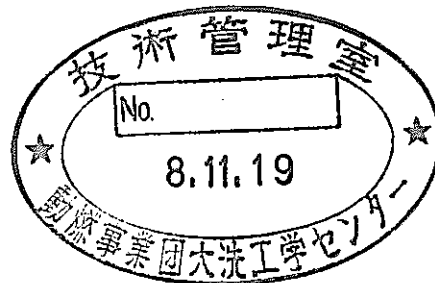


三 月 公 更	
№	—
決 定 日 付	平成 13 年 7 月 31 日

新型転換炉実規模圧力管破断試験

— 昭和63年度成果 —

1996年8月



動力炉・核燃料開発事業団
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ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松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, 319-1184
Japan

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

ては複製、
理して下



社 内 資 料
PNC TON9450 96-035
1 9 9 6 年 8 月

新型転換炉実規模圧力管破断試験 —昭和63年度成果—

川又 伸弘*, 望月 弘保*

要 旨

ATR実証炉の圧力管集合体は、技術的には破断が起こるとは考え難いが、圧力管型炉の安全裕度を確認するために圧力管破断試験を行い、カランドリア管の健全性並びに燃料冷却性について評価する。また、圧力管及びカランドリア管の同時破断試験を行い、隣接チャンネル及びカランドリアタンクの健全性並びに燃料冷却性について評価し、圧力管破断事故評価手法を確立する。

63年度は、圧力管破断試験装置の据付と、流動特性試験を実施して、圧力管破断評価コードの検証を行った。また、圧力管破断時の燃料冷却性並びに圧力管—カランドリア管同時破断時の燃料冷却性に関する予備解析作業を行った。

① 圧力管破断試験装置の据付

圧力管破断事象を想定し、圧力管が破断した場合のカランドリア管健全性、隣接管等の健全性及び燃料冷却性を評価するために、前年度製作した実機模擬試験装置の搬入・据付工事及び試運転を実施した。

また、同時破断試験に使用する試験体を製作した。

② 圧力管破断試験

流動特性試験を実施し圧力管破断時のアニュラス部の冷却材圧力、温度の挙動、カランドリア管へ熱衝撃、衝突等カランドリア管にかかる負荷挙動を明らかにした。その結果、支配的な負荷は内圧上昇と衝突力であった。また、それぞれの負荷の最大値が生じる時間は異なっているので、別々に評価し重ね合わせることができる。

また、実機材料を用いたカランドリア管健全性試験に先立ち実機材料バースト試験を実

* 大洗工学センター 安全工学部 原子炉工学室

施し、圧力管破断時の挙動、及び破断後開口形状を確認した。

③ 検証解析

流動解析コード及び構造解析コードを用いて、本年度実施した流動特性試験の実験解析を行い評価モデルの検討を行い、今後のモデル改良の方向付けを行った。

また、サブチャンネル解析コード及び汎用熱流動解析コード等を用いて、圧力管破断試験及び同時破断試験の燃料冷却評価に必要な予備解析を実施した。

目 次

要 旨	I
目 次	III
表リスト	VII
図リスト	IX
1. 緒 言	1
2. 圧力管破断試験装置の据付	
2.1 はじめに	5
2.2 実施範囲	5
2.3 設計条件	5
2.3.1 試験目的	5
2.3.2 試験装置の実機模機に対する考え方	6
2.3.3 試験装置の概要	7
2.3.4 設計条件	8
2.4 実施結果	11
2.4.1 据付工事	11
2.4.2 計測器の購入	14
2.4.3 同時破断試験用試験体の製作	15
2.5 試験検査	16
2.5.1 試験検査項目	16
2.5.2 試験結果	17
2.6 まとめ	17
2.7 参考文献	17

3. 圧力管破断試験	47
3.1 流動特性試験	47
3.1.1 概要	47
3.1.2 設計条件	47
3.1.3 試験装置	48
3.1.4 試験計測	49
3.1.5 データ収集	50
3.1.6 試験手順	50
3.1.7 試験結果	51
3.1.8 考察	54
3.2 実機材料圧力管バースト試験	57
3.2.1 概要	57
3.2.2 試験条件	57
3.2.3 試験装置	58
3.2.4 試験計測	58
3.2.5 データ収集	59
3.2.6 試験手順	59
3.2.7 試験結果	59
3.2.8 考察	60
3.3 評価	61
3.3.1 流動特性試験	61
3.3.2 実機材圧力管バースト試験	62
4. 実験解析	
4.1 流動解析	167
4.1.1 概要	167
4.1.2 流動特性試験装置	168
4.1.3 試験条件	168
4.1.4 解析条件	168
4.1.5 解析結果	171

4.1.6	考 察	173
4.1.7	評 価	174
4.2	構造解析	174
4.2.1	概 要	174
4.2.2	試験装置及び試験条件	175
4.2.3	解析条件	175
4.2.4	解析結果	175
4.2.5	考 察	176
4.2.6	評 価	177
5.	圧力管破断時の燃料冷却性予備解析	211
5.1	はじめに	211
5.2	想定する圧力管破断事象	212
5.3	解 析	213
5.3.1	チャンネル流量解析	213
5.3.1.1	解析コード	213
5.3.1.2	解析体系	213
5.3.1.3	解析モデル	214
5.3.1.4	解析条件	214
5.3.1.5	解析結果と考察	216
5.3.2	出力分布解析	218
5.3.2.1	解析コード	218
5.3.2.2	解析体系	218
5.3.2.3	解析モデル	219
5.3.2.4	解析条件	219
5.3.2.5	解析結果と考察	220
5.3.3	サブチャンネル解析	222
5.3.3.1	解析コード	222

5.3.3.2	解析体系	222
5.3.3.3	解析モデル	223
5.3.3.4	解析条件	224
5.3.3.5	感度解析	226
5.3.1.6	解析結果と考察	226
5.4	まとめ	232
5.5	参考文献	233
6.	圧力管カランドリア同時破断時の燃料冷却予備解析	
6.1	まえがき	289
6.2	解析手法	290
6.2.1	事故の想定	290
6.2.2	解析条件	290
6.2.3	解析条件	291
6.2.4	解析体系	292
6.3	解析結果	294
6.3.1	ブローダウン解析	294
6.3.2	ホットチャンネル解析	294
6.3.3	水平断面流速分布計算	295
6.3.4	燃料ヒートアップ解析	295
6.4	解析のまとめ	297
6.5	参考文献	298
6.6	付 録	299
6.6.1	付録I HEATUP-V/mod5コード改良内容	299
6.6.2	付録II EUREKA-ATRコードによる圧力管破断事故予備解析…	320
7.	結 論	405

表リスト

表1-1	圧力管破断事故確証試験全体計画	3
表2.2-1	圧力管破断確証試験全体工程	19
表2.3.2-1	試験装置及び試験条件の考え方	20
表2.3.2-2	圧力管破断時のカランドリア管の健全性を評価する上で 重要な負荷要素と計測量の関係	21
表2.3.2-3	同時破断時のカランドリア構造物の健全性を評価する上で 重要とされる負荷要素と計測量の関係	22
表2.3.3-1	圧力管破断試験装置と実証炉実機との比較	23
表2.3.4-1	圧力管破断試験における計測量	24
表2.4.1-1	高速データ収集システムのデータ収集条件	25
表2.4.2-1	計測器一覧表	26
表3.1.1-1	カランドリア管健全性を評価する上で重要な負荷要素と 影響因子及び計測項目	66
表3.1.2-1	冷却材条件比較表	65
表3.1.2-2	試験体仕様比較表	67
表3.1.4-1	検出器仕様一覧表	68
表3.1.5-1	各信号の収集速度	69
表3.2.4-1	検出器仕様	78
表3.2.5-1	計測項目と計測条件	78
表3.2.7-1	実機材圧力管バースト試験結果	79
表3.2.7-2	開口部寸法測定結果(第1回バースト試験)	80
表3.2.7-3	開口部寸法測定結果(第2回バースト試験)	81
表4.1.4-1	装置寸法と解析モデル寸法の比較	179
表4.1.6-1	実験と解析の比較	180
表4.1.6-2	配管圧力損失係数	181

表4.2.3-1	流動特性試験構造物物性値	199
表4.2.4-1	歪値の試験と解析の比較	182
表4.2.4-2	圧力管破断後のカランドリア管歪変化の試験と解析比較	208
表4.2.4-3	破断後の変形時刻暦図	209
表5.3.1-1	主な解析条件（電発殿提示）	236
表5.3.1-2	アニュラス部流路条件（電発殿提示）	237
表5.3.1-3	流路条件	237
表5.3.2-1	燃料集合体内局所出力分布の解析ケース	248
表5.3.2-2	破断チャンネル LAYMON B定数作成のための解析ケース	249
表5.3.2-3	破断チャンネル出力分布の解析ケース	250
表5.3.2-4	圧力管破断時の燃料棒各層での局所出力最大値	251
表5.3.2-5	圧力管破断時の出力ピーキング	252
表5.3.3-1	解析条件及び解析結果一覧表：その1	255
表5.3.3-2	解析条件及び解析結果一覧表：その2	256
表6.2-1	出力条件	327
表6.2-2	ホットチャンネル解析用形状データ（ボリューム）	328
表6.2-3	ホットチャンネル解析用形状データ（ジャンクション）	329
表6.2-4	熱伝達モデル	330
表6.3-1	各燃料位置における水平方向流速比	331
表6.3-2	最大流速と破断放出流速度	332
表6.3-3	水平流速分布がPCTへ与える影響（燃料ヒートアップ解析）	333

図リスト

図1-1	圧力管破断検討フロー	4
図2.3.2-1	ポイズン急速注入実験結果	27
図2.3.3-1	圧力管破断試験装置フローシート	29
図2.3.3-2	カランドリアタンク配置概念図	30
図2.3.3-3	昇温・昇圧工程概念図	31
図2.3.4-1	信号伝送系統	32
図2.3.4-2	モニター設備概略フローシート	33
図2.3.4-3	内圧上昇試験用試験体組立図	34
図2.3.4-4	防振板（試験体部）組立図	35
図2.3.4-5	実証炉圧力管組立図	36
図2.3.4-6	縦弾性係数の試験結果	37
図2.3.4-7	同時破断時燃料冷却性試験用圧力管	38
図2.3.4-8	加熱模擬燃料集合体	39
図2.4.1-1	カランドリアタンク形状	40
図2.4.1-2	高速データ収集システムの構成	42
図2.4.1-3	データ収集処理機能	43
図2.4.1-4	データ収集の概念	43
図2.4.2-1	モニターカメラ配置図	44~45
図3.1.2-1	流動特性試験用試験体組立図	83
図3.1.2-2	圧力管破断用スリット詳細	84
図3.1.3-1	圧力管破断試験装置フローシート	85
図3.1.3-2	圧力管破断試験装置フローシート	87
図3.1.3-3	カランドリアタンク詳細	89
図3.1.4-2	試験部の重点計測域	91

図3.1.4-3	圧力管内計測器取付位置図	93
図3.1.4-4	圧力管外計測器取付位置図	95
図3.1.4-5	カランドリア管外及びアニュラス部計測器取付位置図	97
図3.1.4-6	アニュラス部圧力計測器取付詳細	99
図3.1.4-7	熱電対取付詳細	100
図3.1.4-8	カランドリア管外壁面加速度計取付要領図	101
図3.1.4-9	ボイドモニターカメラ立面配置図	102
図3.1.4-10	ボイドモニターカメラ平面配置図	103
図3.1.4-11	温度計及びボイド計の軸方向取付位置図	104
図3.1.4-12	カランドリアタンク内のボイド計及び熱電対の平面配置図	105
図3.1.5-1	収録システム構成	106
図3.1.5-2	データ収録と周期法	107
図3.1.5-3	亀裂進展計測用ハンドヘルドコンピュータ	108
図3.1.5-4	亀裂進展計測システム構成	109
図3.1.5-5	流動特性試験亀裂進展ゲージ貼付位置図	110
図3.1.5-6	流動特性試験亀裂進展速度計測要領	111
図3.1.6-1	流動特性試験手順フロー	112
図3.1.7-1	圧力管内圧力変化(短期)	114
図3.1.7-2	圧力管内圧力変化(長期)	115
図3.1.7-3	流動特性試験各部圧力変化	116
図3.1.7-4	破断後数十m秒迄の圧力分布	117
図3.1.7-5	比較的長い時間での圧力分布	118
図3.1.7-6	鉄水遮へい体スリーブ近傍部布における周方向圧力分布	119
図3.1.7-7	カランドリア管アニュラス部冷却材及びカランドリア管材温度	120
図3.1.7-8	流動特性試験カランドリア管外表面蒸気泡発生状況	121
図3.1.7-9	模擬重水温度変化	122
図3.1.7-10	流動特性試験各部流体温度変化	123
図3.1.7-11	流動特性試験放出流量時間変化	124
図3.1.7-12	破断後の圧力管開口形状	125

図3.1.7-13	流動特性試験破断後開口幅計測結果	127
図3.1.7-14	圧力管破断状況	129
図3.1.7-15	流動特性試験ガイドき裂部き裂進展速度	131
図3.1.7-16	カランドリア管外径周方向歪	132
図3.1.8-1	カランドリア管温度変化	133
図3.1.8-2	最も温度差の大きい位置のカランドリア管材料温度変化	134
図3.1.8-3	最終臨界部上流側圧力変化	135
図3.1.8-4	破断後状況想定図A	136
図3.1.8-5	破断後状況想定図B	137
図3.2.3-1	試験ループとA安ループの取り合い	138
図3.2.3-2	バースト試験・試験部の構成	139
図3.2.3-3	実機材料圧力管バースト試験装置	140
図3.2.4-1	実機材料圧力管バースト試験計測器取付概要	141
図3.2.4-2	A-A断面概念	142
図3.2.4-3	計測器取付位置図	143
図3.2.5-1	収録システム構成	144
図3.2.5-2	データ収集と同期法	145
図3.2.5-3	クラックゲージ取付位置図(ケース1)	146
図3.2.5-4	クラックゲージ取付位置図(ケース2)	147
図3.2.6-1	試験手順フロー	148
図3.2.7-2	圧力管破断部(ケース2)	151
図3.2.7-3	圧力管亀裂先端詳細(ケース2)	153
図3.2.7-4	実機材料圧力管バースト試験(ケース2)	
	圧力管内圧力と外部伝達荷重	155
図3.2.8-1	表面欠陥を有する内圧破裂強さの評価線図	156
図3.2.8-2	貫通欠陥を有する管の破壊じん性強さ	157
図3.2.8-3	走査電子顕微鏡による破面観察	159
図3.2.8-4	走査電子顕微鏡による破面観察	161
図3.2.8-5	走査電子顕微鏡による破面観察	163

図3.2.8-6	走査電子顕微鏡による破面観察	165
図4.1.2-1	試験体系主要寸法	183
図4.1.2-2	圧力管破断試験装置出入口管寸法図	185
図4.1.4-1	解析モデル並びにメッシュ分割図	187
図4.1.4-2	形状モデルイメージ	188
図4.1.4-3	メッシュ分割イメージ	189
図4.1.5-1	境界条件の影響評価モデル	190
図4.1.5-2	境界条件の影響	191
図4.1.5-3	圧力挙動に及ぼす燃料集合体の影響 (K-FIX)	192
図4.1.5-4	流動解析における熱非平衡の効果 (PTRAC, K-FIX)	193
図4.1.5-5	破断後の主要部圧の試験と解析の比較	194
図4.1.5-6	破断後の主要部温度の試験と解析の比較	195
図4.1.5-8	アニュラス部ボイド率	196
図4.1.5-9	流量計測位置での流量変化	197
図4.1.6-1	流量計測値の時間変化 (実験データ)	198
図4.2.3-1	解析モデル及び境界条件	199
図4.2.3-2	応力-歪曲線	200
図4.2.3-3	境界負荷条件	201
図4.2.3-4	負荷圧力	202
図4.2.3-5	負荷モーメント	206
図4.3.5-1	計算モデル (断面形状)	添4.1.3-11
図4.3.5-2	圧力管内及びアニュラス部の3次元メッシュ	添4.1.3-12
図4.3.5-3	圧力管のメッシュ分割	添4.1.3-13
図4.3.5-4	断面メッシュ分割 (破断中心部付近)	添4.1.3-14
図5.2-1	圧力管破断事故時シーケンス	234
図5.2-2	圧力管破断事故時のチャンネル内形状想定図	235
図5.3.1-1	圧力管本体破断事故解析ノード分割図 (LOTRAC)	238
図5.3.1-2	圧力管破断事故時のCO ₂ アニュラス部流動評価モデル	239

図5.3.1-3	鉄水スリーブ部流路網モデル	240
図5.3.1-4	圧力管破断事故時の過度変化 (拡管後の直径 149.8mm)	241
図5.3.1-5	圧力管破断事故時の過度変化 (拡管後の直径 149.8mm)	242
図5.3.1-6	圧力管破断事故時の過度変化 (拡管後の直径 149.8mm)	243
図5.3.1-7	圧力管破断事故時の過度変化 (拡管しない場合)	244
図5.3.1-8	圧力管破断事故時の過度変化 (拡管しない場合)	245
図5.3.1-9	圧力管破断事故時の過度変化 (拡管しない場合)	246
図5.3.1-10	圧力管の拡管による流量変化	247
図5.3.2-1	内部領域 上・下部 集合体内局所出力分布 (拡管あり/偏心あり)	253
図5.3.2-2	軸方向相対出力分布の変化 (グロス値)	254
図5.3.3-1	実証炉3本Gd入燃料36本クラスタ断面形状	257
図5.3.3-2	燃料体の出力分布とスペーサ配置	258
図5.3.3-3	36本クラスタサブチャンネル分割モデル	259
図5.3.3-4	解析体系	260
図5.3.3-5	クラスタ内局所出力分布の変化	261
図5.3.3-6	感度解析に使用したクラスタ内径方向出力分布	262
図5.3.3-7	ケースNo. 1-1 圧力管内径=117.8 mm 偏心=0.0 mm の解析結果 (MCPR発生位置)	263
図5.3.3-8	圧力管破断時の圧力管拡管に伴うサブチャンネル質量速度分布の変化	264
図5.3.3-9	圧力管破断時の圧力管拡管に伴うサブチャンネル蒸気クオリティ分布 の変化	266
図5.3.3-10	圧力管の拡管量に伴うMCPRの変化	267
図5.3.3-11	圧力管破断時の拡管量によるドライアウト領域の変化	268
図5.3.3-12	圧力管破断時の圧力管内径をパラメータとしたスペクトル解析結果	269
図5.3.3-13	圧力管破断時の拡管量をパラメータとした解析結果	270

図5.3.3-14	ケースNo. 1-9 圧力管内径=149.8 mm 偏心=0.0 mm の解析結果 (MCP R発生位置)	271
図5.3.3-15	圧力管破断及び燃料体偏心に伴うサブチャンネル質量速度分布の変化	272
図5.3.3-16	圧力管破断及び燃料体偏心に伴うサブチャンネル蒸気クオリティ分布 の変化	273
図5.3.3-17	燃料体偏心量の変化に伴うMCP Rの変化	274
図5.3.3-18	燃料体偏心によるドライアウト領域の変化	275
図5.3.3-19	圧力管最大拡張時の燃料体偏心量をパラメータとした解析	276
図5.3.3-20	ケースNo. 1-8 圧力管内径=149.8 mm 偏心=16.5 mm での 軸方向被覆管表面温度分布	277
図5.3.3-21	ケースNo. 1-8 圧力管内径=149.8 mm 偏心=16.5 mm での 周方向温度分布	278
図5.3.3-22	膜沸騰熱伝達率相関式の特長	279
図5.3.3-23	L P F 変化によるドライアウト領域の変化	280
図5.3.3-24	燃料被覆管温度に対するL P F 変化の影響	281
図5.3.3-25	チャンネル流量変化によるドライアウト領域の変化	282
図5.3.3-26	燃料被覆管温度に対するチャンネル流量の変化の影響	283
図5.3.3-27	チャンネル出力変化によるドライアウト領域の変化	284
図5.3.3-28	燃料被覆管温度に対するチャンネル出力変化の影響	285
図5.3.3-29	乱流混合係数変化によるドライアウト領域の変化	286
図5.3.3-30	燃料被覆管温度に対する乱流混合係数変化の影響	287
図6.2-1	圧力管・カランドリア管同時破断解析の処理フロー	335
図6.2-2	圧力管・カランドリア管同時破断解析用ノード分割 (LOTRAAC-II/mod2 コード)	336
図6.2-3	軸方向出力分布	337
図6.2-4	圧力管・カランドリア管同時破断解析用ノード分割(RELAP5/mod1コード)	338
図6.2-5	圧力管・カランドリア管同時破断解析用ノード分割(SOLA-3CT)	339

図6.2-6	圧力管・カランドリア管同時破断解析用ノード分割 (HEATUP-V/mod5 コード)	340
図6.3-1	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	341
図6.3-2	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	342
図6.3-3	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	343
図6.3-4	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	344
図6.3-5	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	345
図6.3-6	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	346
図6.3-7	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	347
図6.3-8	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	348
図6.3-9	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)	349
図6.3-10	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	350
図6.3-11	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	351
図6.3-12	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	352
図6.3-13	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	353
図6.3-14	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	354
図6.3-15	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	355
図6.3-16	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	356
図6.3-17	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	357
図6.3-18	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	358
図6.3-19	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	359
図6.3-20	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	360
図6.3-21	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)	361
図6.3-22	圧力管・カランドリア管同時破断時における炉心燃料部圧力、炉心部 鉛直流量 (RELAP5コード)	362
図6.3-23	圧力管・カランドリア管同時破断解析結果 (SOLA, 1 計算サイクル時の 水平流速分布)	363
図6.3-24	圧力管・カランドリア管同時破断解析結果 (SOLA, 200 計算サイクル時の 水平流速分布)	364

図6.3-25	圧力管・カランドリア管同時破断解析結果 (SOLA, R 方向流速)	365
図6.3-26	圧力管・カランドリア管同時破断解析結果 (SOLA ⊖方向流速)	366
図6.3-27	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (冷却材圧力)	367
図6.3-28	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (冷却材エンタルピー)	368
図6.3-29	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (鉛直材破断流量)	369
図6.3-30	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (冷却材破断流量)	370
図6.3-31	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (下部プレナム部冷却材温度)	371
図6.3-32	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (上部プレナム部冷却材温度)	372
図6.3-33	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (下部プレナム部燃料中心温度)	373
図6.3-34	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (上部プレナム部燃料中心温度)	374
図6.3-35	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (下部プレナム部燃料被覆管表面熱伝達率)	375
図6.3-36	燃料ヒートアップ解析用境界条件 (上部プレナム部燃料被覆管表面熱伝達率)	376
図6.3-37	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	377
図6.3-38	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	378
図6.3-39	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	379
図6.3-40	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	380
図6.3-41	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	381
図6.3-42	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	382
図6.3-43	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	383
図6.3-44	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	384
図6.3-45	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	385
図6.3-46	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	386
図6.3-47	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	387
図6.3-48	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	389
図6.3-49	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	390
図6.3-50	被覆管バルーニングの判定 (外層燃料、ピン35)	391

図6.3-51	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	392
図6.3-52	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	393
図6.3-53	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	394
図6.3-54	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	395
図6.3-55	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	396
図6.3-56	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	397
図6.3-57	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	398
図6.3-58	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	399
図6.3-59	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	400
図6.3-60	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	401
図6.3-61	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	402
図6.3-61	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	403
図6.3-61	圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)	
	バルーニング非考慮	404

1. 緒言

ATR 実証炉の圧力管集合体は、技術的には破断が起こるとは考え難いが、圧力管型炉の安全裕度を確認するため圧力管破断試験を行い、カランドリア管の健全性並びに燃料冷却性について評価する。また、圧力管及びカランドリア管の同時破断試験を行い、隣接チャンネル及びカランドリア構造物の健全性並びに燃料冷却性について評価する。本試験の評価フローを図1-1に示す。又、全体計画を表1-1に示す。

前年度は、圧力管破断試験装置、流動特性試験用試験体及び圧力管破断時燃料冷却性試験用試験体の設計、製作を行い、流動解析コード及び構造解析コードの機能確認作業を行った。

63年度は前年度に製作した試験装置を据付けると共に、同装置を用いた試験を実施した。また、この試験解析を行い、カランドリア管健全性に関する評価手法を検討した。さらに、圧力管破断試験及びカランドリア管同時破断の燃料冷却性評価に必要な予備解析を実施した。

① 圧力管破断試験装置の据付

圧力管破断事象を想定し、圧力管が破断した場合のカランドリア管健全性及び破断チャンネルの流動特性、並びにカランドリア管も同時に破断した場合の隣接チャンネルカランドリア等の健全性及び燃料冷却性を評価するために、前年度製作した実機模擬試験装置の搬入・据付工事及び試運転を実施した。

また、同時破断試験に使用する試験体を製作した。

② 圧力管破断試験

圧力管破断時のアニュラス部の冷却材圧力、温度の挙動、カランドリア管へ熱衝撃、衝突等カランドリア管にかかる負荷挙動を解明するための流動特性試験を実施した。

また、実機材料を用いたカランドリア管健全性試験に先立ち圧力管破断時の挙動、及び破断後開口形状を確認するための実機材料バースト試験を実施した。

③ 検証解析

流動解析コード及び構造解析コードを用いて、本年度実施した流動特性試験の実験解析を行い評価モデルの検討を行った。

また、サブチャンネル解析コード及び汎用熱流動解析コード等を用いて、圧力管破断試験及び同時破断試験の燃料冷却性評価に必要な予備解析を実施した。

昭和63年度新型転換炉技術確証試験 (VI) 試験内容

試験項目	3. 安全性確証試験のうち 3.2 圧力管破断事故の確証試験による評価手法確立
試験実施範囲	試験内容
<p>① 圧力管破断試験装置の据付</p> <p>② 圧力管破断試験</p> <p>③ 検証解析</p>	<p>① 圧力管破断事象を想定し、圧力管が破断した場合の破断チャンネルの流動特性及びカランドリア管健全性、並びにカランドリア管も同時に破断した場合の隣接チャンネル、カランドリア等の健全性及び燃料冷却性を評価するために、前年度製作した実機模擬試験装置の搬入・据付工事及び試運転を行う。 また、同時破断試験に使用する試験体を製作する。</p> <p>②④ 流動特性試験 圧力管破断時のアニュラス部の冷却材圧力、温度の挙動、カランドリア管への熱衝撃、衝突等カランドリア管にかかる負荷挙動を解明するための試験を実施する。</p> <p>⑤ 実機材料圧力管バースト試験 実機材料を用いたカランドリア管健全性試験に先立ち圧力管破断時の挙動、及び破断後開口形状を確認するための実機材料圧力管バースト試験を実施する。</p> <p>③② 実験解析 流動解析コード及び構造解析コードを用いて、本年度実施する圧力管破断試験に関して実験解析を行い評価モデルの検討を行う。 ① 流動解析 ② 構造解析</p> <p>⑥ 予備解析 サブチャンネル解析コード及び汎用熱流動解析コード等を用いて、圧力管破断試験及び同時破断試験の燃料冷却性評価に必要な予備解析を行う。 ① 圧力管破断時の燃料冷却性予備解析 ② 圧力管-カランドリア管同時破断時の燃料冷却性予備解析</p>

表 1 - 1 圧力管破断事故確証試験全体計画

試 験 項 目	試 験 内 容
i) 圧 力 管 破 断 試 験 (a) 流 動 特 性 試 験 (b) カ ラ ン ド リ ア 管 健 全 性 試 験 (c) 燃 料 冷 却 性 試 験	<p>実機を模擬した圧力管破断試験装置を製作して、圧力管破断試験を行い、カランドリア管の健全性並びに燃料冷却性について評価する。</p> <p>模擬圧力管、模擬カランドリア管及び模擬燃料集合体を製作し、圧力管破断試験装置に装着し、実機模擬条件下で模擬圧力管を破断させる試験を行い、模擬カランドリア管内の流動現象等を把握し、カランドリア管健全性評価コードの検証を行う。</p> <p>実機材料の圧力管 (HT・Zr-2.5 wt%Nb) 及びカランドリア管 (Zry-2) を用いた試験体を製作し、上記(a)と同様の試験を行い、圧力管破断時のカランドリア管健全性を評価する。</p> <p>実規模燃料冷却性試験装置を製作し、カランドリア管健全時の燃料の冷却性確認試験を行う。この結果を基に燃料冷却性解析コードの検証を行う。</p>
ii) 圧力管及びカランドリア管の同時破断試験 (a) カ ラ ン ド リ ア タ ン ク 内 圧 上 昇 試 験 (b) カ ラ ン ド リ ア 構 造 物 健 全 性 試 験 (c) 燃 料 冷 却 性 試 験	<p>圧力管及びカランドリア管の同時破断試験を行い、カランドリアタンク内圧上昇挙動、隣接チャンネル及びカランドリア構造物の健全性並びに燃料冷却性について評価する。</p> <p>模擬圧力管模擬カランドリア管及び模擬燃料集合体を製作し、圧力管破断試験装置に装着して実機模擬条件下で同時破断させる試験を行い、カランドリアタンク内圧等を測定し、この結果を基にタンク内圧解析コードの検証を行う。</p> <p>実機材料の圧力管及びカランドリア管を用いた試験体を製作し、上記(a)と同様の試験を行い、隣接圧力管及びカランドリア構造物の健全性を評価する。</p> <p>実規模模擬燃料集合体を製作し、同時破断を模擬した試験を行い、燃料冷却性を評価する。</p>

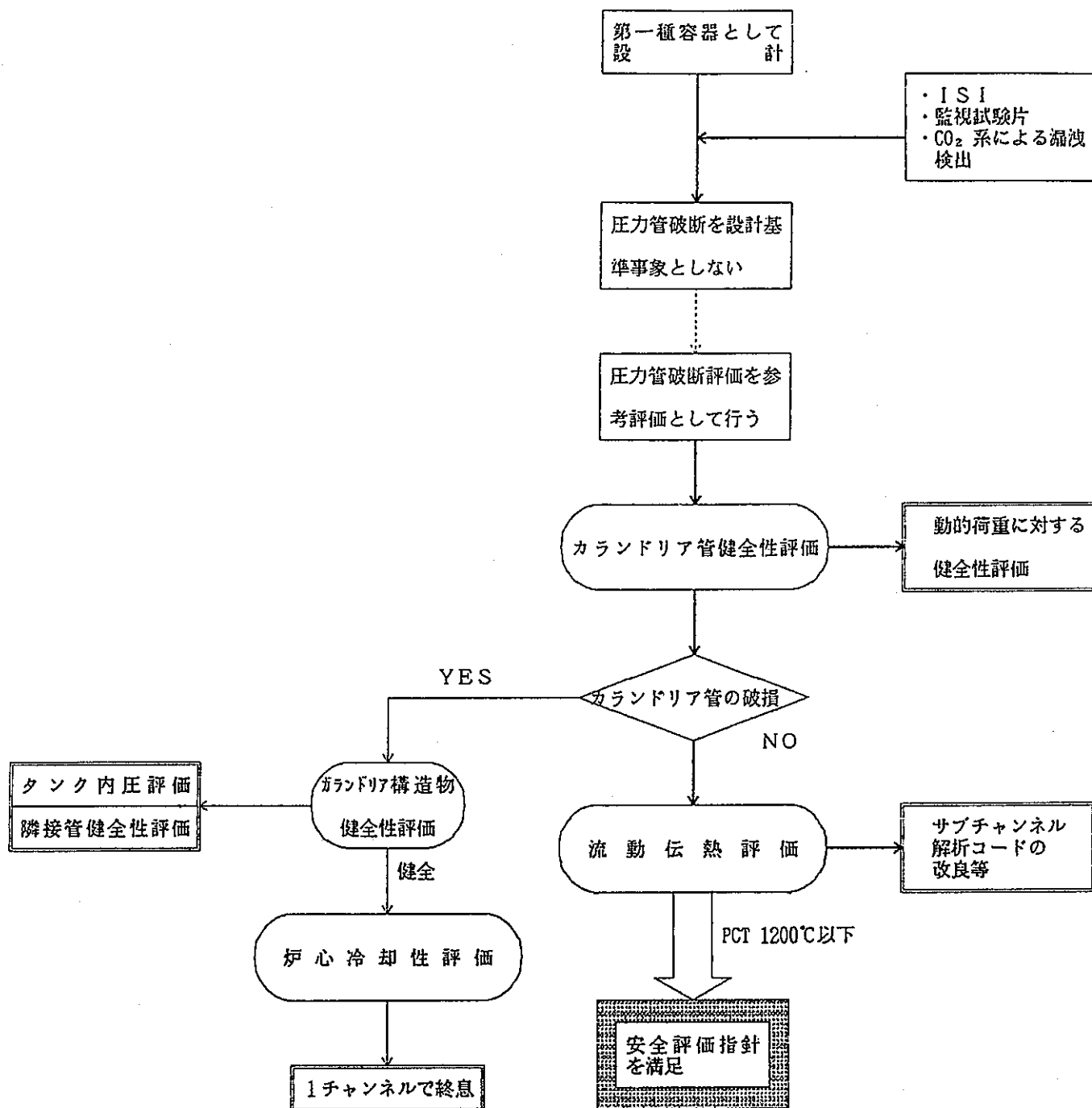


図1-1 圧力管破断検討フロー

2. 圧力管破断試験装置の据付

2.1 はじめに

圧力管型炉である ATR実証炉に特有な圧力管破断事象を想定し、圧力管が破断した場合のカランドリア管健全性、及び破断チャンネルの燃料冷却特性、並びにカランドリア管も同時に破断した場合の隣接管、カランドリアタンクへの影響等を評価するための各種試験を実施する。

63年度は、これら試験に用いる試験装置の据付、試運転を行ない、試験に着手する。また、次年度使用する試験体の一部を製作する。

2.2 実施範囲

圧力管破断確証試験全体工程を表 2.2 - 1 に示す。圧力管破断試験は、昭和62年度着手し平成 3 年度までの 5 ヶ年計画で実施する予定である。

63年度は、62年度製作した試験装置および一部追加製作した附帯設備を据付け、試運転を実施した後、試験に着手する。

- (1) 据付工事
- (2) 計測器の購入
- (3) 同時破断試験用試験体の製作
- (4) 圧力管破断試験室の設置
- (5) 報告書の作成

2.3 設計条件

2.3.1 試験目的

圧力管破断事故が圧力管型炉である新型転換炉固有の想定事故事象であることから、圧力管破断を想定した場合の原子炉本体への影響を評価しておく必要がある。

このため、実証炉実機を模擬した試験装置を用いて、圧力管が破断した場合のカランドリア管健全性、及び破断チャンネルの流動特性、並びにカランドリア管も同時に破断した場合の隣接チャンネル、カランドリアタンクへの影響を明らかにし、安全設計の妥当性を評価する。

試験は、構造健全性及び燃料冷却性に影響を及ぼす主要因子の感度を見るための試験と、実機材料を用いた確証試験からなり、次の試験が予定されている。

- (1) カランドリア管健全性
 - (a) カランドリア管内流動特性試験

模擬カランドリア管と模擬圧力管を用い、アニュラス部の流動挙動及びカランドリア管の健全性に影響を及ぼす各種因子についてのデータを収集する。

(b) カランドリア管健全性確認試験

実機材料の圧力管を破断させ、流動と構造に関する各種データを収集するとともに、実機カランドリア管の健全性を確認する。

(2) 圧力管、カランドリア管同時破断時

(a) カランドリア管内圧上昇試験

模擬カランドリア管と模擬圧力管を同時破断させ、カランドリアタンク内の内圧上昇挙動、及び構造健全性に係る各種データを収集する。

(b) 隣接管健全性確認試験

実機材料の圧力管とカランドリア管を同時破断させ、隣接チャンネルの健全性を確認するとともに、カランドリアタンク構造物の健全性に係る各種データを収集する。

(c) 燃料冷却性試験

加熱模擬燃料集合体を使用し、同時破断時の燃料集合体の温度挙動に係るデータより、燃料が冷却され、健全性が保たれる事を確認する。

2.3.2 試験装置の実機模擬に対する考え方

表2.3.2-1に試験装置及び試験条件の考え方を示す。

(1) 試験体

62年度製作した試験体は、カランドリア管健全性試験の流動特性試験に使用するものである。流動特性試験で解明すべき事項は、カランドリア管にかかる負荷の挙動である。主要な負荷は、アニュラス部の内圧、ジェット力及びカランドリア管の温度上昇に伴う熱応力である。これらの負荷挙動を忠実に模擬するために、実寸大の試験体を使用することとした。

表2.3.2-2に圧力管破断時のカランドリア管の健全性を評価する上で主要な負荷要素を示す。

63年度製作する試験体は、圧力管、カランドリア管同時破断時のカランドリアタンク、内圧上昇試験、および同時破断時燃料冷却特性試験に使用するものである。内圧上昇試験、同時破断時燃料冷却特性試験についても、負荷挙動を忠実に再現するため、実寸大の試験体を使用することとする。

(2) カランドリアタンク設備

圧力管・カランドリア管同時破断試験によって、確認するものは、カランドリアタンクの健全性、及び隣接管の健全性である。

カランドリアタンクの健全性及びカランドリア管群の座屈評価にとって考慮すべき主要な負荷は、破断口からの冷却材放出によるカランドリアタンク内の圧力上昇である。圧力上昇の程度は、放出する流体条件及びタンク内における凝縮特性によって支配される。凝縮特性は特に、破断口から放出する冷却材噴流が、隣接するカランドリア管や制御棒案内管へ衝突することによって生じる乱れ効果により促進される。

隣接カランドリア管及び隣接制御棒案内管の健全性評価で考慮すべき重要な負荷は、ジェット噴流力、及びジェット噴流による破断圧力管及びカランドリア管の反力である。

以上のような負荷は、体系に依存するので、小型試験装置で模擬できないので、実規模大の装置で模擬することとした。なお、破断口から放出する冷却材噴流が生じる乱れ効果の及び距離は、動力炉・核燃料開発事業団が別途実施したポイズン急速注入試験の結果に基づいて予測し、カランドリアタンクの内径を決定する根拠とした。

表2.3.2-3に同時破断時のカランドリア構造物の健全性を評価する上で重要とされる負荷要素と計測量の関係、図2.3.2-1に動燃事業団が実施したポイズン急速注入実験結果を示す。⁽¹⁾

2.3.3 試験装置の概要

試験装置は以下の部分で構成する。本試験装置と実証炉の比較を表2.3.3-1に示す。

- (1) 試験体部を含む装荷チャンネル数が97本の高さを実証炉と同じとしたカランドリアタンク設備。
- (2) 直径と長さを実証炉と同一とした圧力管及びカランドリア管で構成する試験体部。
- (3) 試験体部とA安既設装置との間を高温高圧水が循環するループとする為に必要な配管等で構成する付帯設備。
- (4) 架台等を含むその他設備。

- (5) 試験を制御する電気計装設備
- (6) 試験データを計測する高速度計装機器
- (7) 高速データ収録システム (63年度導入)
- (8) カランドリアタンク内モニター設備 (63年度製作)
- (9) 圧力管破断試験装置を設置する建屋設備 (63年度建築完了)

試験装置のカランドリアタンクには試験体と試験体以外に96本の外径を合せた模擬カランドリア管を配置する。

模擬体部は圧力管とカランドリア管の二重構造になっていて、アニュラス部にはCO₂ガスを連続で通している。

試験体部はカランドリアタンクの中央の位置に設け、4^B配管で試験体部入口管(2^B)と既設A安テストループの非加熱圧力管の入口管部と接続する。また、試験体部上昇管(3^B)も4^B配管で入口管同様既設A安ループの非加熱圧力管の上昇管部に接続して冷却材の循環ループを構成する。図2.3.3-1にフローシートでこれらの関係を示す。また、建屋内のカランドリアタンクの配置を図2.3-1に示す。

尚、試験体部4^B入口管、4^B出口管には配管加温設備並びに保温材を設け、冷却材の放熱を防止して、適切なサブクール度を維持できるようにする。

試験操作では、図2.3.3-3のごとくまず冷却材を既設A安ループの加熱ヒータによって加熱しながら循環ポンプで新たに構成したループを循環させ、約4時間をかけて75ata、285℃近くに昇温昇圧し、圧力管を破断させる。予定した圧力で破断しない場合は所定の試験条件が成立した事を確認した後、試験体部を既設A安ループと遮断し、急速加圧設備によってテスト部を加圧し、破断させる。

この時の流動挙動並びにカランドリア管、圧力管等構造物の挙動を圧力、温度、歪、加速度、亀裂進展量等の変化として求める。

これら各種データは、63年度導入した“高速データ収集システム”ならびに既設のデータ収集システムで収録する。また、破断後、破断チャンネルカランドリア管外表面に生じるボイド挙動をモニターカメラで観察録画する。

尚、試験終了後、試験体を引抜いて、その形状変化を計測する。

2.3.4 設計条件

- (1) 高速データ収集システム

圧力管破断試験での計測系の概要を図2.3.4-1, チャンネル数の使用予定を表2.3.4-1に示す。圧力管破断時現象は1/1000秒程度の極めて短時間のものが含まれることから最高収集速度は20KHz および1 KHz としセンサーの応答速度により振り分ける。

また、挙動が遅いものおよび装置運転監視については既設、U-1500システムを併用する。

(2) モニター設備

モニター設備の概略フローシートを図2.3.4-2に示す。

圧力管破断時破断チャンネルカランドリア管温度挙動は、カランドリア管の健全性に係る重要な負荷要素となるばかりでなく、周辺に生ずるボイドは、燃料の制御性に重要な影響を及ぼす可能性がある。

このため、カランドリア管健全時の試験時カランドリア管外表面付近を観察するためのモニターカメラを設置し記録することにした。モニターカメラは、高温水中で使用するため、周辺カランドリア管内に収納し、カランドリアタンク内に組込めるようにする。

(3) 試験体

(a) 内圧上昇試験用試験体

図2.3.4-3に内圧上昇試験体組立図、図2.3.4-4に内圧上昇試験体の基本的な構造手法は62年度製作した流動特性試験用試験体と同一とし、流動特性試験で使用する部品と共用できるようにする。

(イ) 圧力管

圧力管は、炉心部分を実証炉圧力管(図2.3.4-5)と同一寸法とし、実機での上下ロールジョイント部以降の上下も炉心部分と同一径とすることで圧力管内流動に大きな影響を及ぼす模擬燃料集合体及び上部遮へいプラグの組立を容易にする。

圧力管の材質は、実機と同様ぜい性材料とするため、STPG42相当とし、製作精度をあげるため継目無し管を採用する。

破断用人工欠陥は、実機のスプリット破断事象を想定し、軸方向にCCL以上の極細(0.2mm)スリットを入れることで対応する。

スリット長は、動燃が実施したバースト試験の結果に基づき300mmとした。

なお、実機材料のような異方性を持たないため、破断時のき裂進展方向を決定づけるためのやや浅いスリットも合わせてつける。

実機では圧力管内に上下遮へい体があり圧力管破断時の流動を抑制することから形状及び圧攪を模擬して流動特性試験用に昨年度製作した上下遮へい体を取り付ける。

上部鉄水スリーブについても圧力管破断後のアニュラス部流動を制限するが形状が複雑なため、単純化し $\lambda L/D$ で圧攪を合わせる。

圧力管下部と下部延長管との隙間について $\lambda L/D$ で圧攪を合わせる。

(ii) カランドリア管

流動特性試験体と同様管内径を実機(158.4mm)に合わせ、組立を容易にするため、フランジ接続を採用している。

肉厚は破断後形状を実機に合わせるため、実機の剛性(図2.3.4-6)に近いもの($t=1.9m$)とする。

同様破断用人工欠陥は、実機の破断が溶接線に沿って起ると仮定し、圧力管の人工欠陥と同一手法を用い破断時の亀裂進展方向を決定づけるためのスリットを入れる。

(iii) 防振板

防振板形状および主要寸法を図2.3.4-4に示す。衝突後の変形量を合わせるため、穴寸法を合わせるとともに剛性比を実機に合わせる。

なお、試験体組立手順の関係から分割できるようにする。

(iv) 同時破断時燃料冷却性試験体

図2.3.4-7に同時破断時燃料冷却性試験用圧力管、図2.3.4-8に加熱模擬燃料集合体を示す。同時破断時の燃料冷却特性を評価するための試験体として63年度は圧力管と模擬燃料集合体の製作を実施する。燃料冷却試験の最終段階では圧力管、カランドリア管を同時に破断させ、過渡事象を計測する事が計画されているが、本年度製作する試験体については圧力管に破断後の形状を模擬した開口を空けたものとしカランドリア管を省略した体系で流動条件を実機に合わせるため、破断後定常となった時点での計測を実施することとして計画する。圧力管の内径は、実機と同一とし流動特性試験で使用する下部遮へい体を一部部品を追加することで流用できるようにすると共に

上部遮へい体についても配管等を一部改造することで流用できるようにする。

加熱模擬燃料集合体は非接地間接加熱ヒーターとし、既設の電源設備を使用する。軸方向発熱分布は、5ステップとし実機発熱分布を模擬する。周方向については均一として製作し供給電力量を調整することで実機を模擬する。形状は事故時冷却特性確定試験用に製作するヒーターとほぼ同一形状とし、発熱部と管板との距離を合致させる事で本ヒーター破損時に交換使用する事を考慮する。

2.4 実施結果

2.4.1 据付工事

(1) 圧力管破断試験装置の据付

試験装置及び計測器は、下記仕様を満足するように前年製作した。

63年度は、これらを圧力管破断試験室に搬入し据付けた。なお、機器配置、配管ルート等は、前年度装置製作時の計画を基とし、63年度再度見直した上で施工した。

(a) 圧力管型試験装置

(イ) カランドリアタンク

型 式	鋼版製円筒タンク (ダイヤフラム付)
員 数	1 基
材 質	S S 41
外 径	4,000mm
高 さ	4,610mm

カランドリアタンク形状を図2.4.1-1に示す。

(ロ) 模擬カランドリア管

カランドリアタンク内に、中央の試験体を取り囲んで模擬カランドリア管を配列した。

員 数	96本
配 置	240mm 正方格子
材 質	S U S 304
外 径	162.2mm
肉 厚	5mm

長さ 4,470mm (管板内面間)

このカランドリア間は外径を模擬するのみで内部に圧力管は挿入しない。

また、上部、下部管板と切り離し可能な構造とした。

(ハ) 模擬制御棒案内図

員数 21本
 外径 92mm
 長さ 4,470mm (管板内面間)
 材質 SUS 304

(ニ) 模擬中性子検出器

員数 7本
 外径 17.8mm
 長さ 4,470mm (管板内面間)
 材質 SUS 304

(b) 圧力調整装置

カランドリアタンク内の下部管板上面において常に所定の圧力を保持するよう圧力調整装置を設置した。なお、破断試験時には、タンク内の破断伝播圧力が圧力調整装置から逃げないように遮断できるようにした。

(c) 温度制御装置

タンク内の水温を所定の値にコントロールするため、ヒータを設け、タンク内の水温を均一にするため、循環ポンプを設置した。

- ・昇温速度 15℃/h
- ・制御温度 70±5℃

温度制御装置は図2.3.3-1のフローシートの加温ヒータ及び循環ポンプ部である。

(d) 試験部加圧設備

遠隔操作で既設装置と遮断し、圧力管強制破断がおこる圧力まで急速に昇圧するためのプランジャポンプを設置した。

吹出圧 100℃
 昇圧速度 0.2~1 kg/cm²/秒

試験部加圧設備は図2.3.3-1のフローシートの加圧ポンプ部である。

(e) ラブチャーディスク

カランドリアタンク本体には、試験体破断時の異常圧力上昇に対応してラブチャーディスクを設けた。

口 径	700 ^A
破断圧力	1.3±0.2kg/cm ²

(f) 炭酸ガス注入設備

圧力管とカランドリア管とのアニュラス部には、常時炭酸ガスを充填させるものとし、このための炭酸ガス注入設備を設置した。

(g) 配管設備

試験装置を構成するたその主要な配管を図3.2.3-4フローシートに示す。本試験装置の試験体圧力管への高温・高圧水の循環、カランドリアタンク内への模擬重水（純水又は工水）の供給、計装用空気の供給等は、既設実験設備より分岐、接続した。

なお、既設破断実験装置から試験体圧力管への接続配管については、管外壁保温層からの放散熱を補うためシースヒーターを設置した。

(h) 計測器

試験時の高温高圧水放出による温度、圧力、歪、ポイド率等の変化を計測するための各種センサーを試験装置に取り付けると共に試験体に取り付けるセンサーを含めた各種計測用リード線、アンプ類の設置を行い、高速データ収集システムによるデータの収録が行なえるようにした。

(i) その他

下記の据付を実施した。

- (イ) 電気計装設備
- (ロ) モニター設備（63年度製作）
- (ハ) 天井走行クレーン
- (ニ) 排水中和設備（63年度製作）

(2) 高速データ収集システムの設置

(a) 概 要

本システムは、試験時に圧力管-カランドリア管アニュラス部の圧力、温度変化、圧力管、カランドリア管の歪量等速度の速い事象データを収集するため

のものである。

システムは、演算処理装置、A/D変換装置、磁気テープ装置等から成り、構成を図2.4.1-2に示す。

(b) システムの性能

本システムのデータ収集部は、収集速度等が異なる2つのグループ (①1グループ、②2グループ) から成り、各々のグループにおいてはそれぞれ最高20 KHz 及び1 KHz のサンプリング周波数でのデータ収集が可能である。

表2.4.1-1にデータ収集条件、図2.4.1-3にデータ収集処理機能、図2.4.1-4にデータ収集の概念を示す。

(3) 試運転調整

試験装置の据え付け完了後各種試運転を実施した。単純試運転では、各機器、系統毎の耐圧、作動状況等各種試験を行うとともに、試験を実施する上で必要な機能、性能が設計条件を満たしていることを確認した。

総合試運転では、試運転用試験体をカランドリアタンクに組込み、圧力管破断直前までの運転を実施し、各装置・機器の運転状況、各種センサーの作動状況及び環境特性を確認した。

さらに、試運転用試験体圧力管に穴 (20mm×2箇所) を空け、実証炉運転条件下で試験体を入口弁を開けることにより圧力管破断を模擬した試運転を実施し、試験装置としての機能上の問題がないことを確認するとともに、データ収集システム及び各種センサーの機能・性能を確認した。

また、63年度製作したTVモニター設備についても、破断模擬試運転時カランドリアタンクに組込み試験体カランドリア管外壁面のボイド挙動を視認出来ることを合わせて確認した。

2.4.2 計測器の購入

63年度購入した計測器を表2.4.2-1に示す。

(1) 検出器

(a) 熱電対 (非接地)	30本
(b) 歪ゲージ (カランドリア管外壁取付)	60枚
(c) 圧力計 (カランドリア管外壁取付)	33個
(d) ボイド計 (カランドリアタンク内用)	76本

(出口管用)

45本

(2) アンプ類

(a) チャージアンプ盤	2面 (圧力計用チャージアンプ 80台収出)
(b) ゼロコン盤	1面 (冷接点 60ch収納)
(c) ボイド計アンプ	1台 (80ch用)
(d) ボイド計論理回路	1式 (26ch用)

(3) モニター設備

モニター設備の概略フローを図2.3.4-2, モニターカメラ配置を図

(a) モニターカメラユニット

モニターカメラ取付用模擬カランドリア管	1式
モニターカメラ	3台

(b) 照明ユニット

ライト取付用模擬カランドリア管	1式
照明用ライト	3台

(c) モニターユニット

モニターテレビ	1台
ビデオデッキ	3台

(d) 冷却ユニット

1式

2.4.3 同時破断試験用試験体の製作

(1) カランドリアタンク内圧上昇試験用試験体の製作

圧力管、カランドリア管同時破断時のカランドリアタンク内圧挙動を計測するための試験に用いる試験体を3ケース分製作する。

試験体組立図を図2.3.4-3, 妨振板組立図を図2.3.4-4に示す。

本試験体は、流動特性試験用試験体と構造、寸法を同一とし、可能な限り流動特性試験用に準備した部品を流用できるよう配慮した。

(a) 模擬圧力管試験体

材 質	STPG 42
外 径	126.4mm
肉 厚	4.3mm
長 さ	7490mm

破断用人工欠陥	幅 0.2mm	長さ 300mm
数量	3本	

(b) 模擬カランドリア管試験体

材質	SUS 304
内径	158.4mm
肉厚	1.9mm
長さ	5130mm

破断用人工欠陥	幅 0.2mm	長さ 3700mm
数量	3本	

(c) 妨振板 (試験部用) SS 41

数量	3組
----	----

(2) 燃料冷却製試験用試験体の製作

同時破断時の燃料冷却特性を評価するために用いる試験体として模擬圧力管2体、模擬燃料集合体1体等を製作した。

模擬圧力管試験体を図2.3.4-7、加熱模擬燃料集合体を図2.3.4-8に示す。本試験体に装架する加熱模擬燃料集合体は、事故時冷却特性試験用に製作した加熱模擬燃料集合体と管板及び管板から発熱部までの寸法を同一として製作しており、発熱分布スペーサー位置、タイプレート等が上下逆になるものの、交換使用が出来るものとした。

(a) 模擬圧力管試験体 2本 (STPG 42)

ただし、模擬破断口の加工は次年度実施する予定である。

(b) 加熱模擬燃料集合体 1体 (インコネル-MgO/ニクロム)

加熱方式	非接地間接加熱ヒータ
------	------------

最高使用圧力	84kg/cm ²
--------	----------------------

最高出力	1500kw	軸方向出力分布	5ステップ
		径方向発熱分布	均一

2.5 試験検査

2.5.1 試験検査項目

装置等の検査項目は下記の通りとなる。なお、昨年度で工場製作した製品のうち既に必要な検査が終了しているものについては検査を除外した。

- (1) 員数検査：発注仕様通りの数量であることを確認する。
- (2) 外貨検査：製作物の表面に試験実施上有害な傷、へこみ、汚れ等がないことを目視により確認する。
- (3) 寸法検査：図面通り製作又は据付が行われ、製作物が図面通りの寸法又は据付位置にあることを各種計測器で確認する。
- (4) 材料検査：指定した材料により製作が行われていることをミルシート等で確認する。なお、使用材料のミルシートは検査成績書に添付する。
- (5) 溶接検査：主要配管につき、溶接部に有害な欠陥がないことをPT、RT、UT等によって確認する。
- (6) 機能検査：仕様書及び図面に基づき、要求する機能が確認できていることを確認する。

2.5.2 試験結果

- | | |
|----------|----|
| (1) 員数検査 | 合格 |
| (2) 外観検査 | 合格 |
| (3) 寸法検査 | 合格 |
| (4) 材料検査 | 合格 |
| (5) 溶接検査 | 合格 |
| (6) 機能検査 | 合格 |
| (7) 書類検査 | 合格 |

2.6 まとめ

63年度は圧力管破断試験装置の搬入、据付（一部追加製作を含む）、試運転および同時破断試験用試験体の一部製作を行った。なお、圧力管破断試験室は建築を完了しリースを開始し、今後は試験の進行に合わせ、交換用部品等の製作、補充を行う予定である。

2.7 参考文献

- (1) 望月 弘保, 鴨志田 洋, 飛田 昭, 加藤 清二郎, 末竹 秀志, 北原 種道, ポイズン急速注入時混合の可視化実験：PNC SN941 82-131(1982)

表2.2-1 圧力管破断確証試験全体工程

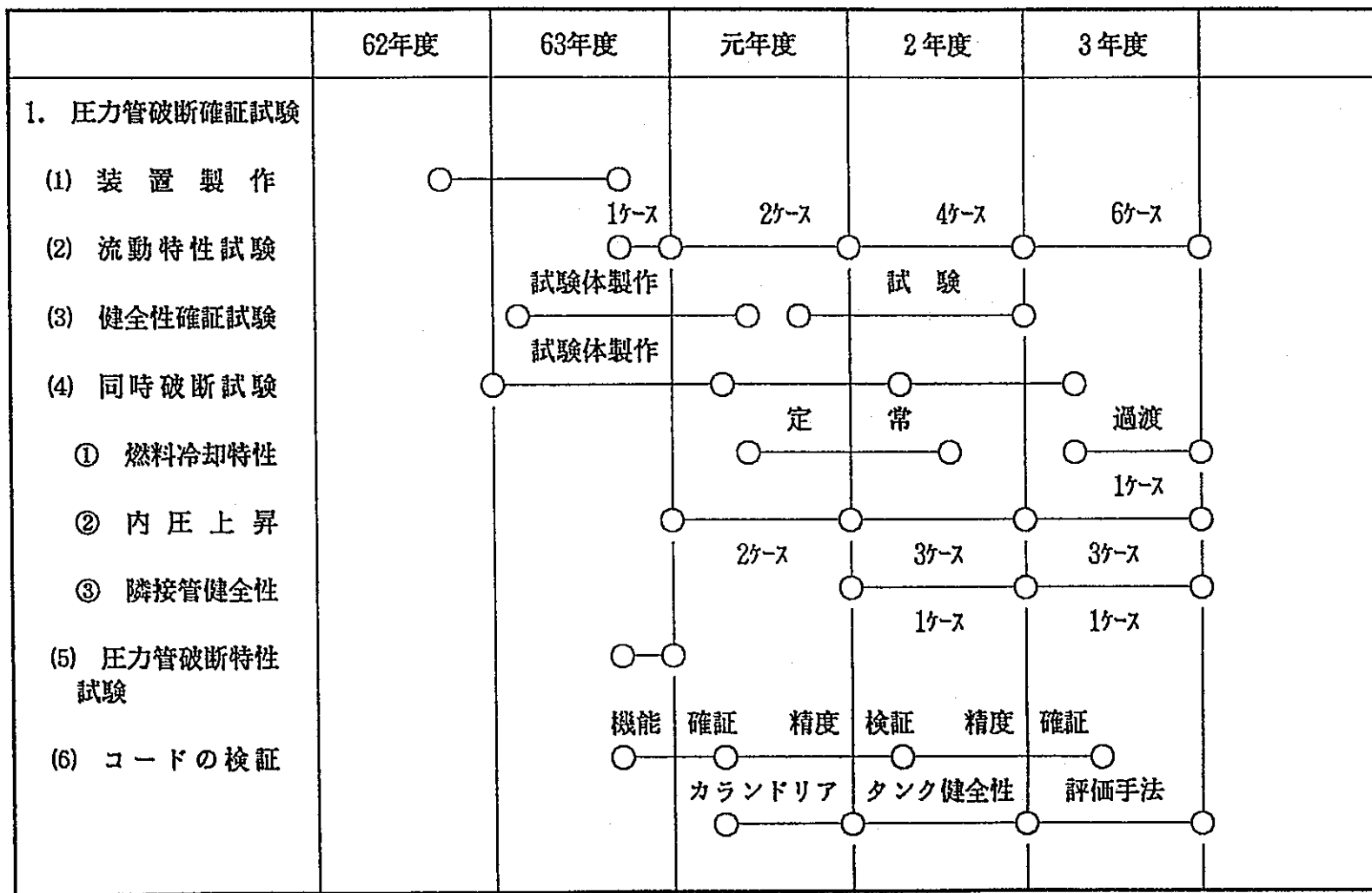


表 2.3.2-1 試験装置及び試験条件の考え方

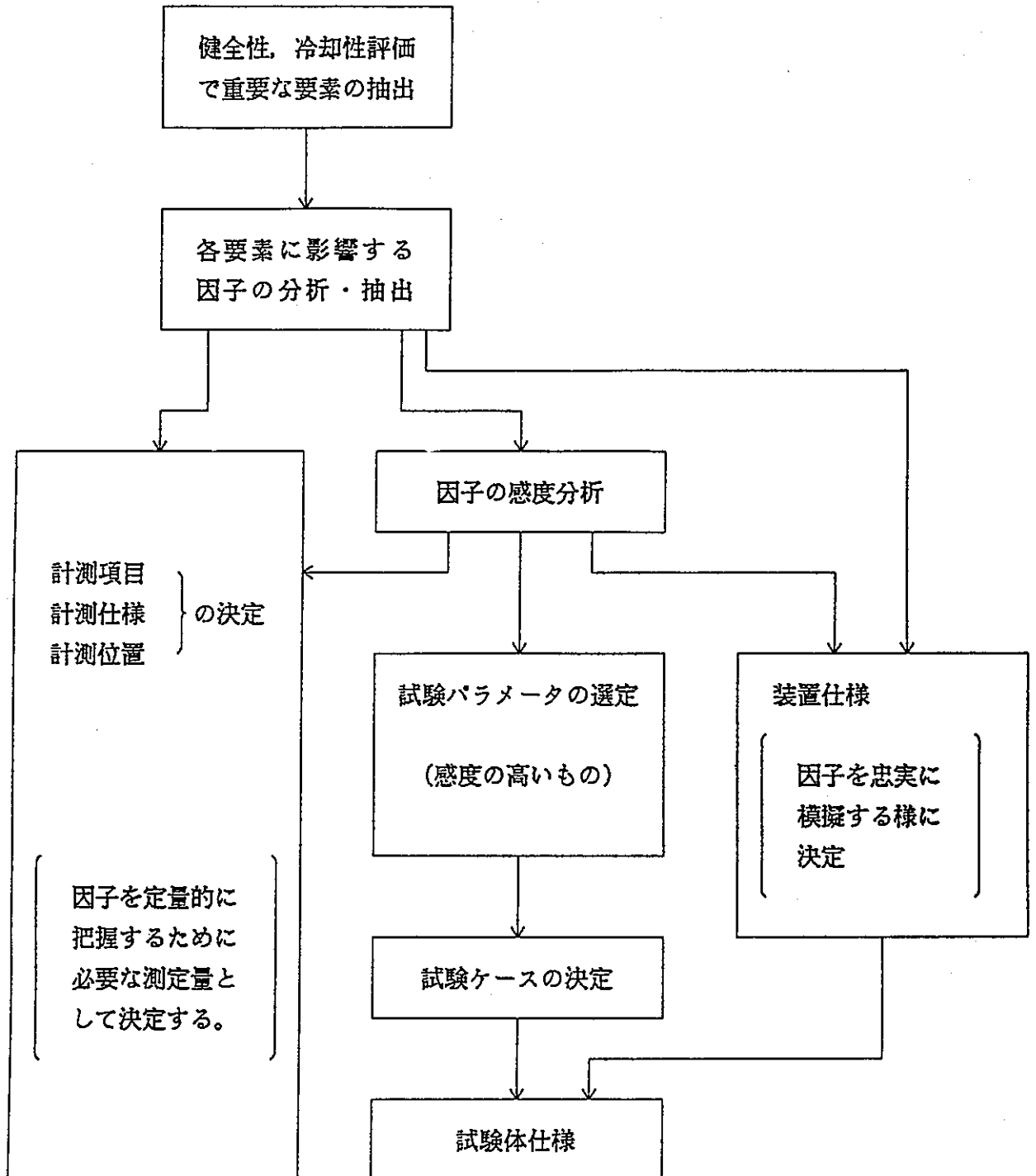


表2.3.2-2 圧力管破断時のカランドリア管の健全性を評価する上で重要な負荷要素と計測量の関係

カランドリア管の健全性評価で、重要な負荷要素	負荷に影響を及ぼす因子	試験パラメータ	計測項目
内 圧 上 昇	<ul style="list-style-type: none"> ○アニュラス部へ冷却材の圧力、エンタルピ 開口面積 燃料集合体流動抵抗 ○アニュラス部からの流出流量 (鉄水スリーブ流路面積) ○アニュラス部容量 ○ C/T鋼性 	<ul style="list-style-type: none"> ○圧力管予亀裂長さ (開口速度対応) ○燃料集合体の有無 ○冷却材の圧力 ○冷却材エンタルピ ○カランドリア管剛性 	<ul style="list-style-type: none"> ○亀裂進展速度 ○アニュラス部圧力の周方向、および軸方向分布 ○アニュラス部温度の周方向、および軸方向分布 ○冷却材の圧力、および温度 (炉心出入口) ○カランドリア管の径方向、および周方向歪
熱 衝 撃	<ul style="list-style-type: none"> ○重水温度 ○冷却材エンタルピ ○カランドリア管の形状、直径、長さ、肉厚 ○カランドリア管の材質 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材エンタルピ ○カランドリア管の肉厚 ○カランドリア管の材質 (流動特性試験 -SUS304健全性試験-Zry2) 	<ul style="list-style-type: none"> ○重水温度 (バルク) ○冷却材温度 (炉心出入口) ○アニュラス部温度の周方向、および軸方向分布 ○カランドリア管材料の軸方向、および周方向の内外表面温度分布 ○カランドリア管材料の周方向、および軸方向歪分布
ジ ェ ッ ト 力	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材圧力、エンタルピ ○開口面積 ○燃料集合体流動抵抗 ○アニュラス部の径方向距離 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材圧力 ○冷却材エンタルピ ○燃料集合体有無 ○圧力管予亀裂長さ 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材の圧力、および温度 (炉心出入口) ○アニュラス部圧力の周方向、および軸方向分布 ○アニュラス部温度の周方向、および軸方向分布
圧力管のカランドリア管への衝突力	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材の圧力、エンタルピ ○燃料集合体流動抵抗 ○圧力管の剛性、および開口面積 ○アニュラス部の径方向距離 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材圧力 ○冷却材エンタルピ ○燃料集合体の有無 ○圧力管予亀裂長さ 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材の圧力、および温度 (炉心出入口) ○カランドリア管加速度 ○圧力管、およびカランドリア管の最終変形形状 ○アニュラス部圧力の周方向、および軸方向分布 ○カランドリア管歪の周方向、および軸方向分布

表 2.3.2-3 同時破断時のカランドリア構造物の健全性を評価する上で重要とされる負荷要素と計測量の関係

カランドリア構造物の健全性を評価する上で重要な負荷要素	想定されるメカニズム	負荷に影響を与える因子	試験パラメータ	計測項目
1 内 圧	冷却材放出による体積増の冷却材の減圧沸騰の体積膨張で内圧上昇 (注) 内圧を抑制する効果は、ラプチャーディスクの破断と放出蒸気の凝縮	・冷却材 エンタルピ・圧力 ・破断口 形状 エンタルピ・質量 圧力 ・隣接カランドリア管・制御棒案内管 剛性 (体積弾性率) 本数・比熱 ・カランドリアタンク 剛性 (体積弾性率) 比熱 (熱容量) ・ラプチャーディスク 設定破断圧 開放時定数 ・燃料集合体 流動抵抗	・冷却材エンタルピ ・破断口 形状 ・減速材温度 ・燃料集合体の有無 ・出口の向き ○ ○ ○ ↖ ○ ← ○ ○ ○ ○ ○	・圧 力 隣接チャンネル タンク内分布 径方向分布 軸方向分布 タンク壁 周方向 上下方向 ラプチャー-Fe四 ・温 度 隣接チャンネル 材料, 流体 制御棒 材料, 流体 径方向分布 タンク壁面 材料, 流体 隣接チャンネル 材料, 流体 ・歪 隣接チャンネル 材料, 流体 制御棒案内管 防振板 タンク壁 ・加速度 破断チャンネル 防振板 隣接チャンネル ・ボイド分布 ボイド計 軸方向 径方向 モニタカメラ 分布状況
2 ジェット力	二相放出に伴う動圧が直接作用する。	・冷却材 エンタルピ・圧力 ・ブローダウン流量 ・減速材 圧力 ・破断口 形状	・破断口形状 ・冷却材エンタルピ ・減速材温度	・圧 力 隣接チャンネル ・ボイド (参考) モニタカメラ
3 反 力 (衝突)	ブローダウンに伴う反力で破断チャンネルが ・直接隣接管と接触 ・防振板を介して接触	・冷却材 エンタルピ 圧力 ・ブローダウン流量 ・破断口 形状 ・圧力管 カランドリア管 材料特性 ・燃料集合体 剛性 質量 ・防振板 剛性 ・減速材 密度・粘性	・破断口形状 ・冷却材エンタルピ ・減速材温度 ・破断口形状 ・冷却材エンタルピ ・破断位置	・加速度 破断チャンネル 防振板 隣接チャンネル ・歪 破断チャンネル 防振板 隣接チャンネル ・最終形状 破断チャンネル 防振板 隣接チャンネル 制御棒案内管 ・温 度 材料温度 破断チャンネル 防振板 チャンネル
4 材 料 温 度	ジェット流による熱伝達率の向上による局所応力	・冷却材 エンタルピ・圧力 ・流量 ・減速材 エンタルピ・圧力 ・質量 ・隣接管 CO ₂ エンタルピ・流量 ・隣接管カランドリア管 比熱・熱容量	・冷却材エンタルピ ・減速材エンタルピ	・温 度 破断チャンネル 防振板 材料 隣接チャンネル 減速材温度分布

表 2.3.3-1 圧力管破断試験装置と実証炉実機との比較

	A T R 実 証 炉	試 験 装 置 (流 動 特 性 試 験)	備 考
1. 構 造			
(1) カランドリアタンク タンク外径、及び高さ (上下管板間)	φ7950mm×4470mm ^H (φ17774mm部 φ9550mm×1200mm ^H)	φ3000mm×4470mm ^H (φ17774mm部 φ4000mm×1200mm ^H)	実証炉カランドリアタンク は基本設計の値で記載
装荷チャンネル数	648チャンネル	97チャンネル	試験体以外のチャンネルは、圧力管を装荷しない。
材質 タンク本体	SUS304	SS 41	リガメント剛性等価
防振板	Zr-2	SUS 304	
ラプチャーディスク			
口径	φ650mm	φ700mm (接続配管650mm)	
破断圧力	1.3kg/cm ² ・G	1.3kg/cm ²	
(2) 圧力管		(試験体)	
外径	φ126.4mm×4.3mm ^t	φ126.4mm×4.3mm ^t	
材質	Zr-2.5Nb	STPG42相当 (シームレス管)	
支持部	下部鉄水遮蔽体下管板	カランドリアタンク下管板	
継手構造	ロールジョイント	フランジ継手	
初期欠陥		0.2mm巾予亀裂	予亀裂長、破断圧力パラメータ
(3) カランドリア管		(試験体)	
内径及び肉厚	φ158.4mm×1.9mm ^H	φ158.4mm×5mm ^t (3ケースは1.9mm ^t)	試験体以外は全て外径 162.2mm×5mm ^t
材質	Zr-2	SUS 304 (シームレス管)	SUS 304
支持部	カランドリアタンク上下管板	カランドリアタンク上下管板	
継手構造	ロールジョイント	フランジ及びボルト	
(4) 鉄水スリーブ			
長さ	1120mm	500mm	水単相λL/D等価
(5) 燃料集合体	36本クラスタ	36本クラスタ形状模擬 (燃料要素は非発熱のSUS304 中実丸棒) とする他は実機形状、材質寸法を模擬	
(6) 上部遮蔽プラグ			
材質	SUS304	SUS304	水単相λL/D等価
寸法	φ994mm×785mm	φ117mm×785mm	
(7) 下部遮蔽プラグ			
材質	SUS316	SUS304	水単相λL/D等価
寸法	φ110mm×1155mm	φ110mm×1000mm	破断模擬はラプチャーディスクを使用
(8) 炭酸ガスベローズ	付	無	
2. 流 体			
(1) 冷却材			
初期温度、及び圧力	274℃、75kg/cm ² a (炉心入口)	240~290℃、65~85kg/cm ² a (炉心入口)	破断圧力、サブクール度パラメータ
クオリティ	入口 0%~出口 16%	0%	
初期流量	10.5kg/s/チャンネル	破断直前 0kg/s/チャンネル (試験体)	試験体強制加圧時
(2) 減速材		(軽水)	
温度	70℃	70℃	
流量	1.5m ³ /分	約0.44m ³ /分	減速材流速がドライアウト時のボイド上昇速度に与える影響は極めて少ない。

表2.3.4-1 圧力管破断試験における計測量

(注、全て最大数量を記載)

収集速度	計測箇所	計測項目	C / T 健全時		C / T 同時破断時			備考
			流動特性試験	C/T 健全性試験	内圧上昇試験	隣接管健全性試験	燃料冷却性試験	
高速	試験体	歪	52					最高20KHz 収集 最大160Ch (12.5 KHz 時) (20KHz時100Ch) トリガーは別Ch 160Chを越える ものはその都度検 討のうえ削除
		加速度	6		5	5		
		圧力	22	5	5	5		
		トリガー	1	1	1	1	1	
	カランドリア タンク内部	圧力			75	75		
	カランドリア タンク壁面	歪			60	60		
		圧力			30	30		
	放出口	圧力			1	1	1	
CO ² ライン	圧力	2	2					
中速	試験体	温度	5	5	5	5	5	最高1KHz 収集 最大112Ch 一部U-1500システ ムを使用
	カランドリア タンク内部	温度			75	75	75	
		ボイド	76		26	26		
	カランドリア タンク壁面	温度			30	30	30	
	放出口	温度			1	1	1	
	CO ² ライン	温度	2	2				
低速	試験体	温度					150	U-1500システムを 使用
	カランドリア タンク内部	温度	50	50				
	試験体入口・ 出口配管	温度	2	2	2	2	2	
圧力		2	2	2	2	2		
超高速	試験体	亀裂進展 速度	20	20	20	20	20	専用特殊ロガーを 使用(専門計測会 社に依頼)
	その他	温度・圧力 (運転用)	15	15	15	15	15	U-1500システムを 使用

表2.4.1-1 高速データ収集システムのデータ収集条件

グループ		収集周期	チャンネル数	収録時間	備 考
1	1	20.0KHz	100 CH.	5 秒間	
	2	10.0KHz	100 CH.	10 秒間	
	3	12.5KHz	160 CH.	5 秒間	
	4	5.0KHz	160 CH.	10 秒間	
	5	2.0KHz	160 CH.	30 秒間	
2	1	1KHz	112 CH.	1 分間	
	2	500KHz	112 CH.	2 分間	
	3	200KHz	112 CH.	5 分間	
	4	100KHz	112 CH.	10 分間	
	5	10KHz	112 CH.	100 分間	

表2.4.2-1 検出器仕様一覧

No.	検出器種類	メーカー・型式	計測すべき状態量	設置環境	測定範囲	精度	応答周波数時定数	数量
1	歪ゲージ式圧力計	ST研究所 PH1100 E S PH110 E S	試験部入出口の冷却材圧力 アニユラス部供給CO ₂ ガス圧力 カランドリアタンク内圧力 アニユラス部圧力	常温～300℃の常水 常温～50℃のCO ₂ ガス中 常温～300℃の水中 常温～300℃の温水	0～100kg/cmG 0～10kg/cmG 0～10kg/cmG 0～10kg/cmG	±1 %FS	10kHz 以上	2 1 1 1
2	C-A熱電対 (非接地)	岡崎製作所 T-35	試験部入出口の冷却材温度 カランドリアタンク内水温 アニユラス部供給CO ₂ ガス温度	0～84Kg/cm ² の水中 0～10Kg/cm ² の水中 0～5 Kg/cm ² のCO ₂ ガス中	0～300℃	0.75級	0.5秒(静水中)	2 1
3	タービン流量計	トキコ PPL1054NPP -DBNS	試験部入出口の冷却材流量	常温～300℃, 0～84Kg/cm ² の水中	±100m ³ /H	±0.5 %FS	150 Hz	本体 2 (内蔵16)
4	CO ₂ 流量計	TECMAX 840-08-1 (CO ₂ , 0-2SLM)	アニユラス部供給CO ₂ ガス流量	常温～50℃, 0～5 Kg/cm ² のガス中	0～2 SLM	±1 %FS	0.3秒	1
5	湿分計	VISALA HMP124B	アニユラス部出口CO ₂ ガス湿分	常温～200℃, 0～5 Kg/cm ² のガス中	0～100%	±2 %FS	5秒	1
6	圧力計	KISTLER 6111Q	圧力管内部, アニユラス部圧力	常温～300℃の水中, CO ₂ ガス中	0～150kg/cmG	±1 %FS	50kHz以上	8 8 (77/25)
7	熱電対 (非接地)	岡崎製作所 T-35	圧力管内部, アニユラス部温度 カランドリア管外面温度	0～84Kg/cm ² の水中	0～300℃	0.75級	5ms以下	5 7 7
8	歪ゲージ	共和電業 SKP-3844	カランドリア管の歪 圧力管の歪	0～10Kg/cm ² の水中 0～84Kg/cm ² の水中	2%		100kHz以上	6 7 6
9	加速度計	DJB A/23/SI.SPL	圧力管, カランドリア管の加速度	常温～300℃, 0～84Kg/cm ² の水中	10000G	±1 %FS	50kHz以上	4 5 (77/6)
10*	圧力計	KISTLER 6111Q	圧力管内部, アニユラス部, カラ ンドリア管タンク内部圧力等	常温～300℃水中 CO ₂ ガス中	0～20kg/cmG	±1 %FS	50kHz以上	3 3 (77/80)
11*	歪ゲージ	共和電業 SKP-3844	カランドリアタンクの歪	大気中	2%		100kHz以上	6 0
12*	熱電対	岡崎製作所 T-35	カランドリアタンク内(外壁)	常温～10Kg/cm ² の水中	0～350℃	0.75級	10ms以下	3 0 (80/60ch)
13*	ボイド計	岡崎製作所	カランドリアタンク内ボイド率	常温～300℃, 減圧～10Kg/cm ²	—	—	—	7 6 (77/80)
		S型	ボイド率	常温～300℃, 減圧～84Kg/cm ²	—	—	—	4 5 (77/76)

*については63年度製作

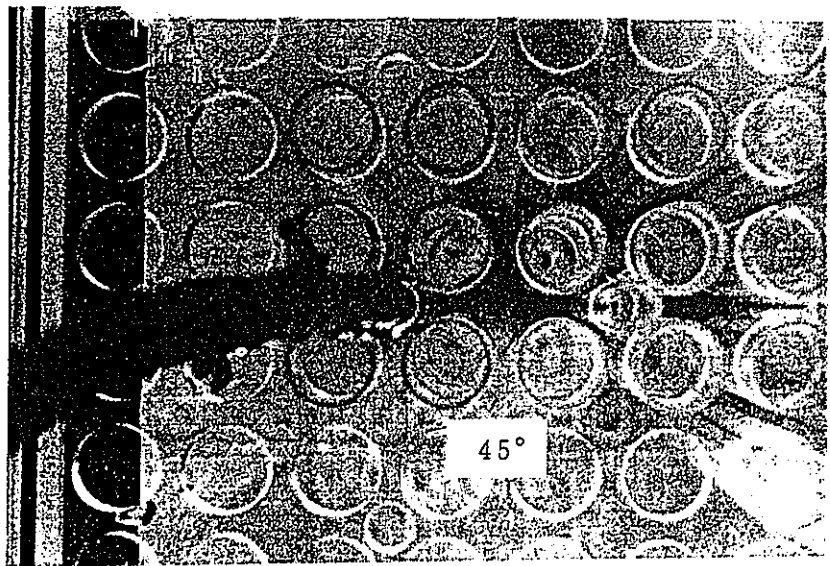
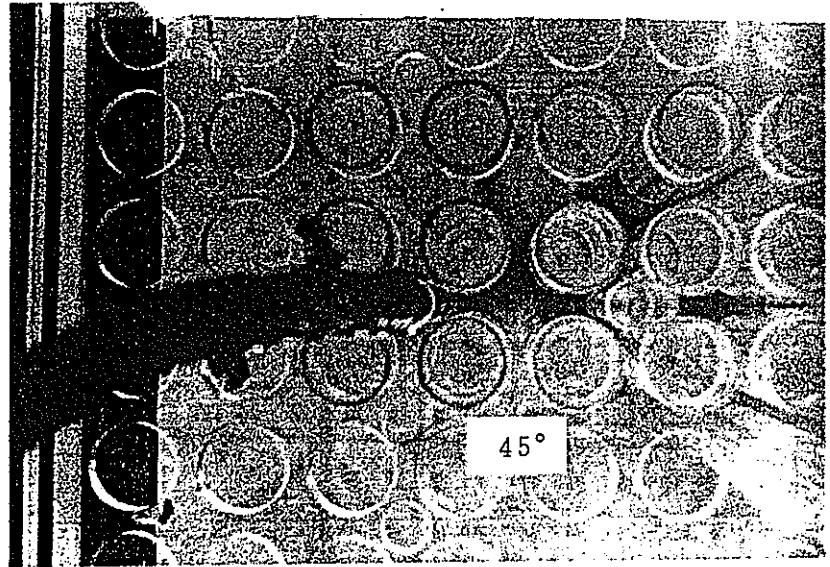
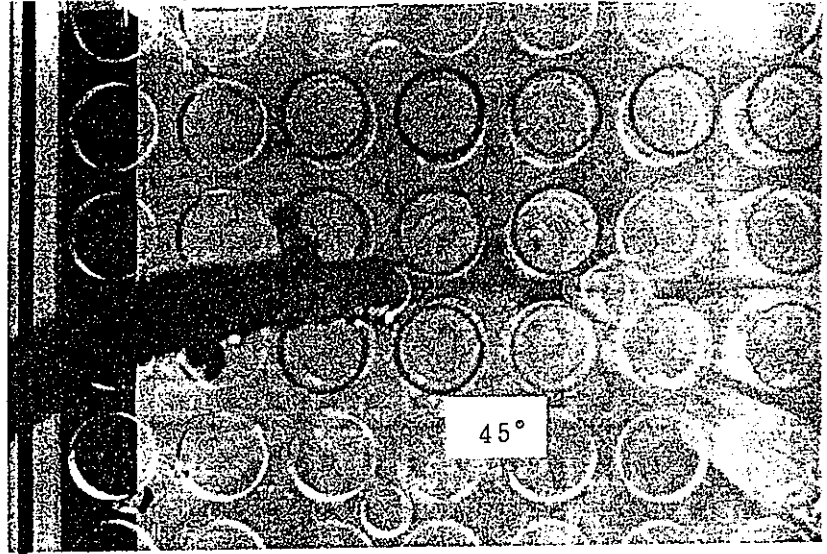
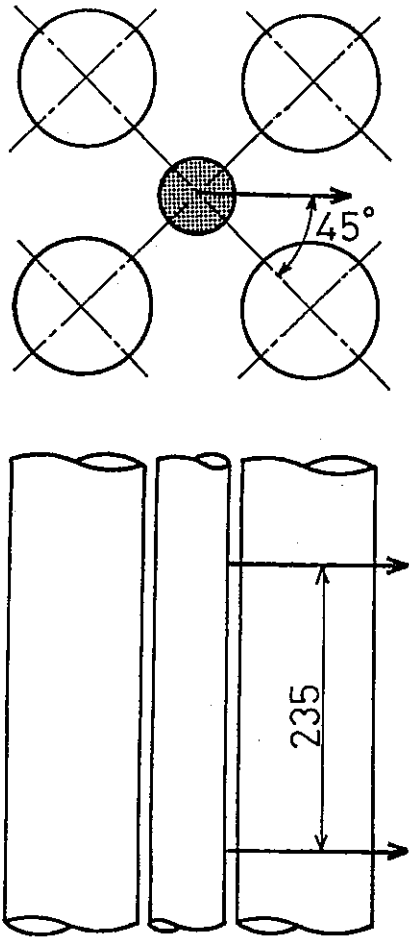


図2.3.2-1 ポイズン急速注入実験結果 (文献(1)より)

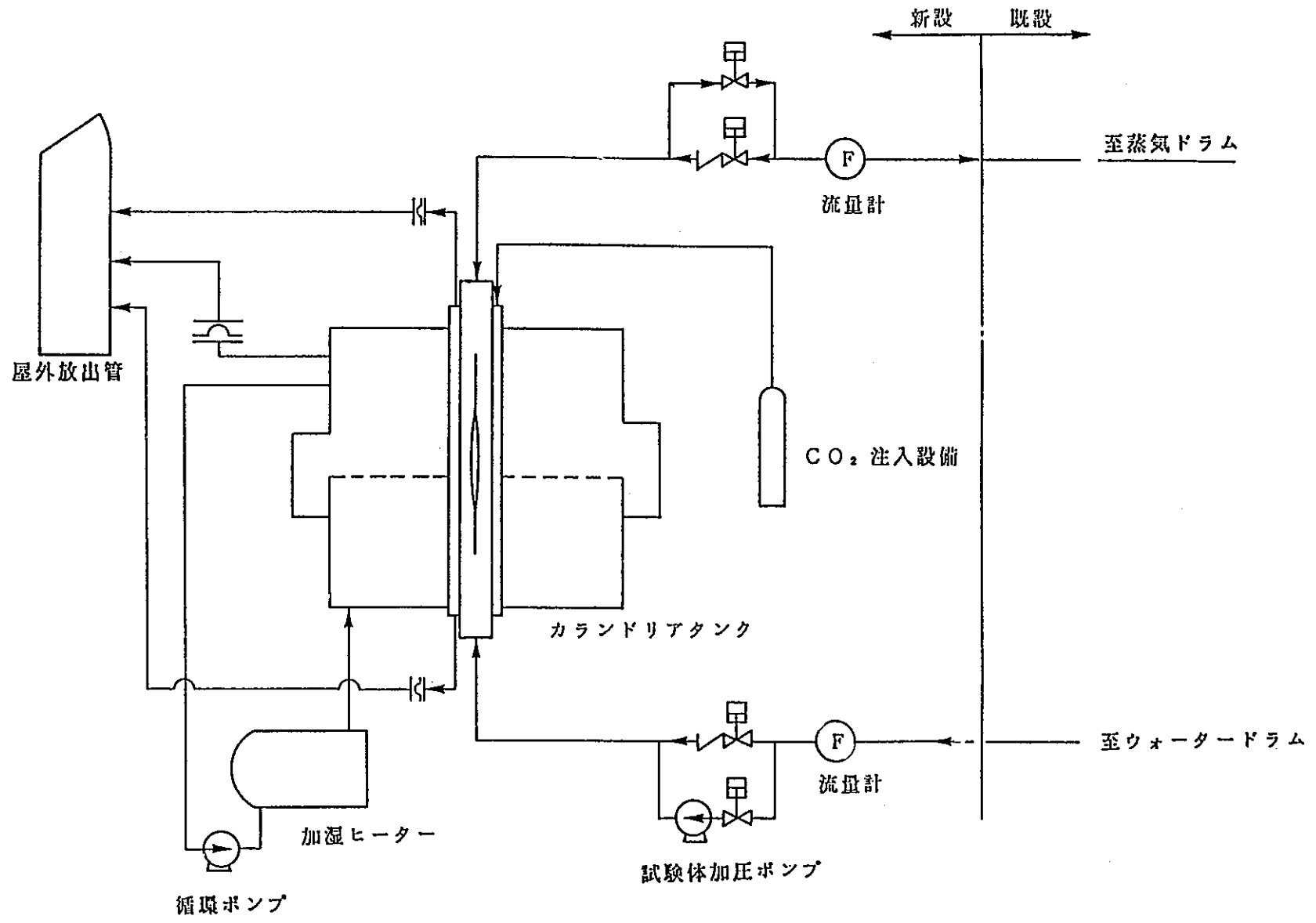


図 2.3.3-1 圧力管破断試験装置フローシート

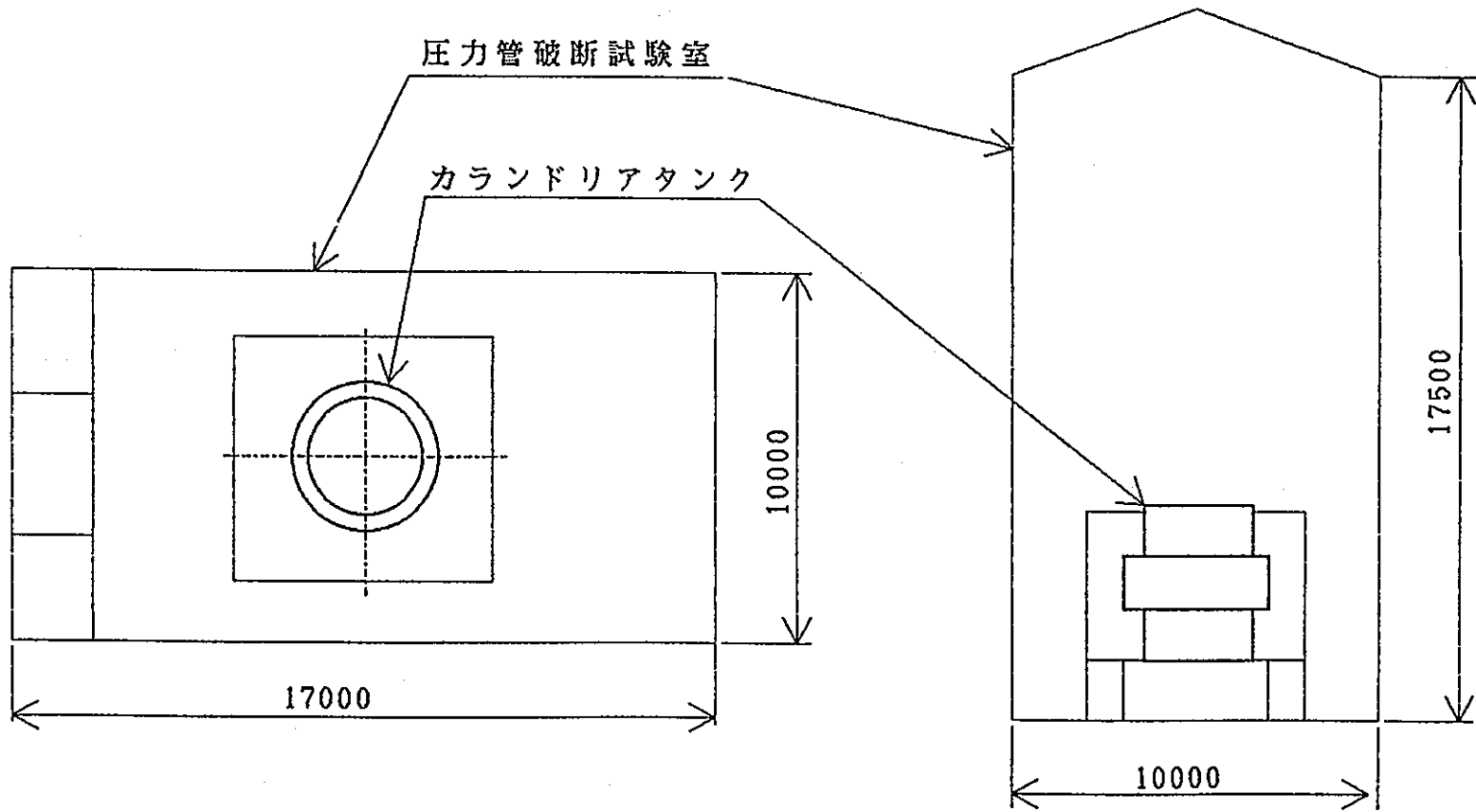


図2.3.3-2 カランドリアタンク配置概念図

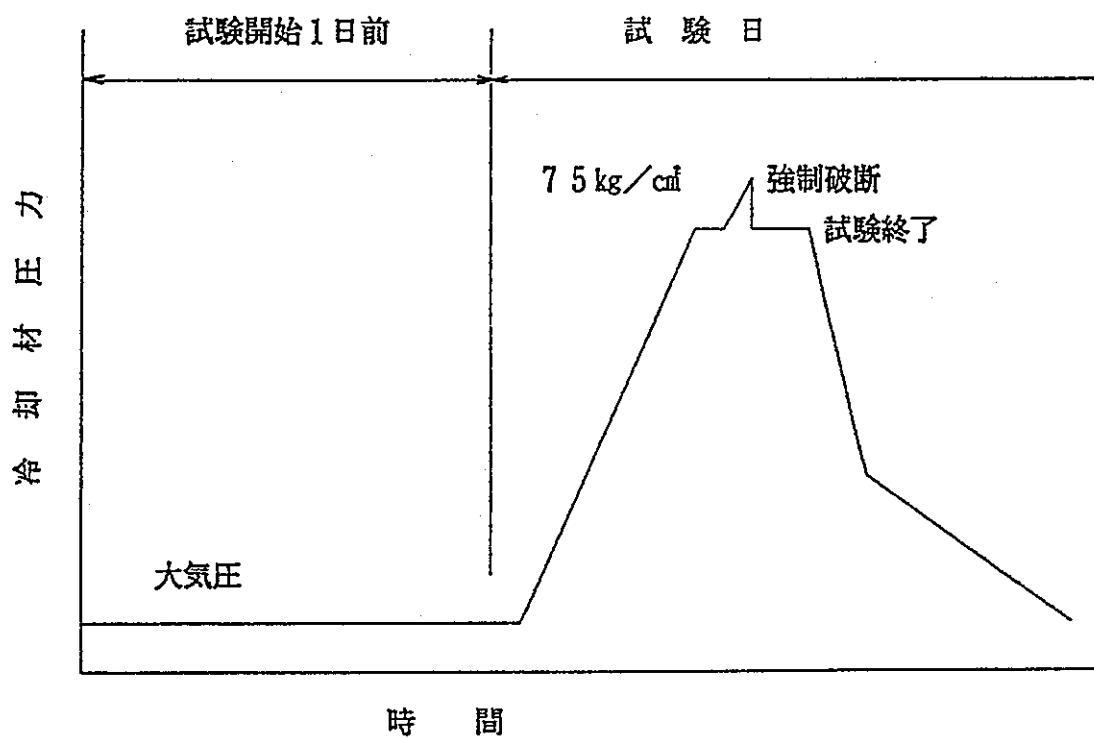
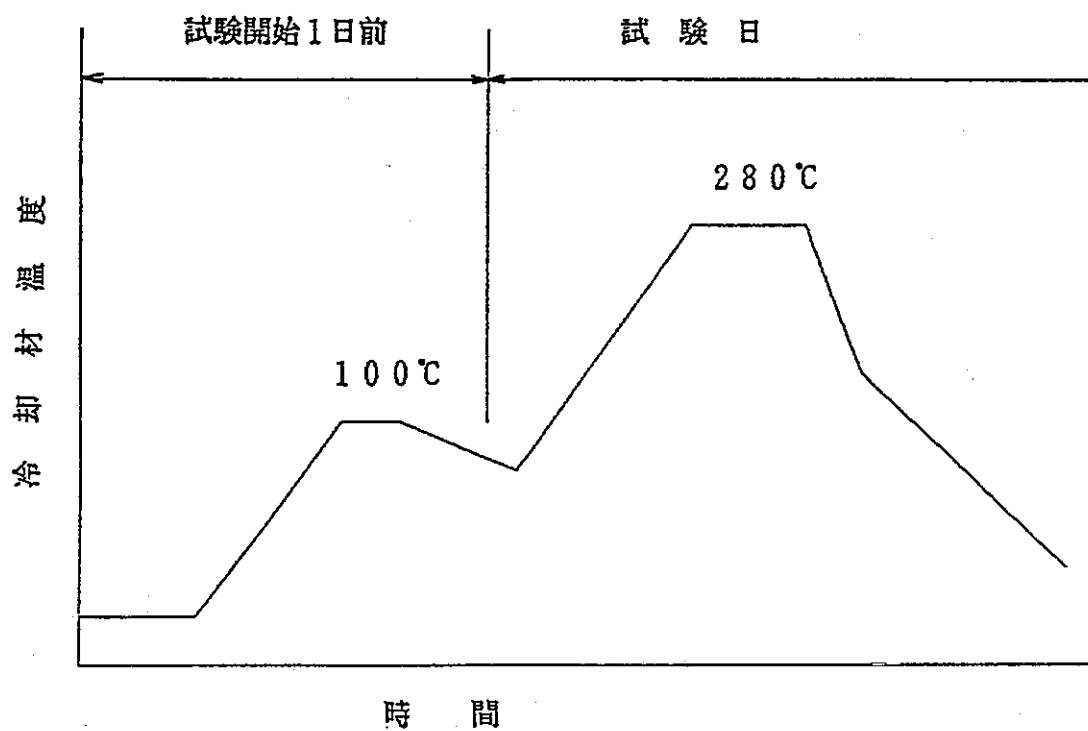


图2.3.3.-3 昇温・昇圧工程概念図

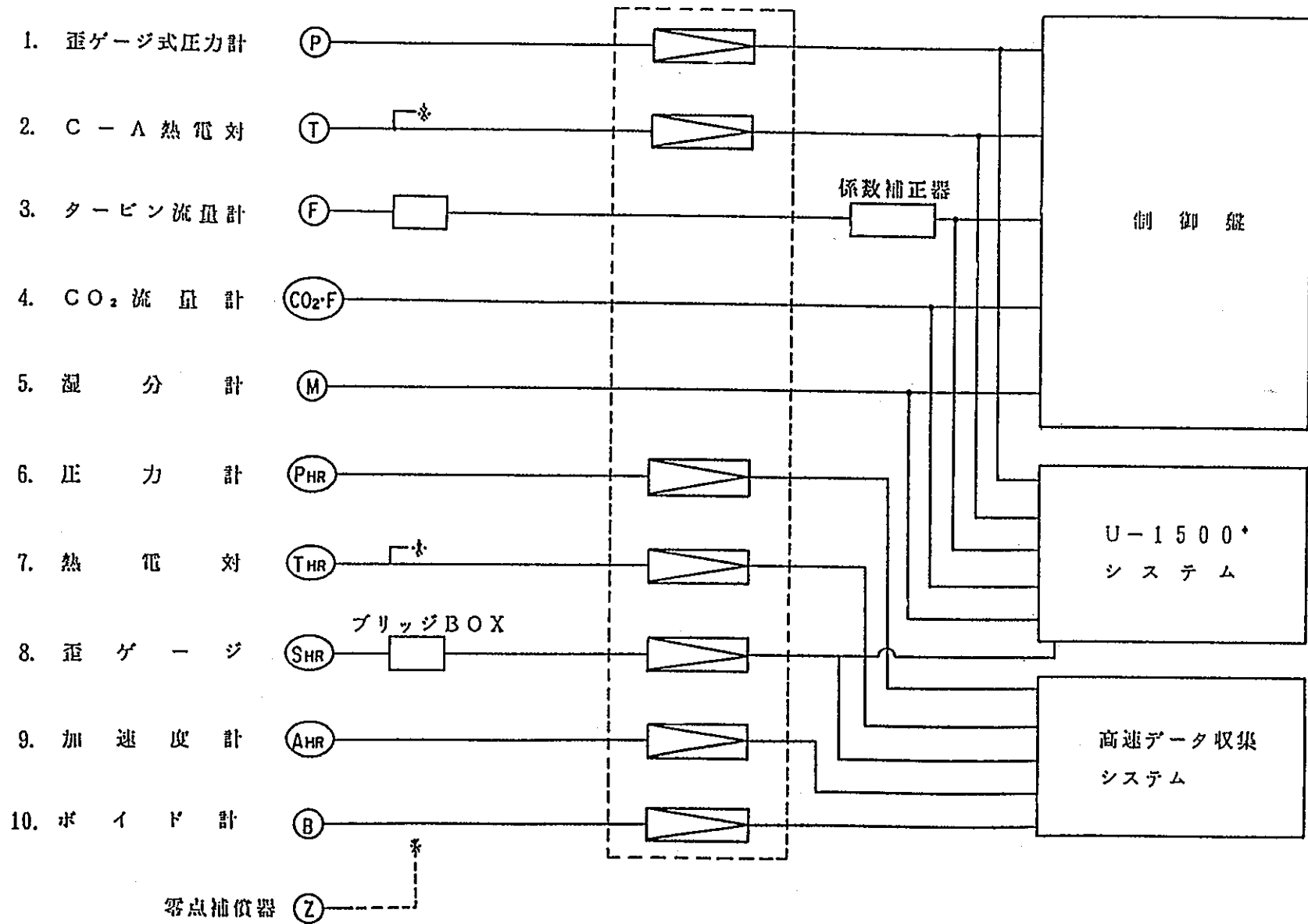


図 2.3.4 - 1 信号伝送系統

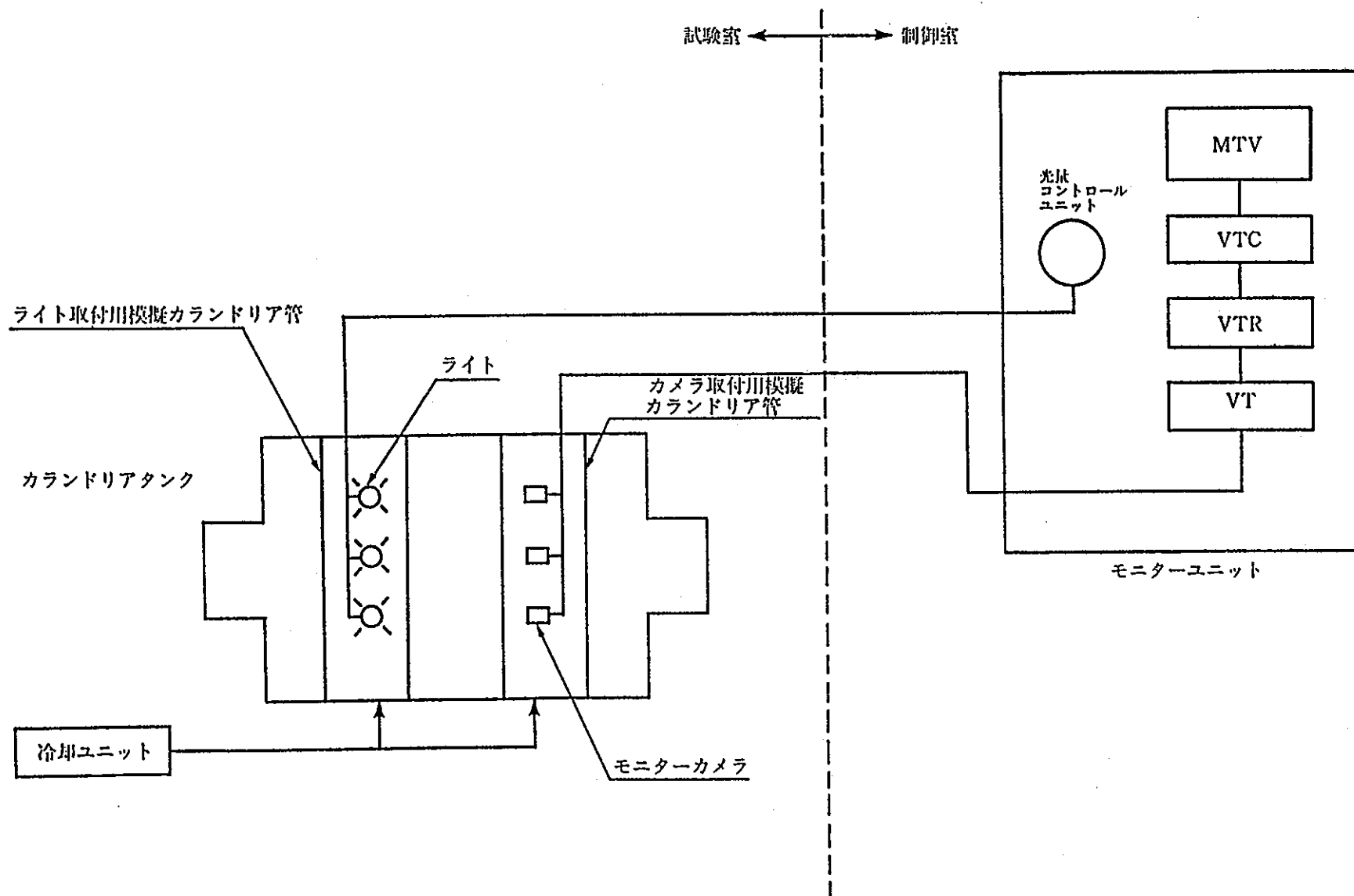


図2.3.4-2 モニター設備概略フローシート

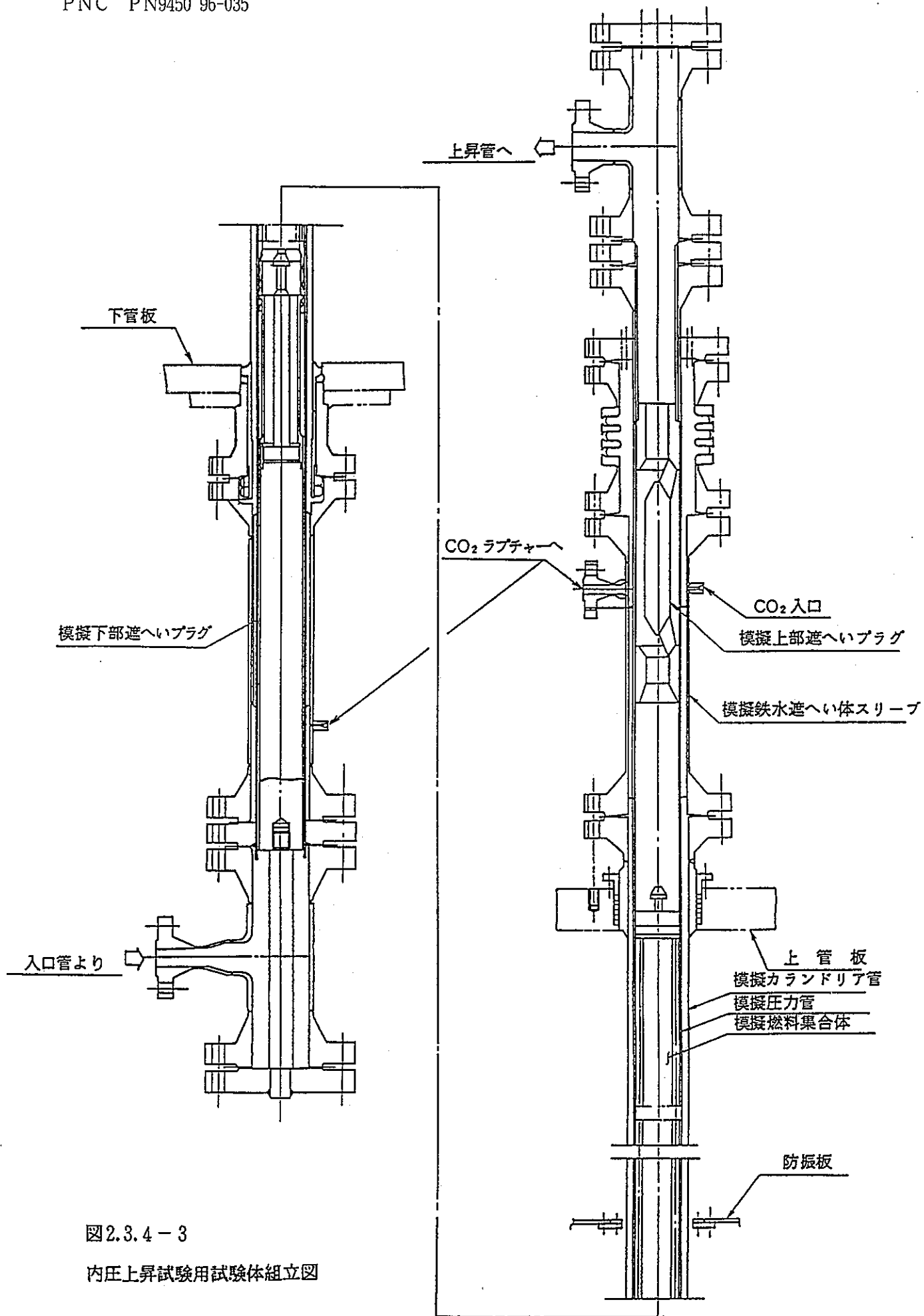
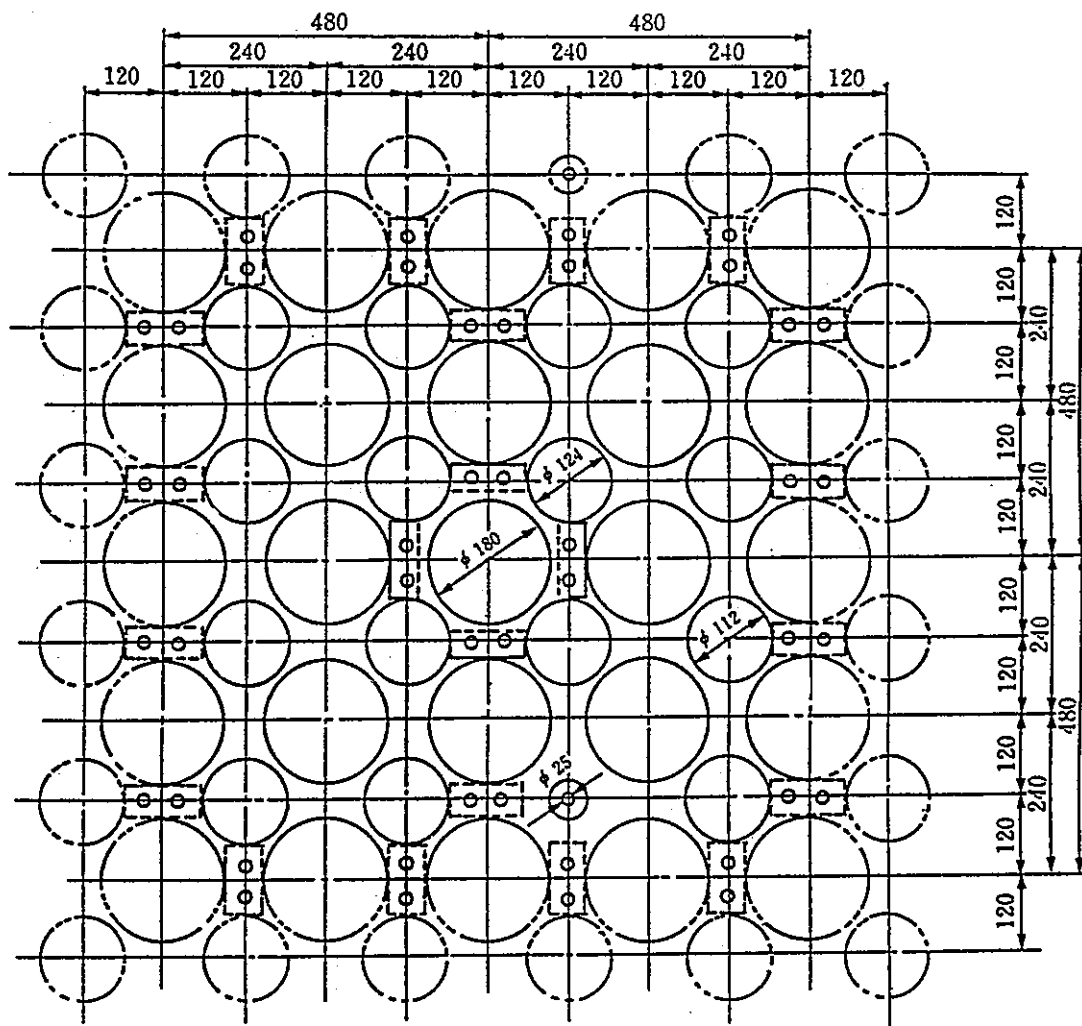


図2.3.4-3
内圧上昇試験用試験体組立図



防振板詳細

図2.3.4-4 防振板試験体部組立図

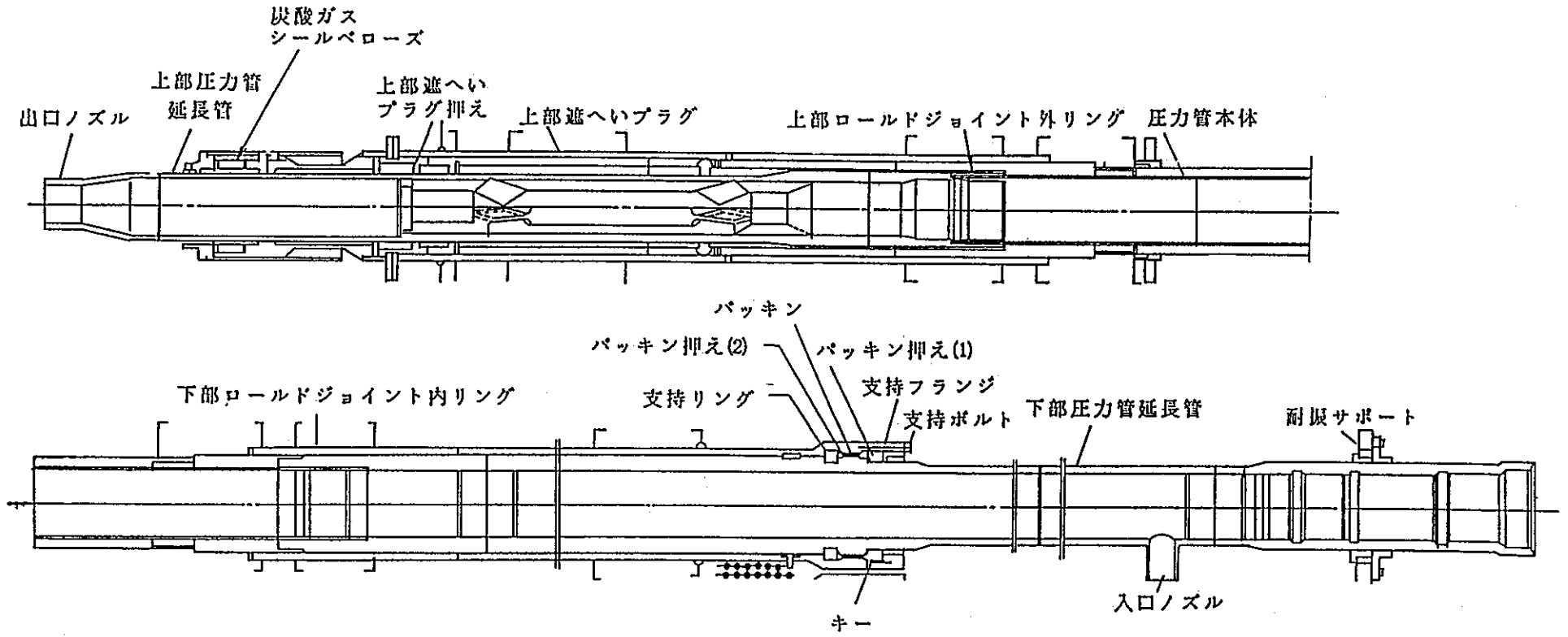


図2.3.4-5 実証炉圧力管組立図

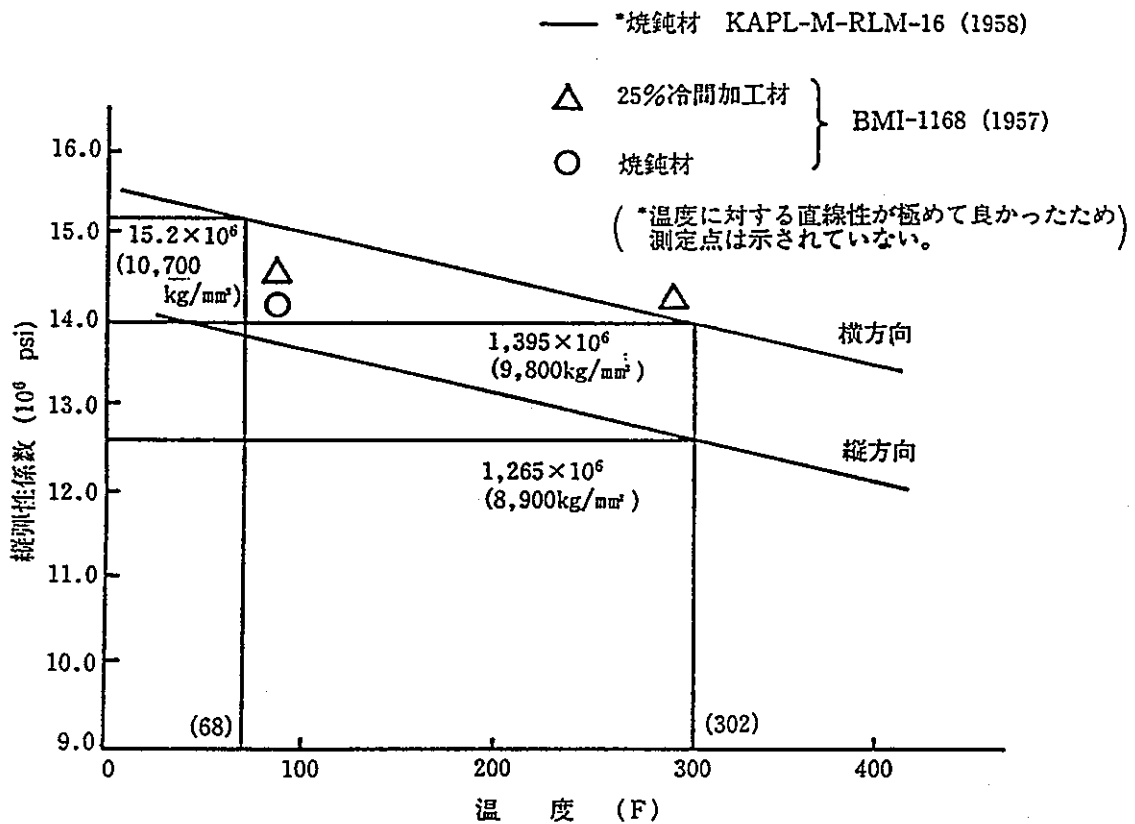


図2.3.4-6 縦弾性係数の試験結果

出典：G. E. Zima; A Review of the
 Properties of Zircaloy-2
 HW-60903 (OCT. 1959)

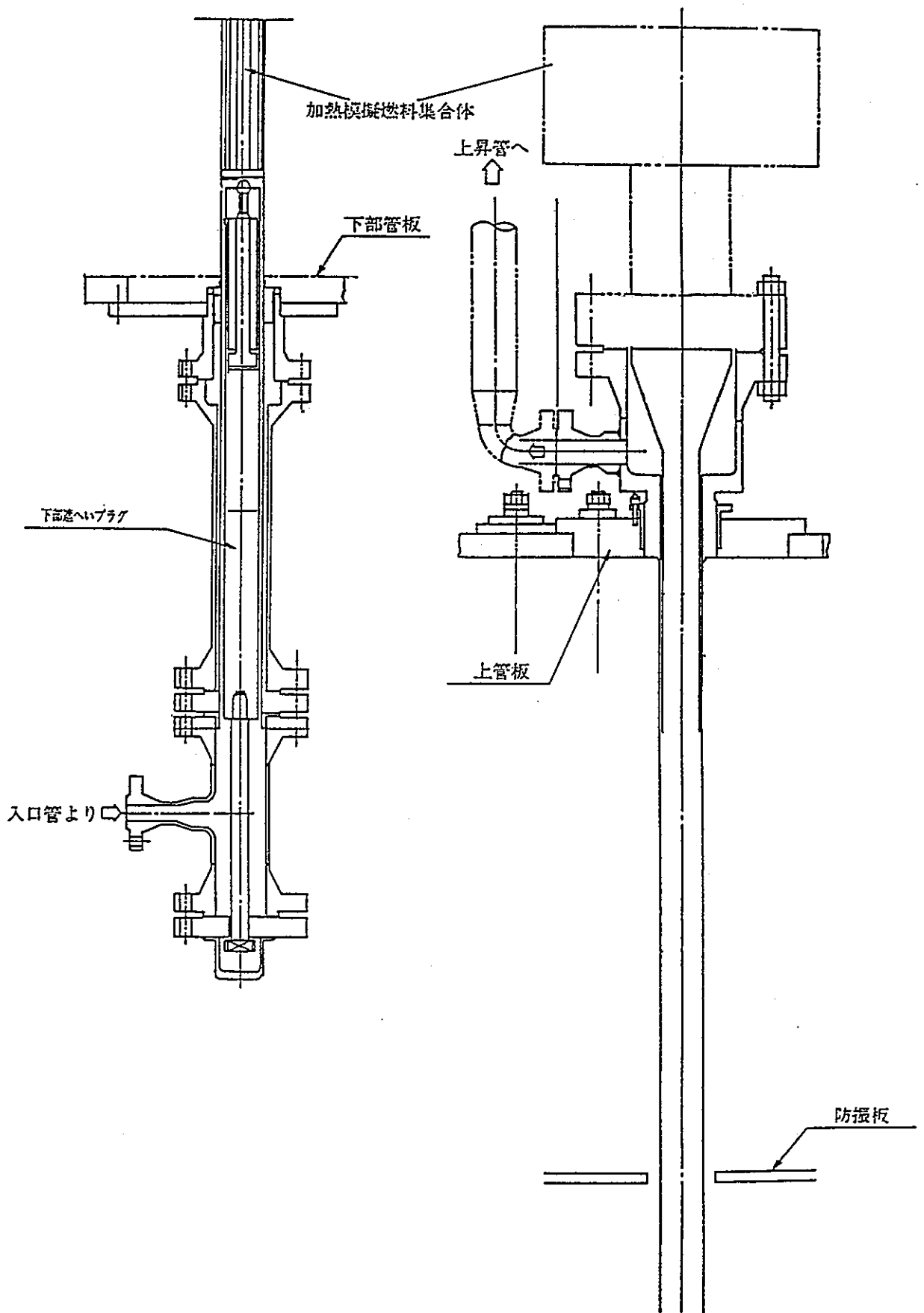


図2.3.4-7 燃料冷却性試験用圧力管組立図

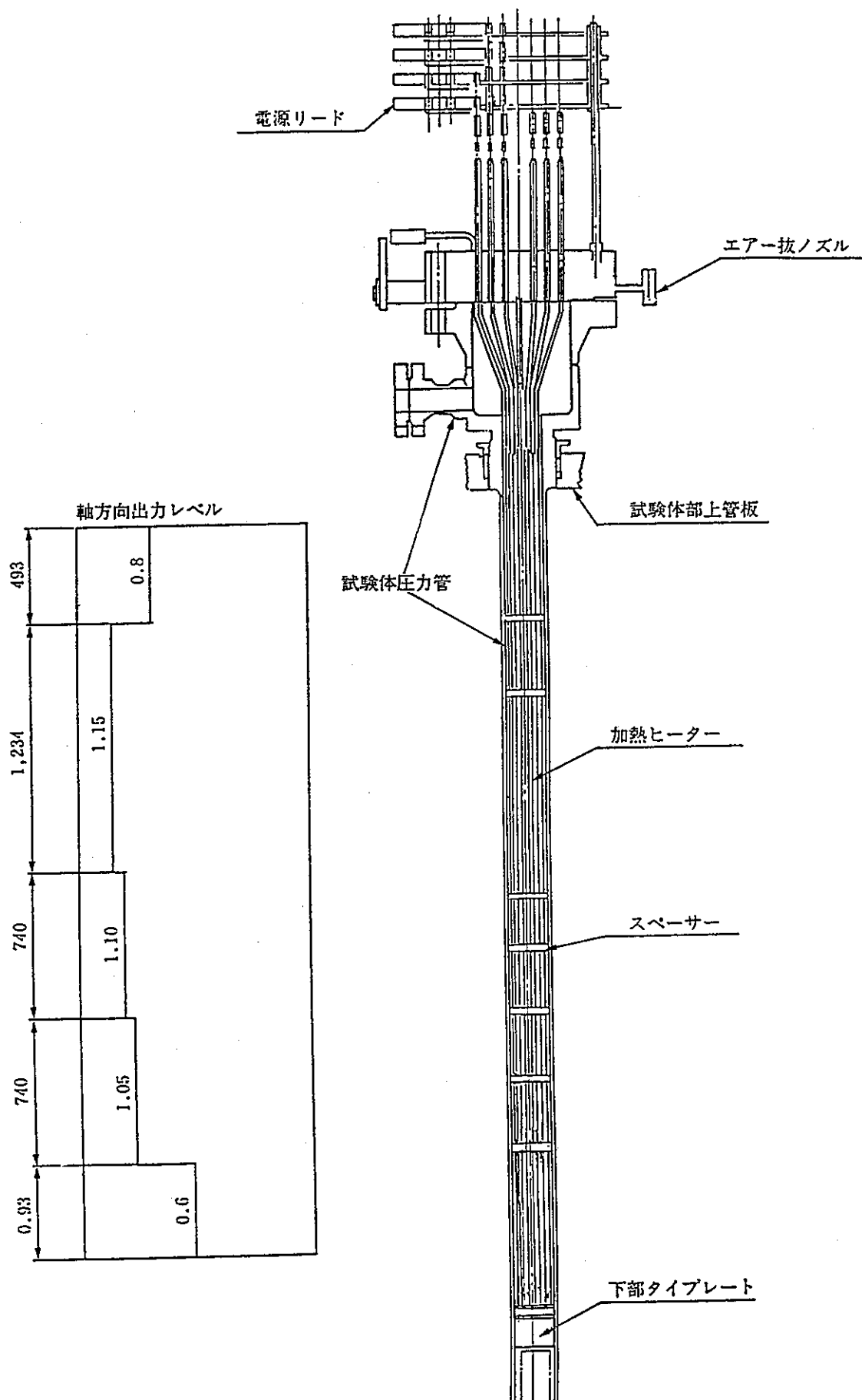


図2.3.4-8 加熱模擬燃料集合体組立図

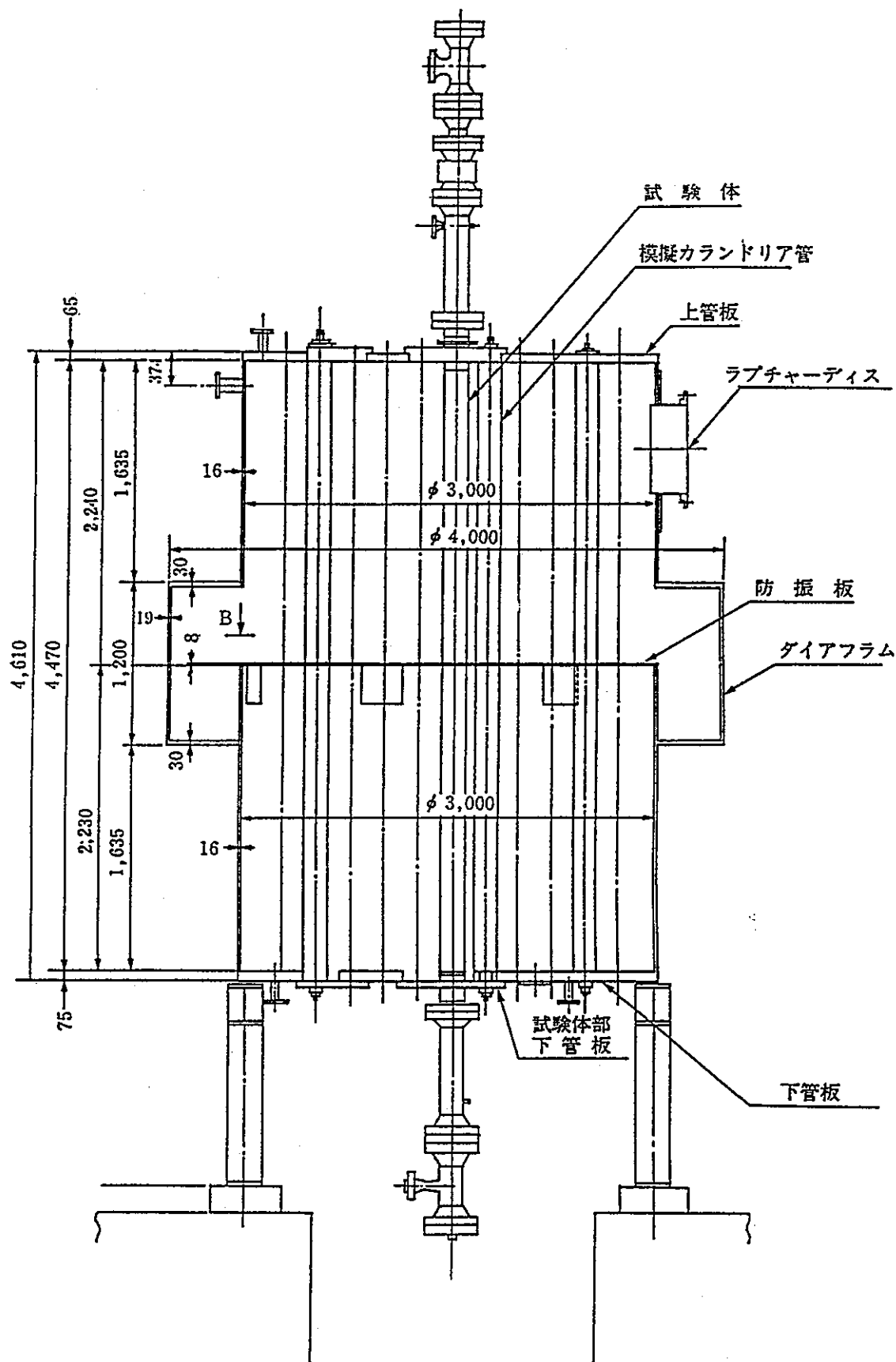


図2.4.1-1(a) カランドリアタンク形状

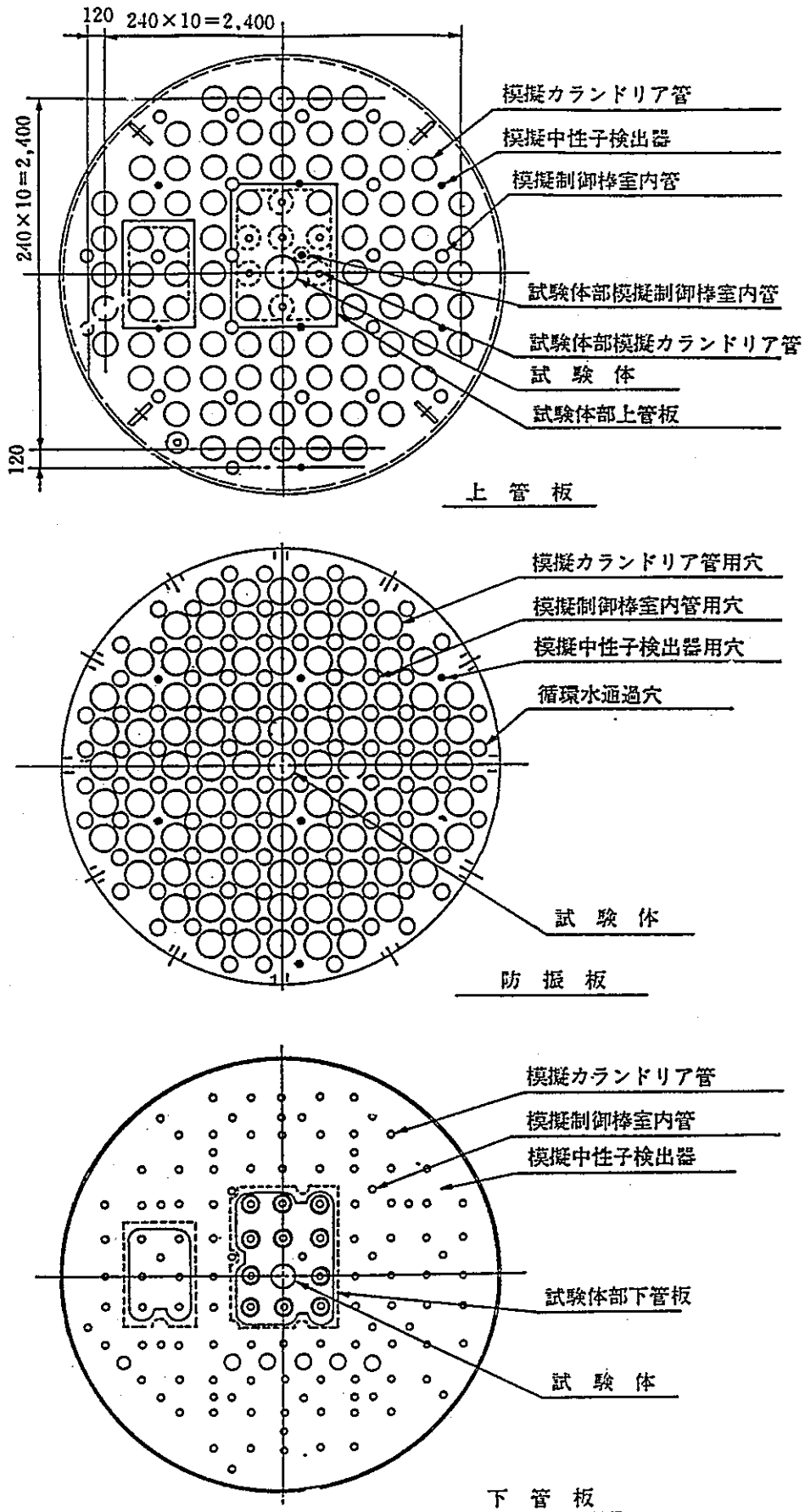


図2.4.1-1(b) カランドリアタンク形状

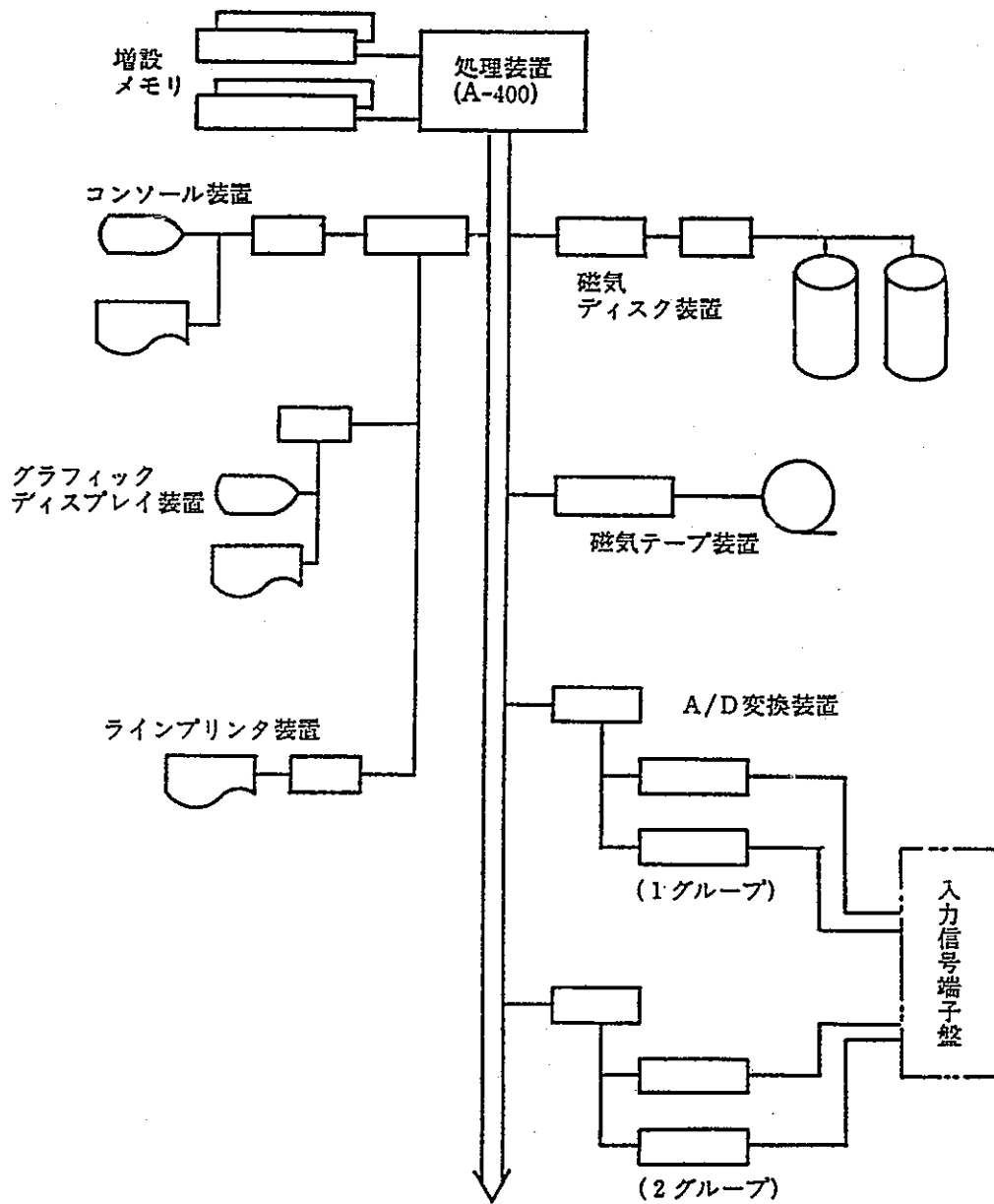


図2.4.1-2 高速データ収集システムの構成

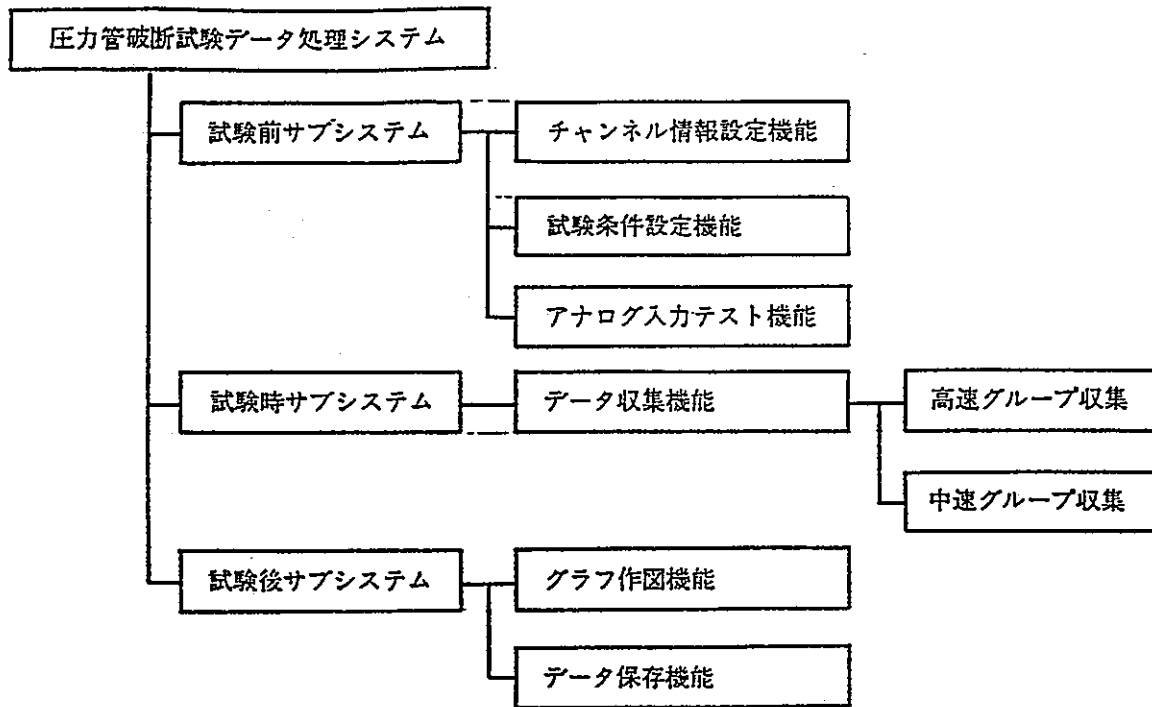


図 2.4.1-3 システムのデータ収集処理機能

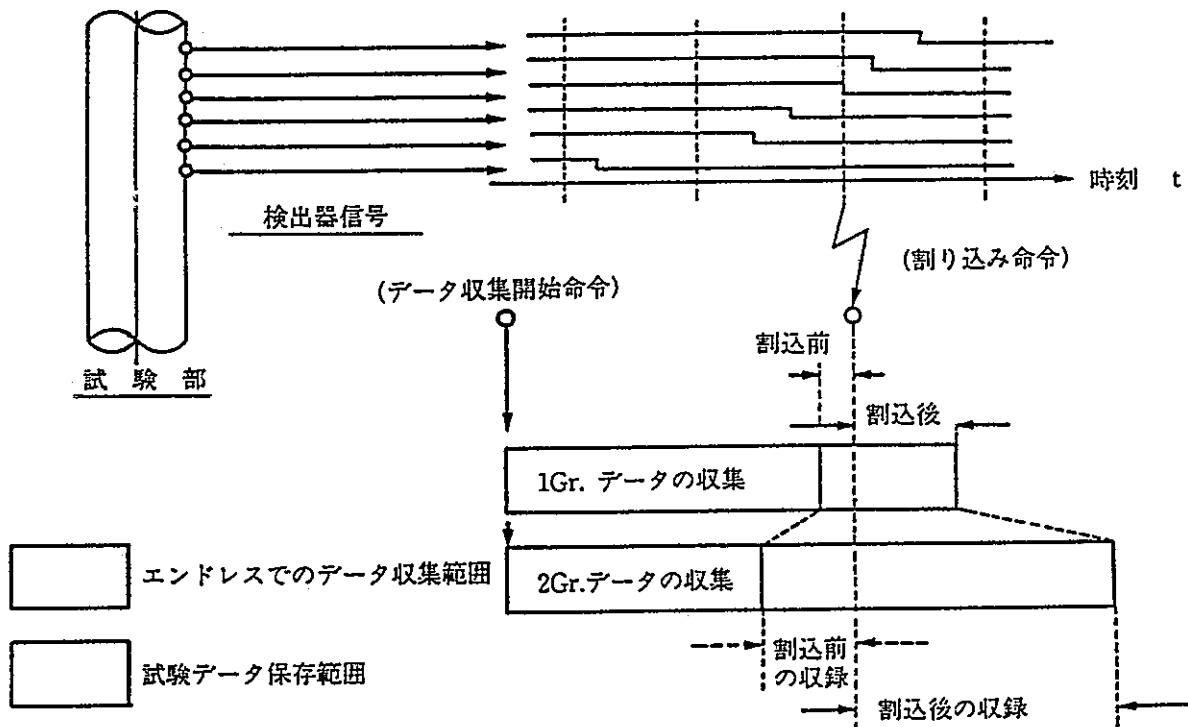


図2.4.1-4 データ収集の概念

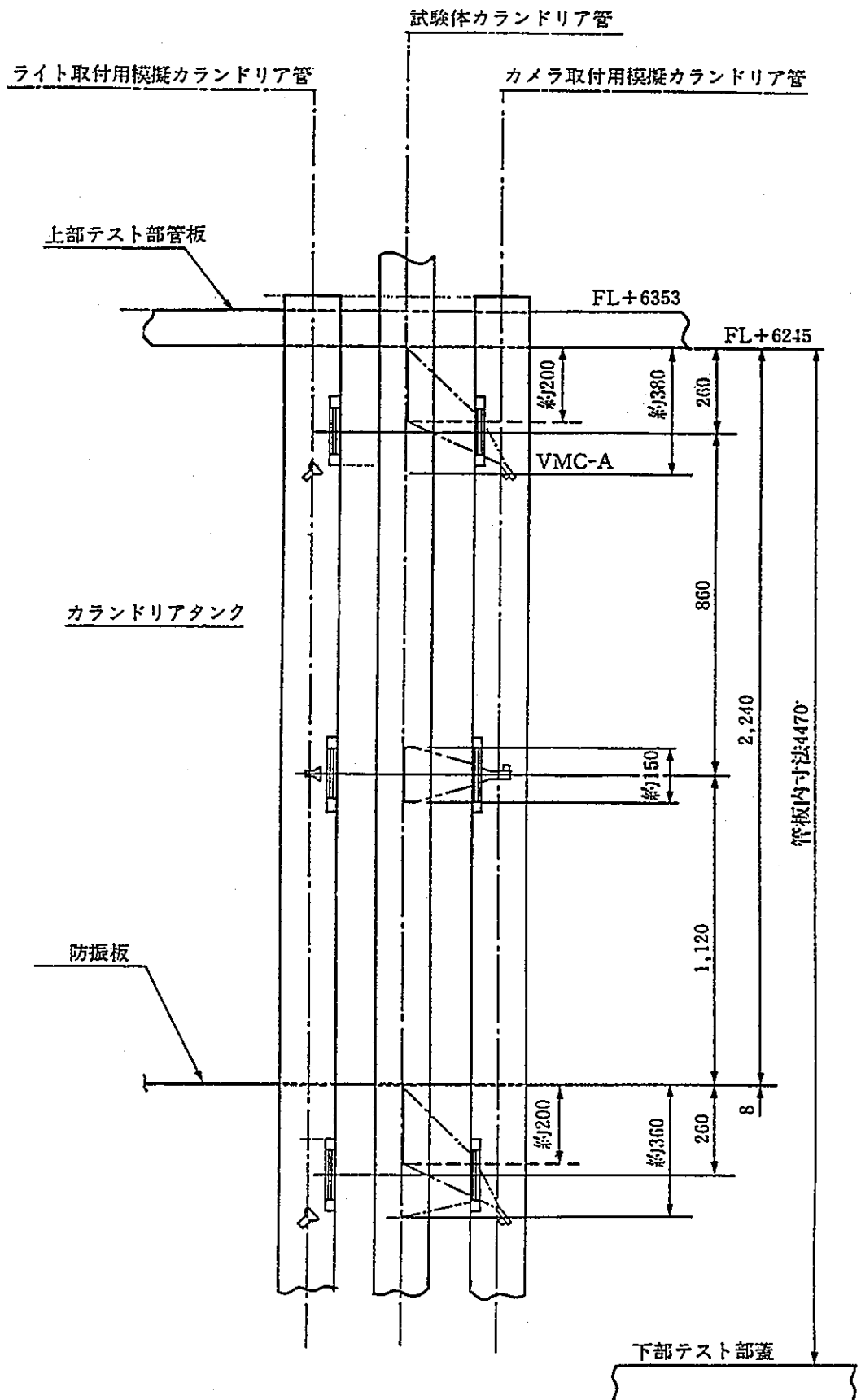


図2.3.2-1(a) モニターカメラ配置(立面図)

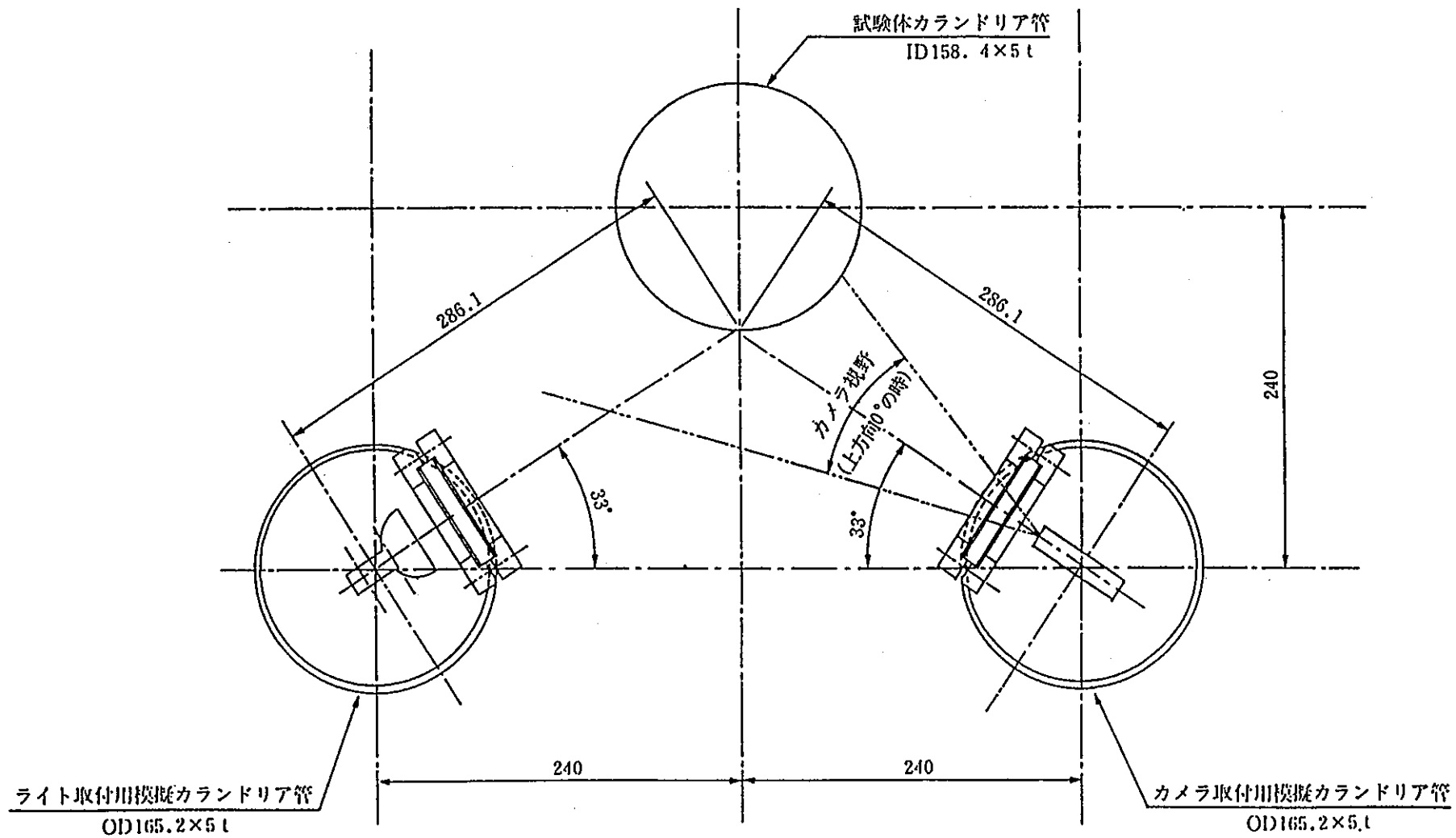


図2.3.2-1(b) モニターカメラ配置(平面図)

3. 圧力管破断試験

圧力管破断試験は表1-1に示す(a)流動特性試験 (b)カランドリア管健全性試験 (c)カランドリアタンク内圧上昇試験 (d)カランドリア構造物健全性試験 (e)燃料冷却性試験の5項目で構成している。本年度は流動特性試験1ケース及び実機材圧力管バースト試験2ケースを実施した。

3.1 流動特性試験

3.1.1 概要

圧力管破断は、第一種圧力容器の破断想定であり、設計基準事象(DBE)を越えるので、その影響評価は可能な限り、現実的なモデルで行う。従って、試験はこの評価モデルの妥当性および保守性を裏付けることができるように、実機を模擬もしくは包絡できるように試験条件および計測条件を設定した。

カランドリア管の健全性を評価するには、圧力管とカランドリア管とのアニュラス部へ、破断口より冷却材が放出する際に生ずる負荷の過渡挙動を解明する事が重要である。破断時にカランドリア管に加わる重要な負荷は、表3.1.1-1に示すアニュラス部内圧上昇、カランドリア管に作用する熱衝撃、ジェット力、そして破断圧力管のカランドリア管への衝突である。

流動特性試験は、これらの負荷の過渡特性の解明を目的として実施した。

なお、試験結果を評価モデルの検証用データとして用いた。

3.1.2 試験条件

流動特性試験は、試験最終年度(平成3年度)までに、計13回の試験を予定している。試験では、負荷に影響を及ぼす因子のうち、特に感度が高いと予想されるき裂速度、燃料集合体の有無、冷却材温度、冷却材圧力、重水温度をパラメータにして実施することとした。63年度はこのうち実機定格運転条件を模擬した試験(ベースケース)を実施した。

(a) 試験ケース : 1ケース

(b) 冷却材条件

実機の冷却材条件を模擬するように圧力、温度を設定したが、圧力管が設定圧力で破断しなかったため、強制的に高圧で破断させた。実機条件と試験条件を比較して表3.1.2-1に示す。

(冷却材)

圧力 : 83.5kg/cm²g

温度 : 259 °C

(模擬重水)

圧力 : 大気圧

温度 : 70°C

(試験体)

図3.1.2-1に試験体外観を示す。

試験体仕様を実機と比較して表3.1.2-2に示す。試験体は、原寸大の模擬圧力管、カランドリア管、燃料集合体及び上下構造物で構成している。圧力管内部には寸法及び公差を実機と同一とした非発熱の模擬燃料集合体を装荷する。また、燃料集合体の上・下には流路形状を模擬し、やや短尺とし表面粗さで圧損を実機と同等とした遮蔽プラグを装置する。圧力管には試験条件の圧力で破断するように試験体中央に長さ 300mmの予亀裂を図3.1.2-2に示す軸方向に外表面から加工している。

カランドリア管の材質はSUS304で、肉厚5mmである。

3.1.3 試験装置

試験装置は、図3.1.3-1に示すように、新設した圧力管破断試験部と既設のATR安全性試験装置とを配管で接続し、一つのループを構成している。試験部のフローシートの詳細を図3.1.3-2に示す。試験条件の冷却材圧力、温度は、既設装置の電気加熱ヒーター（最大7MW）を用いて、昇温昇圧させ設定する。

設定破断圧に対する実際の破断圧は、材料強度のバラツキ及び加工精度のためにこれ迄の予備試験結果から±15%程度の範囲でバラつくことが想定される。従って設定破断圧で破断しない場合には、逆止弁によって試験部を既設ループから隔離し、加圧ポンプによって破断するまで強制加圧する。圧力管の破断後、冷却材は逆止弁を通じて、試験体部に供給され、試験体部を組み込んだループが再構成される。

また、図3.1.3-3に示す試験部カランドリアタンク内の模擬重水は、加熱用電気ヒーターによって予め試験条件温度まで昇温しておき、試験開始までヒーターのON-OFF制御により一定温度を保持させる。

3.1.4 試験計測

(1) 計測項目と検出器仕様

圧力管破断時の挙動を解明する上で必要な計測項目は、表3.1.1-1に示した通りである。これに対応する計測を行う検出器の仕様を表3.1.4-1に示す。検出器の仕様は、試験時に予測される測定量の応答速度、変化幅及び検出器の使用雰囲気から決定した。

(2) 検出器配置

① 試験体部

試験体部は図3.1.4-2に示すように、対称性の観点から圧力管集合体の1/4を重点的に計測することとした。圧力管集合体の構造は上下対称であり、左右も又、軸対称である。従って、構造上は試験体部全体の1/4を計測の対象とすれば良い。一方冷却材条件は実機では入口部と出口部ではクオリティーが0%から16%まで変化しており、対称とは言えないが、試験では単相であり上下対称である。ところで、破断後アニュラス部を経て系外に出る放出水は、上部の鉄水しゃへい体スリーブの面積が下部より約8倍大きいので、試験体上部CO₂ラプチャーからの放出が大半となる。従ってカランドリア管を介した冷却材の重水側への熱流束は上部が大きい。更に重水側の温度分布は、自然対流効果によって上部の温度が高くなる。以上のことから、カランドリア管の健全性で着目すべきは上部となる。図3.1.4-2に示す重点計測域は以上のような観点から決定した。主要な計測量は、圧力管内圧力、圧力管亀裂進展速度、アニュラス部の圧力及び温度、カランドリア管の温度、歪、加速度等である。これらの計測のための検出器の詳細取り付け位置を図3.1.4-3～図3.1.4-5に示す。又、カランドリア管への圧力計、温度計及び加速度計の取付法を図3.1.4-6～図3.1.4-8に示す。

② 重水部

模擬重水中のボイド挙動を視覚的に捉えるボイドモニターカメラは、図3.1.4-9に示す試験体部の上中下方向の3ヶ所を観察の対象とした。また、図3.1.4-10には、断面の観察域を示す。また、模擬重水温度は、図3.1.4-11のごとく上下3ヶ所の位置でカランドリア管外表面から5mm、50mm、105mm離れた点で図3.1.4-12に示す径方向に配置したボイド計測と共に計測を行った。

3.1.5 データ収集

(1) U-1500及びA-400 による収集

各種物理量は各検出器から図3.1.5-1に示すシステム構成で計算機に収録した。A-400は、低・中速度(10Hz~1kHz)のデータを最大640点、中・高速度(1kHz~20kHz)のデータを最大272点収集できる能力がある。

表3.1.5-1に各信号の収録速度を示す。図3.1.5-2には、各収録装置間の同期法を示す。

(2) ハンドヘルドコンピュータ及びCTU-88

本データロガーは亀裂進展計測専用に使った。外観を図3.1.5-3に示す。

① 基本構成

CTU-88では、各チャンネル個々にカウンターを用意し、ゲージが切断する迄このカウンターにてクロック数をハード的にカウントし時間測定を行うものである。クロック数が2MHzなので収録速度は2MHzである。又各チャンネルのカウント数をハンドヘルドコンピュータ(HC/40)により取り出し、カウント値を時間に変換して出力する。図3.1.5-4に計測システム基本構成を示す。

② 測定方法

予め標点間距離を図3.1.5-5のごとく定めて、圧力管に取り付けた亀裂ゲージの切断時刻を各ゲージ毎に測定し、亀裂ゲージ切断を圧力管の破断と定義して個々の亀裂ゲージ取付け距離と切断時間から亀裂スピードを算出した。破断時刻は一番最初に断線した亀裂ゲージの時刻を基準値($t=0$)とし、その後各ゲージが断線する時刻を測定した。

図3.1.5-6に亀裂進展速度測定のプロcedureを示す。

本計測手法では計測時間誤差は 0.5μ 秒である。尚、トリガー出力は亀裂ゲージの切断個数が設定値以上(任意に設定が可能である)になった場合に出力する。本出力はプログラムソフトにより判断させた後出力させる為、最大約1.5m秒程度の時間遅れが生じる。

3.1.6 試験手順

試験は、図3.1.6-1に示す手順フローに従って行った。模擬重水(純水)には溶存ガスが含まれており、これを除去する為、事前に昇温による脱気作業を行った。

3.1.7 試験結果

(1) 破断条件

設定破断圧力は、 $75\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ としていたが、設定値で破断しなかったため、強制加圧ポンプを起動して破断させた。この時の破断圧は $83.5\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ であった。また、破断時の冷却材温度は 259°C であった。また、破断時の既設ループ（蒸気ドラム）の圧力及び温度はそれぞれ約 $64\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ 及び 278°C であった。

(2) 計測結果

① 破断後の圧力管内の圧力低下とその回復挙動

破断開始部を含む圧力管内各部圧力変化を図3.1.7-1に示す。破断開始部の圧力管内圧力は破断後の0.4m秒で $83.5\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ から $31.0\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ へと低下した。図3.1.7-2に示すようにその後圧力は回復し、約0.13秒以降圧力は急激に立ち上り、蒸気ドラム圧以上の $71.2\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ を示したものの図3.1.7-2に示すごとく、破断後1.3秒以降は約 $64\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ で安定した。

② 破断後の圧力管内軸方向圧力分布

図3.1.7-1に圧力管破断直後の数m秒の間の圧力管内軸方向圧力の時間変化を示す。この図に示した各センサーの圧力降下開始時間差から減圧波は破断中央より上下方向に伝播していることがわかる。この時の圧力伝播速度は約 $1000\text{m}/\text{sec}$ である。

③ アニュラス部圧力

アニュラス部圧力は図3.1.7-3に示すように、破断後直ちに圧力管内圧力まで上昇し、その後は圧力管内圧力と同じ変化をし、破断後1.3秒以降は約 $64\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ 一定となっている。この間の最大圧力は $71.2\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ であり、大きなウォーターハンマ現象は見られなかった。

④ アニュラス部周方向、軸方向の圧力空間分布

圧力管破断直後数msecのアニュラス部の周方向、軸方向の圧力分布の時間変化を図3.1.7-4に示す。本図から圧力管とカランドリア管の衝突過渡現象が終了する時間（2～3m秒）を充分超える破断後約50m秒まで、アニュラス部周方向、軸方向に圧力分布が存在しているのがわかる。一方、50m秒を超えてアニュラス部で最大圧力が生ずる数百m秒以上の時間では、図3.1.7-5に示すごとく空間分布はほとんど無いとみなせる。最大圧力の発生しやすい流路急

減部の鉄水遮へい体近傍部の圧力も図3.1.7-6に示すごとく、数百m秒以上の時間では周方向に均一化して空間分布はほとんど存在しない。

⑤ カランドリア管温度変化

図3.1.7-7にカランドリア管外表面温度を示す。

破断後約2.3秒でカランドリア管温度は平衡となり、その時温度は内表面から1mmの位置で200℃又、外表面位置で約110℃を示した。したがって、カランドリア管はドライアウトしていない。

また、減速材中に取付けたモニターカメラからも、図3.1.7-8に示すようにサブクール沸騰蒸気泡が観察されたがカランドリア管のドライアウトは観測されなかった。カランドリア管表面から50mm離れた位置での重水温度は、図3.1.7-9に示すように、乱れはあるものの、ほぼ70℃を基準に一定の範囲で安定している。

⑥ 流体温度変化

図3.1.7-10に各部の流体温度変化を示す。炭酸ガス系配管を除く各部の流体温度は破断後直ちに圧力管内の流体温度に近づき、その後圧力管内と同じ変化をしている。この時、これらの温度の測定箇所での圧力は図3.1.7-3で判る通り同一の変化をしており、流体温度と圧力は対応して変化していることがわかる。一方、炭酸ガス系の流体温度は、ゆるやかに上昇し、破断後約2.1秒でほぼ圧力管内流体と同じ温度となった。

⑦ 圧力管出入口流量

図3.1.7-11に示すように圧力管の出入口流量は、破断後約2秒以降は約46m³/h (=9.6 kg/S)一定となっている。これは、此の時点でアニュラス部の冷却材条件が一定となり、安定した臨界放出流が生じているためと考えられる。

⑧ 圧力管の変形形状

図3.1.7-12に示すように亀裂のほとんど全長2.6mに渡り、開口巾はほぼ同一である。開口巾計測値の詳細を図3.1.7-13に示す。又、代表位置での詳細写真を図3.1.7-14に示す。

・開口面積

$$\text{測定スパン間の台形近似 } S = 1/2 \sum (\omega_n + \omega_{n+1}) \cdot \ell$$

$$S = 2060 \text{ cm}^2$$

・開口巾

水平部算術平均 $\omega = 1/n \sum W_n$

$\omega = 73.7\text{mm}$

・リップ長* (予亀裂長 3700mm)

LIP-1 = 3706mm (伸び量 6mm)

LIP-2 = 3710mm (伸び量 10mm)

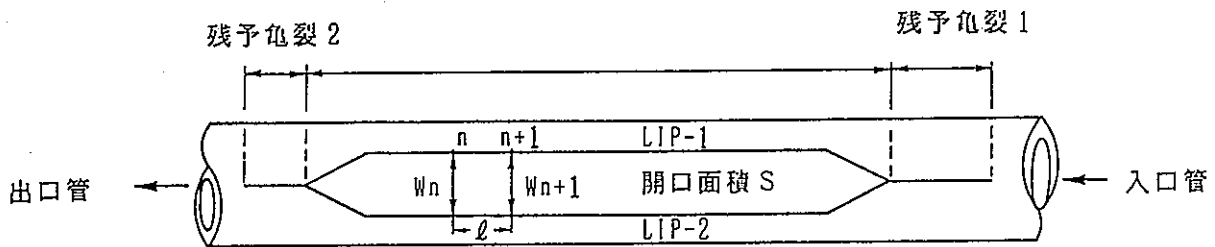
* 変形に伴う亀裂部の伸びを含む

(ただし残予亀裂 1.2を含む)

・残予亀裂

1 = 375mm (入口管側)

2 = 118mm (出口管側)



⑨ き裂進展速度

圧力管に加工した破断予き裂とき裂進展ガイドに対するクラックゲージ配置を図3.1.5-5に、また、図3.1.7-15にガイドき裂部のき裂進展速度計測結果を示す。計測の結果、進展速度は、破断予き裂部は 214m/秒~292m/秒、き裂進展ガイド部は 91.5m/秒~104.5 m/秒であった。

⑩ カランドリア管歪

図3.1.7-16に示すように、破断後2m秒には破断口正面及び背面のカランドリア管にはほぼ同一の0.16%程度の周方向歪が生じ、破断口から90°の位置では圧縮歪がほぼ同程度発生している。試験体のカランドリア管は弾性域にとどまっている。

⑪ 圧力管とカランドリア管の衝突に至る時間

表3.1.7-1には衝突を判断できる物理量を示した。計測の不確実性によって衝突時間を一義的特定出来ないが遅くとも破断後4.0m秒には衝突しているものと考えられる。

3.1.8 考 察

① 破断後の圧力管の圧力低下とその回復挙動

破断後、冷却材温度259°Cの飽和圧力の46kg/cm²・gを大きく下まわる31kg/cm²・gまで低下し、その後259°Cの飽和圧力へと急速に回復するのはEdwardsとO'Brien⁽¹⁾の定容パイプのブローダウン実験で見られた熱非平衡効果と考えられる。

② 破断後の圧力管内軸方向圧力分布

圧力波は一般に流体中を音速で伝わると考えられる。試験体系のような比較的剛な円管中を伝わる音速は次式で求めることができる。⁽²⁾

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + (K/E)(D/e)c_1}}$$

K : 体積弾性率

ρ : 密度

E : 縦弾性係数

D : 管の直径

c_1 : 圧力波の速度に影響を与える

管路拘束条件で定まる無次元数

$$c_1 = 1 - \mu^2$$

μ : ポアソン比

本式から破断時の流体条件（圧力83.5kg/cm²g、温度259°C）から計算すると音速は約1,000m/sとなり、確かに先頭膨張張波が音速で伝播していることが確認できた。

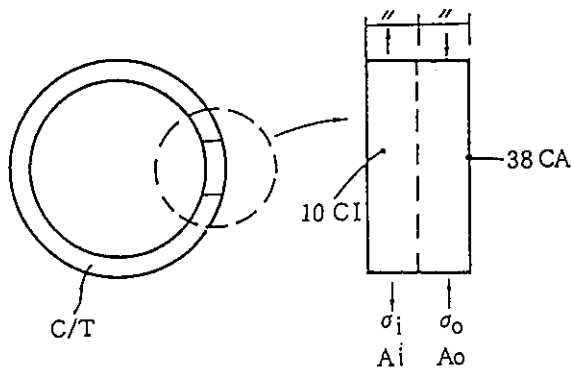
③ アニュラス部の圧力及びその分布

破断後のアニュラス部の最大圧力は71.2kg/cm²であり、顕著なウォーターハンマ現象は生じていない。また、アニュラス部の全ての計測位置でも同じ値である。亀裂進展が停止する16.6m秒よりも少し遅い約50m秒でアニュラス部の圧力空間分布はほとんど無くなる。従って、0.8秒の最大圧力発生は、固定口からの放出に近い条件で生じたものと考ええる。

④ カランドリア外表面温度変化

図3.1.7-7の41CAの温度がほ42CA、43CAの温度に比べ低い値を示すのは、42CAが圧力管破断部正面位置であり、43CAは破断部から45°の位置であって、いずれも圧力管内からの放出流の影響を強く受けているのに対し、41CAは圧力管破断部と正反対の180°の位置で流速があまり無い。従って、温度の指示値の差異は、流速の違いに起因した熱伝達率の違いと考える。

次にカランドリア管の内外温度差の最も大きい位置である破断開始点のカランドリア管の温度変化から内外温度差の最大値を求めそれを実機材に適用し、どの程度の熱衝撃歪となるかを参考として求める。図3.1.8-1に示すように、同じ破断開始点でも周方向に温度分布がある。この内、カランドリア管に最大温度差が生じている破断口正面部の温度データを図3.1.8-2に示す。図中には計算に用いた最大温度差を記入した。計算は平板の応力計算とし、二層に単純分割して求めた。⁽³⁾



$$\sigma_i A_i + \sigma_o A_o = 0 \quad \text{①}$$

$$\Delta L_i + \frac{\sigma_i}{E_i} L = \Delta L_o + \frac{\sigma_o}{E_o} L \quad \text{②}$$

$$\Delta L_i = C \cdot \Delta T_i \quad \dots\dots\dots ③$$

$$\Delta L_o = C \cdot \Delta T_o \quad \dots\dots\dots ④$$

①～④式を整理すると

$$\sigma_o = \frac{\Delta T_i - \Delta T_o}{E_i + E_o} \cdot C \cdot E_o \cdot E_i$$

ここで

$$\begin{array}{l} 200 \text{ }^\circ\text{C} \\ E_i = 9200 \text{ kg/mm}^2 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 100 \text{ }^\circ\text{C} \\ E_o = 10500 \text{ kg/mm}^2 \end{array}$$

$$\Delta T_i = 133 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_o = 46 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\begin{array}{l} 150 \text{ }^\circ\text{C} \\ C = 6 \times 10^{-6} \text{ mm/}^\circ\text{C} \end{array}$$

$$\sigma_o = \frac{133 - 46}{9200 + 10500} \cdot 6 \times 10^{-6} \times 10500 \times 9200$$

$$= 2.5 \times 10^{-4} \text{ (} 250 \mu \varepsilon \text{)}$$

$$= 0.025 \%$$

これ迄に動燃で実施したカランドリア管の内圧による破断試験での破断時歪は3%であったから0.025%はこれに比べて十分小さい事が判る。

⑤ 流体温度変化

アニュラス部の温度挙動が圧力管内とほぼ同じ変化をたどるのに対して炭酸ガス系のゆるやかな温度変化の原因は、炭酸ガスが放出されるまで分圧の分だけ蒸気圧力が低く、従って飽和温度が低いためと考えられる。もう一つの可能性は図3.1.8-3に示すように、炭酸ガス系の上流に位置する鉄水遮へい体スリーブ部で冷却材の放出が制限される為に配管を加熱する割合が大きくなって冷却材温度が259℃よりも低い状態となることである。

⑥ 破断後形状

圧力管破断後のリップ部にはカランドリア管壁との衝突痕があることを破断後の観察で確認している。圧力管壁がカランドリア管の内壁に完全に内接するとした場合の開口巾は93.9mmであるが、計測値は73.7mmで約20mm狭い。したがって、最終形状のカランドリア管の圧力管とは完全には内接していないが、試験体の弾性及び熱伸びを考

慮すると破断時には、相当な範囲で接触したものと考えられる。カランドリア管との接触部を破断口背面と破断口部の2種類想定して、それぞれ図3.1.8-5、図3.1.8-6に示す。尚、圧力管の断面形状は図中に示した位置で試験後切断し、トレースしたものをを用いている。

⑦ 亀裂進展速度

亀裂の進展速度は約 100m/秒で進んだ。これは大気中での同じ肉厚のバースト試験で計測された 125m/秒とほぼ同等の速度であり、二重管の影響はあまり無いようである。

3.2 実機材料圧力管バースト試験

3.2.1 概要

実機材料での圧力管破断試験に先立ち、その破断条件（亀裂形状・破断圧力等）、破断形態（亀裂進展速度・破断の形状）等試験成果を左右する主要な項目についてあらかじめ知見を得るため、予備試験として圧力管長 2 m の短尺条件で実機材料圧力管バースト試験を実施した。本試験では以下に示す項目を明らかにする。

- (a) 破断条件
- (b) 破断後形状
- (c) 亀裂進展速度の見通し
- (d) 予測破断圧と実際圧の破断圧の関係

3.2.2 試験条件

試験は、実機のカランドリア管-圧力管構造を模擬した二重管体系で圧力を破断させた。

- | | | | |
|---------------|---|-------|-----|
| (a) 設定破壊圧及び温度 | 75 kg/cm ² ・g | 280°C | 1 体 |
| | 75.6 kg/cm ² ・g | 280°C | 1 体 |
| (b) 圧力管長さ | 2000mm | | |
| (c) 予亀裂長さ | 200mm ^l × 0.2mm ^w | | 1 体 |
| | 400mm ^l × 0.2mm ^w | | 1 体 |
| (d) 模擬カランドリア管 | | | |

実機カランドリア管と同じ内径 (158.4mm) を有する JIS規格管とした。

材質：SUS304 SC sch10

3.2.3 試験装置

試験ループは、図3.2.3-1に示すように既設の ATR安全性試験装置に接続している。試験部の詳細を図3.2.3-2に示す。試験体は、図3.2.3-3に示すごとく、長さ 2000mm の短尺実機材料圧力管とその外側に内径をほぼ模擬したSUS304の模擬カランドリア管とで構成している。

圧力管とカランドリア管は安全上の観点から偏心させてあり、圧力管は破断（予亀裂部）の 180° 背側でカランドリア管接している。

試験条件の設定は、既設ループの加熱ヒーターによって冷却材を昇温・昇圧して設定し、圧力管を破断させた。設定破断圧力で破断しない場合には、弁V 8-104, 弁V-105, を閉鎖して既設ループと隔離し、N₂ ガス加圧ラインで加圧し、破断させる事が出来る。

3.2.4 試験計測

(1) 計測項目と検出器仕様

概要に示した項目を評価する上で必要な計測を行った。計測に用いた検出器の仕様を表3.2.4-1に示す。検出器の性能の根拠は流動特性試験に準じている。

(2) 検出器配置

下記の主たる計測項目に対応する検出器取り付け位置概要を図3.2.4-1及び図3.2.4-2に示す。取り付け位置詳細寸法を図3.2.4-3に示す。

(a) 冷却材

圧力管	……………	試験部出入口 圧力管内部 アニュラス管
温度	……………	試験部出入口 圧力管内部, アニュラス管
流量	……………	試験部出入口

(b) 試験体

歪	……………	カランドリア管
温度	……………	カランドリア管壁
亀裂進展速度	……………	圧力管
加速度	……………	カランドリア管

破断後形状 …………… 圧力管（実測，写真記録，走査電子顕微鏡写真）
 反力 …………… P/T，C/T連成

3.2.5 データ収集

(1) U1500及びA-400による収録

各種物理量は各検出器から図3.2.5-1に示すシステム構成で計算器に収録される。

データ収録は圧力，加速度，歪，荷重等高速の収録を要するものについては10KHzで行い，その他の測定量は計測器の応答速度に応じて1KHz，50KHz，10KHzで行った。

この内，最高速サンプリングの10KHzについてはA-400で実施した。尚，ケース1ではA-400の据付前であった為，アナログデータレコーダによって10KHz収録を行った。収録速度を表3.2.5-1に示す。図3.2.5-2には各収録装置間の同期法を示す。

(2) ハンドヘルドコンピュータ及びCTU-88による収録

亀裂進展計測専用の本計測システムは流動特性試験と同一である。尚，亀裂ゲージの取り付け位置を図3.2.5-3，図3.2.5-4に示す。

3.2.6 試験手順

試験は図3.2.6-1に示す手順フローに従って行った。

3.2.7 試験結果

① 試験結果を表3.2.7-1に示す。

ケース1，2ともほぼ設定破断圧力でき裂が貫通したがほとんど軸方向に進展しなかった。また，き裂がわずかに進展したケース2でも，進展部のき裂進展速度は約46m/secと遅かった。

今回の試験では，受入れ材（低水素濃度）の実機材圧力管の破壊挙動は延性的であり，Kcで定まるCCL条件を満たすように初期欠陥を設定しても，不安定破壊は生じなかった。最終形状の寸法測定結果を表3.2.7-2，表3.2.7-3にそれぞれケース1，2について示す。又，表に対応する形状写真を図3.2.7-1～図3.2.7-3に示す。

② 圧力管破断時外部伝達荷重

ケースについて試験後計測した破断口面積と（S）と破断時の初期圧（P₀）か

ら理論荷重 (PoS) を求め、これと計測荷重 (W) との比 (W/PoS) を取ると、0.49 となる。又、外部伝達荷重の発生時刻は図 3.2.7-4 に示すごとく、圧力管内圧力が $25\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ に低下した後、再び昇圧を開始する破断後 1 m 秒である。これは熱非平衡効果と考えられる。尚、ケース 1 はロードセルの計測不良で求める事ができなかった。

3.2.8 考察

① 破断条件

ケース 1 では CCL 条件を満たす欠陥を試験データに基づいて作成した図 3.2.8-1 を用い、決定した。ケース 2 では図 3.2.8-2 に示す内圧 $70\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{g}$ 時にランドリア管に生ずる応力 $10\text{kg}/\text{mm}^2$ を基準に裕度を見込んだ応力拡大係数 ($K = 350$) に更に材質の最大バラつき分のファクター 2 を取ると必要欠陥長さは約 200mm となる。この試験では、更に裕度を取り、欠陥長さを倍の 400mm とした。このようにケース 1, 2 のいずれの欠陥も CCL 条件を満たした条件で実施したにもかかわらず不安定破壊には至らなかった理由として以下のことが考えられる。

(i) (a) 図 3.2.7-3 の亀裂部は γ 軸に対して 45° に亀裂を生じており内圧による周方向せん断破壊を呈している。

(b) 図 3.2.8-3 ~ 図 3.2.8-6 に示すように破断中央部、亀裂端部の走査電子顕微鏡の観察によると、破断中央部では伸長ディンプル (tear dimple) 形状を呈し、管外表面側から内部側に破壊が進んでいる事が判る。亀裂端部では、等軸ディンプルと伸長ディンプルが混在し、内圧による応力支配での破壊と亀裂進展に伴う引き裂きとが平行して生じている。

(a), (b), の全体的な塑性変形挙動とミクロ的な破断面ディンプル形態から判断すると受け入れ材である Zr-2.5Nb は実機定格圧力近傍では延性的破壊挙動を取る。

(ii) 破断時の挙動が延性的であるため、欠陥寸法決定に用いた図 3.2.8-1 の図の適用方法に問題がある。即ち、圧力管内圧力は熱非平衡効果によって貫通後急激に圧力の低下が生じる為、母材部に至った時には既に CCL 条件を満たさなくなっている可能性がある。即ち、ケース 1 の亀裂進展速度は $347\text{m}/\text{秒}$ で冷却材中の音速よりも遅く、ケース 2 では $2025\text{m}/\text{秒}$ で音速 ($1000\text{m}/\text{S}$) よりも速い。従って、ケース 2 では端部で圧力の低下が無いので亀裂が進み、ケース 1 では

圧力が低下した為、亀裂が進まなかったと考える。尚、ケース2でも健全部では45.7m /秒の速度となって亀裂は停止した。

② 破断後形状

開口部は塑性変形する。しかし、実機圧力条件下で受け入れ材を用いる限り、不安定破壊による軸方向の大巾なスプリット破断は望めない。従って、軸方向スプリット大破断を模擬するためには流動特性試験に用いるようなガイドきれつをつける必要がある。

内圧による応力支配で亀裂が進むと考えられるので、ガイドき裂の肉厚と亀裂進展速度の関係を求める予備試験を必要とする。

③ 予測破断圧力と実際の破断圧

予き裂件肉厚の決定には延性破壊条件式である

$$P = \frac{2 t \sigma}{D}$$

を用いて決定しており、10%以下の誤差で破断した。充分の精度であると考える。

3.3 評価

3.3.1 流動特性試験

流動特性試験によってカランドリア管の健全性評価にとって重要な負荷が以下のように明らかになった。又、それぞれの負荷は時間的に重なる事はなく、それぞれ個別に評価できる事が判った。

① アニユラス部圧力

アニユラス部圧力は破断後 0.83 秒で最大圧力 71.2 kg/cm² gを示したが、顕著なウォーターハンマ現象は見られなかった。

② 熱衝撃

カランドリア管（肉厚 5 mm）における内外表面の最大温度差は90°Cであった。なお、実機にこの計測結果の条件を適用すると発生する歪は、0.025 %程度で内圧バースト試験時の3%に比べ充分小さい事が判る。

圧力管破断時のカランドリア管の温度上昇がカランドリア管の健全性に与える影響は小さいものと考えられる。

③ ジェットによるカランドリア管壁圧力

破断後 2 msec で最高 88.9 kg/cm²g (破断時系統圧力 83.5 kg/cm²g) のパルス状の上昇が見られたが、その後振動しながら飽和圧力になる。この計測値の確認を今後の試験で行う。

④ 衝突力

破断後圧力管はカランドリア管に衝突し、その時の最大歪は0.15%であった。この衝突力は亀裂の進展速度に依存することが予想されるので今後キレツ進展速度を変えた試験でその影響を見て行く。

3.3.2 実機材圧力管バースト試験

- ① 今回の試験では、受入れ材（低水素濃度）の実機材圧力管の破壊挙動は延性的であり、Kcで定まるCCL条件を満たすように初期欠陥を設定しても、不安定破壊は生じなかった。したがって、長いスプリット破断を模擬するためには、低い圧力でも亀裂が進展するように長いガイド亀裂を付ける必要があると考えられる。

表3.1.4-1 検出器仕様一覧表

No.	検出器種類	検出器番号	計測すべき状態量	設置環境	測定範囲	精度	応答周波数時定数	添付資料
1	歪ゲージ式圧力計	PE 901-1~2 PE 901-3 PE 901-4 PE 901-5	試験部入出口の冷却材圧力 アニユラス部供給CO ₂ ガス圧力 カランドリアタンク内圧力 アニユラス部圧力	常温~300℃の温水 常温~50℃のCO ₂ ガス 常温~100℃の水中 常温~300℃の温水	0~100kg/cm ² G *0~10kg/cm ² G 0~10kg/cm ² G *0~10kg/cm ² G	±1% FS	10KHz 以上	A3.1.3-1
2	C-A熱電対 (非接地)	TE 901-1~3 TE 901-4~6 TE 901-7	試験部入出口の冷却材温度 カランドリアタンク内水温 アニユラス部供給CO ₂ ガス温度	0~84kg/cm ² G の水中 0~10kg/cm ² G の水中 0~5kg/cm ² G のCO ₂ ガス	0~300℃	0.75級	0.5秒(静止中) 以下	A3.1.3-2
3	タービン流量計 (係数補正器付)	FE 901-1~2	試験部入出口の冷却材流量	常温~285℃ 0~84kg/cm ² G の水中	±100m ³ /H	±0.5% FS	約150Hz	A3.1.3-3
4	CO ₂ 流量計	FIC901-3	アニユラス部供給CO ₂ ガス流量	常温~50℃のCO ₂ 0~5kg/cm ² G のガス中	0~2 SLM	±1% FS	0.3秒	A3.1.3-4
5	湿分計	WE 901	大気開放口のCO ₂ ガス中湿分	常温~200℃のCO ₂ 0~5kg/cm ² G のガス中	0~100%	±2% FS	5秒	A3.1.3-5
6	圧力計(ピエゾ) (専用アンプ付)	PE 910-1~22 PE 910-23~25	圧力管内部、アニユラス部圧力 破裂板部圧力	常温~300℃のCO ₂ ガス 及び水中	0~150kg/cm ² G	±1% FS 以下	50KHz以上	A3.1.3-6
7	熱電対 (非接地)	TE 910-1~33 TE 910-34~62 TE 910-48 TE 910-49~51	圧力管内部、アニユラス部温度 カランドリア管外面温度 カランドリアタンク内温度 破裂板部温度	0~84kg/cm ² G の水中 0~10kg/cm ² G の水中 0~10kg/cm ² G の水中 0~84kg/cm ² G の水中	0~300℃	0.75級	5m秒以下	A3.1.3-2
8	歪ゲージ (カプセル式)	SE 910-1~28 SE 910-29~52	カランドリア管の歪 圧力管の歪	0~10kg/cm ² G の水中 0~84kg/cm ² G の水中	2%		100KHz以上	A3.1.3-7
9	加速度計 (専用アンプ付)	AE 910-1~6	圧力管、カランドリア管の加速度	常温~300℃の 0~84kg/cm ² G の水中	500G	±1% FS	50KHz以上	A3.1.3-8
10	亀裂直進ゲージ	CG 910-1~20	圧力管軸方向の亀裂進展速度	0~84kg/cm ² G 水中	20ch	分解能 0.5μsec		
11	ボイド計	VO 1-1 VO10-7	試験部カランドリア管まわり ボイド率	0~10kg/cm ² G 水中	0~100%	—	—	A3.1.3-9
12	モニターカメラ	VVC-A~C	カランドリア管外表面ボイド挙動	模擬カランドリア管内	3ヶ所約100mm	—	シャッター 1/1000sec コマ数 30/sec	A3.1.3-10
					シグナルコンディショナーチャージアンプ			A3.1.3-11

*印は耐圧 100kg/cm²G

表 1-1 圧力管破断事故確証試験全体計画

試 験 項 目	試 験 内 容
i) 圧 力 管 破 断 試 験 (a) 流 動 特 性 試 験 (b) カ ラ ン ド リ ア 管 健 全 性 試 験 (c) 燃 料 冷 却 性 試 験	<p>実機を模擬した圧力管破断試験装置を製作して、圧力管破断試験を行い、カランドリア管の健全性並びに燃料冷却性について評価する。</p> <p>模擬圧力管、模擬カランドリア管及び模擬燃料集合体を製作し、圧力管破断試験装置に装着し、実機模擬条件下で模擬圧力管を破断させる試験を行い、模擬カランドリア管内の流動現象等を把握し、カランドリア管健全性評価コードの検証を行う。</p> <p>実機材料の圧力管 (HT・Zr-2.5 wt%Nb) 及びカランドリア管 (Zry-2) を用いた試験体を製作し、上記(a)と同様の試験を行い、圧力管破断時のカランドリア管健全性を評価する。</p> <p>実規模燃料冷却性試験装置を製作し、カランドリア管健全時の燃料の冷却性確認試験を行う。この結果を基に燃料冷却性解析コードの検証を行う。</p>
ii) 圧力管及びカランドリア管の同時破断試験 (a) カ ラ ン ド リ ア タ ン ク 内 圧 上 昇 試 験 (b) カ ラ ン ド リ ア 構 造 物 健 全 性 試 験 (c) 燃 料 冷 却 性 試 験	<p>圧力管及びカランドリア管の同時破断試験を行い、カランドリアタンク内圧上昇挙動、隣接チャンネル及びカランドリア構造物の健全性並びに燃料冷却性について評価する。</p> <p>模擬圧力管模擬カランドリア管及び模擬燃料集合体を製作し、圧力管破断試験装置に装着して実機模擬条件下で同時破断させる試験を行い、カランドリアタンク内圧等を測定し、この結果を基にタンク内圧解析コードの検証を行う。</p> <p>実機材料の圧力管及びカランドリア管を用いた試験体を製作し、上記(a)と同様の試験を行い、隣接圧力管及びカランドリア構造物の健全性を評価する。</p> <p>実規模模擬燃料集合体を製作し、同時破断を模擬した試験を行い、燃料冷却性を評価する。</p>

表 3.1.2 - 1 冷却材条件比較表

	A T R 実 証 炉	流 動 特 性 試 験
冷却材の初期温度, および圧力	炉心入口 (274℃, 75kg/cm ² a)	炉心入口 (259℃, 83.5kg/cm ² a)
冷却材のクオリティ	入口 0% ~ 出口 16%	0%
冷却材の初期流量	ポンプによる強制循環有り 10.5kg/s	破断直前に 0 kg/s
重水温度	40 ~ 70℃	70℃

表 3.1.1-1 カランドリア管健全性を評価する上で重要な負荷要素と影響因子及び計測項目

負荷要素	影響を及ぼす主因子	試験パラメータ	計測項目
内圧上昇	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材の圧力, およびエンタルピ ○開口面積, 開口速度 ○燃料集合体流動抵抗 <ul style="list-style-type: none"> ●鉄水スリーブ流路面積 ●アニュラス部容積 ○カランドリア管剛性 (肉厚) 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材の圧力, およびエンタルピ ○圧力管予亀裂長さ (開口速度対応) ○燃料集合体の有無 ○カランドリア管肉厚 	<ul style="list-style-type: none"> ○亀面積速度 ○アニュラス部圧力の周方向, および軸方向分布 ○アニュラス部温度の周方向, および軸方向分布 ○冷却材の圧力, および温度 (炉心出入口) ○カランドリア管の径方向, および周方向歪
熱衝撃	<ul style="list-style-type: none"> ○重水温度 ○冷却材圧力, エンタルピ ○カランドリア管の形状 (肉厚) ○カランドリア管の材質 	<ul style="list-style-type: none"> ○重水温度 ○冷却材圧力, エンタルピ ○カランドリア管の肉厚 ○カランドリア管の材質 (SUS304, Zry-2) 	<ul style="list-style-type: none"> ○重水温度 (バルク) ○冷却材温度 (炉心出入口) ○アニュラス部温度の周方向, および軸方向分布 ○カランドリア管材料の軸方向, および周方向の内外表面温度分布 ○カランドリア管材料の周方向, および軸方向歪分布
ジェット力	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材圧力, エンタルピ ○開口面積, 開口速度 <ul style="list-style-type: none"> ●燃料集合体流動抵抗 ●アニュラス部の径方向距離 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材圧力, エンタルピ ○圧力管予亀裂長さ ○燃料集合体有無 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材の圧力, および温度 (炉心出入口) ○アニュラス部圧力の周方向, および軸方向分布 ○アニュラス部温度の周方向, および軸方向分布
圧力管のカランドリア管への衝突力	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材の圧力, エンタルピ ○燃料集合体流動抵抗 ○開口面積, 開口速度 <ul style="list-style-type: none"> ●アニュラス部の径方向距離 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材圧力, エンタルピ ○燃料集合体の有無 ○圧力管予亀裂長さ 	<ul style="list-style-type: none"> ○冷却材の圧力, および温度 (炉心出入口) ○カランドリア管加速度 ○圧力管, およびカランドリア管の最終変形形状 ○アニュラス部圧力の周方向, および軸方向分布 ○カランドリア管歪の周方向, および軸方向分布

④ 試験装置で実機条件を模擬する。

表3.1.2-2 試験体仕様比較表

各 部 名 称		A T R 実 証 炉	流 動 特 性 試 験
圧 力 管	材 質 :	Zr-2.5Nb	STPG42
	肉 厚 :	4.3mm	4.3mm
	長 さ :	4470mm (上下管板間)	4470mm (上下管板間)
	初期亀裂 : (設定)	—	d3.3 : $\phi 300 \times d2.2 : \phi 3700$ (設定破断圧 : 75kg/cm ² a)
	出入口管 :	ロールドジョイント	出入口管との接触方法 : フランジ接合
カランドリア管	材 質 :	Zry-2	SUS304
	肉 厚 :	1.9mm	5.0mm
	長 さ :	4470mm (上下管板間)	4470mm (上下管板間)
燃料集合体	形状・寸法 :	—	実機と同一
	材 質 :	—	SUS304 (燃料ピン : 中実丸棒) インコネル (スペーサー)
上・下遮蔽プラグ	長さ 上部 :	785mm	785mm
	下部 :	1155mm	1000mm
		—	表面粗さを与えることによって、 圧損を実機と等価とする。
アニュラス部 (CO ₂ 系)	ベローズ : 破断面積	2.5 cm ²	2.5 cm ²
	破断圧 :	5 kg/cm ² g	5 kg/cm ² g
	CO ₂ 系配管 : 破断面積	0.4 cm ²	0.4 cm ²
	破断圧 :	5 kg/cm ² g	5 kg/cm ² g
(鉄水遮蔽体 スリーブ)	長さ 上部 :	1120mm	500mm
	下部 :	1120mm	500mm
			表面粗さを与えることによって、 圧損を実機と等価とする。

表3.1.4-1 検出器仕様一覧表

No.	検出器種類	検出器番号	計測すべき状態量	設置環境	測定範囲	精度	応答周波数時定数	添付資料
1	歪ゲージ式圧力計	PE 901-1~2 PE 901-3 PE 901-4 PE 901-5	試験部入出口の冷却材圧力 アニユラス部供給CO ₂ ガス圧力 カランドリアタンク内圧力 アニユラス部圧力	常温~300℃の温水 常温~50℃のCO ₂ ガス 常温~100℃の水中 常温~300℃の温水	0~100kg/cm ² G *0~10kg/cm ² G 0~10kg/cm ² G *0~10kg/cm ² G	±1% FS	10KHZ以上	A3.1.3-1
2	C-A熱電対 (非接地)	TE 901-1~3 TE 901-4~6 TE 901-7	試験部入出口の冷却材温度 カランドリアタンク内水温 アニユラス部供給CO ₂ ガス温度	0~84kg/cm ² Gの水中 0~10kg/cm ² Gの水中 0~5kg/cm ² GのCO ₂ ガス	0~300℃	0.75級	0.5秒(静止中) 以下	A3.1.3-2
3	タービン流量計 (係数補正器付)	FE 901-1~2	試験部入出口の冷却材流量	常温~285℃ 0~84kg/cm ² Gの水中	±100m ³ /H	±0.5% FS	約150HZ	A3.1.3-3
4	CO ₂ 流量計	FIC901-3	アニユラス部供給CO ₂ ガス流量	常温~50℃のCO ₂ 0~5kg/cm ² Gのガス中	0~2 SLM	±1% FS	0.3秒	A3.1.3-4
5	湿分計	WE 901	大気開放口のCO ₂ ガス中湿分	常温~200℃のCO ₂ 0~5kg/cm ² Gのガス中	0~100%	±2% FS	5秒	A3.1.3-5
6	圧力計(ピエゾ) (専用アンプ付)	PE 910-1~22 PE 910-23~25	圧力管内部、アニユラス部圧力 破裂板部圧力	常温~300℃のCO ₂ ガス 及び水中	0~150kg/cm ² G	±1% FS 以下	50KHZ以上	A3.1.3-6
7	熱電対 (非接地)	TE 910-1~33 TE 910-34~62 TE 910-48 TE 910-49~51	圧力管内部、アニユラス部温度 カランドリア管外面温度 カランドリアタンク内温度 破裂板部温度	0~84kg/cm ² Gの水中 0~10kg/cm ² Gの水中 0~10kg/cm ² Gの水中 0~84kg/cm ² Gの水中	0~300℃	0.75級	5m秒以下	A3.1.3-2
8	歪ゲージ (カプセル式)	SE 910-1~28 SE 910-29~52	カランドリア管の歪 圧力管の歪	0~10kg/cm ² Gの水中 0~84kg/cm ² Gの水中	2%		100KHZ以上	A3.1.3-7
9	加速度計 (専用アンプ付)	AE 910-1~6	圧力管、カランドリア管の加速度	常温~300℃の 0~84kg/cm ² Gの水中	500G	±1% FS	50KHZ以上	A3.1.3-8
10	亀裂直進ゲージ	CG 910-1~20	圧力管軸方向の亀裂進展速度	0~84kg/cm ² G 水中	20ch	分解能 0.5μsec		
11	ボイド計	VO 1-1 VO10-7	試験部カランドリア管まわり ボイド率	0~10kg/cm ² G 水中	0~100%	—	—	A3.1.3-9
12	モニターカメラ	VMC-A~C	カランドリア管外表面ボイド挙動	模擬カランドリア管内	3ヶ所約100mm	—	シャッター 1/1000sec コマ数 30/sec	A3.1.3-10
							シグナルコンディショナーチャージアンプ	A3.1.3-11

*印は耐圧 100kg/cm²G

表3.1.5-1 各信号の収集速度

計測項目	計測位置		TAG-No	A-400		U-1500		備考
				10kHz	1kHz	1kHz	10kHz	
圧力	圧力管内	冷却材	PE910-1PC	○				図3.1.4-3
	"	"	" 2PC	○				"
	"	"	" 3PC	○				"
	"	"	" 4PC	○				"
	"	"	" 5PC	○				図3.1.4-3
	アキュムラ部	冷却材	" 6AC	○				図3.1.4-5
	"	"	" 7AC	○				"
	"	"	" 8AC	○				"
	"	"	" 9AC	○				"
	"	"	" 10AC	○				"
	"	"	" 11AC	○				"
	"	"	" 12AC	○				"
	"	"	" 13AC	○				"
	"	"	" 14AC	○				"
	"	"	" 15AC	○				"
	"	"	" 16AC	○				"
	"	"	" 17AC	○				"
	"	"	" 18AC	○				"
	"	"	" 19AC	○				"
	"	"	" 20AC	○				"
	"	"	" 21AC	○				"
	"	"	PE910-22AC	○				図3.1.4-5
	試験部							
	入口	冷却材	PE901-1PC	○				図3.1.3-2
	出口	"	" 2PC	○				"

計測項目	計測位置		TAG-No	A-400		U-1500		備考
				10kHz	1kHz	1kHz	10kHz	
圧力	CO ₂ ラヂャー							
	上部	CO ₂ or 冷却材	PE910-23 CO ₂	○				図3.1.3-2
	下部	CO ₂ or 冷却材	PE910-24 CO ₂	○				"
	C/Tタンク 内	模擬 CO ₂	PE901-4D20	○				"
	C/Tタンク ラヂャー	"	PE910-25TR	○				
流量	試験部							
	入口	冷却材	FE901-1C		○			"
	出口	"	" 2C		○			図3.1.3-2
温度	圧力管内	冷却材	TE910-1PC		○			図3.1.4-3
	"	"	" 2PC		○			"
	"	"	" 3PC		○			"
	"	"	" 4PC		○			"
	"	"	" 5PC		○			図3.1.4-3
	7ニユラス部	冷却材	" 20AC		○			図3.1.4-5
	"	"	" 21AC		○			"
	"	"	" 22AC		○			"
	"	"	" 23AC		○			"
	"	"	" 24AC		○			"
	"	"	" 25AC		○			"
	"	"	" 26AC		○			"
	"	"	" 27AC		○			"
	"	"	" 28AC		○			"
	"	"	" 29AC		○			"
	"	"	" 30AC		○			"

計測項目	計測位置		TAG-No	A-400		U-1500		備考
				10kHz	1kHz	1kHz	10kHz	
温度	フィン部	冷却材	TE910-30AC		○			図3.1.4-5
	"	"	" 31AC		○			"
	"	"	" 32AC		○			"
	"	"	" 33AC		○			"
	カントリア管	内表面	TE910- 6CI		○			"
	"	"	" 7CI		○			"
	"	"	" 8CI		○			"
	"	"	" 9CI		○			"
	"	"	" 10CI		○			"
	"	"	" 11CI		○			"
	"	"	" 12CI		○			"
	"	"	" 13CI		○			"
	"	"	" 14CI		○			"
	"	"	" 15CI		○			"
	"	"	" 16CI		○			"
	"	"	" 17CI		○			"
	"	"	" 18CI		○			"
	"	内表面	" 19CI		○			"
	"	外表面	" 34CA		○			"
	"	"	" 35CA		○			"
	"	"	" 36CA		○			"
	"	"	" 37CA		○			"
	"	"	" 38CA		○			"
	"	"	" 39CA		○			"
	"	"	" 40CA		○			"
	"	"	" 41CA		○			図3.1.4-5

計測項目	計測位置		TAG-No	A-400		U-1500		備考
				10kHz	1kHz	1kHz	10kHz	
温度	カソード管	外表面	TE910-42CA		○			図3.1.4-5
	"	"	" 43CA		○			"
	"	"	" 44CA		○			"
	"	"	" 45CA		○			"
	"	"	" 46CA		○			"
	"	"	" 47CA		○			"
	"	"	TR910-60CA				○	"
	"	"	" 61CA				○	"
	"	"	" 62CA				○	"
	"	"	" 63CA				○	"
	"	"	" 64CA				○	"
	"	"	" 65CA				○	"
	"	"	" 66CA				○	"
	"	"	" 67CA				○	"
	"	"	" 68CA				○	"
	"	"	" 69CA				○	"
	"	"	" 70CA				○	"
	"	"	" 71CA				○	"
	"	"	" 72CA				○	"
	"	"	" 73CA				○	"
	"	"	TR910-74CA				○	図3.1.4-5
	試験部							
	入口	冷却材	TE901-1PC			○		図3.1.3-2
	出口	"	TE901-2PC			○		"

計測項目	計測位置		TAG-No	A-400		U-1500		備考
				10kHz	1kHz	1kHz	10kHz	
温度	CO ₂ パイプ							
	上部	CO ₂ or 冷却材	TE910-49 CO ₂		○			図3.1.3-2
	下部	"	50CO ₂		○			"
	C/タンク	重水	TR1-1 D20				○	図3.1.4-11~12
	"	"	" 3 D20				○	"
	"	"	TR5-1 D20				○	"
	"	"	" 4 D20				○	"
	"	"	" 7 D20				○	"
	"	"	TR10-1 D20				○	"
	"	"	" 4 D20				○	"
	"	"	" 7 D20				○	図3.1.4-11~12
加速度	ハンドパイプ	外表面	AE910-1CA	○				図3.1.4-5
	"	"	" 2CA	○				"
	"	"	" 3CA	○				"
	"	"	" 4CA	○				"
	"	"	" 5CA	○				"
	"	"	" 6CA	○				"
変位	ハンドパイプ	上部フランジ	DIS-1 CF			○		"
	"	"	" 2 CF			○		図3.1.4-5
歪	圧力管外	周方向	SE910-30PC	○				図3.1.4-4
	"	"	" 32PC	○				"
	"	"	" 34PC	○				"

計測項目	計測位置		TAG-No	A-400		U-1500		備考
				10kHz	1kHz	1kHz	10kHz	
歪	圧力管外	周方向	SE910-36PC	○				図3.1.4-4
	"	"	" 38PC	○				"
	"	"	" 40PC	○				"
	"	"	" 42PC	○				"
	"	"	" 44PC	○				"
	"	"	" 46PC	○				"
	"	"	" 48PC	○				"
	"	"	" 50PC	○				"
	"	"	" 52PC	○				"
	"	軸方向	" 29PA	○				"
	"	"	" 31PA	○				"
	"	"	" 33PA	○				"
	"	"	" 35PA	○				"
	"	"	" 37PA	○				"
	"	"	" 39PA	○				"
	"	"	" 41PA	○				"
	"	"	" 43PA	○				"
	"	"	" 45PA	○				"
	"	"	" 47PA	○				"
	"	"	" 49PA	○				"
	"	"	SE910-51PA	○				図3.1.4-4
	カソード管	周方向	SE910-2CC	○				図3.1.4-5
	"	"	" 4CC	○				"
	"	"	" 6CC	○				"
	"	"	" 8CC	○				"
	"	"	" 10CC	○				"

計測項目	計測位置		TAG-No	A-400		U-1500		備考
				10kHz	1kHz	1kHz	10kHz	
歪	バンドパイプ	周方向	SE910-12CC	○				図3.1.4-5
	"	"	" 14CC	○				"
	"	"	" 16CC	○				"
	"	"	" 18CC	○				"
	"	"	" 20CC	○				"
	"	"	" 22CC	○				"
	"	"	" 24CC	○				"
	"	"	" 26CC	○				"
	"	"	" 28CC	○				"
	"	軸方向	SE910- 1CA	○				"
	"	"	" 3CA	○				"
	"	"	" 5CA	○				"
	"	"	" 7CA	○				"
	"	"	" 9CA	○				"
	"	"	" 11CA	○				"
	"	"	" 13CA	○				"
	"	"	" 15CA	○				"
	"	"	" 17CA	○				"
	"	"	" 19CA	○				"
	"	"	" 21CA	○				"
	"	"	" 23CA	○				"
	"	"	" 25CA	○				"
	"	"	" 27CA	○				図3.1.4-5
ボイド	G/T タンク	模擬重水	V01- 1 D20			○		図3.1.4-11~12
	"	"	" 2 D20			○		"

計測項目	計測位置		TAG-No	A-400		U-1500		備考
				10kHz	1kHz	1kHz	10kHz	
ボイド	G/T タウ	模擬重水	" 3 D20			○		"
	"	"	V05- 1 D20			○		"
	"	"	" 2 D20			○		"
	"	"	" 3 D20			○		"
	"	"	" 4 D20			○		"
	"	"	" 5 D20			○		"
	"	"	" 6 D20			○		"
	"	"	" -7 D20			○		"
	"	"	V010-1 D20			○		"
	"	"	" 2 D20			○		"
	"	"	" 3 D20			○		"
	"	"	" 4 D20			○		"
	"	"	" 5 D20			○		"
	"	"	" 6 D20			○		"
	"	"	" -7 D20			○		図3.1.4-11~12
クラック	圧力管	外表面	CG910-1	○				図3.1.4-4
イマージンシ-	手入力	—	EMER	○				
ボイド	ランドリア タンク	模擬重水						
	"	上管板下	VMC-A	シャッタ速度1/1000sce30コマ/sce			S-VHS	
	"	中間部	" B	"	"	"	"	
	"	防振板下	" C	"	"	"	"	

表 3. 1. 7. - 1 衝突を判定する計測量の変化開始時刻

	加 速 度		歪			
				1次 (m秒)	2次 (m秒)	
P/T	なし		31 PA	-	4.0	
			32 PC	0.4	3.1	
			33 PA	0.9	2.2	
			34 PC	1.0	3.5	
			35 PA	1.7	4.0	
			36 PC	-	-	
C/T	3 ACC	1次 (m秒)	9 CA	1.5	-	
		2次 (m秒)	10 CC	-	-	
	4 ACC	1.1	3.2	11 CA	1.7	4.0
		1.1	3.2	12 CC	1.8	-
	1 ACC	1.2	2.9	7 CA	2.0	-
				8 CC	1.3	-

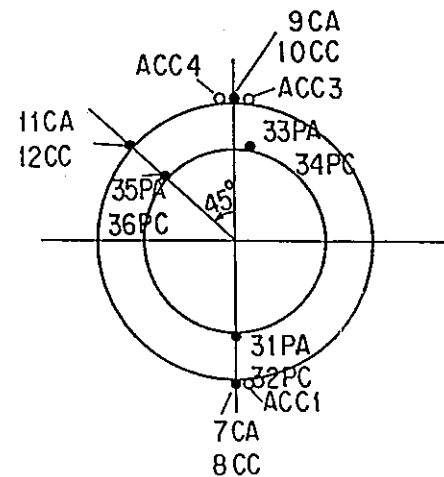


表 3. 2. 4 - 1 検出器仕様

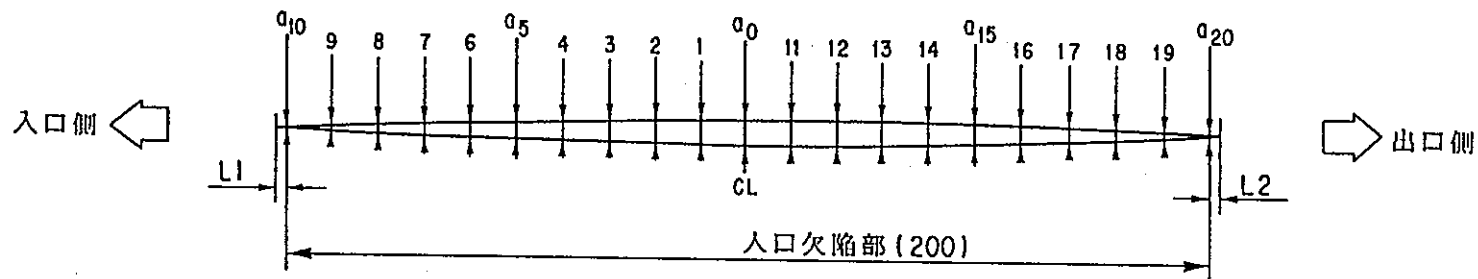
	計測項目	検出器	設置環境	測定範囲	精度	応答周波数	計測点数
1	P/T出・入口の冷却材圧力	歪ゲージ式圧力計	84 kg/cm ² g の水中	100 kg/cm ² g	±1%FS	10 kHz 以上	2
2	P/T出・入口の冷却材温度	C-A熱電対	0~84 kg/cm ² g の水中	300℃	0.75級以上	0.5秒以下 (時定数, 静水中)	2
3	P/T出・入口の冷却材流量	タービン流量計 (係数補正器付)	常温~290℃ 0~84kg/cm ² g の水中	350 m ³ /H	±0.5%FS	1秒以下 (時定数)	2
4	アニュラス部圧力 圧力管内圧力	歪ゲージ圧力計 ピエゾ型	0 kg/cm ² g 0~84 kg/cm ² g	150 kg/cm ² g "	±1%FS "	10 kHz 以上 50 kHz 以上	7 2
5	アニュラス部温度 カンドリア管表面温度	熱電対	常温~300℃の二相 流中	300℃	0.75級以上	10 msec以下 (時定数, 静水中)	5 10
6	カンドリア管の歪	歪ゲージ	常温~150℃の水中	2%	±1%FS	50 kHz 以上	6
7	カンドリア管の加速度	圧電式加速度計	常温~150℃の水中	5000 g	±1%FS	10 kHz 以上	1
8	亀裂進展速度	クラックゲージ	常温~290℃	—	—	200 m/sec 以上 (亀裂進展速度)	20
9	放出反力(荷重)	ロードセル	常温	±20 ton			4

表 3.2.7-1 実機材圧力管バースト試験結果

	試験体	破断時条件	試験時破壊挙動	開口面積	放出反力
ケース 1	予亀裂 ○深 さ 0.66 mm ○長 さ 200 mm	冷却材 圧 力 75.0 kg/cm ² g 温 度 280℃	○亀裂進展速度 予亀裂部347m/sec ○亀裂進展量 ほとんどなし ○最大開口巾 4.5 mm	6.4 mm	—
ケース 2	予亀裂 ○深 さ 0.66 mm ○長 さ 400 mm	冷却材 圧 力 75.6 kg/cm ² g 温 度 280℃	○亀裂進展速度 予亀裂部2025m/sec 健全部 45.7m/sec ○亀裂進展量 ≒ 120 mm (左右合計) ○最大開口巾 31 mm	94.8 cm ²	3.5 ton

表 3.2.7-2 開口部寸法測定結果 (第1回バースト試験)

開口部寸法 (mm)								亀裂長さ (mm)	
a 0	4.50	6	3.05	12	4.25	18	2.20	L 1	1.8
1	4.40	7	2.70	13	4.10	19	1.65	L 2	0.9
2	4.15	8	2.20	14	3.80	a20	0.90	—	—
3	3.90	9	1.70	a15	3.40	—	—	—	—
4	3.70	a10	0.90	16	3.10	—	—	—	—
a 5	3.45	11	4.45	17	2.60	—	—	—	—

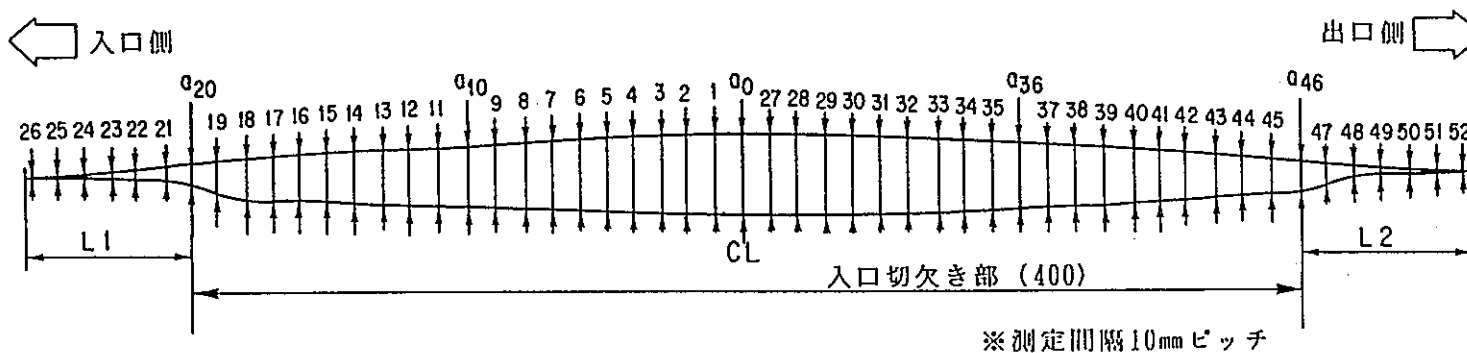


※測定間隔10mmピッチ

開口面積
643.215 mm²

表 3.2.7-3 開口部寸法測定結果 (第2回バースト試験)

開口部寸法 (mm)										亀裂長さ (mm)	
a0	31.00	11	21.00	22	4.20	33	26.15	44	15.80	L1	62.2
1	30.65	12	20.15	23	2.30	34	25.00	45	14.30	L2	61.0
2	29.95	13	19.10	24	1.80	35	24.25	a46	12.50	—	—
3	28.95	14	18.20	25	0.80	a36	23.30	47	7.85	—	—
4	27.80	15	17.25	26	0.10	37	22.35	48	5.50	—	—
5	26.95	16	16.10	27	30.90	38	21.50	49	3.20	—	—
6	26.10	17	14.90	28	31.10	39	20.60	50	0.90	—	—
7	25.05	18	13.55	29	30.60	40	19.70	51	0.10	—	—
8	23.95	19	11.95	30	29.65	41	18.80	52	0.05	—	—
9	23.00	a20	10.10	31	28.50	42	18.00	—	—	—	—
a10	22.05	21	6.20	32	27.40	43	17.00	—	—	—	—



開口面積
9480.885 mm

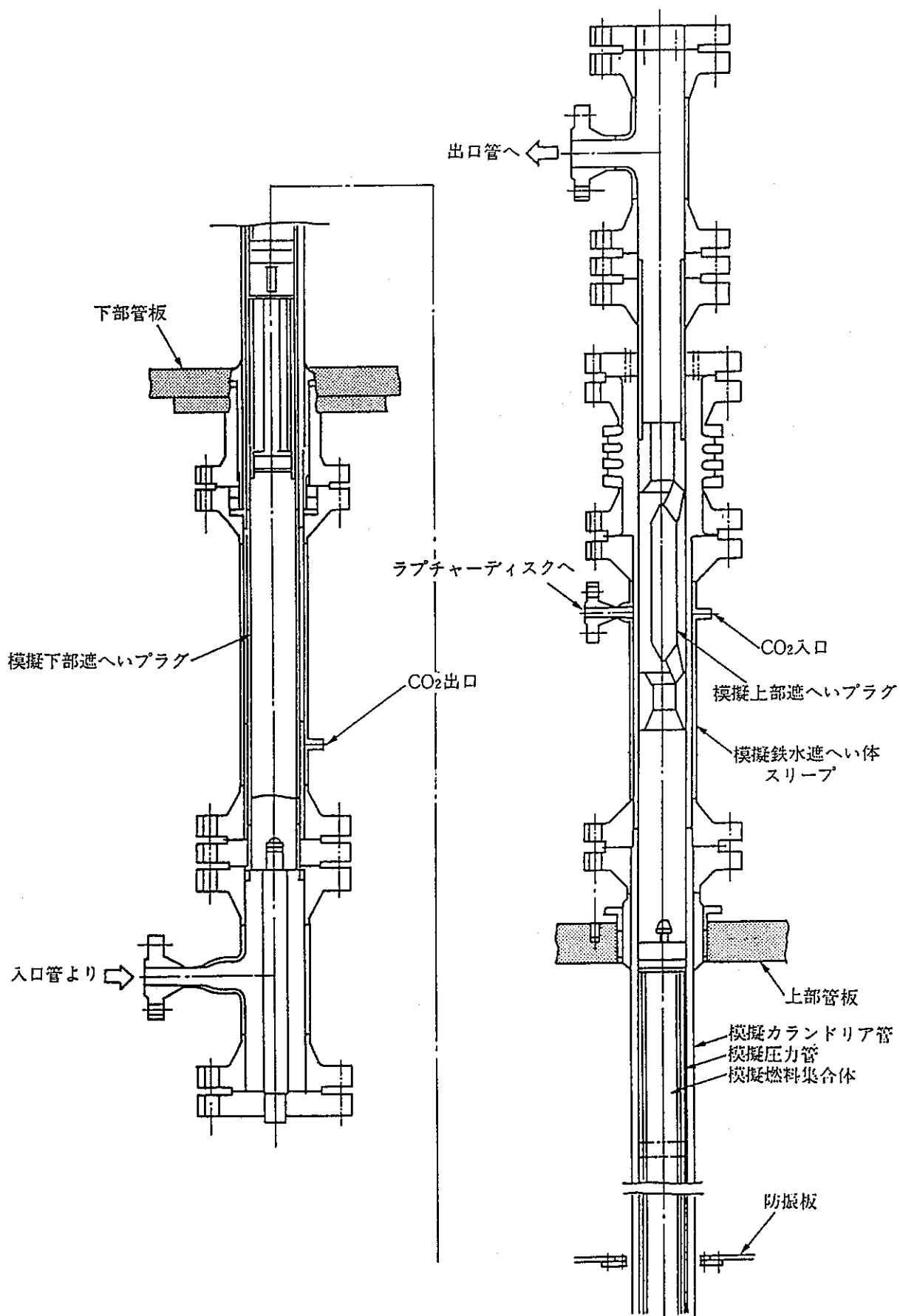
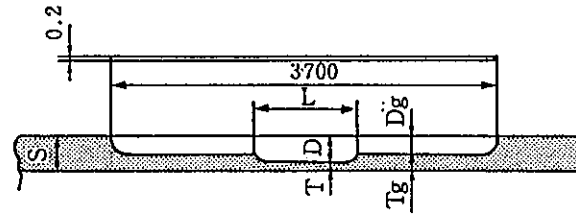
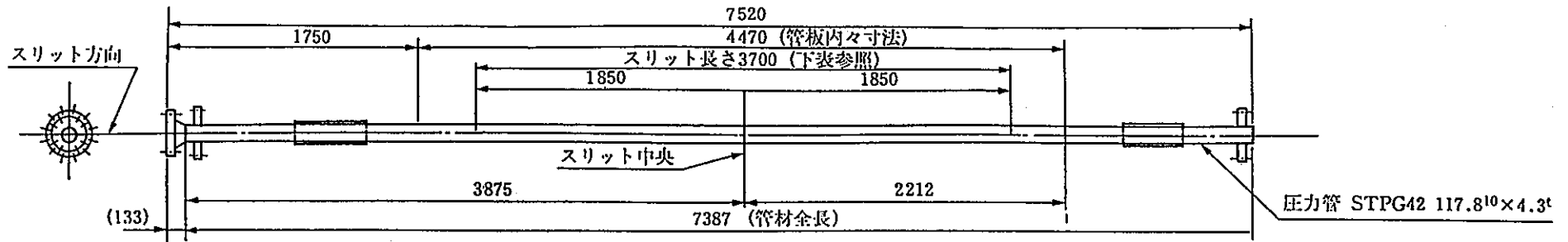


図3.1.2-1 流動特性試験用試験体組立図

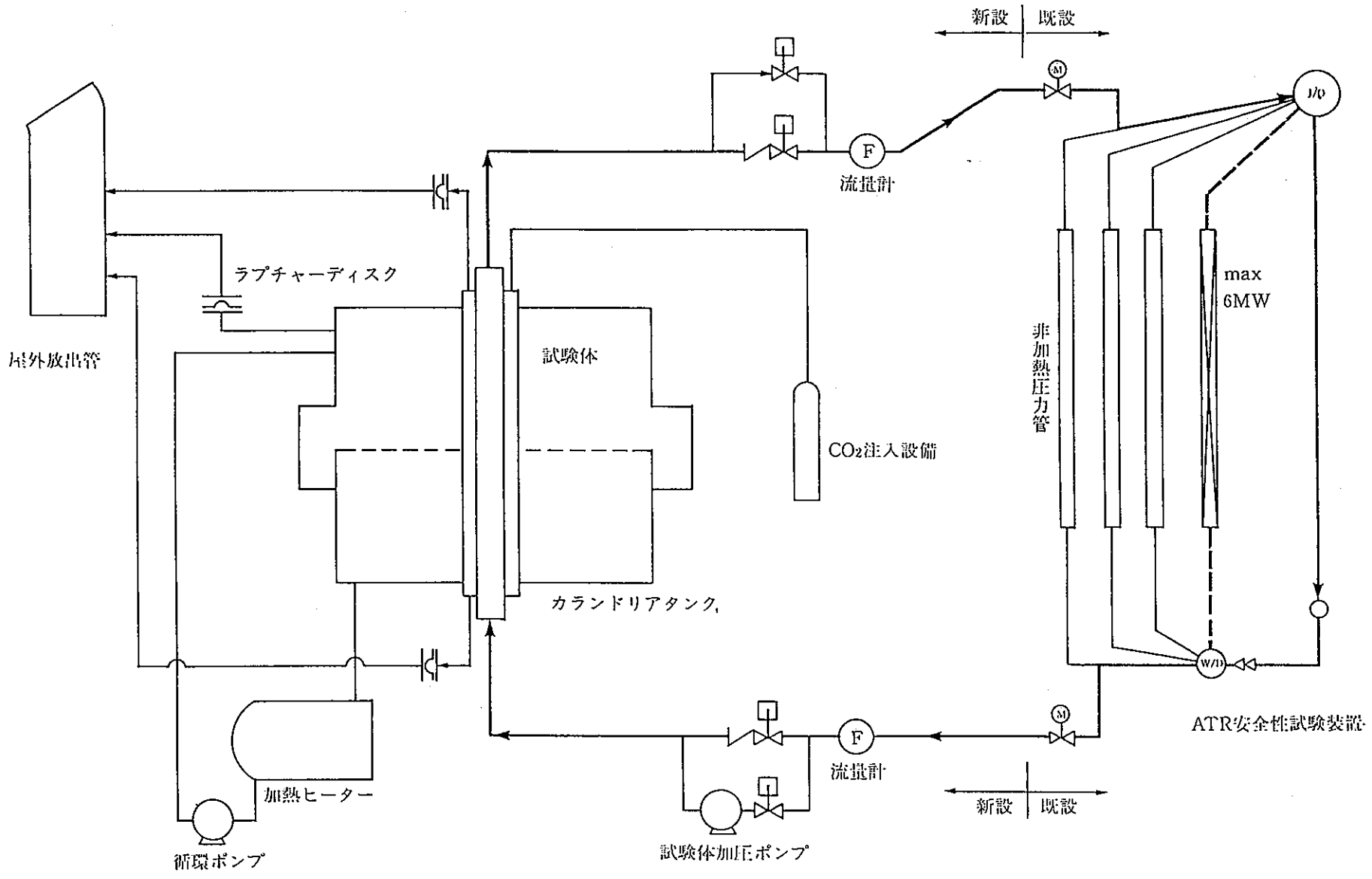


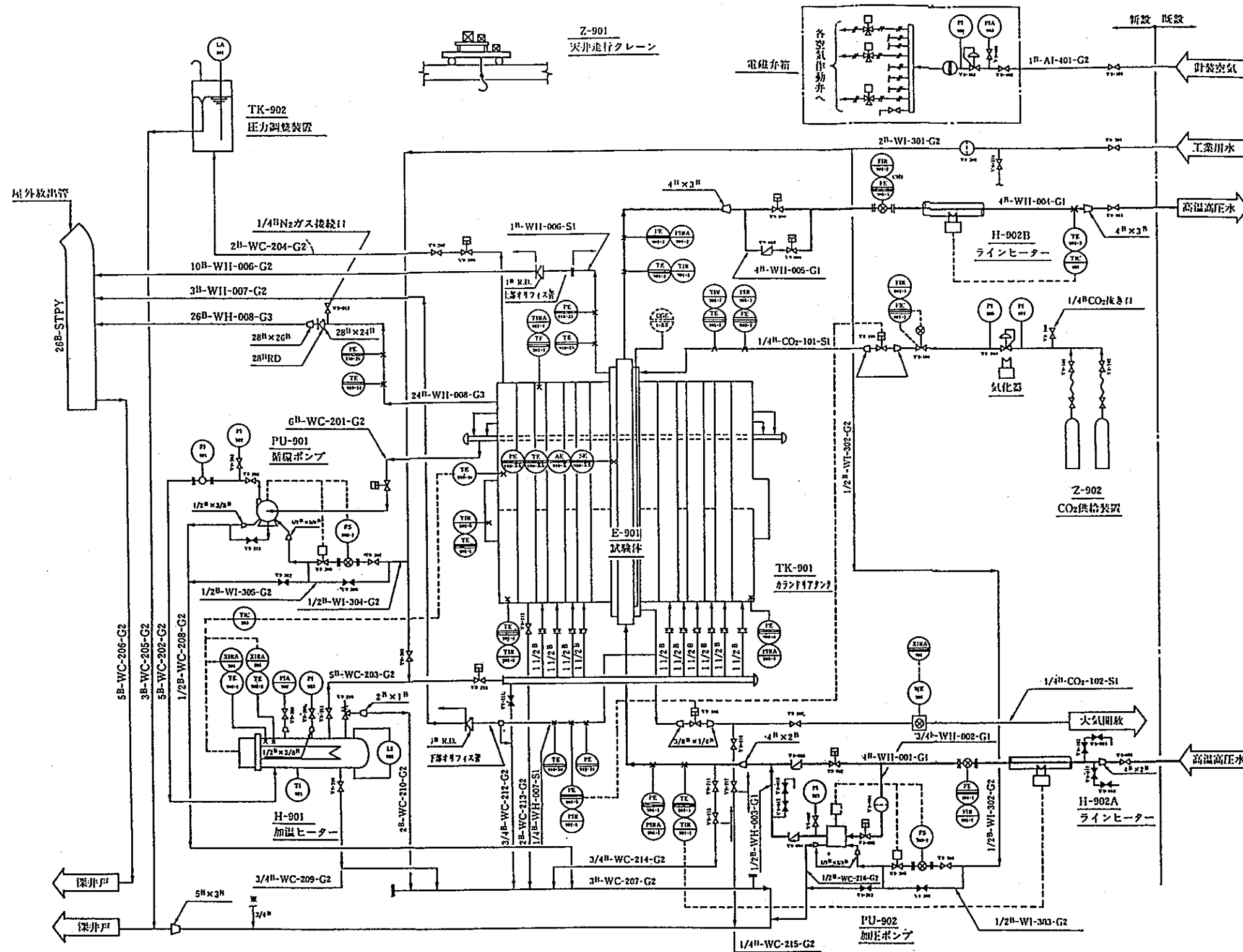
スリット部断面(スリット形式A)

スリット寸法一覧表

No.	スリット部内厚 T	ガイド亀裂部内厚 T _g	スリット長さ L	パイプ内厚 S	スリット深さ D	スリット深さ D _g	スリット形式	設計破断圧力
1	1.11mm	2.22mm	300mm	4.4mm	3.29mm	2.18mm	ガイド付	74kg/cm ² G

図3.1.2-2 圧力管破断用スリット詳細





ライン記号

口徑	4B	HT	001	G1
液体記号			ラインNo	クラス(材質)
WH	高温高压水		001~100	G1: STPG38 Sch80
CO2	炭酸ガス		101~200	G2: SGP(f1)
WC	循環水ドレン		201~300	G3: STPY
WI	工業用水		301~400	S1: SUS304TP Sch80
AI	計装空気		401~500	

計装記号

測定項目及び計器		計器番号			
第1記号	第2,3記号	第1記号	第2,3記号		
P	圧力	E	検出	計器記号	空気作動弁
T	温度	I	指示		直動式電磁弁
A	加速度	R	記録		3方口電磁弁
S	重	C	調節		手動弁
F	流量	A	警報		逆止弁
L	レベル	Q	積算		ラプチャーディスク
W	湿分	S	スイッチ		オリフィス
CG	亀裂進展	X	演算		減圧弁
X	複合				流量調整弁
					安全弁
					ストレーナー
					フィルター
					フレキシブルホース
					常時閉状態
					常時開状態
					客先施工
					現場取付計器
					中央盤指示計器
					高圧アーノウシステム用器具
					U-1500システム用兼中央盤指示計器

アイテムNo	TK-901	TK-902	E-901	Z-901	Z-902	H-901	H-902A, B	PU-901	PU-902
名称	カランドリアタンク	圧力調整装置	試験体	天井走行クレーン	CO2供給装置	加熱ヒーター	ラインヒーター	循環ポンプ	加圧ポンプ
形式	彫形円筒鋼板製	彫形円筒鋼板製	二重円筒形	定価荷重4.9T, 行程15m	電気加温式温水ボイラー	電気加温式温水ボイラー	シースヒーター	片吸込渦巻ポンプ	フランジャーポンプ
仕様				ガーゲースパン8.4m	液化炭酸ガス30kg用	円筒鋼板製		2.2m ³ /min×20m	0~120t/h×100kg/cmG
主要寸法	φ3,000×4,610H	φ600×900H	1E10W 0.25×1.31×1.51×1.51×1.51	ペンダント操作方式		電気容量700kW	電気容量8.8kW	15W×4P×400V×50Hz	3.7W×4P×400V×50Hz
台数	1	1	14組	1	1式	1	2式	2(内1台は自壊予備)	2(内1台は自壊予備)

図3.1.3-2 圧力管破断試験装置
フローシート

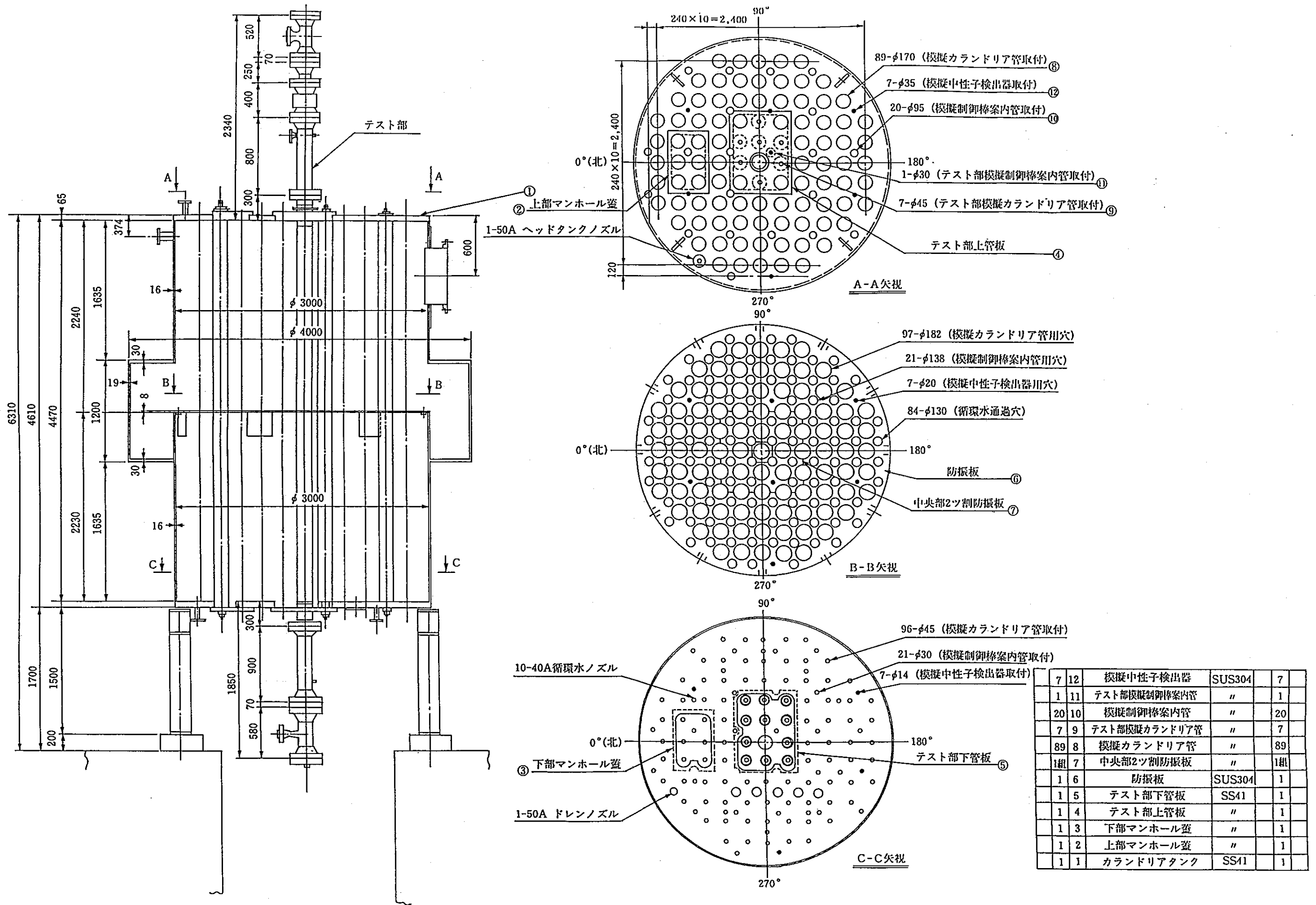
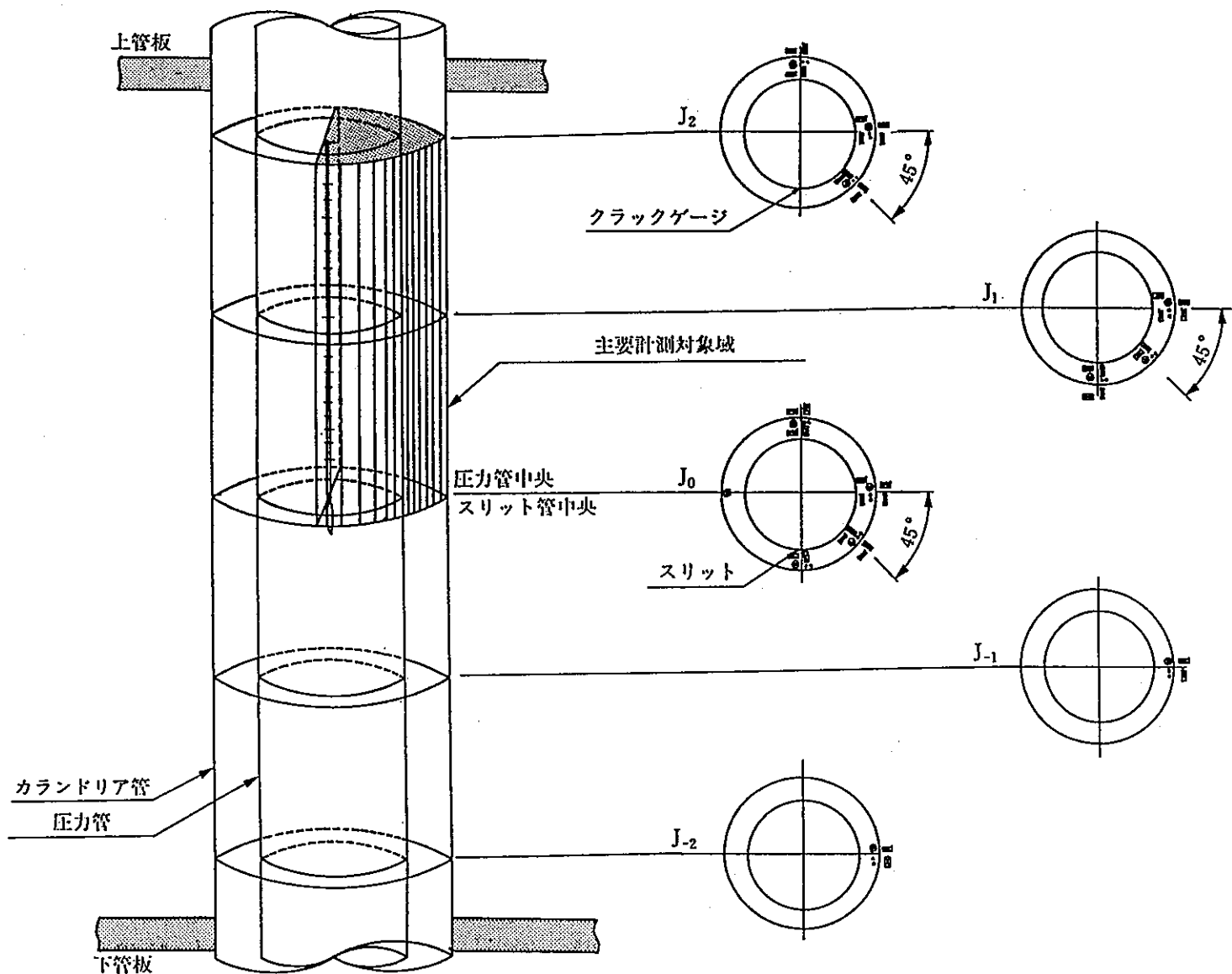


図3.1.3-3 カランドリアタンク詳細



記号	名称
⊗	圧力計
○	ボス用温度計
●	埋込用温度計
⊠	歪計
○	加速度計

図3.1.4-2 試験部の重点計測域

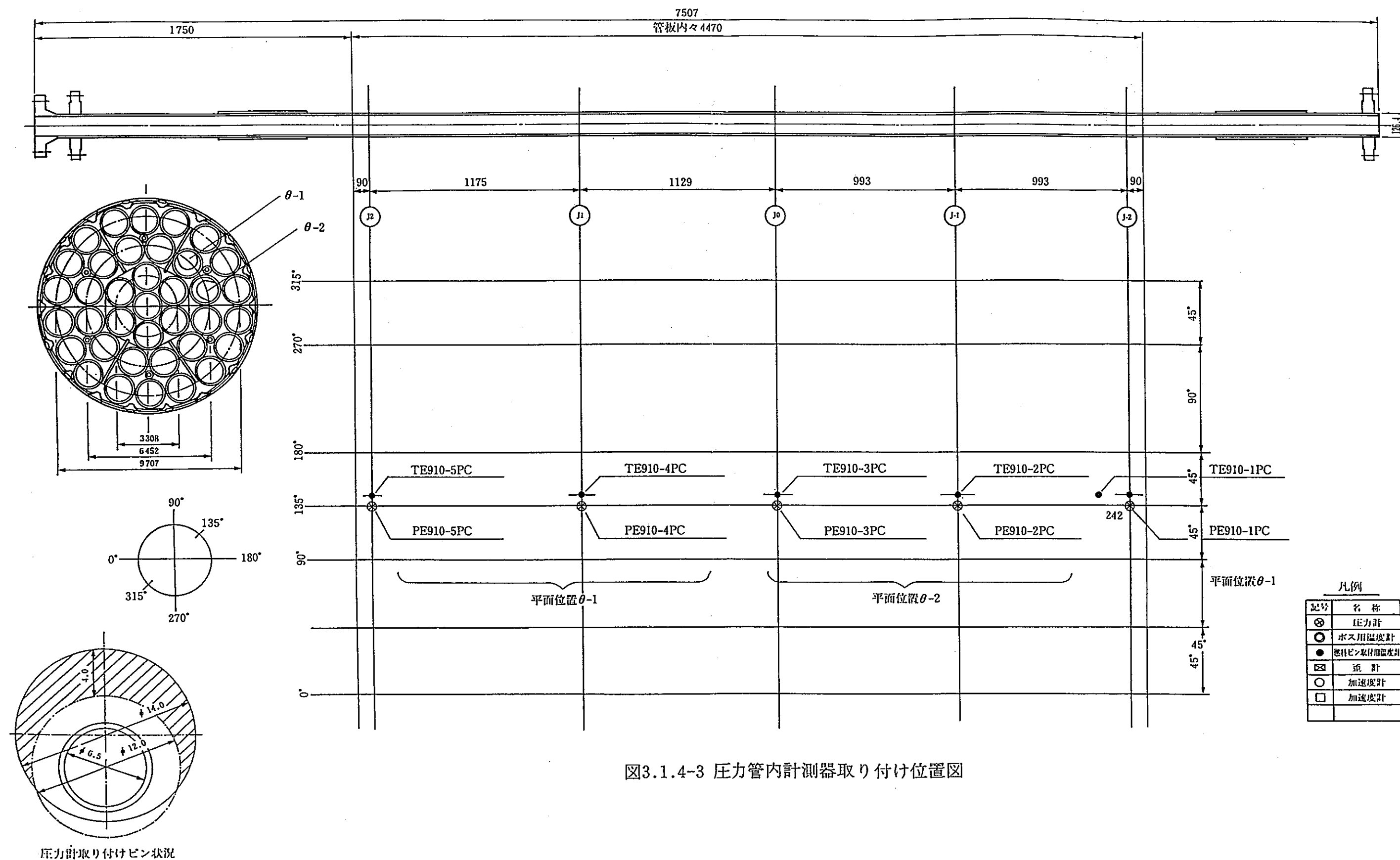


図3.1.4-3 圧力管内計測器取り付け位置図

クラックゲージ配置

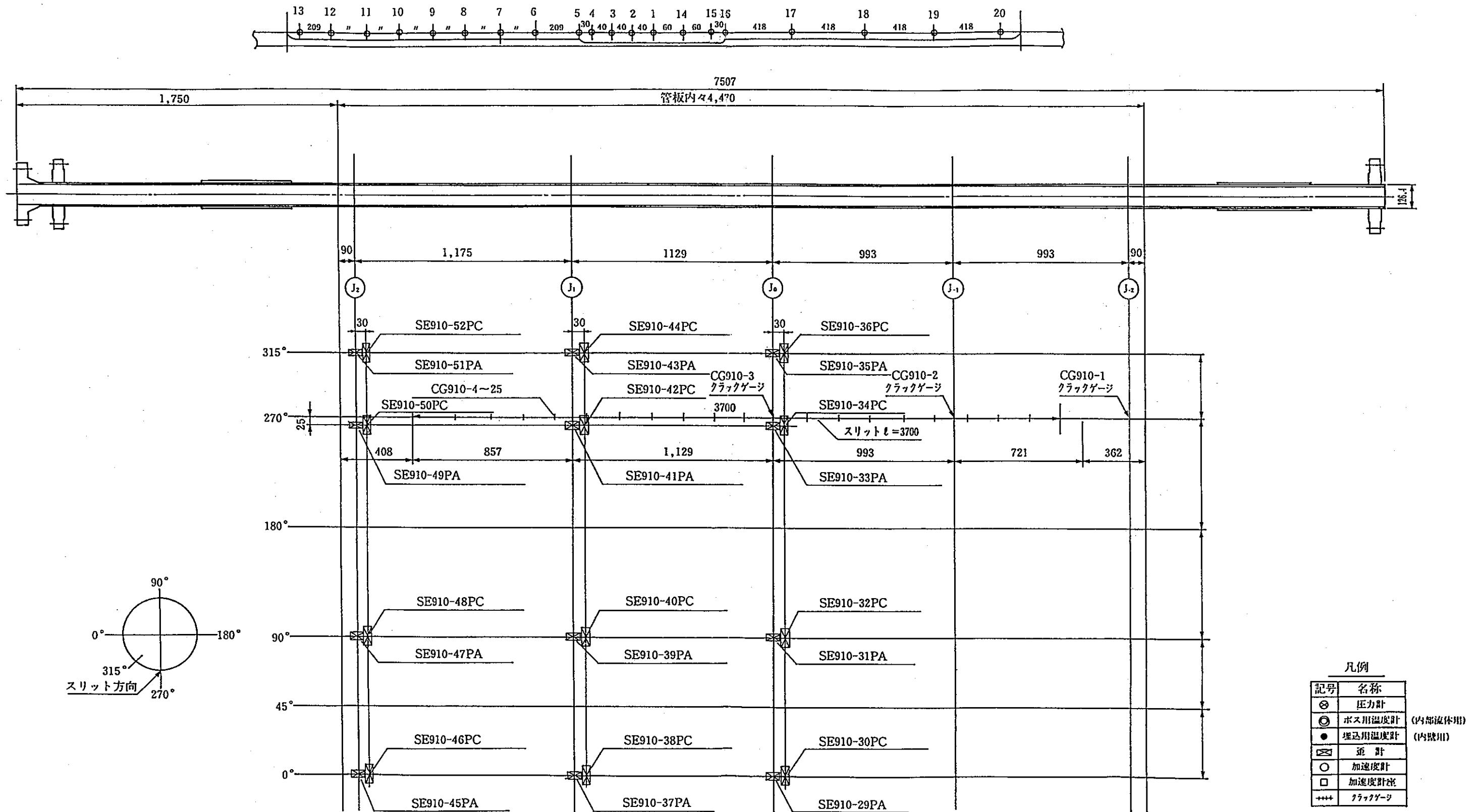


図3.1.4-4 圧力管外計測器取付け位置図

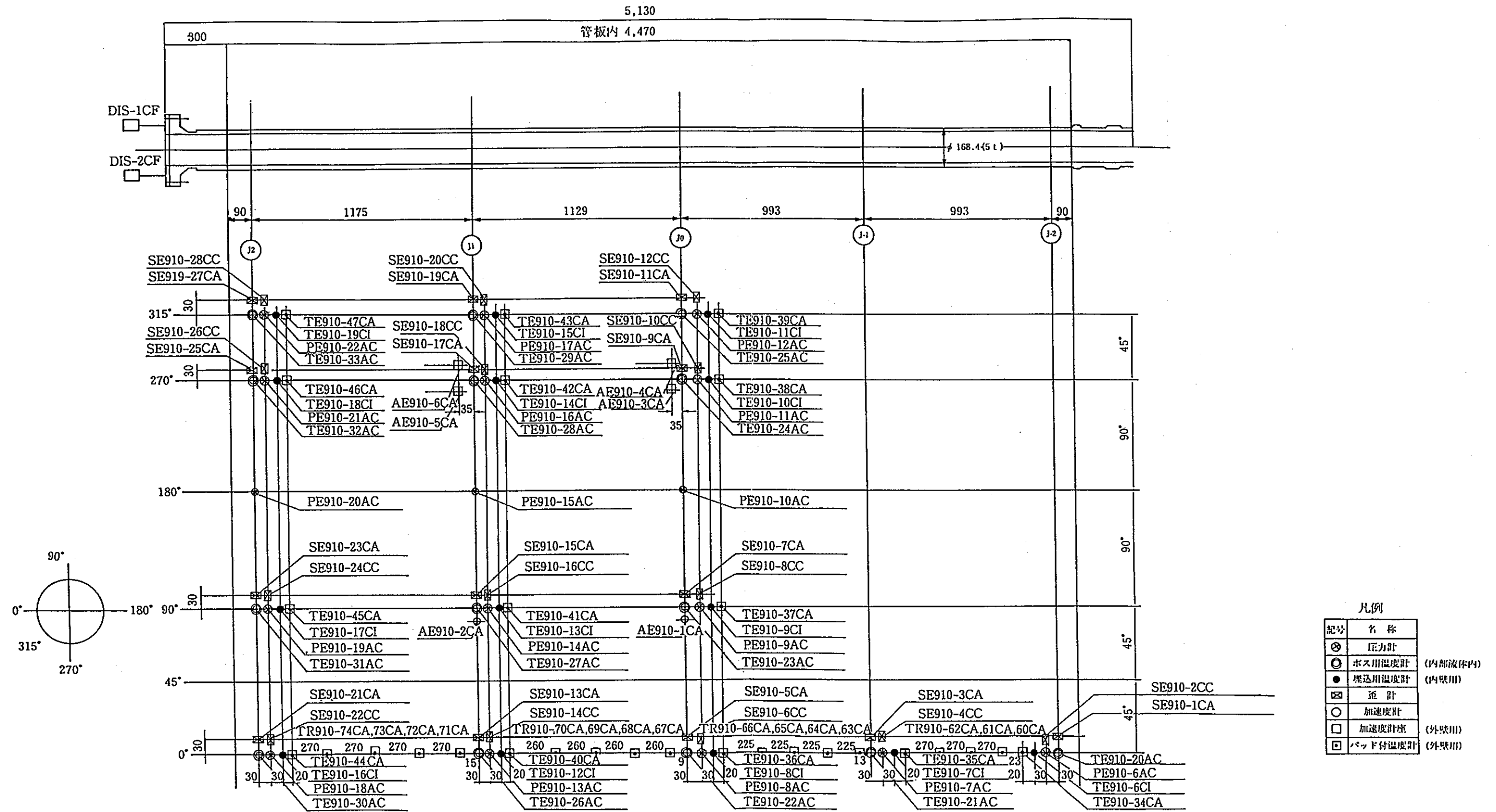


図3.1.4-5 カランドリア管外及びアニュラス部計測器
取り付け位置図

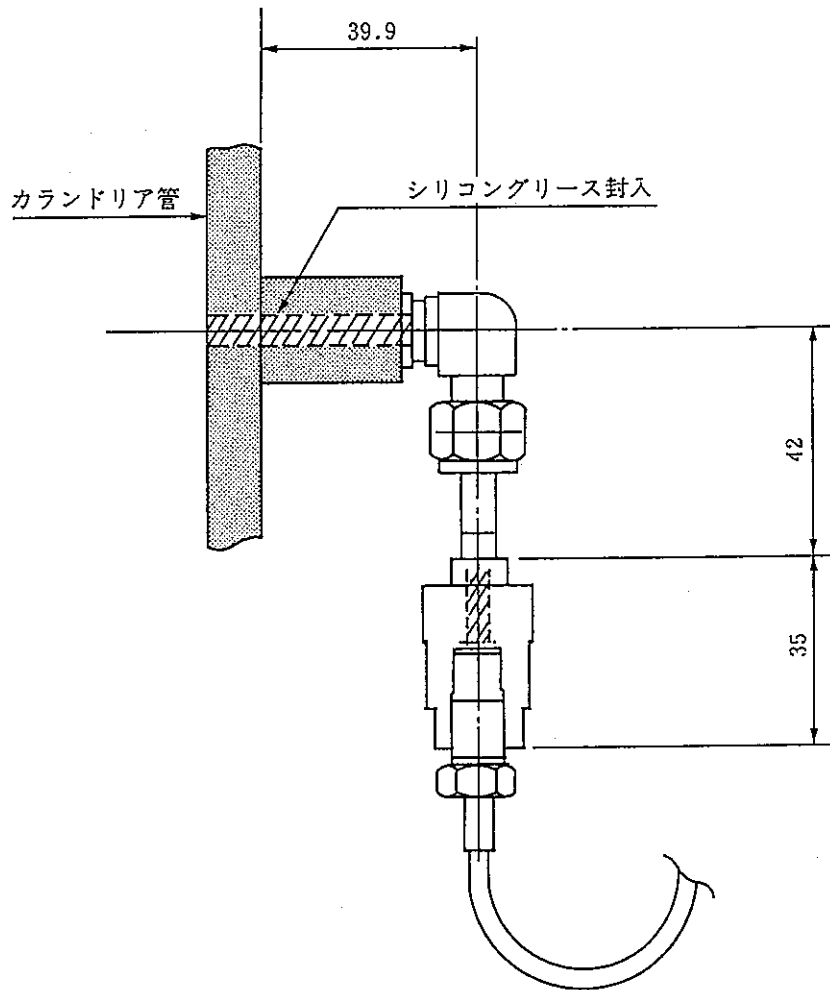
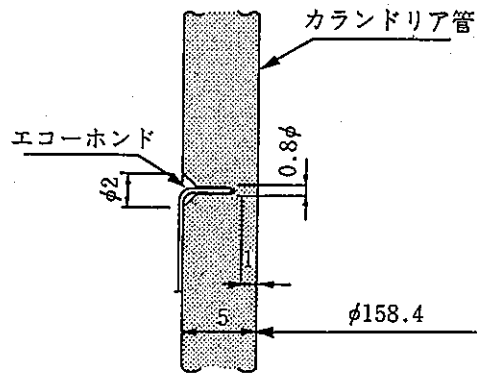
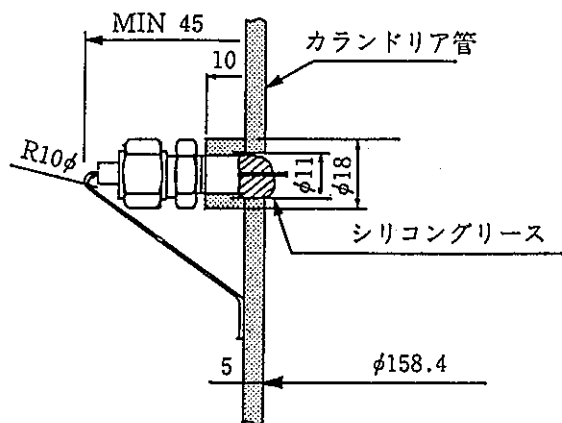


図3.1.4-6 アニュラス部圧力計測器取付詳細



カロンドリア管内壁面温度計取付要領図



アニュラス部温度計取付要領図

図3.1.4-7 熱電対取付詳細

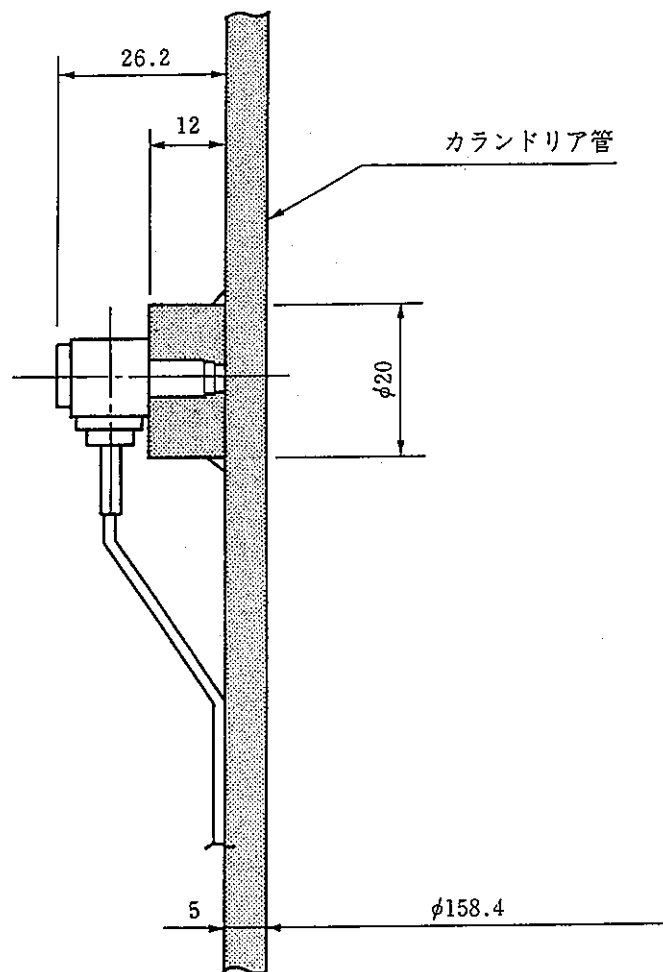


図3.1.4-8 カランドリア管外壁面加速度計取付要領図

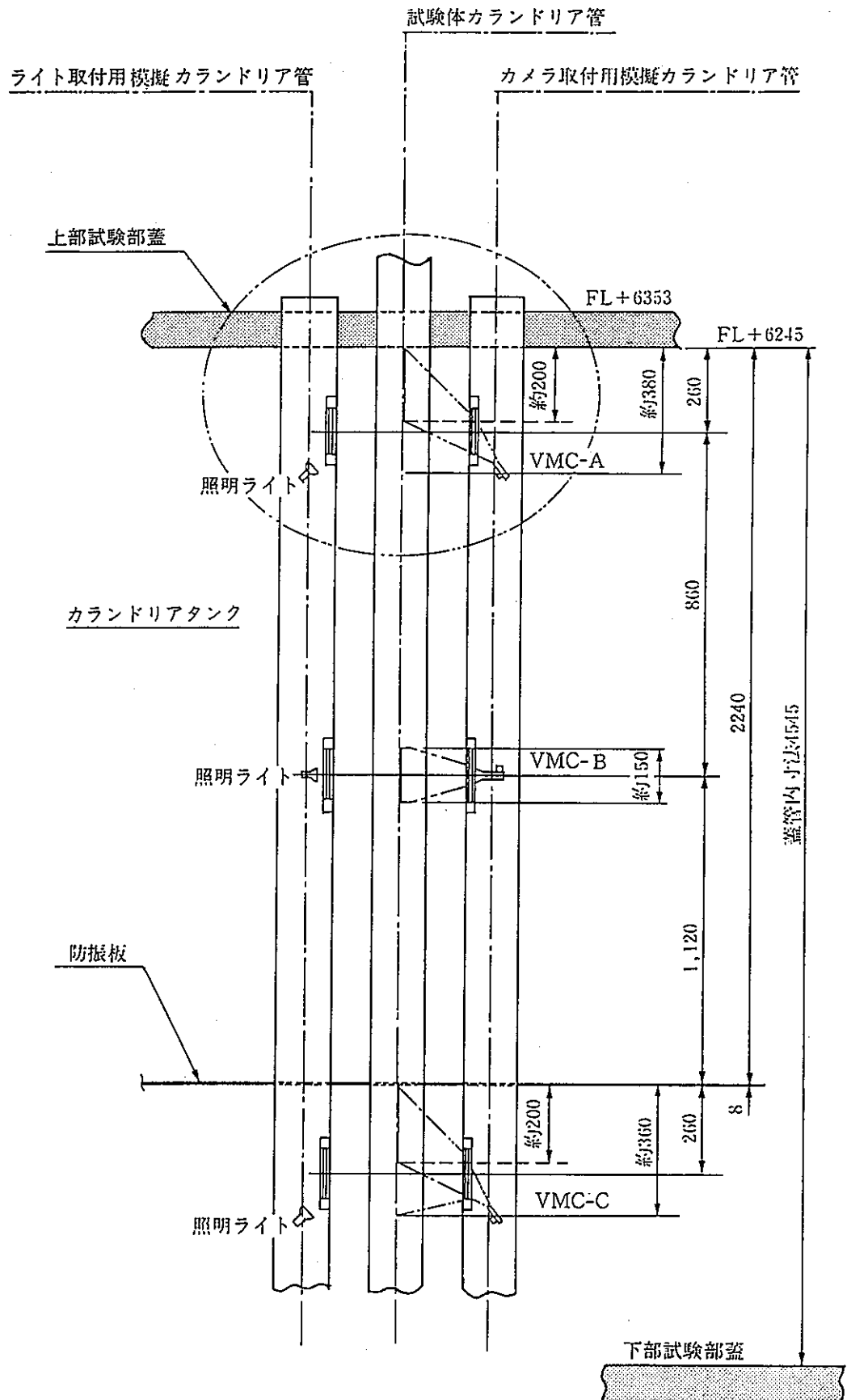


図3.1.4-9 ボイドモニターカメラ立面配置図

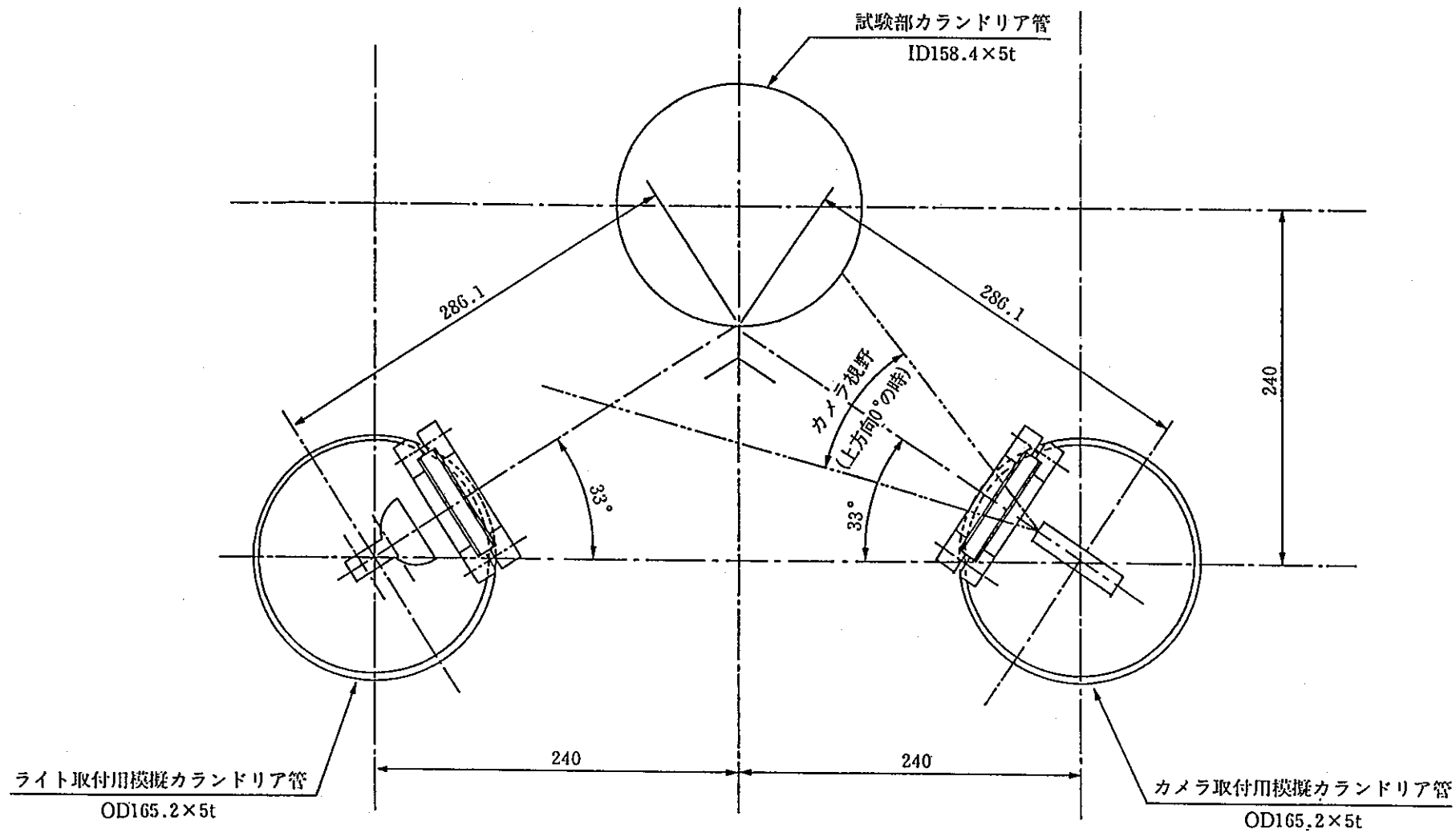


図3.1.4-10 ボイドモニターカメラ平面配置図

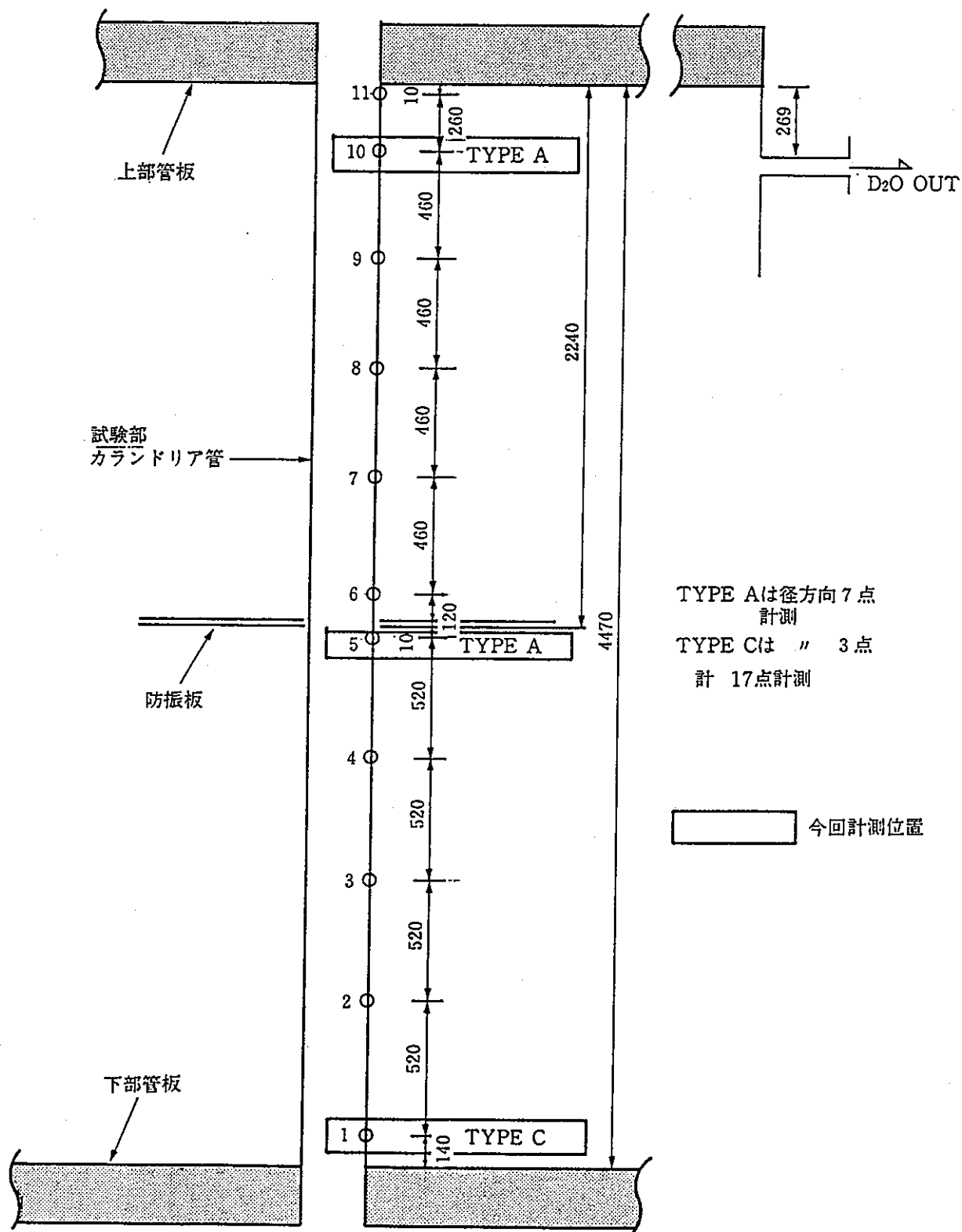


図3.1.4-11 温度計及びボイド計の軸方向取り付け位置図

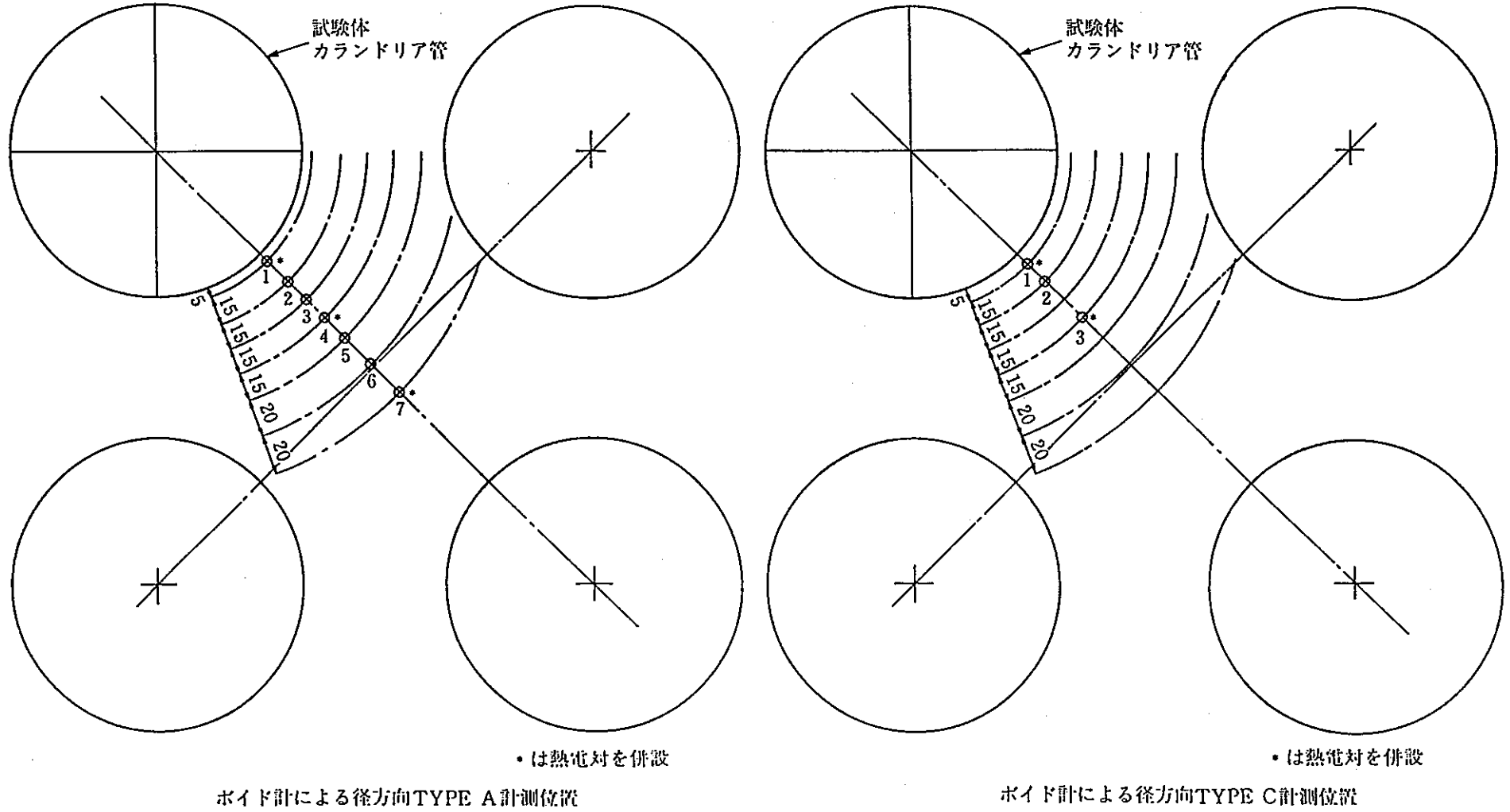


図3.1.4-12 カランドリアタンク内のボイド計及び熱電対の平面配置図

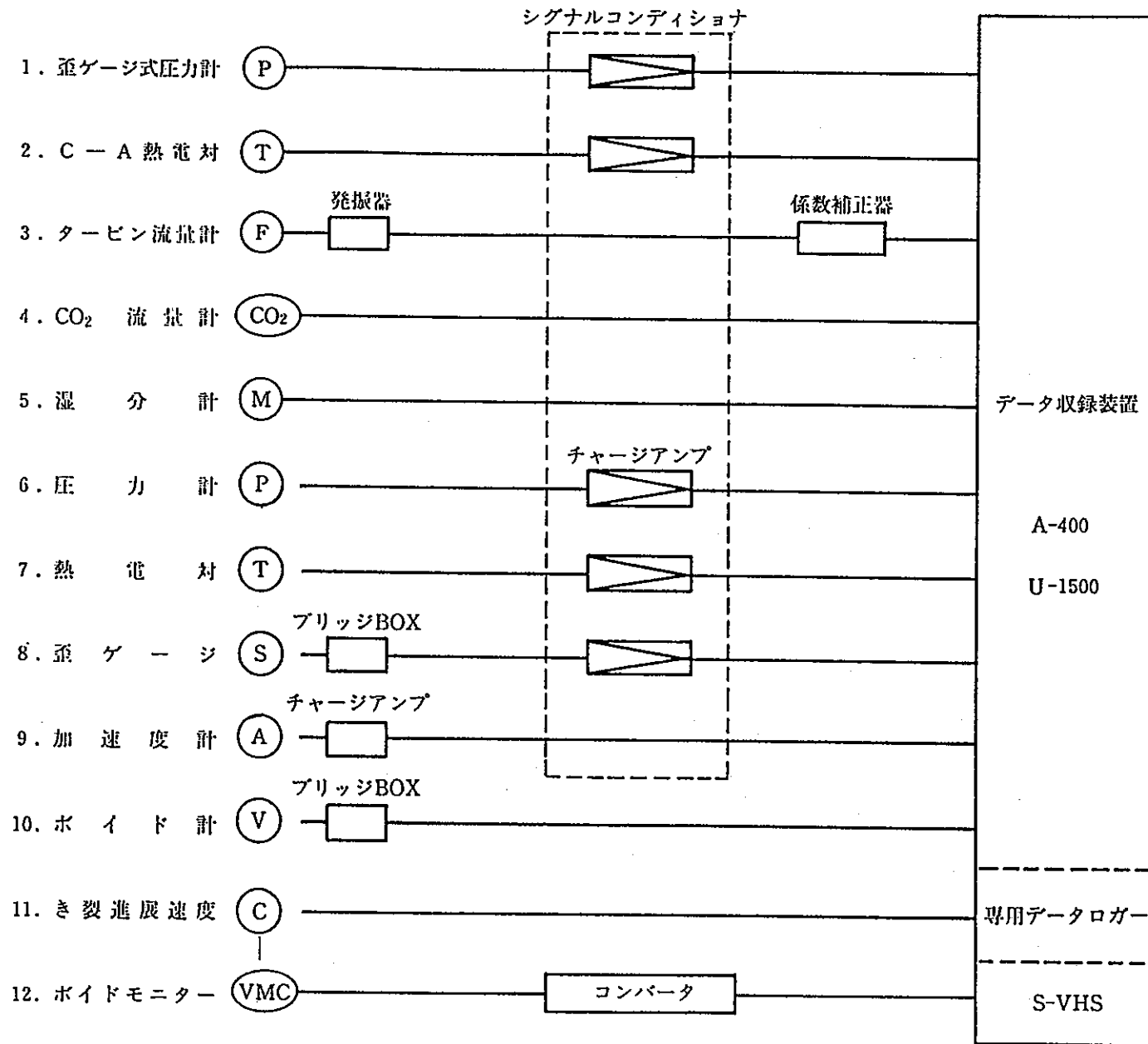


図3.1.5-1 収録システム構成

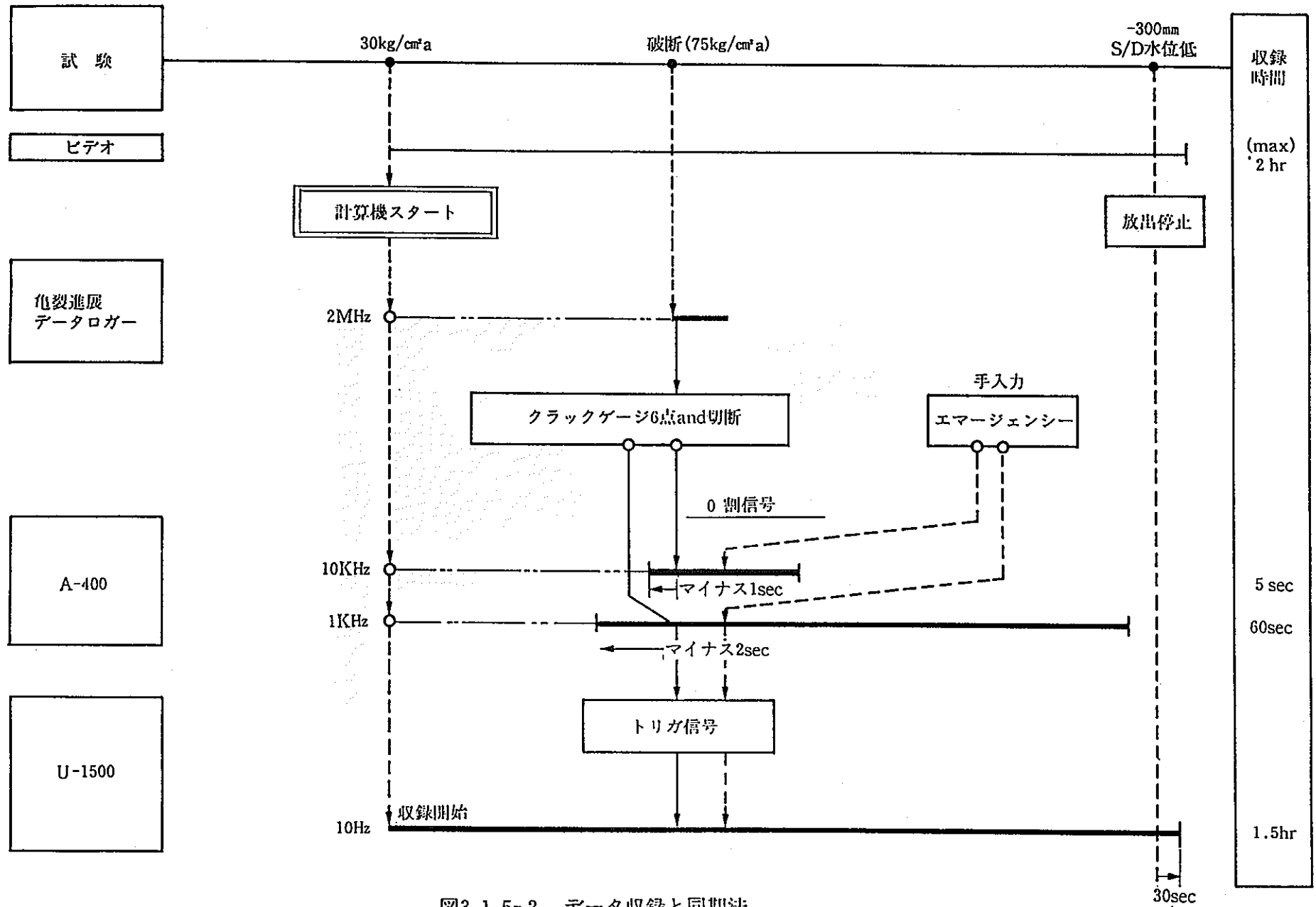


図3.1.5-2 データ収録と同期法



図3.1.5-3 亀裂進展計測用ハンドヘルドコンピュータ

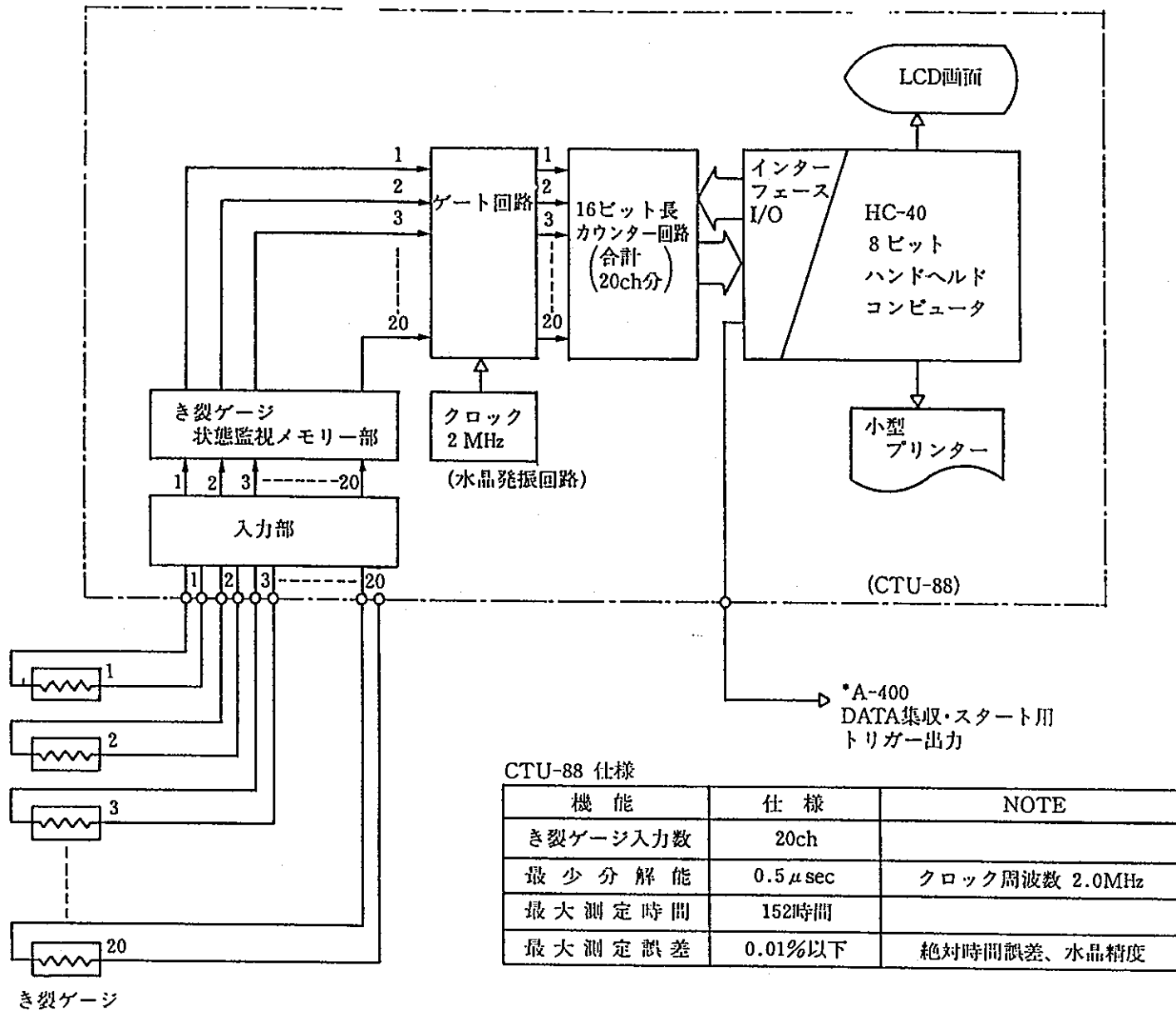


図3.1.5-4 亀裂進展計測システム構成

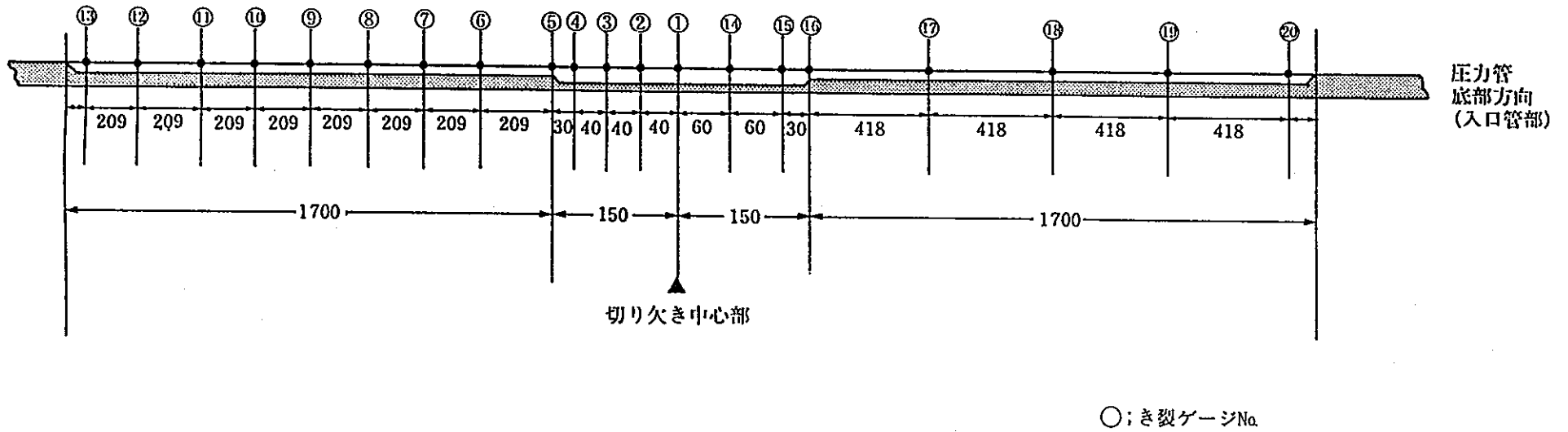


図3.1.5-5 流動特性試験 亀裂進展ゲージ貼付位置図

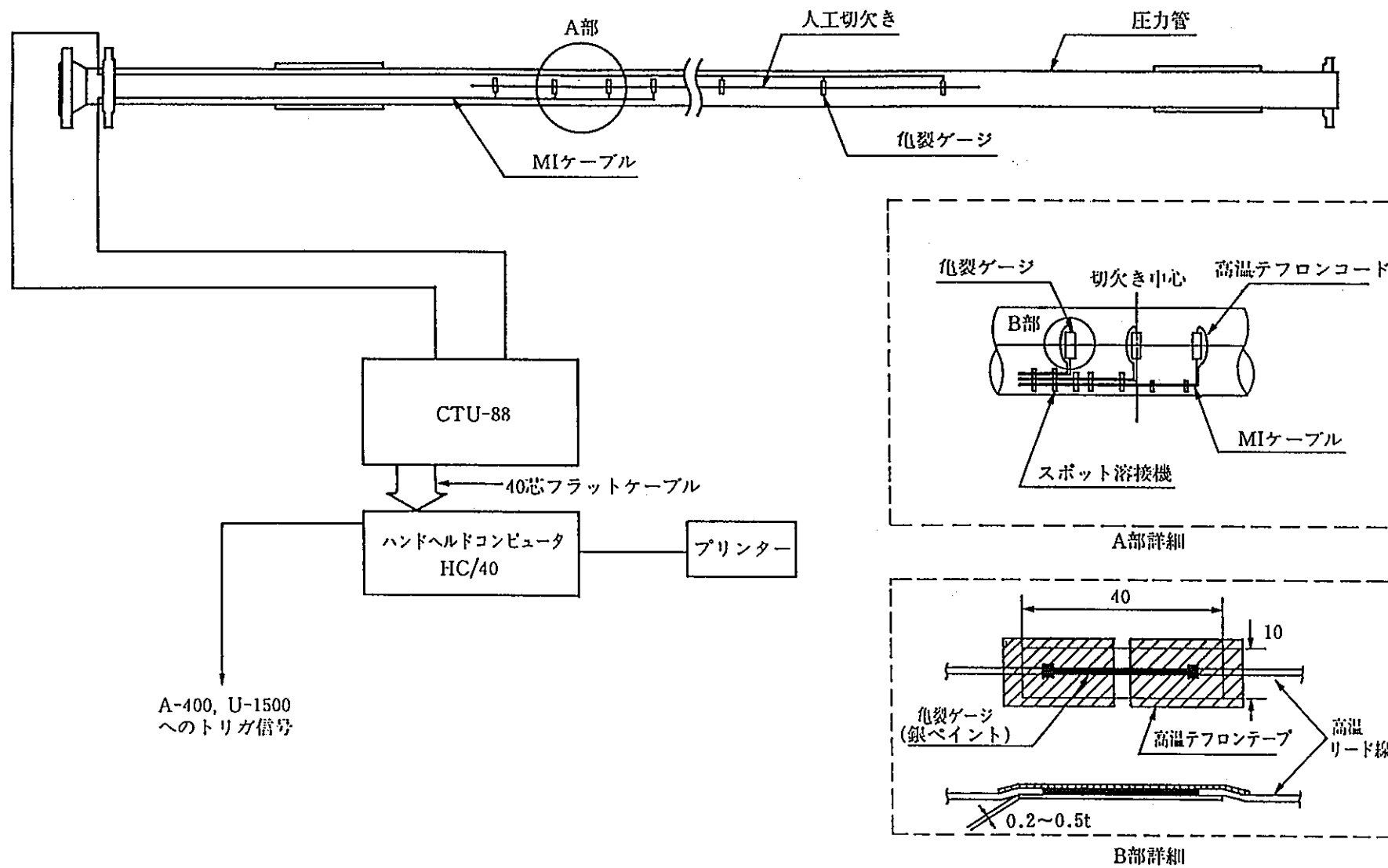


図3.1.5-6 流動特性試験 亀裂進展速度計測要領

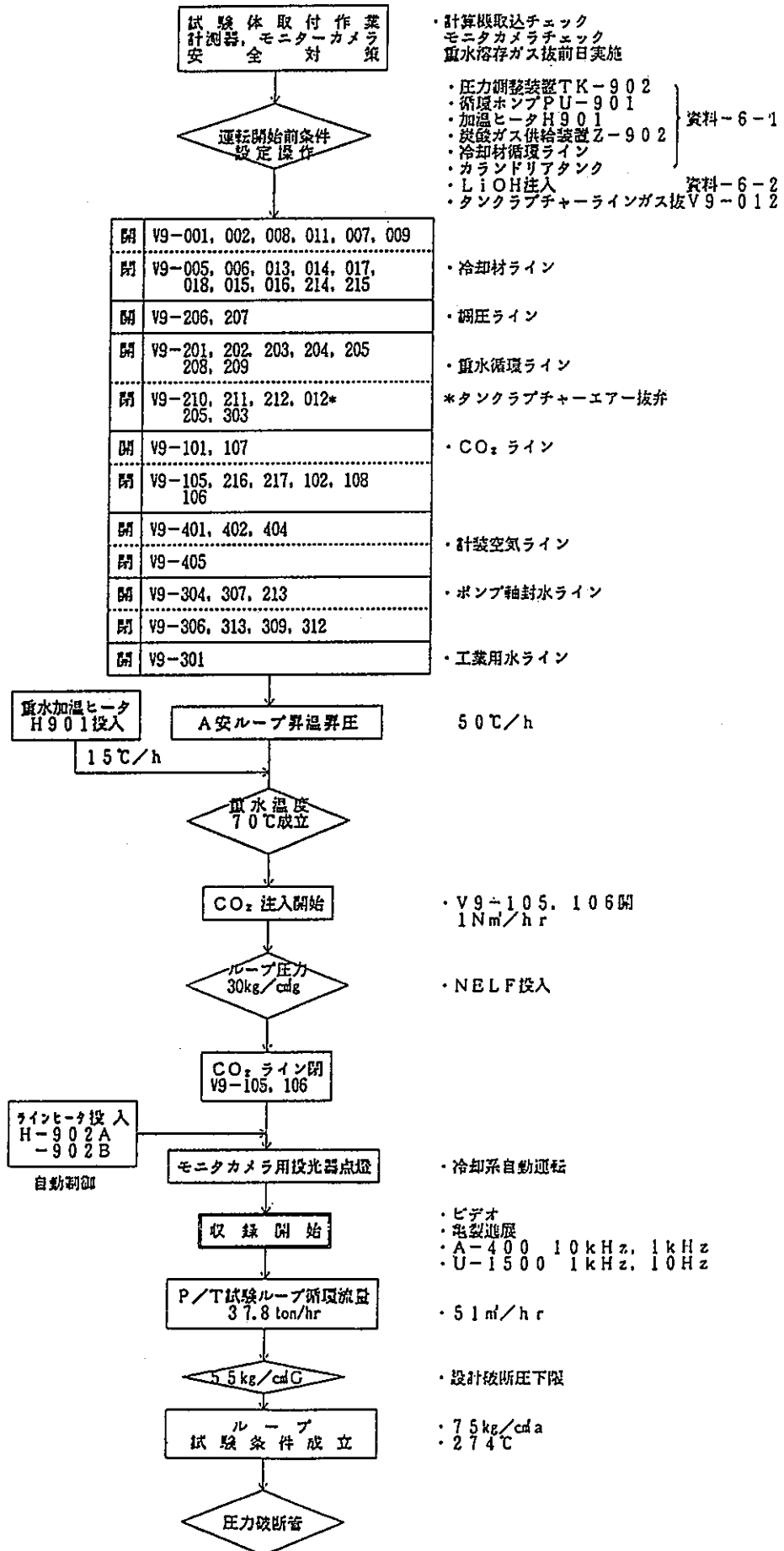


図3.1.6-1 流動特性試験手順フロー (1/2)

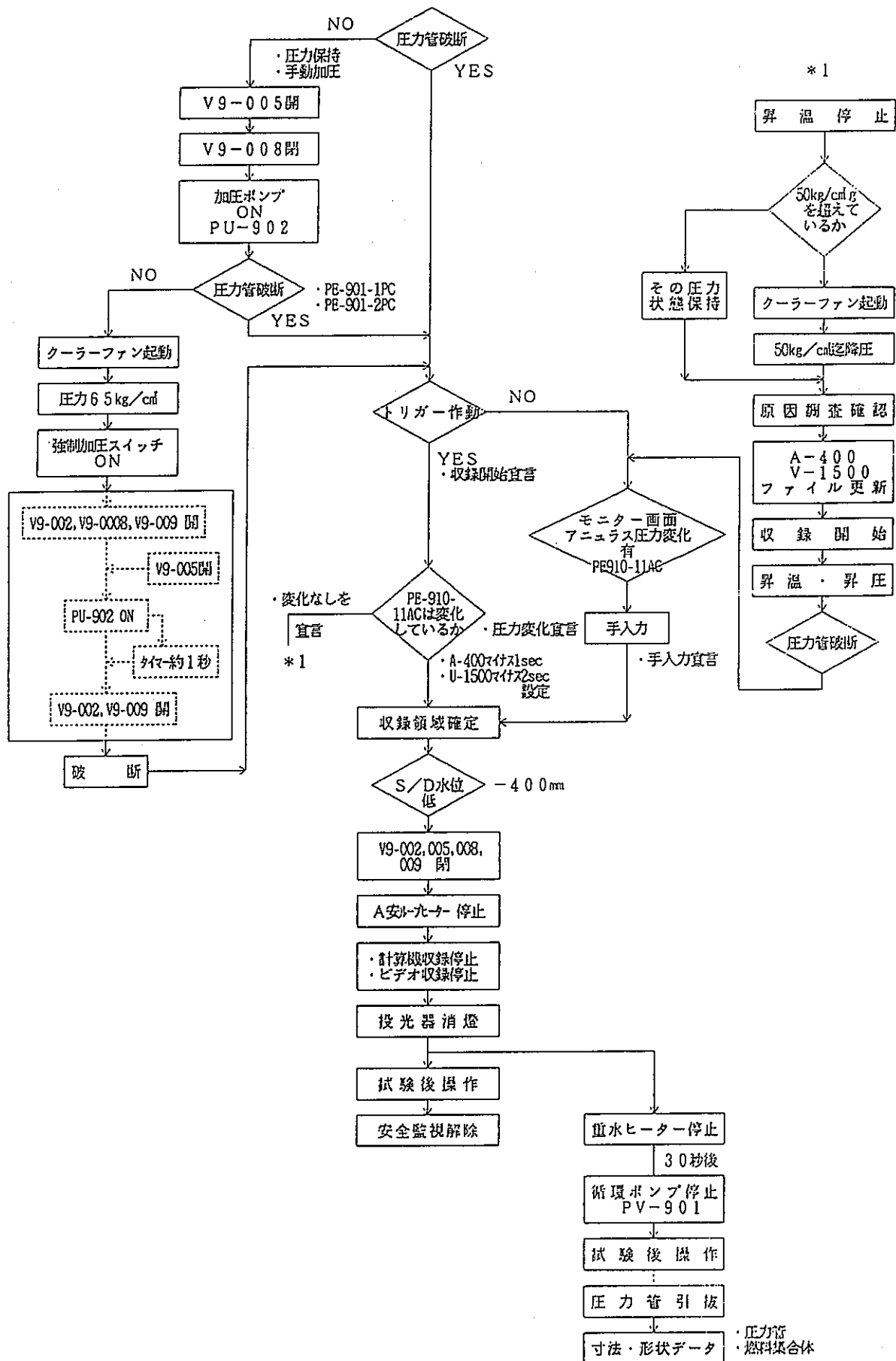
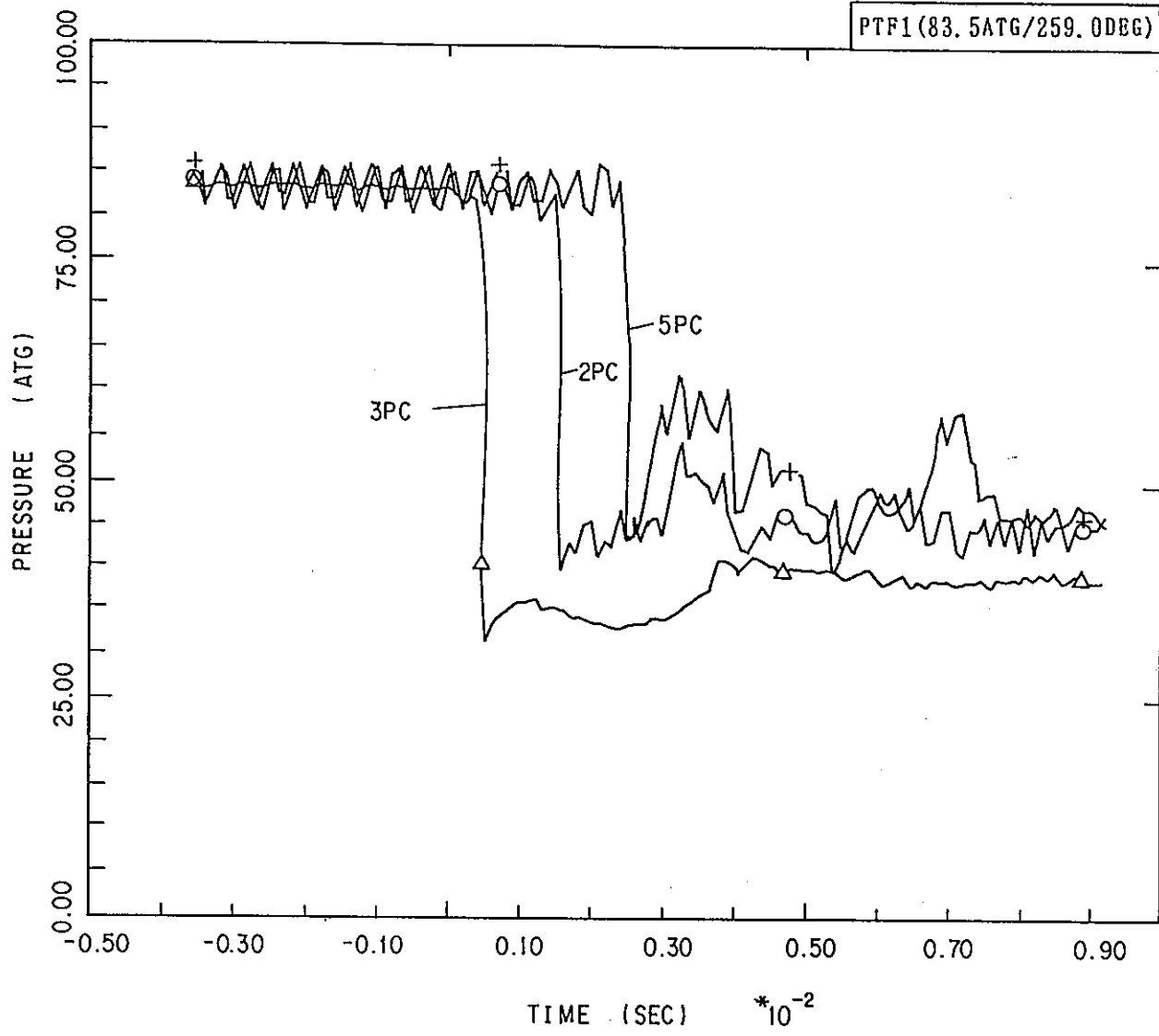


図3.1.6-1 流動特性試験手順フロー (2/2)



- PE910-2PC
- △ PE910-3PC
- + PE910-5PC

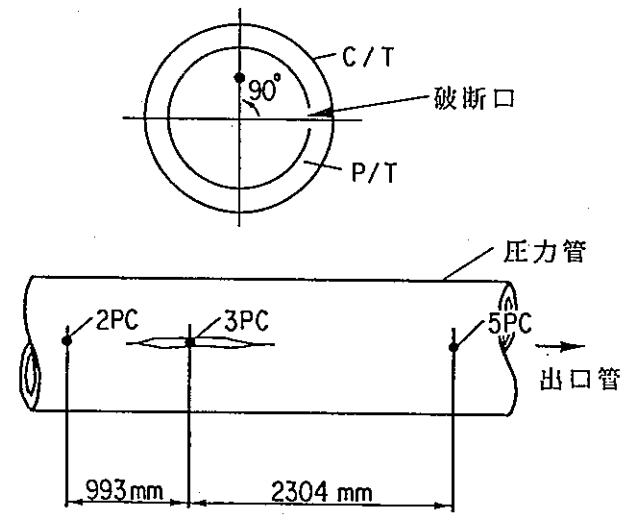
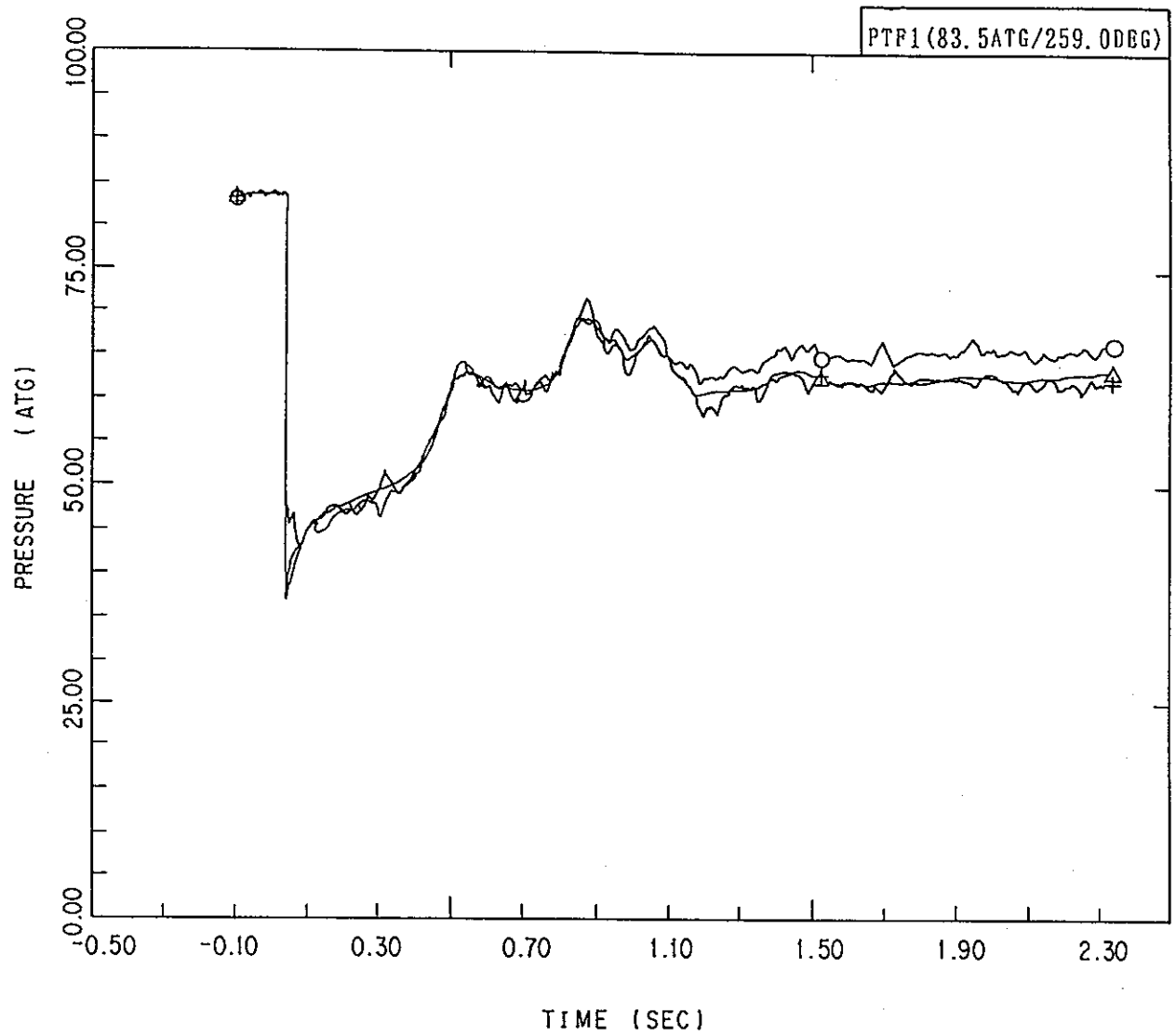


图 3.1.7-1 压力管内压力变化 (短期)



- PE910 - 2PC
- △ PE910 - 3PC
- + PE910 - 5PC

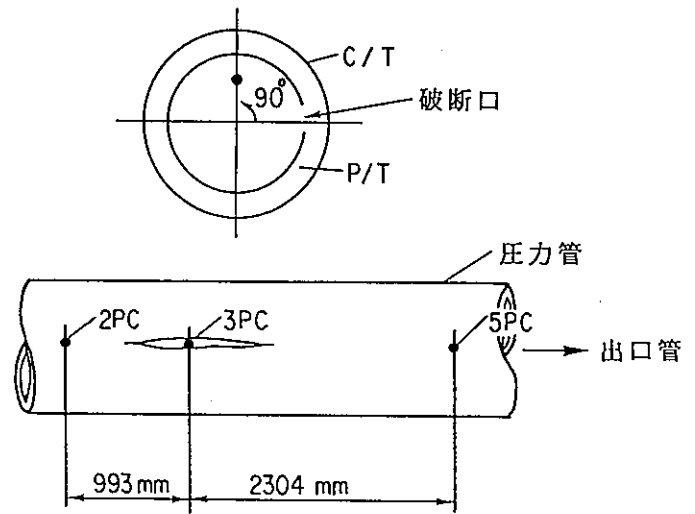
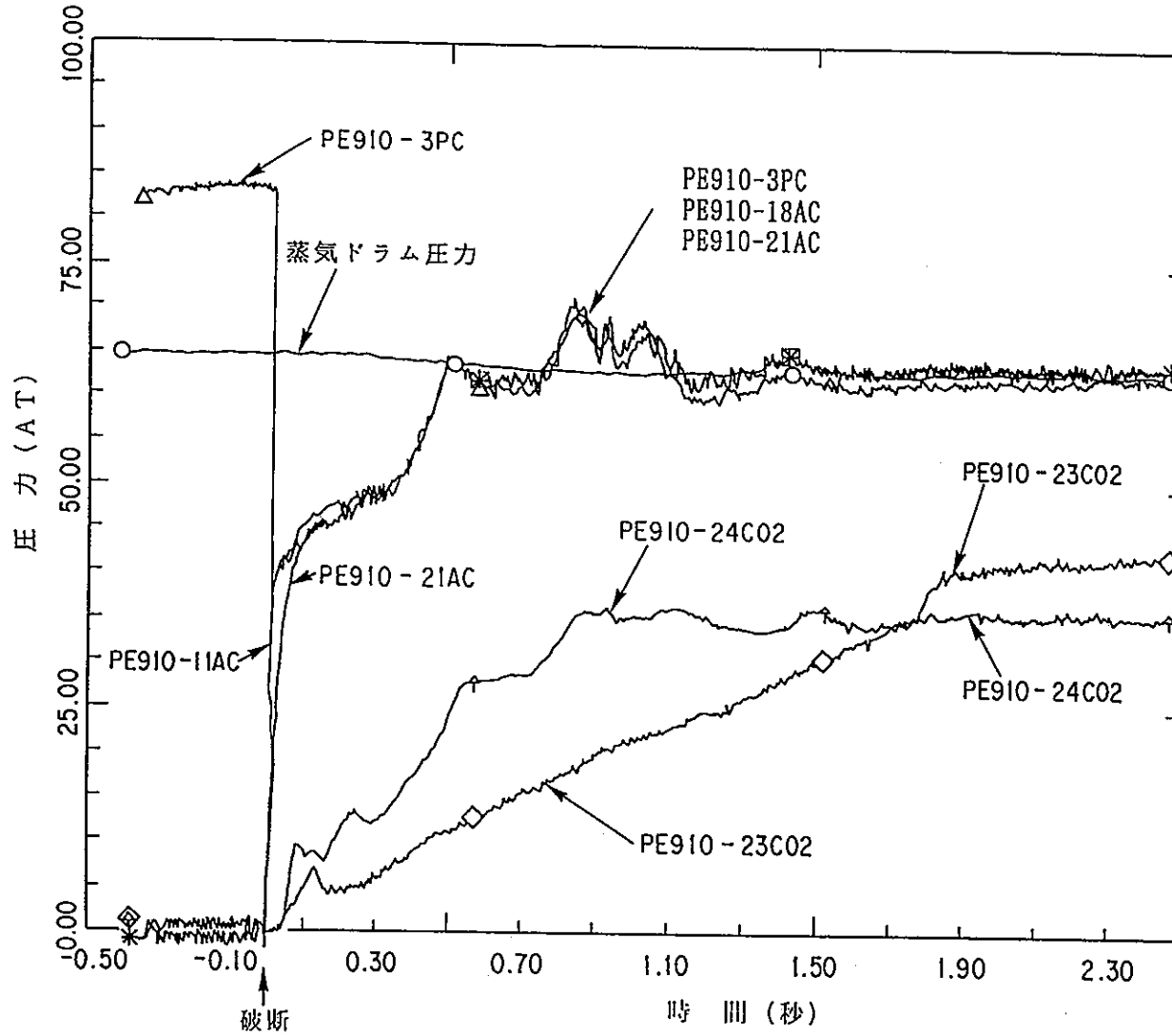


图 3.1.7 - 2 压力管内压力变化 (长期)



- 蒸気ドラム圧力
- △ PE910-3PC
- + PE910-11AC
- × PE910-21AC
- ◇ PE910-23C02
- ⋈ PE910-24C02

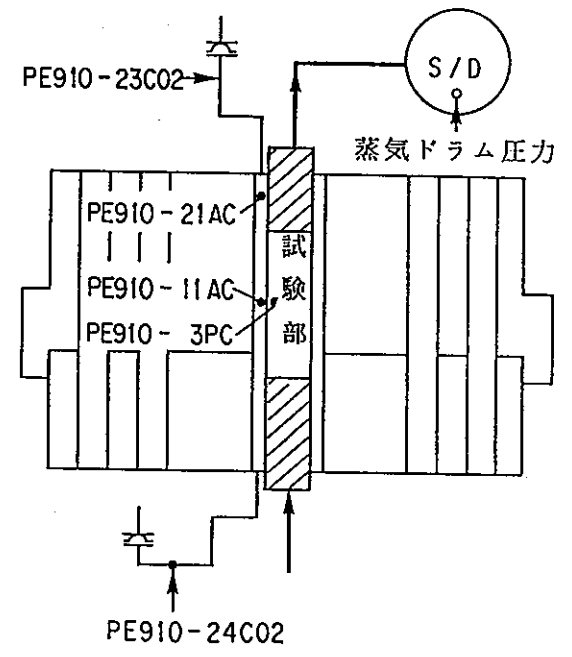
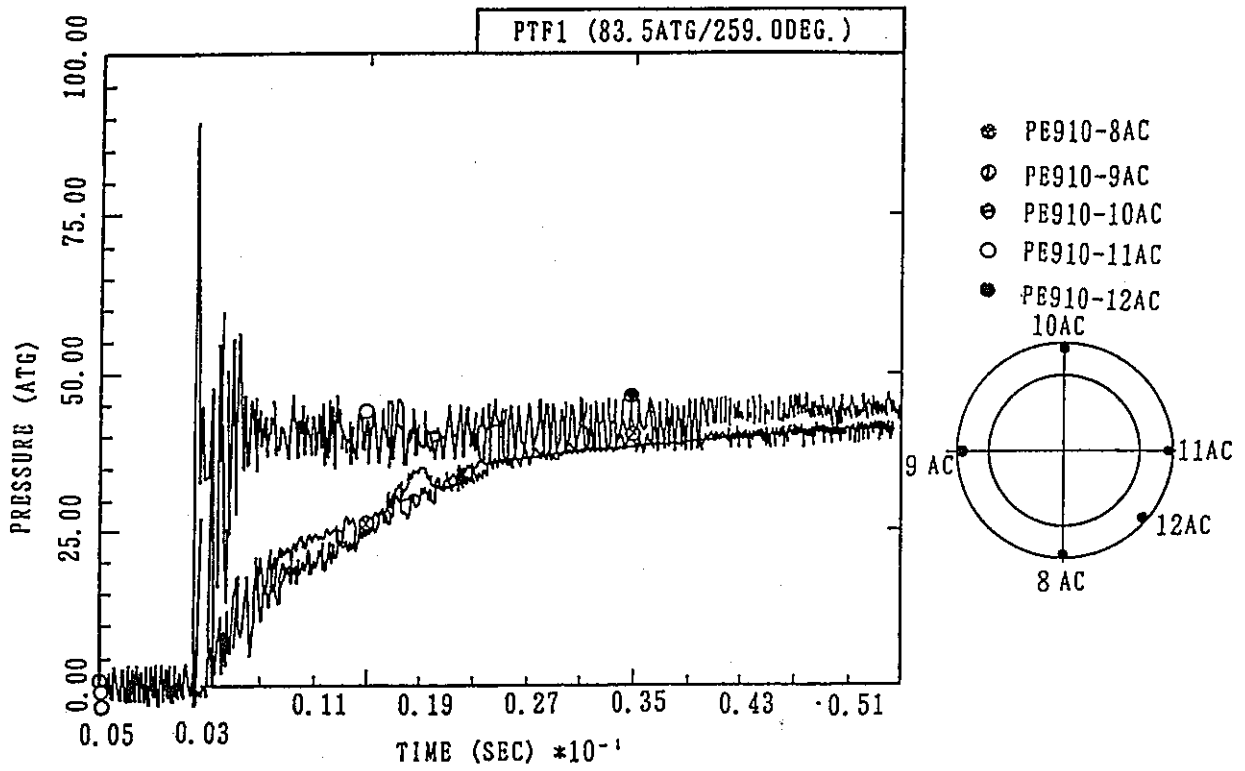
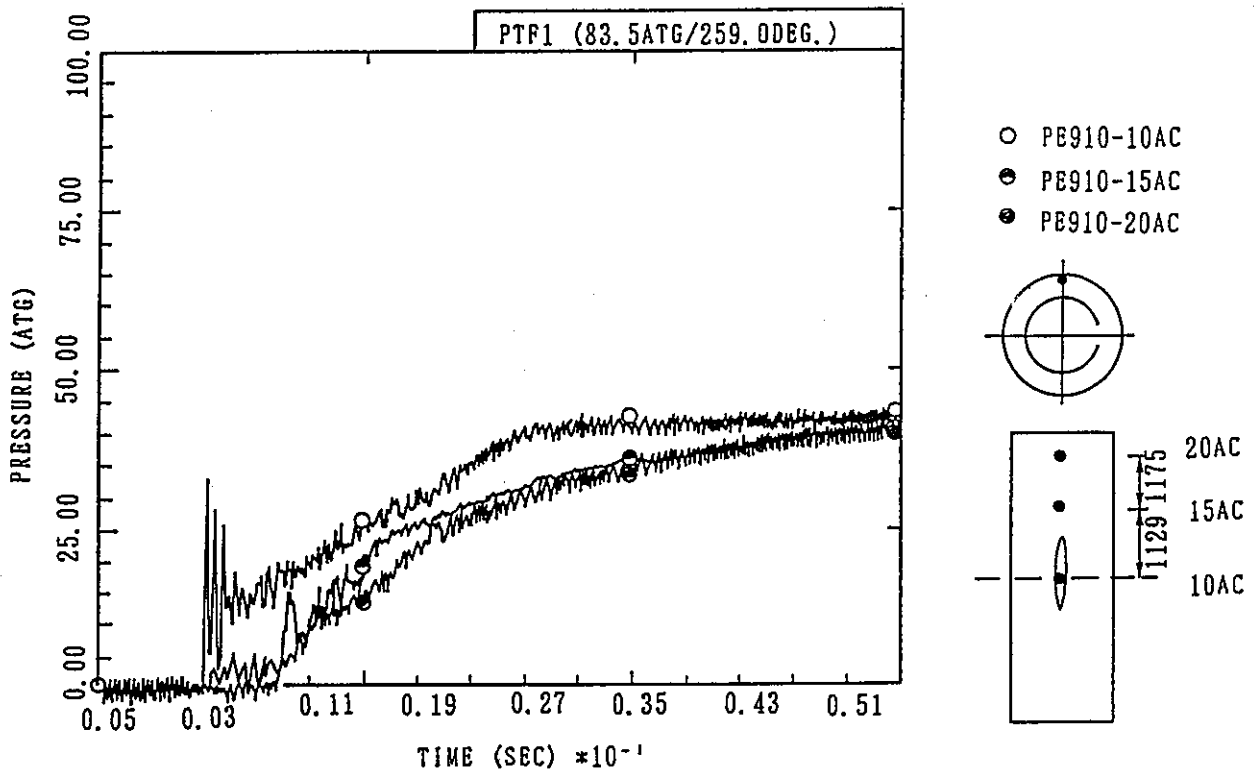


図 3. 1. 7 - 3 流動特性試験各部圧力変化

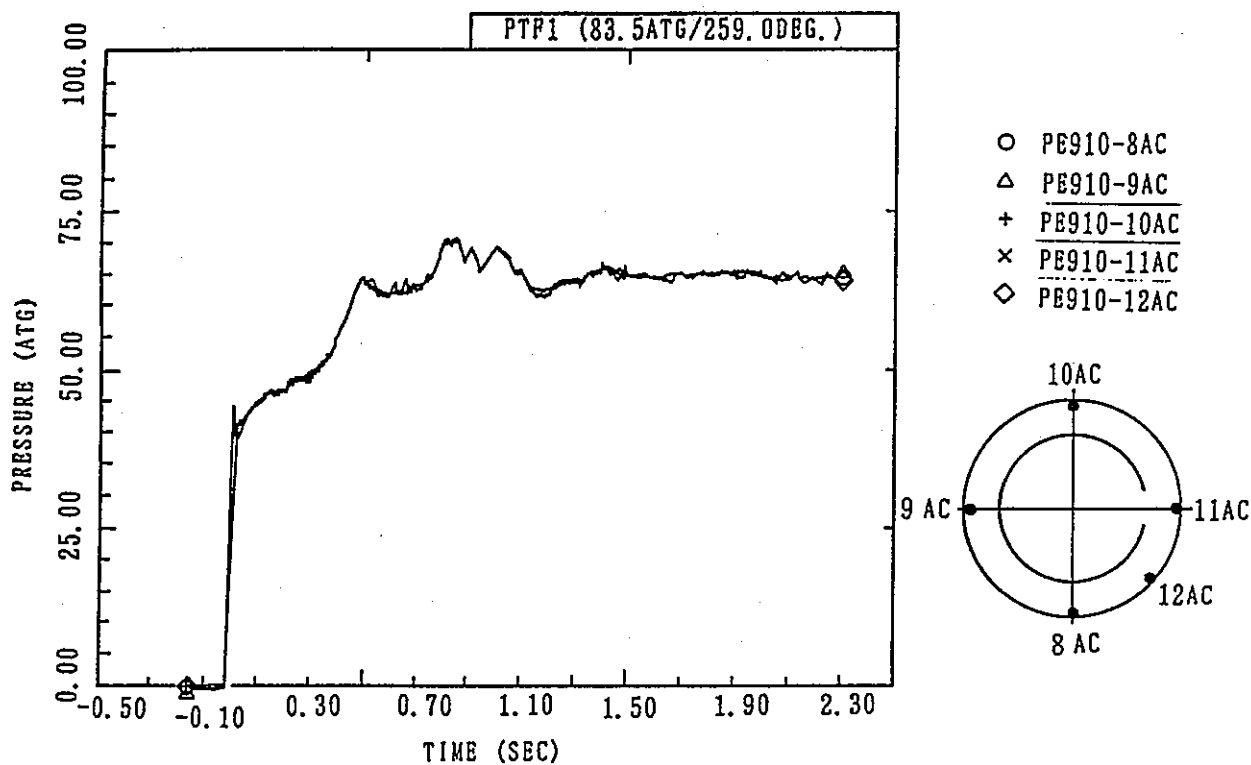


(a) 破断起点部でのアニュラス部周方向圧力分布

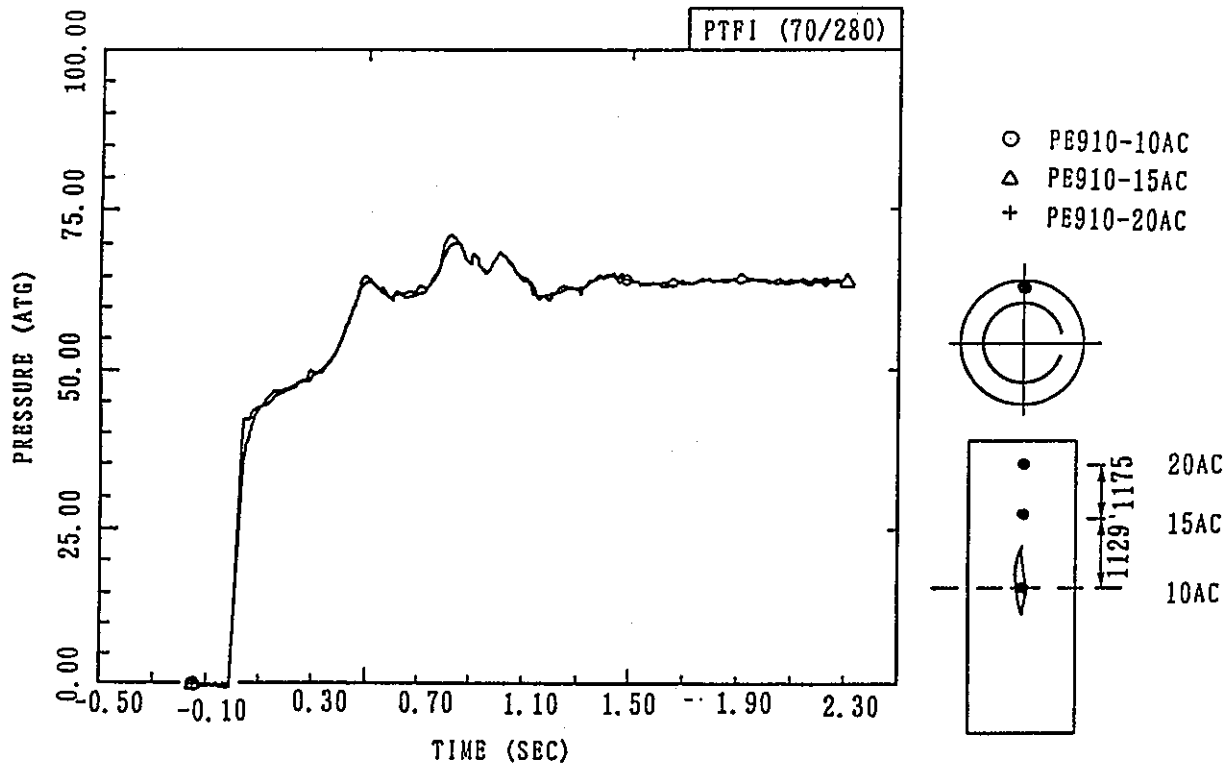


(b) 破断部から90°の位置における軸方向圧力分布

図3.1.7-4 破断後数十m秒迄の圧力分布

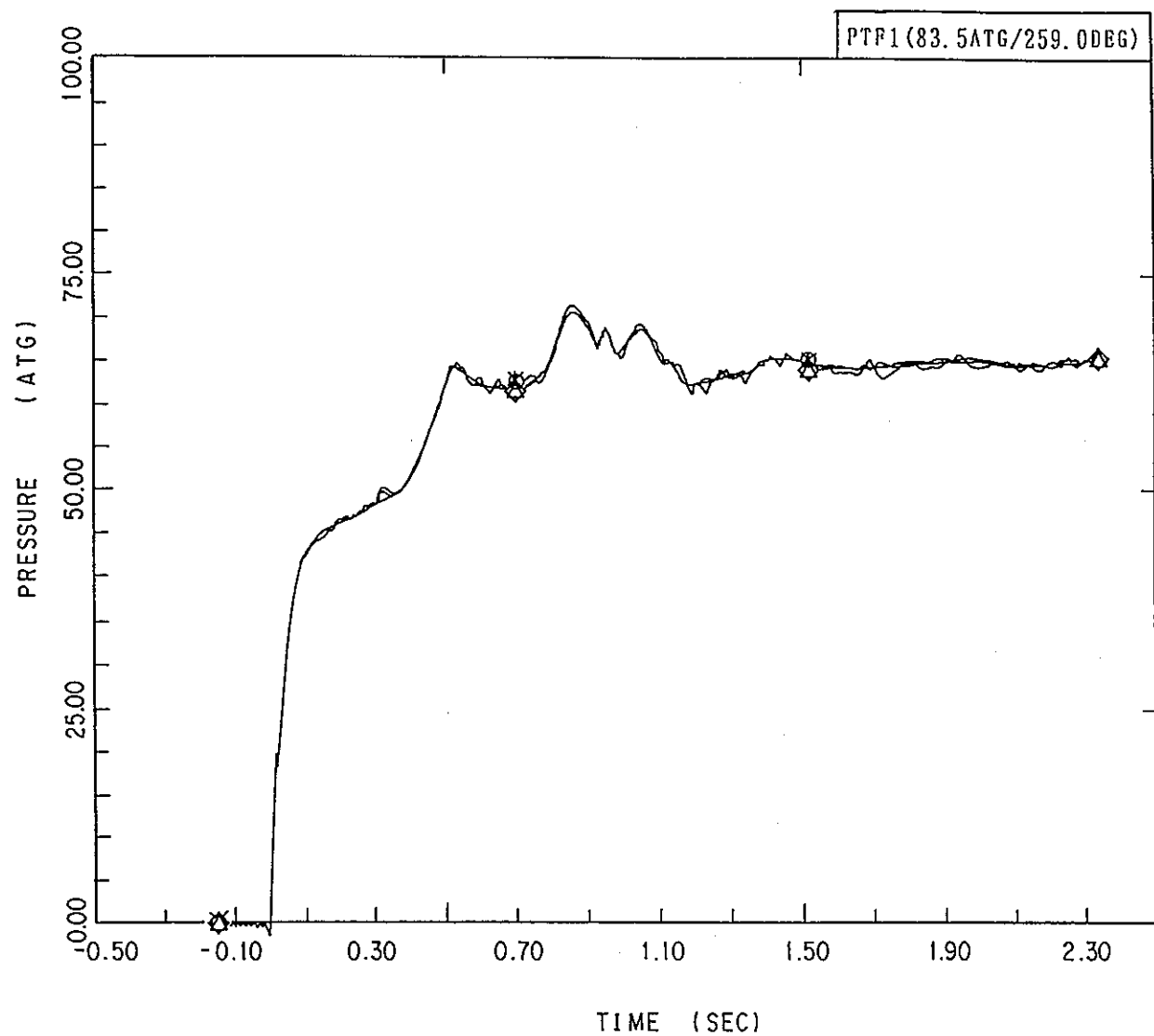


(a) 破断起点部でのアニュラス部周方向圧力分布



(b) 破断部から90° の位置における軸方向圧力分布

図3.1.7-5 比較的長い時間での圧力分布



- PE910-18AC
- △ PE910-19AC
- + PE910-20AC
- × PE910-21AC
- ◇ PE910-22AC

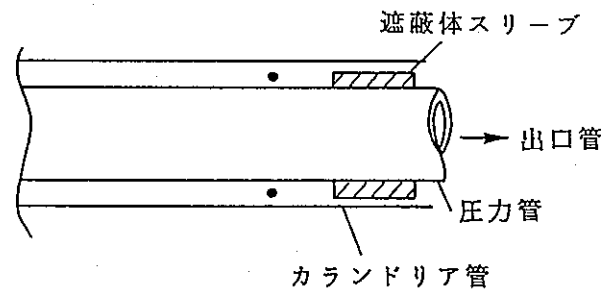
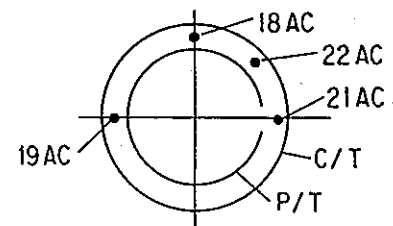
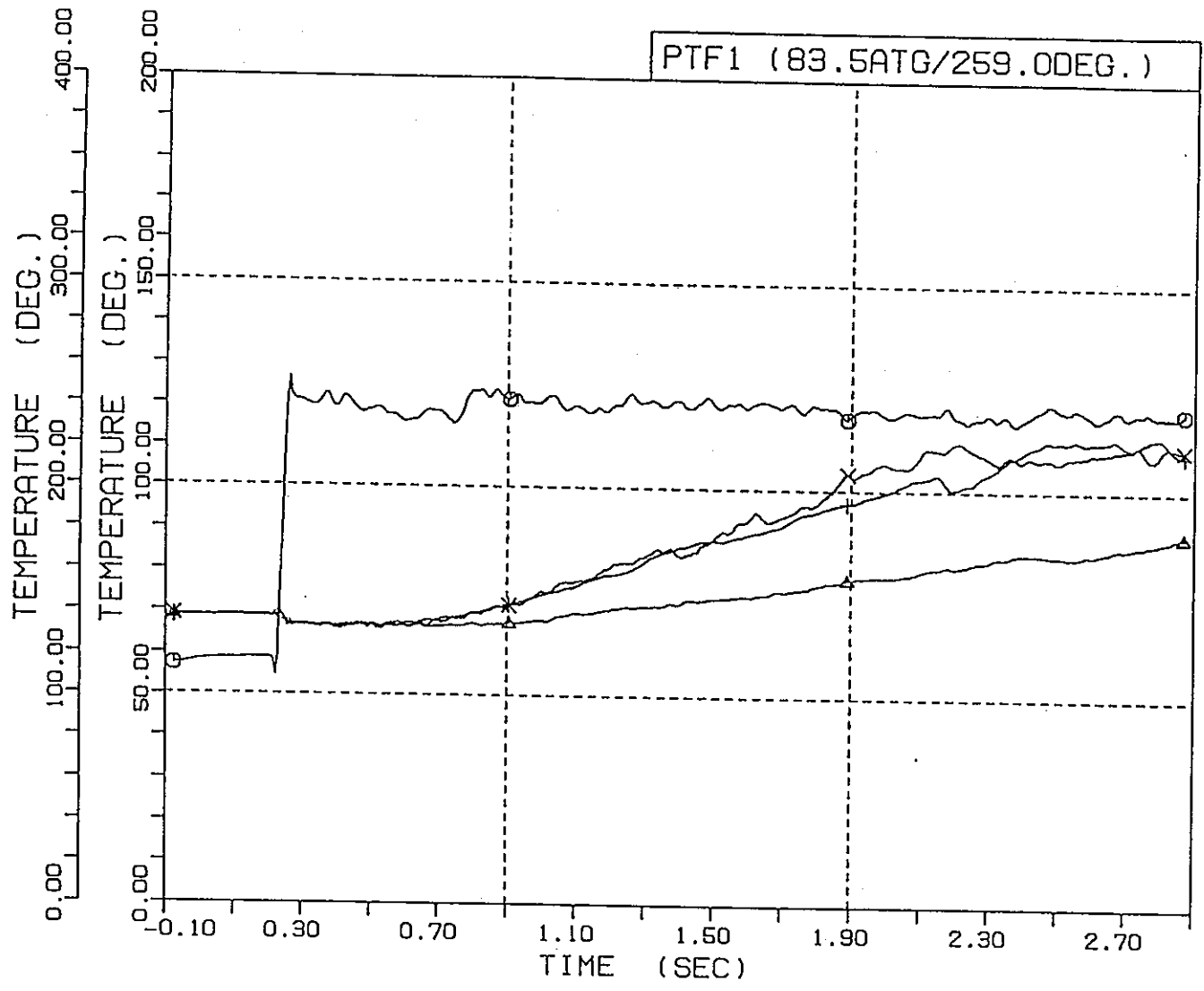


図 3.1.7 - 6 鉄水遮へい体スリーブ部におけるピーク圧力と周方向圧力分布



- TE910-28AC
- △ TE910-41CA
- + TE910-42CA
- × TE910-43CA

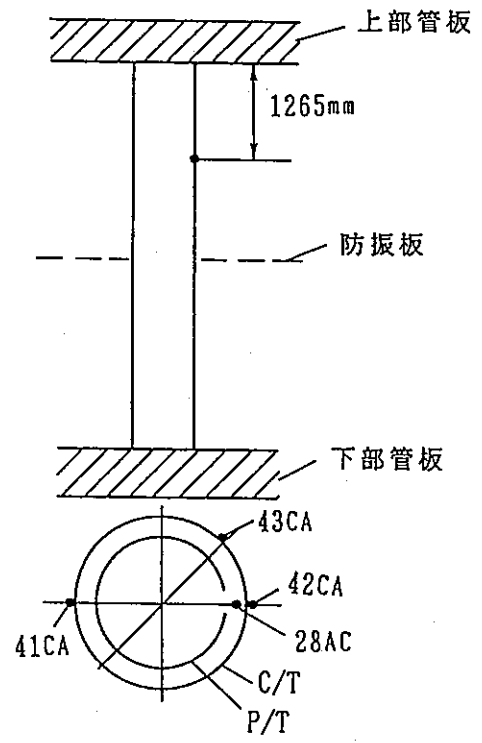


図3.1.7-7 カランドリア管アニュラス部冷却材及びカランドリア管材温度

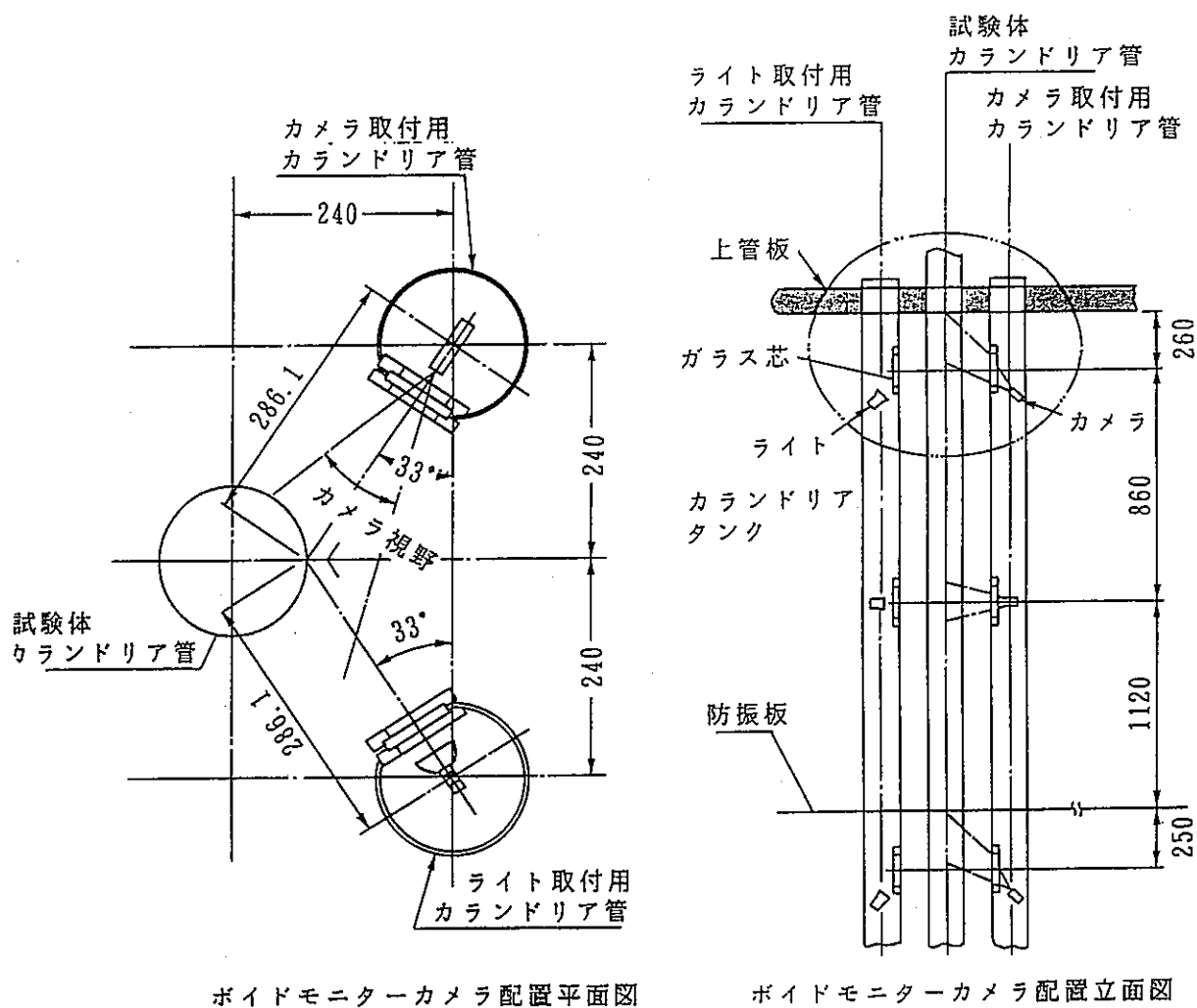


図 3.1.7-8 流動特性試験カランドリア管外表面蒸気泡発生状況

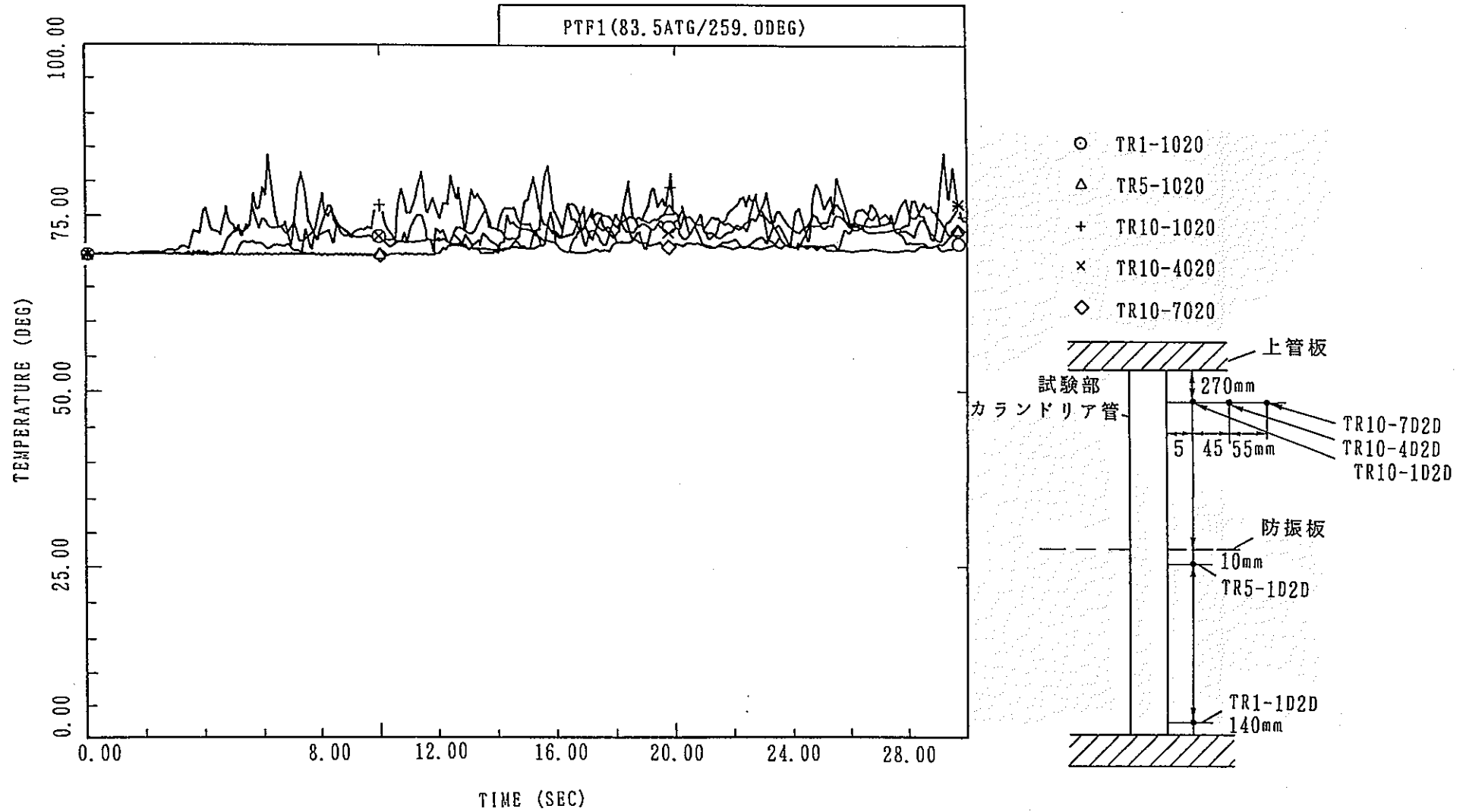
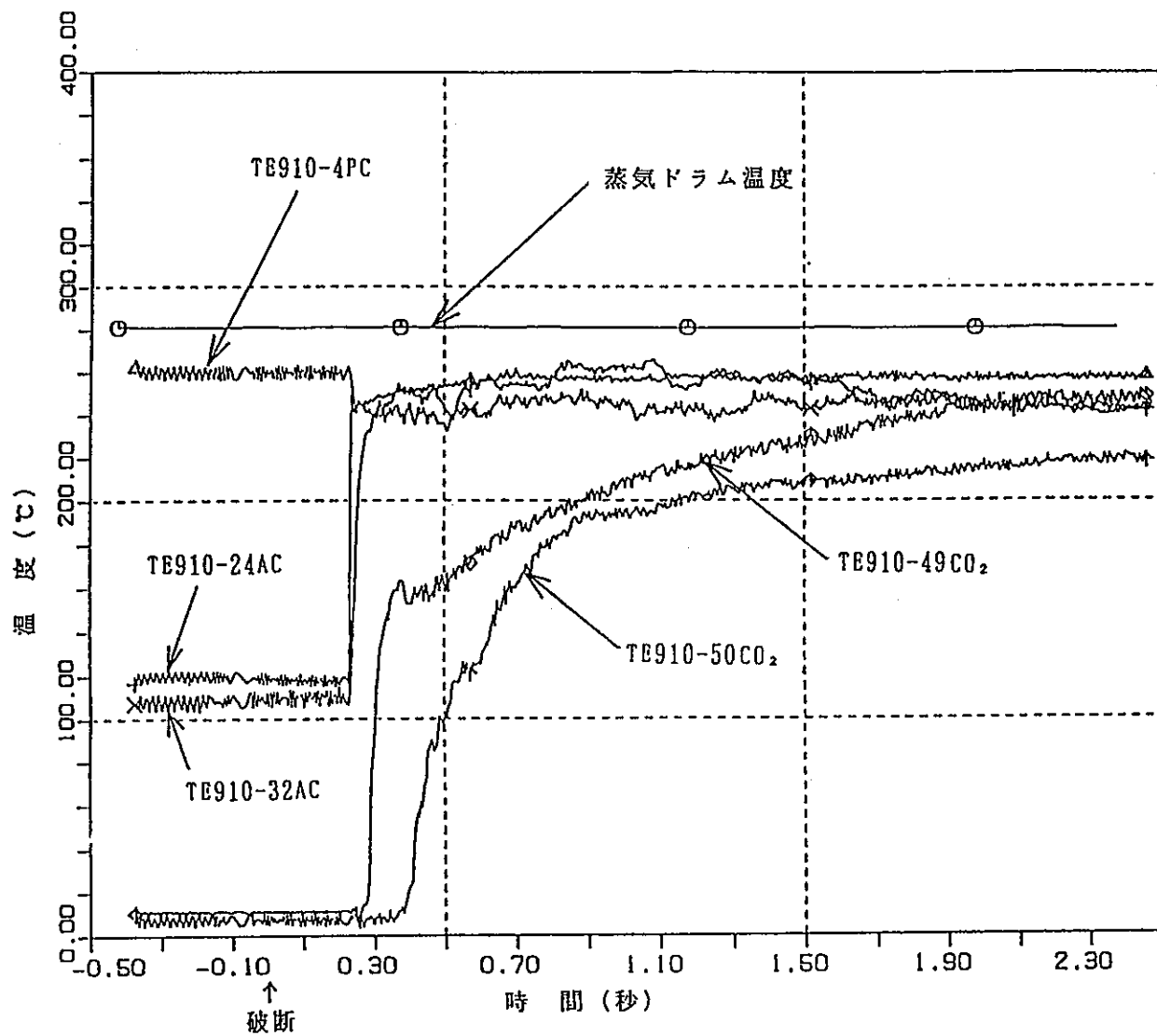


図3.1.7 - 9 模擬重水温度変化



- 蒸気ドラム温度
- △ TE910-4PC
- + TE910-24AC
- × TE910-32AC
- ◇ TE910-49CO₂
- ↑ TE910-50CO₂

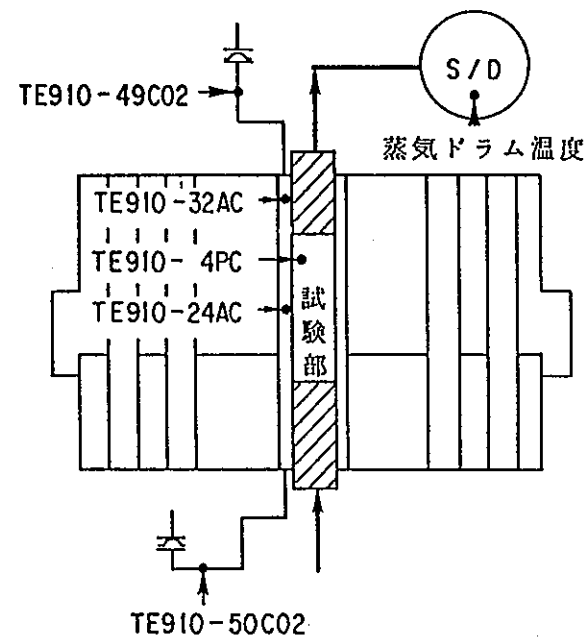
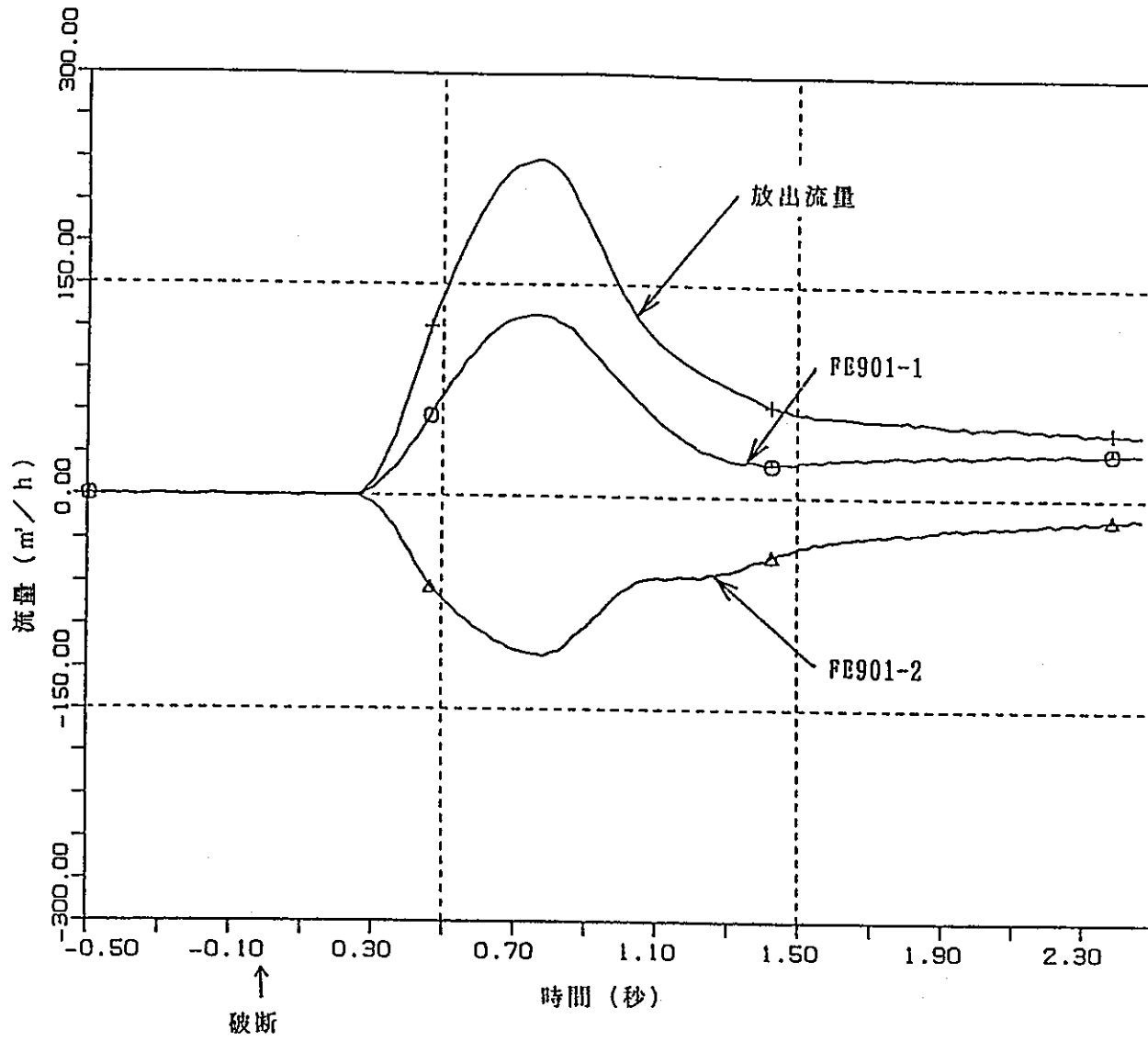


図3.1.7-10 流動特性試験各部流体温度変化



- FE901-1
- △ FE901-2
- + 放出流量 = (FE901-1) - (FE901-2)

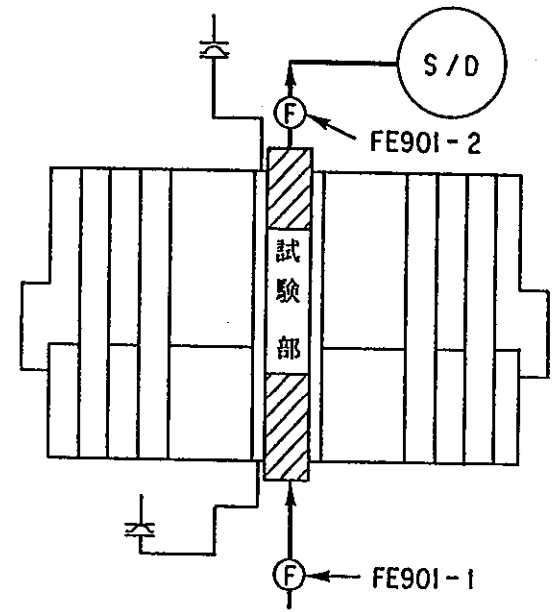


図 3.1.7 - 11 流動特性試験圧力管出入口流量時間変化

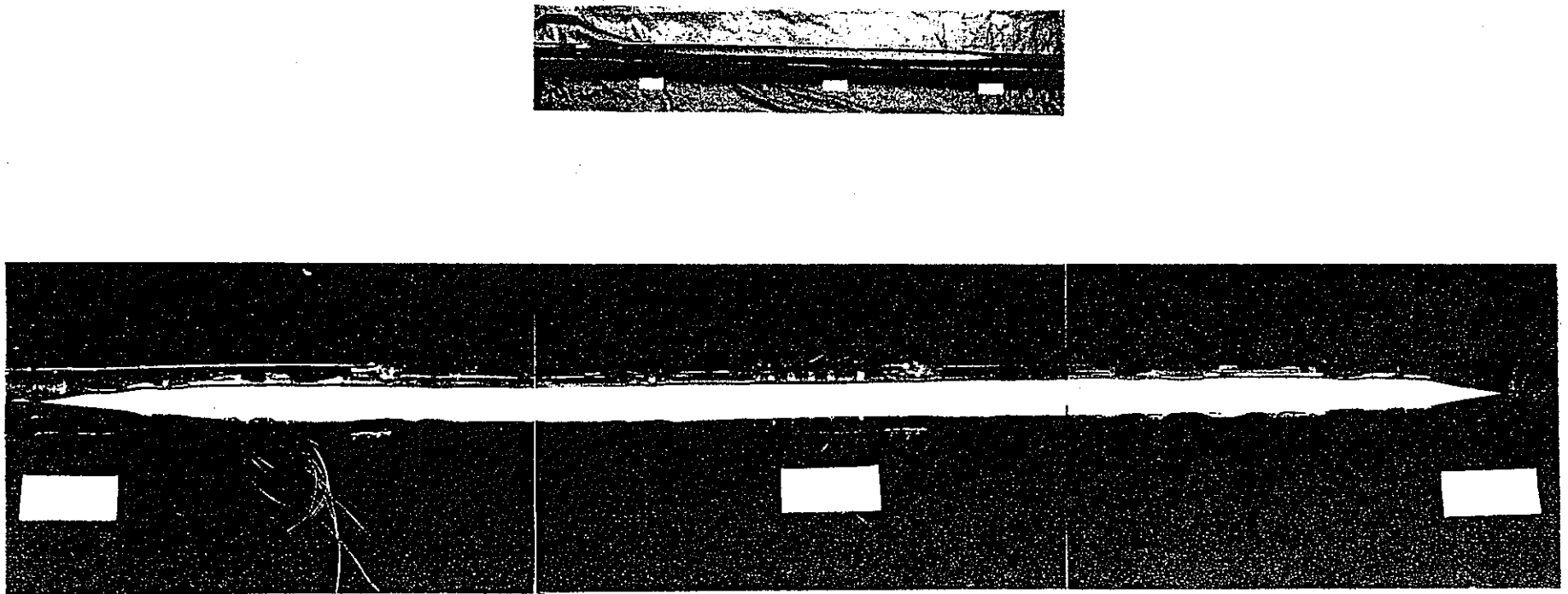
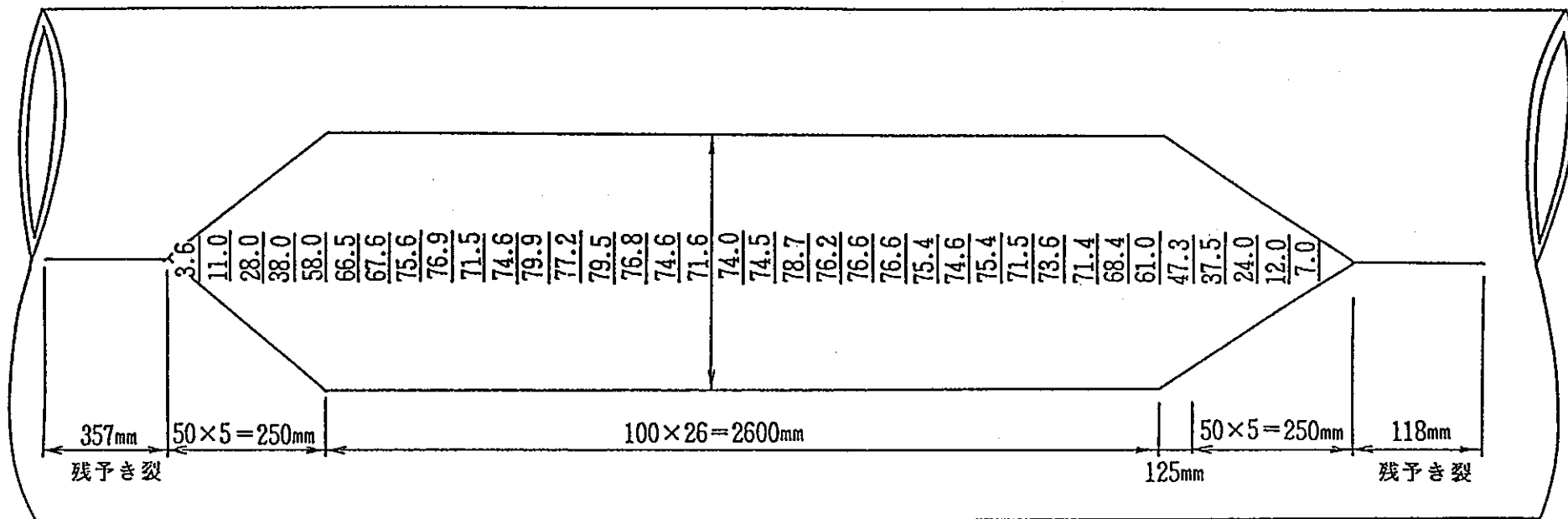


図3.1.7-12 破断後の圧力管開口形状



開口面積 $S = 2.060\text{cm}^2$

開口幅 $\omega = 73.7\text{mm}$

図 3. 1. 7 - 13 流動特性試験破断後開口幅計測結果

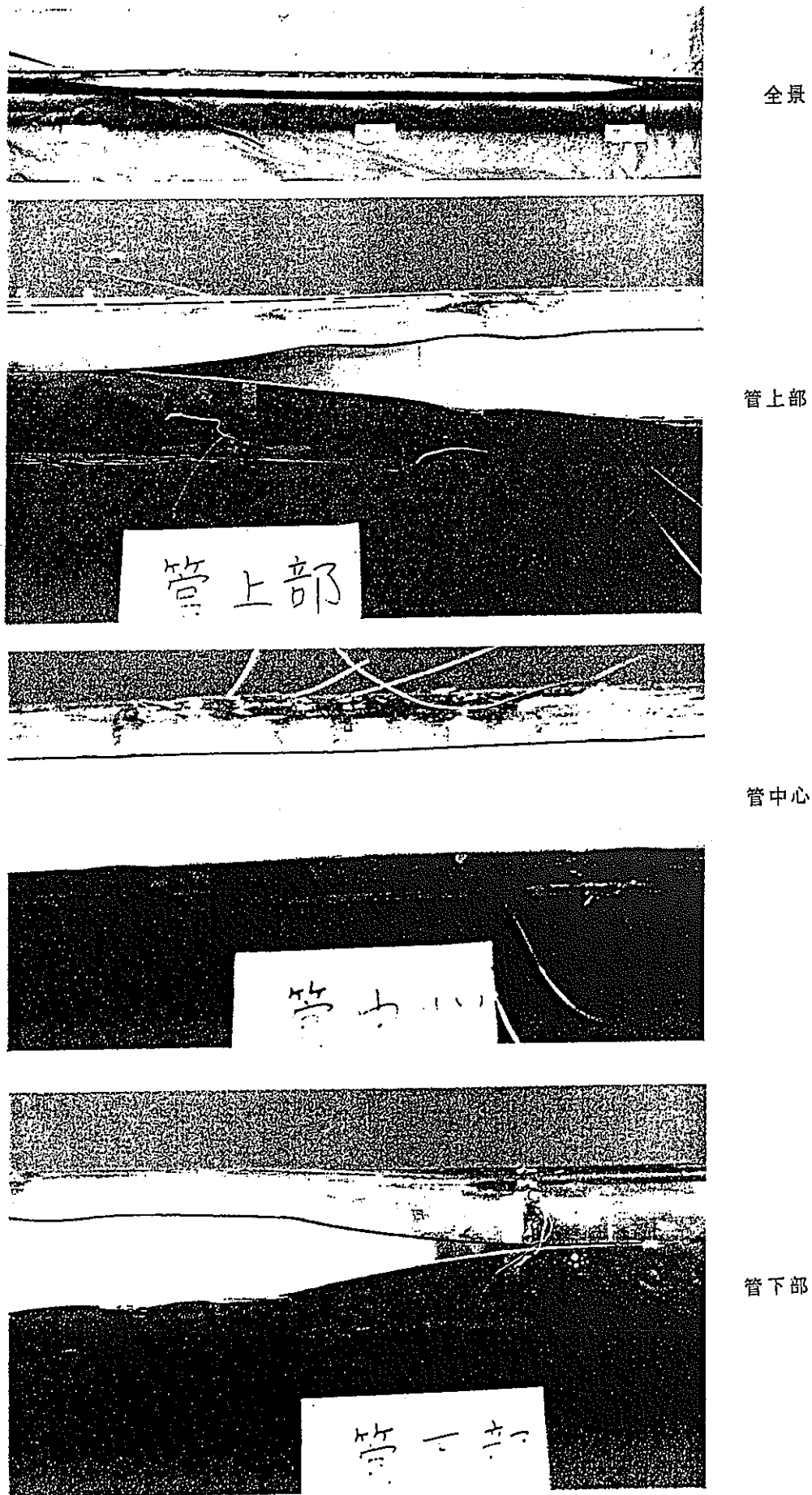
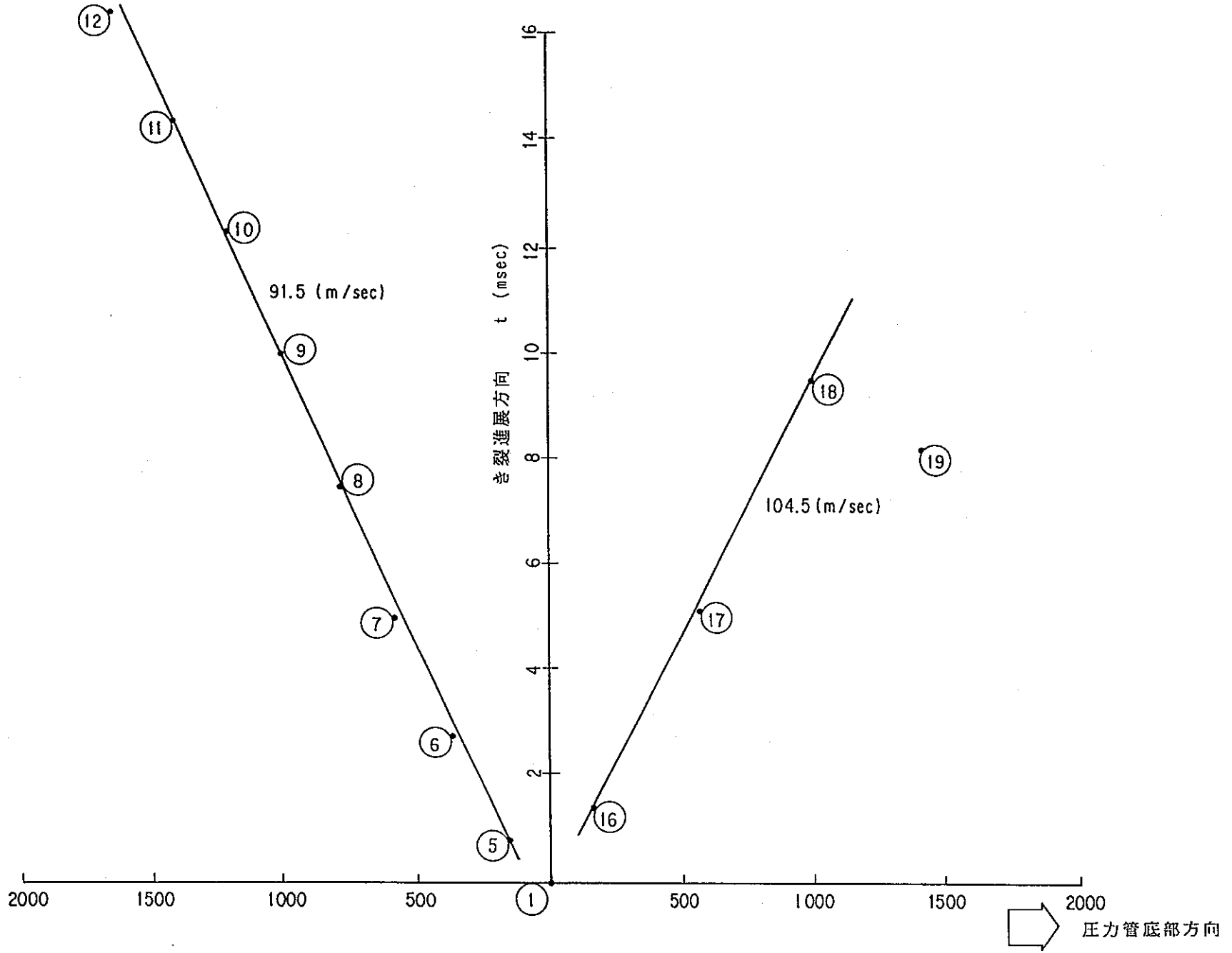
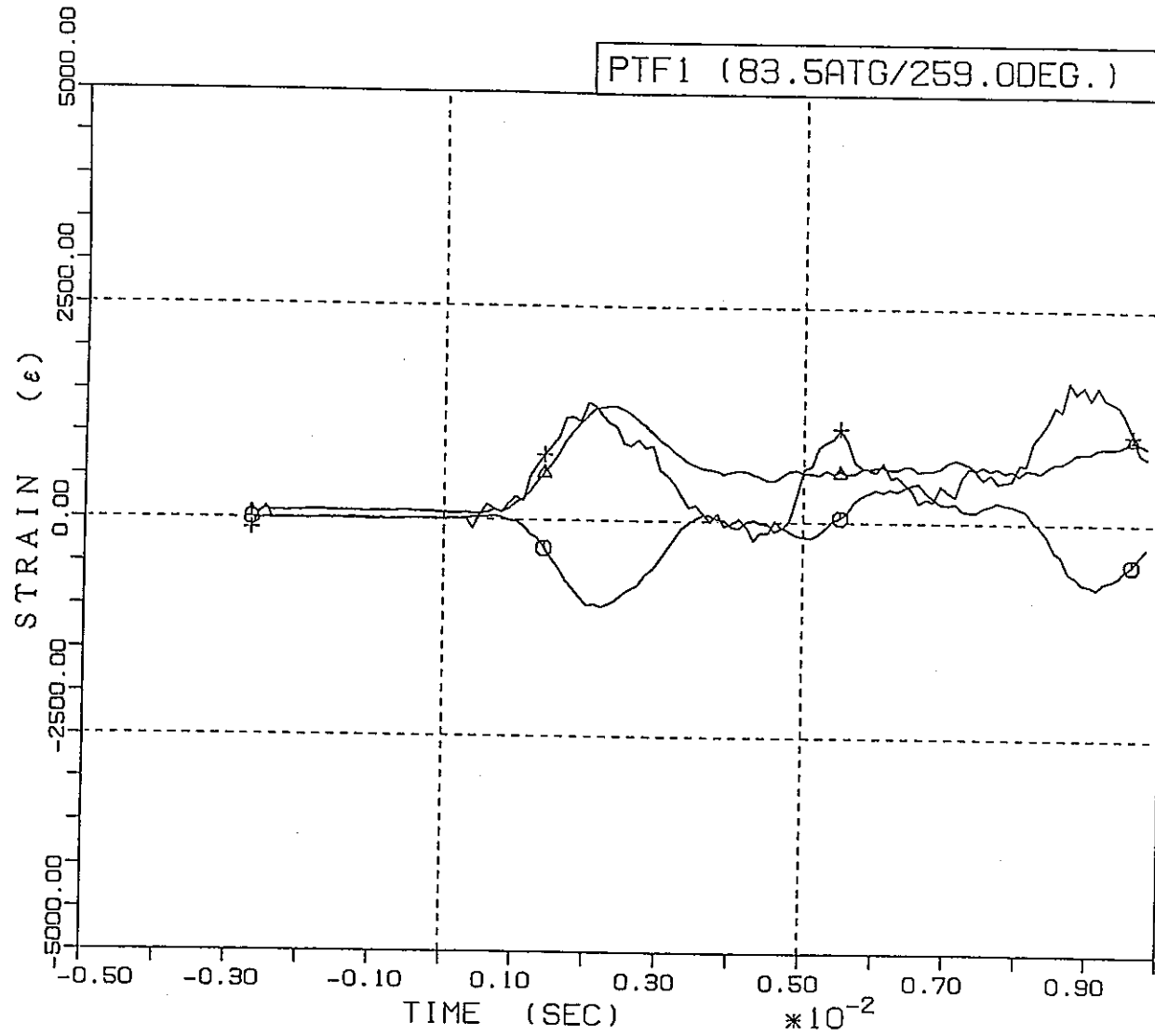


图 3.1.7 - 14 压力管破断状况





- SE910- 6CC
- △ SE910- 8CC
- + SE910-10CC

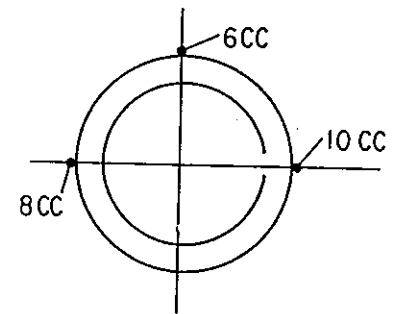


図3.1.7-16 カランドリア管外円周方向歪

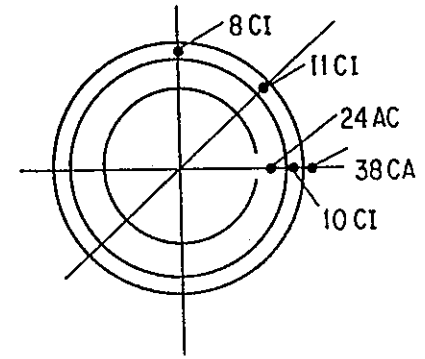
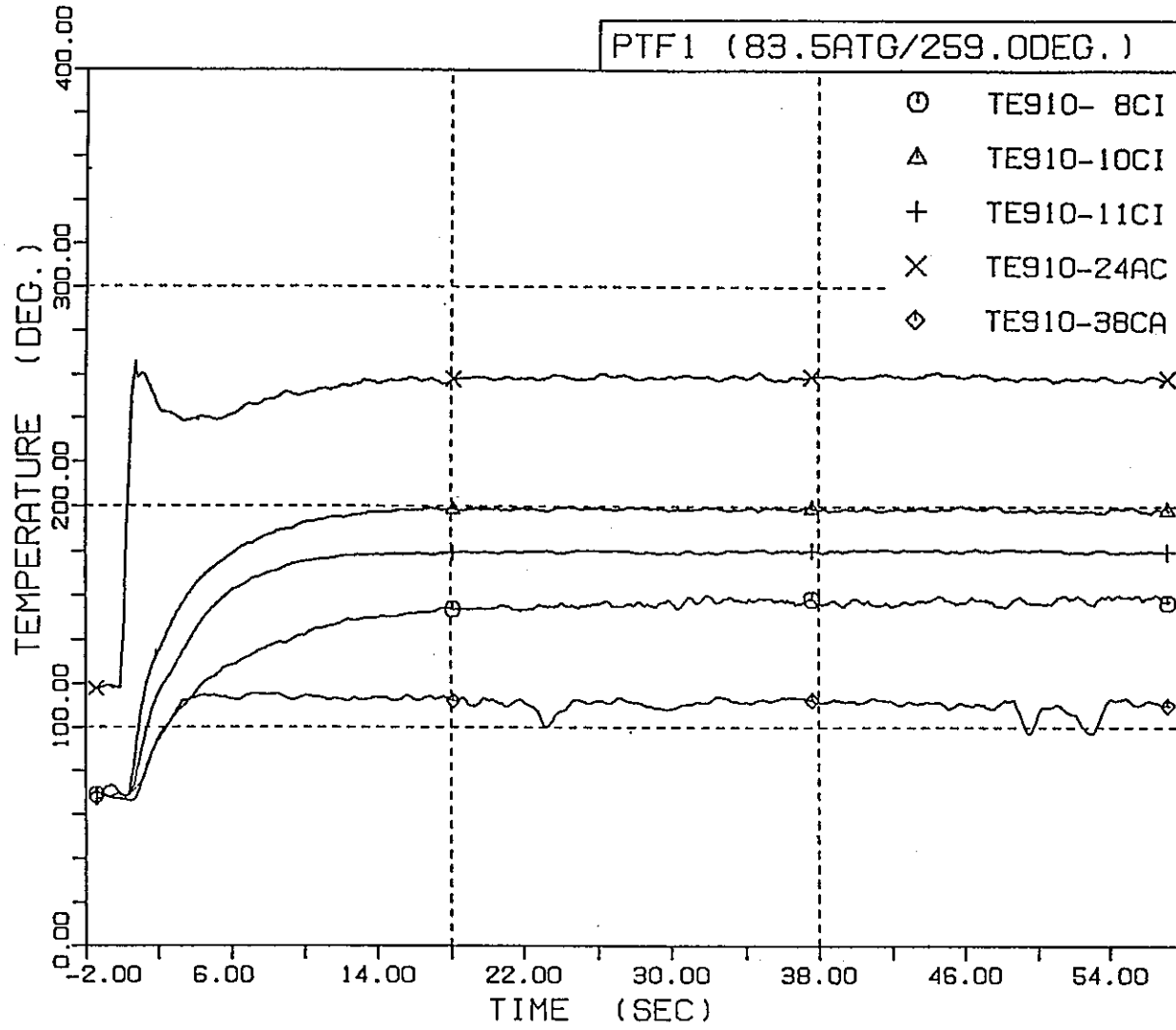


図3.1.8-1 カランドリア管材料温度変化

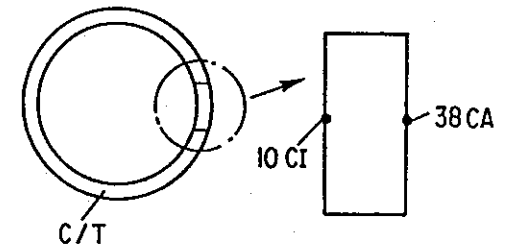
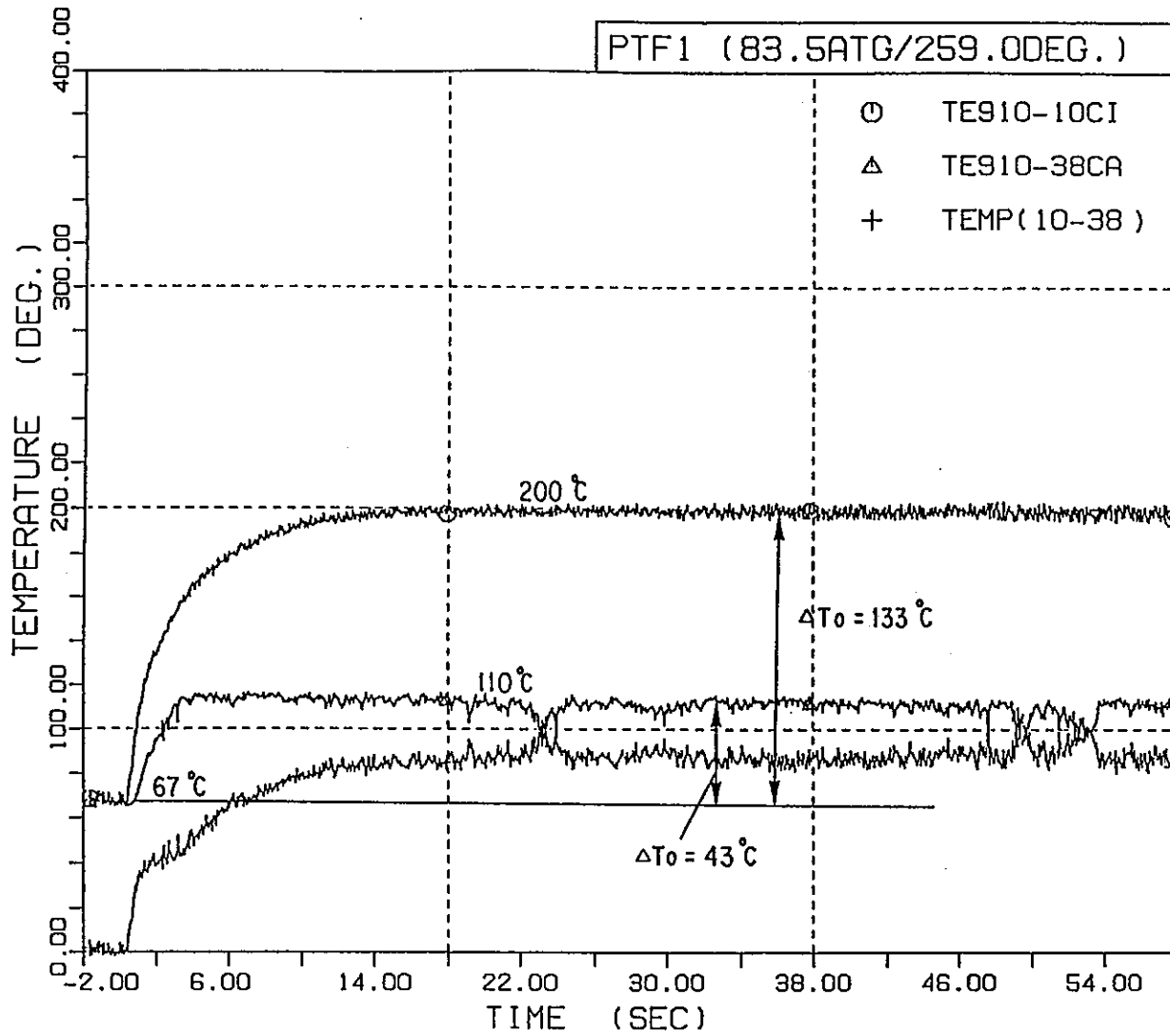


図3.1.8-2 最も温度差の厳しい位置のカランドリア管材料温度変化

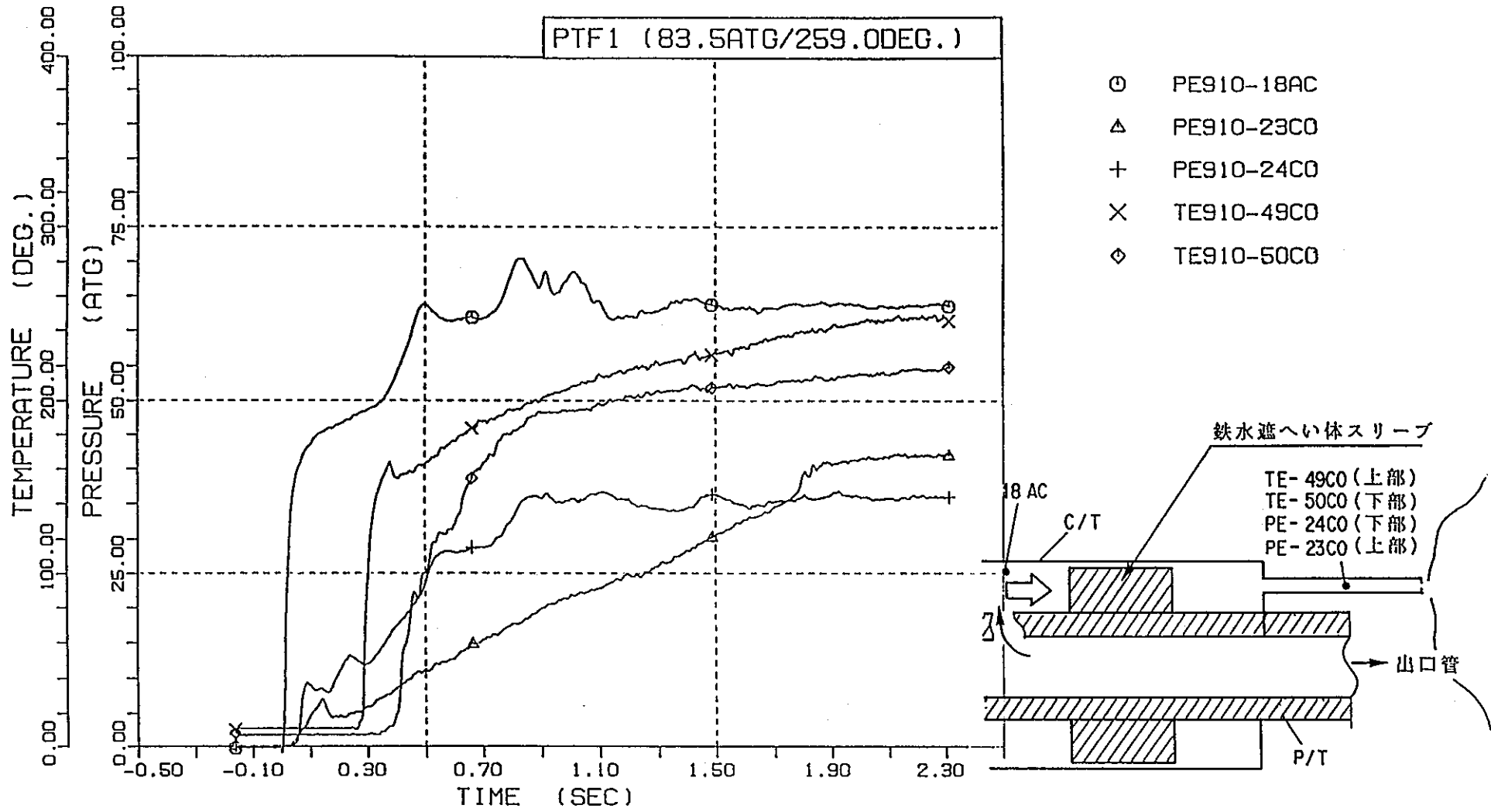
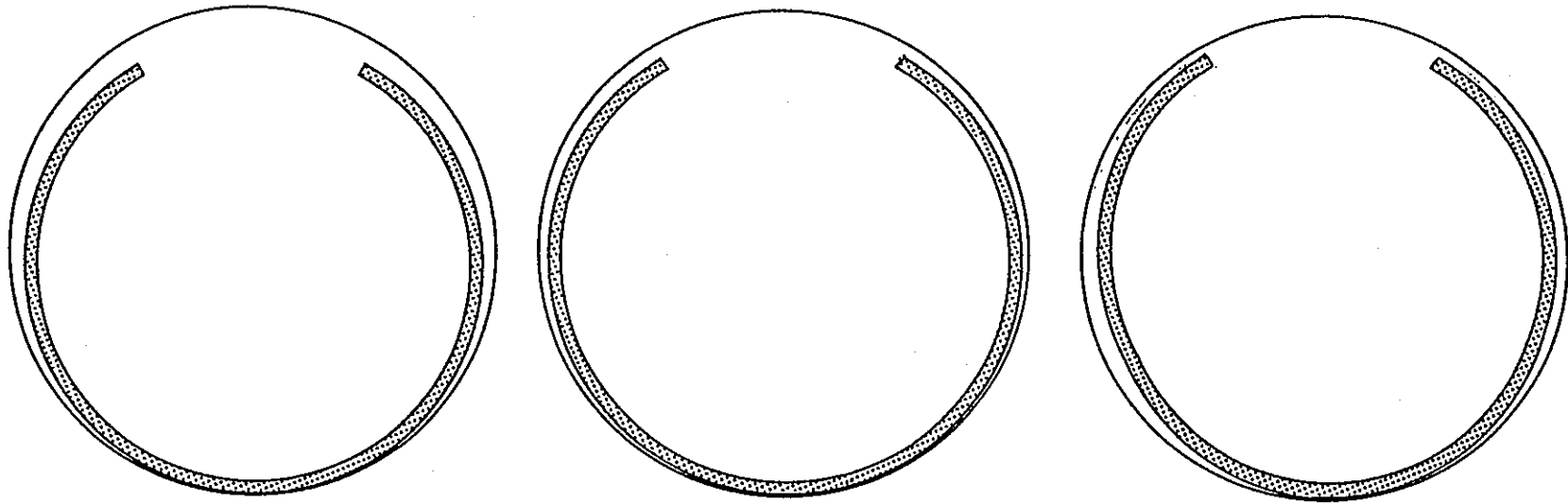


図3.1.8-3 最終臨界面部上流側圧力変化



A 部断面詳細

B 部断面詳細

C 部断面詳細

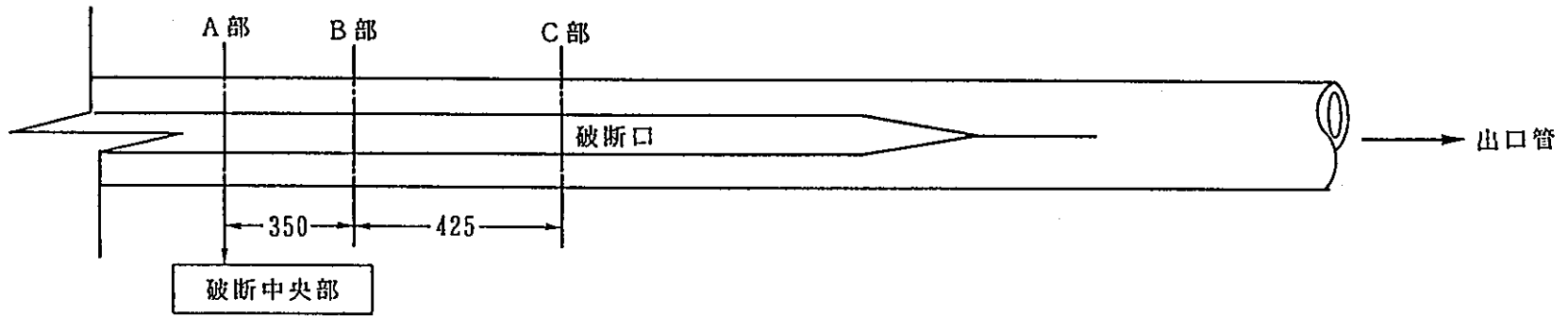
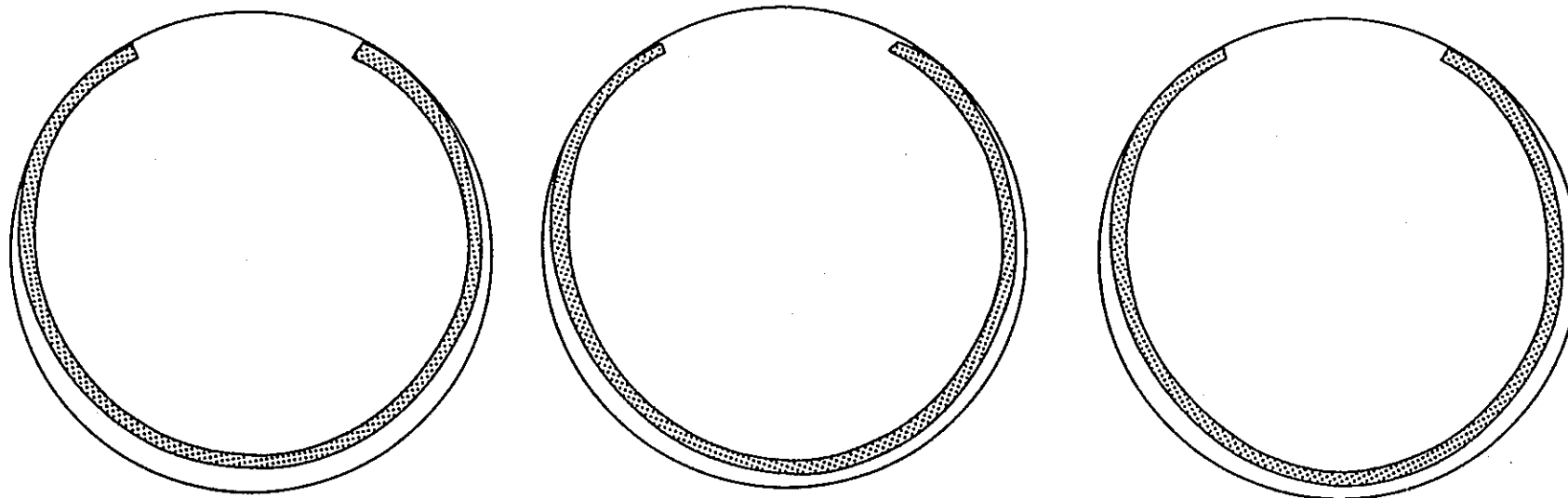


图3.1.8-4 破断後状况想定图



A部断面詳細

B部断面詳細

C部断面詳細

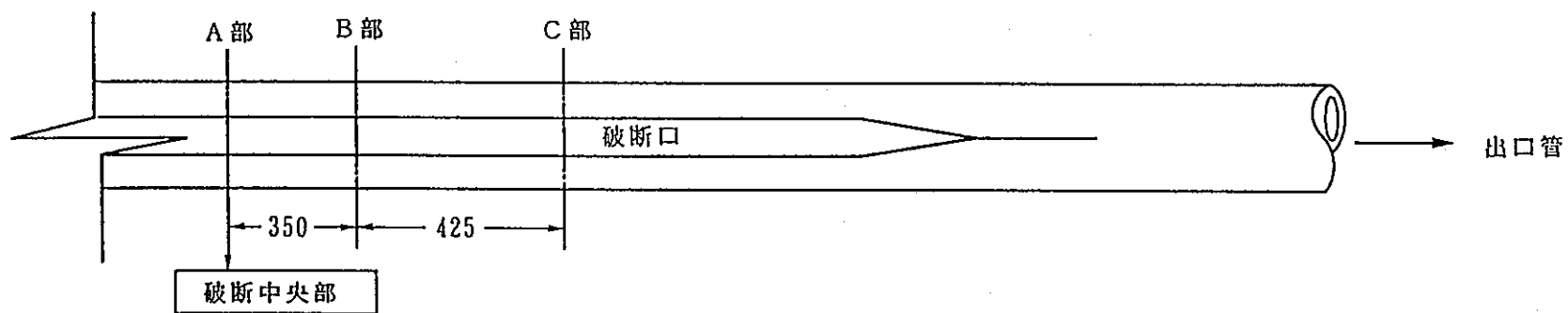


图3.1.8-5 破断後状况想定图

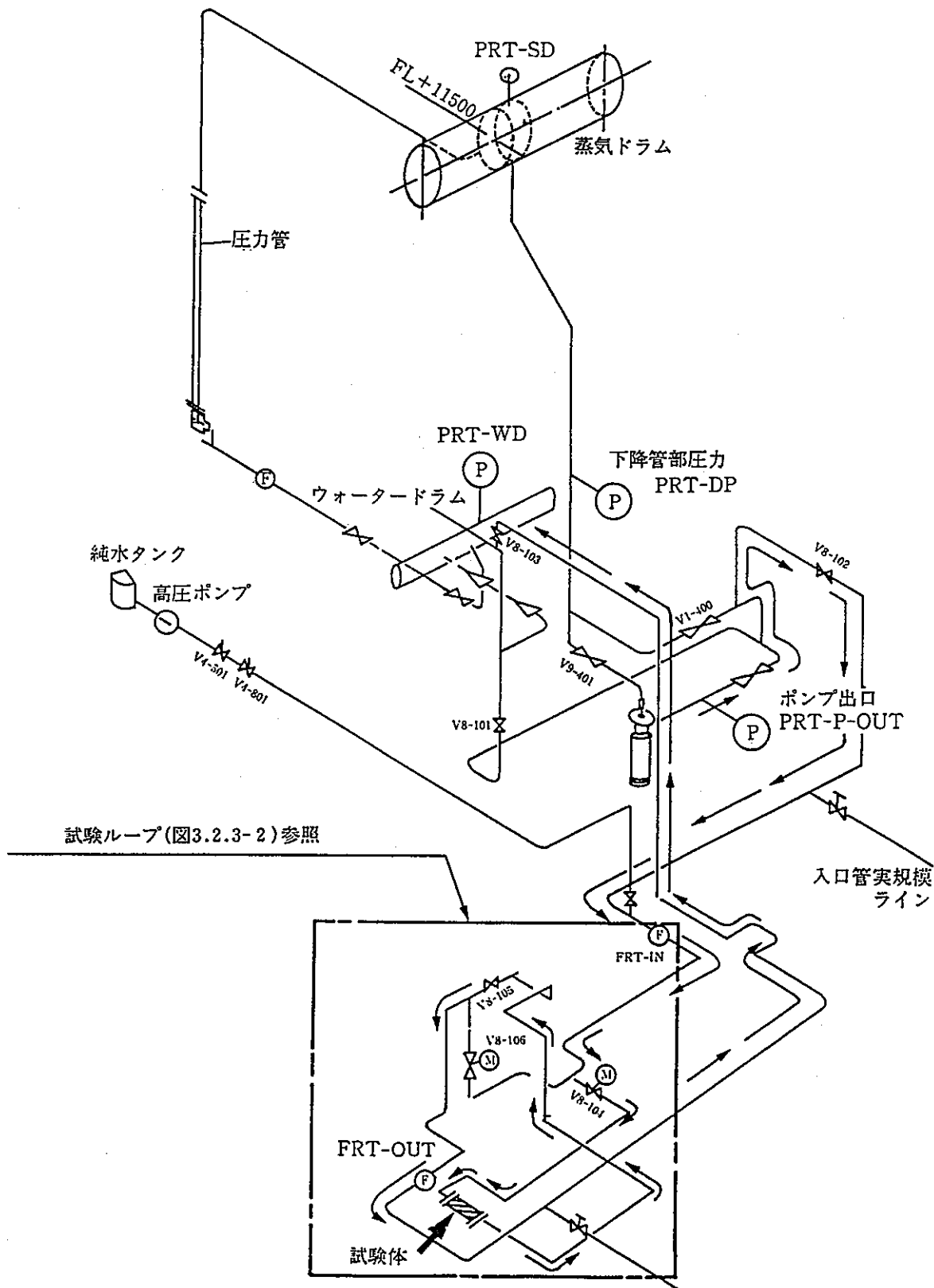


図3.2.3-1 試験ループとA安ループの取合

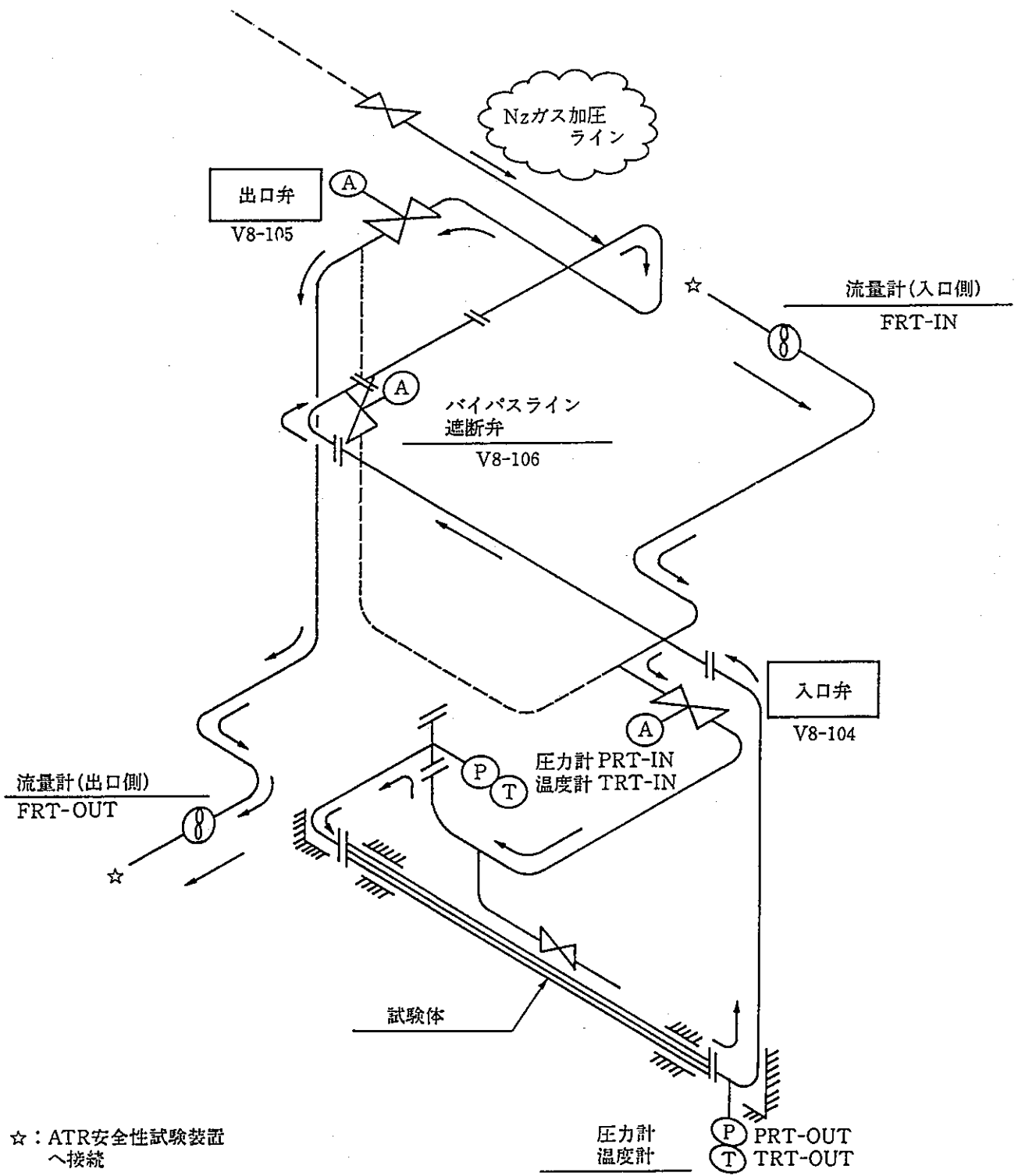
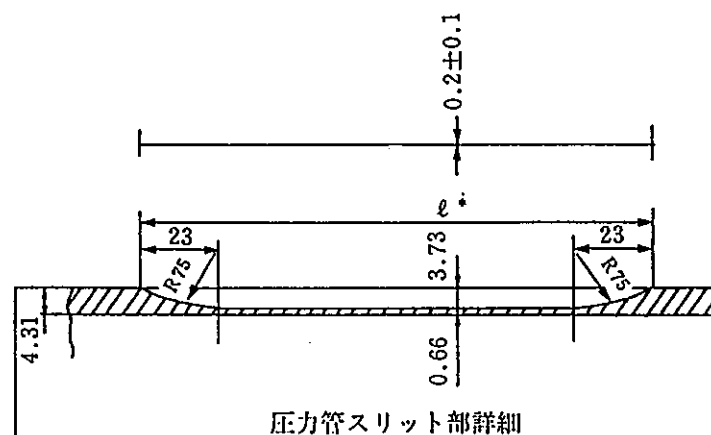
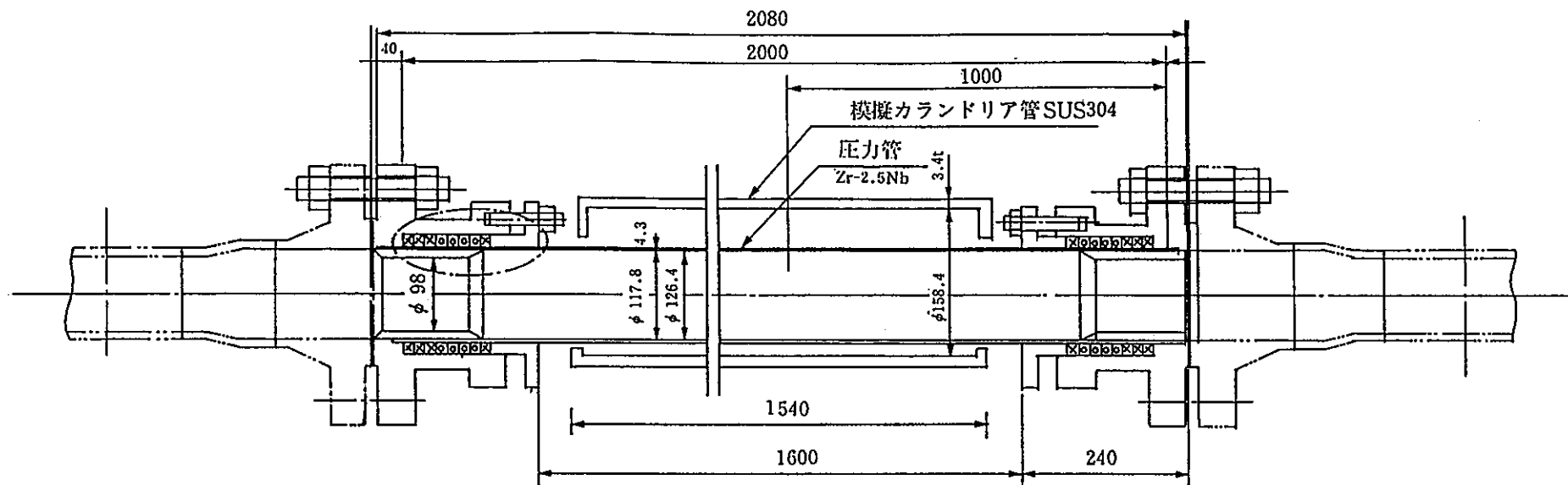


図3.2.3-2 パースト試験・試験部の構成



* ケース 1 ℓ : 200mm
 ケース 2 ℓ : 400mm

図3.2.3-3 実機材料圧力管バースト試験装置

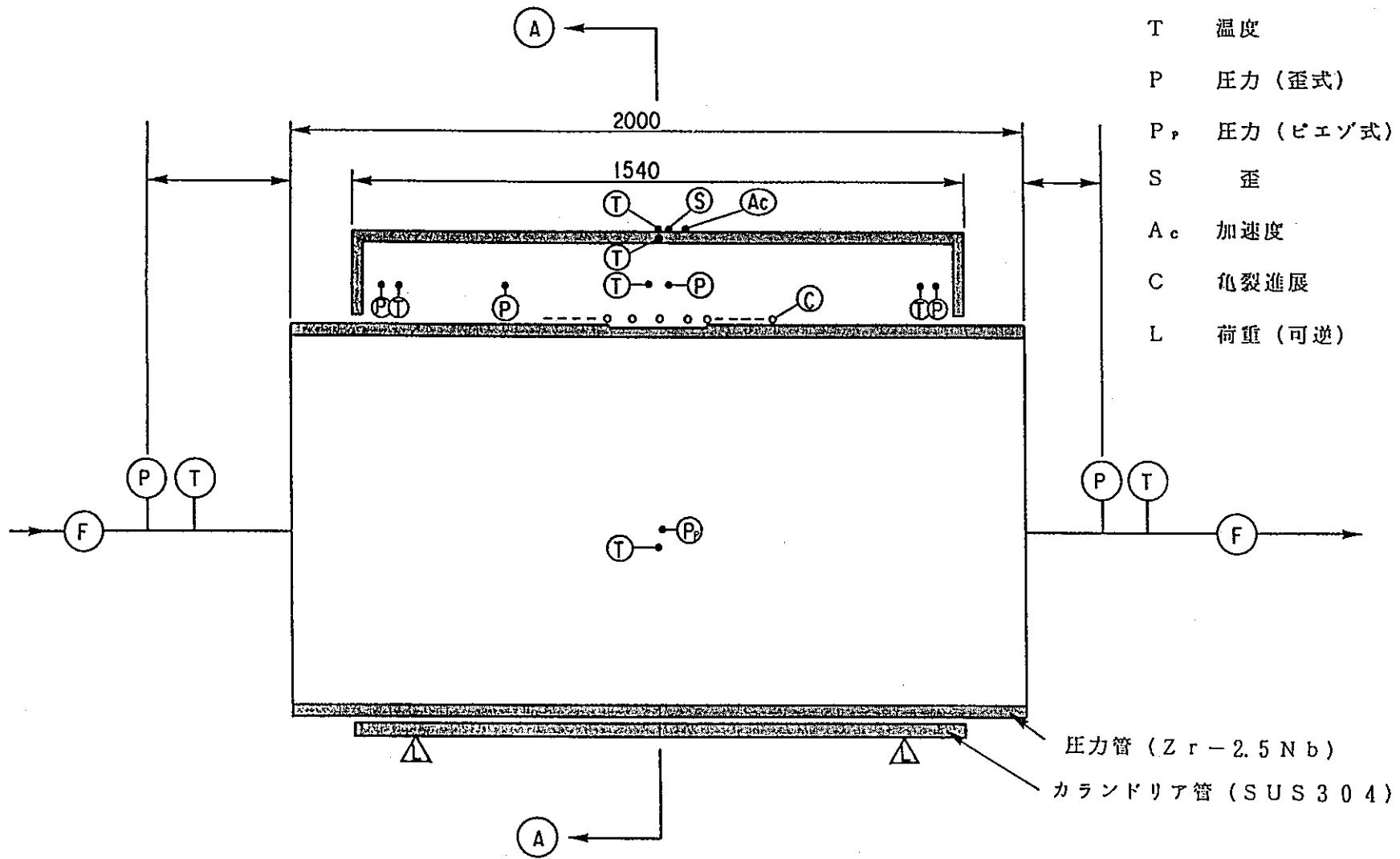


図3.2.4-1 実機材料圧力管バースト試験計測器取付位置概要

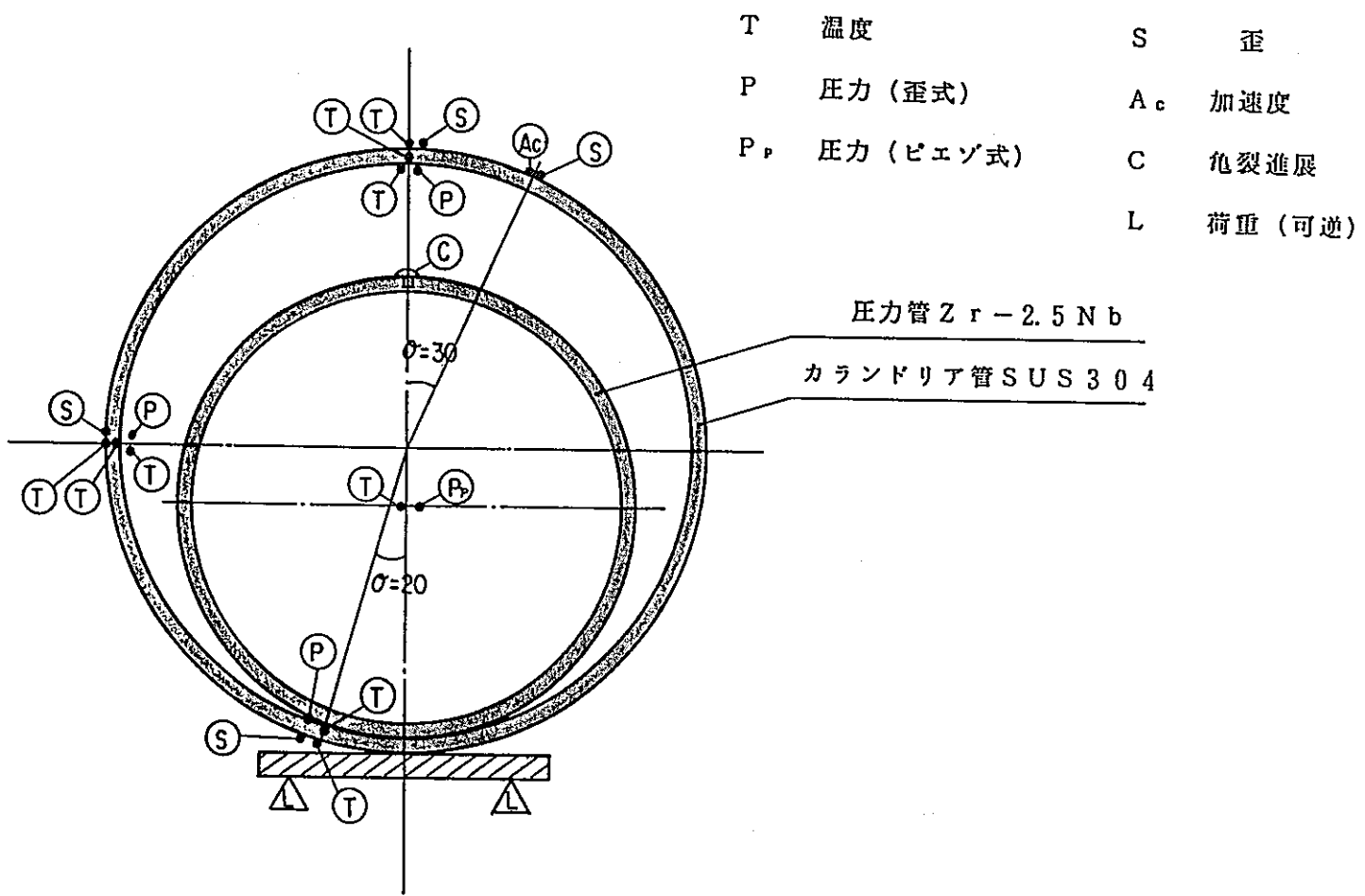


図 3.2.4-2 A-A 断面概念

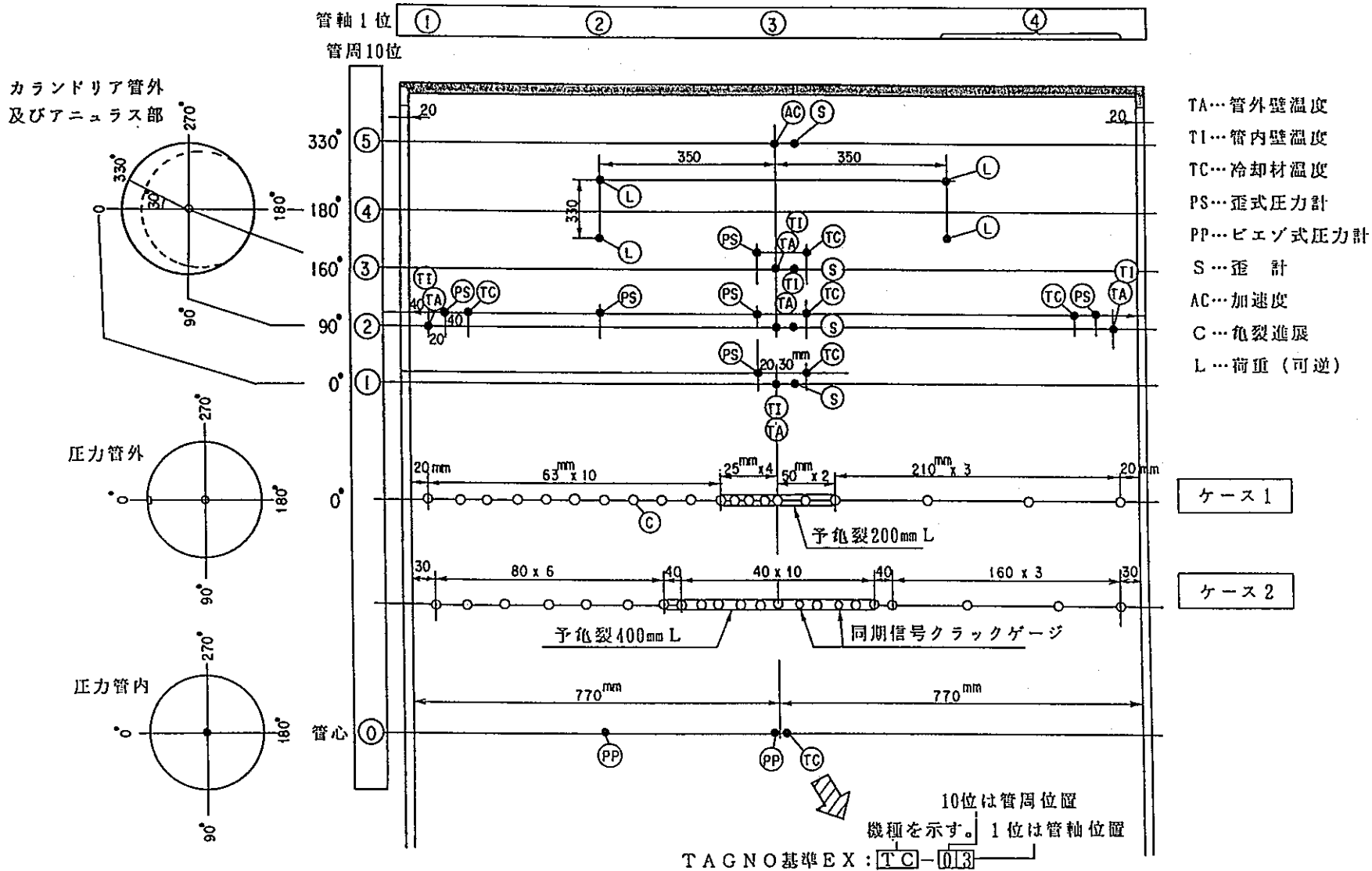


図3.2.4-3 計測器取付位置図

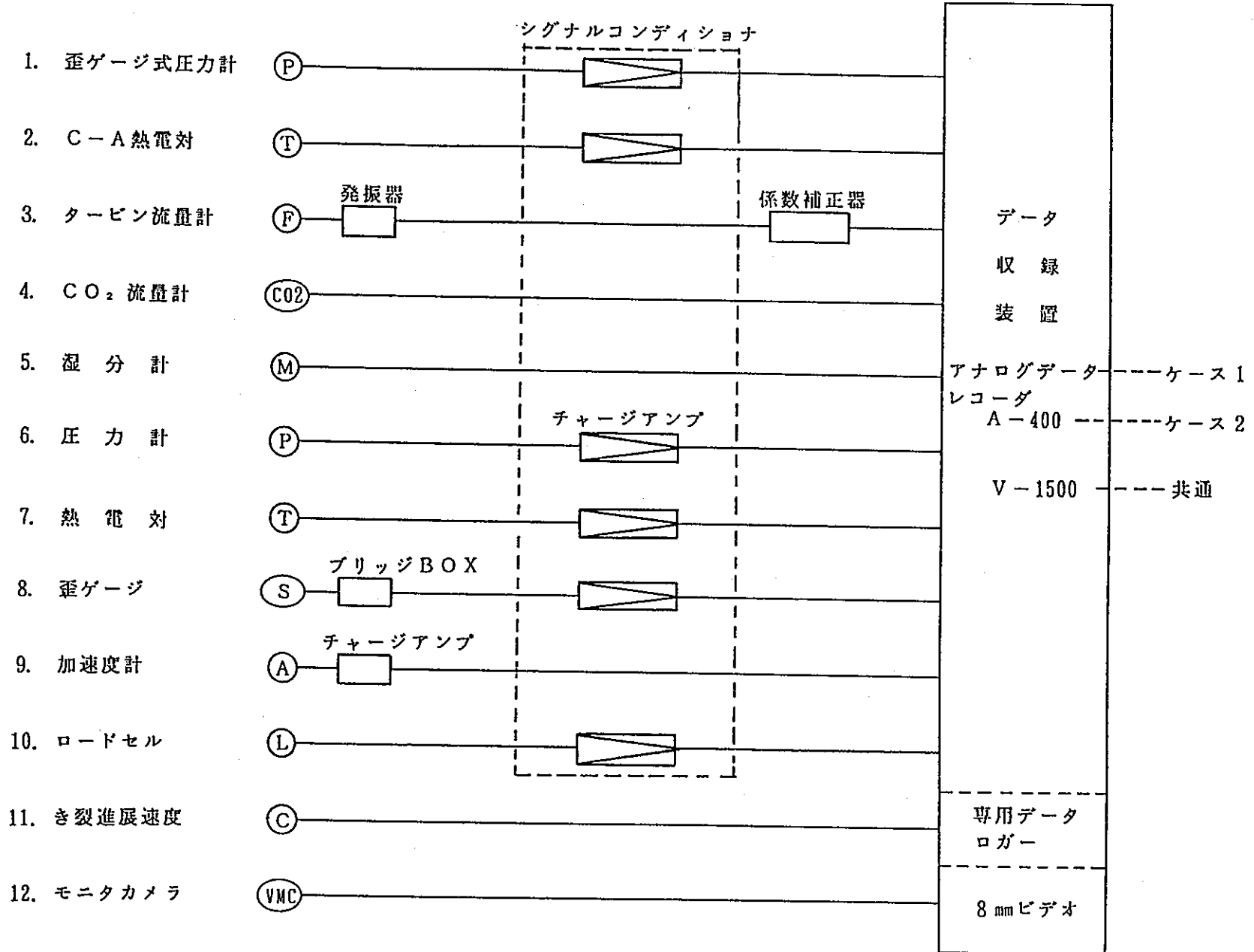


図3.2.5-1 収録システム構成

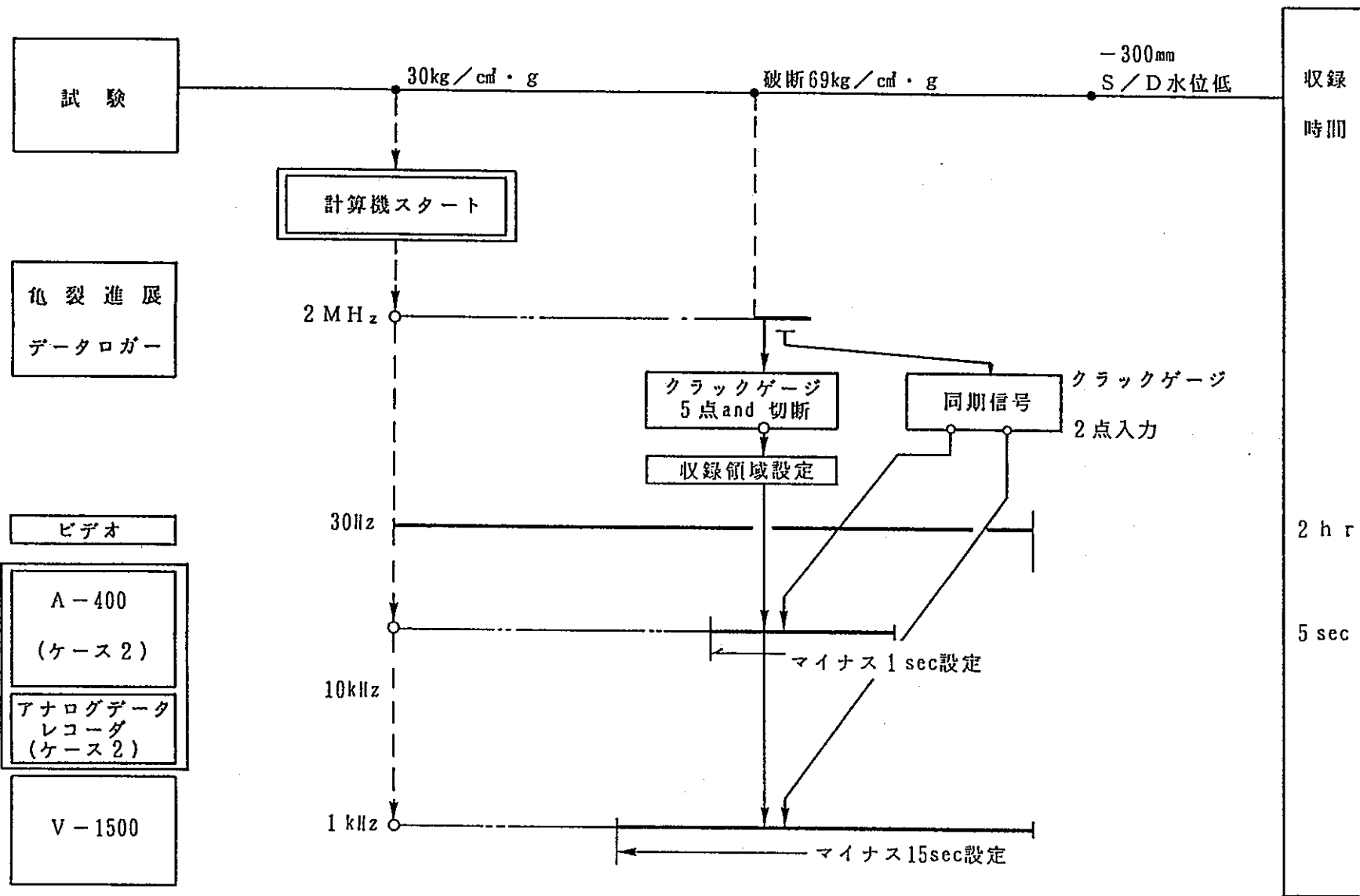


図 3. 2. 5 - 2 データ収録と同期法

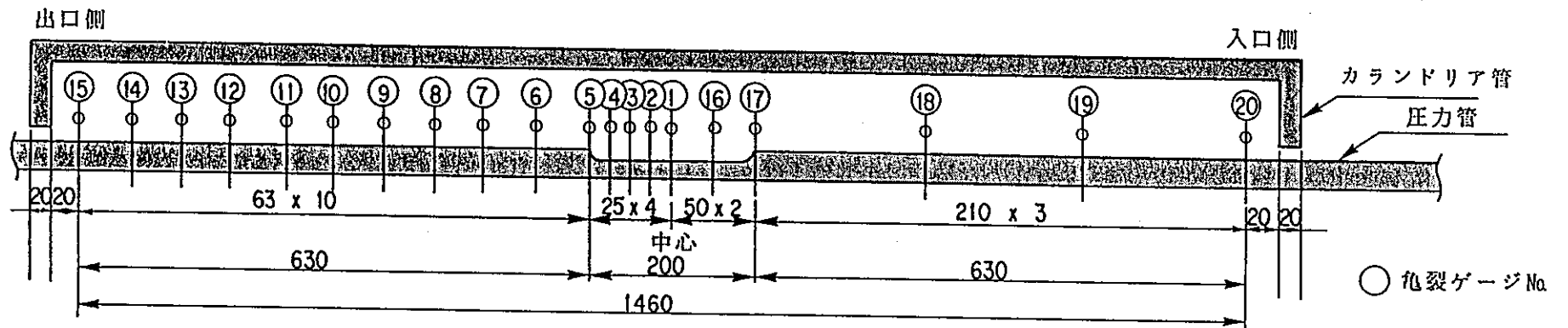
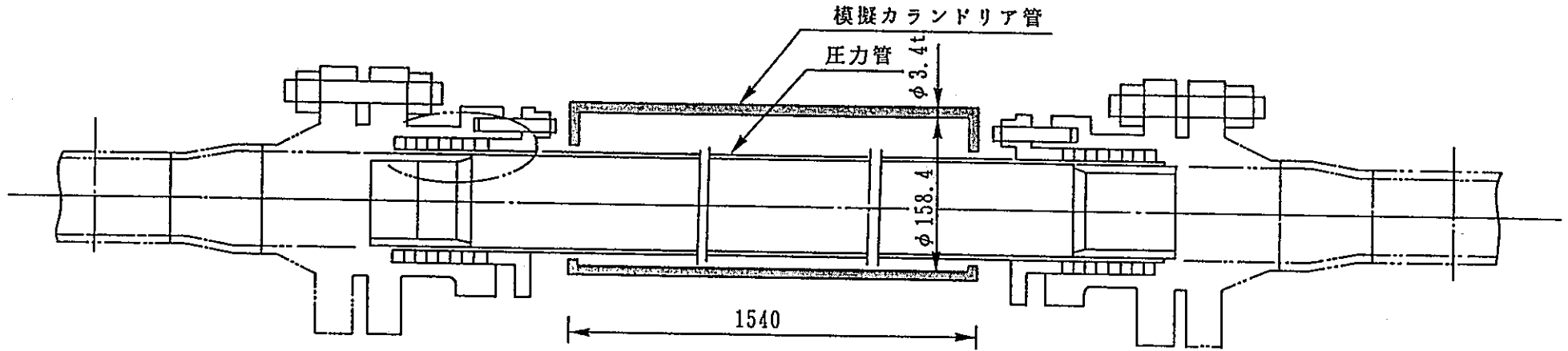


図3.2.5-3 クラックゲージ取付位置図 (ケース1)

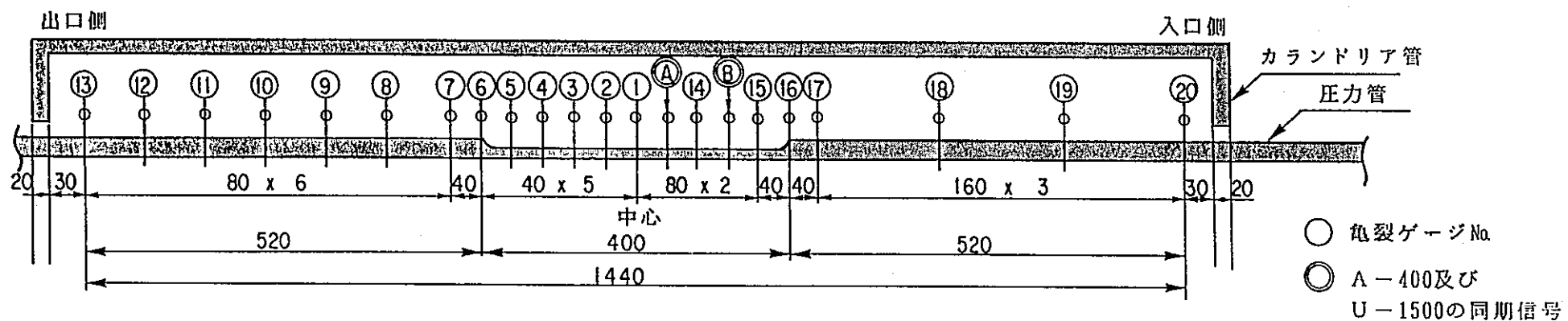
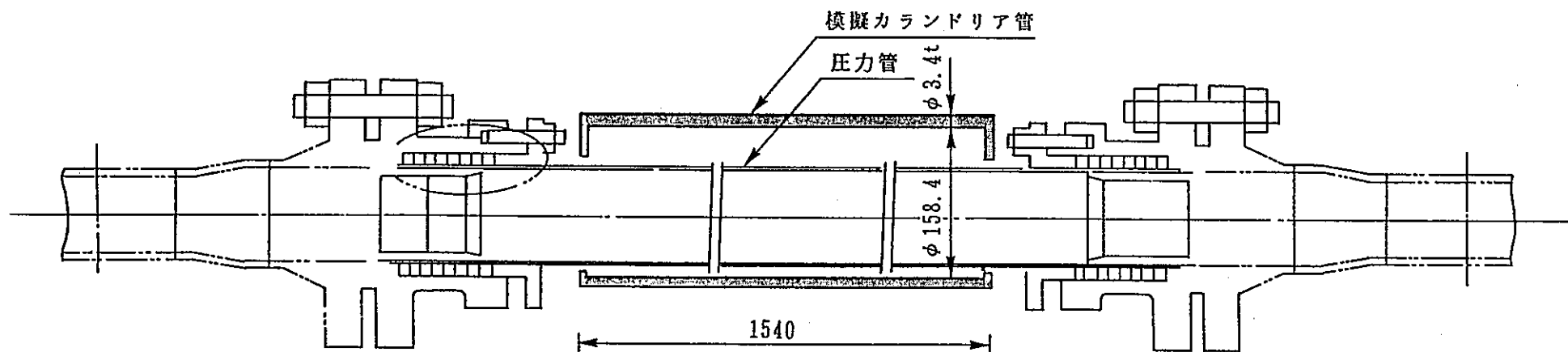


図3.2.5-4 クラックゲージ取付位置図 (ケース2)

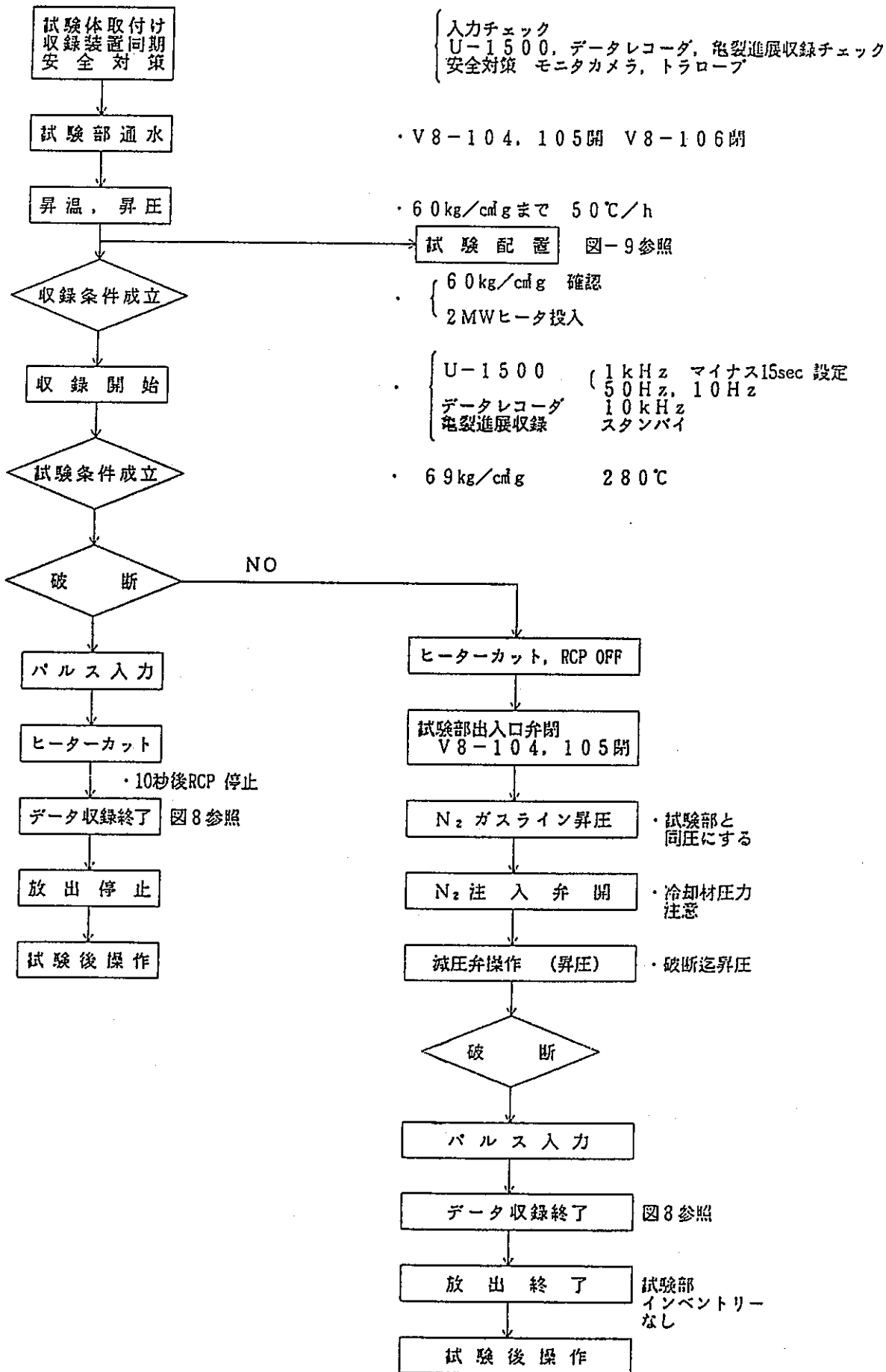


図3.2.6-1 試験手順フロー

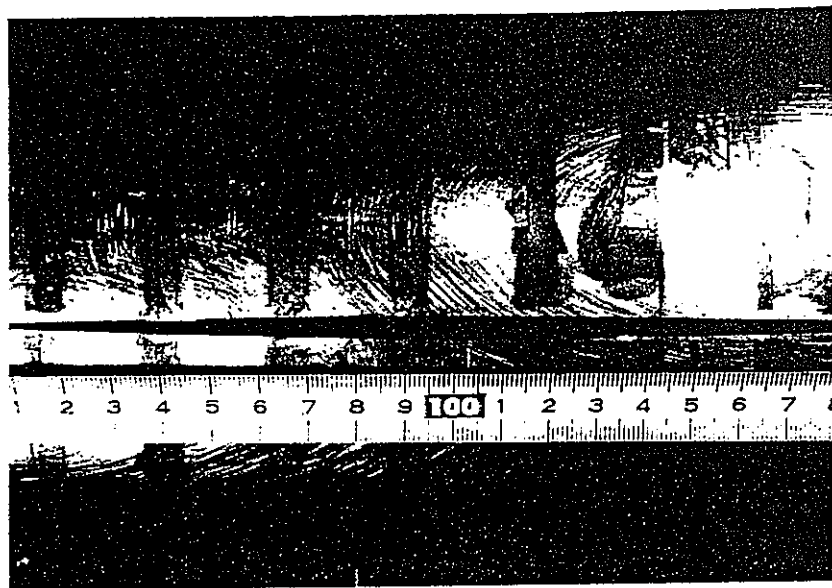
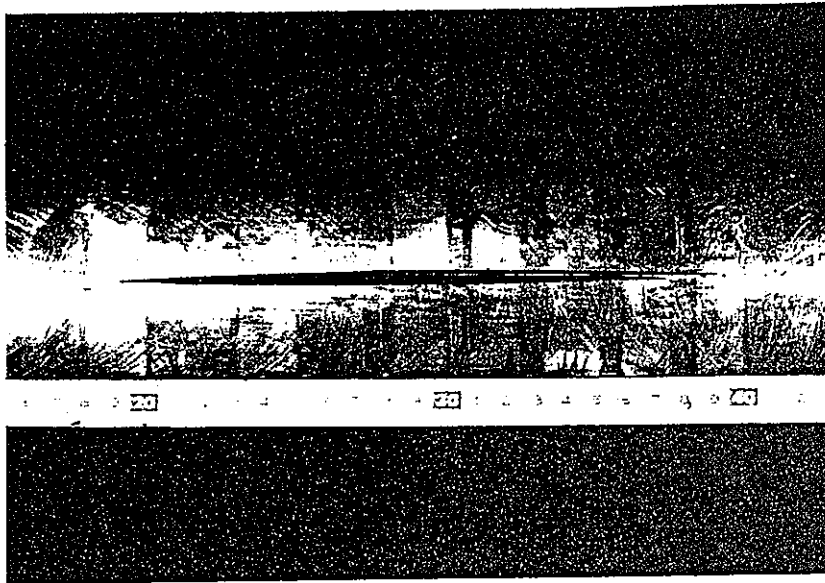


図3.2.7 - 1 圧力管破断部（ケース1）

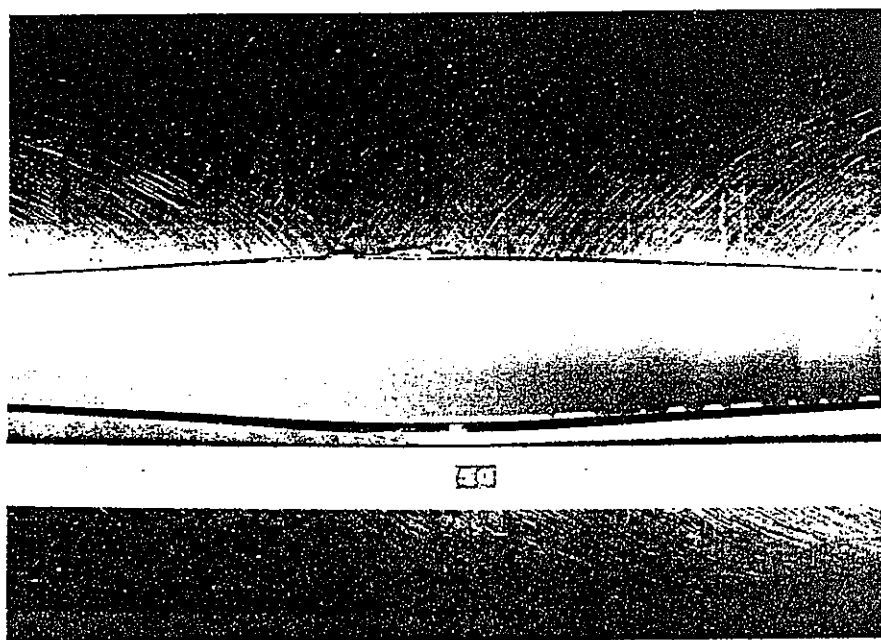
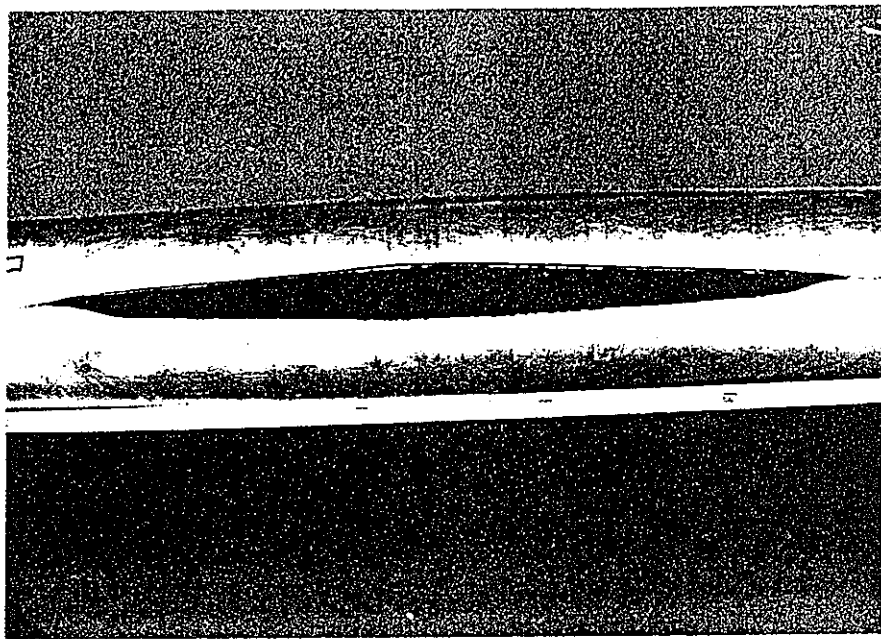
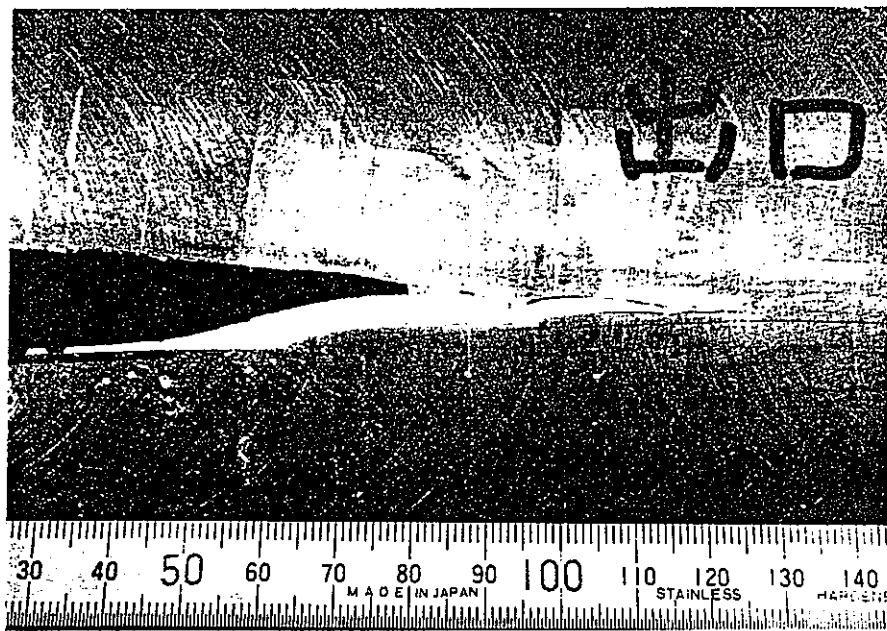
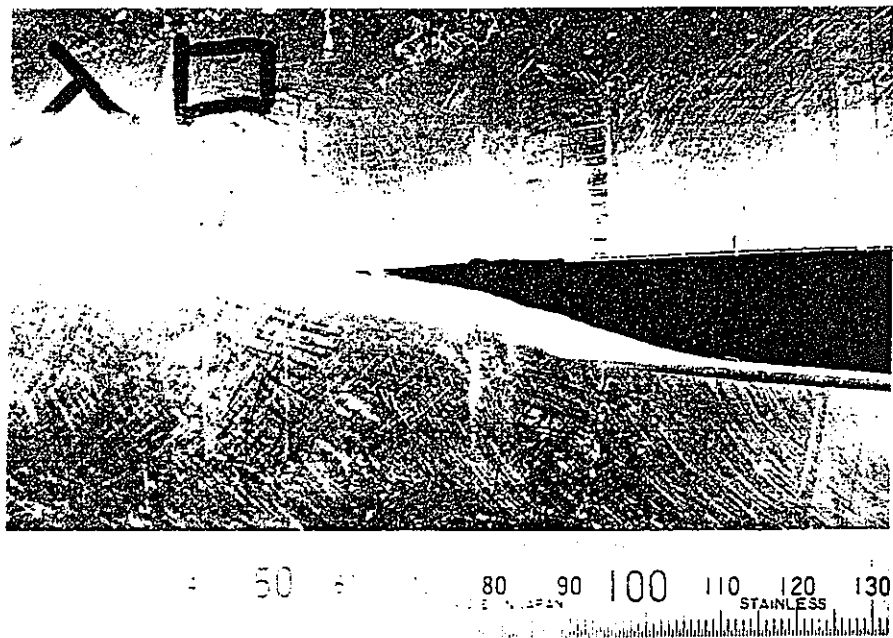


図3.2.7-2 圧力管破断部（ケース2）



入口側



出口側

注 写真中に記載の表示は誤り

図3.2.7-3 圧力管亀裂先端詳細(ケース2)

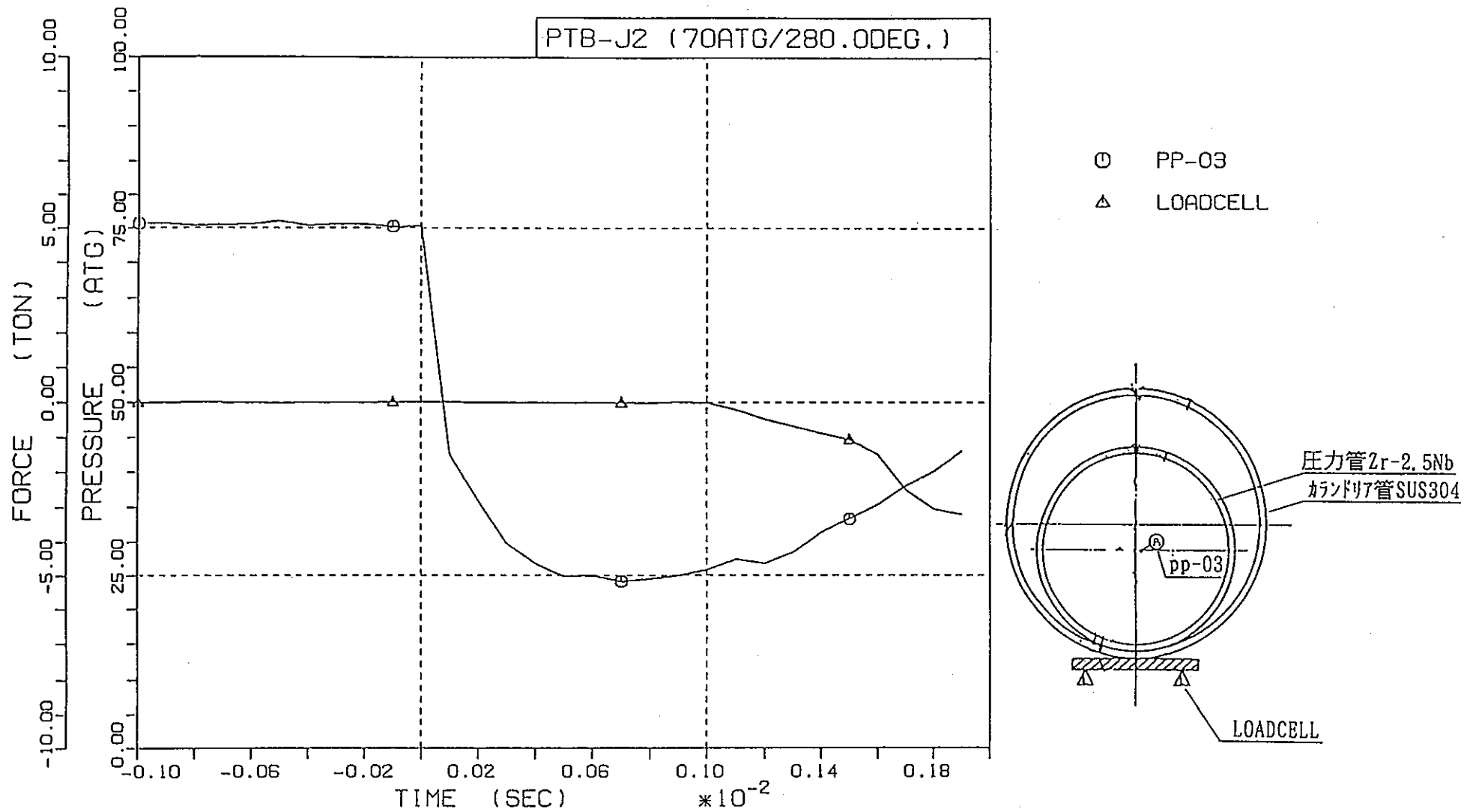


図3.2.7-4 実機材料圧力管バースト試験(ケース2) 圧力管内圧力と外部伝達荷重

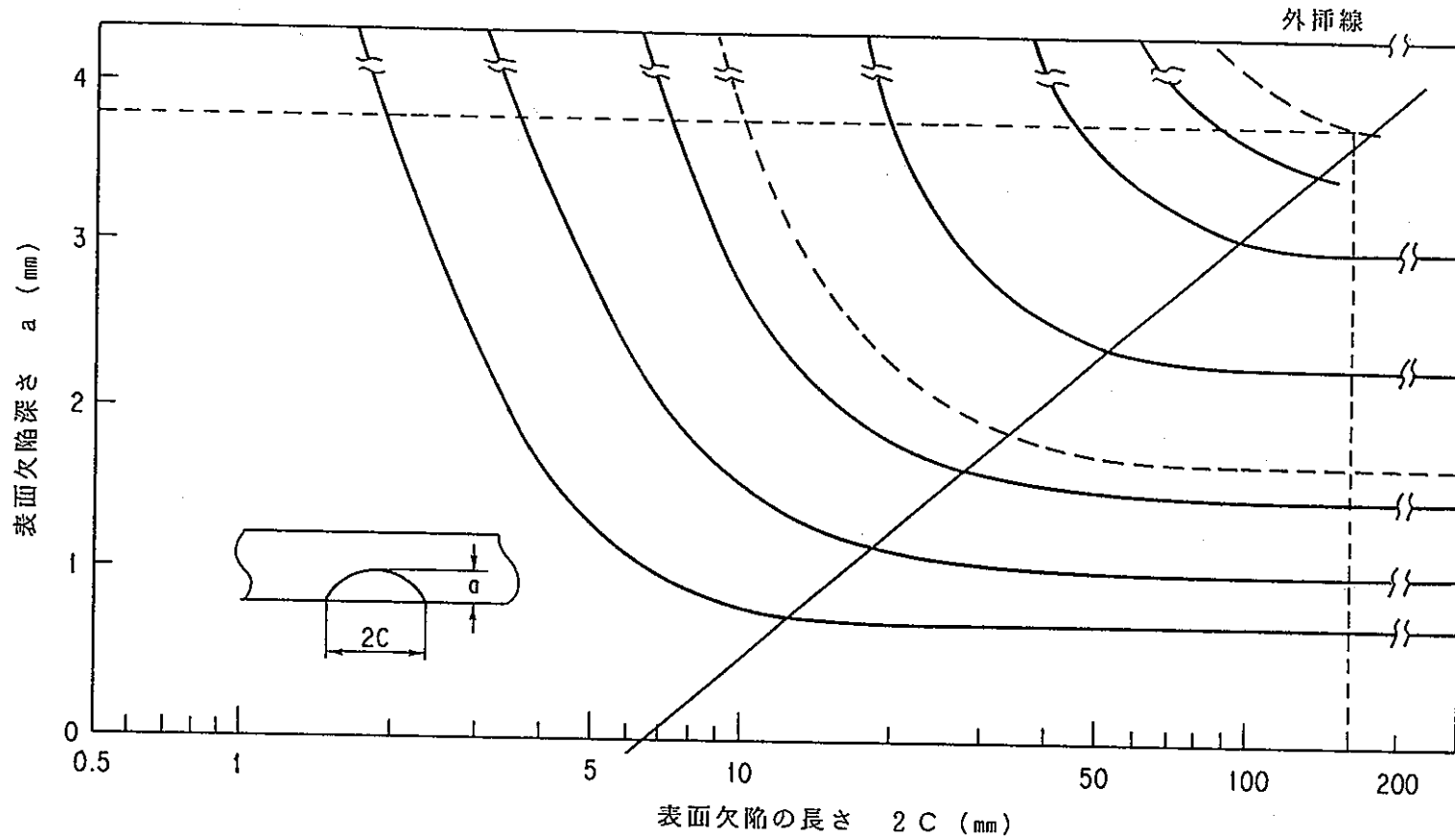


図 3. 2. 8 - 1 表面欠陥を有する内圧破裂強さの評価線図

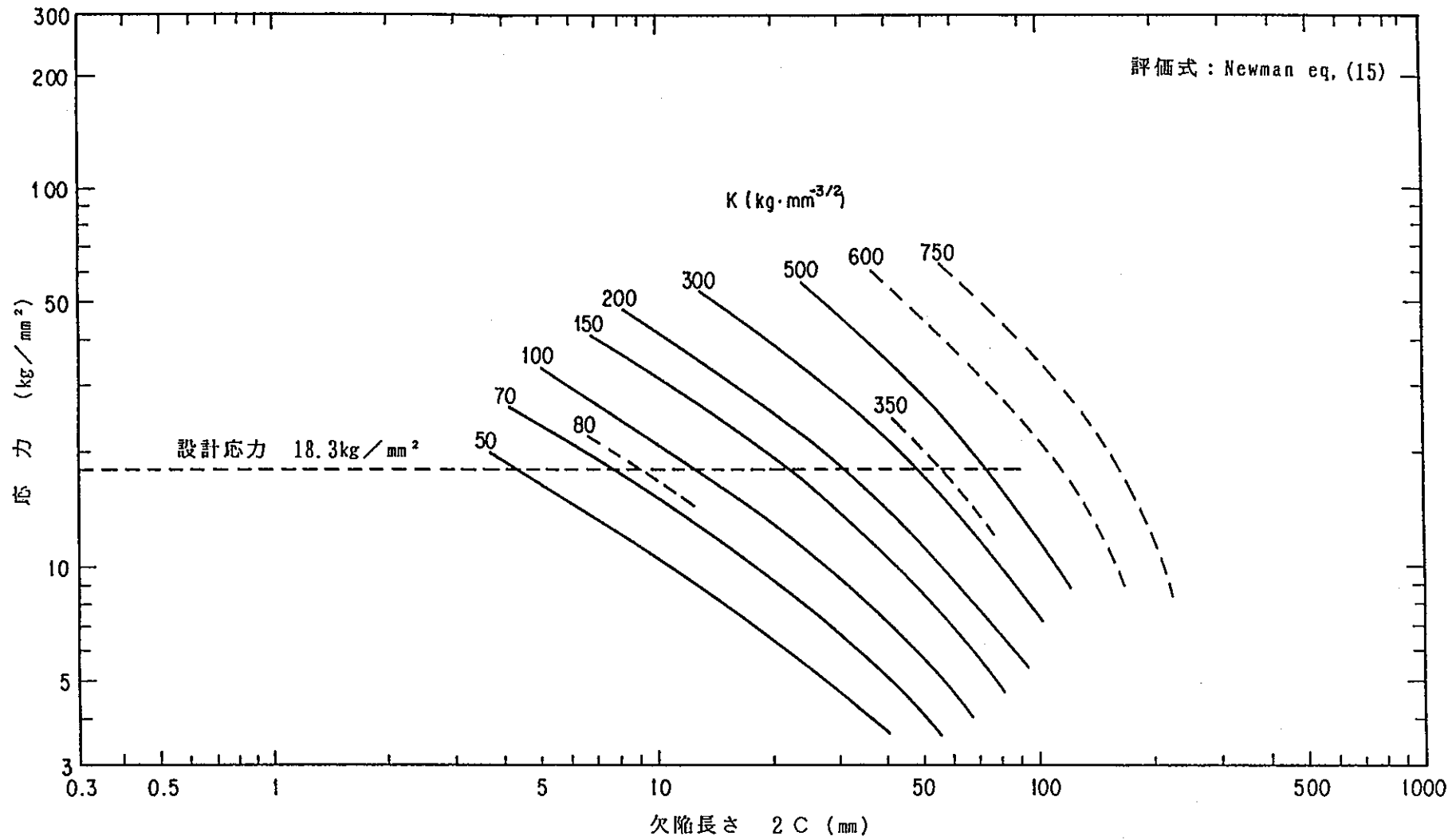
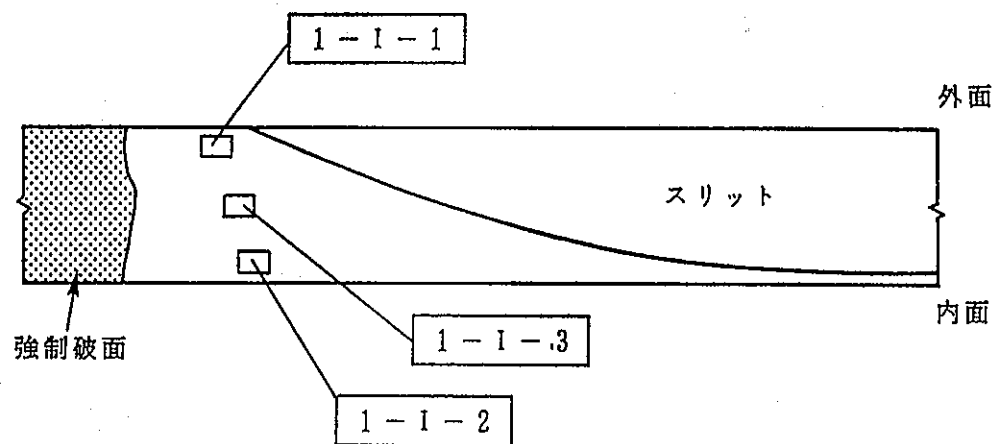
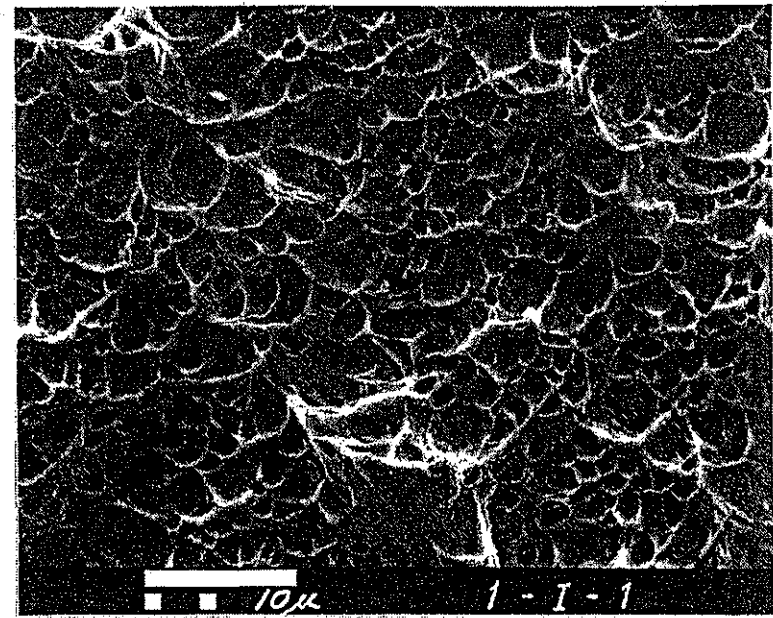
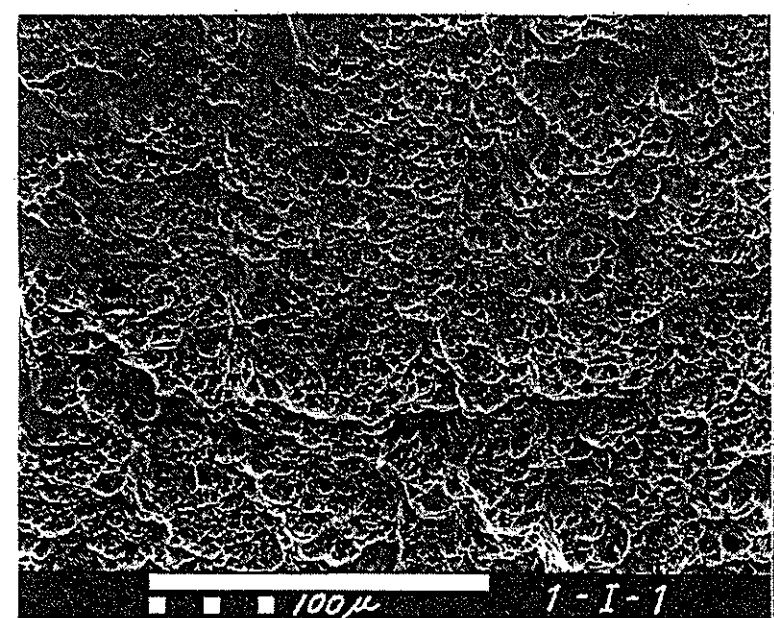


図3.2.8-2 貫通欠陥を有する管の破壊靱性強さ

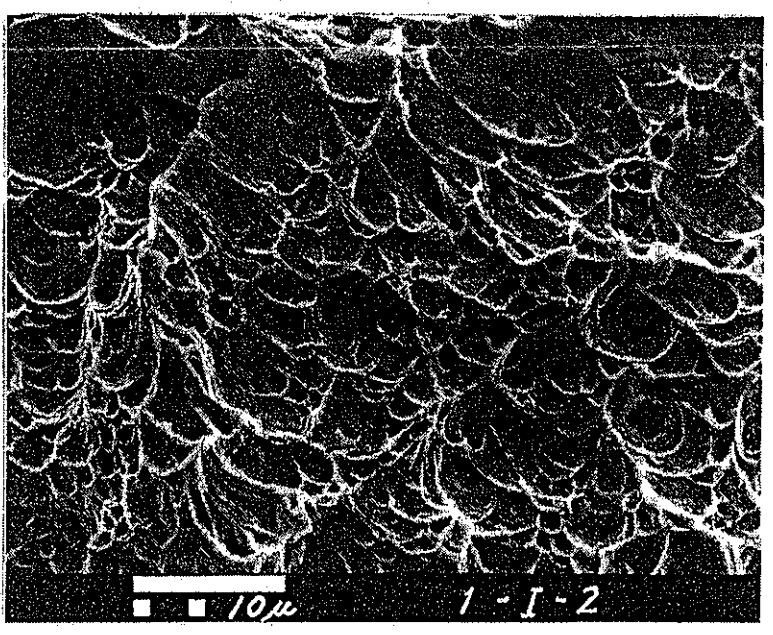
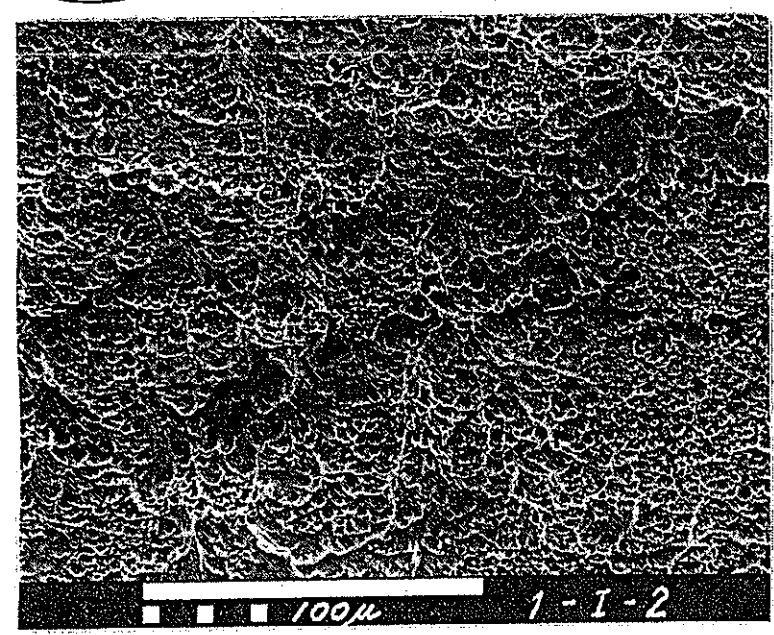


1-I-1 外面近傍



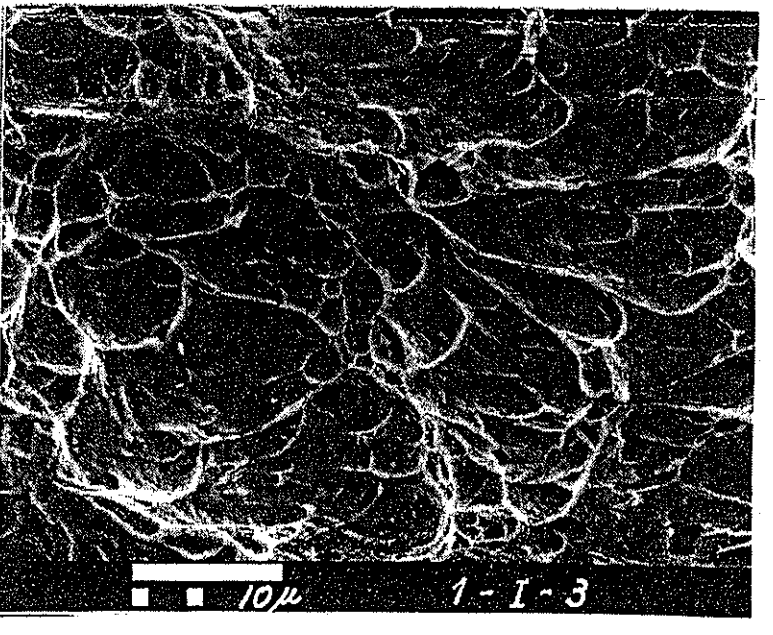
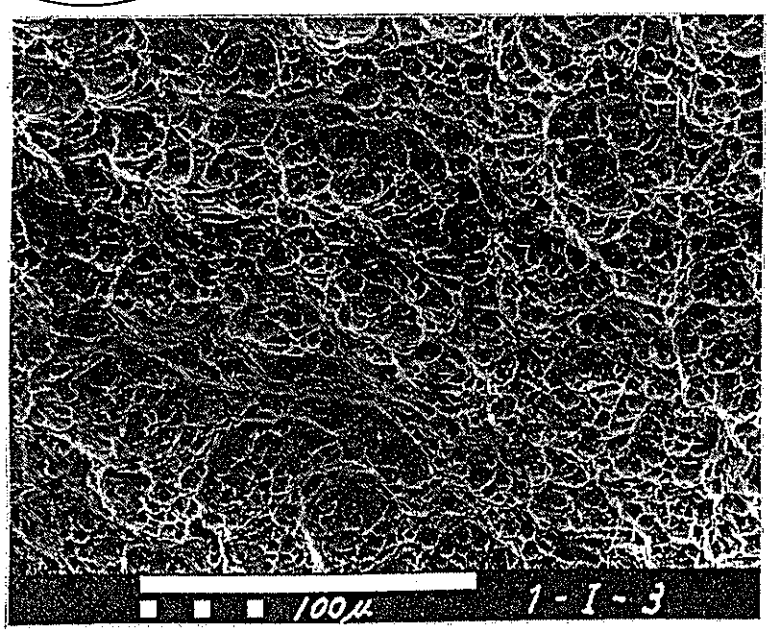
破壊方向

1-I-2 内面近傍



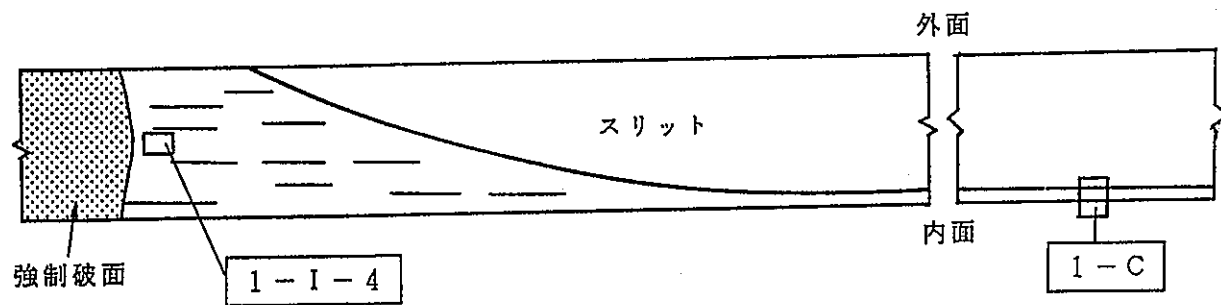
破壊方向

1-I-3 中央部

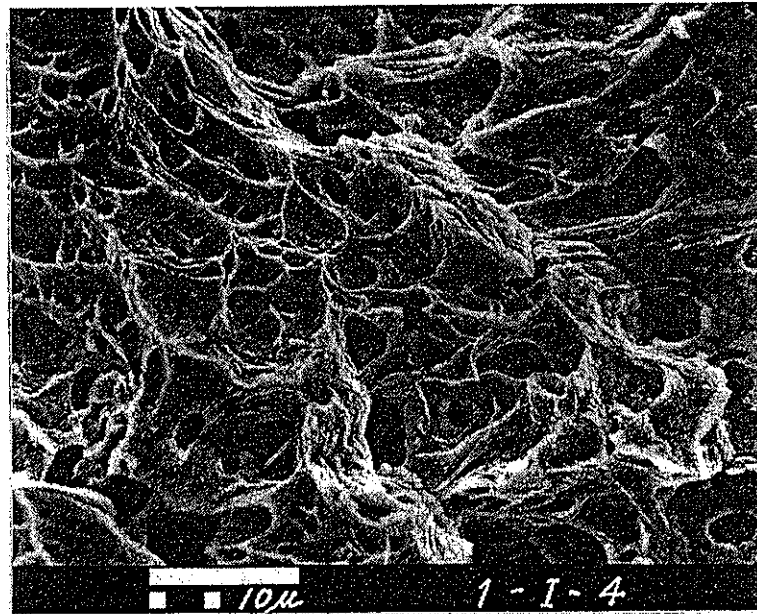
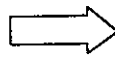
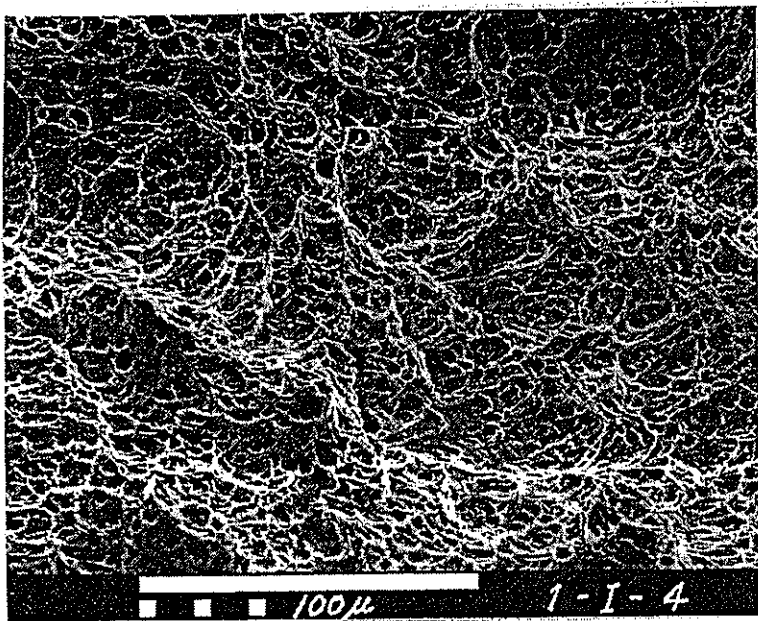


破壊方向

図3.2.8.-3 ケース1の入口側破面の走査電子顕微鏡観察写真

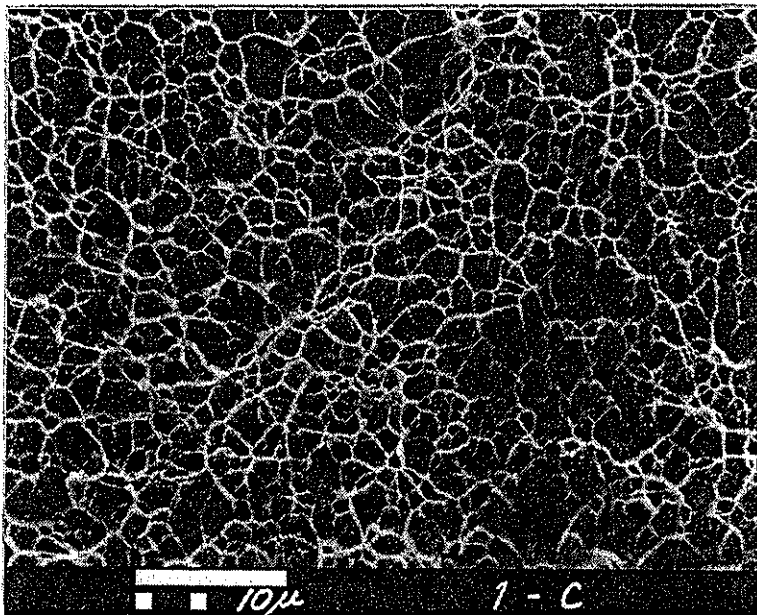
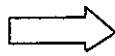
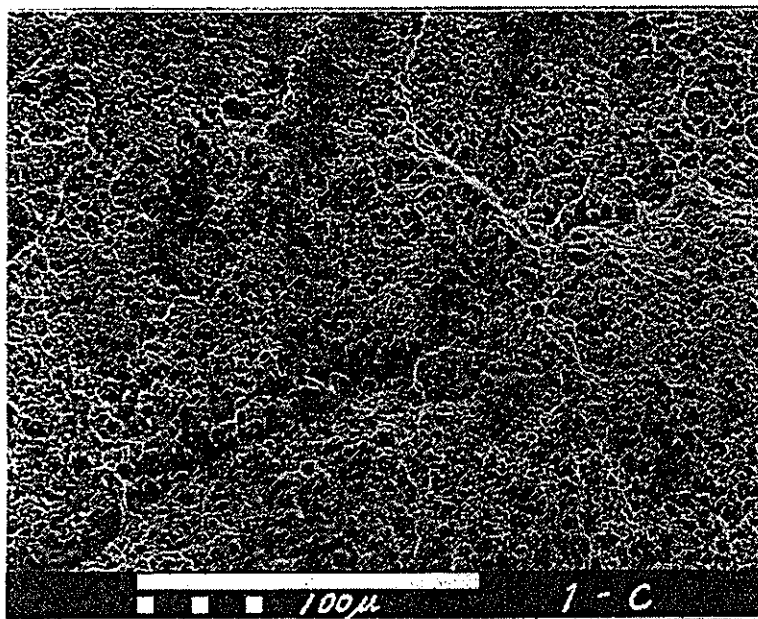


1-I-4 ケース1入口側き裂終端近傍



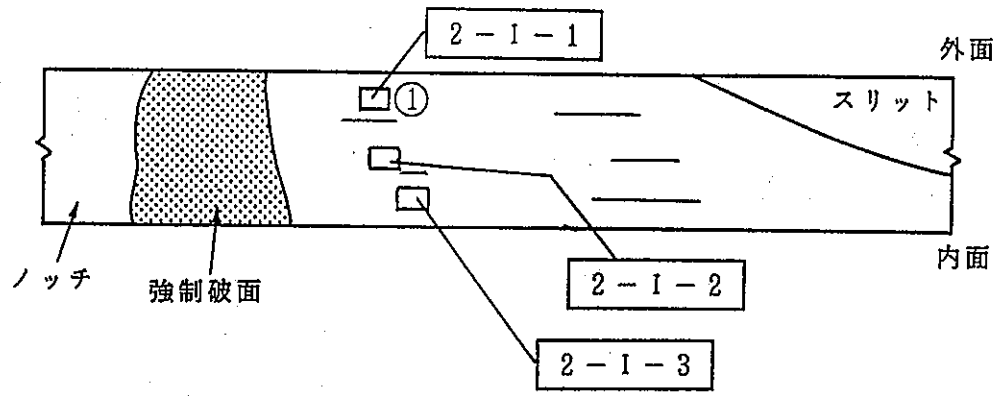
破壊の方向

1-C ケース1スリット中央部

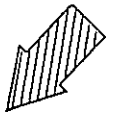
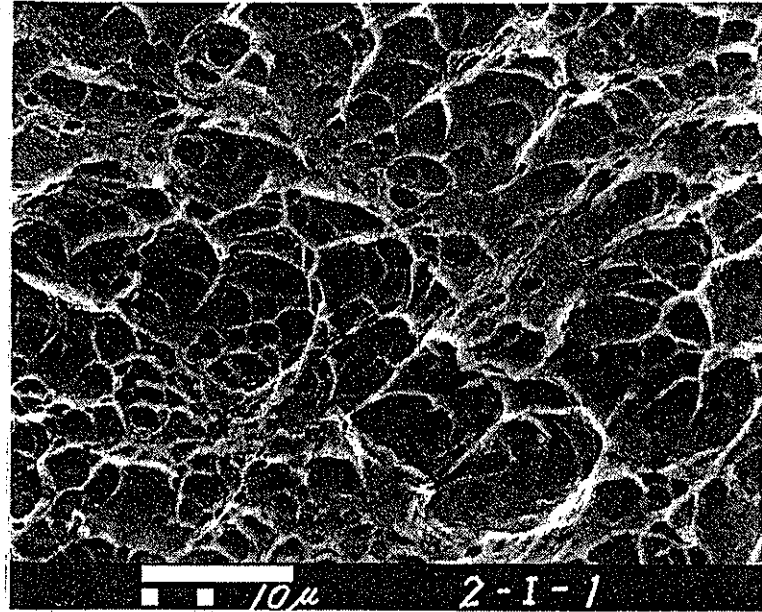
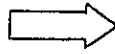
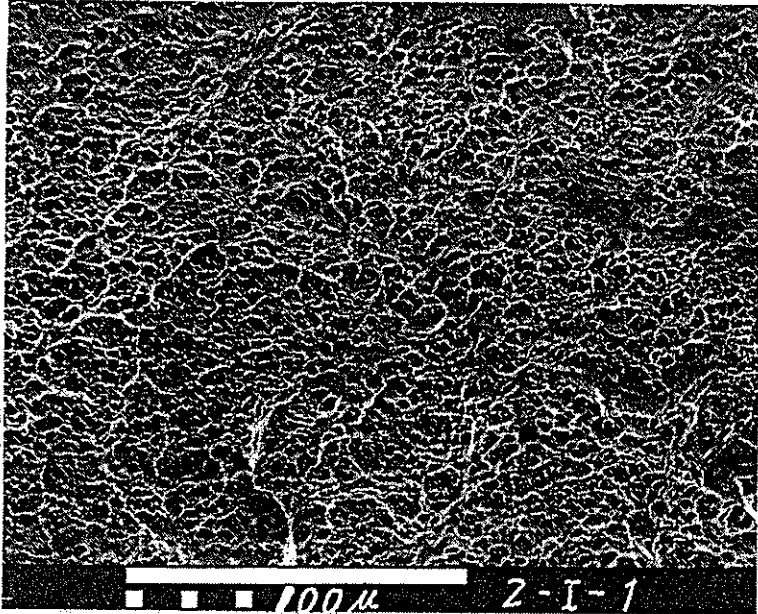


破壊の方向

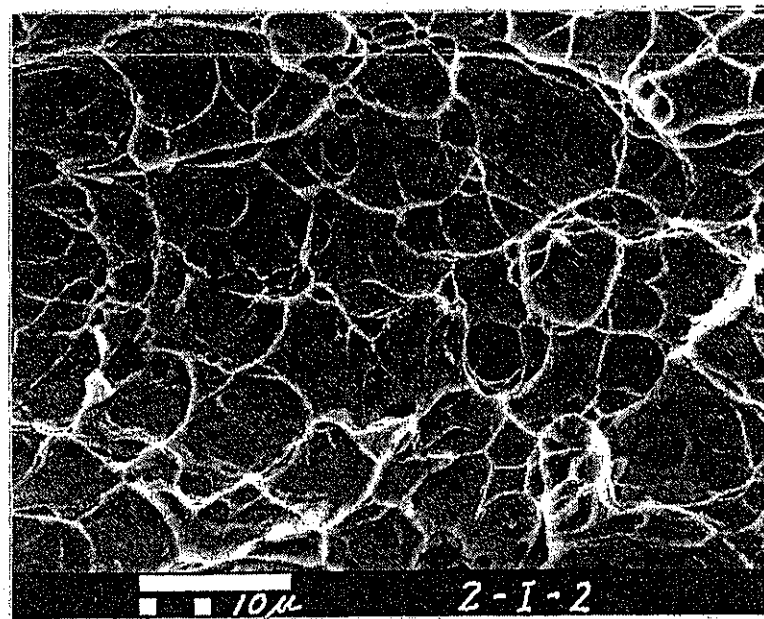
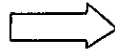
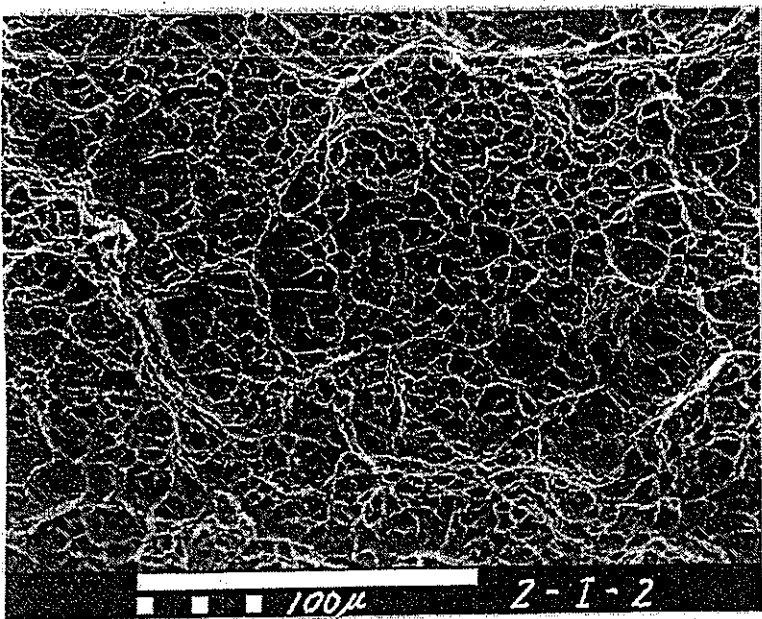
図3.2.8.-4 ケース1入口側、スリット中央部の走査電子顕微鏡観察写真



2-I-1 き裂終端側外面近傍



2-I-2 き裂終端側中央部



等軸型及び
延長型混在

2-I-3 き裂終端側内面近傍

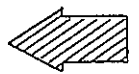
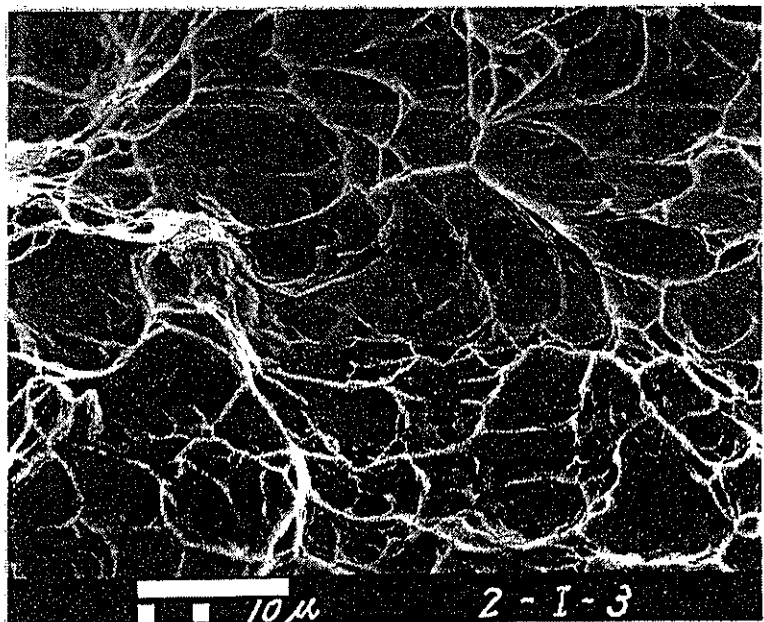
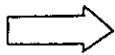
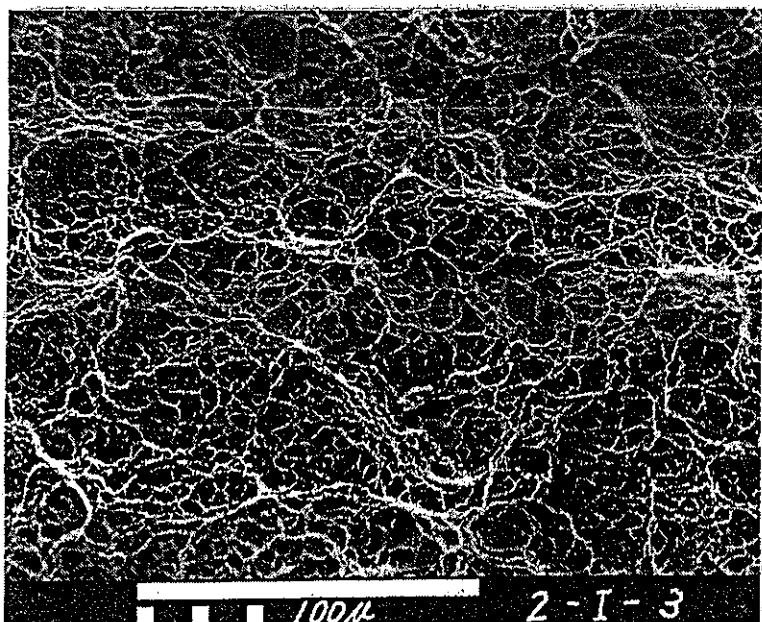
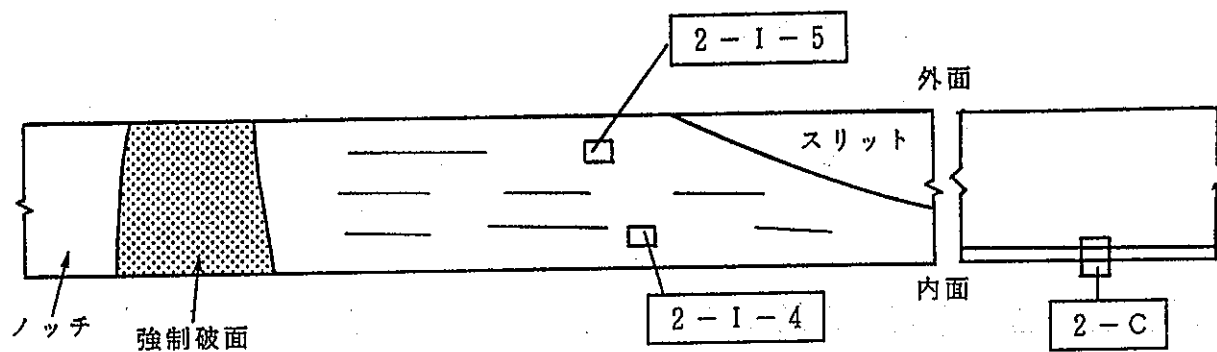
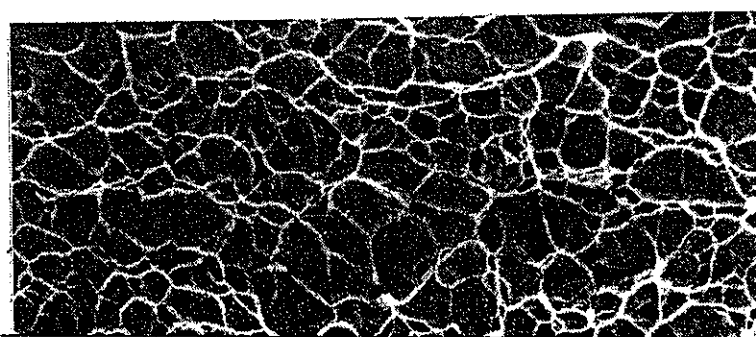
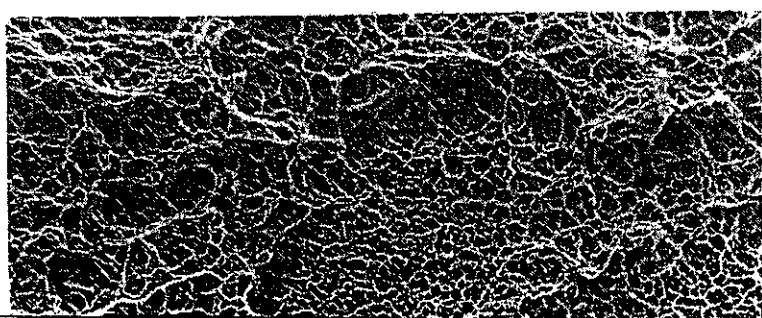


図3.2.8.-5 ケース2の入口側破面の走査電子顕微鏡観察写真

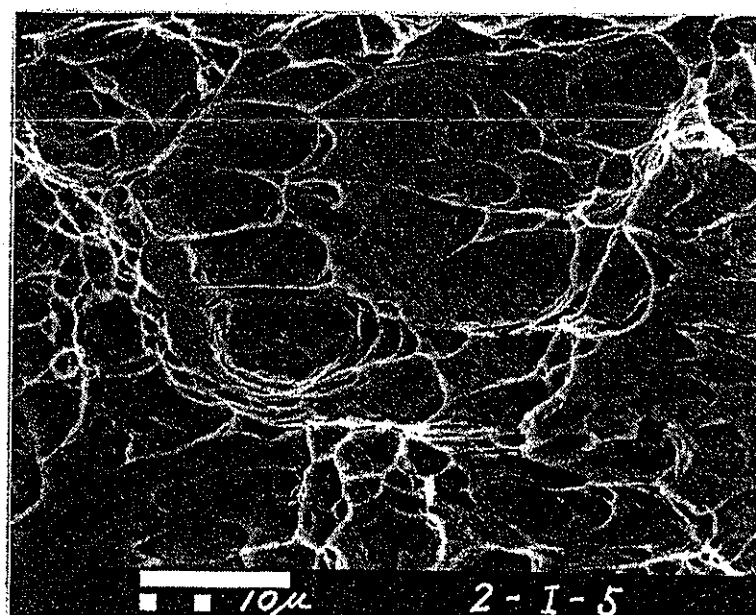
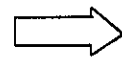
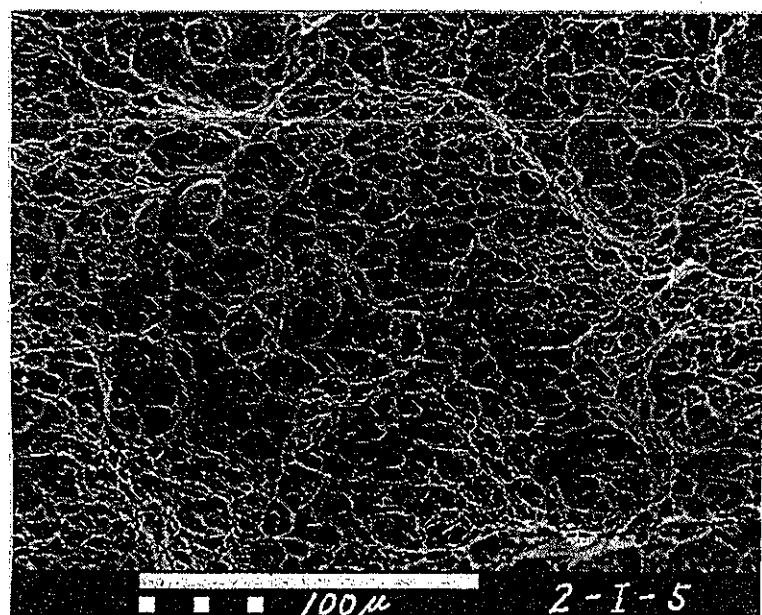


2-I-4 ノッチ側内面近傍



ほぼ等軸

2-I-5 ノッチ外面近傍



2-C スリット中央部

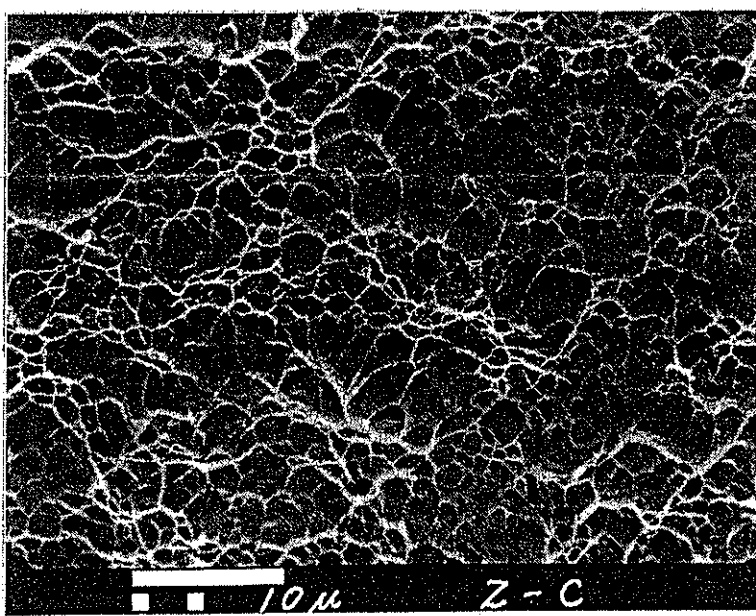
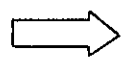
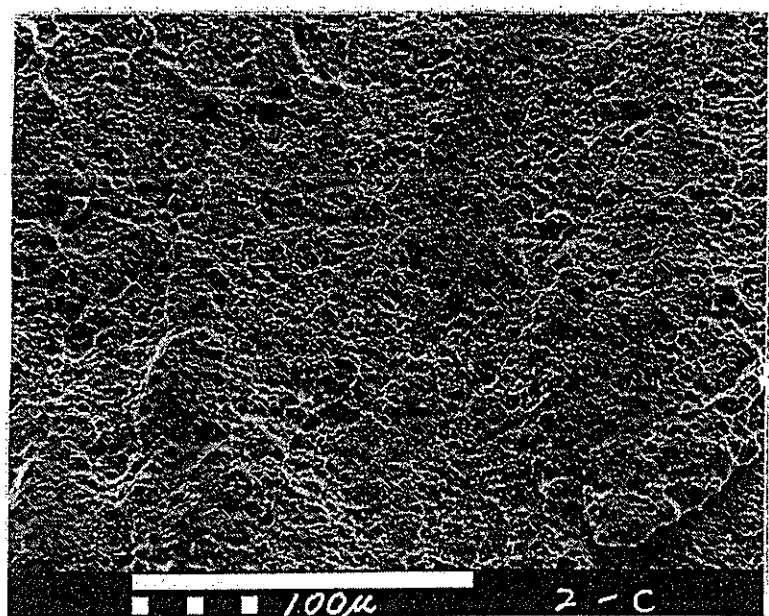


図3.2.8.-6 ケース2の入口側およびスリット中央部破面の走査電子顕微鏡観察写真

4. 実験解析

本年度実施した流動特性試験の実験解析を行い、流動解析コード及び構造解析コードの評価モデルを検討した。

圧力管に破断が生じると、一次系内の冷却材は、圧力管-カランドリア管間のアニュラス部に噴出し、アニュラス部の圧力を上昇させると同時に、カランドリア管に温度変化を与え、圧力と温度による歪を発生させる。又、破断した圧力管は圧力管内圧力とアニュラス圧力との差分によって押し広げられ、衝撃的にカランドリア管と接触する。この時のカランドリア管の応答挙動を解析する為に流動挙動をまず流動解析コードで解析し、検証する。そのコードによって得た結果を構造解析コードに境界条件として与え、カランドリア管に生じる歪を実験結果と比較することによって、構造解析モデルの検討を行った。なお、主要な負荷である内圧上昇、ジェット力、圧力管のカランドリア管への衝突力はそれぞれ時間的に重なる事はなく個別に評価できる事が流動特性試験で明らかとなった。従って、対象とする負荷毎に個別に解析するものとし、用いるコードを以下の通りとした。

	流 動 解 析	構 造 解 析
P/T, C/Tの衝突	K-FIX	DYNA-3D
内 圧 上 昇	PTRAC	
ジ ェ ッ ト 力	K-FIX	

4.1 流動解析

4.1.1 概 要

圧力管が破断した後、カランドリア管との衝突に至る時間は数m秒以内の現象である。このような極めて短い時間での過渡現象では熱的非平衡の効果が無視できないと考えられる。この現象に対応するコードとして二相流熱非平衡(2V2T)解析コード“K-FIX”⁽⁴⁾を用いるものとする。又ウォーターハンマーの現象によって生ずる最大圧力解析には時間的に充分長い現象である事を考慮し、均質熱平衡(1V1T)解析コード“PTRAC”を用いるものとする。この守備範囲に従って、圧力管が破断し、アニュラス部に高温高圧二相流が放出された場合の圧力管内とカランドリア管間のアニュラス部の圧力時間変化を予測し、実験結果と比較して“K-FIX”コード、“PTRAC”コード及びモデルを検討した。

4.1.2 流動特性試験装置

装置の詳細な内容は3章で既に述べたので省略する。解析の対象となるのは“K-FIX”では図3.1.2-1の試験体部であり、解析に必要な主要寸法を図4.1.2-1に示す。又、“PTRAC”のように比較的長い時間の解析ではシステムの影響を受けるので、図4.1.2-2に示す圧力管への接続配管を更に解析の対象に加える。これらの試験部の主要部には圧力計、温度計、流量計を配置し、流動挙動が把握できるようにになっている。

4.1.3 試験条件

設定破断圧は $75\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ としていたが、設定値で破断しなかったため、強制加圧ポンプを起動して破断させた。この時の圧力境界は図4.1.2-2に示す出入口逆止弁であり、その破断圧は $83.5\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ であった。また、破断時の冷却材温度は 259°C であった。また、破断時の既設ループ（蒸気ドラム）の圧力及び温度はそれぞれ約 $64\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ 及び 278°C であった。

4.1.4 解析条件

熱流動モデル、境界条件の設定に当っては、実験解析に先立ち、予備的解析を行い、解析条件に反映した。予備的解析の内容に関しては4.1.5解析結果で述べる。

(1) 衝突迄の短期流動解析

① 使用コード

二相流熱非平衡解析コード“K-FIX”を用いる。

② 解析対象位置

図4.1.2-1に示す試験部長手方向中央の周方向断面とする。

③ 形状モデル及びメッシュ分割

図4.1.4-1に示すように上下を壁境界に設定した 10mm 厚さの1メッシュ二次元モデルとする。図に示す通り“K-FIX”では等メッシュ分割機能しか有しない為、取扱い上圧力管の肉厚をゼロとしている。本モデルでは圧力管の肉厚分の 4.3mm は、アニュラス空間として取扱っている。又、サブチャンネル機能を持たない為、メッシュ分割に合せた矩形で燃料集合体をモデル化している。装置寸法と解析モデル寸法を比較して表4.1.4-1に示す。

④ 流動モデル

蒸発率* $J_e = \rho_l \left[\frac{18}{\pi} \right] \left[\frac{\theta}{r^2} \right] \left[\frac{\rho_l}{\rho_g} \right] d_l \left\{ \frac{C_l (T_l - T_s)}{L} \right\}^2$

d_l 熱拡散率

C_l 水の比熱

L 潜熱

r 気泡の半径

ρ_g 蒸気の比重量

ρ_l 水の比重量

θ ボイド率

T_g 蒸気の温度

T_l 水の温度

T_s 飽和温度

凝縮率 $J_c = 0$

相間摩擦 $K = 10^{10}$ (g/cm² · S)

相間熱伝達 $R = 10^{20}$ (erg/cm² S · K)

*解析は $\left\{ \frac{C_l (T_l - T_s)}{L} \right\}^2 \Rightarrow \frac{C_l (T_l - T_s)}{L} * \frac{(I_l - I_{l_s})}{L}$

I_l 水の比内部エネルギー

I_{l_s} 水の飽和内部エネルギー

※※上記モデル及び蒸気表は、

凝縮率をのぞき文献5, 6による。

⑤ 初期条件及び境界条件

モデル形状を横断面2次元モデルとしている為、初期流体条件には強制吐出時の状態量を用いた。又、圧力管の破断口面積は瞬時に一定開口面積になるとした。開口面積は下図に示す通り流動特性試験結果の開口巾に近い値とした。圧力管部、アニュラス部共、モデルの上下の境界を壁とした。

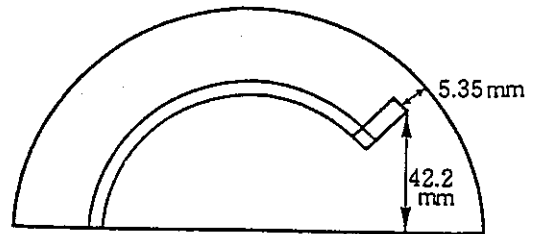
冷却材 : $83.5\text{kg}/\text{cm}^3 \cdot \text{g}$

サブクール 38.4°C

アニュラス部 : $0\text{kg}/\text{cm}^3 \cdot \text{g}$

飽和蒸気

開口幅 : 42.2mm



(2) 内圧上昇解析

① 使用コード

均質熱平衡解析コード“PTRAC”を用いる。

② 解析対象位置

内圧上昇解析では、比較的長い時間に渡る解析であるから、試験装置のシステムの影響を受けると考えられる。従って、図4.1.2-1の試験部全体と図4.1.2-2の出入口管部を解析の対象とする。尚、解析モデルは試験部の対称性を考慮して1/2モデルとする為、出口管及び蒸気ドラム迄をモデル化範囲とした。

③ 形状モデル及びメッシュ分割図

図4.1.4-2に示すように試験部と出口管を含む蒸気ドラム迄をモデル化した。又、形状圧力損失の大きいと考えられる遮へいプラグと試験装置の逆止弁は解析で模擬した。尚、破断口長さは試験結果の亀裂長さである2600mmを用いた。

④ 流動モデル

PTRACコードは2相流を均質熱平衡(1V1T)として取扱っている。

圧力管内の燃料集合体を模擬するためにサブチャンネル座標系が使用できるようになっている。また、軸方向は1次元である。

⑤ 初期条件及び境界条件

蒸気ドラム位置における圧力境界とする。

境界圧力 : $64.1\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$

境界温度 : 259°C

ただし、試験では破断を強制加圧によって $83.5\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 迄昇圧させた。これを模擬する為、解析では試験と同じ様に蒸気ドラム位置で $64.1\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ の圧力境界とし且、逆止弁を境界に試験部を $83.5\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 259°C とした。又、破断後図4.1.4-3に示す逆止弁位置のノードの圧力を判定して以下の条件で逆止弁を開閉し、冷却材の移動を制限した。

$P \geq 64.1\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ …… 逆止弁閉

$P < 64.1\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ …… 逆止弁開

尚、逆止弁の慣性による遅れは取り入れておらず、瞬時に開閉するものとした。

4.1.5 解析結果

(1) 予備的解析

① 境界条件

図4.1.5-1に①上下を壁とした境界条件、②上部を圧力境界とし下部を壁とした境界条件の2種類を示す。このモデルでの“PTRAC”コードによる圧力管内及びアニュラス部の圧力挙動解析結果を図4.1.5-2に示す。

圧力管とカランドリア管の衝突が生じる短時間(5 msec以内)の間では、モデルの違いによる圧力挙動の差はほとんどないことが判った。従って、試験解析は上下壁の条件で解析することにした。

② 燃料集合体の効果

図4.1.5-3に燃料集合体の有無による圧力管内圧力挙動の変化を示す。燃料集合体が存在する場合には、圧力低下が大きく、燃料集合体の有無に依存することが判った。従って、実験解析では燃料集合体を模擬した条件で解析する必要がある。

③ 熱非平衡の効果

図4.1.5-4に飽和水条件での熱平衡モデルの“PTRAC”コードと熱非平衡モデルの“K-FIX”コードの解析結果を比較して示す。“K-FIX”コードの解析と“PTRAC”コードの解析とを比べると、“K-FIX”コードでは圧力管の破断と同時に圧力管内側の圧力が急激に低下する。これは熱非平衡モデルの影響であると

考えられる。この圧力変化の相違は、衝突力に影響することが予想されるので、衝突までの圧力管内圧変化解析には熱非平衡モデルを採用することにする。

(2) 試験解析

① 衝突迄の短期流動解析結果

図4.1.5-5に圧力管内圧力とジェット圧力の試験と解析結果を比較して示す。

(a) 圧力管内圧力

破断口正面から90°の位置の圧力管内圧力は試験が初期値の83.5kg/cm²・gから0.4m秒で31kg/cm²・gに低下するのに対し解析では0.1m秒後に10kg/cm²・g迄落ちた後0.6m秒で約30kg/cm²・g迄回復する。その後数値振動が発生するが、振動の発生前と収束後の圧力を試験と比較するとその差は約5kg/cm²程度であり、比較的良い一致を示している。

(b) ジェット圧力

破断口正面のカランドリア管内壁に取り付けた圧力計は破断後のジェット圧力を計測していると思われる。解析結果は、破断後0.2m秒で58kg/cm²・g迄急激に立ち上り、その後多少の振動を経て圧力管内圧力と同じ約30kg/cm²・gを示した。これに対し、試験では破断後2m秒で88.9kg/cm²・gの圧力を示している。

② 温度

図4.1.5-6に試験と解析を比較して示す。

(a) 圧力管内流体温度

解析の圧力管内側では、温度は259°Cであるが、この温度を飽和とする圧力は、ほぼ47kg/cm²であり、圧力の時刻歴から3.0m秒地点では、非平衡状態にある。

(b) 破断口に面するカランドリア管壁近傍温度

初期条件の温度である100°Cを3m秒迄保っている。

② アニユラス部内圧上昇解析結果

(a) アニユラス部圧力変化

図4.1.5-7に示すように試験では0.5秒で64kg/cm²・g迄昇圧し、その後0.83秒で71.2kg/cm²・gの最大圧となったが、解析では破断後の0.8秒で最大

圧力 $66\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ を示した。その後 $64\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 近傍に落ちつく。

③ アニュラス部ボイド

アニュラス部のボイドは、図4.1.5-8に示すごとくアニュラス圧力が259℃の飽和圧力に到達した0.54秒で全て凝縮した。

④ 流量計測位置での破断後流量変化

図4.1.5-9に示すごとく解析では破断直後から流量が増加し0.3秒で約 $480\text{m}^3/\text{h}$ の流量を示した後、0.5秒以降急減して約 $55\text{m}^3/\text{h}$ で一定となっている。これに対し、実験では破断後0.27秒から流量が増加し始めて、0.8～0.9秒で最高値 $240\text{m}^3/\text{h}$ を示した後減少し、1.5秒以降約 $55\text{m}^3/\text{h}$ で一定となっている。

4.1.6 考察

(1) 衝突迄の短期流動解析

① 圧力管内圧力

試験と解析を主要ポイントで比較してまとめ表4.1.6-1に示す。

解析では、試験後の最終開口巾に近い寸法を解析手法の制限から瞬時に開口させている。試験のように開口巾ゼロから広がって最終開口巾に至る経時変化を模擬できていないため、圧力の減圧速度、最高圧力に差異が生じる原因があると考える。圧力の回復時間は、減圧沸騰遅れに依存すると考えられるが、解析と試験の一致は良い。

② ジェット圧力

急激に立ち上る時間差が試験と解析とではき裂発生後1.8m秒ほど存在するが、試験の計測系に誤差を含む可能性も残っており、計測系の信頼性が確認出来た時点での比較検討を行う必要がある。又、本解析では、圧力管の変形挙動をモデル化していない点も時間差の原因として考えられるが、計測誤差が明らかになった時点で評価する。

③ アニュラス部圧力変化

アニュラス部の圧力上昇解析において、ピーク圧力までの立ち上がり時間の遅れには、つぎの原因が考えられる。

即ち、解析では、熱平衡を仮定しているためにアニュラス部へ放出された冷却材蒸気は、圧力上昇に伴って凝縮が生ずるのに対し、実験では、アニュラス

部に存在している不凝縮ガスである炭酸ガスの存在によって、凝縮率が低下した可能性が考えられる。

図4.1.6-1にアニュラス内で凝縮する蒸気量を補うために流量を多くするべく配管圧力損失係数を表4.1.6-2に示す様に著しく低下させた条件で解析した結果を示す。このようにすると、圧力上昇開始時間が実験と極めて近くなるので、以上の推測の可能性は高いと考えるが、解析モデルが、1/2 のモデルであることから、大気放出部面積の上下の相違（上部は下部の約6倍の面積）の影響との相乗で最終的な差異が決まっているものとする。

④ 流量計測位置での破断後流量変化

解析では破断とほぼ同時に流量変化が出るが試験では0.2秒以上の遅れで変化が起る。流量計時定数は12m秒程度であるから計測上の問題ではない。試験と解析で流量の値に大きな差異があるが、流量を体積流量で比較している為、ボイド率が異なれば質量流量で比較した差異に比べると非常に大きな差異となる。ところで、解析ではボイド率がゼロとなる0.54秒時には流量が急減して55 m³/h一定となるが試験がこの値と等しくなる時間は1.6秒である。

4.1.7 評価

(1) 衝突迄の短期流動解析

- ① " K-FIX " による圧力管内の圧力挙動は比較的良く再現出来た。
- ② アニュラス部圧力の変化の実験と解析の差異が計測系の問題か、凝縮モデルに起因するものなのかを今後の試験で明らかにする。

(2) アニュラス部内圧上昇解析

- ① 破断後のアニュラス部最大圧力をよく再現できた。
- ② アニュラス部最大圧力が発生する時間に対する実験と解析の差異については解析モデルを改良しながら現象説明も含め検討してゆく。

4.2 構造解析

4.2.1 概要

流動解析結果を負荷条件として与え、衝突によるカランドリア管の歪の過渡変化解析を行い試験と比較評価する。

4.2.2 試験装置及び試験条件

圧力管集合体の周囲には、重水を模擬した軽水が満たしてあるので、この条件を解析で模擬する。その他の試験条件は、既に述べたので省略する。

4.2.3 解析条件

① 使用コード

3次元衝撃応力解析FEMコード“DYNA-3D”を用いる。

② 解析対象位置

図4.1.2-1に示す試験部長手方向中央の重水を含む周方向断面とする。

③ 形状モデル及びメッシュ分割

図4.2.3-1に示すように上下を壁境界とし $\gamma-\theta$ 方向はマサツ無しのスベリ境界の2次元モデルとした。又、カランドリア管の外部には重水をモデルとして組み込み、その半径は試験装置のカランドリアタンク半径に等しい1.5mとした。形状と荷重の断面对称性から1/2モデルとして扱い、8節点ソリッド要素で周方向36分割する。モデル規模は節点数962,要素数396である。圧力管とカランドリア管及び重水の材料定数を表4.2.3-1に示す。又、試験に用いた圧力管及びカランドリア管の材料試験結果の応力～歪曲線を実機材料と比較して図4.2.3-2に示す。

④ 境界条件

“K-FIX”コードにより解析結果を入力するものとし、圧力管に作用するす内圧と(加速度項+モーメント項)を考慮する。尚、実験の結果、衝突迄のアニユラス部圧力上昇は無視できる事が判ったので考慮しない。圧力は、流動解析結果の全ノード時刻歴値を8種類にまとめた。まとめたノード分割図を図4.2.3-3に示す。又、各ノードに負荷した圧力を図4.2.3-4 1/4～4/4に示す。又、全ノードに負荷したモーメントを図4.2.3-5に示す。

4.2.4 解析結果

図4.2.4-1に示す計測器取り付け位置の周方向歪で試験と解析を比較して、表4.2.4-1に示す。又、時刻歴の歪変化を図4.2.4-2に試験と解析を比較して示す。図4.2.4-3は破断後の変形時刻歴図である。

① 最大歪値とその発生位置

最大歪の発生位置は破断口から 180° の位置で、試験と解析は一致するがその値は試験の0.15%に対し解析では 2.2%を示す。尚、試験では破断口正面部にも 180° 位置とほぼ同じ0.15%の歪を発生しているのに対し、解析の破断口正面部の歪は 180° 位置の約 8 割りの1.69%で且つ圧縮歪を示す。又、 90° の位置は試験が 0° 、 180° とほぼ同じ圧縮歪を発生するのに比べ解析は0.97%の歪を示す。

② 衝突迄の時間

試験では厳密な衝突時間の特定はできなかったが、加速度計の信号、カランドリア管及び圧力管歪変化から概ね 1.1m 秒～4.0m秒の間であったと考える。これに対し解析では0.7m秒であるから試験よりも早い時間で衝突している。又、試験で歪の発生は 0° 、 90° 、 180° の各位置でほとんど同時に歪が発生するのに対し解析では、 0° 位置で最初に発生し、その後、やや遅れて 90° 、 180° の位置に歪が発生する。

4.2.5 考察

試験と解析では衝突に至る時間あるいは発生する歪に相当の差異がある。この相異はモデル化できていない三次元幾何学形状の効果、物性上の効果に起因すると考えられるので、破断後の挙動に影響を与えると考えられる重要な効果について検討する。

① 歪速度

材料が高速で歪む場合には、材料特性が歪速度に依存して変化する事が判っている。図4.2.5-1に機械学会による調査データを参考として示す。本図から、数十分の歪低減の可能性がある事がわかる。ただし、DYNA-3D では、モデルとして組み入れることは出来ない。

③ 亀裂進展速度

破断後開口巾が広がる為には破断部付近の圧力管に軸方向伸びが必要となる。必要な軸方向伸びは亀裂先端の亀裂進展量とのバランスで決まる。従って、亀裂進展速度が非常に速ければ圧力管の開口変位を拘束する力は小さくなり2次元モデルに近づく。他方、亀裂進展速度が遅いと圧力管の開口変位は軸方向の応力によって拘束され、衝突力も緩和される。今後、この効果を検討する必要がある。

4.2.6 評価

- ① 現状の2次元モデルでは衝突に至る時間あるいは発生する歪値に相当の差異がある。この差異の最も大きな原因は亀裂進展速度と関連のある三次元幾何学的構造に基づく効果にあると考えられる。従って、今後三次元の効果に対応するモデルを早急に検討する。

表4.1.4-1 装置寸法と解析モデル寸法の比較

	試験体系	K-FIX
(A) P/T流路断面積 (cm ²)	47.89	61.25
(B) アニユラス部 流路断面積 (cm ²)	71.58	93.68
(A) / (B)	0.669	0.654
圧力管内径 (cm)	11.78	11.78
圧力管外径 (cm)	12.64	11.78

表4.1.6-1 実験と解析の比較

		90° 位置 (P/T)	
		実験	解析
①	破断からアンダーシュートまでの時間	0.4 m秒	0.1 m秒
②	アンダーシュートの圧力	31kg/cm ² g	10kg/cm ² g
③	回復までの時間	0.7 m秒	0.7 m秒
④	回復圧力	35kg/cm ² g	30kg/cm ² g

上記表の言葉の定義を下図に示す。

図の①~④は表の①~④に対応

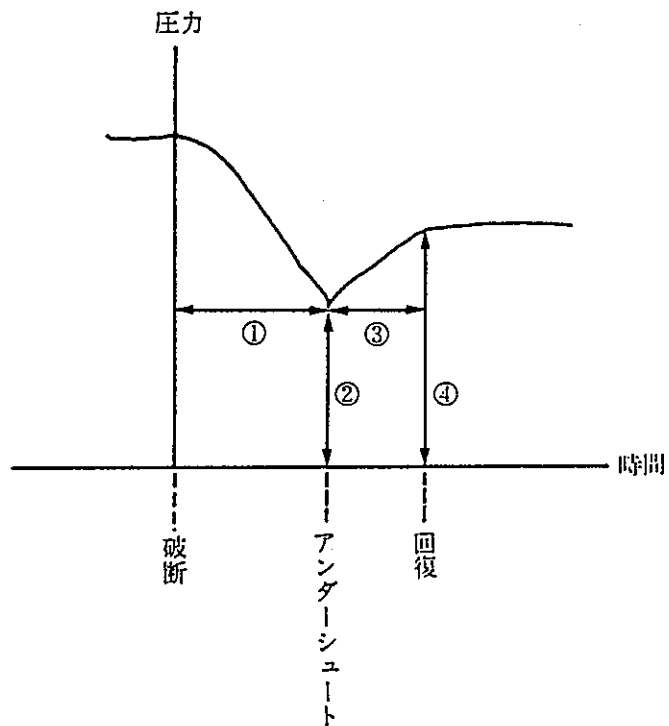
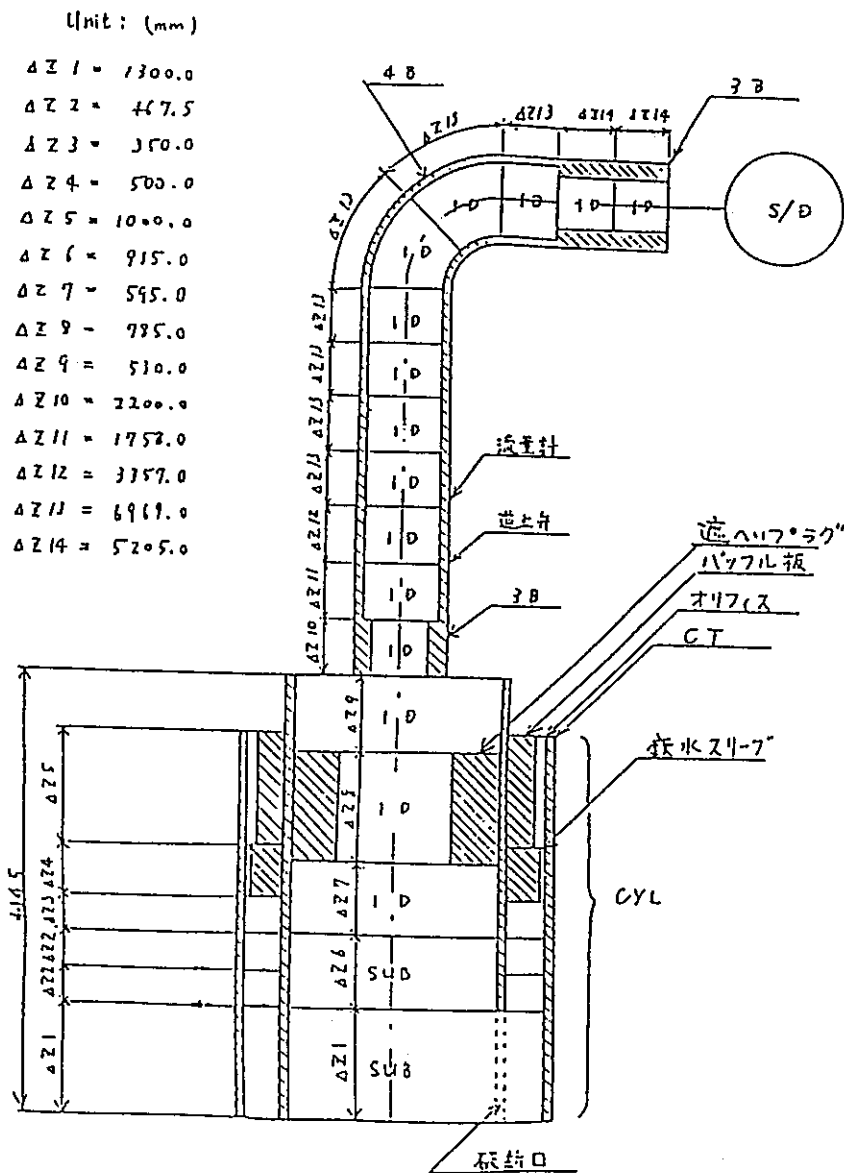


表4.1.6-2 配管圧力損失係数



メッシュ分割イメージ

		圧損係数 (Z軸方向)	
		ベース値	圧損係数
SUB	形状	0.1	0.01
	摩擦	0.001	0.0001
CYL 7=7x	形状	0.0	0.0
	摩擦	0.001	0.0001
CYL 作水 スリット	形状	16.75	16.75
	摩擦	0.0	0.0
CYL 形状	形状	35.0	35.0
	摩擦	0.0	0.0
1D 逆止弁 上流	形状	0.01	0.001
	摩擦	0.001	0.0001
1D 逆止弁 下流	形状	0.1	0.01
	摩擦	0.001	0.0001

表4.2.4-1 歪値の試験と解析の比較

	衝突迄の 時間	C / T 発生歪			歪発生から 最大歪迄の時間
		0°	90°	180°	
試験	1.1 m秒 4.0 m秒	0.15%	-0.14%	0.15%	1.3 m秒
解析	0.7 m秒	-1.7 %	≒0.97%	2.2 %	0° ... 1.4m秒 90° ... ≧3.0m秒 180° ... ≧3.0m秒

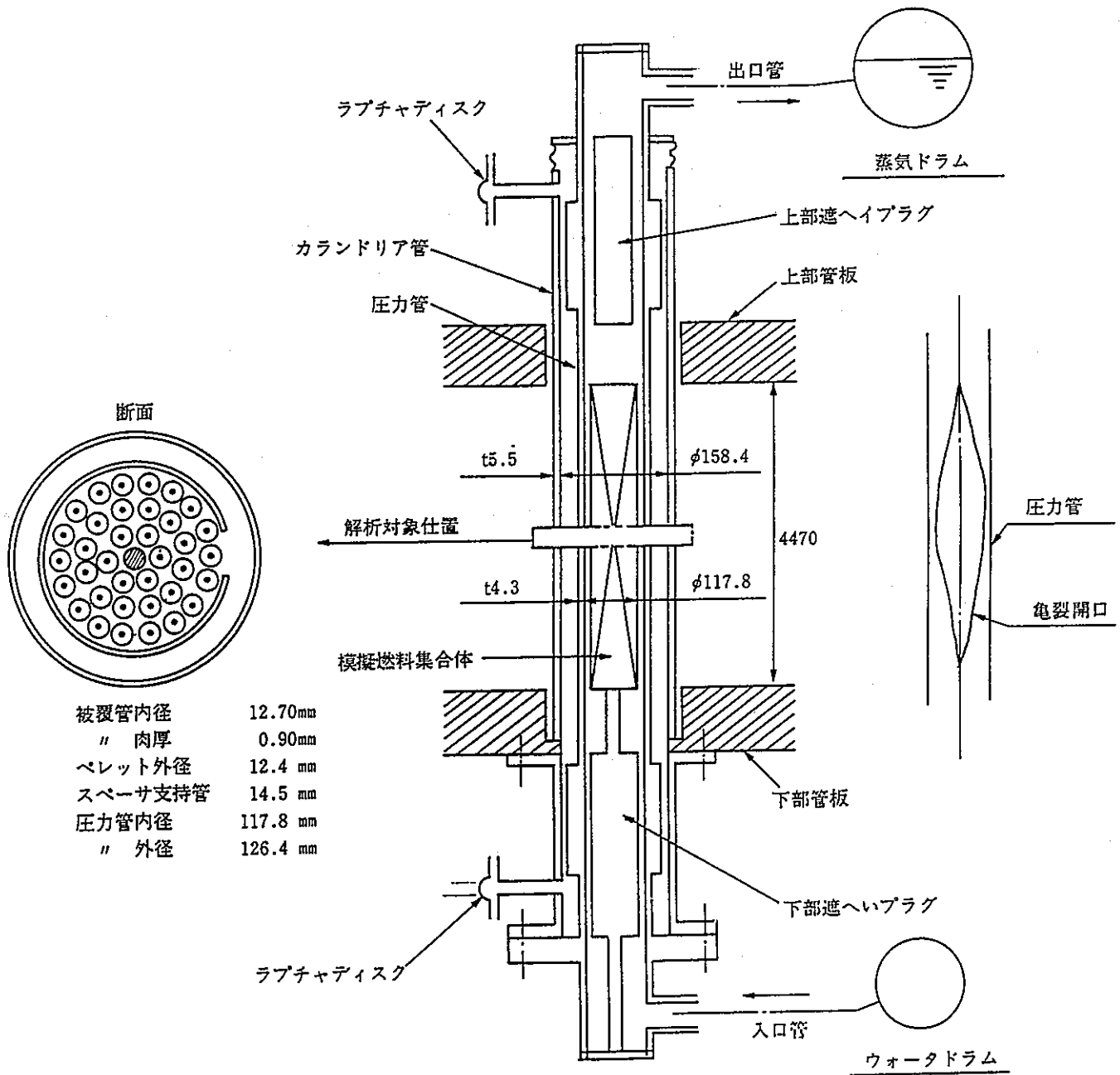


図4.1.2-1 試験体系主要寸法

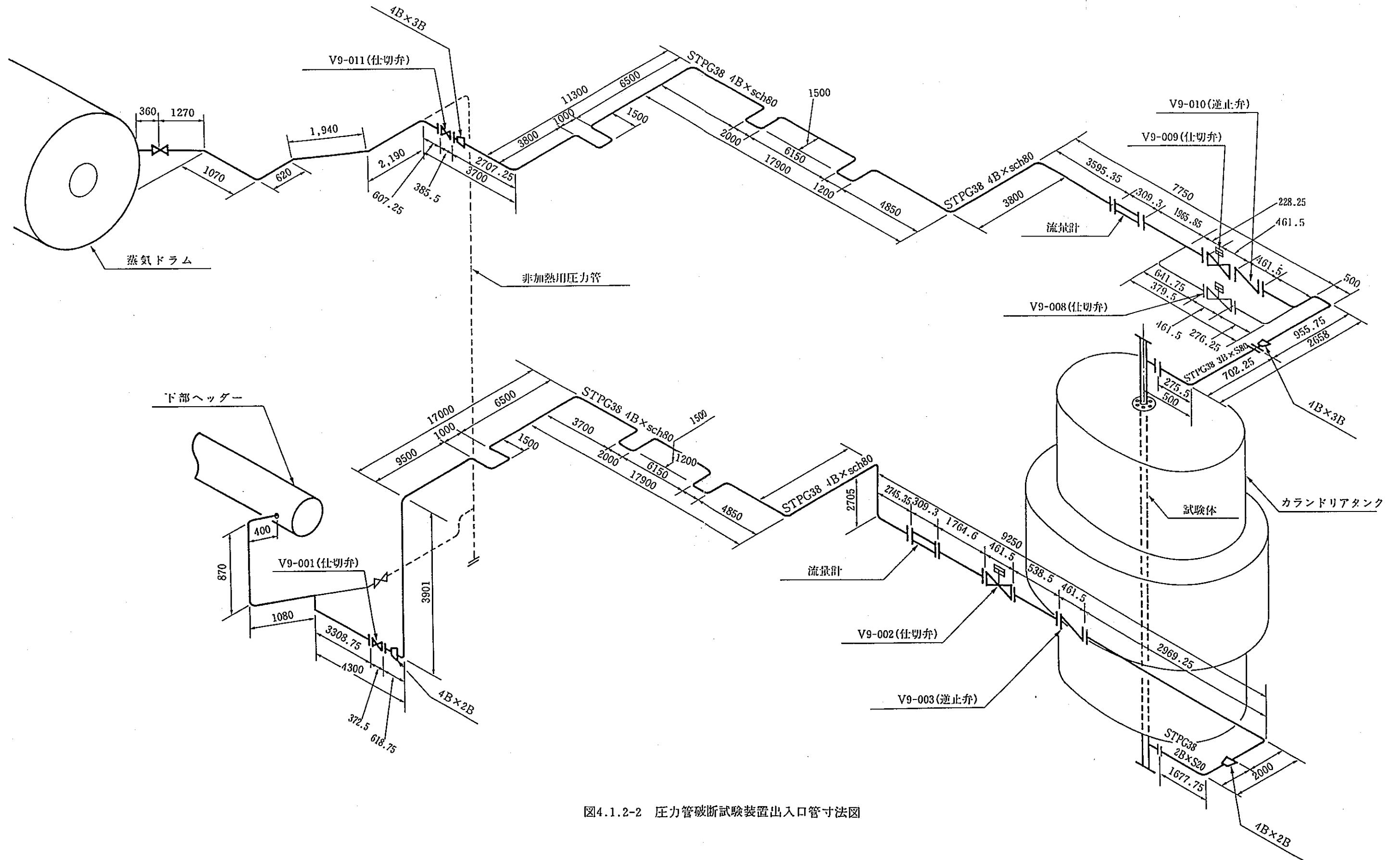
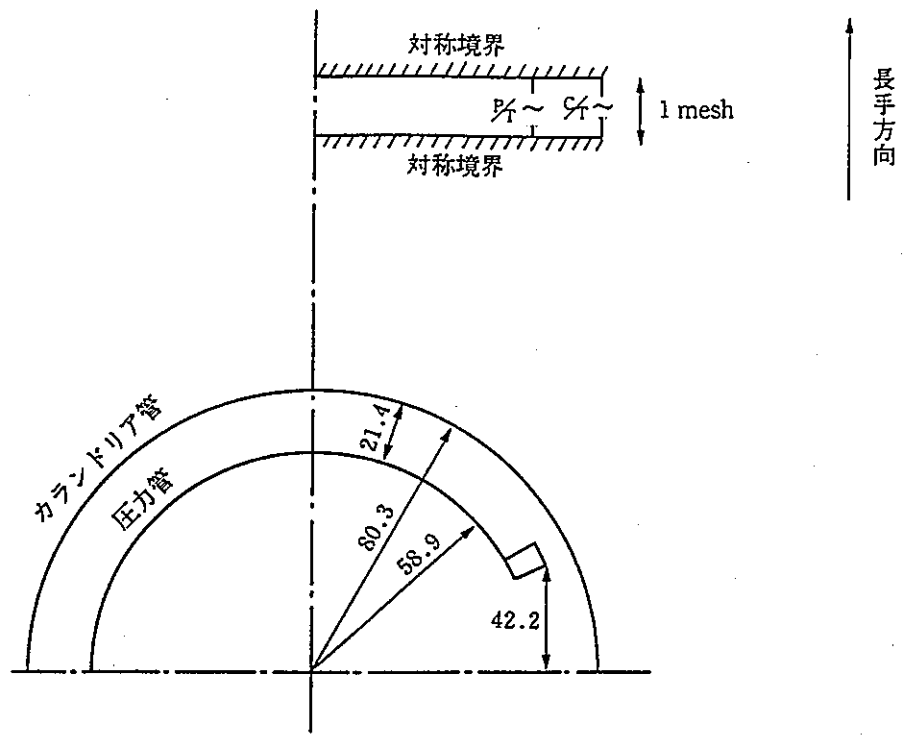
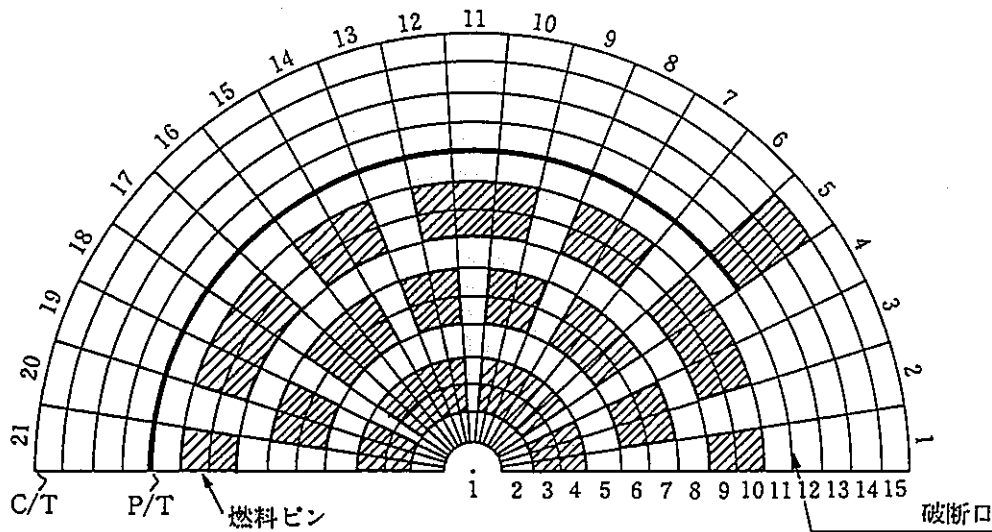


図4.1.2-2 圧力管破断試験装置出入口管寸法図



単位：mm

(a) 解析モデル



(b) メッシュ分割図

図4.1.4-1 解析モデル並びにメッシュ分割図

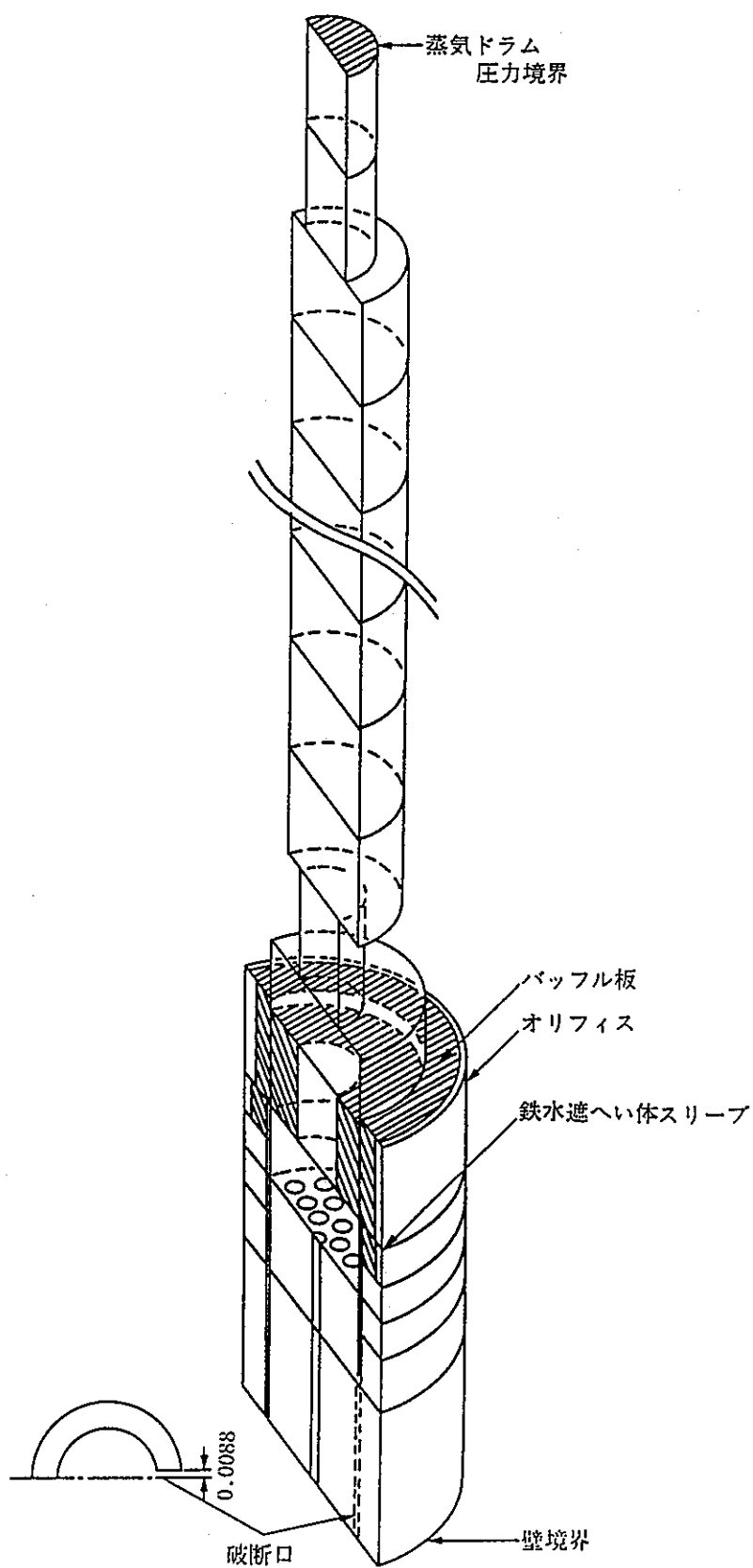
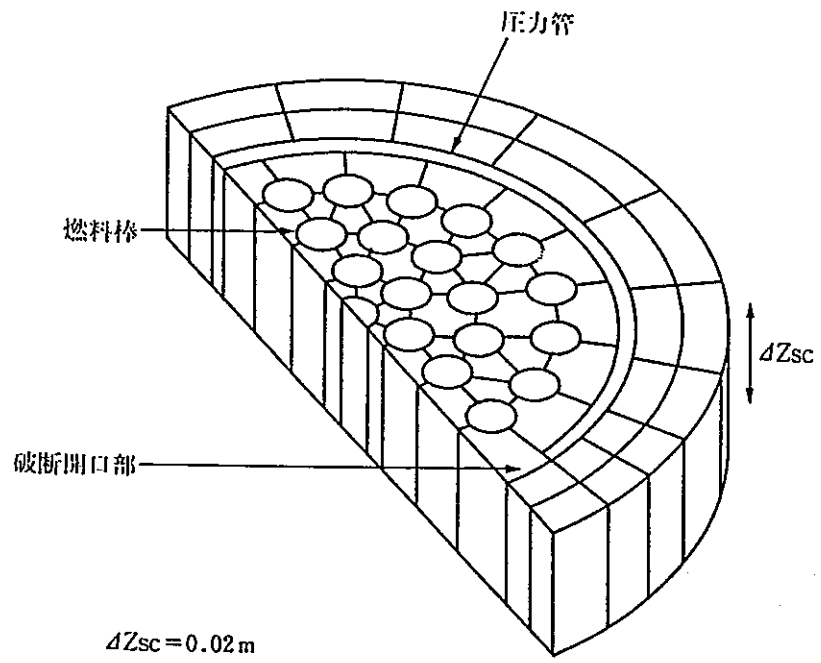
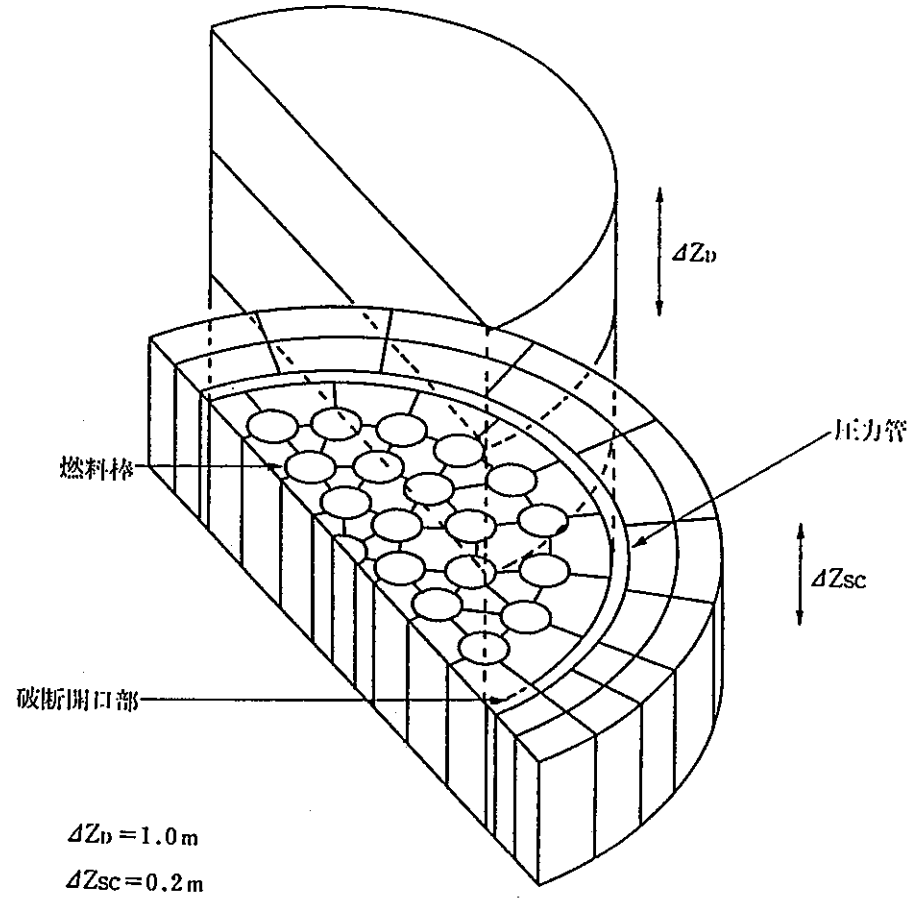


図4.1.4-2 形状モデルイメージ

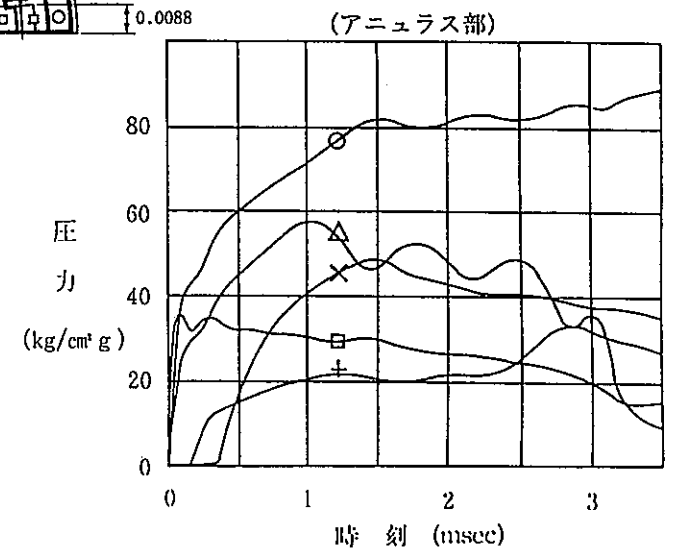
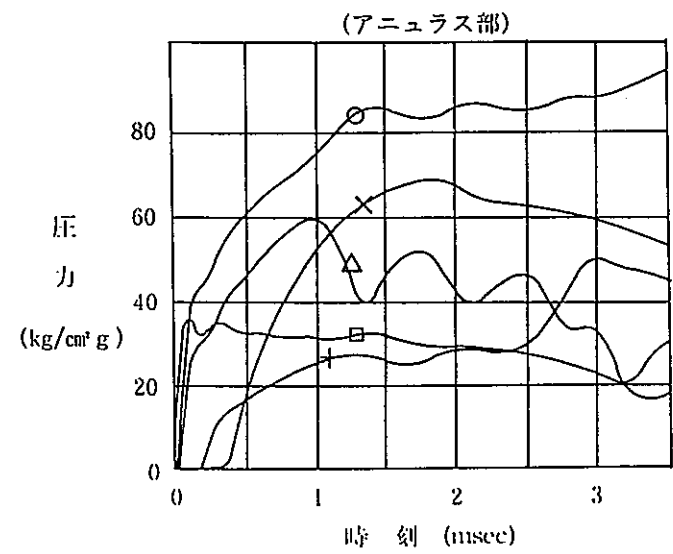
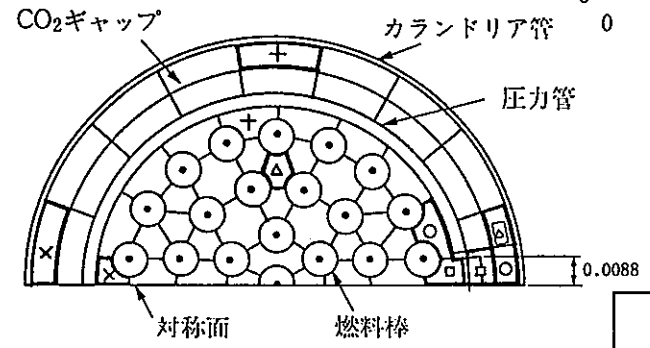
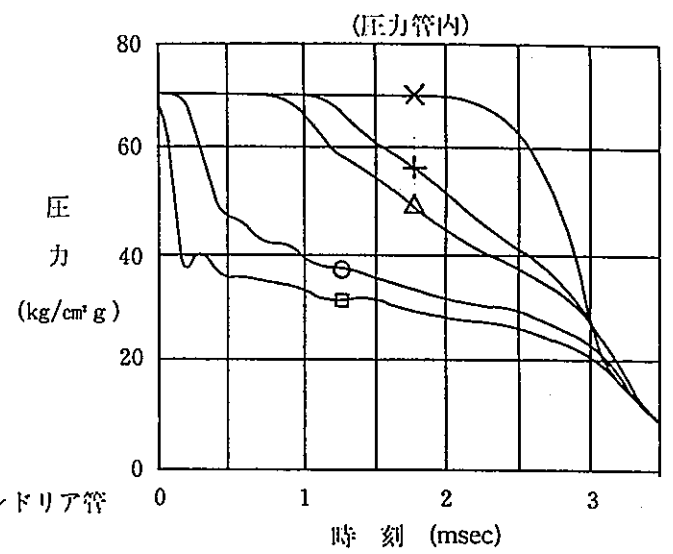
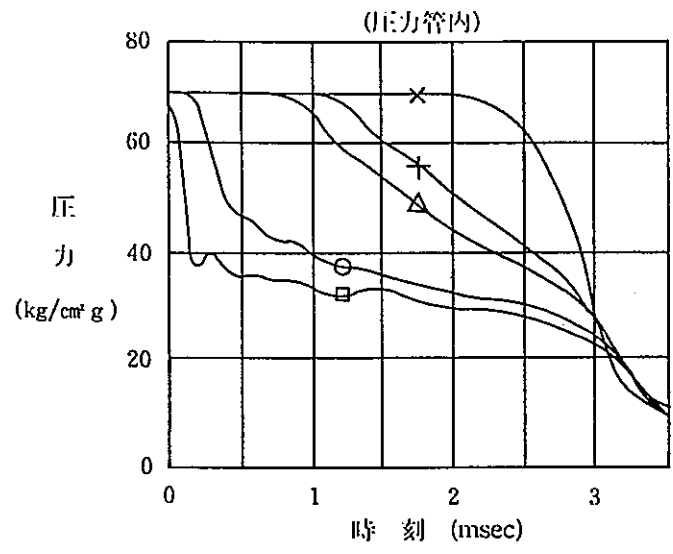


(a) 上下壁境界モデル



(b) 圧力境界モデル
[上: 圧力境界]
[下: 壁]

図4.1.5-1 2次元流動解析モデル



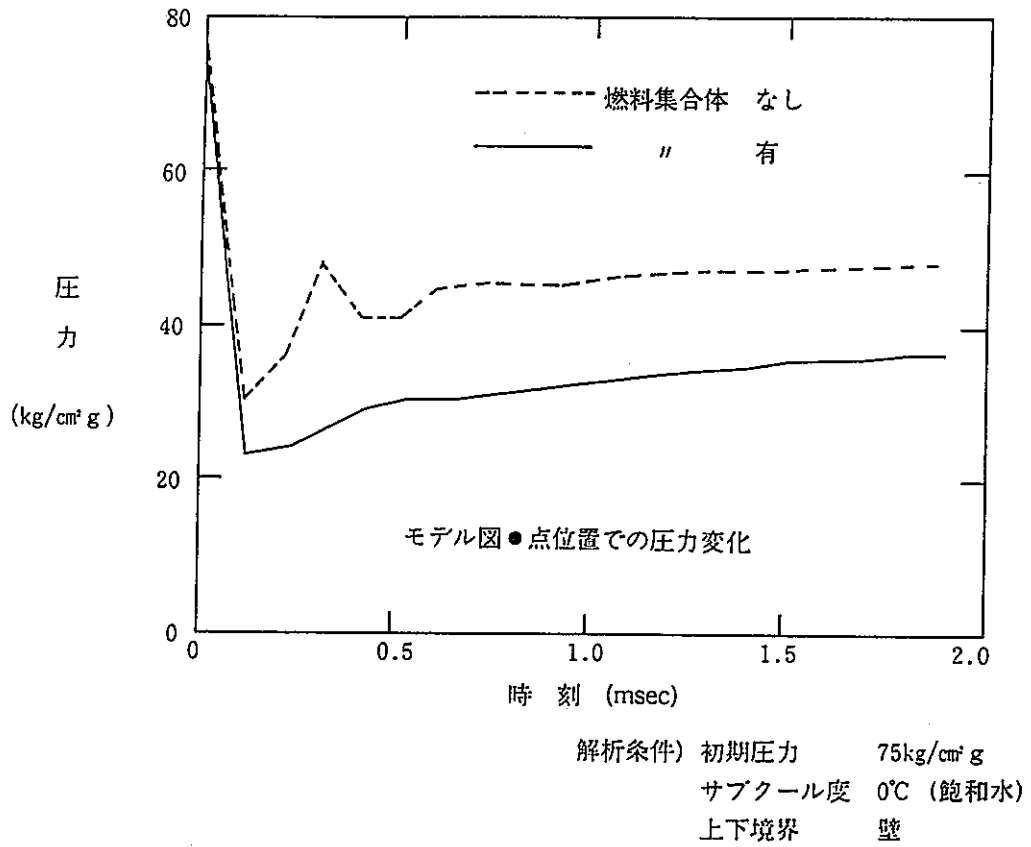
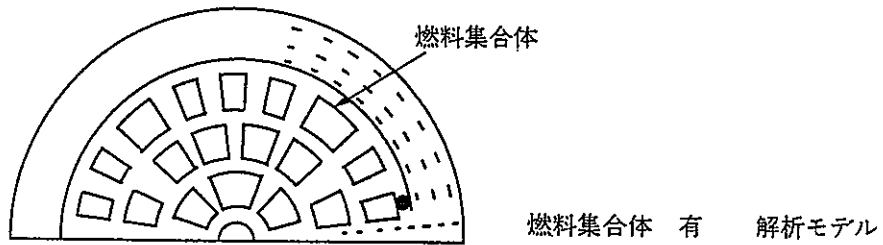
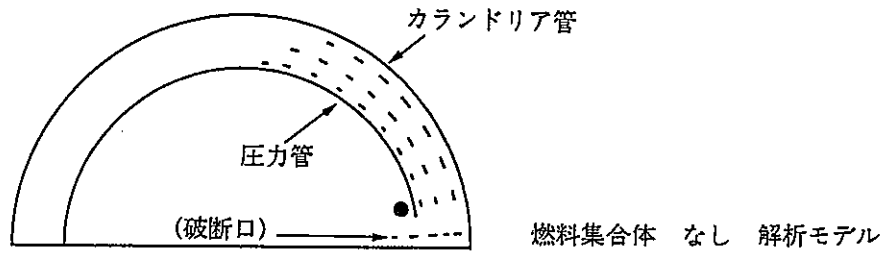
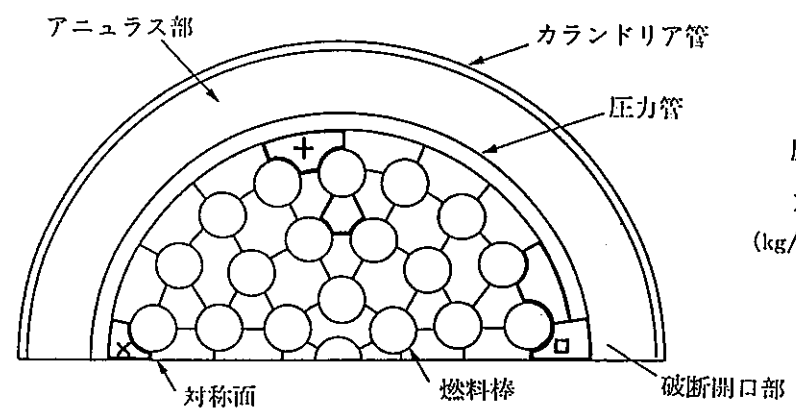
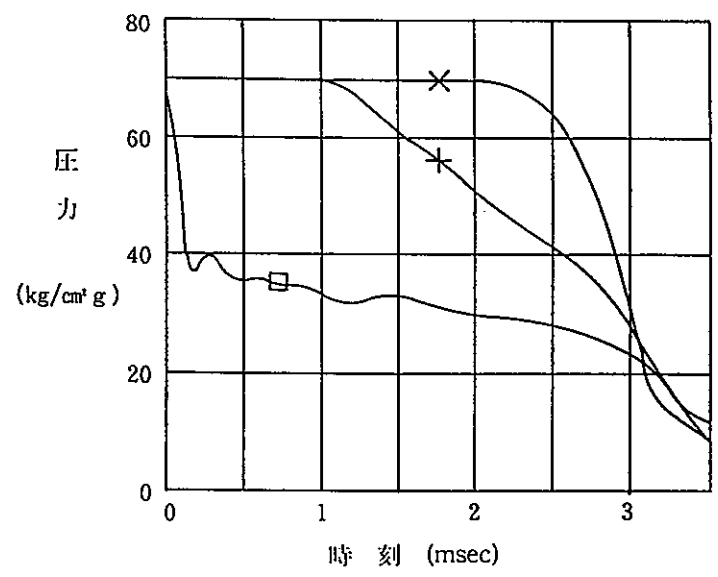
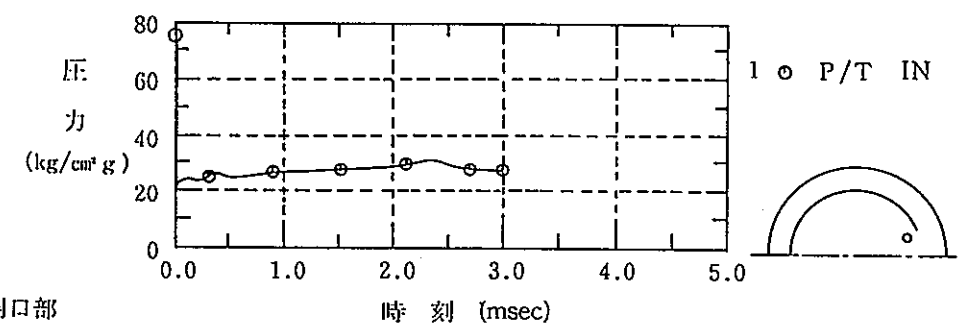
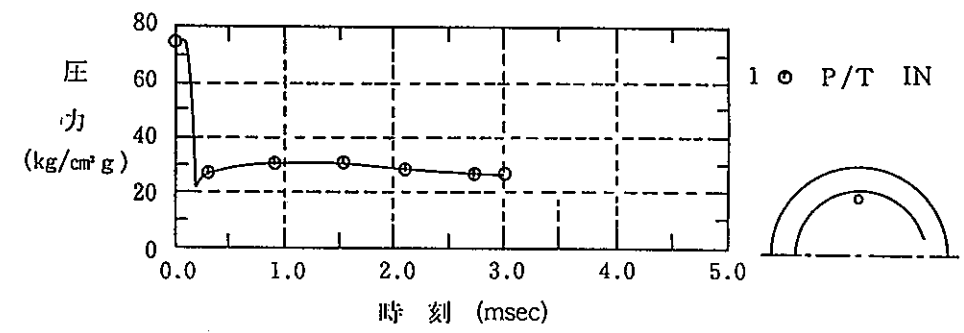
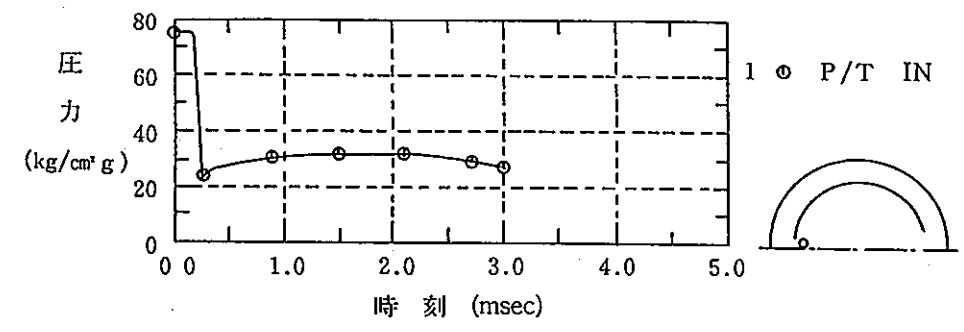


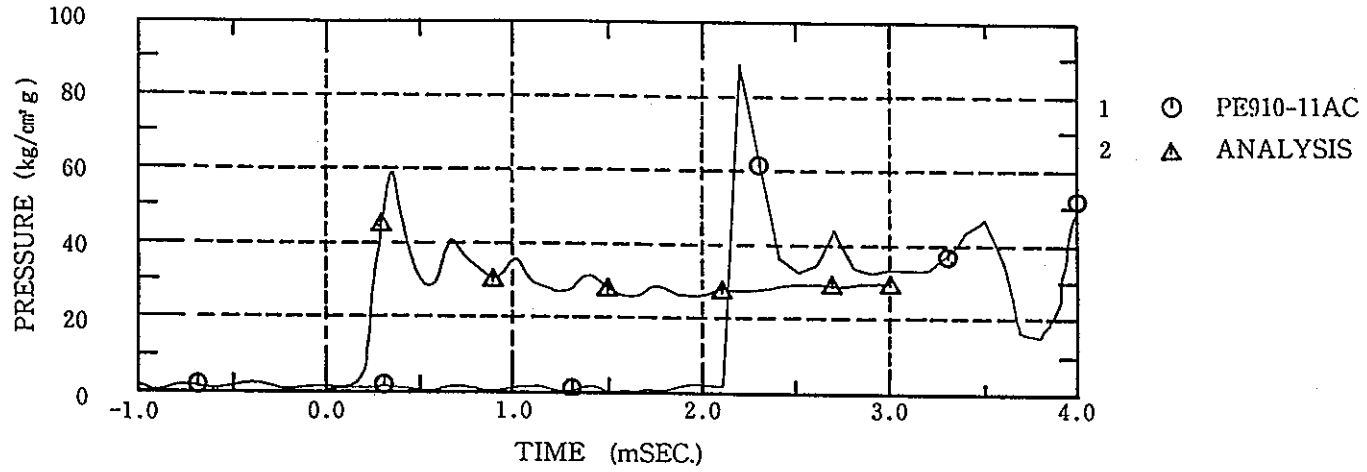
図4.1.5-3 圧力挙動に及ぼす燃料集合体の影響(K-FIX)



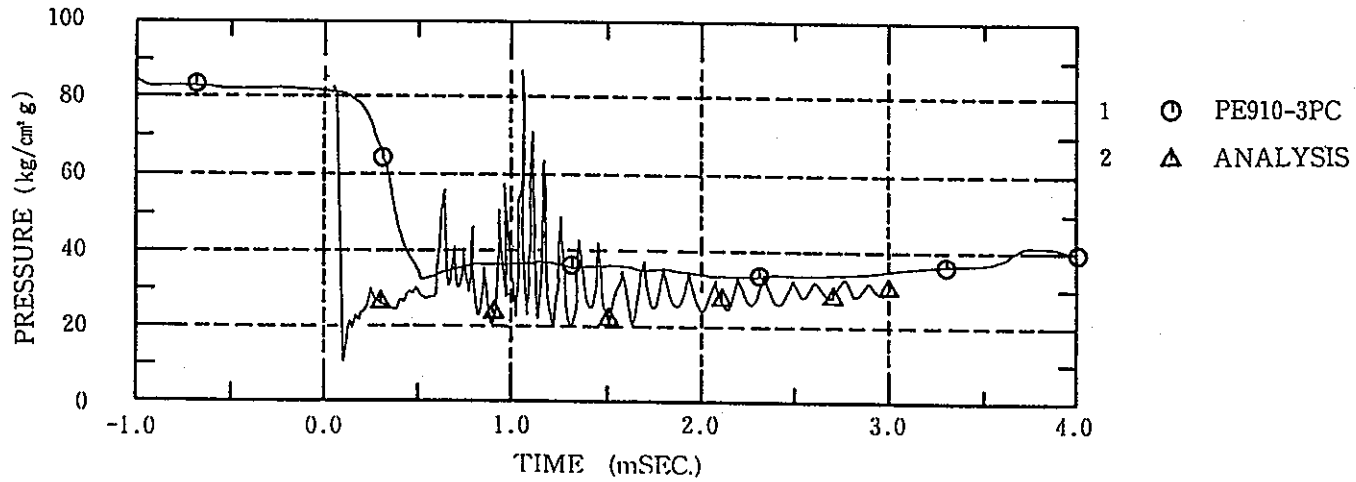
(a) 熱平衡モデルによる解析(初期圧力70kg/cm²g 飽和水)



(b) 熱非平衡モデルによる解析(初期圧力75kg/cm²g 飽和水)

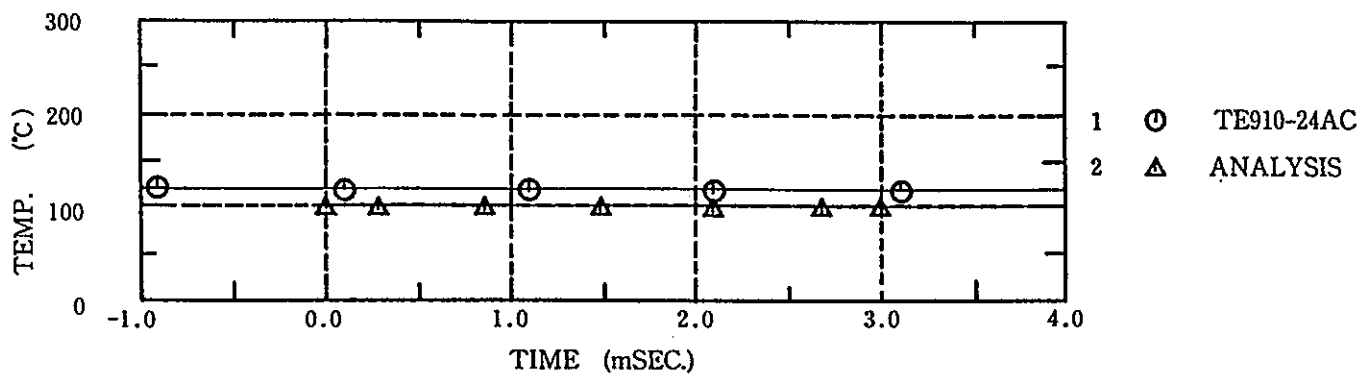


(b) 破断面に面するカランドリア管壁圧力

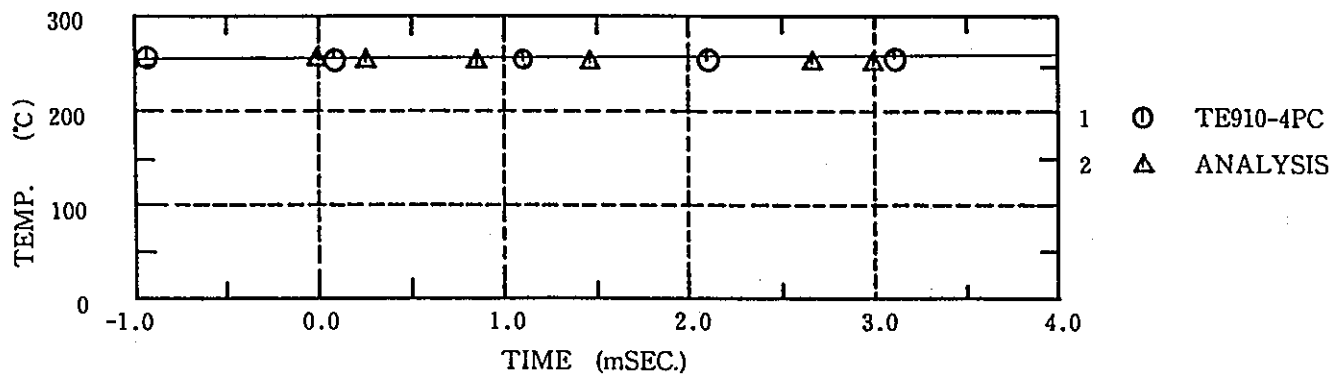


(a) 破断面より90°の位置における圧力管内圧力

図4.1.5-5 破断後の主要部圧力の試験と解析の比較



(b) 破断口に面するカランドリア管壁近傍冷却材温度



(a) 破断口より90°の位置における圧力管内温度

図4.1.5-6 破断後の主要部温度の試験と解析の比較

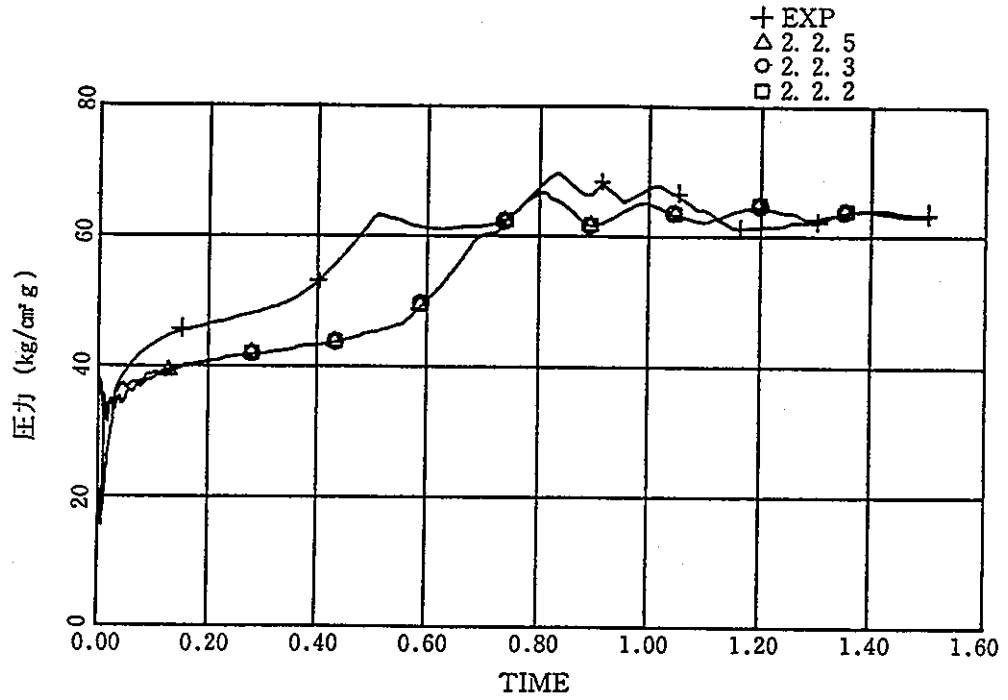


図4.1.5-7 アニユラス部圧力

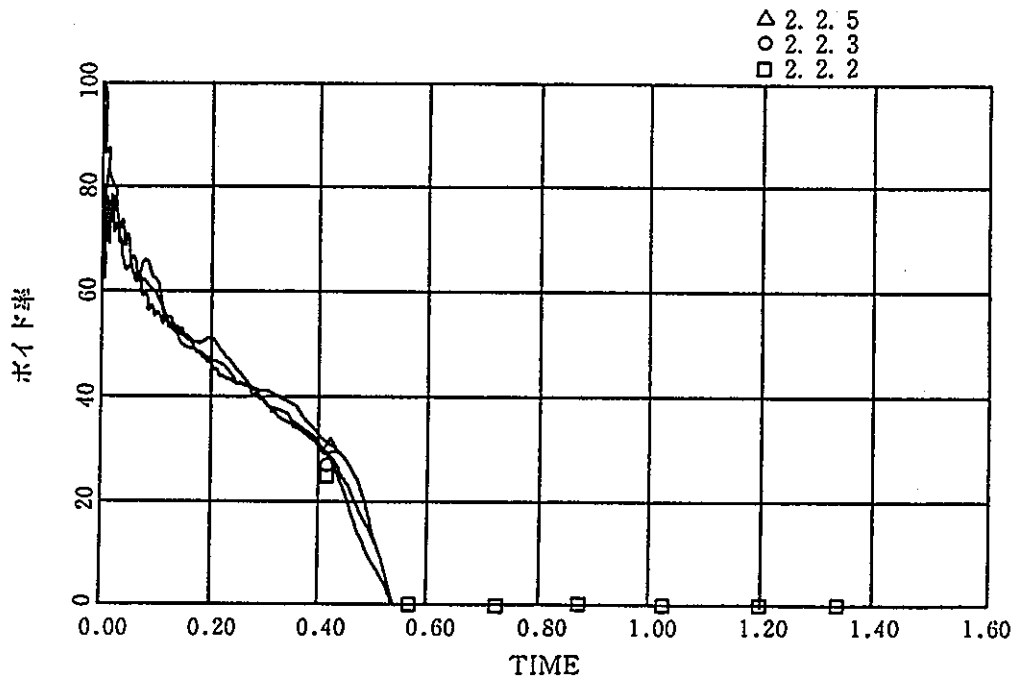


図4.1.5-8 アニユラス部 ボイド率

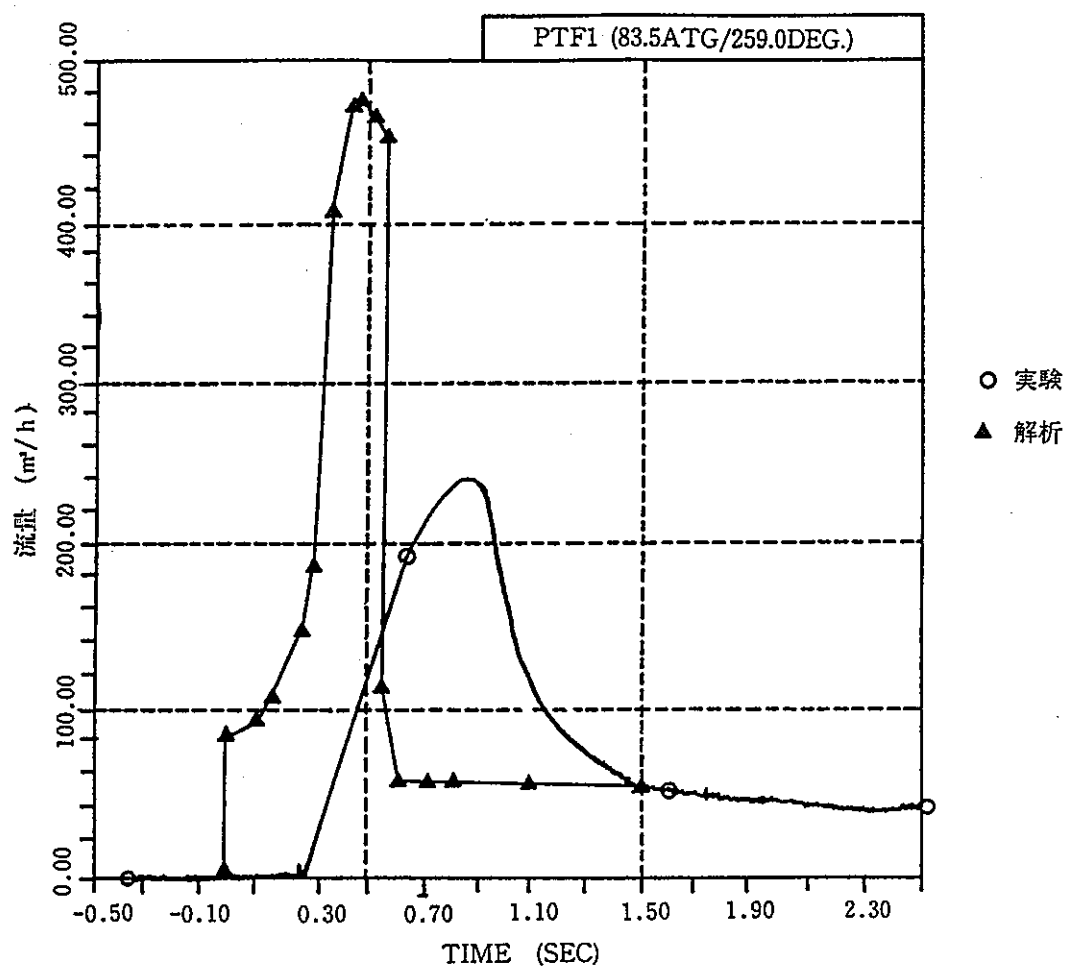
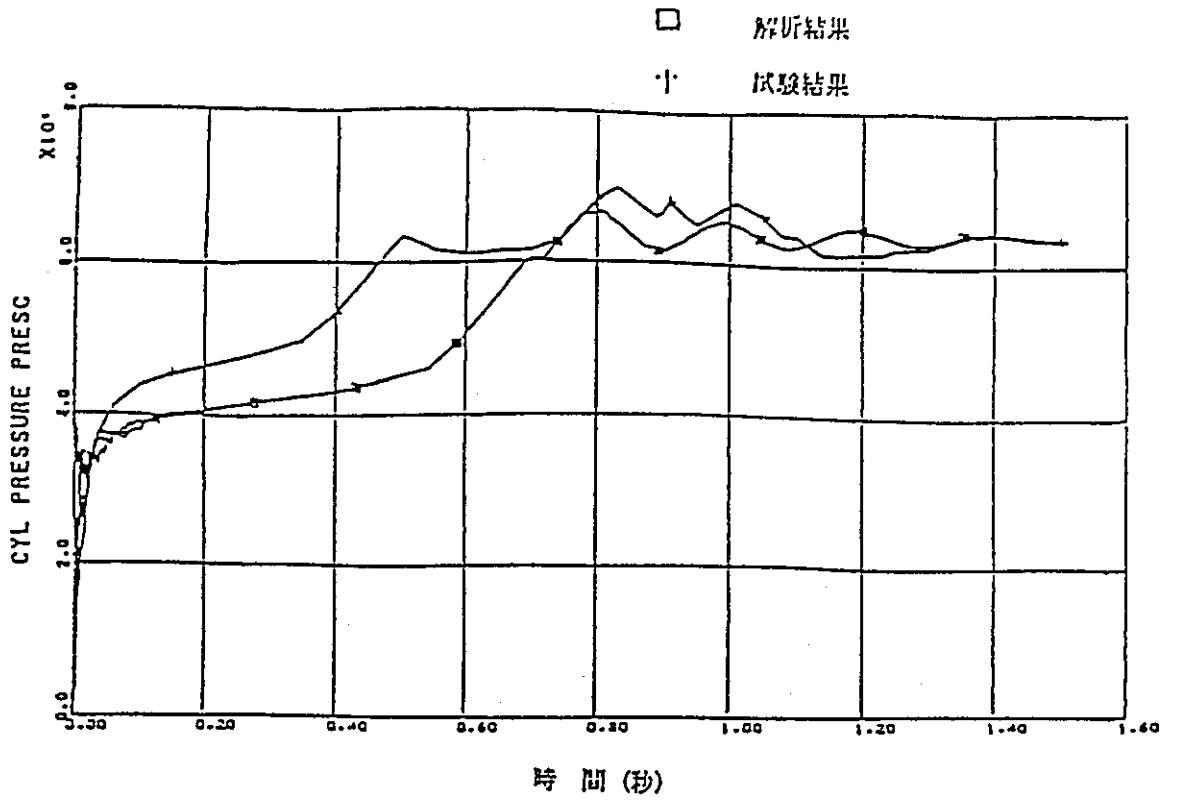
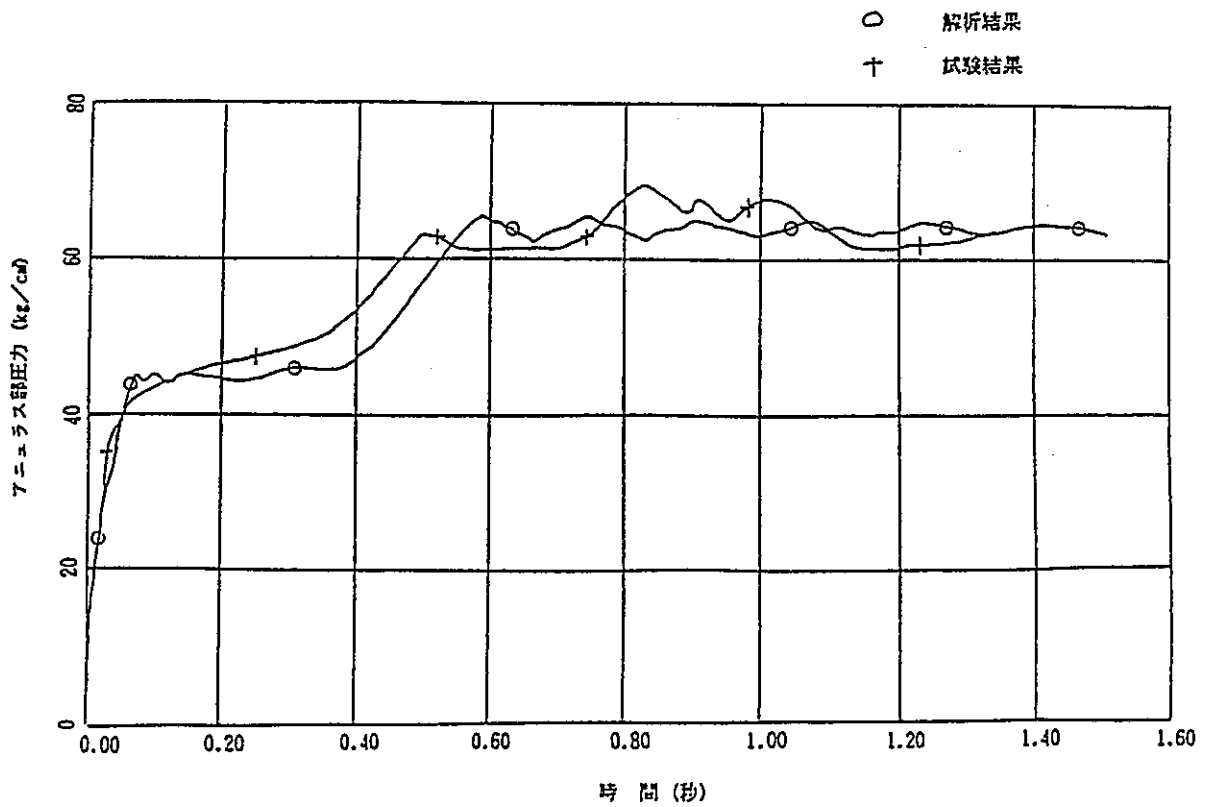


図4.1.5-9 流量計測位置での流量変化



通常の圧力損失係数を用いた解析



圧力損失係数を小さくした解析

図4.1.6-1 流動特性試験長期解析結果 (アニュラス部圧力変化)

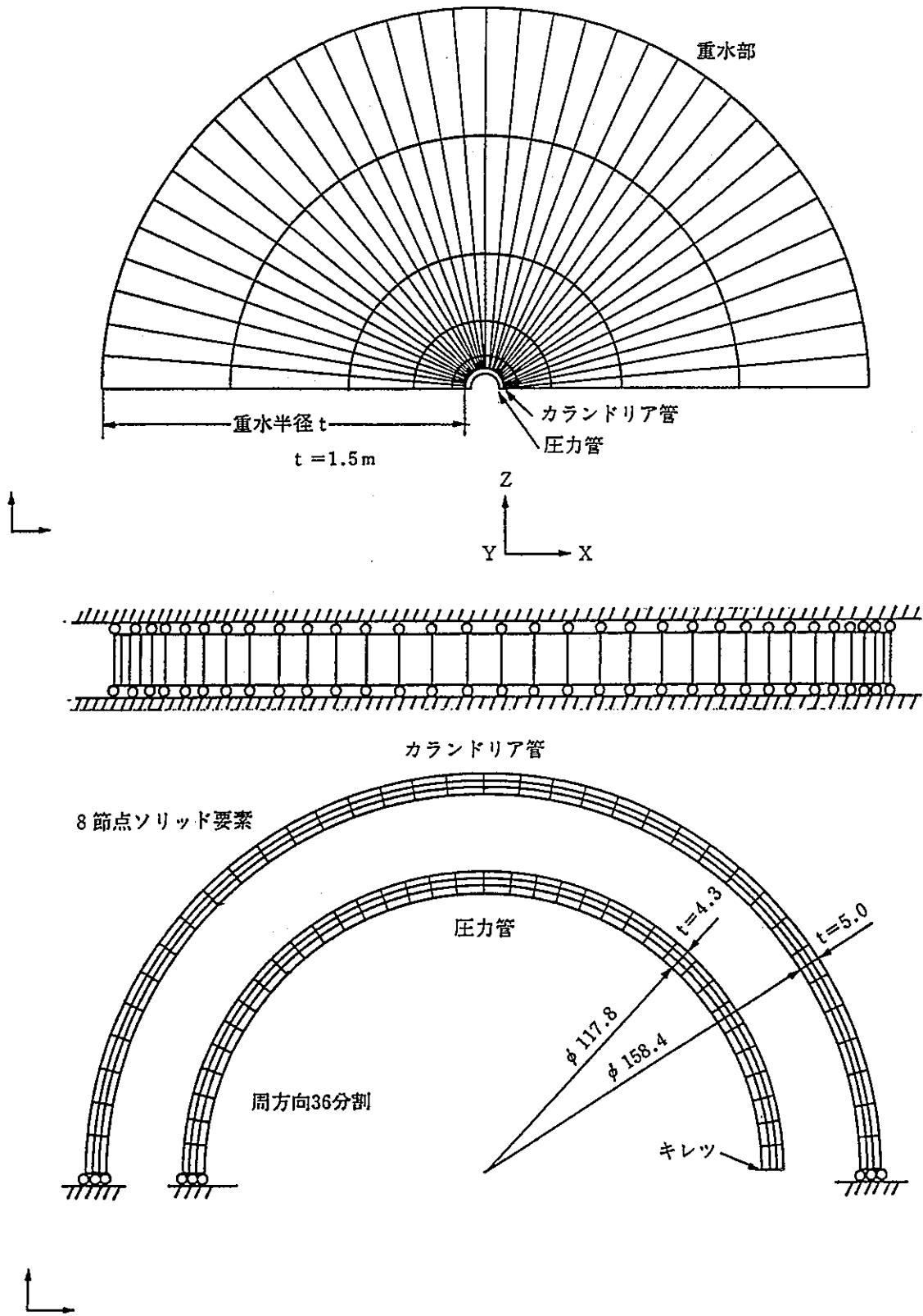


図4.2.3-1 解析モデル及び境界条件

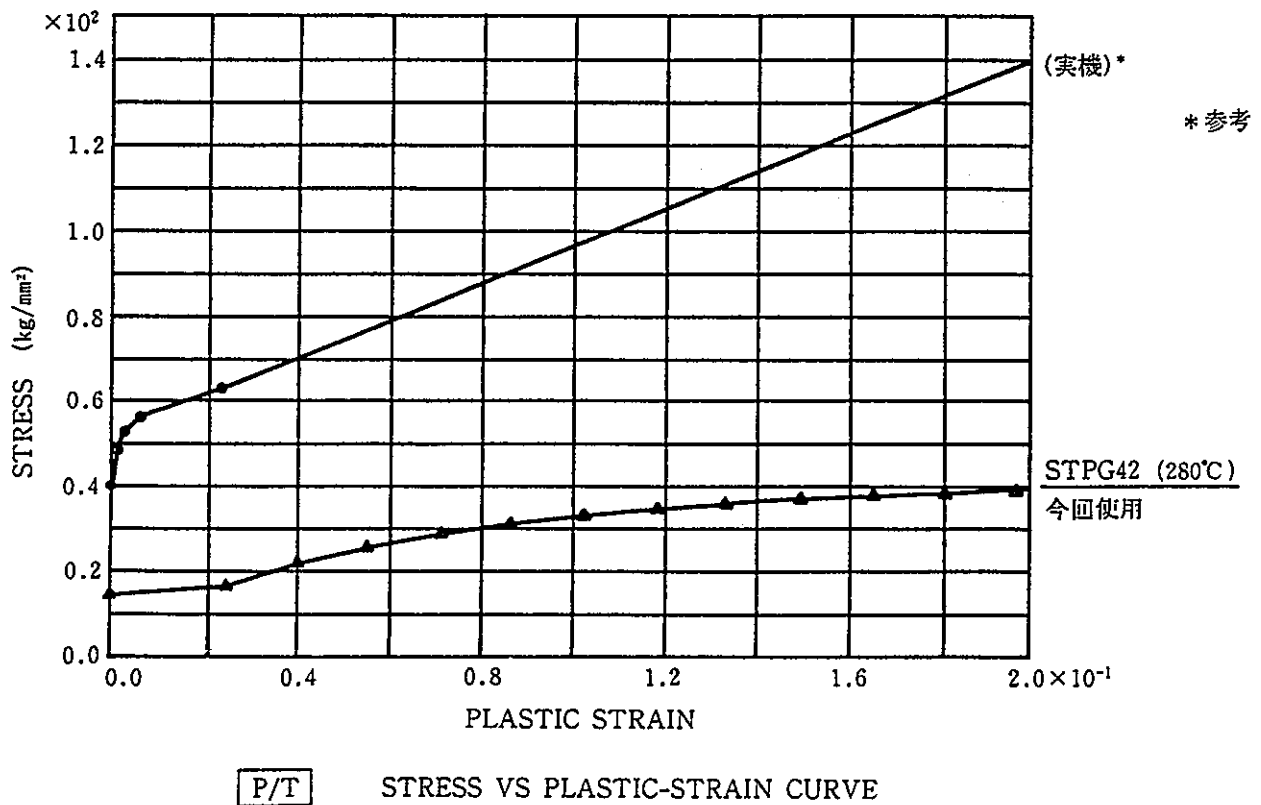
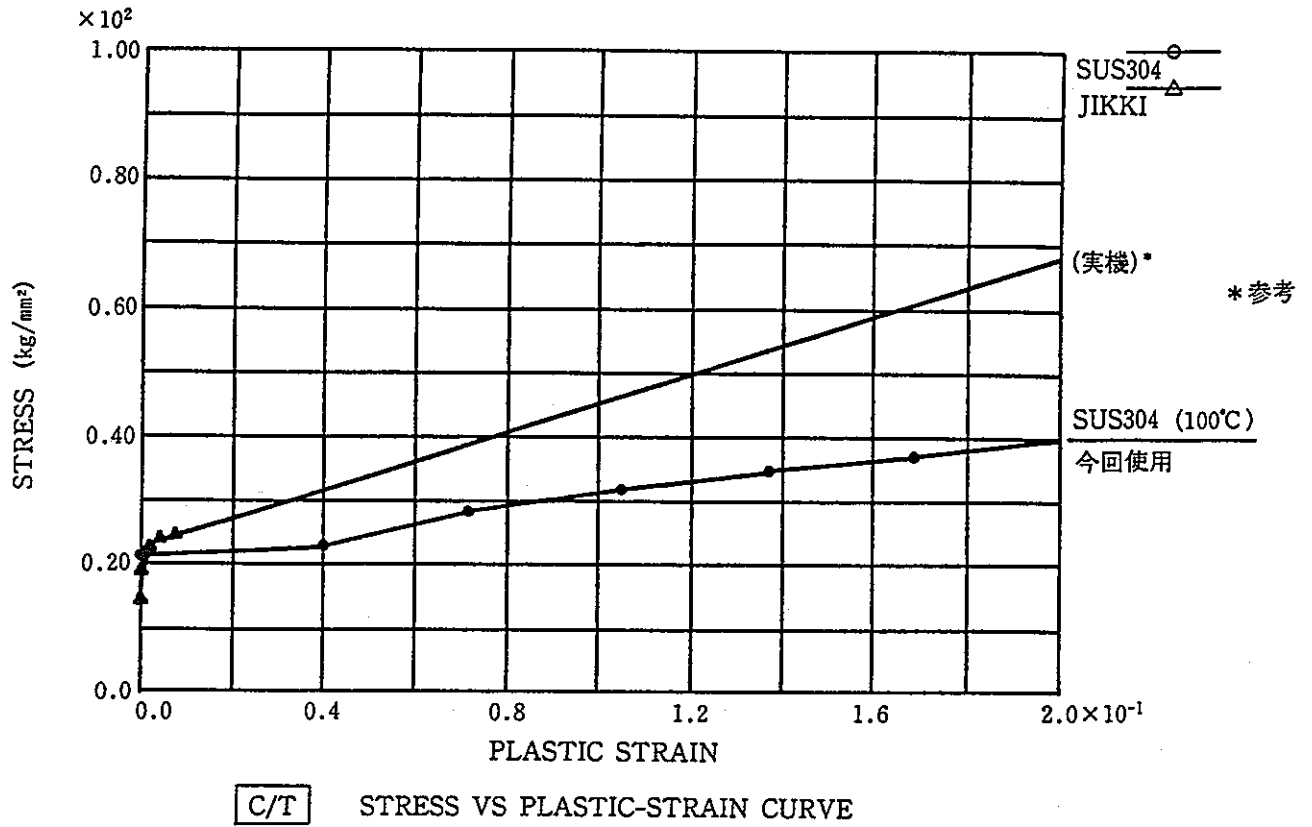


図4.2.3-2 応力～歪曲線

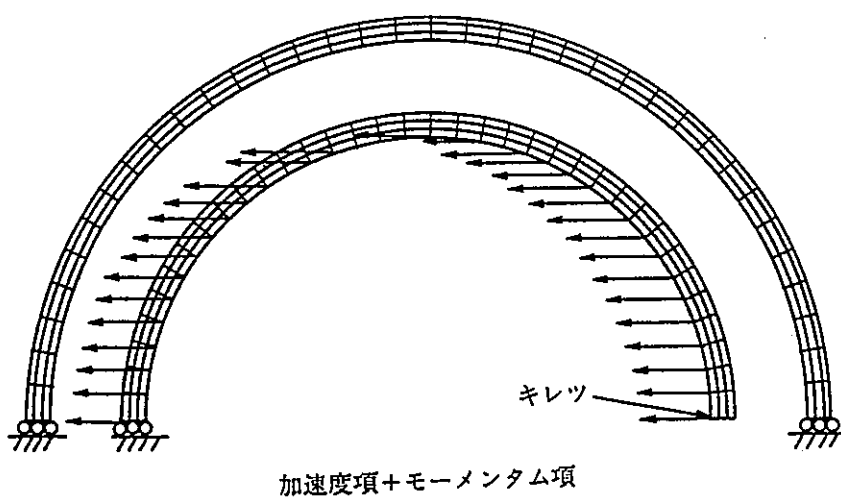
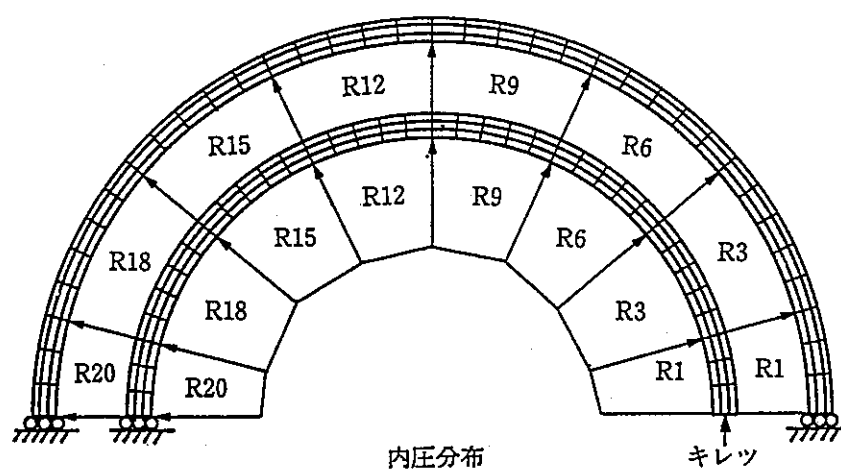


図4.2.3-3 境界負荷条件

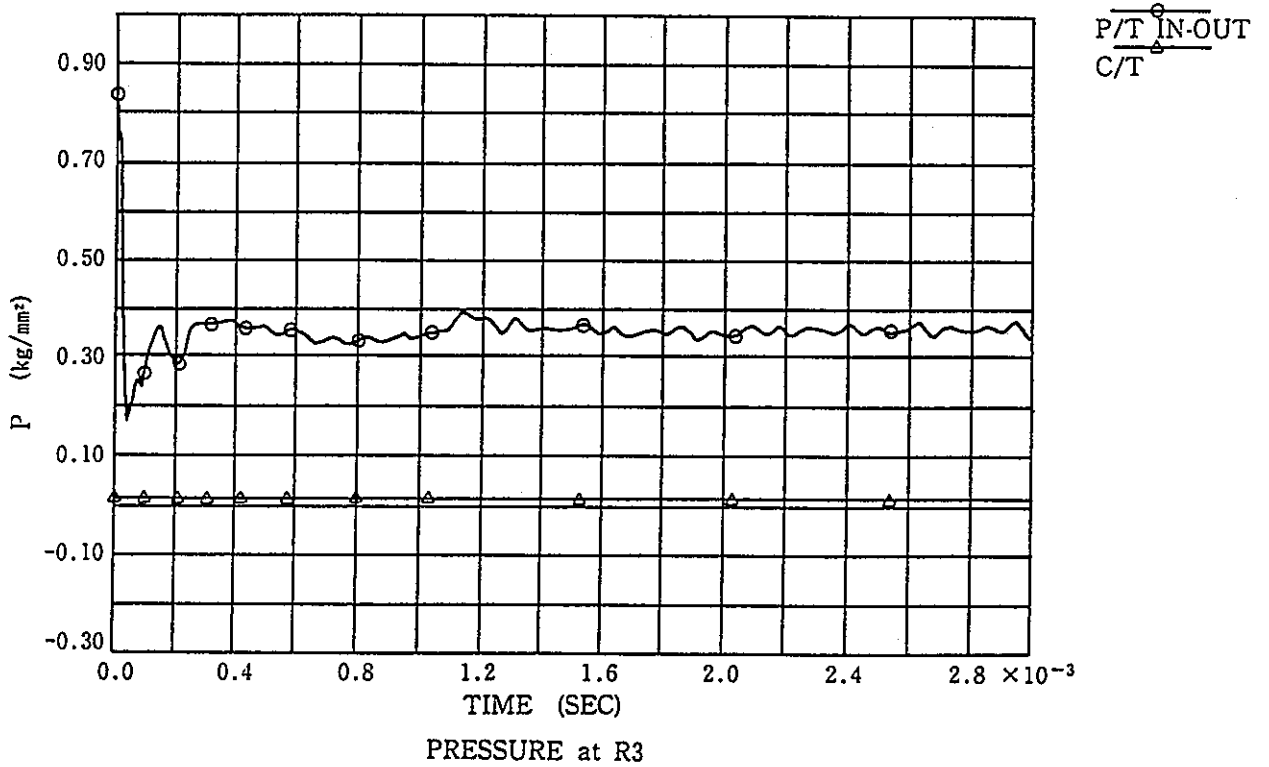
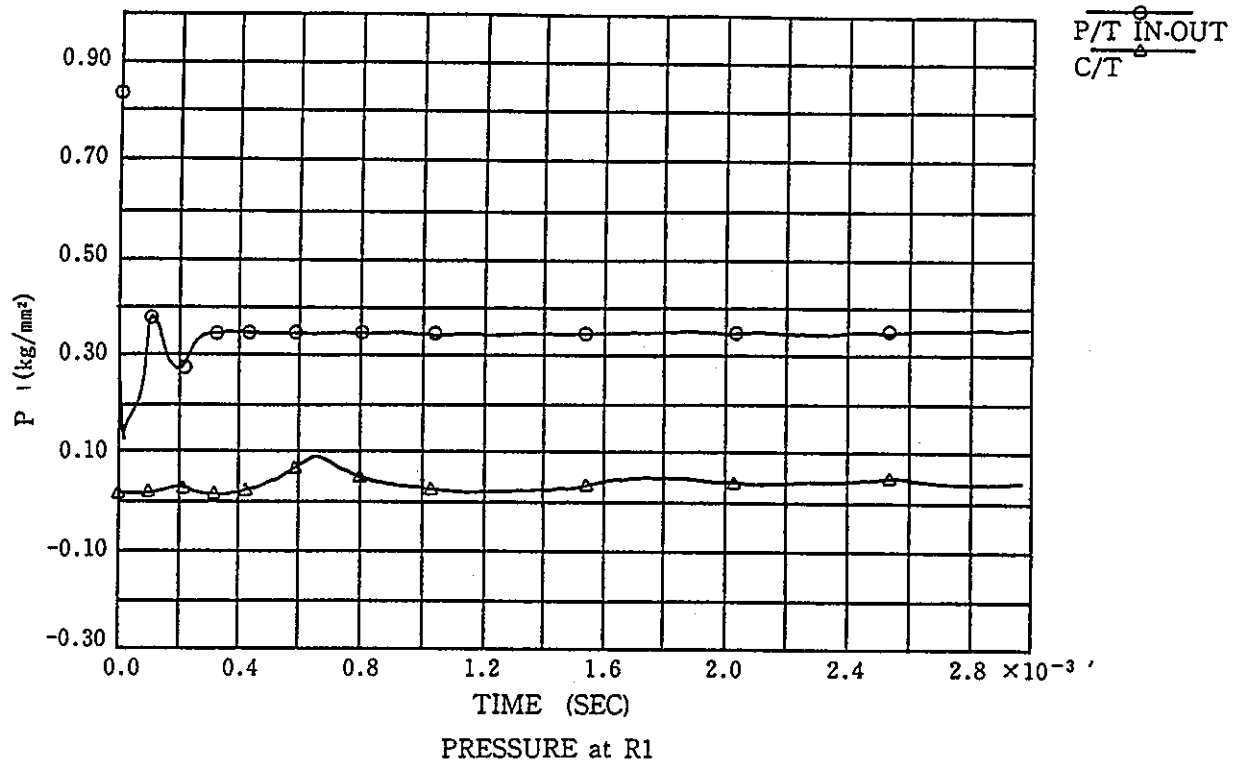
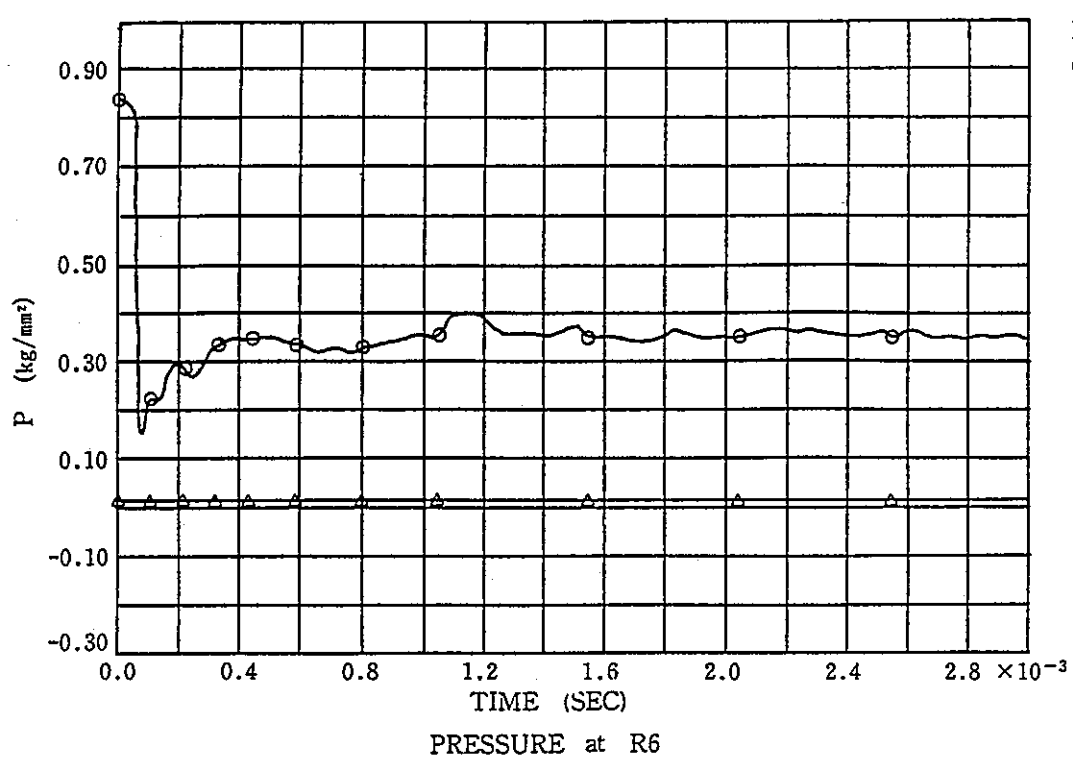
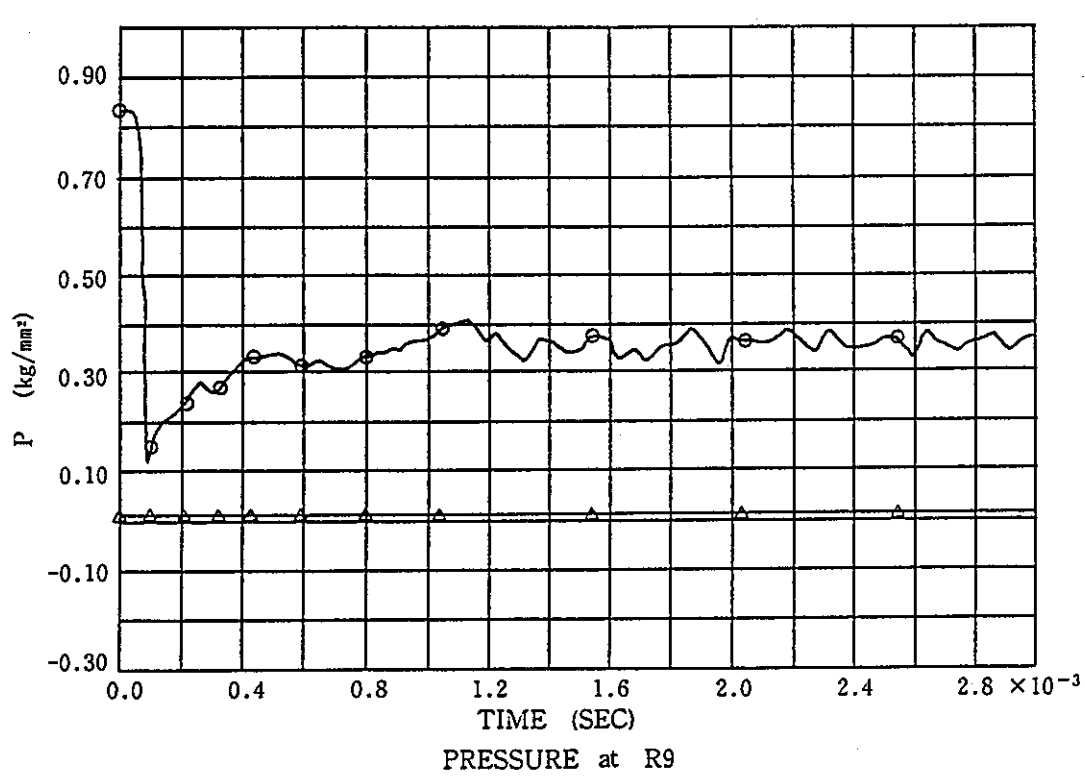


図4.2.3-4 負荷圧力 1/4



P/T IN-OUT
C/T



P/T IN-OUT
C/T

図4.2.3-4 負荷圧力2/4

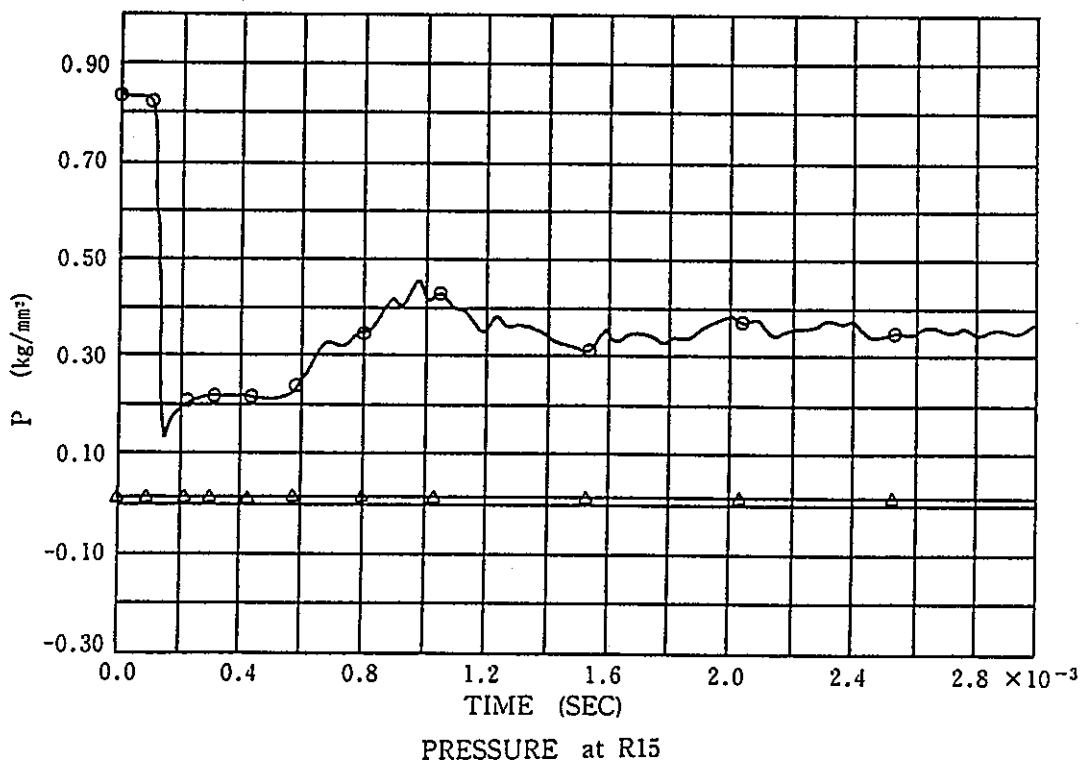
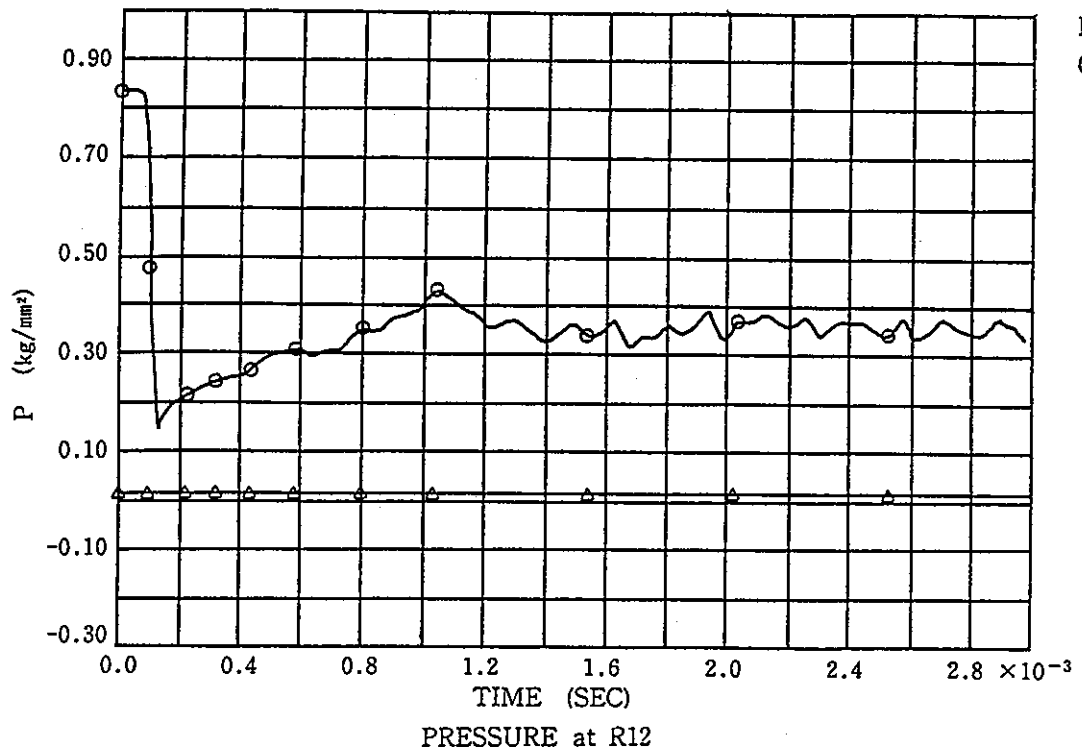


図4.2.3-4 負荷圧力3/4

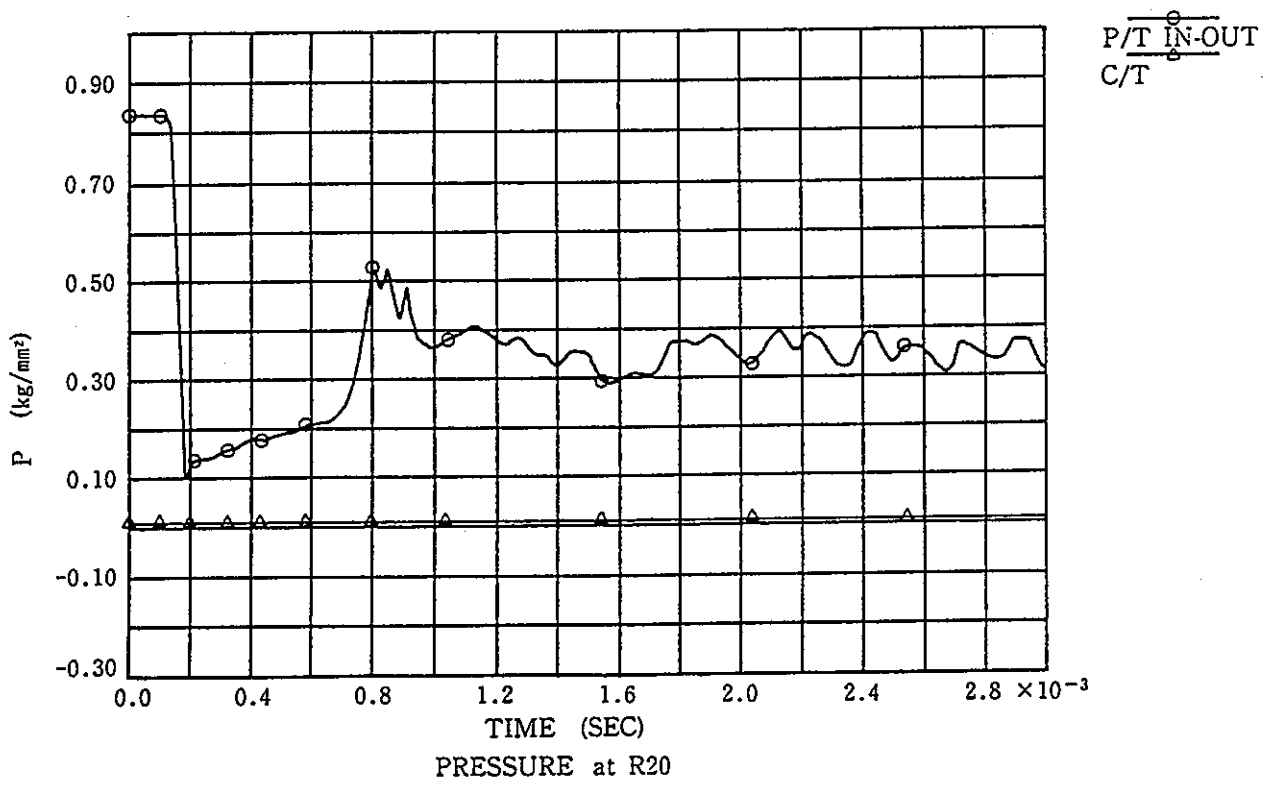
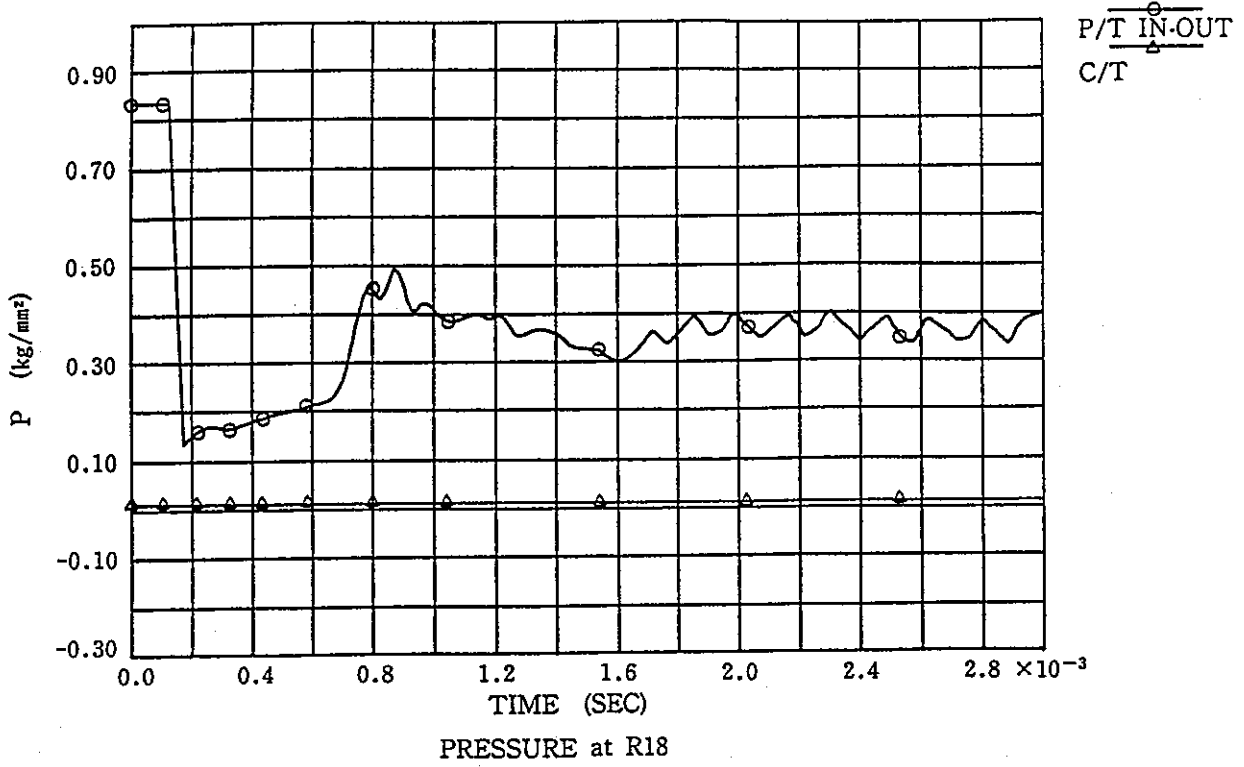


图4.2.3-4 负荷压力4/4

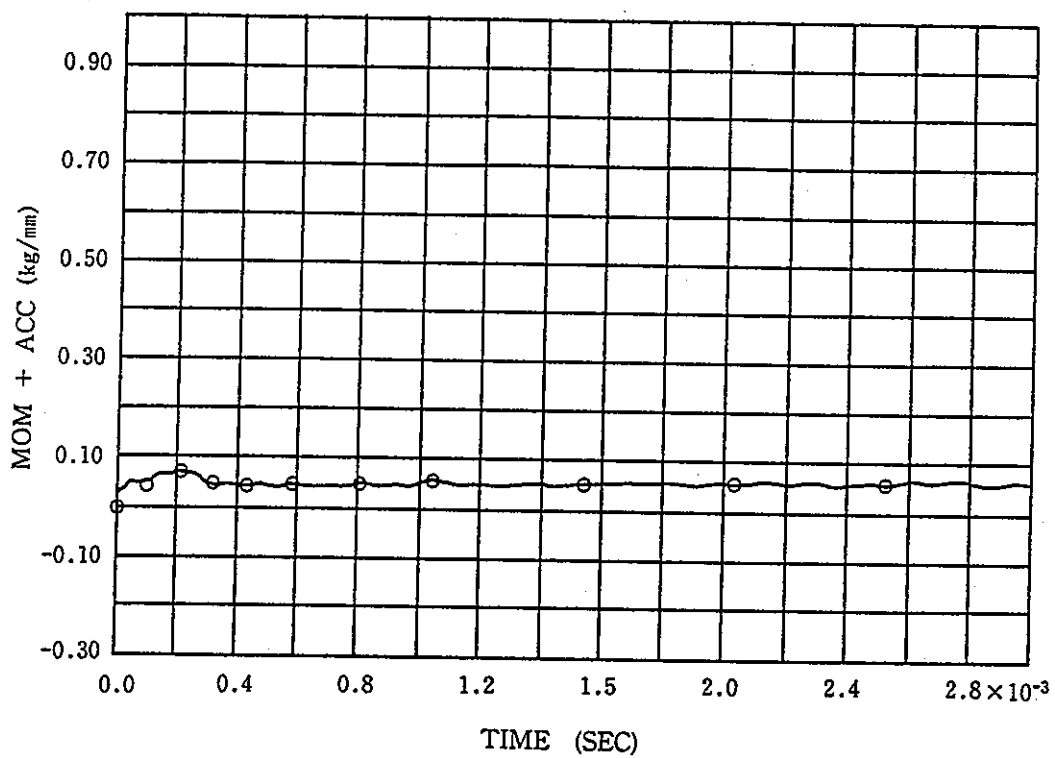


図4.2.3-5 負荷モーメント並びに加速度

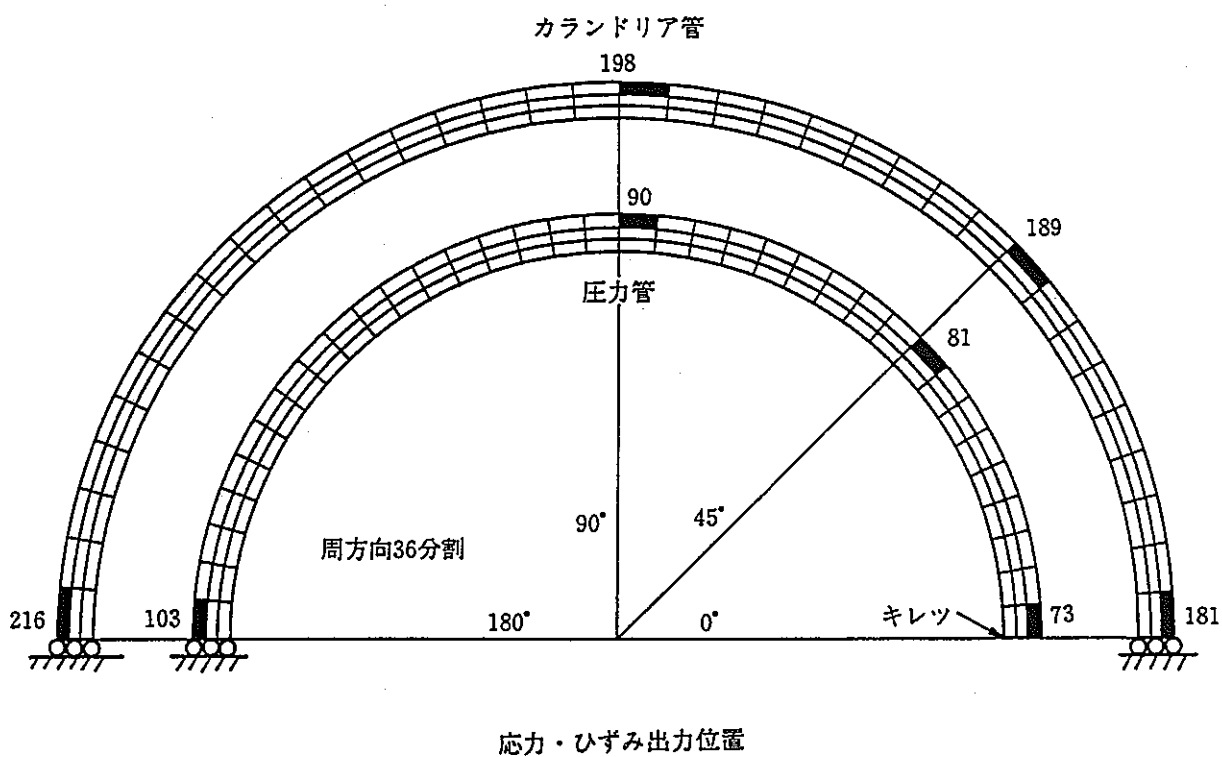
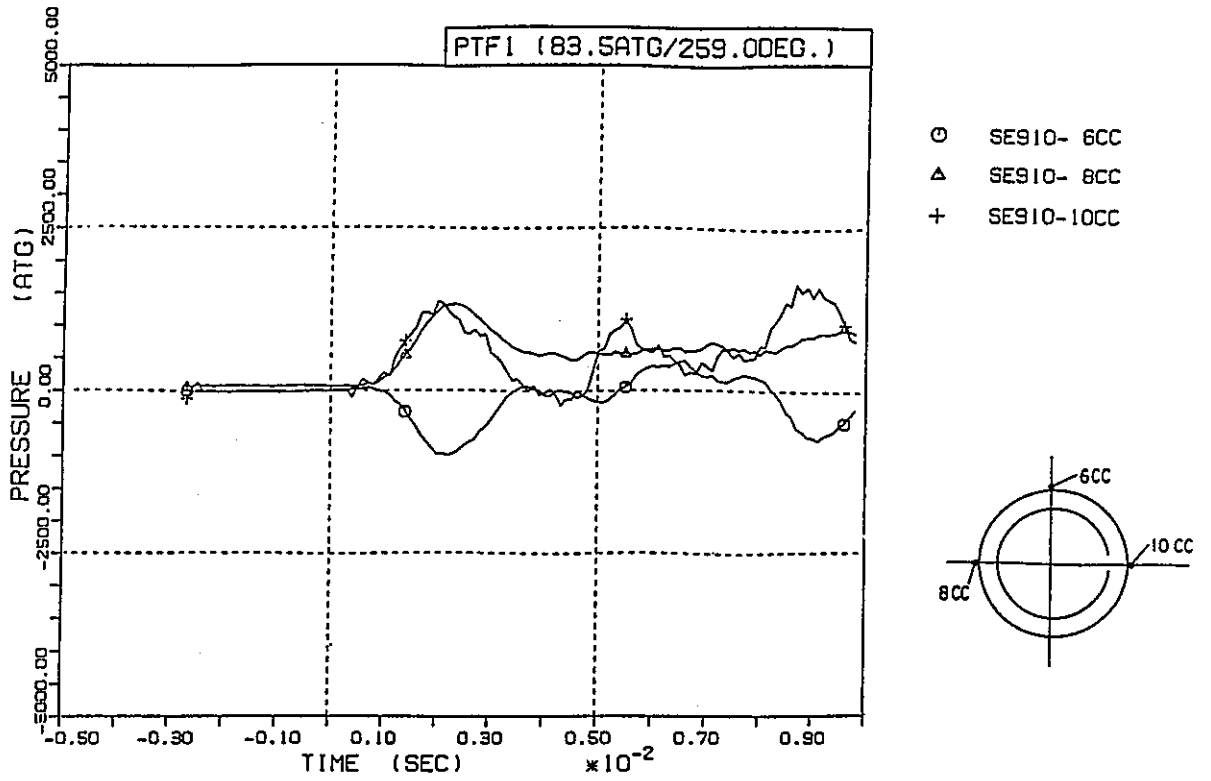
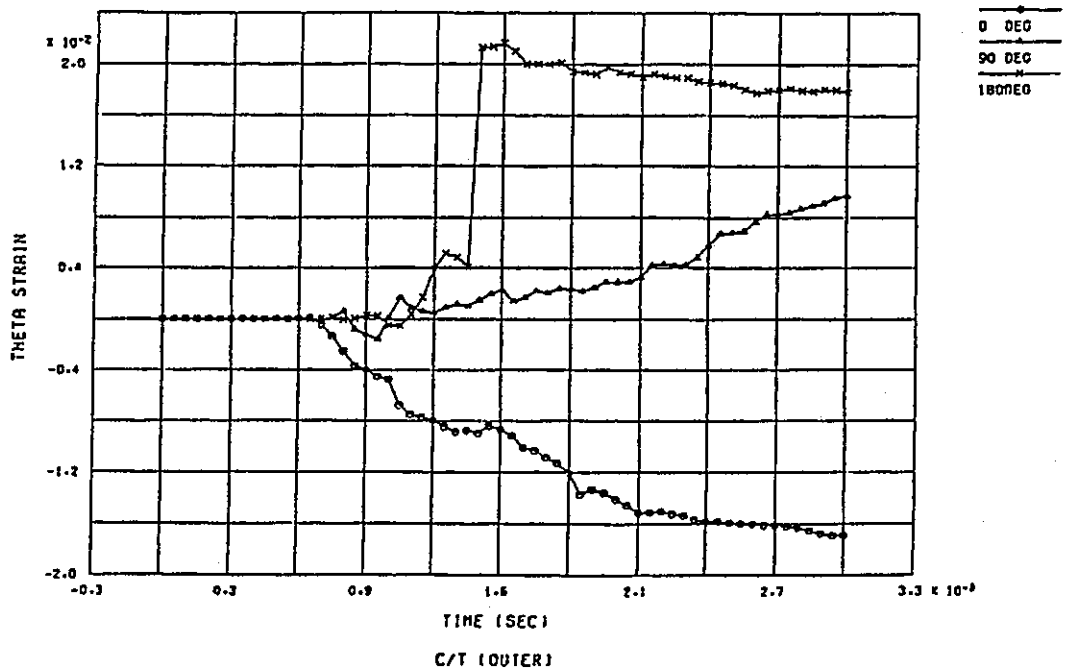


図4.2.4-1 歪値の比較対象位置



試験結果

FINRS



解析結果

図4.2.4-2 圧力管破断後のカランドリア管歪変化の試験と解析比較

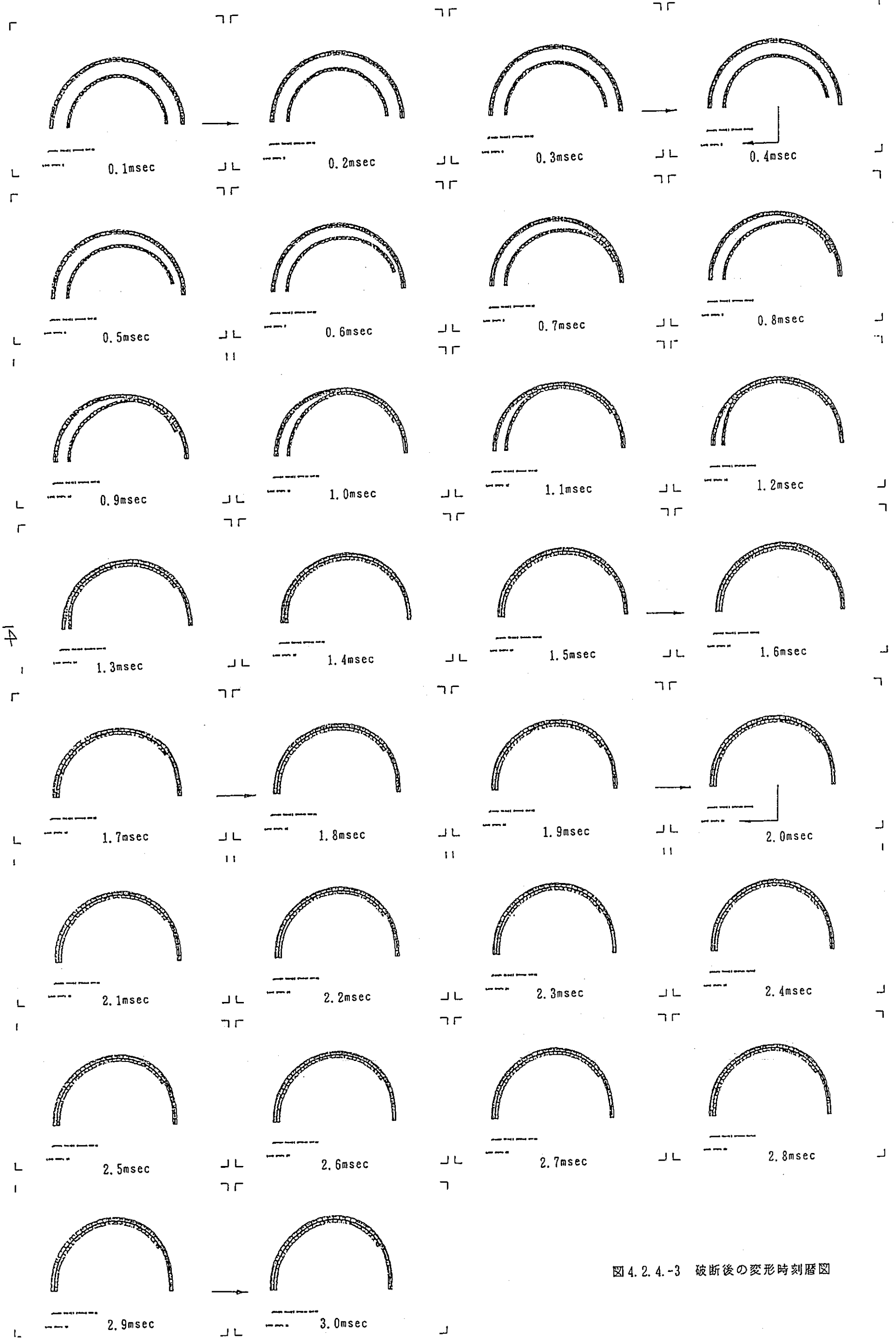


図4.2.4-3 破断後の変形時刻曆図

5. 圧力管破断時の燃料冷却性予備解析

5.1 はじめに

圧力管破断時には、カランドリア管が同時に破断する場合とカランドリア管が圧力バウンダリとして健全な場合の2つが考えられる。

本予備解析では、圧力管破断時にカランドリア管が圧力バウンダリとして健全な場合における、当該チャンネル内の燃料集合体の冷却性を評価することを目的とする。

そのため、昭和63年度は以下の解析を実施する。

・破断チャンネル流量解析

圧力管の破断口からカランドリア管の内側のアニユラス部への放出流量と圧力管径増大による圧力損失の低下などによる破断チャンネル内流量配分の変化を解析して破断チャンネル内で燃料冷却に寄与する冷却材流量を解析する。

出力分布解析

破断チャンネル内の冷却材流量とボイド率の変化、それに破断と共に生ずる圧力管径増大と燃料体偏心等を考慮して当該チャンネルのクラスタ内局所出力分布、軸方向出力分布などが通常状態からどのように変化するかを解析する。

・サブチャンネル解析

圧力管が破断して圧力管の径が増大したり、燃料体が偏心するなどした当該チャンネル内のサブチャンネル毎の質量速度、蒸気クオリティ及びボイド率分布等を解析的に求める。

・被覆管表面温度解析

サブチャンネル解析の結果を基に、ドライアウト発生箇所を求めるとともに、燃料棒間の輻射伝熱及び燃料被覆管のZr-水反応等を考慮して、ドライアウト後の被覆管表面最高温度(PCT)を解析する。

なお、これらの解析において、破断チャンネルの圧力管径や圧力管内での燃料体偏心量等定量的に確定するのが困難であるものについては、解析上のパラメータとする。

5.2 想定する圧力管破断事象

新型転換炉（ATR）の圧力管集合体は技術的には破断が起ることは考え難いので、設計上は破断を想定していない。そのため、ATRの安全評価では、圧力管破断事故を設計基準事象（DBE）としていない。しかし、圧力管がATR固有の機器であることに鑑み、ここでは圧力管破断を想定した場合の燃料冷却性への影響を評価する。現在、想定されている圧力管破断時の事象推移を図5.2-1に示す。ここでは、図5.2-1に示すシーケンスの内、カランドリア管が圧力バウンダリとして健全な場合の当該圧力管内の燃料冷却性について評価する。

圧力管の破断は軸方向スプリット破断とし、き裂がほぼ全長にわたって瞬時に伝播し、かつ、破断した圧力管は図5.2-2に示すようにカランドリア管に密着するものと想定する。カランドリア管や圧力管が破断後も直円であるか否か、また、圧力管の肉厚が破断前後で変化するか否か等の細部については明らかになっていない。このため、後で述べる解析では、圧力管の形状は破断後も直円が保持されたものとするモデルを採用し、破断後の圧力管内径をパラメータとする。また、破断口からの冷却材流出や圧力管内の冷却材流動の変化により、燃料体は圧力管内で横に移動し偏心することが考えられる。この場合の偏心量は定量的に把握できないため、燃料冷却性の評価は熱的に最も厳しくなる最大偏心まで想定して行うものとする。

ところで、図5.2-1に示す事象推移のうち破断後の圧力管の拡張（半径拡大）は数十msecで終息する。これに対し、燃料棒等の熱容量などの効果により被覆管の温度上昇は除々に進行し、PCTは破断後10秒以上経過してから生じる。そのため、本解析は、圧力管が破断した後の被覆管温度が最高になる準定常状態について解析を行う。

5.3 解析

5.3.1 破断チャンネル流量解析

破断チャンネルにおける、チャンネル内流動を計算し、サブチャンネル解析及び被覆管表面温度解析に引渡すための境界条件を得る。

5.3.1.1 解析コード

本事象においては、冷却材はアニュラス部上部及び下部のベローズ部及び炭酸ガスから放出されることを想定するため、放出量はチャンネル一本分の定格流量とほぼ等しくなり、破断の規模は中小破断の領域であると予想される。従って、LOTRACコードを用いて解析する。

5.3.1.2 解析体系

図5.3.1-1に解析体系のノード分割図を示す。放出が開始すると、流量のバランスがチャンネル間で変化し、放出量も変化するとも考えられるため、解析においては、この図に示すように炉心を出力が互いに異なる3チャンネルで代表させる。そして、この中の最も出力が高い、ホットテストチャンネルに破断を想定する。実機での破断は、軸方向のスプリットになると予想されているものの、コードの制約上から炉心流量を厳しく評価するためから、解析では圧力管下部に流路面積の2倍相当の破断口面積をもつスプリット破断が生じたことを仮定する。また、放出流量は図5.3.1-2に示すように、本来少しは燃料冷却に寄与すると考えられるアニュラス部を通り外気に放出される流量は、保守性の観点から全て炉心下部から大気に放出されるものとする。

5.3.1.3 解析モデル

本解析で最も重要になるのは、一次系内の流動であり、流動を解析するのに、基礎方程式と結合して使用する主要モデルを以下に示す。

- ・ 圧力損失係数及び管摩擦係数
- ・ 二相圧損増倍係数
- ・ ボイド～クオリティ相関式
- ・ 臨界流相関式

圧力損失係数、管摩擦係数、二相圧損増倍係数、ボイド・クオリティ相関式及び臨界流相関式は、実証炉設計で使用しているものと同一の式を使用する。

5.3.1.4 解析条件

既述の解析体系に則した主要な一次系の解析条件⁽¹⁾については、表5.3.1-1に示す値を用いている。

圧力管下部で破断が生ずると、冷却材は図5.3.1-2に示すような経路で大気に放出されるため、アニュラス部流路断面積、体積、圧力損失係数等が重要になり、これらについては以下のように決める。

(1) 破断条件

破断口は、放出量が最も多く、また、炉心冷却にとって厳しい炉心下部（炉心は一時的に逆流の流れで冷却される。）において圧力管集合体1体の完全両端破断の面積に相当するスプリット破断を想定する。破断直後には、入口管側からの上向流は下部遮蔽プラグで臨界となり、また炉心上方からの下向流（逆流）は、炉心部上部のタイプレートで臨界となる。破断面積を臨界部面積より少し大きくするため、下部遮蔽プラグ部の流路面積 $1.34 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ と炉心部の流路断面積 $4.79 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ の合計の $6.13 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ とする。

(2) アニュラス部流路条件

表 5.3.1-2 に CO₂ アニュラス部の流路条件をまとめる。図 5.3.1-2 にアニュラス部の放出径路を示す。

冷却材が格納容器内へ放出される際の CO₂ アニュラス部の破損想定位置と放出面積を次に示す。

	破損位置	放出面積	合計放出面積
上部	シール機構部ベローズ	$2.0 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$	$2.57 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$
	炭酸ガス配管	$0.57 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$	
下部	炭酸ガス配管	$0.4 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$	$0.4 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$
計			$2.97 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$

上で示されたようにアニュラス部からの放出面積は、 $2.97 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$ となる。

(3) 圧力管拡管条件

圧力管は破断と同時に拡管し、流路面積が増加するものとする。表 5.3.1-3 に拡管前後の流路条件（圧力管内径、流路断面積、水力等価直径、破断チャンネル初期流量）を示す。

(4) 鉄水スリーブ圧力損失係数

鉄水スリーブ部は流路が非常に複雑であり、圧力損失計算上は局所圧損係数を定義して用いる必要がある。図 5.3.1-3 に流路モデル化したものを示す。

(イ)~(ハ) の全圧損分は、

$$\Delta P = K \frac{G^2}{2grA_0^2} = \left(K_3 \left(\frac{A_0}{A_2} \right)^2 a^2 + K_6 \left(\frac{A_0}{A_6} \right)^2 (a+b)^2 + K_9 \left(\frac{A_0}{A_9} \right)^2 (a+b-c)^2 \right. \\ \left. + K_{14} \left(\frac{A_0}{A_{14}} \right)^2 (a+b-c+d)^2 + K_{17} \left(\frac{A_0}{A_{17}} \right)^2 + K_{19} \left(\frac{A_0}{A_{19}} \right)^2 \right) \frac{G^2}{2grA_0^2}$$

で表される。ここで、 A_i は流路の断面積を、 K_i は圧力損失係数を、 a 、

b、c、d は分岐部における流量割合を示す。

a は③と②の流路の圧損比から、b は⑦と⑤の流路の圧損比から求まる。

c、d も同様な考えで求めることができる。

$$a = 0.711 \quad a + b = 0.669 \quad a + b - c = 0.0789$$

$$a + b - c + d = 0.101$$

のようになる。また、

$$K_3 = \zeta_3 + \lambda_3 \frac{\ell_3}{D_3} = 2.459$$

($\zeta_3 = 1.0 + 0.5$: 出口部 + 入口部圧損係数⁽¹⁾)

$$K_6 = \zeta_6 + \lambda_6 \frac{\ell_6}{D_6} = 1.871$$

($\zeta_6 = 1.0 + 0.5$: 出口部 + 入口部圧損係数⁽¹⁾)

$$K_9 = \zeta_9 + \lambda_9 \frac{\ell_9}{D_9} = 2.277 \quad (\zeta_9 = 0)$$

$$K_{14} = \zeta_{14} + \lambda_{14} \frac{\ell_{14}}{D_{14}} = 6.806 \quad (\zeta_{14} = 0)$$

$$K_{17} = \zeta_{17} + \lambda_{17} \frac{\ell_{17}}{D_{17}} = 3.426 \quad (\zeta_{17} = 1.0)$$

のようになるため、全圧損係数Kは、1.8154と計算される。従って、計算では、 $K = 1.8$ を使用する。

ここで、 ζ : 局所圧損係数、 λ : 管摩擦係数、 ℓ : 流路長さ、 D : 等価直径を示す。

5.3.1.5 解析結果と考察

炉心下部でギロチン破断のスプリット破断、ギロチン破断相当が生じて、かつ圧力管がカランドリア管に接触するまで拡大した場合と拡大しない場合の両極端2ケースについて、解析で得られたチャンネル内流動挙動を図5.3.1-4～図5.3.1-9に示す。解析では、この他拡管径をパラメータとして5ケース計算した。両ケースは、ほぼ相似の挙動を示しているので、拡管が生じたケースを代表例にとり流動挙動の詳細をみてみよう。

破断が生じても、系の圧力、再循環流量などは図5.3.1-4に示すように破断の影響をほとんど受けない。破断チャンネルの流量、放出量などは、破

断後約2秒間は大きく変化するが、10秒以内で定常値に達している。アニュラス部の圧力も約2秒で1次系圧力とほぼ同一になり、アニュラス部の圧力挙動解析結果は、第3章の図3.1.7-3に示す圧力管破断試験結果とよく似ている。

このような流動解析を破断後の圧力管内径をパラメータに行い、得られた炉心流量と放出流量を整理して図5.3.1-10に示す。図から明らかなように放出流量は内径にほとんど依存していない。これは、何れの場合も図5.3.1-1に示した破断口からの放出が臨界流になっていることを意味している。なお、図5.3.1-10に示す解析結果から、2秒後の放出流量の値約9.5kg/sはA安で実施した圧力管破断試験で測定された流量10.2kg/sとほとんど同一である。一方、破断口下流側の炉心流量は圧力管が大きく拡張する程多くなる傾向を示している。これは、圧力管の拡大と共に圧力損失が減少してゆくためである。

以上の解析結果から、破断チャンネル内の燃料体の冷却に寄与する冷却材流量は、破断した圧力管の内径が大きい程増加し、破断後の圧力管内径が破断前と同一の117.8mmのままと想定した場合には5.13kg/s (18.5t/h)、破断後の圧力管がカランドリア管に密着するまで拡大したと想定した場合には、7.13kg/s (25.7t/h)となる。

5.3.2 出力分布解析

破断チャンネル内における、チャンネル内燃料の出力変化を計算し、サブチャンネル解析及び被覆管表面温度解析に引渡すための境界条件を得る。

5.3.2.1 解析コード

解析コードは、格子核計算コードWIMS-ATR、炉心解析コードLAYMON-2Aを使用する。

(1) WIMS-ATR

WIMS-ATRコードは、高速14群、共鳴13群、熱42群、計69群の基本ライブラリーを用い、2次元で任意のエネルギー群数で格子核計算を行い、単位セル内の出力分布を求め、更に格子燃焼計算を実施し、格子定数を作成するものである。

(2) LAYMON-2A

LAYMON-2Aコードは、WIMS-ATRコードで作成した格子平均核定数を入力データとして、炉心各チャンネルの熱水力特性を考慮して核熱結合計算を行い、炉心内の3次元出力分布を解析するものである。

5.3.2.2 解析体系

(1) 基準炉心・格子構造

実証炉炉心・燃料格子構造の基本的な構成は、昭和63年度設計⁽²⁾の値をとるものとし、設計方法に従った設定とする。

(2) 破断チャンネルの圧力管内径

2節で想定した圧力管破断事故時の破断圧力管の内径は、以下に示すように最大149.8mmとなる。

$$\begin{aligned}
 (\text{圧力管内径}) &= (\text{カランドリア管内径}) - (\text{圧力管肉厚}) \times 2 \\
 &= 158.4 \quad - \quad 4.3 \quad \times 2 \\
 &= 149.8 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

(3) 破断チャンネルの燃料体偏心量

圧力管破断事故時の燃料体の最大偏心量は以下の計算に示す通り16.5mmとする。

$$\begin{aligned} (\text{燃料体偏心量}) &= \{ (\text{圧力管内径}) - (\text{スペース外径最小値}) \} \times 1/2 \\ &= (149.8 - 116.8) \times 1/2 \\ &= 16.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

5.3.2.3 解析モデル

(1) 出力分布解析

① 燃料クラスタ内の局所出力分布

燃料体の偏心時のクラスタ内解析では、燃料体の軸方向一様な偏心を模擬し、他の条件は、周方向均一ボイドのモデルで解析し、偏心無しとの差分を計算するものとする。

② チャンネル出力分布及び軸方向出力分布

チャンネル出力の解析では、従来の設計での定数作成モデルと同様とし、圧力管内径拡大と燃料体偏心の効果のみを核定数の形で反映し、偏心無しとの差分を計算するものとする。

5.3.2.4 解析条件

(1) 形状寸法

燃料クラスタ形状寸法は、実機と同一とし、圧力管破断前後でも不変とする。従って、圧力管内径だけを破断前後で軸方向一様に変化させる。

スペーサ配置についても実機と同一とする。また、通常運転時の値については昭和63年度設計計算値⁽²⁾を用いる。

(2) 破断チャンネルのクラスタ内局所出力分布

解析条件は、炉心のMCP R計算値が最も厳しい取替炉心平衡サイクルBOCとし、燃焼度、¹⁰B濃度、ボイド率、燃料体偏心量等を表5.3.2-1のものとする。

(3) 破断チャンネルのチャンネル出力及び軸方向出力分布

解析条件は、破断チャンネル流量⁽³⁾、対象炉心状態、当該チャンネル燃焼度、ボイド率等を表5.3.2-2、5.3.2-3のものとする。

5.3.2.5 解析結果と考察

(1) 破断チャンネルのクラスタ内局所出力分布変化

WIMS-ATRにより平衡炉心BOCのMCPR発生点（内側領域上部燃料）の集合体局所出力分布を算出し、燃料棒各層での周方向局所出力の最大値を表5.3.2-4に示す。また、圧力管破断の結果、拡張、偏心した時の局所出力分布を図5.3.2-1に示す。

軽水冷却圧力管型重水炉では、燃料集合体の外側の重水減速材領域から熱中性子が主に供給される。圧力管の拡張により、燃料の外側の冷却材領域が増え、これによる吸収が増加する。更にボイド率の若干の低下によっても燃料集合体のシールド効果が増大する。このため、外層燃料棒の出力割合が増加し、逆に内層燃料棒の出力割合が低下する。また、偏心方向の燃料棒は、中性子束が高い領域に移動するため、反応率が増加することにより局所出力の増加が著しい。一方、偏心方向と反対側の燃料棒は逆に中性子束の低い領域に移動するため出力は低下する。以上の効果が総合した結果、出力分布は、圧力管に近い側が極めて高くなるような偏った分布となる。

(2) 破断チャンネルのチャンネル出力及び軸方向出力分布の変化

破断による圧力管の拡張、燃料の偏心により格子状態が変化し、チャンネル出力が変わることが予想される。この効果をみるため破断チャンネルの格子平均核定数を算出し、これから炉心計算のためのLAYMON B定数を修正し、炉心解析を行った。本検討では、簡単のためB定数の修正を M^2 、 k_{∞} 、 Σ_f に限定したが、特にボイドによる影響を見るため、軸方向ノードのすべてにわたって核定数を補正した。具体的には、所定の ^{10}B 濃度（平衡炉心BOC条件）で、燃料タイプ別に核定数をボイド率、燃焼度についてフィッティングすることによって求め、炉心計算に使用した。

核定数のフィッティングのみならず破断による冷却材のプロセス量の変化を反映させるため、破断チャンネルで 26.1t/hとなるよう入力を変更し、通常計算と圧力管破断時のチャンネル出力の変化を算出した。

表 5.3.2 - 5 に圧力管破断時の径方向出力ピーキング (RPF) の変化を示す。ここでは、炉心の全出力がほとんど変化していないので、径方向ピーキングの変化がそのままチャンネル出力の変化を表す。また、図 5.3.2 - 2 に軸方向の出力分布の変化を示す。

これによると破断チャンネルの圧力管が拡張したことによりチャンネル出力は～4%低下するが、燃料体の偏心により～10%増加することになる。

通常状態に比べ、圧力管の拡張のみを想定すると破断チャンネルの圧力管内の軽水層が増えるため、中性子吸収が大きくなり、破断チャンネルのチャンネル出力が減少する。この効果は特にボイド率の低い冷却材入口側で顕著である。

一方、偏心時には、(1)で前述したように、中性子束の高い箇所に燃料棒が移動し、出力を増加させる効果が大きく通常時より出力の増加が見られる。これは、炉心解析では、チャンネル出力の計算に支配的な巨視的核分裂断面積が拡張・偏心によるスペクトルの軟化・形状効果等の影響を受けて大きくなるため、LAYMONの計算値がチャンネル出力の増大を示すようになるものと考えられる。しかし、ボイド率が高くなると局所出力分布は全体に平均化されるため、これらの影響が少なくなり出力増加の割合が少ない。

以上の解析結果から、圧力管内径や燃料体偏心量をパラメータとしたサブチャンネル解析及びPCT解析では、内径や偏心量の如何にかかわらず全てのケースにおいて、熱的に最も厳しいと予想される圧力管が最大拡張し燃料体が最大偏心した場合の出力分布を使用し、保守的な出力条件とする。

5.3.3 サブチャンネル解析

5.3.1、5.3.2 で得られた破断チャンネル流量及び出力分布解析結果を基に、破断チャンネル内の燃料冷却性について解析する。

5.3.3.1 解析コード

サブチャンネル解析とPCT解析には、サブチャンネル解析コードCOBRA-ATRを使用する。COBRA-ATRコードは、サブチャンネル間の冷却材の流量配分を考慮して、各サブチャンネルの質量速度、蒸気クオリティ及びボイド率等を計算すると共に、これらのサブチャンネル状態量に基づいて、燃料棒のドライアウト発生や被覆管表面温度が解析できるものである。

5.3.3.2 解析体系

圧力管の破断状態としては、軸方向スプリット破断を想定する。そして、破断に伴い、当該チャンネルでは、図5.2-2に示すように圧力管の内径のみがノミナル値（117.8mm）から最大値（149.8mm）までの範囲で軸方向に一様に変化するものとする。

① 形状寸法

燃料クラスタ形状は、図5.3.3-1に示すように昭和63年度ATR実証炉炉心設計と同一とし、破断しても変形しないものとする。

② スペーサ配置

スペーサ配置は、図5.3.3-2に示すように、昭和63年度ATR実証炉炉心設計と同一とする。

③ 圧力管内径及び燃料体偏心量

2節で述べた想定する圧力管破断事故時の様相から、破断した圧力管の内径は、以下に示すように最大拡張時には149.8mmと推定した。

$$\begin{aligned}
 (\text{圧力管内径}) &= (\text{カランドリア管内径}) - (\text{圧力管肉厚}) \times 2 \\
 &= 158.4 \quad - \quad 4.3 \quad \times 2 \\
 &= 149.8\text{mm}
 \end{aligned}$$

また、この時の圧力管内での燃料体の最大偏心量は以下に示す通り16.5mmとした。

$$\begin{aligned}
 (\text{燃料体偏心量}) &= \{ (\text{圧力管内径}) - (\text{スペーサ外径最小値}) \} \times 1/2 \\
 &= (149.8 - 116.8) \times 1/2 \\
 &= 16.5\text{mm}
 \end{aligned}$$

破断後の圧力管の径が実際にいくらになるか現時点では確定できないため、破断後の圧力管内径についてはパラメータとし、117.8mmから149.8mmの間において5点を選択して解析する。この時の燃料体偏心量は各圧力管内径で最大偏心を想定し、以下に圧力管内径と燃料体偏心量の関係を示す。

圧力管内径(mm)	117.8 (ノミナル値)	125.0	130.0	135.0	140.0	145.0	149.8 (最大値)
燃料体偏心量(mm)	0.5	4.1	6.6	9.1	11.6	14.1	16.5

更に、上述の圧力管内径のうち最も熱的に厳しいと予想される最大拡張時においては、燃料体偏心量を偏心無しから最大偏心までの間において4点を選択して解析する。

5.3.3.3 解析モデル

(1) サブチャンネル分割

解析で用いた圧力管破断前後のサブチャンネル分割を図5.3.3-3に示す。図5.3.3-3(2)に示すように、圧力管の拡張時には周辺サブチャンネルを2分割したモデルを使用する。また、軸方向のノード分割を図5.3.3-4に示すように、1ノード100mmとし全長を40に等分割とする。燃料体の偏心量は全長にわたって模擬し、偏心量は、スペーサセンタリングバネの中間方向が最も最大となるので、ここではこの方向を偏心方向とし、具体的には270°方向とする。

(2) 各種相関式

燃料体の伝熱特性を表すボイド・クオリティ相関式⁽⁴⁾、圧力損失係数⁽⁵⁾、管摩擦損失係数⁽⁵⁾、二相流増倍係数⁽⁵⁾は、実証炉設計に使用されているものと同じの式を使用する。サブチャンネル限界熱流束（CHF）相関式は、動燃で開発された以下の式を使用する。⁽⁶⁾

$$q_c = q_{st} \cdot f_p \cdot f_{sub} \cdot f_{sp} \cdot f_a$$

$$q_{st} = a_1 + a_2 \cdot X_{sub} + a_3 \cdot X_{sub}^2$$

ここで、

q_c ; 限界熱流束 ($\times 10^6 \text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

q_{st} ; 標準の限界熱流束 ($\times 10^6 \text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

X_{sub} ; サブチャンネルクオリティ (-)

f_p ; 圧力依存性を示す係数

f_{sub} ; 入口サブクール度依存性を示す係数

f_{sp} ; スペーサピッチ依存性を示す係数

f_a ; 軸方向出力分布依存性を示す係数

a_1, a_2, a_3 ; 定数

また、乱流混合係数については、これまでの28本クラスタ及び36本クラスタ燃料体に関する実規模バーンアウト実験解析により最適化された式を使用する。⁽⁶⁾ この式は、標準の燃料棒ギャップ間隔と質量速度、更には二相流のフローパターン依存性を考慮して動燃で作成したものである。

5.3.3.4 解析条件

圧力管が正常な場合の熱流動条件は、昭和63年度炉心設計第9サイクルBOC MCP R発生チャンネル⁽²⁾の値を使用する。また、圧力管が破断した場合の破断チャンネル流量、出力分布については破断チャンネル流量解析及び出力分布解析結果を基に以下の条件とする。

① チャンネル流量

	圧力管正常時	圧力管破断時		
圧力管内径	117.8mm	117.8mm	125.0mm	130.0mm
チャンネル流量	35.3t/h (9.81kg/s)	18.5t/h (5.13kg/s)	21.7t/h (6.03kg/s)	23.0t/h (6.40kg/s)

	圧力管破断時			
圧力管内径	135.0mm	140.0mm	145.0mm	149.8mm
チャンネル流量	24.1t/h (6.70kg/s)	24.7t/h (6.85kg/s)	25.2t/h (6.99kg/s)	25.7t/h (7.13kg/s)

- ② チャンネル出力 ; 4.0MW
- ③ 炉心出口圧力 ; 71.6kg/cm²
- ④ 炉心入口冷却材温度 ; 272.8℃
- ⑤ クラスタ内局所出力分布

(表 5.3.3 - 1、表 5.3.3 - 2 及び図 5.3.3 - 5 参照)

圧力管が正常な場合 ;

$$\text{外層} / \text{中間層} / \text{内層} / G d = 1.21 / 1.05 / 0.65 / 0.33$$

圧力管が破断した場合 ;
(燃料体偏心無し)

$$\text{外層} / \text{中間層} / \text{内層} / G d = 1.22 / 1.05 / 0.63 / 0.32$$

圧力管が破断した場合 ;
(燃料体最大偏心)

$$\text{外層} / \text{中間層} / \text{内層} / G d = 1.47 / 1.38 / 0.78 / 0.37$$

⑥ 軸方向出力分布 (APF)

軸方向出力分布は図 5.3.2 - 2 に示す解析結果を基に、圧力管が破断した時の出力分布は圧力管正常な出力からの変化量を求めて図 5.3.3 - 2 に示す出力分布を使用する。

圧力管が正常な場合 ; APF = 1.14

圧力管が破断した場合 ; APF = 1.11

(燃料体偏心無し)

圧力管が破断した場合； $APF = 1.30$

(燃料体最大偏心)

圧力管破断時の圧力管内径及び燃料体偏心量をパラメータとした解析条件一覧表を表 5.3.3-1 に示す。

5.3.3.5 感度解析

先に述べた解析条件の内、最も熱的に厳しいと予想される最大拡管時においては、感度解析を行いドライアウト発生及びドライアウト後の燃料被覆管表面温度に対する影響を解析する。

本解析で想定する事象では、破断口から冷却材放出がある一方、破断に伴う圧力管拡管により当該圧力管チャンネルの流路面積が増加するため流動抵抗が減少し、チャンネル流量は拡管無しの場合よりも増大する傾向にあると考えられ、燃料体冷却に寄与する冷却材流量を正確に同定することは困難である。また、圧力管形状や燃料体偏心によって燃料体出力が増減したり、チャンネル内ボイド率分布変化によってクラスタ内出力が変化したりするが、これらの解析に関する信頼度は現時点では確認されていない。このため、チャンネル流量、燃料体出力及びクラスタ内出力分布については図 5.3.3-6 に示すように各々 10% 程度変化させてその影響を調べる。また、サブチャンネル解析手法の当該事象へ適用した場合の信頼度も現時点では確認されていないため、サブチャンネル間混合係数についてもパラメータとして解析を行う。

解析ケースについての一覧表を 5.3.3-2 に示す。

5.3.3.6 解析結果と考察

(1) 圧力管が正常な場合

圧力管が正常で内径 117.8mm の時のサブチャンネル解析結果を、CPR の値が最も小さい（バーンアウト限界に対する余裕の小さい）軸方向位置の断面について、図 5.3.3-7 に示す。

図 5.3.3-7 (1) からわかるようにサブチャンネル蒸気クォリティは、外層と中間層の燃料棒に囲まれたサブチャンネルで最も高くなり、このサブ

チャンネルに面した出力の高い外層燃料棒でCPRの値が最も小さく、ここでバーンアウトが発生しやすくなっている。また、図中燃料棒位置内数字はCPRの値を示しており、 $CPR \leq 1.0$ でドライアウト発生と判定できる。この場合のCPR最小値は1.62であり、バーンアウト発生まで、出力換算で62%の余裕があることを示している。更に、図5.3.3-7(2)には、サブチャンネル質量速度分布を示す。流路面積の小さいサブチャンネルは流動抵抗が大きいため、質量速度が他に比べてやや小さくなっていることがわかる。

(2) 圧力管が破断した場合

① 圧力管内径をパラメータとした解析

圧力管が破断し燃料体が最大偏心した場合について、圧力管の拡管量をパラメータとした解析結果を図5.3.3-8から図5.3.3-13に示す。

図5.3.3-8に示す質量速度分布から、各ケースとも燃料体が最大偏心したことにより、偏心方向のサブチャンネルで流量が減少し、偏心方向と逆の方向では流量が増大して、サブチャンネル間の流量の不均衡が著しく増大していることがわかる。また、図5.3.3-9により蒸気クオリティ分布をみると、このようなサブチャンネル流量の不均衡から、各ケース共に偏心方向のサブチャンネル蒸気クオリティ（特に外層と中間層に囲まれたサブチャンネル）が著しく増大していることがわかる。

拡管無しのケースからの最小限界出力比(MCPR)の変化を図5.3.3-10からみてみると、圧力管内径が130mmまで拡管したケースでのMCPRは0.78、135mm以上拡管したケースでのMCPRは0.81となっている。そして、ドライアウトが発生する軸方向位置は圧力管内径が130mmのケースでは3.4m、135mm以上のケースでは3.5mとなっている。このことから、上述のMCPRの差異は、圧力管の拡管と共にMCPRの発生が平均熱流束の低い位置(下流側)へと移動してくることによるものと考えられる。

図5.3.3-11からわかるように、ドライアウトが発生する燃料棒は拡管無しのケースでは外層の9本と中間層の4本であるが、圧力管内径が

125、130mm と拡大したケースでは外層の7本と中間層の3本となり、更に拡管が進んだその他のケースでは外層の5本と中間層の3本と、拡管量が大きくなるにしたがってドライアウトの発生が偏心方向の燃料棒に集中するようになり、ドライアウト領域が狭くなっている。

次に、各ケースの燃料被覆管表面最高温度（PCT）と軸方向温度分布を図5.3.3-12に示す。図からわかるように、拡管量が大きくなるにつれてPCTはほぼ線形に上昇し、最大拡管時に最大となっている。拡管量の変化に対するPCTのこの傾向は以下のように説明できる。圧力管が破断したことにより、各ケースの質量速度は図5.3.3-13(1)のように、拡管無しのケースから最大拡管のケースまで $1070\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ から $620\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ と約40%程度減少している。更に図5.3.3-13(2)に示すように、PCT発生位置での流速は、拡管量が増えるにしたがって減少している。このため、拡管量が大きいほど熱伝達率が悪くなり、この結果図5.3.3-12に示すようなPCT変化の傾向（拡管量が大きくなるにしたがってPCTも上昇する）が現れると考えられる。

② 偏心量をパラメータとした解析

圧力管が破断して最大に拡管した場合について（圧力管内径 = 149.8 mm）、燃料体の偏心量をパラメータとした解析を行った。解析結果を図5.3.3-14から図5.3.3-19に示す。

まず、基準となる燃料体の偏心の無い場合の解析結果から見てみよう。図5.3.3-14(1)に示すサブチャンネル質量速度分布及びこれを半径依存性がよくわかるものに編集しなおした図5.3.3-15から、破断圧力管の質量速度の平均値は、正常圧力管の $2046\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ から $619\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ へと約70%減少し、かつ、圧力管と燃料体間の周辺サブチャンネルに冷却材が流れやすくなっていることがわかる。このため、逆にクラスタ内のサブチャンネルでは冷却材が正常時よりも少なくなっていると共に、サブチャンネル間の冷却材流量の不均衡も大きくなっている。このことを踏まえて、図5.3.3-14(2)に示すサブチャンネル蒸気クオリティ分布と半径依存性がわかるものに編集しなおした図5.3.3-16をみると、上述の質量速度分布の不均衡に起因して、クラスタ中心に近いサブチャンネル

程クオリティが高くなり、クオリティの最大値は圧力管が正常な場合に比べて、約2倍大きくなっていることがわかる。しかし、MCP Rは図5.3.3-14及び図5.3.3-17に示すように中間層燃料棒に生じ、その値は偏心しない場合1.26であり、圧力管が破断しても偏心が無ければドライアウトは発生しない。

次に図5.3.3-15に基づき、サブチャンネル流量に対する偏心の影響をみると、燃料体偏心量の増加に伴い、偏心方向の反対側のサブチャンネルの流量が増大し、逆にクラスタ内の偏心方向サブチャンネルの流量が減少する傾向が強まり、サブチャンネル間の不均衡が著しく増大してくることがわかる。また、燃料体偏心量増大に伴うこのようなサブチャンネル流量の不均衡増大によって、クラスタ内の偏心方向のサブチャンネル（特に外層と中間層及び中間層と内層に囲まれたサブチャンネル）では図5.3.3-16に示すように蒸気クオリティの著しい増加が認められる。これらのことから、図5.3.3-17からわかるようにMCP Rの値は燃料体偏心量が大きくなるにしたがって小さくなり、したがって偏心が最大の場合には、0.81まで低下する。

偏心量の変化に伴うドライアウト領域の変化をみると、図5.3.3-18からわかるように、ドライアウトが発生する燃料棒は偏心5mmでは中間層の3本と外層の1本、10mmでは中間層の3本と外層の4本、偏心量が最大となる16.5mmでは中間層の3本と外層の5本となり、偏心量が大きくなるにつれてドライアウト領域も広がっていている。

最後に図5.3.3-19にPCT発生燃料棒の軸方向温度分布の変化を示す。図から明らかなように偏心量が大きくなるにつれて燃料被覆管表面温度は上昇し、最大偏心時に最も高くなる。

③ 燃料棒温度解析

①及び②で見てきたように、燃料被覆管の表面温度は最大拡管で、かつ最大偏心の時に最も高くなることがわかった。この熱的に最も厳しいケースの燃料被覆管の軸方向温度分布を図5.3.3-20に示す。図から、外層燃料棒の6本と中間層燃料棒の3本の計9本で温度上昇がみられ、燃料体偏心方向の外層燃料棒#14でPCTが発生している。その温度は

930℃である。

次に、サブチャンネル流動条件が温度上昇に及ぼす影響の度合いを考察するため、PCT発生燃料棒の周囲における周方向温度分布を図5.3.3-21に示す。図から燃料被覆管表面温度が最も高くなるのは圧力管側のサブチャンネル#14に面したところで、その温度は930℃である。また、最も低いところはクラスタ中心側の#38で906℃である。このことから全周にわたって温度差は小さいことがわかる。圧力管側で温度が高くなる理由としては、解析に用いた膜沸騰熱伝達率相関式の性質によるものと考えられる。即ち、図5.3.3-22に示すように、PCTが900℃程度の時には、熱伝達率はクオリティが40%弱のところ極小値をとる。また、PCTが大きくなるにしたがって極小値をとるクオリティは小さくなることがわかる。今回のケースでは、PCT発生位置でのクオリティは圧力管側のサブチャンネルで約46%、クラスタ中心側で約52%となっており、圧力管側の方で熱伝達が悪くなると考えられる。

(3) 感度解析

第5章の5.3.3.3及び5.3.3.4節に示した解析モデルや解析条件の内、クラスタ内局所出力ピーキング係数や冷却材流量、燃料体出力、乱流混合係数など確定できないパラメータについては、感度解析を行いドライアウト発生及びドライアウト後の燃料棒温度に対する影響を評価する。解析条件は、熱的に最も厳しかった最大拡管、最大偏心のケース（圧力管内径=149.8mm、偏心量=16.5mm）を選定し、上述のパラメータを各々±10%変化させた。

① クラスタ内局所出力ピーキング係数の影響

クラスタ内局所出力ピーキング係数(LPF)を基準値である1.47から±10%変化させた場合の解析結果を図5.3.3-23と図5.3.3-24に示す。図5.3.3-23からわかるように、ドライアウトが発生する燃料棒は基準LPFの場合が外層の5本と中間層の3本の計8本であったが、LPFを±10%変化させた場合でも基準ケースと変わってない。図5.3.3-24には、LPF変化による被覆管表面温度変化を示す。いずれのケー

スもPCTは外層燃料棒で発生しており、LPFが基準LPFより10%増加すると、PCTは1040℃、10%減少すると820℃に各々変化している。

② 冷却材流量の影響

冷却材流量を基準値である25.7t/hから±10%変化させた場合の解析結果を図5.3.3-25と図5.3.3-26に示す。図5.3.3-25からわかるように、ドライアウトが発生する燃料棒は基準流量の場合が外層の5本と中間層の3本の計8本であるのに対し、流量が10%増加した場合には基準流量と同じ領域でドライアウトが発生しているにもかかわらず、逆に10%減少した場合には外層の7本と中間層の4本とドライアウトの発生燃料棒が増加している。図5.3.3-26には、流量変化による被覆管表面温度変化を示す。流量が基準流量より10%増加すると、PCTは860℃、10%減少すると1010℃に各々変化している。

③ 燃料体出力の影響

燃料体出力を基準値である4.0MWから±10%変化させた場合の解析結果を図5.3.3-27、図5.3.3-28に示す。図5.3.3-27からわかるように、ドライアウトが発生する燃料棒は基準出力の場合では、外層の5本と中間層の3本の計8本であるのに対し、出力が10%増加し場合では外層の9本と中間層の6本、内層の3本と増加し、逆に10%減少した場合には外層の3本と中間層の2本と減少している。図5.3.3-28には、出力変化による被覆管表面温度変化を示す。出力が基準出力より10%増加すると、PCTは1060℃、10%減少すると400℃に各々変化している。

④ 乱流混合係数の変化の影響

H TLで実施した正常圧力管を用いた定常バーンアウト試験結果に基づいて最適化した混合係数を基準値として、混合係数を基準値から±10%変化させた場合の解析結果を図5.3.3-29、図5.3.3-30に示す。これらの図から、混合係数が小さい程ドライアウト領域は広がり、PCTも高くなっている。しかし、変化量は少なく±10%程度では余り大きな感度が無いことがわかる。

5.4 まとめ

圧力管破断事故時にカランドリア管が圧力バウンダリとして健全である場合における、当該チャンネル内の燃料体の燃料棒表面温度を解析した。解析結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 被覆管表面温度は、燃料体の偏心を考えると破断後の圧力管内径が増大するに従って高くなり、圧力管がカランドリア管に密着する最大拡張した時に最高となる。
- (2) ドライアウト発生領域は、偏心量が大きくなるにつれて広がり、ドライアウトが発生する燃料棒は中間層から外層へ移る。また、被覆管表面温度も偏心量と共に上昇してゆき、最大偏心時に最高となる。
- (3) 前項(1)及び(2)の結果、ドライアウト領域と被覆管表面温度は、圧力管がカランドリア管に密着するまで拡大し、かつ燃料体が圧力管内で最大偏心した場合に最大または最高となり、偏心方向の外層の6本と中間層の3本でドライアウトが発生し、PCTは930℃まで上昇する。
- (4) 局所出力ピーキング係数、冷却材流量、燃料体出力及び乱流混合係数などのパラメータの中では、チャンネル出力がPCTに対して最も感度が高い。それでも、チャンネル出力の10%の変化によるPCTの増大は高々130℃程度であり、この場合のPCTは1060℃である。

今回実施した圧力管破断時の燃料冷却性予備解析は、現時点で最適と思われる解析手法を用いた予備解析であることから、圧力管が破断した状態での解析コード及びモデルの適用性については今後実施する実規模試験により検証する予定である。

5.5 参考文献

- (1) (社)日本機械学会, 機械工学便覧:P.A-57 (1987)
- (2) 電源開発(株),「技術確証試験(63年度)取替炉心サイクル初期及びサイクル末期におけるMCP R発生チャンネルの熱水力特性データ等の提示について」
: EPDC業務連絡No.原技-63-11 (1988)
- (3) 石井 裕治, 望月 弘保, 速水 義孝, 「PT破断CT健全時の流動解析-Ⅲ」
: SEL-R-88053 (1988)
- (4) 菅原 悟, 北原 種道, 「ガンマ線ボイド計に基づくクォリティボイド相関式の開発」
: PNC SN941 82-201 (1982)
- (5) 鴨志田 洋, 菅原 悟, 柴 公倫, 「36本型燃料集合体の圧力損失評価式の開発」
: PNC SN941 85-86 (1985)
- (6) 堺 公明, 犬飼幸司, 菅原 悟, 「ATR28本クラス燃料集合体のドライアウト限界出力に対する燃料棒間のギャップの影響」 : PNC SN9410 88-052 (1988)

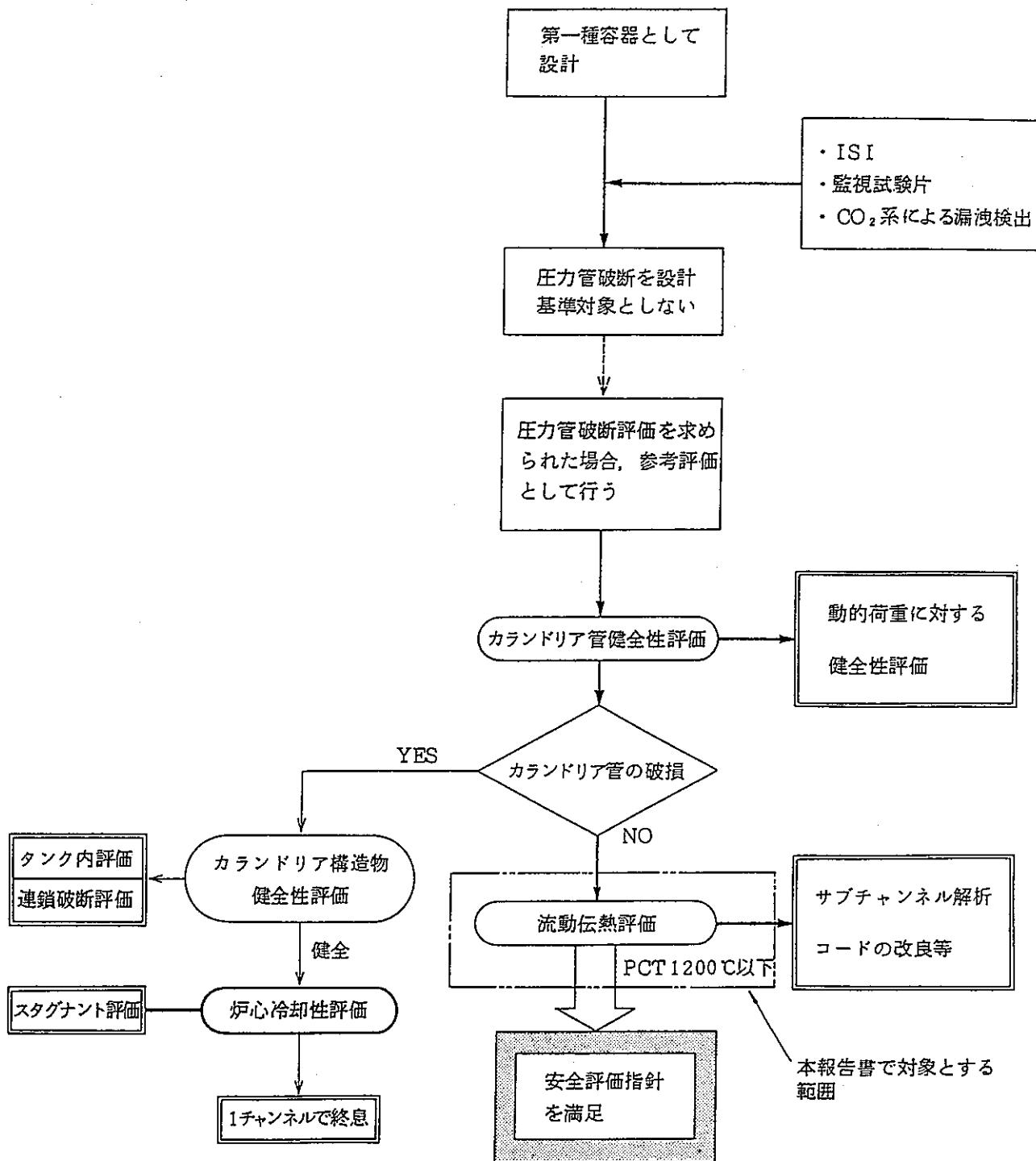
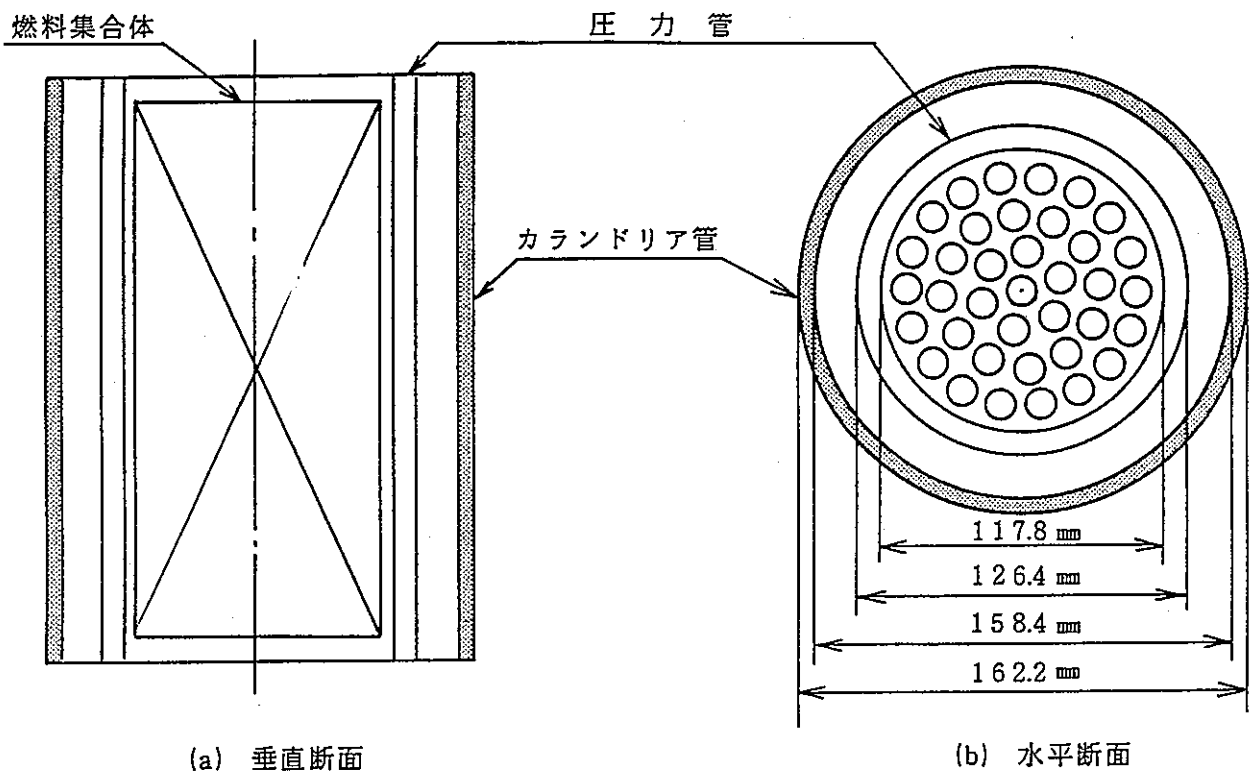
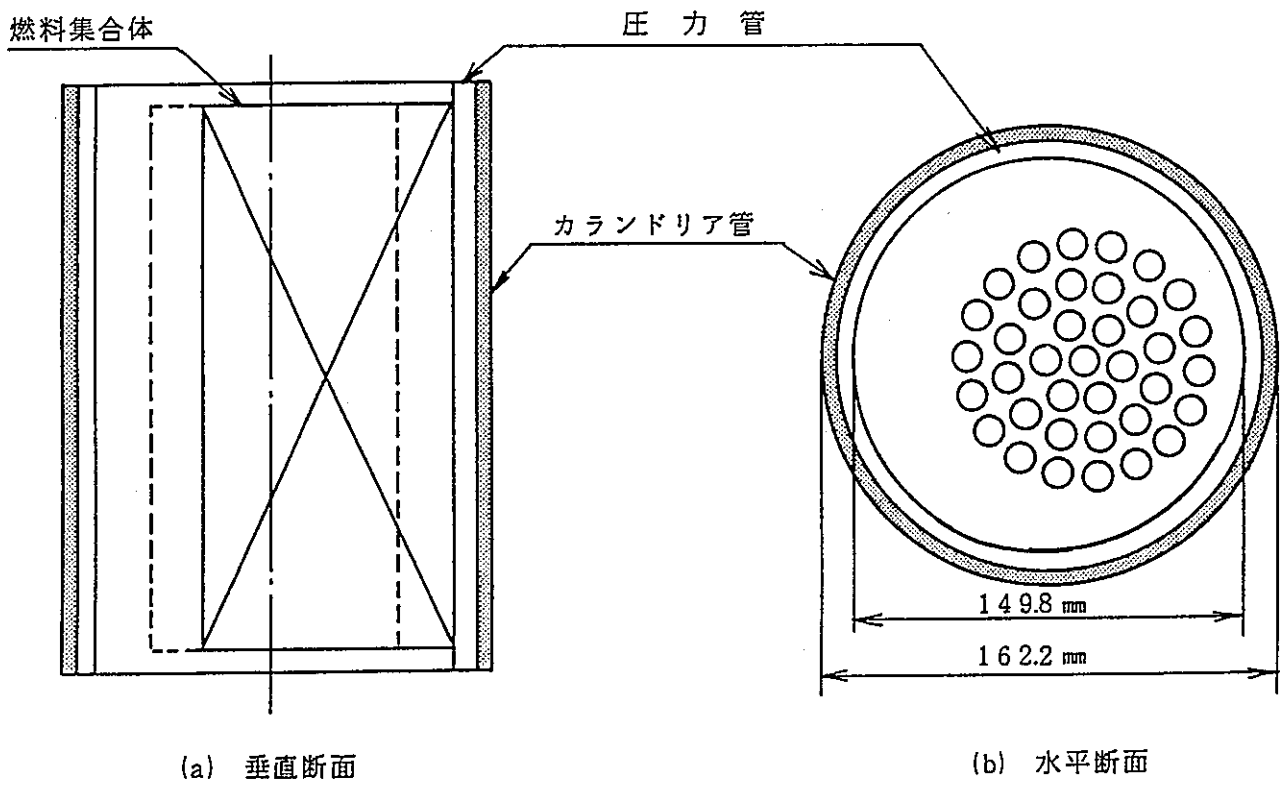


図 5.2 - 1 圧力管破断事故時シーケンス



(1) 圧力管が正常な場合



(2) 圧力管が破断した場合

図 5.2 - 2 圧力管破断時のチャンネル内形状想定図

表5.3.1-1 主な解析条件 (電発殿提示)

項 目	入力データ	備 考
チャンネル出力 ・RPF ・APF	1.49 1.18	62年度データ ホットチャンネル
配管形状 ・入口管 内径 (m) 流路面積 (m ²) 長さ (m) 高低差 (m) 圧損係数 (-)	0.0494 0.00192 18.7/13.2 -2.375 3.78	63年度データ反映 (最長/平均)
・圧力管下部延長部 内径 (m) 流路面積 (m ²) 長さ (m) 高低差 (m) 圧損係数 (-)	0.1178 0.0088 3.29 3.89 26.97	63年度データ反映
・炉心部 内径 (m) 流路面積 (m ²) 長さ (m) 高低差 (m) 圧損係数 (-)	0.00932 0.00479 3.7 3.7 -	内部計算
・圧力管上部延長部・出口管 内径 (m) 流路面積 (m ²) 長さ (m) 高低差 (m) 圧損係数 (-)	0.0739 0.00429 24.435 10.108 3.26 3.66 5.0	遮蔽プラグ タイプレート 出口管
・再循環ポンプ揚程 (m)	110	63年度データ反映

表5.3.1-2 アニュラス部流路条件 (電発殿提示)

項 目	入力データ	備 考
・圧力管-C/T間アニュラス部		
体 積 (m ³)	0.04	
初期温度 (°C)	100	
初期圧力 (kg/cm ² ・g)	1.03	
アニュラス部から格納容器 への放出面積 (m ²)	0.000297	{ 上部 0.000257 m ² 下部 0.00004 m ²
シールドスリーブ圧損係数 (-)	1.8	最も狭い部分で定義した値

表5.3.1-3 流 路 条 件

ケース	抜管後の圧力管 内径 (m)	流路断面積 (m ²)	水力等価直径 (m)	破断チャンネル 初期流量 (kg/s)
初 期	0.1178	0.00479	0.00932	8.48
1	0.1178	0.00479	0.00932	同 上
2	0.1250	0.00616	0.01186	
3	0.1300	0.00716	0.01368	
4	0.1350	0.00820	0.01556	
5	0.1400	0.00928	0.01747	
6	0.1450	0.01040	0.01944	
7	0.1498	0.01151	0.02135	

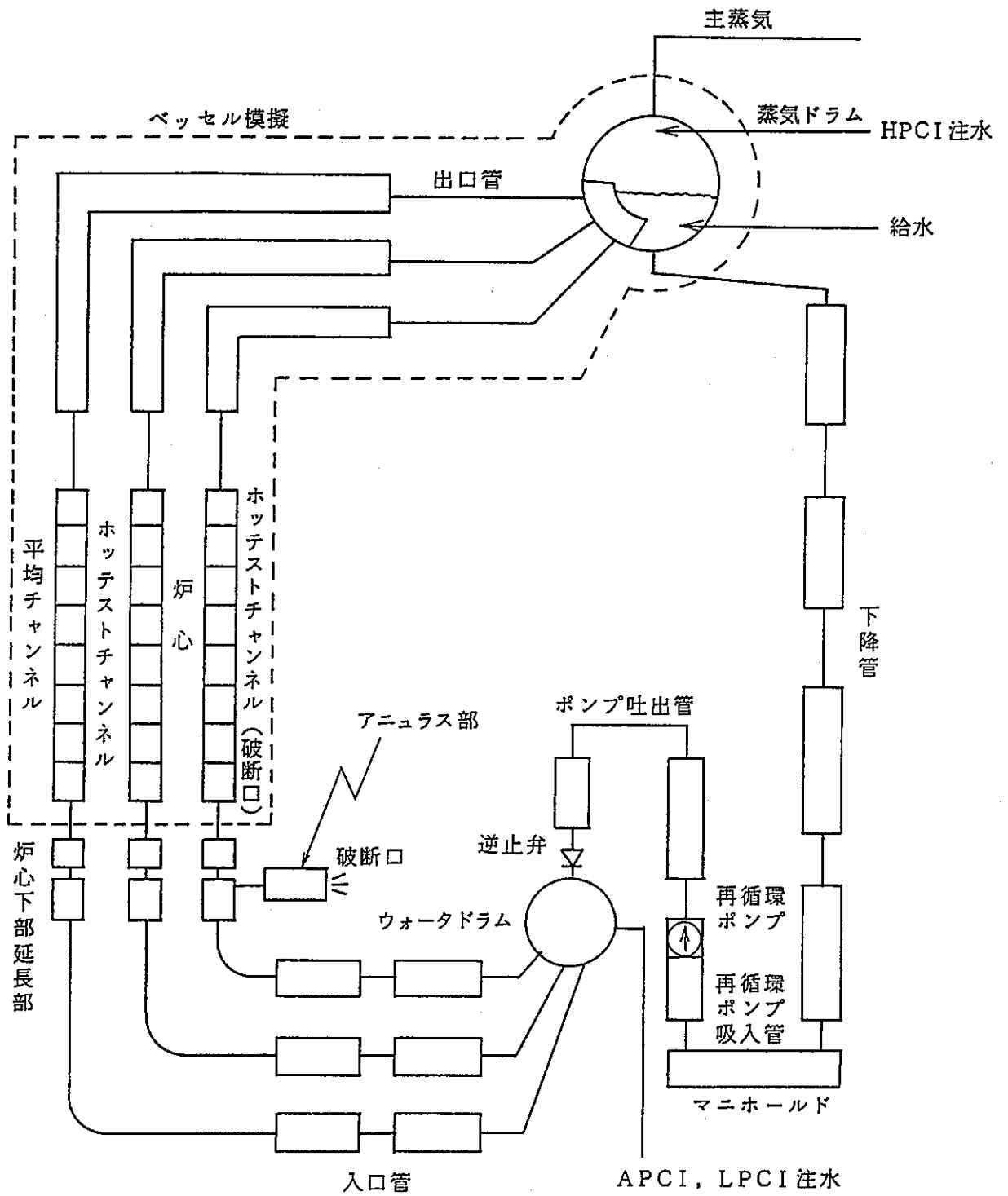


図 5.3.1 - 1 圧力管本体破断事故解析ノード分割図 (LOTRAC)

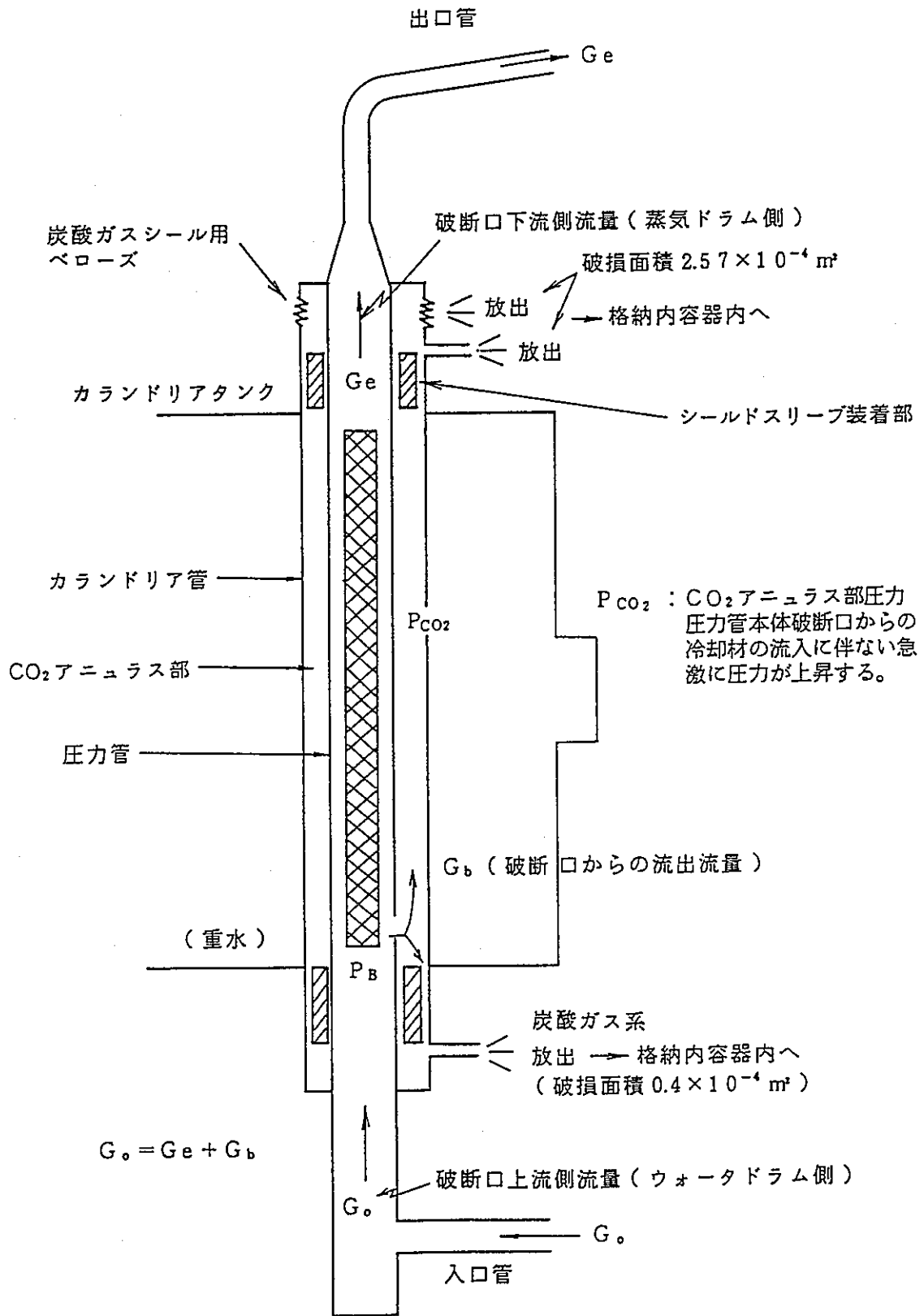
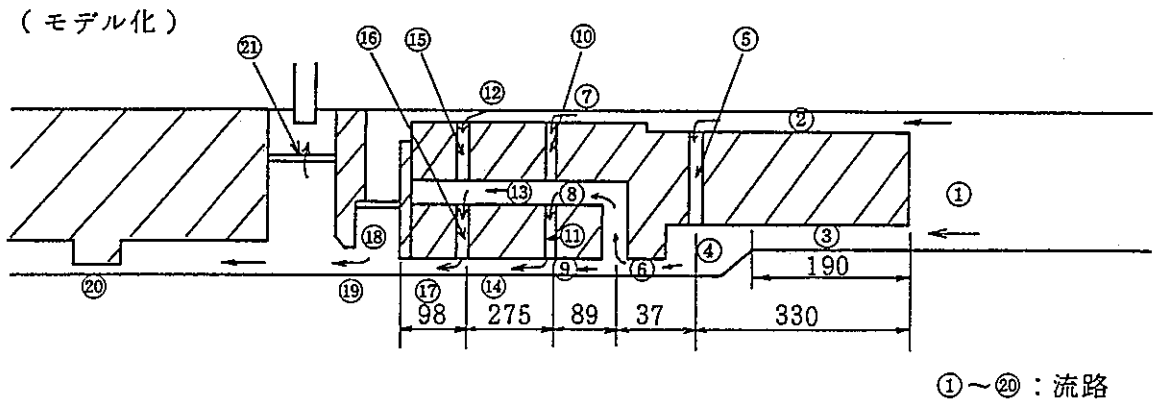


図5.3.1-2 圧力管破断時のCO₂アニュラス部流動評価モデル



(流路とマスバランス)

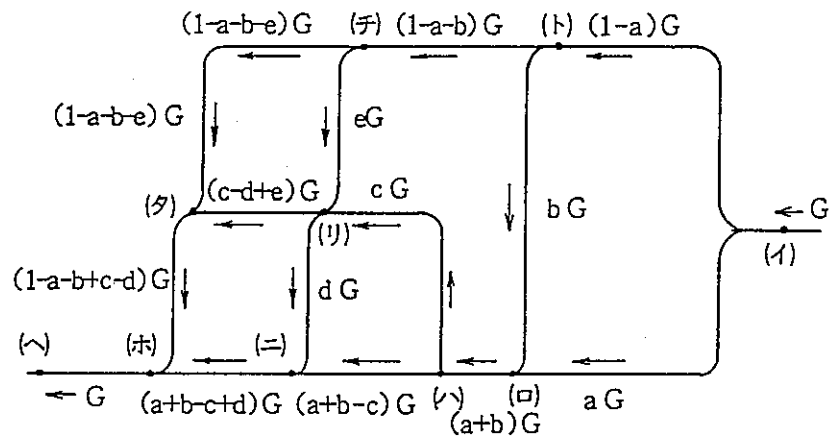


図 5.3.1 - 3 鉄水スリーブ部流路網モデル

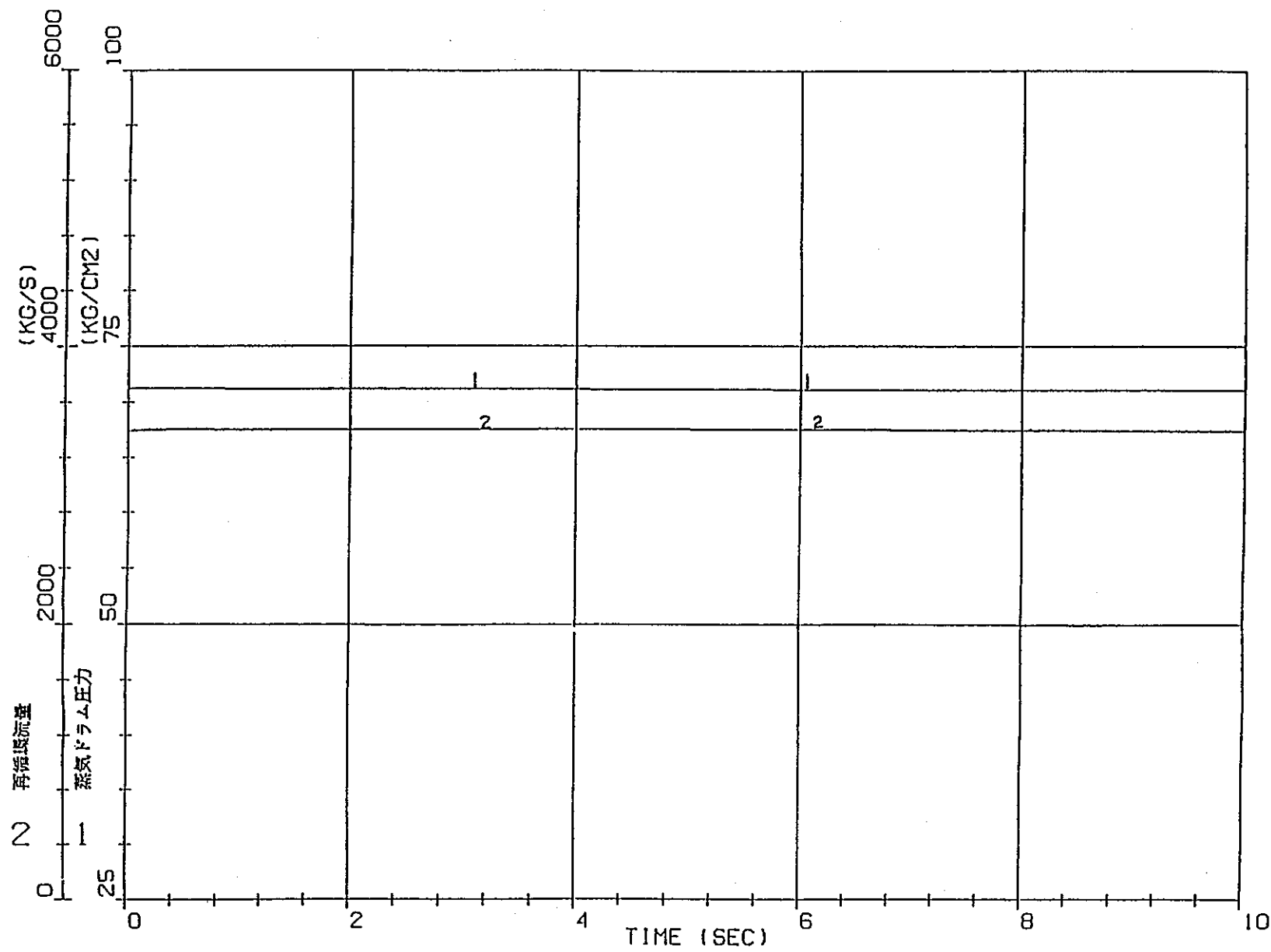


図5.3.1-4 圧力管破断時の過渡変化 (拡管後の直径 149.8mm)

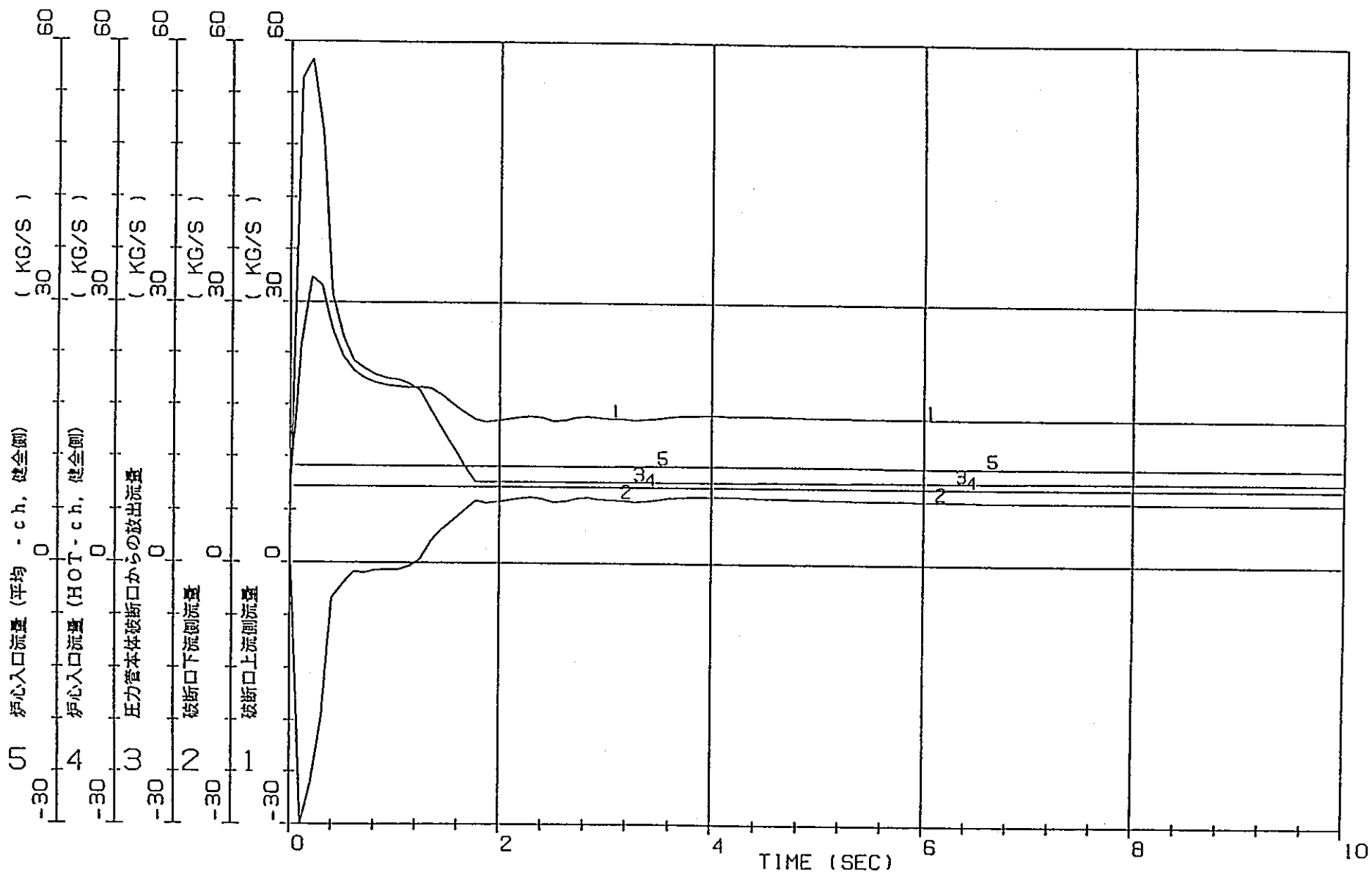


図 5.3.1 - 5 圧力管破断時の過渡変化 (拡管後の直径 149.8mm)

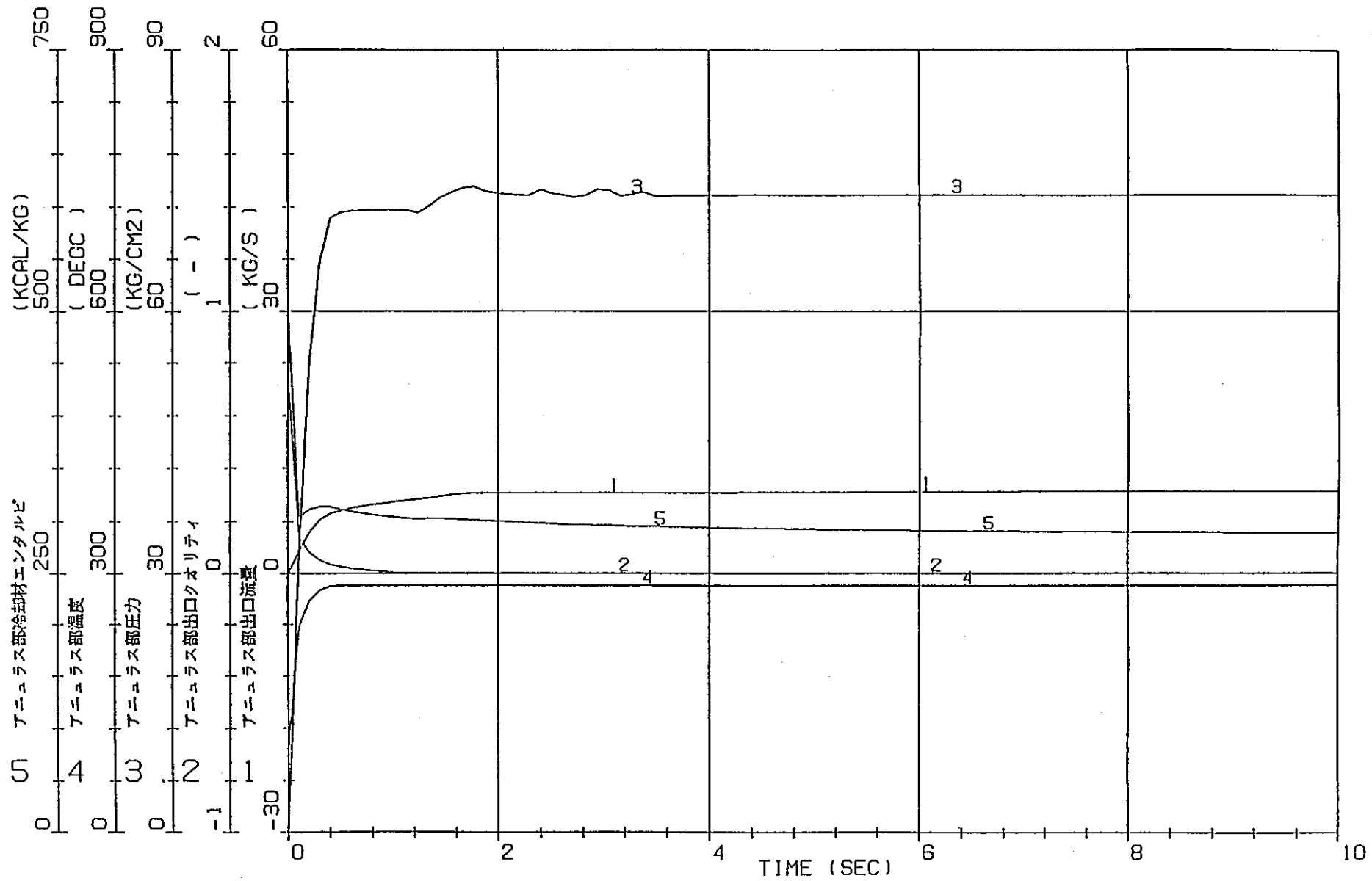


図 5.3.1 - 6 圧力管破断時の過渡変化 (拡管後の直径 149.8mm)

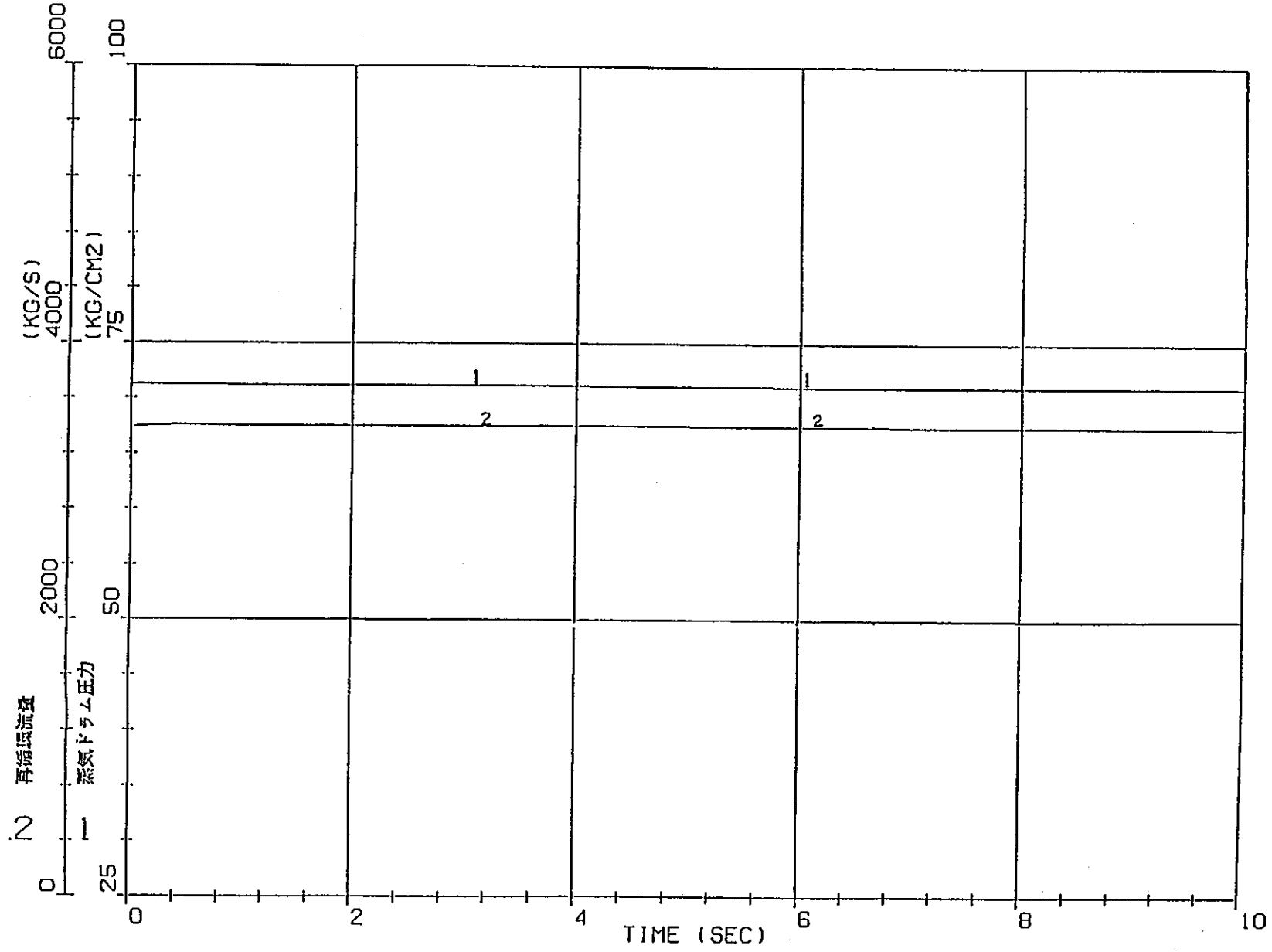


図 5.3.1 - 7 圧力管破断時の過渡変化 (拡管しない場合)

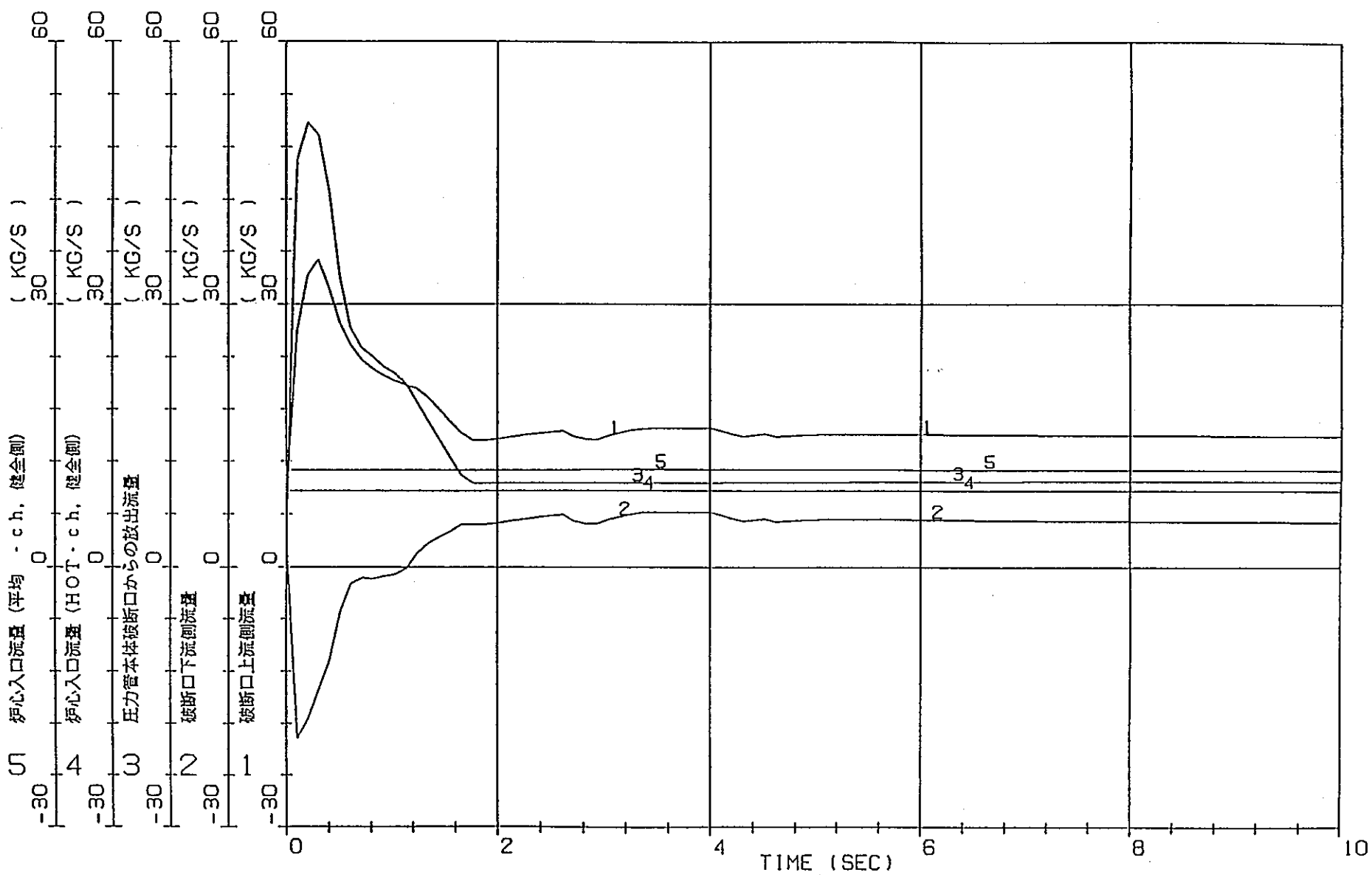


図 5.3.1 - 8 圧力管破断時の過渡変化 (拡管しない場合)

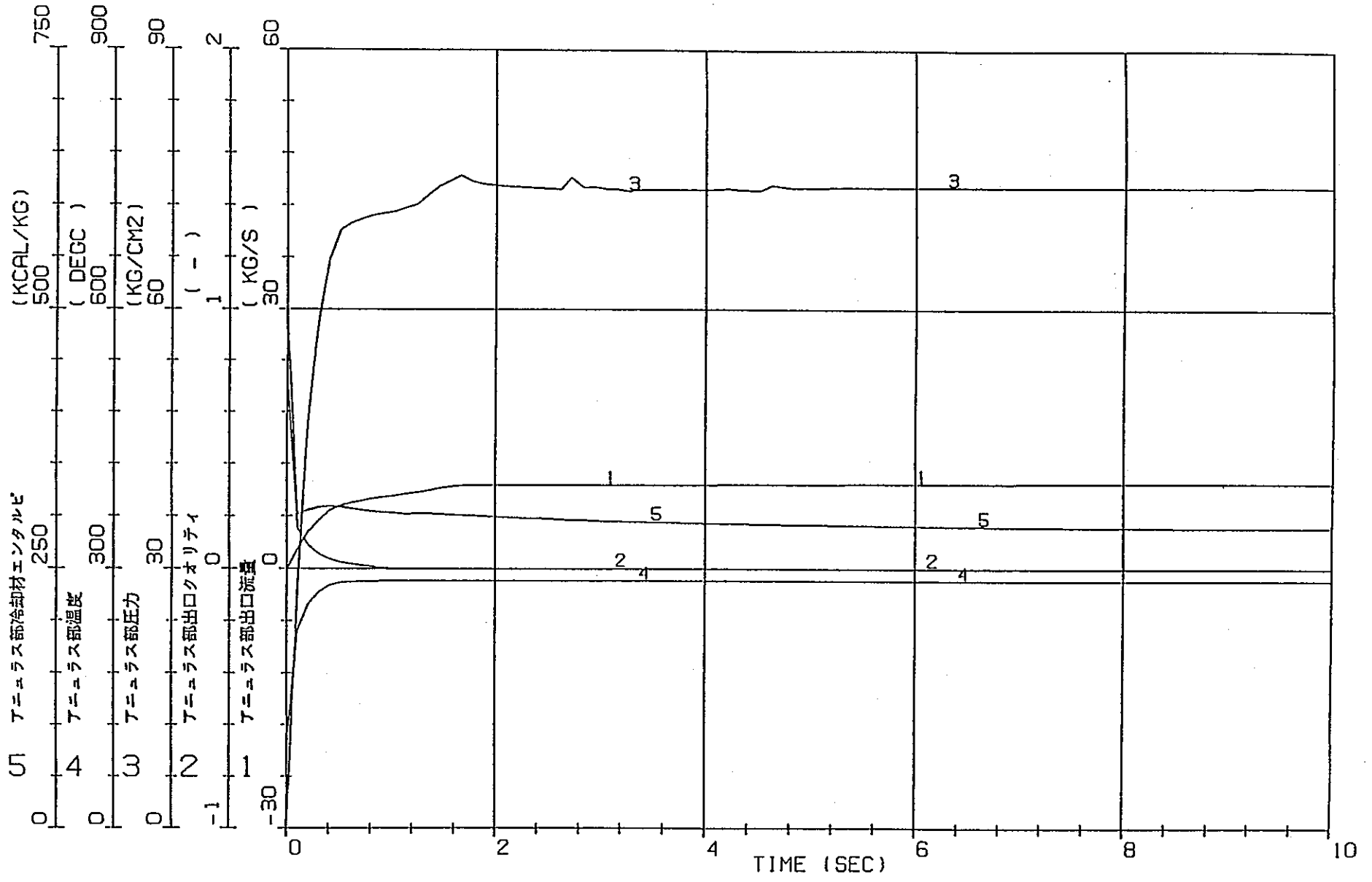


図 5.3.1 - 9 圧力管破断時の過渡変化 (拡管しない場合)

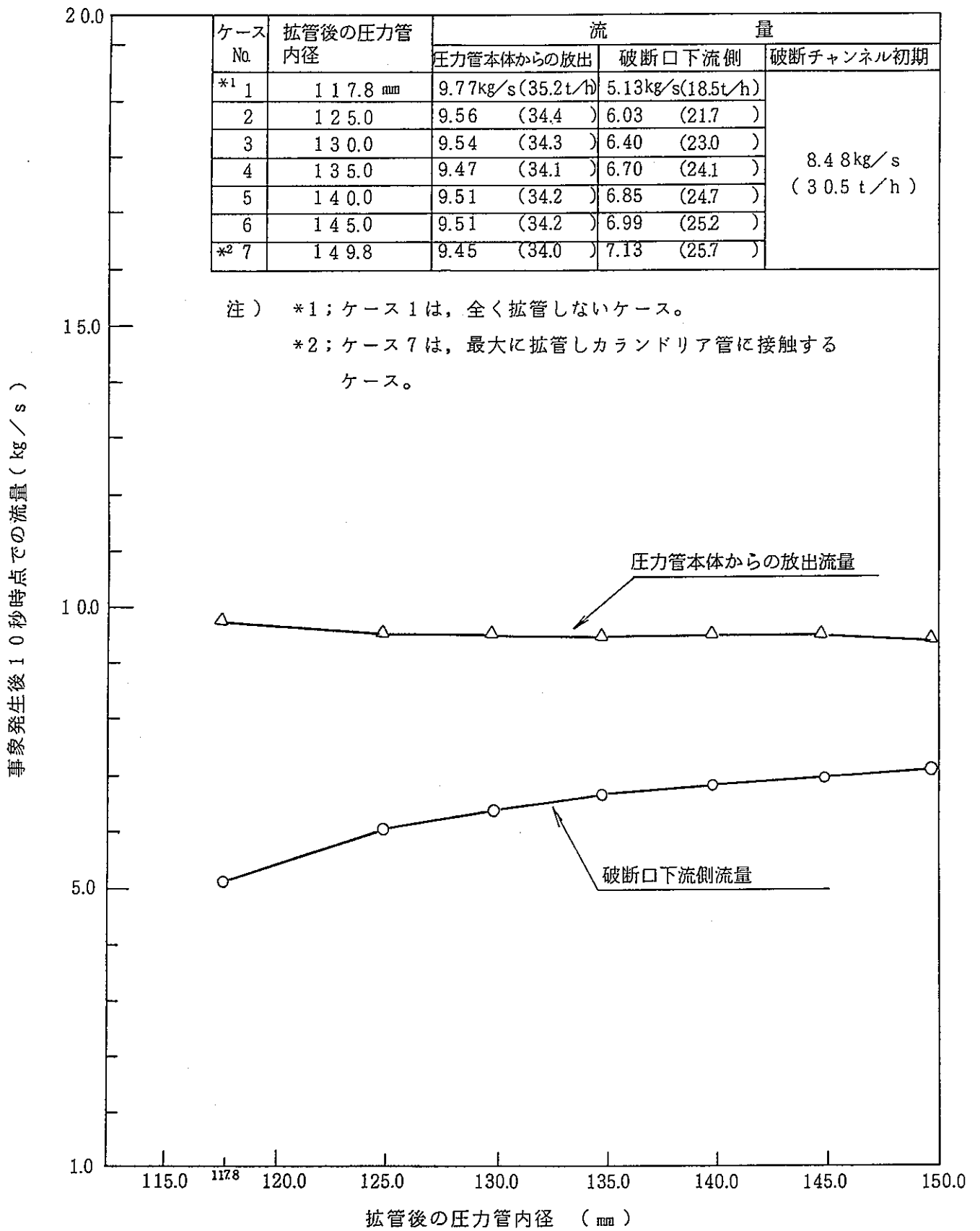


図 5.3.1 -10 圧力管の拡管による流量変化

表 5.3.2 - 1 燃料集合体内局所出力分布の解析ケース

No.	炉 心	サイクル	燃料集合体	圧力/燃料集合体 状 態	偏心量、偏心方向	ボイド率	¹⁰ B濃度 燃焼度	備 考
1	取替炉心BOC	第9サイクルBOC {内側領域でMCPR} が発生	内側領域標準 (上部) *1 燃料 {MCPR} 発生燃料	通常	—	79.3%	6.9ppm	・解析コード WIMS-ATR ・解析項目 (i)集合体内局 所出力分布 (ii)K ∞
2				拡管/偏心無し	—	77.3%	同 上	
3				拡管/偏心有り	16.5mm (270℃)	77.3%	同 上	

*1 MCPRは、軸方向上部燃料にて発生。

(注) 解析の各条件は、電発殿より指示された値である。(偏心量、偏心方向、ボイド率を除く)

表 5.3.2 - 2 破断チャンネル LAYMON B 定数作成のための解析ケース

No.	炉 心	燃 料 集 合 体	圧力/燃料集合体 状 態	ボ イ ド 率	燃 焼 度	^{10}B 濃度	備 考
1	取替炉心BOC	内側領域標準 (上下部・中央部) 燃料	拡管/偏心無し	0, 20, 30, 40, 60, 80 (%)	63年度設計計算値	6.9ppm	・解析コード WIMS-ATR
2			拡管/偏心有り*1	同 上	同 上	同 上	・解析項目 格子平均核定数 (i) M^2 (ii) K_∞ (iii) Σ_f

*1 偏心量、偏心方向は局所出力分布解析 (表5.3.2-1) と同一とする。

(注) 解析の各条件は、電発殿より指示された値である。

表 5.3.2 - 3 破断チャンネル出力分布の解析ケース

No.	炉 心	サイクル	破断チャンネル	破断チャンネル 圧力管/燃料集合体状態	破断チャンネル 流量条件	その他条件	備 考
1	取替炉心BOC	第9サイクルBOC (内側領域でMCPR) 発生	MCPR発生 チャンネル (内側領域)	拡管/偏心無し	26.1t/h (破断口からの放出量 =33.4t/h)	63年度設計計算 条件と同一	・解析コード LAYMON-2A Mod5 ・解析項目 破断チャンネルの 出力分布
2				拡管/偏心有り	同 上		

(注) 解析の各条件は、電発殿より指示された値である。

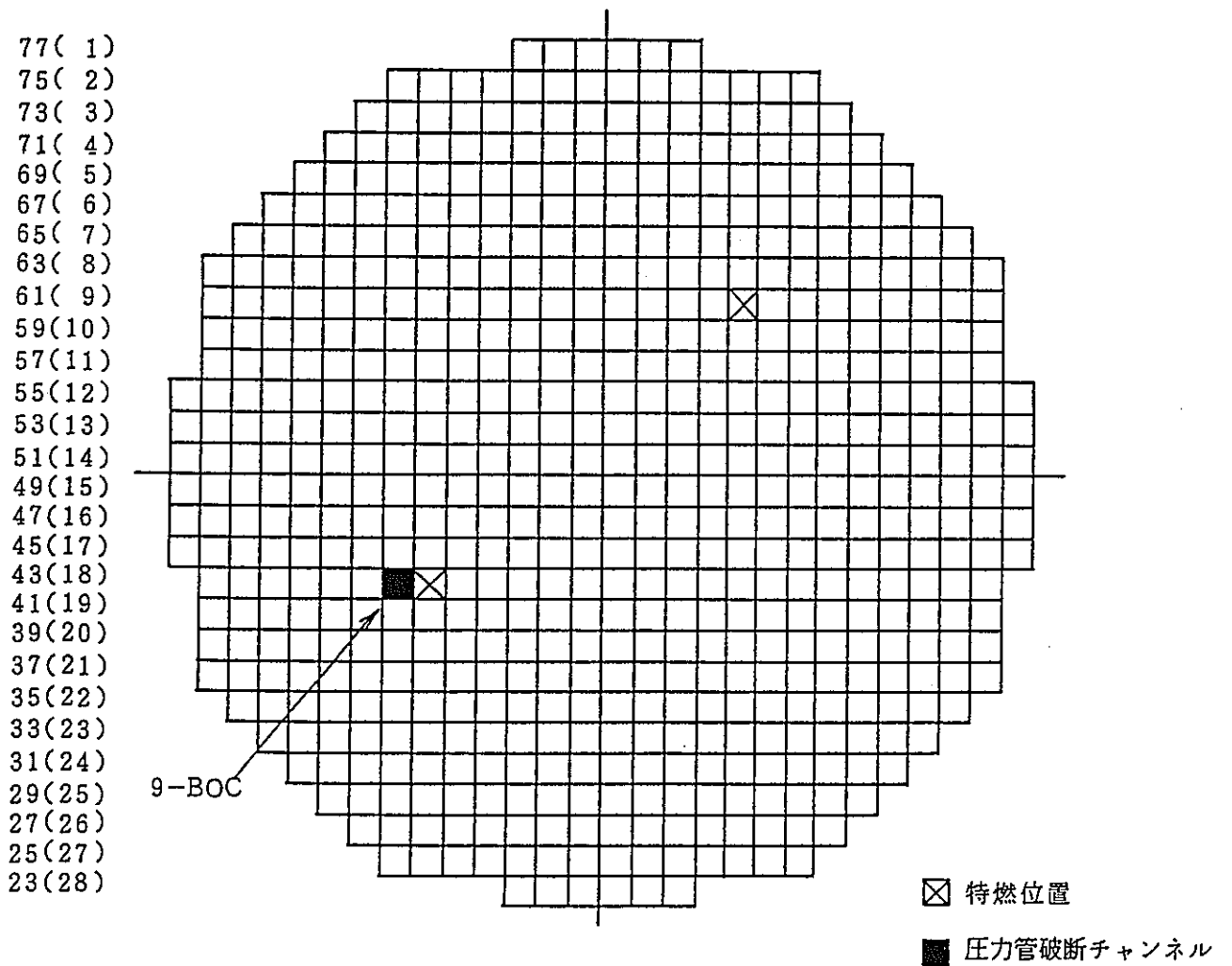
表 5.3.2 - 4 圧力管破断時の燃料棒各層での局所出力最大値

炉心	対象燃料	圧力管/燃料 集集体状態	内層	中間層	外層	Gdピン	void率(%)	備考
取 替 B O C	内側領域上部燃料 (4.00/1.6) puf	通常	0.65	1.05	1.21	0.33	79.3	E=0.05GWd/t ¹⁰ B濃度 6.93ppm
		拡管/偏心無し	0.63	1.05	1.22	0.32	77.5	
		拡管/偏心有り	0.78	1.38	1.47	0.37	77.5	

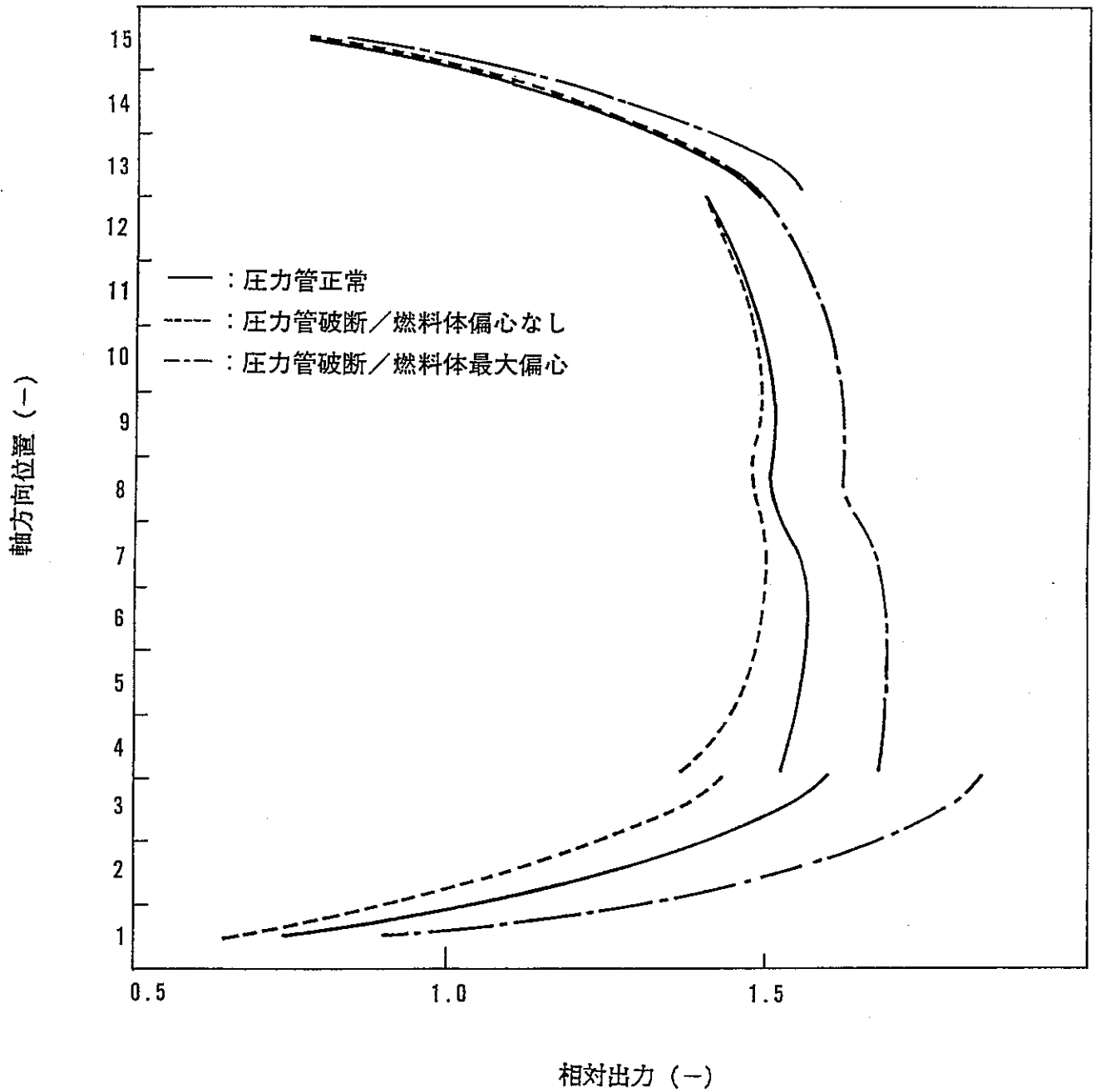
表5.3.2-5 圧力管破断時の出力ピーキング

炉心	対象燃料	圧力管／燃料 集合体状態	R P F	破断チャンネル 流量(t/h)
取	内側領域燃料	正 常	1.37	35.3
替		圧力管破断／ 偏心なし	1.32	26.1
BOC		圧力管破断／ 偏心有り	1.50	26.1

23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77
 (1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28)



合理化検討炉心(取替)炉心構成



注：グロス値は（径方向ピーキング係数）×（軸方向ピーキング係数）を示す。このため、相対出力1.0は、平均出力チャンネルの軸方向ピーキング規格値を示す。

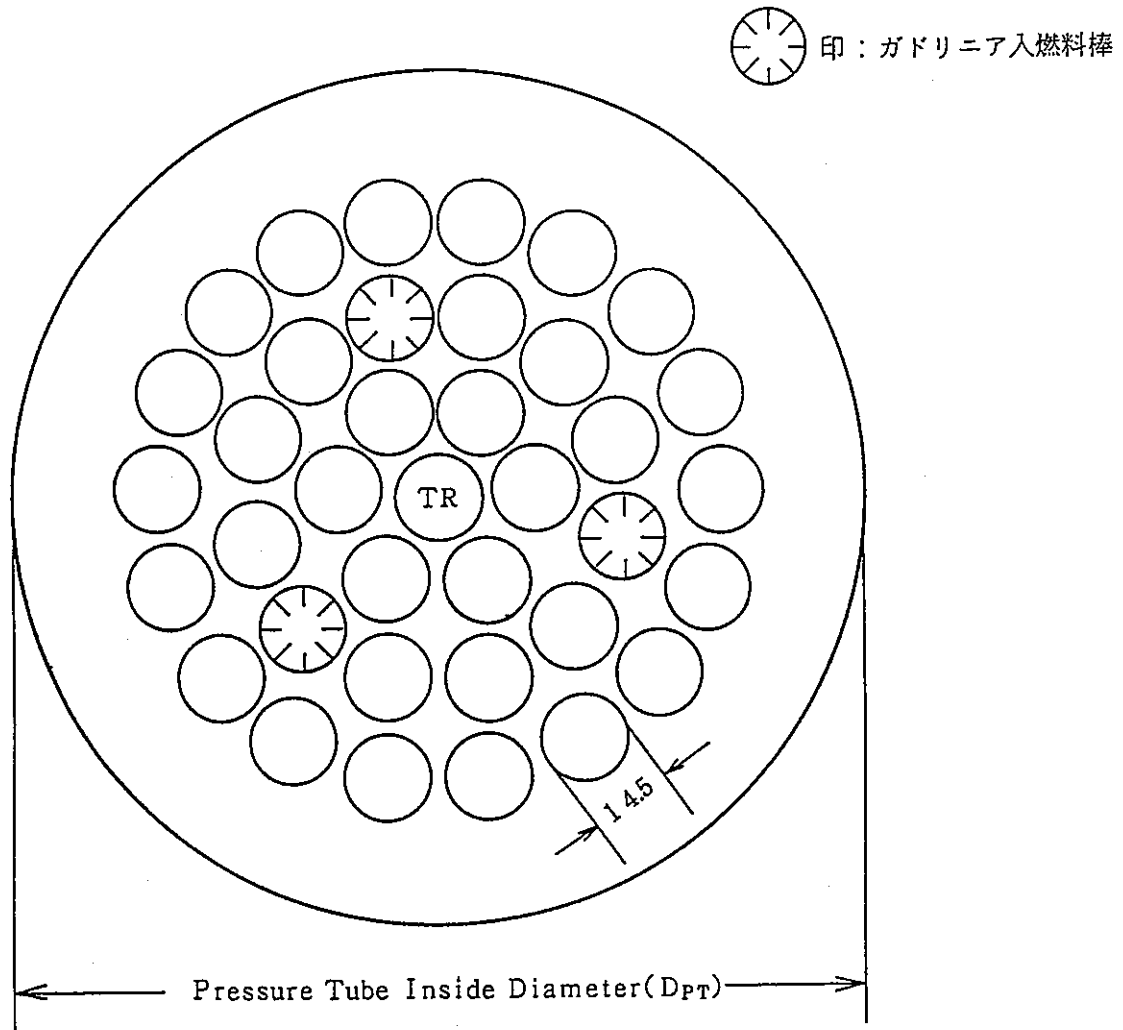
図5.3.2 - 2 軸方向相対出力分布の変化（グロス値）

表 5.3.3 - 1 解析条件及び解析結果一覧表；その1

項目		ケース No.												
		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	1-12	
テ ス ト 部 条 件	圧力管形状	圧力管が 正常な場合	圧力管が破断した場合											
	クラスタ形状	3本Gd入燃料36本クラスタ (図5.3.3-1)												
	圧力管内径	117.8mm	117.8mm	125.0mm	130.0mm	135.0mm	140.0mm	145.0mm	149.8mm					
	燃料体偏心量	0.0mm	0.5mm	4.1mm	6.6mm	9.1mm	11.6mm	14.1mm	16.5mm	0.0mm	5.0mm	10.0mm	0.0mm	
	クラスタ内局所出力 ピーキング係数 (LPF)	1.21 図5.3.3-5(1)	1.47 (図5.3.3-5(3))							1.22 図5.3.3-5(2)	1.47 (図5.3.3-5(3))			
	軸方向出力 ピーキング係数 (APF)	1.14 図5.3.3-2	1.36 (図5.3.3-2)							1.11 図5.3.3-2	1.36 (図5.3.3-2)			
	スペーサ間隔	「実証炉」型配列 (図5.3.3-2)												
熱 流 動 条 件	圧力	71.6kg/cm ²												
	入口温度	272.8℃												
	チャンネル流量	35.3t/h	18.5t/h	21.7t/h	23.0t/h	24.1t/h	24.7t/h	25.2t/h	25.7t/h					
	チャンネル出力	4.0MW												
乱流混合係数	HTLの式													
解 析 結 果	最小限界出力比 (MCPR)	1.62	0.78	0.78	0.78	0.81	0.81	0.81	0.81	1.26	0.95	0.93	0.97	
	燃料被覆管最高温度 (MCPR≤1.0の時)	-	620℃	690℃	750℃	790℃	840℃	880℃	930℃	-	420℃	840℃	400℃	
備 考		圧力管内径の影響							燃料体偏心量の影響					

表 5.3.3-2 解析条件及び解析結果一覧表；アツ2

ケースNo. 項目		1-13	1-14	1-15	1-16	1-17	1-18	1-19	1-20	
		テ ス ト 部 条 件	圧力管形状	圧力管が破断した場合						
クラスタ形状	3本Gd入燃料36本クラスタ (図5.3.3-1)									
圧力管内径	149.8mm									
燃料体偏心量	16.5mm									
クラスタ内局所出力 ピーキング係数 (LPF)	1.32 図5.3.3-6(1)		1.61 図5.3.3-6(2)	1.47 (基準値) (図5.3.3-5(3))						
軸方向出力 ピーキング係数 (APF)	1.36 (図5.3.3-2)									
スペーサ間隔	「実証炉」型配列									
熱 流 動 条 件	圧力	71.6kg/cm ²								
	入口温度	272.8℃								
	チャンネル流量	25.7t/h	23.1t/h	28.3t/h	25.7t/h					
	チャンネル出力	4.0MW (基準値)				3.6MW	4.4MW	4.0MW		
	乱流混合係数	HTLの式						HTL ×0.9	HTL ×1.1	
解 析 結 果	最小限界出力比 (MCPR)	0.89	0.78	0.74	0.89	0.96	0.69	0.76	0.86	
	燃料被覆管最高温度 (MCPR ≤ 1.0の時)	820℃	1040℃	1010℃	860℃	400℃	1060℃	940℃	920℃	
備 考		LPFの影響		チャンネル流量の影響		チャンネル出力の影響		乱流混合係数の影響		



Rod Outside Diameter	= 14.5mm
Tie Rod Outside Diameter	= 14.5mm
Na of Fuel Rod	= 36
Na of Tie Rod	= 1
Flow Area	{ = 4789 mm ² (at D _{PT} = 117.8mm)
	{ = 11515 mm ² (at D _{PT} = 149.8mm)
minimum rod-to-rod gap	= 2.04mm

図 5.3.3 - 1 実証炉 3 本 Gd 入燃料 36 本 クラスタ 断面形状

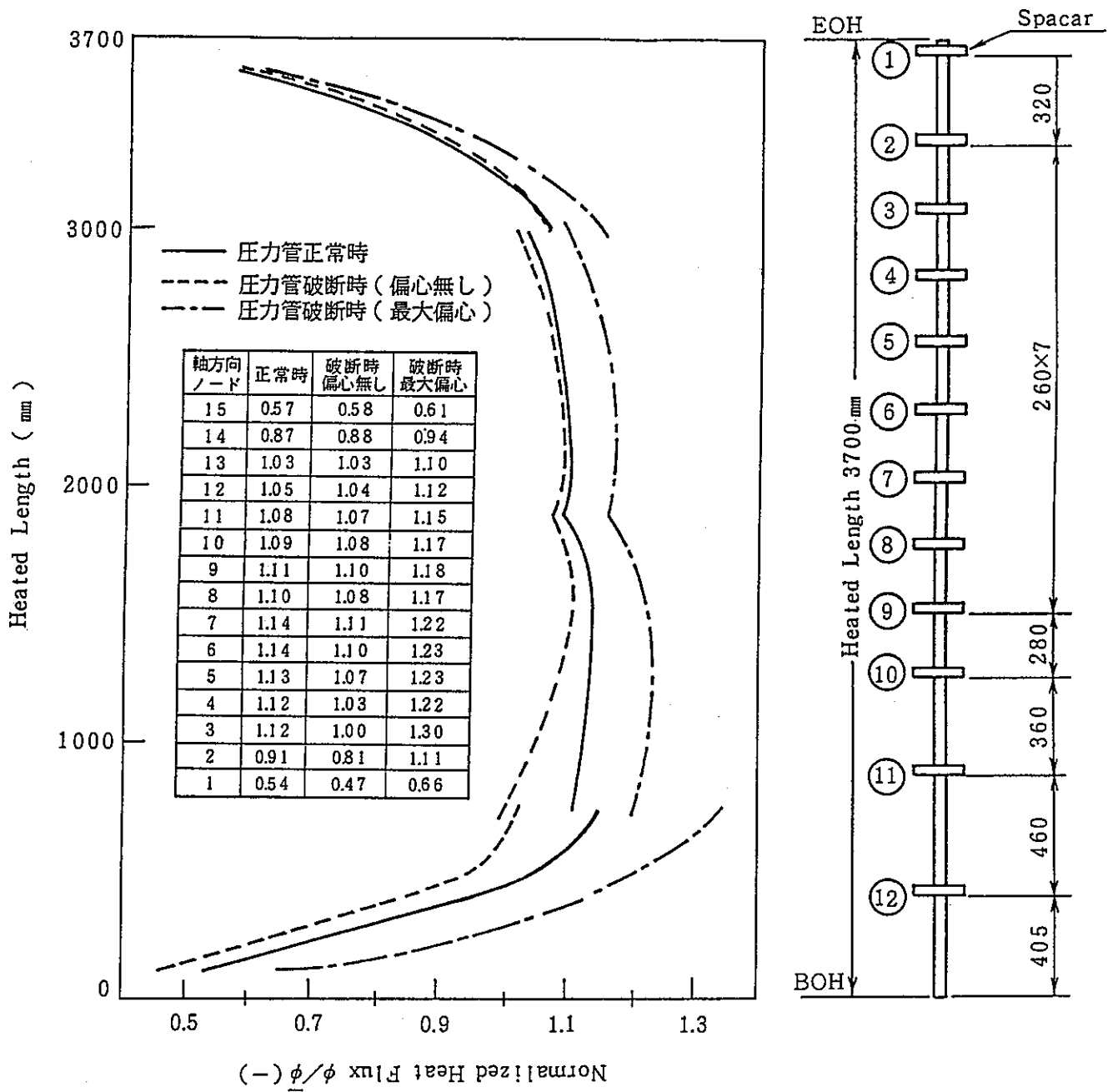
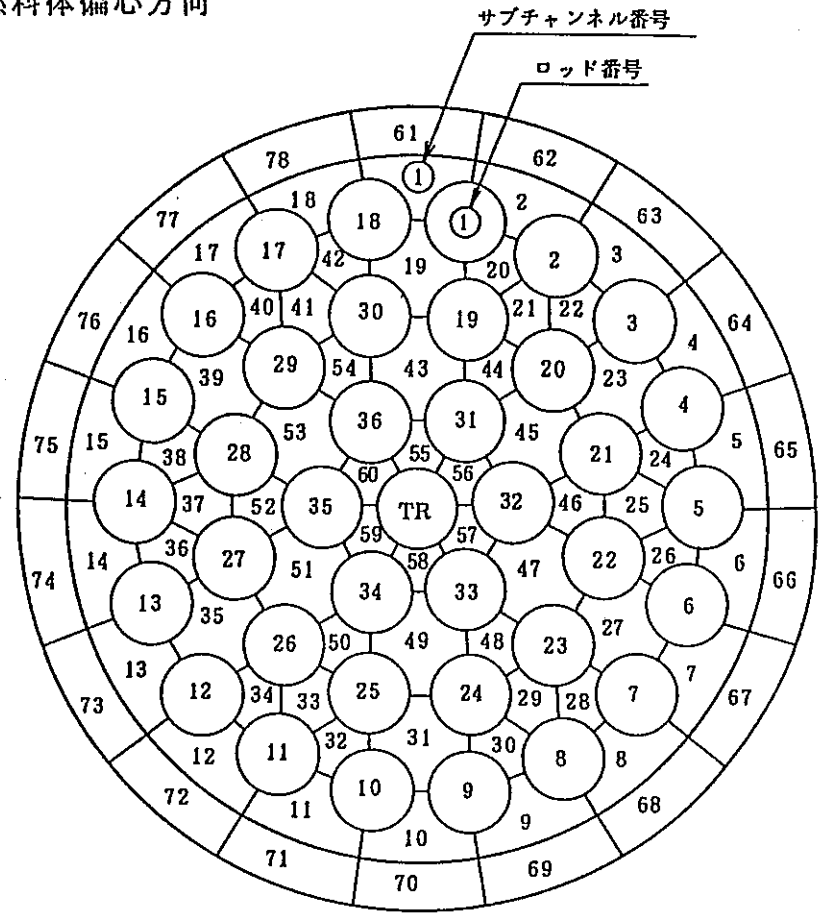
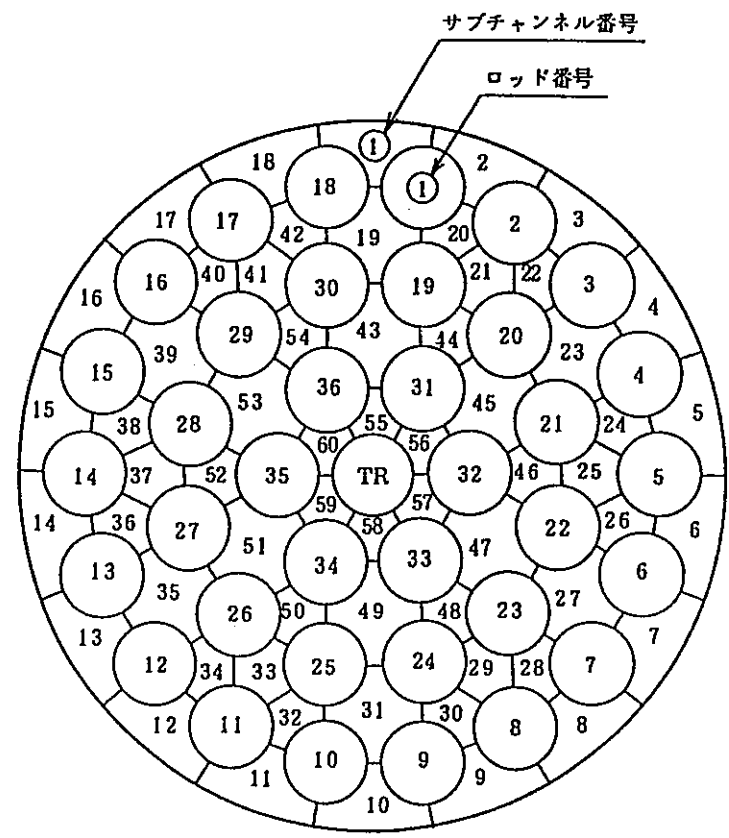


図 5.3.3 - 2 燃料体の出力分布とスペーサ配置

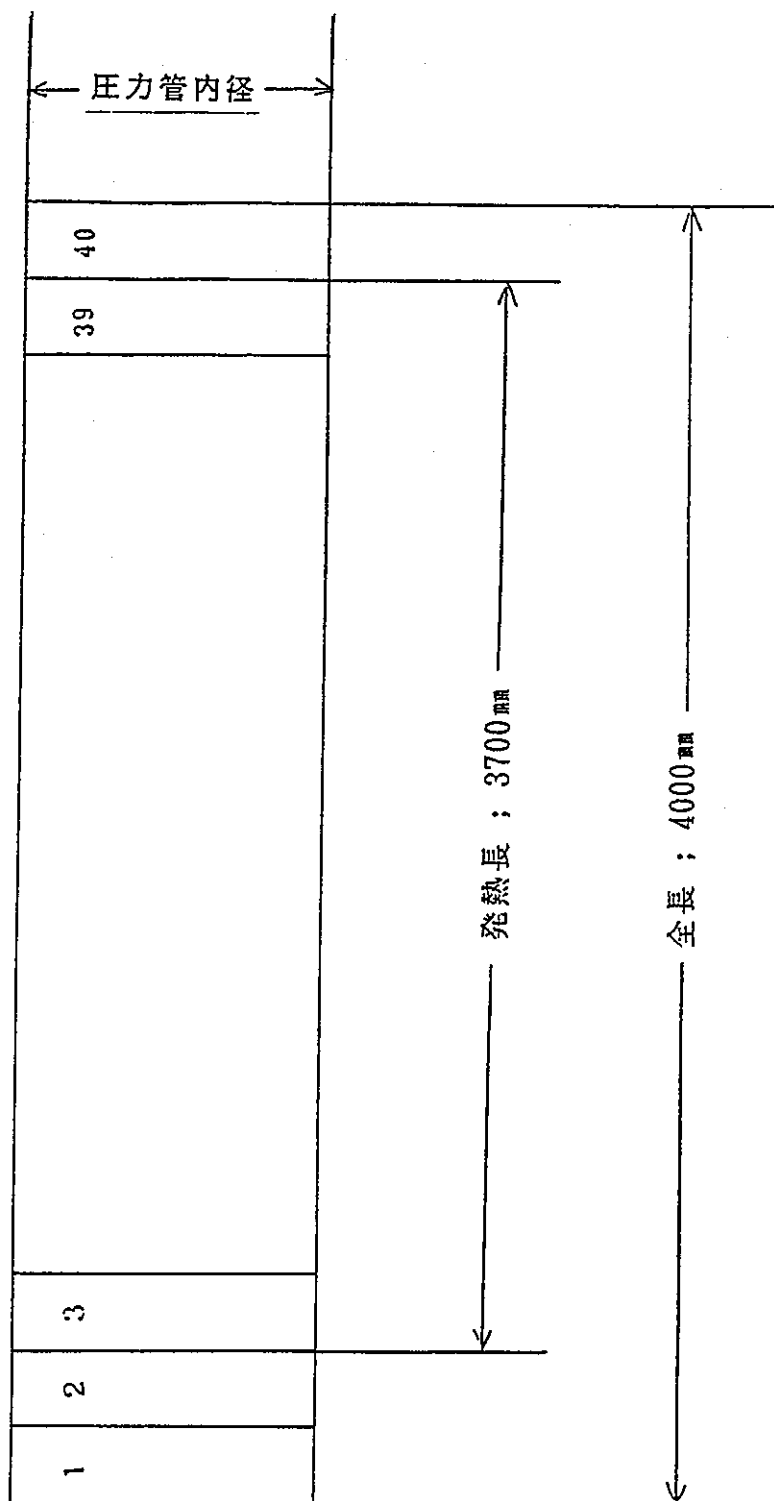
← ; 燃料体偏心方向



(1) 圧力管正常時のサブチャンネル分割

(2) 圧力管破断時のサブチャンネル分割

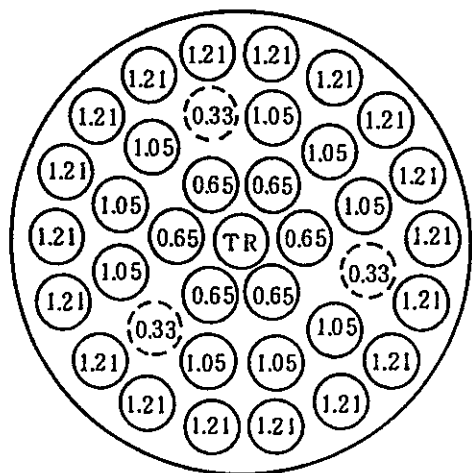
図 5.3.3 - 3 36本クラスタサブチャンネル分割モデル



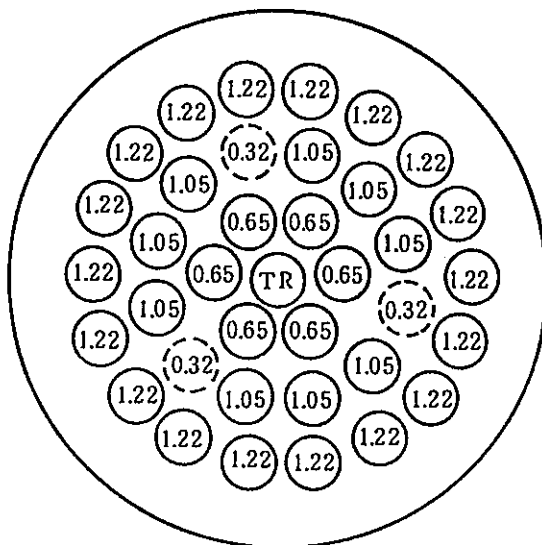
- 注) 1. 1ノード100_{mm}とし、全長を40に等分割した。
 2. 燃料体偏心量は、全長に渡って一定とした。

図5.3.3 - 4 解析体系

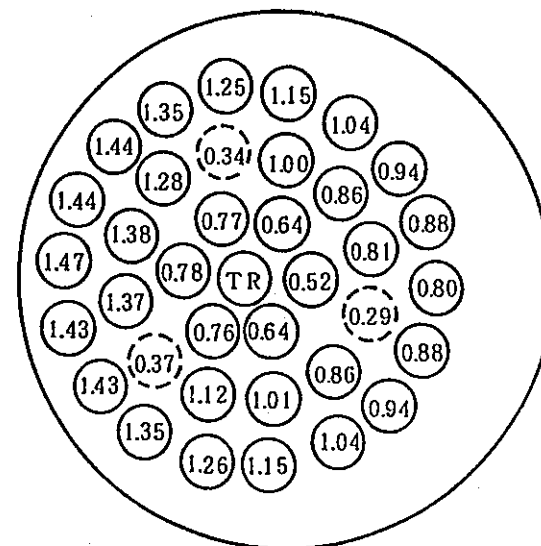
○ 内数値：LPF(-)
 ○ 印：ガドリニア入燃料棒
 (TR) 印：タイロッド



(1) 圧力管が正常な場合
 (圧力管内径 = 117.8 mm)

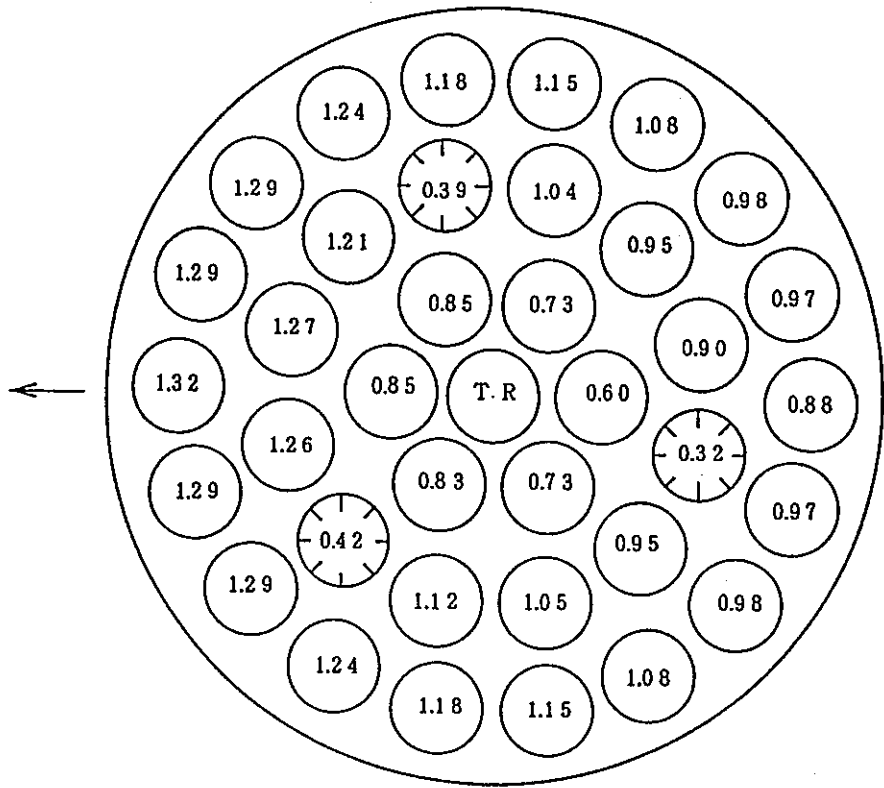
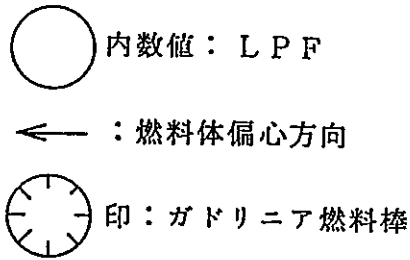


(2) 圧力管が破断した場合
 (圧力管内径 = 149.8 mm,
 燃料体偏心量 = 0.0 mm)

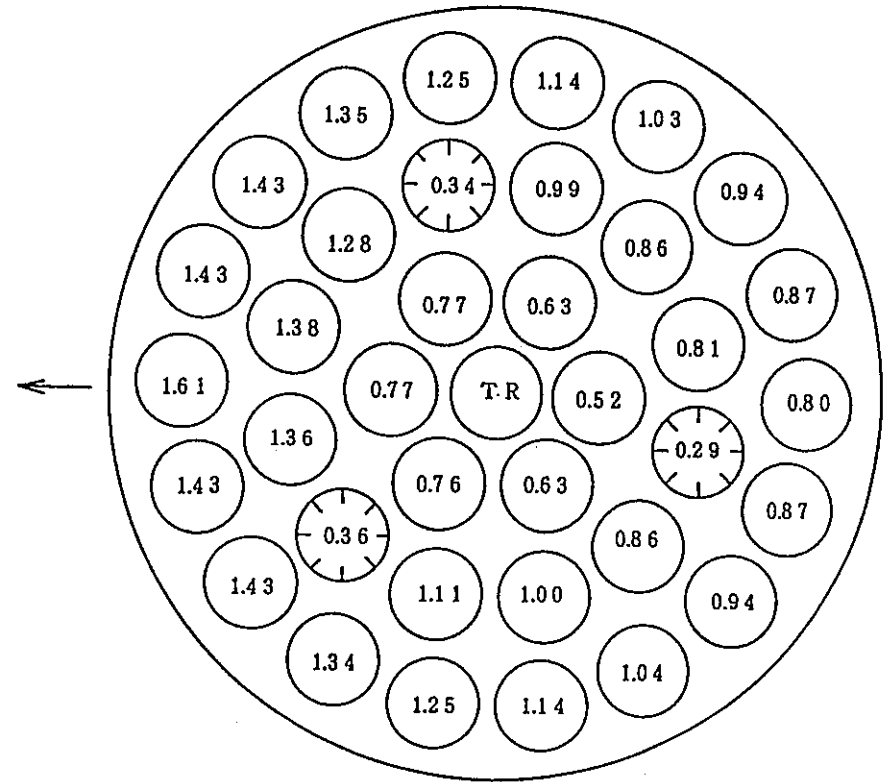


(3) 圧力管が破断した場合
 (圧力管内径 = 149.8 mm,
 燃料体偏心量 = 16.5 mm)

図 5.3.3-5 クラスタ内局所出力分布の変化

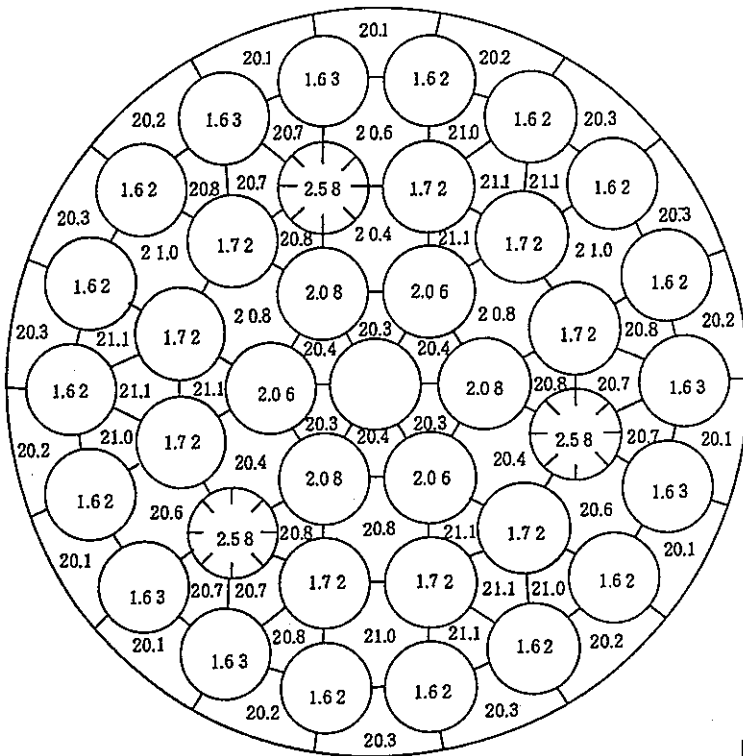


(1) L P F * 0.9



(2) L P F * 1.1

図5.3.3-6 感度解析に使用したクラスタ内径方向出力分布

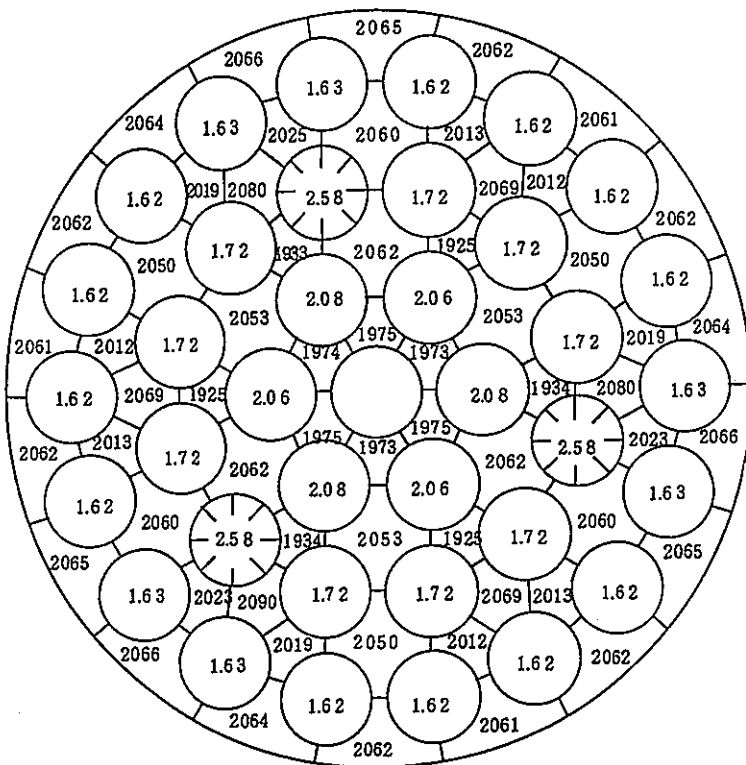


○ 内数値：CPR(-)
 ☆ 印：ガドリニア入燃料棒

平均クオリティ = 2.05%

(1) 蒸気クオリティ分布

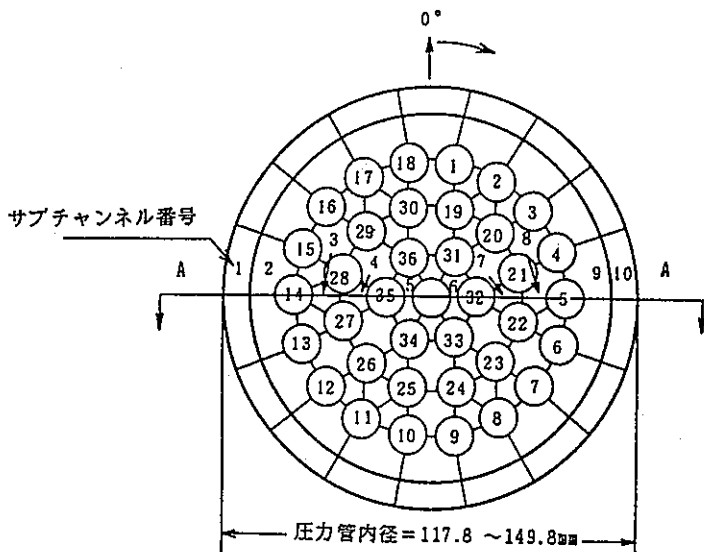
圧力管内径 = 117.8 mm
 偏 心 量 = 0.0 mm
 軸方向位置 = # 2 スペース直前



平均質量速度 = 2046.3 kg/m²·s

(2) 質量速度分布

図5.3.3-7 ケースNo.1-1 圧力管内径=117.8mm 偏心=0.0mmの解析結果 (MCPR発生位置)



シンボル	圧力管内径	偏心量	備考
∅	117.8 mm	0.0 mm	圧力管正常時
○	117.8	0.5	圧力管破断時
△	125.0	4.1	
□	130.0	6.6	
◇	135.0	9.1	
+	140.0	11.6	
×	145.0	14.1	
☆	149.8	16.5	

軸方向位置 = # 2 スペーサ直前
燃料体偏心方向 = 270°

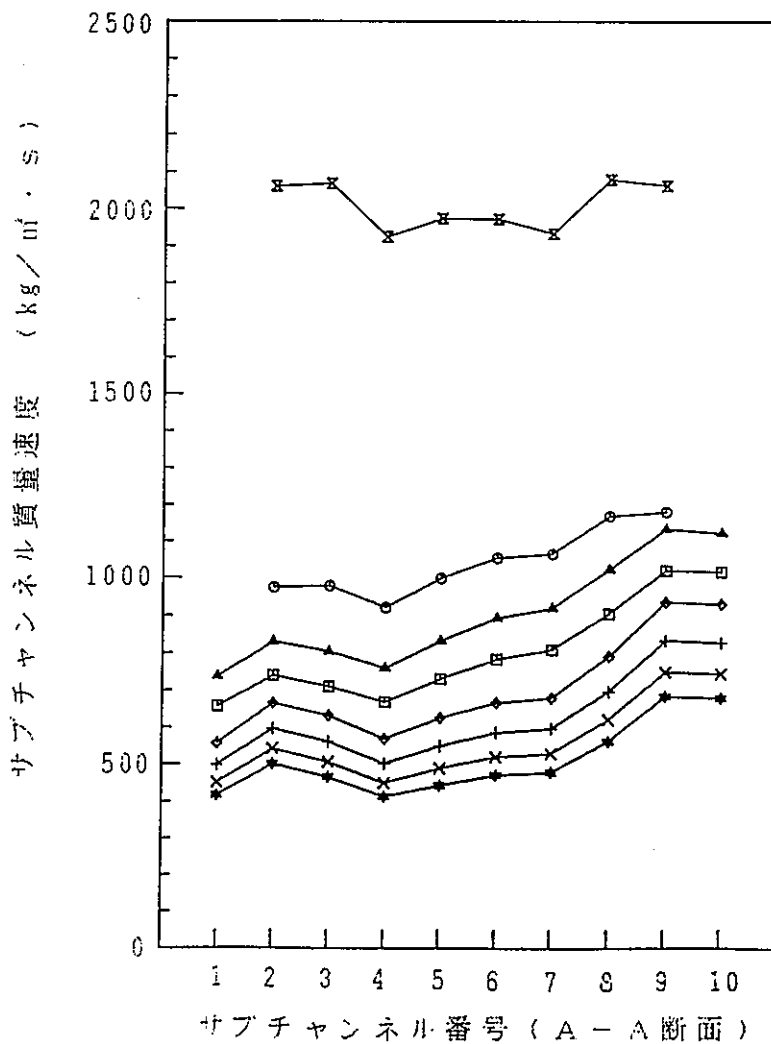
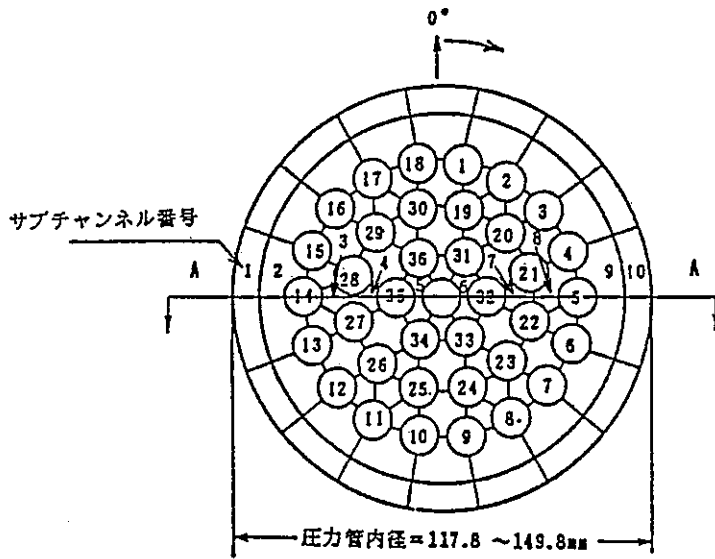


図5.3.3-8 a 圧力管破断時の圧力管拡管に伴うサブチャンネル質量速度分布の変化



シンボル	圧力管内径	偏心量	備考
▲	117.8 mm	0.0 mm	圧力管正常時
●	117.8	0.5	
○	125.8	4.1	圧力管破断時
△	130.0	6.6	
□	135.0	9.1	
◇	140.0	11.6	
+	145.0	14.1	
⊗	149.8	16.5	

軸方向位置 = #2 スペース直前
 燃料体偏心方向 = 270°

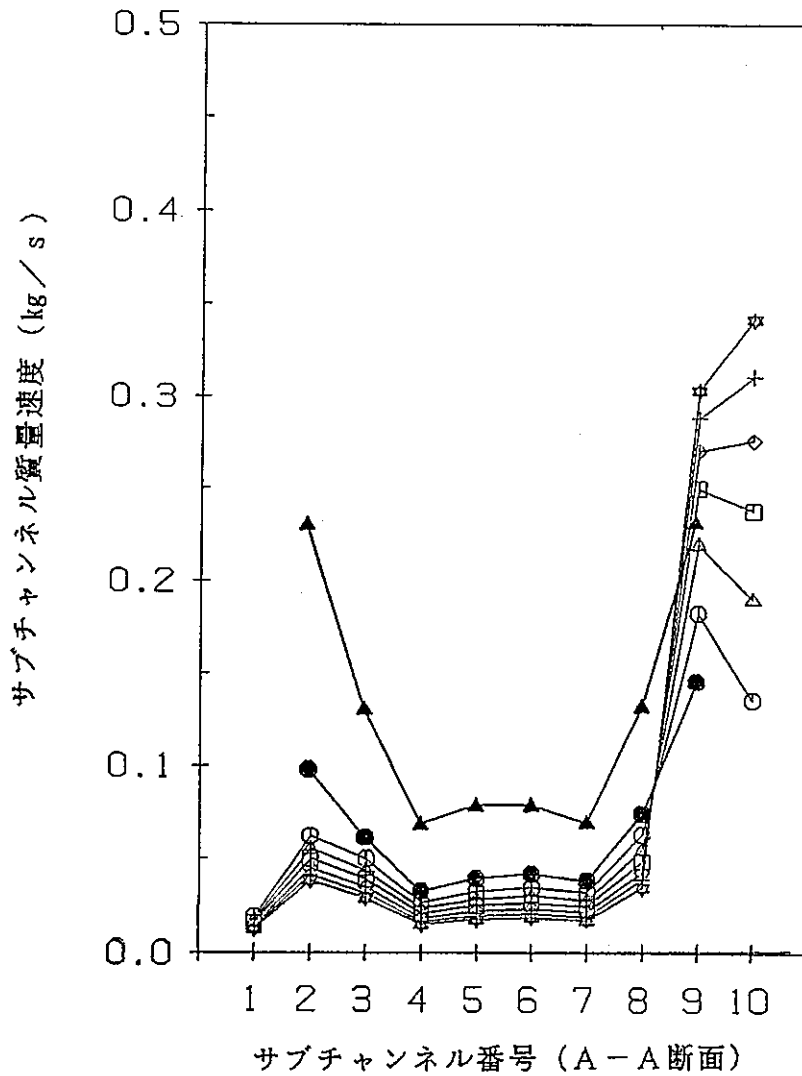
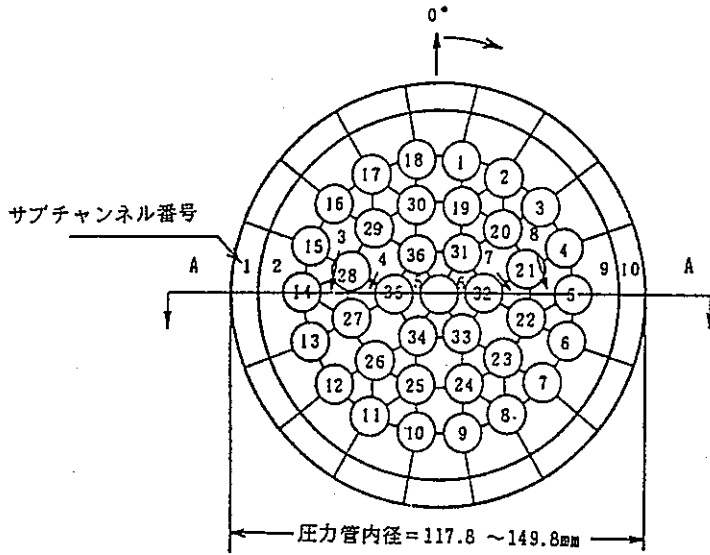


図5.3.3-8b 圧力管破断及び燃料体偏心に伴うサブチャンネル質量速度分布の変化



シンボル	圧力管内径	偏心量	備考
∅	117.8 mm	0.0 mm	圧力管正常時
○	117.8	0.5	圧力管破断時
△	125.0	4.1	
□	130.0	6.5	
◇	135.0	9.1	
+	140.0	11.6	
×	145.0	14.1	
☆	149.8	16.5	

軸方向位置 = # 2 スペース直前
燃料体偏心方向 = 270°

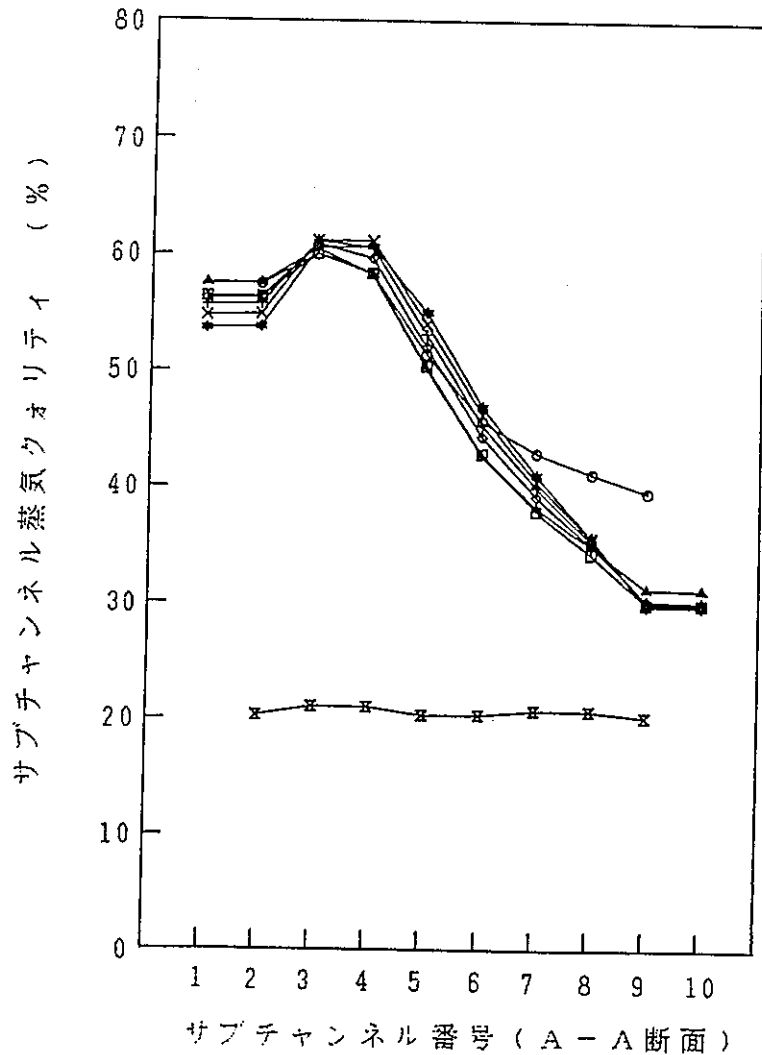


図 5.3.3 - 9 圧力管破断時の圧力管拡管に伴うサブチャンネル蒸気クオリティ分布の変化

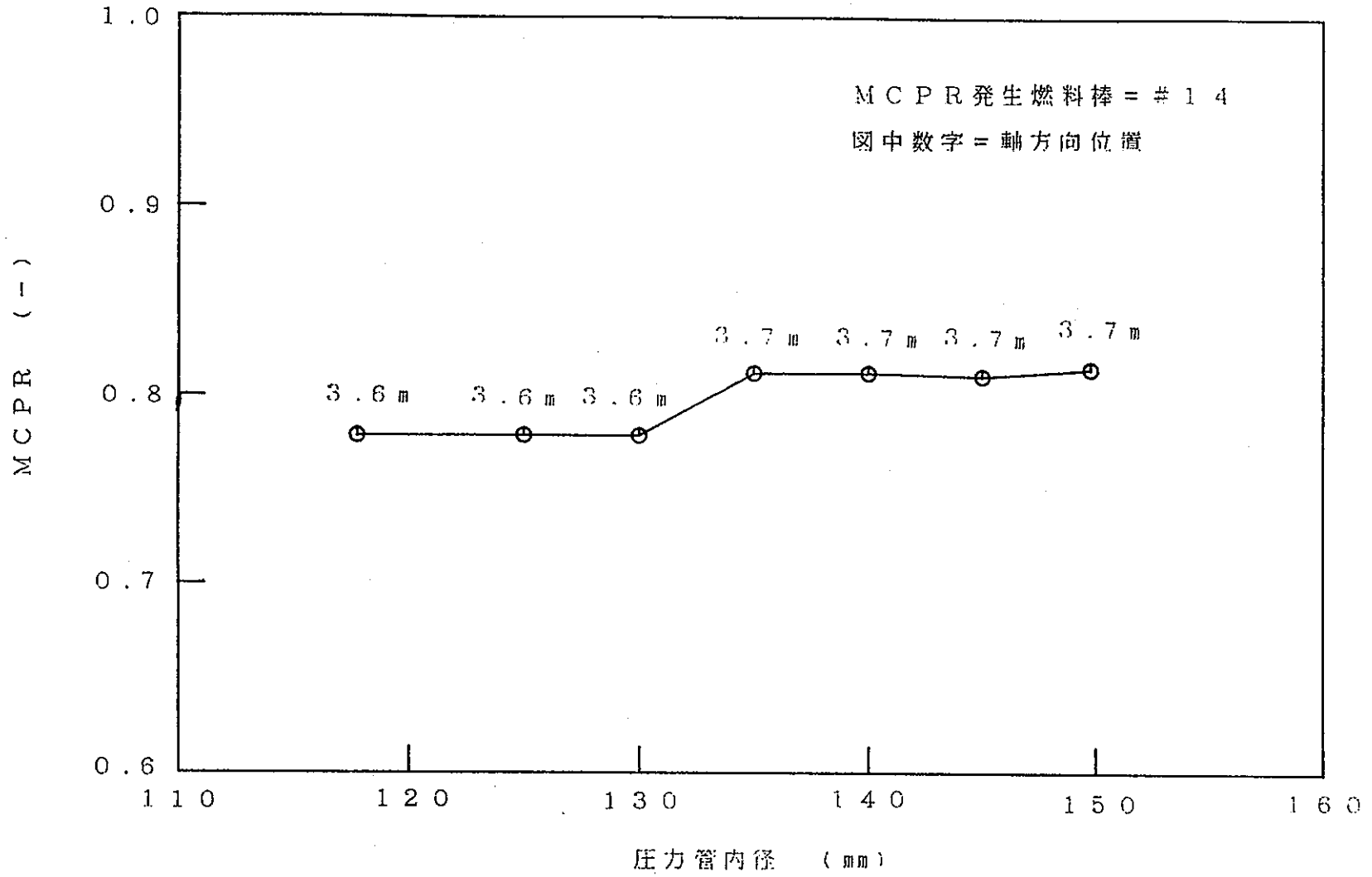


図 5.3.3 -10 圧力管の拡管量に伴う M C P R の変化

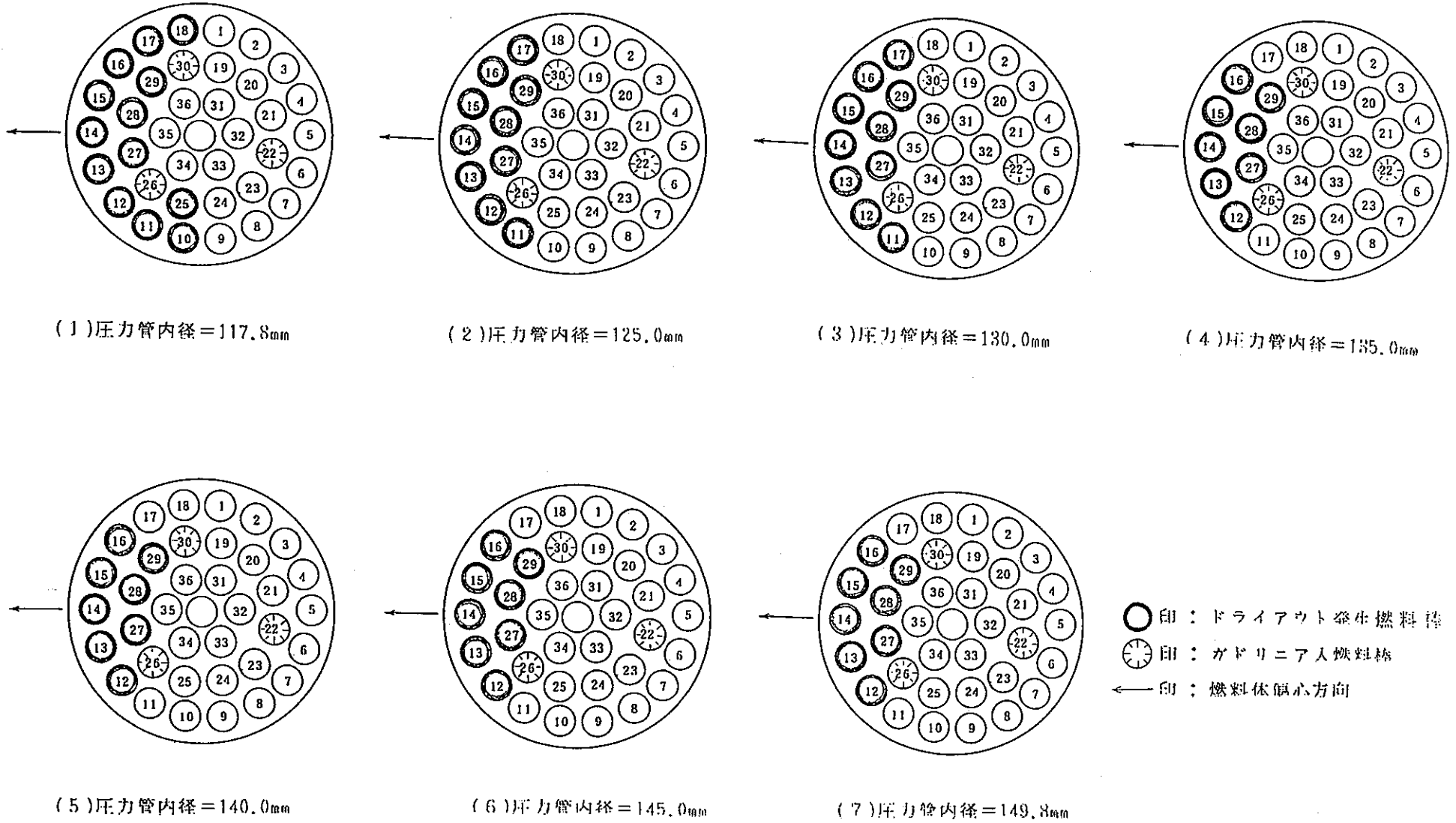
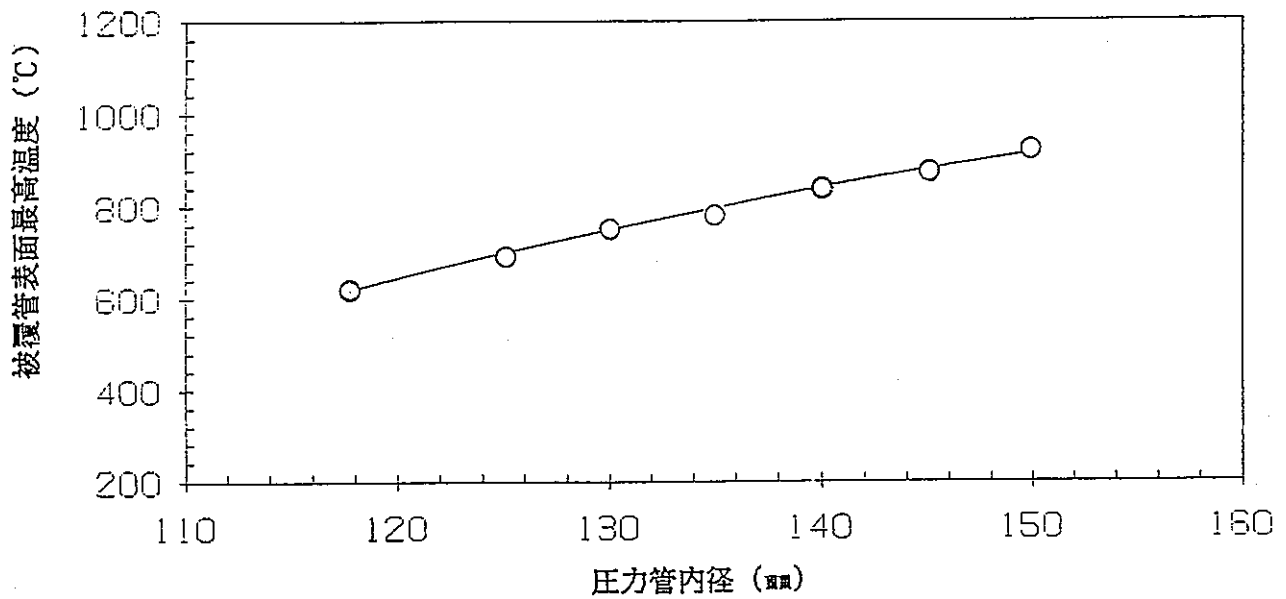
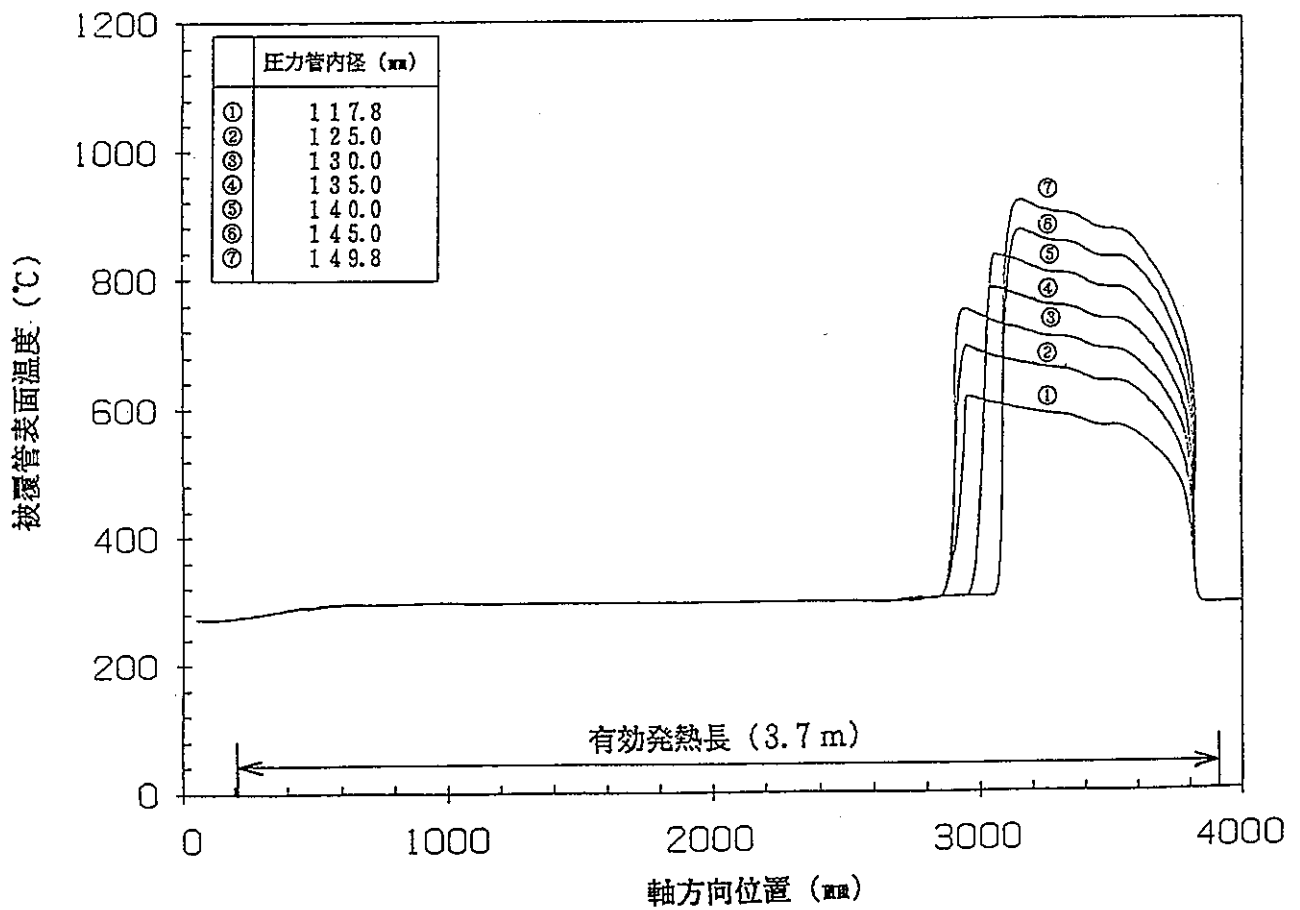


図 5.3.3-11 圧力管破断時の拡管量によるドライアウト領域の変化

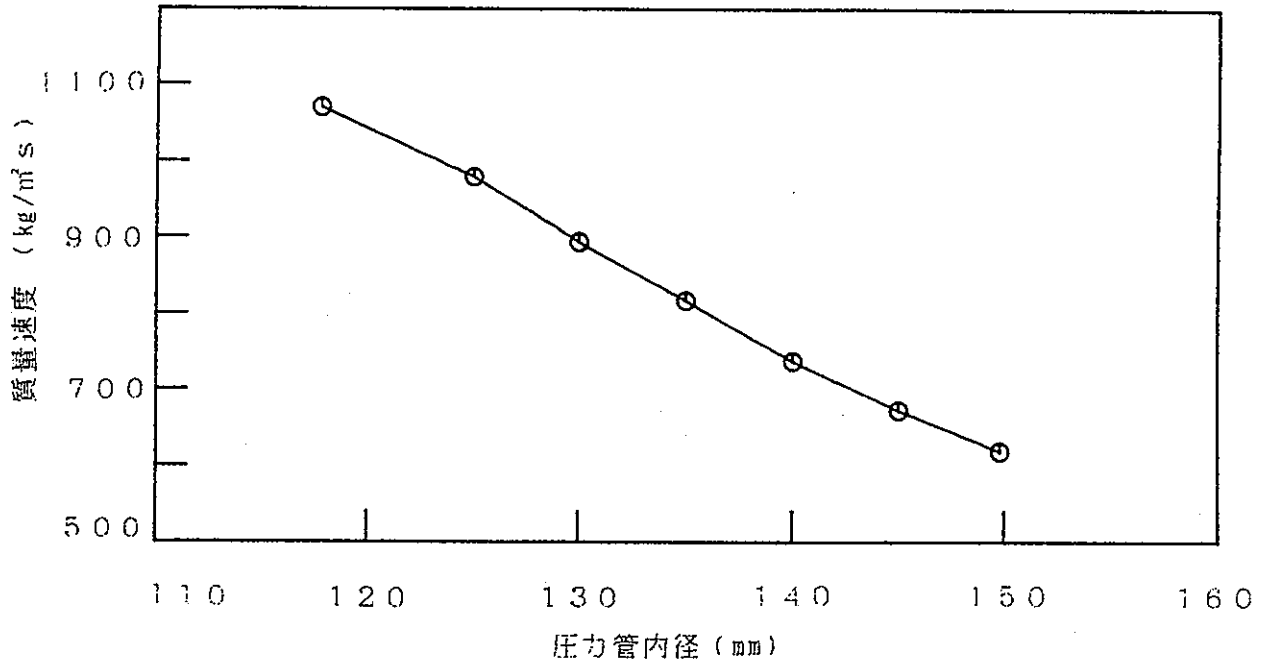


(1) 最大偏心時の圧力管内径と被覆管表面最高温度の関係

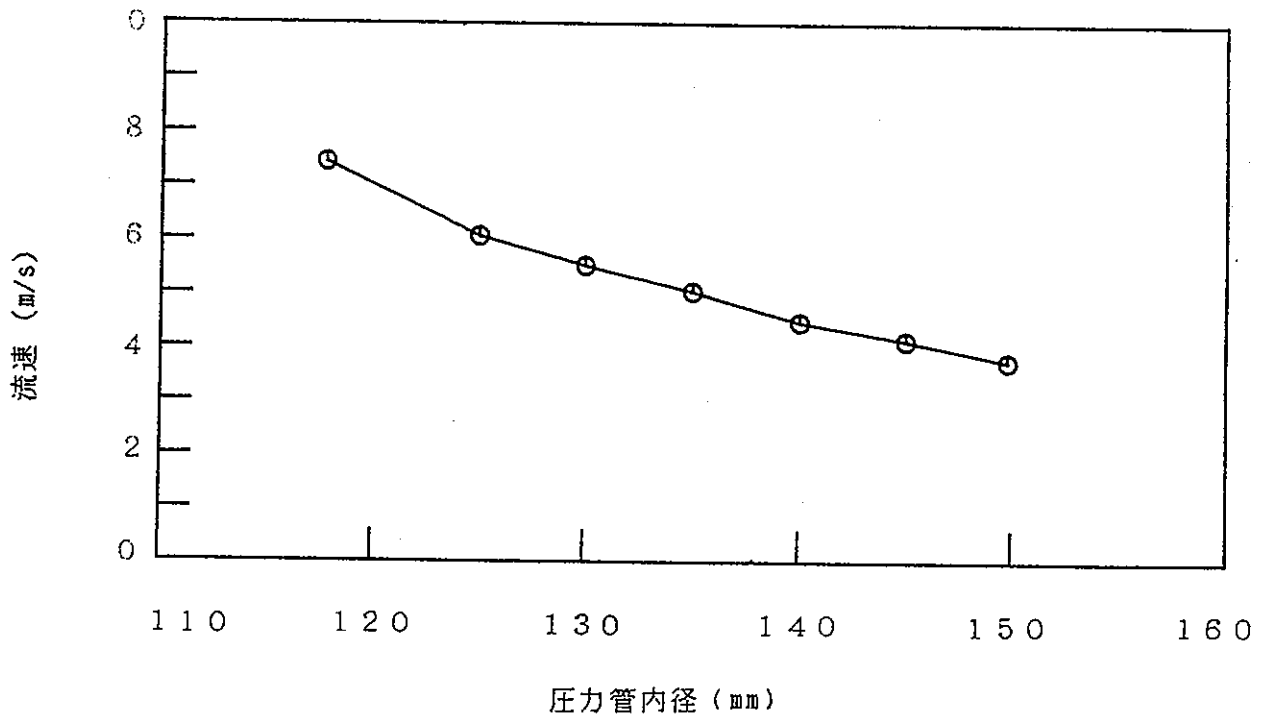


(2) 最大偏心時の軸方向被覆管表面温度分布

図 5.3.3 - 12 圧力管破断時の圧力管内径をパラメータとしたスペクトル解析結果

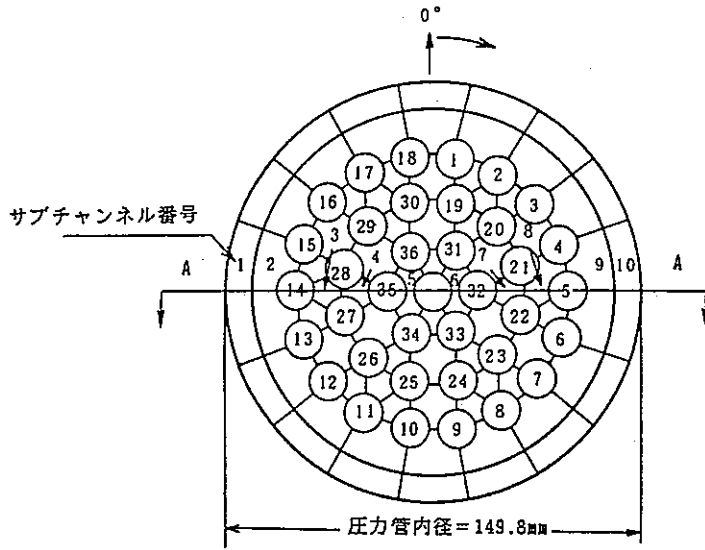


(1) 圧力管の拡管量に伴う平均質量速度の変化



(2) PCT発生位置での各ケースの流速の変化

図5.3.3-13 圧力管破断時の圧力管の拡管量をパラメータとした解析結果



シンボル	圧力管内径	偏心量	備考
○	117.8 mm	0.0 mm	圧力管正常時
△	149.8	0.0	圧力管破断時
□	149.8	5.0	
◇	149.8	10.0	
+	149.8	16.5	

軸方向位置 = # 2 スペース直前
 燃料体偏心方向 = 270°

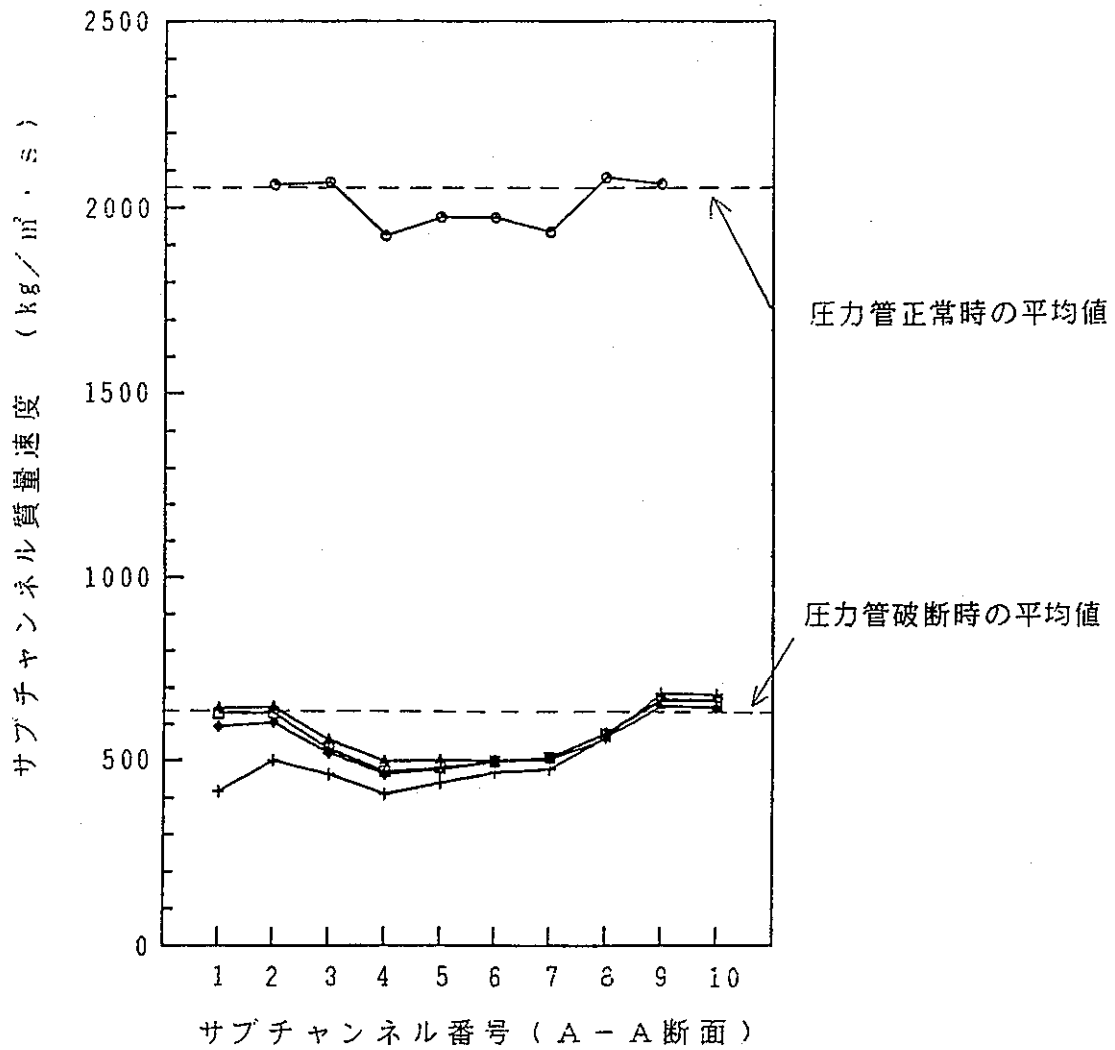
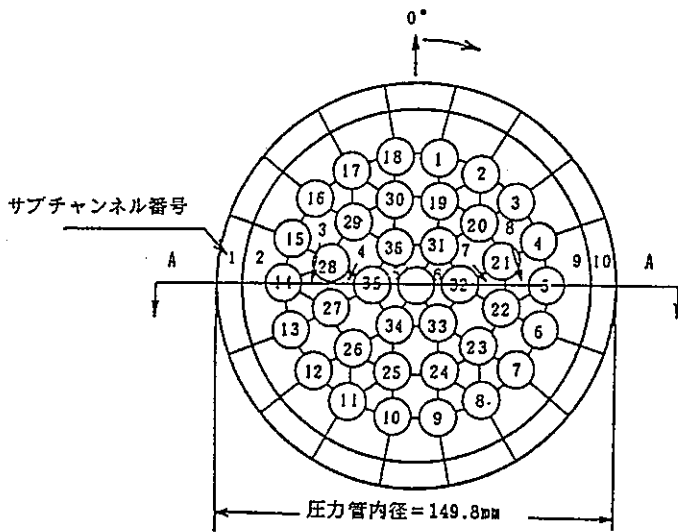


図 5.3.3 - 15 圧力管破断及び燃料体偏心に伴うサブチャンネル質量速度分布の変化



シンボル	圧力管内径	偏心量	備考
○	117.8 mm	0.0 mm	圧力管正常時
△	149.8	0.0	圧力管破断時
□	149.8	5.0	
◇	149.8	10.0	
+	149.8	16.5	

軸方向位置 = # 2 スペース直前
 燃料体偏心方向 = 270°

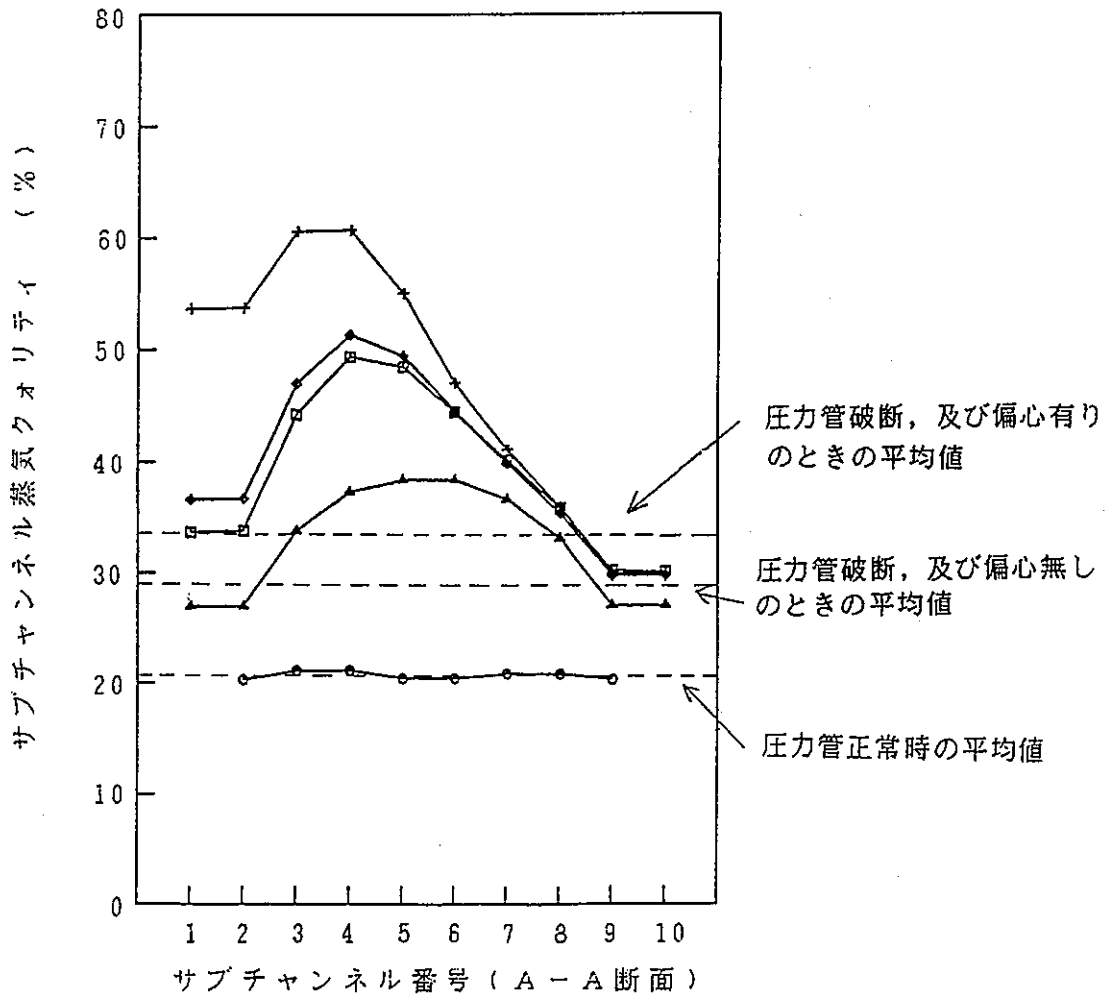


図 5.3.3-16 圧力管破断及び燃料体偏心に伴うサブチャンネル蒸気クオリティ分布の変化

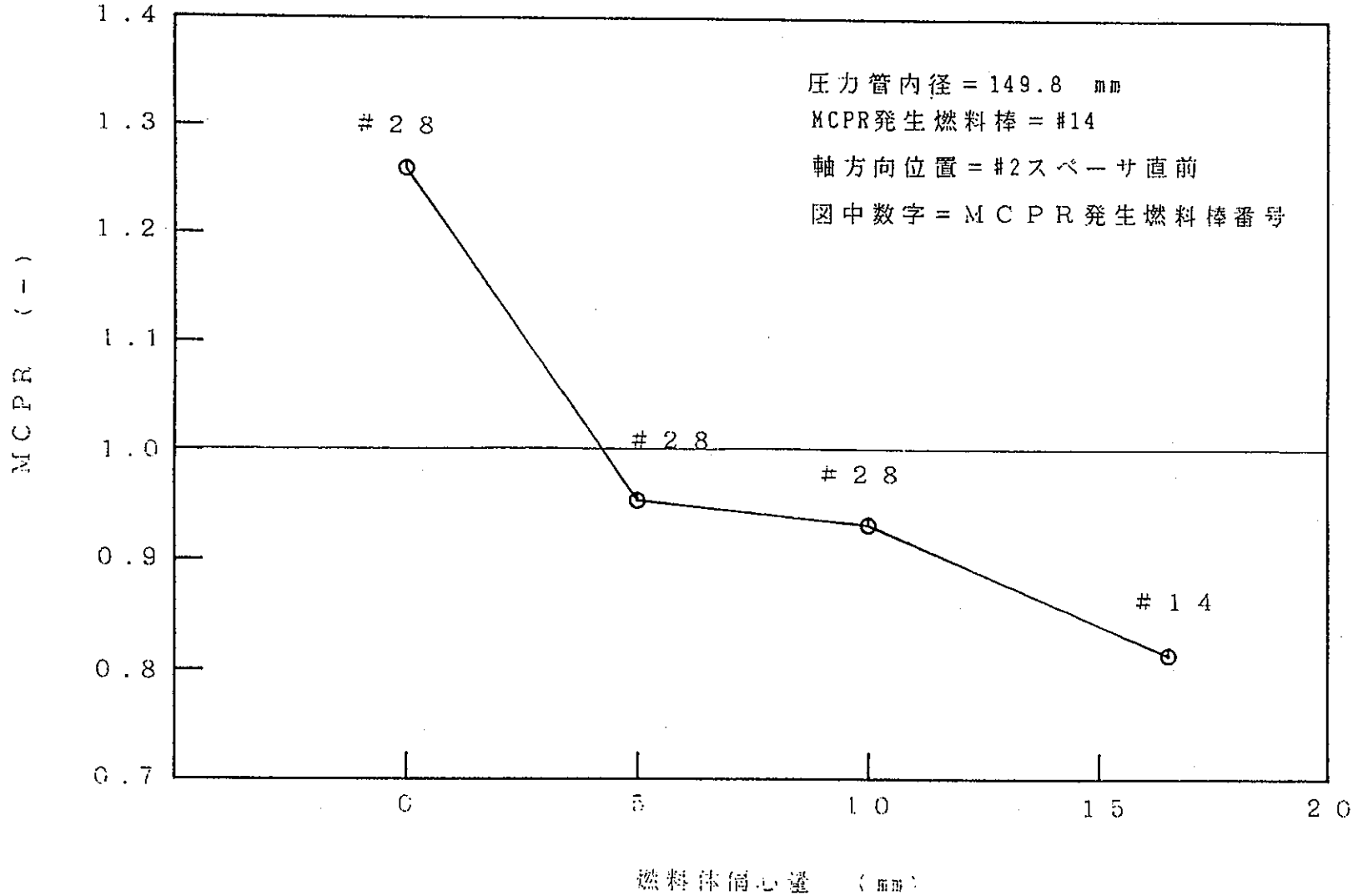
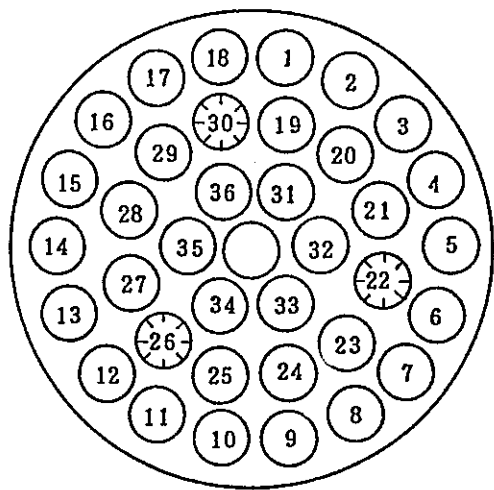
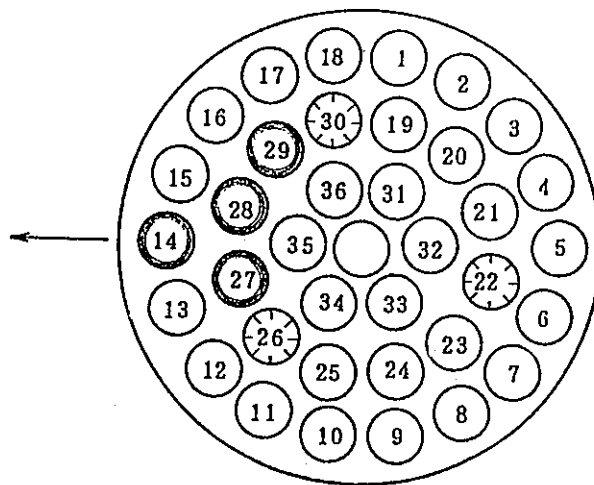


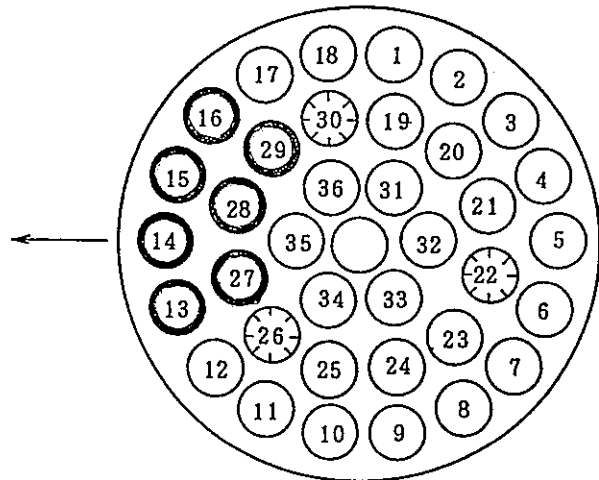
図 5.3.3 - 17 燃料体偏心率の変化に伴うMCPRの変化



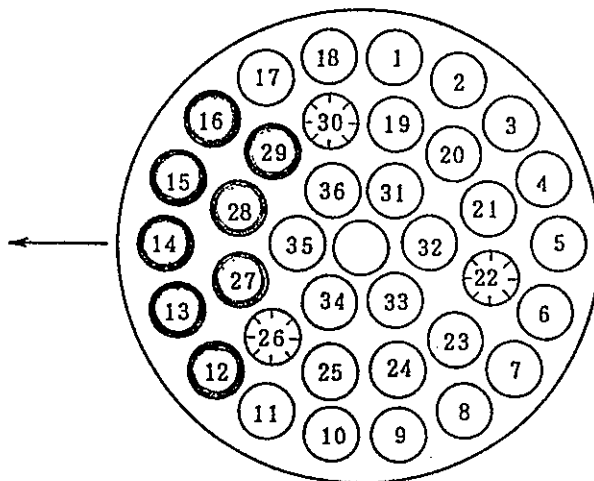
(1) 偏心量 = 0.0mm



(2) 偏心量 = 5.0mm



(3) 偏心量 = 10.0mm



(4) 偏心量 = 16.5mm

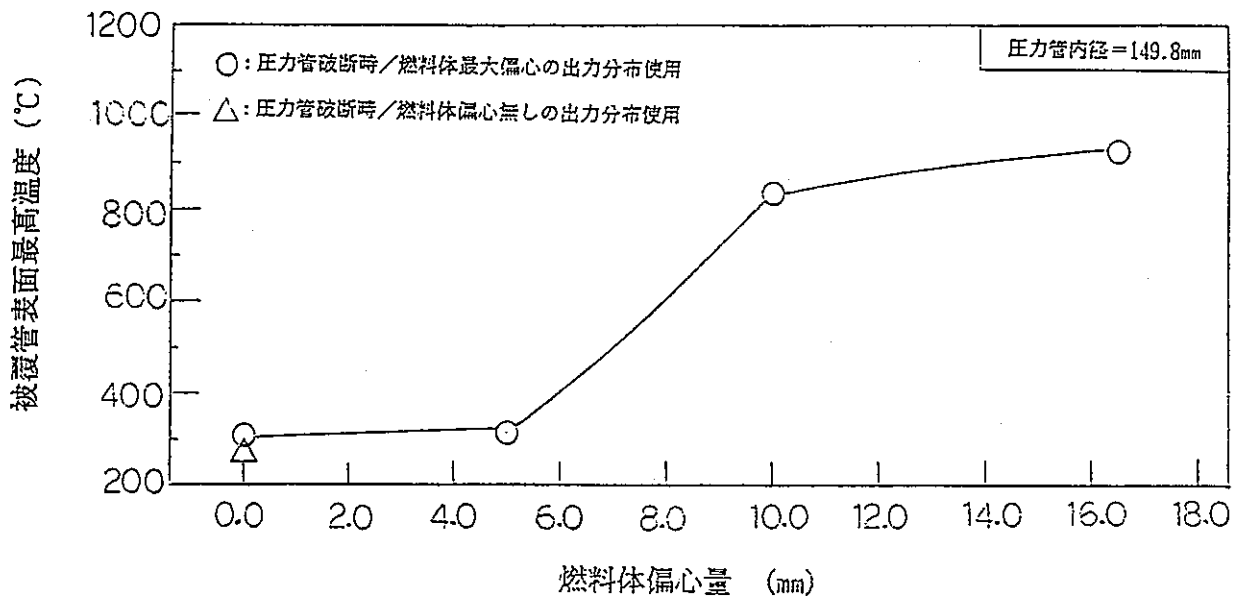
圧力管内径 = 149.6mm

○印 : ドライアウト発生燃料棒

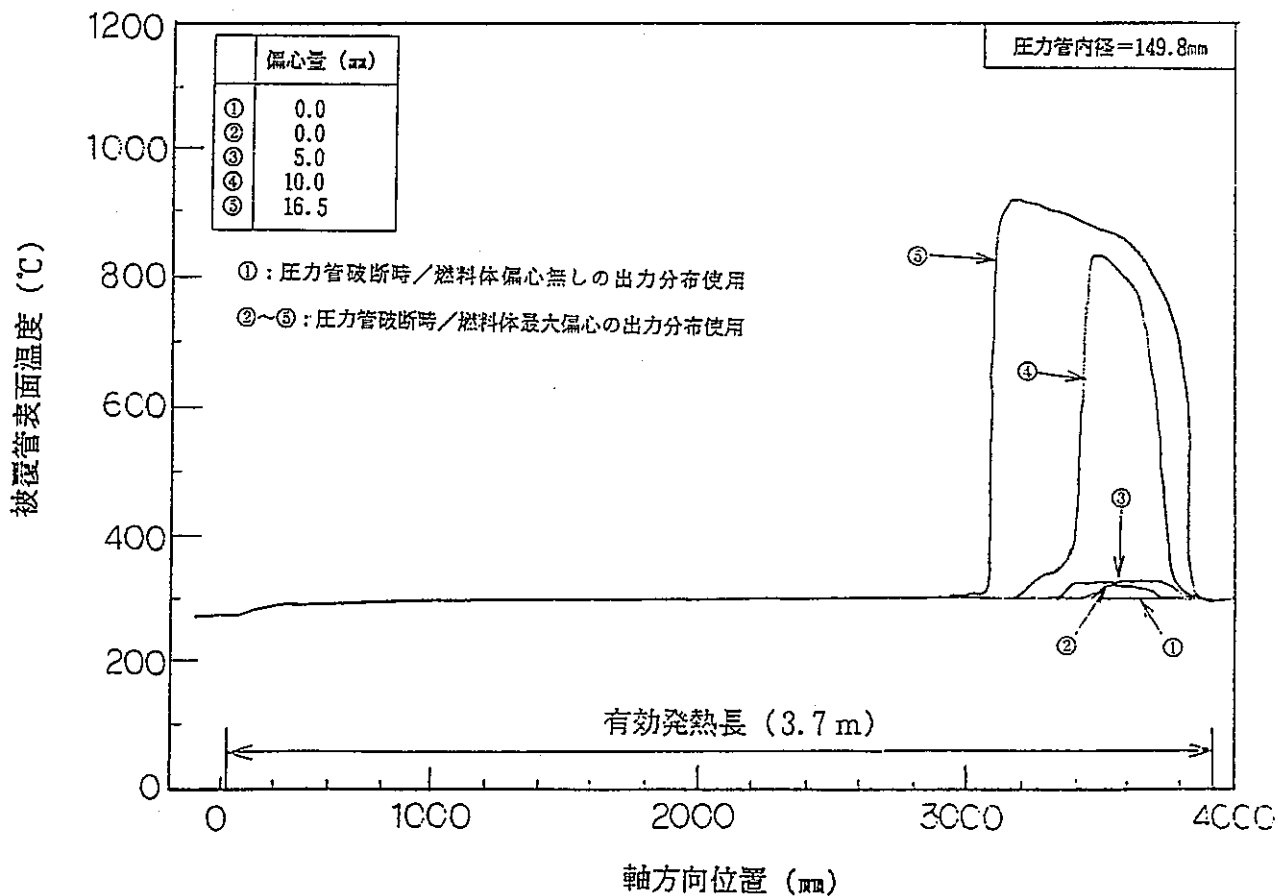
⊛印 : ガドリニア入燃料棒

←印 : 燃料体偏心方向

図 5.3.3-18 燃料体偏心によるドライアウト領域の変化



(1) 燃料体偏心量と被覆管表面最高温度の関係



(2) 燃料体偏心量変化に伴う軸方向被覆管表面温度の変化

図 5.3.3 - 19 圧力管最大拡管時の燃料体偏心量をパラメータとした解析

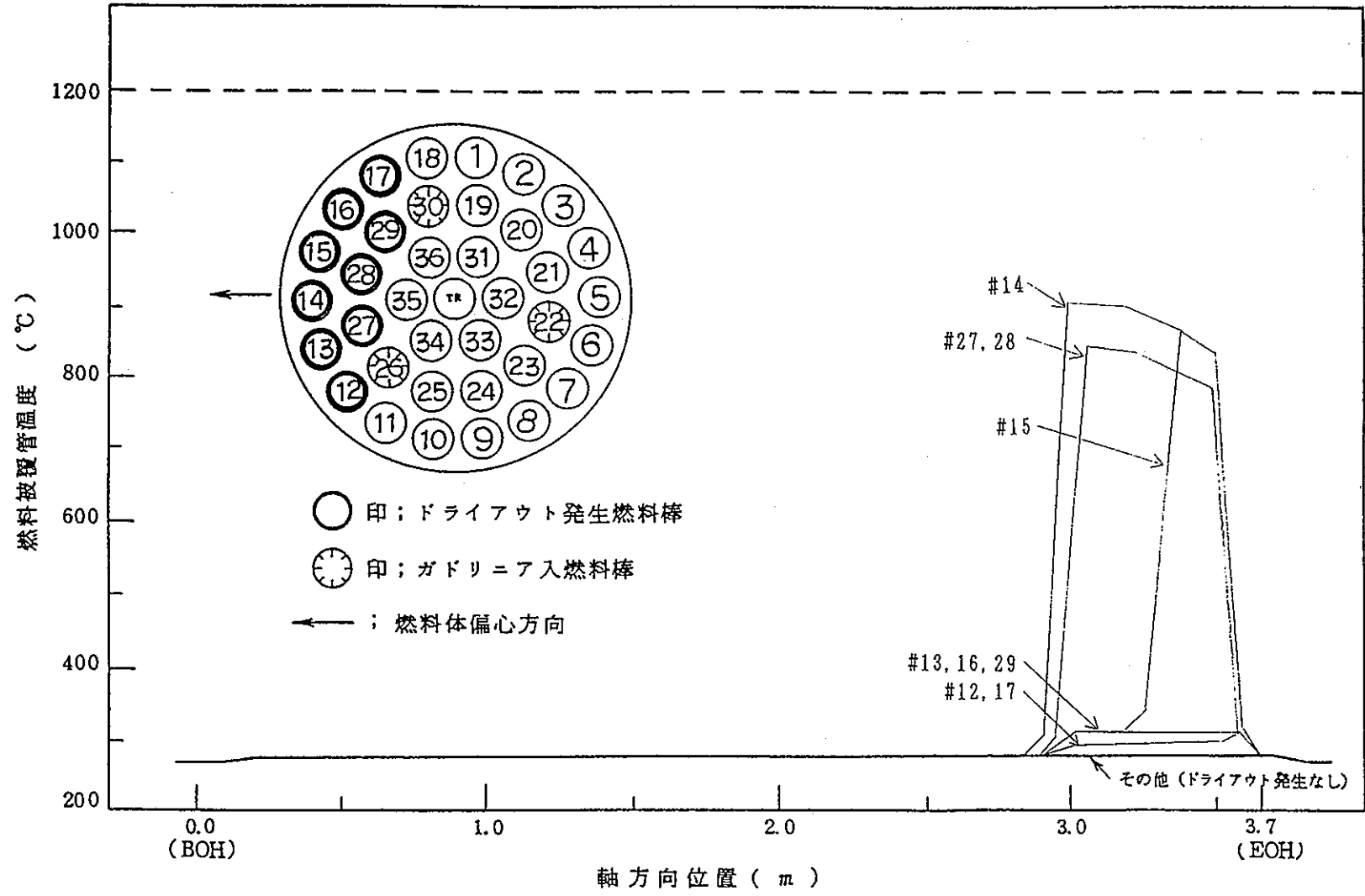


図5.3.3-20 ケースNo.1-8 圧力管内径=149.8mm, 偏心=16.5mmでの軸方向被覆管表面温度分布

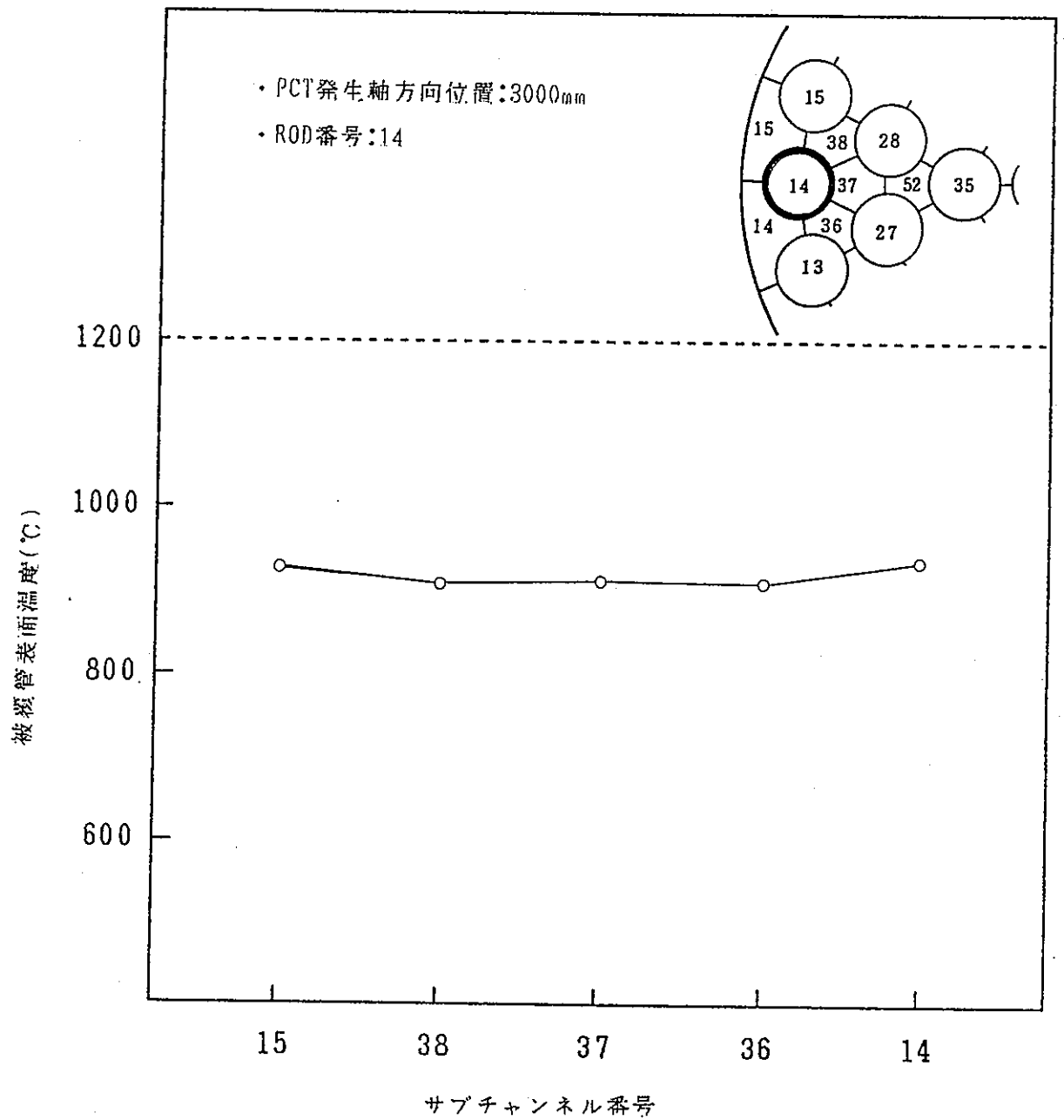


図 5.3.3-21 ケース No. 1-8 圧力管内径=149.8mm, 偏心=16.5mmでの周方向温度分布

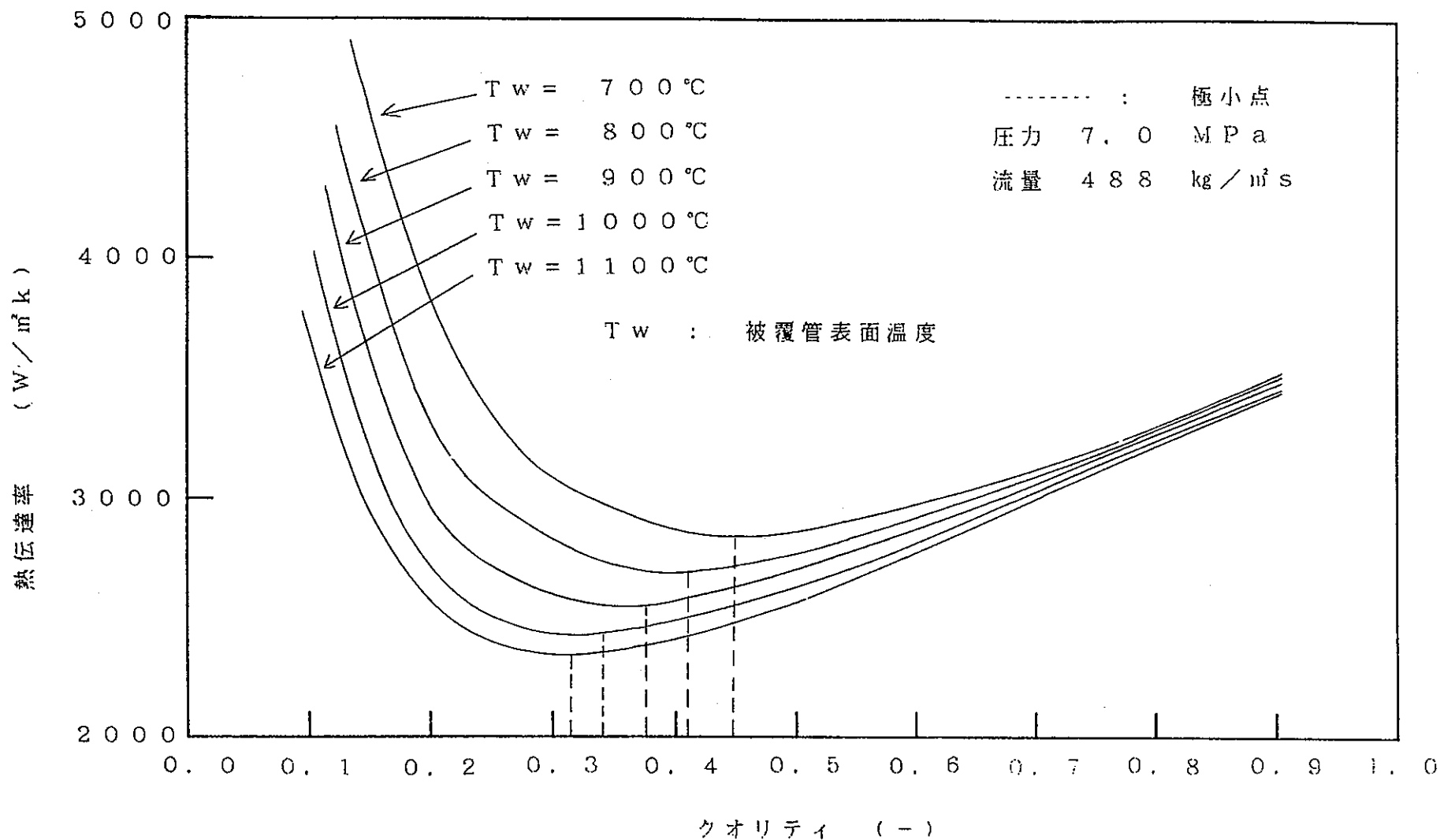


図 5.3.3 - 22 膜沸騰熱伝達率相関式の特 性

○印：ドライアウト発生燃料棒
 ⊙印：ガドリニア入燃料棒
 ←印：燃料体偏心方向

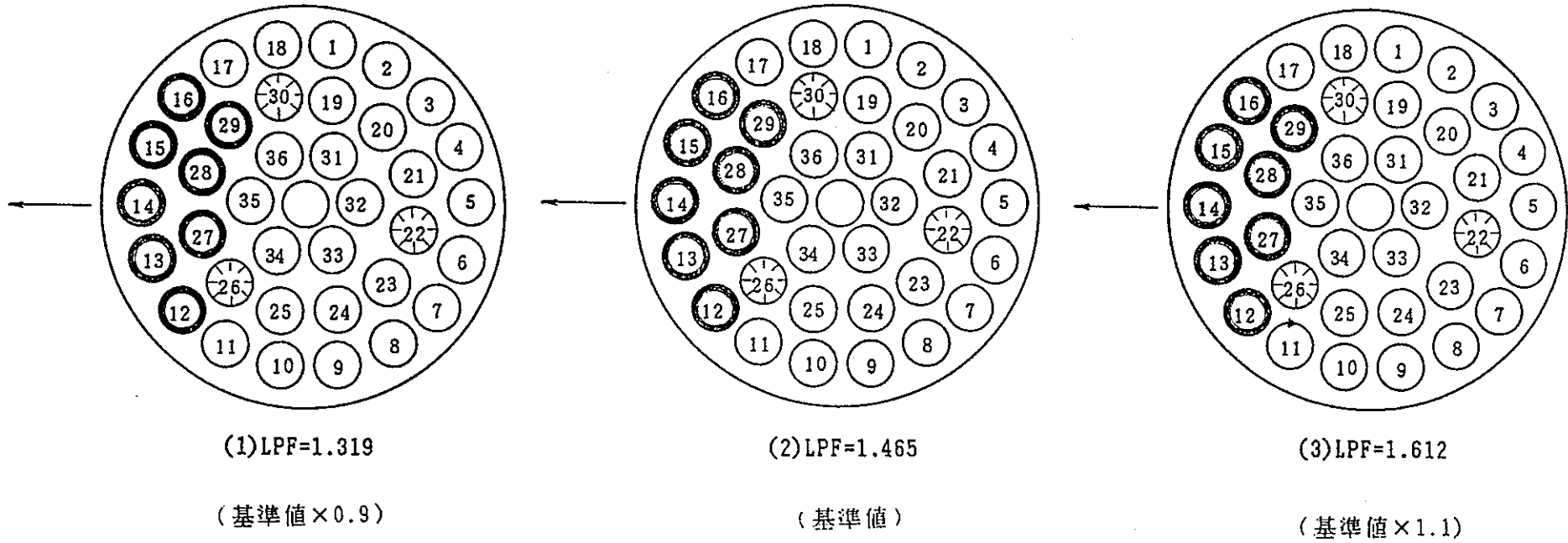


図 5.3.3-23 L P F 変化によるドライアウト領域の変化

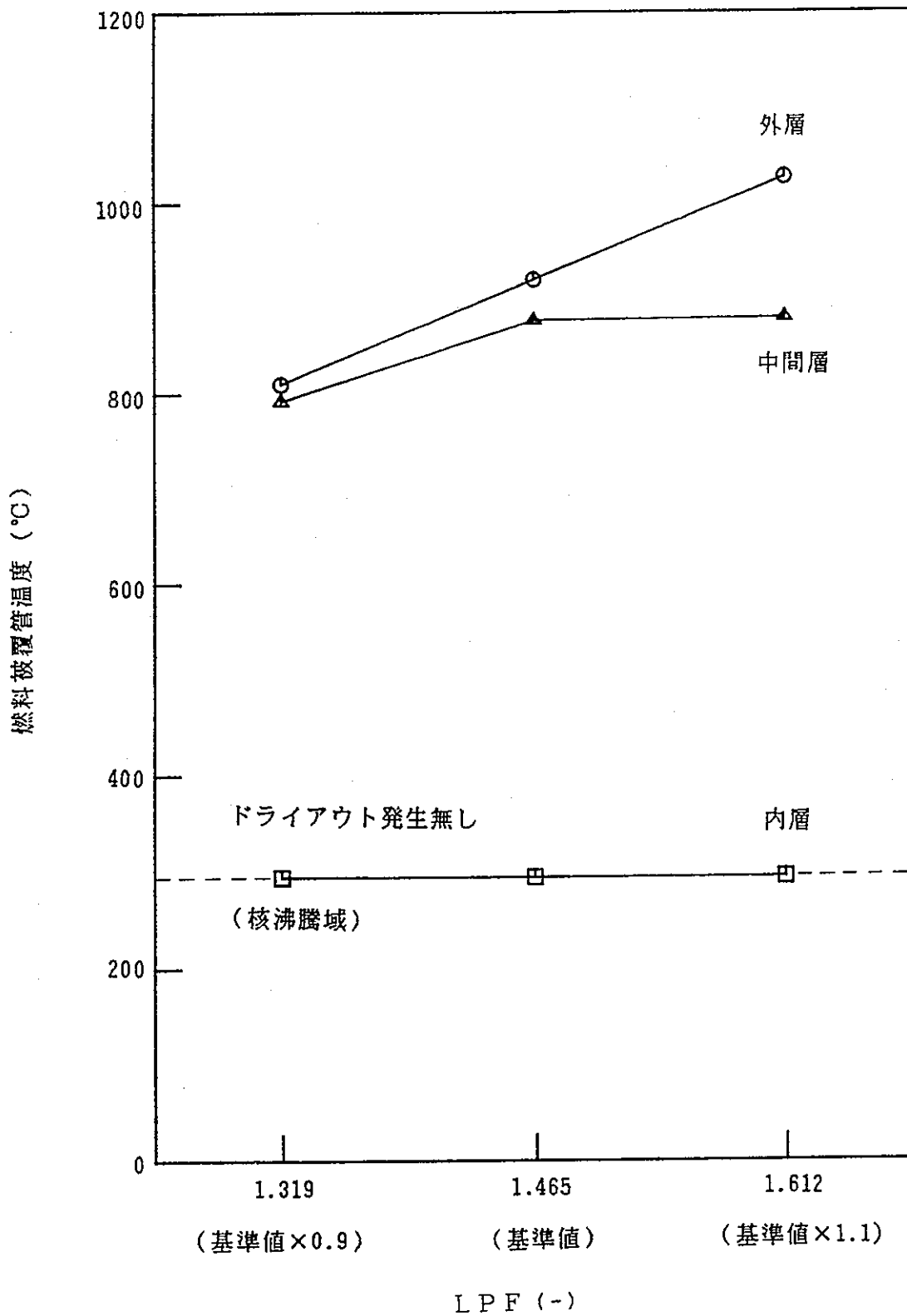


図 5.3.3 - 24 燃料被覆管温度に対する LPF 変化の影響

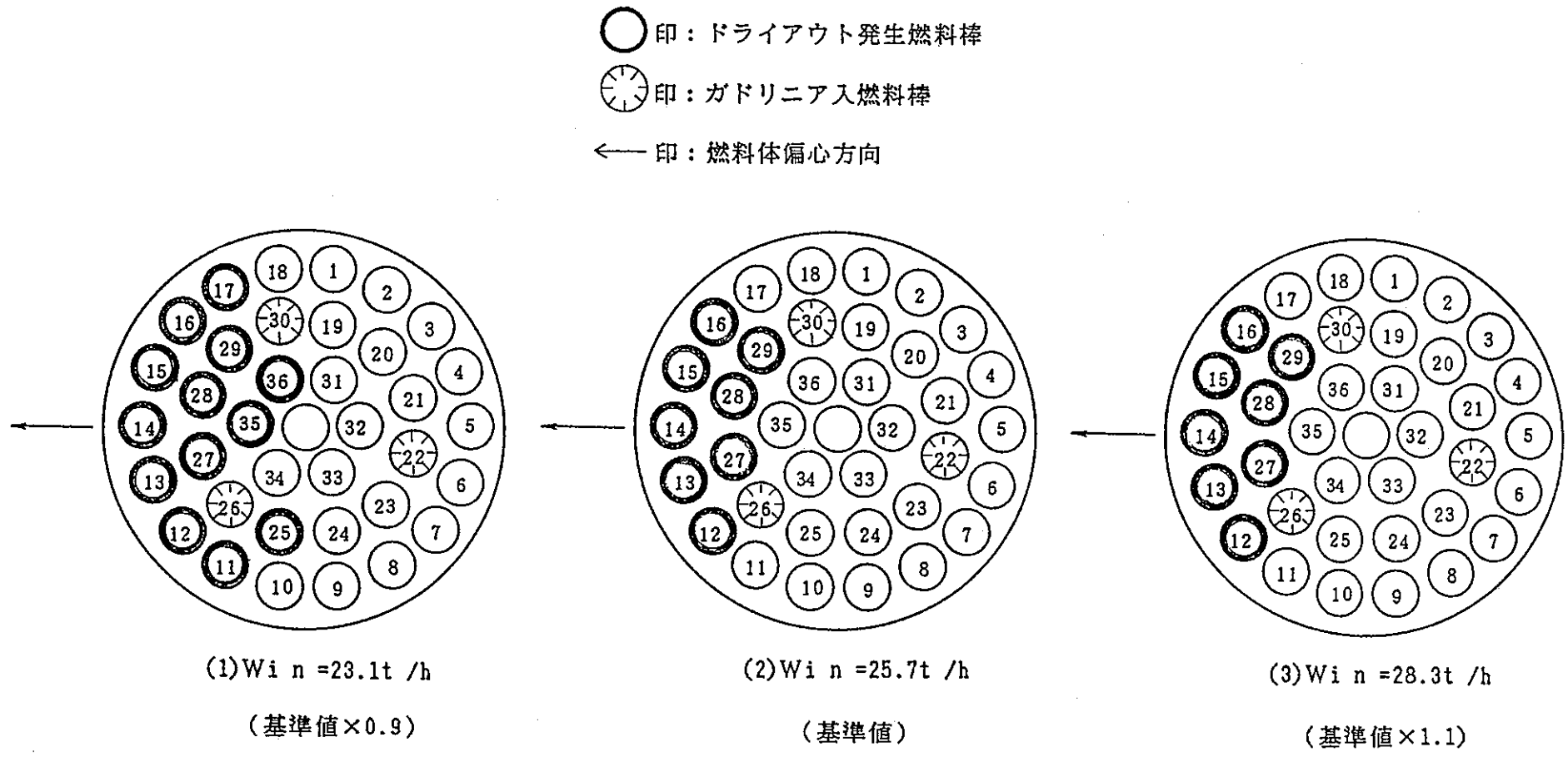


図 5.3.3 - 25 チャンネル流量変化によるドライアウト領域の変化

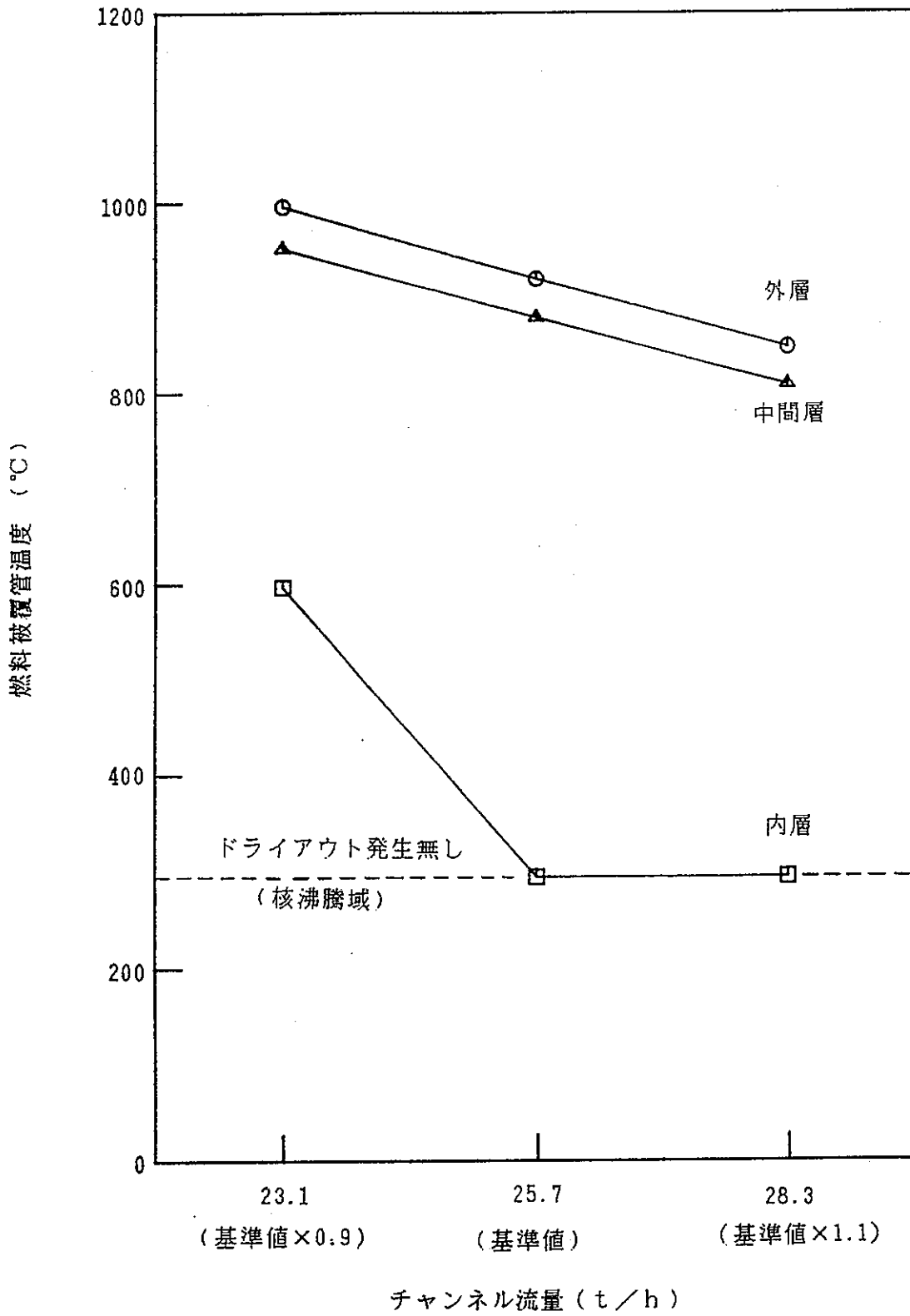


図 5.3.3 - 26 燃料被覆管温度に対するチャンネル流量の変化の影響

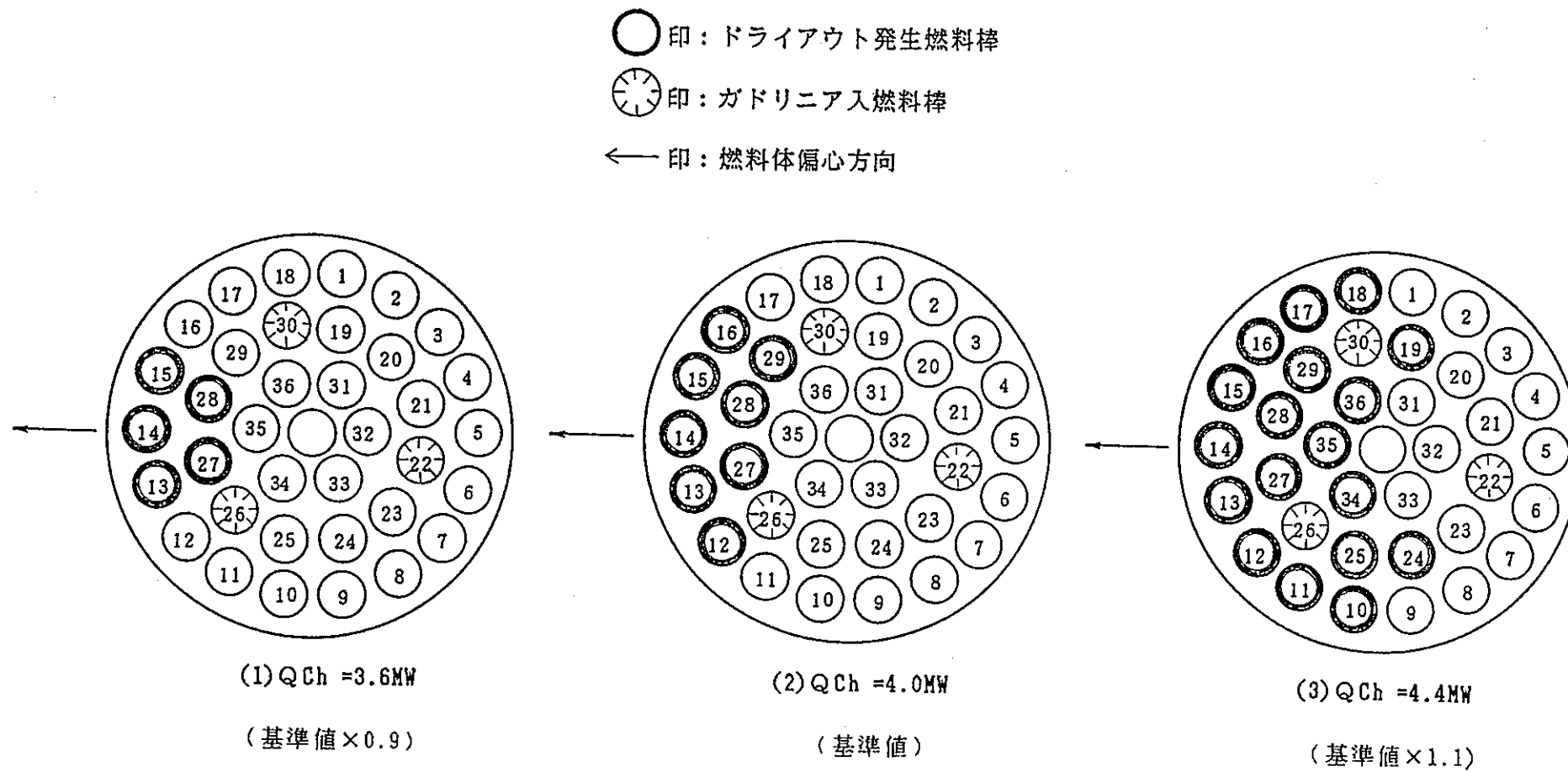


図 5.3.3-27 チャンネル出力変化によるドライアウト領域の変化

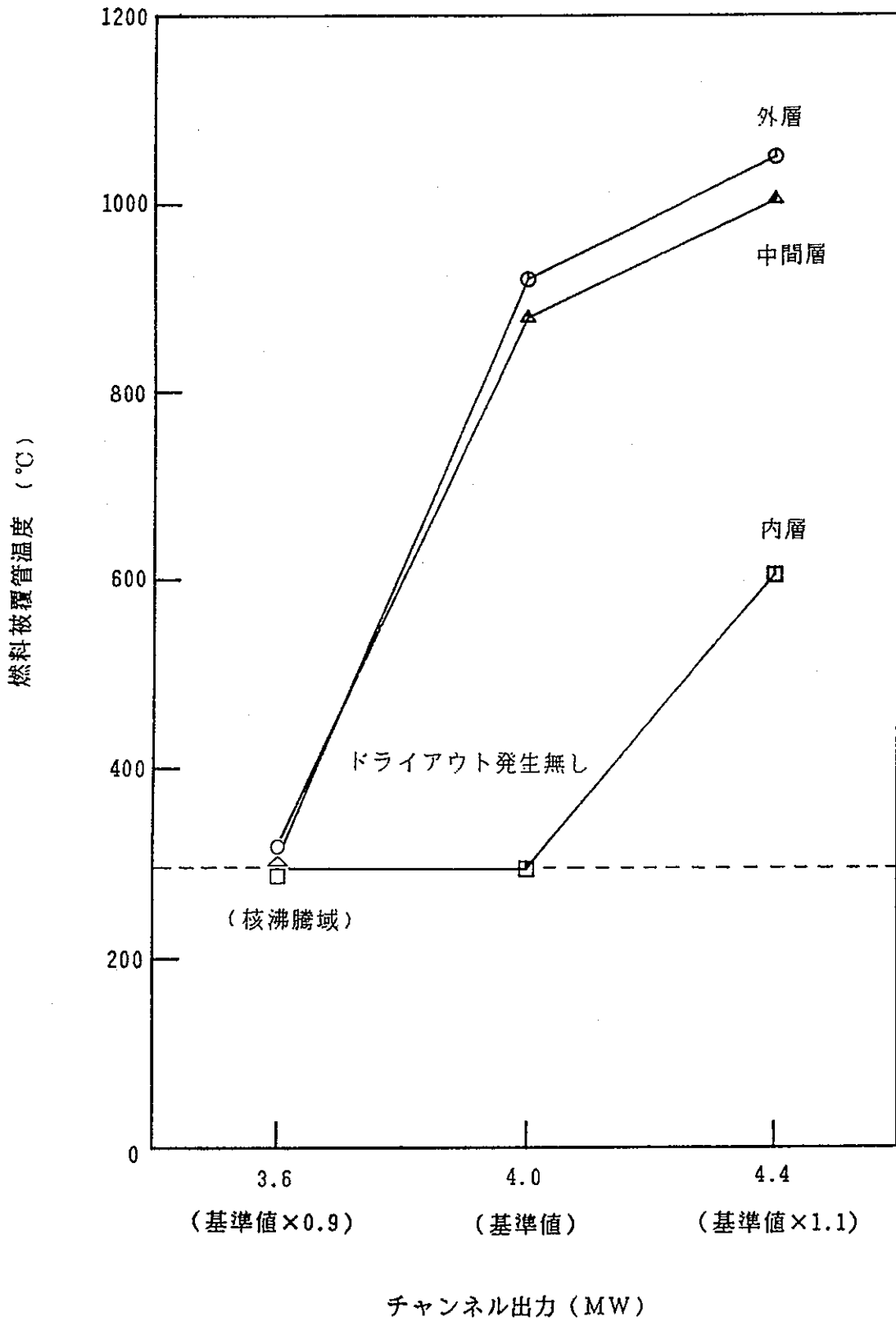


図 5.3.3 - 28 燃料被覆管温度に対するチャンネル出力変化の影響

○印：ドライアウト発生燃料棒
 ⊗印：ガドリニア入燃料棒
 ←印：燃料体偏心方向

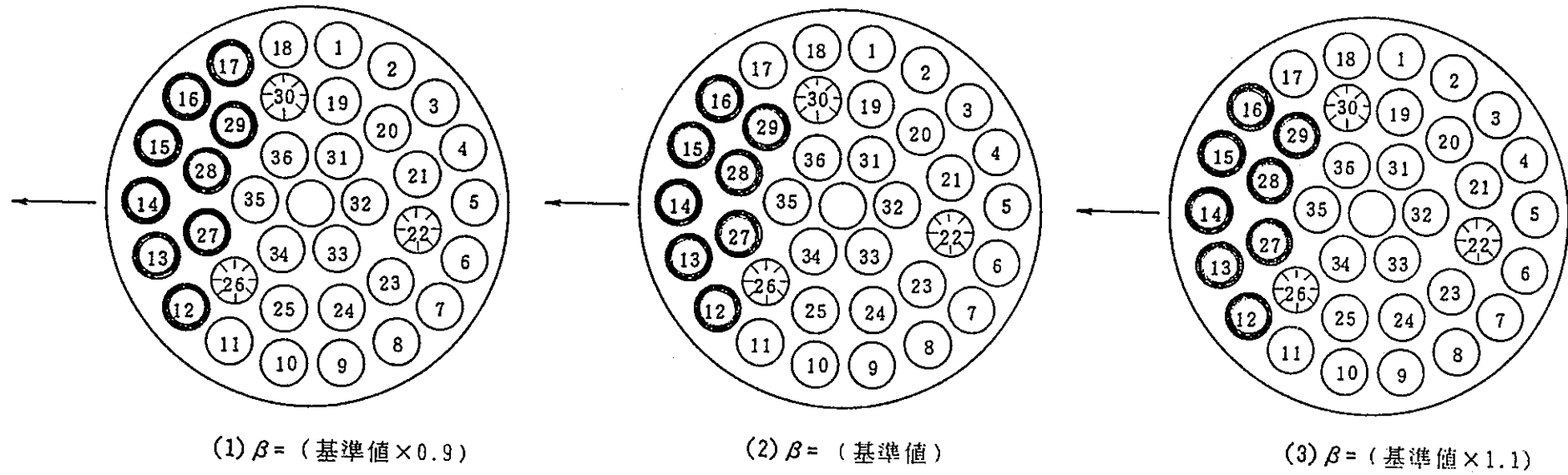


図 5.3.3 - 29 乱流混合係数変化によるドライアウト領域の変化

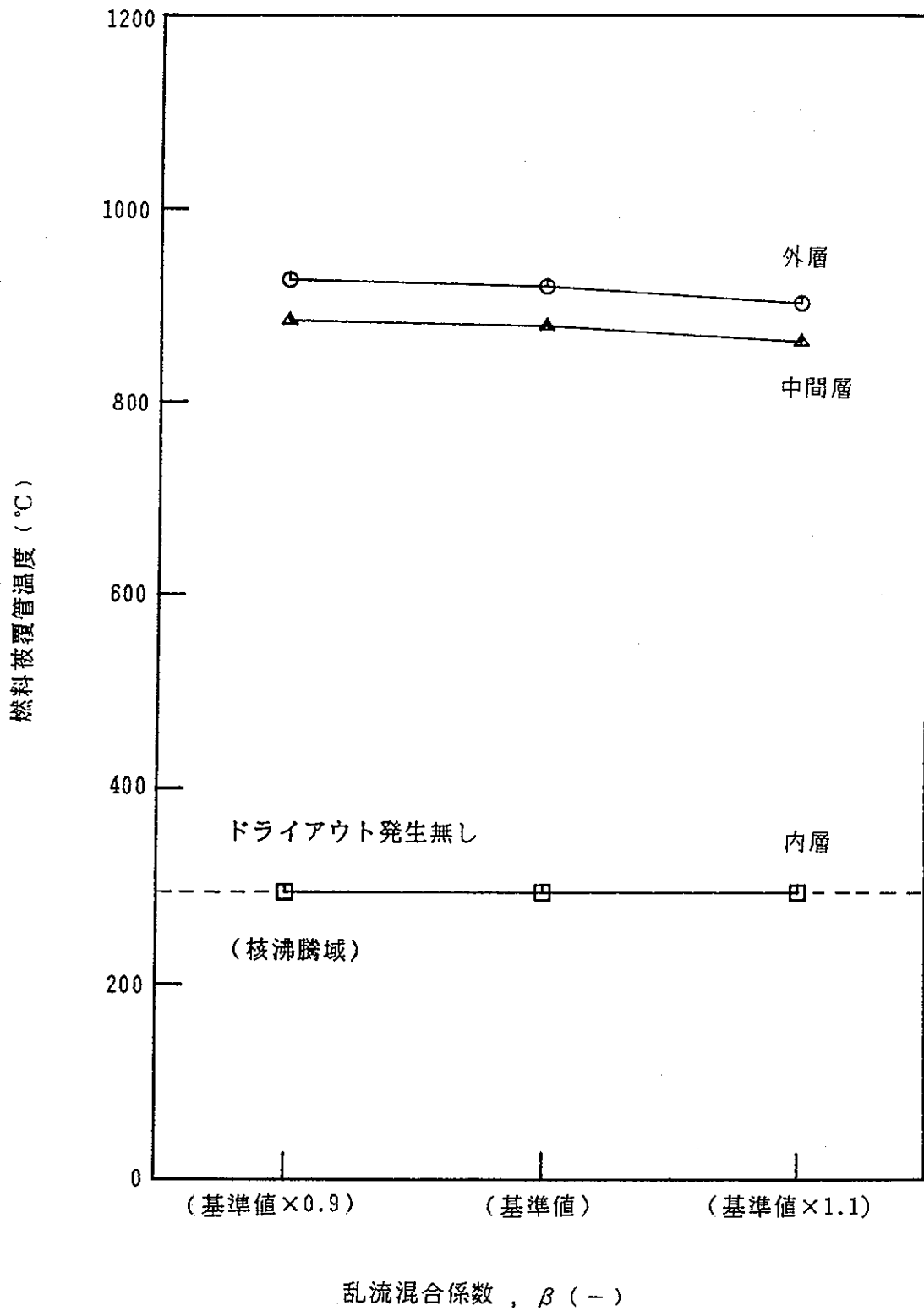


図 5.3.3 - 30 燃料被覆管温度に対する乱流混合係数変化の影響

6. 圧力管カランドリア同時破断時の燃料冷却予備解析

6.1 まえがき

本解析の目的は、新型転換炉の圧力管／カランドリア管同時破断時における燃料冷却性の観点から、その解析手法を確認することにある。解析では、ATR中小破断解析コード LOTRAC⁽¹⁾ でプラントの解析を行い、ウォータードラムと蒸気ドラムにおける圧力とエンタルピを境界条件として2流体熱平衡(2V1T)のコードである一次元汎用流動解析コード RELAP5/mod1⁽²⁾ コードに入力しチャンネルの詳細な流動解析を行う。このようにして求められたチャンネル内の詳細な流動条件をもとに、燃料ヒートアップ解析コードである HEATUP-V/mod5⁽³⁾ コードを用いて燃料被覆管の温度を求める。圧力管とカランドリア管が同時に破断した場合には、径方向の流れが燃料内部で大きくなり、この手法で燃料の冷却性を評価する場合、従来の安全解析のように軸方向一次元の流れのみを考えるわけに行かない。従って解析では、各燃料ピン位置における破断流速分布を、三次元汎用流動解析コード SOLA-3CT⁽⁴⁾ により決定し、炉心軸方向流量に破断流量を合成することによって、ATR実証炉用36本クラスターの各燃料ピンの冷却性を評価する。

6.2 解析手法

6.2.1 事故の想定

圧力管・カランドリア管の同時破断事故について、以下の事故想定に基づき解析が行なえることを確認する。

- (1) 原子炉は、事故発生直前まで定格の102 % (約1970Mw) で運転していたものとする。
- (2) 圧力管集合体1体について、圧力管本体にスプリット破断を想定し、圧力管破断と同時に同一形状でカランドリア管も破断するものとする。
- (3) 圧力管本体破断口から流出した冷却材は、カランドリアタンク内に放出されるが、カランドリアタンク・ラブチャーディスクが破裂した場合、格納容器内へ放出されるものとする。

6.2.2 解析条件

本解析では、これまでに試みたことがない手法で破断に伴う燃料温度の評価をおこなうため、計算コードがどのような条件でもうまく解析出来るとは限らない。また、スクラム条件のように設計でも確定していない条件もある。このため、本解析では以下の条件に基づき被覆管の温度がより高くなる解析を行う。

(1) 破断条件

破断は圧力管集合体1体が、幅2cm、軸方向破断長さ3.7mのスリット形状でスプリット破断するものとし、破断所要時間は0.1秒とする。但し、LOTRACコードによるブロードダウン解析では、破断は冷却材の放出量が最も多く、炉心冷却にとって厳しい炉心下部においてスプリット破断するものとし、その面積は破断直後上部遮へい体部及び入口管で臨界流になることを考慮し、上部遮へい体部流路断面積 $2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、入口管 $1.924 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ の合計 $4.754 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ とする。

(2) 電源の有無

電源喪失を仮定すると、スクラムする事により、これによって結果が非保守的になるため、外部電源は正常として解析する。

(3) スクラム信号

事故後早期に破断を検出する検出系としては、①炭酸ガス圧力検出器 ②炭酸ガス湿分検出器 ③ヘリウム圧力検出器 ④入口管破断検出器（マイクロフォン）等が考えられるが、種々の検討を必要とするため、本解析ではスクラムは考慮しないこととする。

(4) その他の条件

破断時に、重水中に形成される蒸気泡によって重水が排除される効果及び軽水が重水を薄める効果によって、負の大きな反応度が入るが、本解析では反応度の大きさが未評価であるため、考慮しないことにする。給水流量は、定格のままとする。その他の解析条件は実証炉の安全解析に準ずる。

6.2.3 解析方法

解析に使用するコードは、次のとおりである。

- ・ LOTRAC-II/mod 2 : 中小破断時プラント過渡変化解析コード
- ・ RELAP5/mod 1 : 非均質・熱平衡過渡変化解析コード
- ・ SOLA-3CT : 3次元汎用流動解析コード
- ・ HEATUP-V/mod 5 : 燃料温度詳細解析コード

まずLOTRACコードにより、実証炉の一次系全体に対するブローダウン解析を行い、その結果であるウォータードラムと蒸気ドラムの圧力とエンタルピを、境界条件としてRELAP5コードに入力し、破断したチャンネルの流動解析を行う。一方、SOLAコードによって燃料サブチャンネル内の破断による径方向の流れを解析する。解析の結果得られる圧力管水平断面における $R-\theta$ 方向の流速分布より、各燃料棒に対する平均の水平方向流速分布を求める。最後に、ホットチャンネル流動解析結果と各燃料棒の水平方向流速分布を用いて、改良HEATUPコードにより燃料ヒートアップ解析を行う。改良に関しては付録に示す。以上の解析の流れを図6.2-1に示す。SOLAコードは単相流の解析コードであり、破断流は二相流状態になっているため、本来は二相流が解析できるコードを用いるのがよいが、現時点で手軽に解析できるコードがないこと、二相流も単相流と流動の観点ではほぼ相似になっていると考えられること等を考慮して本コードを試しに用いた。

尚、SOLAコードによる解析の結果得られた各燃料棒流速分布は、HEATUPコード

において熱伝達率相関式に用いられるレイノルズ数の算定方法を次式により変更することで考慮した。

$$R_{ei} = f(V_i)$$

$$V_i^2 = V_z^2 + V_{ci}^2$$

$$V_{ci} = K_i \cdot V_c$$

ここで、 R_{ei} ; レイノルズ数

V_z ; チャンネル鉛直方向流速

V_{ci} ; 燃料棒の水平方向流速

K_i ; 燃料棒の水平方向流速分布 ($V_c = 1.0$ に対する値)

V_c ; 破断流速

i ; ピン番号

6.2.4 解析体系

(1) ブローダウン解析 (LOTRACコード)

解析に使用したノード分割を図 6.2-2 に示す。図 6.2-2 にも示したように、炉心は破断ホットチャンネル1本、健全ホットチャンネル1本及び健全平均チャンネル306本の3ループとする。また、入口管、出口管の長さは、次のようにする。

入口管：破断チャンネル=21.59 m、健全チャンネル=16.09 m

出口管：破断チャンネル、健全チャンネル=24.435m

また、図 6.2-3 にブローダウン解析で用いた軸方向出力分布（8ノード分割）を示す。解析のノードの切り方は、実証炉の安全解析に準じている。このときの、炉心出力条件を表 6.2-1 に示す。LOTRACコードでは、圧力管の軸方向スプリット破断を正確には扱えないため、圧力管の下部でギロチン破断が生じたとして模擬する。

(2) ホットチャンネル解析 (RELAP5コード)

解析に使用したノード分割を図 6.2-4 に示す。解析体系は、ウォータードラムから蒸気ドラムまでの一流路とし、破断口は別に設けたカランドリアタンク模擬のノードを切った配管に弁で接続しているとする。各ボリュームとジャンクションの形状データを表 6.2-2～表 6.2-3 に示す。図 6.2-4 からわかるように、炉心の流動を詳細に解析するため、炉心下部延長部、炉心上部延長部及び炉心部のノード分割LOTRACの分割に比べ細かくした。軸方向のスプリット破断を模擬するため、炉心各ノードは仮定したスプリット破断と同

一の面積となる破断口を設け、全てのノードはカランドリアタンク模擬の配管に弁で接続されている。また、カランドリアタンク上部には、 $1.3 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ （破裂遅れ非考慮、破裂径 $609.6 \text{ m}\phi$ ）の圧力で破裂するラプチャーディスクを模擬した破断口を設ける。

ホットチャンネル解析で用いる軸方向出力分布（16ノード分割）については、図 6.2-3 に示すように、8 ノードのものを拡張して用いる。

(3) 水平断面流速分布計算（SOLA-3CTコード）

解析に使用するノード分割を図 6.2-5 に示す。図に示したように、チャンネル内を円筒座標で考え、燃料部及び圧力管は黒くぬりつぶした障害物として扱う。障害物の大きさは出来る限り燃料棒の断面積に等しくなるようにしている。開口部は、図の左側にスリット状に設け、軸方向には、上下境界を与えるメッシュも合わせて、3 メッシュとする。上下境界では、自由流出を仮定して計算を行う。

(4) 燃料ヒートアップ解析（HEATUPコード）

解析に使用するノード分割を図 6.2-6 に示す。本事象解析では、各燃料棒の水平方向流速分布を考慮するため、図 6.2-6 に示すように、36本のピン毎に被覆管温度を解析する。また、本解析では水平方向流速を考慮したレイノルズ数により熱伝達率が計算されるが、解析で使用する熱伝達率相関式は、表 6.2-4 に示すように、実証炉の安全解析で用いるものと同じものを使用する。

6.3 解析結果

6.3.1 ブローダウン解析

図 6.3-1 ～図 6.3-9 に炉心1 チャンネルで圧力管破断が生じた場合について、LOTRACコードで解析したプラント挙動を示す。本事象は、プラント全体で見ると中小破断となるため、図 6.3-1 に示すようにプラントの主要パラメータは、10秒程度ではほとんど変化しない。破断チャンネルの流量のみが、破断によって逆流になることを示している。

1 チャンネルの破断が生ずると、軽水が重水中に噴き出し、重水中に大きなボイドが生じ重水を排除する。また噴出した軽水は、重水を薄めて行く。この効果によって実際には、大きな負の反応度が投入されるはずであるが、解析条件の所で触れたように、本解析ではこの効果を考慮しない。したがって、炉心に加えられる反応度は、破断チャンネルがボイド化す事による小さな反応度であるため、反応度投入は図 6.3-2 に示すようにほとんどない。

図 6.3-3 は、主蒸気流量の変化を示しているが、大きな変化はない。給水流量は、仮定で述べたように一定である。

図 6.3-4 は、放出される冷却材の流量とエンタルピを示している。LOTRACコードでは、圧力管が軸方向に破断する事を正確には模擬出来ないため、冷却材放出流量が大きくなるように、圧力管の下部においてギロチン破断が生じたとしている。このため、放出エンタルピは二相状態になり、図で示された値より大きくなるものと思われるが、本解析手法では、図で示されたようにしか扱えない。ただし、放出流量は多くなるため、全放出エネルギーは多くなる。

図 6.3-5 は、破断口上流側の流量を示している。図 6.3-6 は、破断チャンネルと健全チャンネルの炉心部圧力の比較を示している。破断したチャンネルの圧力が低下しているのがわかる。図 6.3-7 は、3グループに分けた流路の流量を示している。図 6.3-8 はLOTRACによって計算された燃料被覆管の温度変化を示している。

図 6.3-9 は、RELAP5コードに境界条件として与える物理量の変化曲線を示している。すべての物理量は解析時間内でほぼ一定になっている。

6.3.2 ホットチャンネル解析

図 6.3-10 ～図 6.3-22 にLOTRACの結果を境界条件として、RELAP5/mod1 を用いて解析した破断チャンネルの結果を示す。RELAP5を用いた解析では、0 ～10秒間にマルチランジェント計算を行い、計算コードの定常をとっている。10秒～20秒間にLOTRACの0 ～10秒に相当す

る境界条件を与えている。

図 6.3-10、図 6.3-11 は流路各部の圧力であり、破断と同時に炉心上下で臨界状態となり、燃料部の圧力が低下しているのがわかる。このときの図のノード番号は、図 6.3-14 の RELAP5の解析体系図を見ればわかる。201 番が炉心最下部、215 が炉心最上部になる。

図 6.3-12、図 6.3-13 は、炉心部のクオリティーとエンタルピを示したものである。破断後中央に近いノードのクオリティーが1 に近くなっている。図 6.3-14 は、炉心における蒸気生成量である。図 6.3-15 ～図 6.3-17 には、チャンネル内各部における流量を示している。炉心に対して上向きの流れと、下向きの逆流はほぼ等しく、炉心の中央部では開く方向の流れがほとんど無くなっているのがわかる。図 6.3-18 は、RELAP5の伝熱パッケージを使用して求めた被覆管温度挙動である。このコードでは、燃料と圧力管の間の輻射は考慮していない。図 6.3-19 は、温度計算時の熱伝達率の変化を示している。

図 6.3-20 は、カランドリアタンク内重水温度であり、軽水が噴出しても10秒間では温度はほとんど上昇していない。カランドリアタンク内の圧力は図 6.3-21 に示すように破断直後に17ata 程度のパルスが発生していることがわかる。

図 6.3-22 は、以上のRELAP5の結果をまとめ、炉心部の軸方向圧力と流量絶対値をプロットしたものであり、中央部約半分において流量が著しく減少しているのがわかる。

6.3.3 水平断面 流速分布計算

RELAP5での軸方向流動計算に、径方向流れの効果を考慮する手法として、3次元流動解析コードであるSOLA-3CTを用いて、サブチャンネル内流動を解析した結果を図 6.3-22 ～図 6.3-26 に示す。図より 2×10^{-3} 秒で結果は収束している。このような解析を種々のスリット幅について行い、ピン毎の平均流速を求めたものを表 6.3-1 に示す。表中の値は、放出流速を1とした場合の各ピンに対する流速比で示しており、放出口の後ろ側のピンに対する流速は、スリット幅2.0 cmの場合で放出流の約2%しかない。このため、軸方向と径方向の速度を考慮しても燃料冷却性の観点からはあまり改善がないことがわかる。

6.3.4 燃料ヒートアップ解析

燃料被覆管温度の解析は、本作業では、HEATUPコードを用いて炉心中央の最も温度的に厳しくなる所のみを実施している。HEATUPコードで温度を計算するのに、必要となる主な境界条件は、計算着目ノードの圧力、エンタルピ、流量である。この他、内部の圧力計算を行う

のに上下プレナム部の冷却材温度と燃料中心温度等を入力する必要がある。これらの境界条件に関しては、RELAP5の結果を受け渡している。境界条件を図 6.3-27 ～図 6.3-36 に示す。ヒートアップ計算には、付録に示すように径方向の流速も考慮して熱伝達計算を行えるようにしたHEATUPコードを用いている。

計算結果を図 6.3-37 ～図 6.3-49 に示す。図 6.3-37 は、3層のピンの被覆管温度を示している。5秒後に温度が頭打ちになっているが、この部分でバルーニングが生じかつパーフォレーションに至っている。この様子は図 6.3-45 に示したピンギャップの挙動を見れば明らかである。このように被覆管の変形によって温度は、約1000℃までしか上昇しない。一方、燃料の温度は図 6.3-38 に示すように、10秒以内では上昇を続けており、その後どこまで高くなるかは不明である。現在のコードでは、パーフォレーションした後燃料が冷却材によって直接冷却されるような計算はできない。このため、燃料中心温度は、図 6.3-39 に示すように10秒以降上昇する傾向を示している。

図 6.3-40 は、被覆管面の熱伝達率を示しており、破断とほぼ同時に核沸騰から膜沸騰に移行し、その状態を維持していることがわかる。(図 6.3-42 に伝熱モードが示してあり、1 が核沸騰、4 が膜沸騰を示す。) 図 6.3-41 は、その熱伝達率と被覆管表面温度から算出される表面の熱流束を示している。

図 6.3-43 は、被覆管の酸化割合であり、10秒でほぼ40%の厚さまで酸化が進む結果となっている、したがって、ピンは脆くなり、燃料の形状を保つことは難しい。図 6.3-44 は、被覆管の応力を示している。本解析では、図 6.3-50 に示すようなバルーニングの判定曲線を用いているため、前述のような被覆管温度となっている。そこで、バルーニングの判定を行わず燃料被覆管温度計算をした結果を図 6.3-51 ～図 6.3-63 に示す。図 6.3-51 に示した被覆管温度履歴から明らかのように、結果は図 6.3-18 のRELAP5の結果と非常に良く似ている。違う点はHEATUPコードでは輻射伝熱と径方向の流れによる伝熱を考慮しているため、温度が少し低くなっている点である。

6.4 解析のまとめ

圧力管とカランドリア管が同時に破断した場合の燃料温度の評価を行うため、LOTRACコードで一次系の挙動を解析し、RELAP5コードでチャンネル内詳細流動伝熱解析を実施した。RELAP5は流れ方向一次元解析コードであるため、三次元流動解析コードSOLA-3CTで解析した破断に伴う径方向流速を、この結果にベクトル的に加えて伝熱を計算できるようにしたHEATUPコードを用いて燃料の冷却性を解析した。

この結果、2cmのスリット状に破断が生じた場合には、破断後、約5秒で被覆管がバルーニングし、やがては破裂に至ることがわかった。このときの被覆管最高温度は、約1000℃であるが、酸化が内外両面から進むため、被覆管の健全性は保たれない。このため燃料の自立性も不明である。

今回このような結果になったのは、RELAP5で計算すると、ほとんどの冷却材が両端から出てしまい、中央部に行かないためである。圧力管の上下端で臨界流となった冷却材のジェット噴流が中央まで届くか届かないかが結果に重大な影響を与えているわけであるが、この現象に関しては、実験による観察を行い、挙動解明を行なう必要がある。従って、平成元年度に実規模大燃料集合体を用いた圧力管破断時燃料冷却性試験を行い、熱流動挙動を解明して冷却性評価モデルの確立を図る。

6.5 参考文献

- (1) 緑川 浩, 望月 弘保, 速水 義孝, 新型転換炉実証炉 LOTRAC-1/mod6.2 コンピュータ・プログラム取扱説明書 : PNC SN9520 87-015 (1987)
- (2) V.H.Ranson, RELAP5/MOD1 Code Manual Volume 1 ; System Models and Numerical Methods : NUREG/CR-1826 (1981)
- (3) 動燃事業団 大洗工学センター 新型転換炉安全工学室, 新型転換炉実証炉 HEATUP V/mod6 コンピュータ・プログラム取扱説明書 : PNC SN9520 86-008 (1986)
- (4) 望月 弘保, 柴 公倫, 三次元汎用流動解析コード SOLA-3CTの開発 : PNC N941 85-92 (1985)

6.6 付 録

6.6.1 付録I HEATUP-V/mod5コード改良内容

1. 目 的

現HEATUP-V/mod5（以下、HEATUPという）コードは冷却材の流れとして炉心部鉛直方向の流速のみを考慮したものであるが、圧力管とカランドリア管が同時に破断するような状況においては、破断流による水平方向流速も無視できなくなる。

そこで本作業では、鉛直方向及び水平方向の流速を用いた燃料温度計算が可能なようにHEATUPコードを改良した。

2. 改良後及び機能

鉛直方向の流速 V_z 、水平方向の流速 V_c 及び燃料ピン毎の水平方向流速比（水平方向の流速=1） K_i を用いて、次式により得られるレイノルズ数 R_{ei} を用いた熱伝達率計算が可能である。

$$R_{ei} = f(V_i)$$

$$V_i^2 = V_z^2 + V_{ci}^2$$

$$V_{ci} = K_i \cdot V_c$$

ここで、 R_{ei} ：レイノルズ数

V_z ：鉛直方向流速

K_i ：燃料ピン毎の水平方向流速比（ $V_c = 0.1$ ）

V_c ：水平方向流速

添字 i ：燃料ピン番号

入力としては、

- ① 水平方向流速を考慮する計算オプション
- ② 水平方向流速テーブル（時間と流速）
- ③ 水平方向流速比テーブル（時間と流速比、燃料ピン毎）

が追加される。②のテーブルは100点、③のテーブルは20点まで入力可能である。また、①でオプションを選択した場合でも途中からテーブル入力した熱伝達率を用いた計算は可能である（従来と同様）。

出口としては、

- ① 水平方向流速と鉛直方向流速の2乗平均値（ V_i ）

が追加される。

3. 改良内容

(1) ソースプログラムの修正

入力変数と出力変数の追加のため、INPT8 及びCALC5 の変数領域を表C.1 に示すように変更した。また、初期計算及び過渡計算時において水平方向流速を考慮することができるようにした。HEATUPコードの修正ルーチン及び修正内容を表C.2 に、ソースプログラムレベルの修正内容をC-8 ～C-21ページに示す。

(2) マニュアルの変更

HEATUPコードの改良に伴い、変更となったマニュアル部分（抜粋）を表C.3，表C.4 に示す。

表C.1 INPT/CALC 変数領域の変更

INPT	変更前	変更後	CALC	変更前	変更後
1	200	(同左)	1	300	(同左)
2	1	(同左)	2	1	(同左)
3	1	(同左)	3	1	(同左)
4	1	(同左)	4	1	(同左)
5	26000	(同左)	5	34600	36100
6	4900	(同左)	6	5200	(同左)
7	900	(同左)	7	1600	(同左)
8	4000	6000	8	1	(同左)
9	1300	(同左)	9	—	—
0	1	(同左)	0	1	(同左)

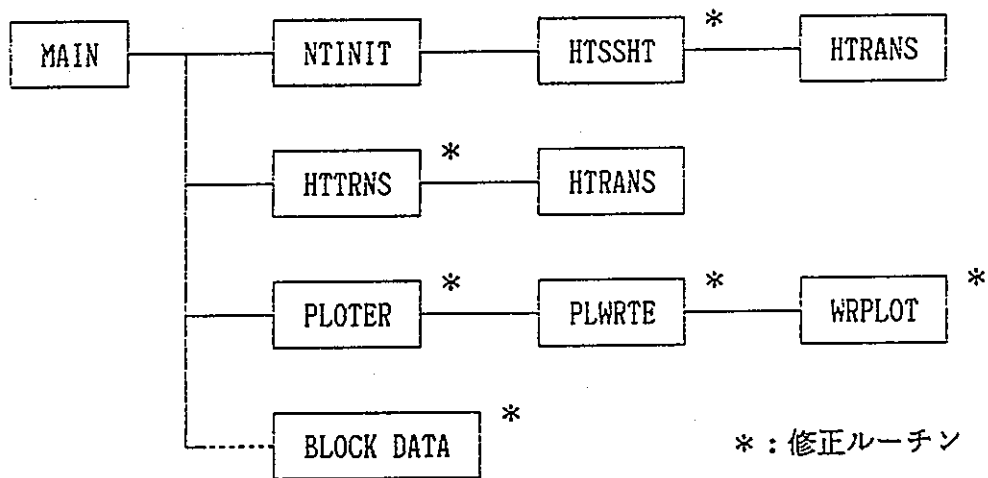
表C.1 INPT/CALC 変数領域の変更

INPT	変更前	変更後	CALC	変更前	変更後
1	200	(同左)	1	300	(同左)
2	1	(同左)	2	1	(同左)
3	1	(同左)	3	1	(同左)
4	1	(同左)	4	1	(同左)
5	26000	(同左)	5	34600	36100
6	4900	(同左)	6	5200	(同左)
7	900	(同左)	7	1600	(同左)
8	4000	6000	8	1	(同左)
9	1300	(同左)	9	—	—
0	1	(同左)	0	1	(同左)

表C.2 コード改良に伴う修正サブルーチン一覧

修正ルーチン	修正内容
BLOCK DATA	コモン領域の拡張
HTSSHT	コモン領域の拡張 水平方向流速の考慮 (初期計算)
HTRNS	コモン領域の拡張 水平方向流速の考慮 (初期計算)
PLOTER	コモン領域の拡張
PLWRTE	コモン領域の拡張
WRPLOT	コモン領域の拡張

(参考)



表C.3 コード改良に伴うINPT変数の追加 (1/2)

INPT	LOCATION	変数名及び単位	定義
5	191 250	IFHFO(60)(I) I=1, IRFL (-)	<p>IRFL本の燃料棒に対して何番目の熱伝達テーブルを使用するかを指定する</p> <p>=0A : 燃料表面温度差— 熱伝達率テーブルから補間する</p> <p>=1A : 時間— 熱伝達率テーブルから補間する</p> <p>=2A : 熱伝達率をHTRANSにより計算で求める</p> <p>=5A : 熱伝達率を水平方向流速と軸方向流速の合成流速によってHTRANSにて求める</p> <p>水平方向流速 VCTBL (I8-3001~),</p> <p>水平方向流速分布 TRTBTL (I8-3201 ~), RTTBL (I8-3221 ~),</p> <p>軸方向流速 GWTBL (I8-55 ~) 参照。</p> <p>A: テーブルの組番号</p> <p>THG(I, J, A,) の最大5組のテーブルの中から選ぶ。2A, 5Aのオプションの場合はA = φでよい (即ちテーブル不要)。</p> <p>ただし, 2A, 5Aのオプション指定時にTFFLOOD (I5-6564)が入力された場合は, Aで指定されたテーブルより熱伝達率を読み込む。</p>

↑
追
加
↓
↑
変
更
↓

表C.3 コード改良に伴うINPT変数の追加 (2/2)

INPT	LOCATION	変数名及び単位	定 義
8	1001 3000	QRTBL (2,100, 10) (I, J, JQR) (SEC)	無次元熱出力のテーブル 1 = 1 : 時間 1 = 2 : 出力 (初期値0.1) JQRはテーブル番号 (INPT5. 6571 (IQU) で入力)
8	3001 3200	VCTBL (2,100) (I, J) (S) (KG/M2・S)	水平方向流速テーブル 1 = 1 : 時間 1 = 2 : 水平方向流速 (注) IFHFO (15 ~ 191~) にて5Aのオプション を選択した場合は, 入力要。
8	3201 3220	TRTTBL (20) (SEC)	水平方向流速分布を時間変化として与える 時間テーブル (RTTBL に対応する) (注) IFHFO (15 ~ 191~) にて5Aのオプション を選択した場合は, 入力要。
8	3221 5220	RTTBL (20,100) (I, J) I=1, 20 J=1, IFUEL (S) (-)	水平方向流速分布を各燃料ピンに対して与える I: TRTTBL に与えた時刻に対応する水平方向流速 分布 J: 燃料ピン番号 (注) IFHFO (15 ~ 191~) にて5Aのオプション を選択した場合は, 入力要。

↑
追↑
加
↓

表C.4 コード改良に伴うCALC変数の追加

CALC	LOCATION	変数名及び単位	定 義
5	34381	HSGSLO(60)	下プレナム部熱遮へい板 ースプリング伝達係
	34440	(KCAL/SC)	
5	34441	HSFGLO(60)	下プレナム部熱遮へい板ー燃料伝達係数
	34500	(KCAL/SC)	
5	35931	GGGUP(KKF)	水平方向流速と軸方向流速の2乗平均流速
	36100	(100)	
		(KG/M2・S)	

↑
追加
↓

(1) BLOCK DATA

```

000001      BLOCK DATA
C *
C * CLEAR OF THE USED COMMON AREA,
C * ESTABLISH OF THE STANDARD DATA AND CONSTANT FOR 'HEATUP-SM4'
C *

```

```

000002      COMMON / TITLE / ITIT (20)
000003      COMMON /INPT1/ HHH1( 200)
000004      COMMON /INPT2/ HHH2( 1)
000005      COMMON /INPT3/ HHH3( 1)
000006      COMMON /INPT4/ HHH4( 1)
000007      COMMON /INPT5/ HHH5(26200)
000008      COMMON /INPT6/ HHH6(4900)
000009      COMMON /INPT7/ HHH7( 900)

```

```

CVREP KCC 89/01 <DGD915>
C COMMON /INPT8/ HHH8(4000)
COMMON /INPT8/ HHH8(6000)
CVREP-END <DGD915>

```

```

000011      COMMON /INPT0/ HHH0( 1)
000012      COMMON /CALC1/ CAL1( 300)
000013      COMMON /CALC2/ CAL2( 1)
000014      COMMON /CALC3/ CAL3( 1)
000015      COMMON /CALC4/ CAL4( 1)

```

```

CVREP KCC 89/01 <DGD915>
C COMMON /CALC5/ CAL5(34600)
COMMON /CALC5/ CAL5(36100)
CVREP-END <DGD915>

```

```

000017      COMMON /CALC6/ CAL6(5200)
000018      COMMON /CALC7/ CAL7(1600)
000019      COMMON /CALC8/ CAL8( 1)
000020      COMMON /CALC0/ CAL0( 1)

```

```

CC
000021      EQUIVALENCE (HHH1( 16), MTINFL)
000022      EQUIVALENCE (HHH1( 17), MTOTFL)
000023      EQUIVALENCE (HHH1( 151), IDTRSV)
000024      EQUIVALENCE (HHH1( 152), IDTLGS)
000025      EQUIVALENCE (HHH1( 153), IDTHET)
000026      EQUIVALENCE (HHH1( 154), IDTPWR)
000027      EQUIVALENCE (HHH6(3971), SIGM )
000028      EQUIVALENCE

```

```

* (HHH5( 130), ICHGF )
* (HHH5(5541), RHOF (1,1) )
* (HHH5(5581), SHTF (1,1) )
* (HHH5(5621), CONF (1,1) )
* (HHH5(5661), RHOF2 (1,1) )
* (HHH5(5701), SHTF2 (1,1) )
* (HHH5(5741), CONF2 (1,1) )
* (HHH5(5781), RHOC (1,1) )
* (HHH5(5821), SHTC (1,1) )
* (HHH5(5861), CONC (1,1) )
* (HHH5(5901), RHOC2 (1,1) )
* (HHH5(5941), SHTC2 (1,1) )
* (HHH5(5981), CONC2 (1,1) )
* (HHH5(6570), NOR )
* (HHH5(6571), IQR ( 1) )

```

```

000029      DIMENSION
1 RHOF (2,20) , SHTF (2,20) , CONF (2,20) ,
2 RHOF2(2,20) , SHTF2(2,20) , CONF2(2,20) ,
3 RHOC (2,5) , SHTC (2,20) , CONC (2,20) ,

```

```

4 RHOC2(2,5) , SHTC2(2,20) , CONC2(2,20) ,
5 IQR (10)
000030      EQUIVALENCE
* (HHH5( 7011), EMISCB ) , (HHH5( 7012), EMISCP )
* (HHH5( 7013), EMISF ) , (HHH5( 7014), TGKD )
* (HHH5( 7015), CRR ) , (HHH5( 7016), EXPAVH )
* (HHH5( 7017), TQSVH ) , (HHH5( 7018), TRO )
* (HHH5( 7019), ZLPUP ) , (HHH5( 7020), ZLPLOW )
* (HHH5( 7021), FGCOE ) , (HHH5( 7022), FACT08 )
* (HHH5( 7025), TBAO ) , (HHH5( 7026), PGO )
* (HHH5( 7027), GASCON ) , (HHH5( 7028), HSCON )
* (HHH5( 7029), ZLFLSG ) , (HHH5( 7030), IFDEL )
* (HHH5( 7031), FALPF ) , (HHH5( 7032), FALPC )
* (HHH5( 7033), IFTPRE ) , (HHH5( 7034), ITPUP )
* (HHH5( 7035), ITPLO ) , (HHH5( 7036), IFTRUP )
* (HHH5( 7037), NTRUP )

```

```

000031      EQUIVALENCE
* (HHH5( 7031), VPO (1) ) , (HHH5( 7191), VGAP0 (1) )
* (HHH5( 7251), PGAS0 (1) ) , (HHH5( 7311), ZLFL (1) )
* (HHH5( 7321), ZLCD (1) ) , (HHH5( 7331), FPUP (1) )
* (HHH5( 7391), FPLOW (1) ) , (HHH5( 7441), EXPAI (1) )
* (HHH5( 7471), TQSI (1) ) , (HHH5( 7481), GIR (1) )
* (HHH5( 7491), IFLAP0(1) ) , (HHH5( 7811), DGDATA(1) )
* (HHH5( 7911), XNIMOL(1,1) ) , (HHH5( 8511), HRTRAO(1) )
* (HHH5( 8611), HFTRAO(1) ) , (HHH5( 8811), PHAI1 (1) )
* (HHH5( 3101), PHAI2 (1) )

```

```

000032      DIMENSION
* VPO (60) , VGAP0 (60) , PGAS0 (60)
* , ZLFL (10) , ZLCD (10) , FPUP (60)
* , FPLOW (60) , EXPAI (10) , TQSI (10)
* , GIR (10) , IFLAP0(60) , DGDATA(100)
* , XNIMOL(60,10) , HRTRAO(100) , HFTRAO(100)
* , PHAI1 (100) , PHAI2 (100)

```

```

CC
000033      EQUIVALENCE
1 (CAL1( 201), PAI ) , (CAL1( 202), PAI2 ) , (CAL1( 203), TKO )
2 (CAL1( 204), E426 ) , (CAL1( 205), GRAV ) , (CAL1( 206), GRAV2 )
3 (CAL1( 207), THUR ) , (CAL1( 208), B1E426) , (CAL1( 209), DUMC16)

```

```

C *
C * CLEAR OF THE USED COMMON AREA
C *

```

```

000034      DATA ITIT / 20 * ' ' /
000035      DATA HHH1 / 200 * 0.0 /
000036      DATA HHH2 / 1 * 0.0 /
000037      DATA HHH3 / 1 * 0.0 /
000038      DATA HHH4 / 1 * 0.0 /
000039      DATA HHH5 / 26200 * 0.0 /
000040      DATA HHH6 / 4900 * 0.0 /
000041      DATA HHH7 / 900 * 0.0 /

```

```

CVREP KCC 89/01 <DGD915>
C DATA HHH8 / 4000 * 0.0 /
DATA HHH8 / 6000 * 0.0 /
CVREP-END <DGD915>

```

```

000043      DATA HHH0 / 1 * 0.0 /
000044      DATA CAL1 / 300 * 0.0 /
000045      DATA CAL2 / 1 * 0.0 /
000046      DATA CAL3 / 1 * 0.0 /
000047      DATA CAL4 / 1 * 0.0 /

```

```

CVREP KCC B9/01
C DATA CAL5 /34600 * 0.0 / <D0D915>
  DATA CAL6 /36100 * 0.0 /
CVREP-END <D0D915>
000048
000049 DATA CAL6 / 5200 * 0.0 /
000050 DATA CAL7 / 1600 * 0.0 /
000051 DATA CAL8 / 1 * 0.0 /
000052 DATA CAL0 / 1 * 0.0 /
C *
C * -----
C * SET OF THE BASIC CONSTANT
C * -----
000053 DATA PAI / 3.1416 /
000054 DATA PAI2 / 4.2632 /
000055 DATA TKO / 273.15 /
000056 DATA E426 / 426.79 /
000057 DATA GRAV / 9.807 /
000058 DATA GRAV2 / 19.614 /
000059 DATA THUR / 3800.0 /
000060 DATA B1E426 / 2.34307E-3 /
C *
C * -----
C * STANDARD DATA SET OF THE CONTROL VARIABLES
C * -----
000061 DATA MTINFL / 1 /
CPNC-MOD5/5 (88/11/14) CHANGE 1 LINE.
C+ DATA MTOTFL / 1 /
000062 DATA MTOTFL / 2 /
CPNC-END
000063 DATA IDTRSV / 1 /
000064 DATA IDTLGS / 1 /
000065 DATA IDTHET / 1 /
000066 DATA IDTPWR / 1 /
C *
C * -----
C * STANDARD DATA SET OF THE HEATUP MODULE
C * ( FUEL PROPERTY FOR THE 'ATR' DESIGN )
C * -----
000067 DATA RHOF/ -17.73, 1.0978E4, 260.0, 1.0927E4, 537.8,
  1 1.0893E4, 815.6, 1.0807E4, 1093.3, 1.0704E4,
  2 1371.1, 1.0586E4, 1648.9, 1.0449E4, 1926.7,
  3 1.0278E4, 2204.4, 1.0142E4, 2482.2, 9.971E3,
  4 2740.0, 9.820E3, 2820.0, 8.896E3, 3037.8,
  5 8.771E3, 3315.6, 8.599E3, 3593.3, 8.428E3,
  6 3871.1, 8.257E3, 4148.0, 8.101E3, 4370.0,
  7 7.914E3, 4482.2, 7.914E3, 4650.0, 7.914E3/
000068 DATA SHTF/ 0.0, 0.06, 200.0, 0.0673, 400.0,
  1 0.0725, 500.0, 0.0740, 600.0, 0.0750,
  2 700.0, 0.0758, 800.0, 0.0766, 900.0,
  3 0.0775, 1000.0, 0.0783, 1200.0, 0.0799,
  4 1400.0, 0.0816, 1600.0, 0.0832, 1800.0,
  5 0.0848, 2000.0, 0.0848, 2200.0, 0.0880,
  6 2400.0, 0.0905, 2600.0, 0.0930, 2740.0,
  7 0.0952, 2760.0, 1.17, 3000.0, 0.098/
000069 DATA CONF/ 0.0, 7.92, 200.0, 5.36, 400.0,
  1 4.11, 500.0, 3.69, 600.0, 3.31,
  2 700.0, 3.06, 800.0, 2.82, 900.0,
  3 2.63, 1000.0, 2.47, 1200.0, 2.19,
  4 1400.0, 2.03, 1600.0, 1.95, 1800.0,
  5 1.91, 2000.0, 1.95, 2200.0, 1.98,
  6 2400.0, 2.05, 2600.0, 2.14, 2740.0,

```

```

000070 7 DATA RHOC/ 2.19, 2760.0, 2.23, 3000.0, 2.38/
  1 0.0, 6650.0, 50.0, 6650.0, 1000.0,
000071 1 DATA SHTC/ 6650.0, 1500.0, 6650.0, 2000.0, 6650.0/
  1 0.0, 0.0670, 50.0, 0.0705, 100.0,
  2 0.0730, 150.0, 0.0747, 200.0, 0.0763,
  3 250.0, 0.0776, 300.0, 0.0789, 350.0,
  4 0.0801, 400.0, 0.0812, 450.0, 0.0822,
  5 500.0, 0.0831, 550.0, 0.0839, 600.0,
  6 0.0847, 650.0, 0.0854, 700.0, 0.0861,
  7 800.0, 0.0874, 900.0, 0.0886, 1000.0,
000072 7 DATA CONC/ 0.0895, 1200.0, 0.0907, 1500.0, 0.0910/
  1 0.0, 11.10, 50.0, 11.25, 100.0,
  2 11.50, 150.0, 11.92, 200.0, 12.38,
  3 250.0, 12.90, 300.0, 13.40, 350.0,
  4 14.00, 400.0, 14.60, 450.0, 15.20,
  5 500.0, 15.83, 550.0, 16.48, 600.0,
  6 17.12, 650.0, 17.81, 700.0, 18.50,
  7 800.0, 19.90, 900.0, 21.40, 1000.0,
C *
C * -----
000073 7 DATA RHOF2/ -17.73, 1.0978E4, 260.0, 1.0927E4, 537.8,
  1 1.0893E4, 815.6, 1.0807E4, 1093.3, 1.0704E4,
  2 1371.1, 1.0586E4, 1648.9, 1.0449E4, 1926.7,
  3 1.0278E4, 2204.4, 1.0142E4, 2482.2, 9.971E3,
  4 2740.0, 9.820E3, 2820.0, 8.896E3, 3037.8,
  5 8.771E3, 3315.6, 8.599E3, 3593.3, 8.428E3,
  6 3871.1, 8.257E3, 4148.0, 8.101E3, 4370.0,
  7 7.914E3, 4482.2, 7.914E3, 4650.0, 7.914E3/
000074 7 DATA SHTF2/ 0.0, 0.06, 200.0, 0.0673, 400.0,
  1 0.0725, 500.0, 0.0740, 600.0, 0.0750,
  2 700.0, 0.0758, 800.0, 0.0766, 900.0,
  3 0.0775, 1000.0, 0.0783, 1200.0, 0.0799,
  4 1400.0, 0.0816, 1600.0, 0.0832, 1800.0,
  5 0.0848, 2000.0, 0.0848, 2200.0, 0.0880,
  6 2400.0, 0.0905, 2600.0, 0.0930, 2740.0,
  7 0.0952, 2760.0, 1.17, 3000.0, 0.098/
000075 7 DATA CONF2/ 0.0, 7.92, 200.0, 5.36, 400.0,
  1 4.11, 500.0, 3.69, 600.0, 3.31,
  2 700.0, 3.06, 800.0, 2.82, 900.0,
  3 2.63, 1000.0, 2.47, 1200.0, 2.19,
  4 1400.0, 2.03, 1600.0, 1.95, 1800.0,
  5 1.91, 2000.0, 1.95, 2200.0, 1.98,
  6 2400.0, 2.05, 2600.0, 2.14, 2740.0,
  7 0.0952, 2760.0, 1.17, 3000.0, 0.098/
000076 7 DATA RHOC2/ 0.0, 6650.0, 50.0, 6650.0, 1000.0,
  1 6650.0, 1500.0, 6650.0, 2000.0, 6650.0/
000077 7 DATA SHTC2/ 0.0, 0.0670, 50.0, 0.0705, 100.0,
  1 0.0730, 150.0, 0.0747, 200.0, 0.0763,
  2 250.0, 0.0776, 300.0, 0.0789, 350.0,
  3 0.0801, 400.0, 0.0812, 450.0, 0.0822,
  4 500.0, 0.0831, 550.0, 0.0839, 600.0,
  5 0.0847, 650.0, 0.0854, 700.0, 0.0861,
  6 800.0, 0.0874, 900.0, 0.0886, 1000.0,
  7 0.0895, 1200.0, 0.0907, 1500.0, 0.0910/
000078 7 DATA CONC2/ 0.0, 11.10, 50.0, 11.25, 100.0,
  1 11.50, 150.0, 11.92, 200.0, 12.38,
  2 250.0, 12.90, 300.0, 13.40, 350.0,
  3 14.00, 400.0, 14.60, 450.0, 15.20,

```

(2) HTSSHT

PNC P9450 98-035

4	500.0,	15.83,	550.0,	14.48,	600.0,
5	17.12,	650.0,	17.81,	700.0,	18.50,
6	800.0,	19.90,	900.0,	21.40,	1000.0,
7	23.00,	1200.0,	26.20,	1500.0,	30.0/

```

C
000079 DATA ICHGF / 1 /
000080 DATA NQR / 1 /
000081 DATA IOR / 10 * 1 /
000082 DATA
1 CRR /2.7E-6 // PHAI1 / 100* 1.0 // PHAI2 / 100* 1.3 /
2 GASCON / 0.847626 // FACTOR / 0.8 // TR0 / 18.0 /
3 FQCOE / 1.0 /
4 TQSI / 0.7203, 0.846 , 0.8541, 7*0.0 /
5 EXPAI / -10.59, -13.08 , -14.57, 7*0.0 /
6 FALPF / 1.0 // FALPC / 1.0 // TBAO / 111.11 /

```

```

C
000083 DATA SIQH / 4.88E-8 /

```

```

C
000084 END

```

```

000001 SUBROUTINE HTSSHT
C *
C * FOR CALCULATING STEADY STATE TEMPERATURES
C *
C *
C ***** INPTS SUZUKI 85.8.22 *****
000002 COMMON /INPT5/ HHS(26200)
000003 EQUIVALENCE
* (HHS( 1), IFUEL ), (HHS( 2), NFO (1) )
* (HHS( 62), NCO (1) ), (HHS( 122), IRFL )
* (HHS( 123), IREWET ), (HHS( 124), ICRIT )
* (HHS( 125), HKKF ), (HHS( 126), IHTPAT )
* (HHS( 127), IPTU ), (HHS( 128), ISPF )
* (HHS( 129), IFPROP ), (HHS( 130), ICHGF )
* (HHS( 131), IFHG (1) ), (HHS( 191), IFHFO (1) )
* (HHS( 251), IFHFI (1) ), (HHS( 311), IHFMDL(1) )
* (HHS( 371), ICLNTW ), (HHS( 372), ICLNTM )
* (HHS( 373), ICRIO ), (HHS( 374), MFLOOD )
* (HHS( 401), ITWW (1) ), (HHS( 451), ITWM (1) )
000004 DIMENSION
* NFO (60) , NCO (60) , IFHG (60) ,
* IFHFO (60) , IFHFI (60) , IHFMDL(60) ,
* ITWW (50) , ITWM (50)
000005 EQUIVALENCE
* (HHS( 501), RAD1 (1,1) ), (HHS( 1401), RPFI (1,1,11) )
* (HHS( 3201), IPROPF(1,1) ), (HHS( 4101), TD (1,1) )
* (HHS( 4821), TD2 (1,1) ), (HHS( 5541), RHOF (1,1) )
* (HHS( 5581), SHTF (1,1) ), (HHS( 5621), CONF (1,1) )
* (HHS( 5661), RHOF2 (1,1) ), (HHS( 5701), SHTF2 (1,1) )
* (HHS( 5741), CONF2 (1,1) ), (HHS( 5781), RHOC (1,1) )
* (HHS( 5821), SHTC (1,1) ), (HHS( 5861), CONC (1,1) )
* (HHS( 5901), RHOC2 (1,1) ), (HHS( 5941), SHTC2 (1,1) )
* (HHS( 5981), CONC2 (1,1) ), (HHS( 6021), THG (1,1,1) )
* (HHS( 6221), THF (1,1,1) ), (HHS( 6421), OR (1) )
* (HHS( 6521), SEDT (1) ), (HHS( 6531), DE )
* (HHS( 6532), GVF ), (HHS( 6533), AWW )
* (HHS( 6534), DTQUE ), (HHS( 6535), DTMQU )
* (HHS( 6561), EPS0 ), (HHS( 6562), EPS1 )
* (HHS( 6563), EPS2 )
000006 DIMENSION
* RAD1 (15,60) , RPFI (2,15,60) , IPROPF(15,60) ,
* TD (12,60) , TD2 (12,60) , RHOF (2,20) ,
* SHTF (2,20) , CONF (2,20) , RHOF2 (2,20) ,
* SHTF2 (2,20) , CONF2 (2,20) , RHOC (2,20) ,
* SHTC (2,20) , CONC (2,20) , RHOC2 (2,20) ,
* SHTC2 (2,20) , CONC2 (2,20) , THG (2,20,1) ,
* THF (2,20,1) , OR (100) , SEDT (10)
000007 EQUIVALENCE
* (HHS(6611), AZR ), (HHS(6612), BZR ), (HHS(6613), CZR )
* (HHS(6614), C001 ), (HHS(6615), C002 ), (HHS(6616), IZR )
* (HHS(6711), PSE ), (HHS(6712), PLE ), (HHS(6713), PSQ )
* (HHS(6714), PDP ), (HHS(6715), FXSUB )
* (HHS(6761), SHFAIN(1) ), (HHS(6811), PSEN(1) )
* (HHS(6861), PLEN(1) )
000008 DIMENSION
* SHFAIN(50) , PSEN(50) , PLEN(10)
C *****

```

```

000009 COMMON /INPTS/ HHH(4000)
000010 EQUIVALENCE
* (HHH( 3001), VCTTBL(1,1) ), (HHH( 3201), TRTTBL(1) )
* (HHH( 3221), RTTBL (1,1) )
000011 DIMENSION
* VCTTBL(2,100) , TRTTBL(20) , RTTBL(20,100)
CYADD-END <0GD915>
000012 COMMON /CALC1/ CAL1(300)
C
000013 EQUIVALENCE
1 (CAL1( 1), IERORN), (CAL1( 2), ICALC ), (CAL1( 3), IPRNT )
2 (CAL1( 4), IPLOT ), (CAL1( 5), DUMC11), (CAL1( 6), DUMC12)
CC
000014 EQUIVALENCE
1 (CAL1( 101), TMMAIN), (CAL1( 103), DTH ), (CAL1( 111), TEDT(1))
2 (CAL1( 125), TMHEAT), (CAL1( 125), TIME ), (CAL1( 126), DTHEAT)
3 (CAL1( 126), DTS )
000015 DIMENSION TEDT(10)
CC
000016 EQUIVALENCE
1 (CAL1( 201), PAI ), (CAL1( 202), PAI2 ), (CAL1( 203), TKO )
2 (CAL1( 204), E426 ), (CAL1( 205), GRAV ), (CAL1( 206), GRAV2 )
C
C ***** CALCS SUZUKI 85.8.22 *****
CYREP 89/01 <0GD915>
C COMMON /CALCS/ CALS(34600)
000017 COMMON /CALCS/ CALS(36100)
CYREP-END <0GD915>
000018 EQUIVALENCE
* (CALS( 1), ISEDT ), (CALS( 11), NNCH1 (1) )
* (CALS( 71), NNC (1) ), (CALS( 131), NNCP1 (1) )
* (CALS( 191), NNFH2 (1) ), (CALS( 251), NNFH1 (1) )
* (CALS( 311), NNF (1) ), (CALS( 371), NNFP1 (1) )
* (CALS( 431), NNFP2 (1) ), (CALS( 491), NNTH2 (1) )
* (CALS( 551), NNTH1 (1) ), (CALS( 611), NNT (1) )
* (CALS( 671), NNTP1 (1) ), (CALS( 731), NNTP2 (1) )
* (CALS( 791), IOUT ), (CALS( 792), NCH1 )
* (CALS( 793), NC ), (CALS( 794), NCP1 )
* (CALS( 795), NFM2 ), (CALS( 796), NFM1 )
* (CALS( 797), NF ), (CALS( 798), NFP1 )
* (CALS( 799), NFP2 ), (CALS( 800), NTH2 )
* (CALS( 801), NTH1 ), (CALS( 802), NT )
* (CALS( 803), NTP1 ), (CALS( 804), NTP2 )
* (CALS( 805), JIF ), (CALS( 806), JFR )
* (CALS( 807), JFK ), (CALS( 811), IMODE(1) )
* (CALS( 911), IEROR ), (CALS( 912), IFLOD )
000019 DIMENSION
* NNCH1 (60) , NNC (60) , NNCP1 (60) ,
* NNFH2 (60) , NNFH1 (60) , NNF (60) ,
* NNFP1 (60) , NNFP2 (60) , NNTH2 (60) ,
* NNTH1 (60) , NNT (60) , NNTP1 (60) ,
* NNTP2 (60) , IMODE (100)
CC
000020 EQUIVALENCE
* (CALS( 951), TFC (1,1) ), (CALS( 2451), TFP (1,1) )
* (CALS( 3951), COND (1,1) ), (CALS( 5451), CONRAD(1,1) )
* (CALS( 4951), SHEAT (1,1) ), (CALS( 8451), DEN (1,1) )
* (CALS( 9951), RADF (1,1) ), (CALS(10851), DELR (1,1) )

```

```

* (CALS(11751), RADAV (1,1) ), (CALS(12651), RN (1,1) )
* (CALS(13551), GAP (1) ), (CALS(13651), VFRAC (1,1) )
* (CALS(14551), VOL (1) ), (CALS(14611), VFT (1) )
* (CALS(14671), SA (1) ), (CALS(14731), GA (1) )
* (CALS(14791), SAN (1) ), (CALS(14861), AM (1) )
* (CALS(15761), HG (1) ), (CALS(15861), HF (1) )
* (CALS(15961), GHF (1) ), (CALS(16061), SHFAO (1) )
* (CALS(16161), SHF (1) ), (CALS(16261), GPF (1) )
* (CALS(16361), PPF (1) ), (CALS(16561), CHFB (1) )
* (CALS(16661), AMCHF (1) ), (CALS(16761), RPFN (1,1) )
000021 EQUIVALENCE
* (CALS(17661), RPFT (1) ), (CALS(17721), QROD (1) )
* (CALS(17821), QRODO (1) ), (CALS(17921), QG (1,1) )
* (CALS(19421), QRKF (1) ), (CALS(19521), ODEN (1,1) )
* (CALS(21021), PFT ), (CALS(21022), ANG )
* (CALS(21031), FMT (1) ), (CALS(21131), FOF (1) )
* (CALS(21191), FOC (1) ), (CALS(21251), SAI (1) )
* (CALS(21311), HFI (1) ), (CALS(21411), FMTI (1) )
* (CALS(21511), SHFIO (1) ), (CALS(21611), SHFI (1) )
* (CALS(21751), DWZRI (1) ), (CALS(21851), DWZRO (1) )
* (CALS(21951), WZRI (1) ), (CALS(22051), WZRO (1) )
* (CALS(22153), DEXPR1 ), (CALS(22251), PPP (1) )
* (CALS(22301), RRR (1) ), (CALS(22351), THW (1) )
* (CALS(22401), GGG (1) ), (CALS(22451), XXX (1) )
* (CALS(22501), TWM (1) ), (CALS(22551), ROO (1) )
* (CALS(22651), GGO (1) ), (CALS(22701), TMOO (1) )
000022 EQUIVALENCE
* (CALS(22851), IHTCAL(1) ), (CALS(22951), CHFBM (1) )
* (CALS(23051), TWL (1) ), (CALS(23151), TWLM (1) )
* (CALS(23251), IMODEM(1) ), (CALS(23351), RMCPR )
* (CALS(23501), SHFASG(1) ), (CALS(23551), XSUB (1) )
* (CALS(23851), CPR (1) )
000023 DIMENSION
* TFC (100,15) , TFP (100,15) , COND (100,15) ,
* CONRAD(100,15) , SHEAT (100,15) , DEN (100,15) ,
* RADF (60,15) , DELR (60,15) , RADAV (60,15) ,
* RN (60,15) , GAP (100) , VFRAC (60,15) ,
* VOL (60) , VFT (60) , SA (60) ,
* AM (60,15) , HG (100) , HF (100) ,
* GHF (100) , SHFAO (50) , SHF (100) ,
* GPF (100) , PPF (100) , GA (60) ,
* CHFB (100) , AMCHF (100) , RPFN (60,15) ,
* RPFT (60) , QROD (100) , QRODO (100) ,
* QG (100,15) , QRKF (100) , ODEN (100,15) ,
* FMT (100) , FOF (60) , FOC (60) ,
* SAI (60) , HFI (100) , FMTI (100) ,
* SHFIO (100) , SHFI (100) , SAN (60)
000024 DIMENSION
* DWZRI (100) , DWZRO (100) , WZRI (100) ,
* WZRO (100) ,
* PPP (50) , RRR (50) , THW (50) ,
* GGG (50) , XXX (50) , TWM (50) ,
* ROO (50) , IHTCAL(100) , IMODEM(100) ,
* CHFBM (100) , TWL (100) , TWLM (100) ,
* SHFASG(50) , XSUB (50) , CPR (100) ,
* GGO (50) , TMOO (100)
000025 EQUIVALENCE
* (CALS(23951), HMIC (1) ), (CALS(24051), HMICI (1) )

```

```

5      , IMODE(IIF) , IMODEM(IIF) , TWL(IIF) , TWLM(IIF)
6      , CHFBM(IIF) , DE , IFSTAT , PSP
7      , PLP , PSQ , AWW , SHFASQ(KKF)
8      , CPR(IIF) , IRETRN , HFM1 , HFM2
9      , ITRAN1 , ITRAN2 , ITRANS , IHFMDL(1)
A      , HMIC(IIF) , DTSAT(IIF) , FMT(IIF) , INCL
B      , PDP , FXSUB , XSUB(KKF) , GGO(KKF)
C      , ICRIQ , DTQUE , DTHOU , TIME
D      , TMGO(IIF) , IFLOD

```

```

000081 CVADD 89/01 <DGD915>
000082 IF ( IHFFO .EQ. 5 ) THEN
000083 IFLAG = 1.0
000084 IF ( GGO(KKF) .LT. 0.) IFLAG = -1.0
000085 VCTT = HTFUN(TIME , VCTTBL(1,1), 2, 100)
000086 XKITT = XT(TRITBL, RTTBL(1,IIF), TIME, 20)
000087 VHT = XKITT * VCTT
000088 GOGUP(IIF) = SORT( GGO(KKF) * GGO(KKF) + VHT * VHT ) * IFLAG
000089 IF(IIF.EQ.1 .OR. IIF.EQ.7 .OR. IIF.EQ.19)
000090 1WRITE(6,*) ' (HTSSHT) KKF,IIF,TIME,VCTT,XKITT,VHT,GGO,GGUP=',
000091 2 KKF,IIF,TIME,VCTT,XKITT,VHT,GGO(KKF),GGUP(IIF)
000092 CALL HTRANS ( 0 , ICRIT , IFIL
000093 2 , ISUP , IREWET , PPP(KKF) , GGO(IIF)
000094 3 , XXX(KKF) , RRR(KKF) , TWW(KKF) , SHF(IIF)
000095 4 , TFC(IIF,NT) , HF(IIF) , CHFB(IIF) , AMCHF(IIF)
000096 5 , IMODE(IIF) , IMODEM(IIF) , TWL(IIF) , TWLM(IIF)
000097 6 , CHFBM(IIF) , DE , IFSTAT , PSP
000098 7 , PLP , PSQ , AWW , SHFASQ(KKF)
000099 8 , CPR(IIF) , IRETRN , HFM1 , HFM2
000100 9 , ITRAN1 , ITRAN2 , ITRANS , IHFMDL(1)
000101 A , HMIC(IIF) , DTSAT(IIF) , FMT(IIF) , INCL
000102 B , PDP , FXSUB , XSUB(KKF) , GGO(KKF)
000103 C , ICRIQ , DTQUE , DTHOU , TIME
000104 D , TMGO(IIF) , IFLOD
000089 ENDIF
000090 CVADD-END <DGD915>

```

```

000090 RMODE(IIF) = IMODE(IIF)
000091 FMTI(IIF) = TFC(IIF, 1) - TFC(IIF, NTP2)
000092 IHFFI = IFHFI(IFR) / 10
000093 IHFI = IFHFI(IFR) - IHFFI * 10
000094 IF ( IHFFI .EQ. 0 ) HF(IIF)=HTFUN(FMTI(IIF) , THF(1,1,IHFI) , 2, 40)
000095 IF ( IHFFI .EQ. 1 ) HF(IIF)=HTFUN(TIME , THF(1,1,IHFI) , 2, 40)
000096 IF ( IHFFI .GE. 2 )
000097 1 CALL HTRANS( 1 , ICRIT , IFIL
000098 2 , ISUP , IREWET , PPP(KKF) , GGO(KKF)
000099 3 , XXX(KKF) , RRR(KKF) , TWW(KKF) , SHF(IIF)
000100 4 , TFC(IIF,1) , HF(IIF) , CHFB(IIF) , AMCHI
000101 5 , IMODI , IMODMI , TWL(IIF) , TWLM(IIF)
000102 6 , CHFBMI , DE , IFSTAT , PSP
000103 7 , PLP , PSQ , AWW , SHFASQ(KKF)
000104 8 , CPRI , IRETRN , HFM1 , HFM2
000105 9 , ITRAN1 , ITRAN2 , ITRANS , IHFMDL(1)
000106 A , HMIC(IIF) , DTSAT(IIF) , FMT(IIF) , INCL
000107 B , PDP , FXSUB , XSUB(KKF) , GGO(KKF)
000108 C , ICRIQ , DTQUE , DTHOU , TIME
000109 D , TMGO(IIF) , IFLOD

```

```

C WRITE(15,9112) IFR,IFHQ(IFR),IFHFO(IFR),IFHFI(IFR)
C9112 FORMAT(1H , 'IFR=',15,5X,'IFHQ(IFR)=' ,15,5X,'IFHFO(IFR)=' ,15,

```

```

C * SX,'IFHFI(IFR)=' ,15)
C
C *
C * CALCULATE COEFFICIENT MATRIX
C *
000097 DO 30 J = 1, NTM1
000098 G(J) = PAI*CONRAD(IIF,J) / DELR(IFR,J)
000099 30 CONTINUE
000100 G(NF) = HG(IIF)*GA(IFR)
000101 G(NT) = HF(IIF)*SA(IFR)
000102 GI = HFI(IIF)*SAI(IFR)

```

```

C WRITE(15,9113) GA(IFR),SA(IFR),SAI(IFR)
C9113 FORMAT(1H ,5X,'GA(IFR)=' ,F10.4,5X,'SAI(IFR)=' ,F10.4,
C * SX,'SAI(IFR)=' ,F10.4)
C

```

```

000103 A(1) = 0.
000104 B(1) = 2.*G(1) + GI*2.0
000105 C(1) = -2.*G(1)
000106 S(1) = 2.*GG(IIF,1) + 2.0*GI*TWW(KKF)
000107 DO 40 I = 2, NTM1
000108 A(I) = -2.*G(I-1)
000109 B(I) = 2.*(G(I) + G(I-1))
000110 C(I) = -2.*G(I)
000111 S(I) = 2.*GG(IIF,I)
000112 40 CONTINUE
000113 A(NT) = -2.*G(NT-1)
000114 B(NT) = 2.*(G(NT) + G(NT-1))
000115 C(NT) = 0.
000116 S(NT) = 2.*G(NT)*TFC(IIF,NT+1) + 2.*GG(IIF,NT)
000117 C(1) = C(1) / B(1)
000118 S(1) = S(1) / B(1)
000119 DO 50 I = 2, NT
000120 B(I) = B(I) / A(I) + C(I-1)
000121 C(I) = C(I) / (A(I)*B(I))
000122 S(I) = (S(I) / A(I) - S(I-1)) / B(I)
000123 50 CONTINUE
000124 TFC(IIF,NT) = S(NT)
000125 DO 60 I = 2, NT
000126 J=NT-I+1
000127 TFC(IIF, J) = S(J) - C(J)*TFC(IIF,J+1)
000128 60 CONTINUE

```

```

C WRITE(15,9501)
C9501 FORMAT(1H ,5X,'SUBROUTINE HTSSHT')
C WRITE(15,9502) IIF,TFC(IIF,1),TFC(IIF,3),TFC(IIF,5),
C * TFC(IIF,7),TFC(IIF,10),TFC(IIF,11),TFC(IIF,12)
C9502 FORMAT(1H ,5X,'IIF=',13,3X,'TFC(IIF,1)=' ,E12.4,
C * 3X,'TFC(IIF,3)=' ,E12.4,3X,'TFC(IIF,5)=' ,E12.4/
C * 1H ,5X,'TFC(IIF,7)=' ,E12.4,3X,'TFC(IIF,10)=' ,E12.4,
C * 3X,'TFC(IIF,11)=' ,E12.4,3X,'TFC(IIF,12)=' ,E12.4)
C WRITE(15,9503) A(1),B(1),C(1),S(1),
C * A(2),B(2),C(2),S(2)
C9503 FORMAT(1H ,5X,'A(1)=' ,E12.4,3X,'B(1)=' ,E12.4,
C * 3X,'C(1)=' ,E12.4,3X,'S(1)=' ,E12.4/
C * 1H ,5X,'A(2)=' ,E12.4,3X,'B(2)=' ,E12.4,
C * 3X,'C(2)=' ,E12.4,3X,'S(2)=' ,E12.4)

```

```

CYREP 89/01
C IF ( IHFFO .GE. 2 )
IF ( IHFFO .GE. 2 .AND. IHFFO .LE. 4 )
CYREP-END
<000915>
1 CALL HTRANS( 0 , ICRIT , IFIL
2 , ISUP , IREWET , PPP(KKF) , GGG(KKF)
3 , XXX(KKF) , RRR(KKF) , TWW(KKF) , SHF(IIF)
4 , TFC(IIF,NT) , HF(IIF) , CHFB(IIF) , AMCHF(IIF)
5 , IMODE(IIF) , IMODEM(IIF) , TWL(IIF) , TWLM(IIF)
6 , CHFBM(IIF) , DE , IFSTAT , PSP
7 , PLP , PSG , AMW , SHFASG(KKF)
8 , CPRI(IIF) , IRETRN , HFM1 , HFM2
9 , ITRAN1 , ITRAN2 , ITRANS , IHFMDL(1)
A , HMIC(IIF) , DTSAT(IIF) , FMT(IIF) , INCL
B , PDP , FXSUB , XSUB(KKF) , GGO(KKF)
C , ICRIO , DTQUE , DTMQU , TIME
D , TMGO(IIF) , IFLOD
    
```

```

CVADD 89/01
IF ( IHFFO .EQ. 5 ) THEN
IFLAG = 1.0
IF ( GGG(KKF) .LT. 0. ) IFLAG = -1.0
VCTI = HTFUN(TIME , VCTTBL(1,1) , 2, 100)
XKIIT = XT(TRTTBL, RTYBL(1,IIF), TIME, 20)
VHT = XKIIT * VCTI
GGGUP(IIF) = SORT( GGG(KKF) * GGG(KKF) + VHT * VHT ) * IFLAG
IF(IIF.EQ.1 .OR. IIF.EQ.7 .OR. IIF.EQ.19)
1WRITE(6,*) (HTTRNS) KKF,IIF,TIME,VCTI,XKIIT,VHT,GGG,GGGUP,*,
2 KKF,IIF,TIME,VCTI,XKIIT,VHT,GGG(KKF),GGGUP(IIF)
000121 CALL HTRANS ( 0 , ICRIT , IFIL
2 , ISUP , IREWET , PPP(KKF) , GGGUP(IIF)
3 , XXX(KKF) , RRR(KKF) , TWW(KKF) , SHF(IIF)
4 , TFC(IIF,NT) , HF(IIF) , CHFB(IIF) , AMCHF(IIF)
5 , IMODE(IIF) , IMODEM(IIF) , TWL(IIF) , TWLM(IIF)
6 , CHFBM(IIF) , DE , IFSTAT , PSP
7 , PLP , PSG , AMW , SHFASG(KKF)
8 , CPRI(IIF) , IRETRN , HFM1 , HFM2
9 , ITRAN1 , ITRAN2 , ITRANS , IHFMDL(1)
A , HMIC(IIF) , DTSAT(IIF) , FMT(IIF) , INCL
B , PDP , FXSUB , XSUB(KKF) , GGO(KKF)
C , ICRIO , DTQUE , DTMQU , TIME
D , TMGO(IIF) , IFLOD
000122 ENDDIF
CVADD-END
<000915>
    
```

```

000123 RMODE(IIF) = IMODE(IIF)
000124 FMT(IIF) = TFC(IIF, 1) - TFC(IIF, NTP2)
000125 IHFFI = IFHFI(IFR) / 10
000126 IHFI = IFHFI(IFR) - IHFFI * 10
000127 IF ( IHFFI.EQ.2 .AND. TFLOOD.NE.0.0 .AND. TIME.GT.TFLOOD
1 .AND. MFLOOD.LE.1 ) IHFFI = 1
000128 IF ( IHFFI .EQ. 0 )HFII(IIF)=HTFUN(FMTI(IIF), THF(1,1,IHFI), 2, 40)
000129 IF ( IHFFI .EQ. 1 )HFII(IIF)=HTFUN(TIME , THF(1,1,IHFI), 2, 40)
000130 IF ( IHFFI .GE. 2 )
1 CALL HTRANS( 1 , ICRIT , IFIL
2 , ISUP , IREWET , PPP(KKF) , GGG(KKF)
3 , XXX(KKF) , RRR(KKF) , TWW(KKF) , SHF(IIF)
4 , TFC(IIF,1) , HF(IIF) , CHFB(IIF) , AMCHI
5 , IMODI , IMODMI , TWL(IIF) , TWLM(IIF)
6 , CHFBMI , DE , IFSTAT , PSP
    
```

```

7 , PLP , PSG , AMW , SHFASG(KKF)
8 , CPRI , IRETRN , HFM1 , HFM2
9 , ITRAN1 , ITRAN2 , ITRANS , IHFMDL(1)
A , HMIC(IIF) , DTSAT(IIF) , FMT(IIF) , INCL
B , PDP , FXSUB , XSUB(KKF) , GGO(KKF)
C , ICRIO , DTQUE , DTMQU , TIME
D , TMGO(IIF) , IFLOD
000131 DO 600 J=1, NTP2
000132 TFP(IIF,J) = TFC(IIF,J)
000133 600 CONTINUE
000134 IF ( IZR .EQ. 0 ) GO TO 800
C *
C * BAKER-JUST EQUATION OF WATER-ZR REACTION
C *
000135 IF ( IFAIL(IIF) .GE. 2 )
10WZRI(IIF) = AZR*CO1*EXP(CO2/( TKO +TFC(IIF,HFP1)))
2 /WZRI(IIF)
000136 DWZRO(IIF) = AZR*CO1*EXP(CO2/( TKO +TFC(IIF,NT )))
1 /WZRO(IIF)
000137 800 CONTINUE
CC
000138 CALL HTPROP
CC
000139 GAP(IIF)=(RCBL(IIF)-RADF(IFR,HF))*1000.0
000140 IFCH = IFUEL / ICHGF
000141 IFRC = IFR + (IIF-1)/IFCH = IRFL
000142 IHGG = IFHG(IFRC) / 10
000143 ING = IFHG(IFRC) - IHGG * 10
000144 IHG = IHGG - 1
000145 IF ( IHGG .EQ. 0 ) HG(IIF)=HTFUN(GAP(IIF), THG(1,1,IHG), 2, 40 )
000146 IF ( IHGG .EQ. 1 ) HG(IIF)=HTFUN(TIME , THG(1,1,IHG), 2, 40 )
000147 IF ( IHGG .EQ. 2 .OR. IHGG .EQ. 3 )
1 HG(IIF)=EXTG (IHG, RADI(INF, IFR), GAP(IIF),
2 OR(IIF), ORKF(IIF) , DNUP )
000148 IF ( IHGG .EQ. 4 ) CALL EXTGTR
000149 IF ( IHGG .GE. 5 ) CALL EXTHG ( IFR, TFC(IIF,HF), TFC(IIF,HFP1),
1 HG(IIF) )
CC
000150 CALL HTRHT
CC
000151 IF( IFR .EQ. IPTU .OR. IFR .EQ. ISPF ) GO TO 3000
000152 IF ( IHGG .EQ. 4 ) GO TO 2000
C *
C * IFAIL = 0 INTACT STATE
C * CHECK OF THE FUEL FAILURE = 1 BALLOONING
C * = 2 PERFORATED
000153 IF ( TFC(IIF,NTM1) .GT. TFAIL(IIF,1) ) IFAIL(IIF) = 1
000154 IF ( TFC(IIF,NTM1) .GT. TFAIL (IIF,2) ) IFAIL(IIF) = 2
C *
C * DETERMINE THE FUEL CLADDING BALLOONING RATIO
C *
000155 IF ( IFAIL(IIF) .LT. 1 .OR. IFAIL(IIF) .GE. 2 ) GO TO 3000
000156 T1 = (TFC(IIF,NTM1)-TFAIL(IIF,1))/(TFAIL(IIF,2)-TFAIL(IIF,1))
000157 RCBL(IIF) = RADF(IFR,NT) + T1*(RCMAX(IFR)-RADF(IFR,NT))
000158 2000 CONTINUE
000159 IF ( RCBL(IIF) .GT. RCMAX(IFR) ) RCBL(IIF) = RCMAX(IFR)
000160 IF ( RCBL(IIF) .LE. RADF(IFR,NT) ) RCBL(IIF) = RADF(IFR,NT)
000161 FRBL2(IIF) = RCBL(IIF)/RADF(IFR,NT)
000162 IF ( IRADI .LE. 1 ) FRBL2(IIF) = 1.0
    
```



```

C *
C * REALCULATION OF SURFACE HEAT FLUX
C *
000129 GHF (IIF) = HG(IIF) * (TFC(IIF,NF)-TFC(IIF,NFP1))
000130 SHF (IIF) = HF(IIF) * (TFC(IIF,NT)-TFC(IIF,NTP1))
000131 SHFI(IIF) = HFI(IIF) * (TFC(IIF, 1)-TFC(IIF,NTP2))
C
C WRITE(15,8011) GHF(IIF),SHF(IIF),SHFI(IIF)
C8011 FORMAT(1H,'GHF,SHF,SHFI=',3E12.5)
C
000132 IF( IHFMOL(1) .NE. 1 ) GO TO 100
000133 SHMIC (IIF) = HMIC (IIF) * DTSAT (IIF)
000134 SHMICI(IIF) = HMICI(IIF) * DTSATI(IIF)
000135 SHF (IIF) = SHF (IIF) + SHMIC (IIF)
000136 SHFI(IIF) = SHFI(IIF) + SHMICI(IIF)
000137 100 CONTINUE
C *
C * CHECK CONVERGENCE
C *
000138 DO 7000 I = 1, NT
000139 DTAB = ABS(TFC(IIF,I)-TFP(IIF,I))
000140 IF ( DTAB .GT. EPSD ) GO TO 1000
000141 TFP(IIF,I) = TFC(IIF,I)
000142 7000 CONTINUE
000143 DTSAP (IIF) = DTSAT (IIF)
000144 DTSAPI(IIF) = DTSATI(IIF)
000145 RETURN
000146 8000 CONTINUE
000147 WRITE(6,9000)
C
000148 CALL EXIT
C
000149 9000 FORMAT(//,10X,'STEADY STATE TEMPERATURE DO NOT CONVERGED')
000150 RETURN
000151 END

```

(3) HTRNS

```

000001 SUBROUTINE HTRNS
C *
C *
C * TRANSIENT ANALYSIS OF ROD TEMPERATURES
C
000002 COMMON /INPT1/ HHH1(200)
000003 EQUIVALENCE
* (HHH1( 6), ITMSTP), (HHH1( 7), IPOWER)
* (HHH1( 101), TSTART), (HHH1( 102), TMAX ), (HHH1( 103), DTSO )
* (HHH1( 104), DTMIN ), (HHH1( 105), DTMAX ), (HHH1( 106), DVRMX )
* (HHH1( 107), DTPRINT), (HHH1( 108), DTPLOT), (HHH1( 109), NDT )
* (HHH1( 110), ISP )
000004 EQUIVALENCE
* (HHH1( 111), TOT (1) ), (HHH1( 121), DTT (1) )
* (HHH1( 131), ISTEP (1) ), (HHH1( 141), THSTEP(1) )
000005 DIMENSION
* TOT (10) , DTT (10) , ISTEP (10) ,
* THSTEP(10)
C ***** INPTS SUZUKI 85.8.22 *****
000006 COMMON /INPT5/ HHH5(26200)
000007 EQUIVALENCE
* (HHH5( 1), IFUEL ), (HHH5( 2), NFO (1) )
* (HHH5( 62), NCO (1) ), (HHH5( 122), IRFL )
* (HHH5( 123), IREWET ), (HHH5( 124), ICRIT )
* (HHH5( 125), NKKF ), (HHH5( 126), IMTPRT )
* (HHH5( 127), IPTU ), (HHH5( 128), ISPF )
* (HHH5( 129), IFPROP ), (HHH5( 130), ICHGF )
* (HHH5( 131), IFHG (1) ), (HHH5( 191), IFHFO (1) )
* (HHH5( 251), IFHFI (1) ), (HHH5( 311), IHFMOL(1) )
* (HHH5( 371), ICLNTW ), (HHH5( 372), ICLNTM )
* (HHH5( 373), ICRIO ), (HHH5( 374), MFLOOD )
* (HHH5( 401), ITHW (1) ), (HHH5( 451), ITWM (1) )
000008 DIMENSION
* NFO (60) , NCO (60) , IFHG (60) ,
* IFHFO (60) , IFHFI (60) , IHFMOL(60) ,
* ITHW (50) , ITWM (50)
000009 EQUIVALENCE
* (HHH5( 501), RAD1 (1,1) ), (HHH5( 1401), RPF1 (1,1,1) )
* (HHH5( 3201), IPROPF(1,1) ), (HHH5( 4101), TD (1,1) )
* (HHH5( 4821), TD2 (1,1) ), (HHH5( 5541), RHOF (1,1) )
* (HHH5( 5581), SHTF (1,1) ), (HHH5( 5621), CONF (1,1) )
* (HHH5( 5661), RHOF2 (1,1) ), (HHH5( 5701), SHTF2 (1,1) )
* (HHH5( 5741), CONF2 (1,1) ), (HHH5( 5781), RHOC (1,1) )
* (HHH5( 5821), SHTC (1,1) ), (HHH5( 5861), CONC (1,1) )
* (HHH5( 5901), RHOC2 (1,1) ), (HHH5( 5941), SHTC2 (1,1) )
* (HHH5( 5981), CONC2 (1,1) ), (HHH5( 6021), THG (1,1,1) )
* (HHH5( 6221), THF (1,1,1) ), (HHH5( 6421), OR (1) )
* (HHH5( 6521), SEDT (1) ), (HHH5( 6531), DE )
* (HHH5( 6532), QVF ), (HHH5( 6533), AWW )
* (HHH5( 6534), DTQUE ), (HHH5( 6535), DTHOU )
* (HHH5( 6541), EPSD ), (HHH5( 6562), EPS1 )
* (HHH5( 6563), EPS2 ), (HHH5( 6564), TFLOOD )
* (HHH5( 6570), NOR ), (HHH5( 6571), IOR (1) )
000010 DIMENSION
* RAD1 (15,60) , RPF1 (2,15,60) , IPROPF(15,60) ,
* TD (12,60) , TD2 (12,60) , RHOF (2,20) ,
* SHTF (2,20) , CONF (2,20) , RHOF2 (2,20) ,
* SHTF2 (2,20) , CONF2 (2,20) , RHOC (2,20) ,

```

```

*   SHTC (2,20)   , CONC (2,20)   , RHOC2 (2,20)   ,
*   SHTC2 (2,20)  , CONC2 (2,20)  , THG (2,20,1)  ,
*   THF (2,20,1)  , QR (100)      , SEDT (10)      ,
*   IQR (10)
000011
EQUIVALENCE
* (HHHS(6611), AZR ), (HHHS(6612), BZR ), (HHHS(6613), CZR )
* (HHHS(6614), C001 ), (HHHS(6615), C002 ), (HHHS(6616), IZR )
* (HHHS(6711), PSE ), (HHHS(6712), PLE ), (HHHS(6713), PSG )
* (HHHS(6714), PDP ), (HHHS(6715), FXSUB )
* (HHHS(6761), SHFAIN(1)), (HHHS(6811), PSEN(1))
* (HHHS(6861), PLEN(1))
000012
DIMENSION
* SHFAIN(50)      , PSEN(50)      , PLEN(10)
*****
000013
EQUIVALENCE
1 (HHHS( 9211),TMELTO)
2 (HHHS( 9221),WWHUP ),(HHHS( 9281),WHPUP ),(HHHS( 9341),WWSUP )
3 (HHHS( 9401),WWQUP ),(HHHS( 9461),CCWUP ),(HHHS( 9521),CCPUP )
4 (HHHS( 9581),CCSUP ),(HHHS( 9641),CCGUP ),(HHHS( 9701),AANCUP )
5 (HHHS( 9761),AAPUP ),(HHHS( 9821),AASPUP ),(HHHS( 9881),AAFUP )
6 (HHHS( 9941),AAGPUP ),(HHHS(10001),HHPUP ),(HHHS(10061),HHSUP )
7 (HHHS(10121),HHFPUP ),(HHHS(10181),HHGPUP ),(HHHS(10241),HKGUP )
8 (HHHS(10301),HKFGUP ),(HHHS(10361),TTPUP )
9 (HHHS(10421),WWHLO ),(HHHS(10481),WWPLO ),(HHHS(10541),WWSLO )
A (HHHS(10601),WWGLO ),(HHHS(10661),CCWLO ),(HHHS(10721),CCPLO )
B (HHHS(10781),CCSLO ),(HHHS(10841),CCGLO ),(HHHS(10901),AANCLO )
C (HHHS(10961),AAPWLO ),(HHHS(11021),AASPLO ),(HHHS(11081),AAFPLO )
D (HHHS(11141),AAGPLO ),(HHHS(11201),HHPWLO ),(HHHS(11261),HHSPLO )
E (HHHS(11321),HHFPLO ),(HHHS(11381),HHGPLO ),(HHHS(11441),HKGSL )
F (HHHS(11501),HKFGLO ),(HHHS(11561),TTPLOO ),(HHHS(11621),APLINT )
G (HHHS(11711),TWUPTB ),(HHHS(14111),TWLOTB ),(HHHS(16511),TFUPTB )
H (HHHS(18911),TFLOTD ),(HHHS(21311),HWUPTB ),(HHHS(23711),HWLOTD )
000014
DIMENSION
1 WWHUP (60)           ,WHPUP (60)           ,WWSUP (60)
2 WWQUP (60)           ,CCWUP (60)           ,CCPUP (60)
3 CCSUP (60)           ,CCGUP (60)           ,AANCUP(60)
4 AAPUP (60)           ,AASPUP(60)          ,AAFUP (60)
5 AAGPUP(60)          ,HHPUP (60)          ,HHSUP (60)
6 HHFPUP(60)          ,HHGPUP(60)          ,HKGUP (60)
7 HKFGUP(60)          ,TTPUP (60)
8 WWHLO (60)           ,WWPLO (60)           ,WWSLO (60)
9 WWGLO (60)           ,CCWLO (60)           ,CCPLO (60)
A CCSLO (60)           ,CCGLO (60)           ,AANCLO(60)
B AAPWLO(60)          ,AASPLO(60)          ,AAFPLO(60)
C AAGPLO(60)          ,HHPWLO(60)          ,HHSPLO(60)
D HHFPLO(60)          ,HHGPLO(60)          ,HKGSL(60)
E HKFGLO(60)          ,TTPLOO(60)
F TWUPTB(2,20,60)     ,TWLOTB(2,20,60)     ,TFUPTB(2,20,60)
G TFLOTB(2,20,60)     ,HWUPTB(2,20,60)     ,HWLOTB(2,20,60)
C *****
C ***** INPT6 SUZUKI 85.8.22 *****
000015
COMMON /INPT6/ HHH6(4900)
000016
EQUIVALENCE
* (HHH6( 1), IRADI ), (HHH6( 3), DFASKP )
* (HHH6( 51), TFAIL (1,1) ), (HHH6( 251), FAO (1,1) )
* (HHH6( 3851), EMIS (1) ), (HHH6( 3911), RCMAX (1) )
* (HHH6( 3971), SIGM ), (HHH6( 3972), FNPIN (1) )
000017
DIMENSION

```

```

*   TFAIL (100,2) , FAO (60,60) , EMIS (60)
*   RCMAX (60)   , FNPIN (60)
C *****
CVREP 89/01
C COMMON /INPT8/ HHH8(4000) <DGD915>
CVREP-END
000018
EQUIVALENCE
* (HHH8( 51), TWTBL (1,1,1)), (HHH8( 51), GWTBL (1,1,1))
* (HHH8( 251), PWTBL (1,1,1)), (HHH8( 451), HWTBL (1,1,1))
* (HHH8( 651), QRTBL(1,1) )
* (HHH8( 901), TRUPTB(1,1) ), (HHH8( 1001), QRTBL (1,1,1))
CVADD 89/01
* (HHH8( 3001), VCTTBL(1,1) ), (HHH8( 3201), TRTTBL(1) )
* (HHH8( 3221), RTTBL (1,1) )
CVADD-END
000019
DIMENSION
* TWTBL (2,10,1) , PWTBL (2,10,1) , HWTBL (2,10,1) ,
* QRTBL(2,40) ,
* QRTBL (2,100,10), GWTBL (2,10,1) , TRUPTB(20,2)
CVADD 89/01
* VCTTBL(2,100) , TRTTBL(20) , RTTBL(20,100)
CVADD-END
000020
COMMON /CALC1/ CAL1(300)
000021
EQUIVALENCE
* (CAL1( 1), IERORN), (CAL1( 2), ICALC ), (CAL1( 3), IPRNT )
* (CAL1( 4), IPLOT ), (CAL1( 5), DUMC11), (CAL1( 6), DUMC12)
000022
EQUIVALENCE
* (CAL1( 101), THMAIN), (CAL1( 103), DTH ), (CAL1( 111), TEDT(1))
* (CAL1( 125), THHEAT), (CAL1( 125), TIME ), (CAL1( 126), DTHEAT)
* (CAL1( 126), DYS )
000023
DIMENSION TEDT(10)
000024
EQUIVALENCE
* (CAL1( 201), PAI ), (CAL1( 202), PAI2 ), (CAL1( 203), TKO )
* (CAL1( 204), E426 ), (CAL1( 205), GRAV ), (CAL1( 206), GRAV2 )
C
C ***** CALC5 SUZUKI 85.8.22 *****
CVREP 89/01
C COMMON /CALC5/ CAL5(34600) <DGD915>
CVREP-END
000025
COMMON /CALC5/ CAL5(36100)
000026
EQUIVALENCE
* (CAL5( 1), ISEDT ), (CAL5( 11), NNCH1 (1) )
* (CAL5( 71), NNC (1) ), (CAL5( 131), NNCP1 (1) )
* (CAL5( 191), NNFM2 (1) ), (CAL5( 251), NNFH1 (1) )
* (CAL5( 311), NNF (1) ), (CAL5( 371), NNFP1 (1) )
* (CAL5( 431), NNFP2 (1) ), (CAL5( 491), NNTH2 (1) )
* (CAL5( 551), NNTH1 (1) ), (CAL5( 611), NNT (1) )
* (CAL5( 671), NNTP1 (1) ), (CAL5( 731), NNTP2 (1) )
* (CAL5( 791), IOUY ), (CAL5( 792), NCH1 )
* (CAL5( 793), NC ), (CAL5( 794), NCP1 )
* (CAL5( 795), NFM2 ), (CAL5( 796), NFM1 )
* (CAL5( 797), NF ), (CAL5( 798), NFP1 )
* (CAL5( 799), NFP2 ), (CAL5( 800), NTH2 )
* (CAL5( 801), NTM1 ), (CAL5( 802), NT )

```

* , (CAL5(803), NTP1 , (CAL5(804), NTP2))
 * , (CAL5(805), JIF , (CAL5(806), JFR))
 * , (CAL5(807), JFK , (CAL5(811), IMODE(1)))
 * , (CAL5(911), IEROR , (CAL5(912), IFLOD))

000028

DIMENSION

* NNCH1 (60) , NNC (60) , NNCP1 (60) ,)
 * NNFM2 (60) , NNFM1 (60) , NNF (60) ,)
 * NNFP1 (60) , NNFP2 (60) , NNFM2 (60) ,)
 * NNTM1 (60) , NNT (60) , NNTP1 (60) ,)
 * NNTP2 (60) , IMODE (100)

CC

000029

EQUIVALENCE

* (CAL5(951), TFC (1,1) , (CAL5(2451), TFP (1,1)))
 * (CAL5(3951), COND (1,1) , (CAL5(5451), CONRAD(1,1)))
 * (CAL5(4951), SHEAT (1,1) , (CAL5(8451), DEN (1,1)))
 * (CAL5(9951), RADF (1,1) , (CAL5(10851), DELR (1,1)))
 * (CAL5(11751), RADAV (1,1) , (CAL5(12651), RN (1,1)))
 * (CAL5(13551), GAP (1) , (CAL5(13651), VFRAC (1,1)))
 * (CAL5(14551), VOL (1) , (CAL5(14611), VFT (1)))
 * (CAL5(14671), SA (1) , (CAL5(14731), GA (1)))
 * (CAL5(14791), SAN (1) , (CAL5(14861), AM (1)))
 * (CAL5(15761), HG (1) , (CAL5(15861), HF (1)))
 * (CAL5(15961), GHF (1) , (CAL5(16061), SHFAO (1)))
 * (CAL5(16161), SHF (1) , (CAL5(16261), GPF (1)))
 * (CAL5(16361), PPF (1) , (CAL5(16561), CHFB (1)))
 * (CAL5(16661), AMCHF (1) , (CAL5(16761), RPFN (1,1)))

000030

EQUIVALENCE

* (CAL5(17661), RPFT (1) , (CAL5(17721), QROD (1)))
 * (CAL5(17821), QRODO (1) , (CAL5(17921), OG (1,1)))
 * (CAL5(19421), QRKF (1) , (CAL5(19521), ODEN (1,1)))
 * (CAL5(21023), C01 , (CAL5(21024), C02))
 * (CAL5(21031), FMT (1) , (CAL5(21131), FOF (1)))
 * (CAL5(21191), FOC (1) , (CAL5(21251), SAI (1)))
 * (CAL5(21311), HFI (1) , (CAL5(21411), FMTI (1)))
 * (CAL5(21511), SHFIO (1) , (CAL5(21611), SHFI (1)))
 * (CAL5(21751), DWZRI (1) , (CAL5(21851), DWZRO (1)))
 * (CAL5(21951), WZRI (1) , (CAL5(22051), WZRO (1)))
 * (CAL5(22153), DEXPRI , (CAL5(22251), PPP (1)))
 * (CAL5(22301), RRR (1) , (CAL5(22351), TWW (1)))
 * (CAL5(22401), GGG (1) , (CAL5(22451), XXX (1)))
 * (CAL5(22501), TWM (1) , (CAL5(22551), RQQ (1)))
 * (CAL5(22651), GGO (1) , (CAL5(22701), TMOO (1)))

000031

EQUIVALENCE

* (CAL5(22851), IHICAL(1) , (CAL5(22951), CHFBM (1)))
 * (CAL5(23051), TWL (1) , (CAL5(23151), TWLM (1)))
 * (CAL5(23251), IMODEM(1) , (CAL5(23351), RHCPR (1)))
 * (CAL5(23501), SHFASG(1) , (CAL5(23551), XSUB (1)))
 * (CAL5(23851), CPR (1))

000032

DIMENSION

* TFC (100,15) , TFP (100,15) , COND (100,15) ,)
 * CONRAD(100,15) , SHEAT (100,15) , DEN (100,15) ,)
 * RADF (60,15) , DELR (60,15) , RADAV (60,15) ,)
 * RN (60,15) , QAP (100) , VFRAC (60,15) ,)
 * VOL (60) , VFT (60) , SA (60) ,)
 * AM (60,15) , HG (100) , HF (100) ,)
 * GHF (100) , SHFAO (50) , SHF (100) ,)
 * GPF (100) , PPF (100) , GA (60) ,)
 * CHFB (100) , AMCHF (100) , RPFN (60,15) ,)

* RPFT (60) , QROD (100) , QRODO (100) ,)
 * OG (100,15) , QRKF (100) , ODEN (100,15) ,)
 * FMT (100) , FOF (60) , FOC (60) ,)
 * SAI (60) , HFI (100) , FMTI (100) ,)
 * SHFIO (100) , SHFI (100) , SAN (60) ,)

000033

DIMENSION

* DWZRI (100) , DWZRO (100) , WZRI (100) ,)
 * WZRO (100) ,)
 * PPP (50) , RRR (50) , TWW (50) ,)
 * GGG (50) , XXX (50) , TWM (50) ,)
 * ROO (50) , IHICAL(100) , IMODEM(100) ,)
 * CHFBM (100) , TWL (100) , TWLM (100) ,)
 * SHFASG(50) , XSUB (50) , CPR (100) ,)
 * GGO (50) , TMOO (100)

000034

EQUIVALENCE

* (CAL5(23951), HMIC (1) , (CAL5(24051), HMICI (1)))
 * (CAL5(24151), SHMIC (1) , (CAL5(24251), SHMICI(1)))
 * (CAL5(24351), DTSAT (1) , (CAL5(24451), DTSAP (1)))
 * (CAL5(24551), DTSATI(1) , (CAL5(24651), DTSAPI(1)))
 * (CAL5(24751), RMODE (1))

000035

DIMENSION

* HMIC (100) , HMICI (100) , SHMIC (100) ,)
 * SHMICI(100) , DTSAT (100) , DTSAP (100) ,)
 * DTSATI(100) , DTSAPI(100) , RMODE (100)

000036

EQUIVALENCE

* (CAL5(24851), AMF (1) , (CAL5(24951), ENT (1)))
 * (CAL5(25051), VOLF (1) , (CAL5(25151), VFRAC(1,1)))
 * (CAL5(26051), ENTNON(1) , (CAL5(26151), POW (1)))
 * (CAL5(26251), POWNON(1))

000037

DIMENSION

* AMF (100) , ENT (100) , VOLF (100) ,)
 * VFRAC(60,15) , ENTNON(100) , POW (100) ,)
 * POWNON(100)

000038

EQUIVALENCE

* (CAL5(26351), FACZR (1) , (CAL5(26451), RZRI (1)))
 * (CAL5(26551), RZRO (1) , (CAL5(26651), RZRT (1)))
 * (CAL5(26751), CTMELT(1))

000039

DIMENSION

* FACZR (100) , RZRI (100) , RZRO (100) ,)
 * RZRT (100) , CTMELT(100)

000040

EQUIVALENCE

1 (CAL5(32651), TTFUP , (CAL5(32711), TTFLO , (CAL5(32771), TTGUP))
 2 (CAL5(32831), TTGLO , (CAL5(32891), TTSUP , (CAL5(32951), TTSLO))
 3 (CAL5(33011), TTPUP , (CAL5(33071), TTPLO , (CAL5(33131), TTWUP))
 4 (CAL5(33191), TTWLO , (CAL5(33251), TTCUP , (CAL5(33311), TTCLO))
 5 (CAL5(33371), HHWCUP , (CAL5(33431), HHWCLO , (CAL5(33491), AMTXUP))
 6 (CAL5(33511), AMTXLO , (CAL5(33531), BMTXUP , (CAL5(33535), BMTXLO))
 7 (CAL5(33541), CHODUP , (CAL5(33601), CHODLO , (CAL5(33661), TTFUPA))
 8 (CAL5(33721), TTFLOA)
 9 (CAL5(33781), HSPWUP , (CAL5(33841), HSSPUP))
 A (CAL5(33901), HSFUPUP , (CAL5(33961), HSGPUP , (CAL5(34021), HSGSUP))
 B (CAL5(34081), HSGFUP))
 C (CAL5(34141), HSPWLO , (CAL5(34201), HSSPLO))
 D (CAL5(34261), HSFPLO , (CAL5(34321), HSGPLO , (CAL5(34381), HSGSLO))
 E (CAL5(34441), HSFQLO)

CVADD B9/01	<OGD915>
F (CAL5(35931), GGGUP)	
CVADD-END	<DDG915>

```

000041 DIMENSION
1 TTFUP (60) ,TTFLO (60) ,TTQUP (60)
2 TTGLO (60) ,TTSUP (60) ,TTSLO (60)
3 TTPVP (60) ,TTPLO (60) ,TTWUP (60)
4 TTWLO (60) ,TTCUP (60) ,TTCL0 (60)
5 HHWCUP(60) ,HHWCLO(60) ,AMTXUP(4,4)
6 ,AMTXLO(4,4) ,BMTXUP(4) ,BMTXLO(4)
7 ,CMODUP(60) ,CMODLO(60) ,TTFUPA(60)
8 ,TTFLOA(60)
9 ,HSPWUP(60) ,HSSPUP(60)
A ,HSFPUP(60) ,HSGPUP(60) ,HSGSUP(60)
B ,HSFGUP(60)
C ,HSPWLO(60) ,HSSPLO(60)
D ,HSFPLO(60) ,HSGPLO(60) ,HSGSLO(60)
E ,HSFQLO(60)

CYADD 89/01
F ,GGGUP (100) <DGD915>
CYADD-END <DGD915>
C *****
C ***** CALC6 SUZUKI 85.8.22 *****
000042 COMMON /CALC6/ CAL6(4650)
000043 EQUIVALENCE
* (CAL6( 1), IFAIL (1) ), (CAL6( 101), RCBL (1) )
* ,(CAL6( 201), FRBL2 (1) ), (CAL6( 321), FA (1) )
* ,(CAL6( 3921), TCL4 (1) ), (CAL6( 4021), SGAE (1) )
* ,(CAL6( 4081), RDC (1) ), (CAL6( 4181), IRETRN )
* ,(CAL6( 4182), HFM1 ), (CAL6( 4183), HFM2 )
* ,(CAL6( 4184), ITRAN1 ), (CAL6( 4185), ITRAN2 )
* ,(CAL6( 4186), ITRANS ), (CAL6( 4551), FPOWER )

000044 DIMENSION
* IFAIL (100) , RCBL (100) , FRBL2 (100)
* FA (3600) ,
* TCL4 (100) , SGAE (60) , RDC (100)

000045 DIMENSION FPW(10)
C *****
C -----
000046 IFSTAT = 1
C
000047 DTH = DTS / 3600.0
000048 IF ( MFLOOD .EQ. 2 .AND. TIME .GT. TFLOOD ) IFLOD = 1
C --
000049 IF ( IPOWER .LE. 0 ) GO TO 50
000050 DO 40 I = 1, NGR
000051 FPW(I) = FPOWER
000052 40 CONTINUE
000053 GO TO 70
000054 50 CONTINUE
000055 DO 60 I = 1, NGR
000056 IF ( IQR(I) .EQ. 0 ) FPW(I) = HTFUN(TIME,QRIBL(1,1) ,2,40)
000057 IF ( IQR(I) .GE. 1 ) FPW(I) = HTFUN(TIME,QRIBL (1,1,IQR(I)),2,100)
000058 60 CONTINUE
000059 70 CONTINUE
C --
000060 INCL = IMFMDL(2)
000061 IFIL = IMFMDL(4)
000062 ISUP = IMFMDL(5)
000063 DO 110 JFR = 1, IRFL

```

```

000064 IF ( IFHG(JFR) .EQ. 40 ) CALL PGAPSG
000065 110 CONTINUE
C
000066 IF ( ICRIT.NE.-2 .AND. ICRIT.NE.-4 .AND. ICRIT.NE.-6
1 .AND. ICRIT.NE.-8 ) GO TO 210
C*
C* CALCULATION OF POWER FOR 'CPR'
C*
000067 KFUEL = ( IFUEL - 1 ) / IRFL + 1
000068 DO 200 KKF = 1, KFUEL
000069 SHFASG(KKF) = SHFAIN(KKF) * RQO(KKF)
000070 200 CONTINUE
000071 210 CONTINUE
000072 DO 5000 I = 1, IFUEL
000073 IIF = I
000074 JIF = IIF
000075 IF ( IMTCAL(IIF) .NE. 0 ) GO TO 5000
000076 IFR = IIF - ((IIF-1)/IRFL) * IRFL
000077 JFR = IFR
000078 KKF = (IIF-1) / IRFL + 1
000079 JFK = KKF
000080 NF = NNF(IFR)
000081 NC = NNC(IFR)
000082 HT = NNT(IFR)
000083 NCM1 = NNCM1(IFR)
000084 NCP1 = NNCP1(IFR)
000085 NFM2 = NNF2(IFR)
000086 NFM1 = NNF1(IFR)
000087 NFP1 = NNF1(IFR)
000088 NFP2 = NNF2(IFR)
000089 NFM2 = NNTM2(IFR)
000090 NTH1 = NNTM1(IFR)
000091 NTP1 = NNTP1(IFR)
000092 NTP2 = NNTP2(IFR)
000093 HMIC(IIF) = 0.0
000094 HMICI(IIF) = 0.0
000095 KO = IFUEL / NGR
000096 IO = (IIF-1)/KO + 1
000097 ORKF(IIF) = OR(IIF) * FPW(10)
000098 QROD(IIF) = ORKF(IIF) * 860.0
000099 FMT(IIF) = TFC(IIF, NT) - TFC(IIF, NTP1)
000100 IF ( ICRIT .GE. 0 ) GO TO 400
000101 PSP = PSE
000102 IF ( PSE .LE. 0.0 ) PSP = PSEN(KKF)
000103 ICH = 1 + (KKF-1)/NKKF
000104 PLP = PLE
000105 IF ( PLE .LE. 0.0 ) PLP = PLEN(ICH)
000106 400 CONTINUE
000107 IHFFO = IFHFO(IFR) / 10
000108 IHFO = IFHFO(IFR) - IHFFO * 10
000109 IF ( IHFFO.EQ.2 .AND. TFLOOD.NE.0.0 .AND. TIME.GT.TFLOOD
1 .AND. MFLOOD.LE.1 ) IHFFO = 1
CYADD 89/01 <DGD915>
000110 IF ( IHFFO.EQ.5 .AND. TFLOOD.NE.0.0 .AND. TIME.GT.TFLOOD
1 .AND. MFLOOD.LE.1 ) IHFFO = 1
CYADD-END <DGD915>
000111 IF ( IHFFO .EQ. 0 ) HFI(IIF)=HTFUN(FMT (IIF), THF(1,1,IHFO), 2, 40)
000112 IF ( IHFFO .EQ. 1 ) HFI(IIF)=HTFUN(TIME , THF(1,1,IHFO), 2, 40)

```

(4) PLOTTER

```

000163 3000 CONTINUE
C *
C * WATER ZIRCONIUM REACTION
C *
000164 IF ( IZR .EQ. 0 ) GO TO 4000
000165 WZRI(IIF) = WZRI(IIF)+DWZRI(IIF)*DTS
000166 WZRO(IIF) = WZRO(IIF)+DWZRO(IIF)*DTS
000167 RZRI(IIF) = WZRI(IIF)*FACZR(IIF)
000168 RZRO(IIF) = WZRO(IIF)*FACZR(IIF)
000169 RZRT(IIF) = RZRI(IIF)+RZRO(IIF)
000170 4000 CONTINUE
C *
C * CALCULATION OF STORED ENERGY IN FUEL
C *
000171 POW(IIF)=0.2388*OROD(IIF)/(AMF(IIF)*860.0)
000172 ENT(IIF)=ENT(IIF)+POW(IIF)*DTS
000173 POWNON(IIF)=0.2388*(OROD(IIF)-GPF(IIF)*860.0)/(AMF(IIF)*860.0)
000174 ENTNON(IIF)=ENTNON(IIF)+POWNON(IIF)*DTS
C *
C * CALCULATION OF MELTEN FUEL FRACTION
C *
000175 IF(TMELT0.EQ.0.0) TMELT0=2815.0
000176 IF(TFC(IIF,1).GE.TMELT0) GO TO 4600
000177 FTMELT=0.0
000178 GO TO 4900
000179 4600 CONTINUE
000180 DO 4700 J1=1,NFM1
000181 J2=J1+1
000182 IF(TFC(IIF,J1).GE.TMELT0.AND.TFC(IIF,J2).LT.TMELT0) GO TO 4800
000183 4700 CONTINUE
000184 IF(TFC(IIF,NF).GE.TMELT0) FTMELT=100.0
000185 GO TO 4900
000186 4800 CONTINUE
000187 RMELT=SQRT(RADI(J1,IFR)**2+(TFC(IIF,J1)-TMELT0)
1 *(RADI(J2,IFR)**2-RADI(J1,IFR)**2)
2 /(TFC(IIF,J1)-TFC(IIF,J2)))
000188 FTMELT=(RMELT**2/RADI(NF,IFR)**2)*100.0
000189 4900 CONTINUE
000190 IF(FTMELT.GE.100.0) FTMELT=100.0
000191 CTMELT(IIF)=FTMELT
C
000192 5000 CONTINUE
C
000193 DO 5100 IIF = 1, IFUEL
000194 IF ( IIF .EQ. 1 ) RMCPR = CPR(IIF)
000195 IF ( CPR(IIF) .EQ. 0.0 ) GO TO 5100
000196 IF ( CPR(IIF) .LE. RMCPR ) RMCPR = CPR(IIF)
000197 5100 CONTINUE
000198 RETURN
000199 END

```

```

000001 SUBROUTINE PLOTER ( IOPT )
C *
C * PLOTTING INFORMATION SAVING ROUTINE
C * FOR "HEATUP-5MOD6" (88/11/14)
C *
000002 COMMON /TITLE/ IT( 20 )
000003 COMMON /INPT0/ H0( 1 )
000004 COMMON /INPT1/ H1( 200 )
000005 COMMON /INPT2/ H2( 1 )
000006 COMMON /INPT3/ H3( 1 )
000007 COMMON /INPT4/ H4( 1 )
000008 COMMON /INPT5/ H5(26200)
000009 COMMON /INPT6/ H6(4900)
000010 COMMON /INPT7/ H7( 900 )
CYREP KCC 89/01 <DGD915>
C COMMON /INPT8/ H8(4000)
COMMON /INPT8/ H8(6000)
000011 CYREP-END <DGD915>
000012 COMMON /INPT9/ H9(1300)
C *
000013 COMMON /CALC1/ C1( 300 )
000014 COMMON /CALC2/ C2( 1 )
000015 COMMON /CALC3/ C3( 1 )
000016 COMMON /CALC4/ C4( 1 )
CYREP KCC 89/01 <DGD915>
C COMMON /CALC5/ C5(34600)
COMMON /CALC5/ C5(36100)
000017 CYREP-END <DGD915>
000018 COMMON /CALC6/ C6(5200)
000019 COMMON /CALC7/ C7(1600)
000020 COMMON /CALC8/ C8( 1 )
000021 COMMON /CALC9/ C9( 1 )
CPNC
C *
000022 EQUIVALENCE (H1( 1),IFREST),
1 (H1( 14),IFKEEP), (H1( 17),MTOTFL),
2 (H1( 23),NPLOT)
C *
000023 DIMENSION CDIF(50)
000024 DIMENSION CWK(50)
000025 DIMENSION IH1( 200), IH9(1300)
000026 DIMENSION ICONT(3)
000027 EQUIVALENCE (H1, IH1), (H9, IH9)
000028 DATA ICONT / 4HREST, 4HPLOT, 4HINPT /
C *
000029 IF ( NPLOT.EQ.0 ) GO TO 5000
C *
000030 HT = MTOTFL
C *
000031 IF ( IOPT.NE.0 ) GO TO 1000
C *
C * WRITE INITIAL INFORMATION FOR PLOTTING
C *
000032 IH1(29) = 0
C *
000033 WRITE(MT) (H9(J),J=301,1000), IT
000034 WRITE(MT) ICONT(3)
000035 WRITE(MT) H1, H5, H6, H7, H8, H9

```

```

000036      WRITE(6,9100)
C *
000037      1000 IF ( NPLOT.EQ.0 ) GO TO 5000
C *
C *      WRITE PLOTTING DATA
C *
000038      DO 1500 N = 1,50
000039          CDIF(N) = 0.0
000040      1500 CONTINUE
C *
000041      DO 3500 N = 301,350
000042          NN = N - 300
000043          J = IH9(N) / 100000
000044          IF ( J .LE. 0 ) GO TO 3000
000045          IF ( J .GT. 6 ) GO TO 3100
000046          K = IH9(N) - J * 100000
000047          GO TO ( 2100, 3500, 3500, 3500, 2500, 2600 ), J
C *
000048      2100 IF ( K.GT.300 ) GO TO 3100
000049          CHK(NN) = C1(K)
000050          GO TO 3500
C *
CYREP KCC 89/01
C2500 IF ( K.GT.34600 ) GO TO 3100
000051      2500 IF ( K.GT.36100 ) GO TO 3100
CYREP-END
000052          CHK(NN) = C5(K)
000053          GO TO 3500
C *
000054      2600 IF ( K.GT.5200 ) GO TO 3100
000055          CHK(NN) = C6(K)
000056          GO TO 3500
C *
000057      3000 CHK(NN) = 0.0
000058          GO TO 3500
C *
000059      3100 IF ( IH1(29).EQ.0 ) WRITE(6,9200) IH9(N)
000060          CHK(NN) = 0.0
C *
000061      3500 CONTINUE
C *
000062      CALL PLWRITE ( MT, CDIF, CHK, IR )
000063          IH1(29) = IH1(29) + 1
000064          IF ( IOPT.NE.2 ) GO TO 5000
C *
C *      CLOSING
C *
000065          WRITE(6,9300) IH1(29)
C *
000066      5000 CONTINUE
000067          RETURN
C *
C *
000068      9100 FORMAT (1H-, 20X, '***** INITIAL INFORMATION FOR PLOTTING',
1          ' WRITED *****' )
000069      9200 FORMAT (1H-, 20X, '***** ERROR. ILLEGAL ADDRESS VALUE = ',
1          I6, ' *****' )
000070      9300 FORMAT (1H-, 20X, '***** TOTAL PLOTTING RECORD NO. = ',

```

```

C *      1 I6, ' *****' )
C *
C *      ----- DUMMY ROUTINE FOR PNC SYSTEM -----
C *
000071      ENTRY      NPLOTR
000072      RETURN
000073      ENTRY      TIMER
000074      RETURN
000075      ENTRY      INPRNT
000076      RETURN
000077      END

```

(5) PLWRTE

```

000001      SUBROUTINE PLWRTE ( IWRTE, CDIF, CWK, IR )
C *
C * COMMON COMPRESS & PLOT DATA WRITE ROUTINE
C *
000002      COMMON /CALC1/ C1( 300)
CVREP KCC 89/01 <DGD915>
C COMMON /CALC5/ C5(34600)
000003      COMMON /CALC5/ C5(36100)
CVREP-END <DGD915>
000004      COMMON /CALC6/ C6( 5200)
C *
000005      DIMENSION CDIF(50)
000006      DIMENSION CWK(50)
C *
000007      INTEGER NSVEC(10)
C *
C * COMMON COMPRESS
C *
000008      CALL COMPRS ( C1, C1, 300, NSVEC(1), IR1 )
C *
CVREP KCC 89/01 <DGD915>
C CALL COMPRS ( C5, C5, 34600, NSVEC(5), IR5 )
000009      CALL COMPRS ( C5, C5, 36100, NSVEC(5), IR5 )
CVREP-END <DGD915>
C *
000010      CALL COMPRS ( C6, C6, 5200, NSVEC(6), IR6 )
C *
C * PLOT DATA WRITE
C *
000011      CALL WRPLOT ( IWRTE, NSVEC, CDIF, CWK, IR )
C *
C * COMMON RECOVERY
C *
000012      CALL EXPNSH ( C1, C1, 300, NSVEC(1), IR1 )
C *
CVREP KCC 89/01 <DGD915>
C CALL EXPNSH ( C5, C5, 34600, NSVEC(5), IR5 )
000013      CALL EXPNSH ( C5, C5, 36100, NSVEC(5), IR5 )
CVREP-END <DGD915>
C *
000014      CALL EXPNSH ( C6, C6, 5200, NSVEC(6), IR6 )
C *
000015      RETURN
000016      END

```

(6) WRPLOT

```

000001      SUBROUTINE WRPLOT ( IWRTE, NSVEC, CDIF, CWK, IR )
C *
C * COMPRESS DATA WRITE ROUTINE TO PLOT DATA FILE
C *
000002      COMMON /CALC1/ C1( 300)
CVREP KCC 89/01 <DGD915>
C COMMON /CALC5/ C5(34600)
000003      COMMON /CALC5/ C5(36100)
CVREP-END <DGD915>
000004      COMMON /CALC6/ C6( 5200)
C *
000005      DIMENSION CDIF(50)
000006      DIMENSION CWK(50)
C *
000007      INTEGER NSVEC(10)
C *
000008      DATA IPLOT / 4HPLOT /
C *
C * PLOT DATA LENGTH WRITE
C *
000009      WRITE (IWRTE) IPLOT
000010      WRITE (IWRTE) NSVEC
C *
C * PLOT COMPRESS DATA WRITE
C *
000011      N1 = NSVEC(1)
000012      N5 = NSVEC(5)
000013      N6 = NSVEC(6)
000014      WRITE (IWRTE)
1 ( C1(J),J=1,N1 )
5 ( C5(J),J=1,N5 )
6 ( C6(J),J=1,N6 ), CDIF, CWK
C *
C * RETURN CODE SET
C *
000015      IR = 0
C *
000016      RETURN
000017      END

```

6.6.2 付録Ⅱ EUREKA-ATRコードによる圧力管破断事故予備解析

実証炉における圧力管破断事故解析(圧力管-カランドリア管同時破断解析)の予備解析をEUREKA-ATRコードを使用して行う。

破断時に重水中に形成される蒸気泡によって重水が排除される効果および軽水が重水を薄める効果によって負の反応度が入るが反応度の大きさは未評価である。そのため本解析では「ふげん」を対象とした反応度解析の結果を基に反応度投入量を仮定し、破断後の炉心挙動について予備的な解析を行う。

1.解析条件

(1)投入反応度

圧力管破断後重水中に蒸気泡が形成されかつ瞬時に軽水が拡散するものとし、 $-0.5\% \Delta k/k$ の反応度がステップ状に投入されるものとする。

(2)スクラム信号

本解析ではスクラムは考慮しないこととする。

(3)運転条件

原子炉の運転条件を下表にしめす。

炉心	合理化設計(II)ベース 初装荷炉心BOC
制御棒パターン	調整棒全挿入 他制御棒全引抜き
出力	1930MWth
蒸気ドラム圧力	70.0ata
冷却材流量	24500t/h(2ループ)
冷却材温度	280°C

(4)動特性パラメータ

$$\beta_{\text{eff}} = 4.36 \times 10^{-3}$$

$$l_p = 2.56 \times 10^{-4} (\text{sec})$$

(5)反応度フィードバック

フィードバック反応度を表1に示す。

(6)格子定数

計算で使用した格子定数の作成条件を表2に示す。

2.解析モデル

全炉心体系を対象とし、熱水力計算においては炉心径方向10領域・軸方向9領域に分割する。

3.解析方法

解析に使用するコードは次のとおりである。

EUREKA-ATR/mod 3.0:三次元空間依存動特性解析コード

ウォータドラムの圧力・エンタルピーと蒸気ドラムの圧力を一定とする境界条件で「炉心部格子」の核定数を変化させるとともに負の反応度を投入し、出力変化解析を行う。なお破断により冷却材がカランドリアタンクに放出されるが熱水力計算においては冷却材の流出を無視する。

4.解析結果および検討

炉心出力・反応度の経時変化を図1~2に示す。圧力管破断による負の反応度投入直後に炉心出力は定格の約50%まで低下し、その後徐々に低下を続ける。出力が低下することで燃料温度が下がりドプラー反応度は正になるが本解析の範囲内では全反応度は負である。ボイド反応度の影響は小さい。これは定格で炉心平均ボイド率は40%程度であり、解析で使用したボイド反応度特性では定格から50%出力までのボイド変化による反応度変化量が小さいことによる。

また図3に径方向出力ピーキングの変化を示す。炉心中心部に負の反応度を投入しているので出力分布は急激に歪み、炉心周辺部の出力ピーキングが増加する。しかし周辺部の出力ピーキングが増加しても全出力が低下しているためチャンネル出力自体は低下している。

5.まとめ

EUREKA-ATRコードを用いて圧力破断時の出力変化解析を行った。その結果、本解析の解析条件では出力は瞬時に約50%まで低下し、その後徐々に低下を続けることが明らかになった。

表1 フィードバック反応度

パラメータ		反応度 ($\Delta k/k$)	
ドップラー 反応度	燃料温度	200	0.81 E-2
		300	0.59 E-2
		500	0.21 E-2
	(°C)	620	0.0
		700	-0.13 E-2
		1000	-0.57 E-2
		1200	-0.83 E-2
		1500	-1.18 E-2
ボイド 反応度	ボイド率	0	0.0
	(%)	20	-0.02 E-2
		40	-0.013 E-2
		60	0.096 E-2
		80	0.425 E-2
		100	1.244 E-2
冷却材温度 反応度	冷却材温度	20	-3.912 E-2
	(°C)	50	-3.534 E-2
		100	-2.852 E-2
		150	-2.078 E-2
		200	-1.276 E-2
		250	-0.494 E-2
		281.54	0.0
		287.80	0.098 E-2
	300	0.289 E-2	

表2 格子定数作成条件

	燃料格子
計算コード	WIMS-ATR
燃料タイプ	初装荷内側燃料(1.9/1.9/0.9 wt%Pu) 初装荷外側燃料(1.7/1.7/1.3 wt%Pu)
ボロン濃度	10,20 ppm
燃焼度	0 MWd/t
ボイド率	0,20,40,60,80 %
燃料温度	0,500,1000,1500 °C

	制御棒補正定数
計算コード	WIMS-ATRマルチセルモデル
燃料タイプ	SUS制御棒に内側燃料を配置 SUS制御棒に外側燃料を配置
ボロン濃度	10,20 ppm
燃焼度	0 MWd/t
ボイド率	0,40,80 %
燃料温度	500 °C

	防震板補正定数
計算コード	WIMS-ATR
燃料タイプ	初装荷外側燃料
ボロン濃度	10,20 ppm
燃焼度	0 MWd/t
ボイド率	40 %
燃料温度	500 °C

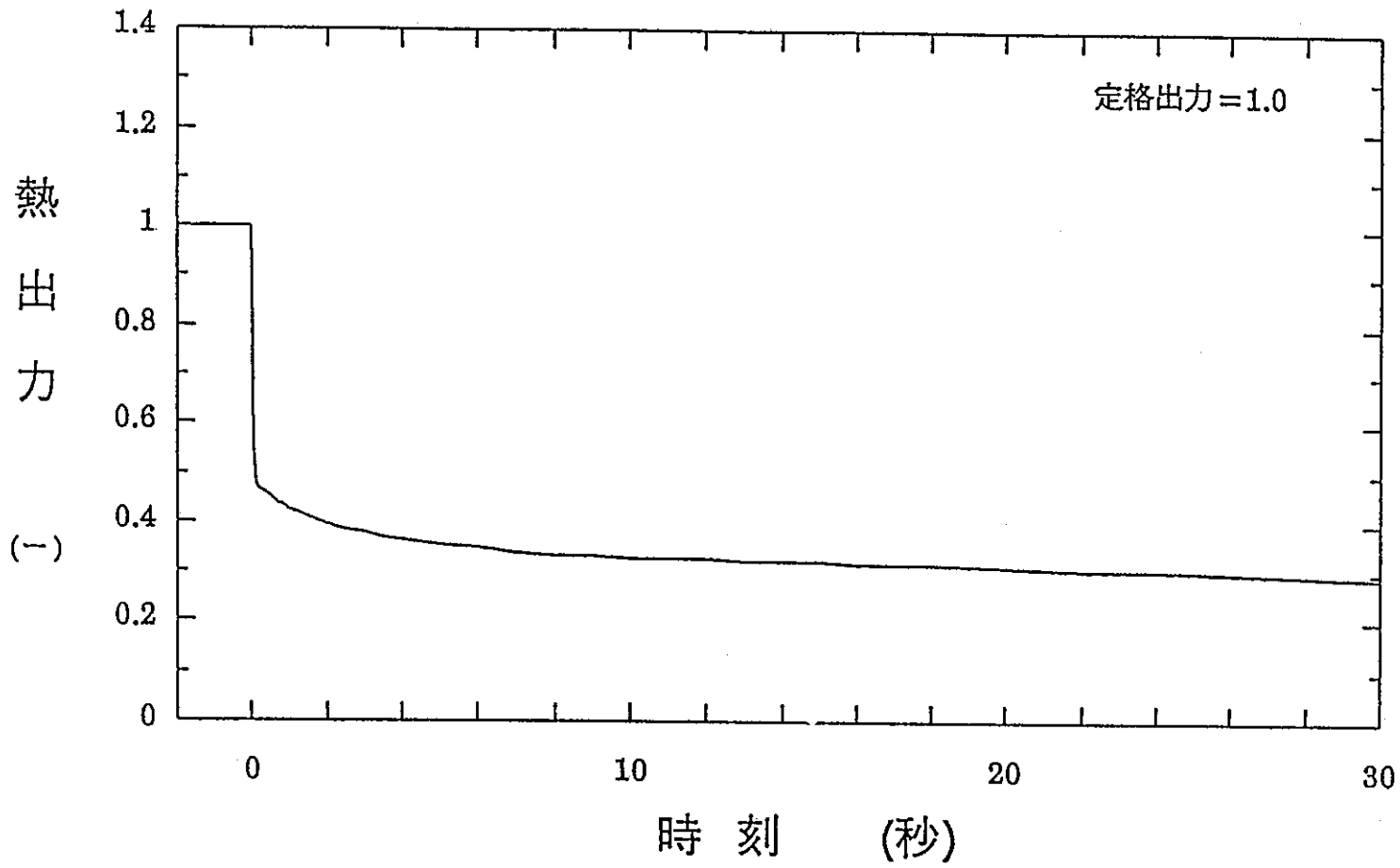


図1 炉心出力の経時変化

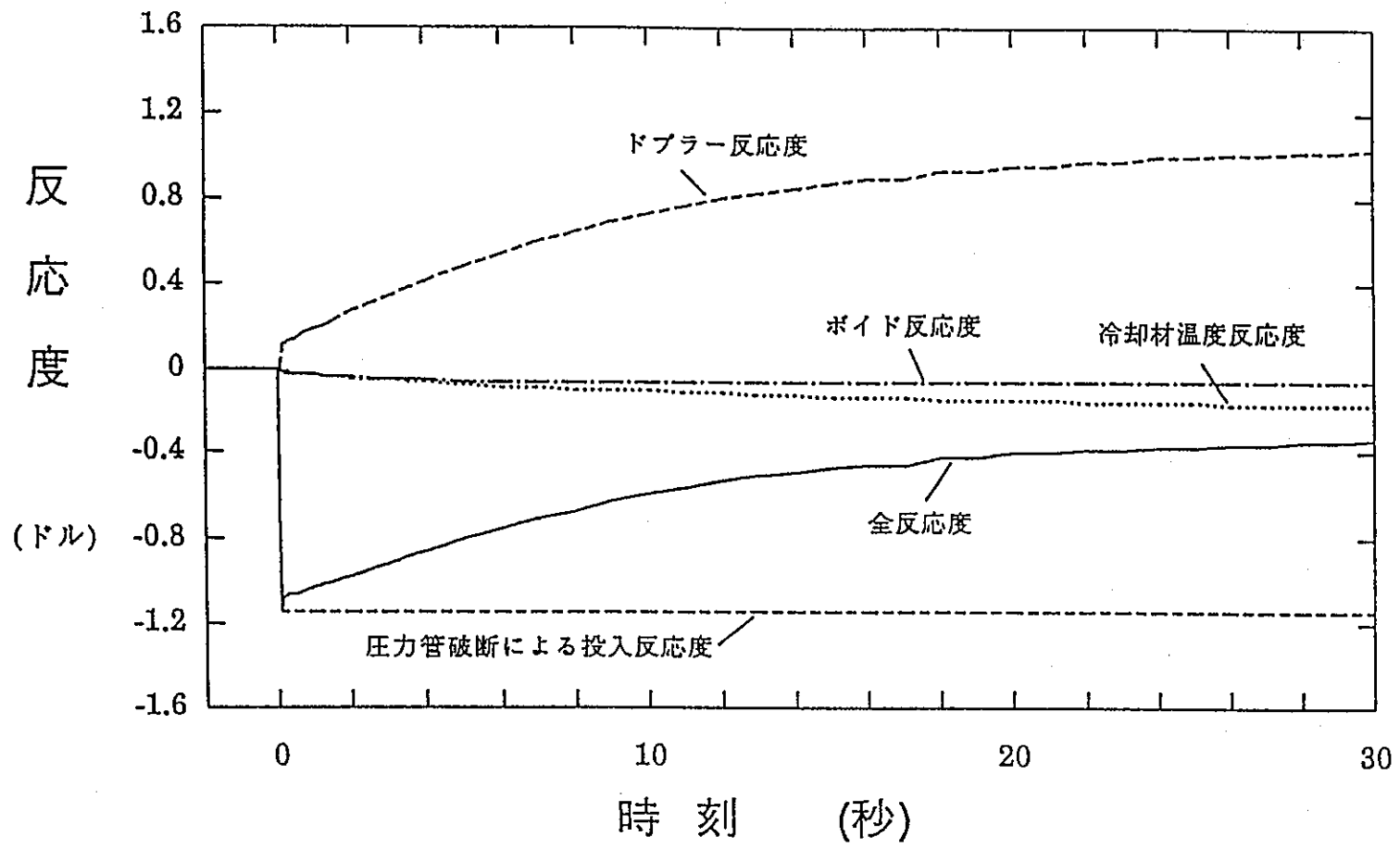


図2 反応度の経時変化

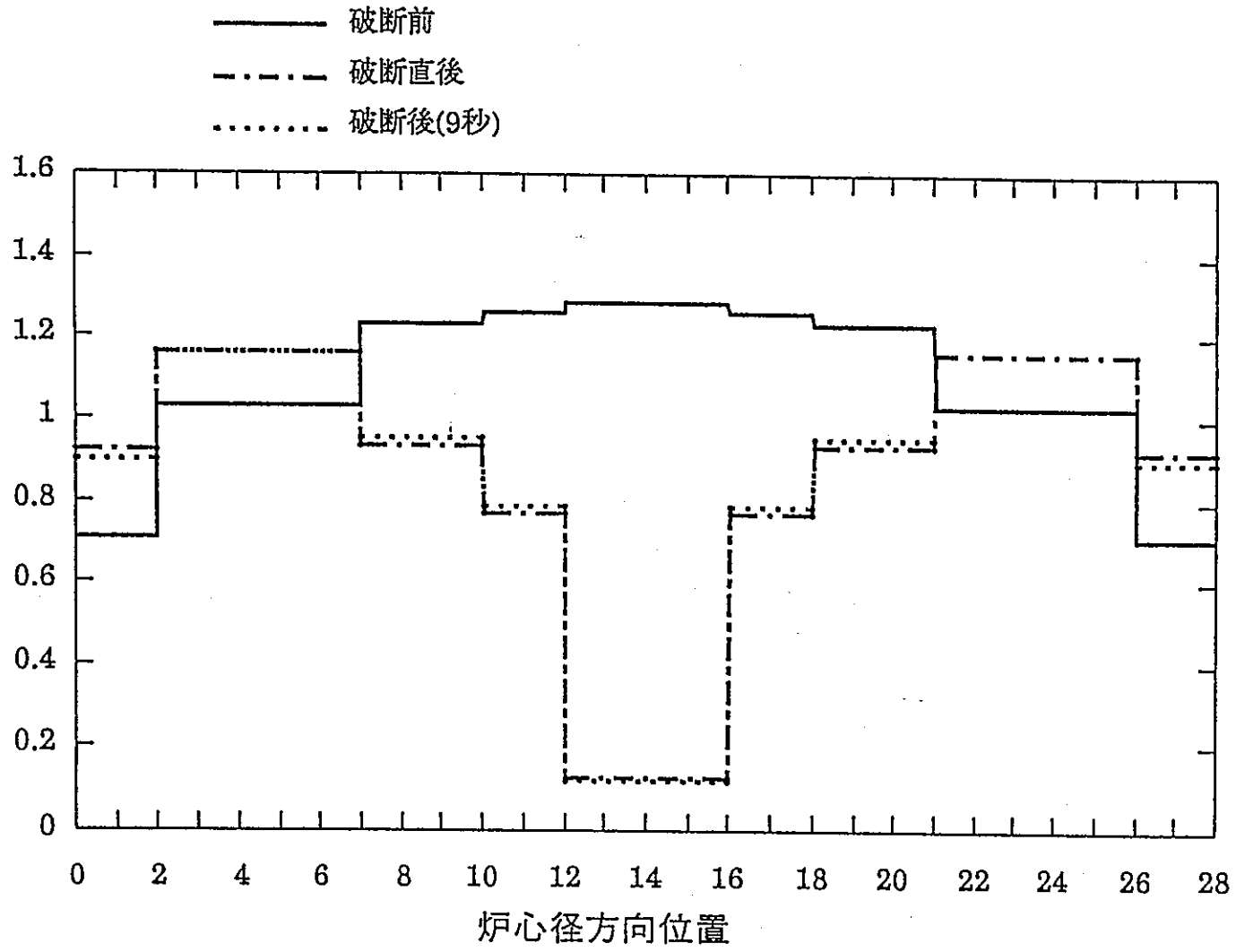


図3 径方向出力ピーキングの推移

表 6.2-1 出力条件

項 目	入力値	備 考	
発熱有効長 (mm)	3700		
熱 出 力 (MW)	炉心全体	1876.08	
	チャンネル出力	3.04558	1876.08/20-プ/308ch
最大線出力密度 (kW/m)	46.231	3045.58/36×1.49×1.18×1.15/3.7	
ピーキングファクタ (-)	R P F	1.49	
	A P F	1.18	
	L P F	1.28	CPR計算に使用
	内 層	0.61	} {内層：中間層：外層} = {26.63 : 42.34 : 50.2} より算出
	中間層	0.97	
外 層	1.15		

表 6.2-2ホットチャンネル解析用形状データ (ボリューム)

コンポーネント	番号	タイプ	流路断面積 (m^2)	流路長さ (m)	体積 (m^3)	水力直径 (m)
ウォーター・ドラム	10	TD	—	—	—	—
入口管 (鉛直部)	20	SV	0.00192	2.375	0.00456	0.0495
入口管 (水平部)	30-01	Pipe	0.00192	合計	合計	0.0495
	30-05			10.125	0.01944	
炉心下部延長部 1	40	SV	0.0108	1.47	0.015876	0.1178
炉心下部延長部 2 (下部遮へい体)	50	SV	0.003045	1.155	0.003517	0.1178
炉心下部延長部 3	60	SV	0.0108	0.487	0.005260	0.1178
炉心部	201	BV	0.00479	合計	合計	0.00932
	216			3.7	0.017723	
炉心上部延長部 1 (燃料棒非発熱部)	80	SV	0.00479	0.402	0.001926	0.1178
炉心上部延長部 2	90	SV	0.0108	0.541	0.005843	0.1178
炉心上部延長部 3 (上部遮へい体)	100	SV	0.00283	0.86	0.002434	0.1178
炉心上部延長部 4	110	SV	0.0108	0.695	0.007506	0.1178
出口管 (鉛直部)	120-01	Pipe	0.00429	合計	合計	0.0739
	120-04			7.61	0.032647	
出口管 (水平部)	130-01	Pipe	0.00429	合計	合計	0.0739
	130-03			7.89	0.033848	
蒸気ドラム・バップル部	140	TD	—	—	—	—
カランドリア・タンク	401	SV	59.73	合計	合計	(省略)
	416			4.47	267.0	
格納容器	600	TD	—	—	—	—

(注1) コンポーネント・タイプの略は、次のとおり。

TD ; 時間依存ボリューム、SV ; Singleボリューム、BV ; Branchボリューム

(注2) 体積は {流路断面積×流路長さ} より算出し、入力上は省略した。

表 6.2-3 ホットチャンネル解析用形状データ (ジャンクション)

ジャンクション	番号	流路断面積 (m ²)	フォームロス係数 (-)	備考
ウォータードラム⇒入口管 (鉛直部)	15	0.00192	0.5	
入口管 (鉛直部) ⇒入口管 (水平部)	25	0.00192	0.5	
{入口管 (水平部) }	30-01 5 30-04	0.00192	0.5	
入口管 (水平部) ⇒炉心下部延長部 1	35	0.00192	0.78	
炉心下部延長部 1 ⇒炉心下部延長部 2	45	0.003045	1.63	
炉心下部延長部 2 ⇒炉心下部延長部 3	55	0.003045	1.63	
炉心下部延長部 3 ⇒炉心部	65	0.00479	23.71	
{炉心部}	201-01 5 215-01	0.00479	0.579	
炉心部 ⇒炉心上部延長部 1	75	0.00479	1.83	
炉心上部延長部 1 ⇒炉心上部延長部 2	85	0.00479	1.83	
炉心上部延長部 2 ⇒炉心上部延長部 3	95	0.00283	1.63	
炉心上部延長部 3 ⇒炉心上部延長部 4	105	0.00283	1.63	
炉心上部延長部 4 ⇒出口管 (鉛直部)	115	0.00429	0.6	
{出口管 (鉛直部) }	120-01 5 120-03	0.00429	0.6	
出口管 (鉛直部) ⇒出口管 (水平部)	125	0.00429	0.6	
{出口管 (水平部) }	130-01 5 130-02	0.00429	0.6	
出口管 (水平部) ⇒SDバッフル部	135	0.00429	0.8	
炉心部 ⇒カランドリアタンク	301 5 316	0.004625	0.0	破断ジャンクション 0.02×3.7/16
{カランドリア・タンク}	501 5 515	59.73	0.0001	
カランドリアタンク ⇒格納容器	595	0.29186	0.1	ラプチャーディスク (φ=609.6)

表6.2-4 熱伝達率モデル

領域		モデル	式
サブクール領域		Dittus-	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$
		Boelter	$H_F = Nu \cdot \frac{\lambda}{De}$
核沸騰領域		Jens- Lottes	$\Delta Ts = 0.82 q^{1/4} e^{(-P/63)}$ $H_F = \frac{q}{\Delta Ts} = \frac{1}{0.82} q^{3/4} e^{(-P/63)}$
膜 沸 騰 領 域	0.0 < x < 1.0 P ≤ 500psia の場合	Rohsenow- Dougall	$H_F = 0.023 \frac{\lambda_g}{De} Pr_g^{0.4} [Re_g \{ X + \frac{\rho_g}{\rho_L} (1-X) \}]^{0.8}$
	0.0 < x < 0.95 P > 500psia の場合	Groeneveld	$Y = 1.0 - 0.1(1-x)^{0.4} \left(\frac{\rho_L}{\rho_g} - 1 \right)^{0.4}$ $H_F = 0.052 \frac{\lambda_g}{De} Pr_w^{1.26} [Re_g \{ X + \frac{\rho_g}{\rho_L} (1-X) \}]^{0.688Y - 1.06}$
	0.95 ≤ x < 1.0 P > 500psia の場合	GroeneveldとMcEligotの補間式*	
スーパーヒート領域		McEligot	$H_F = 0.02 \left(\frac{\lambda_g}{De} \right) Pr_b^{0.4} Pe_b^{0.8} \left(\frac{T_w}{T_b} \right)^{-0.5}$

変数 H_F : 熱伝達率 (kcal/m²h℃)

λ : 熱伝導率 (kcal/mh℃)

De : 流路等価直径 (m)

q : 表面熱流束 (kcal/m²h)

ΔTs : 冷却材と壁の温度差 (℃)

P : 圧力 (kg/cm²)

x : リォリテイ

T : 温度 (℃)

ρ : 冷却材の比率量 (kg/m³)

Nu : ヌッセルト数

Re : レイノルズ数

Pr : プラントル数

添字 g : 飽和蒸気

l : 飽和水

b : 冷却材

w : 壁面

* リォリテイ x = 0.95と x = 1.0 との間を直接にて内挿

表6.3-1 各燃料位置における水平方向流速比*2

ケース	破断開口幅 (cm)	燃 料 棒 番 号 *1																	
		1.6	2.5	3.4	7.16	8.15	9.14	10.13	11.12	17.18	19.34	20.33	21.32	22.31	23.30	24.29	25.28	26.27	35.36
1	1.0	0.05524	0.10097	0.10019	0.05444	0.07509	0.12016	0.19308	0.16426	0.01964	0.02665	0.03922	0.05395	0.07272	0.10243	0.15552	0.32806	0.43045	0.01051
2	1.5	0.08293	0.15219	0.15055	0.08149	0.11316	0.18010	0.29946	0.30080	0.02931	0.03975	0.05898	0.08092	0.10842	0.15136	0.22119	0.43988	0.68237	0.01557
3	2.0	0.11016	0.20218	0.19647	0.10682	0.15116	0.23977	0.40388	0.42177	0.03845	0.05269	0.07890	0.10868	0.14524	0.20193	0.28696	0.56920	0.91701	0.02042
4	2.5	0.13826	0.25317	0.23831	0.13161	0.18934	0.29714	0.51093	0.53520	0.04774	0.06554	0.09888	0.13670	0.18182	0.25115	0.34476	0.71053	1.14088	0.02517
5	3.0	0.17140	0.30995	0.29502	0.15474	0.22704	0.34160	0.61355	0.65230	0.05799	0.07759	0.11786	0.16381	0.2466	0.29368	0.40879	0.90222	1.34169	0.02964
6	3.5	0.19255	0.36320	0.30376	0.18503	0.25549	0.40947	0.67430	0.72780	0.06463	0.06983	0.12228	0.17541	0.24110	0.34445	0.52653	1.02958	1.47166	0.02187
7	4.0	0.18436	0.35213	0.34731	0.18492	0.31485	0.56473	0.93947	1.21362	0.13258	0.08055	0.15112	0.22806	0.33130	0.49460	0.74944	1.14828	1.67182	0.03721

(注) * 1 ; 燃料棒番号は下図のとおりとする。

* 2 ; 各燃料棒流速比 (K_i)

$$K_i = \frac{\frac{1}{n(i)} \sum_{j=1}^n \{ \sqrt{V_{R, (i, j)}^2 + V_{\theta, (i, j)}^2} \}}{\frac{1}{AT} \cdot \sum_{k=1}^m \{ V_R(k) \cdot A(k) \}}$$

ここに

- i ; 燃料棒番号
- j ; i 燃料棒周りに位置するシェル番号
- n ; " シェル数
- k ; 破断部に位置するシェル番号
- m ; " シェル数
- V_R ; 半径方向流速 (m/s)
- V_θ ; 周方向流速 (m/s)
- A ; 破断部シェルの破断面積 (m²)
- AT ; 破断面積 (Σ A) (m²)

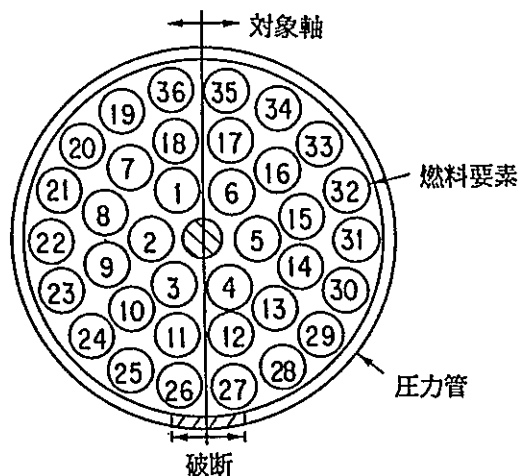


表6.3-2 最大流速と破断放出流速

ケース	破断開口幅 (cm)	開口シェル (周方向)	最大流速*1 発生シェル番号	最大流速 (m/s)	破断放出流速 (m/s)*2	流出入量差 (%)
1	1.0	2.3	(13.2)	43.3654	39.5826	-3.40
2	1.5	同上	(13.2)	50.7158	39.5260	-3.39
3	2.0	同上	(13.2)	58.3071	39.4370	-3.40
4	2.5	同上	(12.4)	65.3543	39.3297	-3.40
5	3.0	同上	(12.4)	81.9188	39.1944	-3.40
6	3.5	同上	(12.4)	113.5633	38.0090	-4.47
7	4.0	2.3.4	(10.2)	85.8720	33.1006	-4.01

(注) *1 : (i, j) = (径方向, 周方向)

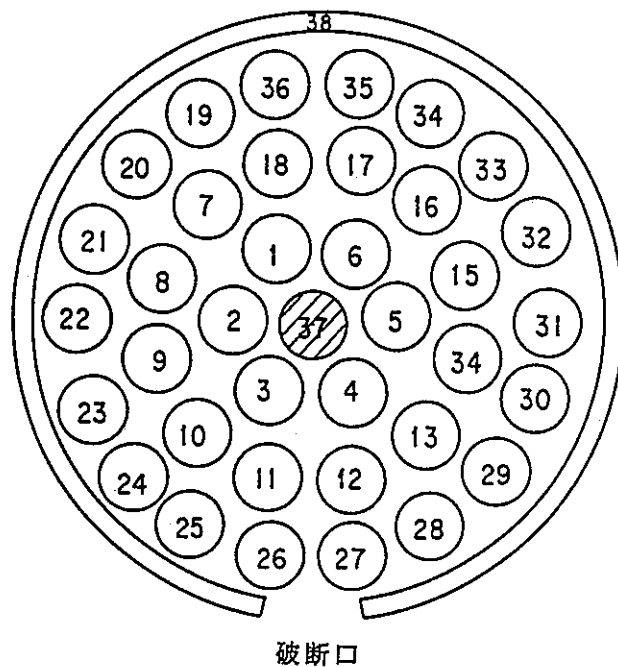
*2 : 各開口シェルにおける放出流速の面積平均値を示す。

表 6.3-3 水平流速分布がPCTへ与える影響 (燃料ヒートアップ解析)

項目		内 層			中 間 層					
		1, 6	2, 5	3, 4	7, 16	8, 15	9, 14	10, 13	11, 12	17, 18
水平流速比 (-)		0.11016	0.20218	0.19647	0.10682	0.15116	0.23977	0.40388	0.42177	0.03845
PCT (℃)	水平流速比 考	882.87 (10.02)	881.76 (10.02)	869.34 (10.02)	1035.60 (8.11)	1035.92 (8.23)	1035.31 (8.80)	1035.10 (9.63)	1035.05 (9.63)	1035.56 (8.08)
	水平流速比 非考	884.18 (10.04)	884.62 (10.04)	871.97 (10.04)	1036.43 (8.11)	1036.56 (8.26)	1035.16 (8.82)	1035.29 (8.82)	1035.29 (8.82)	1036.53 (8.11)

項目		外 層								
		19, 34	20, 33	21, 32	22, 31	23, 30	24, 29	25, 28	26, 27	35, 36
水平流速比 (-)		0.05269	0.07890	0.10868	0.14524	0.20193	0.28696	0.56920	0.91701	0.02042
PCT (℃)	水平流速比 考	1021.49 (4.59)	1021.42 (4.55)	1022.26 (4.65)	1021.99 (6.02)	1021.94 (6.02)	1021.85 (6.02)	1021.11 (6.04)	1020.64 (5.06)	976.98 (6.28)
	水平流速比 非考	1022.57 (5.50)	1022.63 (5.45)	1022.69 (4.65)	1021.72 (6.05)	1021.77 (6.05)	1021.78 (6.05)	1021.78 (6.05)	1021.78 (6.05)	977.35 (6.31)

注) () 内はPCT発生時刻を示す。



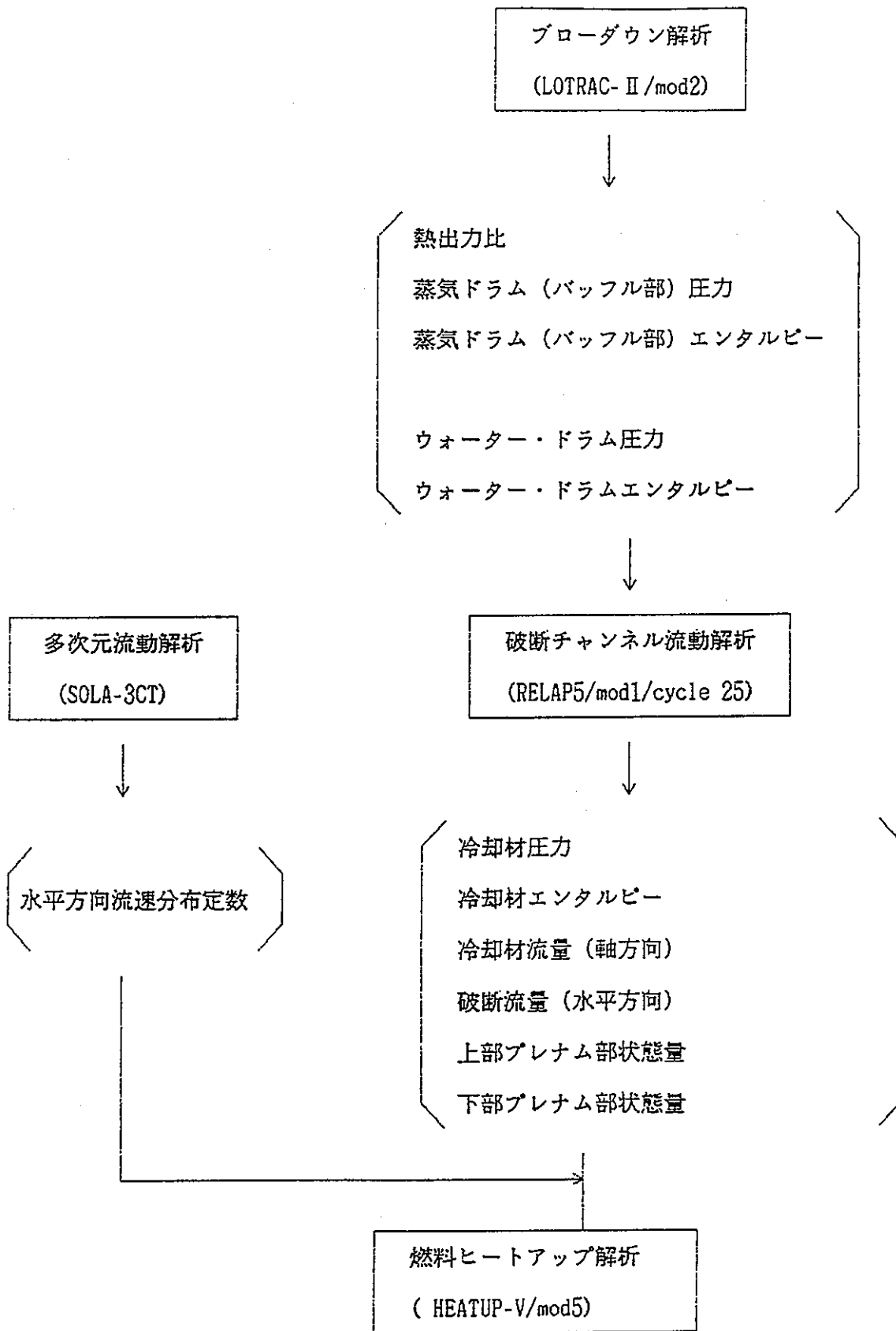


図6.2-1 圧力管・カランドリア管同時破断解析の処理フロー

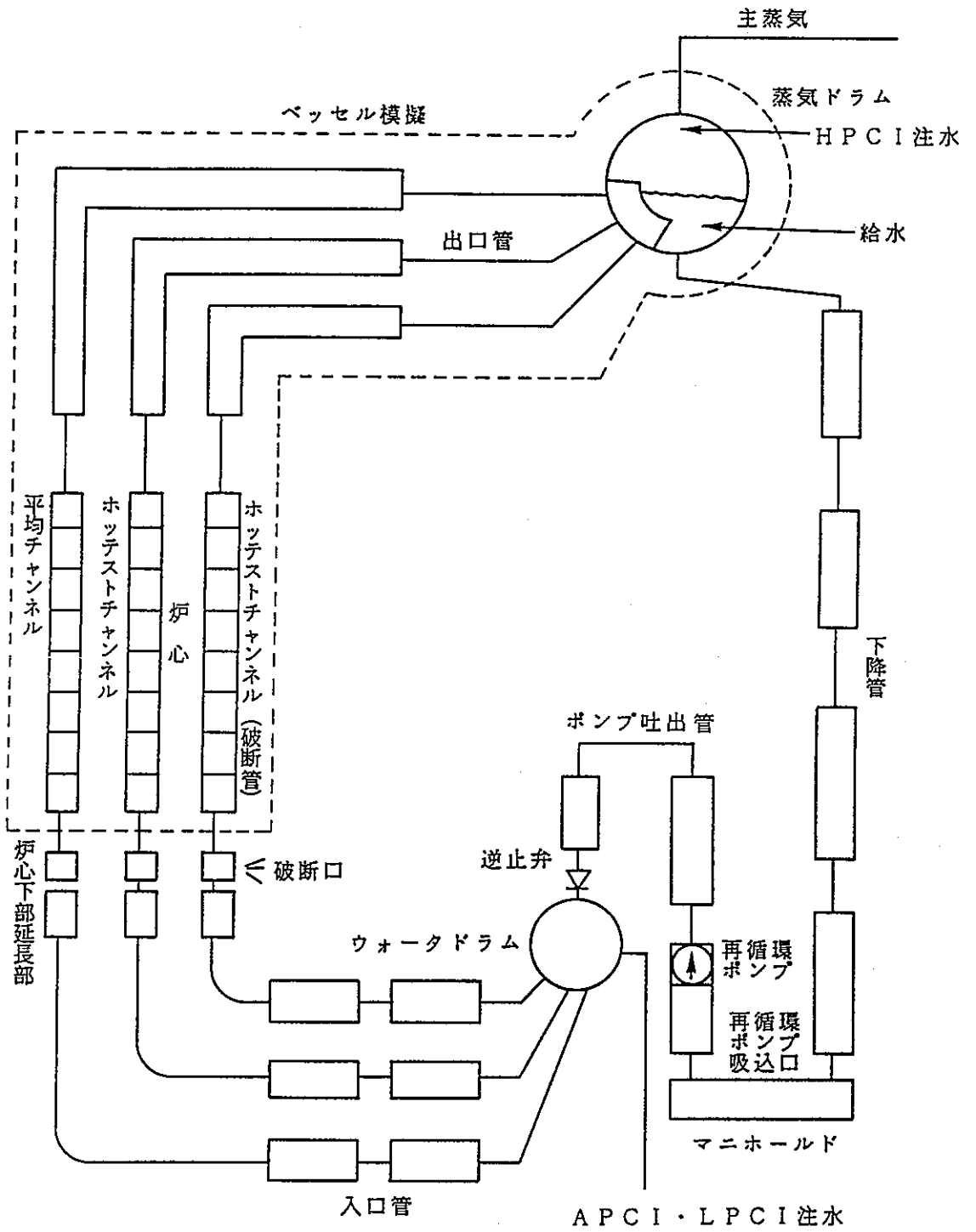
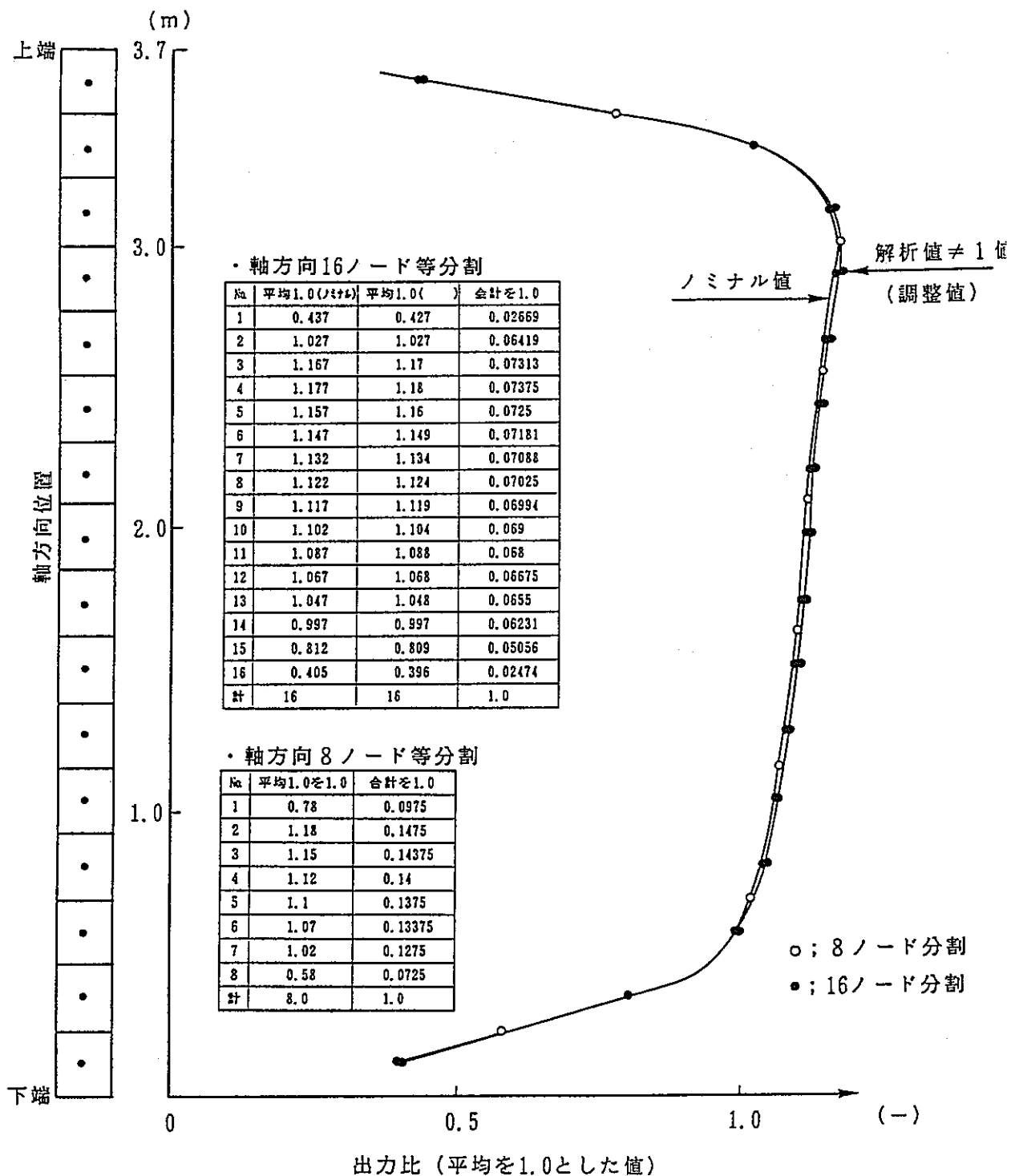


図6.2-2 圧力管・カランドリア管同時破断解析用ノード分割
(LOTRAC-II/mod 2コード)



(注) 平均1.0の調整値 = $[(ノミナル値) - 1.0] \cdot \frac{APF-1.0}{APFノミナル-1.0} + 1.0$

図 6.2 - 3 軸方向出力分布

; 障害物
 ; 流路

3-DIM. MESH IMAGE CYLINDRICAL

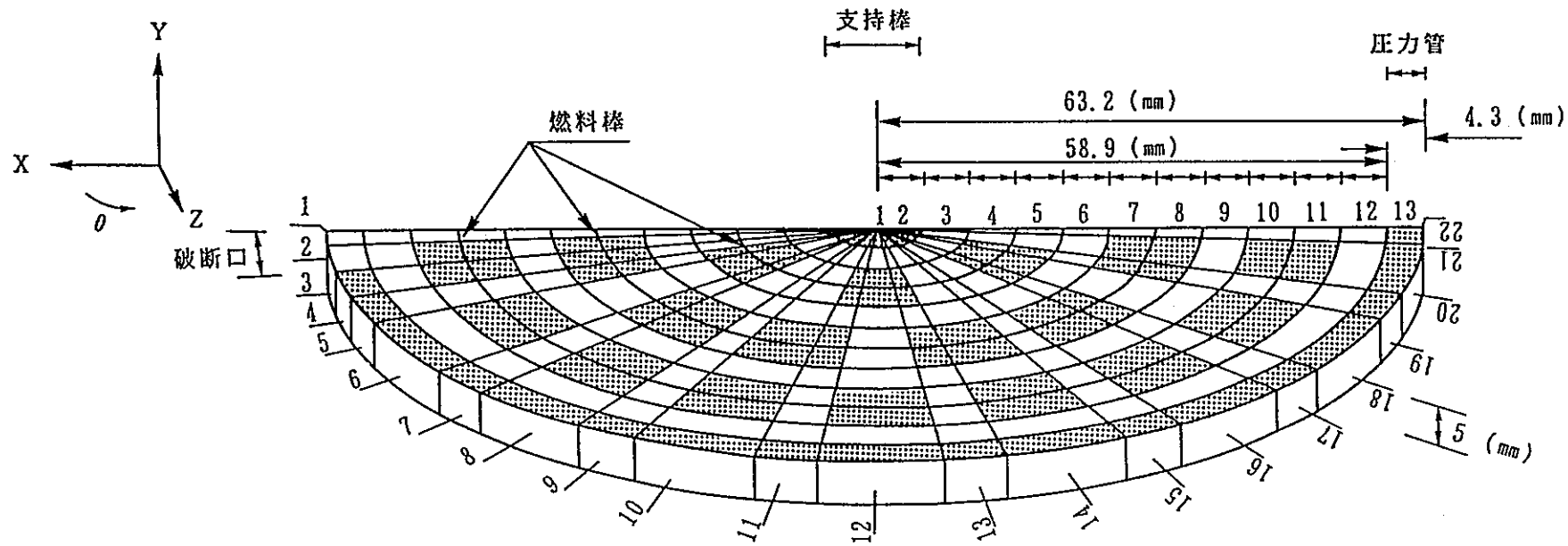
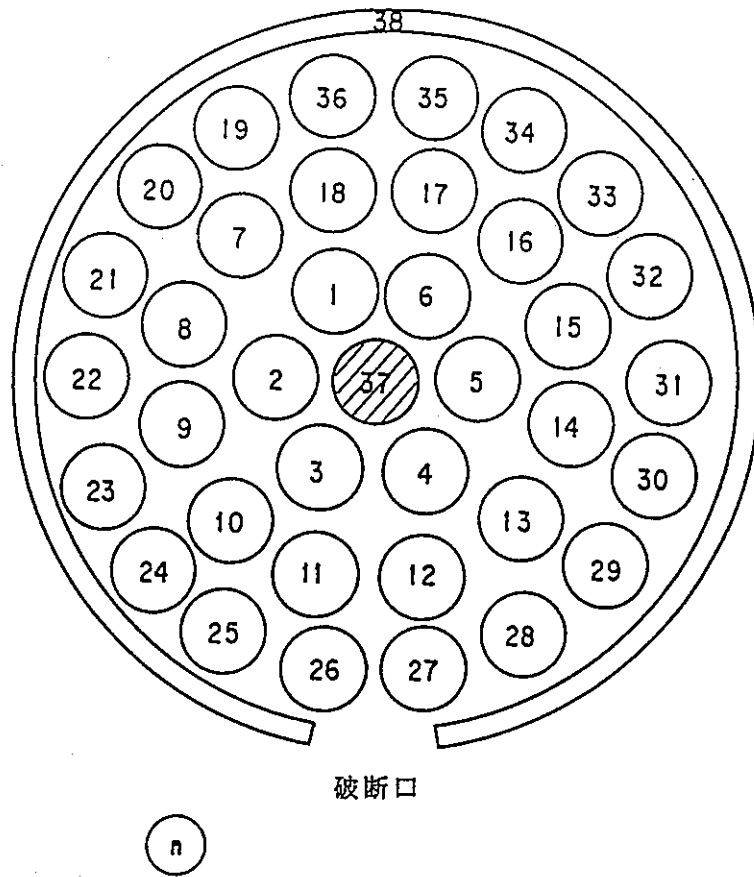


図6.2-5 圧力管・カランドリア管同時破断用ノード分割
 (SOLA-3CT)



燃料番号	名称	ノード分割
1～6	内層燃料	<p>(注) PCTはノード9で評価する。</p>
7～18	中間層燃料	
19～36	外層燃料	
37	タイロッド	
38	圧力管, カランドリア管 重水	

図6.2-6 圧力管・カランドリア管同時破断解析用ノード分割
(HEATUP-V/mod 5コード)

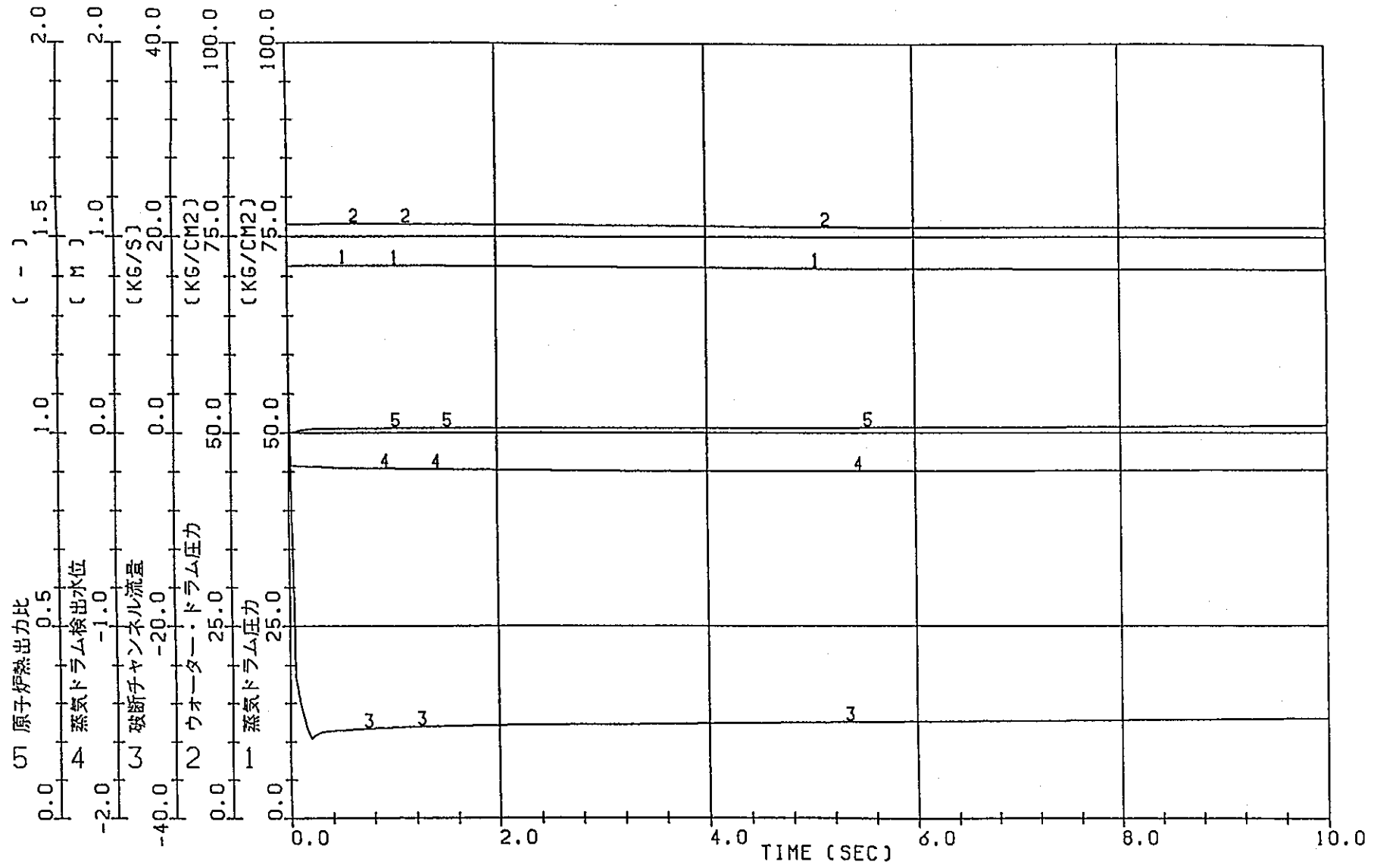


図 6.3-1 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

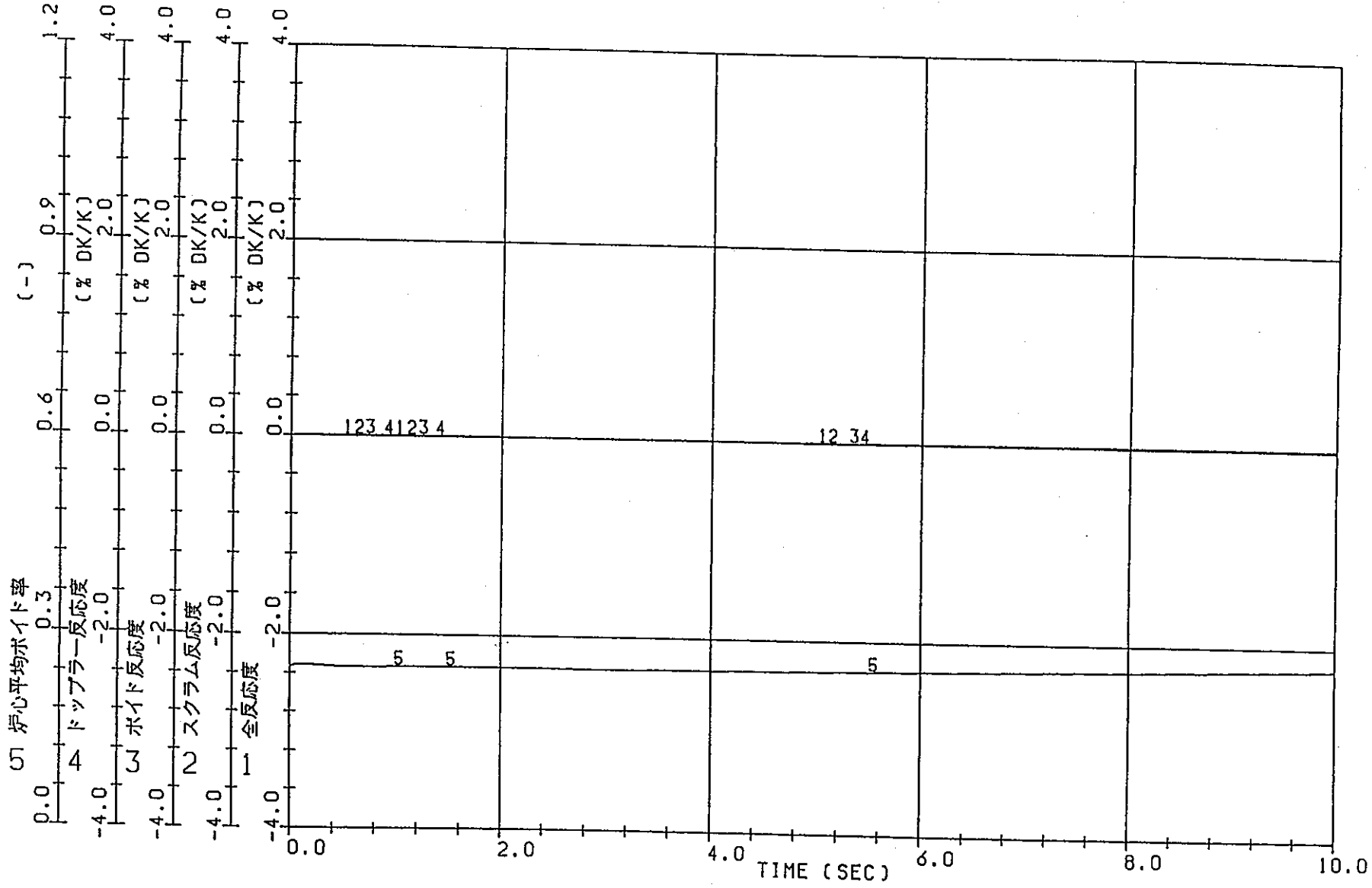


図 6.3-2 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

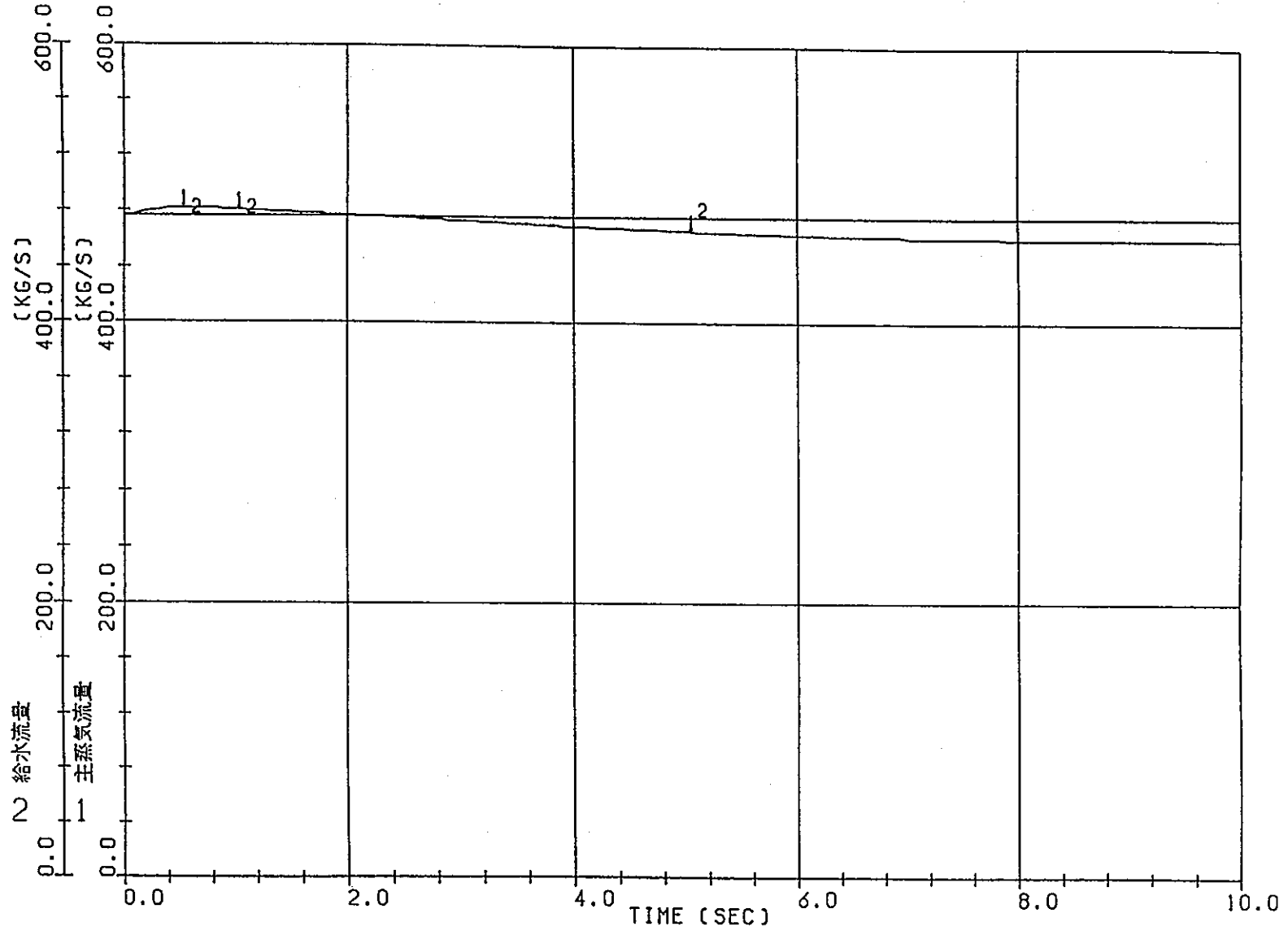


図 6.3-3 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

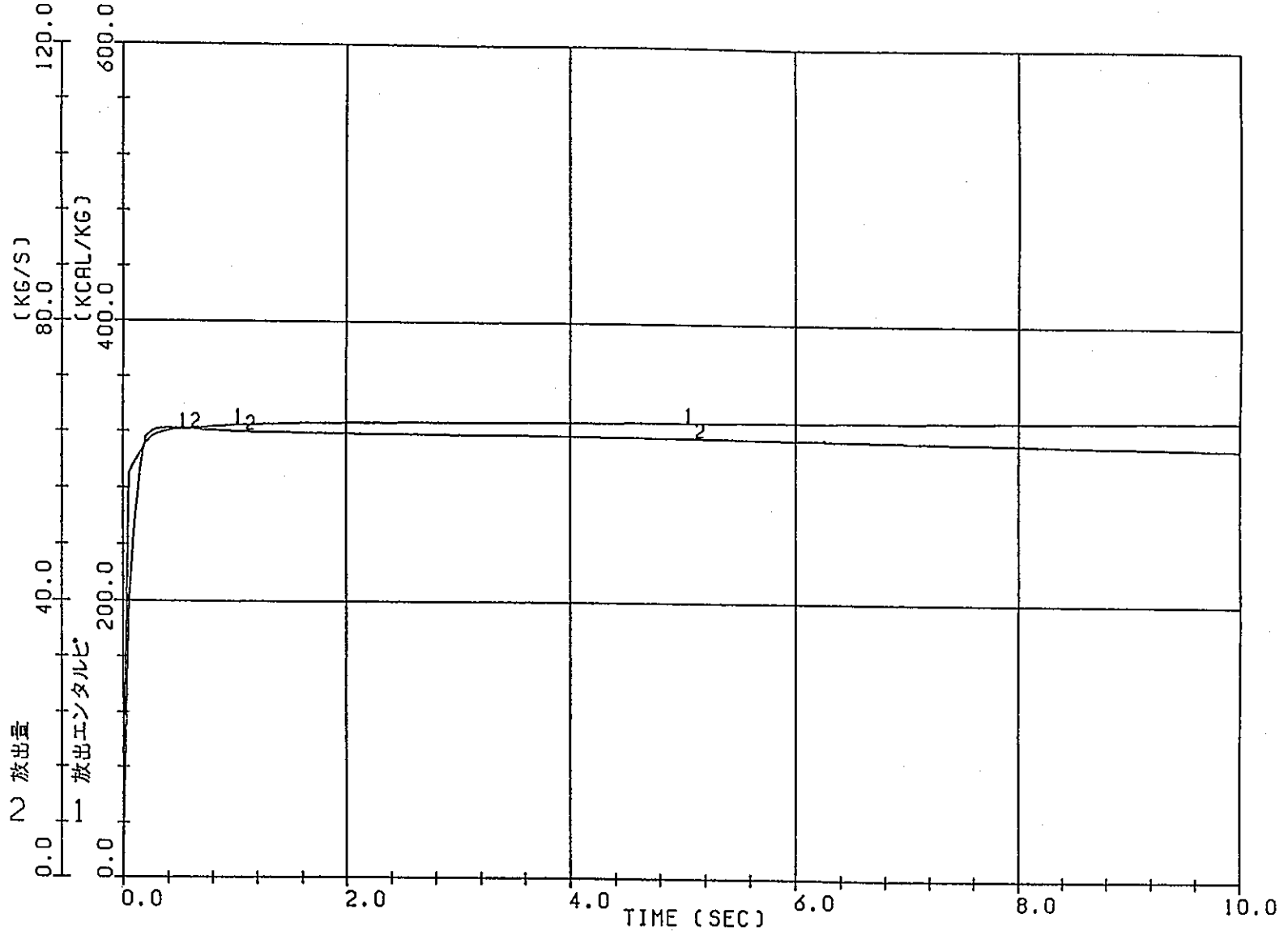


図 6.3-4 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

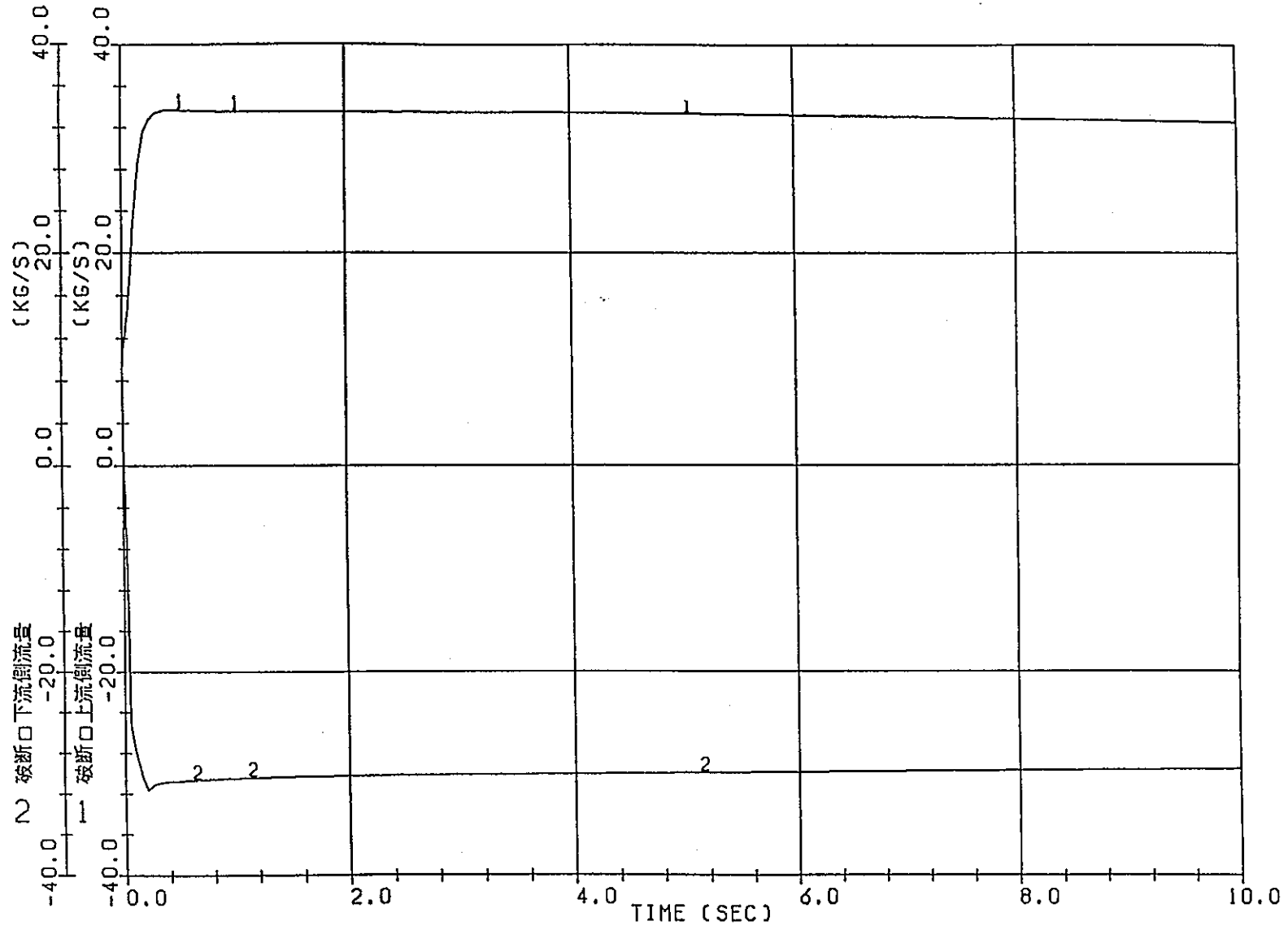


図 6.3-5 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

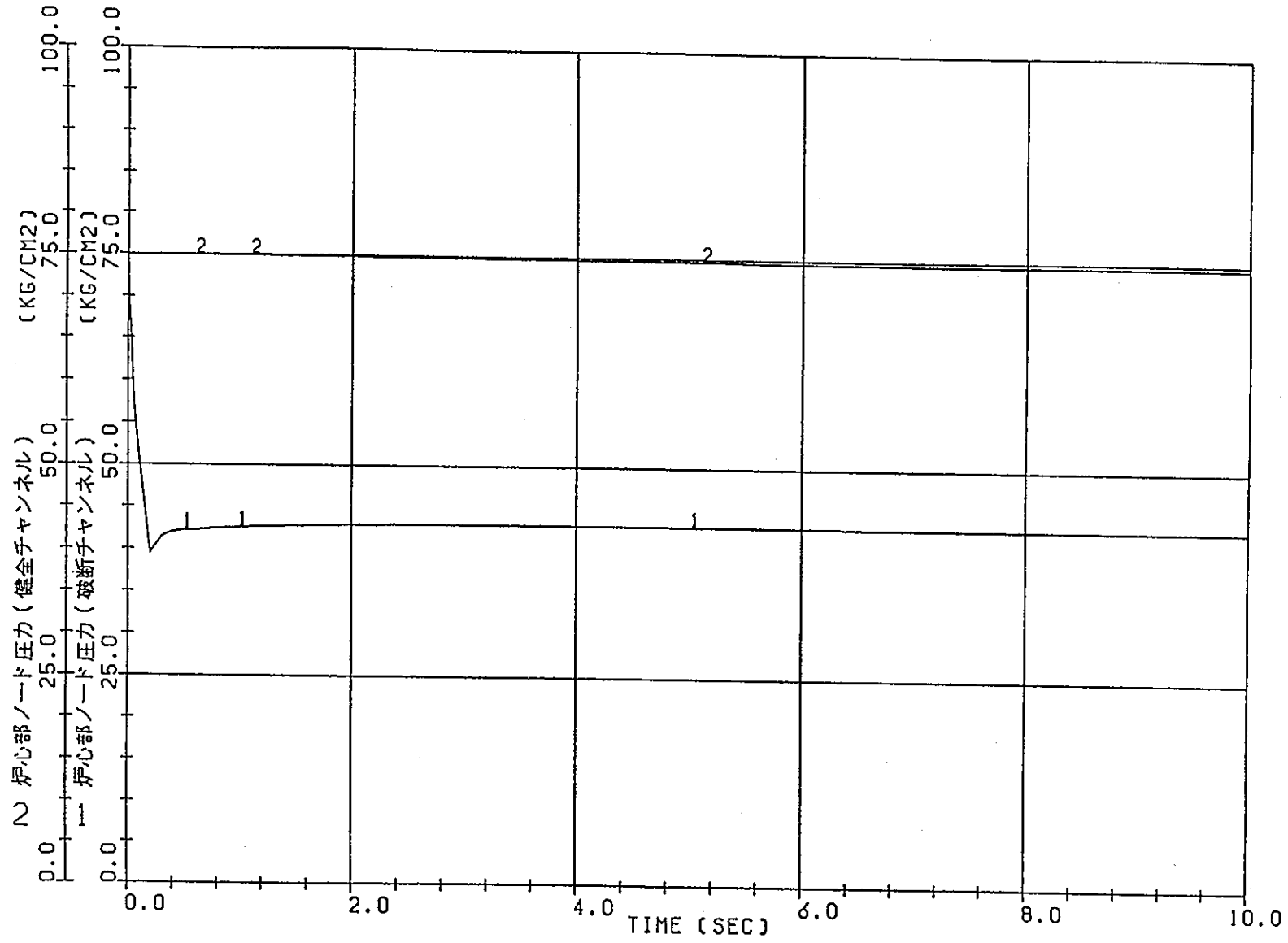


図 6.3-6 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

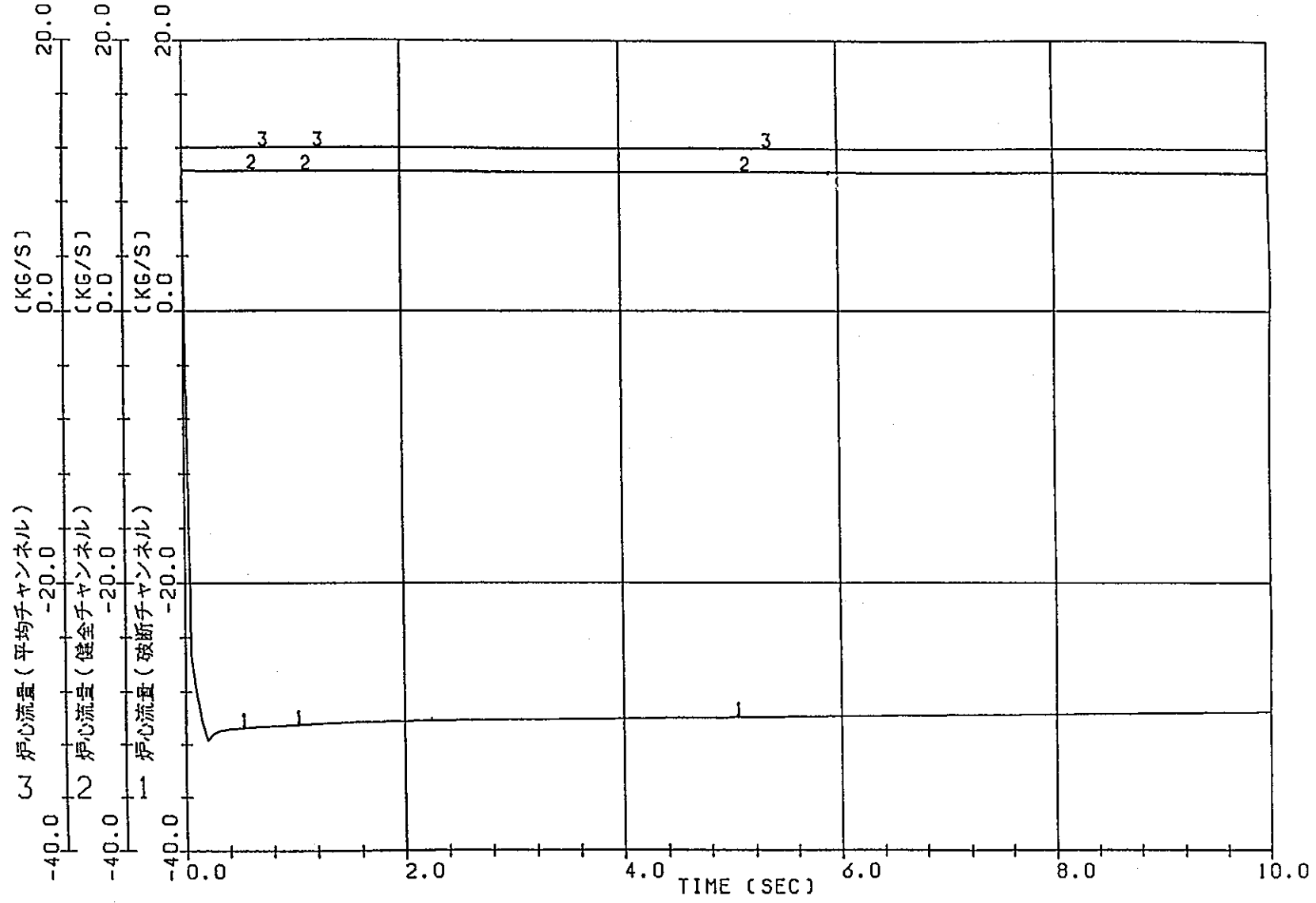


図 6.3-7 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

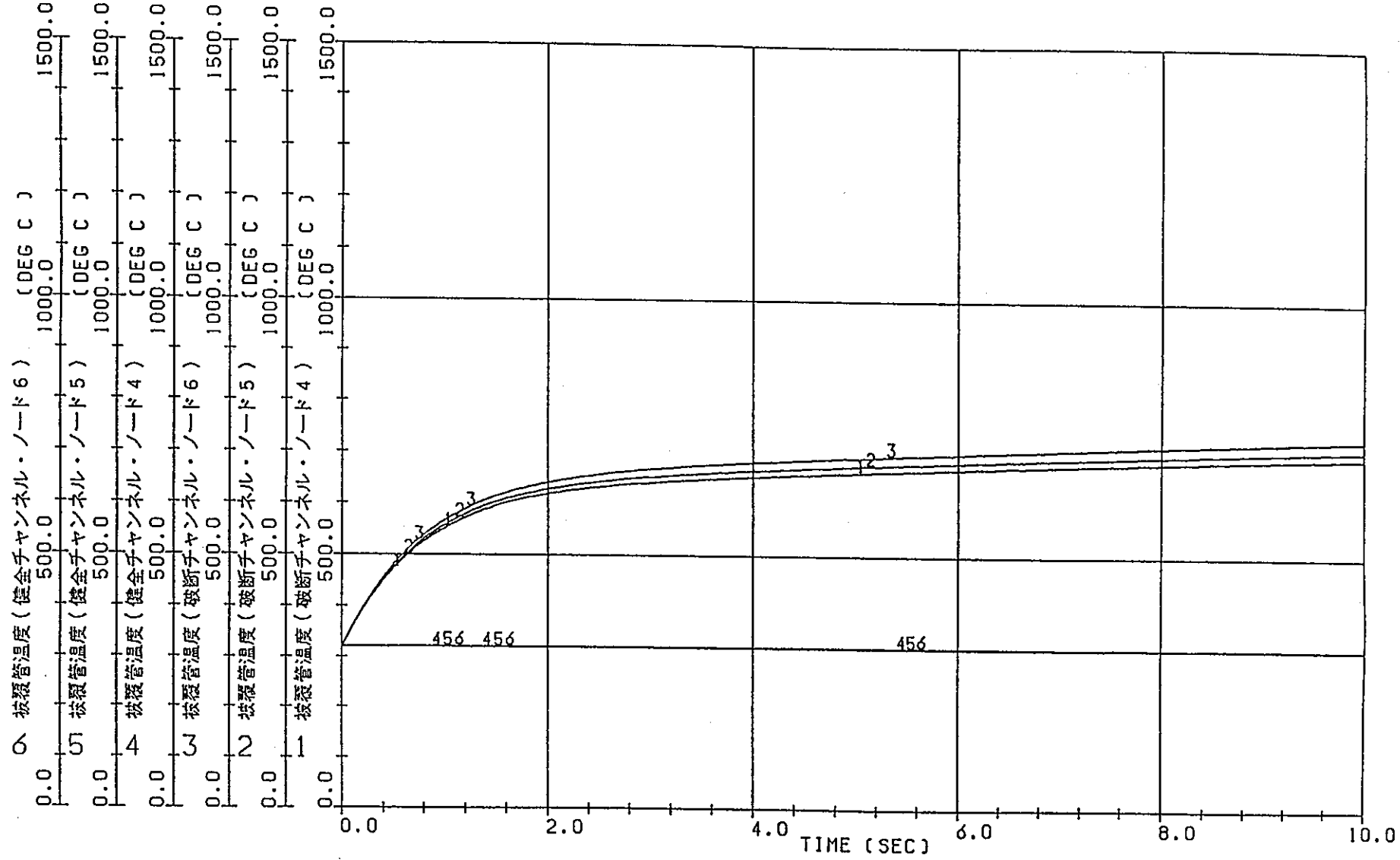


図 6.3-8 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

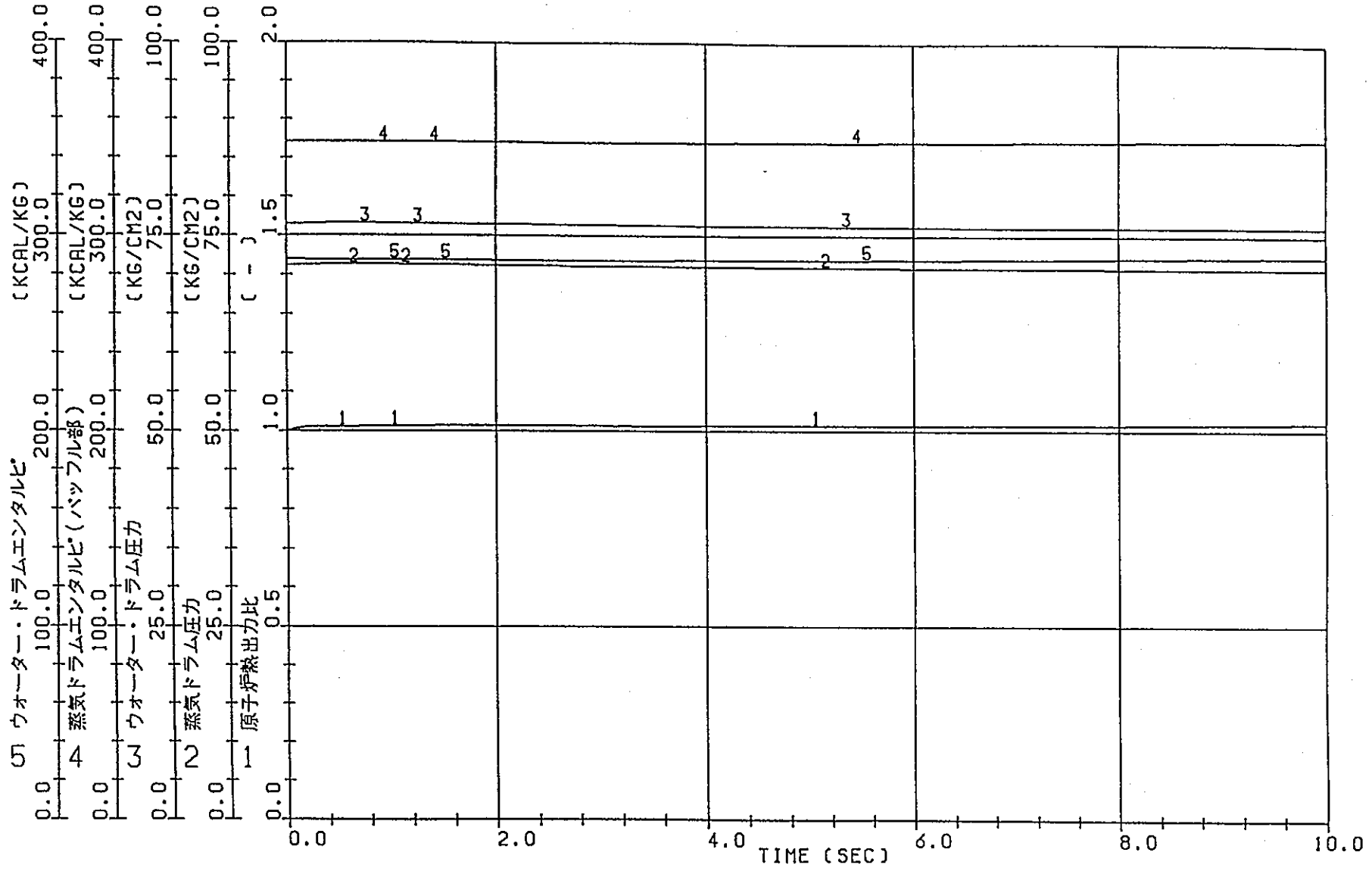


図 6.3-9 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (LOTRAC)

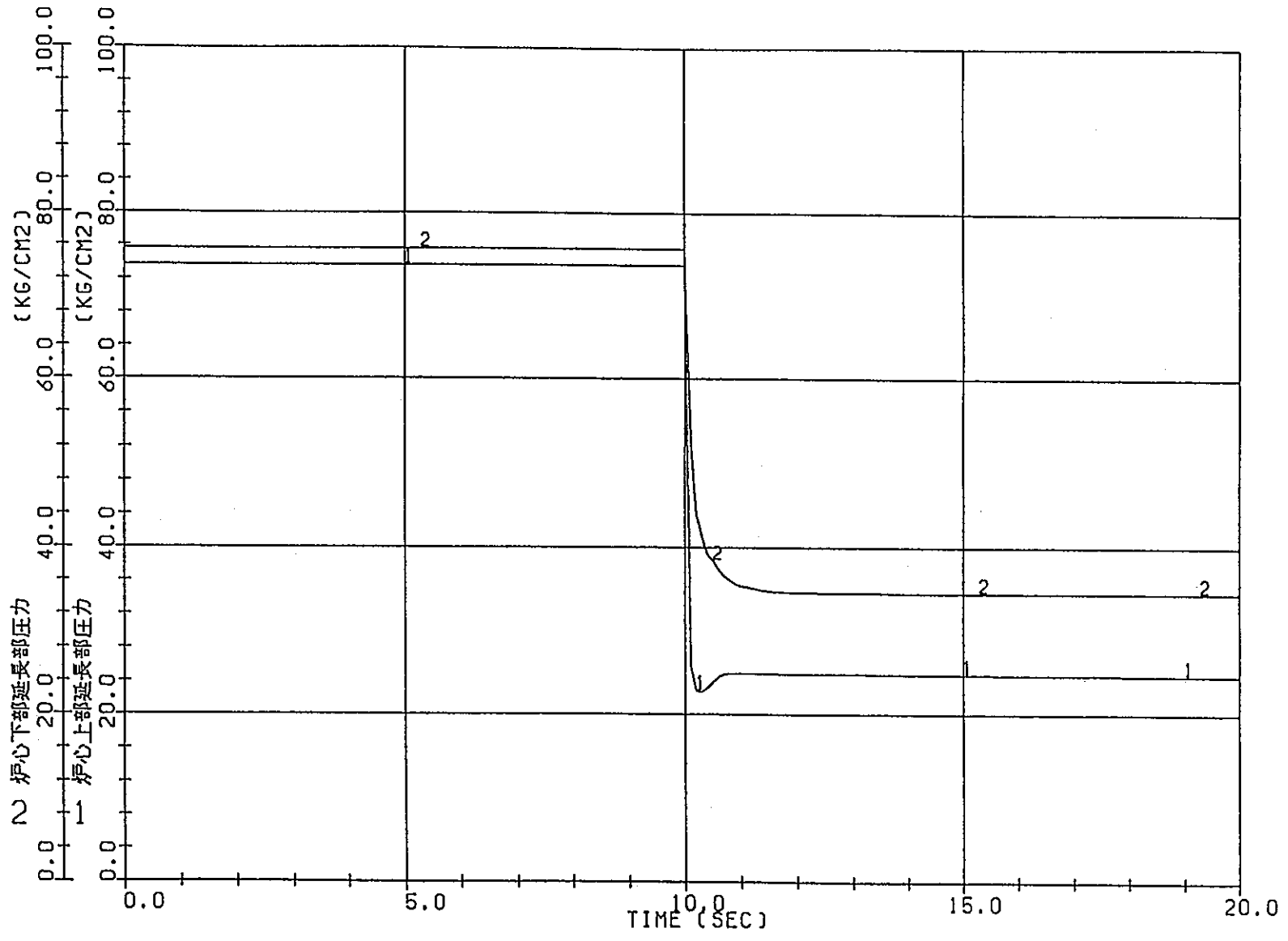


図 6.3-10 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)

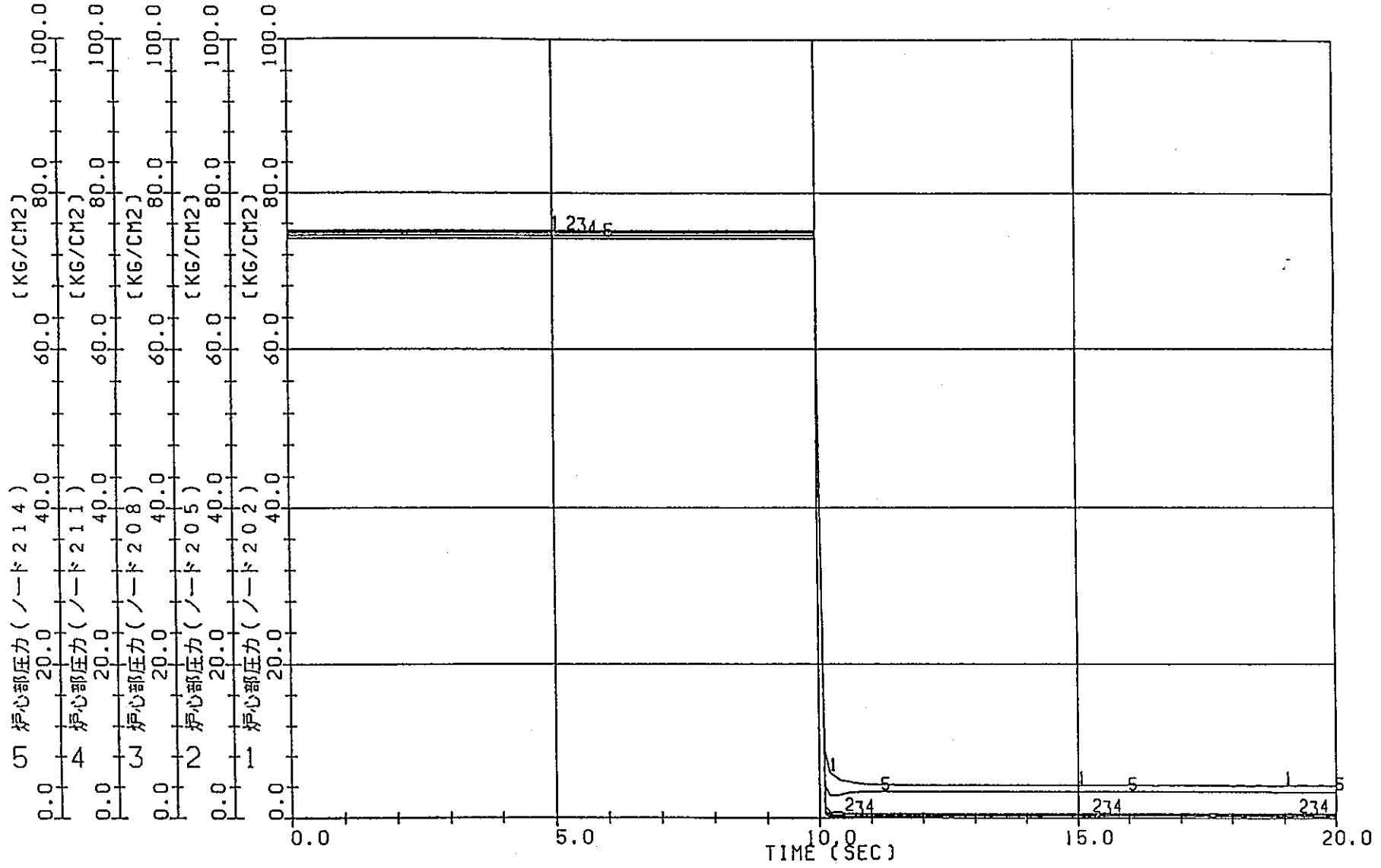


図 6.3-11 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)

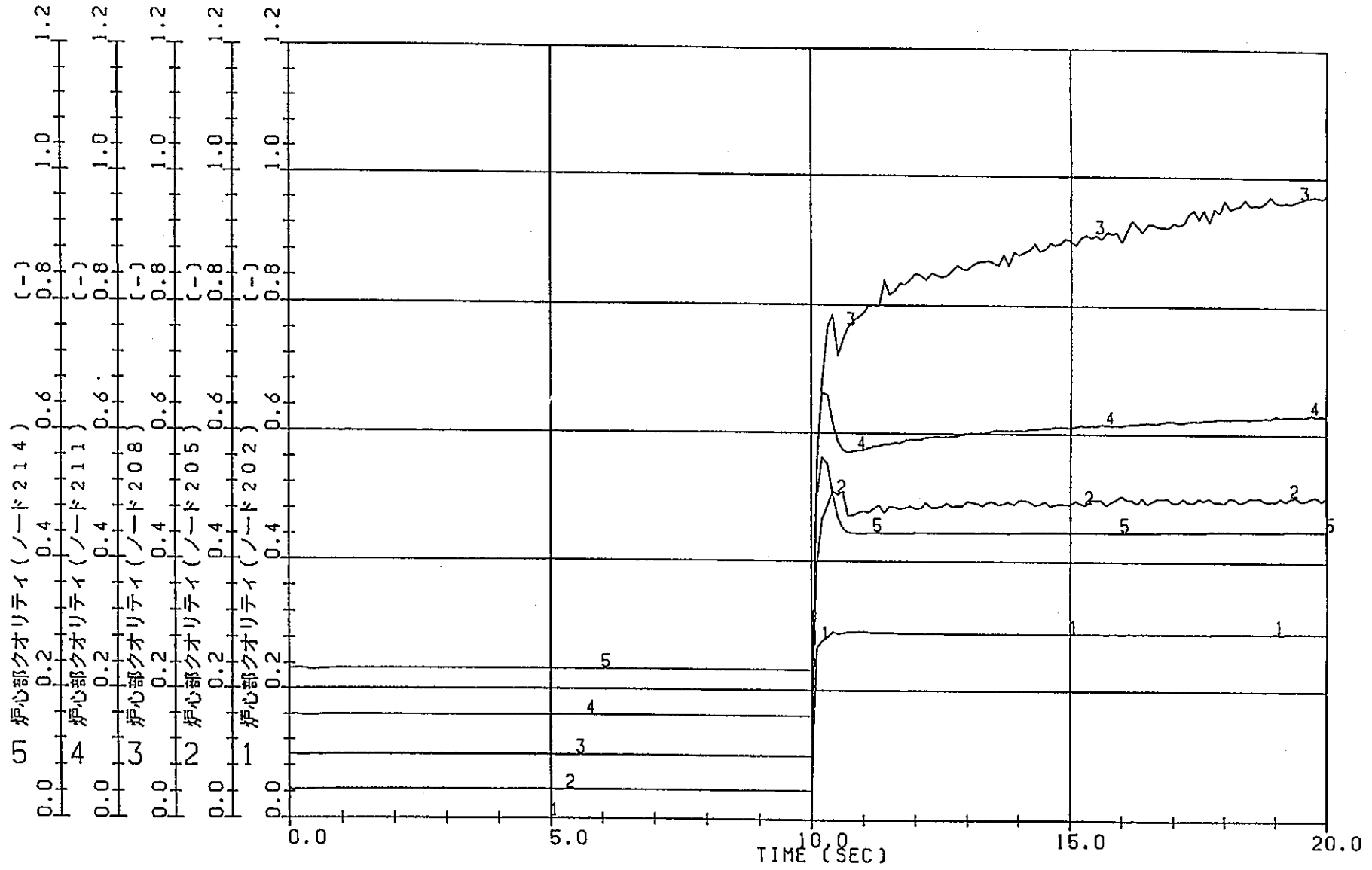


図 6.3-12 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)

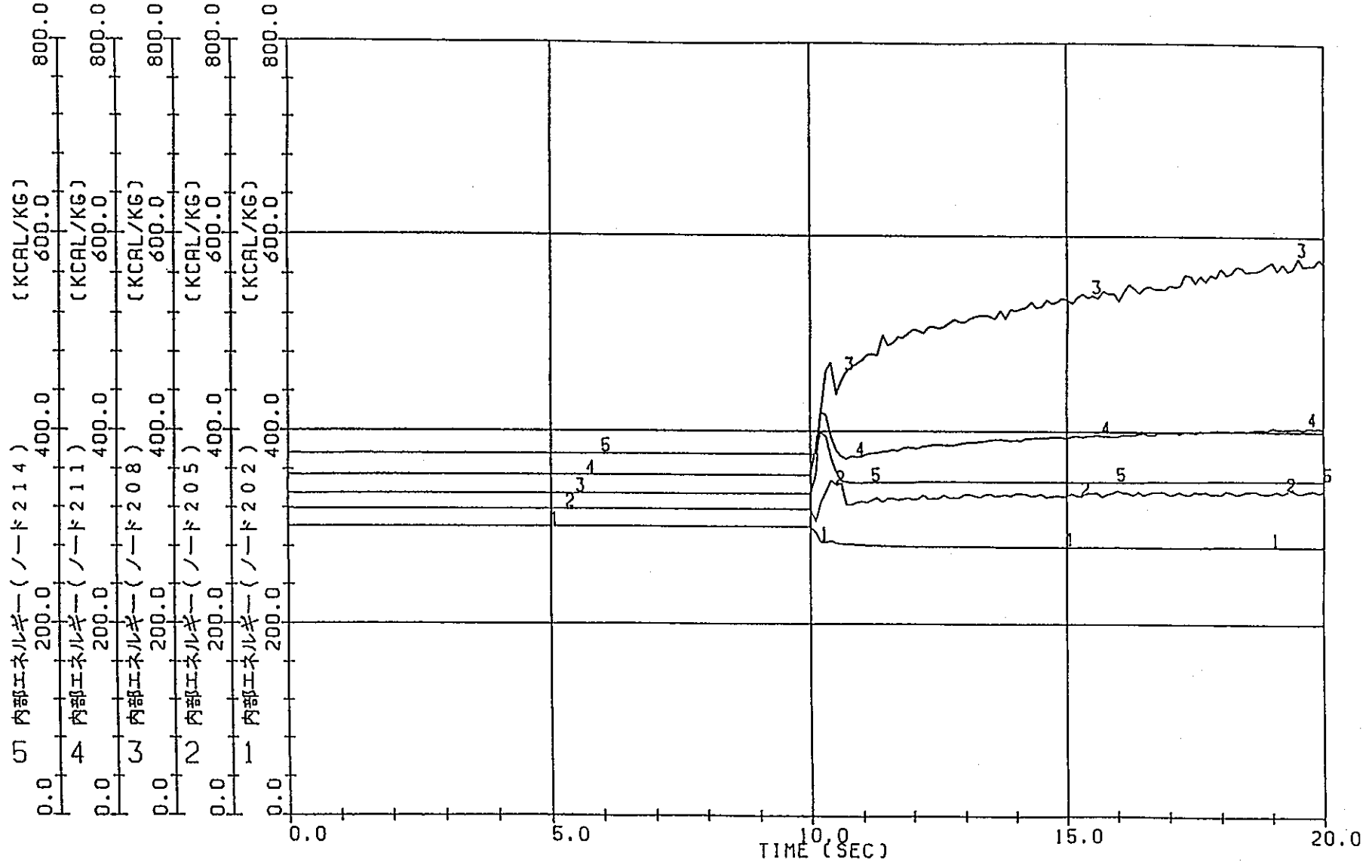


図 6.3-13 圧力管 カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)

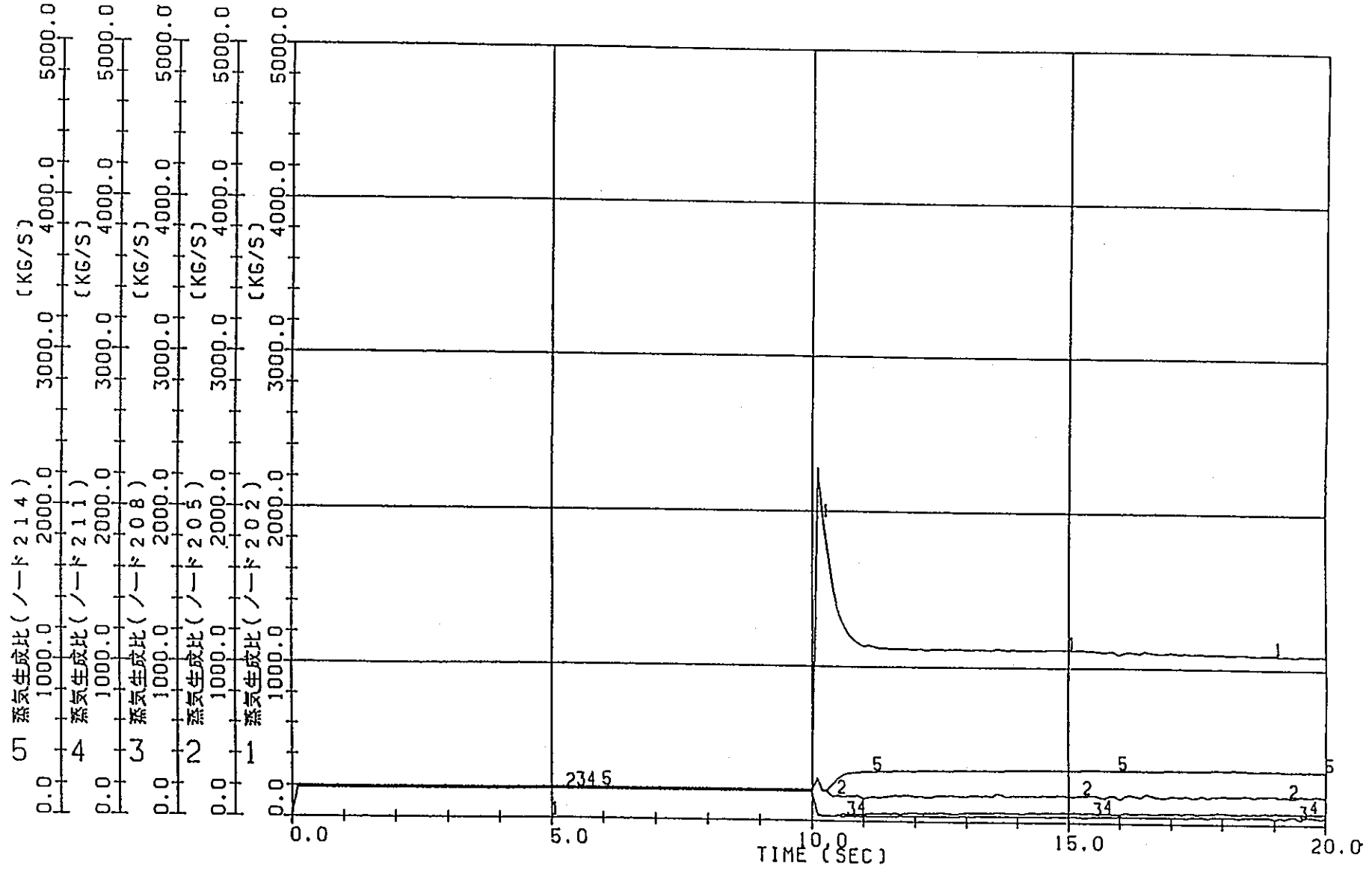
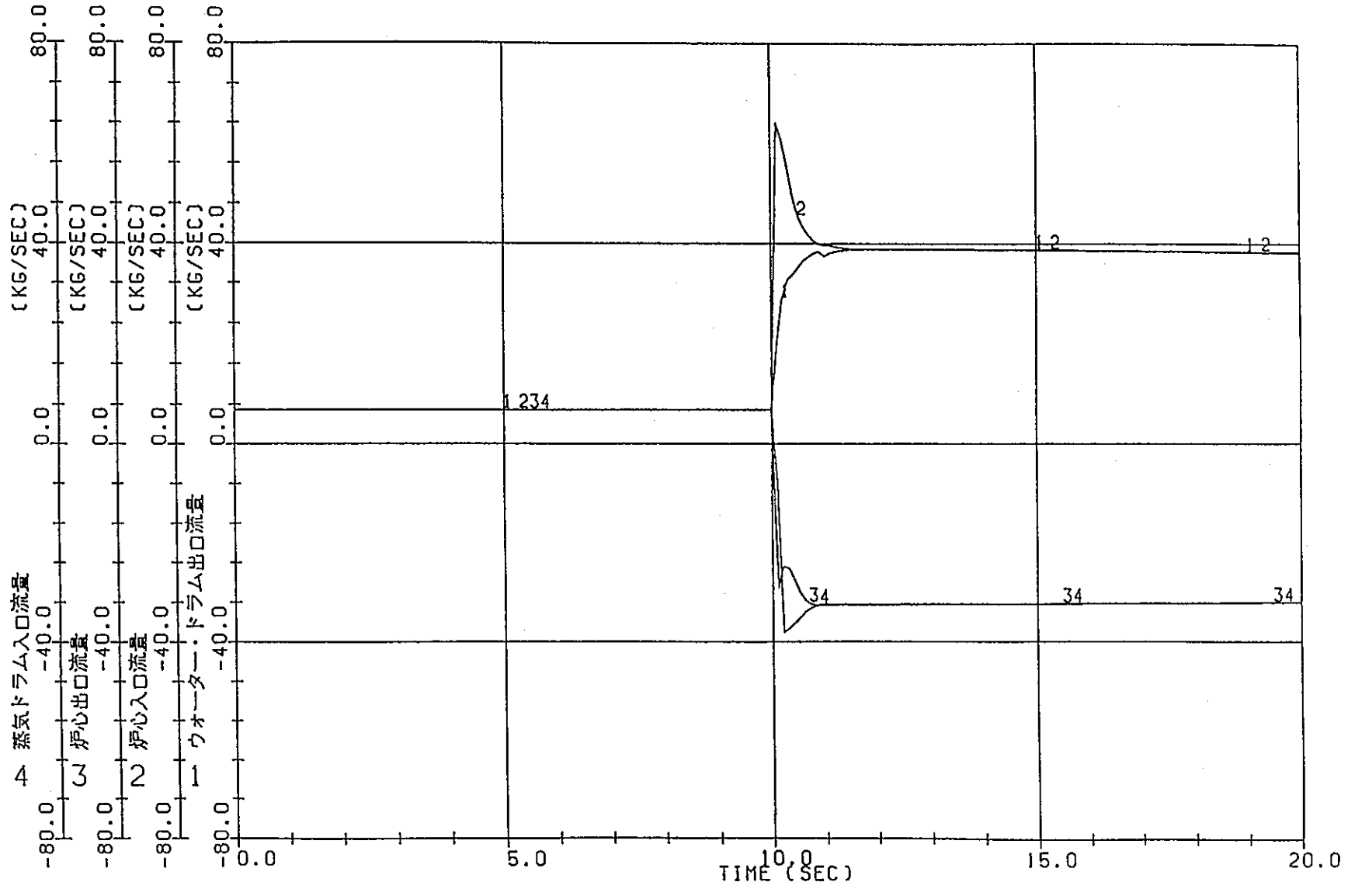


図 6.3-14 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)



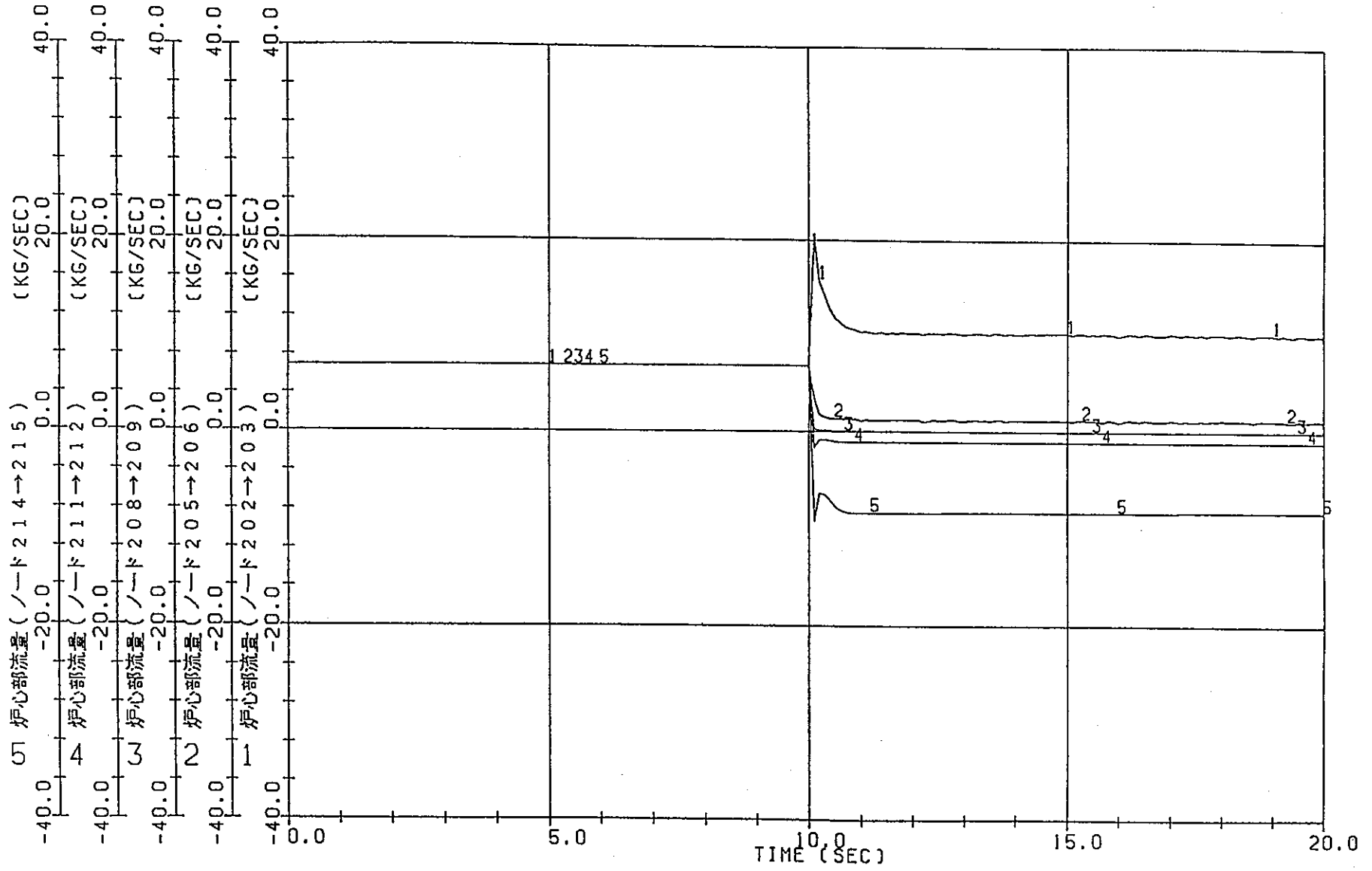


図 6.3-16 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)

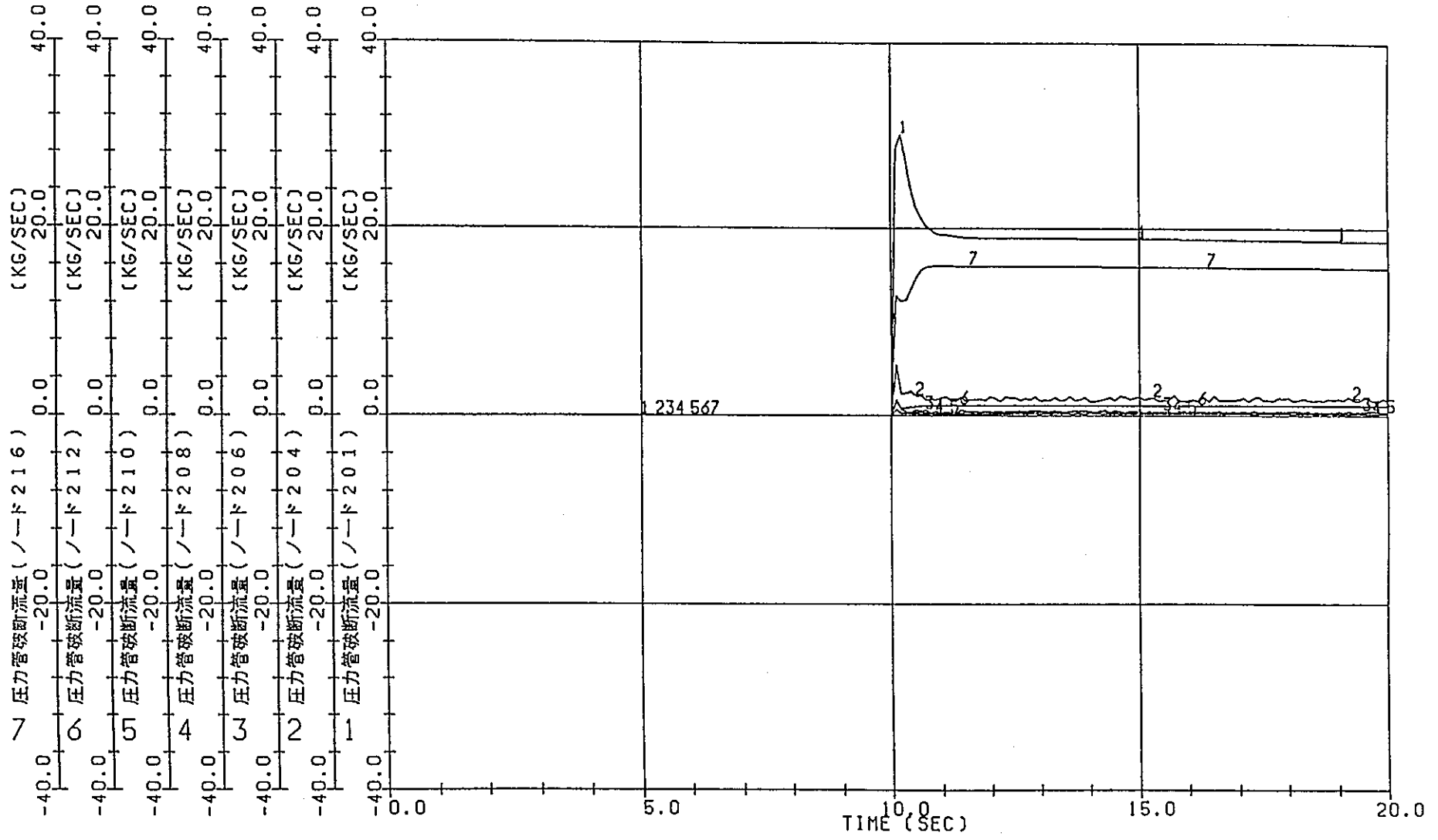
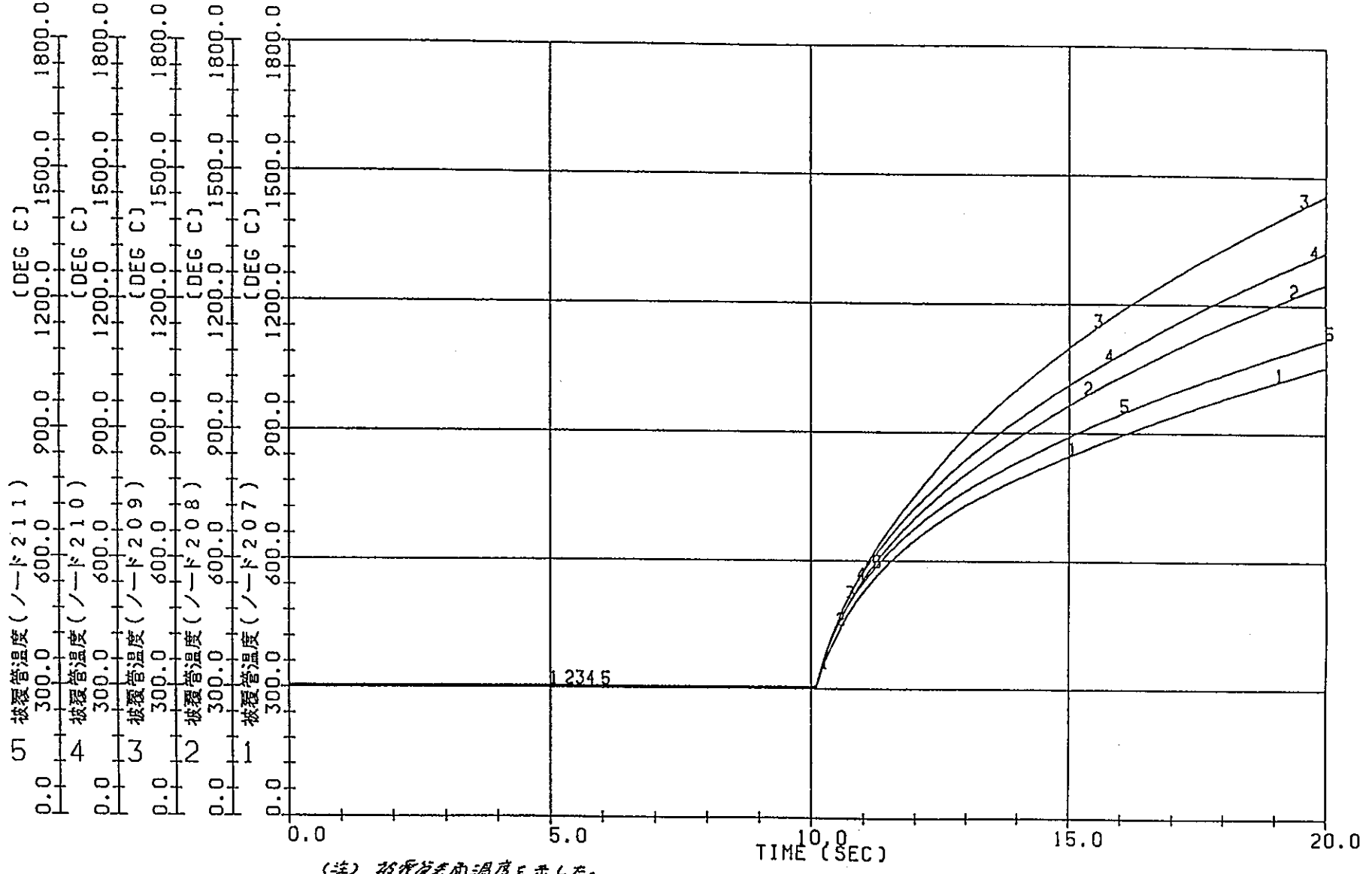


図 6.3-17 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)



(注) 被覆管表面温度を示した。

図 6.3-18 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)

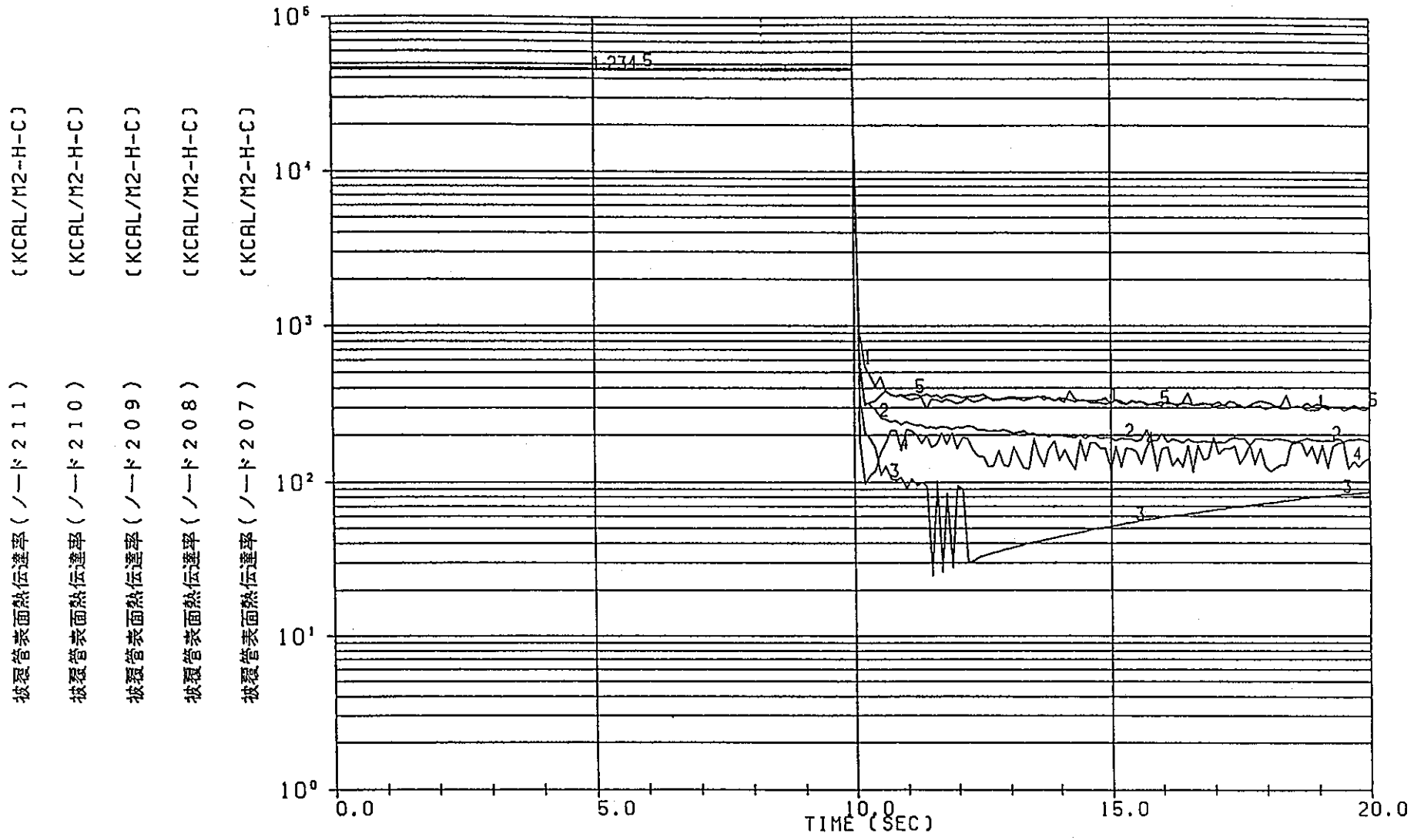


図 6.3-19 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)

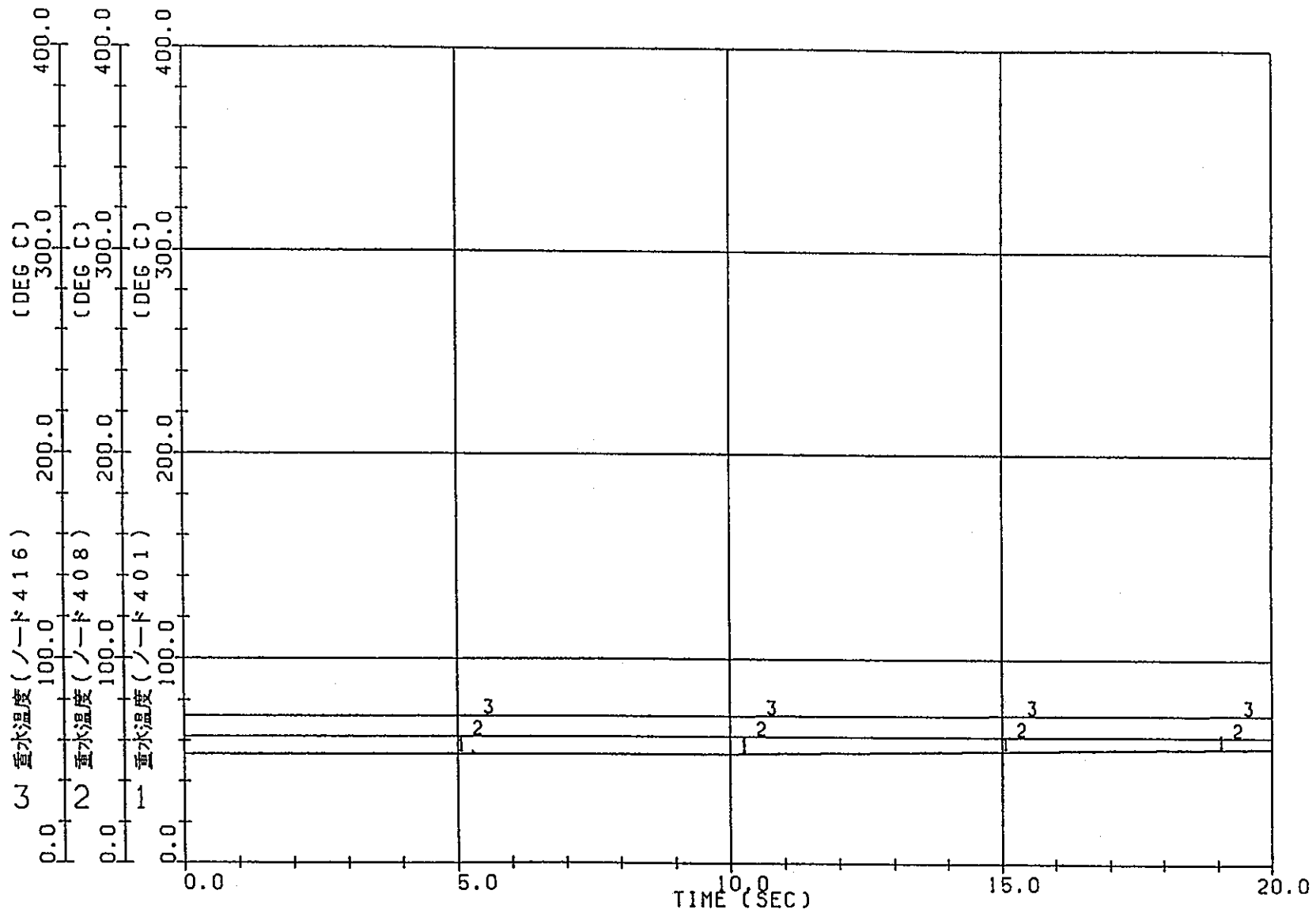


図 6.3-20 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)

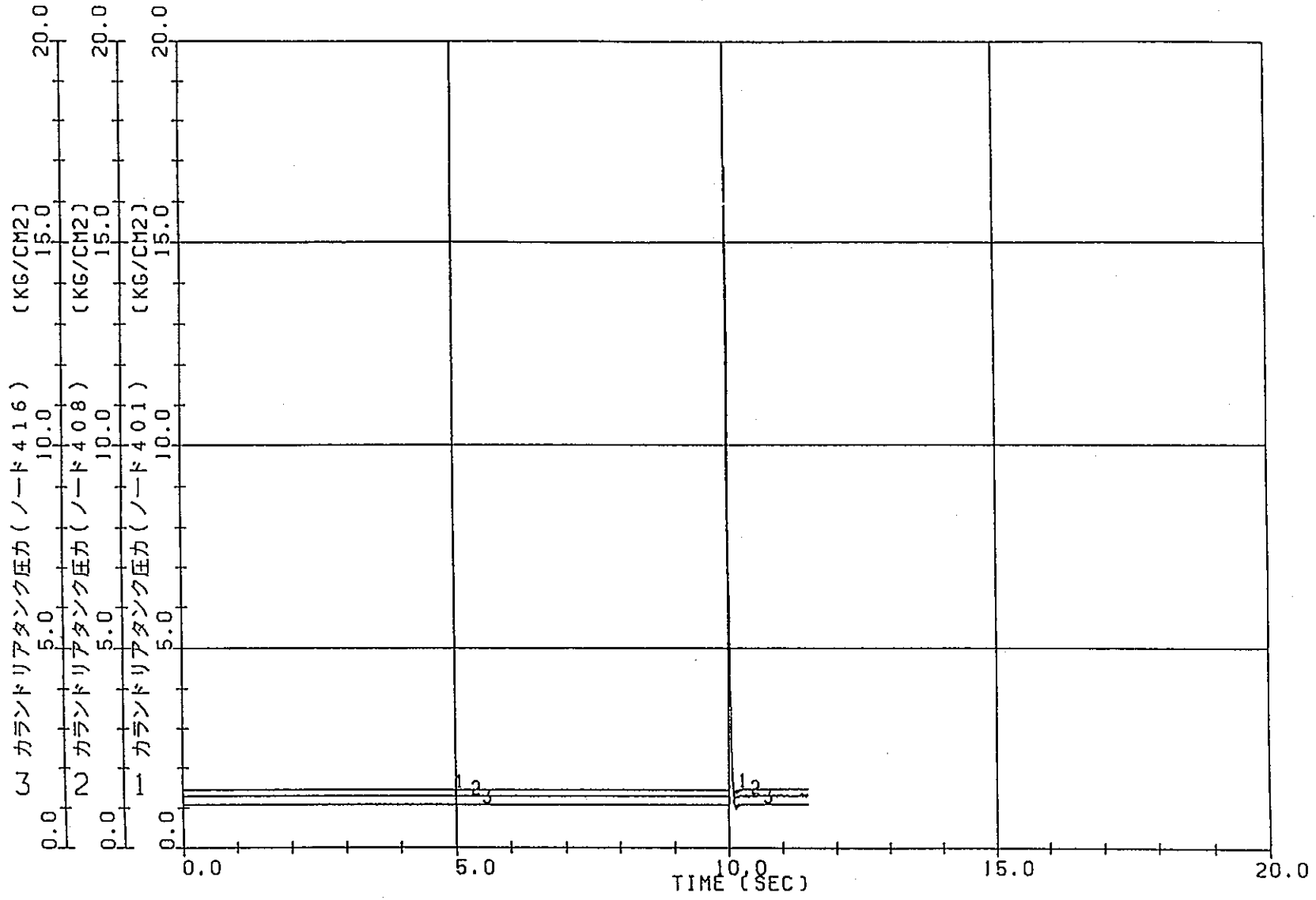
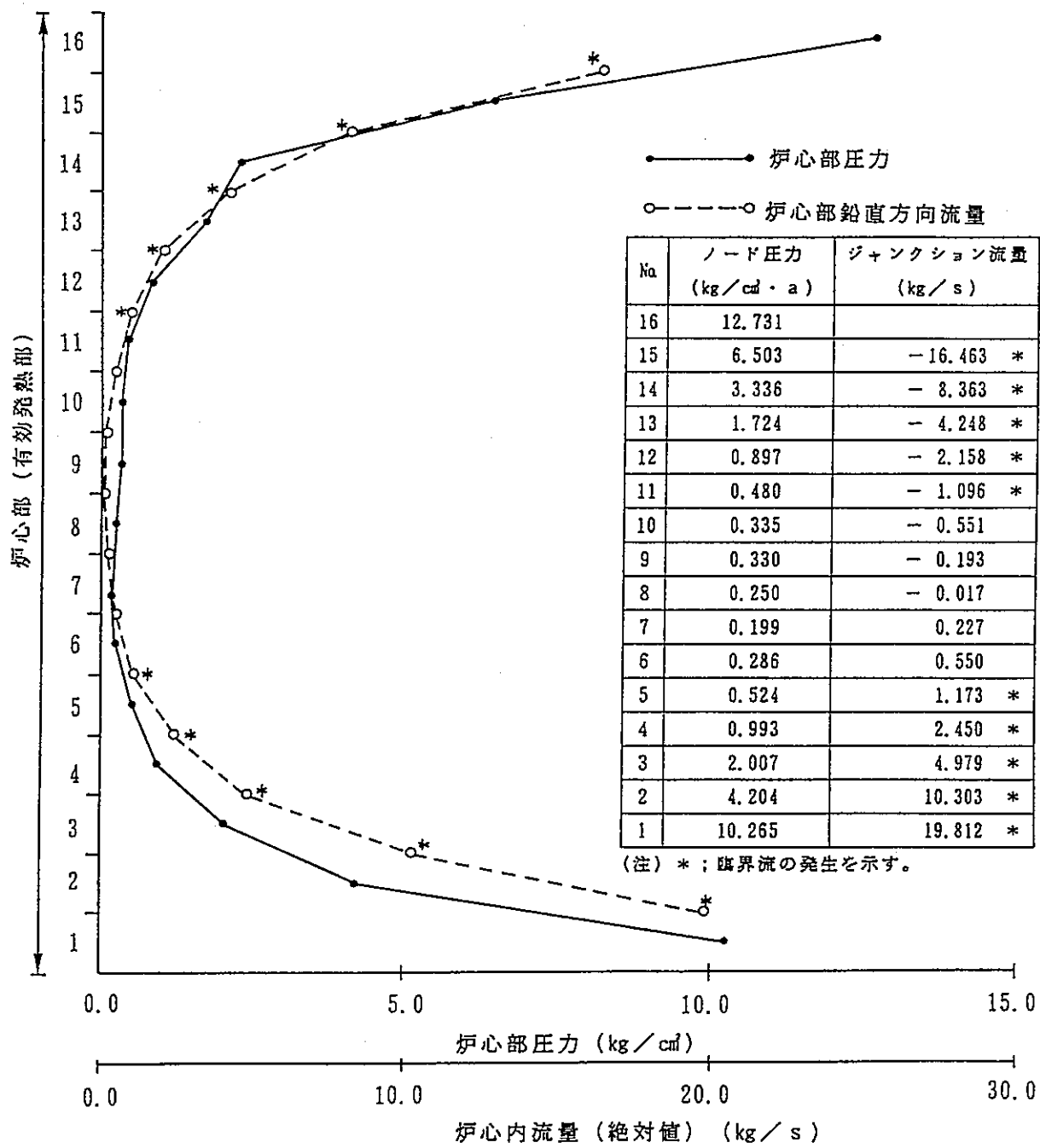


図 6.3-21 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (RELAP5)



(注) 事故発生後5秒経過時点の値をプロットした。

図6.3-22 圧力管・カランドリア管同時破断時における炉心部圧力、炉心部鉛直流量
(RECAP5コード)

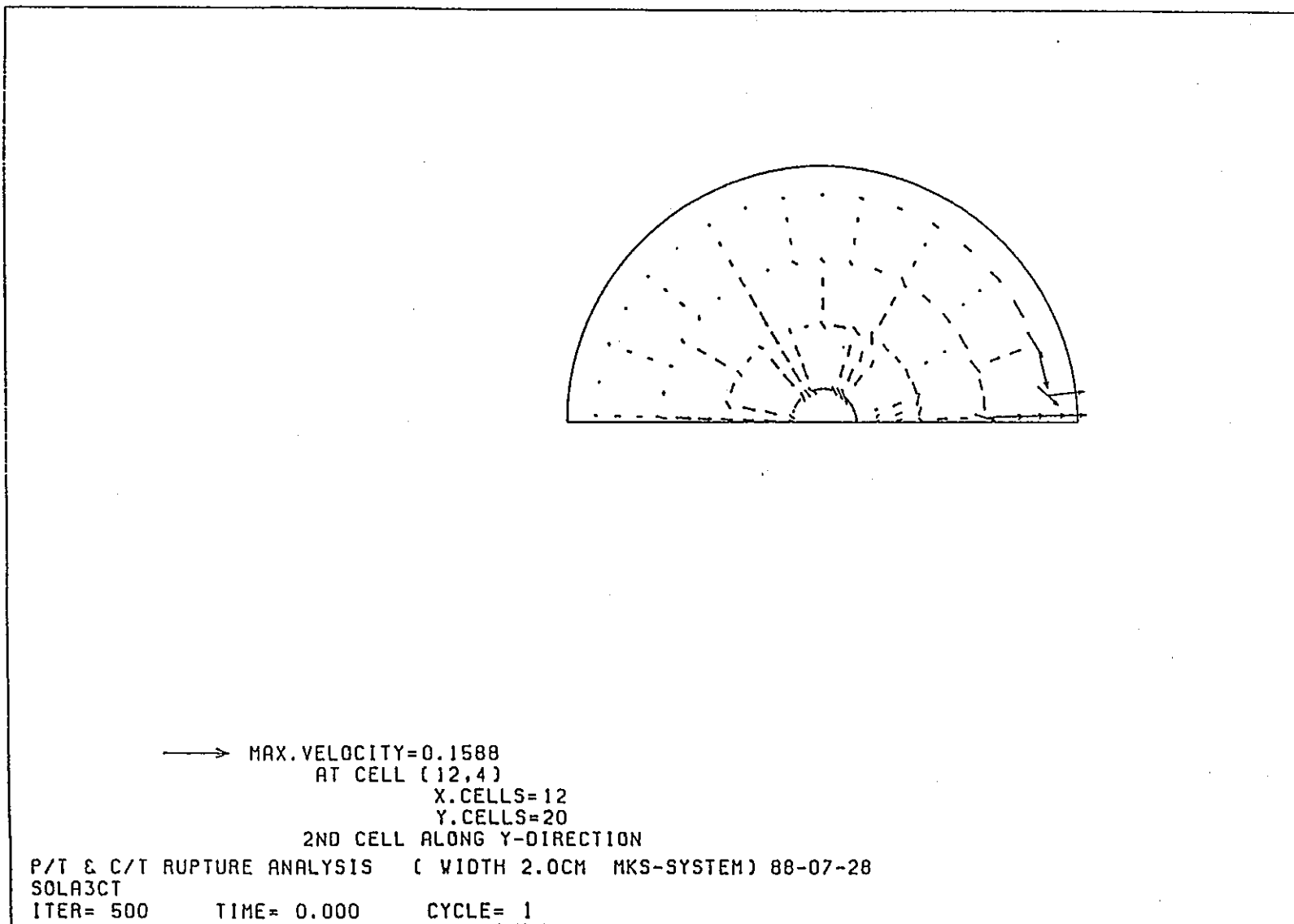


図 6.3-23 圧力管・カランドリア管同時破断解析結果 (SOLA, 1計算サイクル時の水平流速分布)

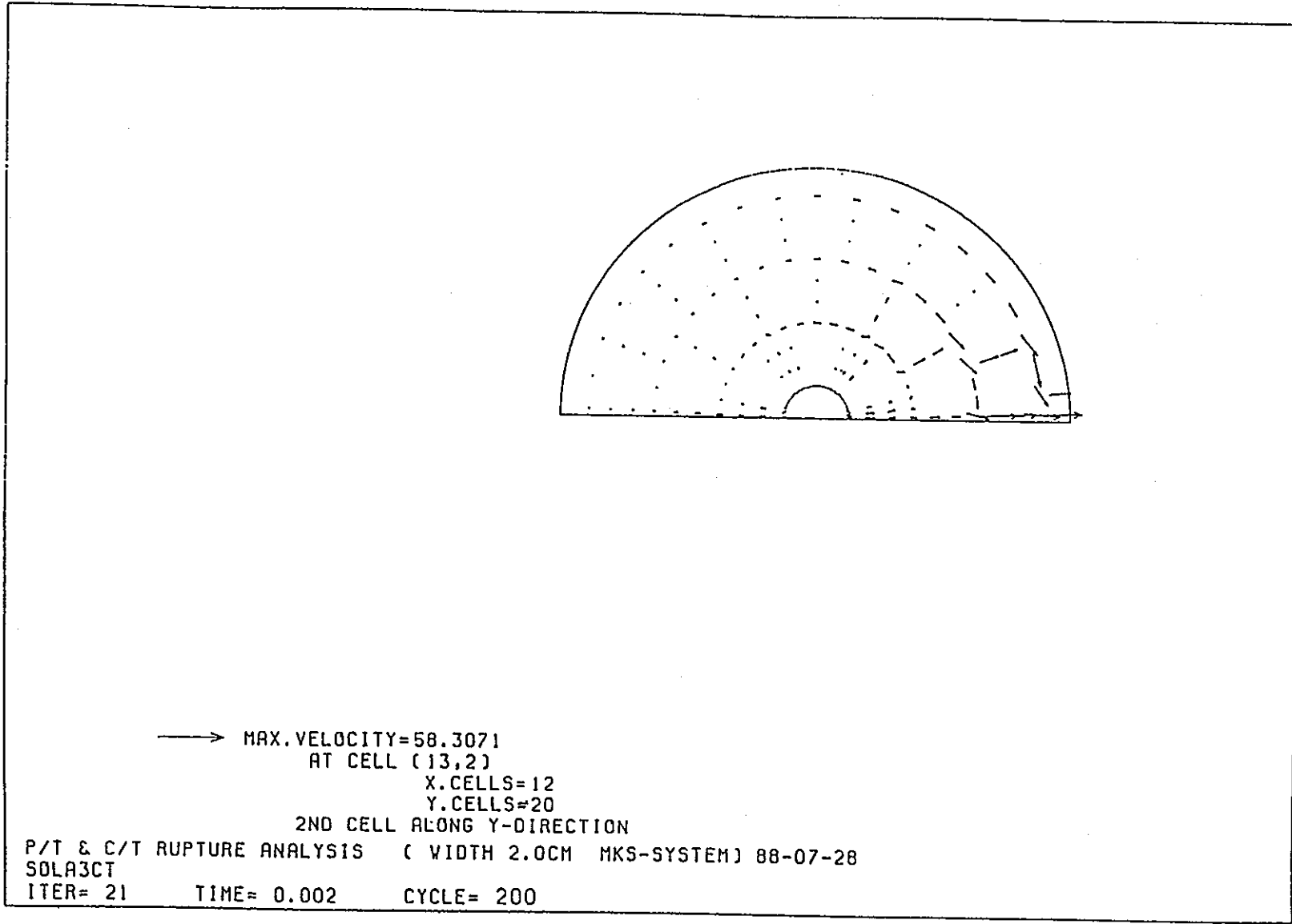
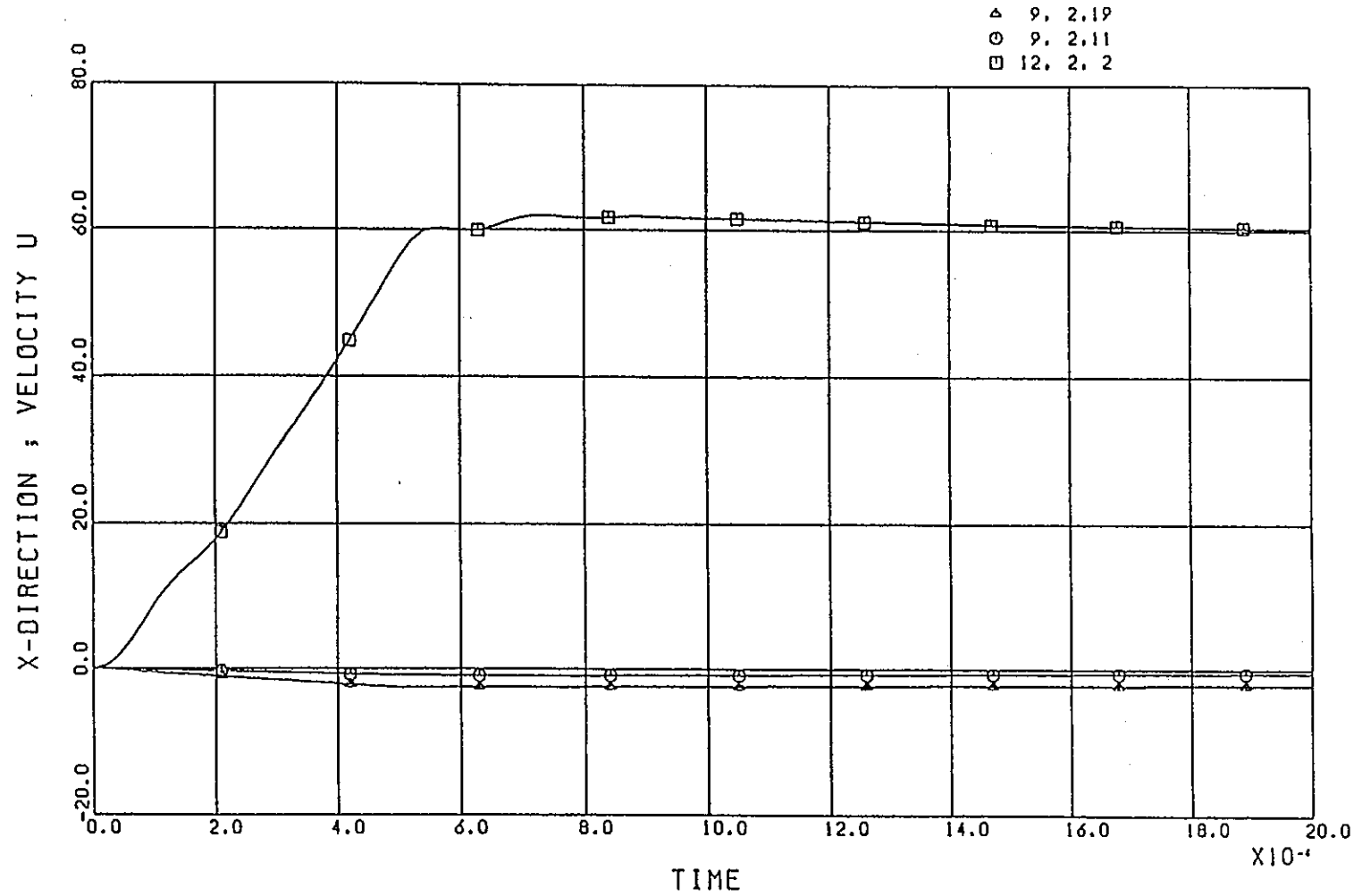
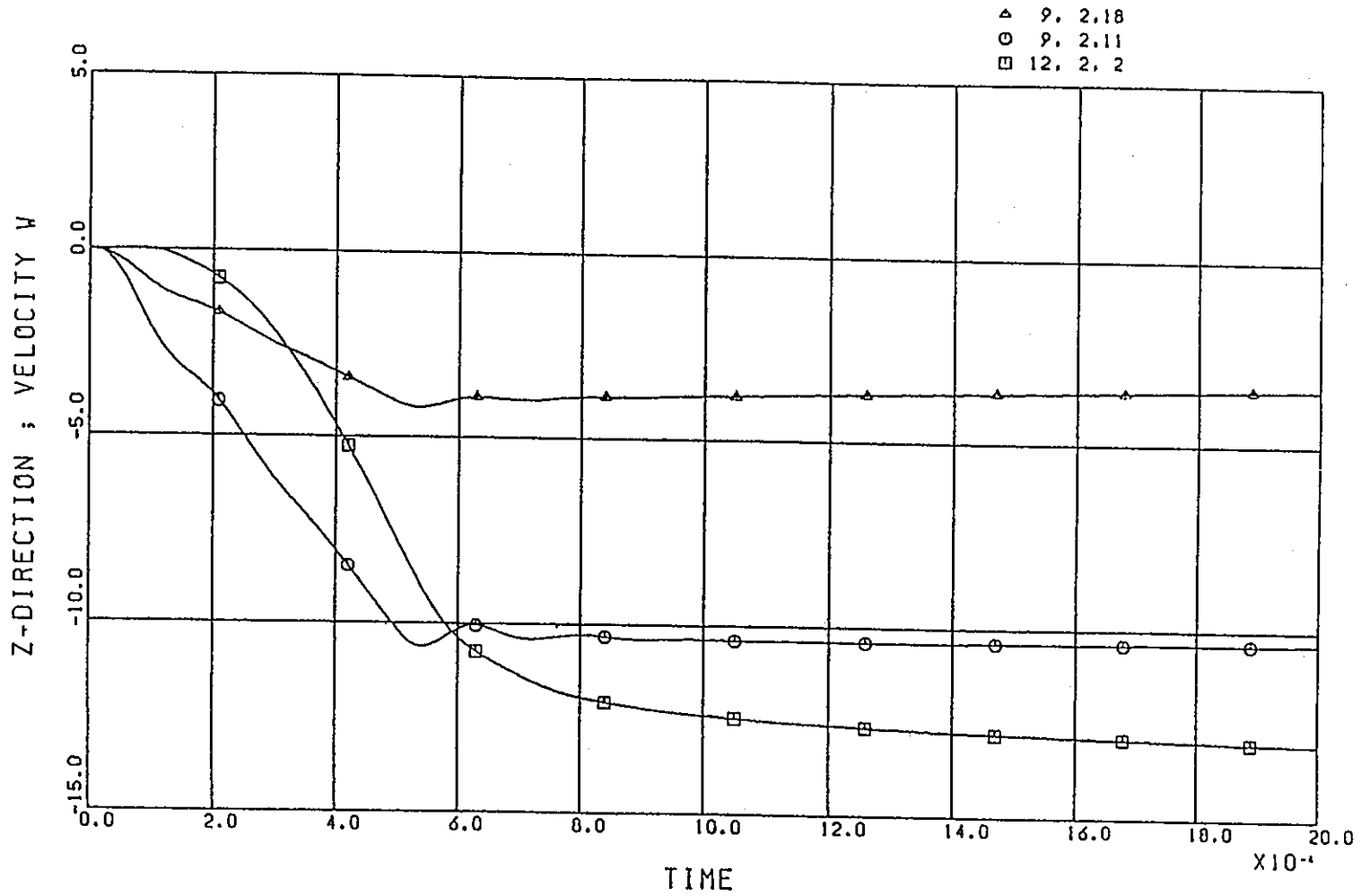


図 6.3-24 圧力管・カランドリア管同時破断解析結果 (SOLA, 200計算サイクル時の水平流速分布)



P/T & C/T RUPTURE ANALYSIS (WIDTH 2.0CM MKS-SYSTEM)

図 6.3-25 圧力管・カランドリア管同時破断解析結果 (SOLA, R方向流速)



P/T & C/T RUPTURE ANALYSIS (WIDTH 2.0CM MKS-SYSTEM)

図 6.3-26 圧力管・カランドリア管同時破断解析結果 (SOLA, ⊙方向流速)

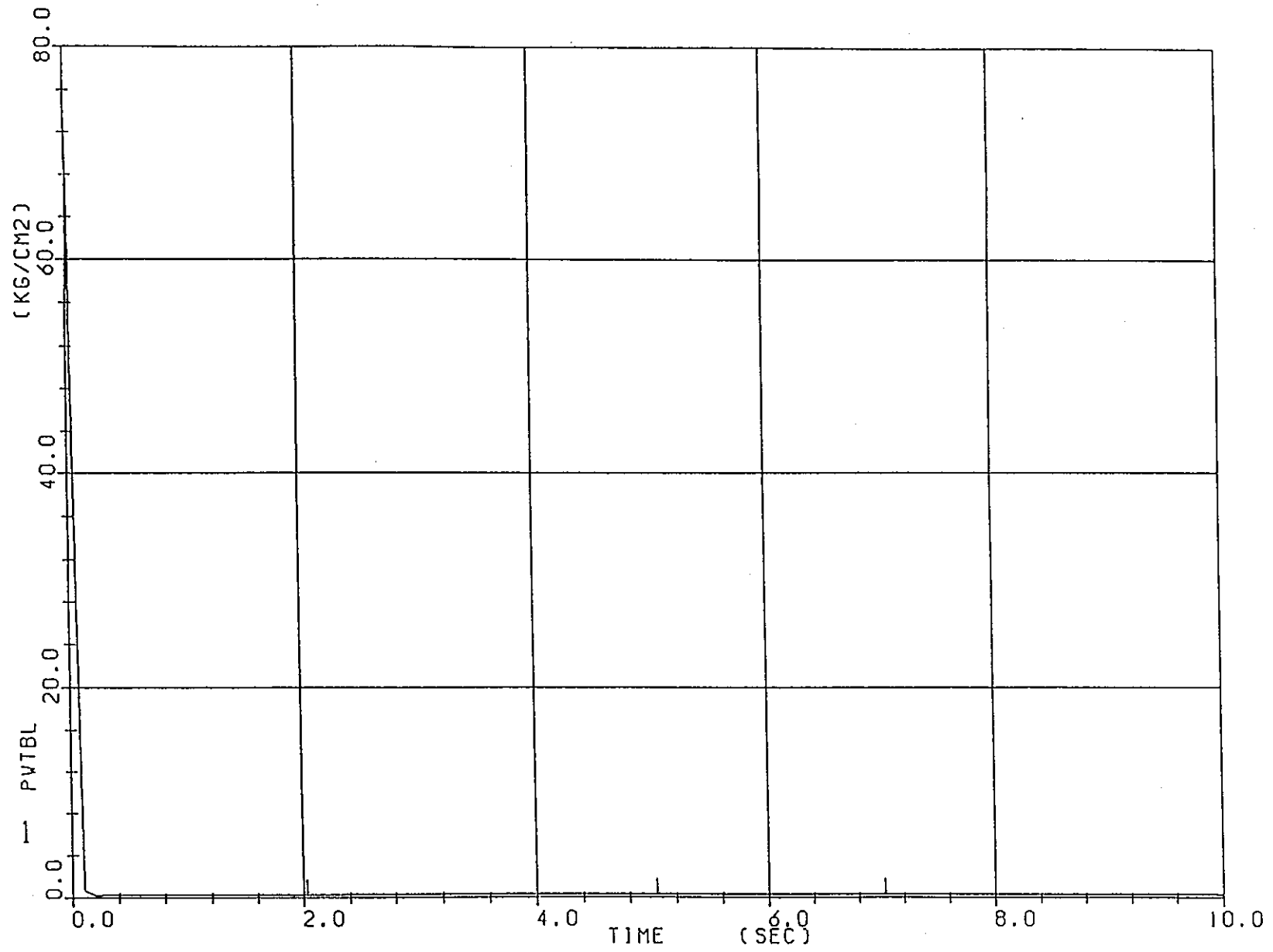


図 6.3-27 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (冷却材圧力)

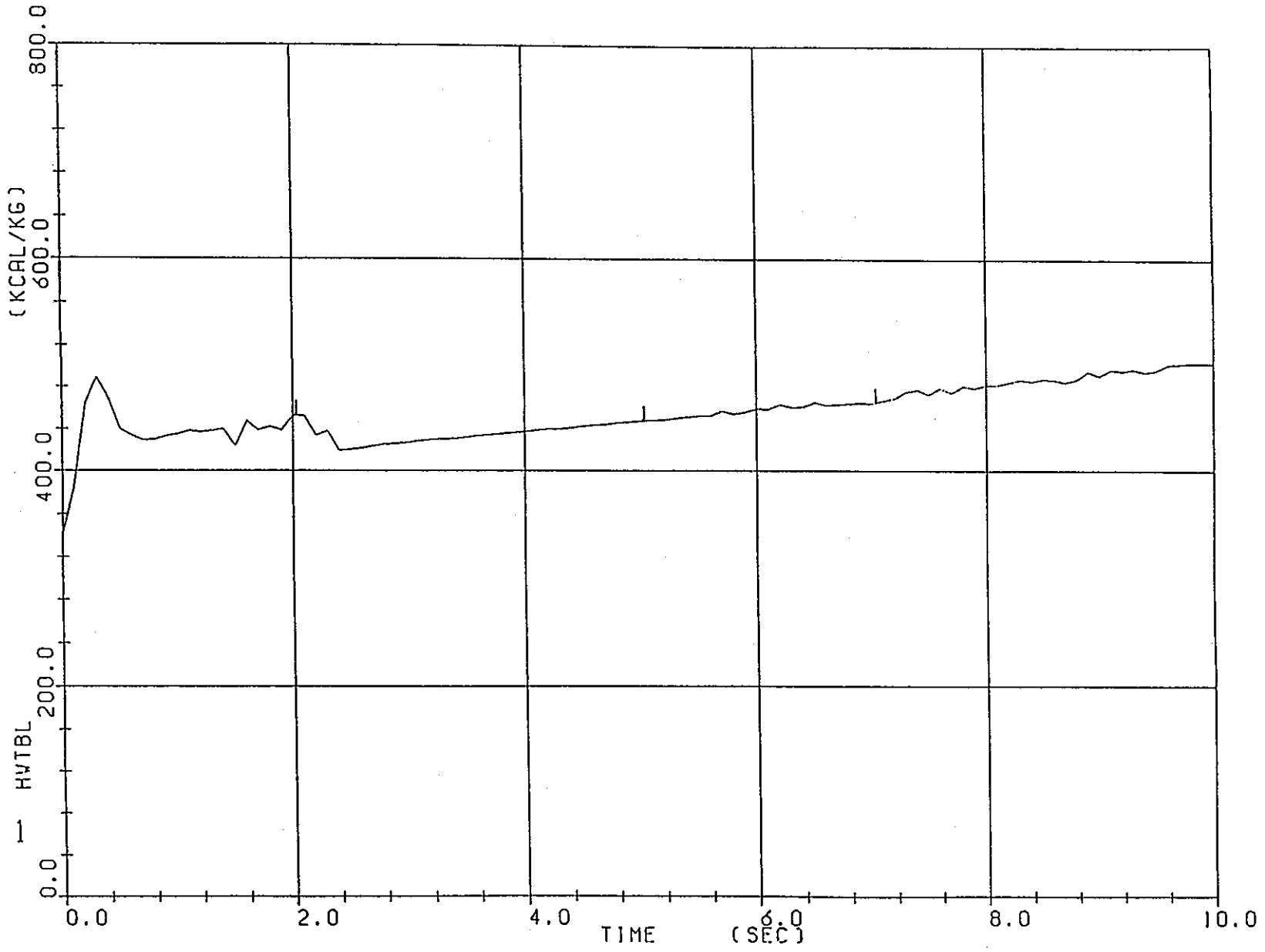


図 6.3-28 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (冷却材エンタルピー)

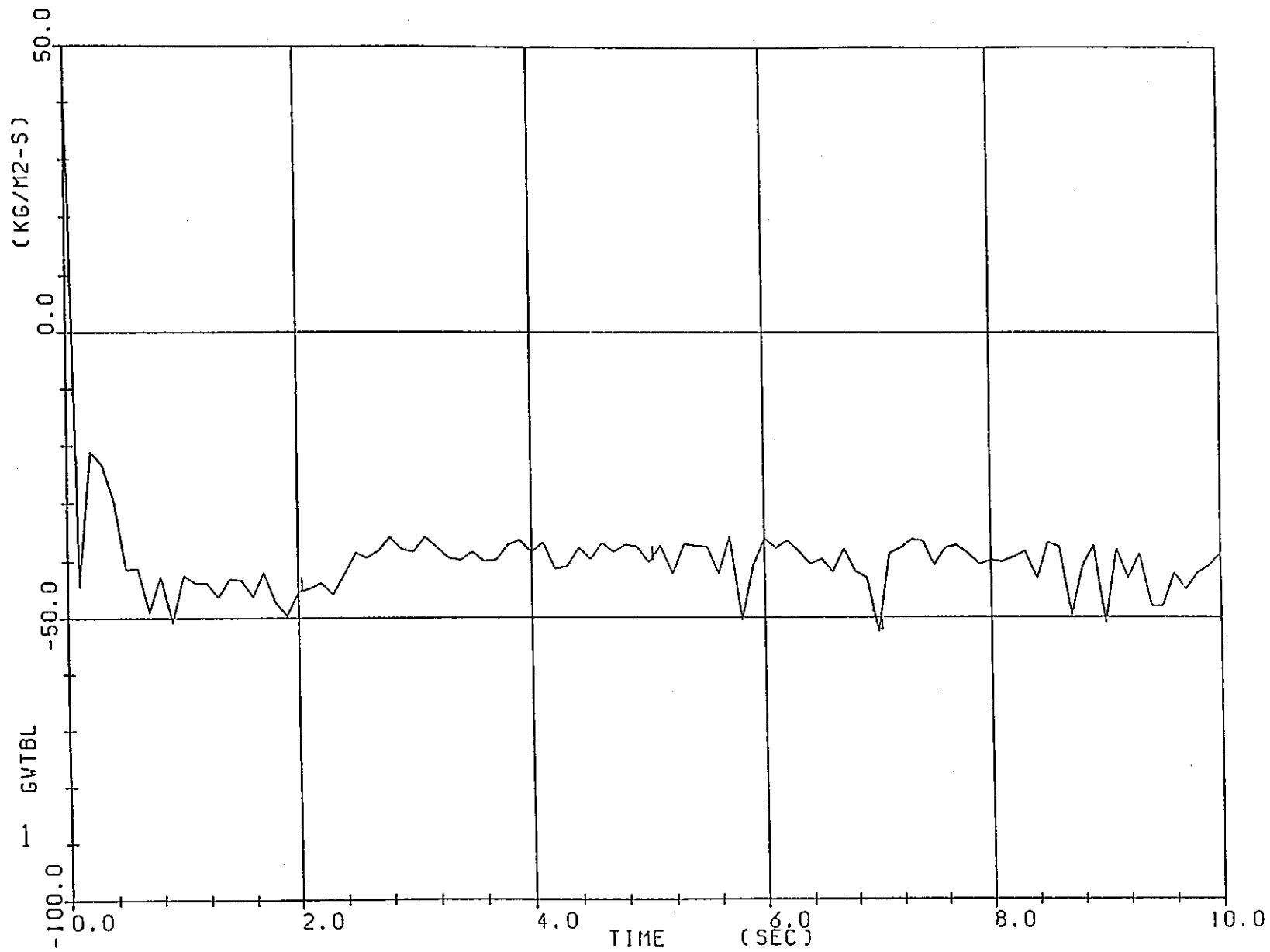


図 6.3-29 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (鉛直方向冷却材流量)

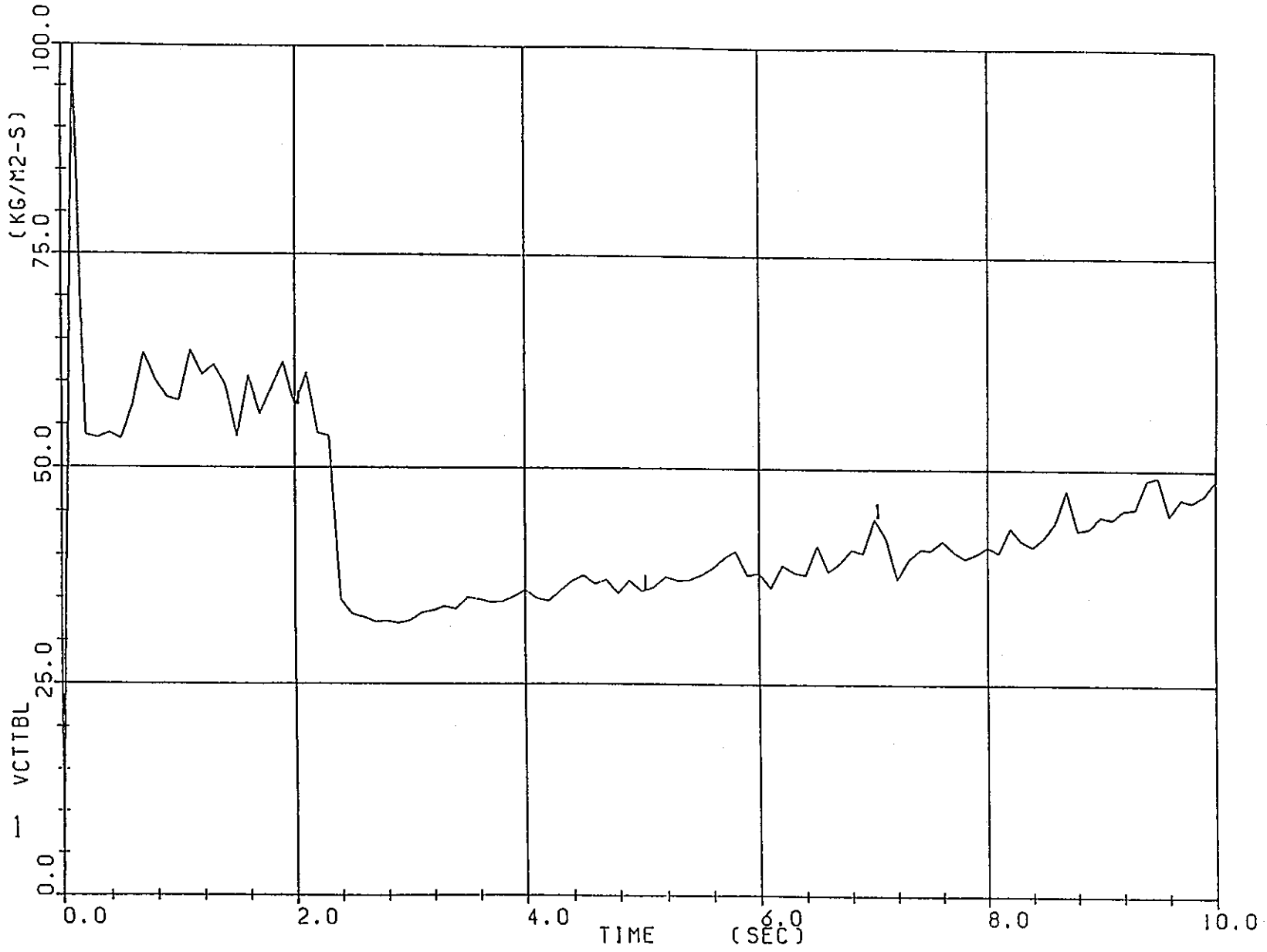


図 6.3-30 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (冷却材破断流量)

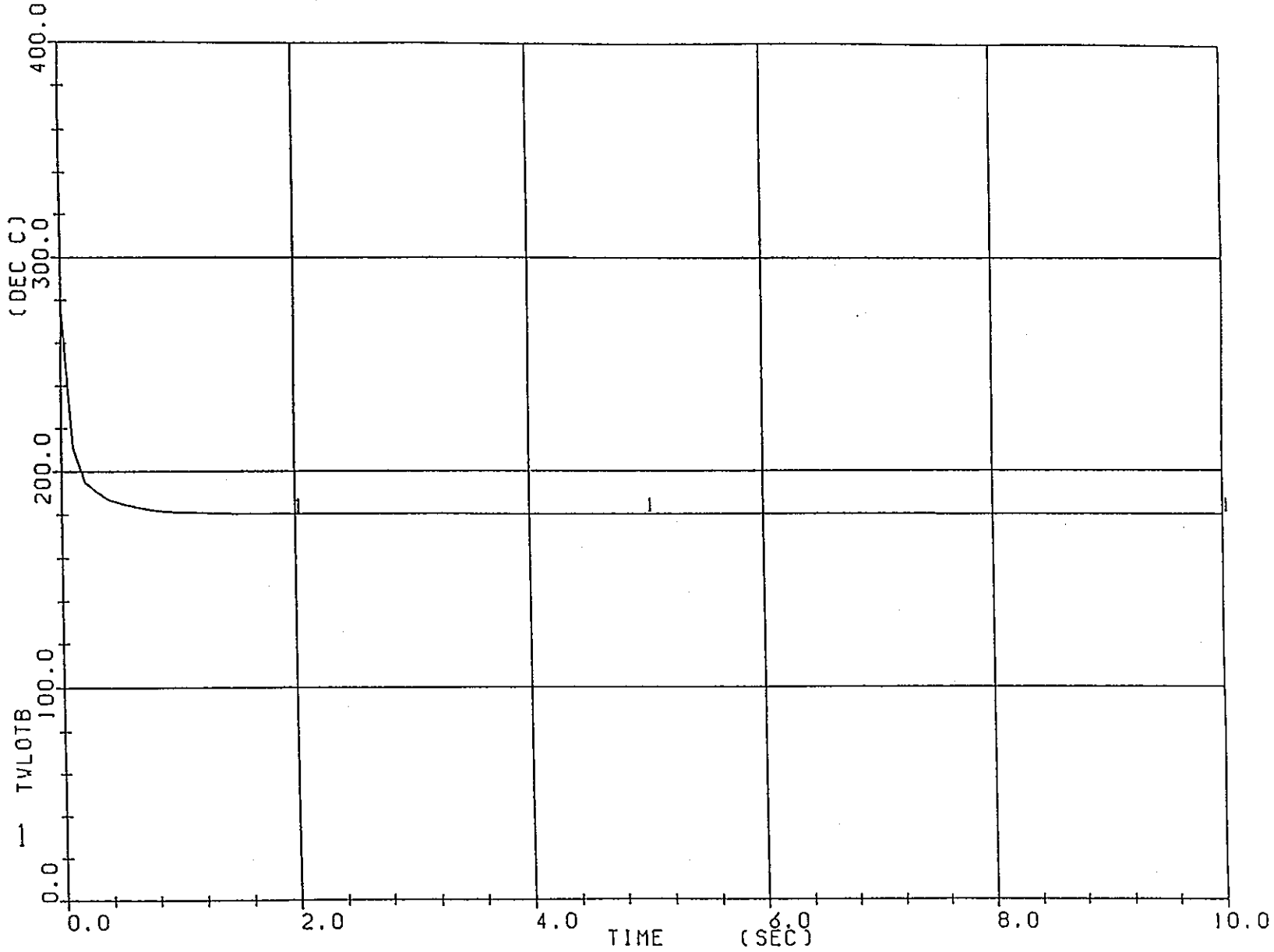


図 6.3-31 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (下部プレナム部冷却材温度)

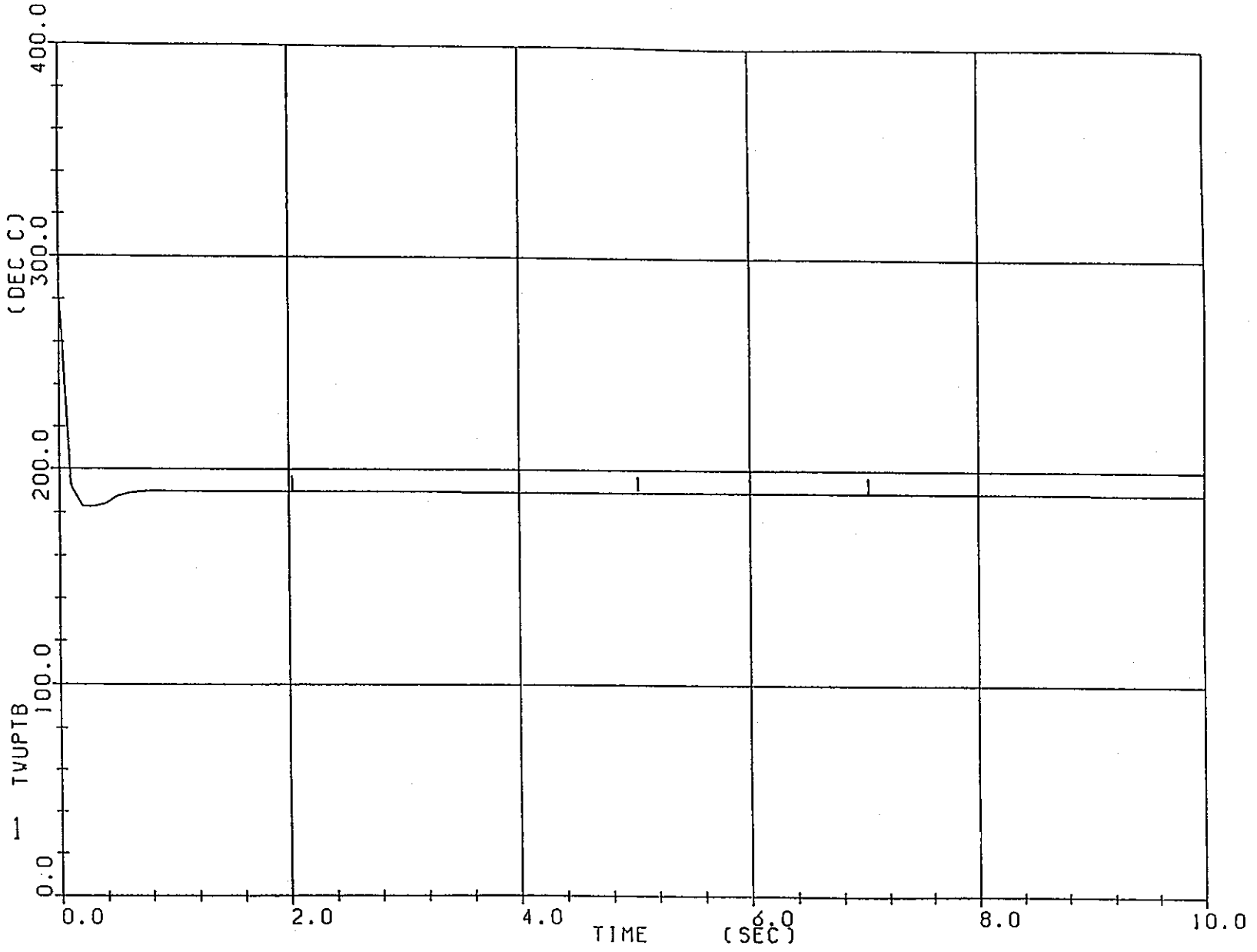


図 6.3-32 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (上部プレナム部冷却材温度)

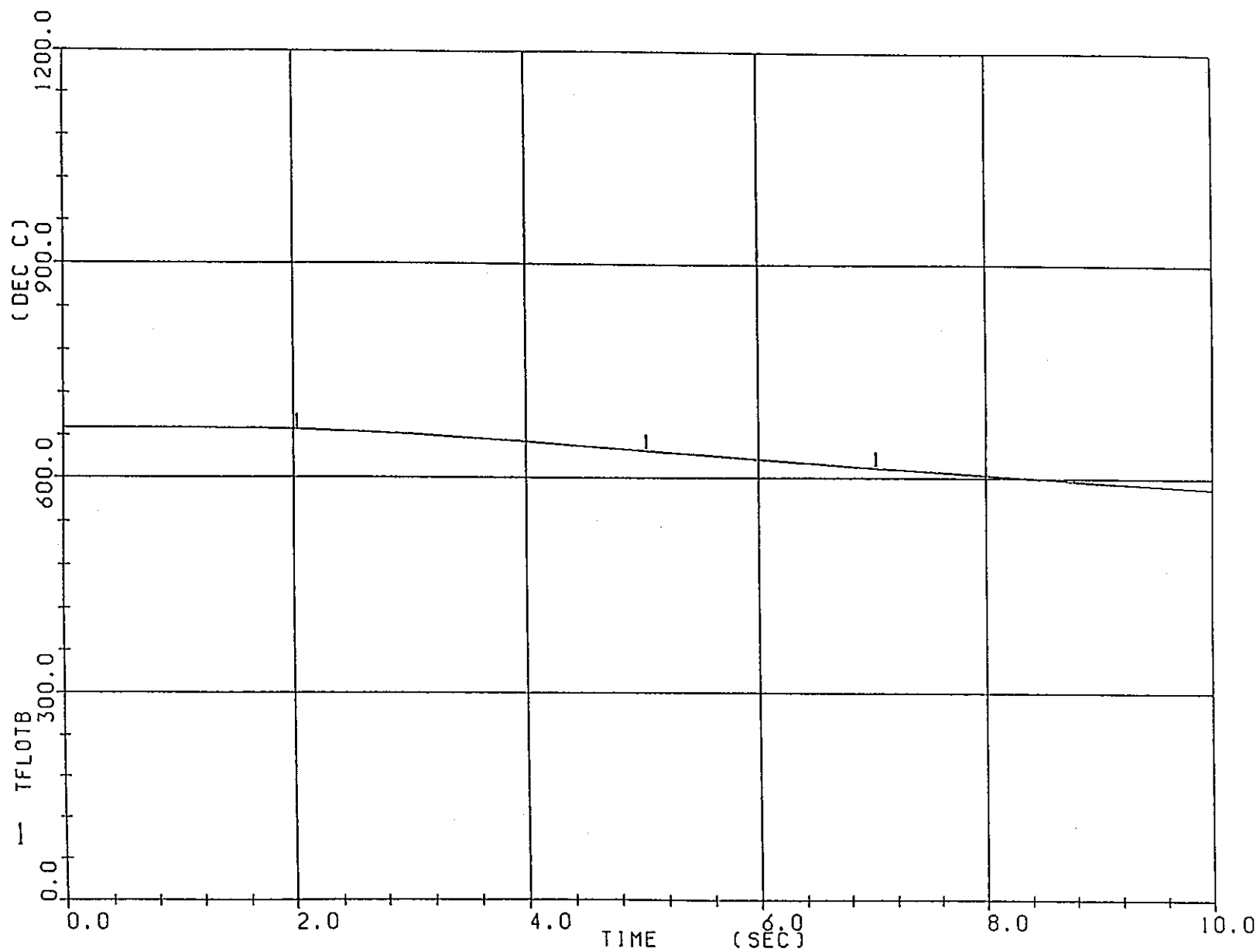


図 6.3-33 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (下部プレナム部燃料中心温度)

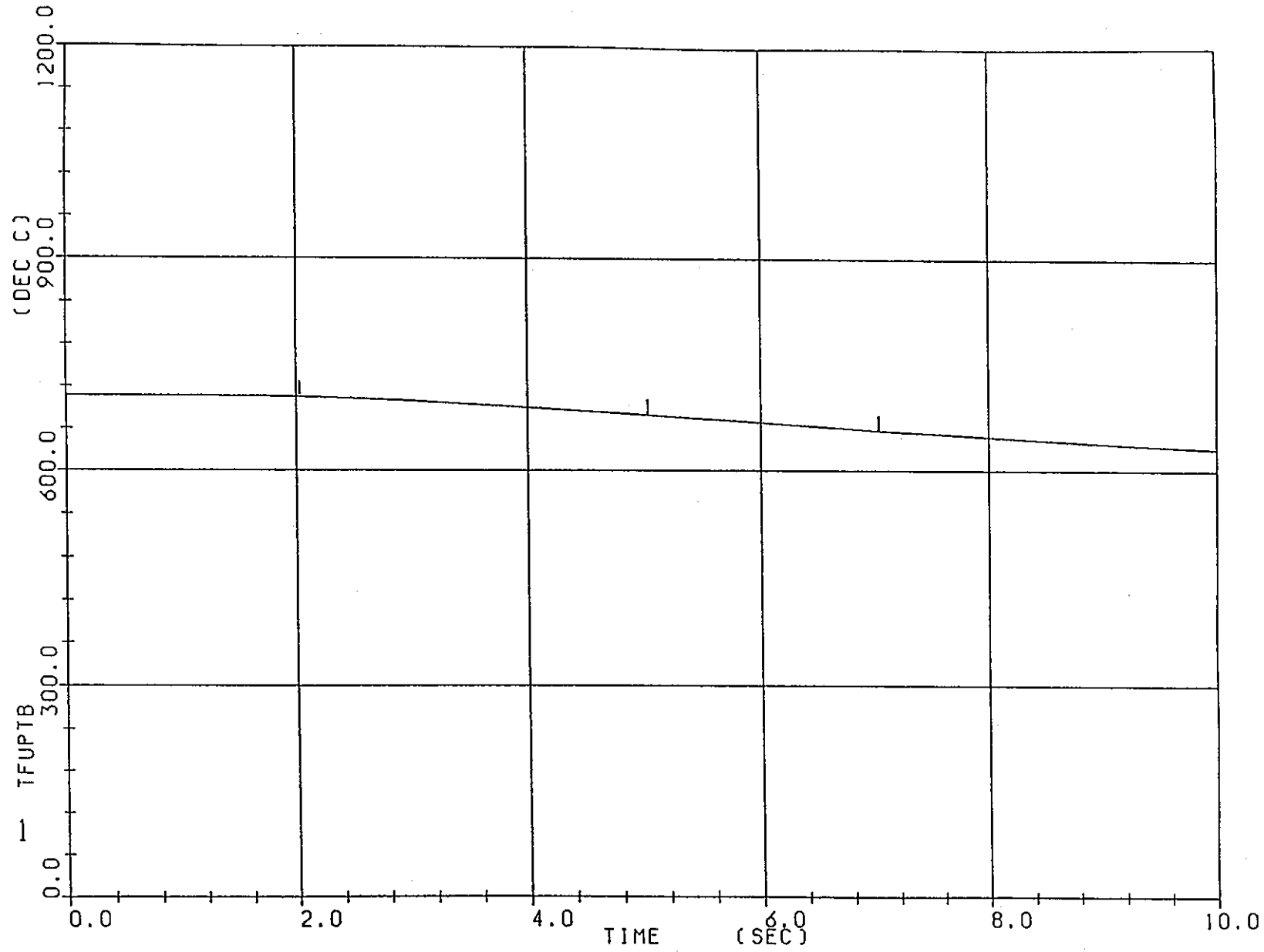


図 6.3-34 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (上部プレナム部燃料中心温度)

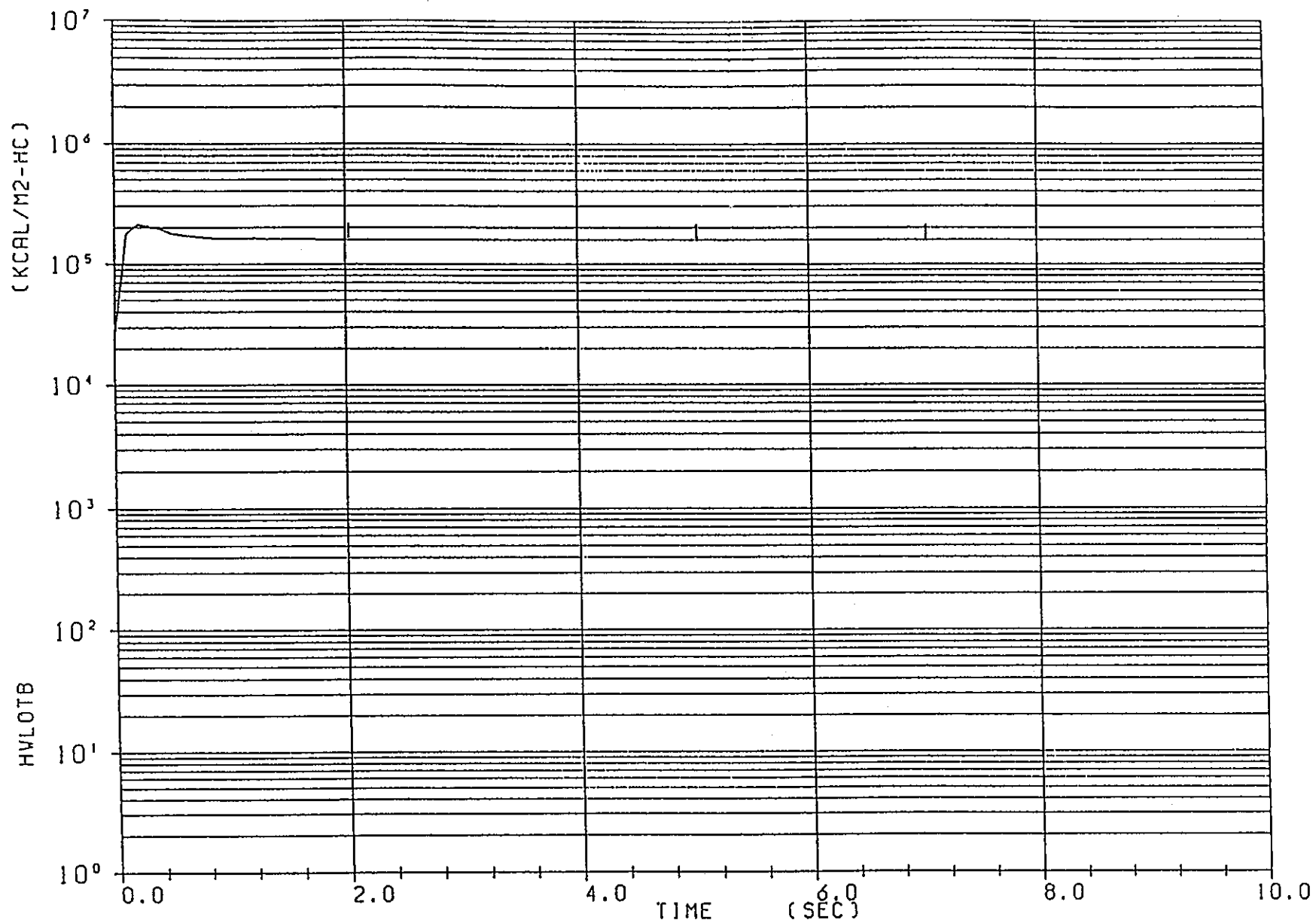


図 6.3-35 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (下部プレナム部燃料被覆管表面熱伝達率)

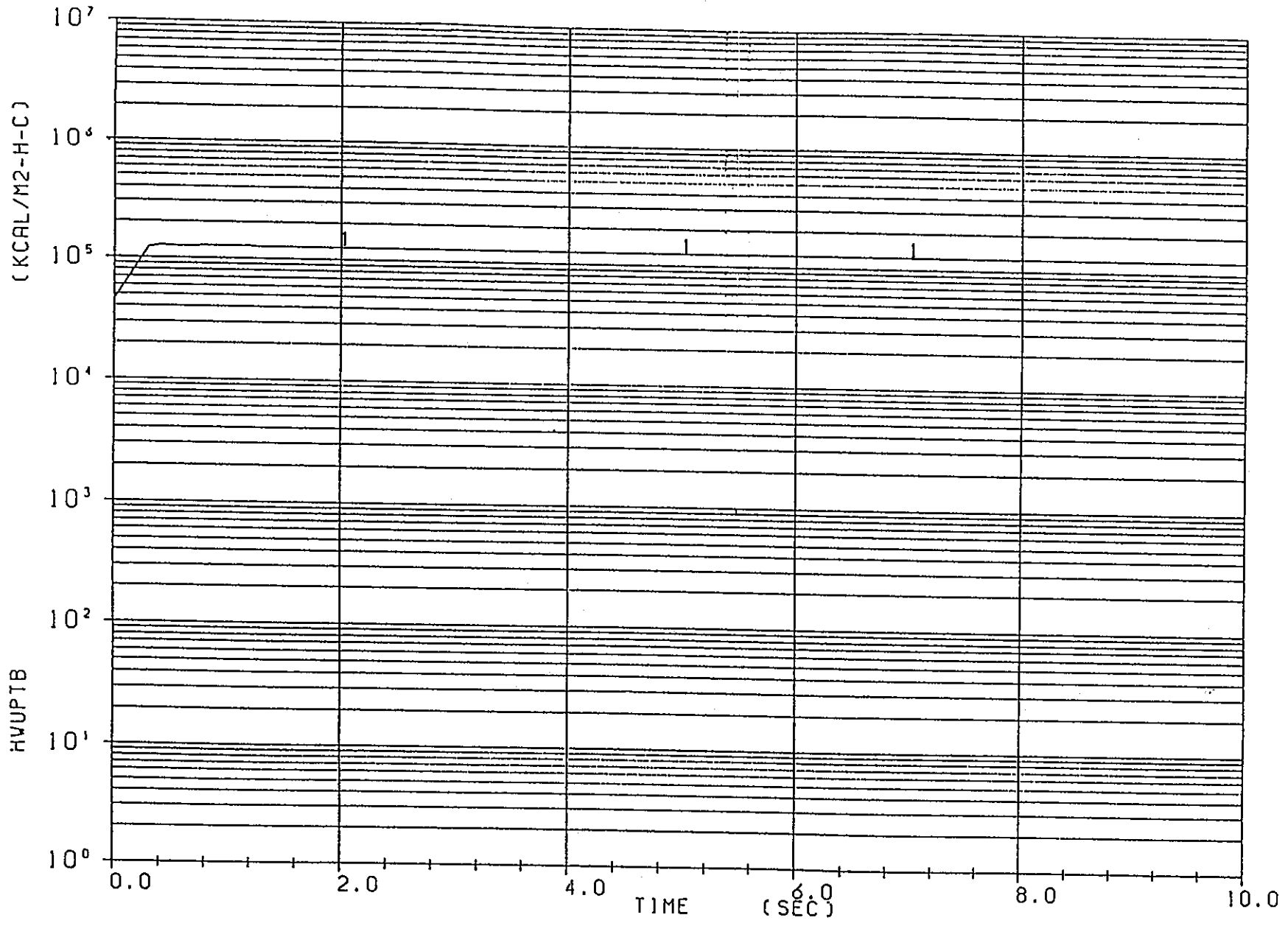


図 6.3-36 燃料ヒートアップ解析用境界条件 (上部プレナム部燃料被覆管表面熱伝達率)

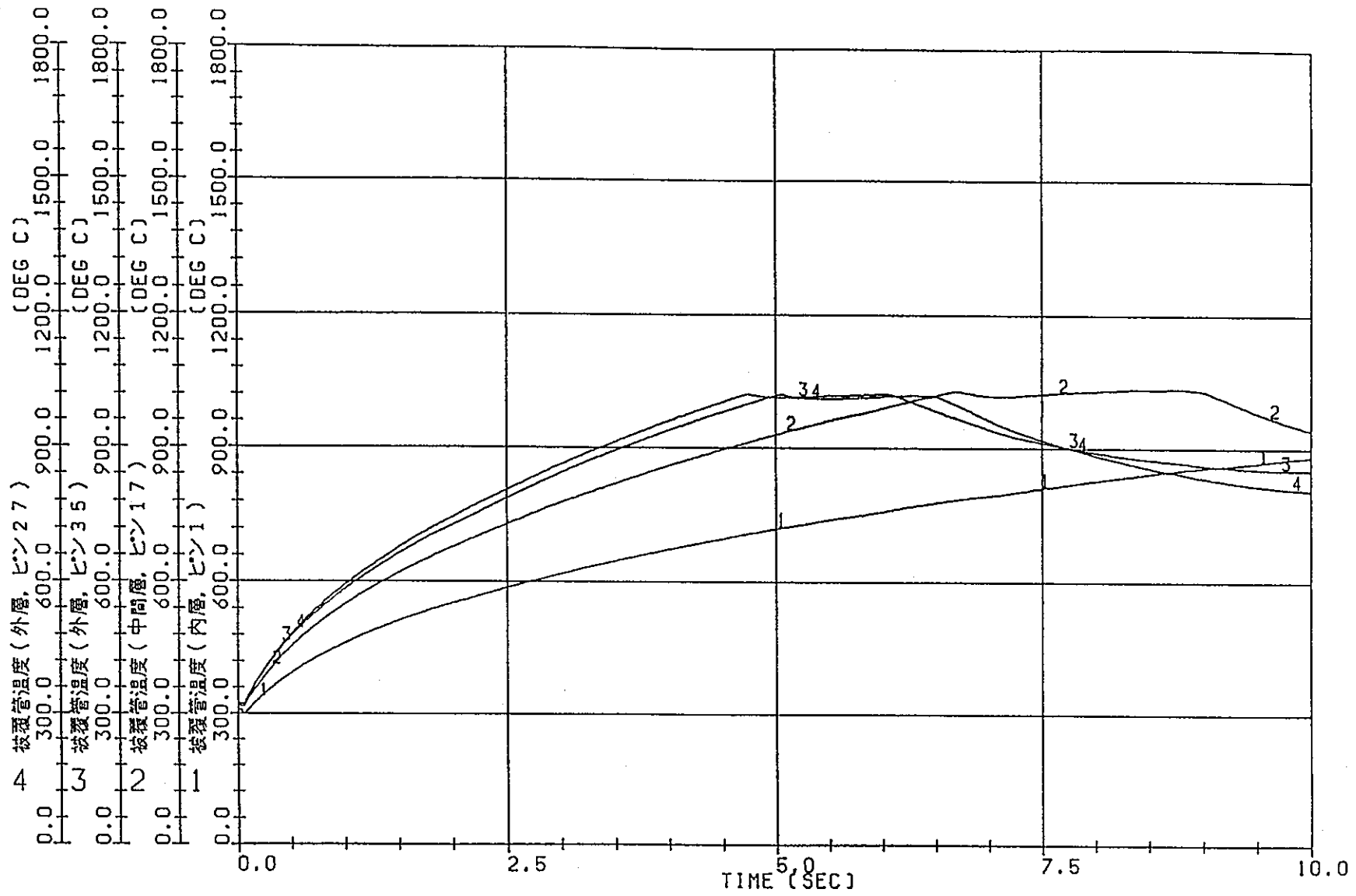


図 6.3-37 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

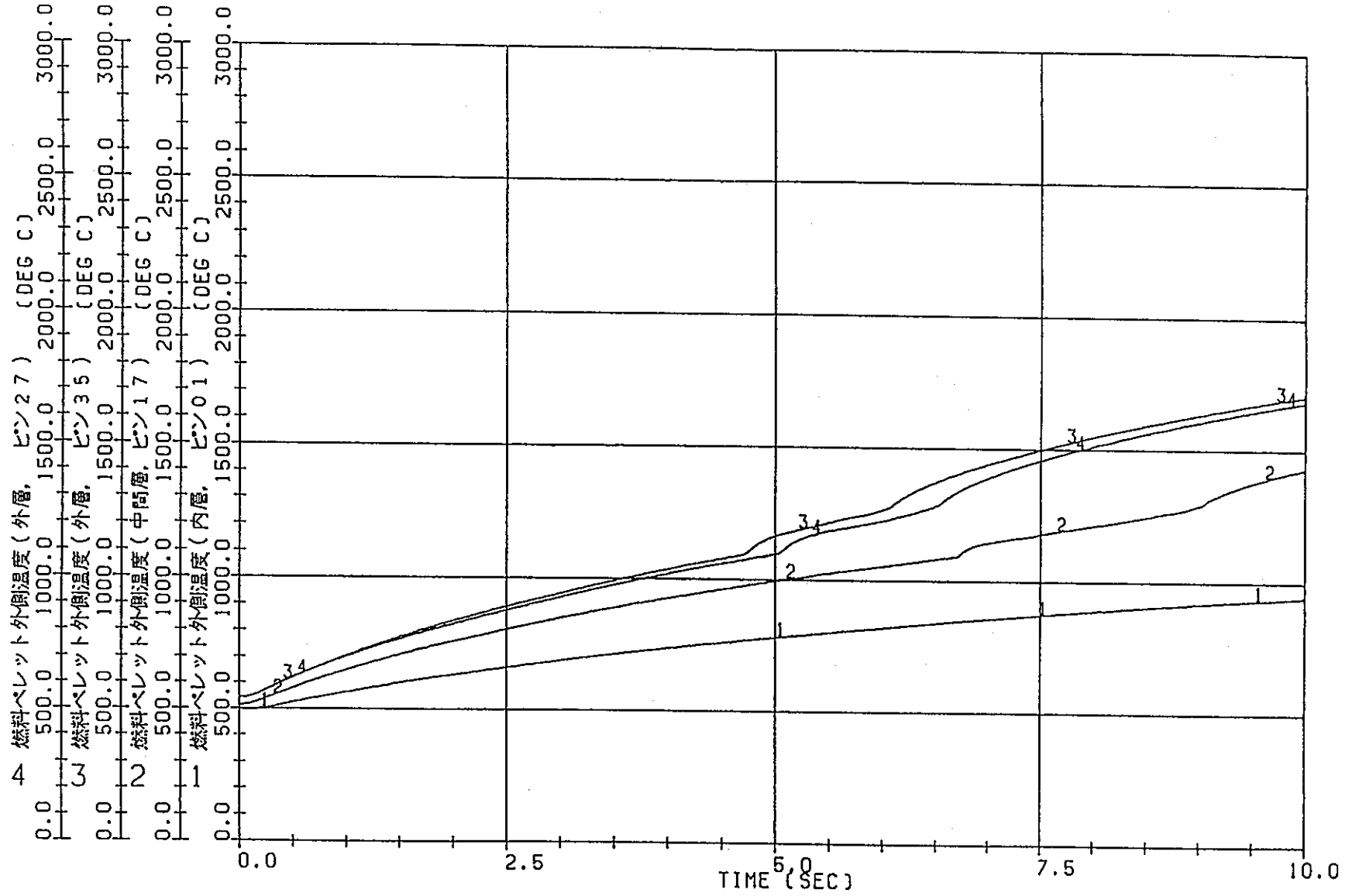


図 6.3-38 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

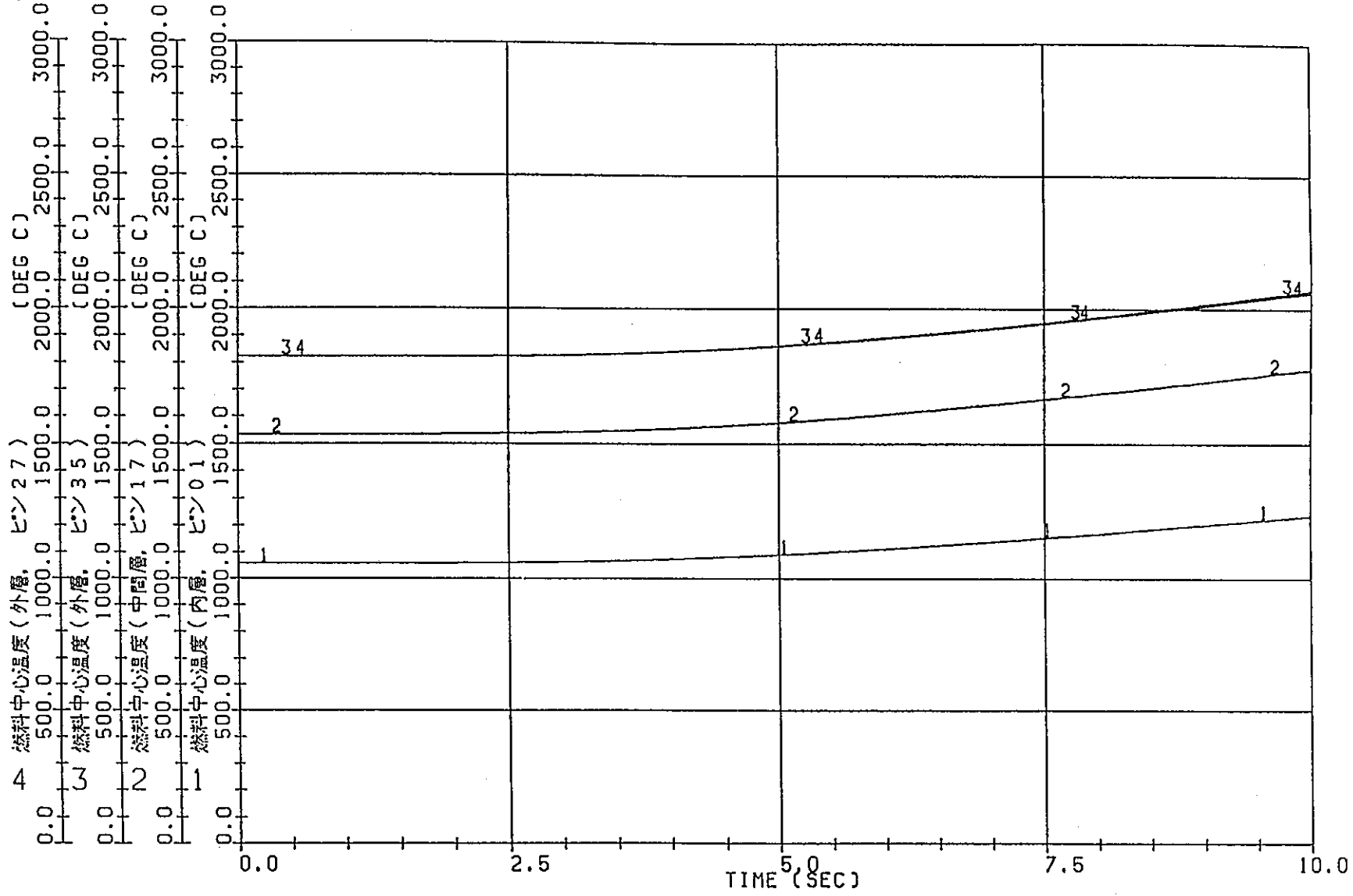


図 6.3-39 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

被覆管表面熱伝達率 (外層, ピン 27) (KCAL/M2-H-C)
被覆管表面熱伝達率 (外層, ピン 35) (KCAL/M2-H-C)
被覆管表面熱伝達率 (中間層, ピン 17) (KCAL/M2-H-C)
被覆管表面熱伝達率 (内層, ピン 1) (KCAL/M2-H-C)

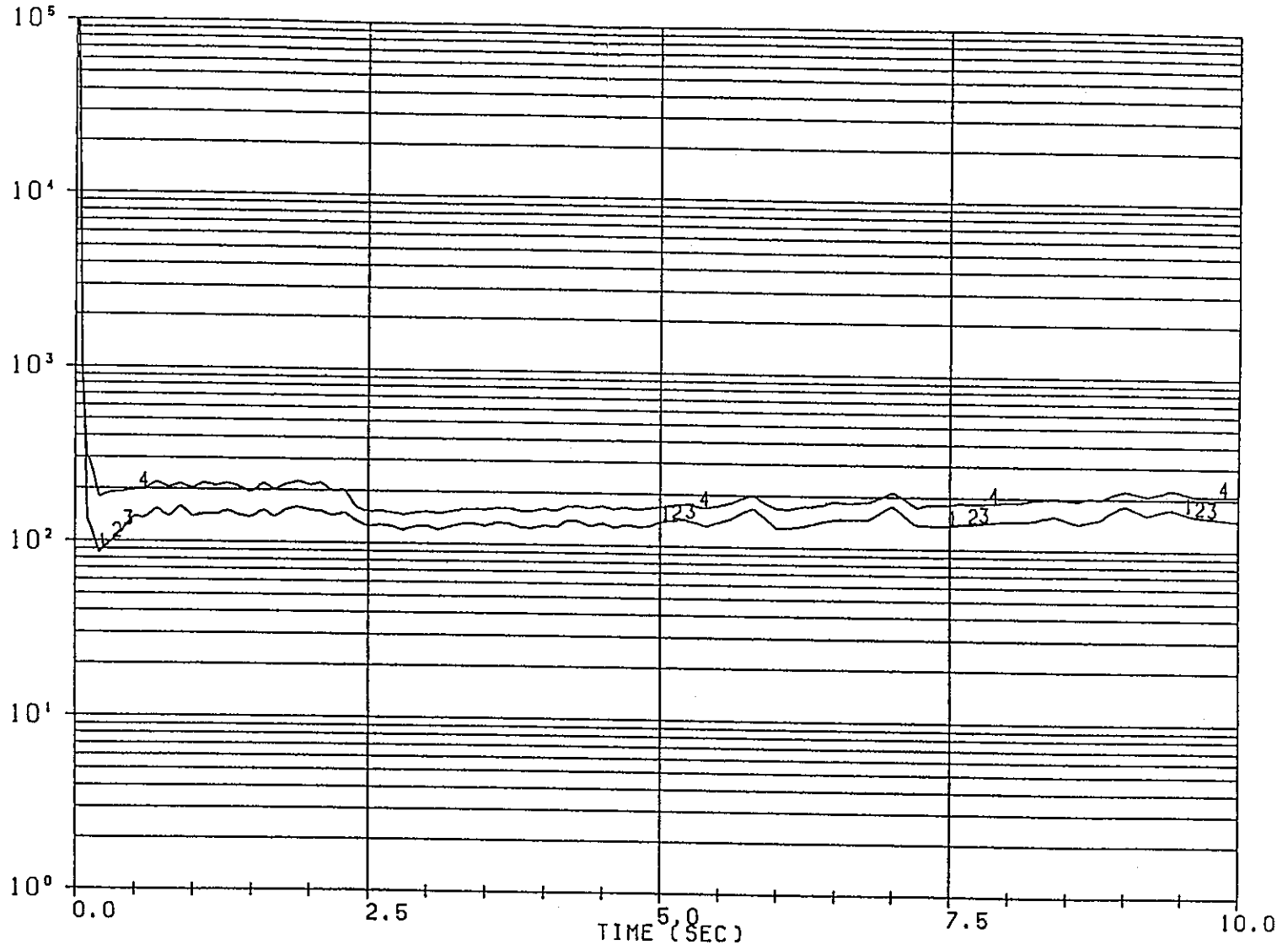


図 6.3-40 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

表面熱流束 (外層, ビン27) (KCAL/M2-H)
表面熱流束 (外層, ビン35) (KCAL/M2-H)
表面熱流束 (中間層, ビン17) (KCAL/M2-H)
表面熱流束 (内層, ビン1) (KCAL/M2-H)

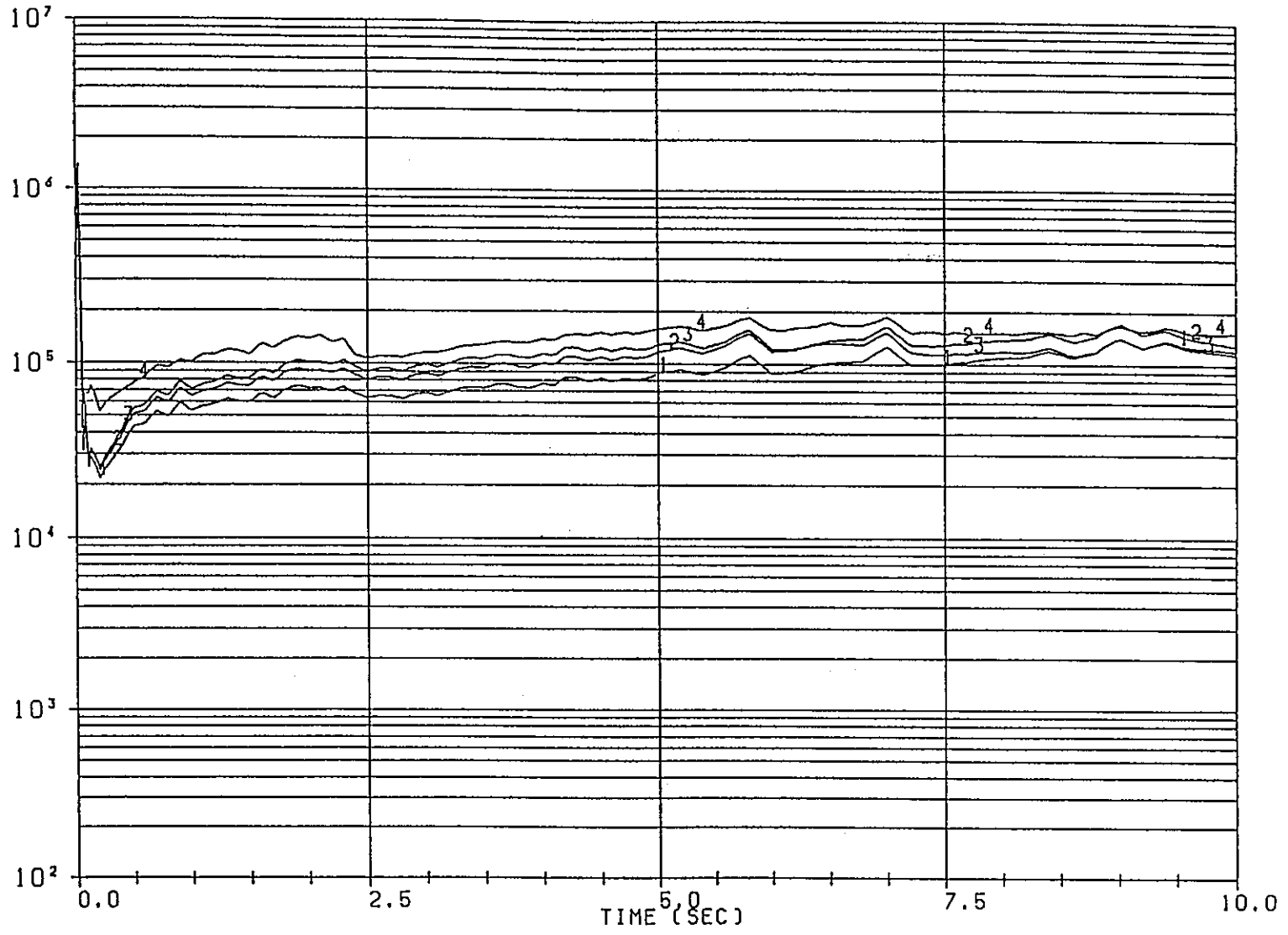


図 6.3-41 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

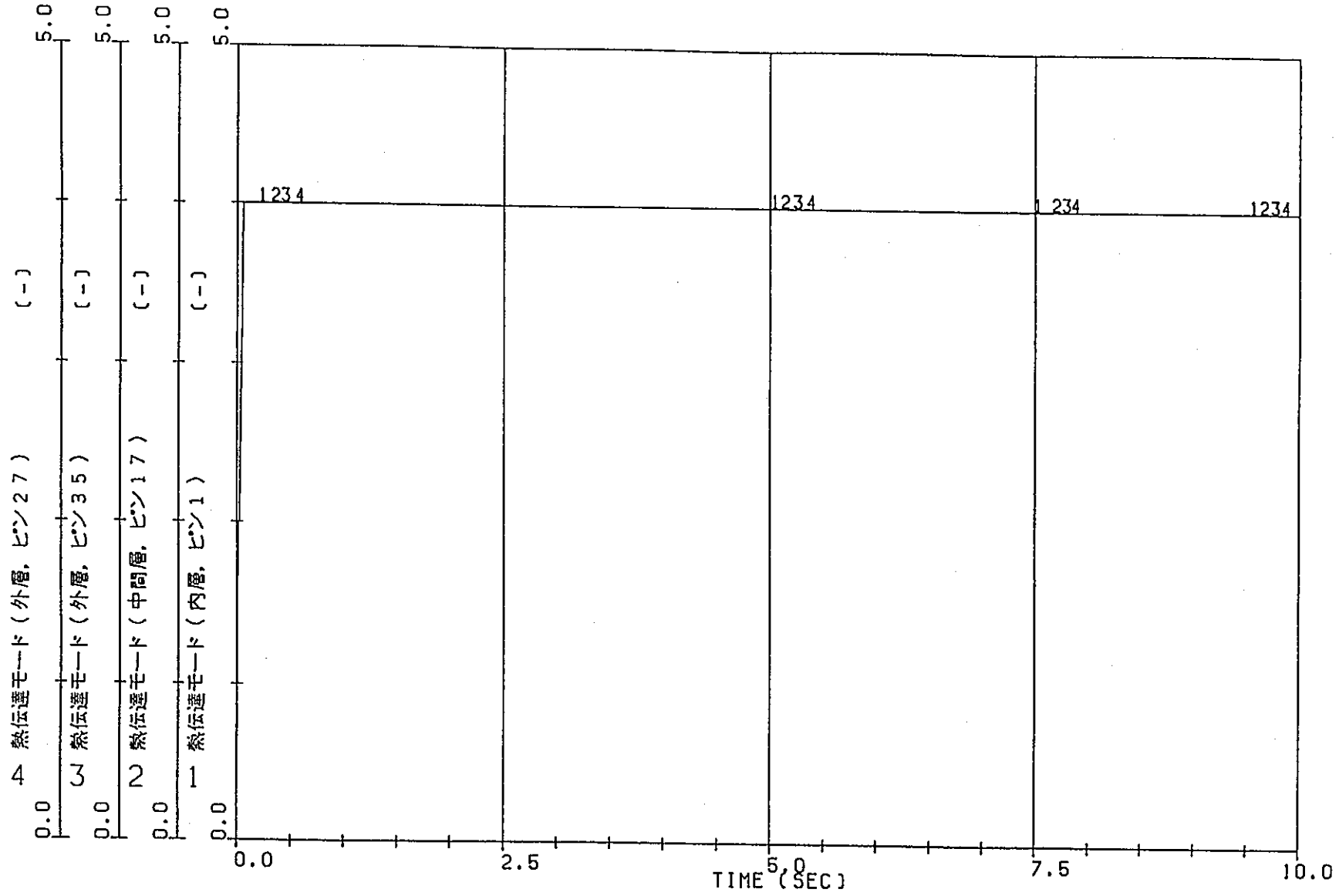


図 6.3-42 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

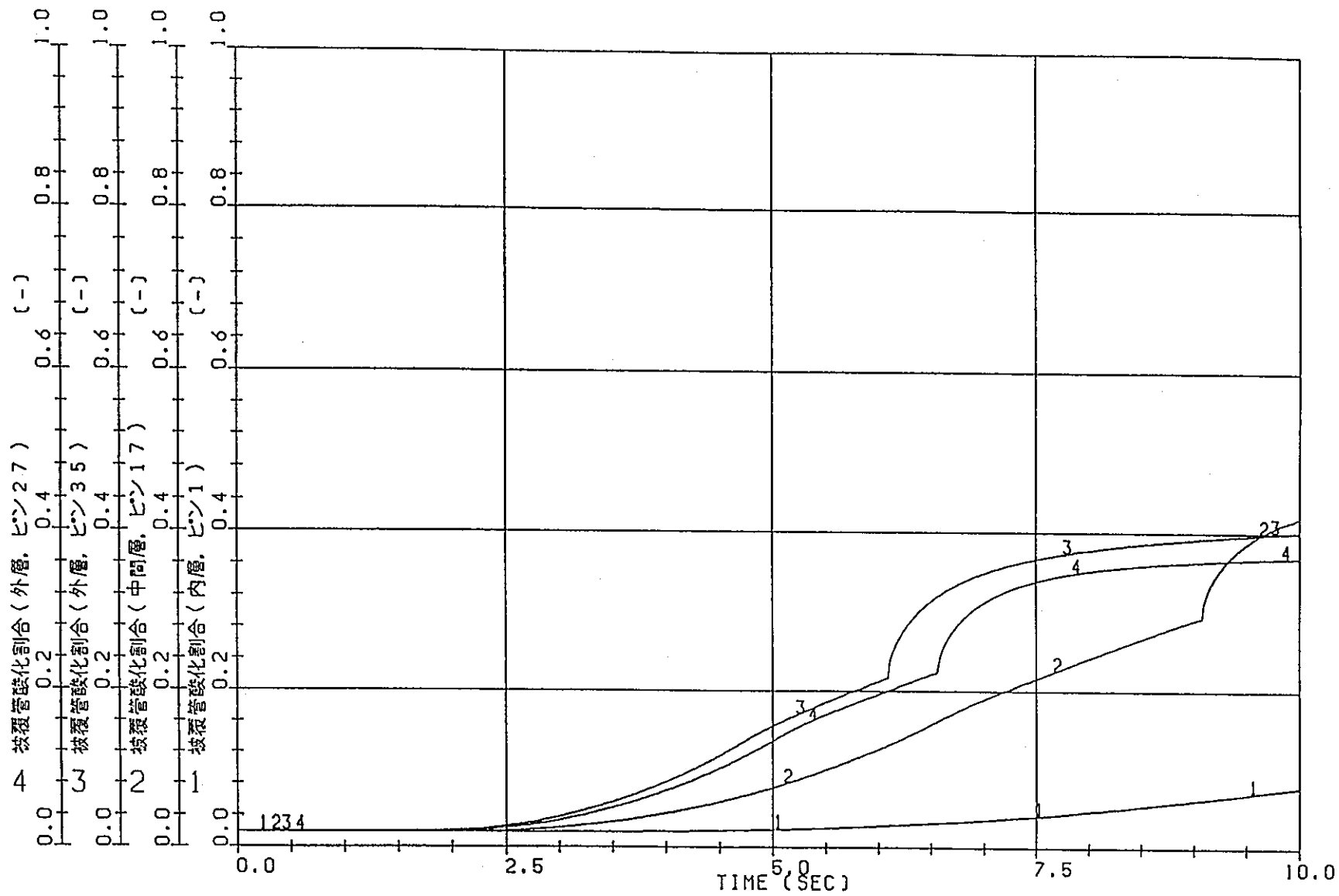


図 6.3-43 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

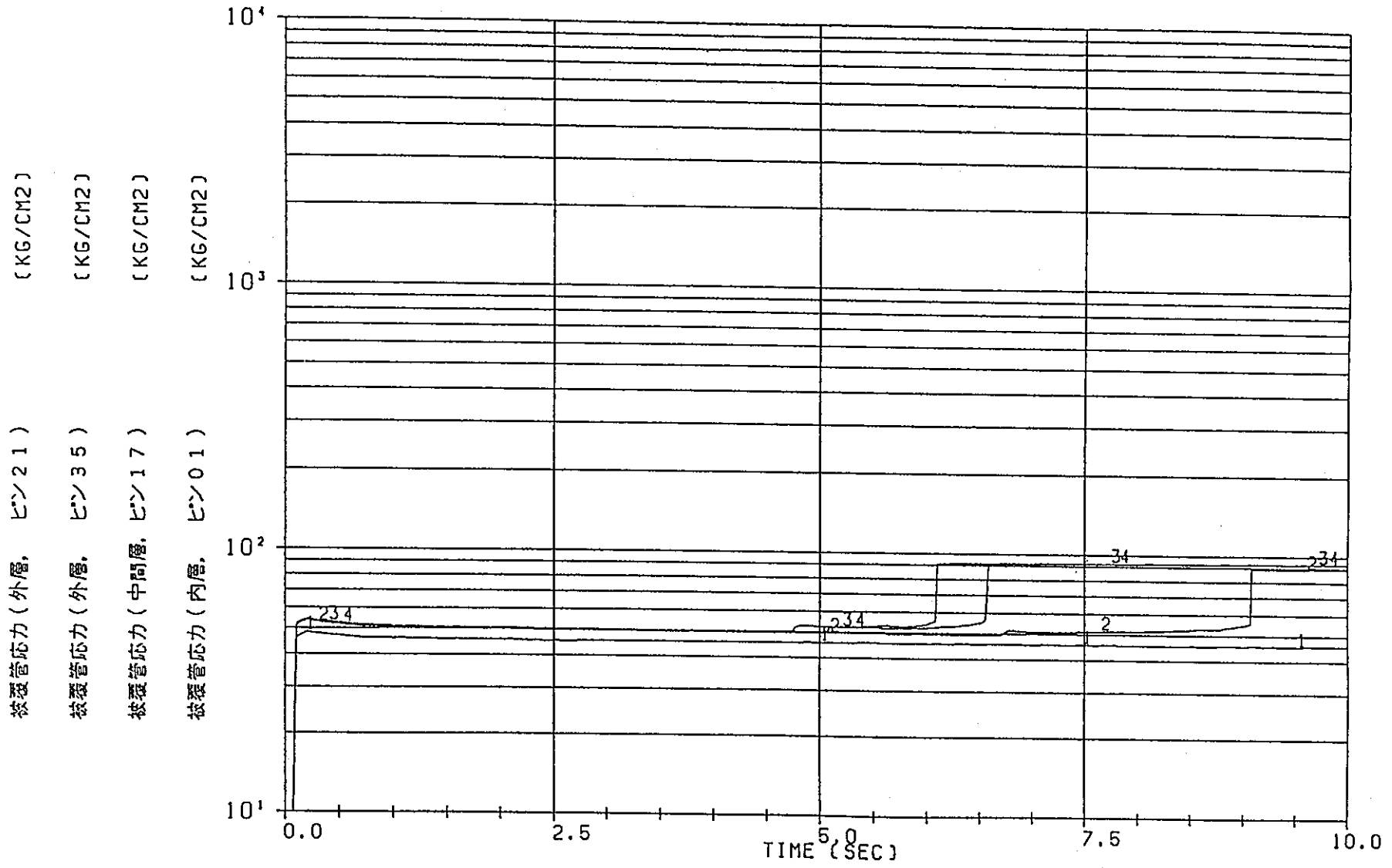


図 6.3-44 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

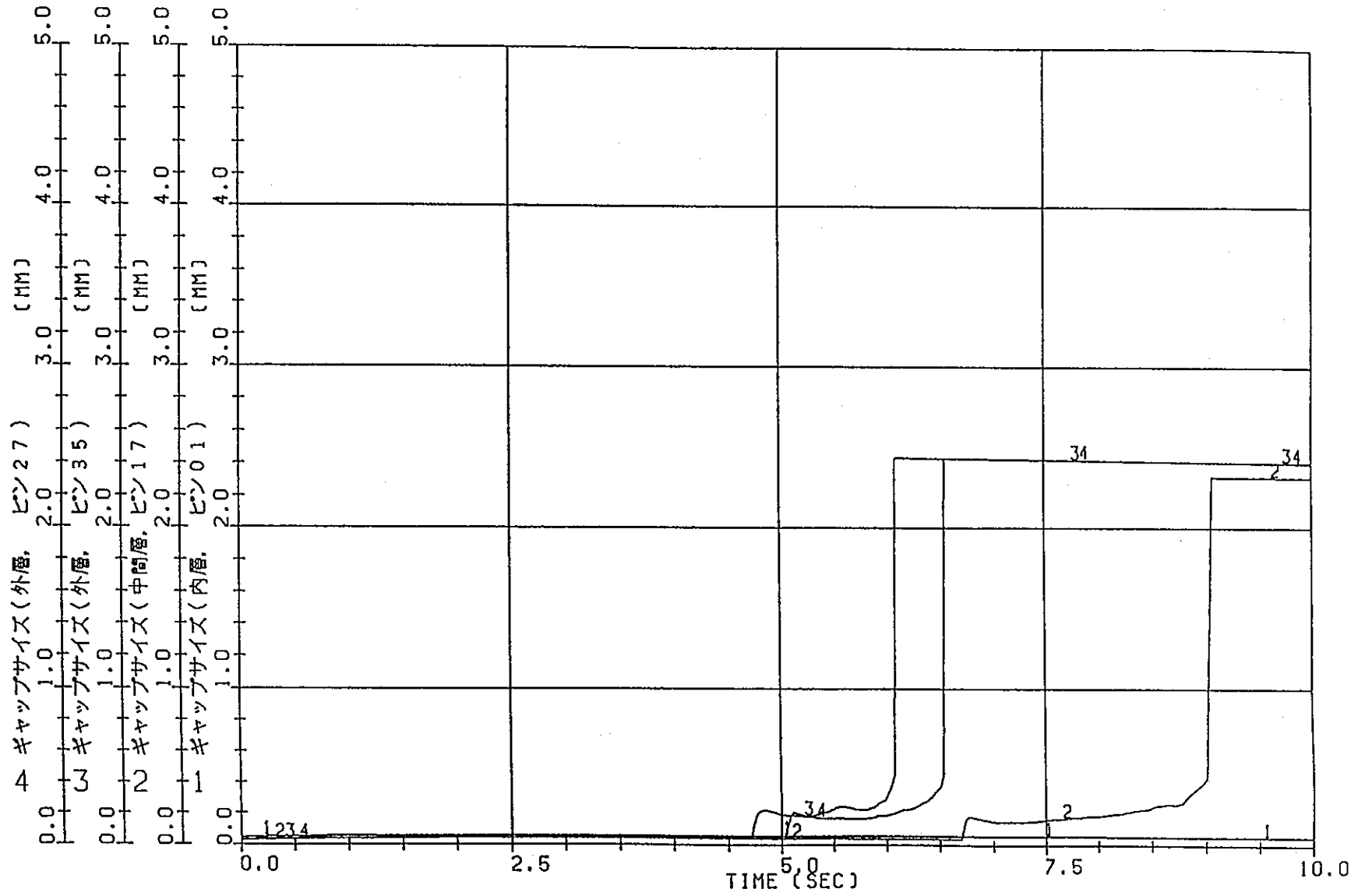


図 6.3-45 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

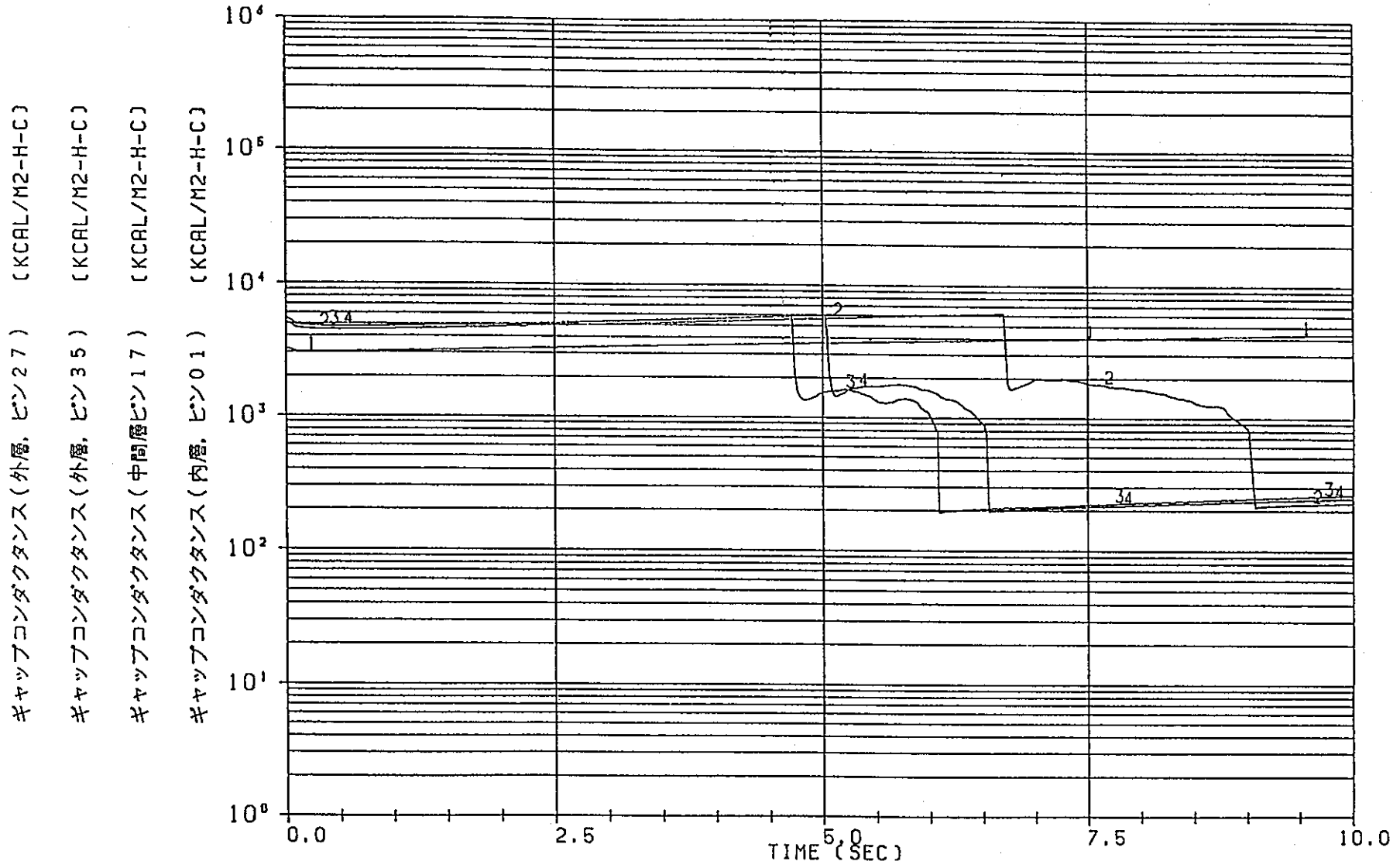


図 6.3-46 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

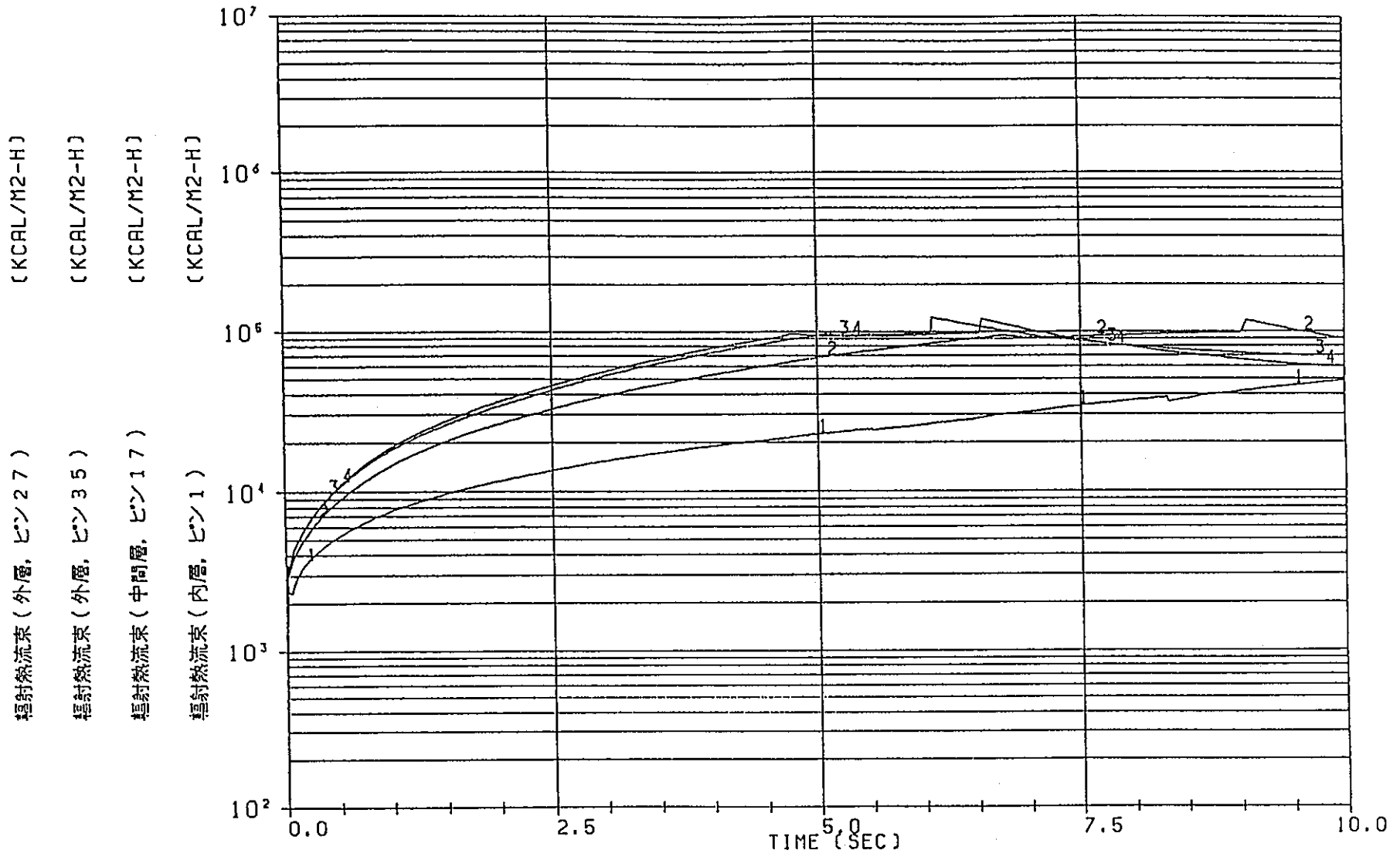


図 6.3-47 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

```

* , (CAL5(24151), SHMIC (1) ) , (CAL5(24251), SHMICI(1) )
* , (CAL5(24351), DTSAT (1) ) , (CAL5(24451), DTSAP (1) )
* , (CAL5(24551), DTSATII(1) ) , (CAL5(24651), DTSAPI(1) )
* , (CAL5(26051), RMODE (1) )

```

```

CVADD 89/01
* , (CAL5(35931), GGGUP (1) )
CVADD-END

```

000026

```

DIMENSION
* HMIC (100) , HMICI (100) , SHMIC (100) ,
* SHMICI(100) , DTSAT (100) , DTSAP (100) ,
* DTSATII(100) , DTSAPI(100) , RMODE (100)

```

```

CVADD 89/01
* , GGGUP (100)
CVADD-END

```

000027
000028

```

C *****
C ***** CALC6 SUZUKI 85.8.22 *****
COMMON /CALC6/ CAL6(4650)
EQUIVALENCE
* (CAL6( 1), IFAIL (1) ) , (CAL6( 101), RCBL (1) )
* (CAL6( 201), FRBL2 (1) ) , (CAL6( 321), FA (1) )
* (CAL6( 3921), TCL4 (1) ) , (CAL6( 4021), SGAE (1) )
* (CAL6( 4081), RDC (1) ) , (CAL6( 4181), IRETRN )
* (CAL6( 4182), HFM1 ) , (CAL6( 4183), HFM2 )
* (CAL6( 4184), ITRAN1 ) , (CAL6( 4185), ITRAN2 )
* (CAL6( 4186), ITRANS ) , (CAL6( 4551), FPOWER )

```

000029

```

DIMENSION
* IFAIL (100) , RCBL (100) , FRBL2 (100) ,
* FA (3600) ,
* TCL4 (100) , SGAE (60) , RDC (100)

```

000030

```

C *****
COMMON /DUMY1/ DUM1(1600)

```

000031

```

EQUIVALENCE
1 (DUM1( 1), A(1) ) , (DUM1( 16), B(1) ) , (DUM1( 31), C(1) )
2 (DUM1( 46), G(1) ) , (DUM1( 61), S(1) ) , (DUM1( 76), GI )

```

000032

```

DIMENSION
1 A (15) , B (15) , C (15) ,
2 G (15) , S (15)

```

000033
000034
000035
000036

```

C
IFSTAT = 0
IIF = JIF
IFR = JFR
KKF = JKF

```

```

C
WRITE(10,9111) IIF,IFR,KKF
C9111 FORMAT(1H0,5X,'IIF=',15,5X,'IFR=',15,5X,'KKF=',15)

```

000037
000038
000039
000040
000041
000042
000043
000044
000045
000046

```

IFCH = IFUEL / ICHGF
IFRC = IFR + (IIF-1)/IFCH * IRFL
IFL0D = 0
IF ( ICRIT .GE. 0 ) GO TO 5
PSP = PSE
IF ( PSE .LE. 0.0 ) PSP = PSEN(KKF)
ICH = 1 + (KKF-1)/NKKF
PLP = PLE
IF ( PLE .LE. 0.0 ) PLP = PLEN(ICH)
5 CONTINUE

```

C

C *
C *
C *

INITIAL SET OF THE CONVERGENCE ERROR

000047
000048
000049
000050
000051
000052
000053
000054

```

INCL = IHFMDL(2)
IFIL = IHFMDL(4)
ISUP = IHFMDL(5)
EPSO = EPSO
IF ( EPSO .EQ. 0.0 ) EPSO = 0.01
HMIC(IIF) = 0.0
HMICI(IIF) = 0.0
GGO(KKF) = GGO(KKF)

```

C *
C *
C *

INITIALIZE TEMPERATURES

000055
000056
000057

```

DO 10 J=1, NT
TFC(IIF,J) = TWW(KKF)
10 CONTINUE

```

C *
C *
C *

ITERATION LOOP

000058
000059
000060
000061

```

IIII=0
1000 CONTINUE
IIII=IIII+1
IF(IIII.GT.199) GO TO 8000

```

C *
C *
C *

SET PREVIOUS TEMPERATURES

000062
000063
000064

```

DO 20 I=1, NT
TFP(IIF,I)=TFC(IIF,I)
20 CONTINUE

```

000065

CALL HTPROP

000066
000067
000068
000069
000070
000071
000072

```

GAP(IIF)=(RCBL(IIF)-RADF(IFR,NF))*1000.0
IHGG = IFHG(IFRC) / 10
IHG = IFHG(IFRC) - IHGG * 10
IHG = IHG - 1
IF ( IHGG .EQ. 0 ) HG(IIF)=HTFUN(GAP(IIF), THG(1,1,IHG), 2, 40 )
IF ( IHGG .EQ. 1 ) HG(IIF)=HTFUN(TIME , THG(1,1,IHG), 2, 40 )
IF ( IHGG .EQ. 2 .OR. IHGG .EQ. 3 )
1 HG(IIF)=EXTG (IHG, RAD(NF, IFR), GAP(IIF),
2 OR(IIF), ORKF(IIF) , BNUP )

```

000073
000074

```

IF ( IHGG .EQ. 4 ) CALL EXTGTR
IF ( IHGG .GE. 5 ) CALL EXTNG ( IFR, TFC(IIF,NF), TFC(IIF,NFP1),
HG(IIF) )

```

000075
000076
000077
000078
000079

```

FMT( IIF) = TFC(IIF, NT) - TFC(IIF, NTP1)
IHFFO = IFHFO(IFR) / 10
IHFO = IFHFO(IFR) - IHFFO * 10
IF ( IHFFO .EQ. 0 ) HF(IIF)=HTFUN(FMY (IIF), THF(1,1,IHFO), 2, 40)
IF ( IHFFO .EQ. 1 ) HF(IIF)=HTFUN(TIME , THF(1,1,IHFO), 2, 40)

```

CVREP 89/01
C
000080
CVREP-END

```

IF ( IHFFO .GE. 2 )
IF ( IHFFO .GE. 2 .AND. IHFFO .LE. 4 )

```

```

1 CALL HTRANS( 0 , ICRIT , IFIL
2 , ISUP , IREWET , PPP(KKF) , GGO(KKF)
3 , XXX(KKF) , RRR(KKF) , THW(KKF) , SHF(IIF)
4 , TFC(IIF,NT), HF(IIF) , CHF(IIF) , AMCHF(IIF)

```

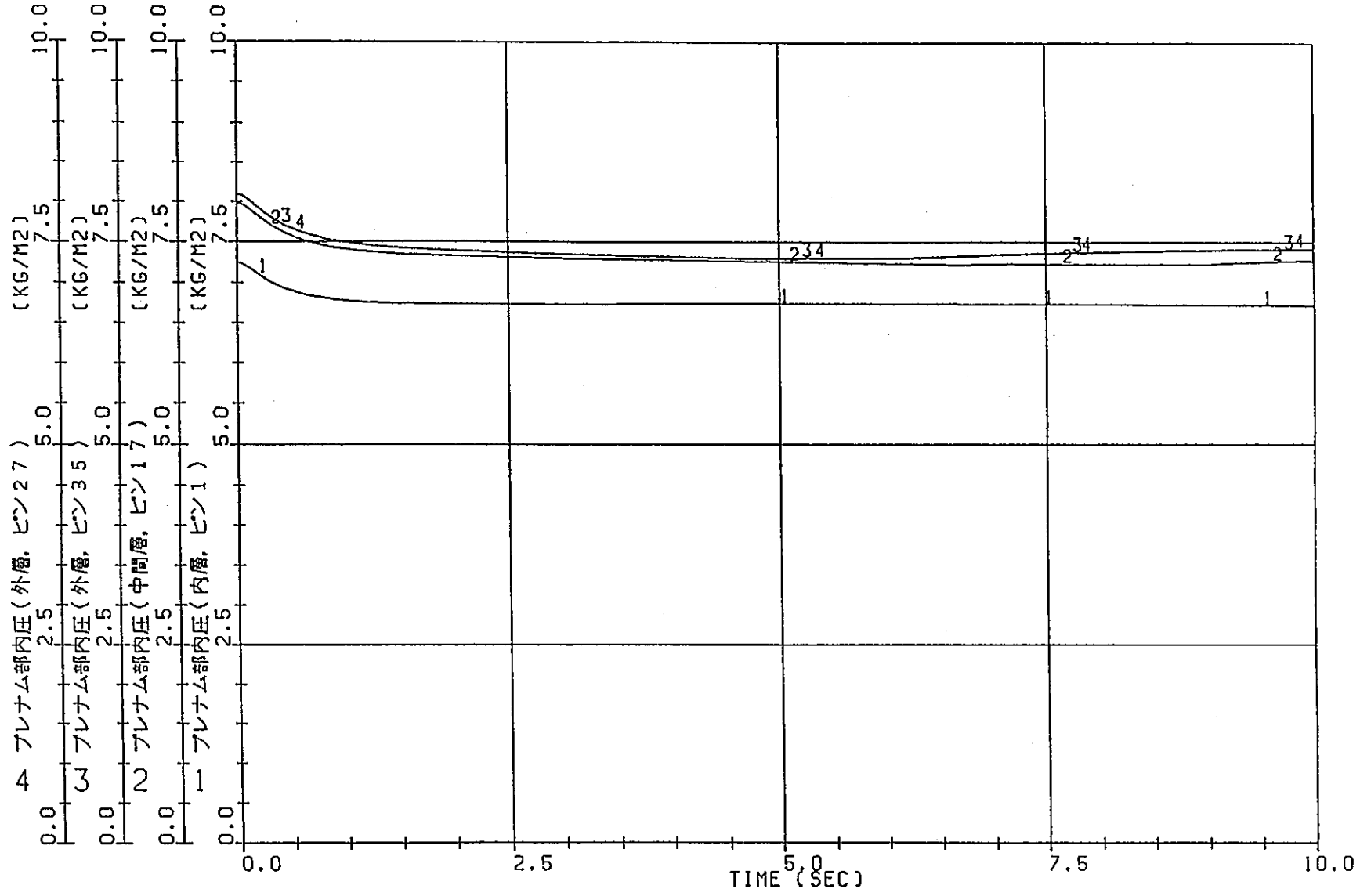


図 6.3-48 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)

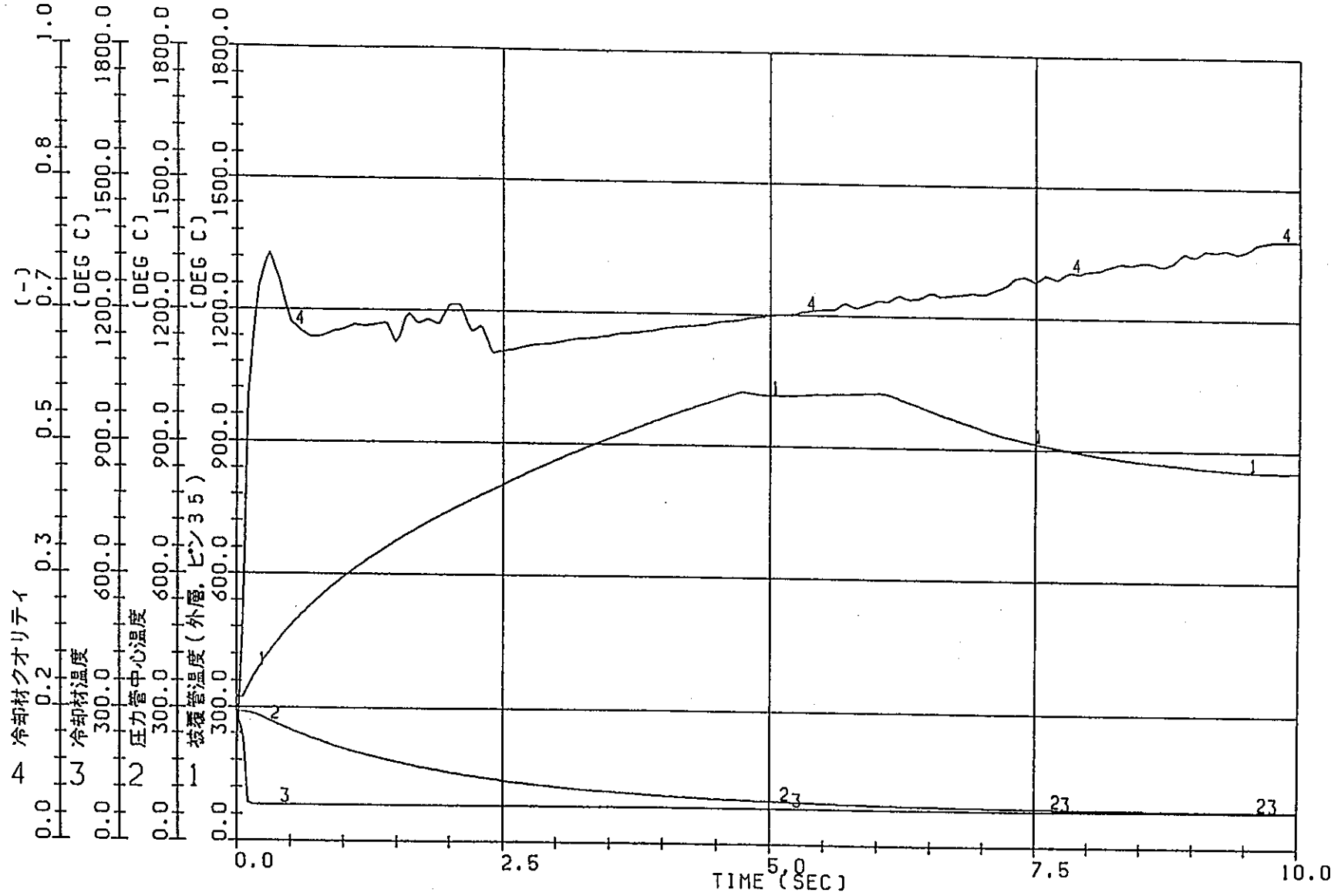
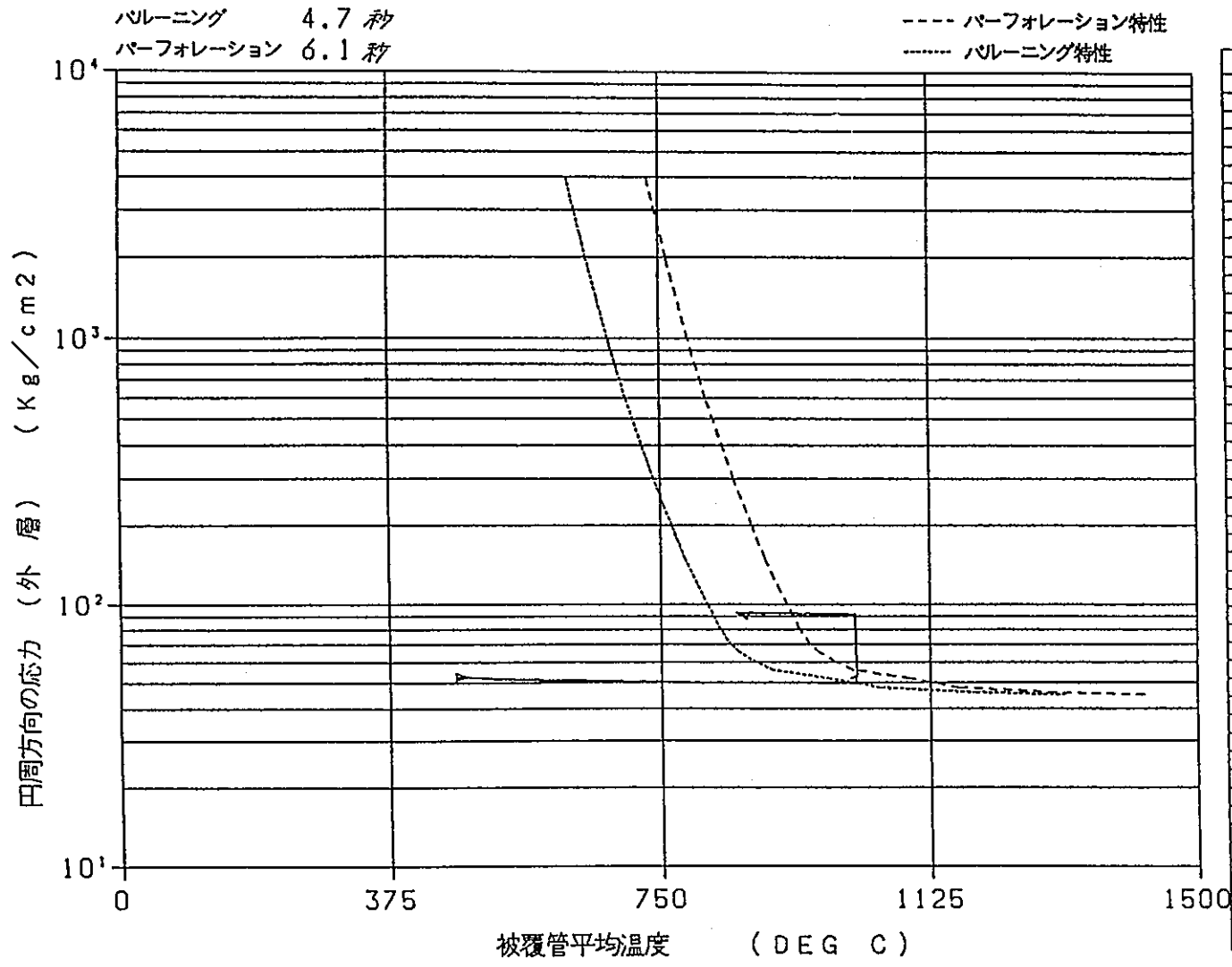


図 6.3-49 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP)



時間	応力	被覆管温度
1.03	5.132E+01	5.980E+02
1.21	5.112E+01	6.299E+02
1.38	5.029E+01	6.556E+02
1.57	5.089E+01	6.848E+02
1.74	5.074E+01	7.097E+02
1.90	5.059E+01	7.305E+02
2.09	5.076E+01	7.545E+02
2.26	5.044E+01	7.730E+02
2.43	5.018E+01	7.974E+02
2.61	5.015E+01	8.174E+02
2.78	5.013E+01	8.375E+02
2.97	5.009E+01	8.559E+02
3.14	5.009E+01	8.739E+02
3.30	5.004E+01	8.935E+02
3.48	4.999E+01	9.103E+02
3.66	4.998E+01	9.271E+02
3.84	5.000E+01	9.436E+02
4.04	4.997E+01	9.620E+02
4.25	4.991E+01	9.775E+02
4.41	4.988E+01	9.937E+02
4.59	4.987E+01	1.009E+03
4.71	4.982E+01	1.019E+03
4.89	5.258E+01	1.016E+03
5.06	5.212E+01	1.013E+03
5.23	5.200E+01	1.014E+03
5.45	5.247E+01	1.017E+03
5.60	5.294E+01	1.018E+03
5.76	5.262E+01	1.019E+03
5.95	5.335E+01	1.022E+03
6.11	9.172E+01	1.020E+03
6.28	9.183E+01	1.005E+03
6.46	9.191E+01	9.887E+02
6.63	9.213E+01	9.733E+02
6.81	9.219E+01	9.590E+02
6.99	9.209E+01	9.447E+02
7.17	9.245E+01	9.322E+02
7.47	9.255E+01	9.149E+02
7.76	9.260E+01	9.027E+02
8.08	9.264E+01	8.890E+02
8.33	9.276E+01	8.801E+02
8.48	9.280E+01	8.759E+02
8.65	9.269E+01	8.716E+02
8.91	9.293E+01	8.666E+02
9.15	9.299E+01	8.624E+02
9.26	9.299E+01	8.577E+02
9.40	9.281E+01	8.551E+02
9.59	9.309E+01	8.531E+02
9.84	9.317E+01	8.520E+02

図 6.3-50 被覆管バルーニングの判定 (外層燃料、ピン35)

7897

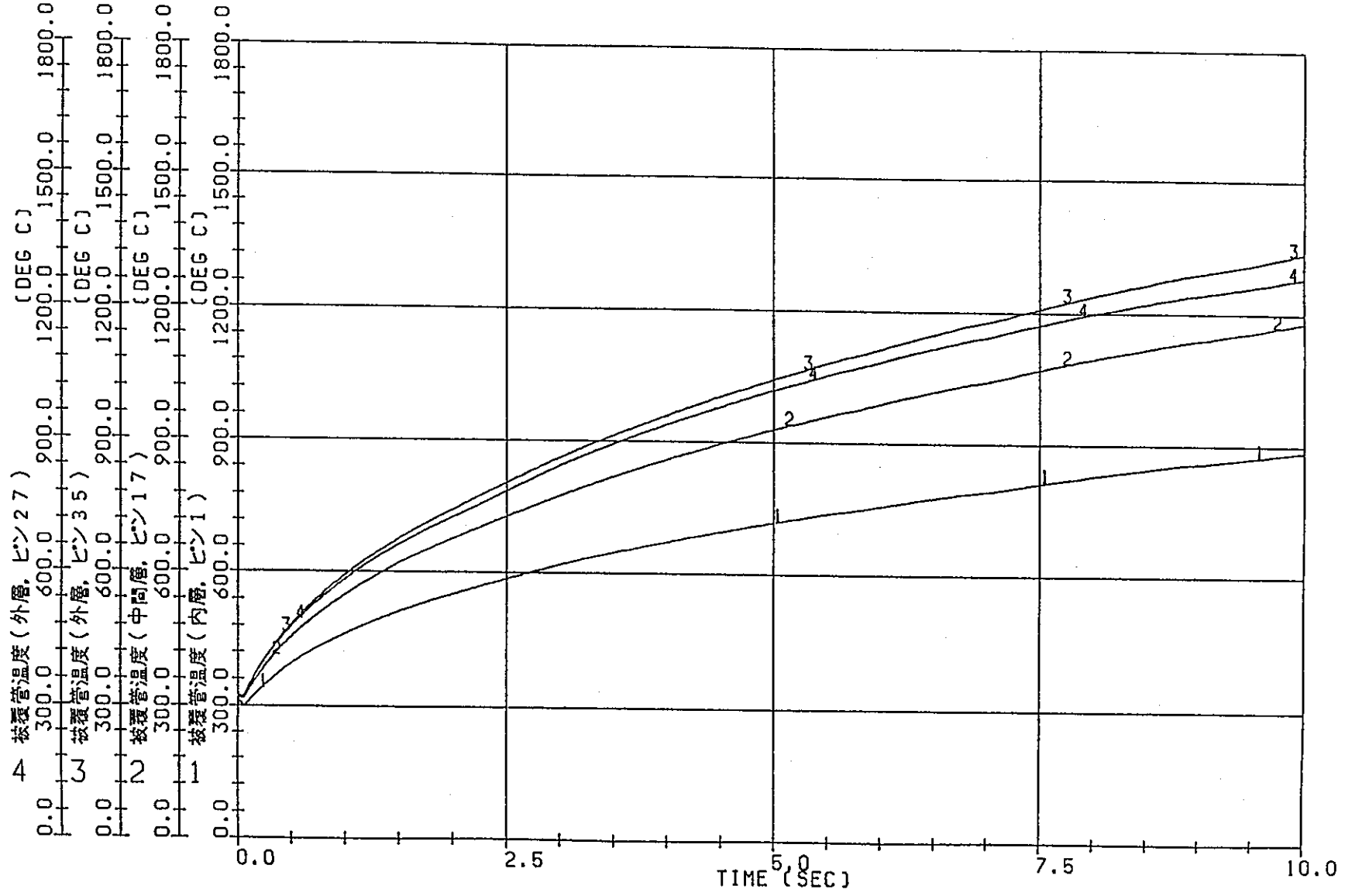


図 6.3-51 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) バルーン非考慮

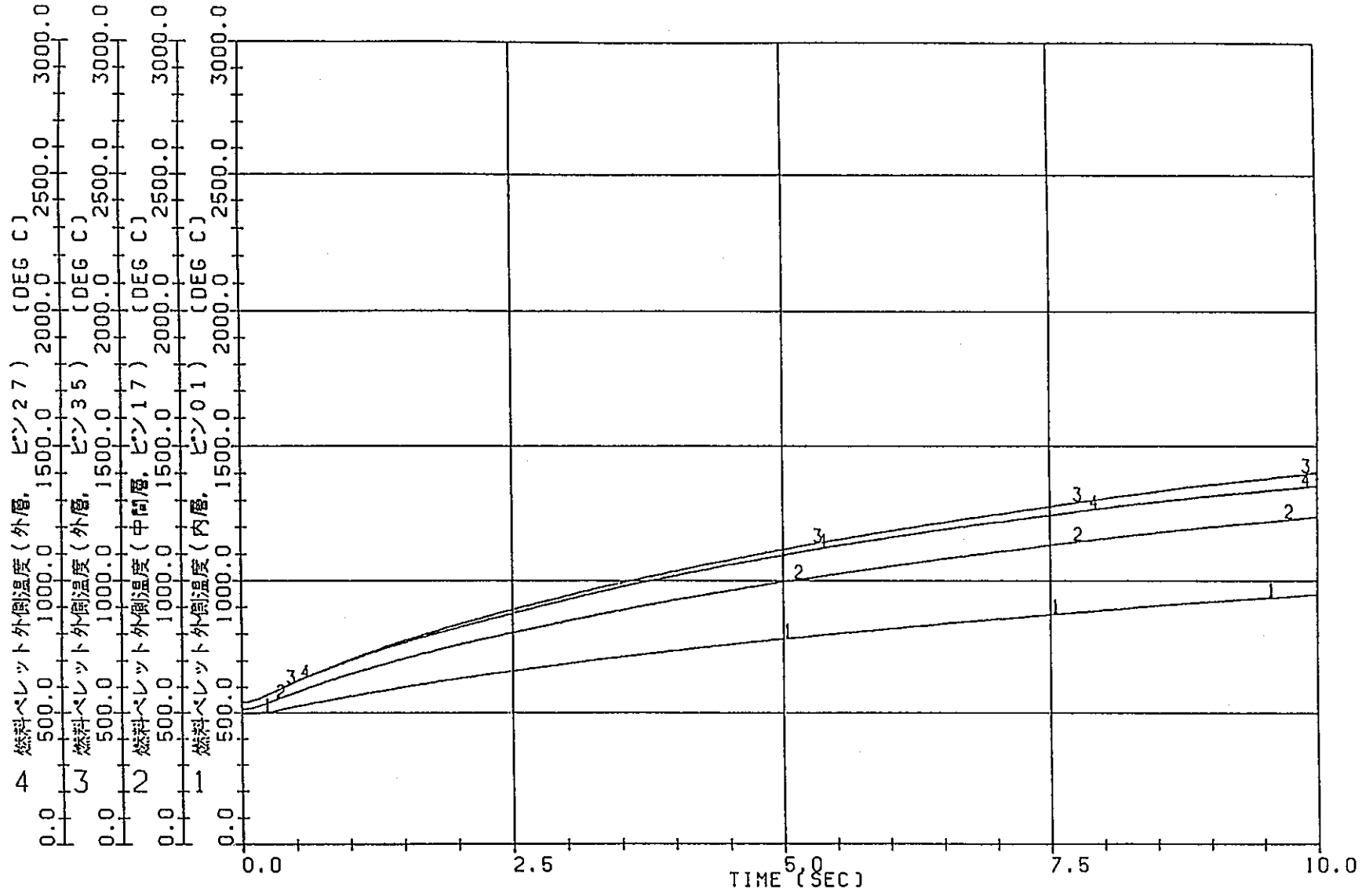


図 6.3-52 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) バルーン非考慮

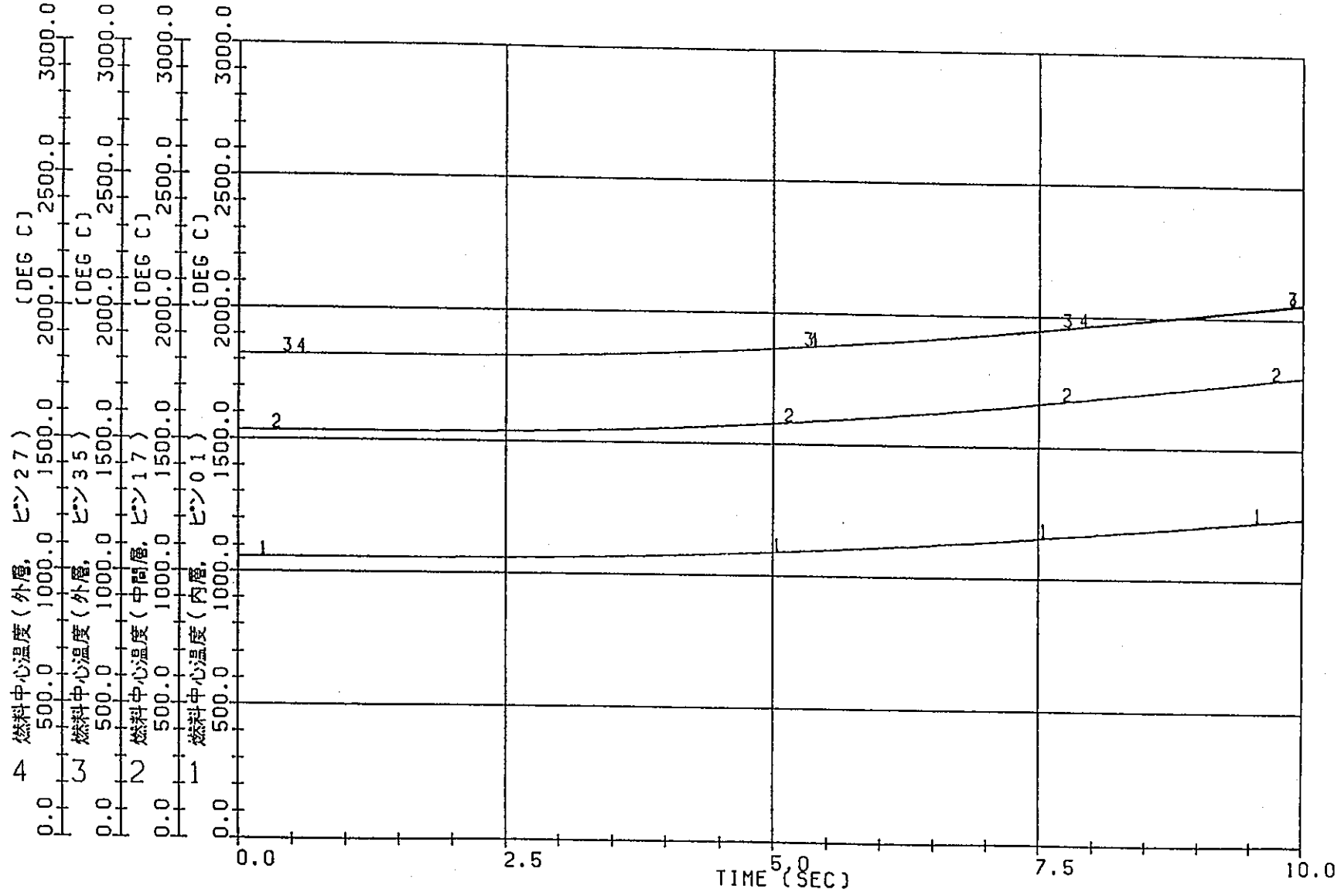


図 6.3-53 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) パルーニング非考慮

被覆管表面熱伝達率 (外層, ビン 2 7) (KCAL/M2-H-C)
 被覆管表面熱伝達率 (外層, ビン 3 5) (KCAL/M2-H-C)
 被覆管表面熱伝達率 (中間層, ビン 1 7) (KCAL/M2-H-C)
 被覆管表面熱伝達率 (内層, ビン 1) (KCAL/M2-H-C)

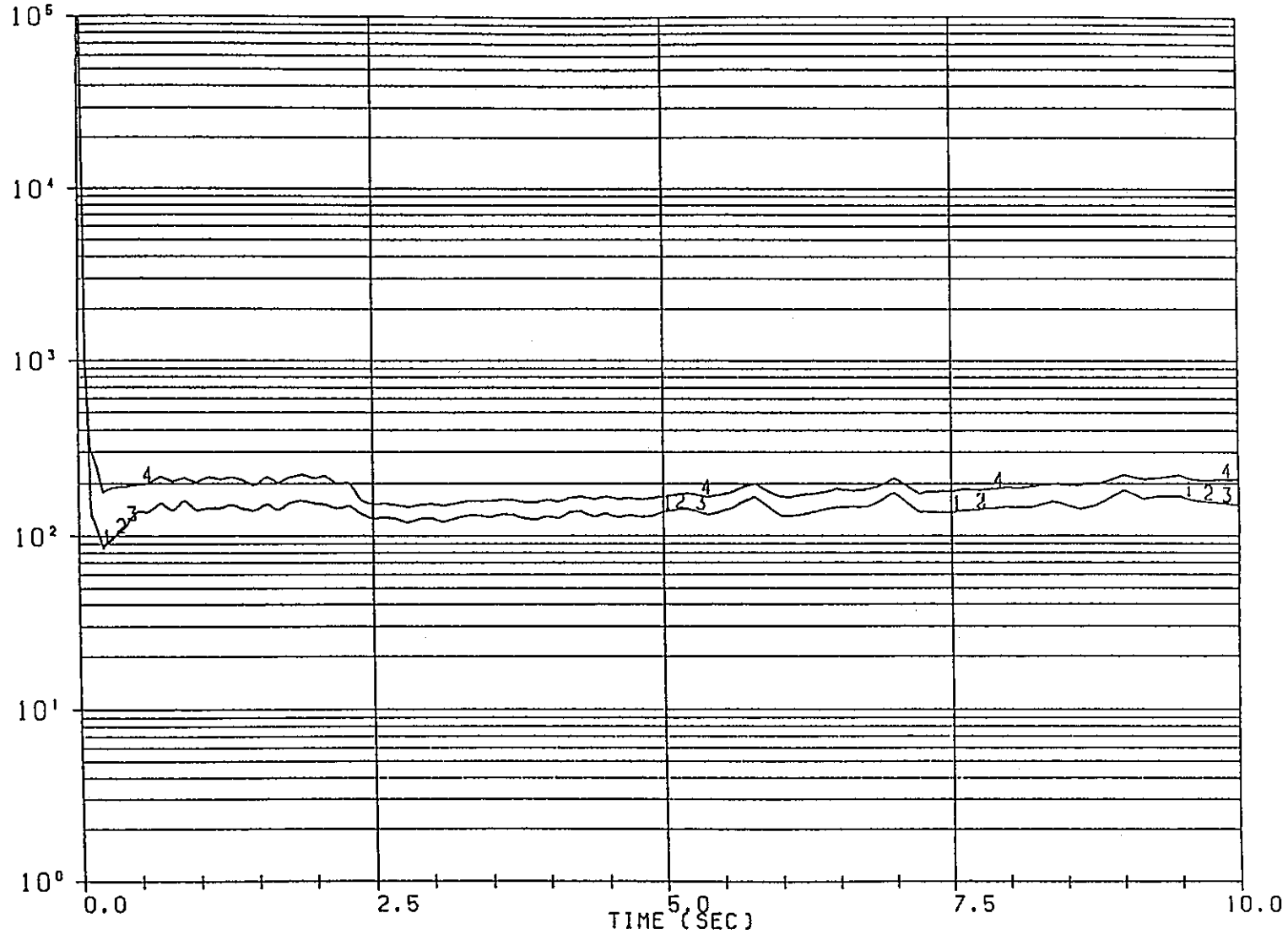


図 6.3-54 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) パルーニング非考慮

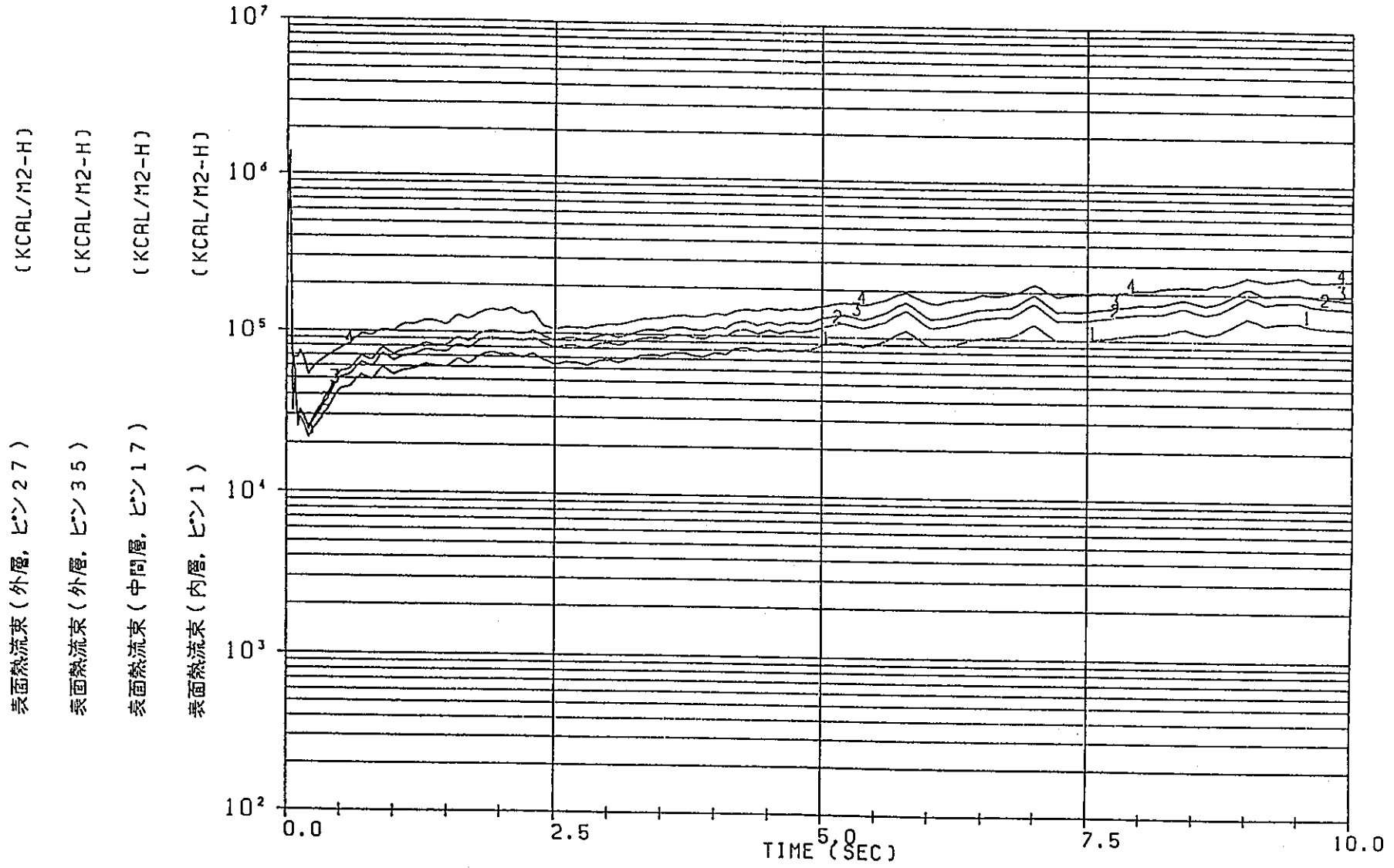


図 6.3-55 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) パルーニング非考慮

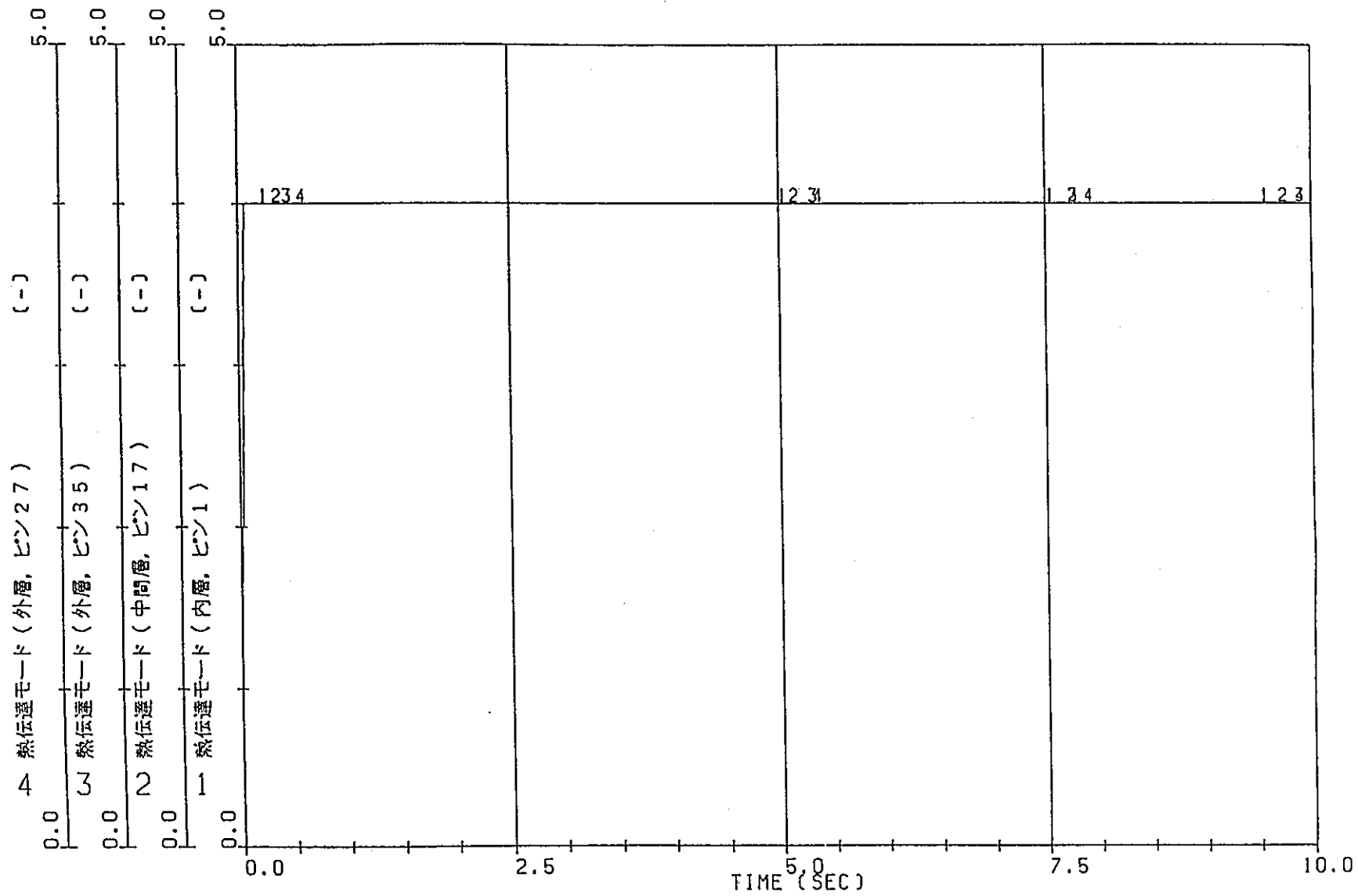


図 6.3-56 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) パルーニング非考慮

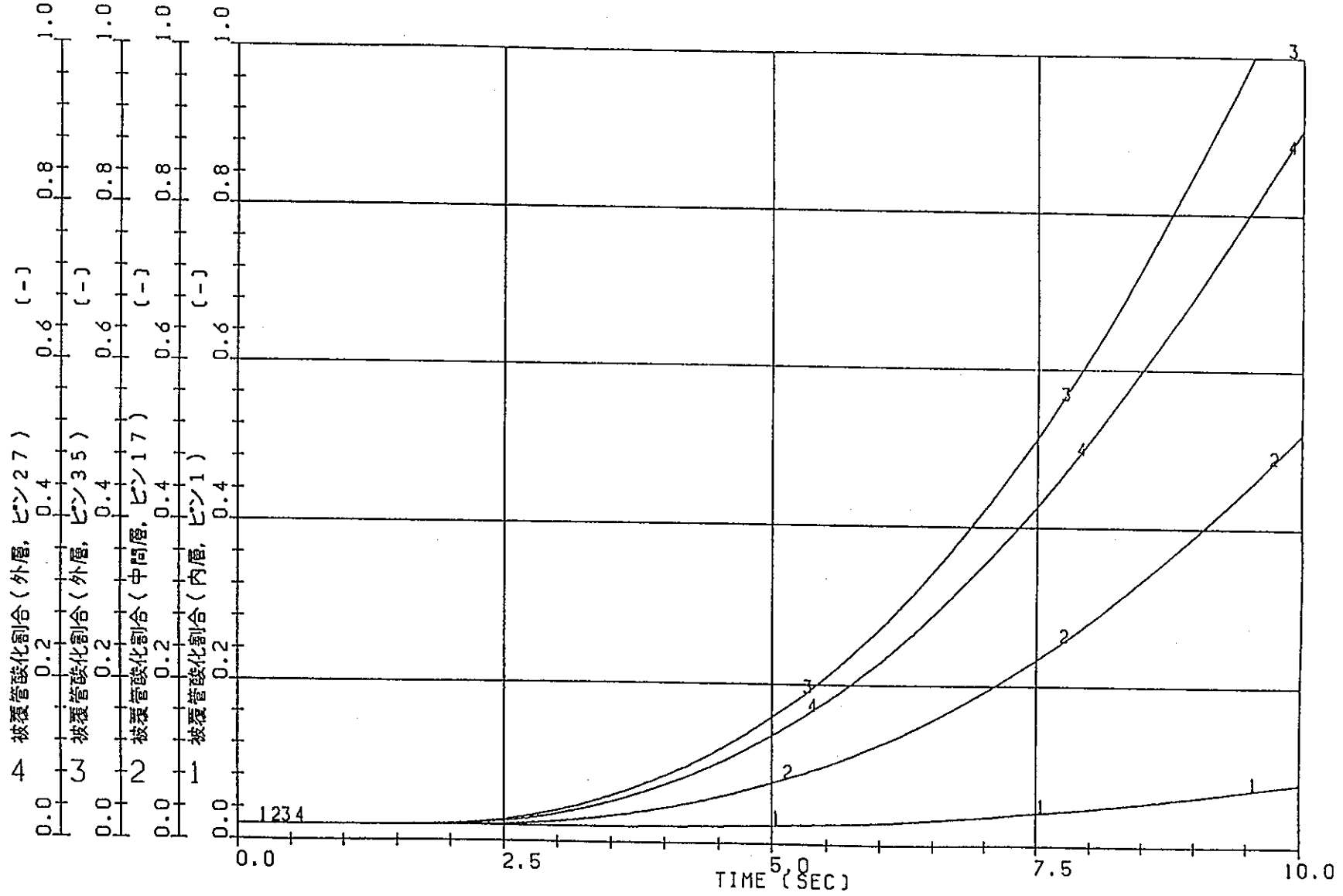


図 6.3-57 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) パルーニング非考慮

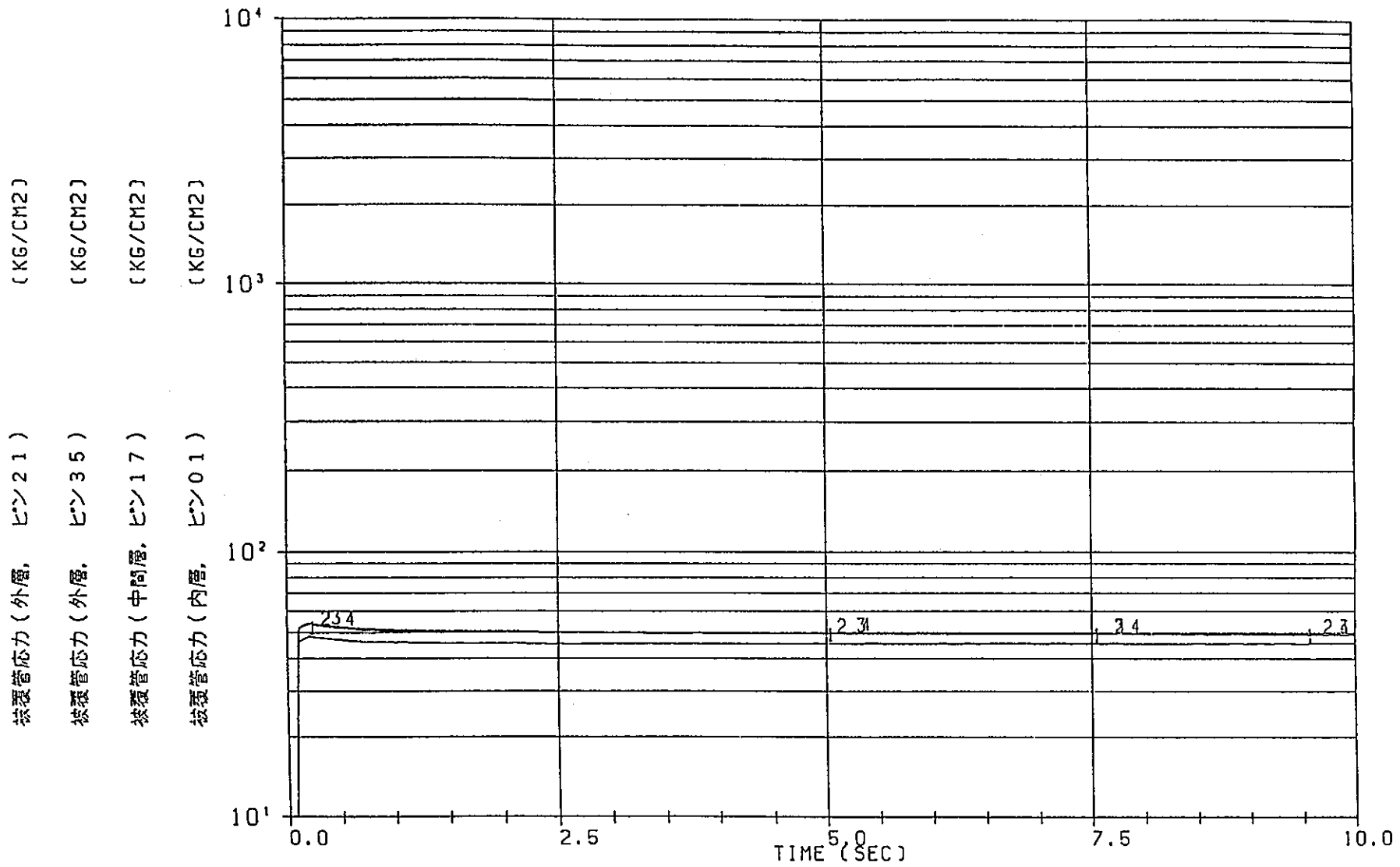


図 6.3-58 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) パルーニング非考慮

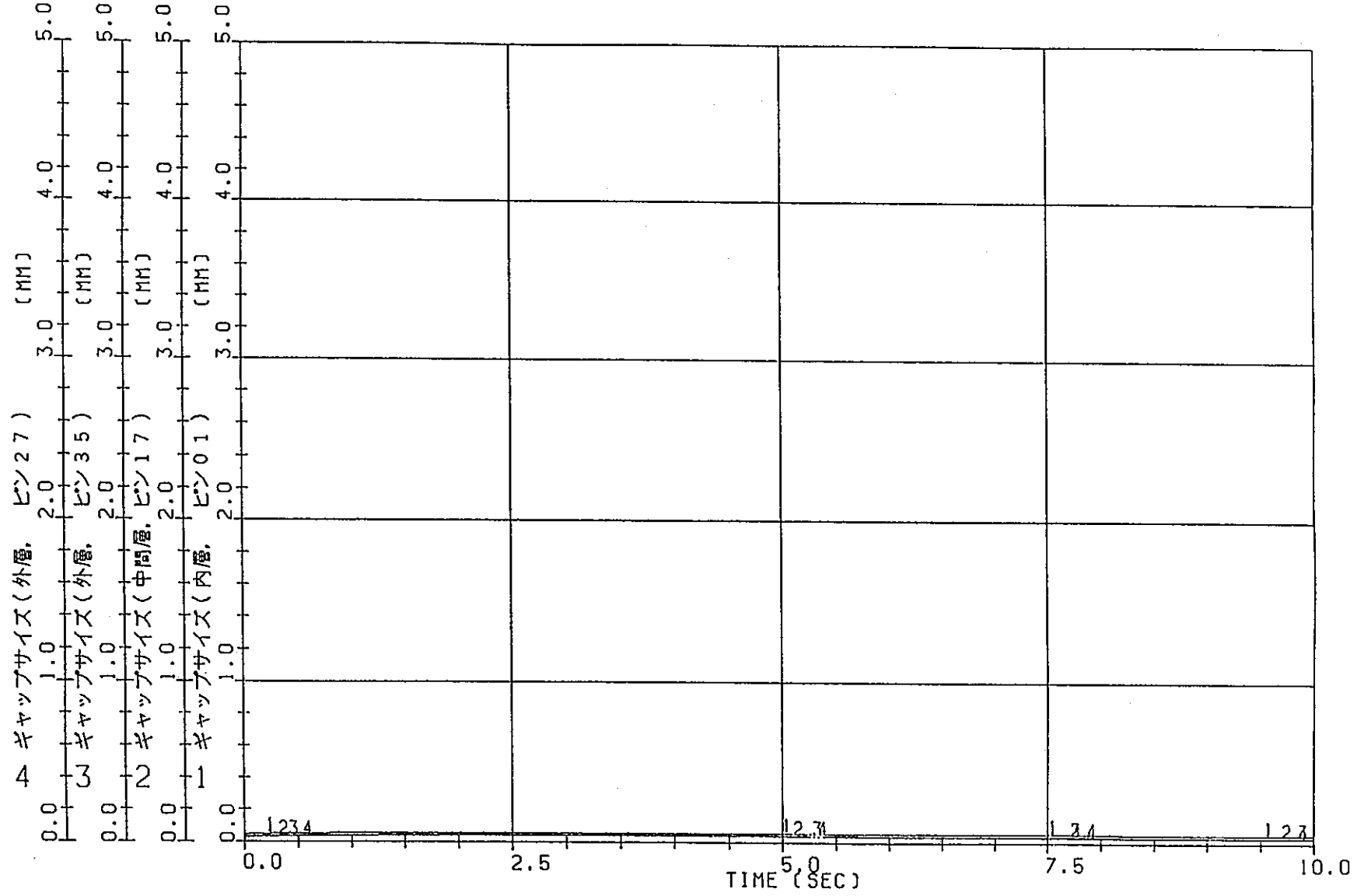


図 6.3-59 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) バルーニング非考慮

キャップコンダクタンス(外層, ビン27) (KCAL/M2-H-C)
キャップコンダクタンス(外層, ビン35) (KCAL/M2-H-C)
キャップコンダクタンス(中間層ビン17) (KCAL/M2-H-C)
キャップコンダクタンス(内層, ビン01) (KCAL/M2-H-C)

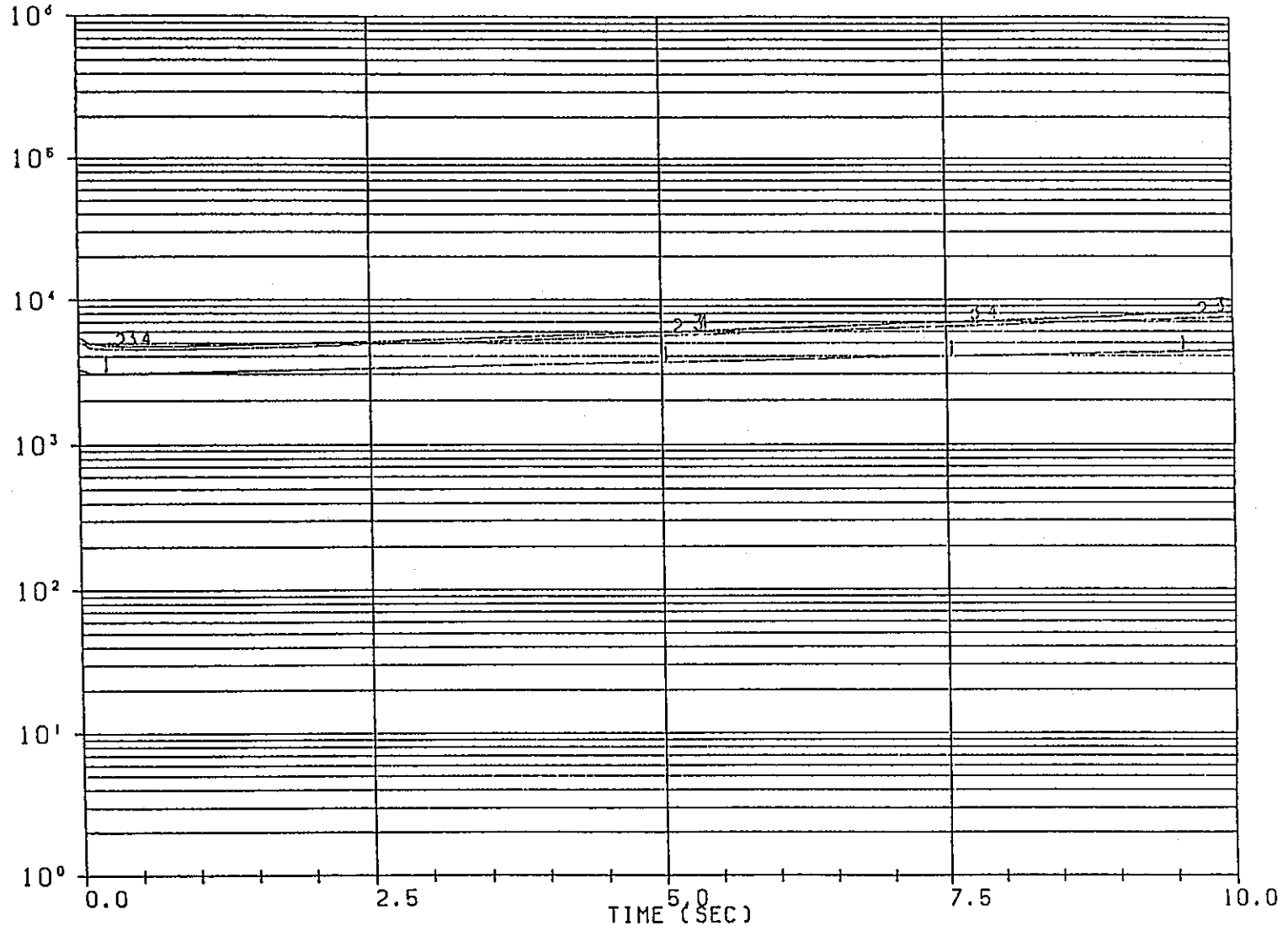


図 6.3-60 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) バルーニング非考慮

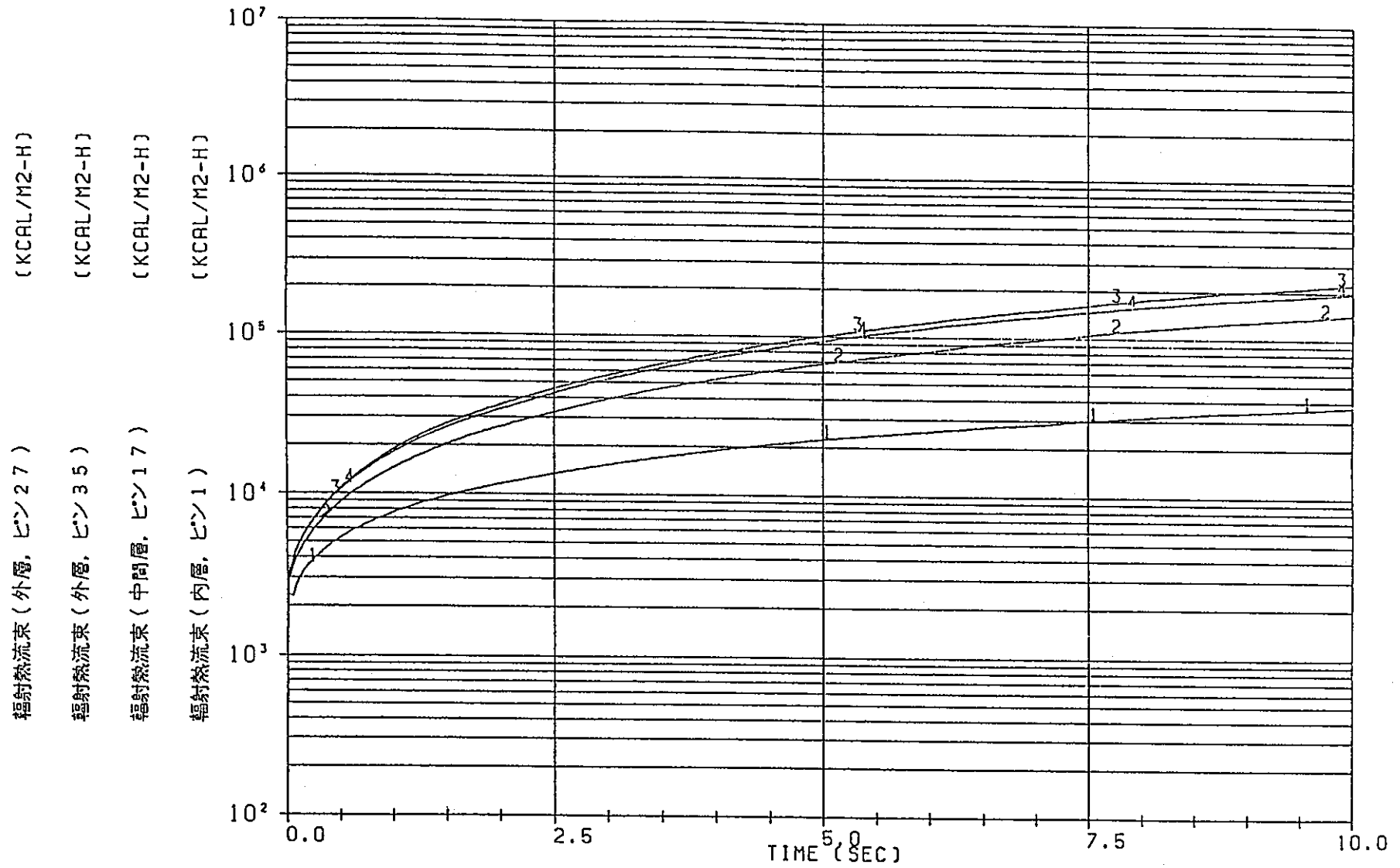


図 6.3-61 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) パルーニング非考慮

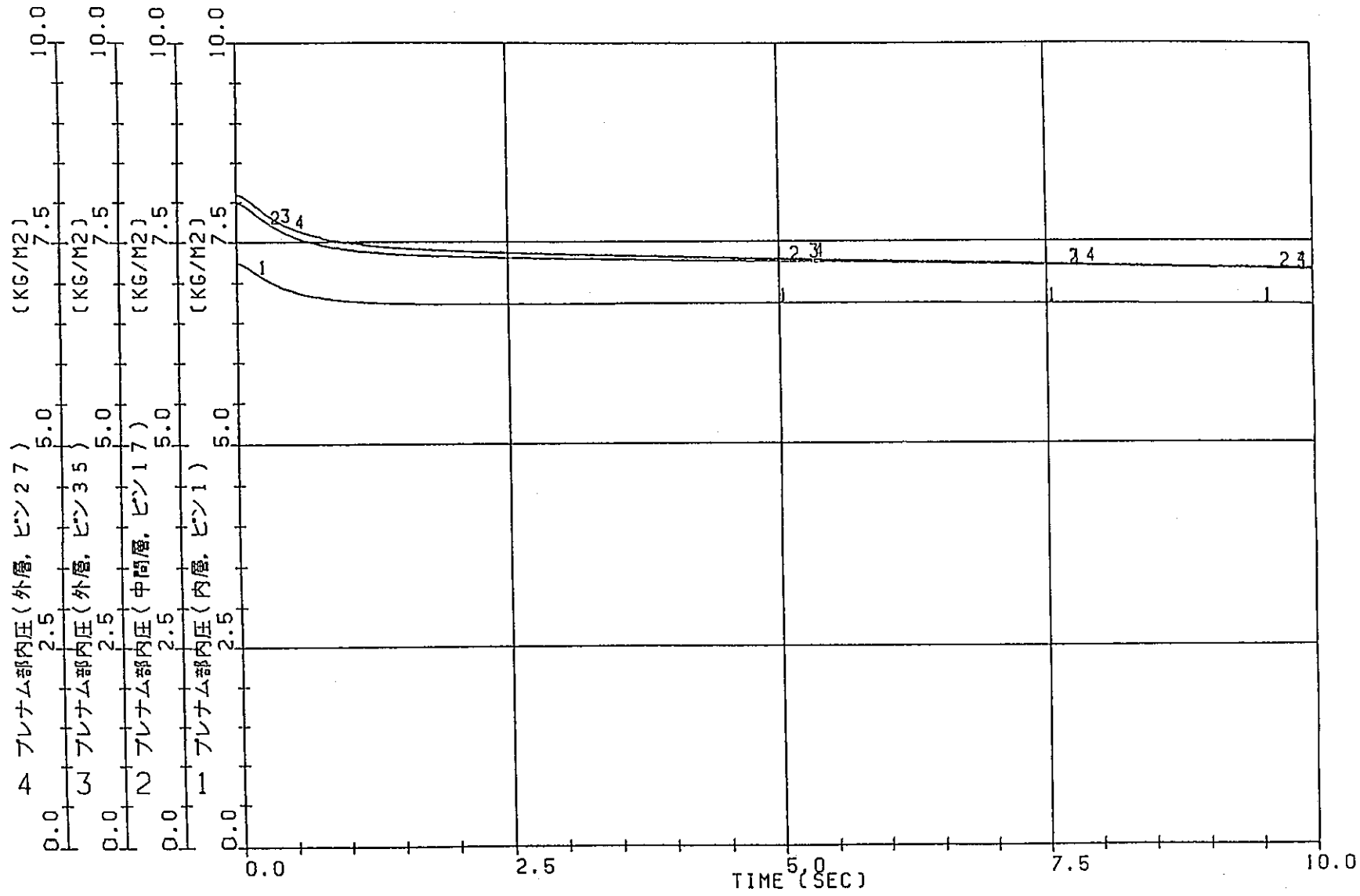


図 6.3-62 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) パルーニング非考慮

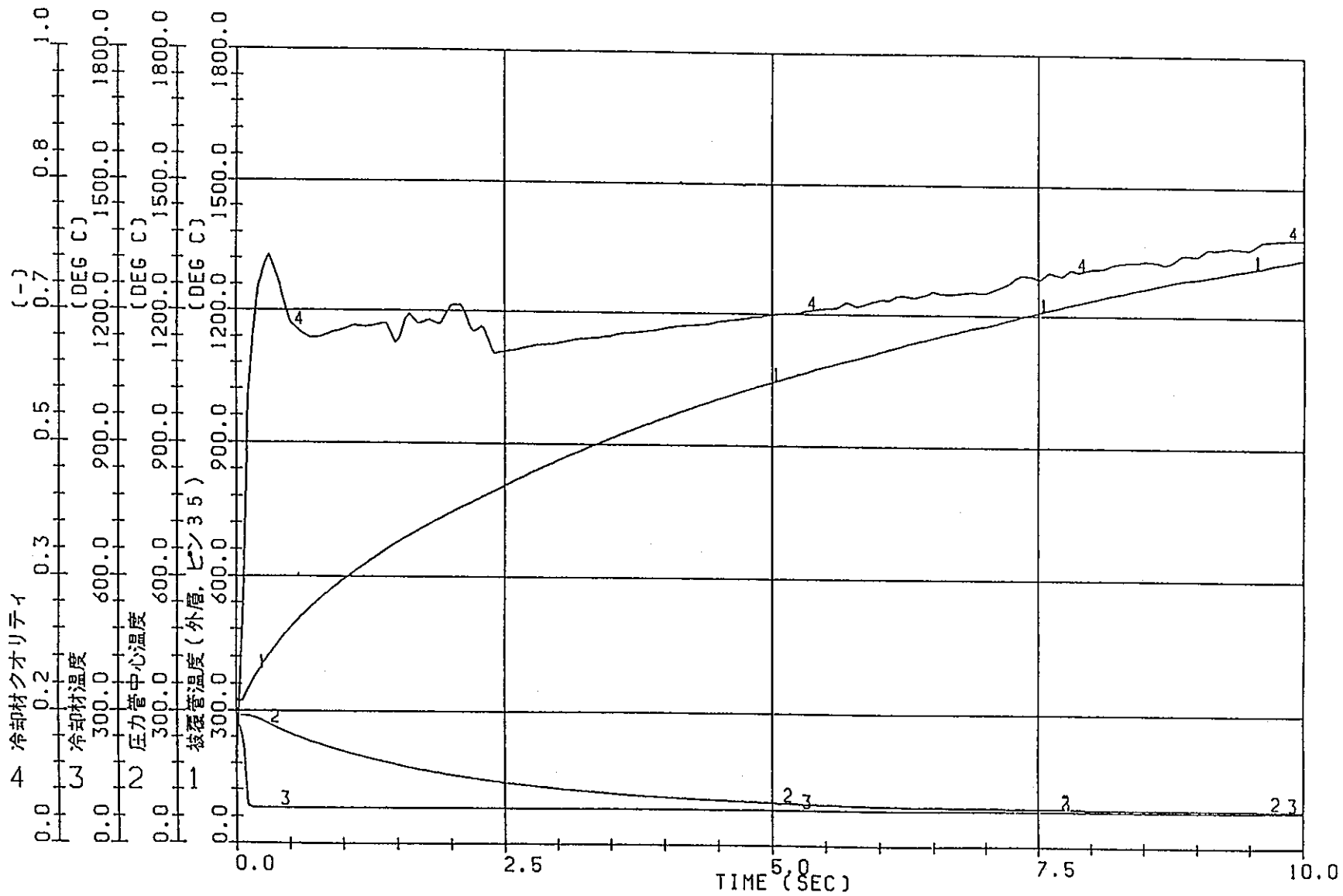


図 6.3-63 圧力管・カランドリア管同時破断時燃料冷却性解析 (HEATUP) バルーニング非考慮

7. 結 論

63年度は、圧力管破断試験装置の据付と、流動特性試験を実施して、圧力管破断評価コードの検証を行った。また、圧力管破断時の燃料冷却性並びに圧力管-カランドリア管同時破断時の燃料冷却性に関する予備解析作業を行った。

① 圧力管破断試験装置の据付

圧力管破断事象を想定し、圧力管が破断した場合のカランドリア管健全性、隣接管等の健全性及び燃料冷却性を評価するために、前年度製作した実機模擬試験装置の搬入・据付工事及び試運転を終えた。

また、同時破断試験に使用する試験体を製作した。

② 圧力管破断試験

流動特性試験を実施し圧力管破断時のアニュラス部の冷却材圧力、温度の挙動、カランドリア管へ熱衝撃、衝突等カランドリア管にかかる負荷挙動を明らかにした。その結果、支配的な負荷は内圧上昇と衝突力であった。また、それぞれの負荷の最大値が生じる時間は異なっているので、別々に評価し重ね合わせることができることを明らかにした。

今回では、き裂進展速度が約 100m/s と比較的遅く、衝突時カランドリア管歪も小さかった。従って、今後は速いき裂進展速度の試験を実施する必要がある。

また、実機材料を用いたカランドリア管健全性試験に先立ち実機材料バースト試験を実施した。その結果、実機材料圧力管の受け入れ材は延性的破壊挙動を示しCCL条件の欠陥では不安定破壊しない事が明らかとなった。従って、軸方向スプリット大破断を模擬するためには内圧による応力で破断するようなガイドき裂を設ける必要がある。

③ 検証解析

流動解析コード及び構造解析コードを用いて、本年度実施した流動特性試験の実験解析を行い、破断後数m秒を範囲とする圧力管内圧力挙動並びに破断後1秒前後にアニュラス部で発生する最大圧力を良く再現できる事を明らかにした。2次元モデルの構造解析の予測値は実験値の約20倍で三次元的な効果等を検討する必要があることが判った。

また、サブチャンネル解析では破断後の圧力管がカランドリア管に密着するまで拡大し、かつ燃料体がそのうちで最大偏心する場合にPCTが最も高くなり、その値は 930°C であった。又、熱流動条件をパラメータとし解析ではチャンネル出力の感度が最も高く、10%の増加に対し、 130°C 程度PCTが増大することがわかった。

同時破断時の燃料冷却性を汎用熱流動解析コードRELAP5で解析した結果、2cm以

上のスプリット巾については冷却材が両端から放出し中央部に届かないため解析できないことがわかった。

従って、今後実験による観察を行い、熱流動挙動を解明して冷却性評価モデルを塑性する必要がある。