

原子炉容器液面近傍部を対象とした 熱応力緩和方策の提案

(研究報告)

2003年9月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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（代表）
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 Muramatsu, 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

原子炉容器液面近傍部を対象とした熱応力緩和方策の提案

(研究報告)

安藤昌教*¹ 笠原直人*¹

要旨

高速炉の原子炉容器は、上端をコンクリート建屋により支持され、炉心上部プレナムに高温の冷却材を有することから、冷却材液面から上端支持部に至る鉛直方向に大きな温度勾配が生じる。その結果炉壁液面近傍部に原理的に高い応力が発生することになる。当該部位についてはこれまで、発生する熱応力を低減させ、炉壁を保護するための様々な方策が採られてきた。しかし、これらの対応策は、物量の増加、制御の複雑化、メンテナンス性の低下等の弊害を併せ持つことが多い。本研究では、単純な構造で物量の増加を最小限に抑えた熱応力緩和方策を提案すると共に、数値計算を用いてそれら緩和方策の効果を検証した。本研究により得られた主な結果は以下のとおりである。

高温ガスを炉壁外面に循環する応力緩和方策を提案し、解析によりその効果を確認した。

- ・ 高温ガス循環による熱応力緩和方策を施した場合、構造設計基準における応力の指標である一次+二次応力強さ範囲 (Sn) が約 45%減少する見通しがある。

熱伝導板を炉壁外面に非接触で設置する熱応力緩和方策を提案し、解析によりその効果を確認した。

- ・ 熱伝導板を用いた熱応力緩和方策の効果は伝導板の物性値に依存することを確認した。
- ・ 熱伝導板の材料に、良熱伝導体である黒鉛を用いた場合、Sn 値が約 27%、また 12Cr 鋼を用いた場合、Sn 値が約 15%減少する見通しがある。

ガードベッセルの材料を良熱伝導体に変更することで、発生熱応力の緩和を図る方策を提案し、解析によりその効果を確認した。

- ・ ガードベッセルの材料を 12Cr 鋼とすることで、Sn 値が約 12%減少する見通しがある。

*¹大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

Proposal on the Mitigation Methods of Thermal Stress Near the Sodium
Surface of Reactor Vessel

Masanori ANDO*¹ Naoto KASAHARA*¹

Abstract

A Reactor vessel of fast reactor plants contains high temperature liquid sodium in its inside and its upper end is supported by a low temperature structures. Therefore, a significant temperature gradient will arise at the vessel wall near the sodium surface. For this reason, a large thermal stress will be generated around this part. To lower this stress and to protect the vessel, a number of methods have been applied the plants. Generally, these mitigation methods by protection equipments for thermal stress also have some problems such as, increase a mount of materials or to be complicate for control, hard to maintenance and so on. In this research, authors suggested another simple methods for thermal stress, and evaluated their effects using computer analysis. The results obtained in this research are as follows.

Authors suggested one method, circulate high temperature gas around outside of the vessel and evaluated the effects of this method by analysis.

- In case of using this method, Sn(one of index values of design) value might be getting lower about 45%.

Authors also suggested another method by setting up a heat transfer plate outside of the vessel and evaluated the effects of this method by analysis.

- Effects of this method depend on material of the plate.
- In case of using Carbon as material of plate, Sn value might be 27% lower and in case of using 12Cr steel as material of plate, Sn value might be 15% lower.

Authors also suggested another method by changing material of the guard vessel to be the one which has good ability of heat transfer and evaluated the effects of this method by analysis.

- In case of changing material of guard vessel to 12Cr steel, Sn value might be lower about 12%.

*¹:Structural Mechanics Research Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center, JNC

目次

1.緒言	1
2 高温ガス循環による熱応力緩和方策	3
2.1 高温ガス循環による熱応力緩和方策の概要	3
2.2 応力緩和方策の有効性確認のための解析詳細	4
2.2.1 解析モデル	4
2.2.2 解析条件	4
(1) 拘束条件	4
(2) 1次応力	4
(3) 熱過渡条件	4
(4) 物性値	4
(5) 熱的境界条件	4
2.3 高温ガス循環による熱応力緩和方策の効果検証のための解析結果と考察	5
3 熱伝導板による熱応力緩和方策	6
3.1 熱伝導板による熱応力緩和方策の概要	6
3.2 応力緩和方策の有効性確認のための解析詳細	7
3.2.1 解析モデル	7
3.2.2 解析条件	7
(1) 拘束条件	7
(2) 1次応力	7
(3) 熱過渡条件	7
(4) 物性値	7
(5) 熱的境界条件	8
3.3 H12年度ナトリウム冷却大型炉設計への応用	8
3.3.1 H12年度の設計を考慮した場合の解析条件	8
(1) 熱的境界条件	8
3.4 熱伝導板による熱応力緩和方策の効果検証のための解析結果と考察	8
4 良熱伝導材を使用したガードベッセルによる熱応力緩和方策	10
4.1 ガードベッセルによる熱荷重緩和方策の概要	10
4.2 熱応力緩和方策の有効性確認のための解析詳細	10
4.2.1 解析モデル	10
4.2.2 解析条件	10
(1) 物性値	11
(2) 熱的境界条件	11
4.3 ガードベッセルの輻射による効果検証のための解析結果と考察	11

5 結言	12
6.謝辞	13
参考文献	14

List of Tables

Table 1 Equipments for analysis	15
Table 2 Elements for analysis	15
Table 3 Material property data	16
Table 4 Comparison of Sn values in each case	16
Table 5 Elements for heat transfer analysis.....	17
Table 6 Material property data for heat transfer analysis (Carbon)	17
Table 7 Material property data for heat transfer analysis (12Cr steel)	17
Table 8 Values of each coefficient for analysis.....	18
Table 9 Analysis cases for heat transfer plate method.....	18
Table 10 Analysis cases.....	19
Table 11 The biggest Sn values in each case	20

List of Figures

fig.1 Examples of thermal stress mitigation methods..... 21

fig.2 Design case of reactor vessel around Sodimu surface..... 21

fig.3 Outline of high temperature gas circulation method..... 22

fig.4 Plinciple of high temperature gas circulation method..... 22

fig.5 Temperature properties of gas 23
for high temperature gas circulation method..... 23

fig.6 Model of reactor vessel near the sodium surface..... 24

fig.7 Analysis model for high temperature gas circulation 24

fig.8 Boundary conditions of each case 25

fig.9 Temperature histry of the vessel (without mitigation measures) 25

fig.10 Temperature histry of the vessel (with passive mitigation measure) 26

fig.11 Temperature histry of the vessel (with gas circulation measure)..... 26

fig.12 Distribution of each stress values (without mitigation measure) 27

fig.13 Distribution of Sn values (without mitigation measure) 27

fig.14 Distribution of each stress values (passive mitigation measure) 28

fig.15 Distribution of Sn values (passive mitigation measure)..... 28

fig.16 Distribution of each stress values (active mitigation measure) 29

fig.17 Distribution of Sn values (active mitigation measure) 29

fig.18 Outline of heat conduction plate measure..... 30

fig.19 Plinciple of heat conduction measure 30

fig.20 Relation between heat transfer coficients by radiation and
temperature 31

fig.21 Analysis model..... 31

fig.22 Analysis model near the heat conduction plate..... 32

fig.23 Design case of reactor vessel around Sodium surface..... 32

fig.24 Effects of heat conduction plate measures 33

fig.25 Comparison of temperature contour..... 33

fig.26 Comparison of temperature distribution..... 34

fig.27 Comparison of temperature distribution (near the Sodium surface) . 34

fig.28 Comparison of analysis results 35

fig.29 Transition of Sn values with temperature changing..... 35

fig.30 Analysis model..... 36

fig.31 Analysis model around Sodium surface..... 36

fig.32 Comparison of Sn values ($\epsilon_2=0.1$ insulation inside) 37

fig.33 Comparison of Sn values ($\epsilon_2=0.8$ insulation inside) 37

fig.34 Comparison of Sn values ($\epsilon_2=0.1$ inside heat transfer)	38
fig.35 Comparison of Sn values ($\epsilon_2=0.8$ inside heat transfer)	38
fig.36 Comparison of temperature distribution.....	39
fig.37 Comparison of temperature distribution (near the Sodium surface) .	39
fig.38 Comparison of Mises stress.....	40
fig.39 Temperature contour (GV-316FR insulation inside).....	40
fig.40 Temperature contour (GV-316FR heat transfer inside)	41
fig.41 Temperature contour (GV without heat transfer plate).....	41
fig.42 Comparison of temperature distribution on outside of the vessel.....	42
fig.43 Comparison of temperature distribution (near the Sodium surface) .	42

1. 緒言

高速炉の原子炉容器は、上端を100℃以下のコンクリート建屋により支持され、その一方で炉心上部プレナムに高温ナトリウムを有することより、ナトリウム液面から炉壁上端支持部までの鉛直方向に非常に大きな温度勾配が生じる。この結果、炉壁液面近傍には大きな熱応力が発生し、この部位は設計における限定要因の一つとなっている。

定常および過渡熱応力を緩和するため、これまで炉容器液面近傍部には低温ナトリウム循環方式、液位制御方式、ライナー構造方式、ガスダム方式など、様々な熱応力緩和装置が採用されてきた。これまでの設計に用いられた熱応力緩和方策の一例をfig.1に示す。

これに対し、FBR サイクル実用化戦略調査研究におけるナトリウム炉の設計では、経済性向上の観点から、簡素で物量の少ない原子炉構造が求められている。この要求を満たすため、単純円筒容器の採用が検討されているが、応力緩和装置を持たない分、相対的に炉壁に生じる熱応力は増大する方向にある。炉壁に生じる曲げ応力を低減させるために、炉壁の薄肉化も検討されているが、他の破損モードの制限から限界がある。また原子炉容器壁の液面近傍部に生じる熱応力は、ホットプレナムの冷却材温度とコンクリート建家の温度差によって生じることから、その大きさは炉心出口温度に比例して増大する可能性がある。このため当該部は、主要部位であることを考えると、プラント高温化の限定要因となりうる。これらの問題を解決するため、高温条件で効果的に機能する熱応力緩和方策が必要となる。

本研究では、単純な構造で、複雑な制御を必要とせず、物量の増加を最小限に抑えた原子炉容器の熱応力緩和方策を提案する。今回提案する熱応力緩和方策は以下の3通りである。

- ・ 高温ガス循環による熱応力緩和方策
液面付近の炉壁外面に、高温の不活性ガスを循環させることで熱伝達を促進させ、急峻な温度勾配を軽減させ、熱荷重を緩和するもの。
- ・ 炉壁外部に設置した熱伝導板による熱応力緩和方策
液面付近の炉壁外面に、熱伝導性と熱輻射率の良好な材料からなる熱伝導板を非接触で設置し、炉壁軸方向の熱伝達を促進させ、急激な温度勾配を軽減し、熱荷重を緩和するもの。
- ・ 良熱伝導材を使用したガードベッセルによる熱応力緩和方策
ガードベッセル自体に熱伝導板の役割を持たせるため、材質に熱伝導性の良好な材料を用い、ガードベッセルからの輻射過熱を考慮することで、前述し

た熱応力緩和方策と同様の効果を期待するもの。
これら各方策について、数値解析を用いてその効果を検証した。

2 高温ガス循環による熱応力緩和方策

これまでの研究から、炉容器液面近傍に発生する熱応力が、熱的境界条件に非常に敏感であることがわかっている^[1]。単純円筒容器を採用するために、これまでの設計では断熱材等を複雑に組み合わせて熱応力の低減を図ってきた。H12年度の設計研究の例をfig.2に示す^[2]。炉壁上端部は、コンクリート建屋に支持されており、その健全性を確保するため低温に保つ必要がある。そこで炉壁外部アニュラス空間には常時低温の冷却ガスを循環させ、冷却を行う必要がある。現在考案されている設計^[2]では、炉壁内面とカバーガスとの境界面の熱伝達を最大限に利用し、液面近傍の応力値を計算上低減させている。そのため設計は成立しているが、実機を考えた場合、炉壁内部の断熱材はナトリウムミストの付着等、熱伝達率の低下の原因となる不確定因子が多く、応力低減策としての機能が運転中に低下することも懸念される。今回提案する高温ガス循環による熱応力緩和方策は、液面付近の炉壁外面に不活性ガスを循環させることで軸方向の熱伝達を促進させ、液面付近に生じる急激な温度勾配を軽減させるものである。炉容器液面近傍の熱応力は、局所的な温度勾配に敏感であるため、局所温度勾配をわずかに緩和することにより、発生する熱応力を効果的に低減させることが可能であると考えられる。なお、電源喪失等によりプラント稼動中に本システムが作動しないケースも考えられるが、当該部位の破損形態としては繰返し負荷による疲労破損が主であることから、少数回の不作動については破損への直接の影響を無視することができる。

2.1 高温ガス循環による熱応力緩和方策の概要

高温ガス循環による熱応力緩和方策の概要をfig.3に、その原理をfig.4に示す。液面近傍部炉壁外面アニュラス空間に、起動に伴う内部ナトリウム温度の上昇にあわせ、窒素ガス等の不活性ガスを強制的に対流させる(fig.3)。これにより液位以上の部位まで昇温され、ナトリウム液温にほぼ追従させることができる。アニュラス空間に不活性ガスを循環させる具体的な装置に関しては、ガードベッセルに循環口を設けることに対する安全性の検討等も含め、今後行う必要がある。今回考案した方法を用いることで、熱応力の発生ポイントが液面付近に集中することを避けることができると考えられる。熱的境界条件に敏感な部位の設計には、経年変化が少なく安定した熱伝達を確保することが不可欠となる。今回提案する方策は、ナトリウム温度の上昇に伴う複雑な温度制御を必要としない。既存のアニュラス空間にガスを循環させることで、液位以下で昇温されたガスが効果的に液面上部を加熱する。また原子炉容器液面近傍には、定常時よりも、熱過渡を受ける起動時に最大応力が発生する。したがって、常時冷却の必要な上端部に対し、高温ガス循環系については、原子炉起動時にの

み動作させる。高温ガス循環による方策の制御シーケンスを fig.5 に示す。

2.2 応力緩和方策の有効性確認のための解析詳細

熱応力緩和の効果を検証するため、考案した高温ガス循環による方策を用いた炉容器液面近傍部をモデル化し、有限要素解析を行った。また、結果を比較するため、応力緩和方策をとらない単純円筒容器と、熱遮蔽板等による応力緩和方策を施したモデルについても解析を行った。解析結果は温度分布、炉壁表面の各応力成分に加え、設計の指標となる一次+二次応力強さ範囲 (Range of Primary plus Secondary Stress Intensity) S_n による評価も行った。

S_n は以下のように定義される。

$$S_n = \text{Max} \{ (S_{12})_R, (S_{23})_R, (S_{31})_R \} \quad (1)$$

$$(S_{ij})_R = (S_{ij})_{\text{max}} - (S_{ij})_{\text{min}} \quad j, i = 1, 2, 3,$$

2.2.1 解析モデル

原子炉容器液面近傍部を、fig.6 に示すような単純円筒形と仮定し、メッシュモデルを作成した。解析に用いた計算環境を Table1 に、メッシュモデル作成に用いた要素を Table2 に示す。作成したメッシュモデルを fig.7 に示す。

2.2.2 解析条件

境界条件を以下の通り設定した^[2]。

(1) 拘束条件

炉容器上端を軸方向にのみ固定。下端は自由端とする。

(2) 1次応力

一次応力として内圧 $1.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ (差圧) を容器内面に、自重 $1.75 \times 10^6 \text{ kg}$ (吊下重量) を容器下端に一様な荷重として加えた。

(3) 熱過渡条件

温度条件として内部ナトリウム温度を 200°C から 550°C まで、昇温速度を毎時 15°C とした。またナトリウムの熱膨張に伴い、液温 200°C から 400°C の間に 880mm 、 400°C から 550°C の間に 350mm ナトリウム液位を上昇させる。各解析ケースにおける熱的境界条件は設計条件を参考に設定した^[2]。それぞれの値を fig.8 に示す。

(4) 物性値

物性値には高速炉用構造材として候補に挙がっている 316FR の物性値を用いた^[3]。解析に用いた物性値を Table3 に示す。

(5) 熱的境界条件

・ナトリウムと炉壁内面との熱伝達係数は $930 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (サーマルライナ

を考慮) とする。

- 炉容器内面とカバーガスとの熱伝達係数は $0.64\text{W/m}^2\text{K}$ (熱遮蔽板を考慮した場合)、 $3.49\text{W/m}^2\text{K}$ (熱遮蔽板を考慮しない場合) とする。
- 炉容器外面とアニュラス部との熱伝達係数は $5.82\text{W/m}^2\text{K}$ (高温ガス循環を考慮した緩和方策を適用した場合)、断熱 ($0\text{W/m}^2\text{K}$: 緩和方策を適用しない場合) とする。
- 上端部冷却ガス温度を 100°C 一定とし、内部カバーガス温度は、ナトリウム温度に追従して上昇するものとする。
- カバーガス温度は $T_{\text{gas}}=0.89T_{\text{Na}}-19(^{\circ}\text{C})$ とする。

2.3 高温ガス循環による熱応力緩和方策の効果検証のための解析結果と考察

fig.9、fig.10、fig.11 にそれぞれ応力緩和方策のないケース、熱遮蔽板を考慮したケース、高温ガス循環による熱応力緩和方策を施したケース、それぞれの解析から得られた温度分布を示す。また fig.12、fig.14、fig.16 に各解析ケースの各応力成分を、fig.13、fig.15、fig.17 に各解析ケースの S_n の分布を示す。

温度分布を比較すると、緩和方策のないケースに比べ、緩和方策のあるケースでは上端と液面との中間点付近に温度勾配の折れ曲がりが見られており、その影響で液面での温度勾配が緩和されたものと考えられる。 S_n 値を比較すると、応力緩和方策のないケースに比べ、熱遮蔽板を考慮したケースおよび高温ガス循環による緩和方策を施したケースでは、 S_n 値のピークが減少していることがわかる。各ケースの S_n 値を比較すると、緩和方策の無いケースに比べ熱遮蔽板を考慮したケースで S_n の最大値で約 8% 減少。さらに高温ガス循環による緩和方策を用いたケースでは約 45% と大幅に減少することがわかった。

数値解析により得られた S_n の最大値を比較した結果を Table4 に示す。高温ガス循環による応力緩和方策を適用した場合、原子炉容器液面近傍応力が設計許容値を余裕を持って下回ることが確認できる。

今回提案した熱応力緩和方策は、ガス循環という簡素で非接触な方法で炉容器液面近傍に生じる熱応力を低減することができる。また、既存のアニュラス空間を流路とし、内部ナトリウムを循環ガスの熱源とするため、有意な物量の増加と複雑な温度制御を必要としない。また原子炉容器液面近傍の熱応力で想定される破損様式は、応力の負荷回数が関係するクリープ疲労と、ラチェット変形であるため、発生頻度の少ない電源喪失や制御機構の故障等の影響を無視することができる。高温ガス循環を用いた応力緩和方策を用いることにより、起動時の熱応力を低減することができれば、プラントの昇温速度を上げ、起動時間を短縮することも可能となり、プラントの安全性と、経済性の両者の向上に寄与するものと思われる。

3 熱伝導板による熱応力緩和方策

ここではガス循環方式に比べて、より単純な構造で複雑な制御を必要としない、熱伝導板を用いた原子炉容器の熱応力緩和方策を提案する。原子炉容器壁の外部に液面の上下をカバーする範囲で、良熱伝導材料を使用した熱伝導板を設置する。これにより原子炉容器壁鉛直方向の伝熱を促進し、熱応力の要因となっている温度分布の折れ曲がりを緩和する。

3.1 熱伝導板による熱応力緩和方策の概要

熱伝導板による熱応力緩和方策の概要を fig.18 に示す。原子炉容器の外部に、液面の移動を包含する範囲で良熱伝導体を使用した熱伝導板を設置する。板は fig.18 に示すようにガードベッセル等の原子炉容器外の構造物から支持する。本方策による熱荷重緩和の原理を fig.19 に示す。熱伝導板はナトリウムからの輻射により加熱される。熱伝導板は良熱伝導材であることから、炉壁より速く上部まで伝熱し、逆に輻射伝熱により外側から炉壁を加熱する。これにより液面近傍部の軸方向の熱伝達効率を向上させ、温度分布の折れ曲がりを緩和する。熱伝導板寸法は厚さが 30mm 程度、長さが 1500mm 程度とする。設置位置に関しては検査性を考慮して、ここでは原子炉容器壁から熱伝導板表面までの距離を 60mm 程度、鉛直方向位置は液面上部の板の長さ 500mm、液面下部の板の長さ 1000mm 程度となるようにする。熱伝導板の材質は、熱の良伝導体である黒鉛および 12Cr 鋼を想定した。ここで平行平面間の輻射による等価熱伝達係数 H は以下の式 2 で表される^[4]。

$$q = \sigma(T_1^4 - T_2^4) \times \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2)$$

$$= \varepsilon_{eq} \sigma (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3) (T_1 - T_2)$$

$$= H(T_1 - T_2)$$

$$\text{ただし } \varepsilon_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

ε_1 、 ε_2 は材料に依存する射出率で、ここではステンレス製の炉壁を $\varepsilon_1 = 0.1$ 、熱伝導板を黒鉛の場合 $\varepsilon_2 = 0.8$ 、12Cr 鋼の場合 $\varepsilon_2 = 0.1$ と保守的（小さめ）に設定する^[5]。 σ はステファン-ボルツマン定数である。上式から等価熱伝達係数 H と、均熱状態における炉壁および伝熱板の温度との関係を算出すると fig.20 のようになる。炉壁および伝熱板が高温になるにつれ急激に熱伝達係数 H が増加することがわかる。このことから実機の使用条件である高温状態において、

熱伝導板を用いた輻射過熱により、ガス強制循環熱伝達（ $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 程度）に比べ、熱伝達が優位に行われることが予想できる。

3.2 応力緩和方策の有効性確認のための解析詳細

考案した熱伝導板による熱応力緩和方策を用いた炉容器液面近傍部をモデル化し、有限要素解析を行った。解析結果は一次+二次応力強さ範囲 S_n による評価を行った。

3.2.1 解析モデル

原子炉容器液面近傍部を、fig.6 に示すような単純円筒形とし、メッシュモデルを作成した。作成した解析メッシュを fig.21 に、また熱伝導板設置部分を拡大したものを fig.22 に示す。さらに解析に用いた要素の一覧を Table5 に、周辺環境を Table1 に示す。

3.2.2 解析条件

境界条件を以下の通り設定した。

(1) 拘束条件

炉容器上端を軸方向にのみ固定。下端は自由端とする。

(2) 1次応力

一次応力として内圧 $1.47 \times 10^5 \text{ Pa}$ （差圧）を容器内面に、自重 $1.77 \times 10^6 \text{ kg}$ （吊下重量、コアキャッチャ含む）と容器下部に内圧が及ぼす分の荷重を、容器下端に一樣な圧力荷重として加えた。

(3) 熱過渡条件

熱応力が最も厳しくなる原子炉容器起動時の条件を模擬し、さらにプラントの高温化を考慮に入れ、内部ナトリウム温度を 200°C から 600°C まで上昇させることとした。昇温速度は 200°C から 400°C までを毎時 15°C 、 400°C から 600°C までを毎時 20°C とした。またナトリウム温度の上昇に伴う液面上昇を考慮した。ナトリウム液面上昇は 200°C から 400°C の上昇区間で 880 mm 、以後 400°C から 600°C の区間で 350 mm それぞれ上昇することとする。

(4) 物性値

原子炉容器の材料には、高速炉用構造材として候補に挙げられている 316FR の物性値を用いた。解析に用いた物性値を Table3 に示す^[3]。また、本方策では輻射加熱による入熱を効率良く熱伝導するため、熱伝導板の材料として良熱伝導体を用いる必要がある。ここでは黒鉛と 12Cr 鋼を想定して解析を行った。ただし黒鉛は結晶構造により物性値が大きく異なるため、それらの代表の値として、

保守的（小さめ）な物性値を用いることとした。熱伝導板に用いた材料の各物性値一覧を Table6、Table7 に示す^[3]。また不確定性のある射出率についても、Table8 に示すように保守的な値を用いた^[4]。

(5) 熱的境界条件

- ・ ナトリウムと炉壁内面との熱伝達係数は $930\text{W/m}^2\text{K}$ （サーマルライナを考慮）とする。
- ・ 上端部冷却ガス温度を 100°C 一定とし、内部カバーガス温度は、ナトリウム温度に追従して上昇するものとする。
- ・ カバーガス温度は $T_{\text{gas}}=0.89T_{\text{Na}}-19(^{\circ}\text{C})$ とする。

3.3 H12 年度ナトリウム冷却大型炉設計への応用

H12 年度ナトリウム冷却大型炉の設計では、原子炉容器内部、液面以上の部分へのナトリウム液面からの輻射加熱による効果を期待している^[2]。そこで今回提案する緩和方策を、上記設計に適用した場合の効果を検証するため、ナトリウム液面からの輻射を考慮して解析を行い、その効果を検証した。

3.3.1 H12 年度の設計を考慮した場合の解析条件

解析条件に関しては 3.2 に順ずるものとする。変更点のみを以下に記す。

(1) 熱的境界条件

- ・ 炉容器内面、液面以上の部分にナトリウムからの輻射加熱を考慮し、カバーガスと炉壁との熱伝達（熱伝達係数 $0.64\text{W/m}^2\text{K}$ ）を想定する。

H12 年度の設計による熱的境界条件を fig.23 に示す。熱伝導板の無いケースと、黒鉛を用いた熱伝導板のあるケースについて、解析により検証を行った。

今回行った解析ケースの一覧を Table9 に示す。

3.4 熱伝導板による熱応力緩和方策の効果検証のための解析結果と考察

熱伝導板による応力緩和方策のないケース、および黒鉛熱伝導板を施したケース、12Cr 鋼熱伝導板を施したケースの 3 パターンの解析を行った。結果を fig.24 に示す。解析結果はそれぞれ炉壁外表面の一次+二次応力強さ範囲 (S_n) を算出して比較した。計算結果より熱伝導板の物性値の差異により S_n 値が変動することがわかる。fig.25 に熱伝導板の有無による温度分布の違いを示す。熱伝導板のないケース (fig.25 左) に対して、黒鉛熱伝導板のあるケース (fig.25 右) では液面上部まで高温の温度域が広がっていることがわかる。最終ステップにおける液面近傍の軸方向温度分布の折れ曲がり を fig.26 に、液面付近の分布を拡大したものを fig.27 に示す。熱伝導板のないケースに比べ、熱伝導板のある

ケースでは温度分布の折れ曲がり方が緩やかになっていることがわかる。これら二つのケースについて解析結果を比較すると、熱伝導率の良好な黒鉛の熱伝導板を用いた解析から得られた結果は、熱伝導板を考慮しないケースに比べ、Snの最大値が約590MPaから約430MPaへ約27%と大幅に減少することがわかった。また、熱伝導板として12Cr鋼を用いた解析から得られた結果から、Snの最大値が約500MPaと、約15%減少することがわかった。起動時に液面近傍部に発生する熱過渡応力は、同部位における温度勾配の微妙な折れ曲がりの度合いに敏感に依存することがわかる。

H12年度の設計を考慮した場合の解析結果(内部輻射あり)をfig.28に示す。解析結果から、H12年度の設計に熱伝導板を設置した緩和方策を追加することで、発生応力を約20%緩和できることが確認された。

冷却材ナトリウムを550℃から600℃まで昇温させた時の、熱伝導板の有無によるSn最大値の変化の違いをfig.29に示す。ナトリウム温度が高温になるにつれ、各ケース共にSn値が上昇するが、熱伝導板の無いケースに比べ、熱伝導板を施したケースではSn値の上昇率が抑えられている。このことから、炉容器温度が高温になるにつれ、輻射による効果が顕著に作用するようになり、熱応力緩和方策が効果を発揮するものと考えられる。

これらのことから、良熱伝導体を熱伝導板に使用することで、制御の必要がなく簡易に炉壁に生じる熱応力を緩和させることが可能であると考えられる。

4 良熱伝導材を使用したガードベッセルによる熱応力緩和方策

前述の熱応力緩和方策は、炉壁外部に設置した熱伝導板もしくは高温ガスの循環により炉壁液面近傍部の熱伝導を促進し、発生する熱応力の低減を図るものであった。ここで提案する方法は、ガードベッセル自体を熱伝導板として使用し、ガードベッセルから得られる輻射加熱を考慮することで前述した方策と同等の熱応力緩和効果を期待するものである。

4.1 ガードベッセルによる熱荷重緩和方策の概要

ガードベッセルの材料として良熱伝導材を使用する。さらに必要に応じてガードベッセル表面を黒体化処理することにより輻射効率の向上を図る。炉容器外面が輻射効果により加熱されることで、原子炉容器壁鉛直方向の伝熱を促進し、熱応力の要因となっている温度の折れ曲がりを緩和する。今回ガードベッセルの材質として、12Cr 鋼および 316 F R 鋼を想定した。炉容器および炉容器外部構造の概要は fig.2 に示す通りであり、特別に付加する装置はない。熱応力緩和の原理は fig.19 に示す熱伝導版と同様であり、ガードベッセルを熱伝導板とみなす。炉壁とガードベッセルを平行平面と見なした場合、輻射による等価熱伝達率の大きさは 3.1 章 (2) 式で表される。ガードベッセルの輻射率として、表面に加工を施さない場合を $\varepsilon_2=0.1$ と、表面を黒体化処理した場合を $\varepsilon_2=0.8$ と、いずれも保守的 (小さめ) に設定した^[5]。等価熱伝達係数と均熱状態における炉壁とガードベッセルの温度との関係は、fig.20 に示す通り。ガードベッセルによる輻射効果を考慮することで、前章において検討した熱伝導板による熱応力緩和方策同様の応力緩和効果が期待できる。

4.2 熱応力緩和方策の有効性確認のための解析詳細

提案する熱応力緩和方策の効果を検証するため、炉容器液面近傍部および同範囲のガードベッセルをモデル化し有限要素解析を行った。解析結果は一次+二次応力強さ範囲 Sn により評価を行った。

4.2.1 解析モデル

原子炉容器液面近傍部を fig.6 に示すような単純円筒形とし、メッシュモデルを作成した。作成した解析メッシュを fig.30 に、またガードベッセル設置部分を拡大したものを fig.31 に示す。また解析に用いた要素の一覧を Table5 に、解析に用いた計算環境を Table1 に示す。

4.2.2 解析条件

境界条件および熱過渡条件については前章解析詳細と同様につき省略する。

3.2.2 章参照。

(1) 物性値

炉壁の材料には高速炉用構造材として候補に挙がっている 316FR を想定した。解析に用いた物性値を Table3 に示す。また、本方策では輻射過熱による入熱を効率良く熱伝導するため、ガードベッセルの材料として良熱伝導体を用いる必要がある。ここでは原子炉容器と同じ 316FR 鋼と、それよりも熱伝導率の高い 12Cr 鋼を想定して解析を行った。12Cr 鋼の物性値一覧を Table7 に示す^[3]。

(2) 熱的境界条件

- ・ ナトリウムと炉壁内面との熱伝達係数は $930\text{W/m}^2\text{K}$ (サーマルライナを考慮) とする。
- ・ 上端部冷却ガス温度を 100°C 一定とし、内部カバーガス温度は、ナトリウム温度に追従して上昇するものとする。
- ・ カバーガス温度は $T_{\text{gas}}=0.89T_{\text{Na}}-19(^\circ\text{C})$ とする。
- ・ 炉壁内部のナトリウム液面からの輻射過熱による効果は、内部カバーガスと炉壁との熱伝達中に考慮する (熱伝達係数 $0.64\text{W/m}^2\text{K}$)。

解析では、炉壁内部の輻射による影響を調べるため、内部輻射の有無も熱伝達率中に考慮し、パラメータの一つとして結果の検討を行った。

4.3 ガードベッセルの輻射による効果検証のための解析結果と考察

ガードベッセルによる輻射加熱を考慮しないケース、およびガードベッセル材質を 12Cr 鋼としたケース、316FR 鋼としたケースの解析を行った。それぞれのケースについて、炉壁内面を断熱にした場合と、内面の輻射を考慮し熱伝達率に加味した場合の 2 パターンで解析を行った。また、ガードベッセルによる輻射を考慮したケースでは、炉壁側の射出率を $\varepsilon_1=0.1$ 、ガードベッセル側の射出率を $\varepsilon_2=0.1$ (表面黒体化処理無し)、 0.8 (表面黒体化処理あり) とした。

解析ケースの一覧を Table10 に示す。解析結果はそれぞれ炉壁外表面の応力強さ範囲 (S_n) を算出して比較した。結果を fig.32~35 に示す。計算結果よりガードベッセルの材質の差異により S_n 値が変動することがわかる。各解析ケースにおける、 S_n の最大値をまとめたものを Table11 に示す。またガードベッセル側の射出率を $\varepsilon_2=0.8$ としたケースの最終ステップにおける、炉壁外面の軸方向温度分布を比較したものを fig.36 に、液面近傍部のみ拡大したものを fig.37 に示す。ガードベッセルの材質により、液面近傍部の温度分布の折れ曲がりが増加していることがわかる。

fig.38 にガードベッセルによる輻射の有無および炉壁内部輻射の有無による炉壁外面の mises 相当応力の分布を示す。fig.38 よりわかるとおり、内部輻射の有無により応力値が大きく変化する。ガードベッセルによる輻射を考慮しな

い場合、内部輻射を考慮することで応力値が約 30%、ガードベッセルによる輻射を考慮した場合、内部輻射を考慮することで応力値が約 20% 減少することがわかった。また内部輻射を考慮しない場合、ガードベッセルによる輻射を考慮することで応力値は約 5%減少するが、逆に内部輻射を考慮した場合、ガードベッセルによる輻射を考慮しない場合に比べ約 9%応力値が増加することがわかった。これらのケースについて、最終ステップにおける温度分布のコンター図を fig.39、40、41 に示す。内部熱伝達のあるケースでは、炉壁上部にかけて高温の部分が広がっていることがわかる。同じ各ケースについて炉壁外面の軸方向温度分布を比較したものを fig.42 に、液面付近を拡大したものを fig.43 に示す。Fig.43 より、ケースによって液面付近における温度分布の折れ曲がりの度合いが微妙に異なることがわかる。グラフ中最も急激な折れ曲がりが見られるケースとして、ガードベッセルによる輻射および炉壁内部の輻射を考慮しないケースがあげられるが、このケースでは S_n 値が他のケースに比べ大きくなっている。このことから、原子炉容器液面近傍付近に発生する応力は、軸方向温度分布の折れ曲がりの程度によって敏感に左右され、折れ曲がり急激であるほど発生応力が増加するという傾向が読み取れる。当該部位の温度の折れ曲がりには、周囲の熱的境界条件等により決定されるが、いくつかの応力緩和策を適用する場合、それらの組み合わせにより効果を相殺してしまう可能性もあり設計には注意を要する。

5 結言

原子炉容器液面近傍部に対して、高温ガス循環による熱応力緩和方策、および熱伝導板による同装置を用いることで、発生熱応力を低減させることが可能であることを確認した。また、ガードベッセル自体に熱伝導板の機能を持たせることで、発生熱応力を低減させることも可能であることを確認した。今回提案する緩和方策は、いずれも複雑な制御を必要とせず、大幅な物量の増加を必要としないことから、実設計への適用が期待される。今後は実設計への適用方法を検討していく予定である。

6.謝辞

本研究の遂行にあたり、大洗工学センター要素技術開発部構造信頼性研究グループ及びシステム技術開発部 FBR システムグループ、本社 FBR 推進部各位から多大なご助言を頂き、深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 安藤昌教、「原子炉容器液面近傍熱応力に及ぼす設計因子の感度解析」、JNC TN9400 2001-088、2001年7月
- [2] 森下正樹、青砥紀身、笠原直人他、「高温構造設計高度化研究 平成12年度共同研究報告書」、JNC TY9400 2001-026、2001年1月
- [3] 日本原子力発電株式会社、高速増殖炉実証炉高温構造設計指針 材料強度基準等（案） 平成11年3月
- [4] 矢島悦次郎他、機械・金属材料、丸善株式会社 昭和57年
- [5] 甲藤好郎、伝熱概論、養賢堂 昭和59年
- [6] 岩田耕司、月森和之、「汎用非線形構造解析システムF I N A S使用説明書」、PNC TN9520 95-014、1995年7月

Table 1 Equipments for analysis

実行環境	
計算機	Endeavor Pro 800L
クロック数	866MHz
メモリ	256MB
解析プログラム	
	FINAS for Windows 3.0 ^[6]
解析結果評価プログラム	
	RANGE

Table 2 Elements for analysis

有限要素モデル作成に用いた要素	
熱伝導解析	
	熱伝導8節点四辺形軸対称要素(HQAX8)
	熱伝導3節点軸対称要素(FCAX3)
弾性解析	
	8節点四辺形軸対称要素(QAX8)

Table 3 Material property data

温度 (°C)	ヤング係数 (N/mm**2)	ポアソン 比	瞬時熱膨張係数 (10E-6 mm/mm/°C)	密度(×E+3 kg/m**3)	熱伝導率(×E-6 kcal/mm・s・°C)	比熱 (kcal/kg・°C)
20	1.54E+05	0.3	15.15	7.97	3.5556	0.114
50	1.54E+05	0.3	15.65	7.97	3.6389	0.117
75	1.54E+05	0.3	16.07	7.97	3.7500	0.118
100	1.54E+05	0.3	16.48	7.97	3.8611	0.120
125	1.54E+05	0.3	16.86	7.97	3.9722	0.122
150	1.54E+05	0.3	17.22	7.97	4.0556	0.123
175	1.54E+05	0.3	17.55	7.97	4.1667	0.125
200	1.54E+05	0.3	17.85	7.97	4.2778	0.127
225	1.54E+05	0.3	18.12	7.97	4.3611	0.127
250	1.54E+05	0.3	18.36	7.97	4.4722	0.128
275	1.54E+05	0.3	18.58	7.97	4.5556	0.129
300	1.54E+05	0.3	18.79	7.97	4.6111	0.130
325	1.54E+05	0.3	18.99	7.97	4.7222	0.130
350	1.54E+05	0.3	19.19	7.97	4.8056	0.132
375	1.54E+05	0.3	19.39	7.97	4.8889	0.133
400	1.54E+05	0.3	19.57	7.97	4.9722	0.133
425	1.54E+05	0.3	19.75	7.97	5.0278	0.133
450	1.54E+05	0.3	19.93	7.97	5.1389	0.134
475	1.54E+05	0.3	20.11	7.97	5.2222	0.136
500	1.54E+05	0.3	20.28	7.97	5.3056	0.136
525	1.54E+05	0.3	20.45	7.97	5.3889	0.137
550	1.54E+05	0.3	20.60	7.97	5.5000	0.137
575	1.54E+05	0.3	20.74	7.97	5.5556	0.138
600	1.54E+05	0.3	20.87	7.97	5.6389	0.138

Table 4 Comparison of Sn values in each case

	温度制御無し	熱遮蔽版考慮	アクティブ温度制御
最大Sn	406(MPa)	372(MPa)	225(MPa)
許容値	400MPa	400MPa	400MPa

Table 5 Elements for heat transfer analysis

有限要素モデル作成に用いた要素	
熱伝導解析	熱伝導8節点四辺形軸対称要素(HQAX8)
	熱伝達3節点軸対称要素(FCAX3)
	輻射リンク6節点四辺形軸対称要素(RALINK6)
応力解析	8節点四辺形軸対称要素(QAX8)

Table 6 Material property data for heat transfer analysis (Carbon)

密度 (kg/m**3)	比熱 (kcal/kg°C)	熱伝導率 (kcal/mm・s・°C)
2.25E+03	0.165	5.70E-06
2.25E+03	0.165	2.51E-04

Table 7 Material property data for heat transfer analysis (12Cr steel)

温度(°C)	密度 (×E+3 kg/m**3)	比熱 (kcal/kg°C)	熱伝導率 (kcal/mm・s・°C)
0	7.860	0.1061	5.422E-06
400	7.860	0.1746	7.452E-06
450	7.860	0.1873	7.643E-06
500	7.860	0.1999	7.810E-06
550	7.860	0.2174	8.049E-06
600	7.860	0.2348	8.264E-06
650	7.860	0.2695	8.192E-06
700	7.860	0.3039	8.096E-06

Table 8 Values of each coefficient for analysis

	形態係数	射出率	ステファン・ボルツマン定数(kcal/m ² hrK ⁴)
炉壁(ステンレス)	1.0	0.1	4.88E-08
熱伝導板(黒鉛)		0.8	
熱伝導板(12Cr鋼)		0.1	

Table 9 Analysis cases for heat transfer plate method

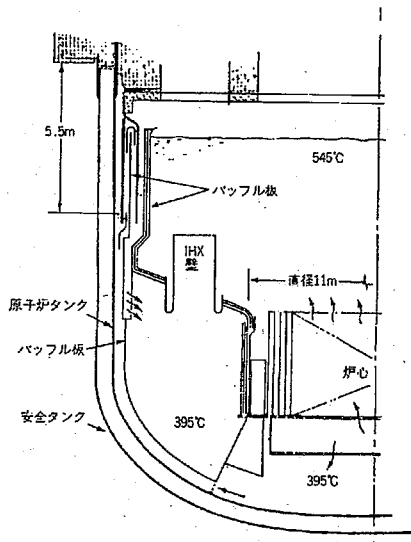
解析ケース	熱伝導板	射出率	内部輻射
1	無し	-	断熱
2	黒鉛	0.8	断熱
3	12Cr鋼	0.1	断熱
4	無し	-	0.64W/m ² K
5	黒鉛	0.8	0.64W/m ² K

Table 10 Analysis cases

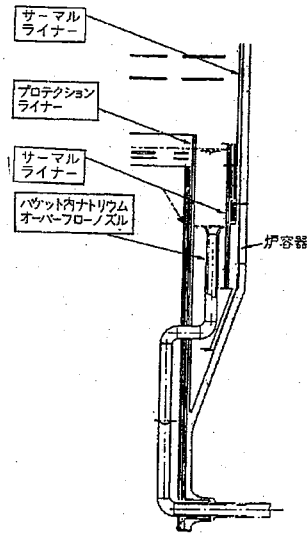
ケース	ガードベッセルによる輻射	ガードベッセル材質	炉壁側輻射率	ガードベッセル側輻射率	炉壁内面熱伝達
1	あり	12Cr鋼	0.1	0.1	あり
2	あり	12Cr鋼	0.1	0.8	あり
3	あり	12Cr鋼	0.1	0.1	なし
4	あり	12Cr鋼	0.1	0.8	なし
5	あり	316FR	0.1	0.1	あり
6	あり	316FR	0.1	0.8	あり
7	あり	316FR	0.1	0.1	なし
8	あり	316FR	0.1	0.8	なし
9	なし	-	-	-	あり
10	なし	-	-	-	なし

Table 11 The largest Sn values in each case

ケース	ガードベツセルによる輻射	ガードベツセル材質	炉壁側輻射率	ガードベツセル側輻射率	炉壁内面熱伝達	最大Sn値 (MPa)
1	あり	12Cr鋼	0.1	0.1	あり	430
2	あり	12Cr鋼	0.1	0.8	あり	426
3	あり	12Cr鋼	0.1	0.1	なし	520
4	あり	12Cr鋼	0.1	0.8	なし	512
5	あり	316FR	0.1	0.1	あり	454
6	あり	316FR	0.1	0.8	あり	452
7	あり	316FR	0.1	0.1	なし	564
8	あり	316FR	0.1	0.8	なし	560
9	なし	-	-	-	あり	413
10	なし	-	-	-	なし	592



低温ナトリウム循環方式



液位制御方式

fig.1 Examples of thermal stress mitigation methods

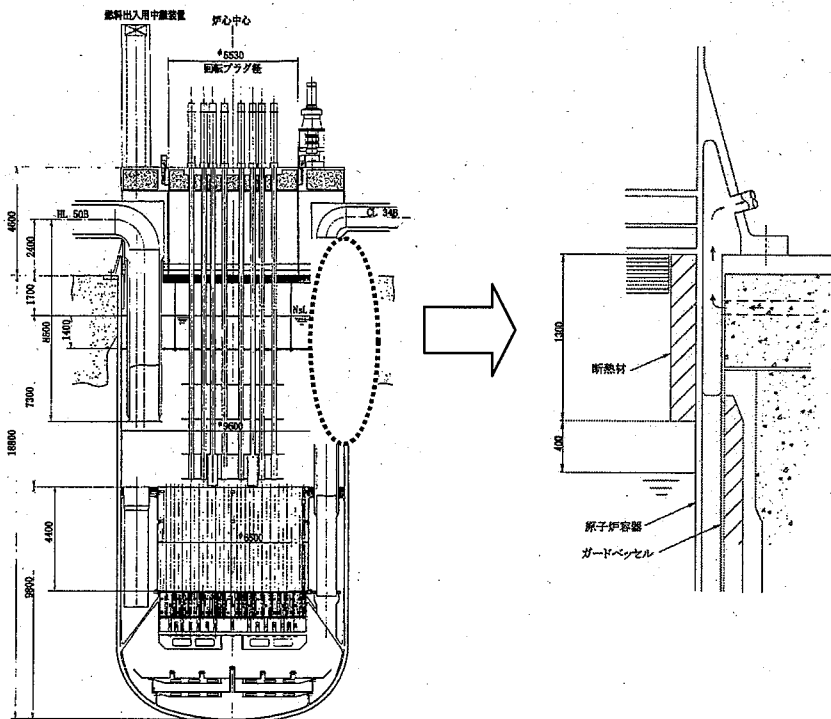


fig.2 Design case of reactor vessel around Sodimu surface

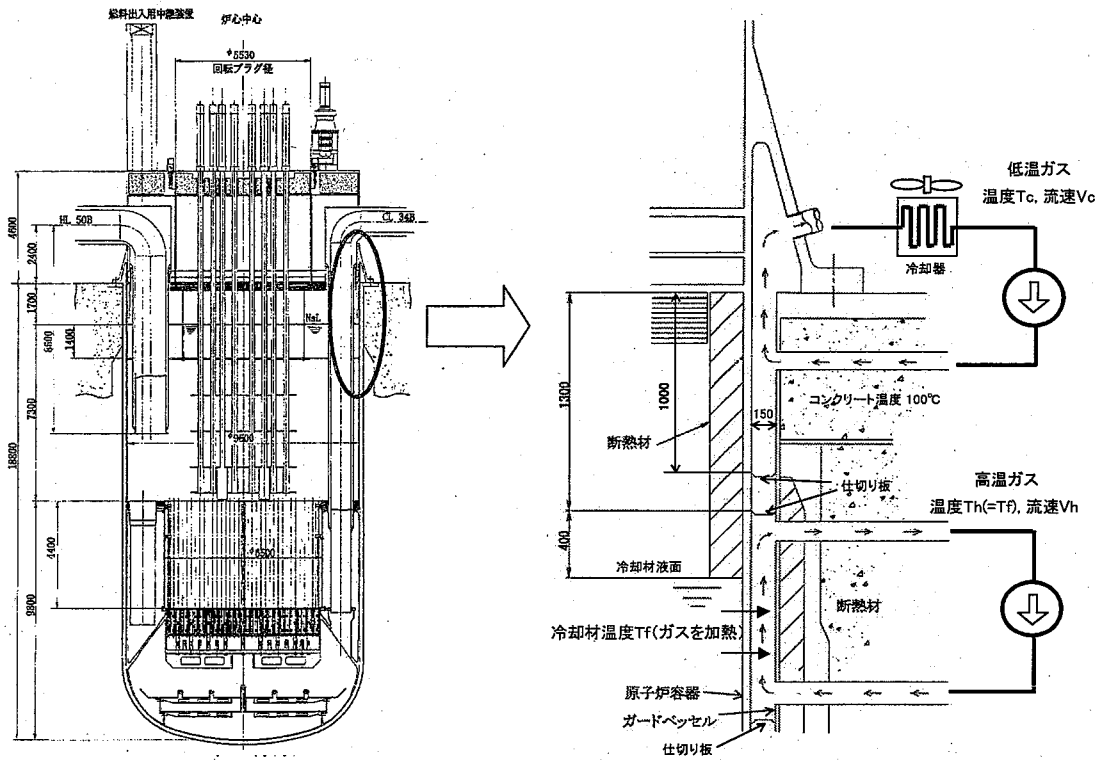


fig.3 Outline of high temperature gas circulation method

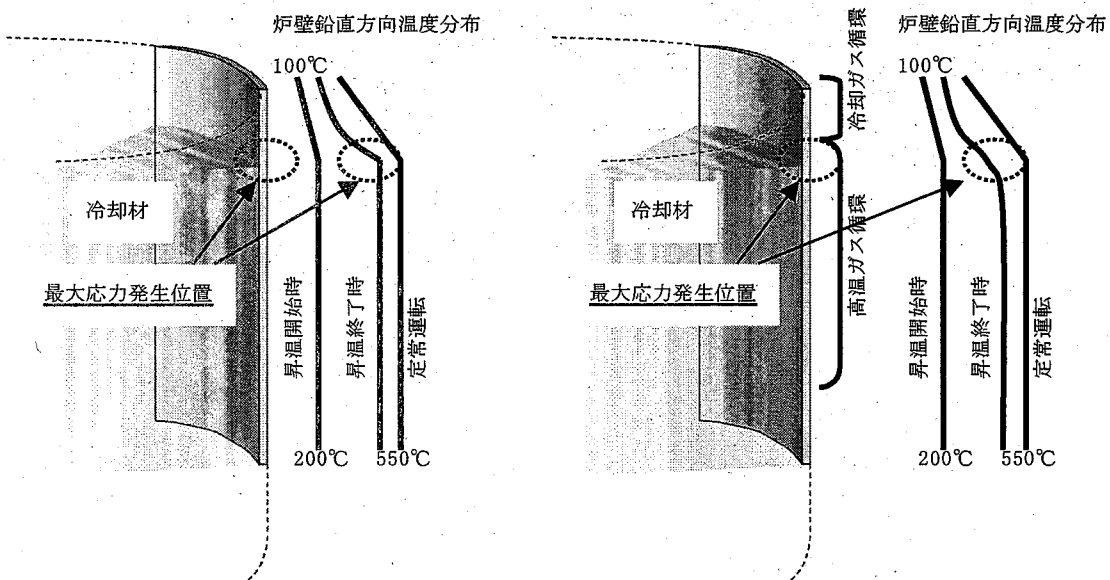


fig.4 Principle of high temperature gas circulation method

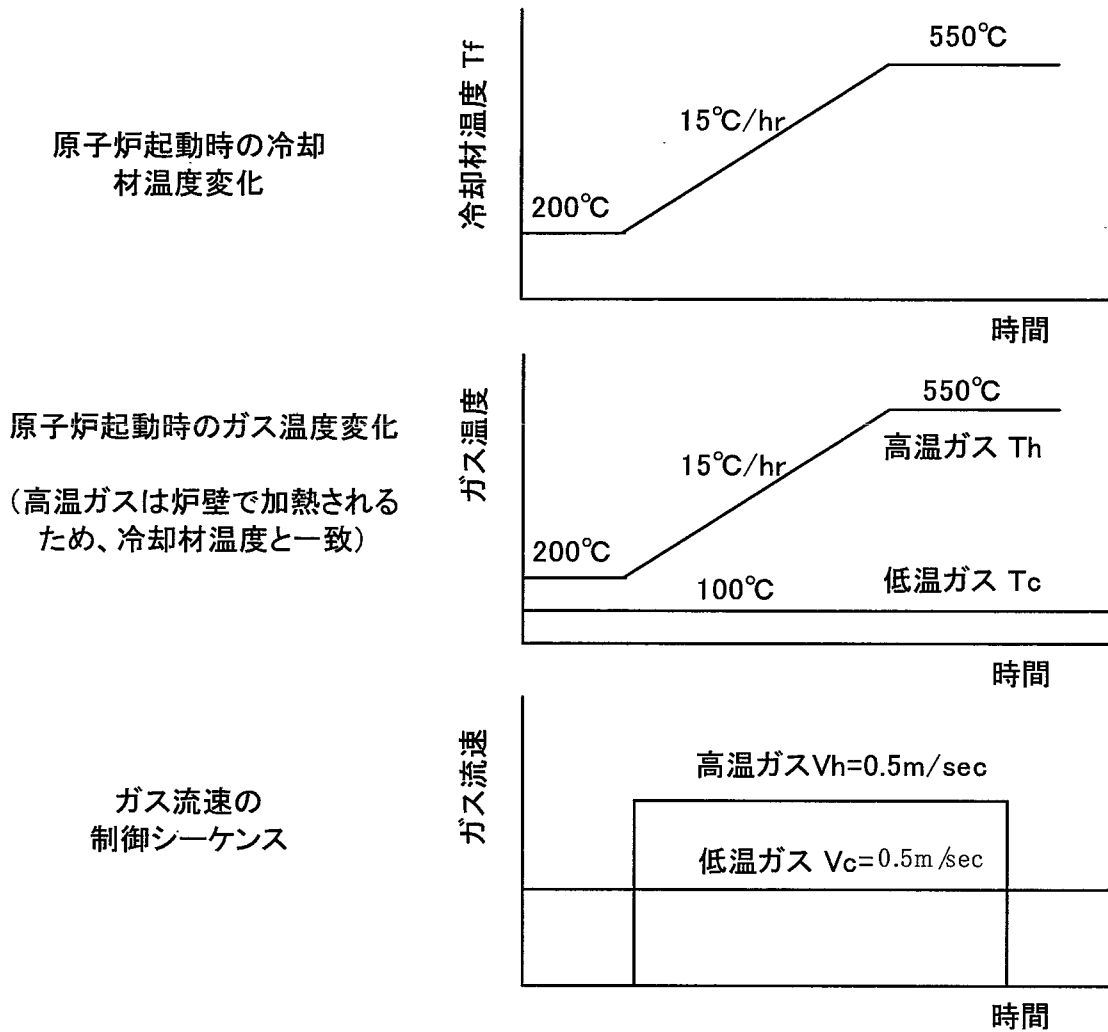


fig.5 Temperature properties of gas for high temperature gas circulation method

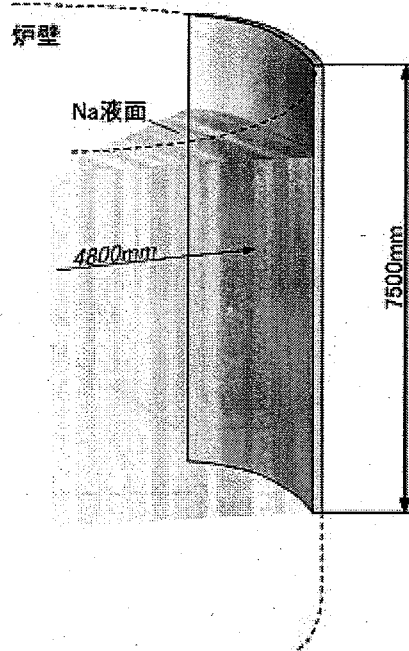


fig.6 Model of reactor vessel near the sodium surface

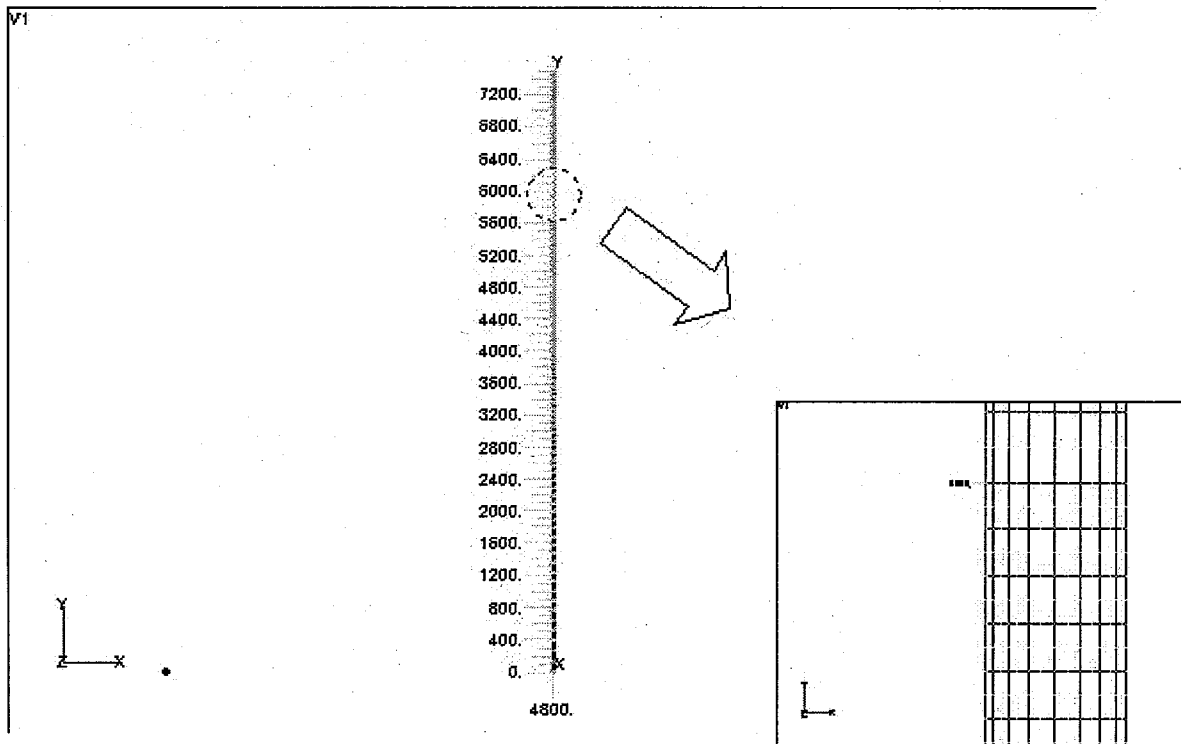
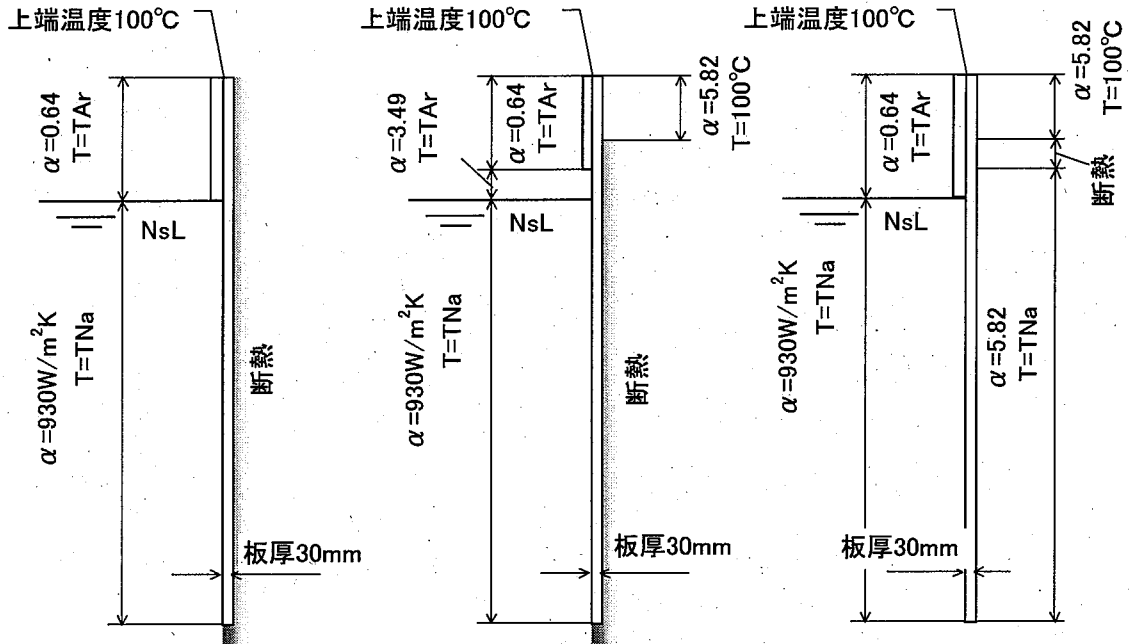


fig.7 Analysis model for high temperature gas circulation



緩和方策無し 熱遮蔽板を考慮したモデル アクティブ温度制御モデル

fig.8 Boundary conditions of each case

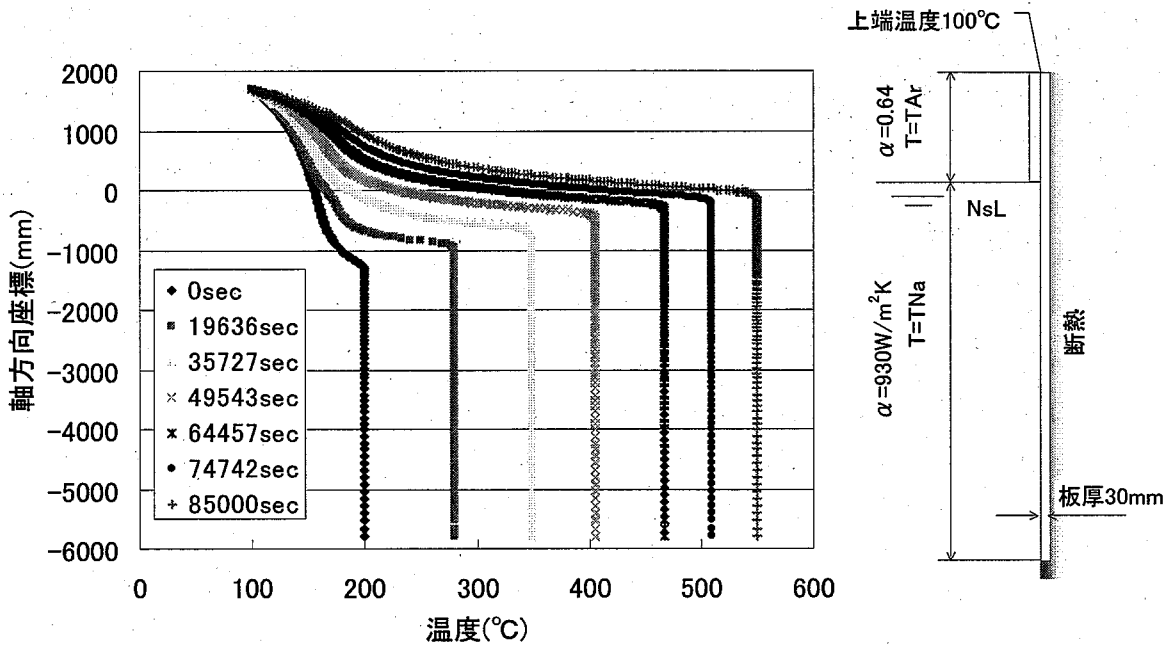


fig.9 Temperature history of the vessel (without mitigation measures)

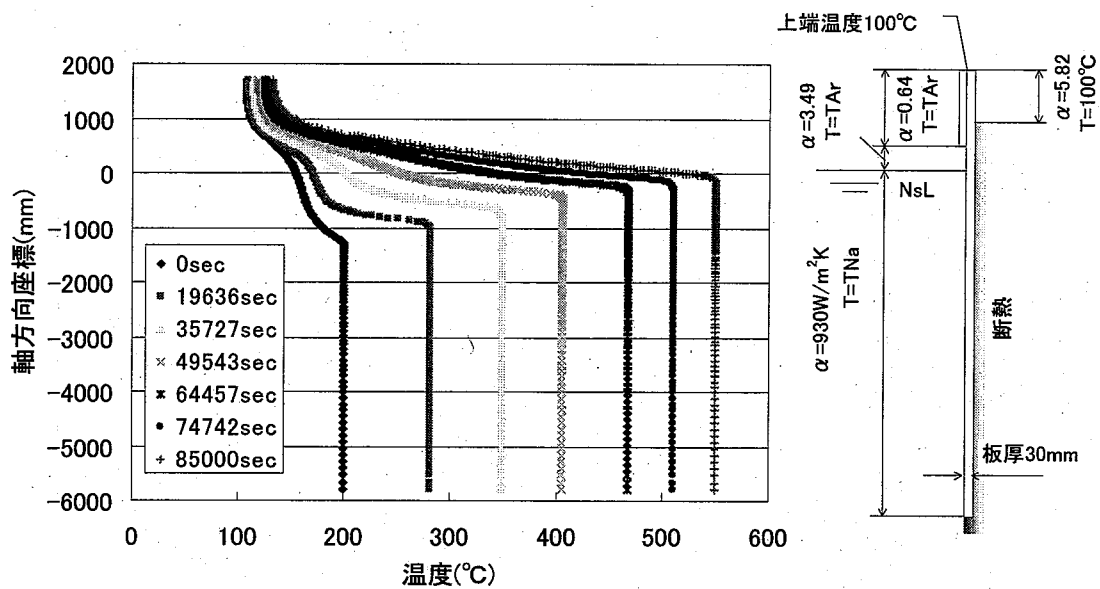


fig.10 Temperature history of the vessel (with passive mitigation measure)

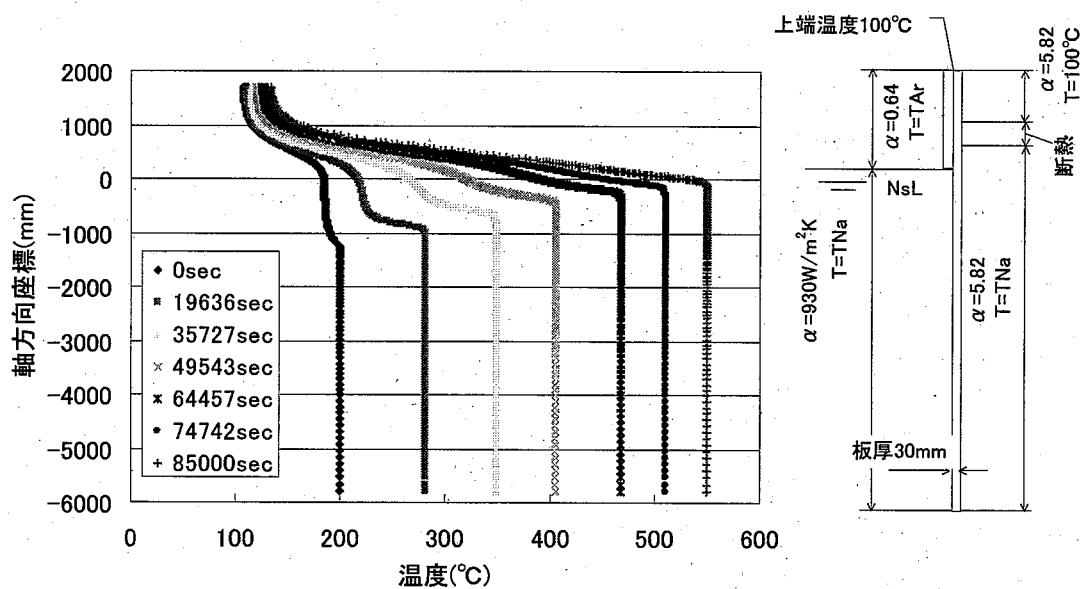


fig.11 Temperature history of the vessel (with gas circulation measure)

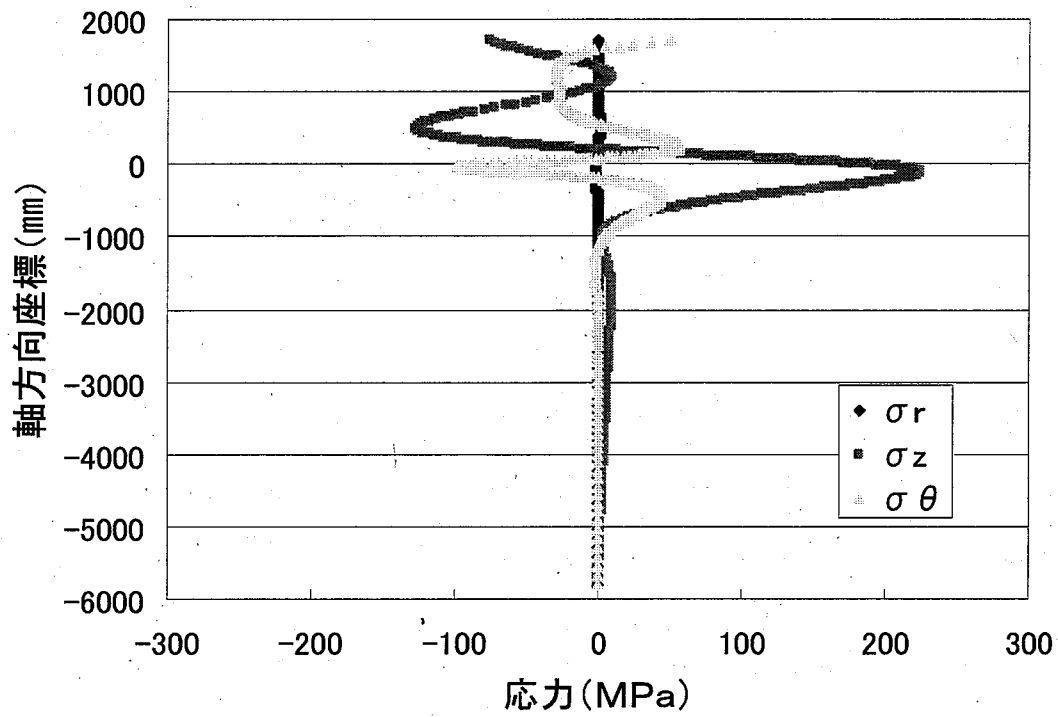


fig.12 Distribution of each stress values (without mitigation measure)

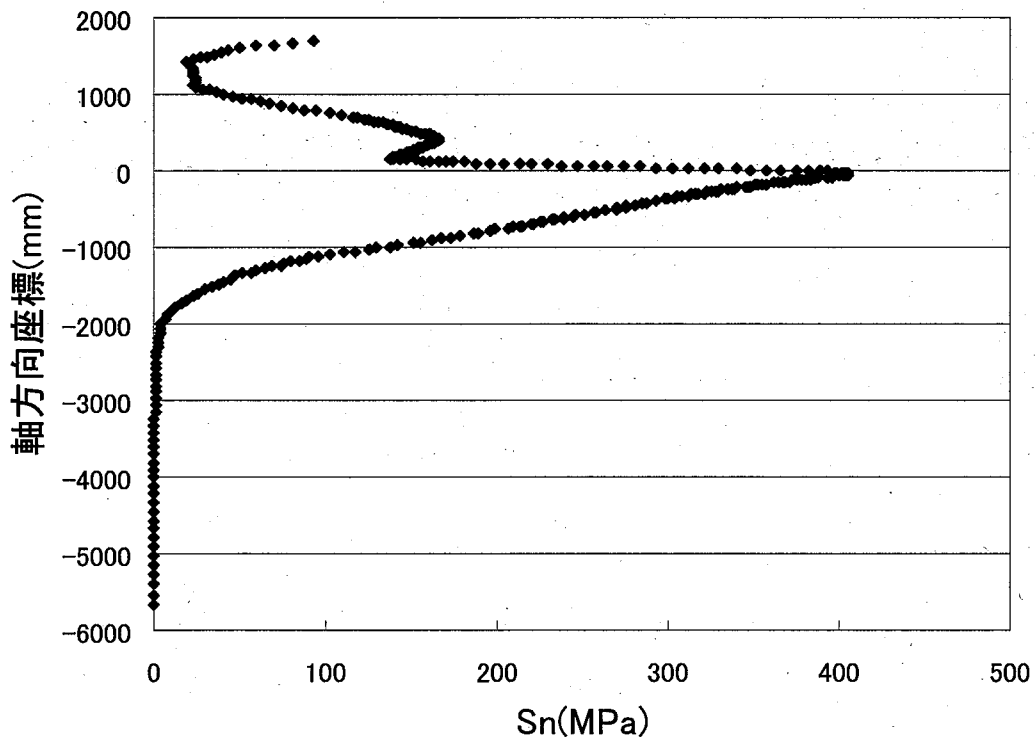


fig.13 Distribution of Sn values (without mitigation measure)

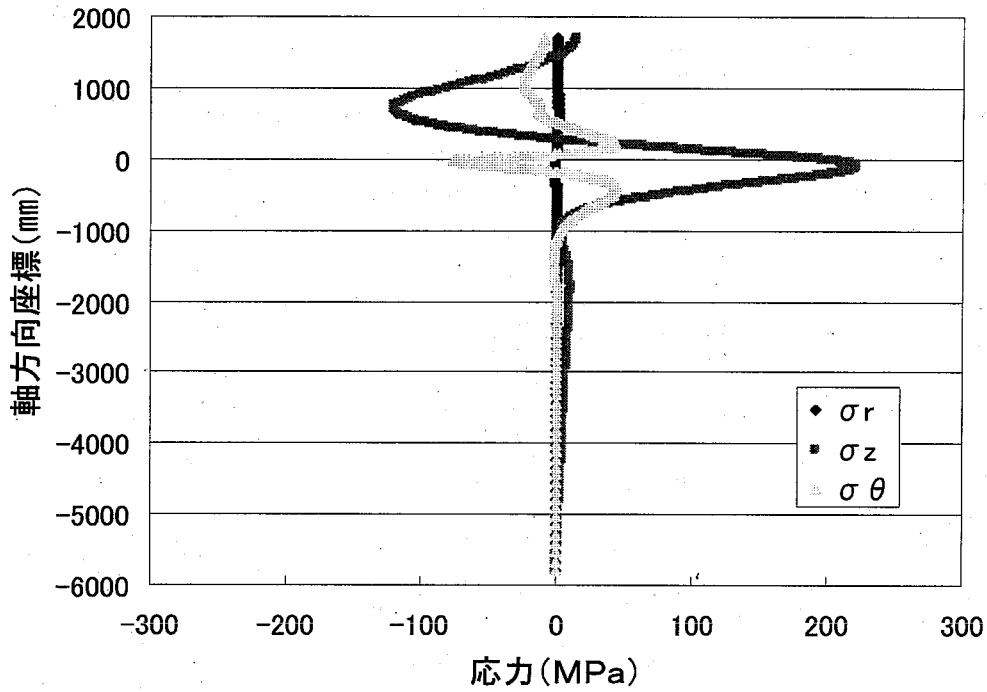


fig.14 Distribution of each stress values (passive mitigation measure)

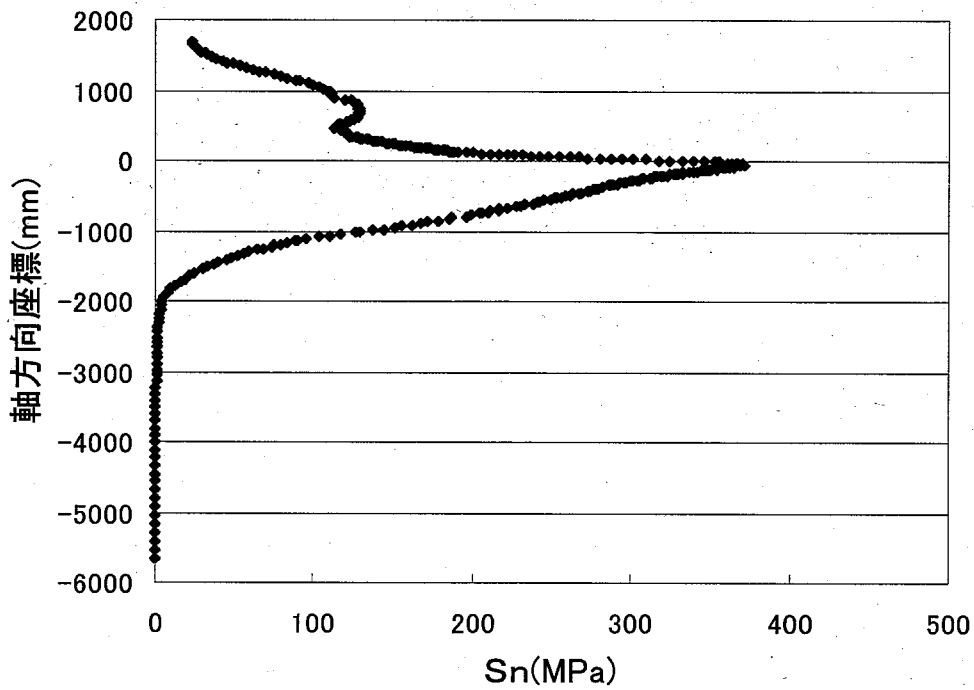


fig.15 Distribution of S_n values (passive mitigation measure)

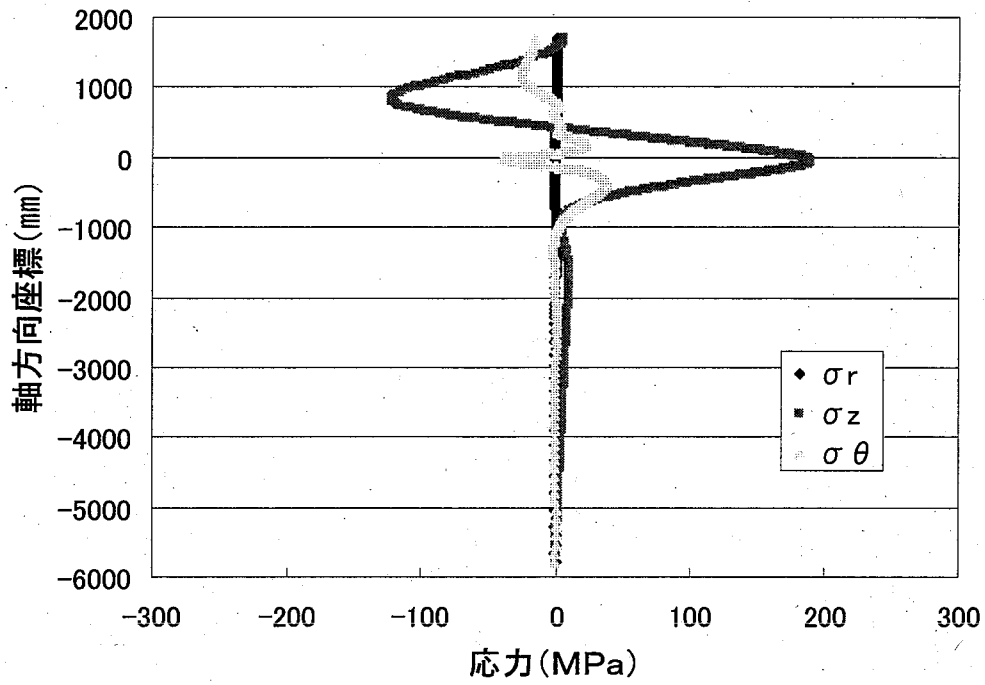


fig.16 Distribution of each stress values (active mitigation measure)

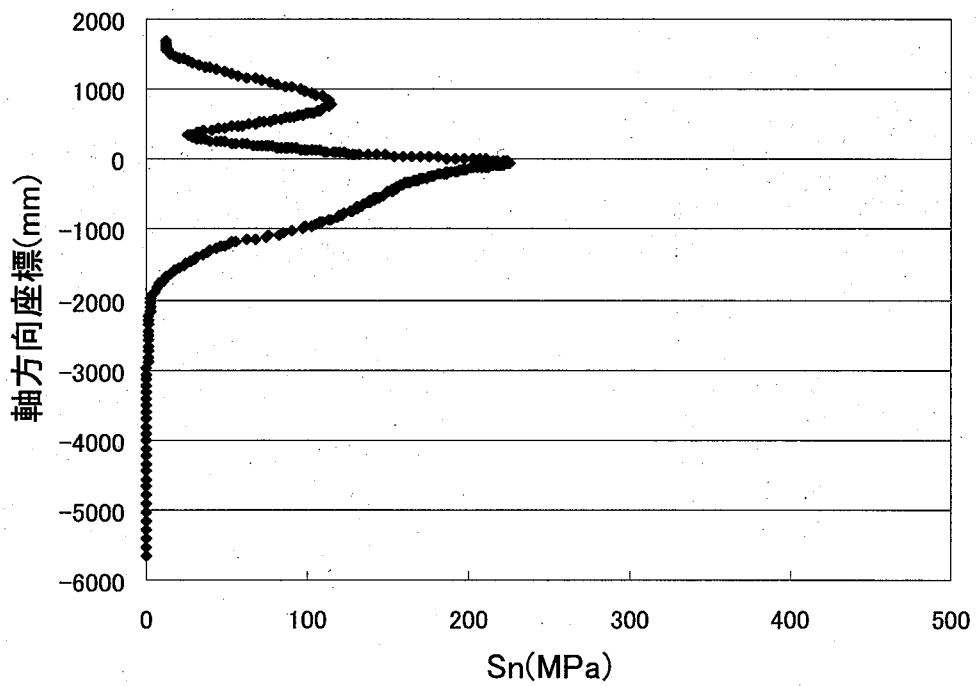


fig.17 Distribution of S_n values (active mitigation measure)

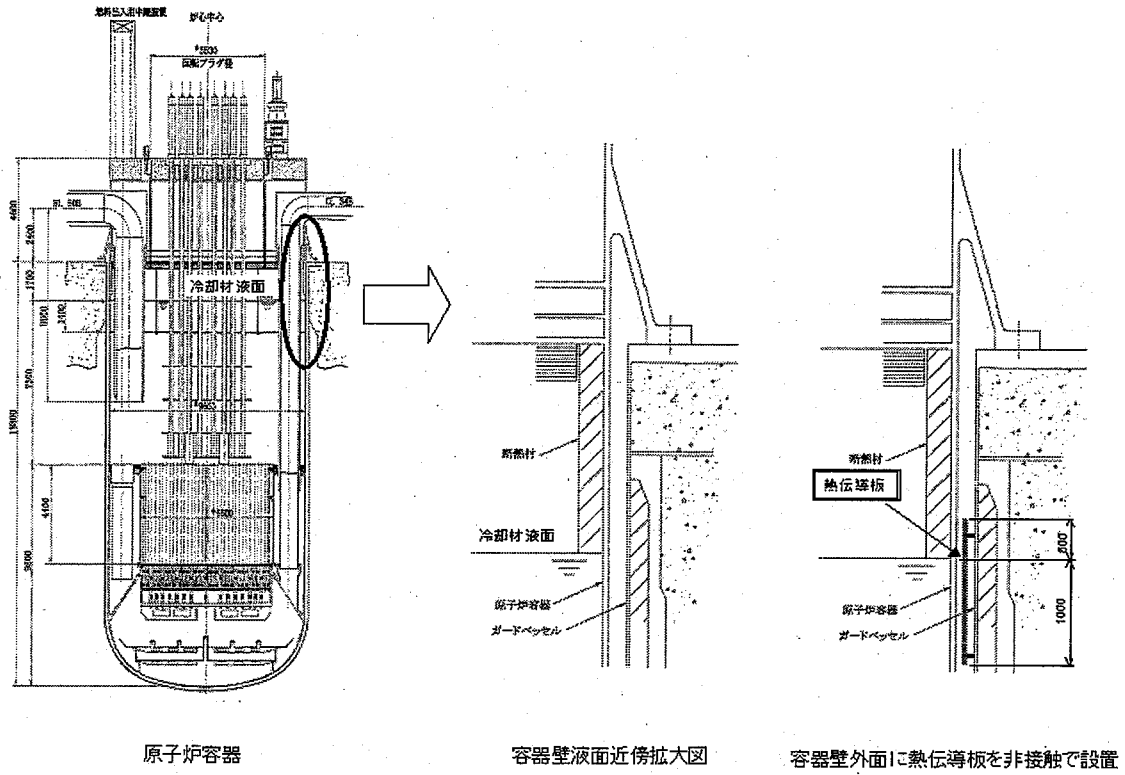


fig.18 Outline of heat conduction plate measure

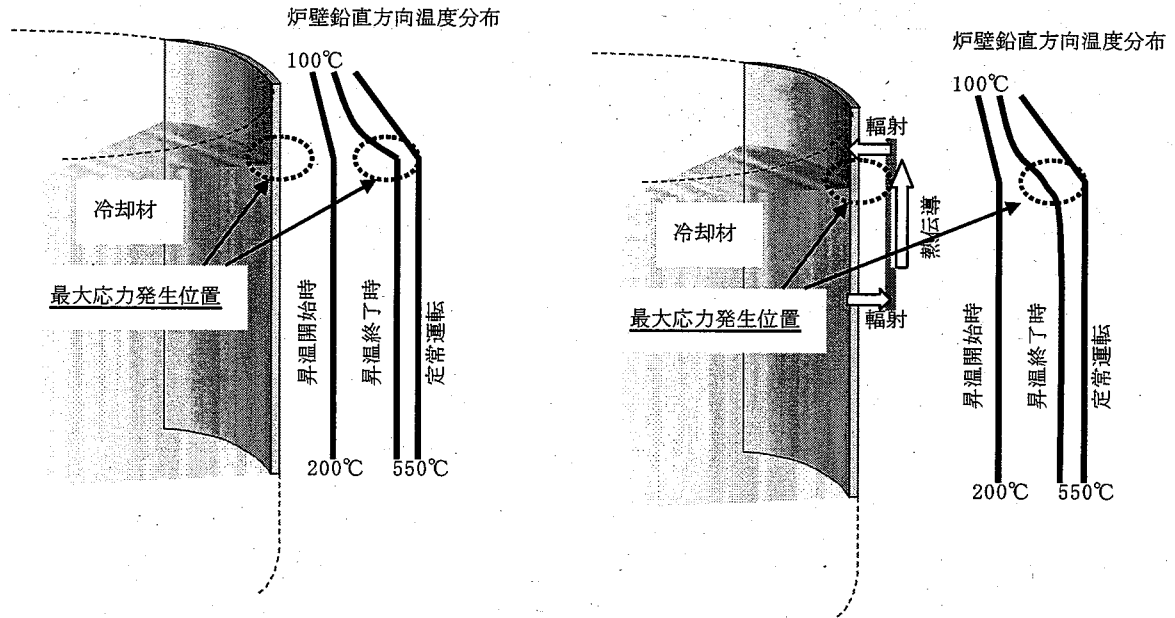


fig.19 Principle of heat conduction measure

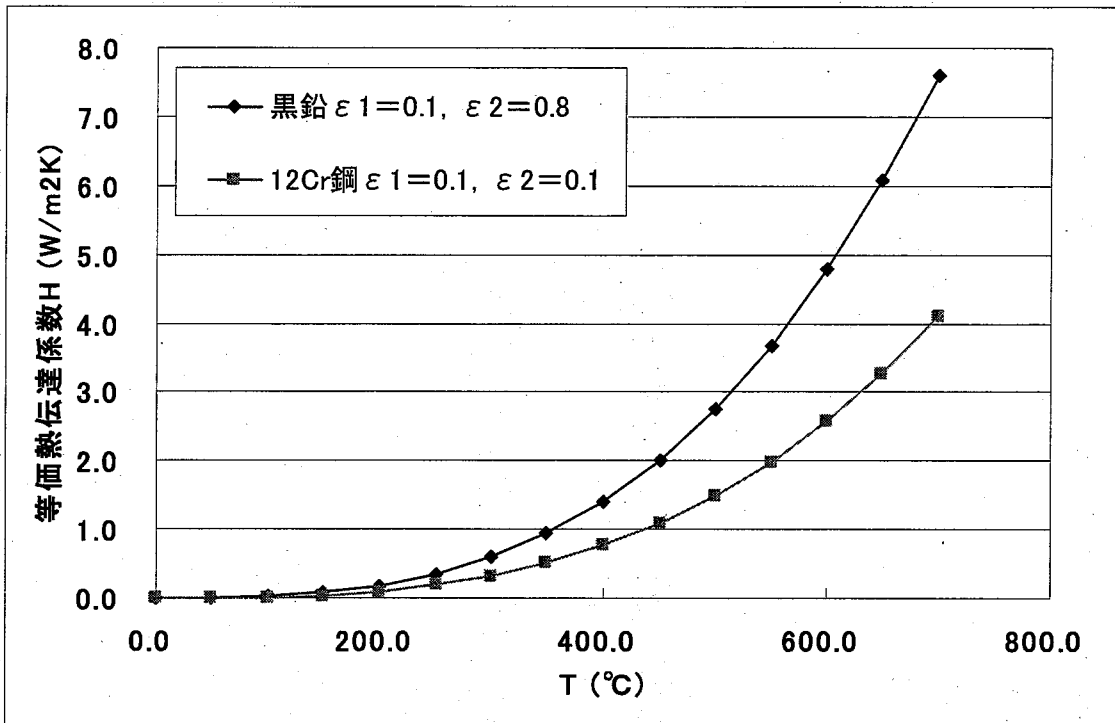


fig.20 Relation between heat transfer coefficients by radiation and temperature

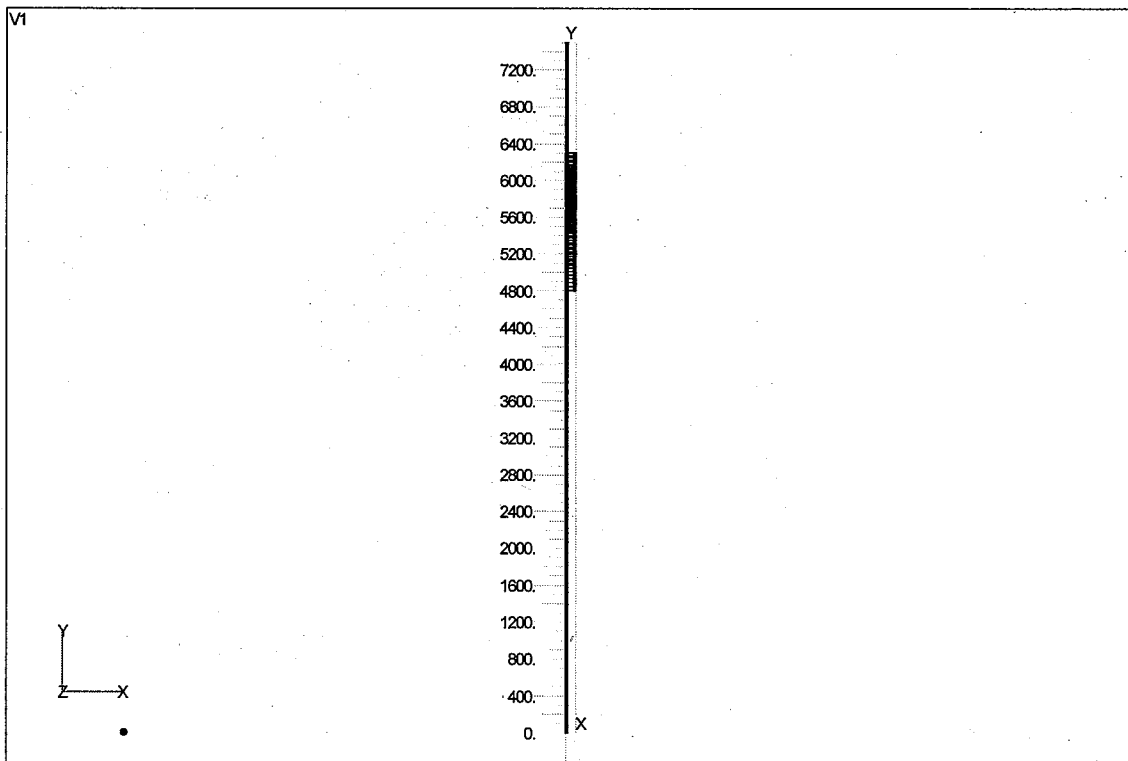


fig.21 Analysis model

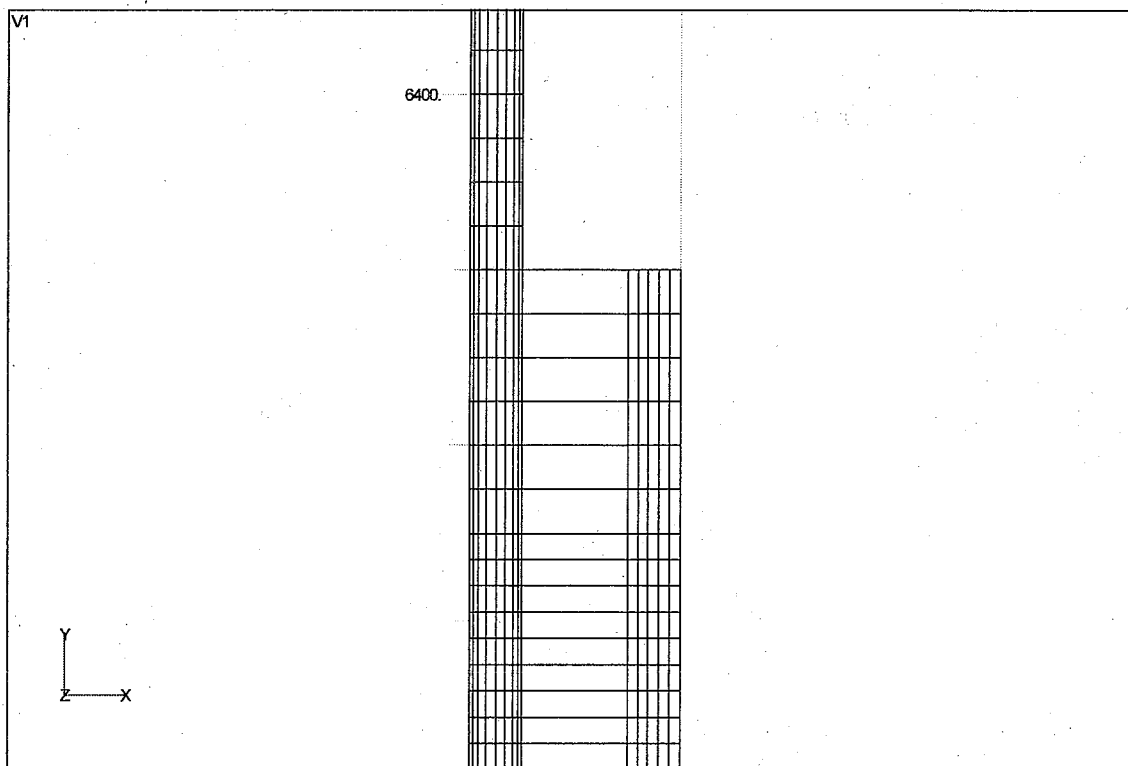


fig.22 Analysis model near the heat conduction plate

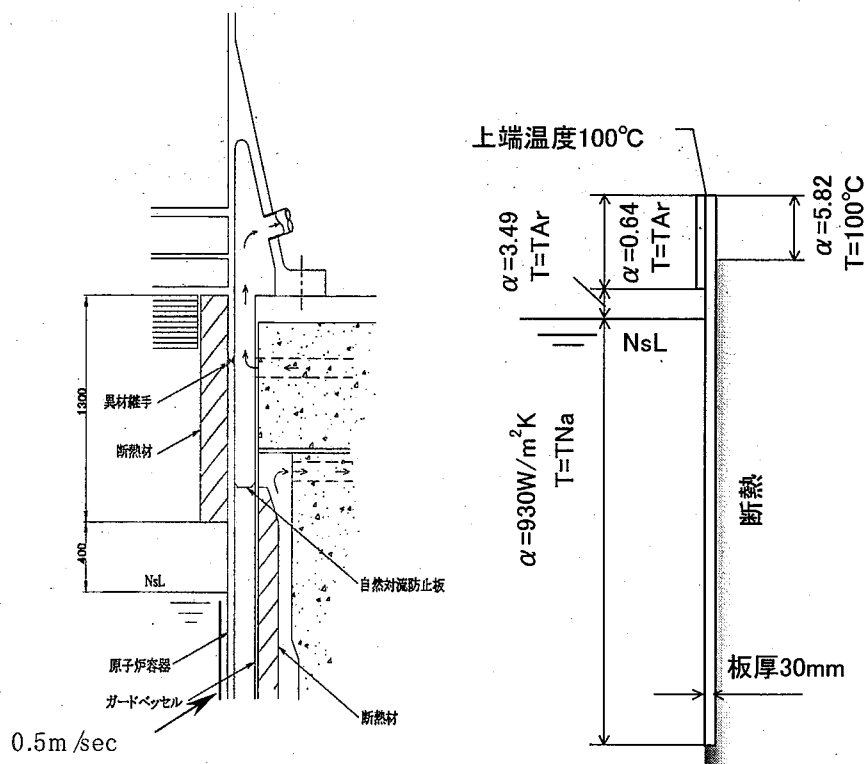


fig.23 Design case of reactor vessel around Sodium surface

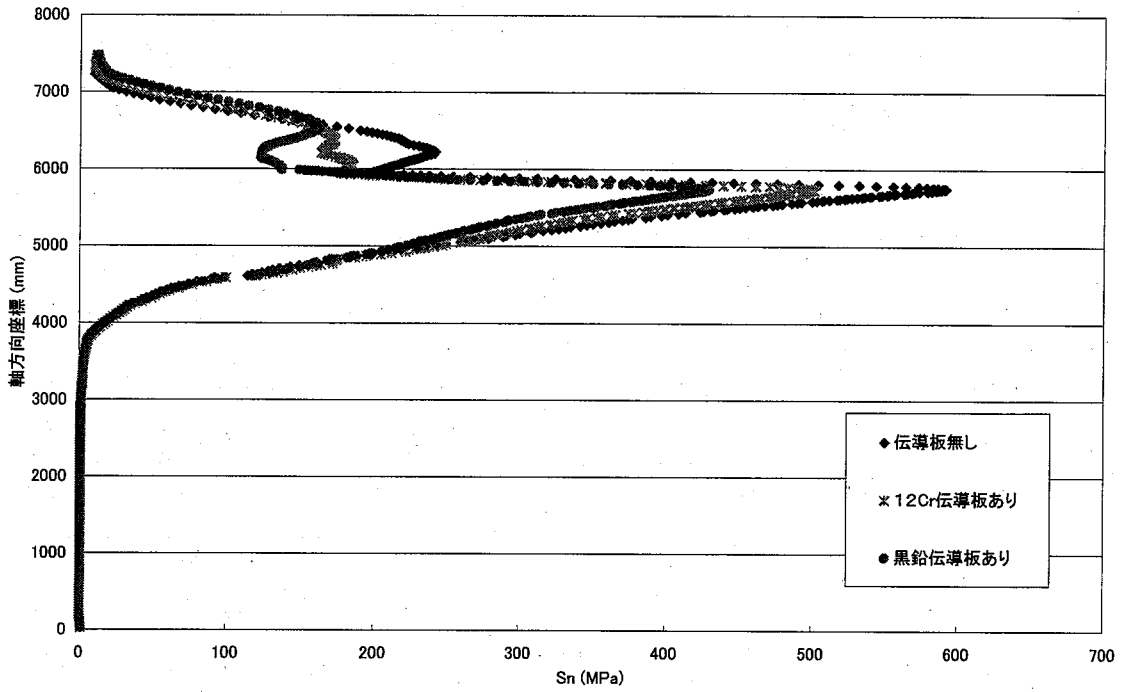


fig.24 Effects of heat conduction plate measures

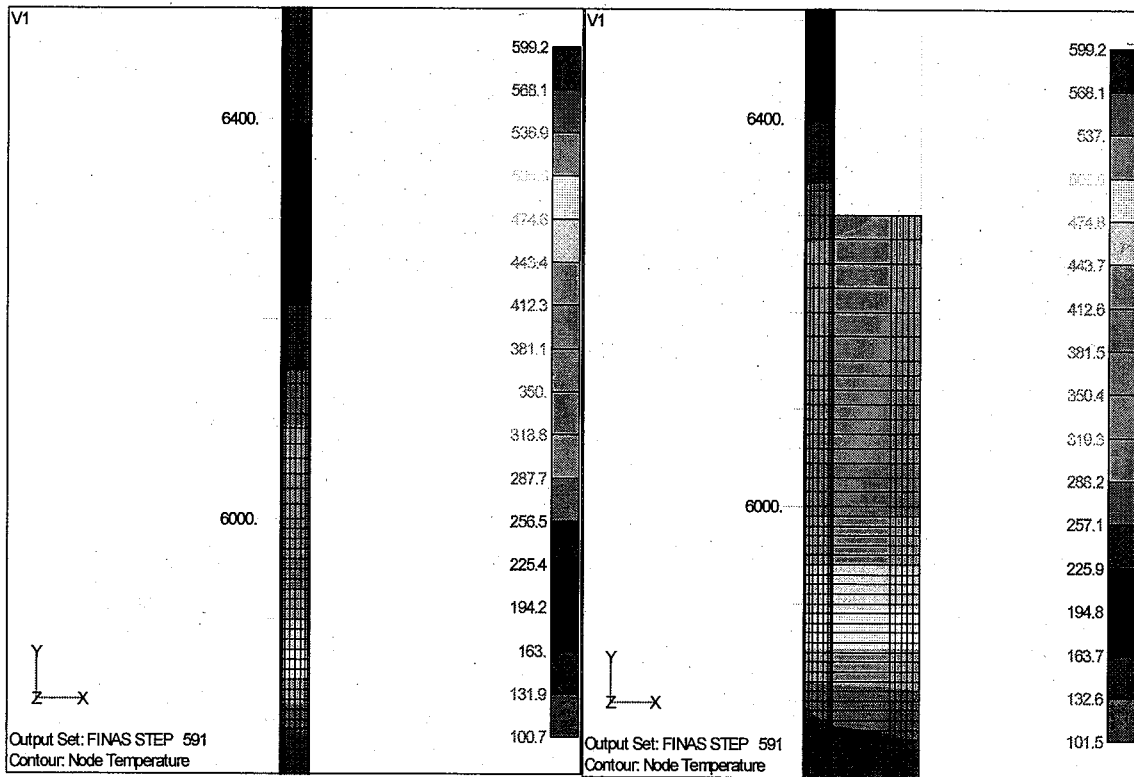


fig.25 Comparison of temperature contour

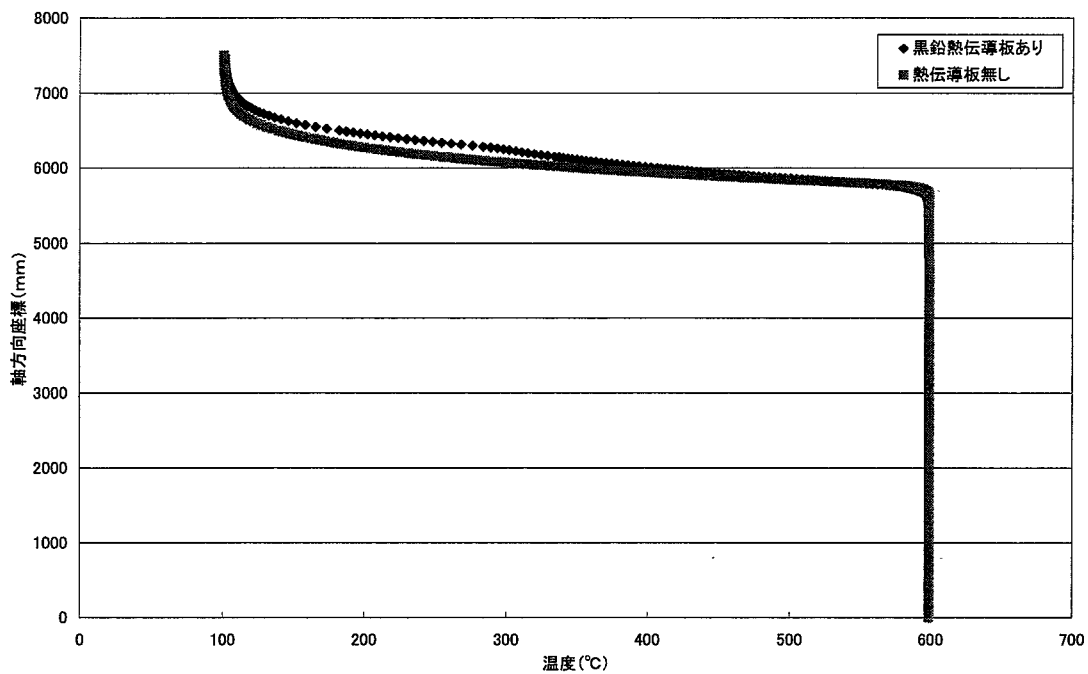


fig.26 Comparison of temperature distribution

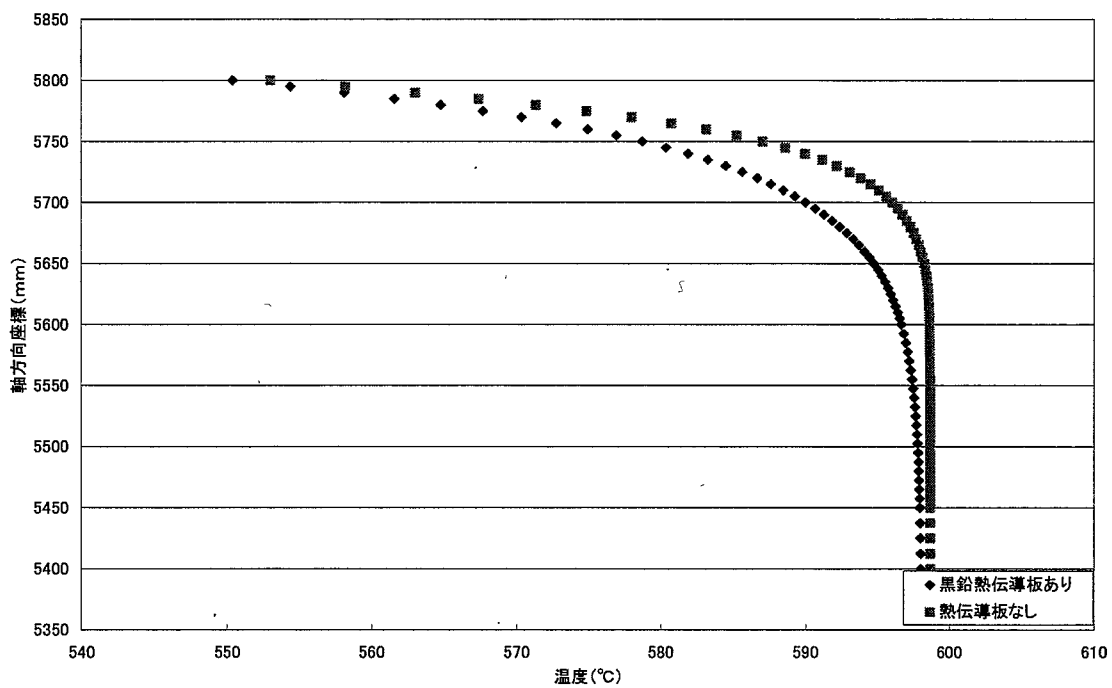


fig.27 Comparison of temperature distribution (near the Sodium surface)

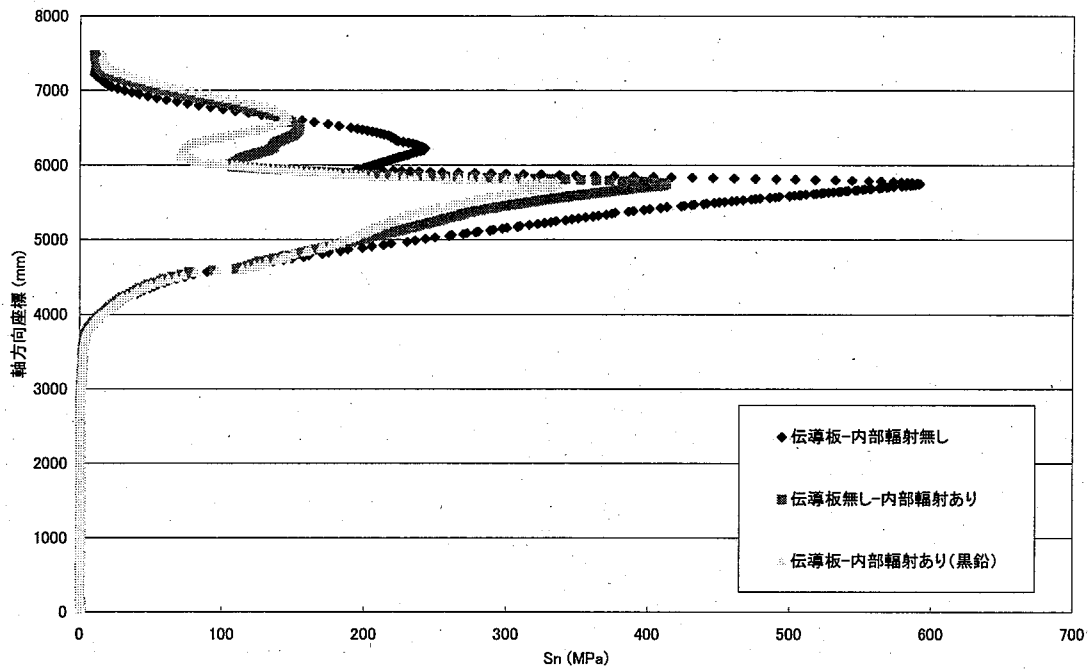


fig.28 Comparison of analysis results

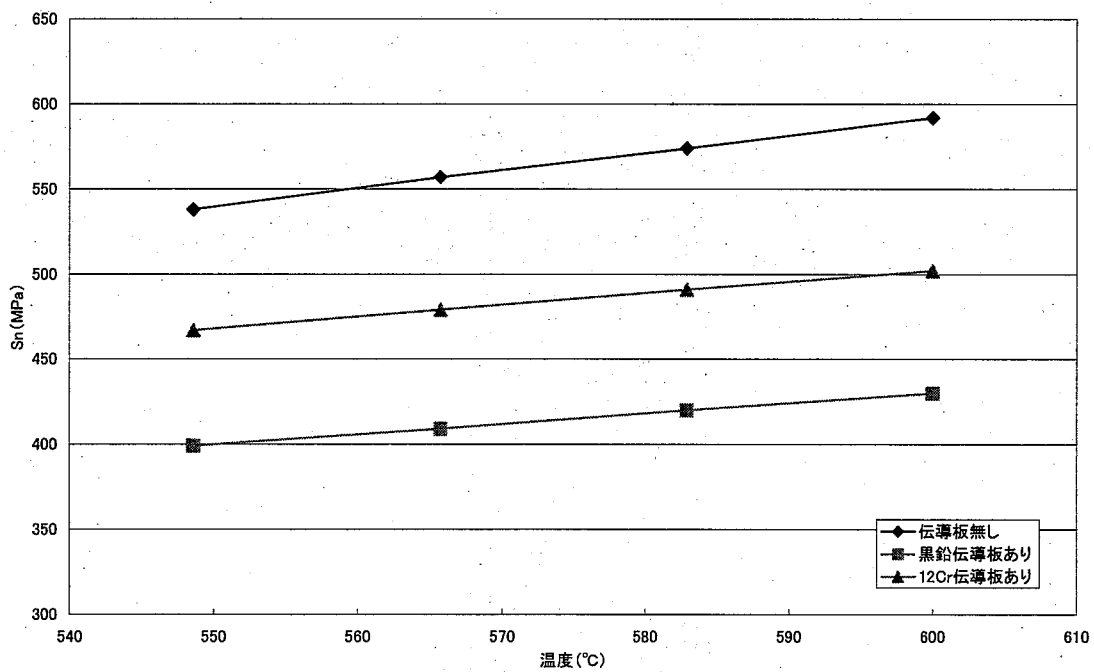


fig.29 Transition of Sn values with temperature changing

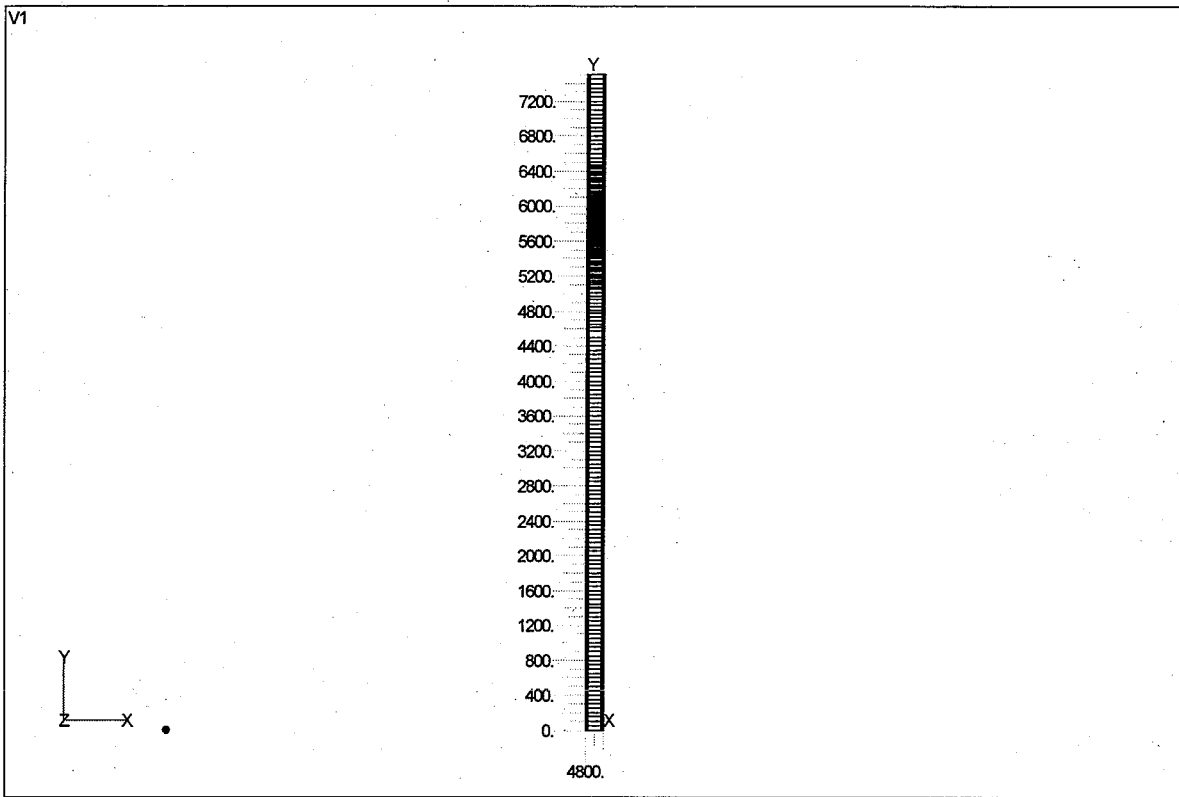


fig.30 Analysis model

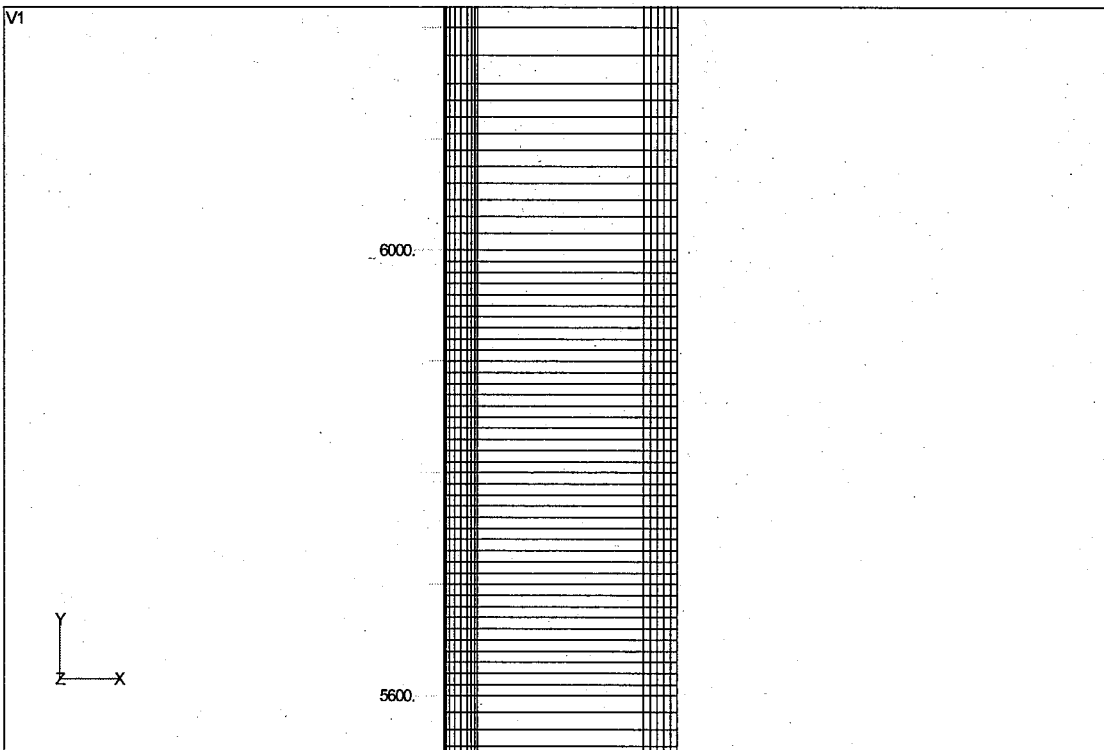


fig.31 Analysis model around Sodium surface

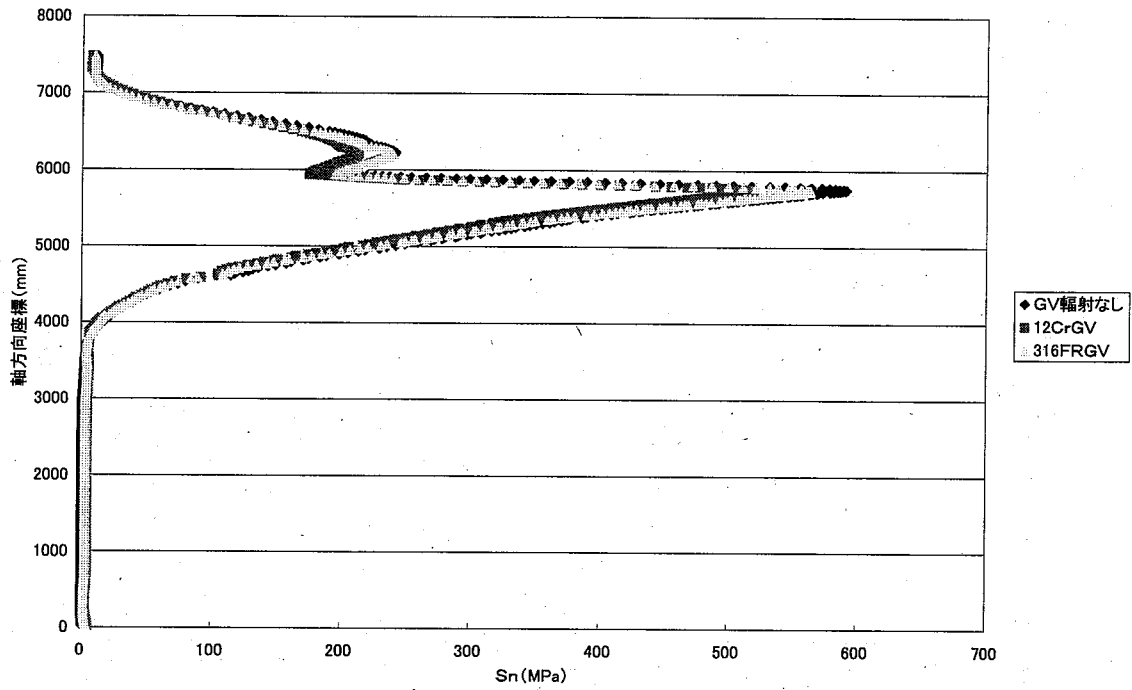


fig.32 Comparison of S_n values ($\epsilon_2=0.1$ insulation inside)

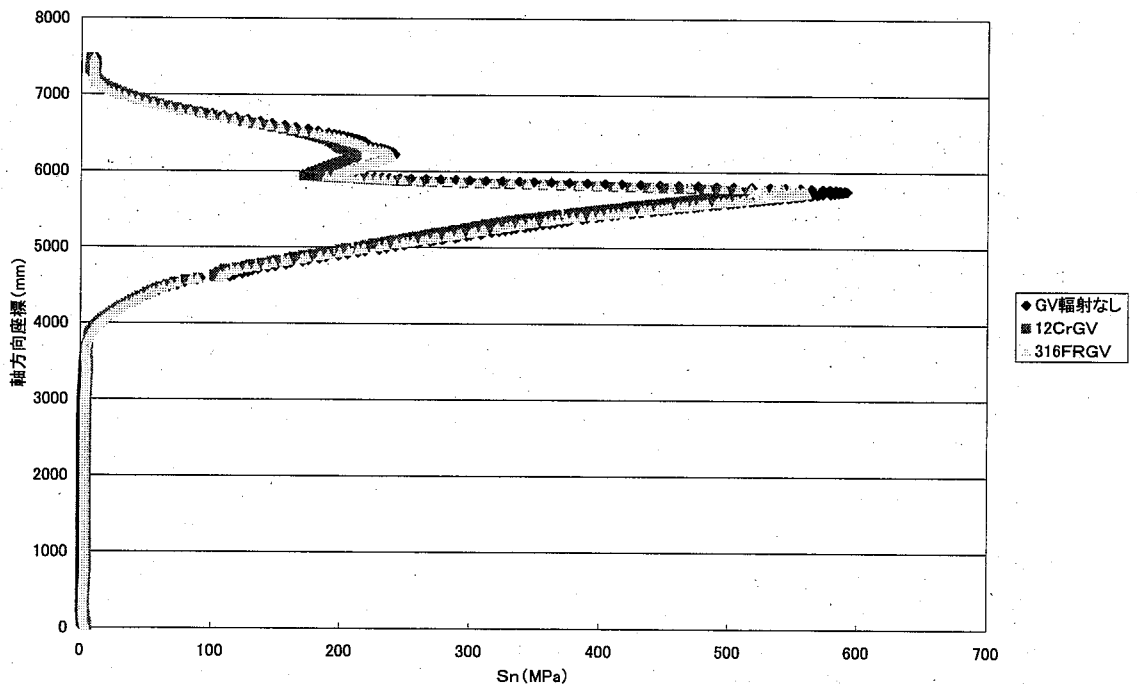


fig.33 Comparison of S_n values ($\epsilon_2=0.8$ insulation inside)

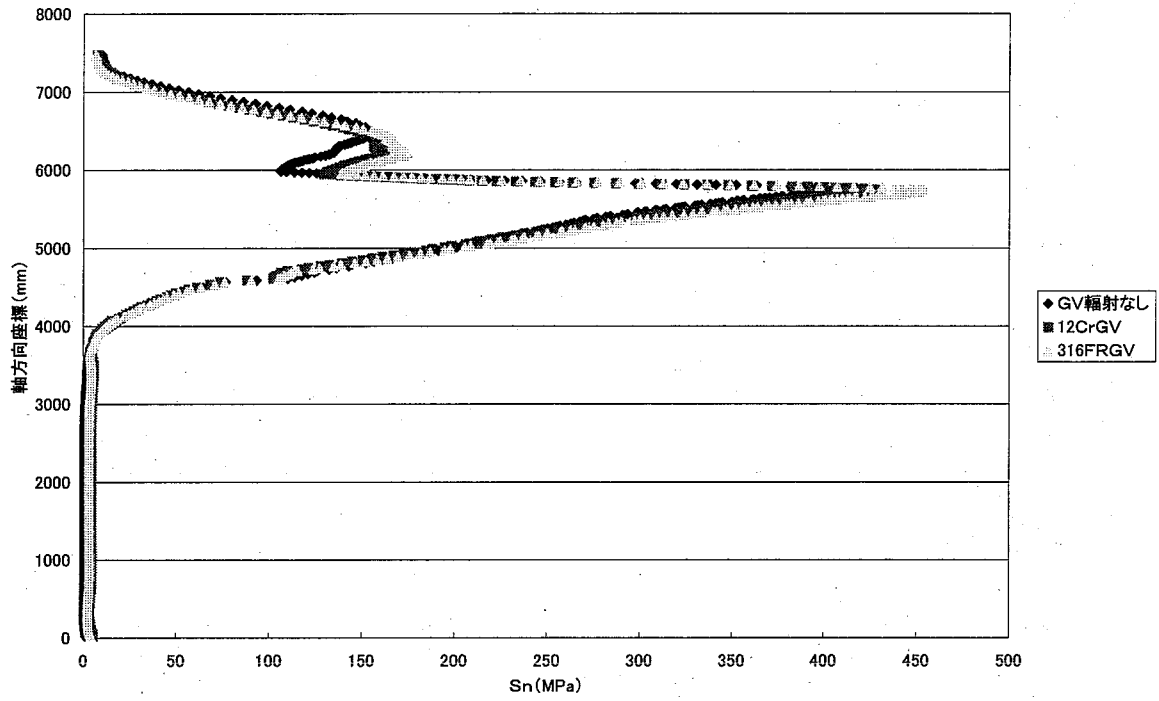


fig.34 Comparison of Sn values ($\epsilon_2=0.1$ inside heat transfer)

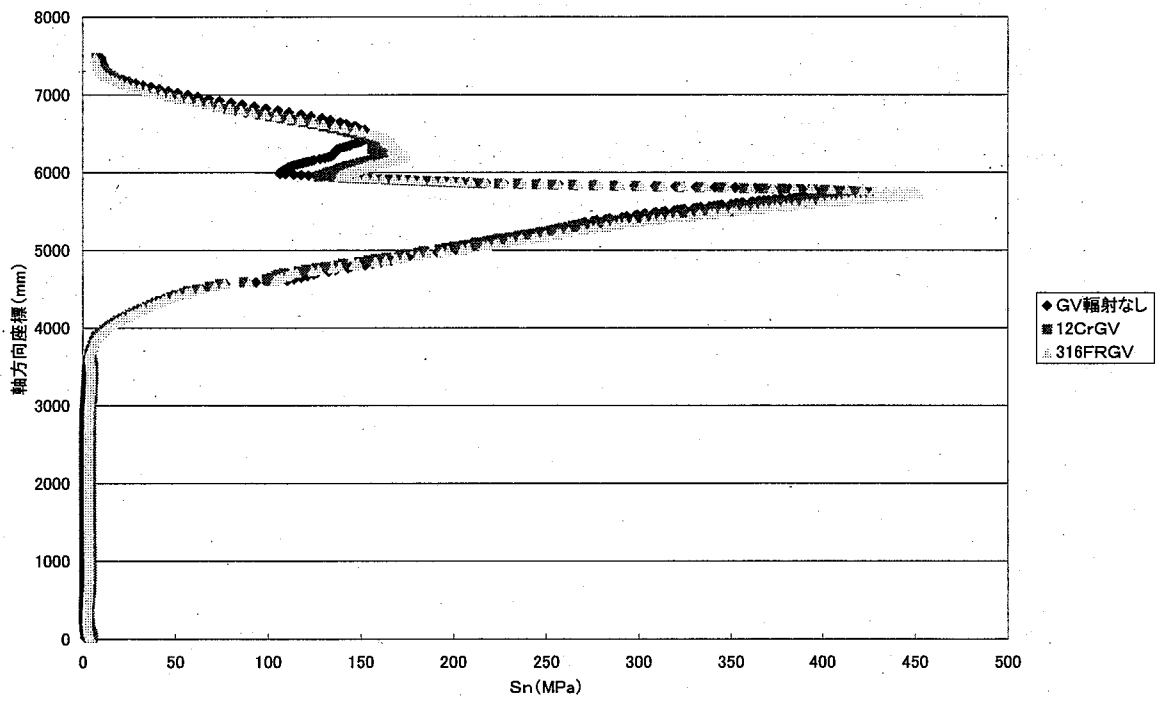


fig.35 Comparison of Sn values ($\epsilon_2=0.8$ inside heat transfer)

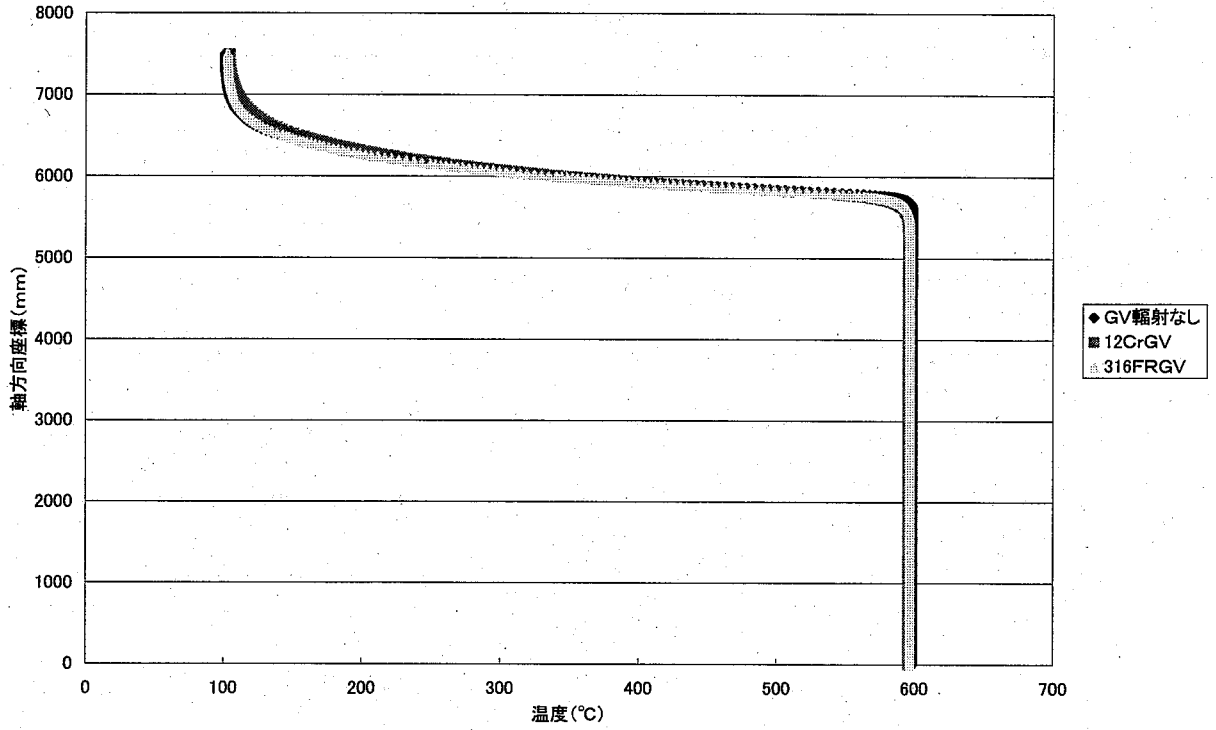


fig.36 Comparison of temperature distribution

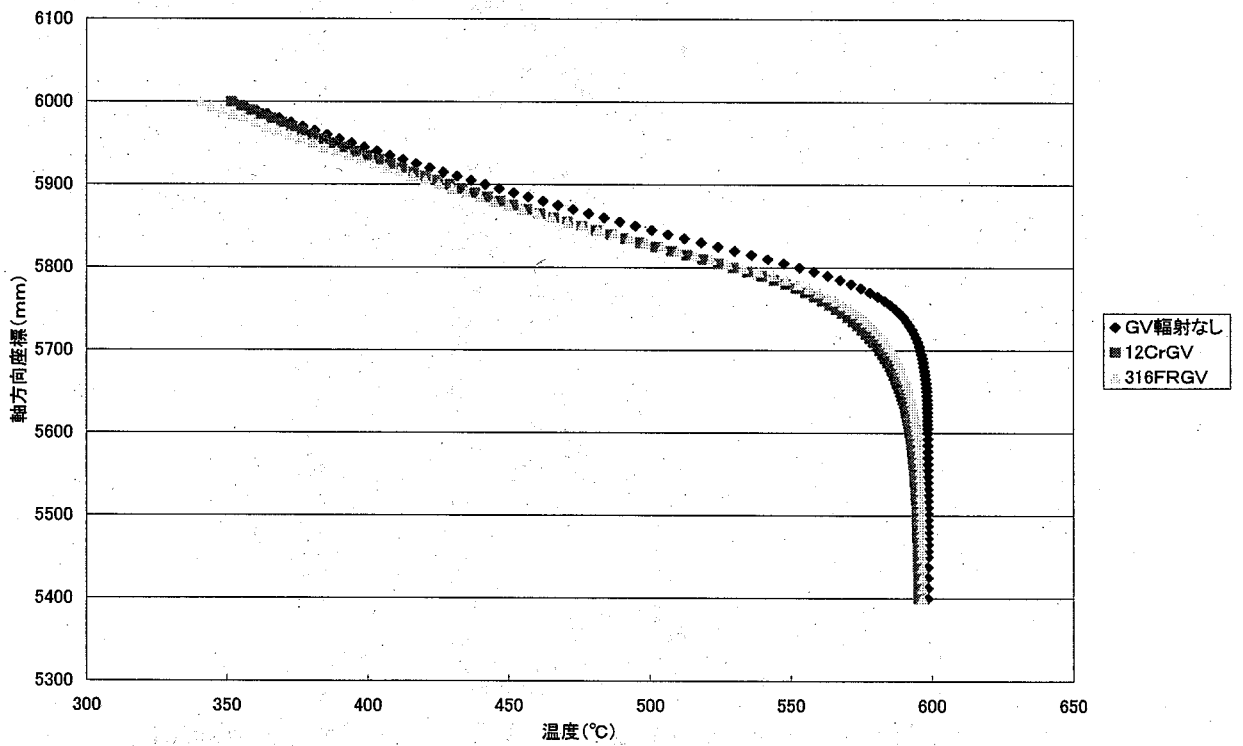


fig.37 Comparison of temperature distribution (near the Sodium surface)

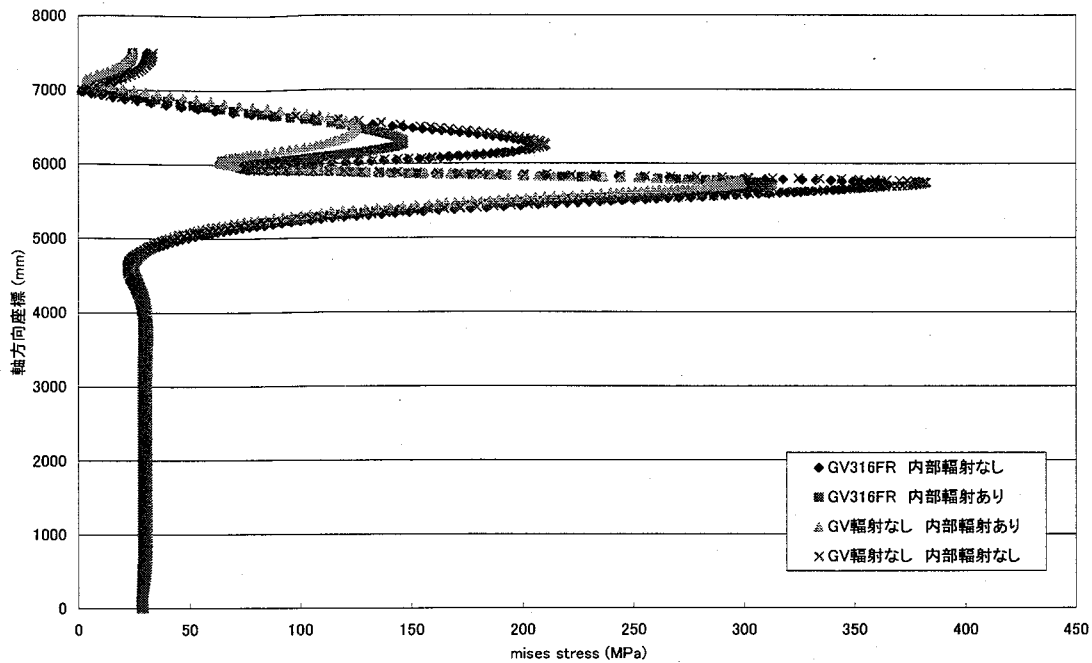


fig.38 Comparison of Mises stress

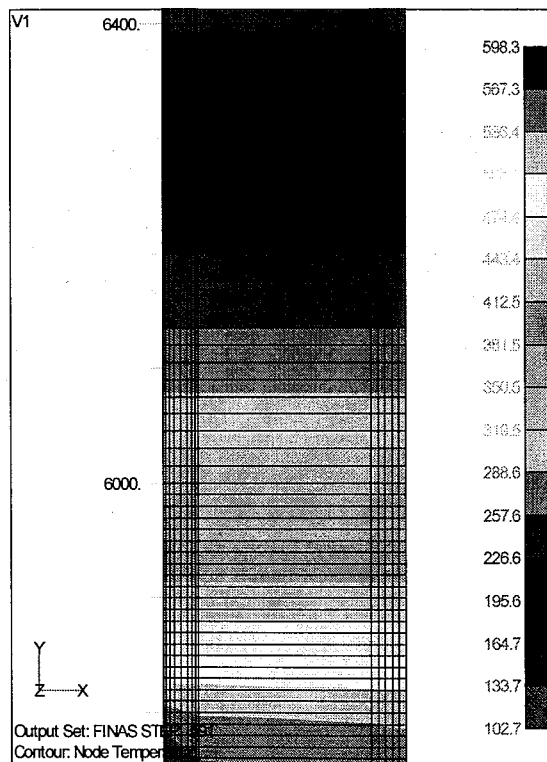


fig.39 Temperature contour (GV-316FR insulation inside)

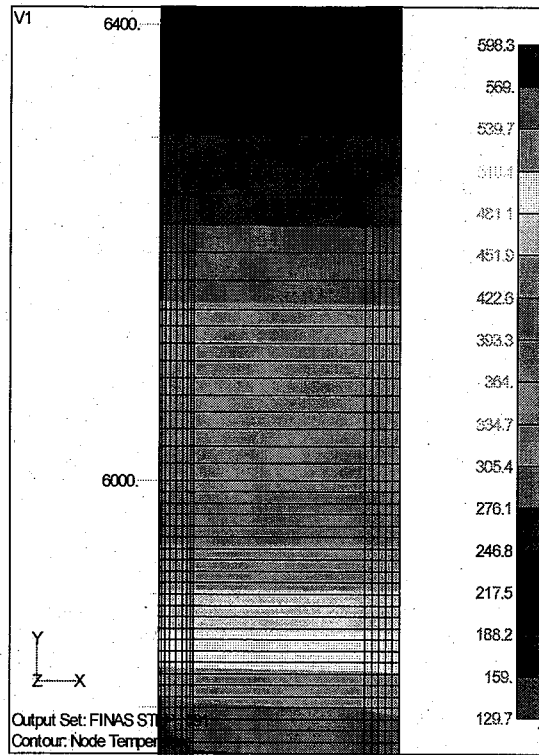


fig.40 Temperature contour (GV-316FR heat transfer inside)

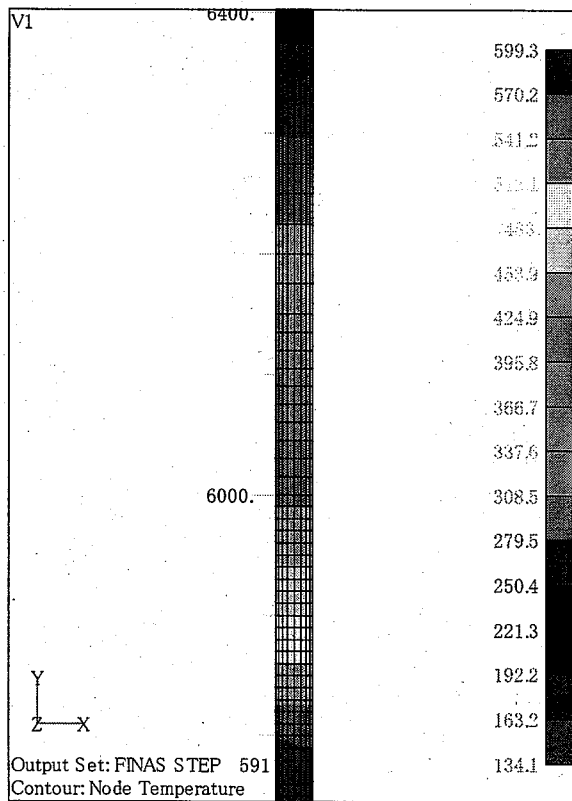


fig.41 Temperature contour (GV without heat transfer plate)

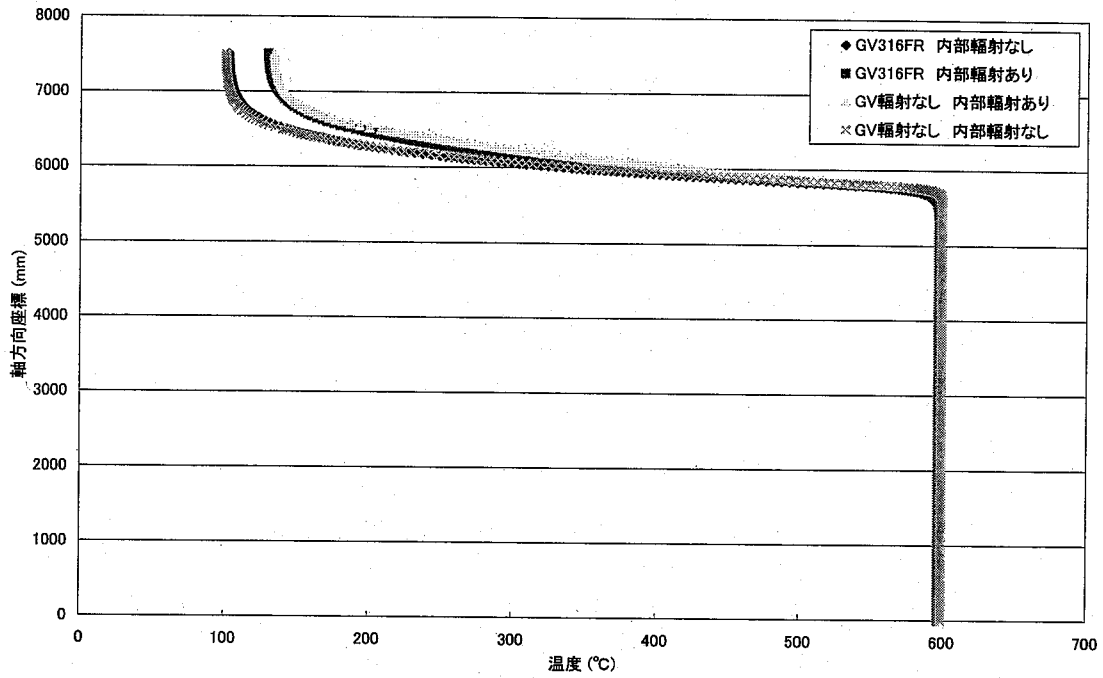


fig.42 Comparison of temperature distribution on outside of the vessel

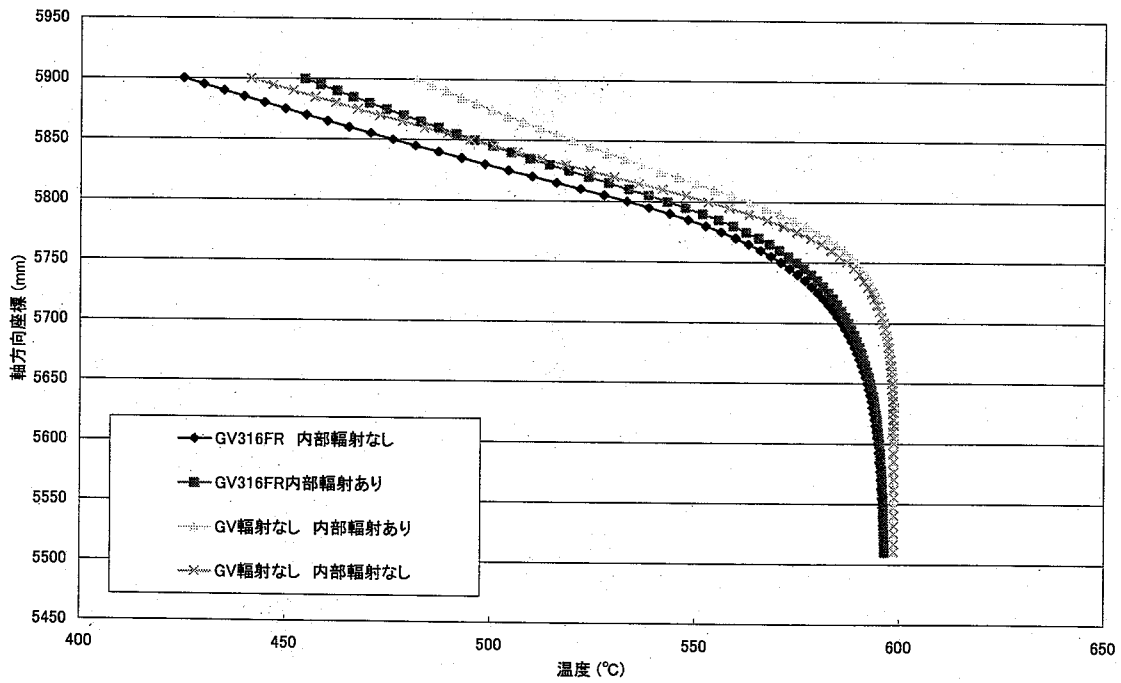


fig.43 Comparison of temperature distribution (near the Sodium surface)