

# 溶接容器型モデル熱過渡強度試験

## 第2報 予備弾性解析と強度評価

1990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、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

## 溶接容器型モデル熱過渡強度試験

## 第2報 予備弾性解析と強度評価

町田秀夫\* 笠原直人\*

渡士克己\* 岩田耕司\*

## 要 旨

構造物強度確性試験施設を用いた溶接容器型モデル供試体の熱過渡強度試験が予定されている。本試験は、FBR機器設計において熱過渡強度上課題となる部位の応力状態に対して、構造物の熱過渡強度及びクリープ疲労評価法の確立を目的として実施される。

溶接容器型モデル供試体は、FBR構造設計で課題となっている液面近傍やスカート構造といった部位に発生する典型的な応力分布及び改良SUS316鋼に対する構造強度試験用に設計・製作された。

本報は、溶接容器型モデル熱過渡強度試験用供試体の弾性熱応力解析及び強度評価について示すものである。解析は、供試体を入口ノズル部、容器上部、容器下部、出口ノズル部及び中子リング部の5つの部位に分割し、供試体製作時に実測された熱電対の設置位置に基づいてメッシュ切りした部分モデルを用いて実施した。熱過渡条件は、供試体の設計用に設定したもの（第1報）を用いた。

クリープ疲労損傷は、熱応力解析から求めた供試体各部のひずみから、構造物強度確性試験施設用専用設計基準を用いて評価した。

---

\* 大洗工学センター、機器構造開発部、構造工学室

## Thermal Transient Strength Test of a Welded Vessel Model

## No.2 Preliminary Elastic Analysis and Creep-Fatigue Evaluation

H. Machida\* , N. Kasahara\*

K. Watashi\* , K. Iwata\*

## Abstract

Thermal transient strength tests of a Welded Vessel Model is carrying out in Thermal Transient Strength Test Facility for Structures. The objective of this test is to grasp the thermal transient strength of fast breeder reactor's components and to develop a life estimation method for creep fatigue failure.

The model is designed and fabricated in order to grasp the thermal creep-fatigue life of SUS304 and modified SUS316 under the noteworthy typical stress distribution encountered in the structures design of Fast Breeder Reactors.

This report shows the results of thermal stress analysis and creep-fatigue damage evaluation of the model. The analytical model was divided the test model into five portions, namely a inlet nozzle, an upper vessel, a lower vessel, an outlet nozzle and an inner shell ring. Thermal transient condition used in the analysis is the same that used in design of the model.

---

\* Structure Engineering Section, OEC

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 伝熱応力解析 .....	4
2.1 解析概要 .....	4
2.2 入口ノズル .....	9
2.3 上部ブロック .....	26
2.4 下部ブロック .....	48
2.5 出口ノズル .....	66
2.6 中子リング .....	84
3. クリープ疲労損傷評価 .....	101
3.1 評価手法 .....	101
3.2 損傷評価結果 .....	102
4. 考 察 .....	109
5. 結 論 .....	116
6. 謝 辞 .....	117
7. 参考文献 .....	118

## 表 リ ス ト

Table 2.1-1	Material Property for Heat Transfer Analysis (SUS304) .....	5
Table 2.1-2	Material Property for Heat Transfer Analysis (Sodium) .....	5
Table 2.1-3	Material Property for Thermal Stress Analysis (SUS304) .....	6
Table 2.2-1	Heat Transfer Analysis Step (Inlet Nozzle) .....	11
Table 2.2-2	Thermal Stress Analysis Step (Inlet Nozzle) .....	12
Table 2.3-1	Heat Transfer Analysis Step (Upper Vessel) .....	28
Table 2.3-2	Thermal Stress Analysis Step (Upper Vessel) .....	29
Table 2.4-1	Heat Transfer Analysis Step (Lower Vessel) .....	50
Table 2.4-2	Thermal Stress Analysis Step (Lower Vessel) .....	51
Table 2.5-1	Heat Transfer Analysis Step (Outlet Nozzle) .....	68
Table 2.5-2	Thermal Stress Analysis Step (Outlet Nozzle) .....	69
Table 2.6-1	Heat Transfer Analysis Step (Inner Shell Ring) .....	86
Table 2.6-2	Thermal Stress Analysis Step (Inner Shell Ring) .....	87
Table 3.2-1	Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Inlet Nozzle) .....	103
Table 3.2-2	Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Upper Vessel) .....	104
Table 3.2-3	Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Lower Vessel) .....	105
Table 3.2-4	Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Outlet Nozzle) .....	106
Table 3.2-5	Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Inner Shell Ring) .....	107
Table 4-1	Comparison of Creep Fatigue Damage (Inlet Nozzle) .....	110
Table 4-2	Comparison of Creep Fatigue Damage (Upper Vessel) .....	111
Table 4-3	Comparison of Creep Fatigue Damage (Lower Vessel) .....	112
Table 4-4	Comparison of Creep Fatigue Damage (Outlet Nozzle) .....	113
Table 4-5	Comparison of Creep Fatigue Damage (Inner Shell Ring) .....	114

# 目 次

Fig.1-1	Flow of Thermal Transient Strength Test .....	2
Fig.1-2	Position of This Report in This Study .....	3
Fig.2.1-1	Perspective View of Welded Vessel Model .....	7
Fig.2.1-2	Model Configuration .....	8
Fig.2.2-1	Heat Transfer Analysis Model (Inlet Nozzle) .....	13
Fig.2.2-2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Inlet Nozzle) ...	14
Fig.2.2-3	Temperature Contour (Inlet Nozzle) .....	15
Fig.2.2-4	Temperature History at Thermocouple Location (Inlet Nozzle) .....	17
Fig.2.2-5	Thermal Stress Analysis Model (Inlet Nozzle) .....	19
Fig.2.2-6	Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Inlet Nozzle) ...	19
Fig.2.2-7	Stress Estimation Line and Section (Inlet Nozzle) .....	20
Fig.2.2-8	Stress History (Inlet Nozzle) .....	21
Fig.2.2-9	Stress Distribution at Estimation Line (Inlet Nozzle) .....	23
Fig.2.3-1	Heat Transfer Analysis Model (Upper Vessel) .....	30
Fig.2.3-2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Upper Vessel) ...	31
Fig.2.3-3	Temperature Contour (Upper Vessel) .....	32
Fig.2.3-4	Temperature History at Thermocouple Location (Upper Vessel) .....	33
Fig.2.3-5	Thermal Stress Analysis Model (Upper Vessel) .....	39
Fig.2.3-6	Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Upper Vessel) ...	39
Fig.2.3-7	Stress Estimation Line and Section (Upper Vessel) .....	40
Fig.2.3-8	Stress History (Upper Vessel) .....	41
Fig.2.3-9	Stress Distribution at Estimation Line (Upper Vessel) .....	44
Fig.2.4-1	Heat Transfer Analysis Model (Lower Vessel) .....	52
Fig.2.4-2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Lower Vessel) ...	53
Fig.2.4-3	Temperature Contour (Lower Vessel) .....	54
Fig.2.4-4	Temperature History at Thermocouple Location (Lower Vessel) .....	55
Fig.2.4-5	Thermal Stress Analysis Model (Lower Vessel) .....	59
Fig.2.4-6	Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Lower Vessel) ...	59
Fig.2.4-7	Stress Estimation Line and Section (Lower Vessel) .....	60
Fig.2.4-8	Stress History (Lower Vessel) .....	61
Fig.2.4-9	Stress Distribution at Estimation Line (Lower Vessel) .....	63
Fig.2.5-1	Heat Transfer Analysis Model (Outlet Nozzle) .....	70

Fig. 2.5-2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Outlet Nozzle) ...	71
Fig. 2.5-3	Temperature Contour (Outlet Nozzle) .....	72
Fig. 2.5-4	Temperature History at Thermocouple Location (Outlet Nozzle) ...	73
Fig. 2.5-5	Thermal Stress Analysis Model (Outlet Nozzle) .....	76
Fig. 2.5-6	Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Outlet Nozzle)...	76
Fig. 2.5-7	Stress Estimation Line and Section (Outlet Nozzle) .....	77
Fig. 2.5-8	Stress History (Outlet Nozzle) .....	78
Fig. 2.5-9	Stress Distribution at Estimation Line (Outlet Nozzle) .....	81
Fig. 2.6-1	Heat Transfer Analysis Model (Inner Shell Ring) .....	88
Fig. 2.6-2	Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Inner Shell Ring) .....	89
Fig. 2.6-3	Temperature Contour (Inner Shell Ring) .....	90
Fig. 2.6-4	Temperature History at Thermocouple Location (Inner Shell Ring) .....	91
Fig. 2.6-5	Thermal Stress Analysis Model (Inner Shell Ring) .....	94
Fig. 2.6-6	Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Inner Shell Ring) .....	94
Fig. 2.6-7	Stress Estimation Line and Section (Inner Shell Ring) .....	95
Fig. 2.6-8	Stress History (Inner Shell Ring) .....	96
Fig. 2.6-9	Stress Distribution at Estimation Line (Inner Shell Ring) .....	98
Fig. 3.1-1	Flow of TTS-DS .....	108
Fig. 4-1	Comparison of Heat Transfer Analysis Model (Inner Shell Ring) ...	115



# 1. まえがき

構造物強度確性試験施設（以降、TTSと略す）を用いた熱過渡強度試験は、FBR機器設計において重要課題となる耐熱応力設計に対する裕度の適性化及び強度評価法の確立を目的として実施されてきた。現在まで6体の供試体が設計・製作され、TTSを用いた試験は、これらの内5体について終了している。現在は、第6回供試体「溶接容器型モデル熱過渡強度試験用供試体」（以降、溶接容器型モデルと呼ぶ）の熱過渡試験の準備が進められている。

溶接容器型モデルは、FBRの機器構造設計において課題となっている液面近傍、管板-シュラウド構造、スカート構造等において発生する典型的な応力状態を模擬した供試体である。これらの部位では、軸方向温度勾配による応力や構造物間の相対温度差によって生じる応力、つまり、軸方向曲げ応力及び周方向膜応力が主体となっている。溶接容器型モデルでは、構造不連続部である出入口ノズル、上下部Yピース取付部、本体胴リング取付部及び中子リング取付部を試験対象部位としている。また、供試体の製作に当たってはFBRの大型化に伴って実機への適用が予想されるT字継手や電子ビーム溶接を採用すると共に、FBR大型炉における原子炉構造用材料として候補材料の1つとされている改良SUS316鋼（316MN鋼）を供試体の一部に採用している。

試験全体の流れはFig.1-1に示す通りであり、供試体の設計・製作については第1報に報告されている。

本報告書は、この溶接容器型モデルに関する一連の報告書のうち、設計形状に基づいて実施した伝熱・弾性応力解析と強度評価についてまとめたものであり、他の報告書との関係は、Fig.1-2に示す通りである。解析では、供試体を入口ノズル部、容器上部、容器下部、出口ノズル部及び中子リング部の5つのブロックに分割し、それらのブロック毎に部分モデルを作成し、伝熱解析及び熱応力解析を実施した。強度評価は、TTS専用設計基準（以降、TTS-DSと略す）を用いて実施した。

本研究で作成した解析モデルは、熱過渡強度試験から得られる熱電対の応答温度を入力できる様に、供試体製作時に実測された熱電対設置位置に節点を設けている。第4報では、試験から得られる熱電対の温度応答に基づいて、供試体の温度応答を模擬した熱的境界条件を定めた弾性熱応力解析並びに強度評価を実施する予定である。

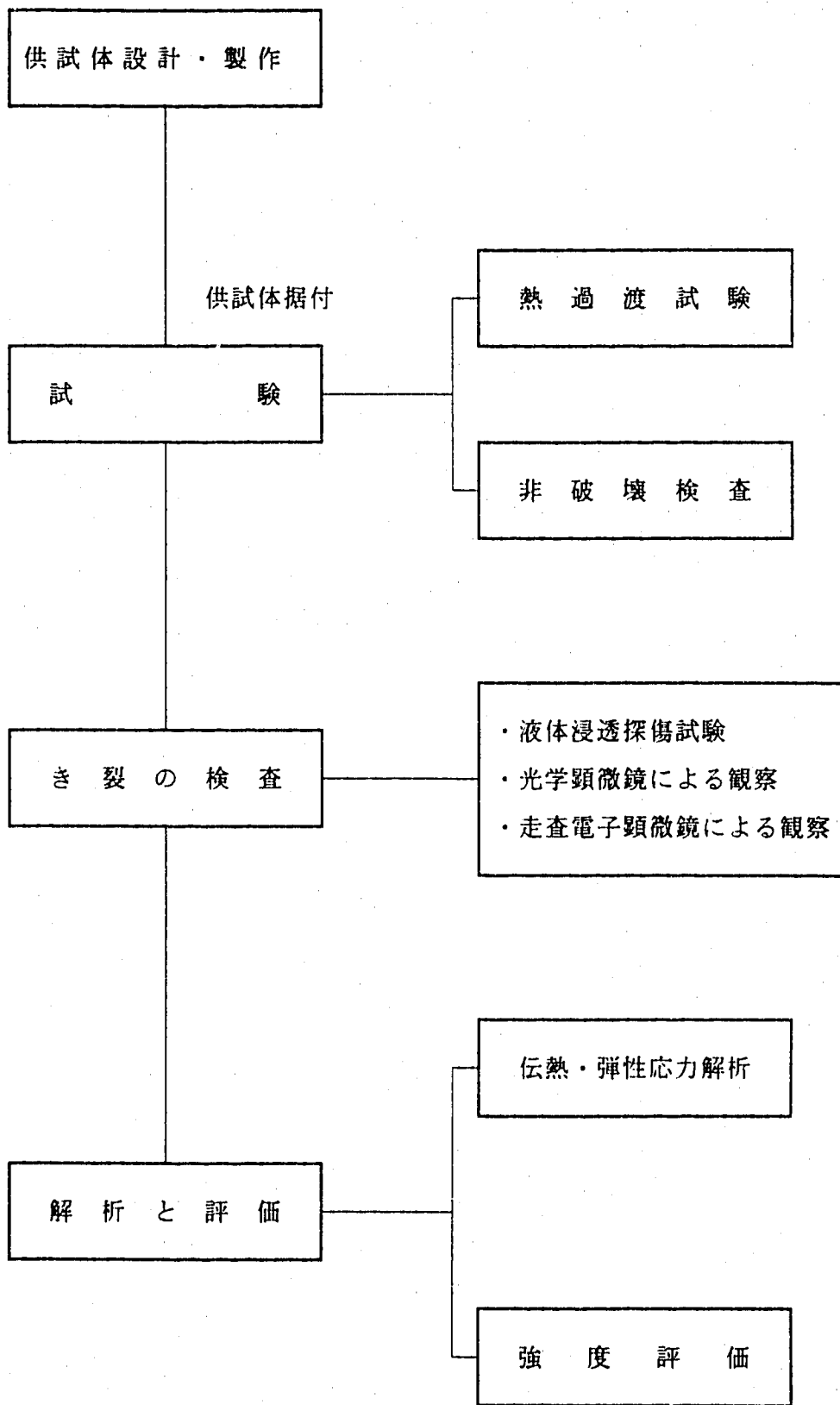


Fig.1-1 Flow of Thermal Transient Strength Test

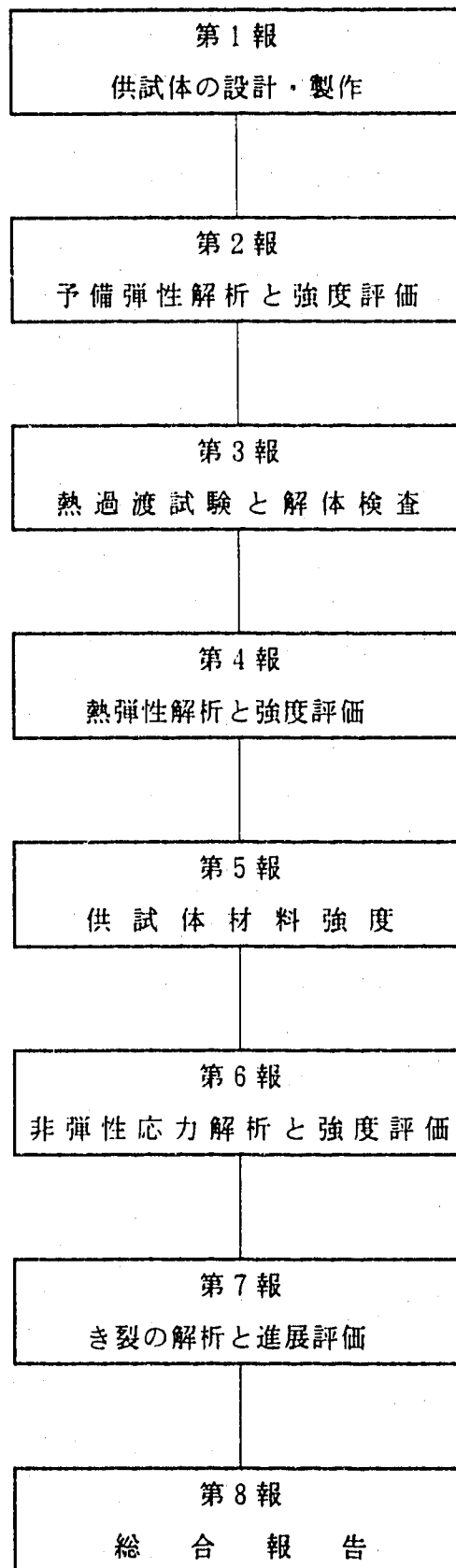


Fig.1-2 Position of This Report in This Study

## 2. 伝熱応力解析

### 2.1 解析概要

溶接容器型モデルの鳥瞰図をFig. 2.1-1 に、構造図をFig. 2.1-2 に示す。伝熱応力解析は、供試体を以下の5つの部位に分割した部分モデルを用いて実施した。

- ① 入口ノズルモデル
- ② 上部ブロックモデル
- ③ 下部ブロックモデル
- ④ 出口ノズルモデル
- ⑤ 中子リングモデル

これらの解析モデルに共通の解析条件を以下にまとめる。個々のモデルに固有の条件については後述する。

#### (1) 解析プログラム

解析プログラムは、伝熱解析、熱応力解析共に汎用構造解析プログラム『FINAS V10.0』を用いた。解析に使用した要素は以下の通りである。

##### ○ 熱伝導解析モデル

- ・ 熱伝導 8 節点四辺形軸対称要素      HQAX 8
- ・ 熱伝導 6 節点三角形軸対称要素      HTAX 6
- ・ 熱伝達 3 節点軸対称要素              FCAX 3

##### ○ 熱応力解析モデル

- ・ 8 節点四辺形軸対称要素              QAX 8
- ・ 6 節点三角形軸対称要素              TAX 6

#### (2) 材料定数

解析に用いた物性値をTable 2.1-1 ~Table 2.1-3 に示す。これらの内、SUS 304については『FINAS-V10.0』のライブラリ、ナトリウムについては一連のTTS供試体設計で用いられている「PNC N941 81-73 ナトリウム技術実用物性値表；高須ら」を用いた。

Table 2.1-1 Material Property for Heat Teat Transfer Analysis (SUS304)

温 度 (°C)	熱伝導係数 (kcal/mm · sec · °C)	比 熱 (kcal/kg · °C)	密 度 (kg/mm <sup>3</sup> )
20	$3.48 \times 10^{-6}$	0.108	$8.03 \times 10^{-6}$
50	$3.53 \times 10^{-6}$	0.112	$8.02 \times 10^{-6}$
100	$3.73 \times 10^{-6}$	0.118	$8.00 \times 10^{-6}$
150	$3.89 \times 10^{-6}$	0.122	$7.97 \times 10^{-6}$
200	$4.05 \times 10^{-6}$	0.125	$7.95 \times 10^{-6}$
250	$4.21 \times 10^{-6}$	0.128	$7.93 \times 10^{-6}$
300	$4.37 \times 10^{-6}$	0.129	$7.90 \times 10^{-6}$
350	$4.53 \times 10^{-6}$	0.131	$7.88 \times 10^{-6}$
400	$4.70 \times 10^{-6}$	0.132	$7.86 \times 10^{-6}$
450	$4.86 \times 10^{-6}$	0.133	$7.83 \times 10^{-6}$
500	$5.02 \times 10^{-6}$	0.134	$7.81 \times 10^{-6}$
550	$5.18 \times 10^{-6}$	0.136	$7.79 \times 10^{-6}$
600	$5.34 \times 10^{-6}$	0.138	$7.76 \times 10^{-6}$
650	$5.51 \times 10^{-6}$	0.140	$7.74 \times 10^{-6}$
700	$5.67 \times 10^{-6}$	0.142	$7.72 \times 10^{-6}$
750	$5.83 \times 10^{-6}$	0.145	$7.70 \times 10^{-6}$
800	$5.98 \times 10^{-6}$	0.147	$7.67 \times 10^{-6}$

Table 2.1-2 Material Property for Heat Transfer Analysis (Sodium)

温 度 (°C)	熱伝導係数 (kcal/mm · sec · °C)	比 熱 (kcal/kg · °C)	密 度 (kg/mm <sup>3</sup> )
100	$2.087 \times 10^{-5}$	0.3305	$9.270 \times 10^{-7}$
150	$2.027 \times 10^{-5}$	0.3249	$9.153 \times 10^{-7}$
200	$1.956 \times 10^{-5}$	0.3199	$9.036 \times 10^{-7}$
250	$1.893 \times 10^{-5}$	0.3155	$8.918 \times 10^{-7}$
300	$1.831 \times 10^{-5}$	0.3116	$8.800 \times 10^{-7}$
350	$1.771 \times 10^{-5}$	0.3082	$8.681 \times 10^{-7}$
400	$1.712 \times 10^{-5}$	0.3054	$8.562 \times 10^{-7}$
450	$1.655 \times 10^{-5}$	0.3032	$8.443 \times 10^{-7}$
500	$1.599 \times 10^{-5}$	0.3015	$8.323 \times 10^{-7}$
550	$1.544 \times 10^{-5}$	0.3004	$8.203 \times 10^{-7}$
600	$1.491 \times 10^{-5}$	0.2998	$8.082 \times 10^{-7}$
650	$1.439 \times 10^{-5}$	0.2998	$7.961 \times 10^{-7}$

Table 2.1-3 Material Property for Thermal Stress Analysis (SUS304)

温 度 (°C)	ヤング係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	線膨張係数 (1/°C)
20	$1.98 \times 10^4$	0.266	$15.15 \times 10^{-6}$
50	$1.96 \times 10^4$	0.268	$15.65 \times 10^{-6}$
100	$1.94 \times 10^4$	0.272	$16.48 \times 10^{-6}$
150	$1.91 \times 10^4$	0.275	$17.22 \times 10^{-6}$
200	$1.88 \times 10^4$	0.279	$17.85 \times 10^{-6}$
250	$1.84 \times 10^4$	0.283	$18.56 \times 10^{-6}$
300	$1.80 \times 10^4$	0.287	$18.79 \times 10^{-6}$
350	$1.76 \times 10^4$	0.291	$19.19 \times 10^{-6}$
400	$1.72 \times 10^4$	0.295	$19.57 \times 10^{-6}$
450	$1.67 \times 10^4$	0.298	$19.93 \times 10^{-6}$
500	$1.62 \times 10^4$	0.302	$20.28 \times 10^{-6}$
550	$1.57 \times 10^4$	0.306	$20.60 \times 10^{-6}$
600	$1.52 \times 10^4$	0.310	$20.87 \times 10^{-6}$
650	$1.47 \times 10^4$	0.314	$21.09 \times 10^{-6}$

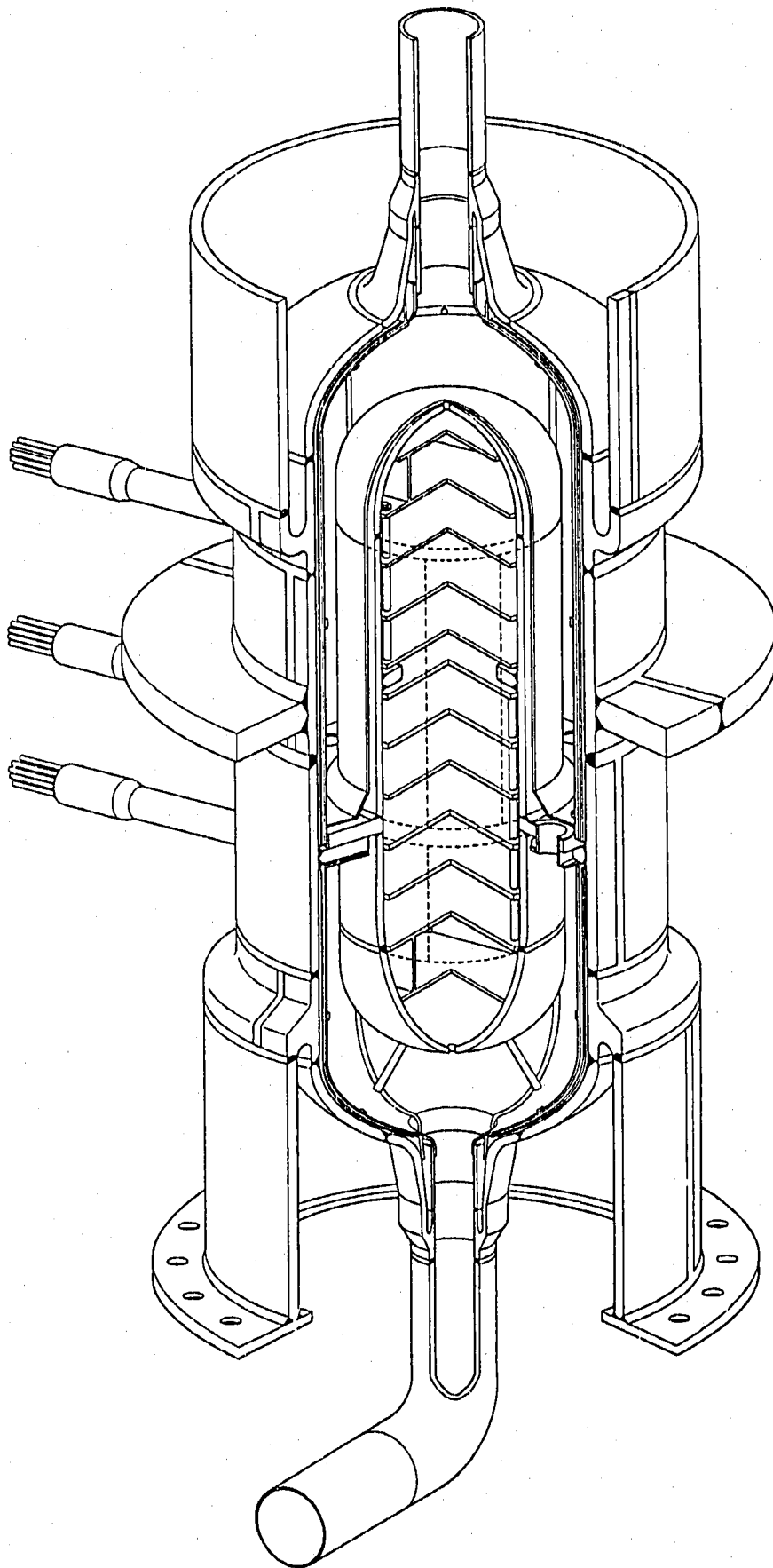


Fig. 2.1-1 Perspective View of Welded Vessel Model

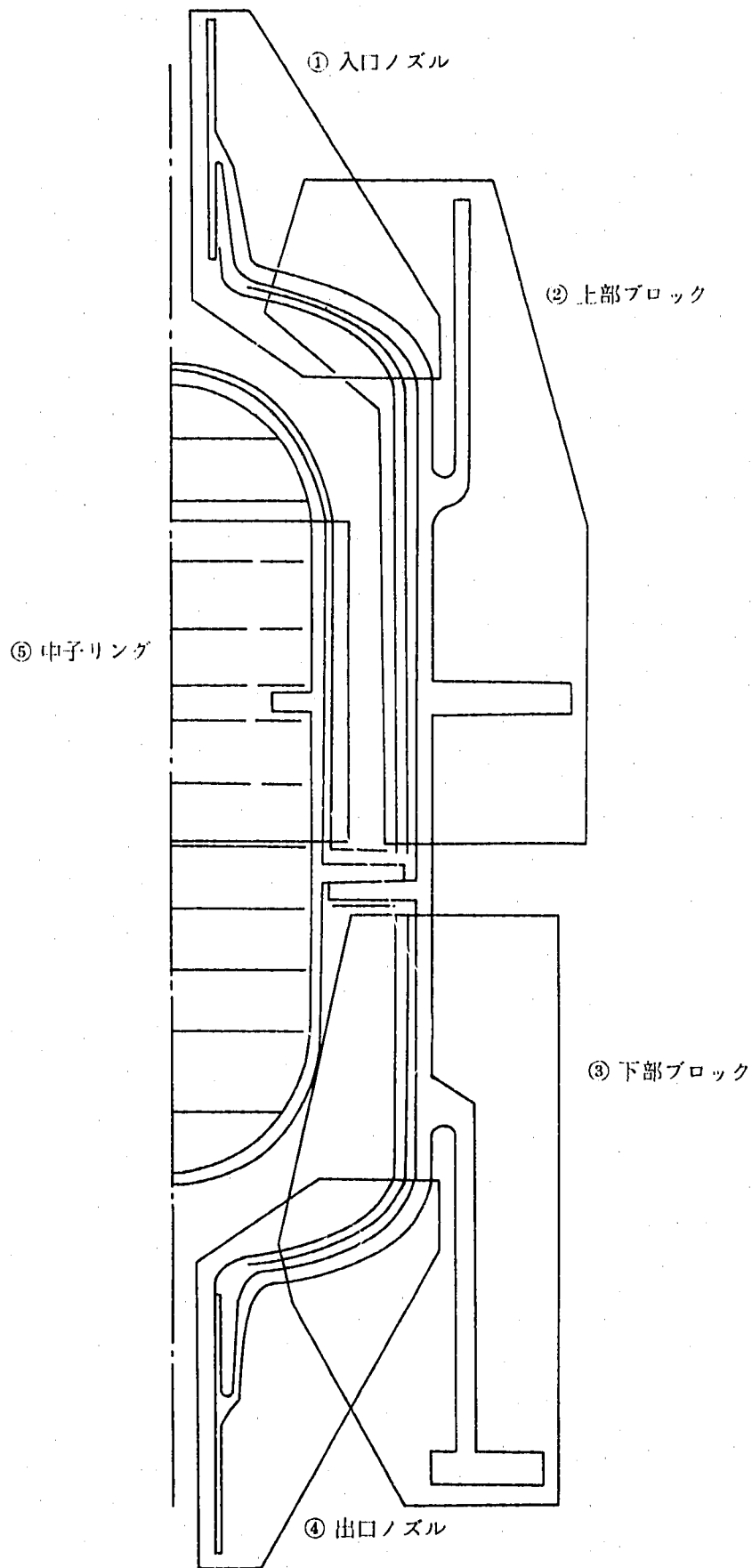


Fig. 2.1-2 Model Configuration



## 2.2 入口ノズル

供試体入口ノズルは、サーマルスリーブ付の一体鍛造ノズルである。溶接容器型モデルでは、サーマルスリーブ付け根の損傷値を従来の入口ノズルよりも小さく抑えるためにセーフエンド付け根Yピース部の構造を変更している。

### 2.2.1 伝熱解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

入口ノズル解析モデルは、Fig. 2.1-2 に示す供試体構造の内、入口配管から上部鏡までを解析範囲とし、荷重及び構造の対称性からFig. 2.2-1 に示すとおり軸対称要素を用いてモデル化する。要素総数465（内、熱伝達要素102、熱伝達リンク要素4）、節点総数1199である。

セーフエンドの上部には、セーフエンド内のガス溜まりを防止するためのガス抜き孔が設けられている。これより上部では、試験時においてもガス空間或いはナトリウムベーパー層が形成されることが予想される。解析では、この領域に熱伝達リンク要素を設け、ガス溜まり部の熱伝達をモデル化する。セーフエンド及びサーマルライナ内のナトリウムは、スタグナントとして取り扱い熱伝導のみを考慮する。

供試体容器内面のサーマルライナは、6mm×2枚のSUS304製板材で、容器胴及びサーマルライナ間ギャップがそれぞれ6mmと成るように取付けられている。解析モデルでは、サーマルライナを12mm×1枚のSUS304の板とし、これと容器との間に12mmのナトリウム層をモデル化する。

##### b. 境界条件

伝熱解析に用いた熱的境界条件をFig. 2.2-2 に示す。境界条件は、第1報にて報告した伝熱流動解析から求めた熱過渡条件及び熱伝達率をサーマルスリーブ及びサーマルライナの内表面に与える。セーフエンド内のガス溜まりに設けた熱伝達リンク要素の熱伝達率の設定に当たっては、熱過渡試験による熱電対の応答温度データが必要となるが、現状このデータが得られていないため、本解析ではサーマルスリーブとノズル本体との温度差による応力を安全側に見積もるため、ガス溜まり部を断熱として取扱う。また、その他の面は断熱として取扱う。

#### (2) 解析方法

伝熱解析は、Fig. 2.2-2 に示す熱過渡をコールド→ホットの順で1サイクル（計148ステップ）分入力する。解析ステップと経過時間並びに熱過渡のデジタル値の関係をTable 2.2-1 に示す。

## (3) 解析結果

温度分布図をFig. 2.2-3 に、また、熱電対設置位置の温度履歴をFig. 2.2-4 に示す。

## 2.2.2 熱応力解析

## (1) 解析条件

## a. 解析モデル

熱応力解析は、伝熱解析モデルからサーマルライナ、スタグナントナトリウム及び熱伝達要素を除いた解析モデルを用いて実施する。Fig. 2.2-5 に解析モデルを示す。要素総数 292、節点総数 1027 である。

## b. 境界条件

幾何学的境界条件はFig. 2.2-6 に示すとおり、ノズルの上端に入口配管との連続条件、上部鏡の下端に対称条件を入力する。

## (2) 解析方法

伝熱解析の供試体の温度分布から 25 ステップを選択し、これらを荷重条件とした熱応力解析を実施する。

伝熱解析と熱応力解析の計算ステップの対応をTable 2.2-2 に示す。

## (3) 解析結果

応力評価ラインと評価断面をFig. 2.2-7 に示す。評価断面に発生する応力の時刻履歴をFig. 2.2-8 に示す。また、構造物の表面に沿って設定した評価ラインの応力分布をFig. 2.2-9 に示す。応力は以下の記号を用いて示した。

- ① SIG-R : 全体座標系での  $\sigma_r$
- ② SIG-Z : 全体座標系での  $\sigma_z$
- ③ SIG-TH : 全体座標系での  $\sigma_\theta$
- ④ TAU-RZ : 全体座標系での  $\tau_{rz}$

上記の記号は、後述する全ての熱応力解析に共通である。

Table 2.2-1 Heat Transfer Analysis Step (Inlet Nozzle)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱過渡 領域 A (°C)	熱過渡 領域 B (°C)
1	0.0	600.000	600.000
29	COLD 8.0	325.000	600.000
34	18.0	275.000	562.500
43	40.0	258.000	480.000
47	60.0	257.000	444.000
53	90.0	255.500	390.000
56	120.0	254.000	360.000
58	135.0	253.250	345.000
61	200.0	250.000	315.000
63	265.0	250.000	300.000
64	300.0	250.000	294.750
65	365.0	250.000	285.000
67	565.0	250.000	270.000
68	600.0	250.000	268.510
69	800.0	250.000	260.000
70	1035.0	250.000	250.000
71	1200.0	250.000	250.000
73	1800.0	250.000	250.000
76	3600.0	250.000	250.000
101	HOT 6.0	500.000	284.500
110	20.0	560.000	365.000
122	40.0	581.765	480.000
125	54.0	597.000	507.067
127	60.0	597.123	518.667
129	70.0	597.328	538.000
131	120.0	598.356	554.923
132	135.0	598.664	560.000
133	200.0	600.000	562.864
134	300.0	600.000	567.271
135	430.0	600.000	573.000
136	560.0	600.000	582.000
137	600.0	600.000	583.333
138	800.0	600.000	590.000
139	1100.0	600.000	600.000
140	1200.0	600.000	600.000
142	1800.0	600.000	600.000
145	3600.0	600.000	600.000
148	7200.0	600.000	600.000

Table 2.2-2 Thermal Stress Analysis Step (Inlet Nozzle)

熱応力解析 インターバル番号	インターバル内 ステップ数	伝熱解析 ステップ	経過時間 (sec)
1	1	1	0.000
2	1	15	4.000
3	1	22	6.000
4	1	29	8.000
5	1	31	12.000
6	1	34	18.000
7	1	37	25.333
8	1	40	32.667
9	1	43	40.000
10	1	47	60.000
11	1	51	80.000
12	1	56	120.000
13	1	58	135.000
14	1	61	200.000
15	1	76	3600.000
16	1	91	3603.600
17	1	96	3604.800
18	1	101	3606.000
19	1	105	3612.222
20	1	110	3620.000
21	1	116	3630.000
22	1	120	3636.667
23	1	125	3654.000
24	1	130	3695.000
25	1	133	3800.000

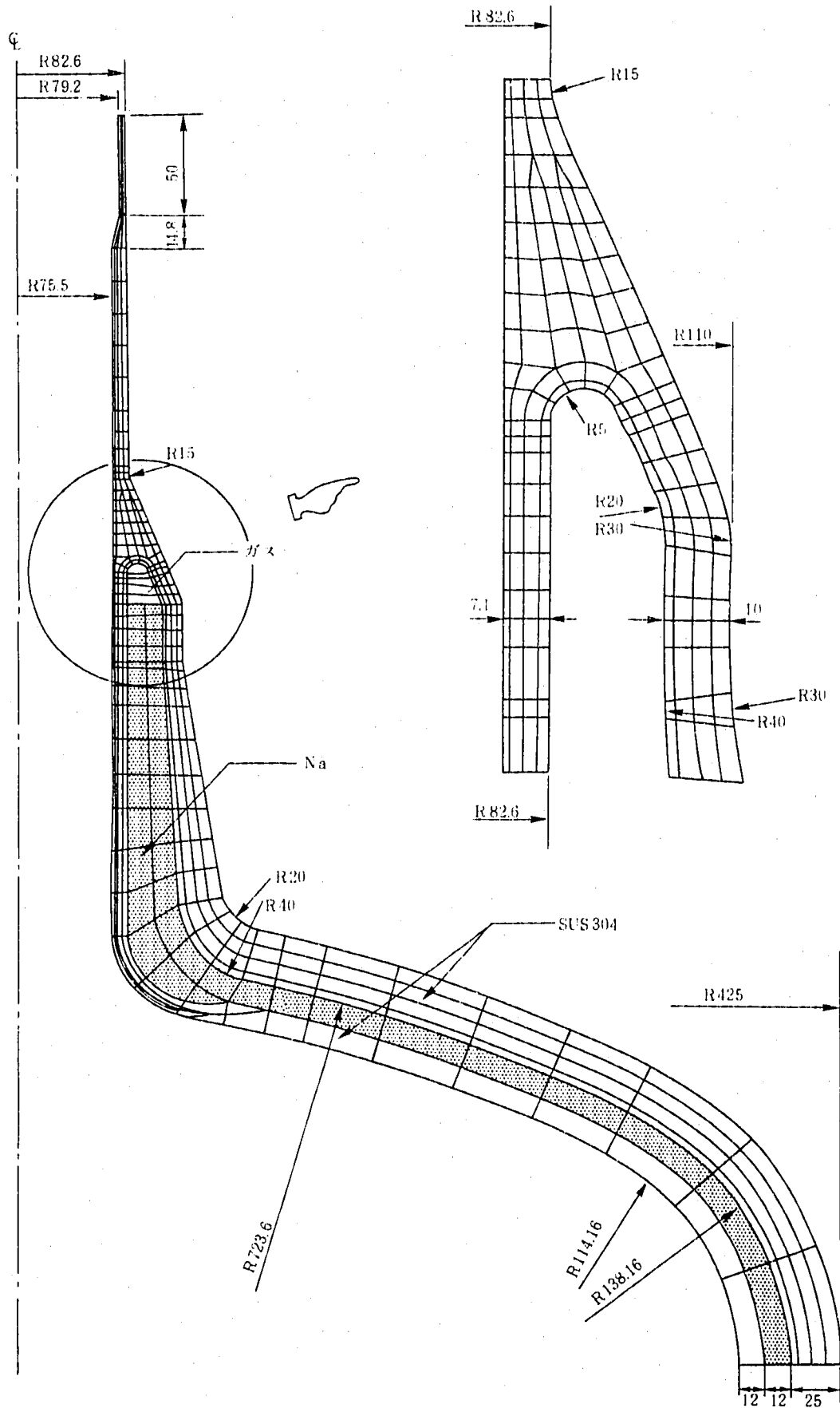


Fig. 2.2-1 Heat Transfer Analysis Model (Inlet Nozzle)

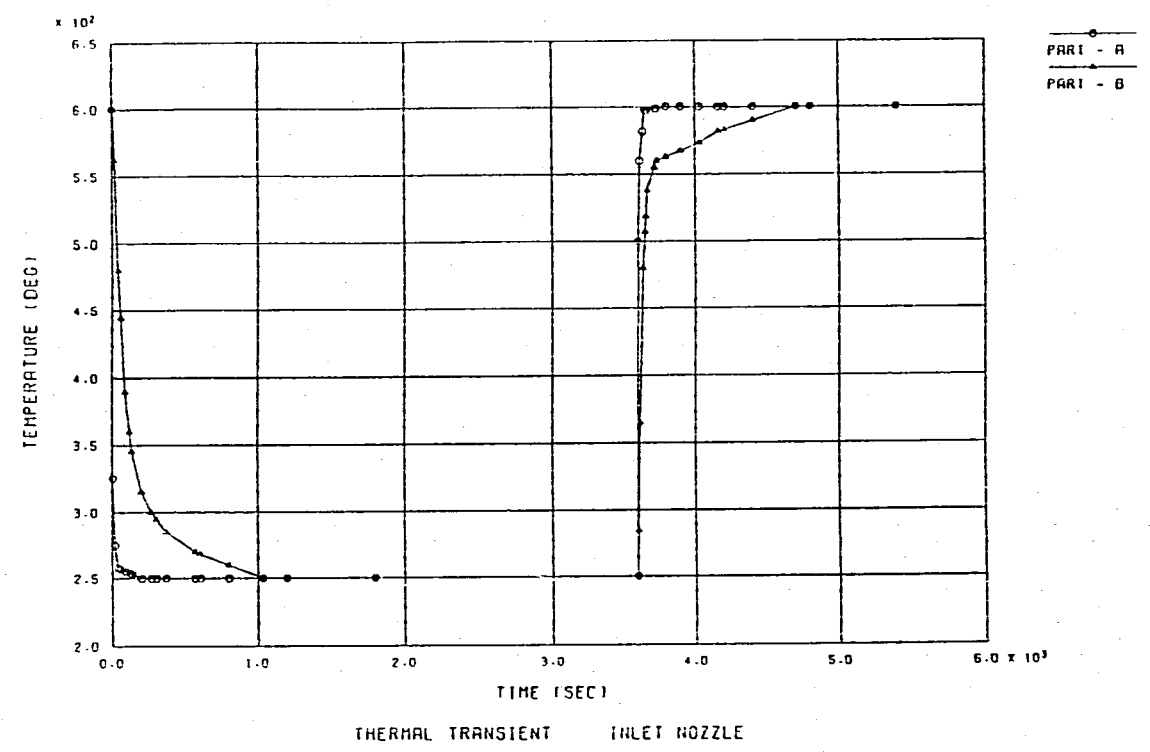
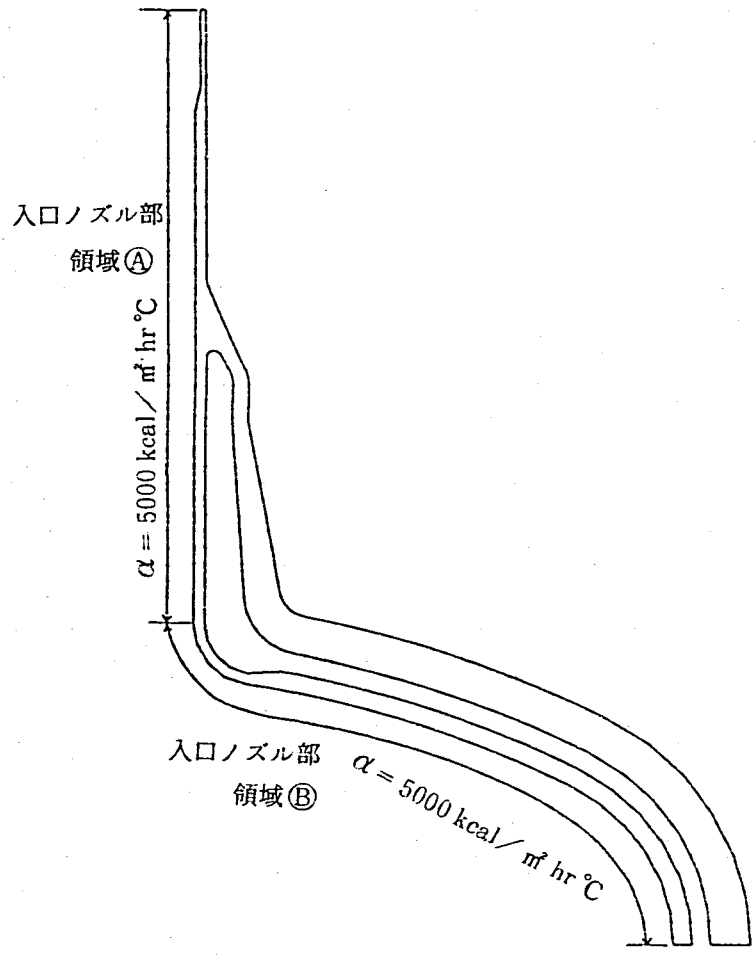
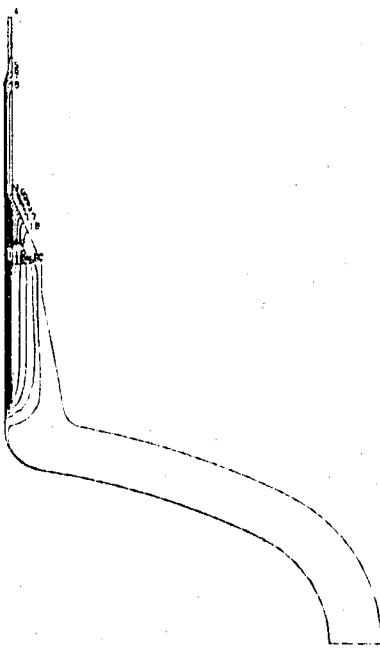


Fig. 2.2-2 Boundary Condition for Htransfer Analysis (Inlet Nozzle)

FINES  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES  
1 240.0000  
2 260.0000  
3 280.0000  
4 300.0000  
5 320.0000  
6 340.0000  
7 360.0000  
8 380.0000  
9 400.0000  
10 420.0000  
11 440.0000  
12 460.0000  
13 480.0000  
14 500.0000  
15 520.0000  
16 540.0000  
17 560.0000  
18 580.0000  
19 600.0000  
20 620.0000



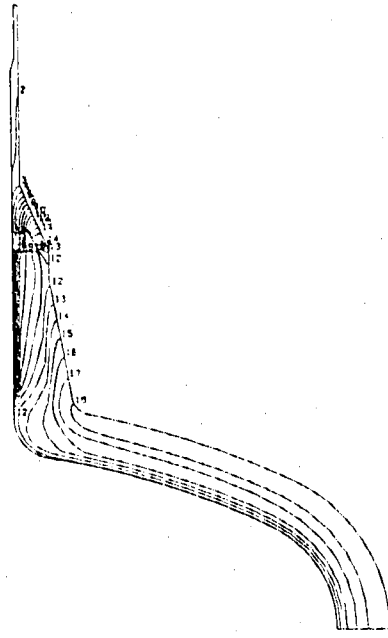
STEP NO. 34

GEOM. SCALE 1 80.0000

INLET NOZZLE TEMPERATURE (C) 60 SEC (1)

FINES  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES  
1 240.0000  
2 260.0000  
3 280.0000  
4 300.0000  
5 320.0000  
6 340.0000  
7 360.0000  
8 380.0000  
9 400.0000  
10 420.0000  
11 440.0000  
12 460.0000  
13 480.0000  
14 500.0000  
15 520.0000  
16 540.0000  
17 560.0000  
18 580.0000  
19 600.0000  
20 620.0000



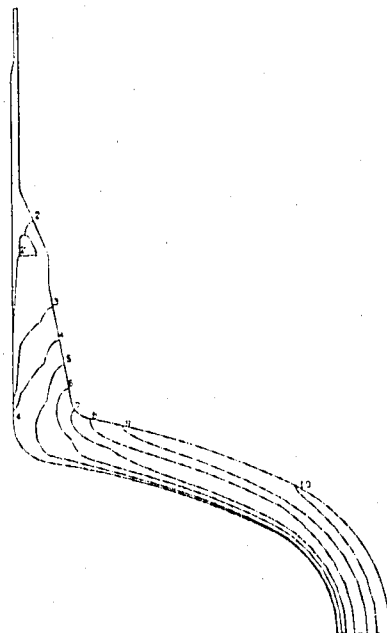
STEP NO. 42

GEOM. SCALE 1 80.0000

INLET NOZZLE TEMPERATURE (C) 60 SEC (1)

FINES  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES  
1 240.0000  
2 260.0000  
3 280.0000  
4 300.0000  
5 320.0000  
6 340.0000  
7 360.0000  
8 380.0000  
9 400.0000  
10 420.0000  
11 440.0000  
12 460.0000  
13 480.0000  
14 500.0000  
15 520.0000  
16 540.0000  
17 560.0000  
18 580.0000  
19 600.0000  
20 620.0000



STEP NO. 54

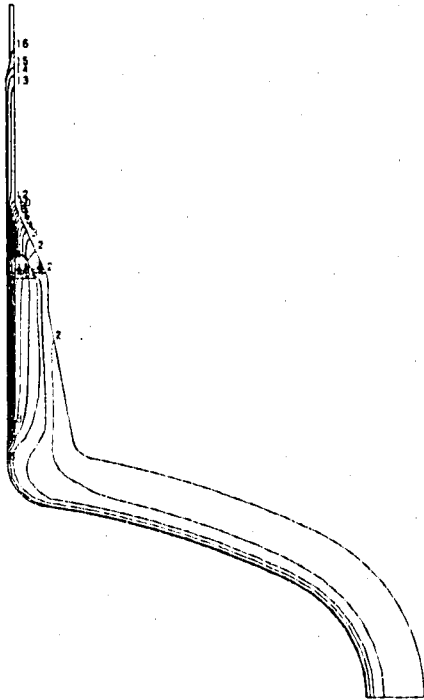
GEOM. SCALE 1 80.0000

INLET NOZZLE TEMPERATURE (C) 300 SEC (1)

Fig. 2.2-3(a) Temperature Contour (Inlet Nozzle)

FINAS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 250.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 450.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 550.0000
  - 18 580.0000
  - 19 620.0000
  - 20 620.0000

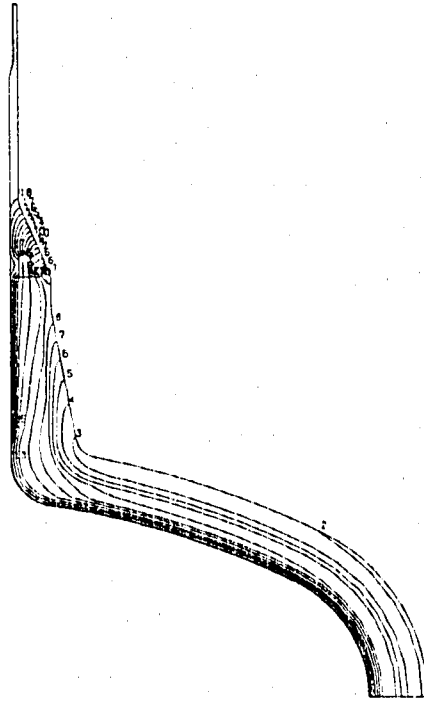


STEP NO. 110      GEOM. SCALE 1/100000

INLET NOZZLE TEMPERATURE (HOT 20 SEC )

FINAS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000

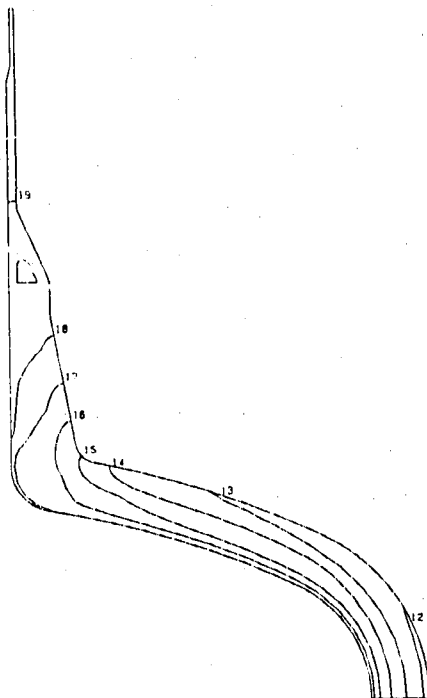


STEP NO. 120      GEOM. SCALE 1/100000

INLET NOZZLE TEMPERATURE (HOT 50 SEC )

FINAS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000



STEP NO. 134      GEOM. SCALE 1/100000

INLET NOZZLE TEMPERATURE (HOT 300 SEC )

Fig. 2.2-3(b) Temperature Contour (Inlet Nozzle)



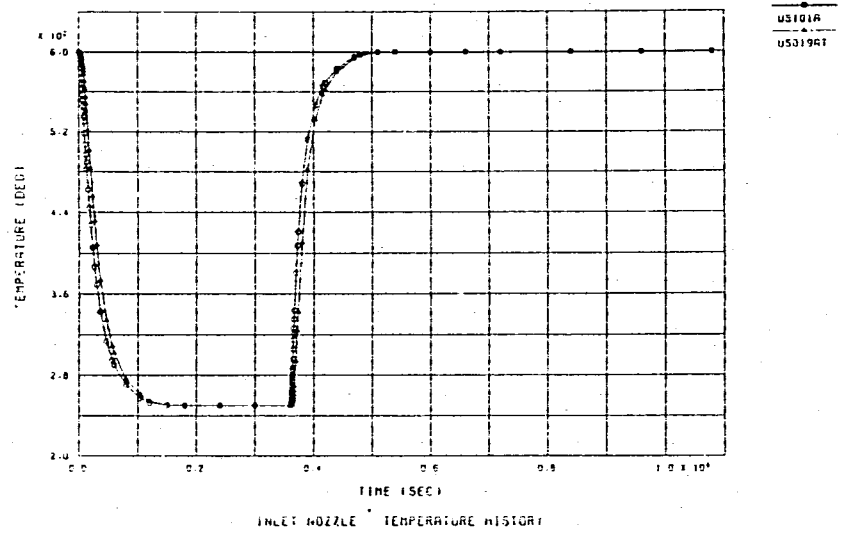
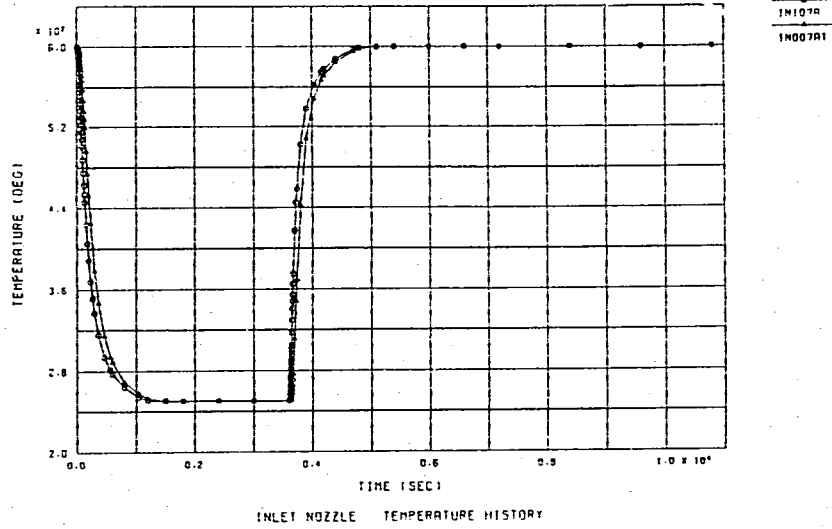
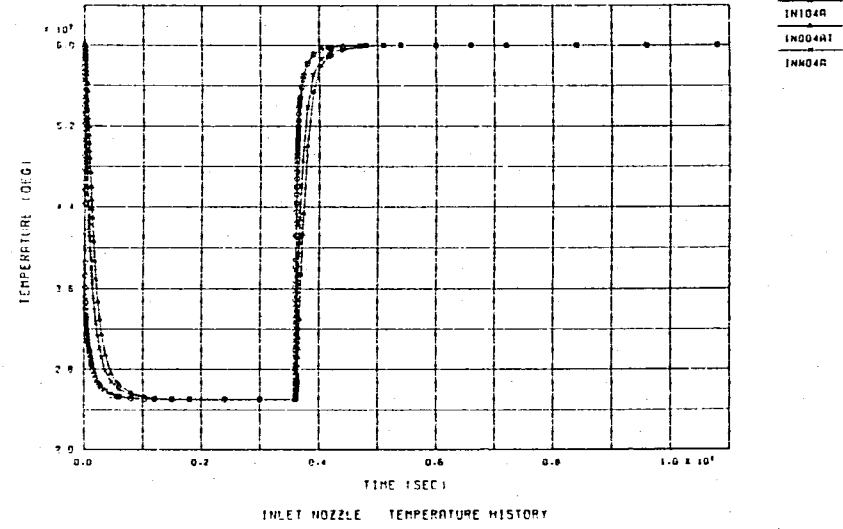
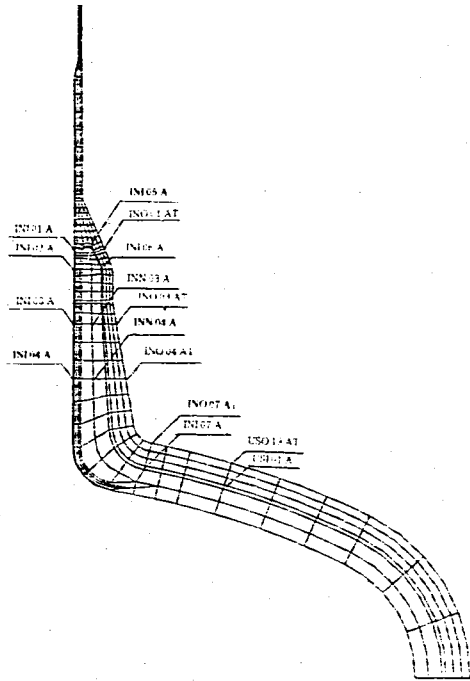
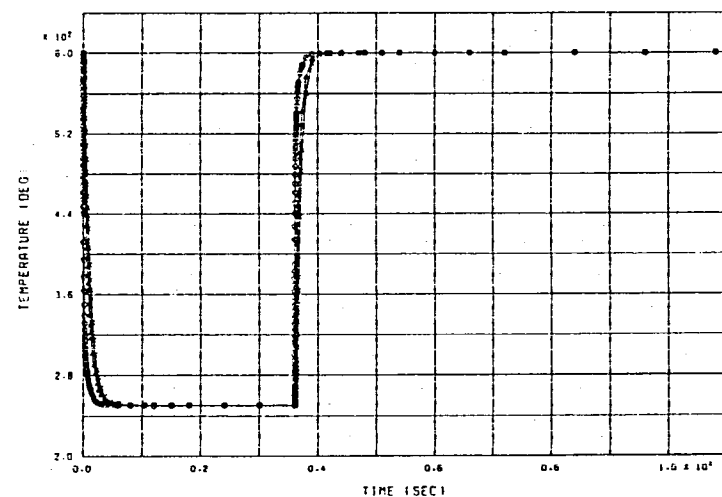
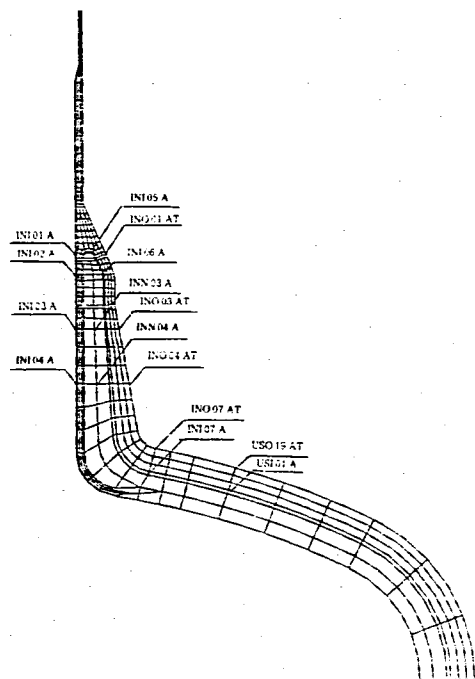
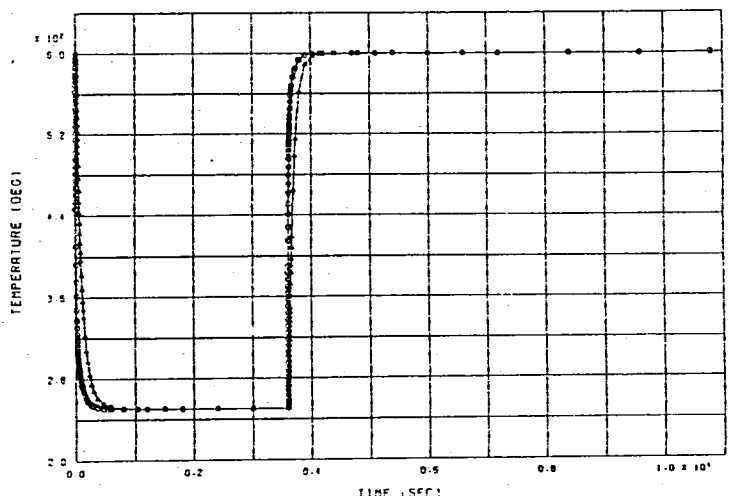


Fig. 2.2-4(a) Temperature History at Thermocouple Location (Inlet Nozzle)



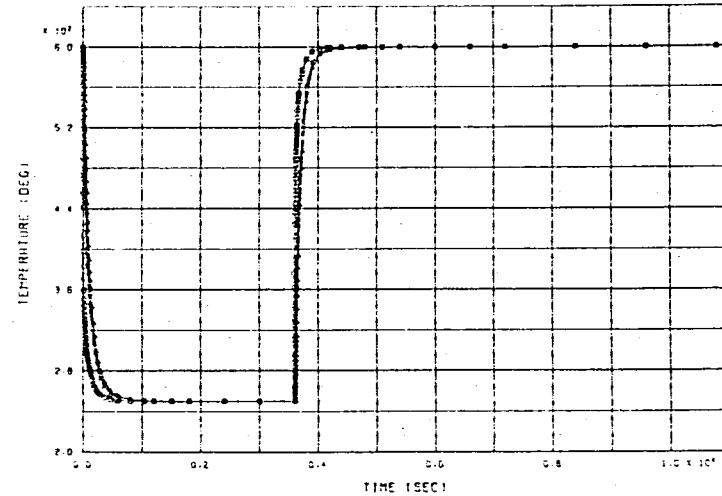
IN101A  
IN105A  
IN101AT

INLET NOZZLE TEMPERATURE HISTORY



IN102A  
IN106A

INLET NOZZLE TEMPERATURE HISTORY



IN103A  
IN103AT  
IN103A

INLET NOZZLE TEMPERATURE HISTORY

Fig. 2.2-4(b) Temperature History at Thermocouple Location (Inlet Nozzle)

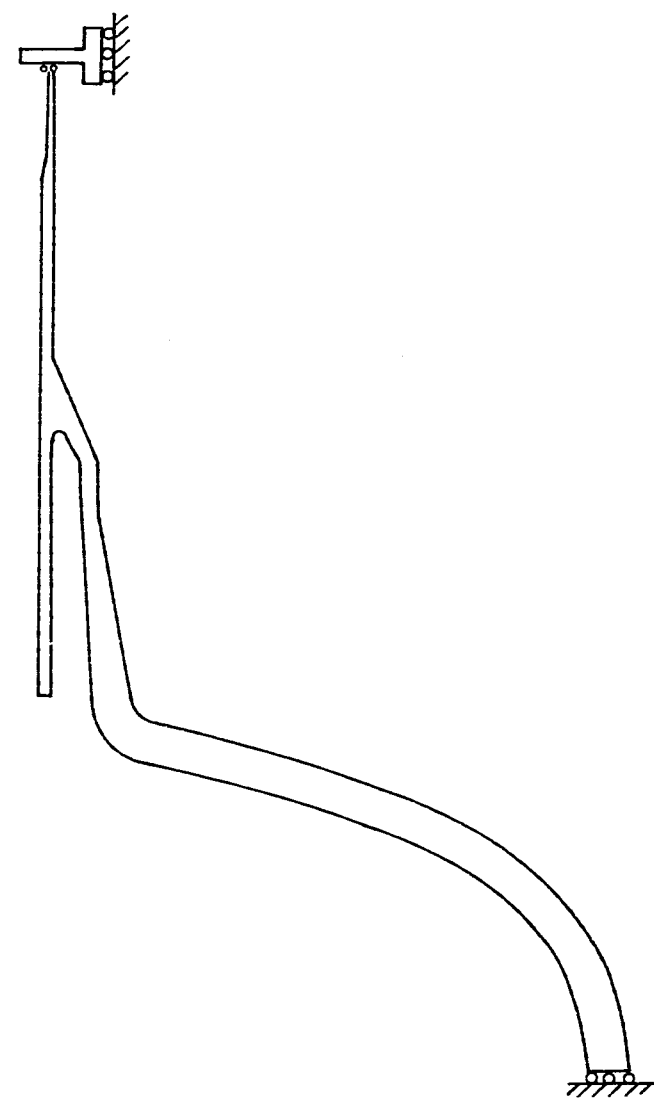
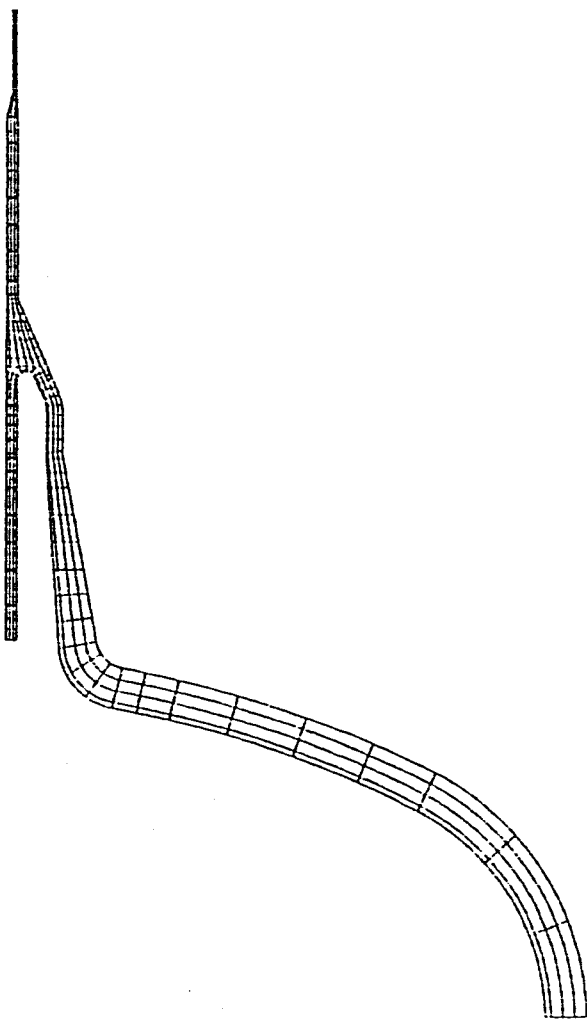


Fig.2.2-5 Thermal Stress Analysis Model(Inlet Nozzle) Fig.2.2-6 Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Inlet Nozzle)

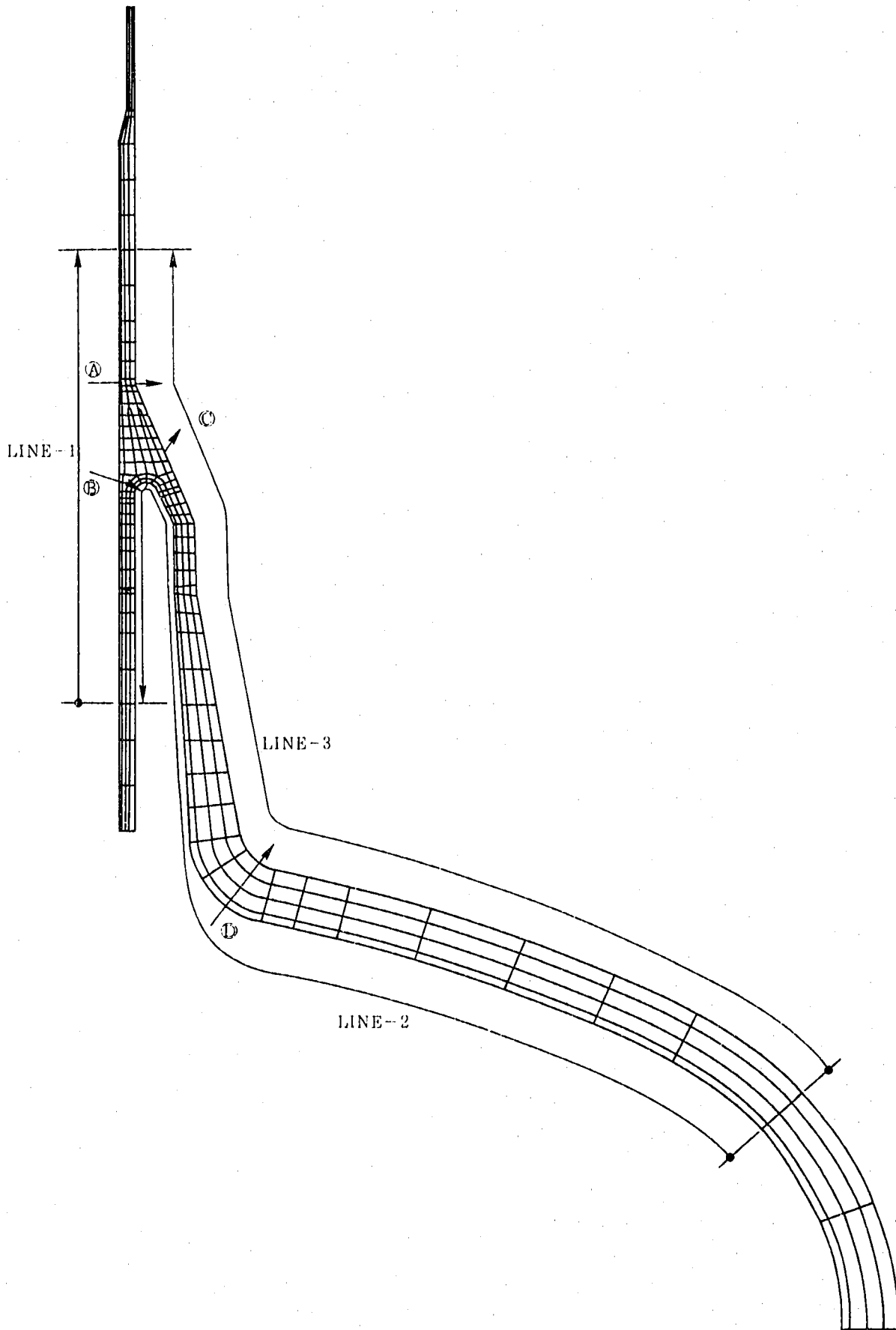


Fig. 2.2-7 Stress Estimation Line and Section (Inlet Nozzle)

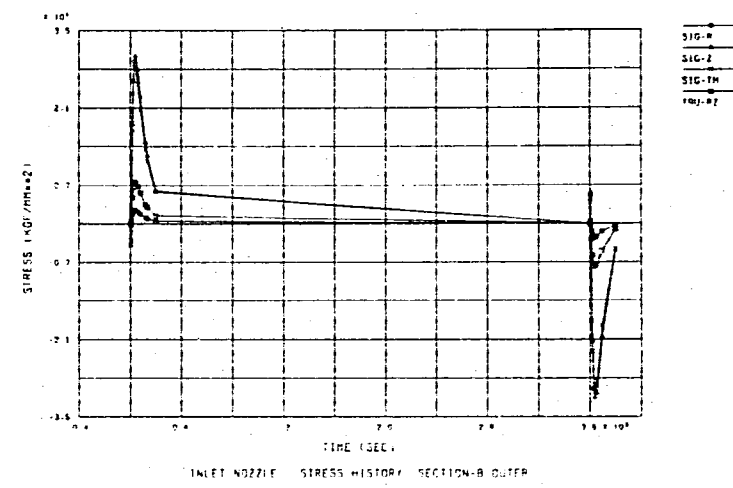
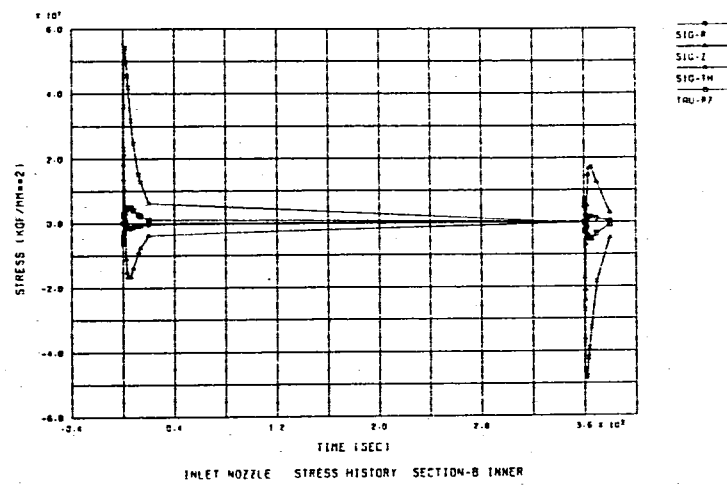
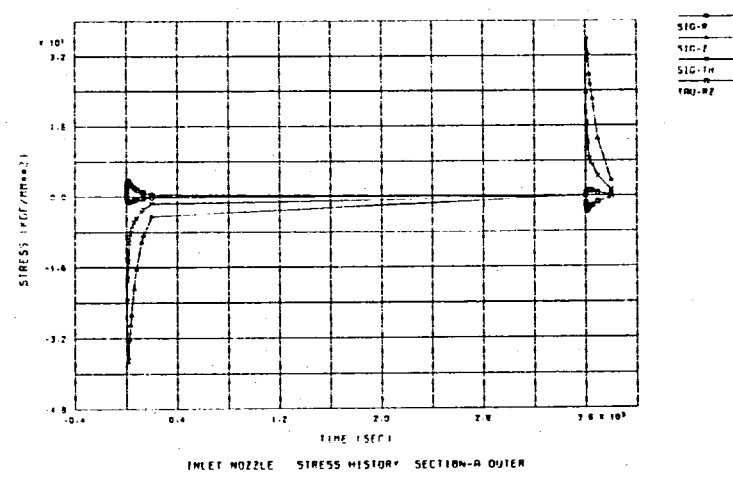
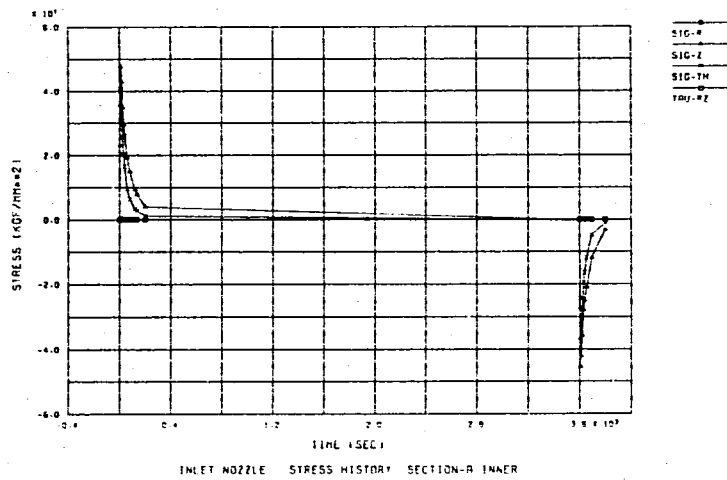


Fig. 2.2-8(a) Stress History (Inlet Nozzle)

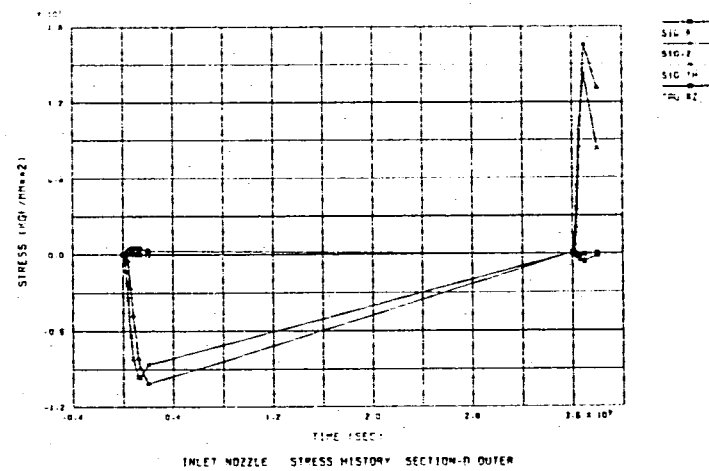
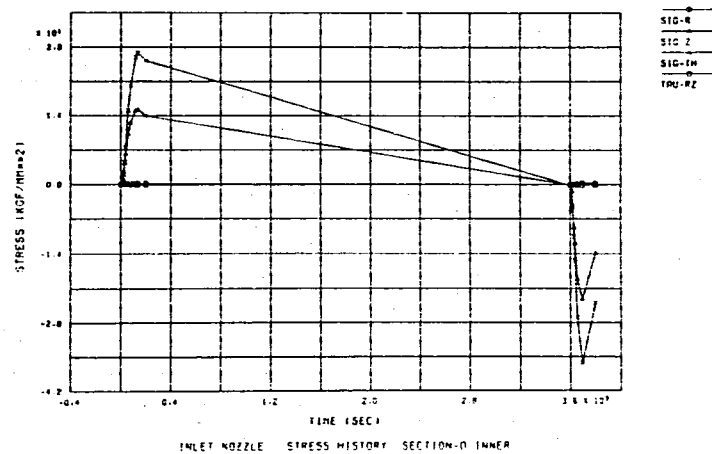
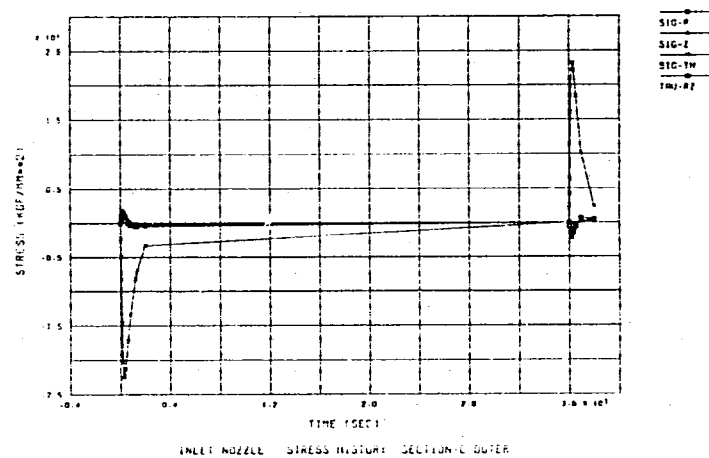
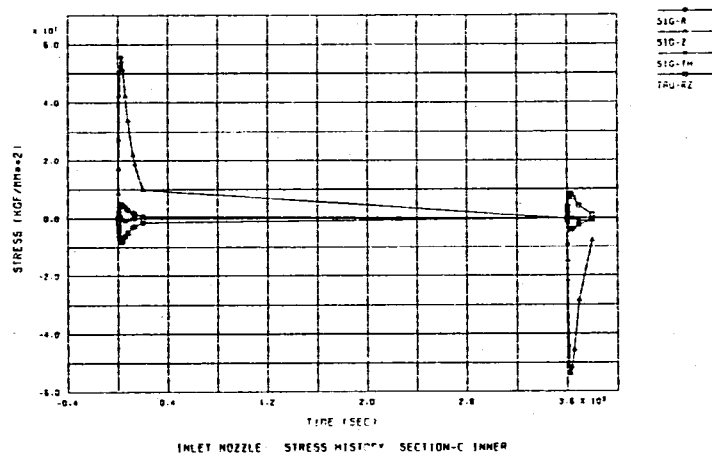
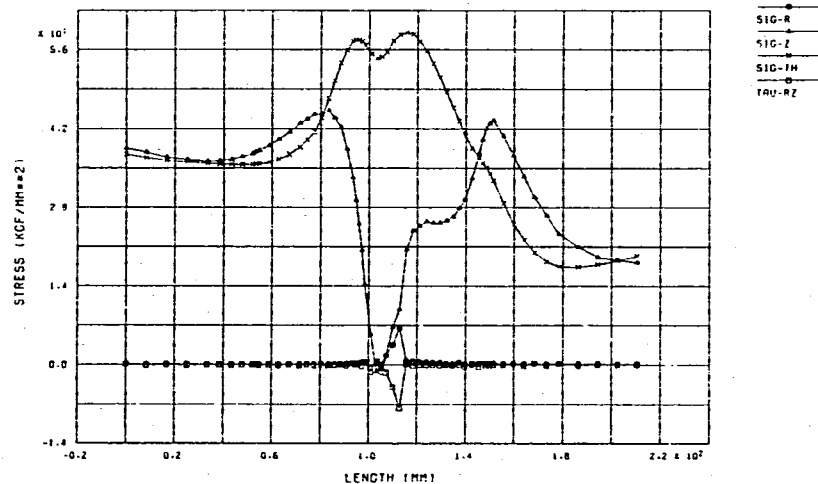
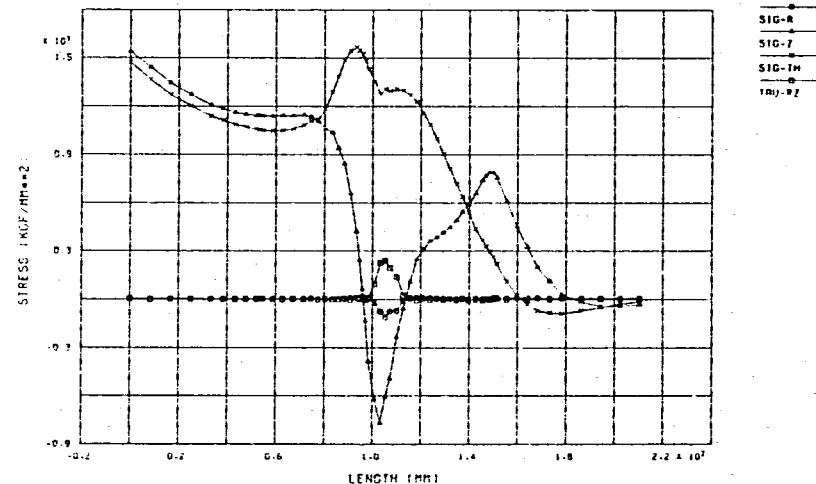


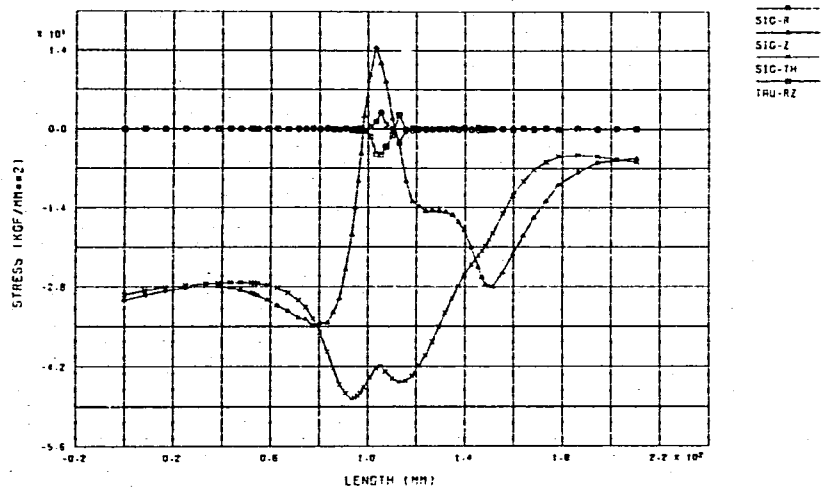
Fig. 2.2-8(b) Stress History (Inlet Nozzle)



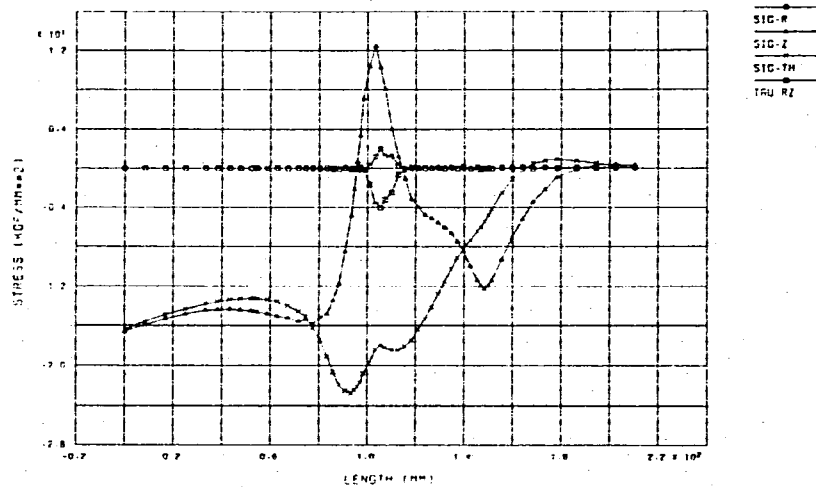
INLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-1 (COLD 10 SEC)



INLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-1 (COLD 135 SEC)



INLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-1 (HOT 30 SEC)



INLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-1 (HOT 55 SEC)

Fig. 2.2-9(a) Stress Distribution at Estimation Line (Inlet Nozzle)

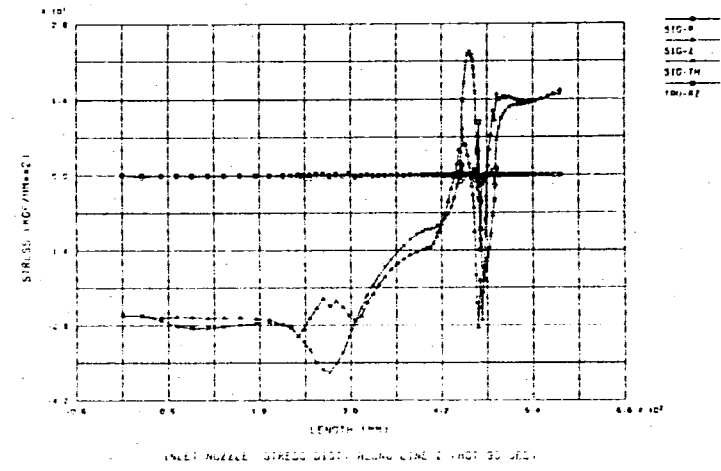
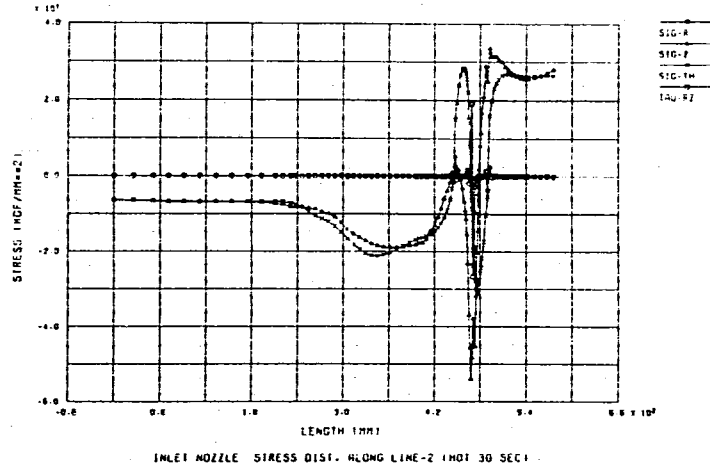
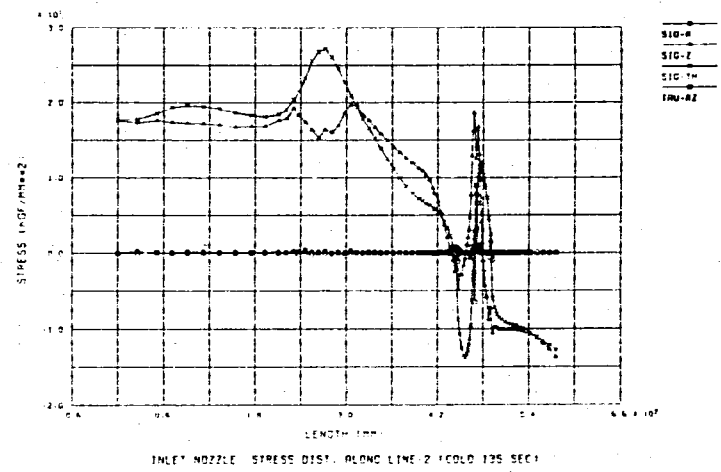
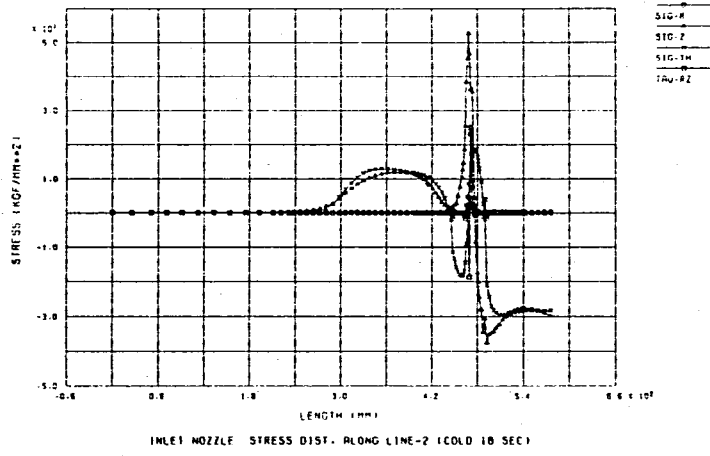


Fig. 2.2-9(b) Stress Distribution at Estimation Line (Inlet Nozzle)



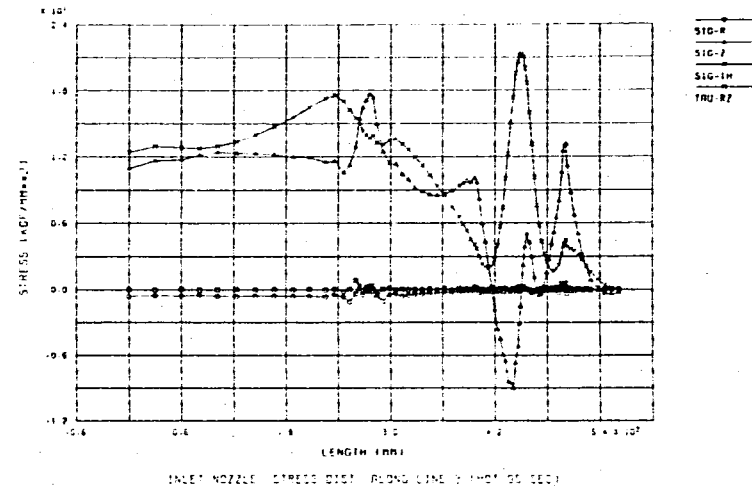
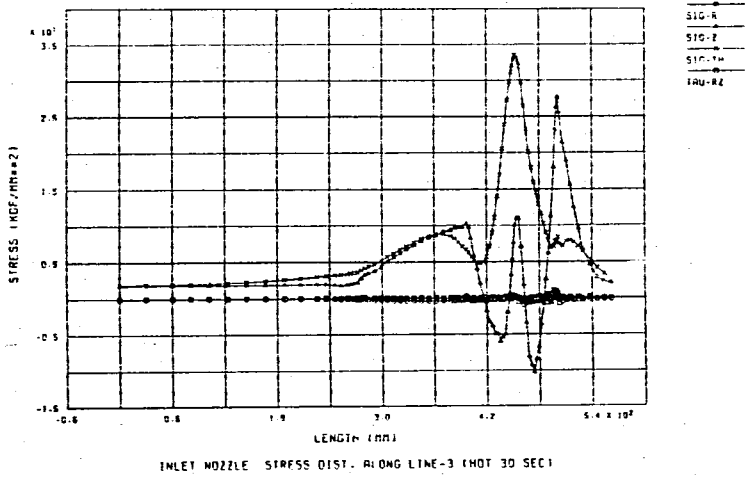
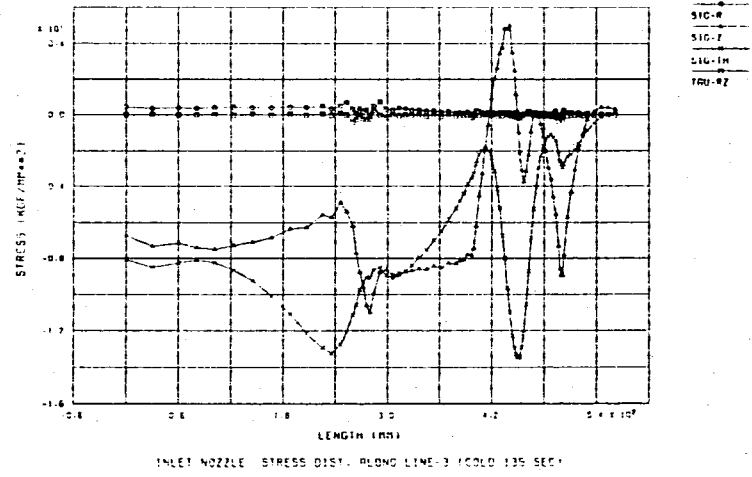
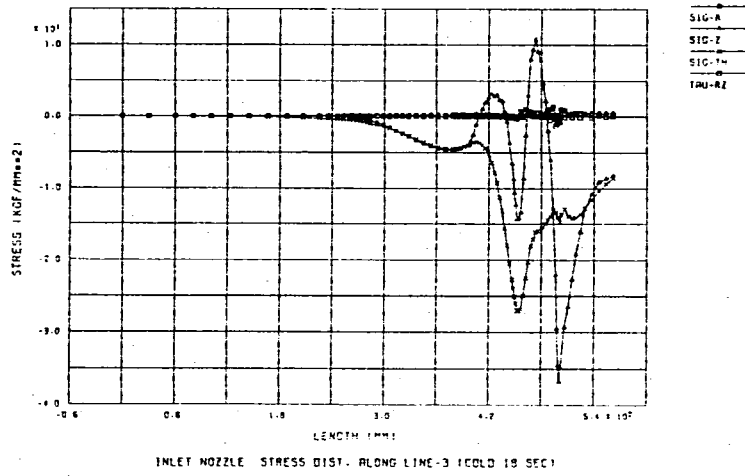


Fig. 2.2-9(c) Stress Distribution at Estimation Line (Inlet Nozzle)

## 2.3 上部ブロック

上部ブロックモデルは供試体構造の内、上部鏡から、中子支持フランジの上部までをモデル化したものである。

### 2.3.1 伝熱解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

上部ブロックモデルは、Fig. 2.1-2 に示す供試体構造の内、上部Yピース及び本体胴リングを含む上部鏡から中子支持フランジの上部までを解析範囲とし、荷重及び構造の対称性からFig. 2.3-1 に示すとおり軸対称要素を用いてモデル化する。要素総数 603 (内、熱伝達要素 153)、節点総数 1501 である。

供試体内面に設けられたサーマルライナ内のナトリウムは、スタグナントとして取り扱いナトリウムの熱伝導のみを考慮する。

供試体容器内面のサーマルライナは、6mm×2枚のSUS304製板材で、容器胴及びサーマルライナ間ギャップがそれぞれ6mmと成るように取付けられている。解析モデルでは、サーマルライナを12mm×1枚のSUS304の板とし、これと容器との間に12mmのナトリウム層をモデル化する。

##### b. 境界条件

伝熱解析用の熱的境界条件をFig. 2.3-2 に示す。境界条件は、第1報にて報告した伝熱流動解析から求めた熱過渡条件及び熱伝達率をサーマルライナ内面に与える。また、その他の面は断熱として取り扱う。

#### (2) 解析方法

伝熱解析は、上部Yピースや容器リングの温度応答が定常に達した後の温度分布を求めるため、Fig. 2.3-2 に示す熱過渡をコールド→ホットの順で4サイクル(計287ステップ)繰り返した。最終サイクルの解析ステップと経過時間並びに熱過渡のデジタル値をTable 2.3-1 に示す。

#### (3) 解析結果

解析結果として、温度分布図をFig. 2.3-3 に、また、熱電対設置位置における温度履歴をFig. 2.3-4 に示す。

### 2.3.2 熱応力解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

熱応力解析は、伝熱解析モデルからサーマルライナ、スタグナントナトリウム及び熱伝達要素を除いた解析モデルを用いて実施した。解析モデルをFig. 2.3-5

に示す。要素総数 3 6 0、節点総数 1 2 2 7 である。

b. 境界条件

幾何学的境界条件はFig. 2.3-6 に示すとおり、上部鏡の上端に連続条件、本体胴の下端に対称条件を入力した。

(2) 解析方法

伝熱解析の最終サイクル（1 1 9 ステップ）の供試体の温度分布から 2 4 ステップを選択し、これらを荷重条件とした熱応力解析を実施する。

伝熱解析と熱応力解析の計算ステップの対応をTable 2.3-2 に示す。

(3) 解析結果

応力評価ライン及び評価断面をFig. 2.3-7 に示す。評価断面に発生する応力の時刻歴をFig. 2.3-8 に示す。また、構造物の表面に沿って設定した評価ラインの応力分布をFig. 2.3-9 に示す。応力を示す記号は入口ノズルと同様である。

Table 2.3-1 Heat Transfer Analysis Step (Upper Vessel)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱過渡 領域 C (°C)	熱過渡 領域 D (°C)
169	0.0	600.000	600.000
170	COLD 6.0	600.000	600.000
175	10.0	575.000	550.000
178	14.0	550.000	534.000
189	40.0	450.000	430.000
193	60.0	415.217	400.000
198	86.0	370.000	361.000
199	90.0	367.037	355.000
202	120.0	344.814	334.000
204	140.0	330.000	320.000
206	190.0	310.000	305.000
208	265.0	295.197	290.000
209	266.0	295.000	289.900
210	300.0	291.583	286.500
212	465.0	275.000	270.000
213	600.0	268.955	265.970
214	800.0	260.000	260.000
215	1023.0	250.000	253.343
216	1135.0	250.000	250.000
217	1200.0	250.000	250.000
219	1800.0	250.000	250.000
222	3600.0	250.000	250.000
223	HOT 5.0	250.000	250.000
230	8.0	314.000	250.000
236	15.0	350.000	309.706
245	25.0	400.000	395.000
248	30.0	425.000	410.000
252	40.0	460.000	440.000
258	58.0	500.000	494.000
259	60.0	502.222	500.000
263	85.0	530.000	530.555
264	87.0	530.588	533.000
266	120.0	540.294	546.062
267	135.0	544.706	552.000
268	136.0	545.000	552.163
269	184.0	552.500	560.000
270	200.0	555.000	560.727
271	300.0	562.500	565.272
272	360.0	567.000	568.000
273	400.0	570.000	572.800
274	460.0	574.500	580.000
276	600.0	585.000	585.353
277	800.0	590.000	593.000
278	983.0	594.575	600.000
279	1200.0	600.000	600.000
281	1800.0	600.000	600.000
284	3600.0	600.000	600.000
287	7200.0	600.000	600.000

Table 2.3-2 Thermal Stress Analysis Step (Upper Vessel)

熱応力解析 インターバル番号	インターバル内 ステップ数	伝熱解析 ステップ	経過時間 (sec)
1	1	169	0.000
2	1	191	50.000
3	1	200	100.000
4	1	204	140.000
5	1	206	190.000
6	1	208	265.000
7	1	210	300.000
8	1	213	600.000
9	1	215	1023.000
10	1	217	1200.000
11	1	219	1800.000
12	1	221	3000.000
13	1	222	3600.000
14	1	252	3640.000
15	1	263	3685.000
16	1	266	3720.000
17	1	268	3736.000
18	1	270	3800.000
19	1	272	3960.000
20	1	274	4060.000
21	1	276	4200.000
22	1	279	4800.667
23	1	281	5400.000
24	1	283	6600.000

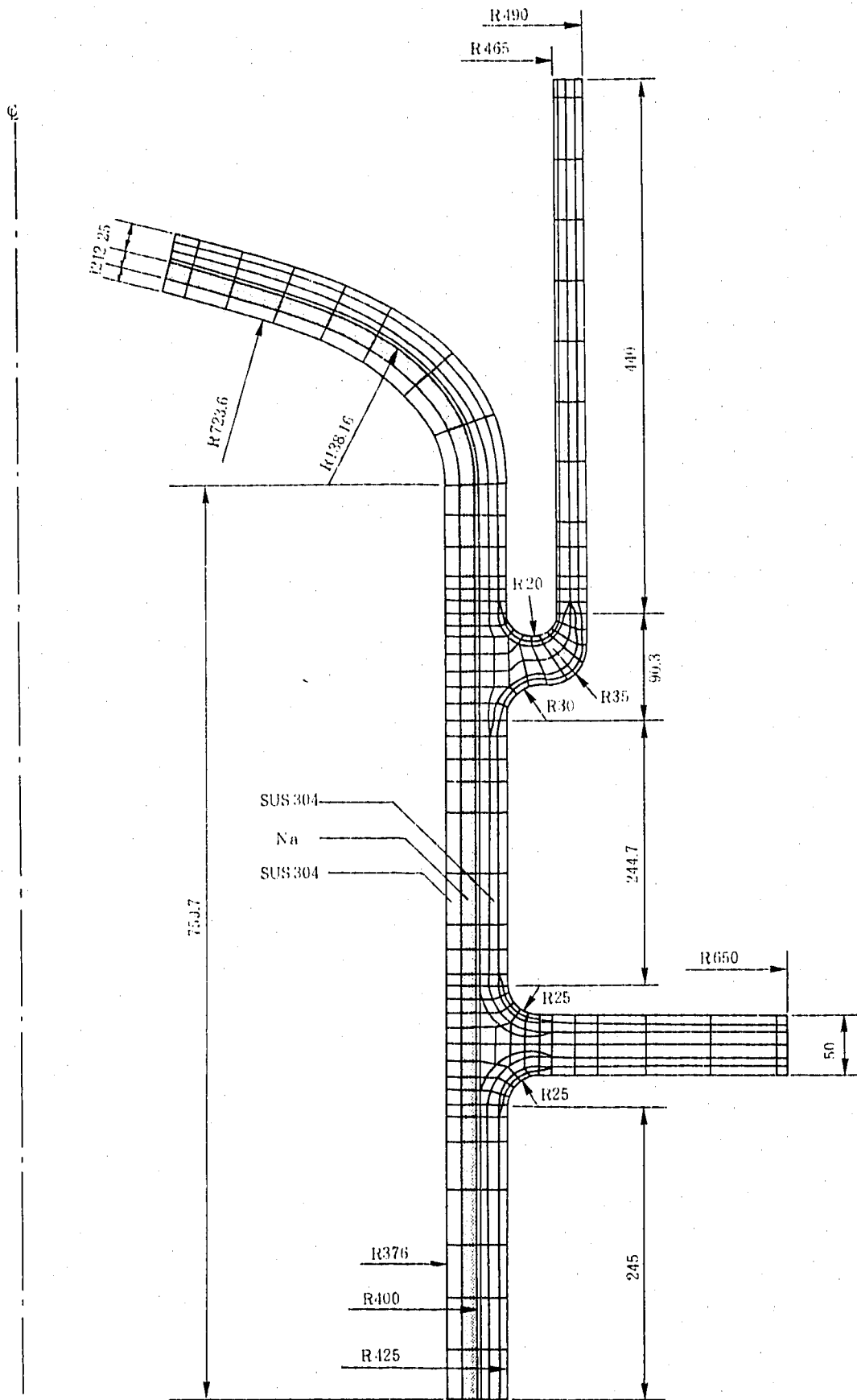


Fig.2.3-1 Heat Transfer Analysis Model (Upper Vessel)

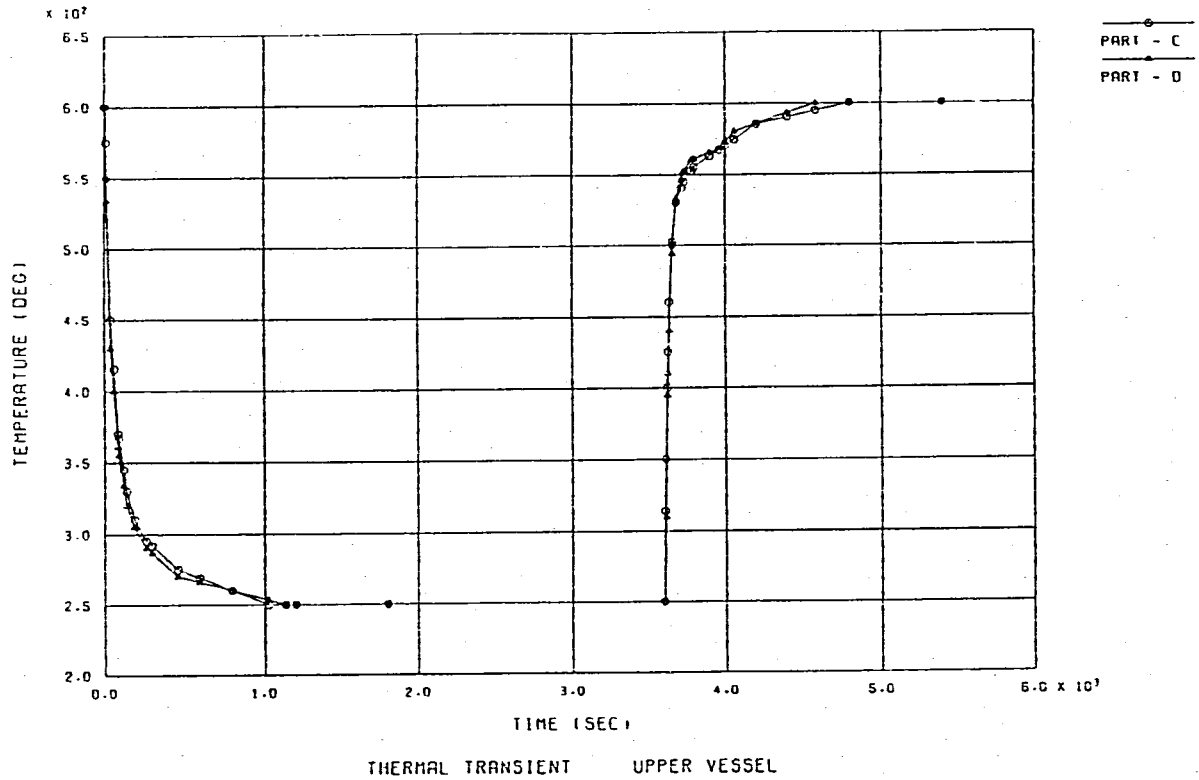
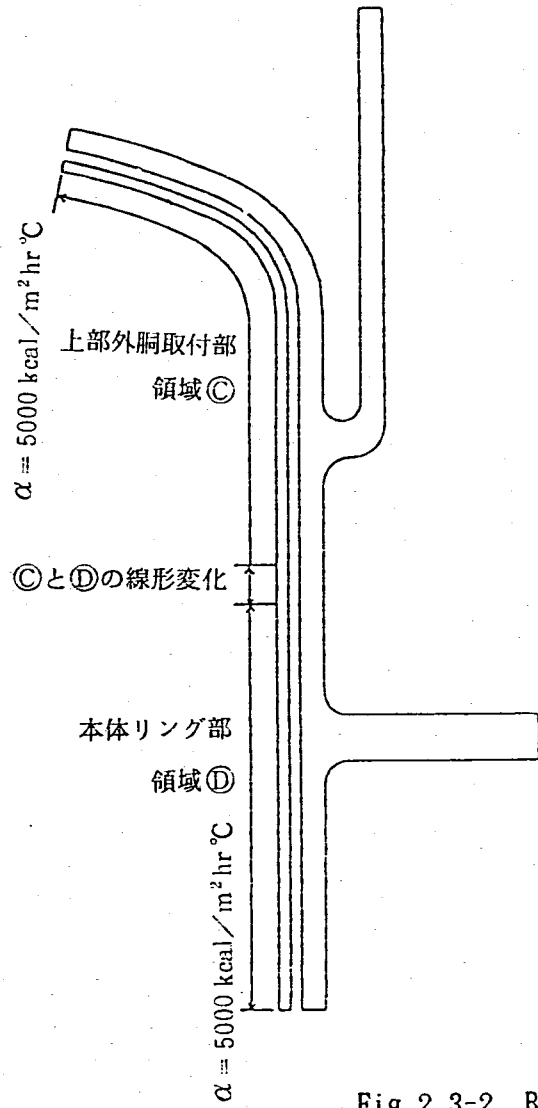
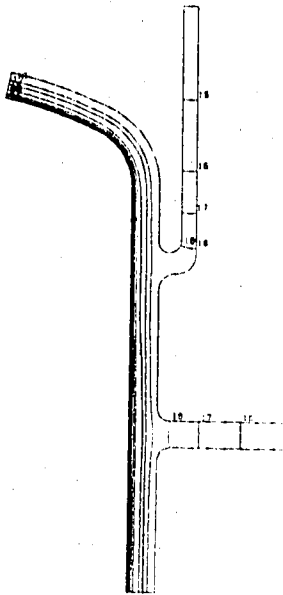


Fig. 2.3-2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Upper Vessel)

FINES  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	240.0000
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	320.0000
6	340.0000
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	420.0000
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000

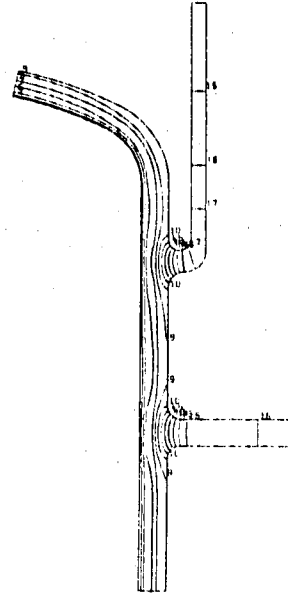


STEP NO. 123      GEOM. SCALE \_\_\_\_\_ 150.000  
UPPER VESSEL    TEMPERATURE | COLD    40 SEC |

FINES  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	240.0000
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	320.0000
6	340.0000
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	420.0000
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000

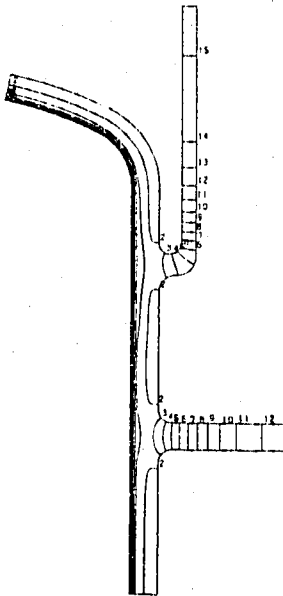


STEP NO. 124      GEOM. SCALE \_\_\_\_\_ 150.000  
UPPER VESSEL    TEMPERATURE | COLD    300 SEC |

FINES  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	240.0000
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	320.0000
6	340.0000
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	420.0000
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000

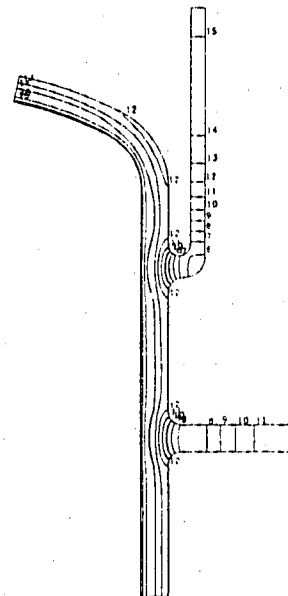


STEP NO. 246      GEOM. SCALE \_\_\_\_\_ 150.000  
UPPER VESSEL    TEMPERATURE | HOT    30 SEC |

FINES  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	240.0000
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	320.0000
6	340.0000
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	420.0000
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000



STEP NO. 247      GEOM. SCALE \_\_\_\_\_ 150.000  
UPPER VESSEL    TEMPERATURE | HOT    300 SEC |

Fig. 2.3-3 Temperature Contour (Upper Vessel)



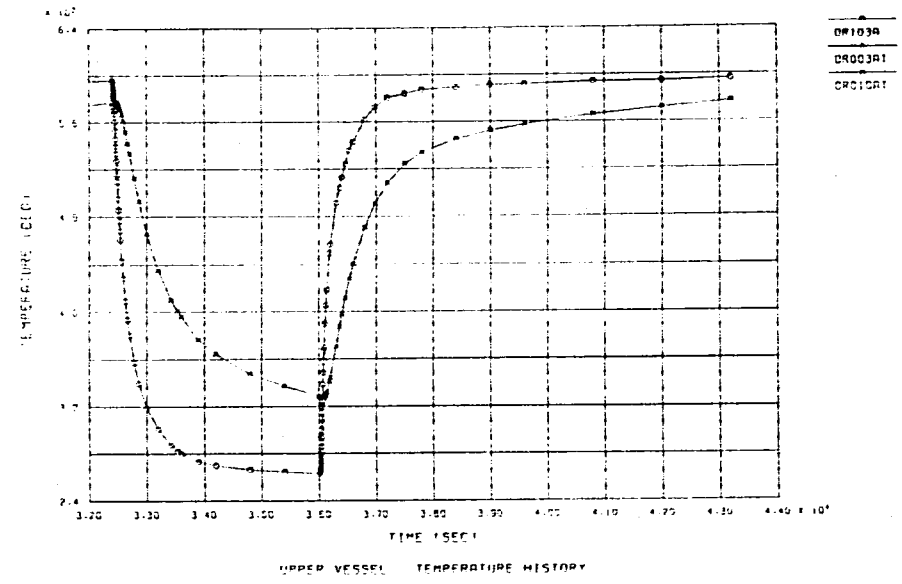
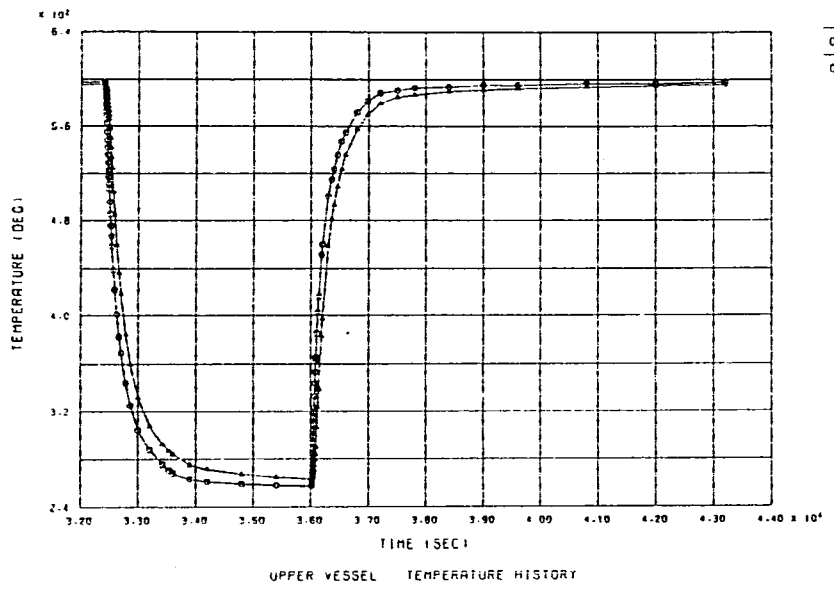
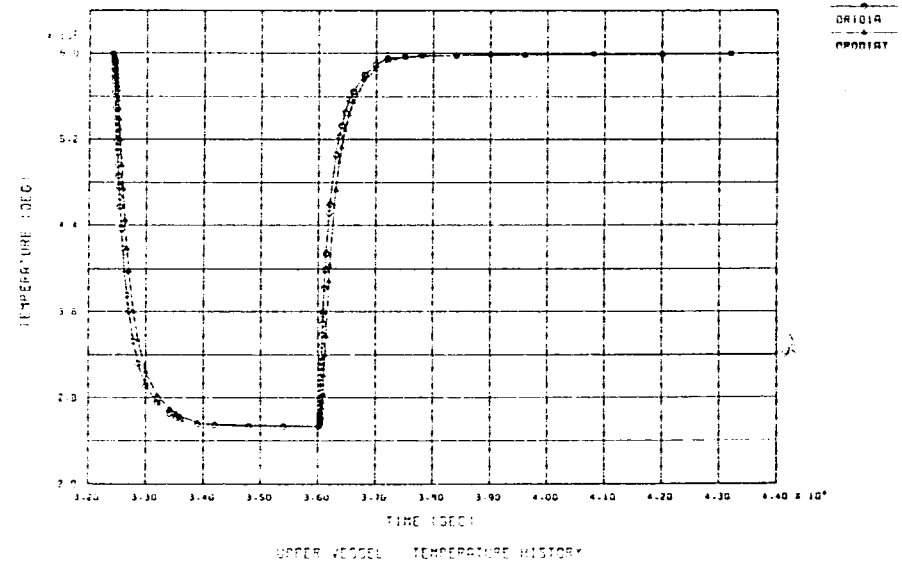
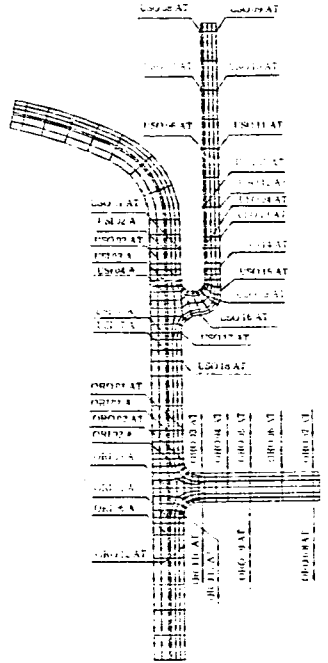


Fig. 2.3-4(a) Temperature History at Thermocouple Location (Upper Vessel)

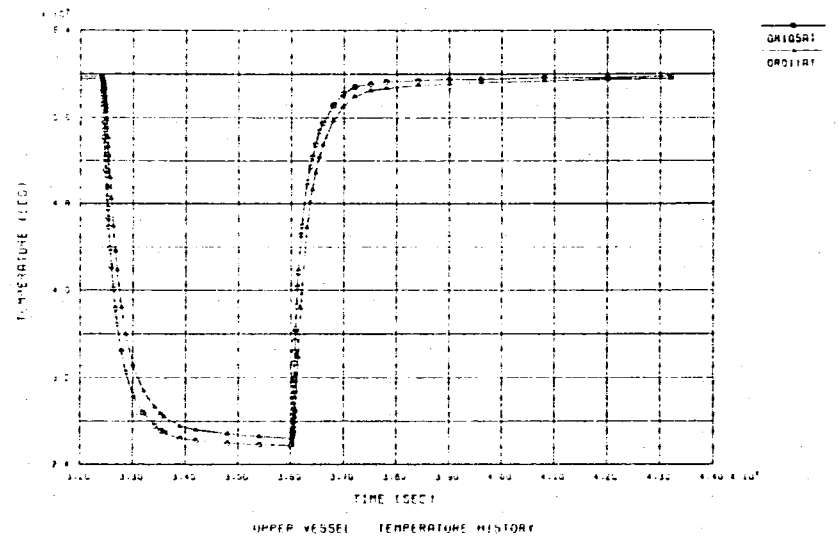
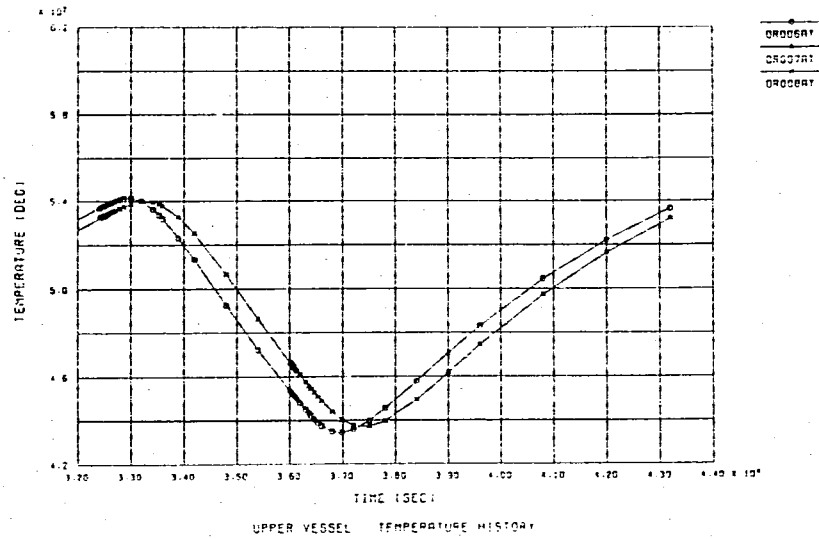
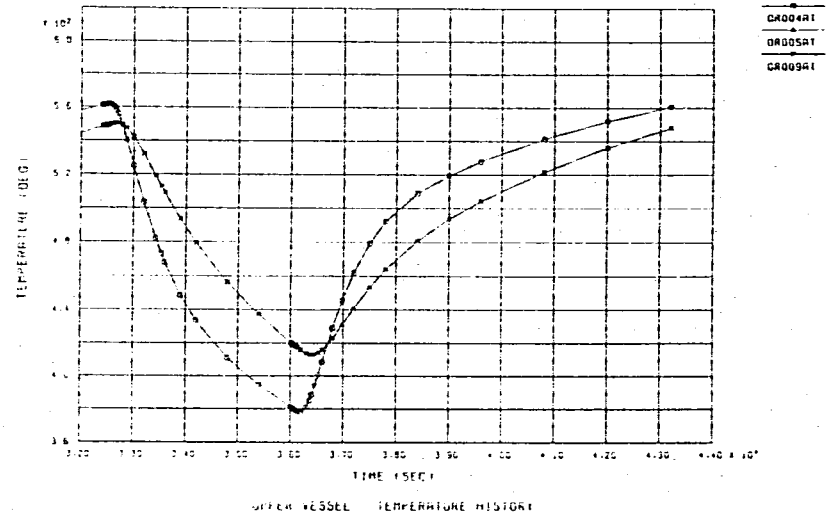
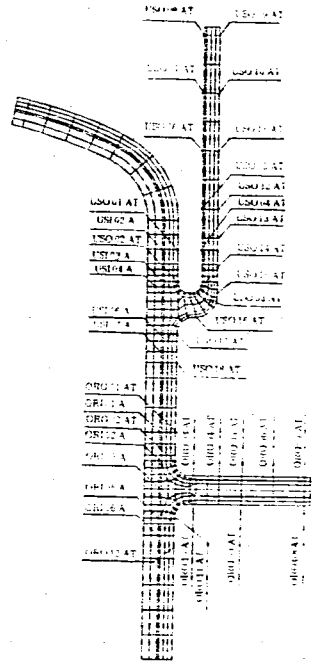
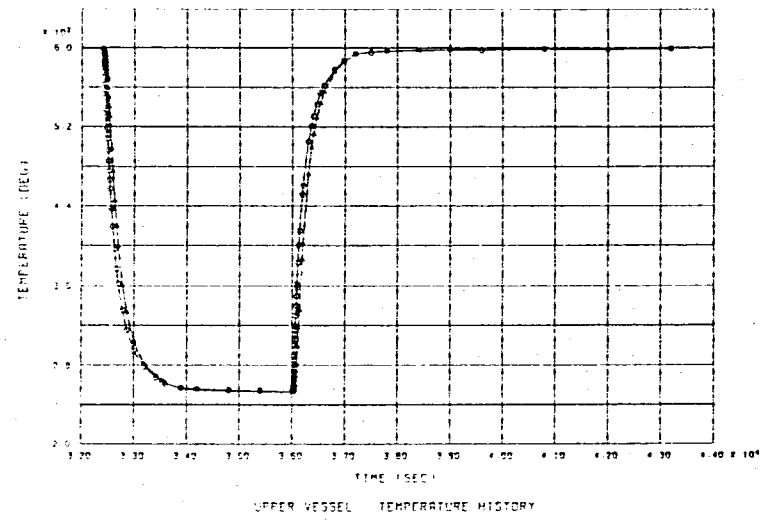
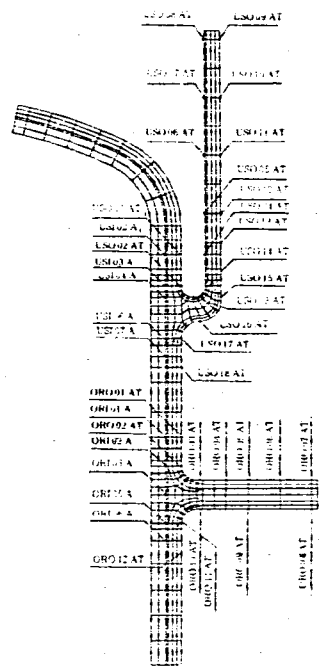
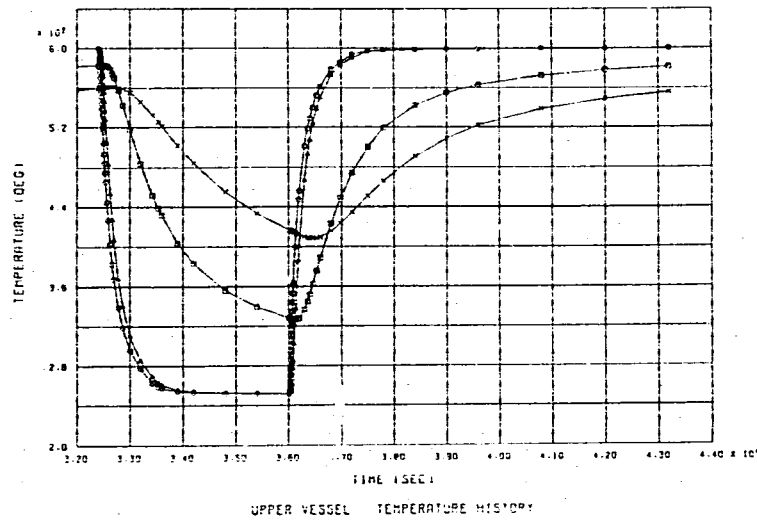


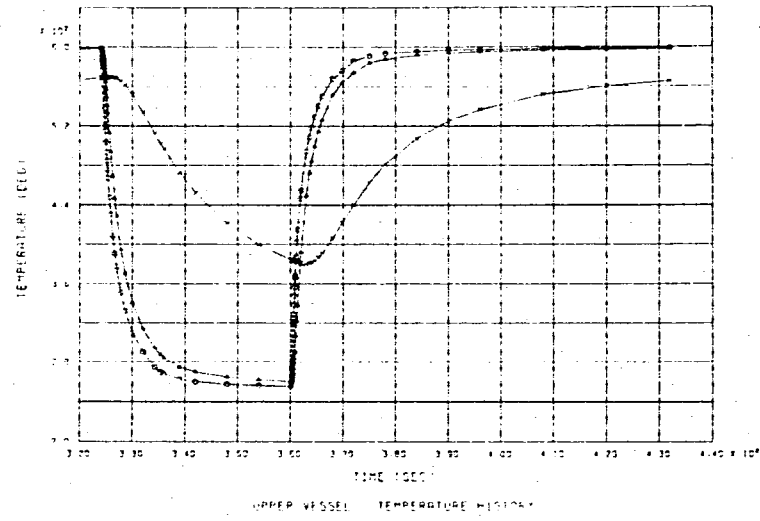
Fig. 2.3-4(b) Temperature History at Thermocouple Location (Upper Vessel)



OR108AT  
OR012AT

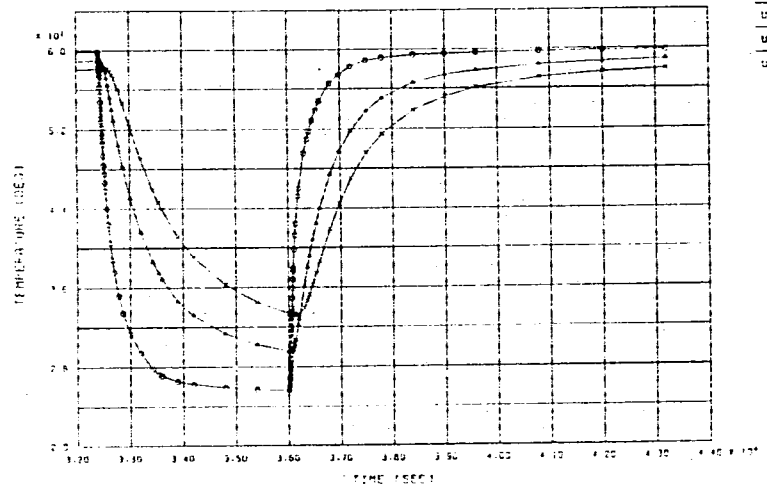
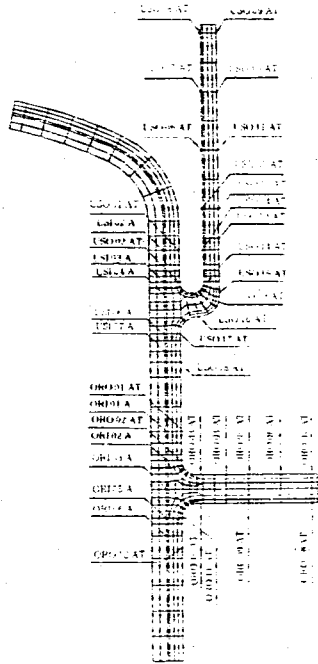


US102A  
US001AT  
US004AT  
US013AT

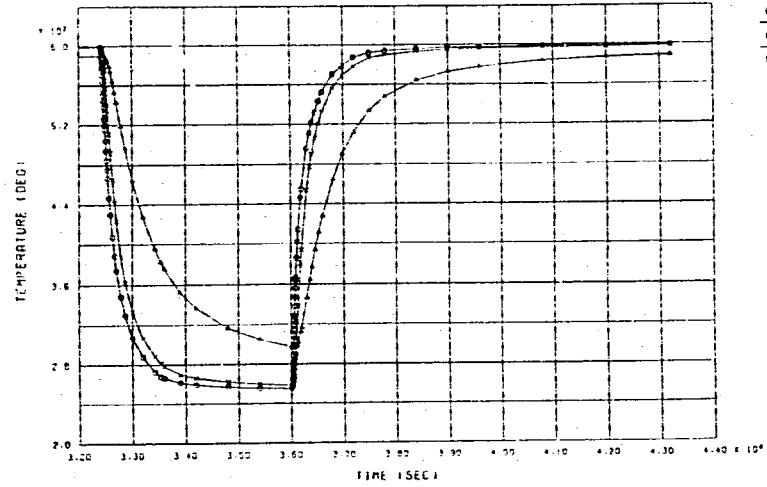


US103A  
US002AT  
US014AT

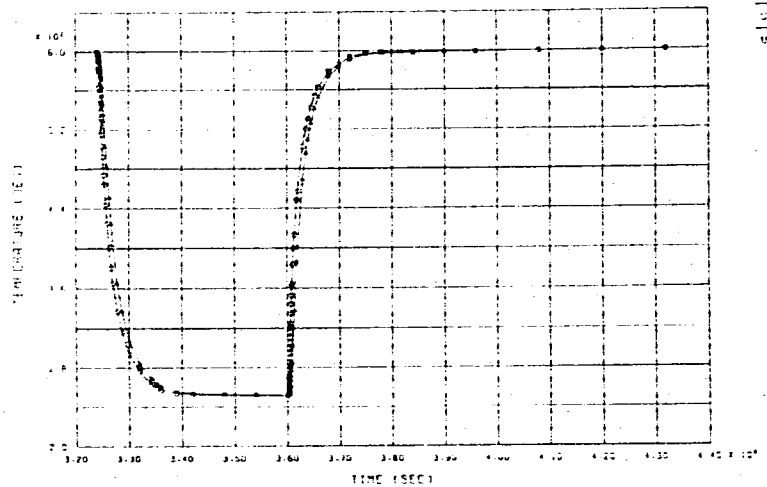
Fig. 2.3-4(c) Temperature History at Thermocouple Location (Upper Vessel)



UPPER VESSEL TEMPERATURE HISTORY



UPPER VESSEL TEMPERATURE HISTORY



UPPER VESSEL TEMPERATURE HISTORY

Fig. 2.3-4(d) Temperature History at Thermocouple Location (Upper Vessel)

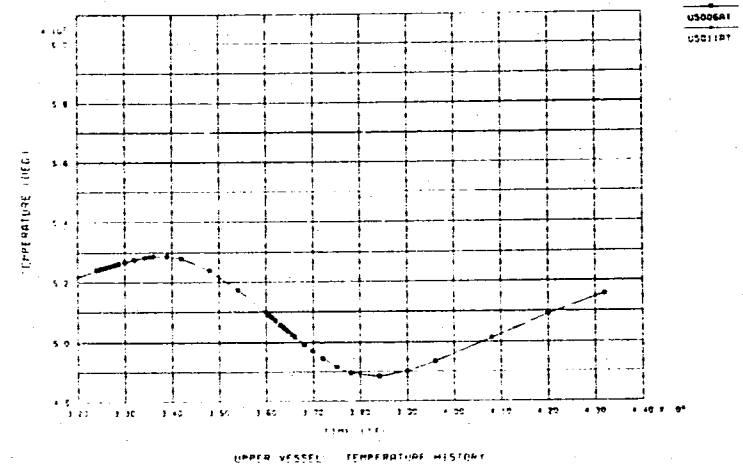
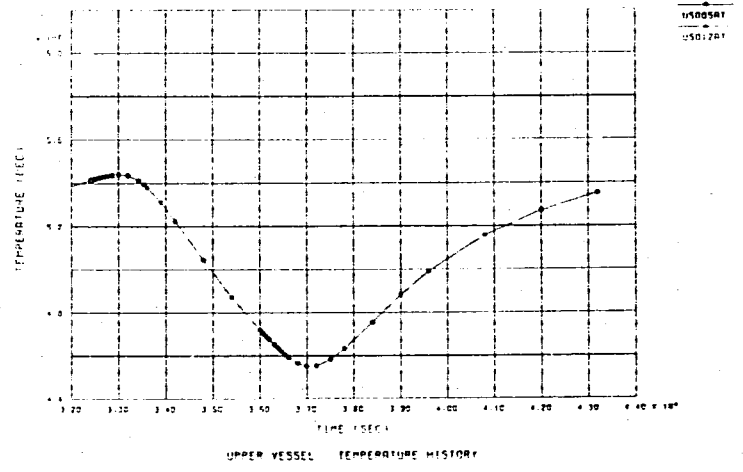
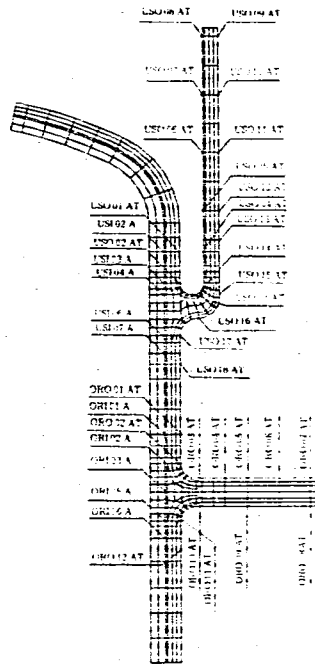


Fig. 2.3-4(e) Temperature History at Thermocouple Location (Upper Vessel)

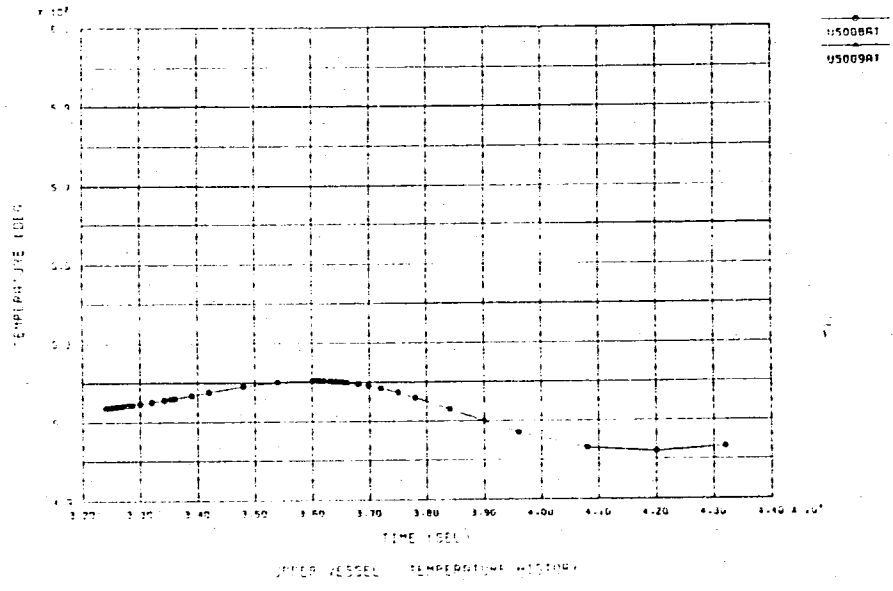
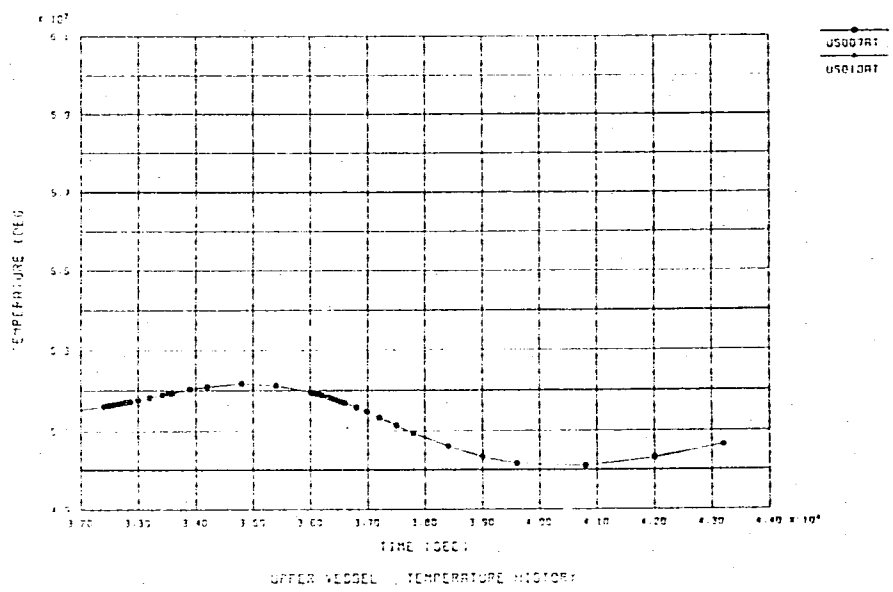
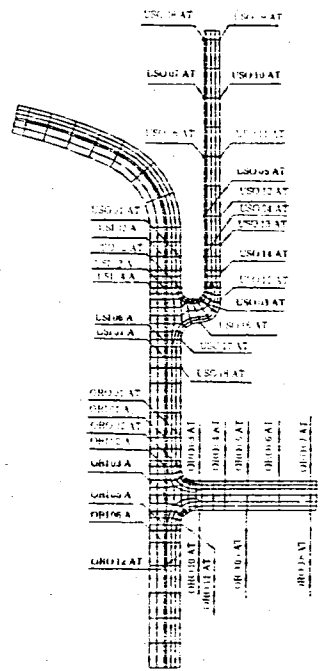


Fig. 2.3-4(f) Temperature History at Thermocouple Location (Upper Vessel)

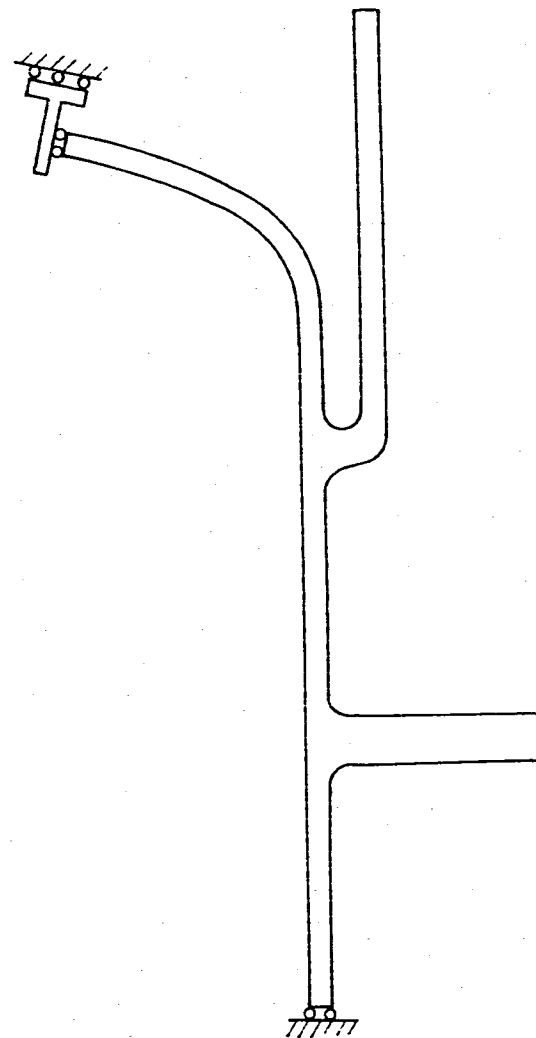
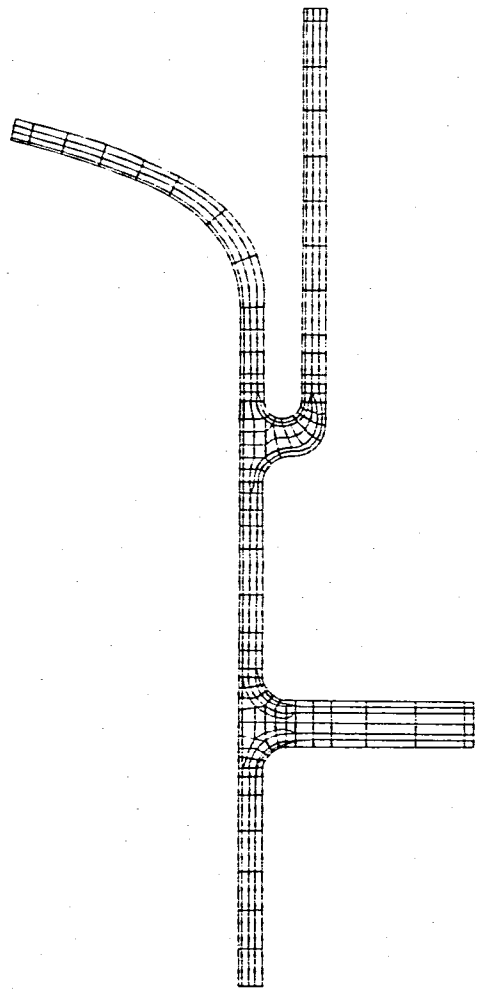


Fig. 2.3-5 Thermal Stress Analysis Model (Upper Vessel) Fig. 2.3-6 Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Upper Vessel)

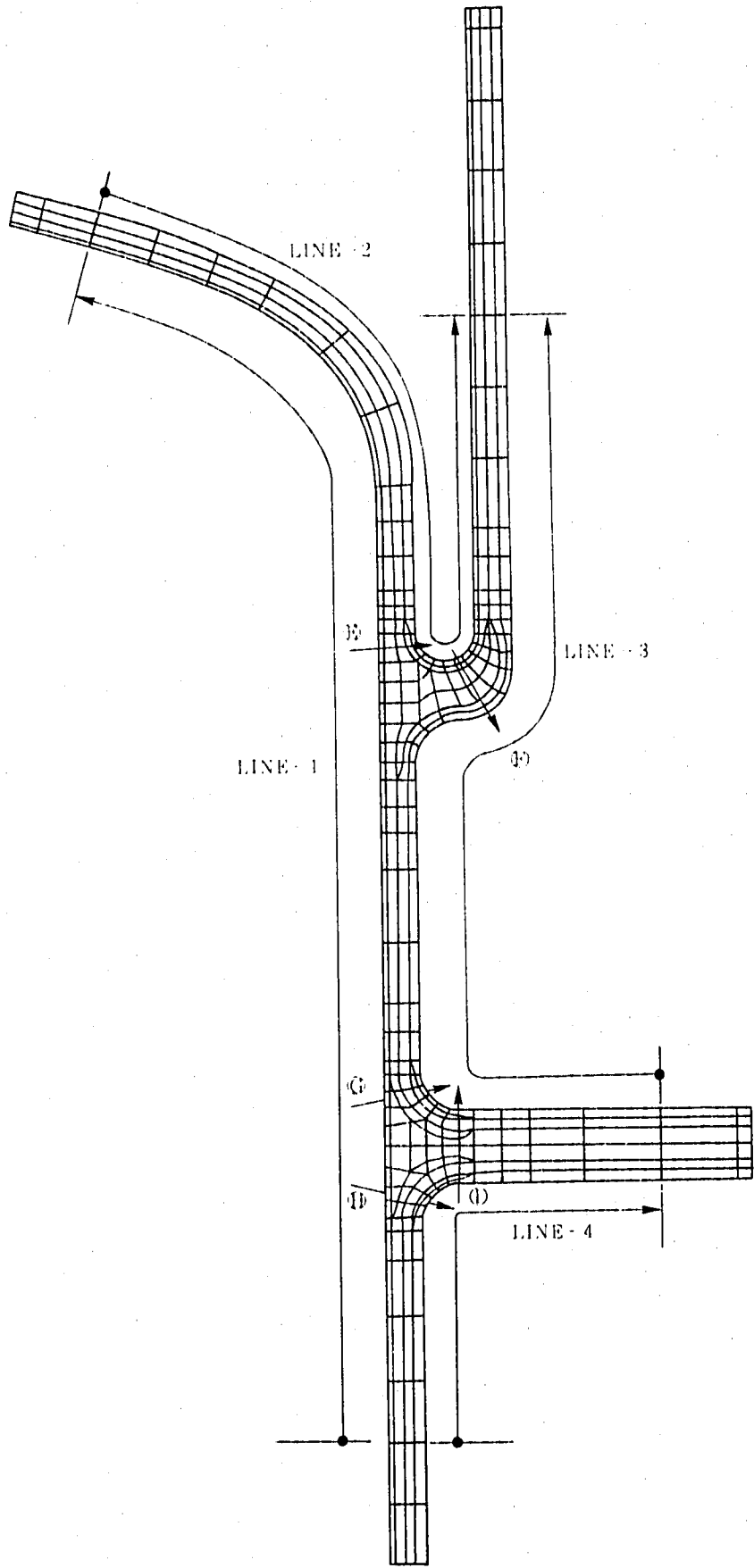


Fig. 2.3-7 Stress Estimation Line and Section (Upper Vessel)



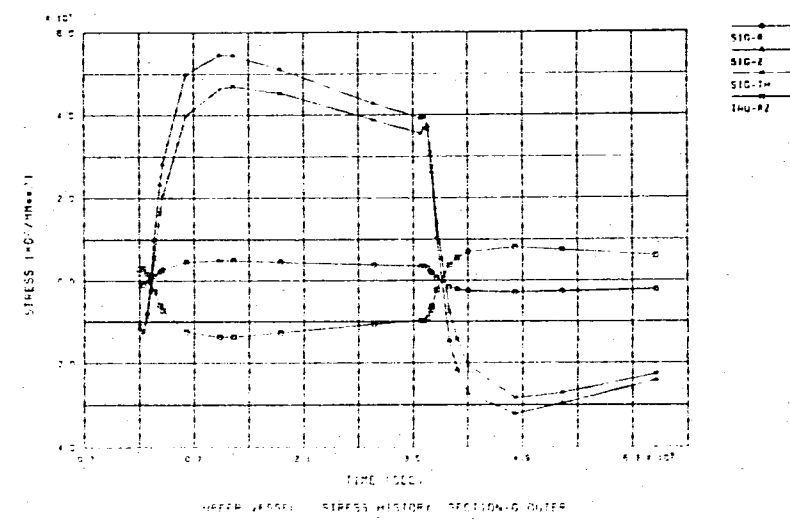
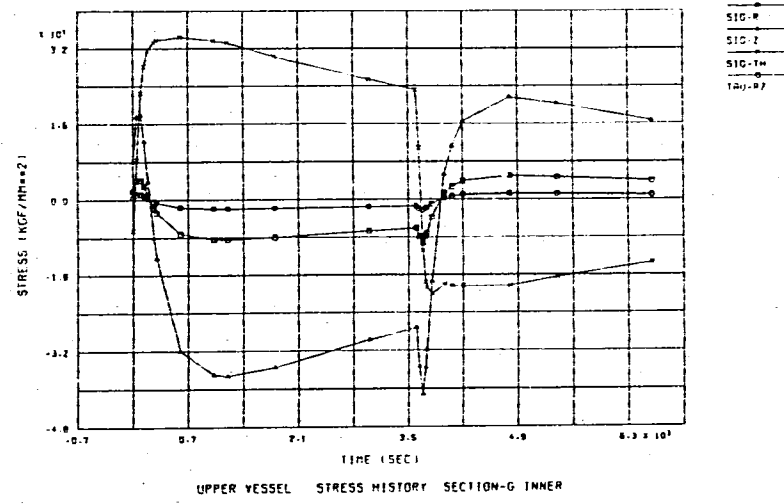
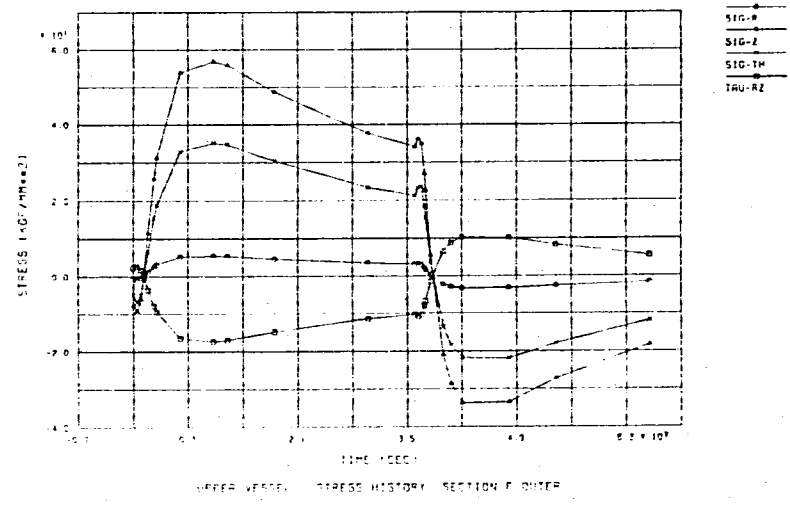
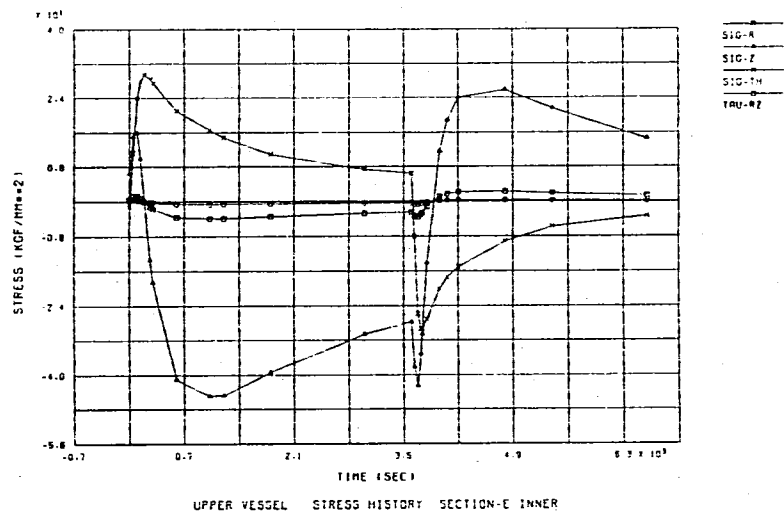


Fig. 2.3-8(a) Stress History (Upper Vessel)

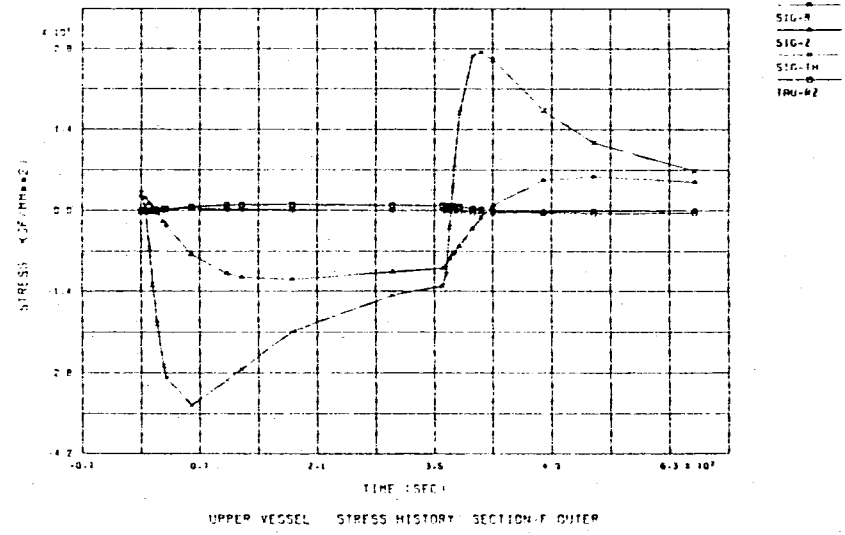
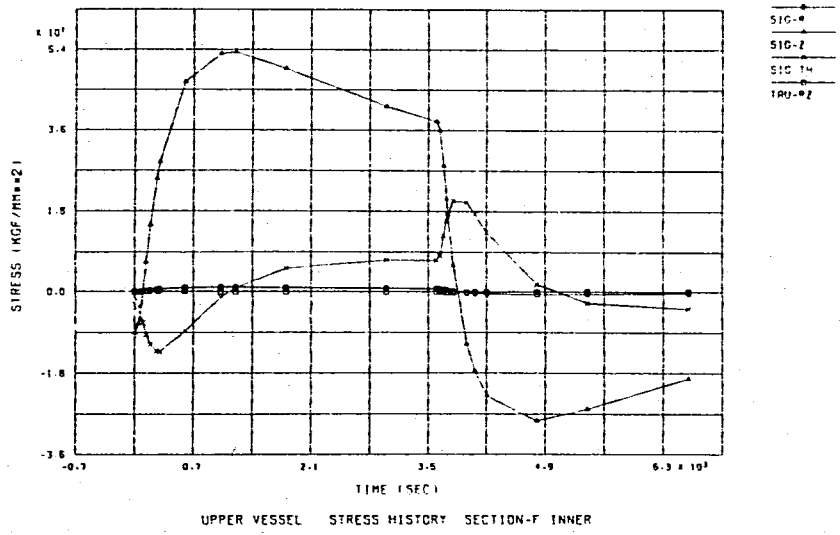
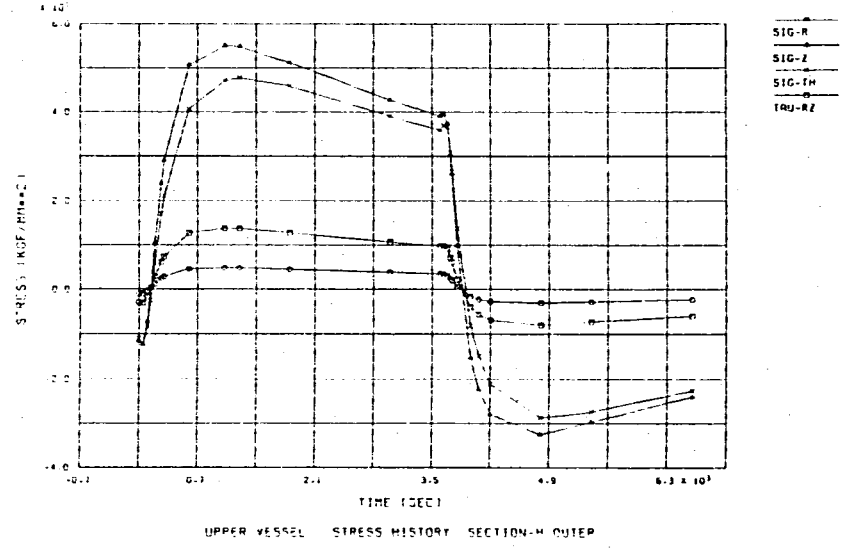
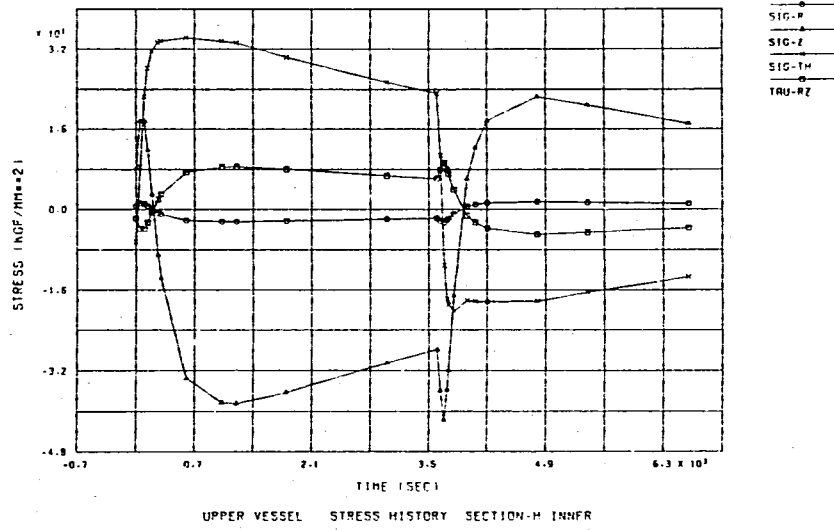


Fig. 2.3-8(b) Stress History (Upper Vessel)

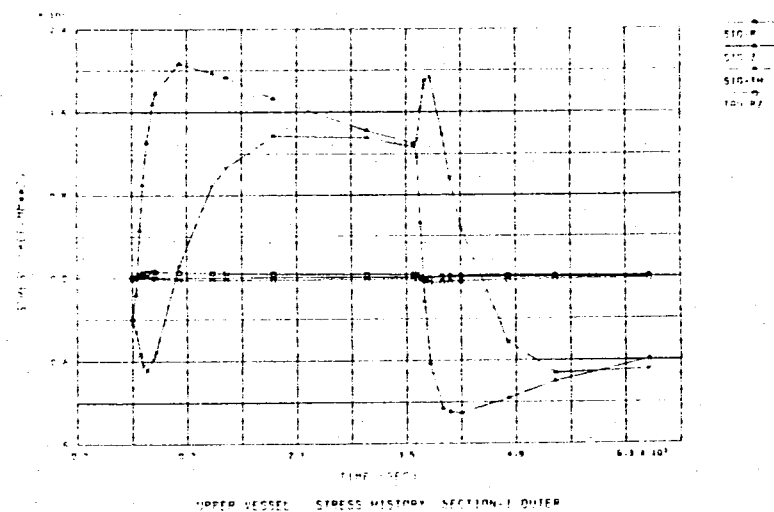
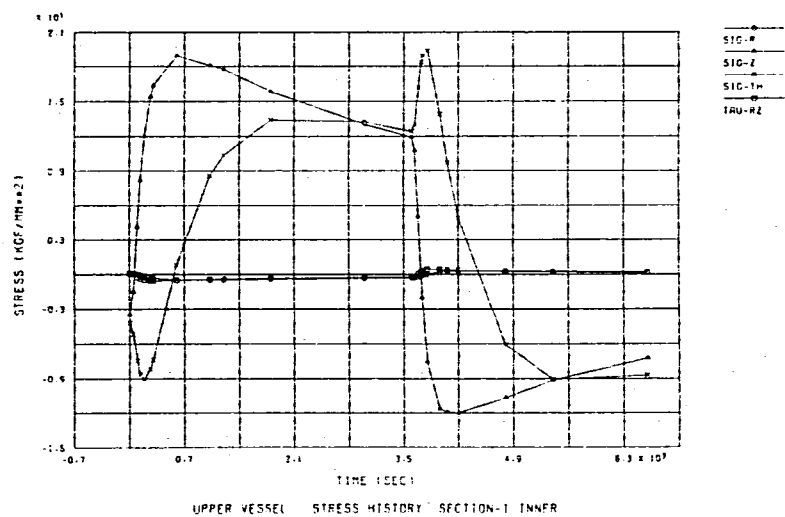


Fig. 2.3-8(c) Stress History (Upper Vessel)

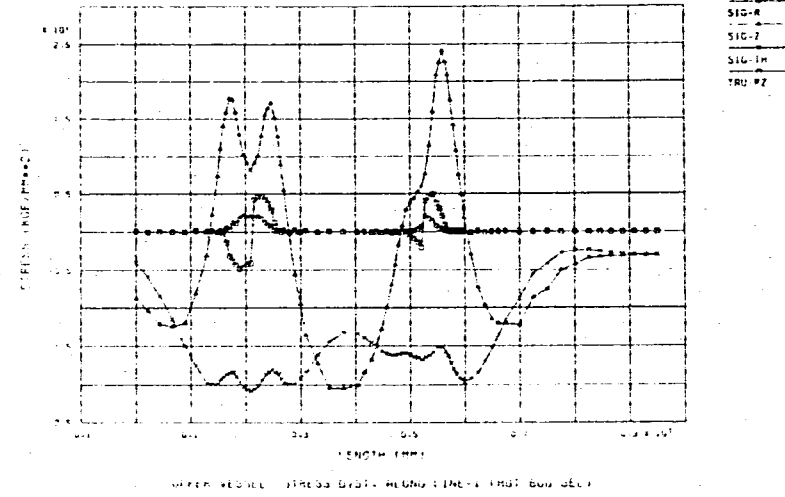
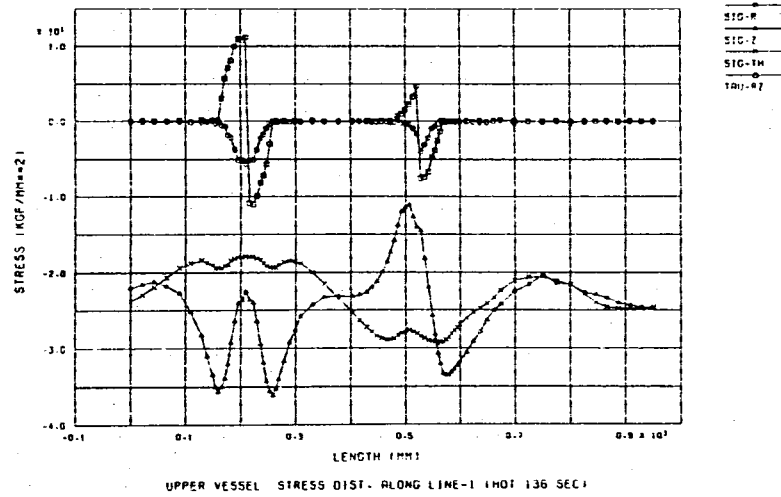
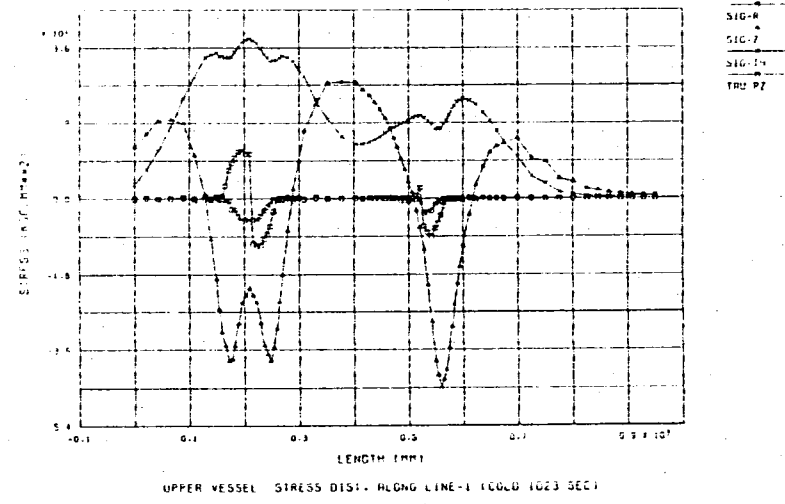
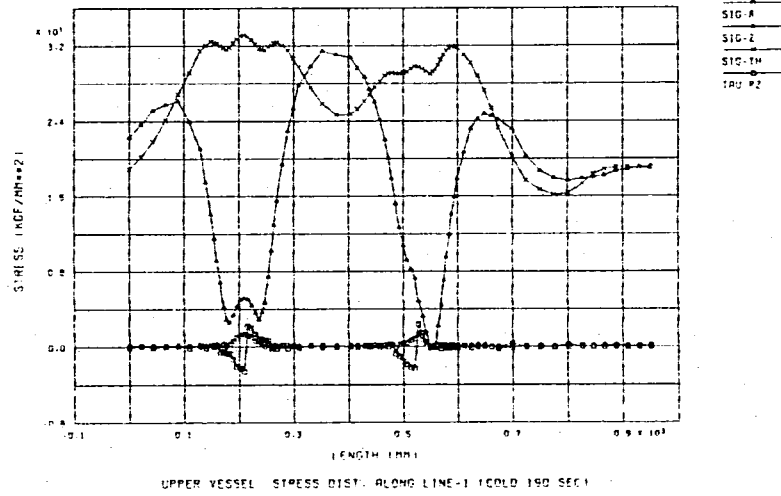


Fig. 2.3-9(a) Stress Distribution at Estimation Line (Upper Vessel)

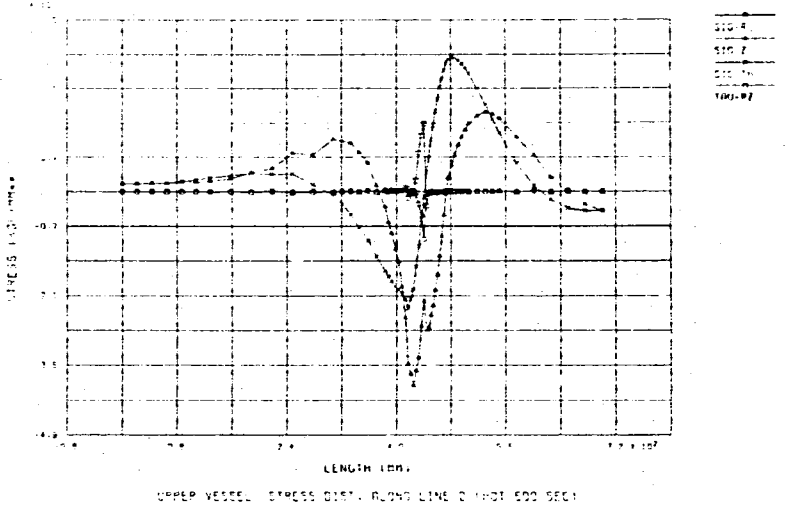
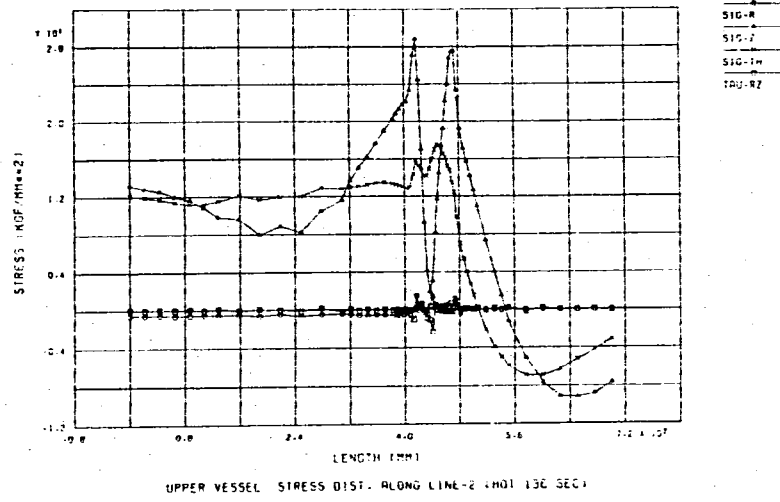
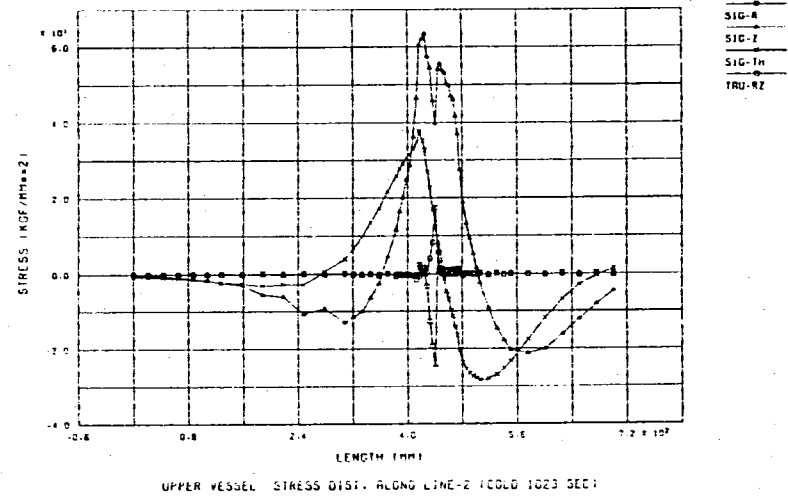
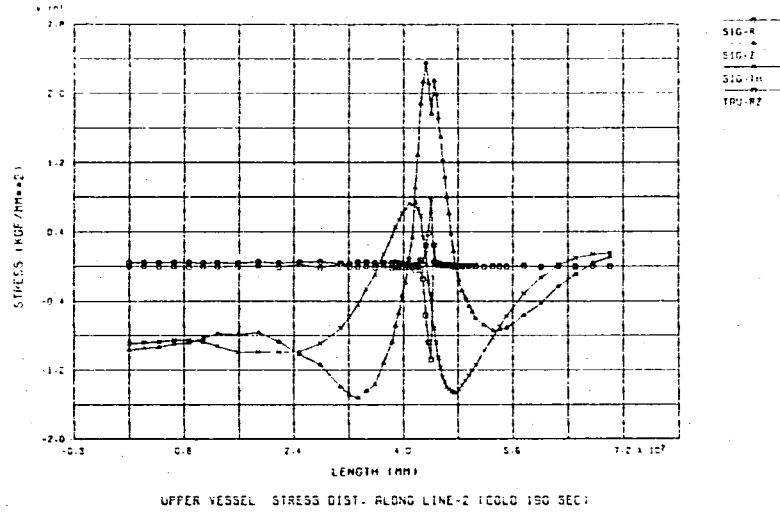


Fig. 2.3-9(b) Stress Distribution at Estimation Line (Upper Vessel)

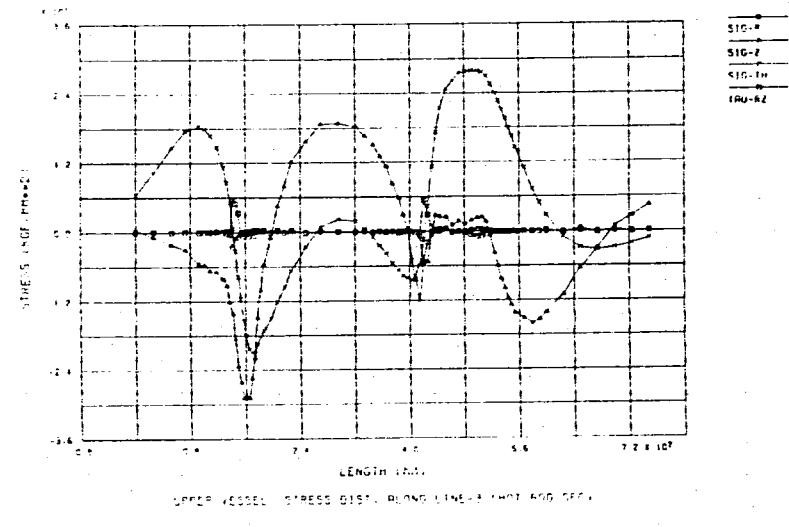
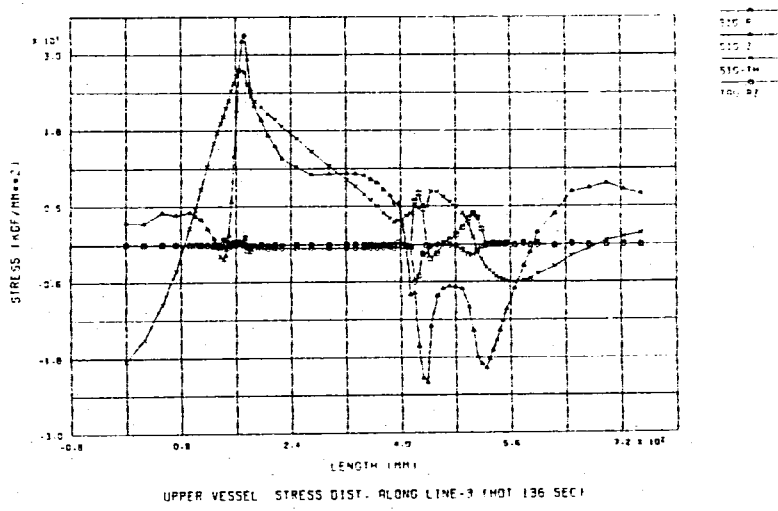
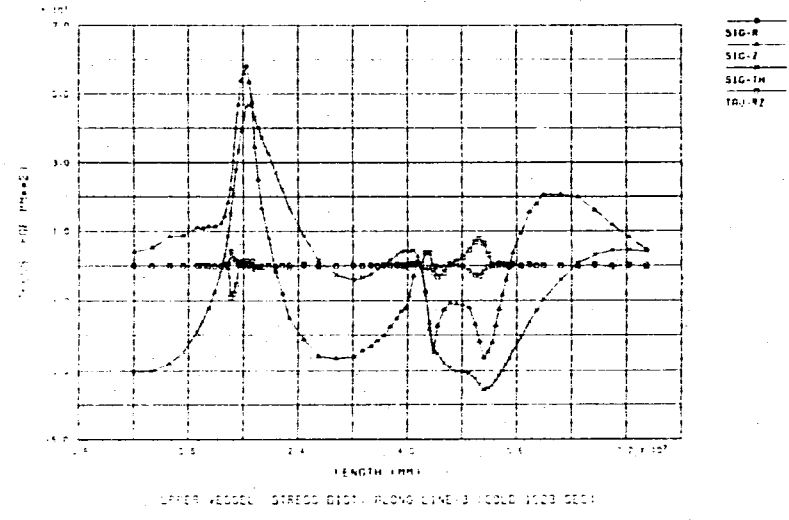
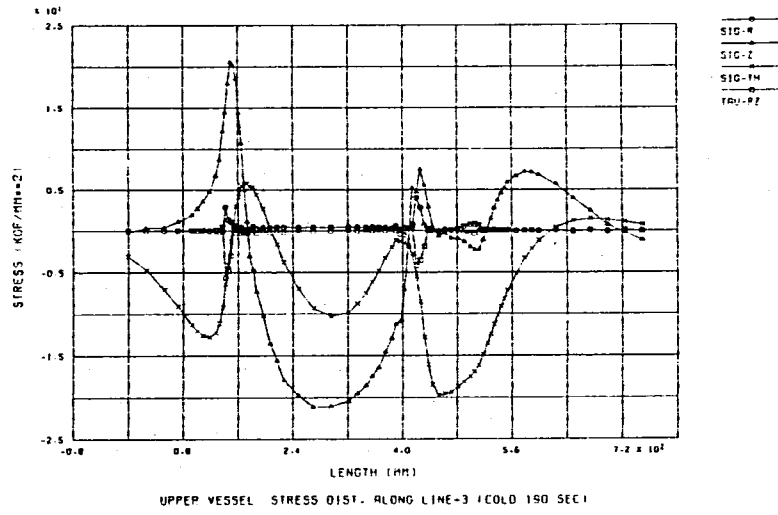


Fig.2.3-9(c) Stress Distribution at Estimation Line (Upper Vessel)

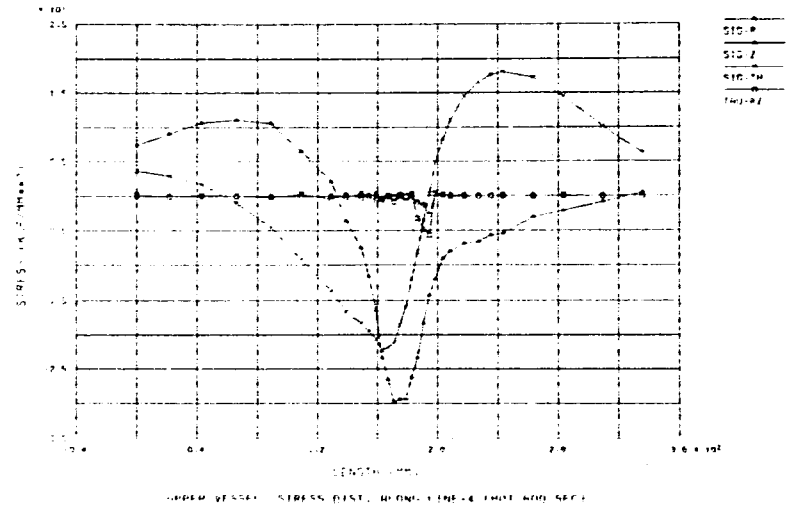
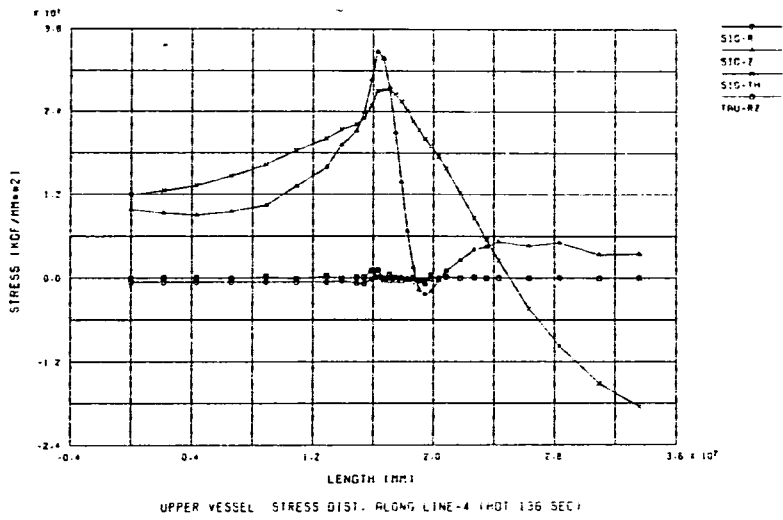
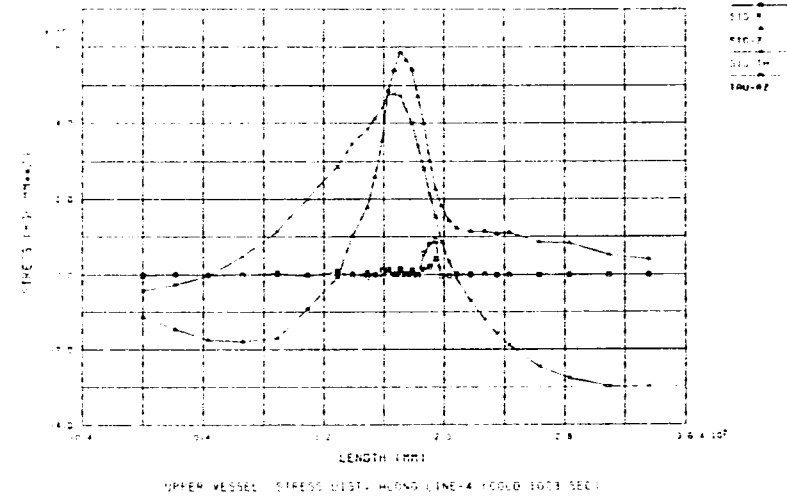
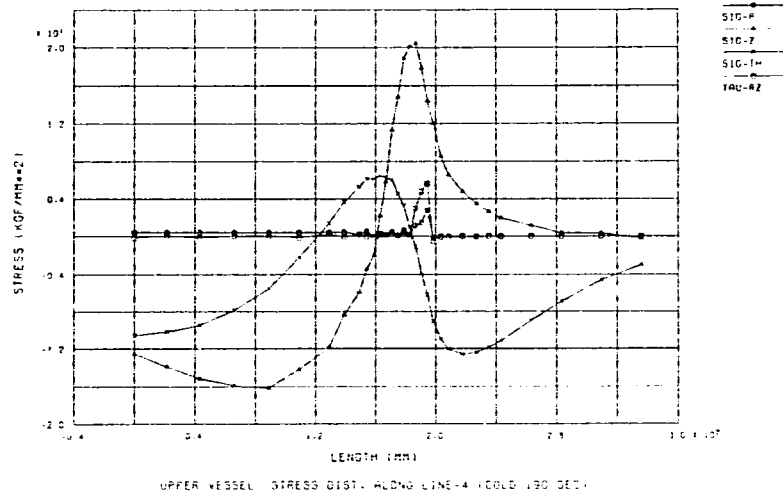


Fig. 2.3-9(d) Stress Distribution at Estimation Line (Upper Vessel)

## 2.4 下部ブロック

下部ブロックモデルは供試体構造の内、中子支持フランジの下部から下部鏡までをモデル化したものである。

### 2.4.1 伝熱解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

下部ブロックモデルは、Fig. 2.1-2 に示す供試体構造の内、スカートYピースを含む中子支持フランジ下部から下部鏡までを解析範囲とし、荷重及び構造の対称性からFig. 2.4-1 に示すとおり、軸対称要素を用いてモデル化した。要素総数 391（内、熱伝達要素 108）、節点総数 980 である。

供試体内面に設けられたサーマルライナ内のナトリウムは、スタグナントとして取り扱いナトリウムの熱伝導のみを考慮する。

供試体容器内面のサーマルライナは、6mm×2枚のSUS304製板材で、容器胴及びサーマルライナ間ギャップがそれぞれ6mmと成るように取付けられている。解析モデルでは、サーマルライナを12mm×1枚のSUS304の板とし、これと容器との間に12mmのナトリウム層をモデル化する。

##### b. 境界条件

伝熱解析用の熱的境界条件をFig. 2.4-2 に示す。境界条件は、第1報にて報告した伝熱流動解析から求めた熱過渡条件及び熱伝達率をサーマルスリーブ内面に与える。スカートフランジ下面は100℃一定とし、その他の面は断熱として扱う。

#### (2) 解析方法

伝熱解析は、構造物の温度応答が定常に達した後の温度分布を求めるため、Fig. 2.4-2 に示す熱過渡をコールド→ホットの順で4サイクル（計244ステップ）繰り返す。最終サイクルの解析ステップと経過時間並びに熱過渡のデジタル値の関係をTable 2.4-1 に示す。

#### (3) 解析結果

解析結果として、温度分布図をFig. 2.4-3 に、また、熱電対設置位置の温度履歴をFig. 2.4-4 に示す。

### 2.4.2 熱応力解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

熱応力解析は、伝熱解析モデルからサーマルライナ、スタグナントナトリウム



及び熱伝達要素を除いた解析モデルを用いて実施した。解析モデルをFig. 2. 4-5に示す。要素総数227、節点総数808である。

b. 境界条件

幾何学的境界条件はFig. 2. 4-6に示すとおり、下部鏡の下端及び本体胴の上端に連続条件、スカート支持フランジの下面に対称条件を入力した。

(2) 解析方法

伝熱解析の最終サイクル(100ステップ)の供試体の温度分布から24ステップを選択し、これらを荷重条件とした熱応力解析を実施する。

伝熱解析と熱応力解析の計算ステップの対応をTable 2. 4-2に示す。

(3) 解析結果

応力評価ライン及び評価断面をFig. 2. 4-7に示す。評価断面に発生する応力の時刻歴をFig. 2. 4-8に示す。また、構造物の表面に沿って設定した評価ラインの応力分布をFig. 2. 4-9に示す。応力を示す記号は入口ノズルと同様である。

Table 2.4-1 Heat Transfer Analysis Step (Lower Vessel)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱過渡 領域 L (°C)
145	0.0	600.000
146	COLD 8.0	660.000
150	12.0	560.000
161	45.0	450.000
164	60.0	427.000
171	100.0	366.000
173	120.0	351.500
175	140.0	337.000
176	158.0	345.000
178	188.0	325.000
181	300.0	300.000
184	500.0	275.000
185	600.0	270.000
186	800.0	260.000
187	1000.0	250.000
188	1200.0	250.000
190	1800.0	250.000
193	3600.0	250.000
194	HOT 20.0	255.000
209	54.0	400.000
211	60.0	417.600
219	84.0	488.000
224	115.0	532.000
225	120.0	535.095
226	136.0	545.000
228	185.0	560.000
229	260.0	570.000
230	300.0	572.400
231	360.0	576.000
232	560.0	586.000
233	600.0	587.000
234	800.0	592.000
235	1120.0	600.000
236	1200.0	600.000
238	1800.0	600.000
241	3600.0	600.000
244	7200.0	600.000

Table 2.4-2 Thermal Stress Analysis Step (Lower Vessel)

熱応力解析 インターバル番号	インターバル内 ステップ数	伝熱解析 ステップ	経過時間 (sec)
1	1	145	0.000
2	1	156	30.000
3	1	164	60.000
4	1	171	100.000
5	1	173	120.000
6	1	175	140.000
7	1	177	173.000
8	1	181	300.000
9	1	185	600.000
10	1	188	1200.000
11	1	190	1800.000
12	1	192	3000.000
13	1	193	3600.000
14	1	209	3654.000
15	1	214	3669.000
16	1	219	3684.000
17	1	224	3715.000
18	1	226	3736.000
19	1	228	3785.000
20	1	230	3900.000
21	1	232	4160.000
22	1	235	4720.000
23	1	238	5400.000
24	1	240	6600.000

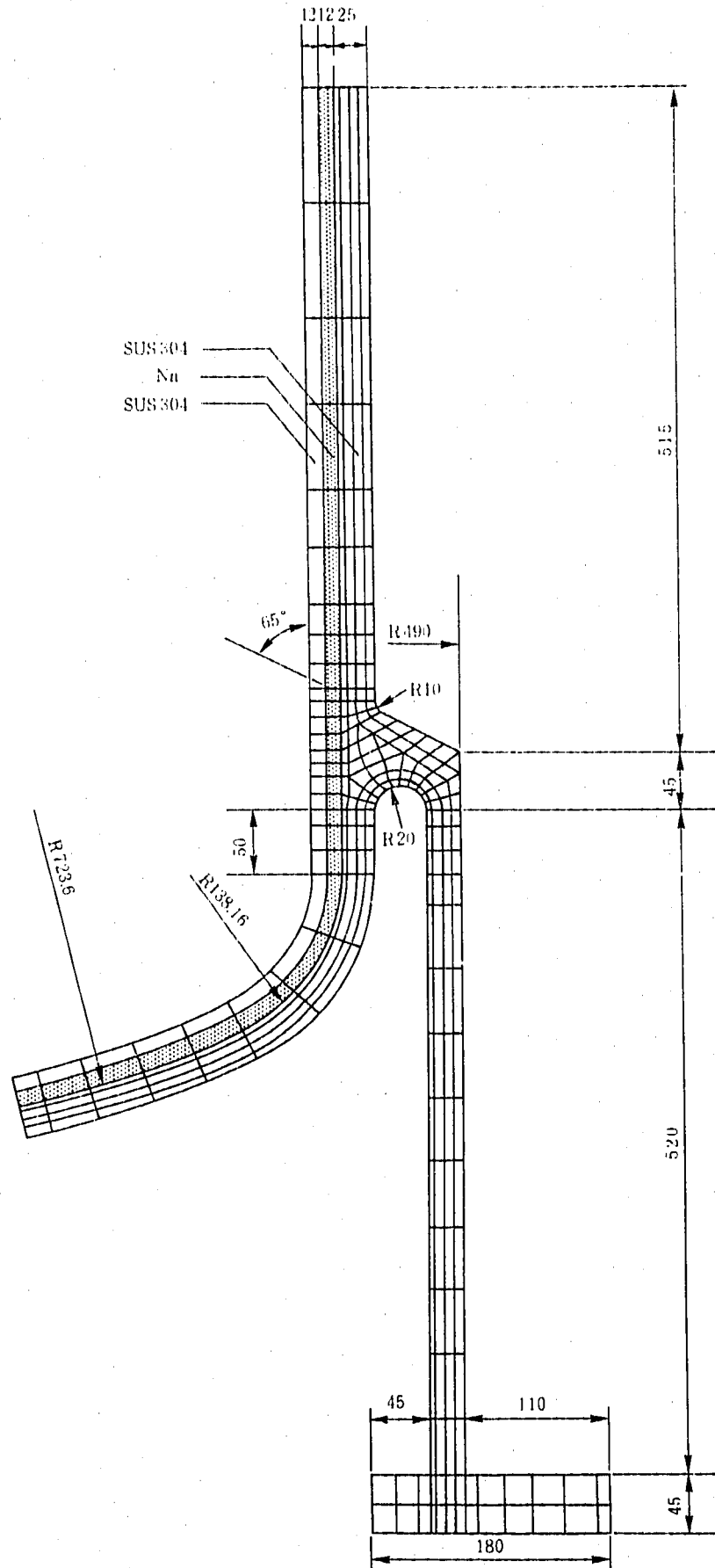


Fig.2.4-1 Heat Transfer Analysis Model (Lower Vessel)

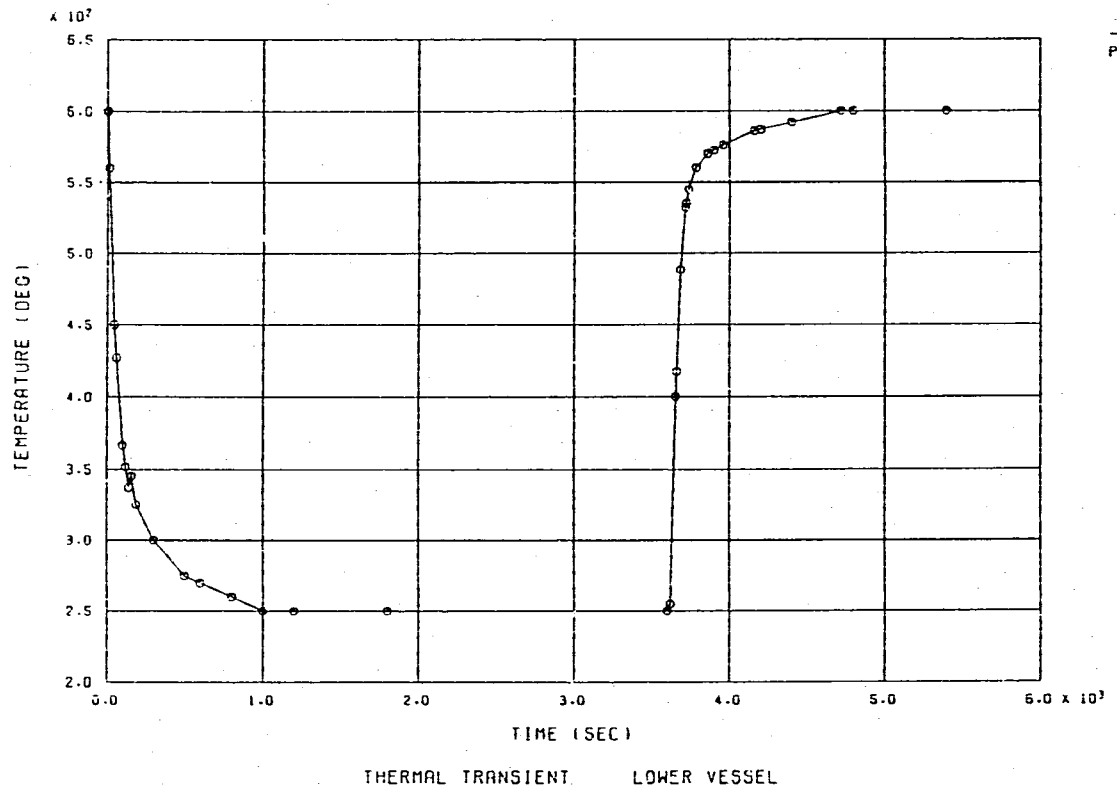
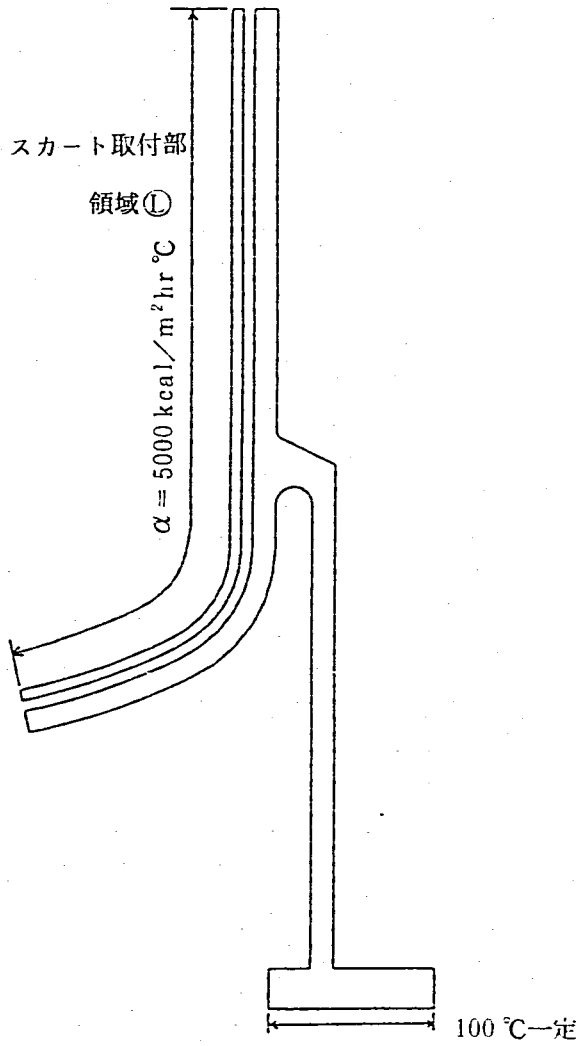
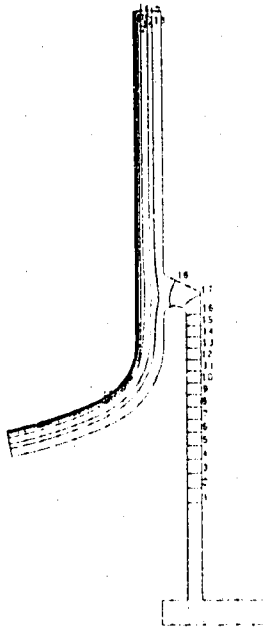


Fig.2.4-2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Lower Vessel)

FINNS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	240.0000
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	320.0000
6	340.0000
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	420.0000
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000



STEP NO. 204

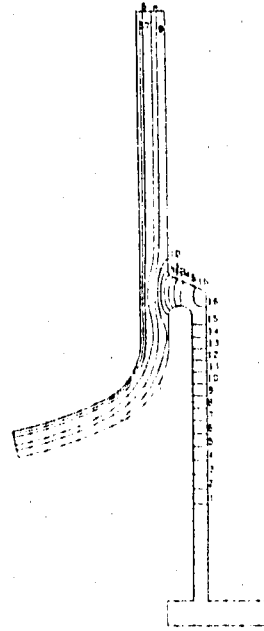
GEOM. SCALE 150.000

LOWER VESSEL TEMPERATURE | HOT | 60 SEC |

FINNS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	240.0000
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	320.0000
6	340.0000
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	420.0000
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000



STEP NO. 205

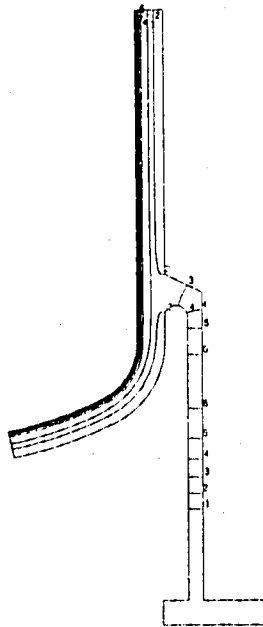
GEOM. SCALE 150.000

LOWER VESSEL TEMPERATURE | HOT | 100 SEC |

FINNS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	240.0000
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	320.0000
6	340.0000
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	420.0000
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000



STEP NO. 211

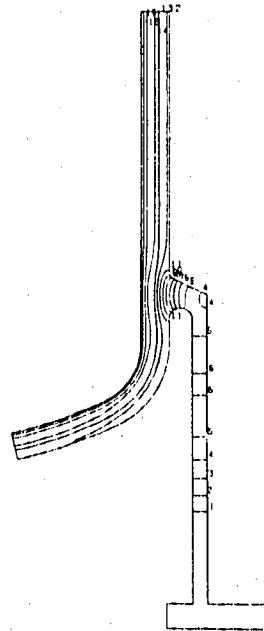
GEOM. SCALE 150.000

LOWER VESSEL TEMPERATURE | HOT | 60 SEC |

FINNS  
TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	240.0000
2	260.0000
3	280.0000
4	300.0000
5	320.0000
6	340.0000
7	360.0000
8	380.0000
9	400.0000
10	420.0000
11	440.0000
12	460.0000
13	480.0000
14	500.0000
15	520.0000
16	540.0000
17	560.0000
18	580.0000
19	600.0000
20	620.0000



STEP NO. 230

GEOM. SCALE 150.000

LOWER VESSEL TEMPERATURE | HOT | 300 SEC |

Fig. 2.4-3(a) Temperature Contour (Lower Vessel)

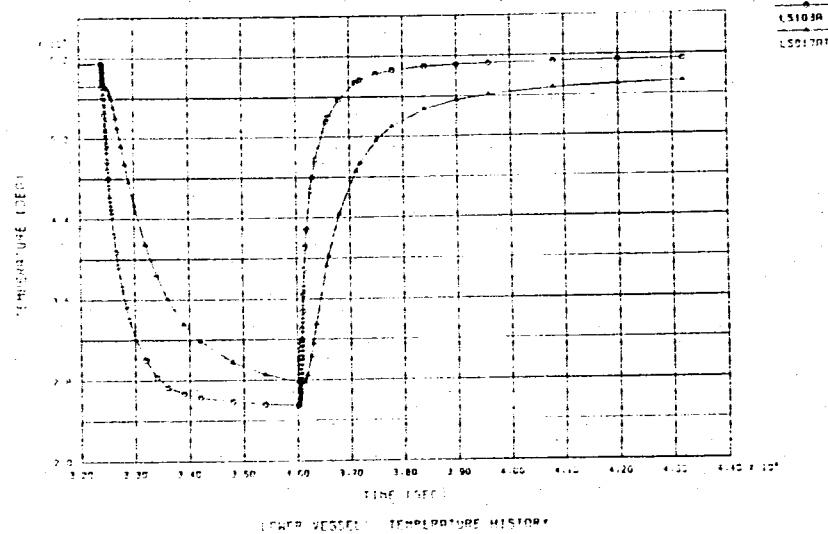
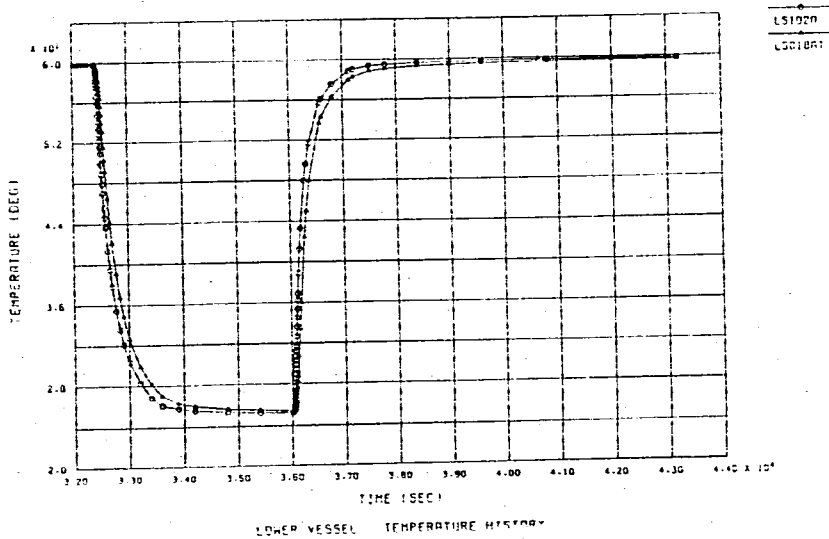
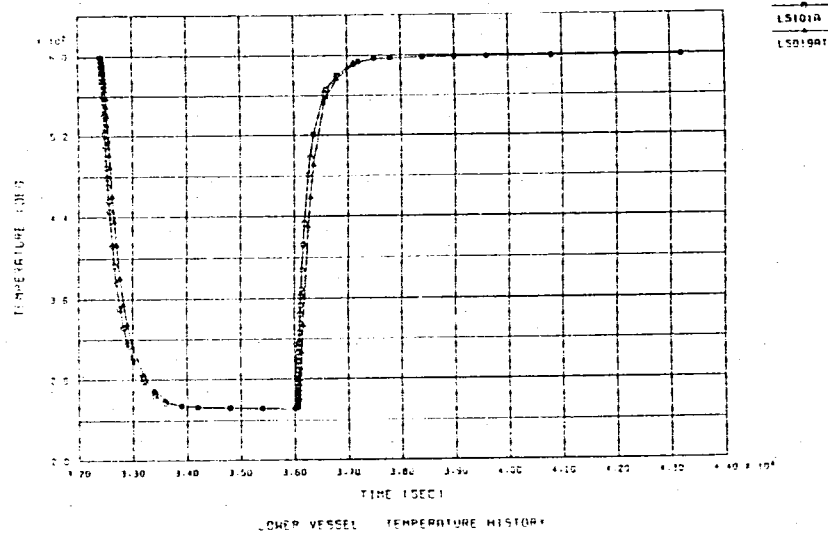
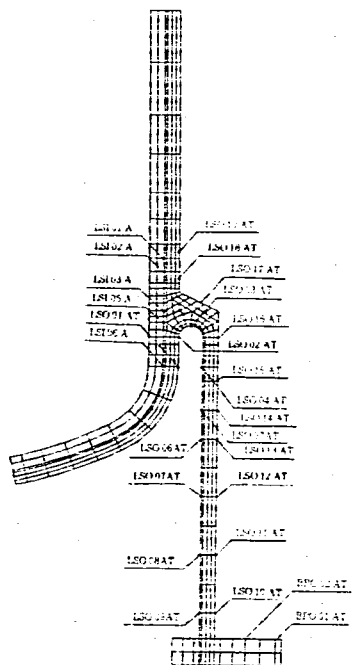


Fig. 2.4-4(a) Temperature History at Thermocouple Location (Lower Vessel)

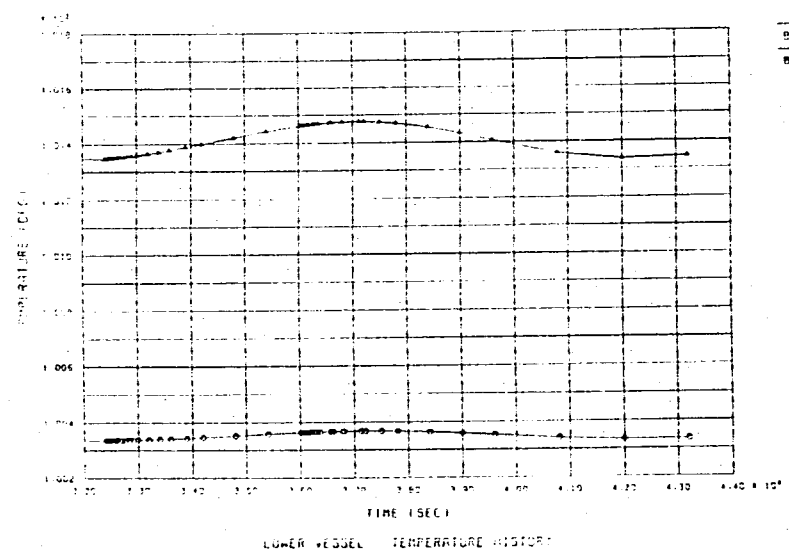
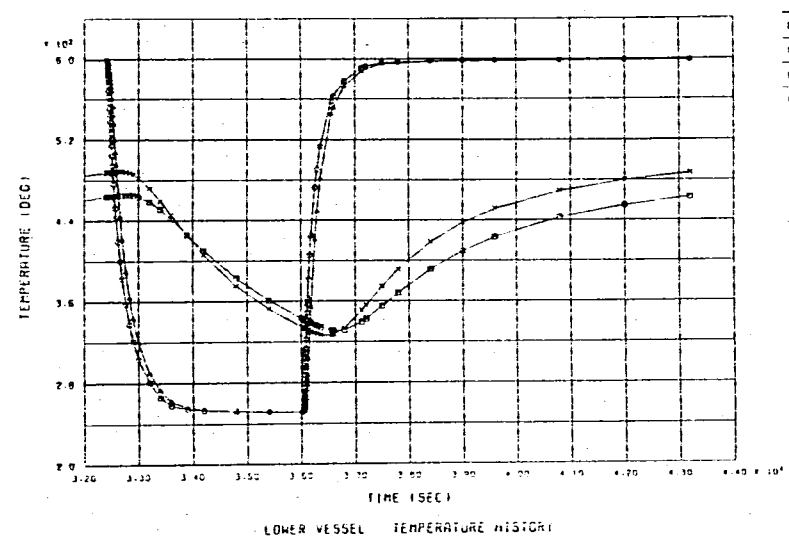
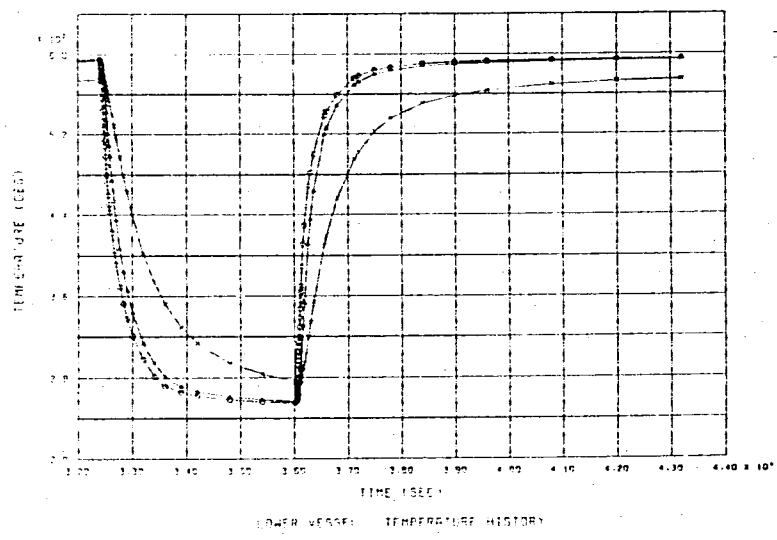
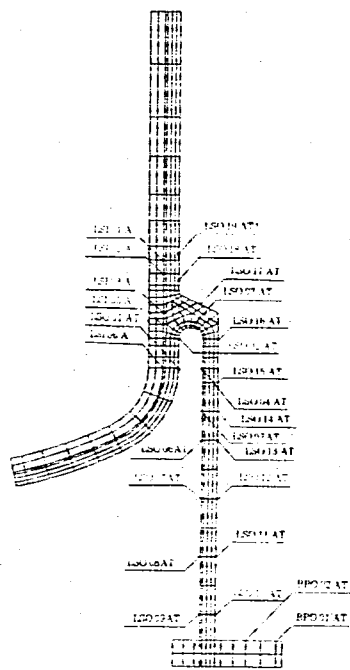


Fig. 2.4-4(b) Temperature History at Thermocouple Location (Lower Vessel)





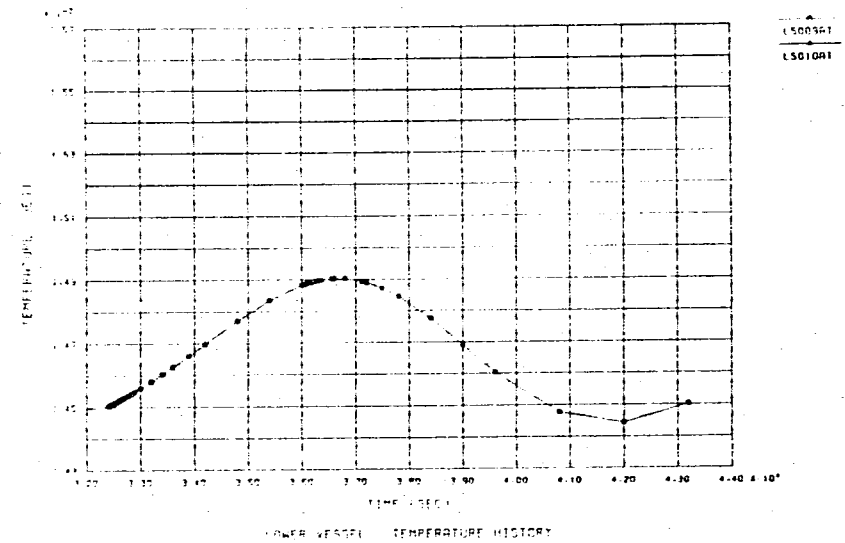
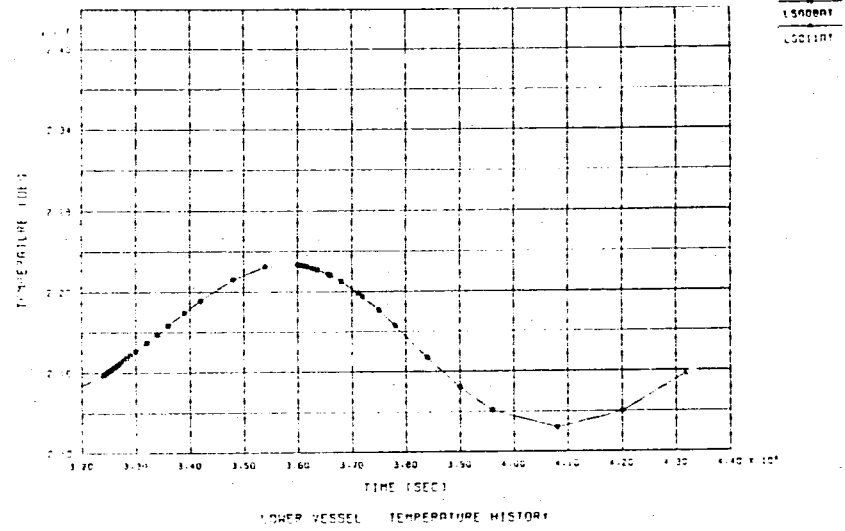
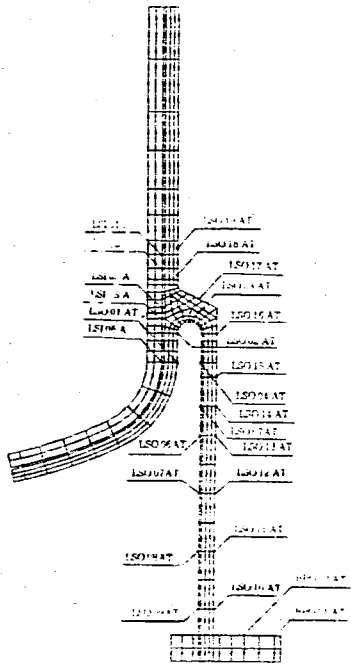


Fig. 2.4-4(d) Temperature History at Thermocouple Location (Lower Vessel)

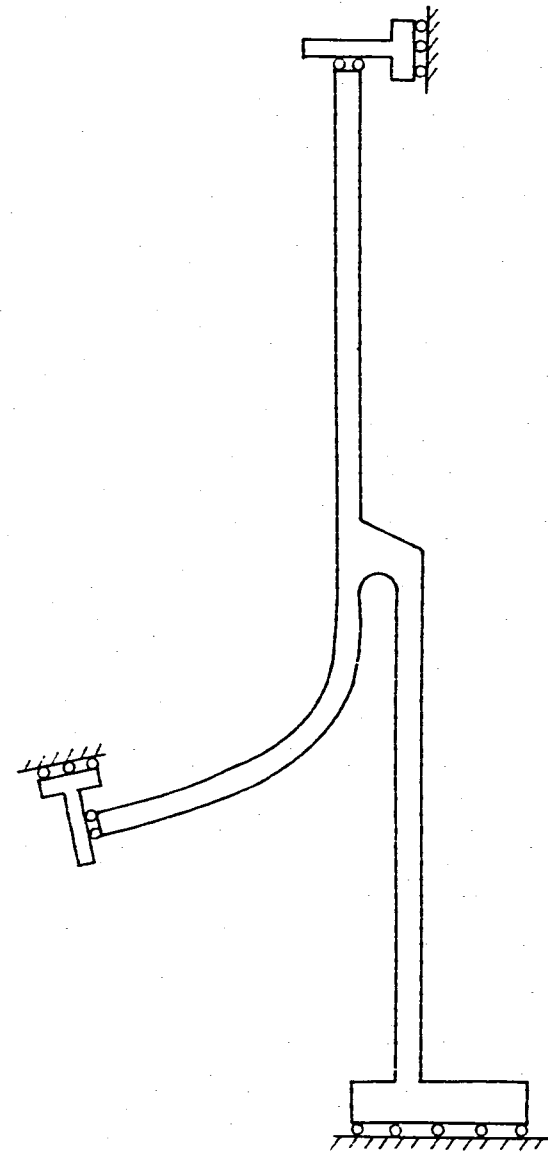
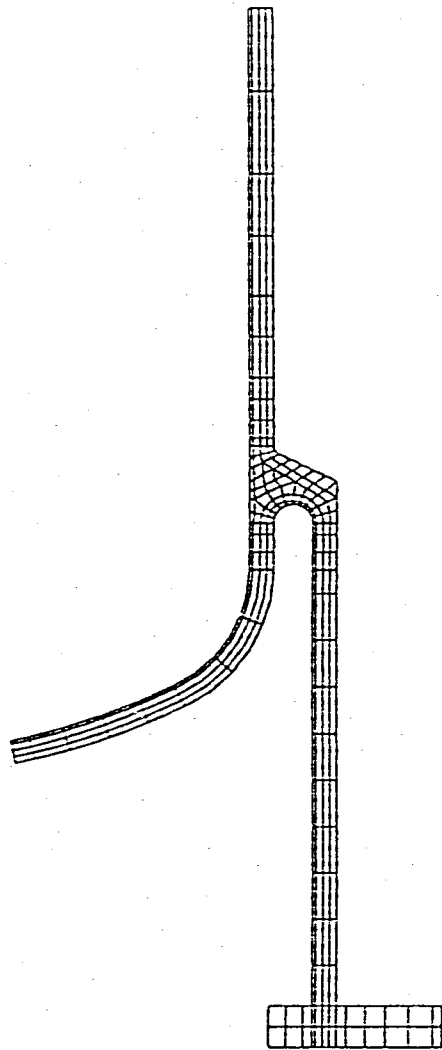


Fig. 2. 4-5 Thermal Stress Analysis Model (Lower Vessel) Fig. 2. 4-6 Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Lower Vessel)

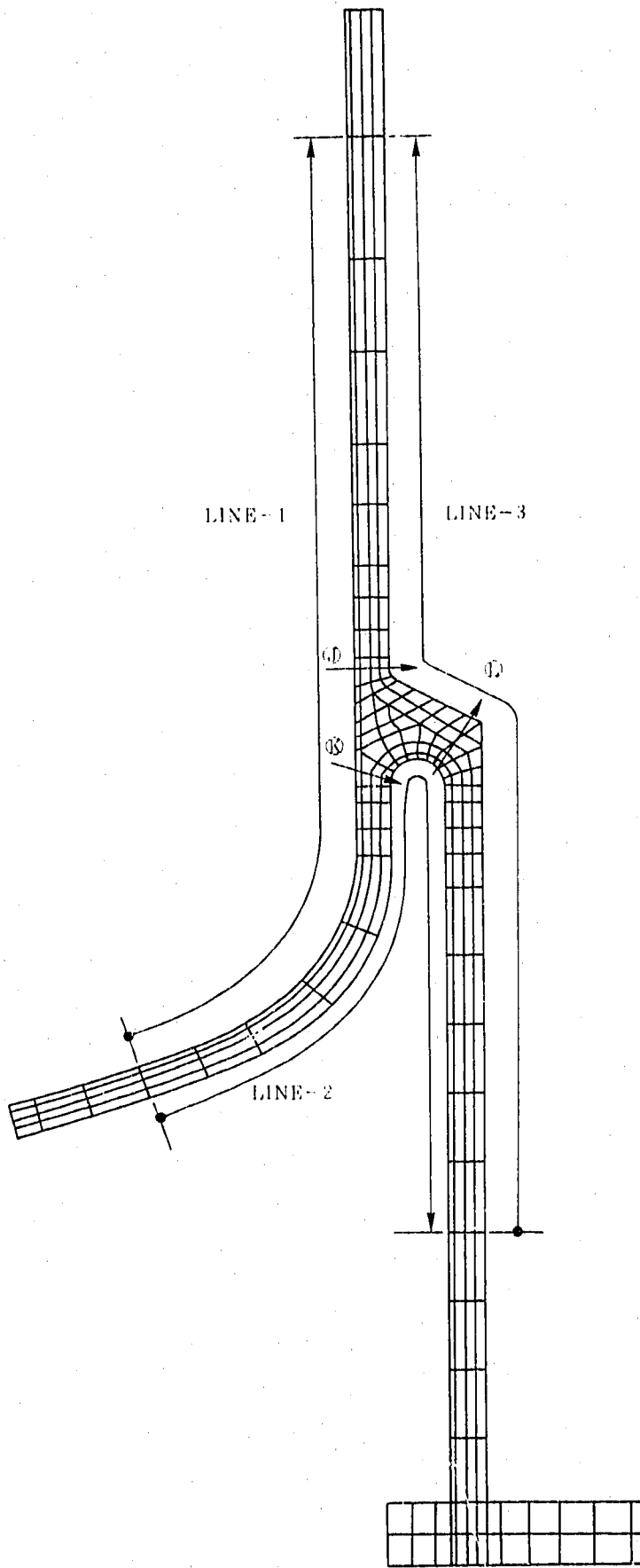
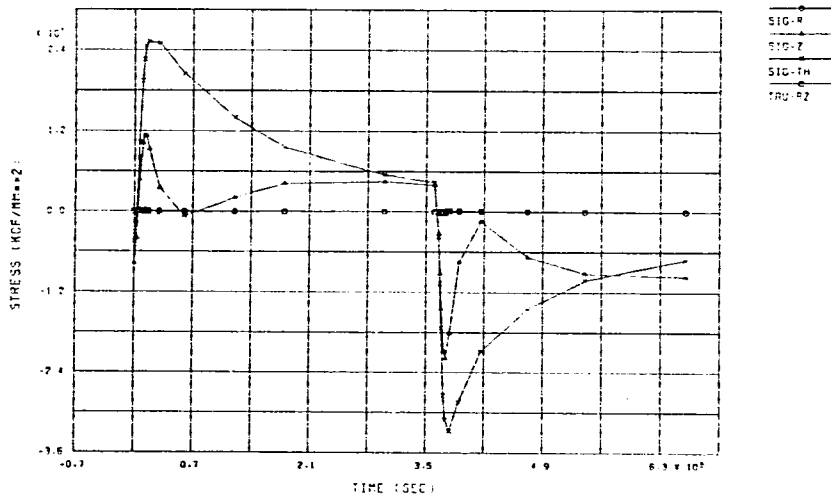
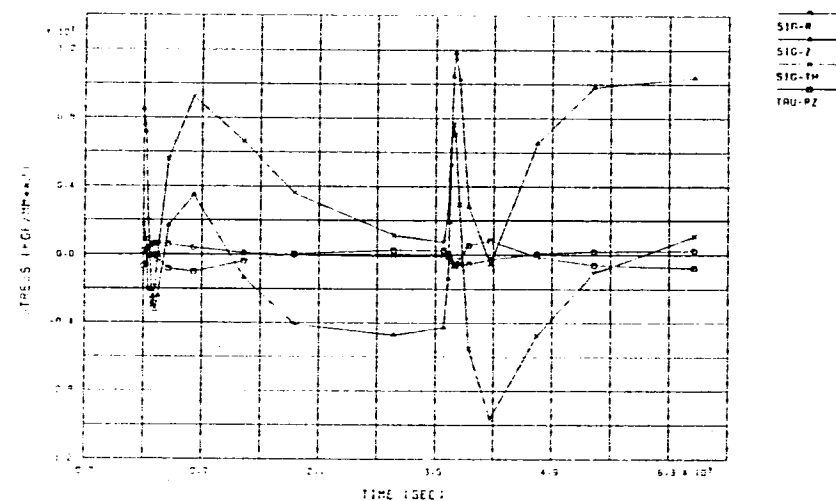


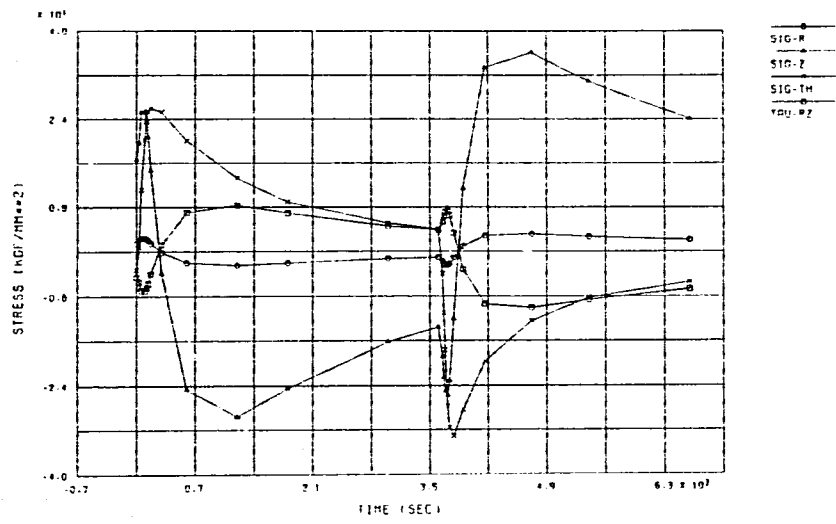
Fig. 2.4-7 Stress Estimation Line and Section (Lower Vessel)



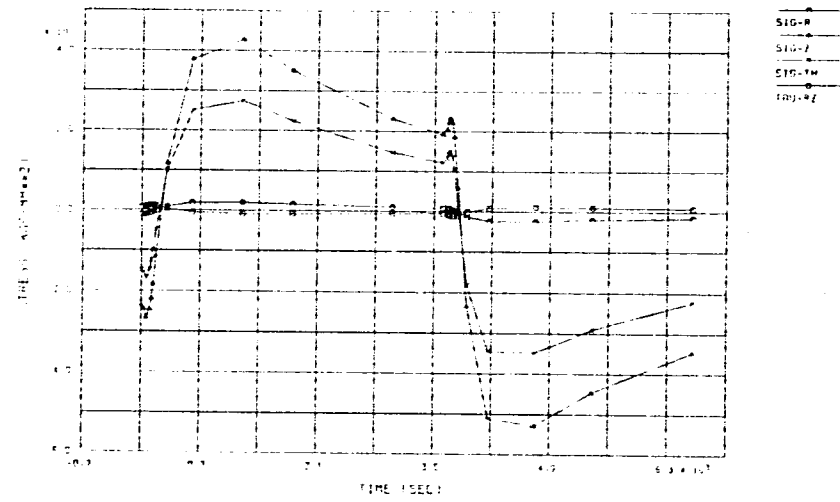
LOWER VESSEL STRESS HISTORY SECTION-J INNER



LOWER VESSEL STRESS HISTORY SECTION-J OUTER



LOWER VESSEL STRESS HISTORY SECTION-K INNER



LOWER VESSEL STRESS HISTORY SECTION-K OUTER

Fig. 2.4-8(a) Stress History (Lower Vessel)

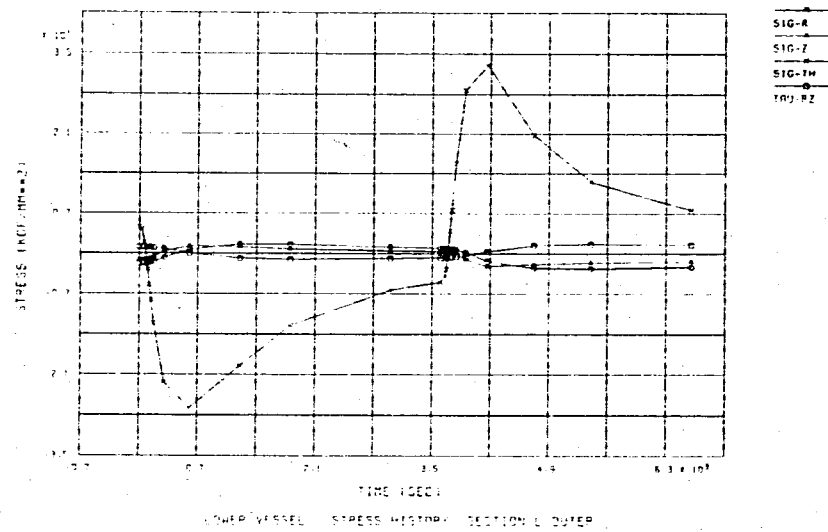
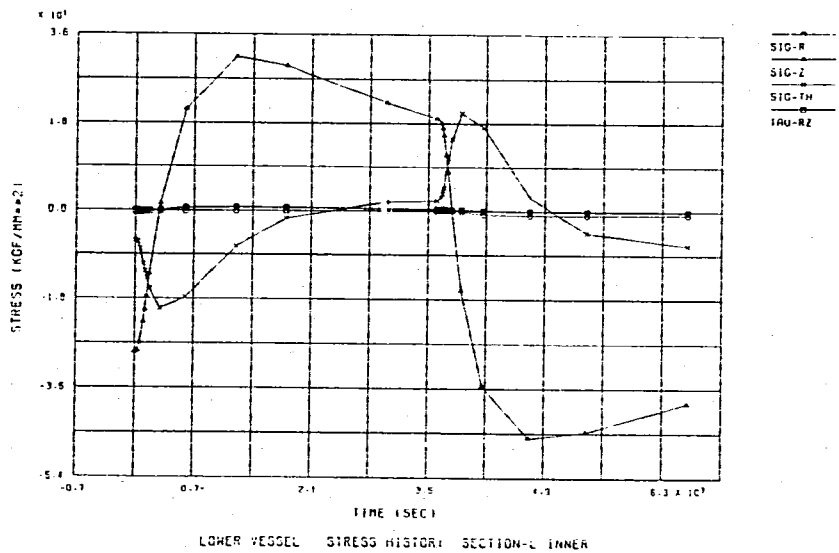


Fig. 2. 4-8(b) Stress History (Lower Vessel)

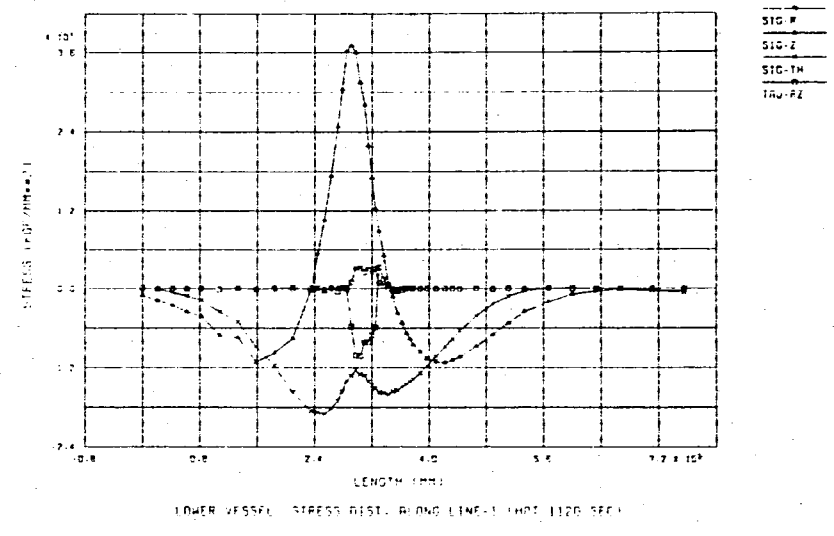
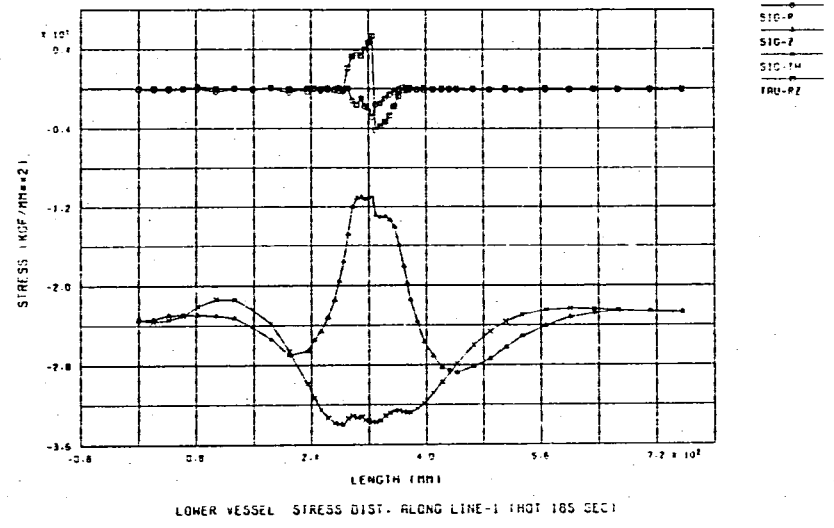
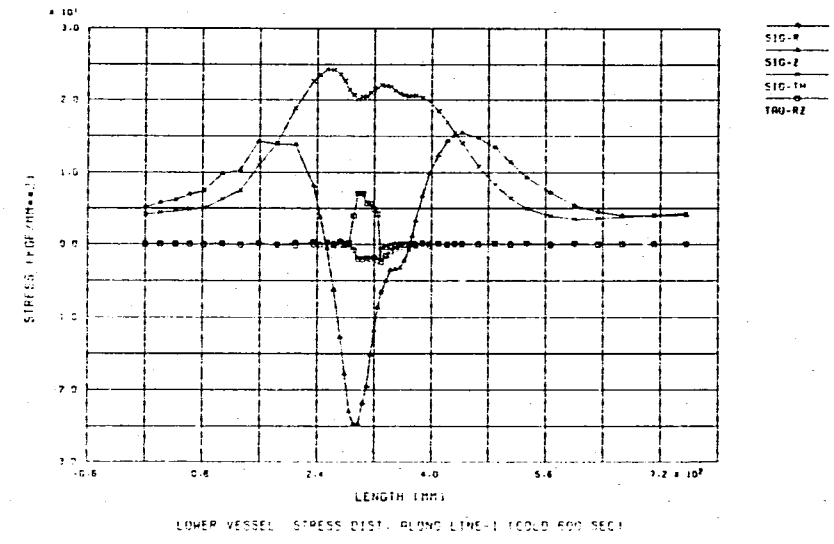
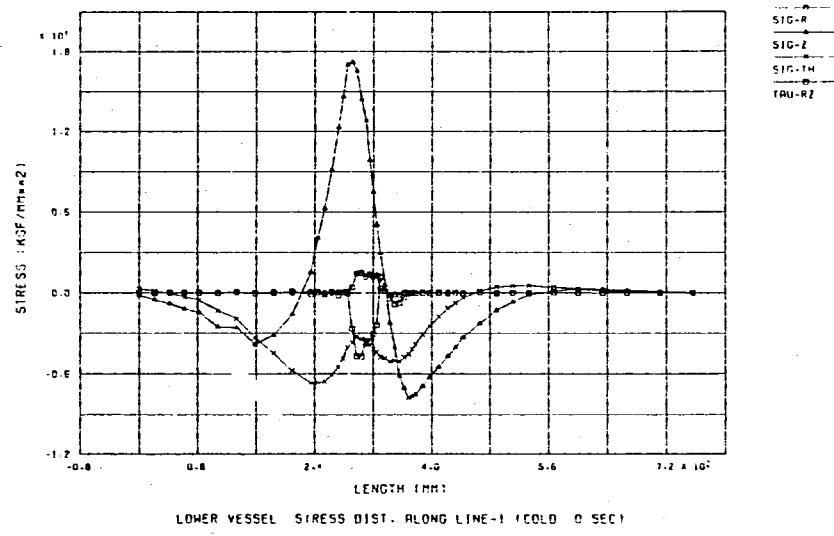
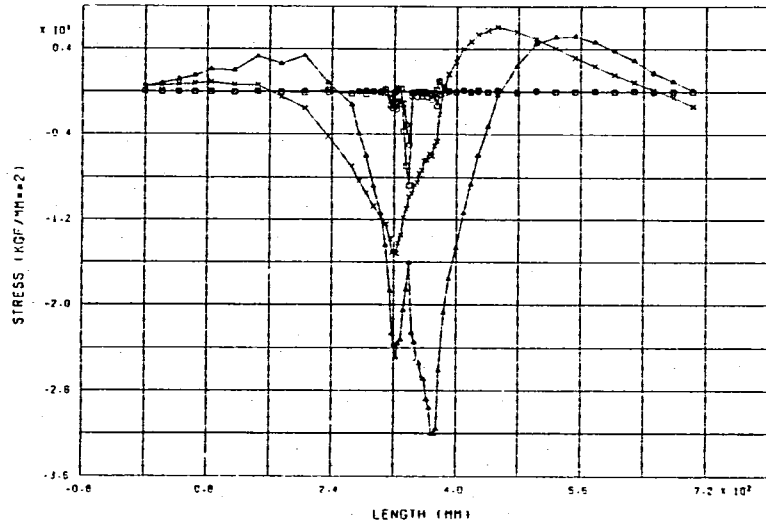
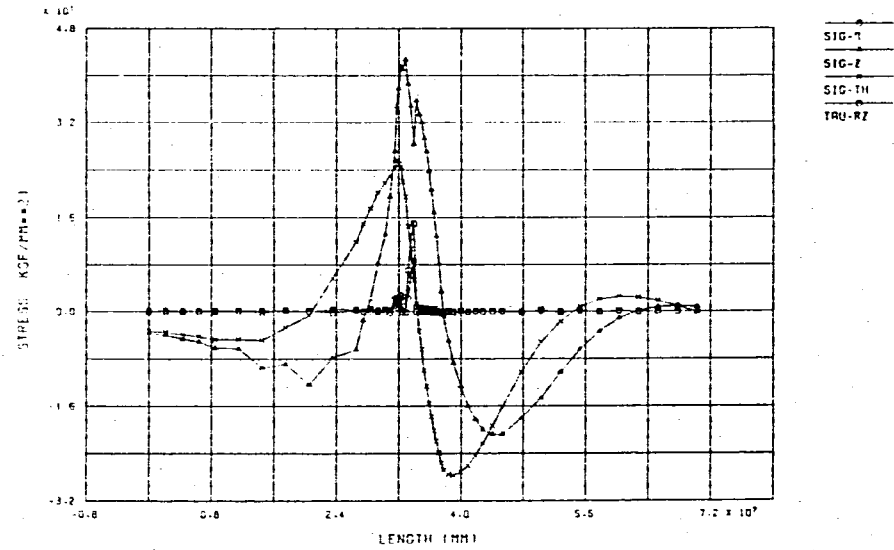


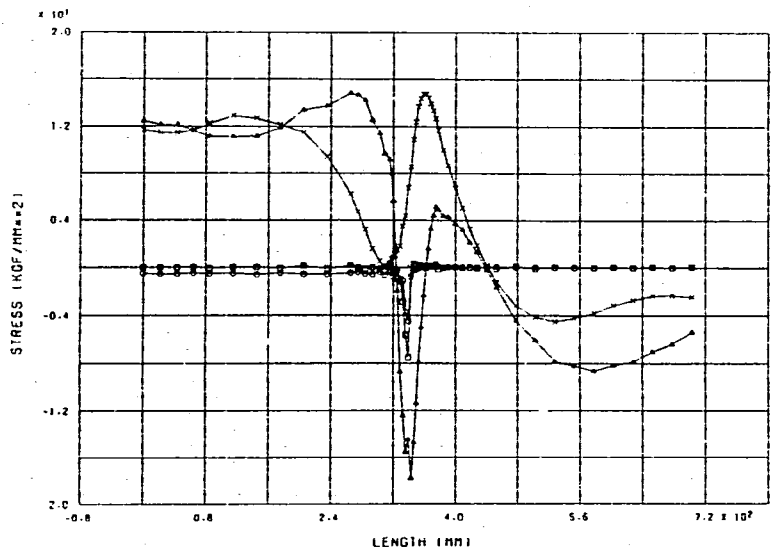
Fig. 2.4-9(a) Stress Distribution at Estimation Line (Lower Vessel)



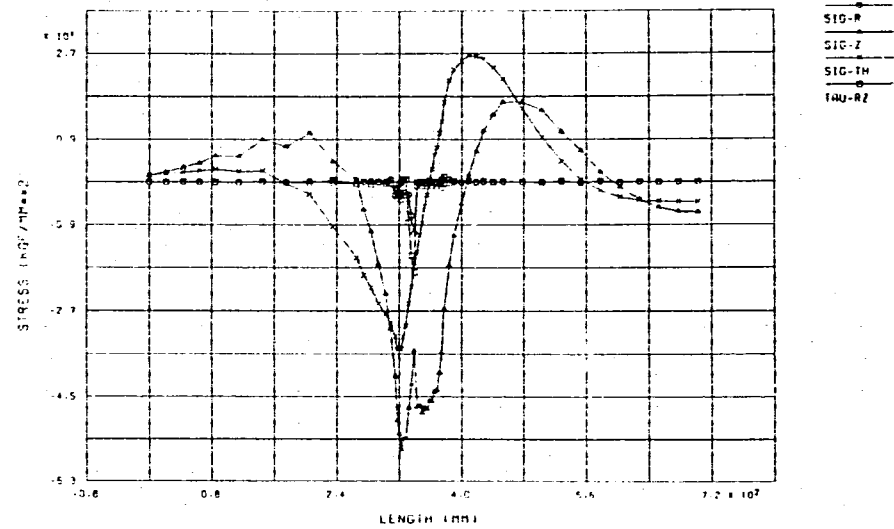
LOWER VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-2 (COLD 0 SEC)



LOWER VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-2 (COLD 600 SEC)



LOWER VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-2 (HOT 185 SEC)



LOWER VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-2 (HOT 1120 SEC)

Fig. 2.4-9(b) Stress Distribution at Estimation Line (Lower Vessel)



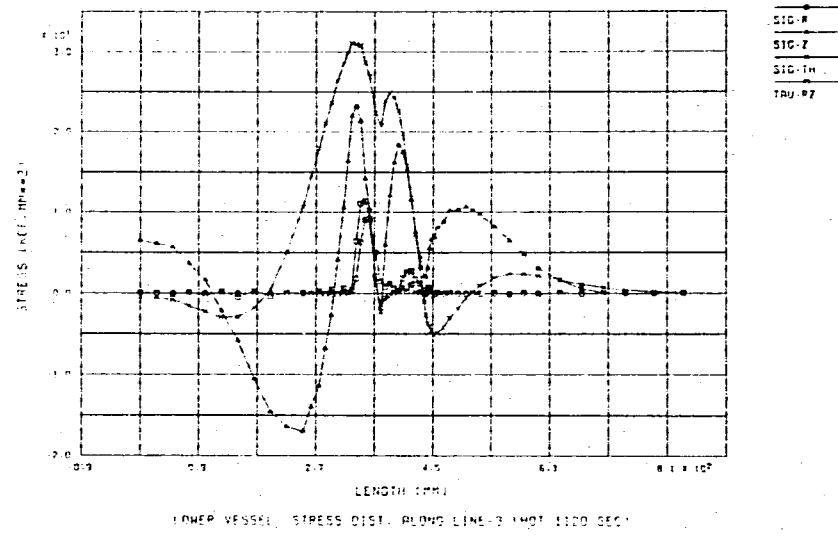
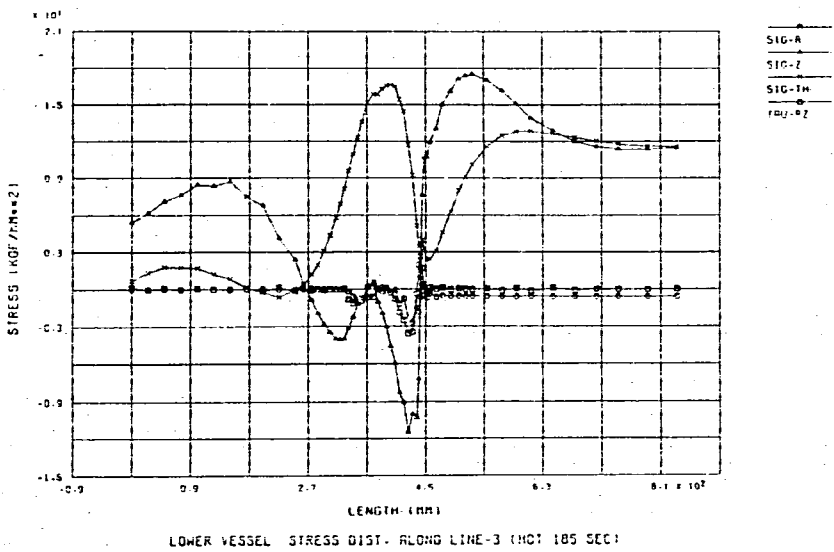
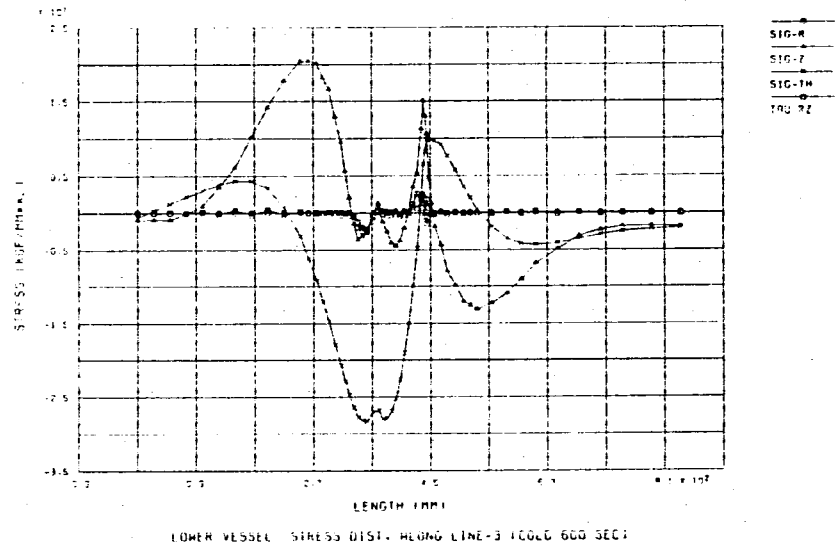
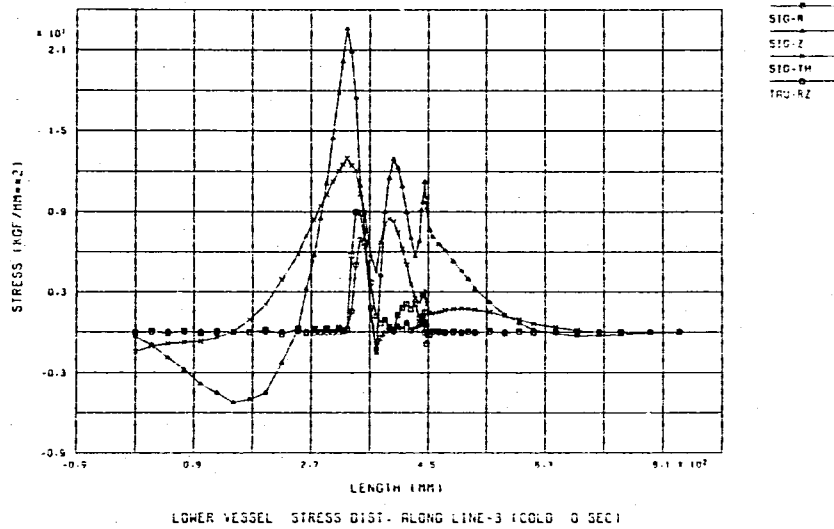


Fig. 2.4-9(c) Stress Distribution at Estimation Line (Lower Vessel)

## 2.5 出口ノズル

供試体出口ノズルは、入口ノズルと同様にサーマルスリーブ付の一体鍛造ノズルである。ただし、ノズルセーフエンドの形状は、入口ノズルとは異なり従来のセーフエンド付ノズルを採用している。

### 2.5.1 伝熱解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

出口ノズルモデルは、Fig. 2.1-2 に示す供試体構造の内、下部鏡から出口ノズルまでを解析範囲とし、荷重及び構造の対称性からFig. 2.5-1 に示すとおり軸対称要素を用いてモデル化する。要素総数 603 (内、熱伝達要素 153)、節点総数 1501 である。

供試体内部に設けられたサーマルスリーブ及びサーマルライナ内のナトリウムは、スタグナントとして取り扱いナトリウムの熱伝導のみを考慮する。

供試体容器内面のサーマルライナは、6 mm × 2 枚の SUS 304 製板材で、容器胴及びサーマルライナ間ギャップがそれぞれ 6 mm と成るように取付けられている。解析モデルでは、サーマルライナを 12 mm × 1 枚の SUS 304 の板とし、これと容器との間に 12 mm のナトリウム層をモデル化する。

##### b. 境界条件

伝熱解析用の熱的境界条件をFig. 2.5-2 に示す。境界条件は、第1報にて報告した伝熱流動解析から求めた熱過渡条件及び熱伝達率をサーマルスリーブ及びサーマルライナ内面に与える。また、その他の面は断熱として取り扱う。

#### (2) 解析方法

伝熱解析は、Fig. 2.5-2 に示す熱過渡をコールド→ホットの順で1サイクル(計 114 サイクル) 分入力する。解析ステップと経過時間並びに熱過渡のデジタル値の関係をTable 2.5-1 に示す。

#### (3) 解析結果

温度分布図をFig. 2.5-3 に、また、熱電対設置位置の温度履歴をFig. 2.5-4 に示す。

### 2.5.2 熱応力解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

熱応力解析は、伝熱解析モデルからサーマルライナ、サーマルスリーブ、スタグナントナトリウム及び熱伝達要素を除いた解析モデルを用いて実施した。解析

モデルをFig. 2.5-5 に示す。要素総数 3 6 0、節点総数 1 2 2 7である。

b. 境界条件

幾何学的境界条件はFig. 2.5-6 に示すとおり、下部鏡の上端に対称条件、ノズルの下端に配管との接続を考慮した連続条件を入力する。

(2) 解析方法

伝熱解析（1 1 4ステップ）の供試体の温度分布から2 0ステップを選択し、これらを荷重条件とした熱応力解析を実施する。

伝熱解析と熱応力解析の計算ステップの対応をTable 2.5-2 に示す。

(3) 解析結果

応力評価ライン及び評価断面をFig. 2.5-7 に示す。評価断面に発生する応力の時刻歴をFig. 2.5-8 に示す。また、構造物の表面に沿って設定した評価ラインの応力分布をFig. 2.5-9 に示す。応力を示す記号は入口ノズルと同様である。

Table 2.5-1 Heat Transfer Analysis Step (Outlet Nozzle)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱過渡 領域 M (°C)	熱過渡 領域 N (°C)
1	0.0	600.000	600.000
2	COLD 10.0	600.000	600.000
5	14.0	575.000	575.000
15	42.0	492.826	478.000
21	60.0	440.000	440.714
24	70.0	426.667	420.000
28	90.0	400.000	385.000
31	120.0	373.000	355.000
33	140.0	355.000	335.000
37	190.0	318.000	310.000
39	265.0	298.263	292.000
40	266.0	298.000	291.880
41	300.0	293.580	287.800
42	365.0	285.130	280.000
43	366.0	285.000	279.940
45	565.0	272.065	268.000
46	566.0	272.000	267.966
47	600.0	270.547	266.808
48	800.0	262.000	260.000
50	1080.0	250.000	250.508
51	1095.0	250.000	250.000
52	1200.0	250.000	250.000
54	1800.0	250.000	250.000
57	3600.0	250.000	250.000
58	HOT 22.0	254.400	253.000
59	25.0	255.000	259.375
62	30.0	277.000	270.000
67	40.0	325.000	318.000
74	60.0	381.667	382.167
83	88.0	461.000	472.000
87	100.0	495.000	494.800
89	108.0	504.600	510.000
91	120.0	519.000	523.333
93	135.0	537.000	540.000
95	185.0	553.364	560.000
96	190.0	555.000	560.667
98	260.0	568.000	570.000
99	300.0	570.800	574.000
100	360.0	575.000	580.000
101	560.0	585.000	587.000
102	600.0	585.833	588.000
103	800.0	590.000	593.000
104	1080.0	595.833	600.000
105	1200.0	598.333	600.000
106	1280.0	600.000	600.000
108	1800.0	600.000	600.000
111	3600.0	600.000	600.000
114	7200.0	600.000	600.000

Table 2.5-2 Thermal Stress Analysis Step (Outlet Nozzle)

熱応力解析 インターバル番号	インターバル内 ステップ数	伝熱解析 ステップ	経過時間 (sec)
1	1	1	0.000
2	1	15	42.000
3	1	21	60.000
4	1	24	70.000
5	1	28	90.000
6	1	31	120.000
7	1	35	165.000
8	1	39	265.000
9	1	43	366.000
10	1	47	600.000
11	1	57	3600.000
12	1	62	3630.000
13	1	67	3640.000
14	1	74	3660.000
15	1	83	3688.000
16	1	86	3697.000
17	1	89	3708.000
18	1	92	3727.500
19	1	95	3785.000
20	1	99	3900.000

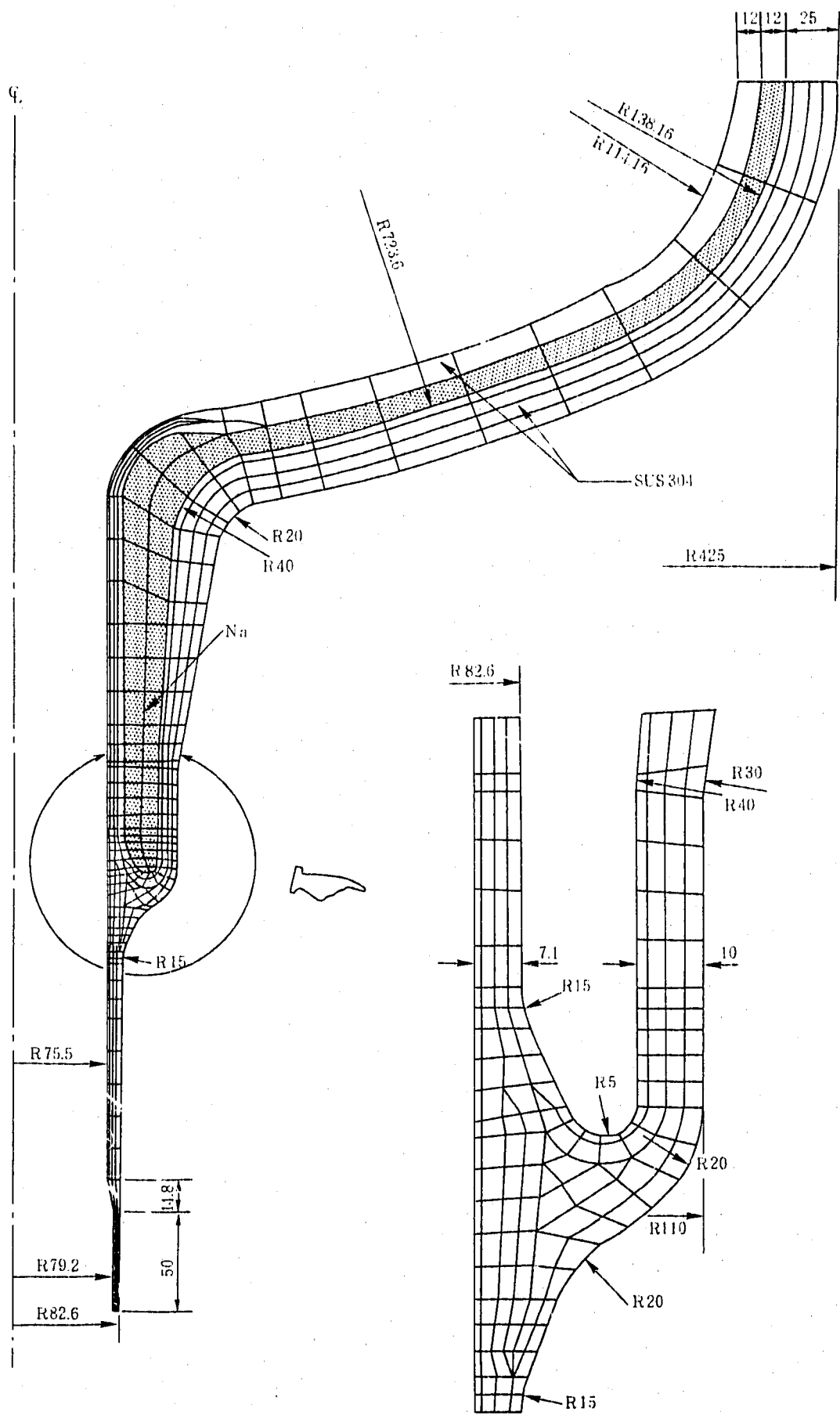


Fig. 2.5-1 Heat Transfer Analysis Model (Outlet Nozzle)

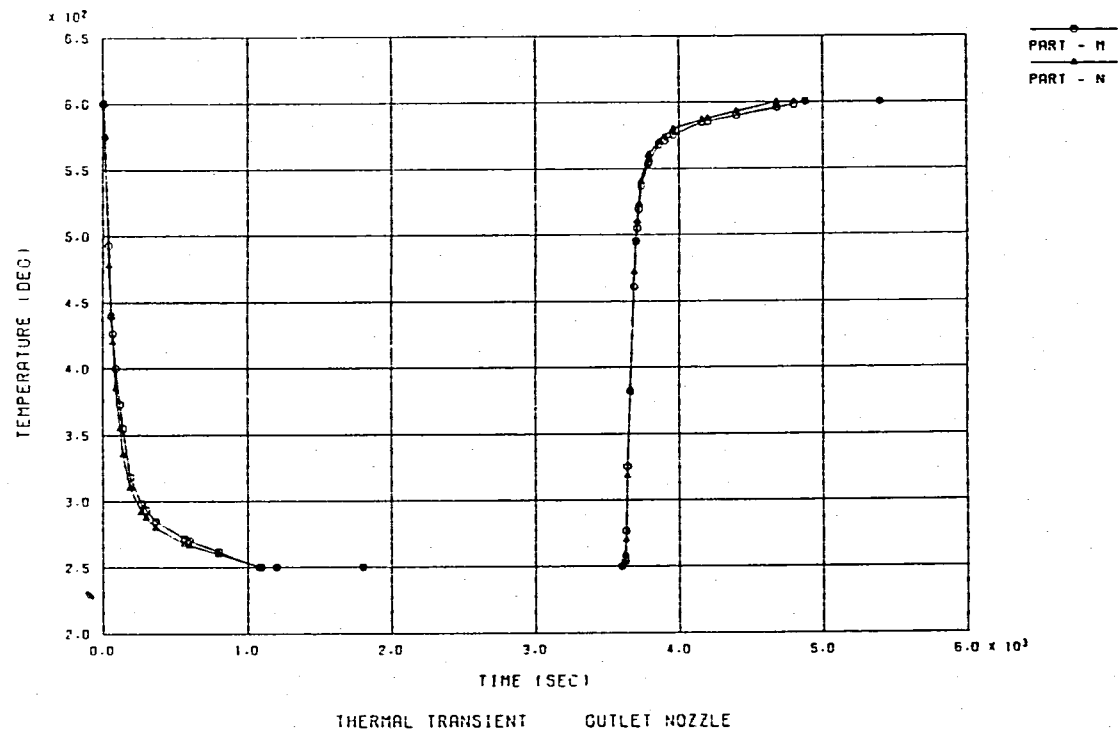
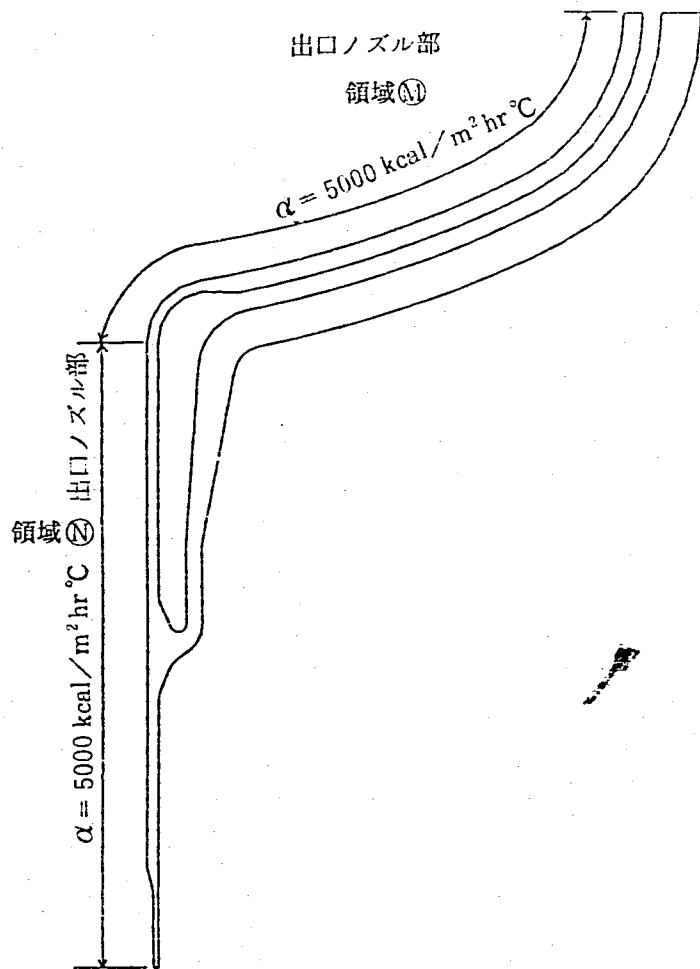
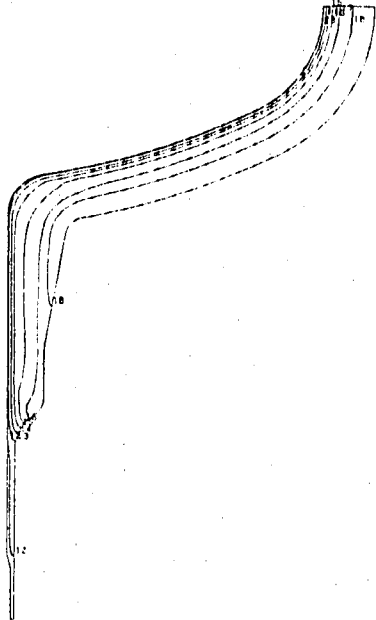


Fig. 2.5-2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Outlet Nozzle)

FINNS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000



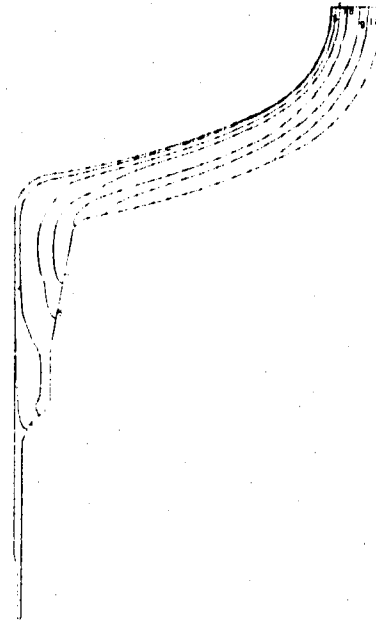
STEP NO. 21

GEOM. SCALE 1:80 0000

OUTLET NOZZLE TEMP. : COLD 50 SEC

FINNS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000



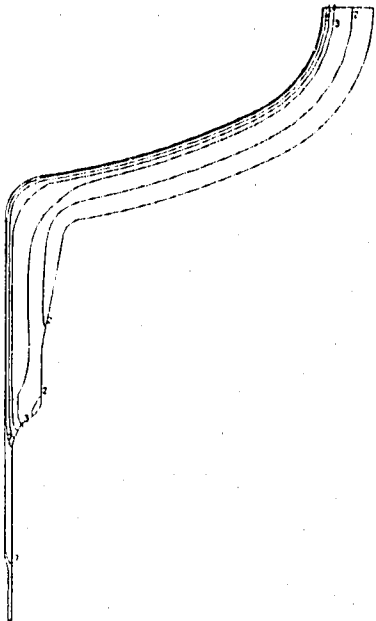
STEP NO. 41

GEOM. SCALE 1:80 0000

OUTLET NOZZLE TEMP. : COLD 300 SEC

FINNS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000



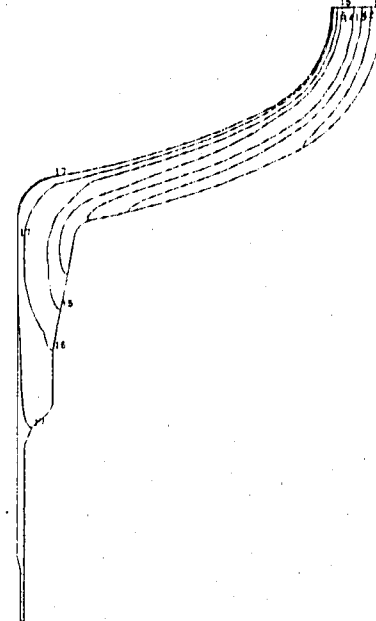
STEP NO. 74

GEOM. SCALE 1:80 0000

OUTLET NOZZLE TEMP. : HOT 50 SEC

FINNS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000



STEP NO. 99

GEOM. SCALE 1:80 0000

OUTLET NOZZLE TEMP. : HOT 300 SEC

Fig. 2.5-3 Temperature Contour (Outlet Nozzle)



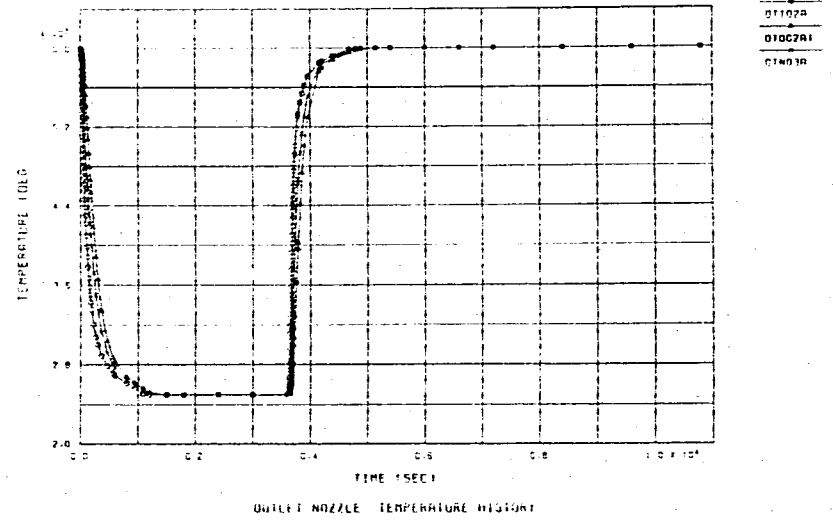
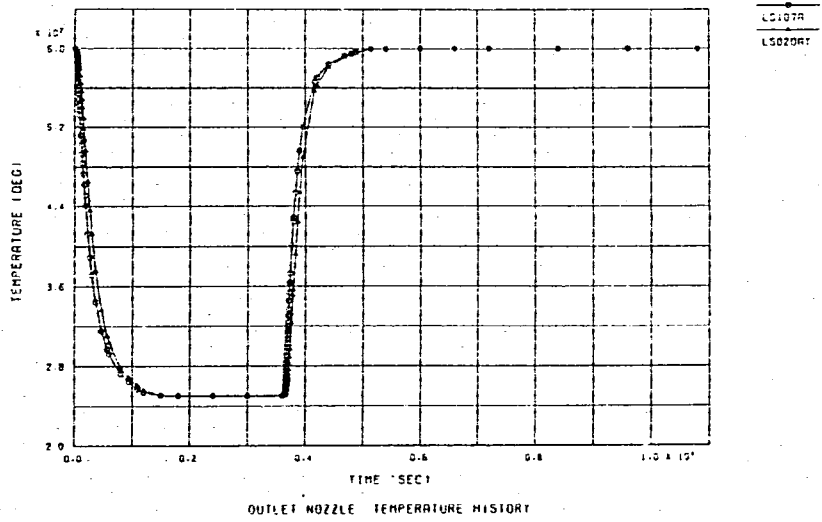
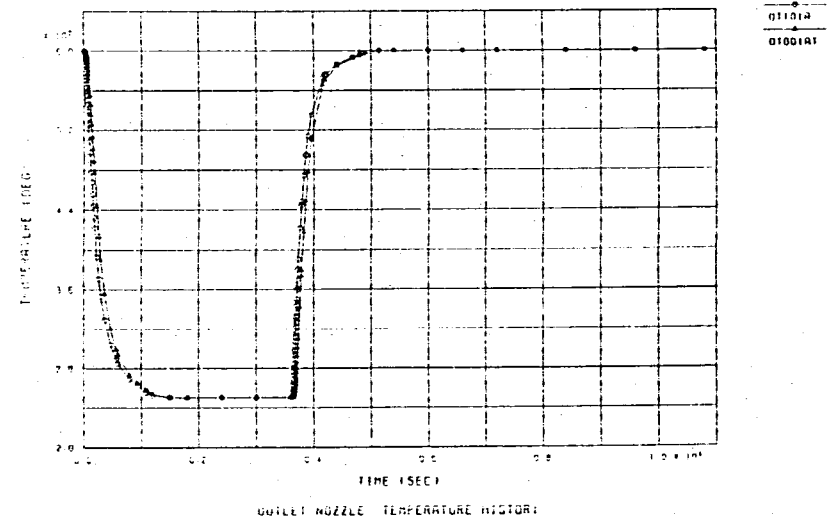
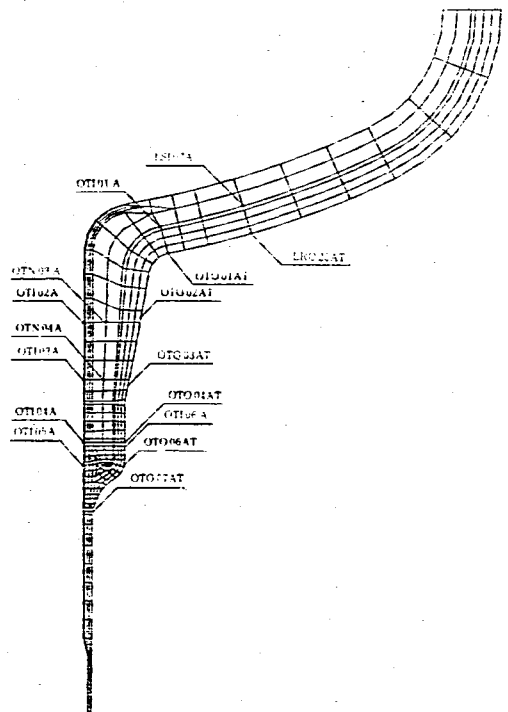


Fig. 2.5-4(a) Temperature History at Thermocouple Location (Outlet Nozzle)

-74-

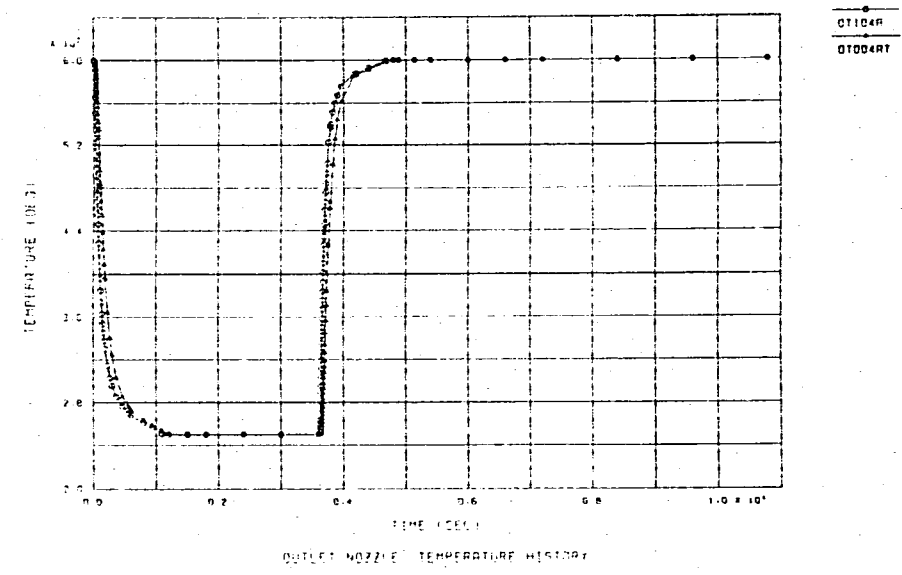
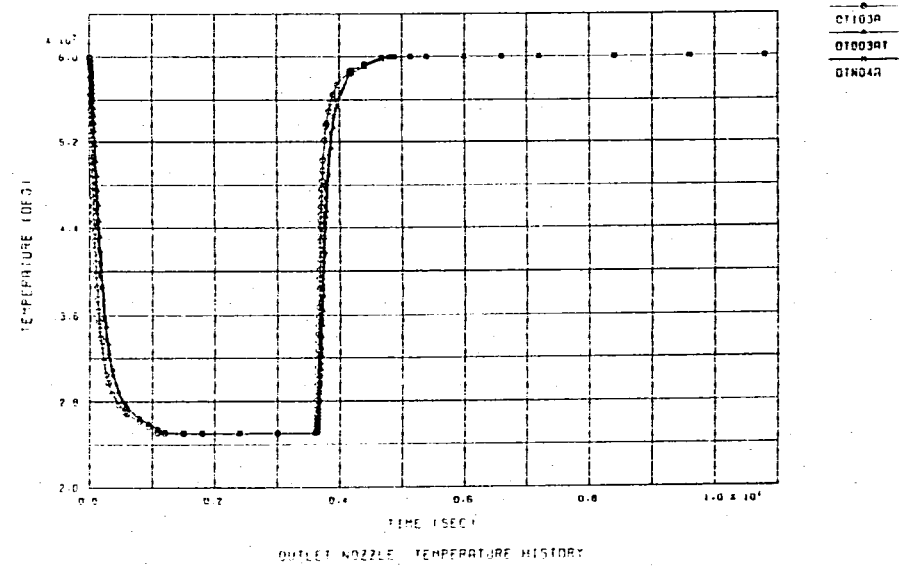
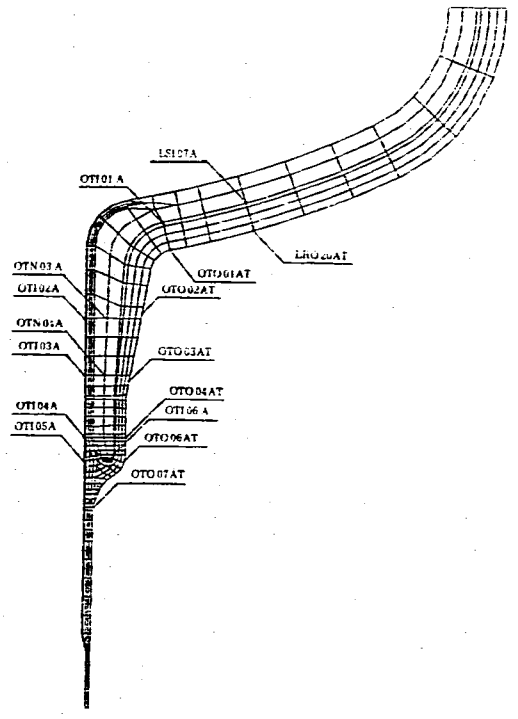


Fig. 2.5-4(b) Temperature History at Thermocouple Location (Outlet Nozzle)

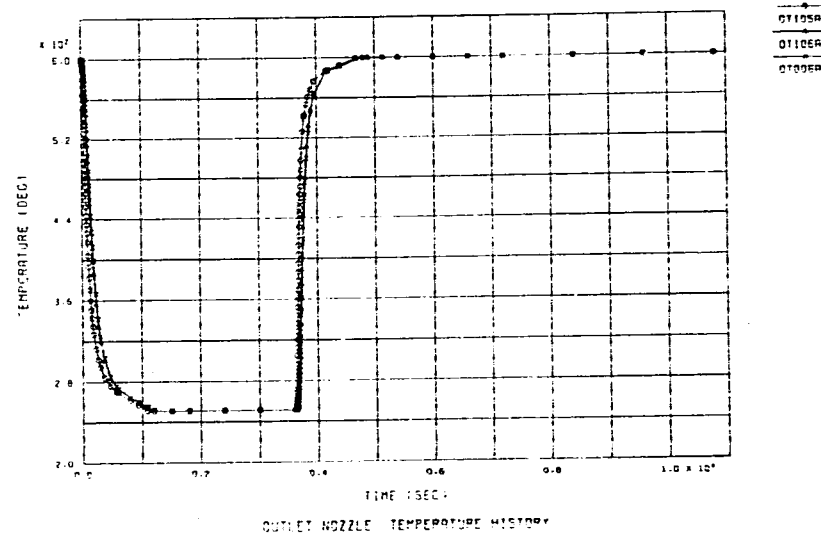
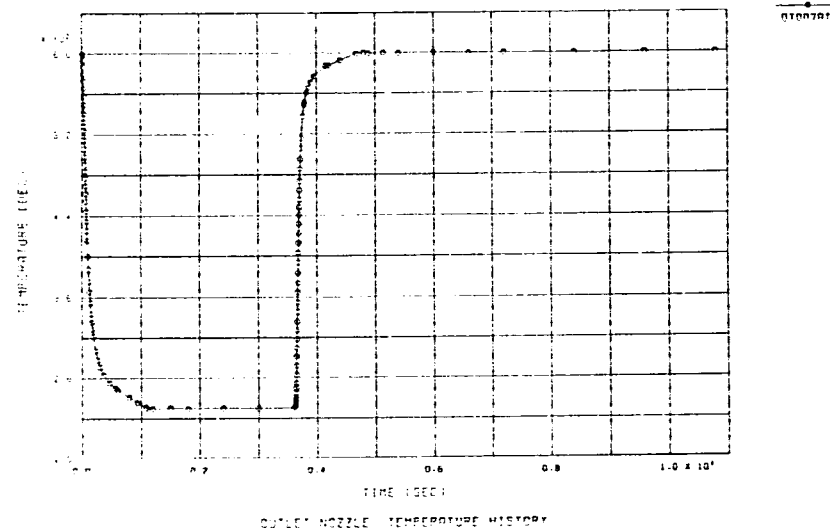
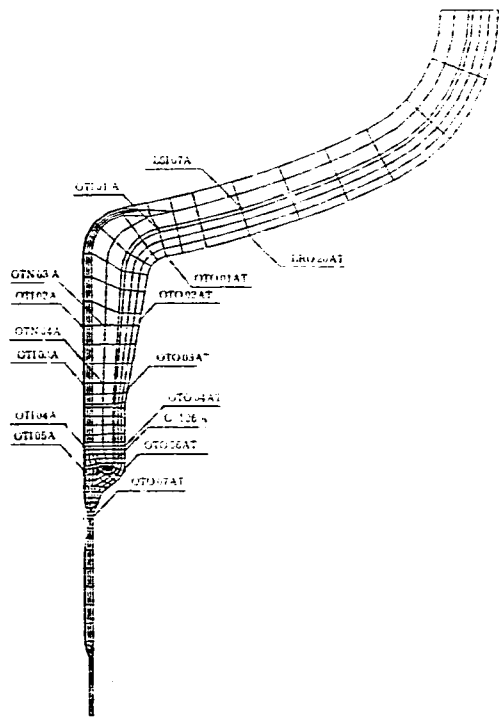


Fig. 2.5-4(c) Temperature History at Thermocouple Location (Outlet Nozzle)

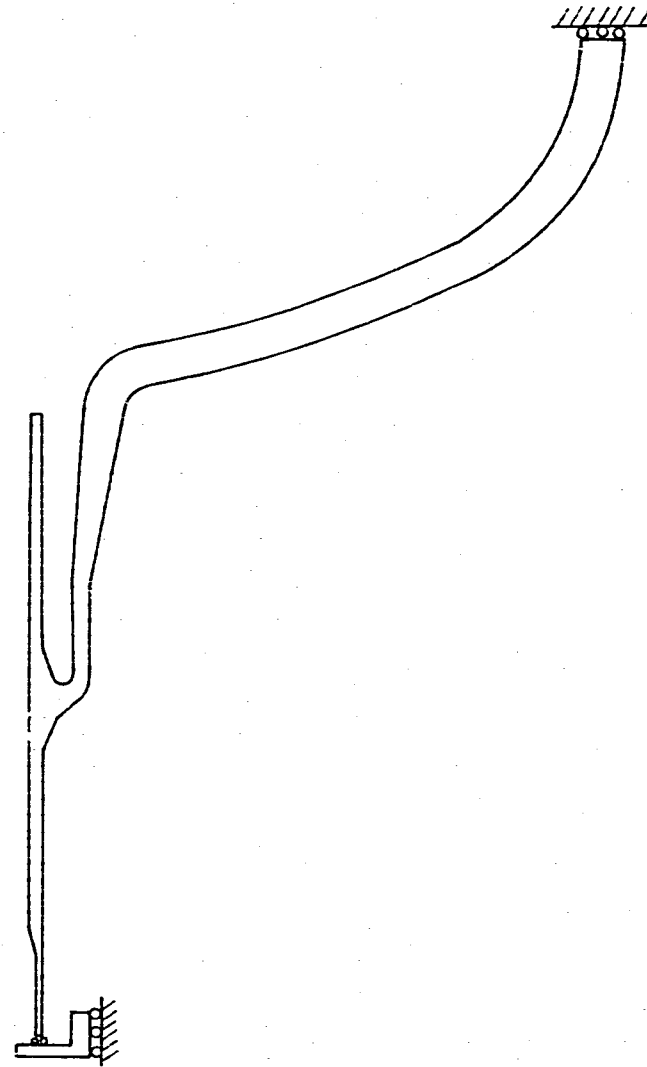
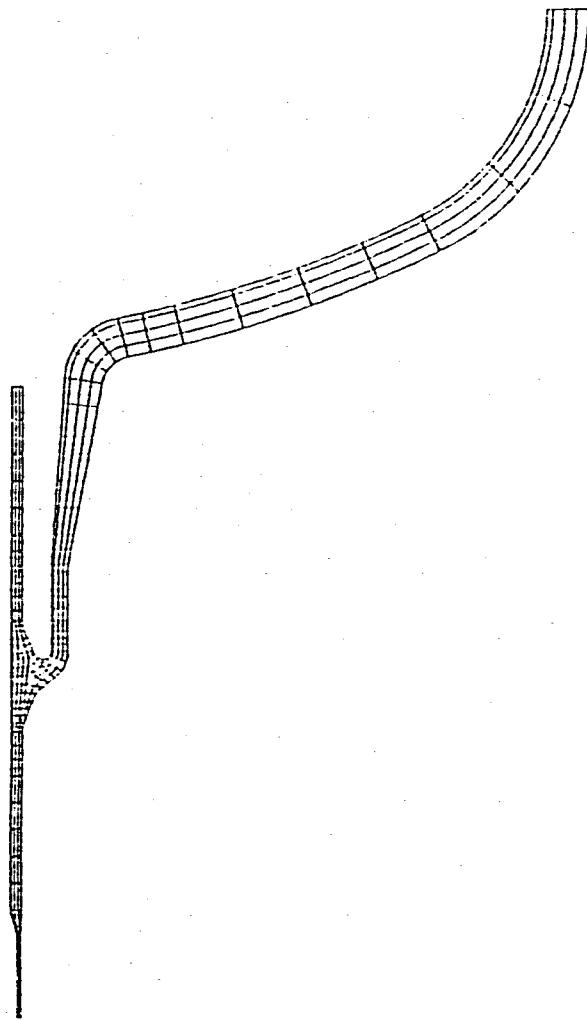


Fig.2.5-5 Thermal Stress Analysis Model (Outlet Nozzle) Fig.2.5-6 Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Outlet Nozzle)

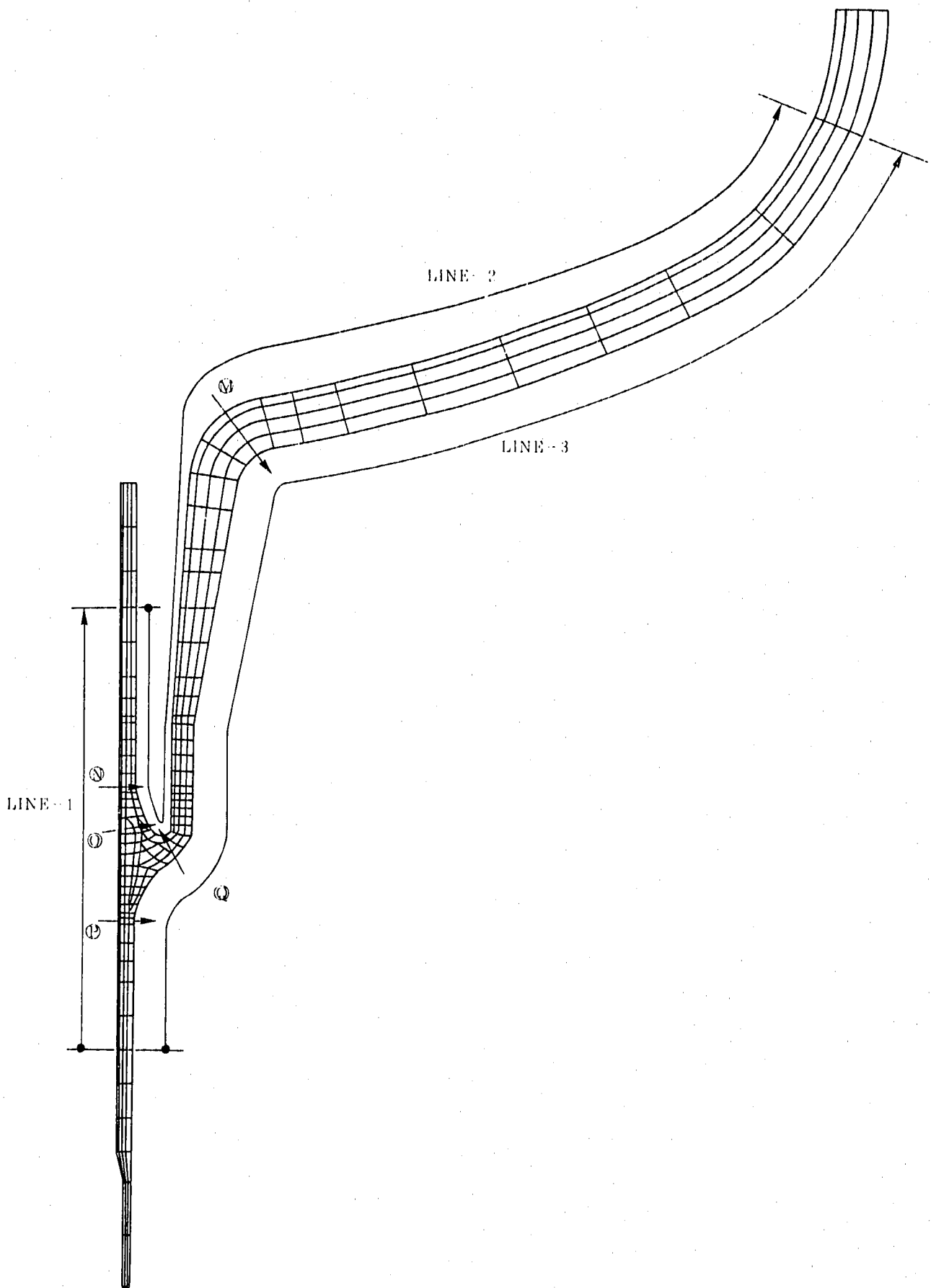
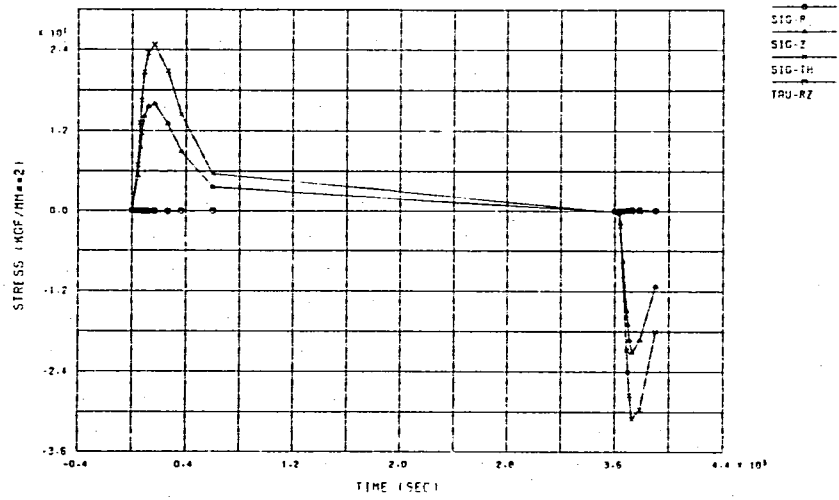
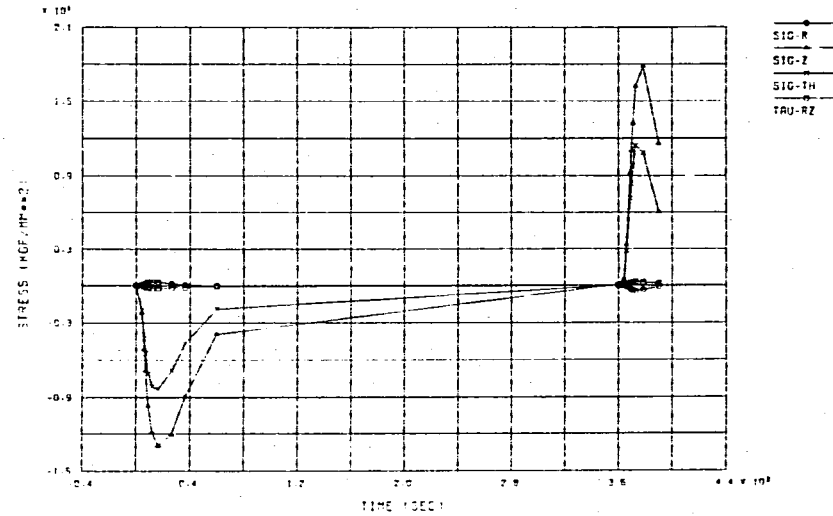


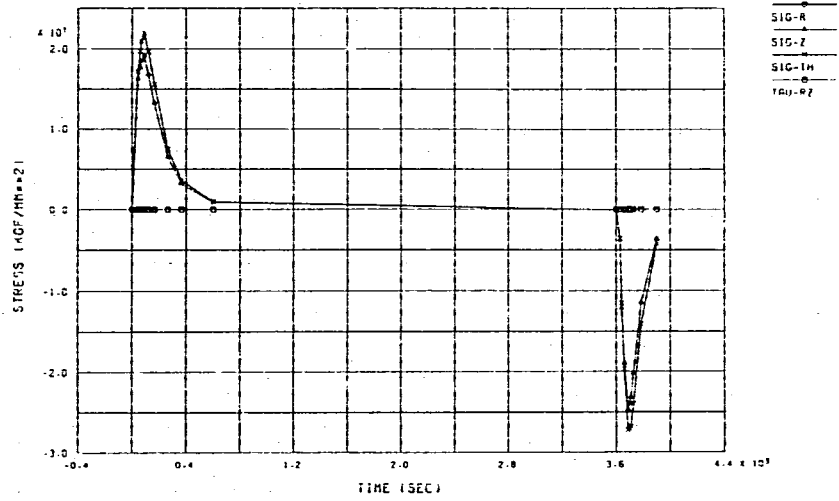
Fig. 2.5-7 Stress Estimation Line and Section (Outlet Nozzle)



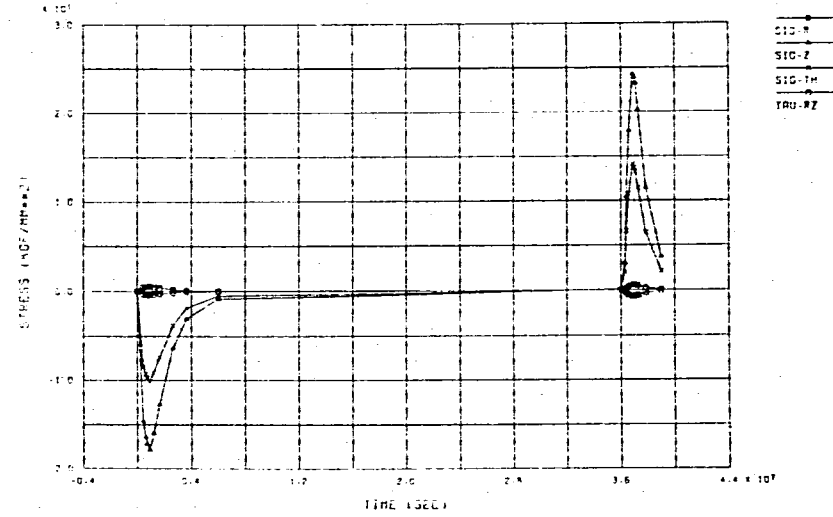
OUTLET NOZZLE STRESS HISTORY SECTION-H INNER



OUTLET NOZZLE STRESS HISTORY SECTION-H OUTER

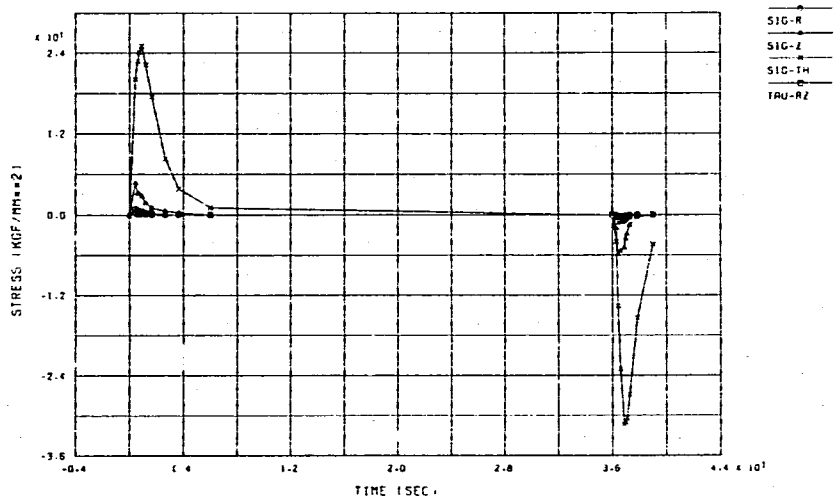


OUTLET NOZZLE STRESS HISTORY SECTION-N INNER

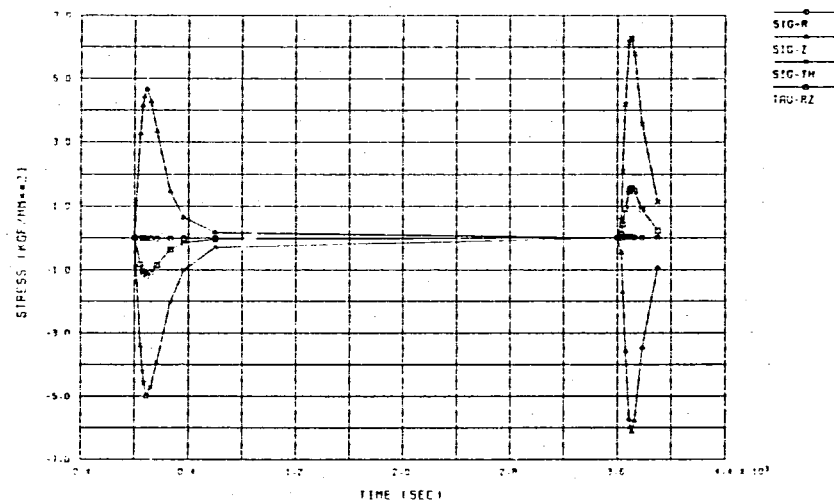


OUTLET NOZZLE STRESS HISTORY SECTION-N OUTER

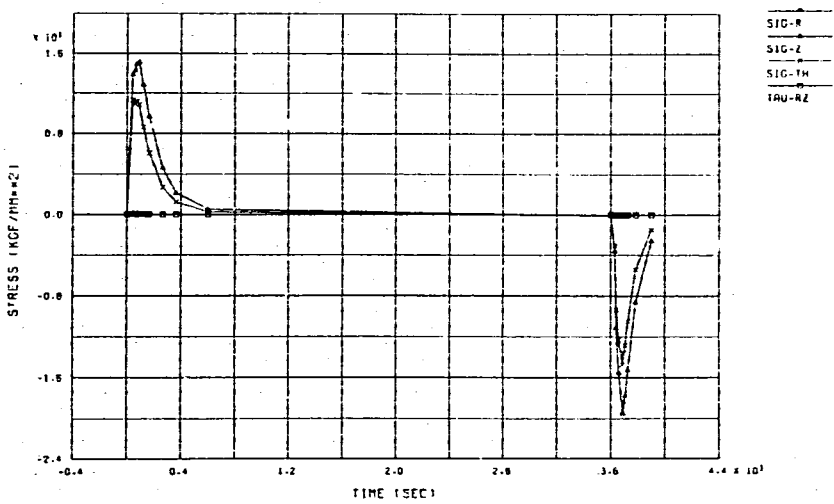
Fig. 2.5-8(a) Stress History (Outlet Nozzle)



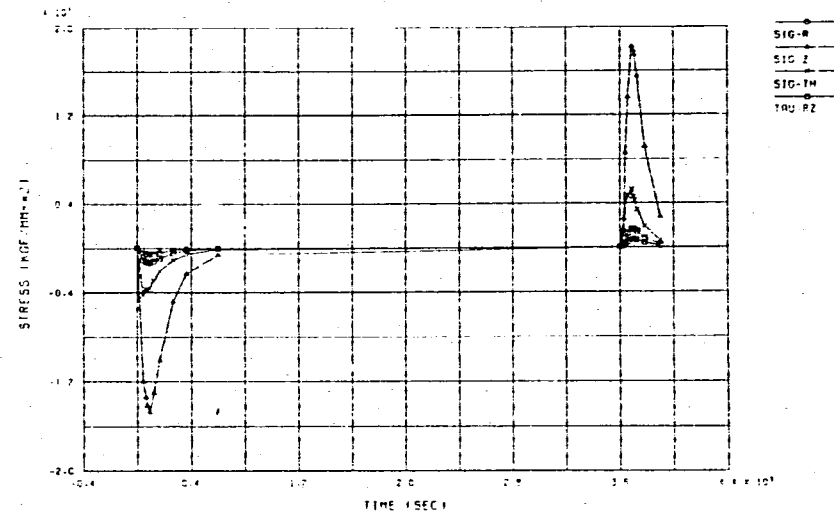
OUTLET NOZZLE STRESS HISTORY SECTION-O INNER



OUTLET NOZZLE STRESS HISTORY SECTION-O OUTER



OUTLET NOZZLE STRESS HISTORY SECTION-P INNER



OUTLET NOZZLE STRESS HISTORY SECTION-P OUTER

Fig. 2.5-8(b) Stress History (Outlet Nozzle)

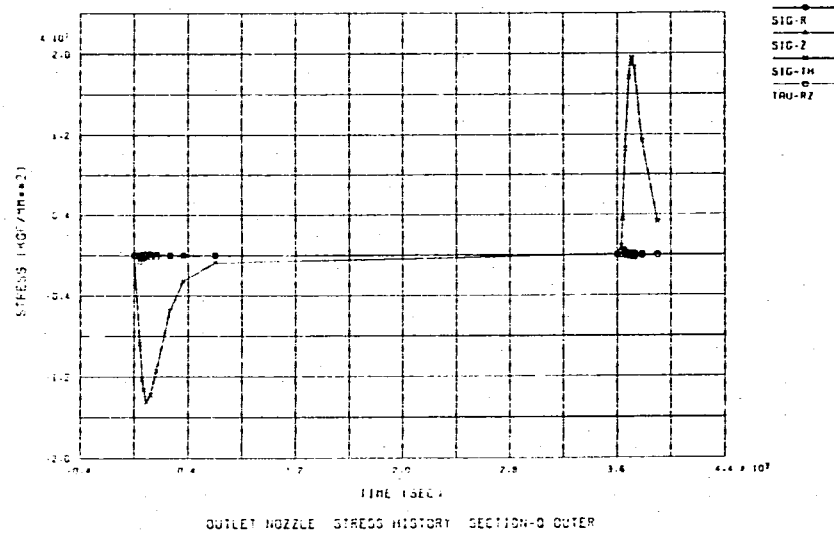
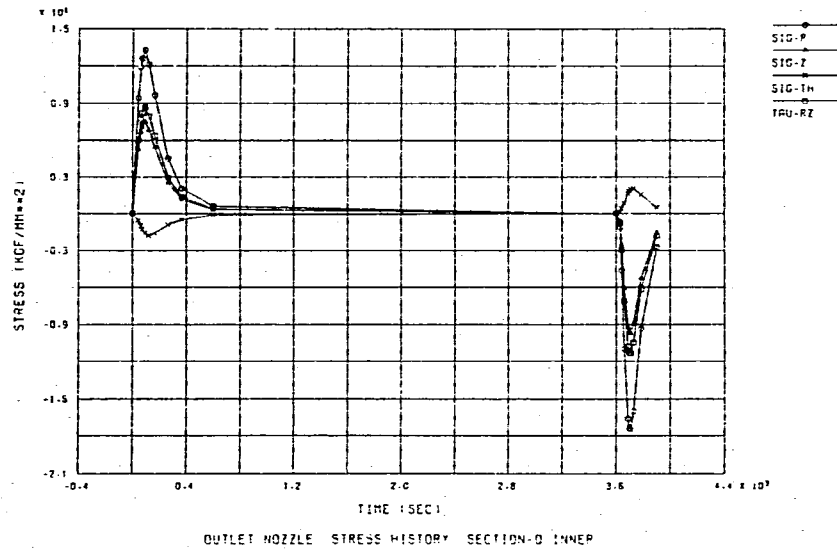
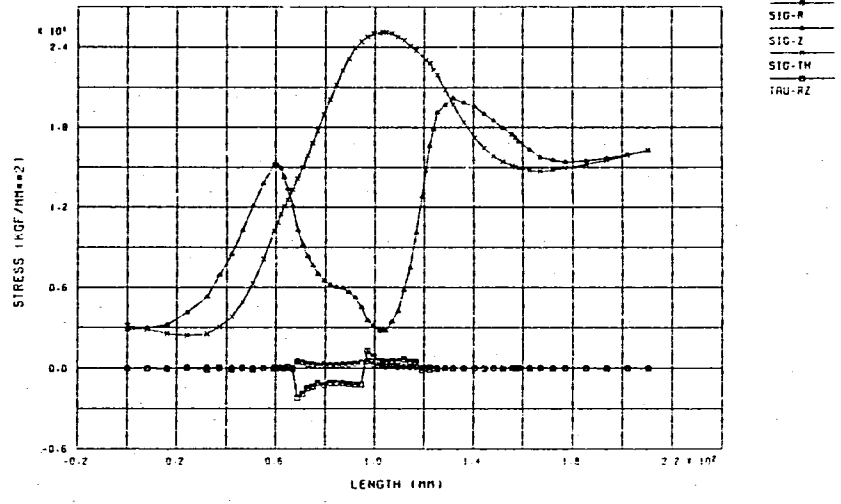
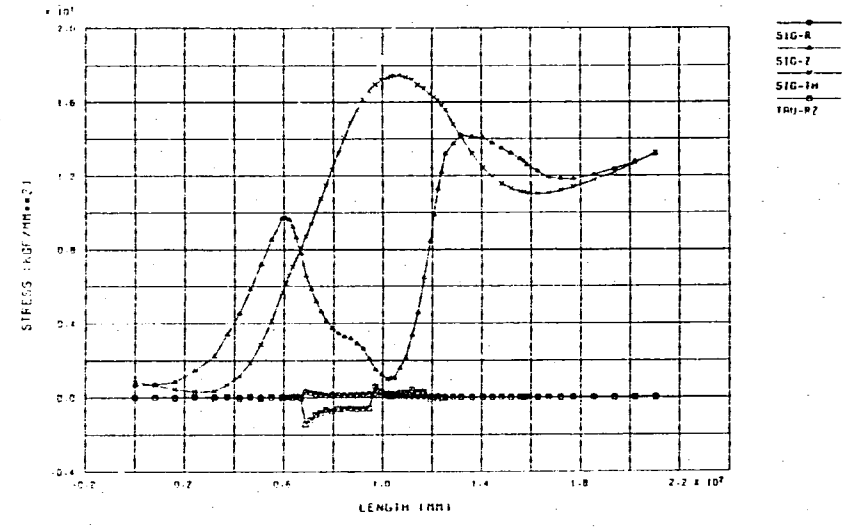


Fig.2.5-8(c) Stress History (Outlet Nozzle)

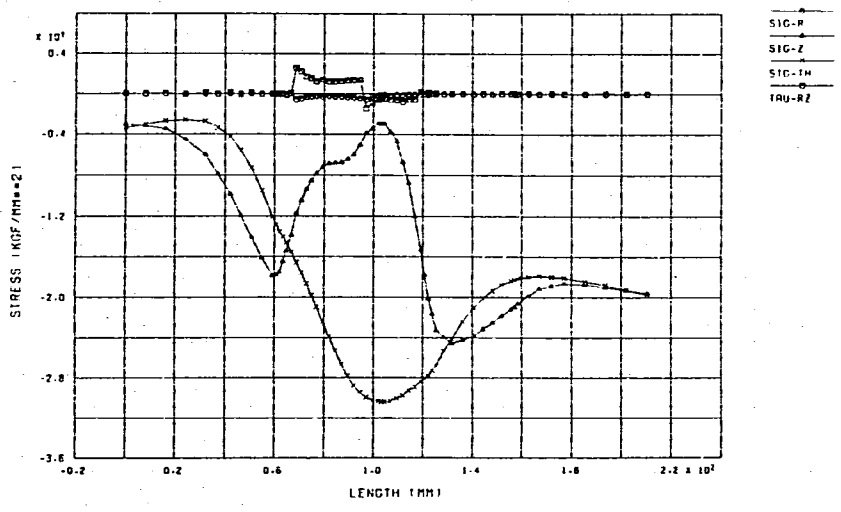




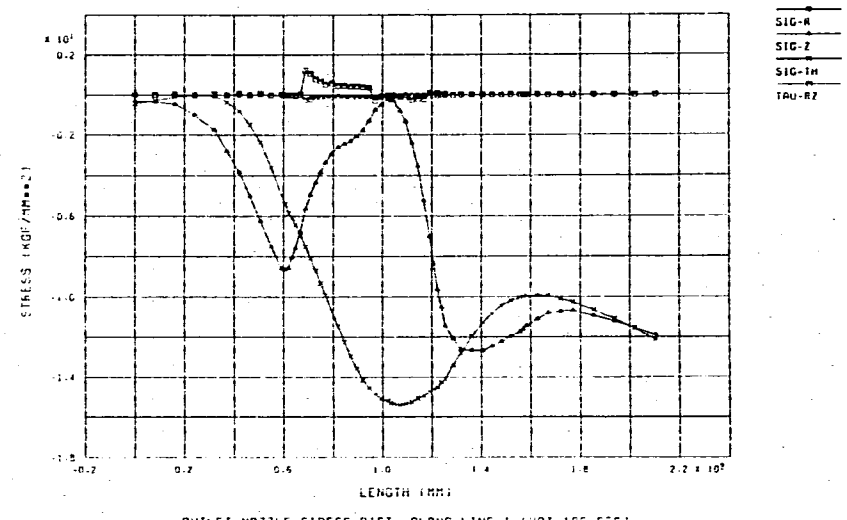
OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-1 (COLD 90 SEC)



OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-1 (COLD 165 SEC)

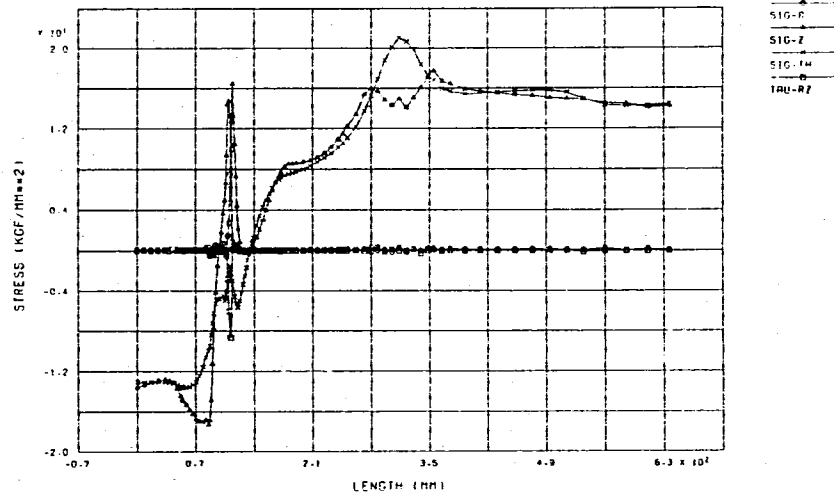


OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-1 (HOT 108 SEC)

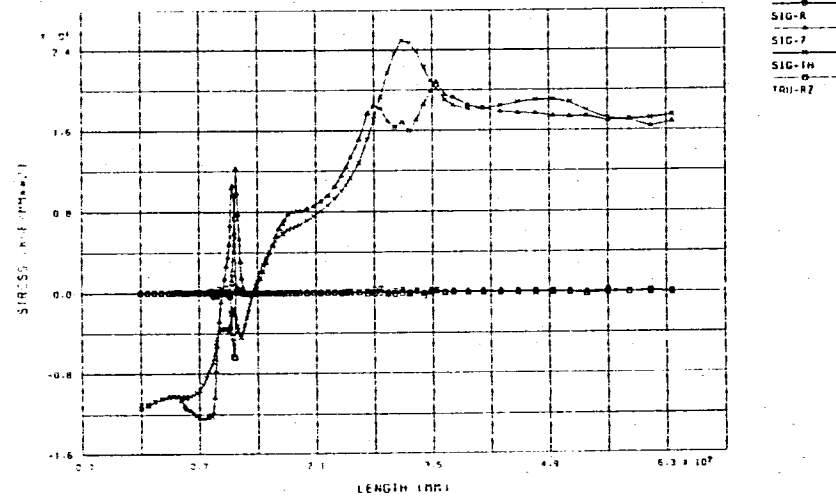


OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-1 (HOT 165 SEC)

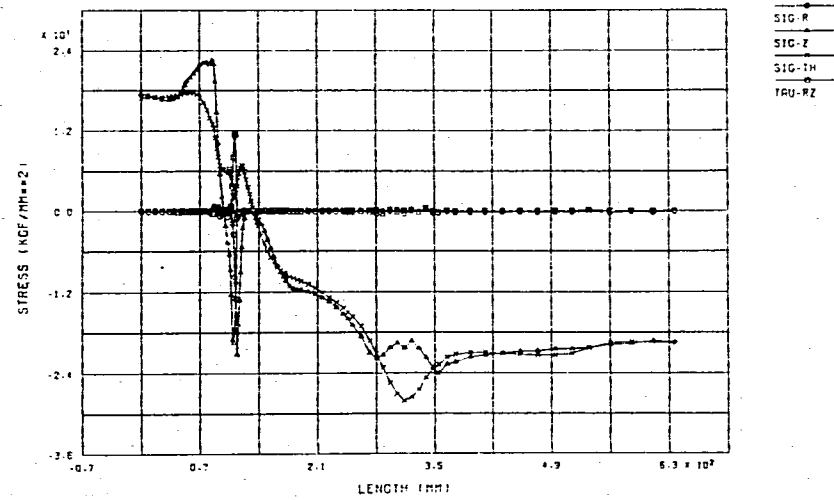
Fig. 2.5-9(a) Stress Distribution at Estimation Line (Outlet Nozzle)



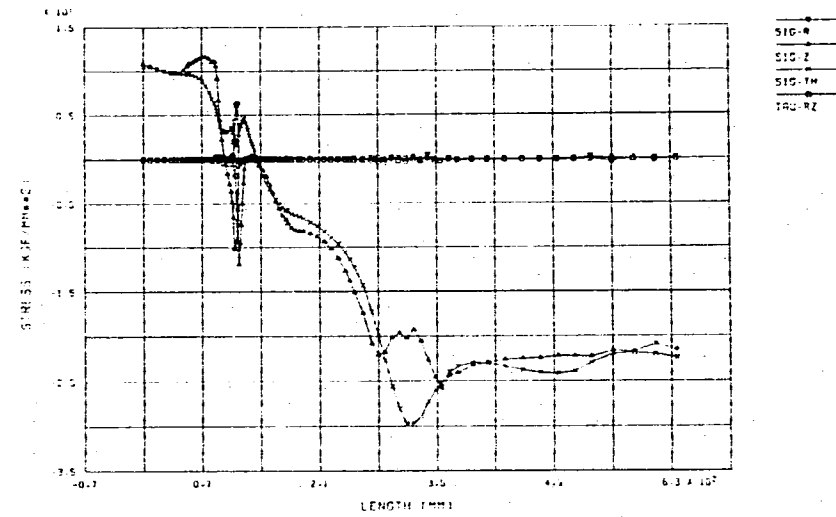
OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-2 (COOL 90 SEC)



OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-2 (COOL 100 SEC)

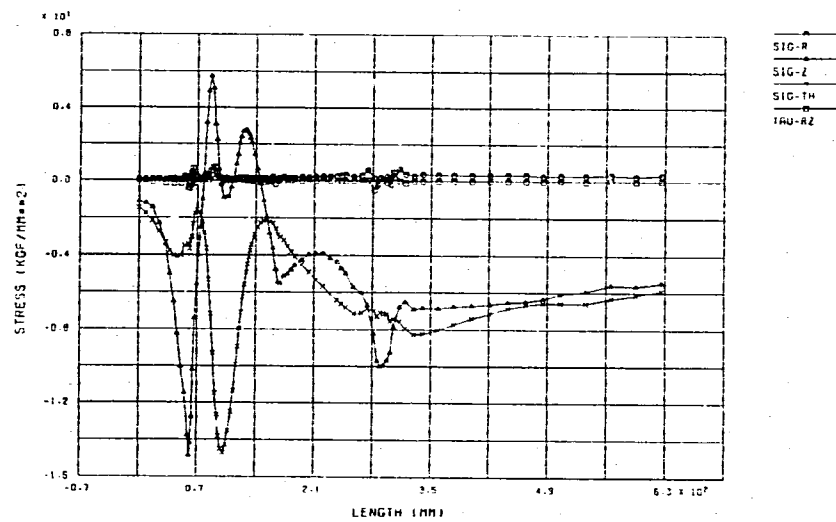


OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-2 (HOT 108 SEC)

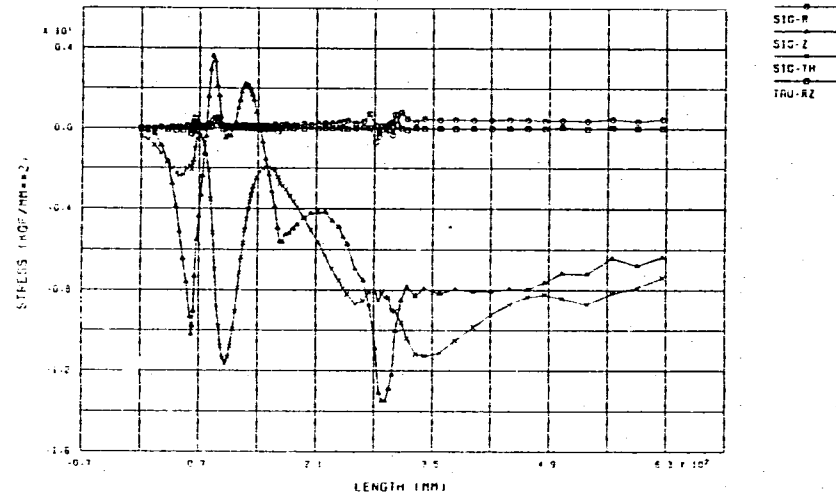


OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-2 (HOT 105 SEC)

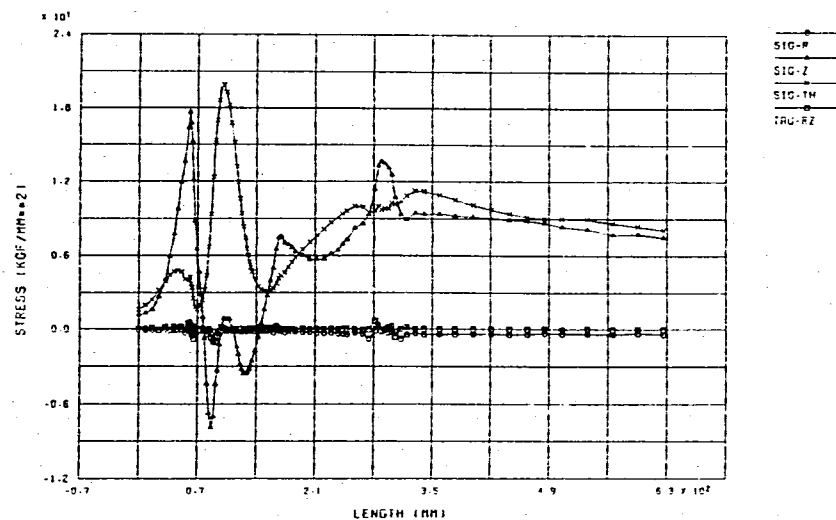
Fig. 2.5-9(b) Stress Distribution at Estimation Line (Outlet Nozzle)



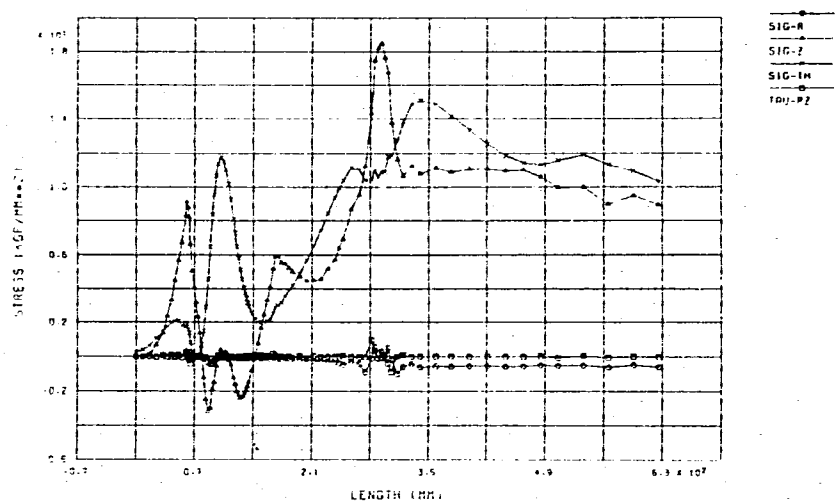
OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-3 (COLD 90 SEC)



OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-3 (COLD 165 SEC)



OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-3 (HOT 106 SEC)



OUTLET NOZZLE STRESS DIST. ALONG LINE-2 (HOT 165 SEC)

Fig. 2.5-9(c) Stress Distribution at Estimation Line (Outlet Nozzle)

## 2.6 中子リング

中子リングモデルは、中子リングとその上下の中子胴をモデル化したものである。

### 2.6.1 伝熱解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

中子モデルは、Fig. 2.1-2 に示す供試体構造の内、中子リングとその上下の中子胴を解析範囲とし、荷重及び構造の対称性からFig. 2.6-1 に示すとおり軸対称要素を用いてモデル化する。要素総数320（内、熱伝達要素24）、節点総数935である。

供試体内面に設けられたサーマルライナ内のナトリウムは、スタグナントとして取り扱いナトリウムの熱伝導のみを考慮する。また、中子内のナトリウムについても対流防止板によって自然対流が抑制されるものと考え、熱容量を考慮したスタグナントナトリウムとしてモデル化する。

##### b. 境界条件

伝熱解析用の熱的境界条件をFig. 2.6-2 に示す。境界条件は、第1報にて報告した伝熱流動解析から求めた熱過渡条件及び熱伝達率をサーマルライナ外面に与えた。また、その他の面は断熱として取り扱った。

#### (2) 解析方法

伝熱解析は、Fig. 2.6-2 に示す熱過渡をコールド→ホットの順に1サイクル（計113ステップ）分入力した。解析ステップと経過時間並びに熱過渡のデジタル値の関係をTable 2.6-1 に示す。

#### (3) 解析結果

解析結果として、温度分布図をFig. 2.6-3 に、また、熱電対設置位置の温度履歴をFig. 2.6-4 に示す。

### 2.6.2 熱応力解析

#### (1) 解析条件

##### a. 解析モデル

熱応力解析は、伝熱解析モデルからサーマルライナ、スタグナントナトリウム及び熱伝達要素を除いた解析モデルを用いて実施した。解析モデルをFig. 2.6-5 に示す。要素総数148、節点総数515である。

##### b. 境界条件

幾何学的境界条件はFig. 2.6-6 に示すとおり、中子胴の上端に連続条件、中子胴の下端に対称条件を入力した。

(2) 解析方法

伝熱解析（113ステップ）の供試体の温度分布から16ステップを選択し、これらを荷重条件とした熱応力解析を実施する。

伝熱解析と熱応力解析の計算ステップの対応をTable 2.6-2 に示す。

(3) 解析結果

応力評価ライン及び評価断面をFig. 2.6-7 に示す。評価断面に発生する応力の時刻歴をFig. 2.6-8 に示す。また、構造物の表面に沿って設定した評価ラインの応力分布をFig. 2.6-9 に示す。応力を示す記号は入口ノズルと同様である。

Table 2.6-1 Heat Transfer Analysis Step (Inner Shell Ring)

解析ステップ	経過時間 (sec)	熱過渡 領域 H (°C)
1	0.0	600.000
10	C O L D 6.0	515.000
13	12.0	493.000
25	40.0	382.000
28	60.0	356.667
32	85.0	325.000
34	120.0	306.100
35	135.0	298.000
37	188.0	285.000
38	266.0	275.000
39	300.0	271.600
40	366.0	265.000
41	566.0	260.000
42	600.0	259.273
43	800.0	255.000
44	1034.0	250.000
45	1200.0	250.000
47	1800.0	250.000
50	3600.0	250.000
51	H O T 2.0	250.000
53	3.0	263.000
58	4.0	313.000
62	5.0	280.000
63	8.0	276.000
64	10.0	277.000
76	15.0	395.000
85	20.0	480.000
90	30.0	525.000
93	40.0	552.000
95	50.0	566.000
96	60.0	575.000
97	80.0	580.000
98	120.0	584.000
99	130.0	585.000
100	200.0	587.000
101	300.0	588.000
102	400.0	590.000
103	600.0	594.000
104	800.0	596.000
105	1200.0	600.000
107	1800.0	600.000
110	3600.0	600.000
113	7200.0	600.000

Table 2.6-2 Thermal Stress Analysis Step (Inner Shell Ring)

熱 応 力 解 析 インターバル番号	インターバル内 ステップ数	伝 熱 解 析 ステップ	経 過 時 間 (sec)
1	1	1	0.000
2	1	19	26.000
3	1	25	40.000
4	1	30	72.500
5	1	32	85.000
6	1	34	120.000
7	1	37	188.000
8	1	39	300.000
9	1	50	3600.000
10	1	76	3615.000
11	1	85	3620.000
12	1	93	3640.000
13	1	96	3660.000
14	1	98	3720.000
15	1	100	3800.000
16	1	102	4000.000

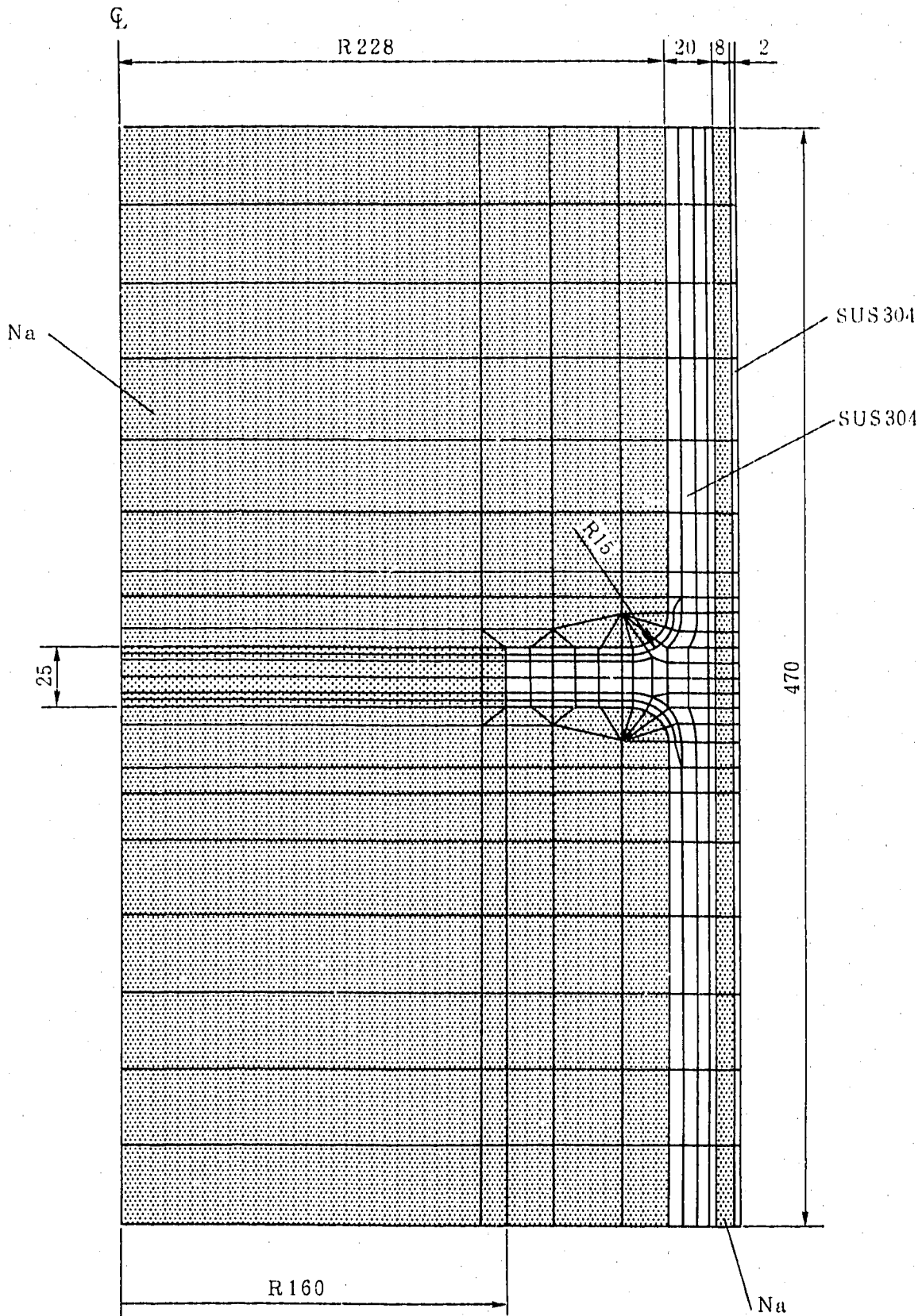


Fig. 2.6-1 Heat Transfer Analysis Model (Inner Shell Ring)



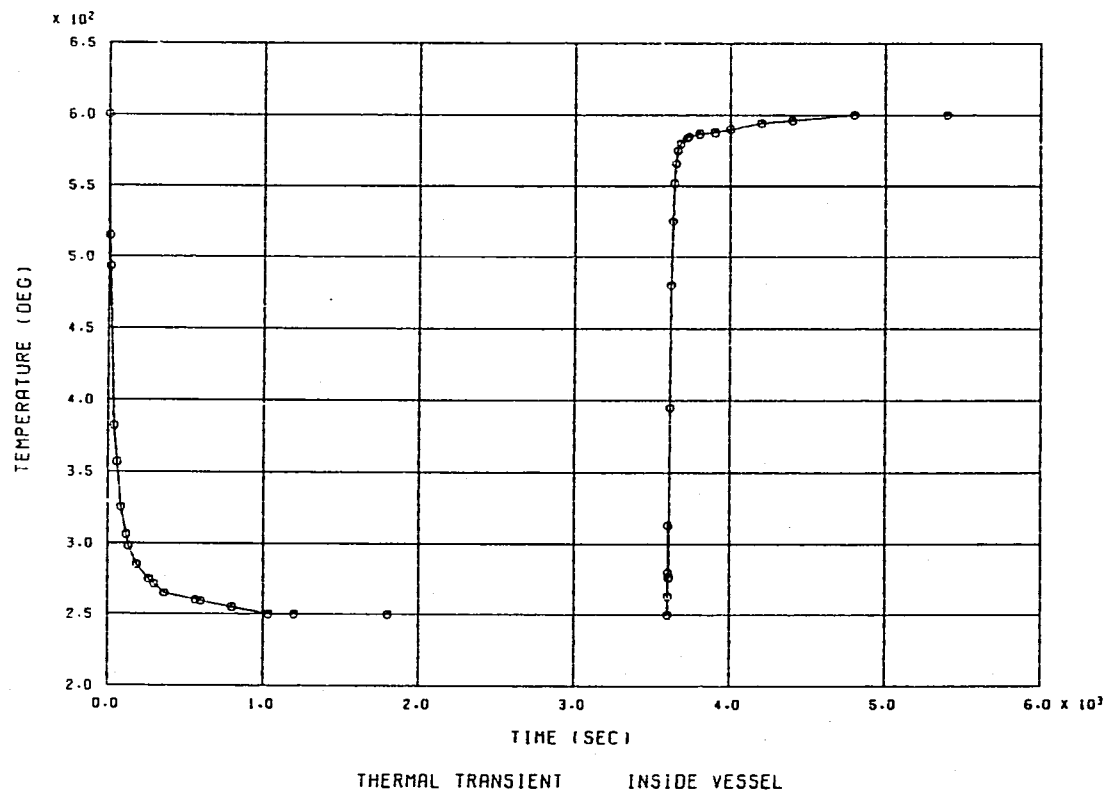
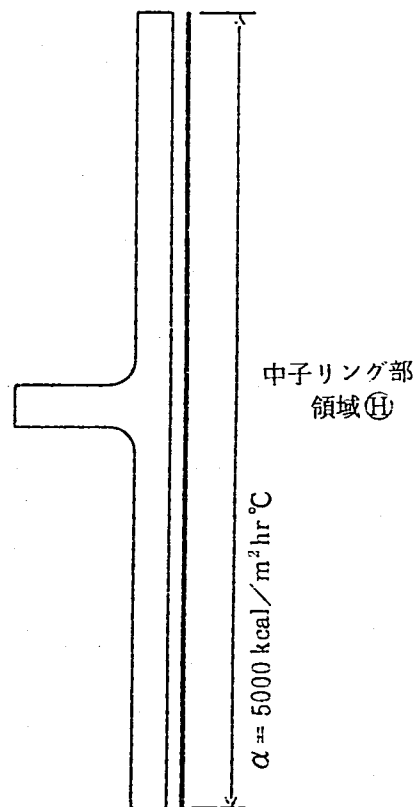
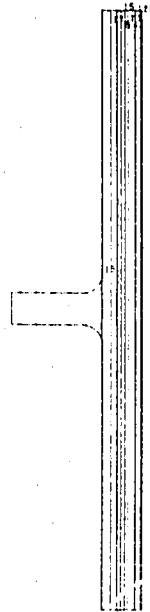


Fig.2.6-2 Boundary Condition for Heat Transfer Analysis (Inner Shell Ring)

FINNS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000



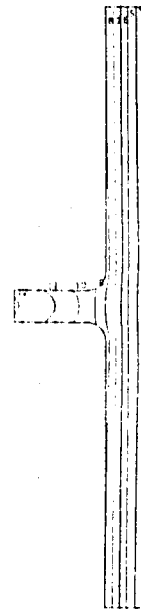
STEP NO. 25

GEOM. SCALE 1: 10000

INSIDE VESSEL TEMPERATURE ( COLD 45 SEC )

FINNS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000



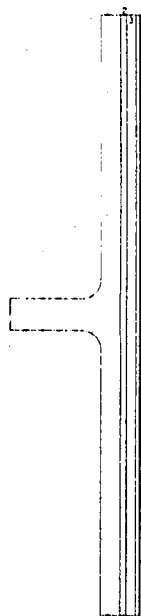
STEP NO. 30

GEOM. SCALE 1: 10000

INSIDE VESSEL TEMPERATURE ( COLD 300 SEC )

FINNS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000



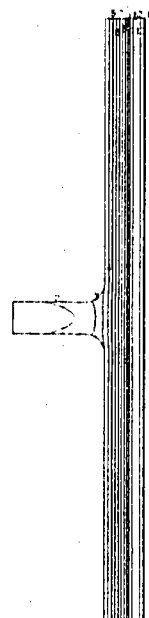
STEP NO. 76

GEOM. SCALE 1: 80000

INSIDE VESSEL TEMPERATURE ( HOT 15 SEC )

FINNS  
TEMPERATURE

- CONTOUR VALUES
- 1 240.0000
  - 2 260.0000
  - 3 280.0000
  - 4 300.0000
  - 5 320.0000
  - 6 340.0000
  - 7 360.0000
  - 8 380.0000
  - 9 400.0000
  - 10 420.0000
  - 11 440.0000
  - 12 460.0000
  - 13 480.0000
  - 14 500.0000
  - 15 520.0000
  - 16 540.0000
  - 17 560.0000
  - 18 580.0000
  - 19 600.0000
  - 20 620.0000

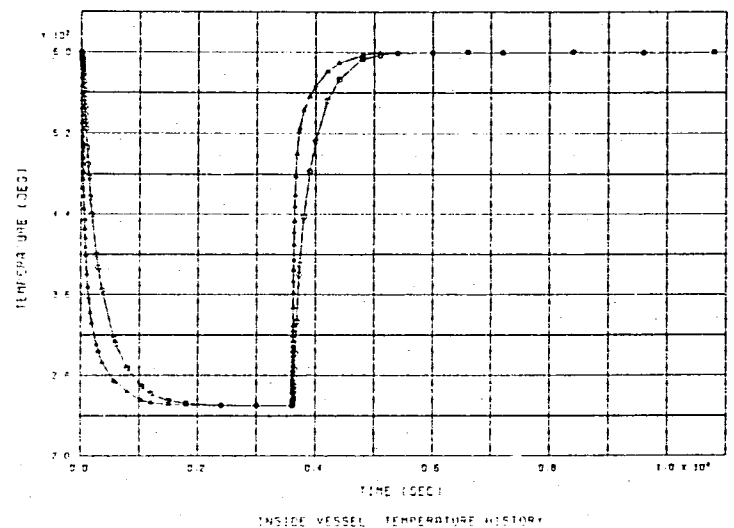
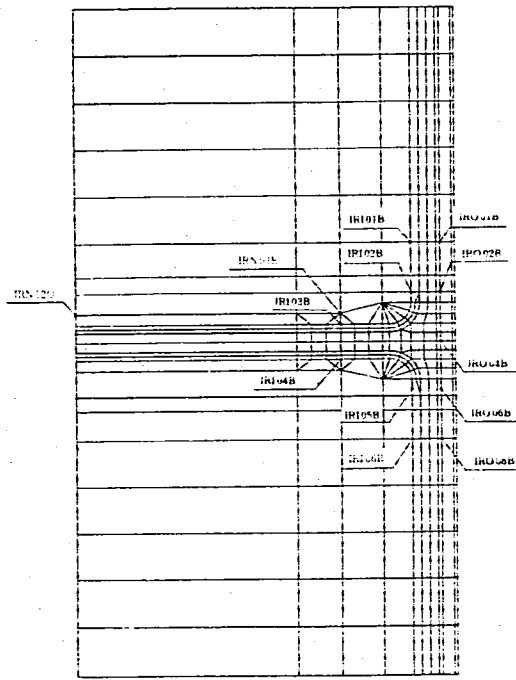


STEP NO. 96

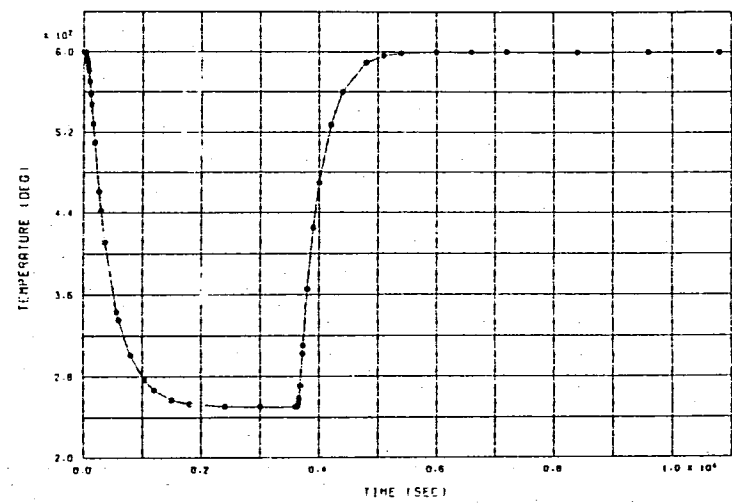
GEOM. SCALE 1: 80000

INSIDE VESSEL TEMPERATURE ( HOT 60 SEC )

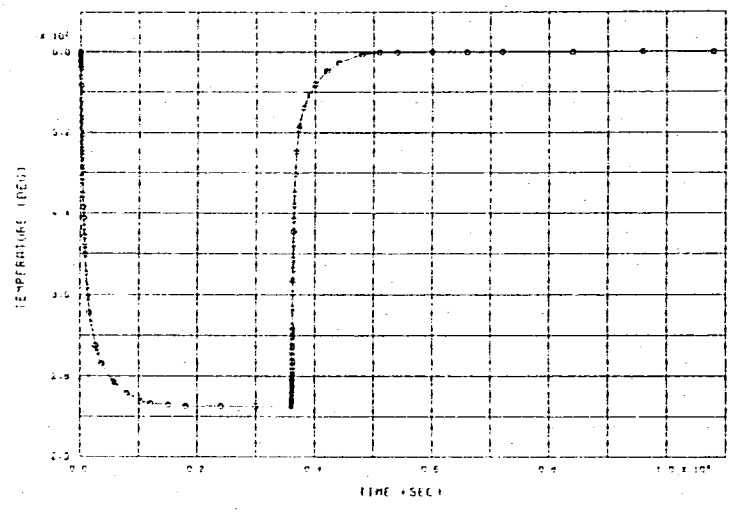
Fig. 2.6-3 Temperature Contour (Inner Shell Ring)



INSIDE VESSEL TEMPERATURE HISTORY



INSIDE VESSEL TEMPERATURE HISTORY



INSIDE VESSEL TEMPERATURE HISTORY

Fig. 2.6-4(a) Temperature History at Thermocouple Location (Inner Shell Ring)

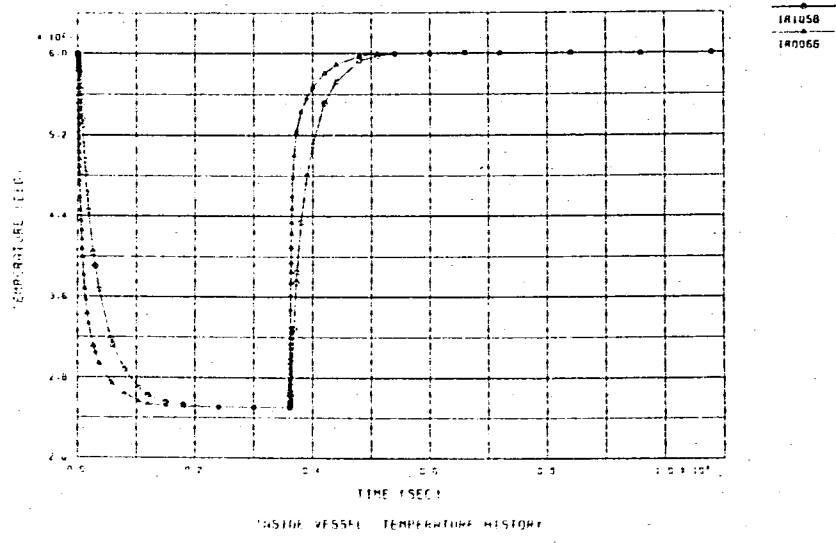
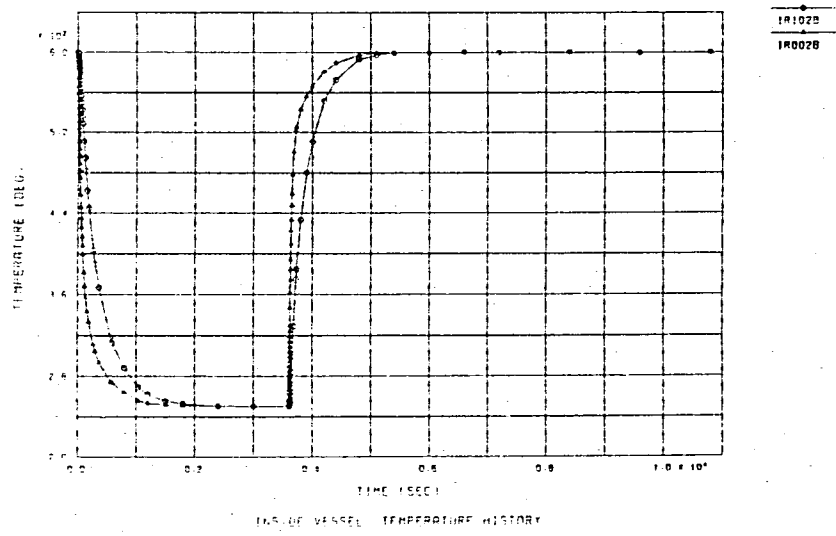
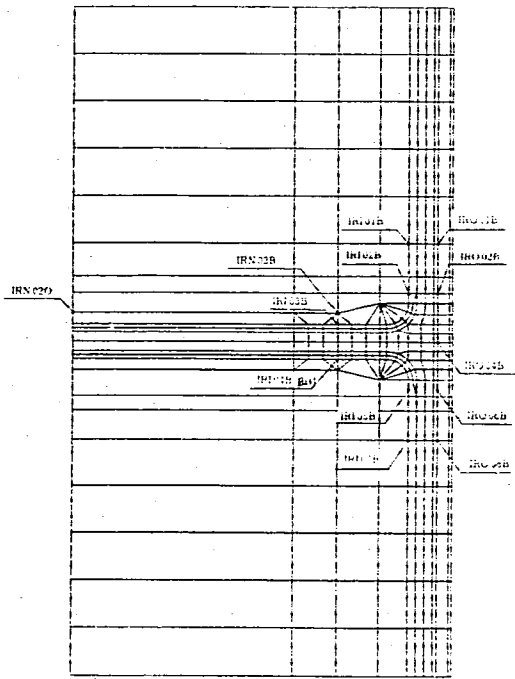


Fig. 2.6-4(b) Temperature History at Thermocouple Location (Inner Shell Ring)

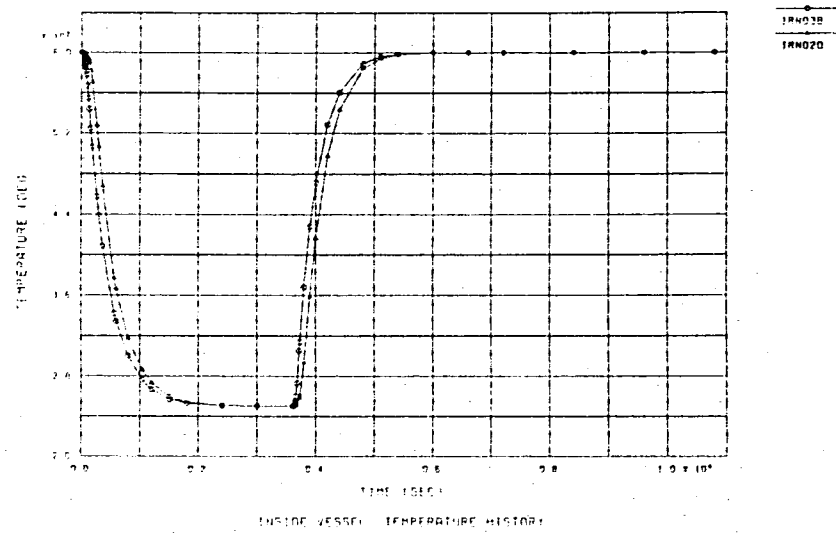
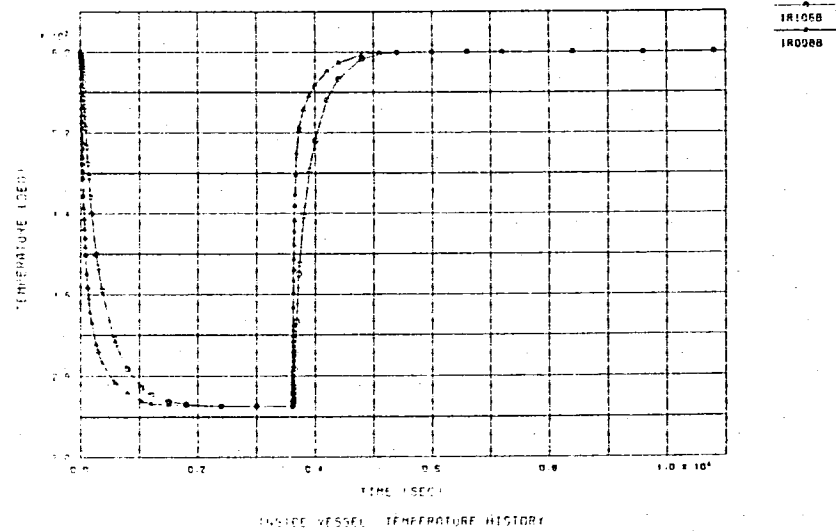
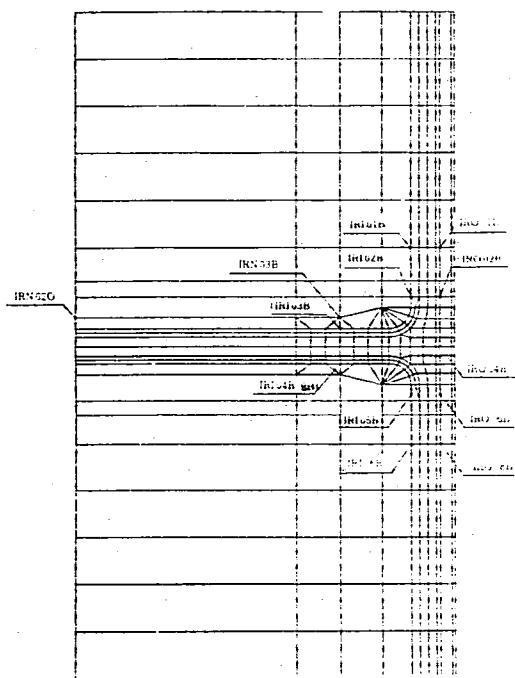


Fig. 2.6-4(c) Temperature History at Thermocouple Location (Inner Shell Ring)

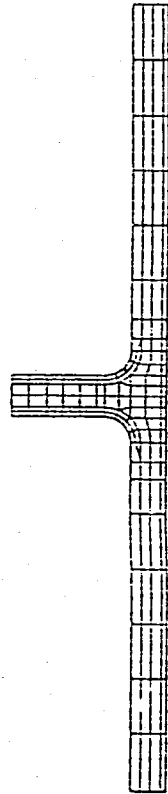


Fig. 2.6-5 Thermal Stress Analysis Model (Inner Shell Ring)

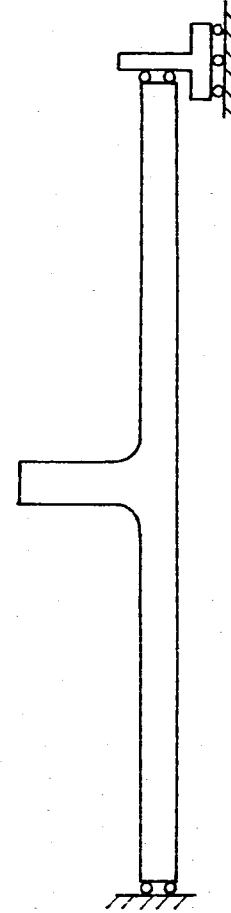


Fig. 2.6-6 Boundary Condition for Thermal Stress Analysis (Inner Shell Ring)

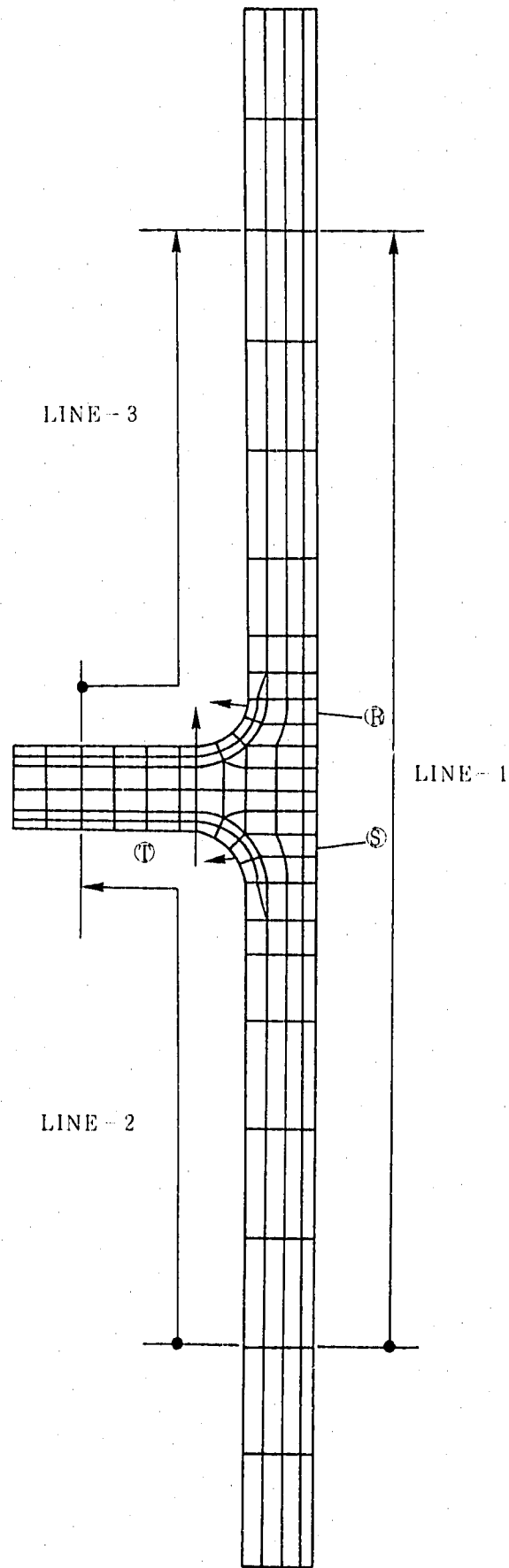
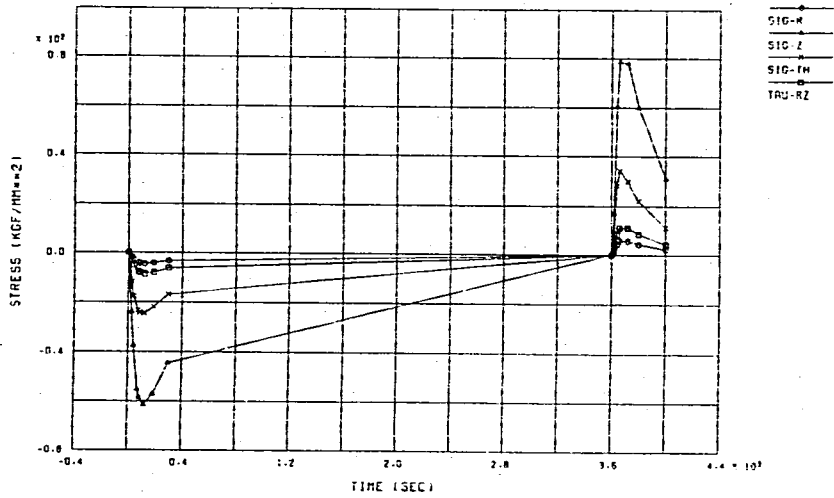
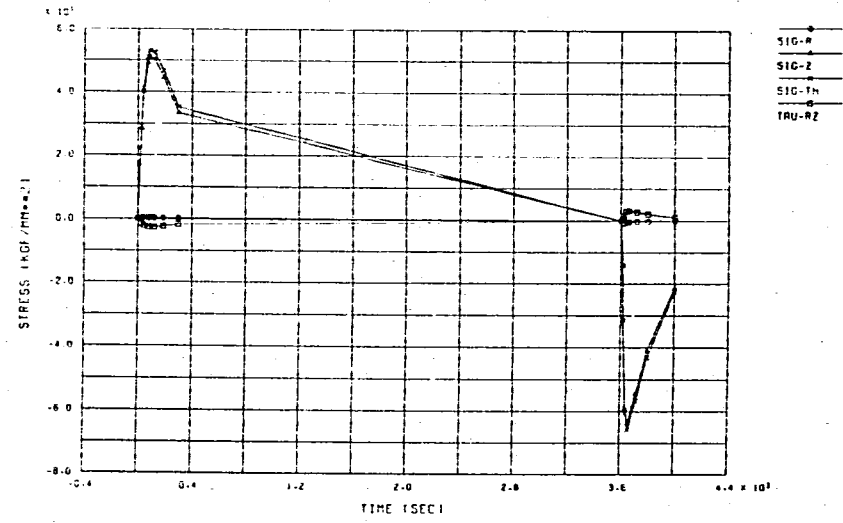


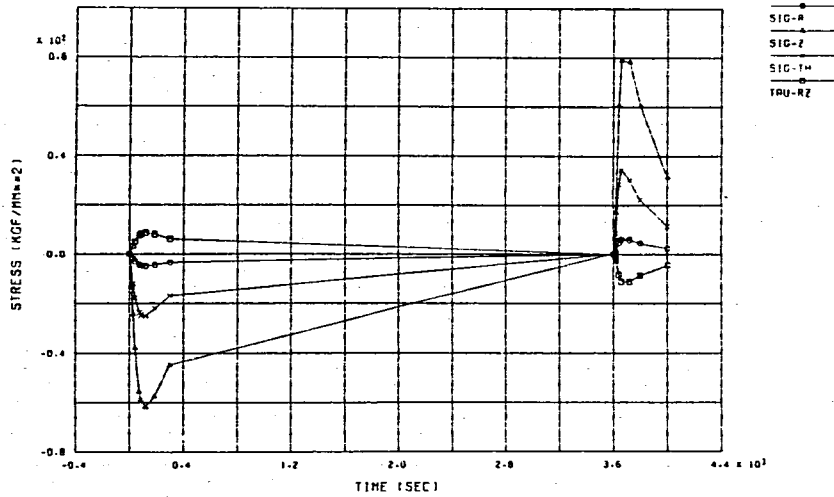
Fig. 2.6-7 Stress Estimation Line and Section (Inner Shell Ring)



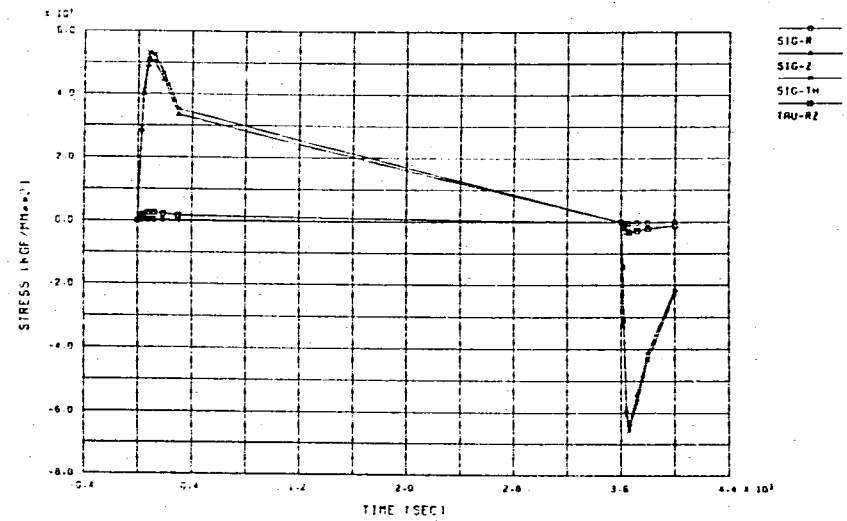
INSIDE VESSEL STRESS HISTORY SECTION-R INNER



INSIDE VESSEL STRESS HISTORY SECTION-R OUTER



INSIDE VESSEL STRESS HISTORY SECTION-5 INNER



INSIDE VESSEL STRESS HISTORY SECTION-5 OUTER

Fig. 2.6-8(a) Stress History (Inner Shell Ring)



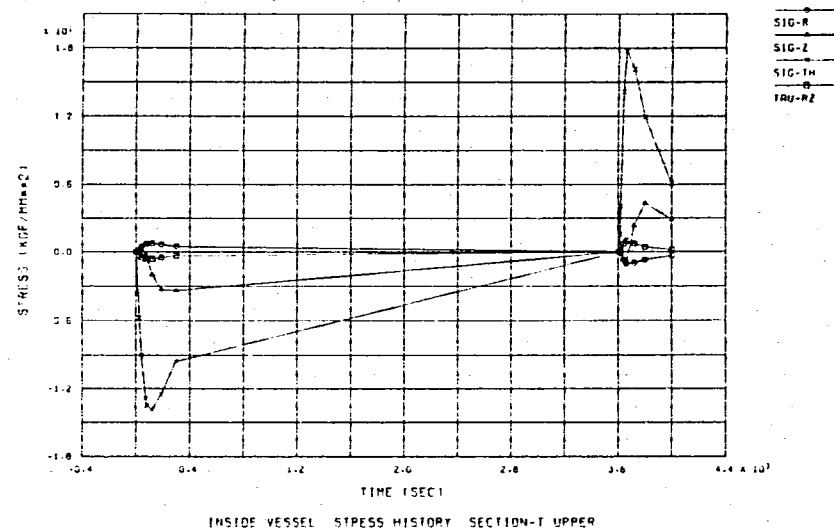
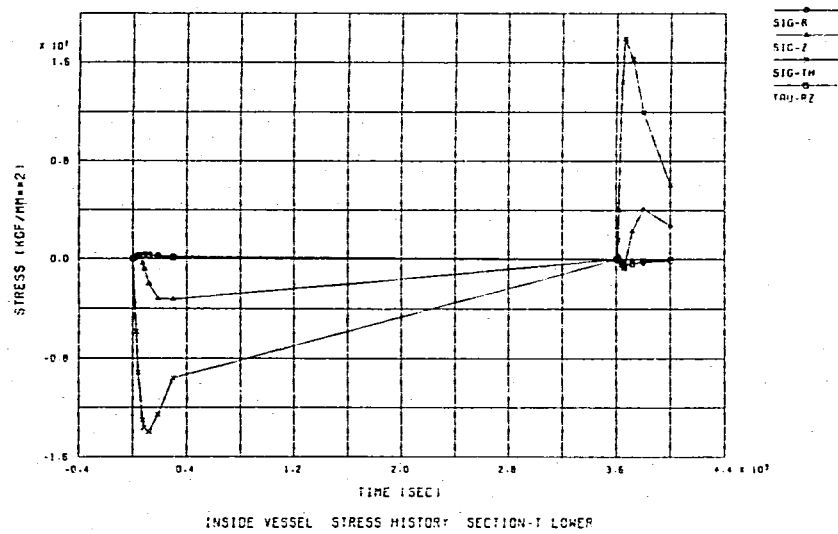
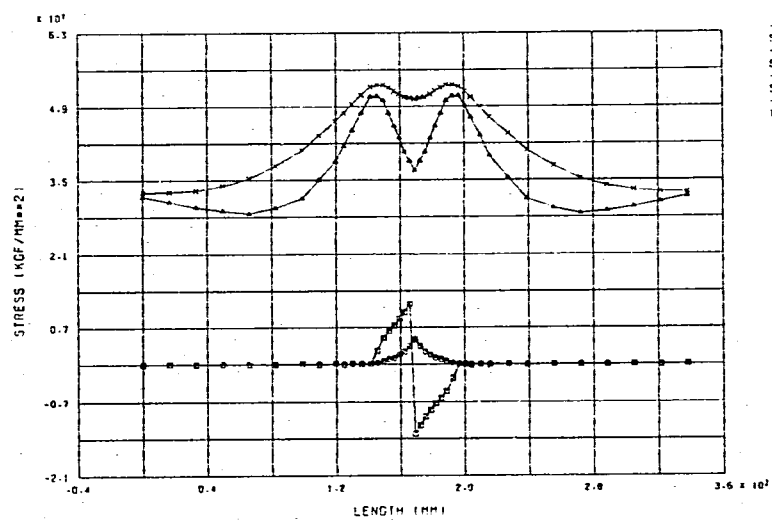
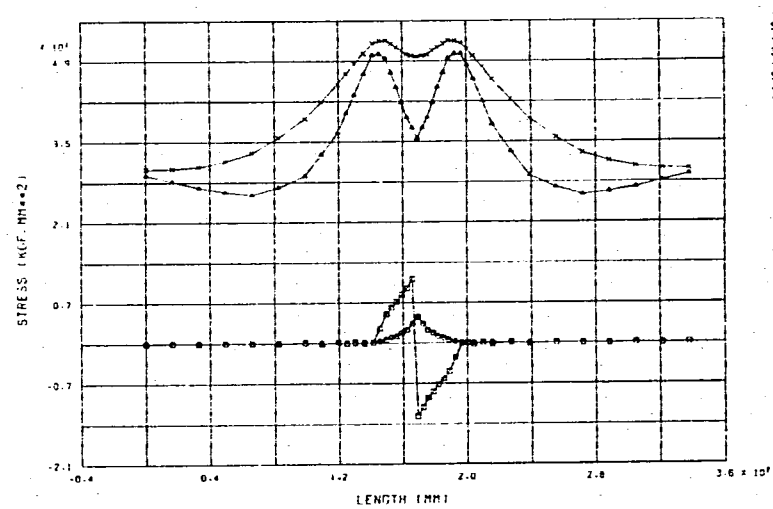


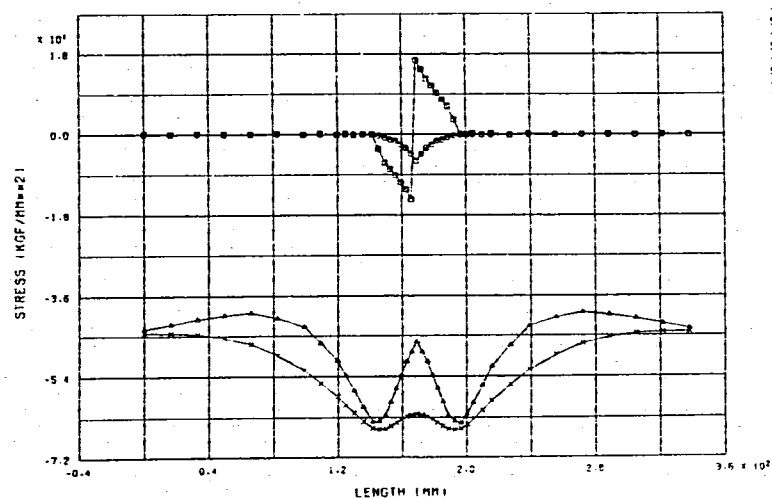
Fig. 2.6-8(b) Stress history (Inner Shell Ring)



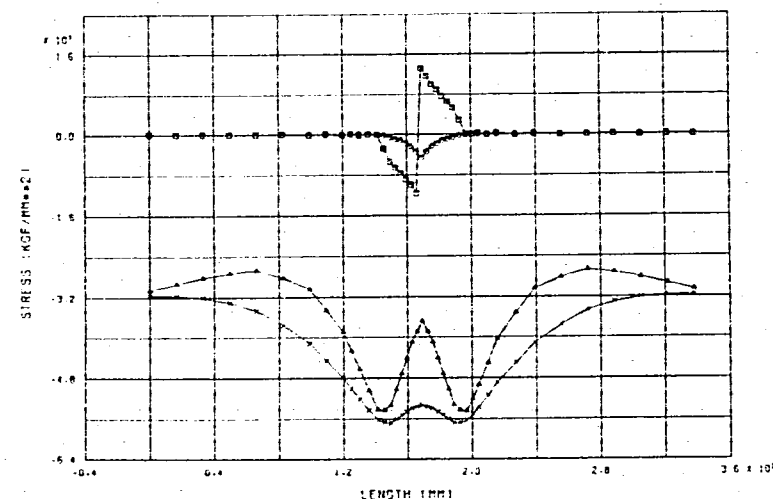
INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-1 (COLD 85 SEC)



INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-1 (COLD 120 SEC)

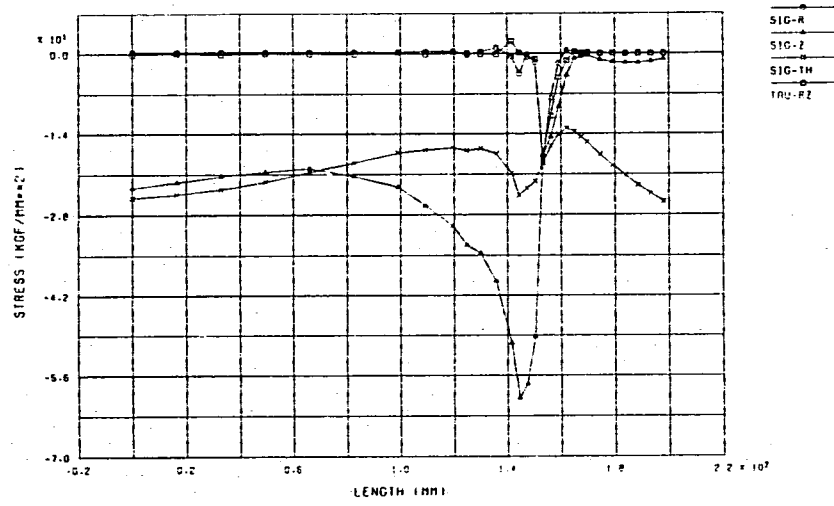


INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-1 (HOT 50 SEC)

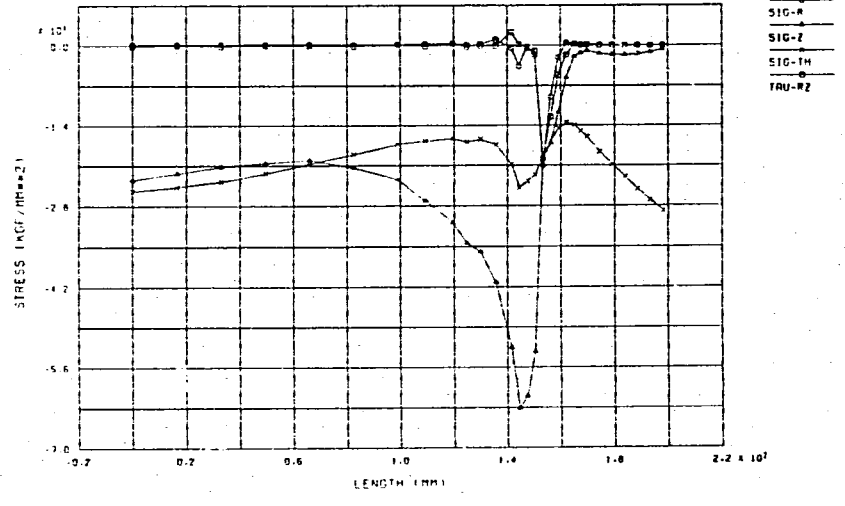


INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-1 (HOT 120 SEC)

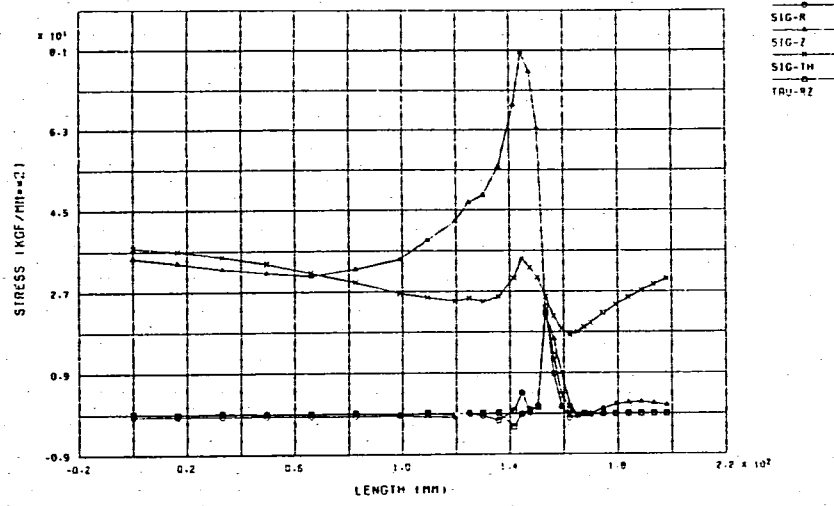
Fig. 2.6-9(a) Stress Distribution at Estimation Line (Inner Shell Ring)



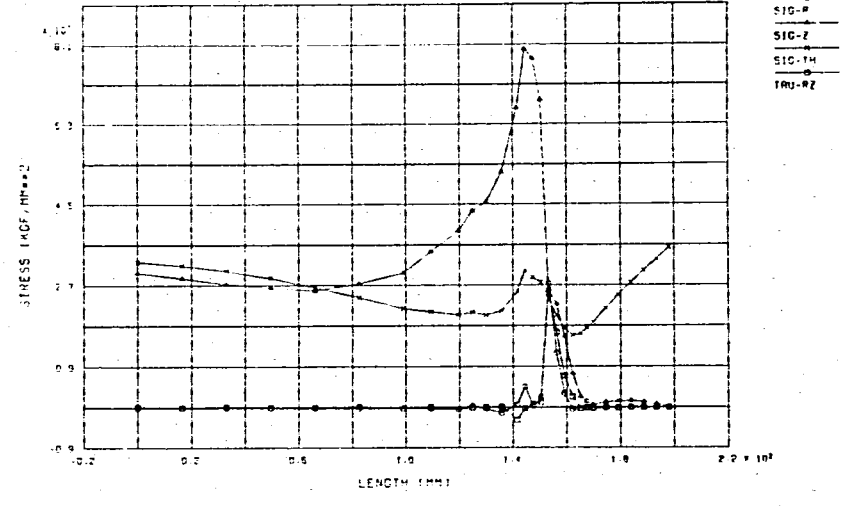
INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-2 (COLD 85 SEC)



INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-2 (COLD 120 SEC)

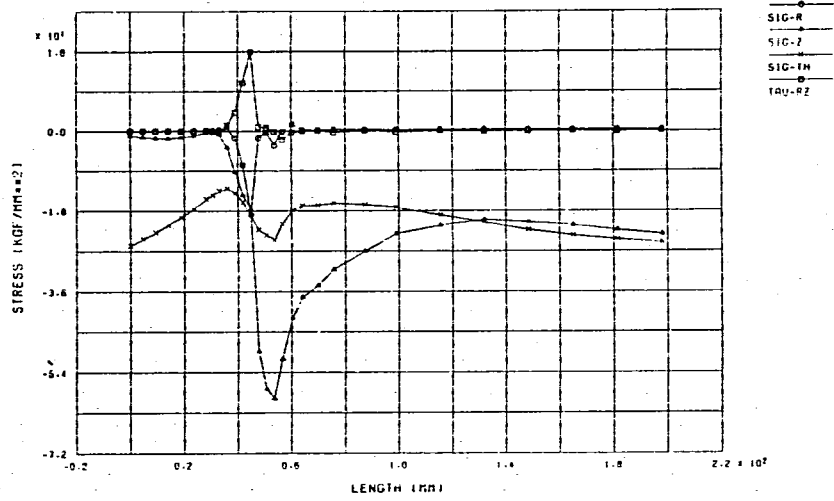


INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-2 (HOT 80 SEC)

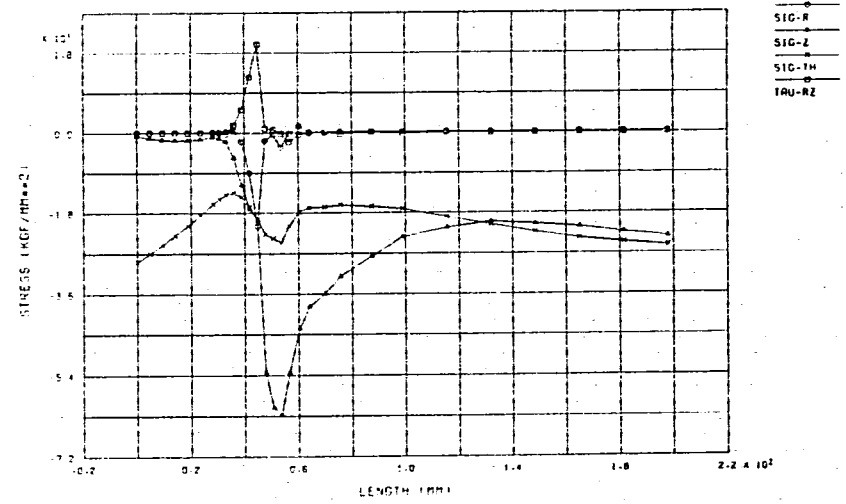


INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-2 (HOT 120 SEC)

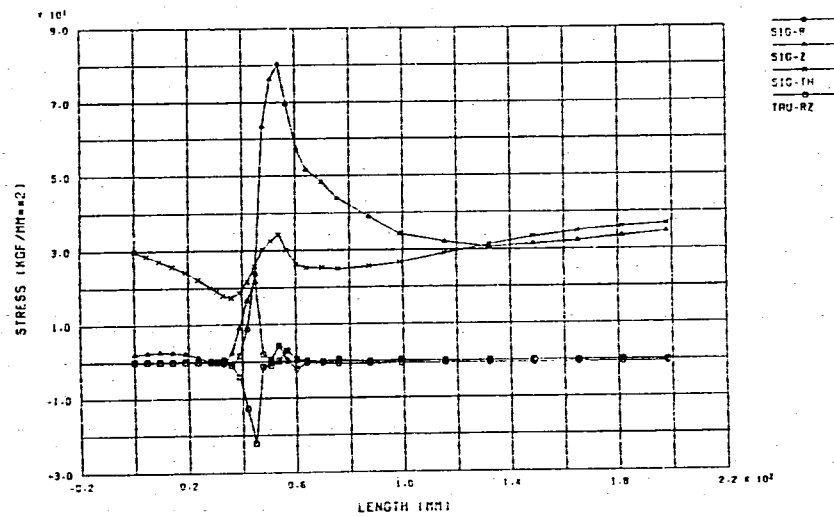
Fig. 2.6-9(b) Stress Distribution at Estimation Line (Inner Shell Ring)



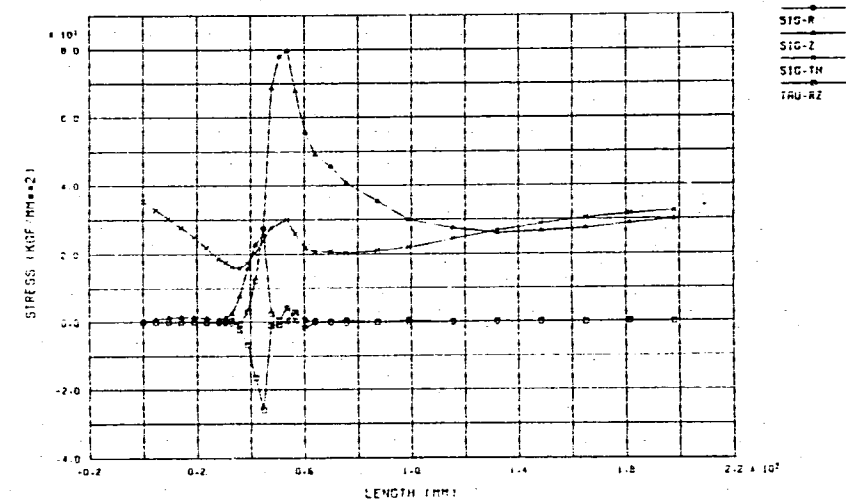
INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-3 (COLD 85 SEC)



INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-3 (COLD 120 SEC)



INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-3 (HOT 60 SEC)



INSIDE VESSEL STRESS DIST. ALONG LINE-3 (HOT 120 SEC)

Fig.2.6-9(c) Stress Distribution at Estimation Line (Inner Shell Ring)

### 3. クリープ疲労強度評価

#### 3.1 評価手法

TTSで試験される供試体の強度は、TTS-DSによって評価される。TTS-DSは、従来の設計評価手法に含まれている安全裕度を合理的に切り詰めた設計評価手法であり、構造物のクリープ疲労強度を実質的に予測することができる。Fig. 3.1-1 にTTS-DSの評価手法の流れを示す。

##### (1) ひずみ範囲の算出

##### a. 最大相当ひずみ範囲

TTS-DSは、軸対称ソリッド要素を用いた弾性解析の場合、ひずみ4成分より熱過渡サイクル中の最大相当ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{eq}$ を次式で求める。

$$\Delta \varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left\{ A^2 + B^2 + C^2 + \frac{3}{2} \Delta \gamma_{RZ}^2 \right\}^{1/2}$$

$$\text{ここで } A = \Delta \varepsilon_R - \Delta \varepsilon_Z$$

$$B = \Delta \varepsilon_Z - \Delta \varepsilon_\theta$$

$$C = \Delta \varepsilon_\theta - \Delta \varepsilon_R$$

公称ひずみ範囲 $\varepsilon_n$ を次式で求める。

$$\varepsilon_n = \frac{1.5}{1 + \nu} \Delta \varepsilon_{eq}$$

ひずみ範囲 $\varepsilon_1$ を次式で求める。

$$\varepsilon_1 = K_\varepsilon \cdot \varepsilon_n$$

ここで、 $K_\varepsilon$ はひずみ集中係数で、弾性解析で得られたひずみにこの定数を乗ずることにより、塑性効果を含めたひずみ範囲を算出する。本評価では $K_\varepsilon = 1.2$ とした。

##### b. 疲労損傷の算出

熱過渡1サイクル中のひずみ範囲 $\varepsilon_1$ 、ひずみ速度 $2\varepsilon_1/t_c$  ( $t_c$ : 熱過渡周期)、温度 $T_{max}$  (熱過渡サイクル中の最高温度)を最適疲労破損式に代入して得られる寿命を $N_f$ とする。

$$N_f = N(\varepsilon_1)$$

繰返し熱過渡サイクル数を $n$ とし、次式で疲労損傷 $D_r$ を求める。

$$D_r = n / N_r$$

### c. クリープ損傷の算出

熱過渡1サイクル中のひずみ範囲から動的応力ひずみ式を用いて初期応力 $\sigma_e$ を算出する。この初期応力を用いて単軸リラクゼーション解析を実施し、高温使用時間中に生じるクリープ損傷 $D_c$ を算出する。単軸リラクゼーション解析ではひずみ硬化型のクリープを想定し、クリープ破断における時間係数 $\alpha_R$ およびクリープひずみ式における時間係数 $\alpha_c$ を考慮してクリープ損傷を算出する。

$$D_c = n \int_0^{t_h} \frac{d t}{T_R}$$

### d. クリープ疲労損傷の算出

疲労損傷 $D_r$ とクリープ損傷 $D_c$ の和としてクリープ疲労損傷 $D$ を算出する。

$$D = D_r + D_c$$

## 3.2 損傷評価結果

供試体各部の熱応力解析結果から、TTS-DSを用いてクリープ疲労損傷を評価した。

クリープ疲労損傷は、熱過渡1サイクル3時間（高温側；2時間、低温側；1時間）とし、寿命中1000サイクルの熱過渡を繰り返す条件で評価した。

各解析モデルに対するクリープ疲労損傷評価結果をTable 3.2-1～5に示す。

Table 3.2-1 Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Inlet Nozzle)

評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	Kε	ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>t</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面A 内面	8.0	6.0	600.0	5.108	1.2	6.130	0.598	0.395	0.993
断面B 内面	25.3	30.0	600.0	6.452	1.2	7.742	0.997	0.499	1.496
断面C 内面	25.3	30.0	600.0	6.506	1.2	7.807	1.014	0.503	1.517
断面D 内面	135.0	95.0	600.0	3.285	1.2	3.941	0.165	0.237	0.402

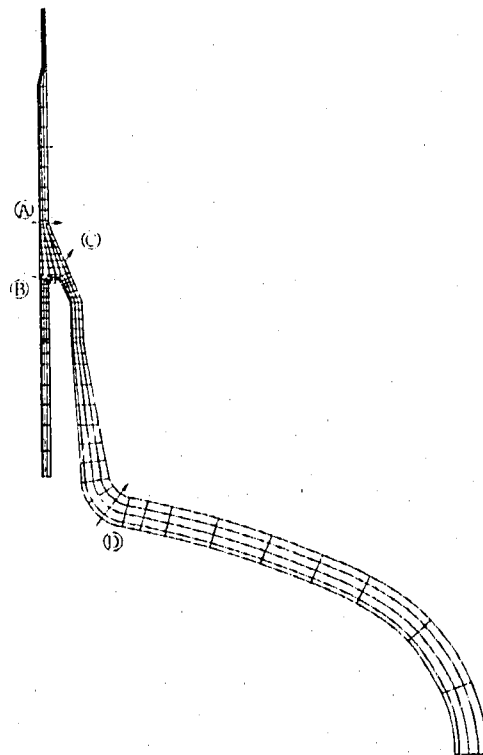


Table 3.2-2 Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Upper Vessel)

評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	Kε	ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>r</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面E 内面	600.0	600.0	598.8	5.240	1.2	6.288	0.629	0.403	1.032
断面F 内面	600.0	600.0	596.6	4.978	1.2	5.974	0.504	0.354	0.858
断面G 内面	1123.0	1200.0	596.7	5.761	1.2	6.914	0.767	0.441	1.208
断面H 内面	1023.0	1200.0	596.7	5.873	1.2	7.047	0.800	0.449	1.249
断面I 下面	300.0	200.0	579.5	2.610	1.2	3.132	0.049	0.121	0.170

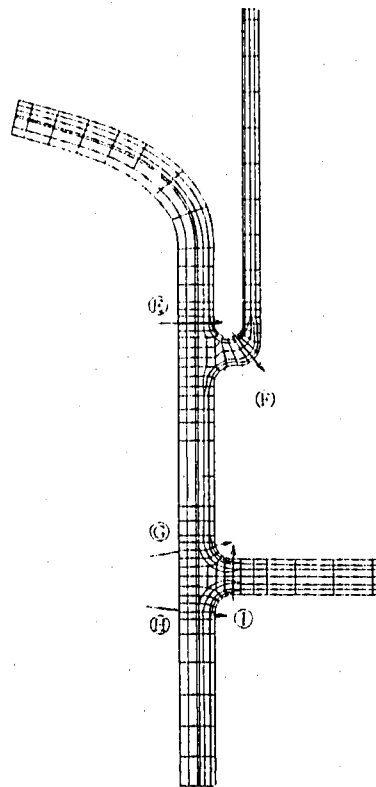




Table 3.2-3 Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Lower Vessel)

評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	K <sub>ε</sub>	ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>t</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面J 内面	173.0	185.0	599.2	2.976	1.2	3.571	0.109	0.200	0.309
断面K 内面	600.0	560.0	595.0	5.372	1.2	6.447	0.652	0.408	1.060
断面L 内面	1200.0	1120.0	557.1	4.886	1.2	5.839	0.373	0.253	0.626

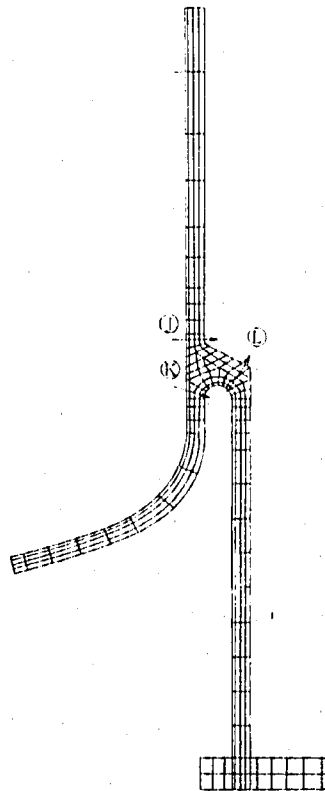


Table 3.2-4 Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Outlet Nozzle)

評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	K <sub>ε</sub>	ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>r</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面M 内面	165.0	127.5	600.0	2.901	1.2	3.481	0.102	0.200	0.302
断面N 内面	90.0	88.0	600.0	2.755	1.2	3.306	0.081	0.186	0.267
断面O 内面	90.0	108.0	600.0	3.160	1.2	3.792	0.143	0.225	0.368
断面P 内面	70.0	88.0	600.0	1.845	1.2	2.214	0.007	0.091	0.098
断面Q 内面	90.0	108.0	600.0	2.704	1.2	3.245	0.075	0.181	0.256

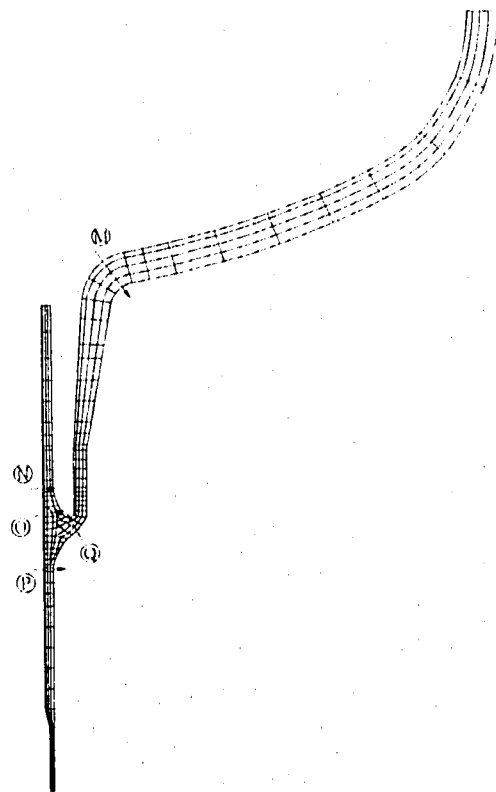
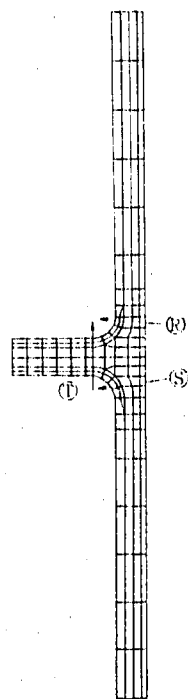


Table 3.2-5 Creep Fatigue Damage according to TTS-DS (Inner Shell Ring)

評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	Kε	ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>r</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面R 内面	85.0	60.0	600.0	6.977	1.2	8.372	1.164	0.538	1.702
断面S 内面	85.0	60.0	600.0	6.973	1.2	8.367	1.163	0.538	1.701
断面T 下面	85.0	60.0	600.0	7.160	1.2	8.592	1.224	0.552	1.776



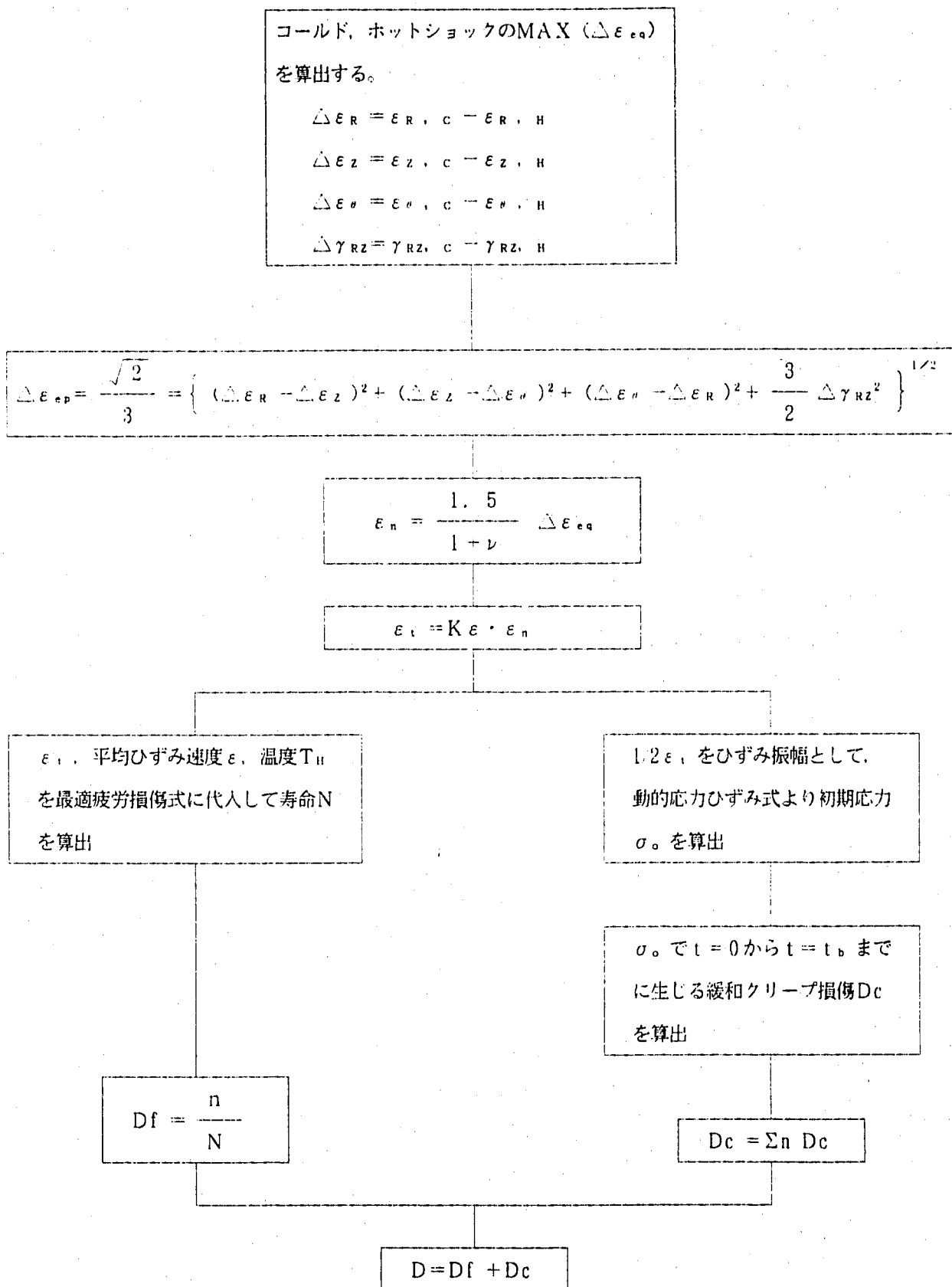


Fig. 3.1-1 Flow of TTS-DS

## 4. 考 察

供試体製作時に供試体の設計・製作を担当した三菱重工業(株)が実施した解析結果の妥当性を確認するために、第1報の解析並びに強度評価結果と今回の検討結果を比較する。

Table 4-1 ~ Table 4-5 に各評価断面における検討結果を示す。これより、中子リングを除く部位で、2つの検討結果がほぼ同等の結果を示していることがわかる。

Table 4-5 に示す様に、中子リング部におけるひずみレンジを定める2時点は、本解析結果に比べ、供試体設計時に実施した解析の方がホット側、コールド側とも約2倍遅れている。この差により、発生応力やひずみレンジに大きな差が生じると考えられる。ここで、2つの解析の伝熱解析モデルには、Fig. 4-1 に示す様に中子内のスタグナントナトリウムのモデル化において大きな差がある。供試体設計時には、汎用構造解析コード『NASTRAN』を用いており、解析モデルの簡略化を図るため、中子内のスタグナントナトリウムを熱容量が等価となるスカラー要素でモデル化している。これに対し、本解析で用いた『FINAS』は、熱容量を持ったスカラー要素が使用できないため、伝熱解析において中子内のスタグナントナトリウム層もメッシュ分割し、その熱伝導を考慮したモデルとなっている。中子内部には対流防止板が多数設けられ、中子内の対流は防止されると考えられるので、構造のモデル化としては本解析の方が実機に忠実であると考えられる。

設計時に用いた解析モデルは、中子内のナトリウムを1点のスカラー要素でモデル化しているため、ナトリウム層の熱伝導効果が考慮されない。よって、中子内のナトリウム温度は、ナトリウムが完全混合された状態（径方向、軸方向の温度分布を持たない状態）になり、中子内表面の温度応答が遅れるものと予想される。これに対し、本解析モデルでは中子内のナトリウムに径方向の温度勾配が生じると予想され、設計時の解析モデルに比べて中子内面の温度応答が早くなっているものと考えられる。

今後、対流を生じない流体を内包する構造物の伝熱解析においては、解析モデルは複雑化するものの、内包流体の熱伝導を模擬したモデル化が必要であろう。

Table 4-1 Comparison of Creep Fatigue Damage (Inlet Nozzle)

評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	Kε	ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>t</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面A 内面	8.0	6.0	600.0	5.108	1.2	6.130	0.598	0.395	0.993
	10.0	8.0	600.0	5.118	1.2	6.142	0.601	0.395	0.996
断面B 内面	25.3	30.0	600.0	6.452	1.2	7.742	0.997	0.499	1.496
	20.0	30.0	600.0	6.291	1.2	7.549	0.947	0.486	1.433
断面C 内面	25.3	30.0	600.0	6.506	1.2	7.807	1.014	0.503	1.517
	20.0	30.0	600.0	5.949	1.2	7.139	0.841	0.460	1.303
断面D 内面	135.0	95.0	600.0	3.285	1.2	3.941	0.165	0.237	0.402
	140.0	100.0	600.0	3.317	1.2	3.980	0.171	0.240	0.410

(注) 上段：今回の解析結果、下段：第1報の解析結果

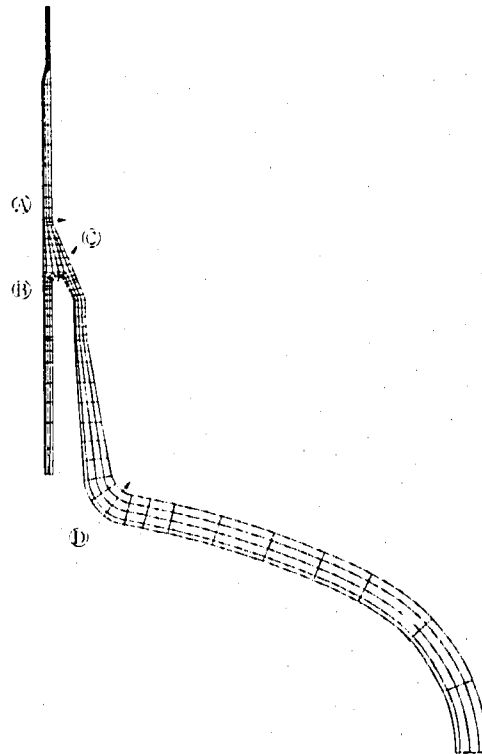


Table 4-2 Comparison of Creep Fatigue Damage (Upper Vessel)

評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	Kε	ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>f</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面E 内面	600.0	600.0	598.8	5.240	1.2	6.288	0.629	0.403	1.032
	700.0	800.0	598.7	5.291	1.2	6.350	0.643	0.406	1.049
断面F 内面	600.0	600.0	596.6	4.978	1.2	5.974	0.504	0.354	0.858
	620.0	800.0	590.0	4.947	1.2	5.936	0.510	0.359	0.869
断面G 内面	1123.0	1200.0	596.7	5.761	1.2	6.914	0.767	0.441	1.208
	1000.0	1100.0	596.4	5.871	1.2	7.045	0.797	0.448	1.245

(注) 上段：今回の解析結果、下段：第1報の解析結果

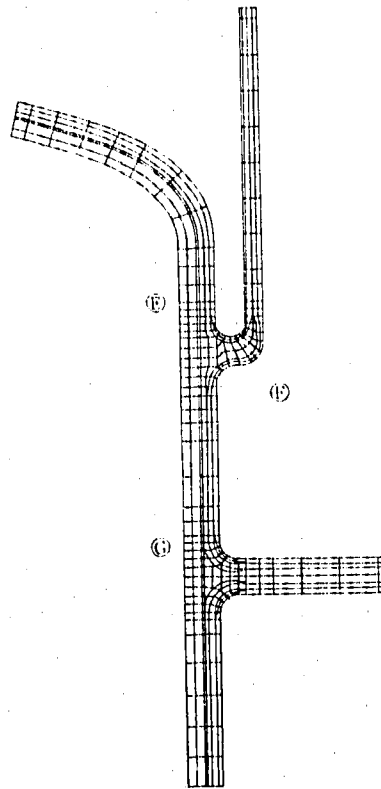


Table 4-3 Comparison of Creep Fatigue Damage (Lower Vessel)

評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	Kε	ε <sub>t</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>r</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面J 内面	173.0	185.0	599.2	2.976	1.2	3.571	0.109	0.200	0.309
	150.0	200.0	596.4	2.959	1.2	3.550	0.106	0.197	0.303
断面K 内面	600.0	560.0	595.0	5.372	1.2	6.447	0.652	0.408	1.060
	800.0	800.0	595.3	5.461	1.2	6.554	0.673	0.413	1.086

(注) 上段：今回の解析結果、下段：第1報の解析結果

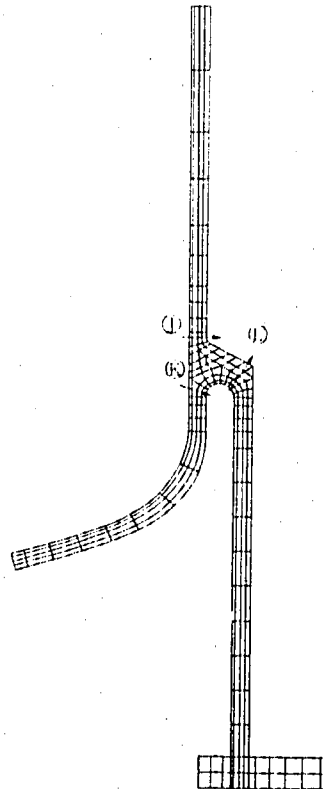




Table 4-4 Comparison of Creep Fatigue Damage (Outlet Nozzle)

評価部位	時刻 (秒)		$T_{max}$ (°C)	$\epsilon_n$ ( $\times 10^{-3}$ )	$K\epsilon$	$\epsilon_t$ ( $\times 10^{-3}$ )	$D_t$	$D_c$	D
	Cold	Hot							
断面M 内面	165.0	127.5	600.0	2.901	1.2	3.481	0.102	0.200	0.302
	150.0	150.0	600.0	2.995	1.2	3.594	0.116	0.209	0.325
断面N 内面	90.0	88.0	600.0	2.755	1.2	3.306	0.081	0.186	0.267
	90.0	100.0	600.0	2.764	1.2	3.317	0.082	0.187	0.269
断面O 内面	90.0	108.0	600.0	3.160	1.2	3.792	0.143	0.225	0.368
	90.0	100.0	600.0	3.079	1.2	3.695	0.129	0.217	0.347
断面P 内面	70.0	88.0	600.0	1.845	1.2	2.214	0.007	0.091	0.098
	70.0	90.0	600.0	1.835	1.2	2.202	0.007	0.090	0.097
断面Q 内面	90.0	108.0	600.0	2.704	1.2	3.245	0.075	0.181	0.256
	90.0	110.0	600.0	2.462	1.2	2.955	0.047	0.156	0.204

(注) 上段：今回の解析結果、下段：第1報の解析結果

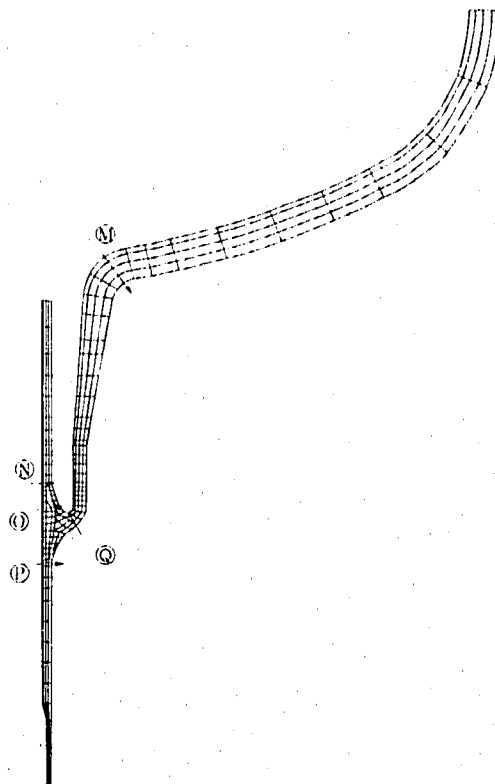
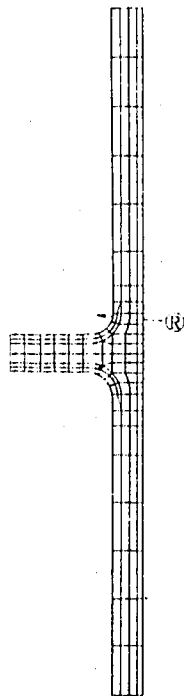
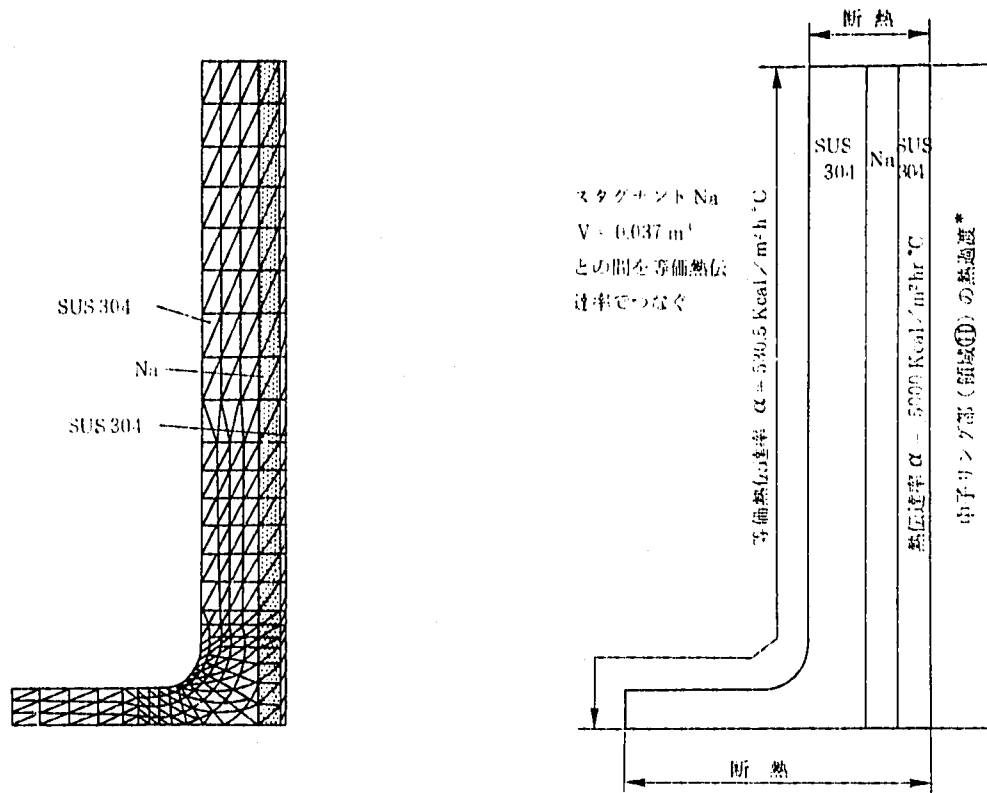


Table 4-5 Comparison of Creep Fatigue Damage (Inner Shell Ring)

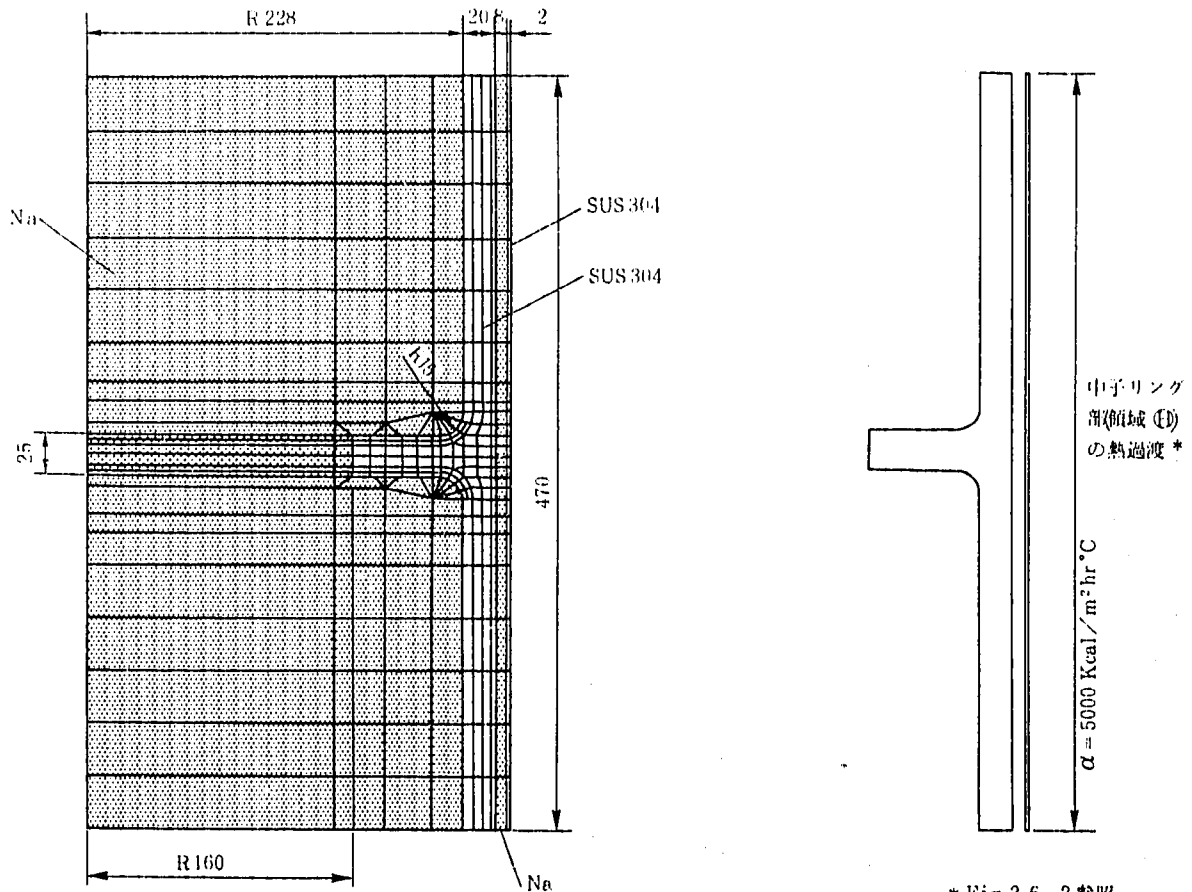
評価部位	時刻 (秒)		T <sub>max</sub> (°C)	ε <sub>n</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	Kε	ε <sub>i</sub> (×10 <sup>-3</sup> )	D <sub>r</sub>	D <sub>c</sub>	D
	Cold	Hot							
断面R 内面	85.0	60.0	600.0	6.977	1.2	8.372	1.164	0.538	1.702
	140.0	110.0	600.0	7.980	1.2	9.576	1.498	0.609	2.107

(注) 上段：今回の解析結果、下段：第1報の解析結果





供試体設計時の解析モデル



本検討に用いた解析モデル

\* Fig.2.6-2 参照

Fig. 4 - 1 Comparison of Heat Transfer Analysis Model (Inner Shell Ring)

## 5. 結 論

供試体製作時に実測された熱電対位置を反映した解析モデルを作成すると共に、供試体設計用に設定した熱過渡条件を用いた弾性熱応力解析並びにクリープ疲労損傷評価を実施した。この結果、

- (1) 設計条件に対する熱電対位置の供試体温度応答が把握できた。これは、熱過渡強度試験から得られる供試体の温度応答と比較し、詳細解析を実施するときの熱的境界条件を定める場合の判断材料となる。
- (2) 供試体設計時に実施した試験対象部のクリープ疲労損傷評価結果と本検討によるクリープ疲労損傷評価結果を比較した。中子リング部については、伝熱解析モデルの差から供試体製作時に実施した評価の方が $D_r + D_c$ において約20%大きくなっていたが、本検討結果においても $D_r + D_c$ の目標値1~3を満足している。また、その他の部位については、供試体製作時に実施した評価結果と本検討結果がほぼ一致しており、供試体試験条件が適切に設定されていたことが確認された。

## 6. 参 考 文 献

- (1) 高須ら：「ナトリウム技術実用物性値表」 PNC N941 81-73
- (2) 木村ら：熱応力緩和構造モデル(1)の供試体熱過渡強度試験  
「第2報 伝熱応力解析と強度評価」 PNC SN9410 89-105
- (3) 町田ら：溶接容器型モデル熱過渡強度試験  
「第1報 供試体の設計・製作」 PNC SN9410 90-096

## 7. 謝 辞

本試験研究を実施するにあたり、解析データの作成及び解析を担当いただいたセンチュ  
リリサーチセンタ株式会社構造技術部 吉田博治氏 及び 藤田真理子氏 に感謝いたし  
ます。