

「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の原因究明対策班作業関連資料

運転履歴に基づく当該温度計ウェルの
クリープ疲労損傷について

1996年7月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の原因究明対策班作業関連資料

運転履歴に基づく当該温度計ウェルのクリープ疲労損傷について

原因究明対策班 原因解析・試験グループ*

要 旨

本報告書は、1995年12月8日に発生した「もんじゅ」2次主冷却系ナトリウム漏えい事故の原因究明作業の一環として実施した、運転履歴に基づく当該温度計ウェルのクリープ疲労損傷についての調査の中間報告をまとめたものである。

* 山下 卓哉 (大洗工学センター 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室)
一宮 正和 (大洗工学センター システム開発推進部 プラント工学室)

運転履歴に基づく当該温度計ウェルのクリープ疲労損傷について

1. 解析条件

(1) 解析モデルおよび使用プログラム

解析モデルを図 1 に示す。使用プログラムは FINAS Ver.12.0 で、使用要素は 2 次元軸対称要素である。

(2) 解析条件

(a) 熱過渡条件

平成 4 年 (1992 年) の総合機能試験から平成 7 年 (1995 年) 12 月 8 日の Na 洩れまでのもんじゅの運転履歴を図 2.1 及び図 2.2 に示す。評価の対象とする事象の選定および熱過渡条件の設定は、以下の方針で行った。

- ① 200℃～455℃の起動・停止は 3 回実施されたが、温度応答解析用の熱過渡条件としては起動・停止のいずれも最も厳しい条件を用いる。
- ② 200℃～455℃の起動・停止以外の起動・停止条件は、200℃～455℃の通常起動・停止曲線を参考に適切に定める。
- ③ '95 年 5 月の給水制御系試験中の自動停止は、保守的にプラントトリップ試験の条件と同じにする。
- ④ $\Delta T \leq 100$ ℃の温度変動は、クリープ疲労損傷の結果からみて有意ではないので無視する。

以上の方針より、事象の回数を下記のように設定する。

・ 200℃～325℃の起動・停止回数	7 回
・ 200℃～400℃の起動・停止回数	1 回
・ 200℃～455℃の起動・停止回数	3 回
・ プラントトリップ	2 回

クリープ疲労損傷評価で対象とする、Na 洩れ以前の過渡事象とシーケンスを図 3 に示す。

また、温度応答解析に用いる熱過渡条件を図 4.1 および図 4.2 に示す。

(b) 境界条件

境界条件は、図 5 に示すよう温度計取付部に温度差がつきやすいように、それぞれ以下のように保守的な条件を設定する。

【過渡時】

- ・ 外表面は断熱とする。
- ・ 管台とウェル間のナトリウムの対流による熱伝達効果を考慮して、ナトリウムの熱伝導率を通常の 100 倍とする。

【定常時】

- ・ 外部雰囲気温度を 20℃として、この空気が、保温材と管台および配管の間隙部を 5 l/min. の流速で流入するものとする。熱伝達率については、実機条件の推定として $1 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ とする。
- ・ 管台とウェル間のナトリウムは、過渡時と同様に、対流効果を考慮してナトリウ

ムの熱伝導率を通常の100倍とする。

(3) 使用物性値

温度応答解析および熱応力解析ともに、SUS304鋼の各温度における物性値を用いる。

2. 解析結果

(1) 温度応答解析結果

温度応答解析から得られた最大応力発生時点の等温度線図を、最も温度差の大きい起動・停止事象（200～455℃）及びプラントトリップについて、それぞれ図6.1～図6.3に示す。

(2) 応力解析結果

(1)の各事象について、熱弾性応力解析から得られた最大応力発生時点のMisesの等応力線図を図7.1～図7.3に示す。これらの図から、以下のことがわかる。

- ・破断が確認されたウエルの細管段付き部では、ほとんど熱応力は発生しない。
- ・最大応力が発生する部位は、ウエル付根溶接部である。
- ・過渡時の応力は比較的小さく、プラントトリップ時の約4.4kg/mm²が最大である。
- ・定常運転時の発生応力は小さく2 kg/mm²以下である。

3. 解析結果の言 じ

表1に、ウエル付根溶接部、管台溶接部およびウエルの段付き部について応力分類行って求めた最大応力発生時点の応力とひずみを示す。ウエルの段付き部は、発生応力が0.1 kg/mm²以下と極めて小さいため、クリープ疲労損傷は無視できる。

表2に、各事象で発生するひずみの極値から計算される弾性ひずみ範囲を示す。

表3に、弾性ひずみ範囲に疲労強度減少係数を掛けて求めたひずみ範囲、疲労寿命および累積疲労損傷係数を示す。ここで疲労寿命は、SUS304鋼の疲労試験データの平均値である。

表4に、累積クリープ疲労損傷係数を示す。累積クリープ損傷係数には、溶接の残留応力による緩和クリープ損傷として、弾性追従係数を3として1.5Smからの応力緩和途中のクリープ損傷を考慮した。計算は、保守的に485℃で行った。高温での使用時間は800時間弱であるが、評価は1000時間として行った。クリープ損傷係数も、SUS304鋼のクリープ破断試験データの平均値を用いて算定したものである。表4から、もんじゅが平成7年12月8日の2次系ナトリウム洩れ発生までに経験した全ての事象で受けた当該部のクリープ疲労損傷係数は極めて小さいため、構造健全性上の問題はないものと考えられる。

4. 結論

熱過渡条件として、平成4年（1992年）の総合機能試験から平成7年（1995年）12月8日のNa漏洩発生までの実際の運転履歴を用いて、2次系温度計管台部分のクリープ疲労損傷評価を実施した。累積クリープ疲労損傷は、疲労及びクリープ破断の各試験データの平均値ベースで求めた。破断が確認された温度計ウエルの細管段付き部で

は、ほとんど熱応力が発生せず、クリープ疲労損傷を受けた可能性は極めて小さいことがわかった。また、最大応力が発生するウェル付根溶接部や管台部溶接部においても累積クリープ疲労損傷係数は十分小さく、構造健全性に及ぼす影響は有意でないと考えられる。

表1 (1) 最大応力発生時点のウェル付根溶接部における応力とひずみ

	発生応力 (kg/mm ²)		発生ひずみ (mm/mm)	
	等価線形応力	ピーク応力	等価線形ひずみ	ピークひずみ
定常455℃	0.284	1.82	1.71×10^{-5}	1.09×10^{-4}
通常485℃	0.307	1.96	1.88×10^{-5}	1.20×10^{-4}
起動 (200~325℃)	0.0246	0.159	1.38×10^{-6}	8.93×10^{-6}
停止 (200~325℃)	0.0254	0.165	1.43×10^{-6}	9.26×10^{-6}
起動 (200~400℃)	0.0285	0.185	1.66×10^{-6}	1.08×10^{-5}
停止 (200~400℃)	0.0259	0.169	1.51×10^{-6}	9.82×10^{-6}
起動 (200~455℃)	0.0292	0.191	1.75×10^{-6}	1.15×10^{-5}
停止 (200~455℃)	0.0302	0.196	1.81×10^{-6}	1.18×10^{-5}
プラントトリップ	0.720	4.44	4.44×10^{-5}	2.75×10^{-4}

表1 (2) 最大応力発生時点の管台付根溶接部における応力とひずみ

	発生応力 (kg/mm ²)		発生ひずみ (mm/mm)	
	等価線形応力	ピーク応力	等価線形ひずみ	ピークひずみ
定常455℃	0.149	0.275	8.94×10^{-6}	1.65×10^{-5}
通常485℃	0.161	0.297	9.84×10^{-6}	1.82×10^{-5}
起動 (200~325℃)	0.0285	0.0475	1.60×10^{-6}	2.67×10^{-6}
停止 (200~325℃)	0.0256	0.0418	1.44×10^{-6}	2.35×10^{-6}
起動 (200~400℃)	0.0313	0.0512	1.82×10^{-6}	2.98×10^{-5}
停止 (200~400℃)	0.0297	0.0492	1.73×10^{-6}	2.86×10^{-6}
起動 (200~455℃)	0.0377	0.0622	2.26×10^{-6}	3.74×10^{-6}
停止 (200~455℃)	0.0363	0.0596	2.18×10^{-6}	3.58×10^{-6}
プラントトリップ	1.66	2.70	1.03×10^{-4}	1.67×10^{-4}

表1 (3) 最大応力発生時点のウェル段付き部における応力とひずみ

	発生応力 (kg/mm ²)		発生ひずみ (mm/mm)	
	等価線形応力	ピーク応力	等価線形ひずみ	ピークひずみ
定常455℃	0.0000184	0.0000397	1.11×10^{-9}	2.38×10^{-9}
通常485℃	0.0000246	0.0000510	1.50×10^{-9}	3.12×10^{-9}
起動 (200~325℃)	0.00000262	0.00000514	1.47×10^{-10}	2.89×10^{-10}
停止 (200~325℃)	0.00133	0.00368	7.47×10^{-8}	2.07×10^{-7}
起動 (200~400℃)	0.00123	0.00319	7.15×10^{-8}	1.85×10^{-7}
停止 (200~400℃)	0.000199	0.000898	1.16×10^{-8}	5.22×10^{-8}
起動 (200~455℃)	0.000305	0.000737	1.83×10^{-8}	4.43×10^{-8}
停止 (200~455℃)	0.00081	0.0022	4.86×10^{-8}	1.32×10^{-7}
プラントトリップ	0.0244	0.0644	1.49×10^{-6}	3.94×10^{-6}

注：ウェル段付き部の応力とひずみは、他の部位に比べて非常に小さい（計算誤差程度）ため、以下の評価を省略する。

表2 (1) ウェル付根溶接部のひずみ範囲計算 (弾性ひずみ範囲)

	最大発生ひずみ			$\Delta \epsilon_n$
	起 動	定 常	停止orトリップ	
起動停止 (200 ~ 325 °C)	8.93×10^{-6}	$6.13 \times 10^{-5*}$	9.26×10^{-6}	7.95×10^{-5}
起動停止 (200 ~ 400 °C)	1.08×10^{-5}	$8.88 \times 10^{-5*}$	9.82×10^{-6}	1.09×10^{-4}
起動停止 (200 ~ 455 °C)	1.15×10^{-5}	1.09×10^{-4}	1.18×10^{-5}	1.32×10^{-4}
プラントトリップ (初期温度: 485°C)	$1.17 \times 10^{-5**}$	1.20×10^{-4}	2.75×10^{-4}	4.07×10^{-4}

注: * 455°Cと 485°Cの定常解析からの直線外挿値

** 455°Cの通常起動解析からの2次回帰外挿値

表2 (2) 管台付根溶接部のひずみ範囲の計算 (弾性ひずみ範囲)

	最大発生ひずみ			$\Delta \epsilon_n$
	起 動	定 常	停止orトリップ	
起動停止 (200 ~ 325 °C)	2.67×10^{-6}	$9.13 \times 10^{-6*}$	2.35×10^{-6}	1.42×10^{-5}
起動停止 (200 ~ 400 °C)	2.98×10^{-5}	$1.34 \times 10^{-5*}$	2.86×10^{-6}	1.92×10^{-5}
起動停止 (200 ~ 455 °C)	3.74×10^{-5}	1.65×10^{-5}	3.58×10^{-6}	2.38×10^{-5}
プラントトリップ (初期温度: 485°C)	$4.38 \times 10^{-5**}$	1.82×10^{-5}	1.67×10^{-4}	1.90×10^{-4}

注: * 455°Cと 485°Cの定常解析からの直線外挿値

** 455°Cの通常起動解析からの2次回帰外挿値

表3 (1) ウェル付根溶接部の累積疲労損傷係数

	ひずみ範囲 ε_t (%)	許容繰返数 N_f	繰返数 n	D_f
起動停止 (200 ~ 325 °C)	0.040	10 ⁶ 以上	7	0
起動停止 (200 ~ 400 °C)	0.055	10 ⁶ 以上	1	0
起動停止 (200 ~ 455 °C)	0.066	10 ⁶ 以上	3	0
プラントトリップ (初期温度: 485 °C)	0.204	10 ⁶ 以上	2	0

注: (1)ひずみ範囲は、術術基準の強度減少係数 5 を適用

(2)疲労損傷係数は、基準の安全率を除いた値

表3 (2) 管台付根溶接部の累積疲労損傷係数

	ひずみ範囲 ε_t (%)	許容繰返数 N_f	繰返数 n	D_f
起動停止 (200 ~ 325 °C)	0.007	10 ⁶ 以上	7	0
起動停止 (200 ~ 400 °C)	0.010	10 ⁶ 以上	1	0
起動停止 (200 ~ 455 °C)	0.012	10 ⁶ 以上	3	0
プラントトリップ (初期温度: 485 °C)	0.095	10 ⁶ 以上	2	0

注: (1)ひずみ範囲は、術術基準の強度減少係数 5 を適用

(2)疲労損傷係数は、基準の安全率を除いた値

表4 (1) ウェル付根溶接部の累積クリープ疲労損傷係数

	累積疲労損傷 係数 D_f	累積クリープ損傷係数 D_C		$D_f + D_C$
		D_{C1}	D_{CP}	
起動停止 (200 ~ 325 °C)	0	0	0	0
起動停止 (200 ~ 400 °C)	0	0	0	0
起動停止 (200 ~ 455 °C)	0	0	0.02×10^{-4}	0.02×10^{-4}
プラントトリップ (初期温度: 485 °C)	0	1.07×10^{-4}	5.78×10^{-4}	6.85×10^{-4}
全事象の損傷和	0	1.07×10^{-4}	5.80×10^{-4}	6.87×10^{-4}

注：溶接の残留応力による緩和クリープ損傷係数を D_{C1} として考慮 (485 °Cで算出)

表4 (2) 管台付根溶接部の累積クリープ疲労損傷係数

	累積疲労損傷 係数 D_f	累積クリープ損傷係数 D_C		$D_f + D_C$
		D_{C1}	D_{CP}	
起動停止 (200 ~ 325 °C)	0	0	0	0
起動停止 (200 ~ 400 °C)	0	0	0	0
起動停止 (200 ~ 455 °C)	0	0	0	0
プラントトリップ (初期温度: 485 °C)	0	1.07×10^{-4}	0.07×10^{-4}	1.14×10^{-4}
全事象の損傷和	0	1.07×10^{-4}	0.07×10^{-4}	1.14×10^{-4}

注：溶接の残留応力による緩和クリープ損傷係数を D_{C1} として考慮 (485 °Cで算出)

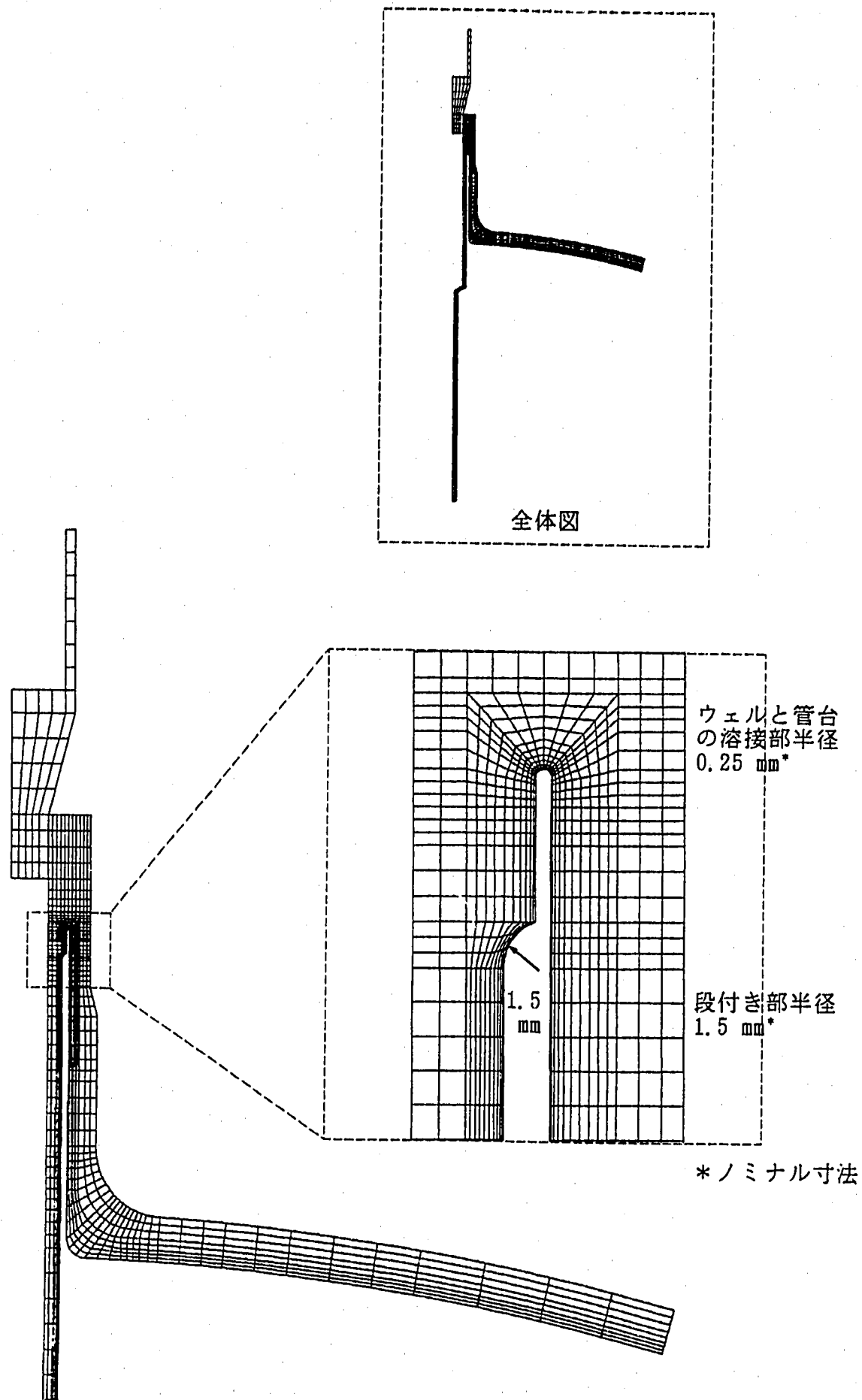
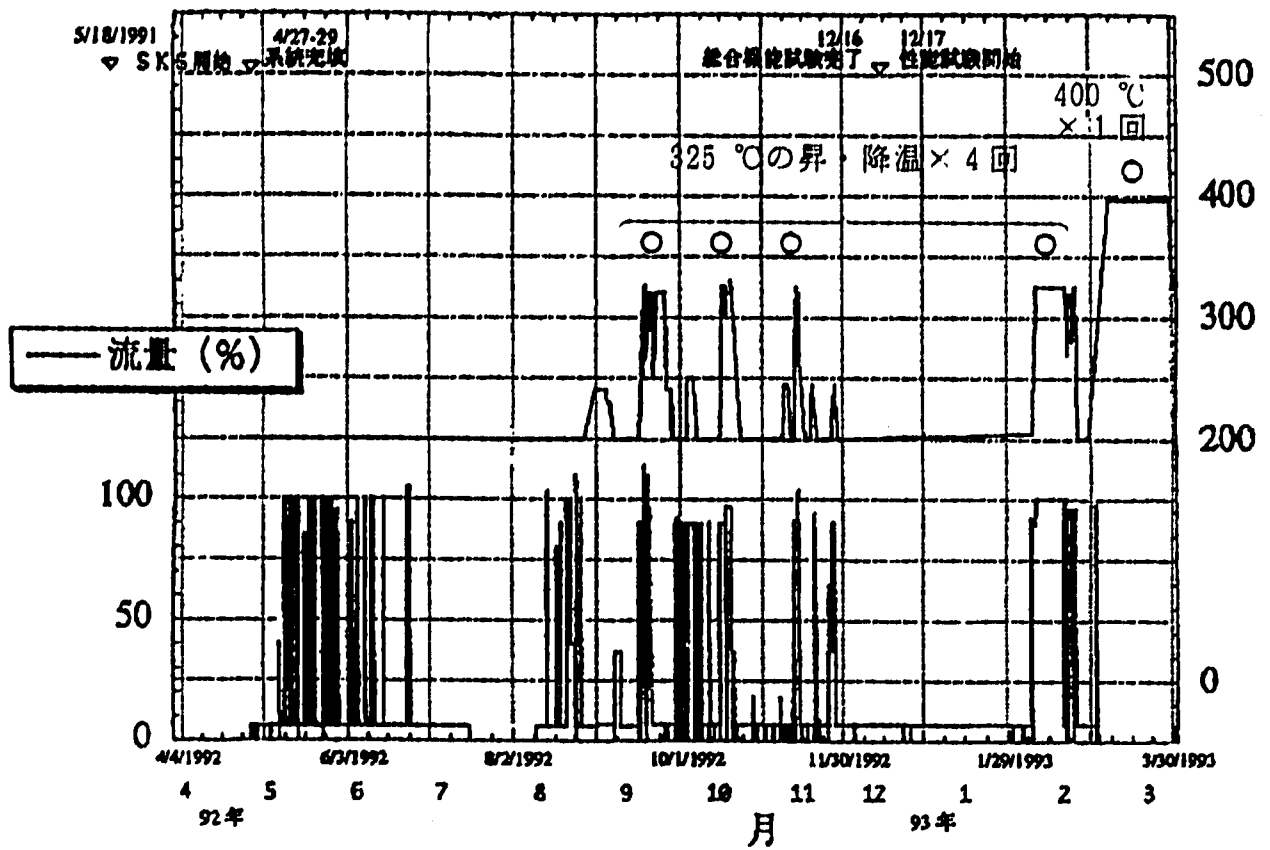


図1 要素分割

92年度 2次系 C-LOOP FLOW/TEMP

— 温度(°C)



93年度 2次系 C-LOOP FLOW/TEMP

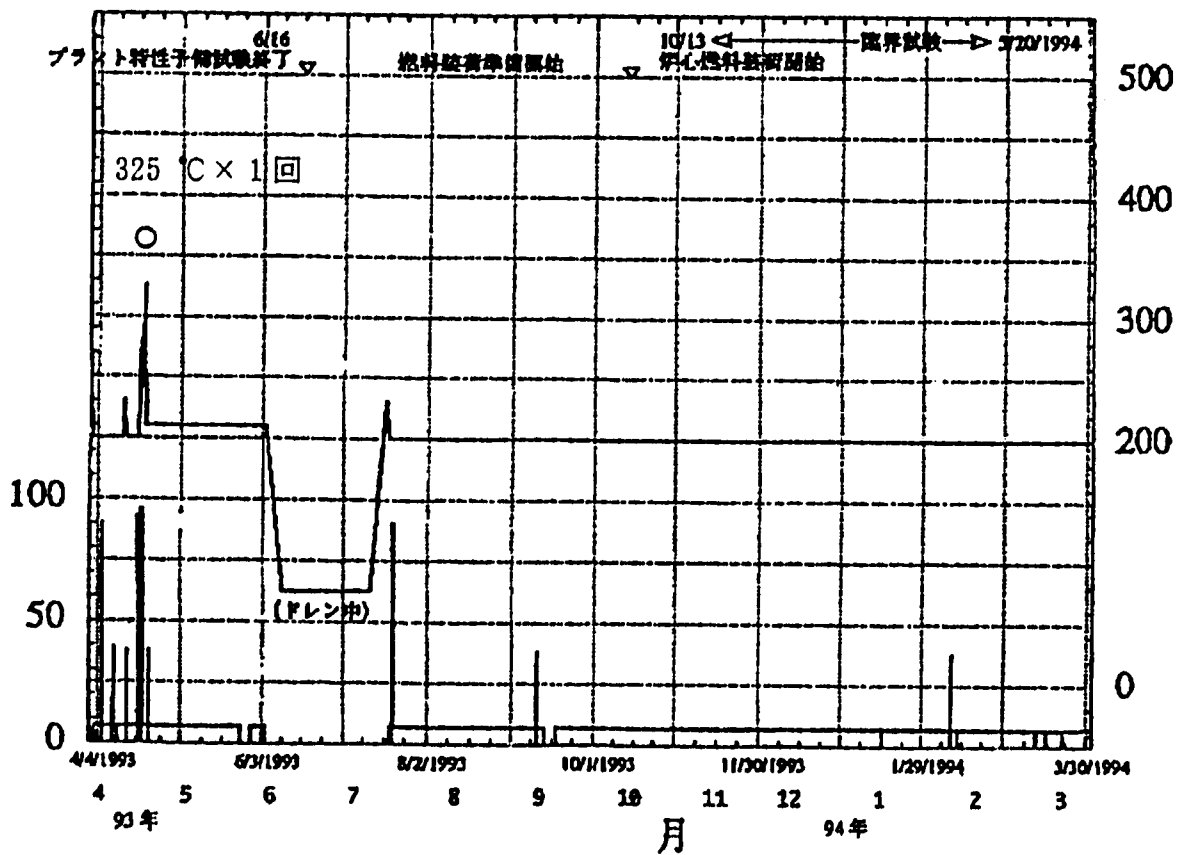
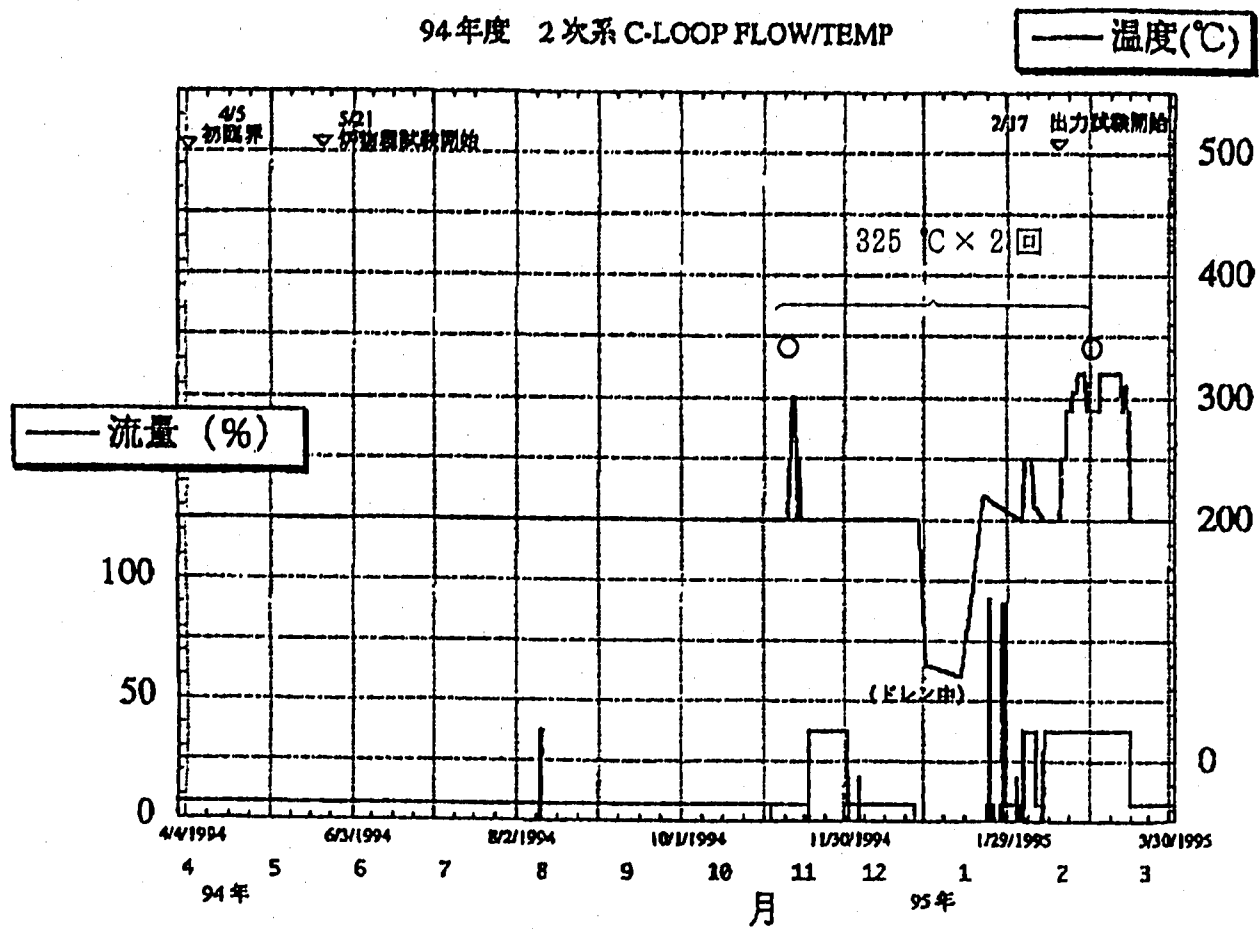


図 2-1 もんじゅの運転履歴

94年度 2次系 C-LOOP FLOW/TEMP



95年度 2次系 C-LOOP FLOW/TEMP

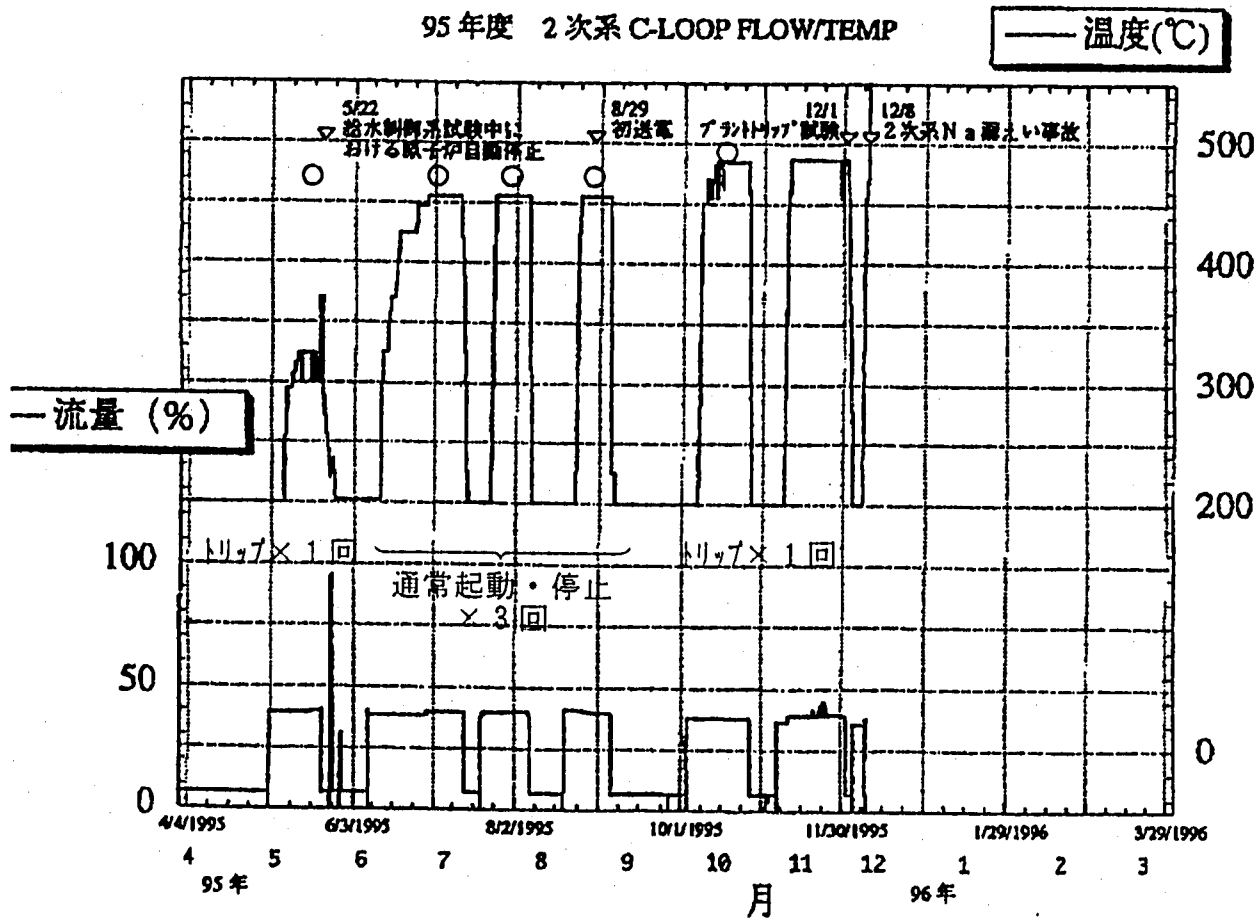


図2-2 もんじゅの運転履歴

- 200 °C～325 °Cの起動・停止回数 7回
- 200 °C～400 °Cの起動・停止回数 1回
- 200 °C～455 °Cの通常起動・停止回数 3回
- プラントトリップの回数 2回

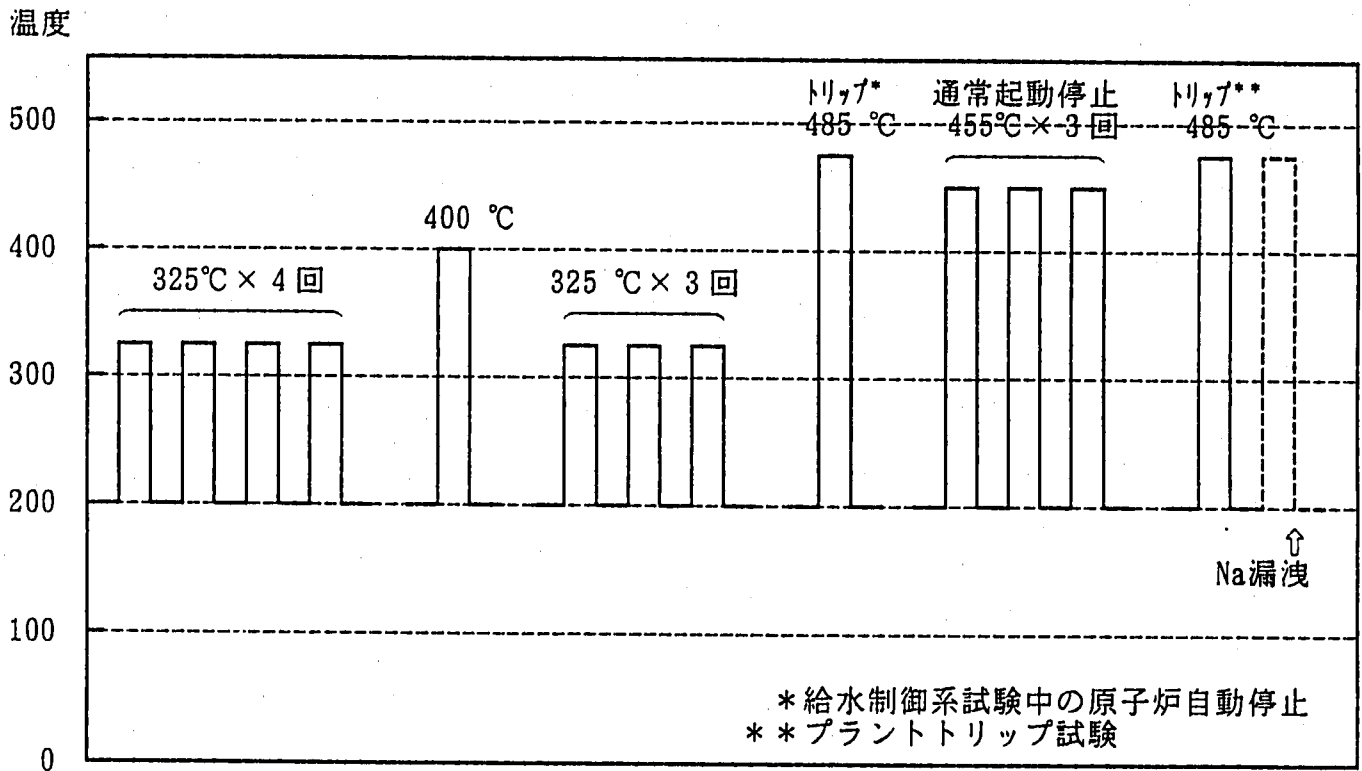
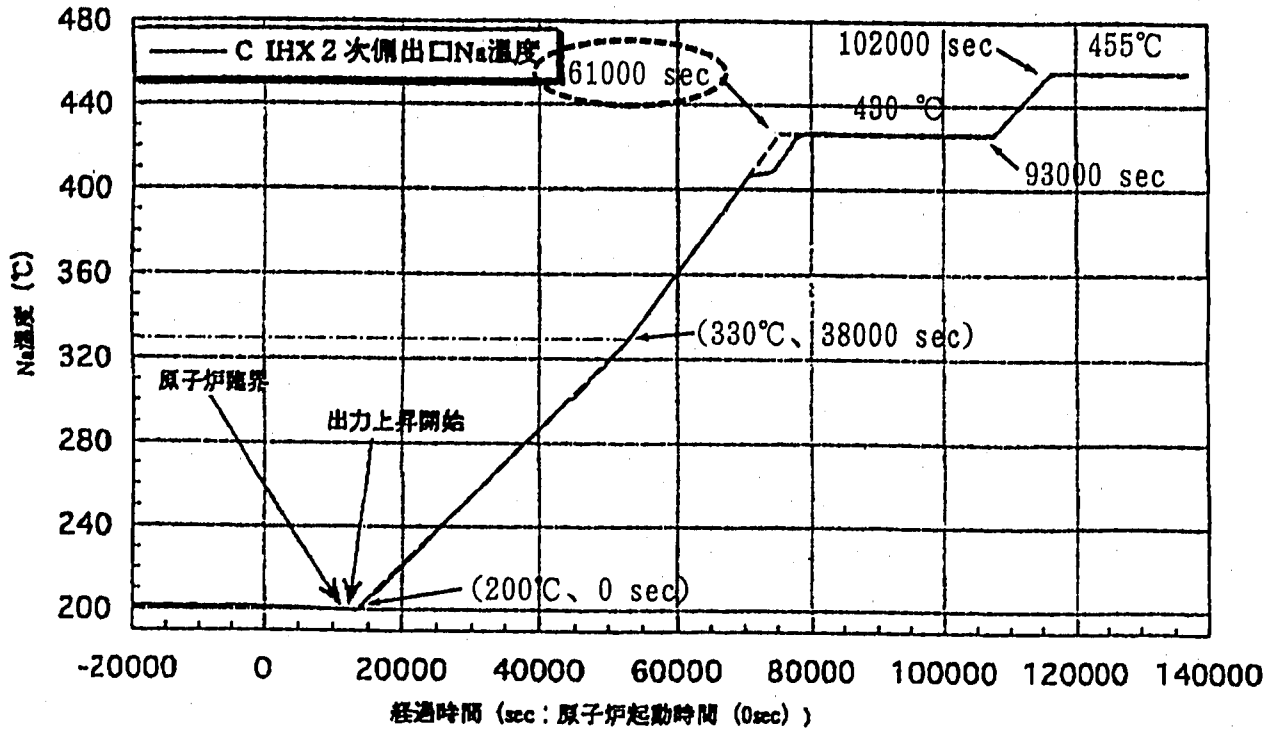


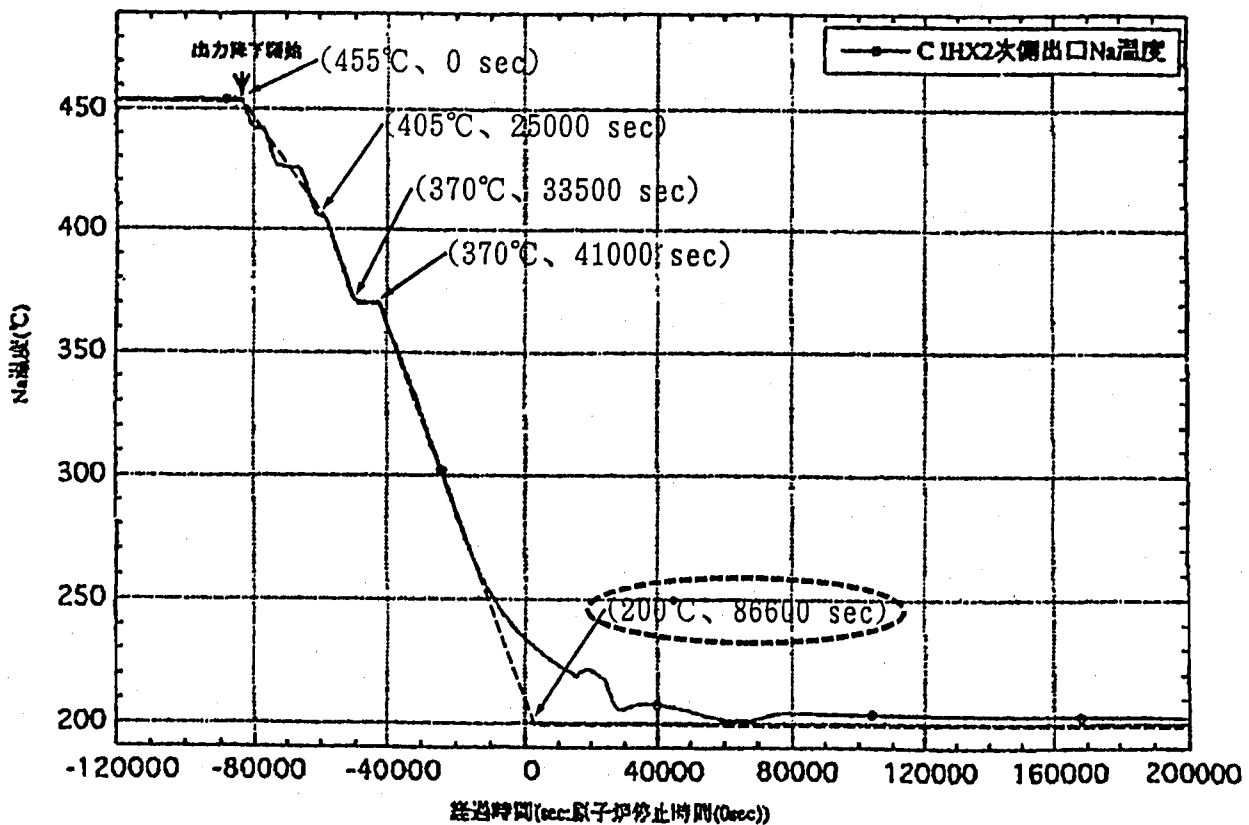
図3 評価対象とするNa漏洩までの過渡事象とシーケンス

原子炉通常起動
(8/18/1995~8/25/1995)



(1) 通常起動

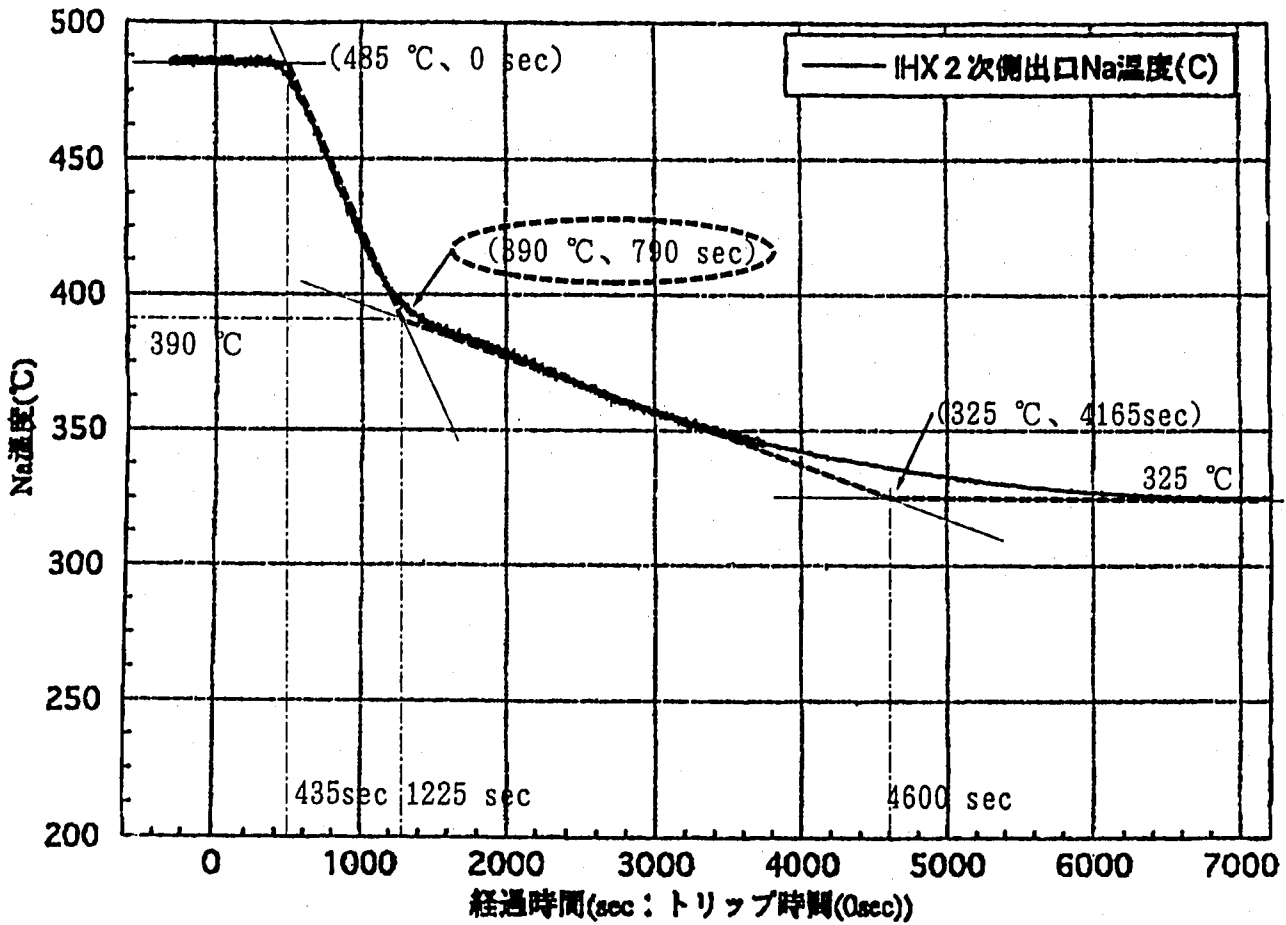
原子炉通常停止
(8/5/1995~8/10/1995)



(2) 通常停止

図4-1 もんじゅ2次系用温度計取付け部の温度解析用条件

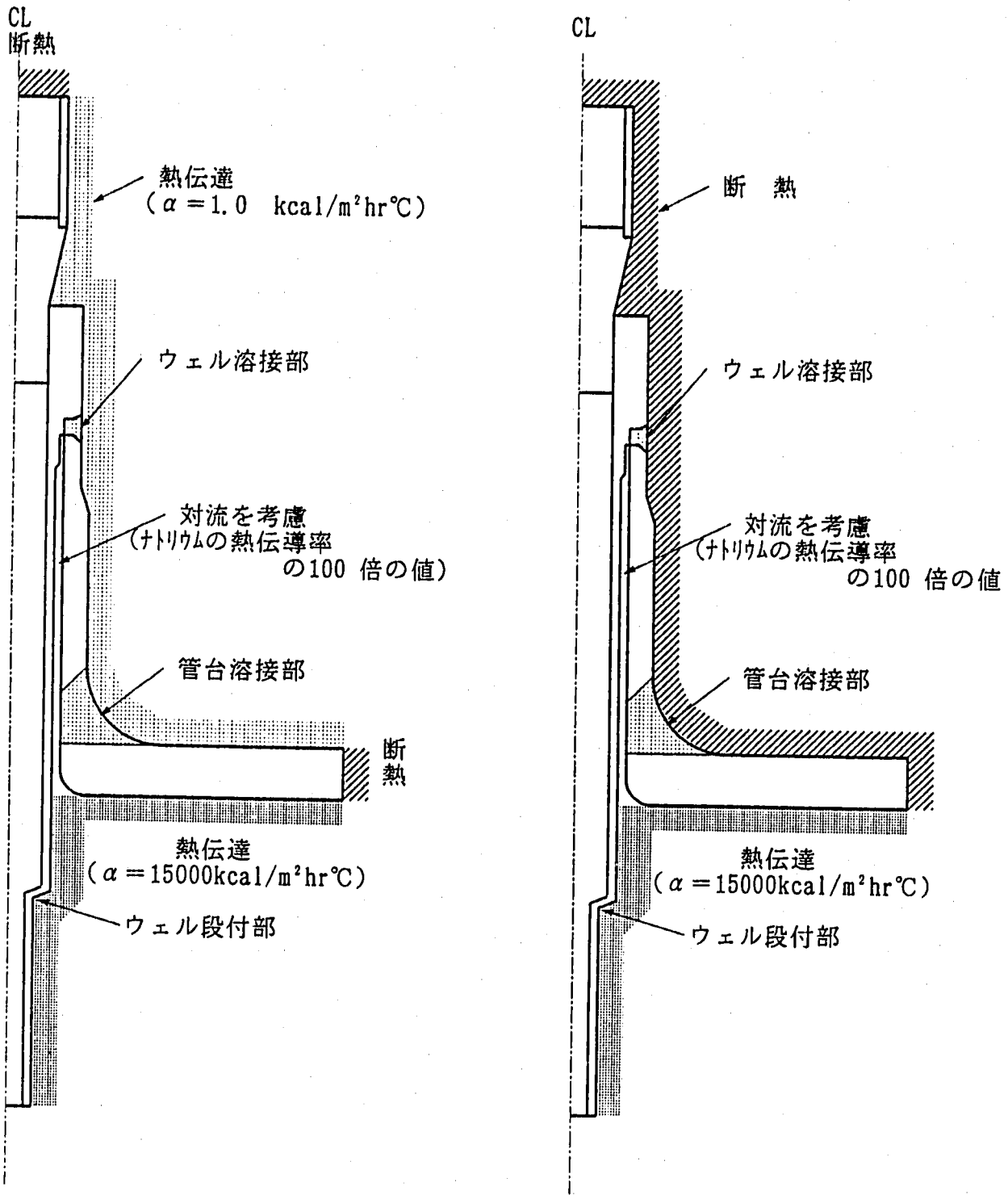
プラントトリップ試験
(12/1/1995)



(3) プラントトリップ試験条件

(1995年12月1日に実施されたプラントトリップ試験条件を点線で保守側に近似)

図 4-2 もんじゅ 2次系用温度計取付け部の温度解析用条件



(1) 定常解析

(2) 非定常解析

図5 もんじゅ2次系用温度計取付け部の熱的境界条件

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

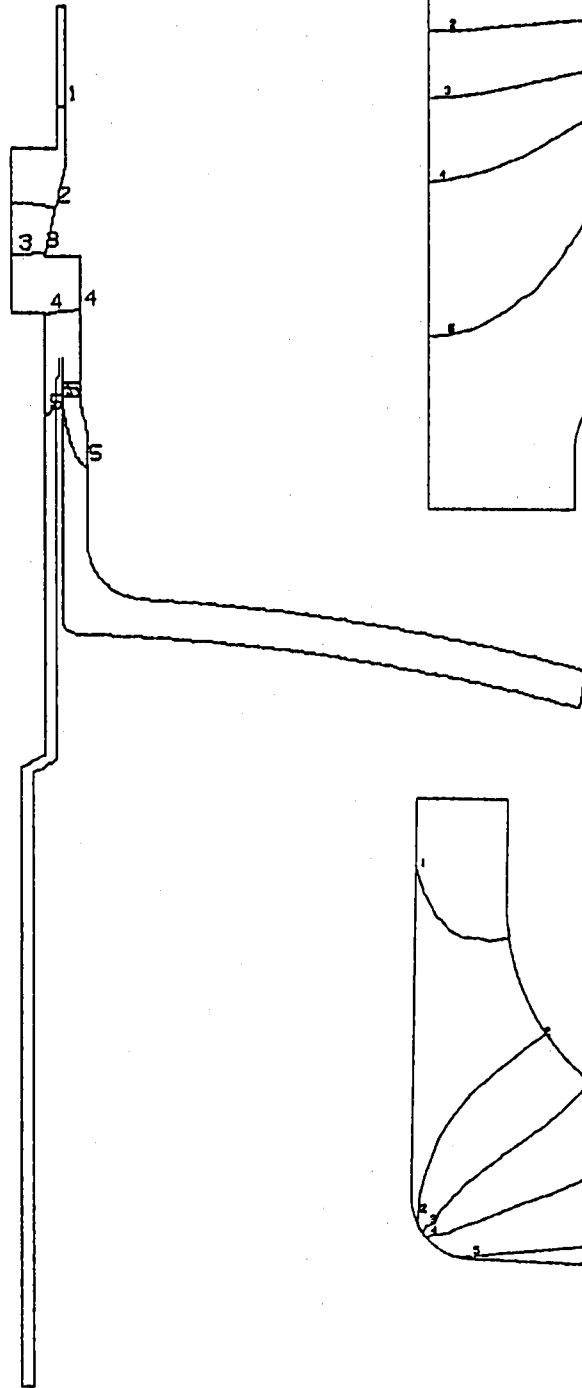
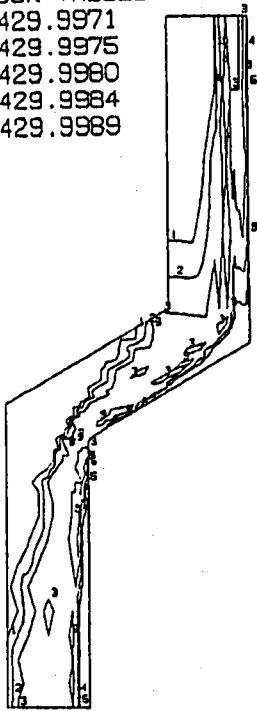
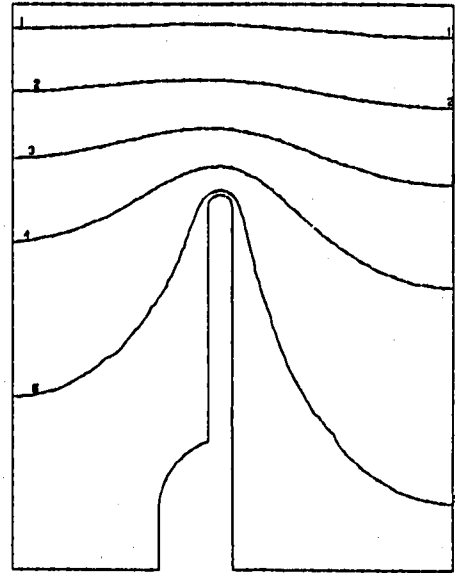
- 1 429.4340
- 2 429.4919
- 3 429.5500
- 4 429.6080
- 5 429.6660

CONTOUR VALUES

- 1 427.3000
- 2 427.9000
- 3 428.5000
- 4 429.1000
- 5 429.7000

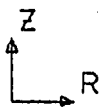
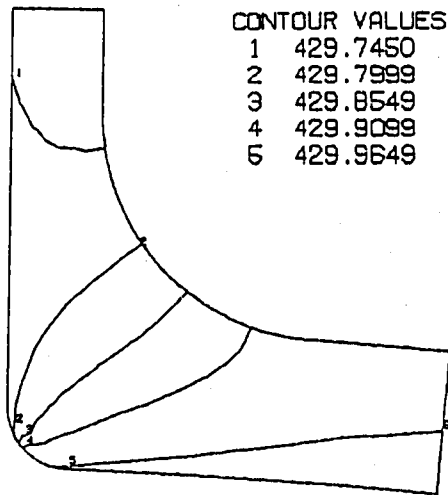
CONTOUR VALUES

- 1 429.9971
- 2 429.9975
- 3 429.9980
- 4 429.9984
- 5 429.9989



CONTOUR VALUES

- 1 429.7450
- 2 429.7999
- 3 429.8549
- 4 429.9099
- 5 429.9649



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1 50.0000

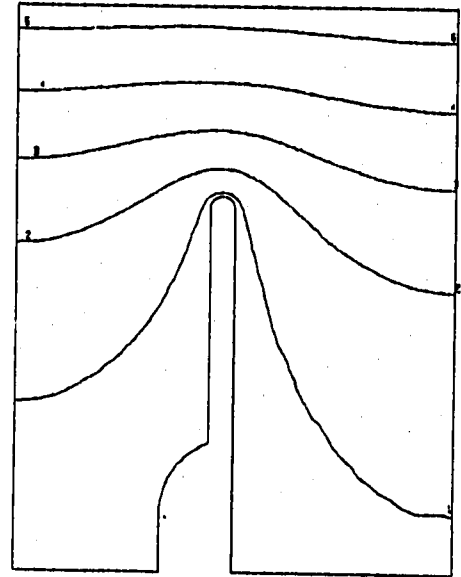
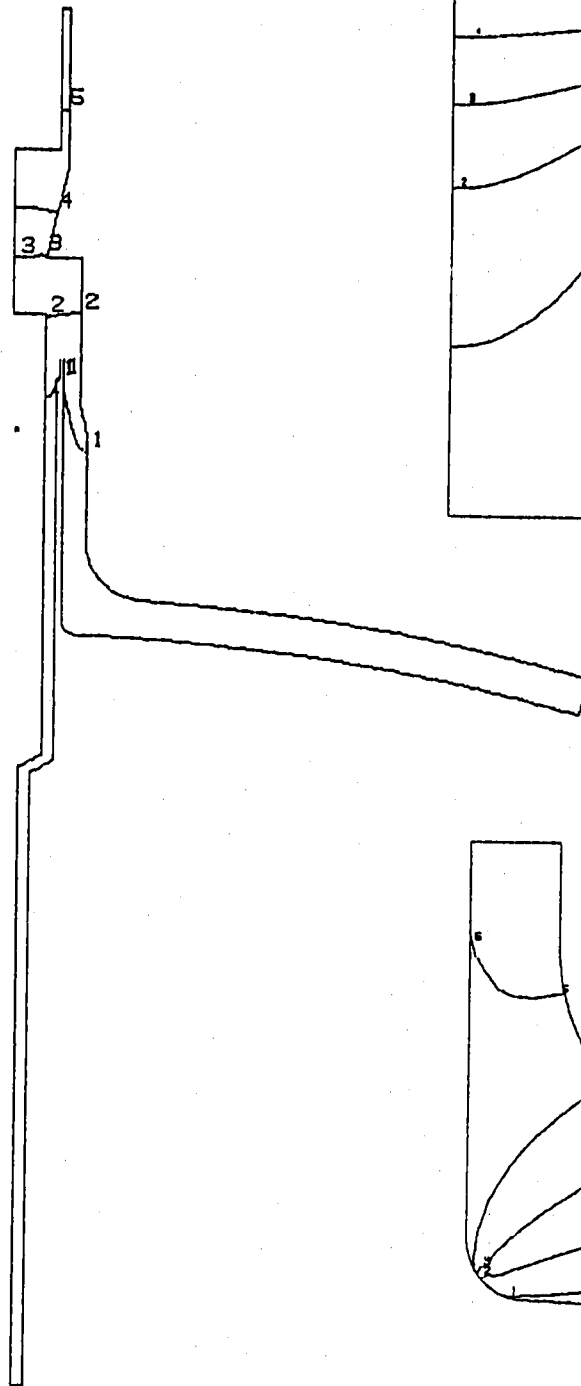
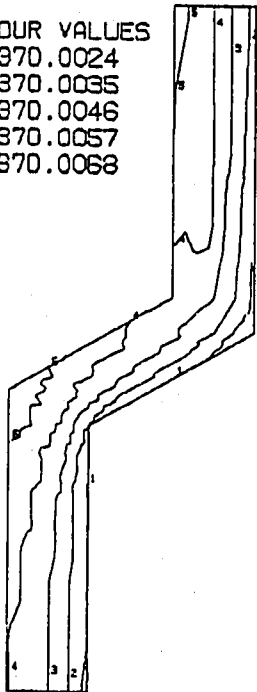
図 6-1 起動時の温度分布。(最大応力発生時点：昇温開始後 61.000秒)

FINAS
TEMPERATURE

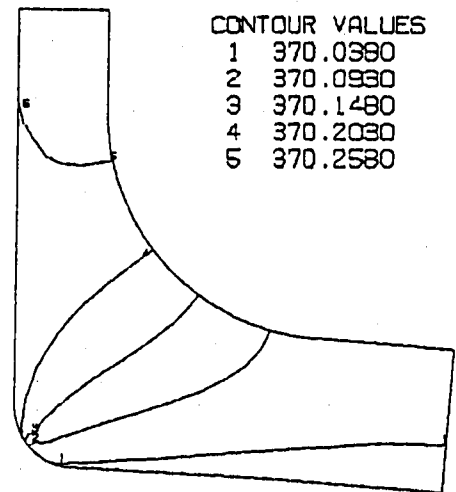
CONTOUR VALUES	
1	370.3390
2	370.3990
3	370.4600
4	370.5210
5	370.5820

CONTOUR VALUES	
1	370.9100
2	370.9200
3	371.5900
4	372.1400
5	372.7500

CONTOUR VALUES	
1	370.0024
2	370.0035
3	370.0046
4	370.0057
5	370.0068



CONTOUR VALUES	
1	370.0380
2	370.0930
3	370.1480
4	370.2030
5	370.2580



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1 _____ 50.0000

図 6-2 停止時の温度分布 (最大応力発生時点: 降温開始後 33.500秒)

FINAS
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

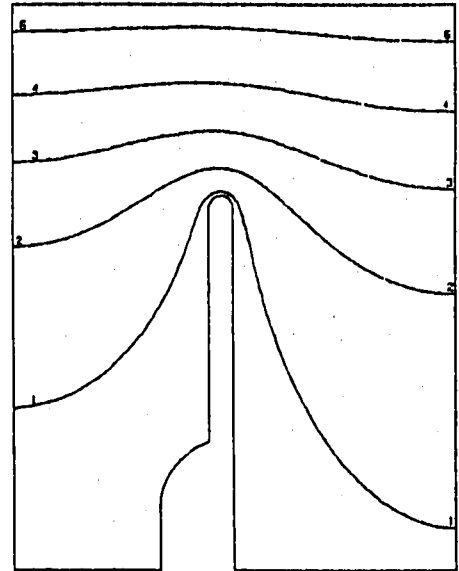
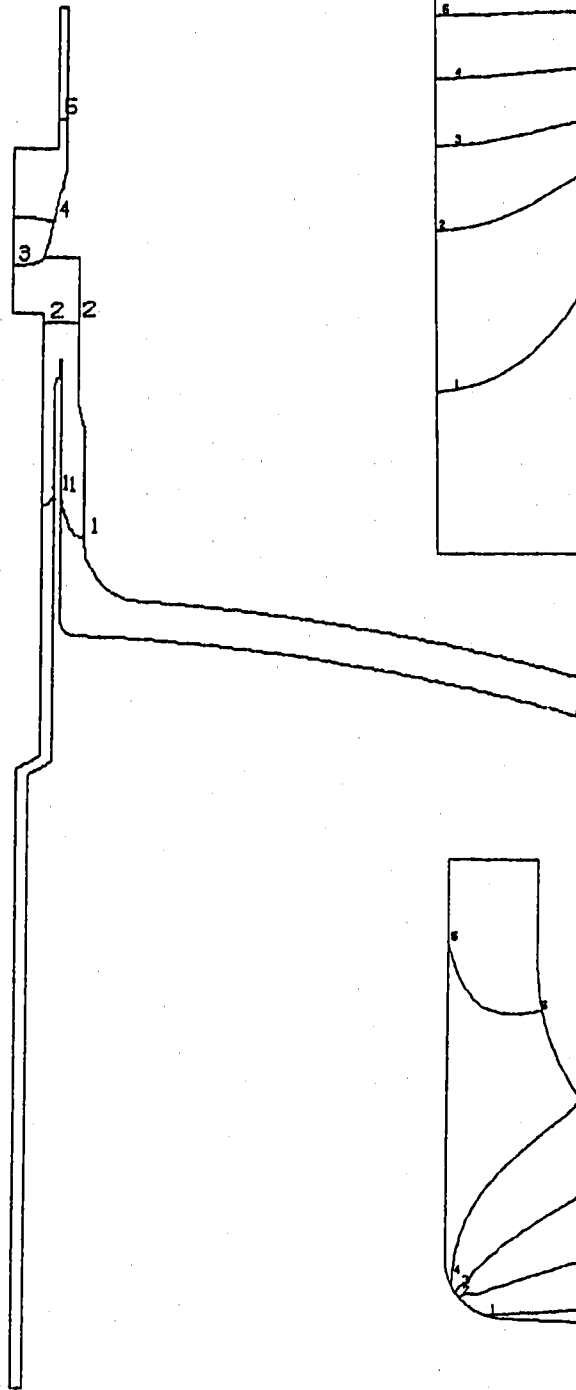
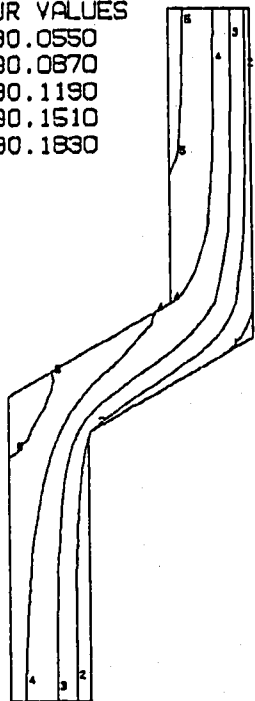
- 1 397.0000
- 2 410.0000
- 3 423.0000
- 4 436.0000
- 5 449.0000

CONTOUR VALUES

- 1 398.5000
- 2 399.9000
- 3 401.3000
- 4 402.7000
- 5 404.1000

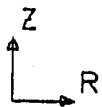
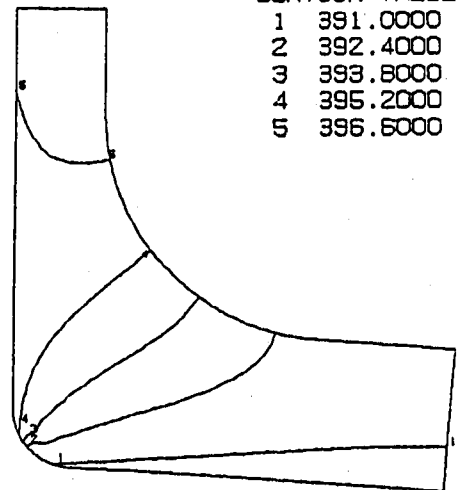
CONTOUR VALUES

- 1 390.0550
- 2 390.0870
- 3 390.1190
- 4 390.1510
- 5 390.1830



CONTOUR VALUES

- 1 391.0000
- 2 392.4000
- 3 393.8000
- 4 395.2000
- 5 396.6000



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 50.0000

図 6-3 プラントトリップ時の温度分布 (最大応力発生時点: 降温開始後 790秒)

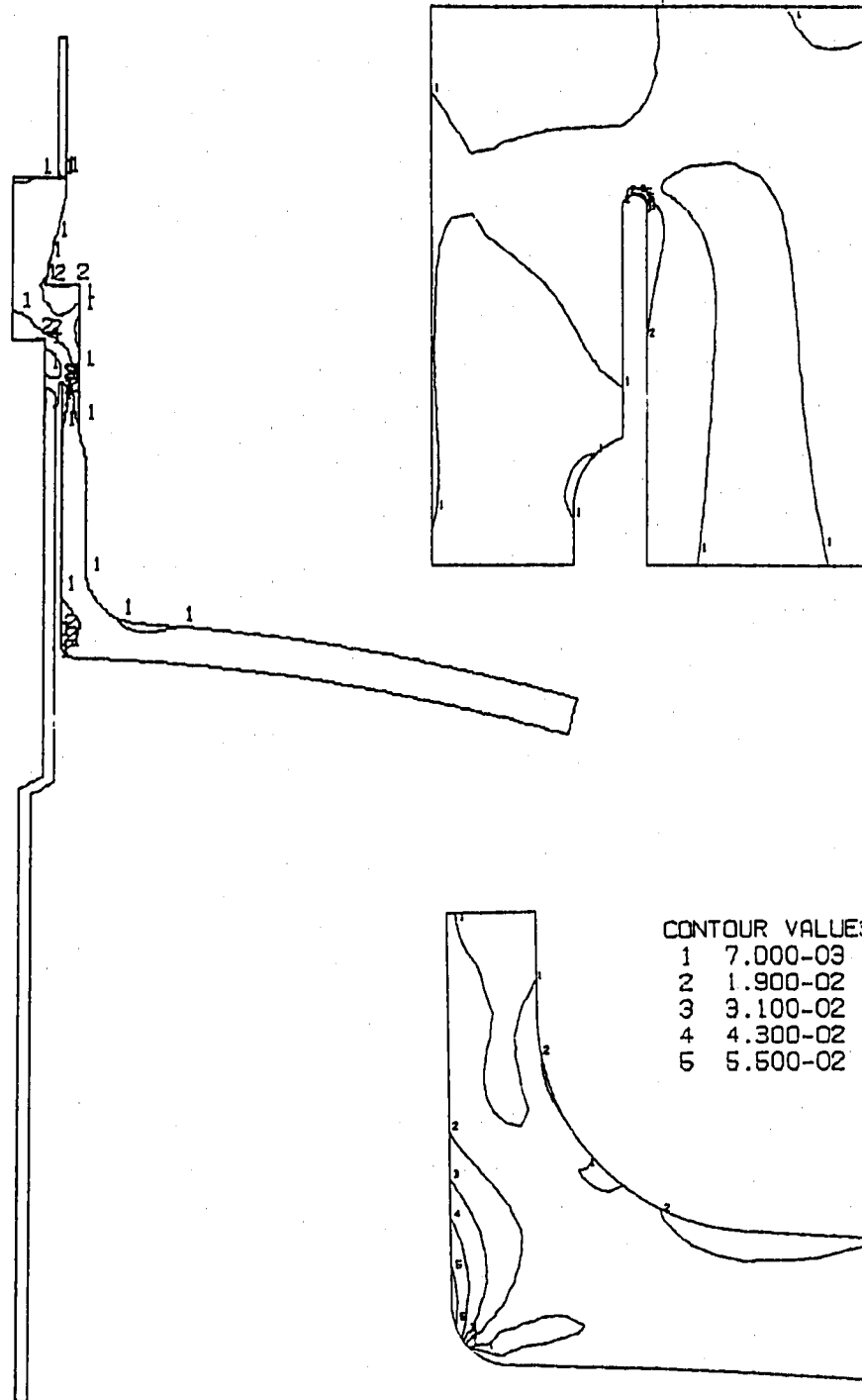
FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

- 1 2.100-02
- 2 5.900-02
- 3 9.700-02
- 4 0.135000
- 5 0.173000

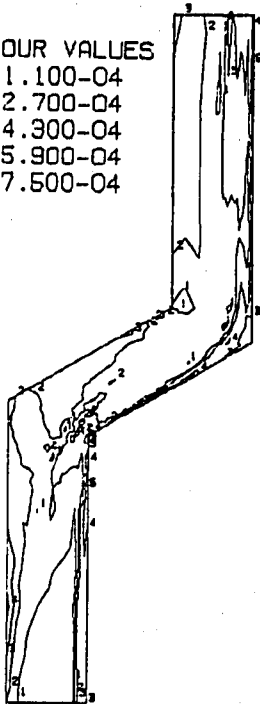
CONTOUR VALUES

- 1 1.900-02
- 2 5.700-02
- 3 9.500-02
- 4 0.133000
- 5 0.171000



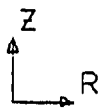
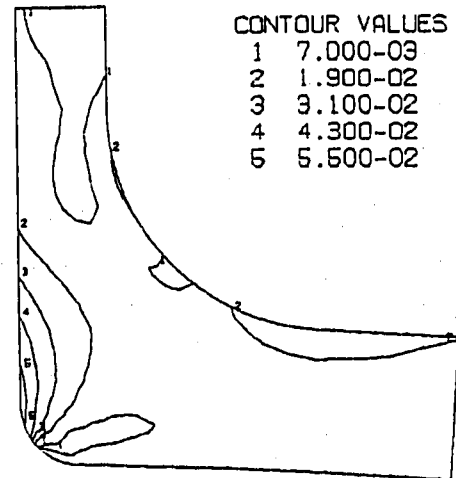
CONTOUR VALUES

- 1 1.100-04
- 2 2.700-04
- 3 4.300-04
- 4 5.900-04
- 5 7.500-04



CONTOUR VALUES

- 1 7.000-03
- 2 1.900-02
- 3 3.100-02
- 4 4.300-02
- 5 5.500-02



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1 _____ 50.0000

図 7-1 起動時の Mises 応力分布 (最大応力発生時点: 昇温開始後 61,000 秒)

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

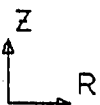
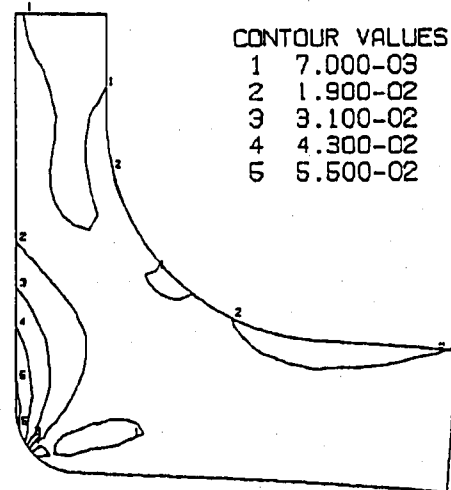
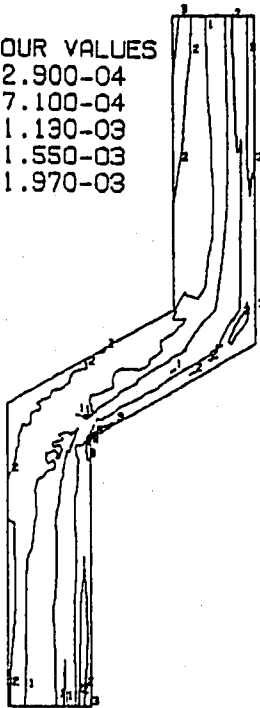
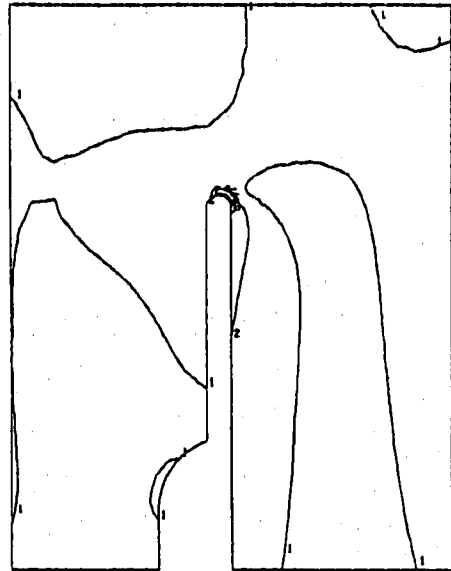
1	2.200-02
2	6.100-02
3	0.100000
4	0.139000
5	0.178000

CONTOUR VALUES

1	2.000-02
2	5.900-02
3	9.800-02
4	0.137000
5	0.176000

CONTOUR VALUES

1	2.900-04
2	7.100-04
3	1.190-03
4	1.550-03
5	1.970-03



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1 _____ 50.0000

図 7-2 停止時の Mises 応力分布 (最大応力発生時点: 降温開始後 33,500 秒)

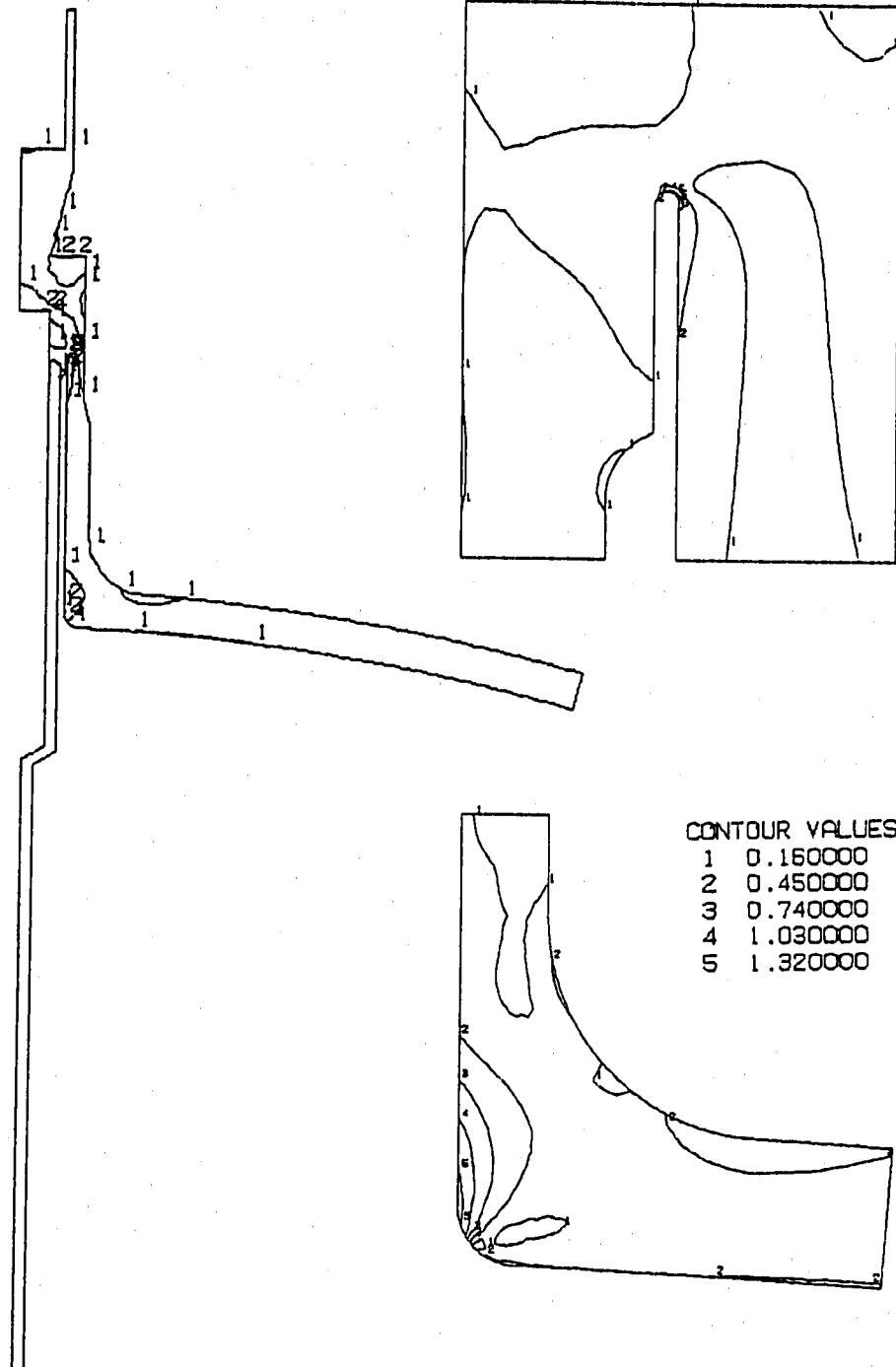
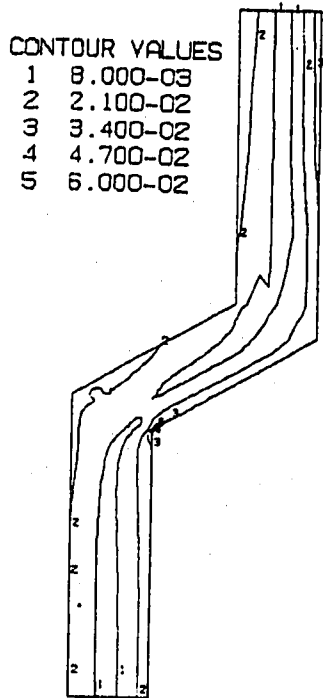
FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	0.450000
2	1.350000
3	2.250000
4	3.150000
5	4.050000

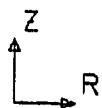
CONTOUR VALUES

1	0.510000
2	1.400000
3	2.290000
4	3.180000
5	4.070000



CONTOUR VALUES

1	0.160000
2	0.450000
3	0.740000
4	1.030000
5	1.320000



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1 _____ 50.0000

図 7-3 プラントトリップ時の Mises 応力分布 (最大応力発生時点: 降温開始後 790 秒)