

「もんじゅ」 SGカバーガス領域熱流動解析

(研究報告)



2002年6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・転載する場合には、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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Toukai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

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

2002

2002 年 6 月

「もんじゅ」SG カバーガス領域熱流動解析

(研究報告)

伊藤 啓^{*1}, 堀 公明^{*1}, 山口 彰^{*1}, 岩崎 隆^{*2}

要旨

蒸気発生器の上部にはアルゴンガスによるカバーガスが充填されており、伝熱管などの構造物及び Na 液面と熱交換することによって、温度場・速度場が形成されている。これまで、カバーガス領域の温度分布・速度分布を多次元的に解析評価した例は無く、蒸気発生器内熱流動特性の解析精度を向上する観点から、研究課題の 1 つとなっている。

本研究では、従来、ナトリウム領域に限られていた MSG コードによる円筒 2 次元計算を、「もんじゅ」蒸気発生器内のカバーガス領域を含む全領域に拡張した解析を実施し、カバーガス領域の温度場・速度場について明らかにした。また、カバーガス領域の実形状を 3 次元メッシュにより模擬した解析(FLUENT コード)を行い、それらの結果を上記発生器胴部の測定温度と比較し、解析の妥当性について検討した。円筒 2 次元計算については、3 次元計算との比較によって温度分布の再現性について検証した。さらに、3 次元計算については、熱伝達係数をパラメータとした解析を実施し、ガス温度及び胴温度に対する感度を評価した。

その結果、2 次元計算と 3 次元計算は比較的良く一致しており、2 次元計算の妥当性が検証された。また、自然対流熱伝達係数が胴温度に及ぼす影響は小さいことを確認した。

*1 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究 Gr

*2 原子力システム株式会社

Thermal-hydraulic analysis of cover gas region
in steam generator of MONJU

Kei Ito^{*1}, Takaaki Sakai^{*1}, Akira Yamaguchi^{*1}, Takashi Iwasaki^{*2}

Abstract

The upper region of steam generator is filled with argon cover gas. The cover gas is expected to constitute a complex natural circulation derived by heat exchange with cold feed water tubes, hot steam tubes, other structures and sodium surfaces. It is one of important issues to make clear the gas temperature distribution for a detail thermal-hydraulic evaluation in a steam generator.

In this study, a cylindrical two-dimensional (2-D) code (MSG code) was applied to the whole region analysis of the Monju steam generator involving the cover gas region. In order to confirm the analysis accuracy, the 2-D results were compared with three-dimensional (3-D) results calculated by the FLUENT code, which has employed unstructured mesh for each tube, and both results were compared with measured temperature of the shell. In addition, a sensitivity of heat transfer coefficients to the shell temperature was evaluated by the 3-D analysis.

As a result, the cover gas temperature distribution by the 2-D analysis showed good agreement with the result by the 3-D analysis. In addition, it was confirmed that heat conductive coefficient has negligible effects on the shell temperature.

*1 Thermal-Hydraulic Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

*2 Nuclear Energy System Inc.

目次

1. 緒言	1
2. 解析条件	2
2.1 解析体系	2
2.2 解析メッシュ	2
2.3 境界条件	3
2.4 解析コード	3
2.5 解析ケース	3
3. 解析結果	11
3.1 ダウンカマ部温度解析結果	11
3.2 負荷増減時解析結果	11
4. 考察	21
4.1 3D 解析	21
4.2 2D 解析と 3D 解析の比較	22
4.3 熱伝達率を変化させた解析	22
5. 結言	36
参考文献	37
謝辞	38

表リスト

表 2.1 解析に用いた熱流動相関式	4
表 2.2 MSG コードのアルゴリズム	5
表 3.1 解析結果と試験結果の比較	13
表 4.1 3D 解析条件	24

図リスト

図 2.1.1 「もんじゅ」SG	6
図 2.1.2 「もんじゅ」SG カバーガス領域	7
図 2.2.1 解析メッシュ	8
図 2.2.2 解析メッシュ(カバーガス領域)	9
図 2.5.1 解析ケース	10
図 3.1.1 Na 液面径方向温度分布	14
図 3.1.2 ダウンカマ部 Na 温度過渡変化	14
図 3.2.1 SG 内温度分布+速度分布(初期定常条件)	15
図 3.2.2 カバーガス領域温度分布+速度分布(初期定常条件)	15
図 3.2.3 温度プロット点	16
図 3.2.4 径方向温度分布(初期定常条件)	17
図 3.2.5 軸方向温度分布(初期定常条件)	17
図 3.2.6 SG 内温度分布+速度分布(負荷低下条件)	18
図 3.2.7 カバーガス領域温度分布+速度分布(負荷低下条件)	18
図 3.2.8 径方向温度分布(負荷低下条件)	19
図 3.2.9 軸方向温度分布(負荷低下条件)	19
図 3.2.10 脊板近傍カバーガス温度の過渡変化	20
図 4.1.1 3D 解析メッシュ	25
図 4.1.2 3D 解析対称面温度分布(初期定常条件)	26
図 4.1.3 3D 解析脣板温度分布(初期定常条件)	26
図 4.1.4 3D 解析径方向温度分布(初期定常条件)	27
図 4.1.5 3D 解析軸方向温度分布(初期定常条件)	27
図 4.1.6 3D 解析対称面温度分布(負荷低下条件)	28
図 4.1.7 3D 解析脣板温度分布(負荷低下条件)	28
図 4.1.8 3D 解析径方向温度分布(負荷低下条件)	29

図 4.1.9	3D 解析軸方向温度分布(負荷低下条件)	29
図 4.2.1	2D 解析・3D 解析温度分布比較	30
図 4.2.2	2D 解析・3D 解析速度分布比較	30
図 4.2.3	2D・3D 温度分布比較($r=0.0m$)	31
図 4.2.4	2D・3D 温度分布比較($r=1.1m$)	31
図 4.2.5	2D・3D 温度分布比較($r=1.45m$)	32
図 4.3.1	熱伝達率を 1/10 倍した時の対称面温度分布	33
図 4.3.2	熱伝達率を 10 倍した時の対称面温度分布	33
図 4.3.3	熱伝達率を変化させた時の温度比較($r=0.0m$)	34
図 4.3.4	熱伝達率を変化させた時の温度比較($r=1.1m$)	34
図 4.3.5	熱伝達率を変化させた時の温度比較($r=1.45m$)	35
図 4.3.6	熱伝達率を変化させた時の温度比較($r=1.5m$)	35

1. 緒言

蒸気発生器内の多次元的な熱流動を評価する観点から、水側一マルチチャンネル、ナトリウム側一円筒2次元モデルによるMSGコード(Multi-dimensional Steam Generator analysis code)の開発を進めてきた。これまで、大洗工学センターにおける50MW蒸気発生器試験データに基づき、予測精度の検証[1]を実施するとともに、敦賀国際技術センターにおいて「もんじゅ」での総合起動試験データによる検証及び高度化が実施されている[2]。

蒸気発生器内での熱流動現象は、ナトリウムと伝熱管中の水の熱交換に着目した解析評価が従来実施されてきた。それらの熱交換については、50MW蒸気発生器試験によって取得された温度分布データに対する、解析コードの予測精度としての評価が実施されている。

一方で、蒸気発生器の上部にはアルゴンガスによるカバーガスが充填されており、充填されたアルゴンガスは、多くの伝熱管と熱交換を行いながら定常的な温度分布でバランスしていると考えられる。給水側及び出口側の双方の伝熱管群がカバーガス領域内に存在するとともに、入口側の高温のナトリウム界面、さらには、給水温度に近いダウンカマ領域のナトリウム界面等、温度差の大きい複雑な境界によって流れ場が形成されている。このアルゴンガスの温度分布については、ガスの自然対流が支配的となって多次元的な温度分布が形成され、それらはシュラウド等の構造材温度と密接な相関を有すると考えられるが、これまで、カバーガスの多次元的な温度分布を解析的に評価した例は無く、蒸気発生器の熱流動評価の観点から、解析の高精度化を目指すべき目標のひとつであると考えられる。

本研究では、従来、ナトリウム領域に限られていたMSGコードによる円筒2次元計算をカバーガス領域にまで拡張し、「もんじゅ」蒸発器内のカバーガス領域を含む全領域を対象とした解析を実施した結果について示す。また、カバーガス領域の実形状を3次元メッシュにより模擬した解析(FLUENTコード)を行い、MSGコードによる円筒2次元計算との比較を行い、それらの妥当性について検討した。さらに、3次元計算については、熱伝達係数をパラメータとした解析を実施し、ガス温度及び胴温度に対する感度を評価した。

2. 解析条件

2.1 解析体系

「もんじゅ」SG を図 2.1.1 に示す。また、カバーガス領域の模式図を図 2.1.2 に示す。

図 2.1.2 に示すように、カバーガスは、カバーガス中水漏洩検出ノズルから流出し、ナトリウム水反応生成物放出ノズルから流入する。カバーガス領域中の構造物としては、以下のものがあげられる。

蒸気側伝熱管(140 本)

給水側伝熱管(140 本)

Na 分配管(6 本)

胴板

内筒

上部平板

シュラウド

Na 液面

カバーガス中水漏洩検出ノズル

ナトリウム水反応生成物放出ノズル

支持棒

サポート

上記の構造物のうち、支持棒とサポートについては、流れに与える影響は少ないとして、無視した。

2.2 解析メッシュ

本件では、図 2.1.1 で示した「もんじゅ」SG を軸対称とみなして、2 次元 r-z 系において解析を行う。解析メッシュを図 2.2.1 に示す。径方向 25 点 × 軸方向 67 点の構造メッシュとなっている。また、解析メッシュのカバーガス領域の拡大図を図 2.2.2 に示す。

Na 中のヘリカルコイル形伝熱管、カバーガス中の蒸気側伝熱管、給水側伝熱管、Na 配管については、体積率(ポロシティ)模擬することで、解析を行っている。また、カバーガス空間中には、Ar の流入口と出口があり、カバーガスの循環を模擬している。

2.3 境界条件

解析に使用した相関式を表 2.1 に示す。

それ以外の構造物表面(胴板, シュラウドなど)においては、断熱条件とし、壁面や液面における流動条件は Freeslip 条件とした。また、以下に示す境界条件については、「もんじゅ」における測定値を用いた。

Na 流入流量

Na 流入温度

給水流量

給水エンタルピー

蒸気側出口圧力

カバーガス流入流量

カバーガス流入温度

2.4 解析コード

本解析には、MSG コード(Multi-dimensional Steam Generator analysis code)を用いた。
MSG コードのアルゴリズムを表 2.2 に示す。

また、今回の解析においては、Na と Ar の 2 成分流体-2 領域を同時に解析した。

2.5 解析ケース

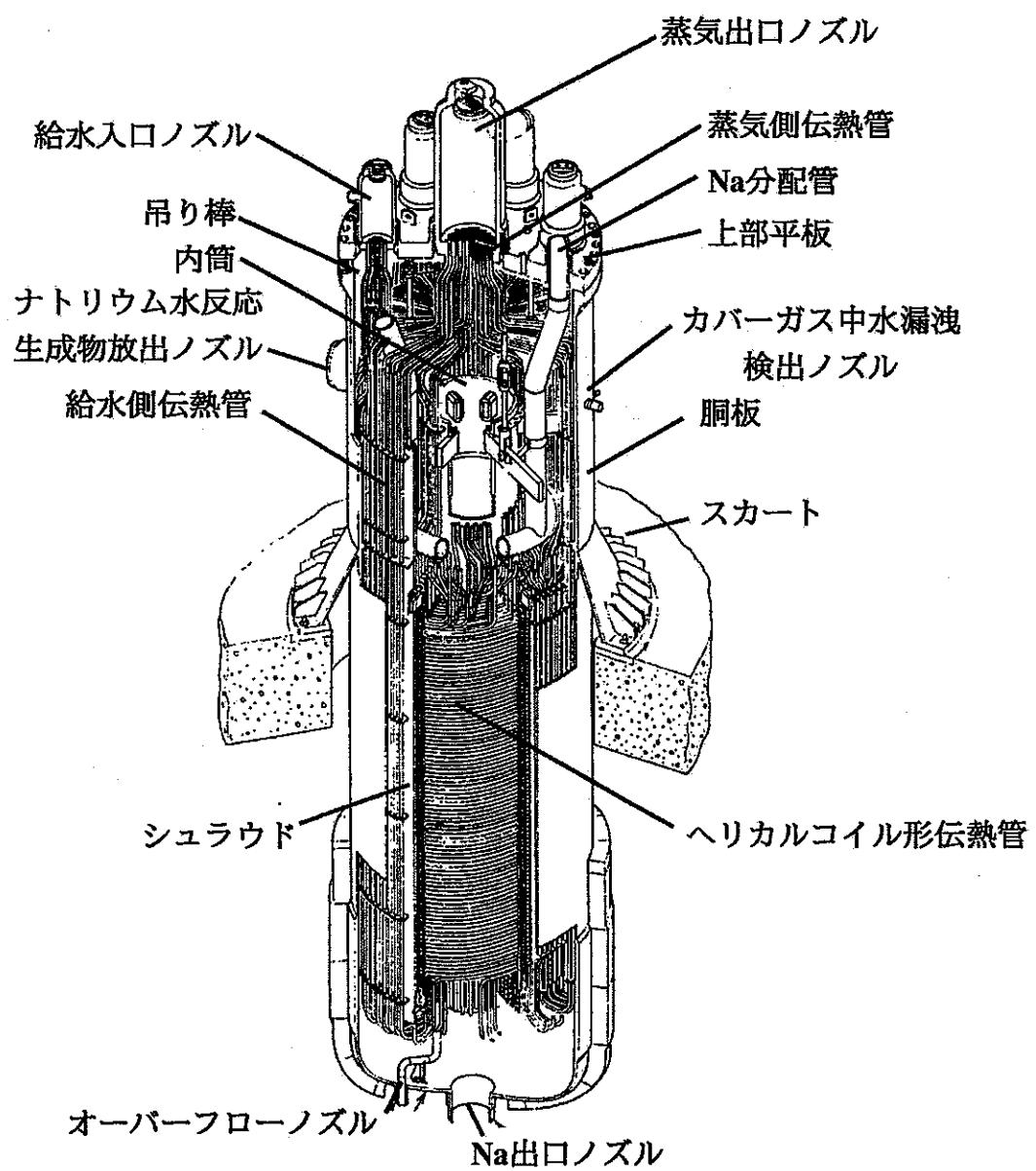
解析は、「もんじゅ」において平成 7 年に実施した、40%出力における性能試験(負荷増減試験)を対象に行った。解析ケースを図 2.5.1 に示す。

表 2.1 解析に使用した熱流動相関式

熱伝達式	ナトリウム側	直管部	Hoe の式
		ヘリカルコイル部	Hoe の式
	水・蒸気側	予熱域	Dittus Boelter の式 (ライザ一部) 森・中山(液相の式) (ヘリカルコイル部)
		核沸騰域	修正 Schrock-Grossman の式
		膜沸騰域	クオリティの比例配分
		過熱域	Dittus Boelter の式 (ライザ一部) 森・中山(気相の式) (ヘリカルコイル部)
	カバーガス側	直管部	一様伝熱面温度の垂直平板の自然対流熱伝達の式
		ナトリウム液面	一様伝熱面温度の水平平板の自然対流熱伝達の式
	DNB クオリティ		0.75
	水・蒸気側	単相域	Colebrook の式
		二相域	Martinelli-Nelson の式
		ヘリカルコイル部	伊藤の式
	ナトリウム側	ヘリカルコイル部	Max-Jacob の式

表 2.2 MSG コードのアルゴリズム

数値解析アルゴリズム : SMAC	
圧力に関する Poisson 方程式の解法	ICCG 法 PCG 法
時間積分法	1 次精度オイラー法
対流項差分法	1 次精度風上差分 スキューアップウインド
拡散項差分法	2 次精度中心差分
乱流モデル	0 次方程式モデル



胴内径 2950 mm
胴板厚 25 mm
全長 15230 mm

図 2.1.1 「もんじゅ」SG

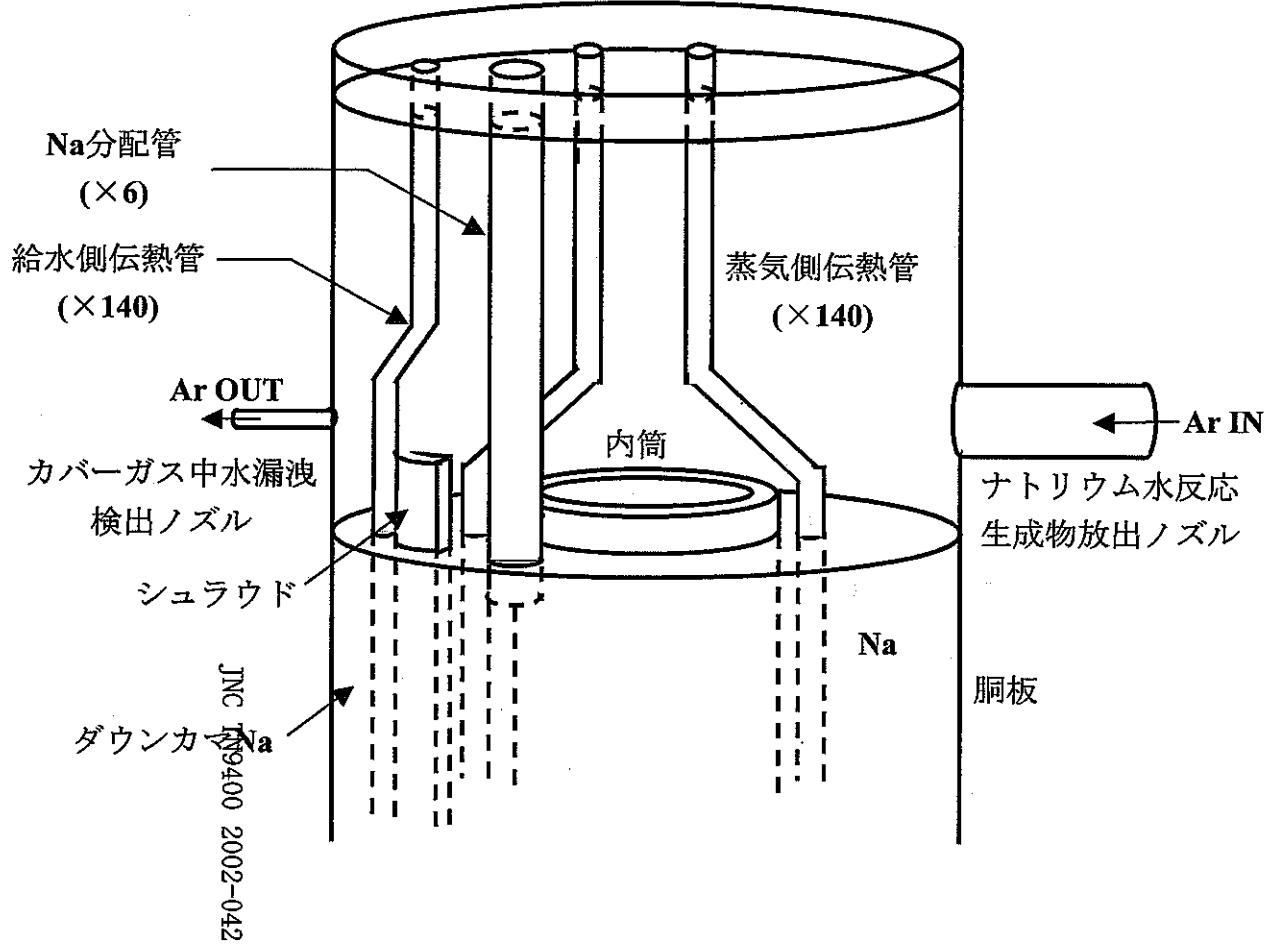


図 2.1.2 「もんじゅ」SG カバーガス領域

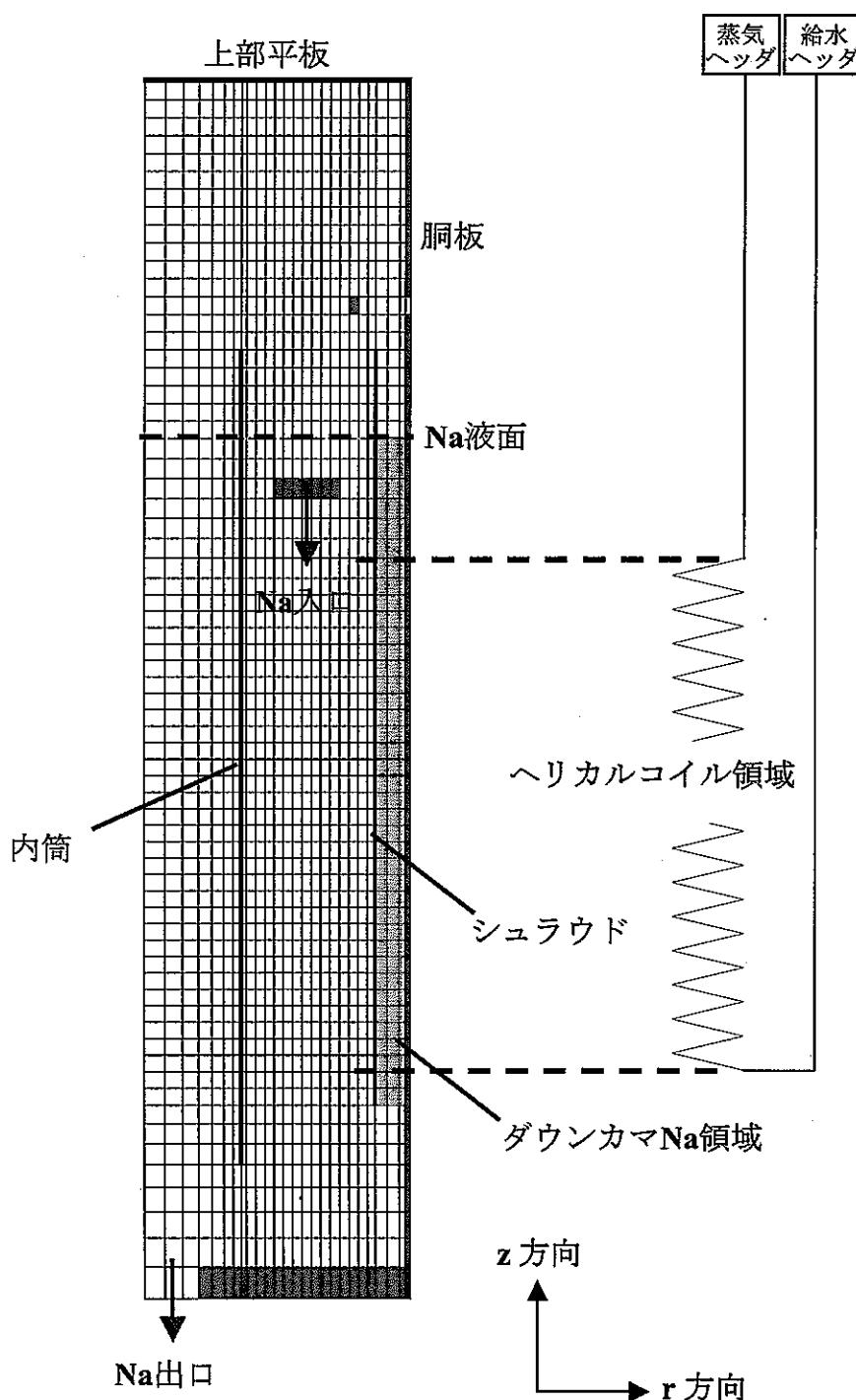
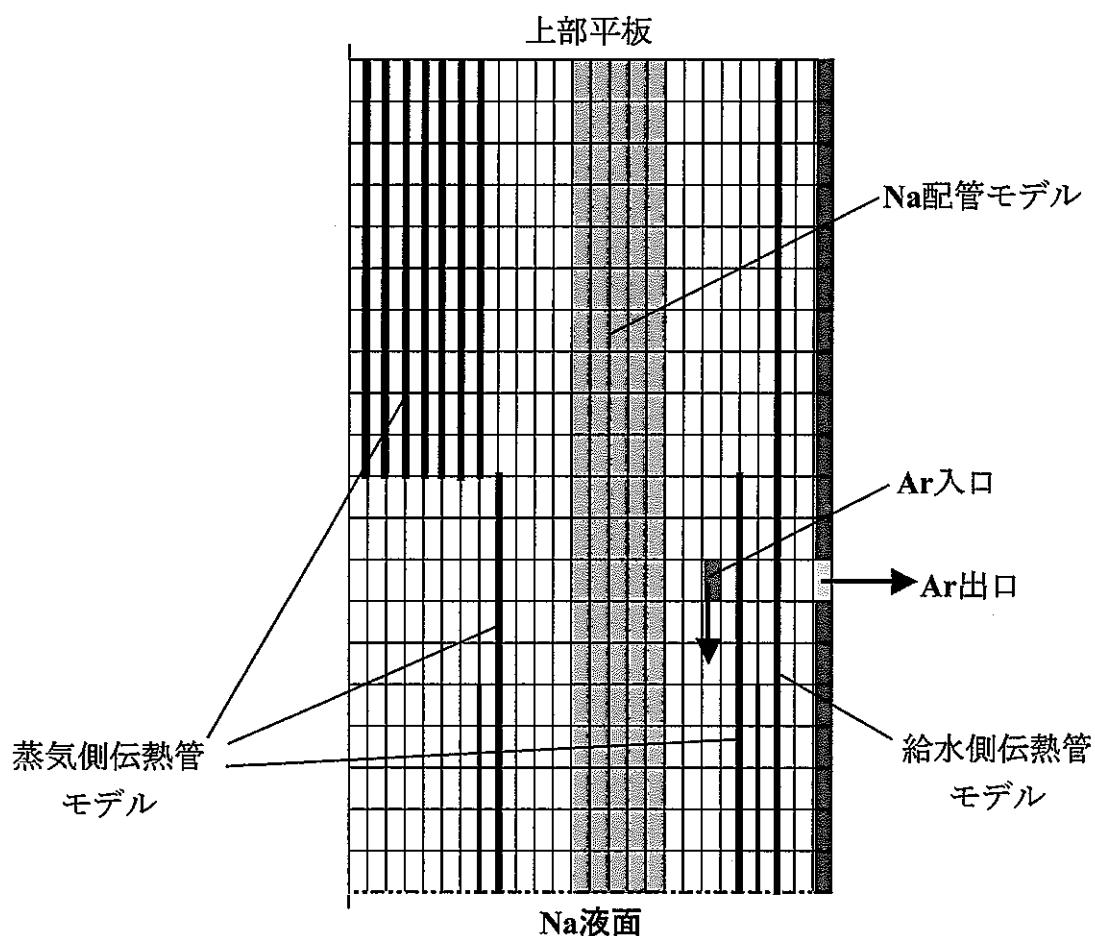


図 2.2.1 解析メッシュ



蒸気側伝熱管・給水側伝熱管・Na配管については、
体積率(ポロシティ)模擬

図2.2.2 解析メッシュ(カバーガス領域)

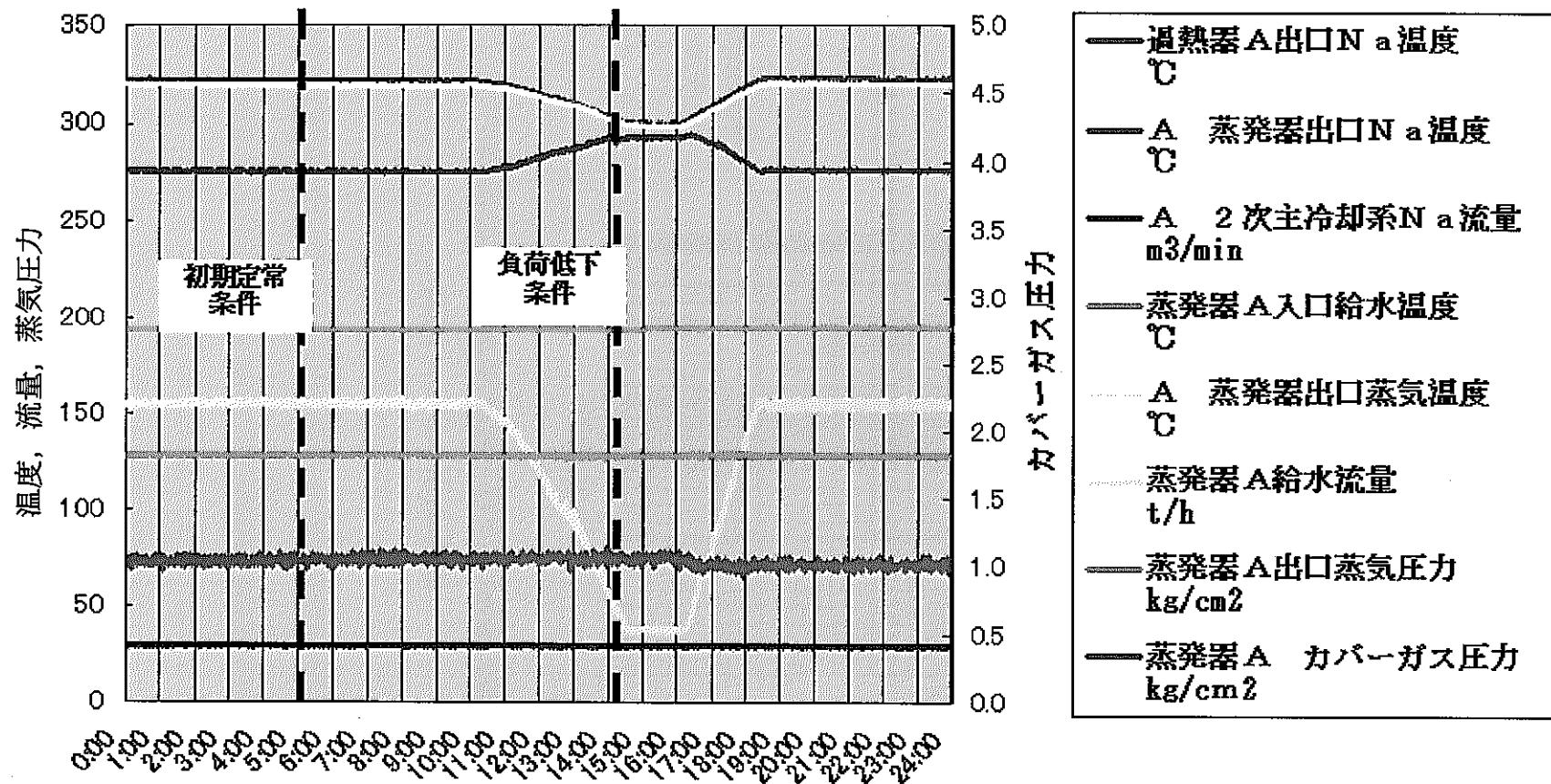


図 2.5.1 解析ケース

3. 解析結果

3.1 ダウンカマ部温度解析結果

「もんじゅ」体系における MSG コード解析の妥当性を検証するため、カバーガス領域を解かない、Na 領域のみにおける過渡解析を行った。解析結果と試験結果の比較を表 3.1 に示す。両者は良く一致しており、熱交換量に関して、MSG コードを用いた「もんじゅ」体系での解析の妥当性が示された。解析結果の Na 液面径方向温度分布を図 3.1.1 に、ダウンカマ部 Na 液面温度の過渡変化を図 3.1.2 に示す。内筒領域・ヘリカル領域において、液面温度は入口 Na 温度と等しくほぼ一定であるが、ダウンカマ領域において、低温の給水側伝熱管があるため低温となっている。また、内筒領域・ヘリカル領域で負荷低下後に、液面温度が 20°C 程度減少するのに対し、ダウンカマ領域において、10°C 程度の温度上昇が観察される。これは、給水流量が減少したことにより、除熱量が減少するためである。また、ダウンカマ部 Na の温度は、時間に対して一定の傾きで変化するのではなく、負荷下降開始直後は小さい傾きで変化し、時間とともに傾きを増加させ、負荷下降終了間際ににおいて、最も大きい傾きで変化する。

3.2 負荷増減時解析結果

MSG コード解析の妥当性が確認されたので、Na と Ar(カバーガス)の 2 成分-2 領域を対象とした過渡解析を行った。本解析においては、「もんじゅ」プラントにおいて 4 時間程度の時間をかけて低下させている負荷を、計算時間低減の観点から 130 秒で低下させた。

負荷低下前(初期定常条件)における SG 内温度分布+速度分布を図 3.2.1 に、カバーガス領域温度分布+速度分布を図 3.2.2 に示す。径方向温度分布、軸方向温度分布のグラフにおけるプロット点を図 3.2.3 に示し、径方向温度分布を図 3.2.4 に、軸方向温度分布を図 3.2.5 に示す。図 3.2.1、図 3.2.2 より、カバーガス領域において、蒸気側伝熱管の領域と、Na 液面近傍で温度が高くなっている。また、カバーガスの流動は、蒸気側伝熱管によって暖められたカバーガスが上昇流となり、上部平板にあたった後、径方向に流れ、給水側伝熱管によって冷やされて下降流となる、という対流を形成している。Na 液面近傍のカバーガスは、内筒やシュラウドによって径方向に仕切られているため、大きな流動は観察されない。径方向温度分布から、 $z=2.5\text{m}$ や $z=1.5\text{m}$ において、径方向に温度差はそれほどない。 $z=0.5\text{m}$ において、Na 液面に近いことと、内筒・シュラウドによって領域が仕切られていることによって、それぞれの領域において、かなりの温度差が観察される。軸方向温度分布より、 $z=1.0\text{m}$ 以上の領域において、カバーガス温度にあまり差はない。しかし、 $z=1.0\text{m}$ 以下の領域において、Na 液面温度の影響を大きく受けることにより、 $r=1.1\text{m}$ のプロットで多少の温度上昇があり、 $r=1.45\text{m}$ のプロットで急激な温度低下が観察される。図中には、胴温度の測定値($z=0.59\text{m}$, $z=1.79\text{m}$)もプロットしてある。この温度と $r=1.45\text{m}$ におけるカバーガス温度を比較すると、 $z=1.79\text{m}$ においては $\pm 2^\circ\text{C}$

の差で一致しており、 $z=0.59m$ においても 10°C 以内の差で一致おり、解析は、実機のカバーガス温度を比較的良く再現できていると考えられる。

負荷低下後(負荷低下条件)における温度分布+流速分布を図 3.2.6 に、カバーガス領域温度分布+速度分布を図 3.2.7 に示す。また、径方向温度分布を図 3.2.8 に、軸方向温度分布を図 3.2.9 に示す。カバーガスの対流形式に差は見られないが、流入 Na 温度の低下にともない、蒸気側伝熱管温度、内筒内 Na 液面、ヘリカル Na 液面温度が低下するため、カバーガス温度が全体的に低下しているのが分かる。径方向温度分布より、温度分布形状は、初期定常条件の時とほとんど変化していない。ただし、カバーガス温度は、初期定常の時と比較して全体的に 10°C 程度低下している。軸方向温度分布において、分布形状にほとんど差は見られない。ただし、負荷低下条件において、初期定常条件よりダウンカマ Na 温度が上昇するため、 $r=1.45m$ の $z=0.5m$ 以下のダウンカマ Na 液面近傍領域において 3°C 程度の温度上昇が観察される。

胴板近傍カバーガス温度の過渡変化を図 3.2.10 に示す。 $z=1.725m$ や $z=0.525m$ において、負荷低下とともに、カバーガス温度が低下するが、 $z=0.2m$ のダウンカマ Na 液面近傍において、ダウンカマ Na 液面温度の上昇により、わずかに温度が上昇する。この際、ダウンカマ Na 液面温度の上昇開始から多少の時間遅れをともなって、カバーガス温度の上昇が開始している。

表 3.1 解析結果と試験結果の比較

		初期定常条件	負荷低下条件
出口ナトリウム温度 [°C]	試験	275.5	292.8
	解析	272.4	290.5
出口蒸気温度[°C]	試験	319.6	299.0
	解析	319.6	299.2
ダウンカマ部上端ナ トリウム温度[°C]	試験	—	—
	解析	206.6	215.4

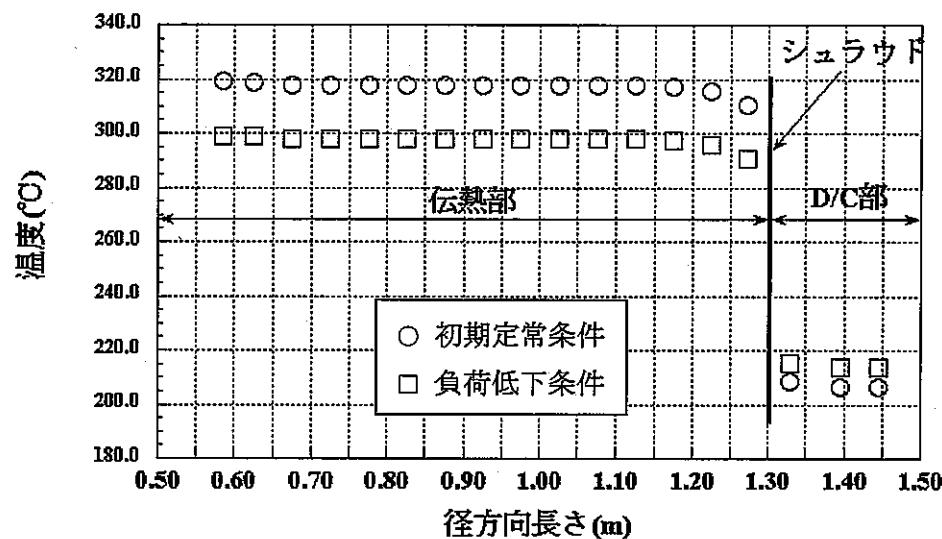


図 3.1.1 Na 液面径方向温度分布

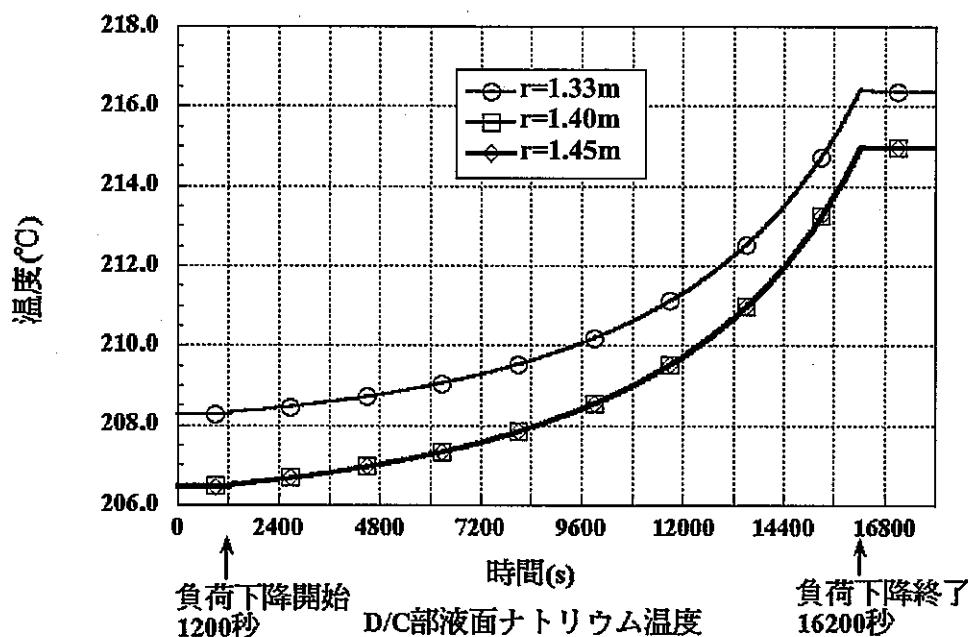


図 3.1.2 ダウンカマ部 Na 温度過渡変化

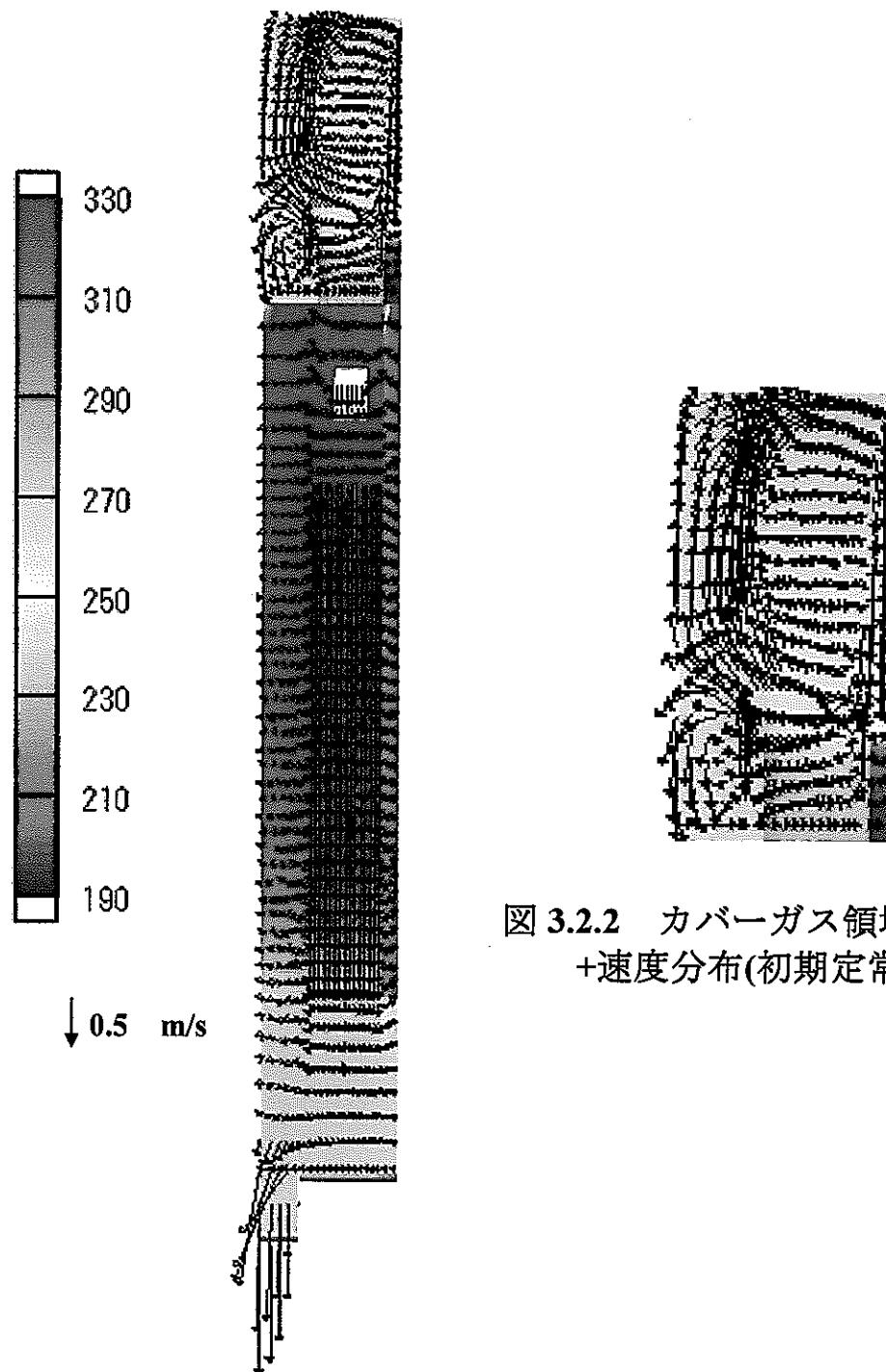
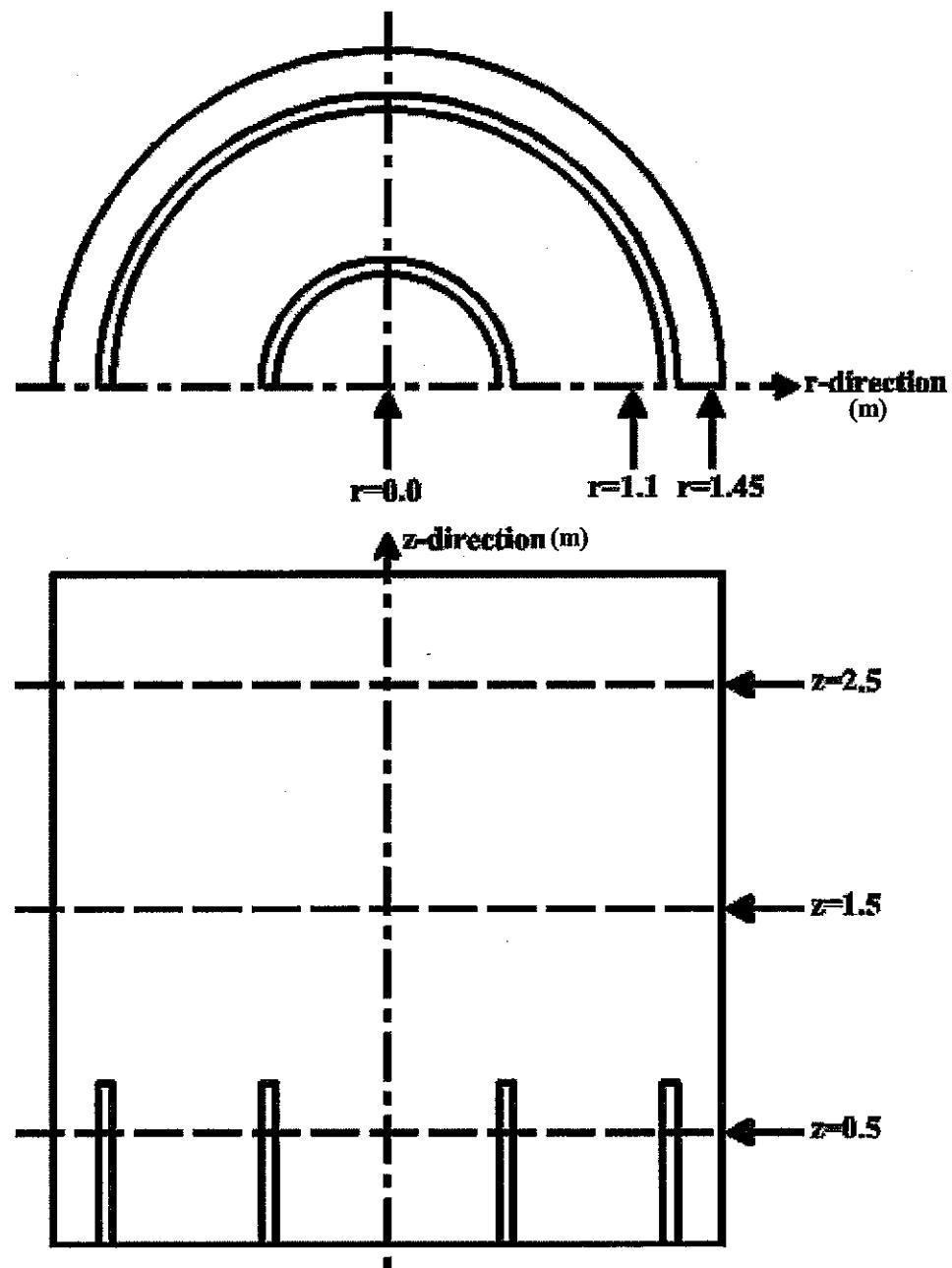


図 3.2.1 SG 内温度分布+速度分布
(初期定常条件)



$r=0.0\text{m}\cdots$ 蒸気側伝熱管中心位置

$r=1.1\text{m}\cdots$ 給水側伝熱管中心位置

$r=1.45\text{m}\cdots$ ダウンカマ部上方位置

図 3.2.3 温度プロット点

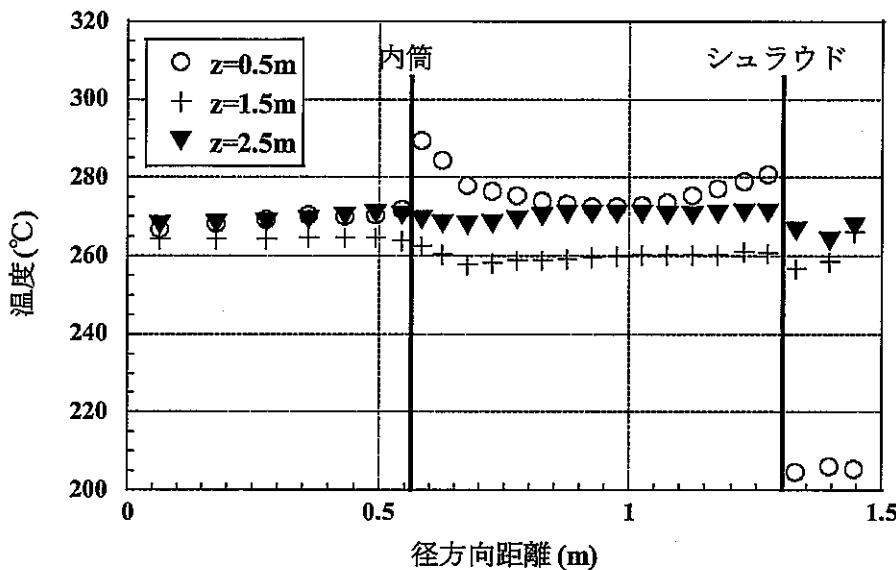


図 3.2.4 径方向温度分布(初期定常条件)

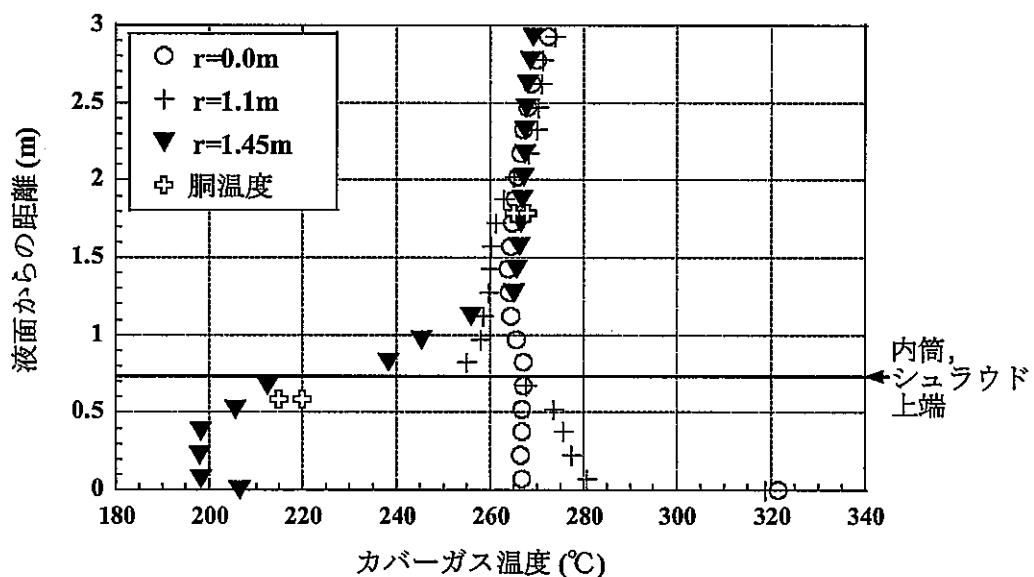


図 3.2.5 軸方向温度分布(初期定常条件)

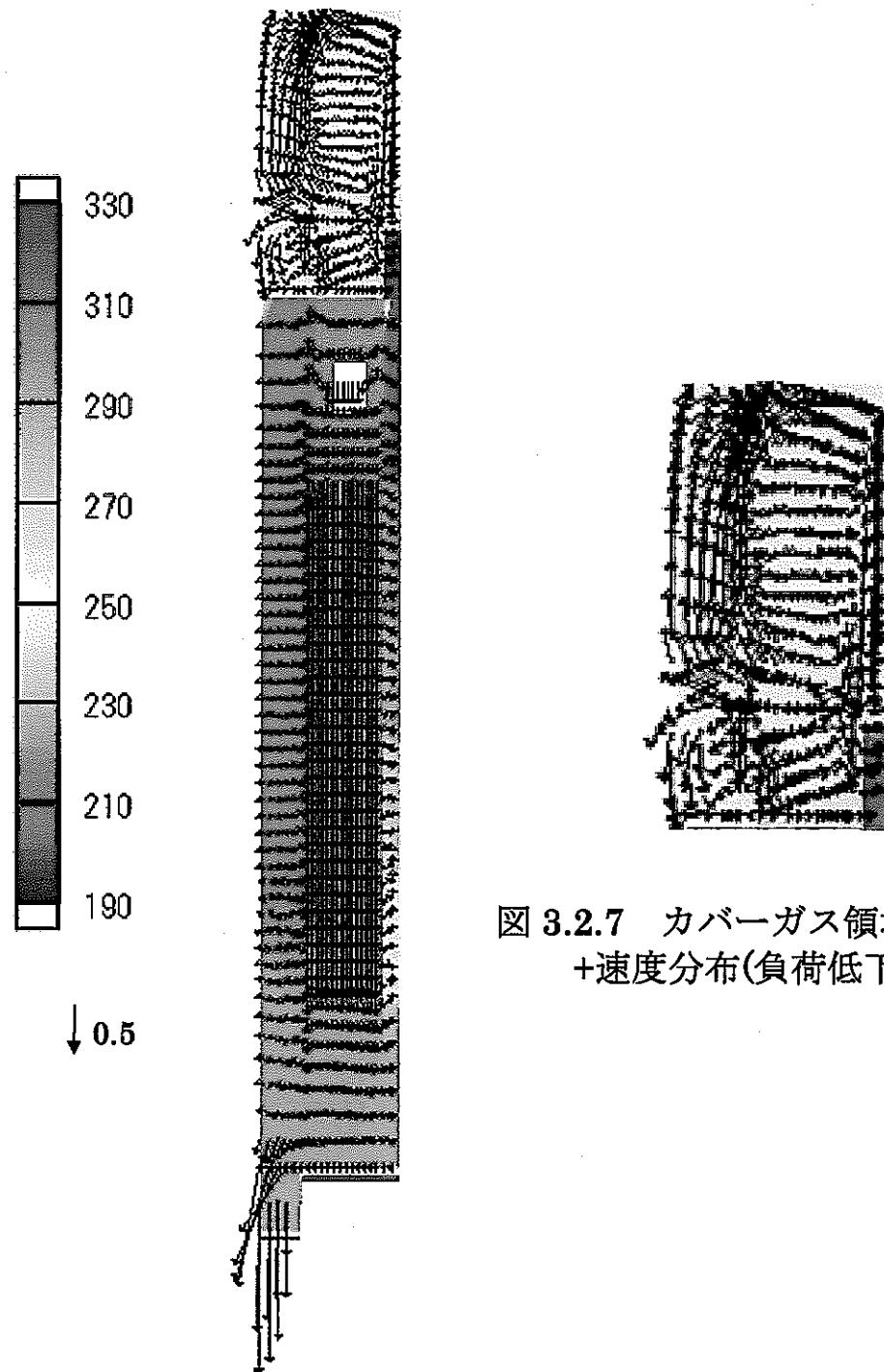


図 3.2.6 SG 内温度分布+速度分布
(負荷低下条件)

図 3.2.7 カバーガス領域温度分布
+速度分布(負荷低下条件)

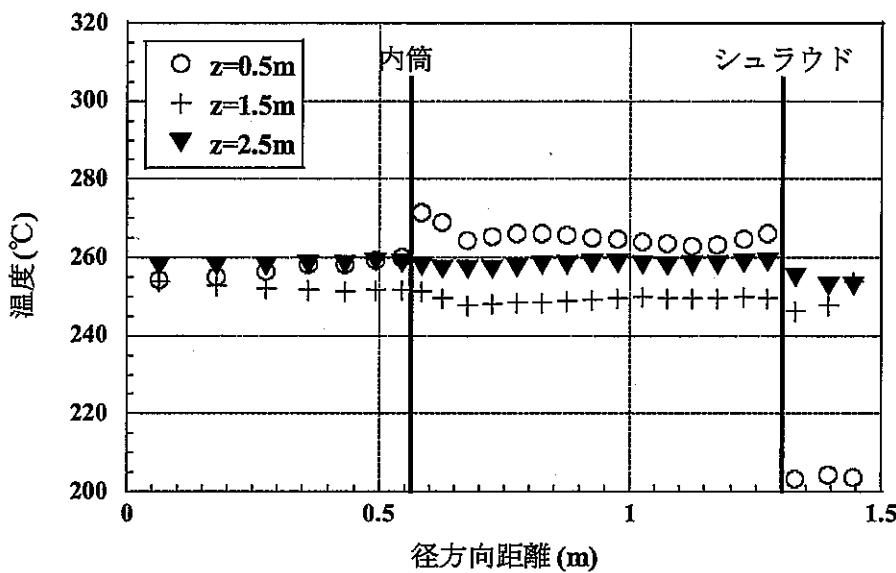


図 3.2.8 径方向温度分布(負荷低下条件)

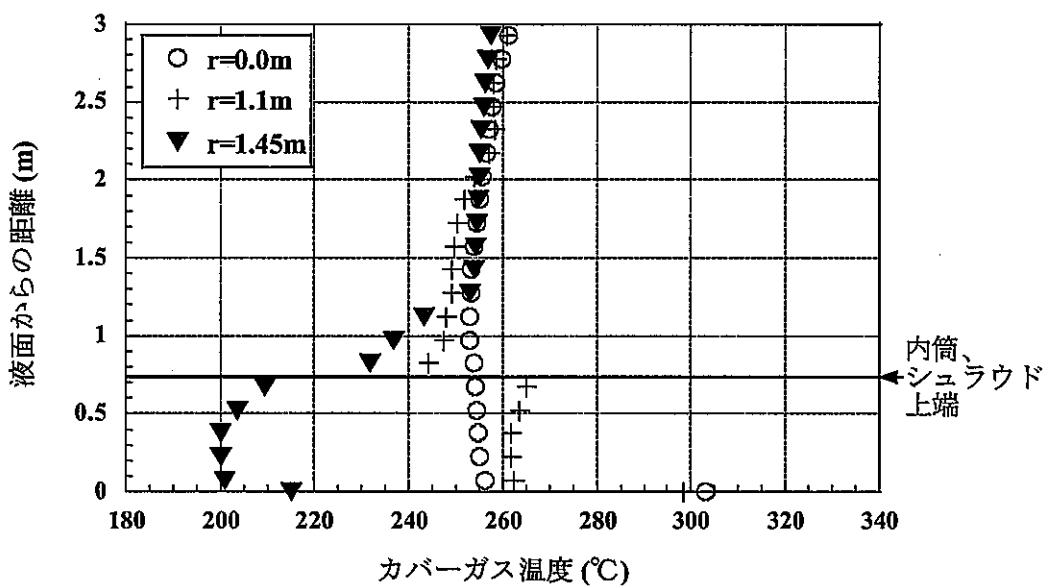


図 3.2.9 軸方向温度分布(負荷低下条件)

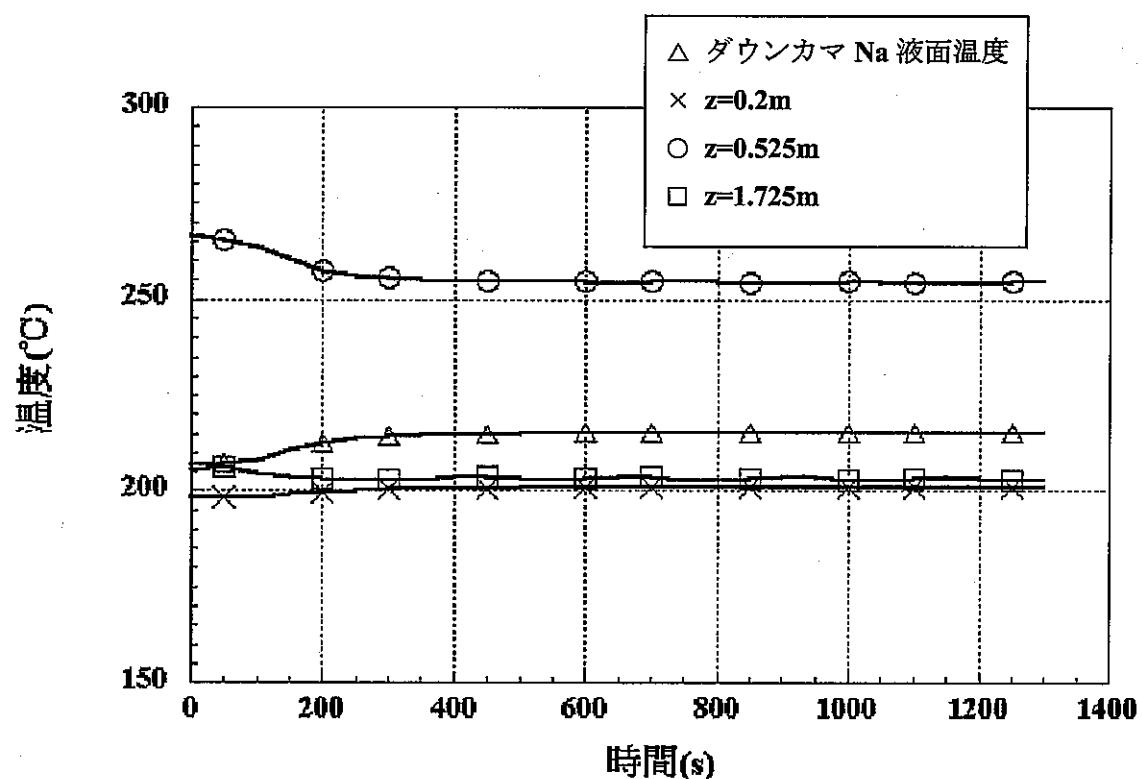


図 3.2.10 胴板近傍ガス温度の過渡変化

4. 考察

4.1 3D 解析

本研究では、MSG コードによる 2 次元過渡解析に加えて、FULUENT コードを用いた 3 次元定常解析も行った。3 次元定常解析の解析条件を表 4.1 に示す。用いた伝熱式の詳細について、Appendix に示す。

3 次元解析では、カバーガス流入口・カバーガス流出口を含む対称面で分けた 180° 領域について、カバーガス領域の構造物をモデル化することなく、非構造メッシュによって実形状模擬して解析を行った。解析メッシュを図 4.1.1 に示す。メッシュは、基本的に 6 面体メッシュを用いているが、伝熱管の曲がり部近傍などの形状が複雑な場所には、構造模擬性を高めるために 4 面体メッシュを用いている。

初期定常条件における、3D 解析結果の対称面温度分布を図 4.1.2 に、胴板温度分布を図 4.1.3 に示す。また、径方向温度分布を図 4.1.4 に、軸方向温度分布を図 4.1.5 に示す。図 4.1.2 より、カバーガスは、蒸気側伝熱管近傍と Na 液面の近傍において高温となっているのが分かる。特に、蒸気側伝熱管が上部平板に繋がる領域が最も高温となっている。これは、蒸気側伝熱管によって暖められたカバーガスが上昇し、上部平板にぶつかるためである。一方、給水側伝熱管近傍と、ダウンカマ Na 液面近傍は、低温領域となっている。図 4.1.3 の胴板温度分布より、胴板温度は、低温のダウンカマ Na に接する領域から、高温の上部平板に接する領域まで、 z 方向に層状の温度分布になっていることが分かる。径方向温度分布より、 $z=2.5\text{m}$ において、 $r=0.5\text{m}$ 以下の蒸気側伝熱管領域が高温となっており、 $z=1.5\text{m}$ において、 $r=1.0\text{m} \sim r=1.5\text{m}$ の給水側伝熱管領域が低温となっている。また、 $z=0.5\text{m}$ において、シラウドより外側の領域が低温となっている。これら以外の領域において、カバーガス温度の径方向変化は小さい。軸方向温度分布より、 $z=1.5\text{m}$ 以上の領域において、カバーガス温度は $r=0.0\text{m}, 1.1\text{m}, 1.45\text{m}$ でほとんど違いは見られない。 $z=1.5\text{m}$ 以下の領域において、 $r=0.0\text{m}$ と $r=1.1\text{m}$ で、高温の Na 液面の影響で液面に近づくにつれて温度が上昇するが、 $r=1.45\text{m}$ において、低温のダウンカマ Na 液面の影響で液面に近づくにつれて温度が低下する。

負荷低下条件における、3D 解析結果の対称面温度分布を図 4.1.6 に、胴板温度分布を図 4.1.7 に示す。また、径方向温度分布を図 4.1.8 に、軸方向温度分布を図 4.1.9 に示す。図 4.1.6 より、初期定常の温度分布と比較して、蒸気側伝熱管近傍の高温領域の温度が低下していることが観察される。これは、蒸気側伝熱管の温度が低下したためであり、図 4.1.7 の胴板温度分布からも、層状の温度分布において、上部平板に接する部分の温度が初期定常条件より低くなっていることが観察される。また、ダウンカマ Na 温度が上昇する影響により、胴板下部の温度が上昇している。径方向温度分布より、温度分布形状は初期定常条件の場合とほぼ相似形となっているが、全体的にカバーガス温度が 10°C 程度低下している。軸方向温度分布も、初期定常条件の場合と似た形状になっている。ただし、プロット中の最高

温度($r=0.0m$ における $z=3.0m$ の温度)が低下し、プロット中の最低温度($r=1.45m$ における $z=0.0m$ の温度)が上昇したため、全体的な温度分布が多少均一化している。

4.2 2D 解析と 3D 解析の比較

図 4.2.1 に、初期定常条件における、2D 解析と 3D 解析の温度コンタの比較を示す。3D 解析側に給水側伝熱管が存在し、また、温度コンタのカラーバーが異なるため、多少の違いはあるが、上部平板近くで高温となり、ダウンカマ Na 液面近傍で低温となる温度分布はほぼ一致している。

流速ベクトルの比較を図 4.2.2 に示す。蒸気側伝熱管近傍において上昇流となり、給水側伝熱管近傍で下降流となる対流形態は、2D 解析と 3D 解析で一致している。また、上昇流領域における速度もほぼ一致している。

$r=0.0m$ における軸方向温度分布の比較を図 4.2.4 に、 $r=1.1m$ における軸方向温度分布の比較を図 4.2.5 に、 $r=1.45m$ における軸方向温度分布の比較を図 4.2.6 に示す。 $r=0.0m$ において、 $z=1.5m$ 以下の領域では両者は完全に一致するが、 $z=1.5m$ 以上の領域において、蒸気側伝熱管の影響で 3D 解析では z 方向に大きく温度上昇するのに対し、2D 解析ではそれほどの温度は見られない。 $r=1.1m$ において、両者は $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で一致している。ただし、 $z=0.5m$ 以下の Na 液面近傍領域では 2D 解析の方が高い温度となり、 $z=0.5m$ 以上では 3D 解析の方が高い温度となる。 $r=1.45m$ の $z=1.0m$ 以下のダウンカマ Na 液面近傍領域において、2D 解析が 3D 解析より 20°C 程度低い温度となっている。また、 $z=2.0m$ 以上の領域においても、2D 解析の方が 3D 解析より低い温度を評価している。

以上の結果より、2D 解析と 3D 解析を比較すると、伝熱管近傍や Na 液面近傍などの領域において 20°C 程度の差が表れるものの、全体的な温度分布は良く一致していると言える。

4.3 热伝達率を変化させた解析

本解析では、伝熱管表面などの熱伝達率を、自然対流熱伝達相關式によって与えている。これは、カバーガス領域において、ポンプなどの強制対流発生機器は存在せず、また、カバーガス流入口・出口から循環するカバーガス量は微少で、全体の流れ場に与える影響が少ないので、流れ場は温度差によってのみ形成されると考えられるためである。しかし、熱伝達率の変化が体系中の温度場・速度場の形成に与える影響は不明なため、熱伝達率をパラメータとした 3D 解析を実施した。

熱伝達率を 1/10 倍したケース、10 倍したケースについて解析を行い、オリジナルケース(初期定常条件)と比較した。熱伝達率を 1/10 倍したケースにおける対称面温度分布を図 4.3.1 に、10 倍したケースにおける対称面温度分布を図 4.3.2 に示す。また、蒸気側伝熱管中心位置における温度分布の比較を図 4.3.3 に、給水側伝熱管中心位置における温度分布の比較を図 4.3.4 に、ダウンカマ上方位置における温度分布の比較を図 4.3.5 に、胴板の温度分布の比較を図 4.3.6 に示す。図 4.3.1 より、熱伝達率を 1/10 倍したケースにおいて、オリジナル

ケースと比較して全体的にカバーガス温度が均一化している。これは、内筒 Na 液面・ヘリカル Na 液面近傍の高温領域が観察されなくなり、ダウンカマ Na 液面近傍の低温領域の温度が上昇しているためである。また、蒸気側伝熱管近傍の高温領域の温度と、給水側伝熱管近傍の低温領域の温度も、それぞれ、低下、上昇している。図 4.3.2 より、熱伝達率を 10 倍にしたケースにおいて、 $1/10$ 倍にしたケースとは逆に、オリジナルケースと比較して、高温領域の温度はさらに上昇し、低温領域の温度はさらに低下する。すなわち、内筒 Na 液面・ヘリカル Na 液面近傍の温度が上昇し、ダウンカマ Na 液面近傍の温度が低下している。また、蒸気側伝熱管近傍の温度が上昇し、給水側伝熱管近傍の温度が低下する。蒸気側伝熱管中心位置における温度分布より、熱伝達率を変化させても、 $z=1.5m$ 以下の領域において、カバーガス温度に差は見られず、 $z=1.5m$ 以上の蒸気側伝熱管近傍の領域において、熱伝達率が大きいほど温度が高くなる結果となる。給水側伝熱管中心位置における温度分布より、 $z=1.0m$ 以上の給水側伝熱管領域において、熱伝達率が大きいほど温度が低くなり、 $z=0.5m$ 以下のヘリカル Na 液面近傍領域において、熱伝達率が大きいほど温度が高くなっている。ダウンカマ部上方位置における温度分布より、 $z=1.5m$ 以下の領域において、給水側伝熱管とダウンカマ Na 液面の影響で、熱伝達率が大きいほど温度が低くなる。胴板温度分布に関して、熱伝達率の違いによる温度の変化は、熱伝達率を 10 倍したケースの $z=1.5m$ 以上の領域においてに 5°C 程度の温度上昇が表れるだけであり、胴板温度は熱伝達率に対する感度が低いことが確認された。また、グラフ中には胴板温度の測定値を示したが、エラーバーの範囲内で、解析結果は測定値と一致する。

表 4.1 3D 解析条件

熱伝達条件	伝熱管外表面	一様伝熱面温度の垂直平板の自然対流熱伝達の式
	伝熱管内表面	管内強制対流熱伝達の式
	Na 分配管外表面	一様伝熱面温度の垂直平板の自然対流熱伝達の式
	Na 分配管内表面	管内強制対流熱伝達の式
	胴板内側表面	一様伝熱面温度の垂直平板の自然対流熱伝達の式
	胴板外側表面	断熱条件
	ナトリウム表面	一様伝熱面温度の水平平板の自然対流熱伝達の式
	上部平板下側表面	一様伝熱面温度の水平平板の自然対流熱伝達の式
	上部平板上側表面	断熱条件
	その他構造物表面	断熱条件
温度条件	伝熱管内流体(水・蒸気・Na)	試験時温度
	Na 表面温度	流入 Na 温度
	ダウンカマ Na 表面温度	MSG 解析によって求められた温度
	流入カバーガス温度	試験時温度
流動条件	構造物表面	No slip 条件
	Na 液面	No slip 条件
	カバーガス流入口	一様流入条件
	カバーガス流出口	Pressure outlet 条件

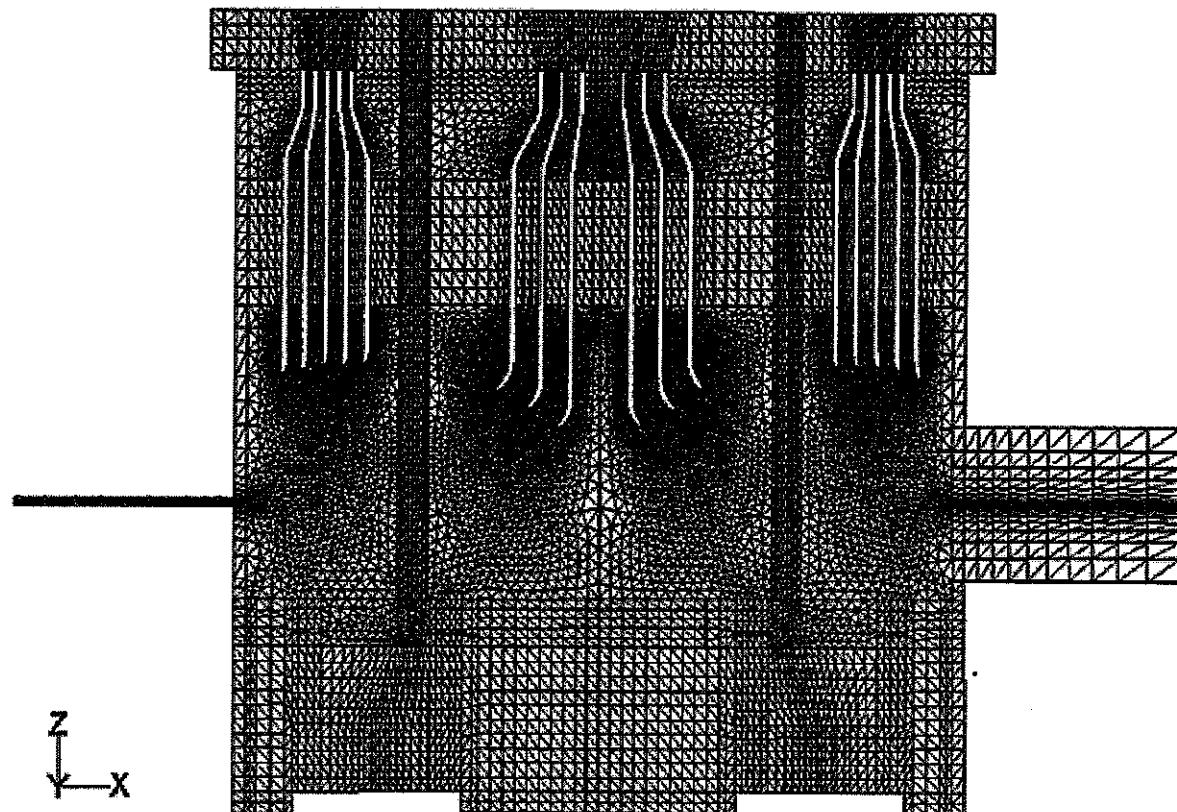


図 4.1.1 3D 解析メッシュ(対称面)

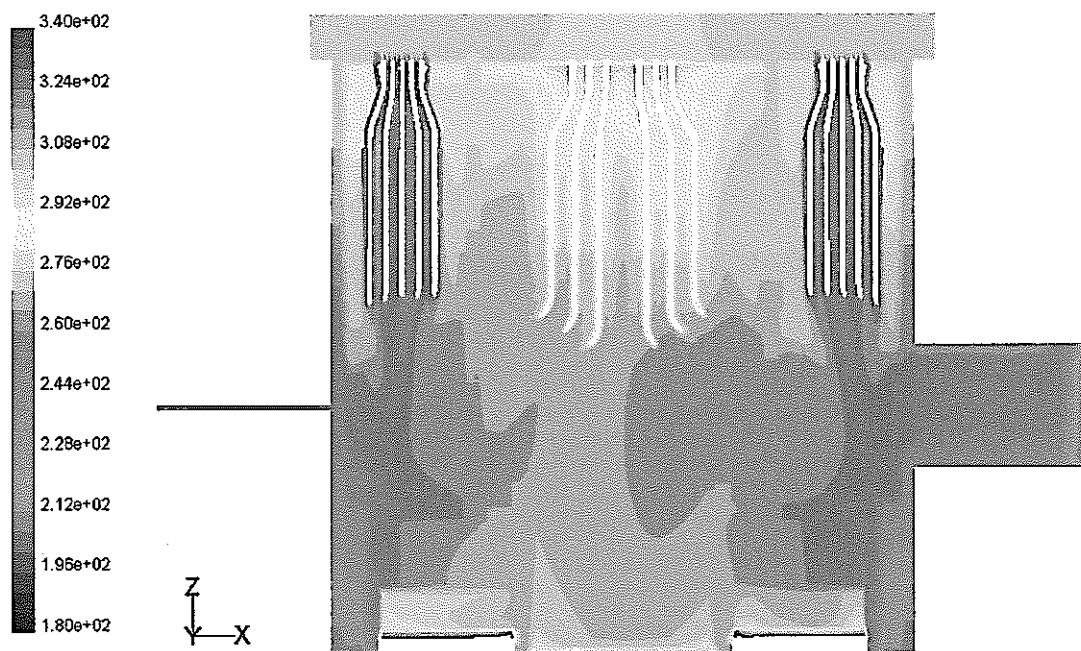


図 4.1.2 3D 解析対称面温度分布(初期定常条件)

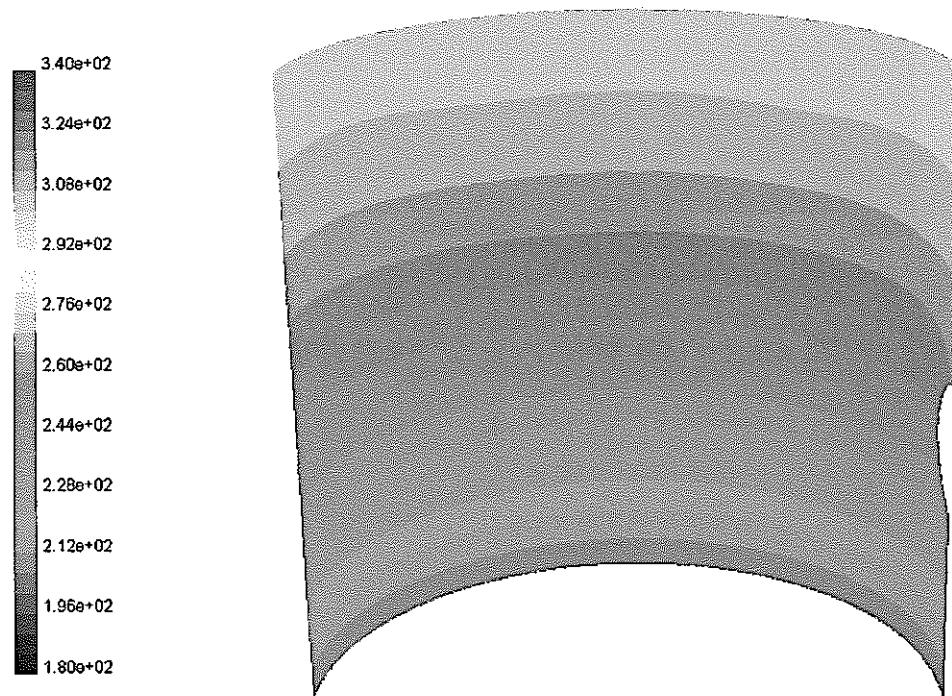


図 4.1.3 3D 解析胴板温度分布(初期定常条件)

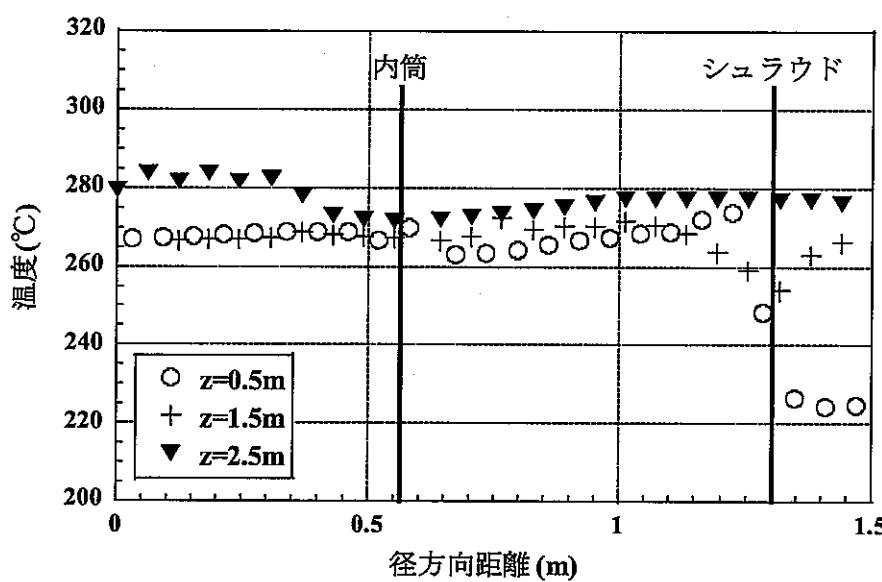
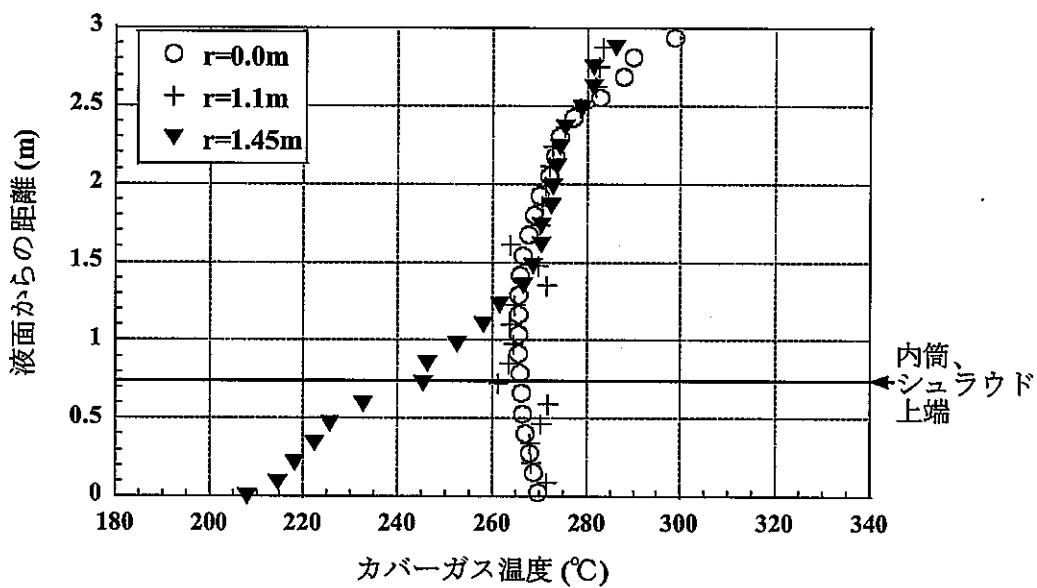


図 4.1.4 3D 解析径方向温度分布(初期定常条件)



z 方向に層状の温度分布になっていることが分かる。

図 4.1.5 3D 解析軸方向温度分布(初期定常条件)

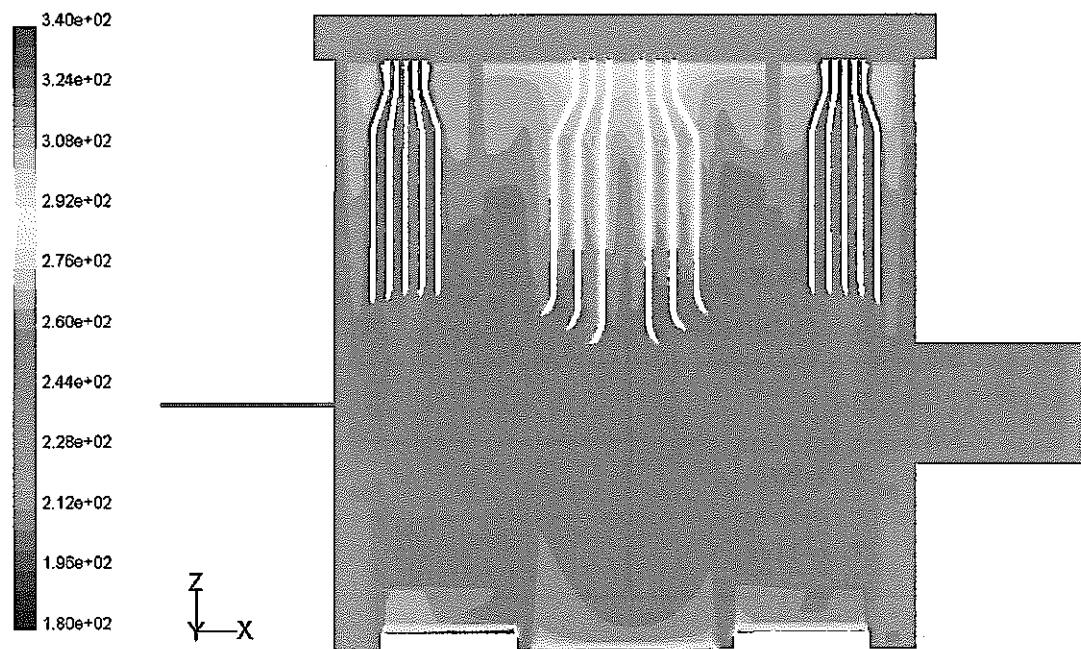


図 4.1.6 3D 解析対称面温度分布(負荷低下条件)

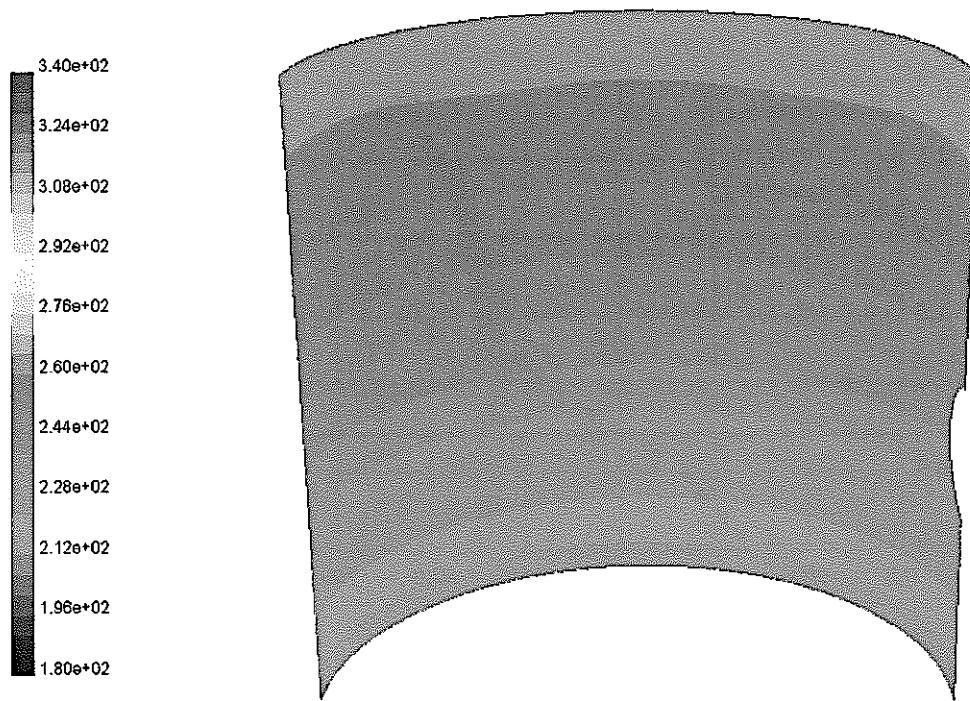


図 4.1.7 3D 解析胴板温度分布(負荷低下条件)

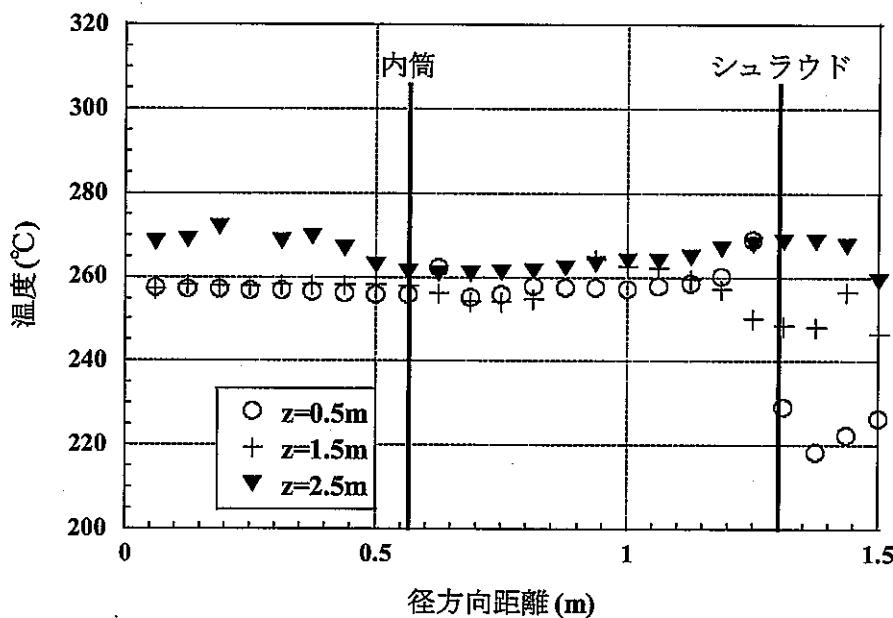


図 4.1.8 3D 解析径方向温度分布(負荷低下条件)

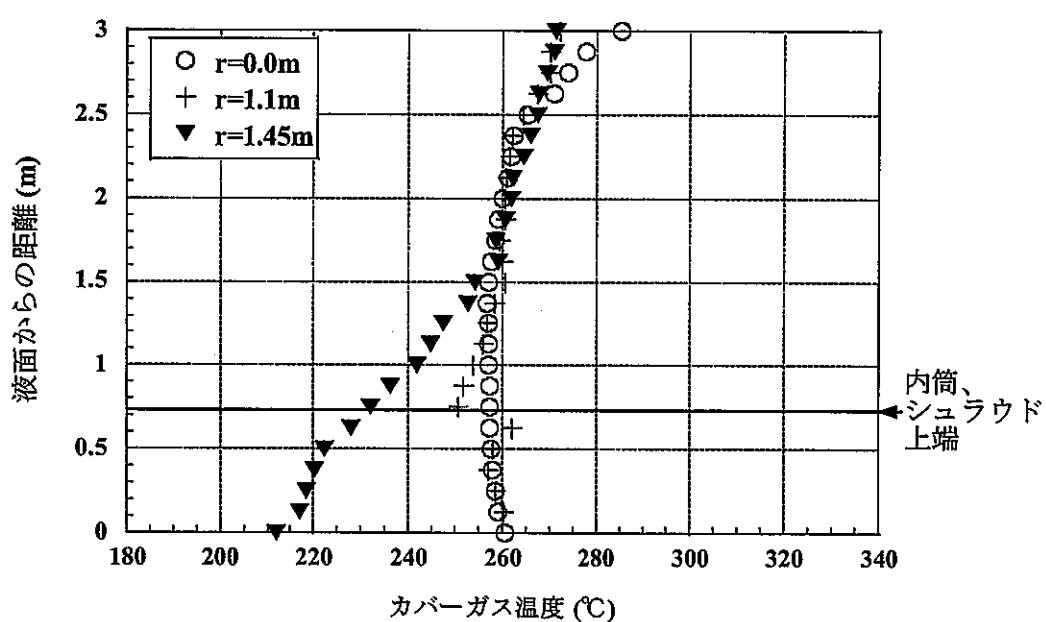
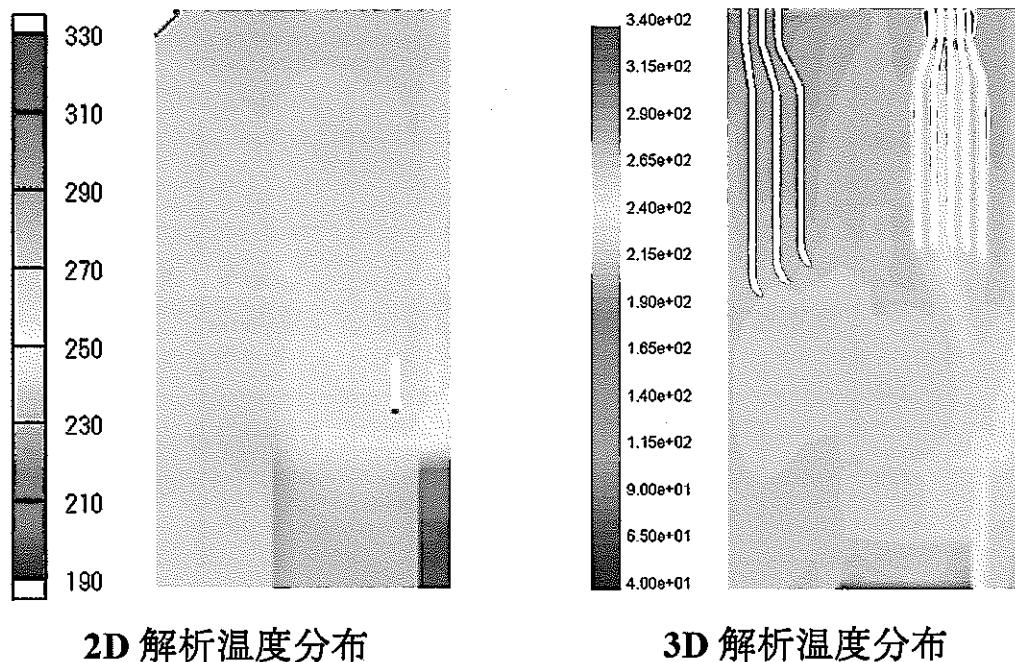


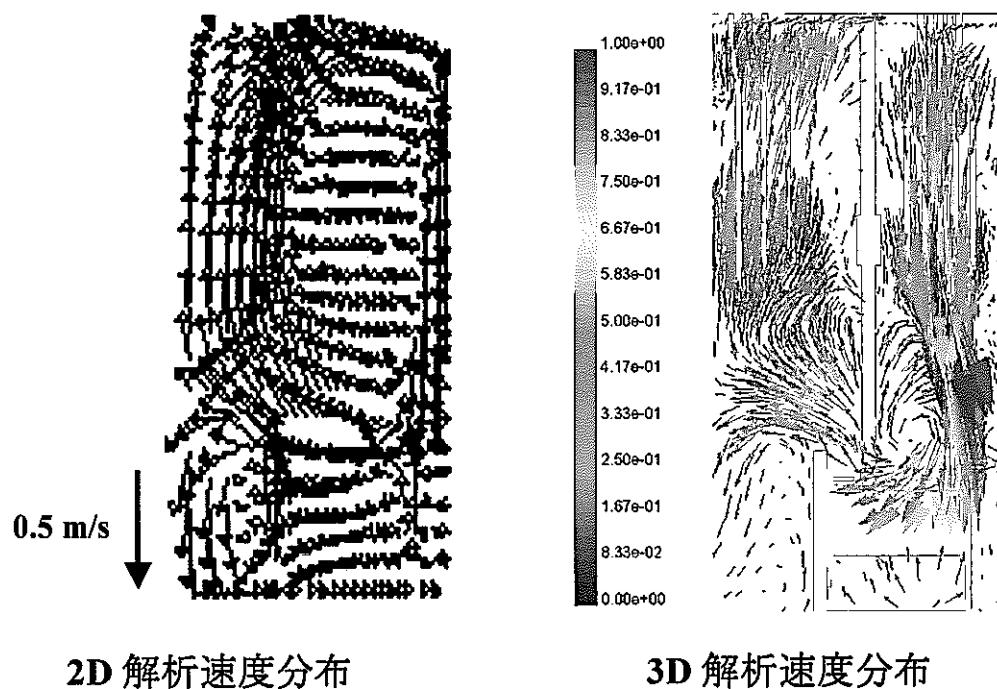
図 4.1.9 3D 解析軸方向温度分布(負荷低下条件)



2D 解析温度分布

3D 解析温度分布

図 4.2.1 2D 解析・3D 解析温度分布比較



2D 解析速度分布

3D 解析速度分布

図 4.2.2 2D 解析・3D 解析速度分布比較

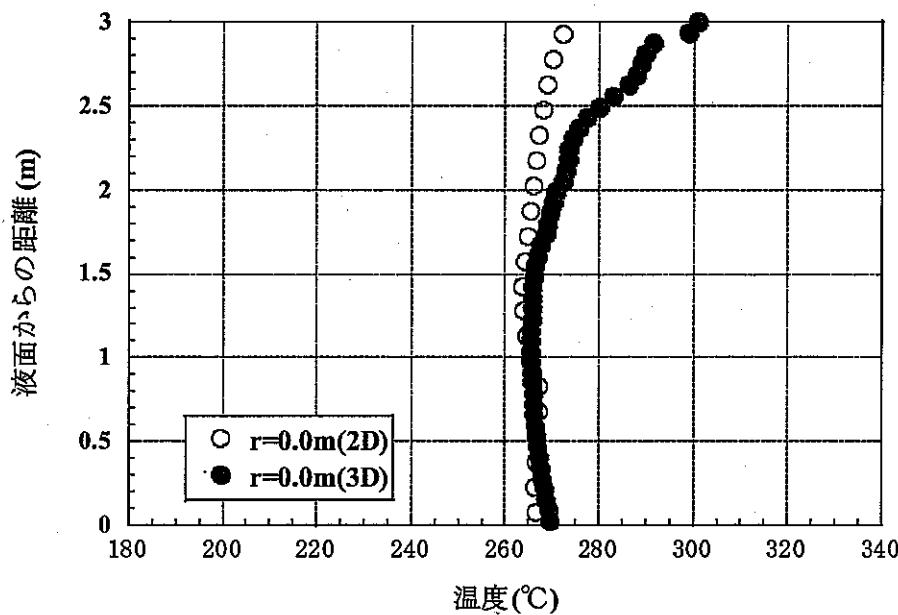


図 4.2.3 2D・3D 温度分布比較($r=0.0\text{m}$)

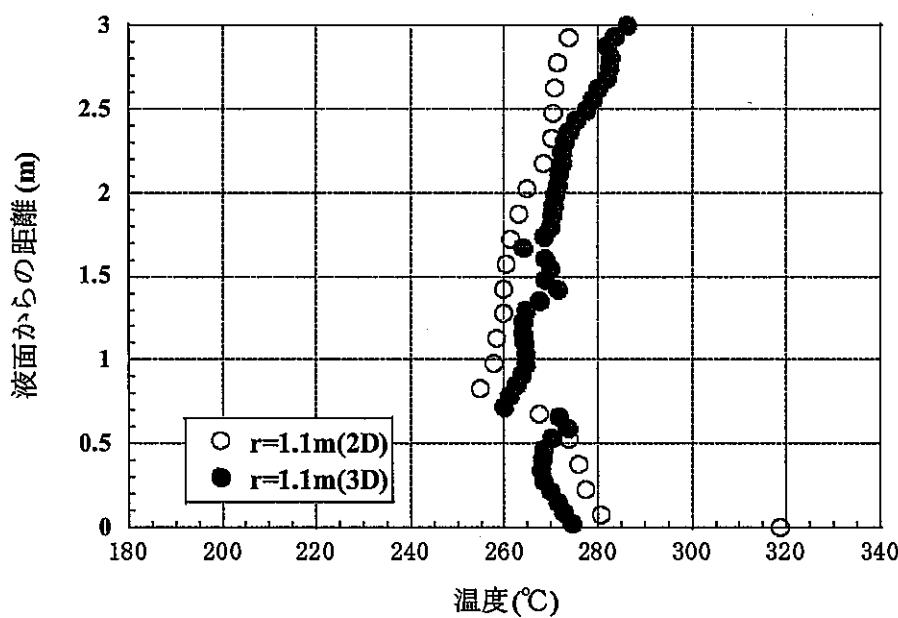


図 4.2.4 2D・3D 温度分布比較($r=1.1\text{m}$)

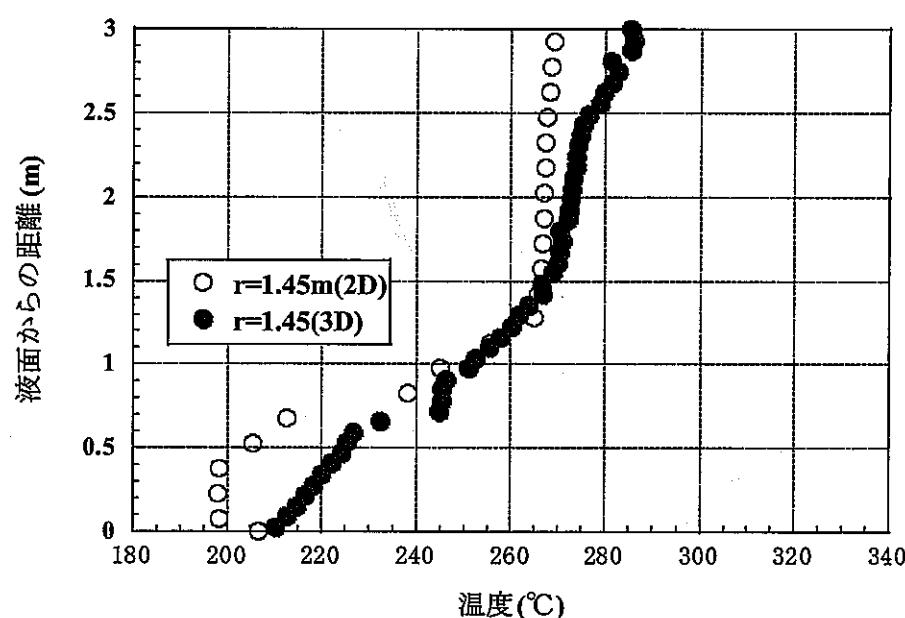


図 4.2.5 2D・3D 温度分布比較($r=1.45\text{m}$)

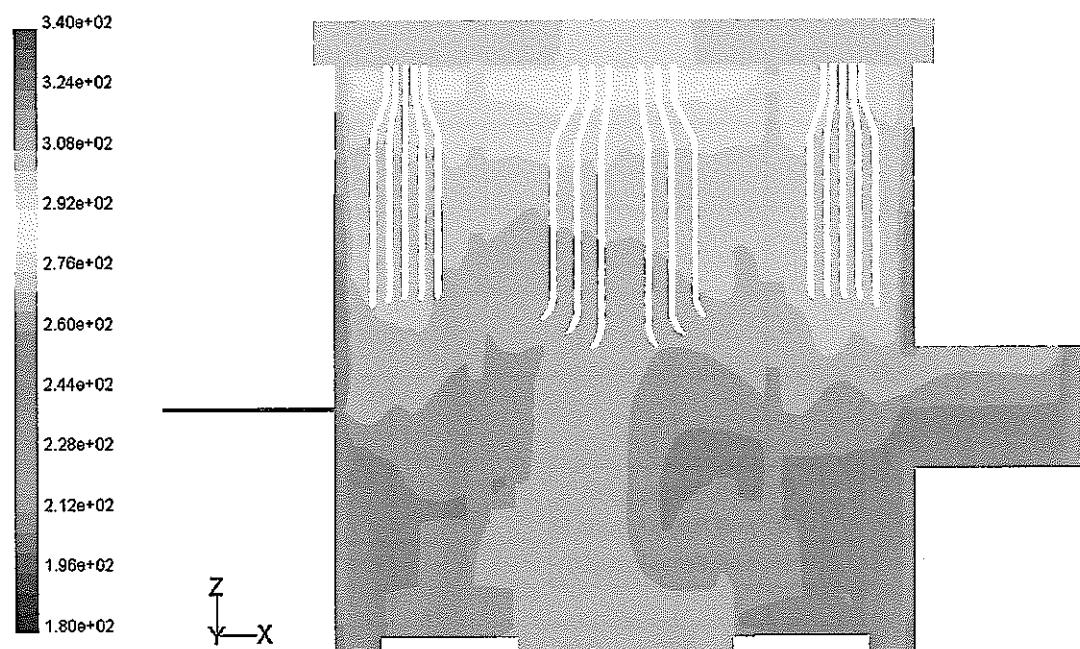


図 4.3.1 热伝達率を $1/10$ 倍した時の対称面温度分布

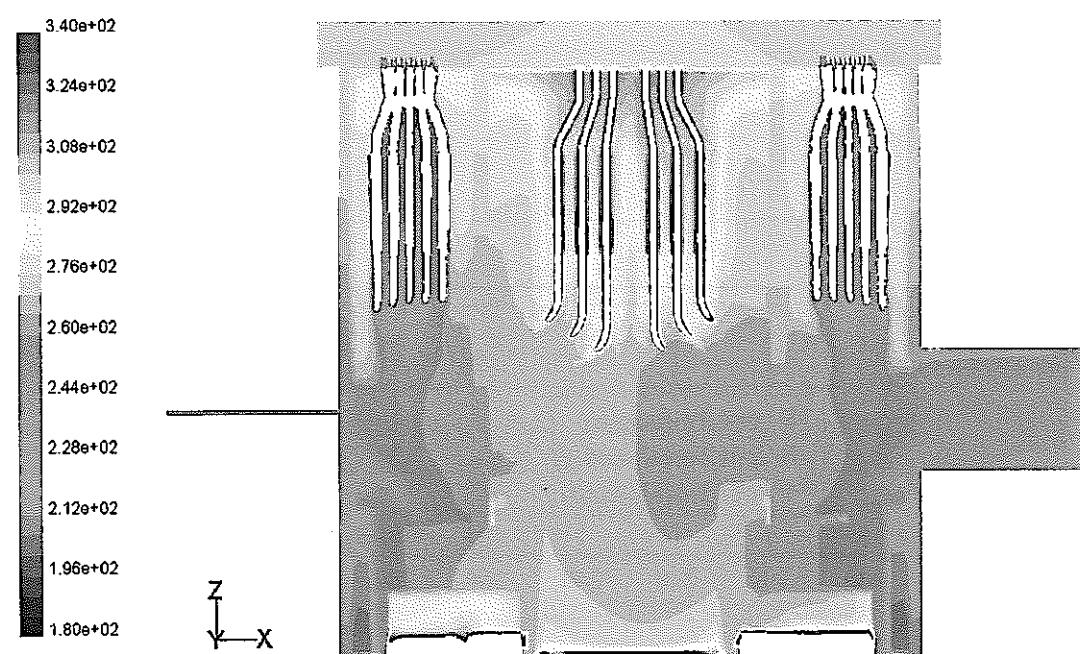


図 4.3.1 热伝達率を 10 倍した時の対称面温度分布

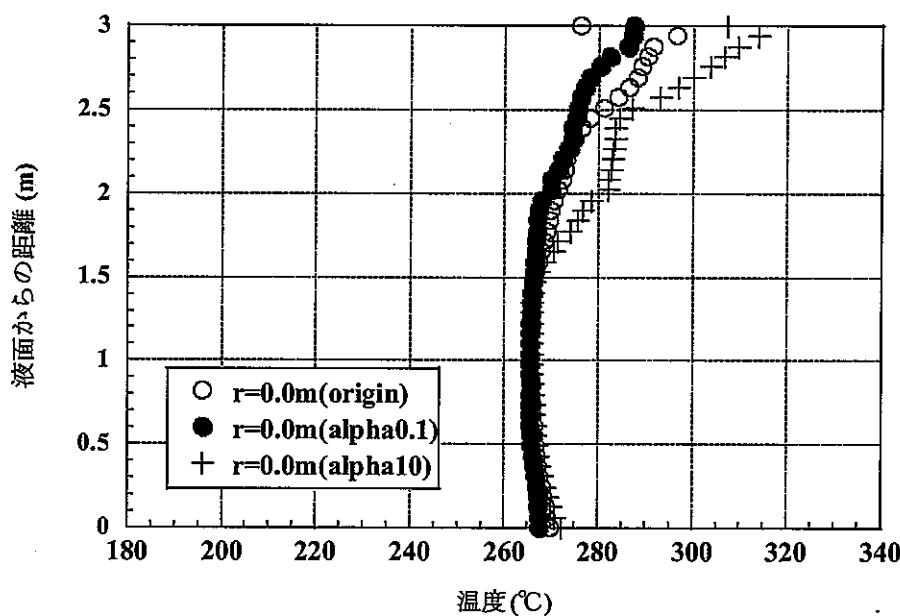


図 4.3.3 热伝達率を変化させた時の温度比較($r=0.0\text{m}$)

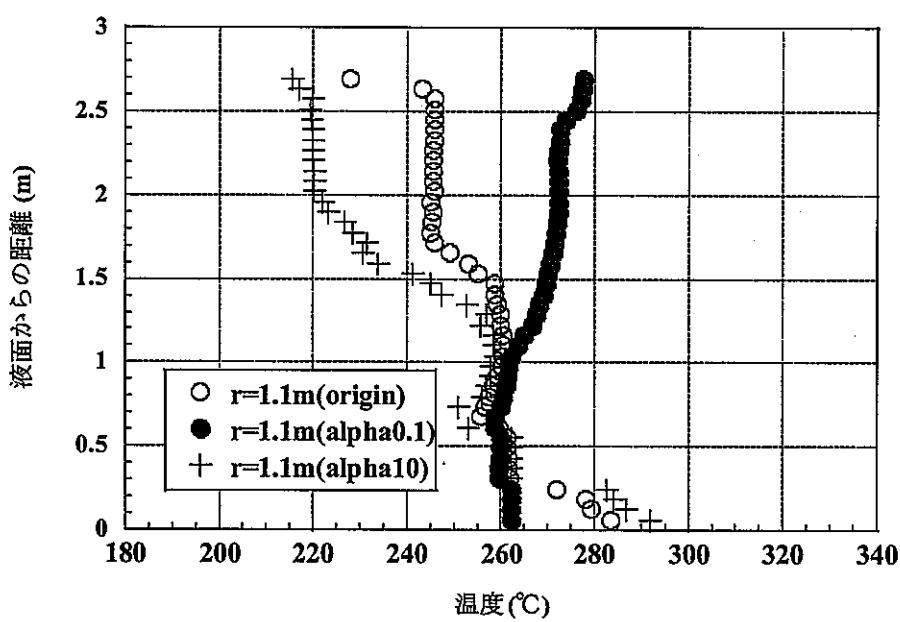


図 4.3.4 热伝達率を変化させた時の温度比較($r=1.1\text{m}$)

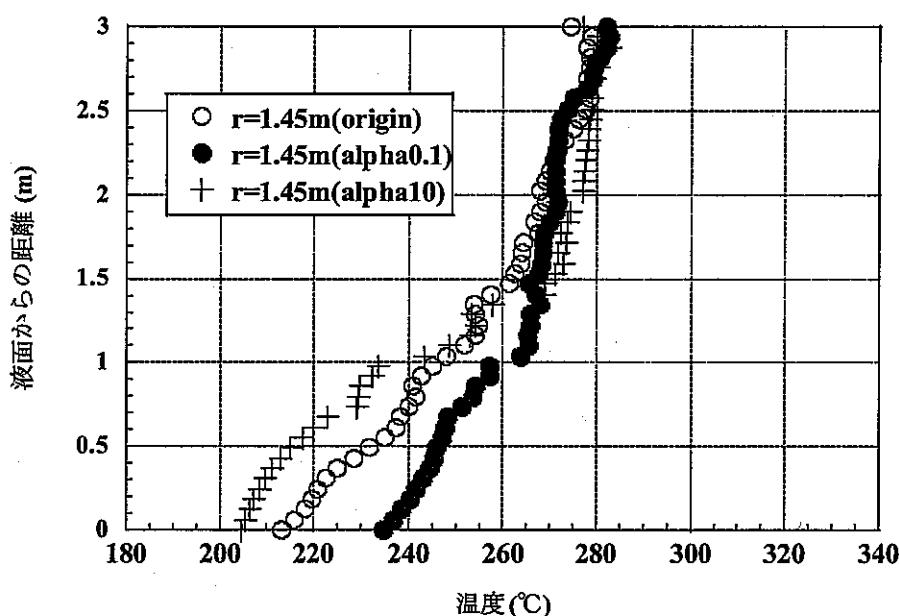


図 4.3.5 热伝達率を変化させた時の温度比較($r=1.45\text{m}$)

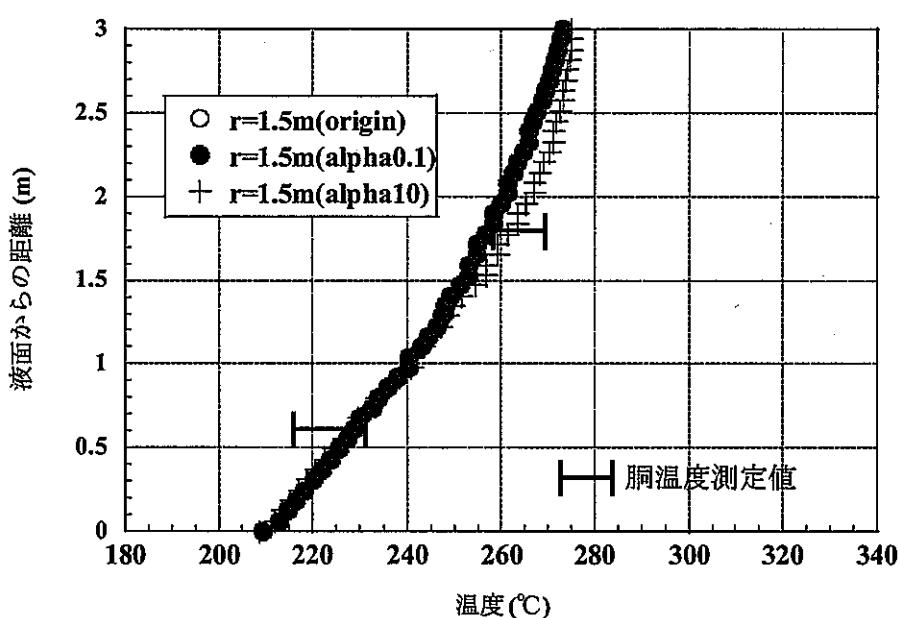


図 4.3.6 热伝達率を変化させた時の温度比較($r=1.5\text{m}$)

5. 結言

もんじゅ SG カバーガス領域を対象とした熱流動解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) MSG コードを用いた 2 次元解析において、もんじゅ SG 内カバーガス領域の温度分布・速度分布を明らかにし、解析値が胴温度の測定値と 10°C 以内の差で一致することを確認した。
- (2) 負荷低下時における 2 次元過渡解析を行い、カバーガス温度の時間挙動を明らかにした。
- (3) FLUENT コードを用いた 3 次元解析を行い、3 次元的な温度分布を明らかにした。また、胴温度の測定値との比較より、エラーバーの範囲内で、両者が一致することを確認した。
- (4) 2 次元解析結果と 3 次元解析結果とを比較した結果、伝熱管近傍領域では 20°C 程度の差異が見られたが、他の領域では両者は良い一致を示しており、2 次元解析による評価でカバーガス領域の温度分布を再現できることを確認した。
- (5) 热伝達率を変化させた解析を行い、熱伝達率を 10 倍した場合においても胴温度は 5°C 程度しか変化せず、胴温度に対して熱伝達率の影響が小さいことを確認した。

以上により、従来、SG 内のナトリウム領域に限られていた MSG コードの解析領域を、カバーガス領域を含めた SG 内全領域に拡張することができた。

参考文献

- [1]Takaaki SAKAI, Akira Yamaguchi, "Multi-shell analysis on the steam generator of the liquid metal reactor by the MSG code", Proc. of the 4th KSME-JSME fluid eng. conf. (FEC-4), Pusan, Korea, (1998.10)
- [2]Peter METZ , Shinji YOSHIKAWA , " Validation of the MSG(Multi-dimensional Thermal-hydraulics Analysis Code for Steam Generator) for CFD Modeling of Sodium Heated Steam Generators", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 38, No. 12, pp. 1126 ~1132, (2001·12)

謝 辞

本研究を実施するにあたり、「もんじゅ」プラント 2 課の金子義久副主研、森泉真氏、志賀幹示氏より貴重なご助言を賜るとともに、実機計測データを御提示頂きました。また、MSG 解析用のデータは、国際技術センターシステム評価グループの戸田信一氏、ピーター・メッツ氏より御提示頂きました。

ここに、感謝の意を表します。

Appendix

3D 解析における解析条件

1.境界条件・熱伝達条件

境界条件の式中の記号については、以下の通りとする。

記号 α : 熱伝達率 [W/m²・K]

N_u : ヌセルト数

λ : 热伝導率 [W/m·K]

P_r : プラントル数

G_r : グラスホフ数

R_e : レイノルズ数

K_j : 定数

g : 重力加速度 [m/s²]

β ：体積膨張係数、[K⁻¹]

T : 温度 [K]

ν : 動粘性係数 [m²/s]

u ：流速 [m/s]

q : 热流束 [W/m²]

添字 w : 壁面の値(管表面, 胴表面など)

g : カバーガスの値

f : 管内流体の值

s : Na 液面における値

ただし、カバーガスの値としては、一様流における値を与えるべきであるが、本解析のような複雑な流れ場に対しては不可能なので、壁面境界層外の値を与える事とする。

1.1 上部平板

上部平板については、外側(上側+横側)を断熱境界とし、平板の平板内熱伝導を考慮する。内側(下側)境界の熱伝達率の計算は、(1)による。流动条件は、内側表面で No Slip とする。

$$\begin{aligned}\alpha &= N_u \lambda_g / l \\ N_u &= 0.6(P_r G_{rl})^{1/5} \\ G_{rl} &= l^3 g \beta (T_w - T_g) / v_g^2 \\ \beta &= \frac{1}{T_g}\end{aligned}\quad \dots \quad (1)$$

ただし l : 上部平板直径 [m]

1.2 蒸気側伝熱管, 給水側伝熱管, Na 入口配管

それぞれについて、管内流体の温度を入口給水温度、出口蒸気温度、入口 Na 温度で与え、

カバーガス領域において高さ方向に変化しないものとする。熱伝達率の計算は、(2), (3)による。流動条件は、管表面で No Slip とする。

管外熱伝達率としては、以下の式を用いる。

$$\begin{aligned} \alpha_x &= N_{ux} \lambda_g / x \\ N_{ux} &= K_1 (\nu_g / \nu_w)^{0.21} (G_{rx} P_r)^{1/4} \\ K_1 &= (3/4) \left\{ 2P_r / 5(1 + 2P_r^{1/2} + 2P_r) \right\}^{1/4} \\ G_{rx} &= x^3 g \beta (T_w - T_g) / \nu_g^2 \end{aligned} \quad \dots \quad (2)$$

ただし、 x は、蒸気管及び Na 配管については、Na 液面からの垂直距離[m]、給水管については、上部平板からの垂直距離[m]である。

管内熱伝達率としては、以下の式を用いる。

$$\alpha_f = N_{uf} \lambda_f / d$$

$$N_{uf} = 0.022 R_e^{0.8} P_r^{0.5} \quad \dots \quad (3)$$

$$R_e = u_m d / \nu_f$$

ただし d : 管の内径[m]

u_m : 管内流速の断面平均[m/s]

これらより、通過熱流量が求まる。

$$q = \frac{T_f - T_g}{\left(\frac{1}{\alpha_f r_{in}} + \frac{1}{\lambda_w} \ln \frac{r_{out}}{r_{in}} + \frac{1}{\alpha_x r_{out}} \right) / r_{out} t}$$

ただし、 r_{in} は、管の内側半径[m]、 r_{out} は、外側半径[m]である。また、 λ_w は伝熱管の熱伝導率である。

1.3 胫板

胴板については、外側境界を断熱条件とし、胴板内の熱伝導を考慮する。ダウンカマ領域Na液面レベルと同じ高さの断面において、ダウンカマNa液面温度と等しい温度とする。内側表面における熱伝達率の計算は、(4)による。流动条件は、内側表面でNo Slipとする。

$$\begin{aligned} \alpha_x &= N_{ux} \lambda_g / x \\ N_{ux} &= K_1 (\nu_g / \nu_w)^{0.21} (G_{rx} P_r)^{1/4} \\ K_1 &= (3/4) \left\{ 2P_r / 5(1 + 2P_r^{1/2} + 2P_r) \right\}^{1/4} \\ G_{rx} &= x^3 g \beta (T_w - T_g) / \nu_g^2 \end{aligned} \quad \dots \quad (4)$$

ただし、 x は上部平板との交点から下向きに計った垂直距離[m]である。

垂直方向平均熱伝達率としては、 $x=x_{max}$ における α_x の値を4/3倍したものを用いる。

1.4 Na 液面

ヘリカルコイル領域及び内筒内の Na 液面については、入口 Na 温度と等しいとする。ダウンカマ領域の Na 液面温度については、別途解析によって求め、その温度を与える。液面における熱伝達率は、(5)による。流动条件は、液面において No Slip とする。

$$\begin{aligned} \alpha_l &= N_{ul} \lambda_g / l \\ N_{ul} &= K_1 (\nu_g / \nu_s)^{0.21} (G_{rl} P_r)^{1/4} \\ K_1 &= (3/4) \left\{ 2P_r / 5(1 + 2P_r^{1/2} + 2P_r) \right\}^{1/4} \\ G_{rl} &= l^3 g \beta (T_s - T_g) / \nu_g^2 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ただし、 l はNa液面の直径[m]であり、胴板の内径と同じである。

1.5 シュラウド・内筒・吊り棒・サポート

シュラウド・内筒・吊り棒・サポートについては、カバーガスに対する熱伝達効果は無視できるとして、表面で断熱条件を与える。内筒・シュラウドについては、下部境界において断熱条件とする。流动条件は、表面において No Slip とする。

1.6 カバーガス流入口

カバーガス流入流速は、 $12[\text{nl}/\text{min}]$ の体積流量より求める。流入温度はヒーターによる加熱温度 $T_{out}=473.15[\text{K}]$ とし、流出速度 $u_{out}[\text{m}/\text{s}]$ は、以下の式で求められる。

$$u_{out} = \{12/(60 \times 1000)\}(1/1.96784)(T_{out}/273.15)/A$$

ただし、 A は流出管路断面積 [m^2] である。

1.7 カバーバス流出口

カバーガス流出口においては, pressure outlet と考えて $p = 0.0[\text{pa}]$ (gauge pressure)とする.

2. 物性値

2.1 カバーバス物性値

カバーガスはアルゴンであり、以下の物性値を用いる。
ただし、それぞれの式における温度の単位は、K(ケルビン)である。

密度 ρ [kg/m³]

$$\rho = 2.3289 - 3.676 \times 10^{-3} \times T + 1.8908 \times 10^{-6} \times T^2$$

熱伝導率 λ [W/m·K]

$$\lambda = 2.845 \times 10^{-3} + 5.4501 \times 10^{-5} \times T - 1.408 \times 10^{-8} \times T^2$$

粘性係数 μ [Pa·s]

$$\mu = 5.9336 \times 10^{-6} + 6.40 \times 10^{-8} \times T - 1.5125 \times 10^{-11} \times T^2$$

動粘性係数 ν [m²/s]

$$\nu = -1.4935 \times 10^{-5} + 8.262 \times 10^{-8} \times T + 1.0715 \times 10^{-10} \times T^2$$

プラントル数 P_r

$$P_r = 0.665$$

定圧比熱 C_p [J/kg·K]

$$C_p = 520.5$$

2.2 水の物性値

給水側伝熱管・蒸気側伝熱管内を流れる水に対しては、以下の物性値を用いる。
ただし、それぞれの式における温度の単位は、K(ケルビン)である。

密度 ρ [kg/m³]

$$\rho = -45.841 + 4.8588 \times T - 6.1621 \times 10^{-3} \times T^2$$

熱伝導率 λ [W/m·K]

$$\lambda = -0.67435 + 6.2164 \times 10^{-3} \times T - 7.1181 \times 10^{-6} \times T^2$$

動粘性係数 ν [m²/s]

$$\nu = 7.0391 \times 10^{-7} - 1.7918 \times 10^{-9} \times T + 1.3428 \times 10^{-12} \times T^2$$

プラントル数 P_r

$$P_r = 11.589 - 4.1457 \times 10^{-2} \times T + 3.9861 \times 10^{-5} \times T^2$$

2.3 ナトリウムの物性値

ナトリウム配管内を流れるナトリウムについては、以下の物性値を用いる。
ただし、それぞれの式における温度の単位は、K(ケルビン)である。

密度 ρ [kg/m³]

$$\rho = 1.0128 \times 10^3 - 0.22587 \times T - 9.2429 \times 10^{-6} \times T^2$$

熱伝導率 λ [W/m·K]

$$\lambda = 1.098 \times 10^2 - 6.451 \times 10^{-2} \times T + 1.1708 \times 10^{-5} \times T^2$$

動粘性係数 ν [m²/s]

$$\nu = 1.4749 \times 10^{-4} - 2.893 \times 10^{-7} \times T + 1.7687 \times 10^{-10} \times T^2$$

プラントル数 P_r

$$P_r = 2.165 \times 10^{-2} - 4.2775 \times 10^{-5} \times T + 2.687 \times 10^{-8} \times T^2$$

2.4 構造材の物性値

構造物としては、SUS304 と、2・1/4Cr-1MO の二種類の材料が用いられている。
それぞれの熱伝導率は、以下の式による。ただし、温度の単位は、K(ケルビン)である。

SUS304 の構造物…ナトリウム配管、シュラウド、吊り棒、サポート

SUS304 の物性値

熱伝導率 λ [W/m·K]

$$\lambda = (7.0032 + 1.390 \times 10^{-2} \times T) \times 1.163$$

比熱 C [J/kg·K]

$$C = 546.19$$

密度 ρ [kg/m³]

$$\rho = 7.79 \times 10^3$$

2・1/4Cr-1MO の構造物…伝熱管, 内筒, 脳板

2・1/4Cr-1MO の物性値

熱伝導率 λ [W/m·K]

$$\lambda = 15.4233 + 4.6264 \times 10^{-2} \times T - 3.0199 \times 10^{-5} \times T^2$$

比熱 C [J/kg·K]

$$C=530.87$$

密度 ρ [kg/m³]

$$\rho=7.7384 \times 10^3$$

3. 解析領域の寸法データ

上部平板直径 2.950[m]

ナトリウム液面直径 2.950[m]

伝熱管外径 31.8[mm] 外側半径(r_{out})=15.9[mm]

伝熱管内径 23.44[mm] 内側半径(r_{in})=11.72[mm]

伝熱管肉厚 4.18[mm]

伝熱管流路断面積 $4.3152 \times 10^{-4}[\text{m}^2]$

ナトリウム配管外径 267.4[mm] 外側半径(r_{out})=133.7[mm]

ナトリウム配管内径 248.8[mm] 内側半径(r_{in})=124.4[mm]

ナトリウム配管肉厚 9.3[mm]

ナトリウム配管流路断面積 $4.8617 \times 10^{-2}[\text{m}^2]$

4. 热伝達率計算に用いる高さデータ

热伝達率を計算する上で必要となる高さのデータは、以下のように求める。

4.1 ヘリカル部に接続する構造物(蒸気側伝熱管、ナトリウム配管)

ナトリウム液面を基準($x=0$)とし、上向きに x を計測する。よって x_{max} は、ナトリウム液面から上部平板下側境界までの距離になる。ヘリカル部のナトリウム液面高さは変動しないので、常に $x_{max}=3.0[m]$ となる。

4.2 ダウンカマ部に接続する構造物(給水側伝熱管、胴板)

上部平板の下側境界を基準($x=0$)とし、下向きに x を計測する。よって x_{max} は、上部平板下側境界からダウンカマ部ナトリウム液面までの距離となる。ダウンカマ部ナトリウム液面は、ヘリカル部ナトリウム液面より $0.088[m]$ 下がった位置にあるので、 $x_{max}=3.088[m]$ となる。