

分置

詳細設計段階における
もんじゅ2次系床ライナのひずみ評価について
(研究報告書)

2004年3月

核燃料サイクル開発機構
高速増殖炉もんじゅ建設所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

2004年3月

詳細設計段階におけるもんじゅ 2次系床ライナのひずみ評価について
(研究報告)

芋生 和道^{*1}, 大貫 康二^{*1}, 菊池 裕彦^{*1},
森下 正樹^{*2}, 井川 健一^{*3}, 西林 洋平^{*1},
内橋 昌也^{*1}, 池田 真輝典^{*1}

要　　旨

もんじゅの2次系床ライナについて、漏えいナトリウムの燃焼による熱荷重に対する床ライナのひずみを、大変形弾塑性クリープ解析により評価した。

解析の結果、床ライナに発生するひずみは、貫通性の損傷発生に関するひずみの目安値を下回ることを確認した。なお、漏えい開始後の床ライナの温度上昇率、ライナ板板厚及び腐食減肉の有無による影響の評価を行ったが、いずれのパラメータも床ライナに発生する最大ひずみに与える影響は小さかった。

また、目安値を超える極めて大きなひずみを試験体に負荷する部分構造模擬試験によって、ライナ板に貫通性の損傷が生じないことを実験的にも確認した。

*1 高速増殖炉もんじゅ建設所 プラント第2課

*2 大洗工学センター 要素技術開発部

*3 原子力システム株式会社

JNC TN2400 2003-004

March, 2004

Evaluation of Mechanical Integrity of Floor Liner in Secondary Heat Transport System
Cells of Monju
(Research Report)

K.Imou^{*1}, K.Oonuki^{*1}, H.Kikuchi^{*1},
M.Morishita^{*2}, K.Igawa^{*3}, Y.Nishibayashi^{*1},
M.Uchihashi^{*1}, M.Ikeda^{*1}

ABSTRACT

Inelastic analyses on the floor liner subjected to thermal loading due to a sodium leakage and combustion were carried out.

It was confirmed by the analysis that inelastic strain in the floor liner was less than a criteria value with regard to the structural integrity. In addition, evaluations were made on the influences of the rate of temperature rise, thickness of the liner plate, and thinning of the plate by severe corrosion. It was also confirmed that these parameters gave negligible effect on the analysis results (maximum strain).

Tests were also made using partial structure model of the floor liner. No through-wall crack was observed in the test specimens that were subjected to much larger strain than the criteria value, which also confirms the mechanical integrity of the floor liner.

*1 Monju Construction Office Maintenance Section

*2 O-arai Engineering Center Fuels and Materials Division

*3 NESI CO., LTD.

目 次

1.	はじめに	1
2.	床ライナの構造と熱ひずみ	2
3.	評価方針	6
4.	高温材料試験によるひずみの目安値の設定と適用	7
5.	解析による評価	10
5. 1	解析の方法	10
5. 2	入熱領域に関するパラメータサーベイ	12
5. 3	評価の条件	18
5. 4	解析の結果	20
5. 5	パラメータ評価	27
5. 6	解析による評価のまとめ	35
6.	部分構造模擬試験	38
7.	まとめ	40
8.	謝辞	41
9.	参考文献	42

付録

A.	解析結果	43
B.	降温過程における腐食減肉の重ね合わせの考え方	65

表リスト

表 5.3-1	解析ケース一覧	19
表 5.6-1	熱ひずみ評価の対象部位一覧	36
表 5.6-2	相当非弾性ひずみ評価表	37
表 A-1	解析ケース一覧	46
表 A-2	相当非弾性ひずみ評価表	47

図リスト

図 2-1	原子炉補助建物床ライナ構造	3
図 2-2	振れ止めアンカー設置状況説明図	4
図 2-3	ライナ板の変形概念とひずみ集中箇所	5
図 4-1	曲げ破断伸びとひずみの目安値	9
図 5.1-1	解析モデル	11
図 5.2-1	基本パラメータサーベイ解析結果	14
図 5.2-2	絞り込みパラメータサーベイ解析結果 (1フレームスパン規模)	15
図 5.2-3	絞り込みパラメータサーベイ解析結果 (リブスパン規模)	16
図 5.2-4	入熱領域と最大ひずみとの関係	17
図 5.4-1	内側リブ端のy方向応力、y方向ひずみの履歴	22
図 5.4-2	床ライナの温度条件	23
図 5.4-3	昇温初期のライナ板の温度分布	24
図 5.4-4	内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴	25
図 5.4-5	外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴	26
図 5.5-1	影響評価用の温度条件	30
図 5.5-2	温度上昇率が熱ひずみに与える影響	31
図 5.5-3	ライナ板板厚が熱ひずみに与える影響	32
図 5.5-4	腐食減肉条件	33
図 5.5-5	腐食減肉が熱ひずみに与える影響 (内側リブ端部減肉)	34
図 6-1	部分構造模擬試験結果	39
図A-1	減肉なしモデル及び減肉ありモデルの形状	48
図A-2	参考文献[1]と同じ温度上昇率における 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース1)	49
図A-3	参考文献[1]と同じ温度上昇率における 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース1)	50

図リスト（続き）

図A-4	参考文献[1]の約120%の温度上昇率における 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース2)	51
図A-5	参考文献[1]の約120%の温度上昇率における 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース2)	52
図A-6	参考文献[1]の約80%の温度上昇率における 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース3)	53
図A-7	参考文献[1]の約80%の温度上昇率における 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース3)	54
図A-8	ライナ板板厚7.2mmにおける 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース4)	55
図A-9	ライナ板板厚7.2mmにおける 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース4)	56
図A-10	内側リブ端部帯状減肉における 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース5)	57
図A-11	内側リブ端部帯状減肉における 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース5)	58
図A-12	外側リブ端部帯状減肉における 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース6)	59
図A-13	外側リブ端部帯状減肉における 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース6)	60
図A-14	部分一様減肉における 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース7)	61
図A-15	部分一様減肉における 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース7)	62
図A-16	全面一様減肉における 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース8)	63
図A-17	全面一様減肉における 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース8)	64
図B-1	床ライナの変形と溶融体挙動（概念図）	69
図B-2	床ライナの熱変形	70
図B-3	外側リブ端部に減肉2.6mmを重ねたケースの解析結果	71
図B-4	NaFe複合酸化型腐食を考慮した減肉履歴	72

1. はじめに

「もんじゅ」の2次系床ライナは、漏えいナトリウムとコンクリートとの直接接触を防止するために設置されており、ナトリウム漏えい時にあってもその機械的健全性を保つことが要求される。ここで、機械的健全性とは、床ライナに貫通性の損傷が発生しないことを意味する。

漏えいナトリウムが床ライナの一部に溜まって燃焼する中小規模の漏えい時には、床ライナが局所的に高温になり熱ひずみが生じるが、この熱ひずみにより床ライナに貫通性の損傷が発生しないことを確認する必要がある。

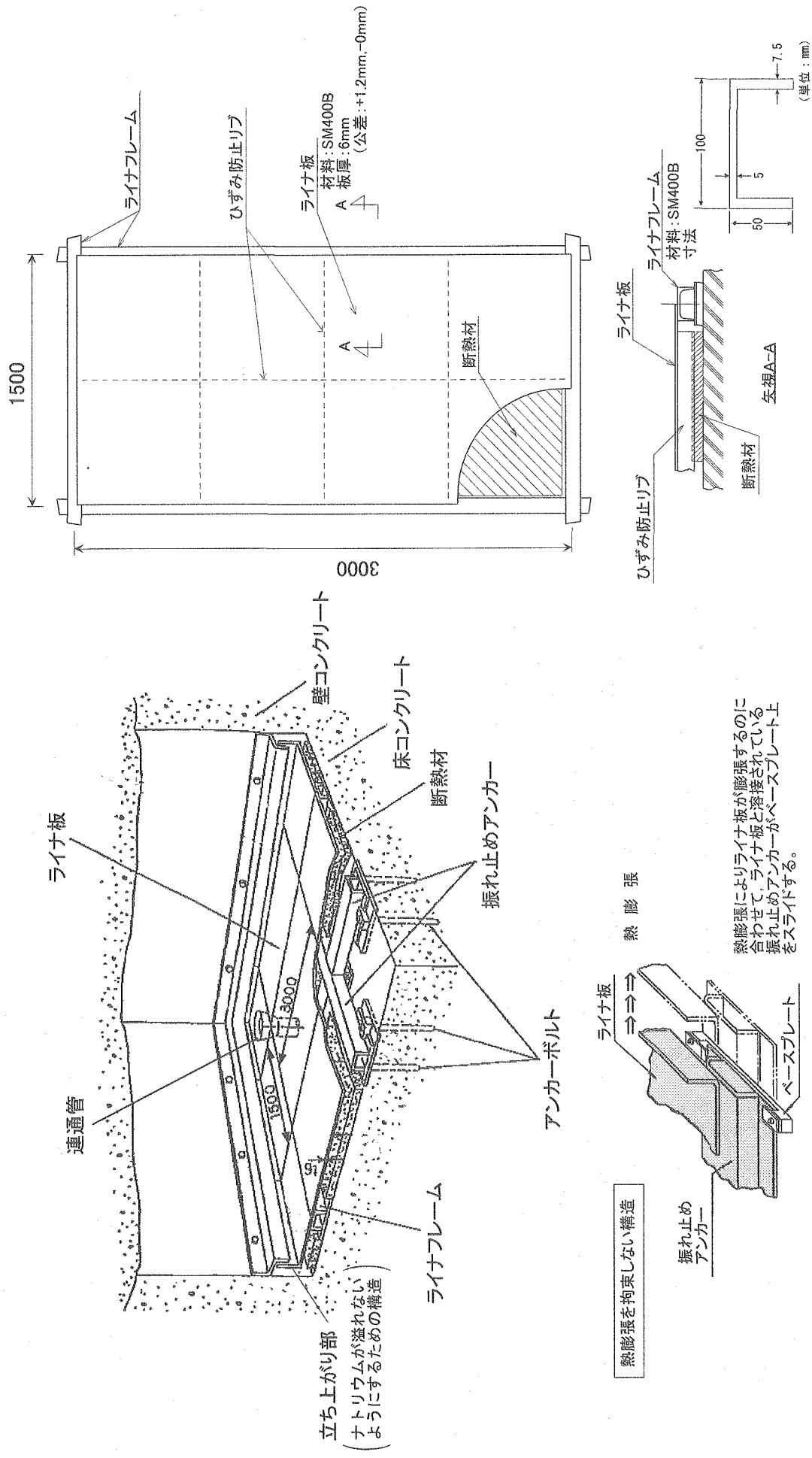
そこで、大変形弾塑性クリープ解析及び床ライナの構造不連続部を模擬した試験体を用いた試験（以下、部分構造模擬試験という）を行い、床ライナの機械的健全性の評価結果を本報告書にまとめた。

なお、参考文献[1]の研究報告書では、床ライナの健全性が詳細設計段階において確保できる見通しがあることを報告した。これに対し、本報告書では、詳細設計段階における床ライナ健全性評価の考え方を整理し、床ライナの健全性が確保されていることを示したものである。

2. 床ライナの構造と熱ひずみ

床ライナは、延性に富み、溶接性に優れた SM400B (JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材) を用いた鋼製ライナである。ライナ板はライナフレームに溶接されており、振れ止めアンカーにより床コンクリートに固定支持されている。ライナ板裏側には溶接によるライナ板のひずみ発生防止のため、ひずみ防止リブが格子状に取り付けられている。それらの構造を図 2-1 に示す。また、振れ止めアンカーは、図 2-2 に示すように一部屋または複数の部屋にわたって十文字状に設置されており、十文字の交点が固定点となり、そこを基点に南北、東西方向にそれぞれ摺動可能で床ライナの熱膨張を拘束しない構造となっている。

漏えいナトリウムが床ライナの一部に溜まって燃焼する中小規模の漏えい時には、ライナ板は局所的に加熱され、周辺部分との間に大きな温度差が生じる。このため局所的な熱膨張による面外の曲げ変形が生じる。このときの床ライナの変形概念を図 2-3 に示す。床ライナは曲げ剛性の低いライナ板と、ライナ板に比べて曲げ剛性の高いひずみ防止リブ及びライナフレームとの複合構造なので、ライナ板の曲げ変形を拘束するライナフレーム及びひずみ防止リブとライナ板との構造不連続部に熱ひずみが集中する。従つて、熱ひずみの評価は、このようなひずみ集中部に着目して行うことが重要である。



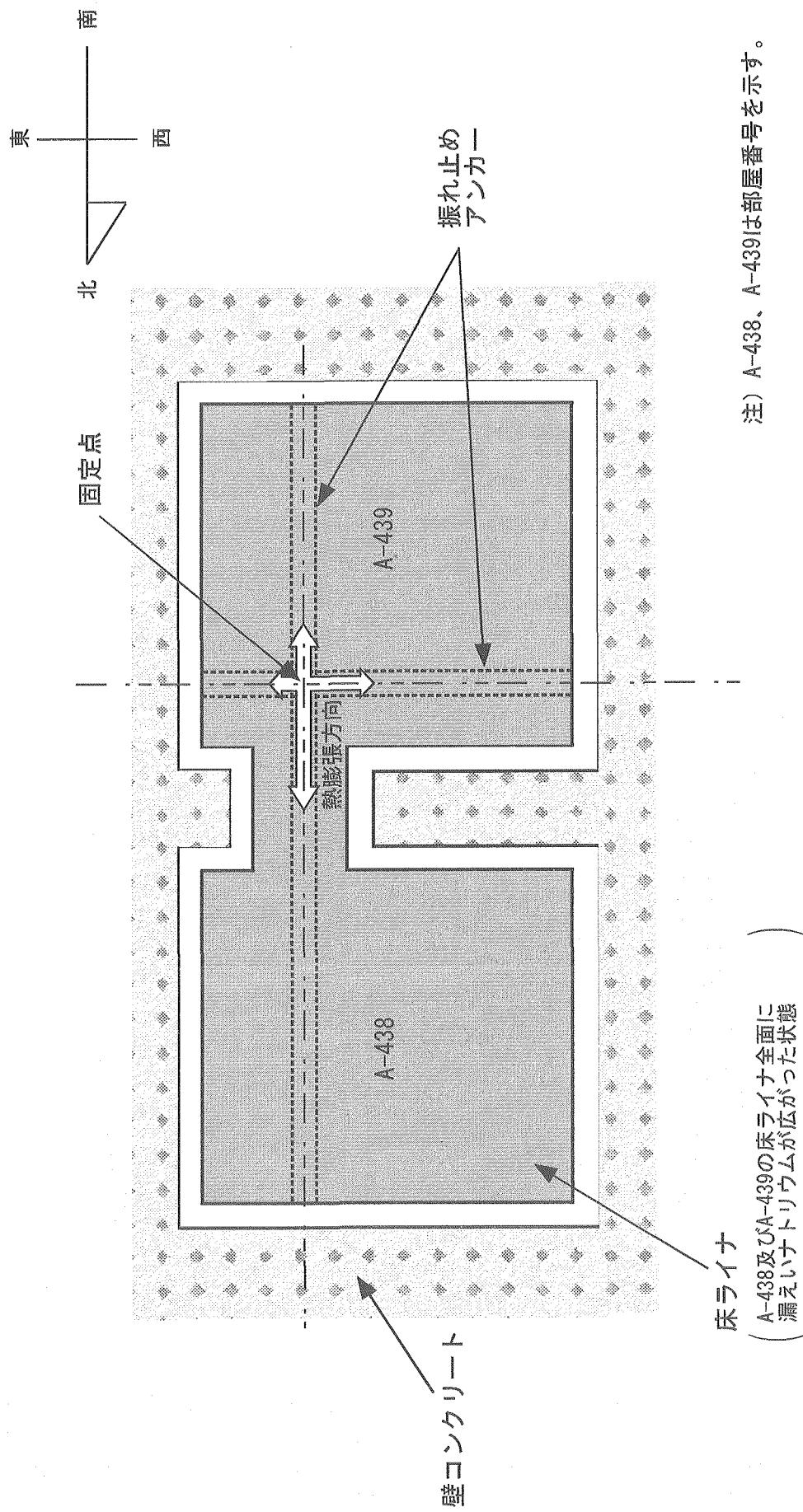


図2-2 振れ止めアンカー設置状況説明図

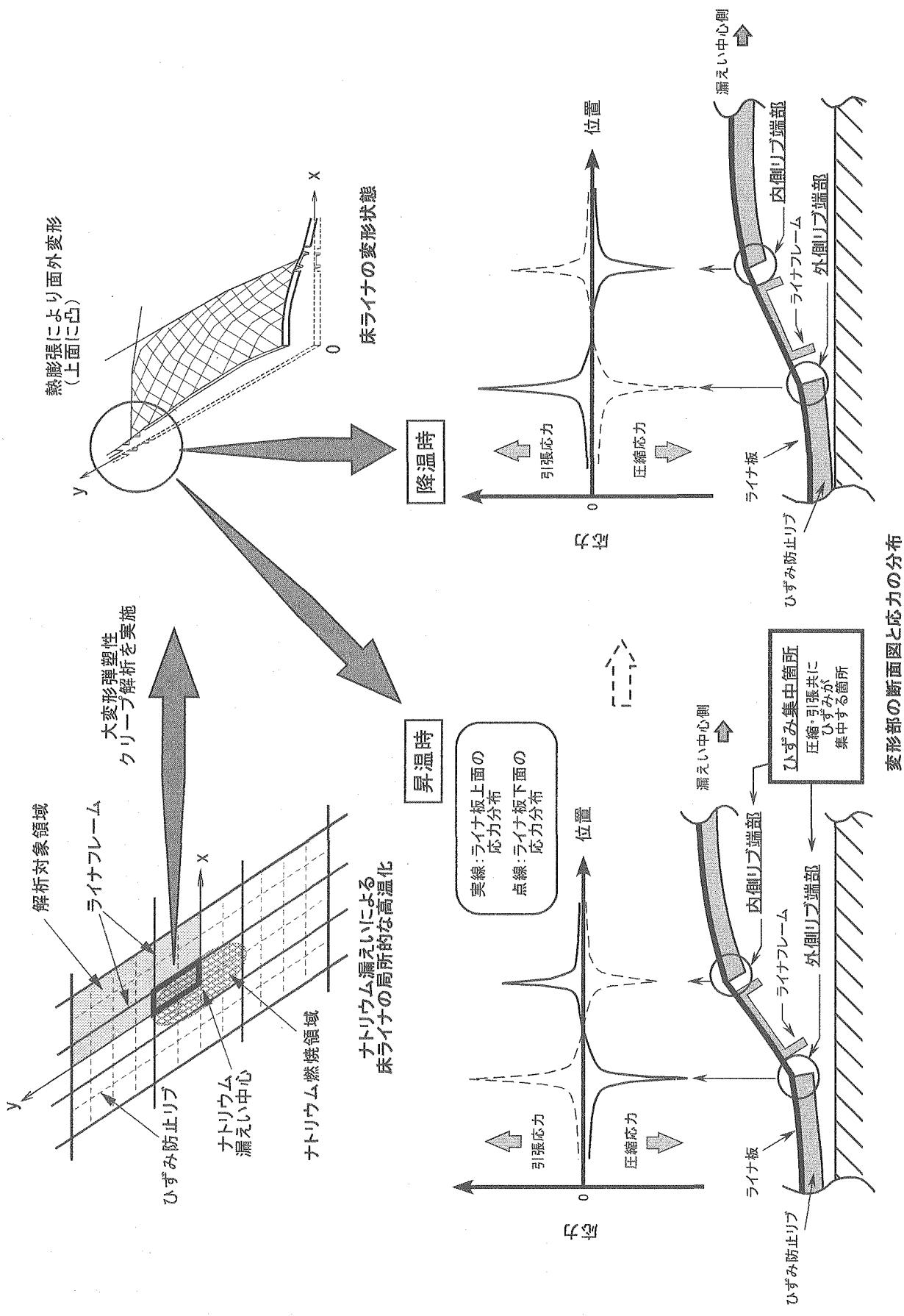


図2-3 ライナ板の変形概念とひずみ集中箇所

3. 評価方針

床ライナの機械的健全性の評価は、大変形弾塑性クリープ解析によって算定した床ライナのひずみと、別途材料試験によって定めたひずみの目安値との比較によって行う。さらに、床ライナの部分構造模擬試験を高温環境下で行い、解析による評価の妥当性を実験的にも確認しておく。

(1) 大変形弾塑性クリープ解析による健全性評価

実機のナトリウム漏えいを想定し、床ライナの変形解析（大変形弾塑性クリープ解析）によるひずみの評価を行う。

床ライナの変形は、図2-3に概念的に示したように、内側リブ端部のライナ板が上に凸、外側リブ端部のライナ板が下に凸に変形し、熱ひずみはひずみ防止リブ端部に集中する。従って、熱ひずみ評価においては、この熱ひずみ集中部に着目し、内側リブ端部及び外側リブ端部の上下面について評価するとともに、その他の部分についてはひずみがひずみ集中部に比べ十分小さいことを確認する。

床ライナの熱ひずみの評価にあたっては、ナトリウムの燃焼条件によって温度上昇率が異なること、ライナ板板厚に製作公差があること、ナトリウムの燃焼に伴つて腐食減肉が生じる可能性があることを考慮する必要がある。このため、温度上昇率の影響評価、ライナ板板厚の影響評価、腐食減肉が生じた場合の影響評価を行い、これらの影響を考慮しても床ライナの健全性に問題がないことを確認する。

(2) 部分構造模擬試験による健全性の確認

上記の解析による評価が妥当であることを確認するため、ひずみの集中する部位を模擬した試験体に高温で大きな曲げひずみを負荷する試験を実施する。具体的には、5項に示す解析によるひずみの値を上回り、さらに4項に示すひずみの目安値を上回る大きなひずみを試験体に与え、床ライナに貫通性の損傷が発生しないことを実験的に確認する。

4. 高温材料試験によるひずみの目安値の設定と適用

床ライナの健全性を評価するためのひずみの目安値の設定とその適用方法について以下に示す。

ひずみの目安値は参考文献[2]で定められている。参考文献[2]では、床ライナ材料と同じ規格の SM400B 材を対象とした引張試験及び曲げ試験を行っており、この内の曲げ試験結果からひずみの目安値を設定した。なお、試験温度は、ナトリウム漏えい時に床ライナに発生すると考えられる上限温度よりも高い範囲までとし、室温～1000°Cとした。

曲げ試験結果を図 4-1 に示す。本図において、200°C付近で青熱脆性^{*1}によると推定される延性の低下が現れるが、高温域では延性は上昇する。(この傾向は引張試験でも同様に現れている^[2])。このような挙動を踏まえて、膜+曲げひずみの目安値を以下のように定めた。

$$\varepsilon_m + \varepsilon_b \leq 15\% \quad (\text{室温} \leq T \leq 350^\circ\text{C})$$

$$\varepsilon_m + \varepsilon_b \leq 30\% \quad (350^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C})$$

ε_m : 膜ひずみ

ε_b : 曲げひずみ

T : ライナ板温度

低温域と高温域の温度境界については、「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（告示 501 号）」の適用温度範囲を参考に、低温域、高温域それぞれ一定のひずみの目安値を設定した。

ひずみの目安値の設定は、保守的かつ簡明であるとの観点から低温域及び高温域でそれぞれ一定としており、図 4-1 より少なくとも 2 倍程度以上の裕度があることが分かる。なお、青熱脆性によると推定される延性の低下は 200°C～300°C のごく狭い温度領域であり、200°C 以下及び 350°C 以上では、ひずみの目安値の裕度は更に大きい。

このひずみの目安値の適用方法は以下の通りである。

- ①ライナ板に貫通性の損傷が生じる可能性があるのは、引張応力の下で大きな引張ひずみが発生する場合であるから、上記のひずみの目安値はこのような引張応力場の引張ひずみに対して適用する。
- ②ひずみの目安値は相当非弾性ひずみ^{*2}と比較する。

* 1 : 青熱脆性

200°C～300°C付近で鋼の引張強さや硬さが常温の場合より増加し、伸び、

絞りが減少してろくなる性質。この温度範囲で青い酸化皮膜が表面に形成されるため、青熱脆性と呼ばれる。

* 2 : 相当非弾性ひずみ

ひずみの目安値との比較には、相当非弾性ひずみを用い、応力とひずみの符号（引張と圧縮）の判定には、最も卓越する成分を用いる。ここで、相当非弾性ひずみは、下記に示す定義式より求められるスカラー量である。

相当非弾性ひずみ $\bar{\varepsilon}^p$:

$$\bar{\varepsilon}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon^p_x - \varepsilon^p_y)^2 + (\varepsilon^p_y - \varepsilon^p_z)^2 + (\varepsilon^p_z - \varepsilon^p_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma^p_{xy}^2 + \gamma^p_{yz}^2 + \gamma^p_{zx}^2)}$$

ε^p : 各方向の非弾性ひずみ

γ^p : 各方向の非弾性せん断ひずみ

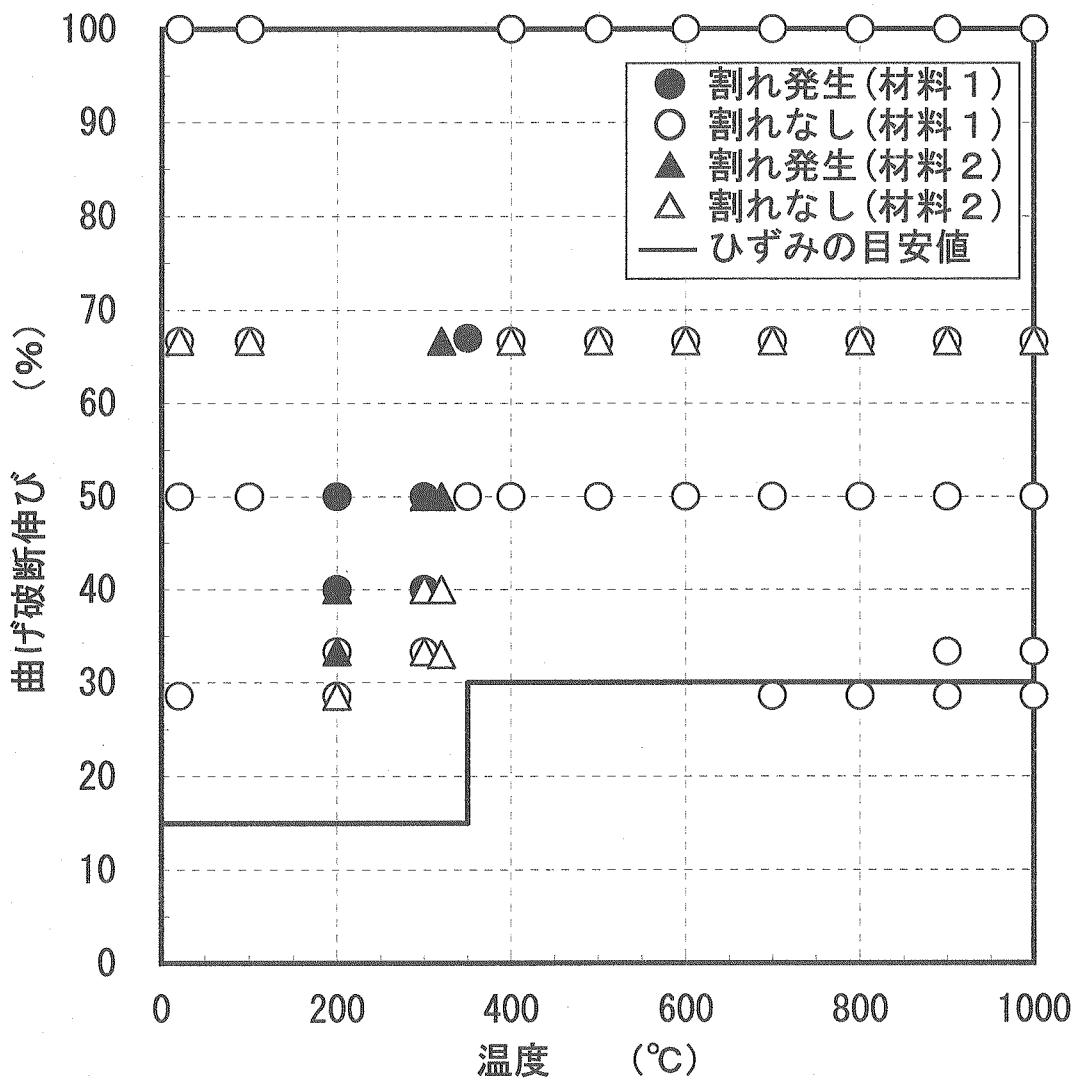


図4-1 曲げ破断伸びとひずみの目安値

* 材料試験から「工学的下限値」を設定し、それを熱ひずみの評価におけるひずみの目安値として以下のとおり設定した。

$$\varepsilon_m + \varepsilon_b \leq 15\% \quad (\text{室温} \leq \text{床ライナ温度} \leq 350^\circ\text{C})$$

$$\varepsilon_m + \varepsilon_b \leq 30\% \quad (350^\circ\text{C} < \text{床ライナ温度} \leq 1000^\circ\text{C})$$

* 材料1及び材料2は、製造メーカーや製造日時が異なる同材料SM400B

5. 解析による評価

大変形弾塑性クリープ解析を実施し、床ライナに発生するひずみを評価する。また、漏えい開始後の床ライナの温度上昇率、ライナ板板厚及び腐食減肉の有無によるひずみへの影響の評価を行う。

5. 1 解析の方法

(1) 解析の流れ

ひずみ評価では、まず、熱伝導解析を実施し、床ライナの温度分布を算出する。次に、得られた温度分布を解析条件として大変形弾塑性クリープ解析を実施し、ひずみの分布及び履歴から最大ひずみを算出する。

(2) 解析モデル

解析モデルを図 5.1-1 に示す。床ライナのような構造物をモデル化する場合、ソリッド要素またはシェル要素を使用することが考えられるが、ソリッド要素に比べてシェル要素の方がライナ板上面のひずみを大きく評価するため、より保守的な結果を与える。よって、シェル要素を使用した。また、ひずみ防止リブ端部近傍に大きなひずみが発生することが予想されるためにその部分の要素分割幅は十分細かくした。

減肉ありモデルでは、局所減肉によるひずみ集中の影響を極端にした場合として、図 2-3 に示したひずみ集中箇所（内側リブ端部、外側リブ端部）に V 字型断面の減肉（帯状減肉）を重ね合わせたモデルとする。

なお、帯状減肉以外の減肉形状についても解析を行い、減肉形態の違いによる影響を確認している。これらの解析結果は付録 A に示す。

また、図 5.1-1 中に示した入熱領域は、ひずみ評価上厳しい入熱領域として設定したものである。入熱領域のパラメータサーバイについては後述の 5.2 項に示す。

(3) 入熱条件

熱伝導解析では床ライナの入熱領域に熱量を入力する条件とした。この場合の床ライナにおける最高到達温度は、中小漏えい時の ASSCOPS 燃焼解析結果による最高温度^[3]を包絡する値として 880°C に設定した。

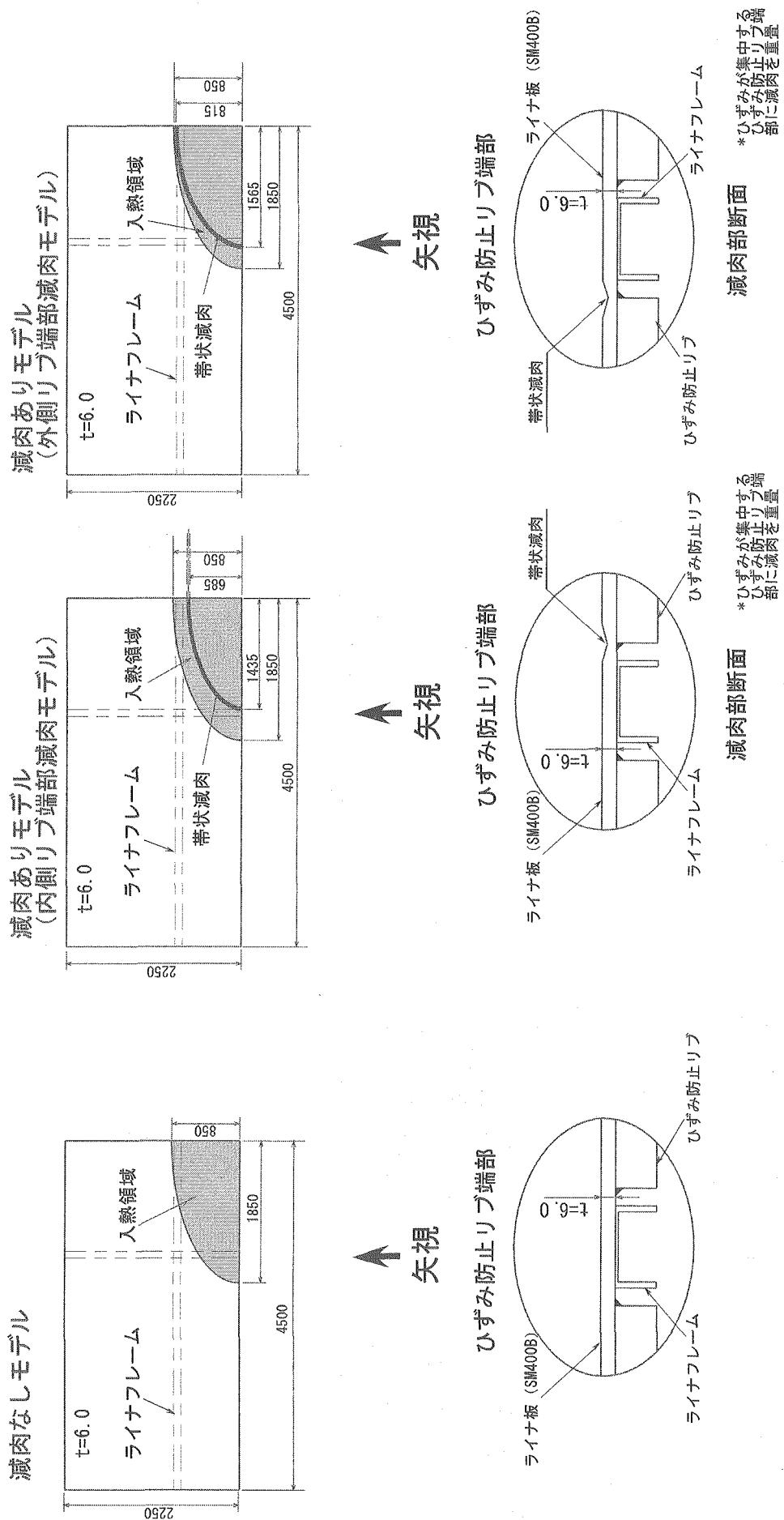
(4) 解析コード

解析コードは大変形弾塑性クリープ解析に対し十分な実績を有する汎用非線形解析コード FINAS^[4]を用いた。

(5) 応力ひずみ関係

応力ひずみ関係については、床ライナ材と同じ規格の SM400B を用いて、室温～1000°C の温度範囲で引張試験を実施し、結果の平均傾向に基づいて策定した。引張試験の試験片と方法は、それぞれ、JIS Z 2201「金属材料試験片」^[5]と JIS G 0567 「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」^[6]に準拠している。

図5.1-1 解析モデル



5. 2 入熱領域に関するパラメータサーベイ

入熱領域に関するパラメータサーベイを行い、ひずみ評価上厳しい入熱領域を設定した。

(1)従来の知見

参考文献[1]では、2段階のパラメータサーベイ解析（基本パラメータサーベイ解析、絞り込みパラメータサーベイ解析）を実施し、局部加熱（漏えい）により熱ひずみが最も厳しい条件を絞り込んでいる。

参考文献[1]で実施した基本パラメータサーベイ解析の結果を図5.2-1に示す。基本パラメータサーベイでは、入熱領域の大きさをリブスパン規模、フレームスパン規模及びフレームスパン数倍規模の3種類に分けて、ある程度粗い解析モデルを用いてパラメータサーベイ解析を行い、その結果から相対的に厳しいフレームスパン規模を絞り込みパラメータサーベイの解析条件として選択した。なお、入熱領域の大きさが、ほぼライナフレームの1スパン（3000mm×1500mm）に相当するものを、特に1フレームスパン規模と称す。

次に、選択した1フレームスパン規模を基準として、詳細な解析モデルを用いて、入熱領域を微調整した絞り込みパラメータサーベイ解析を行い、最も厳しい入熱領域を熱ひずみ評価の解析条件として選択した。1フレームスパン規模を基準とした絞り込みパラメータサーベイ解析の結果を図5.2-2に示す。図5.2-2に示すように、入熱領域が短半径 $a=850\text{mm}$ 、長半径 $b=1850\text{mm}$ の橜円の場合にひずみは最大となり、このときの正規化ひずみの最大値は約4.7となった。なお、ひずみ量の正規化に際しては、基本パラメータサーベイに合わせ、ひずみ量5%を1.0として正規化し、ひずみの大小を比較している。

(2)入熱領域の設定方法の再確認

今回、1フレームスパン規模モデルで評価することが最も厳しいことを再確認するため、まず、リブスパン規模についても詳細な解析モデルを用いた絞り込みパラメータサーベイ解析を行った。これは、図5.2-1に示した基本パラメータサーベイ解析の結果より、1フレームスパン規模に次いでリブスパン規模でも厳しい結果が得られているためである。解析の結果、図5.2-3に示すように、入熱領域が短半径 $a=575\text{mm}$ 、長半径 $b=1100\text{mm}$ の橜円の場合にひずみは最大となり、このときの正規化ひずみの最大値は約4.0となった。なお、図5.2-2と同様に、ひずみ量5%を1.0として正規化し、ひずみの大小を比較している。

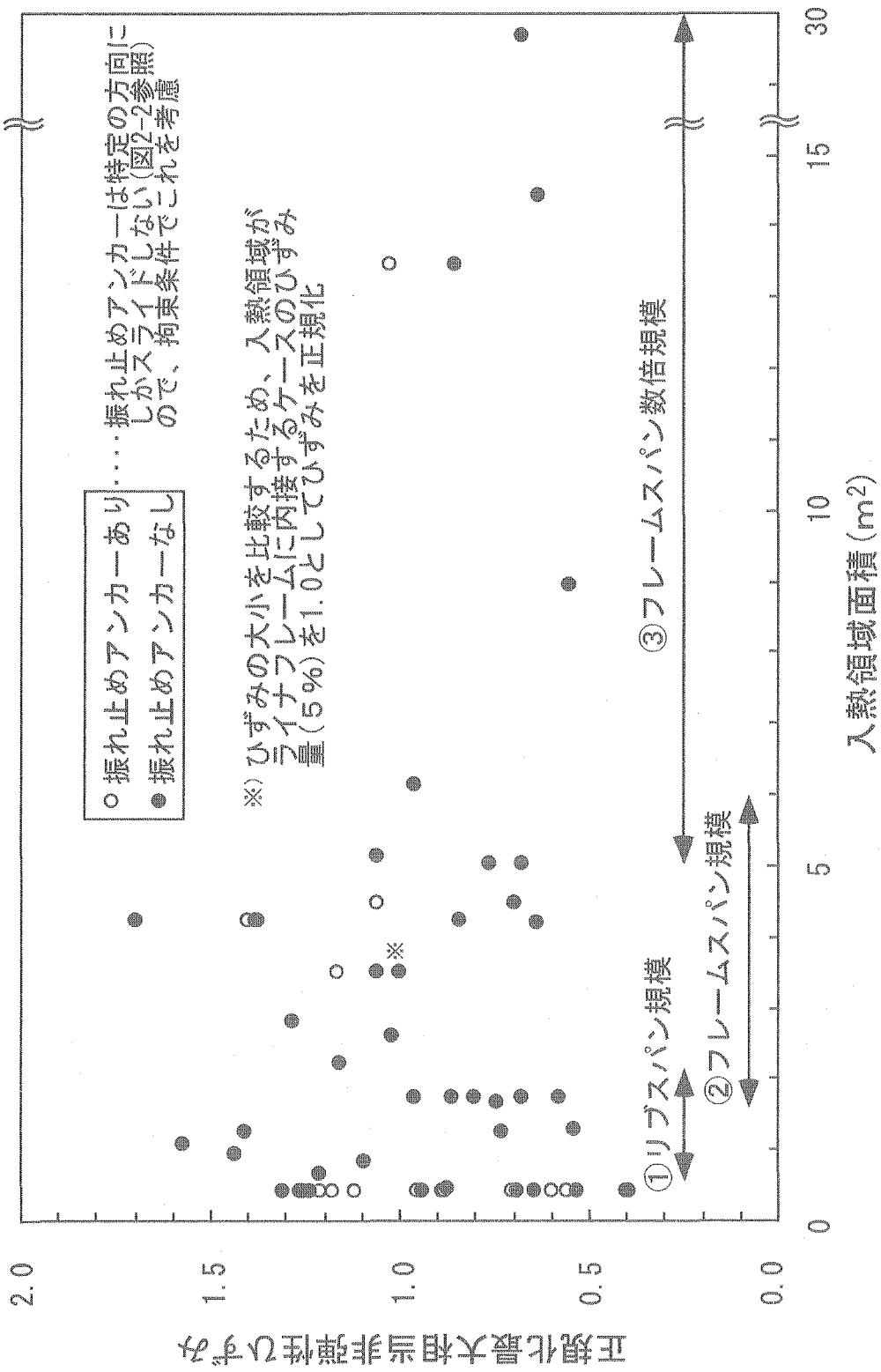
リブスパン規模における絞り込みパラメータサーベイ解析では、1フレームスパン規模と同様に長短半径の振り幅を50mmとした。その結果、1フレームスパン規模と同じ傾向が得られた。即ち、長半径のみ増減の場合、ひずみ値はあまり変化しないが、短半径のみ増減又は長短半径同時増減の場合は、半径がある値のときにひずみ値が最大となり、半径がそれより大きくなつてもひずみはあまり変化しない。

更に、基本パラメータサーベイで相対的にひずみが小さい結果が得られているフレームスパン数倍規模についても、詳細な解析モデルを用いて、代表的な形状で解析を行ったが、やはり1フレームスパン規模よりもひずみは小さかった。

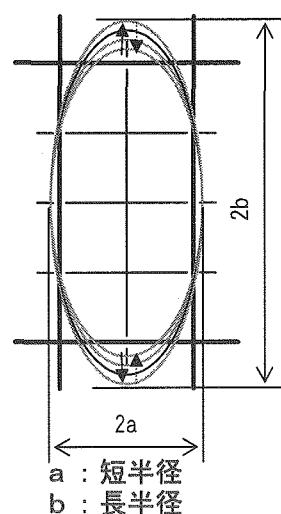
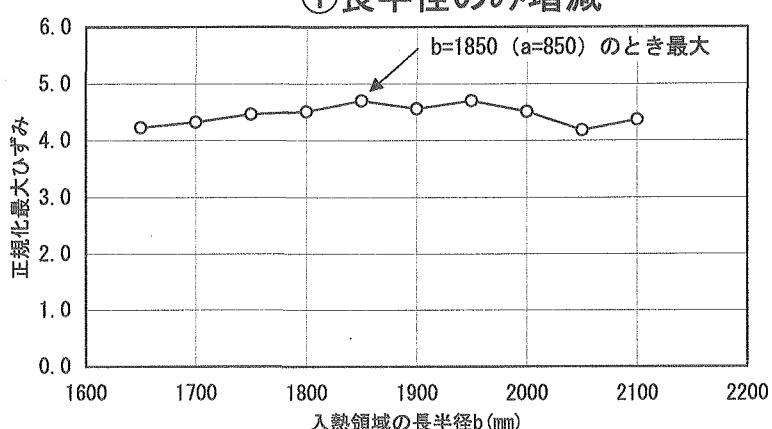
詳細な解析モデルを用いて行った解析結果をまとめて図5.2-4に示す。図5.2-4に示すように、1フレームスパン規模におけるひずみが最大であることから、1フレームスパン規模モデルで評価することが最も厳しいことが改めて確認できた。

以上の結果を受け、入熱領域は1フレームスパン規模（短半径 $a=850\text{mm}$ 、長半径 $b=1850\text{mm}$ の橜円）に設定した。

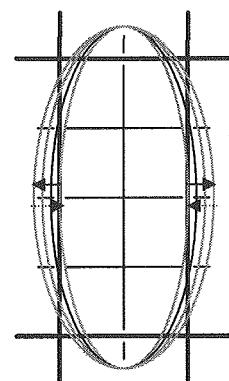
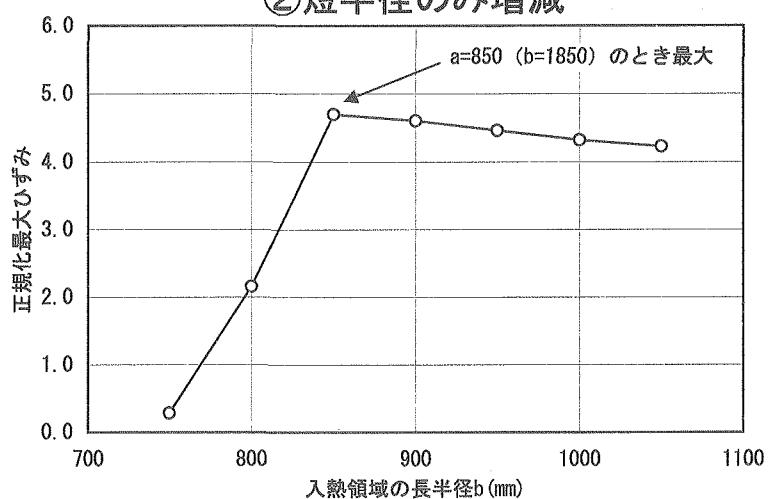
図5.2-1 基本パラメータサーベイ解析結果[1]



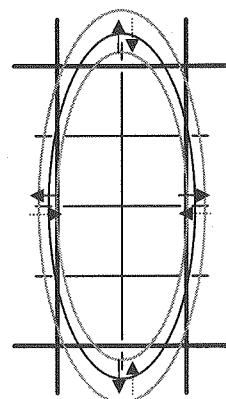
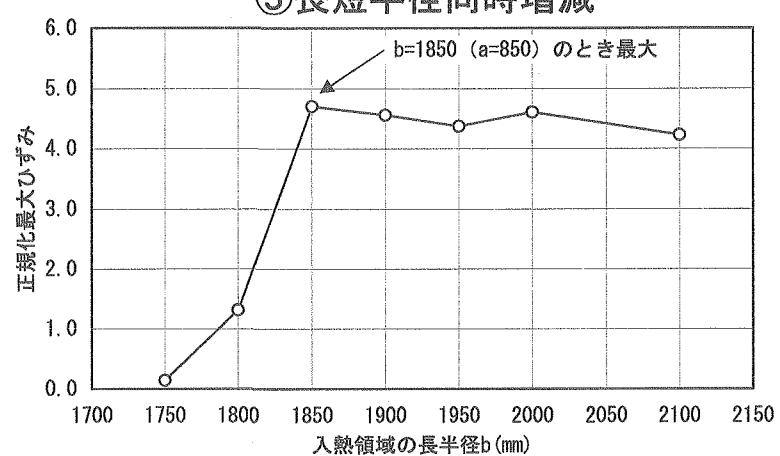
①長半径のみ増減



②短半径のみ増減



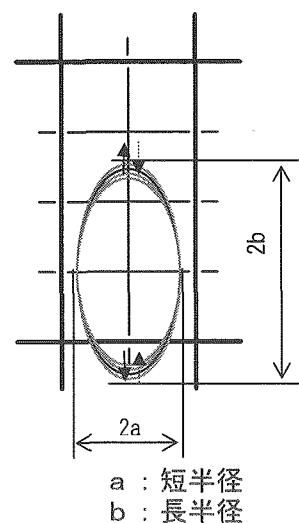
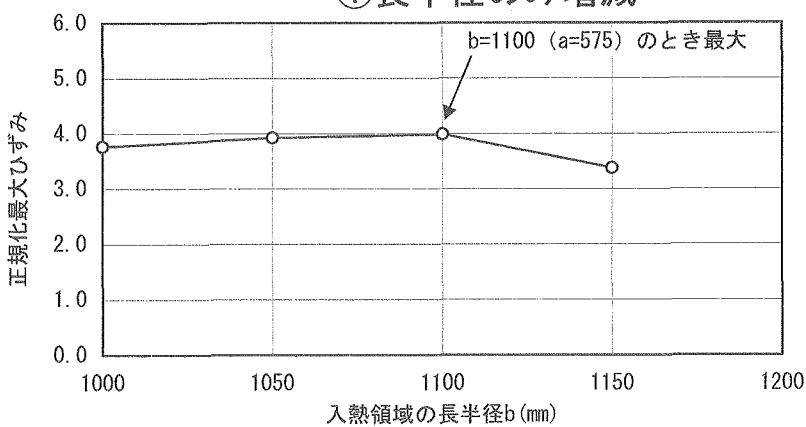
③長短半径同時増減



注) メッシュ分割が詳細な解析モデルを用いた。

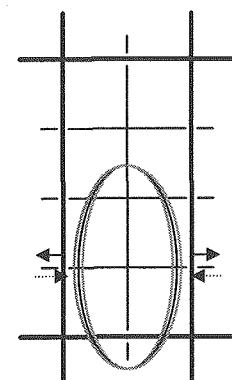
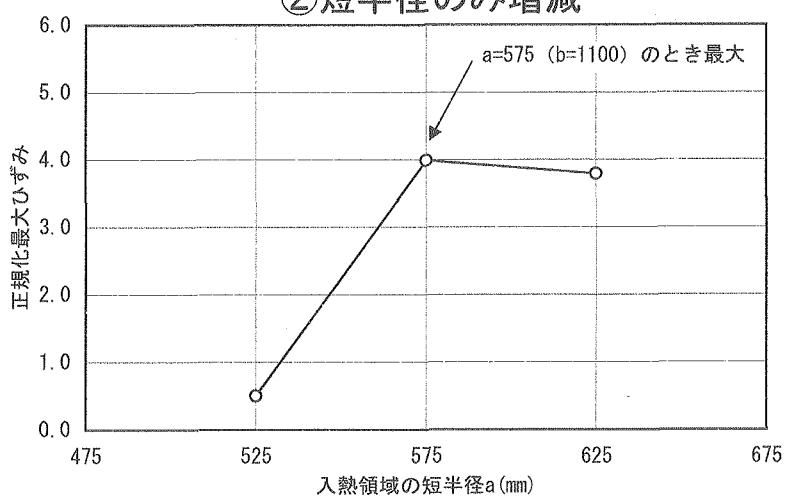
図5.2-2 絞り込みパラメータサーベイ解析結果（1フレームスパン規模）

①長半径のみ増減

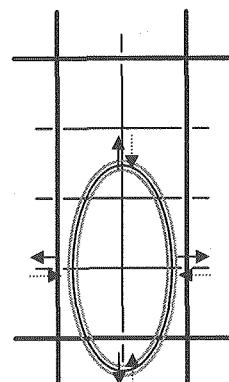
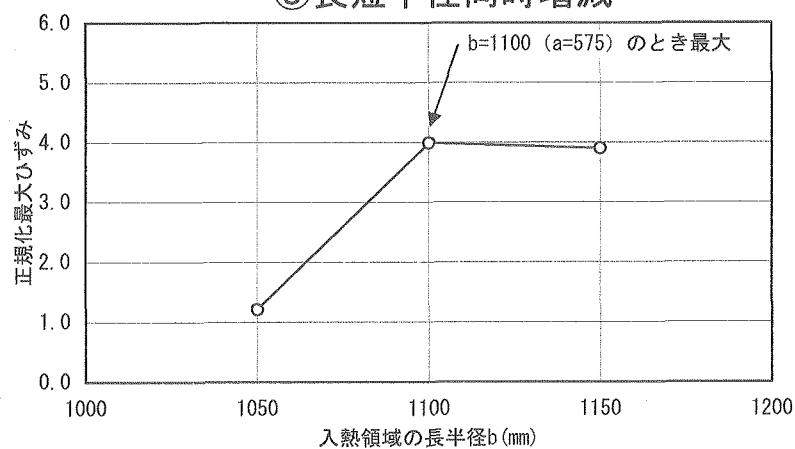


a : 短半径
 b : 長半径

②短半径のみ増減



③長短半径同時増減



注) メッシュ分割が詳細な解析モデルを用いた。

図5.2-3 絞り込みパラメータサーベイ解析結果(リブスパン規模)

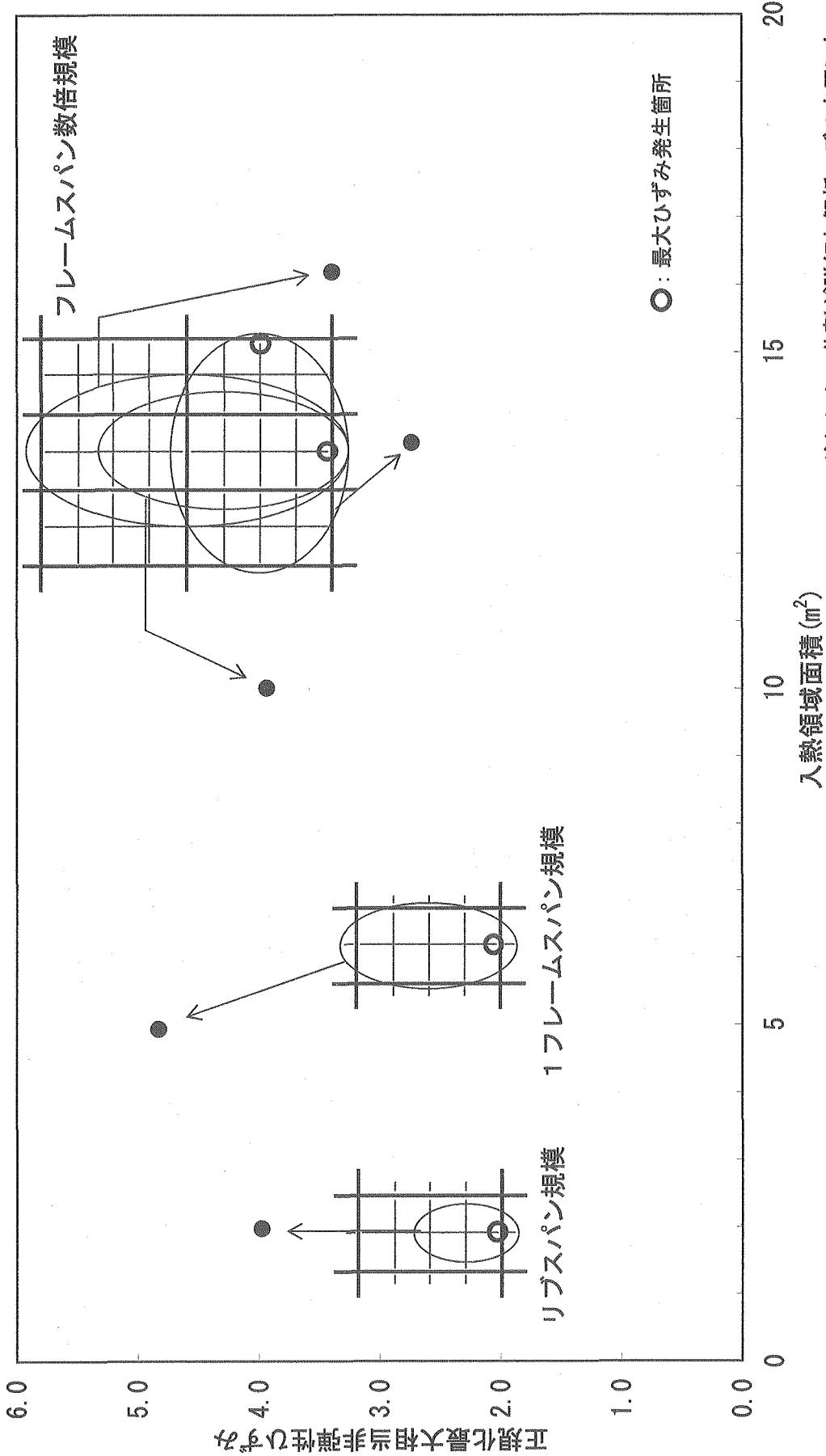


図5.2-4 入熱領域と最大ひずみとの関係

注)メッシュ分割が詳細な解析モデルを用いた。

5. 3 評価の条件

床ライナのひずみ評価では、漏えい開始後の床ライナの温度上昇率、ライナ板板厚及び腐食減肉の有無をパラメータとしたひずみへの影響の評価を行う。

それぞれの解析ケースの条件は表 5.3-1 のようになる。この内、ケース 1 の解析結果は 5.4 項に示す。また、ケース 2～ケース 6 の解析結果は 5.5 項に示す。

なお、腐食減肉ありのケースについては、表 5.3-1 に示した帶状減肉以外の減肉形状についても解析を行い、減肉形態の違いによる影響を確認している。これらの解析結果は付録 A に示す。

表 5.3-1 解析ケース一覧

ケース No.	温度条件 *1	ライナ板板厚	腐食減肉 *2	解析の目的
1	A × 1.0	6mm	なし	
2	A × 1.2	6mm	なし	温度上昇率の影響評価
3	A × 0.8	6mm	なし	温度上昇率の影響評価
4	A × 1.0	7.2mm	なし	ライナ板板厚の影響評価
5	A × 1.0	6mm	あり①	腐食減肉の影響評価
6	A × 1.0	6mm	あり②	腐食減肉の影響評価

*1) 温度条件

- ・ A × 1.0 : 参考文献[1]で用いたものと同じであり、ASSCOPS 燃焼解析結果による最高温度を包絡するように最高到達温度を 880°C と設定したもの
- ・ A × 1.2 : 漏えい開始後の初期の温度上昇率を A × 1.0 の約 120% としたもの
- ・ A × 0.8 : 漏えい開始後の初期の温度上昇率を A × 1.0 の約 80% としたもの

*2) 腐食減肉

- ・ あり① : 内側リブ端部に帯状減肉を重ね合わせたモデル
- ・ あり② : 外側リブ端部に帯状減肉を重ね合わせたモデル

5. 4 解析の結果

(1)床ライナの挙動

床ライナの変形挙動については図 2-3 に示したとおりであるが、このような変形挙動の場合の応力とひずみの一般的傾向は以下のとおりである。図 5.4-1 に、内側リブ端部の y 方向応力、 y 方向ひずみの履歴例を示す (y 方向：座標は図 2-3 の左上図参照、最も卓越する成分)。これらの図から、漏えい開始から終了までのライナ板の応力とひずみは以下のような履歴をたどる。

①内側リブ端部上面（外側リブ端部下面も同様の挙動）

- (i)昇温過程において引張応力が発生する。この応力は約 200 秒で最大値をとったあと、材料のクリープに関連する応力緩和によって、比較的速やかに低下し、1000 秒以降でほぼゼロとなる。この応力によって引張ひずみが発生し、昇温過程において最大値をとる。
- (ii)高温保持期間中は、応力はほぼゼロで推移する。この期間のひずみは基本的に残留ひずみである。
- (iii)漏えい終了後の降温過程において、圧縮応力が発生する。この応力によって引張の残留ひずみが減少する。

②内側リブ端部下面（外側リブ端部上面も同様の挙動）

内側リブ端部下面及び外側リブ端部上面の挙動については、上記①に記載した応力とひずみの符号（引張と圧縮）を入れ替えればそのまま該当する。

- (i)昇温過程において圧縮応力が発生する。この応力は約 200 秒で最大値をとったあと、材料のクリープに関連する応力緩和によって、比較的速やかに低下し、1000 秒以降でほぼゼロとなる。この応力によって圧縮ひずみが発生し、昇温過程において最大値をとる。
- (ii)高温保持期間中は、応力はほぼゼロで推移する。この期間のひずみは基本的に残留ひずみである。
- (iii)漏えい終了後の降温過程において、引張応力が発生する。この応力によって圧縮の残留ひずみが減少する。

(2) 解析結果（ケース 1）

上記(1)に示した床ライナの挙動及び 4 項に示したひずみの目安値の適用方法に基づくと、引張応力場で引張ひずみが発生している範囲、即ち、内側リブ端部上面及び外側リブ端部下面の昇温過程がひずみの目安値と比較する範囲である。この範囲におけるケース 1 の解析結果を以下に示す。ケース 1 の解析条件は前述の表 5.3-1 に示した。

① 热伝導解析結果

床ライナの温度条件を図 5.4-2 に示す。この温度条件は参考文献[1]で用いたものと同じであり、温度履歴中の最高温度を 880°C と設定している。

热伝導解析では、図 5.1-1 に示した入熱領域に熱量を入力する条件としており、この結果得られるライナ板の最高到達温度が 880°C となるように熱量を決めている。よって、例えば昇温過程におけるライナ板の温度分布は図 5.4-3 のようになる。図 5.4-3 に示すように、昇温過程におけるひずみ集中箇所（内側リブ端部）の温度はライナ板一般部に比べて低くなる。これは、ひずみ防止リブの熱容量の影響で、ひずみ集中箇所（内側リブ端部）は一般部に比べて温度上昇が遅れるためである。なお、温度分布は減肉なしモデル及び減肉ありモデルで同様である。

② 大変形弾塑性クリープ解析結果

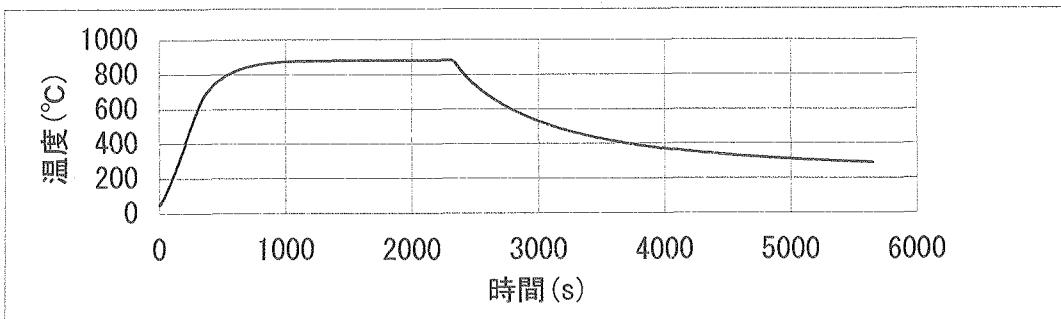
ひずみ集中箇所の温度、ひずみ及び応力履歴を図 5.4-4 及び図 5.4-5 に示す。図 5.4-4 は内側リブ端部上面、図 5.4-5 は外側リブ端部下面について示したものである。昇温初期の履歴には若干差はあるが、最大ひずみは両者とも約 24% である。以下、内側リブ端部上面について、温度、ひずみ及び応力履歴の傾向を述べる。

図 5.4-4a に示すように、漏えい開始直後から床ライナの温度は上昇し、漏えい継続期間中は高温で保持される。

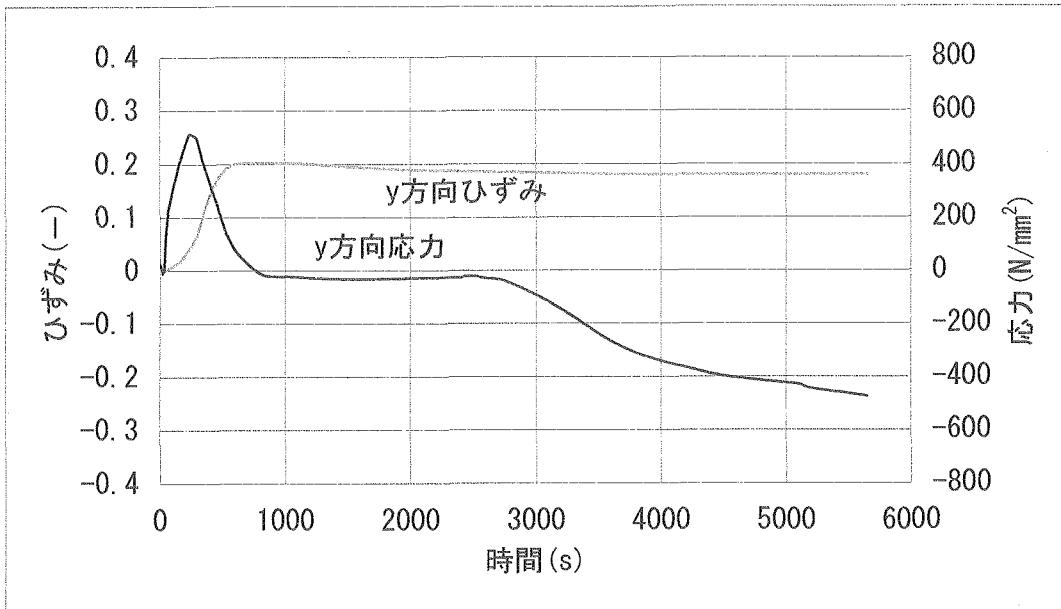
図 5.4-4b に、内側リブ端部の y 方向（最も卓越する方向）の応力とひずみの履歴を示す。4 項に示した目安値の適用方法に基づき、この図において引張応力場で引張ひずみが発生している範囲をひずみの目安値と比較する範囲とした。

図 5.4-4c に、内側リブ端部上面の相当非弾性ひずみ履歴を示す。ひずみ量は、ナトリウム漏えい発生後約 700 秒時点で最大となる。最大ひずみは 24% であり、ひずみの目安値 30% ($350^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C}$) に比べて小さい。また、 350°C 以下における最大ひずみは 6 % であり、ひずみの目安値 15% ($T \leq 350^{\circ}\text{C}$) を満足する。なお、ひずみの評価は、評価箇所（内側リブ端部）の温度履歴に基づいてひずみの目安値を適用した。

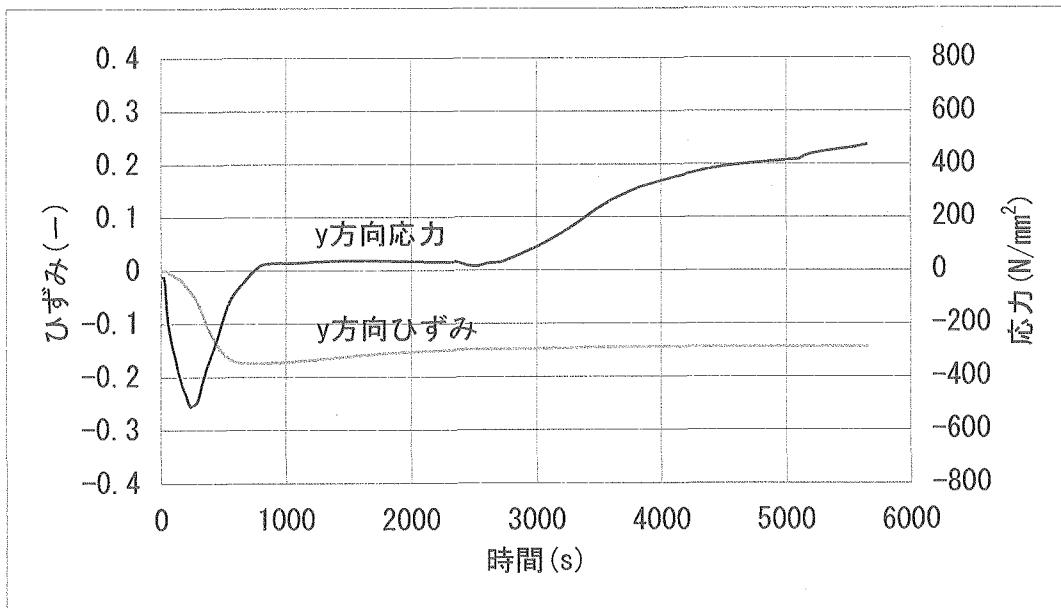
また、リブ端部以外の部位には大きな引張ひずみは発生せず、最大でも 1 % であり問題ない。



a. ライナ板一般部の温度履歴



b. 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴



c. 内側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴

図5.4-1 内側リブ端部のy方向応力、y方向ひずみの履歴

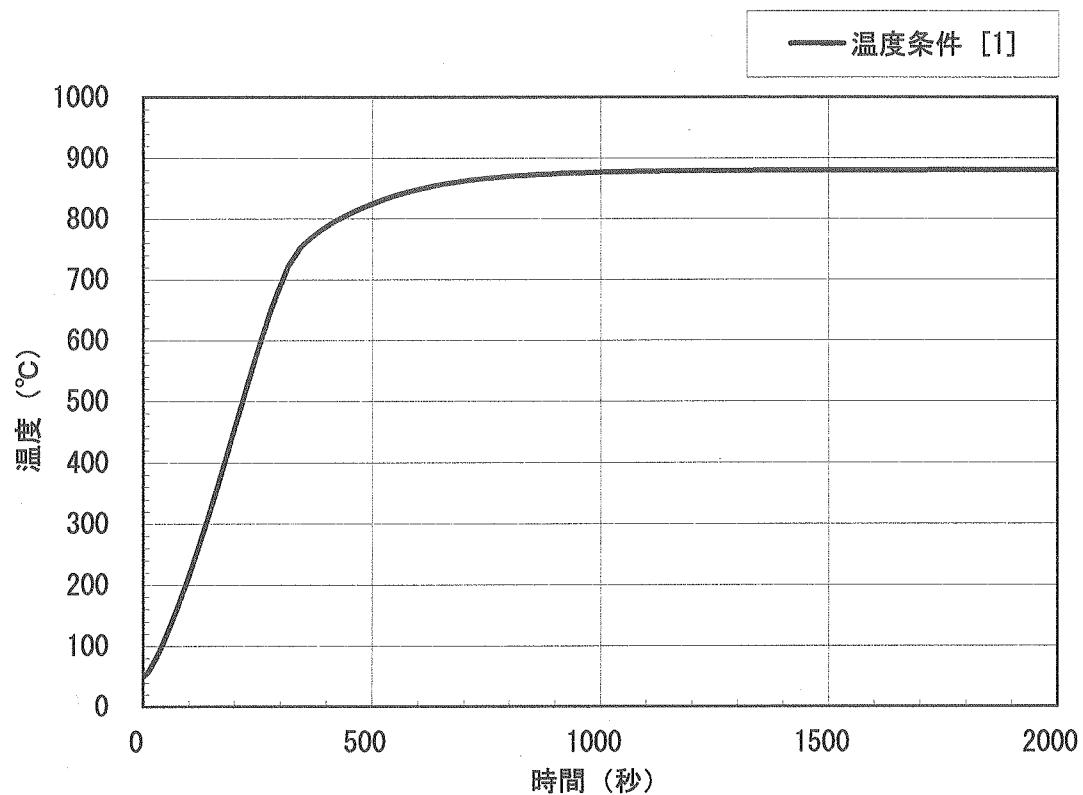


図5.4-2 床ライナの温度条件

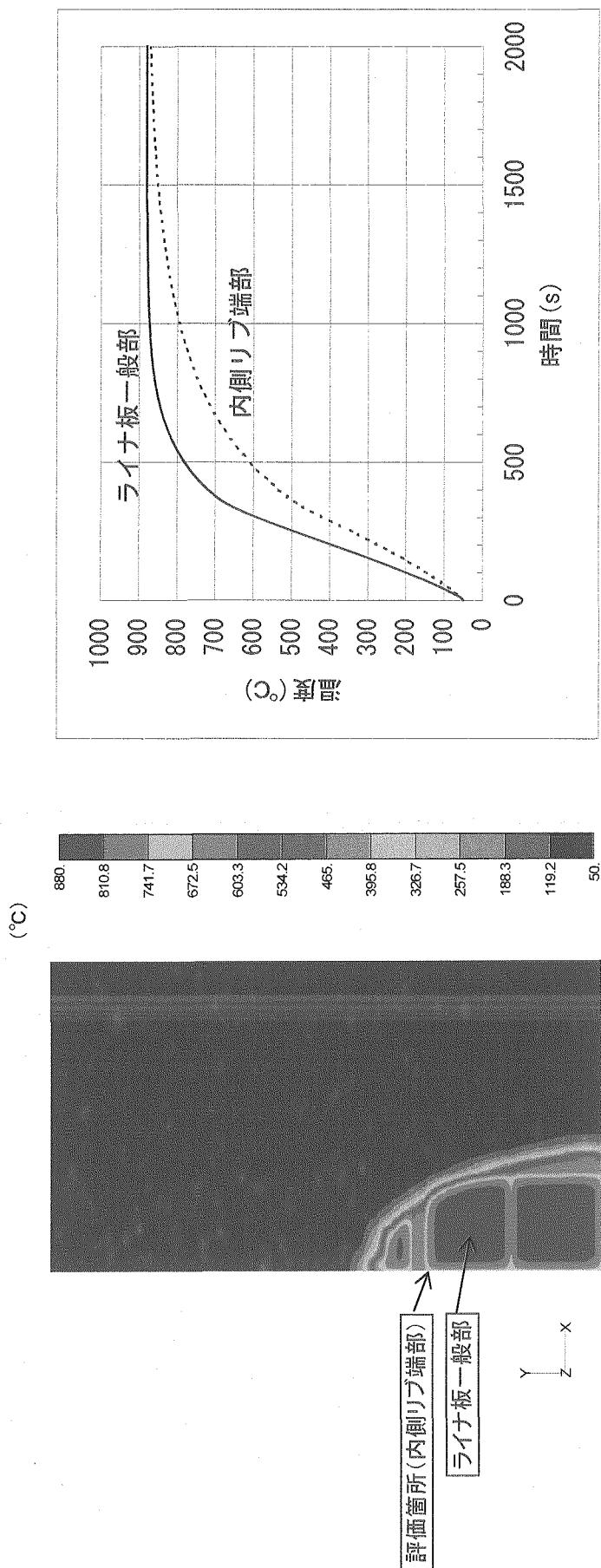
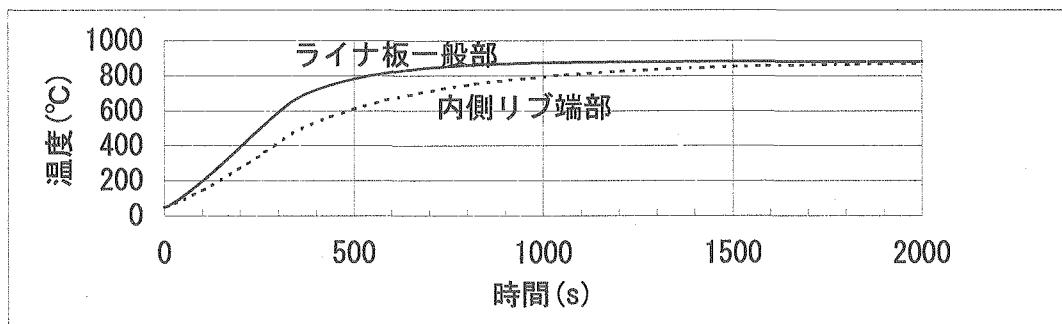
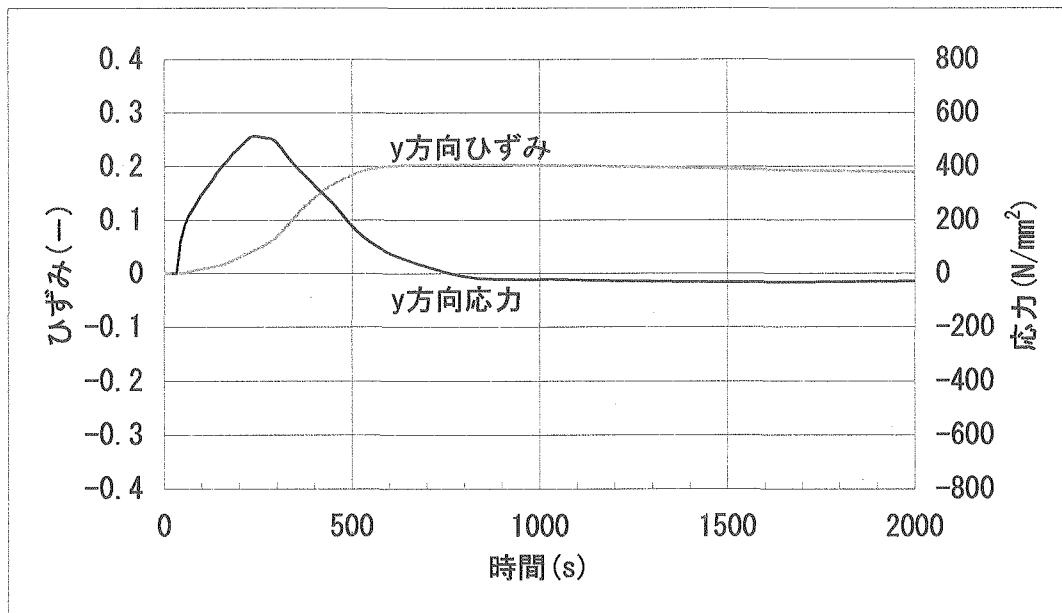


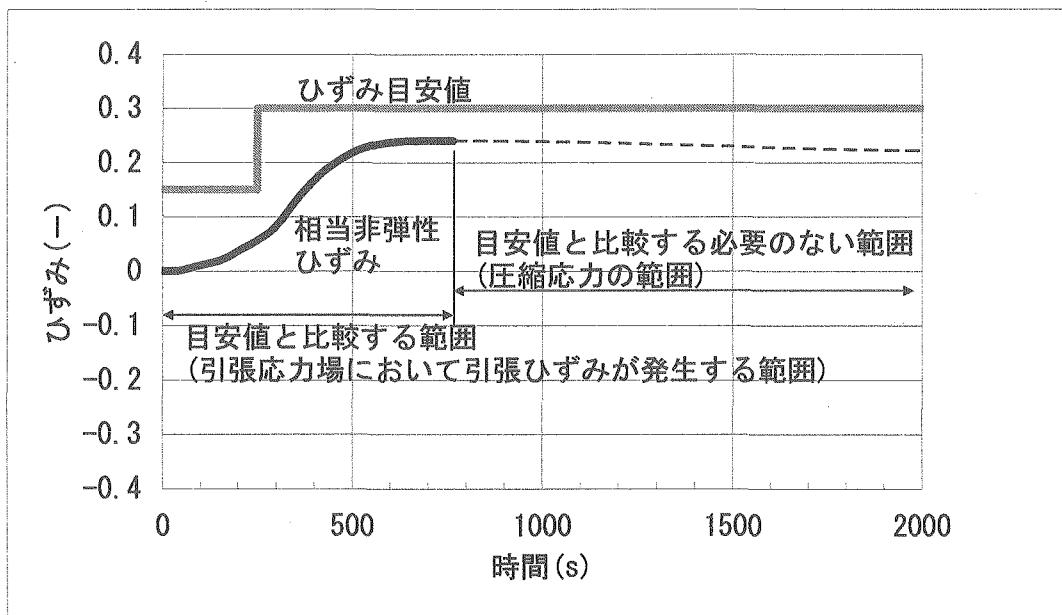
図5.4-3 昇温初期のライナ板の温度分布



a. 温度履歴

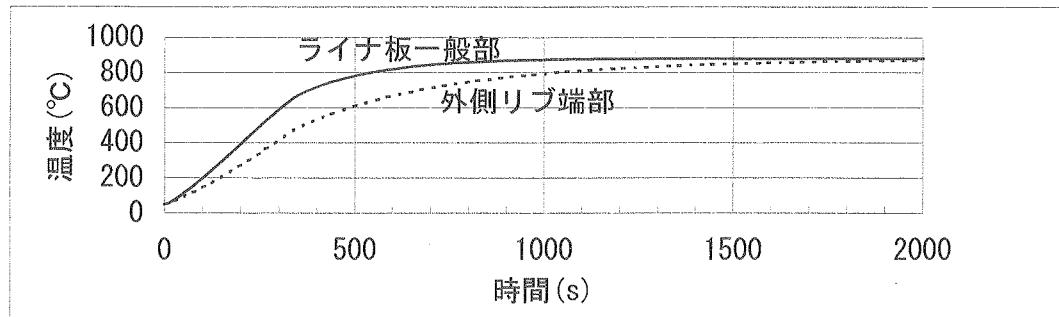


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

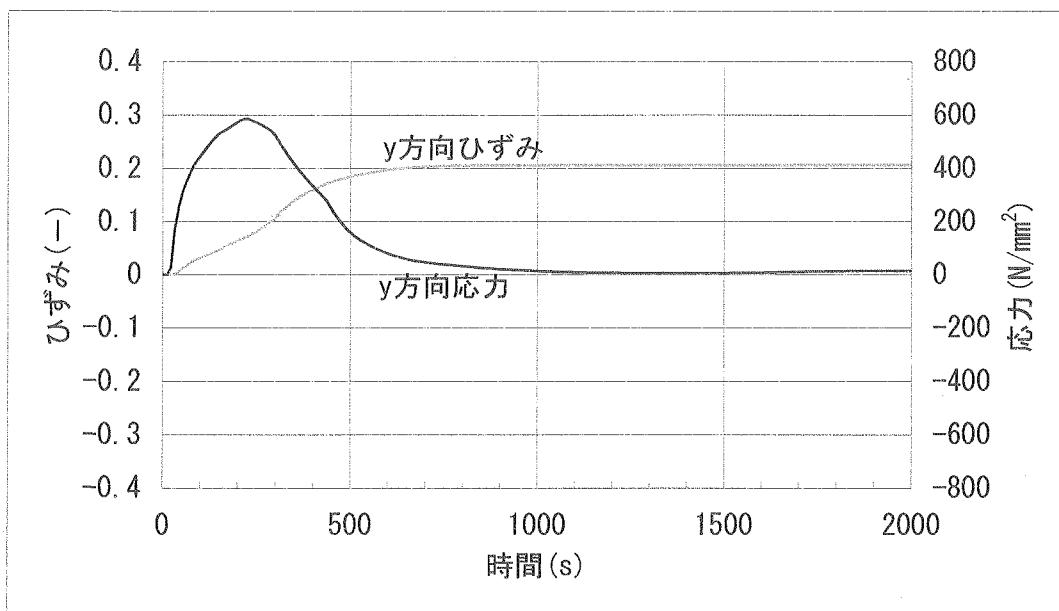


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

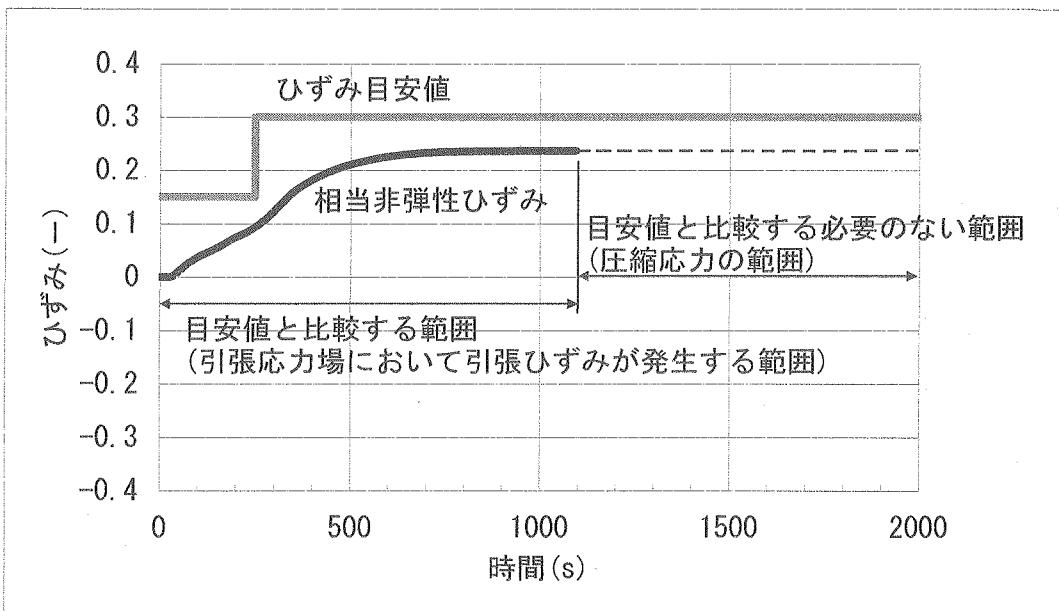
図5.4-4 内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース1)



a. 温度履歴



b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴



c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

図5.4-5 外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース1)

5. 5 パラメータ評価

(1) 温度上昇率の影響評価

参考文献[1]の温度条件は、ASSCOPSによる燃焼解析^[3]での最高温度を上回るよう、温度履歴中の最高温度を880°Cと設定している。一方、燃焼解析では漏えい率等によって温度上昇率に幅があるので、最高温度を880°Cのままでし、温度上昇率を変えた場合の影響評価を行う。

① 解析条件

温度上昇率を変えた以下の3ケースについて解析評価を行った。それぞれの温度履歴を図5.5-1に示す。

- ・参考文献[1]の約120%の温度上昇率
- ・参考文献[1]と同じ温度上昇率
- ・参考文献[1]の約80%の温度上昇率

図5.5-1には、燃焼解析で初期の温度上昇率が最も厳しいケースの温度履歴も併せて記載している。参考文献[1]の約120%の温度上昇率は、燃焼解析の最も厳しい温度上昇率を上回るものであることが分かる。

なお、入熱領域は1フレームスパン規模(短半径a=850mm、長半径b=1850mmの橜円)とし、減肉なしモデルを用いて解析を行った。また、ライナ板板厚は6mmとした。

② 解析結果の比較

ひずみ履歴(相当非弾性ひずみ)を図5.5-2に示す。いずれの場合も最大ひずみは、ほぼ同じ24%である。

温度上昇率が熱ひずみ評価に与える影響としては、ライナ板に発生する温度分布の効果とクリープ変形の効果が考えられる。温度上昇率が大きいと、ライナ板の温度勾配が大きいことから発生するひずみも大きくなり、逆に、温度上昇率が小さいと温度勾配は緩和され、ひずみは減少する。一方、クリープの影響については、温度上昇率が大きいと応力及びひずみの立ち上がり速度も大きく、クリープの影響が出にくくひずみは減少する方向に作用し、逆に温度上昇率が小さいとクリープの影響によってひずみは増大する方向に作用する。両者のひずみに対する影響は互いに相殺する方向であるが、感度が異なるので解析による評価が必要である。解析の結果、20%程度の温度上昇率の変化では最大ひずみに有意な差は現れなかった。

そこで、以下のライナ板板厚の影響評価及び腐食減肉の影響評価においては、参考文献[1]の成果を有効に利用する観点から、参考文献[1]と同じ温度条件を用いて解析を行った。

(2) ライナ板板厚の影響評価

ライナ板は、公称板厚が 6mm で、マイナス側の公差 0mm、プラス側の公差 1.2mm で製作されている。このため、板厚の違いによる影響を確認することを目的として最大板厚 7.2mm での熱ひずみ評価を行った。

① 解析条件

ライナ板板厚を 7.2mm として解析を行った。温度条件は参考文献[1]と同じとし、入熱領域は 1 フレームスパン規模（短半径 $a=850\text{mm}$ 、長半径 $b=1850\text{mm}$ の橜円）、減肉なしモデルを用いて解析を行った。

② 解析結果

内側リブ端部上面の相当非弾性ひずみの履歴をライナ板板厚 6mm の場合と重ねて図 5.5-3 に示す。ライナ板板厚 7.2mm の場合にひずみ量が最大となるのは、ライナ板板厚 6mm の場合と同様ナトリウム漏えい発生後約 700 秒時点である。

解析結果の結果、最大ひずみは 20% となり、板厚 6mm の場合の 24% に比べて小さくなる。床ライナでは、ライナフレーム及びひずみ防止リブがライナ板の曲げ変形を拘束するため、ライナ板とライナフレーム及びひずみ防止リブとの構造不連続部に熱ひずみが集中するが、ライナ板板厚が厚くなると曲げ剛性が大きくなり、相対的にライナフレーム及びひずみ防止リブの曲げの拘束力が低くなる。このため、ライナ板板厚が厚くなるとひずみは小さくなる。この傾向は外側リブ端部下面においても同じである。

(3) 腐食減肉の影響評価

ナトリウムの漏えいによりライナ板に腐食減肉が生じる可能性があるため、その影響を評価した。

① 解析条件

腐食減肉量の推移を図 5.5-4 に示す。これは、温度の関数である腐食減肉速度式の上限値を用いて、床ライナの温度履歴に沿って腐食減肉量を積分して計算したものである。なお、最も厳しい腐食減肉量を与える溶融塩型腐食を想定した場合、最終腐食減肉量は 2.6mm となる^[3]。

図 5.4-4 及び図 5.4-5 に示したように、最大ひずみが昇温初期に生じているこ

とから、腐食減肉の影響評価は昇温時に着目して行う。すなわち、昇温初期においては、腐食減肉が生じる位置とひずみの集中する位置との相対関係はランダムであると考えられるので、最も保守側に、ひずみの集中するリブ端部に腐食減肉が生じ、腐食減肉位置は移動しないものとして評価を行う。具体的には、腐食減肉の形状は帯状減肉とし、腐食減肉位置は内側リブ端部または外側リブ端部に重ねるものとした。減肉ありモデルは図 5.1-1 に示した。

一方、床ライナの熱変形と溶融塩型腐食の発生する可能性がある位置との相対的関係を検討した結果、降温過程の腐食減肉の影響評価は、以下の理由から評価対象外とした。

床ライナの熱変形を考えた場合、入熱領域は上に凸に変形する。このような変形を想定すれば、溶融塩型腐食減肉の原因となる溶融塩プールは流動性を有しているので、床ライナ昇温後、その場に留まると考えるよりも、周辺の低位部に移動すると考えるのが自然である。ひずみ防止リブ端部にひずみが集中するような変形を想定すると、この部位は溶融塩プールの液面より上に位置することから、ひずみ集中部が継続して溶融塩型腐食による減肉を受けることは極めて考えにくい（付録B参照）。

なお、温度条件は参考文献[1]と同じとし、入熱領域は 1 フレームスパン規模（短半径 $a=850\text{mm}$ 、長半径 $b=1850\text{mm}$ の橢円）、ライナ板板厚は 6mm として解析を行った。

② 解析結果

減肉なしモデル及び減肉ありモデル（内側リブ端部減肉モデル）の相当非弾性ひずみ履歴を図 5.5-5 に示す。図 5.5-5 の評価位置は内側リブ端部上面である。ひずみ量が最大となるのは、いずれの場合もナトリウム漏えい発生後約 700 秒時点である。なお、減肉ありモデルでは、漏えい初期に最大ひずみが発生した後、ひずみは減少していく。これは、ライナ板上面から順次腐食減肉が進行し、ひずみが最大となるライナ板表面が順次消失することから、減肉底のひずみとしては小さくなっていくためである。

減肉なしモデルの最大ひずみ 24%に対し、内側リブ端部減肉モデルの最大ひずみ値は 23%であり、ほぼ同じ値である。これは、最大ひずみ発生時点（漏えい開始後約 700 秒）における腐食減肉量が微小であり、この程度の形状の差異はひずみに影響しないためと考えられる。

一方、外側リブ端部減肉モデルについては、最大ひずみは 24%となつた（後述の表 5.6-2 参照）。

図 5.5-5 より、結果として腐食減肉がひずみに与える影響はほとんどない。

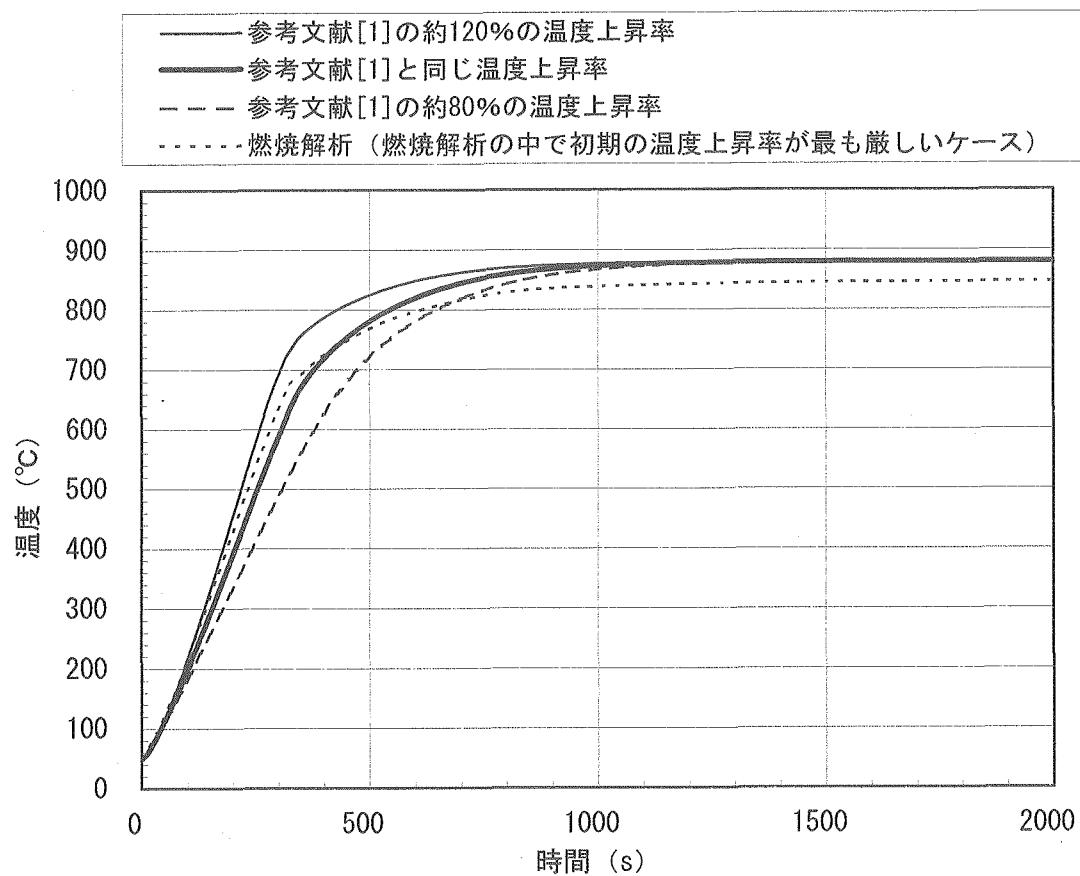


図5.5-1 影響評価用の温度条件

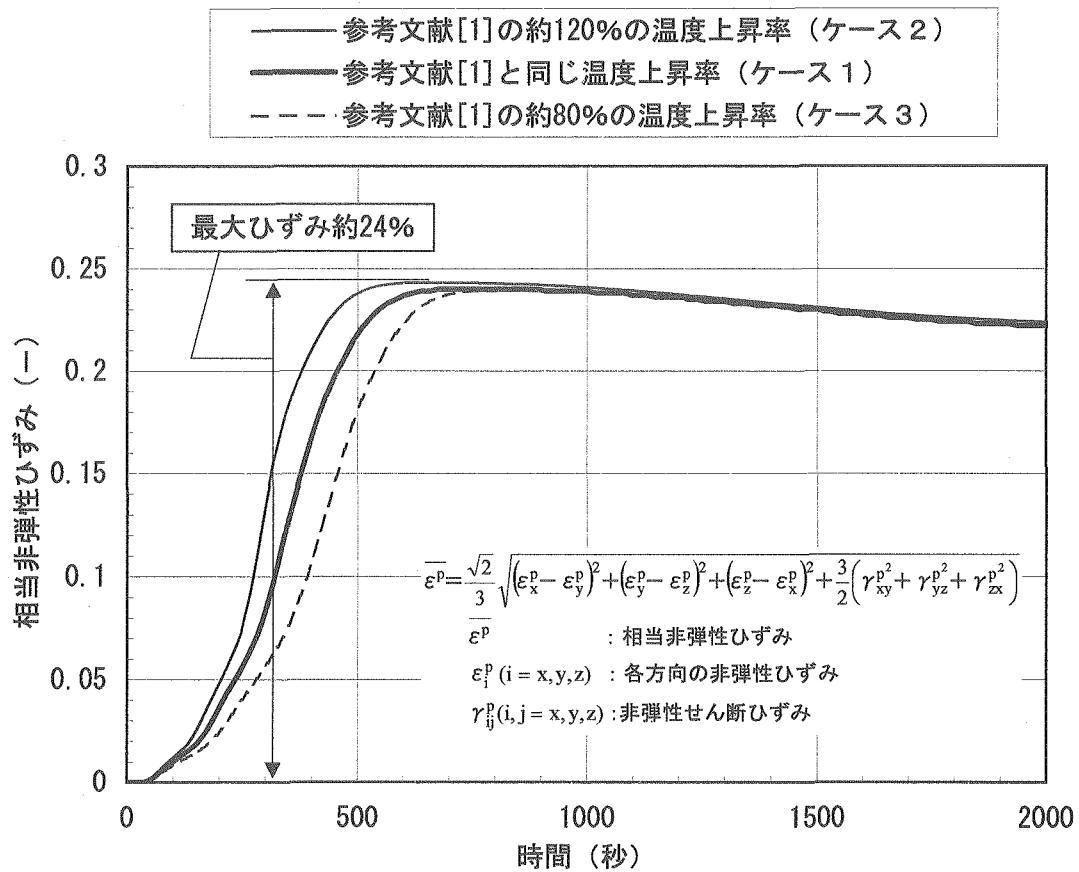


図5.5-2 温度上昇率が熱ひずみに与える影響

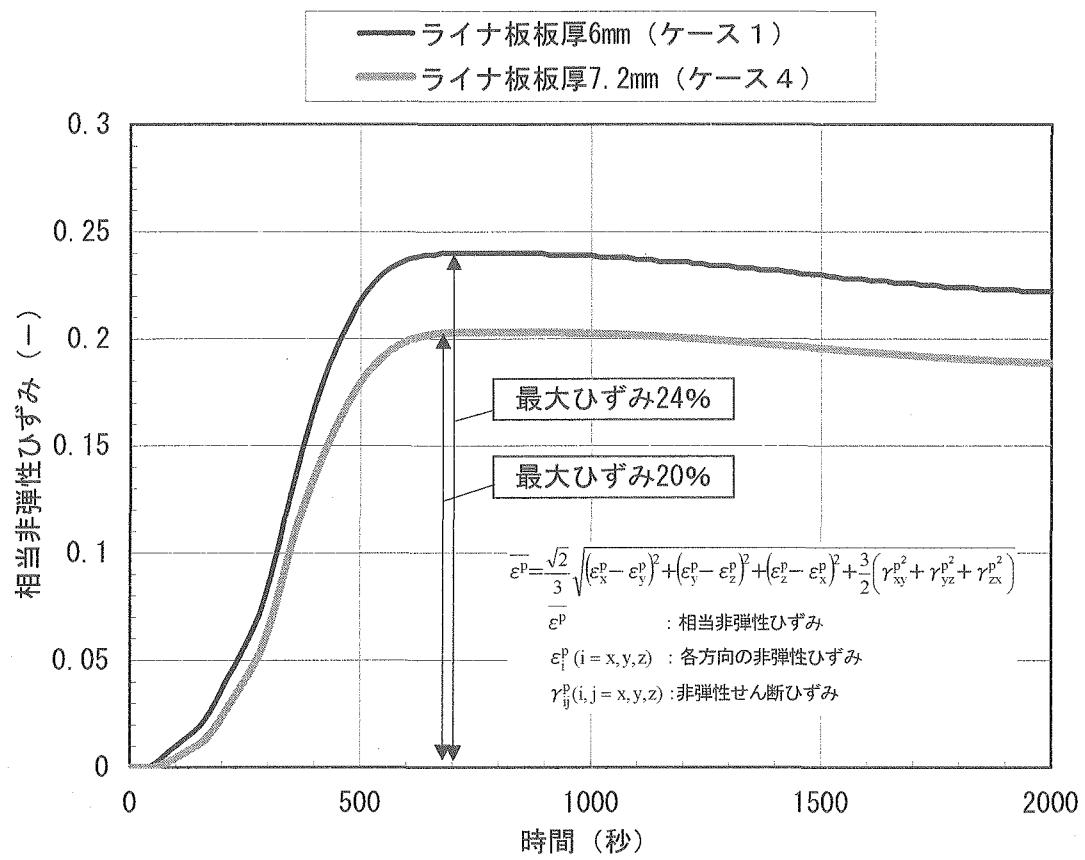


図5.5-3 ライナ板板厚が熱ひずみに与える影響

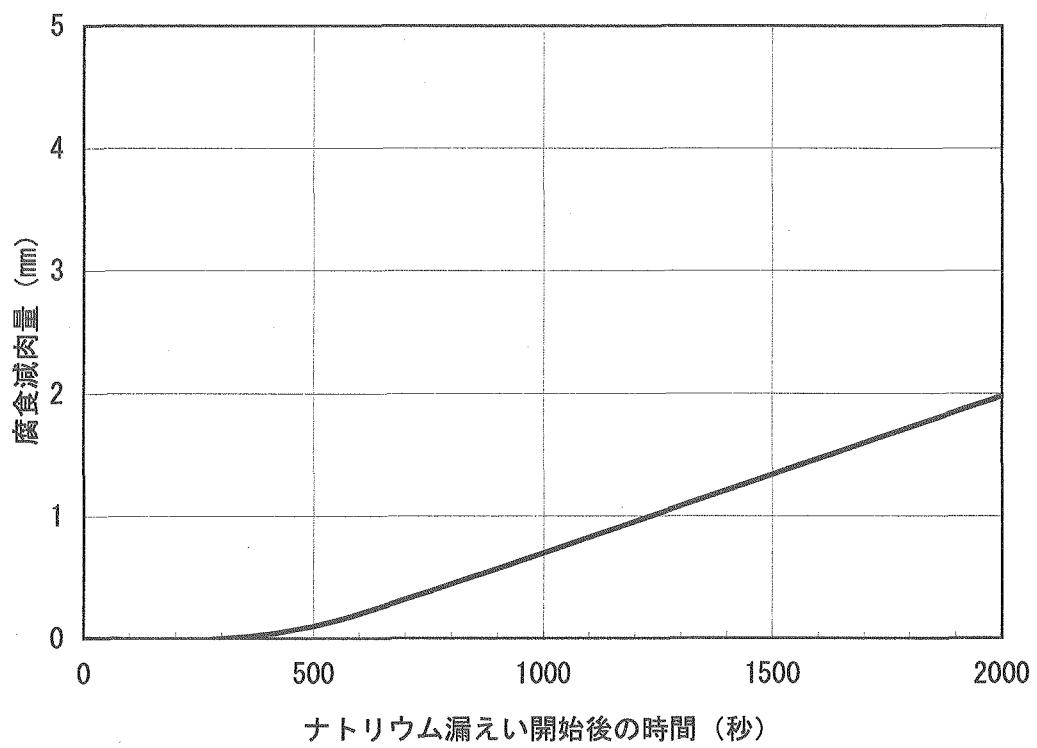
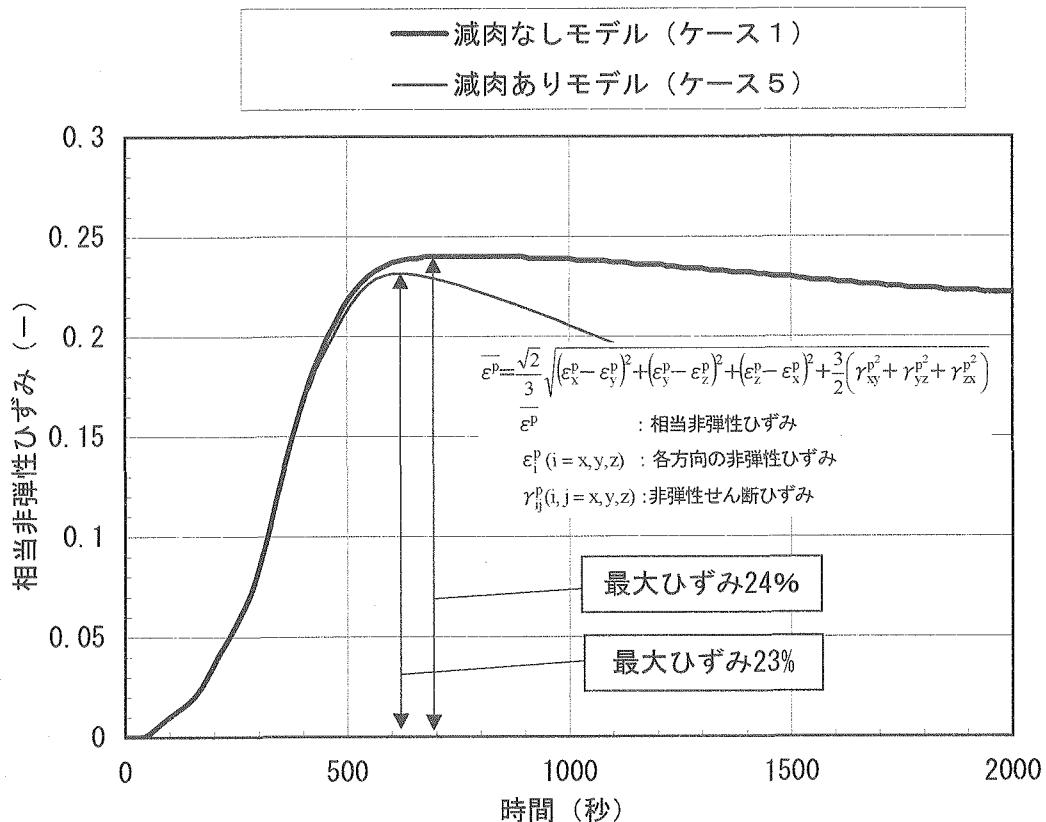


図5.5-4 腐食減肉条件



*) 評価位置は内側リブ端部上面

図5.5-5 腐食減肉が熱ひずみに与える影響（内側リブ端部減肉）

5. 6 解析による評価のまとめ

床ライナは面外剛性の低いライナ板と、ライナ板に比べて剛性の高いひずみ防止リブ及びライナフレームとの複合構造なので、ライナ板の曲げ変形を拘束する構造不連続部に熱ひずみが集中し、最大ひずみはひずみ防止リブ端部の上下面に発生する。このとき、ひずみの目安値と比較すべき引張応力場の引張ひずみは、昇温過程において内側リブ端部上面および外側リブ端部下面に発生する。それ以外は、降温過程も含めて圧縮ひずみまたは圧縮応力場である。なお、ひずみが集中するリブ端部が継続して溶融塩型腐食を受けることはないので、降温過程の腐食減肉の影響は評価対象外としている。以上の結果を整理し、熱ひずみ評価において評価すべき対象部位を表 5.6-1 に示す。

解析から得られた熱ひずみの値を整理し、結果を表 5.6-2 に示す。最大のひずみは 350°C 以下で 10%、350°C を超える範囲で 24% であり、それぞれ目安値の 15% ($T \leq 350^{\circ}\text{C}$)、30% ($350^{\circ}\text{C} < T$) に比べて小さく、床ライナに貫通性の損傷が生じないことを確認した。

パラメータ評価では、温度上昇率、ライナ板板厚及び腐食減肉の有無による影響評価を行ったが、いずれのパラメータも最大ひずみに与える影響は小さかった。

表 5.6-1 热ひずみ評価の対象部位一覧

ひずみの評価位置	評価時の床ライナ温度	ひずみの目安値 (判断基準)	減肉なし		減肉あり	
			昇温時	降温時	昇温時	降温時
内側リブ端部 上面	低温時 ($T \leq 350^{\circ}\text{C}$)	15%	◎	B	◎	C
	高温時 ($350^{\circ}\text{C} < T$)	30%	◎	B	◎	C
内側リブ端部 下面	低温時 ($T \leq 350^{\circ}\text{C}$)	15%	A	A	A	C
	高温時 ($350^{\circ}\text{C} < T$)	30%	A	A	A	C
外側リブ端部 上面	低温時 ($T \leq 350^{\circ}\text{C}$)	15%	A	A	A	C
	高温時 ($350^{\circ}\text{C} < T$)	30%	A	A	A	C
外側リブ端部 下面	低温時 ($T \leq 350^{\circ}\text{C}$)	15%	◎	B	◎	C
	高温時 ($350^{\circ}\text{C} < T$)	30%	◎	B	◎	C

評価結果の凡例

- ◎ : 昇温時における引張応力場の引張ひずみであり、ひずみ目安値との比較対象。
- A : 圧縮ひずみであり、ひずみ目安値との比較対象外。
- B : 圧縮応力であり、ひずみ目安値との比較対象外。
- C : 降温過程（昇温後）では減肉を重ね合わせる必要がないため、評価対象外。

表 5.6-2 相当非弾性ひずみ評価表

		温度上昇率の影響評価			ライナ板板厚の影響評価		腐食減肉の影響評価	
ひずみの評価位置	評価時の床ライナ温度	ひずみの目安値	参考文献[1]と同じ温度上昇率 (減肉なし、板厚 6mm、 ケース 1)	参考文献[1]の約 120%の温度上昇率 (減肉なし、 板厚 6mm、 ケース 2)	参考文献[1]の約 80%の温度上昇率 (減肉なし、 板厚 6mm、 ケース 3)	板厚 7.2mm の場合 (減肉なし、 ケース 4)	板厚 6mm の場合 (外側リブ端部 減肉モデル (ケース 5))	板厚 6mm の場合 (外側リブ端部 減肉モデル (ケース 6))
内側リブ端部 上面	低温時 (T ≤ 350°C)	15%	6%	6%	6%	4%	6%	6%
	高温時 (350°C < T)	30%	24%	24%	24%	20%	23%	24%
外側リブ端部 下面	低温時 (T ≤ 350°C)	15%	10%	10%	10%	7%	9%	9%
	高温時 (350°C < T)	30%	24%	24%	24%	15%	23%	24%

6. 部分構造模擬試験

前述の「5. 解析による評価」においては、ナトリウム漏えいに対する床ライナの機械的健全性を解析結果と材料試験から設定したひずみの目安値と比較することによって示した。

参考文献[1]では、解析による評価が妥当であることを部分構造模擬試験において実験的にも確認している。具体的には、床ライナの大変形弾塑性クリープ解析で得られた最大ひずみ（24%）、さらにライナ板の健全性評価用に定めたひずみの目安値（350°Cを超える高温側で30%）を上回るひずみを与えた場合においても、試験体ライナ板には貫通性の損傷が発生しないことを確認している。試験の概要を以下に示す。

試験は、ライナ板上で最も大きなひずみ集中が生じるひずみ防止リブ端部を模擬した試験体を用いた。試験温度はナトリウム漏えい時の床ライナ温度の最高温度として880°C一定の条件とした。なお、ライナ板板厚は6mmとした。

また、試験体に与えるひずみについては、別途行った大変形弾塑性クリープ解析結果から押込み量と発生ひずみの関係を求め、これを基に目標となるひずみが発生する押込み量を試験体に与えた。なお、このときの解析ではソリッド要素を用いたが、それ以外の基本的な条件は5項に示した解析と同じである。

試験結果を図6-1に示す。部分構造模擬試験では以下の事実を確認し、実験的にも床ライナの熱ひずみに対する健全性を確認した。

- ①ライナ板においてひずみ45%以内では表面割れを含むどのような損傷も発生しなかった。
- ②ひずみが約80%という極めて過酷な条件下においても貫通性の損傷は発生しなかった。

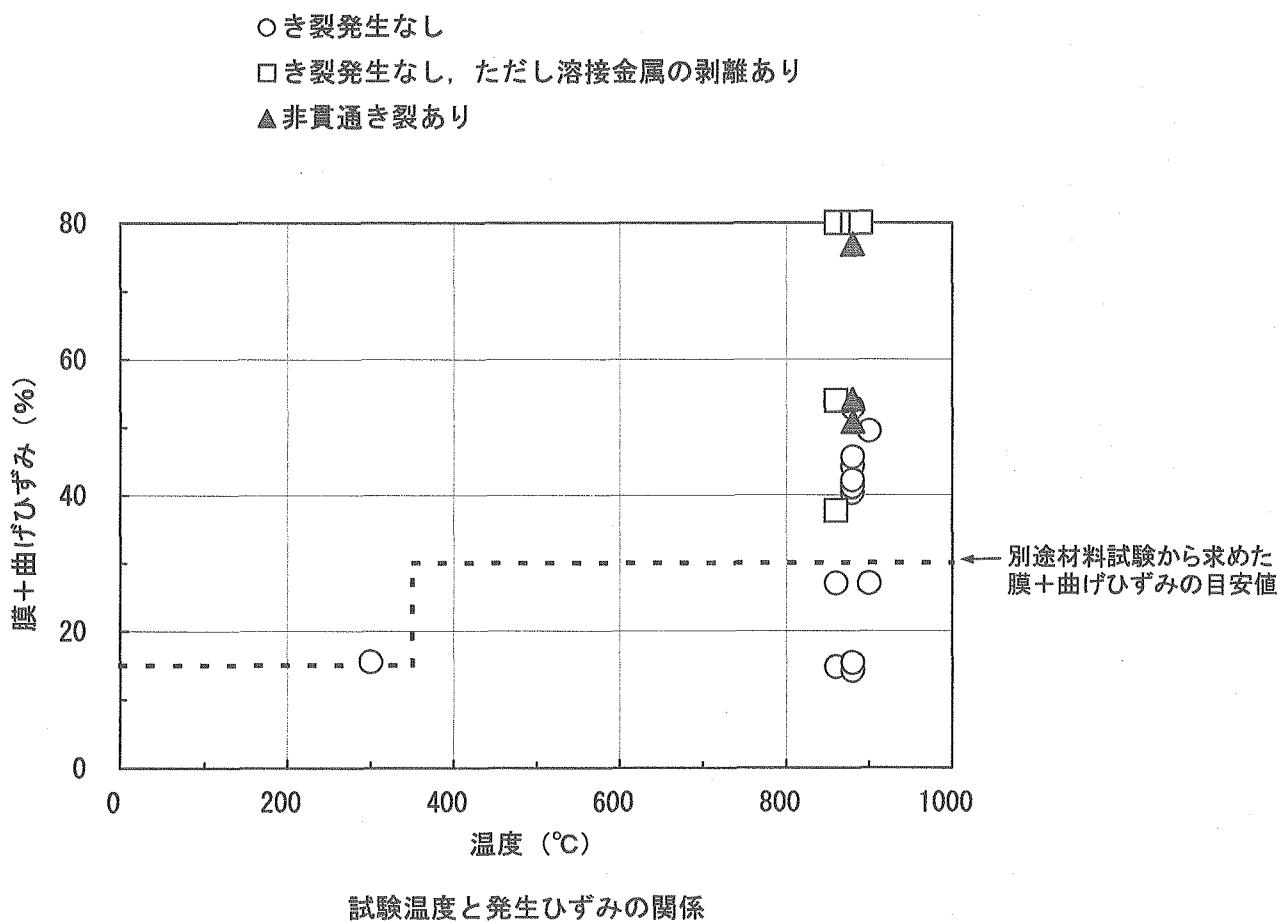


図6-1 部分構造模擬試験結果^[1]

* 大変形弾塑性クリープ解析で得られた最大ひずみ (24%)、さらにひずみの目安値 (350°Cを超える高温側で30%) を大幅に上回るひずみを与えた場合においても、試験体ライナ板には貫通性の損傷は発生しない。

7. まとめ

ナトリウムが漏えいした場合の床ライナの熱ひずみに対する機械的健全性評価を行った。その結果、以下のことを確認した。

①大変形弾塑性クリープ解析結果から、床ライナに発生する熱ひずみは床ライナに貫通性の損傷を発生させないためのひずみの目安値を下回ることを確認した。なお、解析では、温度上昇率、ライナ板板厚及び腐食減肉の有無による影響評価を行ったが、いずれのパラメータも最大ひずみに与える影響は小さかった。

②さらに、部分構造模擬試験によって、目安値を超える極めて大きなひずみを与えた場合でもライナ板に貫通性の損傷は発生しないことを実験的にも確認した。

以上の結果から、ナトリウム漏えい時において、熱ひずみにより床ライナに貫通性の損傷は発生せず、ナトリウムがコンクリートと直接接触することはない。

8. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、大洗工学センター要素技術開発部の和田雄作氏ならびにFBRサイクル開発推進部の中井良大氏には多大なるご指導・ご助言をいただきました。また、高速増殖炉もんじゅ建設所の岩永繁氏、江橋政明氏ならびに嵐田源二氏にもご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

9. 参考文献

- [1] 一宮、他、「もんじゅ 2次系床ライナの機械的健全性について」、JNC TN2400 2000-005 (2000)
- [2] 浅山、他、「もんじゅ二次系床ライナ材の機械的健全性判断のためのひずみ目安値」、JNC TN9400 2001-029 (2001)
- [3] 宮園、他、「高速増殖原型炉「もんじゅ」 2次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼解析」、JNC TN2400 2000-006 (2000)
- [4] 岩田、他、「汎用非線形構造解析システム FINAS Version 13.0 使用説明書」、PNC TN9520 95-014 (1995)
- [5] 日本工業規格、「金属材料試験片」、JIS Z 2201 (1998)
- [6] 日本工業規格、「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」、JIS G 0567 (1998)

付録A. 解析結果

付録-A 解析結果

本文の大変形弾塑性クリープ解析における『減肉ありモデル』では、局所減肉によるひずみ集中の影響を極端にした場合として、ひずみ集中箇所（内側リブ端部、外側リブ端部）にV字型断面の減肉（帯状減肉）を重ね合わせたモデルとした。なお、この『帯状減肉モデル』の腐食形態は、「燃焼実験Ⅱ」の知見及び「社団法人 電気化学会」の知見（溶融塩型腐食は固相、気相、液相の三相界面で加速されやすい）に近いものである。

減肉ありのケースについては、図A-1に示すように『帯状減肉モデル』（内側リブ端部減肉モデル、外側リブ端部減肉モデル）に加え、『部分一様減肉モデル』及び『全面一様減肉モデル』もパラメータとして評価を行い、減肉形態の違いによる影響を確認している。これらの減肉ありのケースに加え、本文に示したパラメータ評価（温度上昇率、ライナ板板厚）の応力、ひずみ履歴を図A-2～図A-17に示す。なお、それぞれの解析ケースの条件は表A-1に示すとおりである。

図A-2～図A-17には、昇温過程において引張応力と引張ひずみが発生する内側リブ端部上面及び外側リブ端部下面の応力、ひずみ履歴を示す。いずれのケースも昇温過程の初期に最大ひずみが発生している。

各ケースの最大ひずみを表A-2に示す。いずれのケースも最大ひずみはひずみの目安値（低温時15%、高温時30%）を満足している。また、昇温過程のひずみは、減肉なしの場合が最大24%であるのに対して、減肉ありの場合が22%～24%と減肉なしと同じか、わずかに小さい。なお、減肉ありモデルでは、外側リブ端部帯状減肉のケースで最大ひずみが発生しており、その値は24%である。

表A-1 解析ケース一覧

ケース No.	温度条件 *1	ライナ板板厚	腐食減肉 *2	解析の目的
1	A × 1.0	6mm	なし	
2	A × 1.2	6mm	なし	温度上昇率の影響評価
3	A × 0.8	6mm	なし	温度上昇率の影響評価
4	A × 1.0	7.2mm	なし	ライナ板板厚の影響評価
5	A × 1.0	6mm	あり①	腐食減肉の影響評価
6	A × 1.0	6mm	あり②	腐食減肉の影響評価
7	A × 1.0	6mm	あり③	腐食減肉の影響評価
8	A × 1.0	6mm	あり④	腐食減肉の影響評価

*1) 温度条件

- ・ A × 1.0 : 参考文献[1]で用いたものと同じであり、ASSCOPS 燃焼解析結果による最高温度を包絡するように最高到達温度を 880°C と設定したもの
- ・ A × 1.2 : 漏えい開始後の初期の温度上昇率を A × 1.0 の約 120% としたもの
- ・ A × 0.8 : 漏えい開始後の初期の温度上昇率を A × 1.0 の約 80% としたもの

*2) 腐食減肉

- ・ あり① : 内側リブ端部に帯状減肉を重ね合わせたモデル
- ・ あり② : 外側リブ端部に帯状減肉を重ね合わせたモデル
- ・ あり③ : 内側リブ端部よりも入熱中心側の部分に一様な減肉を重ね合わせたモデル
- ・ あり④ : ライナ板全面に一様な減肉を重ね合わせたモデル

表A-2 相当非弾性ひずみ評価表

		減肉なし						減肉あり																		
ひずみの評価位置	評価時の床ライナ温度	ひずみの目安値 (判断基準)	参考文献[1]と同じ温度上昇率 (ケース1)			参考文献[1]の約120%の温度上昇率 (ケース2)			参考文献[1]の約80%の温度上昇率 (ケース3)			板厚7.2mmの場合 (ケース4)			内側リブ端部 帶状減肉 (ケース5)			外側リブ端部 帶状減肉 (ケース6)			部分一様減肉 (ケース7)			全面一様減肉 (ケース8)		
			昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時	昇温時	降温時		
内側リブ端部上面	低温時 (T≤350°C)	15%	6%	B	6%	B	6%	B	4%	B	6%	C	6%	C	5%	C	5%	C	5%	C	5%	C	5%	C		
	高温時 (350°C < T)	30%	24%	B	24%	B	24%	B	20%	B	23%	C	24%	C	22%	C	22%	C	22%	C	22%	C	22%	C		
内側リブ端部下面	低温時 (T≤350°C)	15%	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C			
	高温時 (350°C < T)	30%	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C			
外側リブ端部上面	低温時 (T≤350°C)	15%	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C		
	高温時 (350°C < T)	30%	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C		
外側リブ端部下面	低温時 (T≤350°C)	15%	10%	B	10%	B	10%	B	10%	B	7%	B	9%	C	9%	C	9%	C	9%	C	9%	C	9%	C	9%	
	高温時 (350°C < T)	30%	24%	B	24%	B	24%	B	24%	B	15%	B	23%	C	24%	C	23%	C	23%	C	23%	C	23%	C	23%	

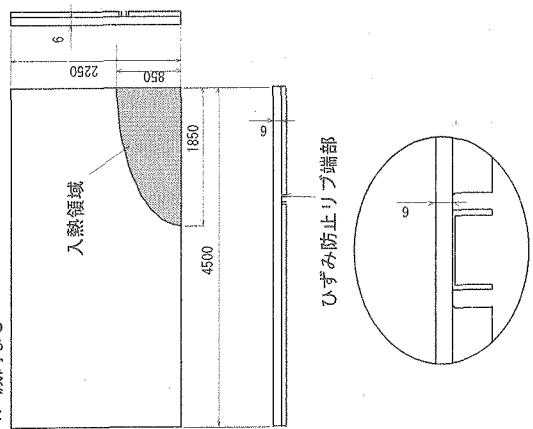
評価結果の凡例

数値 : 昇温時の引張応力下での引張ひずみであり、評価対象。

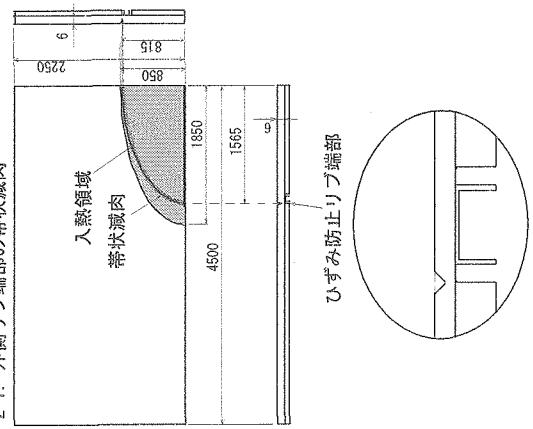
A : 圧縮ひずみであり、貫通性の損傷が生じることはない。

B : 圧縮応力場であり、貫通性の損傷が生じることはない。
C : 降温過程(昇温後)では減肉を重ね合わせる必要がないため、評価対象外。

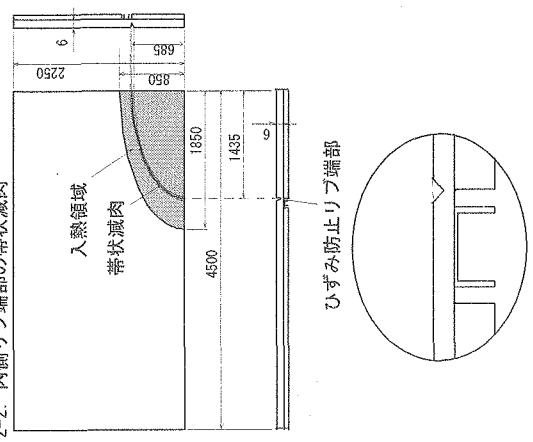
1. 減肉なし



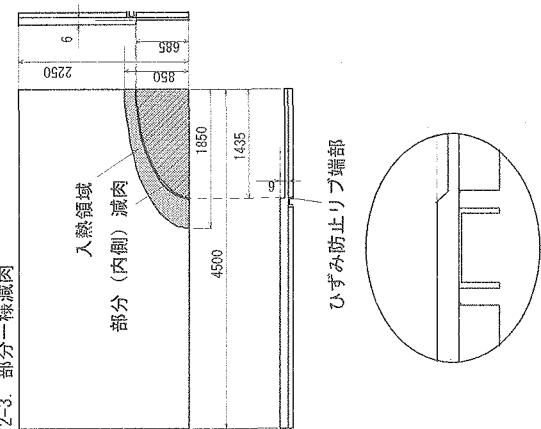
2-1. 外側リブ端部の帶状減肉



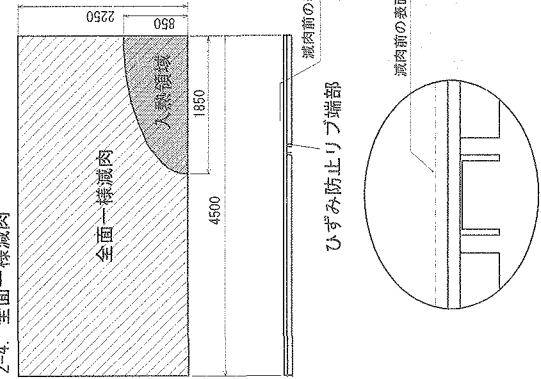
2-2. 内側リブ端部の帶状減肉



2-3. 部分一樣減肉



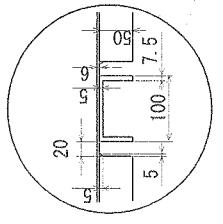
面断部肉減



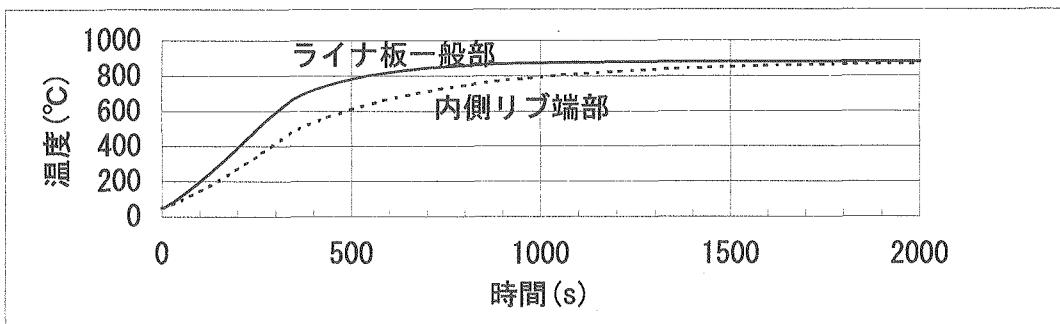
2-4. 全面一樣減肉



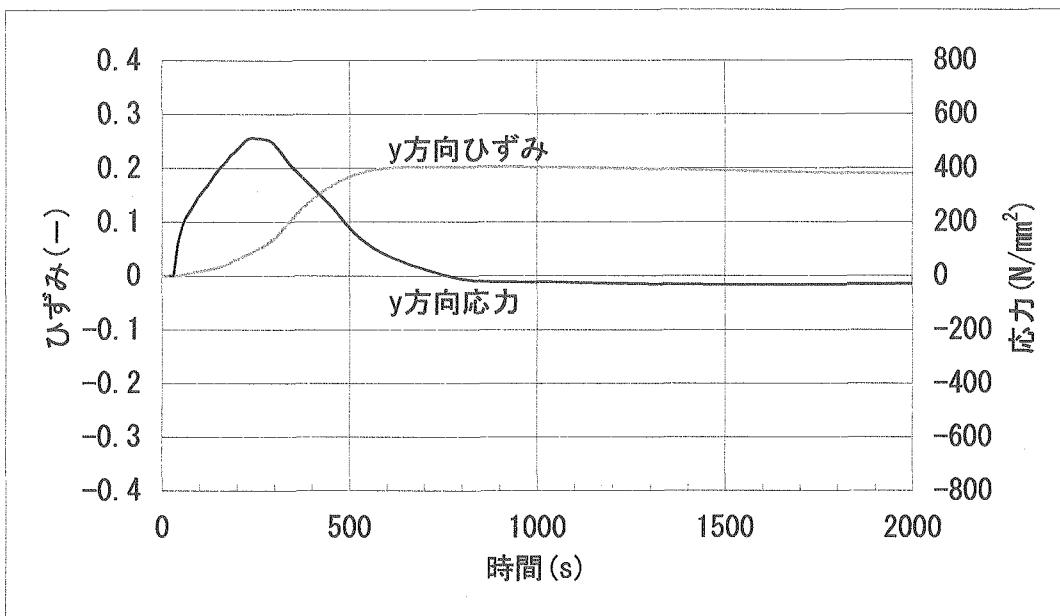
ひずみ防止リブ端部まりの寸法



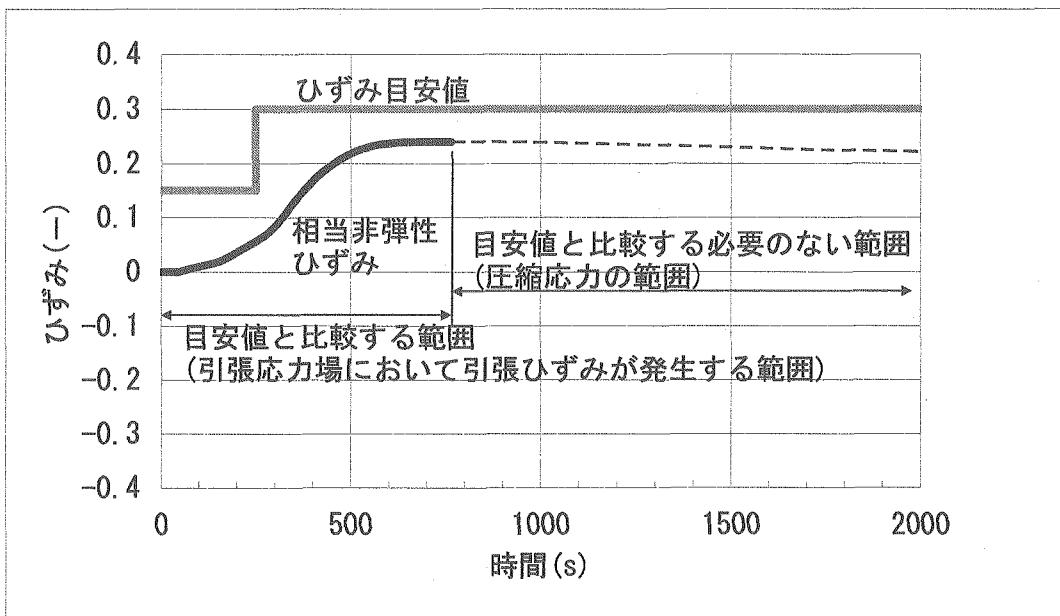
図A-1 減肉なしモデル及び減肉ありモデルの形状



a. 温度履歴

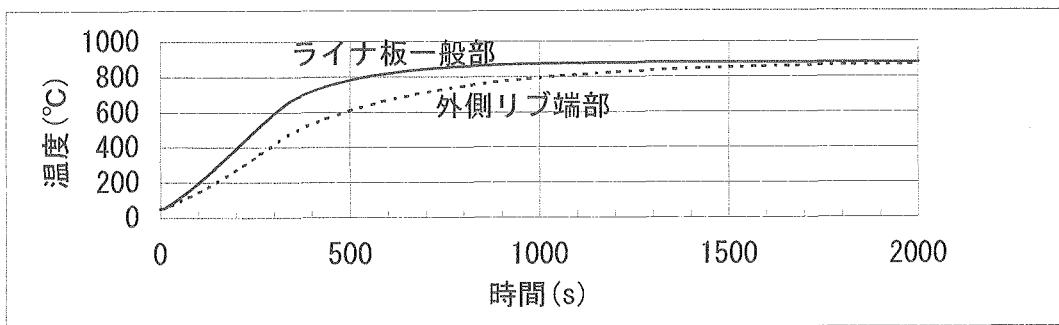


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

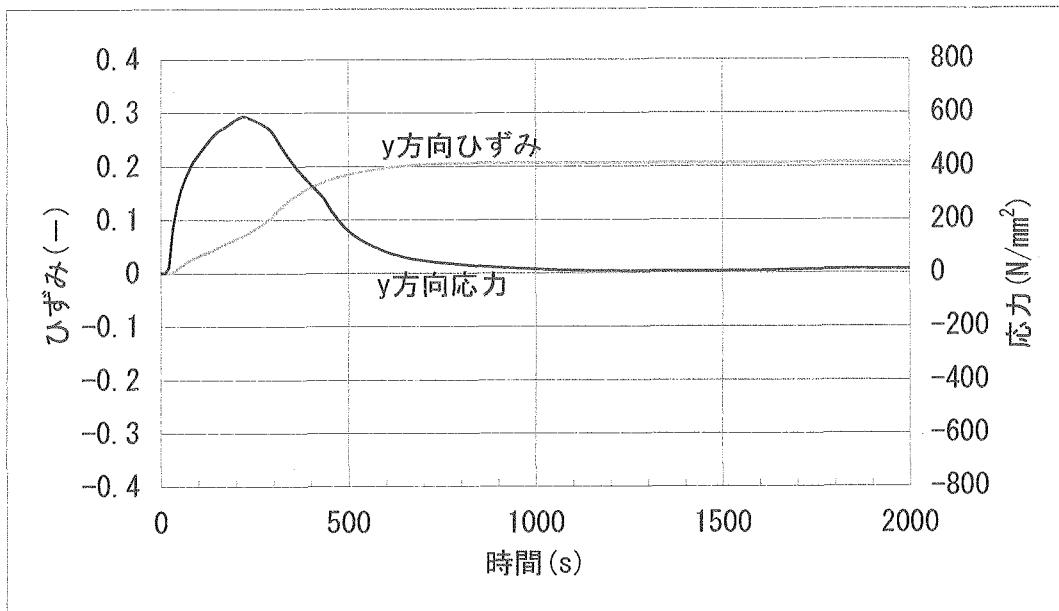


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

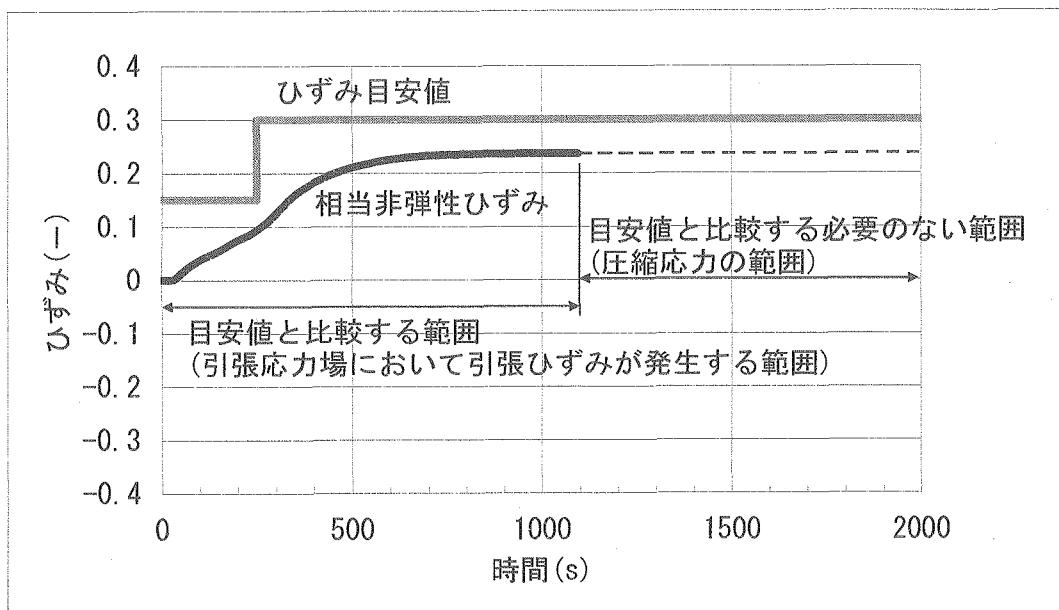
図A-2 参考文献[1]と同じ温度上昇率における
内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース1)



a. 温度履歴

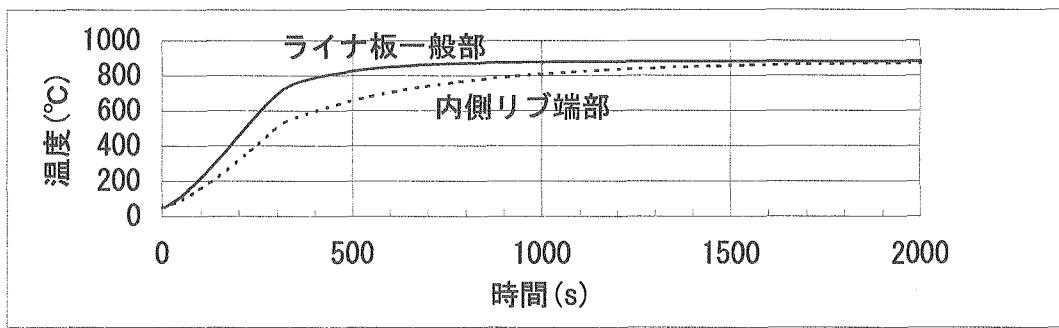


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

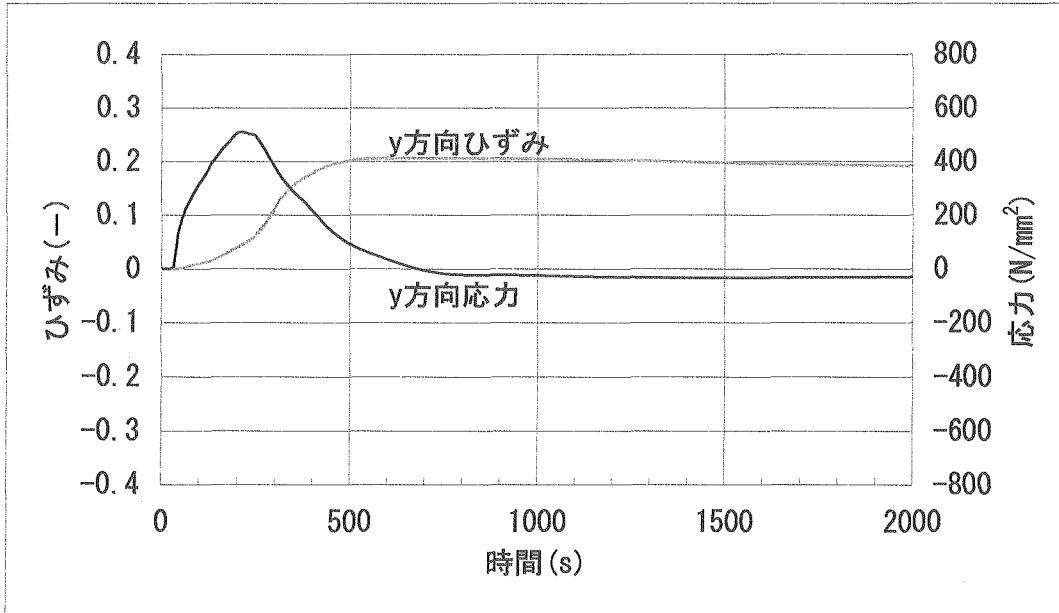


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

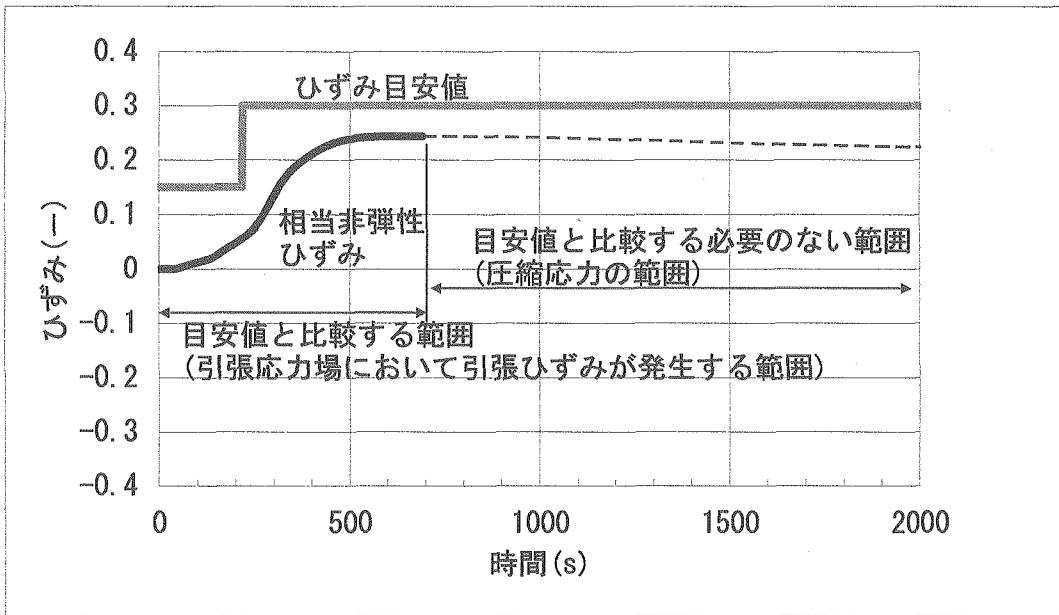
図A-3 参考文献[1]と同じ温度上昇率における
外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース1)



a. 温度履歴

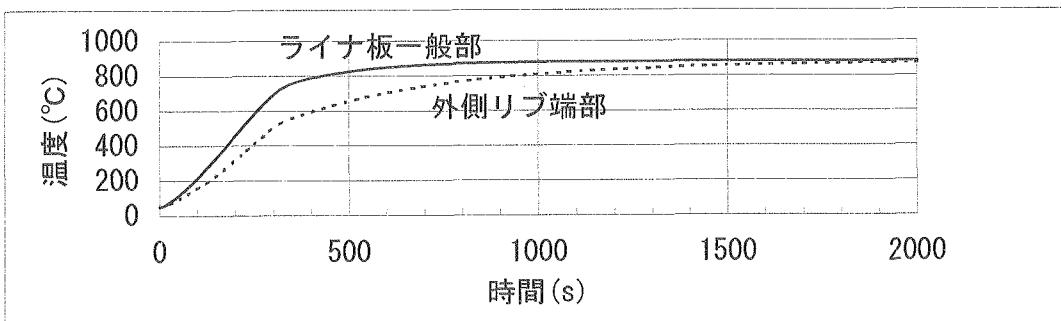


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

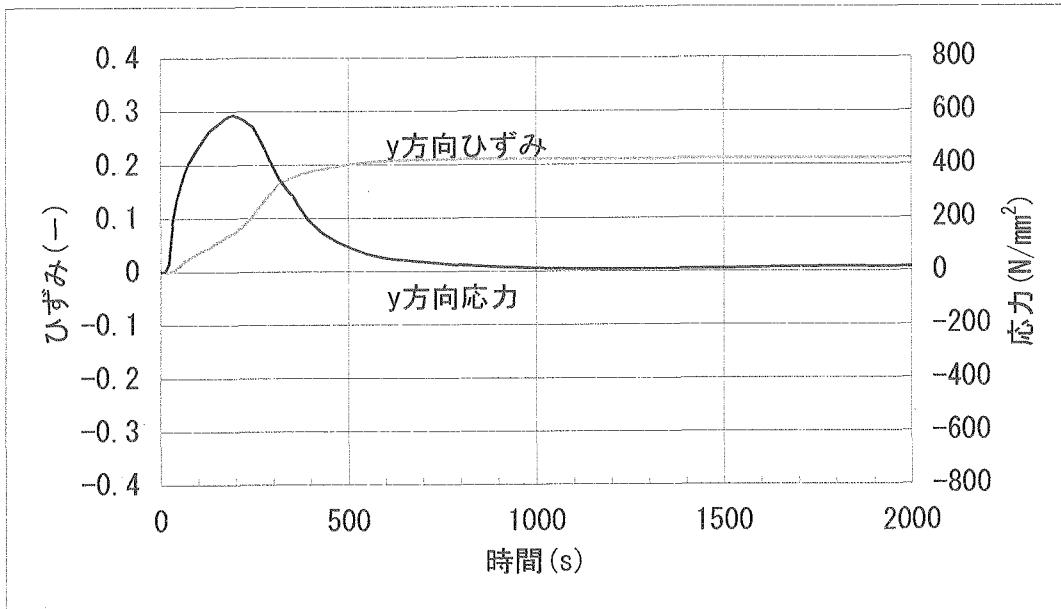


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

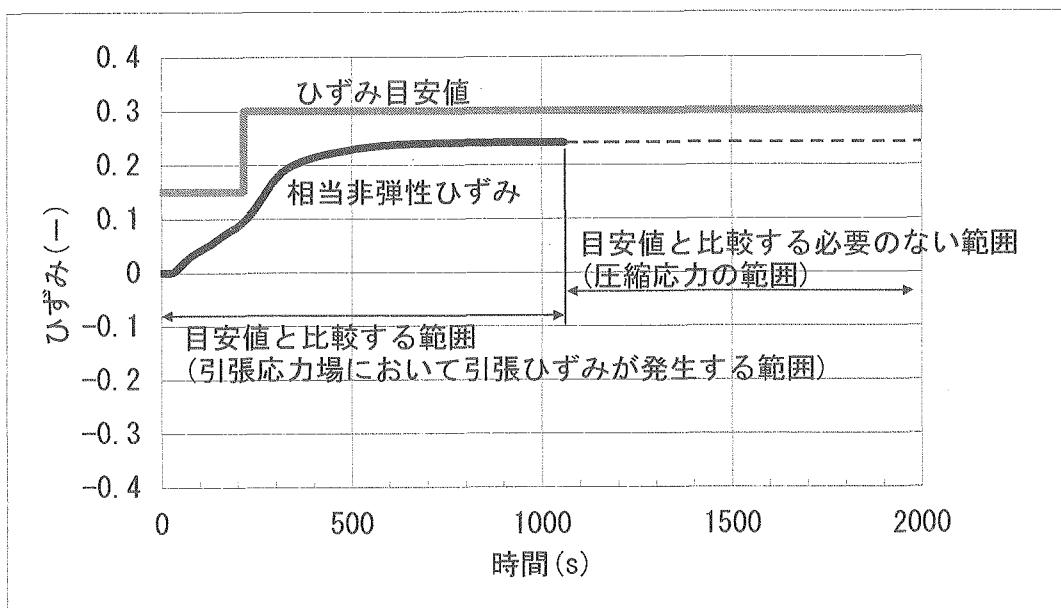
図A-4 参考文献[1]の約120%の温度上昇率における
内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース2)



a. 温度履歴

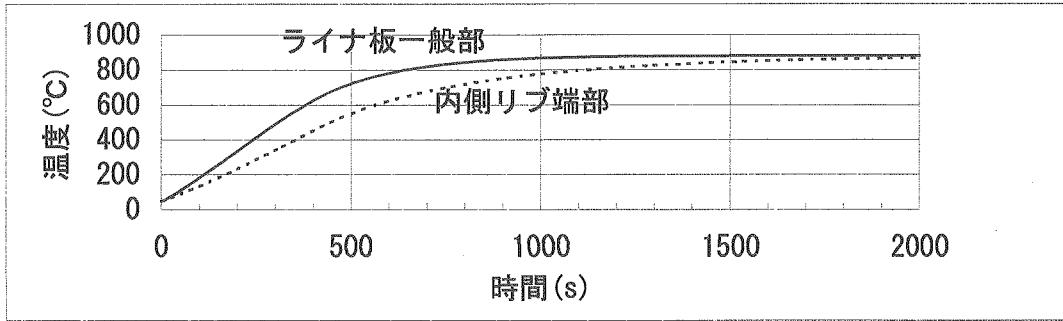


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

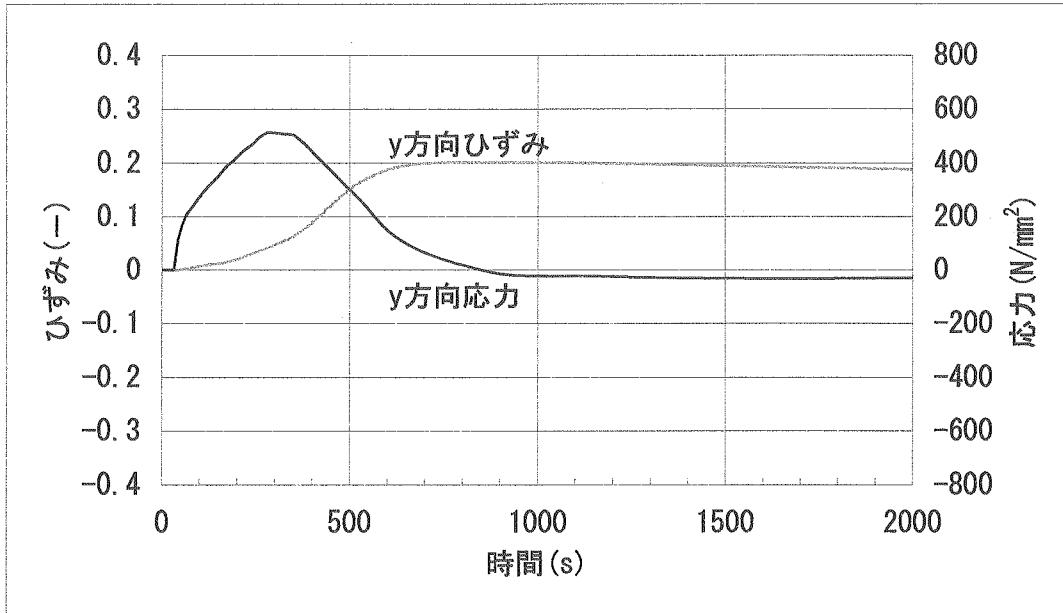


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

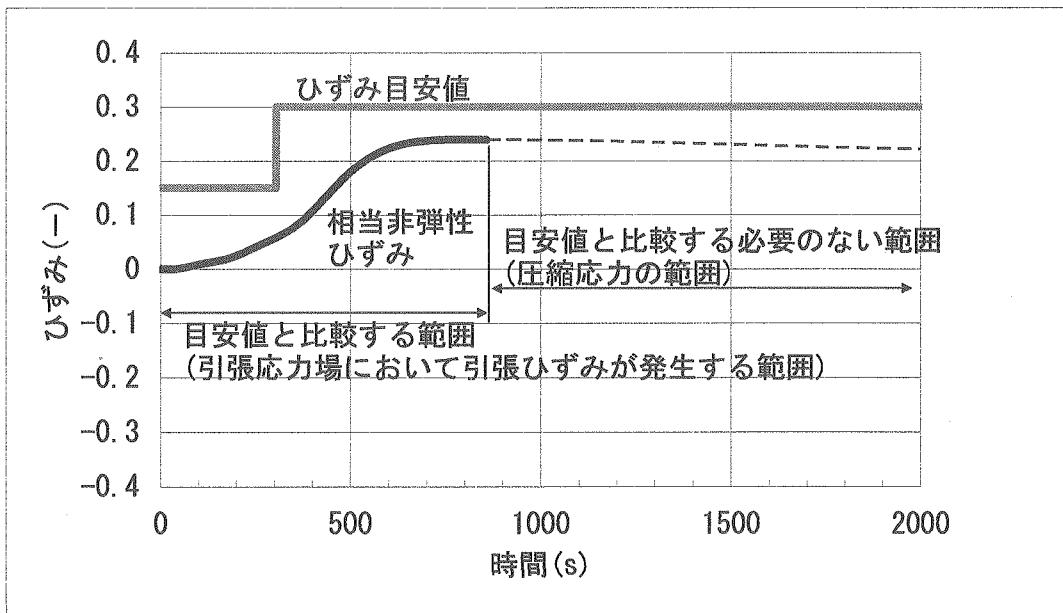
図A-5 参考文献[1]の約120%の温度上昇率における
外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース2)



a. 温度履歴

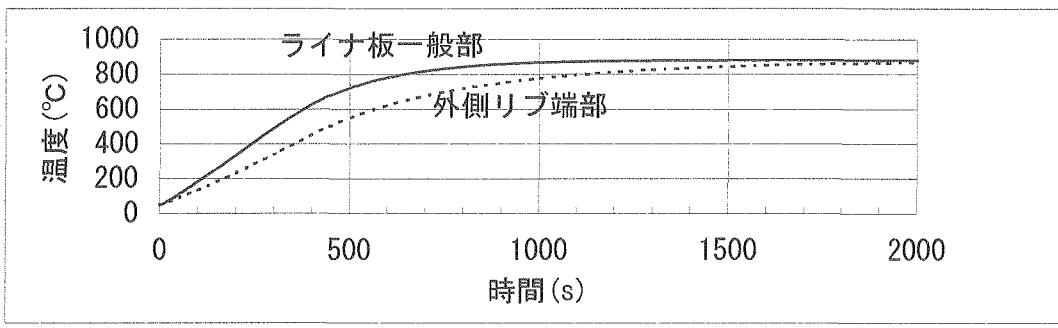


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

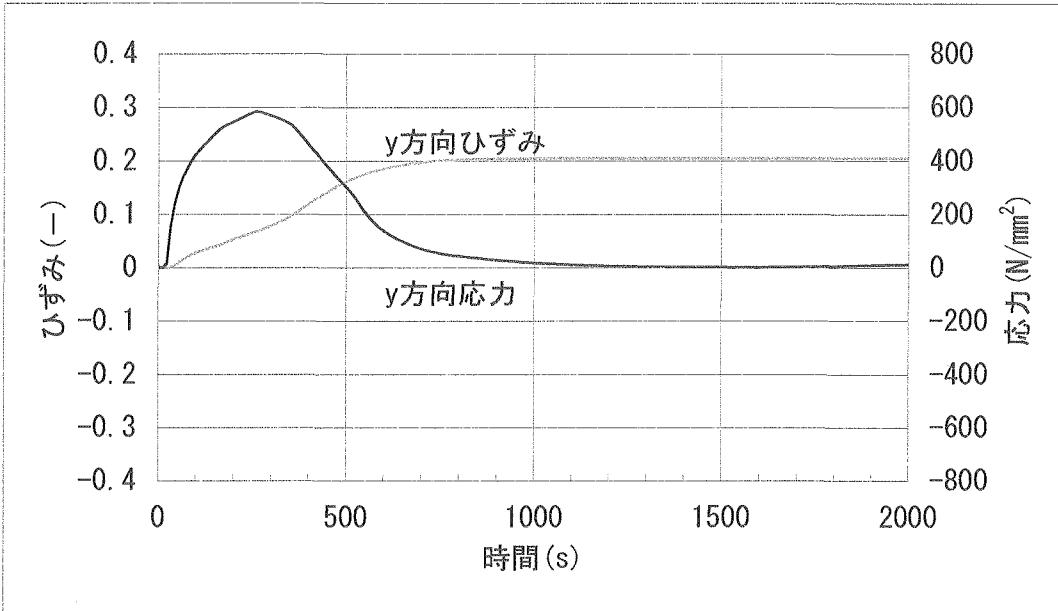


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

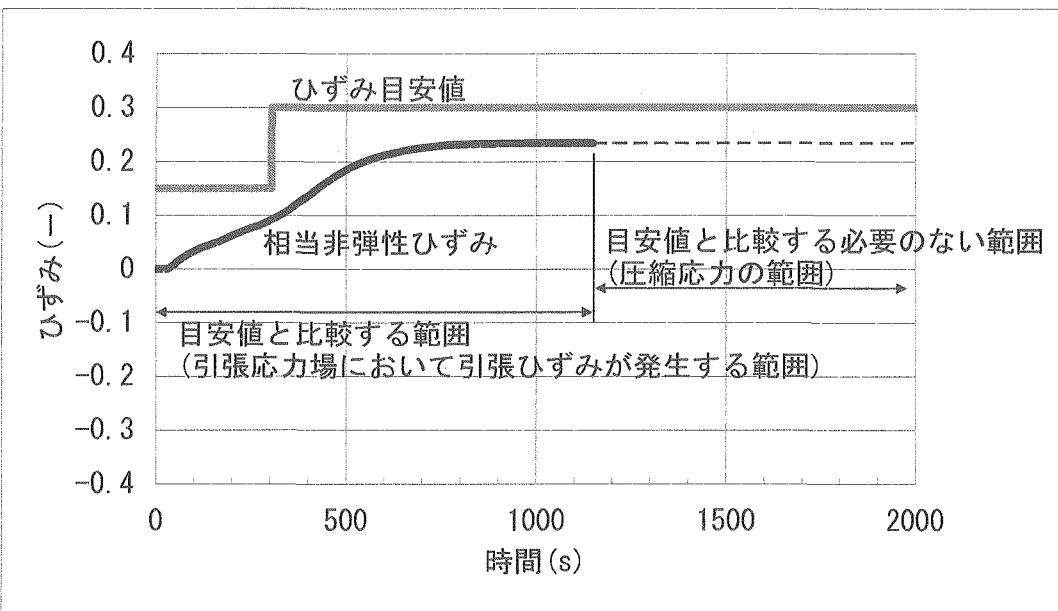
図A-6 参考文献[1]の約80%の温度上昇率における
内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴(ケース3)



a. 温度履歴

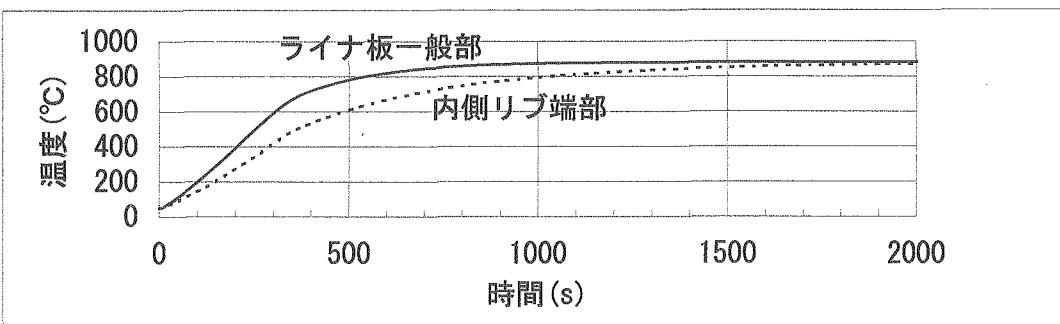


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

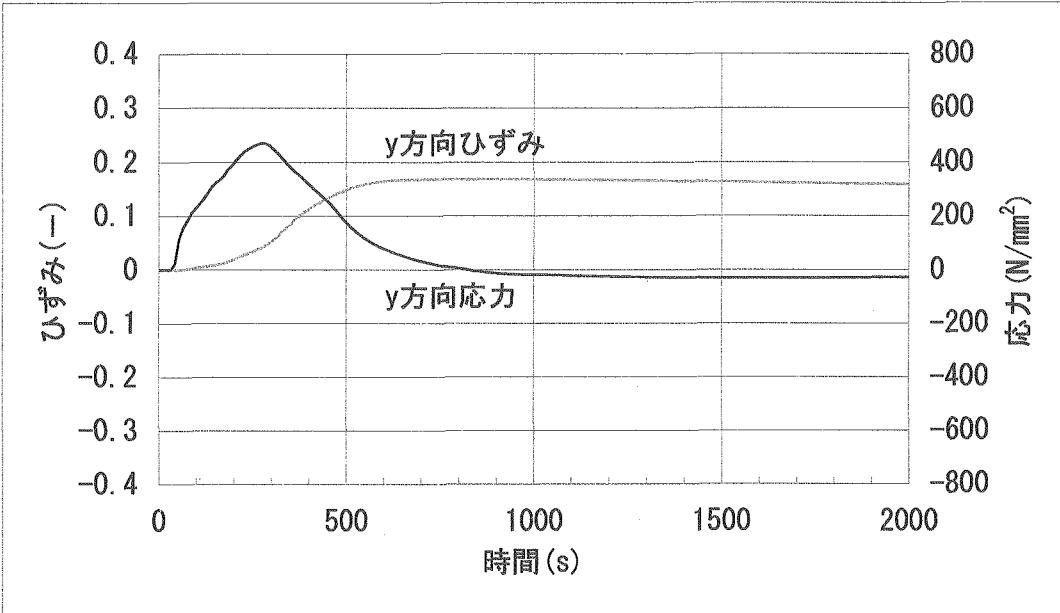


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

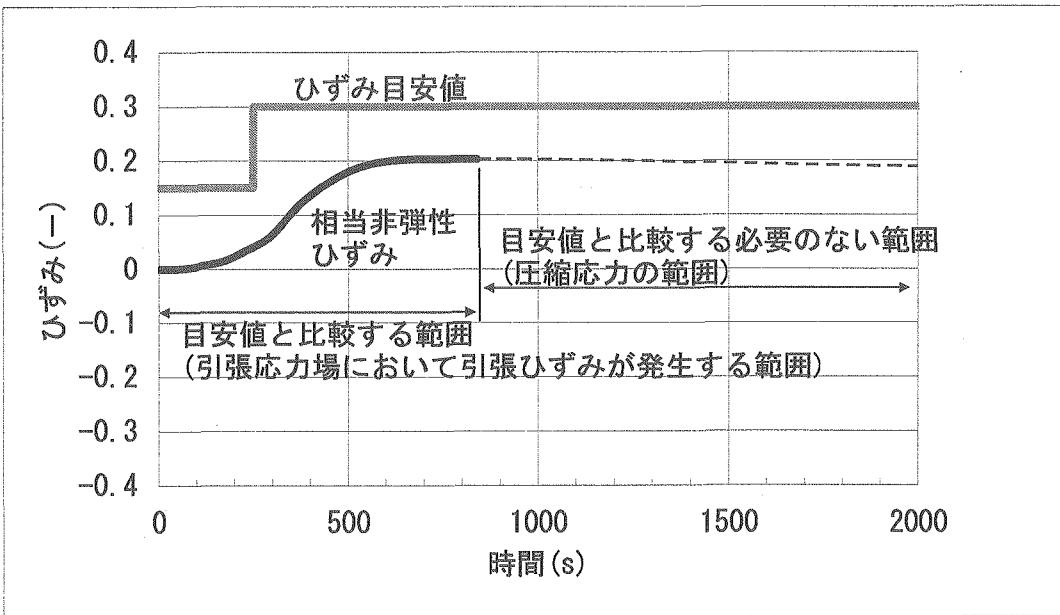
図A-7 参考文献[1]の約80%の温度上昇率における
外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴(ケース3)



a. 温度履歴

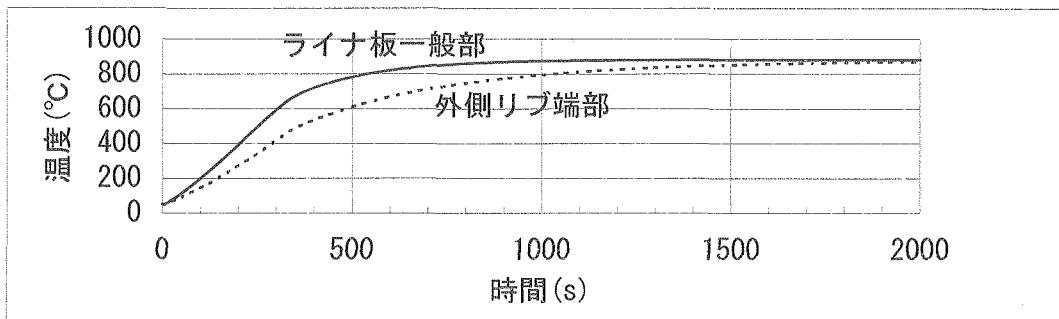


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

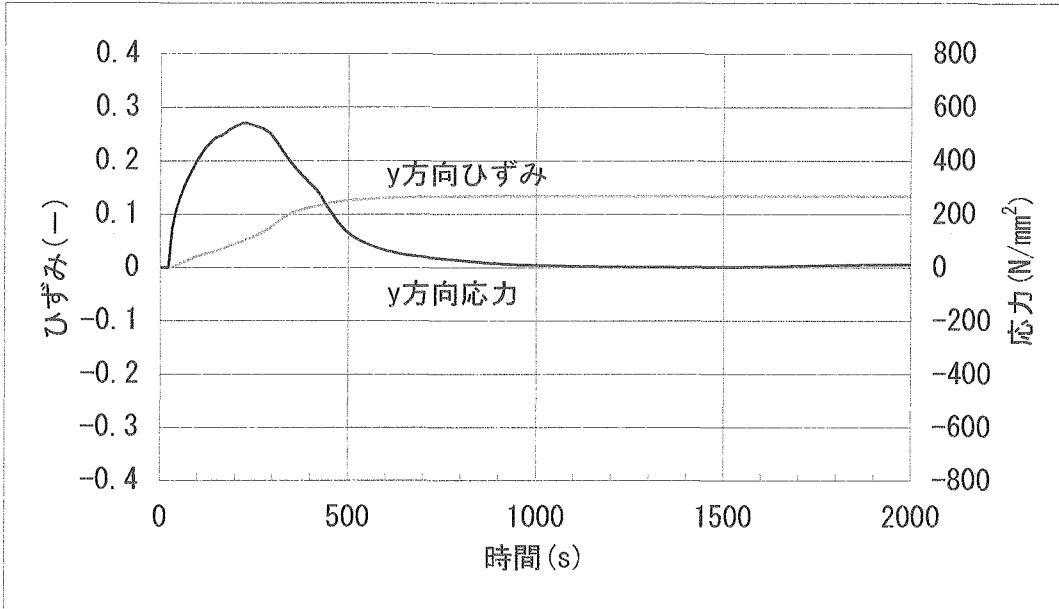


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

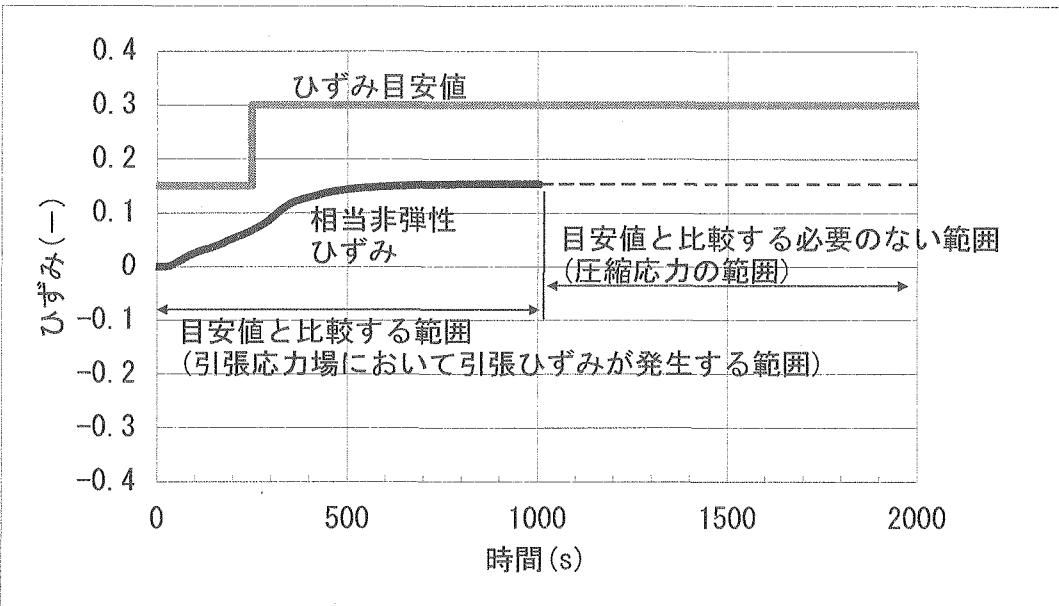
図A-8 ライナ板板厚7.2mmにおける内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴
(ケース4)



a. 温度履歴

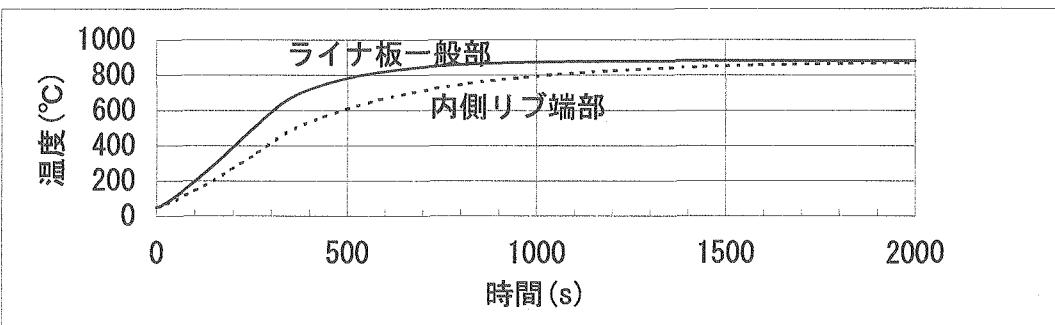


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

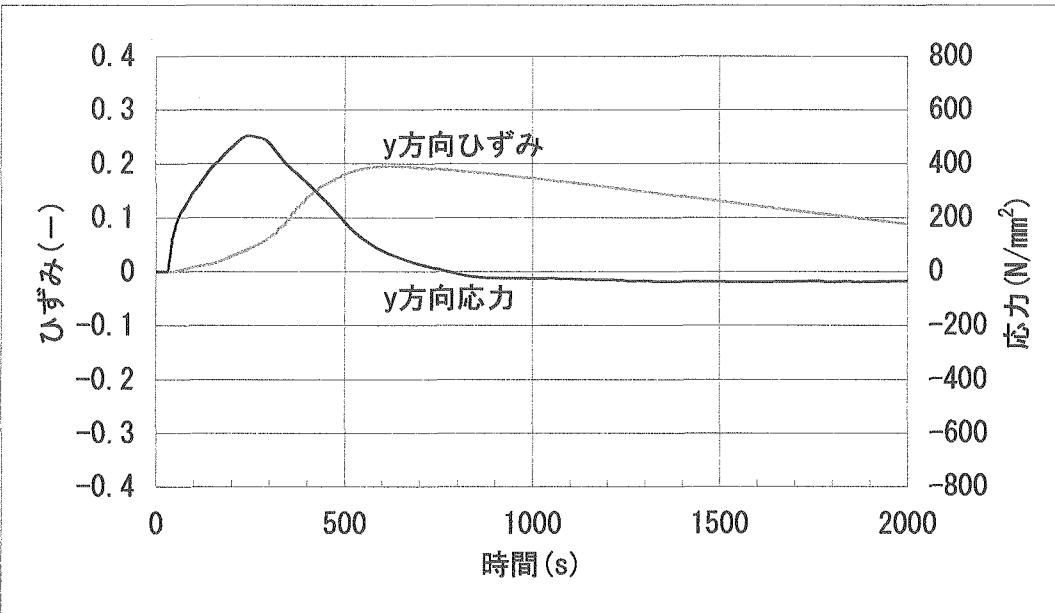


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

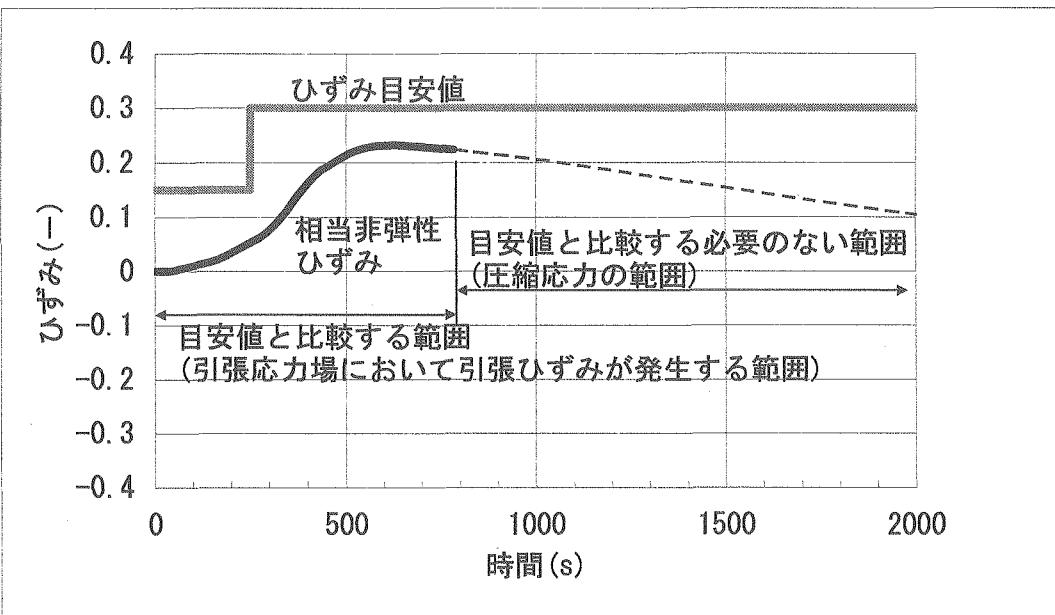
図A-9 ライナ板板厚7.2mmにおける外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴
(ケース4)



a. 温度履歴

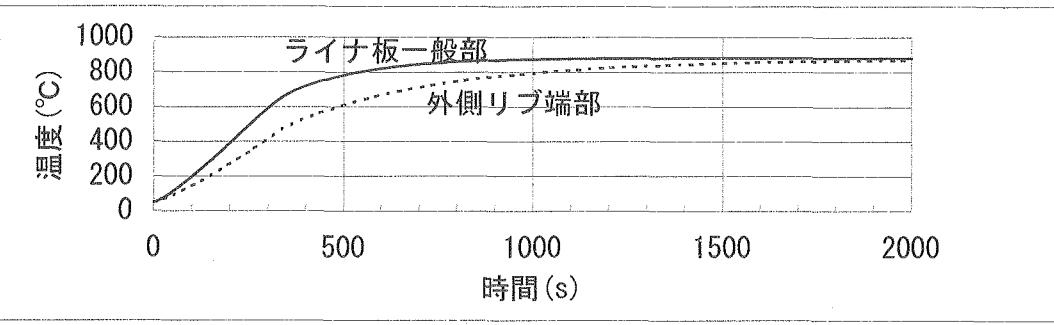


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

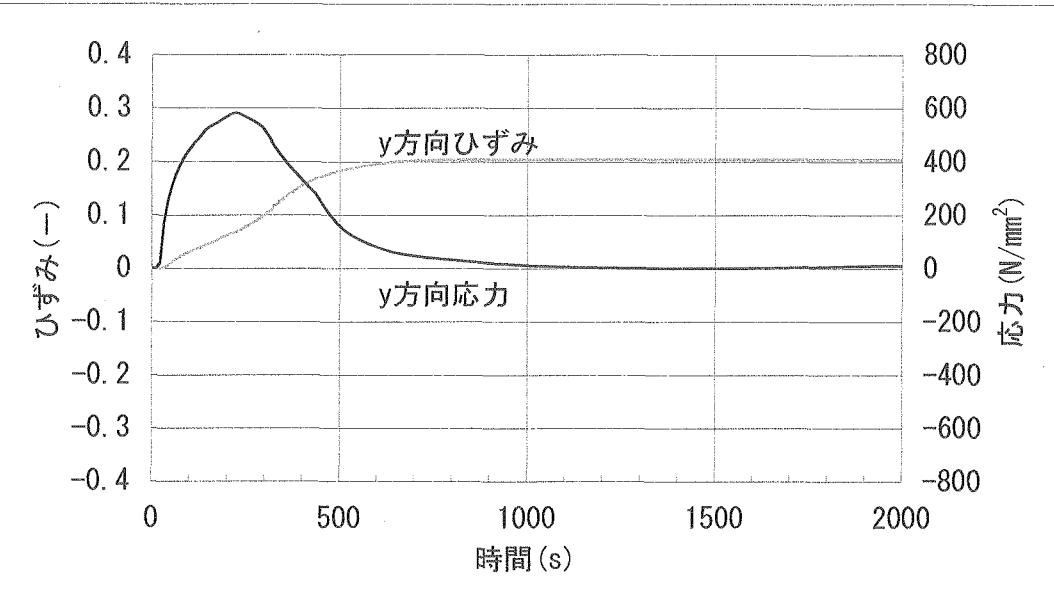


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

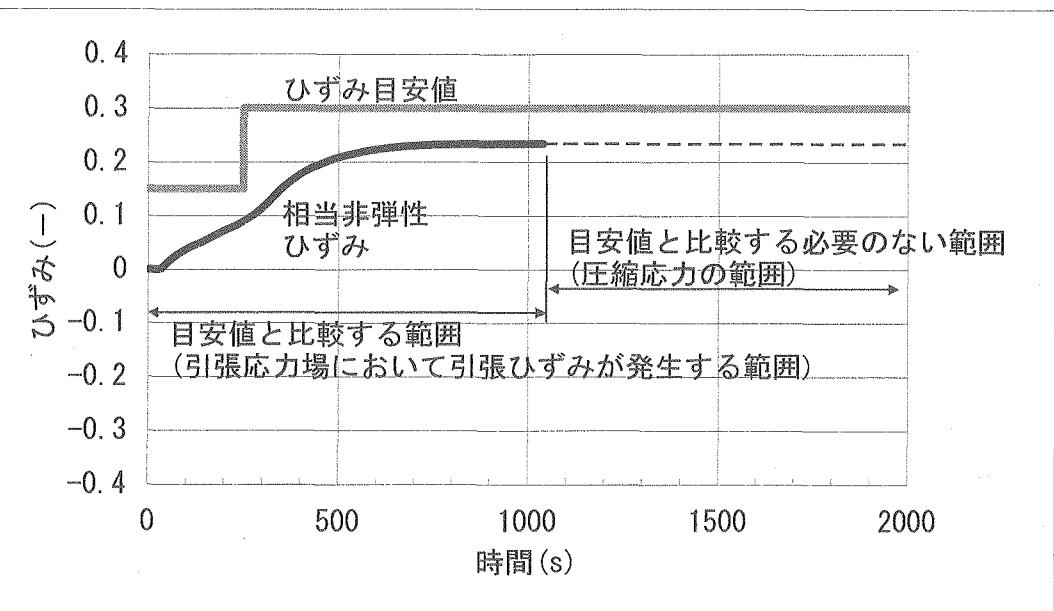
図A-10 内側リブ端部帯状減肉における内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴
(ケース5)



a. 温度履歴

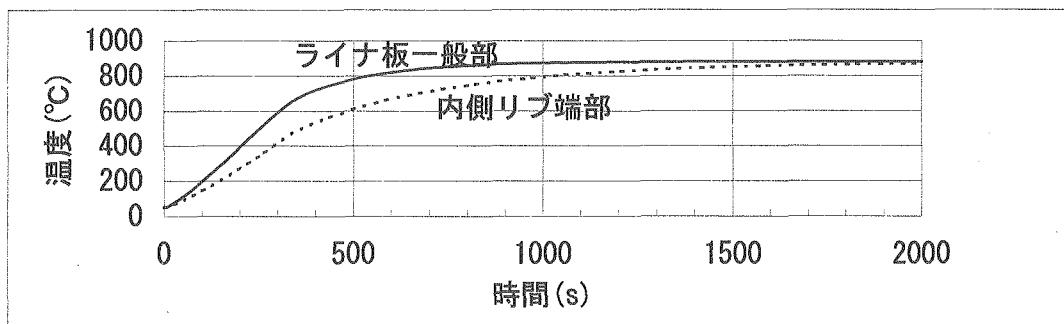


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

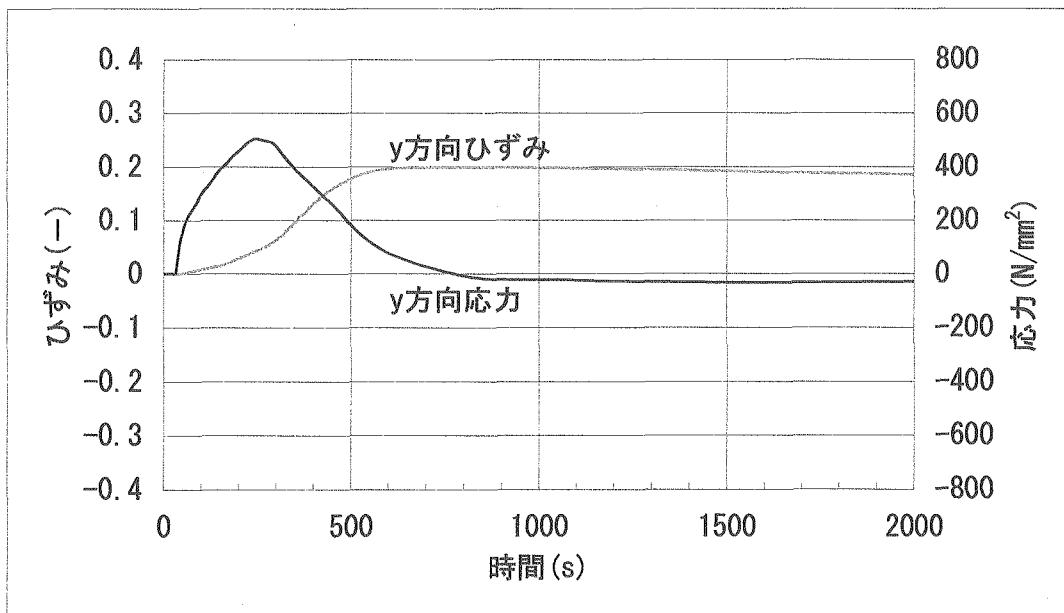


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

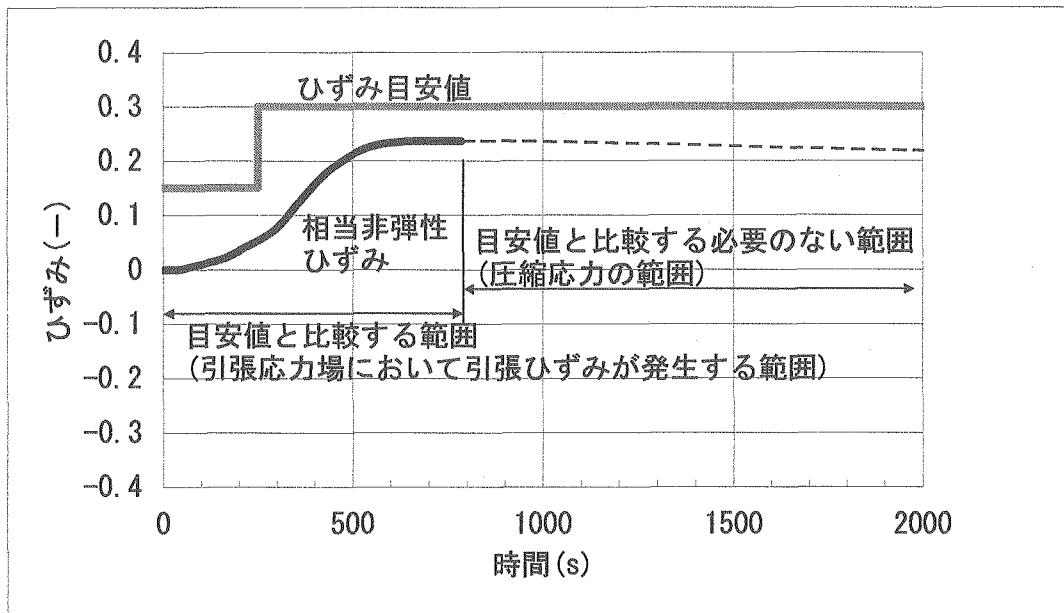
図A-11 内側リブ端部帯状減肉における外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴
(ケース5)



a. 温度履歴

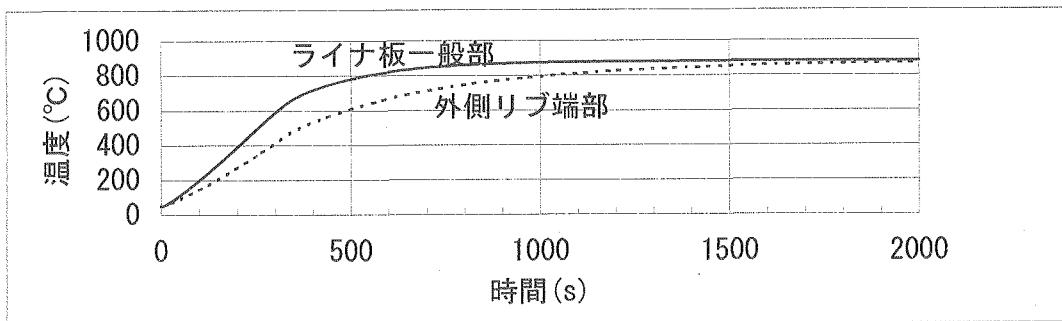


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

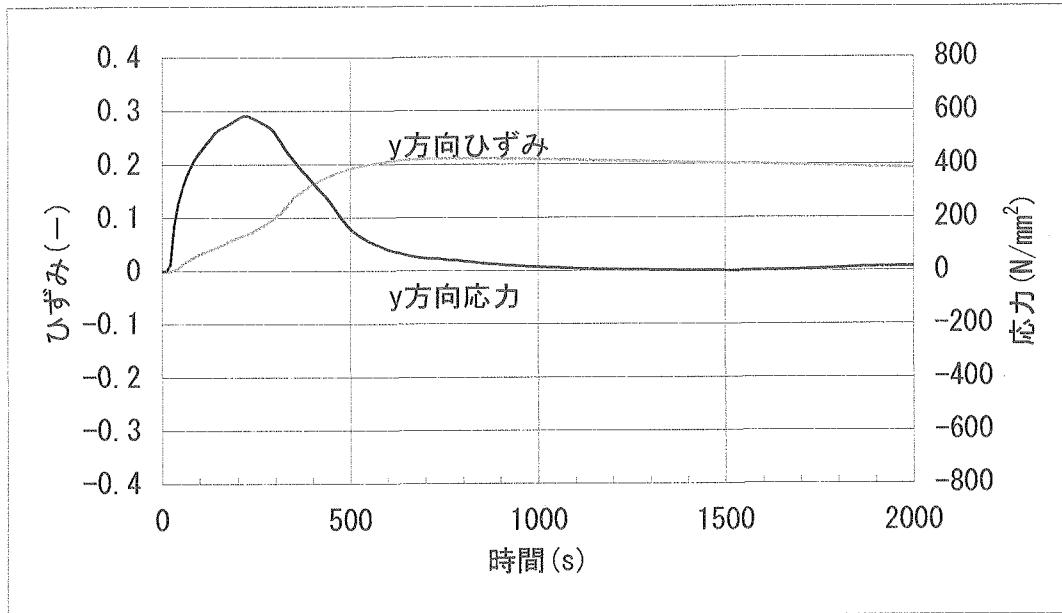


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

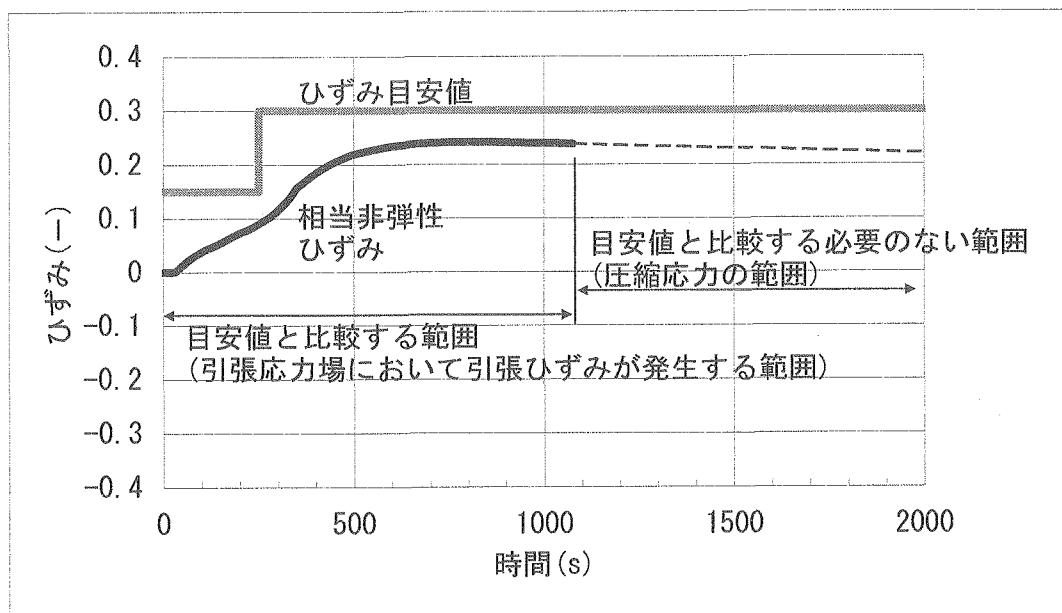
図A-12 外側リブ端部帯状減肉における内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴
(ケース6)



a. 温度履歴

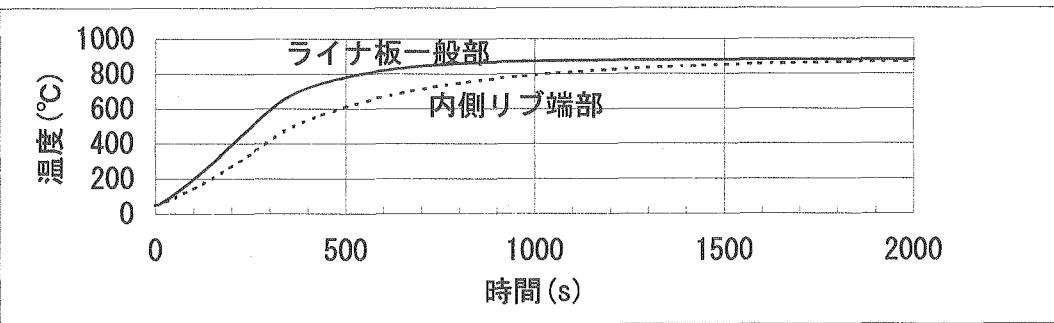


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

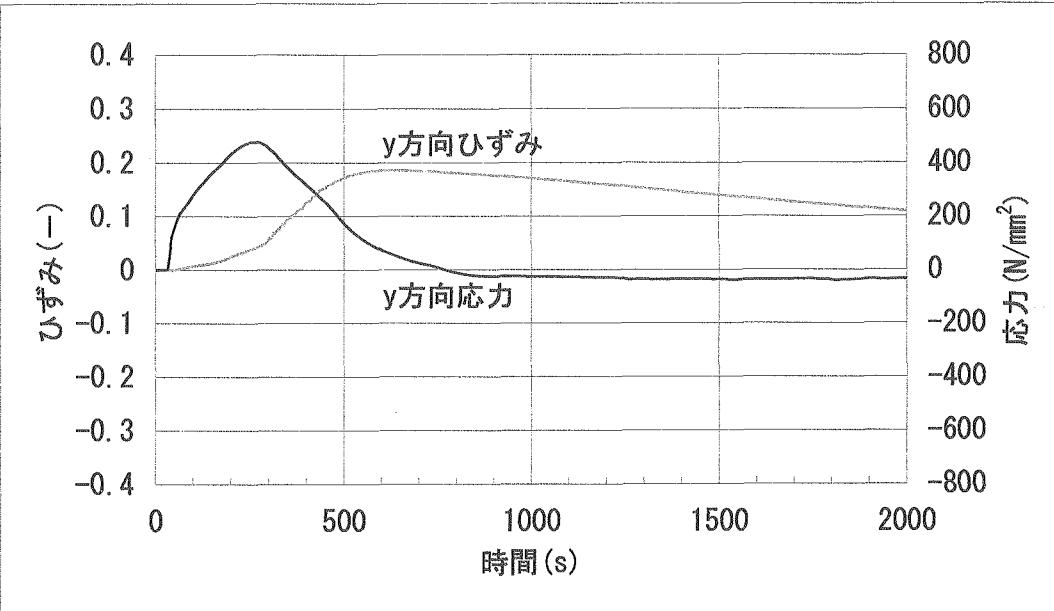


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

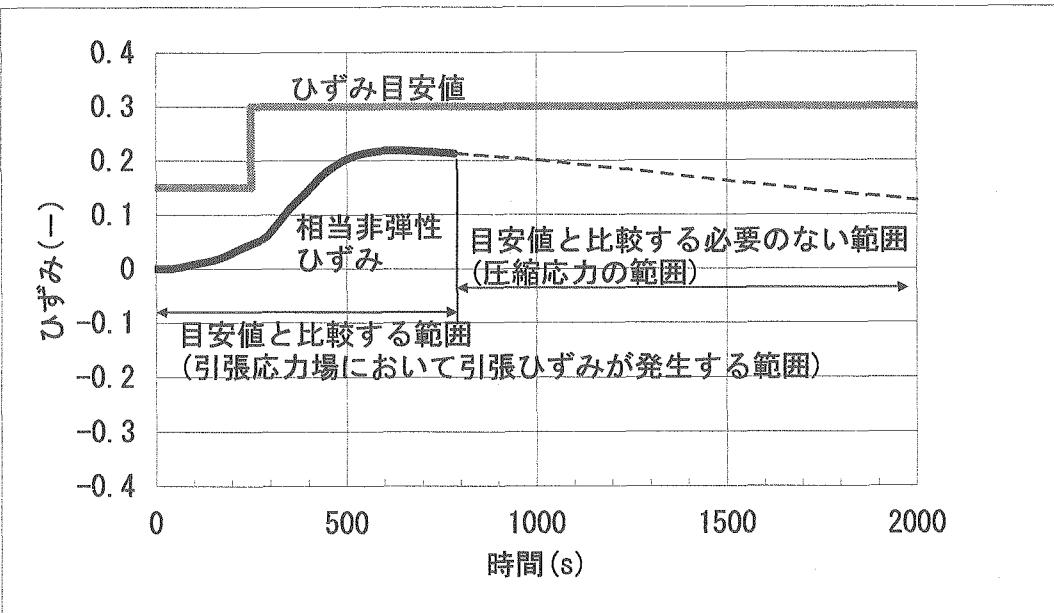
図A-13 外側リブ端部帯状減肉における外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴
(ケース6)



a. 温度履歴

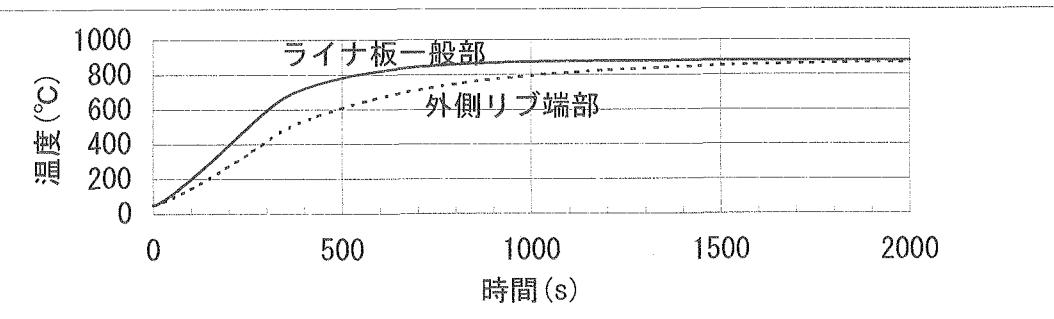


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

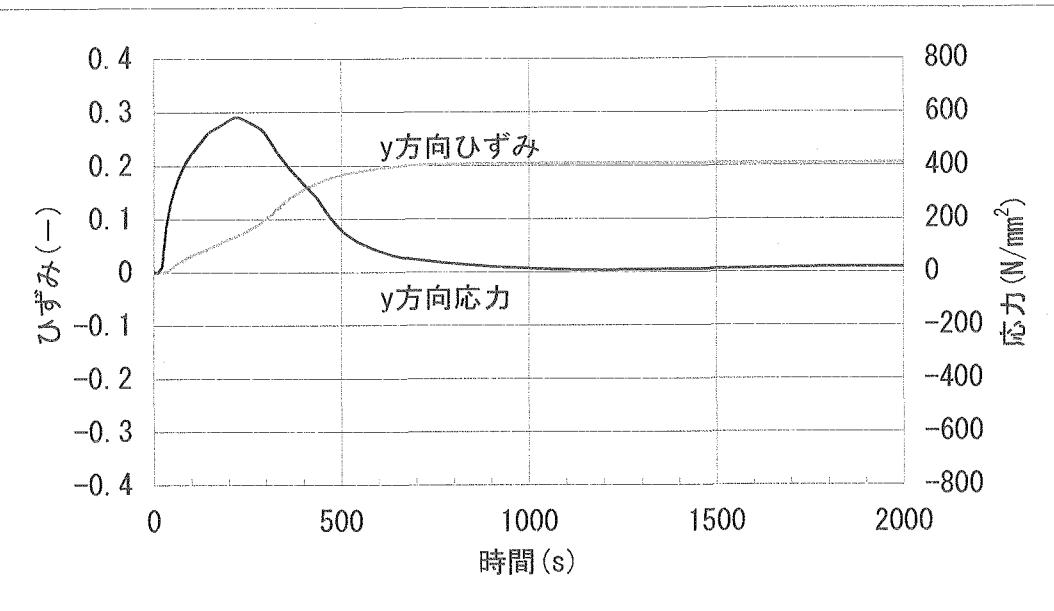


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

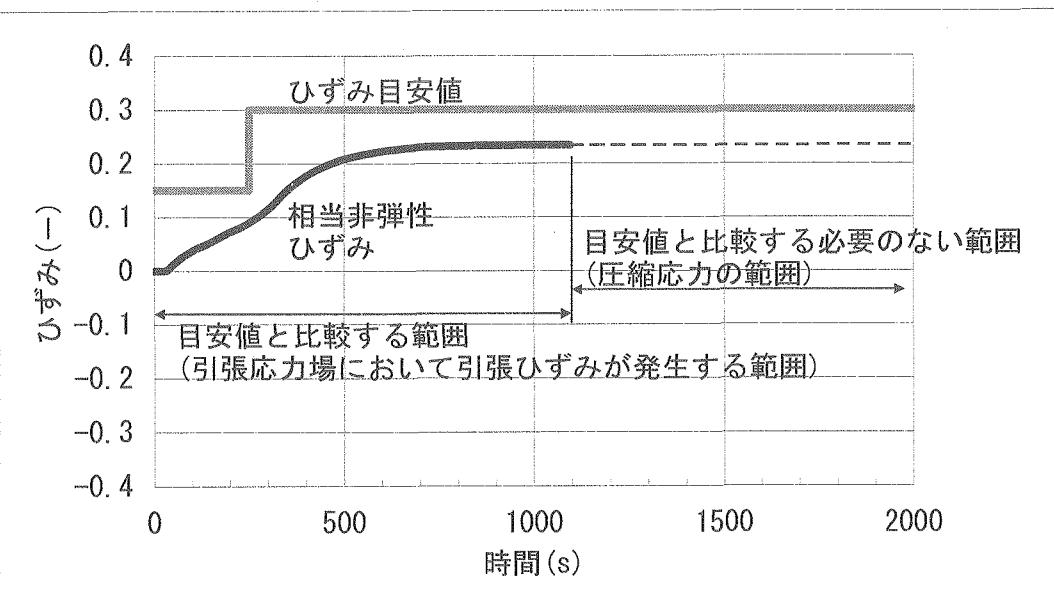
図A-14 部分一様減肉における内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴
(ケース7)



a. 温度履歴

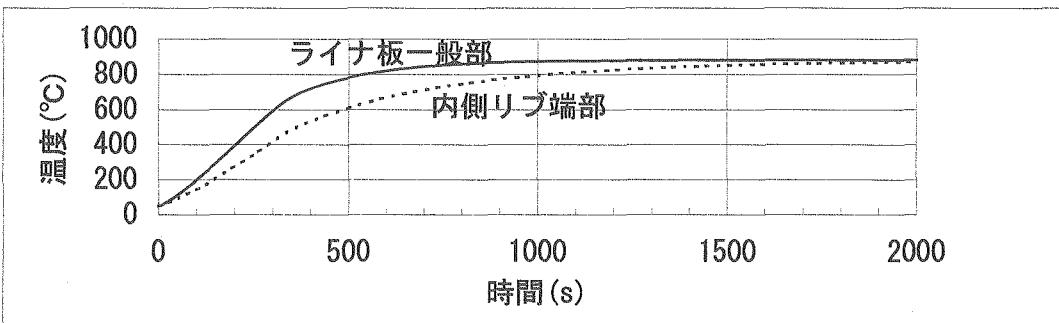


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

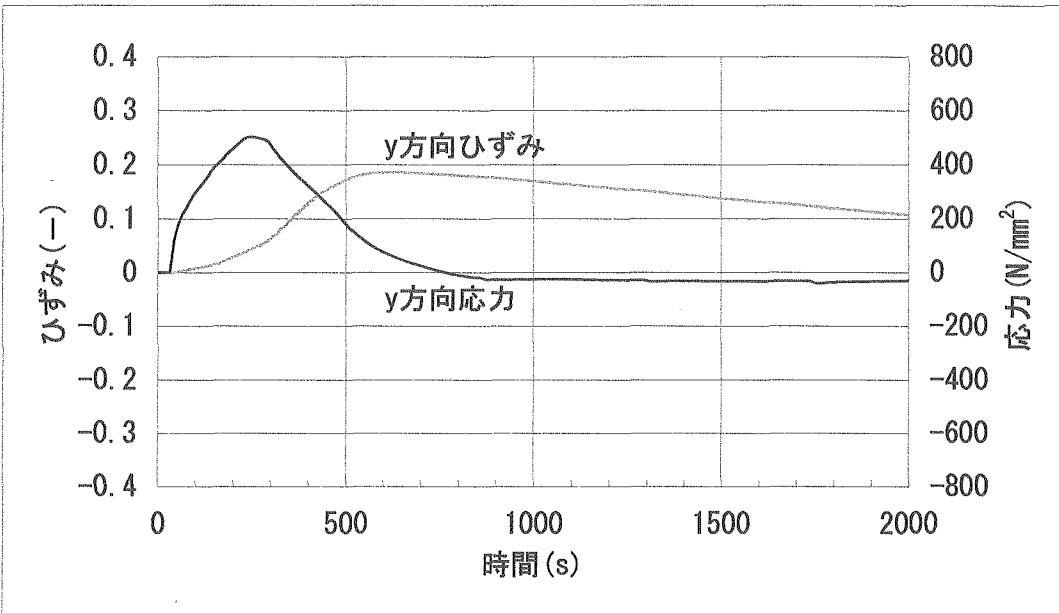


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

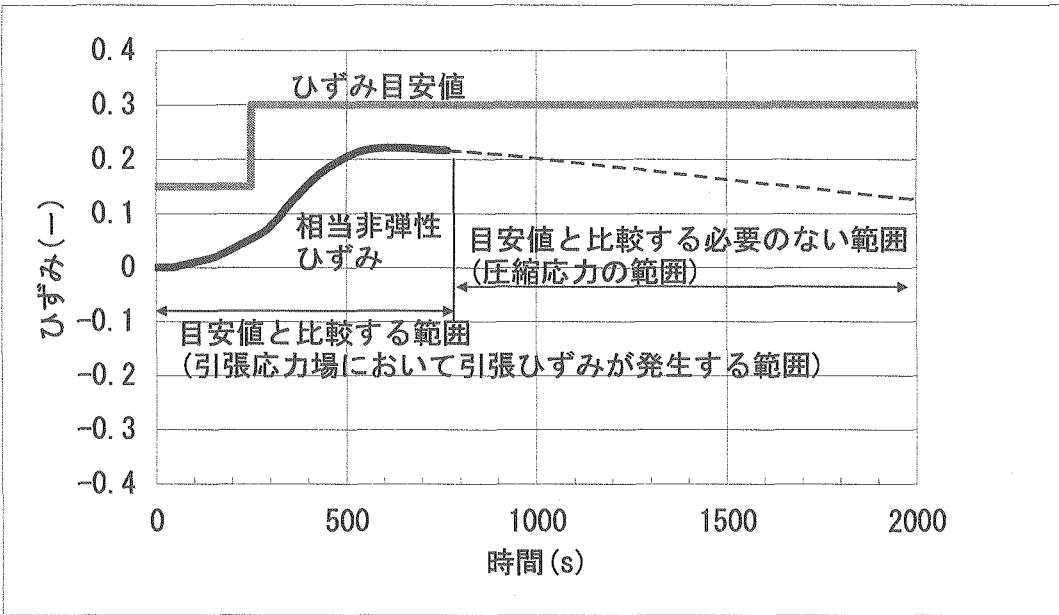
図A-15 部分一様減肉における外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴
(ケース7)



a. 温度履歴

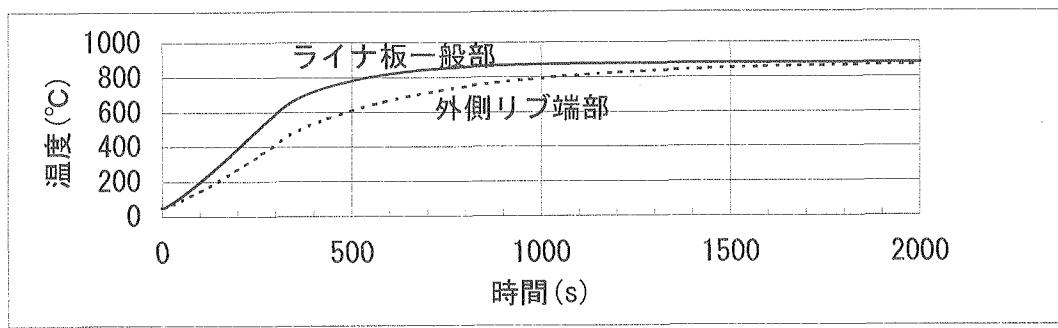


b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴

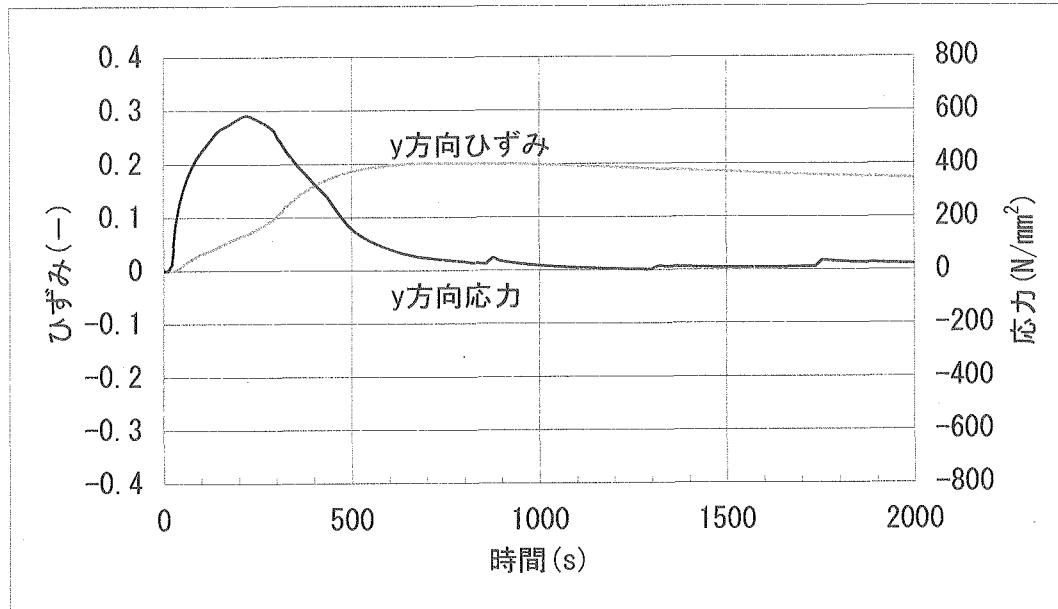


c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

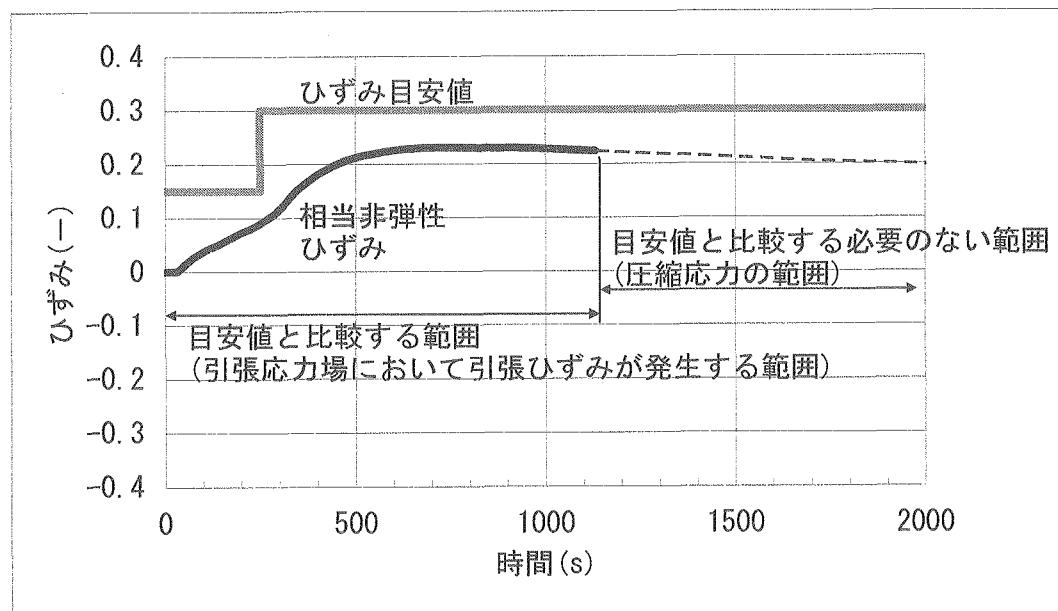
図A-16 全面一様減肉における内側リブ端部上面の応力、ひずみの履歴
(ケース8)



a. 温度履歴



b. y方向ひずみ及びy方向応力履歴



c. 相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値

図A-17 全面一様減肉における外側リブ端部下面の応力、ひずみの履歴
(ケース8)

付録B.
降温過程における腐食減肉の
重ね合わせの考え方

付録-B 降温過程における腐食減肉の重ね合わせ

(1) 降温過程における腐食減肉の重ね合わせの考え方

本文及び付録Aの減肉ありモデルにおいては、溶融塩型腐食（最も厳しい腐食減肉量を与える）を重ね合わせた昇温過程の評価を実施している。床ライナの熱変形挙動及び溶融塩型腐食の発生形態を踏まえ、降温過程におけるひずみ評価において、溶融塩型腐食の重ね合わせの必要があるかどうかを検討した。溶融塩型腐食は固相、気相、液相の三相界面（図B-1に示す床ライナ、雰囲気、溶融体（プール）の境界。以下、溶融体プール境界という。）で加速されやすいという「社団法人 電気化学会」の知見^{*1}に基づくと、ひずみ集中部であるひずみ防止リブ端部における腐食減肉の考え方は以下のようになる。

ひずみ防止リブ端部に大きなひずみが発生する1フレームスパン規模（本文の図5.2-4より）の場合、床ライナの熱変形挙動は図B-1及び図B-2に示すようになる。図B-1及び図B-2について以下に説明する。

図B-1に概念的に示すように、床ライナ上にナトリウムが漏えいすると、ナトリウム燃焼領域は盛り上がり、それに伴って周辺域がわずかに沈み込むような変形を示す。内側リブ及び外側リブで挟まれた部分には最も急峻な勾配が生じる。ナトリウム燃焼領域を一定とする場合、この変形は基本的に漏えい終了時まで持続する。

ひずみが最大となるナトリウム漏えい発生後約700秒時点での床ライナの熱変形を図B-2に示す。大きなひずみが発生するひずみ防止リブ端部は、床ライナの傾斜勾配が最も急峻（30°）な部分の両端に位置している。

一方、溶融塩型腐食を生じさせる溶融体プールは流動性を有しており、ひずみ防止リブ端部が溶融体プール境界となることは考えにくい。むしろ、溶融体プールは床ライナの盛り上がり部から周辺部へ、傾斜に沿って移動すると考えるのが自然である。従って、溶融体プールはナトリウム燃焼領域周辺の最も低い点を中心とする領域に形成されると考えられる。

図B-2に示した床ライナの熱変形から試算すると、漏えいナトリウムの体積は、床ライナが沈み込んだ部分の体積（上下方向変形量0以下領域で、y方向距離2100mm～4500mm）とほぼ等しくなり、漏えいしたナトリウムは床ライナが沈み込んだ部分に全て溜まるため、溶融体プール境界はひずみ防止リブ端部から十分離れた位置になる。

したがって、ひずみ防止リブ端部に大きなひずみが発生する場合は、昇温後に溶融体プール境界がひずみ防止リブ端部に重なることはなく、ひずみ防止リブ端部に有意な減肉が生じることはない。このため、降温過程においてひずみが集中するひずみ防止リブ端部に、溶融塩型腐食による減肉を重ね合わせる評価は不要である。本文5.5(3)項に示すように、溶融塩型腐食減肉を想定した床ライナのひずみ評価は、昇温過程においてのみ実施すればよい。

また、ナトリウム燃焼領域の位置が移動することにより、溶融体プール境界とひずみ防止リブ端部とが一致するような場合も考えられる。しかしながら、このような場合にはひずみ防止リブ端部には有意なひずみは発生しないので問題とはならない。

以上をまとめると、ひずみ集中部であるひずみ防止リブ端部における溶融塩型腐食の重ね合わせの考え方は以下の①～③に集約される。

- ①ひずみ防止リブ端部に大きなひずみが発生する場合、そこは傾斜部に位置することから、溶融体プール境界と重なることはなく、著しい腐食減肉が進行することはない。
- ②ひずみ防止リブ端部に著しい腐食減肉が生じる（溶融体プール境界と重なる）場合、床ライナの熱変形挙動から考えてひずみ防止リブ端部に有意なひずみは発生しない。
- ③したがって、ひずみ防止リブ端部に大きなひずみが発生する場合と著しい腐食減肉が生じる場合は同時に起こり得ず、降温過程においてひずみ防止リブ端部に腐食減肉を重ね合わせる必要はない。

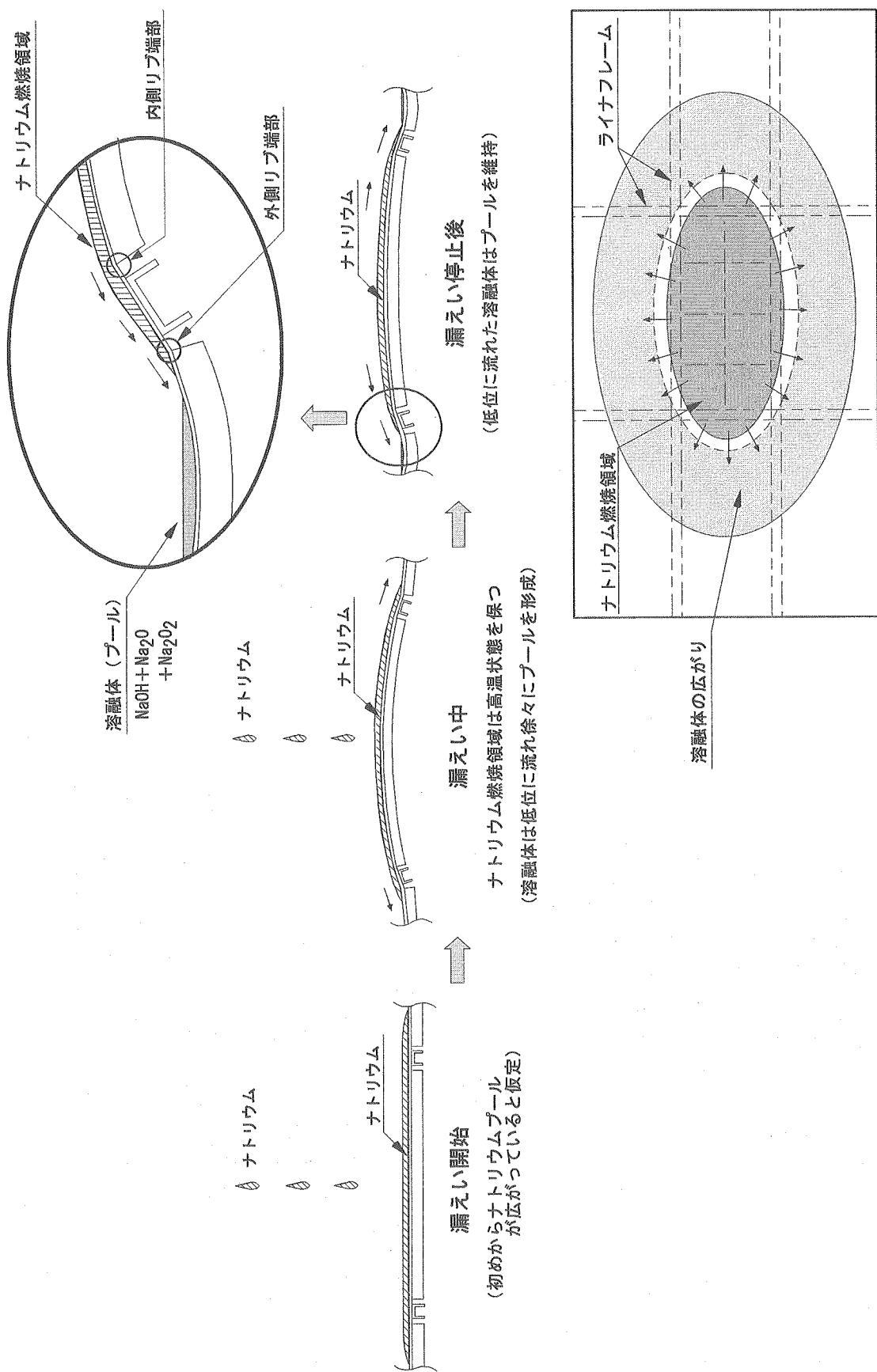
更に、最大ひずみが目安値を下回っていることを念のために確認する目的で、ひずみ防止リブ端部に溶融塩型腐食を想定した最大減肉量 2.6mm^[3]を重ね合わせ、降温過程も含めたひずみ評価を行った。なお、前述の表 A-2 に示した解析結果より、ひずみが最大となる外側リブ端部帶状減肉モデルを用いて解析を行った。

解析結果を図 B-3 に示す。降温過程で外側リブ端部上面に引張応力が生じており、更にひずみが引張に転じているが、最大ひずみはひずみの目安値（15% : 350°C 以下）を下回っており、ライナ板に貫通性の損傷が生じることはない。

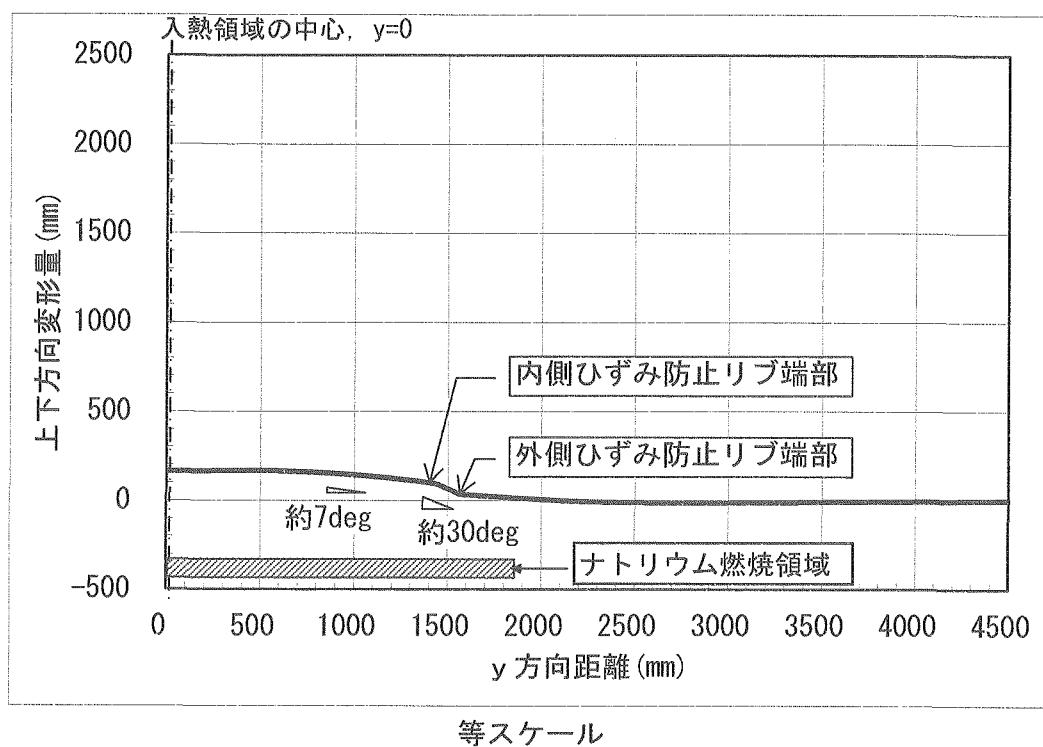
(2) NaFe 複合酸化型腐食を考慮した場合の評価

上記(1)より、降温過程においてひずみ防止リブ端部に溶融塩型腐食減肉を重ね合わせる評価は不要であることを述べた。ただし、溶融塩型腐食よりも腐食速度が遅い NaFe 複合酸化型腐食については、ひずみ防止リブ端部にも腐食減肉が生じる可能性がある。NaFe 複合酸化型腐食の減肉速度の上限値^[3]を用いて減肉量を評価すると、床ライナ温度が最大となる過熱器室 (A-439) の 0.4t/h ナトリウム漏えい時において、その最大腐食減肉量は約 0.7mm である（図 B-4 参照）。この減肉量であれば、外側リブ端部の上面に帶状の腐食減肉を重ね合わせても、降温過程では外側リブ端部上面に引張応力が生じるもの、圧縮の残留ひずみが減少するのみであり、ひずみが引張に転じることはない（目安値と比較する必要のない範囲）。なお、降温過程の負荷反転によりひずみが引張に転じない腐食減肉深さは、およそ 1～2mm である。

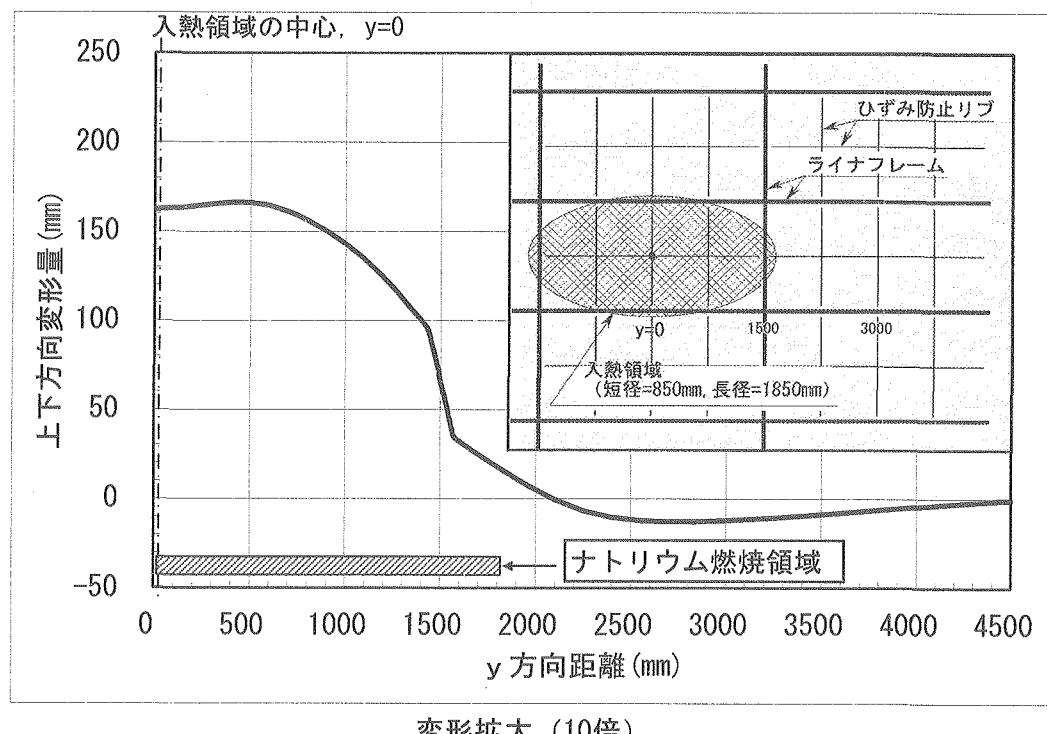
* 1 : 社団法人電気化学会ホームページ (<http://www.electrochem.jp/info.html#21>)
より、「酸化物の関与する鉄の腐食」報告書参照



図B-1 床ライナの変形と溶融体挙動（概念図）

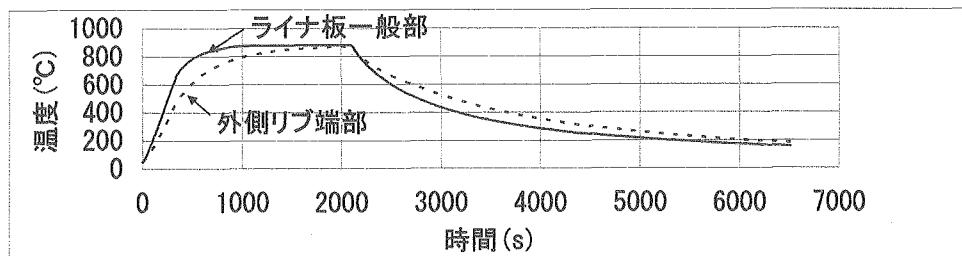


等スケール

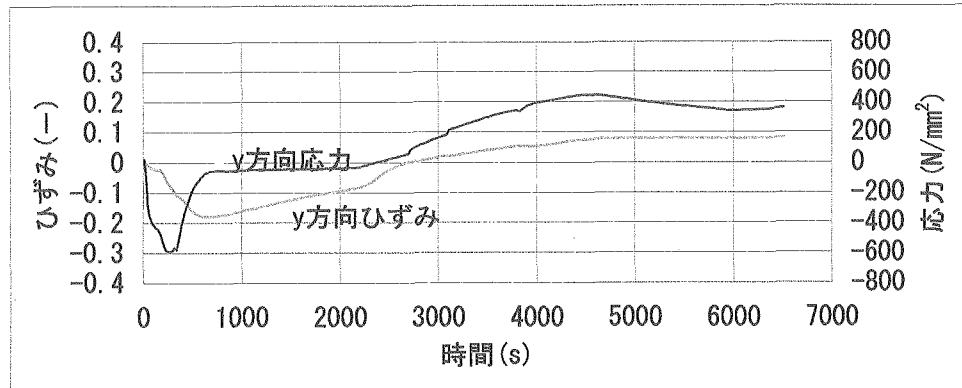


変形拡大 (10倍)

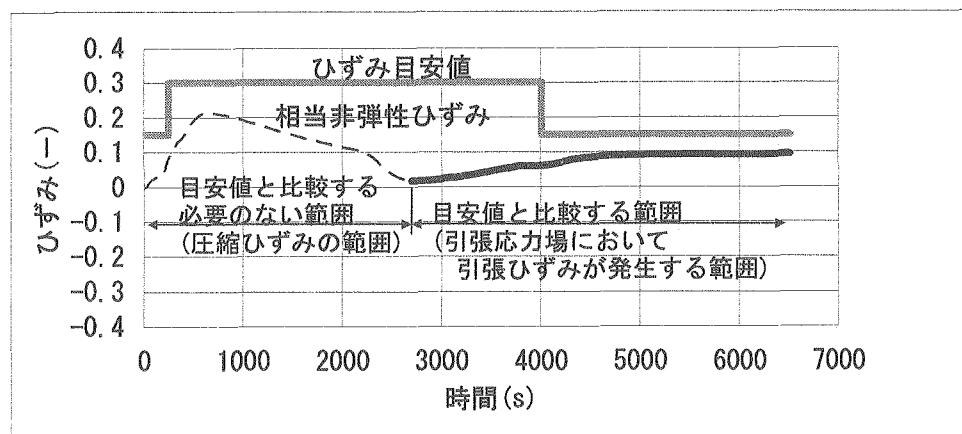
図B-2 床ライナの熱変形



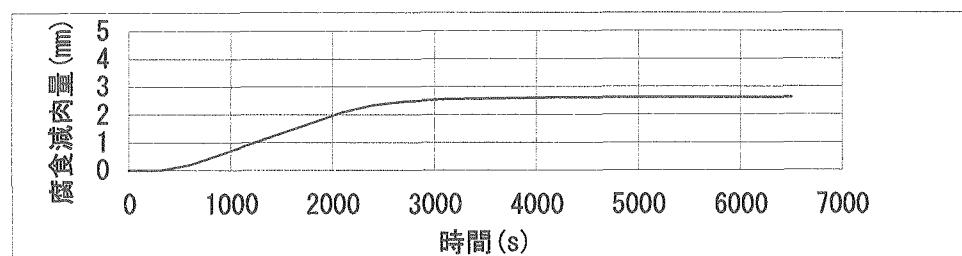
a. 温度履歴



b. 外側リブ端部上面のy方向ひずみ及びy方向応力履歴



c. 外側リブ端部上面の相当非弾性ひずみ履歴及びひずみの目安値



d. 腐食減肉量

図B-3 外側リブ端部に減肉 2.6mm を重ねたケースの解析結果

図B-4 NaFe複合酸化型腐食を考慮した減肉履歴

