

鉛-ビスマス自然循環冷却型 FBR 蒸気発生器の物量評価 (1)

— 1次元定常熱流動解析コードPOPAL-6による検討 —

(研究報告)



2002年5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

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)
2002

鉛-ビスマス自然循環冷却型 FBR 蒸気発生器の物量評価(1)

- 1次元定常熱流動解析コード POPAI-6 による検討 -

(研究報告)

木曾原 直之 *¹ 江沼康弘*¹ 惣万 芳人*¹

要旨

実用化戦略調査研究で検討が進められている鉛-ビスマス自然循環冷却型 FBR は主冷却配管、中間熱交換器、Pb-Bi 駆動用ポンプを有しないことから、Na 炉に比べてプラント建設コストに占める蒸気発生器のコスト割合が大きい。したがって、その物量削減が建設コストに及ぼす効果も大きく、また蒸気発生器の物量評価を精度良く行うことにより、建設コストを適切に評価できる。このため、本研究では冷却系機器の熱交換特性を 1次元で定常計算する解析コード POPAI-6 を用いて、自然循環型 Pb-Bi 炉の蒸気発生器の伝熱面積や大きさに関する検討を行った。

本報告書は、蒸気発生器の物量削減を目的として、Pb-Bi 温度上昇によるヒートフラックスの向上、及び伝熱管の内側に溝を付けることによる水・蒸気側熱伝達率の改善といった方策を用いて伝熱面積縮小の効果について記載したものである。また、別途 Pb-Bi を用いた伝熱試験から伝熱管に対する濡れ性が Na に比べて低下し、したがって熱伝達性能も低下することが報告されているが、これが伝熱面積へ及ぼす影響についても評価した。

解析の結果、Pb-Bi の温度を上昇させることにより蒸気発生器の伝熱面積を約 23%低減させることができ、水・蒸気側熱伝達率を改善した伝熱管の採用により約 15%の伝熱面積低減が可能であることがわかった。さらに、この両者を組み合わせることで、約 34%の伝熱面積低減効果が得られる。ただし、水・蒸気側熱伝達率を改善した伝熱管については、内側に溝加工を施すため、健全性や検査性の観点で別途検討は必要である。一方、Pb-Bi の伝熱管に対する濡れ性低下の影響を POPAI-6 に反映して計算すると、伝熱面積は約 14%増加することが予想され、設計や物量評価において考慮しておかなければならない。

* 1 大洗工学センター システム技術開発部 FBR システム Gr

Evaluation on the size of Steam Generator of Pb-Bi cooled FBR (1)
- Analyses by one dimension steady thermal-hydraulic calculation code -

Naoyuki KISOHARA*¹ Yasuhiro ENUMA*¹ Yoshito SOUMAN*¹

Abstract

Compared to a sodium cooled FBR, the cost ratio of a steam generator (SG) to the total cost of Pb-Bi cooled FBR plant is relatively high, because the main piping, pumps and IHXs are eliminated in the natural circulation Pb-Bi FBR. Then, reducing the size of the SG has a greatly influence on the total construction cost in Pb-Bi cooled FBR.

In this study, the size of the SG of the natural circulation Pb-Bi cooled FBR was evaluated by using one dimensional steady thermal-hydraulic calculation code (POPAL-6) to obtain more benefit of the plant construction cost.

Raising Pb-Bi temperature and adopting heat transfer promoting tubes (which provide grooves inside) to the SG are considered to be the effective method of reducing the heat transfer area. However, another study revealed that Pb-Bi is inferior to sodium in the wetting to the tube surface and this property leads to the less thermal convection. Thus computer code POPAL-6 indicated these effect on the heat transfer area of the SG.

Raising Pb-Bi temperature and adopting heat transfer promoting tubes achieve a 23% and 15% decrease of heat transfer area respectively. And both methods enable to diminish 34% of the heat transfer area. However, the less wetting of Pb-Bi to the tubes surface considered, the heat transfer area was estimated to increase by 14%. This effect must be considered in designing the SG and Plant system.

*1 FBR system design group System engineering an technology division
O-arai engineering center

鉛-ビスマス自然循環冷却型 FBR 蒸気発生器の伝熱特性解析(1)
 - 1次元定常解析コード POPAI-6 によるパラメータ解析 -

目次

1	緒言	1
2	計算モデル	2
2.1	物性値計算ソースプログラムの変更	2
2.2	1次元モデル	2
	(a) 熱計算	2
	(b) Pb-Bi 圧力損失計算	3
2.3	計算結果	3
3	Pb-Bi 加熱型 SG の特徴	9
3.1	Pb-Bi の物性値	9
3.2	Pb-Bi/SG の伝熱特性	9
4	サイジングの検討	22
4.1	解析条件とパラメータ	22
4.2	解析結果	24
5	結言	33
	謝辞	34
	参考文献	35
付録 A	物性値計算ソースプログラム	36
付録 B	12Cr 鋼の熱伝導率	38
付録 C	POPAI-6 入力データ	39
付録 D	Pb-Bi 側圧力損失計算フロー	47
付録 E	伝熱管熱抵抗の定義	50

[表リスト]

Table 2.1-1	Thermal-physical properties of Pb-Bi and Na.....	4
表 2.2-2	各部の伝熱モデル.....	5
表 4.1-1	解析条件とパラメータ.....	25
表 4.1-2	解析パラメータの組合せ.....	26
表 4.2-1	計算結果.....	27
表 4.2-2	伝熱管コイリング (1/2).....	28
表 4.2-2	伝熱管コイリング (2/2).....	29
表 B-1	12Cr 鋼の熱伝導率と比熱.....	38
表 C-1	POPAL-6 入力データ(Pb-Bi/SG) (1/2).....	41
表 C-1	POPAL-6 入力データ(Pb-Bi/SG) (2/2).....	42
表 C-2	PB-Bi/SG コイリング (リファレンス).....	43
表 C-3	POPAL-6 入力データ(実証炉 Na/SG) (1/2).....	44
表 C-3	POPAL-6 入力データ(実証炉 Na/SG) (2/2).....	45
表 C-4	実証炉 Na/SG コイリング.....	46

[図リスト]

Fig. 2.2-1	Natural circulation SG for Pb-Bi cooled reactor	6
Fig. 2.2-2	Thermal hydraulic calculation model of POPAI-6 for Pb-Bi cooled natural circulation reactor	7
Fig. 2.2-3	Temperature profile of Pb-Bi/SG.....	8
Fig. 3.1-1	Density of Pb-Bi and Na	11
Fig. 3.1-2	Thermal conductivity of Pb-Bi and Na	11
Fig. 3.1-3	Kinematic Viscosity of Pb-Bi and Na	12
Fig. 3.1-4	Specific heat of Pb-Bi and Na	12
Fig. 3.1-5	Thermal diffusivity of Pb-Bi and Na	13
Fig. 3.1-6	Prandtl number of Pb-Bi and Na.....	13
Fig. 3.2-1	Forced circulation SG for Na cooled reactor.....	14
Fig. 3.2-2	Thermal resistance of heat transfer from liquid metal to water/steam (Refer to Appendix E) ...	15
Fig. 3.2-3	Temperature and heat flux profile.....	16
Fig. 3.2-4	Thermal resistance of heat transfer region	17
Fig. 3.2-5	Heat transfer coefficient and Nusselt number	18
Fig. 3.2-6	Temperature profile of liquid metal	19
Fig. 3.2-7	Thermal conductivity profile of liquid metal	19
Fig. 3.2-8	Velocity profile of liquid metal	20
Fig. 3.2-9	Reynold's number profile of liquid metal	20
Fig. 3.2-10	Prandtl number profile of liquid metal	21
Fig. 4.1-1	Heat transfer coefficient and Nusselt number	30
Fig. 4.2-1	Heat transfer area of Pb-Bi/SG	31
Fig. 4.2-2	Outer diameter of R/V	32
図 B-1	12Cr 鋼の熱伝導率	38
図 D-1	パラメータ解析のための計算モデル	48
図 D-2	管束部 Pb-Bi 圧力損失計算フロー.....	49

1 緒言

フェーズ1では、Pb-Bi の密度が大きいこと、自然循環特性に優れていること、水・蒸気との反応が小さいことの理由により、Pb-Bi 自然循環冷却型 FBR を研究し、その結果、原子炉容器内部周囲に蒸気発生器伝熱管を配列したタンク型の概念が有望であることがわかった。Pb-Bi 自然循環冷却型 FBR の特徴として、主冷却配管、中間熱交換器、Pb-Bi 駆動用ポンプを有しないことから、プラント建設コストに占める蒸気発生器のコスト割合が相対的に大きく、したがって、蒸気発生器のサイジングを精度良く行うことが、建設コストを適切に評価することになること、また、蒸気発生器の物量削減が建設コストに及ぼす効果も大きいことが示された。このため、伝熱特性解析コード POPAI-6 を用いて、コストダウン方策のパラメータ解析により蒸気発生器の伝熱面積を定量的に計算し、その有効性を検討することとした。

POPAI-6 は SG, IHX, ACS などの冷却系機器の熱交換特性を統合して1次元で定常解析を行う計算コードであり、これまで大洗工学センターの1MWSG 試験施設、50MWSG 試験施設及びもんじゅ SG を用いて多くの検証が行われ、精度良く解析・評価できるように整備されてきている。本報告書では POPAI-6 の SG 計算モジュールを用いて、Pb-Bi 炉 SG の流体温度、伝熱式等の各種パラメータを変えた場合の伝熱面積を解析し、伝熱管のサイジングについての検討を行ったものである。

2 計算モデル

POPAI-6 は Na 加熱型蒸気発生器を対象として開発されてきており、したがって加熱流体を Na から Pb-Bi に変更するためにコード改訂が必要になる。Pb-Bi 物性値計算モデルとこれに伴うソースプログラムの変更を 2.1 節で述べる。また、Pb-Bi 自然循環冷却炉の SG はダウンカマーを有し、かつヘリカルコイル型伝熱管が炉容器の内壁に沿って内外シュラウド間に設置されており、この構造の 1 次元モデル化については 2.2 節に記載する。

2.1 物性値計算ソースプログラムの変更

Na の伝熱流動に関する物性値（密度 ρ 、比熱 C_p 、熱伝導率 λ 、動粘性係数 ν 、比エンタルピー h ）を Pb-Bi のそれに置き換える。物性値はソースプログラム内部で計算されるようになっているため、物性値計算式の変更を行う。

加熱流体 (Na、Pb-Bi) の物性値の計算式を Table 2.1-1 に示す。Table 2.1-1 中の Na の計算式はオリジナルの POPAI-6 に組み込まれているものであり、Pb-Bi の計算式は今回新たに組み込んだものである。なお、実際のソースプログラムの変更については付録 A に記載する。また、Na と比較した Pb-Bi の物性値については 3.1 章 (Fig. 3.1-1～Fig. 3.1-6) に示す。

2.2 1次元モデル

(a) 熱計算

Pb-Bi/SG の構造概念図を Fig. 2.2-1 に、この 1次元モデルを Fig. 2.2-2 に示す。また、Fig. 2.2-2 に対応した伝熱管各部の伝熱計算モデルについては表 2.2-2 に記載する。以下、Fig. 2.2-2 に沿って説明を行う。

給水ヘッドから伝熱管に入った水は炉容器上部カバーガス① (C/G) 空間を通過し、ダウンカマー② (D/C) に入る。コード内で C/G 及び D/C での交換熱量計算は行われるが、C/G は全交換熱量に比べ非常に小さいため実質的に無視できる大きさとなる。一方、D/C では Pb-Bi が滞留しているが、伝熱管管束部と D/C を隔てている外部シュラウド③を通過して、管束部の熱量が僅かながら流入するため、全熱交換量の約 3% は D/C で得ている。

D/C 下部に達した給水は図中③で折り返し有効伝熱部（ヘリカルコイル部④）に入る。③の水平部分の熱交換は POPAI-6 では考慮されておらず、したがって、D/C 下部に達した給水は直接ヘリカルコイル部に入るモデルとなっている。また、外部シュラウド⑩は、炉容器底部まで達しているものと仮定しているため、管束部から降下してきた Pb-Bi が D/C 領域に進入することはない。これについては外部シュラウドを介した熱通過として計算する。

有効伝熱部④は水単相域、2相域および過熱域それぞれについて伝熱計算を行い、全体の約96%がここで熱交換される。

有効伝熱部④を出た過熱蒸気はライザー（⑤及び⑥）を通過して上昇し蒸気温度ヘッダへと導かれる。ライザー部での熱交換はコードにおいて計算され全交換熱量の約1%となる。

D/C、有効伝熱部（ヘリカルコイル部）、ライザー部の伝熱管の外側（液体金属側）及び内側（水側各領域）の伝熱計算式については表2.2-2に示すように従来のNa加熱型SGで一般的に用いられている計算式を採用した。なお、炉心側から内部シュラウド⑦を通過してSG管束部側への熱通過は考慮していない（断熱モデル）。また、水・蒸気及びPb-Bi共に、伝熱通過計算は径方向の移動のみであり、軸方向移動の計算は行っていない。

(b) Pb-Bi 圧力損失計算

POPAI-6は、水・蒸気側については、所定の圧損計算を行うが、Pb-Bi側に関しては熱計算のみで、圧損計算は行わない。しかし、自然循環型のため、Pb-Bi側についても圧力損失を把握する必要があり、コードとは別に全ての解析ケースにおいて付録Dに示す管群直交流の圧力損失式により求めている。

2.3 計算結果

以上の伝熱流動モデルに基づいたPOPAI-6の計算結果（温度プロフィール）をFig. 2.2-3に示す。グラフは有効伝熱部下端～C/G空間上端までのD/C、管束部、ライザー部の水・蒸気、Pb-Biの温度分布を示している。

計算メッシュはC/G領域およびPb-Bi液面～ヘリカルコイル部上端はコードの制約上1メッシュ、ヘリカルコイル部およびそれと同じ高さ領域のD/Cは100メッシュとしている（グラフ中のドットが各メッシュ温度を示す）。

給水ヘッダから流入した水はD/C領域で熱交換されるので、緩やかに温度が上昇し、D/C終端で反転しヘリカルコイル部に流入する。ヘリカルコイル部は有効伝熱部であるため水単相→2相→過熱相と変化をしながら急速に温度上昇していることが確認できる。ヘリカルコイル部を出た後、ライザー部でさらにわずかに温度が上昇し、蒸気ヘッダへと流出している。

一方、Pb-Biの温度は炉心を出た後、最初にライザー部で加熱蒸気と熱交換するため温度が僅かに降下し、さらに有効伝熱部（ヘリカルコイル部）に入ると急速に降下している。またD/C領域のPb-Biは管束部から外部シュラウドを通過しての入熱があるため、水側よりやや高い温度となり、ここでの熱交換に寄与している。

Table 2.1-1 Thermal-physical properties of Pb-Bi and Na

Property	Pb-Bi (Pb:44.5% Bi:55.5%)	Na
Density (kg/m ³)	$\rho = 10735 - 1.375 \times T$	$\rho = 949 - 0.223 \times T - 1.75 \times 10^{-5} \times T^2$
Specific heat (J/kg-K)	$C_p = 146.44 (0.0349 \text{ [kcal/kg-}^\circ\text{C]})$	$C_p = 1436.74 - 0.58049 \times T + 4.6229 \times 10^{-4} \times T^2$
Thermal conductivity (W/m-K)	$\lambda = 9.636 + 0.01014 \times T$	$\lambda = 90.604 - 0.048523 \times T$
Kinematic viscosity (m ² /sec)	$\nu = 5.1 \times 10^{-8} + 4637 \times 10^{-8} \times T^{-1} - 1.582728 \times 10^{-3} \times T^{-2}$	$\nu = \rho^{-2/3} \times 1.2162 \times 10^{-5} \times \exp [0.6976 \rho / (T+273)]$
Specific enthalpy (kcal/kg)	$h = 0.0349 \times T - 4.315$	$h = -32.9449 + 0.34322 \times T - 6.9345 \times 10^{-5} \times T^2 + 3.6847 \times 10^{-8} \times T^3$
	$h = \int_{T_m}^T C_p dT = \int_{123.4}^T 0.0349 dT$ <p>Cp:kcal/kg-°C Tm:Melting point of Pb-Bi (123.4°C)</p>	$h = \int_{T_m}^T C_p dT$ <p>Cp:kcal/kg-°C Tm:Melting point of Na (97.82°C)</p>

T [°C]

表 2.2-2 各部の伝熱モデル

【伝熱管】

Fig. 2.2-2中 での領域	伝熱管領域名称	伝熱管外管側 (Pb-Bi側)	伝熱管内管側 (水・蒸気側)	交換熱量割合 (①～ ⑥を100%とする)
①	カバーガス部	60 (kcal/m ² hr°C)	Dittus-Boelterの式 (直管単相式)	-
②	ダウンカマー	10000 (kcal/m ² hr°C)		3.0 (%)
③	D/C～ ヘリカルコイル部入口	(未考慮)	(未考慮)	(未考慮)
④	有効伝熱部 (ヘリカルコイル部)	Hoeの式 (円管群の直交流)	予熱域：森・中山の式	95.7 (%)
			核沸騰域：修正Schrock-Grossmanの式	
			膜沸騰域：(核沸騰域と過熱域の熱伝達率 をクオリティーに応じて比例配分)	
			過熱域：森・中山の式	
⑤	ライザー部	Seban-Shimazakiの式	Dittus-Boelterの式 (直管単相式)	1.3 (%)
⑥	カバーガス部	60 (kcal/m ² hr°C)		-

【シュラウドと炉容器壁】

Fig. 2.2-2中 での領域	シュラウド領域 名称	伝熱モデル
⑦	内部シュラウド	炉心側から管束部への熱通過は未考慮
⑧	外部シュラウド	管束部からD/Cへの熱通過率は600 (kcal/m ² hr°C)
⑨	炉容器外壁	炉容器壁から大気への放熱は0.3 (kcal/m ² hr°C)
⑩	外部シュラウド 下部	熱通過率が600 (kcal/m ² hr°C)の外部シュラウドが存在するものと仮定

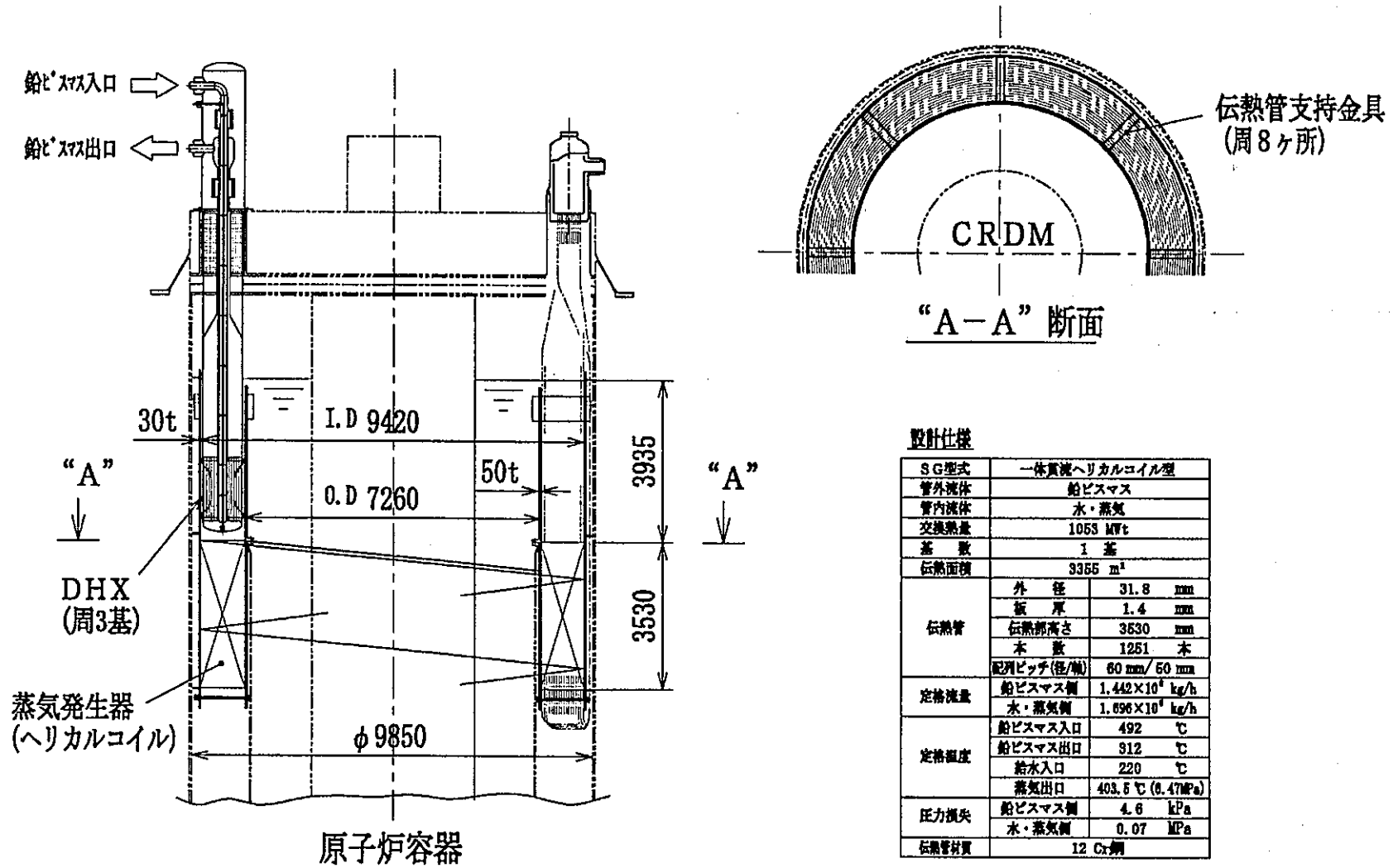


Fig. 2.2-1 Natural circulation SG for Pb-Bi cooled reactor

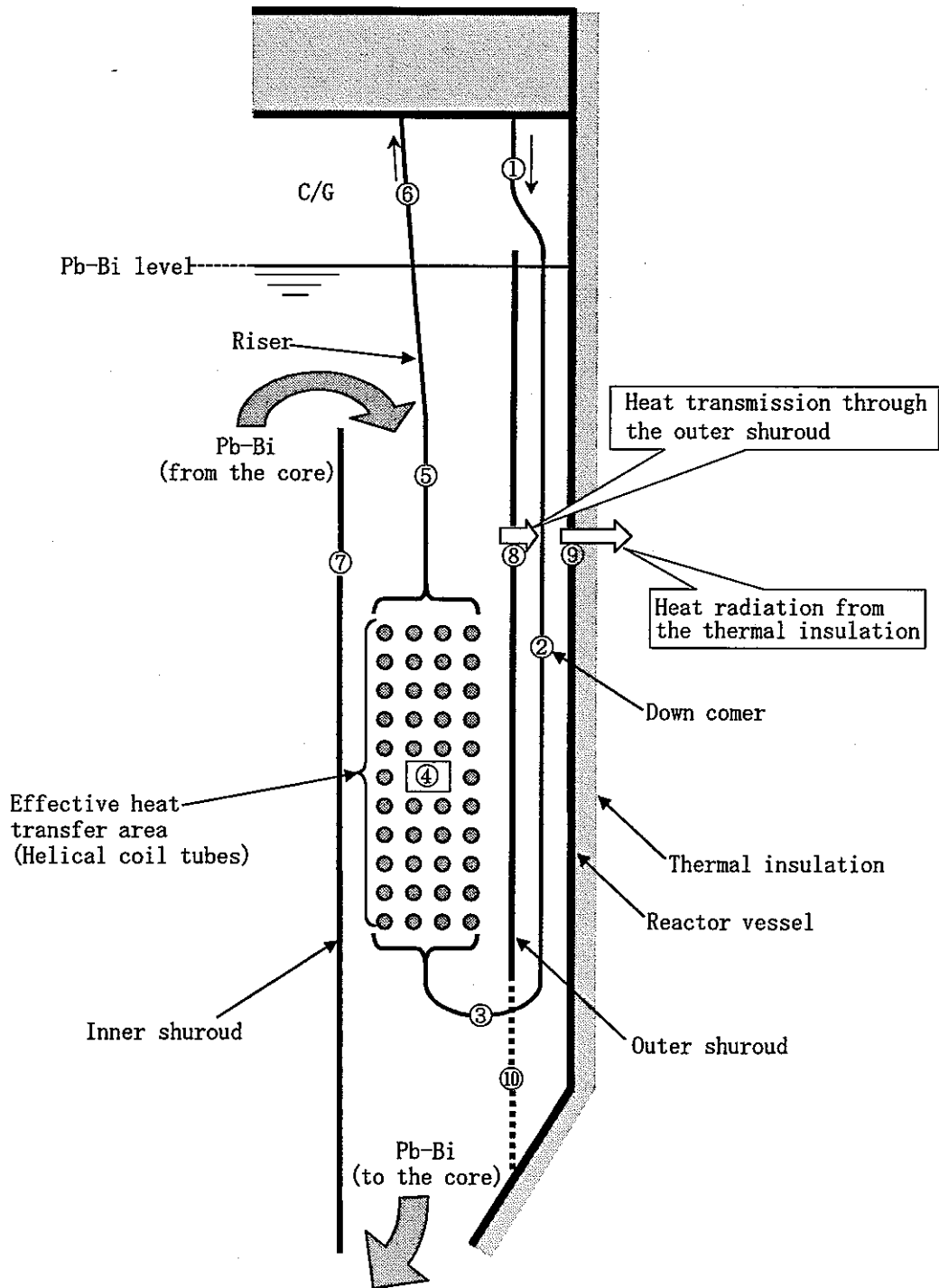


Fig. 2.2-2 Thermal hydraulic calculation model of POPAI-6 for Pb-Bi cooled natural circulation reactor

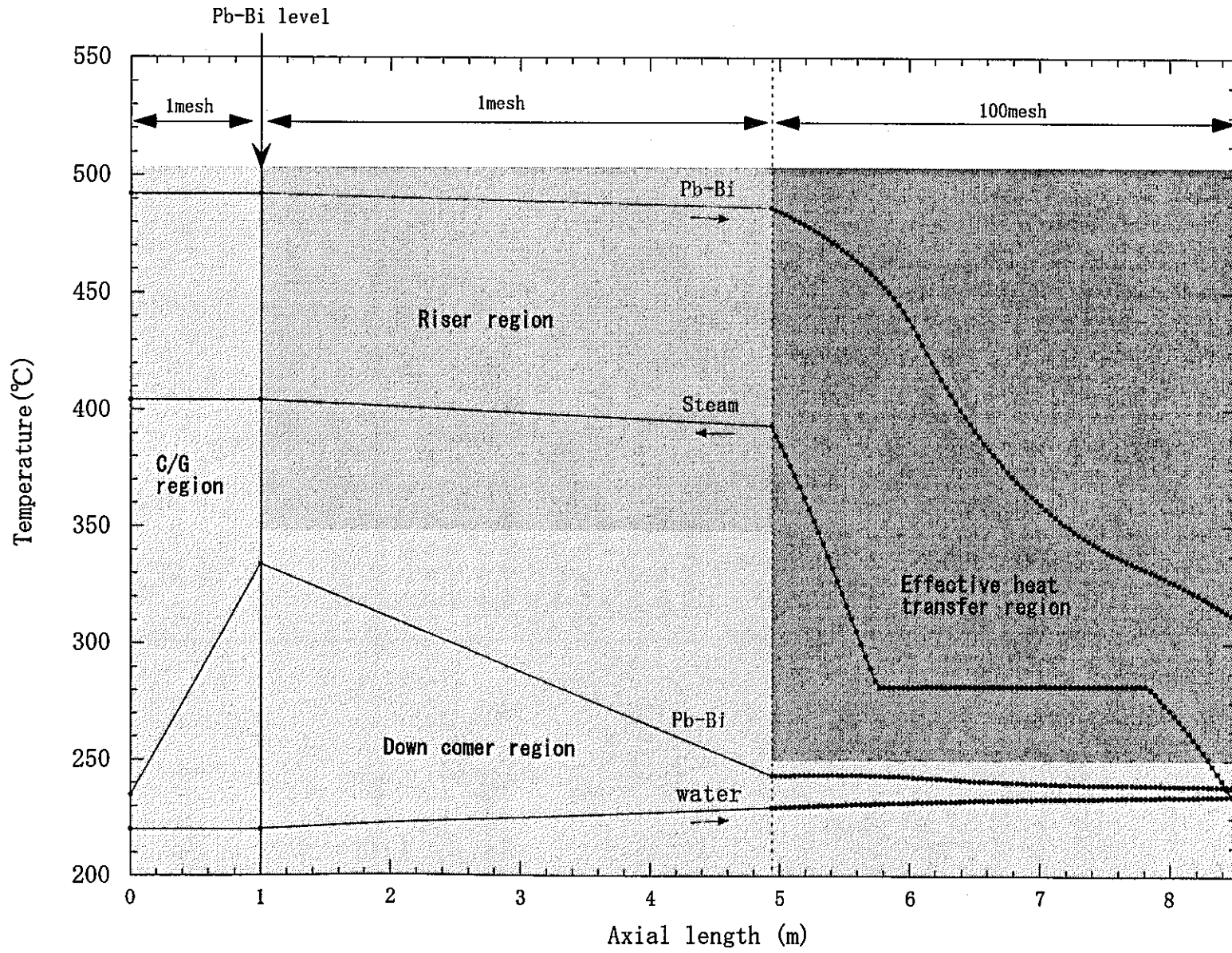


Fig. 2.2-3 Temperature profile of Pb-Bi/SG

3 Pb-Bi 加熱型 SG の特徴

3.1 Pb-Bi の物性値

Table 2.2-1 に示す物性値計算式から、Na と Pb-Bi の密度 γ 、熱伝導率 λ 、動粘性係数 ν 、比熱 C_p を示したグラフが、それぞれ Fig. 3.1-1~Fig. 3.1-4 である。また、これらより求めた熱拡散率 (温度伝導率) とプラントル数を Fig. 3.1-5、Fig. 3.1-6 に示す。

3.2 Pb-Bi/SG の伝熱特性

Na 加熱型 SG (強制循環型) と Pb-Bi 加熱型 SG (自然循環型) の伝熱性能を比較する。Na 加熱 SG として、実証炉 (Phase 1) で検討された SG を用い、この SG の構造・仕様を Fig. 3.2-1 に示す。そして、POPAI-6 で計算した Pb-Bi/SG と実証炉 Na/SG の温度・ヒートフラックスプロフィールを Fig. 3.2-3 に、また、両 SG の液体金属 (Pb-Bi、Na) から水・蒸気への伝熱経路における熱抵抗を Fig. 3.2-4 に示す。熱抵抗は 1) 液体金属から伝熱管外面への熱伝達、2) 伝熱管内部の熱伝導、3) 伝熱管内壁から水側スケールへの熱伝達 4) 水側スケールから水・蒸気側への熱伝達の 4 つに分類される。(これらの熱伝達、熱伝導については Fig. 3.2-3 に、熱抵抗の定義式は付録 E に記載する。)

Na/SG と比較した場合の Pb-Bi/SG の熱抵抗の特徴は、

- 1) 液体金属から伝熱管外面の熱伝達の熱抵抗は、Pb-Bi/SG の方が Na/SG より約 3 倍大きい。
- 2) Na/SG の方が水・蒸気圧が高いため伝熱管肉厚が厚く、このため、伝熱管の熱抵抗は Na/SG の方が約 3 倍大きい。
- 3) 水側スケールの熱抵抗は、50MWSG 試験施設から得られた結果に基づく値であり、両者とも同じと仮定した。
- 4) 伝熱管内壁から水・蒸気への熱伝達による熱抵抗については、相変化が発生するため位置によって熱抵抗は異なるが、水側圧力は Pb-Bi/SG の方が低いため全体的に Pb-Bi/SG の方が熱抵抗は大きい。

ここで、1) の液体金属 (Pb-Bi、Na) から伝熱管外面への熱伝達について、検討する。Pb-Bi/SG 及び Na/SG それぞれについての熱伝達率と Nu 数を Fig. 3.2-5 に示す。熱抵抗は Pb-Bi/SG の方が大きいためその逆数である熱伝達率は Na/SG の方が大きい。しかし、熱伝達特性を表す指標の一つである Nu 数は Pb-Bi/SG の方が大きい値を示している。

Nu 数は Re 数と Pr 数の関数であるため、この両者を Fig. 3.2-9 と Fig. 3.2-10 にそれぞれ示す。Fig. 3.2-9 に示すように Re 数は、Na/SG の方が大きい値であり、これは Na/SG は強制循環方式のため加熱流体の流速が Pb-Bi/SG より約 2.5 倍が大きいことによるものである。一方、Pr 数は Pb-Bi/SG の方が Na/SG より 3~4 倍大きい値となっている (Fig. 3.2-10)。この両者の関数として Nu 数が求められるが、Pb-Bi/SG の方が Na/SG より 1.5 倍程度大きい値を示すようになる。

液体金属の熱伝導率については Fig. 3.2-7 に示すように Na/SG の方が Pb-Bi/SG より 4~5 倍大きい。したがって、Nu 数は Pb-Bi 炉/SG の方が大きいにも係わらず、Na の高い熱伝導率により Na 側の熱抵抗は非常に小さい値になっている。Fig. 3.2-4 に示されているように、液体金属から伝熱管外面への熱抵抗は、Na/SG では全熱抵抗の約 9~13%に過ぎないが、Pb-Bi/SG では 16~46%もの大きさを占めるようになっていることが特徴である。

一方、伝熱管内壁から水・蒸気への熱伝達については、Pb-Bi/SG の水単相域及び過熱蒸気域において特に熱抵抗が大きくなっているため、この領域の熱伝達性能を良くすることによって、伝熱面積削減への効果が期待できると考えられる。

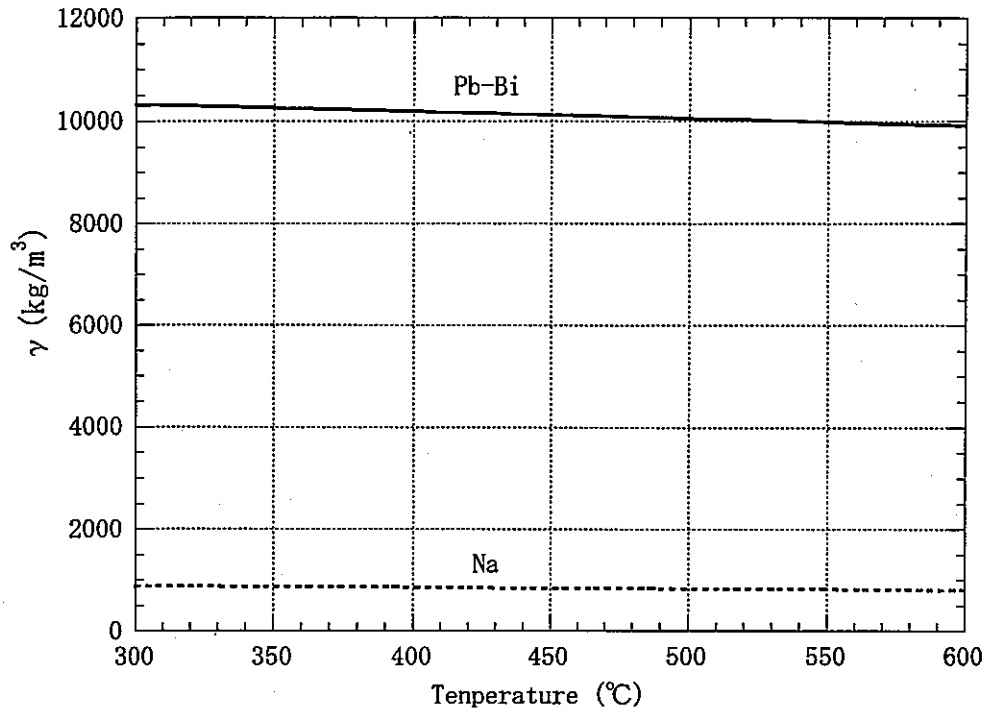


Fig. 3.1-1 Density of Pb-Bi and Na

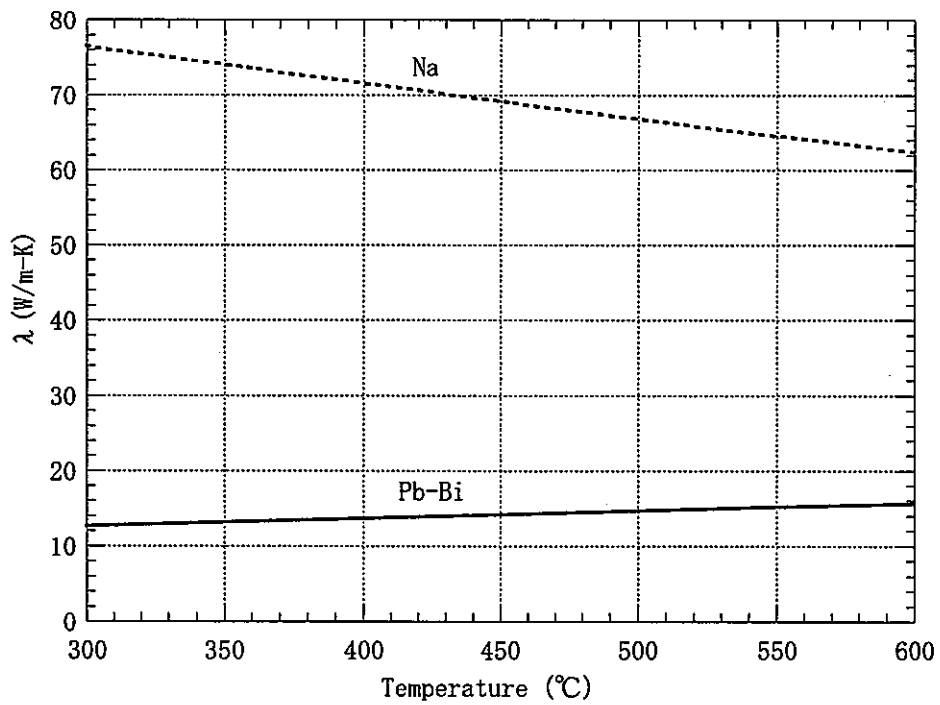


Fig. 3.1-2 Thermal conductivity of Pb-Bi and Na

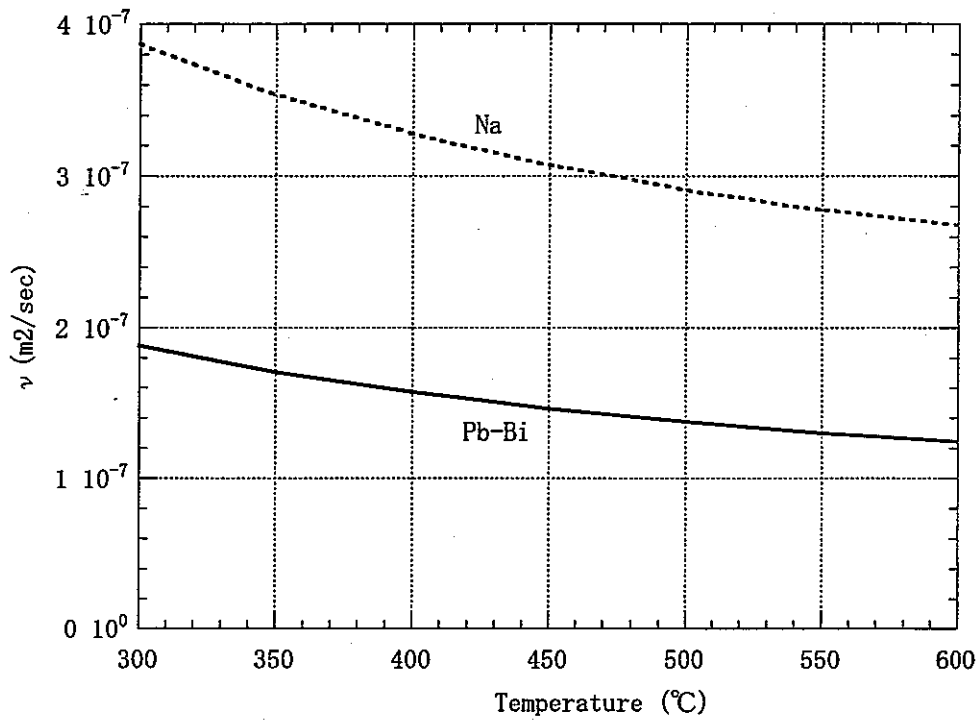


Fig. 3.1-3 Kinematic viscosity of Pb-Bi and Na

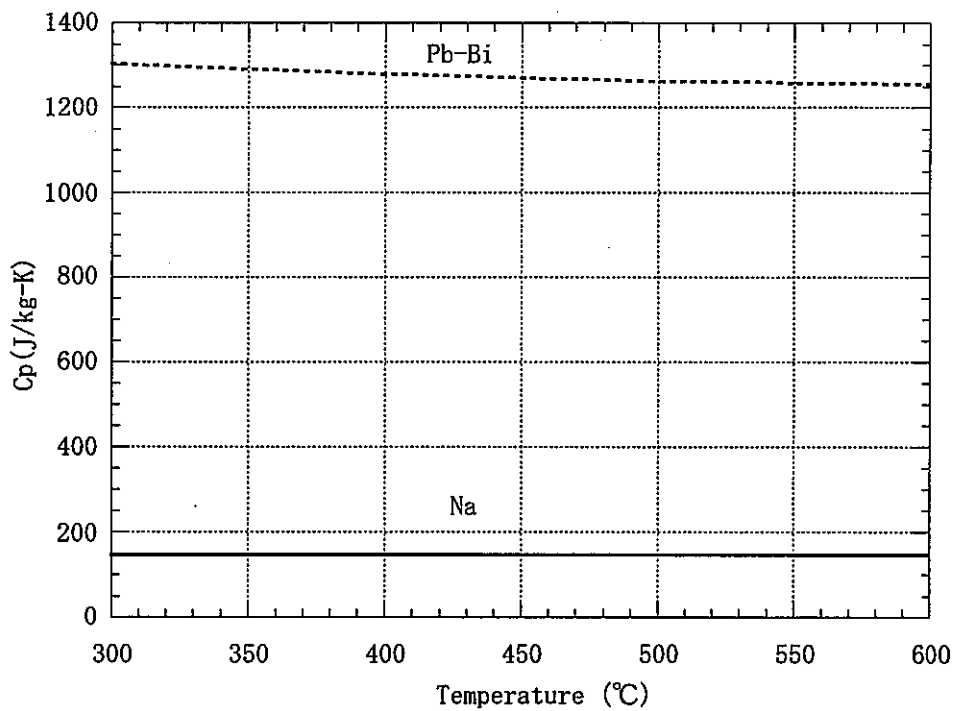


Fig. 3.1-4 Specific heat of Pb-Bi and Na

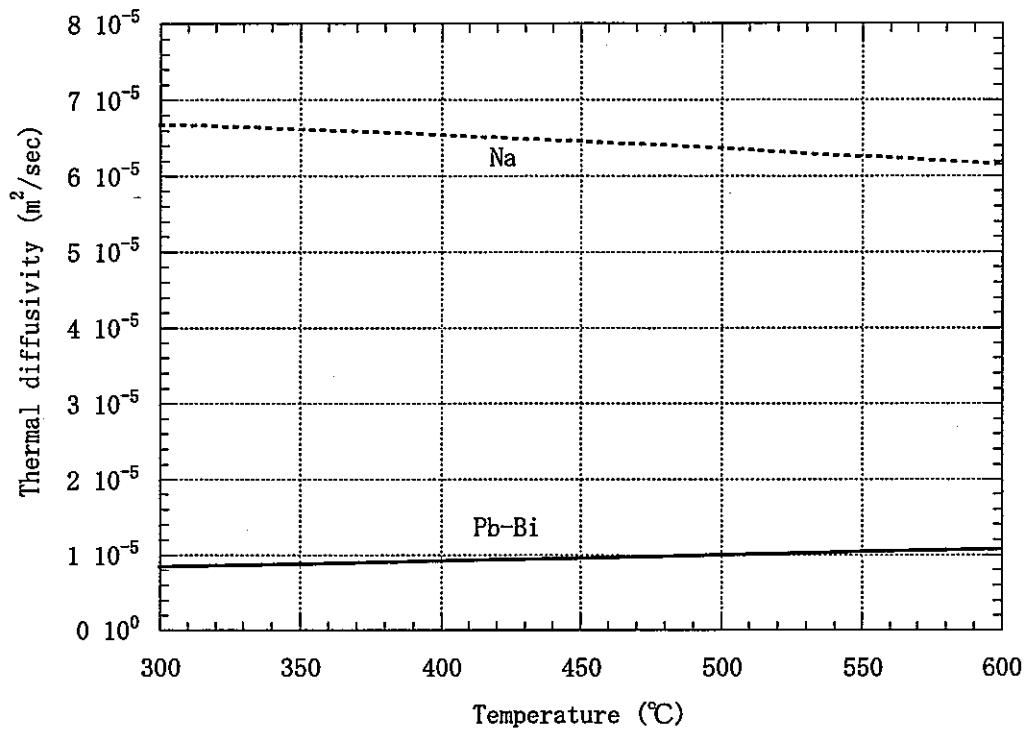


Fig. 3.1-5 Thermal diffusivity of Pb-Bi and Na

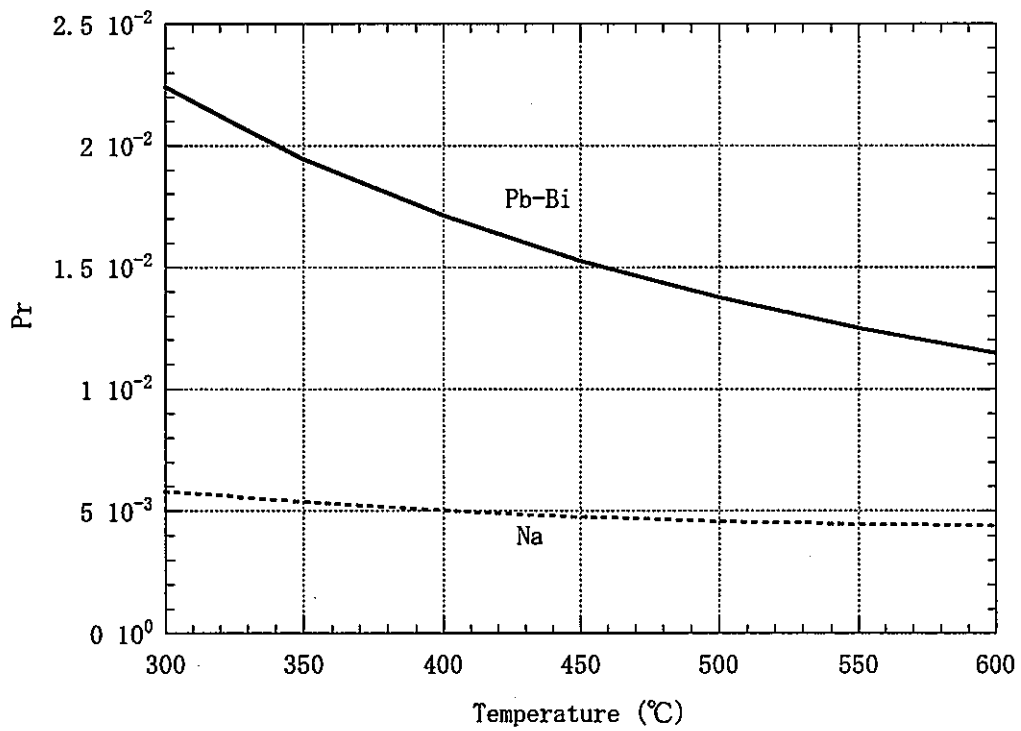
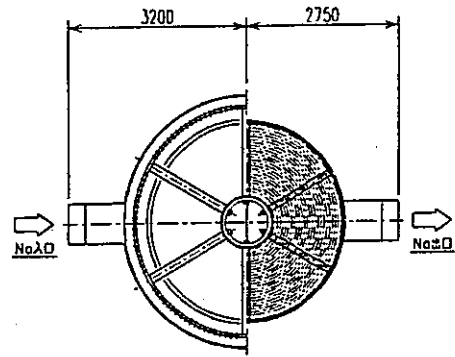
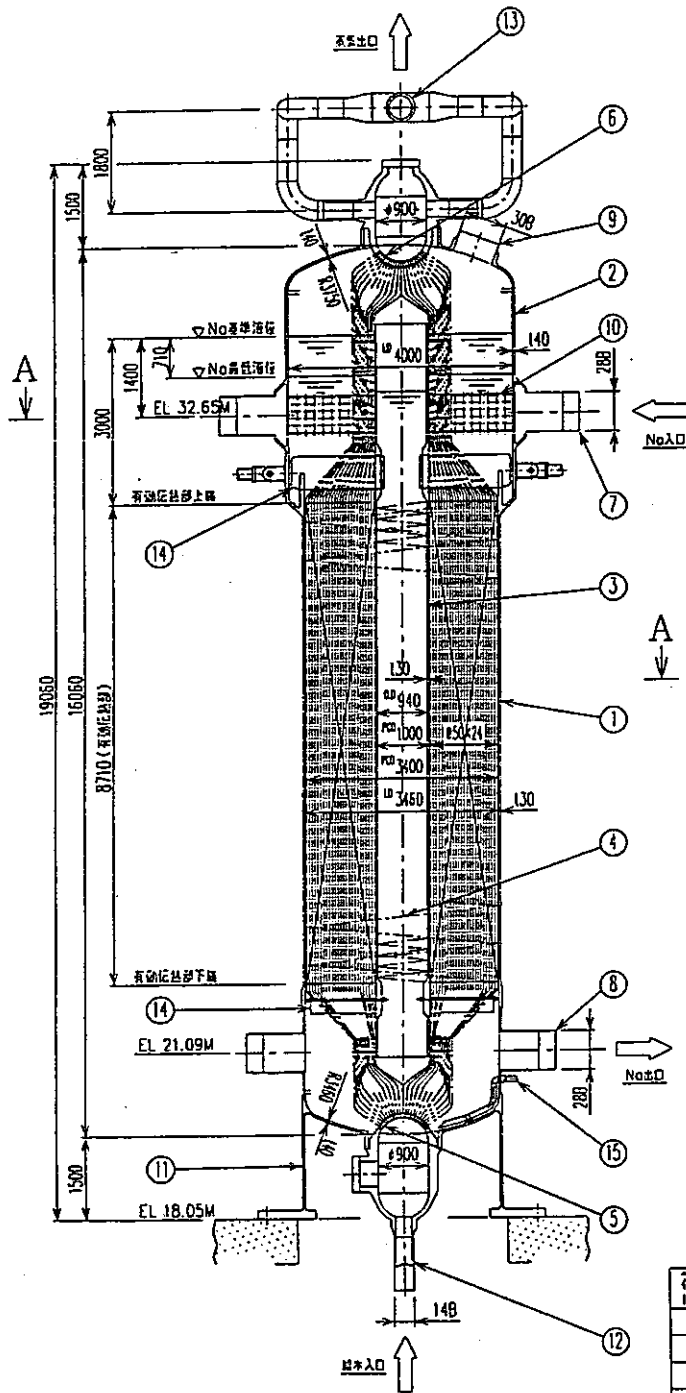


Fig. 3.1-6 Prandtl number of Pb-Bi and Na



A-A断面

設計仕様

型式	一体貫流式有浴面ヘリカルコイル型	
基数	3基	
交換熱量	534MW/基	
運転温度	ナトリウム側 入口/出口	520/335 °C
	水・蒸気側 入口/出口	240/497 °C
運転圧力	ナトリウム側	3 atq
	水・蒸気側 入口/出口	191/175 atq
定格流量	ナトリウム側	8.15×10^6 kg/h
	水・蒸気側	8.62×10^5 kg/h
設計温度	Na/水・蒸気	540/535 °C
設計圧力	Na/水・蒸気	5/205 atq
伝熱管仕様	口径	31.8 mm
	肉厚	3.9 mm
	本数	330 本
	層数	25 層
	ピッチ(縦/水平)	50/50 mm
ヘリカルコイル管長さ	86.4~96.1 m (av91.5)	
コイルリード角	5.20~5.78 Deg	
圧力損失	ナトリウム側	0.52 kg/cm ²
	水・蒸気側	16.0 kg/cm ²
有効伝熱面積	3024 m ²	
材質	Mod. 9Cr-1Mo	
機器種別	第4種機器	
耐震クラス	B (S2)	

部品表

符号 ITEM	名称 TITLE	数量 NO.	材質 MATERIAL	備考 REMARK
1	下部胴	1	Mod.9Cr-1Mo	
2	上部胴	1	Mod.9Cr-1Mo	
3	内筒	1	Mod.9Cr-1Mo	
4	伝熱管	330	Mod.9Cr-1Mo	φ31.8×3.9
5	給水入口管板	1	Mod.9Cr-1Mo	I.D 900
6	蒸気出口管板	1	Mod.9Cr-1Mo	I.D 900
7	Na入口ノズル	2	SUS304	28B
8	Na出口ノズル	2	SUS304	28B
9	放出系ノズル	1	Mod.9Cr-1Mo	30B
10	Na入口分配網	1	Mod.9Cr-1Mo	
11	本体支持スカーフ	1式	Mod.9Cr-1Mo	
12	給水入口ノズル	1	Mod.9Cr-1Mo	14B
13	蒸気出口ノズル	1	Mod.9Cr-1Mo	20B
14	管束部支持梁	6	Mod.9Cr-1Mo	
15	ドレンノズル	1	SUS304	4B

Fig. 3.2-1 Forced circulation SG for Na cooled reactor (Demonstration FBR)

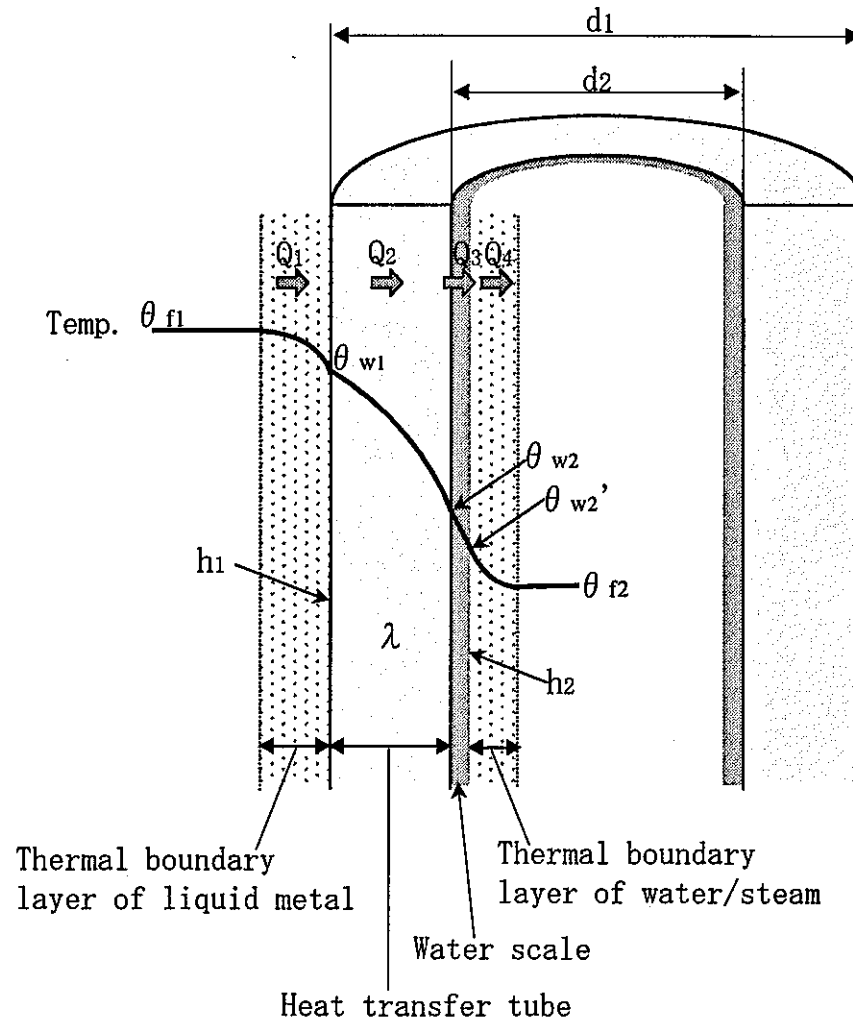


Fig. 3.2-2 Thermal resistance of heat transfer from liquid metal to water/steam
(Refer to Appendix E)

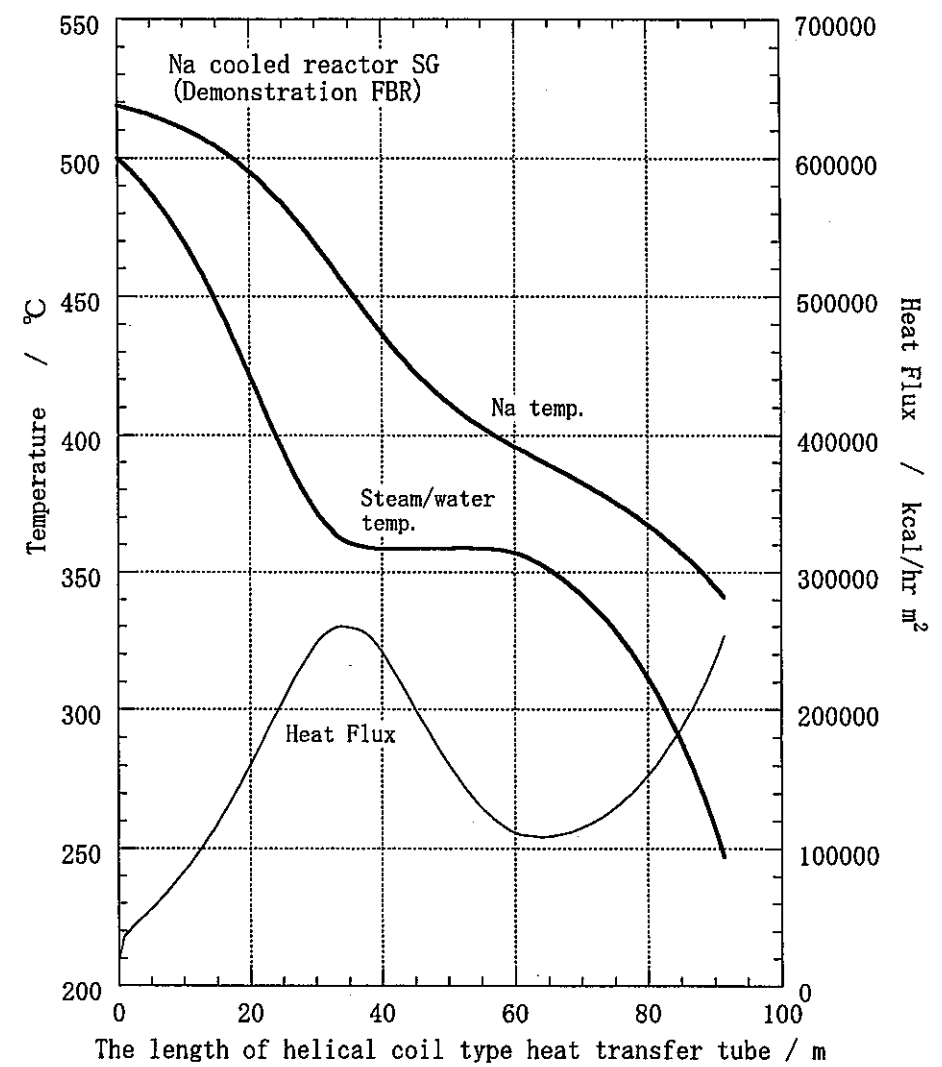
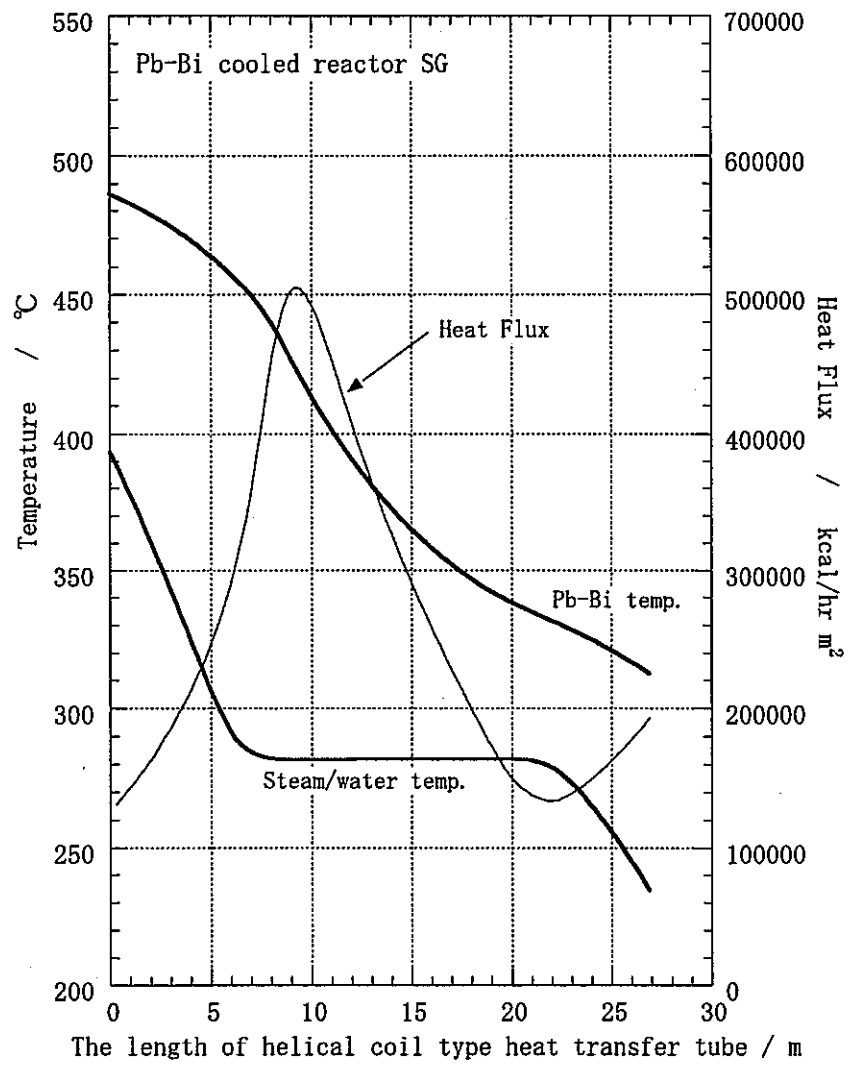


Fig. 3.2-3 Temperature and heat flux profile

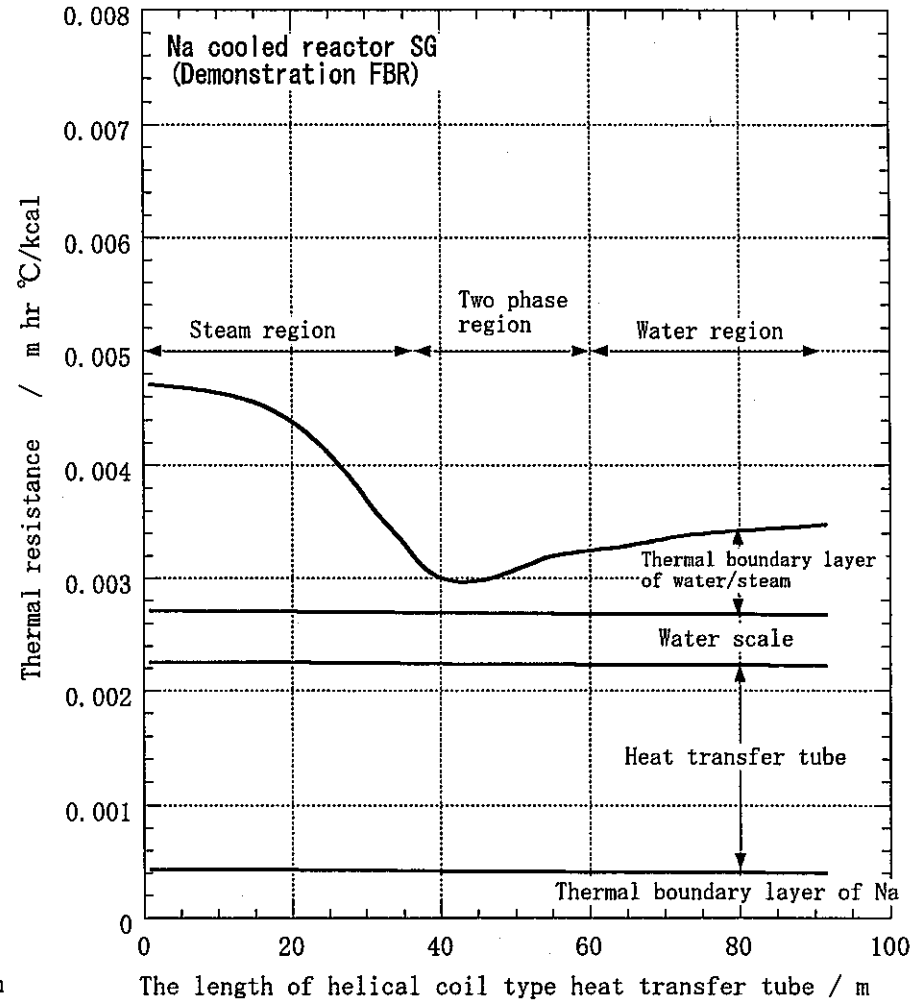
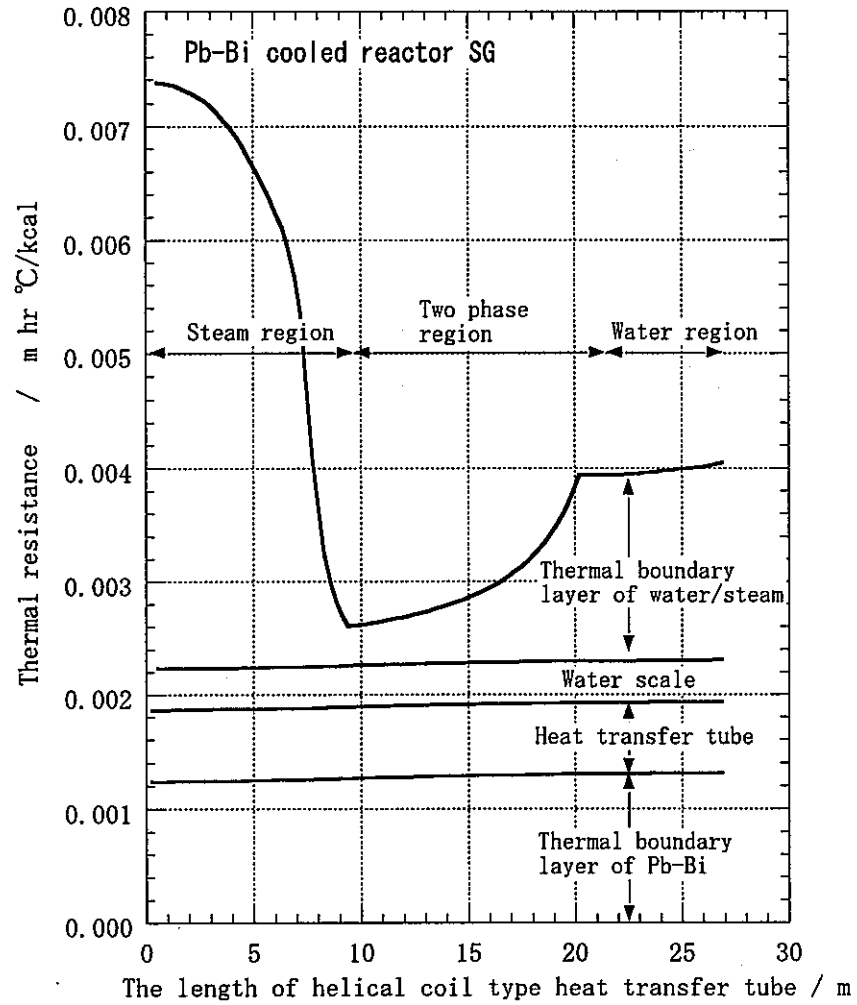


Fig. 3.2-4 Thermal resistance of heat transfer region

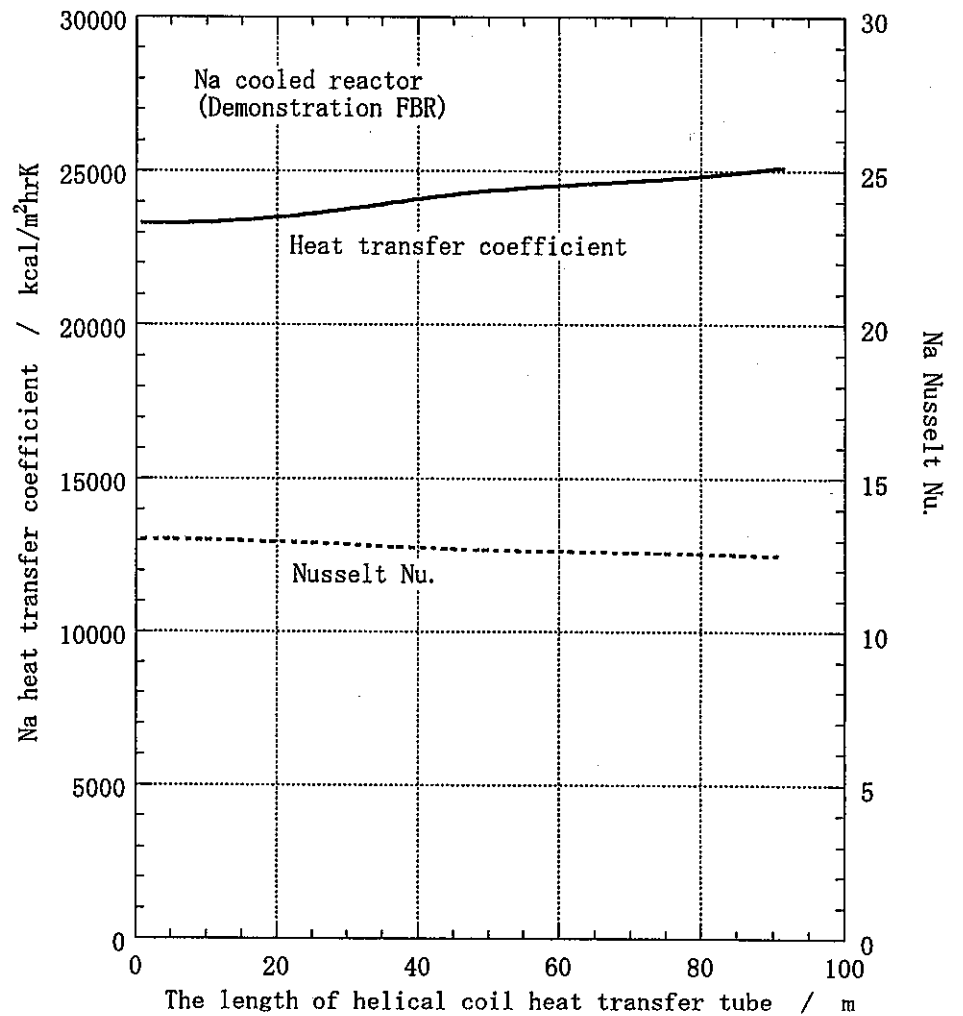
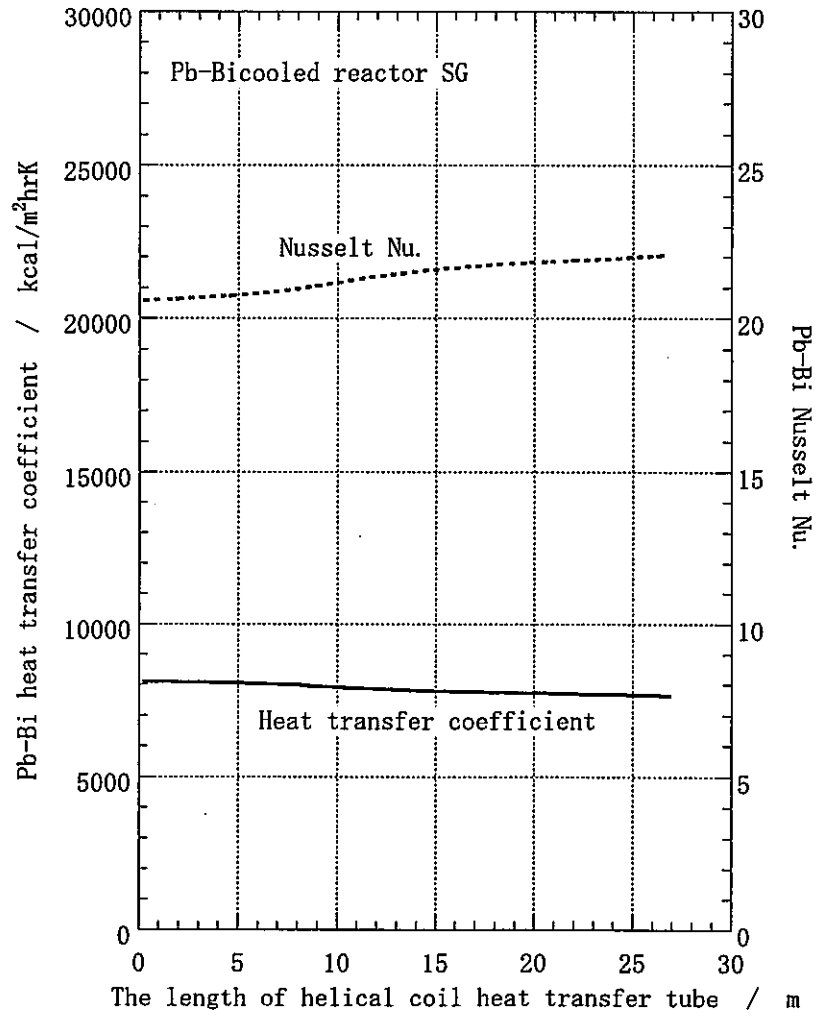


Fig. 3.2-5 Heat transfer coefficient and Nusselt number

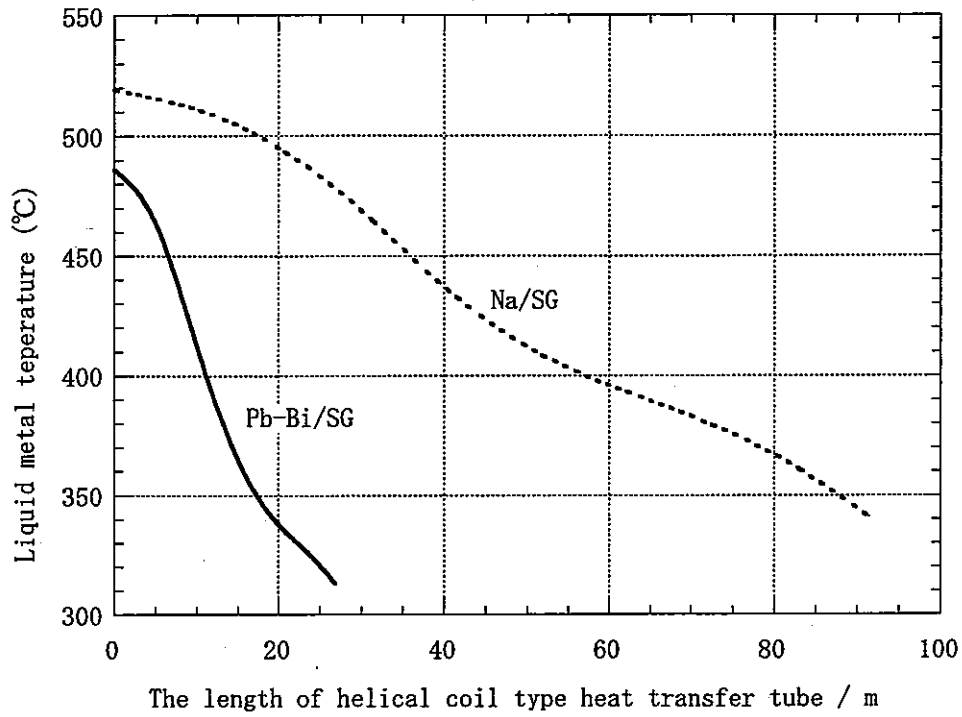


Fig. 3.2-6 Temperature profile of liquid metal

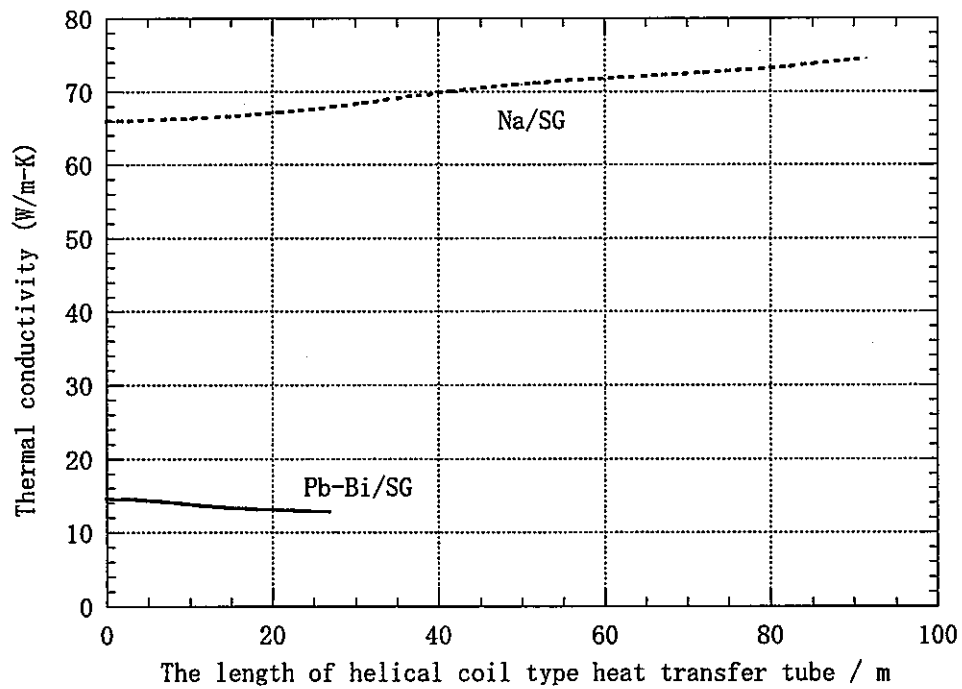


Fig. 3.2-7 Thermal conductivity profile of liquid metal

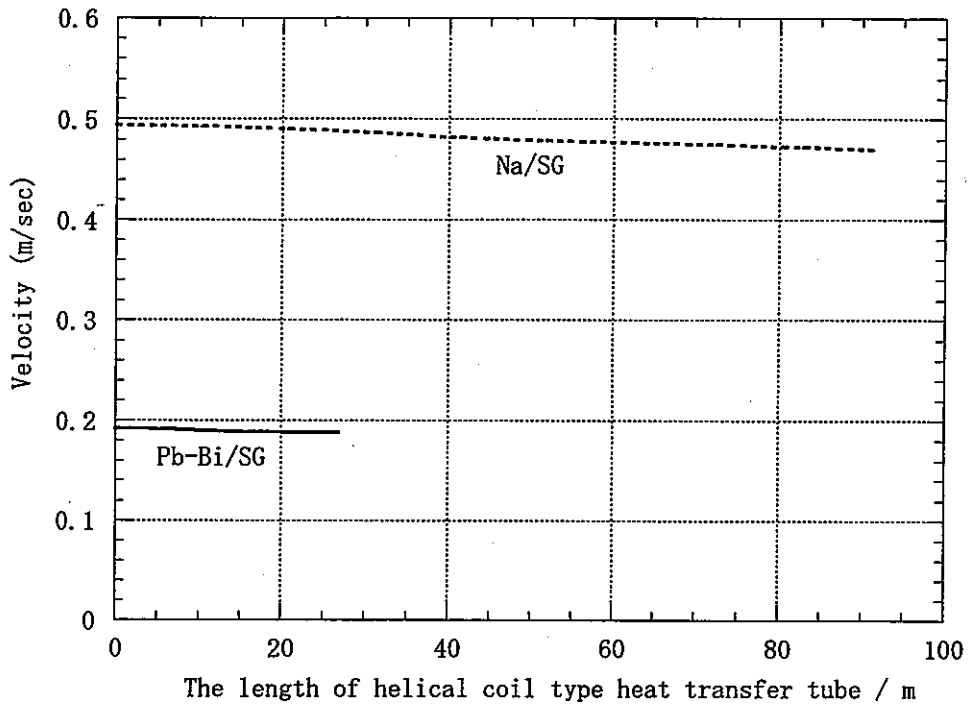


Fig. 3.2-8 Velocity profile of liquid metal

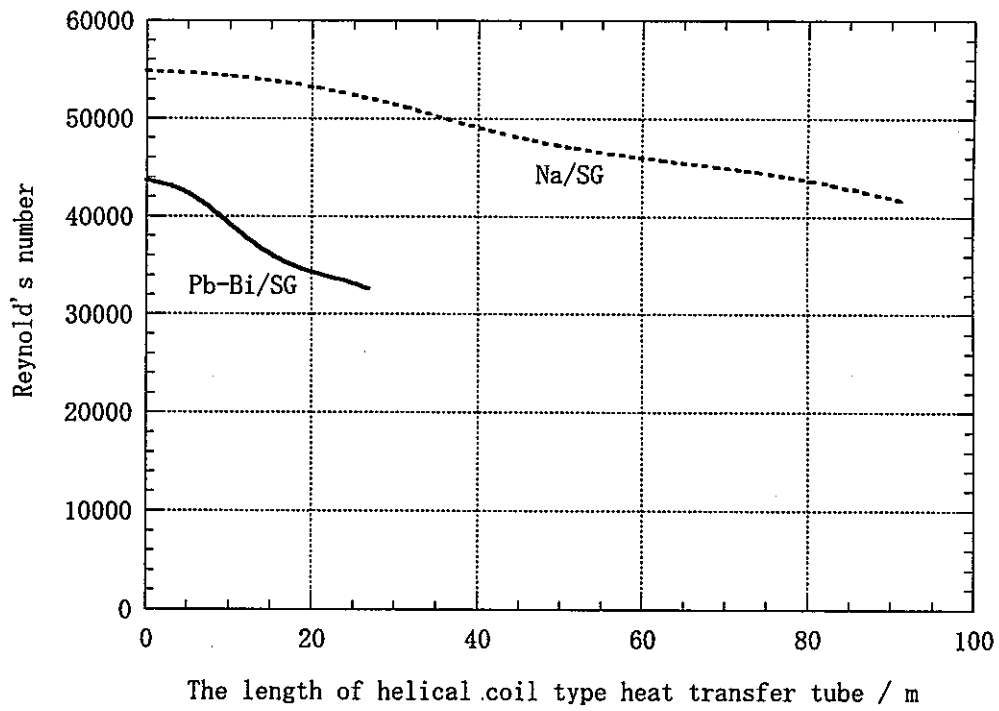


Fig. 3.2-9 Reynold's number profile of liquid metal

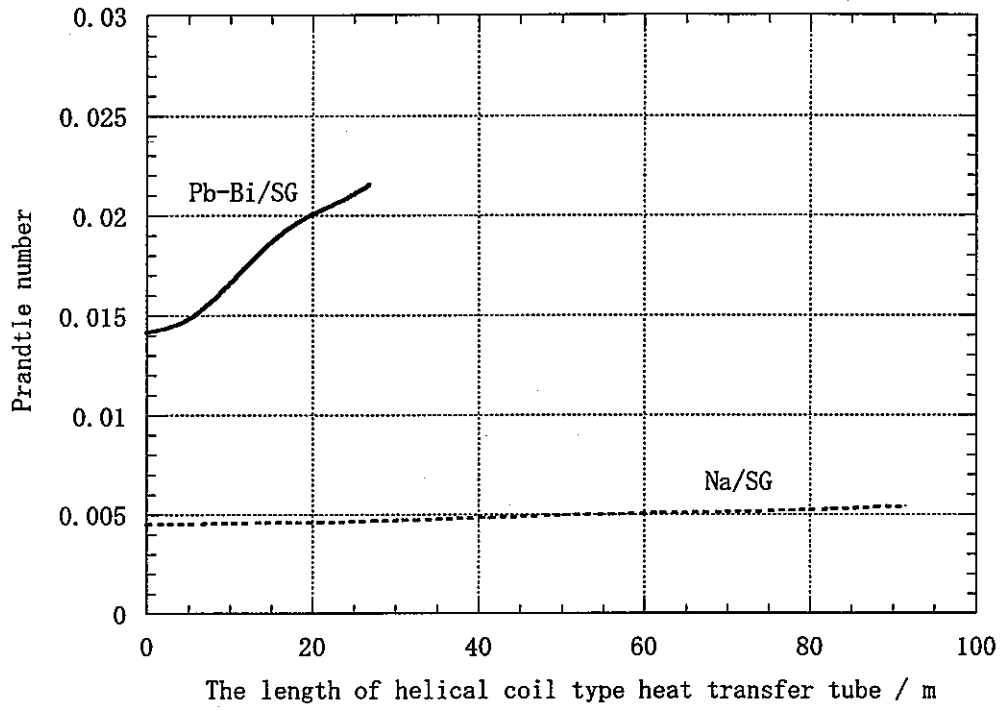


Fig. 3.2-10 Prandtl number profile of liquid metal

4 サイジングの検討

4.1 解析条件とパラメータ

SG 物量（伝熱面積）削減のために、Pb-Bi の温度条件等を変えることによってどの程度の効果を得ることができるかについての定量的な検討を行った。解析パラメータおよび解析条件は表 4.1-1 に、解析パラメータの組合せは表 4.1-2 に示す。

解析パラメータは、1) Pb-Bi 入口温度、2) 水側熱伝達率及び 3) Pb-Bi 側熱伝達率の 3 つとした。

1) の Pb-Bi 入口温度については炉心出口 Pb-Bi 温度を上昇させることによって、ヒートフラックスを高め、伝熱面積低減を図るもので、リファレンスである Pb-Bi 入口温度 492℃に対し、500℃、505℃、510℃の 3 つとする。

2) の水側の熱伝達率については、水側のそれぞれの領域の熱伝達式に修正係数を乗じるものであるが、これは伝熱管の内壁（水・蒸気側）に複数の溝をつけることによって、熱伝達性能を改良した伝熱管の採用を想定したものである。火力ボイラー等で用いられているいわゆるライフル管と呼ばれる伝熱管であり、文献から暫定的に表 4.1-1 に示す様な熱伝達補正係数を決定した。なお、POPAI-6 では溝を付けることによる伝熱管肉厚の増加の影響は考慮していない。また、溝付け加工は、伝熱管破損要因になる可能性があること、および伝熱管の検査性に影響を与える可能性があることから、FBR プラントへの採用については別途詳細な検討が必要である。

3) の Pb-Bi 側熱伝達率については、Pb-Bi の伝熱性能に関する別途研究 [参考文献 2] から、Pb-Bi は Na に比べて伝熱管外壁に対する濡れ性が低下（注 1:P23）し、このため熱伝達率（Nu 数）も 10～20%程度低下することが報告されている。この研究では、Pe 数が 70～300 の領域では熱伝達率を従来 of 式から算出した値より 20%程度低くすることが推奨されており、これに基づいて熱伝達計算式（Hoe の式）に補正係数として 0.8 を乗じた。なお、Fig. 4.1-1 に示すように本 Pb-Bi/SG の Pe 数は 600～700 であり試験範囲を外挿していることになる。

計算に当たっては、交換熱量、蒸気条件（温度・圧力）、Pb-Bi 流量、管束部圧力損失及び内部シュラウド径は固定条件とし、上記のパラメータサーベイをした際に、固定条件を満たすための伝熱面積（伝熱管本数）、伝熱管コイリング（列数と層数）、及び原子炉容器径を求めた。

特に管束部 Pb-Bi の圧力損失については POPAI-6 コードでは計算できないため、コードによる熱計算終了後、別途、圧損計算を行いリファレンスと変わら

ないことを確認した。この際、圧損が変化していれば、コイリングを変更して圧損がレファレンスと同じ大きさになるようにし、再度 POPAI-6 の熱計算により固定条件を満たすことを確認した。(付録 D)

また、管束部圧損および伝熱管長さについては固定条件ではあるが、所定の伝熱管コイリング条件(総数と列数)を満たし、かつ交換熱量を一定となるようにしているため、管束部 Pb-Bi 圧損についてはレファレンスの±8%程度以内のばらつきを有している。伝熱管長さについても同様の理由により±3%程度以内のばらつきを有する結果となっている。

注 1) Pb-Bi の濡れ性の低下について

Pb-Bi は Na と比較して表面張力が大きく、このため金属面との接触面積をできるだけ小さくしようとする性質がある。一方、Pb-Bi 炉では材料腐食防止の観点から表面に酸化被膜を形成しており、これが多孔質構造のため、実質的な接触面積は低下する。また酸化被膜自体の熱抵抗も要因となり Na に比べて伝熱性能は低下すると考えられている。

4.2 解析結果

それぞれの解析条件に基づく伝熱管本数、炉容器径などの計算結果を表 4.2-1 に、各ケースの伝熱管コイルリング状態を表 4.2-2(1/2), (2/2)に示す。また、伝熱面積と原子炉容器外径については、それぞれ Fig. 4.2-1, Fig. 4.2-2 に示す。

グラフからわかるように Pb-Bi 入口温度をリファレンス条件から 510°Cまで上昇させることによって伝熱面積を約 23%低減させることができる。ライフル管の採用では、通常の伝熱管に対し、約 15%の伝熱面積低減が可能である。さらにこの両者を組み合わせることで、約 34%の伝熱面積低減効果が得られる。

一方、Pb-Bi 濡れ性低下に伴い、伝熱面積はリファレンスより約 14%増加することが予測される。Pb-Bi から伝熱管外面への熱伝達性は良好でないため、20%の熱伝達率低下は全体に及ぼす影響は無視できる大きさとはならない。

また、伝熱面積の増減に伴い伝熱管コイル層数も増減し、伝熱管は炉容器内周に設置されているため、炉容器径が変化する。それぞれのパラメータの炉容器径への影響を示したグラフが Fig. 4.2-2 であるが、本解析パラメータの範囲ではリファレンスに対し-2～+1層の増減であるため、炉容器径は 10.9～11.14m の範囲となる。

表4.1-1 解析条件とパラメータ

【解析パラメータ】		リファレンス			
Pb-Bi 入口温度(°C)		492	500	505	510
水・蒸気側熱伝達関連式	予熱域 (森・中山の式) の修正係数	1.0	1.5 (内側溝付き伝熱管を想定した条件)		
	核沸騰域 (修正Schrock-Grossman) の修正係数	1.0	1.3 (")		
	膜沸騰域 (クオリティの比例配分) の修正係数	1.0	1.2 (")		
	過熱域 (森・中山の式) の修正係数	1.0	1.0 (")		
Pb-Bi熱伝達関連式	Hoeの式の修正係数	1.0	0.8 (Pb-Biの濡れ性低下を想定した条件)		

【固定条件】

蒸気条件	出入口温度	403.5°C / 220°C
	圧力	6.47 MPa (出口)
	流量	1.696×10^6 kg/hr
Pb-Bi条件	出入口温度差	180°C
	管束部圧力損失	約4600 kg/m ²
	流量	1.442×10^8 kg/hr
伝熱管長さ	26.9 m	
コイリングピッチ	60mm/50mm(径/軸)	
内部シュラウド径	7260 mm	

【パラメータに伴って固定条件を満たすために変える条件 (本解析のoutput)】

伝熱管本数 (伝熱面積)	
コイリング層数 (SG部外径)	
コイリング列数 (SG部高さ)	→ {伝熱管長さ/(コイリング径×π)} × 伝熱管本数
外部シュラウド径	
原子炉容器外径	

表4.1-2 解析パラメータの組合せ

【Pb-Bi入口温度を変えたケース】		リファレンス	case-1a	case-1b	case-1c
Pb-Bi 入口温度(°C)		492	500	505	510
水・蒸気側熱伝達相関式	予熱域 (森・中山の式) の修正係数	1.0	←	←	←
	核沸騰域 (修正Schrock-Grossman) の修正係数	1.0	←	←	←
	膜沸騰域 (クオリティの比例配分) の修正係数	1.0	←	←	←
	過熱域 (森・中山の式) の修正係数	1.0	←	←	←
Pb-Bi側熱伝達相関式	Hoeの式の修正係数	1.0	←	←	←

【水側高熱伝達伝熱管(ライフル管)のケース】		リファレンス	case-2a	case-2b	case-2c	case-2d
Pb-Bi 入口温度(°C)		492	492	500	505	510
水・蒸気側熱伝達相関式	予熱域 (森・中山の式) の修正係数	1.0	1.5	←	←	←
	核沸騰域 (修正Schrock-Grossman) の修正係数	1.0	1.3	←	←	←
	膜沸騰域 (クオリティの比例配分) の修正係数	1.0	1.2	←	←	←
	過熱域 (森・中山の式) の修正係数	1.0	1.0	←	←	←
Pb-Bi側熱伝達相関式	Hoeの式の修正係数	1.0	←	←	←	←

【Pb-Biの伝熱管に対する熱伝達率低下を想定したケース】		リファレンス	case-3a
Pb-Bi 入口温度(°C)		492	←
水・蒸気側熱伝達相関式	予熱域 (森・中山の式) の修正係数	1.0	←
	核沸騰域 (修正Schrock-Grossman) の修正係数	1.0	←
	膜沸騰域 (クオリティの比例配分) の修正係数	1.0	←
	過熱域 (森・中山の式) の修正係数	1.0	←
Pb-Bi側熱伝達相関式	Hoeの式の修正係数	1.0	0.8

表4.2-1 計算結果

ケースNo.	伝熱管形状	Pb-Bi出口温度(°C)	Pb-Bi入口温度(°C)	水/蒸気出口温度(°C)	水/蒸気入口温度(°C)	管束部Pb-Bi圧損(Pa) (注1)
リファレンス	通常管	312.5	492.0	↑ 403.5 ↓	↑ 220.0 ↓	4597.6
case-1a	通常管	320.5	500.0			4835.2
case-1b	通常管	325.5	505.0			4493.5
case-1c	通常管	330.5	510.0			4321.7
case-2a	ライフル管	312.5	492.0			4754.6
case-2b	ライフル管	320.5	500.0			4241.4
case-2c	ライフル管	325.5	505.0			4806.5
case-2d	ライフル管	330.5	510.0			4515.8
case-3a	通常管	312.5	492.0			4374.3

ケースNo.	管形状	伝熱管本数(本)	コイル層数(注2)	コイル列数(注2)	伝熱管長さ(m) (注3)	有効伝熱部高さ(m)
リファレンス	通常管	1251	18	71	26.79	3.53
case-1a	通常管	1088	17	67	26.78	3.30
case-1b	通常管	1020	17	62	26.69	3.10
case-1c	通常管	986	17	60	26.11	3.00
case-2a	ライフル管	1069	17	66	26.76	3.25
case-2b	ライフル管	966	17	58	26.56	2.90
case-2c	ライフル管	891	16	58	26.57	2.90
case-2d	ライフル管	844	16	55	26.47	2.75
case-3a	通常管	1414	19	76	26.90	3.80

ケースNo.	管形状	内側シュラウド外径(m)	外側シュラウド内径(m)	炉容器内径(m)	炉容器外径(m)
リファレンス	通常管	7.26	9.42	9.85	11.14
case-1a	通常管	7.26	9.30	9.73	11.02
case-1b	通常管	7.26	9.30	9.73	11.02
case-1c	通常管	7.26	9.30	9.73	11.02
case-2a	ライフル管	7.26	9.30	9.73	11.02
case-2b	ライフル管	7.26	9.30	9.73	11.02
case-2c	ライフル管	7.26	9.18	9.61	10.90
case-2d	ライフル管	7.26	9.18	9.61	10.90
case-3a	通常管	7.26	9.54	9.97	11.26

注1) 管束部のPb-Bi圧損はリファレンスの4598Paに対して、±8%程度以内に収まるようにした。

注2) コイルの詳細は表4.2-2参照。

注3) 伝熱管長さはリファレンス(26.79m)とできるだけ同じにするようにしているが、伝熱管コイルに基づいて所定の蒸気条件を得るために、多少ばらつく。

表4.2-2 (1/2) 伝熱管コイリング

リファレンス

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	61	7.32	71.35
2	62	7.44	71.35
3	63	7.56	71.35
4	64	7.68	71.35
5	65	7.80	71.35
6	66	7.92	71.35
7	67	8.04	71.35
8	68	8.16	71.35
9	69	8.28	71.35
10	70	8.40	71.35
11	71	8.52	71.35
12	72	8.64	71.35
13	73	8.76	71.35
14	74	8.88	71.35
15	75	9.00	71.35
16	76	9.12	71.35
17	77	9.24	71.35
18	78	9.36	71.35
合計	1251	平均	71.35

case-1a

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	57	7.32	66.68
2	57	7.44	65.60
3	58	7.56	65.69
4	59	7.68	65.78
5	60	7.80	65.87
6	61	7.92	65.95
7	62	8.04	66.03
8	63	8.16	66.11
9	64	8.28	66.18
10	65	8.40	66.26
11	66	8.52	66.33
12	67	8.64	66.40
13	68	8.76	66.47
14	69	8.88	66.53
15	70	9.00	66.60
16	71	9.12	66.66
17	71	9.24	65.79
合計	1088	平均	66.17

case-1b

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	53	7.32	62.00
2	54	7.44	62.15
3	55	7.56	62.29
4	56	7.68	62.44
5	57	7.80	62.57
6	57	7.92	61.62
7	58	8.04	61.77
8	59	8.16	61.91
9	60	8.28	62.05
10	61	8.40	62.18
11	62	8.52	62.31
12	63	8.64	62.44
13	63	8.76	61.58
14	64	8.88	61.71
15	65	9.00	61.84
16	66	9.12	61.97
17	67	9.24	62.09
合計	1020	平均	62.05

case-1c

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	51	7.32	59.66
2	52	7.44	59.85
3	53	7.56	60.03
4	53	7.68	59.09
5	54	7.80	59.28
6	55	7.92	59.46
7	56	8.04	59.64
8	57	8.16	59.81
9	58	8.28	59.98
10	59	8.40	60.14
11	60	8.52	60.30
12	61	8.64	60.45
13	62	8.76	60.60
14	63	8.88	60.75
15	63	9.00	59.94
16	64	9.12	60.09
17	65	9.24	60.23
合計	986	平均	59.96

case-2a

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	56	7.32	65.51
2	57	7.44	65.60
3	57	7.56	64.56
4	58	7.68	64.66
5	59	7.80	64.77
6	60	7.92	64.87
7	61	8.04	64.96
8	62	8.16	65.06
9	63	8.28	65.15
10	64	8.40	65.24
11	65	8.52	65.32
12	66	8.64	65.41
13	67	8.76	65.49
14	67	8.88	64.60
15	68	9.00	64.69
16	69	9.12	64.78
17	70	9.24	64.87
合計	1069	平均	65.03

case-2b

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	50	7.32	58.49
2	51	7.44	58.69
3	52	7.56	58.90
4	53	7.68	59.09
5	53	7.80	58.18
6	54	7.92	58.38
7	55	8.04	58.57
8	56	8.16	58.76
9	57	8.28	58.94
10	58	8.40	59.12
11	59	8.52	59.29
12	59	8.64	58.47
13	61	8.76	59.62
14	61	8.88	58.82
15	62	9.00	58.99
16	62	9.12	58.21
17	63	9.24	58.38
合計	966	平均	58.76

case-2c

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	50	7.32	58.49
2	51	7.44	58.69
3	51	7.56	57.76
4	52	7.68	57.98
5	53	7.80	58.18
6	54	7.92	58.38
7	54	8.04	57.51
8	55	8.16	57.71
9	56	8.28	57.91
10	57	8.40	58.10
11	58	8.52	58.29
12	58	8.64	57.48
13	59	8.76	57.67
14	60	8.88	57.85
15	61	9.00	58.03
16	62	9.12	58.21
合計	891	平均	58.02

case-2d

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	47	7.32	54.98
2	48	7.44	55.24
3	48	7.56	54.37
4	49	7.68	54.63
5	50	7.80	54.89
6	51	7.92	55.14
7	51	8.04	54.31
8	52	8.16	54.57
9	53	8.28	54.81
10	54	8.40	55.04
11	55	8.52	55.27
12	56	8.64	55.50
13	56	8.76	54.74
14	57	8.88	54.96
15	58	9.00	55.18
16	59	9.12	55.39
合計	844	平均	54.94

表4.2-2 (2/2) 伝熱管コイリング

case-3a

層番号	本数 (本)	伝熱管巻き径 (m)	列数(列)
1	65	7.32	76.03
2	66	7.44	75.96
3	67	7.56	75.88
4	68	7.68	75.81
5	69	7.80	75.75
6	70	7.92	75.68
7	71	8.04	75.61
8	72	8.16	75.55
9	73	8.28	75.49
10	74	8.40	75.43
11	75	8.52	75.37
12	77	8.64	76.31
13	78	8.76	76.24
14	79	8.88	76.18
15	80	9.00	76.11
16	81	9.12	76.05
17	82	9.24	75.99
18	83	9.36	75.93
19	84	9.48	75.87
合計	1414	平均	75.86

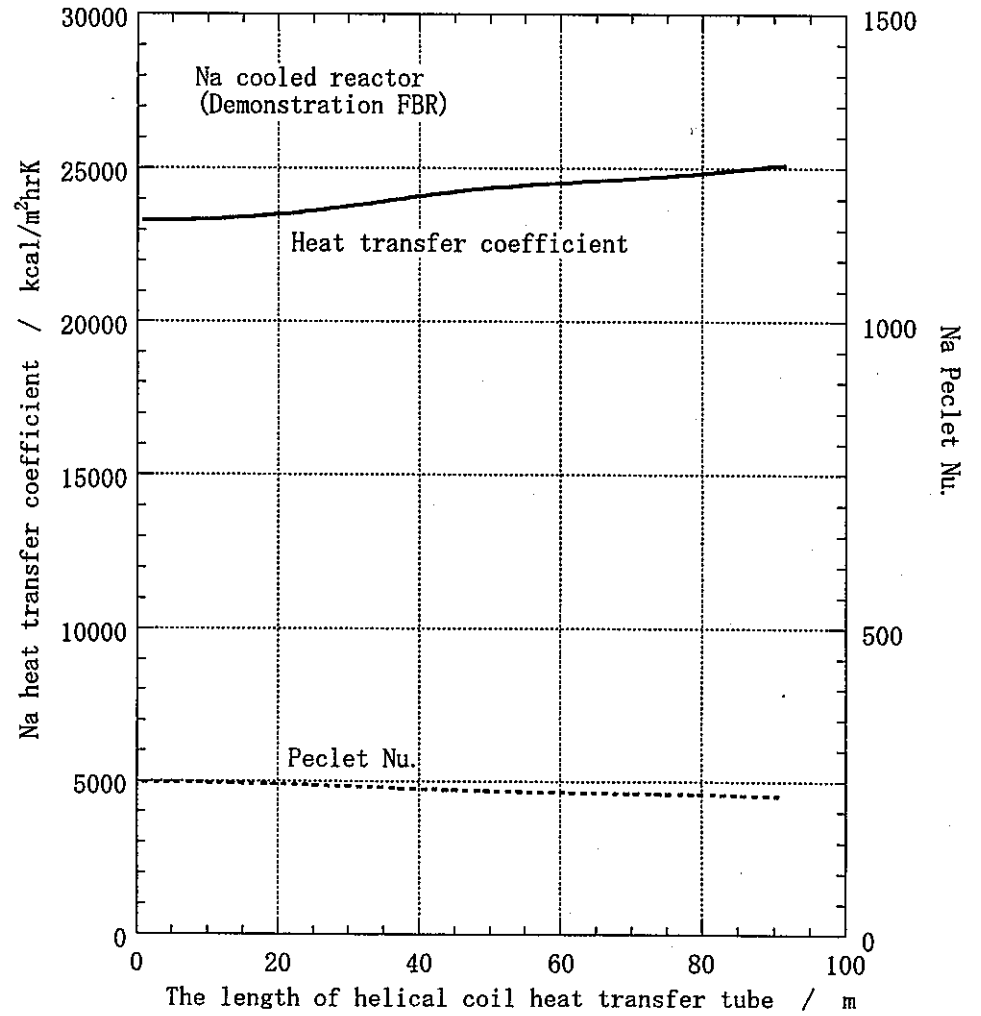
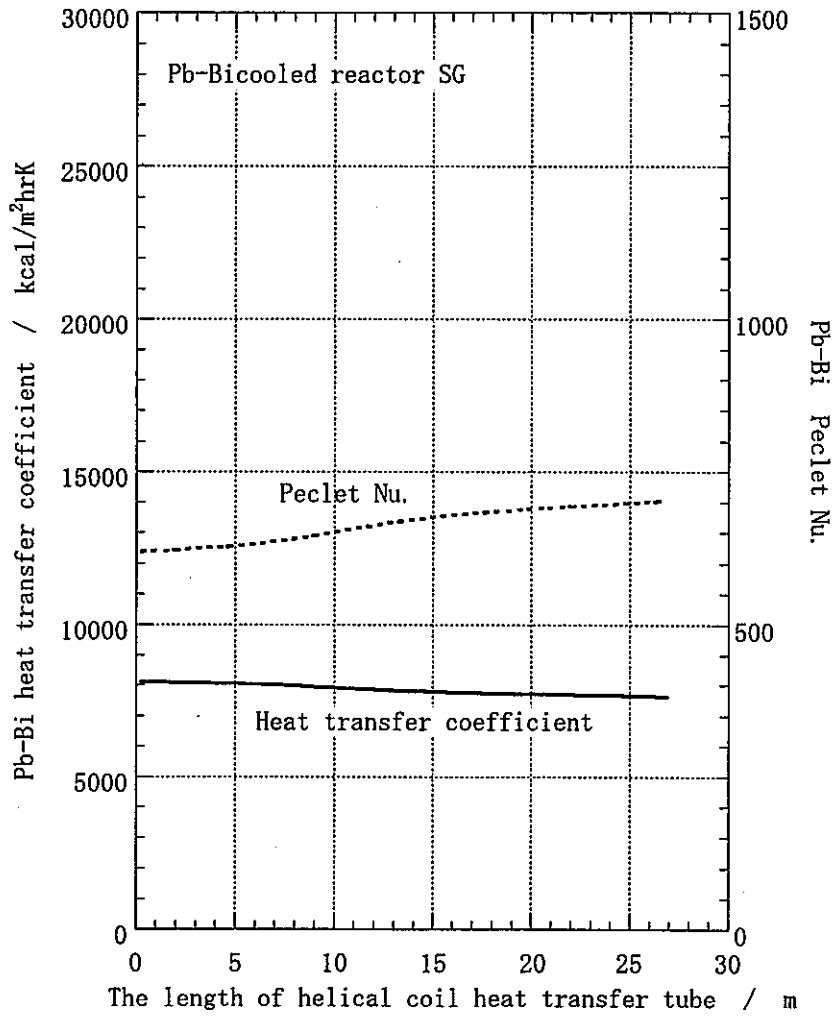


Fig. 4.1.-1 Heat transfer coefficient and Peclet number

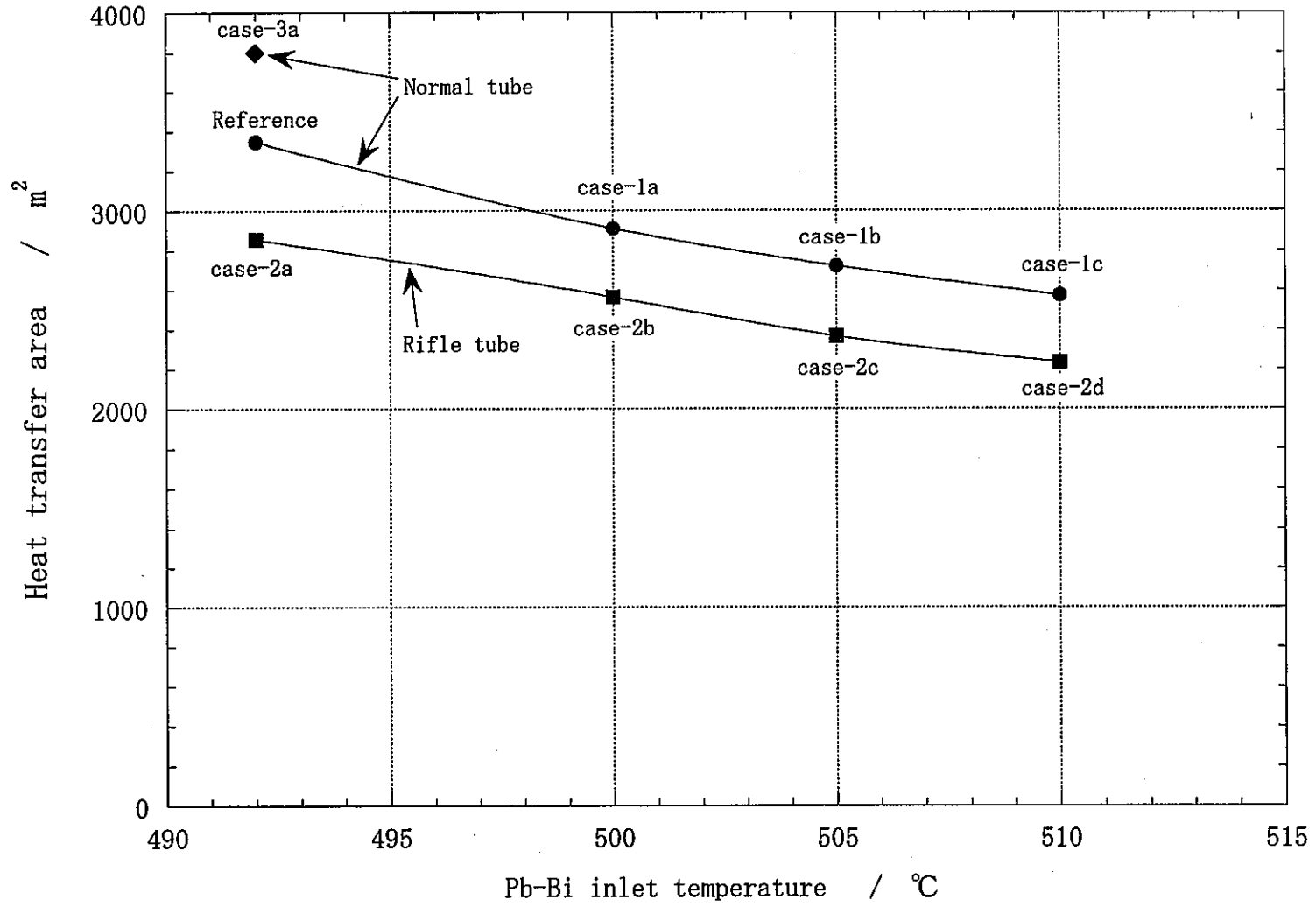


Fig. 4.2-1 Heat transfer area of Pb-Bi/SG

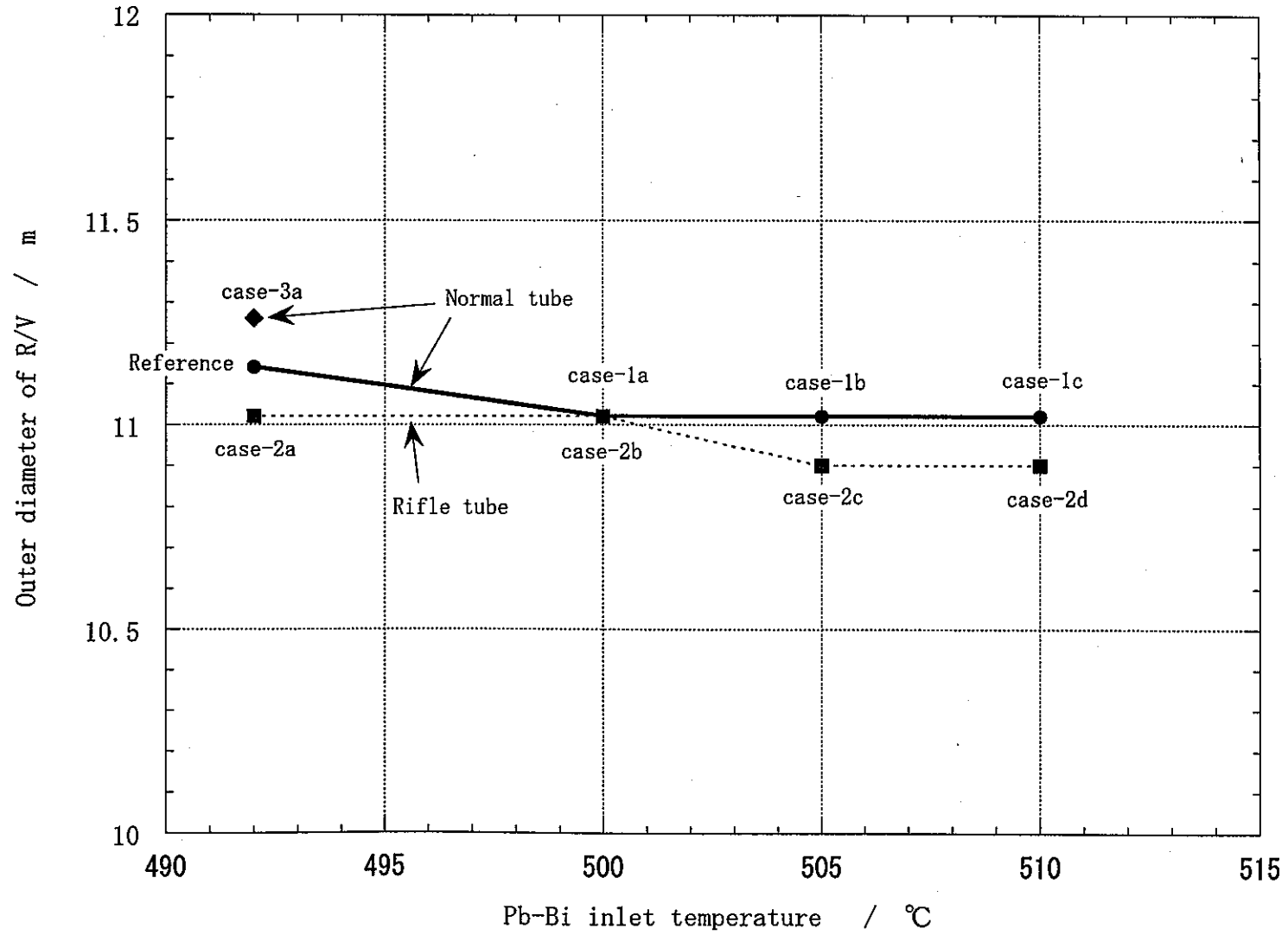


Fig. 4.2-2 Outer diameter of R/V

5 結言

Na 加熱型 SG を用いて開発・整備されてきた 1 次元定常伝熱特性解析コード POPAI-6 について、Na の物性値を Pb-Bi のそれに置き換えることで Pb-Bi 用に改訂し、自然循環型 Pb-Bi/SG の解析を行った。計算では物量削減の観点から Pb-Bi 入口温度上昇や伝熱管水・蒸気側の熱伝達性能向上をパラメータとし、伝熱面積への影響を定量的に評価した。

この結果、Pb-Bi 入口温度を 18°C 上昇させることによってヒートフラックスの増加により、伝熱面積を約 23% 低減させることが可能であることがわかった。さらに水・蒸気側の熱伝達性向上伝熱管（ライフル管）を採用すると、12～15% 程度伝熱面積を削減でき、両者を併せれば 34% 程度の削減効果は期待できる。

一方、別途 Pb-Bi を用いた伝熱試験により、Na と比較して Pb-Bi の伝熱管への濡れ性低下による熱伝達性能の低下が報告されている。これを POPAI-6 に反映して伝熱面積を計算すると、考慮しなかった場合に比べ、約 14% 増の伝熱面積が必要になり、設計において考慮しておかなければならない。

今回の解析対象は自然循環型 SG であるため、管束部の圧力損失が重要になってくる。ところが、POPAI-6 には管束部圧力損失を計算する機能はないため、コードとは別に、円管群の一般的な圧損式を用いて計算している。今後は 50MWSG による検証が行われ、温度分布や流量配分を考慮し精度良く管束部圧力損失を求めることのできる POPAI-3 コードを用いた評価を行う。

謝辞

本報告書を作成するに当たり、原子力システム（株）の井川健一氏には POPAI-6 コードによる計算をしていただいた。よって、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 堺公明 江沼康弘 岩崎隆 大山一弘
重金属冷却高速増殖炉の崩壊熱除去特性
－Pb-Bi 冷却自然循環炉の熱流動特性評価手法整備－
JNC TN9400 2001-052 2001年 5月

- [2] 西義久 木下泉
電力中央研究所報告
FBR用新型熱交換器の大きさの算定（研究報告 T98061）

- [3] 江沼康弘 堺公明 他
FBR システム技術検討書 ー平成 12 年度報告書ー
JNC TN9400 2001-012 2001年 6月

- [4] J.P.ホールマン 伝熱工学 1936年 3月 ブレイン図書出版（株）

- [5] 赤川 浩爾 気液二相流 1974年 5月 コロナ社

付録 A POPAI-6 物性値計算ソースプログラム

```

FUNCTION PRPNA (T, ROH, RMY, RMD, CP)
COMMON/COM900/ VALID, VALID1
C
C *** CALCULATE LIQUID SODIUM PROPERTIES
C
C T : TEMPERATURE (DEG-C)
C
C      CBRT(X)=X**(1.0/3.0)
C
C      CPF(TM)=(1.105417E-7*TM-1.386893E-4)*TM+.3432214← (Na 比熱)
C      CPF(TM)=0.238846*146.44/1000.0← (Pb-Bi 比熱)
C      ENTF(TM)
C      1=((3.684723E-8*TM-6.934465E-5)*TM+.3432214)*TM-32.94486← (Na 比エンタルピ)
C      1=0.0349766*TM-4.316113← (PB-Bi 比エンタルピ)
C
C      JMP=0
C      GOTO 11
C      ENTRY RMYNA(T)
C KINEMATIC VISCOSITY (M2/S)
C
C      JMP=2
C      GOTO 11
C      ENTRY ROHNA(T)
C SPECIFIC WEIGHT (KG/M3)
C
C      JMP=1
C 11 VAL1=((5.638E-9*T-1.460E-5)*T-0.22976)*T+950.1← (Na 比重量)
C 11 VAL1=10735.0-1.375*T← (Pb-Bi 比重量)
C      IF(JMP.NE.1) GOTO 12
C      ROHNA=VAL1
C      RETURN
C
C 12 IF(T.GT.500.0) GOTO 13
C      VAL2=0.1235*CBRT(VAL1*0.001)*EXP(0.697*VAL1/(T+273.15))
C      GOTO 14
C 13 VAL2=0.0851*CBRT(VAL1*0.001)*EXP(1.040*VAL1/(T+273.15))
C 14 VAL2=VAL2*0.001/VAL1
C 12 VAL2=5.1E-8+4637.0E-8/T-1.582728E-3/T**2← (Pb-Bi 動粘性係数)
C      IF(JMP.EQ.0) GOTO 15
C      RMYNA=VAL2
C      RETURN
C      ENTRY RMDNA(T)
C THERMAL CONDUCTIVITY (KCAL/M.H.DEG-C)
C
C      JMP=3
C 15 VAL3=(1.0084E-5*T-4.9947E-2)*T+79.925← (Na 熱伝導率)
C 15 VAL3=(9.636+0.01014*T)*0.859845← (Pb-Bi 熱伝導率)
C      IF(JMP.EQ.0) GOTO 16
C      RMDNA=VAL3
C      RETURN
C      ENTRY CPNA(T)
C ISOBARIC SPECIFIC HEAT CAPACITY (KCAL/KG.DEG-C)
C
C      JMP=4
C 16 VAL4=CPF(T)
C      IF(JMP.EQ.0) GOTO 17
C      CPNA=VAL4
C      RETURN
C      ENTRY ENTNA(T)

```

```

C SPECIFIC ENTHALPY (KCAL/KG)
C   ENTNA=ENTF (T)
   RETURN
   ENTRY SPDNA (T)
C SOUND SPEED (M/S)
C   SPDNA=2578. -0.52*T
   RETURN
   ENTRY SIGNA (T)
C SURFACE TENSION (KGF/M)
C   SIGNA=(206.7-0.1*T)*0.1019716E-3
   RETURN
C
C -----
17 ROH=VAL1
   RMY=VAL2
   RMD=VAL3
   CP =VAL4
   PRPNA=0.0
   RETURN
   ENTRY TMPNA (H)
C TEMPERATURE (DEG-C) FROM ENTHALPY (KCAL/KG)
C
C   TM=H*3.19377+97.82← (Na 温度)
   TM=H*28.59054+123.4← (Pb-Bi 温度)
   DO 100 I=1,10
   F=ENTF (TM)-H
   DF=CPF (TM)
   DELT=F/DF
   IF (ABS (DELT/TM) .LE. VALID1) GOTO 110
   TM=TM-DELT
100 CONTINUE
110 TMPNA=TM
   RETURN
   END

```

付録B 12Cr鋼の熱伝導率フィッティング式

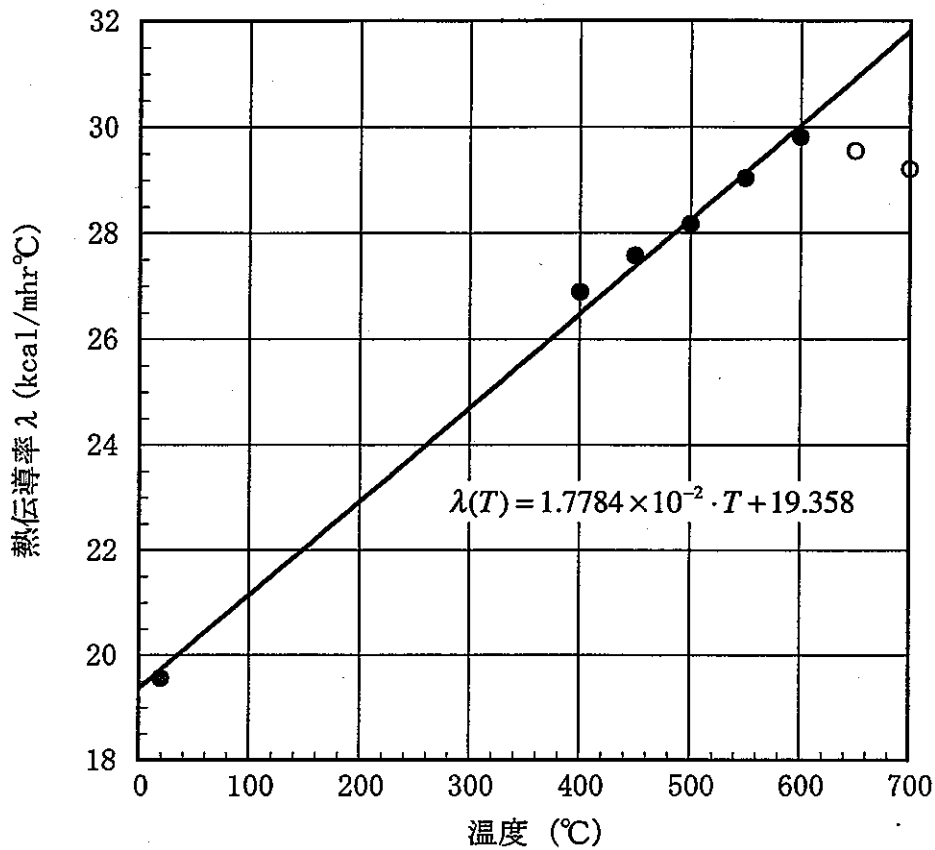


図 B-1 12Cr鋼の熱伝導率

温度 (°C)	密度 ($\times 10^3$ kg/m ³)	熱伝導率 (W/m·K)	比熱 (J/g·K)
R. T	7.86	22.7	0.444
400	—	31.2	0.731
450	—	32.0	0.784
500	—	32.7	0.837
550	—	33.7	0.910
600	—	34.6	0.983
650	—	34.3	1.128
700	—	33.9	1.272

表 B-1 12Cr鋼の熱伝導率と比熱

付録C Pb-Bi/SG (リファレンス) POPAI-6 データ

1	1.0	
101	144200.0 492.0 312.0 1696.0 220.0 403.5 65.98 65.28/	
116	0.0 0.0/	
122	18.0 100.0 1251.0 1251.0 8.39/	LAYER,NO
127	0.02872 0.0318 0.02872 0.0318 0.0/	TUBE
132	5.0E-5/	ROUGH
133	1.0 1.0/	ZL1,ZH1
135	3.935 3.935/	ZL2,ZH2
137	7.62 3.53/	TUBE LENGTH
139	1.0E-10 1.0E-10/	ZL3,ZH3
141	1.0E-10 0.06 0.05/	ZH4 PITCHR,PITCHA
151	7.26 9.42 9.48 9.85 11.14/	SHROUD
187	4.0/	SODIUM HEAT TRANSFER
195	10000.0/	
221	2.0/	PRE-HEAT
233	4.0/	NUCLEATE-BOILING
239	5.0/	FILM-BOILING
245	3.0/	SUPER-HEAT
251	0.75/	DRYOUT QUALITY
259	1.0E-10/	UPPER NONHEAT GAS HTC
266	1.0E-10/	LOWER NONHEAT GAS HTC
303	2.0/	SLIP
321	99.0/	
323	26.0/	12CR THERMAL CONDUCTIVITY
329	3.33E-5/	FOULING FACTOR
330	7860.0/	
351	0.0 600.0 600.0 600.0/	SHROUD HTC
358	0.3/	
359	40.0/	ROOM TEMP.
1845	0.0 0.0/	
1905	0.0 0.0/	
2042	0.0 0.0/	
2102	0.0 0.0/	
9999		

付録C 実証炉 Na/SG POPAI-6 データ

1	1.0	
101	8150.0 520.0 335.0 862.0 240.0 497.0 191.0 175.0/	
116	1.0 0.0/	
122	25.0 100.0 330.0 330.0 2.435/	
129	0.02361 0.0318 0.0/	
132	5.0E-5 /	ROUGH
133	1.5 1.5/	ZL1, ZH1
135	3.0 3.0/	ZL2, ZH2
137	10.505 8.71/	
139	2.0 2.0/	ZL3, ZH3
141	1.0E-10 0.05 0.05/	ZH4 PITCHR, PITCHA
151	1.0 3.4 3.4 3.46 4.52/	SHROUD
187	4.0/	SODIUM HEAT TRANSFER
221	2.0/	PRE-HEAT
233	4.0/	NUCLEATE-BOILING
239	5.0/	FILM-BOILING
245	3.0/	SUPER-HEAT
251	0.75/	DRYOUT QUALITY
259	60.0/	UPPER NONHEAT GAS HTC
266	1.0E-10/	LOWER NONHEAT GAS HTC
303	2.0/	SLIP
321	99.0/	
323	23.0/	MOD. 9CR-1MO THERMAL CONDUCTIVITY
329	3.33E-5/	FOULING FACTOR
330	7850.0/	
332	0.0/	GAP CONDUCTANCE
352	10.0E5 10.0E5 10.0E5/	
355	2.0 9.71/	
358	0.3/	H. T. C. TO ROOM
359	40.0/	ROOM TEMP.
1845	0.0 0.0/	
1905	0.0 0.0/	
2042	0.0 0.0/	
2102	0.0 0.0/	
9999		

表 C-1 (1/2) POPAI-6入力データ (Pb-Bi/SG)

	項目	説明	入力値
101	Pb-Bi質量流量(ton/hr)		144200
102	Pb-Bi入口温度(°C)		492
103	Pb-Bi出口温度(°C)	(POPAI-6 計算値)	312
104	水側質量流量(ton/hr)		1696
105	給水温度(°C)		220
106	蒸気出口温度(°C)	(POPAI-6 計算値)	403.5
107	給水圧力(kg/cm ² g)	(POPAI-6 計算値)	65.98
108	蒸気出口圧力(kg/cm ² g)		65.28
116	下降管オプション	下降管あり	0
117	伝熱管形状	ヘリカルコイル	0
122	コイル数(層数)		18
123	軸方向分割数		100
124	全伝熱管本数		1251
125	通水伝熱管本数		1251
126	代表コイル径(m)	各層本数による重み付け平均 (表 C-2参照)	8.39
127	下降伝熱管内径(m)		0.02872
128	下降伝熱管外径(m)	伝熱管肉厚は製作誤差を見込んで10%増とする。このため、伝熱管はφ31.8mm×1.54mmとなる。	0.0318
129	上昇伝熱管内径(m)		0.02872
130	上昇伝熱管外径(m)		0.0318
131	上昇伝熱管ギャップ径(m)		0
132	伝熱管内面粗さ(m)	もんじゅEV設計値&メーカー設計値(PNC SN941 83-116 P21参照)	0.00005
133	シェル上端~Na液位間伝熱管長さZL1(m)		1
134	シェル上端~Na液位間伝熱管高さZH1(m)		1
135	Na液面~コイル上端伝熱管長さZL2(m)		3.935
136	Na液面~コイル上端伝熱管高さZH2(m)		3.935
137	コイル部単位高さ当り伝熱管長さ(m)	伝熱管平均長さ26.9m÷ヘリカルコイル部高さ3.53m	7.62
138	ヘリカルコイル部高さZCOIL(m)		3.53
139	コイル下端~伝熱管折り返し点長さZL3(m)	(構造条件が不明のため0を暫定入力)	0
140	コイル下端~伝熱管折り返し点高さZH3(m)	〃	0
141	プレナム高さZH4(m)		0
142	径方向ピッチ長さPITCHR(m)	伝熱管ピッチ	0.06
143	軸方向ピッチ長さPITCHA(m)	〃	0.05
151	内側シュラウド外径DOCORE(m)	ヘリカル部と炉心部の隔壁の外径	7.26
152	外側シュラウド内径DISHRD(m)	ダウンカマーとヘリカル部の隔壁の内径	9.42
153	外側シュラウド外径DOSHRD(m)	ダウンカマーとヘリカル部の隔壁の外径	9.48
154	シェル内径DISHEL(m)	炉容器内径	9.85
155	シェル外径DOSHEL(m)	炉容器平均肉厚45mmと保温剤厚さ600mmを炉容器内径に加算	11.14

表 C-1 (2/2) POPAI-6入力データ (Pb-Bi/SG)

【Pb-Bi側伝熱相関式】

187	Pb-Bi側上昇管コイル部熱伝達式	Hoeの式：円管群に対する直交流	4
195	1次側下降管部熱伝達率指定値(kcal/m ² h ^o C)	(default)	10000

【水・蒸気側伝熱相関式】

221	水蒸気側コイル部予熱域熱伝達式	森・中山の式	2
233	水蒸気側コイル部沸騰域熱伝達式(核沸騰)	修正Schrock-Grossman	4
239	水蒸気側コイル部液欠乏域熱伝達式(膜沸騰)	核沸騰域と過熱域の熱伝達率をクオリティに応じて比例配分	5
245	水蒸気側コイル部過熱域熱伝達式	森・中山の式	3
251	水蒸気側コイル部ドライアウトクオリティ	(default)	0.75
259	上部非加熱域ガス熱伝達率	(default)	60
266	下部非加熱域ガス熱伝達率		0
303	Boid-Slip Ratioの相関式	Smith Model	2
321	伝熱管熱伝導率計算式	固定値	99
323	伝熱管熱伝導率算出係数T0乗項(kcal/mhr ^o C)	12C-1Mor鋼の値 (Fig. 2.1-2参照)	26
329	伝熱管内面汚れ(kcal/m ² h ^o C) ⁻¹	50MWSGの解析値(メーカー設計値)	0.0000333
330	伝熱管比重量(kg/m ³)	12C-1Mor鋼の値	7860
351	カバーガス部熱伝導率(kcal/m ² hr ^o C)	(defaultは60であるが不明のため0を暫定入力)	0
352	外部シュラウド第1領域熱通過率(kcal/m ² hr ^o C)	(default)	600
353	外部シュラウド第2領域熱通過率(kcal/m ² hr ^o C)	〃	600
354	外部シュラウド第3領域熱通過率(kcal/m ² hr ^o C)	〃	600
355	外部シュラウド第1、第2領域境界位置(m)	〃	2.71225
356	外部シュラウド第2、第3領域境界位置(m)	〃	8.6413
358	1次～周囲大気熱通過率(kcal/m ² hr ^o C)	〃	0.3
359	周囲大気温度(°C)	(default)	40

表 C-2 Pb-Bi/SGコイリング (リファレンス)

コイリング層	各層の伝熱管本数	伝熱管長さ (m)	コイリング径 (m)	伝熱管本数×コイリング径	*各層の伝熱管列数
1	61	26.9	7.32	446.52	71.35657064
2	62	26.9	7.44	461.28	71.35657064
3	63	26.9	7.56	476.28	71.35657064
4	64	26.9	7.68	491.52	71.35657064
5	65	26.9	7.8	507	71.35657064
6	66	26.9	7.92	522.72	71.35657064
7	67	26.9	8.04	538.68	71.35657064
8	68	26.9	8.16	554.88	71.35657064
9	69	26.9	8.28	571.32	71.35657064
10	70	26.9	8.4	588	71.35657064
11	71	26.9	8.52	604.92	71.35657064
12	72	26.9	8.64	622.08	71.35657064
13	73	26.9	8.76	639.48	71.35657064
14	74	26.9	8.88	657.12	71.35657064
15	75	26.9	9	675	71.35657064
16	76	26.9	9.12	693.12	71.35657064
17	77	26.9	9.24	711.48	71.35657064
18	78	26.9	9.36	730.08	71.35657064
SUM	1251			10491.48	
				代表コイル径(m)→	8.38647482

*各層の伝熱管列数 = {伝熱管長さ/(コイリング径×π)} × 伝熱管本数

表 C-3(1/2) POPAI-6 入力データ (実証炉Na/SG)

	項目	説明	入力値
101	Na質量流量(ton/hr)		8150
102	Na入口温度(°C)		520
103	Na出口温度(°C)	(POPAI-6 計算値)	335
104	水側質量流量(ton/hr)		862
105	給水温度(°C)		240
106	蒸気出口温度(°C)	(POPAI-6計算値)	497
107	給水圧力(kg/cm ² g)	(POPAI-6計算値)	191.0
108	蒸気出口圧力(kg/cm ² g)		175
116	下降管オプション	下降管なし	1
117	伝熱管形状	ヘリカルコイル	0
122	コイル数(層数)		25
123	軸方向分割数		100
124	全伝熱管本数		330
125	通水伝熱管本数		330
126	代表コイル径(m)	各層本数による重み付け平均 (C-4参照)	2.435
127	下降伝熱管内径(m)		0
128	下降伝熱管外径(m)	伝熱管肉厚は製作誤差を見込んで10%増とする。このため、伝熱管はφ31.8mm×4.095mmとなる。	0
129	上昇伝熱管内径(m)		0.02361
130	上昇伝熱管外径(m)		0.0318
131	上昇伝熱管ギャップ径(m)		0
132	伝熱管内面粗さ(m)	もんじゅEV設計値&メーカー設計値(PNC SN941 83-116 P21参照)	0.00005
133	シェル上端~Na液位間伝熱管長さZL1(m)	図から読みとった暫定値	1.5
134	シェル上端~Na液位間伝熱管高さZH1(m)	〃	1.5
135	Na液面~コイル上端伝熱管長さZL2(m)		3
136	Na液面~コイル上端伝熱管高さZH2(m)		3
137	コイル部単位高さ当り伝熱管長さ(m)	伝熱管平均長さ91.5m÷ヘリカルコイル部高さ8.71m	10.505
138	ヘリカルコイル部高さZCOIL(m)		8.71
139	コイル下端~伝熱管折り返し点長さZL3(m)	図から読みとった暫定値	2
140	コイル下端~伝熱管折り返し点高さZH3(m)	〃	2
141	プレナム高さZH4(m)		0
142	径方向ピッチ長さPITCHR(m)		0.05
143	軸方向ピッチ長さPITCHA(m)		0.05
151	内部シュラウド外径DOCORE(m)		1
152	外部シュラウド内径DISHRD(m)	外部シュラウドは存在しないため、径3.4m、肉厚0mmのダミーシュラウドとする。	3.4
153	外部シュラウド外径DOSHRD(m)		3.4
154	シェル内径DISHEL(m)		3.46
155	シェル外径DOSHEL(m)	SG胴肉厚30mmと保温材厚さ500mmをSG内径に加算	4.52

表 C-3(2/2) POPAI-6 入力データ (実証炉Na/SG)

【Na側伝熱相関式】			
187	Na側上昇管コイル部熱伝達式	Hoeの式：円管群に対する直交流	4
195	1次側下降管部熱伝達率指定値(kcal/m ² h ^o C)	(default)	10000
【水・蒸気側伝熱相関式】			
221	水蒸気側コイル部予熱域熱伝達式	森・中山の式	2
233	水蒸気側コイル部沸騰域熱伝達式(核沸騰)	修正Schrock-Grossman	4
239	水蒸気側コイル部液欠乏域熱伝達式(膜沸騰)	核沸騰域と過熱域の熱伝達率をクオリティに応じて比例配分	5
245	水蒸気側コイル部過熱域熱伝達式	森・中山の式	3
251	水蒸気側コイル部ドライアウトクオリティ	(default)	0.75
259	上部非加熱域ガス熱伝達率	(default)	60
266	下部非加熱域ガス熱伝達率		0
303	Boid-Slip Ratioの相関式	Smith Model	2
321	伝熱管熱伝導率計算式	固定値	99
323	伝熱管熱伝導率算出係数T0乗項(kcal/m ² h ^o C)	9C-1Mor鋼の値	23
329	伝熱管内面汚れ(kcal/m ² h ^o C) ⁻¹	50MWSG 解析値(メーカー設計値)	0.0000333
330	伝熱管比重量(kg/m ³)	9C-1Mor鋼の値	7850
351	カバーガス部熱伝導率(kcal/m ² h ^o C)	(default)	60
352	外部シュラウド第1領域熱通過率(kcal/m ² h ^o C)	外部シュラウドは存在しないためダミー値を入力	10e5
353	外部シュラウド第2領域熱通過率(kcal/m ² h ^o C)	外部シュラウドは存在しないためダミー値を入力	10e5
354	外部シュラウド第3領域熱通過率(kcal/m ² h ^o C)	外部シュラウドは存在しないためダミー値を入力	10e5
355	外部シュラウド第1、第2領域境界位置(m)	(default)	2.0
356	外部シュラウド第2、第3領域境界位置(m)	(default)	9.71
358	1次～周囲大気熱通過率(kcal/m ² h ^o C)	(default)	0.3
359	周囲大気温度(°C)	(default)	40

表 C-4 実証炉Na/SGコイリング

層数	コイル径 m	伝熱管長 ¹⁾ m	巻上げ角 deg	伝熱管1本の巻き数 回	伝熱管本数 (計算) 本	(最終設定)	合計	本数×コイル径
1	1	91.5	5.463	28.99301843	6.008343024	6	6	6
2	1.1	86.01	5.812	24.7609245	7.03527851	7	13	7.7
3	1.2	93.7875	5.329	24.77032547	7.032608441	7	20	8.4
4	1.3	89.2125	5.603	21.7395992	8.013027213	8	28	10.4
5	1.4	96.075	5.202	21.75400532	8.007720761	8	36	11.2
6	1.5	91.5	5.463	19.32867895	9.012514536	9	45	13.5
7	1.6	87.84	5.691	17.38904343	10.01780234	10	55	16
8	1.7	93.33	5.355	17.39889937	10.01212757	10	65	17
9	1.8	89.67	5.574	15.78211159	11.03781322	11	76	19.8
10	1.9	94.7025	5.277	15.79836595	11.02645682	11	87	20.9
11	2	91.5	5.463	14.49650921	12.01668605	12	99	24
12	2.1	88.755	5.632	13.38816659	13.01149032	13	112	27.3
13	2.2	92.8725	5.382	13.37811863	13.02126291	13	125	28.6
14	2.3	90.1275	5.546	12.41483289	14.03160248	14	139	32.2
15	2.4	93.7875	5.329	12.38516274	14.06521688	14	153	33.6
16	2.5	91.5	5.463	11.59720737	15.02085756	15	168	37.5
17	2.6	89.2125	5.603	10.8697996	16.02605443	16	184	41.6
18	2.7	92.8725	5.382	10.90068926	15.98064085	16	200	43.2
19	2.8	90.585	5.518	10.25015123	16.99487121	17	217	47.6
20	2.9	93.7875	5.329	10.24978985	16.9954704	17	234	49.3
21	3	91.5	5.463	9.664339475	18.02502907	18	252	54
22	3.1	89.67	5.574	9.16380673	19.00956722	19	271	58.9
23	3.2	91.9575	5.435	9.106033074	19.13017431	19	290	60.8
24	3.3	90.585	5.518	8.697098011	20.02966964	20	310	66
25	3.4	93.33	5.355	8.699449685	20.02425513	20	330	68
								2.434848485

注1) 平均91.5mをもとに、図1から平均に対する比を讀取り

付録D 管束部 Pb-Bi 圧力計算式

Pb-Bi 圧力損失は、

$$\Delta P_f = 4 \cdot CD \cdot N_t \times \frac{1}{2} \rho V^2$$

により計算する。抵抗係数 CD 値は次式を用いる。

(機械工学便覧 A4 流体力学 p. A5-105)

$$CD = \left[0.044 + \frac{0.08(SL/do)}{\left(\frac{ST}{do} - 1\right)^{\{0.43 + (1.13do/SL)\}}} \right] \cdot Re^{-0.15}$$

レイノルズ数 Re は

$$V = Gn / \rho / An$$

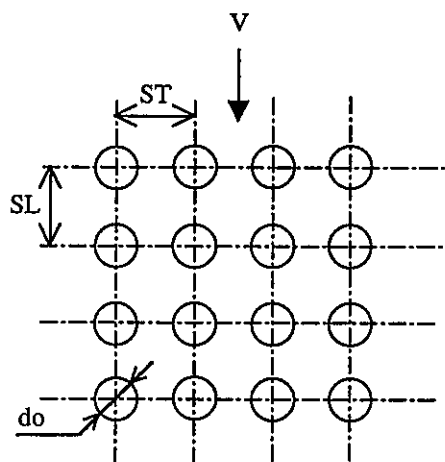
$$Re = \frac{do \cdot V}{\nu}$$

流路断面積 An は

$$An = \frac{\pi}{4} (D1^2 - D2^2) - \sum_{i=1}^n \pi \cdot Dp_i \cdot do$$

円管群の列数 Nt は

$$N_t = \Delta Z / SL$$



CD: 抵抗係数 (-)

Nt: 1セル当りの円管群の
列数 (-) ΔP : 圧力損失 (kg/m²) ρ : 流体密度 (kg/m³)

V: 流速 (m/s)

SL: 軸方向ピッチ (m)

ST: 径方向ピッチ (m)

do: 伝熱管外径 (m)

RE: レイノルズ数 (-)

Gn: 流量 (kg/s)

An: 流路断面積 (m²) ν : 動粘性係数 (m²/s)

D1: 外筒内径 (m)

D2: 内筒内径 (m)

n: 伝熱管層数 (-)

Dp: 伝熱管巻き径 (m)

 Δz : セル軸方向長さ (m)

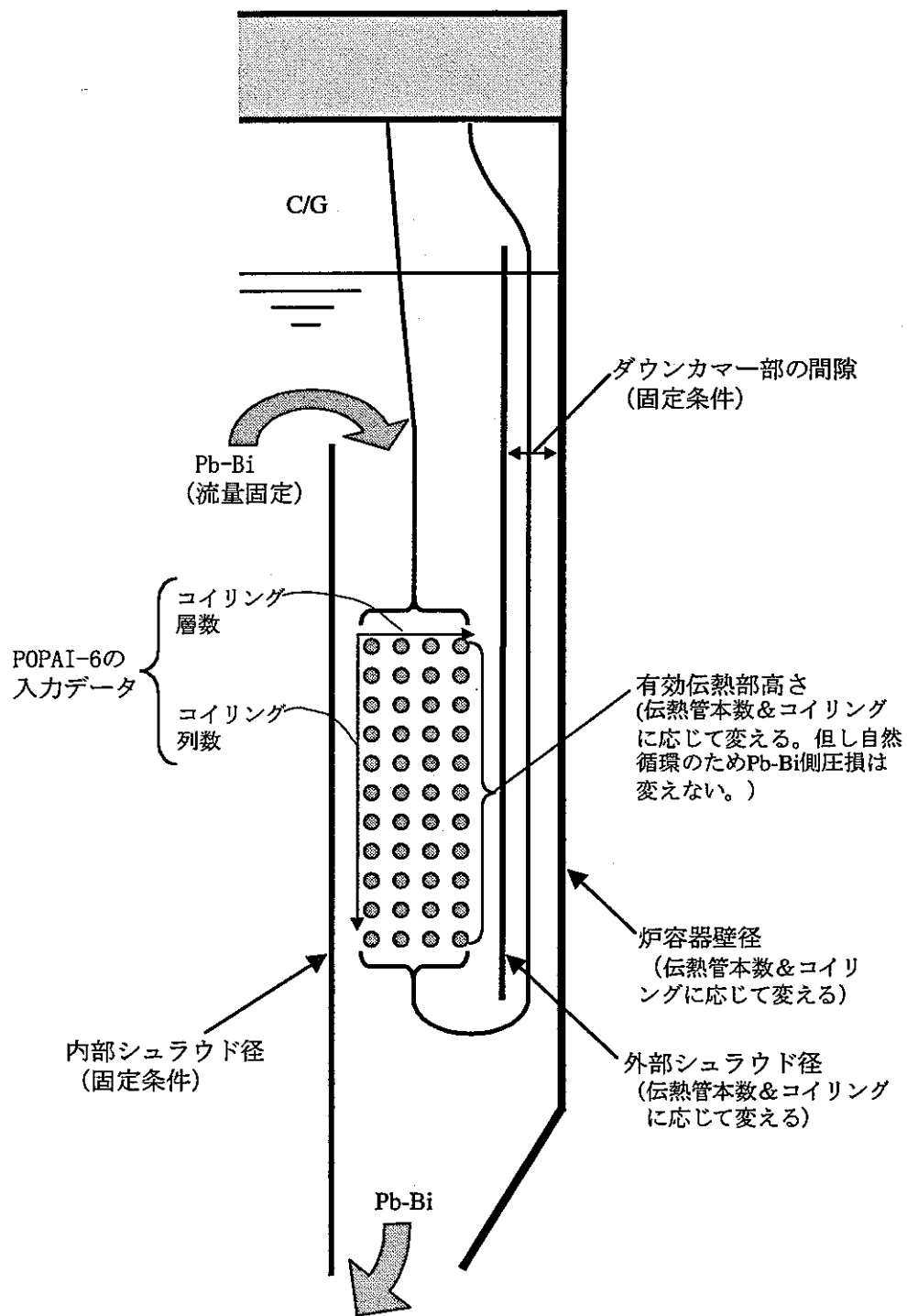


図 D-1 パラメータ解析のための計算モデル

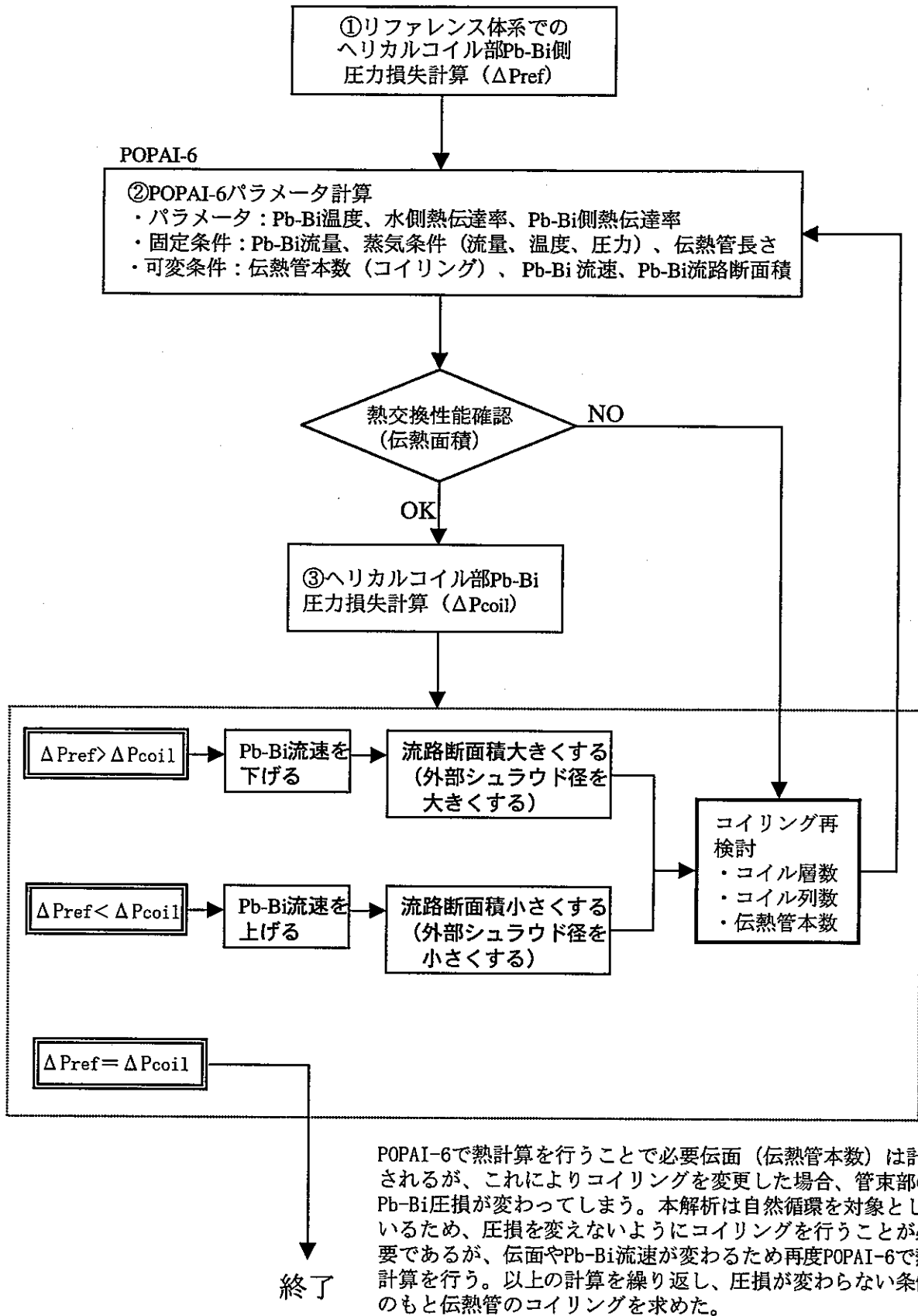


図 D-2 管束部Pb-Bi圧力損失計算フロー

付録 E 伝熱管熱抵抗の定義 (Fig. 3.2-2 参照)

液体金属から伝熱管を介して水・蒸気への伝熱過程は、1) 伝熱管外面での熱伝達、2) 伝熱管内部の熱伝導、3) 伝熱管内面汚れの熱伝達及び 4) 伝熱管内面での熱伝達の 4 つに分類される。これらの伝熱量をそれぞれ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 とすると、

$$Q_1 = h_1 \pi d_1 (\theta_{f1} - \theta_{w1}) \ell$$

$$Q_2 = \frac{2\pi\lambda(\theta_{w1} - \theta_{w2})\ell}{\ln(d_1/d_2)}$$

$$Q_3 = \frac{1}{\alpha} \pi d_2 (\theta_{w2} - \theta_{w2}') \ell$$

$$Q_4 = h_2 \pi d_2 (\theta_{w2}' - \theta_{f2}) \ell$$

$Q_1 \sim Q_4$: 伝熱量 (kcal/hr)

h_1 : 伝熱管外面 (液体金属側) 熱伝達率 (kcal/m²hr°C)

h_2 : 伝熱管内面 (水・蒸気側) 熱伝達率 (kcal/m²hr°C)

λ : 伝熱管材料熱伝導率 (kcal/mhr°C)

α : 伝熱管内面汚れ係数 (m²hr°C/kcal)

ℓ : 伝熱管長さ (m)

定常状態では伝熱量 $Q_1 \sim Q_4$ (Q) は等しい。したがって、

$$\theta_{f1} - \theta_{f2} = \frac{Q}{\pi \ell} \left[\frac{1}{h_1 d_1} + \frac{\ln(d_1/d_2)}{2\lambda} + \frac{\alpha}{d_2} + \frac{1}{h_2 d_2} \right]$$

また、円管 (伝熱管) の熱抵抗 R_{th} 定義式

$$\theta_{f1} - \theta_{f2} = \frac{Q}{\ell} \cdot R_{th}$$

に基づくと、それぞれの熱抵抗は、

$$R_1 = \frac{1}{\pi h_1 d_1}$$

$$R_2 = \frac{\ln(d_1/d_2)}{2\pi\lambda}$$

$$R_3 = \frac{\alpha}{\pi d_2}$$

$$R_4 = \frac{1}{\pi h_2 d_2}$$

R_1 : 伝熱管外面での熱抵抗 (mhr°C/kcal)

R_2 : 伝熱管での熱抵抗 (")

R_3 : 伝熱管内面の汚れの熱抵抗 (")

R_4 : 伝熱管内面での熱抵抗 (")

で表される。