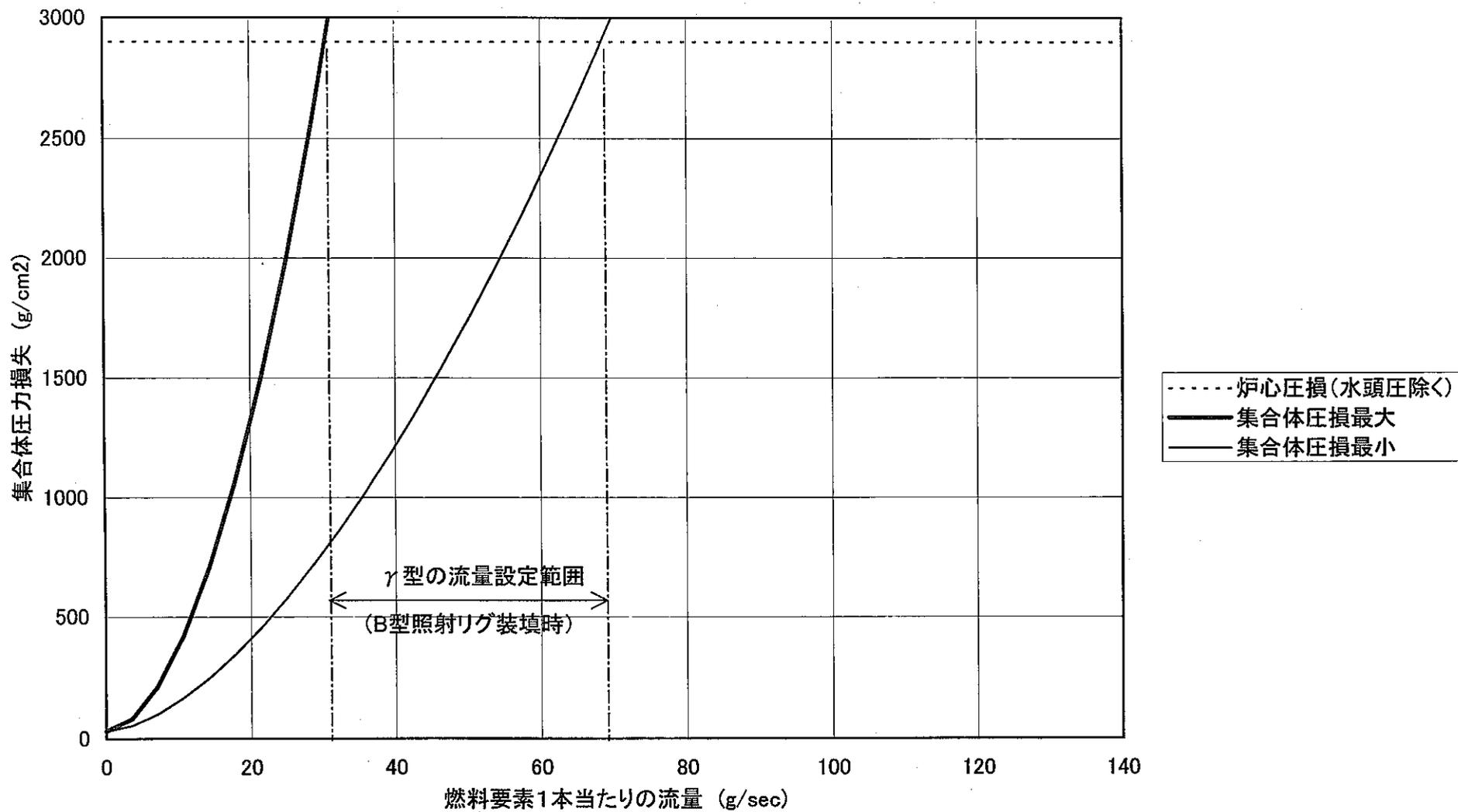


図3.4-45 γ型コンパートメントの燃料要素1本当たりの流量設定範囲

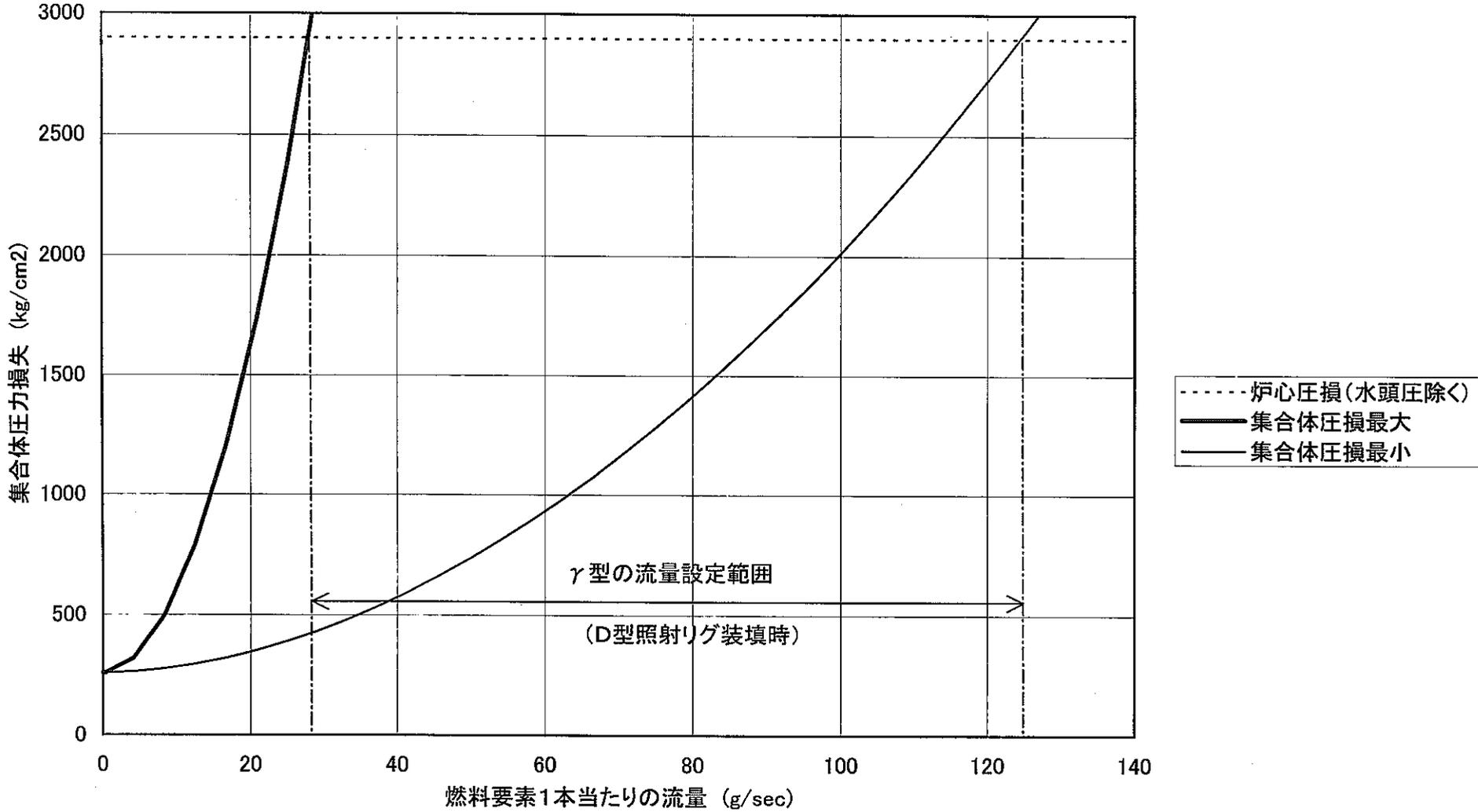


図3.4-46 γ型コンパートメントの燃料要素1本当たりの流量設定範囲

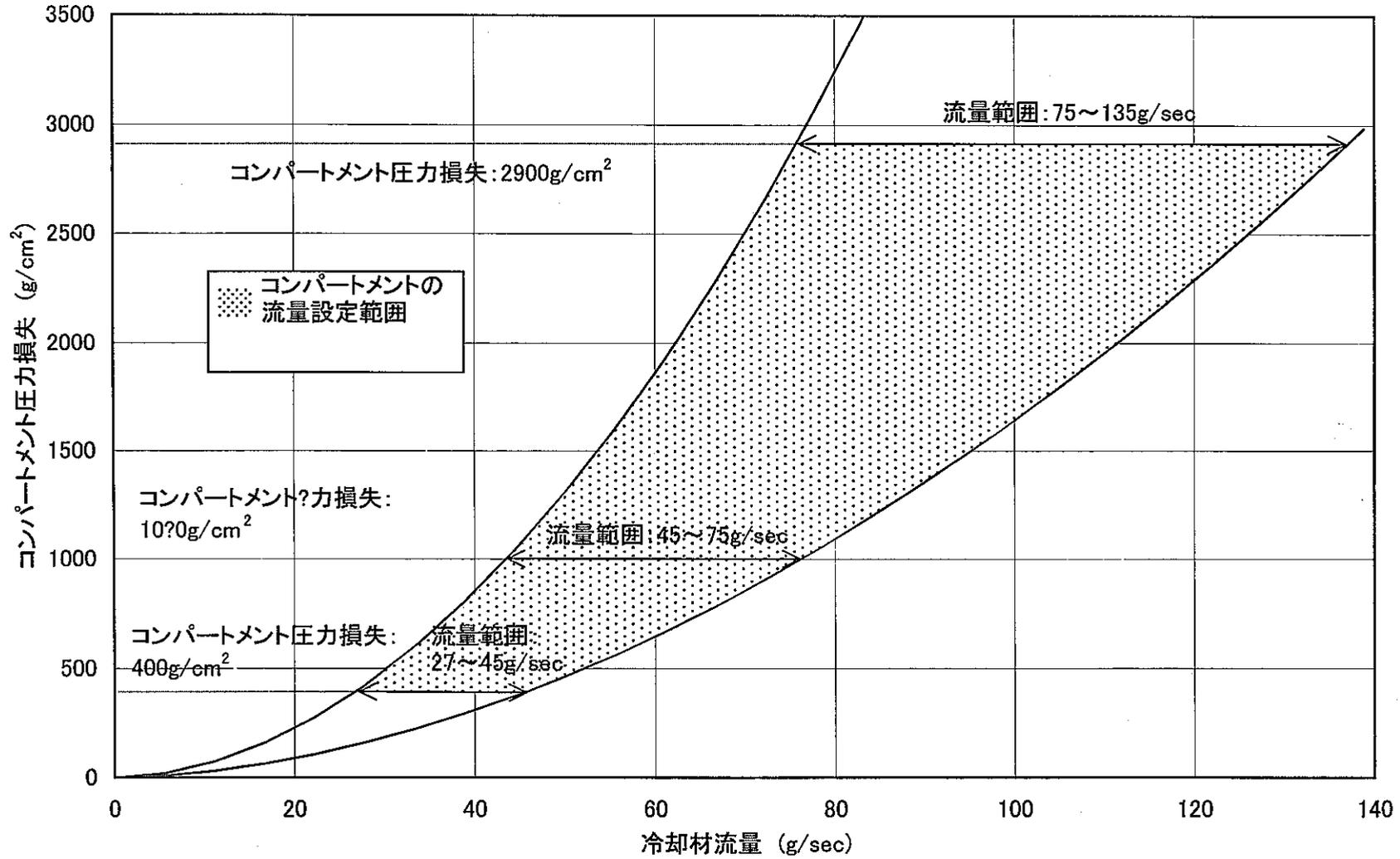


図3.4-47 コンパートメント圧力損失と冷却材流量の関係

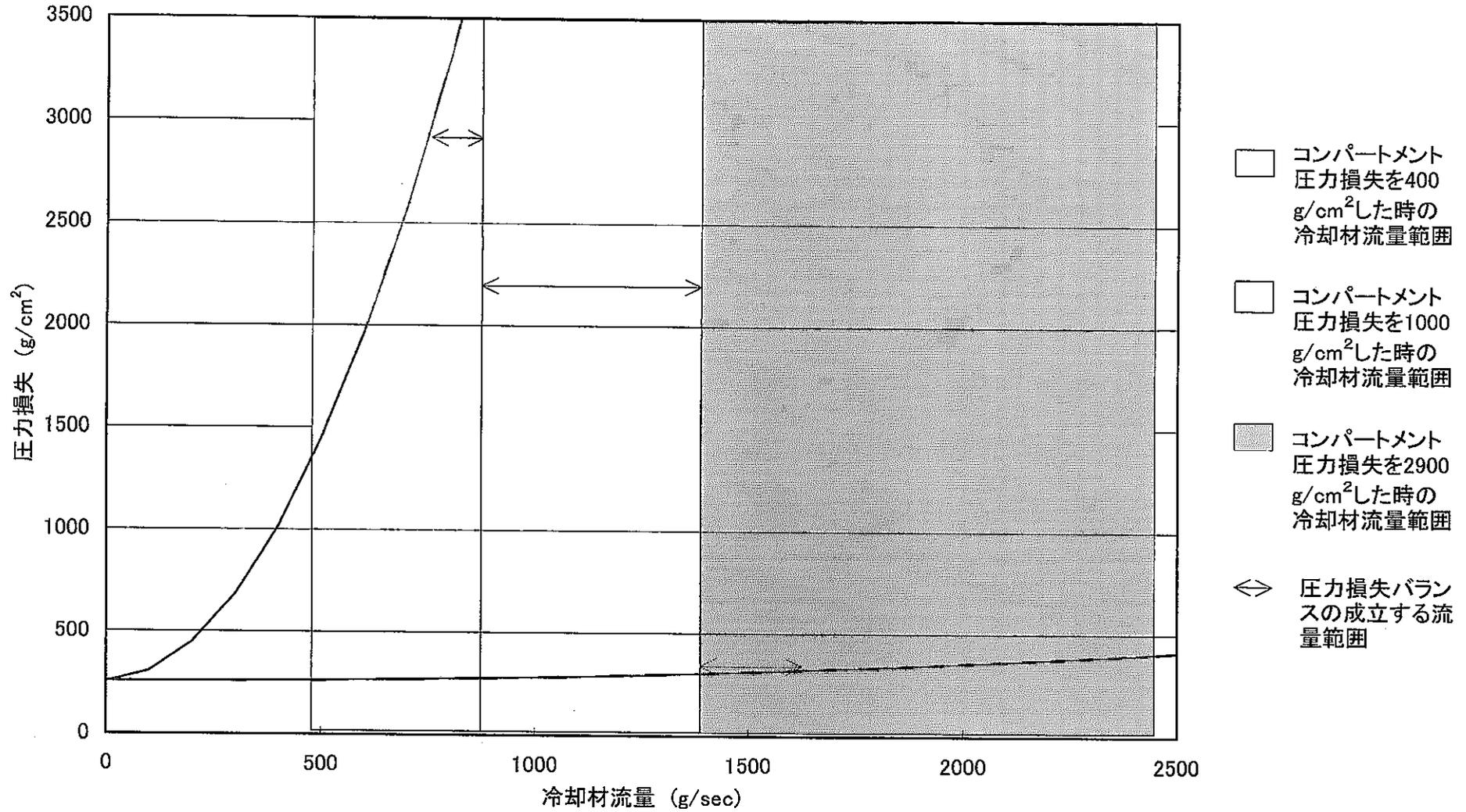


図3.4-48 コンパートメント部以外の圧力損失と冷却材流量の関係

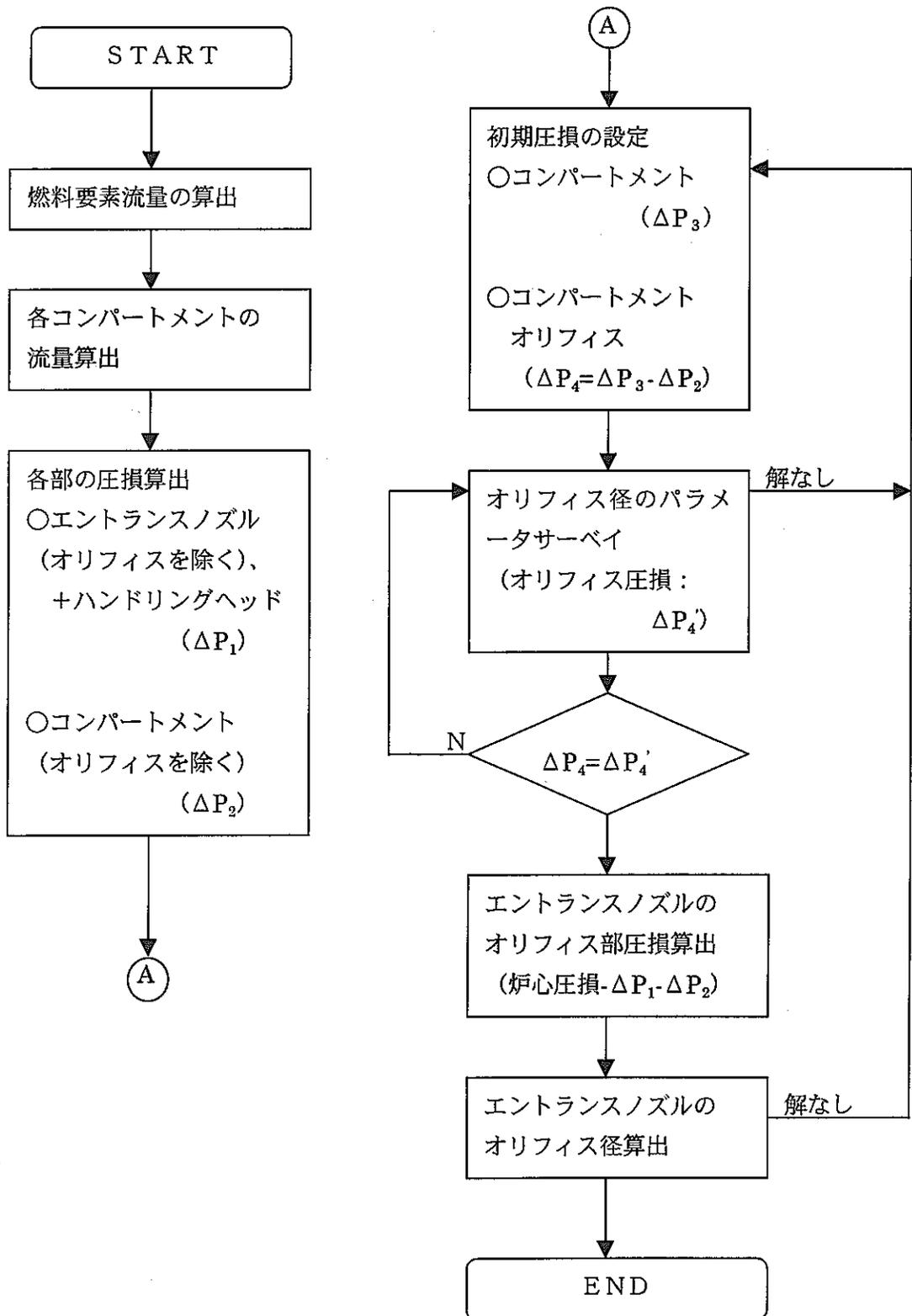


図 3.4-49 D型照射リグの圧力損失設定手順

3.5 熱設計

3.5.1 断熱構造

コンパートメント型の照射リグは、コンパートメント毎に照射温度条件を設定し照射試験を行う。コンパートメント毎に各々異なる照射温度条件を設定するためには、隣接コンパートメントとの熱の流出入を防ぎ、燃料要素の発熱量と冷却材流量の関係で照射温度を決定することが必要である。そのため、コンパートメントの外管と内管の間に不活性ガスを封入した断熱層を設けた。封入ガスは、 γ 型コンパートメントと同様 Ar ガスを用いる。ただし、照射試験内容によっては、He ガスを封入することも考慮する。

ここでは、スペーシングの観点から確保可能な断熱層厚さが十分な断熱性能を有することを検討する。

(1) 断熱層厚さ

断熱効果の観点から断熱層は厚いことが望ましいが、その厚さはラッパ管内対辺間距離により制約されるコンパートメントの最大外径と、考慮すべき燃料要素最大径の関係により制約される。「常陽」ラッパ管に 18 本のコンパートメントを装填する場合、断面寸法により定まるコンパートメント外管の最大外径は 16.4mm である。また FBR 大型炉を考慮すると燃料要素径 8.5mm まで対応する必要があるため、ワイヤスペーサ、シュラウド管の肉厚及びコンパートメント内管の肉厚等を考慮するとコンパートメント内管の外径は最小 13.8mm に制限される。これより、コンパートメント外管及び内管の間に設ける断熱層厚さは最大 0.9mm となる。これを、モデル化し図 3.5-1 に示す。

シュラウド管と燃料要素の間を流れる冷却材は、燃料要素によって加熱される。また、コンパートメント外表面はラッパ管内部の冷却材によって冷却状態にある。従って、コンパートメント内を流れる冷却材は燃料要素により加熱されるとともに、断熱層及びコンパートメントを通じて集合体内冷却材へ熱伝導による熱損出がある。これらをモデル化したものが図 3.5-2 である。この伝熱モデル及び以下の温度条件を基に検討を行う。

- ・燃料ピン発熱部長さ : 500mm
(「常陽」MK-III 炉心での燃料領域)
- ・コンパートメント入口冷却材温度 : 352℃
(「常陽」MK-III 炉心での炉心入口冷却材温度)

(2) 検討パラメータ

- ・燃料要素の最大線出力 : 300W/cm~500W/cm

燃料要素の最大線出力は、従来の照射試験実績を基に範囲を設定した。(線出力分布は一般的な炉心出力分布として cos 分布を仮定する。)

- ・被覆管最高温度設定値 : 500~700℃

被覆管最高温度設定値は、従来の照射試験実績及び現行の設置許可書に示される許可範囲とした。

- ・コンパートメント外管外面温度 : 400℃及び500℃

コンパートメント外管の外面温度は、集合体内に内包する全コンパートメント放熱量、隣接集合体の発熱条件及び集合体内流動状況により決定される。ここでは、コンパートメント外スタグナント Na が炉心内冷却材平均温度に近いケースとして 400℃、また、より炉心出口温度に近いケースとして 500℃を設定した。

(3) 算出結果

被覆管最高温度設定値と冷却材流量の関係を図 3.5-3 及び図 3.5-4 に示す。また、断熱層からの熱損出を図 3.5-5 に示す。一般的な燃料要素でのコンパートメント径方向への放熱量は比較的小さく、冷却材温度最高部においても 30W/cm 程度である。従って、放熱量の観点からは十分必要な断熱性能を満足しうる。

被覆管最高温度を 700℃程度に設定した場合、コンパートメント流量は 40~60cc/sec 程度となる。被覆管最高温度を 600℃程度に設定した場合でも、コンパートメント流量は 40~80cc/sec 程度となる。この冷却材流量範囲は、コンパートメントの流量配分バランス上実現可能な範囲であることから、冷却材流量配分バランスの観点でも十分必要な断熱性能を満足しうる。

3.5.2 集合体内温度分布

D型照射リグ1号機(D1)で予定している照射試験を基に条件を設定し集合体内温度場解析を行い、D型照射リグの流路設計の妥当性及び断熱層の機能を確認する。

(1) 集合体内温度分布解析

① 解析モデル

18本の δ 型コンパートメント及び1本のタイロッドからなる19本バンドル構造を対象とする。解析モデルを図3.5-6に示す。

② 解析条件

D1にて、照射試験を行う予定の燃料要素を対象とした。燃料要素仕様を表3.4-2に示す。(表中のピン番号を解析モデルのピン番号に設定した。)集合体内の冷却材流量は、燃料要素の発熱量から算出した燃料要素の必要冷却材流量を基に3.4節の水流動試験結果を用い設定した。なお、隣接コンパートメント間の温度差が最大となる箇所及び高温のコンパートメントが隣接する箇所が出来るよう燃料要素の配置を設定した。

③ 解析コード

解析には汎用有限要素法コード「NISA」を使用する。燃料要素周囲のNaは流動体として強制対流除熱を考え、シュラウド管外部のNaは静止体として熱伝導のみ考慮した。

(2) 解析結果

本解析により得た被覆管最高温度は692℃である。三次元温度分布及び各燃料要素の軸方向温度分布を図3.5-7～図3.5-10に示す。図より、ほぼ設定通りの被覆管温度で照射できること及び断熱設計が妥当であることが確認できた。また、隣接コンパートメント間の最大温度差は約80℃となるが、コンパートメントの周方向温度差は約13℃となり断熱層が有効に機能していることが確認できた。

なお、参考として断熱層にHeガスを充填した場合について解析を行った。Heガスを断熱層に充填した場合の方がArガスを断熱層に充填した場合より断熱性能が劣り、燃料要素の周方向温度差が大きく、燃料要素の被覆管最高温度が低く(約3℃)なる。

3.5.3 コンパートメント群熱湾曲

上記3.5.2節で行った集合体温度分布解析結果をもとに、コンパートメント群の湾曲解析を行い、コンパートメントの熱湾曲量を確認した。

(1) コンパートメント群湾曲解析

① 解析モデル

有限要素法に基づきコンパートメントをビーム要素で表現し、熱、スエリング、クリープによるコンパートメントの曲げモーメントを計算して、ラッパ管内の拘束条件下での力学平衡を解く。

② 解析条件

上記 3.5.2 節で求めた集合体内温度分布解析結果より、コンパートメントの温度を用いる。また、ラッパ管内面を断熱境界とする。

③ 解析コード

解析コードは、ワイヤスペーサ型燃料要素バンドル照射変形解析コード「MARSE」を使用した。本コンパートメント群の場合、ワイヤスペーサ径を 0mm とすることにより適用が可能である。

(2) 解析結果

前節の集合体内温度分布解析結果を入力してコンパートメント群湾曲解析を実施した。最大変位量は、隣接コンパートメント間の間隔 0.1mm より小さく、隣接コンパートメントの接触による荷重は発生しない。

・ 下端固定、上端固定条件

温度勾配が小さいため、コンパートメントの最大変位は 0.02mm である。

・ 下端固定、上端フリー（参考評価）

コンパートメントの上端の拘束条件がフリーとなることはないが、参考評価として上端の拘束を外した場合の湾曲評価を実施した。

この拘束条件の場合におけるコンパートメント上端部で 0.08mm の変位である。

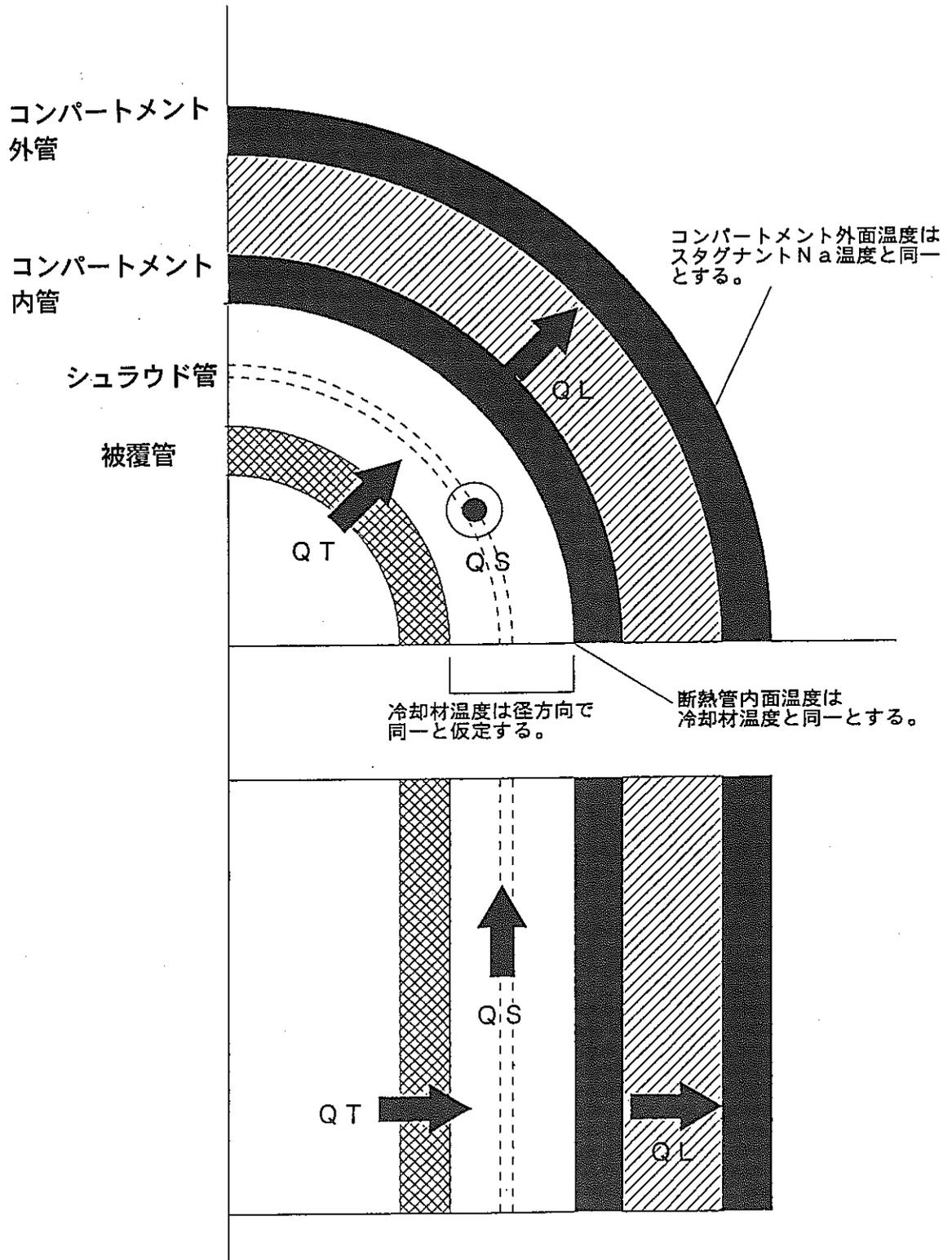


図 3.5-1 断熱層設定モデル

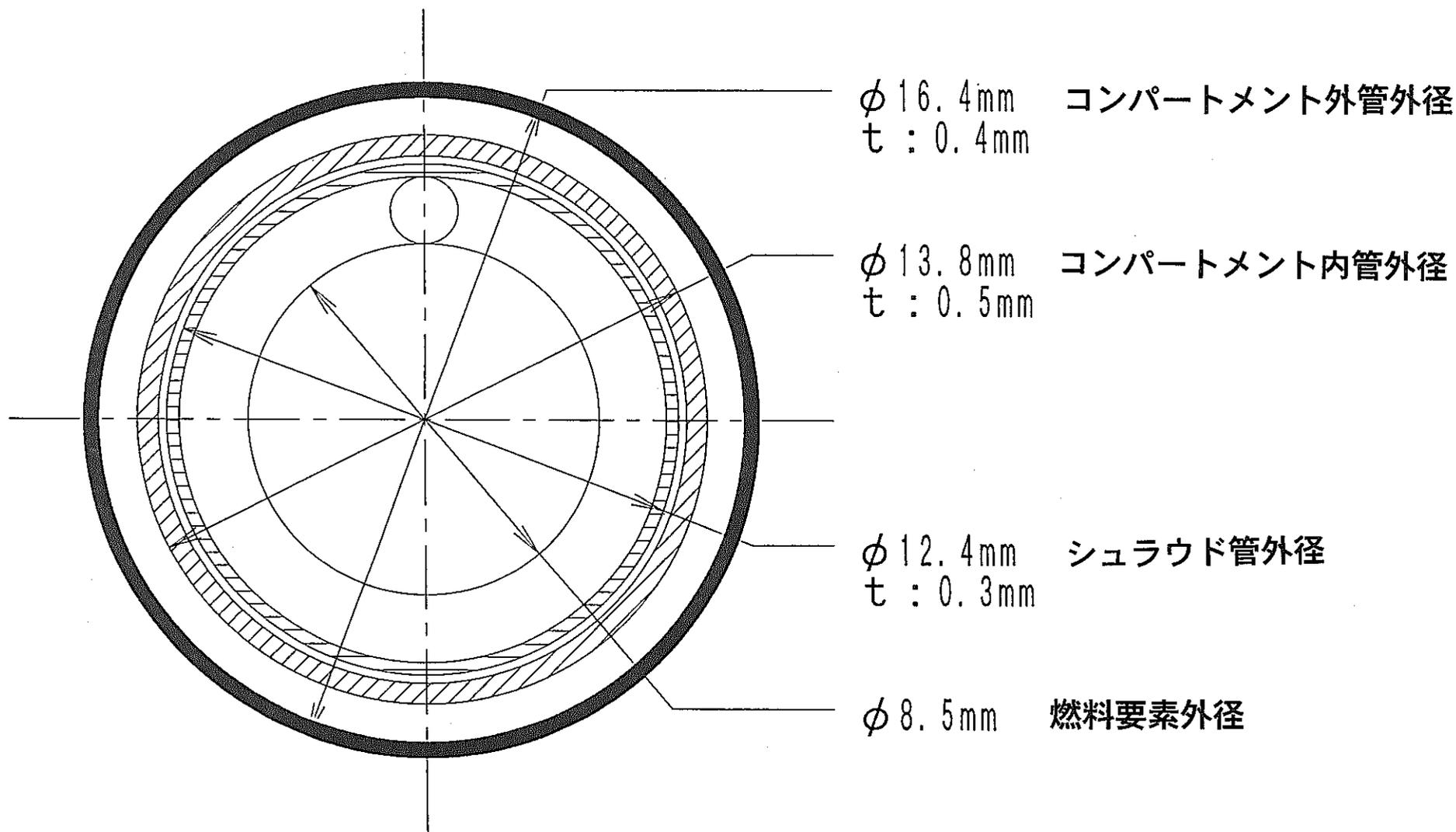


図 3.5-2 熱損出計算モデル

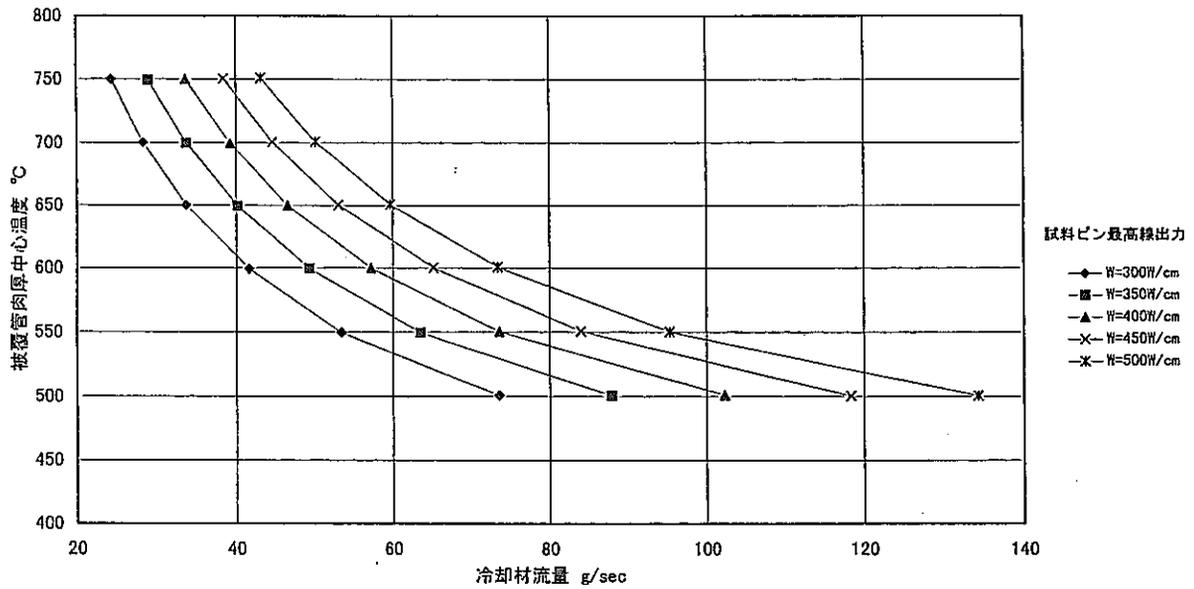


図 3.5-3 被覆管最高温度設定値と冷却材流量の関係 (コンパートメント温度 400°C)

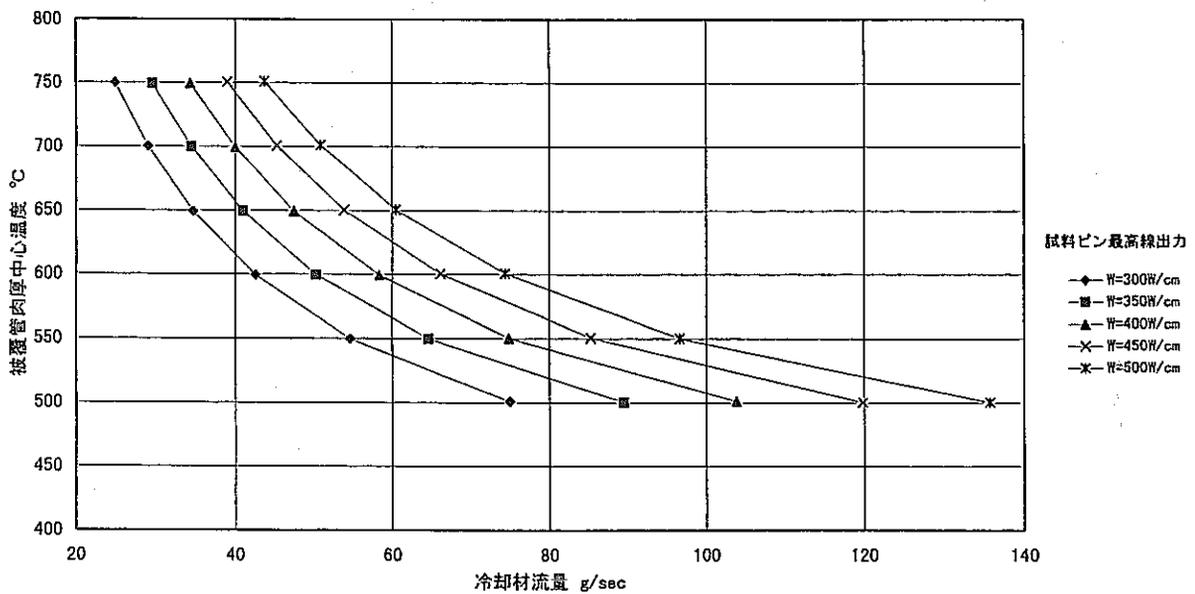


図 3.5-4 被覆管最高温度設定値と冷却材流量の関係 (コンパートメント温度 500°C)

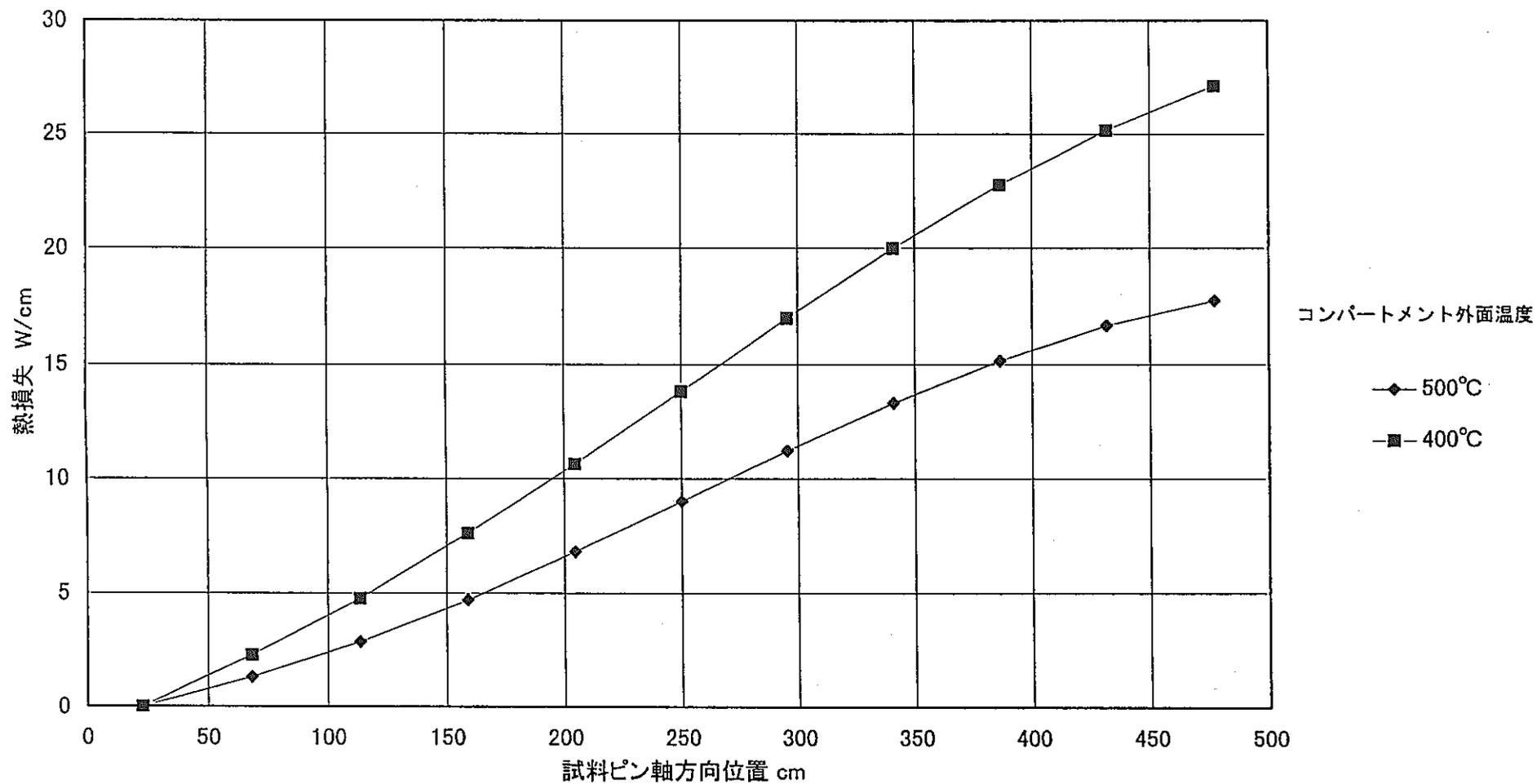
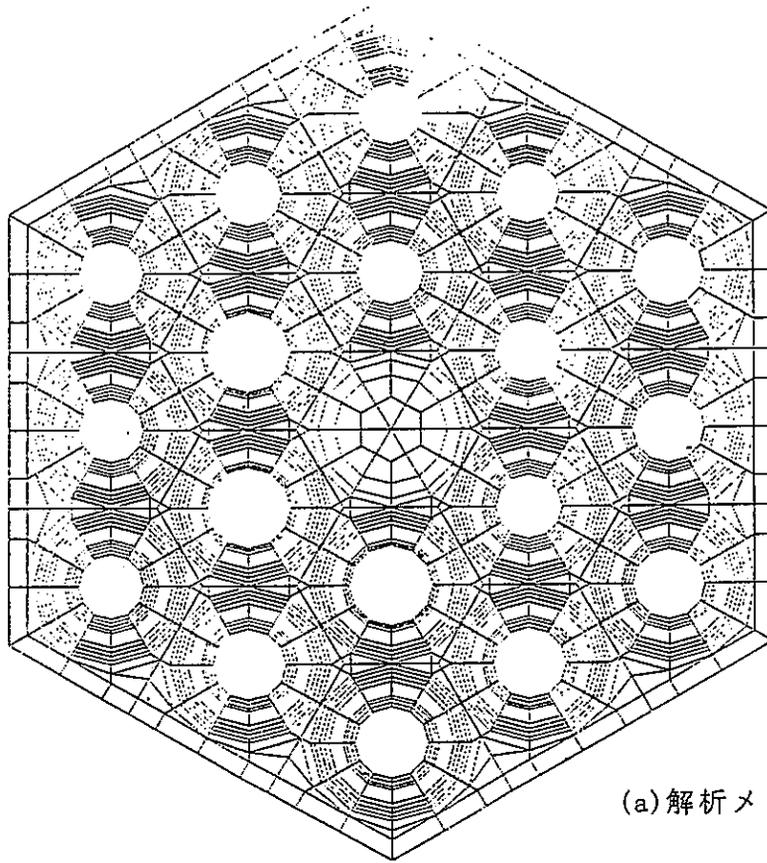
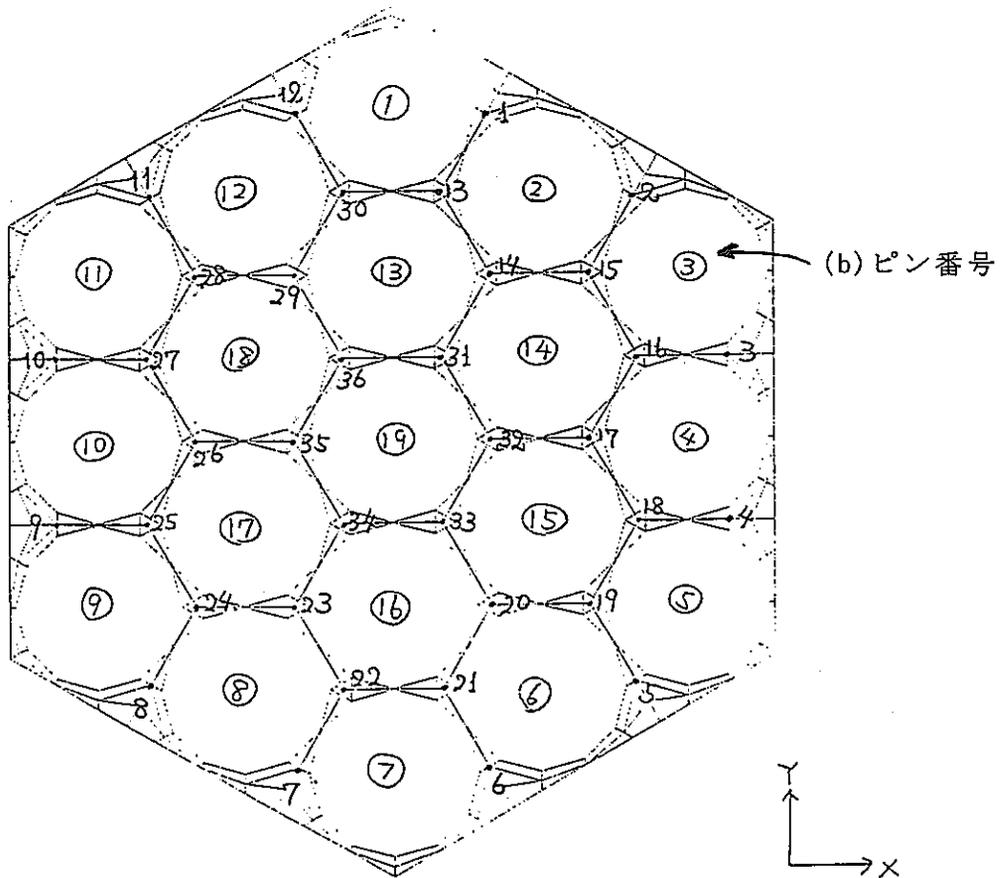


図 3.5-5 断熱層からの熱損出 (被覆管設定温度700°C、線出力400W/cmの場合)

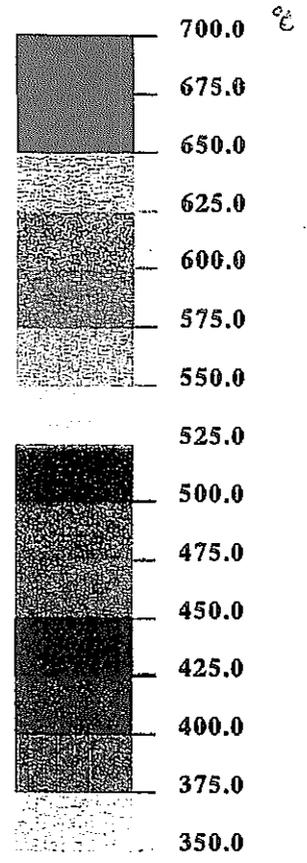
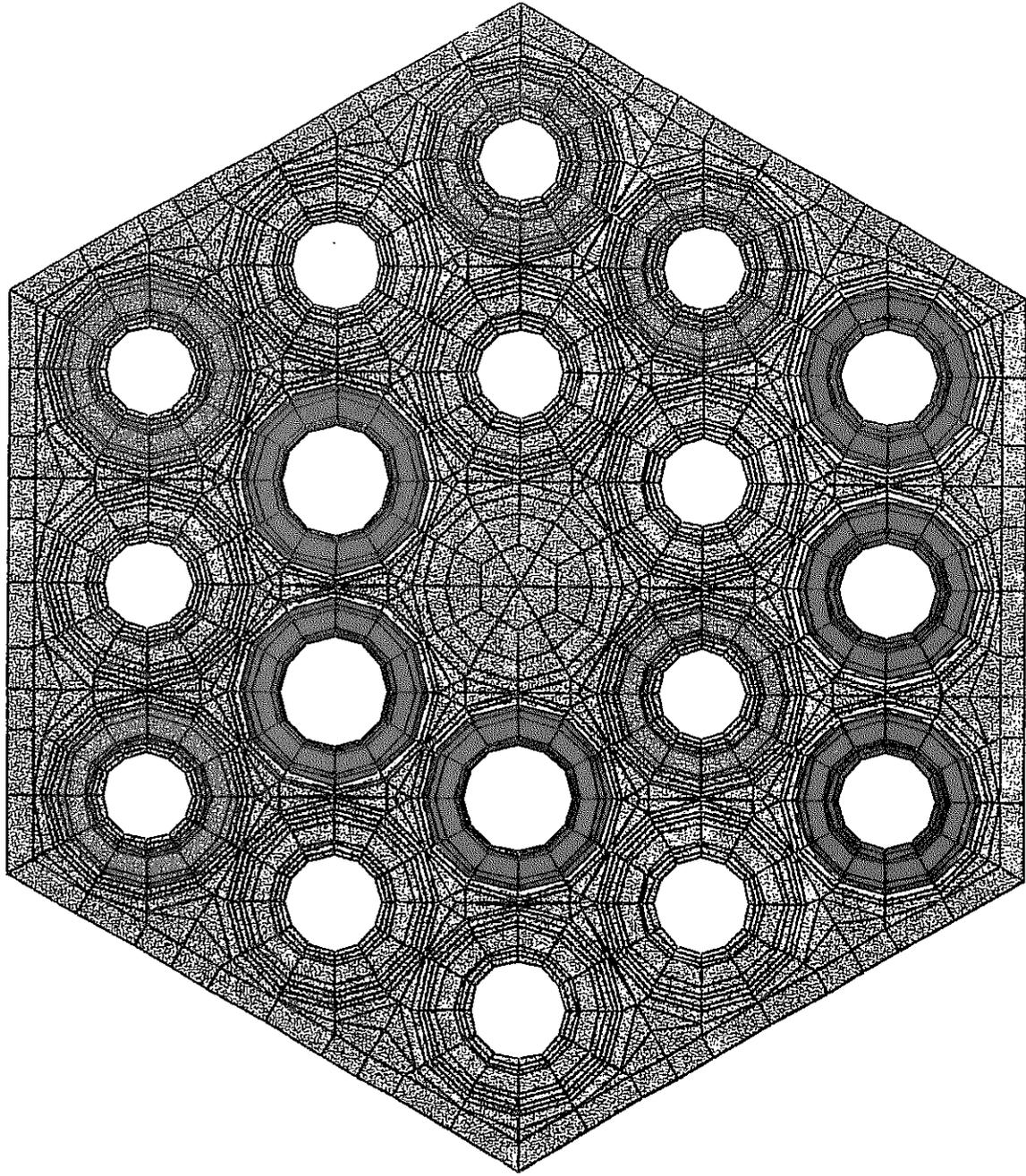


(a) 解析メッシュ



(b) ピン番号

図 3.5-6 集合体内温度分布解析モデル



ΔY
X
ROTX
0.0
ROTY
0.0
ROTZ
0.0

图 3.5-7 集合体内温度分布解析结果

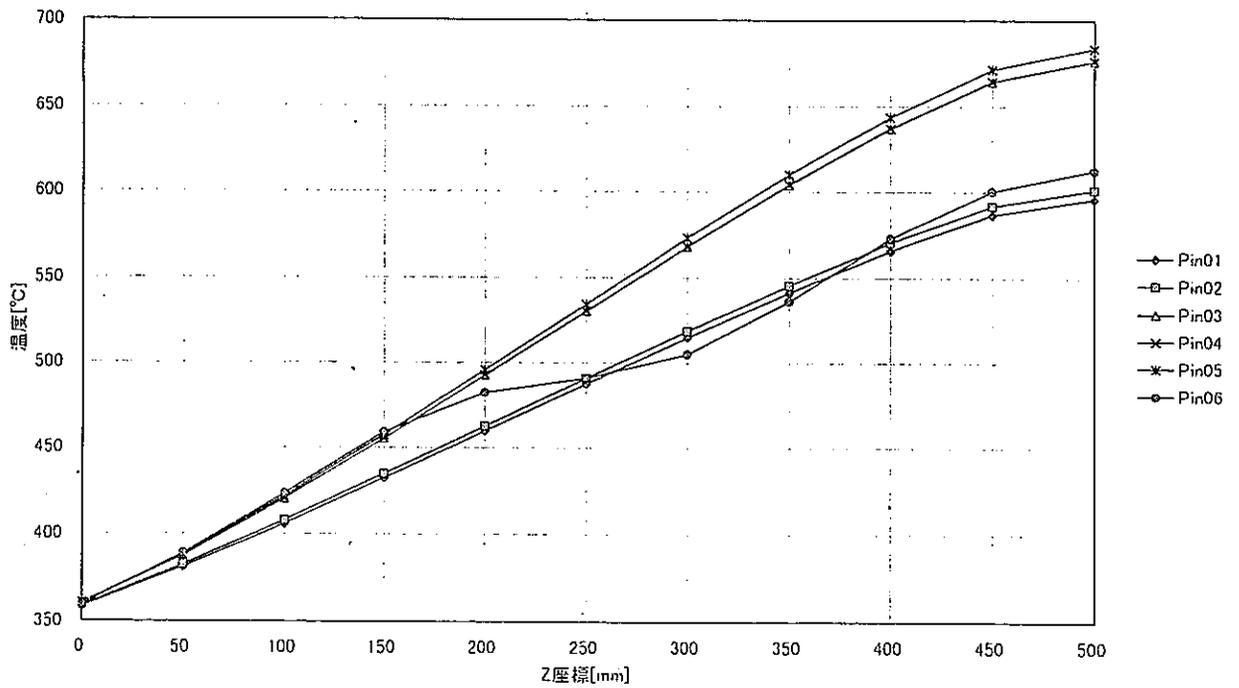


図 3.5-8 各燃料要素の軸方向温度分布 (pin1~pin6)

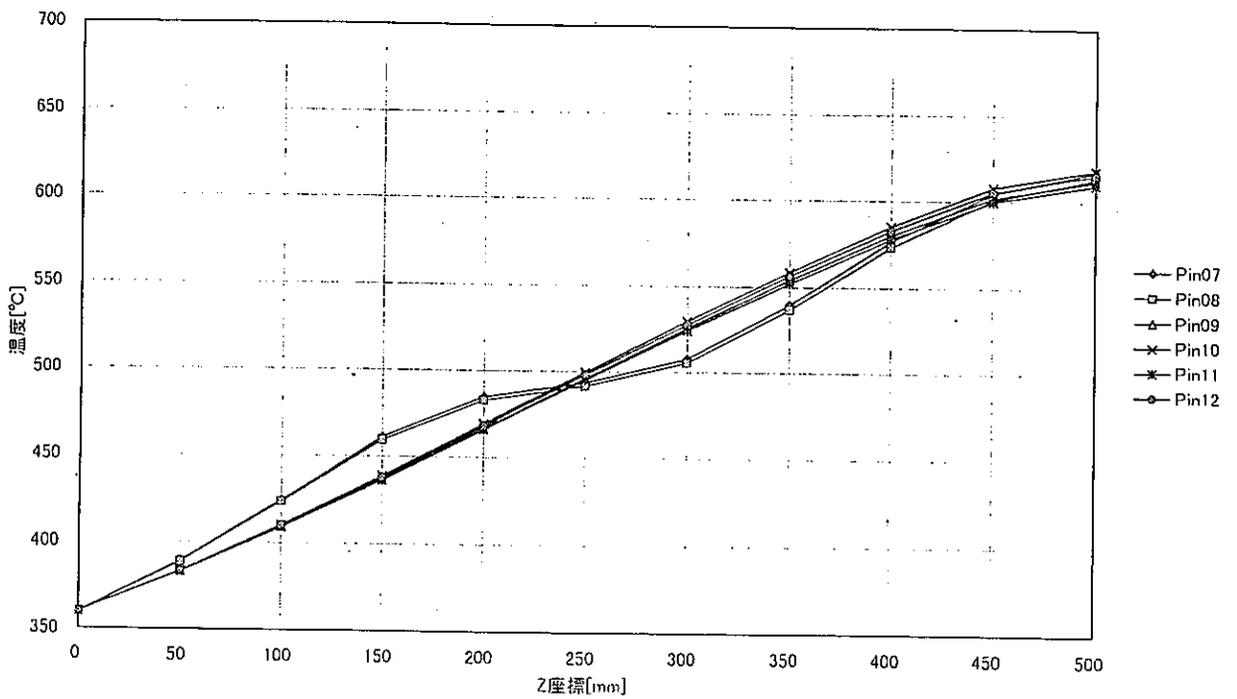


図 3.5-9 各燃料要素の軸方向温度分布 (pin7~pin12)

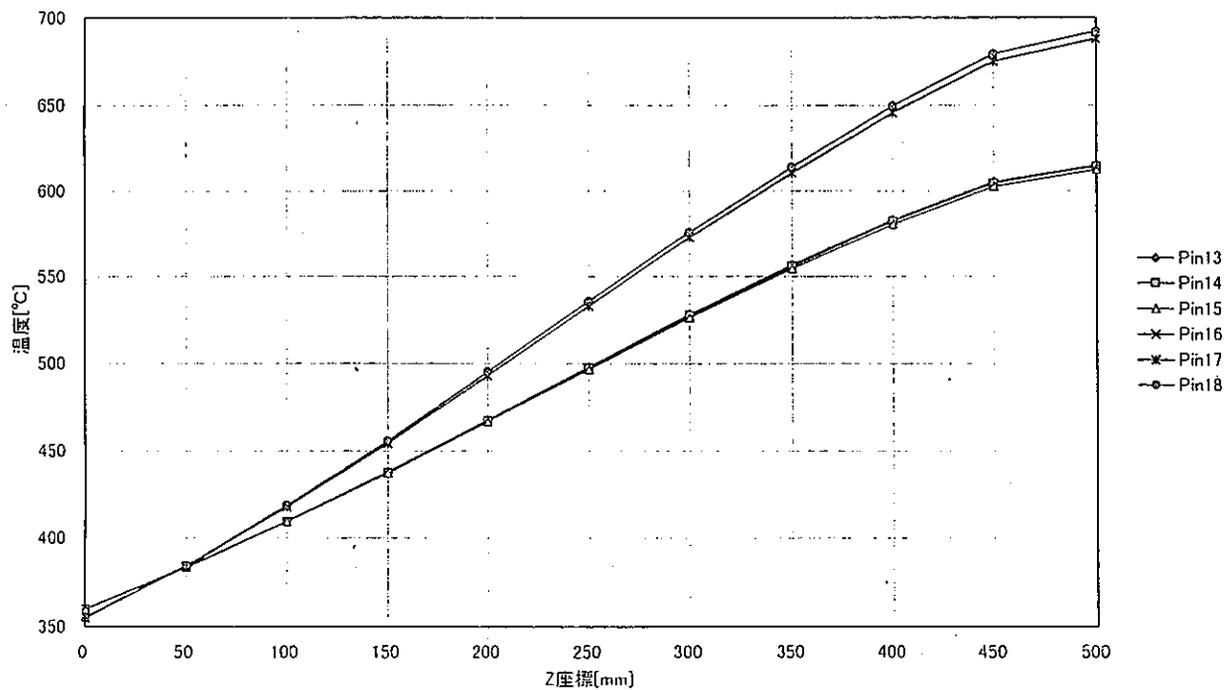


図 3.5-10 各燃料要素の軸方向温度分布 (pin13~pin18)

3.6 流力振動

δ 型コンパートメントの燃料要素保持方式は、ワイヤスペーサ型及びシュラウド管型の2種類である。

このうち、ワイヤスペーサ型は、燃料要素被覆管の周囲にスパイラルワイヤを巻き付けることにより、シュラウド管内壁と燃料要素被覆管の間の冷却材流路間隔を保っている。

一方、シュラウド管型は、シュラウド管の内壁にディンプルを設けることにより、シュラウド管内壁と燃料要素被覆管の間の冷却材流路間隔を保っている。

ワイヤスペーサ型を使用した際は、隣接する燃料要素に巻かれているスペーサワイヤとの接触により、燃料要素被覆管に有意な減肉が発生する可能性がある。しかし、 δ 型コンパートメントは、コンパートメント内に燃料要素を1本しか装填しないため、対象となるスペーサワイヤが無く燃料要素被覆管に有意な減肉が発生することはない。

これに対し、シュラウド管型を使用した際は、燃料要素の周方向でシュラウド管内壁－燃料要素被覆管の間を流れる冷却材の圧力差により、流力振動が引き起こされ、シュラウド管内壁のディンプルと接触し、燃料要素被覆管に有意な減肉が発生する可能性がある。よって、 δ 型コンパートメントでの燃料要素と燃料要素保持部（ディンプル部）の相互作用による、燃料要素の機械設計に影響を与える被覆管（外面）の減肉を検討する。

なお、ディンプルにより燃料要素の周方向を保持する機構は、軽水炉（PWR）と同じである。よって、本評価は、PWRのフレットィング摩耗評価手法を参考に行った。

3.6.1 評価方法

(1) 被覆管の減肉評価方法

燃料要素と燃料要素保持部の相互作用は振動による擦れであり、有意な振動は主に高流量で発生（流力弾性振動）するが、高流量に至る前にカルマン渦との共振により有意な振動が発生する可能性がある。また、周方向の冷却材圧力差によってランダム振動が発生する。

本設計においては、次のとおり流力弾性振動及びカルマン渦との共振を評価するとともに、ランダム振動を主要因とする摩耗について評価する。

①不安定振動に関する評価

不安定振動の原因となるものは、流力弾性振動及びカルマン渦との共振である。不安定振動が発生する場合は、燃料要素の振幅及び加速度が急激に増加するため、デンプルと被覆管表面の接触荷重の増加を招き、摩耗が進行する。そのため、不安定振動が発生しない構造であることを確認する。

流力弾性振動については、無次元流速を算出し振動の発生の有無を判定^[7]する。また、カルマン渦との共振については、加速度計付き模擬要素を水流動試験に供し、得られる応答加速度から共振の有無を確認する。

なお、流力弾性振動は、構造物周囲の流体の流速及び流体が構造物に与える乱流衝撃による構造物の実効的管曲げ剛性の低下現象が影響していることから、流体の流速及び構造物の剛性から求めた無次元流速を用いて判定を行う。

②ランダム振動に関する評価（ランダム振動を主要因とする摩耗）

ランダム振動の原因は、構造物の周囲を冷却材が流れる際の周方向の圧力差によるものであり、流体の中に構造物を置いた場合、ランダム振動は必ず発生する。

そのため、不安定振動がないことを確認した条件で模擬要素を水流動試験に供し、ランダム振動を主要因とする模擬要素表面の有意な摩耗の有無を、目視による外観検査で確認する。

また、有意な摩耗が認められた場合は、水流動試験での摩耗量、模擬要素の振幅及び固有振動数等から摩耗速度を算出し、実機燃料要素被覆管の使用末期の摩耗量を評価する。

3.6.2 水流動試験

燃料要素の不安定振動に係わる流力振動特性を把握する振動特性試験を実施するとともに、長時間の流力振動条件下における被覆管への摩耗による減肉（ウェアマークの発生）の有無を確認する連続流水試験を実施した。

(1) 試験準備

① 試験体および試験容器

水流動試験では、振動特性試験装置（加速度計入り模擬試料ピン、シ

ユラウド管、コンパートメント及び試験容器：図 3.6-1～図 3.6-4）、及び連続流水試験装置（模擬試料ピン、シュラウド管及び試験容器：図 3.6-5～図 3.6-9）を使用した。

図 3.6-1 に示す振動測定用試料ピンは、実機燃料要素の形状、寸法、重量を模擬し、模擬燃料ペレットスタック内に、X-Y2 軸加速度計を組み込んだものである。図 3.6-4 に示される振動測定試験用試験容器は、内部に振動測定用コンパートメント 1 体を実機集合体と同様な上下支持条件で装荷し、流動条件下での振動特性を測定できるようにしたものである。図 3.6-5 および図 3.6-6 に示されるウェアマーク確認試験用試料ピンは、実機燃料要素の形状、寸法、重量を模擬し、水流動試験における流力振動によるウェアマーク発生状況を確認するためのものである。図 3.6-9 に示される連続流水試験用試験容器は、内部にシュラウド管 1 本を装荷することのできる、円形、長尺試験容器で、内径はコンパートメント内管と同等となっている。

②試験装置

試験装置の系統図を図 3.6-10 に示す。流水試験装置は試験容器、循環ポンプ、タンク、及び各種計装装置から構成されている。循環流体は循環ポンプから吐出された後試験容器の下部より上部に向かって流れ、循環ポンプに戻る。循環流体の昇温は、タンク内に設置されている電気ヒータで行った。

試験容器の流量調節は循環ポンプの回転数制御及び試験容器出口部の流量調整弁の開度調整により行なった。この 2 つの流量調整機構を併用することにより、低流量から高流量まで安定した流量が得られる構造になっている。振動特性試験では試験容器の流量は試験容器入口部に設置した電磁流量計で測定した。また、連続流水試験ではフロート式流量計により流量を測定した。図 3.6-11 に連続流水試験の系統図を示す。

③計測装置

a) 振動特性試験

試料ピンの振動は、試料ピン内部に組込んだ 2 軸加速度計により測定した。加速度計のケーブルは試料ピン上端より外部に取り出し、試験容器上部フランジ部で大気との耐圧シールを行なった。加速度計の出力はチャージアンプにより電圧信号に変換し、周波数解析器により周波数解析を行なうと共に、積分器により加速度値を変位値に変換した。図

3. 6-12 に振動測定系統図を示す。

b) 連続流水試験

所定時間経過後に試験装置の通水を停止した後、試験容器から試料ピンを取り出し、拡大鏡を使用してピン表面の目視観察を行なうと共に、代表的な部分について写真撮影を行なった。また、目視観察により摩耗が発生している可能性があるると判定された部位については、光学顕微鏡により 100 倍の倍率で観察、写真撮影を行なった。さらに顕微鏡観察により摩耗痕が認められた個所については、ピン表面と摩耗痕の底部に焦点を合わせた時の試料テーブルの動きをレーザ変位計により測定することにより摩耗深さを求めた。図 3. 6-13 に摩耗深さ測定原理図を示す。

(2) 試験条件及び試験方法

① 振動特性試験

a) 試験条件

振動特性試験装置を用いて流水試験を行い、流動振動による試料ピンの振動特性の測定を行った。

試験では、まず気中でのタッピング試験を行い、試料ピンの基本的な振動特性を把握した上で、流動条件下の振動特性を測定した。表 3. 6-1 に振動特性試験の試験条件を示す。

なお、試験流量は、D型照射リグ1号機(D1)での流量設計条件(40~60g/sec)を基準とし、高流量の60g/secを定格流量に設定し、今後の δ 型コンパートメントでの冷却材流量設定範囲を包絡すると考えられる条件で実施した。

b) 試験方法

試験方法は概略以下に示す通りである。

- i) 加速度計を組込んだスパーサワイヤ付き試料ピンをディンプル無しシュラウド管に組込む。
- ii) 試験容器内に装荷し、上部にコンパートメント押えバネを取り付け固定する。
- iii) 試験容器の外壁面に、試験容器の振動を測定するための加速度計を取り付ける。
- iv) 試験容器を外部より軽くたたき(タッピング)、加速度応答が得

- られることを確認する。さらに試験容器内に水を満たし、同様にタッピング試験により加速度応答を確認する。
- v) ポンプを運転し、徐々に循環水の流量を最大 200%まで徐々に上昇させながら加速度応答を確認する。ここでは特定の流量で試料ピンの応答が急激に大きくなることを確認する。
 - vi) 流量を所定の値に設定し安定したことを確認した後に計測を実施する。加速度応答データは 1 分間データレコーダに収録すると共に、周波数解析および加速度→変位への換算を行なう。
 - vii) 上記測定を計画した流量条件で実施する。
 - viii) 試験終了後、試験容器からシュラウド管、試料ピンの組立体を取り出しす。
 - ix) 試料ピンのワイヤーを切断して取外す。
 - x) 試料ピンをディンプル有りシュラウド管に組込む。
 - x i) 上記 ii)～vii)の手順を繰り返す。

②連続流水試験

a) 試験条件

連続流水試験装置を用いて連続流水試験を行い、流力振動による試料ピンの摩耗発生状況を調べた。連続流水試験では、摩耗発生を促進し発生状況を調べること及びディンプル高さの製作公差による影響を調べるため、ディンプル先端－燃料要素間のギャップ幅をパラメータとした。ギャップ幅は、実機設計の 0.1mm 及び摩耗促進等のための 0.2mm（製作公差の目標値、+0.05mm、-0mm）とした。また、試験では、摩耗発生を促進するため、流量を定格流量，120%相当流量，200%相当流量に設定した。表 3.6-2 に試験条件を示す。

なお、試験流量は、D型照射リグ1号機（D1）での流量設計条件（40～60g/sec）を基準とし、高流量の 60g/sec を定格流量に設定し、今後の δ 型コンパートメントでの冷却材流量設定範囲を包絡すると考えられる条件で実施した。

また、当初、定格流量で 1000 時間の試験を実施し、その後 120%相当流量，200%相当流量で合計 1000 時間の試験を実施することとなっていたが、500 時間経過後の試料ピン表面観察で初期摩耗が認められたことから、摩耗発生状況を連続的に確認するため定格流量で合計 1900 時間まで試験を継続し、その後 120%相当流量，200%相当流量でそれぞれ 50 時間の試験を実施した。

b) 試験方法

試験方法は概略以下に示す通りである。

- i) 通水前に、試料ピンの表面状態を目視にて観察し、初期状態の観察記録を行なう。また、代表的な位置の写真撮影を行なう。
- ii) 試料ピンをシュラウド管内に挿入し、試料ピン支持バネにより固定する。支持バネで固定することにより、試料ピンとシュラウド管の相対的な位置（軸方向、周方向）が決まる。試料ピンとシュラウド管を組み立てた状態で試験容器内に組込む。なお、試料ピン、シュラウド管、試験容器の組合わせは、本試験中は同一とした。
- iii) 試験装置を運転し循環水の流量を所定の値に設定する。装置運転中は1日に2回、運転状態（流量、水温、圧力、タンク水位、リークの有無）を目視にて監視した。
- iv) 所定時間の運転終了後に装置を停止し、試験容器を取外す。その後容器内から、試料ピンとシュラウド管の組立体を抜き出し、さらにシュラウド管より試料ピンを取り出す。
- v) 試料ピン表面を5倍の拡大鏡を用いて観察し、観察結果を記録する。また、代表的な部分について写真撮影を行なう。
- vi) 目視観察の結果、摩耗発生の可能性があるると判定された部分については、100倍の顕微鏡を使用して深さ測定を行なうと共に、顕微鏡写真を撮影する。
- vii) 上記ii)～vi)の手順を繰り返す。
- viii) 必要に応じて、シュラウド管ディンプル部を切り出し、ディンプル部の観察を行う。

(3) 試験結果

① 振動特性試験

試験で得られたスパーサワイヤ付き試料ピンの加速度応答の周波数分析結果を図 3.6-14～図 3.6-19 に示す。また、スパーサワイヤ無し試料ピンの加速度応答の周波数分析結果を図 3.6-20～図 3.6-25 に示す。図 3.6-26 に試験容器の加速度応答を示す。また、表 3.6-3 に卓越周波数を示す。表 3.6-4 に加速度応答を積分して得られた振動振幅を示す。

i) スパーサワイヤ付き試料ピンの加速度応答

100, 120%流量では 20Hz 近傍の応答が大きくなっている。200%流量では 30-45Hz の応答が大きくなっている。高流量域で 67Hz 近傍の応答が大きくなっているが、試験容器及びスぺーサワイヤ無し試料ピンにも同様な応答が出ていることから、試験容器の応答であると考えられる。67Hz 近傍の応答を除いた加速度応答のレベルは低く、最大でも 0.0006G 程度であった。

ii) スぺーサワイヤ無し試料ピンの加速度応答

100 流量では 10-20Hz 近傍の応答、120%流量では 20-40Hz 近傍の応答、200%流量では 20-50Hz の応答が大きくなっている。加速度応答のレベルはスぺーサワイヤ付きより高いが、最大でも 0.001G 程度であった。

iii) スぺーサワイヤ付き試料ピンの振幅

振動振幅が最も大きかったのは流量 200%の時で、 $3.7\mu\text{m}$ であった。

iv) スぺーサワイヤ無し試料ピンの振幅

振動振幅が最も大きかったのは流量 100%の時で、 $7.1\mu\text{m}$ であった。流力振動がランダム振動の場合には、流速の 2 乗に比例して振幅が大きくなるのが一般的であるが、特定の流速で振動が大きくなる要因としては、カルマン渦等による振動、あるいは振動の支持点が流速により変化したことなどが考えられる。カルマン渦等による振動では、流速に比例して発生する渦の周波数が変化し、その周波数と試料ピンの固有振動数がマッチングした時にはその流速近傍で振幅が大きくなり、場合によっては試料ピンが発振し、破損に至る可能性が考えられる。また、流体力により支持点の状態が変化して振動系が変わった場合には、流速を増加させたときに振幅が減少する可能性がある。そこで 100%近傍の流速域で流速を細かく変化させて振動応答を詳細に調べたが、これ以上振幅が増大し発振に至るような現象は見られなかった。

②連続流水試験（試料ピンの摩耗）

図 3.6-27 に試験装置の運転状況と摩耗観察を行った時点を示す。摩耗観察は試験前を含め、合計 10 回実施した。

表 3.6-5 に試料ピンとデンプル接触部の目視観察結果を示す。図 3.6-28 に、連続流水試験の開始前に撮影した代表的な試料ピン表面状態の外観を示す。

摩耗痕発生部の試料ピン表面観察結果（100 倍の顕微鏡写真）を図 3.6-29～図 3.6-44 に示す。図中右下の bottom view は、試料ピンに発生した摩耗痕の周方向位置（No. 1～No. 3）を示す。

a) 0 時間（通水前）

連続流水試験実施前に試料ピンの表面状態を目視にて観察した。観察結果を以下に示す。

・すべての試料ピン

- i) 試料ピン表面のデンプルとの干渉位置に光沢が見られるが深さはない。これは試料ピンの表面には管の製造時の冷間引抜きによる細かな傷が軸方向に一様に付いているが、ハンドリング中あるいは輸送中の振動により金属どうしがこすれることにより、細かな傷が削られて滑らかな表面になったものである。
- ii) 試料ピン表面に細かな傷が認められた。これは試料ピン製造時あるいはハンドリング時に付けられた傷である。

b) 100 時間経過後

連続流水試験開始から 100% 流量で 100 時間経過後に試験装置から試料ピンを取出し、表面状態を観察した。観察結果を以下に示す。

・すべての試料ピン

- i) 試料ピン表面のデンプルとの干渉位置に光沢が見られるが深さはなく、摩耗が発生しているとは言えない。この光沢は試験前の状態でも既に存在しており、試料ピンのハンドリング中あるいは輸送中の振動により生じたものと推察される。
- ii) 100% 流量での 100 時間の流動では摩耗の発生は見られなかった。

c) 500 時間経過後

連続流水試験開始から 100% 流量で 500 時間経過後に試験装置から試料ピンを取出し、表面状態を観察した。観察結果を以下に示す。

- ・ピン径 6.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 100 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

- ・ピン径 6.5mm-ギャップ 0.2mm
 - i) 下部から 2 段目のディンプル位置の試料ピン表面に摩耗痕が認められた。他の部分は 100 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。
 - ii) 試料ピン表面に摩耗痕が認められた部分について顕微鏡を使用して深さの測定、拡大写真撮影を行った。本測定手法で得られた結果については、拡大写真から推定した深さとの比較を行い、両者が大きく変わらないことを確認している(表 3.6-6 参照)。

- ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 100 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

- ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.2mm
 - i) 100 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

- d) 700 時間経過後
 - 700 時間経過時点で試験装置の運転を停止し、試料ピンを取出した。
 - ・ピン径 6.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 500 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

 - ・ピン径 6.5mm-ギャップ 0.2mm
 - i) 500 時間経過後の状態と同様に、下部から 2 段目のディンプル位置の試料ピン表面に摩耗痕が認められた。他の部分は 500 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。
 - ii) 500 時間経過時点で最も試料ピン表面の摩耗痕が大きくなっていた径方向位置 No. 1 の状態は、700 時間経過後でも摩耗痕形状、深さとも変化が見られなかった。径方向位置 No. 2 は 700 時間

経過後でも明確にディンプル形状の凹部とはなっておらず、従って深さにも変化は見られなかった。径方向位置 No. 3 は 500 時間経過後に比べて摩耗痕が明確になっており、深さも増大していた。No. 1 位置の摩耗痕に変化が見られず、No. 3 位置の摩耗痕が進行した原因としては以下の理由が考えられる。

- No. 1 位置は既にディンプルと試料ピンの接触面積が大きくなっているため、摩耗深さの進行が減少した。
- 試料ピンの振動性状が変化して、No. 3 位置の摩耗が進行しやすくなった。

・ ピン径 8.5mm, ギャップ 0.1mm

i) 500 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

・ ピン径 8.5mm, ギャップ 0.2mm

i) 500 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

e) 1000 時間経過後

1000 時間経過時点で試験装置の運転を停止し、試料ピンを取出した。

・ ピン径 6.5mm, ギャップ 0.1mm

i) 700 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

・ ピン径 6.5mm-ギャップ 0.2mm

i) 500, 700 時間経過後の状態と同様に、下部から 2 段目のディンプル位置の試料ピン表面に凹部が認められた。また同一試料ピンの下から 3 段目, 4 段目のディンプル位置にわずかに摩耗痕が見られた。

ii) 700 時間経過時点で最も試料ピン表面の摩耗痕が大きくなっていた下部から 2 段目のディンプル位置の摩耗痕の深さは進行していなかった。このことから、既にディンプルと試料ピンの接触面積が大きくなっているため、摩耗が進まなかったものと推

測される。

- ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 700 時間経過時点に比べて接触部分の金属光沢がはっきりとして明確になっていた。

- ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.2mm
 - i) 下部から 2 段目, 3 段目のディンプル位置の試料ピン表面にもわずかな摩耗痕が認められた。

- f) 1300 時間経過後
 - 1300 時間経過時点で試験装置の運転を停止し、試料ピンを取出した。
 - ・ピン径 6.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 1000 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

 - ・ピン径 6.5mm-ギャップ 0.2mm
 - i) 1000 時間経過時点で最も凹部が顕著に現れていた下部から 2 段目のディンプル対応位置の摩耗痕深さはわずかに増加しているものの測定誤差の範囲内であり、摩耗痕部分の面積もほとんど変化が見られないことから、摩耗の進行速度が遅くなっているものと考えられる。一方、下部から 3 段目, 4 段目のディンプル対応位置の摩耗については多少進行する傾向が見られる。ただし、深さは 10 μ m 以下である。

 - ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 下部から 2 段目, 3 段目のディンプル対応位置で新たに試料ピン表面に摩耗痕が認められた。1000 時間経過後の観察では、ディンプルとの接触痕が明確になっていた個所である。

 - ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.2mm
 - i) 下部から 2 段目, 3 段目のディンプル対応位置の摩耗痕深さもわずかに増加しているもの、深さは 5 μ m 程度である。

g) 1600 時間経過後

1600 時間経過時点で試験装置の運転を停止し、試料ピンを取出した。

・ピン径 6.5mm, ギャップ 0.1mm

i) 1300 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

・ピン径 6.5mm-ギャップ 0.2mm

i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1300 時間経過後と同等であった。

・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.1mm

i) 1300 時間経過時点で下部から 2 段目, 3 段目のディンプル対応位置で新たに試料ピン表面に摩耗痕が認められたが、1600 時間経過後の観察ではそれ以上の摩耗痕深さの進行は見られなかった。

・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.2mm

i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1300 時間経過後と同等であった。

h) 1900 時間経過後

1900 時間経過時点で試験装置の運転を停止し、試料ピンを取出した。

・ピン径 6.5mm, ギャップ 0.1mm

i) 1600 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

・ピン径 6.5mm-ギャップ 0.2mm

i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1600 時間経過後と同等であった。

・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.1mm

i) 摩耗深さは 1600 時間経過後に比べてわずかに増加していたが、増加量は $1\ \mu\text{m}$ と微少であった。

- ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.2mm
 - i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1600 時間経過後と同等であった。

- i) 1950 時間経過後
 - 1950 時間経過時点で試験装置の運転を停止し、試料ピンを取出した。なお、1900 時間から 1950 時間の間は定格の 120%流量で運転を行なった。
 - ・ピン径 6.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 1900 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

 - ・ピン径 6.5mm-ギャップ 0.2mm
 - i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1900 時間経過後と同等であった。

 - ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1900 時間経過後と同等であった。

 - ・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.2mm
 - i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1900 時間経過後と同等であった。

- j) 2000 時間経過後
 - 2000 時間経過時点で試験装置の運転を停止し、試料ピンを取出した。なお、1950 時間から 2000 時間の間は定格の 200%流量で運転を行なった。
 - ・ピン径 6.5mm, ギャップ 0.1mm
 - i) 1950 時間経過時点からの顕著な表面状態の変化は認められなかった。

 - ・ピン径 6.5mm-ギャップ 0.2mm
 - i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1950 時間経過

後と同等であった。

・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.1mm

i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1950 時間経過後と同等であった。

・ピン径 8.5mm, ギャップ 0.2mm

i) 摩耗が発生している個所に付いて、摩耗深さは 1950 時間経過後と同等であった。

③連続流水試験（シュラウド管ディンプルの摩耗）

連続流水試験では試料ピンとシュラウド管の組み合わせにより摩耗の発生状況に差が生じている。そこで連続流水試験のシュラウド管への影響を調べるために、試験終了後にシュラウド管を切断し、ディンプル部内径、ディンプル-試料ピン接触部の観察を行った。

a) ディンプル部内接円径測定

ディンプル部内接円径を測定するため、各シュラウド管の下から 1 段目のディンプル近傍でシュラウド管を横方向に高速回転式カッターで切断し、ピンゲージによりディンプル部内接円径を測定した。また、試料ピンの外径も当該ディンプル近傍についてマイクロメータで測定した。測定結果を表 3.6-7 に示す。表から明らかなように、ディンプル部内接円径および試料ピン外径はいずれも製作公差内となっている。しかし、 $\phi 8.5\text{mm}$ の試料ピンの場合、ディンプル先端-燃料要素間のギャップは、0.1mm 及び 0.2mm（製作公差の目標値、 $+0.05\text{mm}$ 、 -0mm ）から外れている。ディンプル先端-燃料要素間のギャップについては $\phi 6.5\text{mm}-0.1\text{mm}$ のケースでは 0.13mm であるが、 $\phi 8.5\text{mm}-0.1\text{mm}$ のケースでは 0.24mm。また、0.2mm ギャップ条件については試料ピン $\phi 6.5\text{mm}$ のケースで 0.23mm、 $\phi 8.5\text{mm}$ のケースで 0.31mm となっている。

以上のことから、2000 時間の連続流水試験で試料ピン表面に摩耗が発生したケースではディンプル先端-燃料要素間のギャップがいずれも 0.2mm 以上となっており、一方摩耗が発生しなかったケースではギャップが 0.13mm となっていることが判った。

b) ディンプル－試料ピン接触部の観察

ディンプル－試料ピン接触部の観察を行うため、各シュラウド管の下から2段目のディンプル近傍でシュラウド管を高速回転式カッターで切断し、光学式顕微鏡によりディンプル表面の観察を行った。

φ6.5mm-0.1mm のケースでは、周方向位置 No. 1 については明確な接触跡は認められないが、周方向位置 No. 2 および No. 3 については表面にこすれ跡が認められる。このこすれ跡は軸方向に付いていることから、流動下での振動により生じたものではなく、シュラウド管への試料ピンの挿入、引抜き時にこすれて生じたものであると考えられる。周方向位置 No. 1 のみこすれ跡が付いていないのは、試料ピンの挿入、引抜き時にはシュラウド管と試料ピンを横に置いた状態で常に周方向位置 No. 1 を上方にして作業を行ったために、周方向位置 No. 2 および No. 3 のディンプル上を試料ピンが移動したためであると考えられる。

他のケースではいずれも同一周方向位置でディンプル表面は同様な状態となっている。つまり、周方向位置 No. 1 についてはディンプル中央部では周囲の金属表面状態とは異なった表面となっているが、これは試料ピンにより表面がこすられて滑らかなになったものと考えられる。周方向位置 No. 2 および No. 3 についてはやはり軸方向に表面にこすれ跡が認められるが、場所によっては表面が滑らかな部分も見られる。

3.6.3 評価結果

δ型コンパートメントの振動解析及び水流動試験の結果、有意な振動は発生せず、有意な摩耗も見られなかったことから、燃料要素の機械設計に影響を与える被覆管の減肉は発生しないものと判断した。

詳細を以下に示す。

(1) 不安定振動に関する評価

① 流力弾性振動の発生

流力弾性振動の発生の有無を無次元流速により評価した。表 3.6-8 のとおり、無次元流速の設計比が最大 0.08 であるため、流力弾性振動は発生しない。

また、振動特性測定試験結果においても表 3.6-4 に示すように、200%流量で平均振幅は約 4 μm とわずかなものであった。このことから、試験的にも試料ピンに流体弾性振動は発生していないことを確認した。

②カルマン渦との共振

水流動試験に供した加速度計付き模擬要素からの応答加速度から、カルマン渦との共振の有無を評価した。評価結果を図 3.6-45 に示す。図は、水流動試験時の定格流量 (60g/sec) を 100% とし、周波数 100Hz まで、流量 200% まで 20% 毎に応答加速度の出力 (燃料要素の振幅に相当) を測定したデータを示したものである。

燃料要素の固有振動数は、 $\phi 8.5\text{mm}$ の燃料要素で 270Hz であり、カルマン渦の発生振動数^[8] ((1)式より算出) である 40Hz (定格流量時) に比べ、十分共振点は離れている。カルマン渦発生上留意すべき領域は、燃料要素後流側に発生するカルマン渦の周波数の 20~30% の幅の領域であり、この領域での応答加速度の最大出力は、流量 200%、周波数 60Hz で 0.02g (10mV) である。これはカルマン渦の影響による出力とみなせるが、 δ 型コンパートメントの使用範囲外であり、応答加速度を解析した結果得られる振幅も 0.001mm と小さく問題とはならない。振幅の算出方法を(2)式に示す。

従って、 δ 型コンパートメントの使用流量範囲内においては、カルマン渦との作用による出力は認められず、カルマン渦との共振は発生しないと判断した。

なお、水流動試験条件と実機条件では、流体の種類、温度及び燃料要素径が異なっているが、カルマン渦との共振は、構造及び流体の流速に依存するため、流体の種類は問題とはならない。また、温度については、実機条件では水流動試験時の条件に比べ温度が高くなるので燃料要素の剛性が低下し、固有振動数が若干低下するが、(1)式で求めたカルマン渦の発生振動数とは十分離れており問題とはならないと考える。さらに、燃料要素径については、径が異なる場合でも流路構造がほぼ相似形であるため相似則^[9]により流動特性がほぼ同じになると考えられること及び燃料要素の固有振動数と(1)式で求めたカルマン渦の発生振動数とが十分離れていることから、問題とはならないと考える。

$$f = St \frac{v}{d} \dots \dots \dots (1)$$

f : カルマン渦の周波数

St : ストローハル数

V : 流速
 d : 燃料要素径

$$\delta = \frac{A}{(2\pi f)^2} \dots \dots \dots (2)$$

δ : 振幅
 A : 応答加速度
 f : 振動数

(2) ランダム振動を主要因とする摩耗

上記(1)において、 δ 型コンパートメントの使用流量範囲では不安定振動が発生しない事を確認した上で、その条件で、模擬要素を水流動試験に供し、ランダム振動を主要因とする有意な摩耗の発生の有無を目視により確認した。

燃料要素（外径 ϕ 6.5mm、ディンプル先端－燃料要素間のギャップ0.1mm条件）では、目視による外観検査の結果、有意な摩耗は見られなかった。従って、ランダム振動を主要因とする摩耗も問題とはならないと考える。

なお、燃料要素（外径 ϕ 8.5mm、ディンプル先端－燃料要素間のギャップ0.1mm条件）については、以下の理由により摩耗が発生しないと考えられる。

- ・連続流水試験では摩耗が観察されたが、試験後のシュラウド管内面の観察により、実際のギャップ幅が0.2mm以上であったこと。
- ・ ϕ 8.5mmの燃料要素に比べ、剛性が弱く振動振幅が大きくなるため摩耗による減肉が進みやすい ϕ 6.5mmの燃料要素（ディンプル先端－燃料要素間のギャップ0.1mm条件）で摩耗が観察されなかったこと。

また、連続流水試験により、ディンプル先端－燃料要素間のギャップは試料ピンの摩耗に影響を与えることが明らかとなった。従って、実機製作設計にあたってはディンプル先端－燃料要素間のギャップ幅0.2mmで摩耗が観察されたため、ギャップ幅を0.1mm \pm 製作公差の目標値（+0.05mm、-0mm）内で収める製作管理方法を検討する必要がある。

3.6.4 水流動試験結果に関する考察

(1) 10000 時間後の摩耗深さの予測

本試験ではディンプル先端－燃料要素間のギャップが0.2mm以上のものについて、燃料要素被覆管表面の摩耗深さのデータが得られた。ここでは、得られたデータを基に10000時間運転後（D型照射リグ1体当たりの使用期間に相当）の燃料要素表面の摩耗深さを予測する。

表3.6-9～表3.6-11に測定した試料ピンの凹部深さを示す。また、図3.6-46～図3.6-52に試料ピンの凹部深さの時系列変化を示す。本試験は100%流量に換算すると、2172時間運転に相当する。

なお、本ケース（ディンプル先端－燃料要素間のギャップが0.2mm以上）については、実機条件と異なるため固有振動数解析等を行っていないことから、摩耗部の幾何形状及び摩耗深さの時間推移の近似曲線から摩耗量を予測した。

① 摩耗幾何形状に基づいた予測

100倍の顕微鏡観察の結果より、摩耗部の形状はディンプル部の形状に対応していることが明らかである。摩耗部の深さが深くなるほど摩耗部とディンプル部の接触面積が大きくなり、単位面積当たりの面圧が低下するため、摩耗の進行も徐々に停止する。そこで、安全側に2172時間以降も同様な形状で摩耗が進行すると仮定する。また、ディンプルの曲率に比べて試料ピンの曲率の方が十分大きいことから、ディンプル先端が平板と摩耗していると仮定する（下図参照）。

摩耗体積 V と摩耗深さ h の間には次式の関係がある。

$$V = \frac{1}{3} \pi h^2 (3r - h) \quad \dots \dots \dots (3)$$

(3) 式を微分すると

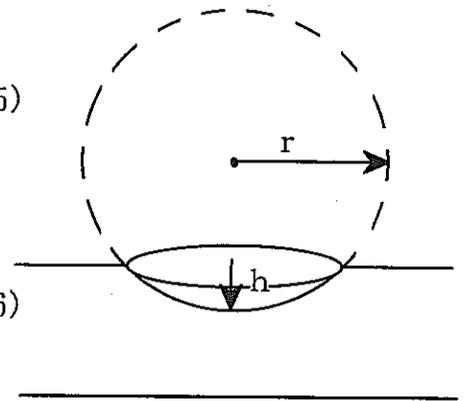
$$\frac{dV}{dh} = 2\pi rh - \pi h^2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

単位時間あたりの摩耗量が一定と仮定すると、

$$\frac{dV}{dh} = w \quad \dots \dots \dots (5)$$

wは定数であるから、

$$\frac{dV}{dh} = \frac{w}{2\pi rh - \pi h^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$



(6)式を積分すると、

$$\pi rh^2 - \frac{\pi}{3} h^3 = wt + c \quad \dots \dots \dots (7)$$

t = 0 で h = 0 であるから、C = 0
従って、

$$\pi rh^2 - \frac{\pi}{3} h^3 = wt \quad \dots \dots \dots (8)$$

ディンプル加工部の形状より、ディンプル外面球の半径は 1.3mm (内寸法+シュラウド管板厚) である。また、本試験で得られている最大摩耗深さは、0.011mm (11μm) である。これらを(8)式に代入して、単位時間あたりの摩耗量 W を求める。

$$w = 2.26 \times 10^{-7} \quad \text{mm}^3/\text{hr} \quad \dots \dots \dots (9)$$

(8), (9)式より、10000 時間後の摩耗深さは、0.0236mm → 24μm

ここで得られた、経過時間と摩耗深さの関係を試験データと比較して図 3.6-53 に示す。図からも明らかのように上述の摩耗予測はかなり保守的であることが判る。この原因は、一般的には単位時間あたりの摩耗量は一定ではなく時間の経過につれて減少するためである^[10]。また、後述する試験データの近似曲線からの予測と初期に摩耗深さの予測値が大きくずれているのは、幾何形状からの予測を行う上で、2000 時間時点の測定結果を使用したためである。

②試験データの近似曲線からの予測

図 3.6-46～図 3.6-52 に示すように、本試験では経過時間に対する試料ピン表面の凹部の深さの傾向が明確に得られている。そこで、本試験で最も摩耗が進行したデータを近似式にあてはめ、10000 時間経過後の摩耗深さを予測した。近似式はデータの傾向から対数近似式を用いた。得られた近似式は下記の通りであり、また近似式と試験データの比較を図 3.6-53 に示す。

$$h = 3.3445 \times \ln(t) - 13.464 \quad \dots \dots \dots (10)$$

(10) 式により予測した 10000 時間経過後の摩耗深さは、 $18 \mu\text{m}$ である。

③10000 時間後の摩耗予測

ここでは、2 種類の方法により 10000 時間経過後の摩耗深さの予測を行った。この中で、摩耗部の幾何形状から予測する手法は保守的すぎるということが明らかである。一方、今回の試験では 1300 時間経過時点でもっとも摩耗が進行している部分の摩耗深さは $11 \mu\text{m}$ であり、その後 2172 時間（100%流量換算）までその部分の摩耗は進行しておらず、他の部分についても 1900 時間以降は摩耗が進行していないことから、試料ピンとシュラウド管ディンプルの摩耗は $11 \mu\text{m}$ 程度で飽和するとも考えられるが、摩耗予測としては非安全側の判断となる。

以上のことから、試料ピンとシュラウド管ディンプルの摩耗予測としては、試験データの近似曲線により予測するのが妥当であると考えられる。なお、この予測手法でも下記に示すように明らかに安全側の予測となっている。

- a) 最も摩耗が進行した試料ピンとシュラウド管ディンプル間ギャップが 0.2mm のデータを用いたこと。実機で使用する 0.1mm ギャップのケースでは最大摩耗は $7 \mu\text{m}$ である。
- b) 対数近似曲線でも、試験データの予測は経過時間が多くなるほど過大な予測となる。

(2) 摩耗発生メカニズム

本試験の結果得られた摩耗痕の状態より、D型照射リグのシュラウド管ディンプルと試料ピンの摩耗メカニズムを推定する。

試験の結果得られた摩耗痕の形状は、シュラウド管ディンプルの形と同様な形状で試料ピンの表面が欠落していた。この摩耗形状から推定すると試料ピンがディンプル先端に軽く接触した状態で、冷却材の流れによる燃料棒の振動による径方向に周期的な荷重が作用し、摩耗が発生したものと考えられる。

本試験では摩耗発生時期に差が生じているが、上記メカニズムによる場合には、冷却材の流れによる試料ピンのディンプルへの押し付けは流況のわずかな違いにより差が生じる恐れがあること、および、実際にはわずかに摩耗が発生していた場合でも摩耗深さの測定限界が $2\mu\text{m}$ 以上であるためそれ以上の深さにならないと測定値としてデータが得られないこと等が原因であると考えられる。

表 3. 6-1 振動特性試験の試験条件

項目	内容
試験容器	コンパートメント模擬体(支点間距離:200mm)
試験体	加速度計入り模擬燃料要素(外径:8.5mm, 肉厚:0.50mm)
試験出力	模擬燃料要素の応答加速度
試験パラメータ	コンパートメント内流量(12~120 g/sec, 12 g/sec毎に11点測定)

表3. 6-2 連続流水試験の試験条件

項目	内容			
試験容器	コンパートメント模擬体(支点間距離:200mm)			
試験体	模擬要素(2種類) 材質:SUS316, 外径:6.5mm, 肉厚:0.47mm 材質:SUS316, 外径:8.5mm, 肉厚:0.50mm			
試験条件	水温	20℃		
	流量	60g/sec	72g/sec	120g/sec
	試験時間	1900時間	50時間	50時間
	シラウト管 ディンプル 燃料要素間隔	0.1mm, 0.2mm		
試験出力	模擬要素被覆管の摩耗の有無(摩耗深さ)			
確認方法	目視による外観検査(深度顕微鏡)			

表3.6-3 卓越周波数

単位：Hz

ワイヤー有り

流量(%)	卓越周波数							
	100	X	18.25	24.75	54.5	81.25	90.75	
Y		18.25	23	36.25	54.5	63.75	72.5	90.75
120	X	17.5	21.25	42.5	63.75	82.75	85	
	Y	21.25	42.5	63.75	79.5	85		
200	X	17.75	23	33.5	46	67	80.5	
	Y	24.75	33.25	46	67	81.25		

ワイヤー無し

流量(%)	卓越周波数							
	100	X	7.00	23.00	24.75	52.00	69.50	87.25
Y		15.75	23.25	52.25	69.50	87.25	99.50	
120	X	20.50	22.75	24.75	41.25	62.00	82.25	
	Y	20.50	28.00	41.25	62.00	71.50	82.25	
200	X	17.75	23.00	33.75	38.00	64.50	80.00	96.25
	Y	17.50	23.25	39.25	64.50	80.25	96.00	

表3.6-4 振動特性試験結果

スパーサ条件 流 量		平均振幅 μm	
		ワイヤスパーサ	シュラウド管ディンプル
100%	1.8	7.1	
120%	1.6	2.9	
200%	3.7	2.7	

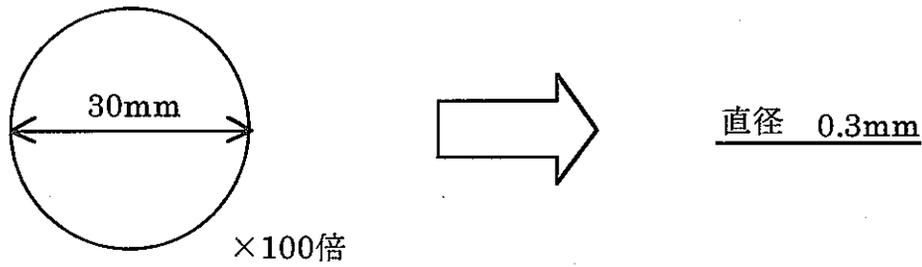
表3.6-5 試料ピン表面目視観察結果

ギャップ	位置(mm)	試験時間																				
		試験前		100時間		500時間		700時間		1000時間		1300時間		1600時間		1900時間		1950時間		2000時間		
		数	観察結果	数	観察結果	数	観察結果	数	観察結果	数	観察結果	数	観察結果	数	観察結果	数	観察結果	数	観察結果	数	観察結果	
φ8.5	0.1	294	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		494	-	-	-	-	-	-	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		694	-	-	-	-	-	-	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		894	-	-	-	-	-	-	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1094	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1294	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1494	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1694	-	-	-	-	-	-	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
	0.2	242	1	D	1	D	1	D	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ
		296	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ
		294	3	D	3	D	3	W	3	W	3	W	3	W	3	W	3	W	3	W	3	W
		439	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ
		494	3	D	3	D	3	D	3	D	3	W	3	W	3	W	3	W	3	W	3	W
		496	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ
		694	3	D	3	D	3	D	3	D	1	W	1	W	1	W	1	W	1	W	1	W
		894	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
φ8.5	0.1	1094	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1294	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1494	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1694	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		244	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	2	W	2	W	2	W	2	W	2	W
		444	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	W	3	W	3	W	3	W	3	W
		644	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	D	1	D	1	D	1	D	1	D	1	D	1	D
		677	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ
	0.2	810	3	D	3	D	3	D	3	キズ	3	キズ	3	キズ	3	キズ	3	キズ	3	キズ	3	キズ
		844	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1044	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1244	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1444	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		1644	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D
		245	3	D	3	D	3	D	3	D	1	W	1	W	1	W	1	W	1	W	1	W
		445	3	D	3	D	3	D	3	D	1	W	1	W	1	W	1	W	1	W	1	W
0.2	645	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	
	854	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	
	1045	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	
	1244	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	
	1445	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	
	1645	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	3	D	
	1566~1575	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	
	1603~1631	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	1	キズ	

W: 試料ピン表面に凹部 D: デンプルあたりマーク

表3.6-6 摩耗深さの算出

100%流量×500時間経過後に観察された、φ6.5mm—ギャップ0.2mmの試料ピン下部摩耗痕の深さを顕微鏡写真より推定した。



デインプルは半径1mmの半球型に成形されており、その形状で試料ピン表面に摩耗が発生していると仮定して摩耗深さを推定する。

$$s = 2r \sin \frac{1}{2}\theta$$

$$h = r(1 - \cos \frac{1}{2}\theta)$$

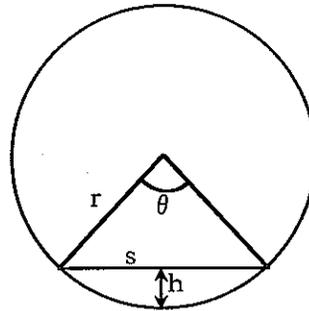
$$s = 0.3, \quad r = 1$$

$$0.3 = 2 \sin \frac{1}{2}\theta$$

$$\theta = 0.301^\circ$$

$$h = 1(1 - \cos \frac{0.301}{2})$$

$$\doteq 0.0113\text{mm}$$



11.3 μmとなり、顕微鏡の焦点調整による評価結果(9.4 μm)に近い値が得られた。

表3.6-7 ディンプル内径測定結果

単位:mm

ケース	シュラウドディンプル内接円径				試料ピン外径			シュラウドディンプル 試料ピンギャップ
	設計値	+公差	-公差	実測値	設計値	公差	実測値	
φ6.5-0.1	6.6	0.20	-0.05	6.65	6.5	±0.03	6.52	0.13
φ6.5-0.2	6.7	0.20	-0.05	6.75	6.5	±0.03	6.52	0.23
φ8.5-0.1	8.6	0.20	-0.05	8.76	8.5	±0.03	8.52	0.24
φ8.5-0.2	8.7	0.20	-0.05	8.83	8.5	±0.03	8.52	0.31

表 3.6-8 流力弾性振動の判定結果

燃料要素径 (mm)	流力弾性振動					
	設計流速* ¹ (m/sec)	評価流速 (m/sec)	無次元 流速 * ²	判定値* ²	設計比	判 定
5.5	0.4 ~4.6	4.6	0.11	1.5	0.08	発生しない
6.5	0.5 ~2.6	2.6	0.06	1.5	0.04	発生しない
8.5	0.9 ~2.8	2.8	0.05	1.5	0.03	発生しない

*1) 圧力損失バランスが成立する設計流速の範囲。

燃料要素径に適用可能なシュラウド管の最大径と最小径を使用し、算出した。

*2) 無次元流速の算出式は、軸方向流れの条件下での式を使用した。

$$\text{無次元流速 } u = (\rho A / E I)^{1/2} U L$$

$u > 1.5$: 流力弾性振動が発生

$u \leq 1.5$: 流力弾性振動は発生しない

ρ : 流体密度 I : 断面二次モーメント

A : 断面積 U : 流速

E : ヤング率 L : 管長

表3.6-9

摩耗深さ測定結果 ($\phi 6.5\text{mm}$ -ギヤップ 0.2mm)単位 ; μm

経過時間 hr	流量100%換算時間 hr	下から294mm位置			下から494mm位置			下から694mm位置		
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3
100	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	500	10	4	6	—	—	—	—	—	—
700	700	10	4	9	—	—	—	—	—	—
1000	1000	10	4	9	2	2	2	—	—	2
1300	1300	11	6	9	9	7	5	—	—	6
1600	1600	11	6	9	9	7	5	—	—	6
1900	1900	11	6	9	9	7	6	—	—	7
1950	1972	11	6	9	9	7	6	—	—	7
2000	2172	11	6	9	9	7	6	—	—	7

— : 測定限界以下

表3.6-10 摩耗深さ測定結果 ($\phi 8.5\text{mm}$ -ギャップ 0.1mm) 単位; μm

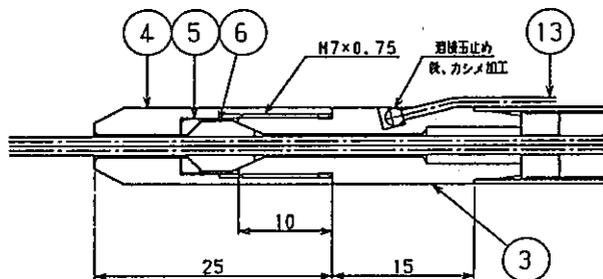
経過時間 hr	流量100%換算時間 hr	下から294mm位置			下から494mm位置		
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3
100	100	—	—	—	—	—	—
500	500	—	—	—	—	—	—
700	700	—	—	—	—	—	—
1000	1000	—	—	—	—	—	—
1300	1300	5	—	5	5	3	5
1600	1600	5	—	5	5	3	5
1900	1900	7	—	6	6	3	7
1950	1972	7	—	6	6	3	7
2000	2172	7	—	6	6	3	7

— : 測定限界以下

表3.6-11 摩耗深さ測定結果 ($\phi 8.5\text{mm}$ -キヤップ 0.2mm) 単位; μm

経過時間 hr	流量100%換算時間 hr	下から294mm位置			下から494mm位置		
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3
100	100	—	—	—	—	—	—
500	500	—	—	—	—	—	—
700	700	—	—	—	—	—	—
1000	1000	—	2	—	—	2	—
1300	1300	—	5	—	—	5	—
1600	1600	—	5	—	—	5	—
1900	1900	—	5	—	—	6	—
1950	1972	—	5	—	—	6	—
2000	2172	—	5	—	—	6	—

— : 測定限界以下



符号	名称
1	被覆管
2	下部端栓
3	上部端栓(1)
4	上部端栓(2)
5	シール材抑え
6	シール材
7	抑え板付プレナムスリーブ(上)
8	抑え板付プレナムスリーブ(下)
9	反射体ペレット(上)
10	反射体ペレット(下)
11	プレナムスプリング
12	模擬ペレット
13	スペーサワイヤ
14	加速度計

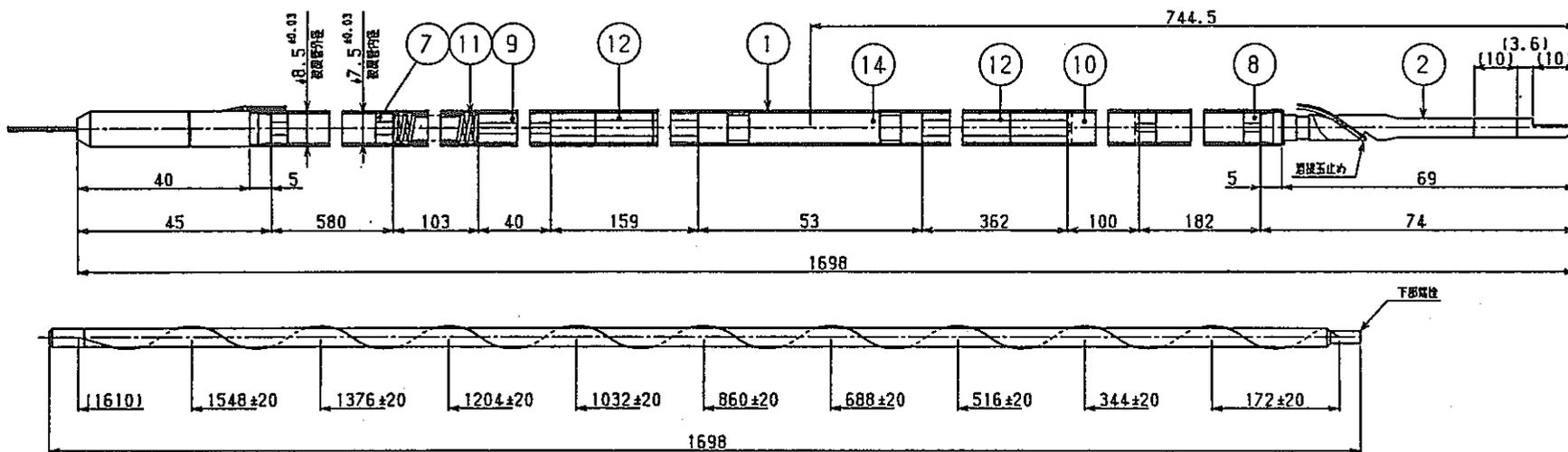


図 3.6-1 振動特性試験装置 (加速度計入り模擬試料ピン)

符号	名称
1	シュラウド素管(ディンプル無し)
2	シュラウド素管(ディンプル有り)
3	下部ストレナ
4	オリフィスホルダ
5	試料ピン支持バネ

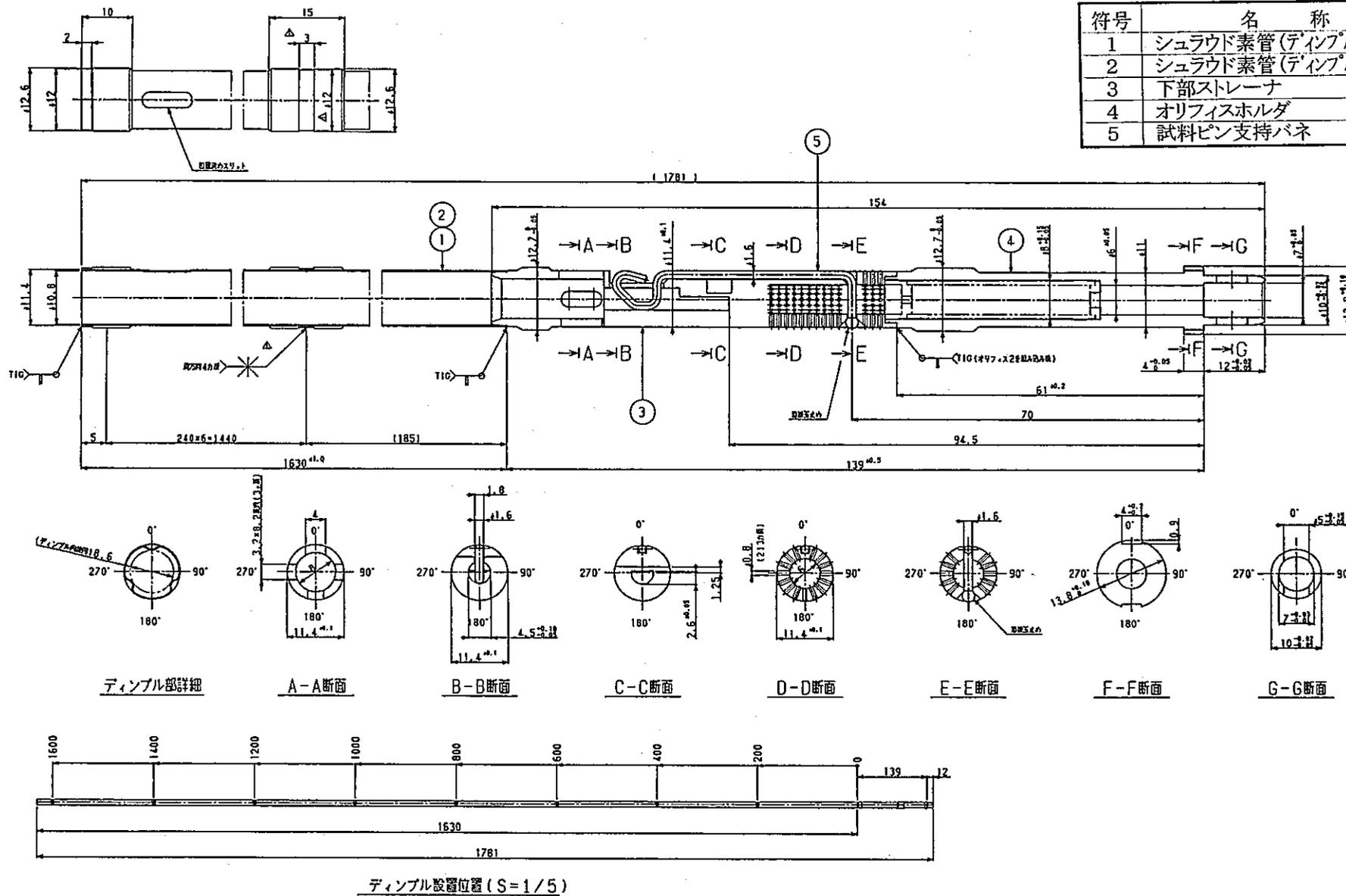
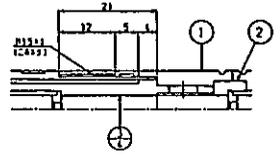
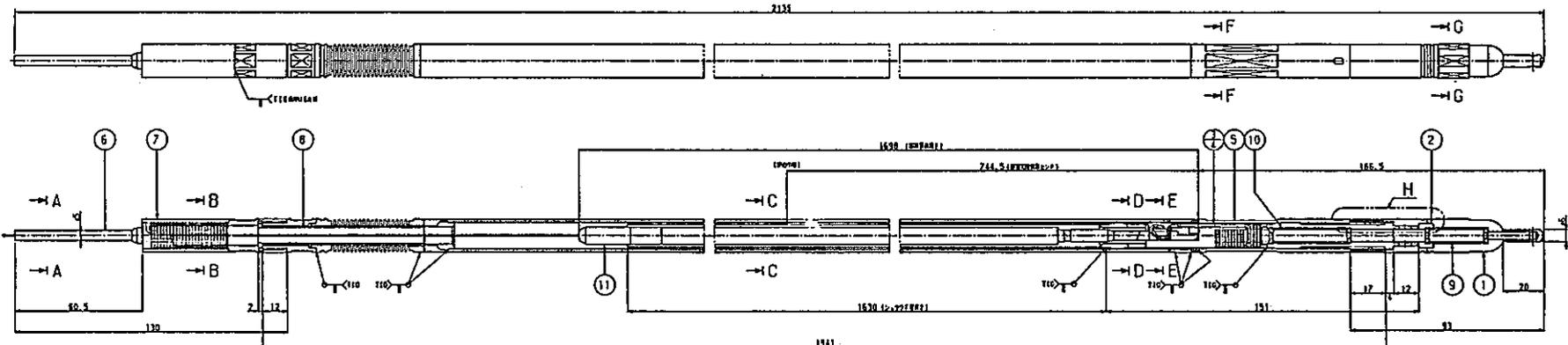
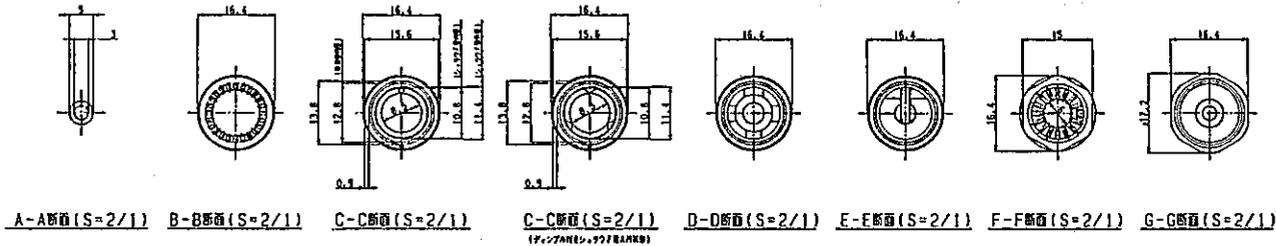


図 3.6-2 振動特性試験装置 (シュラウド管)

符号	名称
1	流入管
2	スリーブ
3	シユラウド管組立(デインブル無し)
4	シユラウド管組立(デインブル有り)
5	断熱管組立
6	上部ストレナ
7	エンクロージャ
8	模擬TED収納具
9	オリフィス(1)組立
10	オリフィス(2)組立
11	試料ピン(加速度計入り)組立



H-H断面(S=2/1)

図 3.6-3 振動特性試験装置 (コンパートメント)

符号	名称
1	被覆管(下部)
2	被覆管(上部)
3	試験容器(下部)
4	試験容器(上部)
5	観察管
6	下部支持板
7	上部支持板
8	リード線取出フランジ
9	パッキン
10	六角ボルト
11	六角ボルト
12	六角ボルト
13	六角ボルト
14	六角ナット
15	六角ナット

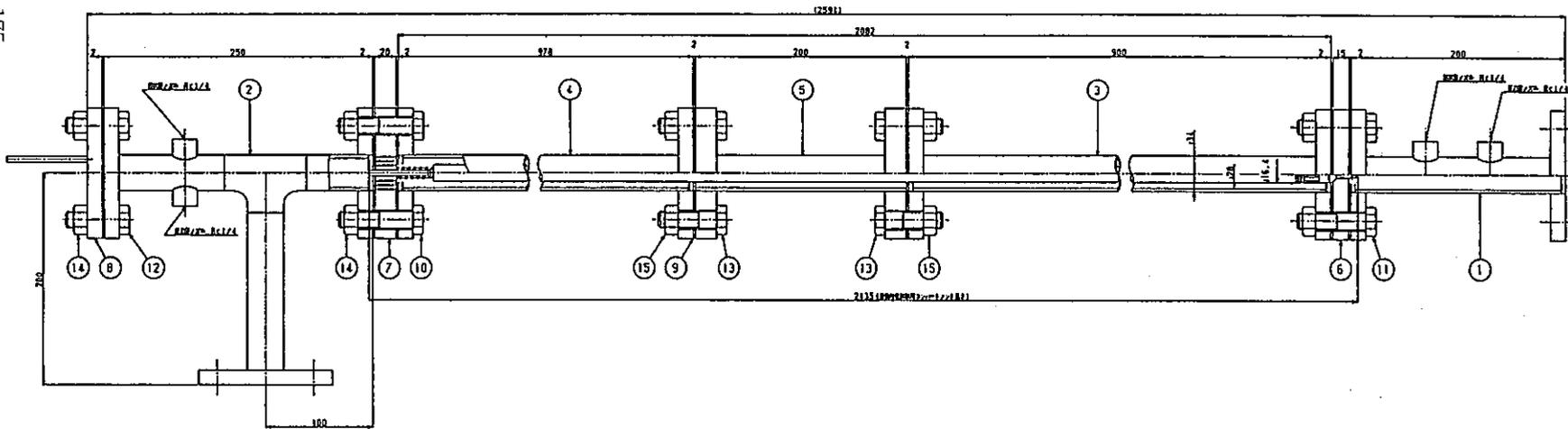


図 3. 6-4 振動特性試験装置 (試験容器)

符号	名 称
1	被覆管
2	下部端栓
3	上部端栓
4	抑え板付プレナムスリーブ
5	反射体ペレット(上)
6	反射体ペレット(下)
7	プレナムスプリング
8	模擬ペレット

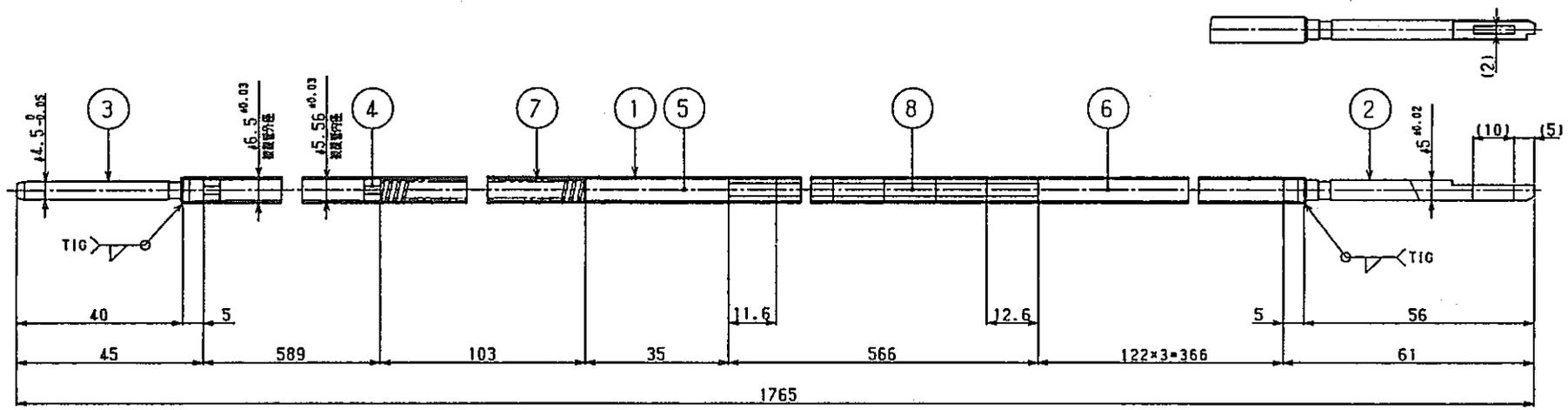


図 3.6-5 連続流水試験装置 (模擬試料ピン、φ6.5mm)

符号	名称
1	被覆管
2	下部端栓
3	上部端栓
4	抑え板付プレナムスリーブ(上)
5	抑え板付プレナムスリーブ(下)
6	反射体ペレット(上)
7	反射体ペレット(下)
8	プレナムスプリング
9	模擬ペレット

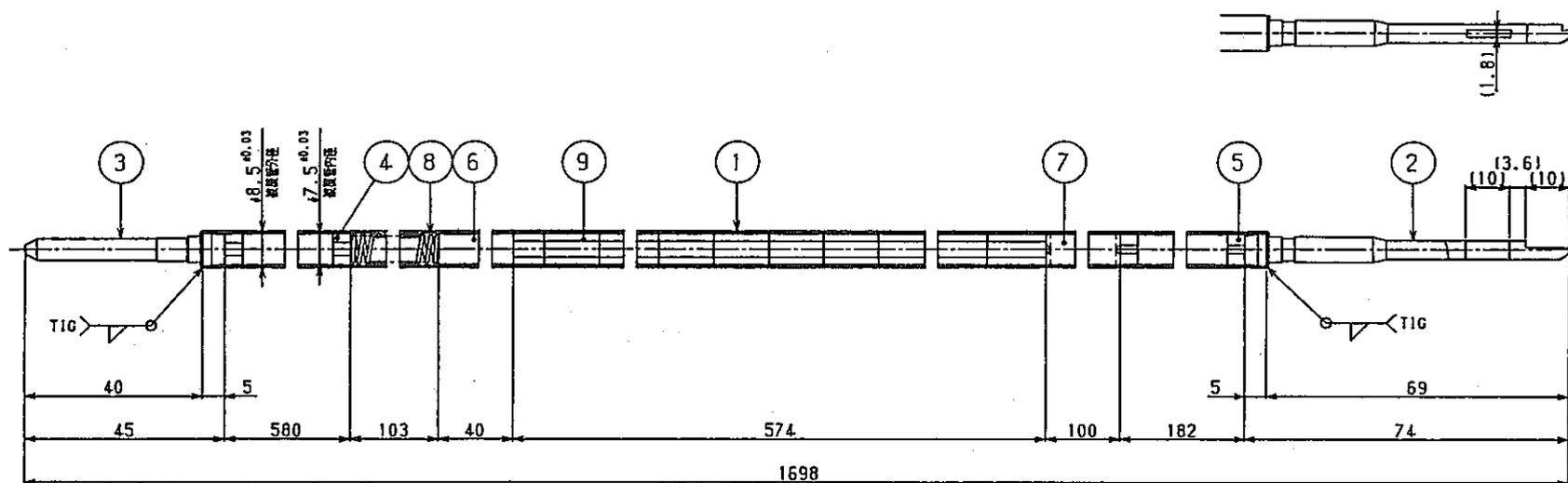
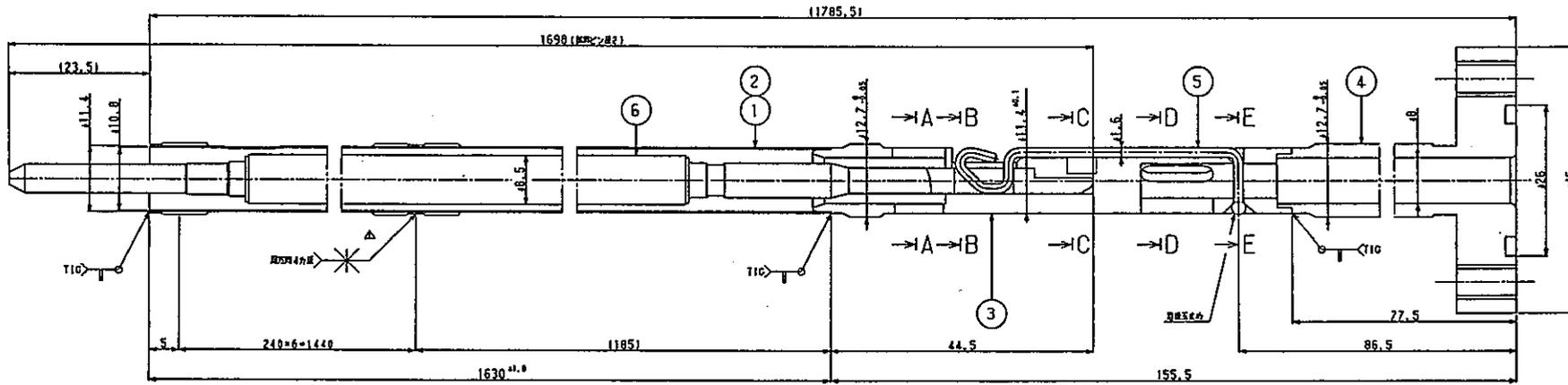
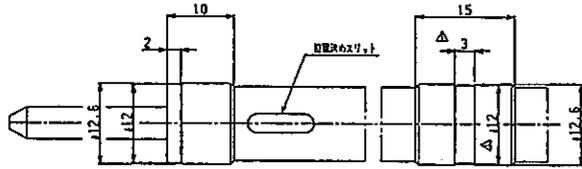
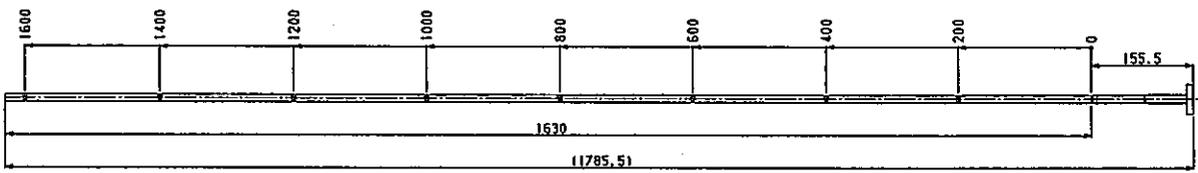
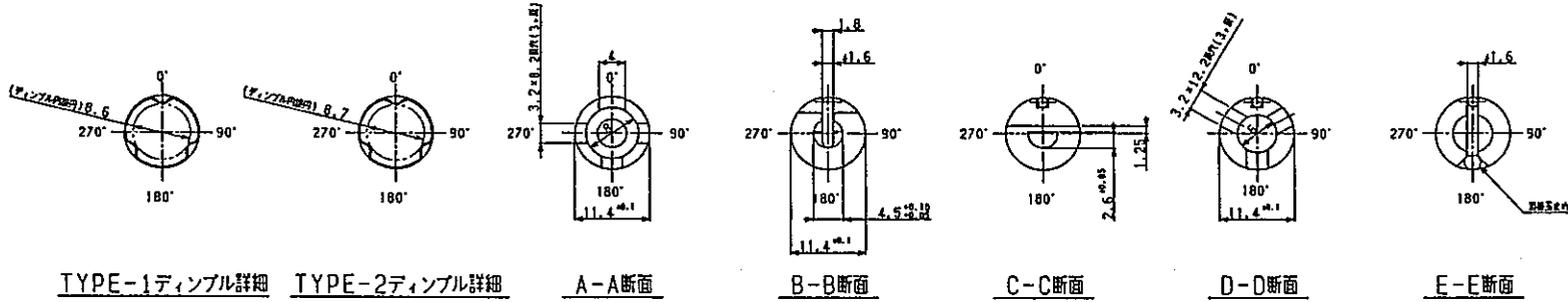


図 3.6-6 連続流水試験装置 (模擬試料ピン、φ8.5mm)

符号	名称
1	シュラウド素管 (TYPE-1)
2	シュラウド素管 (TYPE-2)
3	下部ストレナ
4	導入管
5	試料ピン支持バネ
6	試料ピン (φ8.5)

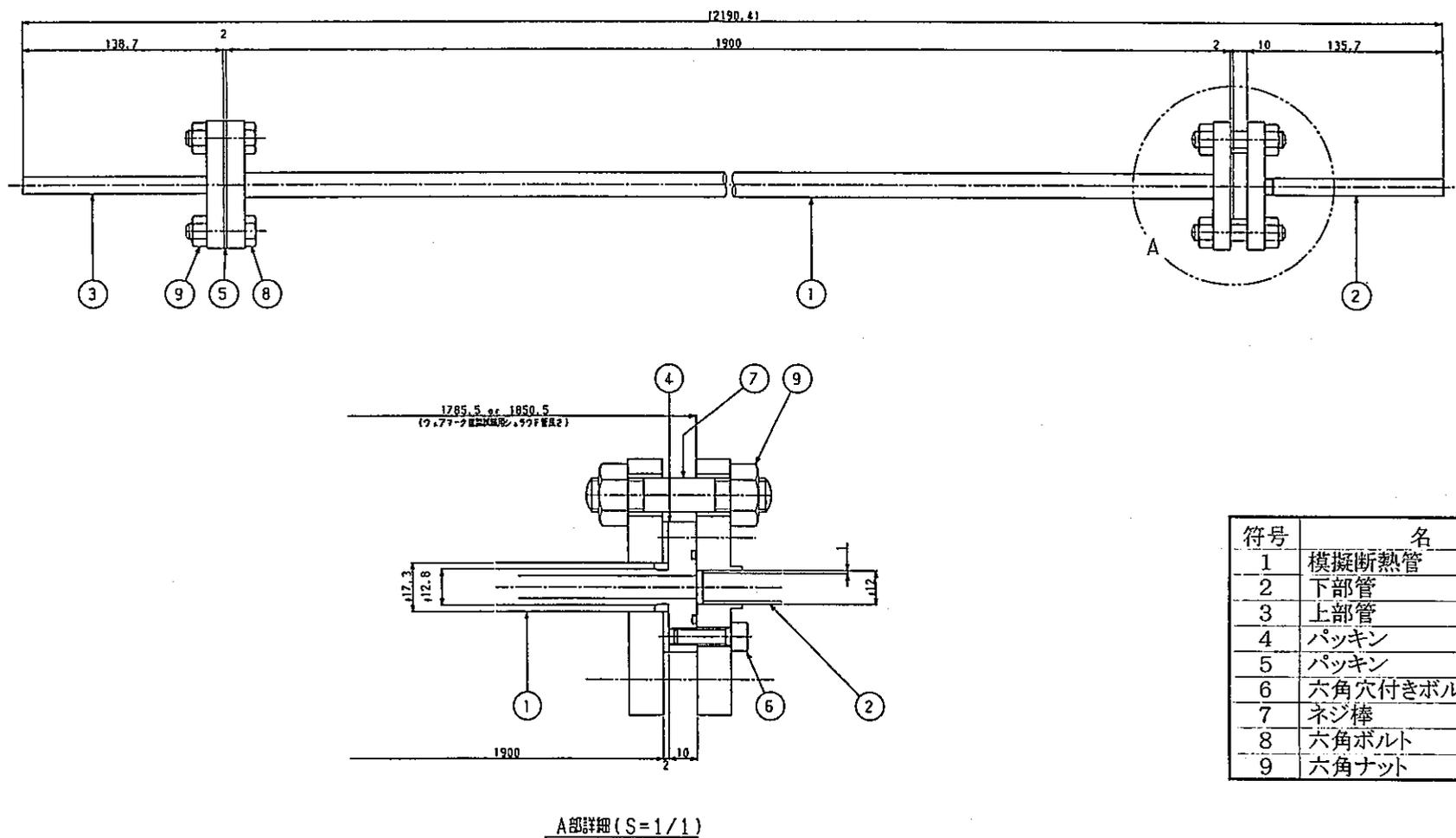


- 179 -



ディンプル設置位置 (S=1/5)

図 3.6-8 連続流水試験装置 (シュラウド管、模擬試料ピン径 φ8.5mm 用)



符号	名称
1	模擬断熱管
2	下部管
3	上部管
4	パッキン
5	パッキン
6	六角穴付きボルト
7	ネジ棒
8	六角ボルト
9	六角ナット

図 3.6-9 連続流水試験装置 (試験容器)

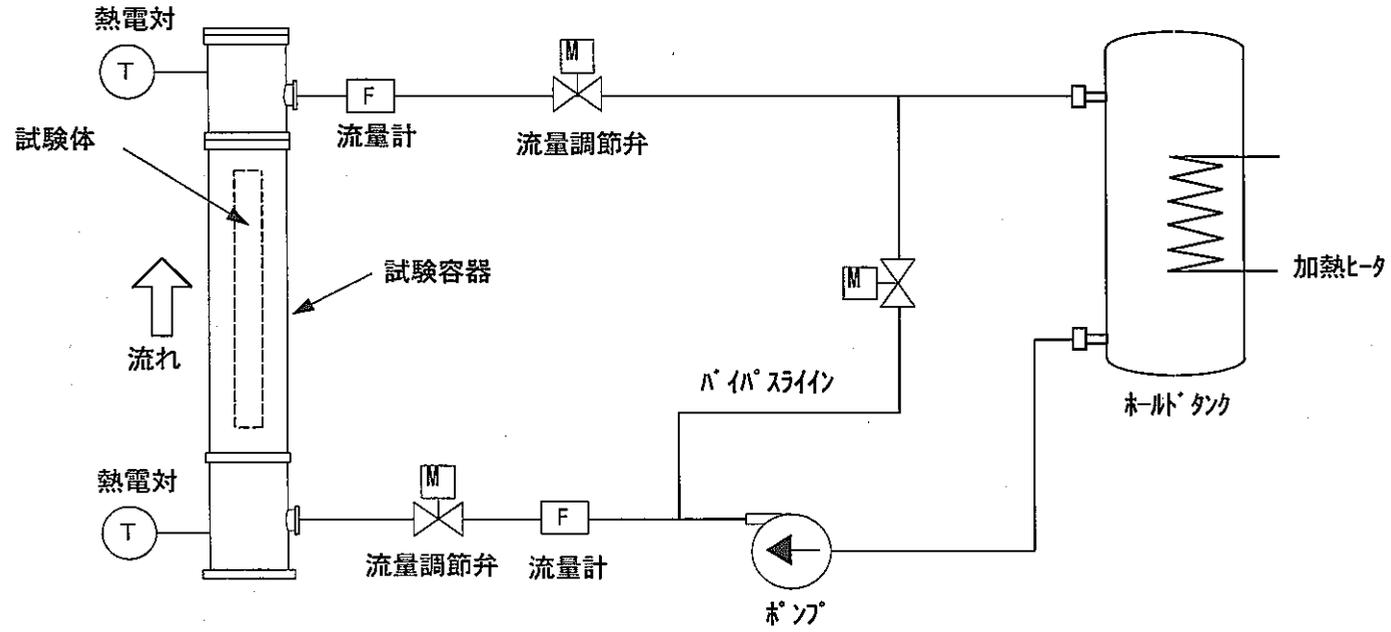


図3.6-10 流水試験系統図

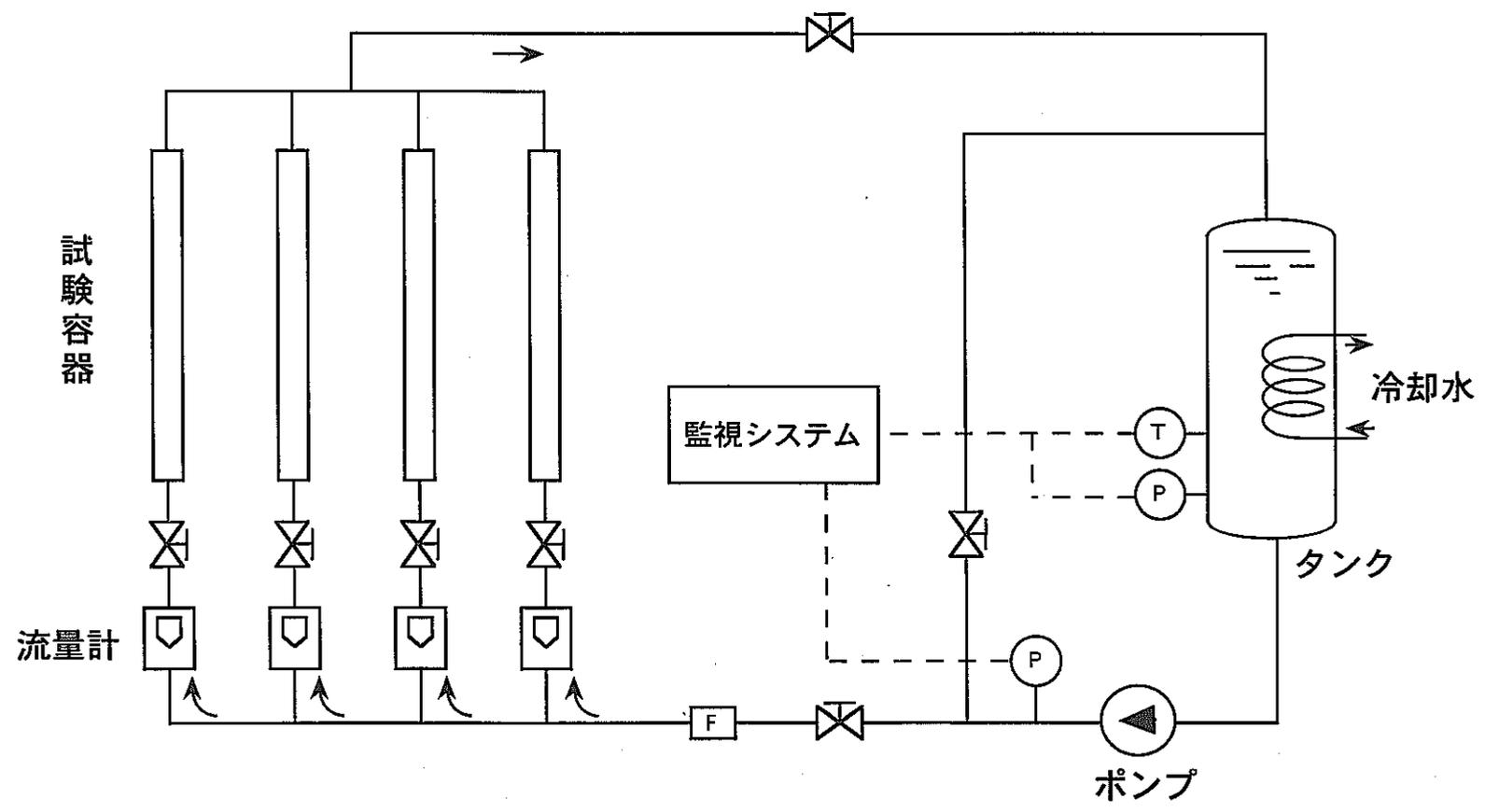


図3.6-11 連続流水試験の系統図

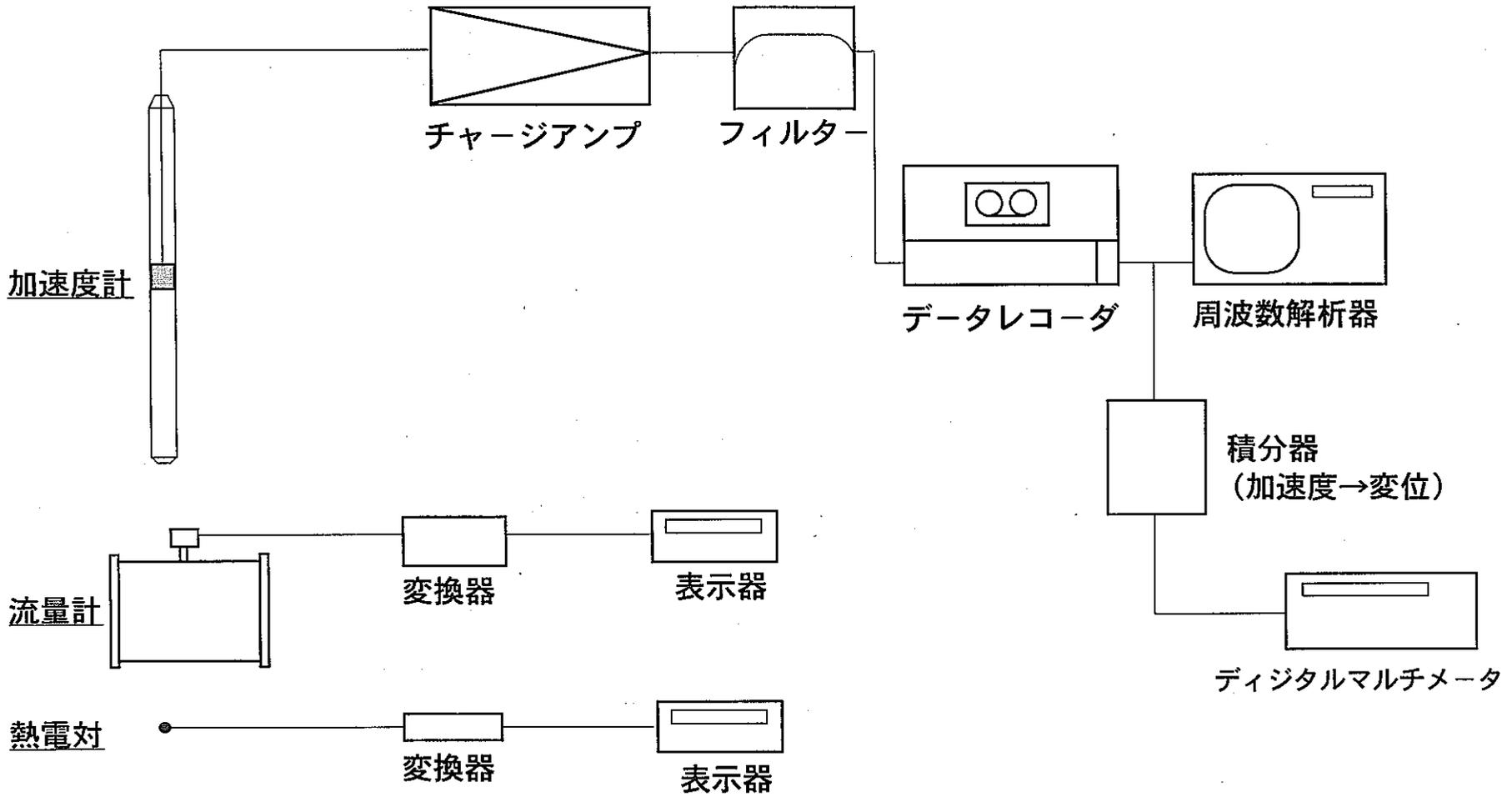


図3.6-12 振動測定系統図

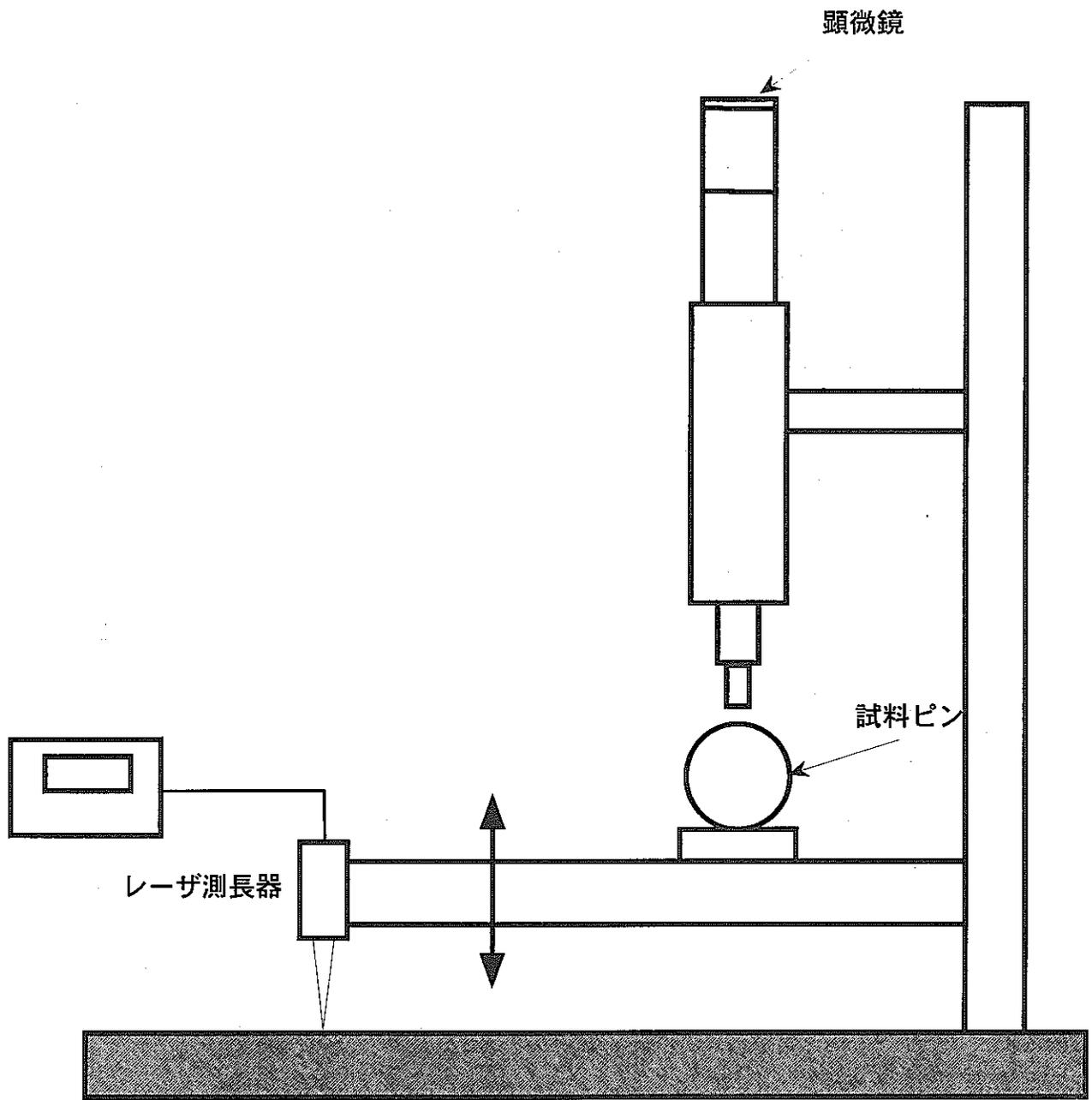
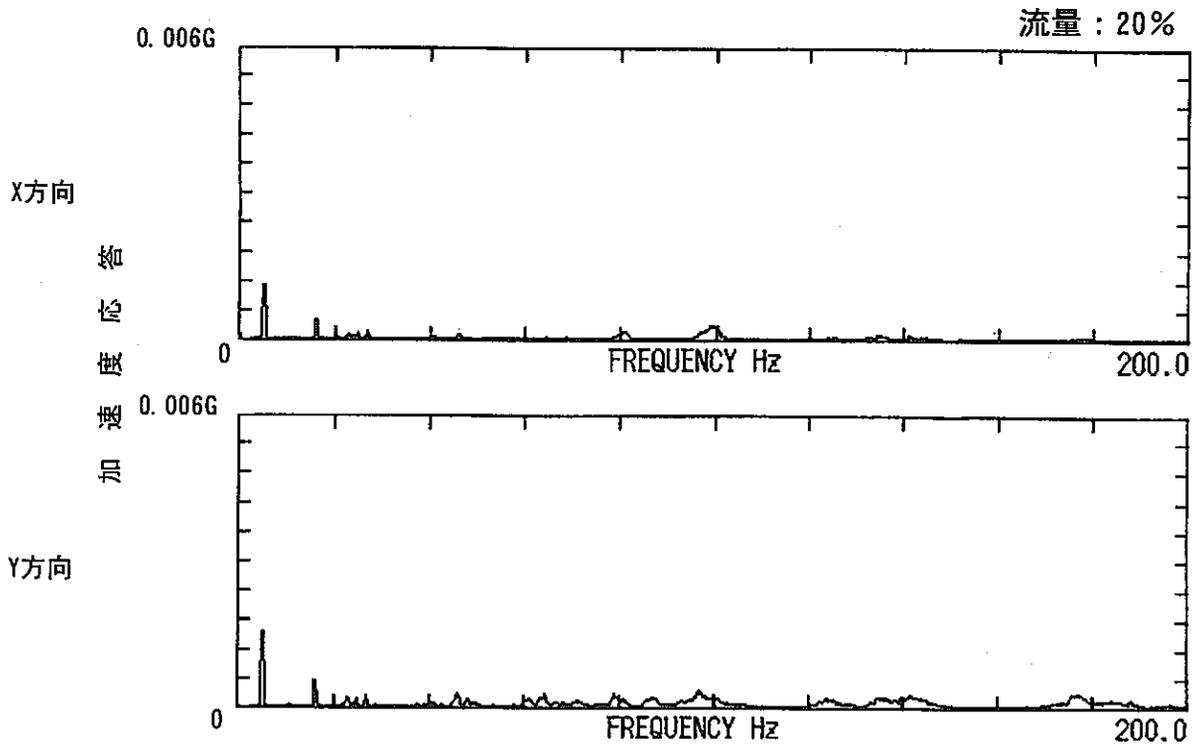
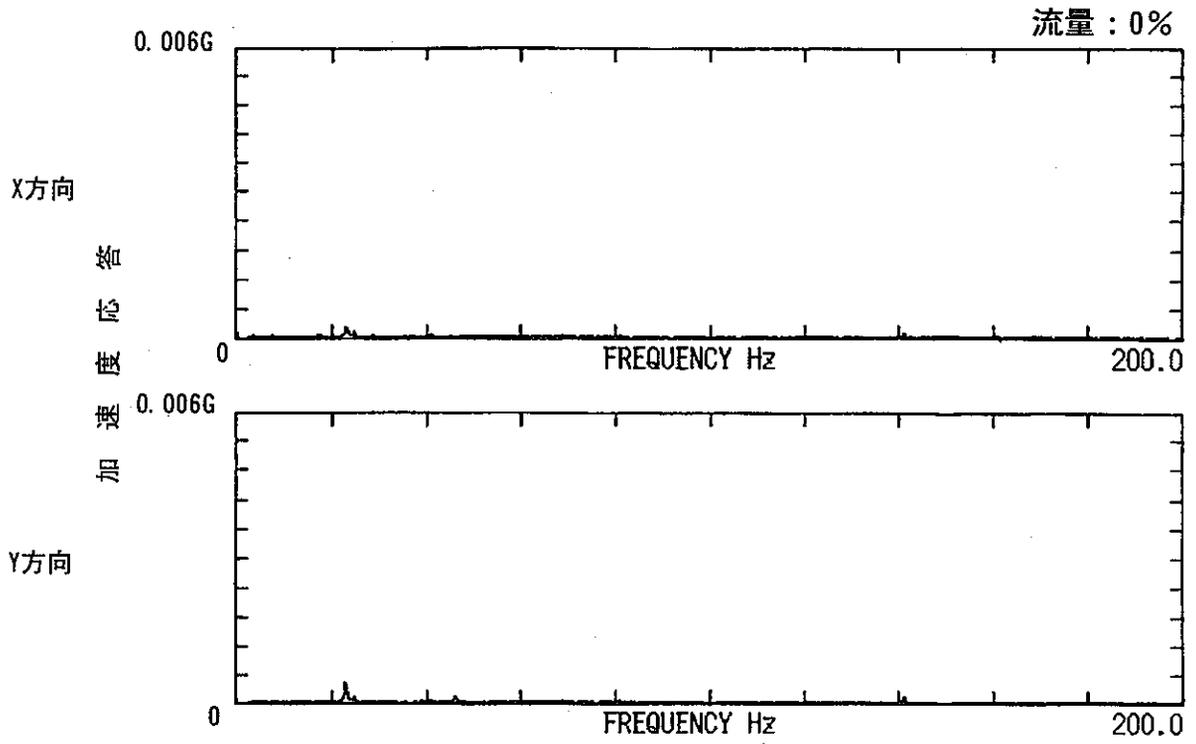
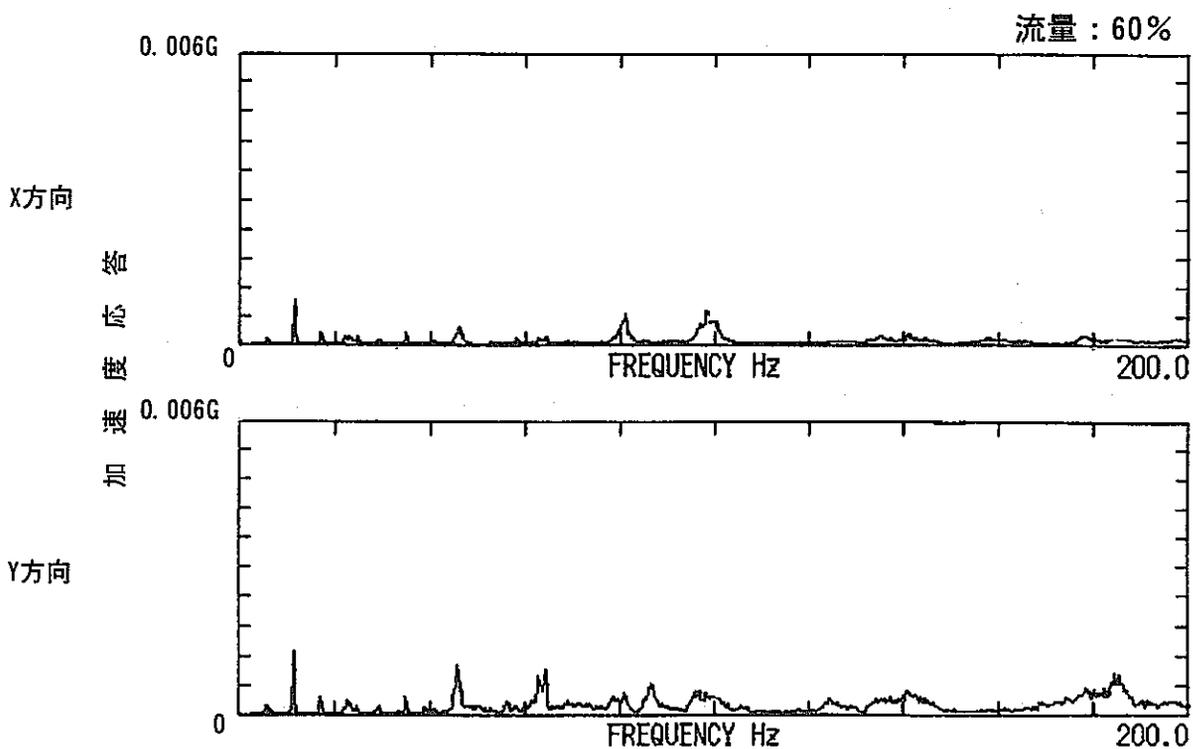
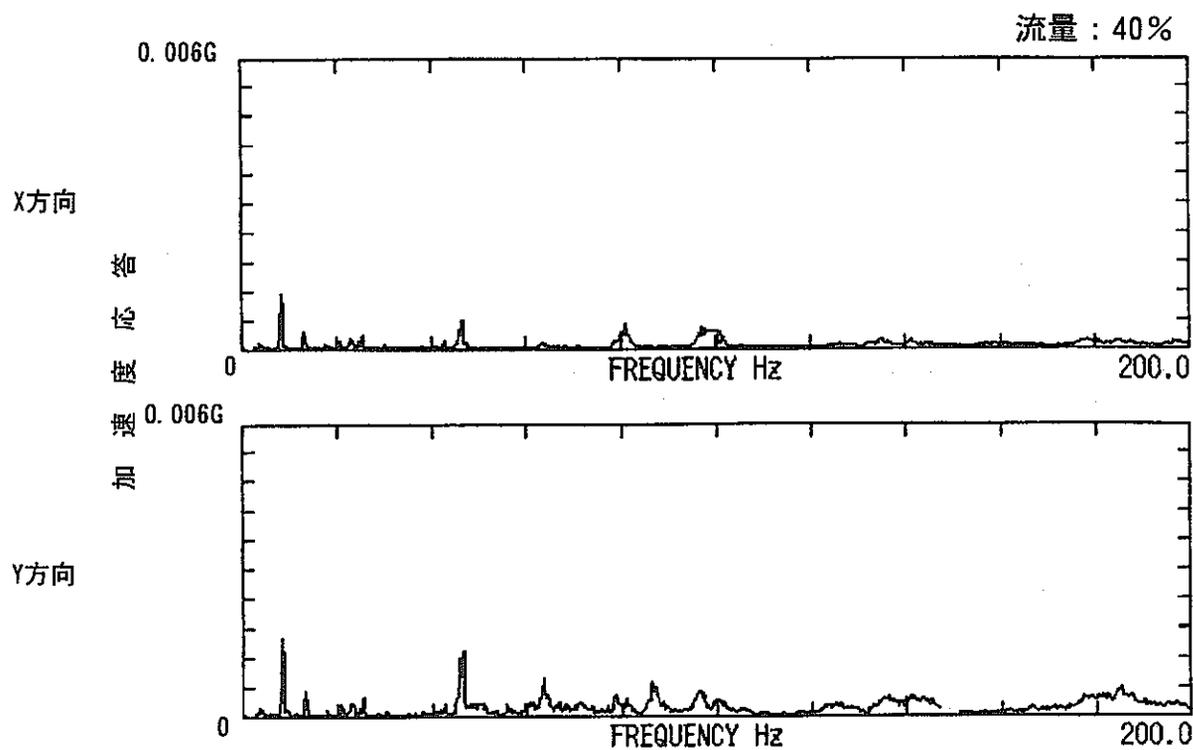


図3.6-13 摩耗深さ測定原理図



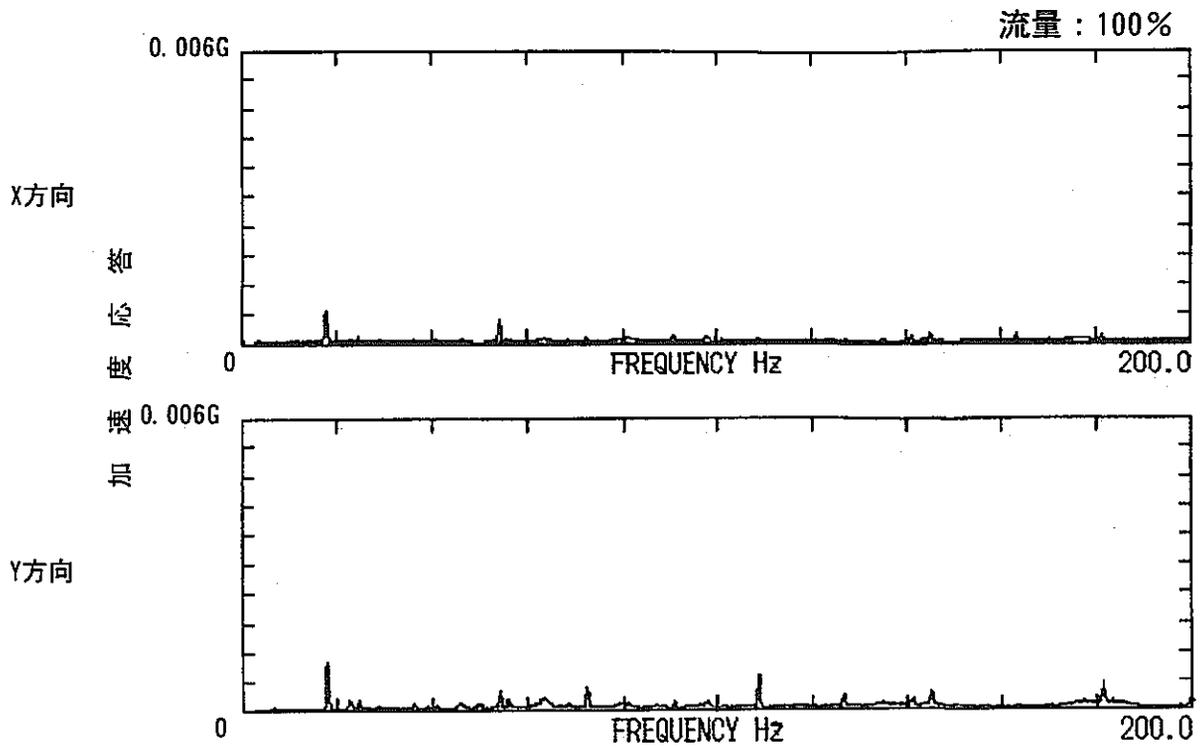
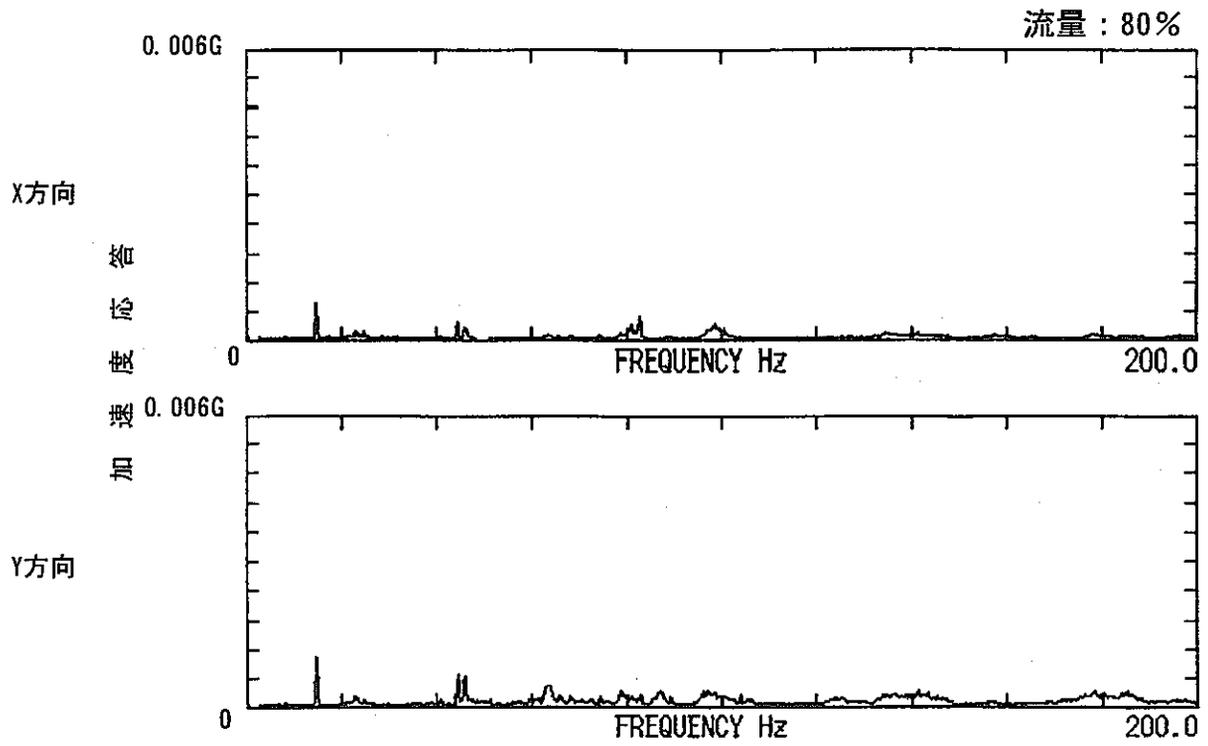
- ・ワイヤースペーサ
- ・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-14 振動特性試験結果(1)



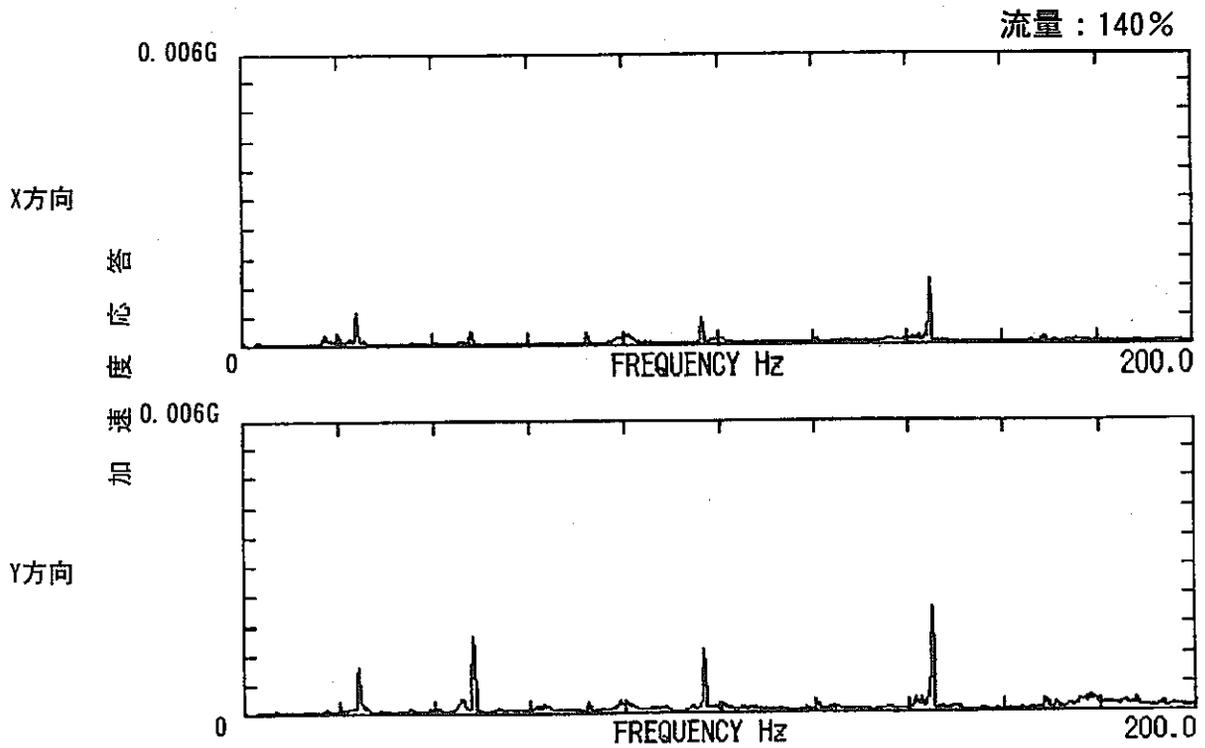
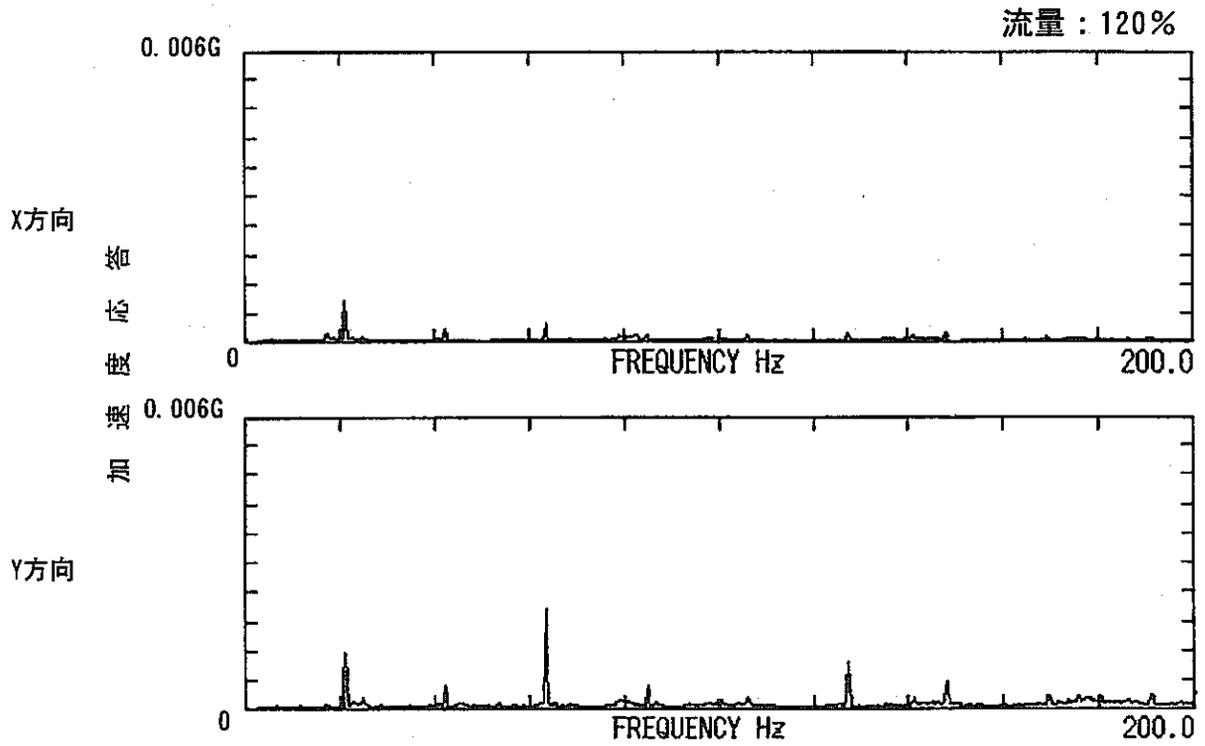
・ワイヤースペーサ
・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-15 振動特性試験結果(2)



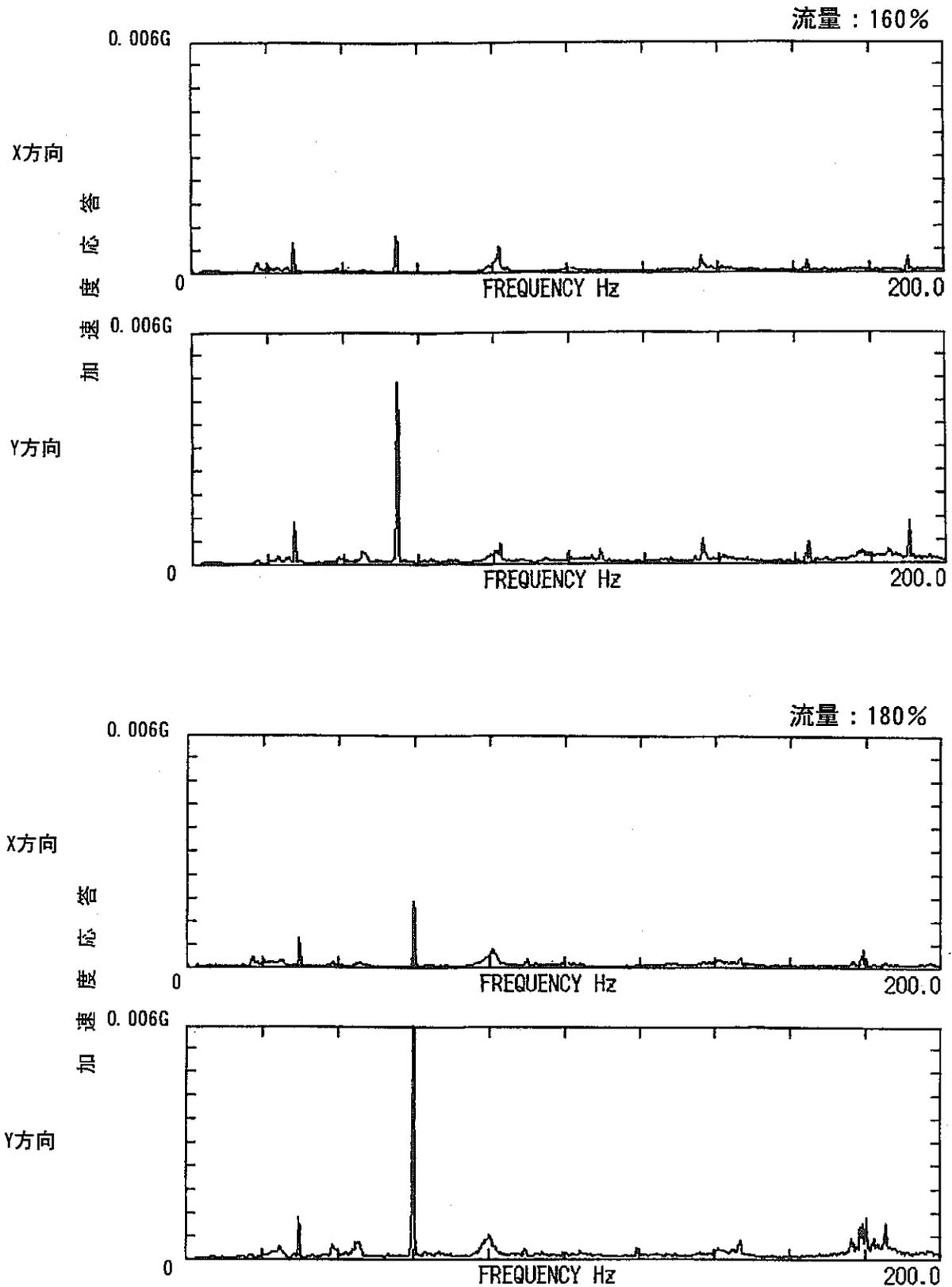
- ・ワイヤースペーサ
- ・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-16 振動特性試験結果(3)



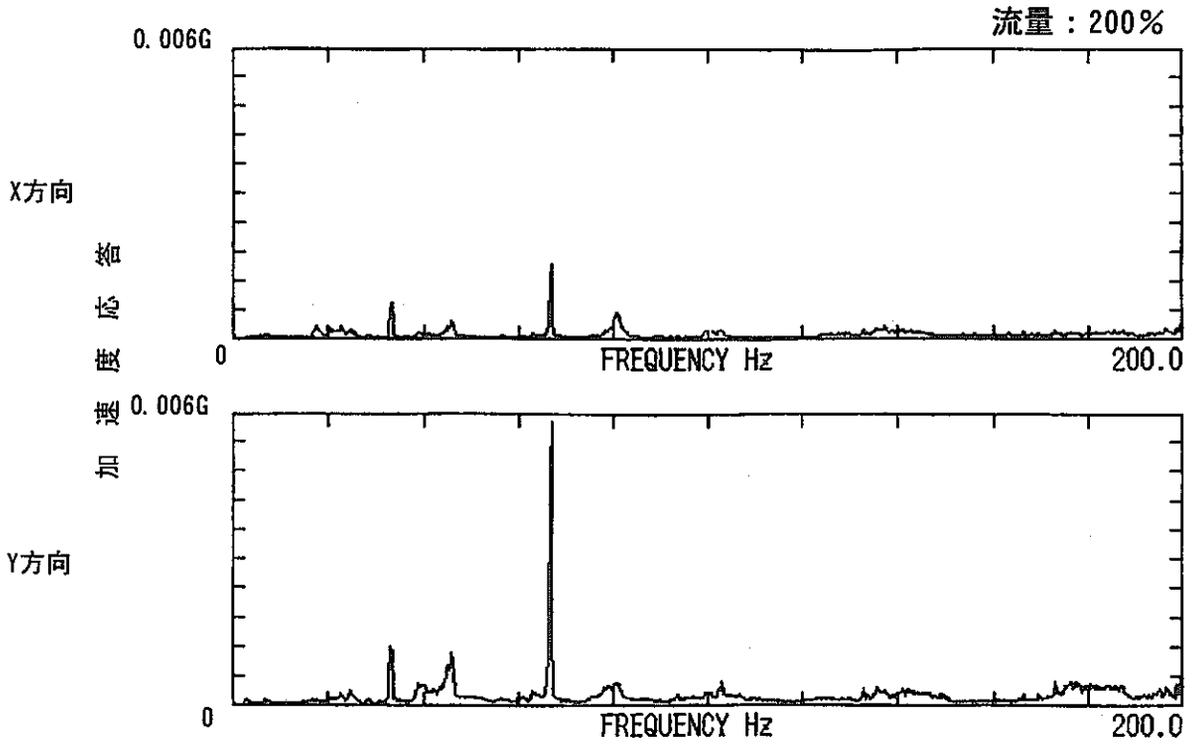
- ・ワイヤースペーサ
- ・ピン径 ; 8.5mm

図3. 6-17 振動特性試験結果(4)



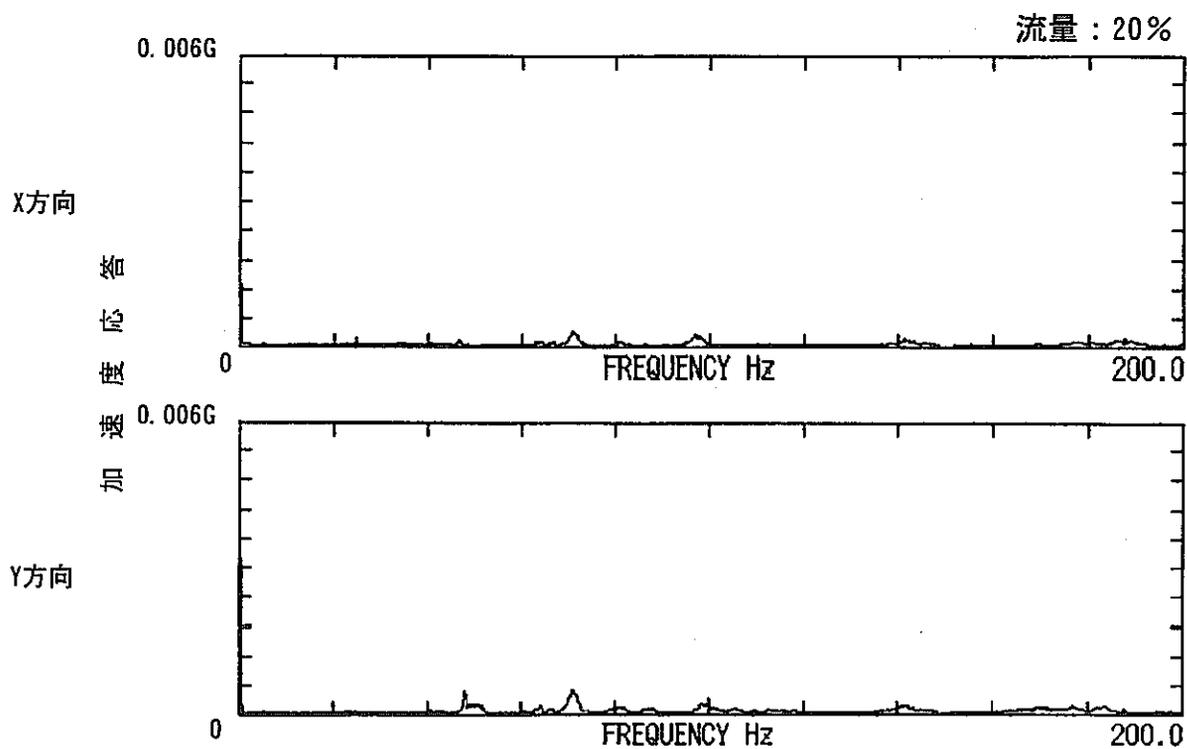
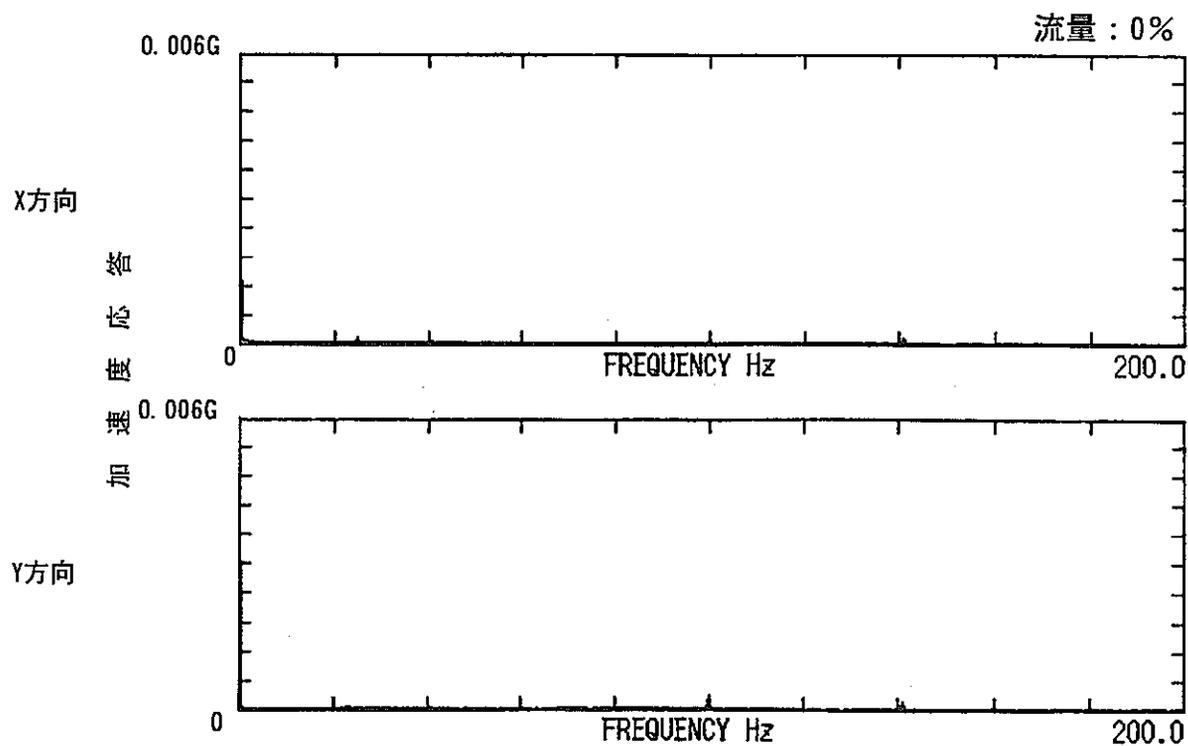
・ワイヤースペーサ
・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-18 振動特性試験結果(5)



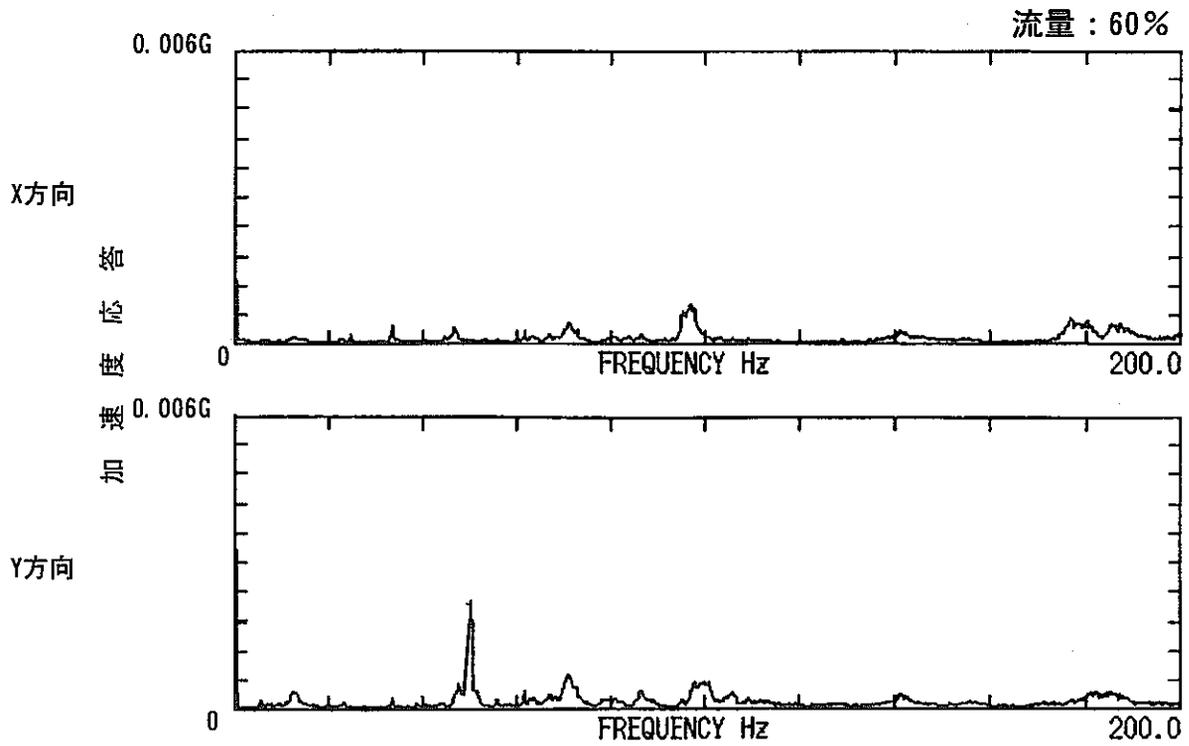
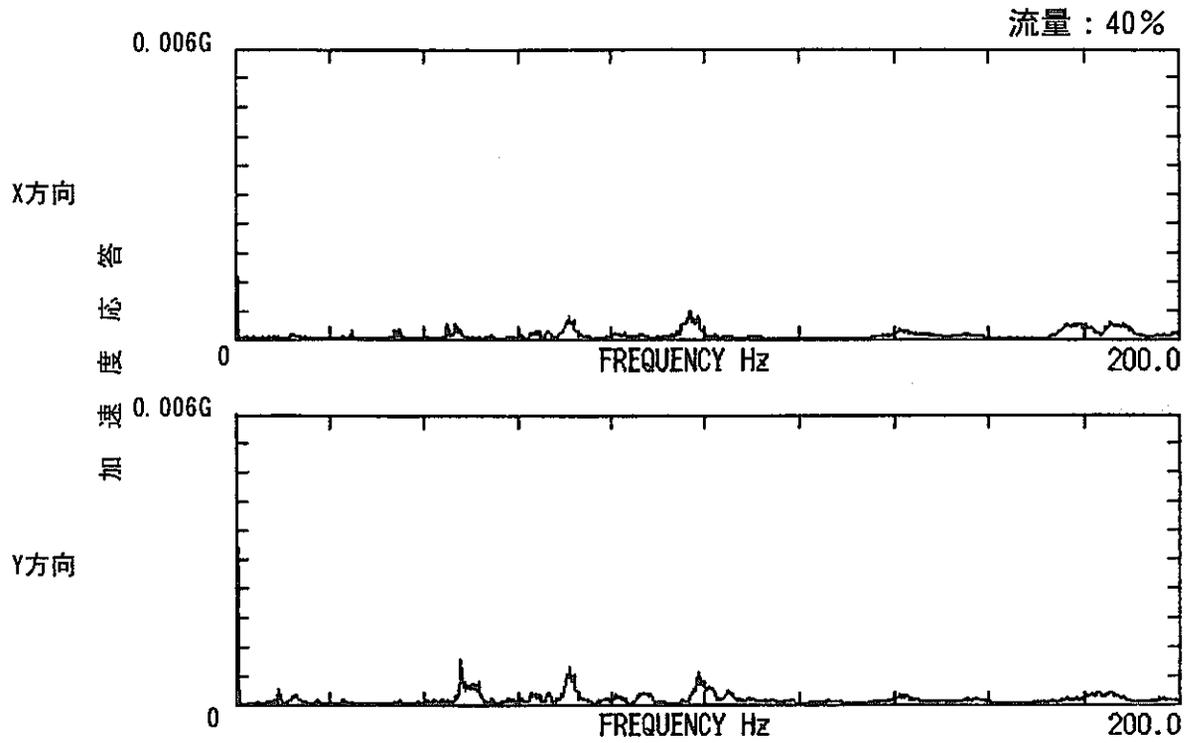
- ・ワイヤースペーサ
- ・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-19 振動特性試験結果(6)



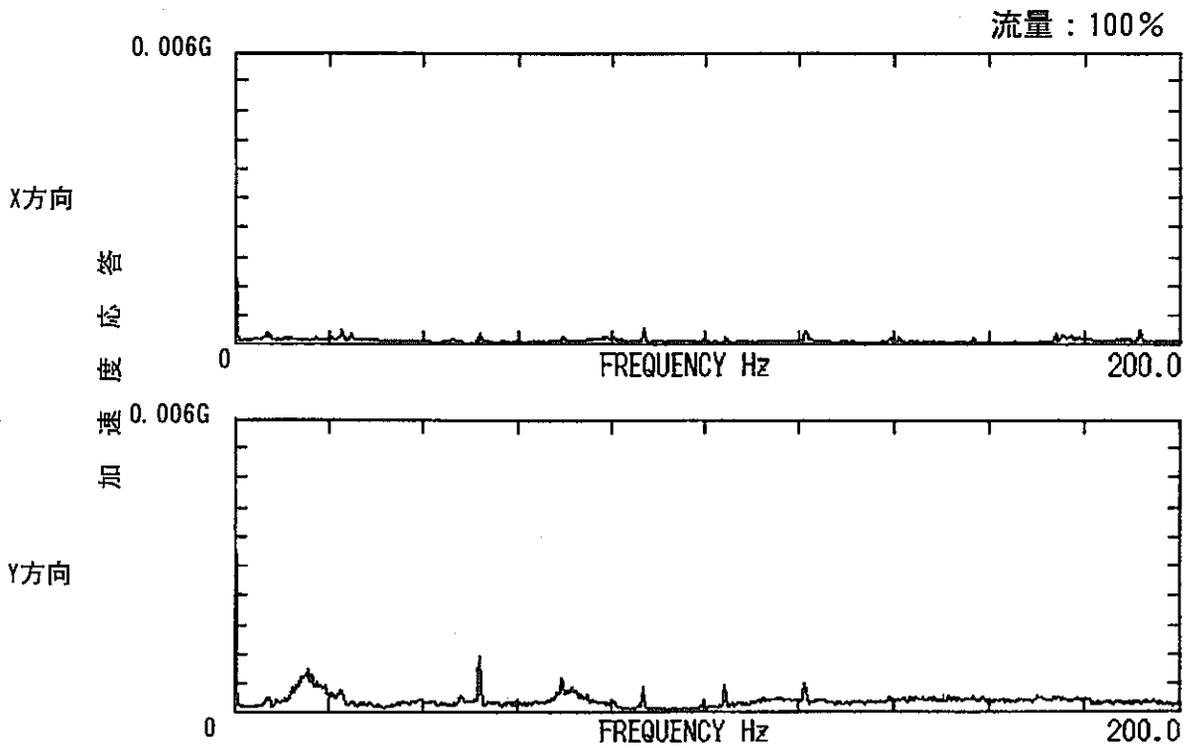
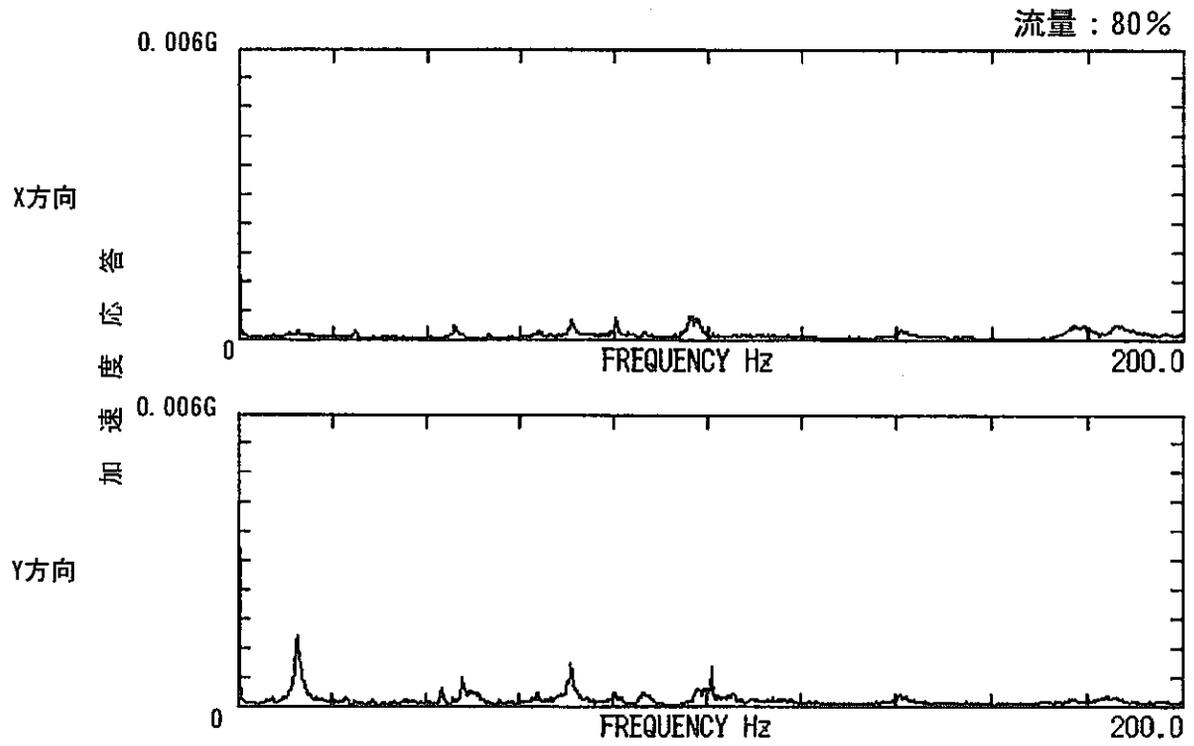
- ・シュラウド管ディンプル
- ・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-20 振動特性試験結果(7)



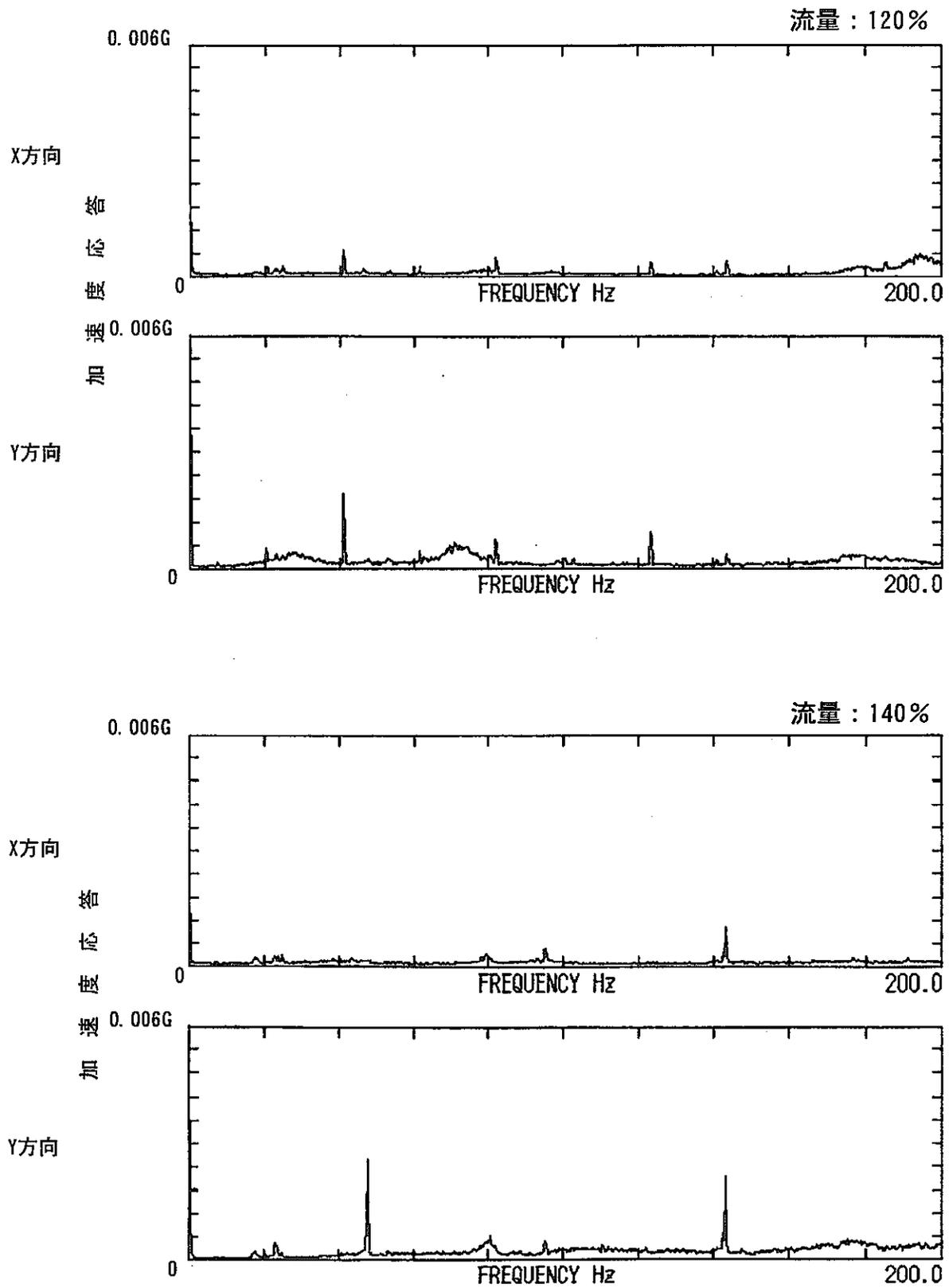
・シュラウド管ディンプル
・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-21 振動特性試験結果(8)



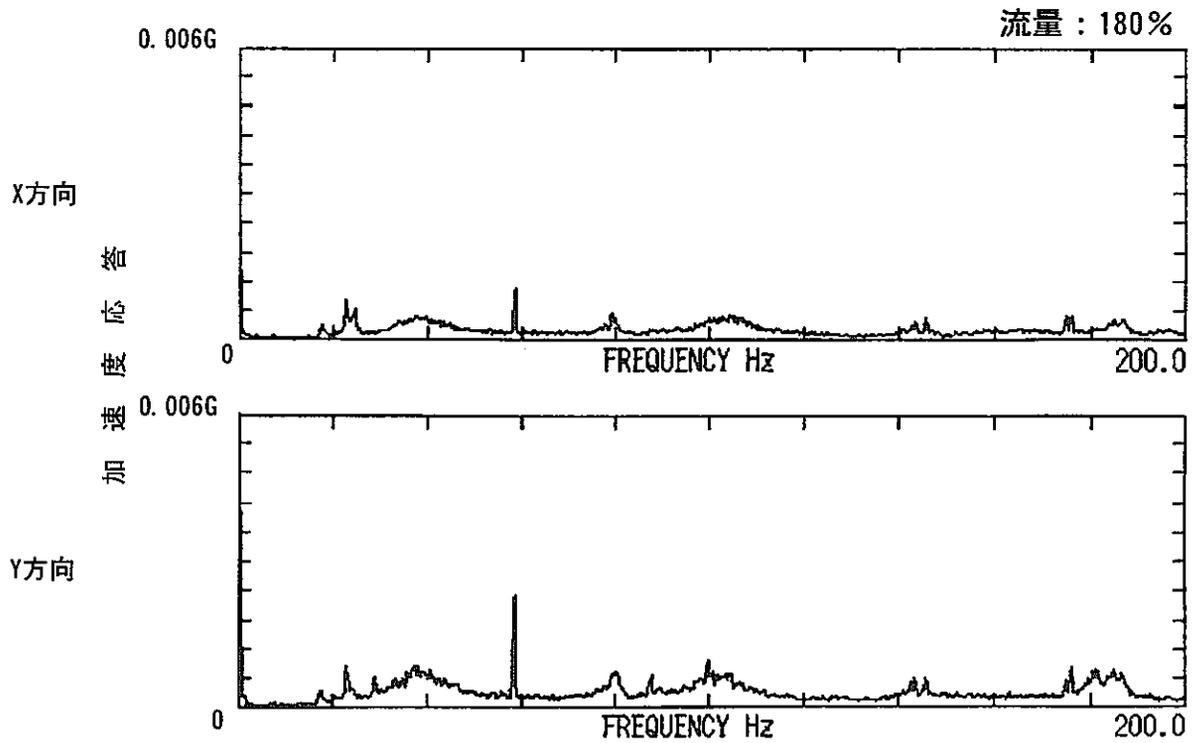
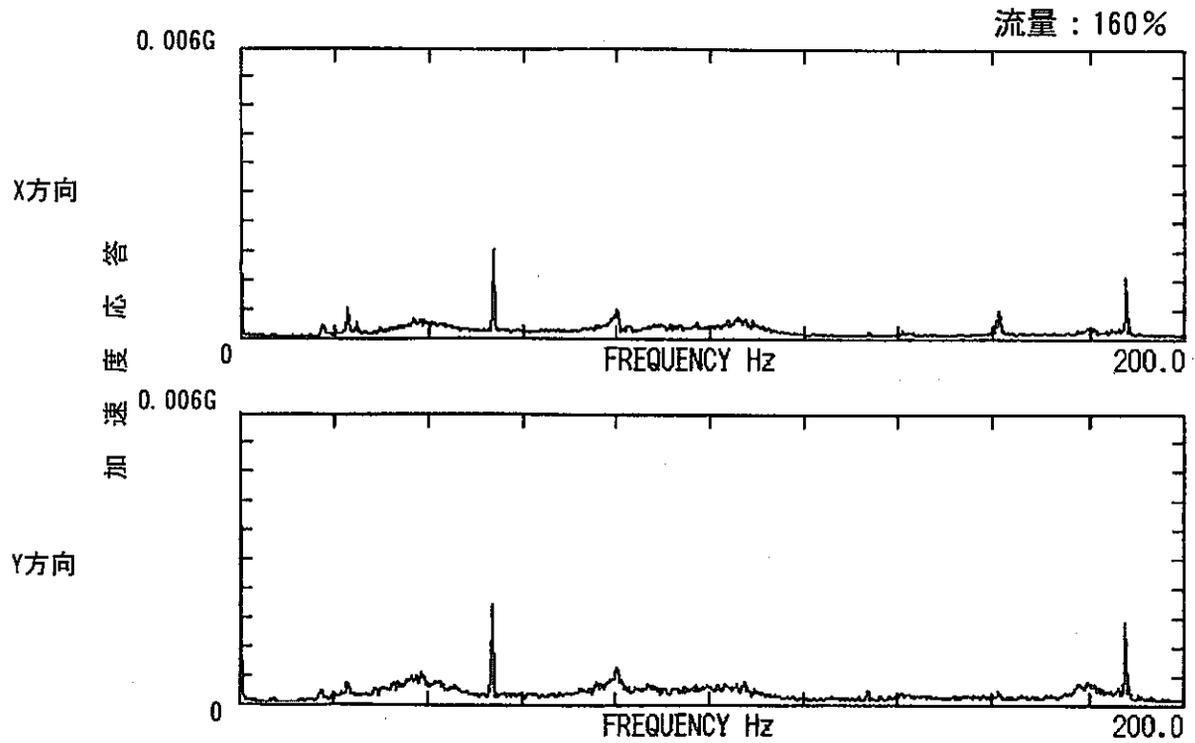
・シュラウド管ディンプル
・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-22 振動特性試験結果(9)



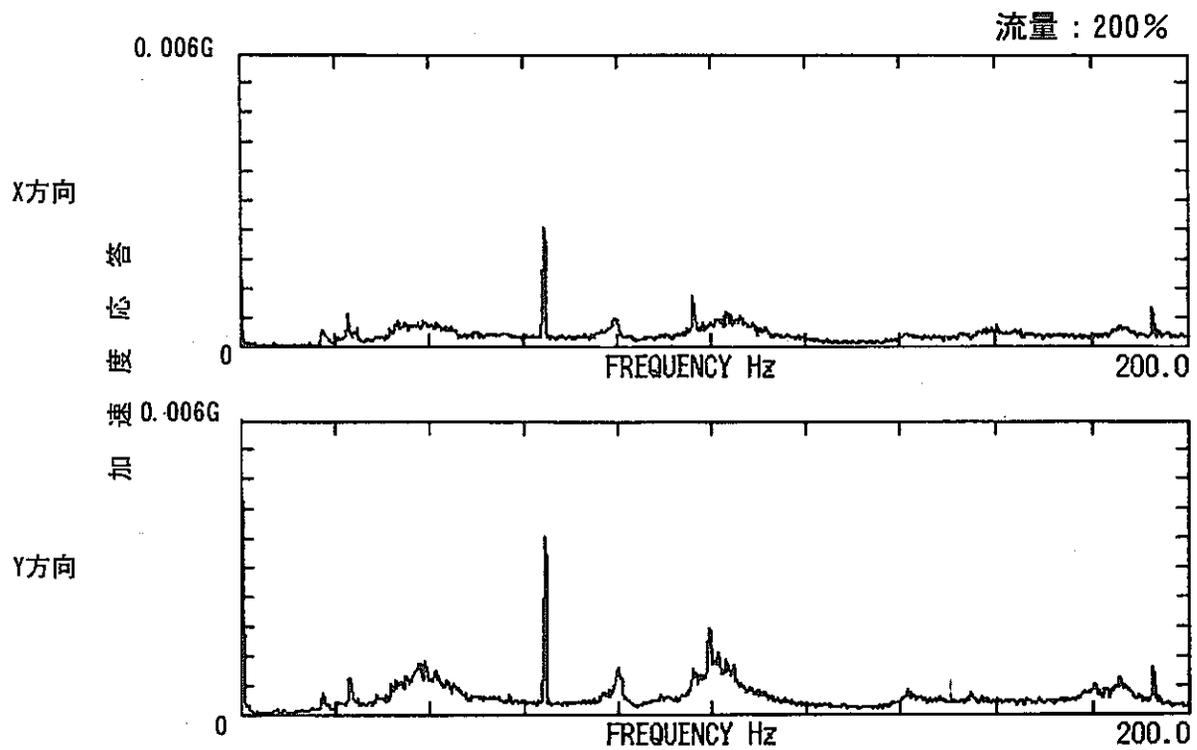
・シュラウド管ディンブル
・ピン径 ; 8.5mm

図3. 6-23 振動特性試験結果(10)



・シュラウド管ディンプル
・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-24 振動特性試験結果(11)



- ・シュラウド管ディンプル
- ・ピン径 ; 8.5mm

図3.6-25 振動特性試験結果(12)

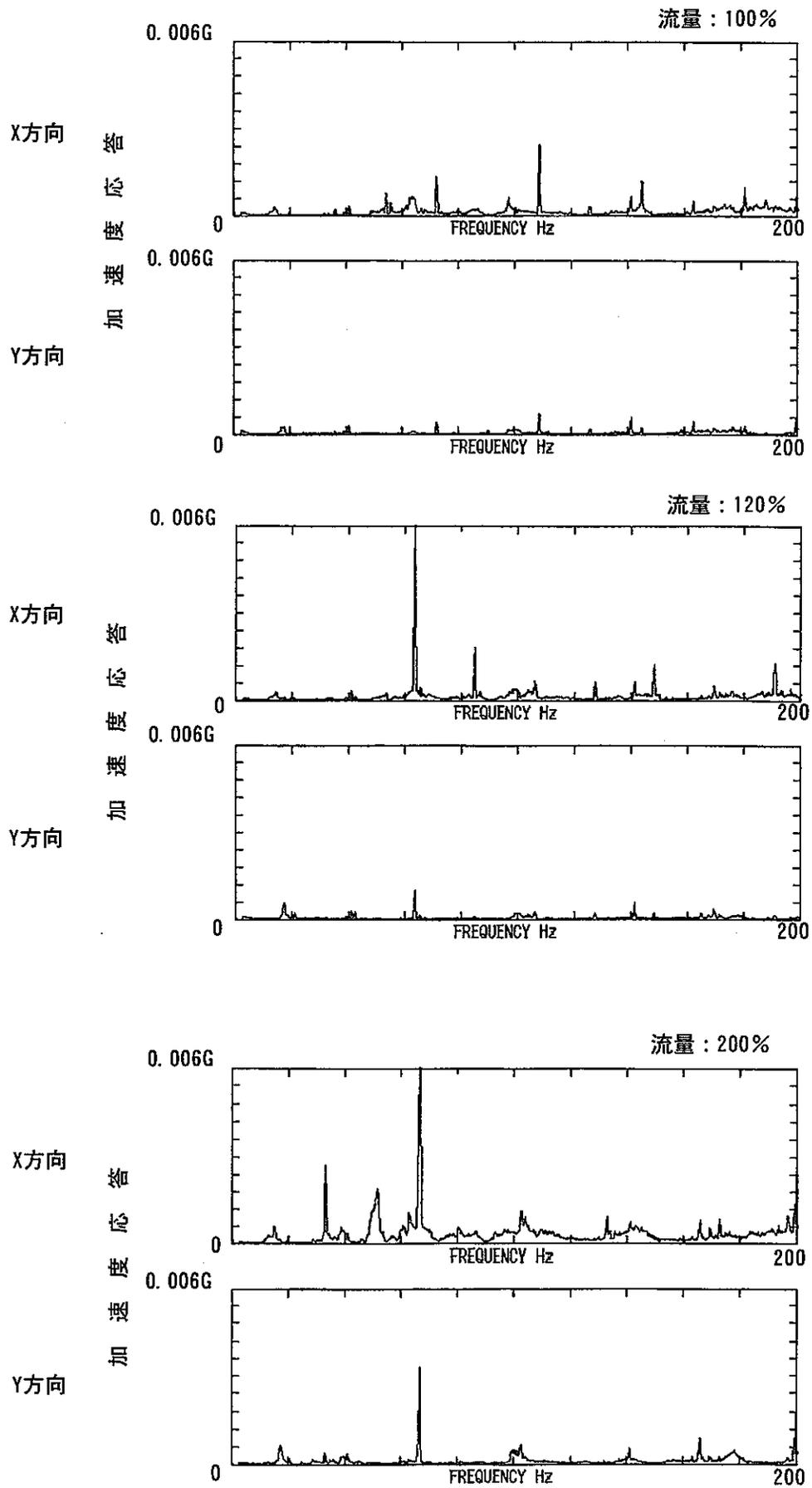


図3.6-26 試験容器の加速度応答

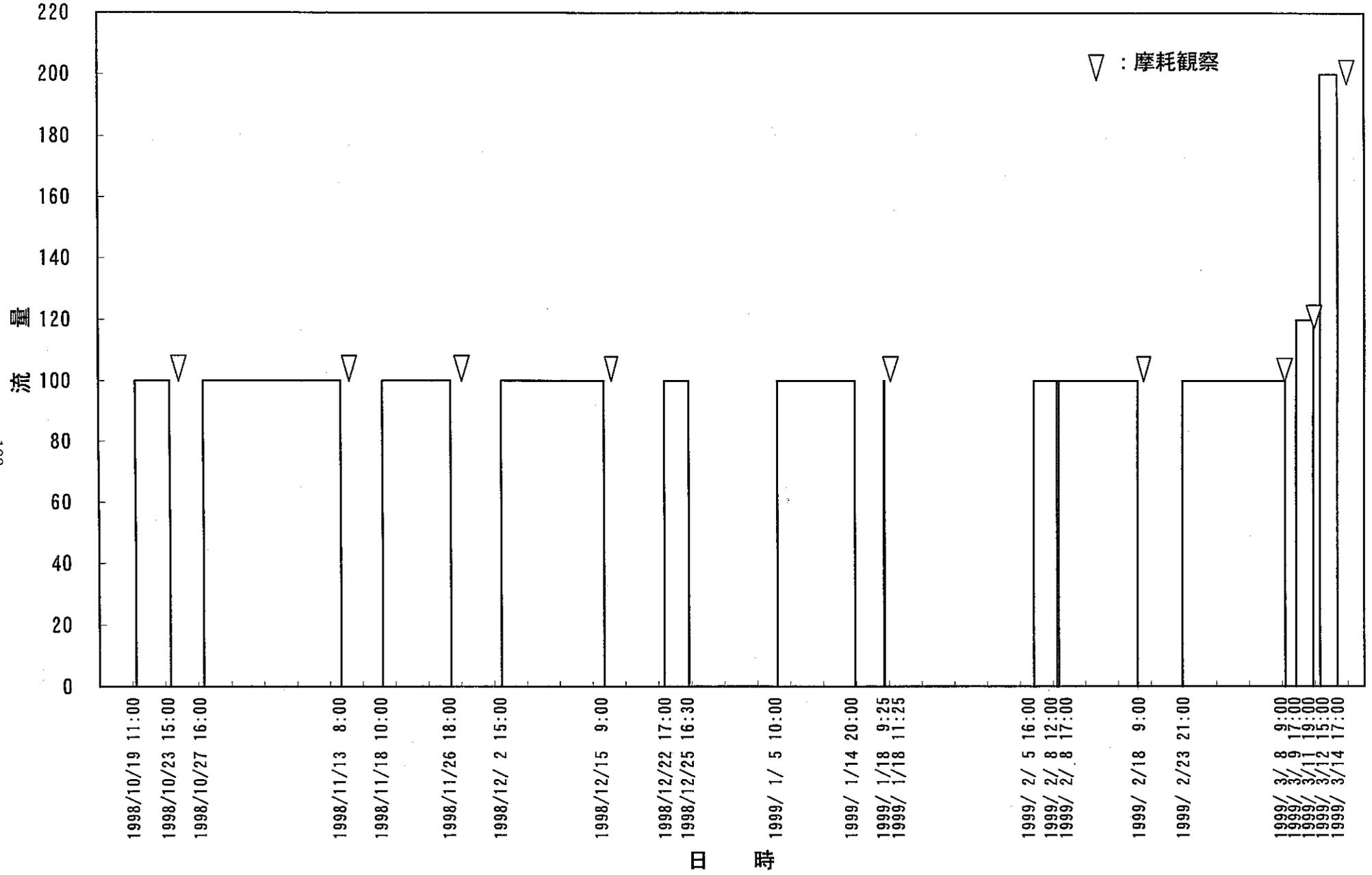
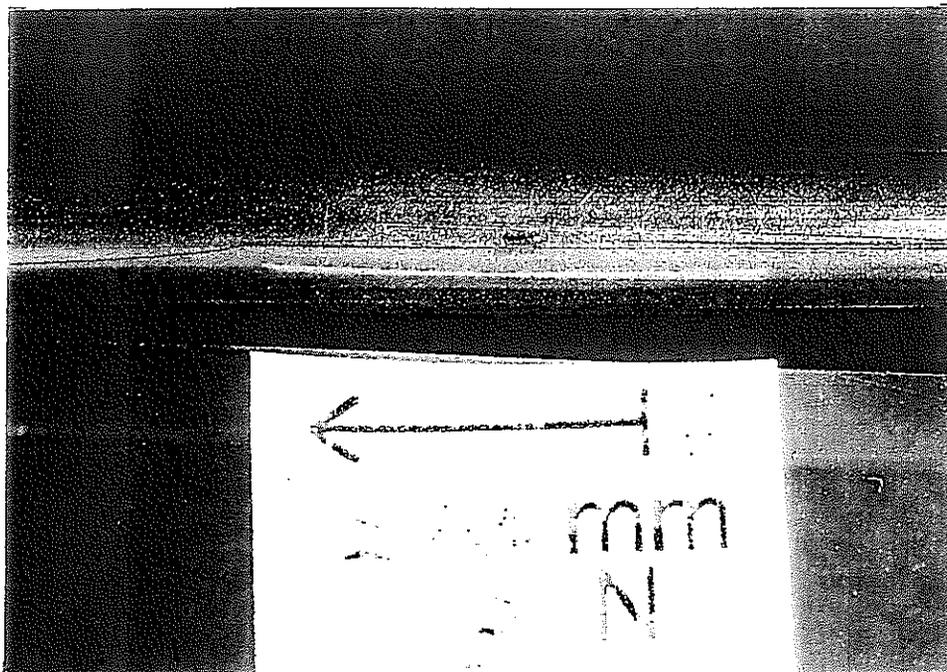
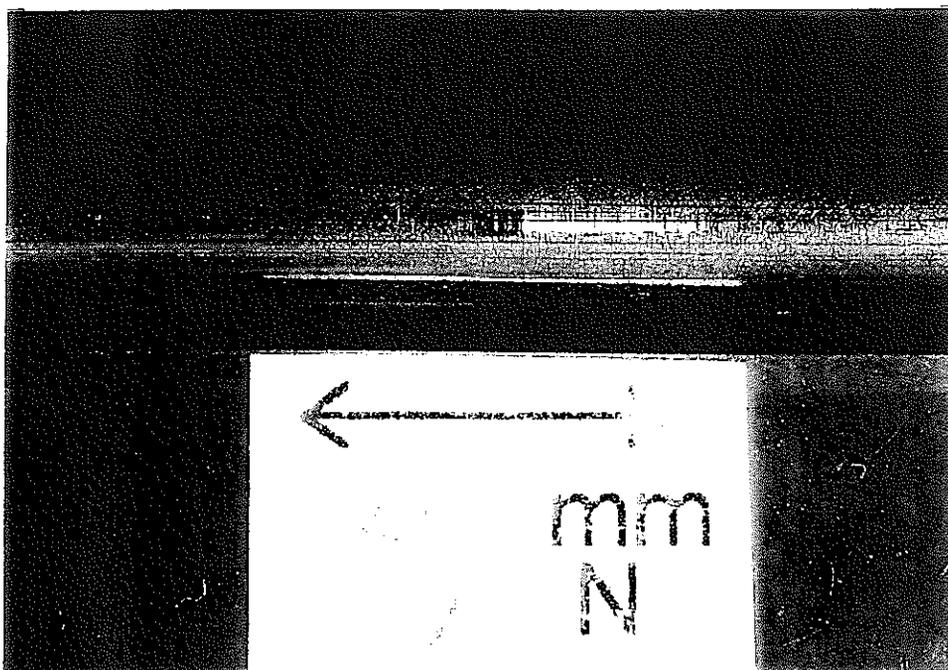


図3.6-27 運転履歴と摩耗観察



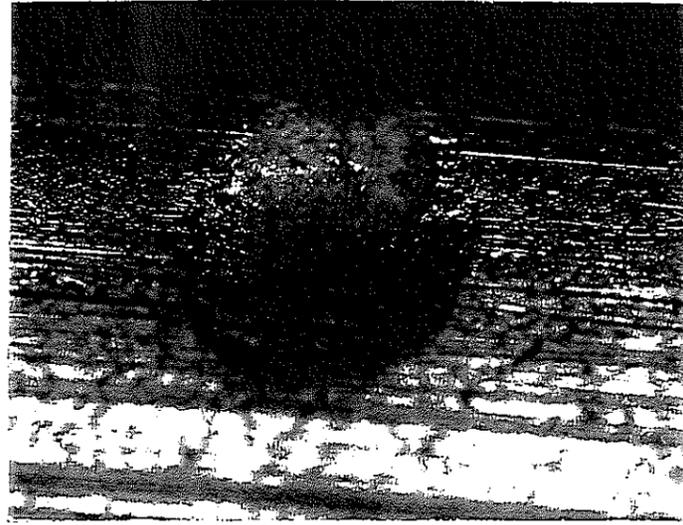
位置：294mm，デインブルマーク



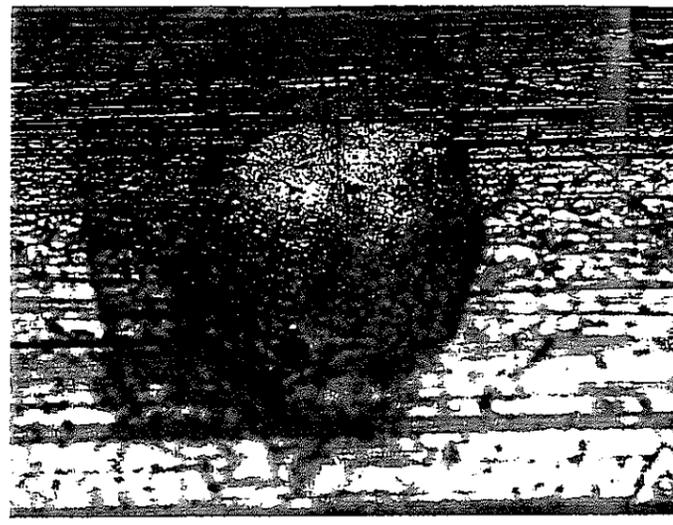
位置：439mm，キズ

試験時間；試験前
試験ピン； $\phi 6.5\text{mm}$
ギャップ0.2mm

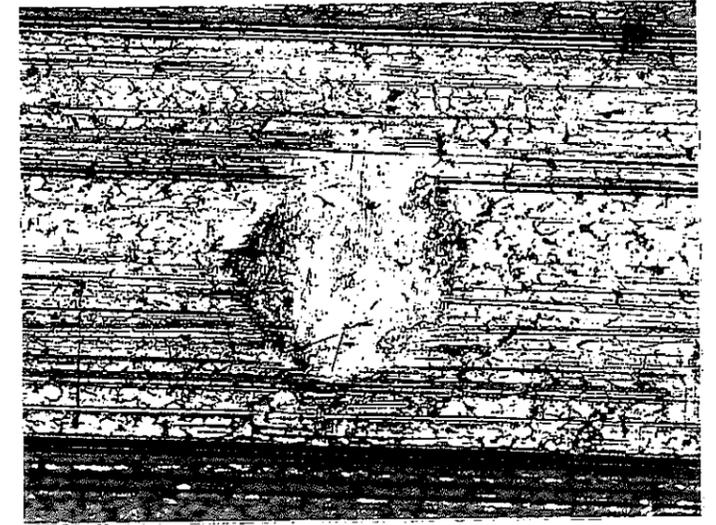
図 3.6-28 試験ピン表面観察結果（試験前）



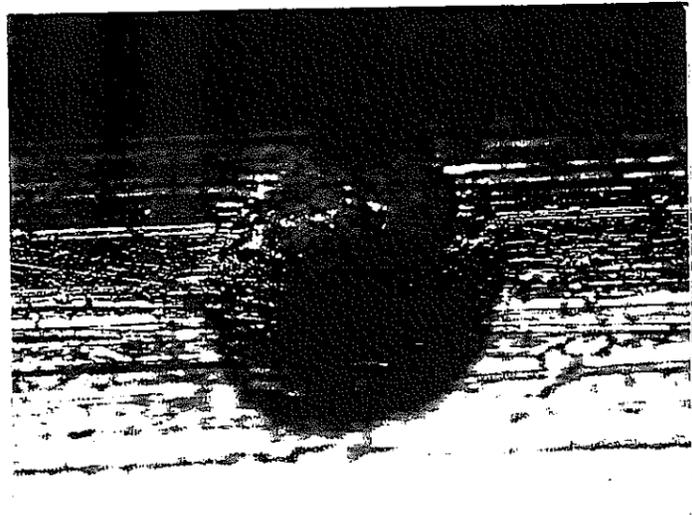
500時間経過後



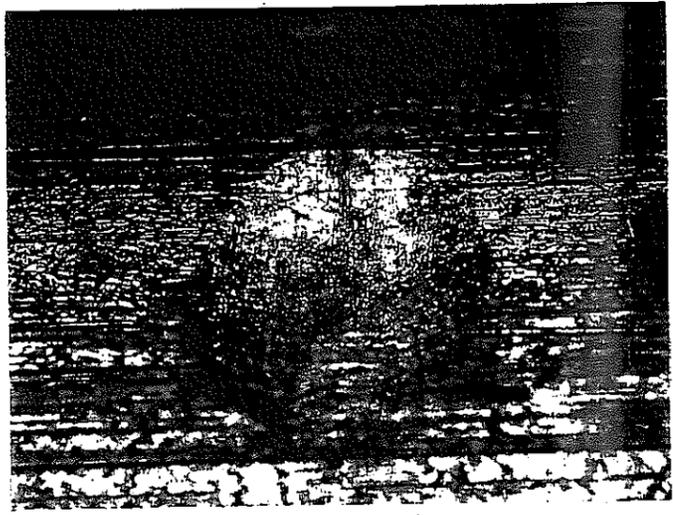
1300時間経過後



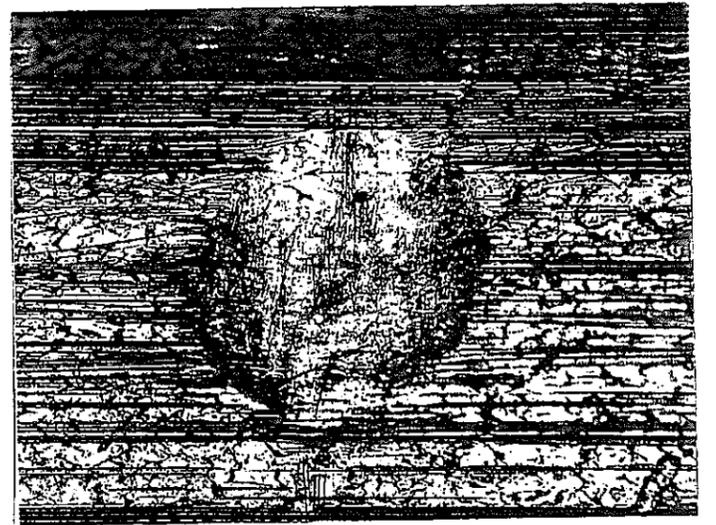
1950時間経過後



700時間経過後



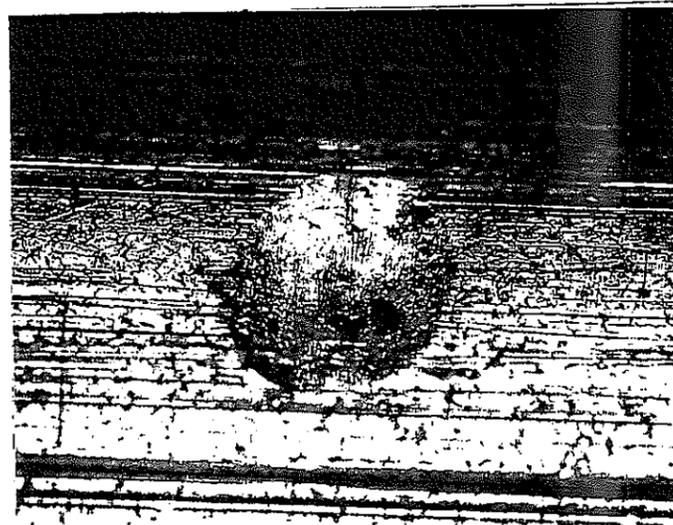
1600時間経過後



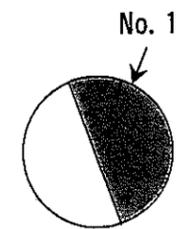
2000時間経過後



1000時間経過後



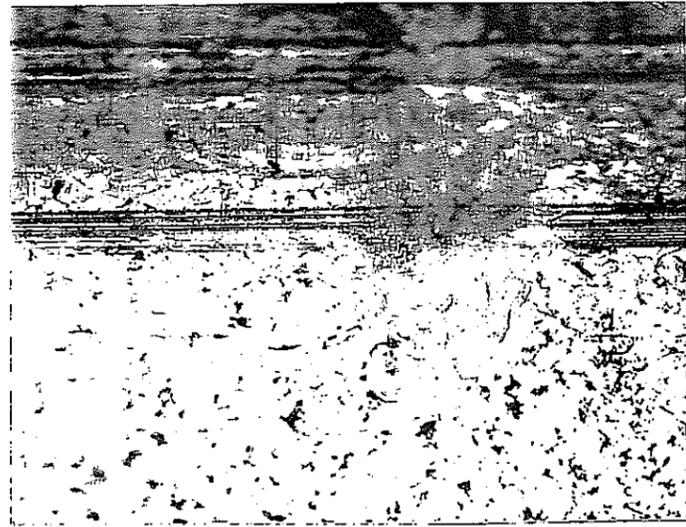
1900時間経過後



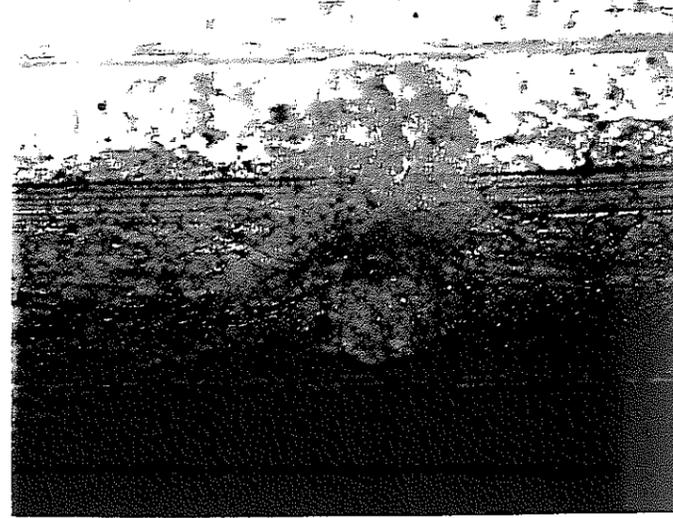
Bottom View

軸方向位置 ; 294mm
試料ピン ; φ6.5mm
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

図 3.6-29 試料ピン表面観察結果 (1)



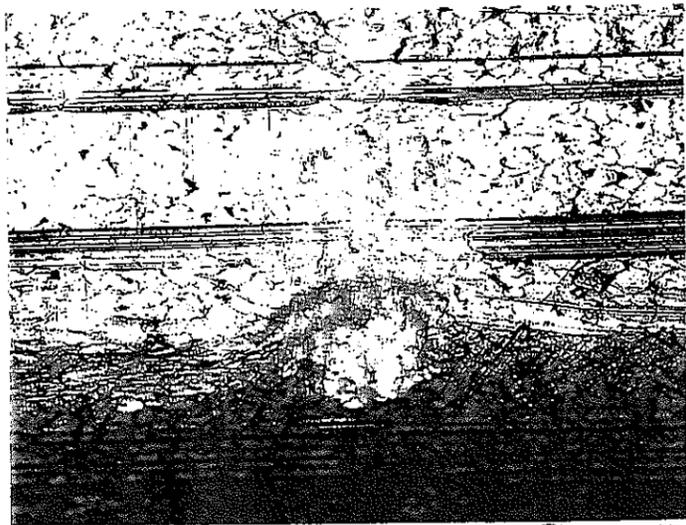
500時間経過後



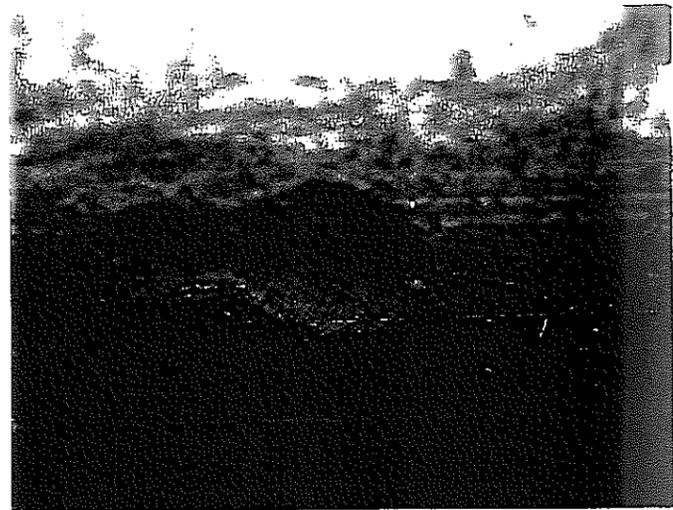
1300時間経過後



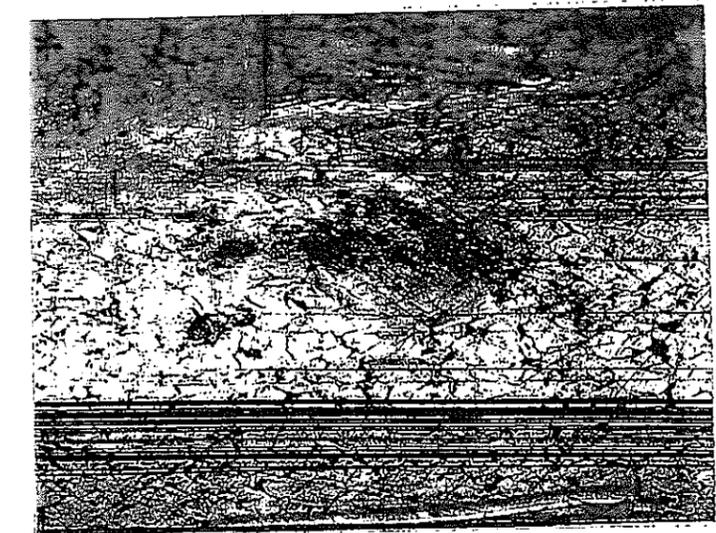
1950時間経過後



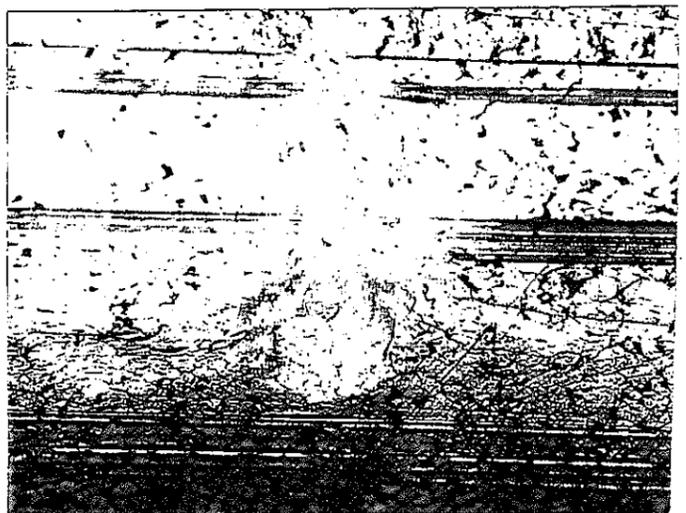
700時間経過後



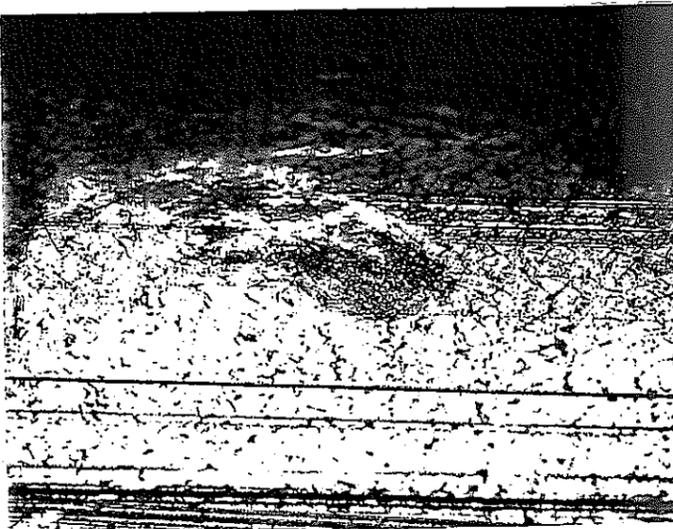
1600時間経過後



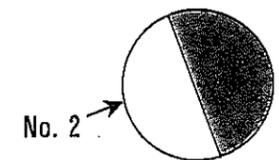
2000時間経過後



1000時間経過後



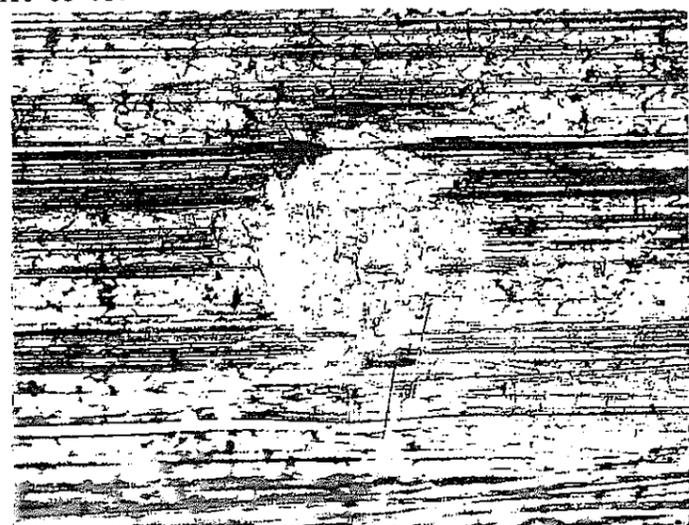
1900時間経過後



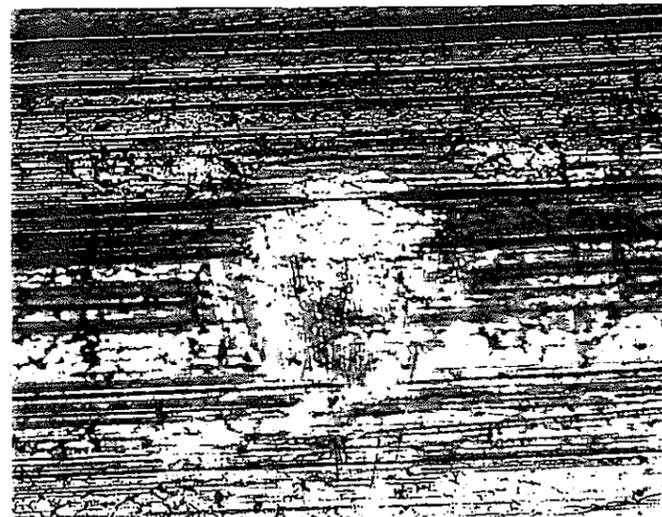
Bottom View

軸方向位置 ; 294mm
試料ピン ; $\phi 6.5\text{mm}$
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

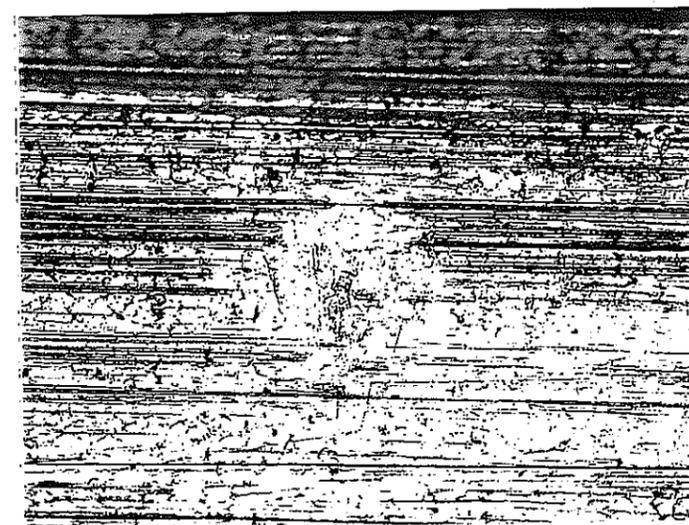
図 3.6-30 試料ピン表面観察結果 (2)



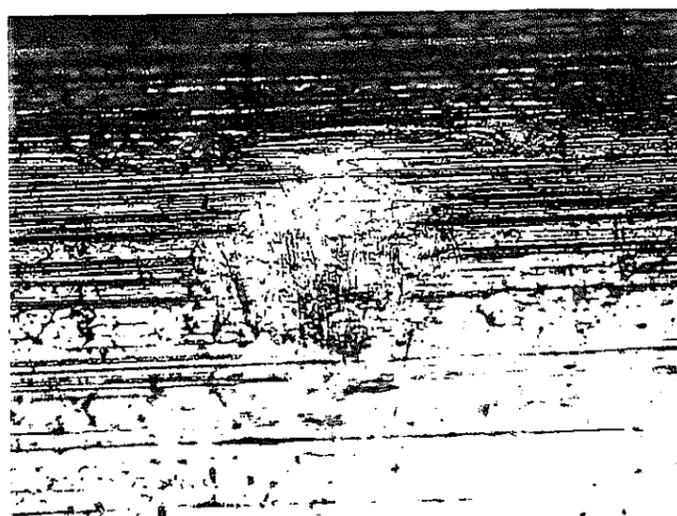
500時間経過後



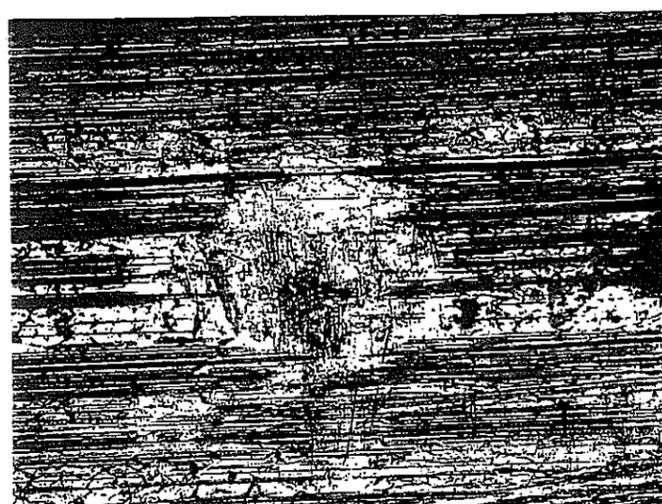
1300時間経過後



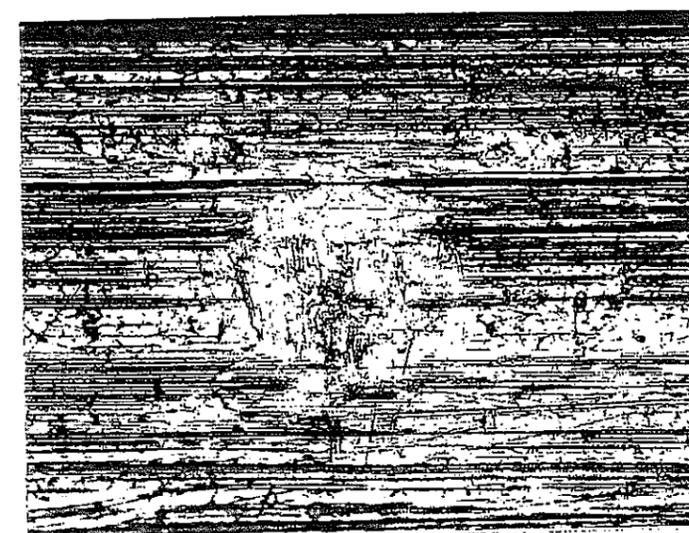
1950時間経過後



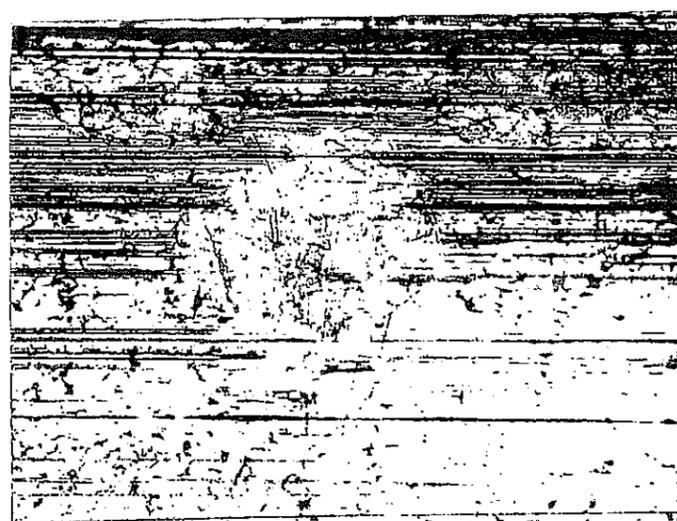
700時間経過後



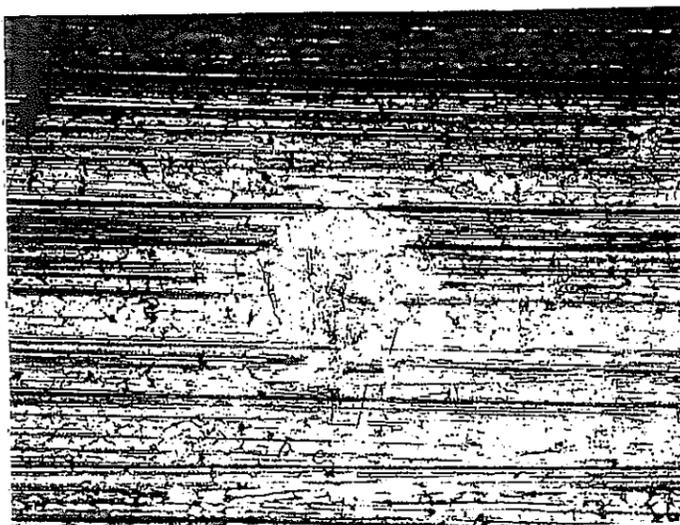
1600時間経過後



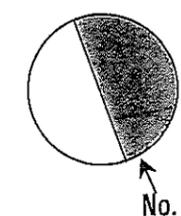
2000時間経過後



1000時間経過後



1900時間経過後



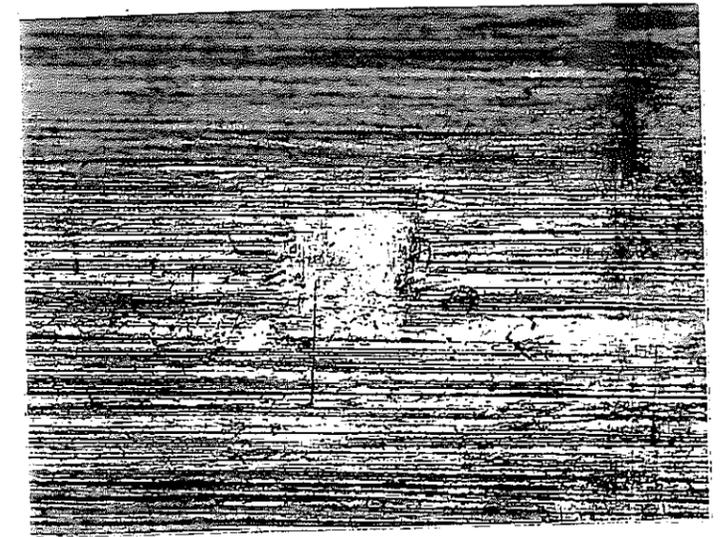
Bottom View

軸方向位置 ; 294mm
試料ピン ; $\phi 6.5\text{mm}$
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

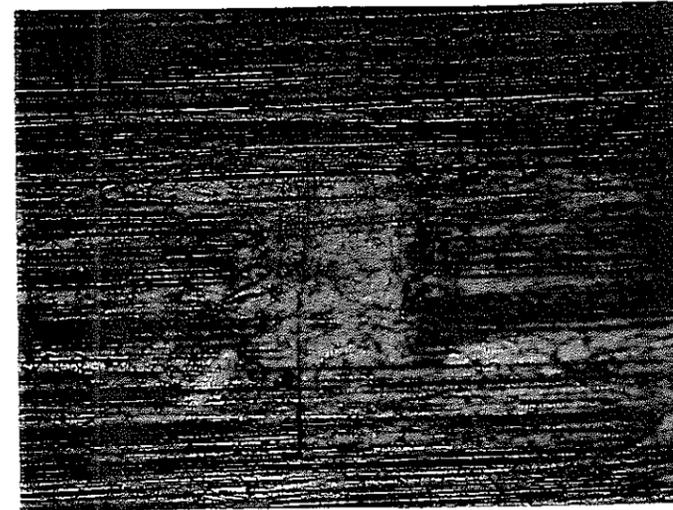
図 3.6-31 試料ピン表面観察結果 (3)



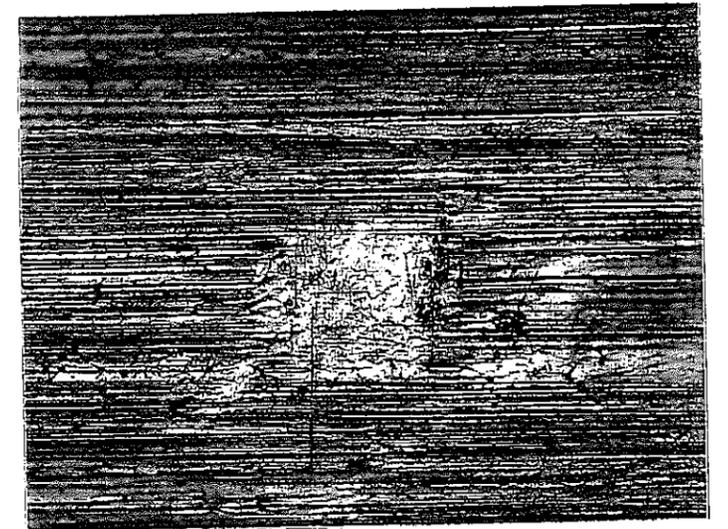
1300時間経過後



1950時間経過後



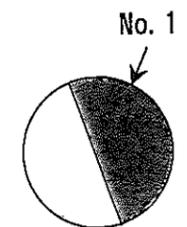
1600時間経過後



2000時間経過後



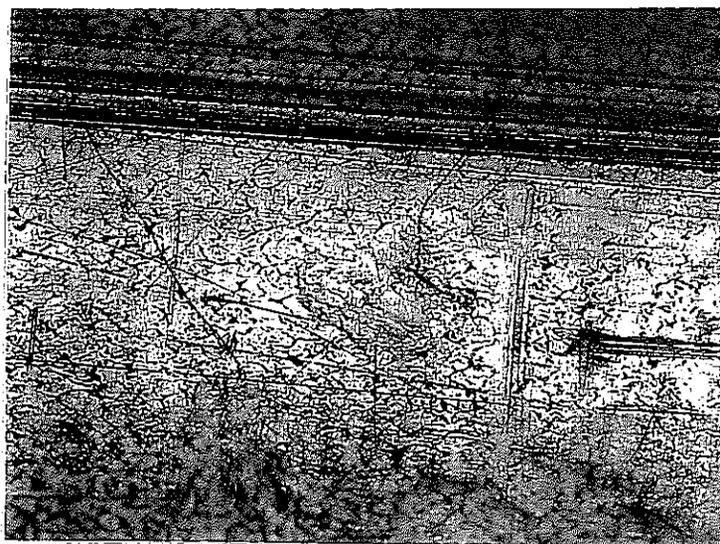
1900時間経過後



Bottom View

軸方向位置 ; 494mm
試料ピン ; $\phi 6.5\text{mm}$
ギャップ 0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

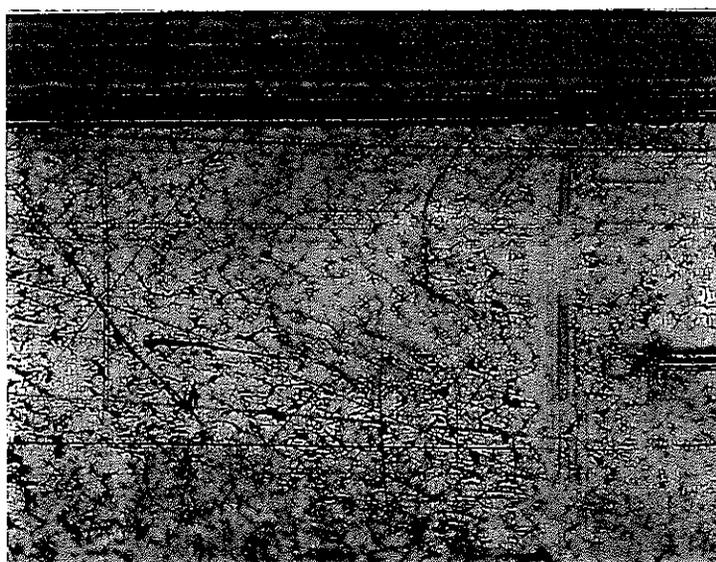
図 3.6-32 試料ピン表面観察結果 (4)



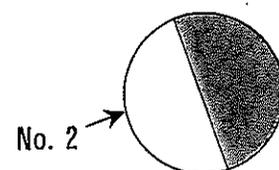
1900時間経過後



1950時間経過後



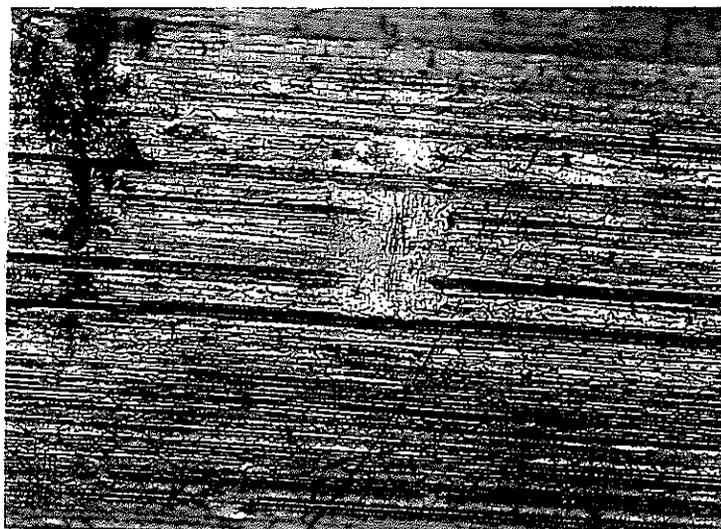
2000時間経過後



Bottom View

軸方向位置 ; 494mm
試料ピン ; $\phi 6.5\text{mm}$
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

図 3.6-33 試料ピン表面観察結果 (5)



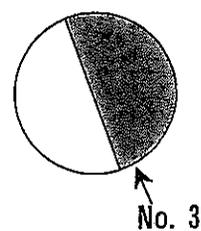
1900時間経過後



1950時間経過後



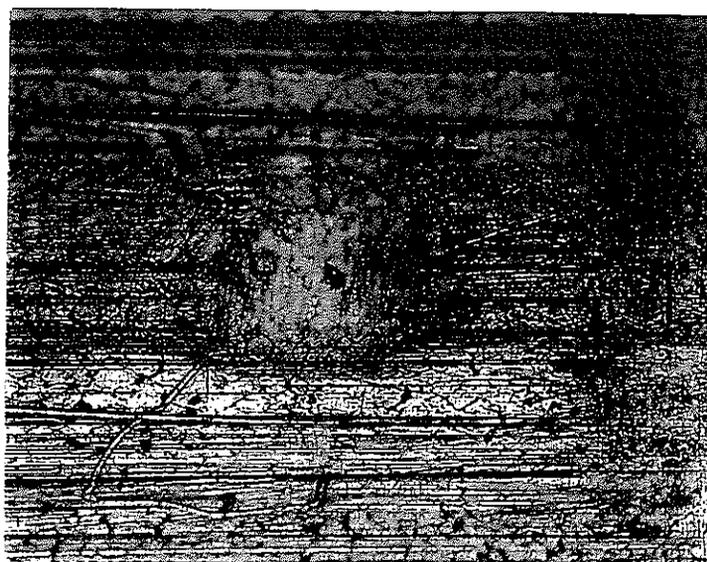
2000時間経過後



Bottom View

軸方向位置 ; 494mm
試料ピン ; $\phi 6.5\text{mm}$
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

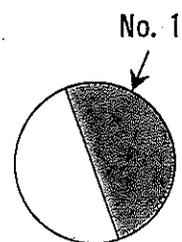
図 3.6-34 試料ピン表面観察結果 (6)



1300時間経過後



2000時間経過後



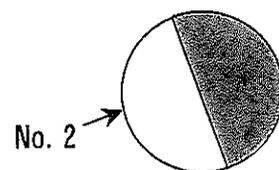
Bottom View

軸方向位置 ; 694mm
試料ピン ; $\phi 6.5\text{mm}$
ギャップ0.1mr
撮影倍率 ; 100倍

図 3.6-35 試料ピン表面観察結果 (7)



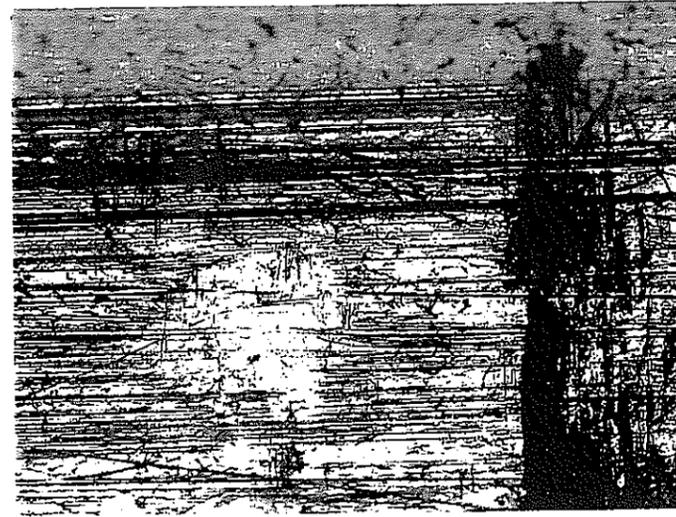
1600時間経過後



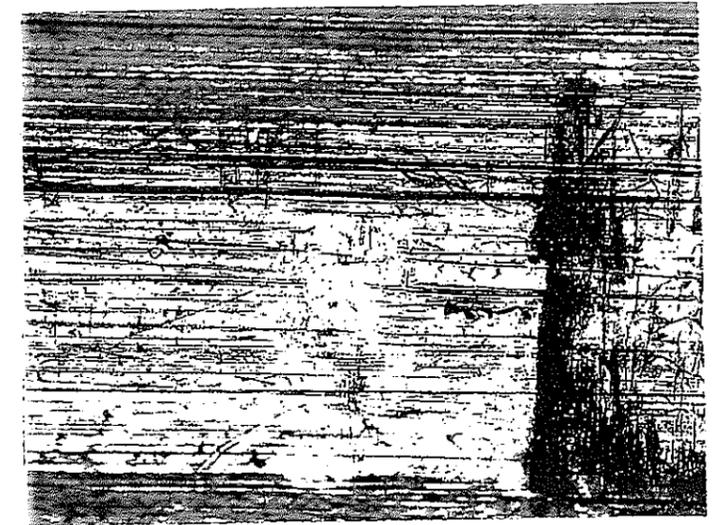
Bottom View

軸方向位置 ; 694mm
試料ピン ; $\phi 6.5\text{mm}$
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

図 3.6-36 試料ピン表面観察結果 (8)



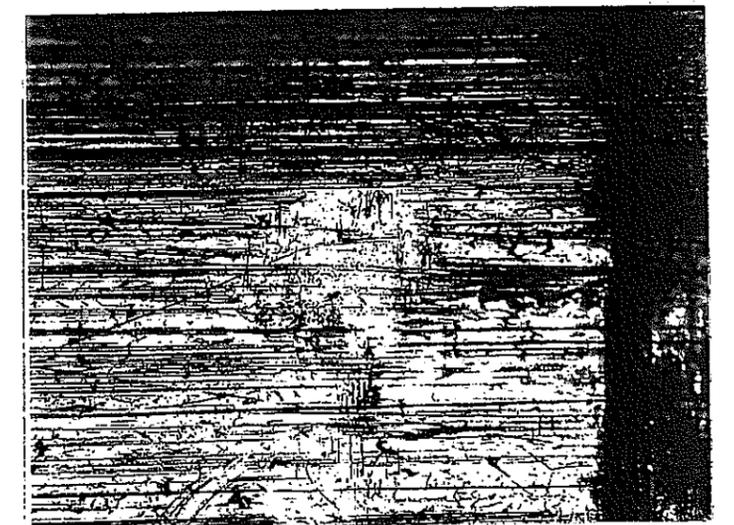
1300時間経過後



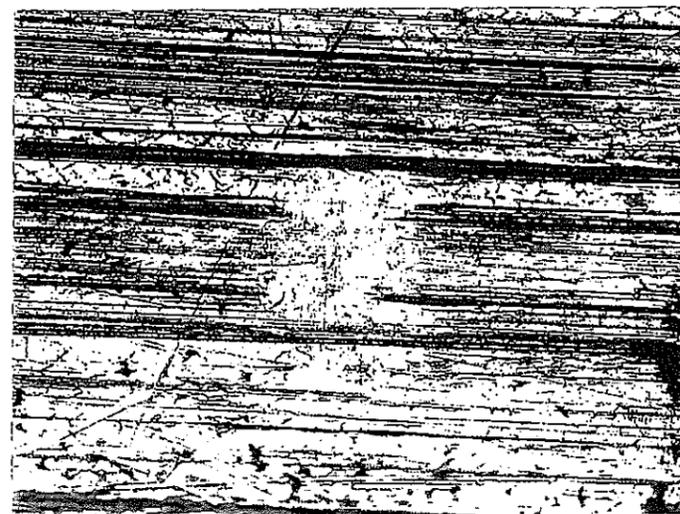
1950時間経過後



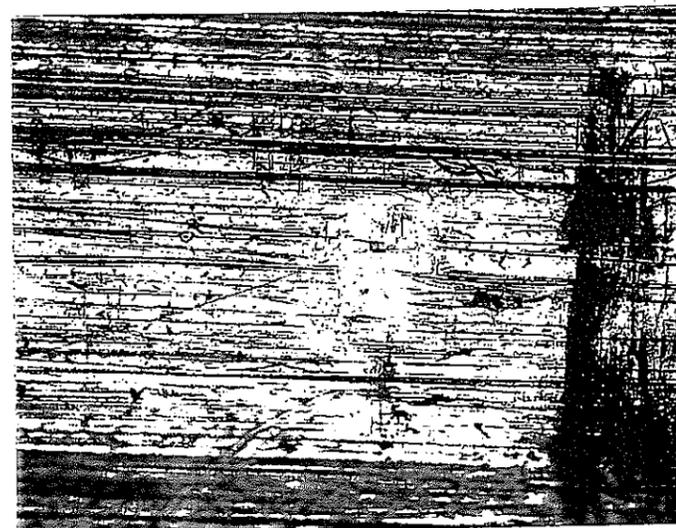
1600時間経過後



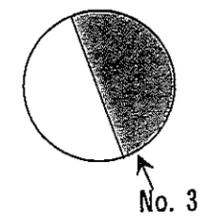
2000時間経過後



1000時間経過後



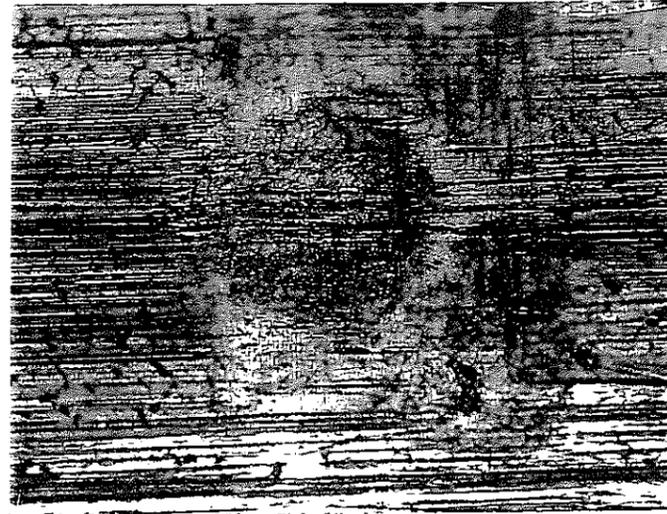
1900時間経過後



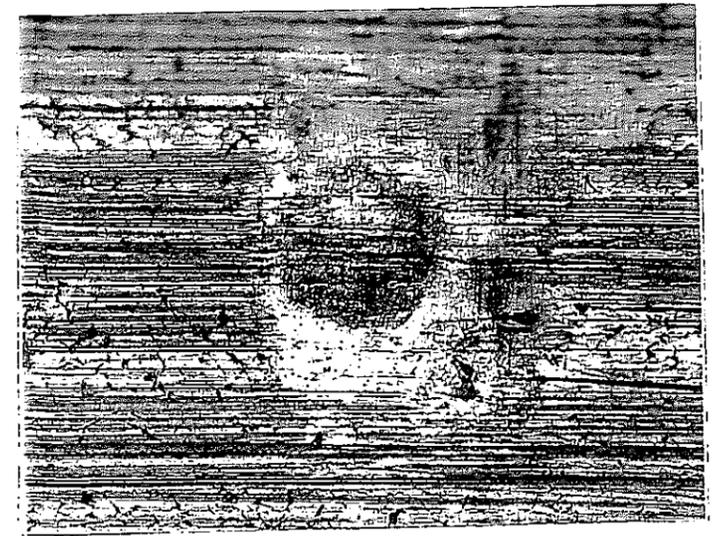
Bottom View

軸方向位置 ; 694mm
試料ピン ; φ6.5mm
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

図 3.6-37 試料ピン表面観察結果 (9)



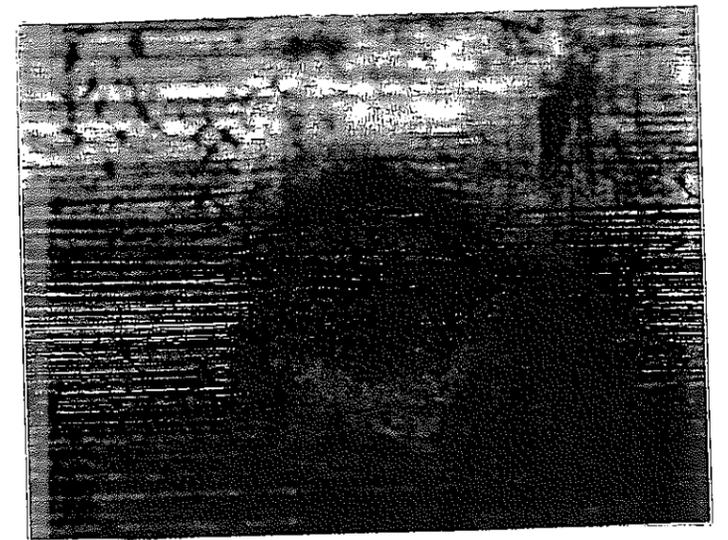
1300時間経過後



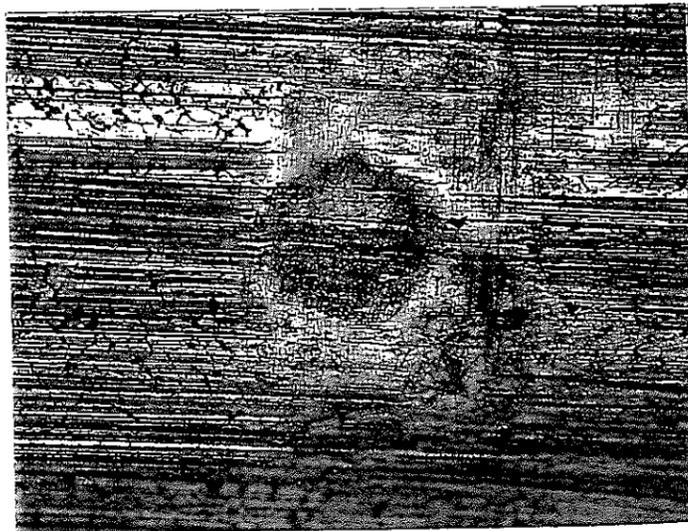
1950時間経過後



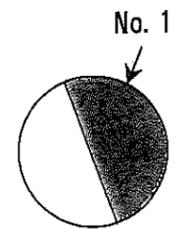
1600時間経過後



2000時間経過後



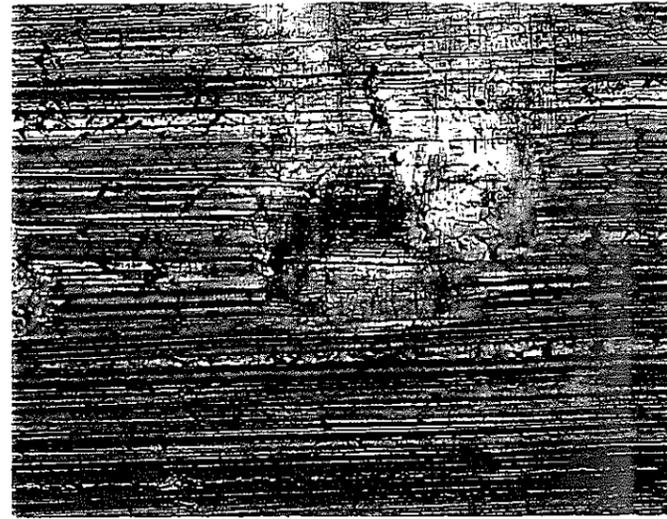
1900時間経過後



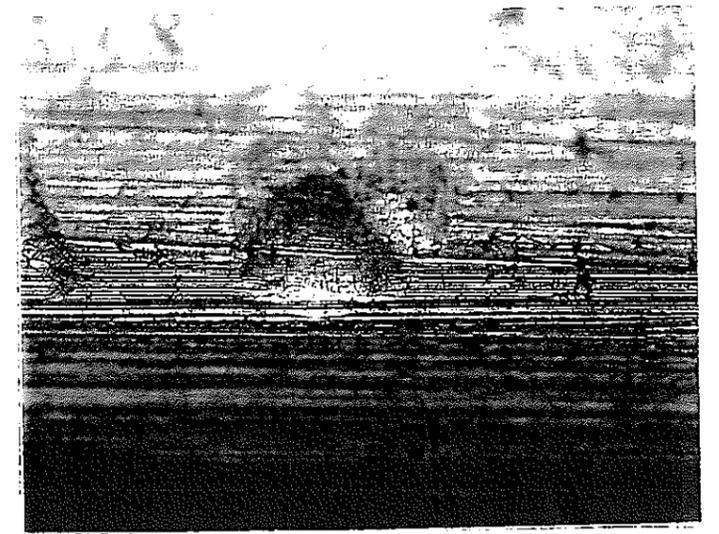
Bottom View

軸方向位置 ; 244mm
試料ピン ; $\phi 8.5\text{mm}$
ギャップ0.1mm
撮影倍率 ; 100倍

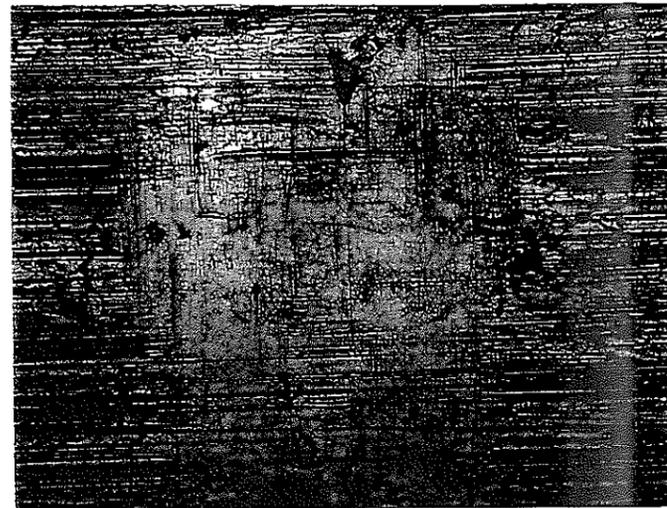
図 3.6-38 試料ピン表面観察結果 (10)



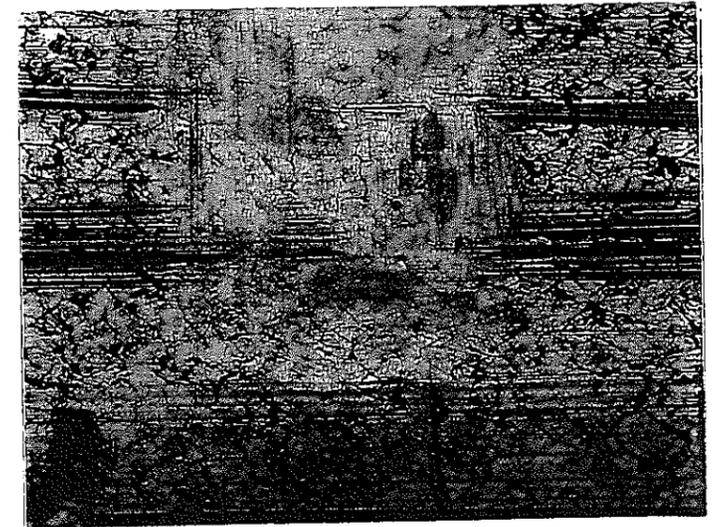
1300時間経過後



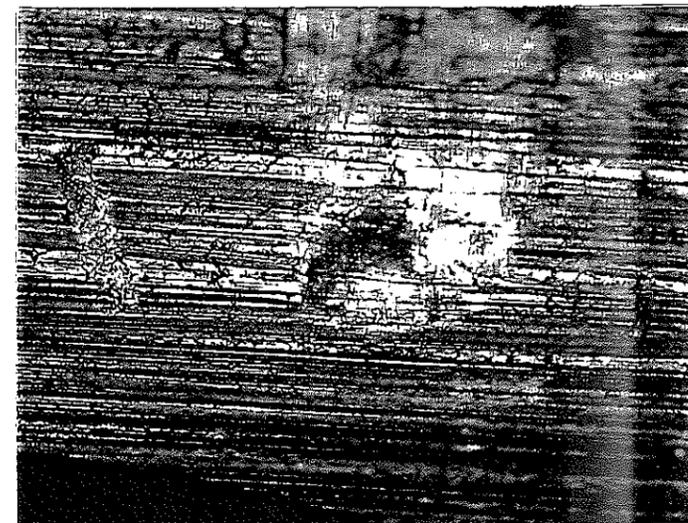
1950時間経過後



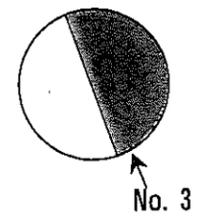
1600時間経過後



2000時間経過後



1900時間経過後



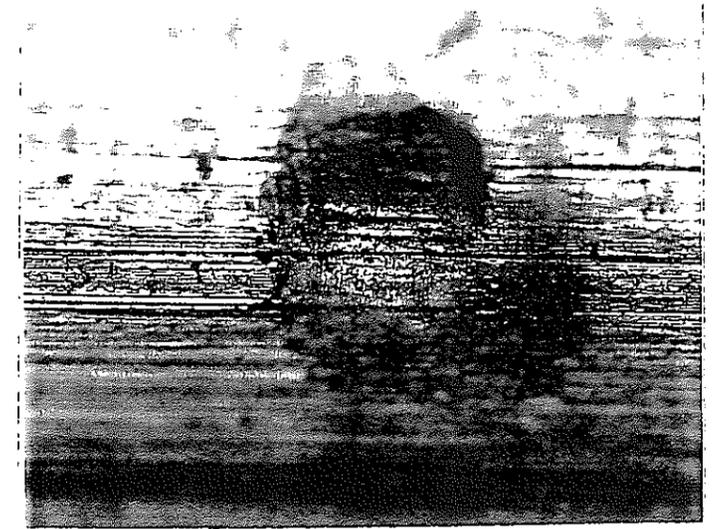
Bottom View

軸方向位置 ; 244mm
試料ピン ; $\phi 8.5\text{mm}$
ギャップ 0.1mm
撮影倍率 ; 100倍

図 3.6-39 試料ピン表面観察結果 (11)



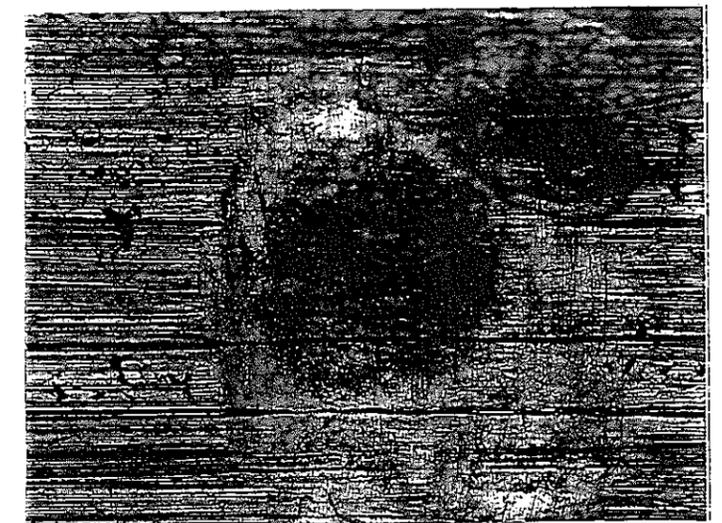
1300時間経過後



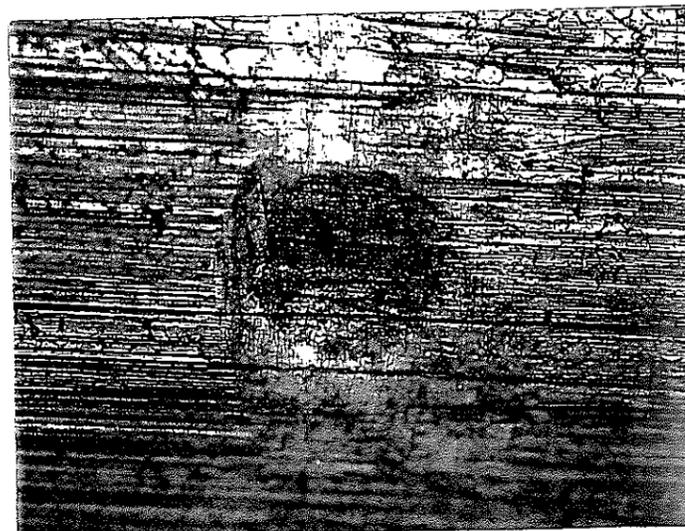
1950時間経過後



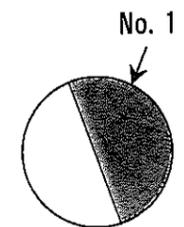
1600時間経過後



2000時間経過後



1900時間経過後



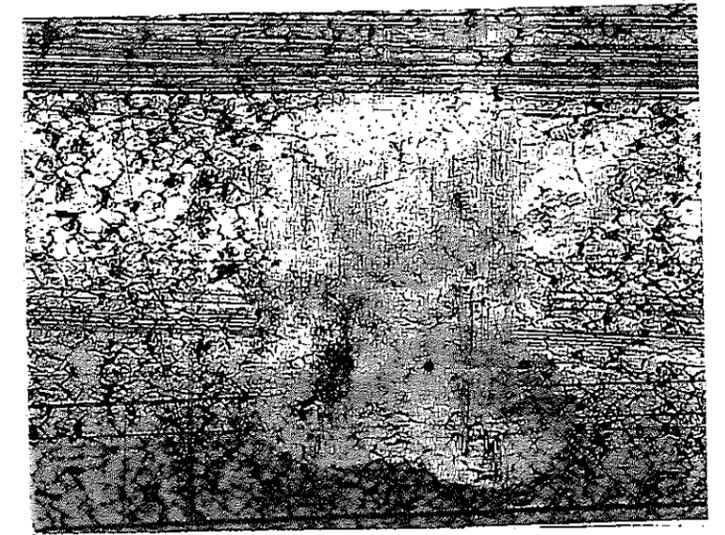
Bottom View

軸方向位置 ; 444mm
試料ピン ; $\phi 8.5\text{mm}$
ギャップ0.1mm
撮影倍率 ; 100倍

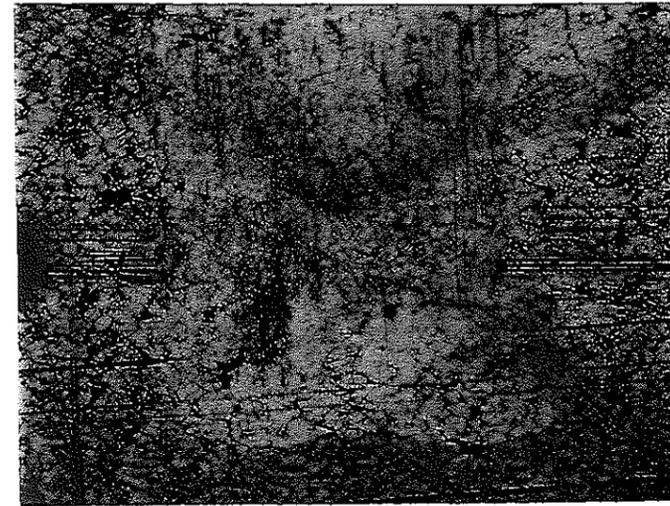
図 3.6-40 試料ピン表面観察結果 (1 2)



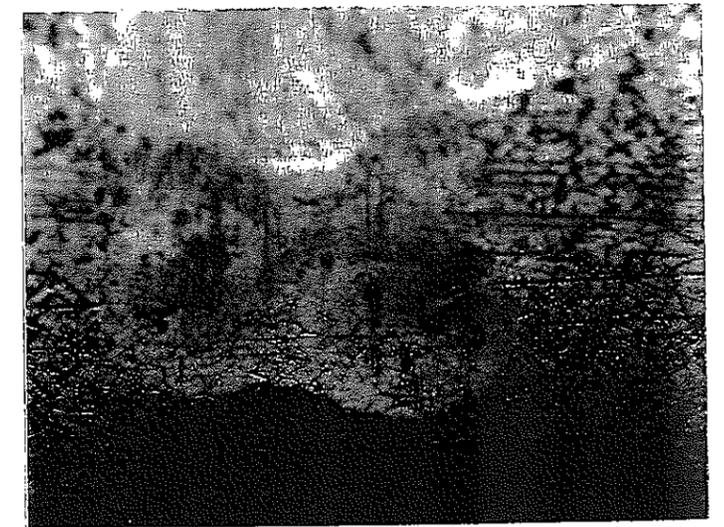
1300時間経過後



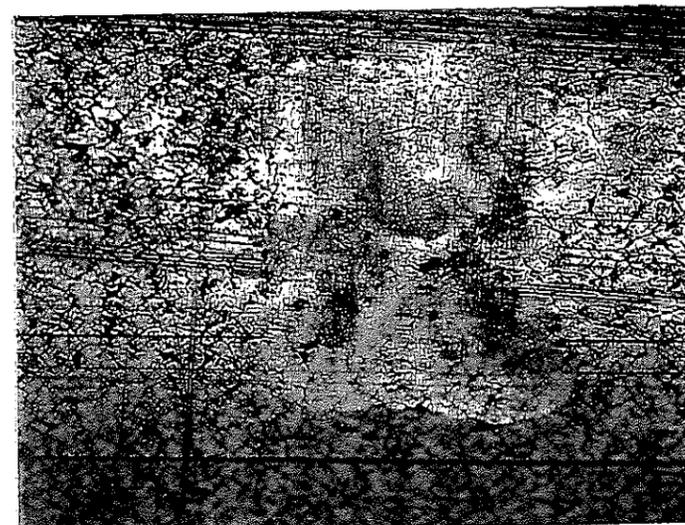
1950時間経過後



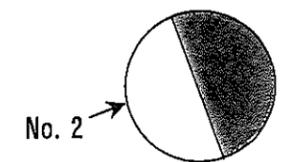
1600時間経過後



2000時間経過後



1900時間経過後



Bottom View

軸方向位置 ; 444mm
試料ピン ; $\phi 8.5\text{mm}$
ギャップ0.1mm
撮影倍率 ; 100倍

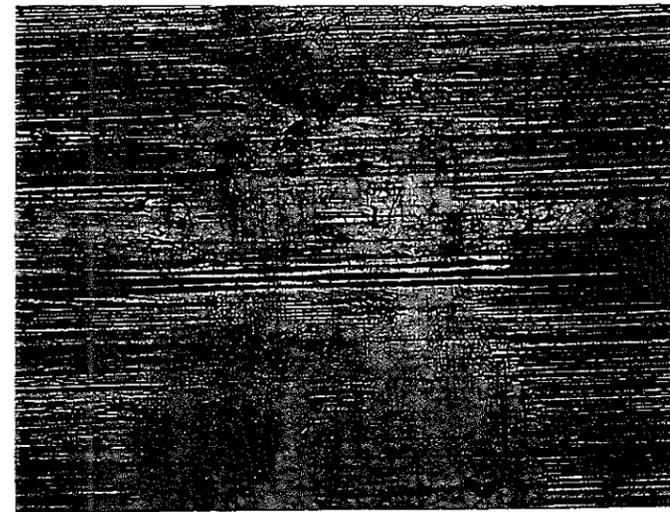
図 3.6-41 試料ピン表面観察結果 (13)



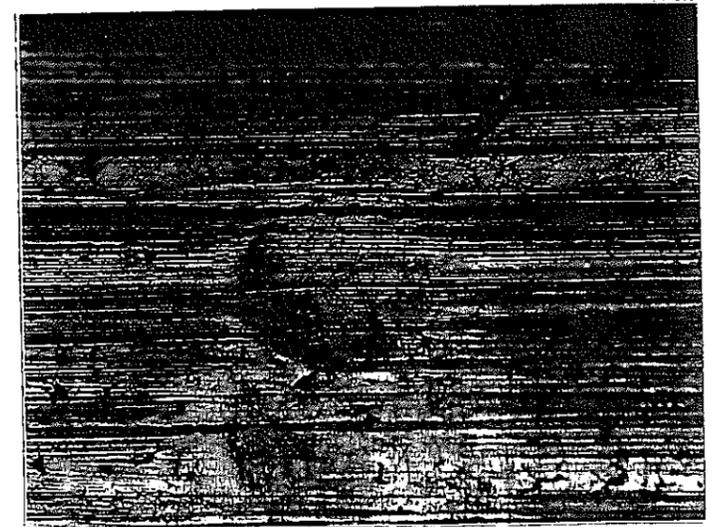
1300時間経過後



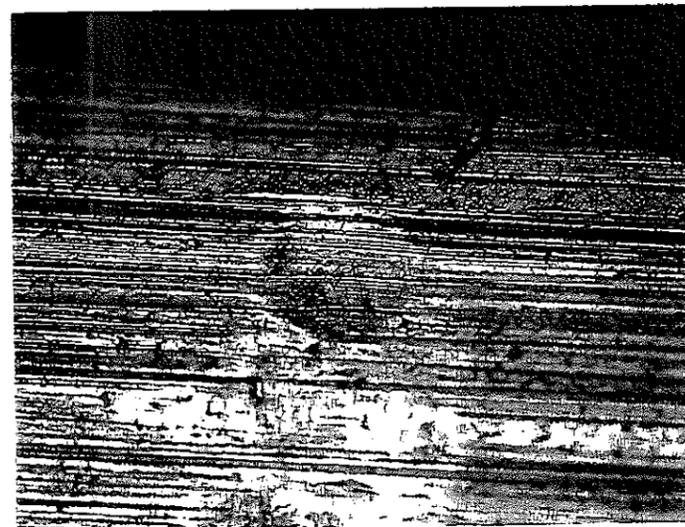
1950時間経過後



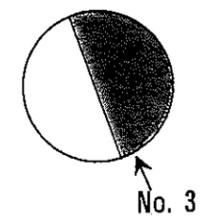
1600時間経過後



2000時間経過後



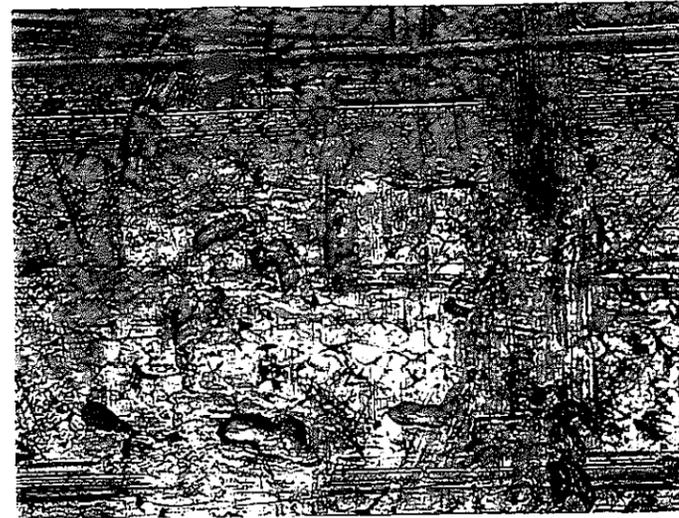
1900時間経過後



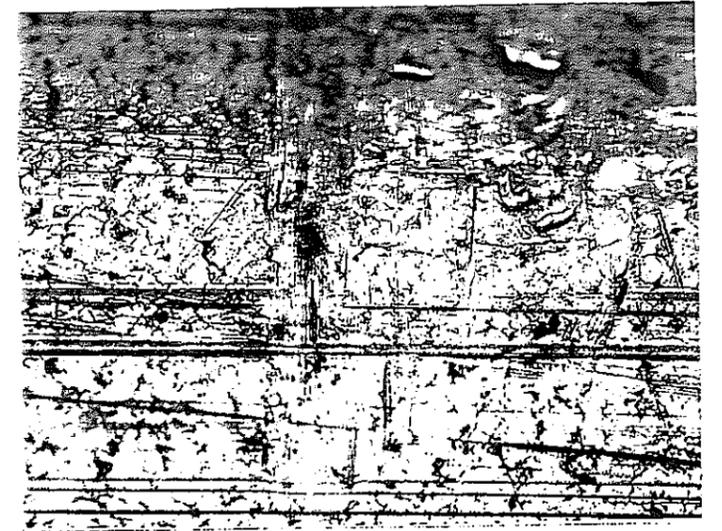
Bottom View

軸方向位置 ; 444mm
試料ピン ; $\phi 8.5\text{mm}$
ギャップ 0.1mm
撮影倍率 ; 100倍

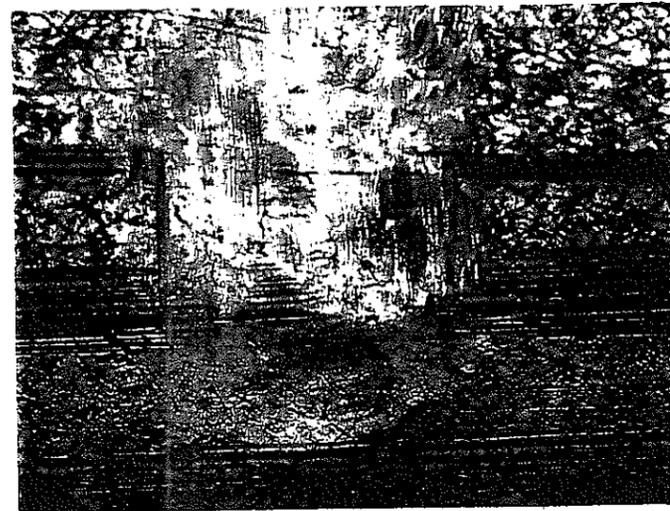
図 3.6-42 試料ピン表面観察結果 (14)



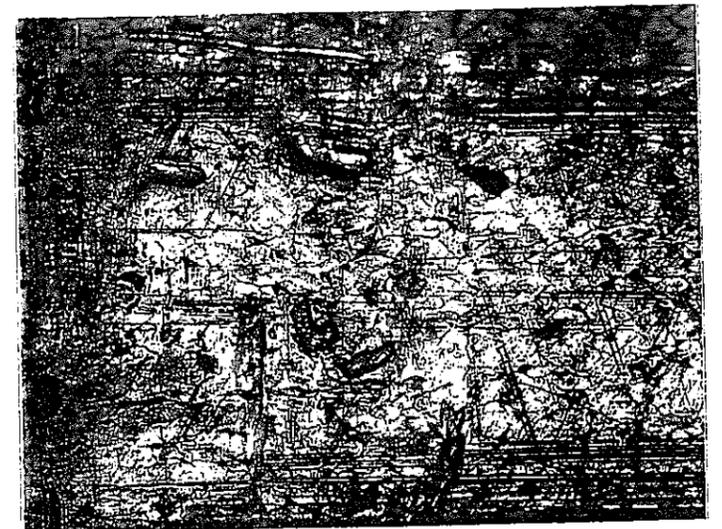
1300時間経過後



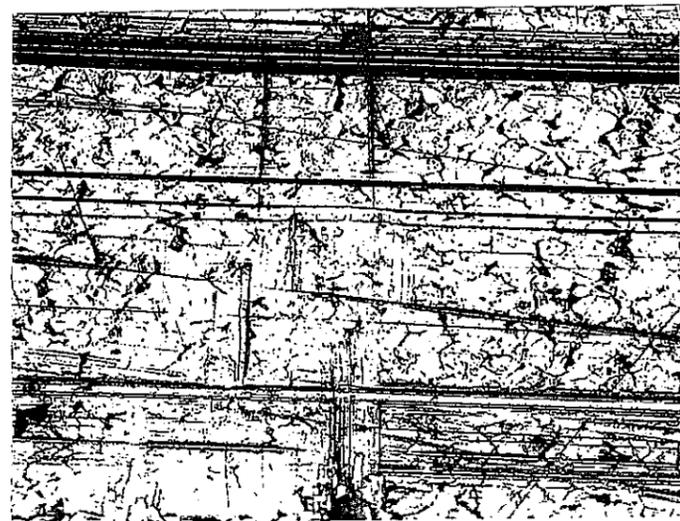
1950時間経過後



1600時間経過後



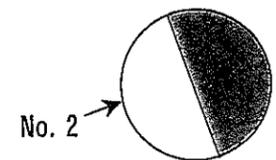
2000時間経過後



1000時間経過後



1900時間経過後



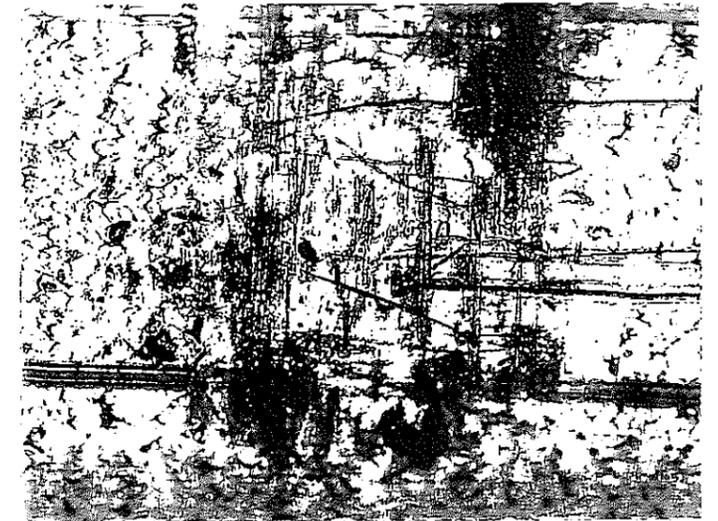
Bottom View

軸方向位置 ; 245mm
試料ピン ; $\phi 8.5\text{mm}$
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

図 3.6-43 試料ピン表面観察結果 (15)



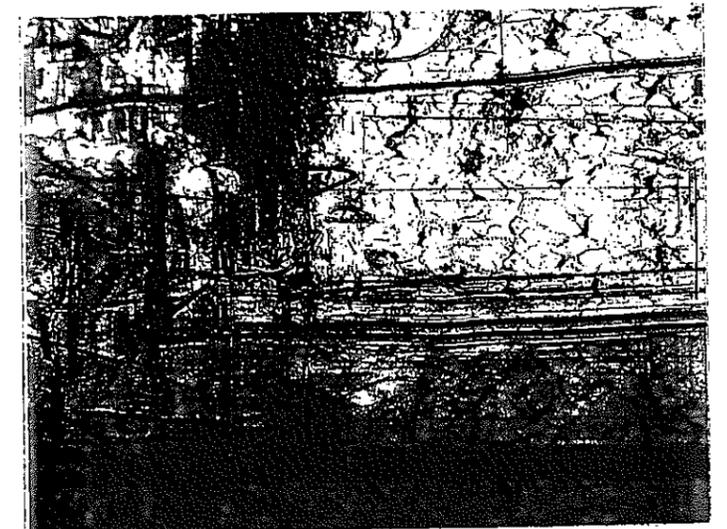
1300時間経過後



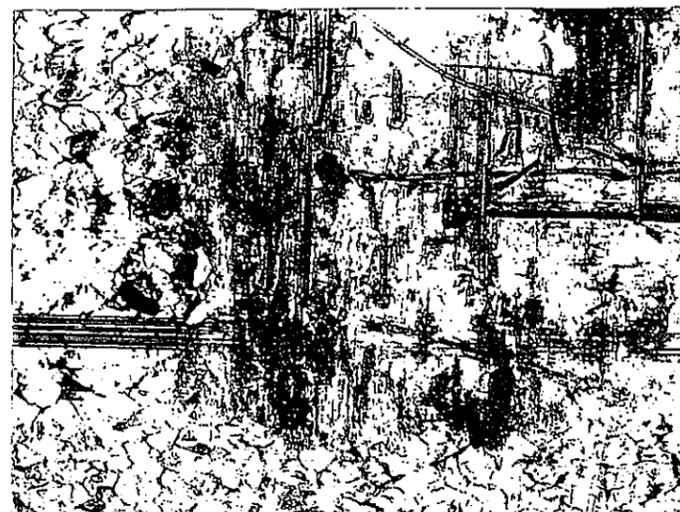
1950時間経過後



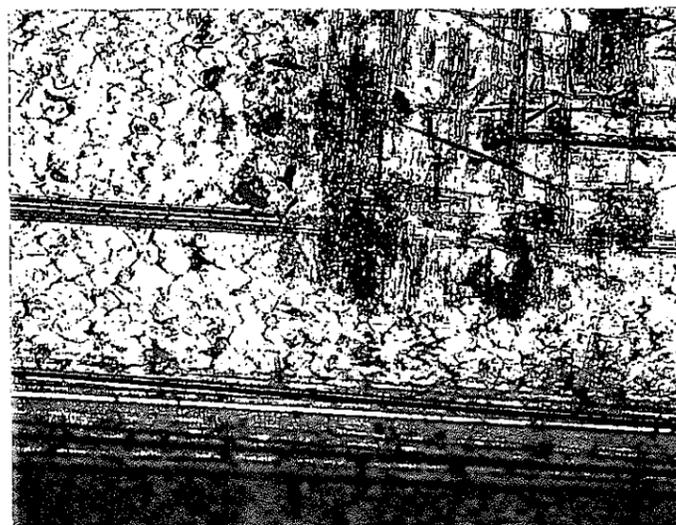
1600時間経過後



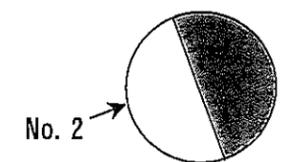
2000時間経過後



1000時間経過後



1900時間経過後



Bottom View

軸方向位置 ; 445mm
試料ピン ; φ8.5mm
ギャップ0.2mm
撮影倍率 ; 100倍

図 3.6-44 試料ピン表面観察結果 (16)

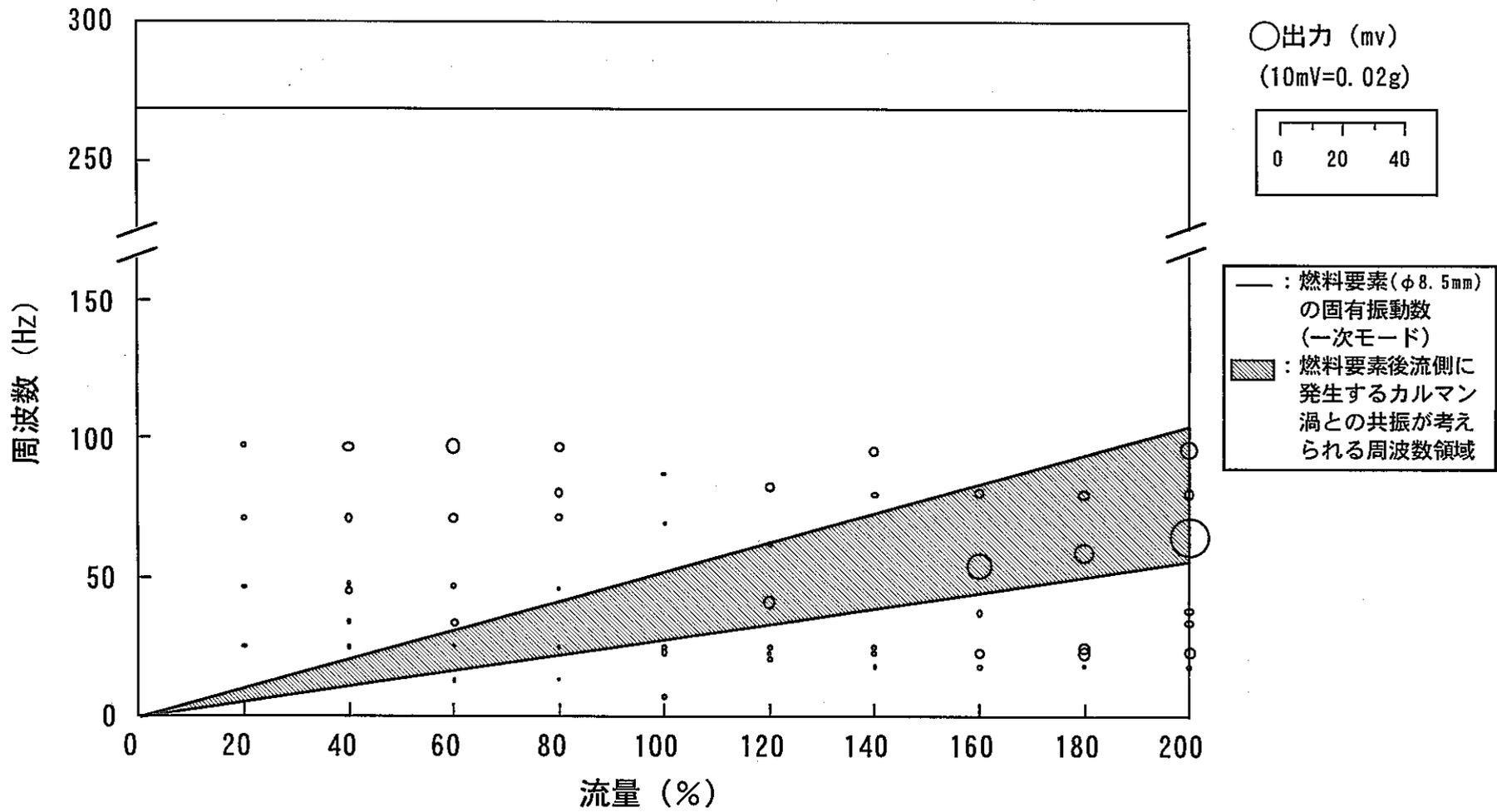


図3.6-45 カルマン渦との共振評価結果

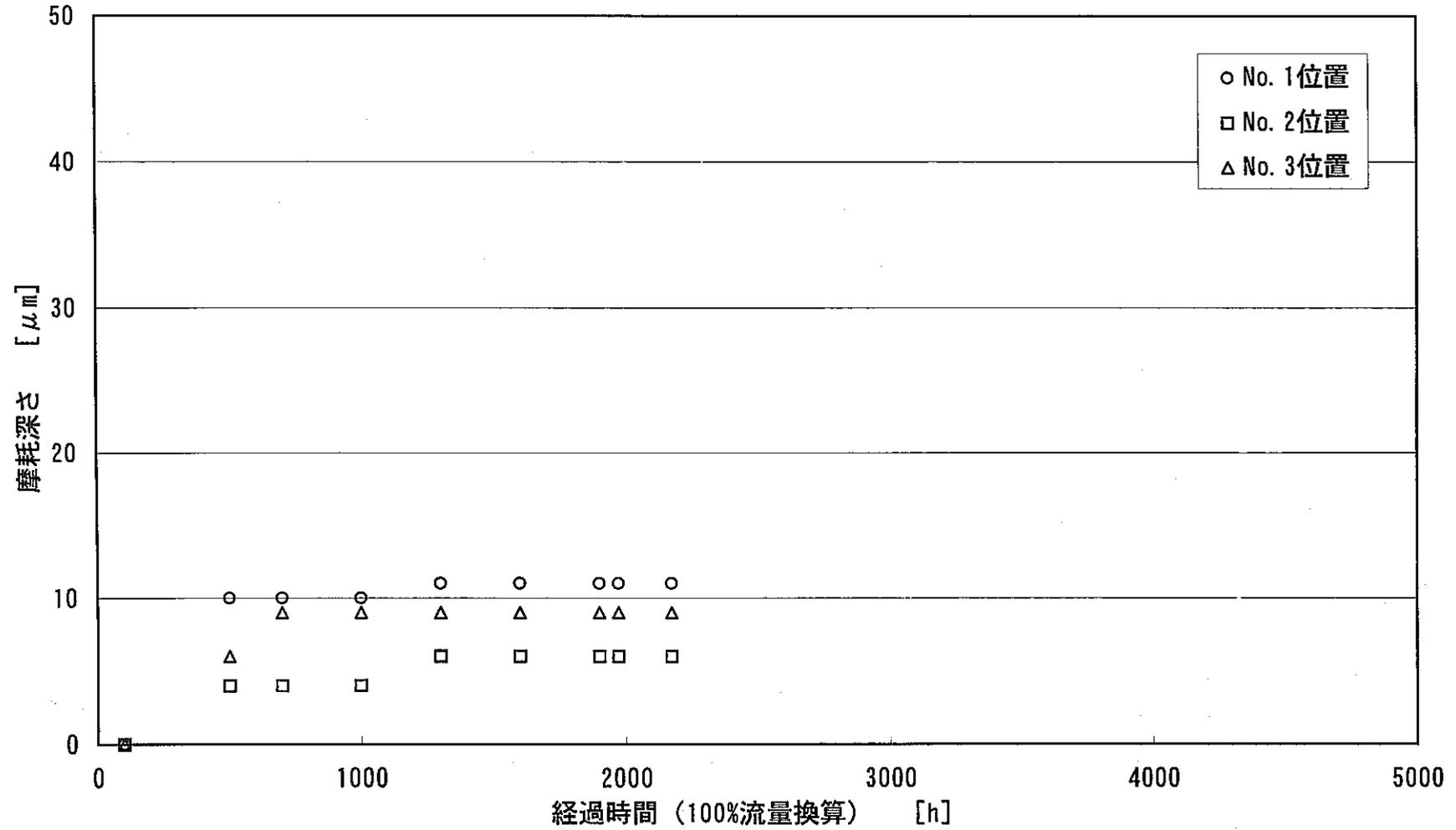


図3.6-46 試料ピン摩耗評価結果 (ピン外径; 6.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から294mmのデインプル対応位置)

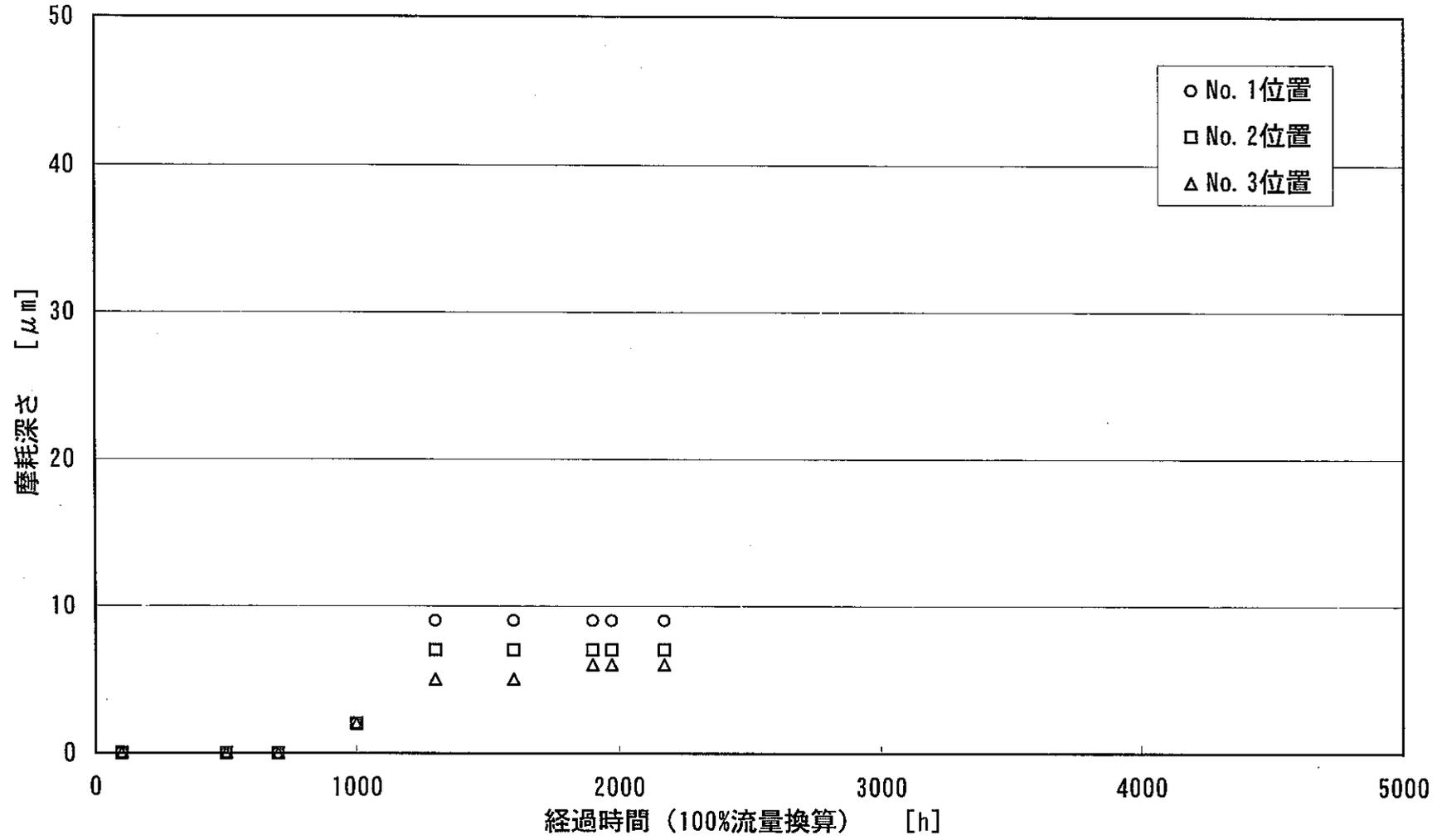


図3.6-47 試料ピン摩耗評価結果 (ピン外径; 6.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から494mmのデインプル対応位置)

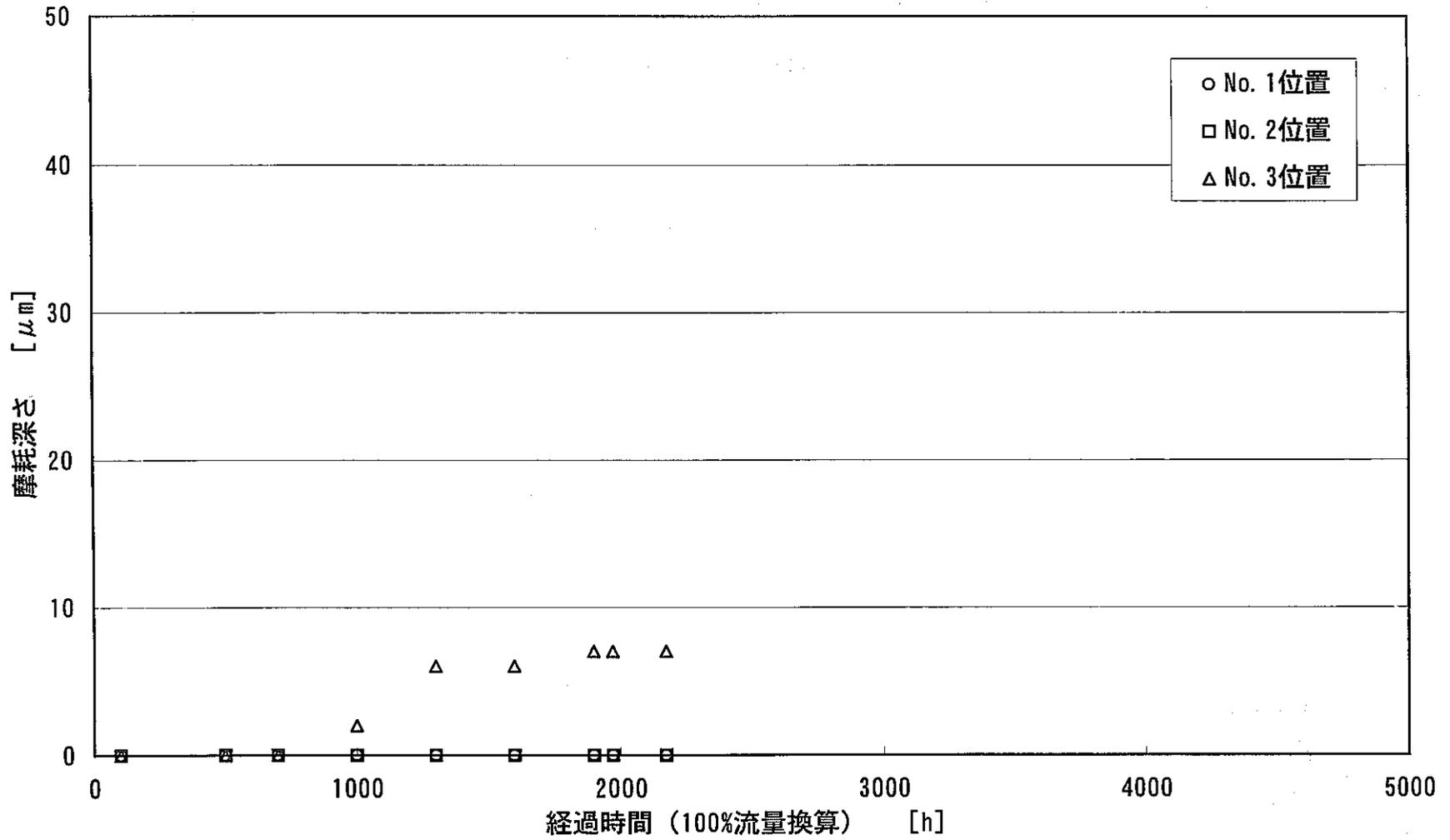


図3.6-48 試料ピン摩耗評価結果 (ピン外径; 6.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から694mmのディンプル対応位置)

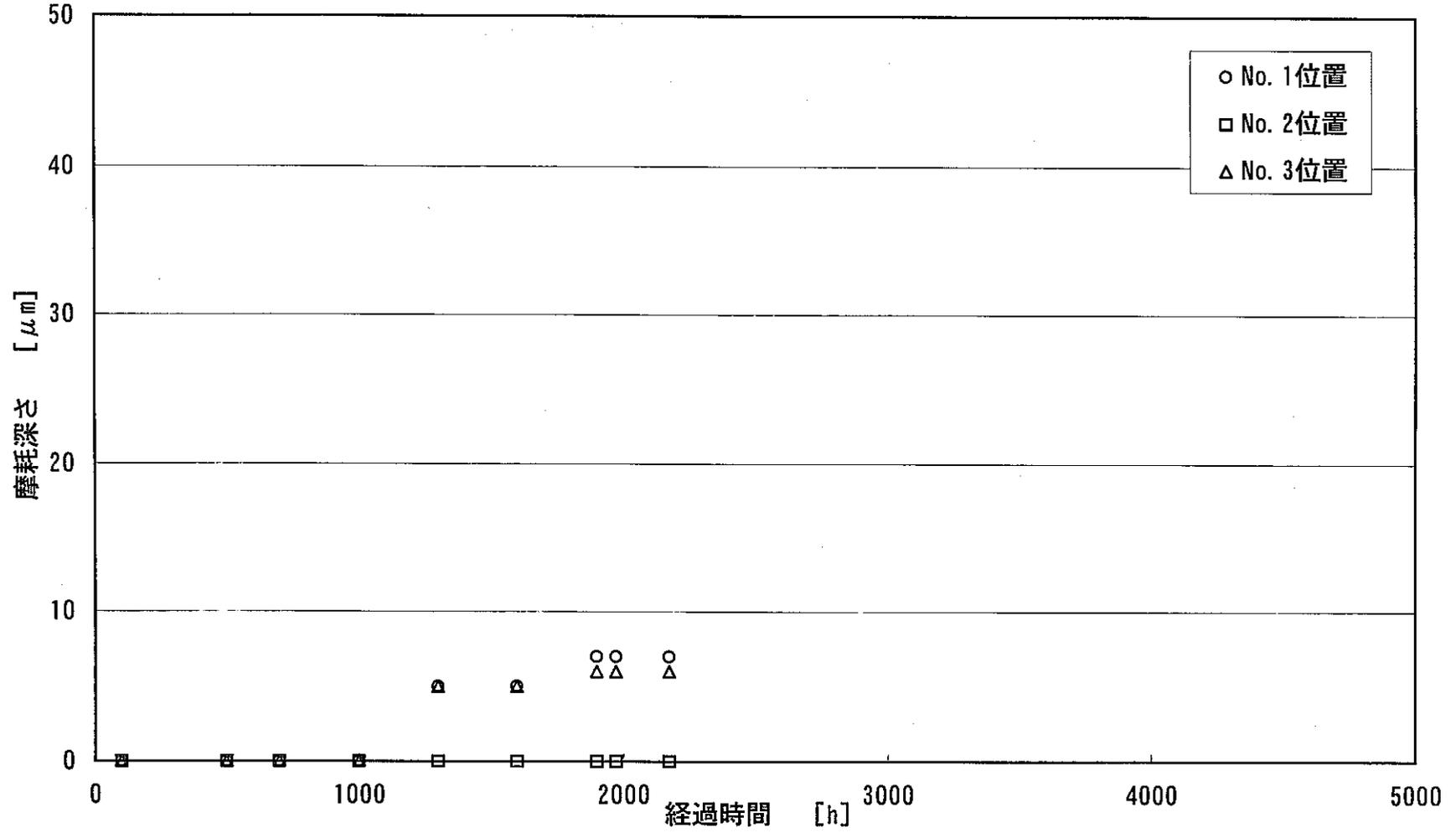


図3.6-49 試料ピン摩耗評価結果 (ピン外径; 8.5mm, ギャップ; 0.1mm, 下から244mmのデインプル対応位置)

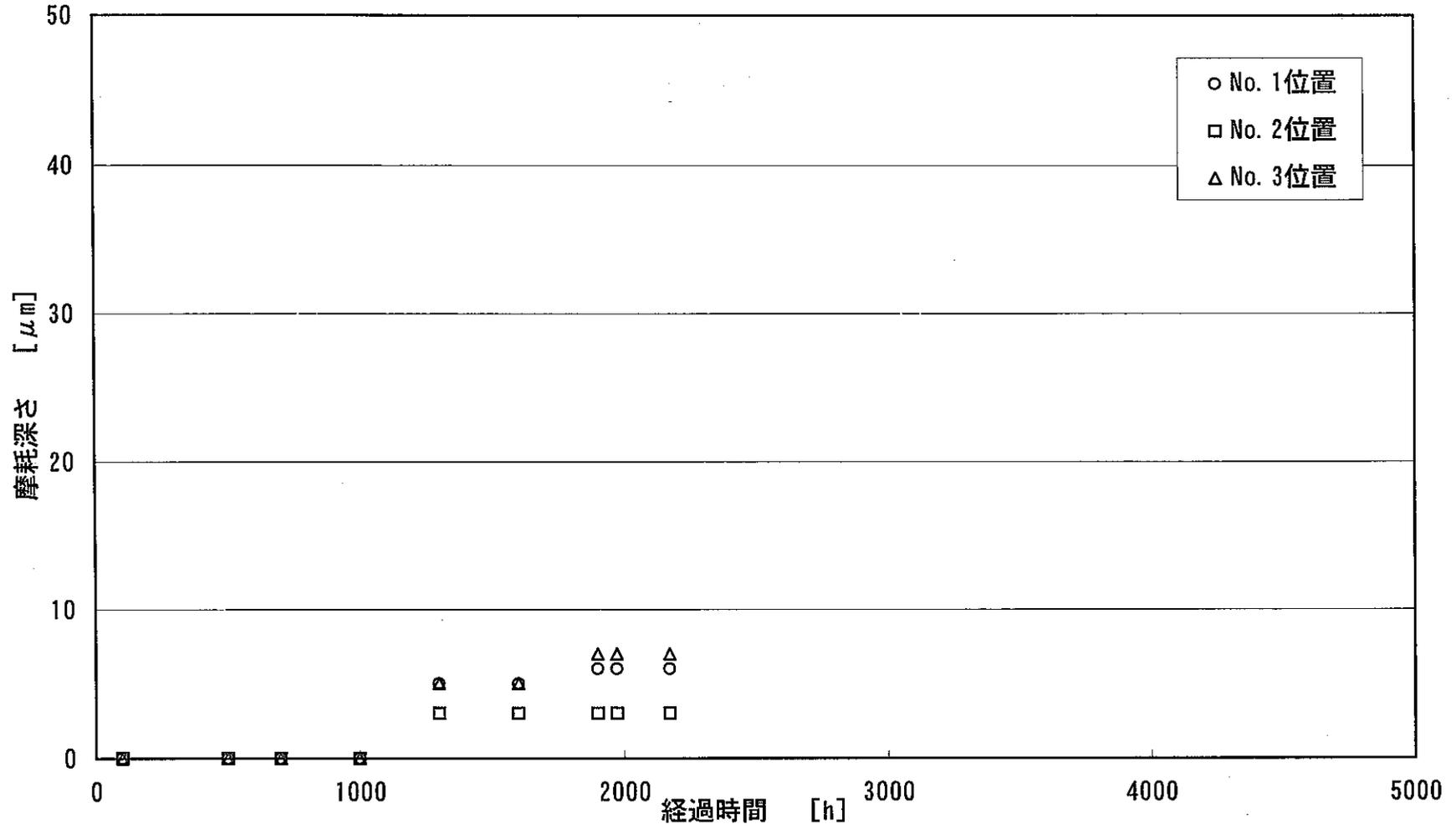


図3. 6-50 試料ピン摩耗評価結果 (ピン外径 ; 8. 5mm, ギャップ ; 0. 1mm, 下から444mmのディンプル対応位置)

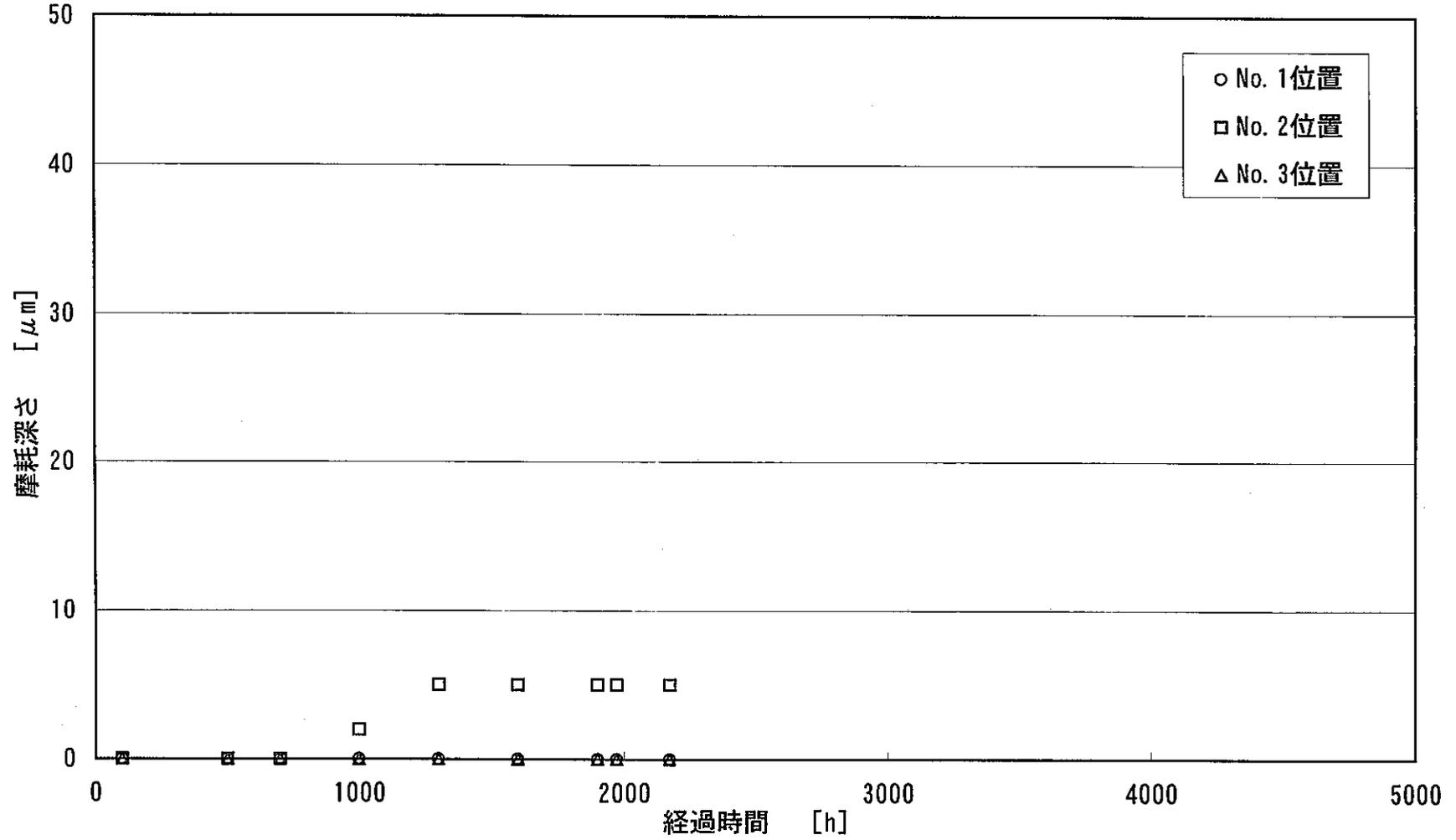


図3.6-51 試料ピン摩耗評価結果 (ピン外径; 8.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から245mmのディンプル対応位置)

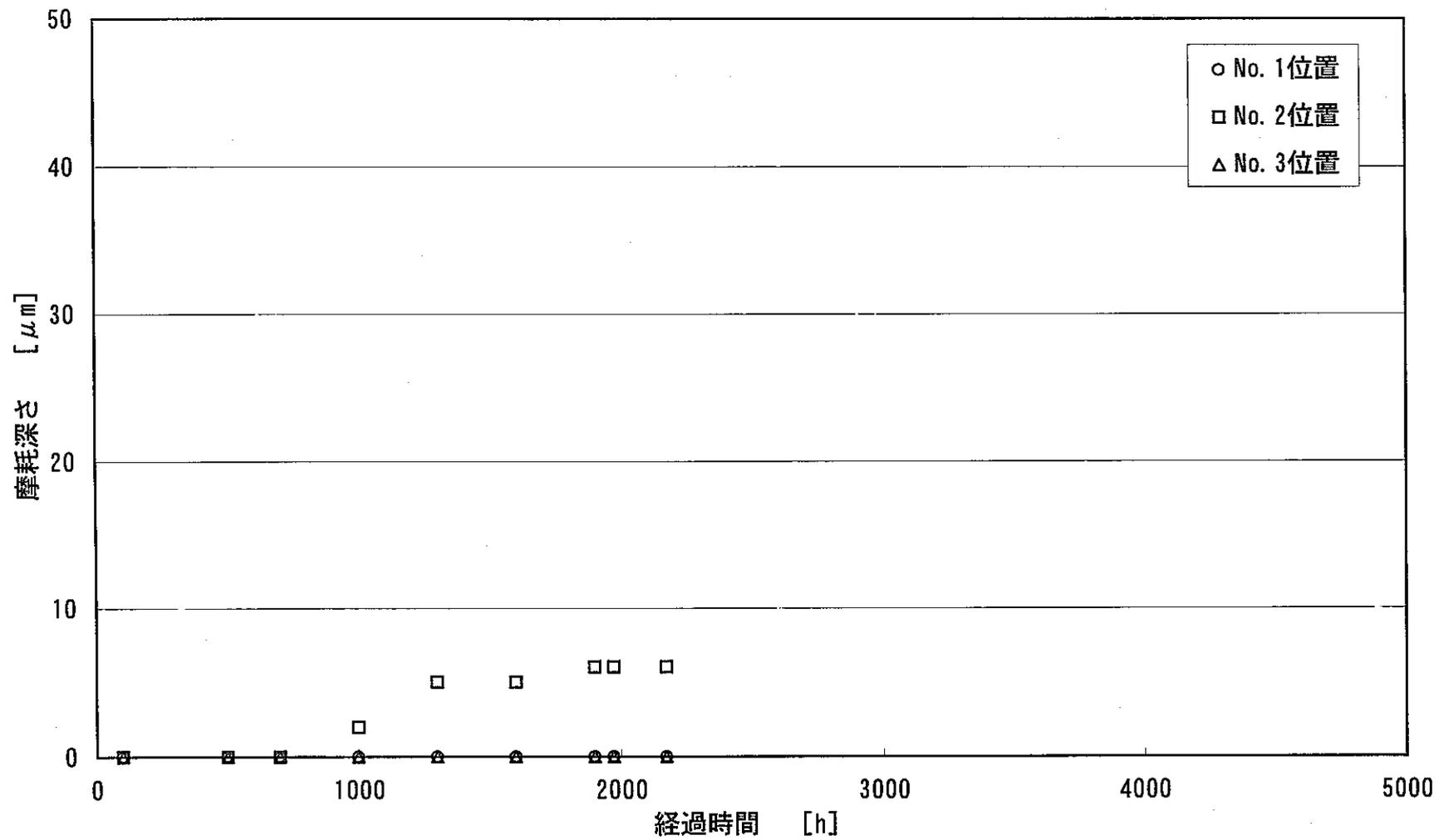


図3.6-52 試料ピン摩耗評価結果 (ピン外径; 8.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から445mmのディンプル対応位置)

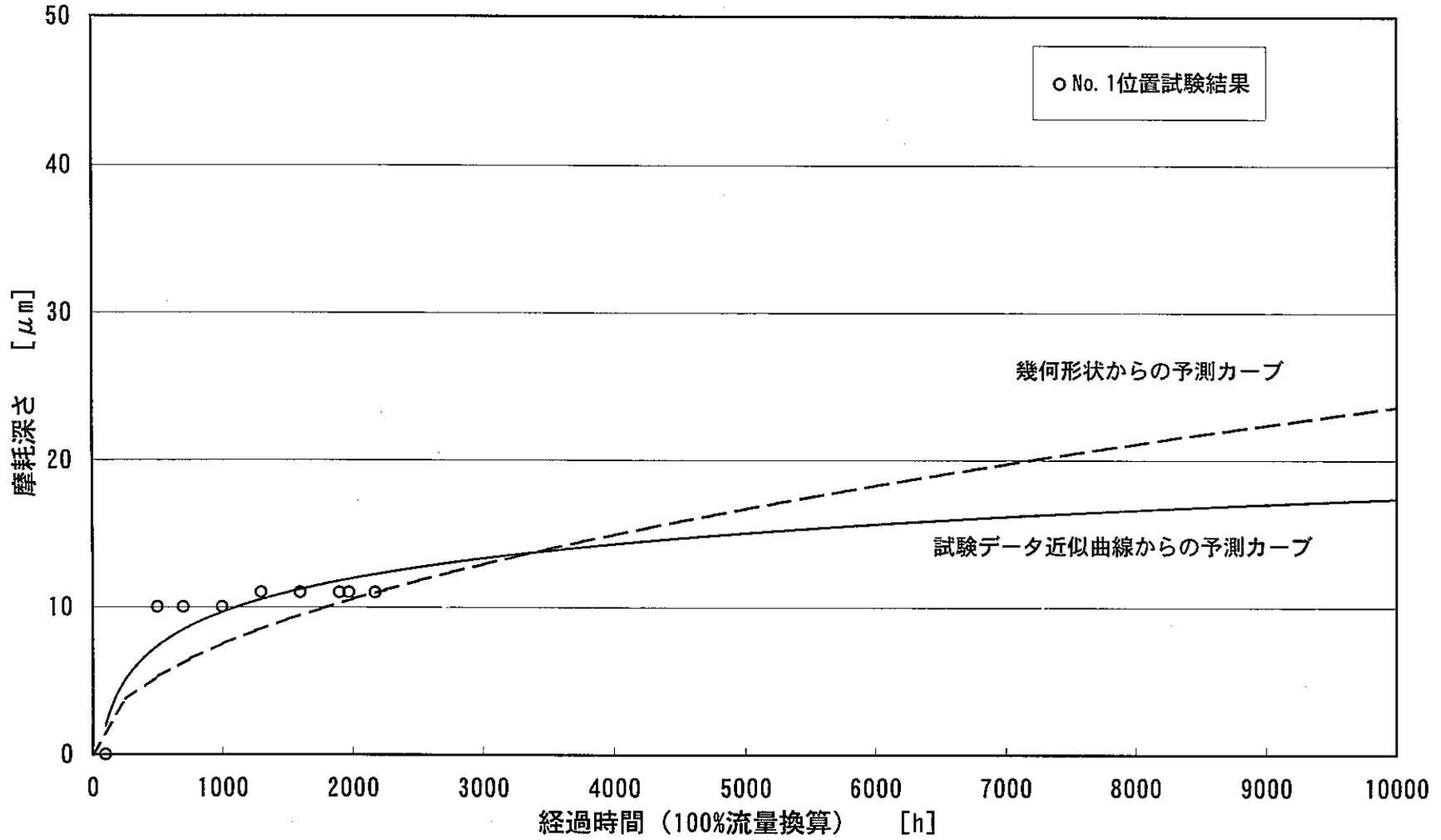


図3.6-53 試料ピン摩耗予測 (ピン外径; 6.5mm, ギャップ; 0.2mm, 下から294mmのデインプル対応位置)

3.7 R T C B 試験対応

現在、 γ 型コンパートメントだけでなく、 δ 型コンパートメントでも R T C B 試験を実施できるよう検討を進めている。 δ 型コンパートメントで R T C B 試験を実施するためには、ガスブランケット対策及び被覆管から放出された燃料粉（他の燃料集合体等の機能を阻害する可能性のある大きさのもの）をコンパートメント外に放出させないための対策が必要である。

(1) ガスブランケット対策

δ 型コンパートメントでのガスブランケット対策については、コンパートメントの径方向寸法が小さいため、現状の評価では、ガスブランケット対策を施す空間が無く、 δ 型コンパートメントと同じように1本の燃料要素を装填し R T C B 試験を実施する β 型コンパートメント（A型照射リグに装填し R T C B 試験を行う）の R T C B 評価条件範囲外となると考えられる。予想としては、冷却材流量が少ないことから結果として燃料要素下方での冷却材圧力が低くなり、破損時に放出された F P ガスが排出されにくくなることからガスブランケットの時間が長くなるため、被覆管の最高温度が制限値を越えてしまうと考えられる。 δ 型コンパートメントのガスブランケット対策としては、シュラウド管へのスリットの設置が考えられる。ただし、燃料要素から放出される F P ガスのための空間を小さくすれば結果として燃料要素下方での冷却材圧力は高くとれる傾向にあるので、ガスブランケット対策なしの条件で解決できる可能性も考えられる。

(2) 被覆管から放出された燃料粉をコンパートメント外へ放出させないための対策

被覆管から放出された燃料粉の δ 型コンパートメント外へ放出させないための対策については、既に上部キャップ部のストレーナ（孔径 0.8mm）及びシュラウド管下部ストレーナ（孔径 0.8mm）を設けるためのスペースを確保しているため対応可能である。なお、R T C B 試験は、燃料破損後も破損限界まで照射運転を続ける R B C B（Run Beyond Cladding Breach）試験と異なり、燃料破損を検知した後、すぐに原子炉を停止させるため、ストレーナに燃料粉が詰まって流路閉塞を起こすことを想定した他の燃料粉トラップ構造を考慮する必要はない。

4 強度評価

D型照射リグの強度評価として、通常運転時及び異常な過渡変化時、輸送・取扱時、地震時及びその他の強度評価を実施した。強度評価では、集合体外筒部の形状及び使用条件がB型照射リグと同じであるためD型照射リグの集合体外筒部の評価結果は、B型照射リグの集合体外筒部の評価結果と同じである。B型照射リグにおいて集合体外筒部の評価結果のうち、「常陽」MK-II炉心での評価条件のものはB型照射リグの設工認申請書等で記載されているが、「常陽」MK-III炉心ではB型照射リグの設工認申請を行っていない。そのため、D型照射リグの強度評価については、評価条件で「常陽」MK-III炉心での条件^[11]を使用したものについて記載した。(文献[11]では、炉心燃料集合体の評価条件を記載しているが、これを基にD型照射リグの構造仕様に合わせた評価条件を求め、使用した。)

4.1 通常運転時及び異常な過渡変化時の強度評価

集合体外筒部、タイロッド、上部支持板及びコンパートメントの強度評価結果を以下に示す。集合体外筒部の強度評価方法は、B型照射リグの設工認申請書^[12]に記載の方法を使用した。

4.1.1 集合体外筒部の強度評価

(1) 強度計算内容

① 応力の原因

- (i) 冷却材圧力
- (ii) 管壁温度勾配による熱応力
- (iii) 軸方向温度勾配による熱応力
- (iv) 湾曲拘束による応力
- (v) 湾曲拘束によるパッド部反力による応力
- (vi) 接合部構造不連続による応力
- (vii) 接合部温度差による応力
- (viii) 接合部スエリング差による応力

② 応力計算時期

- (i) 使用初期 (BOL)
- (ii) 使用中期 (MOL)
- (iii) 使用末期 (EOL)

③ 応力計算位置

- (i) エントランスノズル部
- (ii) エントランスノズル-ラッパ管接合部
- (iii) 中間パッド部
- (iv) ハンドリングヘッド-ラッパ管接合部
- (v) 上部パッド部

④ 集合体構成材料

- (i) エントランスノズル (SUS316)
- (ii) ラッパ管 (SUS316 相当ステンレス鋼)
- (iii) ハンドリングヘッド (SUS316)

(2) 強度評価条件

① 評価条件の設定について

(i) 評価温度

ア) 通常運転時

「常陽」MK-III炉心での温度条件及び水流動試験結果から、以下の通り設定した。

上部パッド部	610℃
ハンドリングヘッド-ラッパ管接合部	610℃
中間パッド部	480℃
エントランスノズル-ラッパ管接合部	350℃
エントランスノズル部	350℃

イ) 運転時の異常な過渡変化時

以下に示す「常陽」MK-III炉心での温度条件より、各評価部位までの通常運転時と異常な過渡変化時での上昇温度の比率を求め、上記(i)で設定した各部位の温度に乘じ、異常な過渡変化時の各評価部位における温度を設定した。

	通常運転時	異常な過渡変化時
上部パッド部	550℃	615℃
ハンドリングヘッド-ラッパ管接合部	550℃	615℃
中間パッド部	450℃	475℃
エントランスノズル-ラッパ管接合部	350℃	350℃

エントランスノズル部 350℃ 350℃

即ち、

中間パッド部

$$(480 - 350) \times \frac{475 - 350}{450 - 350} + 350 = 512.5 \rightarrow 515 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ハントリングヘッド-ラッパ管接合部、上部パッド部

$$(610 - 350) \times \frac{615 - 350}{550 - 350} + 350 = 694.5 \rightarrow 695 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(ii) 冷却材内外圧力差条件の設定方法

ア) 通常運転時

水流動試験結果より、D型照射リグの各部の圧力損失は以下の通りである。

エントランスノズル部圧力損失	2.0 kgf/cm ²
コンパートメント部圧力損失	0.9 kgf/cm ²
水頭圧	0.3 kgf/cm ²

以上より、通常運転時の各部の冷却材内外圧力差を以下の通りに設定する。

ハントリングヘッド-ラッパ管接合部	0.3 kgf/cm ²
中間パッド部	3.2 - 2.0 - 0.9/2 = 0.75 kgf/cm ²
エントランスノズル-ラッパ管接合部	3.2 - 2.0 = 1.2 kgf/cm ²

イ) 運転時の異常な過渡変化時

以下に示す「常陽」MK-III炉心の冷却材内外圧力差条件を基に設定した。

	通常運転時	異常な過渡変化時
ハントリングヘッド-ラッパ管接合部	0.3 kgf/cm ²	0.4 kgf/cm ²
中間パッド部	1.9 kgf/cm ²	2.3 kgf/cm ²
エントランスノズル-ラッパ管接合部	2.6 kgf/cm ²	3.1 kgf/cm ²
エントランスノズル部	3.2 kgf/cm ²	3.8 kgf/cm ²

水頭圧は炉心燃料集合体と同様 0.4 kgf/cm^2 とし、水頭圧を除いた集合体圧力損失は炉心燃料集合体と同等として、通常運転時の圧力損失分担比を用いて各部の圧力損失を設定する。即ち、各部の圧力損失は以下ようになる。

エントランスノズル部

$$(3.8 - 0.4) \times \frac{2.0}{2.0 + 0.9} = 2.34 \rightarrow 2.3 \text{ kgf/cm}^2$$

コンパートメント部

$$(3.8 - 0.4) \times \frac{0.9}{2.0 + 0.9} = 1.05 \rightarrow 1.1 \text{ kgf/cm}^2$$

以上より、各部での冷却材内外圧力差を以下の通りに設定する。

エントランスノズル部	3.8 kgf/cm^2
エントランスノズル-ラップ管接合部	$3.8 - 2.3 = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$
中間パッド部	$3.8 - 2.3 - 1.1/2 = 0.95 \text{ kgf/cm}^2$
ハンドリングヘッド-ラップ管接合部	0.4 kgf/cm^2

(iii) 管壁温度差

集合体温度分布解析結果から、炉心燃料集合体の条件で包絡できるため、以下に示す「常陽」MK-III炉心での条件を適用する。

	通常運転時	異常な過渡変化時
上部パッド部	28°C	37°C
ハンドリングヘッド-ラップ管接合部	28°C	37°C
中間パッド部	28°C	37°C

(iv) その他の条件

以下の応力については、炉心燃料集合体と同一条件として、炉心燃料集合体における応力評価結果を適用する。

ア) 湾曲拘束による応力 (全評価部位)

イ) 湾曲拘束によるパッド部反力 (中間パッド部、上部パッド部)

ウ) 接合部温度差 (ハンドリングヘッド-ラップ管接合部)

エ) 接合部スエリング差 (エントランスノズル-ラップ管接合部、

及びハンドリングヘッド-ラップ管接合部)

② 主要な評価条件

上記①の評価条件をまとめた表を以下に示す。

(i) 内外圧力差

	通常運転時	運転時の異常な過渡変化時 (1次冷却材流量減少)
ハンドリングヘッド －ラッパ管接合部	0.3 kgf/cm ²	0.4 kgf/cm ²
中間パッド部	0.75 kgf/cm ²	0.95 kgf/cm ²
エントランスノズル －ラッパ管接合部	1.2 kgf/cm ²	1.5 kgf/cm ²
エントランスノズル部	3.2 kgf/cm ²	3.8 kgf/cm ²

(ii) 温度条件

	通常運転時	運転時の異常な過渡変化時 (1次冷却材流量減少)
上部パッド部	610℃	695℃
ハンドリングヘッド －ラッパ管接合部	610℃	695℃
中間パッド部	480℃	515℃
エントランスノズル －ラッパ管接合部	350℃	350℃
エントランスノズル部	350℃	350℃

(iii) 管壁温度差

	通常運転時	運転時の異常な過渡変化時 (1次冷却材流量減少)
上部パッド部	28℃	37℃
ハンドリングヘッド -ラップ管接合部	28℃	37℃
中間パッド部	28℃	37℃

(iv) 材料強度基準

強度評価に使用した材料強度を表 4.1-1~4.1-2 に示す。

(3) 応力計算式

応力計算式に用いる記号は下記のように定義する。

- P_{mr} : 半径方向一次一般膜応力
- $P_{m\theta}$: 円周方向一次一般膜応力
- P_{mz} : 軸方向一次一般膜応力
- $P_{L\theta}$: 円周方向一次局部膜応力
- P_{Lz} : 軸方向一次局部膜応力
- $P_{b\theta}$: 円周方向一次曲げ応力
- P_{bz} : 軸方向一次曲げ応力
- $Q_{in\theta}$: 円周方向二次応力 (集合体内面)
- $Q_{out\theta}$: 円周方向二次応力 (集合体外面)
- Q_{inz} : 軸方向二次応力 (集合体内面)
- Q_{outz} : 軸方向二次応力 (集合体外面)

① 冷却材による応力

(i) エントランスノズル部

$$P_{mr} = -P \text{ (内面)}, \quad P_{mr} = 0.00 \text{ (外面)}$$

$$P_{m\theta} = \frac{\sigma_{\theta \max} + \sigma_{\theta \min}}{2}$$

$$P_{mz} = 0.00$$

$$P_{b\theta} = \sigma_{\theta \max} - P_{m\theta} \text{ (内面)}, \quad P_{b\theta} = \sigma_{\theta \min} - P_{m\theta} \text{ (外面)}$$

$$P_{bz} = 0.00 \text{ (内面)}, \quad P_{bz} = 0.00 \text{ (外面)}$$

$$\sigma_{\theta \max} = \frac{a_2^2 + a_1^2}{a_2^2 - a_1^2} \times P \text{ (内面)}$$

$$\sigma_{\theta \min} = \frac{2 \cdot P \cdot a_1^2}{a_2^2 - a_1^2} \text{ (外面)}$$

ここで、

P : 内外圧力差

a_1 : エントランスノズル内径

a_2 : エントランスノズル外径

(ii) 中間パッド部

$$P_{m\theta} = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot t}$$

$$P_{mz} = 0.00$$

$$P_{b\theta} = \pm \frac{6 \cdot M_0}{t^2}$$

$$M_0 = -\frac{P \cdot a^2}{4} \frac{u - \tanh u}{u^2 \cdot \tanh u}$$

$$u = \sqrt{\frac{s \cdot a^2}{4 \cdot D}} \quad s = \frac{P \cdot D_i}{2}$$

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad a = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot D_i$$

$$P_{bz} = 0.00$$

(iii) 上部パッド部

$$P_{m\theta} = P_{mZ} = 0.00$$

$$P_{b\theta} = P_{bZ} = 0.00$$

② 管壁温度差による応力

(i) ハンドリングヘッドーラッパ管接合部、中間パッド部

$$Q_{in\theta} = \frac{-\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1-\nu)} \quad Q_{out\theta} = \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1-\nu)}$$

$$Q_{inZ} = Q_{in\theta} \quad Q_{outZ} = Q_{out\theta}$$

ここで、

α : 熱膨張率

E : ヤング率

ν : ポアソン比

ΔT : 管壁温度差

(ii) 上部パッド部

$$Q_{in\theta} = 0.85 \times \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1-\nu)\log_e(b/a)} \cdot \left(1 - \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \log_e(b/a)\right)$$

$$Q_{out\theta} = 0.85 \times \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{2(1-\nu)\log_e(b/a)} \cdot \left(1 - \frac{2a^2}{b^2 - a^2} \log_e(b/a)\right)$$

$$Q_{inZ} = Q_{in\theta} \quad Q_{outZ} = Q_{out\theta}$$

ここで、

a : 上部パッド内半径

b : 上部パッド部外対面間距離

α : 熱膨張率

E : ヤング率

ν : ポアソン比

ΔT : 管壁温度差

③ 軸方向温度差による応力

$$Q_{in\theta} = Q_{out\theta} = 0.00$$

$$Q_{inZ} = Q_{outZ} = 0.00$$

④ 湾曲拘束による応力

$$Q_{in\theta} = \nu \cdot Q_{inZ} \quad Q_{out\theta} = \nu \cdot Q_{outZ}$$

$$Q_{inZ} = \pm \frac{M}{Z} \quad Q_{outZ} = Q_{inZ}$$

ここで、

ν : ポアソン比

Z : 断面係数

(i) ハンドリングヘッドーラッパ管接合部

$$Z = \frac{5\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{A_0^4 - A_1^4}{A_0}$$

$$M = Fu \cdot (\ell_2 - x_3)$$

ここで、

A_0 : ラッパ管外面辺長

A_1 : ラッパ管内面辺長

Fu : 上部パッド部にかかる荷重

ℓ_2 : 集合体支持部から上部パッド部までの距離

x_3 : 集合体支持部からハンドリングヘッドーラッパ管接合部までの距離

(ii) 中間パッド部

$$Z = \frac{5\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{A_0^4 - A_1^4}{A_0}$$

$$M = Fu \cdot (\ell_2 - \ell_1)$$

ここで、

A_0 : パッド部外面辺長

A_1 : パッド部内面辺長

Fu : 上部パッド部にかかる荷重

ℓ_2 : 集合体支持部から上部パッド部までの距離

ℓ_1 : 集合体支持部から中間パッド部までの距離

(iii) エントランスノズルラップ管接合部

$$Z = \frac{5\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{A_0^4 - A_1^4}{A_0}$$

$$M = Fu \cdot (\ell_2 - x_1) + F_m \cdot (\ell_1 - x_1)$$

ここで、

A_0 : ラップ管外面辺長

A_1 : ラップ管内面辺長

Fu : 上部パッド部にかかる荷重

F_m : 中間パッド部にかかる荷重

ℓ_2 : 集合体支持部から上部パッド部までの距離

ℓ_1 : 集合体支持部から中間パッド部までの距離

x_1 : 集合体支持部からエントランスノズルラップ管接合部までの距離

(iv) エントランスノズル

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{a_2^2 - a_1^2}{a_2^2}$$

$$M = Fu \cdot \ell_2 + F_m \cdot \ell_1$$

ここで、

a_1 : エントランスノズル内径

a_2 : エントランスノズル外径

Fu : 上部パッド部にかかる荷重

F_m : 中間パッド部にかかる荷重

ℓ_2 : 集合体支持部から上部パッド部までの距離

ℓ_1 : 集合体支持部から中間パッド部までの距離

⑤ 湾曲拘束によるパッド部反力による応力

(i) 上部パッド部、中間パッド部

MK-Ⅲ炉心燃料集合体で得られた評価結果を使用する。

⑥ 接合部構造不連続による応力

$$P_{L\theta} = 0.00$$

$$P_{LZ} = 0.00$$

$$Q_{in\theta} = v \cdot Q_{inZ} + \frac{\Delta P \cdot Re}{t} \xi \quad Q_{out\theta} = -v \cdot Q_{inZ} + \frac{\Delta P \cdot Re}{t} \xi$$

$$Q_{inZ} = \frac{3D_i}{\pi t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-v^2}} \Delta P \zeta \quad Q_{outZ} = -Q_{inZ}$$

ここで、

D_i : ラッパ管内対面間距離

t : ラッパ管肉厚

Re : 等価半径($=\sqrt{3} \cdot D_i / \pi$)

v : ポアソン比

ΔP : 内外圧力差

ξ : 補正係数($= 0.55$)

ζ : 補正係数($= 2.00$)

⑦ 接合部温度差による応力

$$Q_{in\theta} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T - v \sqrt{\frac{3}{1-v^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$Q_{out\theta} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T + v \sqrt{\frac{3}{1-v^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$Q_{inZ} = -\sqrt{\frac{3}{1-v^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$Q_{outZ} = -Q_{inZ}$$

ここで、

E : ヤング率

α : 熱膨張率

v : ポアソン比

ΔT : 温度差

⑧ 接合部スエリング差による応力

$$Q_{in\theta} = Q_{out\theta} = 0.00$$

$$Q_{inZ} = E \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_c) \times 10^{-2}$$

$$Q_{outZ} = -Q_{inZ}$$

ここで、

E : ヤング率

ε_a : ハンドリングヘッド, エントランスノズルのスエリング率 (%)

ε_c : ラッパ管スエリング率 (%)

(4) 評価結果

強度計算結果を表 4.1-3~4.1-7 に示す。

D型照射リグ集合体外筒にかかる応力計算結果は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において全て設計許容応力以下である。

4.1.2 タイロッドの強度評価

(1) 熱湾曲による応力

$$\sigma_z = \pm \frac{M}{Z} = \pm 0.12 \text{ kgf/mm}^2$$

$$M = \frac{E \cdot I}{\gamma} = 33.43 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^3$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{d_o^4 - d_i^4}{d_o} = 291.5 \text{ mm}^3$$

ここで、

σ_z : 軸方向応力 (kgf/mm²)

M : 曲げモーメント (kgf/mm²)

Z : 断面係数 (mm³)

d_o : タイロッド外径 (mm)

d_i : 内径 (mm)

E : ヤング率 (kgf/mm²)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

γ : タイロッド曲率半径 (mm)

(2) タイロッド-コンパートメント熱膨張差による応力

コンパートメントとの熱膨張差により、タイロッド軸方向に引張荷重が発生する。コンパートメントの熱膨張により、コンパートメント上部にある押えバネに発生する荷重は 1.3 kgf であり、これに通常の

バネ力 10.4 kgf を加えた 11.7 kgf の荷重がタイロッドに引張荷重として発生する（3.6.1 節参照）。

従って、タイロッドに発生する軸方向応力 σ_z は、18 本のコンパートメントからの荷重を考慮すると、

$$\sigma_z = \frac{18 \times 11.7}{\frac{\pi}{4}(16.4^2 - 12.4^2)} = 2.3276 \approx 2.33 \text{ kgf/mm}^2$$

である。

(3) 評価結果

タイロッドに発生する応力は、熱湾曲によるものとタイロッド-コンパートメント熱膨張差によるものとの和である。

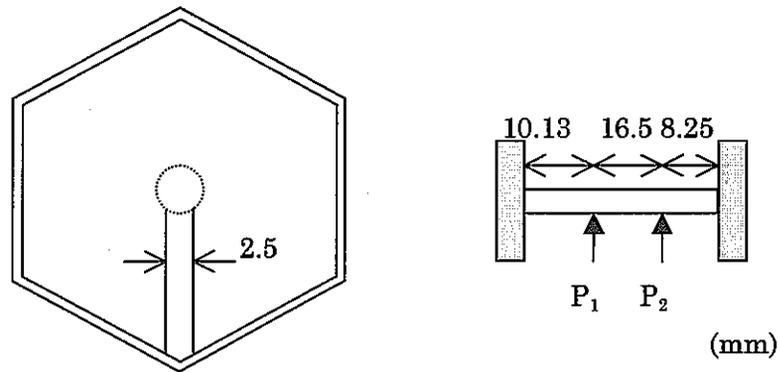
従って、タイロッドに発生する応力（軸方向）は 2.45 kgf/mm² であり、許容値（1.5Sm = 12.3 kgf/mm² (SUS316, 600℃)）に比べ十分小さく、タイロッドの健全性は保たれる。

4.1.3 上部支持板の強度評価

(1) 曲げ応力の計算

上部支持板は図 4.1-1 に示すように複雑な形状をしているが、ここでは、簡単のため図中に記した太線で囲んだ部分を下図に示すような単純な両端固定はりとして強度計算を行う。コンパートメントを固定する部分には孔が設けられており、コンパートメントからの荷重は、この孔の周りの部材によって支えられる。この部分の幅は 1.75mm（左下図参照）であり、両側合せて 3.5mm 幅のはりと考えることができる。しかし、ここでは他の部位の幅と同様保守側に幅 2.5mm として扱う。

この単純化したはりモデルは、図 4.1-1 に示すようにコンパートメントを支える孔部分から横方向に伸びるはり部分への荷重の分散を無視し、コンパートメントからの荷重をモデル化したはり部分だけで支えるという点、及び横方向に伸びる部材剛性を無視するという点で保守的なものである。



ここで、 P_1 、 P_2 はコンパートメントの熱膨張による荷重である。また、 M_0 、 M_1 、 M_2 、 M_3 を各部に発生する曲げモーメントとし、各々、ラッパ管との接合部、荷重 P_1 の荷重位置、荷重 P_2 の荷重位置、及び軸心管との接合部での曲げモーメントを表す。ここでは、 P_1 、 P_2 の荷重を各々負荷した場合の曲げモーメントを計算し、これらを重ね合わせることにより各部に発生する曲げモーメントを算出する。コンパートメントからの荷重は熱膨張による 1.3kgf と通常のばね力 10.4kgf とを加えた 11.7kgf を考える。

① P_1 を負荷した場合の各部の曲げモーメント

$$M_0 = -\frac{P_1 \ell_1 \ell_2^2}{\ell^2} = -59.68$$

$$M_1 = \frac{2P_1 \ell_1^2 \ell_2^2}{\ell^3} = 34.67$$

$$M_2 = \frac{P_1 \ell_1^2}{\ell^2} \left\{ \ell_1 + 2\ell_2 - \frac{x}{\ell} (\ell_1 + 3\ell_2) \right\} = -4.73$$

$$M_3 = -\frac{P_1 \ell_1^2 \ell_2}{\ell^2} = -24.43$$

ここで、 $P_1 = 11.7 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $\ell_1 = 10.13 \text{ mm}$

$\ell_2 = 24.75 \text{ mm}$ 、 $\ell = 34.88 \text{ mm}$

$x = 26.63 \text{ mm}$

② P_2 を負荷した場合の各部の曲げモーメント

$$M_0 = -\frac{P_2 \ell_1 \ell_2^2}{\ell^2} = -17.43$$

$$M_1 = \frac{P_2 \ell_2^2}{\ell^2} \left\{ \frac{x(3\ell_1 + \ell_2)}{\ell} - \ell_1 \right\} = -0.68$$

$$M_2 = \frac{2P_2 \ell_1^2 \ell_2^2}{\ell^3} = 26.62$$

$$M_3 = -\frac{P_2 \ell_1^2 \ell_2}{\ell^2} = -56.27$$

ここで、 $P_2 = 11.7 \text{ kgf/mm}^2$, $\ell_1 = 26.63 \text{ mm}$

$\ell_2 = 8.25 \text{ mm}$, $\ell = 34.88 \text{ mm}$

$x = 10.13 \text{ mm}$

①と②を重ね合わせると

$$M_0 = -77.11$$

$$M_1 = 33.99$$

$$M_2 = 21.89$$

$$M_3 = -80.70$$

となる。従って、上部支持板に発生する最大の曲げ応力は、

$$\sigma_b = \pm \frac{M_{\max}}{Z} = \pm \frac{-80.70}{2.5 \times 20 / 6} = 9.69 \text{ kgf/mm}^2$$

Z : 断面係数

ただし、 b : はりの幅 (2.5 mm)

h : はりの厚さ (20 mm)

$$Z = \frac{1}{6}bh^2$$

(2) 評価結果

(1)の結果より、上部支持板に発生する応力は 9.69 kgf/mm^2 であり、許容応力 ($1.5\sigma_m = 11.4 \text{ kgf/mm}^2$ (SUS316 : 610°C)) に比べて小さく、上部支持板の健全性は保たれる。

4.1.4 コンパートメントの強度評価

δ 型コンパートメントでは、 γ 型コンパートメントに比べ以下のような構造上の相違がある。

		γ 型	δ 型
・ 円筒部の細径化	外管	: $\phi 26.4\text{mm}$	$\phi 16.4\text{mm}$
	内管	: $\phi 22.4\text{mm}$	$\phi 12.8\text{mm}$
・ 円筒部の薄肉化	外管	: 0.6mm	0.4mm
	内管	: 0.6mm	0.5mm
・ 多本数化		: 6本	18本

上記の構造上の相違により発生する特有の問題として、隣接コンパートメントとの相互作用が挙げられる。多本数化したことにより、隣接コンパートメント同士が熱膨張して接触することで曲げ応力が発生する。円筒部の細径化では、炉心湾曲や地震といった曲げモーメントが応力の原因となるものにより、 δ 型コンパートメントの発生応力は γ 型コンパートメントに比べ厳しくなる。また、円筒部の薄肉化では、輸送時の軸圧縮荷重に対する座屈評価が γ 型コンパートメントに比べ厳しくなる。 δ 型コンパートメントの健全性評価として、曲げ応力（2次応力分）評価を行う。

(1) 評価条件

① 応力の原因

- ・ 熱膨張による隣接コンパートメントとの接触応力
- ・ 炉心湾曲による曲げ応力
- ・ 地震による曲げ応力

② 部材の材質

コンパートメント	:	SUS316 相当ステンレス鋼
下部キャップ	:	SUS316 ステンレス鋼
上部キャップ	:	インコネル 718

なお、インコネル 718 は照射効果に関するデータが無いため、保守側に高温強度の低い SUS316 相当ステンレス鋼とした場合で評価を行った。

③評価温度

最も保守側となる条件とし、 δ 型コンパートメントの温度分布は、以下の条件の場合の冷却材温度分布とする。

中性子束分布	:	「常陽」MK-III炉心条件
燃料要素		
スタック長	:	55cm
線出力	:	1000w/cm
被覆管肉厚最高温度		
通常運転時	:	700℃
異常な過渡変化時	:	830℃

(1次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時)

④曲げモーメント

MK-III炉心燃料集合体の炉心湾曲拘束及び地震による曲げモーメントを使用した。

⑤解析モデル

解析で用いた境界条件及び δ 型コンパートメントの解析モデルを図4.1-2及び図4.1-3に示す。

(2)評価結果

汎用有限要素法応力解析コード「FINAS」により、 δ 型コンパートメント各部に発生する応力を求めた。解析結果を表4.1-8に示す。 δ 型コンパートメントに発生する応力は、許容値に比べて小さく、 δ 型コンパートメントの健全性は保たれる。

4.1.5 コンパートメントベローズの強度評価

δ 型コンパートメントは、現行の γ 型コンパートメントと同様に、コンパートメント内管と外管の熱膨張差を吸収する目的でベローズを設置している。

δ 型コンパートメントは、 γ 型コンパートメントと異なり、ベローズを円筒部上端側に設置している。これは、 δ 型コンパートメントの上端側の構造に余裕があること及び組立・解体の際、 δ 型コンパートメントの下端側でシュラウド管の取扱を行うため下端側にベローズを設置すると、 δ 型コンパートメントの取扱時の妨げとなるためである。ベローズを δ 型コンパートメントの上端

に設置したことにより、高温強度での健全性を評価することが必要である。

なお、現在のところペローズの高温強度評価について確立された評価方法が無いことから、ここでは、動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 構造工学室が中心となってまとめた、「高速増殖炉第1種配管用ペローズ継手の高温構造設計方針（暫定案）－改訂第1版－」^[13]を使用する。

(1) 評価内容

- ①一次応力の制限
- ②ひずみの制限
- ③クリープ疲労損傷の制限
- ④座屈評価

(2) 評価条件

① 評価温度

評価上最も保守的となるよう条件を設定する。ここでは、コンパートメントの強度評価で用いた δ 型コンパートメントの温度条件を使用する。

② 材質

SUS 316 相当ステンレス鋼

(3) 評価結果

評価結果を表 4.1-9～表 4.1-12 に示す。設計比はいずれも1以下であり、コンパートメントペローズの健全性は保たれる。

表 4.1-1 SUS 316 の材料強度

温 度 (°C)	0.2%耐力 (Sy) (kgf/mm ²)	許容応力強さ (Sm) (kgf/mm ²)
427	12.37	11.11
454	12.23	11.04
482	12.16	10.90
510	12.02	10.83
538	11.95	10.76
565	11.74	10.19
593	11.60	8.72
621	11.53	6.89
648	11.39	5.20
676	11.11	3.79
704	10.75	2.88

表 4.1-2 SUS 316 相当ステンレス鋼の材料強度

温 度 (°C)	引張強さ (Su) (kgf/mm ²)	0.2%耐力 (Sy) (kgf/mm ²)	許容応力強さ (Sm) (kgf/mm ²)
RT	76.1	65.2	38.1
400	62.2	54.2	31.1
500	52.9	41.7	26.5
600	34.8	29.8	17.4
650	29.7	25.7	14.9
700	25.0	21.6	12.5
800	18.0	15.0	9.0

表4.1-3 集合体外筒部の応力評価結果 (1 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置		エントランスノズル部						評価時期	使用初期				
応力の原因	半径方向					円周方向					軸方向					
	Pm*	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面				内面	外面	
冷却材圧力	-0.04 0.00					0.14		0.02 -0.02			0.00		0.00			
湾曲拘束									±0.37	±0.37				±1.23	±1.23	
応力の合計	-0.04 0.00					0.14		0.02 -0.02	0.37 -0.37	0.37 -0.37	0.00		0.00	1.23 -1.23	1.23 -1.23	
Pm	-0.04 0.00	/				0.14	/				0.00	/				
PL+Pb	-0.04 (内) 0.00 (外)					0.16 (内) 0.12 (外)					0.00					
PL+Pb+Q			-0.04 (内) 0.00 (外)				0.53 -0.21		0.49 -0.25				1.23 -1.23		1.23 -1.23	

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.18	12.8 (Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb	0.20	19.2 (1.5Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb+Q	1.27	38.4 (3Sm)	0.04

表4.1-3 集合体外筒部の応力評価結果 (2 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時			評価位置	エントランスノズル部						評価時期	使用中期			
応力の原因	半径方向					円周方向					軸方向				
	Pm*	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力	-0.04 0.00					0.14		0.02 -0.02			0.00		0.00		
湾曲拘束									±0.37	±0.37				±1.23	±1.23
応力の合計	-0.04 0.00					0.14		0.02 -0.02	0.37 -0.37	0.37 -0.37	0.00		0.00	1.23 -1.23	1.23 -1.23
Pm	-0.04 0.00	/				0.14	/				0.00	/			
PL+Pb	-0.04 (内) 0.00 (外)					0.16 (内) 0.12 (外)					0.00				
PL+Pb+Q			-0.04 (内) 0.00 (外)						0.53 -0.21	0.49 -0.25			1.23 -1.23	1.23 -1.23	

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.18	12.8 (Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb	0.20	19.2 (1.5Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb+Q	1.27	38.4 (3Sm)	0.04

表4.1-3 集合体外筒部の応力評価結果 (3 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置	エントランス/ズル部						評価時期	使用末期					
応力の原因	半径方向					円周方向					軸方向					
	Pm*	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面				内面	外面	
冷却材圧力	-0.04 0.00					0.14		0.02 -0.02			0.00		0.00			
湾曲拘束									±0.37	±0.37				±1.23	±1.23	
応力の合計	-0.04 0.00					0.14		0.02 -0.02	0.37 -0.37	0.37 -0.37	0.00		0.00	1.23 -1.23	1.23 -1.23	
Pm	-0.04 0.00	-0.04 (内) 0.00 (外)			0.16 (内) 0.12 (外)		0.00		0.00		0.00		1.23 -1.23		1.23 -1.23	
PL+Pb	0.53 -0.21																0.49 -0.25
PL+Pb+Q			-0.04 (内) 0.00 (外)		0.53 -0.21		0.49 -0.25		1.23 -1.23		1.23 -1.23					

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.18	12.8 (Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb	0.20	19.2 (1.5Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb+Q	1.27	38.4 (3Sm)	0.04

表4.1-3 集合体外筒部の応力評価結果 (4 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置		エントランスノズル部					評価時期	使用初期				
応力の原因	半 径 方 向					円 周 方 向					軸 方 向				
	Pm*	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力	-0.04 0.00					0.16		0.02 -0.02			0.00		0.00		
湾曲拘束									±0.55	±0.55				±1.81	±1.81
応力の合計	-0.04 0.00					0.16		0.02 -0.02	0.55 -0.55	0.55 -0.55	0.00		0.00	1.81 -1.81	1.81 -1.81
Pm	-0.04 0.00	/				0.16	/				0.00	/			
PL+Pb	-0.04 (内) 0.00 (外)					0.18 (内) 0.14 (外)					0.00				
PL+Pb+Q		-0.04 (内) 0.00 (外)							0.73 -0.37	0.69 0.41			1.81 -1.81	1.81 -1.81	

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.20	12.8 (Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb	0.22	19.2 (1.5Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb+Q	1.85	38.4 (3Sm)	0.05

表4.1-3 集合体外筒部の応力評価結果 (5 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置		エントランスノズル部					評価時期	使用中期					
応力の原因	半径方向					円周方向					軸方向					
	Pm*	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面				内面	外面	
冷却材圧力	-0.04 0.00					0.16		0.02 -0.02			0.00		0.00			
湾曲拘束									±0.55	±0.55				±1.81	±1.81	
応力の合計	-0.04 0.00					0.16		0.02 -0.02	0.55 -0.55	0.55 -0.55	0.00		0.00	1.81 -1.81	1.81 -1.81	
Pm	-0.04 0.00	/				0.16	/				0.00	/				
PL+Pb	-0.04 (内) 0.00 (外)					0.18 (内) 0.14 (外)					0.00					
PL+Pb+Q			-0.04 (内) 0.00 (外)		/		0.73 -0.37		0.69 0.41		/		1.81 -1.81		1.81 -1.81	

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 350℃)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.20	12.8 (Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb	0.22	19.2 (1.5Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb+Q	1.85	38.4 (3Sm)	0.05

表4.1-3 集合体外筒部の応力評価結果 (6 / 6)

(単位 kgf/mm²)

JNC TN9410 99-010

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置		エントランスノズル部					評価時期	使用末期				
応力の原因	半径方向					円周方向					軸方向				
	Pm*	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力	-0.04 0.00					0.16		0.02 -0.02			0.00		0.00		
湾曲拘束									±0.55	±0.55				±1.81	±1.81
応力の合計	-0.04 0.00					0.16		0.02 -0.02	0.55 -0.55	0.55 -0.55	0.00		0.00	1.81 -1.81	1.81 -1.81
Pm	-0.04 0.00	/				0.16	/				0.00	/			
PL+Pb	-0.04 (内) 0.00 (外)		/			0.18 (内) 0.14 (外)		/			0.00		/		
PL+Pb+Q			-0.04 (内) 0.00 (外)			/		0.73 -0.37		0.69 0.41	/		1.81 -1.81	1.81 -1.81	

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.20	12.8 (Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb	0.22	19.2 (1.5Sm)	0.02
Pm(PL)+Pb+Q	1.85	38.4 (3Sm)	0.05

表4.1-4 集合体外筒部の応力評価結果 (1 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置	エントランス/ズルーラッパ管接合部		評価時期	使用初期			
応力の原因	円周方向				軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
湾曲拘束				±0.24	±0.24				±0.79	±0.79
接合部構造不連続				0.43	-0.15				0.95	-0.95
接合部スエリング差									0.00	0.00
応力の合計	0.00			0.67 0.19	0.09 -0.39				1.74 0.16	-0.16 -1.74
Pm	0.00					0.00				
PL+Pb	0.00					0.00				
PL+Pb+Q				0.67 0.19	0.09 -0.39				1.74 0.16	-0.16 -1.74

強度評価 (評価温度 350°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	12.8 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	19.2 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	1.74	38.4 (3Sm)	0.05

表4.1-4 集合体外筒部の応力評価結果 (2 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置	エントランスノズルラッパ管接合部		評価時期	使用中期			
応力の原因	円周方向				軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
湾曲拘束				±0.24	±0.24				±0.79	±0.79
接合部構造不連続				0.43	-0.15				0.95	-0.95
接合部スエリング差									-1.92	1.92
応力の合計				0.67	0.09				-0.18	1.76
				0.19	-0.39				-1.76	0.18
Pm	0.00	0.00				0.00	0.00			
PL+Pb	0.00										0.00
PL+Pb+Q				0.67	0.09				-0.18	1.76
				0.19	-0.39				-1.76	0.18

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	12.8 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	19.2 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	1.95	38.4 (3Sm)	0.06

表4.1-4 集合体外筒部の応力評価結果 (3 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置	エントランスノズルラップ管接合部				評価時期	使用末期		
応力の原因	円周方向					軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面	
湾曲拘束				±0.24	±0.24				±0.79	±0.79	
接合部構造不連続				0.43	-0.15				0.95	-0.95	
接合部スエリング差									-6.26	6.26	
応力の合計				0.67 0.19	0.09 -0.39				-4.52 -6.10	6.10 4.52	
Pm	0.00	/					0.00	/			
PL+Pb	0.00						0.00				
PL+Pb+Q	/			0.67 0.19	0.09 -0.39	/			-4.52 -6.10	6.10 4.52	

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	12.8 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	19.2 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	6.29	38.4 (3Sm)	0.17

表4.1-4 集合体外筒部の応力評価結果 (4 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少	評価位置	エントランスノズルラップ管接合部				評価時期	使用初期			
応力の原因	円周方向					軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面	
湾曲拘束				±0.32	±0.32				±1.07	±1.07	
接合部構造不連続				0.54	-0.18				1.19	-1.19	
接合部スエリング差									0.00	0.00	
応力の合計				0.86	0.14				2.26	-0.12	
				0.22	-0.50				0.12	-2.26	
Pm	0.00	/					0.00	/			
PL+Pb	0.00			/		0.00			/		
PL+Pb+Q	/			0.86	0.14	/			2.26	-0.12	
	/			0.22	-0.50	/			0.12	-2.26	

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	12.8 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	19.2 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	2.26	38.4 (3Sm)	0.06

表4.1-4 集合体外筒部の応力評価結果 (5 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置	エントランスノズルラップ管接合部		評価時期			使用中期		
応力の原因	円周方向					軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面	
湾曲拘束				±0.32	±0.32				±1.07	±1.07	
接合部構造不連続				0.54	-0.18				1.19	-1.19	
接合部スエリング差									-1.92	1.92	
応力の合計				0.86 0.22	0.14 -0.50				0.34 -1.80	1.80 -0.34	
Pm	0.00	/					0.00	/			
PL+Pb	0.00						0.00				
PL+Pb+Q	/			0.86 0.22	0.14 -0.50	/			0.34 -1.80	1.80 -0.34	

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	12.8 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	19.2 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	2.02	38.4 (3Sm)	0.06

表4.1-4 集合体外筒部の応力評価結果 (6 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置	エントランス/ズルーラツパ管接合部		評価時期	使用末期			
応力の原因	円周方向				軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
湾曲拘束				±0.32	±0.32				±1.07	±1.07
接合部構造不連続				0.54	-0.18				1.19	-1.19
接合部スエリング差									-6.26	6.26
応力の合計				0.86 0.22	0.14 -0.50				-4.00 -6.14	6.14 4.00
Pm	0.00					0.00				
PL+Pb	0.00					0.00				
PL+Pb+Q				0.86 0.22	0.14 -0.50				-4.00 -6.14	6.14 4.00

強度評価 (評価温度 350 °C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	12.8 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	19.2 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	6.36	38.4 (3Sm)	0.17

表4.1-5 集合体外筒部の応力評価結果 (1 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置	中間パッド部		評価時期			使用初期	
応力の原因	円周方向					軸方向				
	Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力	0.15		1.94 -1.94			0.00		0.00		
管壁温度差				-5.92	5.92				-5.92	5.92
軸方向温度差				0.00	0.00				0.00	0.00
湾曲拘束				±0.67	±0.67				±2.23	±2.23
湾曲拘束によるパッド部反力				-13.39	13.39				-4.02	4.02
応力の合計	0.15		1.94 -1.94	-18.64 -19.98	19.98 18.64	0.00		0.00	-7.71 -12.17	12.17 7.71
Pm	0.15					0.00				
PL+Pb	2.09 (内) -1.79 (外)					0.00				
PL+Pb+Q				-16.55 -17.89	18.19 16.85				-7.71 -12.17	12.17 7.71

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 480°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.15	27.4 (Sm)	0.01
Pm(PL)+Pb	2.09	41.1 (1.5Sm)	0.06
Pm(PL)+Pb+Q	18.19	49.9 (Sq) ^注	0.37

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-5 集合体外筒部の応力評価結果 (2 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置	中間パッド部		評価時期			使用中期	
	円周方向					軸方向				
	Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q	
内面				外面	内面				外面	
冷却材圧力	0.15		1.94 -1.94			0.00		0.00		
管壁温度差				-5.92	5.92				-5.92	5.93
軸方向温度差				0.00	0.00				0.00	0.00
湾曲拘束				±0.67	±0.67				±2.23	±2.23
湾曲拘束によるパッド部反力				-13.39	13.39				-4.02	4.02
応力の合計	0.15		1.94 -1.94	-18.64 -19.98	19.98 18.64	0.00		0.00	-7.71 -12.17	12.17 7.71
Pm	0.15					0.00				
PL+Pb	2.09 (内) -1.79 (外)					0.00				
PL+Pb+Q				-16.55 -17.89	18.19 16.85				-7.71 -12.17	12.17 7.71

*) 上段 : 内面
下段 : 外面

強度評価 (評価温度 480°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.15	27.4 (Sm)	0.01
Pm(PL)+Pb	2.09	41.1 (1.5Sm)	0.06
Pm(PL)+Pb+Q	18.19	49.9 (Sq) ^注	0.37

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-5 集合体外筒部の応力評価結果 (3 / 6)

(単位 kgf/mm²)

JNC TN9410 99-010

運転状態	通常運転時		評価位置	中間パッド部		評価時期			使用末期	
応力の原因	円周方向					軸方向				
	Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力	0.15		1.94 -1.94			0.00		0.00		
管壁温度差				-5.92	5.92				-5.92	5.92
軸方向温度差				0.00	0.00				0.00	0.00
湾曲拘束				±0.67	±0.67				±2.23	±2.23
湾曲拘束によるパッド部反力				-13.39	13.39				-4.02	4.02
応力の合計	0.15		1.94 -1.94	-18.64 -19.98	19.98 18.64	0.00		0.00	-7.71 -12.17	12.17 7.72
Pm	0.15					0.00				
PL+Pb	2.09 (内) -1.79 (外)					0.00				
PL+Pb+Q				-16.55 -17.89	18.19 16.85				-7.71 -12.17	12.17 7.71

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 480°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.15	27.4 (Sm)	0.01
Pm(PL)+Pb	2.09	41.1 (1.5Sm)	0.06
Pm(PL)+Pb+Q	18.19	49.9 (Sq) ^注	0.37

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-5 集合体外筒部の応力評価結果 (4 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置	中間パッド部		評価時期			使用初期	
応力の原因	円周方向					軸方向				
	Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力	0.19		2.45 -2.45			0.00		0.00		
管壁温度差				-7.75	7.75				-7.75	7.75
軸方向温度差				0.00	0.00				0.00	0.00
湾曲拘束				±0.94	±0.94				±3.12	±3.12
湾曲拘束によるパッド部反力				-14.02	14.02				-4.22	4.22
応力の合計	0.19		2.45 -2.45	-20.83 -22.71	22.71 20.83	0.00		0.00	-8.85 -15.09	15.09 8.85
Pm	0.19					0.00				
PL+Pb	2.64 (内) -2.26 (外)					0.00				
PL+Pb+Q				-18.19 -20.07	20.45 18.57				-8.85 -15.09	15.09 8.85

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 515°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.19	25.1 (Sm)	0.01
Pm(PL)+Pb	2.64	37.6 (1.5Sm)	0.08
Pm(PL)+Pb+Q	20.45	47.8 (Sq) ^注	0.43

注：当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-5 集合体外筒部の応力評価結果 (5 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置	中間パッド部		評価時期			使用中	
応力の原因	円周方向					軸方向				
	Pm	PL	Pb *	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力	0.19		2.45 -2.45			0.00		0.00		
管壁温度差				-7.75	7.75				-7.75	7.75
軸方向温度差				0.00	0.00				0.00	0.00
湾曲拘束				±0.94	±0.94				±3.12	±3.12
湾曲拘束によるパッド部反力				-14.02	14.02				-4.22	4.22
応力の合計	0.19		2.45 -2.45	-20.83 -22.71	22.71 20.83	0.00		0.00	-8.85 -15.09	15.09 8.85
Pm	0.19					0.00				
PL+Pb	2.64 (内) -2.26 (外)					0.00				
PL+Pb+Q				-18.19 -20.07	20.45 18.57				-8.85 -15.09	15.09 8.85

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 515°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.19	25.1 (Sm)	0.01
Pm(PL)+Pb	2.64	37.6 (1.5Sm)	0.08
Pm(PL)+Pb+Q	20.45	47.8 (Sq) ^注	0.43

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-5 集合体外筒部の応力評価結果 (6 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置	中間パッド部		評価時期			使用末期	
応力の原因	円周方向					軸方向				
	Pm	PL	Pb*	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力	0.19		2.45 -2.45			0.00		0.00		
管壁温度差				-7.75	7.75				-7.75	7.75
軸方向温度差				0.00	0.00				0.00	0.00
湾曲拘束				±0.94	±0.94				±3.12	±3.12
湾曲拘束によるパッド部反力				-14.02	14.02				-4.22	4.22
応力の合計	0.19		2.45 -2.45	-20.83 -22.71	22.71 20.83	0.00		0.00	-8.85 -15.09	15.09 8.85
Pm	0.19					0.00				
PL+Pb	2.64 (内) -2.26 (外)					0.00				
PL+Pb+Q				-18.19 -20.07	20.45 18.57				-8.85 -15.09	15.09 8.85

*) 上段：内面
下段：外面

強度評価 (評価温度 515°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.19	25.1 (Sm)	0.01
Pm(PL)+Pb	2.64	37.6 (1.5Sm)	0.08
Pm(PL)+Pb+Q	20.45	47.8 (Sq) ^注	0.43

注：当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-6 集合体外筒部の応力評価結果 (1 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置	ハンドリングヘッド-ラップ管接合部				評価時期	使用初期		
応力の原因	円周方向					軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面	
管壁温度差				-5.70	5.70				-5.70	5.70	
湾曲拘束				±0.04	±0.04				±0.13	±0.13	
接合部構造不連続				0.11	-0.04				0.24	-0.24	
接合部温度差				0.13	0.45				-0.53	0.53	
接合部スエリング差									0.00	0.00	
応力の合計				-5.42	6.15				-5.86	6.12	
				-5.50	6.07				-6.12	5.86	
Pm	0.00	/					0.00	/			
PL+Pb	0.00						0.00				
PL+Pb+Q	/			-5.42	6.15	/			-5.86	6.12	
				-5.50	6.07				-6.12	5.86	

強度評価 (評価温度 610°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	7.6 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	11.4 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	6.15	12.2 (Sq) ^注	0.51

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-6 集合体外筒部の応力評価結果 (2 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置	ハンドリングヘッド-ラッパ管接合部		評価時期	使用中期			
応力の原因	円周方向				軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
管壁温度差				-5.70	5.70				-5.7	5.7
湾曲拘束				±0.04	±0.04				±0.13	±0.13
接合部構造不連続				0.11	-0.04				0.24	-0.24
接合部温度差				0.13	0.45				-0.53	0.53
接合部スエリング差									-0.01	0.01
応力の合計				-5.42	6.15				-5.87	6.13
				-5.50	6.07				-6.13	5.87
Pm	0.00	/				0.00	/			
PL+Pb	0.00					0.00				
PL+Pb+Q	/			-5.42	6.15	/			-5.87	6.13
				-5.50	6.07				-6.13	5.87

強度評価 (評価温度 610°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	7.6 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	11.4 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	6.15	12.2 (Sq) ^注	0.51

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-6 集合体外筒部の応力評価結果 (3 / 6)

(単位 kgf/mm²)

JNC TN9410 99-010

運転状態	通常運転時		評価位置	ハンドリングヘッドーラッパ管接合部		評価時期			使用末期	
応力の原因	円周方向					軸方向				
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
管壁温度差				-5.70	5.70				-5.7	5.7
湾曲拘束				±0.04	±0.04				±0.13	±0.13
接合部構造不連続				0.11	-0.04				0.24	-0.24
接合部温度差				0.13	0.45				-0.53	0.53
接合部スエリング差									-0.03	0.03
応力の合計				-5.42	6.15				-5.89	6.15
				-5.50	6.07				-6.15	5.89
Pm	0.00					0.00				
PL+Pb	0.00					0.00				
PL+Pb+Q				-5.42	6.15				-5.89	6.15
				-5.50	6.07				-6.15	5.89

強度評価 (評価温度 610°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	7.6 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	11.4 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	6.15	12.2 (Sq) ^注	0.51

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-6 集合体外筒部の応力評価結果 (4 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置	ハンドリングヘッド-ラップ管接合部		評価時期	使用初期			
応力の原因	円周方向				軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
管壁温度差				-7.26	7.26				-7.26	7.26
湾曲拘束				±0.06	±0.06				±0.18	±0.18
接合部構造不連続				0.15	-0.06				0.32	-0.32
接合部温度差				0.25	0.88				-1.02	1.02
接合部スエリング差									0.00	0.00
応力の合計				-6.80	8.14				-7.78	8.14
				-6.92	8.02				-8.14	7.78
Pm	0.00					0.00				
PL+Pb	0.00					0.00				
PL+Pb+Q				-6.80	8.14				-7.78	8.14
				-6.92	8.02				-8.14	7.78

強度評価 (評価温度 695°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	3.1 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	4.7 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	8.14	11.9 (Sq) ^注	0.69

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-6 集合体外筒部の応力評価結果 (5 / 6)

(単位 kgf/mm²)

JNC TN9410 99-010

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置	ハンドリングヘッド-ラップ管接合部				評価時期	使用中期		
応力の原因	円周方向					軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面	
管壁温度差				-7.26	7.26				-7.26	7.26	
湾曲拘束				±0.06	±0.06				±0.18	±0.18	
接合部構造不連続				0.15	-0.06				0.32	-0.32	
接合部温度差				0.25	0.88				-1.02	1.02	
接合部スエリング差									-0.01	0.01	
応力の合計				-6.80	8.14				-7.79	8.15	
				-6.92	8.02				-8.15	7.79	
Pm	0.00	/					0.00	/			
PL+Pb	0.00						0.00				
PL+Pb+Q				-6.80	8.14				-7.79	8.15	
				-6.92	8.02				-8.15	7.79	

強度評価 (評価温度 695°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	3.1 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	4.7 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	8.15	11.9 (Sq) ^注	0.69

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-6 集合体外筒部の応力評価結果 (6 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置	ハンドリングヘッドーラップ管接合部		評価時期	使用末期			
応力の原因	円周方向				軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面
管壁温度差				-7.26	7.26				-7.26	7.26
湾曲拘束				±0.06	±0.06				±0.18	±0.18
接合部構造不連続				0.15	-0.06				0.32	-0.32
接合部温度差				0.25	0.88				-1.02	1.02
接合部スエリング差									-0.03	0.03
応力の合計				-6.80 -6.92	8.14 8.02				-7.81 -8.17	8.17 7.81
Pm	0.00					0.00				
PL+Pb	0.00					0.00				
PL+Pb+Q				-6.80 -6.92	8.14 8.02				-7.81 -8.17	8.17 7.81

強度評価 (評価温度 695°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	3.1 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	4.7 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	8.17	11.9 (Sq) ^注	0.69

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-7 集合体外筒部の応力評価結果 (1 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置		上部パッド部						評価時期	使用初期			
	半径方向				円周方向						軸方向				
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
内面				外面	内面				外面	内面				外面	
冷却材圧力						0.00		0.00			0.00		0.00		
管壁温度差									-4.96	4.73				-4.96	4.73
軸方向温度差									0.00	0.00				0.00	0.00
湾曲拘束によるパッド部反力									-1.25	1.25				-0.38	0.38
応力の合計						0.00		0.00	-6.21	5.98	0.00		0.00	-5.34	5.11
Pm					0.00						0.00				
PL+Pb					0.00						0.00				
PL+Pb+Q											-6.21	5.98			

強度評価 (評価温度 610°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	7.6 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	11.4 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	6.21	12.2 (Sq) ^注	0.51

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-7 集合体外筒部の応力評価結果 (2 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置		上部パッド部						評価時期		使用中期					
	半径方向						円周方向						軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q				
				内面	外面				内面	外面				内面	外面			
冷却材圧力						0.00		0.00			0.00		0.00					
管壁温度差									-4.96	4.73				-4.96	4.73			
軸方向温度差									0.00	0.00				0.00	0.00			
湾曲拘束によるパッド部反力									-1.25	1.25				-0.38	0.38			
応力の合計						0.00		0.00	-6.21	5.98	0.00		0.00	-5.34	5.11			
Pm	/					0.00	/				0.00	/						
PL+Pb	/					0.00				/				0.00				
PL+Pb+Q	/					/				-6.21	5.98	/				-5.34	5.11	

強度評価 (評価温度 610°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	7.6 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	11.4 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	6.21	12.2 (Sq) ^注	0.51

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-7 集合体外筒部の応力評価結果 (3 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	通常運転時		評価位置		上部パッド部						評価時期	使用末期			
応力の原因	半径方向					円周方向					軸方向				
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q	
				内面	外面				内面	外面				内面	外面
冷却材圧力						0.00		0.00			0.00		0.00		
管壁温度差									-4.96	4.73				-4.96	4.73
軸方向温度差									0.00	0.00				0.00	0.00
湾曲拘束によるパッド部反力									-1.25	1.25				-0.38	0.38
応力の合計						0.00		0.00	-6.21	5.98	0.00		0.00	-5.34	5.11
Pm						0.00					0.00				
PL+Pb							0.00					0.00			
PL+Pb+Q									-6.21	5.98				-5.34	5.11

強度評価 (評価温度 610°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	7.6 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	11.4 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	6.21	12.2 (Sq) ^注	0.51

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy) 値の平均値を用いた。

表4.1-7 集合体外筒部の応力評価結果 (4 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置		上部パッド部						評価時期		使用初期			
	半径方向				円周方向						軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面				内面	外面	
冷却材圧力						0.00		0.00			0.00		0.00			
管壁温度差									-6.32	6.02				-6.32	6.02	
軸方向温度差									0.00	0.00				0.00	0.00	
湾曲拘束によるパッド部反力									-1.74	1.74				-0.55	0.55	
応力の合計						0.00		0.00	-8.06	7.76	0.00		0.00	-6.87	6.57	
Pm	/				0.00	/						0.00	/			
PL+Pb	/				0.00			/			0.00			/		
PL+Pb+Q	/				/			-8.06	7.76	/			-6.87	6.57		

強度評価 (評価温度 695°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	3.1 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	4.7 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	8.06	11.9 (Sq) ^注	0.68

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-7 集合体外筒部の応力評価結果 (5 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少		評価位置		上部パッド部					評価時期	使用中期					
応力の原因	半径方向					円周方向					軸方向					
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		
				内面	外面				内面	外面				内面	外面	
冷却材圧力						0.00		0.00			0.00		0.00			
管壁温度差									-6.32	6.02				-6.32	6.02	
軸方向温度差									0.00	0.00				0.00	0.00	
湾曲拘束によるパッド部反力									-1.74	1.74				-0.55	0.55	
応力の合計						0.00		0.00	-8.06	7.76	0.00		0.00	-6.87	6.57	
Pm																
PL+Pb					0.00					0.00						
PL+Pb+Q					-8.06					7.76					-6.87	6.57

強度評価 (評価温度 695°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	3.1 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	4.7 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	8.06	11.9 (Sq) ^注	0.68

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-7 集合体外筒部の応力評価結果 (6 / 6)

(単位 kgf/mm²)

運転状態	一次冷却材流量減少			評価位置		上部パッド部					評価時期	使用末期						
応力の原因	半径方向					円周方向					軸方向							
	Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q				
				内面	外面				内面	外面				内面	外面			
冷却材圧力						0.00		0.00			0.00		0.00					
管壁温度差									-6.32	6.02				-6.32	6.02			
軸方向温度差									0.00	0.00				0.00	0.00			
湾曲拘束によるパッド部反力									-1.74	1.74				-0.55	0.55			
応力の合計						0.00		0.00	-8.06	7.76	0.00		0.00	-6.87	6.57			
Pm	/					0.00	/				0.00	/						
PL+Pb						0.00					0.00							
PL+Pb+Q																		

強度評価 (評価温度 695°C)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm(PL)	0.00	3.1 (Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb	0.00	4.7 (1.5Sm)	0.00
Pm(PL)+Pb+Q	8.06	11.9 (Sq) ^注	0.68

注: 当該評価部位の温度と350°Cにおける0.2%耐力(Sy)値の平均値を用いた。

表4.1-8 コンパートメントの強度評価結果

運転状態	評価位置	熱膨張 (kg/mm ²)	炉心湾曲 (kg/mm ²)	地震 (kg/mm ²)	組合せ応力 (kg/mm ²)	許容値 (kg/mm ²)	設計比
通常 運転時	上部キャップ部	13.1	1.58	3.47	18.2	35.5	0.52
	内管-外管接続部	14.6	0.26	0.57	15.5	35.5	0.44
	下部キャップ部	8.23	0.31	0.67	9.21	51.5	0.18
過渡 変化時	上部キャップ部	14.6	2.32	3.47	20.4	21.6	0.95
	内管-外管接続部	15.8	0.38	0.57	16.8	21.6	0.78
	下部キャップ部	8.23	0.45	0.67	9.35	51.5	0.19

表 4.1-9 D型照射リグの一次応力の制限評価結果

(kg/mm²)

	応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
通常 運 転 時	Pm(PL)	0.089	4.30 (Sm)	0.03
	Pm(PL) + Pb	0.940	6.45 (1.5Sm)	0.15
	Pm(PL) + Pb + Q	3.583	12.00 (Sq)	0.30
過 渡 変 化 時	Pm(PL)	0.112	1.56 (Sm)	0.08
	Pm(PL) + Pb	1.194	2.34 (1.5Sm)	0.52
	Pm(PL) + Pb + Q	3.966	11.50 (Sq)	0.35

表 4.1-10 D型照射リグの座屈評価結果

(kg/mm²)

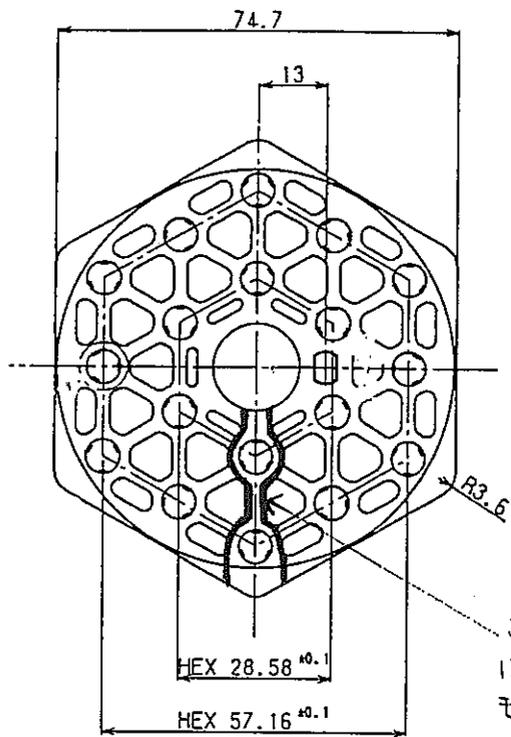
	冷却材圧力	座屈限界圧力	設計比
通常運転時	0.017	0.128	0.13
運転時の異常な 過渡変化時	0.021	0.123	0.18

表 4.1-11 D型照射リグのひずみの制限評価結果

	項目	設計値	制限値	設計比
通常 運 転 時	ϵ_m (%)	0.000029	0.01	0.01
	$\epsilon_m + \epsilon_b$ (%)	0.00092	0.02	0.05
	S (kg/mm ²)	3.59	17.1 (3Sm)	0.21
	領域	E	—————	—————
過 渡 変 化 時	ϵ_m (%)	0.000032	0.01	0.01
	$\epsilon_m + \epsilon_b$ (%)	0.00093	0.02	0.05
	S (kg/mm ²)	3.97	17.1 (3Sm)	0.24
	領域	E	—————	—————

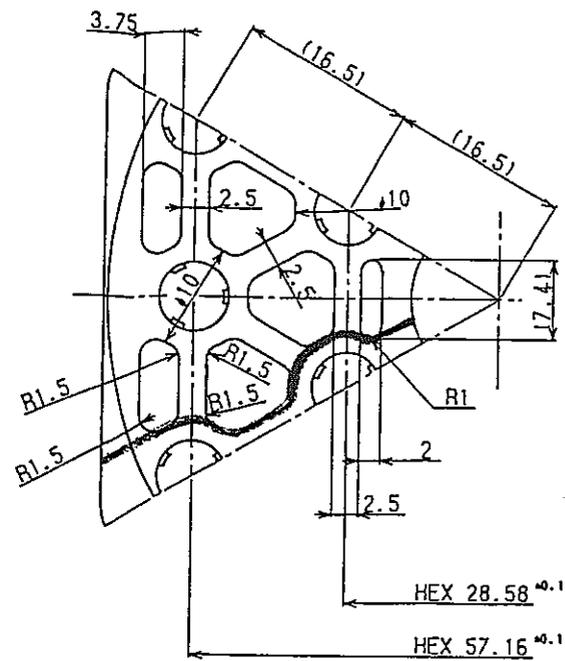
表 4.1-12 D型照射リグのクリープ疲労損傷評価結果

クリープ損傷和 (D c)	疲労損傷和 (D f)	累積クリープ 疲労損傷和	制限値 (D)	設計比
0.339	0.001	0.340	0.62	0.55



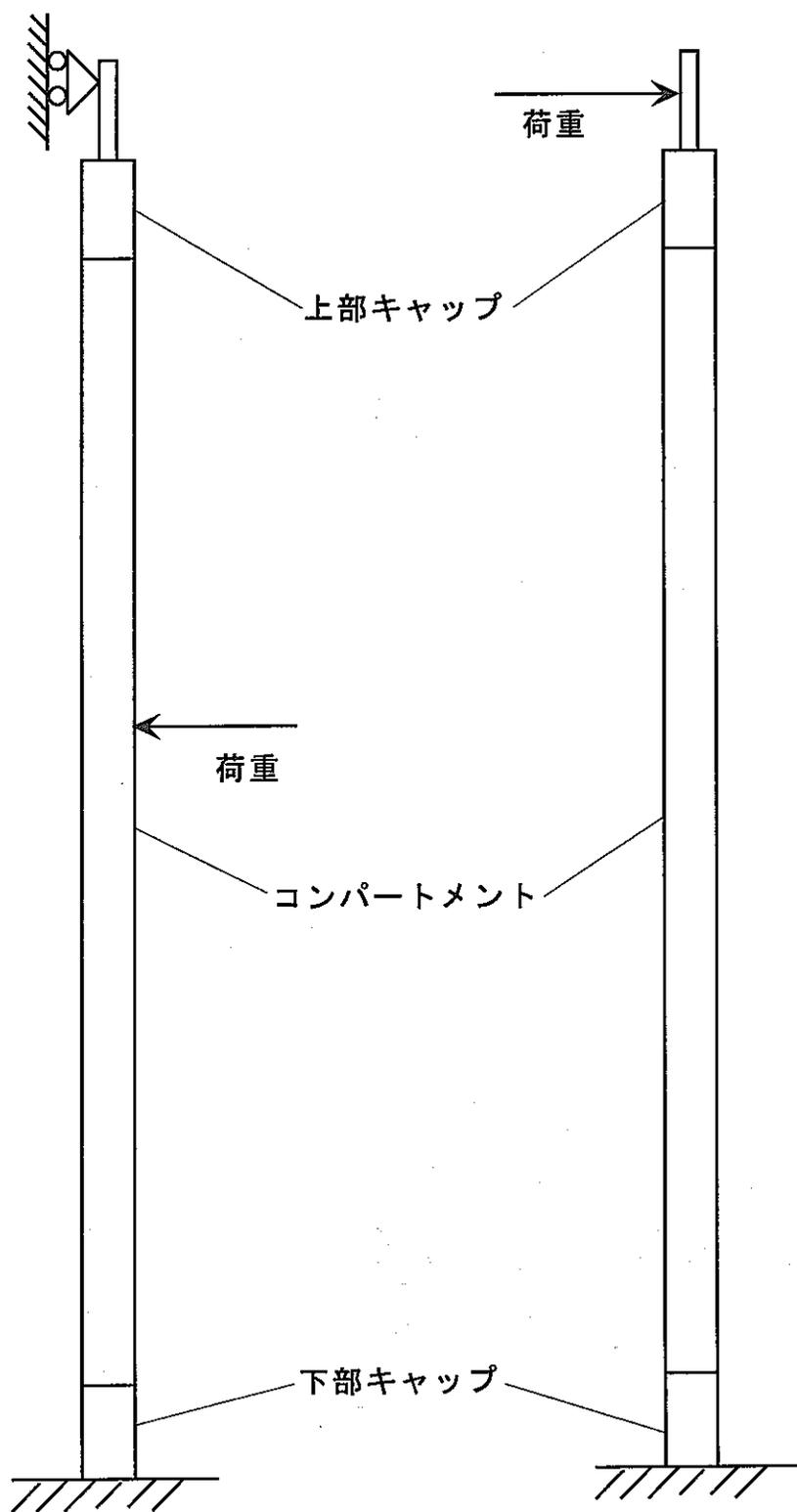
この部分を
1本のはりとして
モジュール化

(a) 上部支持板全体図



(b) 上部支持板詳細図

図 4.1-1 上部支持板の詳細構造



熱膨張による隣接コンパートメントとの接触応力計算時

炉心湾曲時及び地震時の応力計算時

図4.1-2 境界条件

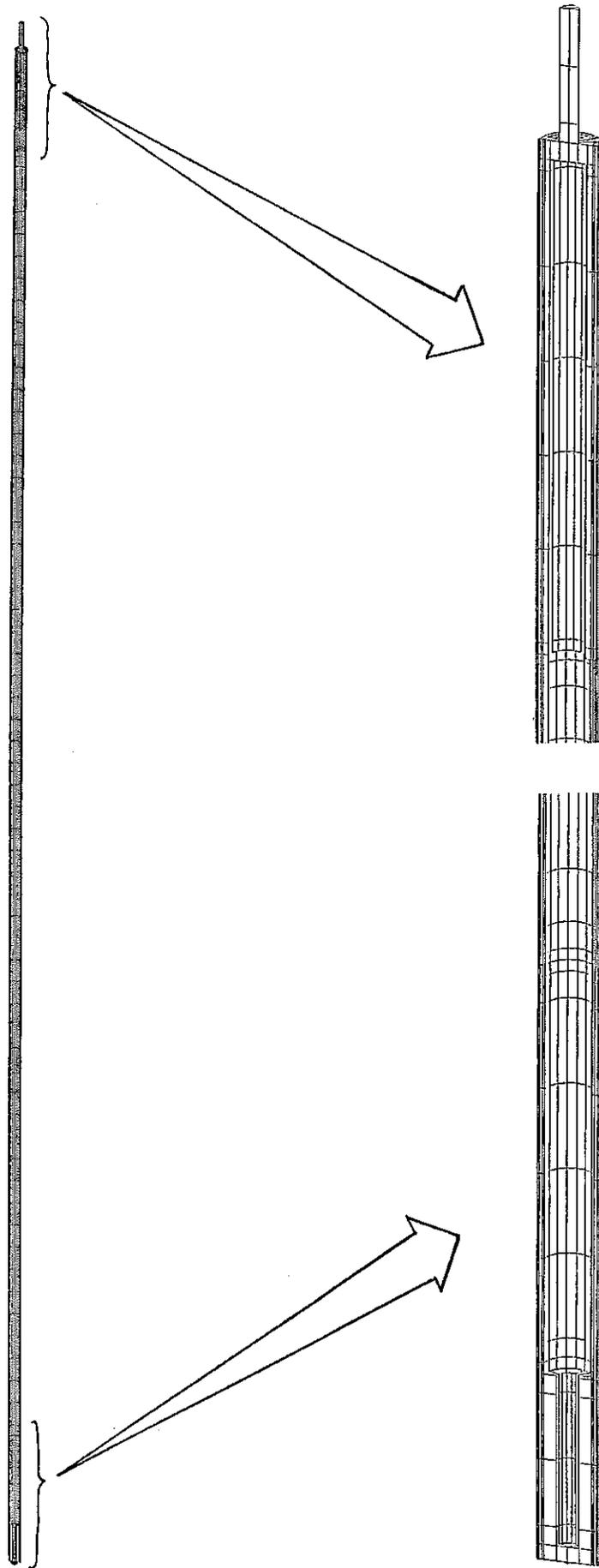


図4.1-3 δ 型コンパートメントの解析モデル

4.2 輸送・取扱時の強度評価

D型照射リグの輸送・取扱時には、コンパートメントの自重が軸圧縮荷重としてコンパートメント内管にかかり、集合体の自重が引張荷重としてタイロッドにかかる。また、コンパートメント全体の重量が上部支持板にかかる。このため、コンパートメント内管、タイロッド及び上部支持板に関する強度評価を行った。

4.2.1 コンパートメント内管の強度評価

D型照射リグの構造上の特徴として、コンパートメント外管及び内管が薄肉長尺管であることが挙げられる。輸送及び取扱時にコンパートメント内管にかかる軸方向圧縮応力に対する座屈強度評価を行う。

(1) 評価条件

① 応力の原因

輸送時荷重 : コンパートメント重量（シュラウド管及び燃料要素の重量含む）の6G

② コンパートメント内管の材料

SUS 316 相当ステンレス鋼

③ 評価温度

輸送時温度 : 室温

④ 輸送時荷重

燃料輸送時の燃料集合体への荷重として、6G 加速度による荷重が評価荷重として設置許可書で規定されている。これは、一般の燃料輸送キャスクの緩衝材設計との取り合い値として従来より設定され規定しているものである。D型照射リグのコンパートメント組立品に軸方向加速度を加えた場合、コンパートメント組立品の内、上部キャップ分の重量を除いたコンパートメント全質量に加わる加速度によって生じる荷重がコンパートメント内管に加わるとしたケースが最も保守側の想定となる。ここで、コンパートメントをφ16.4mmの中実棒と想定し、コンパートメント外管長さ（2135mm）のうち、上部キャップ分長さ（130mm）を除いた部分の重量は、1.63kgである。従って、6G 加速度による軸圧縮力 F_{6G} は、9.78kgとなる。

⑤ 解析モデル

コンパートメントの解析モデルを図 4.2-1 に示す。解析モデル

は、コンパートメント外管、内管、シュラウド管及び燃料要素をビーム要素及びバネ要素でモデル化した。

(2) 評価結果

汎用有限要素法応力解析コード「FINAS」により、コンパートメントの座屈荷重を求めた。解析結果を表 4.2-1 に示す。また、コンパートメント内管の座屈モードを図 4.2-2 に示す。コンパートメントの軸圧縮荷重は、座屈許容応力に比べて小さく、コンパートメントの健全性が保たれる。計算結果を表 4.2-2 を示す。

4.2.2 タイロッドの強度評価

コンパートメント型の集合体では、構造上、集合体の取扱時（燃料交換の際の吊り上げ時）に集合体の重量が全てタイロッドにかかる。そのため、タイロッドの健全性評価として輸送時の応力評価を行った。

(1) 評価条件

① 応力の原因

- ・ 輸送時の吊り下げ荷重 : 集合体重量 (60 kg) の 6 G 荷重
(取扱時の荷重である集合体重量 + 燃料交換機最大引抜き力
(250 kg) より大きくなるため)
- ・ コンパートメント抑えバネにより発生する荷重
3.0 kg (コンパートメント 1 本当たり)

② 部材の材料

SUS 316 相当ステンレス鋼

③ 評価温度

燃料交換時温度 : 250°C

④ 集合体自重

水流動試験に用いた試験体 (コンパートメント無し) の重量は 18.37 kg であり、これにコンパートメント (1.63 kg/一体、燃料要素含む) 18 本分を加えた重量は 47.71 kg である。しかし、試験体は D 型照射リグとエントランスノズルの全長及びハンドリングヘッド外形が若干異なっている。D 型照射リグと B 型照射リグの集合体外筒の形状は同じであるため、B 型照射リグの集合体外筒の重量 (実績から約 27kg) を基に D 型照射リグの重量を設定する。集合体自重は、56.4kg であるため保守側に 60 kg とする。

⑤計算方法

汎用有限要素法応力解析コード「FINAS」により、タイロッドにかかる引張応力を求めた。タイロッドの解析モデルを図 4.2-3 に示す。

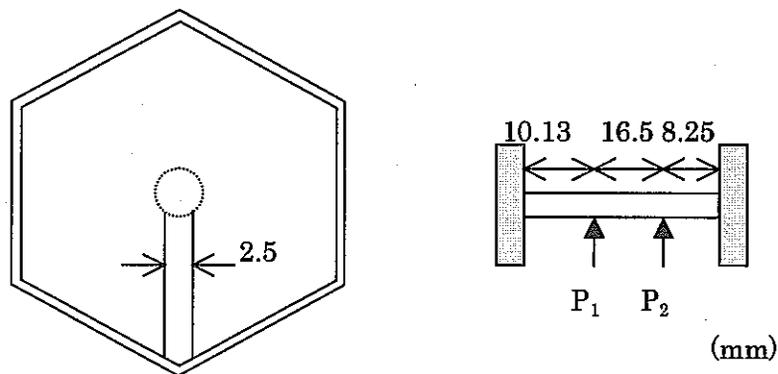
(2)評価結果

タイロッドにかかる引張応力は、許容値に比べて十分小さいため、タイロッドの健全性は確保される。表 4.2-3 に、評価結果を示す。

4.2.3 上部支持板の強度評価

(1)曲げ応力の計算

上記 4.1.2(2)項と同様に下図に示す簡単なはりモデルを用いて上部支持板の強度計算を行う。



ここで、 P_1 、 P_2 はコンパートメント重量に6Gの加速度が加わった場合の荷重である。また、 M_0 、 M_1 、 M_2 、 M_3 を各部に発生する曲げモーメントとし、各々、ラッパ管との接合部、荷重 P_1 の荷重位置、荷重 P_2 の荷重位置、及び軸心管との接合部での曲げモーメントを表す。ここでは、 P_1 、 P_2 の荷重を各々負荷した場合の曲げモーメントを計算し、これらを重ね合わせるにより各部に発生する曲げモーメントを算出する。コンパートメント重量1,630gであり、6Gの加速度が加わった場合の荷重は9.78kgfである。 P_1 、 P_2 は、これに通常のばね力(10.4kgf)を加えた20.18kgfを考える。

① P_1 を負荷した場合の各部の曲げモーメント

$$M_0 = -\frac{P_1 \ell_1 \ell_2^2}{\ell^2} = -102.93$$

$$M_1 = \frac{2P_1 \ell_1^2 \ell_2^2}{\ell^3} = 59.79$$

$$M_2 = \frac{P_1 \ell_1^2}{\ell^2} \left\{ \ell_1 + 2\ell_2 - \frac{x}{\ell} (\ell_1 + 3\ell_2) \right\} = -8.16$$

$$M_3 = -\frac{P_1 \ell_1^2 \ell_2}{\ell^2} = -42.13$$

ここで、 $P_1 = 20.18 \text{ kgf/mm}^2$, $\ell_1 = 10.13 \text{ mm}$

$\ell_2 = 24.75 \text{ mm}$, $\ell = 34.88 \text{ mm}$

$x = 26.63 \text{ mm}$

② P_2 を負荷した場合の各部の曲げモーメント

$$M_0 = -\frac{P_2 \ell_1 \ell_2^2}{\ell^2} = -30.07$$

$$M_1 = \frac{P_2 \ell_2^2}{\ell^2} \left\{ \frac{x(3\ell_1 + \ell_2)}{\ell} - \ell_1 \right\} = -1.17$$

$$M_2 = \frac{2P_2 \ell_1^2 \ell_2^2}{\ell^3} = 45.91$$

$$M_3 = -\frac{P_2 \ell_1^2 \ell_2}{\ell^2} = -97.05$$

ここで、 $P_2 = 20.18 \text{ kgf/mm}^2$, $\ell_1 = 26.63 \text{ mm}$

$\ell_2 = 8.25 \text{ mm}$, $\ell = 34.88 \text{ mm}$

$x = 10.13 \text{ mm}$

①と②を重ね合わせると

$$M_0 = -133.00$$

$$M_1 = 58.62$$

$$M_2 = 37.75$$

$$M_3 = -139.18$$

となる。従って、上部支持板に発生する最大の曲げ応力は、

$$\sigma_b = \pm \frac{M_{\max}}{Z} = \pm \frac{-139.18}{2.5 \times 20/6} = 16.71 \text{ kgf/mm}^2$$

Z : 断面係数

$$Z = \frac{1}{6} b h^2$$

ただし、b : はりの幅 (2.5 mm)
h : はりの厚さ (20 mm)

(2) 評価結果

(1)の結果より、上部支持板に発生する応力は 16.71 kgf/mm^2 であり、許容応力 ($1.5S_m = 19.2 \text{ kgf/mm}^2$ (SUS316 : 350°C)) に比べて小さく、上部支持板の健全性は保たれる。

表4.2-1 コンパートメントの許容座屈荷重の解析結果

座屈モード	座屈荷重 (kg)
一次	56.4
二次	451.6
三次	1237.5

表4.2-2 コンパートメントの座屈評価結果

評価部位	評価温度 (°C)	発生応力 (kg/mm ²)	許容値 (kg/mm ²)	設計比
コンパートメント内管	室温	0.47	3.75	0.13

表4.2-3 タイロッドの強度評価結果

評価部位	評価温度 (°C)	発生応力 (kg/mm ²)	許容値 (kg/mm ²)	設計比
タイロッド	250	14.3	50.7	0.29

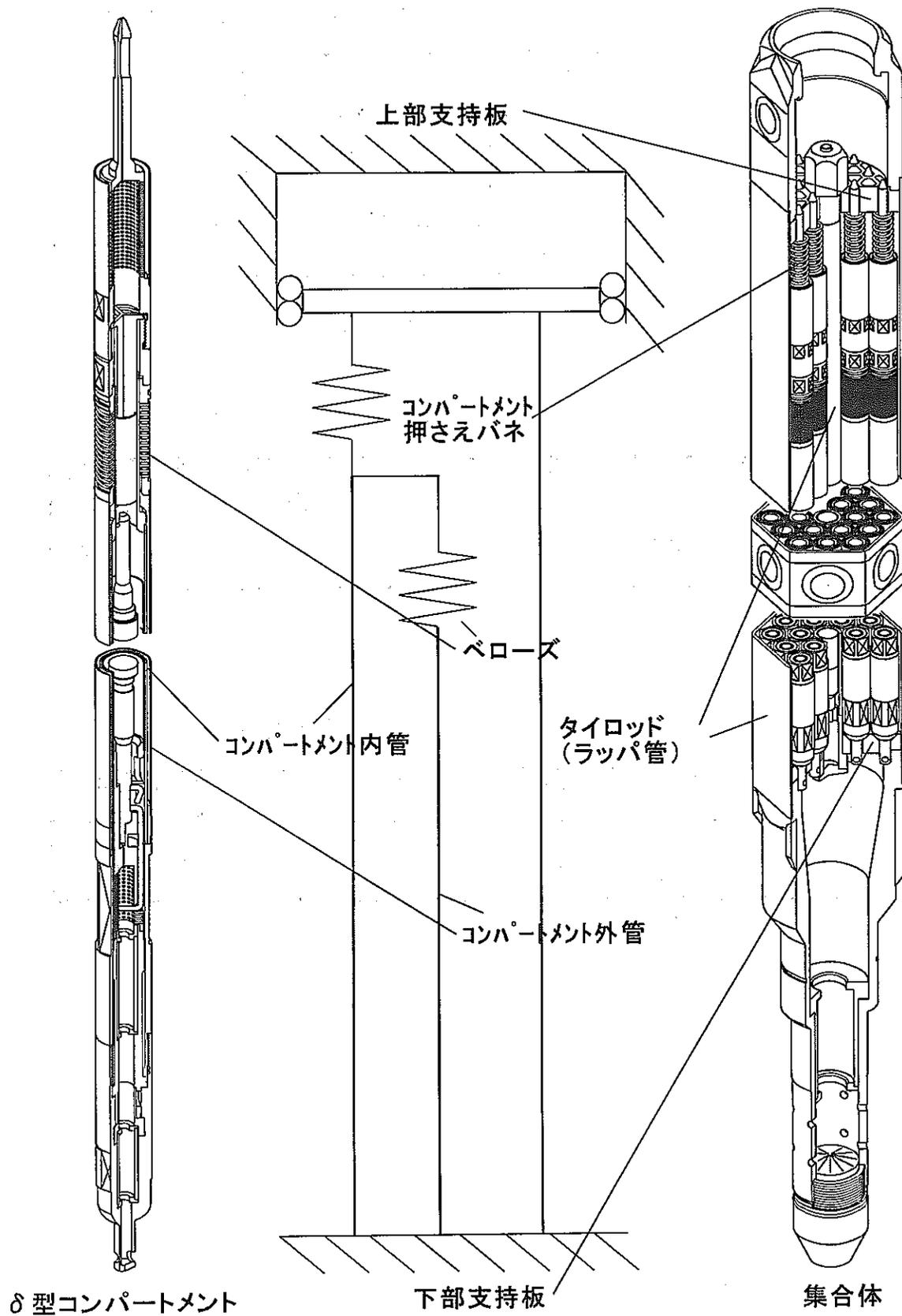


図4.2-1 コンパートメントの座屈解析モデル

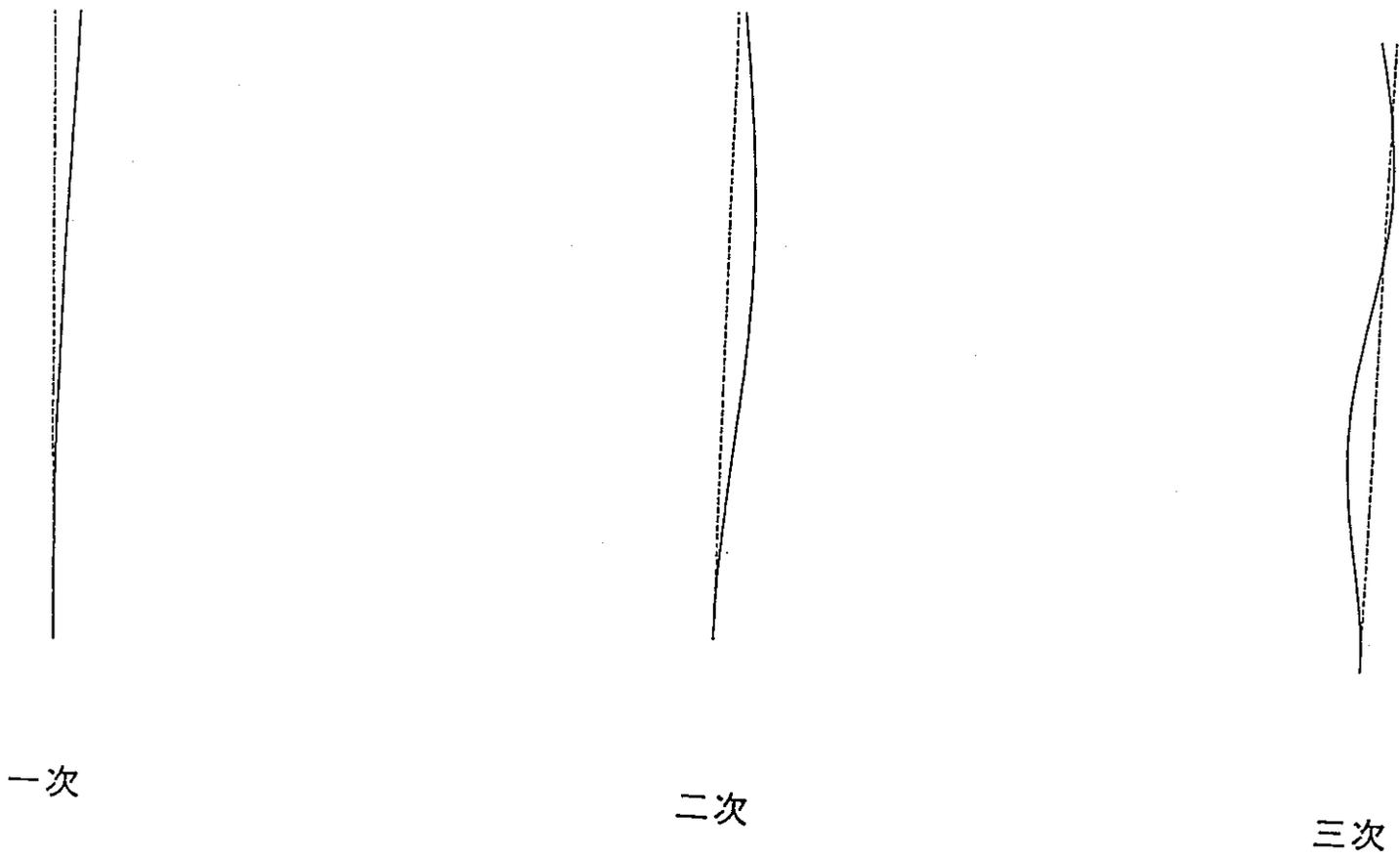


図 4. 2-2 コンパートメントの座屈モード

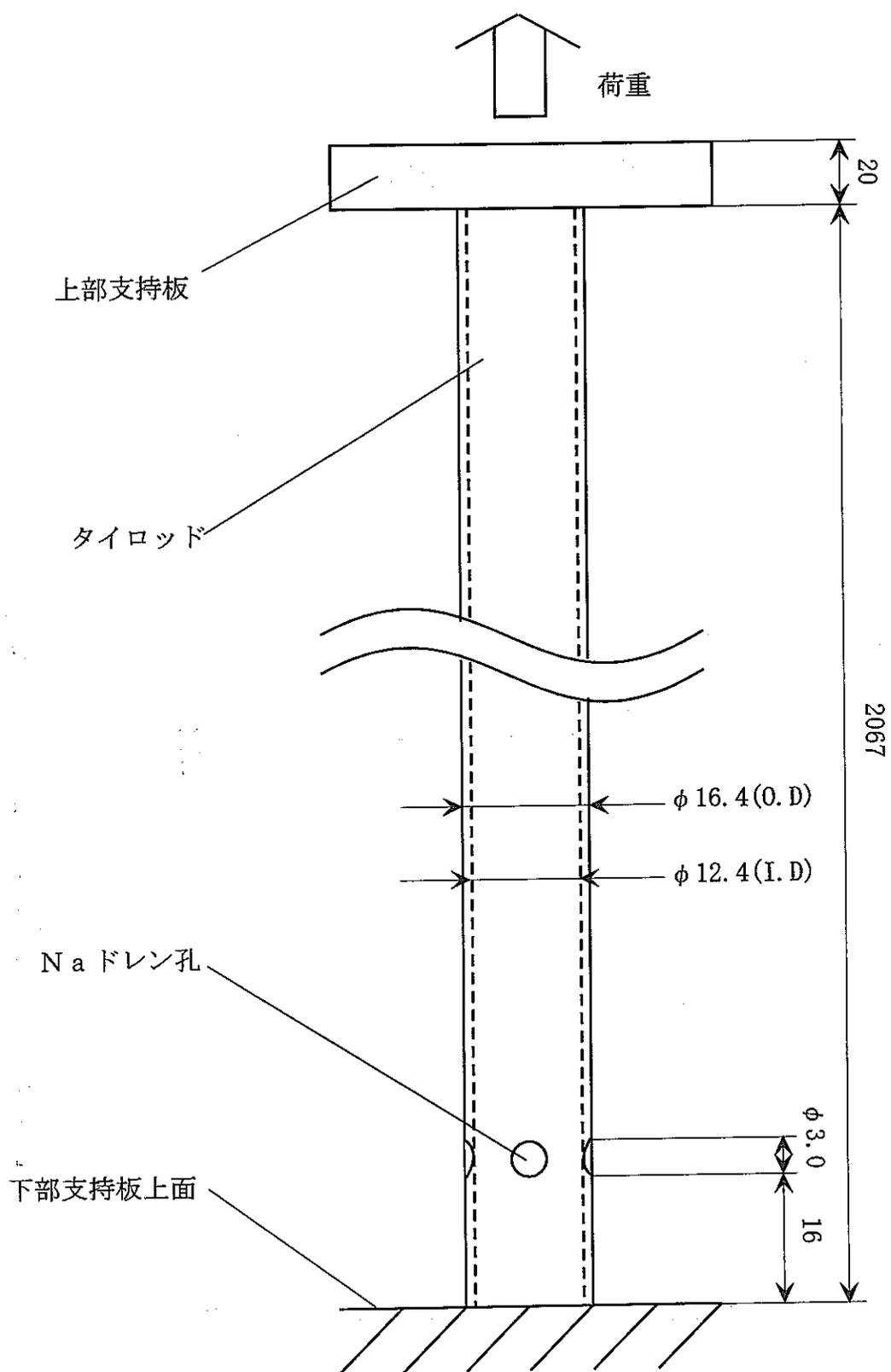


図4.2-3 タイロッドの解析モデル

4.3 地震時の強度評価

地震により集合体に発生する応力（衝突力及び曲げモーメントに基づく応力）及び集合体各部に発生する一次応力を「常陽」MK-Ⅲ条件として強度評価を行う。

4.3.1 概要

D型照射リグの地震時の応力評価は、B型照射リグの地震時の応力評価と同様に行う。

(1) 応力の原因

- ① 衝突力に基づく応力
- ② 曲げモーメントに基づく応力
- ③ 炉心湾曲に基づく応力

(2) 応力評価時期

- ① 使用初期
- ② 使用末期

(3) 応力評価位置

- ① エントランスノズル部
- ② エントランスノズルラップ管接合部
- ③ 中間パッド部
- ④ 上部パッド部

(4) 集合体部材の材料

- ① エントランスノズル : SUS316
- ② ラップ管 : SUS316相当ステンレス鋼
- ③ ハンドリングヘッド : SUS316

4.3.2 評価条件

(1) 評価温度

上記4.1.1節の強度評価条件に示す各部の評価温度を使用した。

(2) 材料強度基準

上記4.1.1節の強度評価条件に示す材料強度基準を適用した。

(3) その他の条件

以下の応力については、炉心燃料集合体と同一条件とし、MK-III炉心燃料集合体における応力評価結果^[11]を適用する。

- ① 衝突力に基づく応力
- ② 曲げモーメントに基づく応力
- ③ 炉心湾曲に基づく応力

4.3.3 評価結果

強度計算結果を表 4.3-1 に示す。

いずれの評価位置においても発生応力は許容値に比べて小さく、地震時の健全性は保たれている。

表4.3-1 D型照射リグの地震時の応力評価結果 (1/2)

運転状態	評価位置	評価時期	使用初期		使用末期	
		応力分類	< Pm > [Sm]	< PL + Pb > [1.5Sm]	< Pm > [Sm]	< PL + Pb > [1.5Sm]
通常運転時	エントランスノズル部	応力強さ	0.19	9.04	0.19	9.04
		許容値	12.8	19.2	12.8	19.2
		設計比	0.02	0.47	0.02	0.47
	ラップ管接合部	応力強さ	0.00	3.23	0.00	3.23
		許容値	12.8	19.2	12.8	19.2
		設計比	0.00	0.17	0.00	0.17
	中間パッド部	応力強さ	0.31	6.79	0.31	6.79
		許容値	27.4	41.1	27.4	41.1
		設計比	0.02	0.17	0.02	0.17
	上部パッド部	応力強さ	0.06	2.40	0.06	2.40
		許容値	7.6	11.4	7.6	11.4
		設計比	0.01	0.22	0.01	0.22

表4.3-1 D型照射リグの地震時の応力評価結果 (2/2)

運転状態	評価位置	評価時期	使用初期		使用末期		
		応力分類	< Pm > [Sm]	< PL + Pb > [1.5Sm]	< Pm > [Sm]	< PL + Pb > [1.5Sm]	
運転時の異常な過渡変化時	エントランスノズル部	応力強さ	0.21	9.06	0.21	9.06	
		許容値	12.8	19.2	12.8	19.2	
		設計比	0.02	0.48	0.02	0.48	
	ラツパ管接合部	エントランスノズル	応力強さ	0.00	3.23	0.00	3.23
		許容値	12.8	19.2	12.8	19.2	
		設計比	0.00	0.17	0.00	0.17	
	中間パッド部	応力強さ	0.36	7.25	0.36	7.25	
		許容値	25.1	37.6	25.1	37.6	
		設計比	0.02	0.20	0.02	0.20	
	上部パッド部	応力強さ	0.06	2.40	0.06	2.40	
		許容値	3.1	4.7	3.1	4.7	
		設計比	0.02	0.52	0.02	0.52	

4.4 その他の強度評価

4.4.1 タイロッドの軸方向伸び量

D型照射リグは、タイロッドによりハンドリングヘッドとラッパ管付きエントランスノズルを接続している。ハンドリングヘッド部とラッパ管付きエントランスノズル部は、溶接接合部ではないことから、タイロッドの軸方向の伸びにより嵌合部が外れることが考えられる(図4.4-1)。ここでは、タイロッドの軸方向の伸びについて評価する。

なお、ラッパ管とタイロッドの温度差がほぼ無いことから、タイロッドの軸方向の伸び量は、照射クリープ、熱クリープ及びスウェリングを基に算出する。各算出式の出典^[4]を以下に示す。

- 照射クリープ : PNC 1984 年式
 熱クリープ : SUS316 20%CW の熱クリープ式
 スウェリング : WARD-4135-11 (1970) の式

(1) 評価条件

① 評価温度

タイロッドの最高温度はコンパートメント周囲の漏洩流量によりコンパートメント最高温度より低くなるが、ここでは、保守側に4.1.5節のコンパートメントの強度評価で用いたコンパートメント外管の最高温度を軸方向一定として使用する。熱クリープの評価温度は、コンパートメント外管の最高温度667℃を使用する。なお、照射クリープ及びスウェリングは、コンパートメント外管の最高温度がスウェリングピーク温度を超えていることから、保守側にスウェリングピーク温度595℃を使用する。

② 荷重

コンパートメント押えバネによるバネ荷重 : 3.0kg/本

③ 材質

SUS316相当ステンレス鋼

(2) 軸心管伸び量の算出

① 照射クリープ

$$\varepsilon = 100 \left(B_0 \phi + D S \right) \cdot \sigma$$

- ε : 照射クリープ歪速度 (%/sec)
- σ : 応力 (kgf/mm^2)
- ϕ : 中性子束 ($\text{n/cm}^2/\text{sec}, E \geq 0.1\text{Mev}$)
- B_0 : 4.9×27^{-27} ($\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{n/cm}^2$)⁻¹
- D : 1.0×10^{-1} (kgf/mm^2)⁻¹
- S : スウェリング速度 ($\Delta V/V/\text{sec}$)

② 熱クリープ

$$\varepsilon_c = \varepsilon_T \{1 - \exp(-r \cdot t)\} + \varepsilon_S \cdot t$$

$$0.01 \leq \sigma \leq 18.0$$

$$\varepsilon_T = \alpha_C \cdot \varepsilon_{T0}$$

$$\varepsilon_S = \alpha_C \cdot \varepsilon_{S0} \cdot t_R^{-1}$$

$$r = r_0 \cdot t_R^{-1}$$

$$\log_{10} t_R \quad \textcircled{1} \quad 10.0 \leq \sigma$$

$$= A_0 + A_1 \log_{10} \sigma + A_2 (\log_{10} \sigma)^2 + A_3 (\log_{10} \sigma)^3$$

$$\textcircled{2} \quad 0.01 \leq \sigma < 10.0$$

$$= B_0 + B_1 \log_{10} \sigma$$

$$\varepsilon_{T0} = 0.00197 \quad A_0 = 46868/(T + 273.15) - 18.36$$

$$\varepsilon_{S0} = 0.0166 \quad A_1 = -57265/(T + 273.15)$$

$$r = 206 \quad A_2 = 45135/(T + 273.15)$$

$$A_3 = -12675/(T + 273.15)$$

$$B_0 = 27083/(T + 273.15) - 18.36$$

$$B_1 = -5020/(T + 273.15)$$

ε_c = クリープひずみ (%)
 t = 時間 (h)
 T = 温度 (°C)
 t_R = 破断時間 (h)
 α_c = クリープ歪ばらつき
 $0.18 \leq \alpha_c < 2.5$ 平均値 1.0

③スウェリング

$$\frac{\Delta V}{V} = 9 \times 10^{-35} (\phi t)^{1.5} (4.028 - 3.712 \times 10^{-2} T + 1.0145 \times 10^{-4} T^2 - 7.879 \times 10^{-8} T^3)$$

ここで

T : 温度 (°C)
 ϕt : 中性子照射量 (n/cm^2 , $E \geq 0.1 MeV$)
 $\Delta V/V$: スウェリング ($V \circ 1. \%$)

(3) 評価結果

計算結果を表 4.4-1 に示す。設計比が 1 以下となり、ハンドリングヘッドとラッパ管の嵌合部が外れることはない。

4.4.2 タイロッドのネジ部の強度評価

タイロッド上部のネジ部は、ハンドリングヘッドに取り付けられた上部支持板を挟みロックナットと接続する。ハンドリングヘッドとラッパ管は溶接接続しないことから、タイロッドのネジ部の強度が集合体の構造を保つ上で重要となる。

ここでは、タイロッドのネジ部の取扱時及び炉内装荷末期での雄ネジの強さ、ネジ山のせん断強さ、及びネジ山側面の接触圧について強度評価を行う。タイロッドのネジ部及びロックナットの構造を図 4.4-2 に示す。

(1) 評価条件

① 評価温度

- ・ 集合体取扱時 : 250°C
- ・ 炉内装荷時 : 667°C

(保守側にコンパートメント強度評価時のコンパー

トメント最高温度とする。)

②荷重

- ・ 集合体取扱時 : 414 kg
(集合体重量 (60 kg) × 6 G + コンパートメント抑えバネ 54 kg)
- ・ 炉内装荷時 : 410 kg
(コンパートメントの伸びによる抑えバネ力の増加 (356 kg) + コンパートメント抑えバネ力 (54 kg))

コンパートメント抑えバネ力は、集合体組立時よりかかる荷重である。また、コンパートメントの伸びによる抑えバネ力の増加によりタイロッドに掛かる荷重は、照射クリープ、熱クリープ及びスウェリングによりコンパートメントのみ伸びるものとして保守側に算出した。

③材質

- タイロッド : SUS 316 相当ステンレス鋼
- ロックナット : Inconel 718

(2) 応力の算出^[15]

- ①雄ねじ (タイロッドのネジ部) の強さ
以下の計算式により算出する。

$$\sigma_o = Q / Ae$$

Q : タイロッドにかかる荷重

Ae : ネジ部の有効断面積

$$Ae = \pi / 4 \times [\{ (d_2 + d_1) / 2 \}^2 - d_3^2]$$

d_2 : ネジ部の有効径

d_1 : ネジ部の谷径

d_3 : タイロッドの内径

②ネジ山のせん断強さ

以下の計算式により算出する。

$$\tau_b = Q / (Z \cdot \pi d_1 \cdot kp)$$

$$\tau_m = Q / (Z \cdot \pi D \cdot kp)$$

τ_b : 雄ネジのせん断応力

τ_n : 雌ネジのせん断応力

Z : ネジ山の巻数

(ネジのかみ合い長さ / ネジのピッチ)

D : 雄ネジの谷径

P : ネジのピッチ

K : ネジの谷部の丸みによる補正係数 (=0.75)

③ネジ山側面の接触圧

以下の計算式により算出する。

$$P_m = Q / (Z \cdot \pi \cdot d_2 \cdot t)$$

P_m : ネジ山側面の平均接触圧

t : ネジのひっかけり高さ

(3) 評価結果

計算結果を表 4.4-2 に示す。設計比が 1 以下となり、タイロッドのネジ部の健全性は保たれている。

表 4.4-1 タイロッドの軸方向の伸び量評価結果

(mm)

評価部位	照射 クリープ	熱 クリープ	スウェリ ング	嵌合部 長さ	設 計 比
タイロッド	0.01	0.19	10.5	27	0.40

表 4.4-2 タイロッドのネジ部の強度評価結果

(kg/mm²)

評価項目		計算値	許容値	設計比	
雄ネジの強さ (タイロッドのネジ部)		取扱時	7.01	53.3	0.14
		炉内装荷時	6.95	35.0	0.20
ネジ山のせん断強さ	タイロッド	取扱時	0.79	59.6	0.03
		炉内装荷時	0.78	31.8	0.05
	ロックナット	取扱時	0.74	59.6	0.03
		炉内装荷時	0.73	31.8	0.05
ネジ山側面の接触圧		1.06	4	0.27	

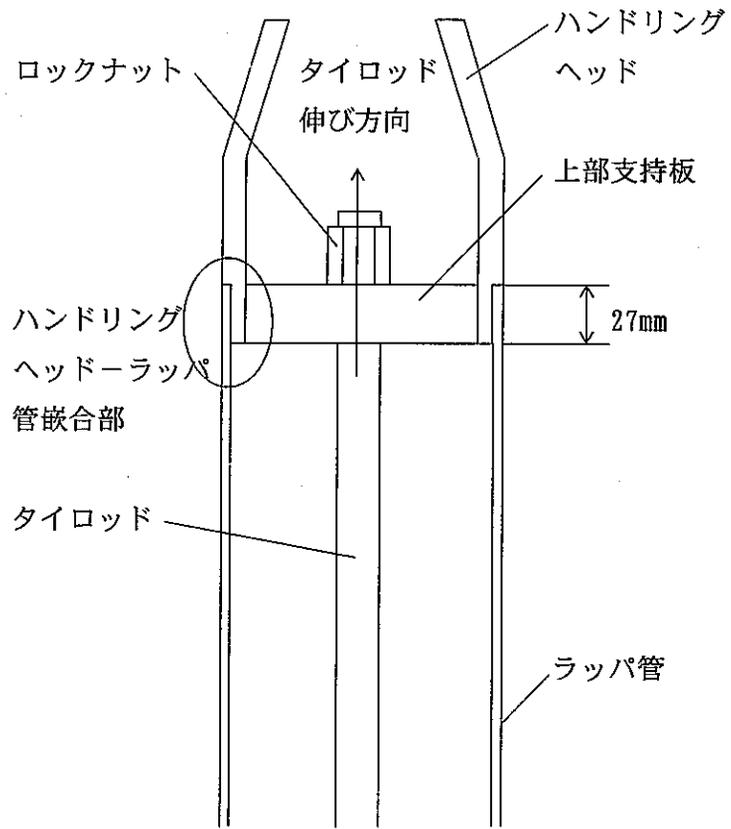
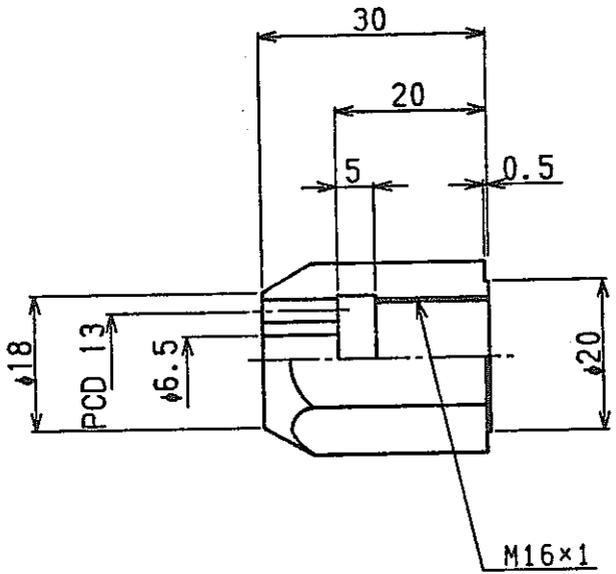
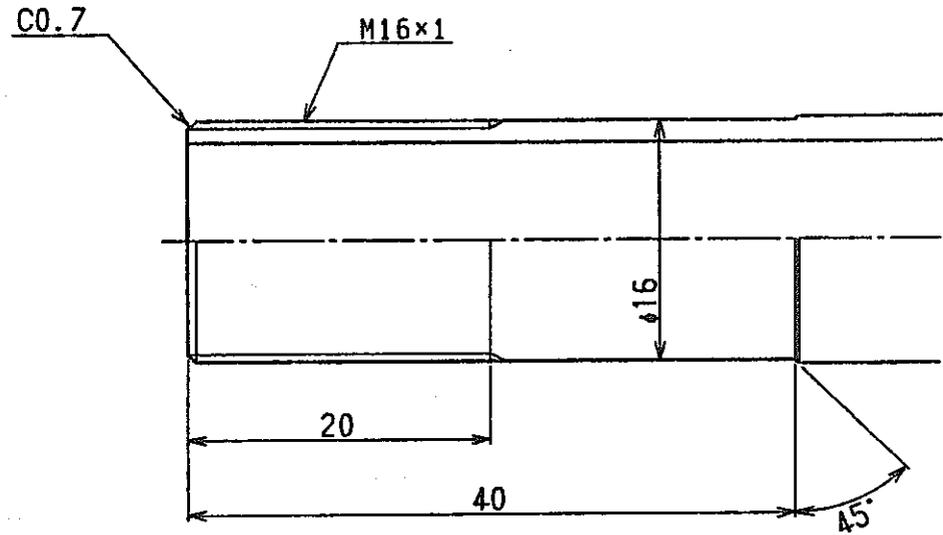


図 4. 4-1 ハンドリングヘッドーラッパ管嵌合部構造



ロックナット



タイロッドネジ部

図 4.4-2 タイロッドネジ部及びロックナットの構造

5 安全評価

5.1 概要

D型照射リグの安全評価で使用する被覆管最高温度の計算方法及び計算結果を以下に示す。

(1) 安全評価事象

照射燃料集合体の安全評価は、「運転時の異常な過渡変化」については比較的頻度の高い事象と考えられる事象を、「事故」については炉心冷却能力が失われる恐れのある事象から、燃料、被覆管及び冷却材温度が最も高くなる事象を選択している。

なお、「運転時の異常な過渡変化」は、出力上昇型事象として「出力運転時の制御棒の異常な引抜き」を、冷却材流量減少型事象として「外部電源喪失」を選択し、「事故」は、出力上昇型事象として「燃料スランピング事故」を、冷却材流量減少型事象として「1次冷却系主循環ポンプ軸固着事故」を選択している。

(2) D型照射リグの安全評価上の特徴

D型照射リグは、従来の照射燃料集合体と比べ、燃料要素仕様が変わらず、集合体内の冷却材流路構造が異なることのみなので、炉心に異常な正の反応度が付加される出力上昇型事象に関しては、燃料初期温度といった評価条件及び原子炉出力上昇割合といった事象進展が従来と変わらない。また、冷却材流量減少型事象に関しては、燃料初期温度といった評価条件は従来と変わらないが、事象進展の一つである集合体内冷却材流量減少割合が従来と異なる。

5.2 被覆管最高温度の計算方法

D型照射リグと現行の照射リグの被覆管温度計算条件の相違は、集合体内の冷却材流路構造の違いによる集合体の圧力損失係数の差である。そのためD型照射リグの事故時の被覆管温度は、現行の照射リグの流量変動(集合体内冷却材流量履歴)及びD型照射リグと現行の照射リグの圧力損失係数の差を用い簡易的に算出できる。

なお、現行の照射リグの被覆管最高温度計算結果としてC型照射リグの計算結果を設置許可書に記載していることから、C型照射リグの被覆管最高温度計算結果を使用しD型照射リグの被覆管最高温度を計算する。

(1) 計算条件

① 事故事象開始時の被覆管温度

I～Ⅲ型特殊燃料要素	:	700℃
Ⅳ型特殊燃料要素	:	610℃
炭化物試験用要素	:	700℃
窒化物試験用要素	:	700℃

② 事故事象開始時の集合体冷却材流量

C型照射リグ

I～Ⅲ型特殊燃料要素	:	2.70kg/sec
Ⅳ型特殊燃料要素	:	4.90kg/sec
炭化物試験用要素	:	4.50kg/sec
窒化物試験用要素	:	5.70kg/sec

D型照射リグ

I～Ⅲ型特殊燃料要素	:	0.93kg/sec
Ⅳ型特殊燃料要素	:	1.08kg/sec
炭化物試験用要素	:	1.37kg/sec
窒化物試験用要素	:	1.62kg/sec

なお、本集合体内冷却材流量は、集合体内に装填する燃料要素は1種類とし、各燃料要素は許可上の最大線出力で用いることとして算出した。

③ 集合体の圧力損失係数

C型照射リグ

エントランスノズル部	:	$\zeta = 2.049Re^{-0.04094}$
集合体部	:	$\zeta = 126.4Re^{-0.2053}$

D型照射リグ	:	$\zeta = 795.4Re^{-0.0091}$
--------	---	-----------------------------

D型照射リグの及びC型照射リグの圧力損失係数は、水流動試験結果より得た実験式である。本実験式は、流速をパラータとした水流動試験により得た圧力損失測定値を後述する(2)項の(1-1)式に代入して求めた圧力損失係数を、レイノルズ数の指数関数としてまとめたものである。

また、本安全評価では、低流量領域において冷却材が流れ難くなるよう圧力損失係数の増加傾向が最も高い構造の実験式を使用した。

④冷却材流量履歴

出力上昇型事象

出力運転中の制御棒の異常な引抜き :

設置許可書添付書類 10 第 2.2 図

燃料スランピング事故 : 設置許可書添付書類 10 第 3.1 図

冷却材減少型事象

外部電源喪失 : 設置許可書添付書類 10 第 2.5 図

1 次冷却系主循環ポンプ軸固着事故 :

設置許可書添付書類 10 第 3.2 図

⑤C型照射リグの被覆管温度履歴

1 次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時の設置許可書添付書類 10 に記載されている計算コード HARHO-1N によって計算した被覆管温度履歴を代表として図 5-1 及び図 5-2 に示す。なお、炭化物試験用要素及び窒化物試験用要素の被覆管温度履歴は、事故事象開始時の被覆管温度が I ~ III 型特殊燃料要素と同じであること及び被覆管最高温度が I ~ III 型特殊燃料要素より約 10℃低いことから、保守側に I ~ III 型特殊燃料要素の被覆管温度履歴を使用する。

(2) 計算方法

過渡時の各時刻における炉心内の圧力損失は、炉心内の装荷体数が多い炉心燃料集合体の圧力損失でバランスし一定となる。圧力損失が炉心燃料集合体の値で求まることから、これを用い各時刻における D 型照射リグ及び C 型照射リグ内を流れる冷却材の流量比を求める。各時刻における冷却材の流量比及び C 型照射リグに装填された燃料要素被覆管の温度履歴から、D 型照射リグに装填された燃料要素の被覆管温度履歴を算出する。詳細は以下に示す。

①各時刻における D 型照射リグと C 型照射リグの冷却材流量比の算出

流量 (流速: V) と圧力損失 (ΔP) の関係は、(1-1) 式で表される。これより、D 型照射リグと C 型照射リグの各時刻における冷却材流量比 (ξ) は(1-2) 式となる。

$$\Delta P = \zeta \frac{V^2}{2g} \gamma \quad \dots\dots\dots (1-1)$$

$$= \zeta_D \frac{V_D^2}{2g} \gamma = \zeta_{Dri} \frac{V_C^2}{2g} \gamma$$

$$\frac{V_D}{V_C} = \frac{\zeta_C}{\zeta_D}$$

$$\xi = \frac{\zeta_C}{\zeta_D} = \frac{\zeta_C(t)/\zeta_C(0)}{\zeta_D(t)/\zeta_D(0)} \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

- ζ : 圧力損失係数
- g : 重力加速度
- γ : 冷却材の比重
- ζ(0) : 時刻 t における圧力損失係数
- ζ(t) : 時刻 t における圧力損失係数

添字は、それぞれD型照射リグ (D)、C型照射リグ(C)を示す。

②各時刻におけるD型照射リグの被覆管温度の算出

各時刻におけるC型照射リグの被覆管温度履歴は、(1-3)式で示される。各時刻におけるD型照射リグの被覆管温度は、冷却材入口に加え時刻 t におけるC型照射リグの冷却材入口温度と被覆管最高温度に上記(2)①で求めた流量比の逆数を乗じることで算出する((1-4)式)。

$$T_C(t) = T_{in} + \Delta T_C(t) \quad \dots\dots\dots (1-3)$$

$$T_D(t) = T_{in} + \Delta T_C(t) \times \frac{1}{\xi} \quad \dots\dots\dots (1-4)$$

- T_c(t) : 時刻 t におけるC型照射リグの被覆管温度
- T_{in} : 冷却材入口温度
- ΔT_c(t) : 時刻 t におけるC型照射リグの冷却材入口温度と被覆管最高温度との温度差
- T_D(t) : 時刻 t におけるD型照射リグの被覆管温度

5.3 評価結果

安全評価条件及び安全評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

なお、安全評価では、被覆管温度のみを評価している。燃料温度及び冷却材温度については、出力上昇型事象及び冷却材流量減少事象のどちらにあっても、燃料の出力の推移は原子炉出力の推移にしたがい、照射リグの種類に依存しないため、D型照射リグにおいても従来と変わらない。そのため、被覆管温度が従来の評価結果に包絡されれば、燃料温度及び冷却材温度も従来の評価結果に包絡される。

①出力上昇型事象

照射リグの出力上昇型事象の評価結果は、評価条件である、燃料要素仕様、初期条件（熱的制限値と同じ値としている）及び投入される反応度に依存するが、燃料要素仕様及び初期条件は照射リグの種類によらないため変わらず、また、投入される反応度は炉心に依存するため、照射リグの種類が異なっても同じである。

よって、D型照射リグの出力上昇型事象の評価条件は、従来の評価条件と同じであり、評価結果も同じである。

②冷却材流量減少型事象

照射リグの冷却材流量減少型事象の評価結果は、評価条件である、燃料仕様、初期条件及び集合体毎の冷却材流量推移（減少割合）に依存する。よって、燃料仕様及び初期条件は、出力上昇型事象と同様、照射リグの種類に依存しないが、集合体内冷却材流量推移（減少割合）は照射リグの種類によって異なるため、照射リグの種類毎に評価結果は異なる。

D型照射リグは、B型照射リグと同様、燃料要素をコンパートメントに装填しているため、集合体内部の圧力損失発生の主要因はオリフィスによる圧力損失になる。したがって、D型照射リグは、B型照射リグと同様、冷却材の流量が低下し層流領域の状態となった際、燃料要素バンドル部での圧力損失が支配的であるバンドル型集合体での、冷却材と燃料要素被覆管の摩擦による圧力損失の急激な増加が起きない。

一方、C型照射リグは、バンドル型集合体であるため、冷却材と燃料要素被覆管の摩擦による圧力損失の急激な増加が起きる。このため、D型照射リグは、B型照射リグと同様、C型照射リグより冷却材流量低下割合が小さく、被覆管温度の上昇する割合が小さくなる。よって、

従来の評価は、集合体内冷却材流量減少割合が最も大きく、各部の温度上昇割合が最も大きくなるC型照射リグを代表として実施しており、その他の照射リグの評価結果は、C型照射リグの評価結果に包絡されている。

ここで、被覆管最高温度が最も高くなる事象である1次冷却系主循環ポンプ軸固着事故を代表として被覆管温度履歴及び冷却材流量履歴の算出結果を図5-3～図5-5に示す。

I～III型特殊燃料要素、炭化物試験用要素及び窒化物試験用要素の被覆管最高温度は、約830℃となり熱設計基準値の890℃を十分下回り、C型照射リグの評価結果にも包絡される。また、IV型特殊燃料要素の被覆管最高温度は、約710℃となり熱設計基準値の810℃を十分下回り、C型照射リグの評価結果にも包絡される。

表5-1 安全評価条件及び安全評価結果（出力上昇型事象）

評価事象		出力運転中の制御棒の異常な引抜き		燃料スランピング		
		C型照射燃料集合体 (従来の評価結果)	D型照射燃料集合体	C型照射燃料集合体 (従来の評価結果)	D型照射燃料集合体	
初期条件 ¹⁾	原子炉出力		100%	100%	100%	100%
	炉心流量		100%	100%	100%	100%
	被覆管最高温度	I～Ⅲ型特殊燃料要素	700℃	700℃	700℃	700℃
		Ⅳ型特殊燃料要素	610℃	610℃	610℃	610℃
		炭化物試験用要素	700℃	700℃	700℃	700℃
窒化物試験用要素		700℃	700℃	700℃	700℃	
事象条件	投入反応度		5¢/sec	5¢/sec	20¢	20¢
	反応係数	ドップラ係数	$-0.37 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$	$-0.37 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$	$-0.37 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$	$-0.37 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$
		冷却材温度係数	$-5.5 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$-5.5 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$-5.5 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$-5.5 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$
		構造材温度係数	$-0.60 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$			
		燃料温度係数	0 Δk/k/°C	0 Δk/k/°C	0 Δk/k/°C	0 Δk/k/°C
		炉心支持板温度係数	0 Δk/k/°C	0 Δk/k/°C	0 Δk/k/°C	0 Δk/k/°C
	原子炉の自動停止	種類	中性子束高	中性子束高	中性子束高	中性子束高
		設定値	出力 107%	出力 107%	出力 107%	出力 107%
		応答時間	0.2 sec	0.2 sec	0.2 sec	0.2 sec
	評価結果 ²⁾	被覆管最高温度	I～Ⅲ型特殊燃料要素	約730℃	約730℃	約720℃	約720℃
Ⅳ型特殊燃料要素			約620℃	約620℃	約630℃	約630℃
炭化物試験用要素			約710℃ ^{*1}	約710℃	約730℃ ^{*1}	約730℃
窒化物試験用要素			約710℃ ^{*1}	約710℃	約730℃ ^{*1}	約730℃

* 1 炭化物試験用要素及び窒化物試験用要素は、C型照射燃料集合体で照射試験を行う許可を得ていないが、現行の許可書では、冷却材流量減少型事象に於ては、C型照射燃料集合体最高温度を被覆管最高温度と評価結果を記載している。
 * 2 炭化物試験用要素及び窒化物試験用要素は、C型照射燃料集合体最高温度を被覆管最高温度と評価結果を記載している。

表5-2 安全評価条件及び安全評価結果（冷却材流量減少型事象）

評価事象		外部電源喪失		1次冷却系主循環ポンプ軸固着事故		
照射燃料集合体		C型照射燃料集合体 (従来の評価結果)	D型照射燃料集合体	C型照射燃料集合体 (従来の評価結果)	D型照射燃料集合体	
初期条件 ¹²⁾	原子炉出力	100%	100%	100%	100%	
	炉心流量	100%	100%	100%	100%	
	被覆管最高温度	I～Ⅲ型特殊燃料要素	700℃	700℃	700℃	700℃
		Ⅳ型特殊燃料要素	610℃	610℃	610℃	610℃
		炭化物試験用要素	700℃	700℃	700℃	700℃
窒化物試験用要素		700℃	700℃	700℃	700℃	
事象条件	投入反応度		—	—	—	—
	反応度係数	ドップラ係数	$-3.1 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$	$-3.1 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$	$-3.1 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$	$-3.1 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$
		冷却材温度係数	$-5.5 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$-5.5 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$-5.5 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$-5.5 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$
		構造材温度係数	$-0.6 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$			
		燃料温度係数	$-5.6 \times 10^{-6} \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$			
		炉心支持板温度係数	$0 \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$0 \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$0 \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$	$0 \Delta \text{k/k/}^\circ\text{C}$
	原子炉の自動停止	種類	電源喪失	電源喪失	1次冷却材流量低	1次冷却材流量低
		設定値	—	—	流量 77%	流量 77%
		応答時間	1.2 sec	1.2 sec	0.4 sec	0.4 sec
	評価結果 ¹²⁾	被覆管最高温度	I～Ⅲ型特殊燃料要素	約750℃	約750℃	約880℃	約830℃
Ⅳ型特殊燃料要素			約640℃	約640℃	約740℃	約710℃
炭化物試験用要素			約750℃ ^{*1}	約750℃	約870℃ ^{*1}	約830℃
窒化物試験用要素			約750℃ ^{*1}	約750℃	約870℃ ^{*1}	約830℃

*1 炭化物試験用要素及び窒化物試験用要素は、C型照射燃料集合体で照射試験を行う許可を得ていないが、現行の許可書では、安全評価上最も厳しい評価結果をとるから、C型照射燃料集合体で照射試験を行った場合の安全評価結果を記載している。
 *2 各事象の原子炉出力履歴が、被覆管最高温度評価結果が包絡されれば燃料最高温度及び冷却材最高温度も包絡されるため、被覆管最高温度評価結果を代表とした。

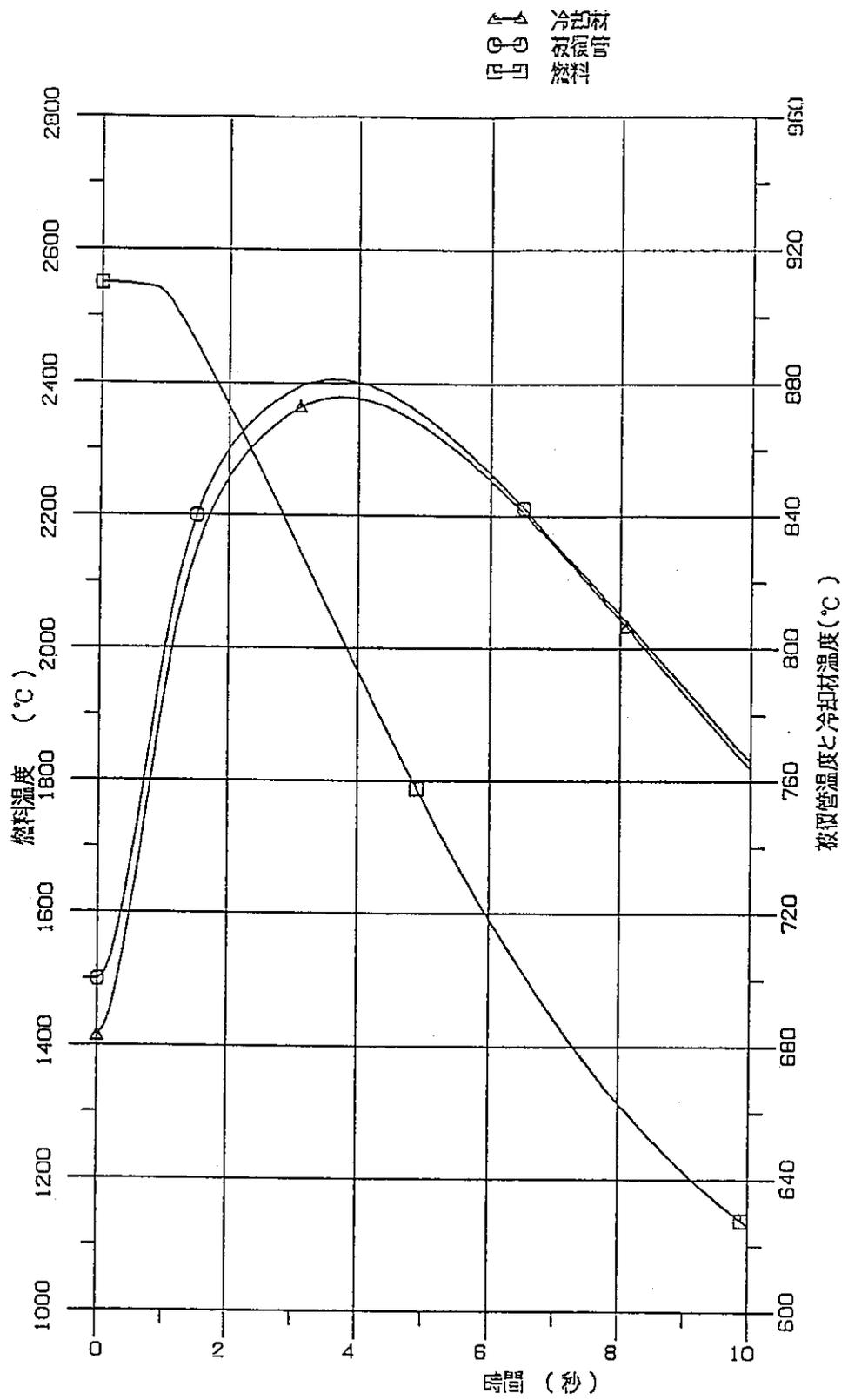


図 5-1 一次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時のC型照射リグの被覆管温度履歴 (I~III型特殊燃料要素)

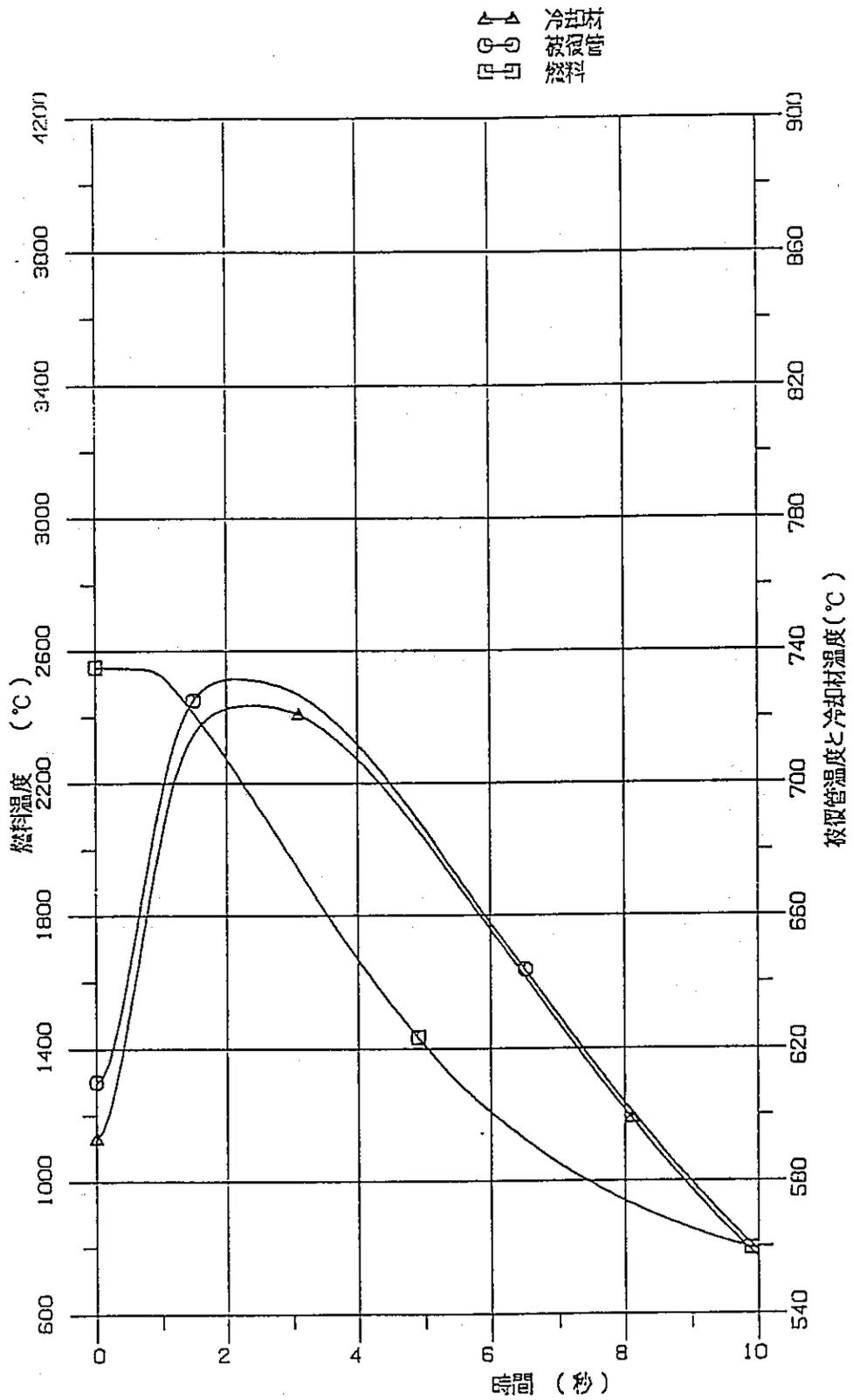


図 5-2 一次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時のC型照射リグの被覆管温度履歴 (IV型特殊燃料要素)

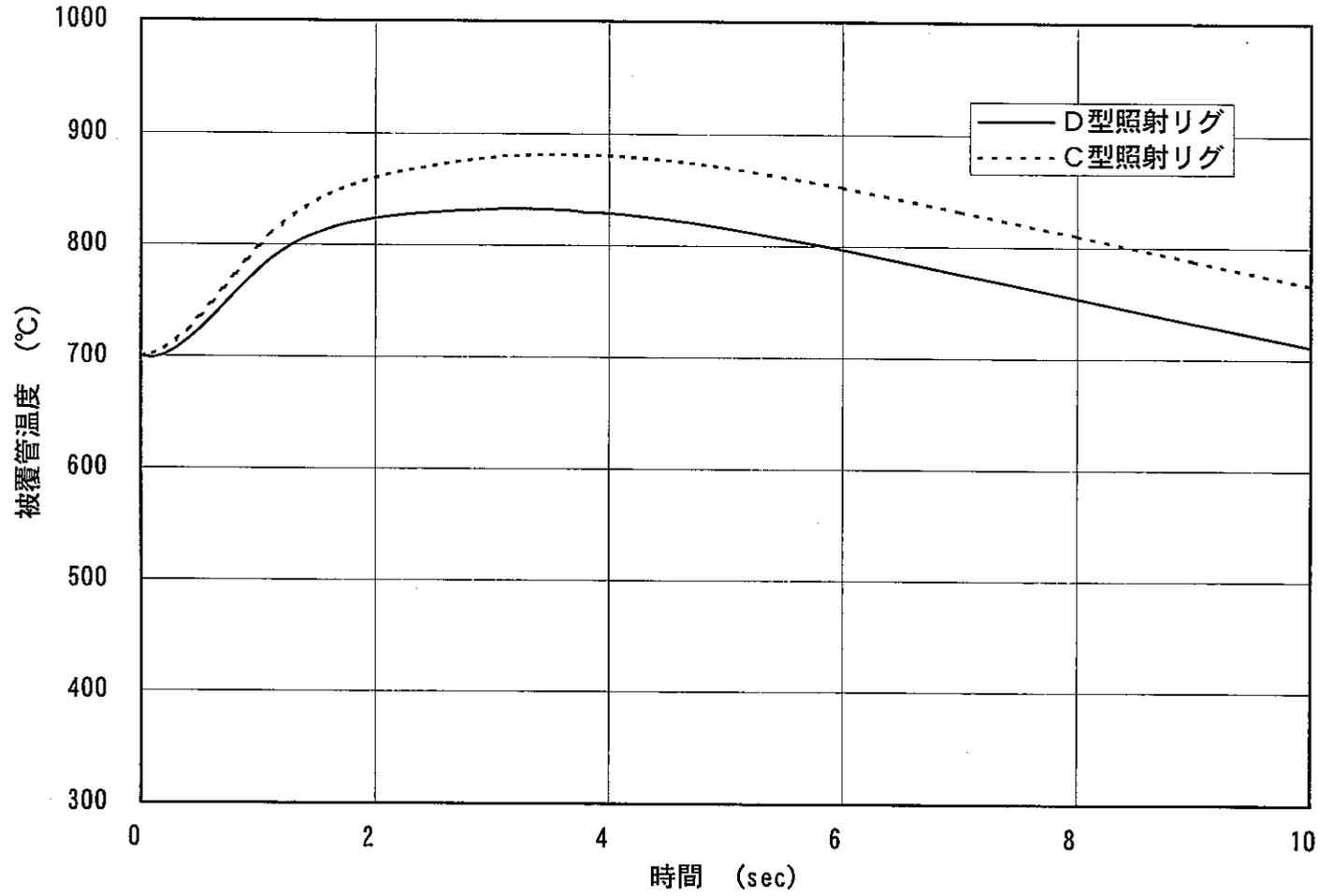


図5-3 1次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時の被覆管温度
(I～Ⅲ型特殊燃料要素、炭化物試験用要素、窒化物試験用要素)

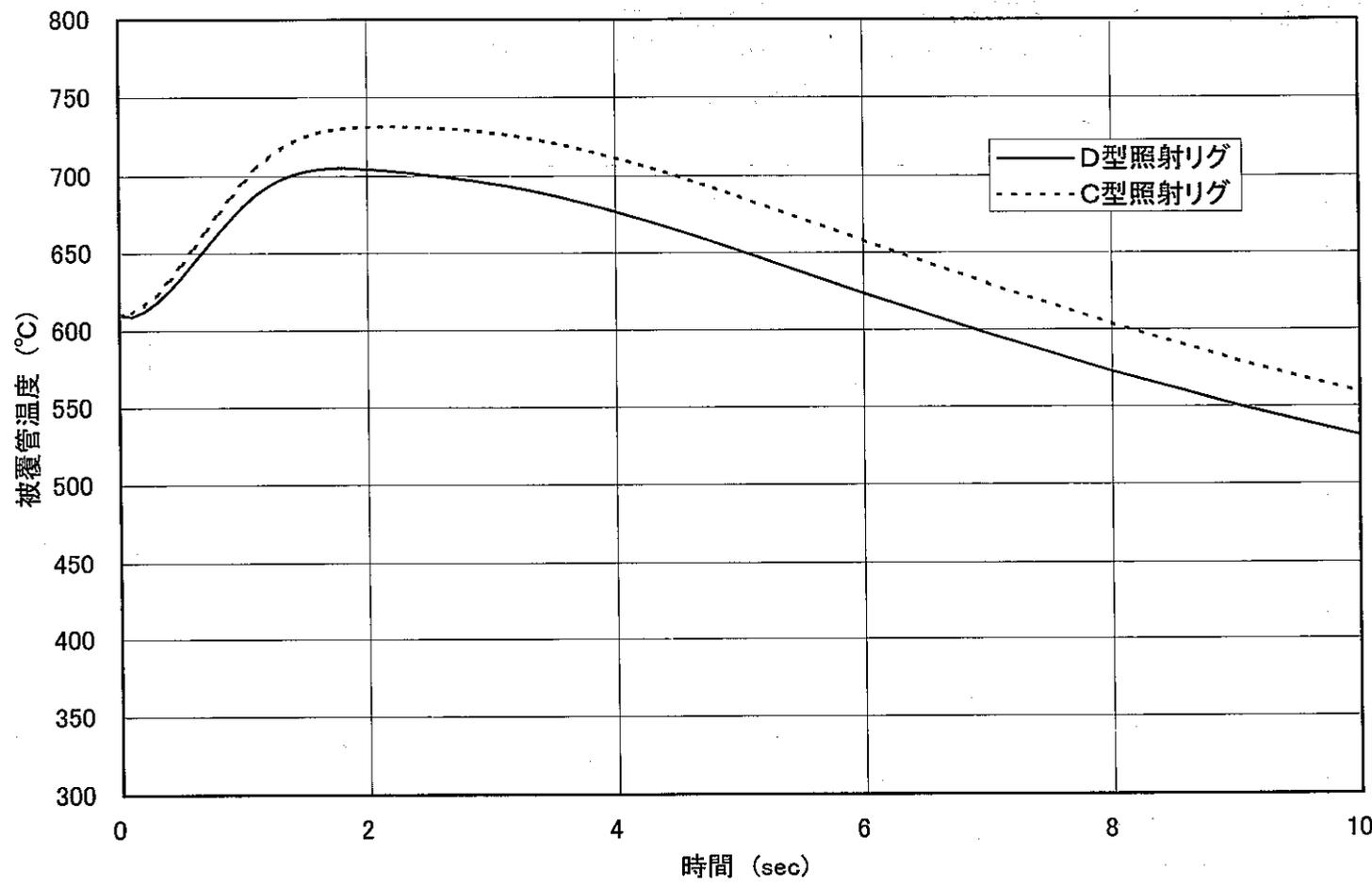


図5-4 1次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時の被覆管温度 (IV型特殊燃料要素)

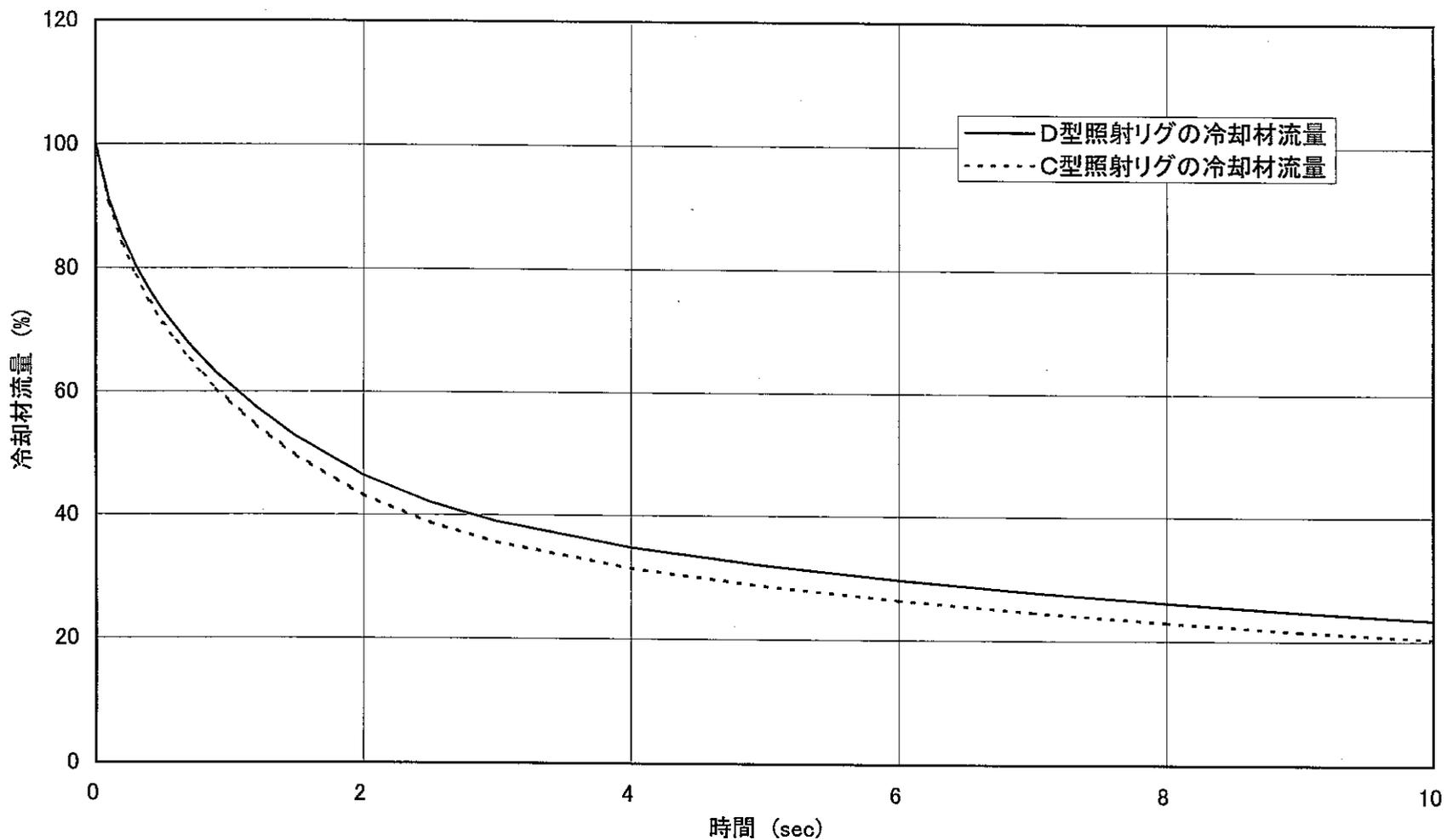


図5-5 1次冷却系主循環ポンプ軸固着事故時の集合体内冷却材流量

6 照射性能予測

6.1 照射温度設定範囲

(1) 設定範囲

D型照射リグの照射温度設定範囲を示す。δ型コンパートメントの冷却材流量設定範囲は、3.4.3項に示す算出結果を使用する。冷却材流量の設定範囲は、以下の通りである。

① 同一コンパートメント仕様時

コンパートメント1本当たりの

冷却材流量設定範囲 : 45~125g/sec

② コンパートメント仕様をパラメータとした時

δ型コンパートメント仕様（集合体内に装填する18本について）

- ・ワイヤスペーサ型及びシュラウド管型を各1本以上使用する。
- ・燃料要素径φ6.5mm及びφ8.5mm用シュラウド管各1本以上使用する。
- ・同一のコンパートメント圧損での冷却材最小流量及び最大流量を各1本以上流す。

コンパートメント1本当たりの

冷却材流量設定範囲 : 27~135g/sec

上記のコンパートメント1本当たりの冷却材流量を流した場合の、オーステナイト系ステンレス鋼製被覆管及びフェライト系ステンレス鋼製被覆管の被覆管最高温度（板厚中心）と冷却材流量の関係を図6.1-1及び図6.1-2に示す。なお、被覆管最高温度（被覆管外径φ6.0mm）と冷却材流量の関係は、線出力をパラメータ（オーステナイト系ステンレス鋼製被覆管：300、400、500、800及び1000w/cm、フェライト系ステンレス鋼製被覆管：300、400及び500w/cm）とし、現行設置許可書に記載の式を用い算出した。

図より、線出力300~1000w/cmのオーステナイト系ステンレス鋼製被覆管の燃料要素を700℃以下（熱的制限値）及び線出力300~500w/cmのフェライト系ステンレス鋼製被覆管を610℃以下（熱的制限値）で照射することが可能である。

(2) 設定誤差

D型照射リグの冷却材流量設計において、当初より見込んでいる集合体構造に起因する冷却材流量設定誤差を基に被覆管温度の設定誤差範囲を算出した。なお、ここでは保守側に集合体全体の冷却材流量設定誤差を δ 型コンパートメントの流量誤差とした。

① 冷却材流量設定誤差

D型照射リグの冷却材流量設計において、当初より見込んでいる集合体構造に起因する冷却材流量設定誤差は、圧力損失特性式の誤差、熱膨張による誤差及び設計に伴う誤差である。

圧力損失特性式の誤差は、フィッティング式と実験値の差及び測定器の精度に係るものである。熱膨張による誤差は、実機は熱膨張により水流動試験時に比べ流路断面積及びオリフィス径が変化するので、この条件の違いに伴うものである。熱膨張による誤差は、実機は熱膨張により水流動試験時に比べ流路断面積及びオリフィス径が変化するので、この条件の違いに伴うものである。設計に伴う誤差は、各部材の製作公差や設計計算の誤差等によるものである。

流量設定誤差の算出方法の詳細及びB型照射リグ及びD型照射リグの集合体構造に起因する冷却材流量設定誤差を表 6.1-1 及び表 6.1-2 に示す。

なお、D型照射リグは、これらの誤差がB型照射リグの範囲と同じになるよう、圧力損失特性式の誤差については水流動試験条件やオリフィス段数等の構造条件を、熱膨張による誤差及び設計に伴う誤差についてはオリフィス段数等の構造条件を定めている。

② 被覆管温度設定誤差

被覆管温度は、冷却材流量に比例するため、冷却材流量の設定誤差による被覆管温度の変動は、集合体下端から上部までの温度上昇に対して冷却材流量設定誤差を掛けたものとなる。従って、 δ 型コンパートメント装填時の冷却材流量設定誤差は、 $\pm 6.0\%$ であることから被覆管温度の設定誤差も $\pm 6.0\%$ となる。冷却材設定誤差を見込んだ被覆管最高温度と冷却材流量の関係を図 6.1-3 及び図 6.1-4 に示す。

表6.1-1 集合体構造に起因する冷却材流量設定誤差の算出方法

	算出方法
<p>圧力損失特性式の誤差</p>	<p>フィッティング式と実験値の圧力損失係数の誤差 β は、以下の標準偏差による誤差算出の一般式を用い求めた。下式の β では、1σ の標準偏差を取って誤差を平均化しているため、実験値に含まれる測定器の精度等が考慮されているが、保守側に測定器の校正時に求めた精度 γ を加える。圧力損失特性式の誤差 α は、誤差伝ばんの法則に従い、β と γ の二乗平均和で算出した。</p> $\alpha = \sqrt{\beta^2 + \gamma^2}$ $\beta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i}{X_i}\right)^2}{n}} \times 100$ <p> α : 圧力損失特性式の誤差 β : フィッティング式と実験値の誤差 γ : 測定器の精度 V_i : フィッティング式による値と実験値の差 X_i : 実験値 n : データ個数 </p>
<p>熱膨張による誤差</p>	<p>オリフィス部及びバンドル部の熱膨張時（コンパートメント最高温度 700℃、燃料要素被覆管最高温度 700℃）と、常温時の流路断面積の差（オリフィス部 1.9%、バンドル部 2.7%）より冷却材流速の誤差（4.0%）を算出した。集合体の誤差は、誤差伝ばんの法則より各部の誤差の二乗平均和で求めた。</p>
<p>設計に伴う誤差</p>	<p>オリフィス部及びバンドル部の設計寸法と設計公差の最大値の流路断面積の差（オリフィス部 1.7%、バンドル部 3.3%）より冷却材流速の誤差（4.0%）を算出した。集合体の誤差は、誤差伝ばんの法則より各部の誤差の二乗平均和で求めた。</p>

表6.1-2 集合体構造に起因する冷却材流量設定誤差（最大）

	B型照射燃料集合体	D型照射燃料集合体	
		δ型コハ ^o -トメント 装填時	γ型コハ ^o -トメント 装填時
圧力損失特性式の誤差	3.0%	2.0%	3.0%
熱膨張による誤差	4.0%	4.0%	4.0%
設計に伴う誤差	4.0%	4.0%	4.0%
合計	7.0%	6.0%	7.0%

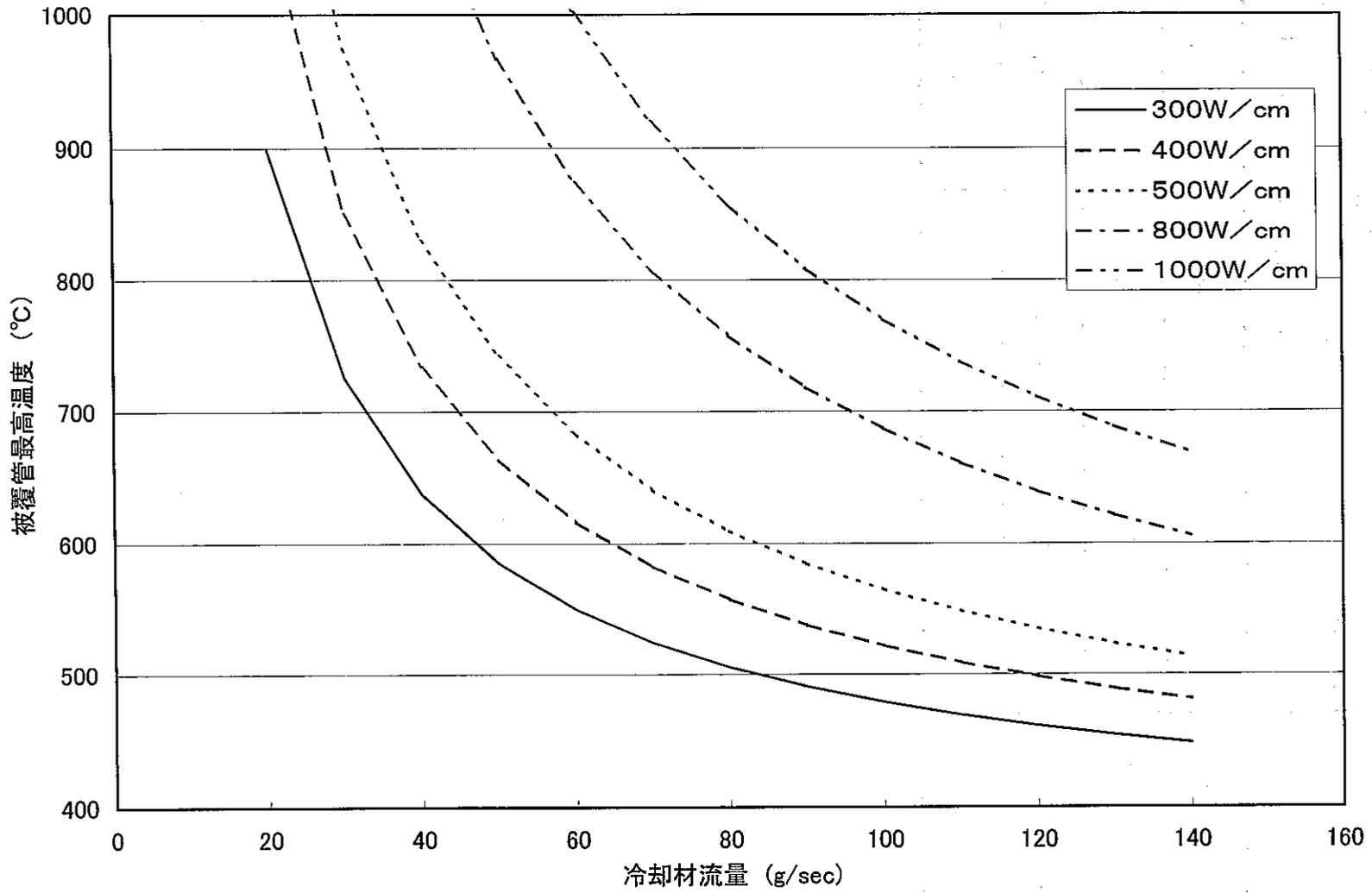


図6.1-1 被覆管最高温度(板厚中心)と冷却材流量の関係 (オーステナイト系ステンレス鋼)

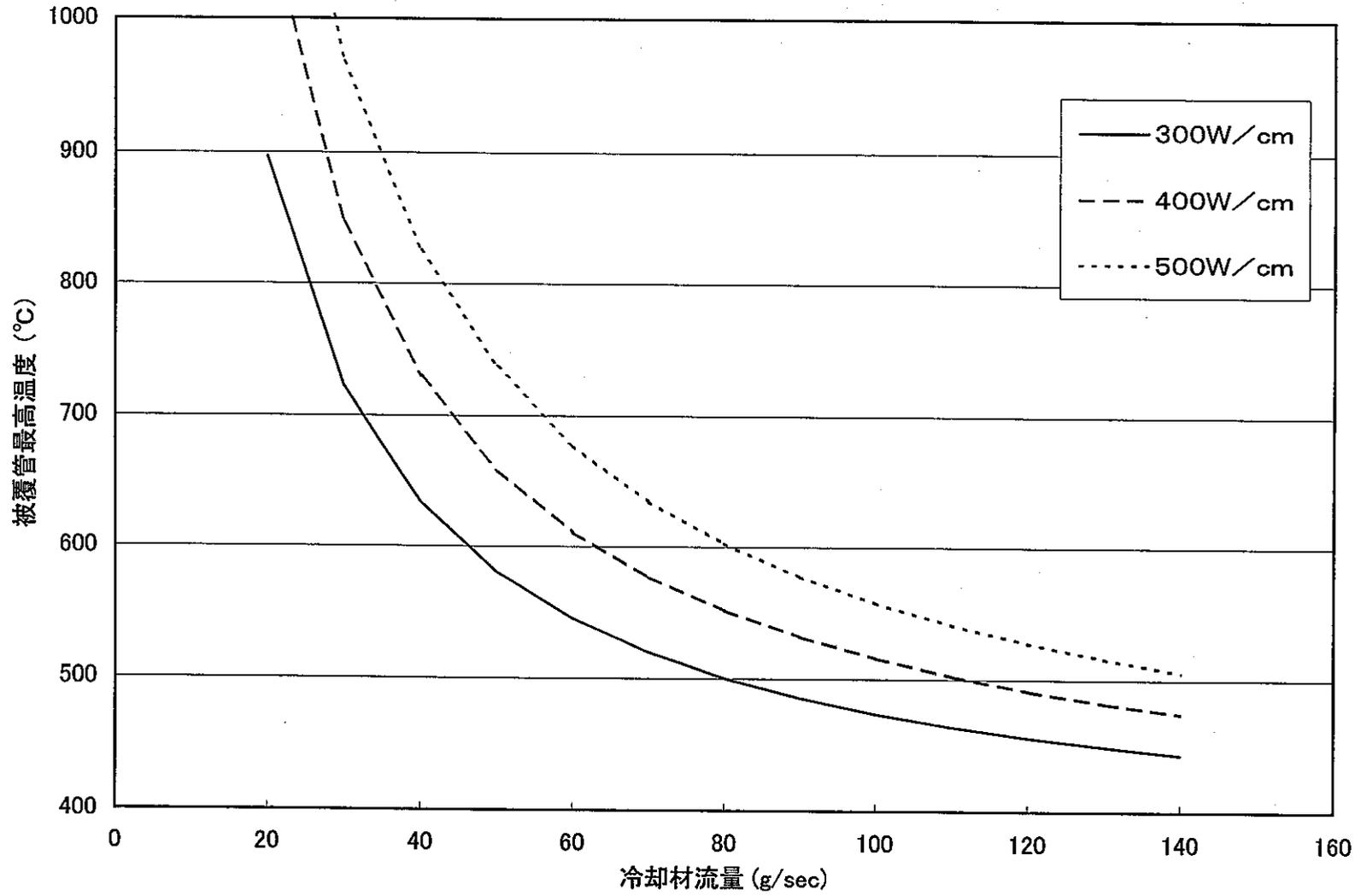


図6.1-2 被覆管最高温度(板厚中心)と冷却材流量の関係 (フェライト系ステンレス鋼)

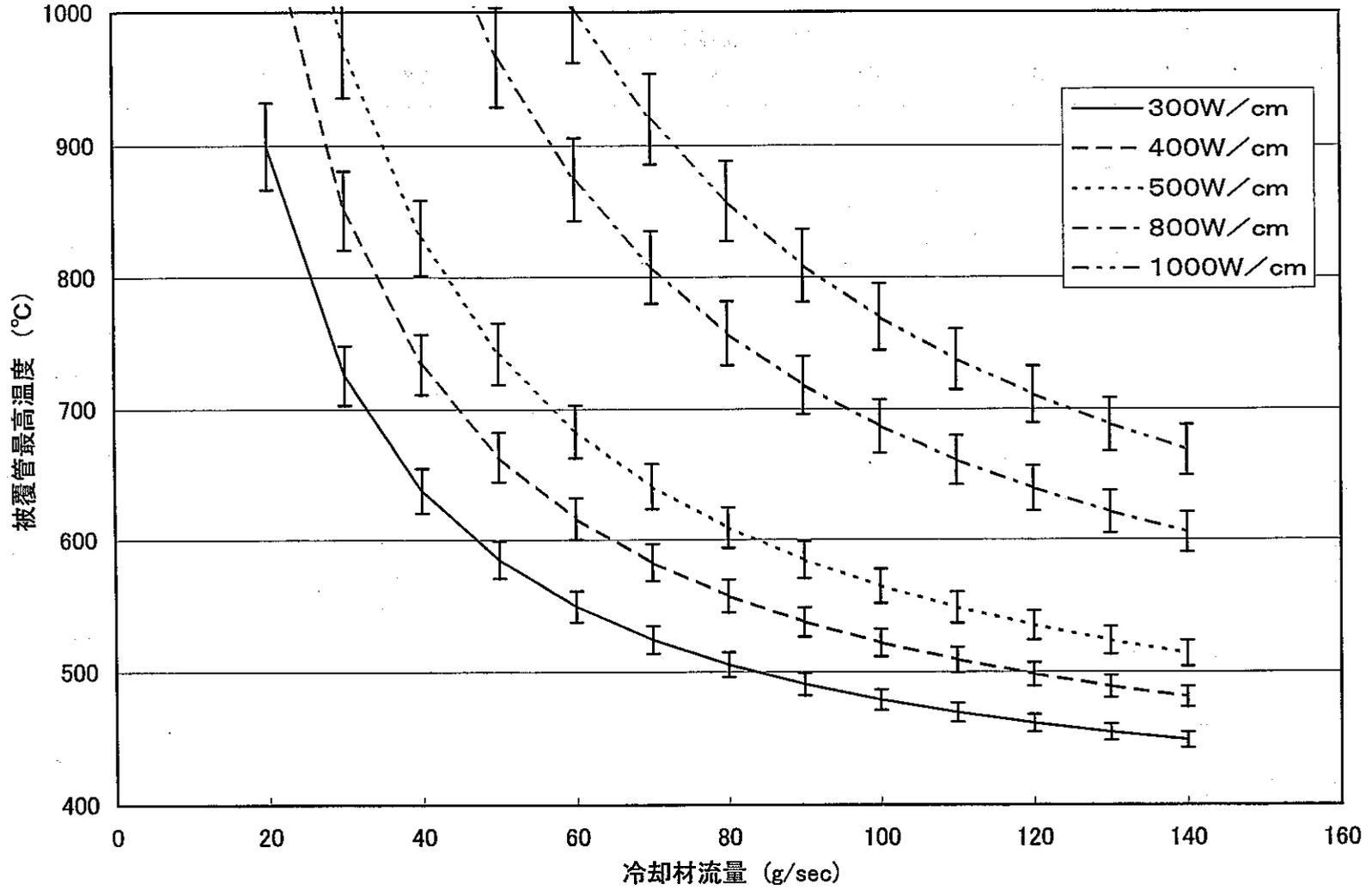


図6.1-3 冷却材流量設定誤差を含む被覆管最高温度と冷却材流量の関係 (オーステナイト系ステンレス鋼)

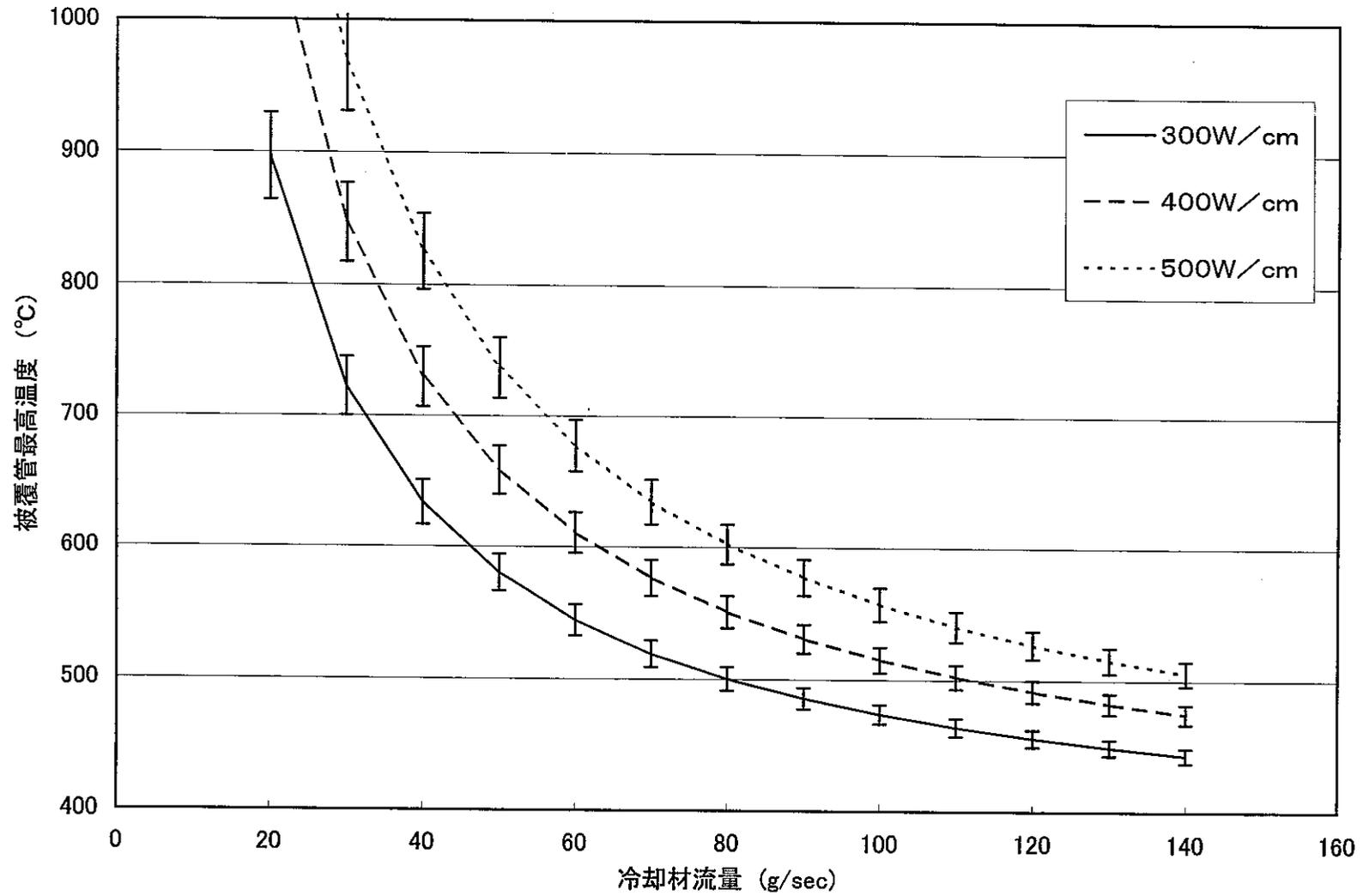


図6.1-4 冷却材流量設定誤差を含む被覆管最高温度と冷却材流量の関係 (フェライト系ステンレス鋼)

6.2 モニタ設計

D型照射リグには、照射試験終了後に燃料要素の照射温度を確認するためのTED（熱膨張差利用温度モニタ）及び中性子照射量を確認するためのドシメータ^[10]を装填する構造を有している。TED及びドシメータの構造を図6.2-1及び図6.2-2に示す。TED温度モニタは、各コンパートメントの上部空間の専用ホルダ内に1個装填することが可能である。そのため集合体内に最大18個装填することが可能である。

ドシメータは、B型照射リグ同様タイロッド内に装填するフラックスモニタ管内に装填することが可能である。ドシメータは、通常集合体内に3個装填するが、必要に応じて装填数を変えることが可能である。

6.2.1 温度モニタ装填部

TEDは、燃料要素の被覆管最高温度を推定するために装填する。

δ 型コンパートメントでは、コンパートメントの径が小さく被覆管の径方向にTEDを配置する寸法的余裕がないことから、燃料要素上部の空間にTEDを装填する。TEDは、温度モニタホルダ内に格納されコンパートメントの所定の位置に配置される。温度モニタホルダの構造及び設置位置を図6.2-3及び図6.2-4に示す。

コンパートメント内の冷却材流路は、主にシュラウド管内のみであり、シュラウド管外面－コンパートメント内管の間には僅かにリーク流量がある。また、コンパートメント上部までコンパートメント外管と内管の間の断熱層がある。このため、コンパートメント内部を流れる冷却材は、ほぼ最高温度のまま温度モニタホルダ装荷位置を通過する。

TEDの照射後試験により冷却材の最高温度近傍の温度が測定できるため、燃料要素1本毎の被覆管最高温度を推定することが可能である。

6.2.2 ドシメータ装填部

ドシメータは、照射試験期間中の集合体への中性子照射量を測定するために装填する。コンパートメント内にドシメータを装填する空間的余裕がないことから、タイロッド内に装填したフラッ

クスモニタ管内に装填し、照射リグの中性子照射量を測定する。

ドシメータは通常、軸方向位置として炉心中心、燃料スタックの両端に装填する。フラックスモニタ管の構造及び装填位置を図 6.2-5 及び図 6.2-6 に示す。

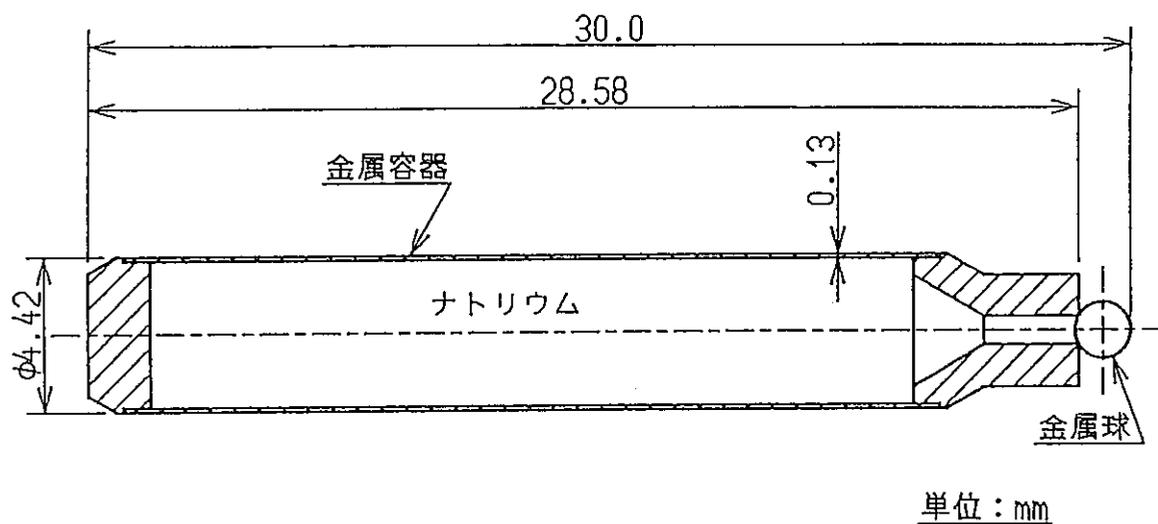
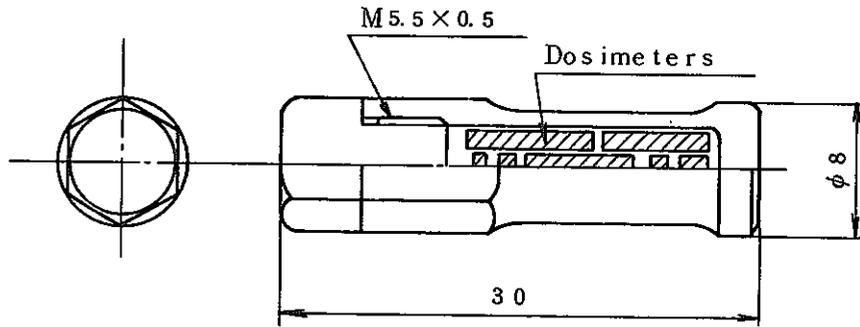


図 6.2-1 TEDの構造



核物質 ドシメータ	²³² Th ²³⁵ U ²³⁸ U ²³⁷ Np
非核物質 ドシメータ	Nb Fe Cu Ni Co-Al Ta-V Ti Sc

図6.2-2 ドシメータの構造

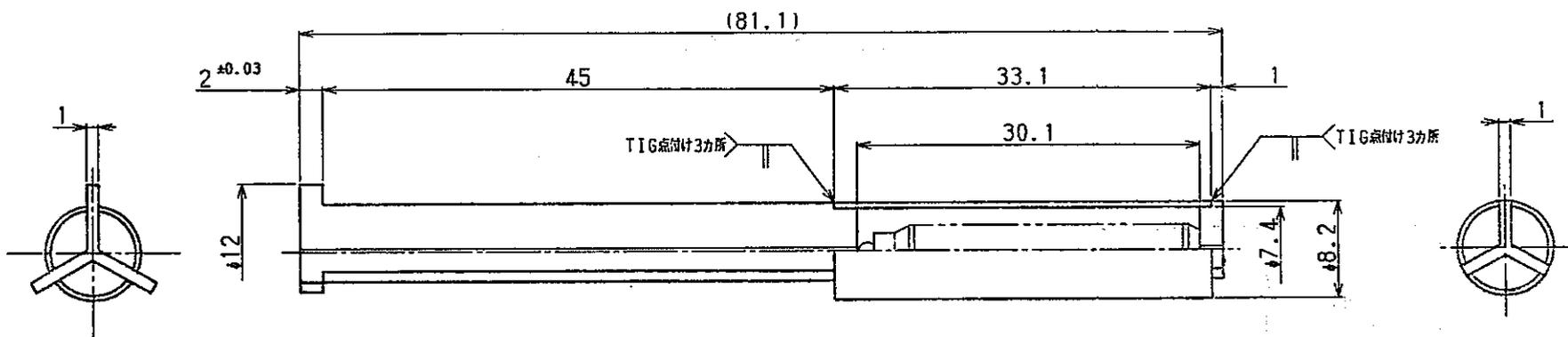


図 6.2-3 温度モニタホルダーの構造

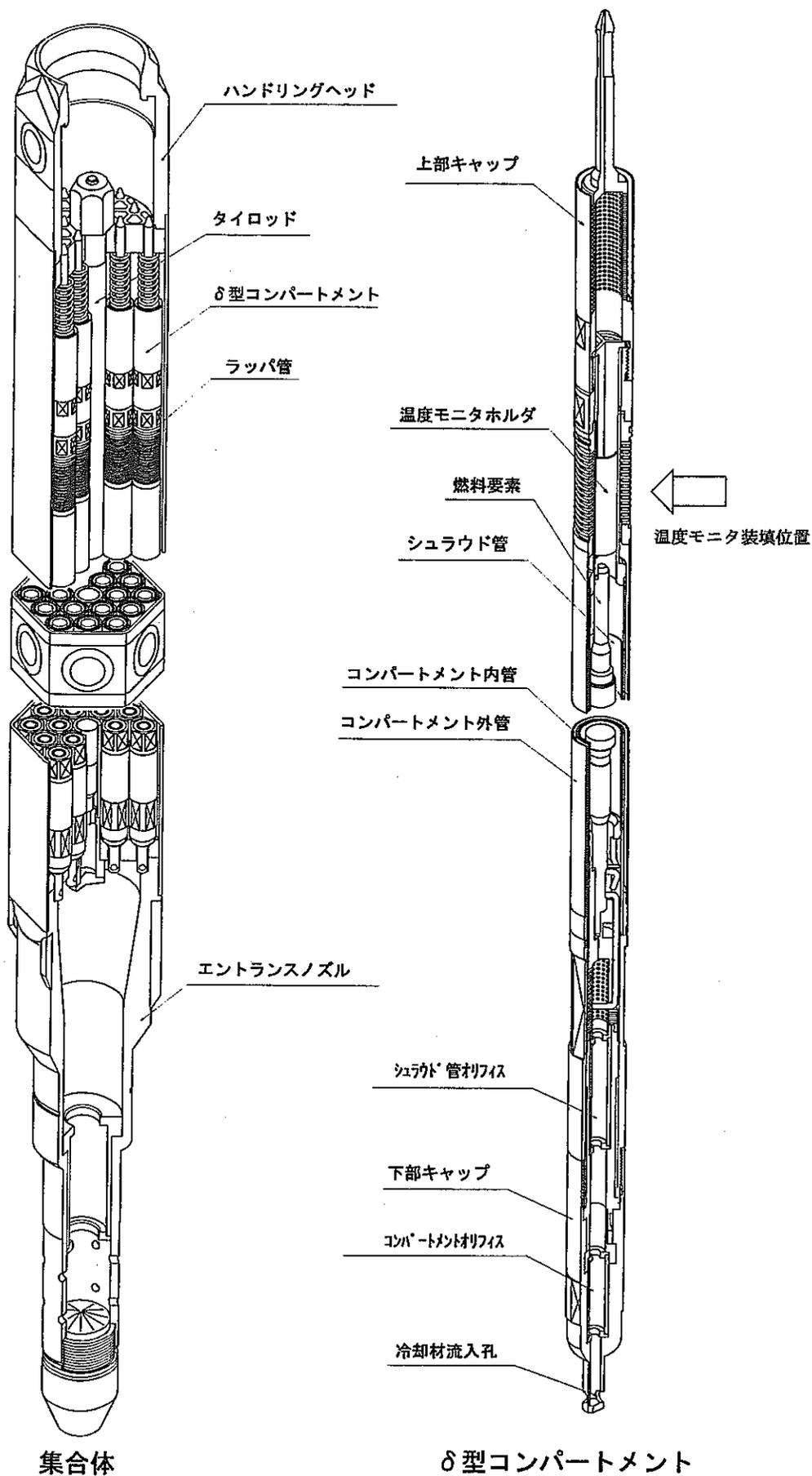


図6.2-4 TED温度モニタの装填位置

符号 ITEM	名 称 DESCRIPTION	数量 NO.	材 料 MATERIAL	備 考 NOTE
1	F/M 下部端栓	1	SUS316	SKA64-181-4024
2	F/M 上部端栓	1	SUS316	-4025
3	フラックスモニタ素管	1	SUS316	-4026

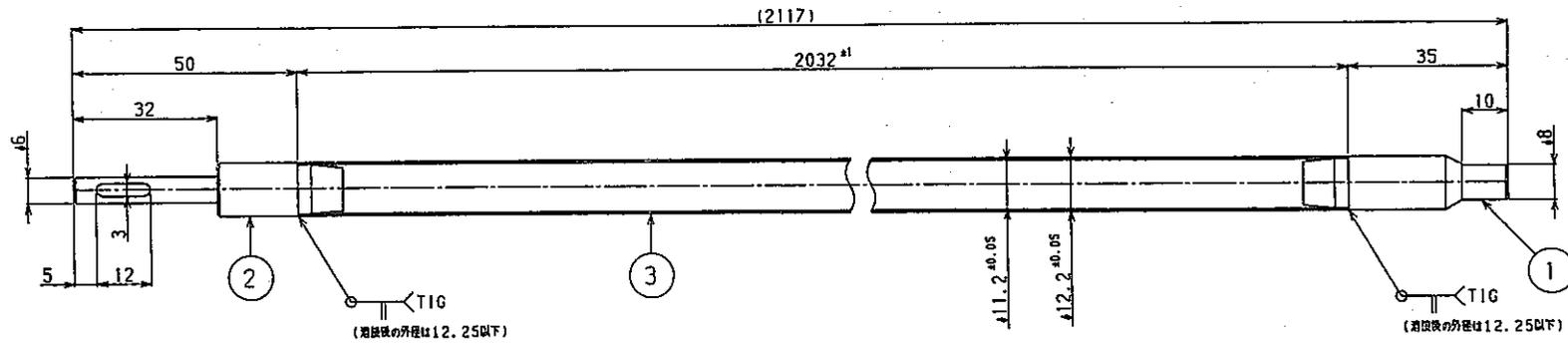


図 6.2-5 フラックスモニタ管の構造

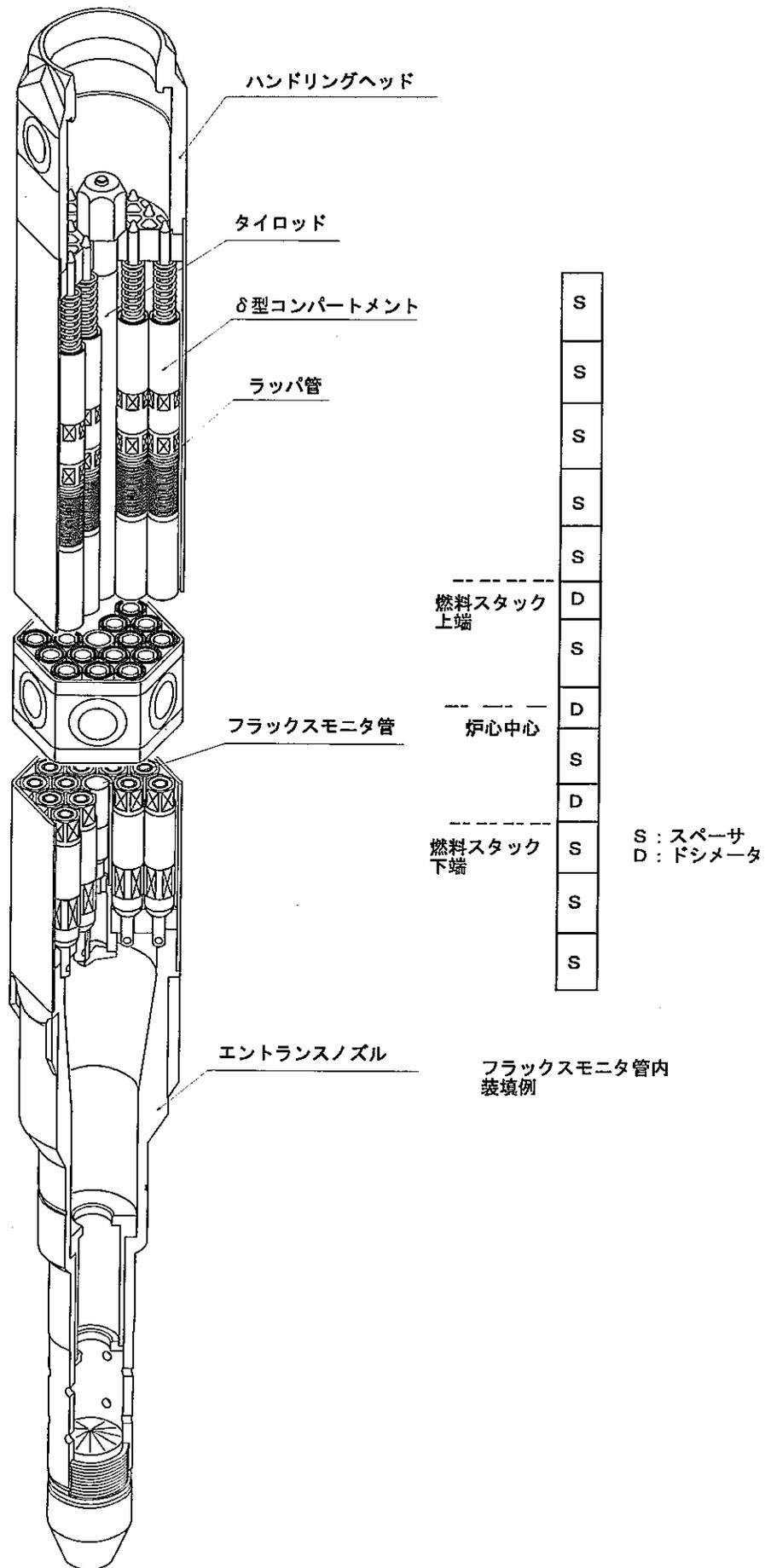


図6.2-6 フラックスモニタ管及びモニタの装填位置

7 おわりに

D型照射リグの開発では、平成6年度から平成10年度にかけて基本設計、詳細設計及び各種試験を行い、従来の照射リグの機械設計方針及び熱設計方針のもと、2章に示す設計条件を満足する構造を明らかにした。

これより、高速実験炉「常陽」において、D型照射リグを用いた照射試験を行うことが可能である。

8 今後の課題（作業）

8.1 薄肉溶接部の強度確認

δ 型コンパートメントには、シュラウド素管（肉厚 0.3mm）やコンパートメント外管（肉厚 0.4mm）等のステンレス製の薄肉円筒管が使用されている。これらの薄肉管同士の溶接接合部では、溶接条件に注意を払う必要があり、また、溶接条件の変化により部材強度に影響が出る可能性がある。そのため、溶接条件をパラメータとした引張強度測定試験を行い、最適な溶接条件を確認しておく必要がある。

なお、薄肉管の溶接性に関しては、試作及び水流動試験体の製作を通して確認しているため、引張強度は実機部材製作時の溶接施工試験で確認する予定である。

8.2 製作公差の影響を受けにくいオリフィス構造の検討

3.4 節水流動試験の項で述べたが、D型照射リグの流量配分設計では、オリフィスの製作方法が冷却材の流量変動に与える誤差がある。オリフィス設定の上で見込まれる誤差要因として、オリフィスの製作公差及び面取り方法がある。検討では冷却材流量変動誤差約 4.0%を見込んでいるがオリフィス製作方法によっては、誤差を低減する可能性がある。そのため照射精度向上の観点から、オリフィスの公差及び面取り方法をパラメータとした検討を行う予定である。

8.3 再装荷のための取扱試験

D型照射リグは、継続照射試験のため照射後試験施設での再組立を考慮した設計を行っている（3.3.1 節参照）。現在段階では、D型照射リグの再組立用治具の完成する平成 12 年度頃に照射後試験施設において、水流動試験体を用い再組立時の取扱性確認試験を実施する予定である。

8.4 ディンプル先端－燃料要素間のギャップの製作管理方法

現在、シュラウド管のディンプルは、3カ所のディンプル先端の内接円の径で製作管理している。3.6 節の連続流水試験の項で述べたが、試験体製作時にシュラウド管のディンプル先端－燃料要素間のギャップを 0.1mm（製作公差の目標値+0.05mm、-0mm）として製作する予定であったが、実際に製作した試験体の中に製作公差を大きく超えるものが含まれていた。

そのため、実機製作時には、ディンプル先端－燃料要素間のギャップ幅を目標値内に収めるための製作管理方法を検討する必要がある。

9 謝辞

本報告書の作成にあたって、照射施設運転管理センター内の関係者と、三菱重工業（株）、新型炉技術開発（株）、ニュークリアデベロップメント（株）など、多くの方々の多大な協力、支援を得た。

特に δ 型コンパートメントの詳細構造設計においては、三菱重工業（株）の小倉理志氏、ニュークリアデベロップメント（株）の伊藤邦博氏、小山好一氏より、また、集合体内の流動設計では、ニュークリアデベロップメント（株）の小林裕氏より多くの指導や助言を頂いた。

ここに深く感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] 動力炉・核燃料開発事業団, 大洗工学センター「常陽」設置変更許可申請書(高速実験炉設置変更), 平成6年1月27日 変更その15まで, (1994)
- [2] 野口好一他, 照射試験用熱膨張差温度モニタ(TED)の製作法の開発, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN9410 98-35, (1998)
- [3] I. E. Idelchik, HAND BOOK OF HYDRAURIC RESISTANCE 3rd Edition, Diagram4-15
- [4] 日本機械学会編, 機械工学便覧, 改訂第6版, P. 8-14(1977)
- [5] 日刊工業新聞社, 工業計測技術大系2 流量(上), P. 123(1964)
- [6] I. E. Idelchik, HAND BOOK OF HYDRAURIC RESISTANCE SectionIV, Diagram4-14
- [7] M. P. PAIDOUSSIS, A REVIEW OF FLOW-INDUCED VIBRATIONS IN REACTORS AND REACTOR COMPONENTS, Nuclear Engineering and Design 74, P. 31-60(1982)
- [8] 日本機械学会, 機械工学における流体関連振動, P. 109(1980)
- [9] 日本機械学会, 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗, P. 5-6(1979)
- [10] Feng, I. M. and Uhlig, H. H., J. Appl. Mech. 21, P. 395 (1954)
- [11] 動力炉・核燃料開発事業団, 高速実験炉 設計及び工事の方法の認可申請書 本文及び添付書類 (移行炉心及びMK-III炉心燃料集合体の製作), (1995)
- [12] 動力炉・核燃料開発事業団, 高速実験炉 設計及び工事の方法の認可申請書 本文及び添付書類 (試験用集合体(B型試験用集合体)の製作), (1993)
- [13] Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation Oarai Engineering Center, Structural Design Guide for Class 1 Piping Bellows Expansion Joints of Fast Breeder Reactor for Elevated Temperature Service (Draft) -Revision1-, PNC ZN9410 89-097, (1989), 邦訳版あり
- [14] 動力炉・核燃料開発事業団, 解説 高速原型炉燃料集合体及び炉心構成要素設計用物性値集, PNC ZN241 85-23(2), P. 7-15(1985)
- [15] 機械設計便覧編集委員会編, 機械設計便覧, 丸善株式会社, P. 1663-1666(1980)
- [16] 佐々木誠、鈴木惣十, 「常陽」ドシメトリー試験の計画と現状, 動力炉技報, No. 38, P. 72-96(1981)