

# もんじゅプラント熱過渡条件の裕度に関する検討

昭和60年4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。

## もんじゅプラント熱過渡条件の裕度に関する検討

大矢 哲夫<sup>1)</sup> 岩田 耕司<sup>1)</sup>  
工藤 文夫<sup>2)</sup> 今津 彰<sup>1)</sup>

### 要 旨

高速原型炉「もんじゅ」の設備設計に用いるプラント熱過渡条件は、高速増殖炉開発本部原型炉建設部原子炉課において種々の検討が行われ、設定されている。

こうして設定された設計用プラント熱過渡条件がプラント解析から得られる解析結果（通称生カーブ）と比較して安全側の評価を与えることを確認し、かつその安全裕度を把握することは設計用プラント熱過渡条件の妥当性を示す上で重要である。本報はこの目的のために実施した原子炉容器入口ノズル及びIHX1次側入口ノズルの裕度評価結果を報告するものである。解析には実機形状をもとに軸対称化したモデルを用い、設計用プラント熱過渡条件及び生カーブに対する熱伝導解析と弾性応力解析を実施した。

この結果、（膜+曲げ）応力強さで見た場合、2つのモデルの全ての評価ラインにおいて設計用プラント熱過渡条件による値が生カーブによる値より大きくなり、原子炉容器入口ノズルモデルの場合で1.52～3.01の安全裕度、IHX1次側入口ノズルモデルの場合で1.12～1.84の安全裕度をそれぞれ有することが明らかになった。

---

1) 大洗工学センター高速炉機器開発部構造物強度試験室  
2) 高速増殖炉開発本部原型炉建設部原子炉課

Evaluation of Safety Margin in Thermal Transient Conditions

Tetsuo Ohya<sup>1)</sup>, Koji Iwata<sup>1)</sup>  
Fumio Kudough<sup>2)</sup> and Akira Imazu<sup>1)</sup>

Abstract

Plant Thermal Transient Conditions for Monju plant have been established by Reactor Section, FBR Development Project, PNC/HQ.

This report is concerned with the heat conduction analysis and the stress analysis to confirm the safety margin inherent in the plant thermal transient conditions against the so-called "as calculated" curves and to evaluate the conservatism of the transient conditions. The analyses are conducted for the reactor vessel inlet nozzle and IHX primary inlet nozzle using axisymmetric FEM models.

As the result, membrane plus bending stress intensities produced by the plant thermal transient condition were greater than those produced by the "as-calculated" curves in every stress classification line of each model. Safety margins were in the range of 1.52 to 3.01 in the case of the reactor vessel inlet nozzle, and 1.12 to 1.84 in the case of the IHX primary inlet nozzle.

---

1) Structural Engineering Section, O-arai Engineering Center, PNC

2) Reactor Section, FBR Development Project PNC

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 解析モデル .....	2
2.1 原子炉容器入口ノズル .....	2
2.2 IHX 1次側入口ノズル .....	2
3. 物 性 値 .....	11
3.1 熱伝導解析 .....	11
3.2 熱応力解析 .....	11
4. 境界条件 .....	15
4.1 熱伝導解析 .....	15
4.2 熱応力解析 .....	15
5. 熱過渡条件 .....	21
6. 原子炉容器入口ノズルの解析結果 .....	34
7. IHX 1次側入口ノズルの解析結果 .....	59
8. 結 言 .....	78
9. 謝 辞 .....	79
文 献 .....	80
Appendix 応力分類の方法	

## List of figures

- Fig. 2.1 Configuration of Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの形状, 寸法
- Fig. 2.2 Analytical Model of Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの解析モデル
- Fig. 2.3 FEM Model of Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの有限要素モデル
- Fig. 2.4 Configuration of IHX Primary Inlet Nozzle  
IHX 1次側入口ノズルの形状, 寸法
- Fig. 2.5 Analytical Model of IHX Primary Inlet Nozzle  
IHX 1次側入口ノズルの解析モデル
- Fig. 2.6 FEM Model of IHX Primary Inlet Nozzle (Heat Conduction Analysis)  
IHX 1次側入口ノズルの有限要素モデル (熱伝導解析)
- Fig. 2.7 FEM Model of IHX Primary Inlet Nozzle (Stress Analysis)  
IHX 1次側入口ノズルの有限要素モデル (応力解析)
- Fig. 4.1 Thermal Boundary Conditions for Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの熱境界条件
- Fig. 4.2 Thermal Boundary Conditions for IHX Primary Inlet Nozzle  
IHX 1次側入口ノズルの熱境界条件
- Fig. 4.3 Boundary Conditions for Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの境界条件
- Fig. 4.4 Boundary Conditions for IHX Primary Inlet Nozzle  
IHX 1次側入口ノズルの境界条件
- Fig. 5.1 Thermal Transient Condition A-1  
熱過渡条件 A-1
- Fig. 5.2 Thermal Transient Condition A-2  
熱過渡条件 A-2
- Fig. 5.3 Thermal Transient Condition A-4  
熱過渡条件 A-4
- Fig. 5.4 Thermal Transient Condition B-1  
熱過渡条件 B-1

- Fig. 5.5 Thermal Transient Condition B-2  
熱過渡条件 B-2
- Fig. 5.6 Thermal Transient Condition B-3  
熱過渡条件 B-3
- Fig. 5.7 Thermal Transient Condition B-4  
熱過渡条件 B-4
- Fig. 5.8 Thermal Transient Condition B-5  
熱過渡条件 B-5
- Fig. 5.9 Example of Establishing Thermal Transient Condition  
設計用プラント熱過渡条件の作成例
- Fig. 6.1 Stress Classification Line  
応力評価断面
- Fig. 6.2 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-1, Line-3)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-1, ライン-3)
- Fig. 6.3 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-1, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-1, ライン-4)
- Fig. 6.4 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-1, Line-11)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-1, ライン-11)
- Fig. 6.5 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-1, Line-12)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-1, ライン-12)
- Fig. 6.6 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-2, Line-3)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-2, ライン-3)
- Fig. 6.7 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-2, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-2, ライン-4)
- Fig. 6.8 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-2, Line-11)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-2, ライン-11)
- Fig. 6.9 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-2, Line-12)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-2, ライン-12)
- Fig. 6.10 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-4, Line-3)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-4, ライン-3)
- Fig. 6.11 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-4, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-4, ライン-4)
- Fig. 6.12 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-4, Line-11)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-4, ライン-11)

- Fig. 6.13 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-4, Line-12)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-4, ライン-12)
- Fig. 6.14 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-3, Inner)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-3, 内面)
- Fig. 6.15 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-3, Outer)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-3, 外面)
- Fig. 6.16 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-4, Inner)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-4, 内面)
- Fig. 6.17 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-4, Outer)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-4, 外面)
- Fig. 6.18 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-11, Inner)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-11, 内面)
- Fig. 6.19 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-11, Outer)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-11, 外面)
- Fig. 6.20 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-12, Inner)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-12, 内面)
- Fig. 6.21 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-12, Outer)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-12, 外面)
- Fig. 7.1 Stress Classification Line (1)  
応力評価断面 (1)
- Fig. 7.2 Stress Classification Line (2)  
応力評価断面 (2)
- Fig. 7.3 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-1, Line-1)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-1, ライン-1)
- Fig. 7.4 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-1, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-1, ライン-4)
- Fig. 7.5 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-2, Line-1)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-2, ライン-1)
- Fig. 7.6 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-2, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-2, ライン-4)
- Fig. 7.7 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-3, Line-1)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-3, ライン-1)
- Fig. 7.8 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-3, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-3, ライン-4)



- Fig. 7.9 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-4, Line-1)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-4, ライン-1)
- Fig. 7.10 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-4, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-4, ライン-4)
- Fig. 7.11 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-5, Line-1)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-5, ライン-1)
- Fig. 7.12 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-5, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-5, ライン-4)
- Fig. 7.13 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-1, Inner)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-1, 内面)
- Fig. 7.14 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-1, Outer)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-1, 外面)
- Fig. 7.15 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-4, Inner)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-4, 内面)
- Fig. 7.16 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-4, Outer)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-4, 外面)

## List of tables

- Table 3.1 Heat Conductivity, Specific Heat and Density of SUS304  
SUS 304 の熱伝導係数, 比熱, 密度
- Table 3.2 Heat Conductivity and Density of Sodium  
ナトリウムの熱伝導係数, 密度
- Table 3.3 Young's Modulus, Poisson's Ratio and Thermal Expansion Rate of SUS304  
SUS 304 のヤング率, ポアソン比, 熱膨張係数
- Table 4.1 Heat Transfer Rate for Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの熱伝達率
- Table 4.2 Heat Transfer Rate for IHX Primary Inlet Nozzle  
IHX 1次側入口ノズルの熱伝達率
- Table 5.1 Combination of Analytical Model and Thermal Transient Condition  
解析モデルと熱過渡条件の組合せ
- Table 5.2 Parameter Set for "II-1 Manual Trip"  
II-1 手動トリップ パラメータ設定
- Table 6.1 Time Step for Stress Analysis  
応力解析のステップ
- Table 6.2 Membrane Plus Bending Stress Intensity  
(膜+曲げ) 応力強さ
- Table 6.3 Membrane Plus Bending Stress Intensity Range  
(膜+曲げ) 応力強さ範囲
- Table 7.1 Time Step for Stress Analysis  
応力解析のステップ
- Table 7.2 Membrane Plus Bending Stress Intensity  
(膜+曲げ) 応力強さ

## 1. 緒 言

高速原型炉「もんじゅ」の設備設計に用いるプラント熱過渡条件は高速増殖炉開発本部原型炉建設部原子炉課において種々の検討が行われ、設定されている。<sup>1) 2)</sup>

このプラント熱過渡条件図は、プラント熱過渡解析より得られる温度履歴図（通称生カーブ、以下生カーブと呼ぶ）を基に、画一的な手法を用いてその推移を構造解析評価用の折れ線に表したものであり、作成に関する基本的考え方は以下のとおりである。

- ① 構造健全性評価上、一般に温度変化率に着目すべき過渡的な部分に関しては、温度変化率により、また温度変化率が緩慢な他の部分に関しては温度差の巾揚げにより条件図化する。
- ② 過渡変化が急な部分では生カーブ上の時刻、温度、最急勾配を読みとり、その最急勾配を工学的余裕係数( $\beta$ )倍した温度変化率により条件図化する。
- ③ 過渡温度変化発生前の初期温度を基準温度とし、各部位で設定した工学的余裕係数( $\alpha$ )により巾揚げした温度差 $\Delta T$ で条件図化する。

本報にて報告するのは、この作成方針に従って策定されたプラント熱過渡条件が、生カーブに基づく熱過渡条件と比較して安全側の評価を与えることを確認し、かつその安全裕度を把握することを目的とした一連の解析結果をとりまとめたものである。解析には実機形状に基づく原子炉容器入口ノズル部及びIHX 1次側入口ノズル部をモデル化した軸対称モデルを用いて熱伝導解析と弾性応力解析を実施した。熱過渡条件としては「もんじゅ」実機の熱過渡II-1手動トリップを取り上げ、熱過渡に影響を与える崩壊熱、ポンプコーストダウン特性、ポンプモータ流量等のパラメータの標準値設定ケース（ノミナルケース）、温度変化巾が大きくなる組合せのケース、温度変化率が大きくなる組合せのケース、これらのケースを包絡しかつ安全側の評価が期待される設計用プラント熱過渡条件によるケースを考慮した。

解析に関するモデル化、物性値、境界条件、熱過渡条件等の諸条件については2章から5章に示した。また原子炉容器入口ノズル及びIHX 1次側入口ノズルの解析結果についてはそれぞれ6章及び7章に示した。弾性応力解析の結果については各モデルで評価断面を設定し、この評価断面での膜+曲げ応力強さとしてとりまとめた。

最後に本解析はFBR本部厚型炉建設部原子炉課の依頼（エンジニアリングシート、P2-A 0039 (978)、「プラント熱過渡条件の持つ裕度の検討」、昭和59年9月25日）を受けて構造物強度試験室で実施したものであること、及び解析にはすべて高速炉非弾性構造解析システムFINASを用いたことを付記しておく、なお本報告書は解析の概要をとりまとめたものであり、結果の詳細については構造物強度試験室にて保管している。

## 2. 解析モデル

ここでの解析は、熱伝導解析、熱応力解析とも、動燃事業団所有の汎用構造解析プログラム FINAS<sup>3)</sup>を使用して行なった。

### 2.1 原子炉容器入口ノズル

原子炉容器入口ノズルの形状および寸法を Fig 2.1 に示す。

#### (1) 熱伝導解析モデル

原子炉容器部分を半径を  $2R$  (Fig 2.2 の  $R = 7060$  がこれに相当する), 開き角  $10^\circ$  の等価な球殻におきかえ, 軸対称体としてモデル化する。入口ノズルの配管側および, 原子炉容器の内面においては, 熱伝達を考慮する。解析モデルの形状, 寸法を Fig 2.2 に, 有限要素モデルを Fig 2.3 に示す。

・使用要素

熱伝導 8 節点四辺形軸対称要素	HQAX8	127 要素
熱伝導 6 節点三角形軸対称要素	HTAX6	9 要素
熱伝達 3 節点軸対称要素	FCAX3	41 要素

#### (2) 熱応力解析モデル

熱伝導解析モデルより熱伝達の要素を除いたものである。

・使用要素

8 節点四辺形軸対称要素	QAX8	127 要素
6 節点三角形軸対称要素	TAX6	9 要素

### 2.2 IHX1 次側入口ノズル

IHX1 次側入口ノズルの形状および寸法を Fig 2.4 に示す。

#### (1) 熱伝導解析モデル

IHX1 次側ノズルの中心軸を対称軸とする軸対称体としてモデル化する。IHX 容器部分は, 応力解析にあわせて半径を  $2R$  とし開き角は  $45^\circ$  の等価な球殻におきかえる。熱伝達は, ノズルの内面および容器内面の流路に面した部分で行なわれる。この面を熱伝達要素によりモデル化する。また, スタグナント Na の部分は, 熱伝導要素によりモデル化する。解析モデルの形状, 寸法を Fig 2.5 に, 有限要素モデルを Fig 2.6 に示す。

・使用要素

熱伝導 8 節点四辺形軸対称要素	HQAX8	350 要素
熱伝導 6 節点三角形軸対称要素	HTAX6	30 要素
熱伝達 3 節点軸対称要素	FCAX3	55 要素

(2) 熱応力解析モデル

ノズルおよび内面のライナー部は、モデル化の対象としない。また、スタグナントNaの部分もモデル化の対象としない。有限要素モデルを Fig 2.7 に示す。

・使用要素

8 節点四辺形軸対称要素	QAX8	265 要素
6 節点三角形軸対称要素	TAX6	13 要素

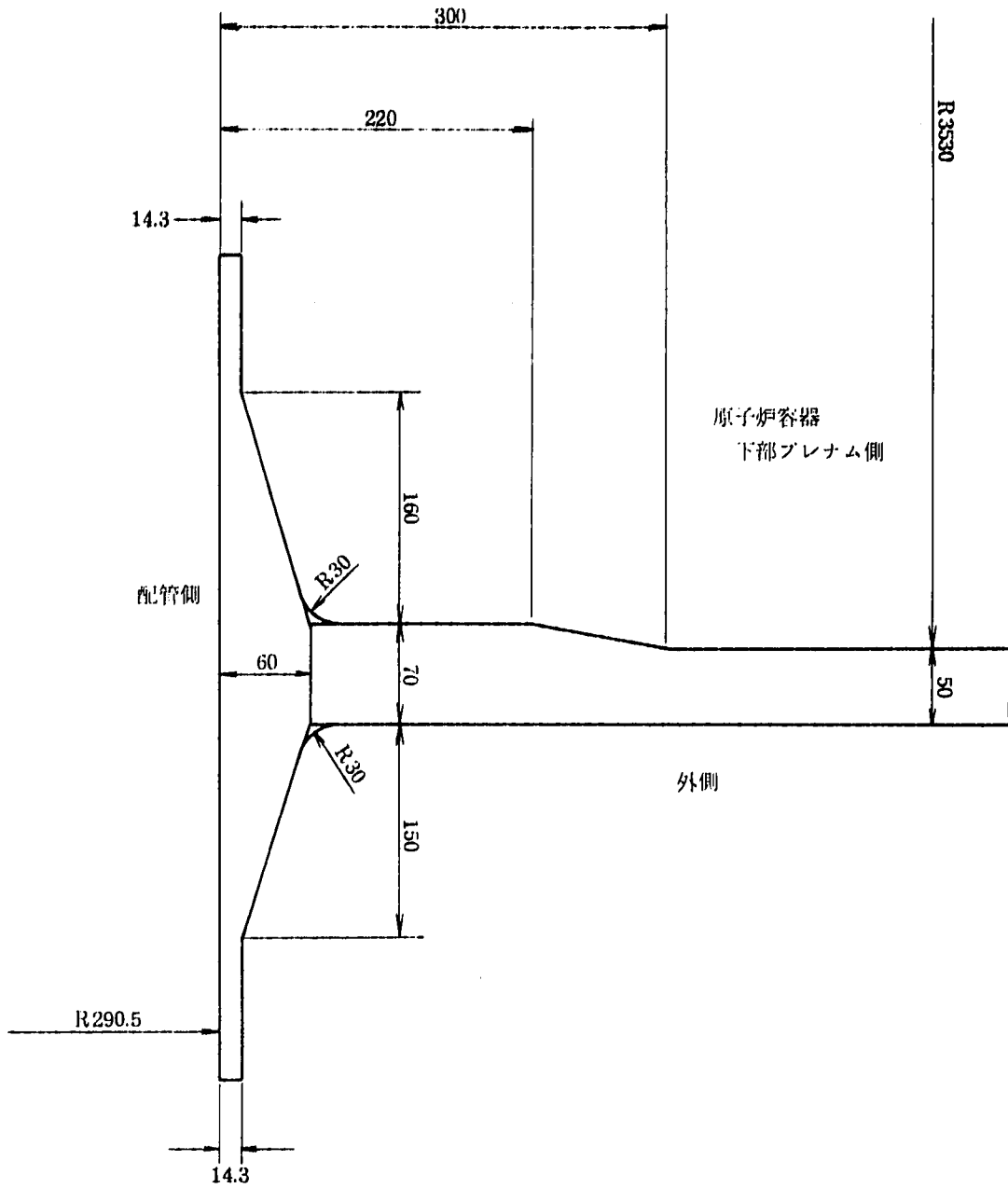


Fig. 2.1 Configuration of Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの形状、寸法

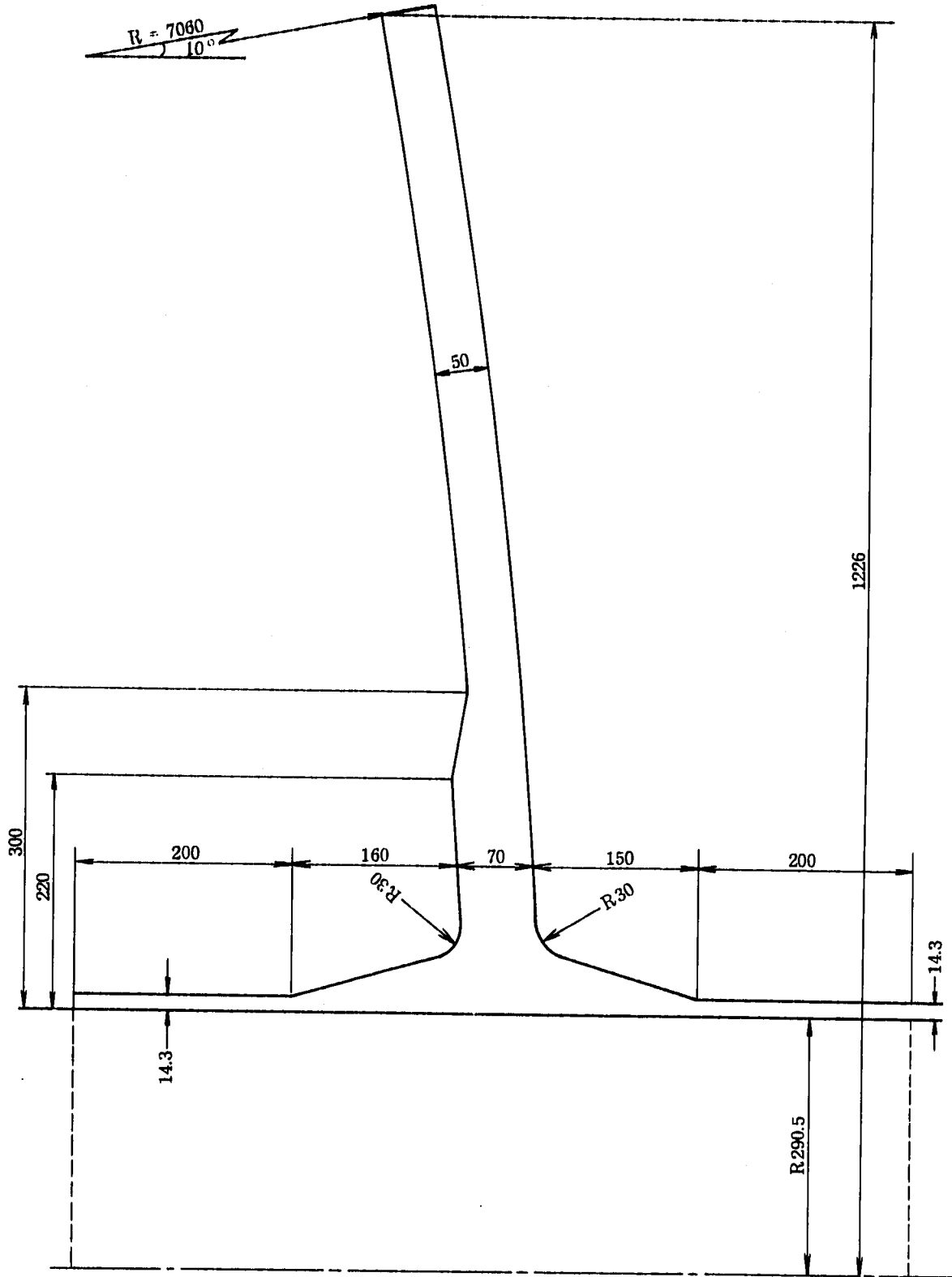


Fig. 2.2 Analytical Model of Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの解析モデル

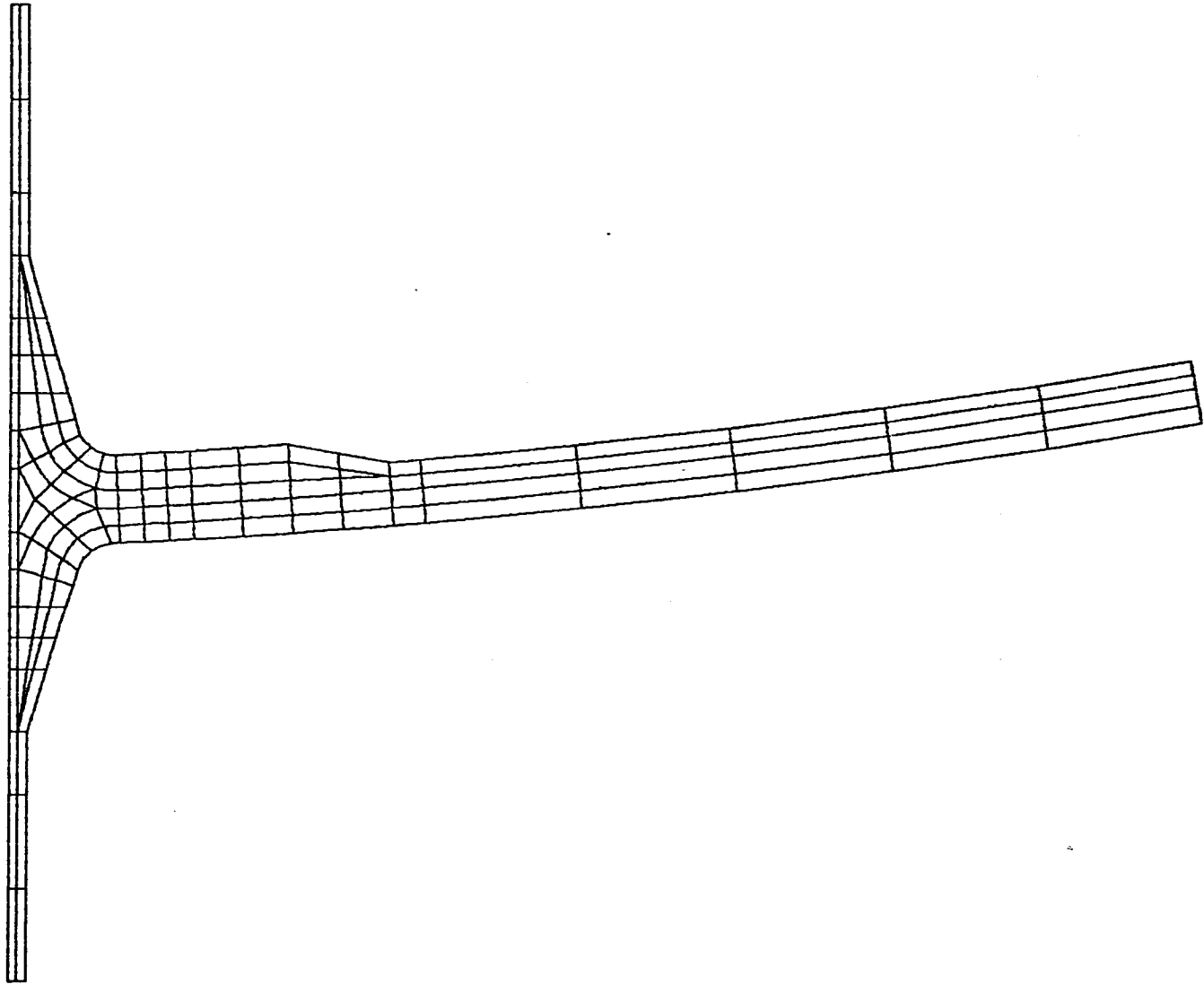


Fig. 2.3 FEM Model of Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの有限要素モデル



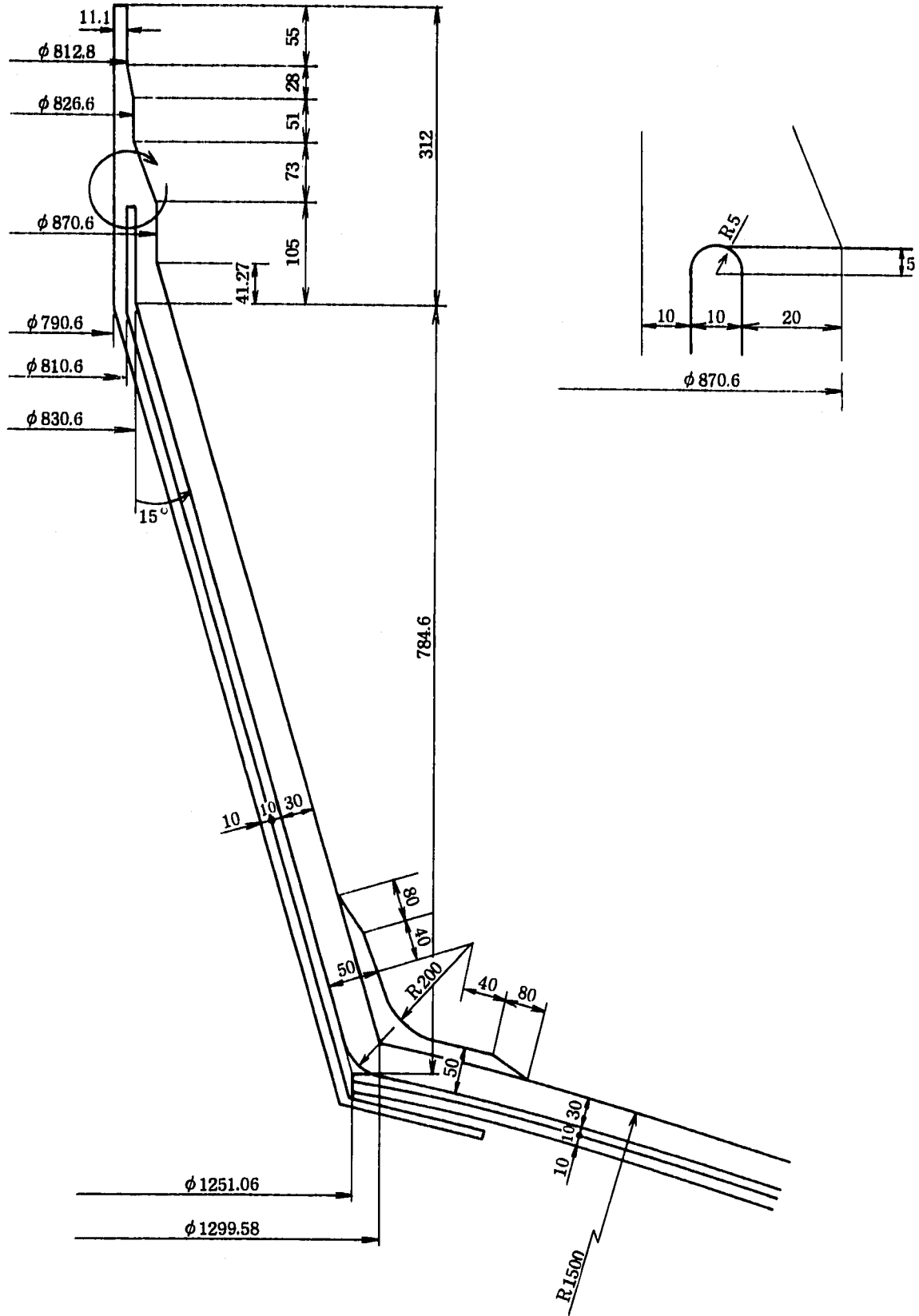


Fig. 2.4 Configuration of IHX Primary Inlet Nozzle  
 IHX 1次側入口ノズルの形状, 寸法

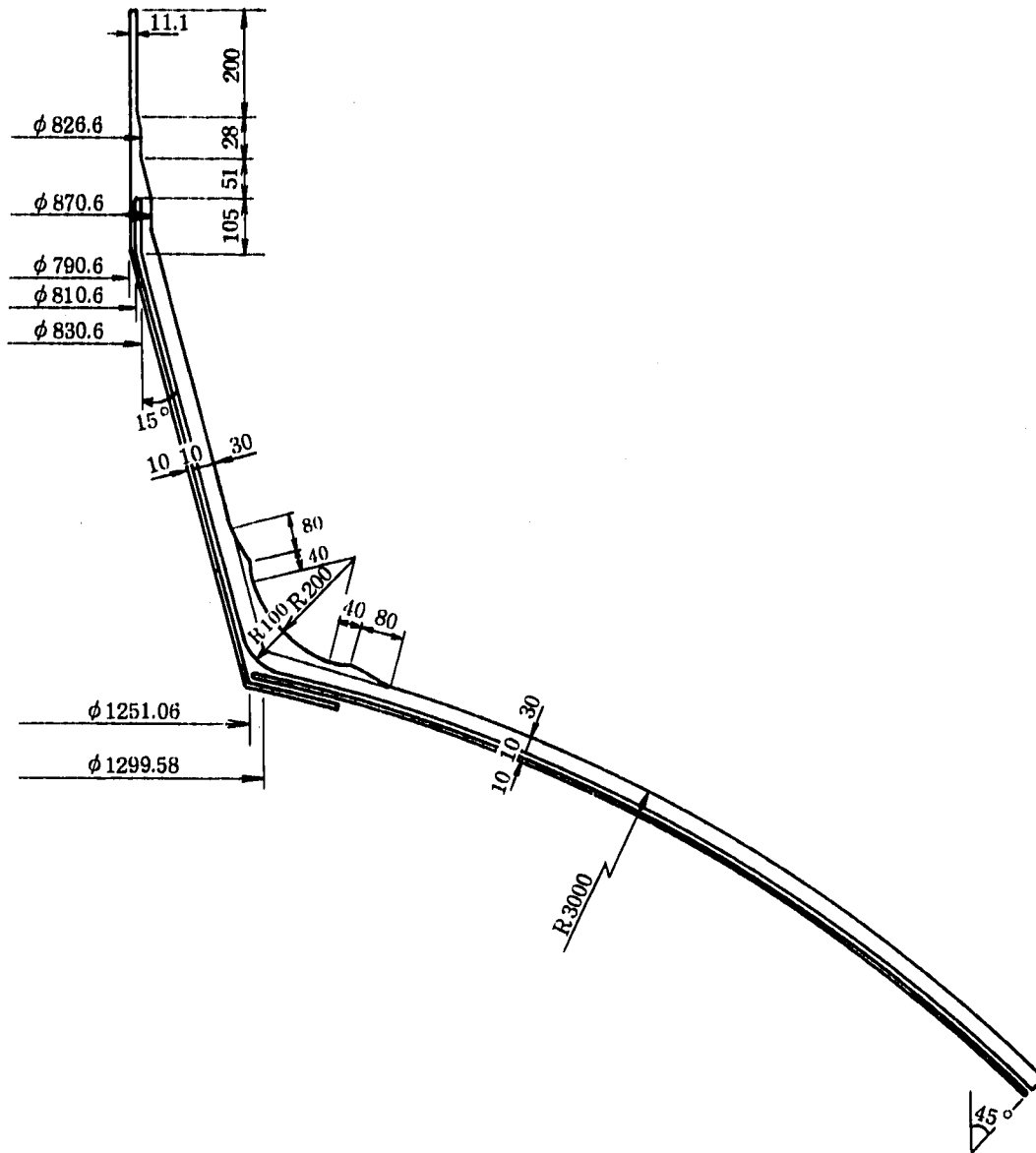


Fig. 2.5 Analytical Model of IHX Primary Inlet Nozzle  
 IHX 1次側入口ノズルの解析モデル

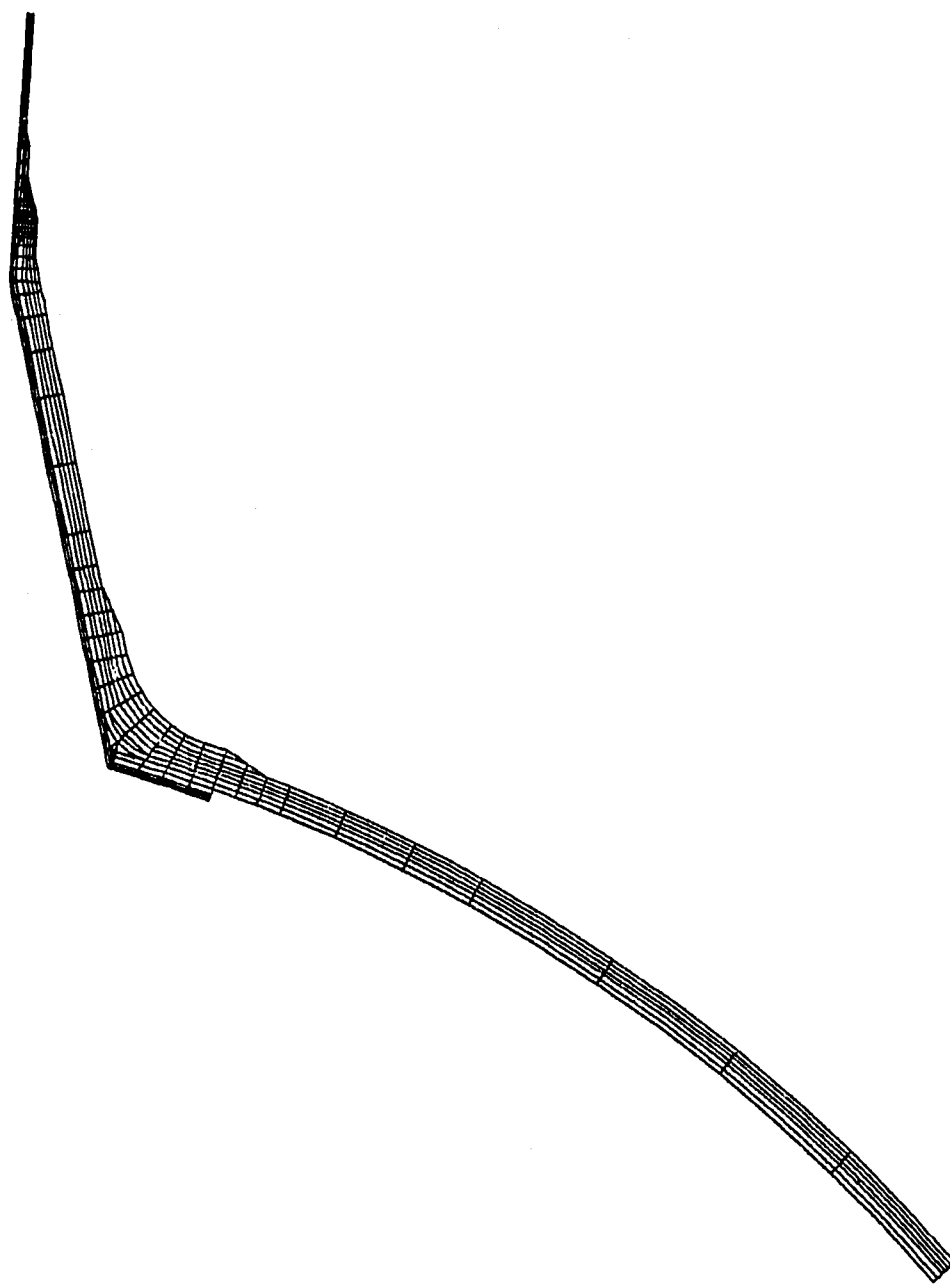


Fig. 2.6 FEM Model of IHX Primary Inlet Nozzle (Heat Conduction Analysis)  
IHX 1次側入口ノズルの有限要素モデル (熱伝導解析)

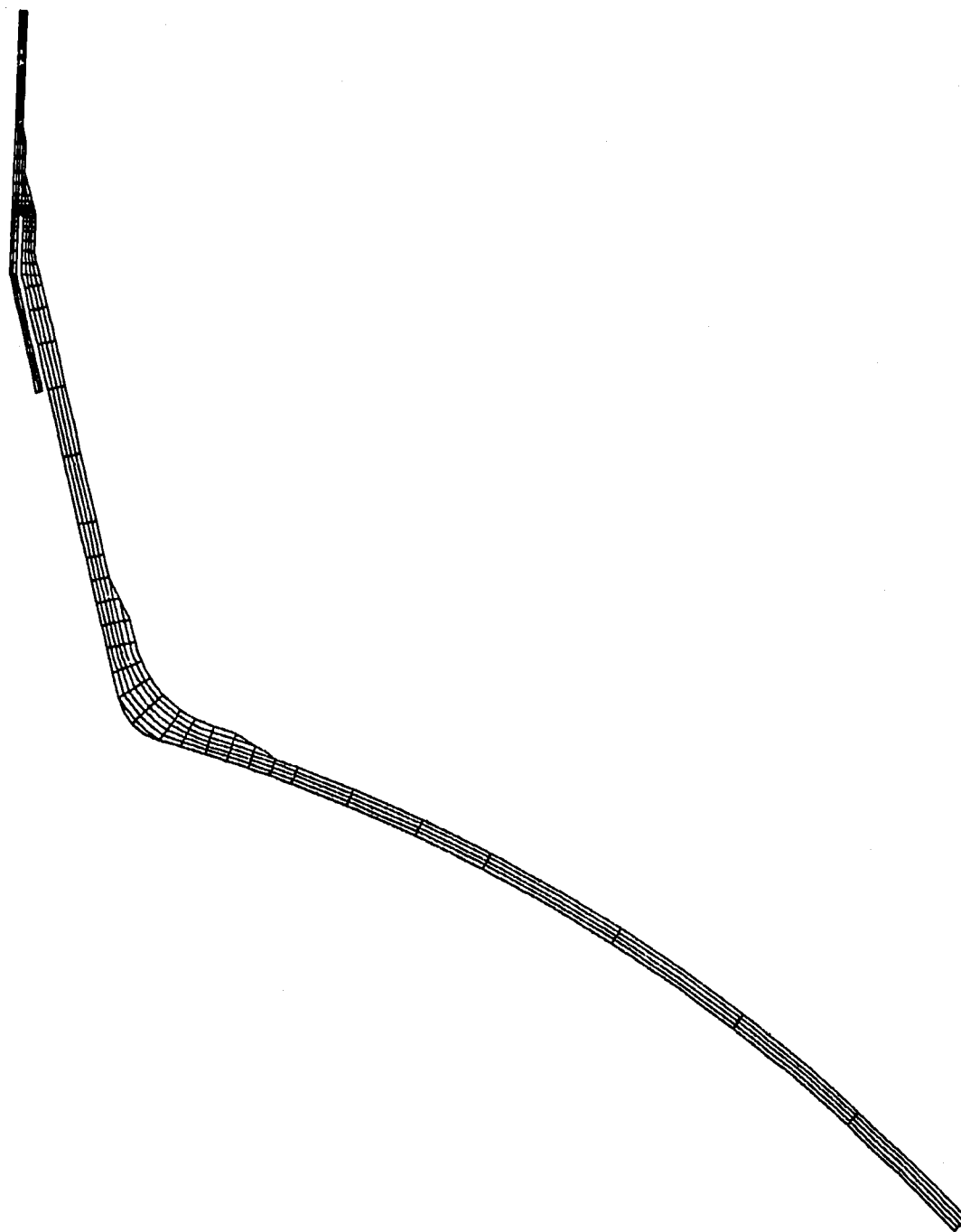


Fig. 2.7 FEM Model of IHX Primary Inlet Nozzle (Stress Analysis)  
IHX 1次側入口ノズルの有限要素モデル (応力解析)

### 3. 物 性 値

原子炉容器入口ノズルおよびIHX1次側入口ノズルの構造材料は、オーステナイトステンレス鋼SUS304である。また、IHX1次側入口ノズルにおいては、スタグナントNaもモデル化の対象である。これらの物性値については、温度依存性を考慮する。

#### 3.1 熱伝導解析

##### (1) SUS304

SUS304の熱伝導係数、比熱および密度をTable 3.1に示す。出典はEPICC材料データ集<sup>4)</sup>による。

##### (2) ナトリウム

ナトリウムの熱伝導係数および密度をTable 3.2に示す。また比熱は次式で与える。

$$C = 0.34324 - 1.36868 \times 10^{-4} T + 1.1044 \times 10^{-7} T^2$$

C : 比熱 [kcal/kg·°C]

T : 温度 [°C]

出典は、Liquid Metals Handbook<sup>5)</sup>による。

#### 3.2 熱応力解析

SUS304の弾性係数、ポアソン比および瞬間熱膨張係数をTable 3.3に示す。出典は「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」<sup>6)</sup>による。

Table 3.1 Heat conductivity, specific heat and density of SUS 304  
 SUS 304の熱伝導係数, 比熱, 密度

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	0.112	8.02
100	3.73	0.118	8.00
150	3.89	0.122	7.97
200	4.05	0.125	7.95
250	4.21	0.128	7.93
300	4.37	0.129	7.90
350	4.53	0.131	7.88
400	4.70	0.132	7.86
450	4.86	0.133	7.83
500	5.02	0.134	7.81
550	5.18	0.136	7.79
600	5.34	0.138	7.76
650	5.51	0.140	7.74
700	5.67	0.142	7.72
750	5.83	0.145	7.70
800	5.98	0.147	7.67

Table 3.2 Heat conductivity and density of Sodium  
 ナトリウムの熱伝導係数, 密度

温 度 (°C)	熱 伝 導 係 数 (kcal / mm · sec · °C)	密 度 (kg / ml)
100	$2.075 \times 10^{-5}$	$0.9270 \times 10^{-6}$
150		0.9153
200	1.958	0.9036
250		0.8918
300	1.841	0.8800
350		0.8681
400	1.724	0.8562
450		0.8443
500	1.607	0.8323
550		0.8203
600	1.490	0.8082
650		0.7961
700	1.373	0.7840
750		0.7719
800	1.256	0.7598

Table 3.3 Young's modulus, Poisson's ratio and thermal expansion rate of SUS 304

SUS 304 のヤング率, ポアソン比, 熱膨張係数

温 度	弾 性 係 数 (kg/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	熱膨張係数 (mm/mm/°C)
20	19900	0.300	15.15 × 10 <sup>-6</sup>
50	19700		15.65
75	19600		16.07
100	19400		16.48
125	19200		16.86
150	19000		17.22
175	18900		17.55
200	18700		17.85
225	18600		18.12
250	18400		18.36
275	18200		18.58
300	18000		18.79
325	17800		18.99
350	17600		19.19
375	17400		19.38
400	17200		19.57
425	17000		19.75
450	16700	0.300	19.93
475	16400	0.301	20.11
500	16200	0.302	20.28
525	15900	0.304	20.45
550	15700	0.306	20.60
575	15400	0.308	20.74
600	15200	0.310	20.87
625	14900	0.312	20.99
650	14700	0.314	21.09



## 4. 境界条件

### 4.1 熱伝導解析

#### (1) 原子炉容器入口ノズル

配管側および原子炉容器下部プレナム内面は熱伝導面であり、外面は断熱である。熱伝導解析における境界条件を Fig 4.1 に示す。また、熱伝達率を Table 4.1 に示す。

#### (2) I H X 1 次側入口ノズル

ノズル内面および I H X 容器内面の流路に直接面した部分は熱伝導面であり、外面は断熱である。ライナーと容器壁間のスタグナント Na は熱伝導とする。熱伝導解析における境界条件を Fig 4.2 に示す。また、熱伝達率を Table 4.2 に示す。

### 4.2 熱応力解析

#### (1) 原子炉容器入口ノズル

ノズルの両端においては、回転を拘束する。また、原子炉容器の端部においては、長手方向の変位を拘束する。熱応力解析における境界条件を Fig 4.3 に示す。

#### (2) I H X 1 次側入口ノズル

ノズルの先端においては、回転を拘束する。また、容器の端部においては、長手方向の変位を拘束する。熱応力解析における境界条件を Fig 4.4 に示す。

Table 4.1 Heat Transfer rate for reactor vessel inlet nozzle  
 原子炉容器入口ノズルの熱伝達率

	熱 伝 達 率	
	(kcal/mm <sup>2</sup> ·sec·°C)	(kcal/m <sup>2</sup> ·hr·°C)
配 管 側 α <sub>1</sub>	0.8889 × 10 <sup>-6</sup>	3200.0
原子炉容器下側 プレナム側 α <sub>2</sub>	0.8333 × 10 <sup>-6</sup>	3000.0

Table 4.2 Heat transfer rate for IHX primary inlet nozzle  
 IHX 1次側入口ノズルの熱伝達率

		伝 達 率	
		(kcal/mm <sup>2</sup> ·sec·°C)	(kcal/m <sup>2</sup> ·hr·°C)
9.5% 流量時 熱過渡条件 B-1, 2, 3, 4	α <sub>1</sub>	5.278 × 10 <sup>-7</sup>	1900.0
	α <sub>2</sub>	3.611 × 10 <sup>-7</sup>	1300.0
	α <sub>3</sub>	2.500 × 10 <sup>-7</sup>	900.0
11% 流量時 熱過渡条件 B-5	α <sub>1</sub>	5.833 × 10 <sup>-7</sup>	2100.0
	α <sub>2</sub>	3.889 × 10 <sup>-7</sup>	1400.0
	α <sub>3</sub>	2.778 × 10 <sup>-7</sup>	1000.0

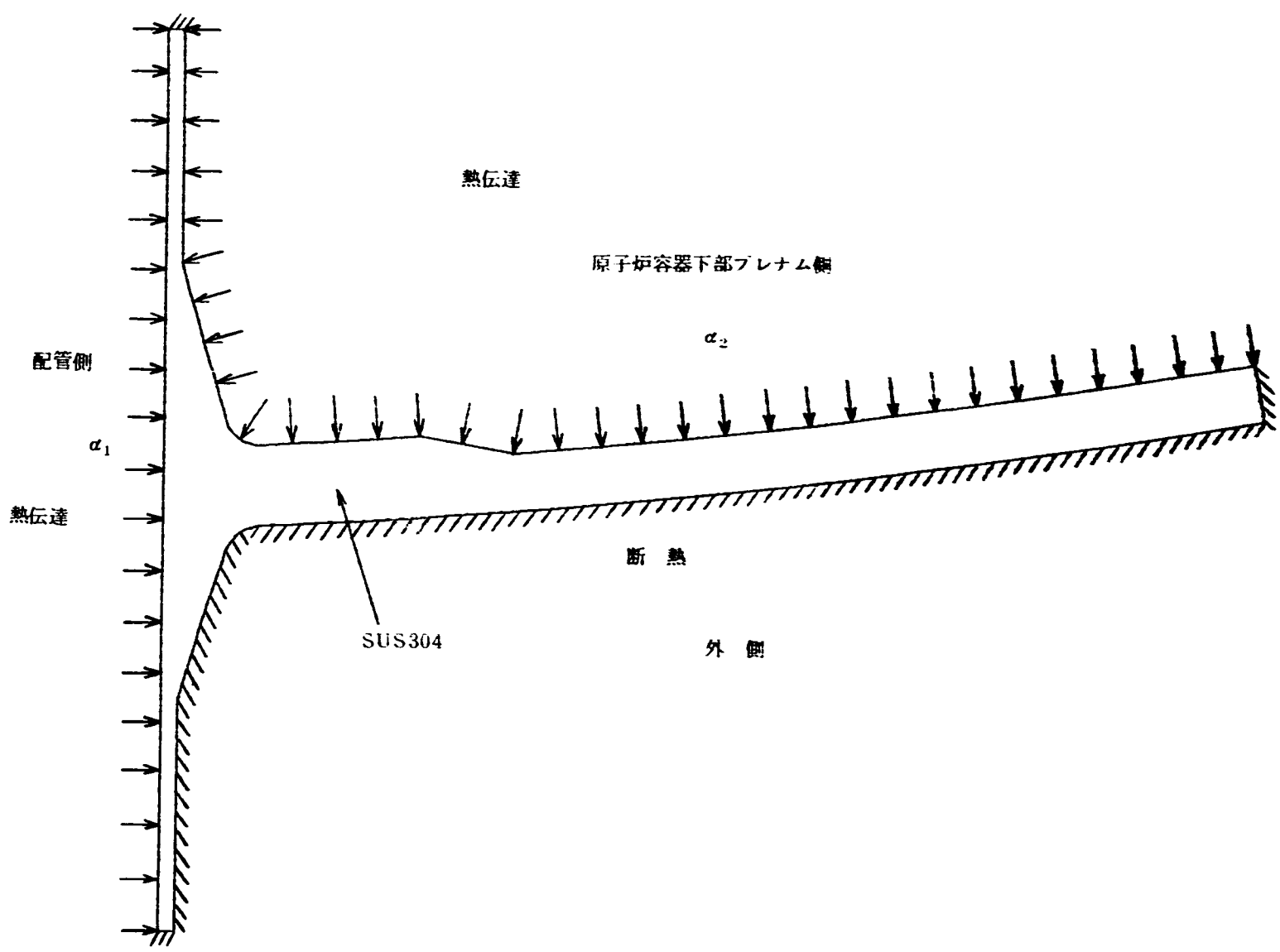


Fig. 4.1 Thermal Boundary Conditions for Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの熱境界条件

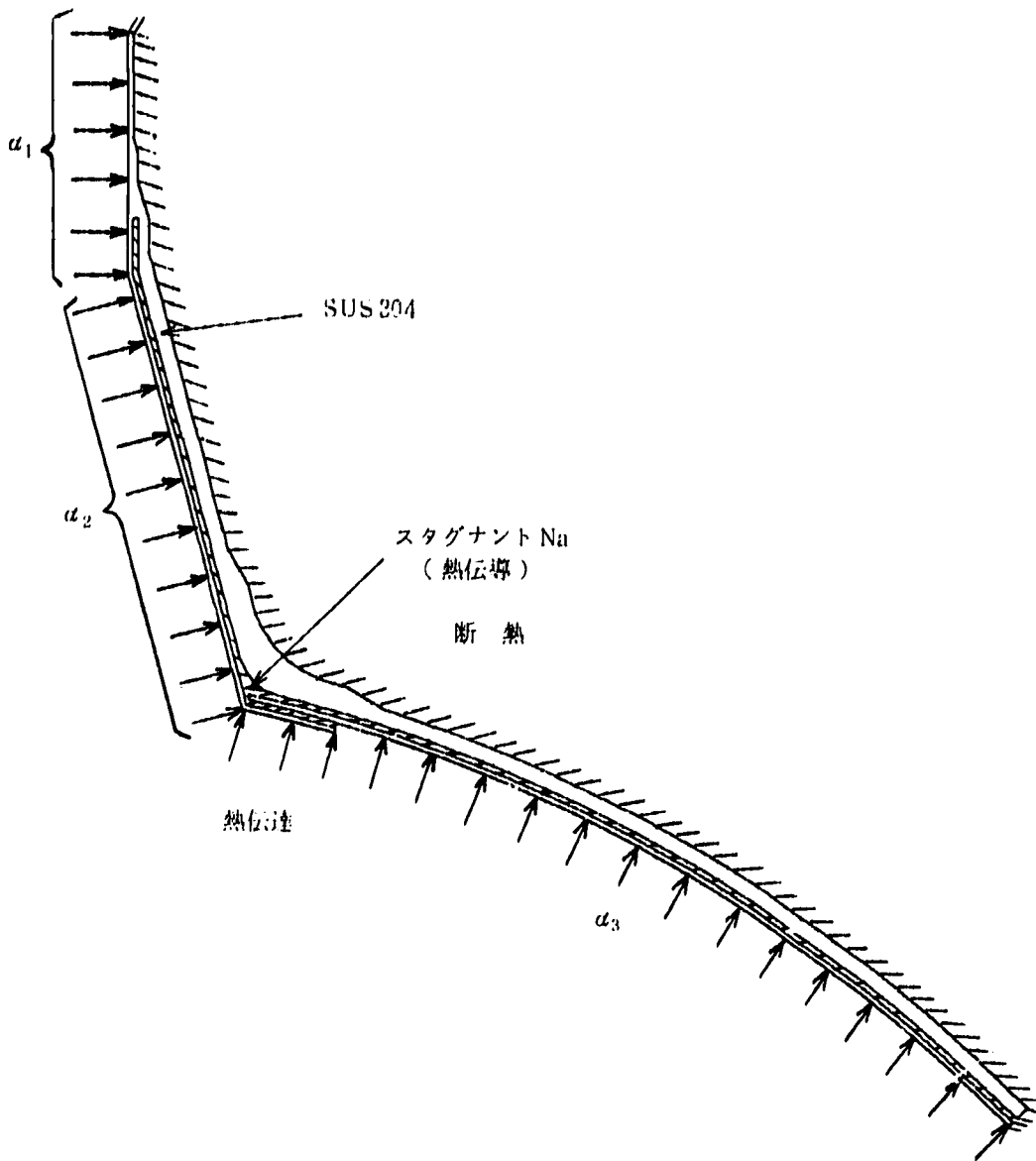


Fig. 4.2 Thermal Boundary Conditions for IHX Primary Inlet Nozzle  
 IHX 1次側入口ノズルの熱境界条件

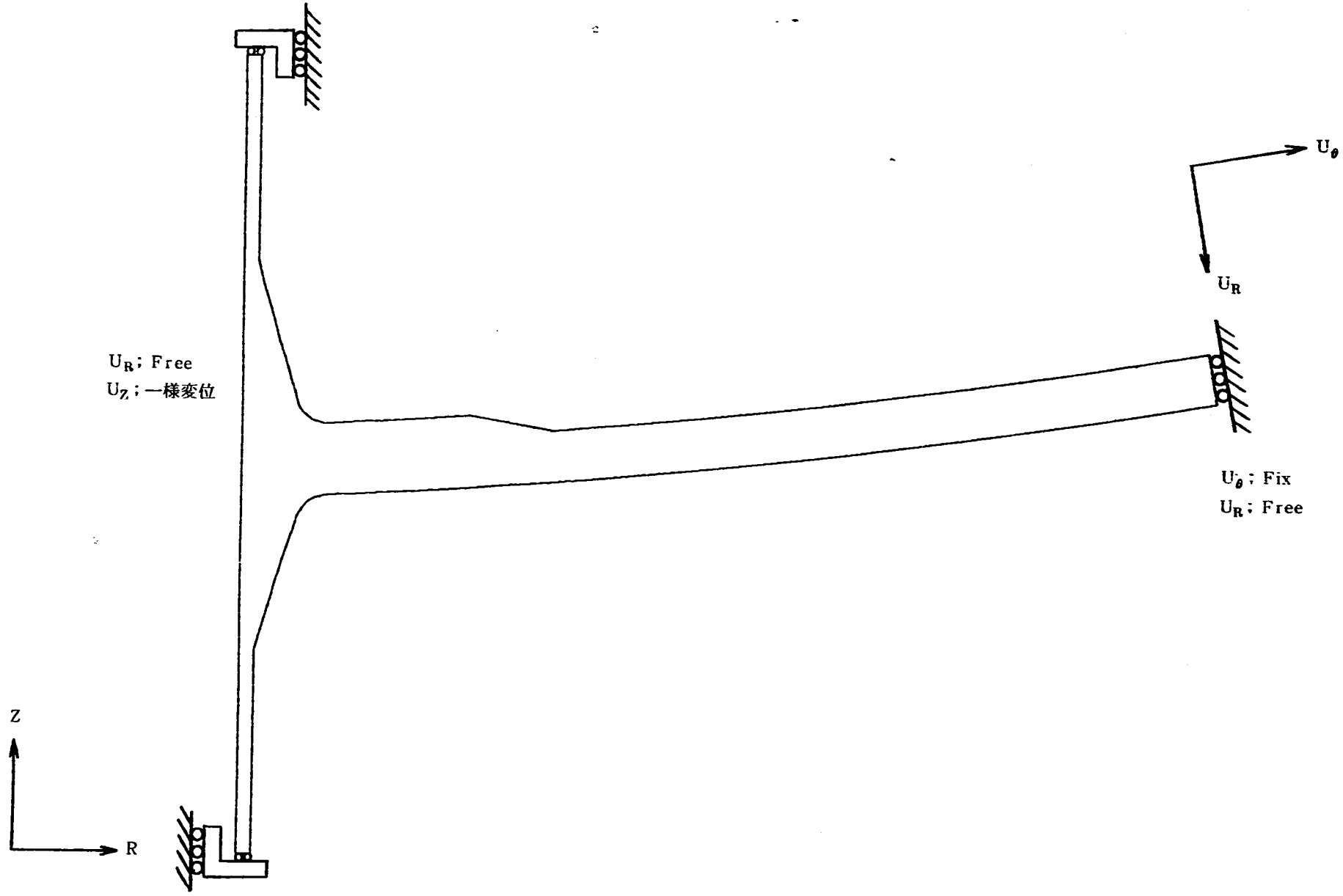


Fig. 4.3 Boundary Conditions for Reactor Vessel Inlet Nozzle  
原子炉容器入口ノズルの境界条件

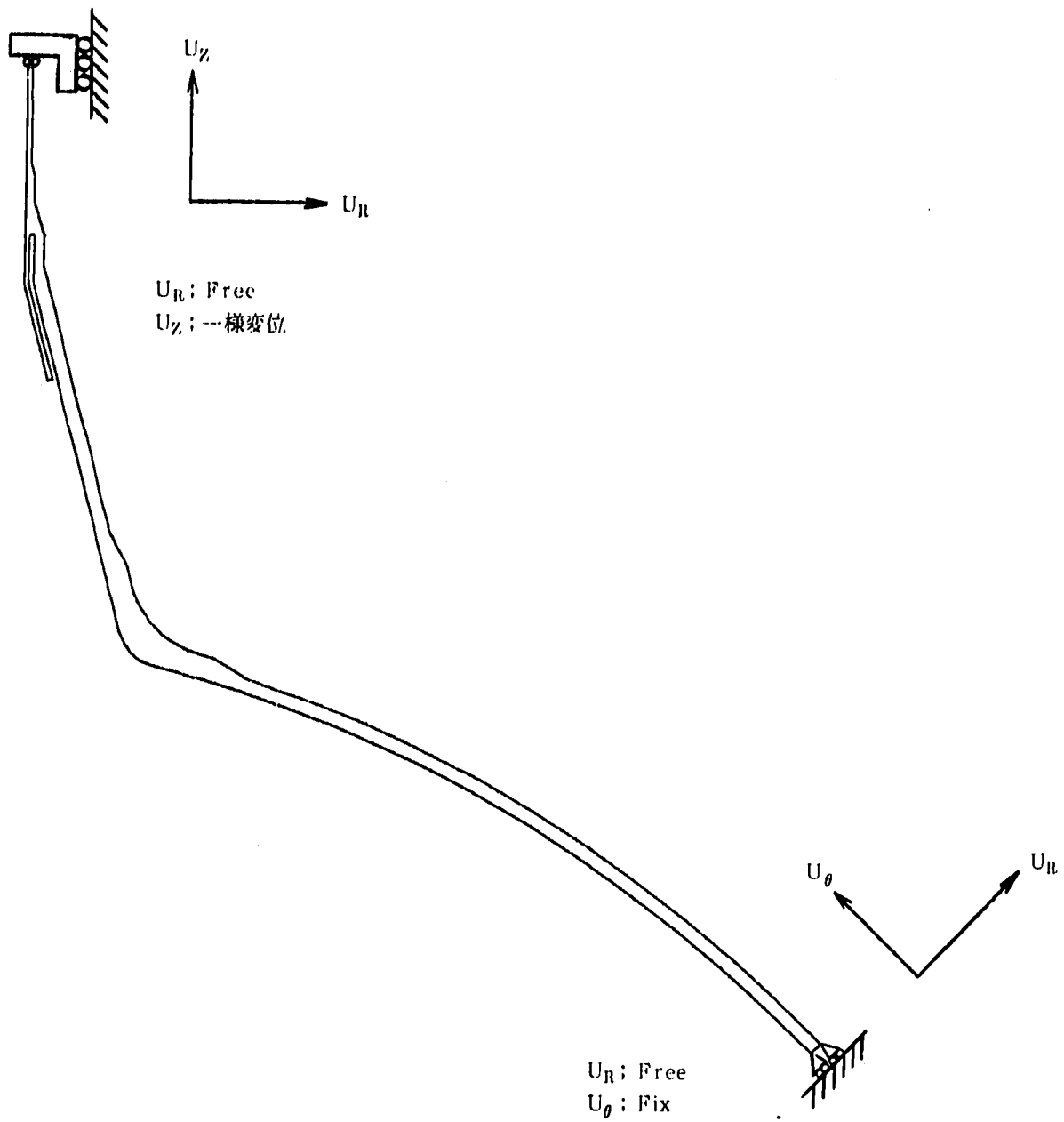


Fig. 4.4 Boundary Conditions for IHX Primary Inlet Nozzle  
IHX 1次側入口ノズルの境界条件

## 5. 熱過渡条件

Table 5.1 に解析モデルと熱過渡条件の組合せに示す。原子炉容器入口ノズルモデルに対してはA-1, A-2, A-4の3ケースの熱過渡条件 (Fig 5.1~3) をIHX1次側入口ノズルモデルに対してはB-1, B-2, B-3, B-4, B-5の5ケースの熱過渡条件 (Fig 5.4~8) をそれぞれ負荷した。これらの熱過渡条件は全て「もんじゅ」実機の熱過渡条件II-1手動トリップに伴うもので、このうちA-2, 4及びB-2~5はTable 5.2に示すパラメータに設定されたプラント熱過渡解析より得られる温度履歴図 (生カーブ) である。

A-2, B-2はノミナルケースであり、崩壊熱, ポンプコーストダウン特性, ポニーモータ流量等のパラメータを標準的に設定したケースである。A-4, B-3~4は多くのパラメータ組み合わせの中で温度変化巾が大きくなる様にパラメータが組み合わされたケースで、B-3は温度変化巾が最大となるケース, B-5は温度変化率が大きくなる様にパラメータが組み合わされたケースとした。

一方, A-1, B-1は「もんじゅ」の設備設計に用いる設計用プラント熱過渡条件であり, プラント熱過渡解析より得られる温度履歴図 (A-2, 4及びB-2~5に示す生カーブ) をもとに画一的な手法を用いてその推移を構造解析評価用の折れ線に表したものである。この設計用プラント熱過渡条件の作成に関する基本的考え方は以下のとおりである。

### プラント熱過渡条件の作成に関する基本的考え方

- ① 構造健全性評価上, 一般に温度変化率に着目すべき過渡変化が急な部分に関しては, 温度変化率により, また温度変化率が緩慢な他の部分に関しては温度差の巾拡げにより条件図化する。
- ② 過渡変化が急な部分では, 生カーブ上の時刻, 温度, 最急勾配を読みとり, その最急勾配を工学的余裕係数( $\beta$ )倍した温度変化率により条件図化する。
- ③ 過渡温度変化発生前の初期温度を基準温度とし, 各部位で設定した工学的余裕係数( $\alpha$ )により巾拡げした温度差 $\Delta T$ で条件図化する。
- ④ 工学的余裕係数( $\alpha$ )は巾広げ係数であり, 熱過渡条件図基本形状の極大・極小 (温度が単調減少して極値がない場合は変曲点) に着目してノミナルケースの解析の基準温度からの振れ幅 (Bループ) とパラメータ解析から得られる最大振れ幅 (A, B, Cループ対象) との比を求め $\alpha$ とする。
- ⑤ 工学的余裕係数( $\beta$ )は勾配係数であり, 熱過渡条件図基本形状の極大~極小値間の最大勾

配に着目して、ノミナルケースの解析より得られる最大勾配（Bループ）とパラメータ解析から得られる最大勾配（A、B、Cループ対象）との比を求め $\beta$ とする。

Fig 5.9 にこの手法による設計用プラント熱過渡条件の作成例を示す。



Table 5.1 Combination of analytical model and thermal transient condition

解析モデルと熱過渡条件の組合せ

解析モデル	ケース番号及び図番				
原子炉容器入口ノズル	A-1 (Fig 5.1)	A-2 (Fig 5.2)	—	A-4 (Fig 5.3)	—
IHX 1次側入口ノズル	B-1 (Fig 5.4)	B-2 (Fig 5.5)	B-3 (Fig 5.6)	B-4 (Fig 5.7)	B-5 (Fig 5.8)
備考	II-1 手動トリップ 機器設計用プラント 熱過渡条件図	II-1 手動トリップ ノミナルケース  (C-S)	II-1 手動トリップ 温度変化中最大とな るケース (C-23)	II-1 手動トリップ 温度変化中大のケー ス { C-14 (RV) C-6 (IHX) }	II-1 手動トリップ 温度変化率大のケー ス (C-12)

Table 5.2 Parameter set for "II-1 manual trip"

## II-1 手動トリップ パラメータ設定

ケース	崩壊熱	R/V内筒 フローホ ール流量	1次主冷却系		2次主冷却系、補助冷却設備					自 然 循環力	SH出口 ドレン弁 開口面積	給水止弁 閉 時 間	そ の 他 システ ム デ ー タ	備 考
			ポンプ コスト ダウン 特 性	ポニー モータ 流 量	ポンプ コスト ダウン 特 性	トリップ 後ACナ トリウム 流 量	A弁,C弁 開閉時間	出口ダン パ入口ベ ーン 作動時間	トリップ 後SG 流 量					
A-2, B-2	min	nom	nom	nom	nom	nom	nom	nom	nom	考 慮 し ない	—	nom	—	ノミナルケース(1) (C-S)
B-3	min	max	min	min	max	max	A弁遅く 開 C弁早く 開	早く開	max	考 慮 す	nom	nom	nom	温度変化巾が最大 となる組合せ (C-23)
A-4, B-4	max	min	nom	max	nom	mix	nom	nom	nom	考 慮 し ない	nom	nom	—	温度変化巾が大き くなる組合せ { C-14 (RV) } { C-6 (IHX) }
B-5	min	max	max	max	max	max	nom	遅く開	nom	考 慮 し ない	nom	nom	—	温度変化率が大き くなる組合せ (C-12)

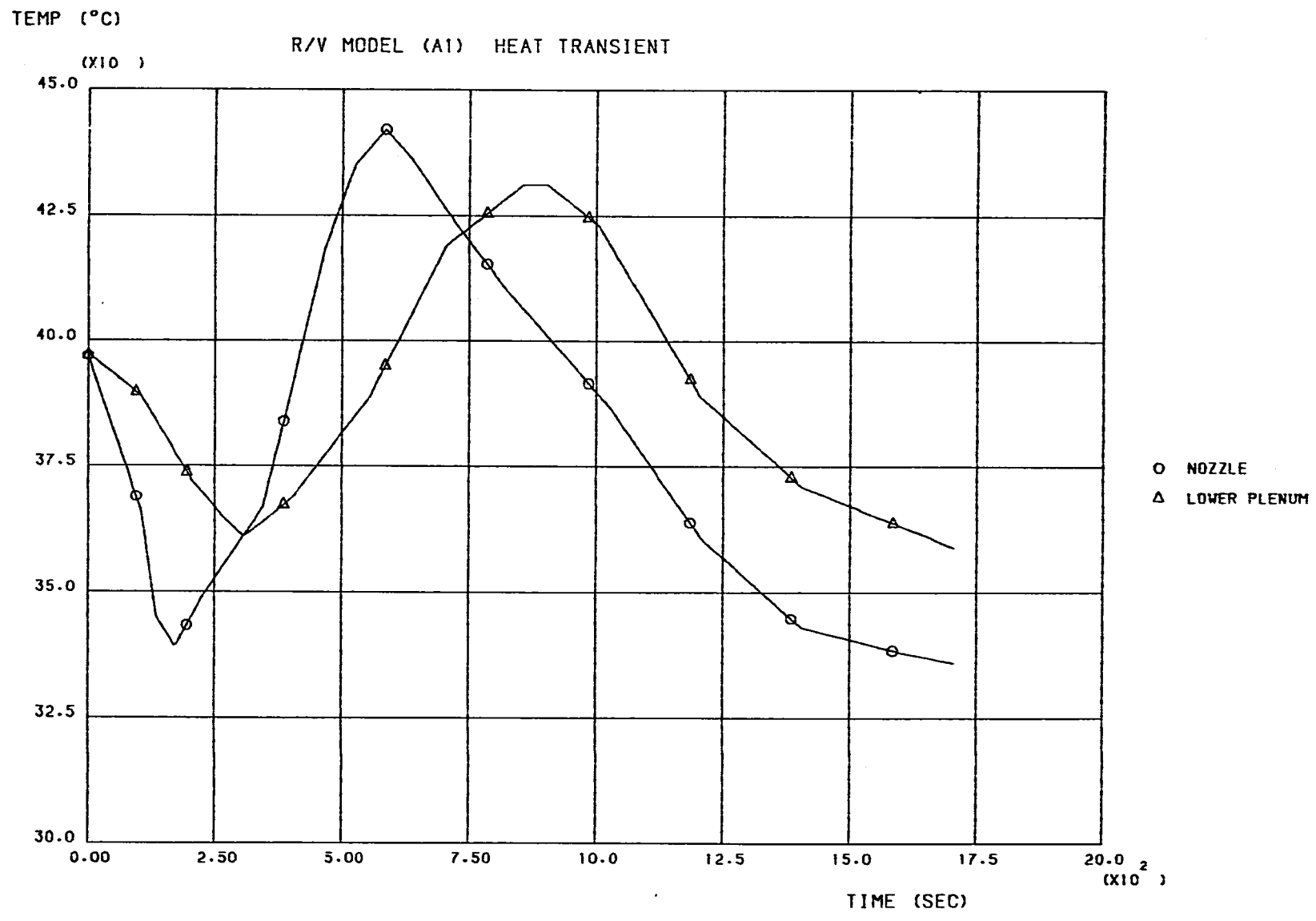


Fig. 5.1 Thermal Transient Condition A-1  
熱過渡条件 A-1

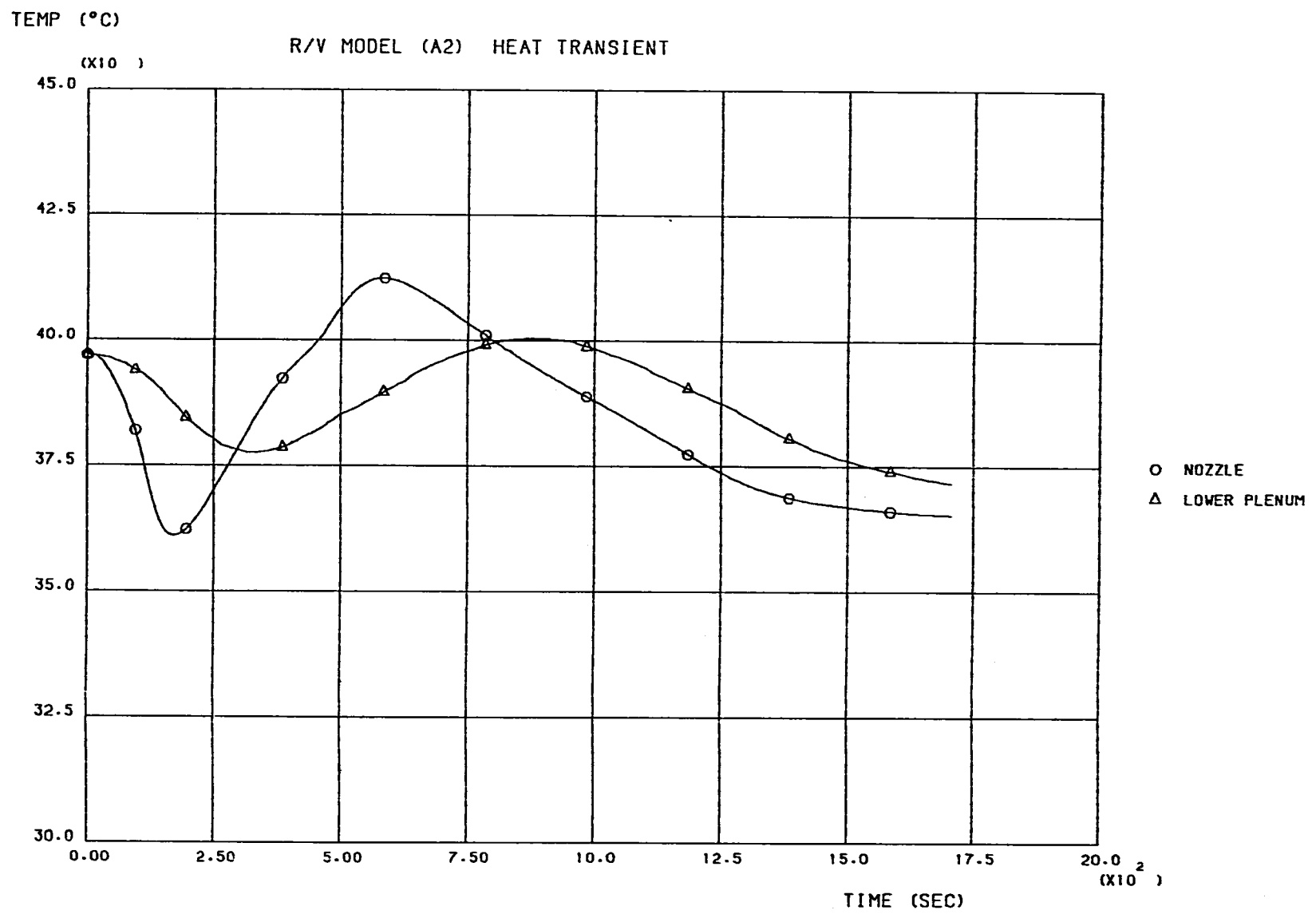


Fig. 5.2 Thermal Transient Condition A-2

熱過渡条件 A-2

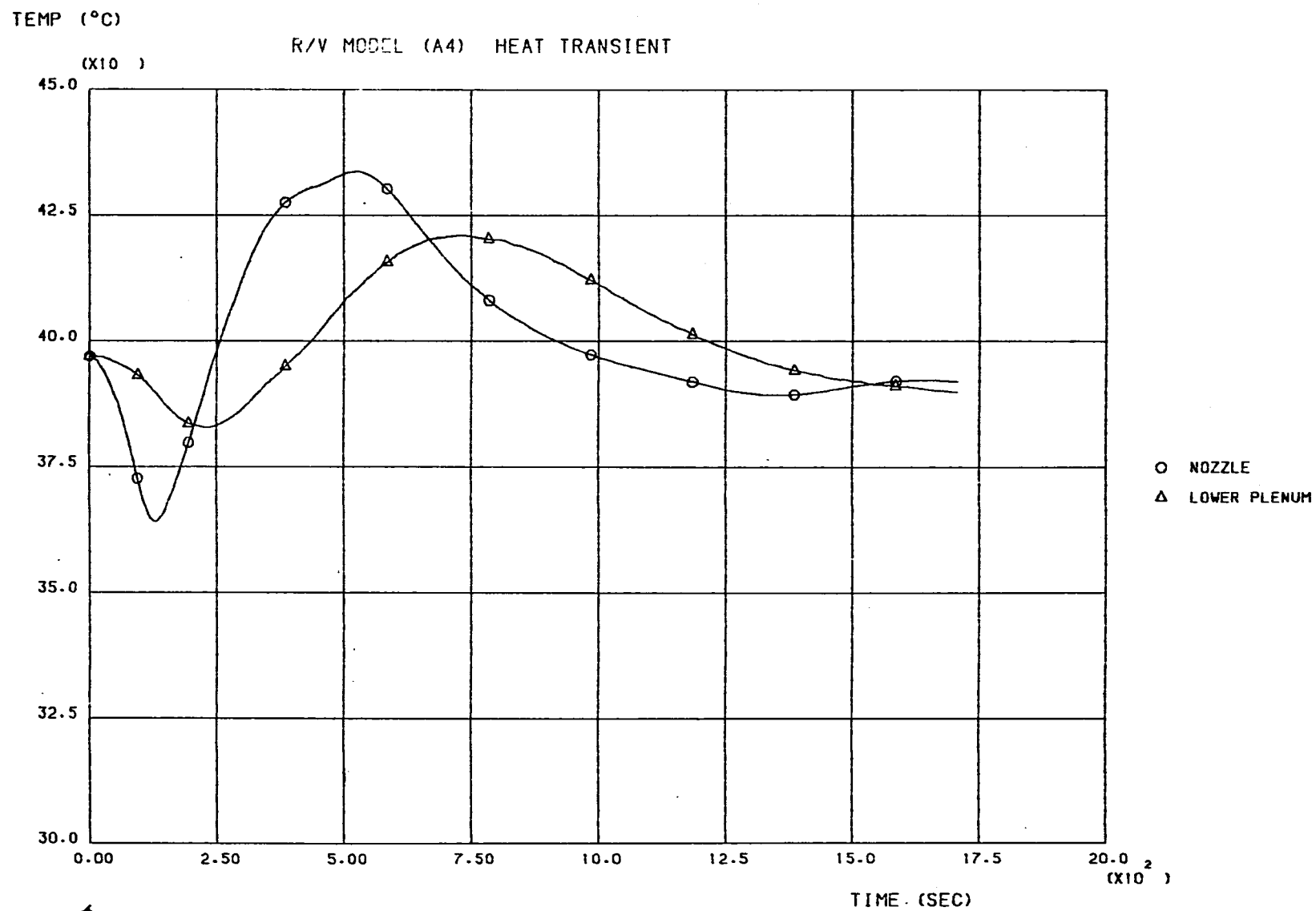


Fig. 5.3 Thermal Transient Condition A-4  
熱過渡条件 A-4

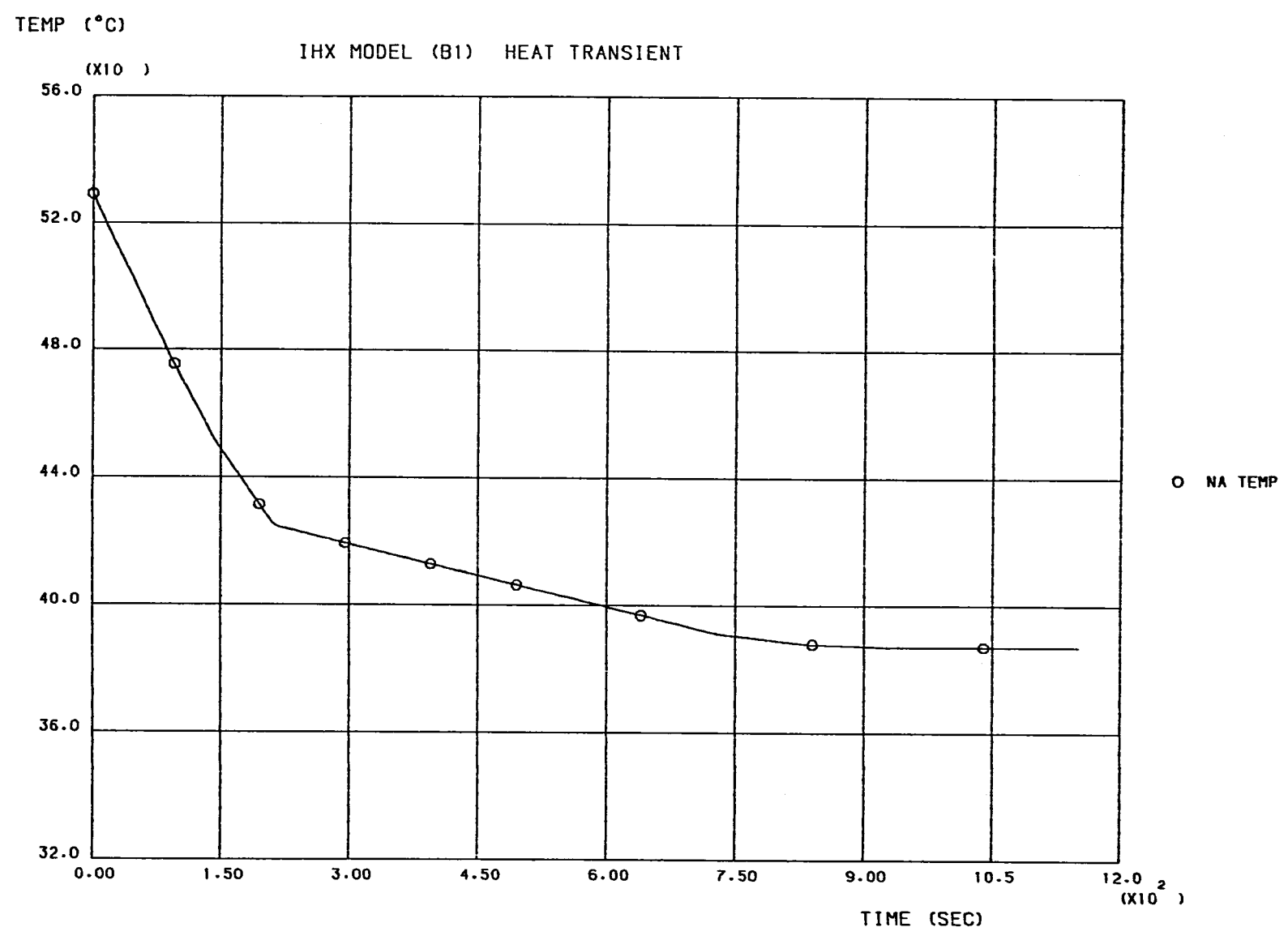


Fig. 5.4 Thermal Transient Condition B-1  
熱過渡条件 B-1

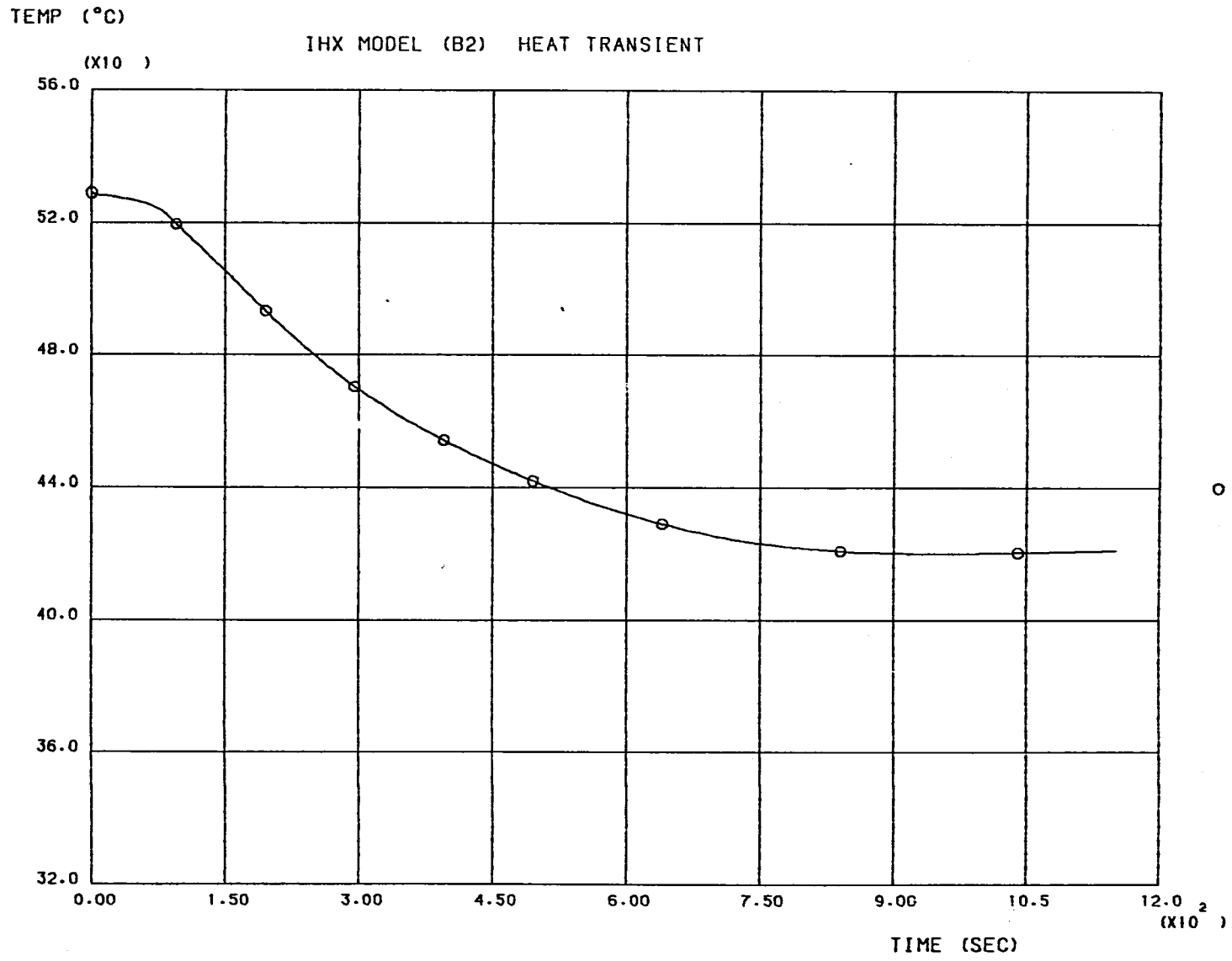


Fig. 5.5 Thermal Transient Condition B-2  
熱過渡条件 B-2

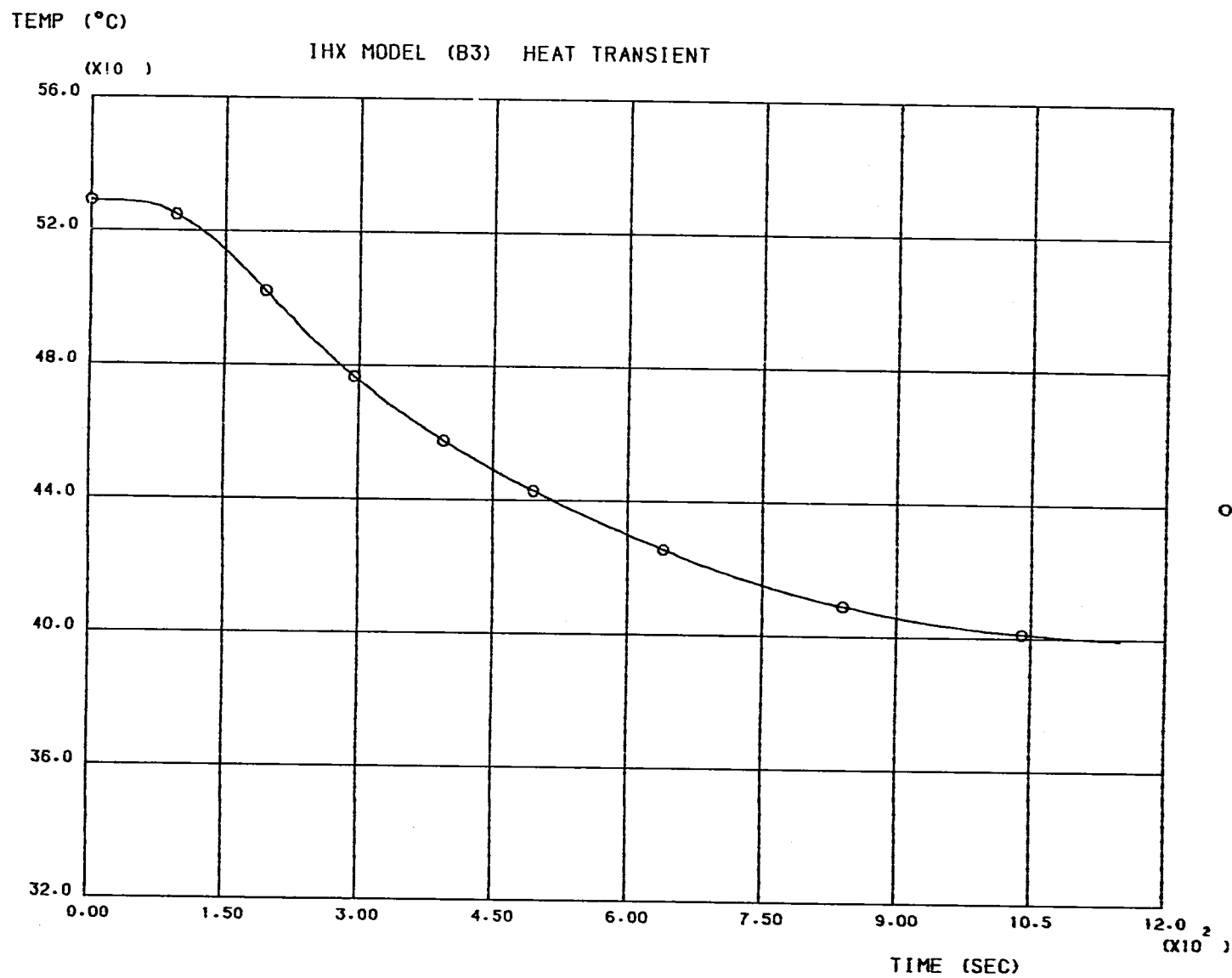


Fig. 5.6 Thermal Transient Condition B-3

熱過渡条件 B-3



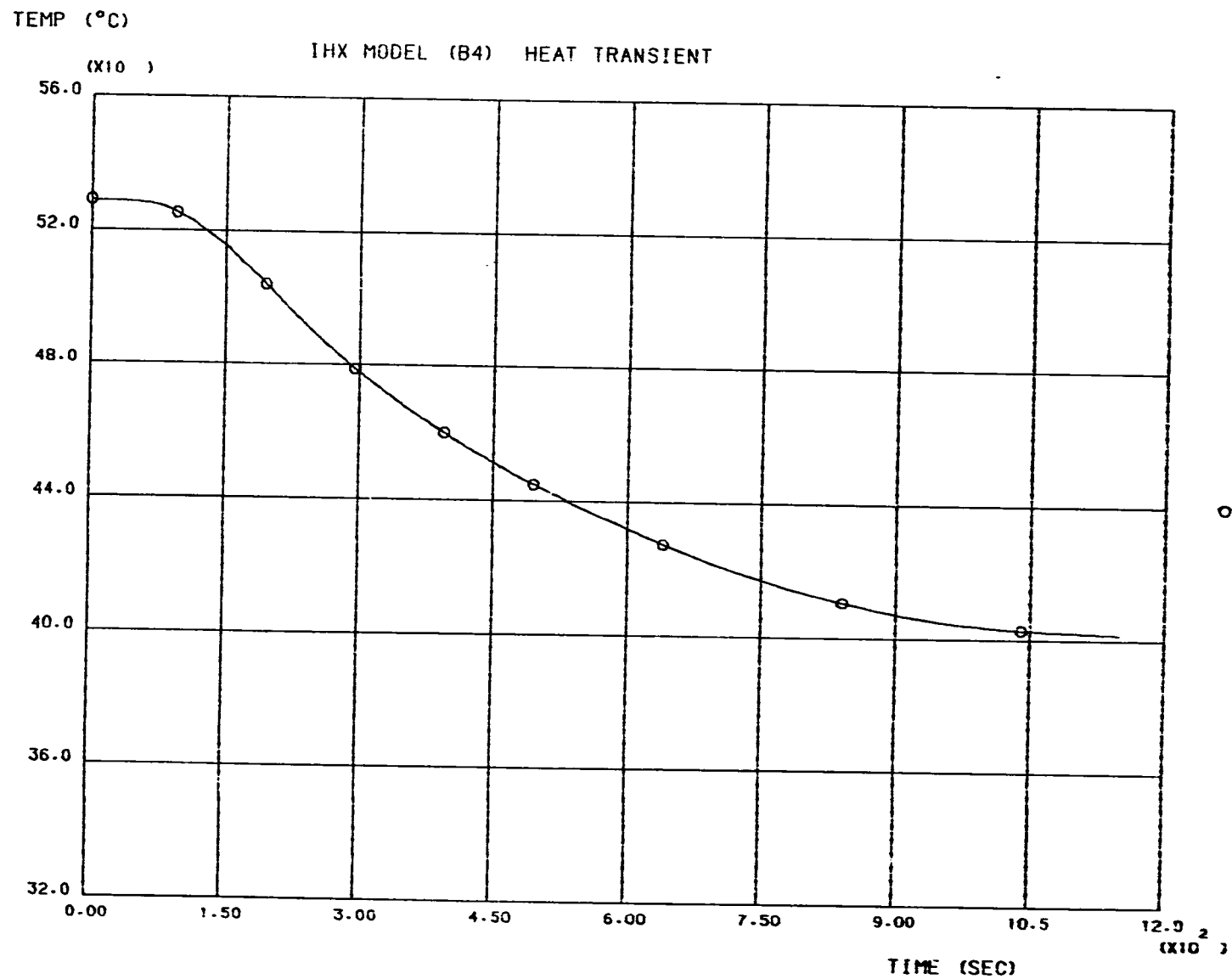


Fig. 5.7 Thermal Transient Condition B-4

熱過渡条件 B-4

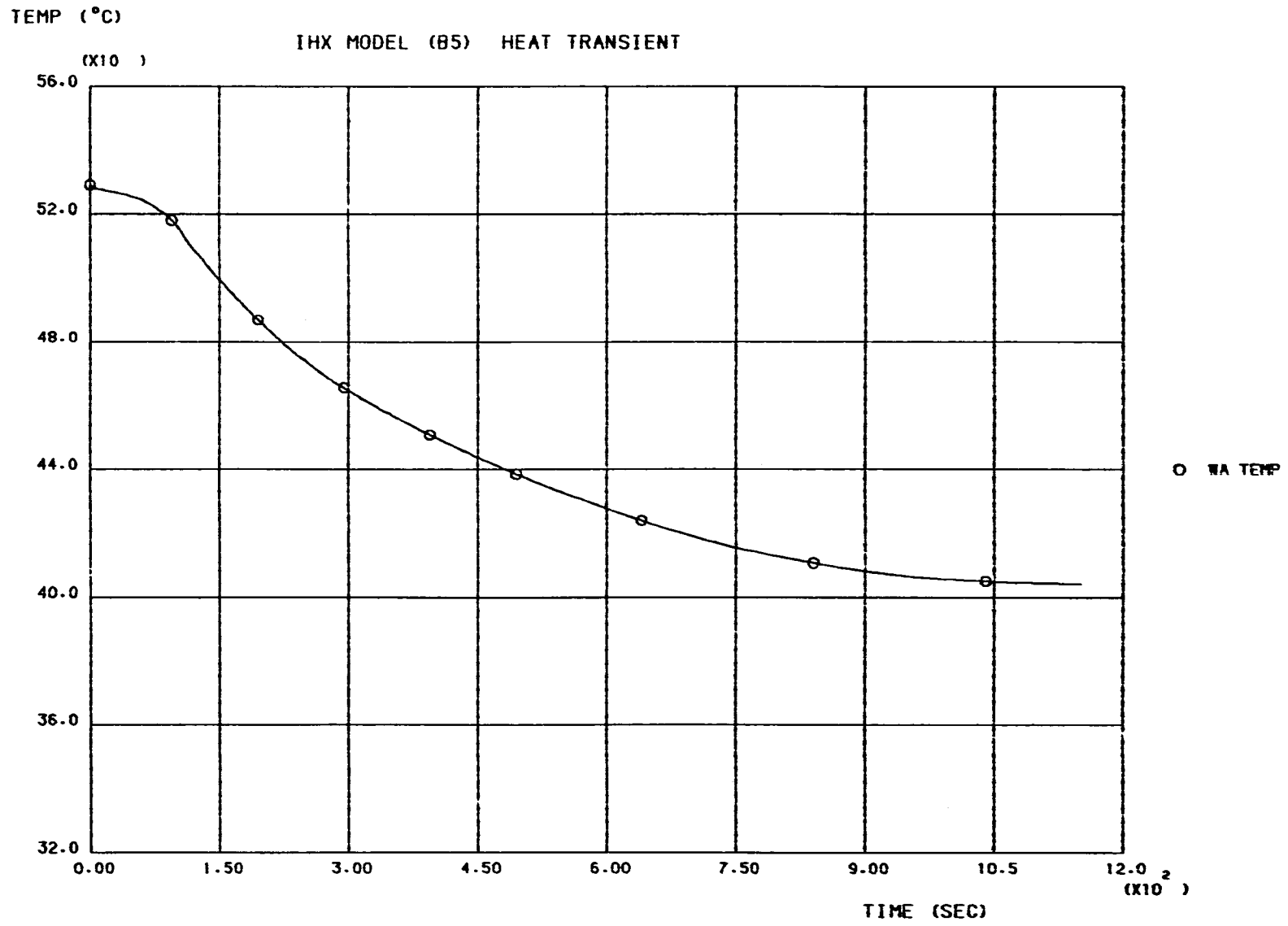
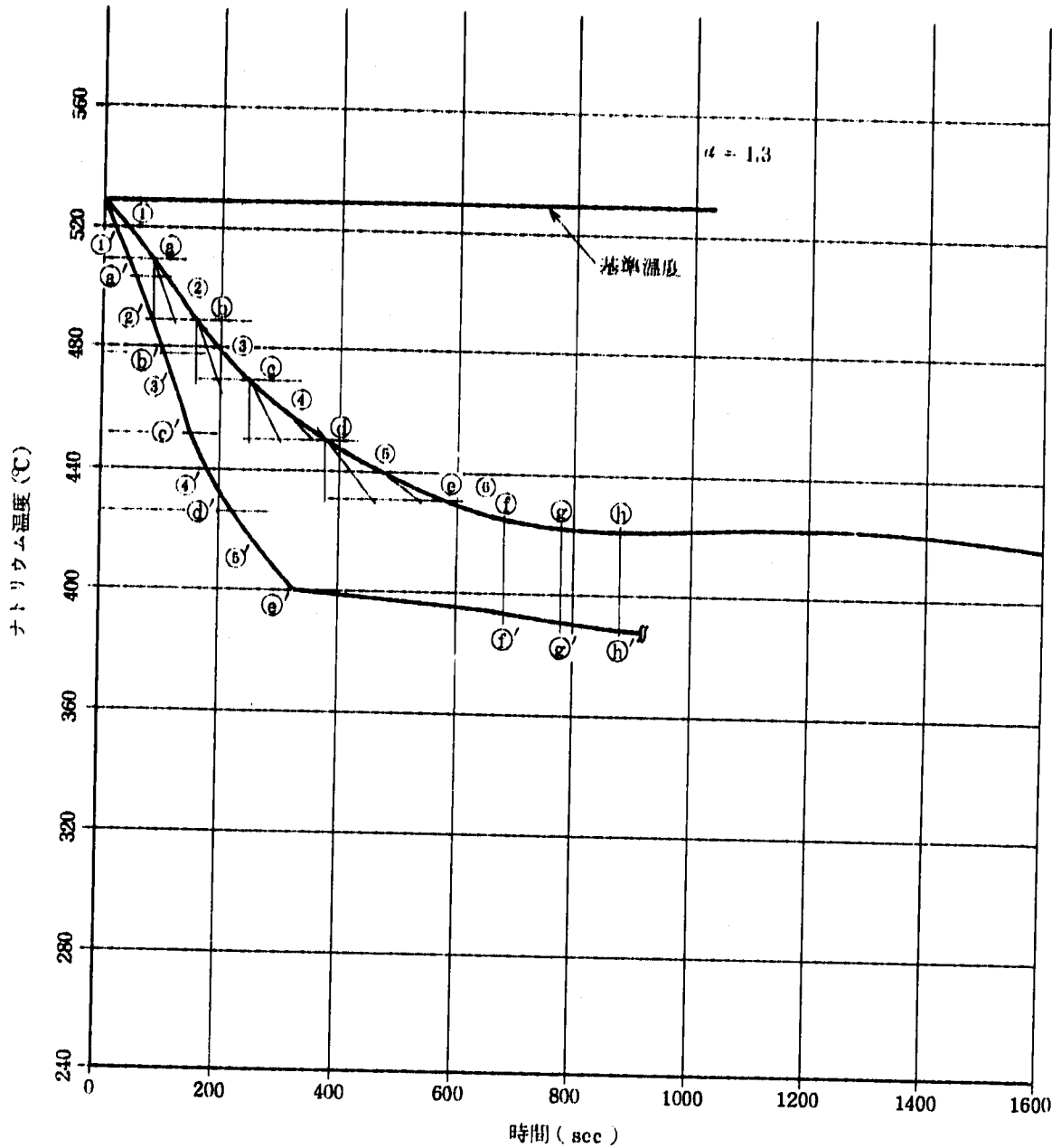


Fig. 5.8 Thermal Transient Condition B-5  
熱過渡条件 B-5



[例] 単調降下型(勾配+巾抜け)

- i) 生カーブ①~⑤は勾配が支配的な箇所である。(120℃分割する)  
 ①~⑤の最急勾配を求め、それを2倍し、直線①'~⑤'の勾配とする。  
 直線①'~⑤'の温度巾は、 $20^\circ\text{C} \times \alpha = 20^\circ\text{C} \times 1.3 = 26^\circ\text{C}$ とし、上から①'~⑤'を求め結んで行く。
- ii) 生カーブ⑥以降は巾抜けにて条件化していく。  
 点⑦~⑩は生カーブを100秒分割し求めていく。  
 点⑦'~⑩'は、点⑦~⑩と基準温度との $\Delta T$ を $\alpha$ 倍し求める。
- iii) ⑥'と⑦'は単に条件図を補完するため直線で結んだものである。

Fig. 5.9 Example of Establishing Thermal Transient Condition  
 設計用プラント熱過渡条件の作成例

## 6. 原子炉容器入口ノズルの解析結果

熱過渡条件 A-1, (設計用プラント熱過渡条件) A-2 (プラント解析から得られる熱過渡条件: ノミナルケース) および A-4 (プラント解析から得られる熱過渡条件: 温度変化中大のケース) に対する熱伝導解析, 熱応力解析を実施した。熱応力解析を行う時刻及び熱伝導解析でのステップを Table 6.1 に示す。また熱応力解析の結果をもとに (膜+曲げ) 応力強さを算出するための評価ラインの設定を Fig 6.1 に, 各熱過渡に対する Fig 6.1 の評価ライン 3, 4, 11, 12 の内外表面における (膜+曲げ) 応力強さの履歴を Fig 6.2 ~ Fig 6.13 に示す。さらに評価ライン 3, 4, 11, 12 の内面, 外面それぞれでのすべての熱過渡条件に対する (膜+曲げ) 応力強さの履歴をまとめたものを Fig 6.14 ~ Fig 6.21 に示す。これらの履歴より (膜+曲げ) 応力に着目すると, 各評価ラインにおいていずれの熱過渡ともピークが 3 時点で現われるが, このピーク時の各評価ラインでの (膜+曲げ) 応力強さを Table 6.2 に, またこの 3 時点間での (膜+曲げ) 応力強さ範囲の最大を Table 6.3 に示す。

これらの結果によるといずれの熱過渡に対しても, 評価ライン 12 の内面において最も (膜+曲げ) 応力強さが高い。Fig 6.20 にこの評価ライン 12 の内面における全ての熱過渡条件に対する (膜+曲げ) 応力強さの履歴を示す。前述のようにこの評価点においても他の評価点においても, いずれの熱過渡に対してもピークは 3 時点で現われるが, 最も高い応力強さが現われる時点は熱過渡により異なる。熱過渡 A-1, A-4 ではそれぞれ 2 回目のピーク時 595 秒, 515 秒において最も応力強さが高く, 熱過渡 A-2 では 1 回目のピーク時 200 秒において最も応力強さが高い。これは配管側ナトリウム温度が熱過渡 A-1, A-4 では降温し, 次に昇温する時の温度勾配が急であるのに対し, 熱過渡 A-2 では最初に降温する時の温度勾配が急であり, 次の昇温時の温度勾配は比較的ゆるやかであることによる。

各熱過渡に対する応力強さのうち, 最も高い応力強さが生じるのは, 熱過渡 A-1 で, 以下熱過渡 A-4, A-2 の順になっている。熱過渡 A-1 に対し各ピーク時に最大の応力強さが生じる評価点 (200 秒では評価ライン-11 内面, 595 秒, 1395 秒では評価ライン-12 内面) での値と他の熱過渡 A-2, A-4 に対し同じ評価点に生ずる値とを比較すると, 熱過渡 A-2 に対しては, 1.52 ~ 2.38 倍, 熱過渡 A-4 に対しては, 1.53 ~ 3.01 倍の値となっており, 最大の (膜+曲げ) 応力強さを見た場合, 原子炉容器入口ノズルではこれらのプラント解析より得られる熱過渡 (A-2, A-4) に対し, 設計用プラント熱過渡条件 (A-1) は 1.52 ~ 3.01 の安全裕度を持つことがわかった。また各ピーク間のレンジをとり, (膜+曲げ) 応力強さ範囲で比較すると, やはり評価ライン 12 の内面において最も応力強さ範囲が高く, 熱過渡 A-1 の場合に最大値が得られた。応力強さ範囲は熱過渡 A-1, A-4, A-2 の順に大きく, 設計用

プラント熱過渡条件 (A-1) に対し評価ライン12の内面において生じる値と、プラント解析より得られる熱過渡 (A-2, A-4) に対し同じ点に生じる値を比較すると熱過渡 A-2, A-4 に対しそれぞれ 1.92, 1.67 倍の値となっている。

Table 6.1 Time step for stress analysis  
 応力解析のステップ

応力解析 のステップ	熱 過 渡 条 件 A-1 A-2		熱 過 渡 条 件 A-4	
	時 間 (sec)	熱伝導解析 のステップ	時 間 (sec)	熱伝導解析 のステップ
1	100	20	100	20
2	125	25	125	25
3	150	30	150	30
4	175	35	175	35
5	200	40	200	40
6	225	43	225	43
7	245	45	245	45
8	265	47	265	47
9	295	50	295	50
10	395	60	395	60
11	495	70	425	63
12	525	73	455	66
13	555	76	475	68
14	575	78	495	70
15	595	80	515	72
16	615	82	535	74
17	635	84	565	77
18	665	87	595	80
19	695	90	695	90
20	795	100	795	100
21	895	110	895	110
22	995	120	995	120
23	1095	130	1095	130
24	1195	140	1195	140
25	1295	150	1295	150
26	1395	160	1395	160
27	1495	170	1495	170
28	1595	180	1595	180
29	1705	191	1705	191

Table 6.2 Membrane plus bending stress intensity  
(膜+曲げ) 応力強さ

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

事 象		LINE-1	LINE-2	LINE-3	LINE-4	LINE-5	LINE-11	LINE-12
		内面	内面	内面	外面	外面	内面	内面
熱過渡 A-1	200秒	9.38	9.25	8.34	5.82	4.72	10.42	10.34
	595秒	11.85	11.95	11.69	5.14	4.64	13.06	13.26
	1395秒	10.05	10.51	7.76	7.81	6.58	10.28	11.06
熱過渡 A-2	200秒	6.13	6.02	5.86	3.31	2.53	6.87	6.80
	615秒	5.25	5.42	5.24	1.84	1.81	5.66	5.91
	1395秒	4.26	4.40	3.24	3.37	2.72	4.37	4.65
熱過渡 A-4	150秒	5.37	5.16	5.58	2.44	1.89	6.16	6.01
	515秒	7.86	8.06	6.63	4.80	4.01	8.26	8.64
	1195秒	3.29	3.51	2.47	2.34	2.42	3.38	3.68

Table 6.3 Membrane plus bending stress intensity range  
(膜+曲げ) 応力強さ範囲

(単位: kg/mm<sup>2</sup>)

	LINE-1	LINE-2	LINE-3	LINE-4	LINE-5	LINE-11	LINE-12
	内面	内面	内面	外面	外面	内面	内面
熱過渡 A-1	21.84	21.54	20.03	12.95	11.13	23.48	24.39
熱過渡 A-2	11.38	11.44	11.10	5.21	4.46	12.56	12.71
熱過渡 A-4	13.14	13.22	12.21	7.24	6.43	14.37	14.59

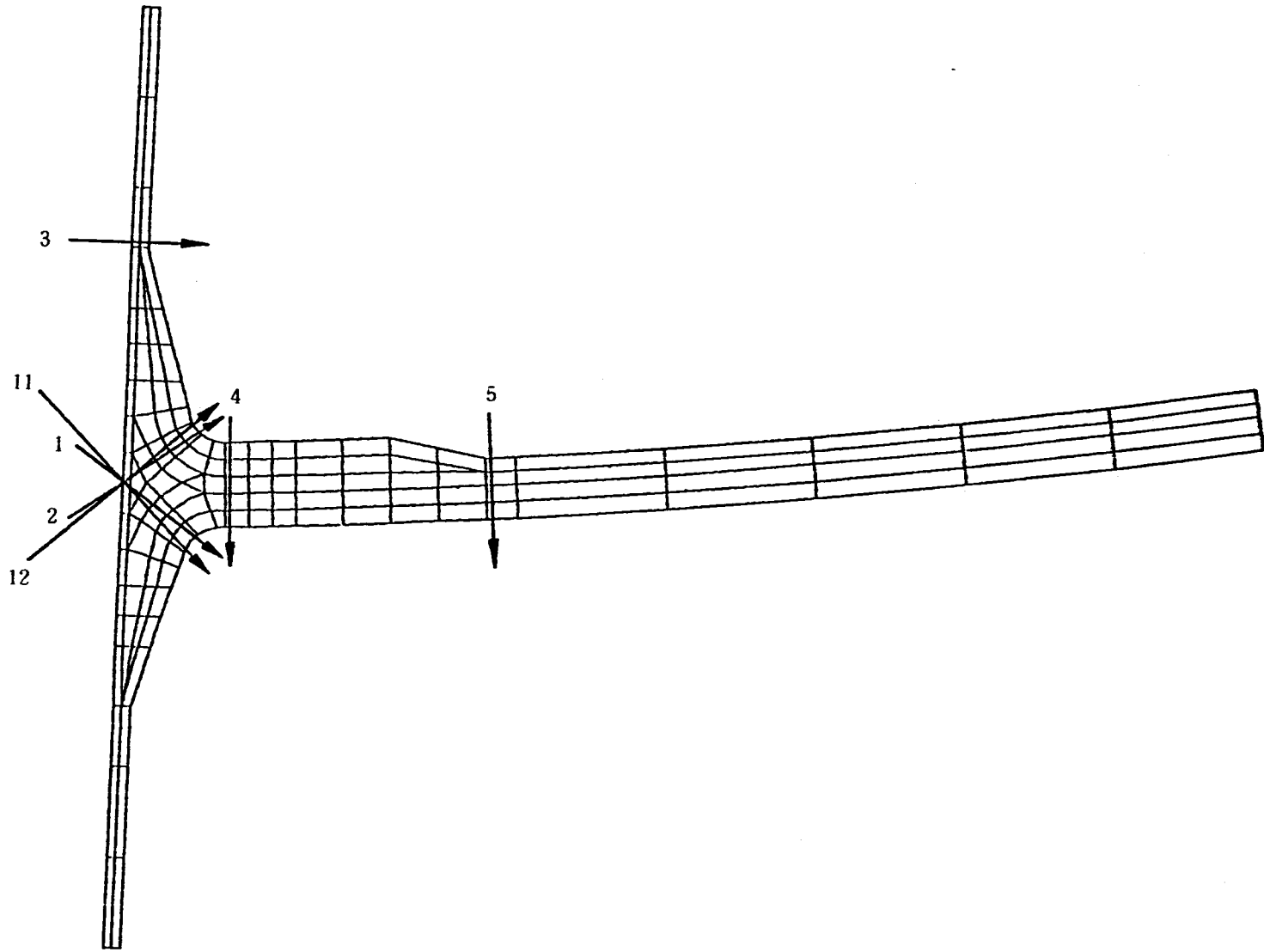
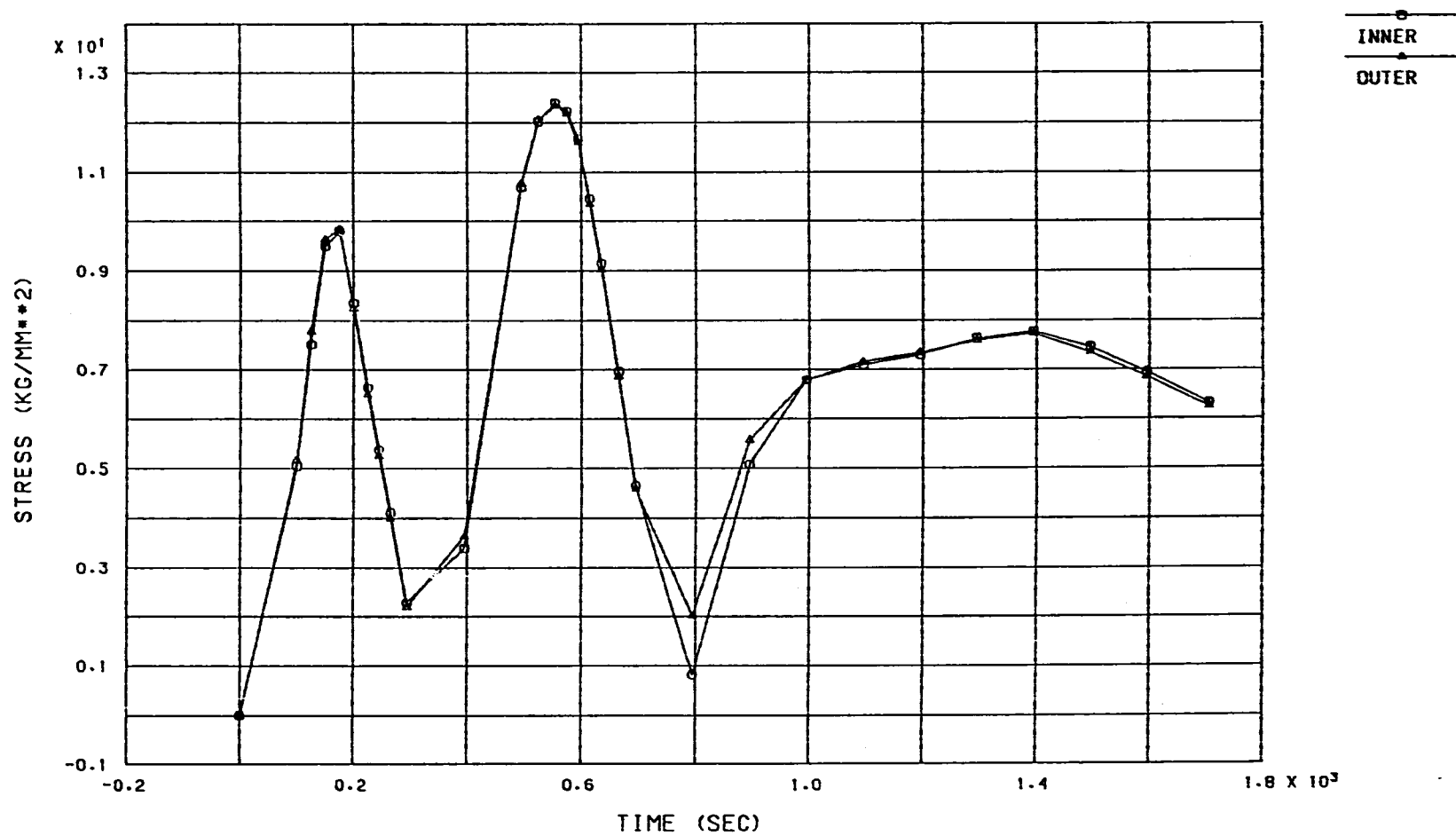


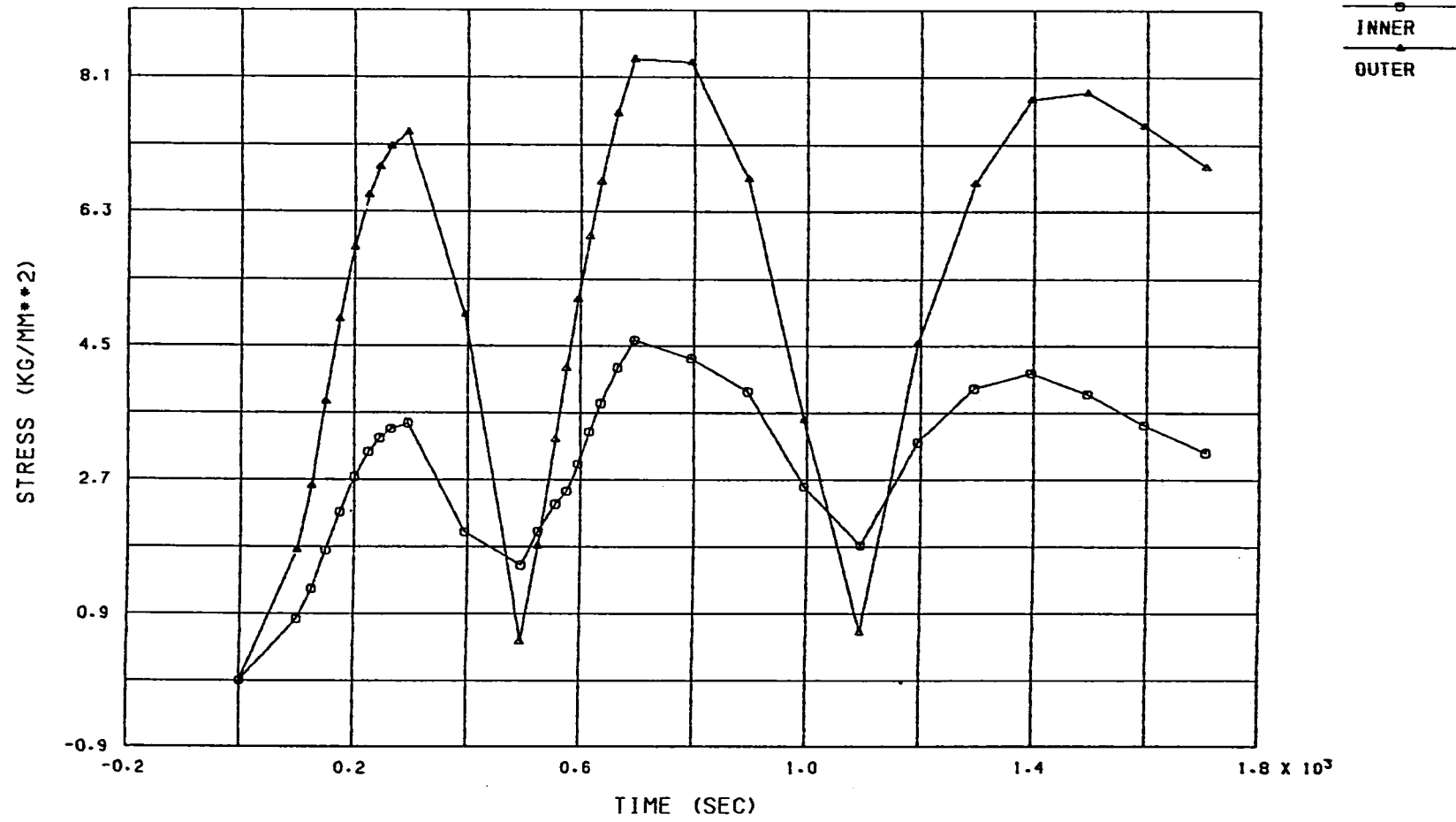
Fig. 6.1 Stress Classification Line  
応力評価断面





R/V MODEL (A1) LINE-3 (MEM.+BEN.) HISTORY

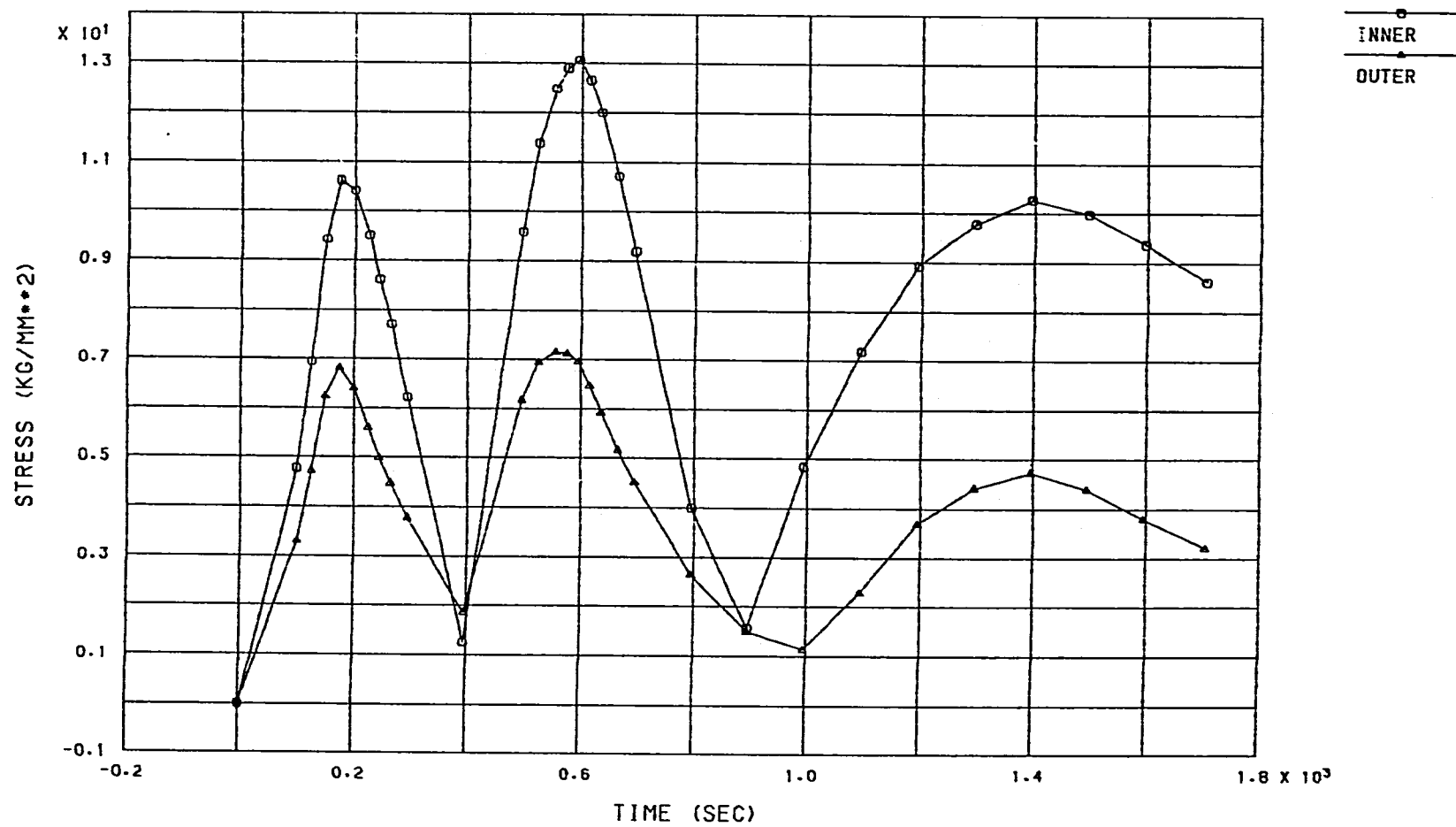
Fig. 6.2 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-1, Line-3)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-1, ライン-3)



R/V MODEL (A1) LINE-4 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.3 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-1, Line-4)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-1, ライン-4)

FINAS



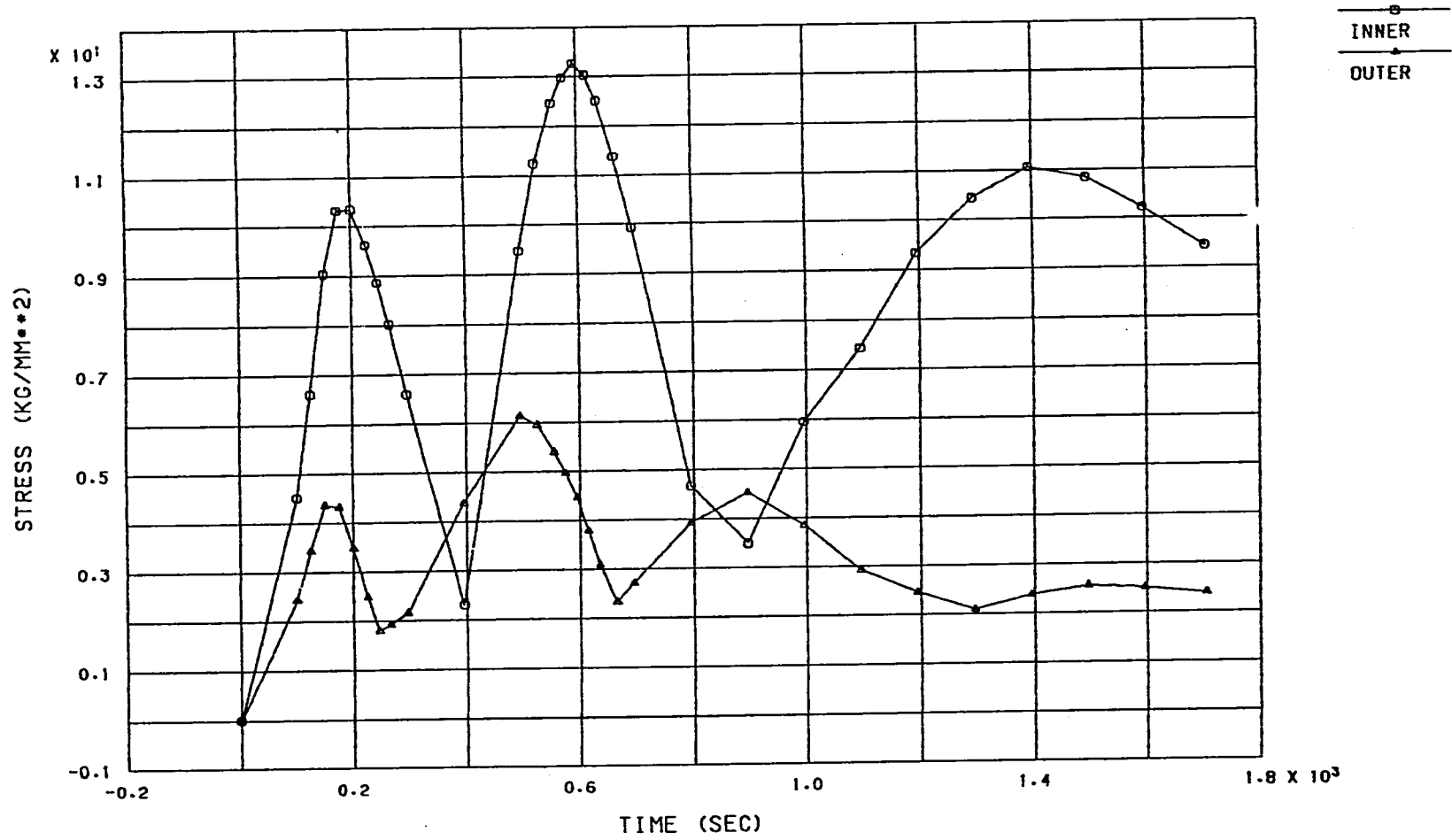
R/V MODEL (A1) LINE-11 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.4 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-1, Line-11)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-1, ライン-11)

PNC SN941 85-78

FINAS

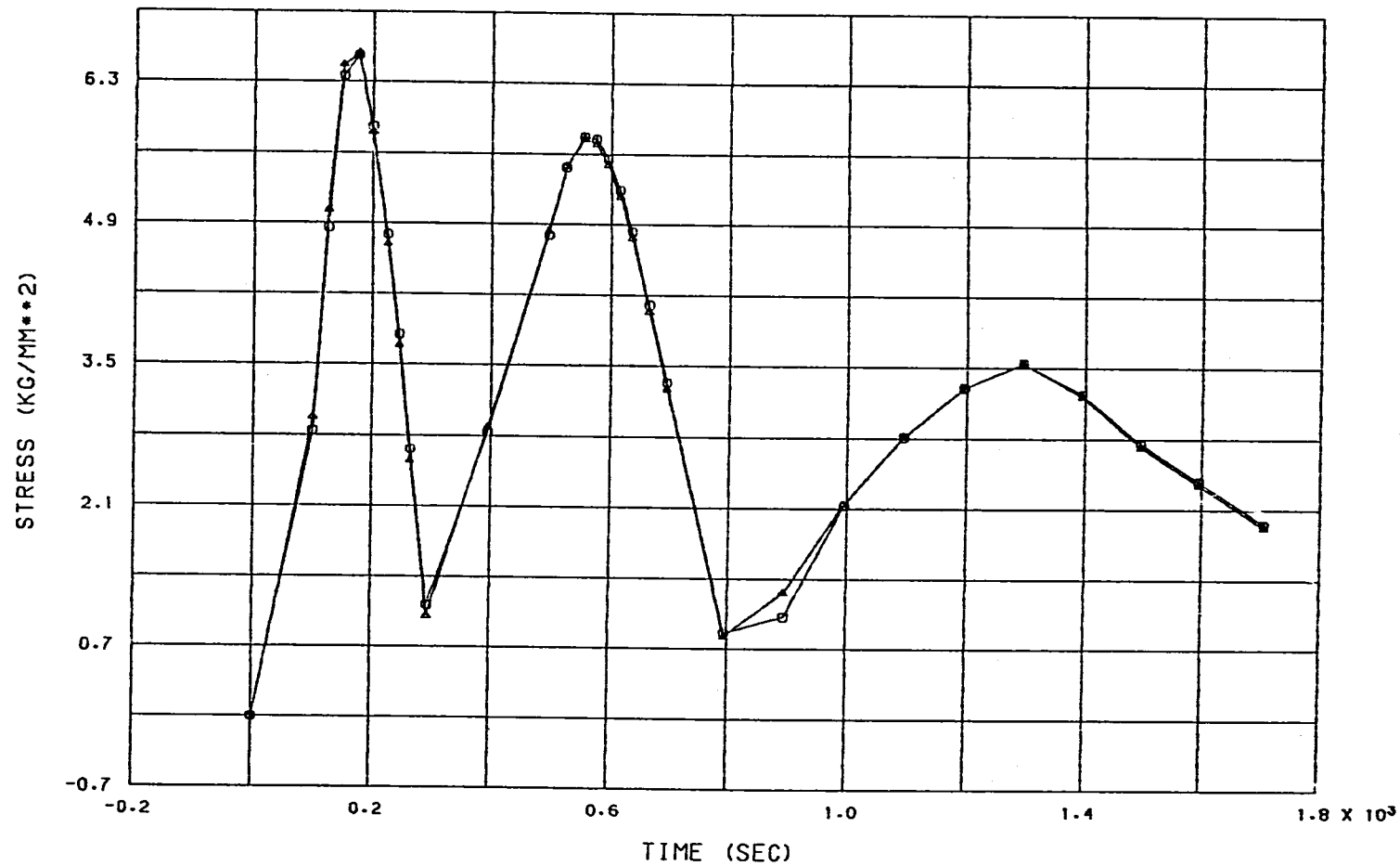
PNC SN941 85-78



R/V MODEL (A1) LINE-12 (MEM.+BEN.) HISTORY

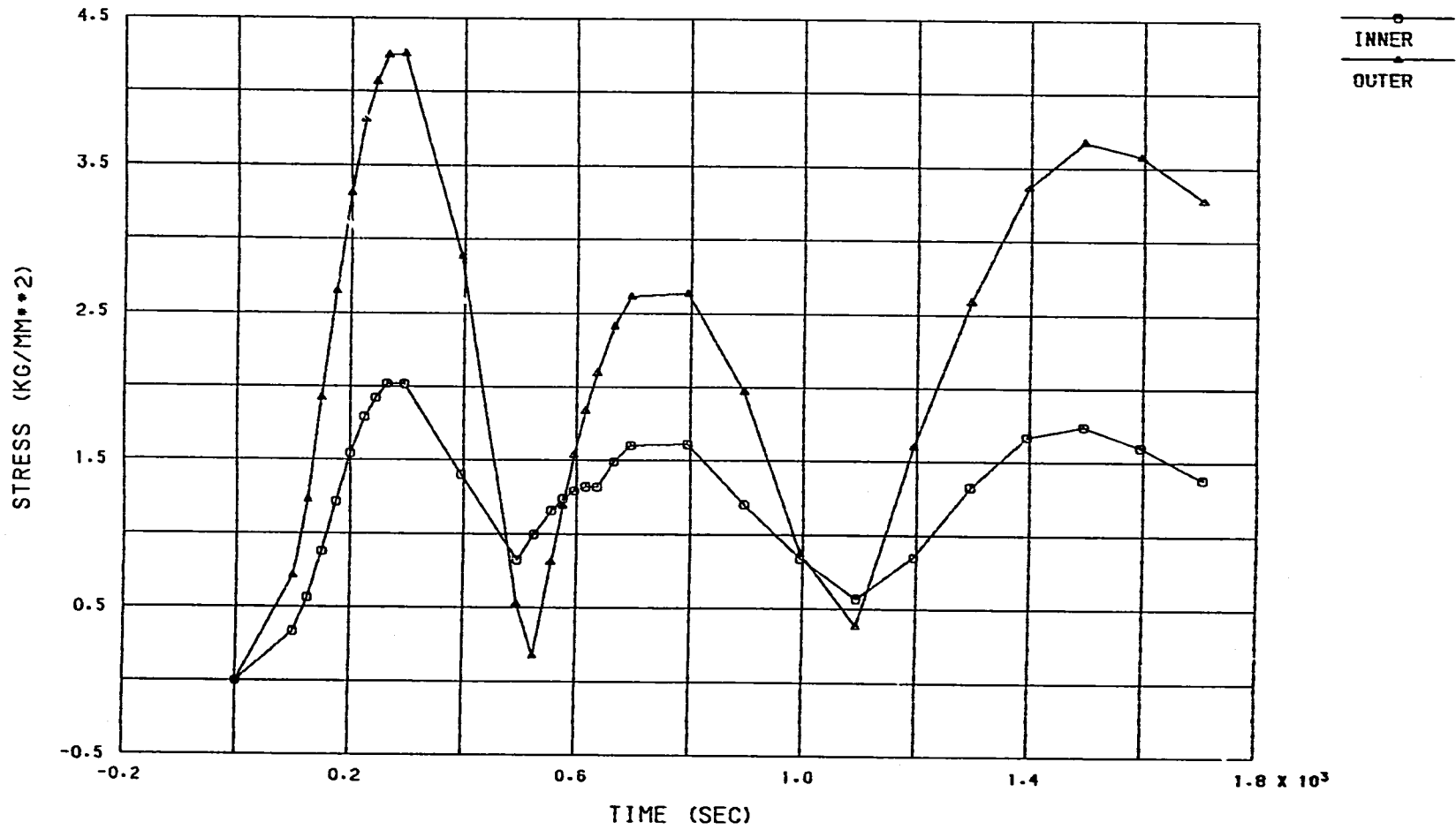
Fig. 6.5 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-1, Line-12)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-1, ライン-12)

FINAS



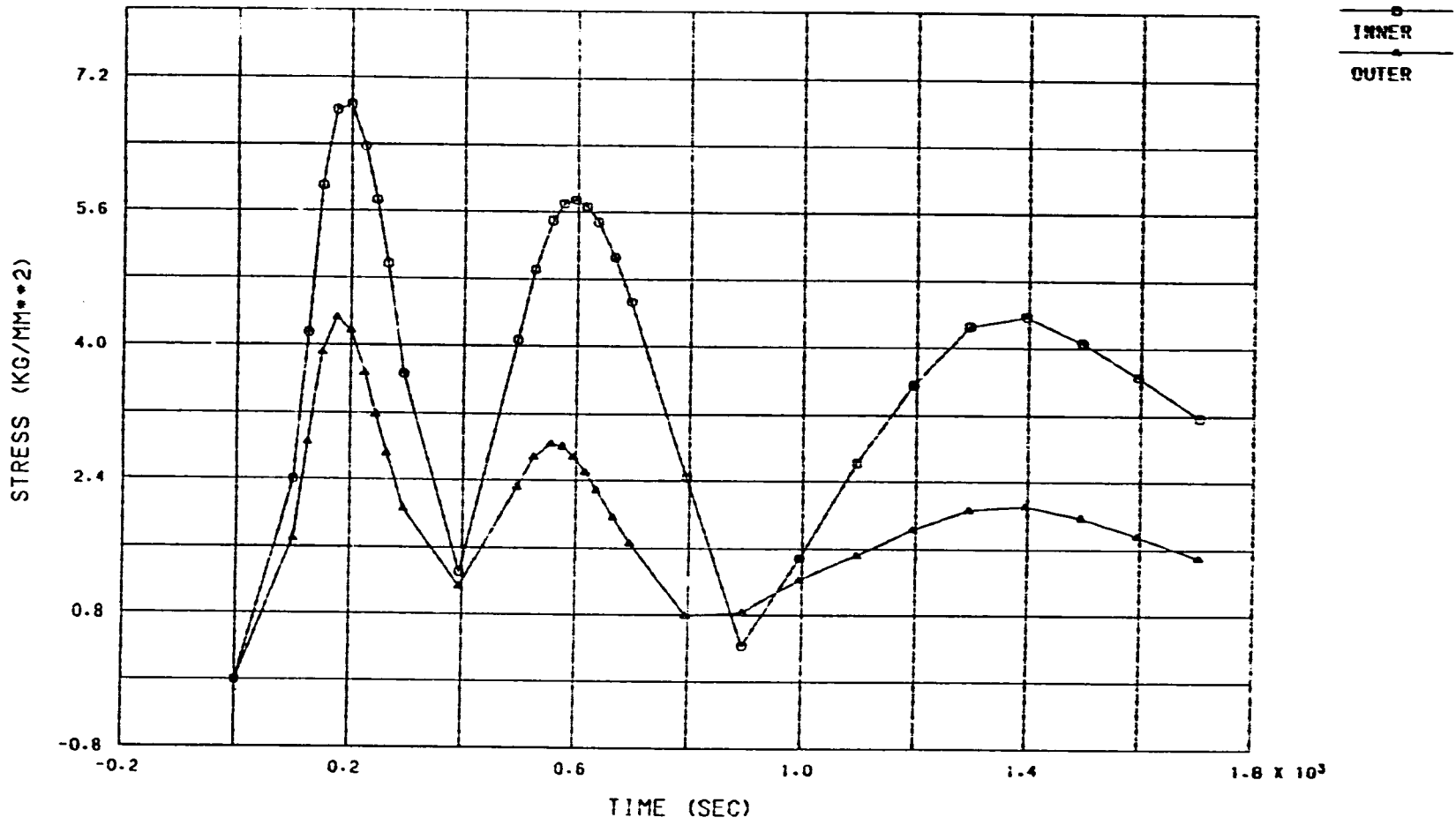
R/V MODEL (A2) LINE-3 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.6 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-2, Line-3)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-2, ライン-3)



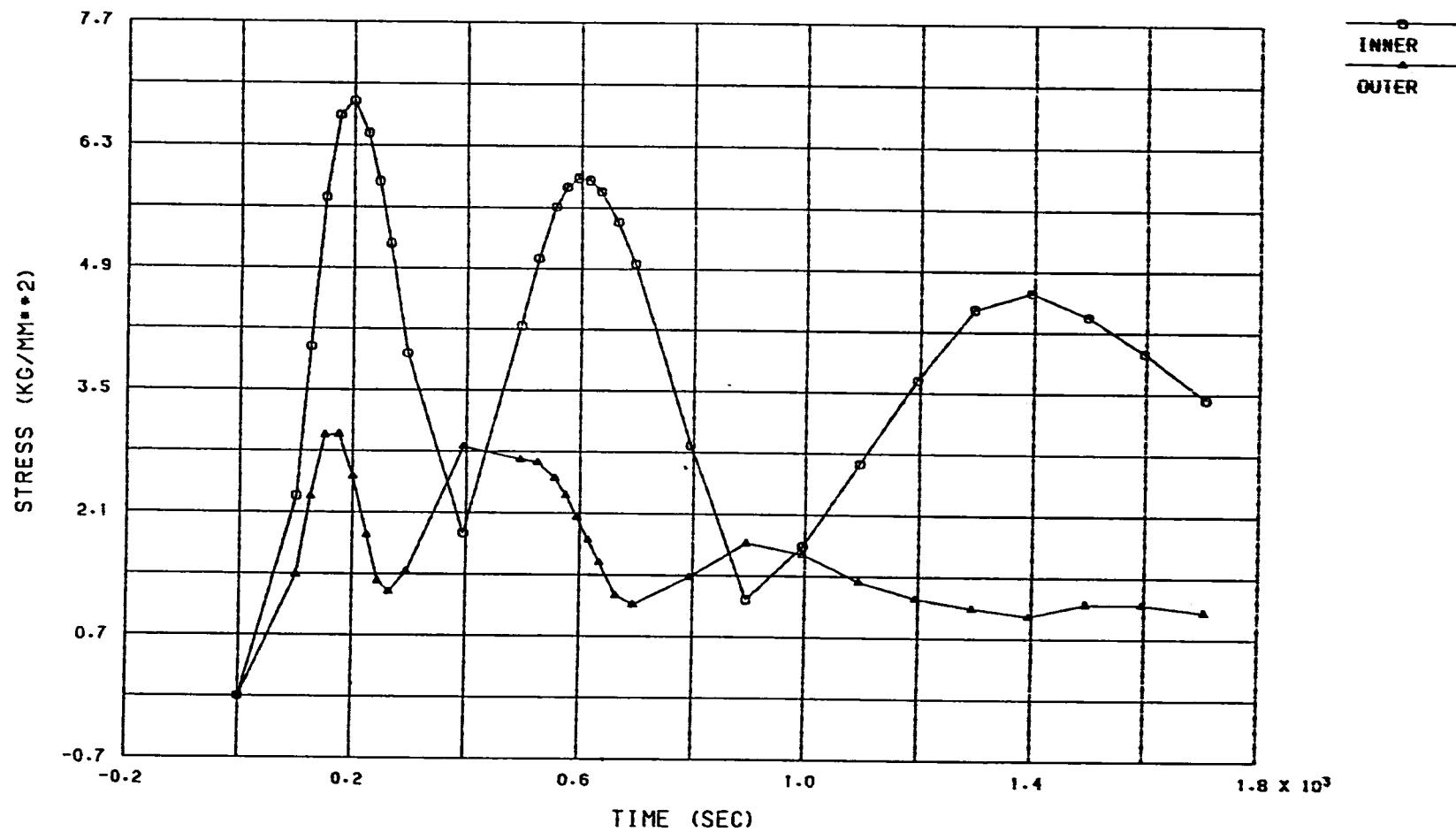
R/V MODEL (A2) LINE-4 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.7 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-2, Line-4)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-2, ライン-4)



R/V MODEL (A2) LINE-11 (MEM.+BEN.) HISTORY

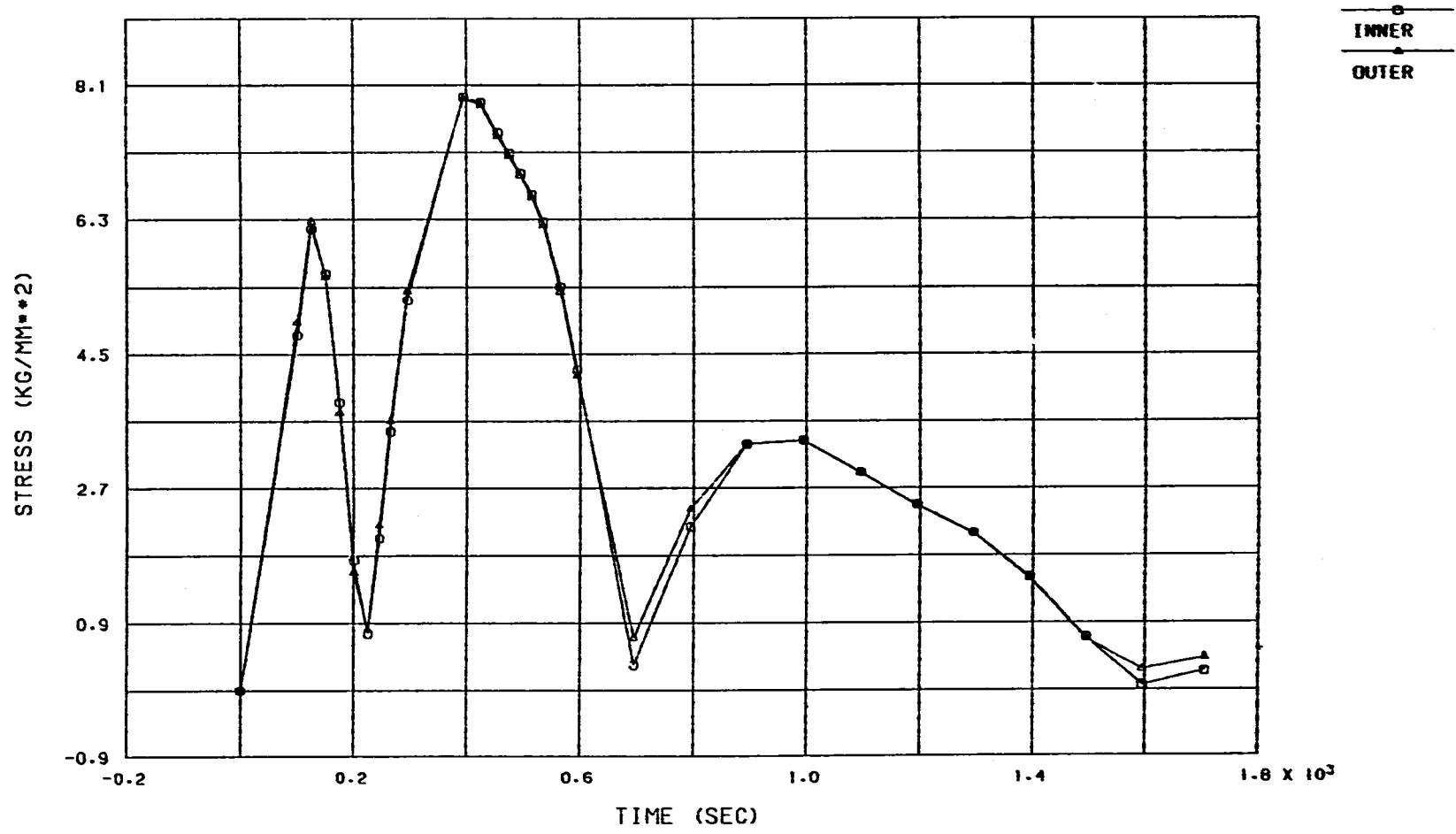
Fig. 6.8 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-2, Line-11)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-2, ライン-11)



R/V MODEL (A2) LINE-12 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.9 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-2, Line-12)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-2, ライン-12)





R/V MODEL (A4) LINE-3 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.10 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-4, Line-3)

(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-4, ライン-3)

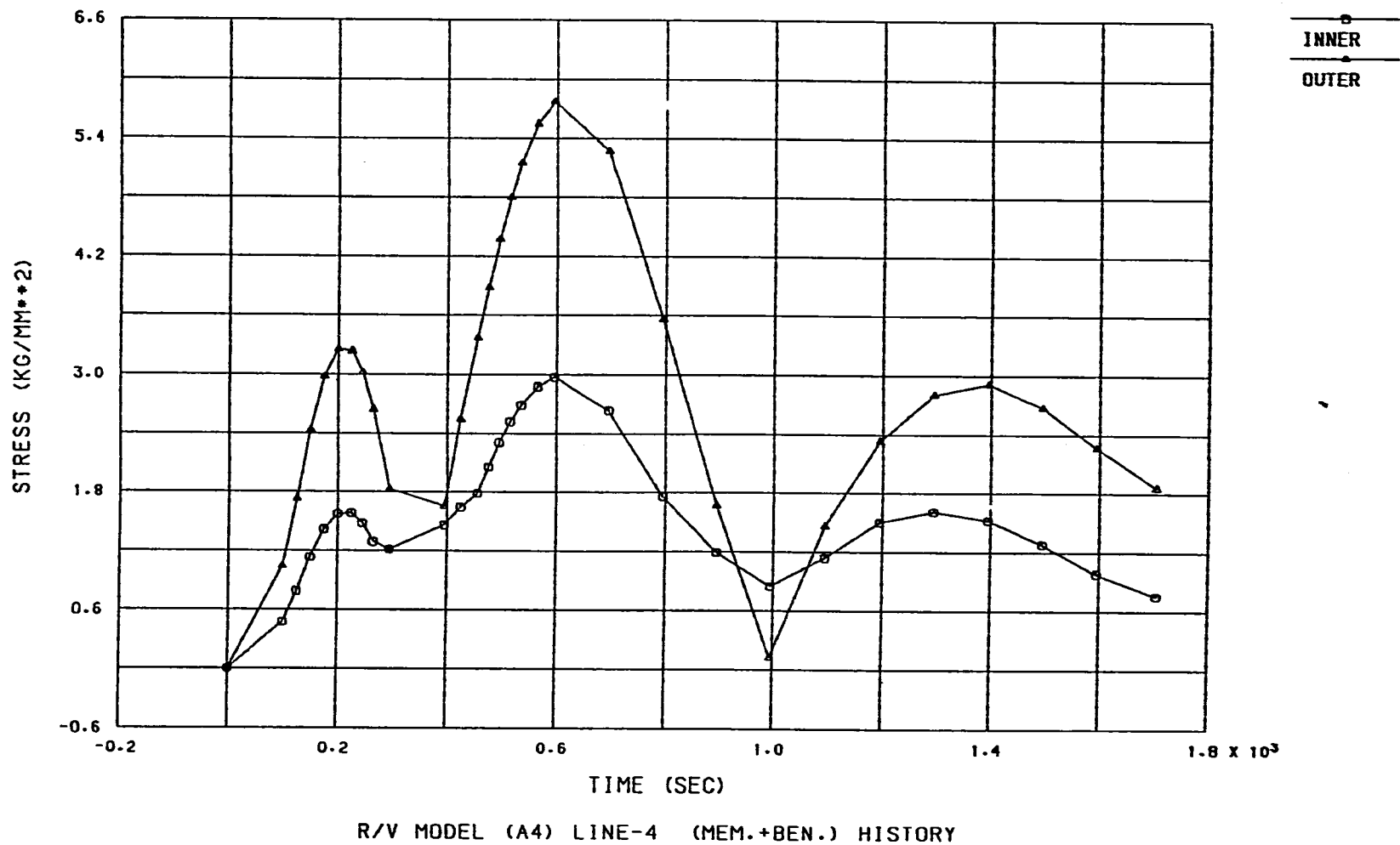
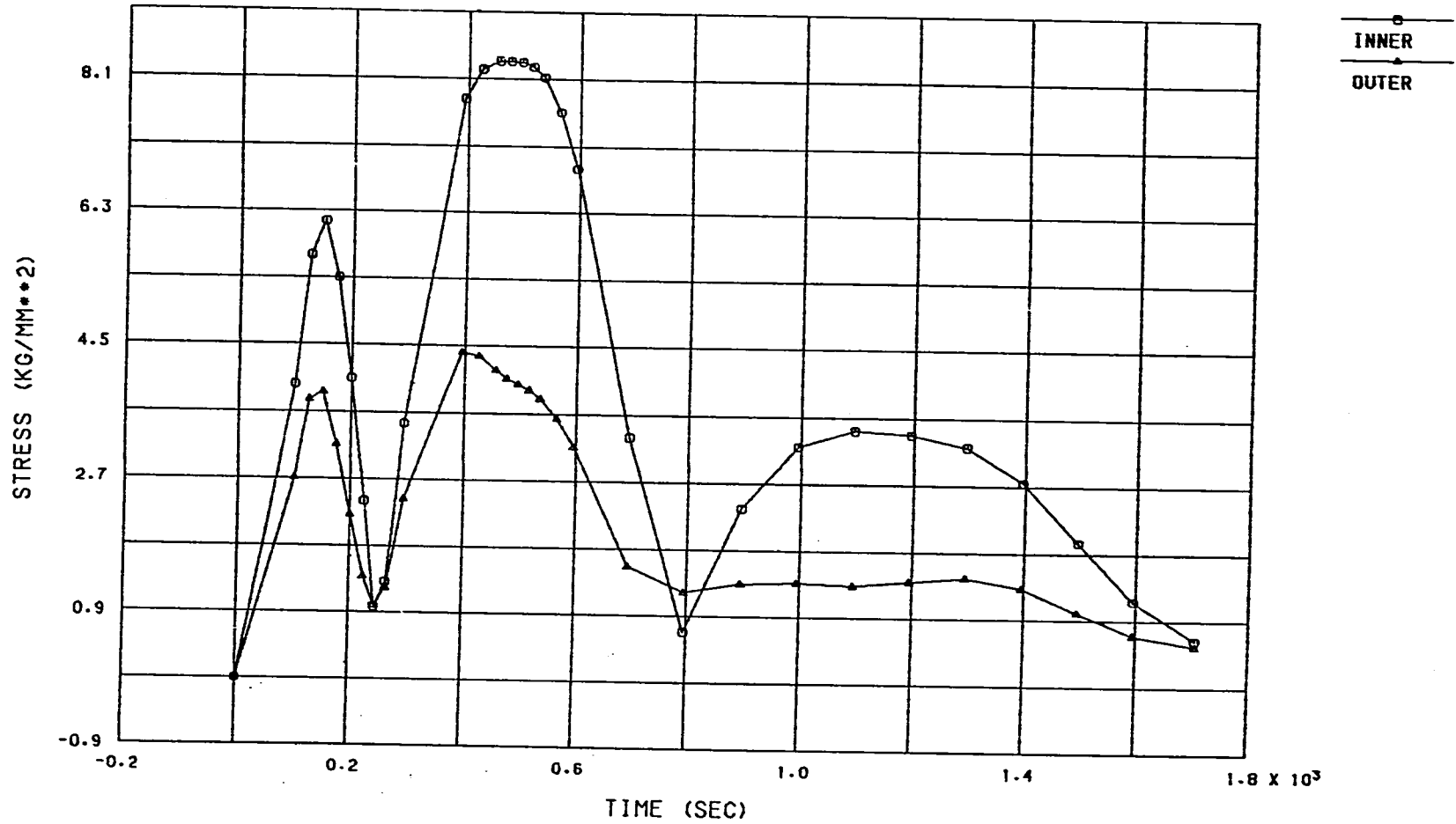
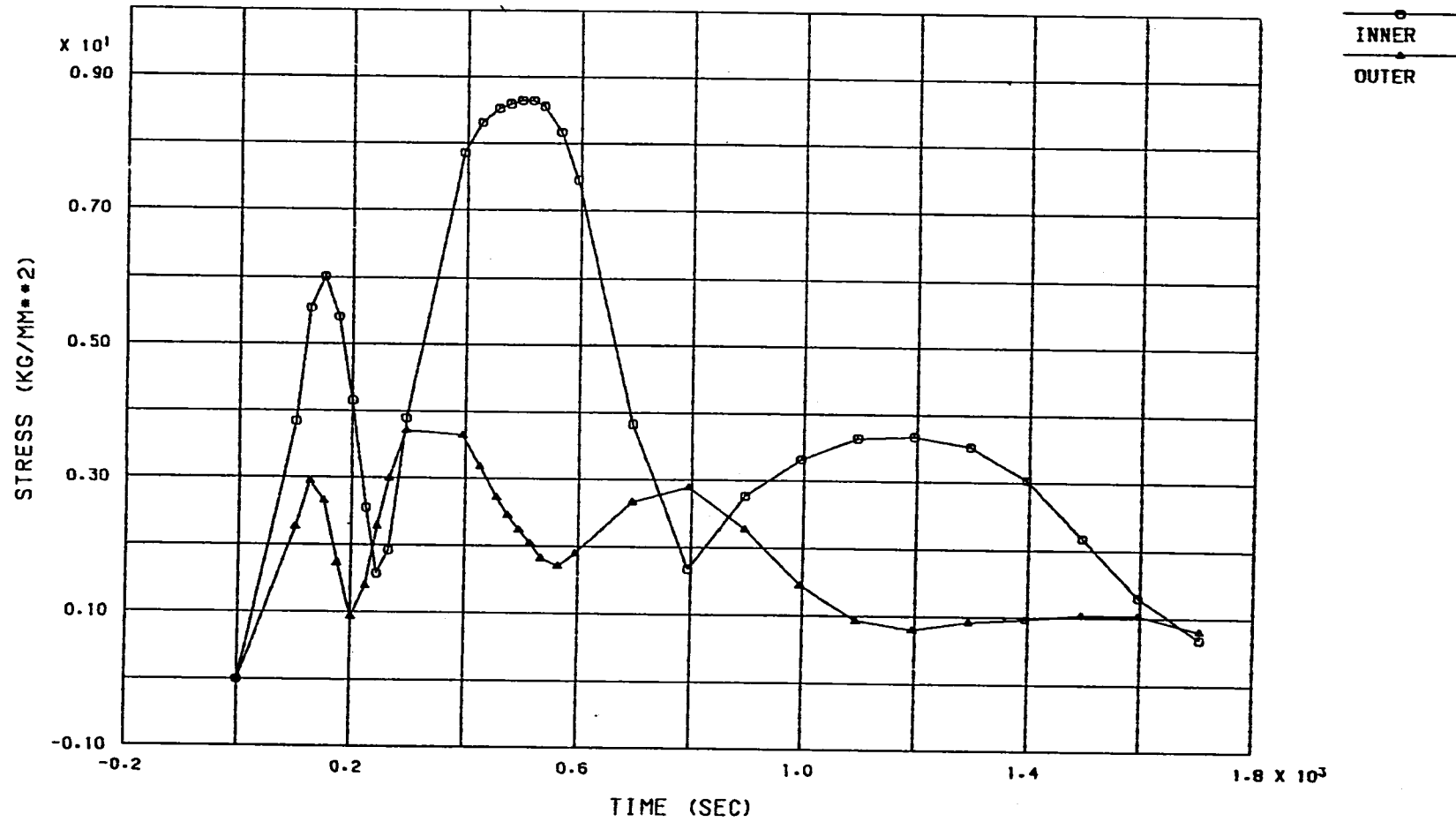


Fig. 6.11 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-4, Line-4)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-4, ライン-4)



R/V MODEL (A4) LINE-11 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.12 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-4, Line-11)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-4, ライン-11)



R/V MODEL (A4) LINE-12 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.13 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (A-4, Line-12)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (A-4, ライン-12)

FINAS

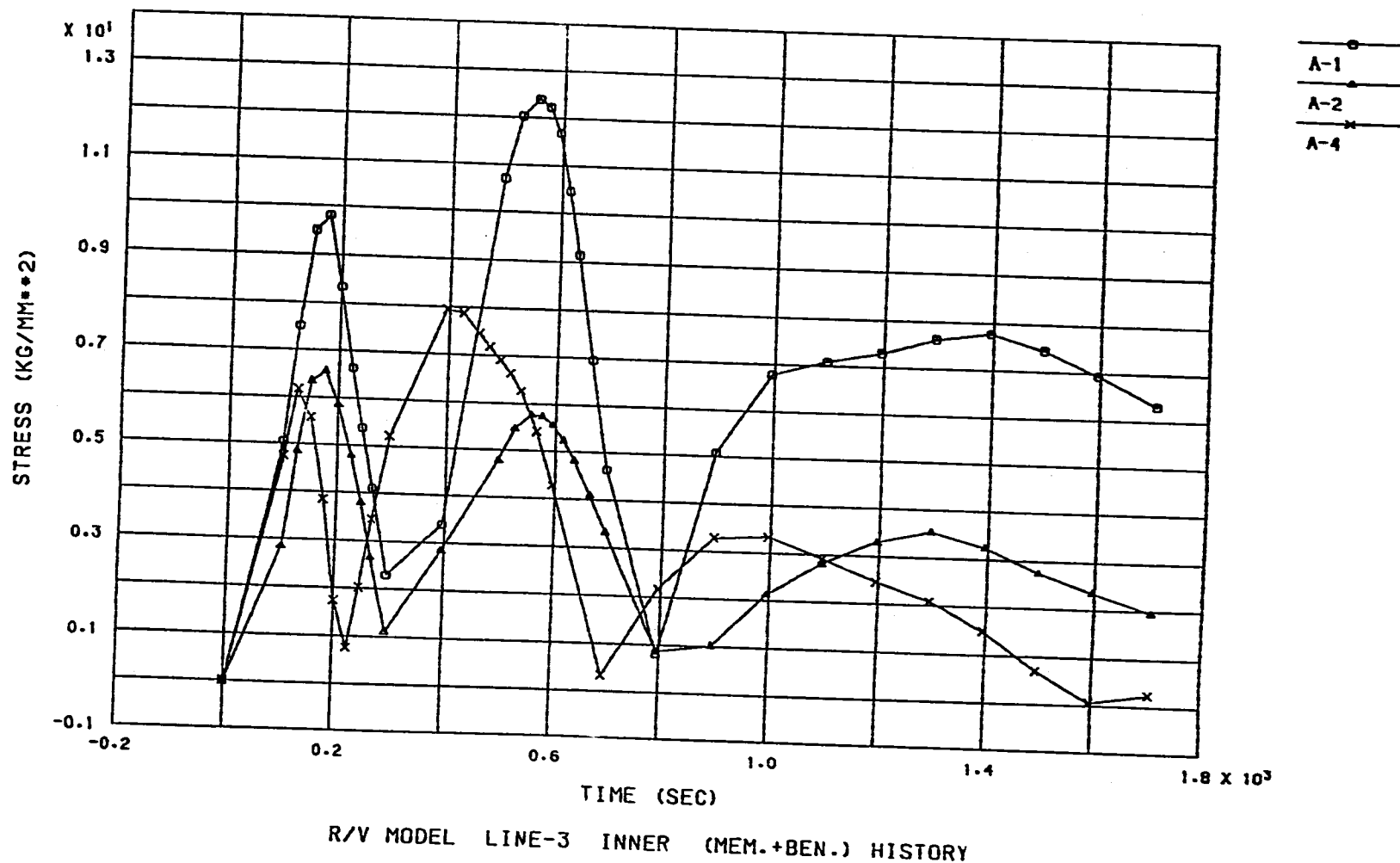
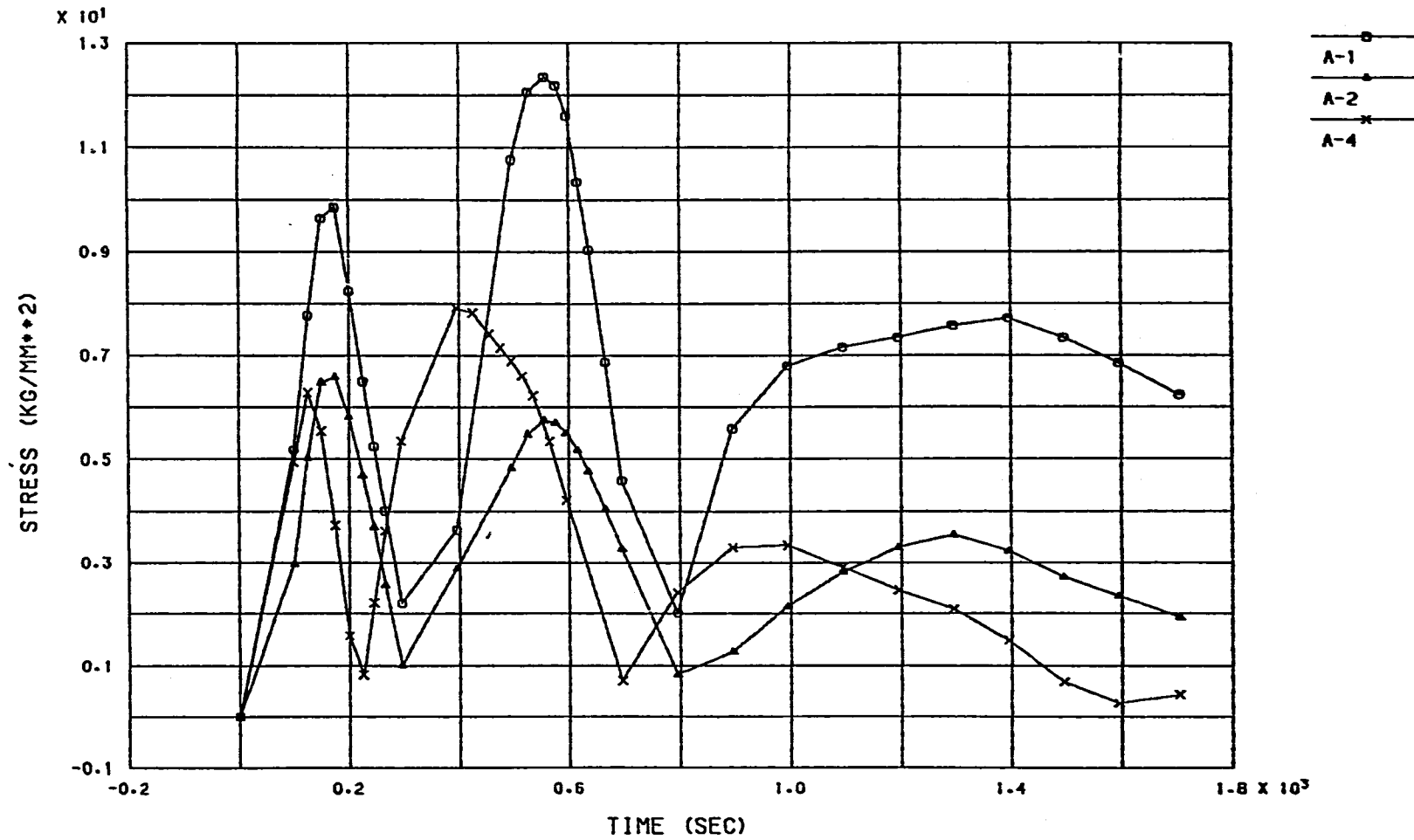


Fig. 6.14 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-3, Inner)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-3, 内面)

FINAS



R/V MODEL LINE-3 OUTER (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.15 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-3, Outer)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-3, 外面)

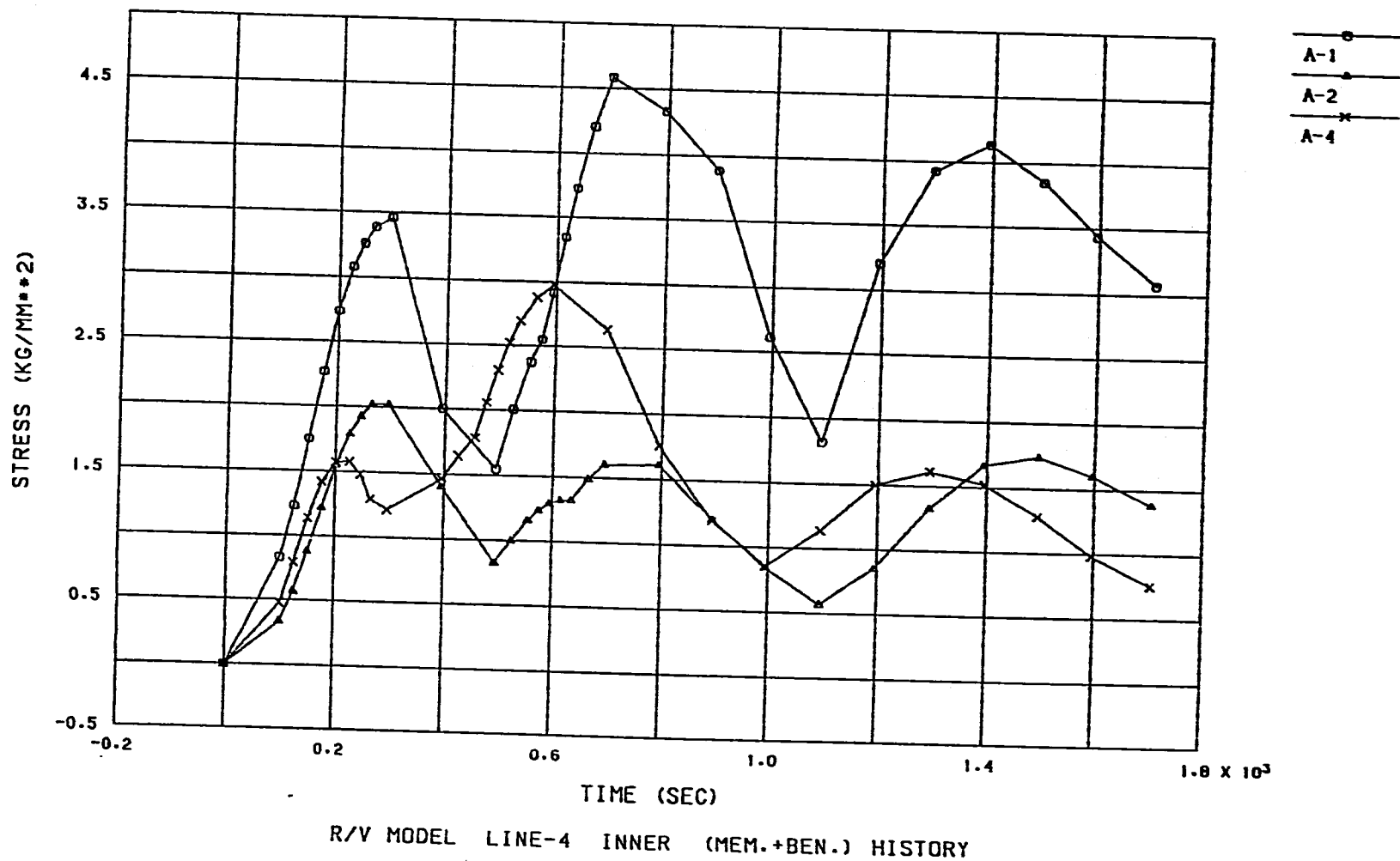
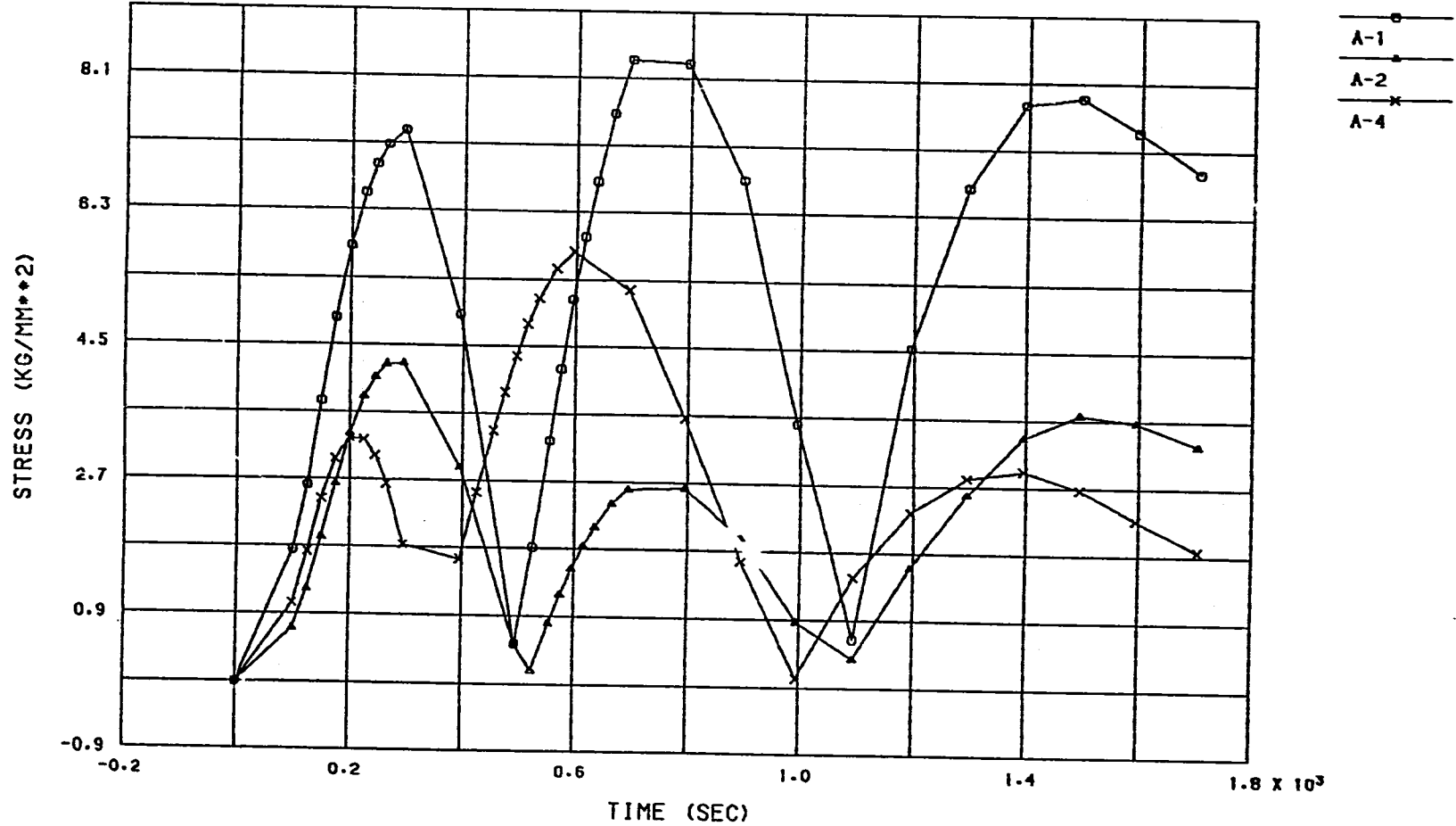


Fig. 6.16 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-4, Inner)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-4, 内面)



R/V MODEL LINE-4 OUTER (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.17 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-4, Outer)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-4, 外面)



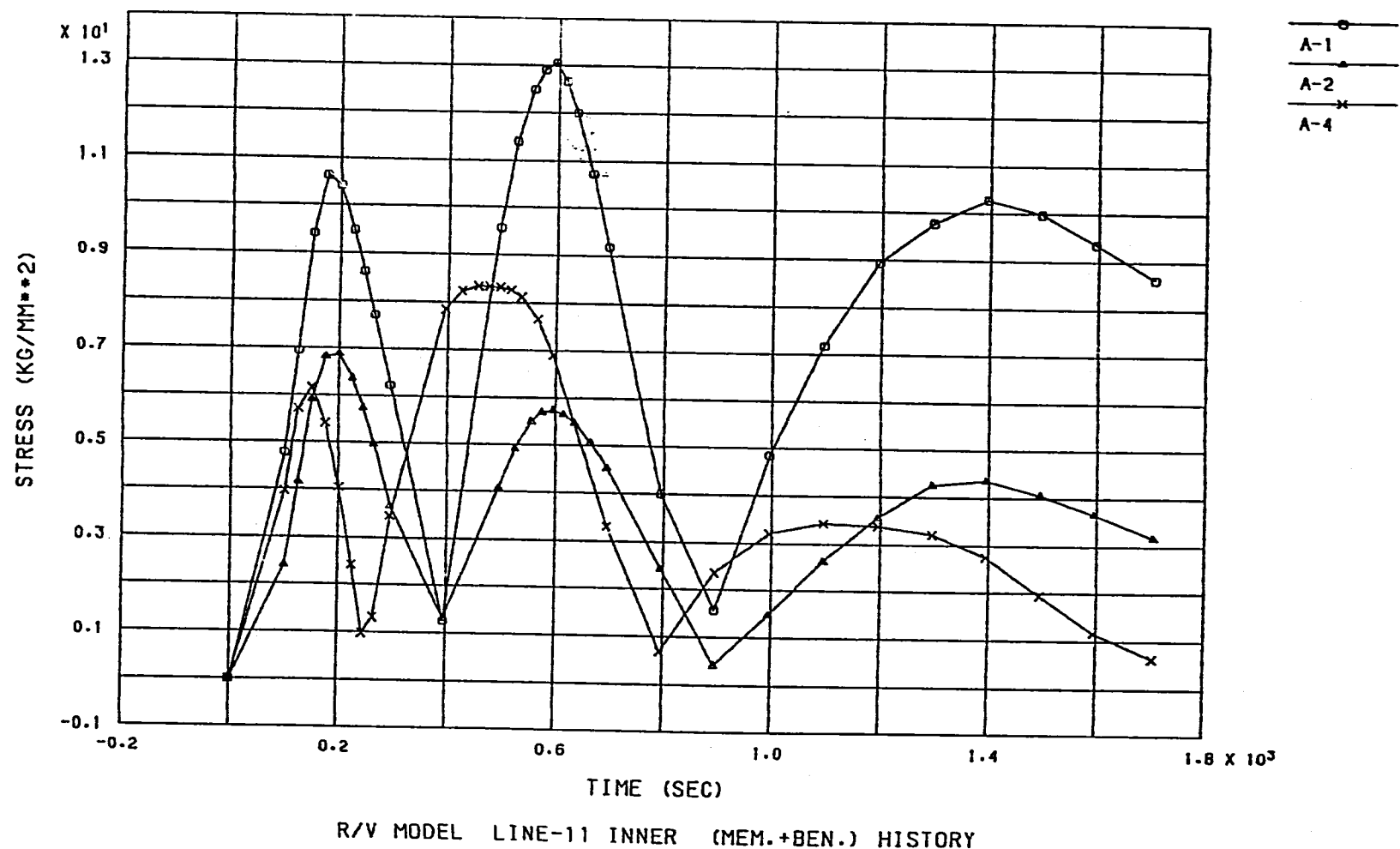
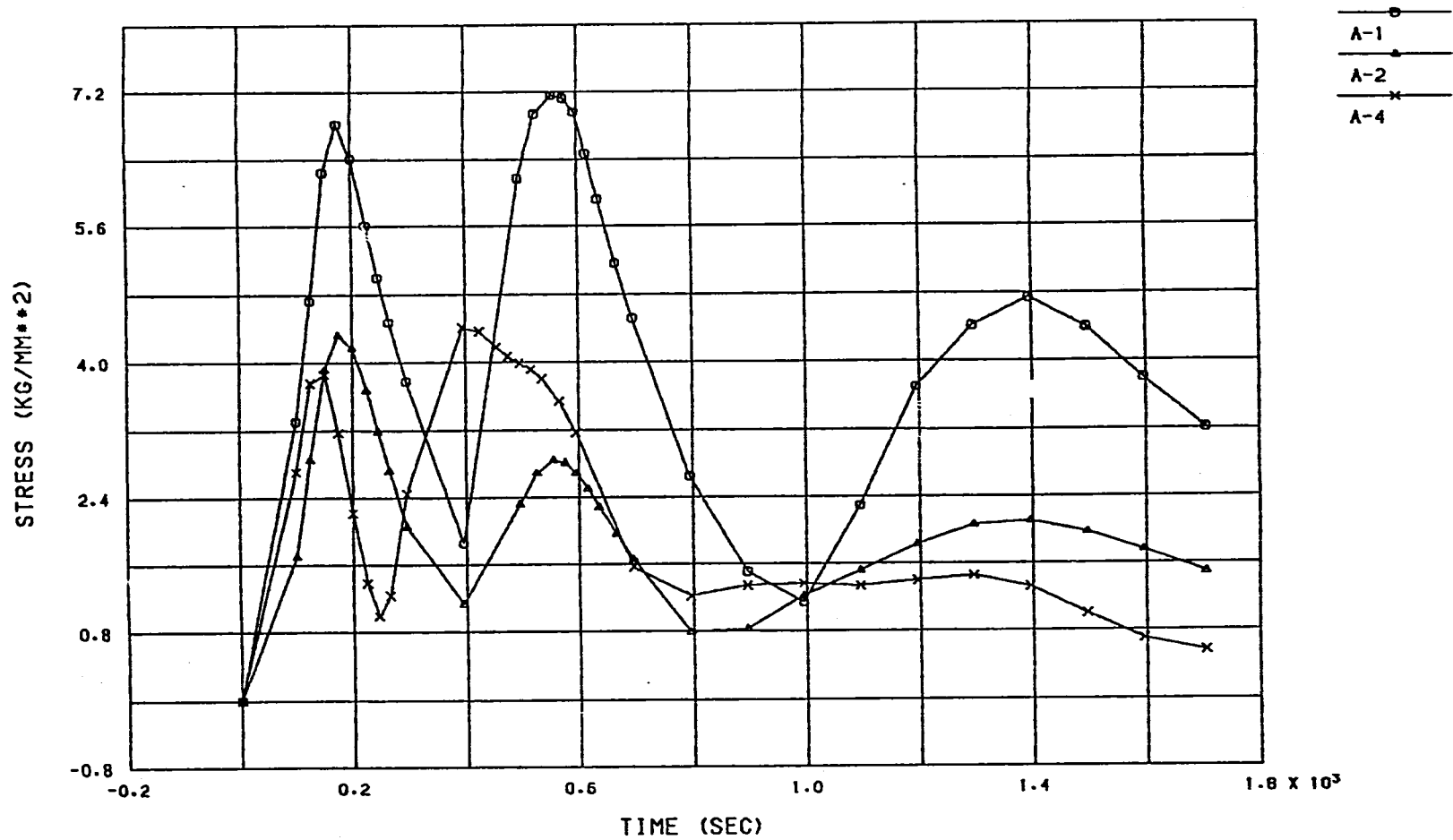


Fig. 6.18 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-11, Inner)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-11, 内面)



R/V MODEL LINE-11 OUTER (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.19 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-11, Outer)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-11, 外面)

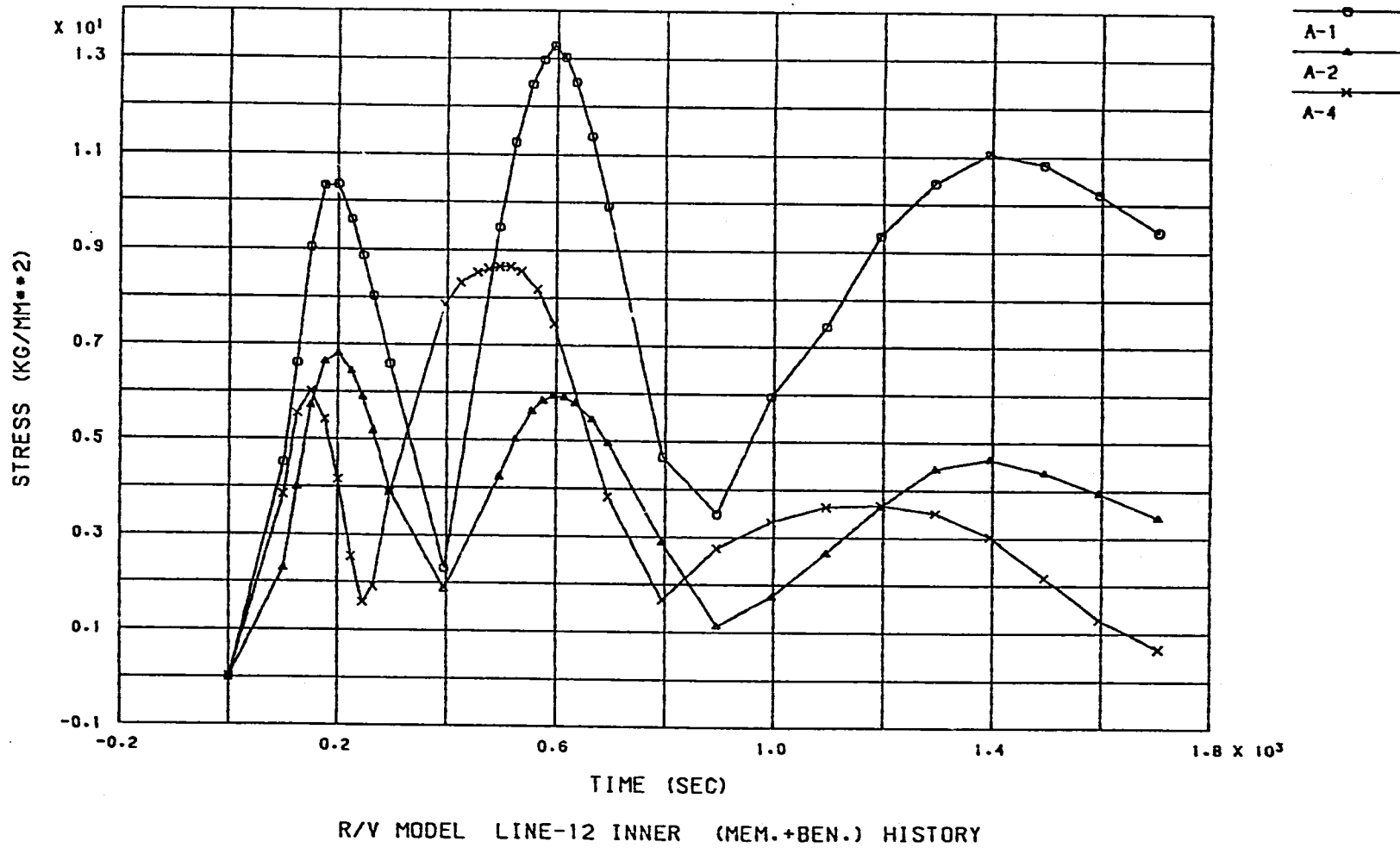
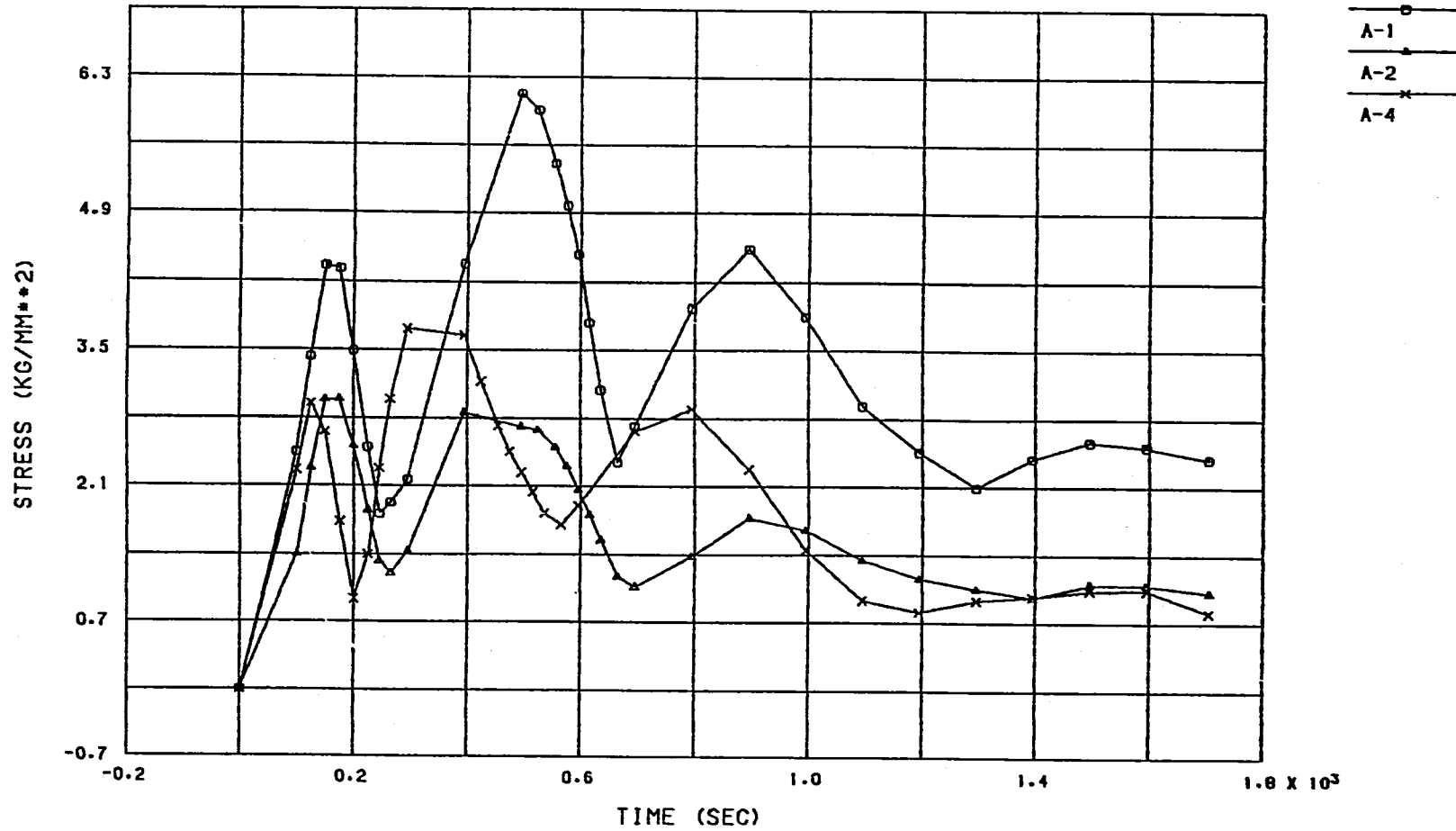


Fig. 6.20 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-12, Inner)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-12, 内面)



R/V MODEL LINE-12 OUTER (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 6.21 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-12, Outer)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-12, 外面)

## 7. IHX 1 次側入口ノズルの解析結果

熱過渡条件 B-1 (設計用プラント熱過渡条件), B-2, B-3, B-4, B-5 (プラント解析から得られる熱過渡: それぞれノミナルケース, 温度変化中最大のケース, 温度変化中大のケース, 温度変化率大のケース) に対する熱伝導解析, 熱応力解析を実施した。熱応力解析を行う時刻及び熱伝導解析のステップを Table 7.1 に示す。また熱応力解析の結果をもとに (膜+曲げ) 応力強さを算出するための評価ラインの設定を Fig 7.1, Fig 7.2 に, 各熱過渡に対して Fig 7.1 の評価ライン 1 及び Fig 7.2 の評価ライン 4 の内外表面における (膜+曲げ) 応力強さの履歴を Fig 7.3 ~ Fig 7.12 に示す。さらに評価ライン 1, 4 の内面, 外面それぞれでの全ての熱過渡条件に対する (膜+曲げ) 応力強さの履歴をまとめたものを Fig 7.13 ~ Fig 7.16 に示す。これらの履歴より (膜+曲げ) 応力に着目すると, 各評価ラインにおいて各熱過渡ともピークは 1 時点だけであるが, 評価ラインの位置によりピークの現われる時刻はかなり異なってくる。このピーク時の各評価ラインでの (膜+曲げ) 応力強さを表 7.2 に示す。

これらの結果によると, 熱過渡 B-1 に対しては評価ライン 1 の内面において最も応力強さが高く, 熱過渡 B-2 ~ B-5 に対しては評価ライン 4 の外面において最も応力強さが高い。Fig 7.13 に評価ライン 1 の内面における全ての熱過渡条件に対する (膜+曲げ) 応力強さの履歴を示すが, いずれの熱過渡でもピークは 300 秒前後で現われる。この時の (膜+曲げ) 応力強さの値は熱過渡 B-1 に対する値が他の熱過渡に対する値より大きく, 熱過渡 B-2 ~ B-5 に対して 1.74 ~ 1.84 倍の値となっている。また Fig 7.16 に評価ライン 4 の外面における全ての熱過渡条件に対する (膜+曲げ) 応力強さの履歴を示すが, ピークは熱過渡 B-1 は 600 秒, 熱過渡 B-2, B-5 では 800 秒, 熱過渡 B-3, B-4 では 900 秒で現われる。この時の (膜+曲げ) 応力強さの値は熱過渡 B-1 に対する値が他の熱過渡に対する値より大きく, 熱過渡 B-2 ~ B-5 に対して 1.12 ~ 1.25 倍の値となっている。これは熱過渡 B-1 の初期の温度勾配が他の熱過渡より急であることに起因している。以上の結果より最大の (膜+曲げ) 応力強さを見た場合, IHX 1 次側入口ノズルではプラント解析より得られる熱過渡 (B-2 ~ B-5) に対し, 設計用プラント熱過渡条件 (B-1) は 1.12 ~ 1.84 の安全裕度を持つことがわかった。

Table 7.1 Time step for stress analysis

応力解析のステップ

応力解析 のステップ	熱過渡条件 B-1		熱過渡条件 B-2 B-5		熱過渡条件 B-3 B-4	
	時間(sec)	熱伝導解析 のステップ	時間(sec)	熱伝導解析 のステップ	時間(sec)	熱伝導解析 のステップ
1	100	20	100	20	100	20
2	130	26	200	40	200	40
3	160	32	230	46	300	60
4	180	36	260	52	330	66
5	200	40	280	56	360	72
6	220	44	300	60	380	76
7	240	48	320	64	400	80
8	270	54	340	68	420	84
9	300	60	370	74	440	88
10	400	80	400	80	470	94
11	500	100	500	100	500	100
12	605	116	605	116	605	116
13	705	126	705	126	705	126
14	805	136	805	136	805	136
15	905	146	905	146	905	146
16	1005	156	1005	156	1005	156
17	1105	166	1105	166	1105	166

Table 7.2 Membrane plus bending stress intensity  
(膜+曲げ) 応力強さ

(単位: kg/md)

事 象		LINE-1 内 面	LINE-2 外 面	LINE-3 外 面	LINE-4 外 面	LINE-5 外 面	LINE-11 内 面
熱過渡 B-1	220 秒	10.24	3.92	6.39	5.80	5.09	9.73
	605 秒	2.97	1.95	9.30	9.59	8.37	2.74
熱過渡 B-2	320 秒	5.63	2.19	3.99	3.65	3.23	5.33
	805 秒	2.31	1.49	7.44	7.69	6.70	2.15
熱過渡 B-3	360 秒	5.71	2.23	4.15	3.81	3.38	5.41
	905 秒	2.76	1.69	8.26	8.54	7.42	2.58
熱過渡 B-4	360 秒	5.57	2.17	3.98	3.65	3.23	5.28
	905 秒	2.83	1.71	8.17	8.44	7.35	2.65
熱過渡 B-5	280 秒	5.88	2.28	3.79	3.45	3.05	5.59
	805 秒	2.82	1.72	8.04	8.28	7.24	2.63

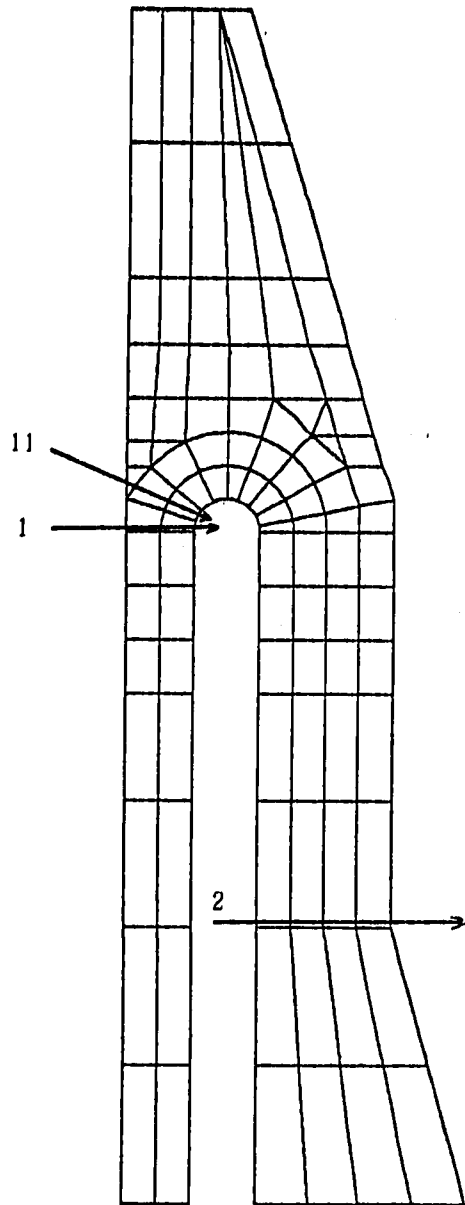


Fig. 7.1 Stress Classification Line (1)  
応力評価断面 (1)



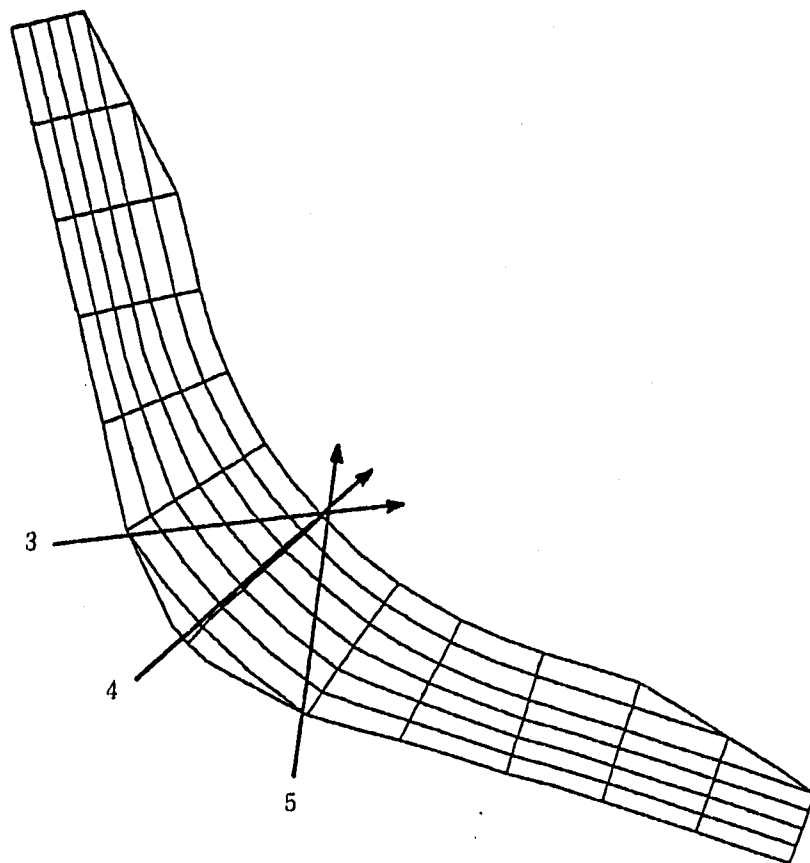
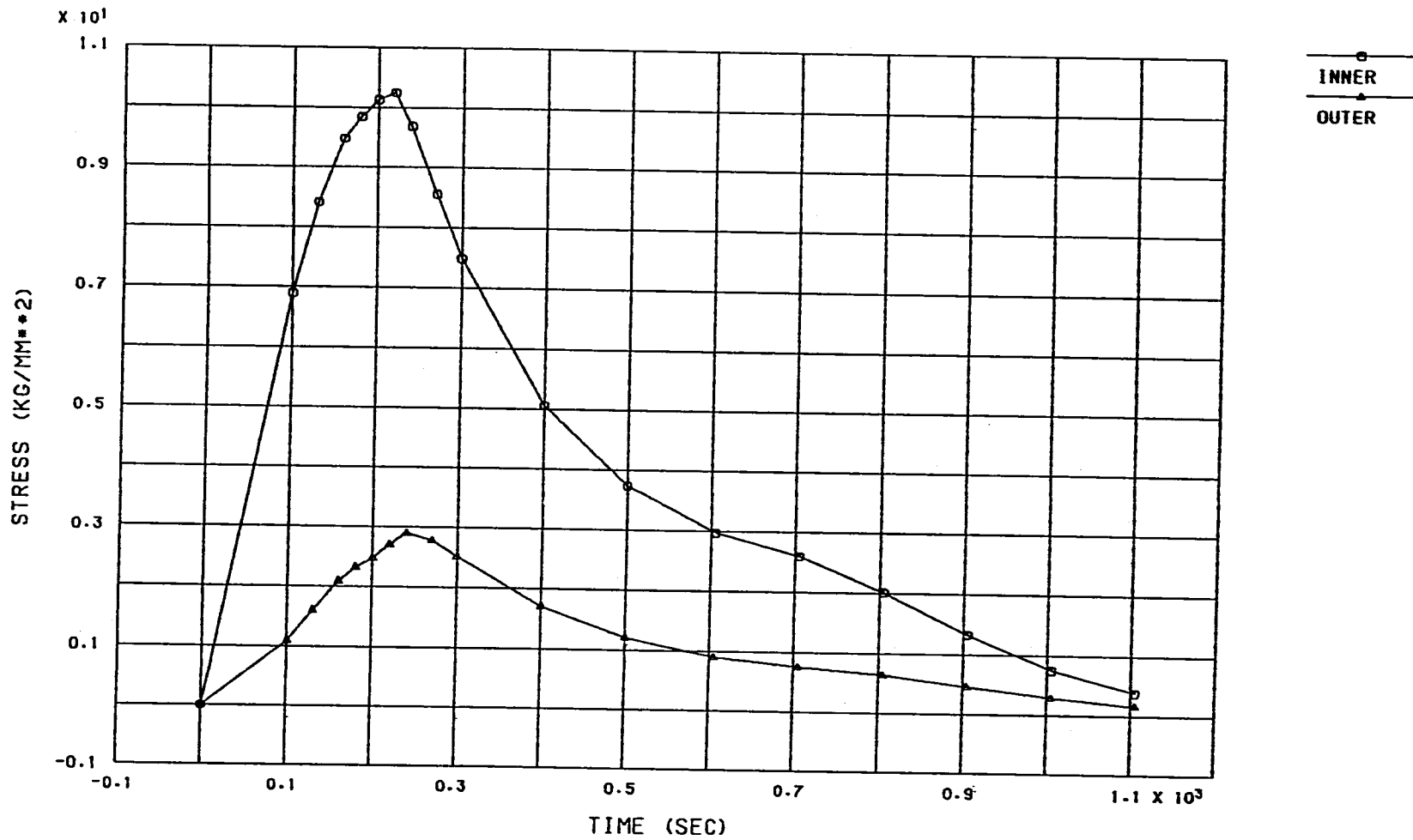


Fig. 7.2 Stress Classification Line (2)  
応力評価断面 (2)

FINAS

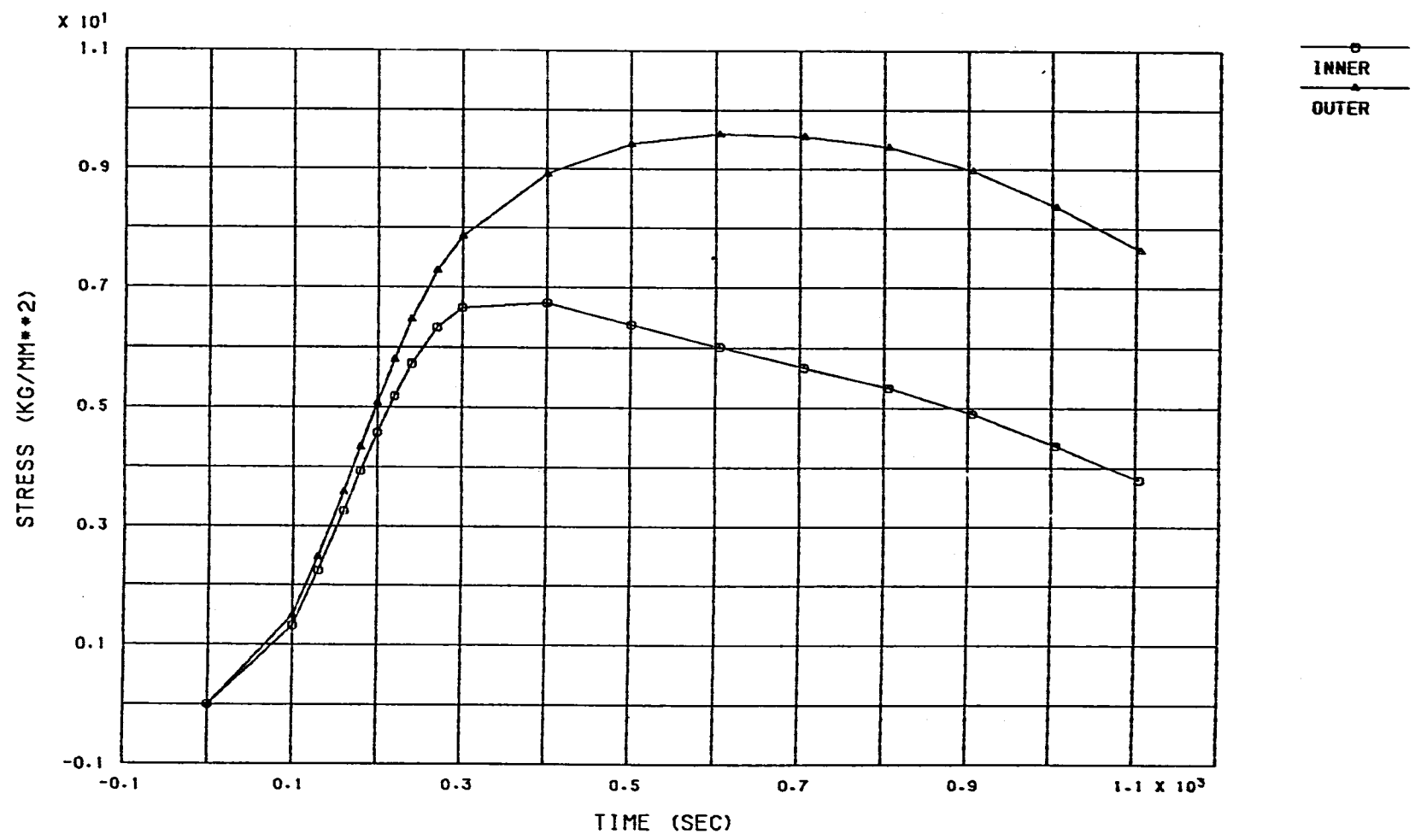


IHX MODEL (B1) LINE-1 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 7.3 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-1, Line-1)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-1, ライン-1)

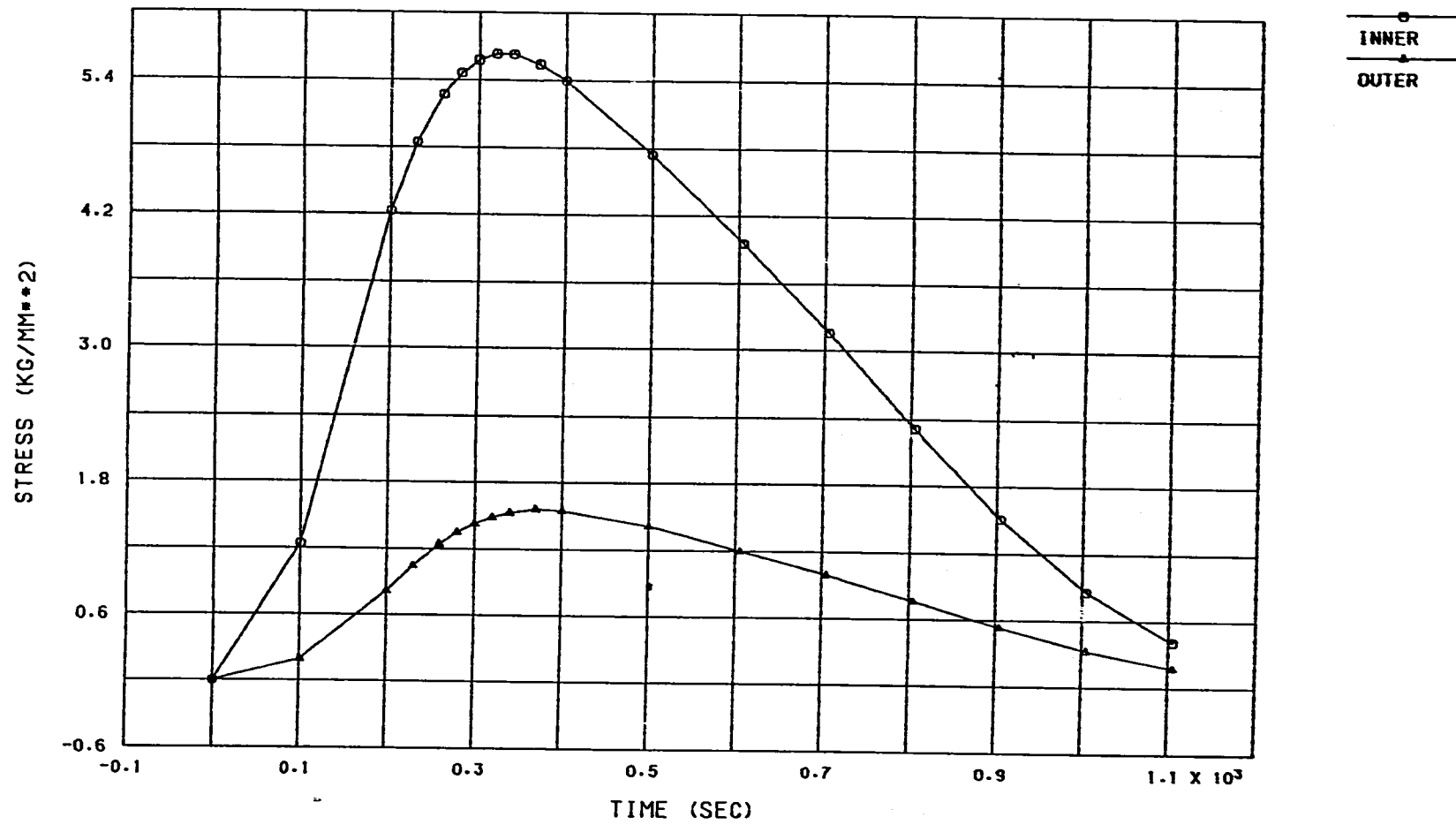
PNC S941 86-78

FINAS



IHX MODEL (B1) LINE-4 (MEM.+BEN.) HISTORY

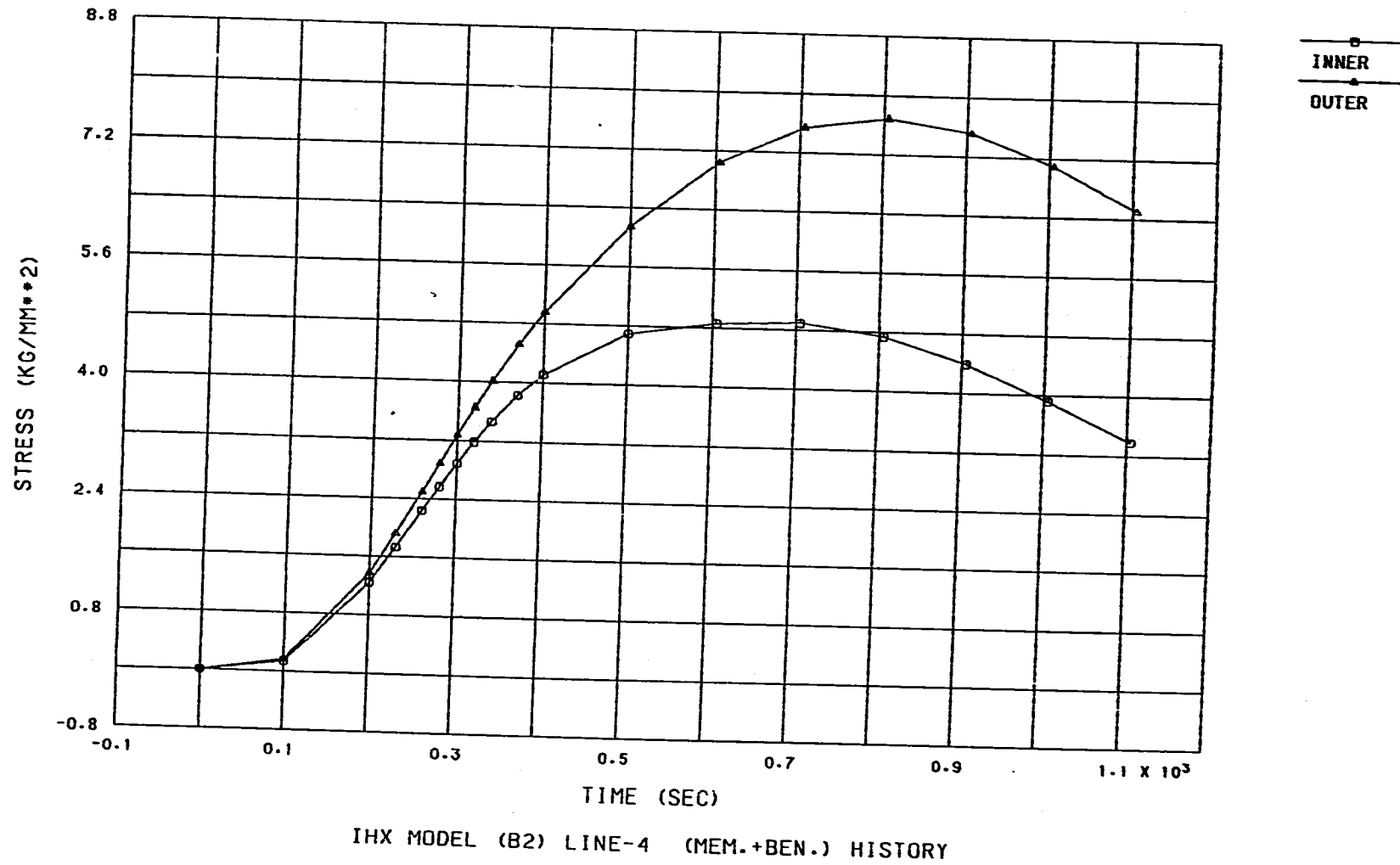
Fig. 7.4 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-1, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-1, ライン-4)



IHX MODEL (B2) LINE-1 (MEM.+BEN.) HISTORY

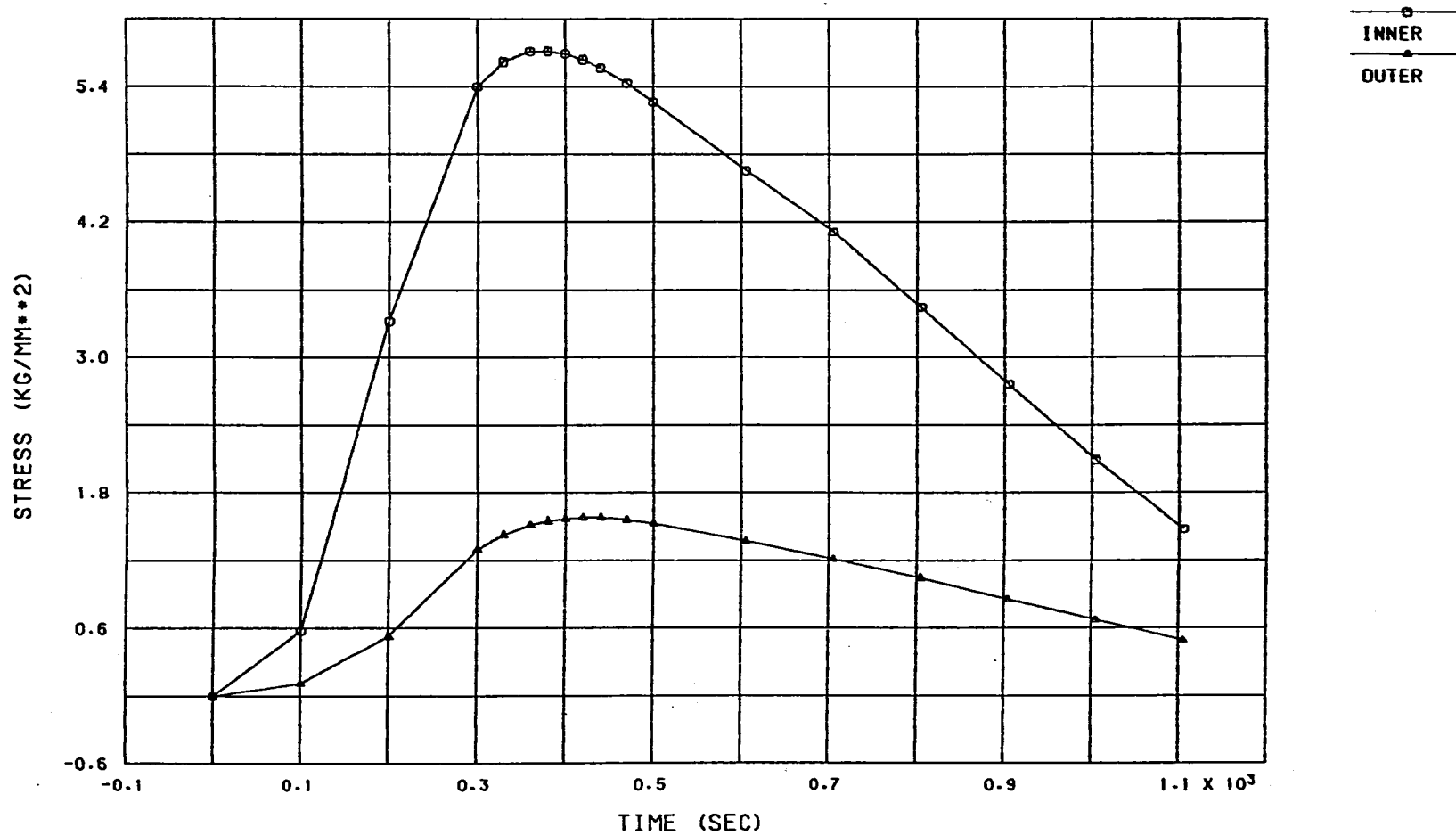
Fig. 7.5 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-2, Line-1)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-2, ライン-1)

FINAS



PNC SN941 85-78

Fig. 7.6 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-2, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-2, ライン-4)



[HX MODEL (83) LINE-1 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 7.7 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-3, Line-1)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-3, ライン-1)

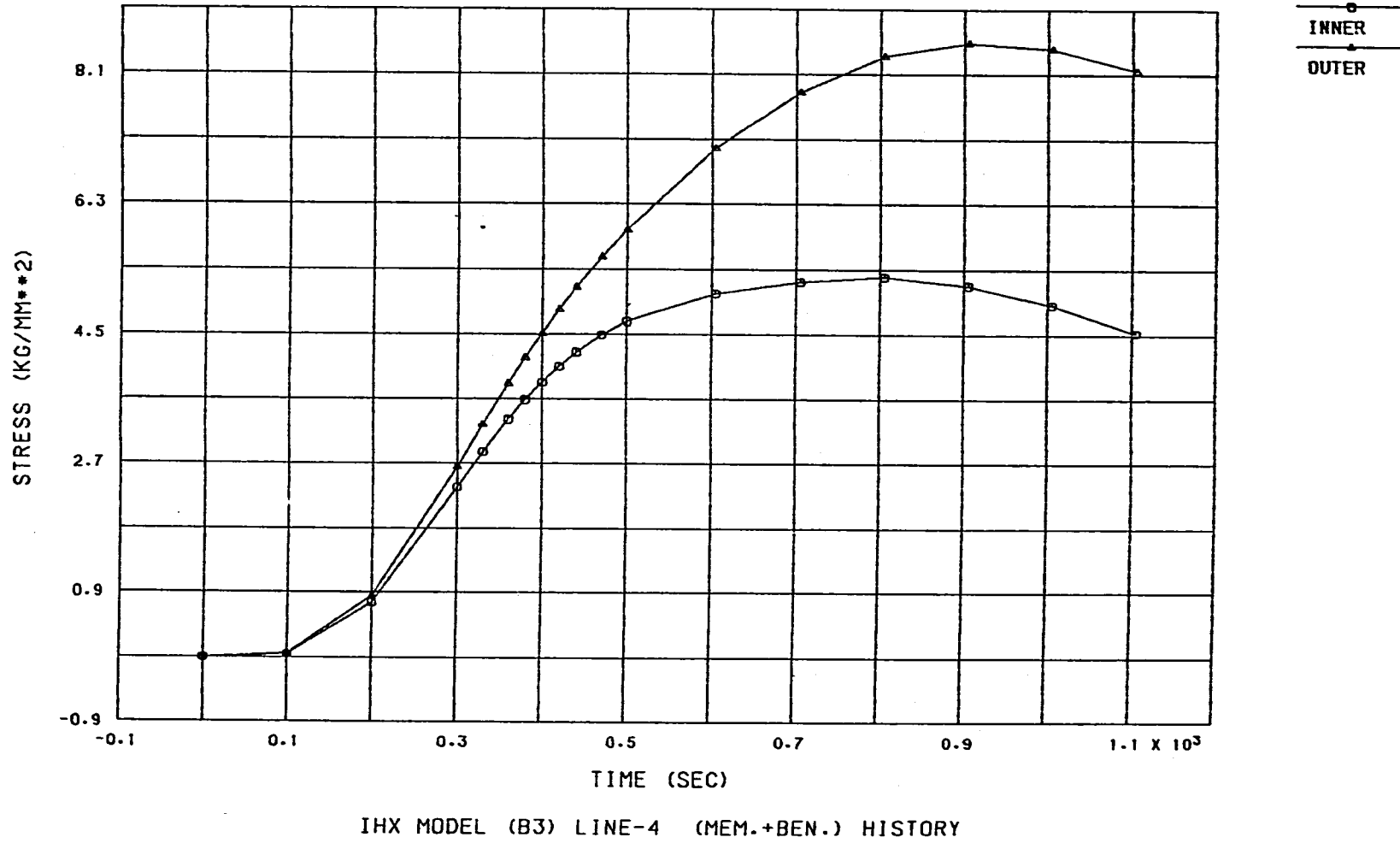


Fig. 7.8 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-3, Line-4)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-3, ライン-4)

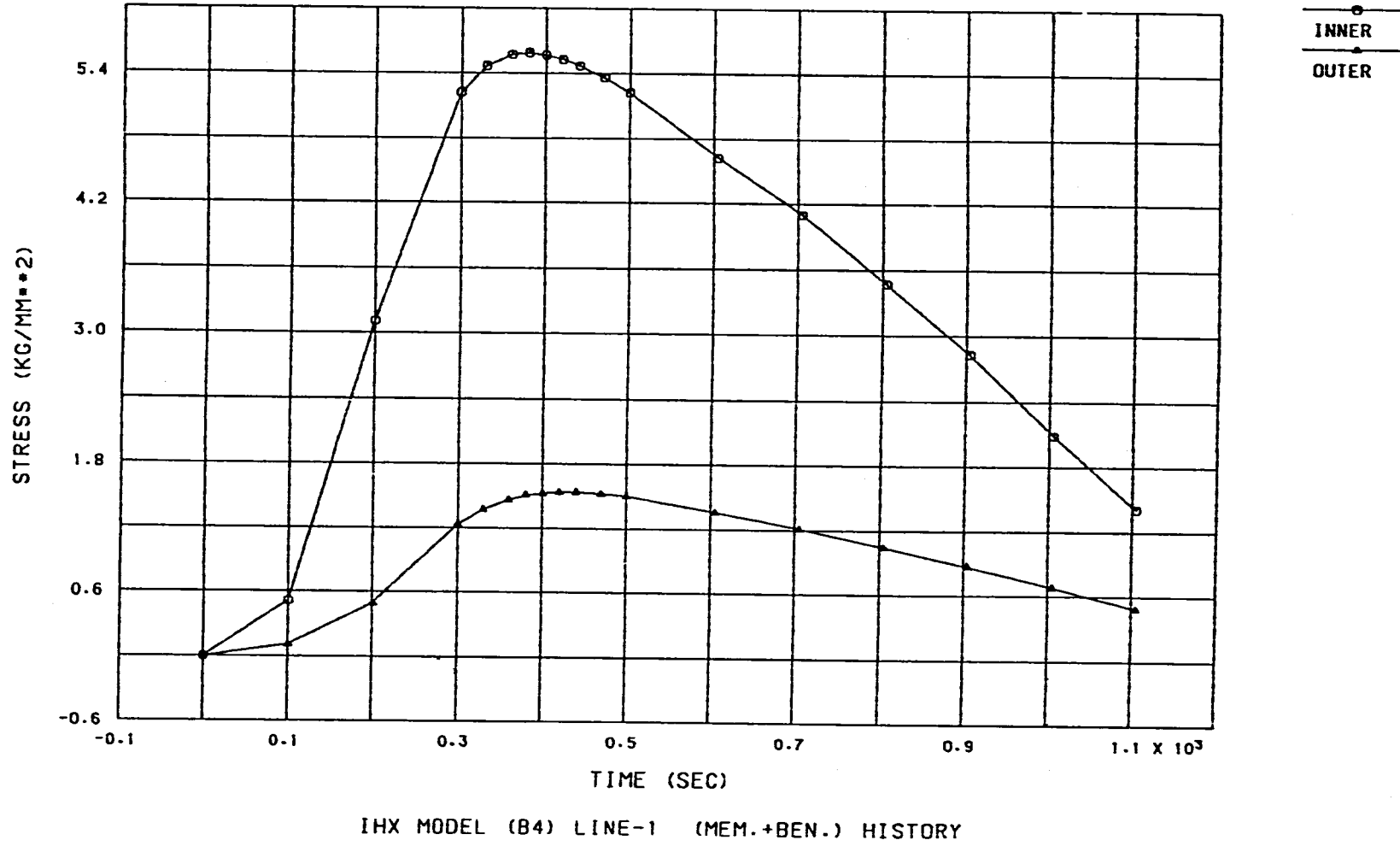
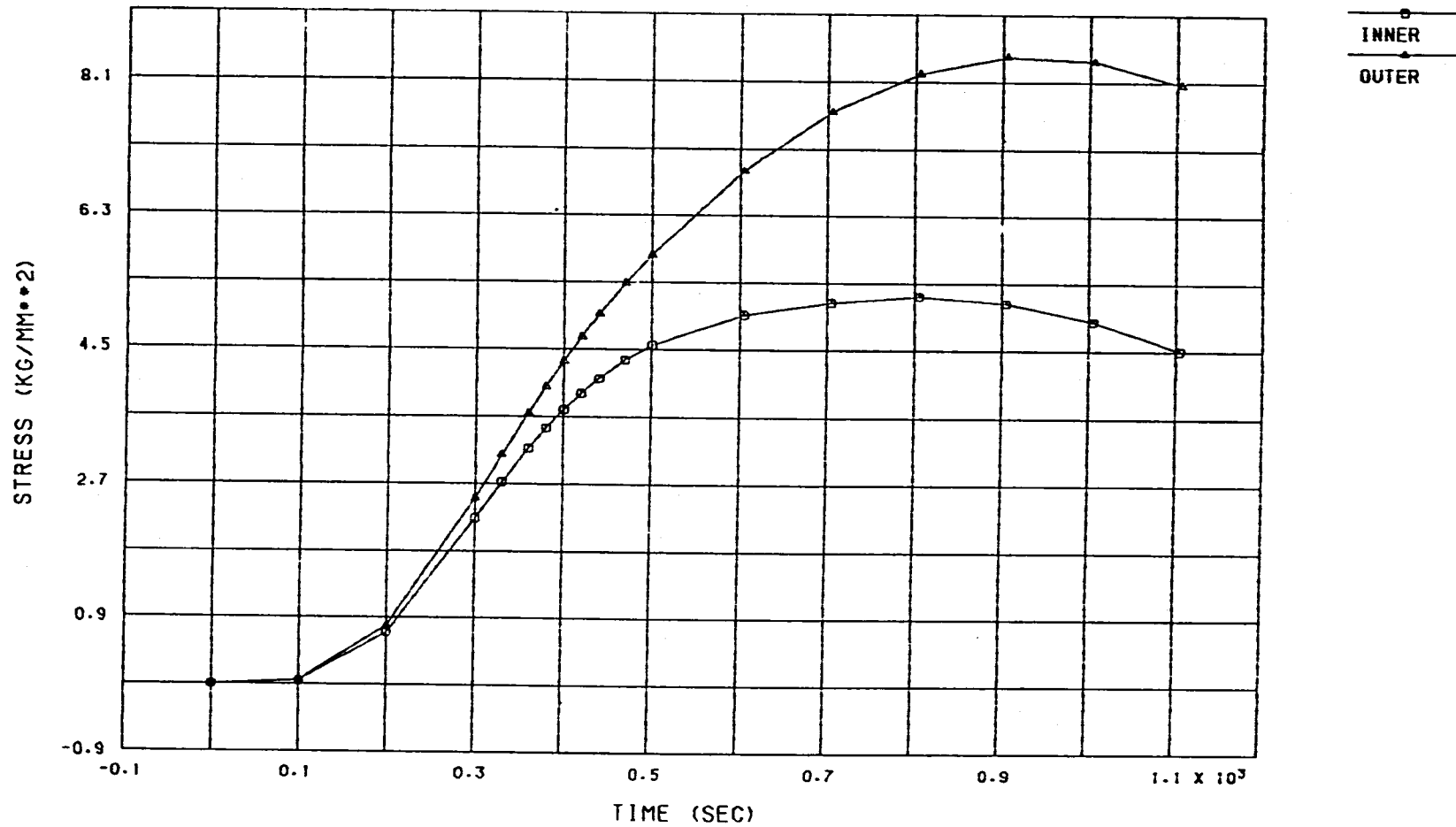


Fig. 7.9 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-4, Line-1)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-4, ライン-1)



FINAS

PNC SN941 86-78

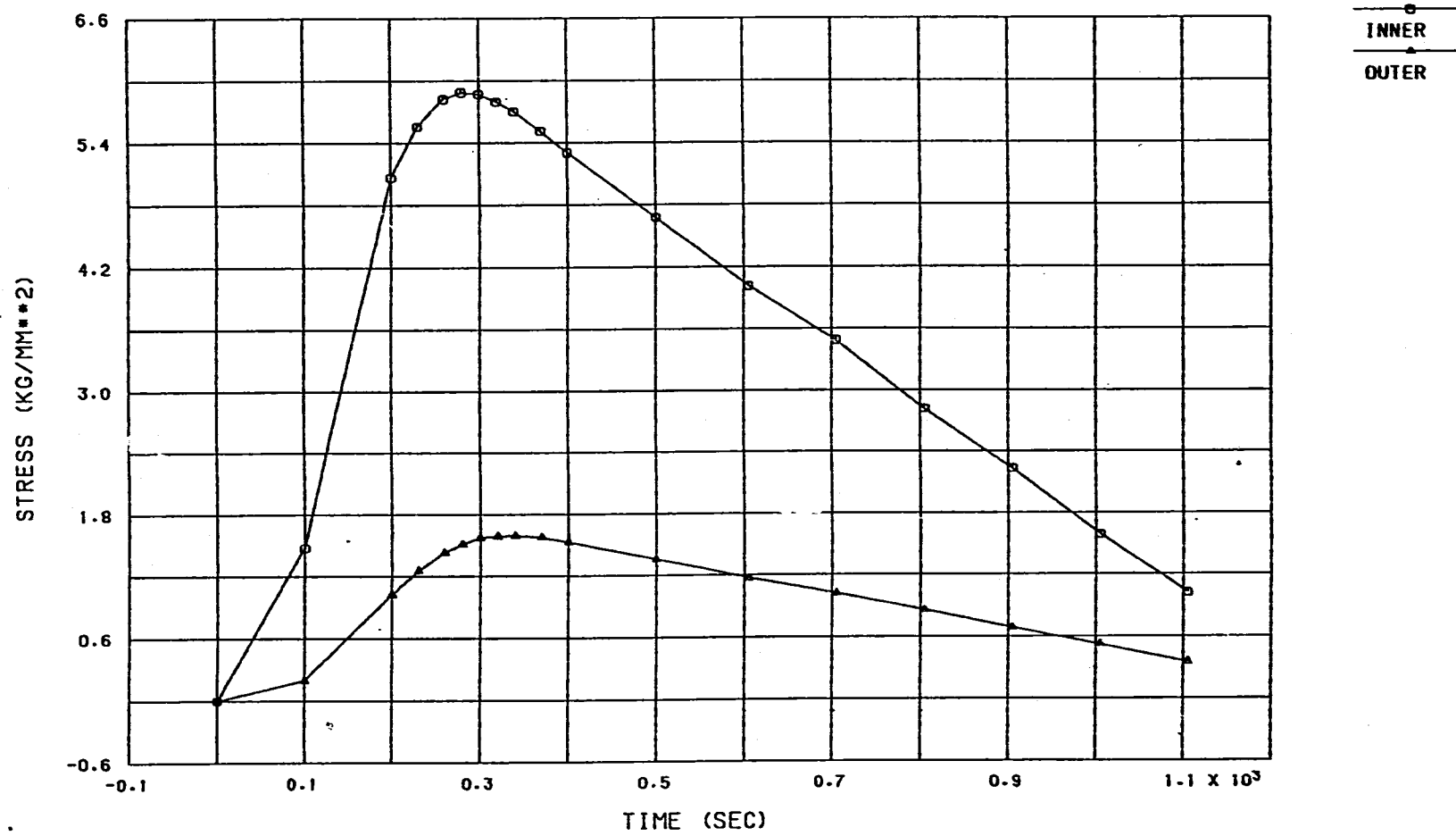


IHX MODEL (B4) LINE-4 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 7.10 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-4, Line-4)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-4, ライン-4)

FINAS

PNC SN941 85-78



IHX MODEL (B5) LINE-1 (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 7.11 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-5, Line-1)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-5, ライン-1)

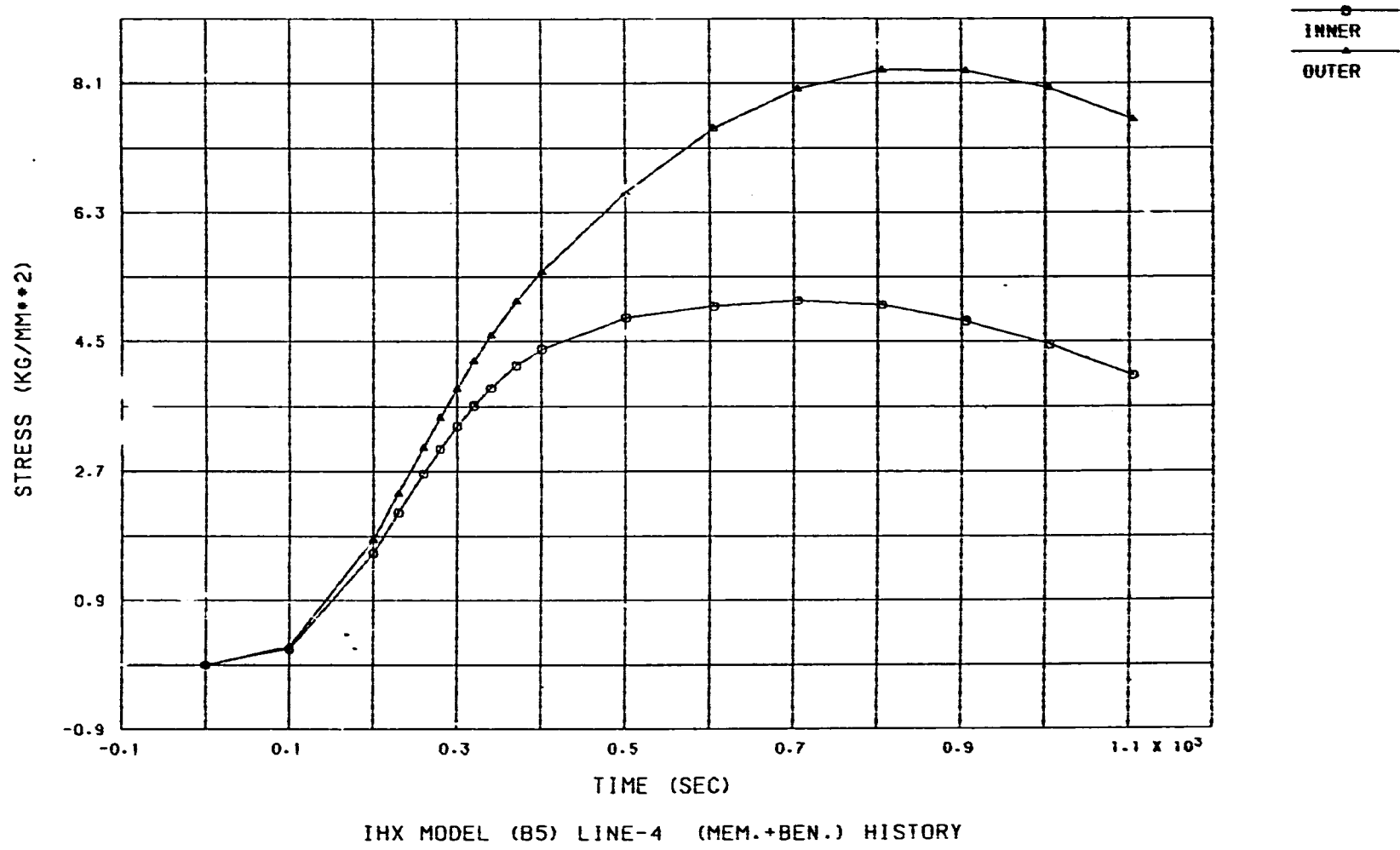
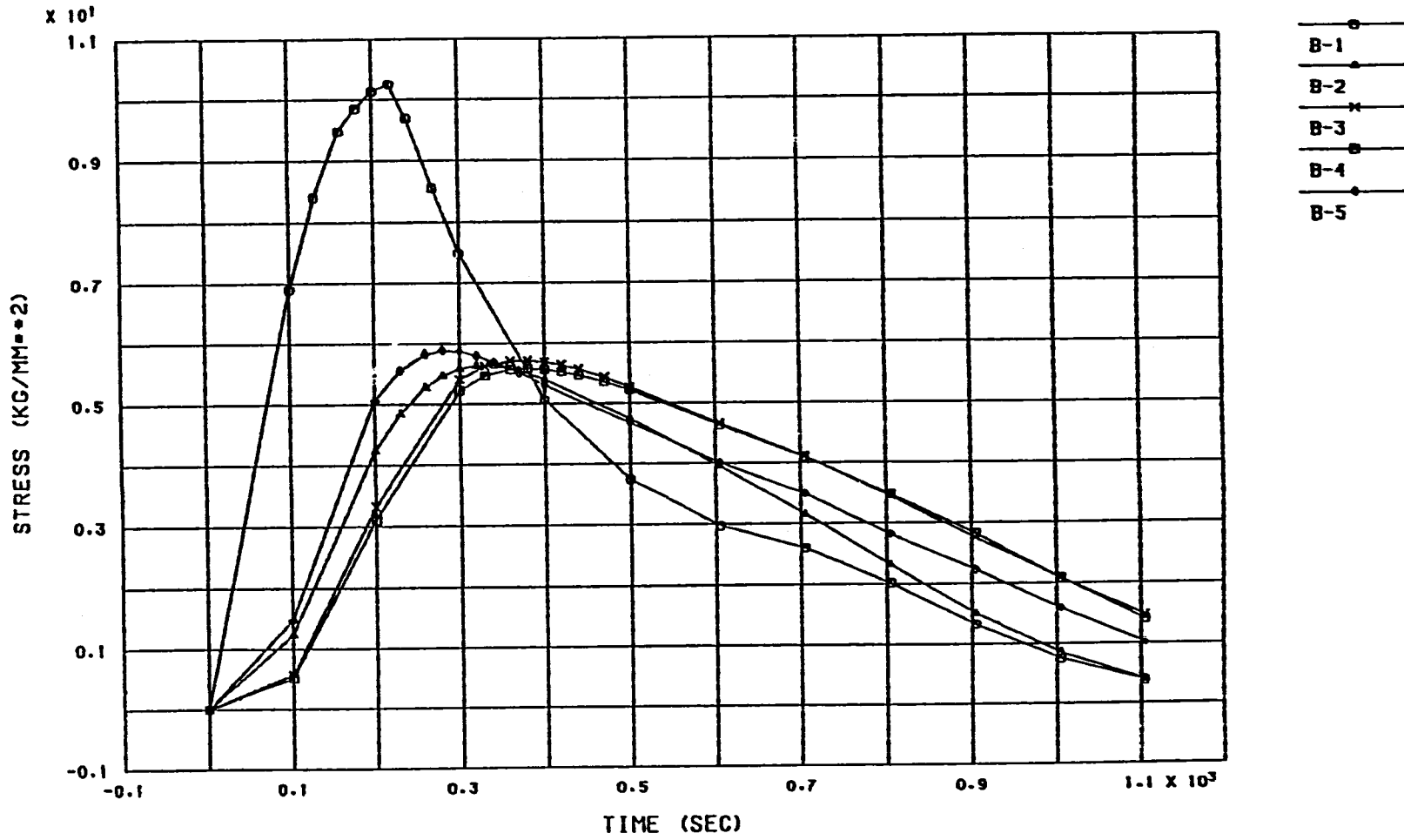


Fig. 7.12 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (B-5, Line-4)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (B-5, ライン-4)

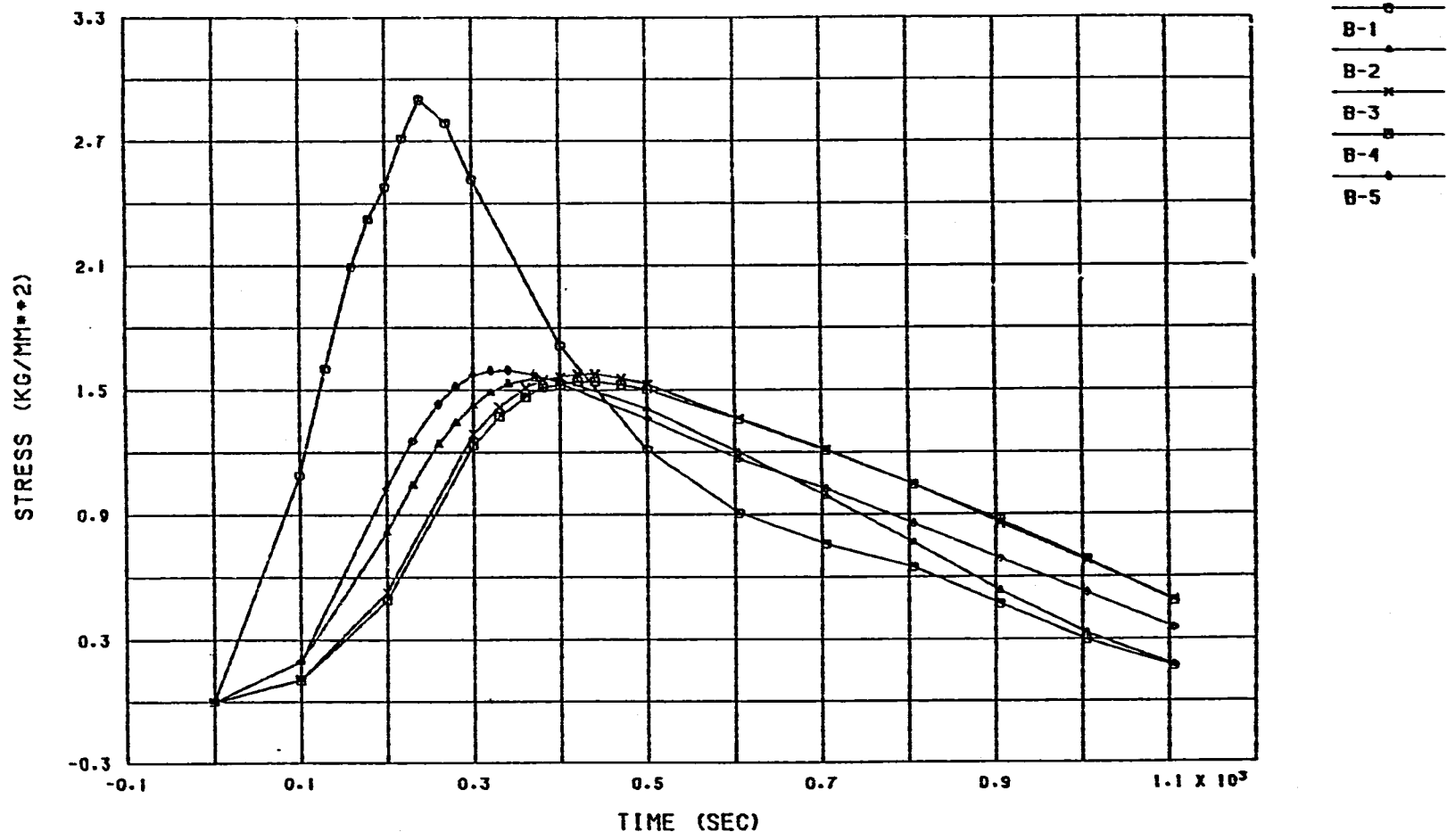


IXH MODEL LINE-1 INNER (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 7.13 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-1, Inner)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-1, 内面)

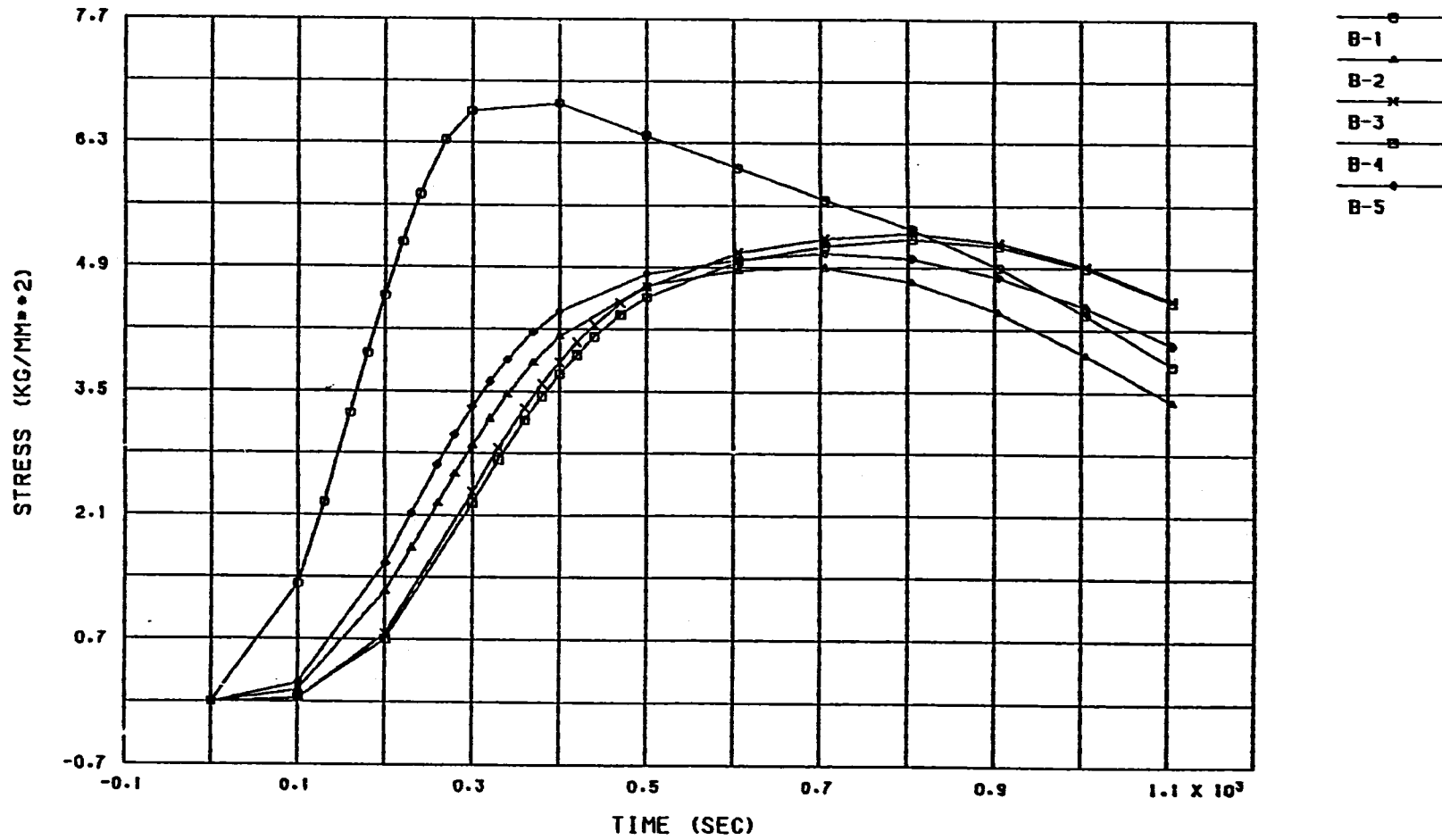
FINAS

PNC SN041 85-78



IHX MODEL LINE-1 OUTER (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 7.14 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-1, Outer)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-1, 外面)



IHX MODEL LINE-4 INNER (MEM.+BEN.) HISTORY

Fig. 7.15 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-4, Inner)  
 (膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-4, 内面)

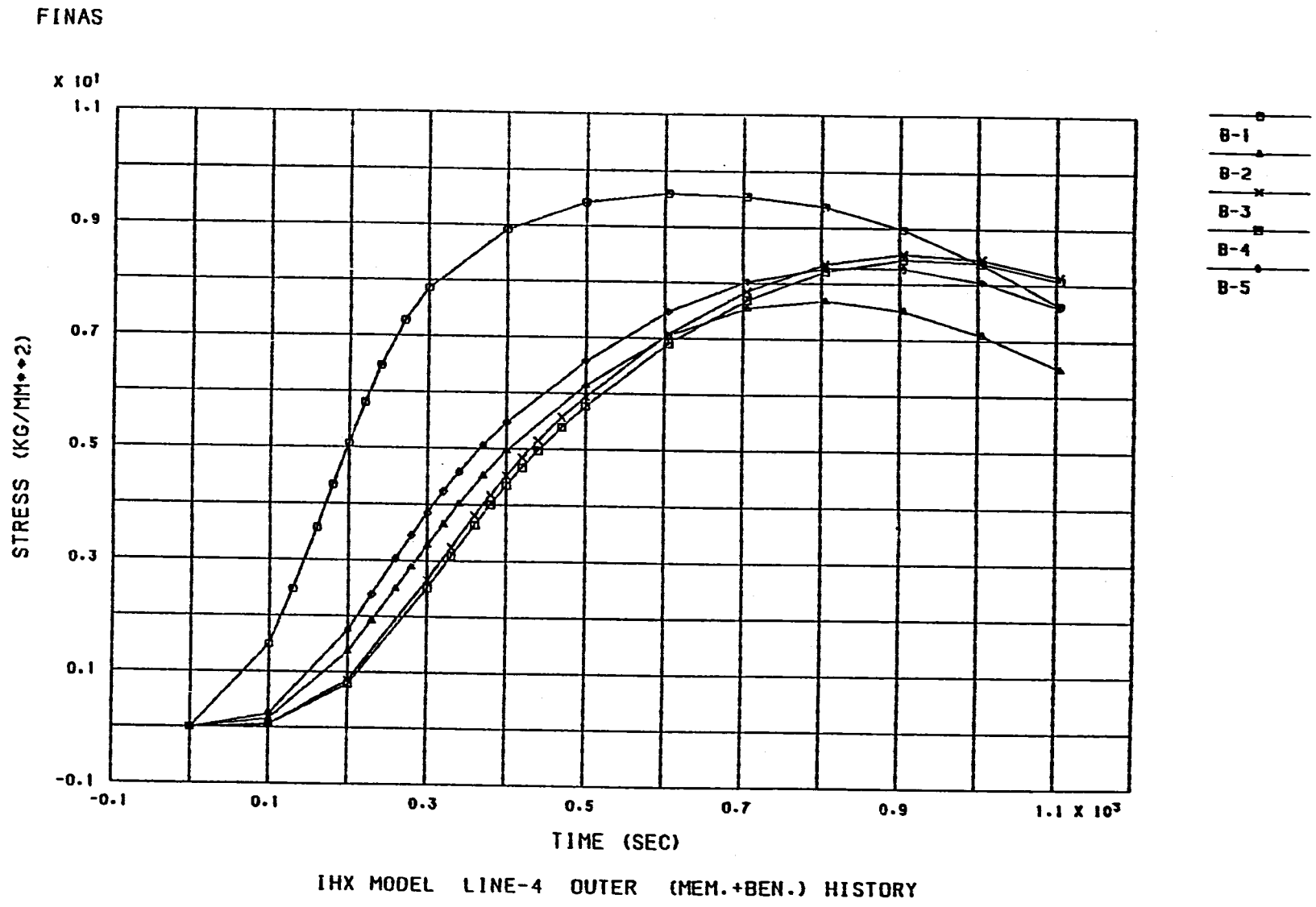


Fig. 7.16 Time History of Membrane Plus Bending Stress Intensity (Line-4, Outer)  
(膜+曲げ) 応力強さの履歴 (ライン-4, 外面)

## 8. 結 言

高速原型炉「もんじゅ」の実機形状にもとづく原子炉容器入口ノズル部及びIHX1次側入口ノズル部をモデル化した2つの軸対称モデルを用い、設計用プラント熱過渡条件及びプラント熱過渡解析より得られる熱過渡条件（生カーブ）に対する熱伝導解析と弾性応力解析を実施した。

この結果、（膜+曲げ）応力強さで見た場合、2つのモデルの全ての評価ラインにおいて設計用プラント熱過渡条件による値が生カーブから得られる熱過渡条件による値より大きくなり、原子炉容器入口ノズルモデルの場合で1.52～3.01の安全裕度、IHX1次側入口ノズルモデルの場合で1.12～1.84の安全裕度をそれぞれ有することが明らかになった。



## 9. 謝 辞

本計算を実施するに当っては、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  
に大変お世話になった。

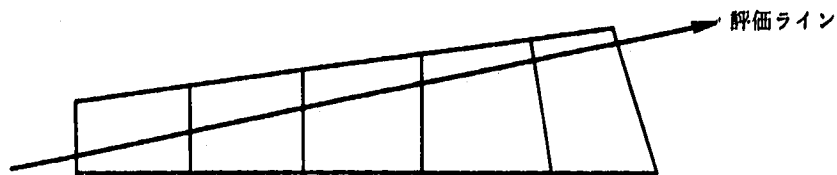
ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 高速増殖炉もんじゅ発電所仕様図書「熱過渡解析条件書」, 高速炉エンジニアリング編 (1984)
- 2) 高速増殖炉もんじゅ発電所仕様図書「熱過渡条件図関連説明書(1)(2)」, 高速炉エンジニアリング編 (1984)
- 3) 高速炉非弾性構造解析システム FINAS 使用説明書, 動燃事業団, PNC SN 252 83-05, (1983)
- 4) 非弾性構造解析プログラムの調査と試用(II), 日本機械学会 (1975)
- 5) Liquid Metals Handbook Sodium and Nak Supplement, O.J.Foust, LMEC (1967)
- 6) 高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等, 動燃事業団: PNC N 241 84-08 (2) (1984)

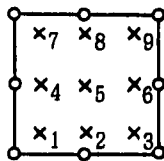
## Appendix

2次内挿関数の軸対称体要素QAX8およびTAX6を用いた応力解析において、ここで使用した応力分類の方法を以下に示す。ここで、応力値の計算点は、評価ラインと要素の辺の交点とする。



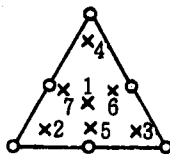
1. 要素の積分点応力より要素を構成する節点の応力を計算する。

○ Q A X 8



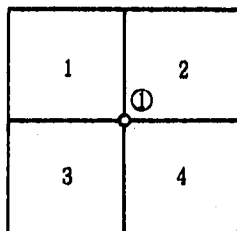
$$\begin{aligned}
 \sigma^{①} &= \sigma^5 + 1.291 \times (\sigma^1 - \sigma^5) \\
 \sigma^{②} &= \sigma^5 + 1.291 \times (\sigma^2 - \sigma^5) \\
 \sigma^{③} &= \sigma^5 + 1.291 \times (\sigma^3 - \sigma^5) \\
 \sigma^{④} &= \sigma^5 + 1.291 \times (\sigma^4 - \sigma^5) \\
 \sigma^{⑤} &= \sigma^5 + 1.291 \times (\sigma^6 - \sigma^5) \\
 \sigma^{⑥} &= \sigma^5 + 1.291 \times (\sigma^7 - \sigma^5) \\
 \sigma^{⑦} &= \sigma^5 + 1.291 \times (\sigma^8 - \sigma^5) \\
 \sigma^{⑧} &= \sigma^5 + 1.291 \times (\sigma^9 - \sigma^5)
 \end{aligned}
 \tag{A-1}$$

○ T A X 6



$$\begin{aligned}
 \sigma^{①} &= \sigma^1 + 1.436 \times (\sigma^2 - \sigma^1) \\
 \sigma^{②} &= \sigma^1 + 1.558 \times (\sigma^6 - \sigma^1) \\
 \sigma^{③} &= \sigma^1 + 1.436 \times (\sigma^3 - \sigma^1) \\
 \sigma^{④} &= \sigma^1 + 1.558 \times (\sigma^7 - \sigma^1) \\
 \sigma^{⑤} &= \sigma^1 + 1.558 \times (\sigma^6 - \sigma^1) \\
 \sigma^{⑥} &= \sigma^1 + 1.436 \times (\sigma^4 - \sigma^1)
 \end{aligned}
 \tag{A-2}$$

2. 数要素により共有する節点の応力は、これらの要素より計算される応力の平均値とする。



$$\sigma^{①} = \frac{1}{4} (\sigma^{①,1} + \sigma^{①,2} + \sigma^{①,3} + \sigma^{①,4}) \quad (\text{A-3})$$

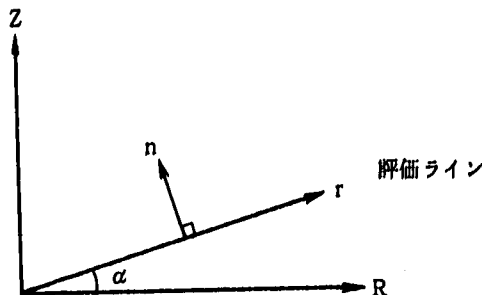
3. 評価ライン上の応力値の計算点における応力は、要素を構成する節点の応力を用いて、2次の補間関数により補間して求める。

$$\sigma^* = [N] \{ \sigma \} \quad (\text{A-4})$$

$$\{ \sigma \}^T = [ \sigma^{①}, \sigma^{②}, \sigma^{③}, \sigma^{④}, \sigma^{⑤}, \sigma^{⑥}, \sigma^{⑦}, \sigma^{⑧} ] \quad (\text{A-5})$$

$$[N]^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} (1 - \xi) (1 - \eta) (-\xi - \eta - 1) \\ \frac{1}{2} (1 - \xi^2) (1 - \eta) \\ \frac{1}{4} (1 + \xi) (1 - \eta) (\xi - \eta - 1) \\ \frac{1}{2} (1 - \xi) (1 - \eta^2) \\ \frac{1}{2} (1 + \xi) (1 - \eta^2) \\ \frac{1}{4} (1 - \xi) (1 + \eta) (-\xi + \eta - 1) \\ \frac{1}{2} (1 - \xi^2) (1 + \eta) \\ \frac{1}{4} (1 + \xi) (1 + \eta) (\xi + \eta - 1) \end{bmatrix} \quad (\text{A-6})$$

4. 評価ラインの方向により、各応力成分を座標変換する。



$$\begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_n \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C^2 & S^2 & 0 & 2SC \\ S^2 & C^2 & 0 & -2SC \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -SC & SC & 0 & C^2 - S^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_R \\ \sigma_\theta \\ \sigma_\theta \\ \tau_{RZ} \end{pmatrix} \quad (A-7)$$

ここで  $S = \sin \alpha$   
 $C = \cos \alpha$

5. 評価ライン上の各計算点における応力を膜応力、曲げ応力に分類する。

ここで、膜応力は全成分、曲げ応力は  $\sigma_n, \sigma_\theta$  のみについて計算する。 $\sigma_r$  と  $\tau_{rn}$  の曲げ応力は 0 とする。

(1) 膜応力  $\sigma_m$

膜応力  $\sigma_m$  は次式により計算される。

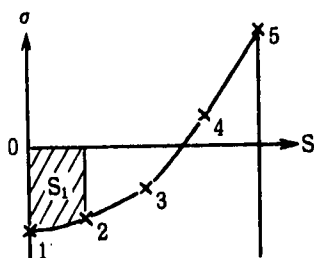
$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma(s) ds \quad (A-8)$$

数値積分は以下のように行なう。

① 端点 1 より 3 点 (点 1, 2, 3) を用いて、これを最小 2 乗法により 2 次関数近似する。

$$\sigma(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 \quad (A-9)$$

② 式 (A-9) を用いて区間 ( $S_1, S_2$ ) の積分を行なう。



$$\begin{aligned} S_1 &= \int_{S_1}^{S_2} \sigma(s) ds \\ &= \int_{S_1}^{S_2} (a_0 + a_1 s + a_2 s^2) ds \\ &= \left[ a_0 s + \frac{1}{2} a_1 s^2 + \frac{1}{3} a_2 s^3 \right]_{S_1}^{S_2} \quad (A-10) \end{aligned}$$

③ 次に点 2 より 3 点 (点 2, 3, 4) を用いて 2 次関数近似し、区間 ( $S_2, S_3$ ) の積分を行なう。

- ④ 以下、順次積分を行なう。
- ⑤ 膜応力  $\sigma_m$  は次式で計算される。

$$\sigma_m = \frac{1}{t} (S_1 + S_2 + \dots) \quad (A-11)$$

(2) 曲げ応力  $\sigma_b$

曲げ応力  $\sigma_b$  は次式により計算される。

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_0^t \sigma(s) \left( s - \frac{t}{2} \right) ds \quad (A-12)$$

数値積分は、膜応力の場合の積分と同様に行なう。

- ① 3点を用いてこれを最小2乗法により2次関数近似する。

$$\sigma(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 \quad (A-13)$$

- ② 式(A-13)を用いて区間  $(s_i, s_{i+1})$  の積分を行なう。

$$\begin{aligned} S_i &= \int_{s_i}^{s_{i+1}} \sigma(s) \left( s - \frac{t}{2} \right) ds \\ &= \int_{s_i}^{s_{i+1}} (a_0 + a_1 s + a_2 s^2) \left( s - \frac{t}{2} \right) ds \\ &= \int_{s_i}^{s_{i+1}} \left\{ -\frac{t}{2} a_0 + \left( a_0 - \frac{t}{2} a_1 \right) s + \left( a_1 - \frac{t}{2} a_2 \right) s^2 + a_2 s^3 \right\} ds \\ &= \left[ -\frac{t}{2} a_0 s + \frac{1}{2} \left( a_0 - \frac{t}{2} a_1 \right) s^2 + \frac{1}{3} \left( a_1 - \frac{t}{2} a_2 \right) s^3 + \frac{1}{4} a_2 s^4 \right]_{s_i}^{s_{i+1}} \end{aligned} \quad (A-14)$$

- ③ 曲げ応力  $\sigma_b$  は次式で計算される。

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} (S_1 + S_2 + \dots) \quad (A-15)$$

6. 数値積分の精度の検討

膜応力  $\sigma_m$ 、曲げ応力  $\sigma_b$  を求める場合の前記5の数値積分の精度について、例題により比較する。例題として用いる応力分布は、以下の式によるものとする。

- ① 直線分布

$$\begin{aligned} \sigma(s) &= s \\ \sigma_m &= \frac{1}{t} \int_0^t s ds \\ &= \frac{1}{t} \left[ \frac{1}{2} s^2 \right]_0^t \\ &= \frac{1}{2} t \end{aligned} \quad (A-16)$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= \frac{6}{t^2} \int_0^t s \left( s - \frac{t}{2} \right) ds \\
 &= \frac{6}{t^2} \int_0^t \left( s^2 - \frac{t}{2} s \right) ds \\
 &= \frac{6}{t^2} \left[ \frac{1}{3} s^3 - \frac{t}{4} s^2 \right]_0^t \\
 &= \frac{1}{2} t
 \end{aligned} \tag{A-17}$$

(2) 放物線分布

$$\sigma(s) = s^2$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_m &= \frac{1}{t} \int_0^t s^2 ds \\
 &= \frac{1}{t} \left[ \frac{1}{3} s^3 \right]_0^t \\
 &= \frac{1}{3} t^2
 \end{aligned} \tag{A-18}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= \frac{6}{t} \int_0^t s^2 \left( s - \frac{t}{2} \right) ds \\
 &= \frac{6}{t} \int_0^t \left( s^3 - \frac{t}{2} s^2 \right) ds \\
 &= \frac{6}{t} \left[ \frac{1}{4} s^4 - \frac{t}{6} s^3 \right]_0^t \\
 &= \frac{1}{2} t^2
 \end{aligned} \tag{A-19}$$

(3) 3次曲線分布

$$\sigma(s) = s^3 - s - 1$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_m &= \frac{1}{t} \int_0^t (s^3 - s - 1) ds \\
 &= \frac{1}{t} \left[ \frac{1}{4} s^4 - \frac{1}{2} s^2 - s \right]_0^t \\
 &= \frac{1}{4} t^3 - \frac{1}{2} t - 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= \frac{6}{t^2} \int_0^t (s^3 - s - 1) \left( s - \frac{t}{2} \right) ds \\
 &= \frac{6}{t^2} \int_0^t \left\{ s^4 - \frac{t}{2} s^3 - s^2 + \left( \frac{t}{2} - 1 \right) s + \frac{t}{2} \right\} ds \\
 &= \frac{6}{t^2} \left[ \frac{1}{5} s^5 - \frac{t}{8} s^4 - \frac{1}{3} s^3 + \frac{1}{2} \left( \frac{t}{2} - 1 \right) s^2 + \frac{t}{2} s \right]_0^t \\
 &= \frac{9}{20} t^3 - \frac{1}{2} t
 \end{aligned} \tag{A-21}$$

上記①, ② ③において  $t=2$  とした場合の分布を用いて分類を行ない, 理論値と比較する。

① 直線分布  $\sigma(s) = s$        $\sigma_m = \frac{1}{2} t$        $\sigma_b = \frac{1}{2} t$       (  $t = 2$  )

	s	$\sigma$
1	0.00000	0.00000
2	1.0000	1.0000
3	2.0000	2.0000

計算値			理論値	
MEM	= 1.0000		1.0	
BEN	= -1.0000	1.0000	-1.0	1.0
MEM+BEN	= 0.12790E-12	2.0000	0.0	2.0

② 放分線分布  $\sigma(s) = s^2$        $\sigma_m = \frac{1}{3} t^2$        $\sigma_b = \frac{1}{2} t^2$       (  $t = 2$  )

	s	$\sigma$
1	0.00000	0.00000
2	1.0000	1.0000
3	2.0000	4.0000

計算値			理論値	
MEM	= 1.3333		1.3333	
BEN	= -2.0000	2.0000	-2.0	2.0
MEM+BEN	= -0.66667	3.3333	-0.6667	3.3333



③ 3次曲線分布  $\sigma(s) = s^3 - s - 1$      $\sigma_m = \frac{1}{4}t^3 - \frac{1}{2}t - 1$      $\sigma_b = \frac{9}{20}t^3 - \frac{1}{2}t$     ( $t = 2$ )

	s	$\sigma$
1	0.00000	-1.0000
2	0.25000	-1.2340
3	0.50000	-1.3750
4	0.75000	-1.3280
5	1.0000	-1.0000
6	1.2500	-0.29700
7	1.5000	0.87500
8	1.7500	2.6090
9	2.0000	5.0000

計算値			理論値	
MEM	=	-0.29375E-02	0.0	
BEN	=	-2.6024      2.6024	-2.6	2.6
MEM+BEN	=	-2.6053      2.5994	-2.6	2.6

7. 主 応 力

主応力 ( $s_1, s_2, s_3$ ) は応力分類後の各応力成分より次式で計算する。

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = \frac{\sigma_r + \sigma_n}{2} \pm \frac{\sqrt{(\sigma_r - \sigma_n)^2 + 4\tau_r^2}}{2}$$

$$s_3 = \sigma_\theta$$

(A-22)

8. 応力強さ

応力強さ S.I. は次式により求められる。

$$S.I. = \text{Max} \left\{ |s_1 - s_2|, |s_2 - s_3|, |s_3 - s_1| \right\}$$

(A-23)