

54 本クラスタ燃料による破断実験解析

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
T	N1410 98-005	1998.4.25.
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1998年3月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂 1 - 9 - 13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical
Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1998

5 4 本クラスタ燃料による破断実験解析

松本 光雄*、川又 伸弘**、鴨志田 洋**

要 旨

動燃事業団大洗工学センター原子炉工学室において、平成8年度に54本クラスタ燃料を用いた下降管破断実験、主蒸気管破断実験等が実施された。ここでは、従来の「ふげん」安全評価コード及び軽水炉の安全評価コードであるRELAP5コードにより、上記の下降管破断実験及び主蒸気管破断実験を解析し、「ふげん」安全評価コードの妥当性を評価した。この結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 「ふげん」安全評価コードは、ドライアウト後の被覆管温度について、実験結果に対して高めの値を算出し、保守的な評価をしていることが確認できた。
- (2) 「ふげん」最適評価コードのリターンモデルは、実験時の被覆管温度挙動に見られるドライアウト及びクエンチ現象をよく再現できることが確認できた。
- (3) RELAP5コードは、「ふげん」の下降管破断を模擬したLOCA実験時の伝熱流動現象をほぼ再現し、同コードがATR体系のLOCA解析にも使用できる可能性があることが分かった。

* 本社 動力炉開発推進本部

**大洗工学センター 安全工学部

目次

1. 緒言	1
2. 破断実験	2
2.1 実験装置	2
2.2 実験条件及び実験方法	17
2.2.1 実験条件	17
2.2.2 実験方法	17
2.3 実験結果	20
2.3.1 下降管大破断実験	20
2.3.2 下降管小破断実験	21
2.3.3 主蒸気管大破断実験	22
2.3.4 主蒸気管小破断実験	23
3. 実験解析	38
3.1 解析コード及び解析条件	38
3.1.1 解析コード	38
3.1.2 解析条件	40
3.2 解析結果	49
3.2.1 下降管大破断実験解析	49
3.2.2 下降管小破断実験解析	51
3.2.3 主蒸気管大破断実験解析	52
3.2.4 主蒸気管小破断実験解析	54
3.2.5 リターンモデルによる解析結果	55
4. RELAP 5 / MOD 2 による実験解析	85
4.1 解析コード及び解析条件	85
4.1.1 RELAP5/MOD2 コード	85
4.1.2 解析条件	85

4.2 解析結果	87
5. 結言	94
6. 謝辞	95
7. 参考文献	96

図表一覧

表 2.1-1	実験装置基本仕様	5
表 2.1-2	実験装置と「ふげん」仕様比較表	6
表 2.1-3	測定箇所一覧	7
表 2.2.1-1	冷却材条件	17
表 2.2.1-2	下降管破断実験条件	18
表 2.2.1-3	主蒸気管破断実験条件	19
図 2.1-1	ATR 安全性実験装置	9
図 2.1-2	ループ構成及び計測点	10
図 2.1-3	高出力チャンネル再循環ライン図	11
図 2.1-4	圧力管	12
図 2.1-5	遮へいプラグ	13
図 2.1-6	54 本燃料集合体構造図	14
図 2.1-7	模擬燃料体の軸方向出力分布	15
図 2.1-8	模擬燃料体の温度計装図	16
図 2.3.1-1	下降管大破断実験結果（蒸気ドラム圧力）	25
図 2.3.1-2	下降管大破断実験結果（下部ヘッダ圧力）	25
図 2.3.1-3	下降管大破断実験結果（炉心入口流量）	26
図 2.3.1-4	下降管大破断実験結果（蒸気ドラム水位）	26
図 2.3.1-5	下降管大破断実験結果（APCI 流量）	27
図 2.3.1-6	下降管大破断実験結果（外層ピン被覆管温度）	27
図 2.3.2-1	下降管小破断実験結果（蒸気ドラム圧力）	28
図 2.3.2-2	下降管小破断実験結果（下部ヘッダ圧力）	28
図 2.3.2-3	下降管小破断実験結果（炉心入口流量）	29
図 2.3.2-4	下降管小破断実験結果（蒸気ドラム水位）	29
図 2.3.2-5	下降管小破断実験結果（HPCI 流量）	30
図 2.3.2-6	下降管小破断実験結果（APCI 流量）	30
図 2.3.2-7	下降管小破断実験結果（外層ピン被覆管温度）	31

図 2.3.3-1	主蒸気管大破断実験結果 (蒸気ドラム圧力)	32
図 2.3.3-2	主蒸気管大破断実験結果 (下部ヘッダ圧力)	32
図 2.3.3-3	主蒸気管大破断実験結果 (炉心入口流量)	33
図 2.3.3-4	主蒸気管大破断実験結果 (蒸気ドラム水位)	33
図 2.3.3-5	主蒸気管大破断実験結果 (APCI 流量)	34
図 2.3.3-6	主蒸気管大破断実験結果 (外層ピン被覆管温度)	34
図 2.3.4-1	主蒸気管小破断実験結果 (蒸気ドラム圧力)	35
図 2.3.4-2	主蒸気管小破断実験結果 (下部ヘッダ圧力)	35
図 2.3.4-3	主蒸気管小破断実験結果 (炉心入口流量)	36
図 2.3.4-4	主蒸気管小破断実験結果 (蒸気ドラム水位)	36
図 2.3.4-5	主蒸気管小破断実験結果 (APCI 流量)	37
図 2.3.4-6	主蒸気管小破断実験結果 (外層ピン被覆管温度)	37
図 3.1.1-1	LOCA 解析コードフロー	42
図 3.1.1-2	下降管大破断解析ノード分割図 (SENHOR コード)	43
図 3.1.1-3	主蒸気管大破断解析ノード分割図 (SENHOR コード)	44
図 3.1.1-4	下降管小破断解析ノード分割図 (LOTRAC コード)	45
図 3.1.1-5	主蒸気管小破断解析ノード分割図 (LOTRAC コード)	46
図 3.1.1-6	再冠水解析ノード分割図 (FLOOD コード)	47
図 3.1.1-7	PCT 断面におけるロッド配列図 (HEATUP コード)	48
図 3.2.1-1	下降管大破断実験解析結果 (蒸気ドラム圧力)	57
図 3.2.1-2	下降管大破断実験解析結果 (下部ヘッダ圧力)	57
図 3.2.1-3	下降管大破断実験解析結果 (炉心入口流量)	58
図 3.2.1-4	下降管大破断実験解析結果 (蒸気ドラム水位)	58
図 3.2.1-5	下降管大破断実験解析結果 (下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧)	59
図 3.2.1-6	下降管大破断実験解析結果 (高出力チャンネル炉心部差圧)	59
図 3.2.1-7	下降管大破断実験解析結果 (蓄圧器内圧力)	60
図 3.2.1-8	下降管大破断実験解析結果 (APCI 流量)	60
図 3.2.1-9	下降管大破断実験解析結果 (平均再冠水速度)	61
図 3.2.1-10	下降管大破断実験解析結果 (内層ピン被覆管温度)	61
図 3.2.1-11	下降管大破断実験解析結果 (中層ピン被覆管温度)	62

図 3.2.1-12	下降管大破断実験解析結果（ガドリピン被覆管温度）	62
図 3.2.1-13	下降管大破断実験解析結果（外層ピン被覆管温度）	63
図 3.2.2-1	下降管小破断実験解析結果（蒸気ドラム圧力）	64
図 3.2.2-2	下降管小破断実験解析結果（下部ヘッダ圧力）	64
図 3.2.2-3	下降管小破断実験解析結果（炉心入口流量）	65
図 3.2.2-4	下降管小破断実験解析結果（蒸気ドラム水位）	65
図 3.2.2-5	下降管小破断実験解析結果（下降管水位）	66
図 3.2.2-6	下降管小破断実験解析結果（下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧）	66
図 3.2.2-7	下降管小破断実験解析結果（高出力チャンネル炉心部差圧）	67
図 3.2.2-8	下降管小破断実験解析結果（蓄圧器内圧力）	67
図 3.2.2-9	下降管小破断実験解析結果（APCI 流量）	68
図 3.2.2-10	下降管小破断実験解析結果（HPCI 流量）	68
図 3.2.2-11	下降管小破断実験解析結果（外層ピン被覆管温度）	69
図 3.2.3-1	主蒸気管大破断実験解析結果（蒸気ドラム圧力）	70
図 3.2.3-2	主蒸気管大破断実験解析結果（下部ヘッダ圧力）	70
図 3.2.3-3	主蒸気管大破断実験解析結果（下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧）	71
図 3.2.3-4	主蒸気管大破断実験解析結果（高出力チャンネル炉心部差圧）	71
図 3.2.3-5	主蒸気管大破断実験解析結果（蓄圧器内圧力）	72
図 3.2.3-6	主蒸気管大破断実験解析結果（APCI 流量）	72
図 3.2.3-7	主蒸気管大破断実験解析結果（蒸気ドラム水位）	73
図 3.2.3-8	主蒸気管大破断実験解析結果（下降管水位）	73
図 3.2.3-9	主蒸気管大破断実験解析結果（炉心入口流量）	74
図 3.2.3-10	主蒸気管大破断実験解析結果（平均再冠水速度）	74
図 3.2.3-11	主蒸気管大破断実験解析結果（内層ピン被覆管温度）	75
図 3.2.3-12	主蒸気管大破断実験解析結果（中層ピン被覆管温度）	75
図 3.2.3-13	主蒸気管大破断実験解析結果（ガドリピン被覆管温度）	76
図 3.2.3-14	主蒸気管大破断実験解析結果（外層ピン被覆管温度）	76
図 3.2.4-1	主蒸気管小破断実験解析結果（蒸気ドラム圧力）	77
図 3.2.4-2	主蒸気管小破断実験解析結果（下部ヘッダ圧力）	77
図 3.2.4-3	主蒸気管小破断実験解析結果（炉心入口流量）	78

図 3.2.4-4	主蒸気管小破断実験解析結果 (蒸気ドラム水位)	78
図 3.2.4-5	主蒸気管小破断実験解析結果 (下降管水位)	79
図 3.2.4-6	主蒸気管小破断実験解析結果 (下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧)	79
図 3.2.4-7	主蒸気管小破断実験解析結果 (高出力チャンネル炉心部差圧)	80
図 3.2.4-8	主蒸気管小破断実験解析結果 (蓄圧器内圧力)	80
図 3.2.4-9	主蒸気管小破断実験解析結果 (APCI 流量)	81
図 3.2.4-10	主蒸気管小破断実験解析結果 (外層ピン被覆管温度)	81
図 3.2.5-1	下降管大破断実験解析結果 (蓄圧器内圧力)	82
図 3.2.5-2	下降管大破断実験解析結果 (APCI 流量)	82
図 3.2.5-3	下降管大破断実験解析結果 (内層ピン被覆管温度)	83
図 3.2.5-4	下降管大破断実験解析結果 (中層ピン被覆管温度)	83
図 3.2.5-5	下降管大破断実験解析結果 (ガドリピン被覆管温度)	84
図 3.2.5-6	下降管大破断実験解析結果 (外層ピン被覆管温度)	84
図 4.1.2-1	解析モデル図 (RELAP5/mod2 コード)	86
図 4.2-1	下降管大破断実験解析結果 (蒸気ドラム圧力)	89
図 4.2-2	下降管大破断実験解析結果 (下部ヘッダ圧力)	89
図 4.2-3	下降管大破断実験解析結果 (下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧)	90
図 4.2-4	下降管大破断実験解析結果 (炉心入口流量)	90
図 4.2-5	下降管大破断実験解析結果 (APCI 流量)	91
図 4.2-6	下降管大破断実験解析結果 (蒸気ドラム水位)	91
図 4.2-7	下降管大破断実験解析結果 (外層ピン被覆管温度)	92
図 4.2-8	下降管大破断実験解析結果 (中層ピン被覆管温度)	92
図 4.2-9	下降管大破断実験解析結果 (ガドリピン被覆管温度)	93
図 4.2-10	下降管大破断実験解析結果 (内層ピン被覆管温度)	93

1. 緒言

動燃事業団大洗工学センター原子炉工学室において、平成8年度に54本クラスタ燃料を用いた下降管破断実験、主蒸気管破断実験等が実施された。ここでは、従来の「ふげん」安全評価コード及び軽水炉の安全評価コードである RELAP5 コードにより、上記の下降管破断実験及び主蒸気管破断実験を解析し、「ふげん」安全評価コードの妥当性を評価する。

2章で破断実験の概要を、3章で「ふげん」安全評価コードによる解析結果を、4章でRELAP5コードによる解析結果を、5章で結論を述べる。

2. 破断実験

2.1 実験装置

実験は、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターにあるATR安全性実験装置を用いて行われた。実験装置は、図 2.1-1 に示すように、「ふげん」の原子炉冷却系と同様に、蒸気ドラム、下部ヘッダ、圧力管、入口管、上昇管、再循環ポンプ、逆止弁等から構成されている。圧力管は実寸で製作されており、電気間接加熱方式の実物大模擬燃料集合体が挿入されている。模擬燃料集合体は6体あり、そのうち5体が出力 200kW の低出力模擬燃料集合体で崩壊熱出力を模擬できる。残りの1体は、ATR高燃焼度燃料（54本クラスタ燃料集合体）を模擬した高出力模擬燃料集合体で、定格運転時の出力からスクラム後の崩壊熱にいたるまでの出力変化を模擬できる。また、実験装置には、ECCSとして「ふげん」と同様、急速注水系（APCI）、高圧注水系（HPCI）及び低圧注水系（LPCI）が設置されている。

破断は、下降管及び主蒸気管破断実験共にラプチャディスクを破断することにより模擬された。実験ループでは、各部圧力、差圧、温度、水位、各チャンネル入口流量等の計測が行われた。

主要な構成機器の仕様及び設定は次のとおりである。

(1) メインループ

実験装置の基本仕様を表 2.1-1 に示す。

実験装置は、表 2.1-2 に示すように「ふげん」に対して容積比が約 1/7 のスケールで模擬されており、運転圧力及び温度については「ふげん」と同一の条件で運転ができるようになっている。蒸気ドラム、下部ヘッダ等は短型であるが、圧力管と燃料集合体（電気ヒータ）は実寸で製作されており、特に炉心部における熱流動挙動の模擬性を高くしている。実験ループの構成を図 2.1-2 に、圧力管等の配置図を図 2.1-3 に示す。同図に示すように、ATRの主要な機器は全て設置されており、特に配管中の流動抵抗の大きな逆止弁、燃料集合体及び遮へいプラグについては実機の形状を模擬している。

(2) 圧力管及び遮へいプラグ

圧力管は、図 2.1-4 に示すように、内径、全長とも実寸で製作されており、次に述べる模擬燃料集合体と組み合わせることにより、「ふげん」のクラスタ

内流路形状を完全に模擬している。圧力管出口には図 2.1-5 に示す上部遮へいプラグが装着されている。

(3) 模擬燃料集合体及び電源

図 2.1-6 に 54 本燃料集合体構造図を示す。これを模擬した燃料集合体は、被覆管内に絶縁材が充填された間接加熱の電気ヒータであり、最高出力 6000kW の容量を有している。軸方向出力分布は、図 2.1-7 に示すように、5 ステップで模擬し、断面方向の出力分布については、サイリスタ制御電源（交流 400V、外周 3300kW、中周 2000kW、内周 700kW）によって外層、中間層、内層ピンがそれぞれ独立に出力制御ができるようになっている。また、ガドリニア添加ピンの出力についても独立に出力制御できる。出力の制御は計算機によって行ない、破断後の出力上昇やスクラム後の出力低下を、「ふげん」の特性に従って任意に制御できる。

また、軸方向温度分布測定のために、図 2.1-8 に示すように 168 点のクロメル-アルメル熱電対を軸方向 6 断面のヒータピンの表面に取り付けている。

(4) 再循環ポンプ

実機の再循環ポンプはフライホイールによりコーストダウンするが、実験装置の再循環ポンプはフライホイールを装備していない。実験装置の再循環ポンプでは、モータの駆動電源を周波数制御して任意のポンプ回転数半減時間を選定できるようになっている。

(5) 急速注水系 (APCI)

注水量は「ふげん」と実験装置の容量比 (7 : 1) から

$$12\text{m}^3 \text{ (「ふげん」の注水量)} \times \frac{1}{7} = 1.7\text{m}^3$$

とし、

注水流量は「ふげん」と実験装置のチャンネル数比 (112 : 6) から

$$3688 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (「ふげん」の注水流量)} \times \frac{6}{112} = 198\text{m}^3/\text{h}$$

とした。

窒素ガス初期圧力は「ふげん」と同じ $75\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ とし、蓄圧器と下部ヘッダ間の配管については、上記流量での圧力損失が「ふげん」と同様になるよ

うに、注水配管に設置されている手動弁（V4-103）の開度を調整した。また、蓄圧器の水温は「ふげん」の設計温度である 40℃に昇温した。

(6) 高圧注水系（H P C I）

H P C I 注入開始から A P C I 注入開始までの注水流量が、「ふげん」と実験装置の容量比（7：1）となるように、注水配管に設置されている手動弁（V10-401）を調整した。注水水温は常温である。

(7) 低圧注水系（L P C I）

本実験は、長期冷却を目的とせず、かつ、L P C I を作動させなくとも炉心の冷却が可能である。このため、本実験では L P C I を使用していない。

(8) 実験計測

温度は非接地のクロメル－アルメル・シース型熱電対を、圧力と差圧は歪ゲージ式を、流量はタービン式を用いて計測した。表 2.1-3 に計測箇所一覧を示す。

実験データの収録には、パナファコム U-1500II を用いた。サンプリング速度は、温度が 10Hz で、圧力、流量、差圧等が 50Hz である。差圧については、60kg/cm²g の圧力で再循環ポンプを停止した条件でゼロ調整している。

表 2.1-1 実験装置基本仕様

最高使用圧力	84kg/cm ² g		
最高使用温度	298℃		
冷却材	純水		
蒸気ドラム	寸法	ϕ 1525mm ^D ×t 65mm×4827mm ^L	
	容積	8.05m ³	
下部ヘッダ	寸法	ϕ 387.4mm ^D ×t 34.9mm×4040mm ^L	
	容積	0.47m ³	
入口管	口径	2.5B (内径 63.2mm)	
上昇管	口径	3B (内径 74.0mm)	
圧力管	内径	117.8mm	
燃料集合体	ピン本数	54本	36本
	ピン外径	10.8mm	14.5mm
	スぺーサ支持管本数	1本	1本
	スぺーサ支持管外径	34mm	14.5mm
	流路面積	5044mm ²	4786mm ²
	有効発熱長	3700mm	3700mm
発熱量	6000kW×1体 200kW×5体		

表 2.1-2 実験装置と「ふげん」仕様比較表

項 目	単 位	実験装置	ふげん
1. ループ			
(1) ループ数	—	1	2
(2) 圧 力	kg/cm ²	85 (最大)	82 (最大)
(3) 容 積	m ³	10.2	70.7/ループ
(4) 蒸気ドラム			
容 積	m ³	8.05	37
内 径	m	1.525	1.765
(5) 下部ヘッダ			
容 積	m ³	0.47	2.7
内 径	m	0.39	0.5318
(6) 下降管			
本 数	本	1	4/ループ
内 径	m	0.28	0.3176
(7) 再循環ポンプ			
基 数	台	1	2/ループ
定格揚程	m	108	100
定格流量	m ³ /h	180	約 2500
回転数半減時間	sec	2 秒以上可変	5～7 秒
2. 炉 心			
(1) 圧力管			
本 数	本	6	112/ループ
内 径	mm	117.8	117.8
(2) 燃料集合体			
加熱チャンネル数	本	6	112/ループ
	MW	6MW×1ch 0.2MW×5ch	
(3) 初期流量	kg/sec	2.2～2.5	
3. ECCS 構成			
		APCI (最大 5 m ³)	12 m ³
		HPCI (60 m ³ /h)	90 m ³ /h
		LPCI (150 m ³ /h)	390 m ³ /h

表2.1-3(1/2) 測定箇所一覧

項目	記号	測定値	メーカー	型式	レンジ	精度	備考
圧力	PRT-6	蒸気ドラム	共和電業(株)	PGM-100KE	100kg/cm ²	±0.5%	大気圧, 蒸気ドラム満水の条件でゼロバランスを取って測定した値
	PRT-3-8	下部ヘッダ	〃	〃	〃	〃	
	PRT-LW	高出力チャンネル(下端)	〃	〃	〃	〃	
	PRT-UP	高出力チャンネル(上端)	〃	〃	〃	〃	
	PRT-IN	高出力チャンネル(入口)	〃	〃	〃	〃	
	PRT-RCP	R C P 出口	〃	〃	〃	〃	
	PRT-CV1	逆止弁間	〃	〃	〃	〃	
	PRT-AC	A P C I 圧力	〃	〃	〃	〃	
差圧	DRT-3	高出力チャンネル(上-下間)	SSK	DP GX	10kg/cm ²	±0.5%	70kg/cm ² Gの飽和水の初期静水頭圧力を含まない値
	DRT-3-1	No.1 圧力管(上-下間)	〃	〃	5 〃	〃	
	DRT-3-2	No.2 圧力管(上-下間)	〃	〃	5 〃	〃	
	DRT-3-3	No.3 圧力管(上-下間)	〃	〃	〃	〃	
	DRT-3-4	No.4 圧力管(上-下間)	〃	〃	〃	〃	
	DRT-3-5	No.5 圧力管(上-下間)	〃	〃	〃	〃	
	DRT-SW	蒸気ドラム-下部ヘッダ間	〃	〃	10 〃	〃	
	DRT-SD	蒸気ドラム(上-下間)	〃	〃	1 〃	〃	
流量	FRT-2	高出力チャンネル入口	トキコ(株)	FLP0547	±40m ³ /h	±2%	タービン流量計による測定値
	FRT-3-1	No.1 圧力管入口	〃	〃	〃	〃	
	FRT-3-2	No.2 圧力管入口	〃	〃	〃	〃	
	FRT-3-3	No.3 圧力管入口	〃	〃	〃	〃	
	FRT-3-4	No.4 圧力管入口	〃	〃	〃	〃	
	FRT-3-5	No.5 圧力管入口	〃	〃	〃	〃	
	FRT-CP	循環ポンプ出口	〃	〃	400m ³ /h	〃	
	FRT-AC	A P C I 流量	〃	〃	400m ³ /h	〃	
	FRT-HP	H P C I 流量	〃	〃	100m ³ /h	〃	
水位	LR-102	下降管水位	富士電機(株)	FFF35W	15m	±0.5%	常温水校正 70kg/cm ² G 飽和水校正
	LRT-SD	蒸気ドラム水位	〃	FFC34W	±1m	〃	
温度	TRT-1	蒸気ドラム(蒸気部)	助川電気(株)	K(CA)	500℃	0.75 級	クロメル-アルメル熱電対の出力を JIS の起電力表に基づいて温度変換 した値
	TRT-2	蒸気ドラム(水部)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-WD1	下部ヘッダ(入口管破断口側)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-WD2	下部ヘッダ(中央部)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-WD3	下部ヘッダ(ECCS ノズル部)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-3-1	No.1 圧力管入口	〃	〃	〃	〃	
	TRT-3-2	No.1 圧力管出口	〃	〃	〃	〃	

表 2.1-3(2/2) 測定箇所一覧

項 目	記 号	測 定 値	メーカ-	型 式	レンジ	精 度	備 考
温 度	TRT-N-1	高出力チャンネル (出 口)	助川電気(株)	K(CA)	500℃	0.75 級	クロメル-アルメル熱電対の出力を JIS の起電力表に基づいて温度変換 した値
	TRT-N-2	高出力チャンネル (出 口)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-N-3	高出力チャンネル (発熱部上端)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-N-4	高出力チャンネル (発熱部中央)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-N-5	高出力チャンネル (発熱部下端)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-N-1N	高出力チャンネル (入 口)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-AC	APCI 注 水 温 度	〃	〃	〃	〃	
	TRT-HP	HPCI 注 水 温 度	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-1	圧力管外表面 (発熱部下端)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-2	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-3	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-4	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-5	圧力管外表面 (発熱部 1 / 4 高さ)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-6	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-7	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-8	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-9	圧力管外表面 (発熱部中央)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-10	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-11	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-12	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-13	圧力管外表面 (発熱部 3 / 4 高さ)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-14	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-15	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-16	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-17	圧力管外表面 (発熱部上端)	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-18	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-19	〃	〃	〃	〃	〃	
	TRT-P-20	〃	〃	〃	〃	〃	
出 力	QRT-H0	全 出 力	横河電気(株)	2885	6000kW	±0.5%	
	QRT-H1	内 層	〃	〃	700kW	〃	
	QRT-H2	中 間 層	〃	〃	2000kW	〃	
	QRT-H3	外 層	〃	〃	3300kW	〃	
	QRT-H4	ガ ド リ ピ ン	〃	〃	1000kW	〃	
回転数	RPM-1	再 循 環 ポ ン プ	富士電機(株)	—	3000rpm	±1.5%	

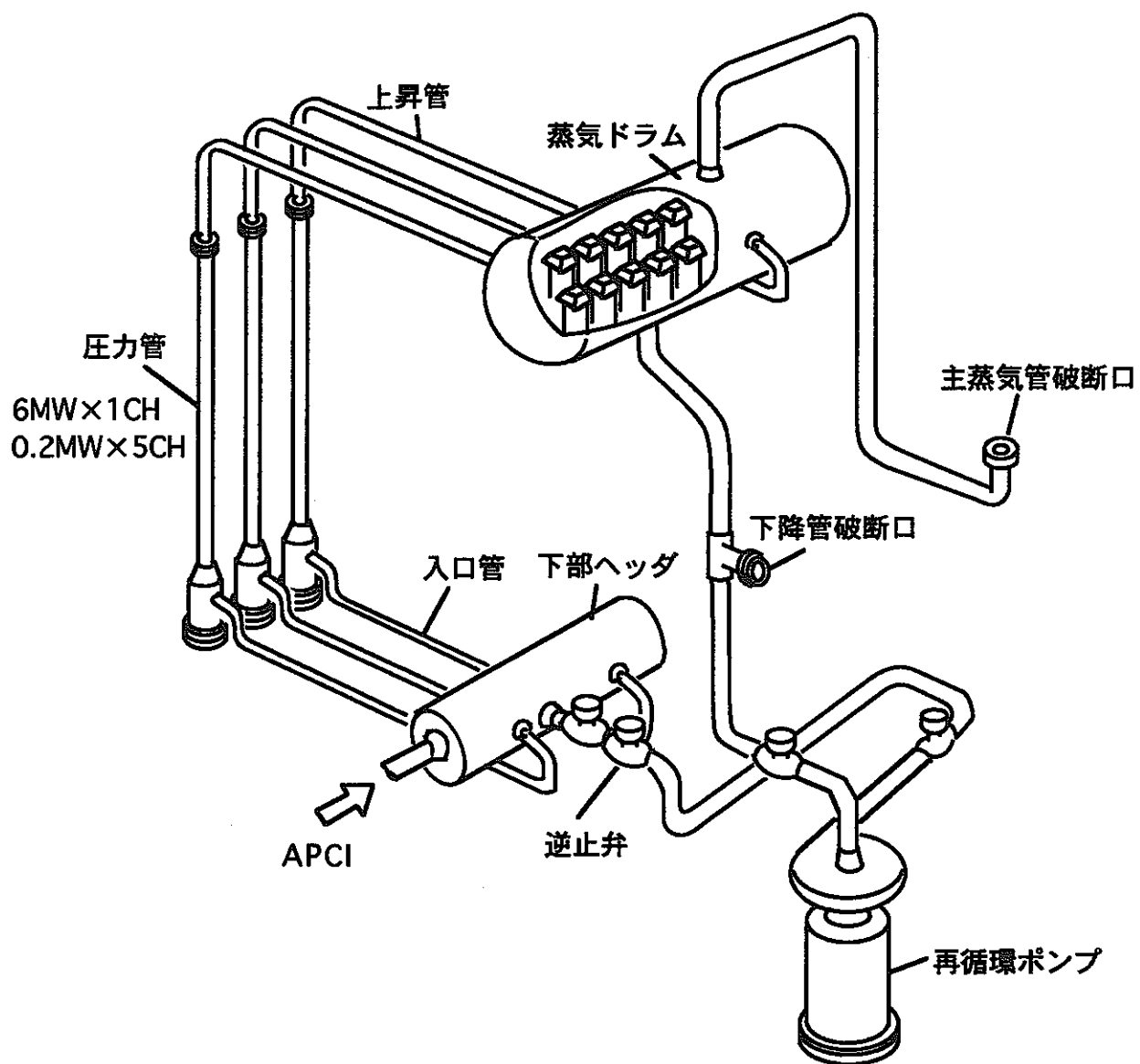


図2.1-1 ATR安全性実験装置

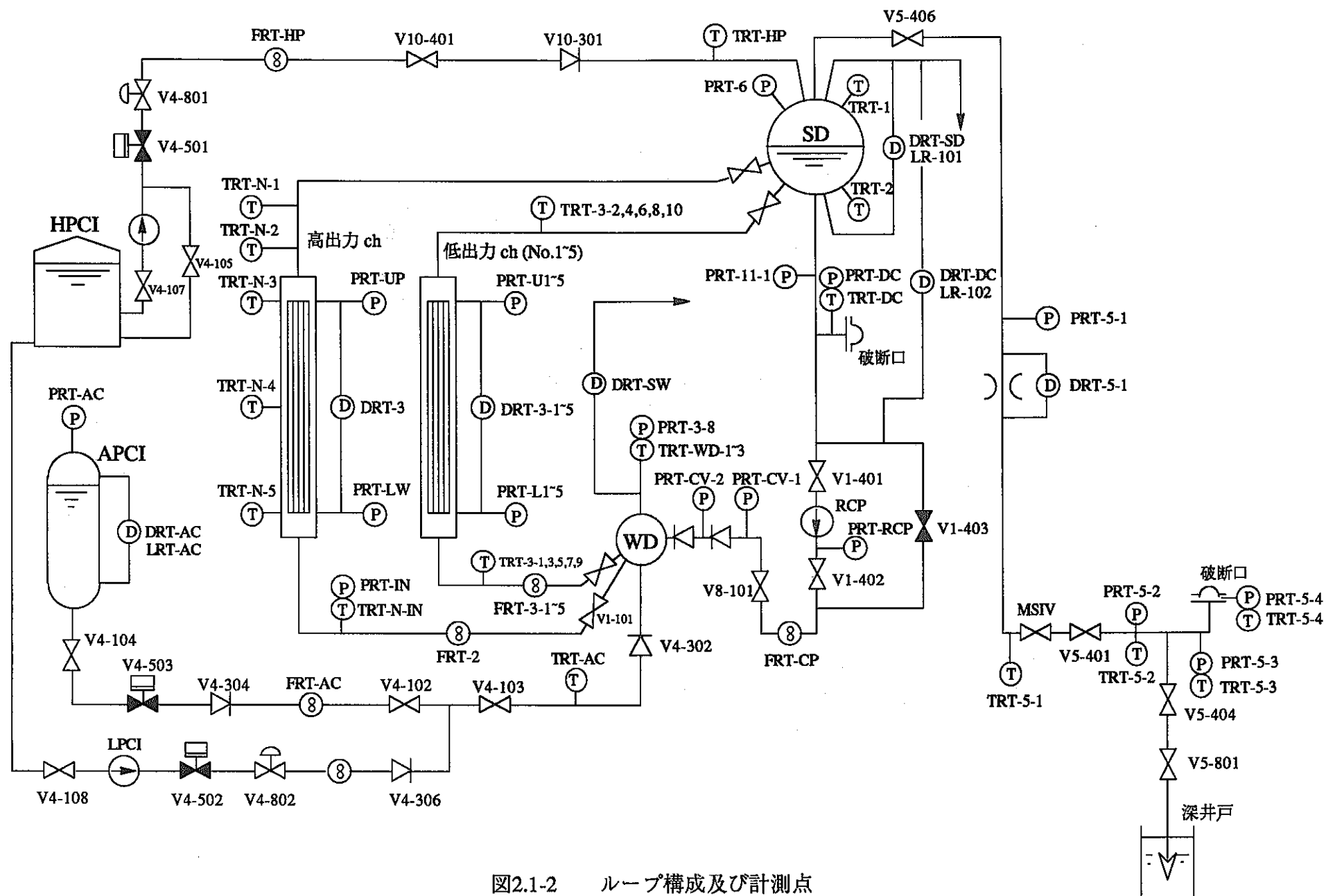


図2.1-2 ループ構成及び計測点

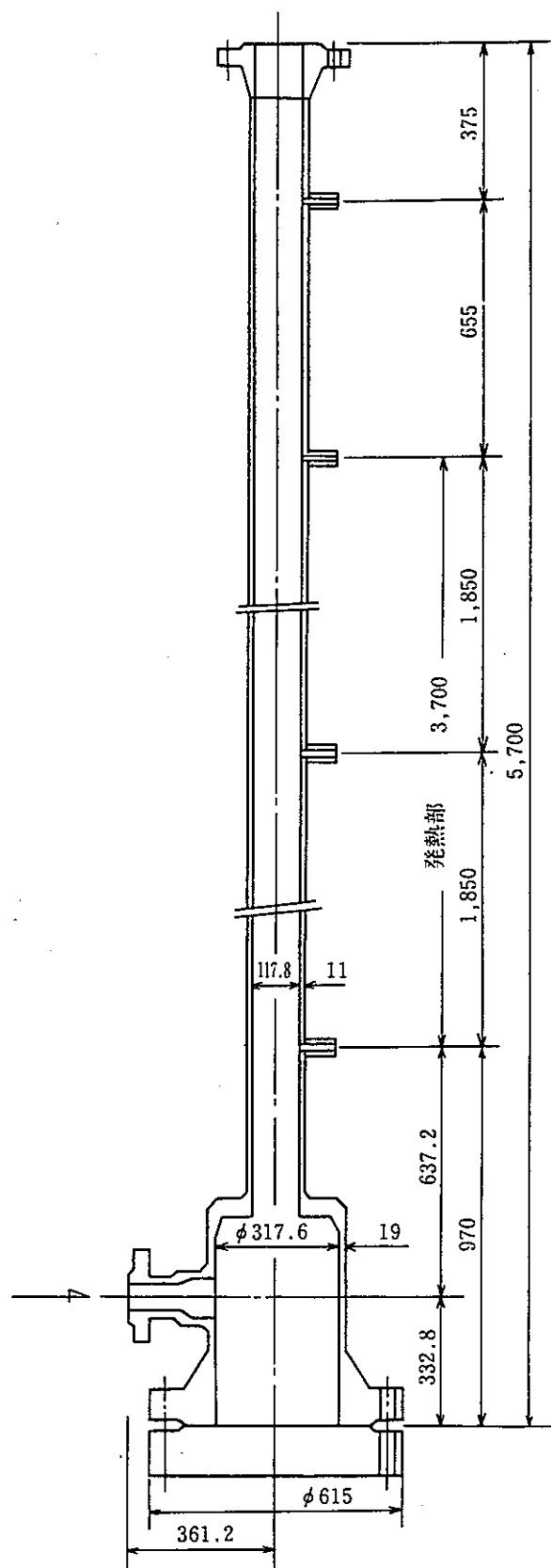


图 2.1-4 压力管

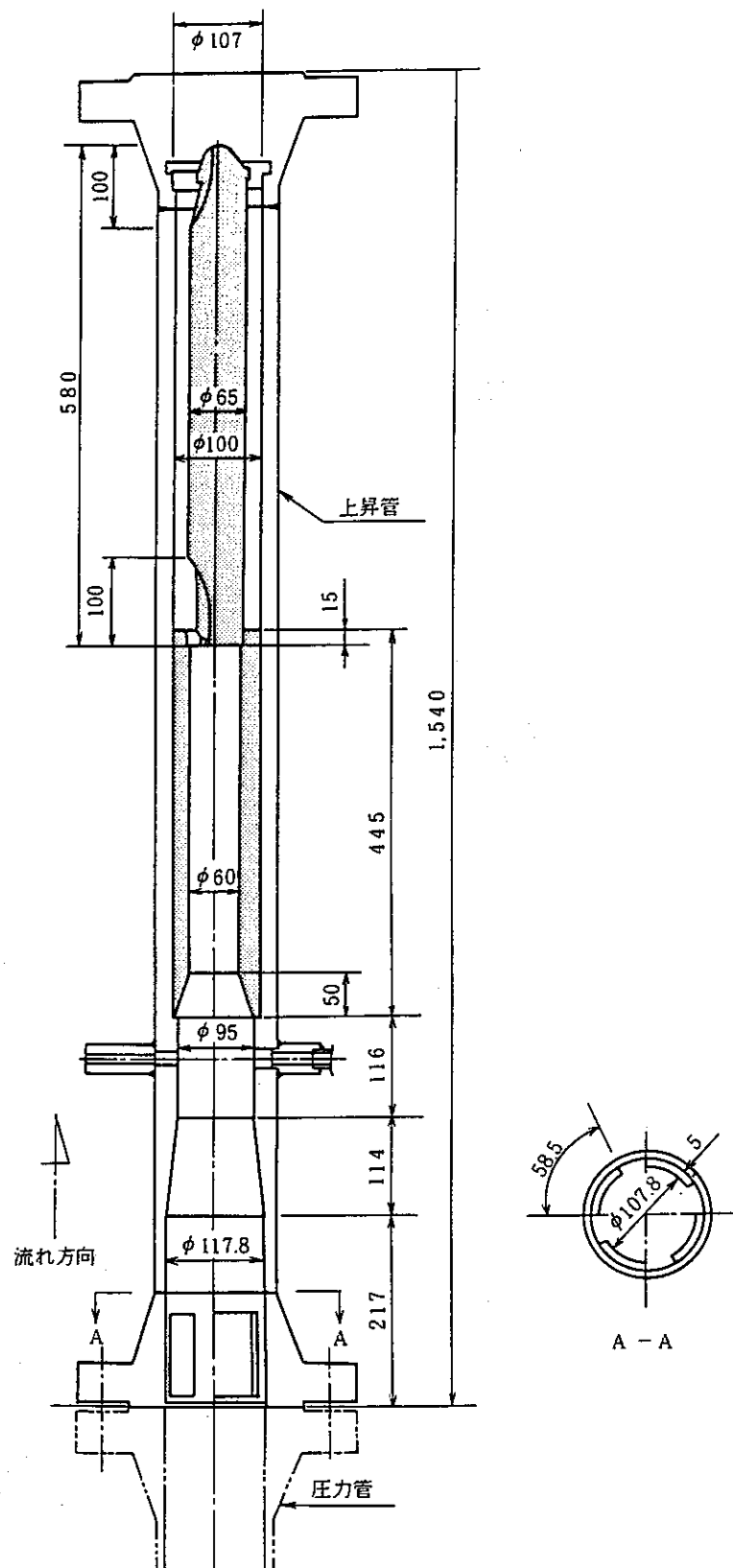


図 2.1-5 遮へいプラグ

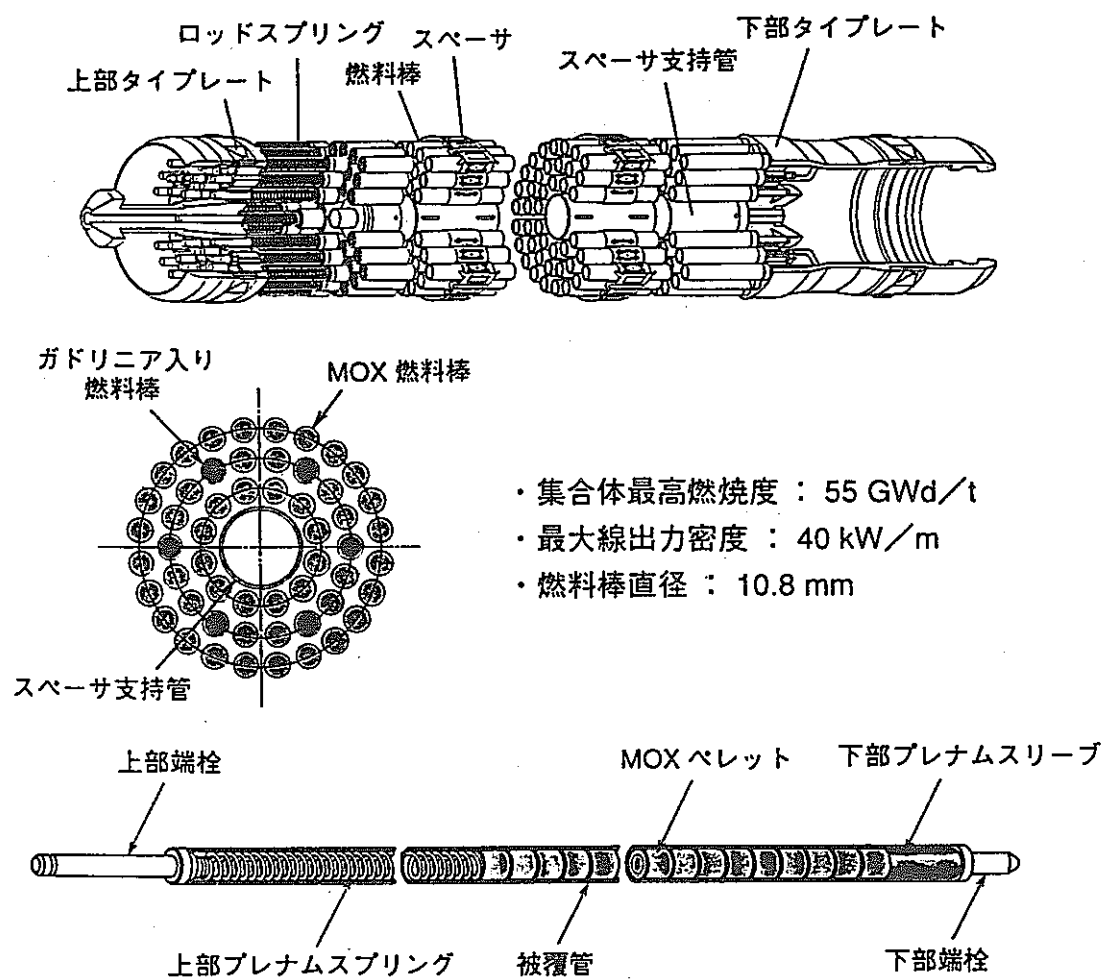
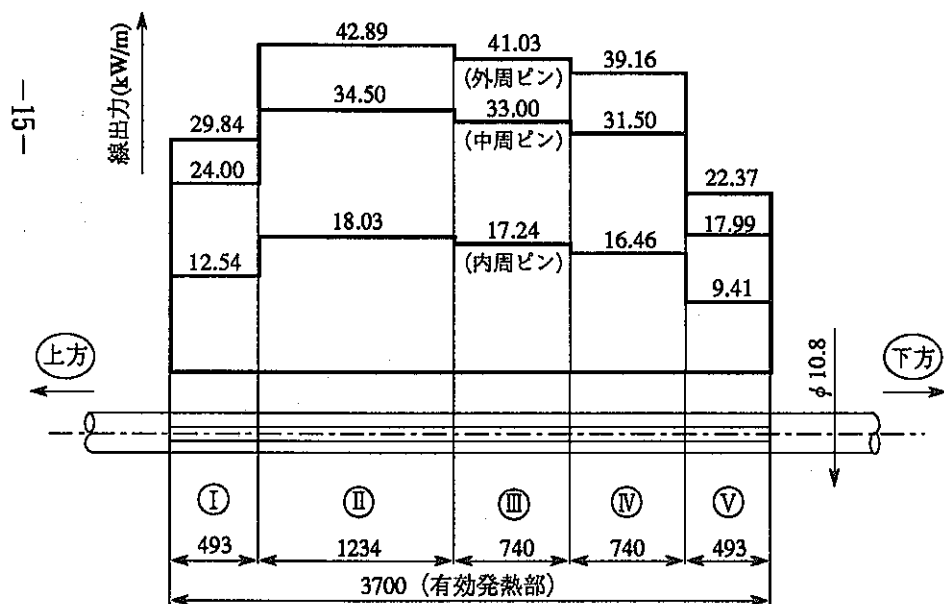


図 2.1-6 54 本燃料集合体構造図



外周ピン

区 分	設計値 (計算値)						
	出力比	出力 (kW)	線出力 (kW/m)	電力密度 (W/cm ²)	定格抵抗 (Ω)	電圧 (V)	電流 (A)
Ⅰ	0.80	14.71	29.84	87.94	0.1001	38.4	383
Ⅱ	1.15	52.93	42.89	126.42	0.3602	138.1	↑
Ⅲ	1.10	30.36	41.03	120.92	0.2066	79.2	↑
Ⅳ	1.05	28.98	39.16	115.42	0.1972	75.6	↑
Ⅴ	0.60	11.03	22.37	65.94	0.0751	28.8	↓
合 計	—	138.0	37.30	—	0.9392	360.0	383

中周ピン

区 分	設計値 (計算値)						
	出力比	出力 (kW)	線出力 (kW/m)	電力密度 (W/cm ²)	定格抵抗 (Ω)	電圧 (V)	電流 (A)
Ⅰ	0.80	11.83	24.00	70.72	0.1245	38.4	308
Ⅱ	1.15	42.57	34.50	101.68	0.4478	138.1	↑
Ⅲ	1.10	24.42	33.00	97.26	0.2569	79.2	↑
Ⅳ	1.05	23.31	31.50	92.84	0.2452	75.6	↑
Ⅴ	0.60	8.87	17.99	53.03	0.0933	28.8	↓
合 計	—	111.0	30.00	—	1.1677	360.0	308

内周ピン

区 分	設計値 (計算値)						
	出力比	出力 (kW)	線出力 (kW/m)	電力密度 (W/cm ²)	定格抵抗 (Ω)	電圧 (V)	電流 (A)
Ⅰ	0.80	6.18	12.54	36.95	0.2382	38.4	161
Ⅱ	1.15	22.25	18.03	53.14	0.8570	138.1	↑
Ⅲ	1.10	12.76	17.24	50.82	0.4916	79.2	↑
Ⅳ	1.05	12.18	16.46	48.51	0.4692	75.6	↑
Ⅴ	0.60	4.64	9.41	27.74	0.1786	28.8	↓
合 計	—	58.0	15.68	—	2.2346	360.0	161

図2.1-7 模擬燃料集合体の軸方向出力分布

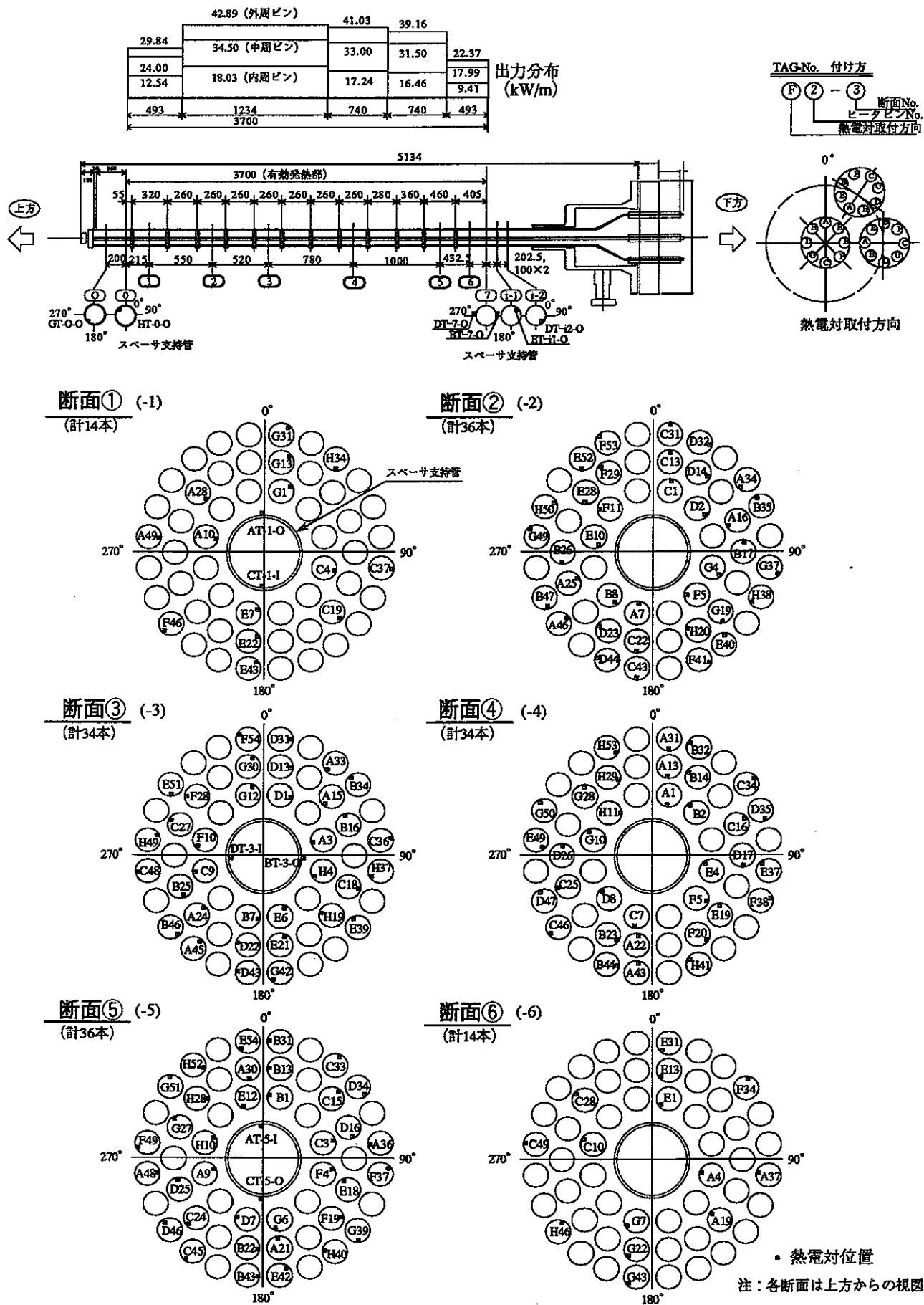


図2.1-8 模擬燃料集合体の温度計装図

2.2 実験条件及び実験方法

2.2.1 実験条件

実験の冷却材条件は表 2.2.1-1 に示すような幅に全ケースが入っており、「ふげん」条件をほぼ完全に模擬した。

表 2.2.1-1 冷却材条件

冷却材条件	ふげん	実験
蒸気ドラム圧力 (kg/cm ² g)	68	70 ^{*1} ±2%
圧力管入口温度 (℃)	284	284±3%
圧力管入口流量 (kg/s)	8.5	8.5±5%

*1) 実験の蒸気ドラムの初期圧力設定は、破断口からの流出量を大きく見込むため定格圧力 (68 kg/cm²g) に対して圧力計測誤差 (±2 kg/cm²) を正側に加えて 70 kg/cm²g とした。

各実験毎の実験条件を表 2.2.1-2、3 に示す。

2.2.2 実験方法

実験の実施手順を以下に示す。

(1) 昇温・昇圧

加熱模擬燃料集合体を用いて実験ループを実験条件まで昇温・昇圧する。

また、蓄圧器に冷却水を張り、約 40℃まで昇温した後、窒素ガスで加圧する。

(2) 実験開始

蒸気ドラム圧力を 70±1 kg/cm²g に設定した後、蒸気ドラム圧力、チャンネル流量等の条件設定を確認し、実験を開始する。

(3) 破断及び過渡変化

ラプチャディスクを破断させるとともに、再循環ポンプのトリップ又はコーストダウン制御及び模擬燃料集合体の出力制御を開始する。

ECCS の注水条件は「ふげん」の注水条件と同一とし、ECCS の作動は、圧力と水位を監視しながら手動にて行う。

(4) 実験終了

ドライアウトした被覆管が全てクエンチして系内の状態が安定したことを確認後、模擬燃料集合体の電源を切り、実験を終了する。

表 2.2.1-2 下降管破断実験条件

実験条件	下降管小破断実験	下降管大破断実験
破断位置	下降管	下降管
破断口径 (mm)	25 ^{*2}	150 ^{*3}
蒸気ドラム圧力 (kg/cm ² g)	69.5	70.5
蒸気ドラム水位 (m)	-0.13	-0.11
冷却材温度 (℃)	282	282
チャンネル数	高出力 ch: 1 低出力 ch: 5	高出力 ch: 1 低出力 ch: 5
チャンネル流量 (m ³ /h)	高出力 ch: 42 低出力 ch: 40	高出力 ch: 41 低出力 ch: 28
チャンネル出力 (MW)	高出力 ch: 0.1 ^{*4} (一定) 低出力 ch: 0.1 (一定)	高出力 ch: 4.7 ^{*5} (最大) 低出力 ch: 0.2 ^{*6} (一定)
再循環ポンプ特性	破断と同時にトリップ 破断後2秒にて回転数0	コーストダウン (回転数半減時間: 5秒)
ECCS ^{*7}	APCI + HPCI	APCI

* 2) 最小破断口径: 安全審査指針で想定する最小破断面積は、冷却材の流出量が補給水系の補給容量となる面積を下限とするとしている。これを「ふげん」で算出すると20mmφ以下であるが、実験では実験装置が所有する最小のオリフィスである25mmφを採用した。

* 3) 最大破断口径: 「ふげん」の下降管破断では、マニホールド部での破断を想定するため流量制限器での流路断面積が破断時の放出流量を決定する。これより、流量制限器での流路断面積 (0.0269m²) × 4 本と、「ふげん」と実験装置の保有水体積比 (7 : 1) より 150 mmφを採用した。

* 4) 「ふげん」スクラム後の崩壊熱出力を模擬した。

* 5) 実験装置は高熱量を長期に渡って冷却する冷却系を持たないため、高出力チャンネルの出力は破断と同時に「ふげん」の最大チャンネル出力まで上昇させ、その後スクラムカーブに合うように制御している。

* 6) 「ふげん」スクラム直後の崩壊熱出力を模擬した。

* 7) ECCSの注水条件は「ふげん」の注水条件と同一とした。

表 2.2.1-3 主蒸気管破断実験条件

実験条件	主蒸気管大破断実験	主蒸気管小破断実験
破断位置	主蒸気管	主蒸気管
破断口径 (mm)	100 ^{*8}	25 ^{*9}
蒸気ドラム圧力 (kg/cm ² g)	70.0	69.6
蒸気ドラム水位 (m)	-0.13	-0.21
冷却材温度 (℃)	282	283
チャンネル数	高出力 ch: 1 低出力 ch: 5	高出力 ch: 1 低出力 ch: 5
チャンネル流量 (m ³ /h)	高出力 ch: 41 低出力 ch: 28	高出力 ch: 42 低出力 ch: 41
チャンネル出力 (MW)	高出力 ch: 4.5 ^{*10} (最大) 低出力 ch: 0.2 ^{*11} (一定)	高出力 ch: 0.1 ^{*12} (一定) 低出力 ch: 0.1 (一定)
再循環ポンプ特性	コーストダウン (回転数半減時間: 5 秒)	コーストダウン (回転数半減時間: 5 秒)
ECCS ^{*7}	APCI	APCI + HPCI

* 8) 最大破断口径: 「ふげん」の格納容器内主蒸気管破断では、流量制限器により放出流量は定格の 200%に抑えられる。これに相当する流路断面積は 0.03576m²であり、下降管破断実験と同様に体積比によって放出口径を決定した。

* 9) 最小破断口径: 下降管小破断実験と同様。

* 10) 下降管大破断実験の条件設定と同様。

* 11) 下降管大破断実験の条件設定と同様。

* 12) 下降管小破断実験の条件設定と同様。

2.3 実験結果

2.3.1 下降管大破断実験

下降管大破断実験結果を図 2.3.1-1～6 に示す。

(1) 蒸気ドラム圧力挙動

蒸気ドラム圧力は、図 2.3.1-1 に示すように、破断とともに圧力降下を開始し、破断後 5 秒付近から蒸気ドラム内で蒸気の巻き込みが開始されるとともに圧力降下速度が速くなる。

(2) 下部ヘッダ圧力挙動

下部ヘッダ圧力は、図 2.3.1-2 に示すように、破断後緩やかな弧を描いて降下し、15 秒に作動した APCI の ECC 水注水により下部ヘッダ内で冷却材が凝縮するため急減圧している。その後、下部ヘッダ内が ECC 水で満水になり、下部ヘッダ圧力の降下が抑制されている。

(3) 炉心入口流量挙動

炉心入口流量は、図 2.3.1-3 に示すように、破断直後に $-45\text{m}^3/\text{h}$ まで逆流し、逆止弁の閉鎖、下部ヘッダ側でのフラッシングにより、正流に転じ増加している。15 秒に作動した APCI の ECC 水注水により下部ヘッダ内で冷却材が凝縮するため、炉心入口流量は一時的に逆流する。その後、ECC 水の注水継続により炉心入口流量は安定する。なお、約 13 秒～約 15 秒間で炉心入口流量が零となっているのは、フラッシングにより蒸気流量が増加し、タービン流量計の計測範囲を超えたため、流量計指示値が、見掛け上、零となったものである。

(4) 蒸気ドラム水位挙動

蒸気ドラム水位は、図 2.3.1-4 に示すように、破断後速やかに低下し、約 20 秒で蒸気ドラム下端に達している。

(5) ECCS 挙動

APCI 流量は、図 2.3.1-5 に示すように、15 秒に注水が開始され、注水開始後 4 秒弱で約 $300\text{m}^3/\text{h}$ に達し、その後、蓄圧器内圧力の降下とともに減少している。

(6) 被覆管温度挙動

被覆管温度は、図 2.3.1-6 に示すように、破断直後の炉心流量の低下によ

り遷移沸騰に移行し、被覆管から冷却材への熱伝達係数が低下するため、上昇する。しかし、スクラムによる出力の低下とフラッシングに伴う炉心流量の増加により、冷却材温度付近までクエンチされる。その後、下部ヘッダへの APCI 注水により下部ヘッダの蒸気が凝縮し炉心流量が一時的に減少するため、被覆管は再度ドライアウトするが、APCI の ECC 水による冷却により再度クエンチし、被覆管は冷却される。

2.3.2 下降管小破断実験

下降管小破断実験の結果を図 2.3.2-1～7 に示す。

(1) 蒸気ドラム圧力挙動

蒸気ドラム圧力は、図 2.3.2-1 に示すように、破断後から HPCI 注水開始 (100 秒) まで緩やかに減少し、HPCI による蒸気ドラム内へのスプレー注水により圧力降下速度が早くなる。その後も圧力降下を続け、APCI の作動圧力に達すると、ECC 水が下部ヘッダに注水され、蒸気ドラム圧力は、わずかに減圧している。

(2) 下部ヘッダ圧力挙動

下部ヘッダ圧力は、図 2.3.2-2 に示すように、150 秒に作動した APCI の ECC 水注水による急減圧を除けば、蒸気ドラム圧力と同様な挙動を示している。

(3) 炉心入口流量挙動

炉心入口流量は、図 2.3.2-3 に示すように、破断後、徐々に低下し、20 秒付近から水位が下降管に到達する 80 秒付近まで約 $5\text{m}^3/\text{h}$ で安定している。その後、下降管内の水位が低下するとともに、炉心入口流量も低下する。100 秒から HPCI のスプレー注水が開始されると蒸気ドラム圧力が減圧し、炉心入口流量は増加している。150 秒に作動した APCI の ECC 水注水により下部ヘッダで冷却材が凝縮するため、一時的に逆流になるが、注水量の増加にともない再び正流になっている。

(4) 蒸気ドラム水位挙動

蒸気ドラム水位は、図 2.3.2-4 に示すように、破断後徐々に低下し、80 秒付近から上昇管より流れ込む冷却材によりほぼ一定の水位となり、その後

HPCI の ECC 水により水位が上昇している。

(5) ECCS 挙動

HPCI は、図 2.3.2-5 に示すように、下降管水位が HPCI 作動開始水位に達した約 100 秒に注水を開始している。HPCI の注水により蒸気ドラム圧力が減圧され、図 2.3.2-6 に示すように約 150 秒に下部ヘッダへ APCI の注水が開始される。

(6) 被覆管温度挙動

被覆管温度は、図 2.3.2-7 に示すように、破断後、徐々に低下している。その後、下部ヘッダへの APCI の注水開始により、被覆管は、瞬時、ドライアウトしているが、すぐに冷却される。約 180 秒からは、APCI の ECC 水による冷却により被覆管温度の低下は速くなっている。

2.3.3 主蒸気管大破断実験

主蒸気管大破断実験の結果を図 2.3.3-1～6 に示す。

(1) 蒸気ドラム圧力挙動

蒸気ドラム圧力は、図 2.3.3-1 に示すように、破断直後に急減圧した後、直線的に圧力降下している。

(2) 下部ヘッダ圧力挙動

下部ヘッダ圧力は、図 2.3.3-2 に示すように、蒸気ドラム圧力と同様に破断直後に急減圧するが、下部ヘッダ側のフラッシングにより圧力降下が抑制される。11 秒に作動した APCI の ECC 水により下部ヘッダ内で冷却材が凝縮するため下部ヘッダ圧力は一時的に急減圧している。

(3) 炉心入口流量挙動

炉心入口流量は、図 2.3.3-3 に示すように、破断直後に $-25\text{m}^3/\text{h}$ まで逆流し、その後、逆止弁の閉鎖、下部ヘッダ側でのフラッシングにより正流に転じ回復している。11 秒に作動した APCI の ECC 水注水により下部ヘッダ内で冷却材が凝縮するため、再び炉心入口流量は逆流する。その後、ECC 水の注水継続により炉心入口流量は安定する。

(4) 蒸気ドラム水位挙動

蒸気ドラム水位は、図 2.3.3-4 に示すように、破断直後、減圧沸騰によ

り一時的に上昇し、約 10 秒後から低下を開始する。

(5) ECCS 挙動

APCI 流量は、図 2.3.3-5 に示すように、11 秒に注水が開始され、注水開始後約 2 秒で約 $220\text{m}^3/\text{h}$ に達し、その後、蓄圧器内圧力の降下とともに減少している。

(6) 被覆管温度挙動

被覆管温度は、図 2.3.3-6 に示すように、破断直後の炉心流量の低下により遷移沸騰に移行し、被覆管から冷却材への熱伝達係数が低下するため、上昇する。しかし、スクラムによる出力の低下とフラッシングに伴う炉心流量の増加により、冷却材温度付近までクエンチされる。その後、下部ヘッダへの APCI の注水開始により下部ヘッダの蒸気が凝縮して炉心流量が一時的に減少するため、被覆管は再度ドライアウトするが、APCI の ECC 水による冷却により再度クエンチし、被覆管は冷却される。

2.3.4 主蒸気管小破断実験

主蒸気管小破断実験の結果を図 2.3.4-1～6 に示す。

(1) 蒸気ドラム圧力挙動

蒸気ドラム圧力は、図 2.3.4-1 に示すように、破断後緩やかに圧力低下する。

(2) 下部ヘッダ圧力挙動

下部ヘッダ圧力は、図 2.3.4-2 に示すように、蒸気ドラム圧力と同様に、破断後緩やかに圧力低下する。

(3) 炉心入口流量挙動

炉心入口流量は、図 2.3.4-3 に示すように、破断後 20 秒程度で $8\text{m}^3/\text{h}$ まで低下し、その後、APCI の ECC 水注水まで $11\text{m}^3/\text{h}$ 程度の自然循環状態を維持する。1050 秒付近で APCI の ECC 水注水により急増している。

(4) 蒸気ドラム水位挙動

蒸気ドラム水位は、図 2.3.4-4 に示すように、主蒸気管大破断実験の結果と同様に、破断後、100 秒付近まで徐々に上昇し、その後、下降に転じる。1050 秒まで水位の低下が続き、APCI 注水開始水位である -0.35m に達し、

APCI の ECC 水注水により回復している。

(5) ECCS 挙動

APCI 流量は、図 2.3.4-5 に示すように、蒸気ドラム水位が APCI 注水開始水位に達した約 1050 秒に注水が開始され、最大流量約 250m³/h に達し、その後、蓄圧器内圧力の降下とともに減少している。

(6) 被覆管温度挙動

被覆管温度は、図 2.3.4-6 に示すように、破断直後より温度低下を示し、その後、APCI 注水開始により炉心部が冷却され、急激に温度低下する。ドライアウトは発生していない。

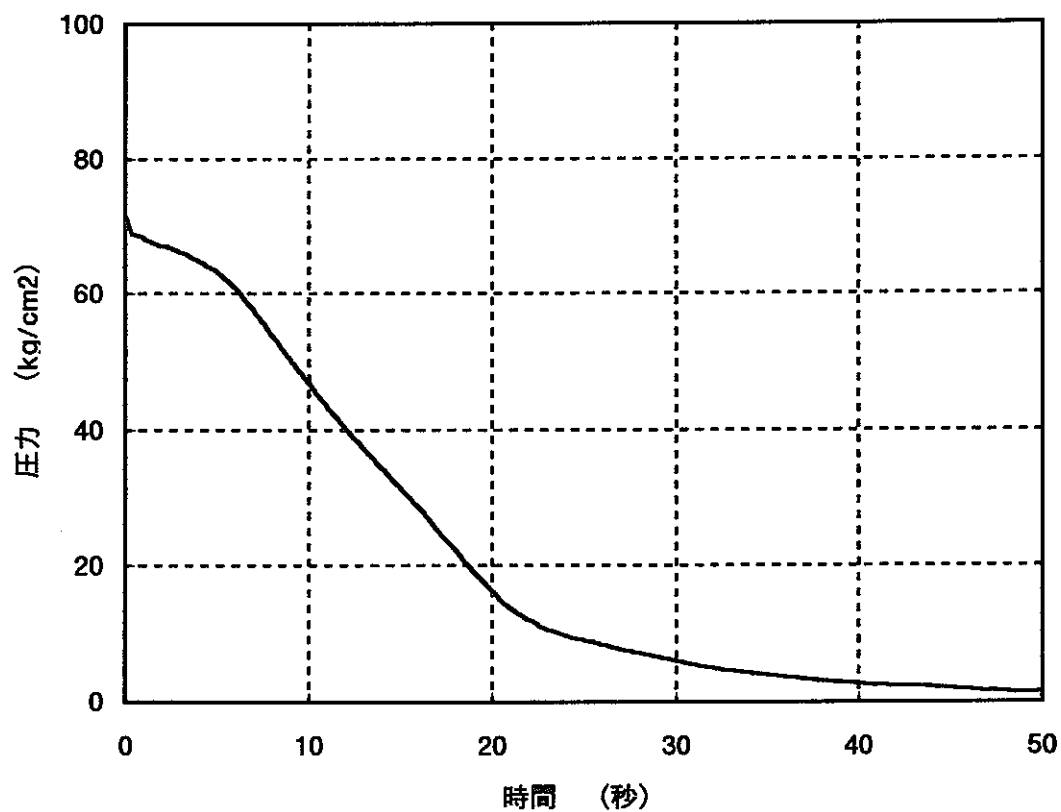


図2.3.1-1 下降管大破断実験結果(蒸気ドラム圧力)

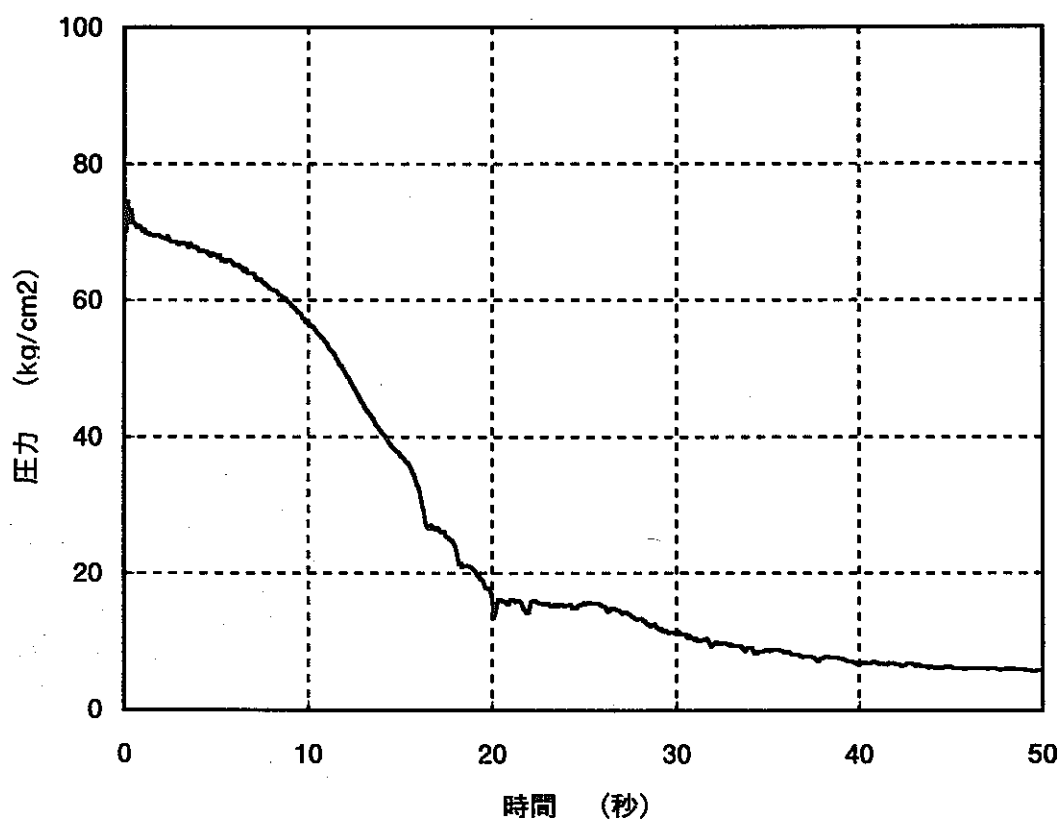


図2.3.1-2 下降管大破断実験結果(下部ヘッダ圧力)

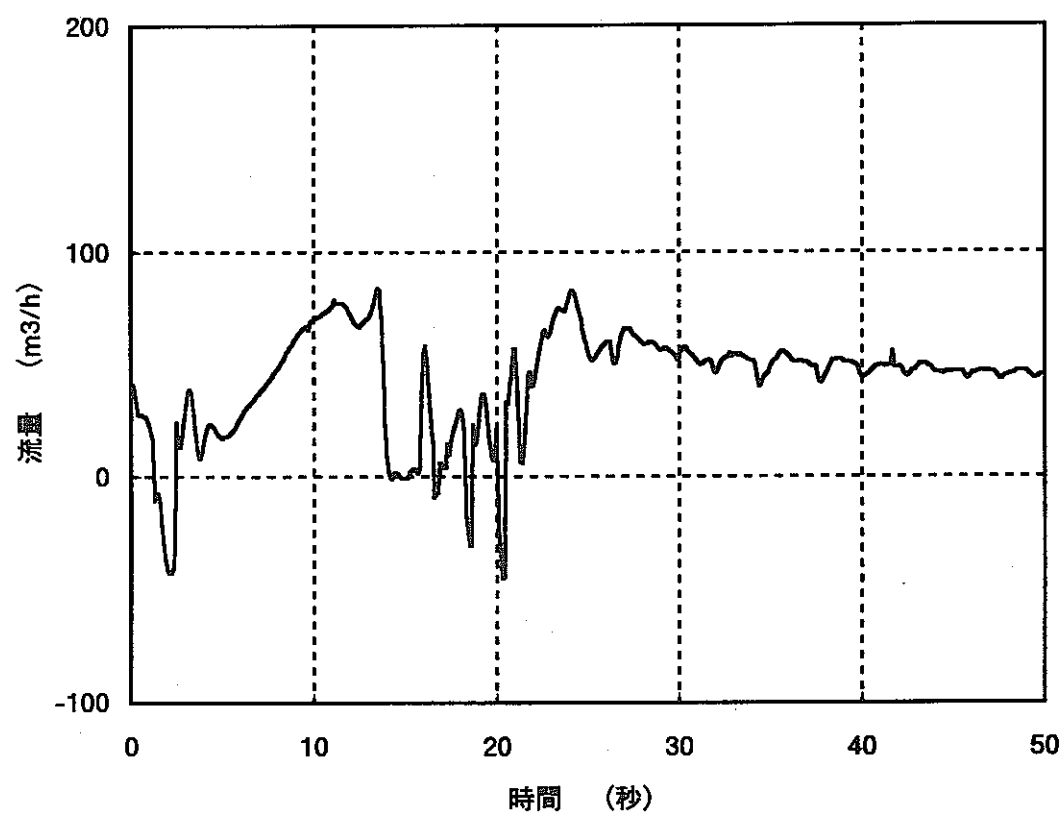


図2.3.1-3 下降管大破断実験結果(炉心入口流量)

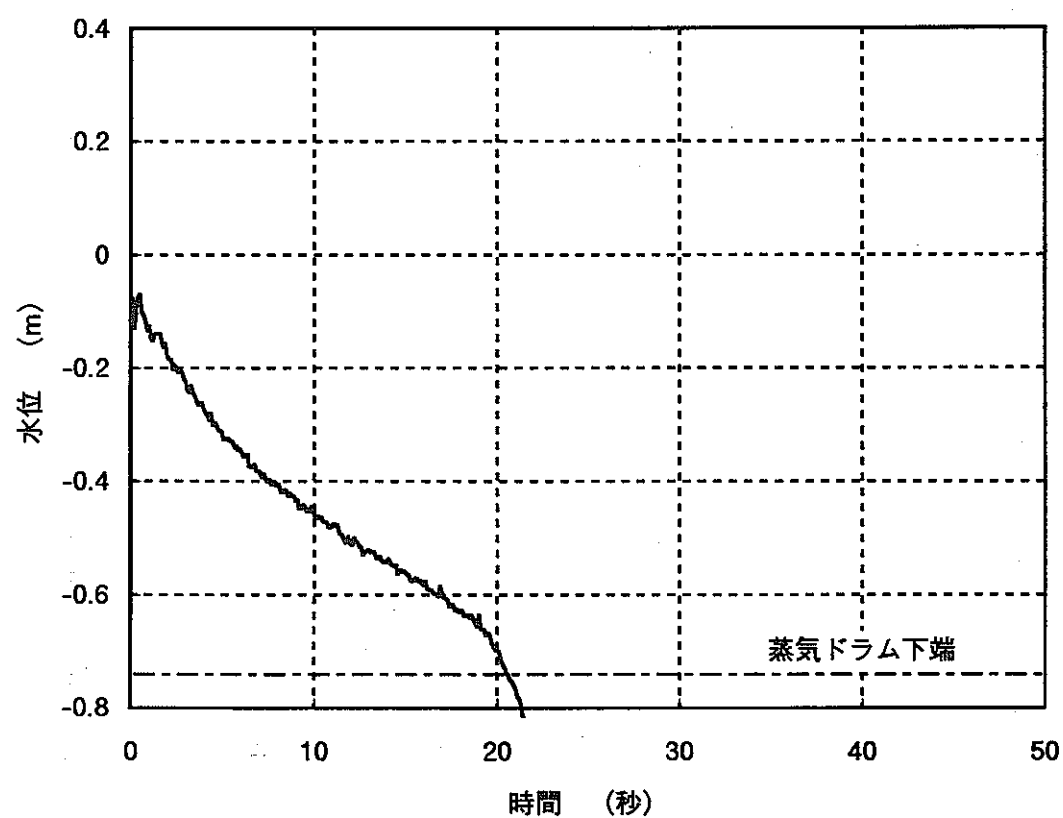


図2.3.1-4 下降管大破断実験結果(蒸気ドラム水位)

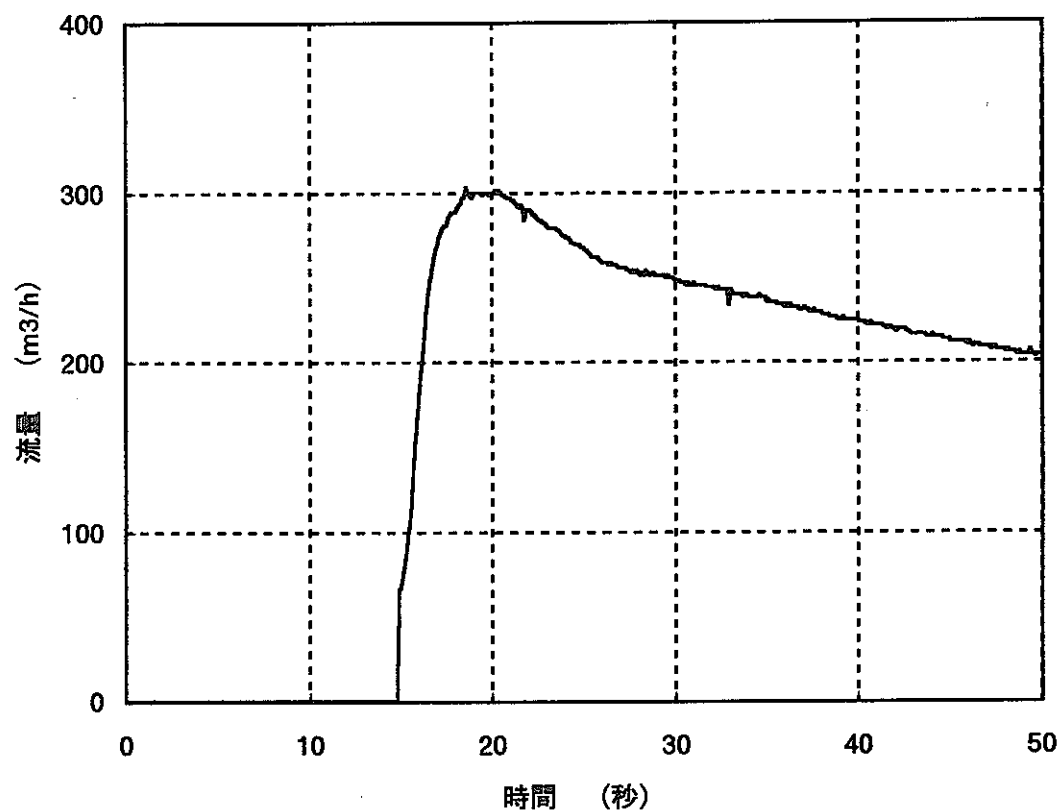


図2.3.1-5 下降管大破断実験結果(APCI流量)

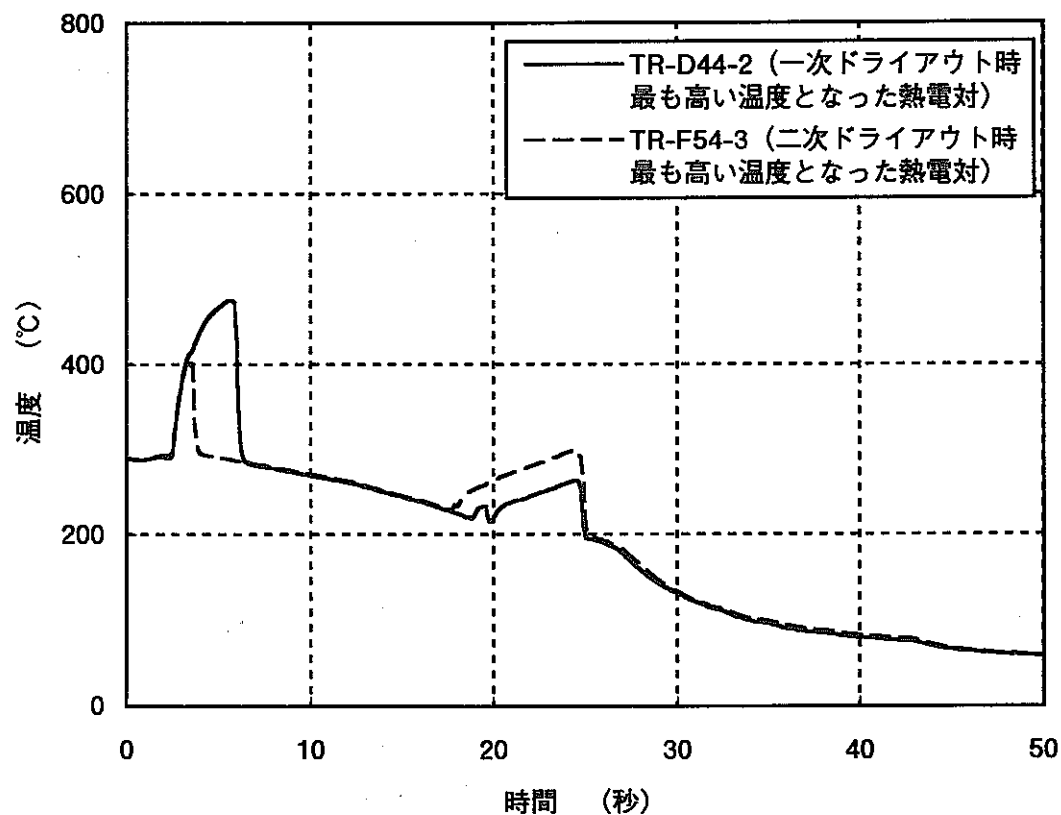


図2.3.1-6 下降管大破断実験結果(外層ピン被覆管温度)

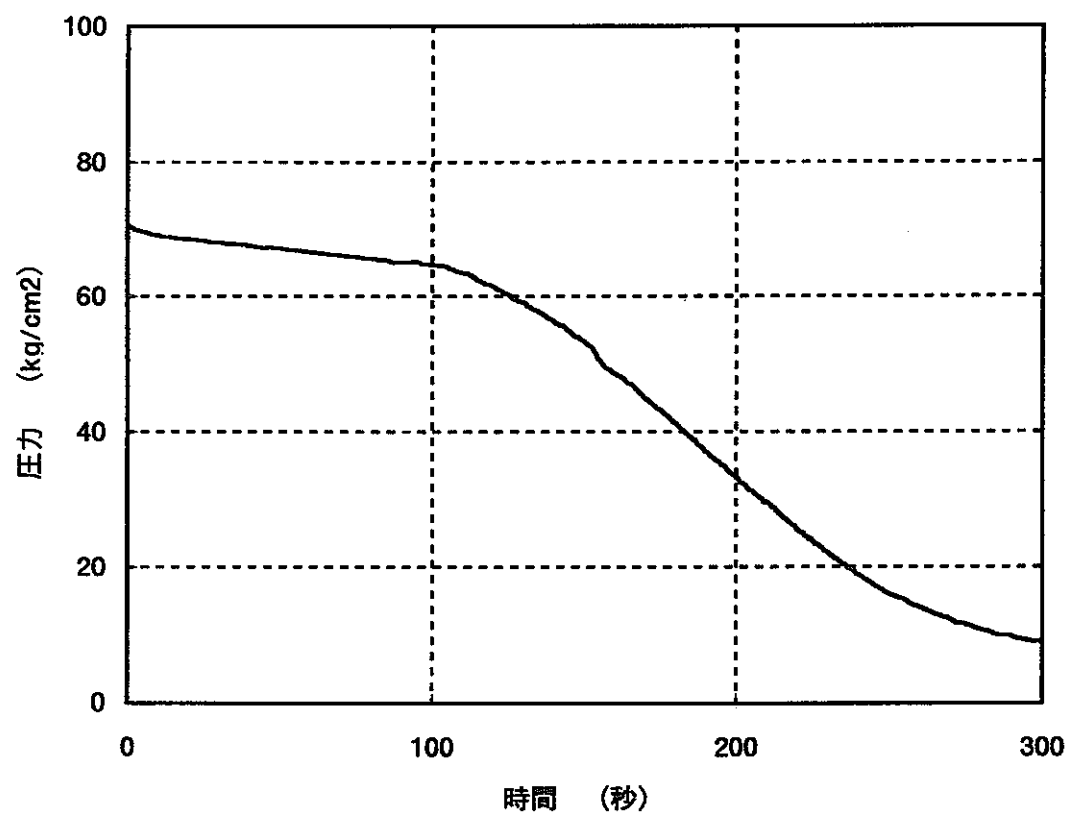


図2.3.2-1 下降管小破断実験結果(蒸気ドラム圧力)

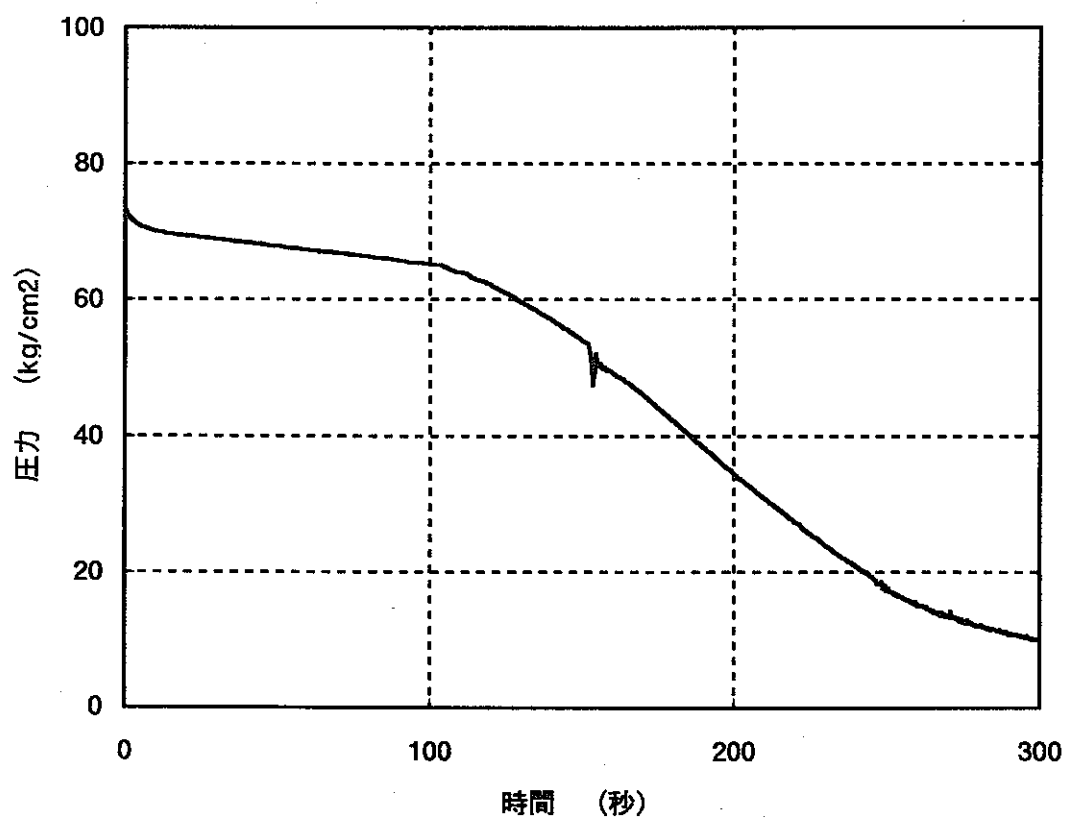


図2.3.2-2 下降管小破断実験結果(下部ヘッダ圧力)

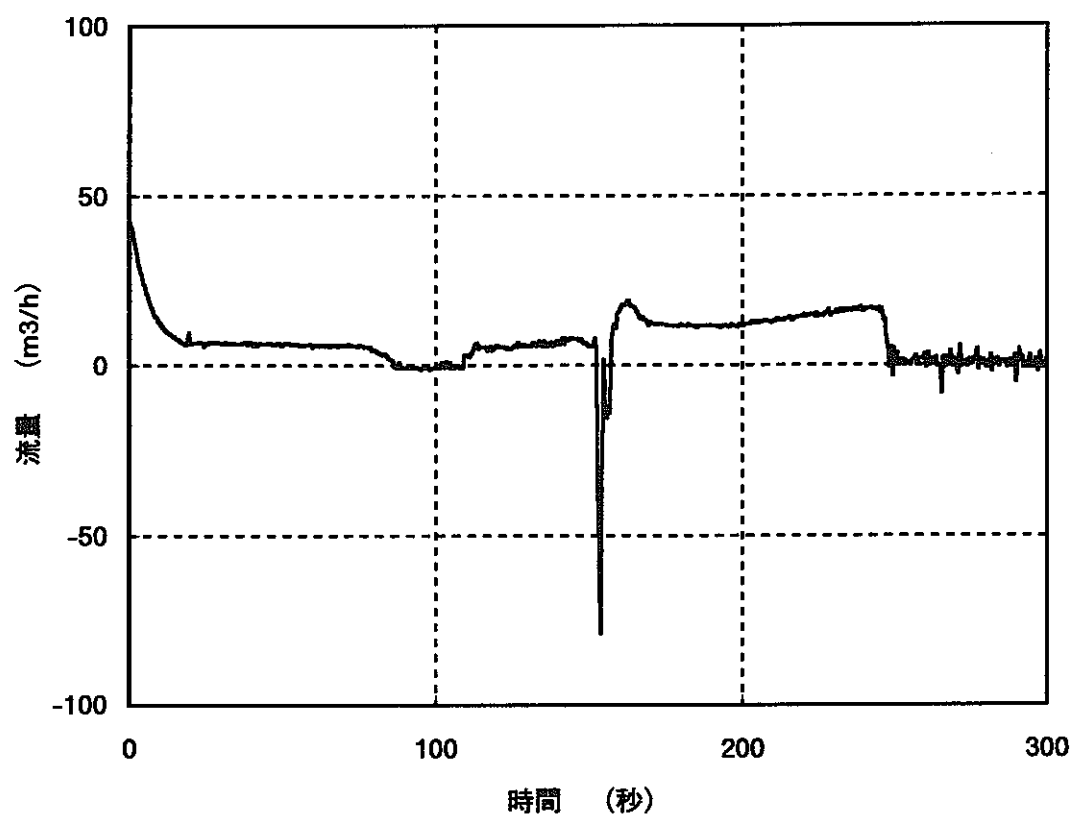


図2.3.2-3 下降管小破断実験結果(炉心入口流量)

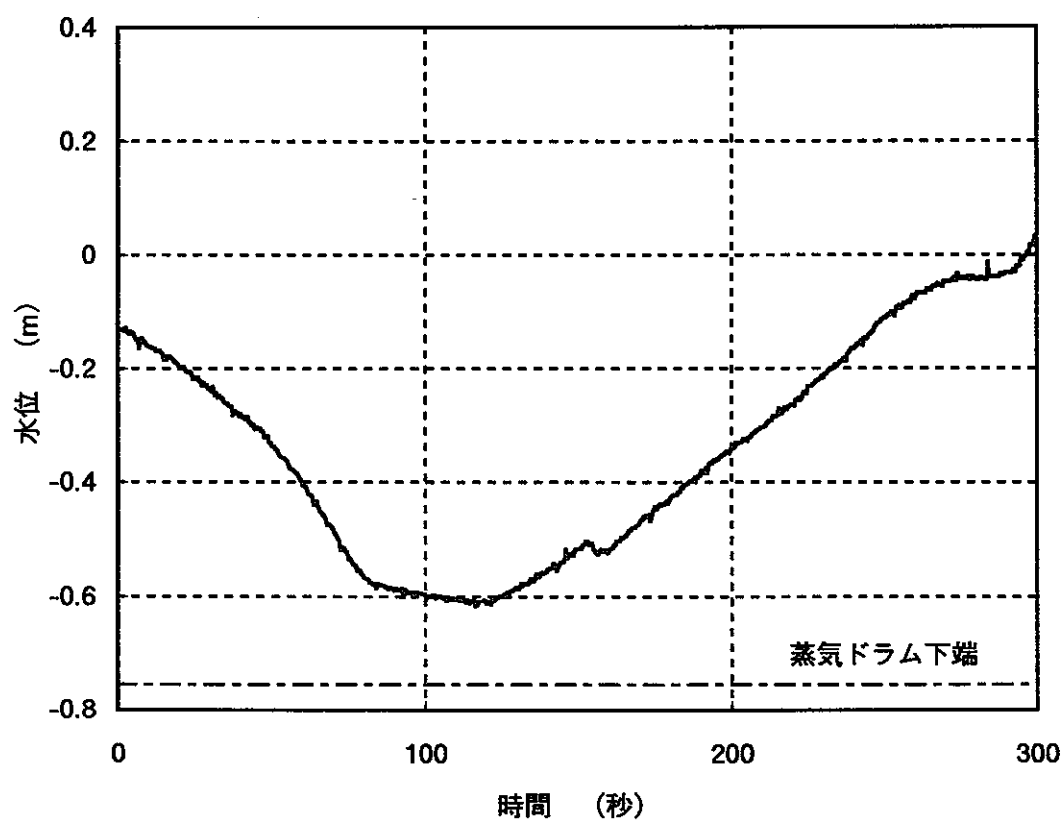


図2.3.2-4 下降管小破断実験結果(蒸気ドラム水位)

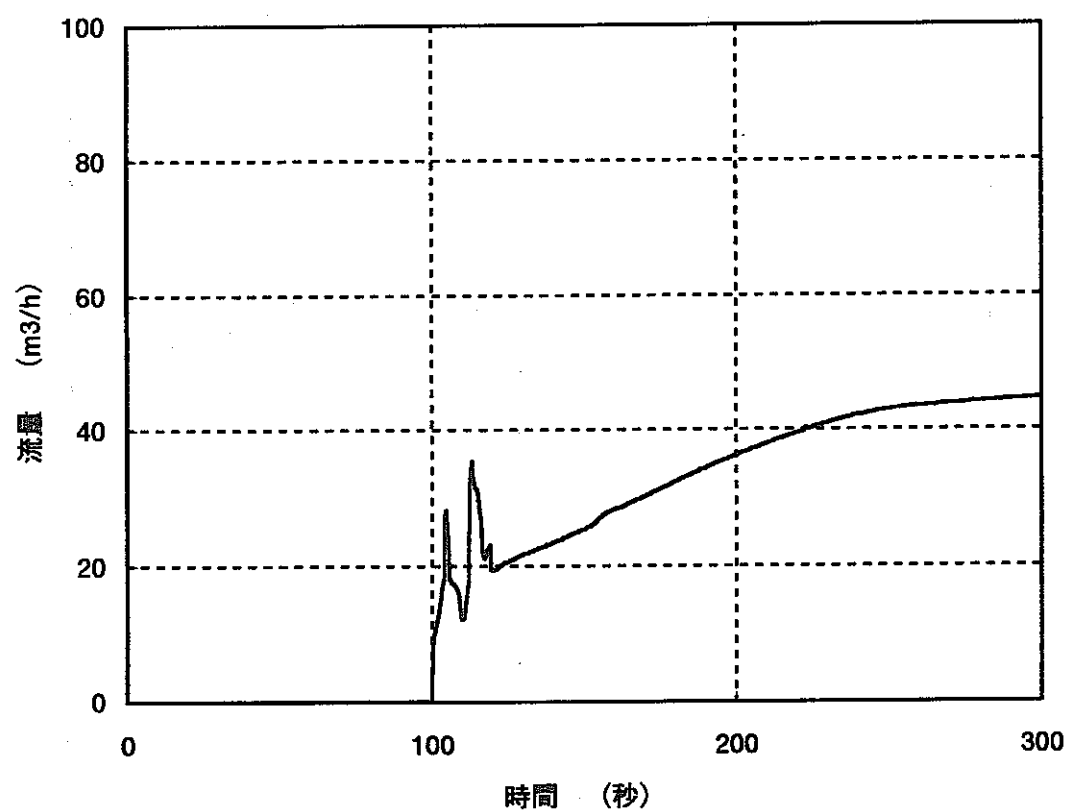


図2.3.2-5 下降管小破断実験結果(HPCI流量)

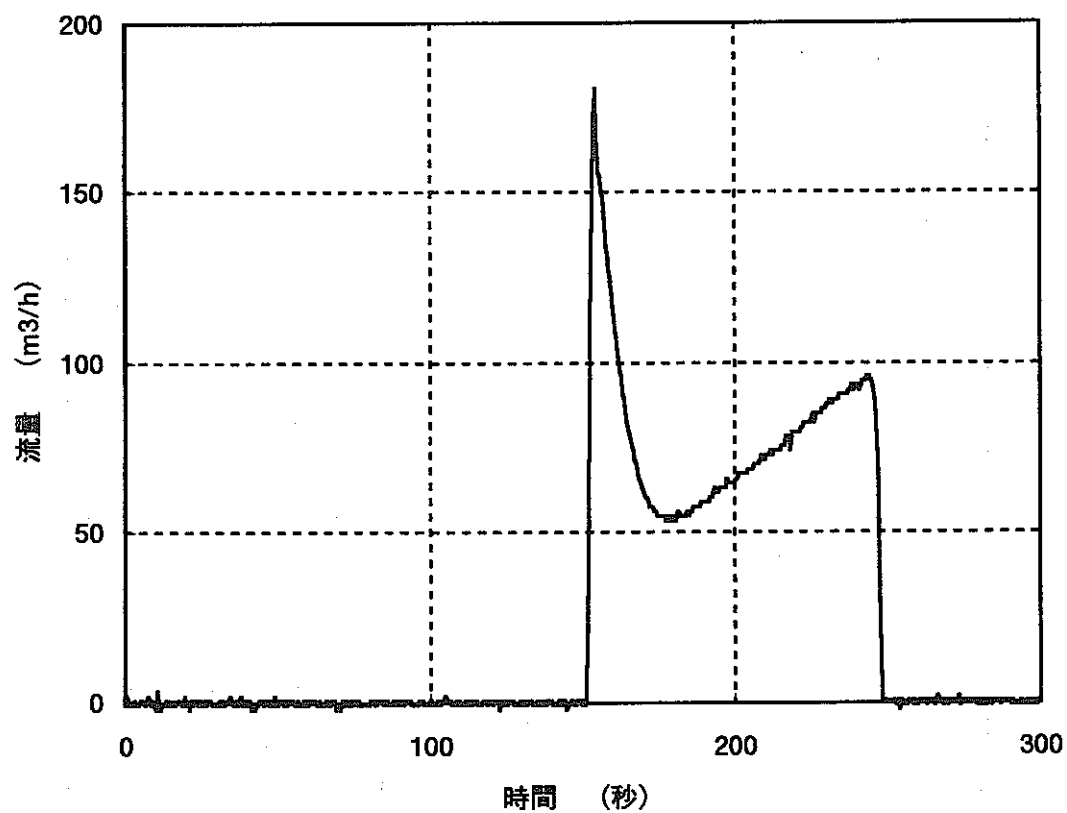


図2.3.2-6 下降管小破断実験結果(APCI流量)

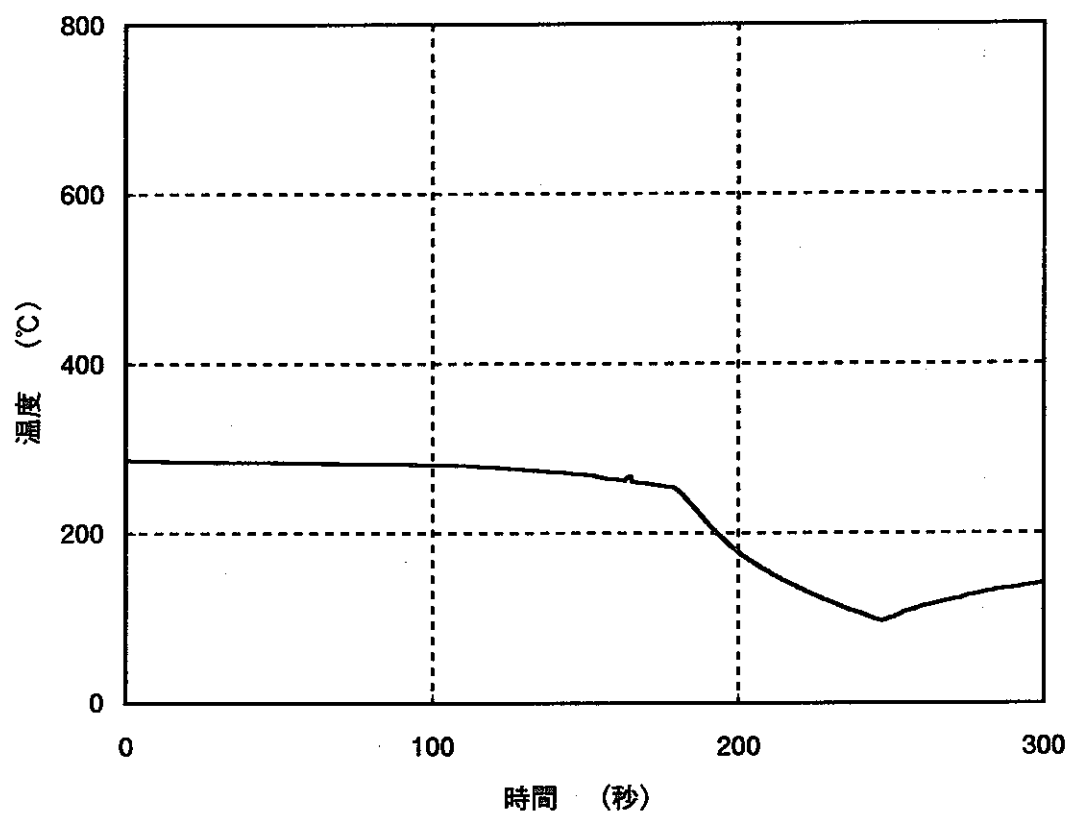


図2.3.2-7 下降管小破断実験結果(外層ピン被覆管温度)

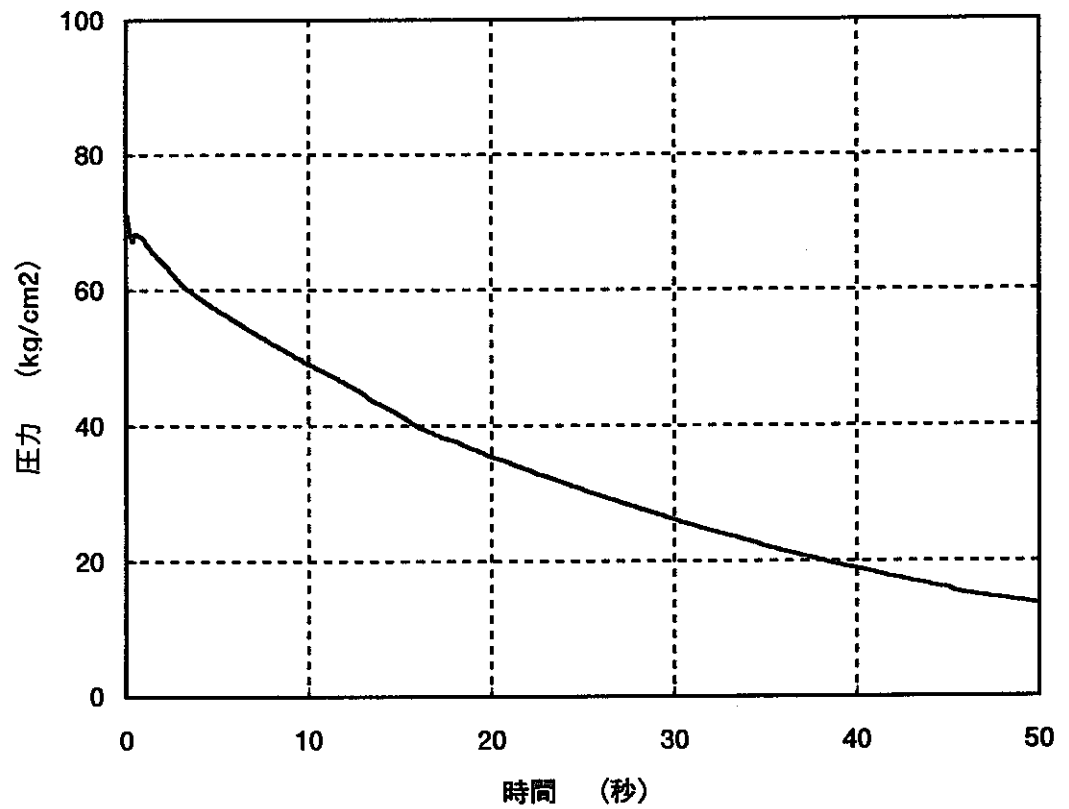


図2.3.3-1 主蒸気管大破断実験結果(蒸気ドラム圧力)

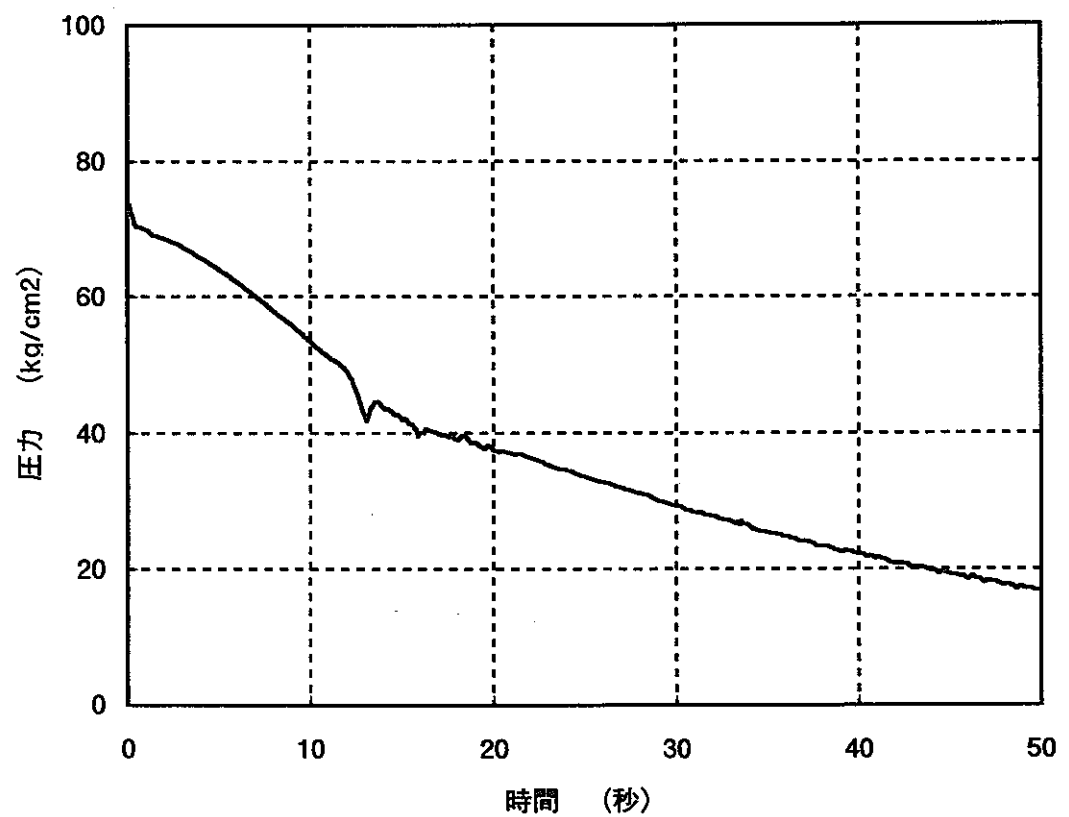


図2.3.3-2 主蒸気管大破断実験結果(下部ヘッダ圧力)

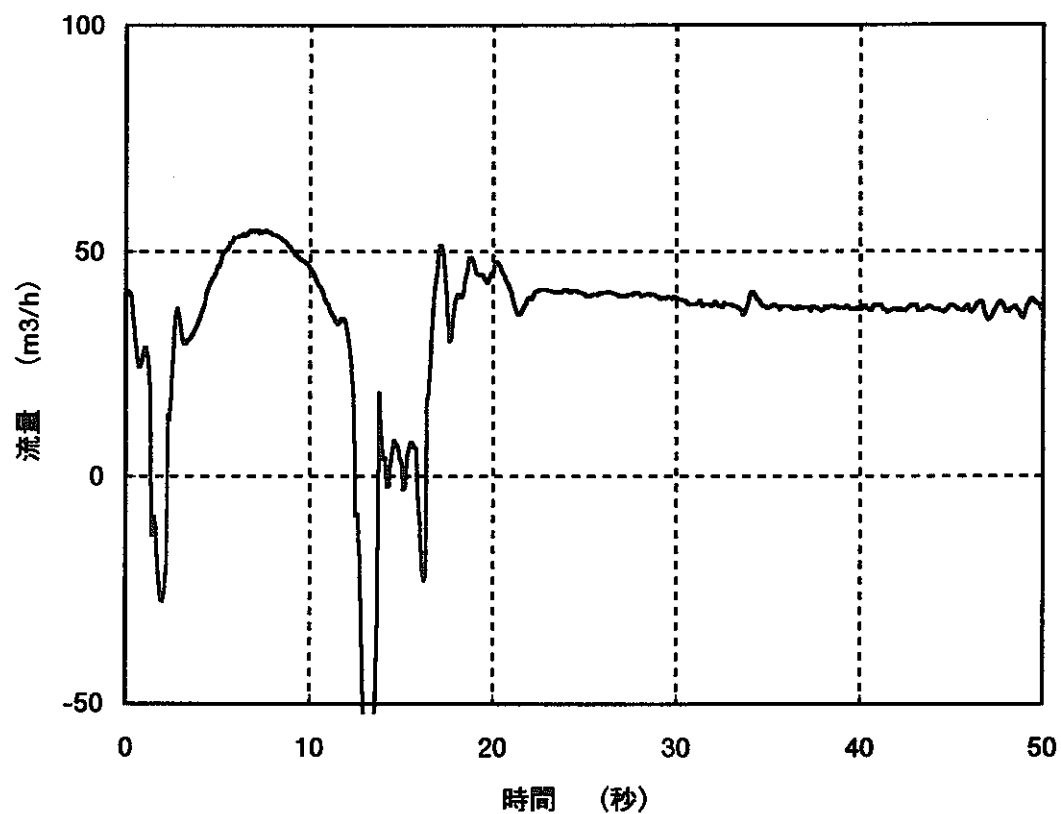


図2.3.3-3 主蒸気管大破断実験結果(炉心入口流量)

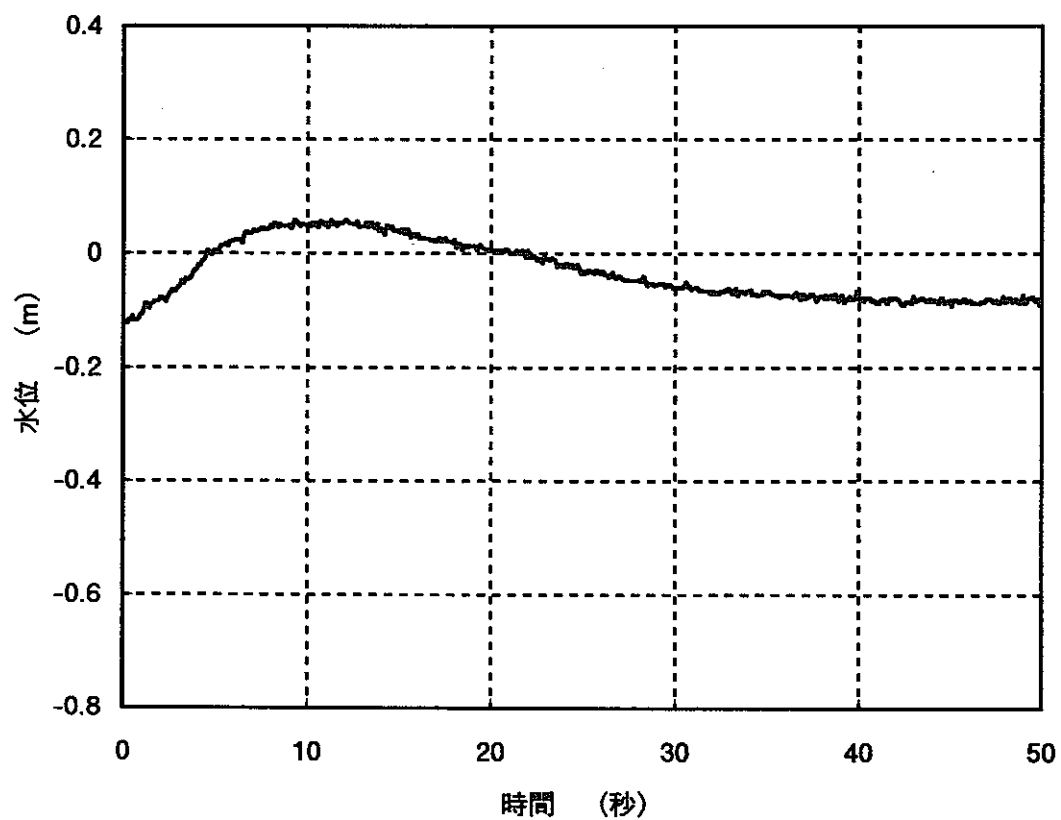


図2.3.3-4 主蒸気管大破断実験結果(蒸気ドラム水位)

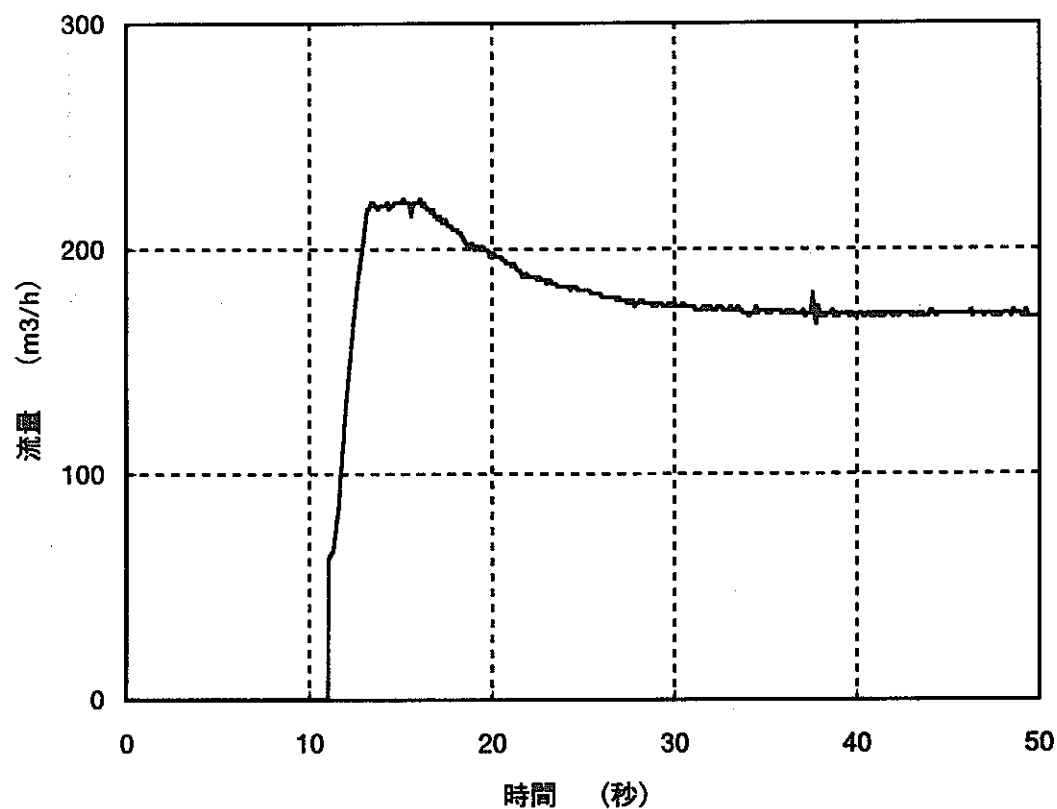


図2.3.3-5 主蒸気管大破断実験結果(APCI流量)

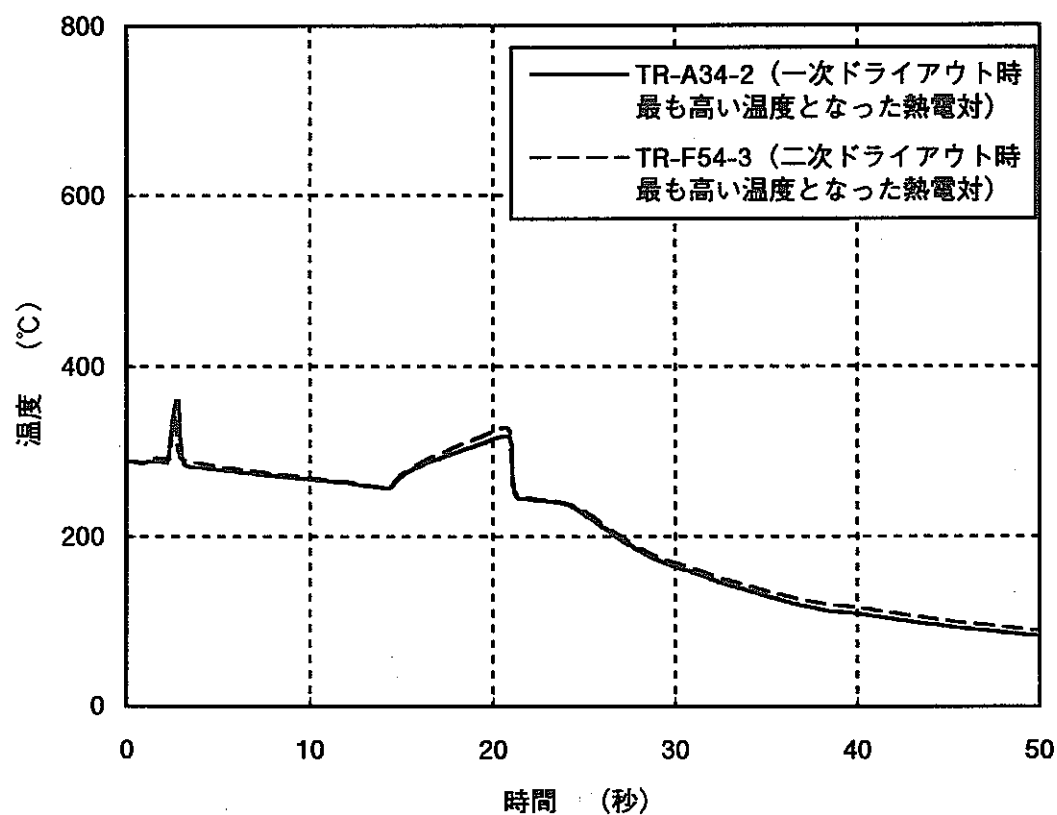


図2.3.3-6 主蒸気管大破断実験結果(外層ピン被覆管温度)

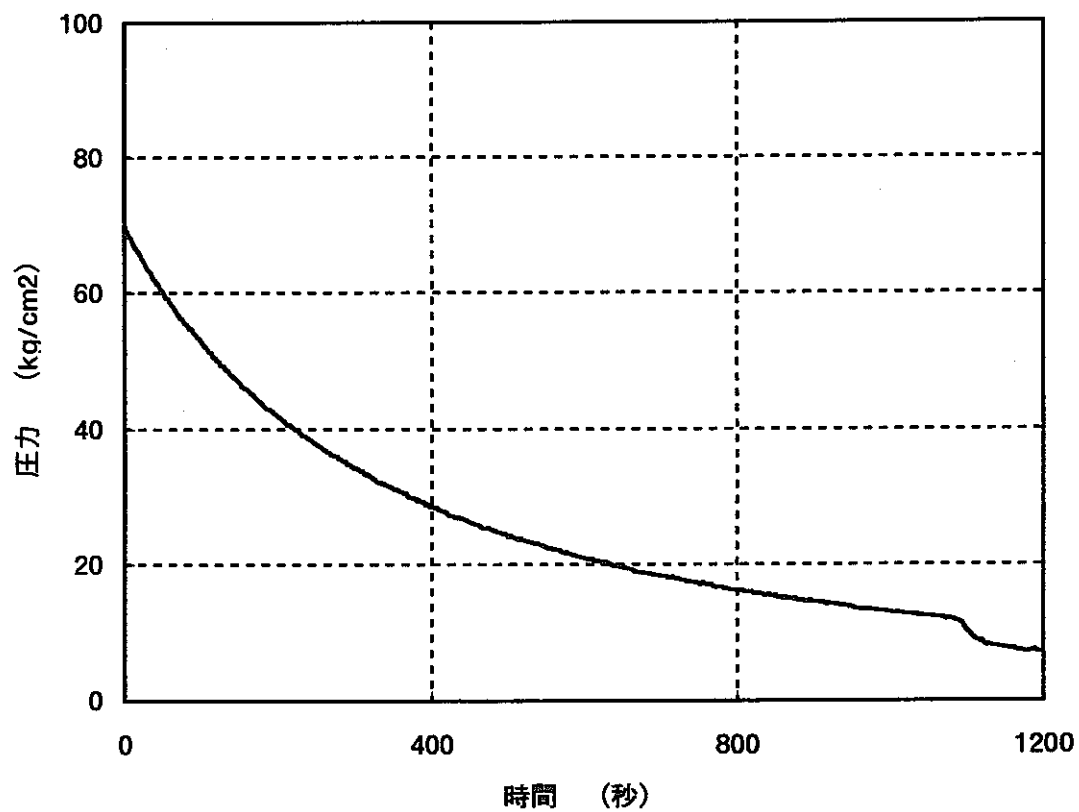


図2.3.4-1 主蒸気管小破断実験結果(蒸気ドラム圧力)

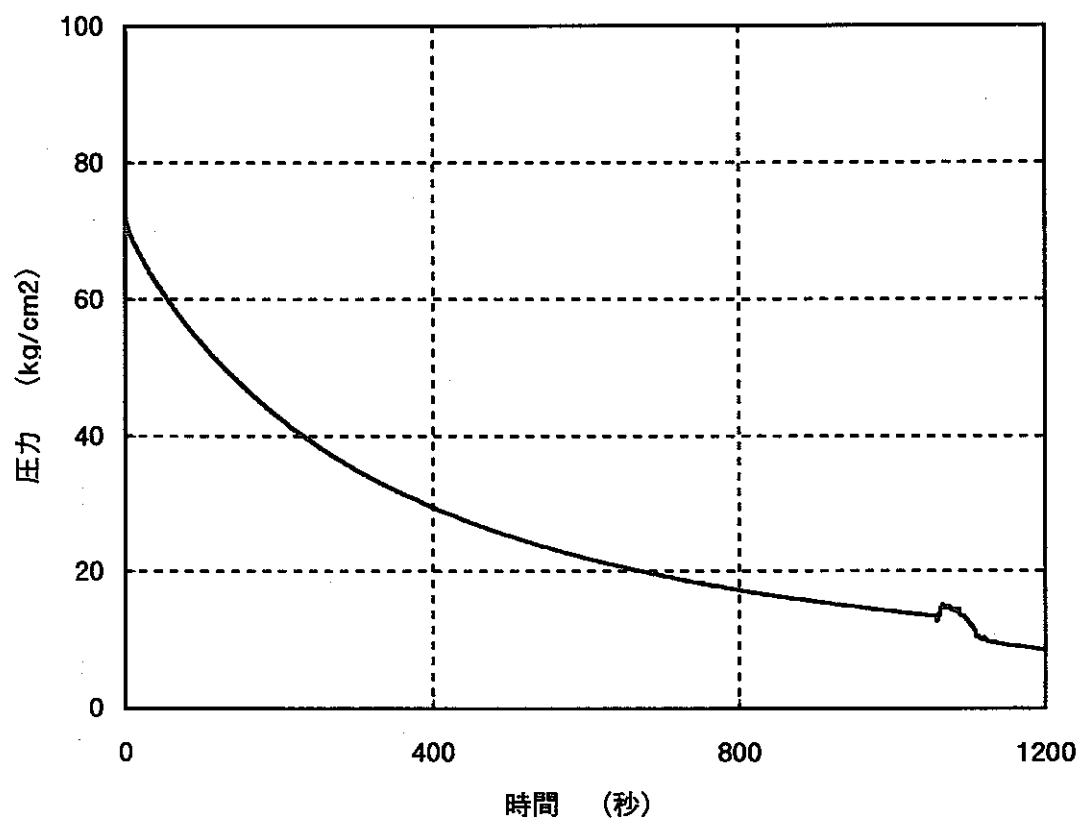


図2.3.4-2 主蒸気管小破断実験結果(下部ヘッド圧力)

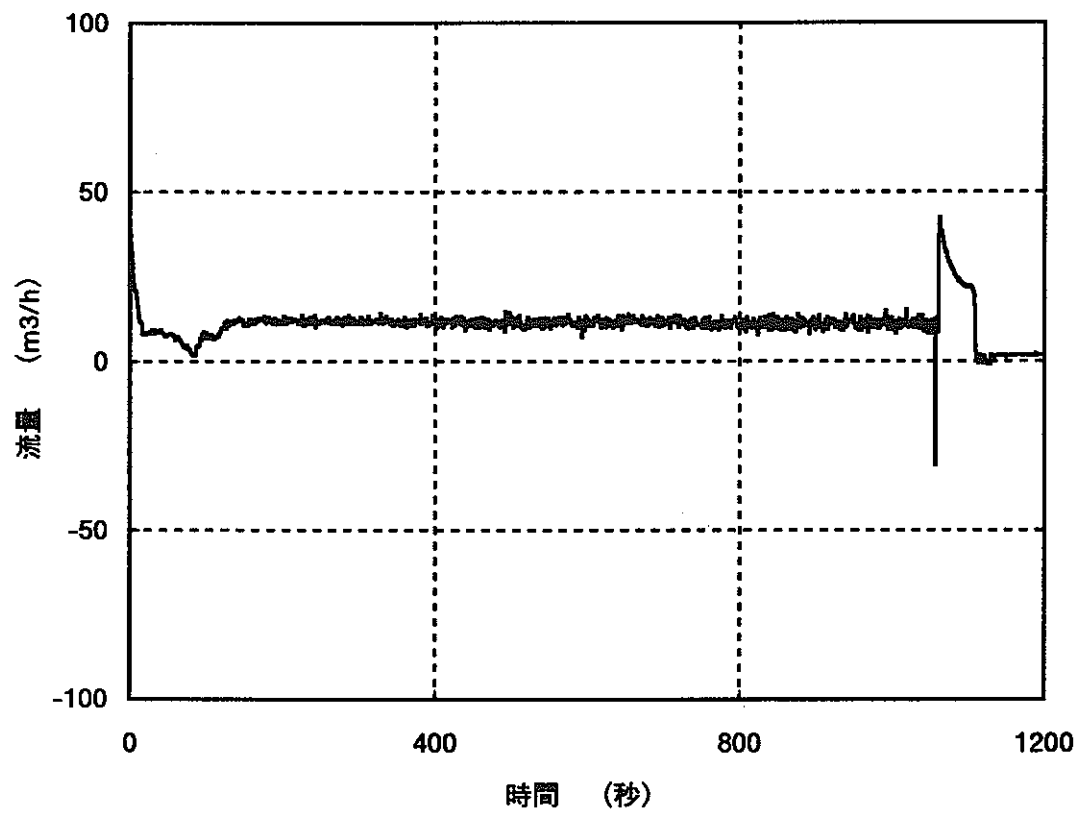


図2.3.4-3 主蒸気管小破断実験結果(炉心入口流量)

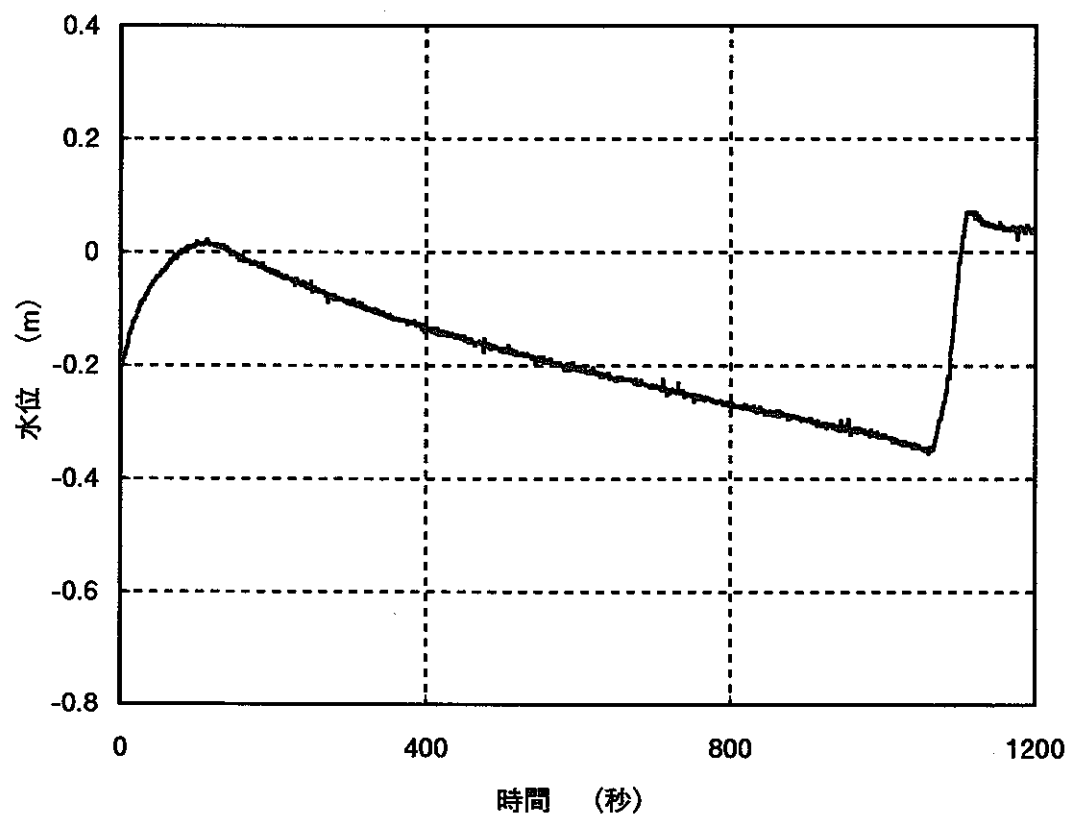


図2.3.4-4 主蒸気管小破断実験結果(蒸気ドラム水位)

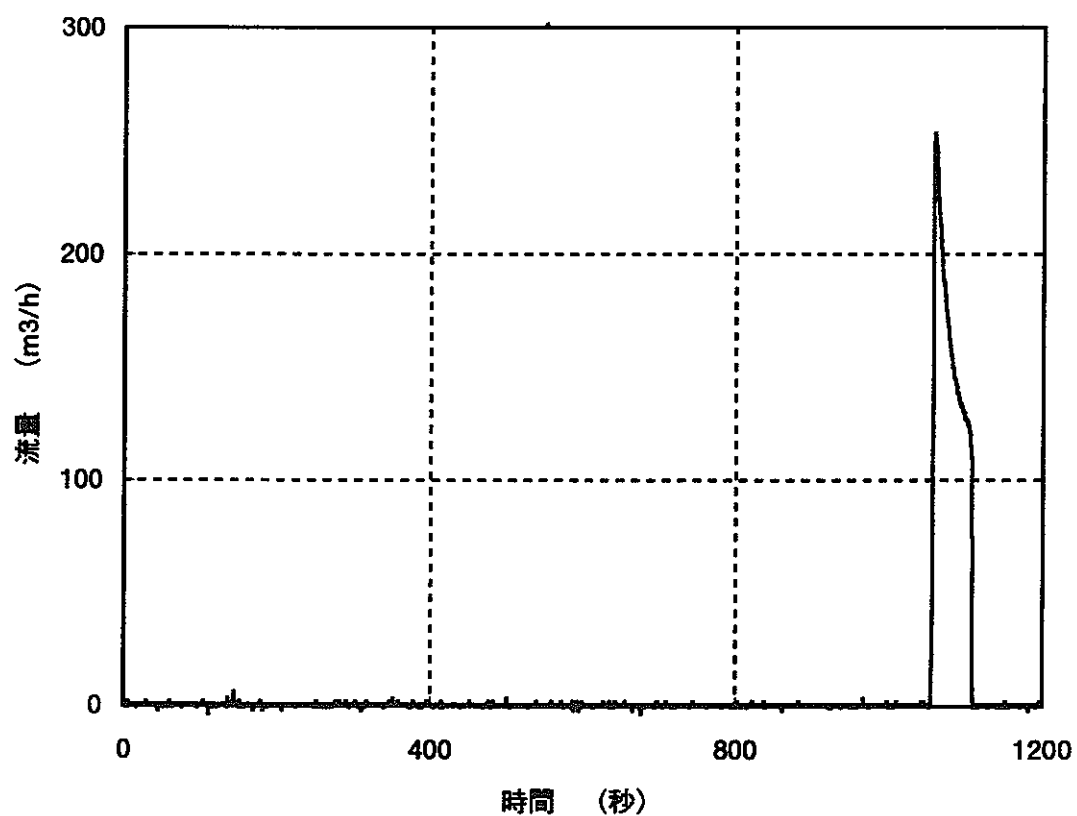


図2.3.4-5 主蒸気管小破断実験結果(APCI流量)

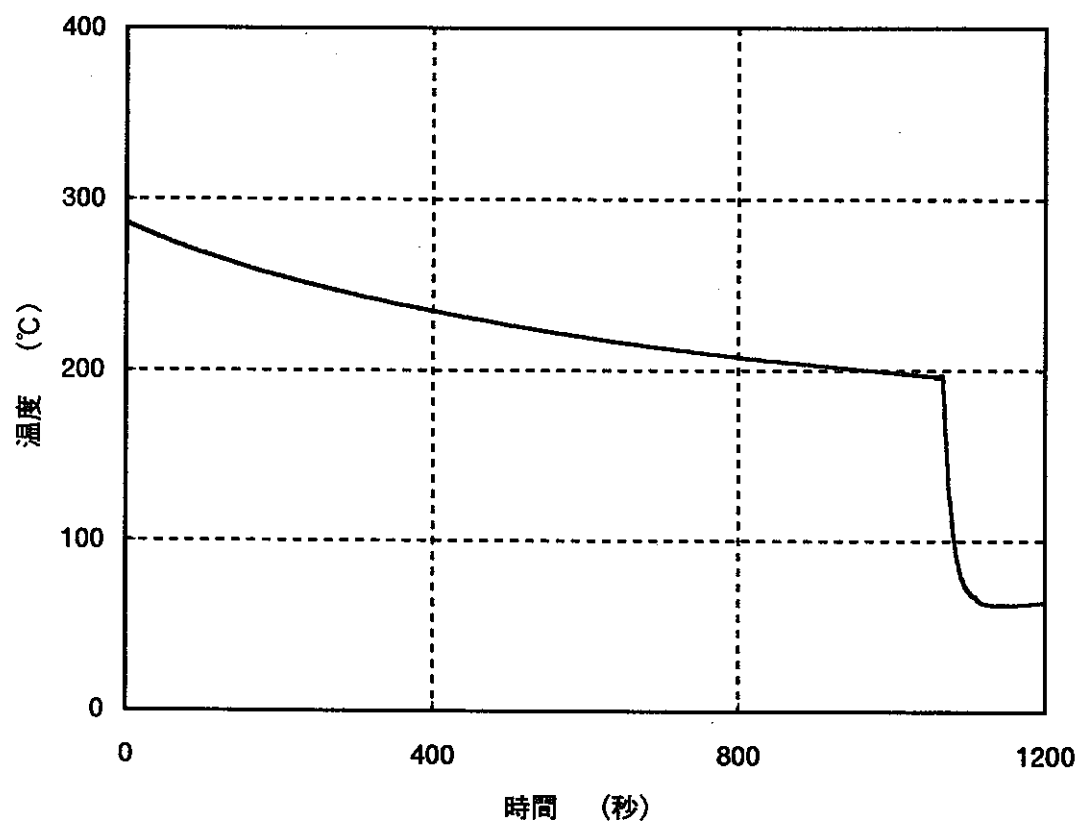


図2.3.4-6 主蒸気管小破断実験結果(外層ピン被覆管温度)

3. 実験解析

3.1 解析コード及び解析モデル

3.1.1 解析コード

A T Rの冷却材喪失事故（以下LOCAという）時の安全評価コードシステム^{(1)、(2)、(3)}を図3.1.1-1に示す。同図に示すように、大破断事故に分類される事象における熱水力過渡変化の評価には大破断時熱水力過渡変化解析コードSENHOR、中小破断事故に分類される事象における熱水力過渡変化の評価には中小破断時総合熱水力過渡変化解析コードLOTRAC、炉心再冠水挙動、燃料温度過渡変化の評価にはそれぞれ炉心再冠水特性解析コードFLOOD、燃料温度詳細解析コードHEATUPを用いている。

以下に、各解析コードの概要を述べる。

(1) SENHORコードの概要

大破断時熱水力過渡変化解析コードSENHORは、A T Rの大破断LOCA解析用に開発されたコードであり、ブローダウン時の原子炉冷却設備内の熱水力学的な挙動及び燃料の温度挙動を解析する。

本コードでは、図3.1.1-2、3に示すように、原子炉冷却設備を蒸気ドラム、下降管、再循環ポンプ、下部ヘッダ、入口管、圧力管集合体、燃料集合体、上昇管からなる体系と考え、配管内の流動、圧力分布、エネルギー分布と蒸気ドラム及び下部ヘッダ内の圧力、保有水量、エネルギーの変化及び燃料要素の温度変化を求める。

本コードの入力は、原子炉熱出力、再循環流量等の初期条件、原子炉の幾何学的形状及び水力学的データ、燃料要素及び炉心に関するデータ、ECCSの性能特性、再循環ポンプ特性、破断の想定位置及び破断面積等であり、出力として、燃料温度挙動解析に使用する炉心での冷却材の圧力、流量、エンタルピー、原子炉熱出力の時間変化、炉心再冠水特性解析に使用する蒸気ドラム圧力の時間変化、ECCS注入開始時間等が求められる。

(2) LOTRACコードの概要

中小破断時総合熱水力過渡変化解析コードLOTRACは、A T Rの中小破断LOCA時における長時間の現象を解析するために開発されたコードであり、ブローダウン時の原子炉冷却設備内の熱水力学的な挙動及び燃料の温度挙動

を解析する。

本コードでは、図3.1.1-4、5に示すように、原子炉冷却設備を蒸気ドラム、下降管、再循環ポンプ、下部ヘッダ、入口管、圧力管集合体、燃料集合体、上昇管からなる体系と考え、配管内流動計算は配管をいくつかのノードに分割し、運動量、質量、エネルギーの各保存則を基礎とし、各ノードでは瞬時完全混合を仮定した差分近似解法にて配管内流動を求める。

本コードの入力は、原子炉熱出力、再循環流量等の初期条件、原子炉の幾何学的形状及び水力学的データ、燃料要素及び炉心に関するデータ、ECCSの性能特性、再循環ポンプ特性、破断の想定位置及び破断面積等であり、出力として、燃料温度挙動解析に使用する炉心での冷却材の圧力、流量、エンタルピ、原子炉熱出力の時間変化、燃料被覆管温度ターンアラウンド開始時間、ターンアラウンド後熱伝達率等が求められる。

(3) FLOODコードの概要

炉心再冠水特性解析コードFLOODは、ATRのLOCA時の再冠水過程における燃料被覆管温度ターンアラウンド開始時間及びターンアラウンド後の熱伝達率を解析するコードである。

本コードでは、図3.1.1-6に示すように、何本かの配管と、それらをつなぐヘッダと配管の途中に介在する弁からなる体系を考え、配管内の流動は水単相ピストン型の流動として扱い、両端の圧力差による軸方向一次元モデルの運動量保存式とヘッダ及び配管接合部での質量保存式により求める。

本コードの入力は、原子炉の幾何学的形状、燃料要素及び炉心に関するデータ、ECCS性能特性、SENHORにより求められる蒸気ドラム圧力及び下部ヘッダ圧力変化、ECCS注入開始時間等であり、出力として、ECCS注入流量の時間変化、配管内水位変化、平均再冠水速度、燃料被覆管温度ターンアラウンド開始時間及びターンアラウンド後の熱伝達率等が求められる。

(4) HEATUPコードの概要

燃料温度詳細解析コードHEATUPは、燃料集合体温度挙動の詳細を求めるコードである。

伝熱計算は、図3.1.1-7に示すように、燃料要素、冷却材、圧力管、断熱

ガス層、カランドリア管、減速材を含む燃料集合体軸方向に直角な 1 断面について行う。燃料被覆管表面熱伝達は、対流及び輻射による熱伝達を考慮する。対流熱伝達率は、次のモデルに基づいて計算する。

- a. 未飽和单相強制対流熱伝達率；Dittus-Boelterの式⁽⁴⁾
- b. 強制対流核沸騰熱伝達率；Jens-Lottesの式⁽⁵⁾
- c. 強制対流膜沸騰熱伝達率；HTLの式⁽⁶⁾
- d. 蒸気单相強制対流熱伝達率；McEligotの式⁽⁷⁾

また、金属－水反応計算はBaker-Justの式⁽⁸⁾に基づいて計算する。

本コードの入力は、燃料要素及び炉心に関するデータ、SENHORにより求められる炉心での冷却材圧力、流量、エンタルピー、原子炉熱出力の時間変化及び FLOODにより求められる燃料被覆管温度ターンアラウンド開始時間、ターンアラウンド後の熱伝達率等であり、出力として、燃料エンタルピー、燃料被覆管最高温度、金属－水反応量等が求められる。

3.1.2 解析条件

(1) 下降管大破断実験解析

下降管大破断実験の解析は、SENHOR コード、FLOOD コード、HEATUP コードを用いて行った。

SENHOR コードによる解析では、図 3.1.1-2 に示すように、6 本ある圧力管を高出力チャンネル(1本の保有水量)と低出力チャンネル(5本の保有水量)の2本でモデル化した。FLOOD コードによる解析では、図 3.1.1-6 に示すように、高出力チャンネル、低出力チャンネル、APCI 配管から構成される体系を考えた。入力データは、SENHOR により求められた解析結果(冷却材温度、熱伝達率、熱出力など)を用いた。HEATUP コードの解析体系である PCT 断面におけるロッドの配列を図 3.1.1-7 に示す。ここで、ガドリニア入り燃料ピン(以下ガドリピン)は、No.15、18、21、24、27、30 である。入力データは、SENHOR 及び FLOOD より求められた解析結果(PCT 断面における圧力、流量、エンタルピー及びターンアラウンド開始時間、ター

ンアラウンド後の熱伝達率など)を用いた。解析の初期条件は、2章に示した実験条件を考慮して設定した。また、流出係数 C_D は0.65を設定した。

(2) 下降管小破断実験解析

下降管小破断実験の解析は、LOTRAC コード、HEATUP コードを用いて行った。

LOTRAC コードによる解析では、図 3.1.1-4 に示すように、6 本ある圧力管を1本の出力チャンネルでモデル化した。小破断実験では、2章で述べたように各チャンネルともに同一出力であるため、各チャンネル間で有為な差はない。このため、解析では、6チャンネルを1本に束ねて扱った。HEATUP コードの解析体系である PCT 断面におけるロッドの配列を図 3.1.1-7 に示す。解析の初期条件は、2章に示した実験条件を考慮して設定した。また、流出係数 C_D は1.0を設定した。

(3) 主蒸気管大破断実験解析

主蒸気管大破断実験の解析は、SENHOR コード、FLOOD コード、HEATUP コードを用いて行った。

SENHOR コード、FLOOD コード解析のノーディングを図 3.1.1-3、-6 に、HEATUP コードの解析の体系である PCT 断面におけるロッドの配列を図 3.1.1-7 に示す。解析の初期条件は、2章に示した実験条件を考慮して設定した。また、流出係数 C_D は0.65を設定した。

(4) 主蒸気管小破断実験解析

主蒸気管小破断実験の解析は、LOTRAC コードを用いて行った。

LOTRAC コードによる解析では、図 3.1.1-5 に示すように、安全弁からの放出で破断を模擬した。解析の初期条件は、2章に示した実験条件を考慮して設定した。また、流出係数 C_D は0.7を設定した。

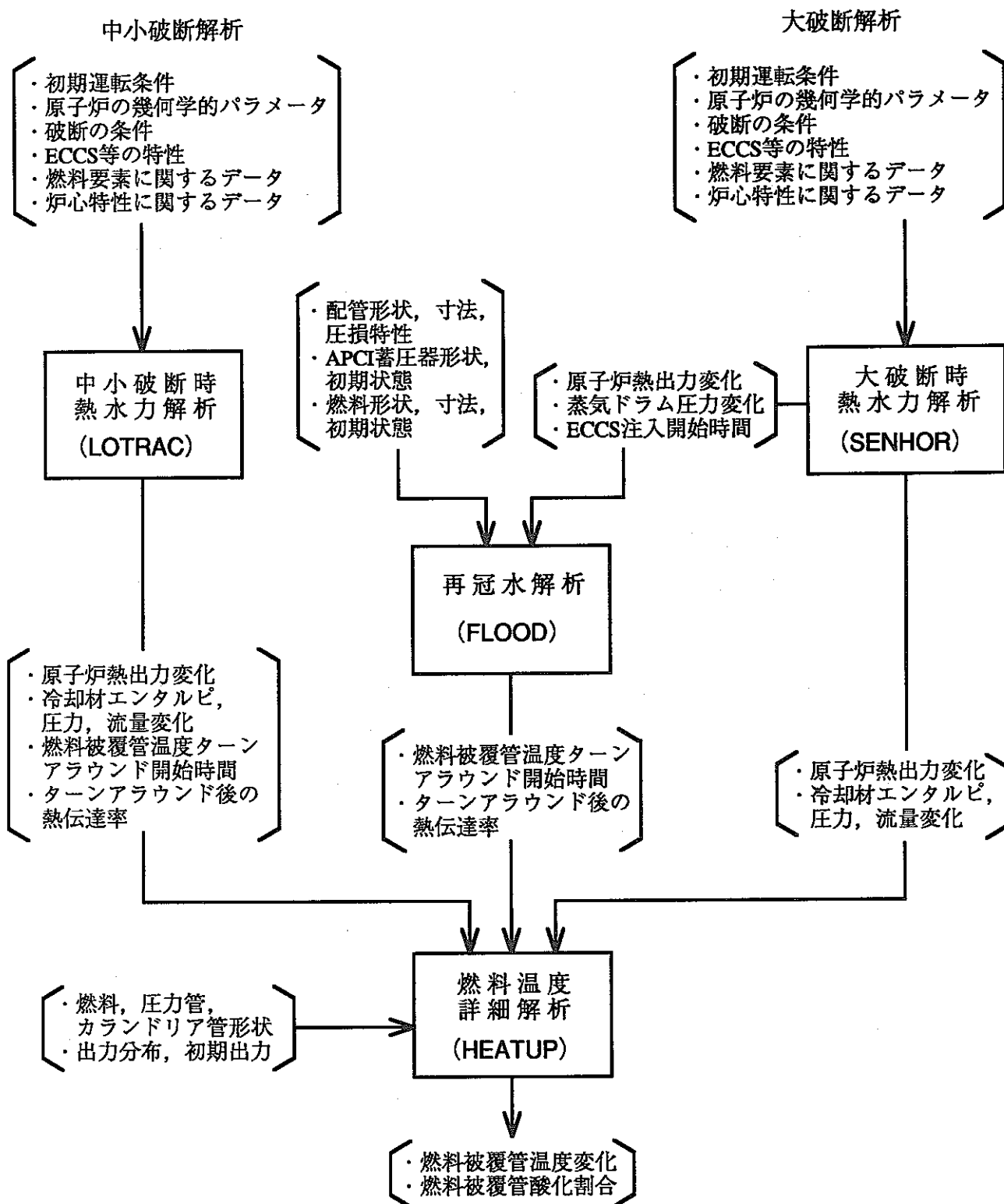


図3.1.1-1 LOCA解析コードフロー

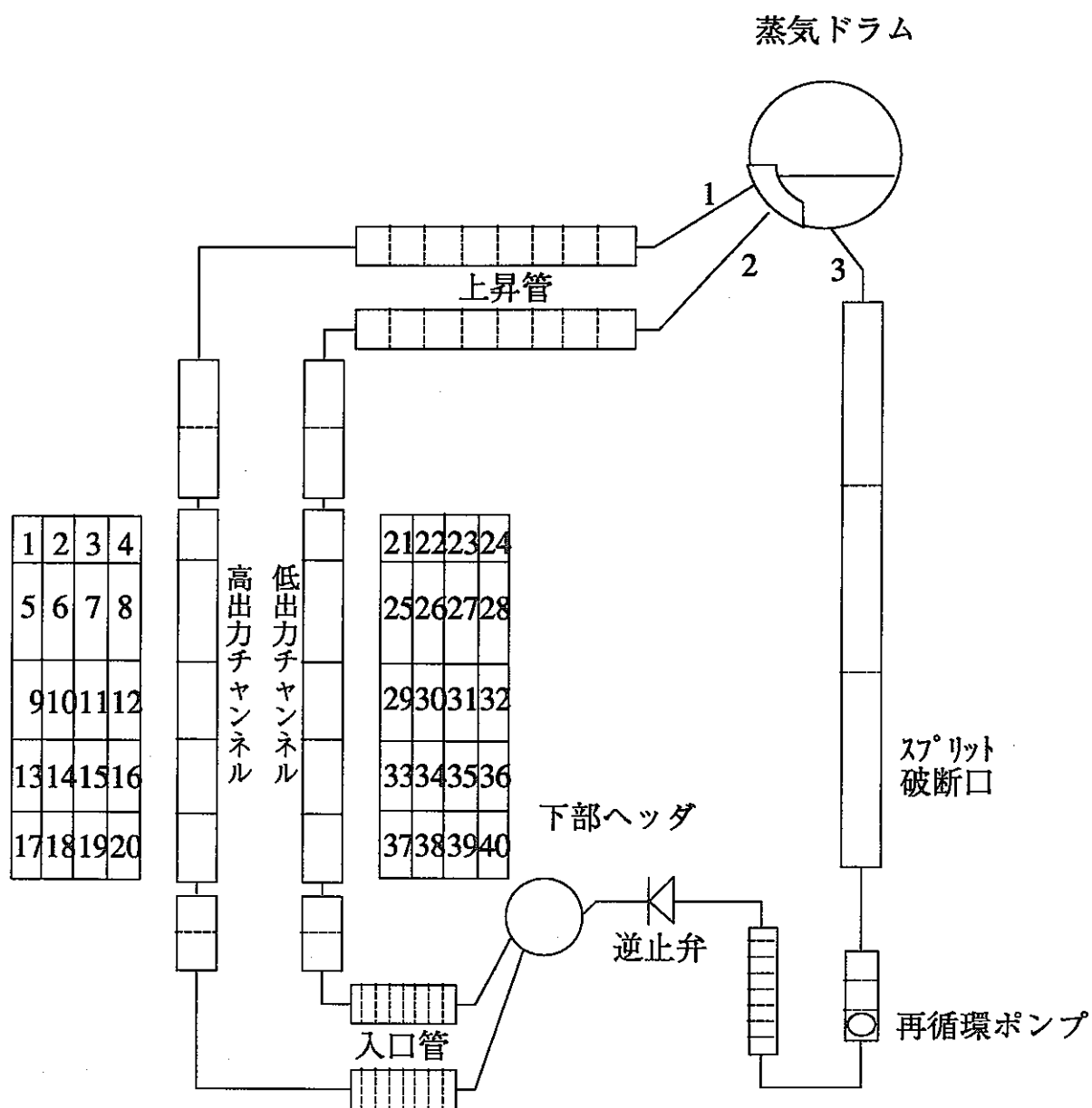


図3.1.1-2 下降管大破断解析ノード分割図 (SENHORコード)

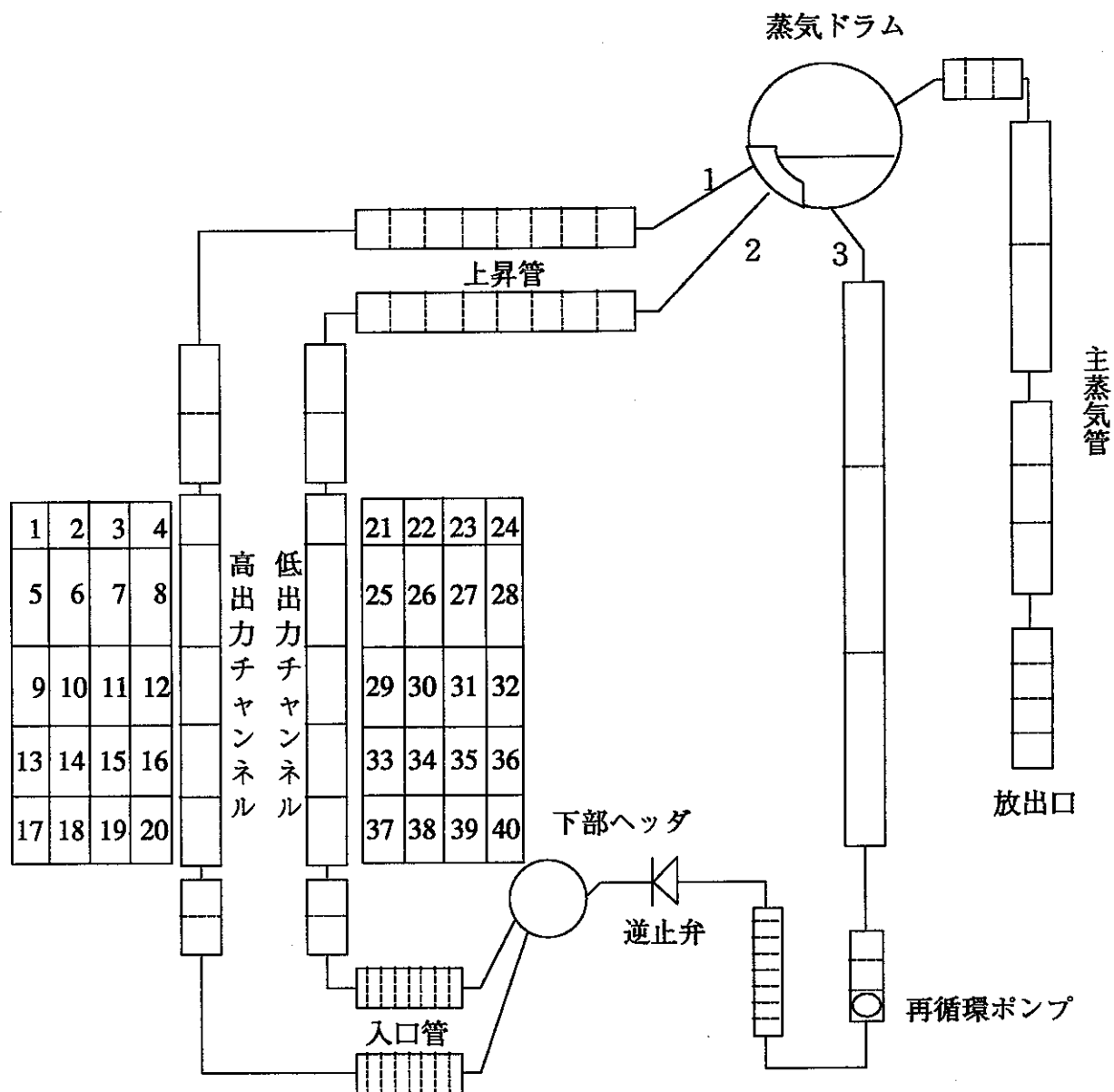


図3.1.1-3 主蒸気管大破断解析ノード分割図 (SENHORコード)

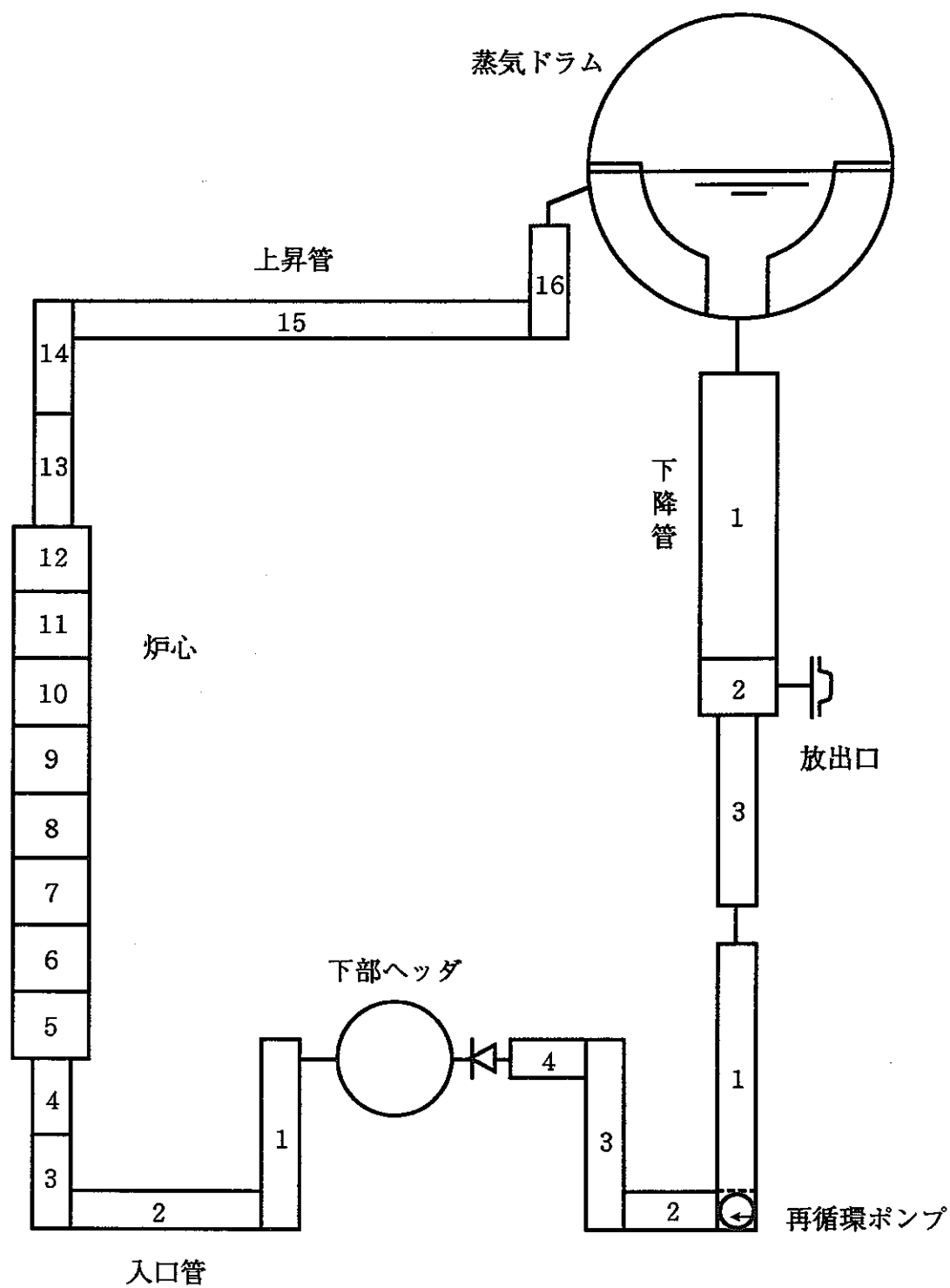


図3.1.1-4 下降管小破断解析ノード分割図 (LOTRACコード)

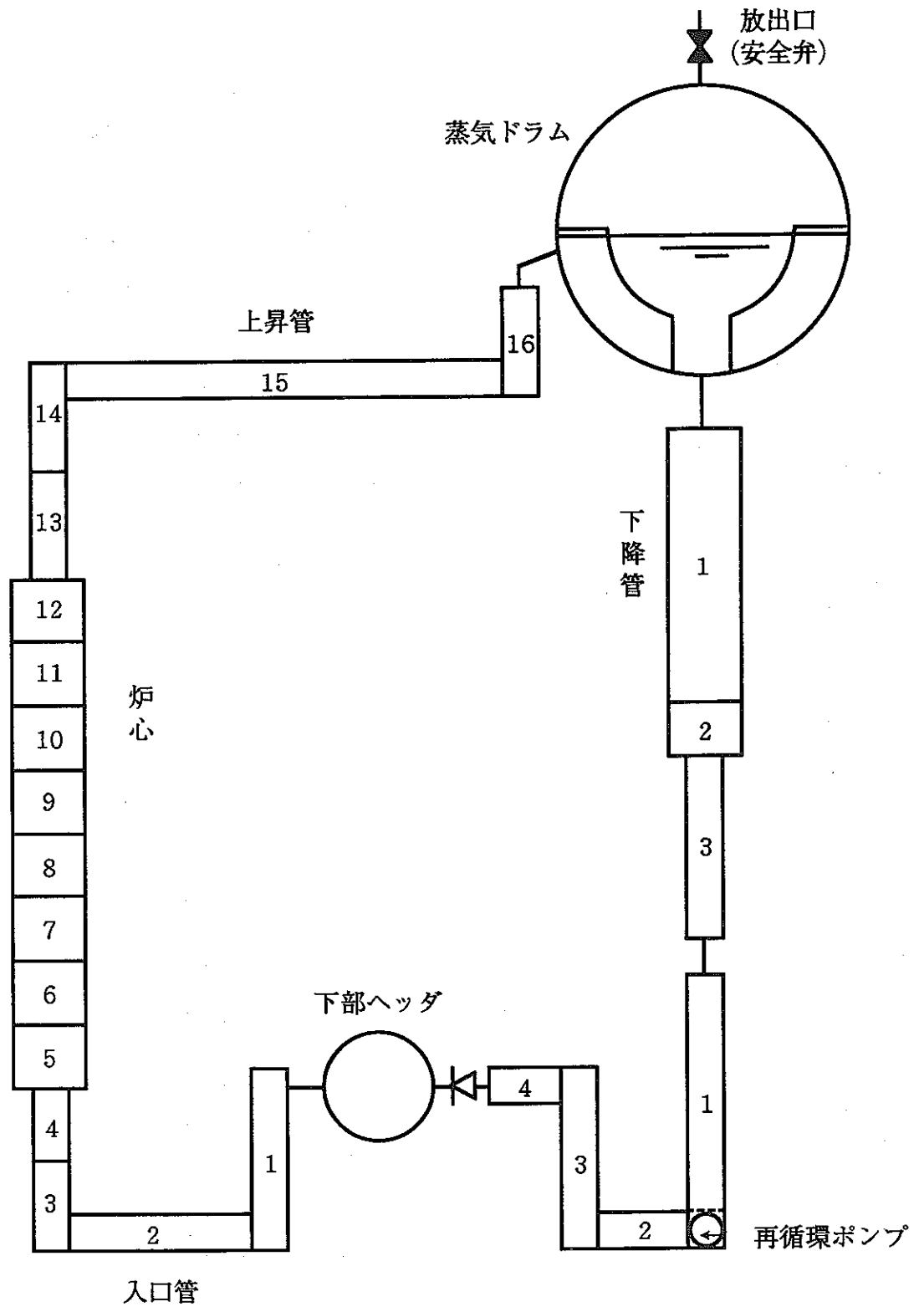


図3.1.1-5 主蒸気管小破断解析ノード分割図 (LOTRACコード)

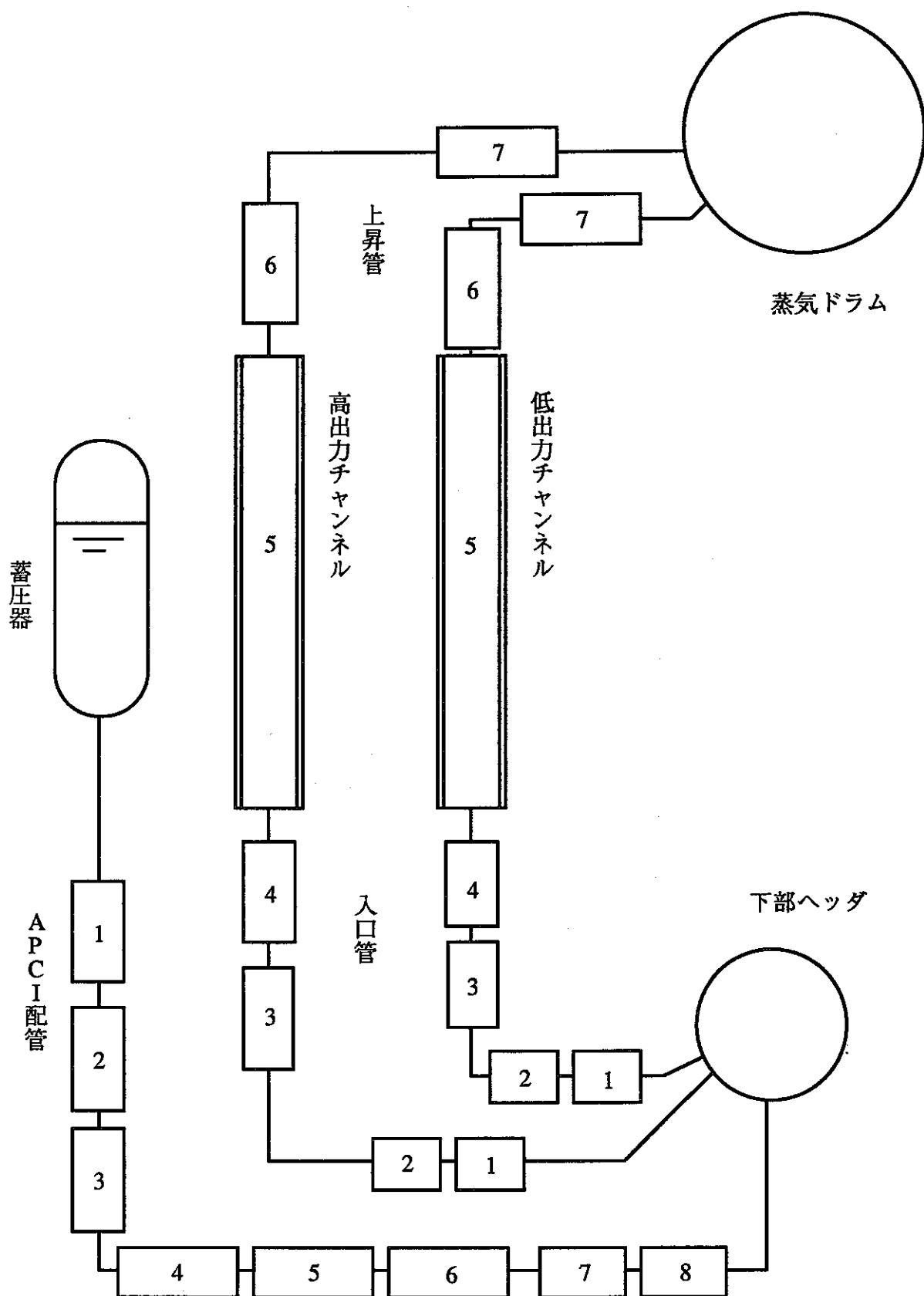
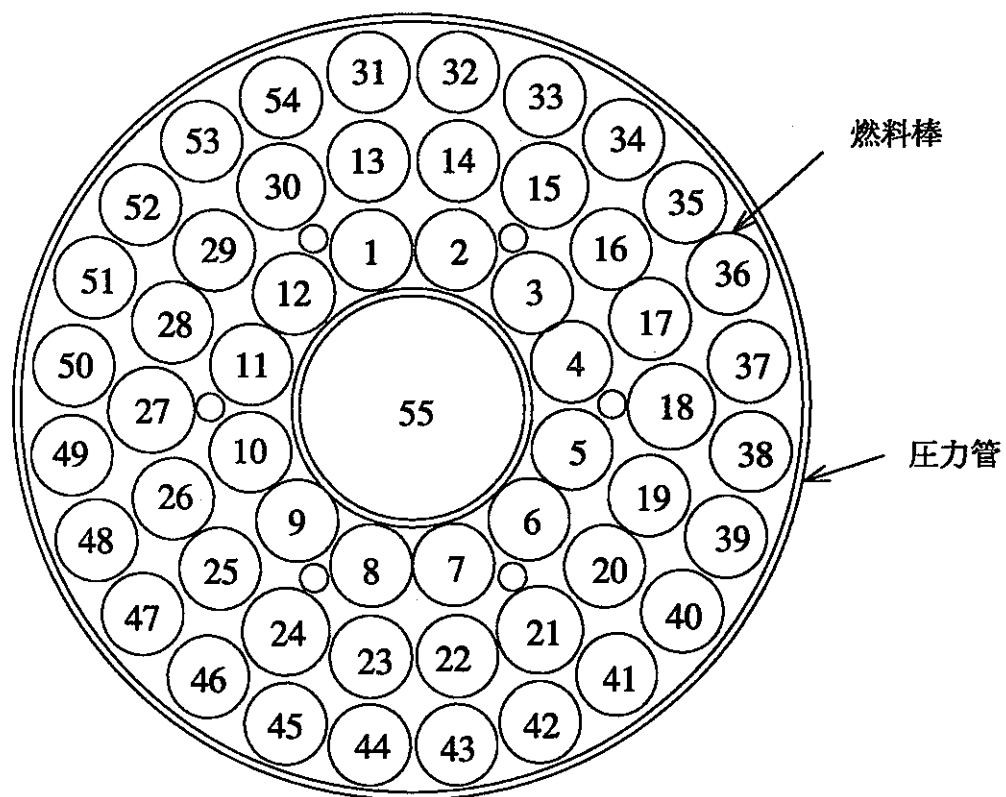


図3.1.1-6 再冠水解析ノード分割図 (FLOODコード)



※：No.55はスペーサ支持管

図3.1.1-7 PCT断面におけるロッド配列図 (HEATUPコード)

3.2 解析結果

「ふげん」安全評価コードによる下降管大破断実験、下降管小破断実験、主蒸気管大破断実験、主蒸気管小破断実験の解析結果及びリターンモデルを用いた下降管大破断実験の解析結果を述べる。

3.2.1 下降管大破断実験解析

(1) 熱水力挙動解析 (SENHOR)

蒸気ドラム圧力の解析結果を図 3.2.1-1 に示す。実験結果では、蒸気ドラム内の蒸気の巻込みにより 5 秒付近に圧力降下の変曲点がある。解析結果は、圧力の変曲点の実験結果ほど明瞭ではないが、圧力降下を良く再現している。

下部ヘッダ圧力の解析結果を図 3.2.1-2 に示す。解析結果は、フラッシングにより 2.4 秒に圧力降下の変曲点がみられるが、圧力降下を良く再現している。

炉心入口流量の解析結果を図 3.2.1-3 に示す。実験結果では、破断直後に $-45\text{m}^3/\text{h}$ まで逆流し、その後、正流に転じ増加している。解析でも、破断直後に $-20\text{m}^3/\text{h}$ まで逆流し、その後、正流に転じ増加している。15 秒に作動した APCI の注水により下部ヘッダ内で冷却材が凝縮すると再び $-86\text{m}^3/\text{h}$ まで逆流し、その後、APCI による ECC 水の注水継続により正流に転じる。解析結果は、破断直後の逆流現象、フラッシングによる流量の回復現象及び APCI 作動時の現象を良く再現している。なお、炉心入口流量の実験結果が、約 13 秒～約 15 秒間で流量零となっているのは、フラッシングにより蒸気流量が増加し、タービン流量計の計測範囲を超えたため、流量計指示値が、見掛け上、零となったものである。

蒸気ドラム水位の解析結果を図 3.2.1-4 に示す。解析結果は、破断直後の水位低下が速く、逆に蒸気巻込み後の水位低下が遅いが、概ね実験結果と一致している。

下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧と高出力チャンネル炉心部差圧の解析結果を図 3.2.1-5、6 に示す。解析結果は、破断後のフラッシングによる差圧の増加及び ECC 水注水による差圧の減少とも概ね実験結果と一致している。下部ヘッダ内が ECC 水注水により満水になり、差圧が増加するタイミングは、下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧では実験結果より 2 秒遅いが、炉心部では一

致している。

蓄圧器内圧力の解析結果を図 3.2.1-7 に示す。実験及び解析ともに APCI の注水開始と同時に圧力は低下を開始しているが、解析では蓄圧器内の窒素ガスを断熱変化と仮定しているため、等温変化に近い結果であった実験結果よりも圧力降下が速くなっている。

APCI 流量の解析結果を図 3.2.1-8 に示す。解析では、ECC 水注水開始後 $319\text{m}^3/\text{h}$ まで急上昇し、蓄圧器内圧力の降下とともに減少している。下部ヘッダ内が ECC 水で満された 23 秒に下部ヘッダ圧力が上昇するため APCI 流量が減少しているが、解析結果は概ね実験結果を再現している。

(2) 再冠水解析 (FLOOD)

再冠水挙動の解析結果を図 3.2.1-9 に示す。

解析の再冠水挙動は、図 3.2.1-9 に示すように、APCI の ECC 水が破断後 26.9 秒で炉心下端に到達する。到達直後の平均再冠水速度は、 2.7m/s で、その後徐々に減少している。

(3) 燃料温度解析 (HEATUP)

PCT 断面における被覆管温度の解析結果を図 3.2.1-10~13 に示す。

一次ドライアウト時の最高被覆管温度について、実験結果と解析結果を比較すると、実験では内層ピン (TR-G4-2) 344°C 、中層ピン (TR-B16-3) 398°C 、ガドリピン (TR-H20-2) 302°C 、外層ピン (TR-D44-2) 475°C であるのに対し、解析では内層ピン 392°C 、中層ピン 401°C 、ガドリピン 311°C 、外層ピン 479°C である。最高温度は外層ピンで発生しており、その解析結果は、実験結果より 4°C 高い。

二次ドライアウト時の最高被覆管温度について、実験結果と解析結果を比較すると、実験では内層ピン (TR-B2-3) 246°C 、中層ピン (TR-E28-2) 257°C 、ガドリピン (TR-B17-2) 244°C 、外層ピン (TR-F54-3) 299°C であるのに対し、解析では内層ピン 352°C 、中層ピン 357°C 、ガドリピン 278°C 、外層ピン 416°C である。最高温度は外層ピンで発生しており、その解析結果は、実験結果より 117°C 高い保守側の結果である。

3.2.2 下降管小破断実験解析

(1) 熱水力挙動解析 (LOTRAC)

蒸気ドラム圧力の解析結果を図 3.2.2-1 に示す。解析結果は、148 秒に作動した APCI の ECC 水注水による圧力降下が実験結果よりも大きい、HPCI の注水による圧力降下速度が早くなる圧力挙動等をよく再現している。

下部ヘッダ圧力の解析結果を図 3.2.2-2 に示す。解析及び実験ともに APCI 注水時の挙動を除き蒸気ドラム圧力と同様の挙動である。解析では、APCI 注水により下部ヘッダが満水となる 153 秒付近でウォーターハンマ現象により圧力が一時的に上昇している。

炉心入口流量の解析結果を図 3.2.2-3 に示す。解析結果は、80 秒付近からの下降管内の水位低下にともなう流量低下が実験結果ほど明瞭ではないが概ね一致している。

蒸気ドラム水位の解析結果を図 3.2.2-4 に示す。実験結果では破断後徐々に低下を開始して、80 秒付近から上昇管より流れ込む冷却材によりほぼ一定の水位となり、その後 HPCI の ECC 水により水位が上昇している。解析結果では、上昇管からの冷却材の流れ込みや HPCI による水位の上昇が見られない。

下降管水位の解析結果を図 3.2.2-5 に示す。解析結果は、実験結果に比べ全体的にやや高い結果であるが、概ね実験結果と一致している。

下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧と高出力チャンネル炉心部差圧の解析結果を図 3.2.2-6、7 に示す。破断後、差圧は減少し、フラッシング発生後は、ほぼ一定の圧力である。APCI 注水により、炉心部差圧は一時的に -3.3kg/cm^2 まで減少し、実験結果より大きな負値を示しているが、解析結果は概ね実験結果と一致している。

蓄圧器内圧力の解析結果を図 3.2.2-8 に示す。実験及び解析ともに APCI の注水開始と同時に圧力は低下を開始するが、解析では蓄圧器内の窒素ガスを断熱変化と仮定しているため、等温変化に近い結果であった実験結果よりも圧力の降下が速くなっている。

APCI 流量の解析結果を図 3.2.2-9 に示す。解析では、ECC 水注水開始後 $176\text{m}^3/\text{h}$ 程度まで急上昇し、蓄圧器内圧力の降下とともに減少している。180

秒付近から下部ヘッダ圧力と蓄圧器内圧力との差が再び大きくなり APCI 流量が増加している。この増加割合は実験結果より大きいが、解析結果は実験結果と概ね一致している。

HPCI 流量の解析結果を図 3.2.2-10 に示す。解析では、下降管水位 (LOTRAC では蒸気ドラム水位) が ECCS 開始水位に達した 107 秒から注水を開始している。HPCI の注水が開始されることにより蒸気ドラム圧力が減圧され 148 秒に下部ヘッダへ APCI の注水が開始された。HPCI 注水開始時間、APCI 注水までの HPCI 流量とも実験結果に概ね一致している。APCI の ECC 水注水後の HPCI 流量が実験結果より多い結果となったが、これは、APCI 注水後の蒸気ドラム圧力が実験結果より低いためである。

(2) 燃料温度解析 (HEATUP)

PCT 断面における外層ピンの被覆管温度解析結果を図 3.2.2-11 に示す。

最高被覆管温度の解析値は 471℃であったが、実験では内層ピン (TR-B2-3)、中層ピン (TR-B16-3)、ガドリピン (TR-H20-2) ではドライアウトが見られず、外層ピン (TR-G42-3) で 267℃であった。これは、解析 (LOTRAC) において、炉心水位が燃料集合体上端位置より低くなった時点でドライアウトすると保守側に仮定しているためであり、この結果、実験結果より 204℃高い結果となった。

3.2.3 主蒸気管大破断実験解析

(1) 熱水力挙動解析 (SENHOR)

蒸気ドラム圧力の解析結果を図 3.2.3-1 に示す。解析結果は、破断直後の圧力降下を再現できていないが、概ね実験結果と一致している。

下部ヘッダ圧力の解析結果を図 3.2.3-2 に示す。解析では、フラッシング発生による下部ヘッダ圧力の変曲点が 2 秒に見られる。また、下部ヘッダ内が APCI の ECC 水注水により満水となった 18 秒に圧力が一時的に上昇しているが、解析結果は概ね実験結果と一致している。

下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧と高出力チャンネル炉心部差圧の解析結果を図 3.2.3-3、-4 に示す。解析結果は、破断後のフラッシングによる差圧の増加及び ECC 水注水による差圧の減少とも概ね実験結果と一致している。

蓄圧器内圧力の解析結果を図 3.2.3-5 に示す。実験及び解析ともに APCI の注水開始と同時に圧力は低下を開始しているが、解析では蓄圧器内の窒素ガスを断熱変化と仮定しているため、等温変化に近い結果であった実験結果よりも圧力降下が速くなっている。

APCI 流量の解析結果を図 3.2.3-6 に示す。解析では蓄圧器内圧力の低下が早いため APCI 流量の低下が速いが、解析結果は概ね実験結果を再現している。

蒸気ドラム水位の解析結果を図 3.2.3-7 に示す。解析では、ECC 水注水による下部ヘッダ満水後に蒸気ドラム水位の上昇傾向が見られるが、解析結果は、破断直後からの減圧沸騰による水位上昇等を良く再現している。

下降管水位の解析結果を図 3.2.3-8 に示す。実験及び解析とも減圧沸騰により下降管水位は振動している。8 秒付近から解析結果はやや低くなっているが、概ね実験結果と一致している。

炉心入口流量の解析結果を図 3.2.3-9 に示す。実験結果では、破断直後に $-25\text{m}^3/\text{h}$ まで逆流し、その後、正流に転じ増加している。解析では逆流には至らなかったが、その後のフラッシングによる流量の回復現象、APCI 作動時の現象を良く再現している。

(2) 再冠水解析 (FLOOD)

再冠水挙動の解析結果を図 3.2.3-10 に示す。

解析の再冠水挙動は、図 3.2.3-10 に示すように、APCI の ECC 水が破断後 29.6 秒で炉心下端に到達する。到達直後の平均再冠水速度は、 1.8m/s で、その後徐々に減少している。

(3) 燃料温度解析 (HEATUP)

PCT 断面における被覆管温度の解析結果を図 3.2.3-11～14 に示す。

一次ドライアウト時の最高被覆管温度について、実験結果と解析結果を比較すると、実験では内層ピン (TR-H4-3) ドライアウトなし、中層ピン (TR-G19-2) 294°C 、ガドリピン (TR-B17-2) ドライアウトなし、外層ピン (TR-A34-2) 335°C であるのに対し、解析では内層ピンがドライアウトなし、中層ピン 352°C 、ガドリピンがドライアウトなし、外層ピン 431°C である。最高温度は外層ピンで発生しており、その解析結果は、実験結果より 96°C

高い。

二次ドライアウト時の最高被覆管温度について、実験結果と解析結果を比較すると、実験では内層ピン (TR-G12-3) 262℃、中層ピン (TR-E28-2) 283℃、ガドリピン (TR-F29-2) 262℃、外層ピン (TR-F54-3) 327℃であるのに対し、解析では内層ピン 324℃、中層ピン 384℃、ガドリピン 307℃、外層ピン 483℃である。最高温度は外層ピンで発生しており、その解析結果は、実験結果より 156℃高い保守側の結果である。

3.2.4 主蒸気管小破断実験解析

(1) 熱水力学動解析解析 (LOTRAC)

蒸気ドラム圧力と下部ヘッダ圧力の解析結果を図 3.2.4-1、2 に示す。解析結果は、APCI 注水開始時間が早いですが、概ね実験結果と一致している。

炉心入口流量の解析結果を図 3.2.4-3 に示す。破断後 20 秒程度で 5m³/h まで低下し、APCI の ECC 水注水まで自然循環状態を維持している。解析結果は、実験結果より少ない流量であるが、概ね実験結果と一致している。

蒸気ドラム水位の解析結果を図 3.2.4-4 に示す。解析結果は、実験結果と同様に破断直後減圧沸騰により一時的に上昇し、その後低下を開始する。実験結果より水位の低下が速く、APCI 注水開始水位に 730 秒で達し、ECC 水の注水を開始している。

下降管水位の解析結果を図 3.2.4-5 に示す。解析結果は、破断直後減圧沸騰により低下し、その後、実験結果より大きく回復している。その後、実験結果と同様に徐々に上昇している。

下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧と高出力チャンネル炉心部差圧を図 3.2.4-6、7 に示す。解析結果は、破断直後の差圧の減少、自然循環状態での差圧、APCI 注水による差圧の増加等を良く再現している。

蓄圧器内圧力の解析結果を図 3.2.4-8 に示す。実験及び解析ともに APCI の注水開始と同時に圧力は低下を開始しているが、解析では蓄圧器内の窒素ガスを断熱変化と仮定しているため、等温変化に近い結果であった実験結果よりも圧力の降下が速くなっている。

APCI 流量の解析結果を図 3.2.4-9 に示す。解析では、ECC 水注水開始後

251m³/h まで急上昇し、蓄圧器内圧力の降下とともに減少している。APCI 注水開始時刻は実験結果より約 300 秒早い、解析結果は実験結果をよく再現している。

被覆管温度の解析結果を図 3.2.4-10 に示す。実験、解析ともドライアウトしていない。これは、炉心部入口流量が低流量ながら冷却材を保持し自然循環を行っているため、APCI 注水時には、炉心は十分に冷却されているため、炉心流量の大きな減少には至らず、その結果、ドライアウトしなかったものである。

3.2.5 リターンモデルによる解析結果

安全評価コードでは、被覆管温度に対して保守性を確保するために、一旦ドライアウトした場合、APCI 注水によるサブクール水到達まで、冷却材のクオリティーに応じた膜沸騰もしくは過熱蒸気による熱伝達モードを維持するモデルを採用している。

ここでは、下降管大破断実験について、リターンモデルを用いた最適評価解析を実施する。リターンモデルとは、各時刻における冷却材のクオリティーと圧力より限界熱流束 (CHF) を算出し、それと壁面からの熱流束を比較することにより各熱伝達モード（核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰）を選定し、温度計算を実行するモデルである。

また、最適評価解析においては、蓄圧器内の窒素ガス断熱係数に現実的な 1.1 を設定した。蓄圧器内圧力及び APCI 流量の解析結果を図 3.2.5-1、2 に示す。同図に示すように、実験及び解析ともに APCI の注水開始と同時に圧力が低下を開始し、実験結果の圧力降下及び流量を良く再現している。

PCT 断面における被覆管温度の解析結果を図 3.2.5-3～6 に示す。なお、実験結果は、PCT 断面において各燃料ピン層毎に一次ドライアウト発生時に最高温度を記録した計測点、最も低い温度を記録した計測点及び中位の温度を記録した計測点での温度を示してある。同図に示すように、リターンモデルを採用することにより、一次ドライアウト後のクエンチ現象を良く再現しており、外層ピンの二次ドライアウト開始時刻も、実験の約 18～20 秒に対して、解析では 18 秒であり、解析結果は実験結果を良く再現している。

一次ドライアウト時の最高被覆管温度について、実験結果(中央値)と解析結果を比較すると、実験では内層ピン (TR-F10-3) 334℃、中層ピン (TR-A25-2) 390℃、ガドリピン (TR-B17-2) 297℃、外層ピン (TR-E40-2) 440℃であるのに対し、解析では内層ピン 384℃、中層ピン 396℃、ガドリピン 316℃、外層ピン 448℃であり、解析結果は実験結果を良く再現している。

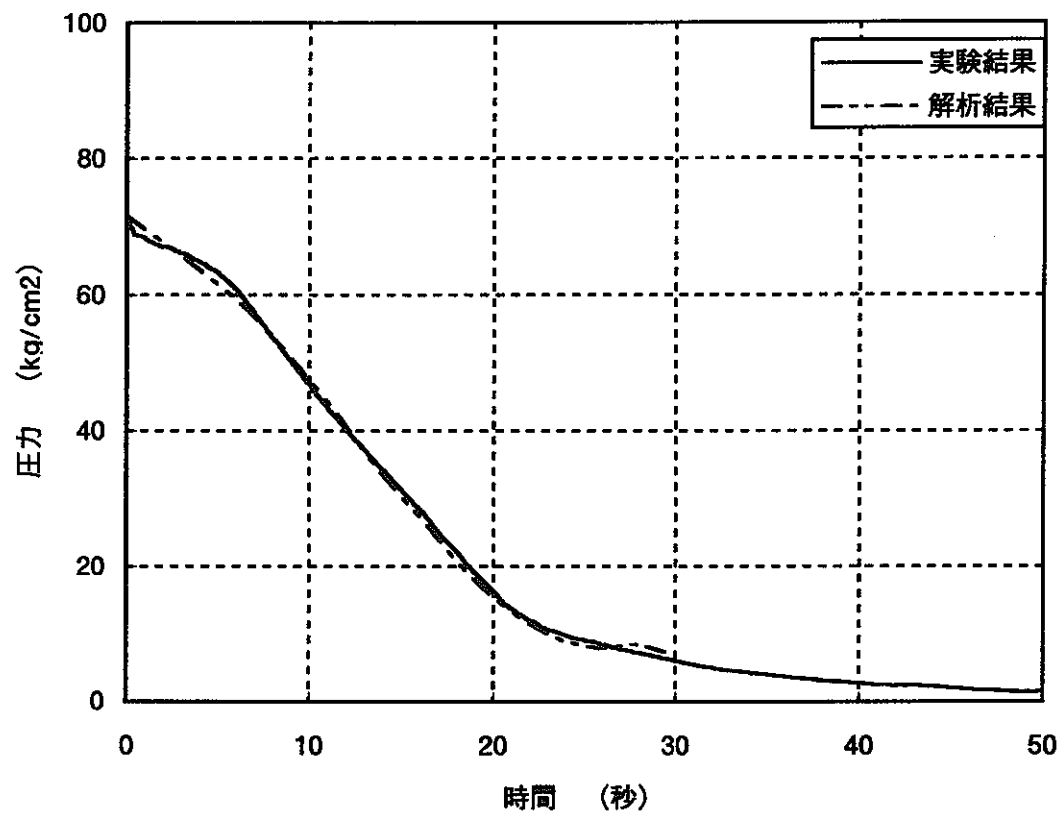


図3.2.1-1 下降管大破断実験解析結果(蒸気ドラム圧力)

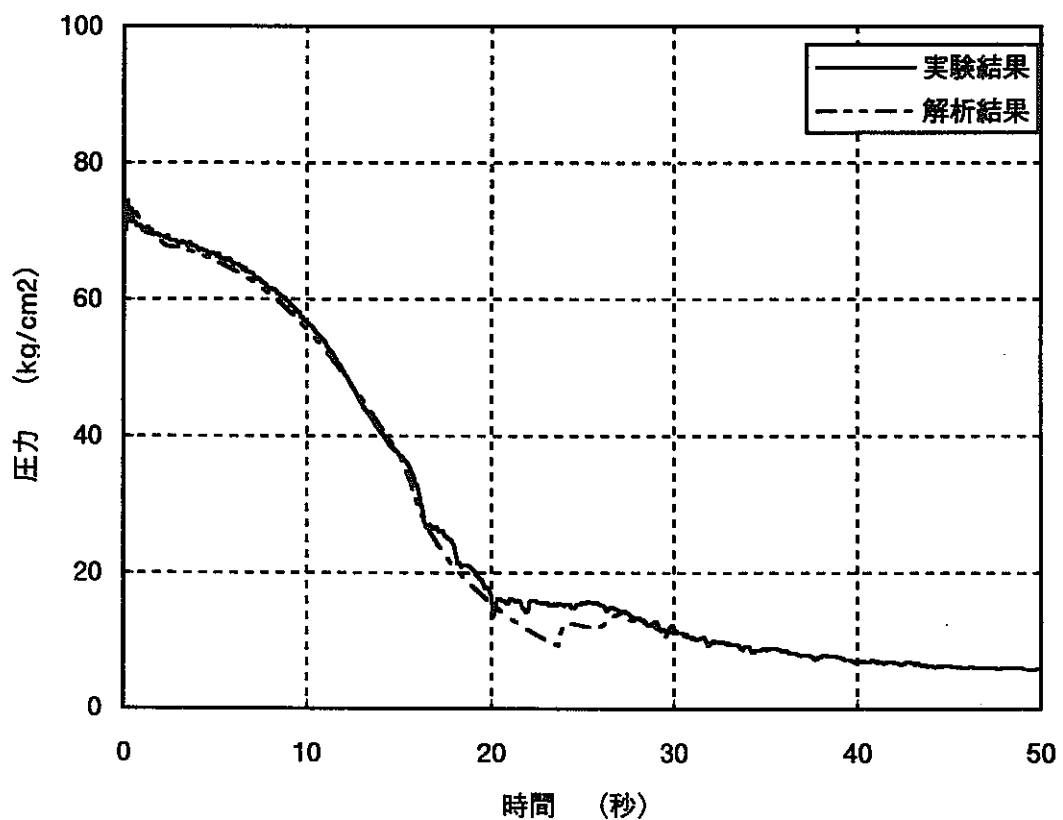


図3.2.1-2 下降管大破断実験解析結果(下部ヘッダ圧力)

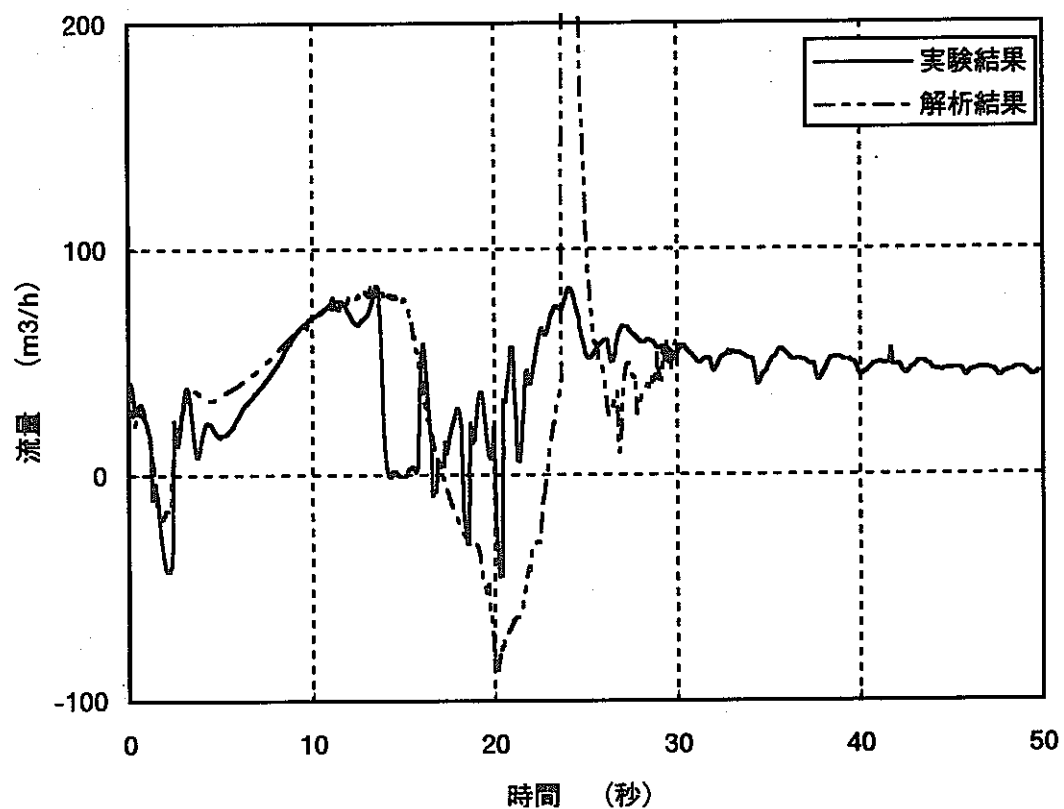


図3.2.1-3 下降管大破断実験解析結果(炉心入口流量)

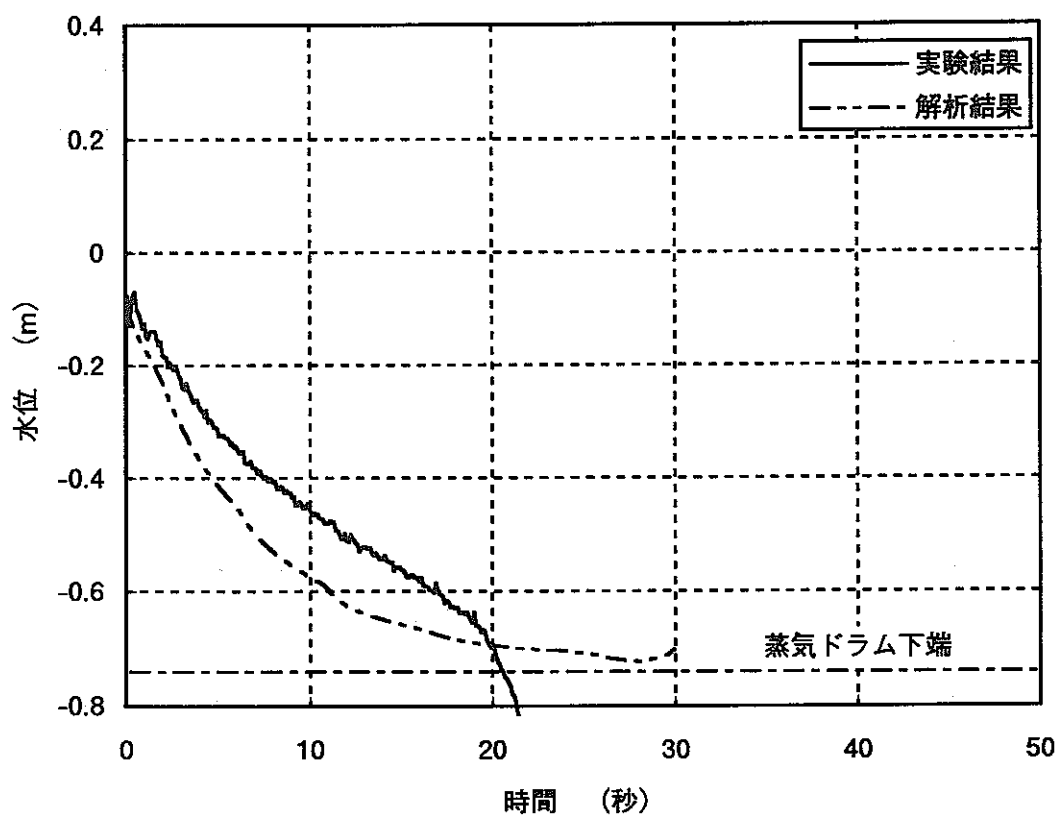


図3.2.1-4 下降管大破断実験解析結果(蒸気ドラム水位)

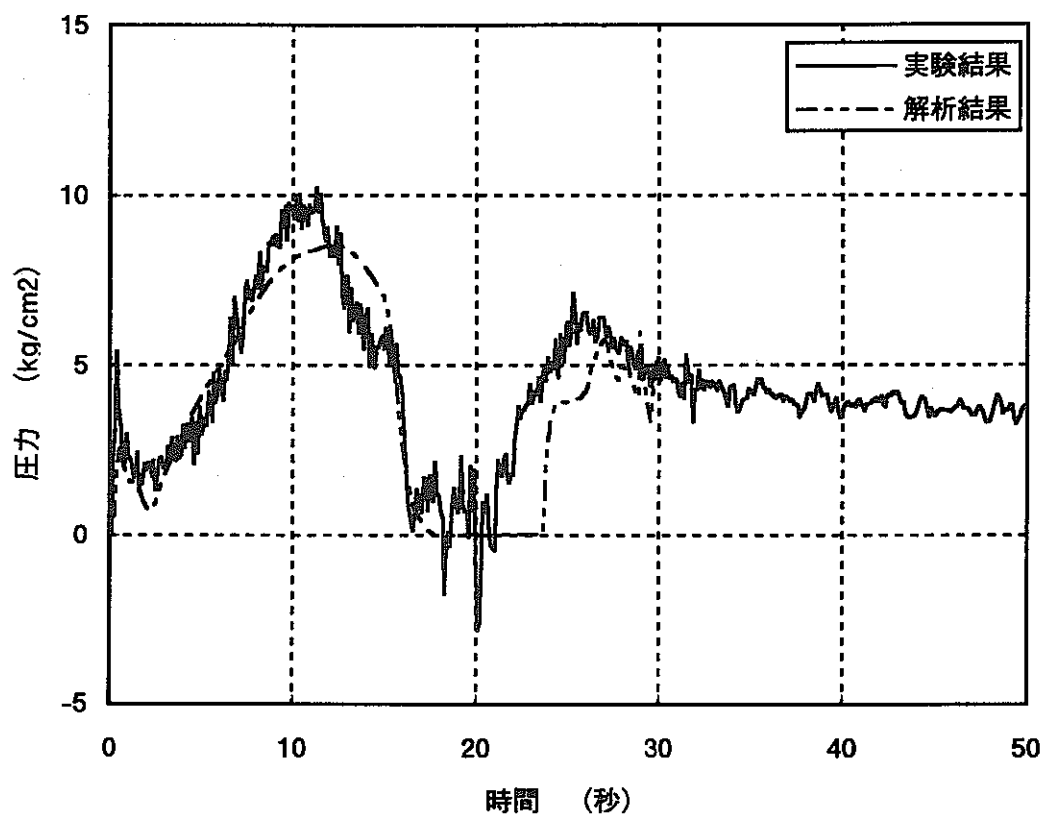


図3.2.1-5 下降管大破断実験解析結果(下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧)

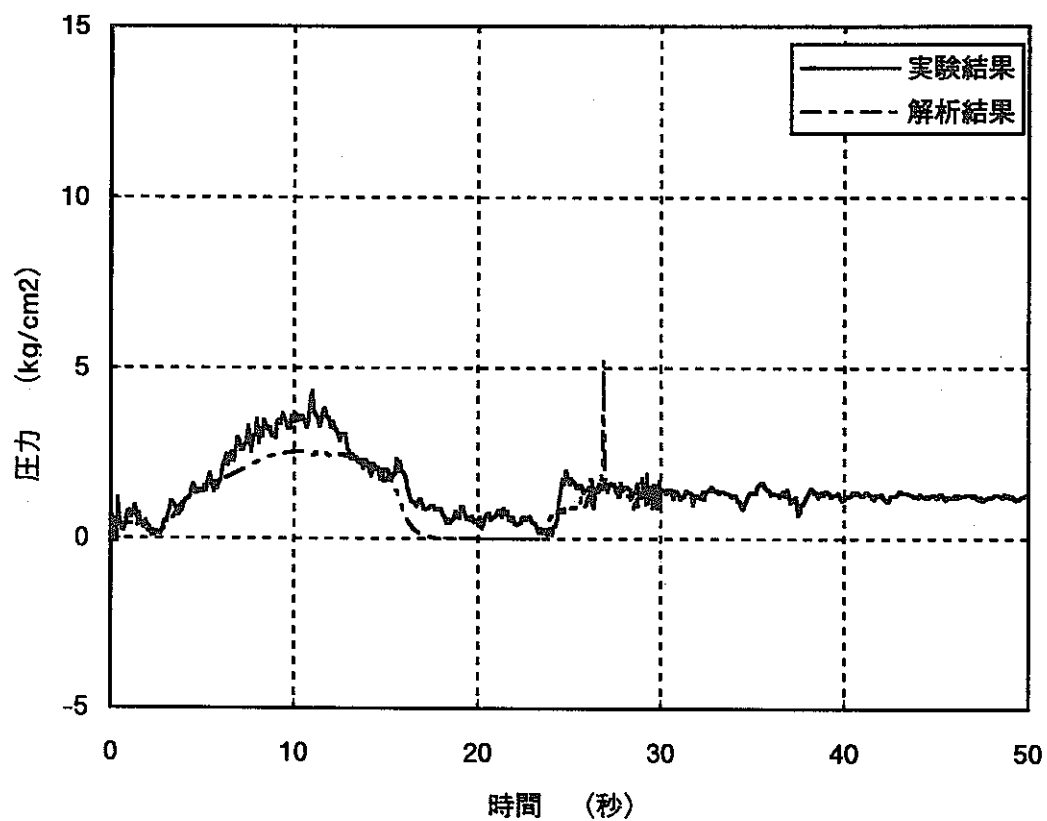


図3.2.1-6 下降管大破断実験解析結果(高出力チャンネル炉心部差圧)

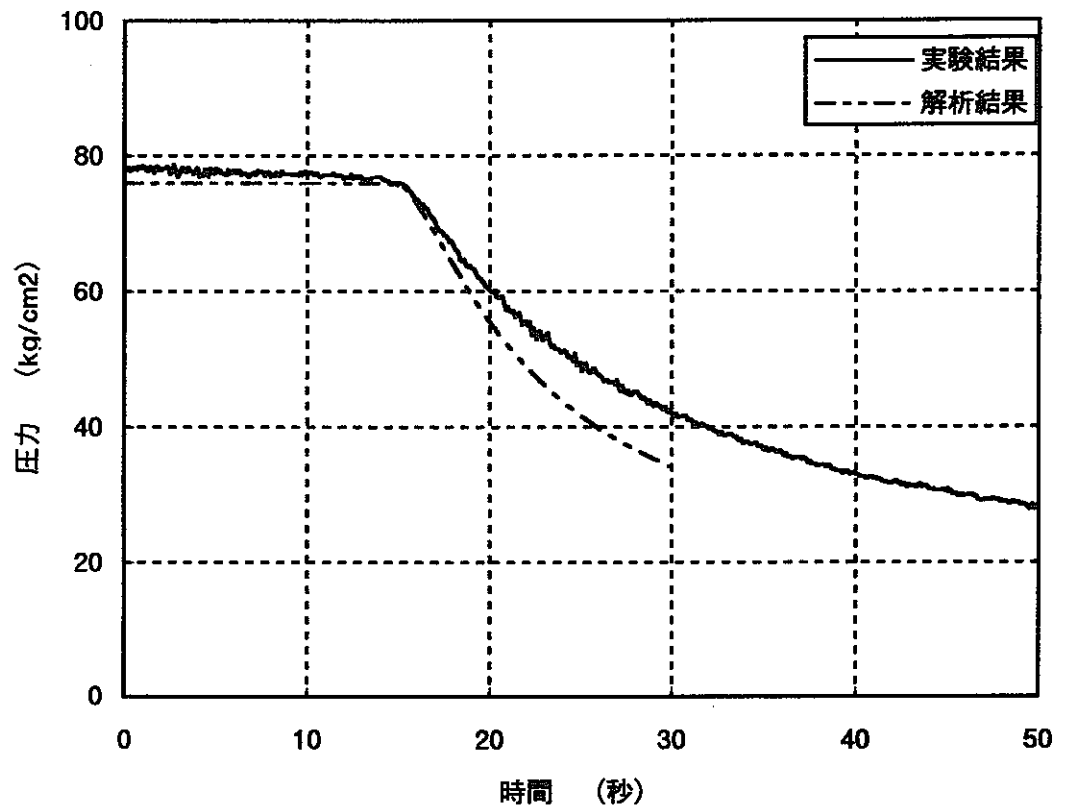


図3.2.1-7 下降管大破断実験解析結果(蓄压器内压力)

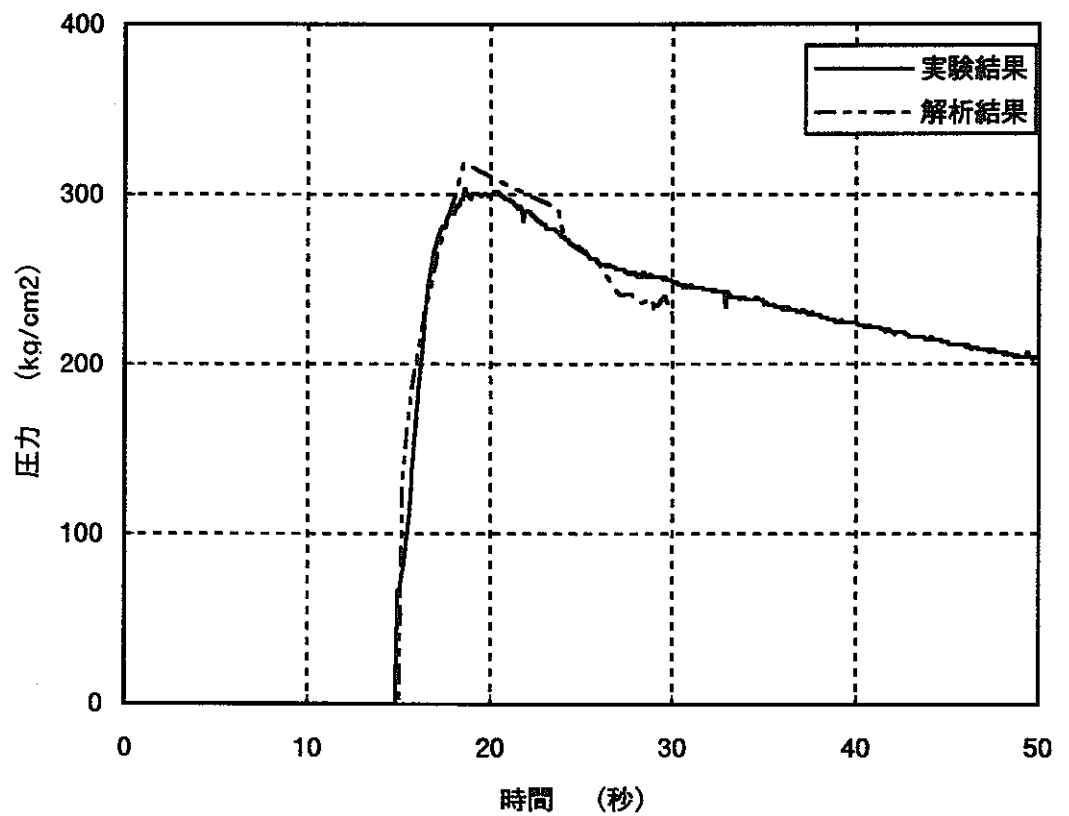


図3.2.1-8 下降管大破断実験解析結果(APCI流量)

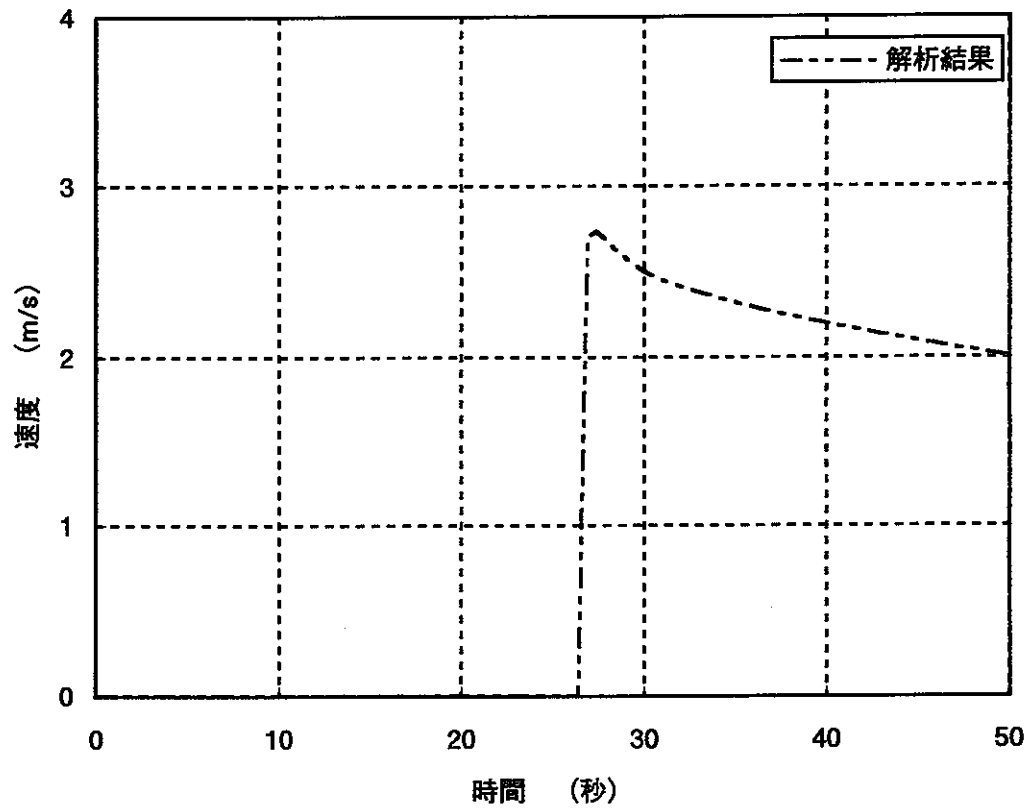


図3.2.1-9 下降管大破断実験解析結果(平均再冠水速度)

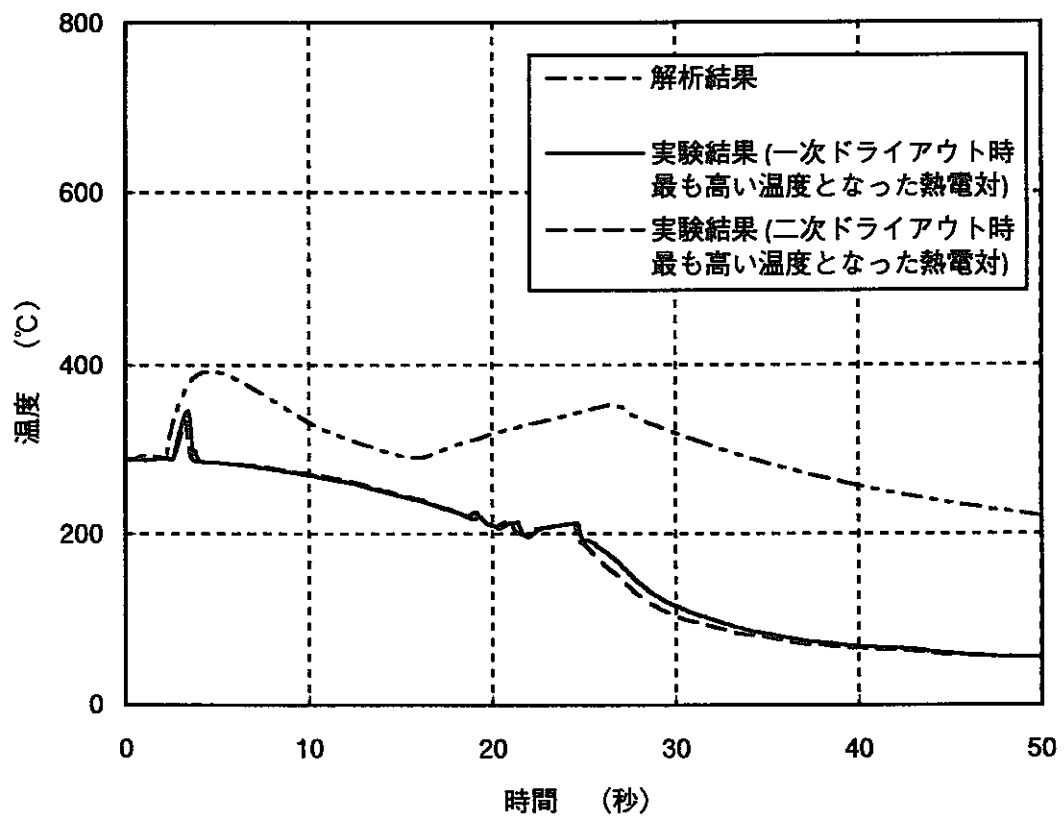


図3.2.1-10 下降管大破断実験解析結果(内層ピン被覆管温度)

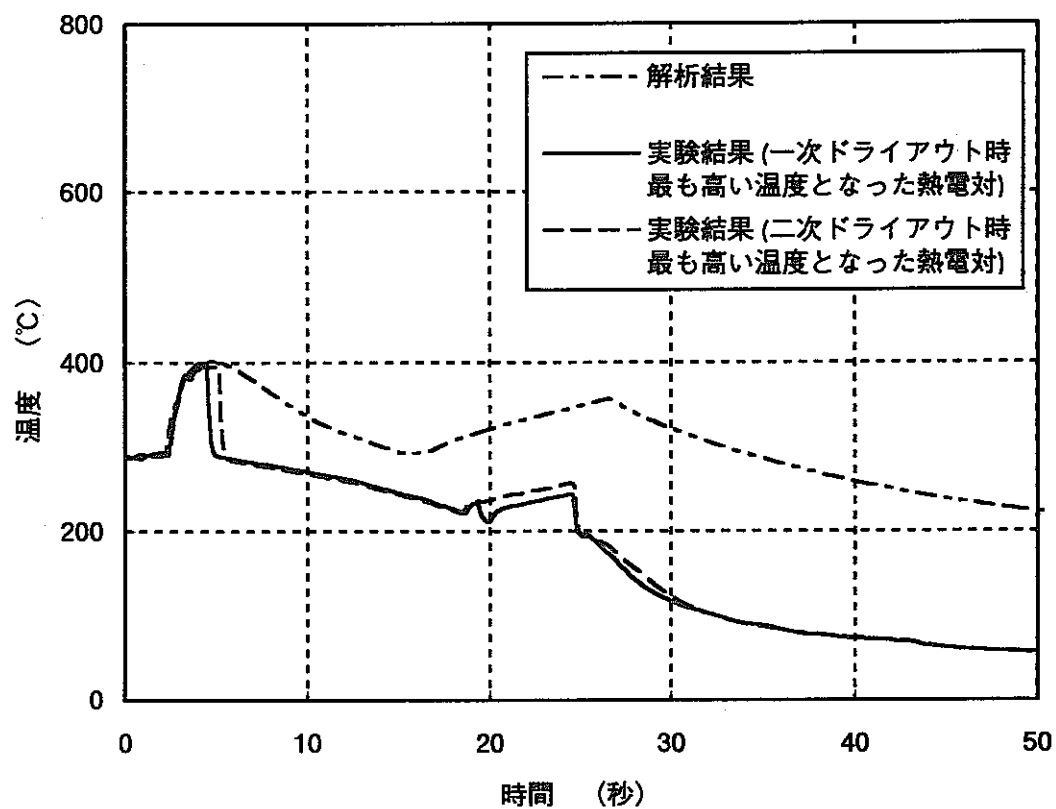


図3.2.1-11 下降管大破断実験解析結果(中層ピン被覆管温度)

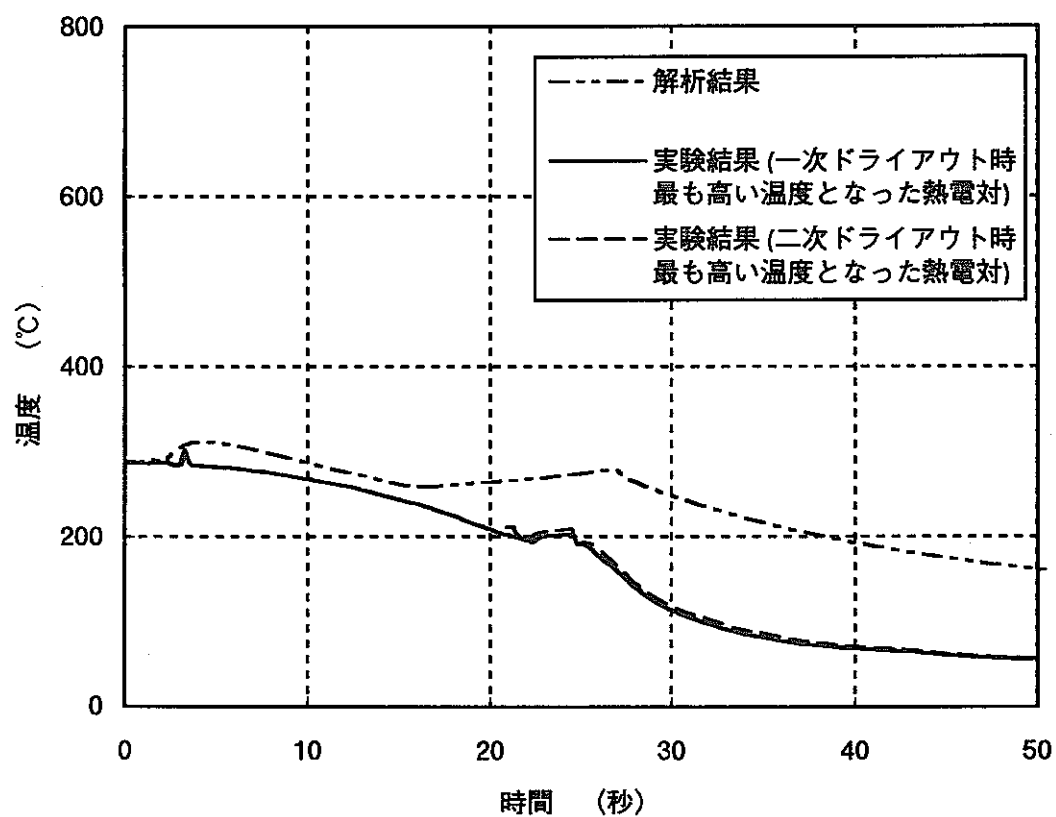


図3.2.1-12 下降管大破断実験解析結果(ガドリピン被覆管温度)

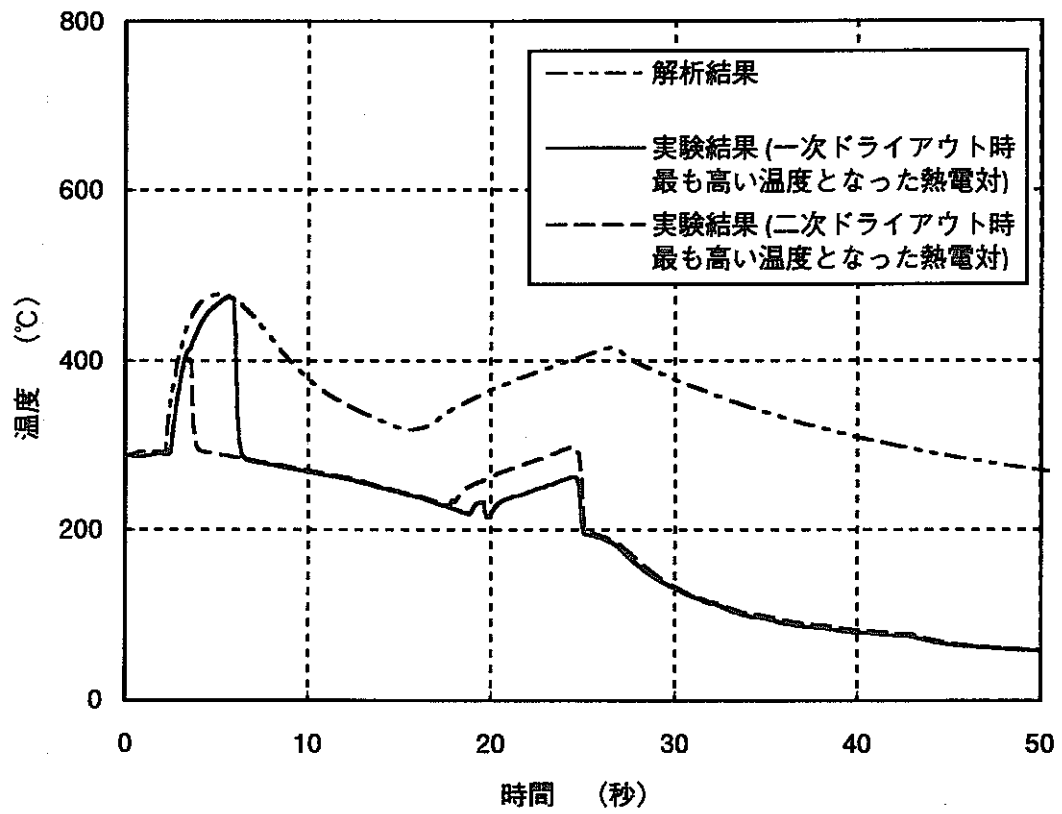


図3.2.1-13 下降管大破断実験解析結果(外層ピン被覆管温度)

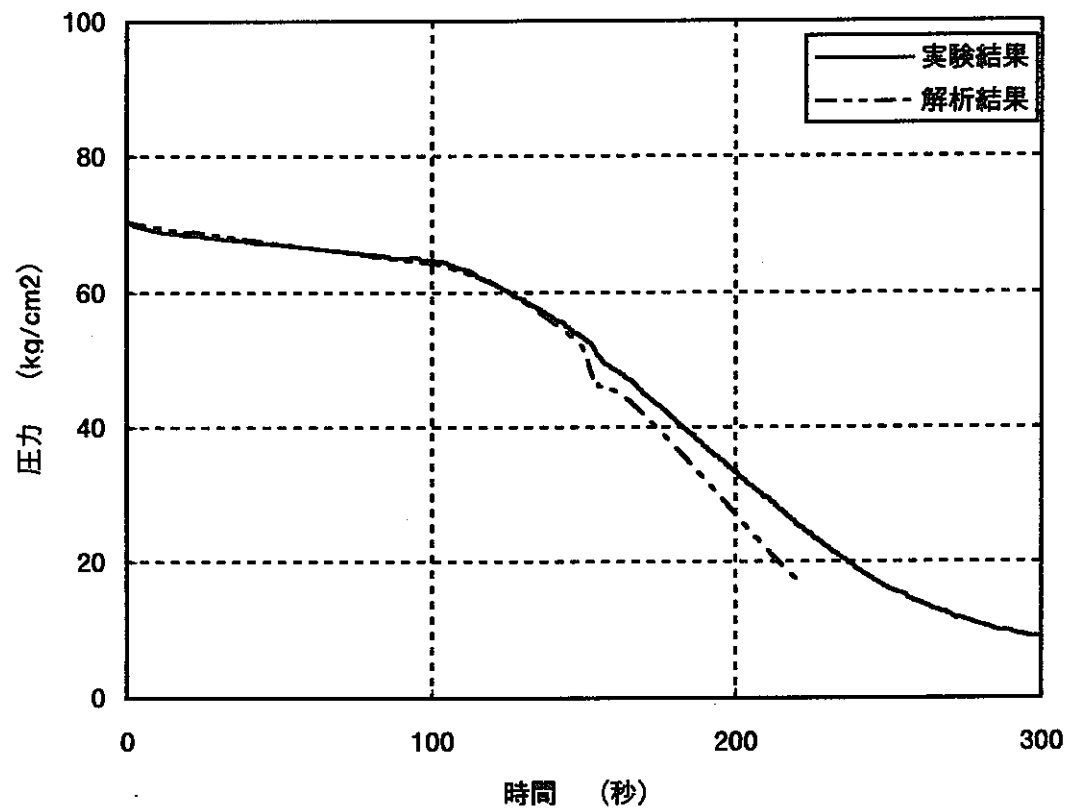


図3.2.2-1 下降管小破断実験解析結果(蒸気ドラム圧力)

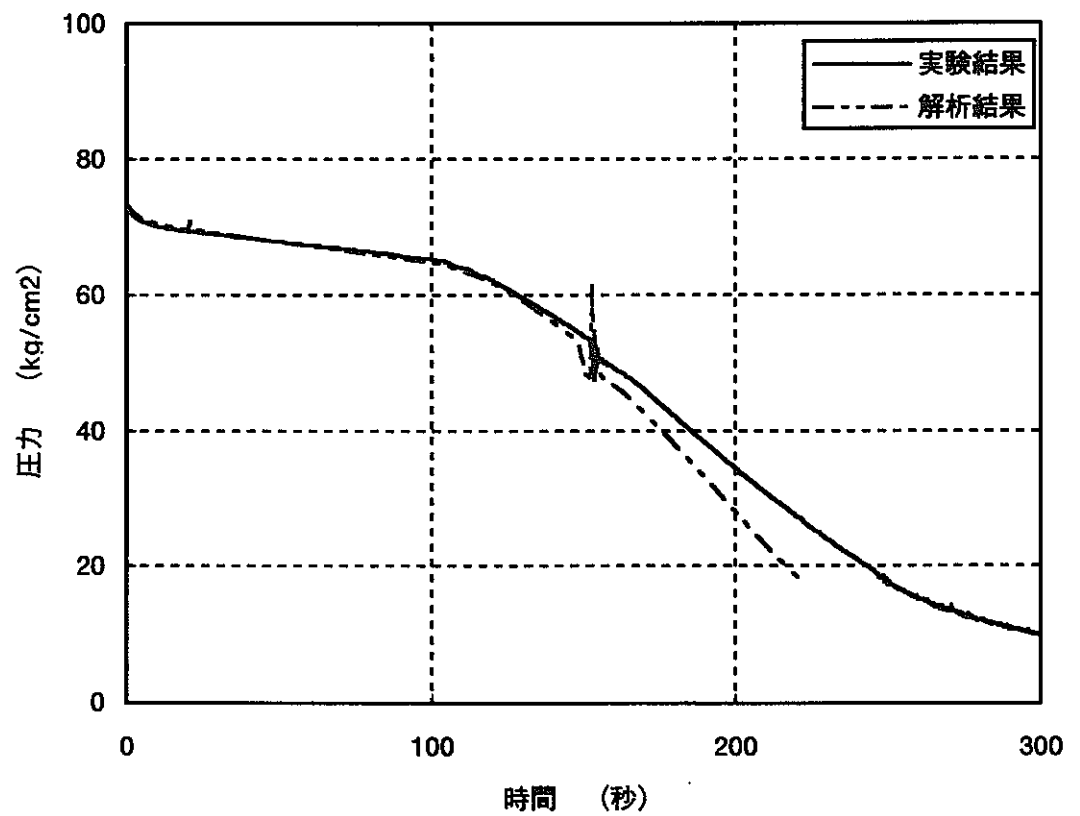


図3.2.2-2 下降管小破断実験解析結果(下部ヘッド圧力)

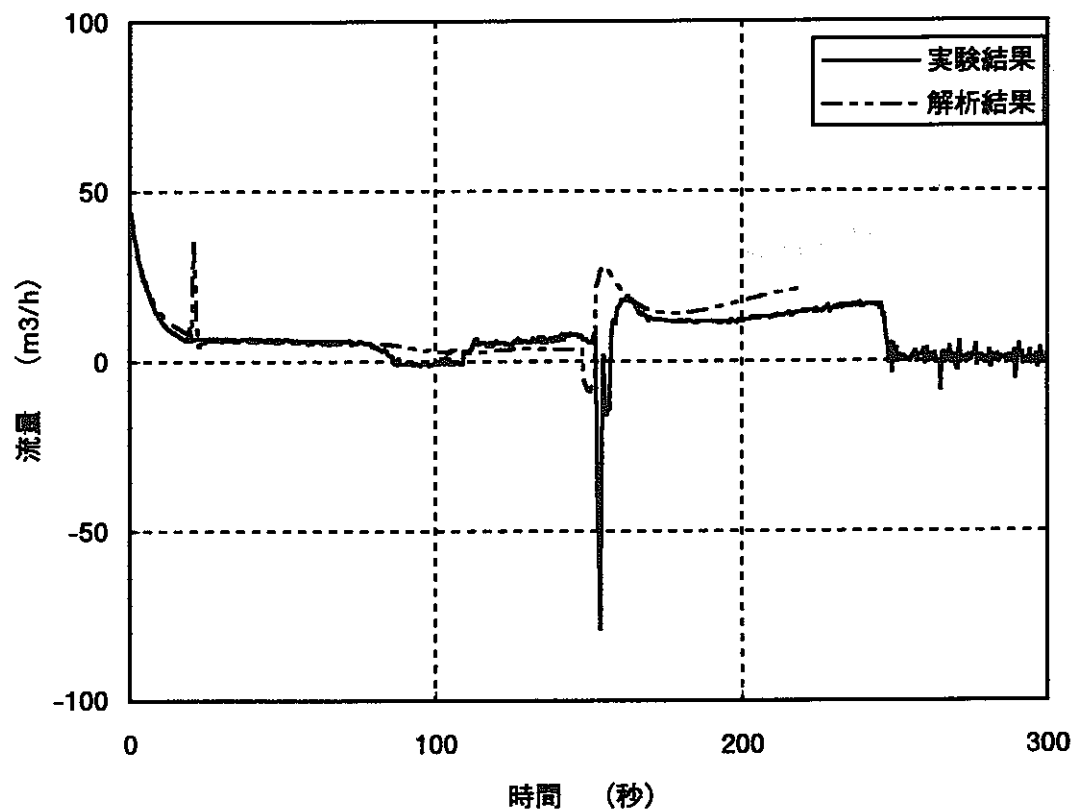


図3.2.2-3 下降管小破断実験解析結果(炉心入口流量)

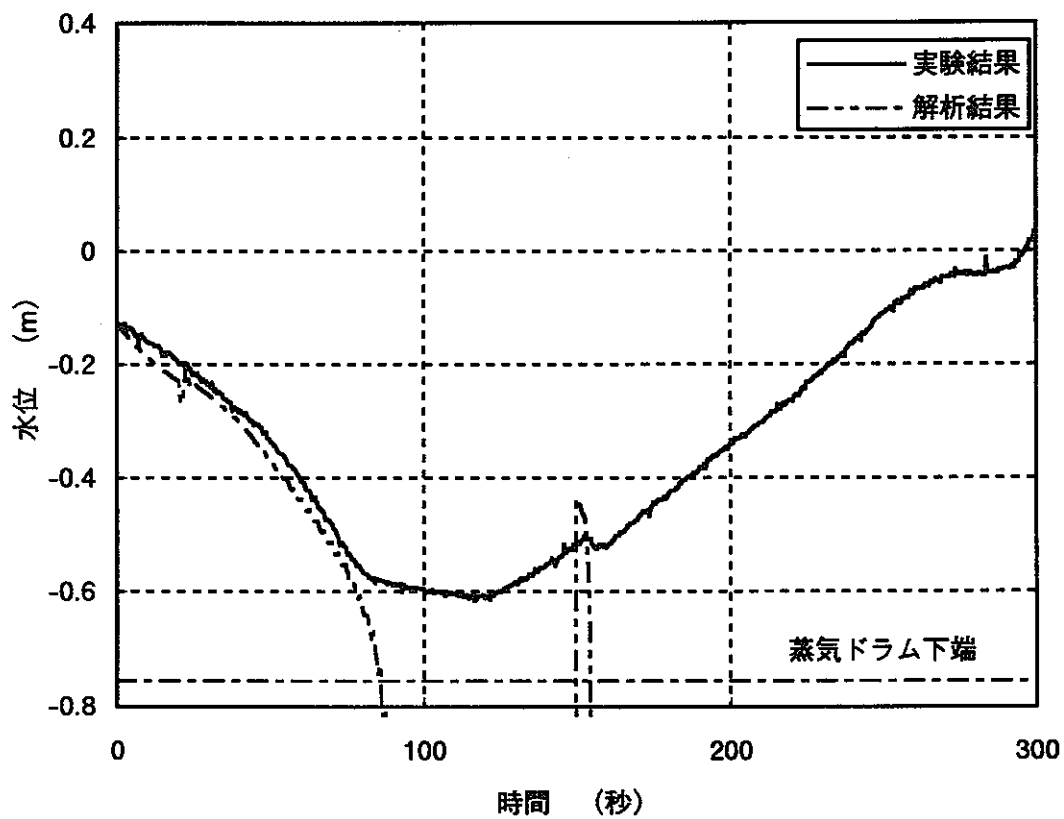


図3.2.2-4 下降管小破断実験解析結果(蒸気ドラム水位)

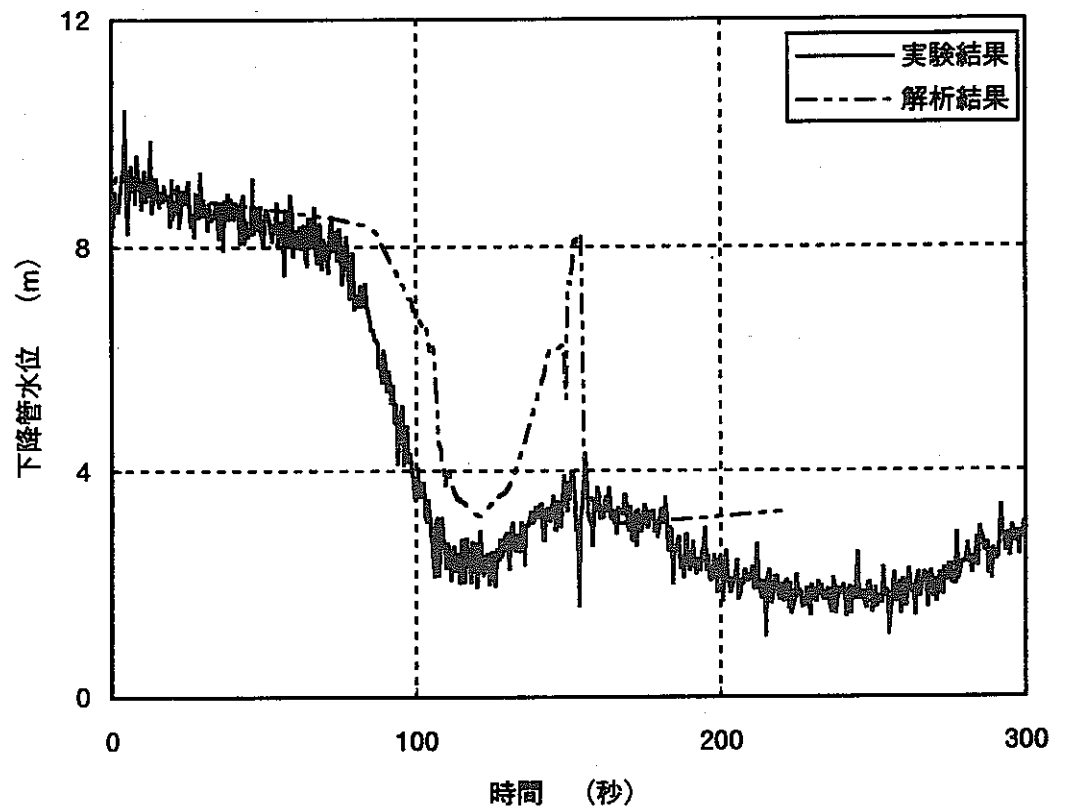


図3.2.2-5 下降管小破断実験解析結果(下降管水位)

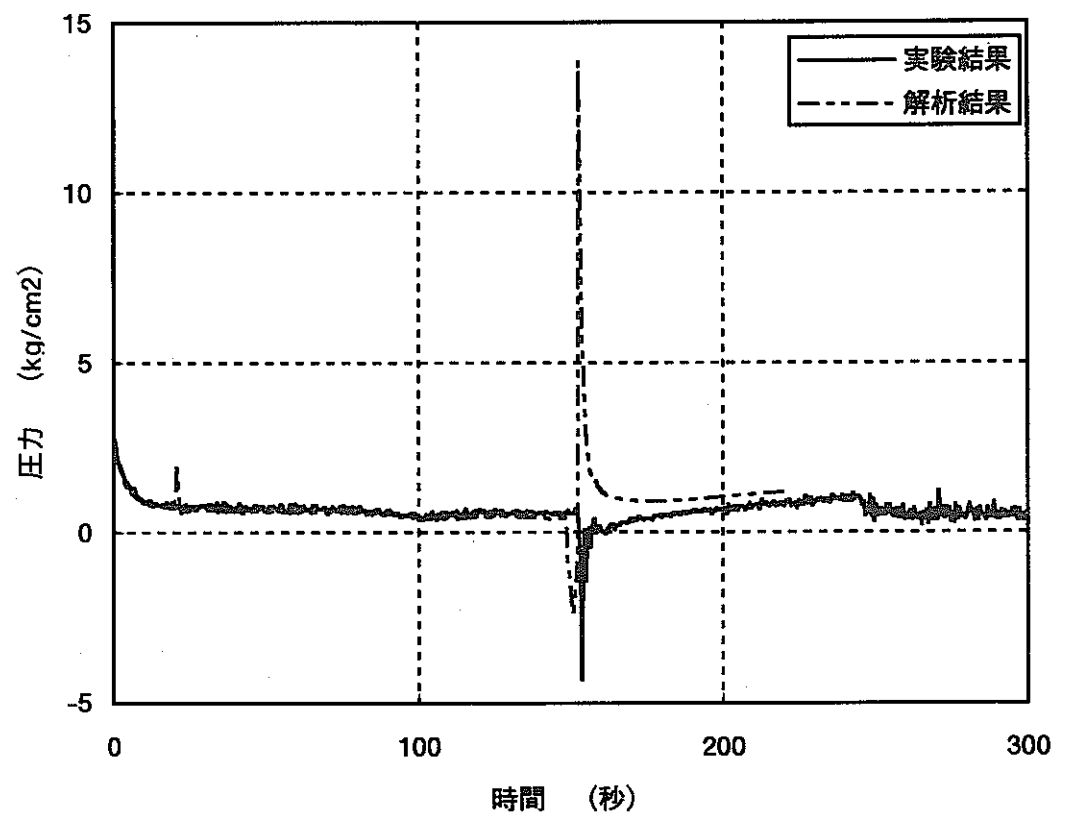


図3.2.2-6 下降管小破断実験解析結果(下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧)

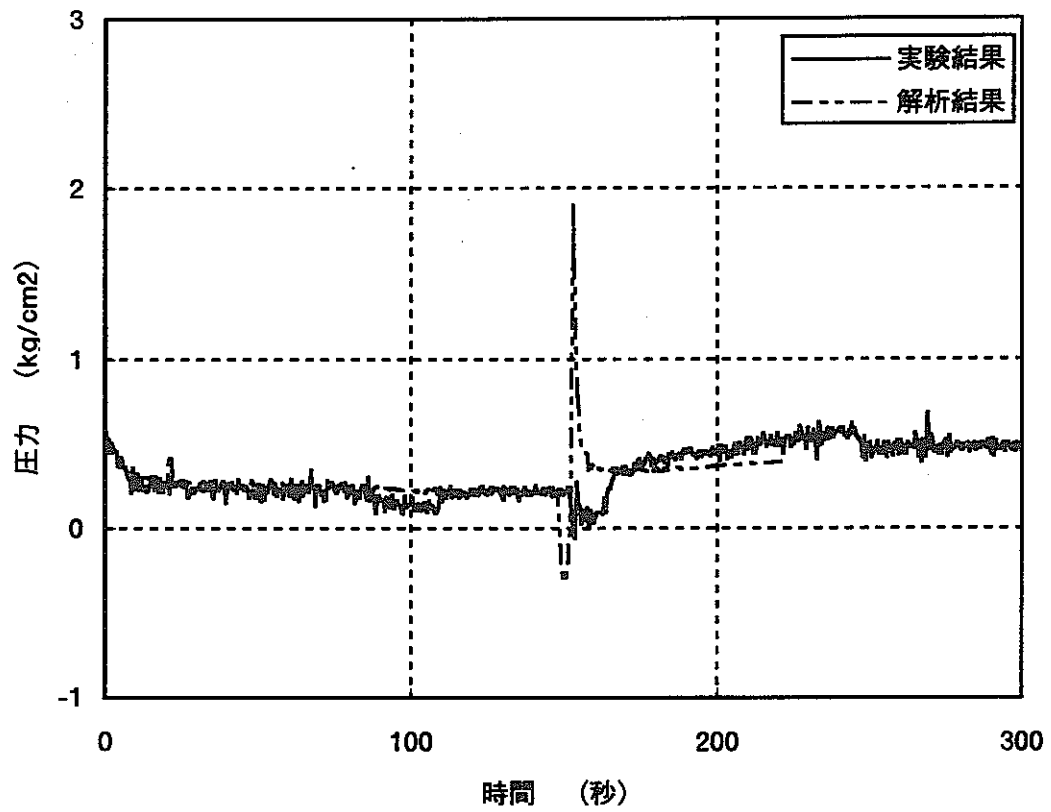


図3.2.2-7 下降管小破断実験解析結果(高出力チャンネル炉心部差圧)

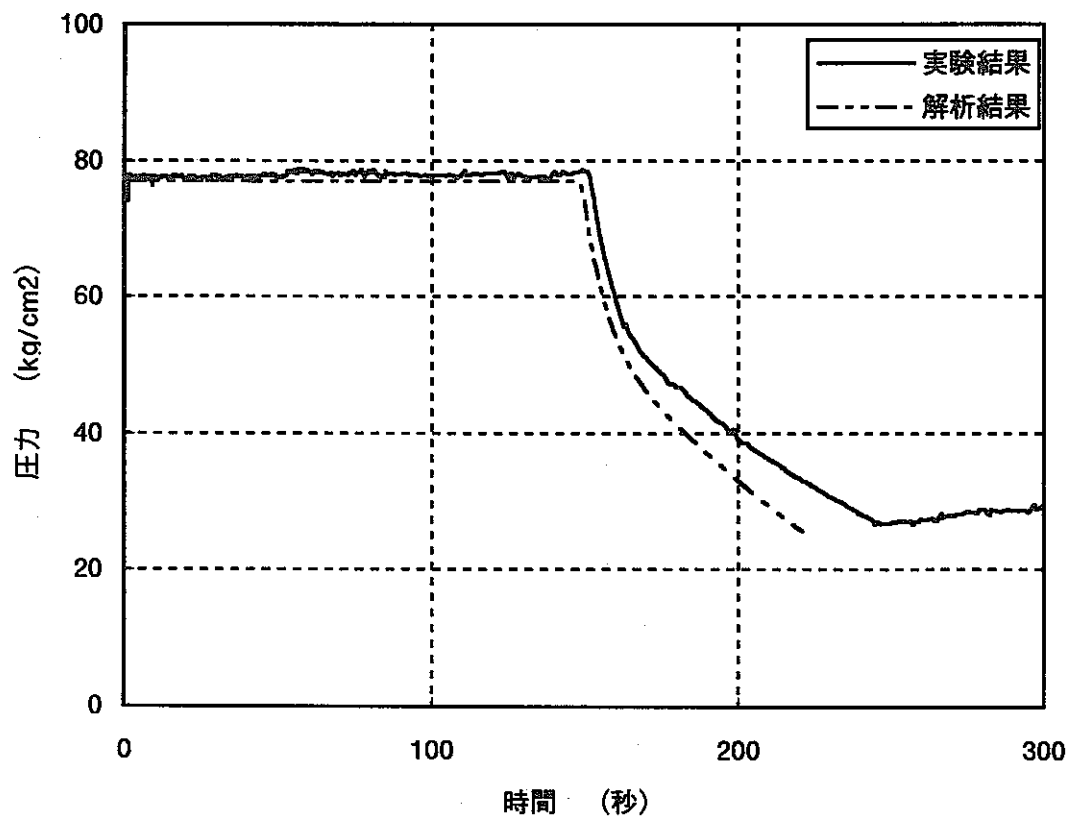


図3.2.2-8 下降管小破断実験解析結果(蓄圧器内圧力)

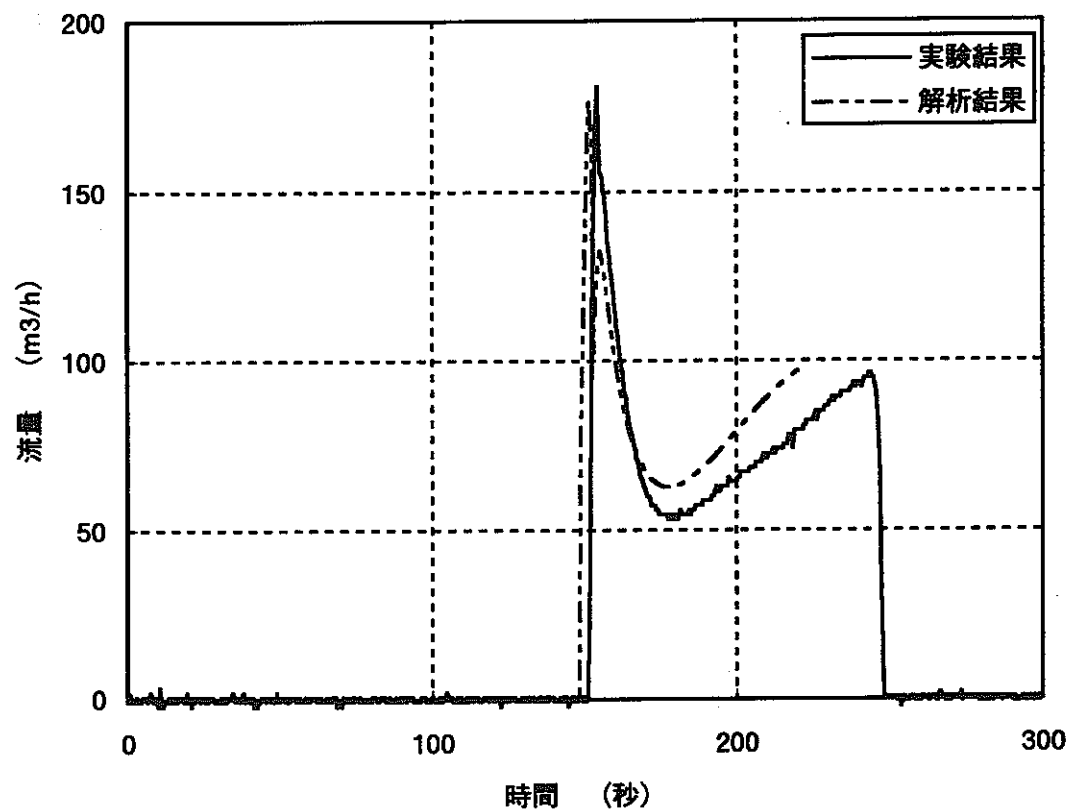


図3.2.2-9 下降管小破断実験解析結果(APCI流量)

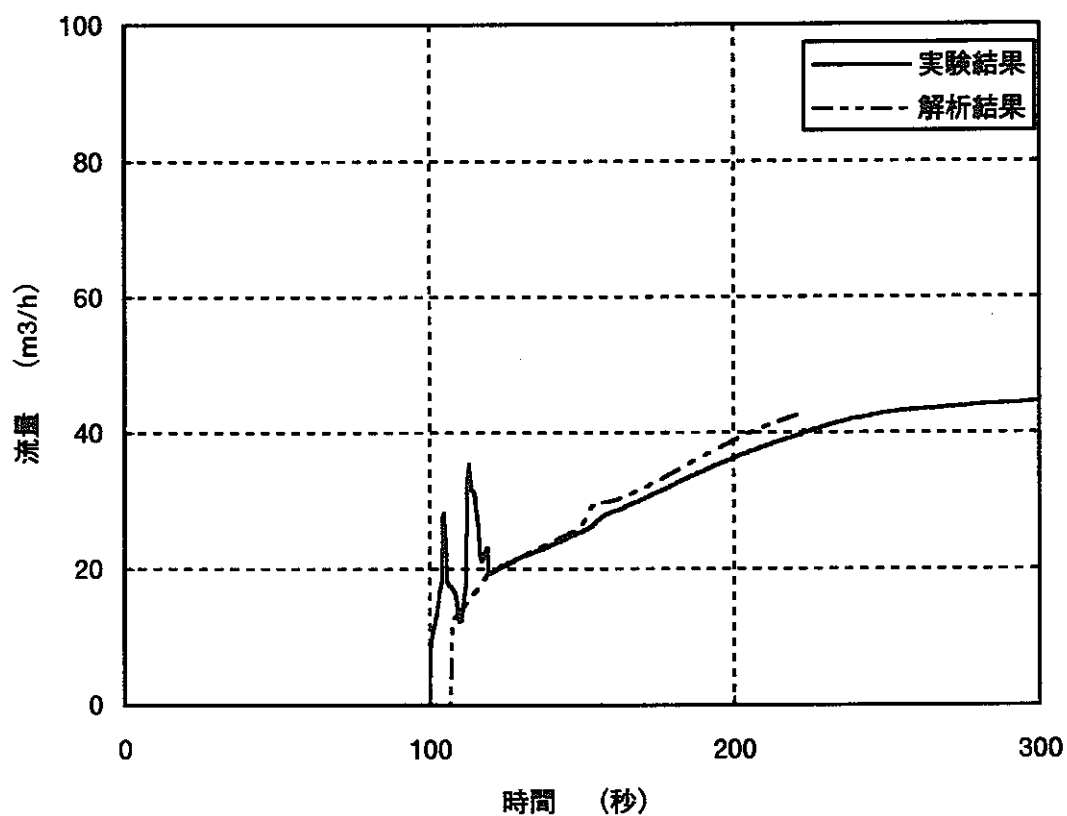


図3.2.2-10 下降管小破断実験解析結果(HPCI流量)

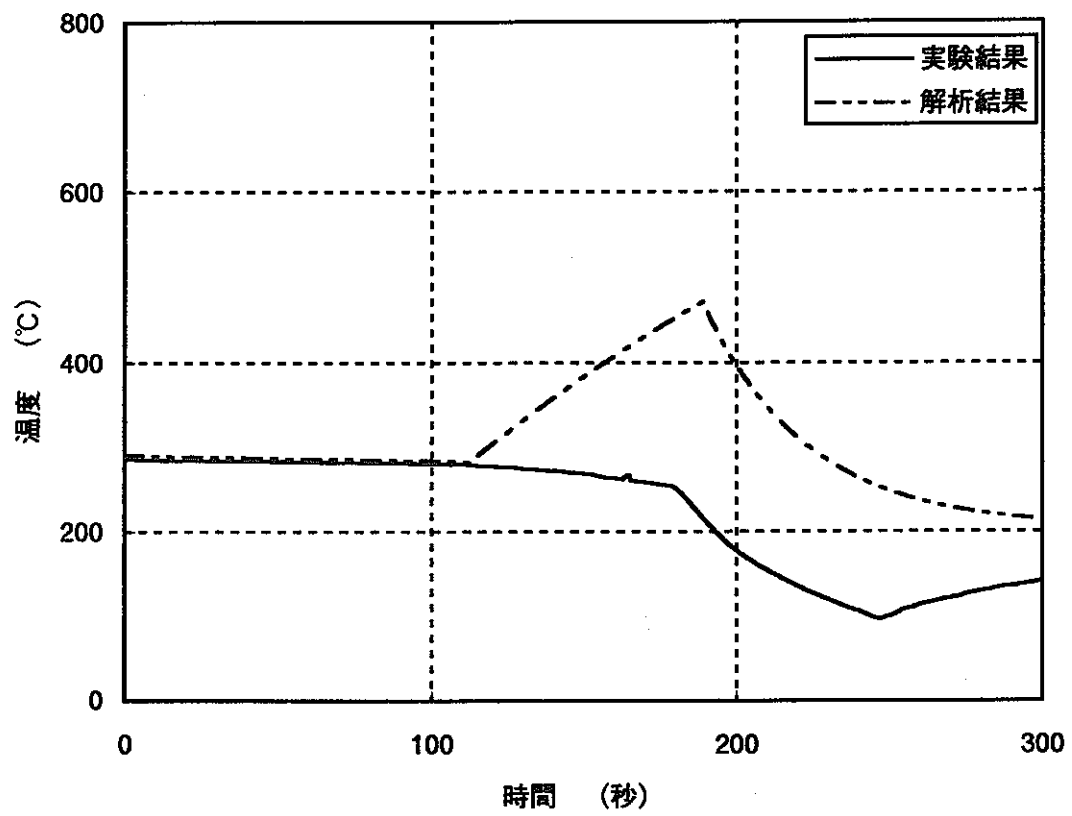


図3.2.2-11 下降管小破断実験解析結果(外層ピン被覆管温度)

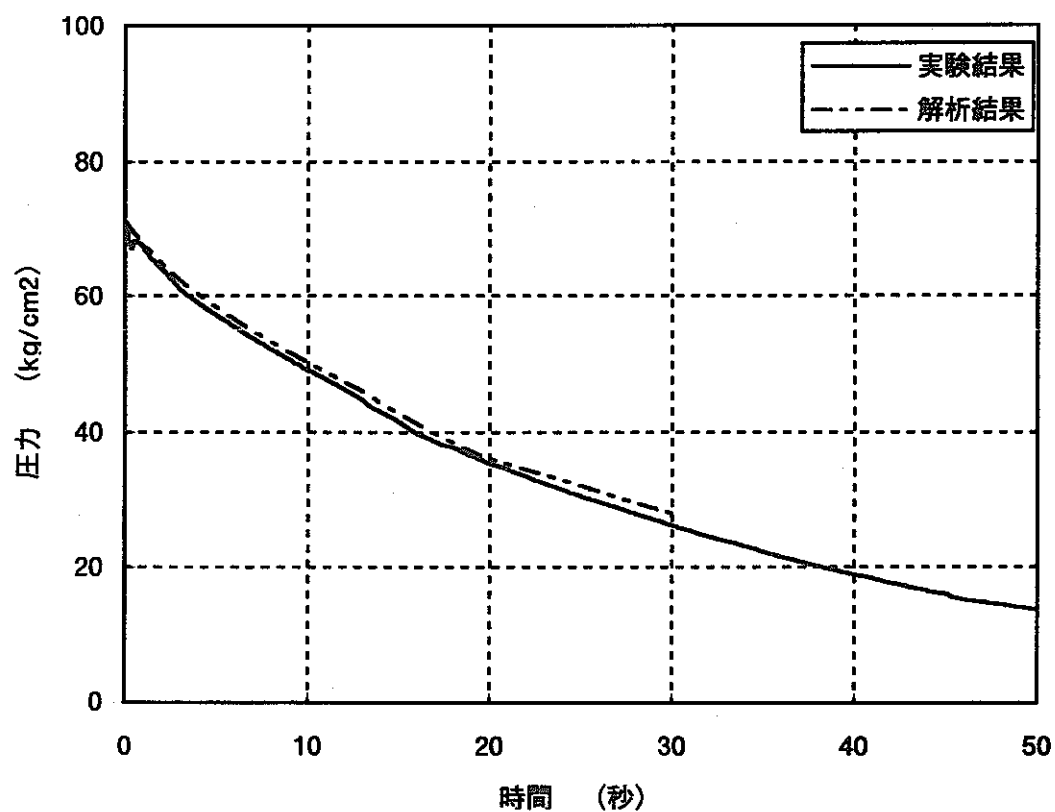


図3.2.3-1 主蒸気管大破断実験解析結果(蒸気ドラム圧力)

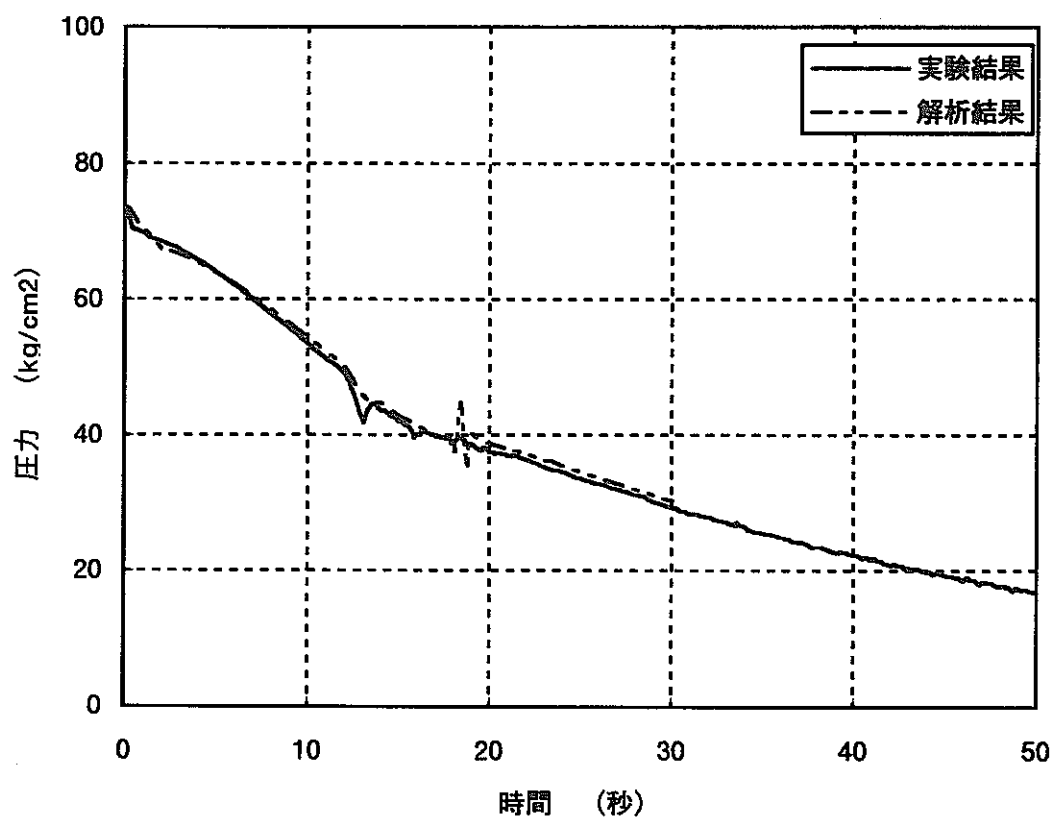


図3.2.3-2 主蒸気管大破断実験解析結果(下部ヘッド圧力)

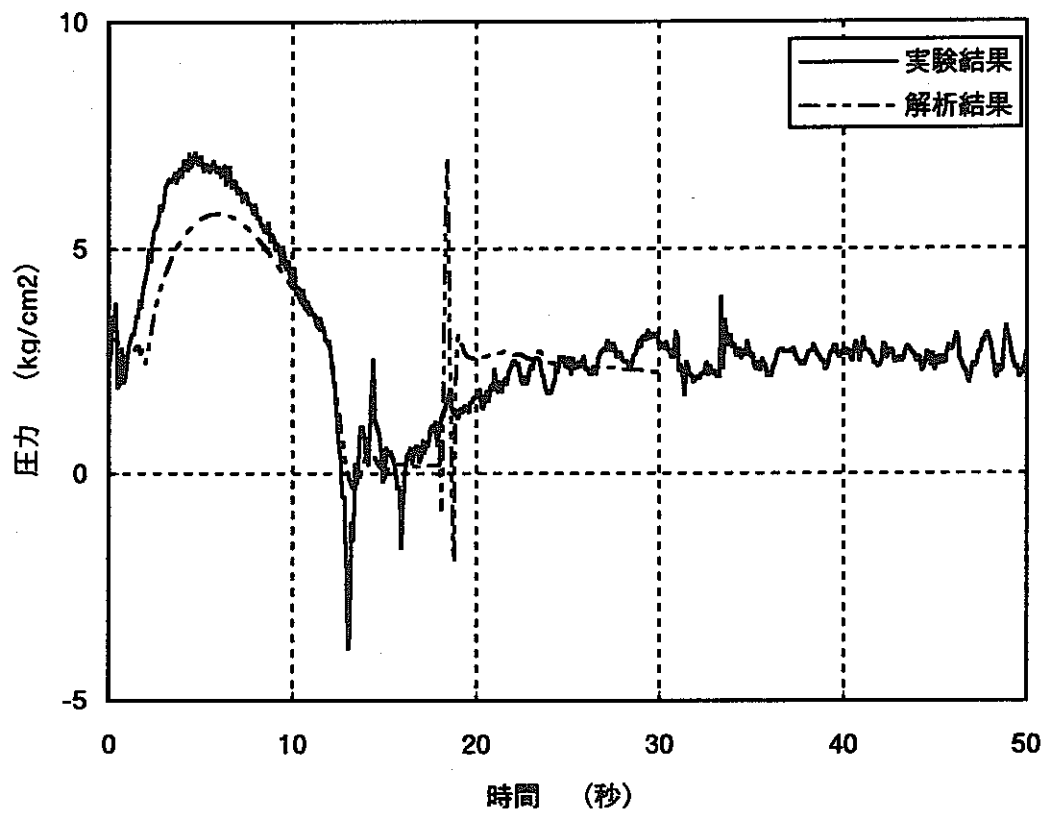


図3.2.3-3 主蒸気管大破断実験解析結果(下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧)

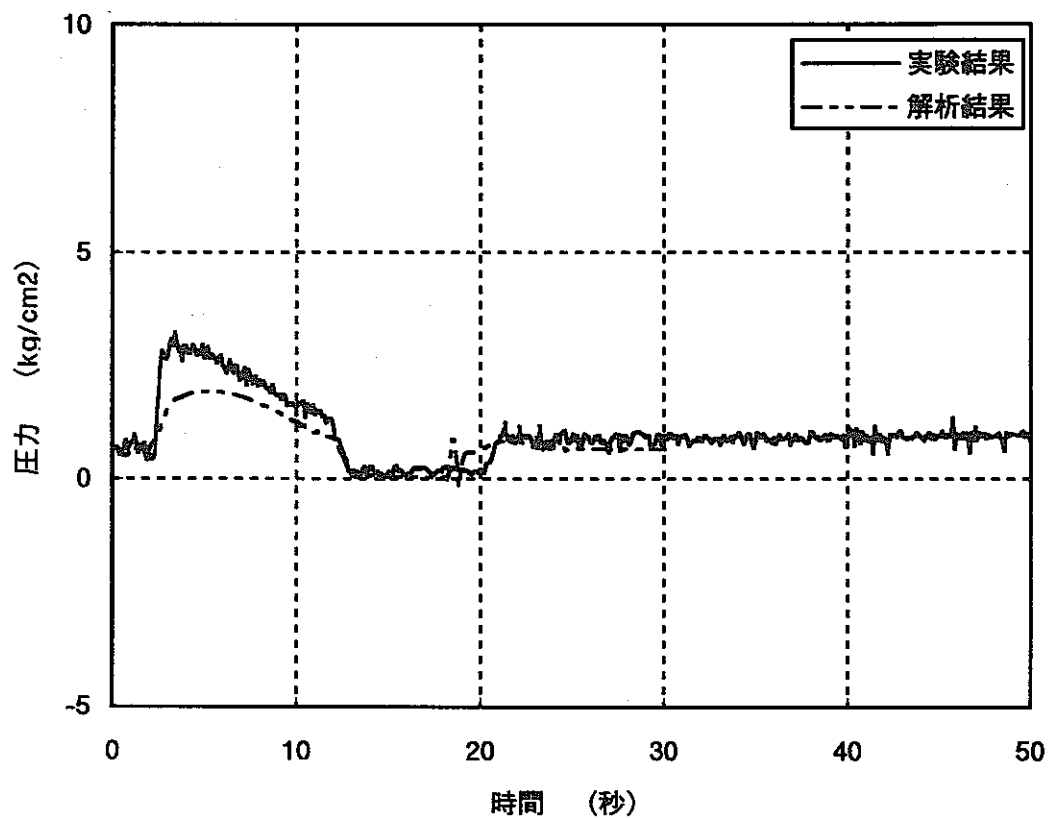


図3.2.3-4 主蒸気管大破断実験解析結果(高出力チャンネル炉心部差圧)

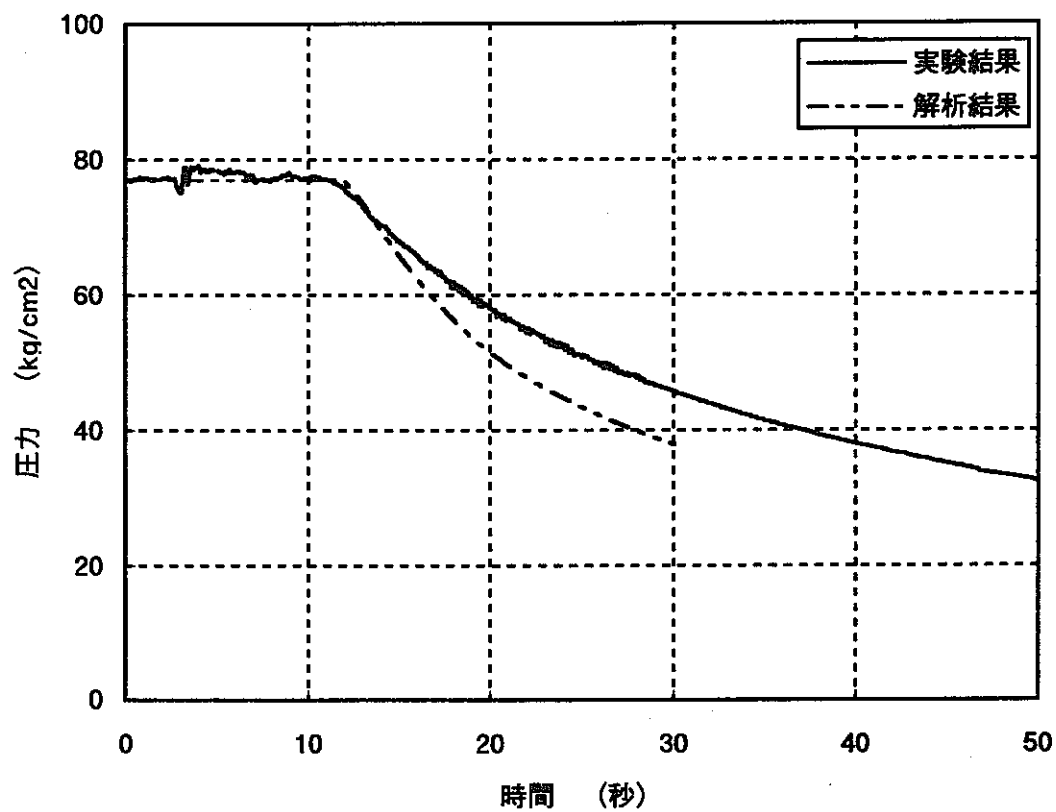


図3.2.3-5 主蒸気管大破断実験解析結果(蓄圧器内圧力)

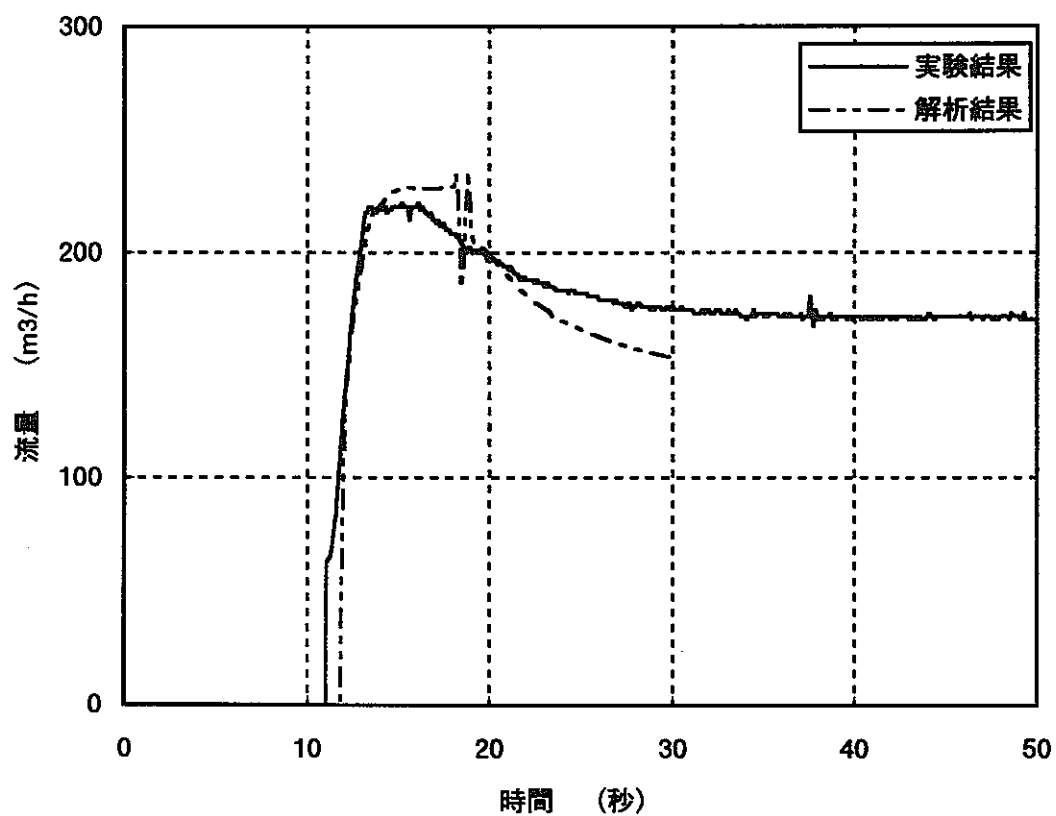


図3.2.3-6 主蒸気管大破断実験解析結果(APCI流量)

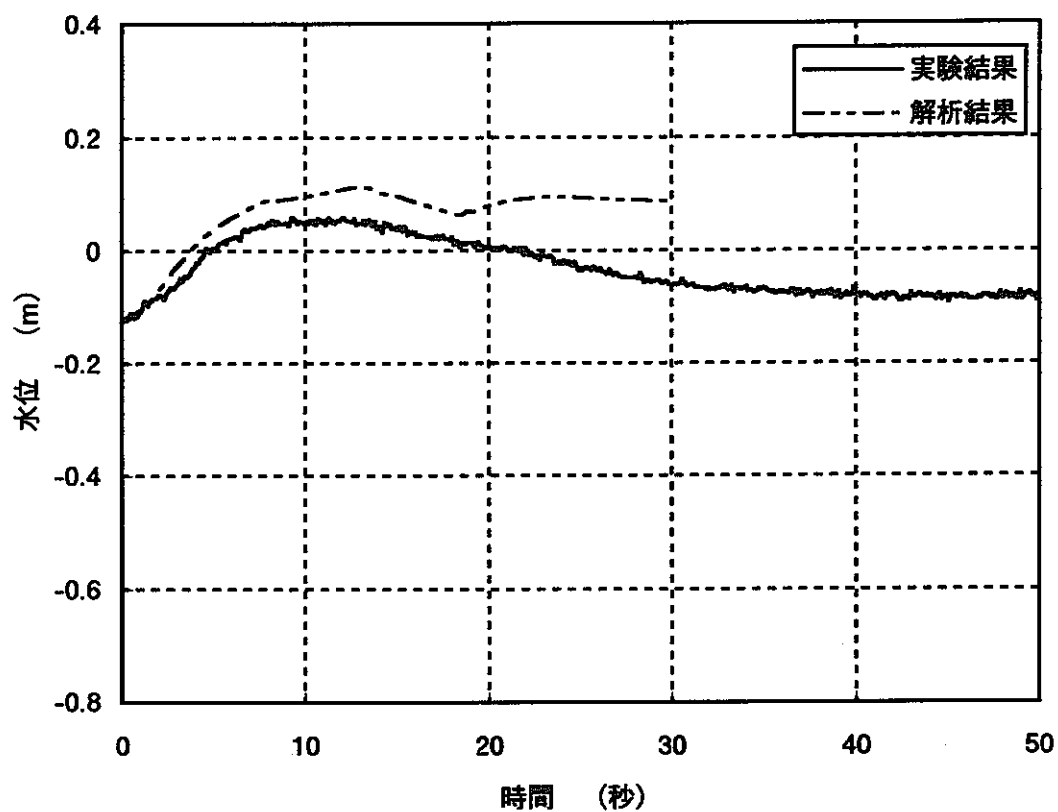


図3.2.3-7 主蒸気管大破断実験解析結果(蒸気ドラム水位)

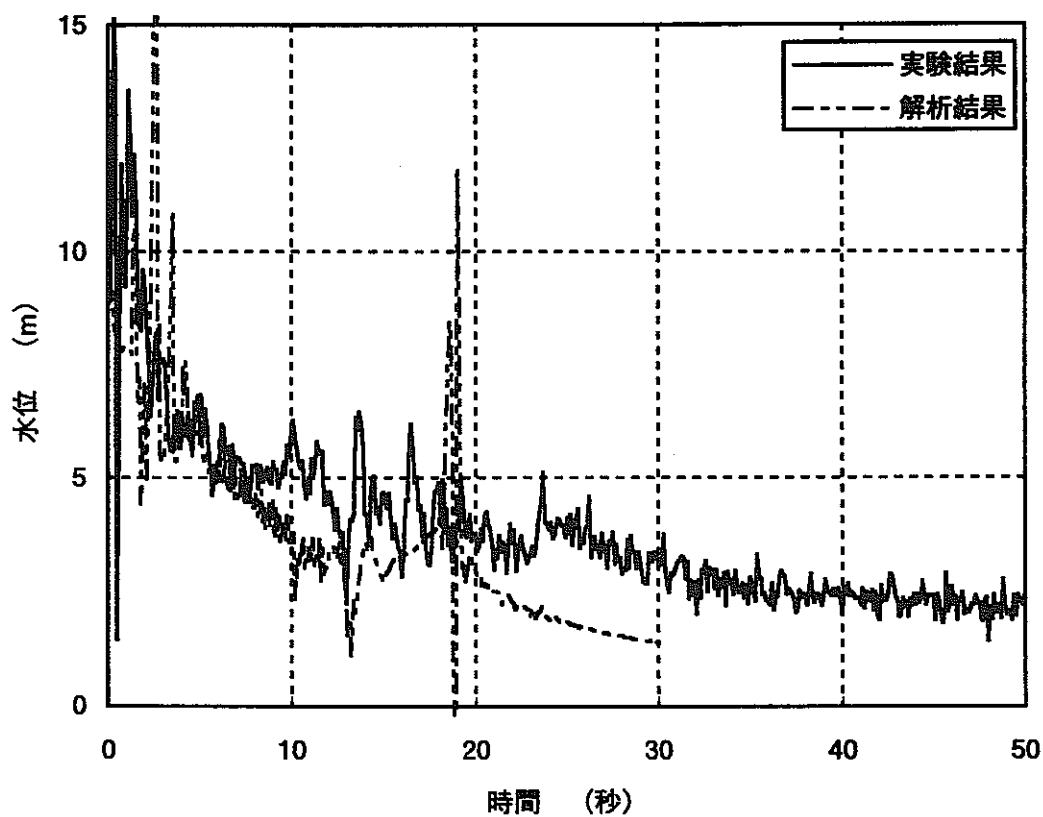


図3.2.3-8 主蒸気管大破断実験解析結果(下降管水位)

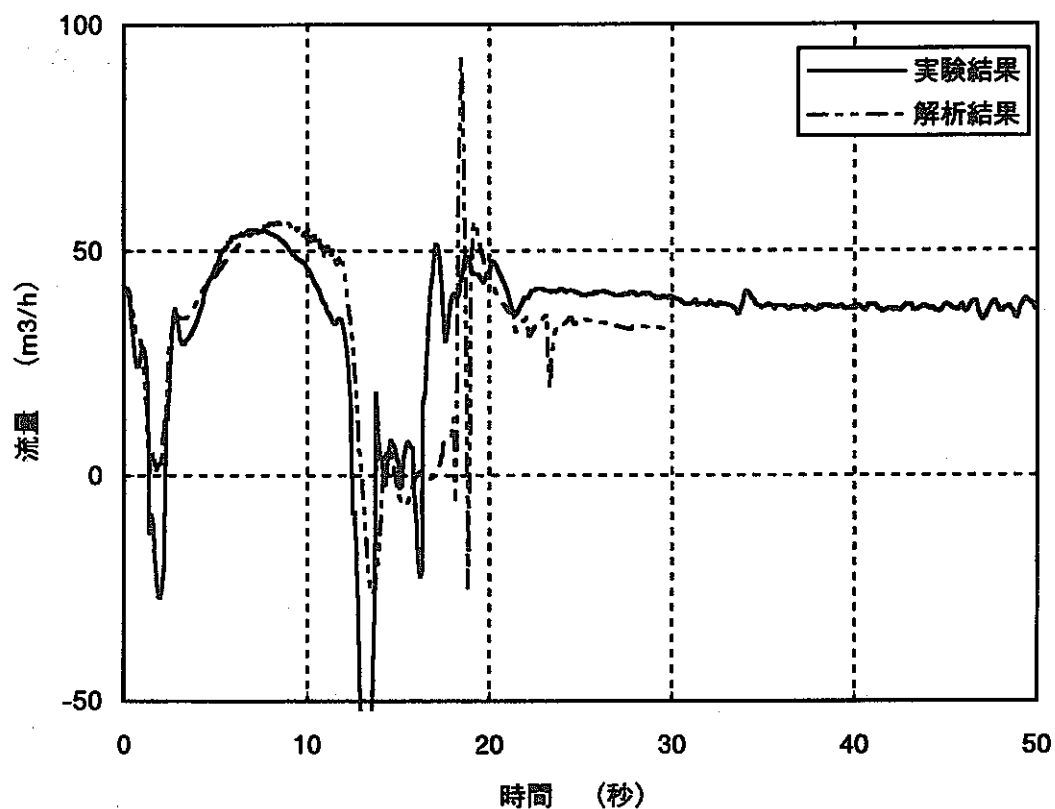


図3.2.3-9 主蒸気管大破断実験解析結果(炉心入口流量)

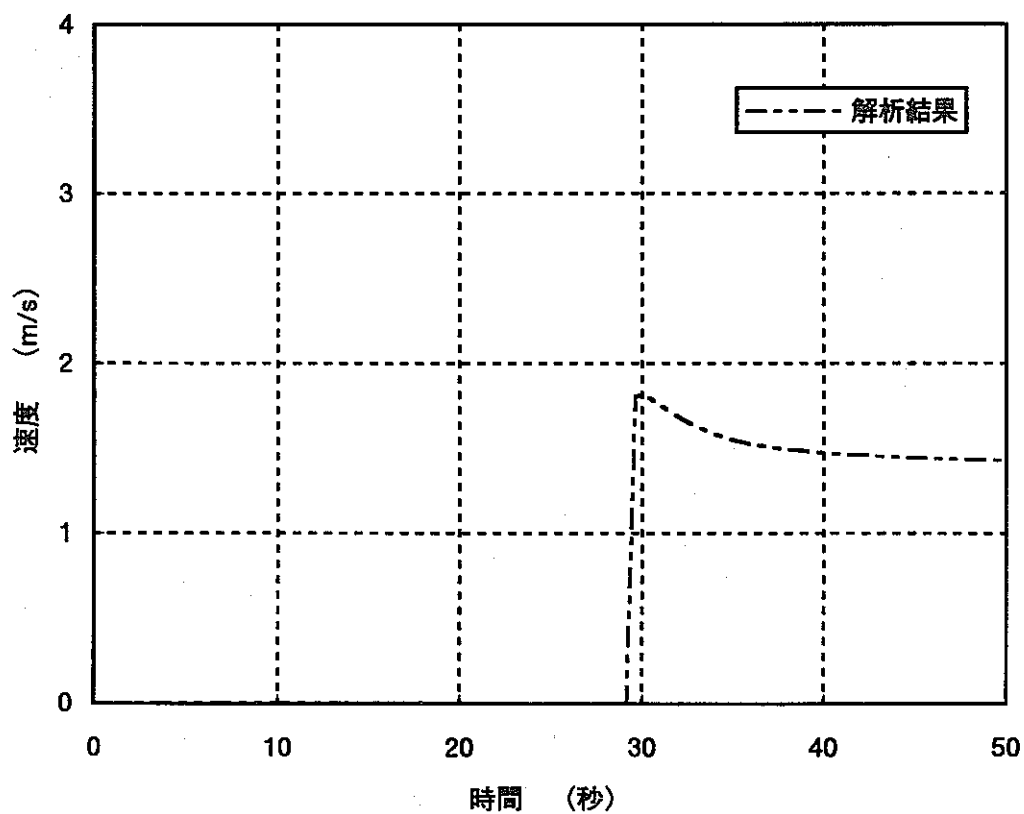


図3.2.3-10 主蒸気管大破断実験解析結果(平均再冠水速度)

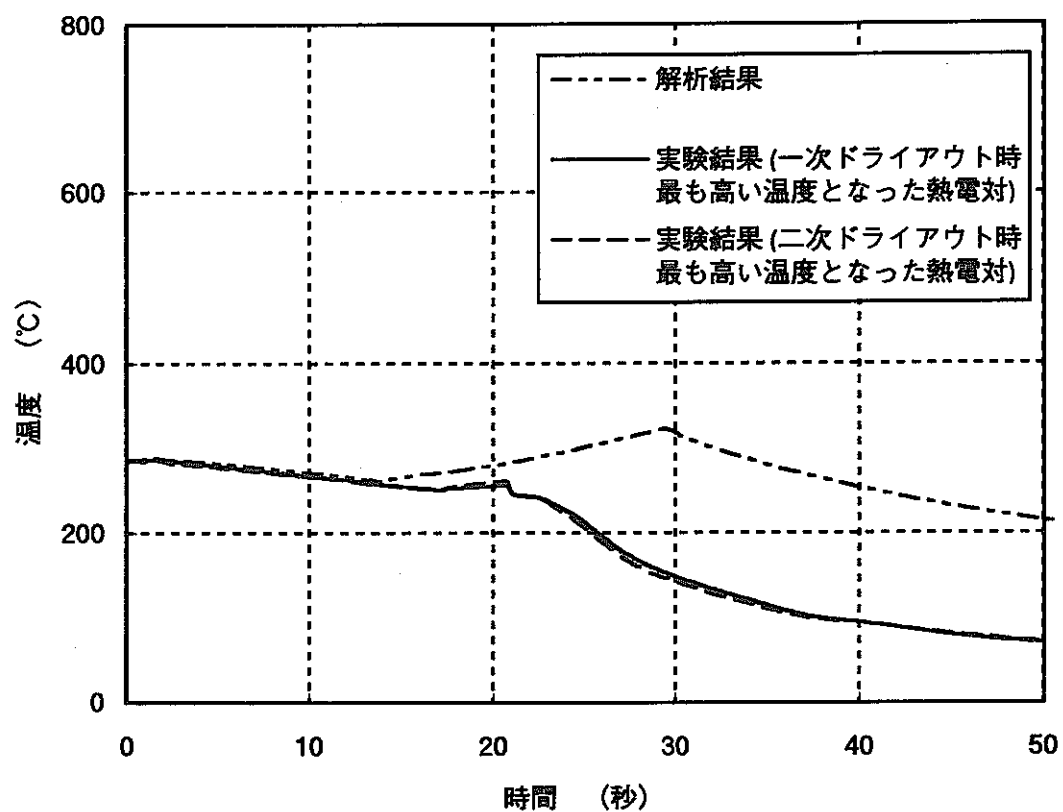


図3.2.3-11 主蒸気管大破断実験解析結果(内層ピン被覆管温度)

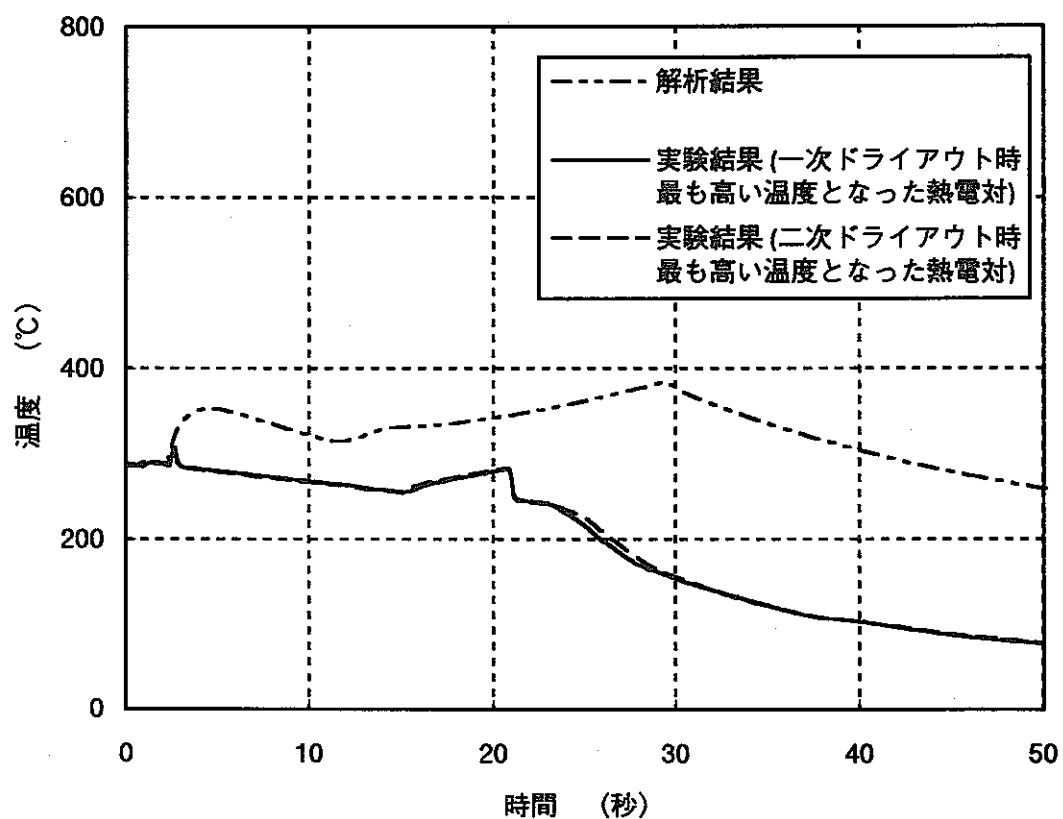


図3.2.3-12 主蒸気管大破断実験解析結果(中層ピン被覆管温度)

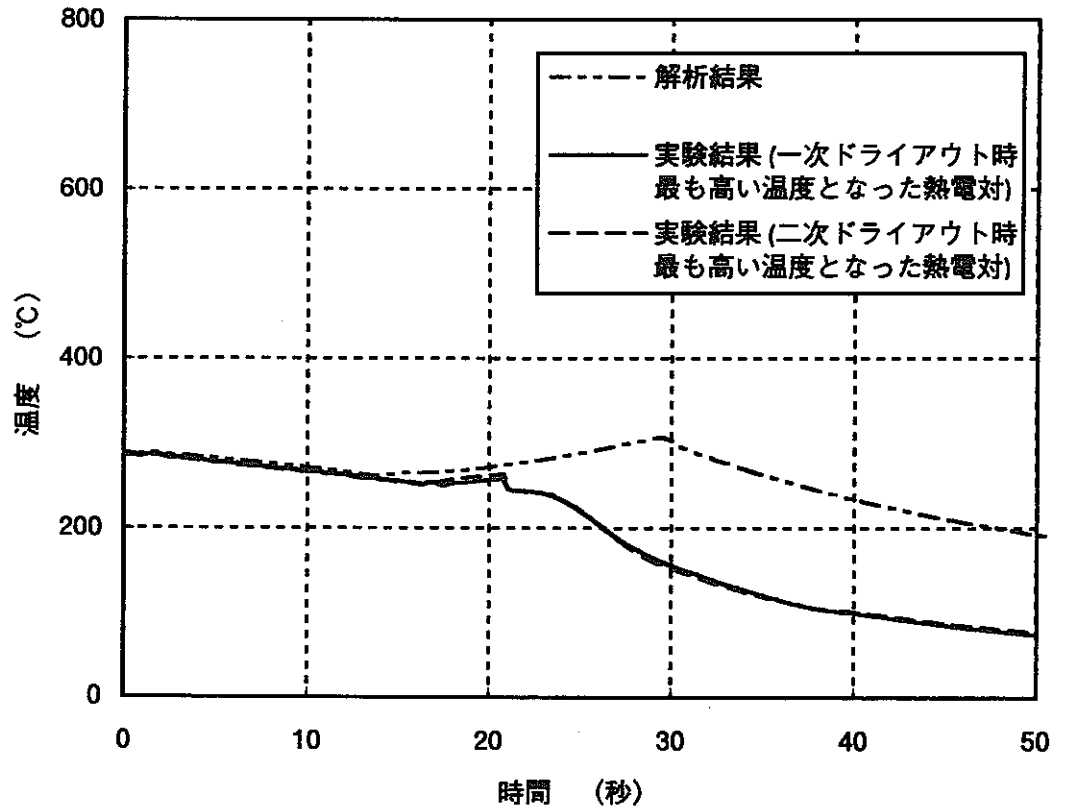


図3.2.3-13 主蒸気管大破断実験解析結果(ガドリピン被覆管温度)

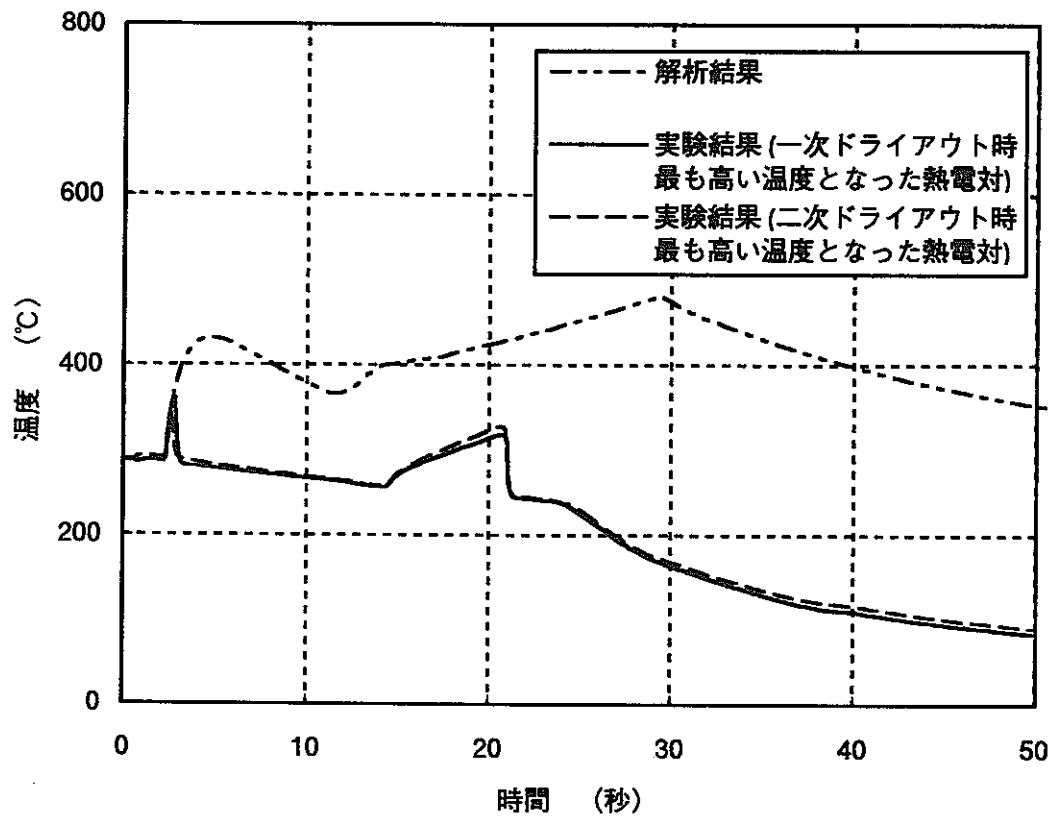


図3.2.3-14 主蒸気管大破断実験解析結果(外層ピン被覆管温度)

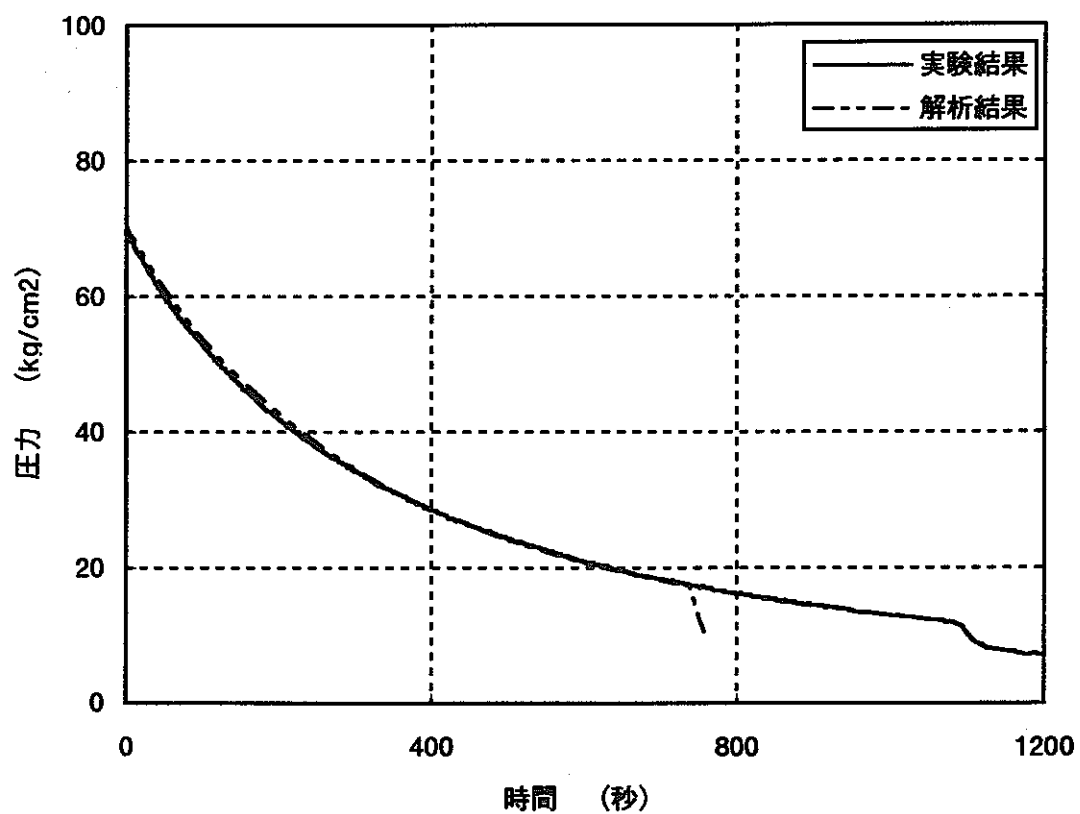


図3.2.4-1 主蒸気管小破断実験解析結果(蒸気ドラム圧力)

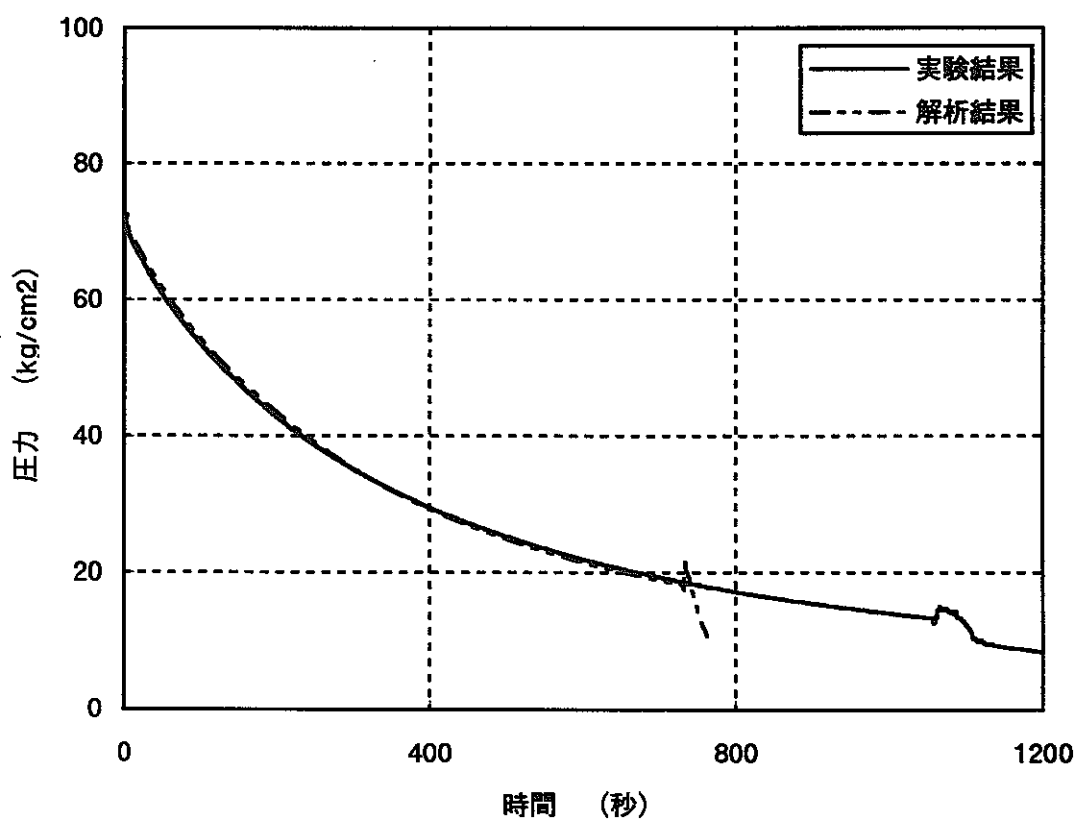


図3.2.4-2 主蒸気管小破断実験解析結果(下部ヘッダ圧力)

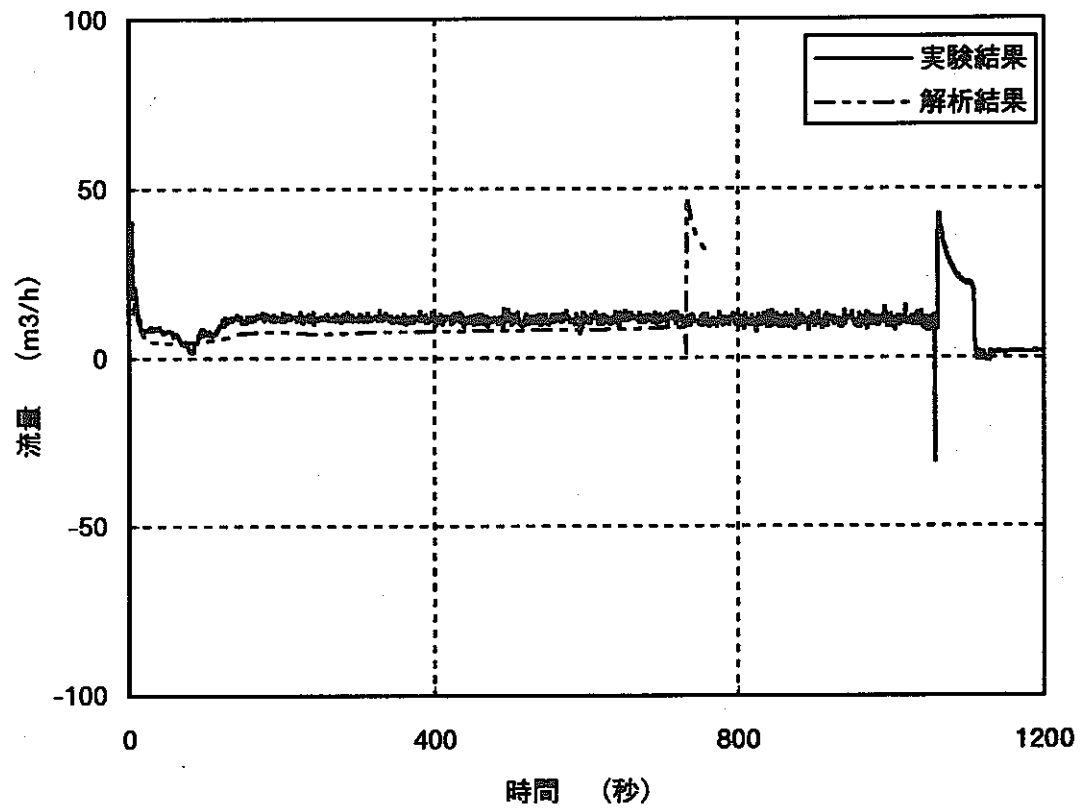


図3.2.4-3 主蒸気管小破断実験解析結果(炉心入口流量)

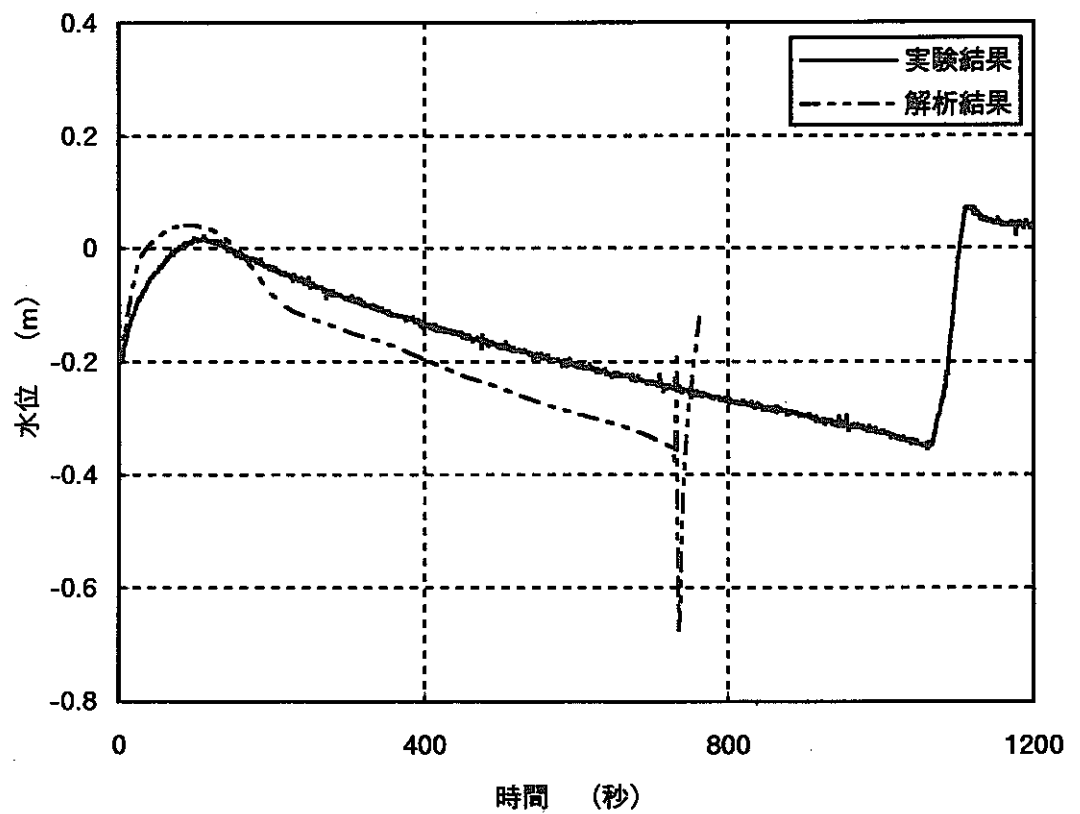


図3.2.4-4 主蒸気管小破断実験解析結果(蒸気ドラム水位)

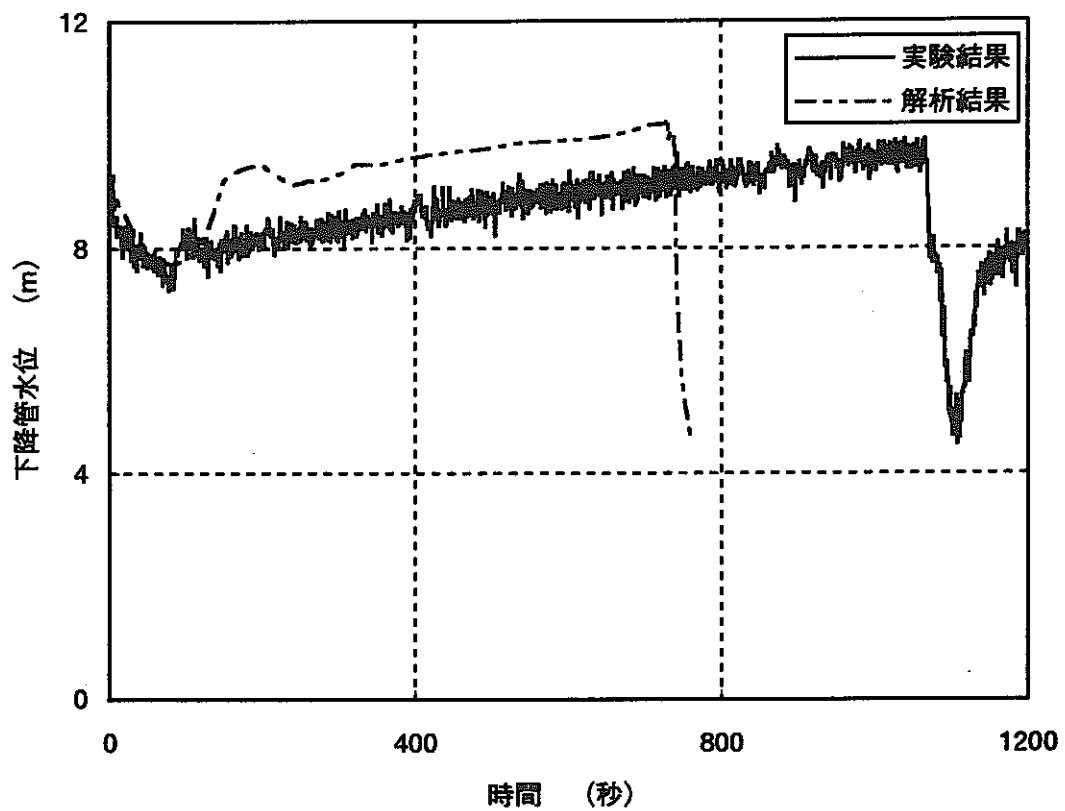


図3.2.4-5 主蒸気管小破断実験解析結果(下降管水位)

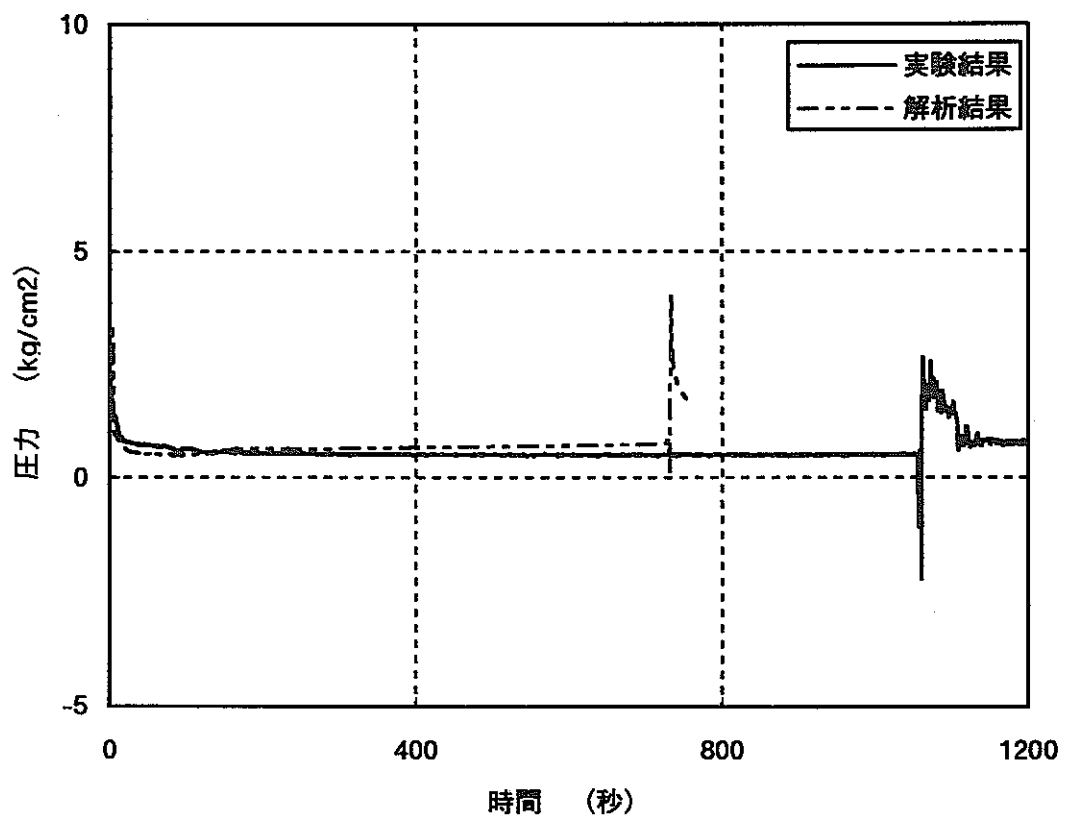


図3.2.4-6 主蒸気管小破断実験解析結果(下部ヘッダー-蒸気ドラム間差圧)

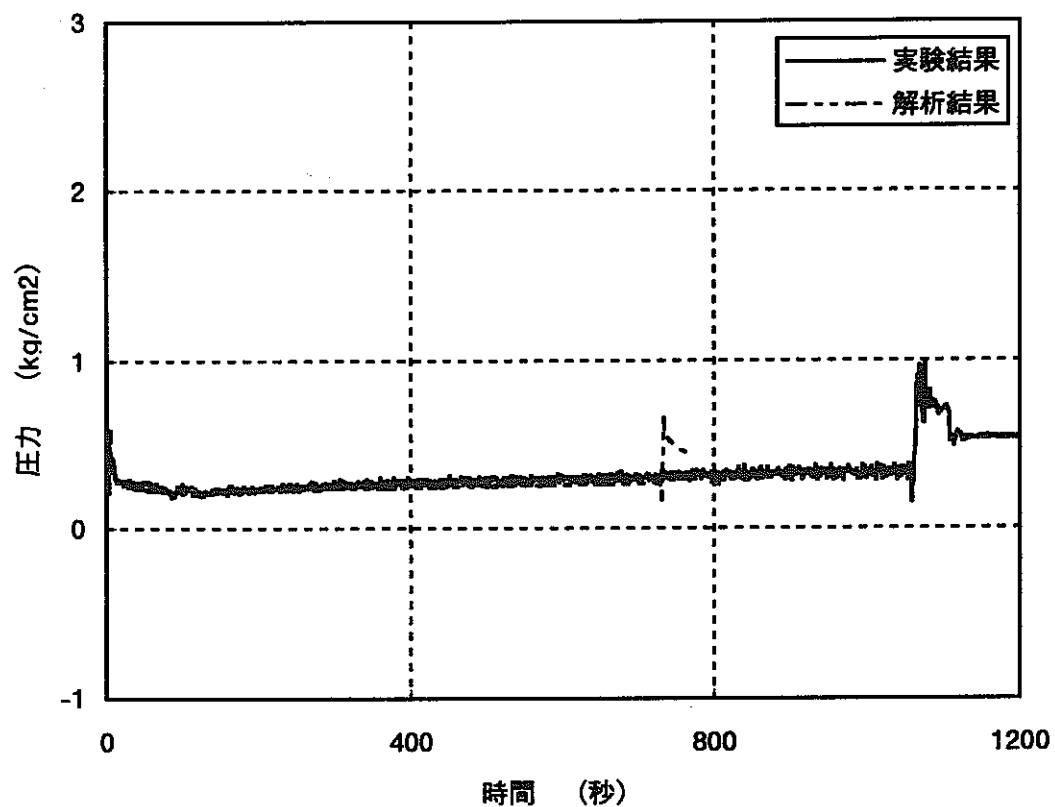


図3.2.4-7 主蒸気管小破断実験解析結果(高出力チャンネル炉心部差圧)

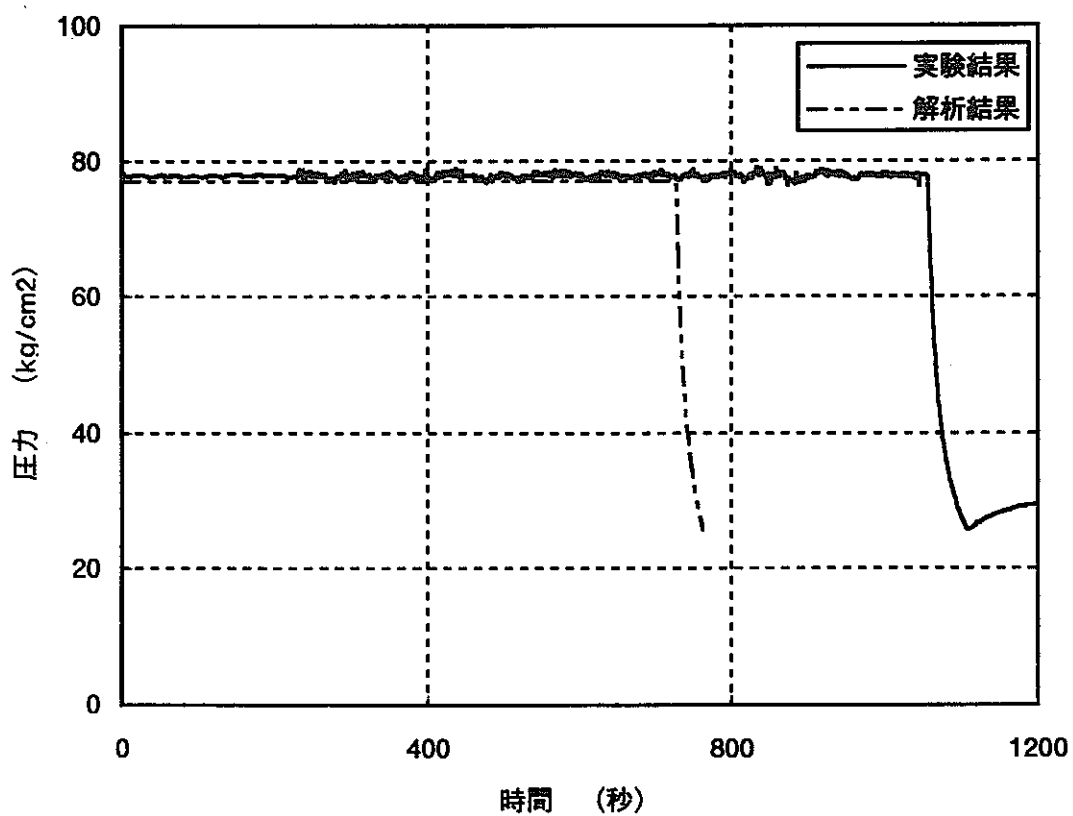


図3.2.4-8 主蒸気管小破断実験解析結果(蓄圧器内圧力)

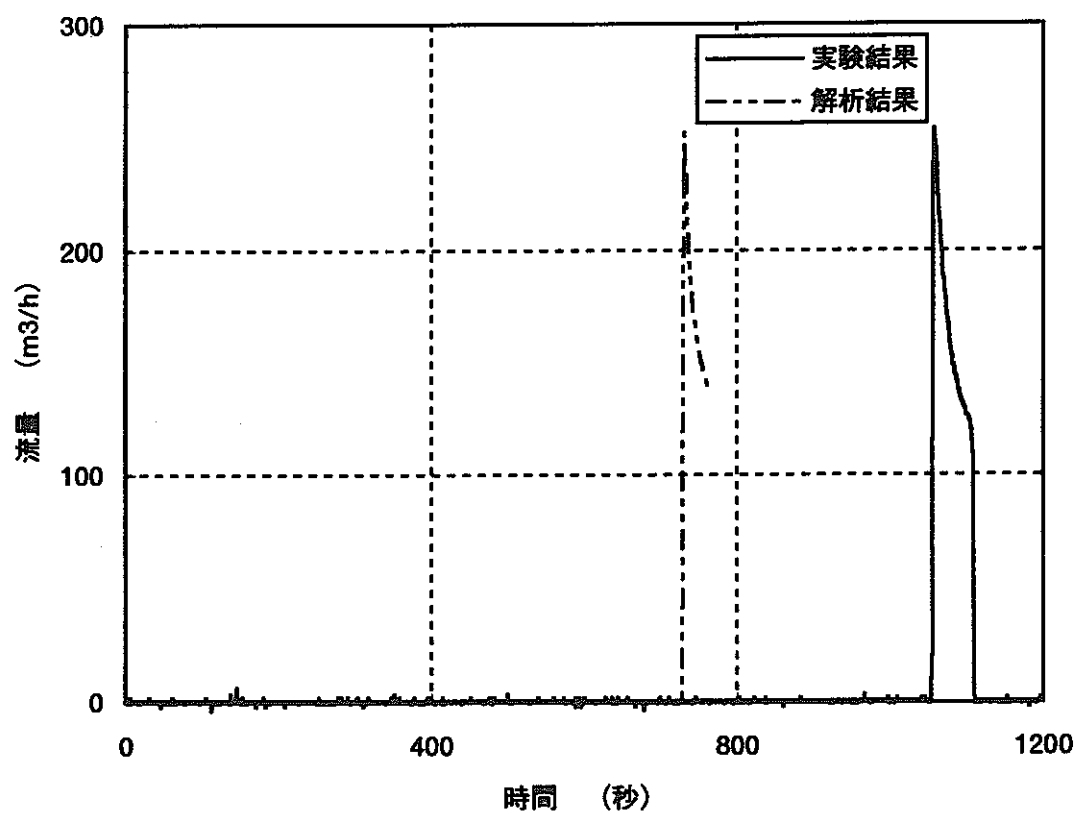


図3.2.4-9 主蒸気管小破断実験解析結果(APCI流量)

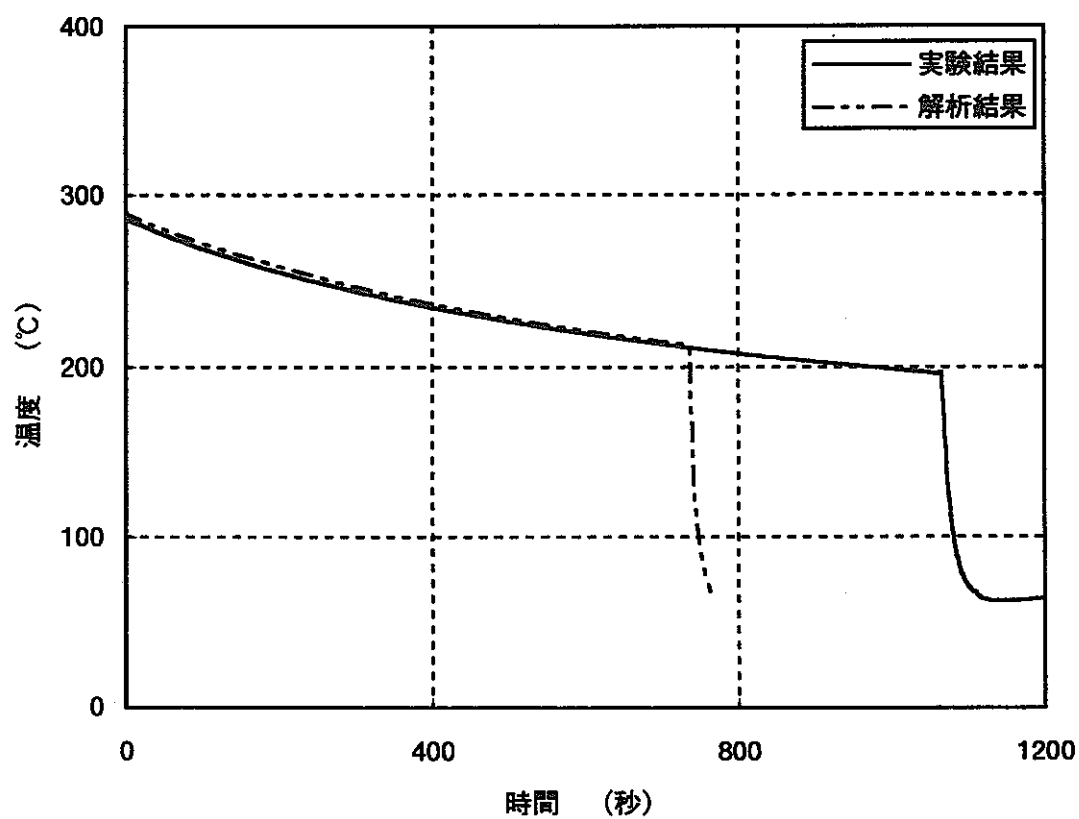


図3.2.4-10 主蒸気管小破断実験解析結果(外層ピン被覆管温度)

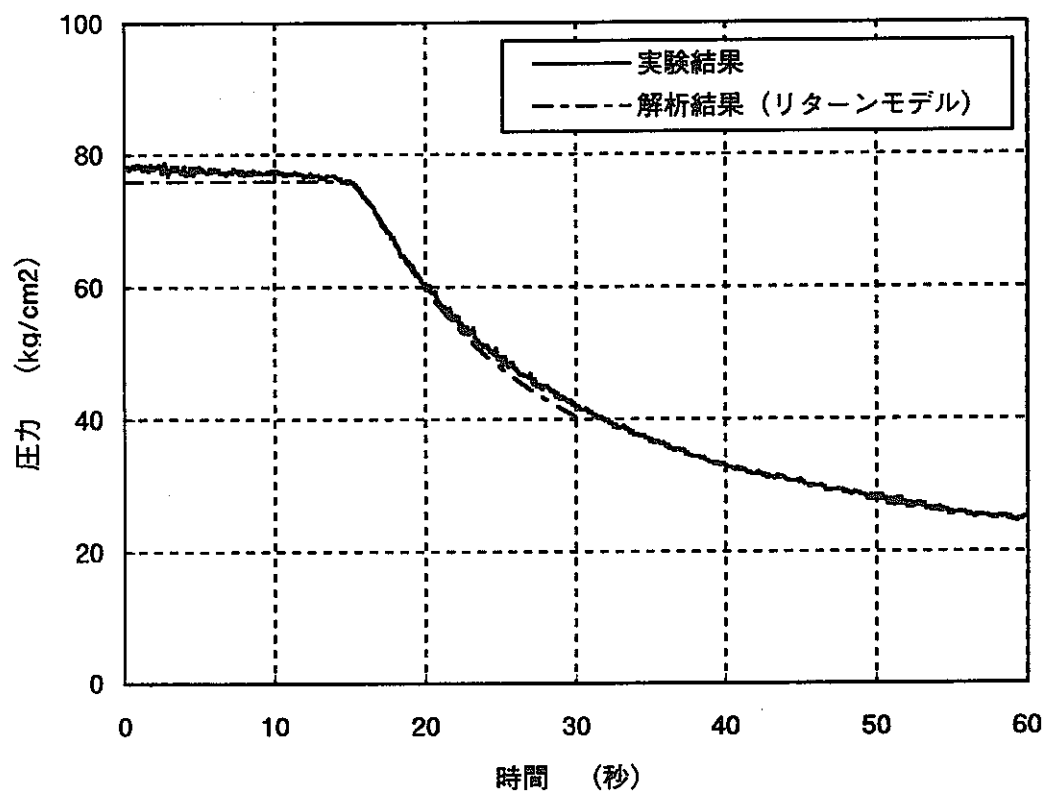


図3.2.5-1 下降管大破断実験解析結果(蓄圧器内圧力)

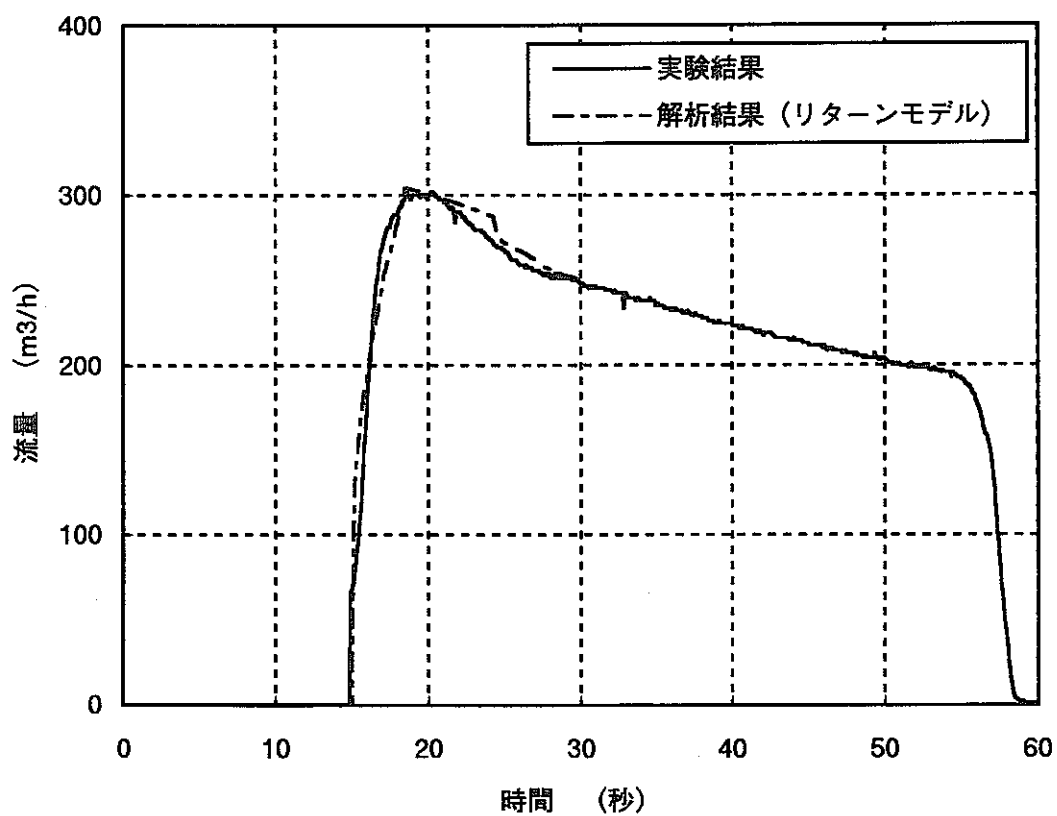


図3.2.5-2 下降管大破断実験解析結果(APCI流量)

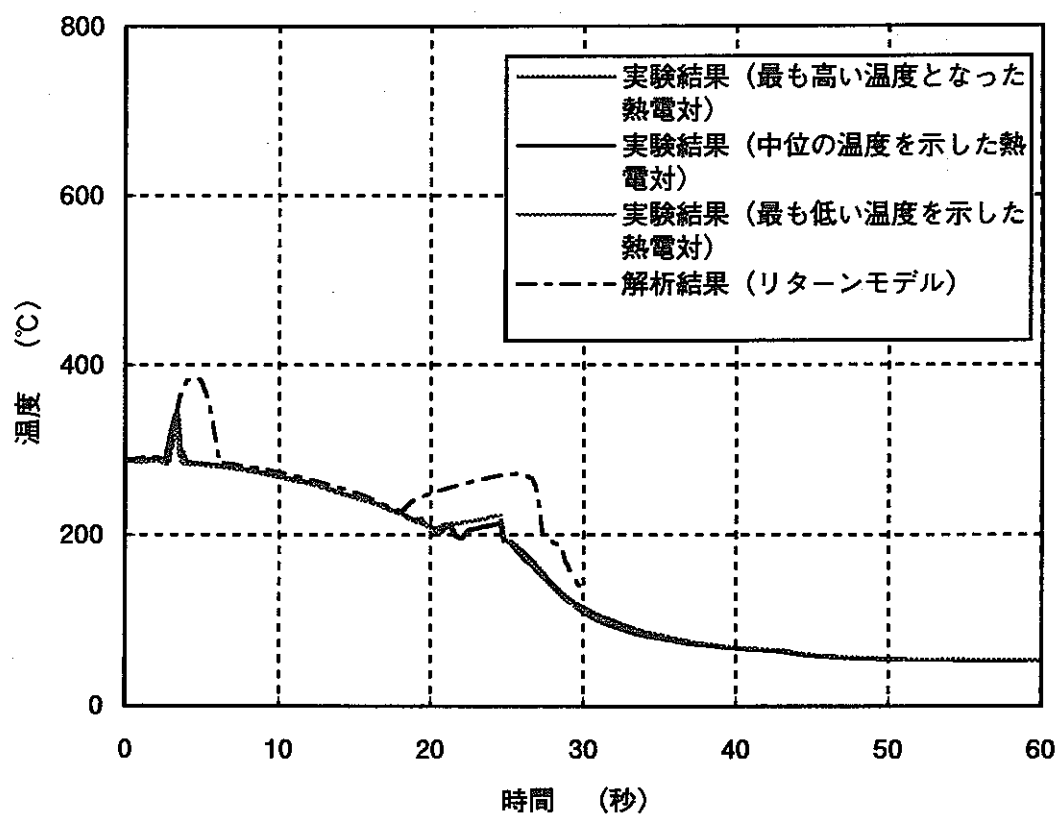


図3.2.5-3 下降管大破断実験解析結果(内層ピン被覆管温度)

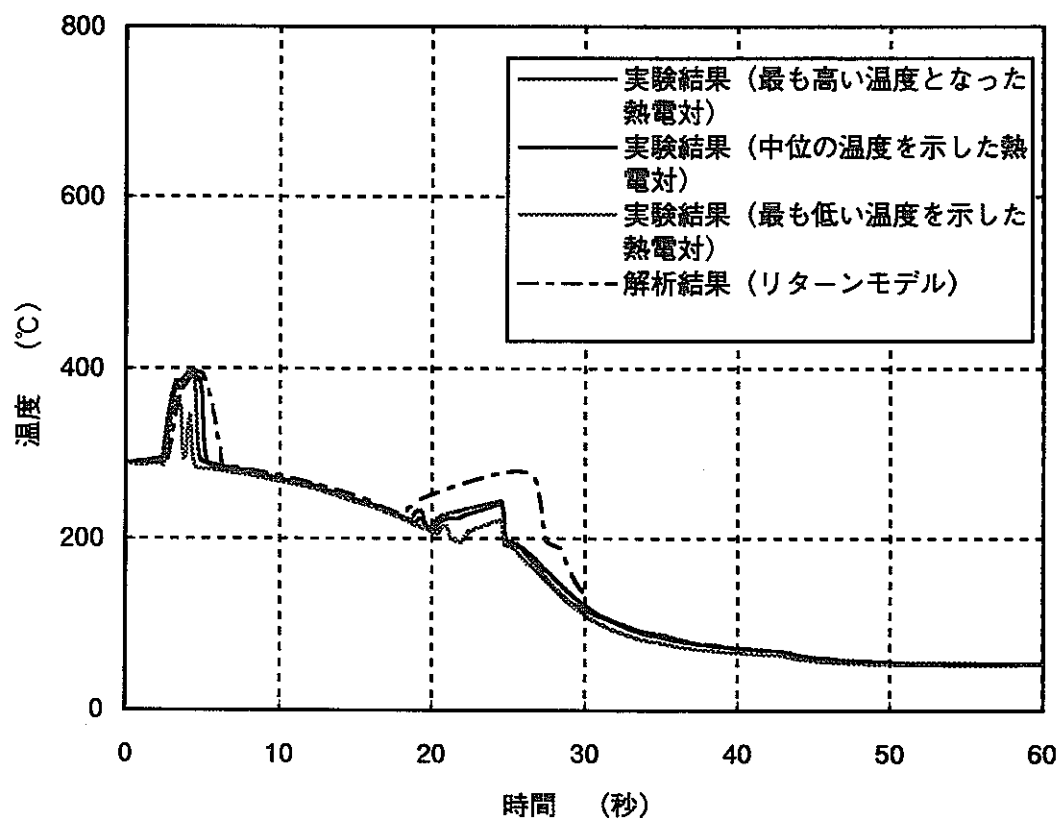


図3.2.5-4 下降管大破断実験解析結果(中層ピン被覆管温度)

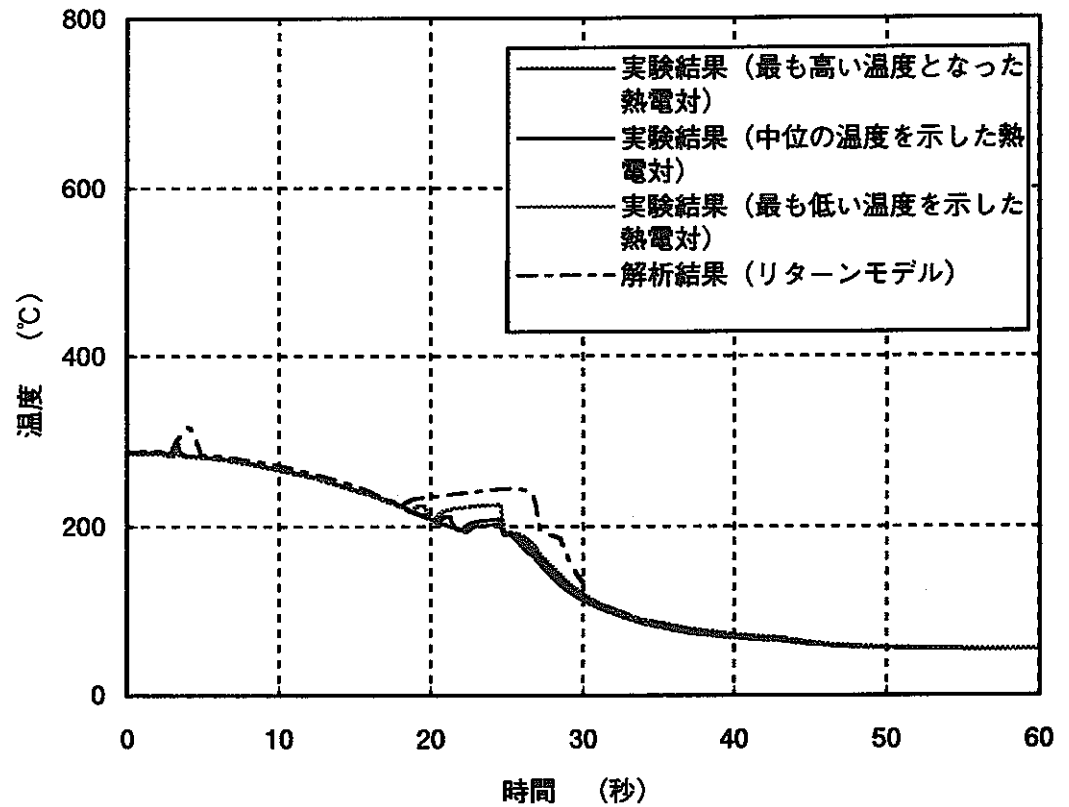


図3.2.5-5 下降管大破断実験解析結果(ガドリピン被覆管温度)

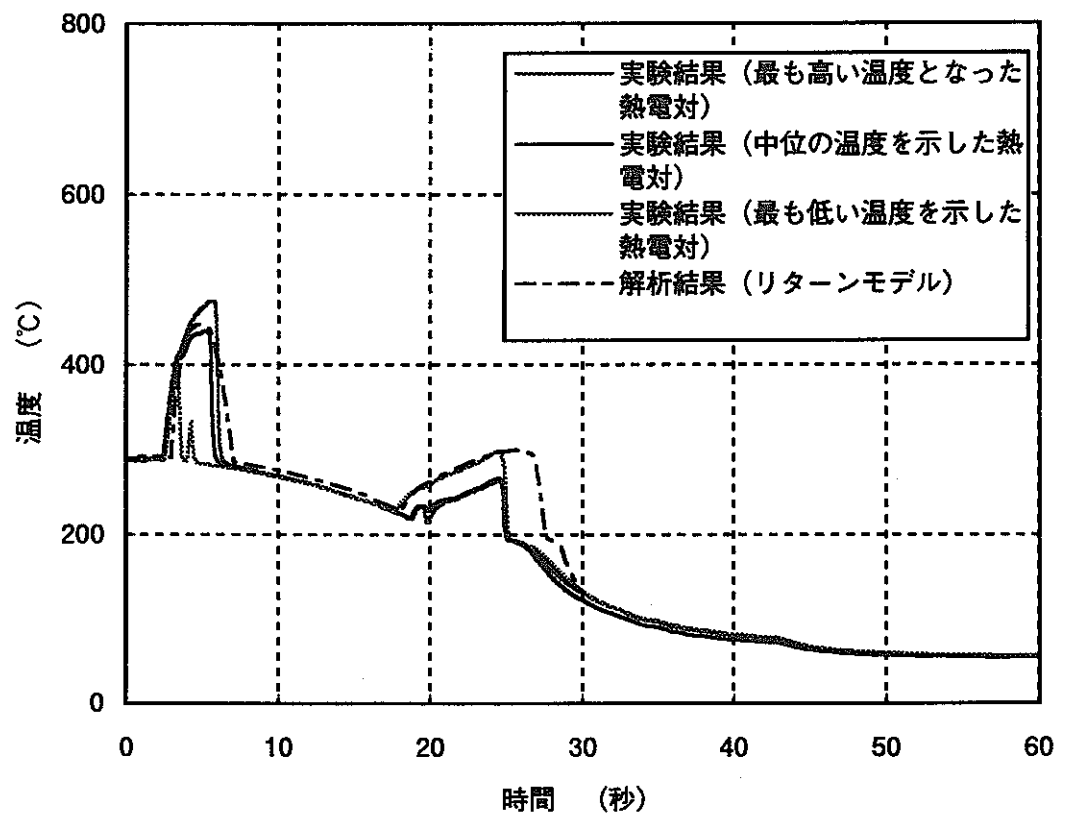


図3.2.5-6 下降管大破断実験解析結果(外層ピン被覆管温度)

4. RELAP 5 /MOD 2 による実験解析

4.1 解析コード及び解析条件

4.1.1 RELAP5/MOD2コード

軽水炉過渡解析コードRELAP5/MOD2⁽⁹⁾は、PWR及びその関連設備の過渡事象の最適予測解析用に開発され、大破断及び小破断LOCAを初めとし、ATWS、外部電源喪失、給水喪失、1次冷却材流量喪失等の過渡事象を模擬することができる。また、RELAP5コードは、完全非平衡の二流体モデル（2 V 2 T）を使用している。

本コードの入力は、原子炉熱出力、再循環流量等の初期条件、原子炉の幾何学的形状及び水力学的データ、燃料要素及び炉心に関するデータ、ECCSの性能特性、再循環ポンプ特性、想定破断の位置及び破断面積等であり、出力として、冷却材の圧力、流量、温度、ボイド率、燃料被覆管温度、熱伝達率等が求められる。

4.1.2 解析条件

RELAP5/MOD2コードを用いて、下降管大破断実験（破断口径6インチ）を対象とした解析を実施した。

解析では、図4.1.2-1に示すように、原子炉冷却設備を蒸気ドラム、下降管、再循環ポンプ、下部ヘッダ、入口管、圧力管集合体、燃料集合体、上昇管からなる体系と考え、配管内流動計算は配管をいくつかのノードに分割し、運動量、質量、エネルギーの各保存則を基礎として、配管内の流動、圧力分布、エネルギー分布と蒸気ドラム及び下部ヘッダ内の圧力、保有水量、エネルギーの変化及び燃料要素の温度変化を求める。また、炉心側チャンネルのモデル化は、SENHORコードと同様に、6本ある配管を高出力チャンネル（1本の保有水量）と平均出力チャンネル（5本の保有水量）の2本でモデル化し、圧損バランスより各々の流量配分を計算している。解析の初期条件については、2章に示した実験条件を考慮し、SENHORコードの解析条件に一致させた。

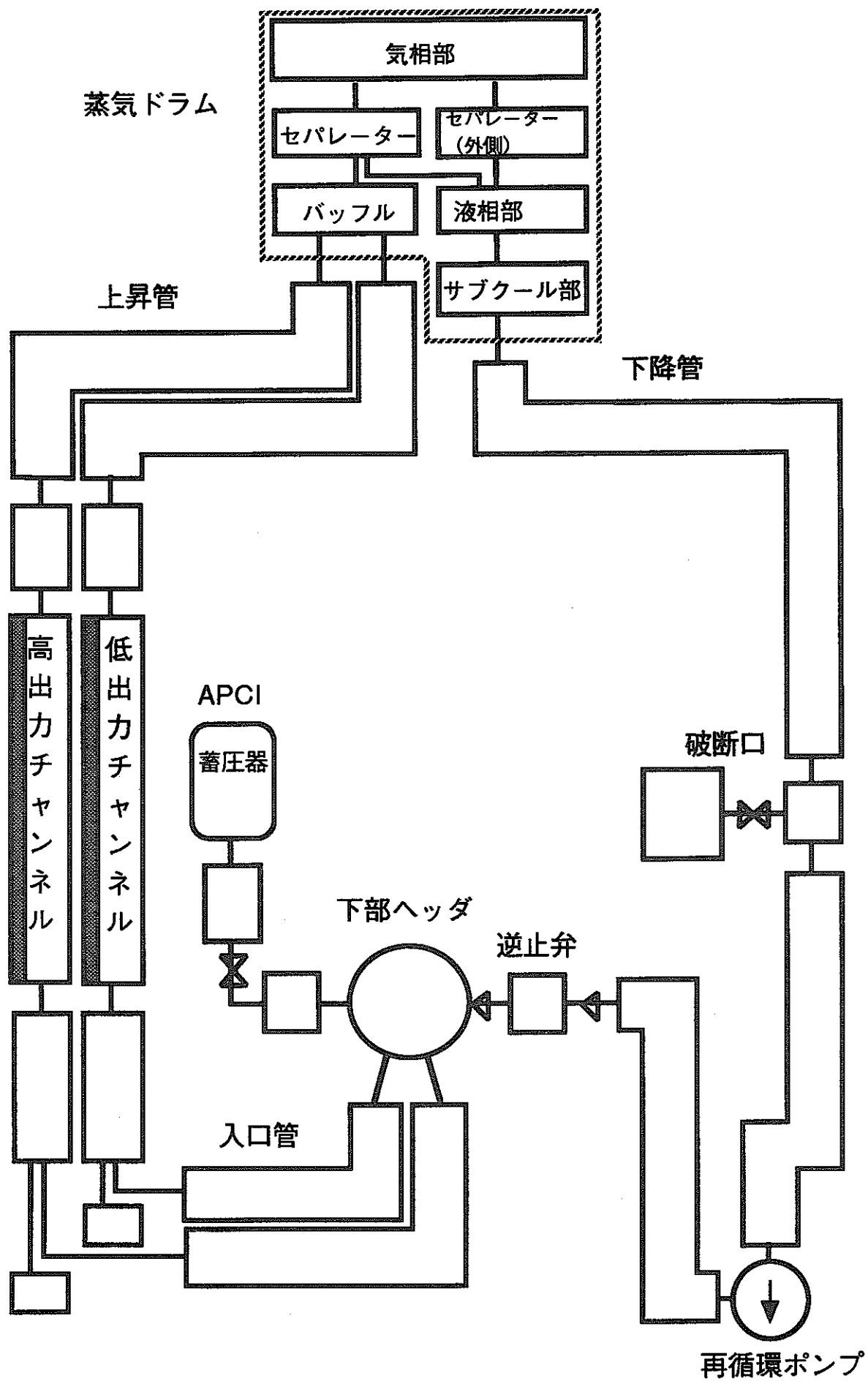


図4.1.2-1 解析モデル図 (RELAP5/MOD2コード)

4.2 解析結果

下降管大破断実験について、SENHOR コード（リターンモデル）と RELAP5 コードの解析結果を比較して図 4.2-1～10 に示す。

(1) 圧力挙動

蒸気ドラム圧力、下部ヘッダ圧力を図 4.2-1、2 に、下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧を図 4.2-3 に示す。SENHOR コードは熱平衡コードであるので、図 4.2-1 に示す破断直後の蒸気ドラム圧力低下を再現できていないが、RELAP5 コードは非平衡コードであるので、破断直後の圧力挙動も再現している。しかし、いずれの解析結果も、概ね実験結果と一致している。同様に、図 4.2-2 に示す下部ヘッダ圧力についても、両コードは実験結果を良く再現している。また、下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧については、図 4.2-3 に示すように、最大差圧発生時点が実験結果に対して両コードともに 2 秒程度遅いが、いずれの解析結果も概ね実験結果と一致している。

(2) 流動挙動

炉心入口流量を図 4.2-4 に示す。炉心入口流量については、図 4.2-4 に示すように両コードともに、破断直後の逆流現象、その後の下部ヘッダフラッシングによる流量増加現象を再現している。正流時の最大流量は、SENHOR コードの解析結果が $100\text{m}^3/\text{h}$ で、RELAP5 コードの解析結果が $180\text{m}^3/\text{h}$ であり、実験結果より大きな値を示している。RELAP5 コードの解析結果は、SENHOR コードの解析結果の約 2 倍近い値であるが、質量流量で比較すると、ほぼ同程度である。

APCI 流量は、図 4.2-5 に示すように RELAP5 コードの解析結果において最大流量で実験の最大流量を 5 % 程度上回るが、RELAP5 コードと SENHOR コードともに、注水開始タイミング及び注水後の流量挙動について実験結果をよく再現している。

(3) 水位挙動

蒸気ドラム水位を図 4.2-6 に示す。解析の蒸気ドラムモデルは、SENHOR コードではバッフルモデルを使用しており、RELAP5 コードではいくつかの水力コンポーネントを組合せることによりモデル化を実現している。この解析モデルの違いにより、図 4.2-6 に示す両コードの蒸気ドラム水位の解

析結果に違いがあるが、両コードともに実験結果をよく再現している。

(4) 温度挙動

被覆管温度を図 4.2-7～10 に示す。最高被覆管温度 (PCT) が発生する燃料集合体の外層部被覆管温度は、図 4.2-7 に示すように実験結果、解析結果ともに初期ドライアウトにより一旦温度上昇した後、リウエットにより低下する。リウエットによる温度低下を RELAP5 コードは十分再現していないが、これは、同コードの熱伝達評価式等が、ATR 固有のものに設定していないためと考えられる。外層被覆管温度及び図 4.2-8～10 に示す外層以外の被覆管温度を含めた温度挙動について比較すると、SENHOR コードの解析結果は実験結果より若干高めの温度であり、RELAP5 コードの解析結果は実験結果より若干低めの温度となっている。しかし、ドライアウト及びクエンチ挙動等の発生タイミングに関して、両コードはともに実験結果を良く再現している。

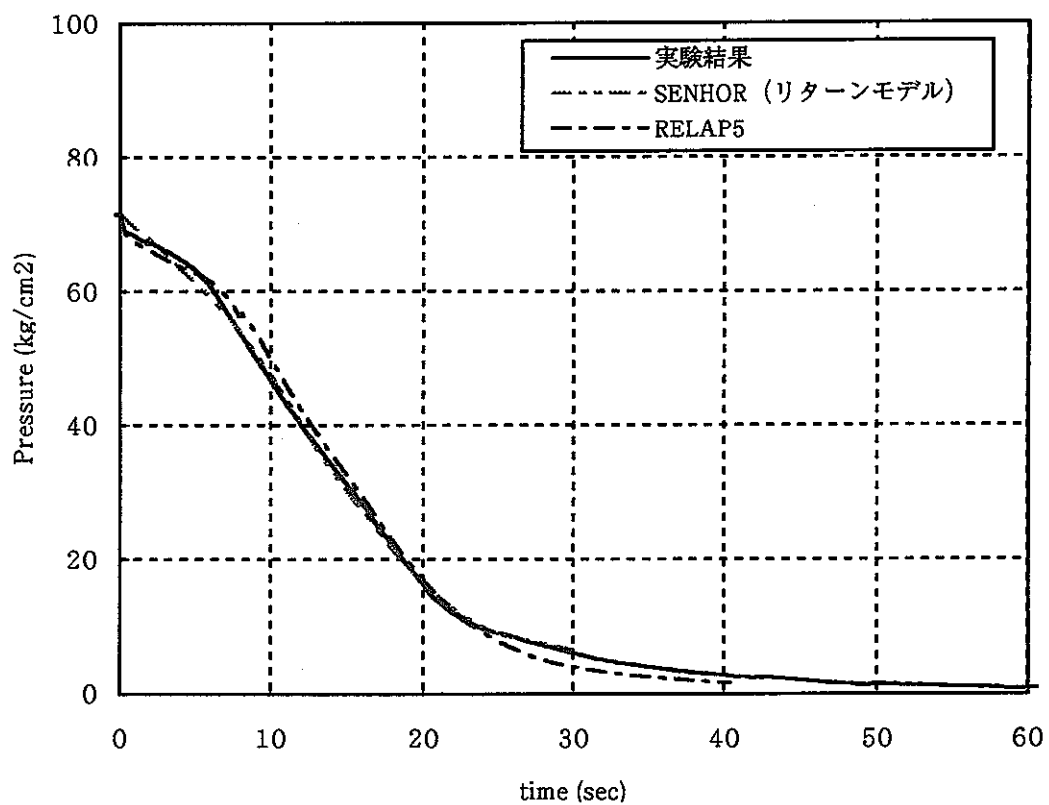


図4.2-1 下降管大破断実験解析結果
(蒸気ドラム圧力)

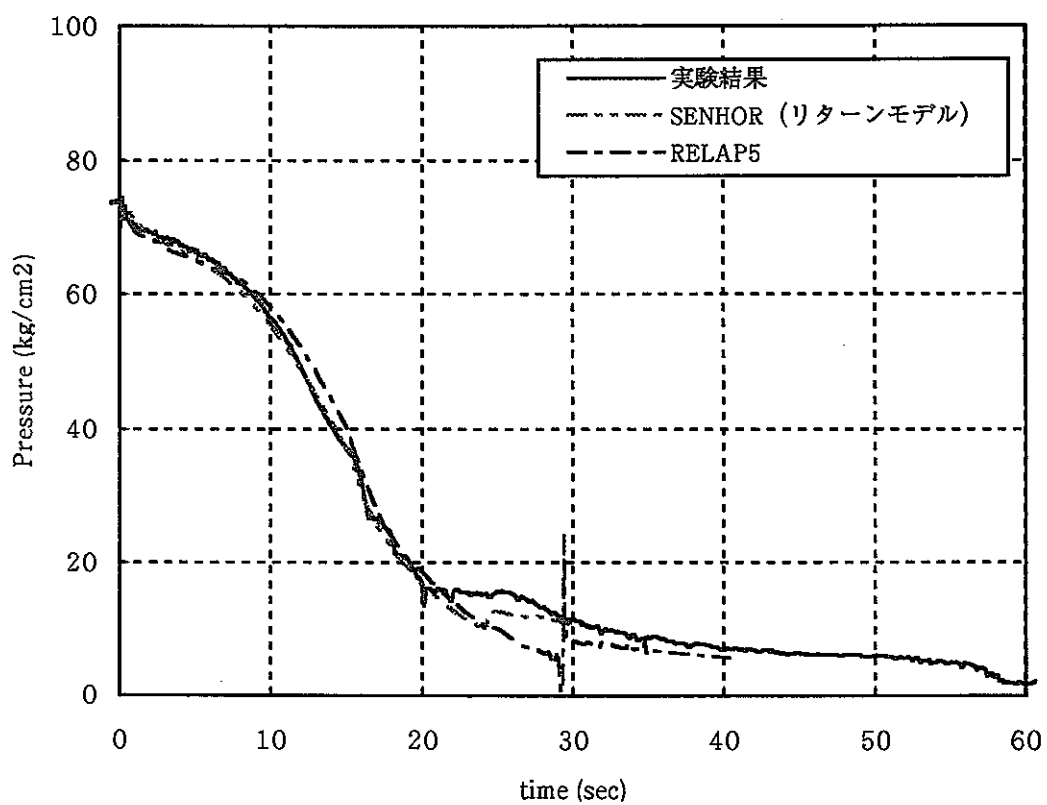


図4.2-2 下降管大破断実験解析結果
(下部ヘッダ圧力)

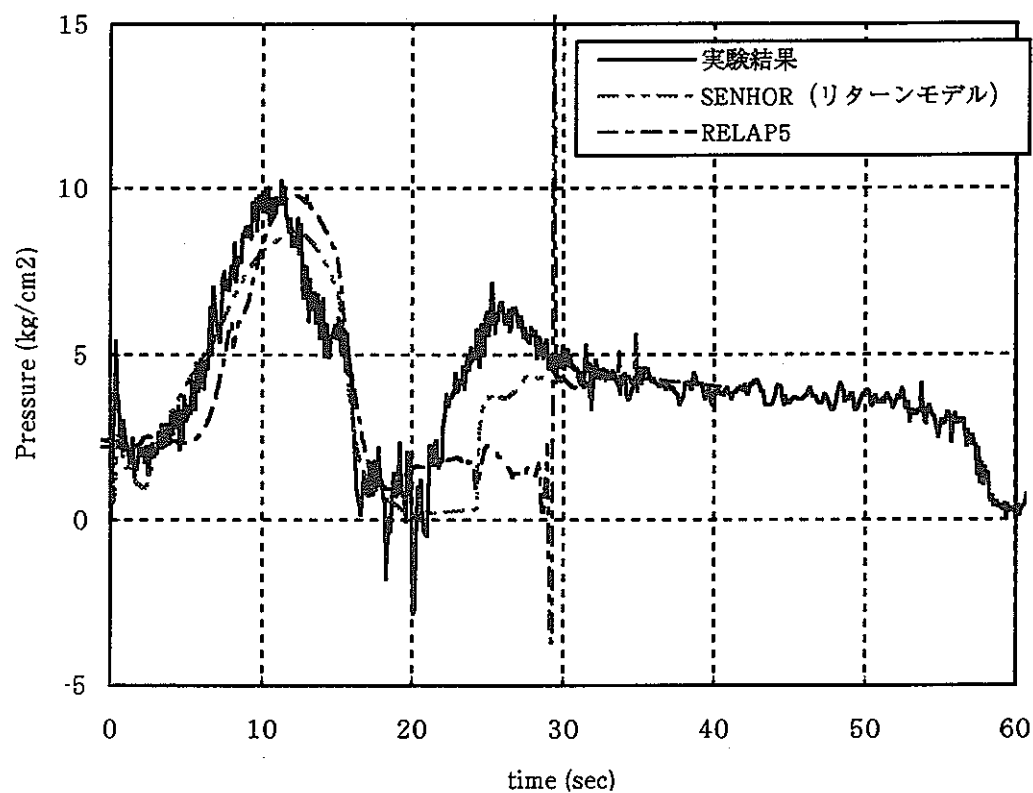


図4.2-3 下降管大破断実験解析結果
(下部ヘッダー蒸気ドラム間差圧)

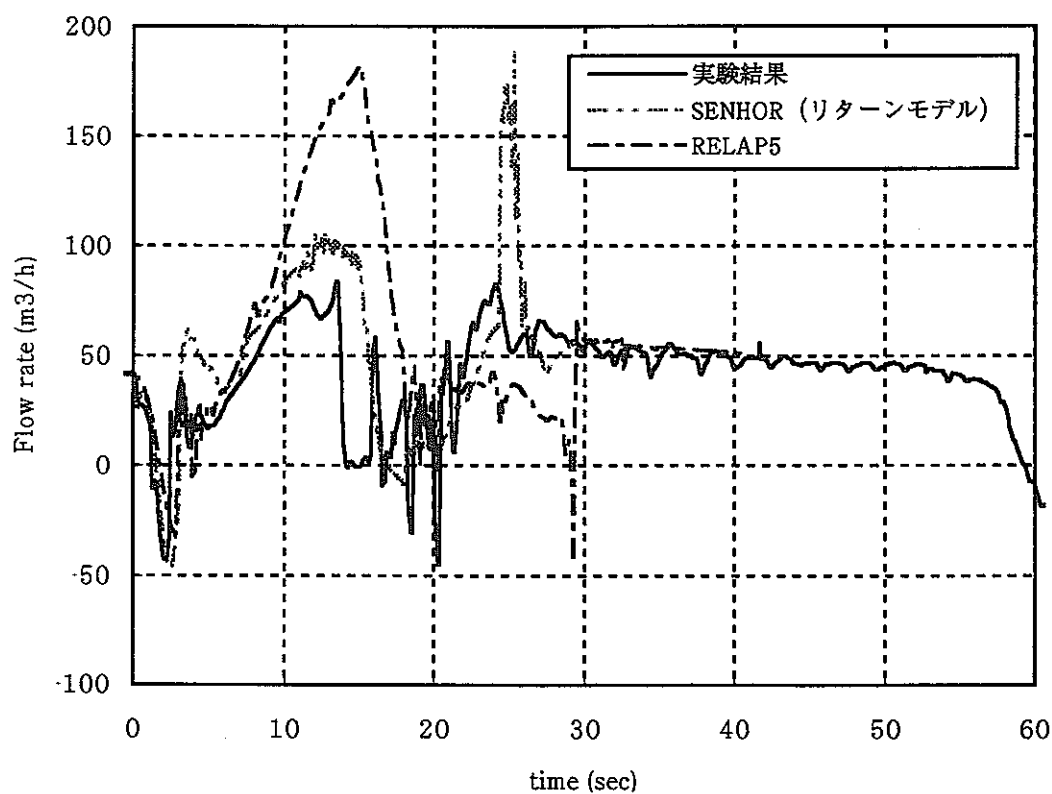


図4.2-4 下降管大破断実験解析結果
(炉心入口流量)

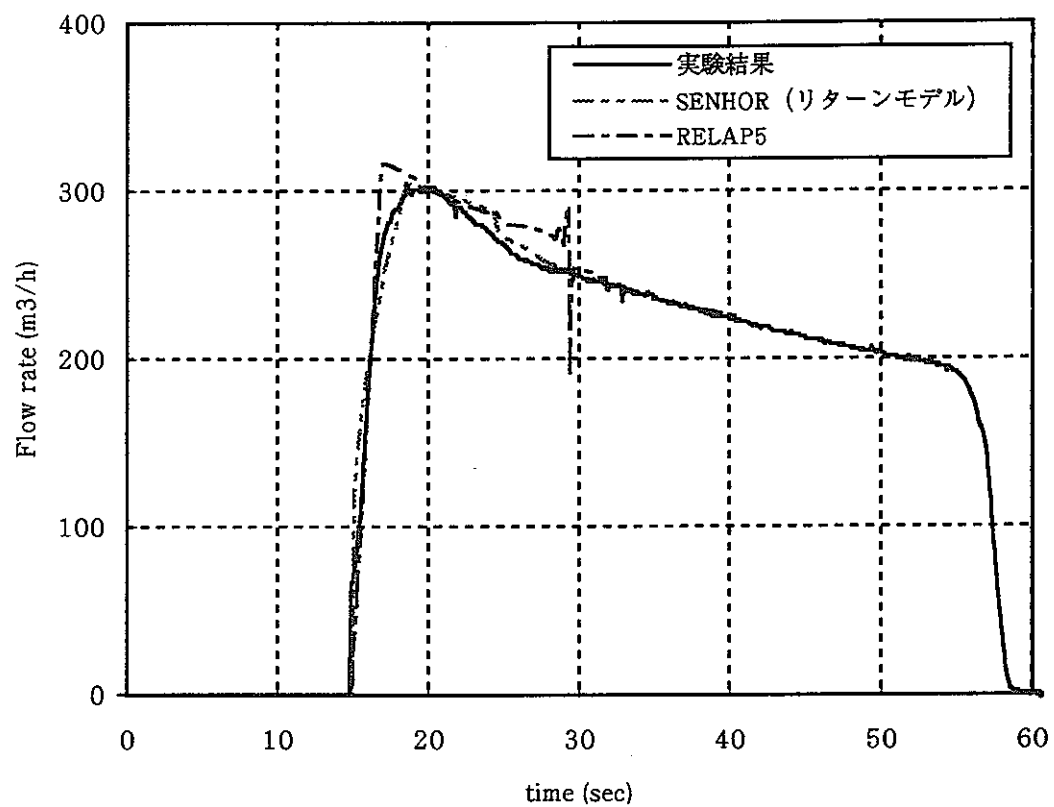


図4.2-5 下降管大破断実験解析結果
(APCI流量)

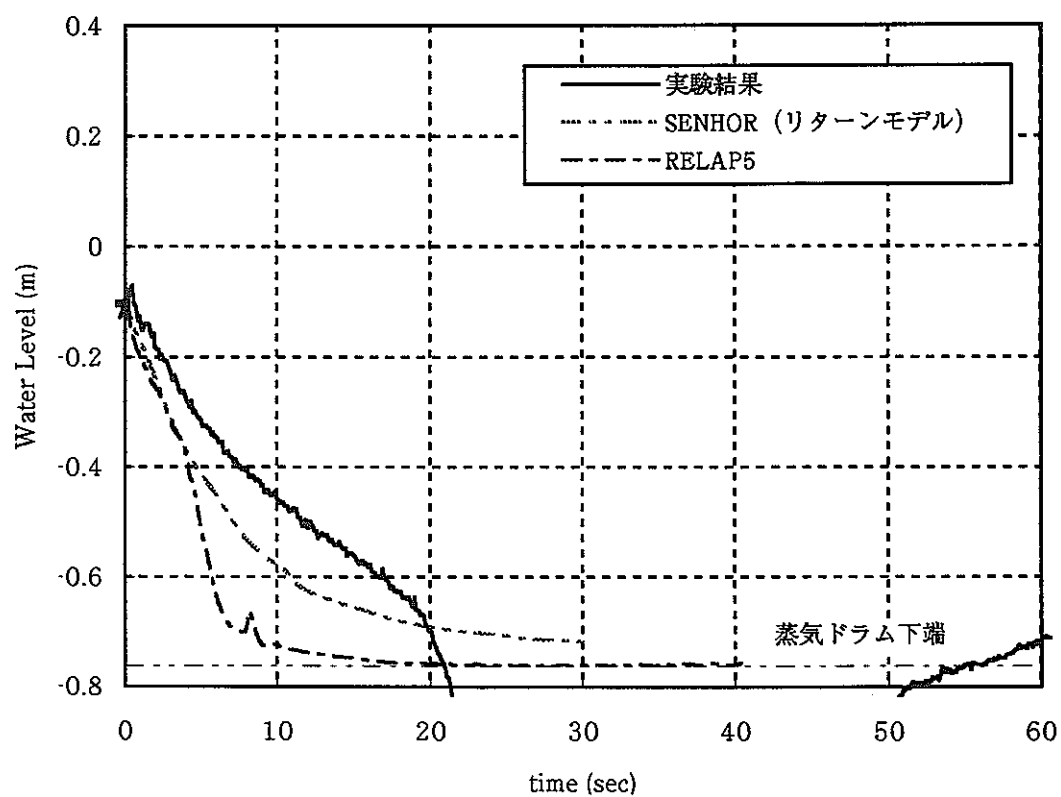


図4.2-6 下降管大破断実験解析結果
(蒸気ドラム水位)

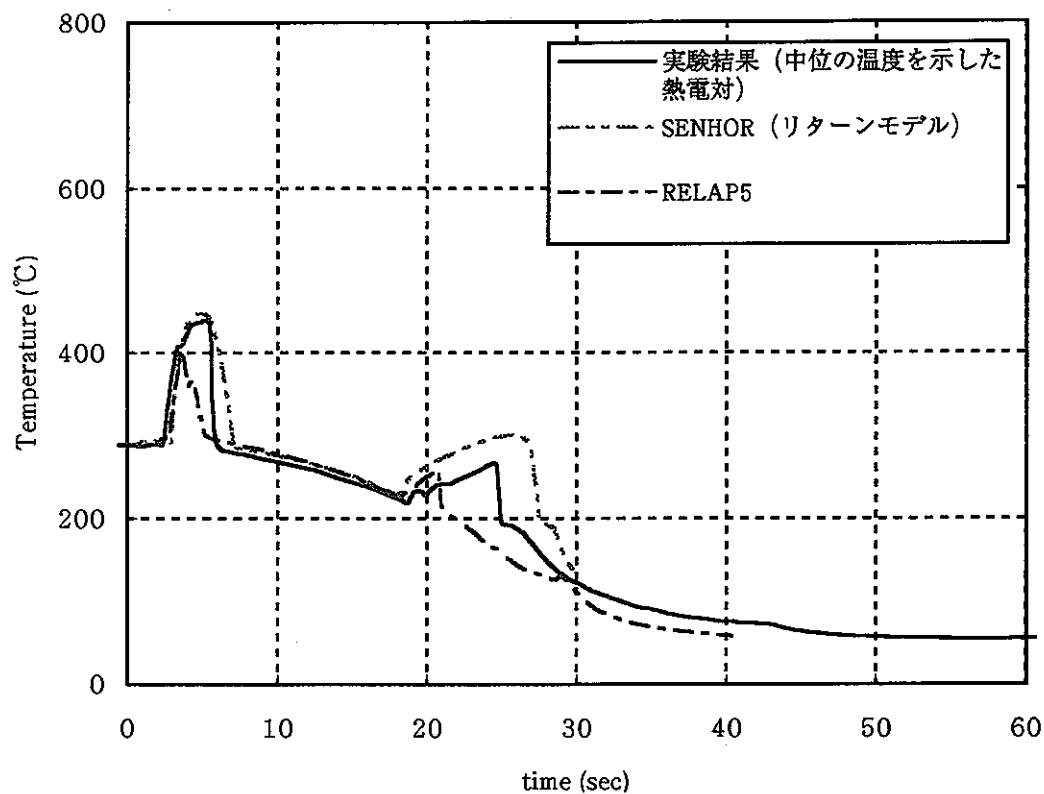


図4.2-7 下降管大破断実験解析結果
(外層ピン被覆管温度)

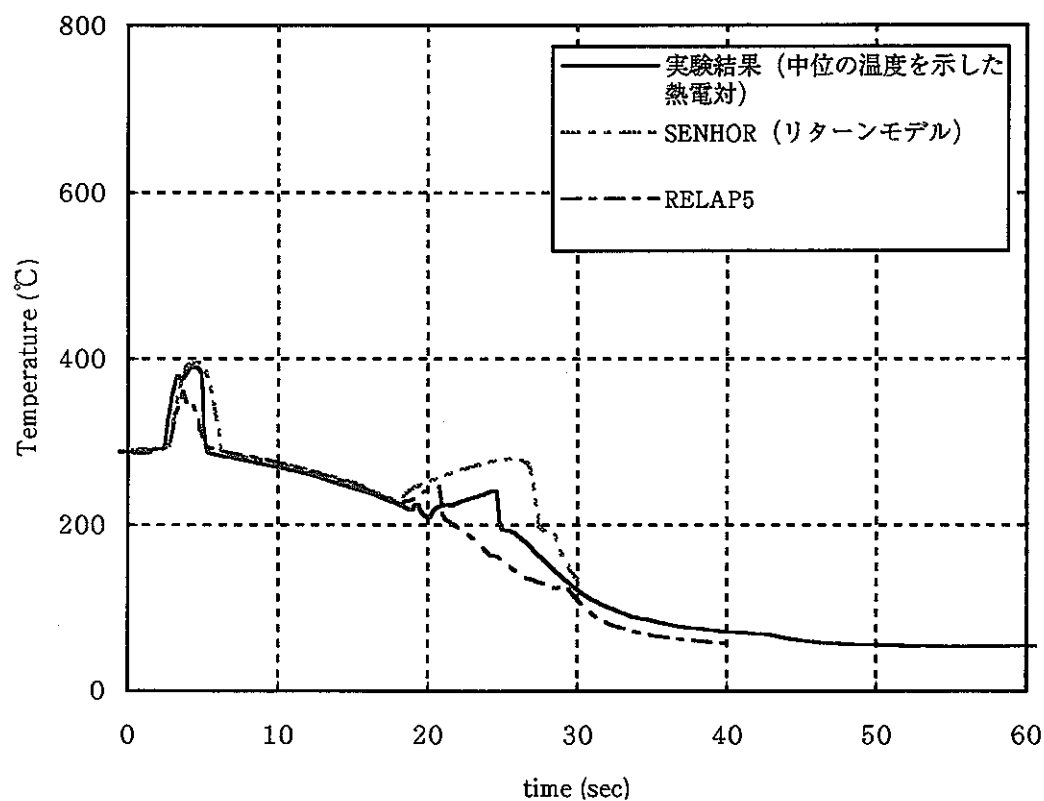


図4.2-8 下降管大破断実験解析結果
(中層ピン被覆管温度)

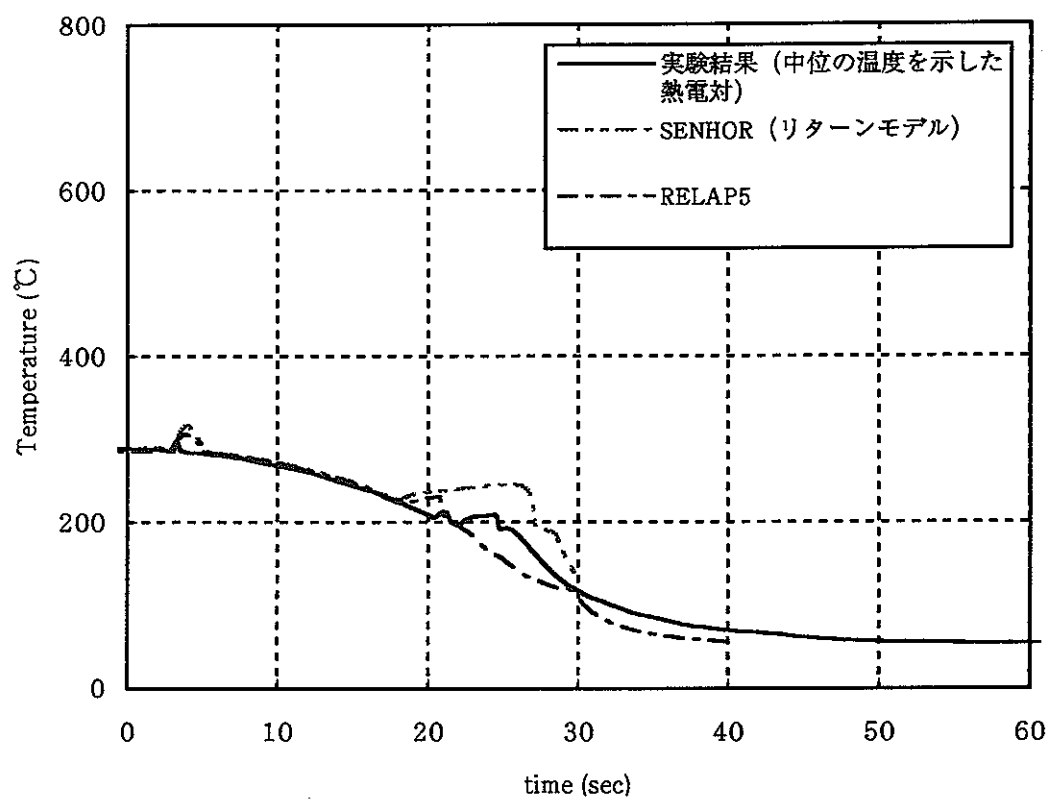


図4.2-9 下降管大破断実験解析結果
(ガドリピン被覆管温度)

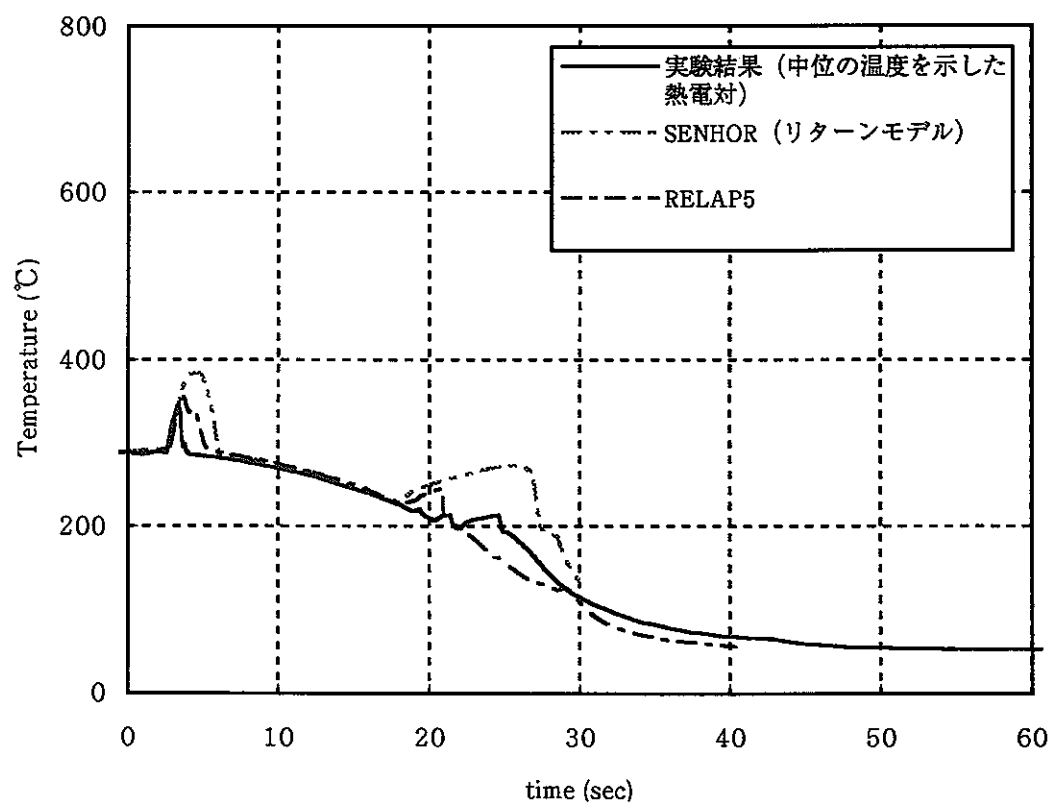


図4.2-10 下降管大破断実験解析結果
(内層ピン被覆管温度)

5. 結言

「ふげん」安全評価コード及びRELAP5/MOD2コードによる破断実験解析を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 「ふげん」安全評価コードは、ドライアウト後の被覆管温度について、実験結果に対して高めの値を算出し、保守的な評価をしていることが確認できた。
- (2) 「ふげん」安全評価コードのリターンモデルは、実験時の被覆管温度挙動に見られるドライアウト及びクエンチ現象をよく再現できることが確認できた。
- (3) RELAP5コードは、「ふげん」の下降管破断を模擬したLOCA実験時の伝熱流動現象をほぼ再現し、同コードがATR体系のLOCA解析にも使用できる可能性があることが分かった。

6. 謝辞

実験解析にあたり、原子力システム株式会社 技術開発部の高橋一彦、後藤博政の両氏に多大な尽力を頂いた。特に、解析モデルや解析コードでの扱い方について有益な議論を頂いた両氏に深く感謝の意を表する。

7. 参考資料

- (1) 速水義孝, 菅原悟, 望月弘保, “ATR熱流動解析”, 日本原子力学会 Vol. 31, No. 12 (1989)
- (2) 動力炉・核燃料開発事業団, “ATR大破断事故解析コード — SENHOR/FLOOD/HEATUP—”, PNC TN1410 97-030(1997)
- (3) 動力炉・核燃料開発事業団, “ATR中小破断事故解析コード — LOTRAC/HEATUP—”, PNC TN1410 97-029(1997)
- (4) F.W.Dittus and L.M.K.Boelter, “Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type,” Publications in Engineering, University of California, Berkeley (1930)
- (5) W.H.Jens and P.A.Lottes, “Analysis of Heat Transfer, Burnout, Pressure Drop, and Density Data for High Pressure Water,” USAEC Report ANL-4627 (1951)
- (6) S.Sugawara, “Post Dryout Heat Transfer of an ATR 36-Rod Bundle,” Proc. of NUPHO-2, Tokyo, Japan (1986)
- (7) D.M.McEligot et al., “Effect of Large Temperature Gradients on Convective Heat Transfer,” Transactions of ASME (1965)
- (8) L.Jr.Baker and L.C.Just, “Studies of Metal-Water Reactions at High Temperatures-III,” ANL- 6548 (1962)
- (9) V.H.Ransom, et al., “RELAP5/MOD2 Code Manual,” U.S.Nuclear Regulatory Commission (1985)