

# 大型FBR設計研究(平成3年度上期)

高温待機状態の成立性に関する系統降温特性調査結果

1991年9月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1 9 9 1 年 9 月

## 大型FBR設計研究（平成3年度上期） 高温待機状態の成立性に関する系統降温特性調査結果

大滝 明\*

### 要 旨

電気出力60万kW級のFBR設計研究で計画されている高温待機状態は、冷却系の熱過渡を緩和し、且つプラントの再起動を容易にする目的で、トリップ発生から約48時間にわたって冷却材温度を300°C程度で維持することを達成目標にしている。

この高温待機状態の課題を摘出するため、平成2年度設計条件に基づく本プラントの放熱量や構造材重量、冷却材重量を調査し、さらに各調査結果を反映したSuper-COPDの入力データを用いてナトリウム系の降温特性解析を実施した。

同時に、高温待機状態の達成に必要な対策を案出した。

本報告書は、高温待機状態の成立性評価方法に関する検討結果や一連の調査結果、系統降温特性等について報告するものであり、以下に要約を示す。

- (1) 本プラントの温度応答は「もんじゅ」とほぼ同様の挙動を示す。その原因として「もんじゅ」に準じた安全保護系と系統運用を適用したことが考えられる。
- (2) また、「もんじゅ」と同様にA/Cが本プラントで最大の放熱源となる。
- (3) 系統全体の放熱量は定格時で約3.2MWt、崩壊熱除去運転末期（入口ダンパ「全開」入口ペーンおよび出口ダンパ「制御下限状態」）で系統温度が300°Cの時には約3.3MWtと推定される。
- (4) 現状で原子炉容器入口温度が300°Cまで低下する時間は約14時間であり、この時点の降温率は約3.5°C/hrである。
- (5) 定格流量で運転する循環ポンプの総入熱量は8.1MWt程度（1次系：約6MWt、2次系：約2.1MWt）と推定されるため、系統全体の降温抑制に充分適用可能である。また、崩壊熱を含めた全入熱量と系統放熱量がバランスする流量でポンプを運転することにより温度制御も可能と考える。

以上の結果を踏まえ、今後は高温保持時間の延長や急速な温度応答の緩和を目指したプラント運用方法を具体化するとともに、評価手法の整備を行う計画である。

---

\* 大洗工学センター、機器構造開発部、機器システム開発室

September, 1991

Design Study on Large Scale Fast Breeder Reactor Plant  
(The First Half of the 1991)

Research Results of Thermal Characteristics for Cooling System  
In Regard to Feasibility of A Hot Standby

Akira Ohtaki

Abstract

A Hot Standby examined through the design study of 600 MW<sub>e</sub> class FBR aims at maintaining the coolant temperature at about 300 °C for 48 hours or more after breaking out a trip, in order to relax the thermal transient on Cooling Systems and to make restarting the plants easier.

To pick up problems of Hot Standby, the heat loss, the weight of structure and coolant on this plant are calculated based on the design in 1990, and the thermal characteristic of the heat transport systems are analysed with Super-COPD using above input data.

And the conditions needed to Hot Standby are clarified.

In this report, research related to an evaluation method of feasibility and so on are obtained as follows :

- (1) This plant thermal response behaves similarly with MONJU.
- (2) The Air Cooler is the maximum source of the heat loss so as in MONJU.
- (3) The heat loss in the whole system are estimated as 3.2MW in rated output, and 3.3 MW when system temperature is 300°C after the Decay Heat Removal Operation.
- (4) The duration heat sink time when the inlet temperature of reactor vessel drops to 300°C is about 14 hours and the droprate is about 3.5°C/h.
- (5) The whole input heat value of the circulation pumps at the rating flow is estimated as 8.1 MW and therefore affects to heat sink.  
Balancing heat gain including the decay heat with system heat loss by manipulating the pumps enables to control the temperature.

After this, the plant operating method should be defined and the estimation method will be provided.

大型FBR設計研究（平成3年度上期）  
— 高温待機状態の成立性に関する系統降温特性調査結果 —

目 次

第1章 緒 言 .....	1
第2章 高温待機状態の成立性評価方法 .....	3
2.1 調査・検討項目と概要 .....	3
2.2 成立性評価手順 .....	4
第3章 系統放熱量の調査 .....	5
3.1 放熱調査の概要 .....	5
3.2 配管放熱の調査 .....	7
3.2.1 保溫表面からの放熱量算定方法 .....	7
3.2.2 配管支持構造からの放熱量算定方法 .....	10
3.2.3 配管放熱量の計算結果 .....	10
3.3 機器放熱の調査 .....	11
3.3.1 原子炉容器廻りの放熱量調査結果 .....	13
3.3.2 ポンプ・IHX・SGの放熱量調査結果 .....	14
3.3.3 空気冷却器の放熱量調査結果 .....	15
3.4 系統放熱量の調査結果 .....	21
第4章 系統降温特性検討解析 .....	45
4.1 調査・検討項目 .....	45
4.2 解析条件と環境整備の概要 .....	45
4.3 計算結果 .....	47
4.4 計算結果の考察 .....	49
第5章 結 言 .....	63
謝 辞 .....	65
参考文献 .....	66

Appendix-1 「系統熱過渡評価に使用する保溫施工要領」	67
Appendix-2 「長時間系統降温特性解析用機器重量とナトリウム重量の暫定」	71

## 図表リスト

## 〔 表 〕

表3. 1	保温施工要領想定条件	6
表3. 2	放熱評価用配管支持構造の暫定仕様	33
表3. 3	配管放熱計算結果（その 1）	34
表3. 4	配管放熱計算結果（その 2）	35
表3. 5	配管放熱計算結果（その 3）	36
表3. 6	配管支持構造の放熱量	37
表3. 7	原子炉容器廻りの放熱量計算結果	38
表3. 8	主要機器の放熱量計算結果（その 1）	39
表3. 9	主要機器の放熱量計算結果（その 2）	40
表3. 10	蒸気発生器における突起物の放熱量	41
表3. 11	A C S 待機時放熱量試計算結果	42
表3. 12	大型炉用空気冷却器の放熱量計算結果	43
表3. 13	大型炉と「もんじゅ」の系統放熱量	44
表4. 1	Super-COPDの整備概要	53
表4. 2	炉心崩壊熱テーブル	54
表4. 3	放熱計算データ作成用ワークシート	55

## 〔 図 〕

図2. 1	高温待機状態の成立性評価手順	4
図3. 1	配管表面放熱量の計算手順	24
図3. 2	配管支持構造の放熱量評価対象部位（もんじゅ 1次系主配管32 <sup>ø</sup> ）	25
図3. 3	主要機器の形状と温度区分（その 1）	26
図3. 4	主要機器の形状と温度区分（その 2）	27
図3. 5	蒸気発生器の突起物暫定形状（放熱計算用）	28
図3. 6	空気冷却器放熱評価モデル	29
図3. 7	空気冷却器仕様想定条件	30
図3. 8	空気冷却器放熱計算フローチャート（待機時）	31
図3. 9	もんじゅ 3 2 5 °C保持時間に係わるA／C放熱解析の再現計算	32
図4. 1	放熱計算対象機器・配管	56
図4. 2	A／C出口ナトリウム温度制御系モデル図（A／C起動後）	57
図4. 3	A／C制御モード変更シーケンス論理回路	58

図4.4 流量応答特性（原子炉手動トリップ解析）	59
図4.5 冷却系各部温度応答特性（原子炉手動トリップ解析）	60
図4.6 ホットレグ温度応答特性（原子炉手動トリップ解析）	61
図4.7 コールドレグ温度応答特性（原子炉手動トリップ解析）	62

## 第 1 章 緒 言

今日、世界中の原子力発電プラントの主流であるLWRは、わが国においても年間総発電量の約30%を安定供給している。しかしながらLWRの建設数は、原油価格が比較的安定していることや、経済成長の鈍化、建設用地難などによって年々減少の一途を辿っている。この様な情勢のさなかで核燃料サイクル確立の一環として開発を進めているFBRは、将来の長期的なエネルギー戦略の中軸を担うものと期待されているが、現時点では開発コストや信頼性の面で踏破すべき課題が残っていることから商業プラントへの積極的な導入には理解が薄い。

たしかに建設コストの低減はFBRがもつ課題の一つであり旧来からその低減に取り組んでいるが、長期的に視れば発電効率や稼働率の改善により補えるものと考える。とくに稼働率の向上は、プラント寿命期間中における総発電量の増大によって電力単価の引き下げといった経済効果をもたらすとともに、信頼性や運転性を包括したバロメーターとしてとらえた場合においても社会的に大きな意義をもつ。

LWRにおける稼働率向上を目指した取り組みは、厳密な品質保証管理に基づく設計・製作や定期保守点検の実施に加え、

- ① コンピュータによる異常診断の導入
- ② 自動運転・制御の導入
- ③ マン・マシン・インターフェースの改善

などに象徴されるよう、異常時の運転性をコンピュータ・ソフトウェアで改善し、人為的な異常の拡大や運転停止を防止する方向で進められている。

前記の各技術は将来的にはLWRとFBRの共通技術として実用化に至るものと考えるが、これとは別にFBR独自の改善策を見い出すことが、LWRと競合しうる経済性ならびに信頼性を獲得するうえで重要といえよう。

それではFBR実用化にむけ稼働率向上を図るために改善点について考えると、第一に「プラント起動から発電運転までの所要時間の短縮=早期起動性の向上」があげられる。具体的にFBRとLWRのプラント起動準備開始から発電機併列運転まで、制御棒引抜き開始から発電機併列運転までの各所要時間を比較すると次のように大幅な差が見られる。

- |                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| (1) プラント起動準備         | 備開始～発電機併列運転          |
| ① FBR原型炉「もんじゅ」       | 約54時間 <sup>(1)</sup> |
| ② PWR                | 約42時間 <sup>(2)</sup> |
| ③ BWR                | 約17時間 <sup>(3)</sup> |
| (2) 制御棒引抜き開始～発電機併列運転 |                      |
| ① FBR原型炉「もんじゅ」       | 約26時間 <sup>(1)</sup> |

- |       |                      |
|-------|----------------------|
| ② PWR | 約12時間 <sup>(2)</sup> |
| ③ BWR | 約11時間 <sup>(3)</sup> |

この所要時間差の原因を定性的に整理すると、a) FBRでは停止時と運転時の温度差が大きいうえに、熱応力の発生・残留を防止するため昇温速度が $15^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ 以下に制限されている、b) 原子炉冷却系から水・蒸気系までの主冷却系統が幾重にも構成されており、起動時には機器操作および系統切換操作が多いことなどが挙げられる。

1990年度から技術開発部プラント工学室が中心となり大洗工学センターで全所的に取り組んでいる60万kW。規模のFBR設計研究<sup>(3)</sup>では、実用化を見通した信頼性・経済性・運転性を備えたプラント概念の創出にむけて、原型炉までの従来技術をベースに、その後の改良技術やFBRの本質的課題に対応する新概念を導入した検討が行われている。同設計研究においても先に述べた「プラント早期起動性の向上」は重要な実現目標の一つであり、とくに一時的な運転停止後の再起動を容易にする固有機能は高い稼働率が望まれる発電プラントにとって必要不可欠である。その実現にあたってはFBRの起動性を損ねている各原因の抑制が鍵を握り、本設計研究では一時的な運転停止後の再起動に限定した対応策として、原子炉停止から48時間程度に渡って系統温度を約 $300^{\circ}\text{C}$ 以上の高温状態（以後、高温待機状態と称す）に保つことにより再起動時の昇温幅および操作量の軽減を目指している。

一方、高温待機状態を実現するうえでの課題は高温保持時間にある。「もんじゅ」長時間降温特性解析結果<sup>(4)</sup>の一例では、冷却材温度がACS制御の下限温度 $325^{\circ}\text{C}$ まで低下する時間は原子炉停止から約4~6時間後であり、冷却材温度はACS停止後も配管や機器からの放熱によって約 $4, 5^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ の降温速度で低下し続け、約10時間後に本設計研究の目標温度 $300^{\circ}\text{C}$ に達している。本例から推察できるように高温保持時間を目標時間に近づけるためには、崩壊熱による炉心部の温度上昇に配慮しつつも冷却材を過冷却させない崩壊熱除去方法、系統放熱の抑制策などを見い出す必要がある。

本報告書は、高温待機状態の詳細検討に一石を投じる資料として、系統降温特性の調査結果、高温保持に係わる最有力因子、実現に向けての対策案について報告するものである。

なお、本設計研究は、機器構造開発部機器システム開発室が1990年度に検討した冷却系設備・機器の暫定仕様<sup>(5)</sup>に基づいて実施した。

## 第2章 高温待機状態の成立性評価方法

前章ではFBRの課題、FBR大型炉設計研究の目的、同設計研究における高温待機状態の目的と課題について述べた。ここでは、高温待機状態の成立性評価に係わる調査・検討項目と各概要、成立性評価手順について述べる。

### 2.1 調査・検討項目と概要

高温待機状態の課題は冷却系の高温保持時間にあることはすでに述べた。したがって成立性評価では、高温保持間に的をしぼって冷却材温度の経時変化を調査し、その調査結果および調査結果に基づいた助長策の効果を包括して実現性の可否を判断する。

以下に高温待機状態の成立性評価に係わる調査・検討項目と各概要を示す。

#### (1) 系統放熱量の調査

配管や機器からの放熱は、IRACS停止後のプラントでは最大のヒートシンクとなるため、系統降温特性を解析するうえで定量化が必要な計算条件である。放熱量の調査では、配管・機器の各放熱計算に該当する評価手法を「もんじゅ」設計評価手法や伝熱工学上的一般的評価方法などから見い出し、平成2年度設計条件に基づくプラント冷却システムに適用して定格温度および系統温度300°Cでの熱通過率や放熱量を算出する。

#### (2) 系統降温特性の調査

前記の放熱量調査結果に基づいてプラント動特性解析コードSuper-COPDの入力データを一部改訂し、同コードを用いて原子炉入口冷却材温度が約300°Cに到達するまでの冷却系の降温特性を計算する。Super-COPDは観測するプロセス量あるいは特性値の経時変化を計算結果として出力するため、同計算結果から高温保持時間を読み取る。

#### (3) 高温保持に係わる影響因子の調査

前記(1)および(2)の各調査結果から高温保持時間に与える影響が大きい要因を特定し、同要因と高温保持時間との定量的関係をパラメータ解析により明らかにする。

#### (4) 助長策の検討・評価

前記(3)の調査結果を踏まえ、現設計条件下での設備運用方法の改善、設備への高温保持助長機能の附加などソフトとハードの両面から対策を立案し、その有効性について評価する。

## 2.2 成立性評価手順

高温待機状態の成立性評価は、実現性を判断するうえでの課題と調査対象を次の様に分けて段階的に取り組むものとする。

### (1) 第1ステップ

- ・課題：高温保持時間（関連する調査事項は前記2.1項に既述）

- ・対象範囲：原子炉からSGまでのナトリウム系

### (2) 第2ステップ

- ・課題：高温保持時間を短縮させないSG運用方法の探求

- ・対象範囲：プラント全系（水・蒸気系はSG給水止弁からタービン・バイパスまで）

成立性評価のアプローチを図2.1に示す。

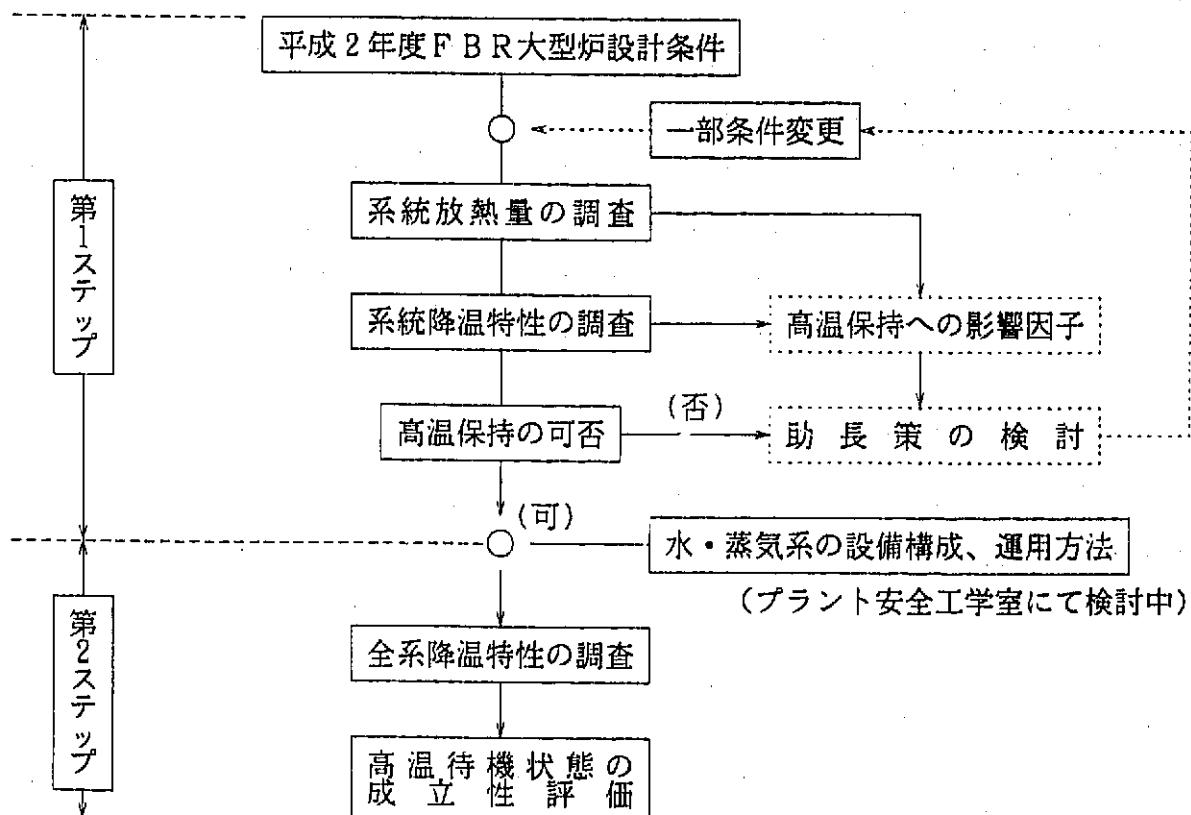


図2.1 高温待機状態の成立性評価手順

### 第3章 系統放熱量の調査

#### 3.1 放熱調査の概要

これまで既に述べたように「もんじゅ」長時間降温特性解析では、プラント・トリップ後の冷却材温度はA C S停止後も配管や機器からの放熱によって約4, 5°C/h rの降温速度で低下し続け、原子炉停止から約10時間後にF B R大型炉設計研究で実現しようとしている高温待機状態の下限温度300°Cに到達している。

同設計研究では、建設コストの低減を図るために配管や機器のコンパクト化を指向していることから、単位熱出力当たりの表面積は「もんじゅ」を下回り、且つ定格出力および崩壊熱に対する放熱量の割合も「もんじゅ」に比べて小さいと考える。しかし、配管や機器の放熱はI R A C S停止後のプラントにおいて最大のヒートシンクとなるため、高温保持時間ならびに高温待機状態の実現性に深く係わることに相違ない。つまり、本設計研究プラントの放熱を定量的に把握することが、高温待機状態に関する検討のスタートとなる。放熱量の調査では、配管・機器の各放熱計算に該当する評価手法を「もんじゅ」設計評価手法や伝熱工学上的一般的評価方法などから見いだし、平成2年度設計条件に基づいたプラント冷却システムに適用して定格温度および系統温度300°Cでの放熱量や熱通過率などを算出する。

なお、放熱計算対象機器と計算条件は次の通り。

##### (1) 放熱計算対象機器

###### ① 配管

- a. 1次系ホットレグ配管 6 m
- b. 1次系コールドレグ(X/L+C/L) 配管 3 4 m
- c. 2次系ホットレグ配管
  - I H X～I R A C S 分岐点 1 0 m
  - I R A C S 分岐点～S G 1 5 m
- d. 2次系コールドレグ配管
  - S G～I R A C S 合流点 1 7 m
  - I R A C S 合流点～I H X 2 0 m
- e. I R A C S
  - ホットレグ配管 3 3 m
  - コールドレグ配管 3 1 m

###### ② 機器

- a. 原子炉容器
- b. 1次系主循環ポンプ

- c. I H X
- d. S G
- e. 2次系主循環ポンプ
- f. I R A C S 用空気冷却器

## (2) 計算条件

- ① 冷却材温度 定格運転温度／300°C
- ② 露露気温度 20°C<sup>\*1</sup> (但し、空気冷却器は除く)
- ③ 保温施工要領 プラント工学室の指示<sup>\*2</sup>により以下の条件を適用。

表3.1 保温施工要領想定条件

	ホットレグ部	コールドレグ部
アニュラスギャップ	15.0mm	15.0mm
内装板 内径 厚さ	材料 SUS304 機器外径+30.0mm 0.3mm	SUS304 機器外径+30.0mm 0.3mm
保温材 内径 厚さ	材料 グラスウール <sup>*3</sup> 比重 80Kg/m <sup>3</sup> 機器外径+30.6mm 184.4mm	グラスウール <sup>*3</sup> 比重 80Kg/m <sup>3</sup> 機器外径+30.6mm 134.4mm
外装板 内径 厚さ	材料 SUS304 機器外径+399.4mm 0.3mm	SUS304 機器外径+299.4mm 0.3mm

\* 1 : プラント工学室からの検討依頼条件

\* 2 : Appendix-1 「系統熱過渡評価に使用する保温施工要領」(プラント工学室作成)

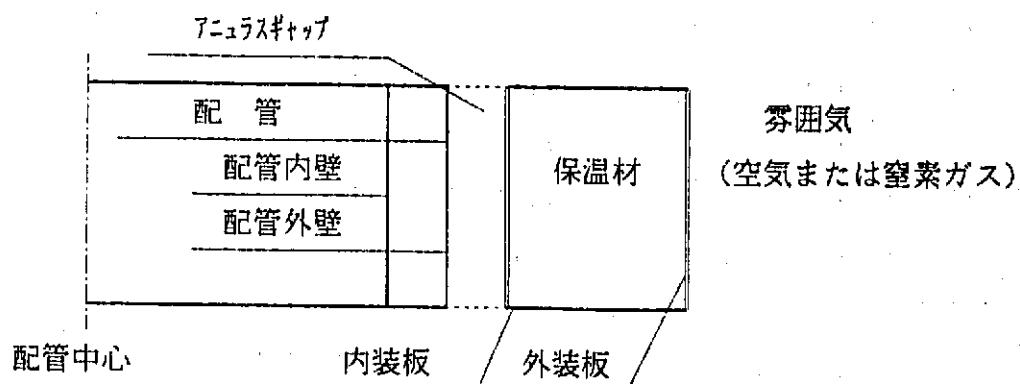
\* 3 : 旭石綿社製ロックウールを想定、物性値は伝熱工学資料第4版より出典

### 3.2 配管放熱量の調査

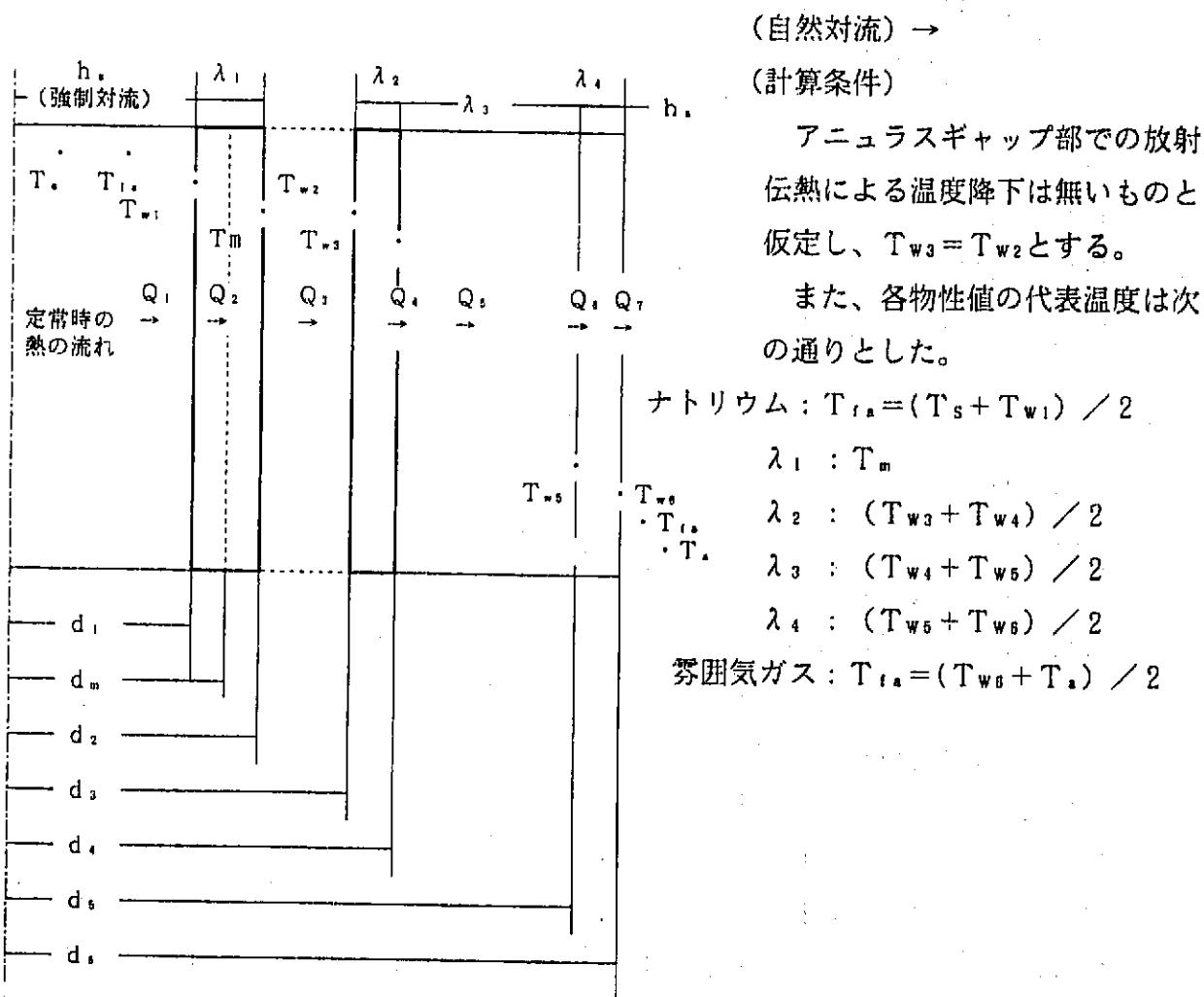
#### 3.2.1 保温表面からの放熱量算定方法

ここでは、配管を覆う保温表面からの放熱量の計算方法、計算結果にて述べる。

##### (1) 保温構造の概略



##### (2) 計算モデル



## (3) ナトリウム～霧囲気ガス間における総括熱通過率 (K) の導出

## ①通過熱量

各部を通過する熱量 ( $Q_1 \sim Q_7$ ) は次のように表すことができる。

$$Q_1 = \pi \cdot d_1 \cdot h_s (T_s - T_{w1}) L \quad (3.1)$$

$$Q_2 = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_1 (T_{w1} - T_m) L / \ln (d_m / d_1) \quad (3.2)$$

$$Q_3 = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_1 (T_m - T_{w2}) L / \ln (d_2 / d_m) \quad (3.3)$$

$$Q_4 = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_2 (T_{w3} - T_{w4}) L / \ln (d_4 / d_3) \quad (3.4)$$

$$Q_5 = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_3 (T_{w4} - T_{w5}) L / \ln (d_5 / d_4) \quad (3.5)$$

$$Q_6 = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_4 (T_{w5} - T_{w6}) L / \ln (d_6 / d_5) \quad (3.6)$$

$$Q_7 = \pi \cdot d_6 \cdot h_s (T_{w6} - T_s) L \quad (3.7)$$

ここで、

$h_s$  : ナトリウム側管内強制対流熱伝達率 (Seban-Shimazakiの式)

$$\begin{aligned} &= Nu \cdot \lambda_{rs} / d_1 \\ &= [5.0 + 0.025 (Re \cdot Pr)^{0.8}] \lambda_{rs} / d_1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

L : 放熱部長さ

$h_s$  : 霧囲気ガス中での自然対流 (水平円柱) 热伝達率<sup>(6)</sup>

$$\begin{aligned} &= Nu \cdot \lambda_{rs} / d_6 \\ &= [0.13 (Gr \cdot Pr)^{1/3}] \lambda_{rs} / d_6 \\ &\quad (\text{ここで, } 10^6 < Gr \cdot Pr < 10^{13}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

## ②総括熱通過率 (K) の導出

静的な状態では各部を通過する熱量は等しいため

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_5 = Q_6 = Q_7 \quad (3.10)$$

とし、

さらに (3.1) 式の左辺を温度で整理すると

$$T_s - T_{w1} = Q / (h_s \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L) \quad (3.11)$$

同様に (3.2) 式は

$$T_{w1} - T_m = Q / (2 \pi \lambda_1 L) \cdot \ln (d_m / d_1) \quad (3.12)$$

また、高温側の伝熱部温度は

$$T_{w1} = Q / (2 \pi \lambda_1 L) \cdot \ln (d_m / d_1) + T_m \quad (3.13)$$

と表すことができる。

同様に  $T_m$ 、 $T_{w3}$ 、 $T_{w4}$ 、 $T_{w5}$ 、 $T_{w6}$  は

$$T_m = Q / (2 \pi \lambda_1 L) \cdot \ln (d_2 / d_m) + T_{w3} \quad (3.14)$$

$$T_{w3} = Q / (2 \pi \lambda_2 L) \cdot \ln (d_4 / d_3) + T_{w4} \quad (3.15)$$

$$T_{w4} = Q / (2 \pi \lambda_3 L) \cdot \ln (d_5 / d_4) + T_{w5} \quad (3.16)$$

$$T_{w5} = Q / (2 \pi \lambda_4 L) + \ln(d_8 / d_5) + T_{ws} \quad (3.17)$$

$$T_{w6} = Q / (h_s + \pi \cdot d_8 \cdot L) + T_s \quad (3.18)$$

となる。

この(3.13)式~(3.18)式を(3.11)式の左辺に適用して整理すると

$$\begin{aligned} T_s - T_a &= Q / (h_s + \pi \cdot d_1 \cdot L) \\ &+ Q / (2 \pi \lambda_1 L) \cdot \ln(d_m / d_1) + Q / (2 \pi \lambda_1 L) \cdot \ln(d_2 / d_m) \\ &+ Q / (2 \pi \lambda_2 L) \cdot \ln(d_4 / d_3) + Q / (2 \pi \lambda_3 L) \cdot \ln(d_5 / d_4) \\ &+ Q / (2 \pi \lambda_4 L) \cdot \ln(d_6 / d_5) + Q / (h_s + \pi \cdot d_6 \cdot L). \end{aligned} \quad (3.19)$$

と表すことができる。

一方、単位直従当たりの熱通過率( $K^*$ )は

$$\begin{aligned} K^* &= Q / [(T_s - T_a) \pi L] \\ &= 1 / [1 / (h_s + d_1) + 1 / (2 \lambda_1) \cdot \ln(d_m / d_1) \\ &+ 1 / (2 \lambda_1) \cdot \ln(d_2 / d_m) + 1 / (2 \lambda_2) \cdot \ln(d_4 / d_3) \\ &+ 1 / (2 \lambda_3) \cdot \ln(d_5 / d_4) + 1 / (2 \lambda_4) \cdot \ln(d_6 / d_5) \\ &+ 1 / (h_s + d_6)] \end{aligned} \quad (3.20)$$

配管肉厚中心を基準にする総括熱通過率Kは

$$\begin{aligned} K &= Q / [(T_s - T_a) \pi d_m L] \\ &= 1 / [d_m / (h_s + d_1) + 1 / (2 \lambda_1) \cdot \ln(d_m / d_1) \\ &+ d_m / (2 \lambda_1) \cdot \ln(d_2 / d_m) + d_m / (2 \lambda_2) \cdot \ln(d_4 / d_3) \\ &+ d_m / (2 \lambda_3) \cdot \ln(d_5 / d_4) + d_m / (2 \lambda_4) \cdot \ln(d_6 / d_5) \\ &+ d_m / (h_s + d_6)] \end{aligned} \quad (3.21)$$

となる。

また、Kはナトリウムと配管との熱通過率 $U_1$ 、配管から雰囲気ガス間における熱通過率 $U_2$ に分離でき、 $U_1$ および $U_2$ は以下の通りとなる。

$$1/K = 1/U_1 + 1/U_2 \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} 1/U_1 &= (T_s - T_m) \pi d_m L / Q \\ &= d_m / (h_s + d_1) + d_m / (2 \lambda_1) \cdot \ln(d_m / d_1) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} 1/U_2 &= (T_m - T_a) \pi d_m L / Q \\ &= d_m / (2 \lambda_1) \cdot \ln(d_2 / d_m) + d_m / (2 \lambda_2) \cdot \ln(d_4 / d_3) \\ &+ d_m / (2 \lambda_3) \cdot \ln(d_5 / d_4) + d_m / (2 \lambda_4) \cdot \ln(d_6 / d_5) \\ &+ d_m / (h_s + d_6) \end{aligned} \quad (3.24)$$

## (4) 放熱量および各壁面温度の計算

## ①放熱量

次式により算出する。

$$Q = K (T_s - T_w) \pi d_m L \quad (3.25)$$

## ②壁面温度

$T_{w1} \sim T_{w6}$  の各壁面温度はナトリウム温度を基準に高温側から低温側を順次もとめる。

各壁面温度の算出式は次の通り。

$$T_{w1} = T_s - Q / (h_s \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L) \quad (3.26)$$

$$T_m = T_{w1} - Q / (\lambda_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L) \cdot \ln (d_m / d_1) \quad (3.27)$$

$$T_{w2} = T_m - Q / (\lambda_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L) \cdot \ln (d_2 / d_m) \quad (3.28)$$

$$T_{w3} = T_{w2} \quad (3.29)$$

$$T_{w4} = T_{w3} - Q / (\lambda_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L) \cdot \ln (d_4 / d_3) \quad (3.30)$$

$$T_{w5} = T_{w4} - Q / (\lambda_3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L) \cdot \ln (d_5 / d_4) \quad (3.31)$$

$$T_{w6} = T_{w5} - Q / (\lambda_4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L) \cdot \ln (d_6 / d_5) \quad (3.32)$$

## ③計算実施手順

図3. 1に計算実施手順を示す。

なお、本計算は計算実施手順と同一実行フローを成すプログラム（言語：FORTRAN77）を作成して行った。

## 3.2.2 配管支持構造からの放熱量算定方法

配管支持構造からの放熱量は、「もんじゅ」設計条件（MJ-314「室内放散熱量算定基準」）に準じて計算する。

なお、配管支持構造における突起物（バンドクランプ、サポート用ラグ）の暫定的な形状と寸法は、「もんじゅ」1次系主配管（32<sup>B</sup>）の支持構造をベースに設定した。

図3. 2に「もんじゅ」1次系主配管を例とする配管支持構造の放熱評価対象部位を、表3. 2に大型炉用配管支持構造の暫定仕様を示す。

## 3.2.3 配管放熱量の計算結果

## (1) 保温表面の放熱量

定格温度条件下でナトリウム流量（定格100%流量、ボニーモータ流量）が異なる運転モードでの計算結果を表3. 3と表3. 4に示す。

また、ボニーモータ運転で系統温度が300°Cまで低下した状態を想定した計算結果を表3. 5に示す。

各運転モードでの計算結果の比較から、放熱量および総括熱通過率の大きさは内部流

体の強制対流熱伝達には殆ど影響されず、保温部での熱伝導ならびに外装板と雰囲気ガスとの間に作用する自然対流熱伝達に依存することが判った。端的に言い替えれば、放熱量は放熱部表面温度と雰囲気温度によって定まる。また放熱部の表面温度を決定づける要因として保温材の熱伝導特性と保温施工厚さ、保温施工精度が重要なポイントになる。

本計算では、保温材の材質と施工厚さはプラント工学室の指定条件を採用し、保温施工精度はベーシックな条件として1.0を用いた。しかし、「もんじゅ」の保温施工状況を見ると保温材を配管破損検出用サンプリング管や熱電対、ヒータ端子などが貫通しており、これらの貫通孔によって保温性能が低下するため「もんじゅ」の放熱評価では保温施工形態係数を乗じて放熱量を補正している。

そこで、「もんじゅ」と同様に保温性能の低下を想定した場合の放熱量は、表3.3～表3.5の各放熱量に保温施工形態係数(=2.0)を乗じた値となる。

## (2) 配管支持構造の放熱量

配管支持構造からの放熱量を表3.6に示す。

当初、支持構造の放熱量は計算対象から外していたが、「もんじゅ」配管放熱量の調査を通じて同部の放熱量は無視できないことが判った。とくに大型炉では、配管の大幅な短縮化によって保温表面からの放熱量が軽減されるため、支持構造からの放熱量は配管の全放熱量に対して高い割合を占めることになる。事実、定格時における保温表面と支持構造の各放熱量は次のような割合となった。

配管名	全放熱量	保温表面	支持構造	
1次系主配管	$55.4 \times 10^3$	$32.8 \times 10^3$	$22.6 \times 10^3$	
2次系主配管	$69.1 \times 10^3$	$30.0 \times 10^3$	$39.1 \times 10^3$	単位:kcal/h

## 3.3 機器放熱量の調査

放熱調査の対象機器は形状や温度分布、放熱のプロセスが個々に異なるため、各機器の放熱量を統一した手法で評価することは難しい。

ここでは、空気冷却器以外の各機器で共通とする壁面からの放熱計算方法を紹介し、機器固有の放熱計算方法については、次のような分類のもとに別途各項目で述べるものとする。

- ① 原子炉容器
- ② 主循環ポンプ、IHX、SG
- ③ 空気冷却器

## (1) 機器モデル

放熱の検討範囲は機器表面から保温外装板までの熱伝導、同外装板と雰囲気ガスとの自然対流熱伝達とし、支持構造物や配管ノズルでの熱伝導に伴う放熱は対象外とした。

その結果、主要機器の形状は支持構造物およびノズル等の突起物を除いた円筒形として扱うこととした。

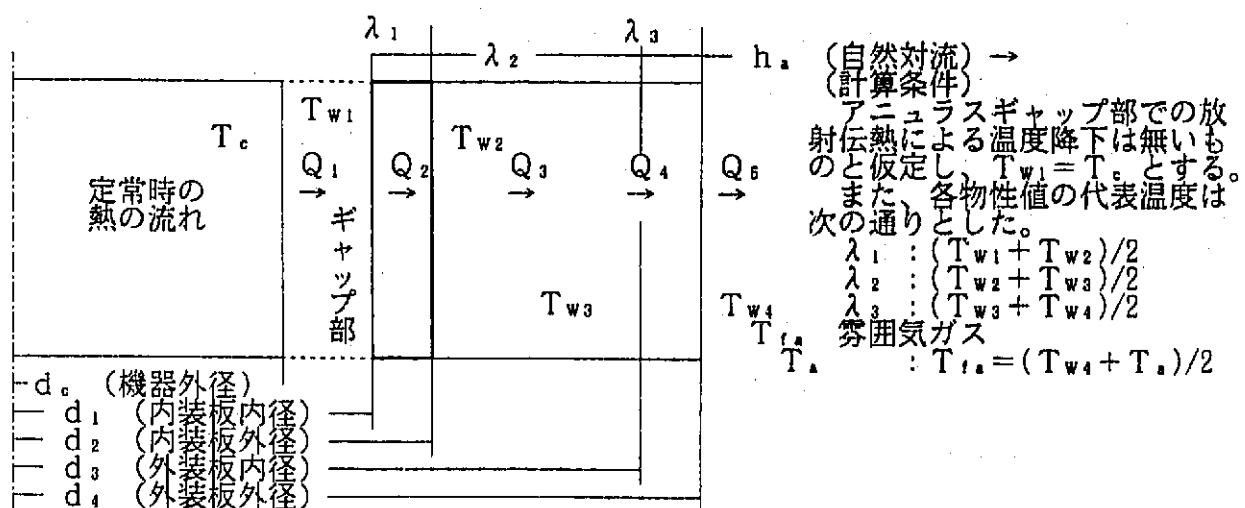
また、ポンプ以外の機器表面温度は内部流体の影響により鉛直方向に温度分布を形成すると考えられるため、原子炉容器・IHX・SGの各表面温度を大きく3領域（ホット、ミドル、コールド）に分割し、それぞれの温度条件下で放熱量を算出するものとした。

図3.3および図3.4に主要機器の形状と温度区分を示す。

一方、IHXとSGの支持構造物をはじめとする突起物からの放熱量については、別途MJ-314「室内放散熱量算定基準」に基づいて計算する。

## (2) 計算モデル

壁面の放熱を対象とする計算モデルを以下に示す。



## (3) 総括熱通過率 (K)

内装板内壁を基準伝面とする総括熱通過率は次式の通り。

$$\begin{aligned} K &= Q / [(T_{w1} - T_e) \pi d_1 L^*] \\ &= d_1 / (2\lambda_1) \cdot \ln(d_2/d_1) + d_1 / (2\lambda_2) \cdot \ln(d_3/d_2) \\ &\quad + d_1 / (2\lambda_3) \cdot \ln(d_4/d_3) + d_1 / (h_a \cdot d_4) \end{aligned} \quad (3.33)$$

ここで

$h_a$  : 雰囲気ガス中の自然対流（垂直円柱）熱伝達率<sup>(7)</sup>

$$\begin{aligned} &= N u \cdot \lambda_{air} / L^* \\ &= [0.0214 (Gr_1 \cdot Pr)^{1/4}] \lambda_{air} / L^* \end{aligned} \quad (3.34)$$

$L^*$  : 鏡部の面積を便宜的に機器高さで捕った代表長さ (m)

$$= h + 0.25 d_c \quad (3.35)$$

## (4) 放熱量および壁面温度の計算方法

## ①放熱量

$$Q = K (T_{w1} - T_w) \pi d_1 L^* \quad [\text{kcal}/\text{hr}] \quad (3.36)$$

## ②壁面温度

内装板内壁温度 ( $T_{w1}$ ) を基準として高温側から低温側に順次もとめる。

$$T_{w2} = T_{w1} - Q / (\lambda_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L^*) \cdot \ln (d_2 / d_1) \quad (3.37)$$

$$T_{w3} = T_{w2} - Q / (\lambda_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L^*) \cdot \ln (d_3 / d_2) \quad (3.38)$$

$$T_{w4} = T_{w3} - Q / (\lambda_3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L^*) \cdot \ln (d_4 / d_3) \quad (3.39)$$

## ③計算実施手順

配管とほぼ同様につき図3.1を参照されたい。

## 3.3.1 原子炉容器廻りの放熱量調査結果

## (1) 計算方法

原子炉容器廻りの主な放熱の内訳は、遮蔽プラグと炉容器壁からの放熱である。

炉容器壁の放熱量は前記3.3項の手法で算出し、強制除熱量を含む遮蔽プラグの総放熱量は、「もんじゅ」の遮蔽プラグ放熱量<sup>(8)</sup>から算出した熱通過率 ( $K'$ )を暫定的な相関条件にしてもとめる。

①熱通過率 ( $K'$ )の暫定

先ず「もんじゅ」体系下での熱通過率 ( $K$ )を「もんじゅ」遮蔽プラグの総放熱量と運転温度、雰囲気温度、固定プラグ外周までの炉上部投影面積から便宜的にもとめ、この  $K$  を大型炉の運転温度で補正して  $K'$  を算出する。この  $K'$  は正規の伝熱計算に基づいたものではなく、「もんじゅ」をベースにした暫定値として適用するものである。

各算出式を以下に示す。

$$K = [(Q_C + Q_R) / 1.3] / [(T_o - T_w) \cdot 0.25 \pi D_M^2] \quad [\text{kcal}/\text{m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}] \quad (3.40)$$

ここで、

$Q_C$  : プラグ冷却系の除熱量(定格時:47000, 325°C時: 0) [kcal/hr]

$Q_R$  : 格納容器内への放熱 (定格時: 1000, 325°C時: 13000) [kcal/hr]

$T_o$  : 運転温度 (529/325) [°C]

$T_w$  : 雰囲気温度 (40/40) [°C]

$D_M$  : 固定プラグ外径 (7.59) [m]

1.3 : 補正係数 [-]

である。

$$K' = K \cdot [(T_0' - T_{\infty}') / (T_0 - T_{\infty})] \quad [\text{kcal}/\text{m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}] \quad (3.41)$$

ここで、

$T_0'$  : 大型炉運転温度 (530/300) [°C]

$T_{\infty}'$  : 大型炉霧囲気温度 (20/20) [°C]

$T_0$  : 「もんじゅ」運転温度 (529/325) [°C]

$T_{\infty}$  : 「もんじゅ」霧囲気温度 (40/40) [°C]

である。

## ②遮蔽プラグ総放熱量の算出方法

遮蔽プラグの総放熱量は次式よりもとめる。

$$Q = K' (T_0' - T_{\infty}') \cdot 0.25 \pi D_{LFBR2} \quad [\text{kcal}/\text{hr}] \quad (3.42)$$

ここで  $D_{LFBR}$  は大型炉の炉上部直径 (= 12 m) である。

## (2) 計算結果

定格温度および 300 °Cにおける炉容器廻りの放熱量を表3.7に示す。

### 3.3.2 ポンプ・IHX・SGの放熱量調査結果

#### (1) 計算方法

各機器の保温表面からの放熱量と壁面温度は (3.33) 式～(3.39) 式を適用して算出する。

また、IHX と SG の支持構造等の放熱量は、次の暫定条件を MJ-314 「室内放散熱量算定基準」に適用して計算する。

#### ① IHX 支持構造 (Y型ピース)

a. 本体支持部形状 断面積 = 0.509 m<sup>2</sup>、周長 = 20.458 m

b. 温度条件 [°C] 運転温度 = 530, 300、霧囲気温度 = 20

#### ② SG の突起物

放熱計算用に暫定した SG の突起物形状を図3.5に示す。

## (2) 計算結果

定格温度における保温表面放熱量を表3.8に、同じく 300 °C 等温運転時の放熱量を表3.9に示す。

支持構造等の突起物からの放熱量 (単位 : kcal/hr) は次の通りであった。

#### ① IHX

a. 530 °C 21.66 × 10<sup>3</sup> (保温施工形態係数による補正值 30.33 × 10<sup>3</sup>)

b. 300 °C 10.79 × 10<sup>3</sup> (保温施工形態係数による補正值 15.11 × 10<sup>3</sup>)

#### ② SG

- a. 定格時  $34.39 \times 10^3$  (保温施工形態係数による補正值 $48.14 \times 10^3$ )
- b.  $300^{\circ}\text{C}$   $25.83 \times 10^3$  (保温施工形態係数による補正值 $36.17 \times 10^3$ )

なお、SGにおける突起物の放熱量の内訳を表3.10に示す。

### 3.3.3 空気冷却器の放熱量調査結果

#### (1) 調査方針

空気冷却器の放熱調査では、50MWSG試験施設で実施した「もんじゅ」補助冷却システム実証試験(9)の成果から、待機時の伝熱特性に係わる実験式や評価手法を本設計研究プラントの空気冷却器(以後、A/Cと略す)に適用し、IRACS待機時およびIRACS停止後の自然通風量および放熱量等を算出する。また、両施設におけるA/Cの除熱容量あるいは構造・寸法の隔たりを補うために「もんじゅ」ACSの放熱評価方法を調査し、その結果も計算条件に取り入れるものとする。

#### (2) 計算方法

##### ①評価モデル

IRACS待機時およびIRACS停止後のA/C内部の熱は、自然通風による機外への漏洩、ケーシングやダクトでの表面放熱によって大気に移動する。

このようにA/Cを介して移動する熱の内訳、伝熱量やドラフト力を算出するための代表温度等を図3.6に示す。また、「もんじゅ」A/Cの設計仕様を基に暫定した大型炉用A/Cの外形図を図3.7に示す。

##### ②自然通風量の計算方法

自然通風時の風量は、A/C全体の温度分布で定まるドラフト力と空気側圧力損失とのバランスよりもとめる。

なお、出入口ダクトおよびA/C本体の摩擦抵抗は、ダンバやベーンの抵抗に比べ極めて小さいので計算対象から除くものとする。ドラフト力と通風量の各算出式は次の通り。

##### a. ドラフト力 [F]

$$F = \sum (\rho_0 - \rho_i) \cdot \Delta H_i \quad [\text{kg}/\text{m}^2] \quad (3.43)$$

ここで、

$\rho_0$  : 大気温度での比重  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$\rho_i$  : A/C内部各位置での比重  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$\Delta H_i$  : 各部の高さ  $[\text{m}]$

である。

b. 通風量 [ $W_A$  ]

$$W_A = (F \cdot 2 g / C)^{1/2} \quad [\text{kg/sec}] \quad (3.44)$$

ここで、  $C = \sum_{i=1}^3 K_i / (\rho_i \cdot A_i^2)$

$F$  : ドラフト力  $[\text{kg/m}^2]$

$K_i$  : ダンパ、ベーンの抵抗係数  $[ - ]$

$A_i$  : 流路断面積  $[\text{m}^2]$

$i$  : 1 = 入口ベーン、 2 = 入口ダンパ、 3 = 出口ダンパ

である。

## ③放熱量および温度分布の計算方法

50 MWS G 試験施設の ACS は、試験データを「もんじゅ」ACS の設計評価に直接利用するため「もんじゅ」と同一仕様の伝熱管形状を採用し、1/5 の伝熱管本数で熱容量を1/5にスケールダウンしたモックアップ装置である。同装置の構造が「もんじゅ」と唯一異なる点は出口ダクト部の保温施工にある。「もんじゅ」ではA/C本体からスタック出口部までホットレグ相当の保温が施されているが、同装置では出口ダンパからスタック出口までの区間は保温が施工されていない。この保温施工の相違は待機時における表面放熱量と漏洩空気による放熱との割合を左右するとともに、ドラフト力さらには全放熱量の大きさに影響を及ぼすものと考える。大型炉用A/Cでは、高温待機状態を指向する観点から「もんじゅ」に準じた保温施工を検討条件とする。

また、50 MWS G 試験施設で得られた試験データや実験式等は、モックアップ装置のA/Cを対象とする最確値であり、同装置の固有条件を含んでいることが予想される。したがって、実験式等を大型炉で用いる場合には適用条件を吟味するとともに、「もんじゅ」 A/C 設計での実用例を調査し、その結果も計算条件に取り入れるものとした。

ここではA/Cの放熱量と温度分布の計算方法を次の区分毎に述べる。

- ・入口ダクト部輻射入熱 ( $Q_1$ )
- ・伝熱部最上段空気温度 ( $T_2$ )
- ・有効伝熱出口部放熱 ( $Q_3$ )
- ・出口ダンパ部放熱 ( $Q_4$ )
- ・出口ダクト部放熱 ( $Q_5$ )
- ・漏洩空気による放熱 ( $Q_L$ )

a. 入口ダクト部輻射入熱 ( $Q_1$ )

入口ダクトに流入した空気は高温の伝熱管から輻射熱を受け入口ダクト温度相当まで

予熱される。この輻射伝熱量は、伝熱管最下段パスの平均温度と入口ダクト平均温度を計算条件とする「灰色体2面間の輻射伝熱式」によって近似できる。

$$Q_1 = \alpha \cdot (T_{NB}^4 - T_A^4) \quad (3.45)$$

ここで、

$T_{NB}$  : 最下段伝熱管平均温度 =  $T_{N1} + (T_{N1} - T_{N2}) \mu$  [°K]

$T_{N1}$  : A/C 入口ナトリウム温度 [°K]

$T_{N2}$  : A/C 出口ナトリウム温度 [°K]

$\mu$  : 最下段伝熱管降温率 ( $0.15 \pm 0.04$ )、「もんじゅ」では  $Max$  値を採用。

$T_A$  : 入口ダクト平均温度 =  $(T_0 + T_1) / 2$  [°K]

$T_0$  : 大気温度 [°K]

$T_1$  : A/C 有効伝熱部入口空気温度 [°K]

$\alpha$  : 変数 =  $\sigma / C$

$\sigma$  : ボルツマン定数 =  $4.88 \times 10^{-8}$  [kcal/m<sup>2</sup> h°K<sup>4</sup>]

$C$  :  $1 / (A_1 \cdot F_1) + (1 / \varepsilon_1 - 1) / A_1 + (1 / \varepsilon_2 - 1) / A_2$

$A_1$  : 最下段伝熱管表面積 [m<sup>2</sup>]

$A_2$  : 入口ダクト表面積 [m<sup>2</sup>]

$F_1$  : 形態係数 (0.336) [-]

$\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  : 輻射率 (0.44) [-]

である。

なお、最下段伝熱管表面積 ( $A_1$ ) の計算では、伝熱管はフィン外径を直徑とする円柱として考え、この円柱の曲面部の表面積を 50 MWS G 試験施設と「もんじゅ」の両 A/C 評価手法に準じて 1.9 倍した。

### b. 伝熱部最上段空気温度 ( $T_2$ )

待機時の伝熱管最上段の空気温度は、管束部（1段目の伝熱管と2段目の伝熱管との間）の空気温度より低いことが 50 MWS G 試験施設の実験で確認されている。

また、この変則的な温度分布を形成する原因是、伝熱部で加熱された空気（上昇流）が保溫表面の放熱で冷やされダンパ近傍からケーシング内壁に沿って下降し、最上段の伝熱管で再び上昇する循環流が発生しているためと考えられる。

待機時に循環流が無い状態では  $T_2$  は概ね A/C 入口ナトリウム温度 ( $T_{N1}$ ) に等しいが、ダンパから漏洩する自然通風量の  $x$  倍の循環流が発生していると仮定すると、

$$T_2 = (T_{N1} + T_3) / (1 + x) \quad (3.46)$$

となり、実測データから逆算した  $x$  は約 2.2 ( $\pm 30\%$ ) であることが実験的に判明し

ている。

50 M W S G 試験施設の A/C 性能評価では前記(3.46)式でもとめた  $T_2$  を用いて放熱量を算出しているが、「もんじゅ」 A/C の放熱評価では保守的な計算結果を導くために  $T_2 = T_{N1}$  とし、且つ循環流も放熱計算の想定条件に加えている。

大型炉用 A/C では、「もんじゅ」と同一条件で計算を行うものとする。

### c. 有効伝熱出口部放熱 ( $Q_3$ )

伝熱管最上段から出口ダンパ入口までの表面放熱量 ( $Q_3$ ) は次式にて近似する。

$$Q_3 = S_{AC} \cdot U (T_A - T_0) \quad [\text{kcal}/\text{hr}] \quad (3.47)$$

ここで、

$S_{AC}$  : 保温表面積  $[\text{m}^2]$

$U$  : 熱通過率  $= \lambda / t$   $[\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$

$\lambda$  : 保温材熱伝導率  $[\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}]$

$t$  : 保温材厚さ  $[\text{m}]$

$T_A$  : 代表温度  $= (T_2 + T_3) / 2$   $[\circ\text{C}]$

$T_0$  : 霧囲気温度  $[\circ\text{C}]$

である。

### d. 出口ダンパ部放熱 ( $Q_4$ )

「もんじゅ」および大型炉では、出口ダンパからスタック出口までホットレグ配管相当の保温が施されているため同区間の放熱計算は前記(3.47)式と同一であるが、50 M W S G 試験施設の場合は保温が施されていないため、実験データを整理して得た次の近似式を適用する。

$$Q_4 = C_F \cdot S_{DMP} \cdot h_{out} (T_3 - T_0) \quad [\text{kcal}/\text{hr}] \quad (3.48)$$

ここで、

$C_F$  : 表面積に対する係数 (待機時=0.5、通風時=1.0)

$S_{DMP}$  : ダンパ部の表面積  $[\text{m}^2]$

$h_{out}$  : 熱通過率  $= 0.0075(T_3 - T_0)^{1.4} \pm 50\% \quad [\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$

である。

### e. 出口ダクト部放熱 ( $Q_5$ )

「もんじゅ」および大型炉は前記と同一理由により(3.47)式で算出し、50 M W S G 試験施設については次式によって近似する。

$$Q_5 = S_{DCT} \cdot h_{out} (T_A - T_0) \quad [\text{kcal}/\text{hr}] \quad (3.49)$$

ここで、

$$S_{DMP} : ダクト表面積 [m^2]$$

$$h_{out} : 热通過率 = 0.0075(T_A - T_0)^{1.4} \pm 50\% [\text{kcal}/m^2 h ^\circ C]$$

$$T_A : ダクト平均温度 = (T_4 + T_5)/2 [^\circ C]$$

#### f. 漏洩空気による放熱 ( $Q_L$ )

これまで紹介した  $Q_3 \sim Q_5$  は表面放散による放熱であるが、ここでは自然通風力によって発生したリーク風とともに A/C から大気に放出される放熱 ( $Q_L$ ) の計算方法を紹介する。 $Q_L$  の算出式は次の通り。

$$Q_L = W_A \cdot C_{PA} (T_5 - T_0) [\text{kcal}/hr] \quad (3.50)$$

ここで、

$$W_A : リーク風量 [kg/hr]$$

$$C_{PA} : 空気の比熱 [\text{kcal}/kg ^\circ C]$$

$$T_5 : スタック出口空気温度 [^\circ C]$$

$$T_0 : 大気温度 [^\circ C]$$

#### g. 全放熱量に対する表面放熱量と漏洩空気による放熱量の割合

A/C 待機時における放熱量の内訳は先に述べた通りである。

ここでは、50MW SG 試験施設と「もんじゅ」での全放熱量の導出方法について記す。

##### a) 50MW SG 試験施設

同試験施設の実績では全放熱量 ( $Q_0$ ) と表面放熱量 ( $Q_R$ )、漏洩放熱量 ( $Q_L$ ) について次のような関係が判っている。

$$Q_R = C F_3 \cdot Q_3 + C F_4 \cdot Q_4 + C F_5 \cdot Q_5$$

$$Q_L = C F_L \cdot Q_L$$

ここで、補正係数 ( $C F$ ) は、 $CF_3 \sim CF_5 = 1.40 \sim 2.0$ 、 $CF_L = 0.85 \sim 1.2$  の値をとる。

また、 $Q_R$  と  $Q_L$  は以下の関係を成す。

$$Q_R \approx Q_L$$

$$Q_0 \approx Q_R + Q_L$$

##### b) 「もんじゅ」

「もんじゅ」では出口ダクトに保温が施されているため  $Q_R$  と  $Q_L$  の関係は成立しないが、全放熱量は 50MW SG 試験施設での実績を反映して両放熱量に各補正係数の最大値を乗じ、その合計値に設計マージン (1.4 倍) を見込んだ値<sup>\*1</sup>を採用している。

#### ④ 計算手順

放熱量および温度分布の算定はリーク風量 ( $W_A$ ) の仮定から始まる。具体的には図3.8の計算フローチャートに示すが、前記(3.45)式～(3.50)式で $W_A$ に基づいた空気温度分布をもとめ、その温度分布に見合うドラフト力およびシステム抵抗から空気風量 ( $W_A'$ ) を算定し、 $W_A$  と $W_A'$  の差が許容誤差範囲に入るまで繰り返し計算を行う。

なお、本計算は便宜的に計算プログラム（言語：FORTRAN77）を作成して実施した。

また、この計算プログラムではA/C内部の温度分布や放熱量、通風量の計算以外に、空気側とナトリウム側との相互干渉にともなうa)A/C出口ナトリウム温度（ナトリウム流量を固定条件とする）、b)A/Cナトリウム流量（A/C出口ナトリウム温度を固定条件とする）のバランス量も計算できる。

#### (3) 試計算

これまでに述べた一連の計算方法および計算上の仮定の妥当性を確認する目的で、50MW SG試験施設および「もんじゅ」の各A/Cのヒートバランスを計算し、その計算結果と試験データならびに設計解析結果との相互比較を実施した。

試計算は次の6ケースについて行い、計算結果が各試験結果または解析結果と概ね一致することを確認した。本試計算の結果を表3.11および図3.9に示す。

##### ① A/C待機状態のヒートバランス計算

a. 50MW SG試験施設 ACS試験 2ケース (Exp No. HHE0-3CBE, EHE1-0C31)

b. 「もんじゅ」電気出力100%時 1ケース

##### ② 「もんじゅ」325°C保持時間に係わるA/C放熱量解析の再現計算 3ケース

\*1 : 「もんじゅ」ACS設計担当の口頭回答

## (4) 放熱量の計算結果

## ① 想定条件

大型炉用A/Cの放熱計算は、以下の運転状態を想定して行った。

	CASE-L1	CASE-LA	CASE-LA'	CASE-LB
主冷却系	定格運転	再起動準備状態(300°C等温)		
IRACS	待機状態	制御状態		
入口ペーン	全閉	5%開 <sup>*1</sup>	全閉 <sup>*2</sup>	全閉 <sup>*2</sup>
入口ダンパ	全閉	全開	全開	全閉 <sup>*3</sup>
出口ダンパ	全閉	5%開 <sup>*1</sup>	全閉 <sup>*2</sup>	全閉 <sup>*2</sup>
備考	*1: 制御下限値（「もんじゅ」相当） *2: 理想状態 *3: 手動閉操作			

## ② 計算結果

本計算結果を表3.1.2に示すとともに、各運転状態における全放熱量を以下に記す。

単位:  $\times 10^3$  [kcal/hr]

全放熱量(kw <sub>T</sub> )	CASE-L1	CASE-LA	CASE-LA'	CASE-LB
設計裕度無し	429.3	573.0	387.2	232.4
設計裕度有り	601.0	801.6	541.8	325.7

## 3.4 系統放熱量の調査結果

前項までに算出した配管や機器の各放熱量、および「もんじゅ」系統放熱量<sup>(4), (10)</sup>を表3.1.3に示す。

また、前記表3.1.3に整理した大型炉と「もんじゅ」の系統放熱量から読み取れる大型炉の放熱特性を以下に記す。

## (1) 放熱分布に見る大型炉の最大放熱要因

大型炉における系統全体の放熱量は「もんじゅ」に比べて約20%~10%軽減しているが、A/Cの放熱量は除熱容量の大型化（「もんじゅ」の1.33倍）によって増大し、本プラント最大の放熱要因（定格時56.8%、300°C時74.8%）となっている。

また、大型炉の系統放熱量は定格時と300°C時でほぼ等しい特徴を示し、「もんじゅ」のような低温化による減少は見られない。この放熱特性の違いは、崩壊熱除去運転を終えたA/Cの放熱量は大型炉および「もんじゅ」のいずれにおいても定格時を上回っているが、「もんじゅ」ではA/Cの増分以上に配管の放熱量が低下しているため全放熱量は減少傾向を示す。すなわち、「もんじゅ」では系統全体の放熱に対して配管放

熱が占める割合が大きいことを意味する。大型炉では、配管放熱は配管短縮によって軽減されているため全放熱に対する割合は小さく、低温化によって同放熱量が減少しても系統全体の放熱特性はA／Cの放熱特性に支配される。

大型炉および「もんじゅ」の放熱分布を以下に示す。

		大 型 炉		もんじゅ	
		定格時	300°C	定格時	325°C
全放熱量		3.17 MW	3.21 MW	3.81 MW	3.54 MW
内訳	配管	19.2 %	12.2 %	37.4 %	24.0 %
	A/C	56.8 %	74.8 %	37.8 %	52.3 %
	その他	24.0 %	13.0 %	24.8 %	23.7 %

## (2) 配管短縮にともなう放熱量の減少

定格時における配管放熱が全放熱を占める割合は、大型炉では19.2%、「もんじゅ」では37.4%であり、絶対量を見ても前者は0.61MW、後者は1.59MWと両プラントの間には約1MWのひらきがある。この配管放熱量の差は前項で述べたように配管短縮が起因している。

ここでは1次系および2次系のホットレグ配管とコールドレグ配管（クロスオーバーレグ配管を含む）を対象とし、配管短縮による放熱量の減少を定量的に説明する。

なお、大型炉と「もんじゅ」では各配管口径、放熱量を算出した温度条件が異なるため、以下の条件で算出した単位表面積当たりの熱通過率( $K^*$ )で比較評価する。

$$K^* = Q / [A \cdot (T_{in} - T_{out})] \quad (\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}) \quad (3.51)$$

ここで

$Q$  : 配管放熱量 [ $\text{kcal}/\text{h}$ ]

$A$  : 配管表面積 [ $\text{m}^2$ ]

$T_{in}$  : 内部流体温度 [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_{out}$  : 霧囲気温度 [ $^\circ\text{C}$ ]

である。

前記(3.51)式で算出した熱通過率を次表に示す。

同表では、大型炉と「もんじゅ」の各熱通過率が概ね等しいことから、大型炉の配管放熱は配管短縮に伴う表面積の減少によって軽減されたことが判る。

		大型 炉		もんじゅ	
		定格時	300°C	定格時	325°C
1 次 系	H ／ L 配 管	Q	16.4E+3	7.7E+3	68.0E+3
		A	20.74	←	98.82
		dT	510.0	280.0	474.0
		K*	1.55	1.33	1.45
	C ／ L 配 管	Q	38.9E+3	27.2E+3	77.0E+3
		A	73.39	←	162.66
		dT	360.0	280.0	342.0
		K*	1.47	1.32	1.38
2 次 系	H ／ L 配 管	Q	47.4E+3	23.3E+3	167.0E+3
		A	55.86	←	209.79
		dT	485.0	280.0	465.0
		K*	1.75	1.49	1.72
	C ／ L 配 管	Q	31.8E+3	28.9E+3	112.0E+3
		A	76.76	←	187.27
		dT	305.0	280.0	285.0
		K*	1.36	1.34	2.10
備 考		(1) 単位 Q [kcal/h], A [m <sup>2</sup> ] dT [°C], K* [kcal/m <sup>3</sup> h°C] (2) 「もんじゅ」配管長は鳥瞰図 <sup>(1)</sup> の記載値を採用した。			

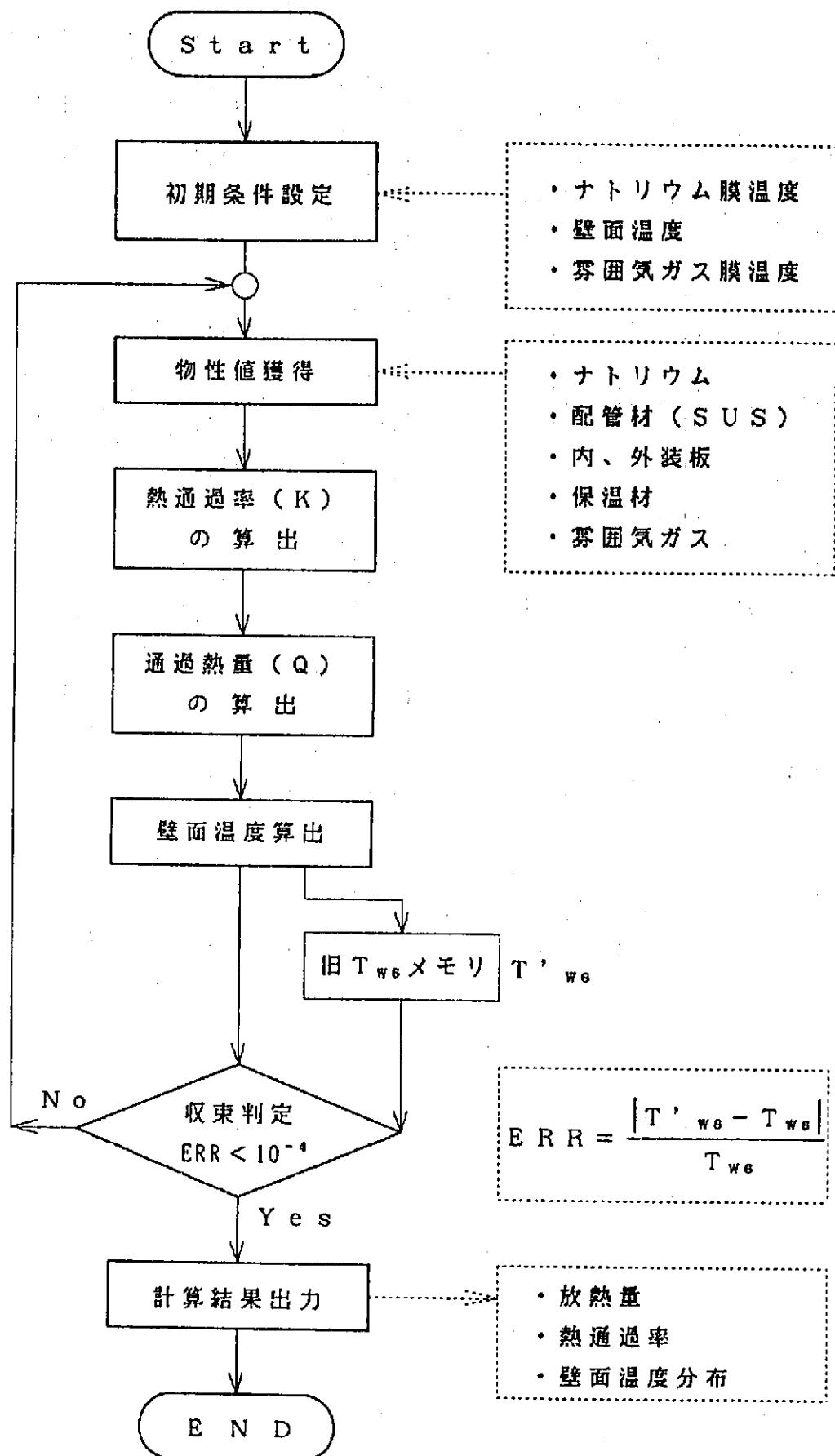


図3.1 配管表面放熱量の計算手順

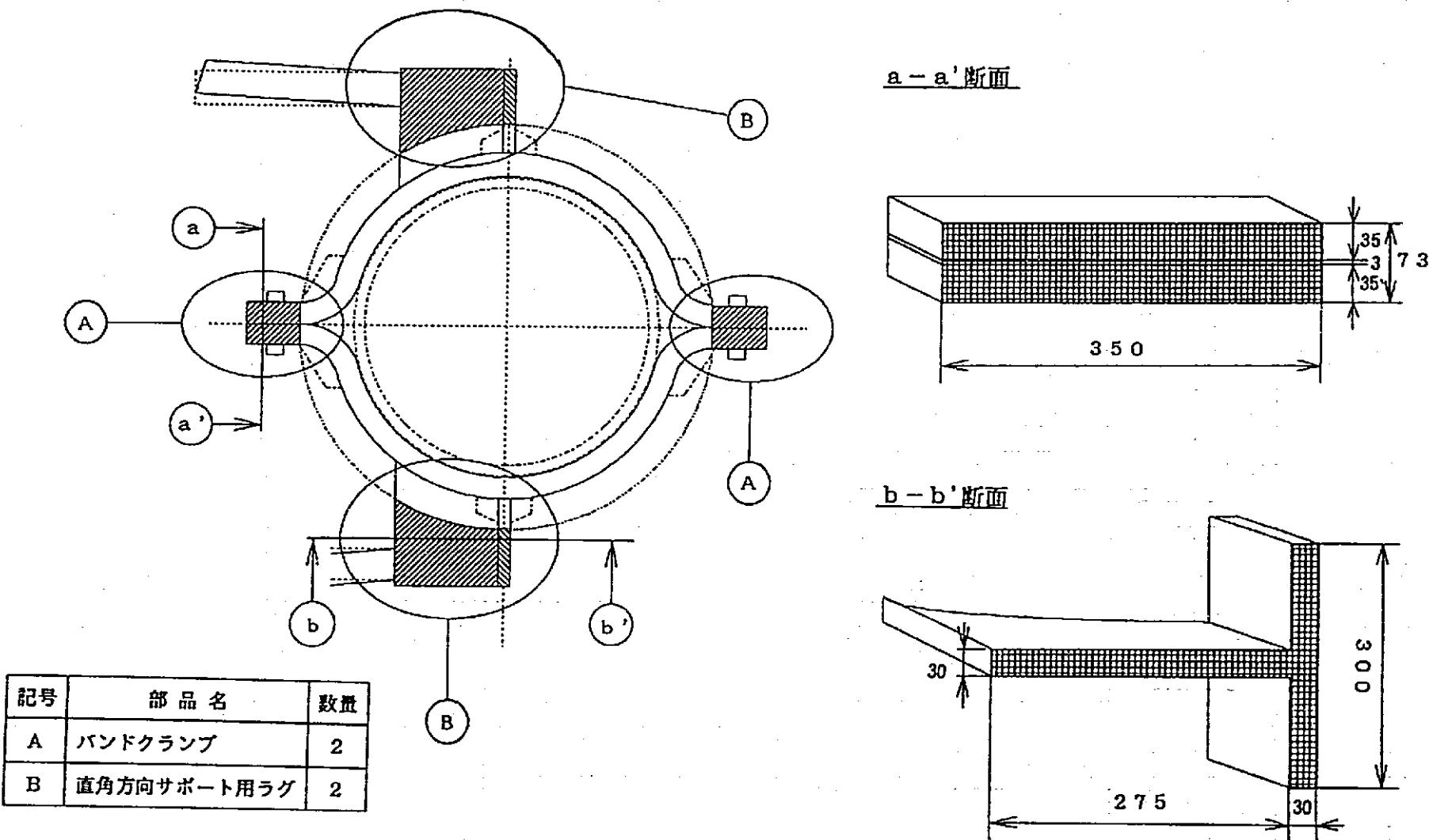
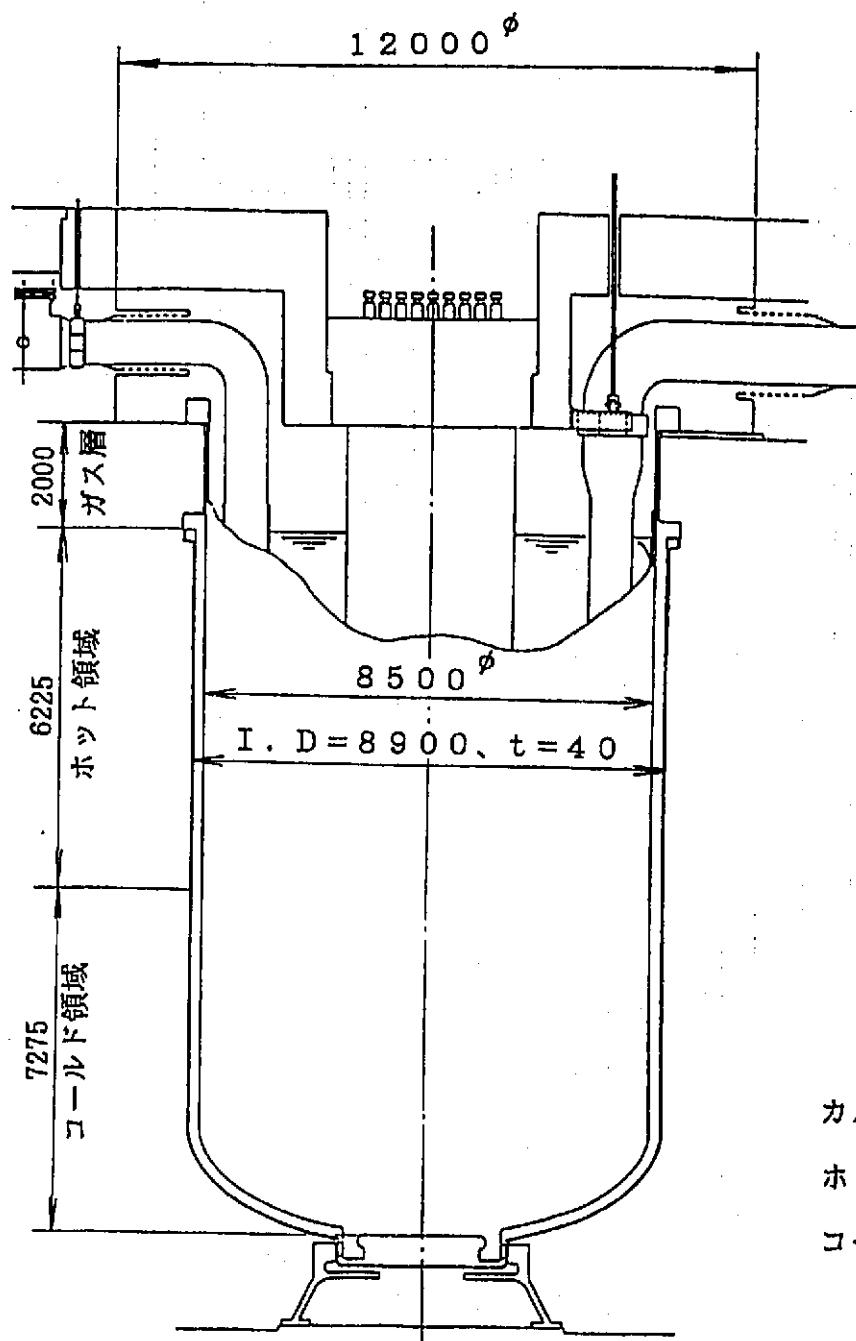


図3.2 配管支持構造の放熱量評価対象部位（もんじゅ1次系主配管32B）



< 温度区分 >

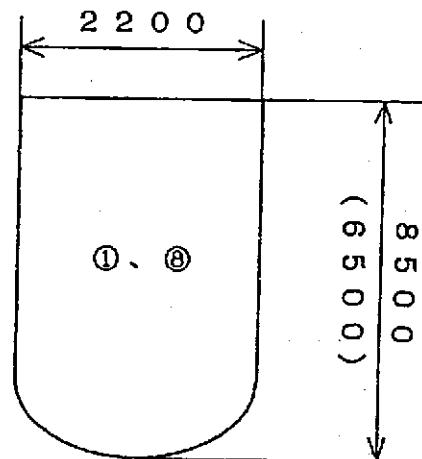
カバーガス層 : 290°C

ホット領域 : 530°C

コールド領域 : 380°C

図3.3 主要機器の形状と温度区分(その1)

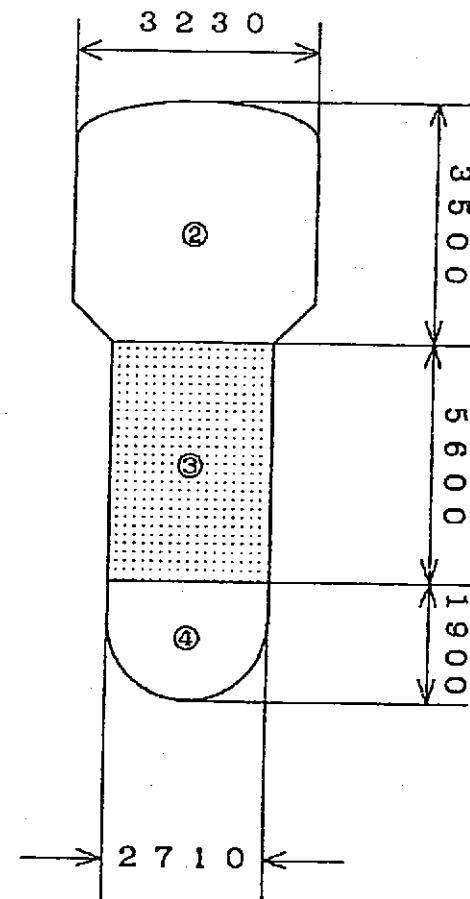
1次・2次主循環ポンプ



機器表面温度分布

- |   |     |   |
|---|-----|---|
| ① | 380 | ℃ |
| ② | 530 | ℃ |
| ③ | 415 | ℃ |
| ④ | 380 | ℃ |
| ⑤ | 505 | ℃ |
| ⑥ | 415 | ℃ |
| ⑦ | 325 | ℃ |
| ⑧ | 325 | ℃ |

I H X



蒸気発生器

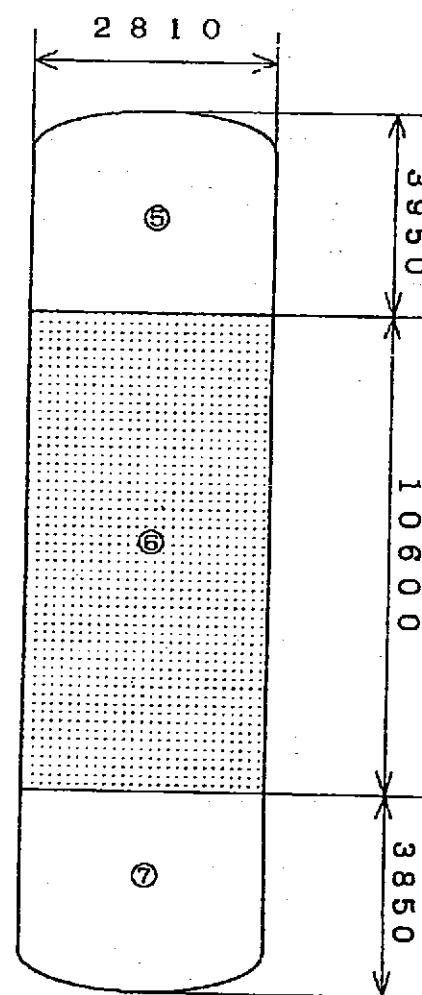
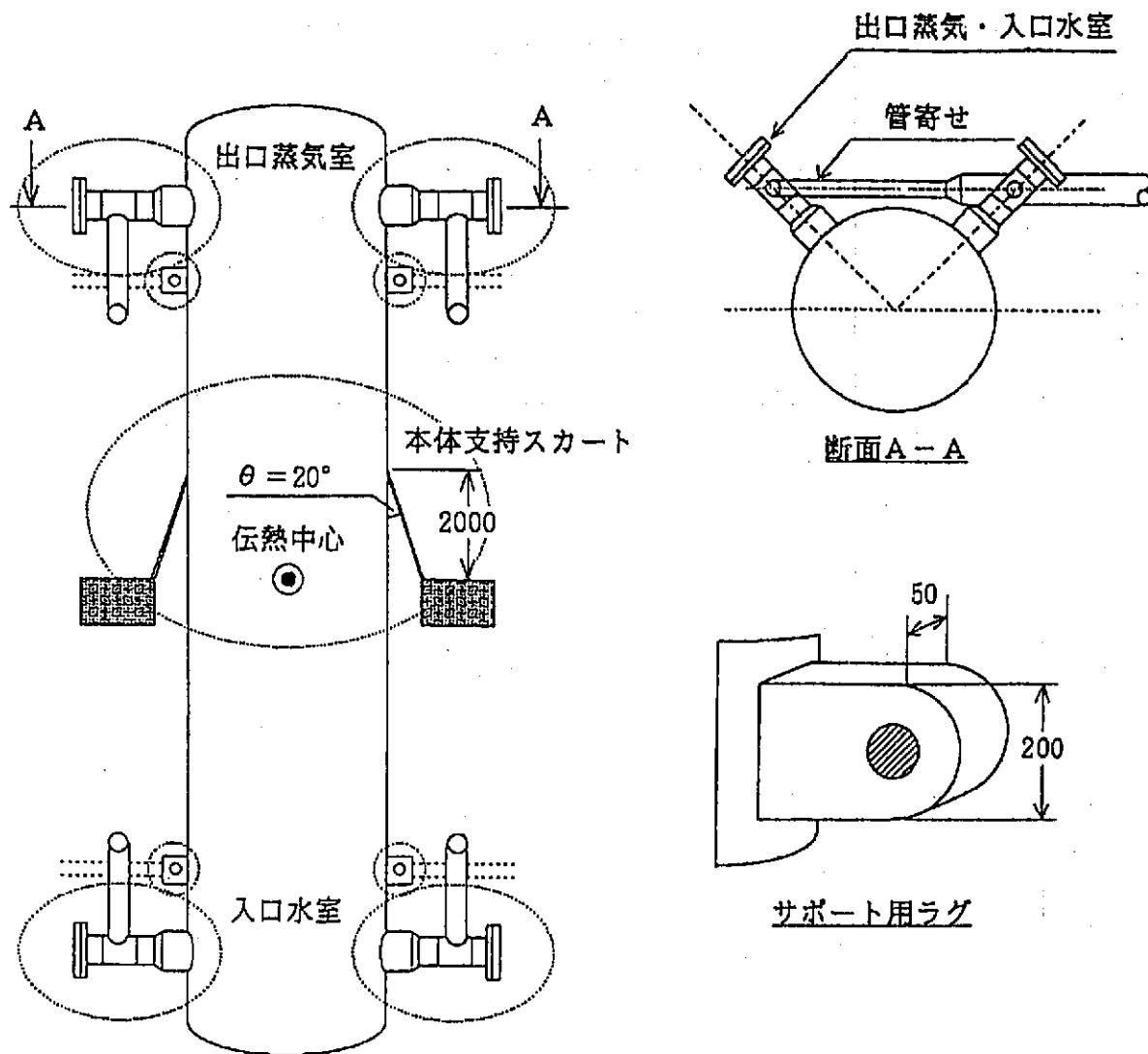


図3.4 主要機器の形状と温度区分 (その2)



蒸気発生器外形図

部品名称	材質・仕様	個数
出口蒸気室	Mod.9Cr-1Mo, 18 <sup>B</sup> , S160	4
入口水室	Mod.9Cr-1Mo, 18 <sup>B</sup> , S160	4
サポート用ラグ	Mod.9Cr-1Mo	12
スカート	Mod.9Cr-1Mo, t=40	1

図3.5 蒸気発生器の突起物暫定形状（放熱計算用）

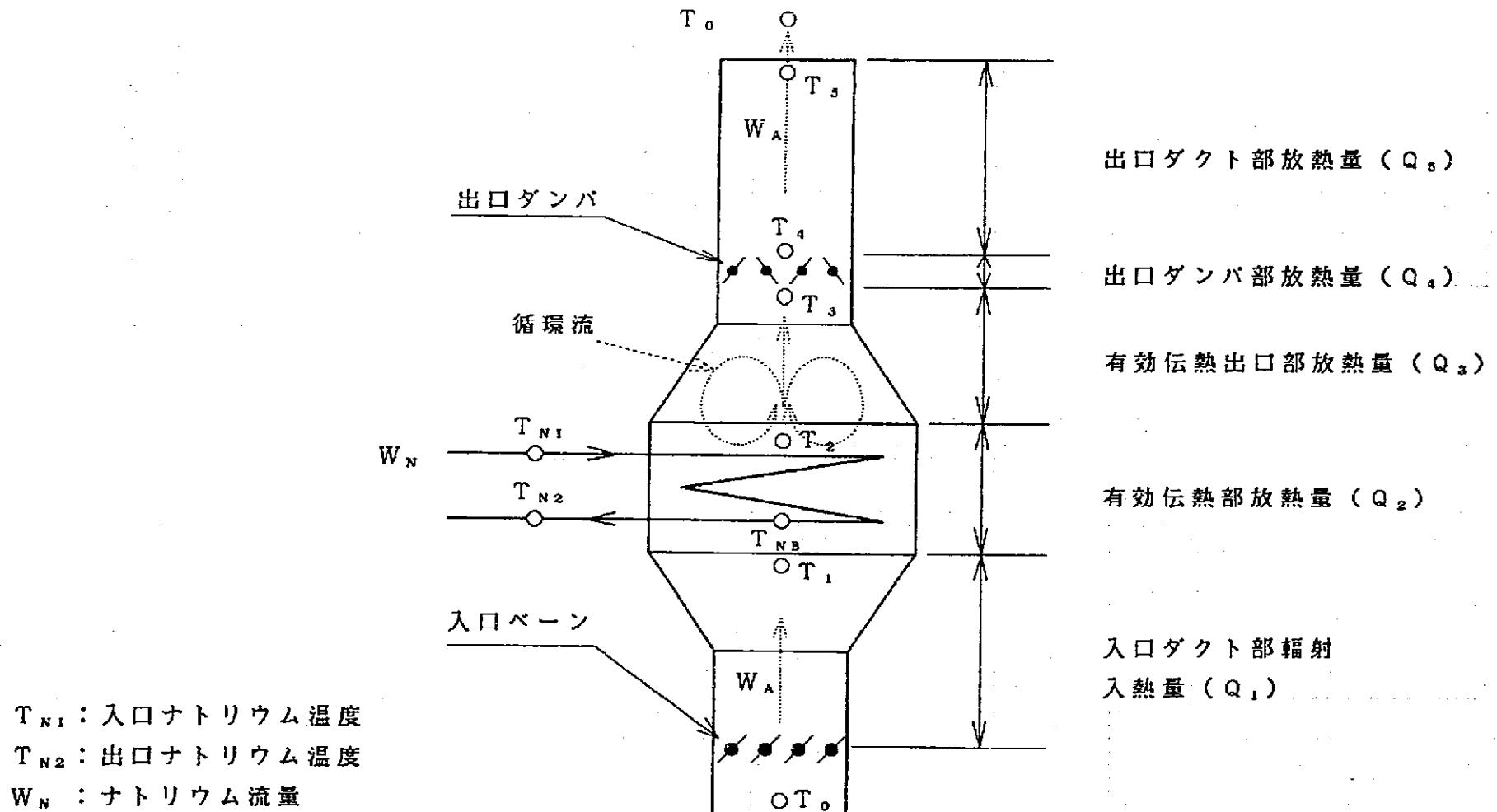
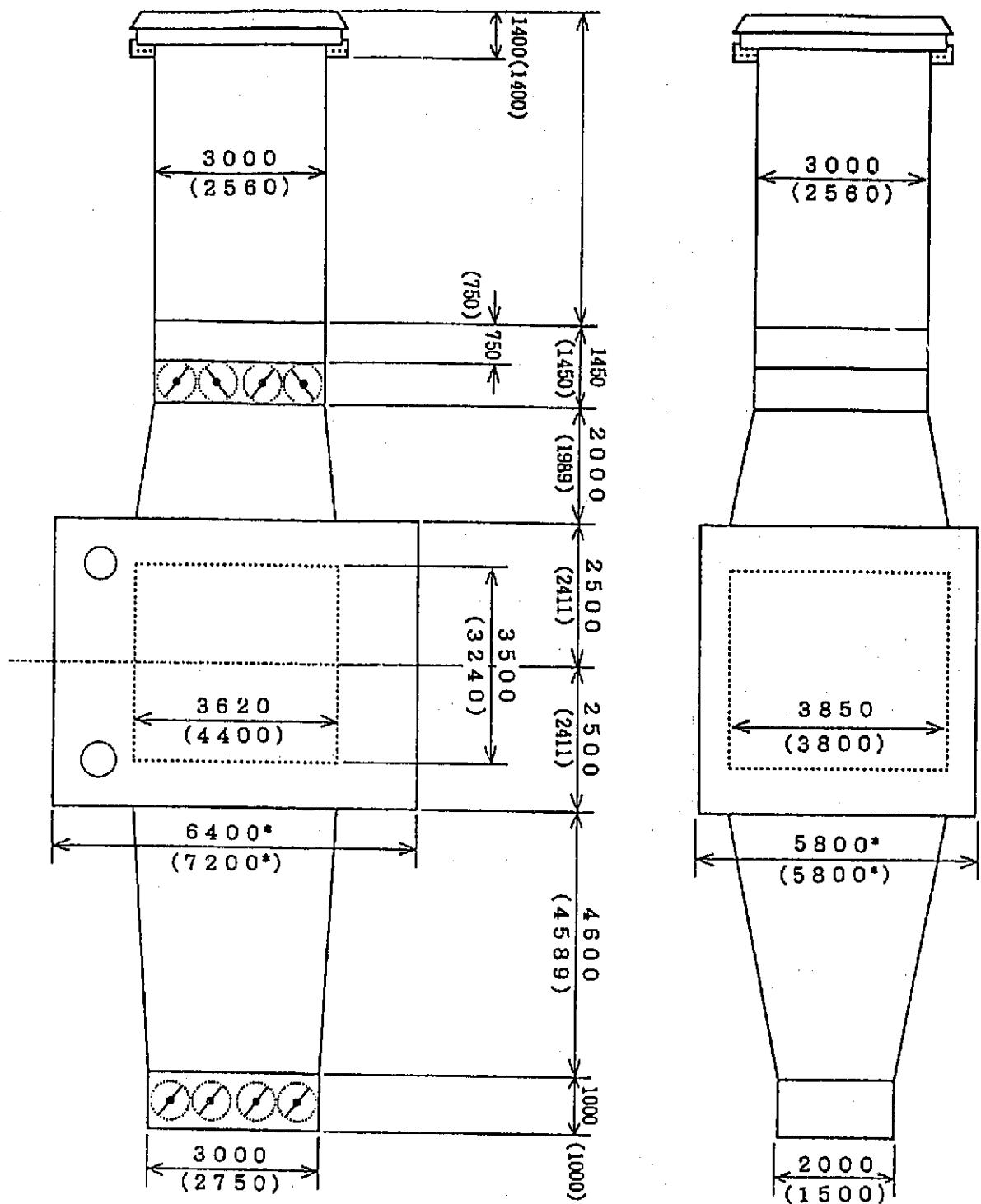


図3.6 空気冷却器放熱評価モデル



(備考)

- 1) () 内は「もんじゅ」A/C設計寸法
- 2) \*印は保温外表面を基準とする寸法

図3.7 空気冷却器仕様想定条件

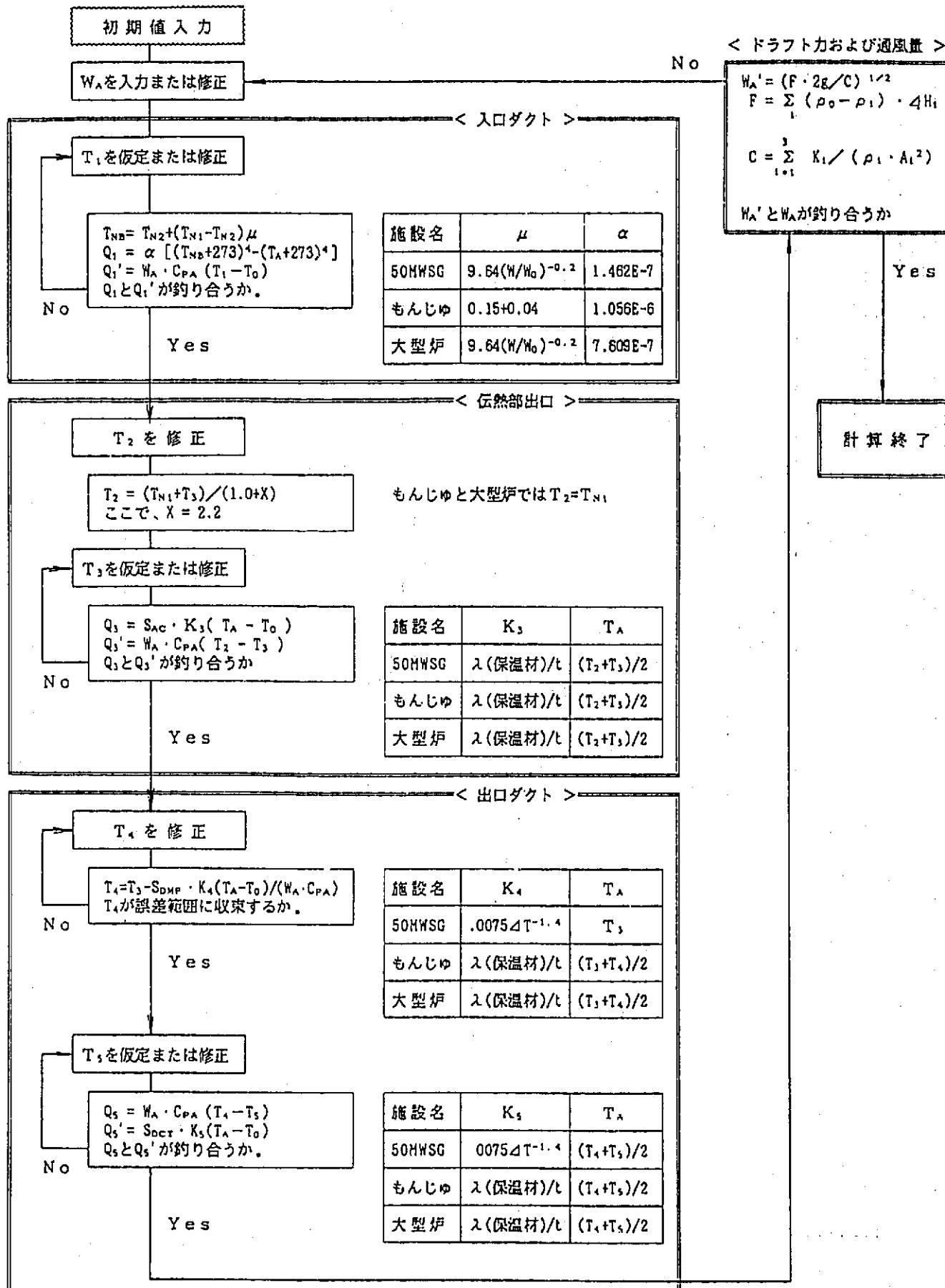


図3.8 空気冷却器放熱計算フローチャート（待機時）

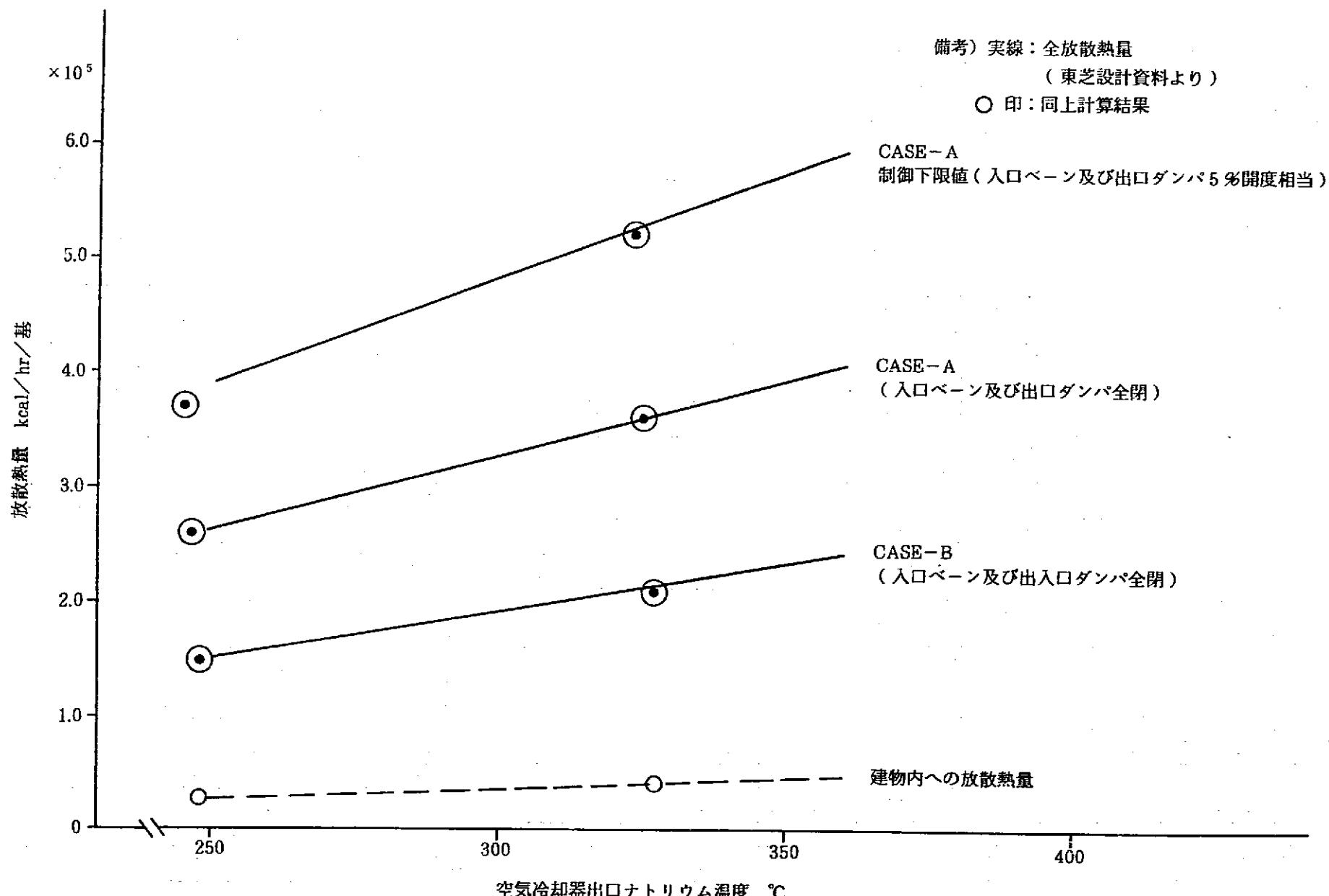


図 3.9 「もんじゅ」 325 °C保持時間に係わる A/C 放熱解析の再現計算

表3.2 放熱評価用配管支持構造の暫定仕様

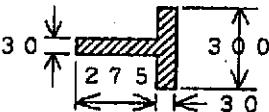
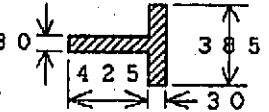
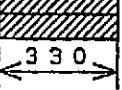
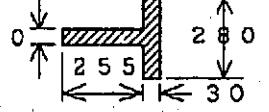
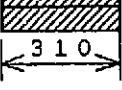
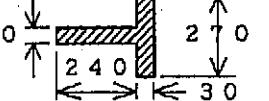
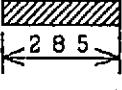
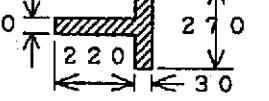
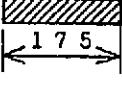
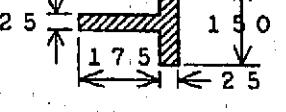
配管口径	バンドクランプ部仕様	サポート用ラグ仕様
32 <sup>b</sup> (Sch 20)	 断面積 : $S = 25.55 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 0.846 \text{ m}$	 断面積 : $S = 17.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 1.21 \text{ m}$
1.1m	 断面積 : $S = 34.68 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 1.096 \text{ m}$	 断面積 : $S = 24.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 2.53 \text{ m}$
30 <sup>b</sup> (Sch 20)	 断面積 : $S = 24.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 0.803 \text{ m}$	 断面積 : $S = 16.05 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 1.13 \text{ m}$
28 <sup>b</sup> (Sch 20)	 断面積 : $S = 22.63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 0.776 \text{ m}$	 断面積 : $S = 22.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 1.08 \text{ m}$
26 <sup>b</sup> (Sch 20)	 断面積 : $S = 20.81 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 0.716 \text{ m}$	 断面積 : $S = 14.40 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 1.02 \text{ m}$
14 <sup>b</sup> (Sch 20)	 断面積 : $S = 11.20 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 0.478 \text{ m}$	 断面積 : $S = 6.875 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 周 長 : $P = 0.6 \text{ m}$

表3.3 配管放熱計算結果（その1）

[定格温度、定格流量]

		1次主冷却系		2次主冷却系				IRACS	
		ホット	コールド	ホットレグ		コールドレグ		ホット	コールド
				IHX～M/T	M/T～SG	SG～M/T	M/T～IHX		
配管長(m)	6.0	34.0	10.0	15.0	17.0	20.0	33.0	31.0	
配管・保温壁直徑m	d <sub>1</sub>	1.0400	0.7366	0.6858	0.6858	0.6350	0.6350	0.3334	0.3334
	d <sub>m</sub>	1.0700	0.7493	0.6985	0.6985	0.6477	0.6477	0.3445	0.3445
	d <sub>2</sub>	1.1000	0.7620	0.7112	0.7112	0.6604	0.6604	0.3556	0.3556
	d <sub>3</sub>	1.1300	0.7920	0.7412	0.7412	0.6904	0.6904	0.3856	0.3856
	d <sub>4</sub>	1.1306	0.7926	0.7418	0.7418	0.6910	0.6910	0.3862	0.3862
	d <sub>5</sub>	1.4994	1.0614	1.1106	1.1106	0.9598	0.9598	0.7550	0.6550
	d <sub>6</sub>	1.5000	1.0620	1.1112	1.1112	0.9604	0.9604	0.7556	0.6556
温度分布°C	T <sub>a</sub>	530.0	380.0	505.0	505.0	325.0	325.0	505.0	325.0
	T <sub>w1</sub>	529.980	379.992	504.989	504.989	324.994	324.994	504.787	324.880
	T <sub>w2</sub>	529.660	379.869	504.852	504.852	324.890	324.890	504.640	324.773
	T <sub>w3</sub>	529.660	379.869	504.852	504.852	324.890	324.890	504.640	324.773
	T <sub>w4</sub>	529.656	379.866	504.849	504.849	324.887	324.887	504.636	324.771
	T <sub>w5</sub>	53.736	48.235	50.339	50.339	43.064	43.064	47.677	41.526
	T <sub>w6</sub>	53.732	48.232	50.335	50.335	43.062	43.062	47.674	41.524
	T <sub>a</sub> * <sup>1</sup>	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
雰囲気ガス	窒素	窒素	空気						
ナトリウム流量* <sup>2</sup>	2800.00	2800.00	2320.56	2317.95	2317.95	2320.56	2.61	2.61	
h <sub>a</sub> * <sup>3</sup>	4.1017	3.8888	3.9892	3.9892	3.6693	3.6693	3.8799	3.5920	
K* <sup>3</sup>	0.3803	0.4323	0.3969	0.3969	0.4114	0.4114	0.4856	0.4824	
放散熱量* <sup>4</sup>	3.912	12.454	4.225	6.337	4.340	5.106	8.411	4.937	
放散熱量* <sup>5</sup>	4.549	14.481	4.913	7.369	5.046	5.937	9.780	5.741	
備考	* 1 : プラント工学室からの検討依頼条件 * 2 : 単位 (kg/sec) * 3 : 単位 (kcal/m <sup>2</sup> hr°C)、配管肉厚中心基準 * 4 : 単位 × 10 <sup>3</sup> (kcal/hr) * 5 : 単位 (kw)								

表3.4 配管放熱計算結果（その2）

[定格温度、P/M流量]

		1次主冷却系		2次主冷却系				IRACS	
		ホット	コールド	ホットレグ		コールドレグ		ホット	コールド
				IHX～M/T	M/T～SG	SG～M/T	M/T～IHX		
配管長(m)		6.0	34.0	10.0	15.0	17.0	20.0	33.0	31.0
配管・保温壁直徑m	d <sub>1</sub>	1.0400	0.7366	0.6858	0.6858	0.6350	0.6350	0.3334	0.3334
	d <sub>2</sub>	1.0700	0.7493	0.6985	0.6985	0.6477	0.6477	0.3445	0.3445
	d <sub>3</sub>	1.1000	0.7620	0.7112	0.7112	0.6604	0.6604	0.3556	0.3556
	d <sub>4</sub>	1.1300	0.7920	0.7412	0.7412	0.6904	0.6904	0.3856	0.3856
	d <sub>5</sub>	1.1306	0.7926	0.7418	0.7418	0.6910	0.6910	0.3862	0.3862
	d <sub>6</sub>	1.4994	1.0614	1.1106	1.1106	0.9598	0.9598	0.7550	0.6550
	d <sub>7</sub>	1.5000	1.0620	1.1112	1.1112	0.9604	0.9604	0.7556	0.6556
温度分布°C	T <sub>a</sub>	530.0	380.0	505.0	505.0	325.0	325.0	505.0	325.0
	T <sub>w1</sub>	529.887	379.952	504.896	504.727	324.853	324.944	504.957	324.974
	T <sub>w2</sub>	529.567	379.829	504.759	504.589	324.749	324.839	504.810	324.867
	T <sub>w3</sub>	529.567	379.829	504.759	504.589	324.749	324.839	504.810	324.867
	T <sub>w4</sub>	529.564	379.826	504.756	504.586	324.746	324.837	504.806	324.865
	T <sub>w5</sub>	53.731	48.231	50.331	50.318	43.052	43.061	47.689	41.534
	T <sub>w6</sub>	53.728	48.229	50.328	50.315	43.050	43.059	47.686	41.532
	T <sub>a</sub> * <sup>1</sup>	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
雰囲気ガス		窒素	窒素	空気	空気	空気	空気	空気	空気
ナトリウム流量* <sup>2</sup>		266.0	266.0	100.9441	13.9233	13.9233	100.9441	87.0208	87.0208
h <sub>a</sub> * <sup>3</sup>		4.1015	3.8889	3.9890	3.9890	3.6687	3.6692	3.8804	3.5922
K* <sup>3</sup>		0.3803	0.4322	0.3968	0.3966	0.4111	0.4113	0.4859	0.4826
放散熱量* <sup>4</sup>		3.9114	12.4530	4.223	6.332	4.337	5.106	8.416	4.939
放散熱量* <sup>5</sup>		4.549	14.4802	4.910	7.363	5.043	5.937	9.786	5.743
備考		* 1 : プラント工学室からの検討依頼条件 * 2 : 単位 (kg/sec) * 3 : 単位 (kcal/m <sup>2</sup> hr°C)、配管肉厚中心基準 * 4 : 単位 × 10 <sup>3</sup> (kcal/hr) * 5 : 単位 (kw)							

表3.5 配管放熱計算結果（その3）

[300°C、P/M運転]

	1次主冷却系		2次主冷却系				IRACS		
	ホット	コールド	ホットレグ		コールドレグ		ホット	コールド	
			IHX～M/T	M/T～SG	SG～M/T	M/T～IHX			
配管長 (m)	6.0	34.0	10.0	15.0	17.0	20.0	33.0	31.0	
配管・保温壁直 径 m	d <sub>1</sub>	1.0400	0.7366	0.6858	0.6858	0.6350	0.6350	0.3334	0.3334
	d <sub>m</sub>	1.0700	0.7493	0.6985	0.6985	0.6477	0.6477	0.3445	0.3445
	d <sub>2</sub>	1.1000	0.7620	0.7112	0.7112	0.6604	0.6604	0.3556	0.3556
	d <sub>3</sub>	1.1300	0.7920	0.7412	0.7412	0.6904	0.6904	0.3856	0.3856
	d <sub>4</sub>	1.1306	0.7926	0.7418	0.7418	0.6910	0.6910	0.3862	0.3862
	d <sub>5</sub>	1.4994	1.0614	1.1106	1.1106	0.9598	0.9598	0.7550	0.6550
	d <sub>6</sub>	1.5000	1.0620	1.1112	1.1112	0.9604	0.9604	0.7556	0.6556
温度分布 °C	T <sub>w</sub>	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
	T <sub>w1</sub>	299.957	299.968	299.957	299.891	299.872	299.950	299.982	299.978
	T <sub>w2</sub>	299.799	299.876	299.885	299.819	299.777	299.856	299.905	299.881
	T <sub>w3</sub>	299.799	299.876	299.885	299.819	299.777	299.856	299.905	299.881
	T <sub>w4</sub>	299.797	299.874	299.884	299.818	299.775	299.854	299.903	299.878
	T <sub>w5</sub>	36.940	41.317	36.205	36.200	40.984	40.991	34.810	39.605
	T <sub>w6</sub>	36.939	41.317	36.203	36.199	40.982	40.989	34.808	39.603
	T <sub>a</sub> * <sup>1</sup>	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
雰囲気ガス	窒素	窒素	空気	空気	空気	空気	空気	空気	空気
ナトリウム流量* <sup>2</sup>	266.0	266.0	100.9441	13.9233	13.9233	100.9441	87.0208	87.0208	
h <sub>a</sub> * <sup>3</sup>	3.3218	3.5686	3.2864	3.2860	3.5635	3.5639	3.1939	3.4889	
K* <sup>3</sup>	0.2819	0.3850	0.3026	0.3024	0.3960	0.3962	0.3705	0.4648	
放散熱量* <sup>4</sup>	1.592	8.629	1.859	2.787	3.835	4.514	3.705	4.367	
放散熱量* <sup>5</sup>	1.851	10.034	2.162	3.241	4.459	5.249	4.308	5.078	
備考	* 1 : プラント工学室からの検討依頼条件 * 2 : 単位 (kg/sec) * 3 : 単位 (kcal/m <sup>2</sup> hr°C)、配管肉厚中心基準 * 4 : 単位 × 10 <sup>3</sup> (kcal/hr) * 5 : 単位 (kw)								

表3.6 配管支持構造の放熱量

単位 :  $\times 10^3$  (kcal/hr)

配管名称 (支持構造数)	口径	定格運転時		300°C時	
		クランプ部	取付用ラグ	クランプ部	取付用ラグ
1次系H/L配管 (1)	1.1m	2. 672	3. 408	1. 336	1. 698
		小計	6.08(8.512)	小計	3.034(4.248)
1次系C/L配管 (X/L:1、C/L:3)	30 <sup>B</sup>	1. 270	1. 230	0. 954	0. 828
		小計	10.0(14.0)	小計	7.128(9.979)
2次系H/L配管 (5)	28 <sup>B</sup>	1. 716	2. 018	0. 908	1. 068
		小計	18.67(26.138)	小計	9.88(13.832)
2次系C/L配管 (5)	26 <sup>B</sup>	0. 922	0. 916	0. 836	0. 904
		小計	9.19(12.866)	小計	8.70(12.180)
補助冷却系H/L (3)	14 <sup>B</sup>	0. 948	0. 832	0. 502	0. 440
		小計	5.34(7.476)	小計	2.826(3.956)
補助冷却系C/L (4)	14 <sup>B</sup>	0. 552	0. 486	0. 502	0. 440
		小計	4.152(5.813)	小計	3.768(5.275)
備 考		(1) 計算方法はMJ-314「室内放散熱量算定基準」に準じた。 (2) 2次系および補助冷却系の支持構造数は暫定値 (3) バンドクランプとサポート用ラグの数は、支持構造一式あたり各々2個とした。 (4) 保温施工形態係数は「もんじゅ」と同じく1.4 (5) () 内の数字は前記係数にて補正後の放熱量。			

表3.7 原子炉容器廻りの放熱計算結果

		定格運転温度				300°C等温運転			
		炉上部	ガス層	ホット	コールド	炉上部	ガス層	ホット	コールド
高さ (m)	—	2.000	6.225	7.275	—	2.000	6.225	7.275	
伝熱面直徑 m	d <sub>1</sub>	12.0000	8.5300	9.0100	9.0100	12.0000	8.5300	9.0100	9.0100
	d <sub>2</sub>	—	8.5306	9.0106	9.0106	—	8.5306	9.0106	9.0106
	d <sub>3</sub>	—	8.8994	9.4094	9.3094	—	8.8994	9.4094	9.3094
	d <sub>4</sub>	—	8.9000	9.4100	9.3100	—	8.9000	9.4100	9.3100
伝熱壁溫度 °C	T <sub>w1</sub>	—	290.000	530.000	380.000	—	175.000	300.000	300.000
	T <sub>w2</sub>	—	299.999	529.998	379.998	—	174.999	299.999	299.998
	T <sub>w3</sub>	—	41.277	54.474	47.028	—	32.271	37.767	40.638
	T <sub>w4</sub>	—	41.275	54.471	47.025	—	32.270	37.766	40.636
	T <sub>a</sub> * <sup>1</sup>	—	20.0	20.0	20.0	—	20.0	20.0	20.0
雰囲気ガス	窒素	窒素	窒素	窒素	窒素	窒素	窒素	窒素	窒素
K* <sup>2</sup>	—	0.22946	0.29453	0.32264	—	0.18774	0.21790	0.28728	
放散熱量* <sup>3</sup>	100.393	3.321	26.893	31.374	24.128	1.560	10.923	21.727	
放散熱量* <sup>4</sup>	116.373	3.862	31.271	36.481	28.055	1.814	12.701	25.264	
備 考	* 1 : プラント工学室からの検討依頼条件 * 2 : 単位 (kcal/m <sup>2</sup> hr°C)、内装板内壁基準 * 3 : 単位 × 10 <sup>3</sup> (kcal/hr) * 4 : 単位 (kw) ・炉上部からの放散熱量は、「もんじゅ」遮蔽プラグの放熱量を参考にして算出した。								

表3.8 主要機器の放熱量計算結果（その1）

[定格温度]

		1次系 循環 ポンプ	中間熱交換器(IHX)			蒸気発生器(SG)			2次系 循環 ポンプ
			ホット	ミドル	コールド	ホット	ミドル	コールド	
機器高さ(m)	8.500	8.500	3.500	5.600	1.900	3.950	10.600	3.850	6.500
伝熱面直徑 m	d <sub>1</sub>	2.2300	3.2600	2.7400	2.7400	2.8400	2.8400	2.8400	2.2300
	d <sub>2</sub>	2.2306	3.2606	2.7406	2.7406	2.8406	2.8406	2.8406	2.2306
	d <sub>3</sub>	2.4994	3.6294	3.1094	3.1094	3.2094	3.2094	3.2094	2.4994
	d <sub>4</sub>	2.5000	3.6399	3.1100	3.1100	3.2100	3.2100	3.2100	2.5000
伝熱壁溫度 °C	T <sub>w1</sub>	380.0	530.0	415.0	380.0	505.0	415.0	325.0	325.0
	T <sub>w2</sub>	379.997	528.997	414.998	379.998	504.997	414.998	324.998	324.998
	T <sub>w3</sub>	48.526	57.639	46.906	47.090	54.839	44.533	40.880	44.625
	T <sub>w4</sub>	48.523	57.637	46.903	47.088	54.836	44.530	40.878	44.623
	T <sub>a</sub> * <sup>1</sup>	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
雰囲気ガス	窒素	窒素	窒素	窒素	空気	空気	空気	空気	空気
K* <sup>2</sup>	0.3728	0.3276	0.2886	0.2741	0.3213	0.2890	0.2539	0.3441	
放散熱量* <sup>3</sup>	8.530	7.408	5.495	2.209	6.500	10.795	3.161	5.200	
放散熱量* <sup>4</sup>	9.919	8.614	6.390	2.569	7.558	12.552	3.676	6.047	
備考	*1 : プラント工学室からの検討依頼条件 *2 : 単位 (kcal/m <sup>2</sup> hr°C)、内装板内壁基準 *3 : 単位 × 10 <sup>3</sup> (kcal/hr) *4 : 単位 (kw)								

表3.9 主要機器の放熱量計算結果（その2）

[300°C]

	1次系 主循環 ポンプ	中間熱交換器(IHX)			蒸気発生器(SG)			2次系 主循環 ポンプ
		ホット	ミドル	コールド	ホット	ミドル	コールド	
高さ(m)	8.500	3.500	5.600	1.900	3.950	10.600	3.850	6.500
伝熱面直徑m	d <sub>1</sub>	2.2300	3.2600	2.7400	2.7400	2.8400	2.8400	2.2300
	d <sub>2</sub>	2.2306	3.2606	2.7406	2.7406	2.8406	2.8406	2.2306
	d <sub>3</sub>	2.4994	3.6294	3.1094	3.1094	3.2094	3.2094	2.4994
	d <sub>4</sub>	2.5000	3.6399	3.1100	3.1100	3.2100	3.2100	2.5000
伝熱壁温度°C	T <sub>w1</sub>	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
	T <sub>w2</sub>	299.998	299.999	299.999	299.999	299.999	299.999	299.999
	T <sub>w3</sub>	42.547	39.359	38.558	40.684	39.024	36.942	39.082
	T <sub>w4</sub>	42.544	39.359	38.556	40.682	39.022	36.941	39.080
	T <sub>a</sub> * <sup>1</sup>	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
雰囲気ガス	窒素	窒素	窒素	窒素	空気	空気	空気	空気
K* <sup>2</sup>	0.3319	0.2422	0.2453	0.2441	0.2445	0.2457	0.2445	0.3313
放散熱量* <sup>3</sup>	5.907	3.008	3.311	1.530	2.856	6.507	2.794	4.596
放散熱量* <sup>4</sup>	6.869	3.498	3.850	1.779	3.321	7.566	3.249	5.344
備考	*1: プラント工学室からの検討依頼条件 *2: 単位(kcal/m <sup>2</sup> hr°C)、内装板内壁基準 *3: 単位 × 10 <sup>3</sup> (kcal/hr) *4: 単位 (kw)							

表3.10 蒸気発生器における突起物の放熱量

単位 :  $\times 10^3$  (kcal/hr)

内訳名称(員数)	定格運転時		300°C時
	代表温度(°C)	放熱量	
出口蒸気室(4)	487	12.261	7.396
入口水室(4)	240	5.795	7.396
サポート用ラグ (各6)	上部 505	4.651	2.706
	下部 325	2.941	2.706
本体支持スカート(1)	415	22.493	15.962
合計		48.141	36.166

(備考)

- (1) 計算方法はMJ-314「室内放散熱量算定基準」に準じた。
- (2) 保温施工形態係数は「もんじゅ」と同じく1.4を採用。
- (3) 霧囲気温度は他の機器と同様に20°Cとした。

表3.11 A C S 待機時放熱量試計算結果

試計算 No.		CASE-1		CASE-2		CASE-3	
計算対象施設		50MW SG		50MW SG		'もんじゅ'	
試験番号又は運転負荷		HHE0-3CB4		EHE1-OC31		電気出力100%	
		実測値	計算値	実測値	計算値	設計値	計算値
ナトリウム	入口温度 (°C)	426.6	←	461.5	←	505.0	←
	出口温度 (°C)	282.4	←	325.6	←	325.0	←
	流量×10 <sup>3</sup> (kg/h)	1.1496	1.1473	1.0576	1.1686	6.9370	6.9084
各部空氣溫度 °C	T <sub>0</sub>	14.9	←	16.0	←	40.0	←
	T <sub>1</sub>	210.8	210.8	282.7	283.6	—	322.5
	T <sub>2</sub>	361.4	359.0	394.6	387.6	—	505.0
	T <sub>3</sub>	312.1	315.3	342.4	339.5	—	498.3
	T <sub>4</sub>	75.9	75.5	67.0	67.1	—	485.1
	T <sub>5</sub>	—	47.9	—	46.1	—	461.4
空気流量×10 <sup>3</sup> (kg/h)		—	0.2871	—	0.2695	4.1780	1.7918
入口ペーン開度 (%)		0.0	←	0.0	←	0.0	←
入口ダンバ開度 (%)		0.9	←	1.6	0.9	0.0	←
出口ダンバ開度 (%)		2.2	←	6.9* <sup>1</sup>	0.0	0.0	←
放熱量 (kW <sub>T</sub> )	表面放散熱量	—	31.1	—	32.2	90.7	65.6
	リーク放熱量	—	28.1	—	24.3	346.5	249.1
	合計	裕度無	59.4	59.2	51.1	56.5	—
		裕度有	—	—	—	437.2	440.6
備 考		(1) 試験値はPNC SN941 84-115より転記。 (2) * <sup>1</sup> : 試験条件は全閉であるが、開度指示計の誤差によって微開となった。 (3) 設計値はPNC ZJ2449 90-001とMP-GC047より転記。 (4) 設計裕度有りは、計算で得られた表面放熱量とリーク放熱量の合計値に1.4を乗じたもの。					

表3.12 大型炉用空気冷却器の放熱量計算結果

計算 No.		CASE-L1		CASE-LA		CASE-LA'		CASE-LB	
計算対象施設		大型炉		大型炉		大型炉		大型炉	
運転状態		電気出力100%		系統温度300°C		系統温度300°C		系統温度300°C	
		裕度無	裕度有	裕度無	裕度有	裕度無	裕度有	裕度無	裕度有
ナトリウム	入口温度 (°C)	505.0	505.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
	出口温度 (°C)	325.0	325.0	295.0	292.9	296.6	295.2	298.0	297.1
	流量 × 10³ (kg/h)	6.7	9.4	313.3	313.3	313.3	313.3	313.3	313.3
各部空気温度 °C	T₀	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
	T₁	240.3	240.3	101.1	100.4	129.7	129.0	183.9	183.3
	T₂	505.0	505.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
	T₃	500.5	500.5	299.1	299.1	298.7	298.7	297.8	297.8
	T₄	491.6	491.6	297.4	297.4	296.1	296.1	293.4	293.4
	T₅	475.3	475.3	294.0	294.0	291.1	291.1	285.2	285.2
空気流量 × 10³ (kg/h)		2.5121	2.5121	5.7672	5.7636	3.8629	3.8592	2.2723	2.2716
入口ペーン開度 (%)		0.0	0.0	5.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
入口ダンバ開度 (%)		0.0	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0
出口ダンバ開度 (%)		0.0	0.0	5.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
放熱量 (kW <sub>T</sub> )	表面放散熱量	62.2	87.1	28.0	39.1	27.8	38.9	27.5	38.5
	リーク放熱量	376.1	513.9	545.0	762.5	359.4	502.9	204.9	286.7
	合計値	429.3	601.0	573.0	801.6	387.2	541.8	232.4	325.2
備考		(1) 網掛けは固定条件、他は計算値。 (2) T₂は、「もんじゅ」にならい入口ナトリウム温度とした。 (3) 設計裕度は「もんじゅ」と同様に1.4倍とした。 (4) 系統温度300°Cにおけるナトリウム流量は、A/Cの定格流量である。 (5) ダンバとペーンの開度-抵抗特性は「もんじゅ」設計値を採用。							

表3.13 大型炉と「もんじゅ」の系統放熱量

単位: × 10<sup>3</sup> [kcal/h]

プラント名		大型炉		もんじゅ	
運転モード		定格運転	300°C	定格運転	325°C
炉容器廻り	系統・機器	裕度			
	遮蔽プラグ	1.3	130.5	31.3	48.0
	炉容器	1.4	86.2	47.9	134.0
小計		216.7	79.2	182.0	101.0
1次主冷却系	IHX	1.5	53.2	27.1	62.0
	循環ポンプ	1.4	12.8	8.9	16.0
	P O F C、他		—	—	(上記含む)
	H/L配管	2.0	16.4	7.7	68.0
	C/L配管	2.0	38.9	27.2	77.0
	小計	1ループ	121.3	70.9	223.0
		3ループ	363.9	212.7	669.0
2次主冷却系	S G	1.2	72.8	50.8	100.0
	循環ポンプ	1.4	7.3	6.4	6.0
	P O F C、他		—	—	16.0
	H/L配管	2.0	47.4	23.3	167(92)
	M/L配管	2.0	—	—	38.0
	C/L配管	2.0	31.8	28.9	112(60)
補助冷却系	小計	1ループ	159.3	109.4	439(312)
		3ループ	477.9	328.2	1190.0
	H/L配管	2.0	24.3	11.4	22.0
	C/L配管	2.0	15.9	14.1	15.0
	A/C本体	1.4	516.9	689.4	376.0
	小計	1ループ	557.1	714.9	413.0
		3ループ	1671.3	2144.7	1239.0
	総放熱量	kcal/hr	2729.8	2764.8	3280.0
		kw	3174.2	3214.9	3814.0
備考		( ) 内はBループ分を示す			

## 第4章 系統降温特性検討解析

### 4.1 調査・検討項目

本解析は、プラントトリップ後の原子炉入口冷却材温度が高温待機状態の下げ止まり目標である300°Cに到達するまでの経過時間を定量的に把握することを主目的としている。

また、本解析では「もんじゅ」のプラント運用方法を適用した運転条件下でトリップ後の温度挙動を調査し、さらに同結果を踏まえて本プラントにふさわしいトリップ後の系統運用方法を検討・案出する。

主な検討項目を以下に示す。

- a. 流量半減時間とボニーモータ流量の適正化
- b. 定格流量移行時期とポンプ入熱の検討
- c. IRACS運用の最適化
- d. IRACSとSGの並行運用

### 4.2 解析条件と環境整備の概要

#### (1) 解析条件

- a. 計算コード：Super-COPD
- b. 解析事象：原子炉手動トリップ
- c. 計算時間：トリップ後24時間
- d. 安全保護系：「もんじゅ」相当
- e. 崩壊熱割合：「もんじゅ」低燃焼度初装荷炉心

初期100%出力到達直後のノミナル値を適用

- f. 雰囲気温度：20°C (但し、A/C入口空気温度のみ40°C)
- g. 放散熱量：第3章の調査結果を適用
- h. 初期条件：100%定格出力 (1600MWt)

#### (2) 計算環境の整備

##### ① 機器構造材重量および冷却材重量の算出

各重量は、構造材と冷却材の保有熱を熱容量として扱うために算出した。原子炉容器および炉心構成要素、1次系主配管の各重量はプラント工学室の検討結果を参考とし、IHXを含めた2次系の機器重量については平成2年度暫定仕様に基づいて機器構造を具体化したうえで定量化した。

なお、計算方法および計算結果等についてはAppendix-2を参照されたい。

##### ② Super-COPDコードの整備

異常事象発生から1時間以降の過渡計算では、A/C制御モードの変更や系統放熱な

どをシミュレーションする必要がある。そこで、これらの計算に関わる計算モジュールを長時間解析に適応すべく整備した。主な整備内容を表4. 1に示す。

### ③ システム入力データの整備

平成2年度に作成した大型炉用のシステム入力データについて、以下の整備を実施した。

#### a. 炉心崩壊熱データの改訂

解析対象の炉心は、「もんじゅ」325°C保持時間検討解析に準じて低燃焼度初装荷炉心・初期100%出力到達直後を採用した。また、着目値には最確値(ノミナル値)を適用した。

表4. 2に炉心崩壊熱の経時変化を示す。

#### b. 構造材重量および冷却材重量の改訂

プラント構成機器の各重量データを前項①の重量算出結果に基づいて改訂した。

データ整備に採用した各機器毎の構造材と冷却材の各重量を表4. 3に示す。

#### c. 放熱計算用データの整備

本解析では図4. 1に示す配管および機器、プレナムの放熱を計算対象としている。

また、放熱計算の主要データは各部位の伝熱面積や熱通過率などであり、そのうち熱通過率については第3章で既述した放熱量の調査結果に基づいて近似式を作成し、この近似式に与える係数をシステム入力データに追加した。

前記表4. 3に各部位の伝熱面積および熱通過率を示す。

#### d. A/C出口ナトリウム温度制御系モデルの改訂

同制御系はIRACS起動後の2次系コールドレグ温度をトリップ前の運転温度に調節するものであり、その制御方式は「もんじゅ」と同様に送風機速度およびダンパ開度を可変して行う。

一方、本制御モデルの主な改訂内容は、制御モード切替用非線形要素と制御モードI～IIIに対応するフィードフォワード信号用非線形要素の追加、演算要素のアドレス変更などである。改訂後のA/C出口ナトリウム温度制御系モデルを図4. 2に示す。

#### e. A/C制御モード変更シーケンスの整備

本シーケンスは、ダンパが制御領域内の開度(10%～90%)で送風量を調節するように、送風機速度を自動的に切替えるシステムインターロックである。このインターロックシーケンスは「もんじゅ」のACS制御モード切換ロジック(11)に倣い、送風機速度を高速(モードI)、低速(モードII)、自然通風(モードIII)の順に段階的に変更する。

入力データのコーディング用に作成した本シーケンスの論理回路を図4. 3に示す。

#### f. ダンパ開度～風量テーブルの改訂

崩壊熱除去運転後におけるA/Cの全放熱は、出口ダクト連絡部に発生する循環流や伝熱部をバイパスするリーク流による熱損失、ダクトやケーシングでの輻射などにより、有効伝熱部のみを計算対象にした放熱量を上回ることが実験的に判明している。COPDやNATURALといった一連の「もんじゅ」設計評価コードのA/Cモデルは、有効伝熱部における対流熱伝達だけに着目してモデル化がなされ、且つ、以下に示すような解析事象を対象に検証が行われていることから、有効伝熱部以外の放熱やダンパがほぼ閉切った状態の運転特性については詳細化されていない。

COPD : 送風機起動状況下での風量やナトリウム流量等の外乱に対する熱的応答

NATURAL : 自然通風状態（ダンパ全開）でのヒートマスバランスおよびプラント運転特性の経時変化

一方、Super-COPDにはケーシング等の放熱を計算するオプション（但し、熱通過率の入力が必要）が用意されているが、本解析では計算時間を短縮するために敢えて同オプションは使用せずに、有効伝熱部の除熱量がA/C全放熱量と等価になる空気流量を与えて近似することにした。

改訂後のダンパ開度 - 風量テーブル（制御モードⅢ用）では最小空気流量を3.5 [kg/sec] と改め、Super-COPDで計算したA/C全放熱量と前記3.3.3項に基づく計算結果が概ねよく一致することを確認した。各計算方法で算出したA/C一基あたりの全放熱量を以下に示す。

運転温度(°C)	Super-COPD計算値	実機放熱評価手法
325	837.83 (kw <sub>t</sub> )	823.97 (kw <sub>t</sub> )
300	794.12 (kw <sub>t</sub> )	801.60 (kw <sub>t</sub> )
250	633.84 (kw <sub>t</sub> )	610.52 (kw <sub>t</sub> )

#### 4.3 計算結果

##### (1) 流量応答

図4.4に各系統の流量応答特性を示す。

本解析では、ポンプトリップ遅延時間を0秒で計算していることから1次系と2次系の各流量は原子炉トリップ後直ちに減少する（図a）。

1次系流量は「もんじゅ」と同様に5.6秒で半減し、原子炉トリップから約50秒後にはボニーモータ運転を想定した9.5%流量に達する。

2次系では、ポンプは「もんじゅ」とほぼ同様の流量半減時間（約6秒）でコースト

ダウンするが、これと並行する形で I R A C S 「起動」に関わる弁の開閉動作 (A/C 出口ナトリウム止弁「開」、SG入口ナトリウム止弁「閉」) が伴うため、約 25 % からボニーモータ流量到達までの流量低下は緩やかな減少カーブを描いている。2 次系のボニーモータ流量は定格流量の 4.35 % に相当し、この内訳は A/C 定格流量 (3.75 %) と SG 最小流量 (0.6 %) である。

水・蒸気系については、SG給水流量はプラントトリップ発生から 30 秒後に 0 % に至るものとし、その間の流量降下は減少率一定とする暫定条件を設定した。SG出口蒸気流量の応答は、給水流量が 0 % に達するまではほぼ給水流量の変化に追従し、30 秒以降はナトリウム側との交換熱量の低下および SG 伝熱管内部保有水の減少によって徐々に低下している (図 b)。

図 c と図 d は空気流量の経時変化である。計算開始から 15 秒までの空気流量の増加は、送風機「起動」と入口ダンパ「開」によってリーク風量が増加したために生じた。また、入口ペーンと出口ダンパは 30 秒で開きはじめ、45 秒に全開となり、それ以後は A/C 出口ナトリウム温度制御系のダンパ開閉指令信号によって開度を変えて空気流量を調節する。

図 d は、A/C 出口ナトリウム温度制御系指令に応答した空気流量の変化である。同図では計算開始から約 130 分と約 180 分の時点で空気流量がステップ状に減少しているが、これは送風機速度がモード I (高速) からモード II (低速) へ、同じくモード II からモード III (自然通風) にそれぞれ切り替わったためである。

## (2) 温度特性

定格運転状態での原子炉スクラム発生から 24 時間経過後に亘る冷却系の温度応答特性を図 4.5 に示す。

先ずはじめに、解析の本題にあげている原子炉容器入口温度 (①) が 300 °C に達するまでの経過時間は、スクラムの発生から約 850 分 (14 時間 10 分) であった。この時点で原子炉容器出口温度 (②) は入口側に比べ 2 °C 程度高く、同観測位置の冷却材温度が 300 °C に到達する時間は約 890 分 (14 時間 50 分) 後である。

また、1 次系全般の温度応答は、原子炉スクラムによる炉心出力の急速な低下に伴って各部の温度が一旦下がり、その後 1 次系流量の減少によって炉心出力と流量の比が増加するため一次ピークを迎えるが、炉心崩壊熱の低下により再び降温率 3.4 °C/h で徐々に降下していく。

なお、1 次系各部の一次ピーク温度は概ね次の通りであった。

- a) IHX 1 次側出口 : 440 °C
- b) 原子炉容器入口 : 415 °C
- c) 炉心入口 : 400 °C

d) 炉心出口 : 417°C

2次系では、IHX出口をはじめとするホットレグの各温度(⑦, ⑧, )は、スクラム直後に定格運転温度を上回る520°C前後まで一旦上昇し、その後IRACSの起動や崩壊熱の低下により1次系ホットレグとほぼ同じ温度勾配で徐々に低下している。また、コールドレグのうちA/C出口とIHX入口の各温度は、A/Cの起動や制御モードの変更によって若干変動しているが約350分まではほぼ制御目標温度(325°C)を保持しており、それ以降はA/C等の放熱によって約3.5°C/hrの降温率で徐々に低下している。一方、給水停止およびドライアウトにより除熱機能を失ったSGでは、ナトリウム出口部(⑨)に上下幅が比較的大きい温度変動を見る。この温度変動は、SG内部に停滞していたナトリウムや低流量で流入したナトリウムが熱交換されずに輸送遅れ時間を経て流出されることに起因する。SG出口部の温度変動は約400分後に収束するが、輸送遅れによる入口温度と出口温度の逆転状態は解消されずに計算終了まで継続している。

更に、各観測部の温度をホットレグとコールドレグに分類してグラフ化すると、1次系と2次系の各ホットレグ温度はスクラム発生から約200分後にはほぼ等温となり、その後は同一勾配で低下しているのが判る(図4.6)。コールドレグでは、原子炉容器入口とIHX1次側出口はホットレグと同様な温度特性を示すが、IHX2次側入口はIRACSによる除熱が影響して主冷却系で最も温度が低くなっている。また、IHX2次側入口温度と前記1次系の各温度との差は、スクラム発生から400分後では4.8°C程度、同じく1440分(24時間)後では3.3°C程度であり、僅かにその差を狭めながら徐々に低下している(図4.7)。

#### 4.4 計算結果の考察

Super-COPDによる計算では、原子炉容器入口温度を判定基準(300°C)とする高温保持時間は、原子炉スクラムから14時間程度と見込まれ、目標としている4.8時間を大幅に下回る結果となった。系統降温特性については、既にこれまで紹介した温度応答とHYMONによる「もんじゅ」の長時間熱過渡解析例<sup>(12)</sup>とを比較した結果、本プラントの温度応答はピーク温度や発生時間、温度勾配等の固有量が異なる点を除いては「もんじゅ」とほぼ同様の挙動を示すことが判った。

この様な結果をもたらした背景として、ハード面では配管短縮や機器のコンパクト化を図っているが、冷却系の基本的構成が「もんじゅ」と同様に中間系を有する多重系統であること、ソフト面では「もんじゅ」に準じた安全保護系と崩壊熱除去系の運用方法を適用したことが考えられる。さらに特筆すべき要因としてA/Cの放熱があげられる。崩壊熱除去運転を終えたA/Cは、「もんじゅ」ならびに本プラントの中で最大の放熱源である

ことから、高温保持時間および系統降温特性を改善するうえでハードとソフトの両面で対策を必要とする。

また、前記4.1項の各検討項目について、今回の計算結果に基づく考察を以下に記す。

#### (1) 流量半減時間とボニーモータ流量の適正化

本来、当該値は冷却系機器に与える熱過渡や炉心崩壊熱の冷却に必要な最小流量を調査したうえで設定すべきものである。しかし、今回の計算に用いた流量半減時間とボニーモータ流量は「もんじゅ」設計値を適用した暫定条件であることから、本プラントへの適応性を考えた場合には一切に妥当と云い難い。したがって、今後の計算に採用する各設定値については所期の調査方法に基づいて適用範囲や最確値を明らかにしておくことが肝要であり、定性的には次の様な点に留意した調査を提案する。

##### ①流量半減時間の短縮化

主冷却系配管の合理化によって冷却材一巡時間が短くなっていることから、「もんじゅ」と同時間では I H X 以降で熱交換されなかった冷却材が原子炉容器入口および炉心入口に温度上昇をもたらすため、崩壊熱レベルが高い時期にコールドレグの温度が低い冷却材で効率よく炉心冷却を行うように流量半減時間の短縮を図る。

##### ②ボニーモータ流量の最適化

現状のボニーモータ流量の内訳については既に述べた通りである。

本プラントでは、ボニーモータ運転時の1次系と2次系の流量比は約1:0.38であり、「もんじゅ」の約1:0.56に比べると極度にアンバランスといえよう。この様な流量条件が起因あるいは助長したと考えられる熱的事象を以下に示す。

- a. 2次系ホットレグの急速な温度上昇、1次系ホットレグとの等温化
- b. SG出入口温度差
- c. 1次系コールドレグの急速な温度上昇
- d. 一次ピークの到達温度

上記の温度応答を緩和するうえで鍵となる2次系ボニーモータ流量は、A/C定格流量とプラス $\alpha$  (SG極小流量) から成り、対策時には炉心冷却を損ねない範囲の $+ \alpha$ を見い出して再設定する。

#### (2) 定格流量移行時期とポンプ入熱の検討

ポンプ入熱は、放熱による系統全体の温度低下を緩和する手段の一つとして考えられるため、ボニーモータ運転から定格運転への移行時期と入熱量について検討した。

##### ①移行時期

定格流量への移行時期は系統全体がほぼ等温状態に達し、2次系コールドレグのミキシングティー部で I R A C S 出口と SG 出口の双方の冷却材温度差が 5 °C 前後になった時点が妥当と考える。この状態に該当する時間は、今回の計算ではスクラムから約

600分後であったが、ポンプモータ流量が異なれば幾分前後するものと考える。

また、移行に際してはポンプ以外で唯一自由液面を有する原子炉容器の炉壁、遮蔽ブラングの出入口配管貫通部等の熱過渡に留意し、定格流量への移行後はIRACS待機時出口ナトリウム温度制御系と連動する流量調節弁（「もんじゅ」D弁相当）の全開が予想されるため、2次系流量が定格流量を若干上回ることを念頭に入れておく。

## ②ポンプ入熱量

ポンプ入熱量は定格流量時のポンプ軸動力( $q$ )を4.1式から求め、各算出値に単位換算を施して算定した。

その結果、循環ポンプ1基当たりの入熱量は1次系が約2000 [kw]、2次系が約700 [kw]となり、総入熱量は8100 [kw]程度と推定される。

また、算出した総入熱量は系統温度300°Cでの全放熱量(約3300 kw)を上回ることから系統全体の降温抑制に充分適用可能であり、温度制御についても崩壊熱とポンプ入熱から成る系統入熱量と放熱量がバランスする流量でポンプを運転することにより対応可能と考える。

$$q = Q \cdot h \quad [\text{kg} \cdot \text{m/sec}] \quad (4.1)$$

ここで

$Q$ ：主循環ポンプ定格流量  $[\text{kg/sec}]$

$h$ ：系統損失ヘッド =  $\Delta P / \rho$   $[\text{m}]$

## (3) IRACS運用の最適化

周知の通りIRACSは炉心冷却を目的に設置されている。

しかし、IRACS運転時の制御系は「もんじゅ」に準じてスクラム5分前のSG出口ナトリウム温度を制御目標にしているため、炉心部が定格運転温度をはるかに下回ってもIRACSの運転を継続する。その結果、IRACSは所期の目標を充分に果たすが、高温待機に逆行して冷却材温度を過剰に低下させる。

崩壊熱以外に熱源が無い状況で高温待機状態を実現するには、本報の冒頭でも触れたように「崩壊熱による炉心部の温度上昇に配慮しつつも冷却材を過冷却させない崩壊熱除去方法」の導入が賢明である。その一案として、冷却材温度の低下を緩和するために崩壊熱を積極的に活用した運転への移行が考えられる。現段階の検討では、この移行時期は崩壊熱の低下により一次ピークが回復し、更に各部が定格運転温度以下になった時点を一つの目安と考える。また、制御目標はSG出口ナトリウム温度から炉心出口温度、あるいは炉容器出口温度に切換えることを提案する。

尚、本件については概念的な検討にとどめ、制御系の具体化や成立性の評価に関しては有効性を検討したうえで取り組むことにした。また、工学的安全保護系であるIRACSの多用化や制御系の複雑化が許されるものか懐疑的な課題を有する。

(4) I R A C S と SG の並行運用

I R A C S と SG の並行運用は、高温待機状態の対象範囲が水・蒸気系まで拡張した場合に必然的なものとなる。現時点では、水・蒸気系の高温待機状態を実現する上で必要な熱量が明らかになっていないため成立性に関わる定量的な検討はできないが、ナトリウム系を対象にした今回の計算から少なくとも次のことが類推できる。

- a. 水・蒸気系への熱供給は原子炉スクラムから数時間程度であれば可能と考えるが、SG および水・蒸気系の一部が崩壊熱除去設備として機能するため、工学的安全保護設備の対象範囲が大幅に拡大する。
- b. 現状の運転条件では、水・蒸気系に熱供給すると高温保持時間が更に短くなり、高温待機状態の実現の見通しが危ぶまれる。
- c. 水・蒸気系の機密性や保温性能はナトリウム系に比べ一般的に劣るため、ポンプ入熱によるナトリウム系の高温保持と水・蒸気系への熱供給は両立し難い。

表4. 1 Super-COPDの整備概要

モジュール名	整備内容
L G	<ul style="list-style-type: none"> <li>システムインターロック上の自己保持回路やW, P(ワイヤーアウト)回路がモデル化できるよう、既存の論理ブロックにN O R(Not OR)を追加した。</li> <li>検出要素と動作要素が成立条件の変化に対応して「動作」と「復帰」を計算終了まで判定し続けるオプションを追加した。</li> </ul>
S G	<ul style="list-style-type: none"> <li>計算時間が指定時間を超えると1次側から2次側への伝熱を断熱扱いにする計算オプションを追加した。</li> </ul>
SG, HX, LN, MN	<ul style="list-style-type: none"> <li>シェルや配管等の構造材と空気との熱通過率を、両者の温度差の関数であらわした近似式で計算するオプションを追加した。</li> </ul>
V A	<ul style="list-style-type: none"> <li>実機では、A/C制御モード変更直後の空気流量は、送風機速度の切換えにより急速に増減する。この空気流量のステップ変化は、モジュールVAではモード変更前後の空気流量に差が生じた場合、両流量が一致するまでモード変更前の流量を出力値としてホールドしているため生じない。そこで、機器動作と状態量との整合を図る目的で、モード変更後の空気流量は、変更前後における流量差の有無に関わらず機器動作に対応した状態量を適用する。</li> <li>なお、モード変更にともなう空気流量の過剰な操作量は、A/C出口ナトリウム温度制御系と連動するダンバの開度を変えて調節される。</li> </ul>

表4. 2 炉心崩壊熱テーブル

冷却時間(sec)	ノミナル値	ミニマム値
0.0	5.1724E-2	4.3966E-2
2.000E-1	5.0630E-2	4.3035E-2
5.000E-1	4.9231E-2	4.1846E-2
1.000E00	4.7333E-2	4.0233E-2
3.000E00	4.2410E-2	3.6048E-2
7.000E00	3.7287E-2	3.1694E-2
2.000E+1	3.0597E-2	2.6008E-2
5.000E+1	2.5034E-2	2.1279E-2
1.000E+2	2.0928E-2	1.7784E-2
3.000E+2	1.5396E-2	1.3087E-2
7.000E+2	1.1717E-2	9.9597E-3
1.500E+3	8.2736E-3	7.0326E-3
2.500E+3	6.0173E-3	5.1147E-3
4.000E+3	4.2357E-3	3.6004E-3
6.000E+3	3.0569E-3	2.5984E-3
1.000E+4	2.0385E-3	1.7327E-3
2.000E+4	1.2213E-3	1.0381E-3
3.000E+4	9.1864E-4	7.8084E-4
5.000E+4	6.3036E-4	5.3581E-4
7.000E+4	4.8169E-4	4.0944E-4
1.728E+5	2.2139E-4	1.8818E-4
4.320E+5	8.5985E-5	7.3087E-5
8.640E+5	3.1770E-5	2.7005E-5
2.592E+6	6.2591E-6	5.3203E-6
6.048E+6	1.9426E-6	1.6512E-6

(備考)

・崩壊熱( $P/P_0$ )：「もんじゅ」低燃焼度初装荷炉心、

初期100%出力到達直後

表4.3 放熱計算データ作成用ワークシート

機器名称	モジュールNo.	構造重量 *10 <sup>3</sup> (kg)	冷却材 重量 *10 <sup>3</sup> (kg)	放熱量 *10 <sup>3</sup> kcal/h	表面積 S(m <sup>2</sup> )	熱通過率 300°C時	備考		
炉容器	MN(1) 下部ブレナム	68.349	357.622	172.8 定格時	48.8 300°C時	176.2 0.592	0.9 0.527		
配管	H/L C/L配管+ポンプ	116.268 LN(1)～LN(3) LN(4)～LN(6)	345.788 10.080 13.354 161.454	43.9 7.207 10.007 25.077	30.4 16.4 38.9 51.7	205.9 7.7 27.2 36.1	0.652 0.658 0.973 1.11.0		
I	1次系入口ブレナム 1次系出口ブレナム	MN(3)～MN(5) MN(6)～MN(8)	10.527 2.646	17.732 4.199	11.1 3.3	4.5 2.3	44.2 22.3	0.492 0.411	0.364 0.368
H	伝熱部	HX(1)～HX(3)	10.205	6.9/11.2	8.2	5.0	38.6	0.538	0.463
X	2次系入口ブレナム 2次系入口ブレナム	MN(9)～MN(11) MN(24)～MN(26)	3.809 7.209	— —	— —	— —	—	—	—
5	H/L(M/T)	LN(7)～LN(9)	3.998	4.604	28.4	13.9	31.1	1.883	1.596
2	ミキシングディイーI	MN(12)～MN(14)	—	—	—	—	—	—	—
次	H/L(M/T～SG)	LN(10)～LN(12)	3.236	3.070	18.9	9.3	22.2	1.755	1.496
系	X/L(SG～M/T)	LN(13)～LN(15)	3.401	3.116	13.8	12.5	25.0	1.810	1.786
配	ミキシングディイーII	MN(21)～MN(23)	—	—	—	—	—	—	—
管	C/L(M/T～HX)	LN(16)～LN(18)	6.840	5.841	17.9	16.3	46.8	1.254	1.244
C/L配管+ポンプ	MN(15)～MN(17)	42.846	15.841	25.2	22.7	46.8	1.765	1.732	
S	入口ブレナム	SG(1)～SG(3)	6.086	7.625	7.8	3.4	41.6	0.387	0.292
G	出口ブレナム	MN(18)～MN(20)	5.436	14.793	3.8	3.4	40.7	0.306	0.298
A	H/L配管	LN(19)～LN(21)	3.521	2.394	24.3	11.4	35.6	1.407	1.144
C	C/L配管	LN(22)～LN(24)	3.396	2.365	15.9	14.1	35.6	1.464	1.415

【注】 1)熱容量計算用鋼材重量、 2)内部構造材重量等価分を含む、

W<sub>c</sub>:伝熱管重量 \*10<sup>3</sup>(kg)

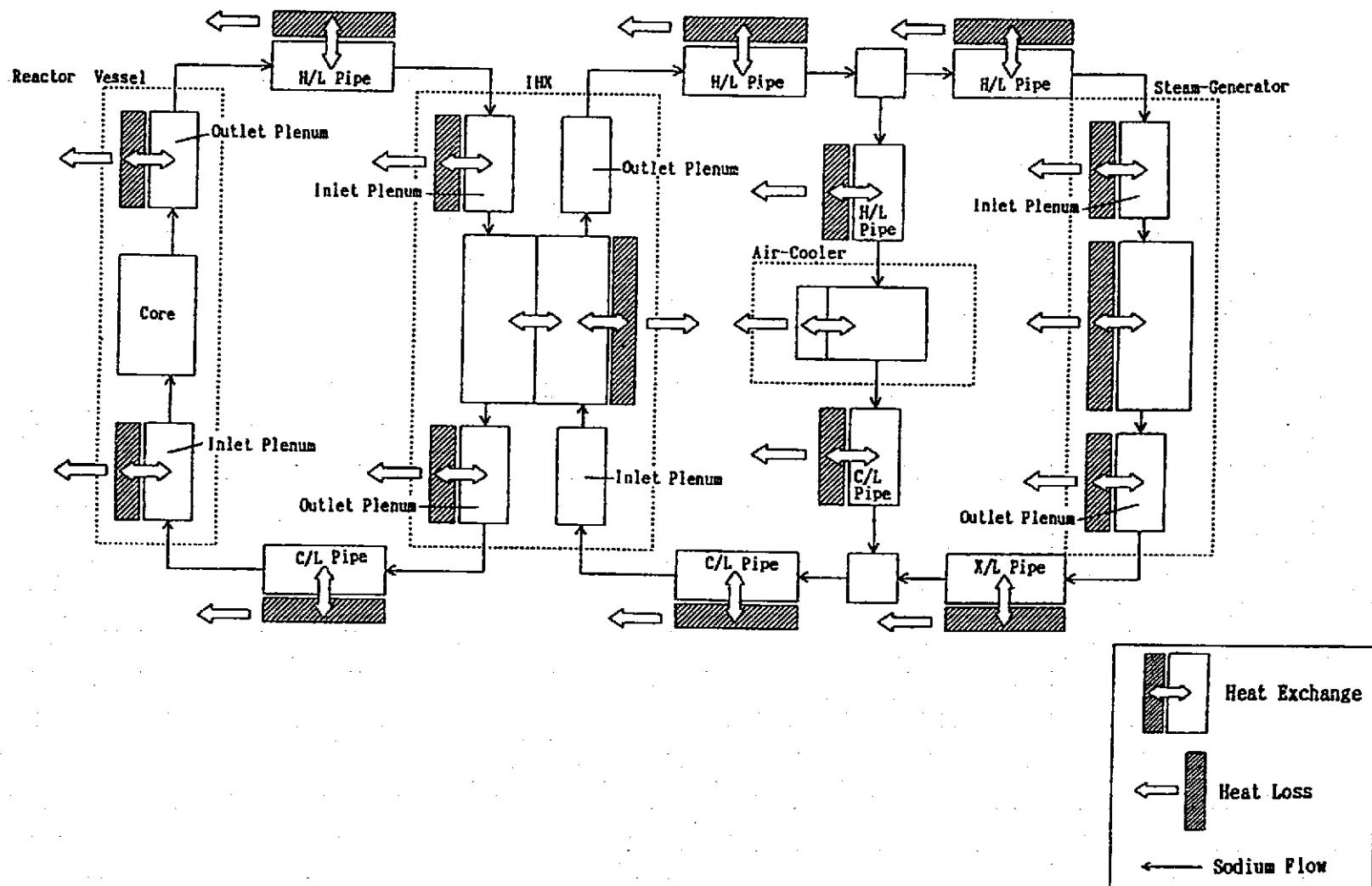


図4.1 放熱計算対象機器・配管

- 57 -

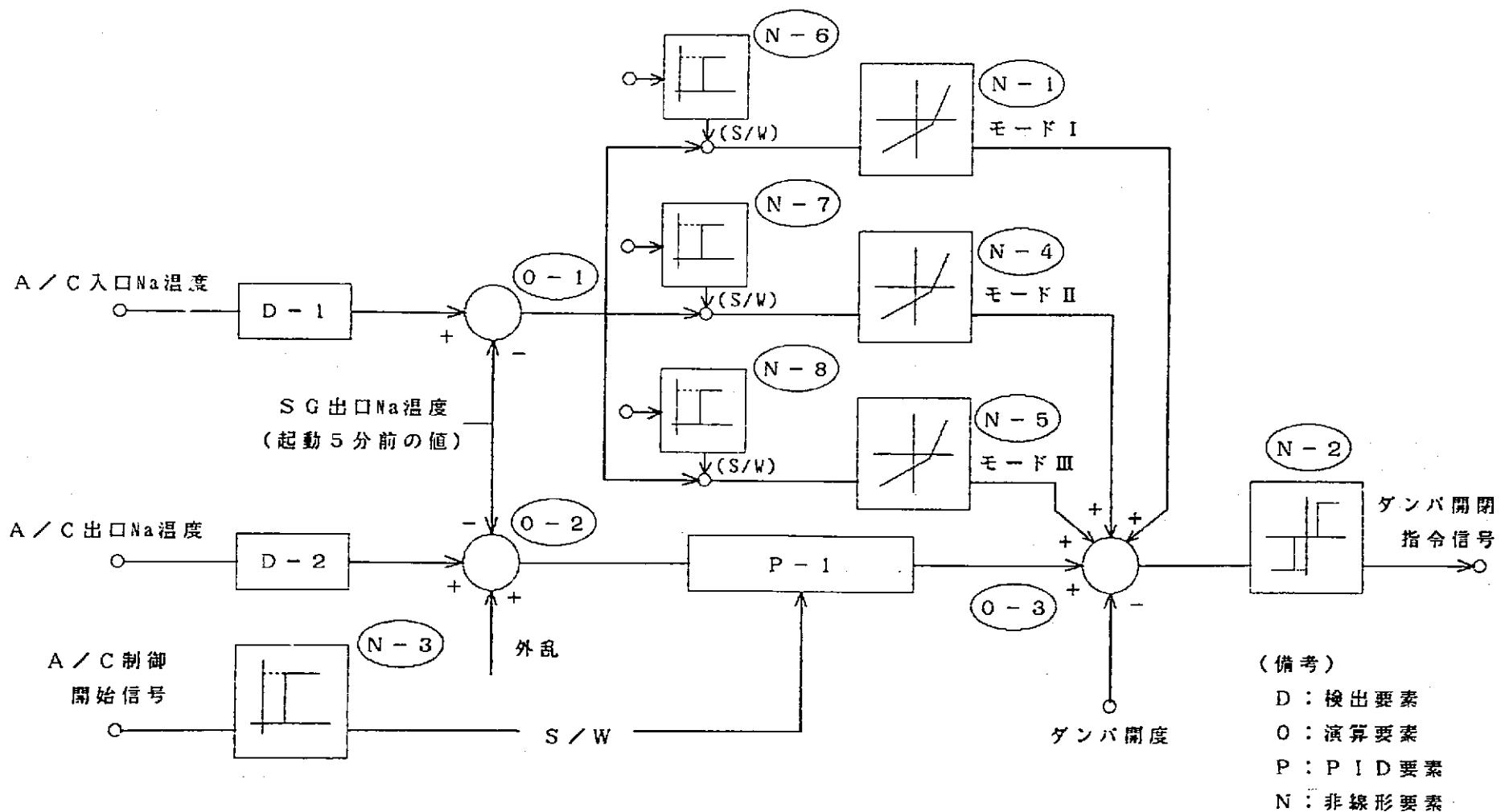


図4.2 A/C出口ナトリウム温度制御系モデル図 (A/C起動後)

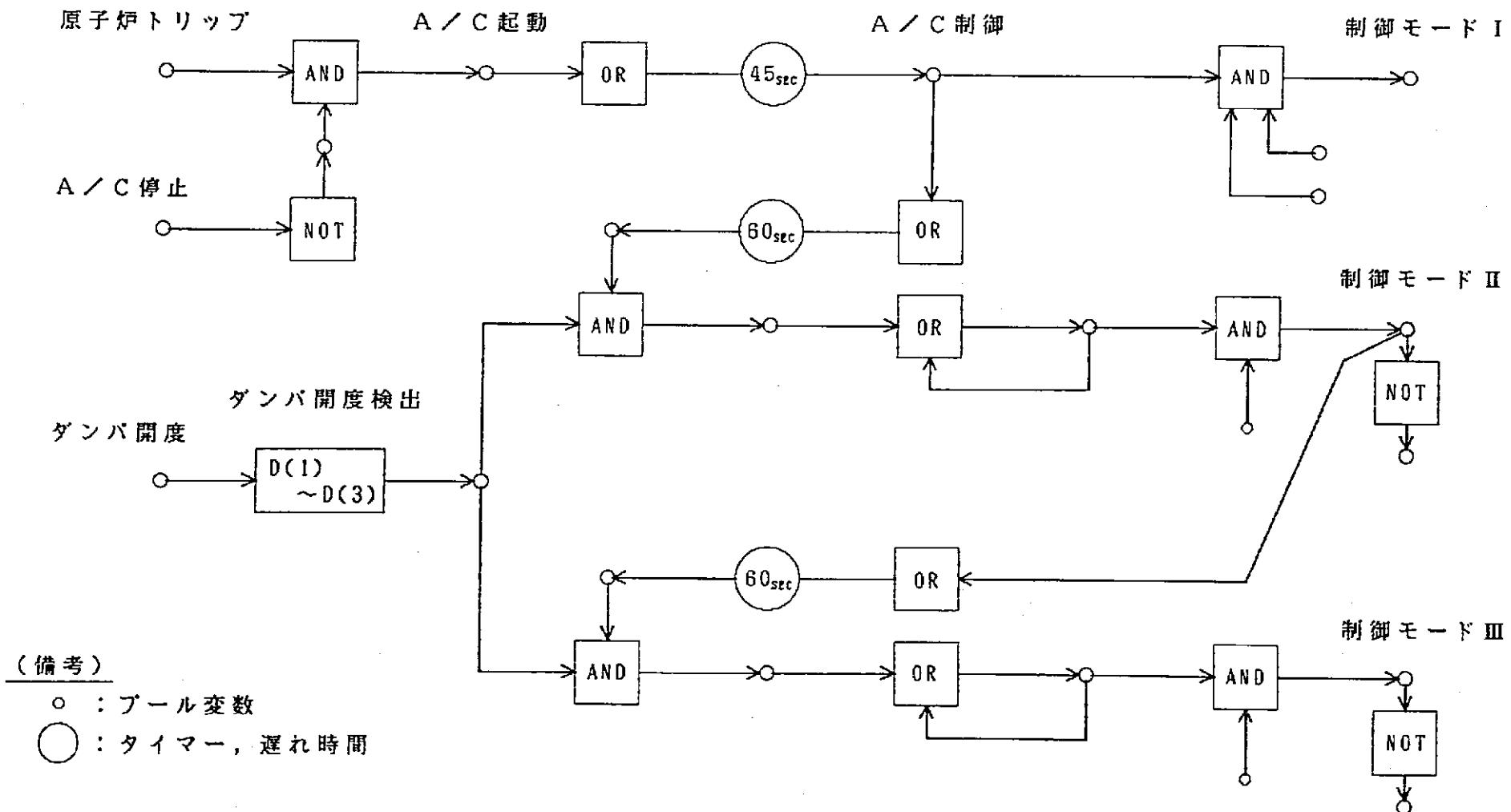


図4.3 A/C制御モード変更シーケンス論理回路

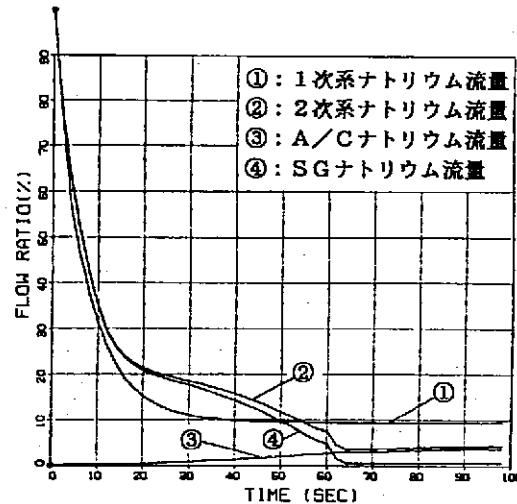


図 a

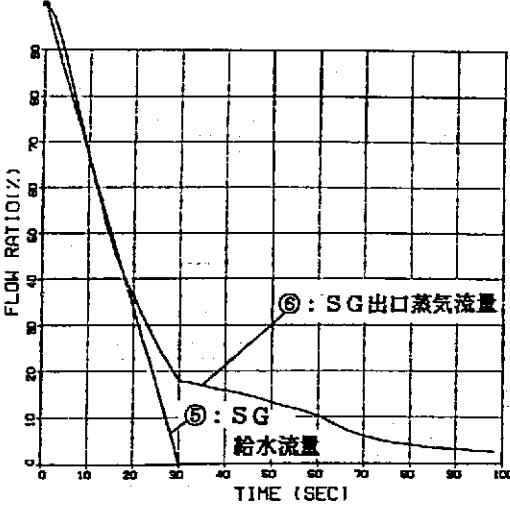


図 b

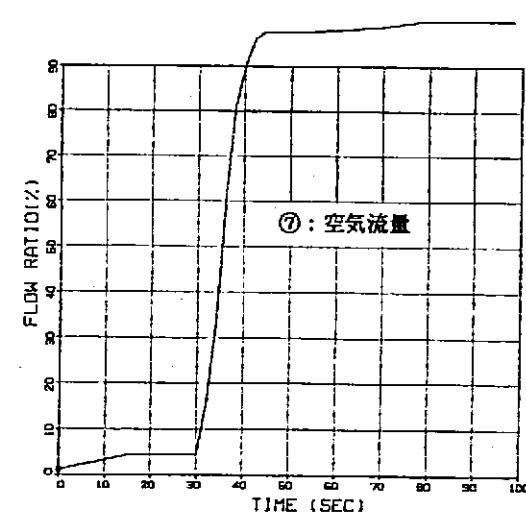
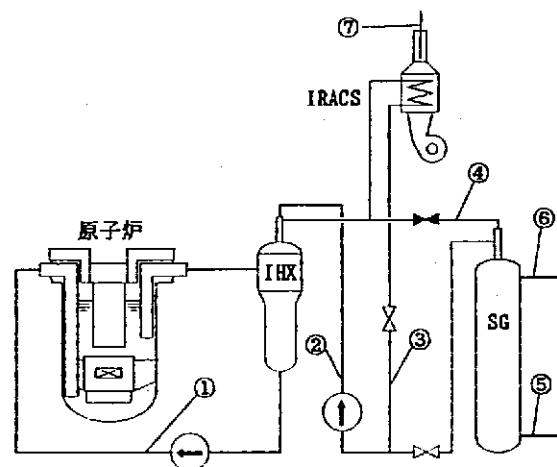


図 c

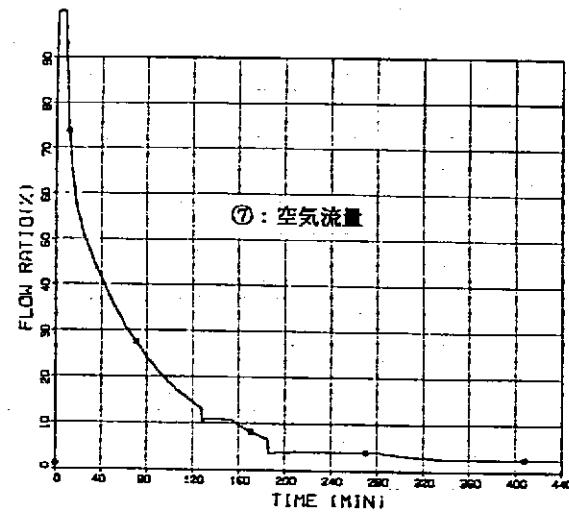


図 d

図4.4 流量応答特性（原子炉手動トリップ解析）

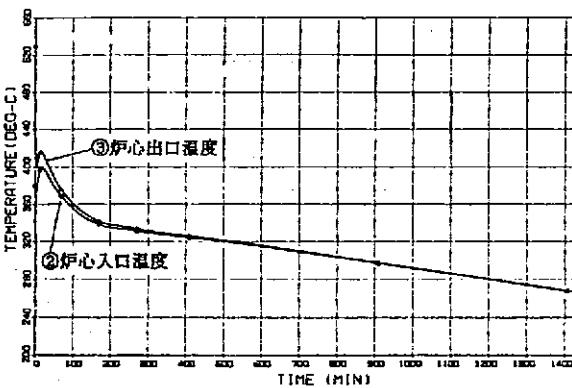


図 b

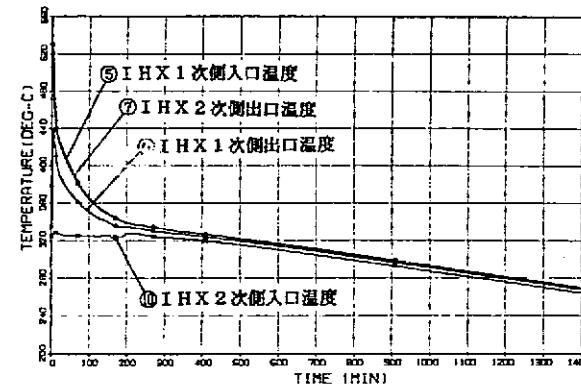


図 c

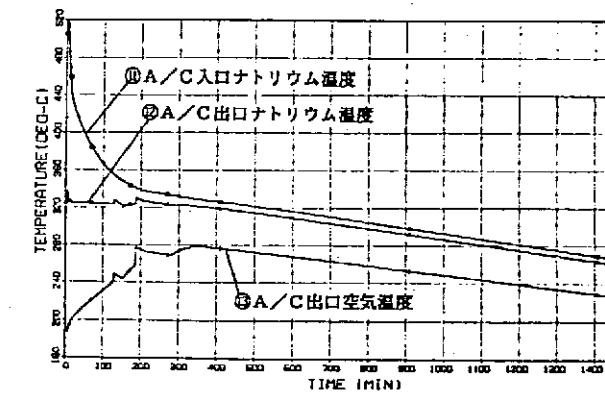


図 d

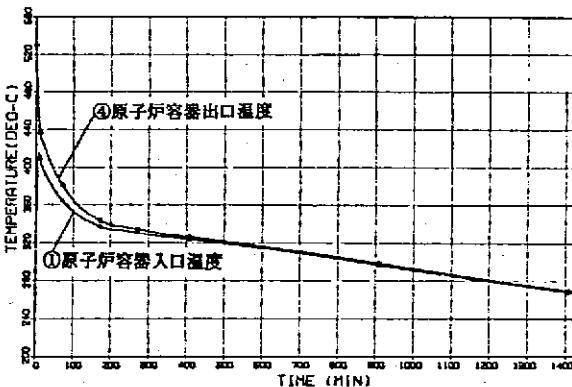


図 a

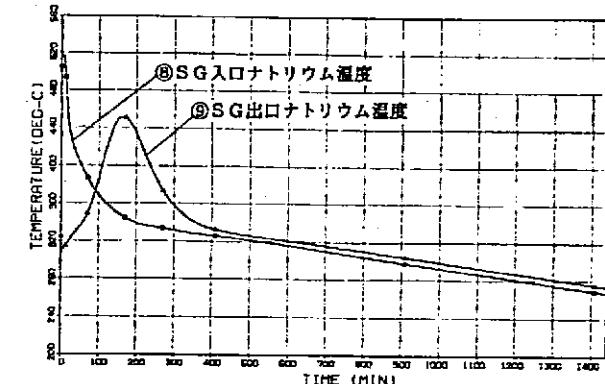
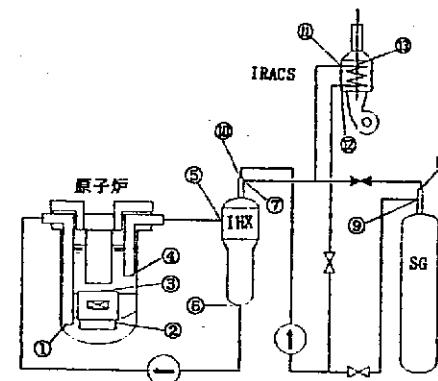


図 e

図4.5 冷却系各部温度応答特性（原子炉手動トリップ解析）

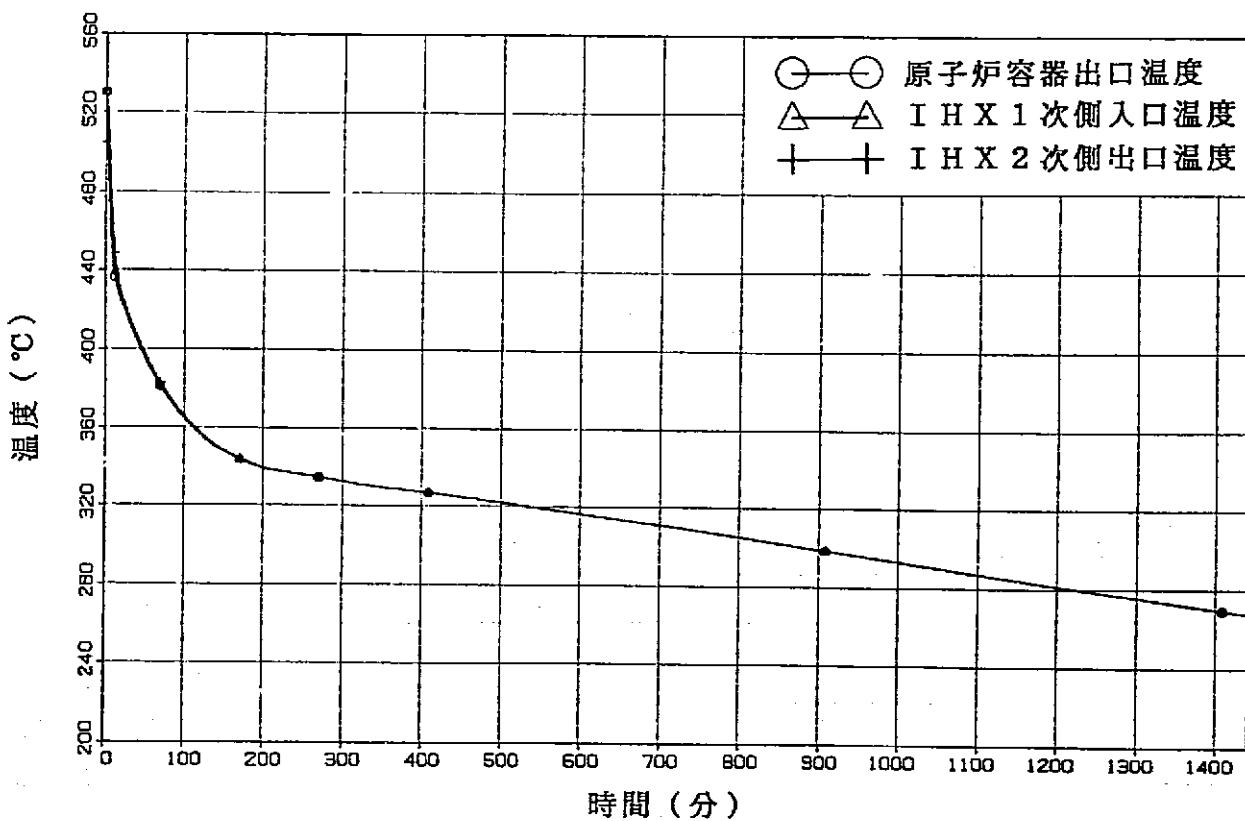


図4.6 ホットレグ温度応答特性（原子炉手動トリップ解析）

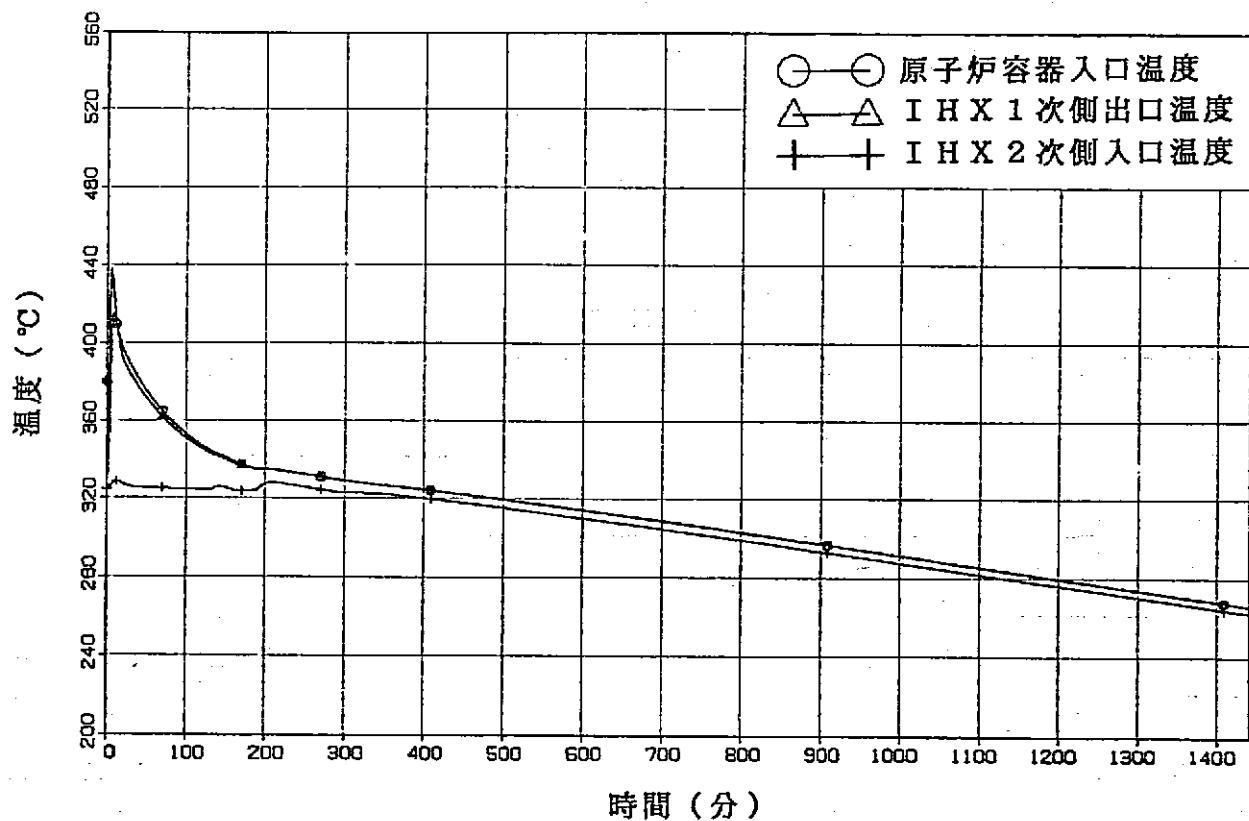


図4.7 コールドレグ温度応答特性（原子炉手動トリップ解析）

## 第5章 結 言

60万KWeクラスのFBR大型炉を対象にした今回の放熱調査や系統降温特性解析は、高温待機状態の実現にむけて対応すべき課題を発掘する目的で行った。

また、同主旨に基づいて定量化した温度応答や高温保持時間は、現段階で高温待機実現の可否を決定づけるものではないことを予め述べ、一連の調査結果を以下に示す。

- (1) 「もんじゅ」設計手法および伝熱工学上の一般的手法に基づいて算出した系統全体の放熱量は、定格運転時で約3.2 MWt、系統温度300°Cでは約3.3 MWtであり、機器や配管のコンパクト化によって「もんじゅ」に比べ約10%~20%減少している。
- (2) 原子炉スクラムから24時間後までの系統降温特性解析では、原子炉容器入口温度を判定基準(300°C)とする高温保持時間は14時間程と見込まれ、目標としている48時間を大幅に下回る結果が得られた。
- (3) 本プラントの温度応答は、一次ピーク温度や発生時間、温度勾配等が異なる点を除いては「もんじゅ」とほぼ同様である。その原因として、「もんじゅ」に準じた安全保護系と崩壊熱除去系の運用方法を適用したことが考えられる。
- (4) 全放熱量の57%~75%を占めるA/Cは、系統降温特性や高温保持時間を改善するうえで優先的にハードとソフトの両面で対策を必要とする。
- (5) 定格流量で運転する循環ポンプの総入熱量は、系統放熱を上回る8.1 MWt程度と推定されることから、冷却材温度の降温抑制や高温保持時間の延長に最も効果的な対策と考える。

以上の結果を踏まえ、高温保持時間の延長や系統降温特性の緩和を目指した系統運用の具体化は、次の観点から取り組むことが肝要と思われる。

### I. 系統運用方法の改善

- ①原子炉スクラムから一次ピークまでの急速な温度応答を緩和するため、本プラントに適した流量半減時間とボニーモータ流量を調査・設定する。
- ②崩壊熱除去運転後におけるダンパやベーンの開閉モードを改善し、A/Cの放熱量の軽減を図る。
- ③ポンプ入熱は高温待機状態の成立性を左右する鍵と考えられることから、冷却材温度の維持に適した運転流量を調査・設定し、その有効性を計算コードで確認する。

### II. 評価手法の整備

- ①設計評価に採用する放熱量や崩壊熱の最適値、これらパラメータの適正な組み合わせを改めて調査・整備する。
- ②今回の計算では、CPU時間はシミュレーション時間の1/8であったが、長時間解析をさらに効率的に行うため適正なタイムメッシュを調査・設定する。

③パーソナルコンピュータ等でプラント全体の降温特性を簡便に解くた、崩壊熱量および系統放熱量等を一点集中モデルとして扱う計算プログラムを作成する。

## 謝　　辞

本設計研究の実施にあたり終始貴重な助言を頂いたプラント工学室永田担当役に謝意を表す。

## 参考文献

- (1) 「もんじゅ」運転要領書(案) 第1分冊, D18\*01/R4
- (2) 「軽水炉発電所のあらまし」, 財団法人原子力安全研究協会,
- (3) 大久保他: 平成二年度F B R大型炉設計研究 -60万kW<sub>n</sub>級プラント-,  
PNC SN9410 90-180
- (4) もんじゅ技術資料「325°C保持時間の検討に係わる解析結果」, MP-GC047
- (5) 大滝: 大型炉設計研究上期報告(5)-系統熱過渡解析条件の検討(その1)-  
PNC PN9410 91-068
- (6) 西川他: 「伝熱工学の学び方」, オーム社
- (7) 甲藤: 「伝熱概論」, 株式会社養賢堂
- (8) もんじゅ技術資料「325°C保持時間に関する解析書」, EP-GC037R
- (9) 星他: 機器単体特性評価試験 -機器単体特性評価-, 東芝(株),  
PNC SJ201 83-09
- (10) 原型炉総合機能試験予測解析のための入力データの整備(Ⅱ) [別冊: データ集(2/3)]  
東芝, 日立, 三菱重工, F B E C, PNC ZJ2449 90-001(3)
- (11) もんじゅ技術資料「実機熱過渡解析用プラントシステムデータ」, EP-B0051R8C
- (12) 猪瀬他: もんじゅ熱過渡解析評価, PNC ZN2410 89-019

A p p e n d i x - 1

系統熱過渡評価に使用する保溫施工要領

平成3年2月6日

## 「系統熱過渡評価に使用する保温施工要領」

プラント工学室 永田

## 1. 概 要

本日依頼があった系統熱過渡評価における保温施行要領想定法について以下の通り回答します。

熱容量算出用には以下の保温施行要領を想定するのが適当と考えられる。

表 热容量算出用保温施行要領想定条件

	ホットレグ部	コールドレグ部
アニュラスギャップ	15.0mm	15.0mm
内装板 材料	SUS304	SUS304
内径	機器外径 + 30mm	機器外径 + 30mm
厚さ	0.3mm	0.3mm
保温材 材料	グラスウール 比重 80kg/m <sup>3</sup>	グラスウール 比重 80kg/m <sup>3</sup>
内径	機器外径 + 30.6mm	機器外径 + 30.6mm
厚さ	184.4mm	134.4mm
外装板 材料	SUS304	SUS304
内径	機器外径 + 199.4 mm	機器外径 + 199.4 mm
厚さ	0.3 mm	0.3mm

放熱量の計算は、上記による計算値を基本としながらも、それに従来機器システム開発で行った実機模擬条件での放熱量測定結果に基づく補正を行った上で実施することが望ましい。

## 2. 補足説明

原則は以下の通りです。

- ① もんじゅ施行要領に基づき想定する。
- ② 当面ホットレグ部及びコールドレグ部の2区分とする。口径・1次系／2次系区分等は考慮しない。
- ③ 使用目的に応じて、非保守的とならない範囲で現実的な想定値とする。

参考とするもんじゅ施行要領は添付資料に示す通りです。

耐震解析では重量が非保守的とならないようにするため、以下の想定としました。

表1 耐震解析用重量算出時における保温施行想定

		ホットレグ部	コールドレグ部
アニュラスギャップ		15.0mm	15.0mm
内装板 材料 内径 厚さ	SUS304 機器外径+30mm 1.6mm	SUS304 機器外径+30mm 1.0mm	
保温材 材料 内径 厚さ	グラスウール 比重量 80kg/m <sup>3</sup> 機器外径+33.2mm 181.8mm	グラスウール 比重量 80kg/m <sup>3</sup> 機器外径+32.0mm 133.0mm	
外装板 材料 内径 厚さ	SUS304 機器外径+196.8 mm 1.6 mm	SUS304 機器外径+198.0 mm 1.0mm	

ここで、内装板及び外挿板がもんじゅ実績より著しく大きくなっているのは、当該厚さが必要との判断ではなく、以下を考慮した結果です。

- (1) 本来耐震解析では支持装置・計装ケーブル等配管付属物の重量を考慮する必要があるが、現在考慮できる段階になく無視している。
- (2) 保温材重量を80kgとしているが、もんじゅ実績値(110kg及び130kg)よりも若干小さい想定となっている。

内装板及び外装板厚さがホットレグ配管とコールドレグ配管と異なっていますが、これは当初ホットレグ配管検討時に想定した厚さ1.6mmについて、やや厚すぎるとの批判があったため、引き続き行なったコールドレグ配管及びクロスオーバレグ配管の検討に際して修正を図ったものです。今後行う予定の2次系配管の重量算出ではホットレグ部についても厚さ1.0mmとして計算を実施する予定です。

系統熱過渡評価には、以下の2つの量が必要になると考えられます。

系統熱容量

放熱量

系統熱容量算出には、厚さを小さめに評価するのが保守的であるため、もんじゅ実績値の小さい方の厚さ0.3mmを使用するのが適当と考えられる。概要に記した表は本考え方によるものです。

一方、放熱量評価について、上記に基づく放熱量はいわば理想条件での放熱量であり、実際には以下の理由により系統放熱量は増加すると予想されます。

- ① アニュラスギャップでの対流効果による熱伝達の促進  
(厳密には、漏洩検出用のガスサンプリングの影響もあるように思われる。)
- ② ヒータ・熱電対取付け孔からの放熱
- ③ 内装板・保温材・外装板隙間部からの放熱

したがって、系統下げ止まり温度を推定する上で系統放熱量推定が重要であることを勘案し、放熱量の計算は、機器システム開発室でこれまで実施した実機模擬条件での放熱量規格化値(例えば理想条件での熱伝達係数と実際の熱伝達係数との比)を使用して修正を施した上で行って下さいますようお願い致します。

添付資料

平成2年8月23日

## もんじゅ1次主冷却系配置保溫施行要領について

プラント工学室 永田

前記について、本日日立水野氏に問い合わせた結果以下の回答を得た。

### (1) 保溫材厚さ

ホットレグの場合 185mm アニュラスギャップ 15mm  
(すなわち、外装板外径は32B+400mmとなる。)

コールドレグの場合 135mm アニュラスギャップ 15mm

### (2) 保溫材単位重量

主として130kg/m<sup>3</sup>を使用している。

一部100kg/m<sup>3</sup>を使用している。

また、呼び径8寸以下の小口径配管の場合はロックウールを成形加工したものを使用している部分があるが、その場合には160kg/m<sup>3</sup>である。

### (3) 内装板及び外装板厚さ

内装板厚さ 0.3mm

外装板厚さ 0.4mm

である。ただし、重ねている部分が多いので、配管単位長重量への寄与はこれより大きい場合が多い。

例えば、ヒータ貫通部はある程度のバカ孔とし、これに150□のあて板をあてている。

### (4) その他

付加重量には、上記の他ヒータ・アニュラスギャップ保持用スペーサ等がある。

動燃の設計研究で進めているように内装板・外装板の厚さを割り切りで厚くして付加重量を適当に推定するのも良い方法と思われる。ただし、ホットレグ配管に想定した各1.6mm想定というのはやや厚すぎると思われる。

—————以上—————

A p p e n d i x - 2

長時間系統降温特性解析用機器重量とナトリウム重量の暫定

## 「長時間系統降温特性解析用機器重量とナトリウム重量の暫定」

## 1. 概要

## 1.1 目的

機器構造材および冷却材の保有熱を系統降温特性解析時の熱容量として扱うため、平成2年度検討結果に基づいた機器構造材重量とナトリウム重量を設定する。

## 1.2 対象機器と計算モジュールの対応

該当する機器名およびSuper-COPDの計算モジュールを以下に示す。

機器名称	計算モジュール	備考
(1) 原子炉容器 ①上部ブレナム ②下部ブレナム	MN(1) MN(2)	・プラント工学室の計算結果を参考にする。
(2) 炉心構成要素	RF(1)	
(3) 1次系配管 ①H/L配管 ②C/L配管	LN(1)～LN(3) LN(4)～LN(6)	・平成2年度検討結果に基づいて機器構造を具体化したうえで、構造材重量とナトリウム重量を算出する。
(4) IHX ①1次側入口ブレナム ②1次側出口ブレナム ③伝熱部 ④2次側出口ブレナム ⑤2次側入口ブレナム	MN(3)～MN(5) MN(6)～MN(8) HX(1)～HX(3) MN(9)～MN(11) MN(24)～MN(26)	
(5) 2次系配管 ①H/L配管 a. IHX～IRACS分岐点 b. IRACS分岐点～SG ②X/L配管 ③C/L配管 ④IRACS a. H/L配管 b. C/L配管	LN(7)～LN(9) LN(10)～LN(12) LN(13)～LN(15) LN(16)～LN(18) LN(19)～LN(21) LN(22)～LN(24)	
(6) SG ①入口ブレナム ②伝熱部 ③出口ブレナム	MN(15)～MN(17) SG(1)～SG(3) MN(18)～MN(20)	

## 1.3 計算条件

原子炉容器および炉心構成要素の構造材重量とナトリウム重量は、平成2年度にプラント工学室で検討した結果を再編して各計算モジュールに適用する。配管やIHX、SGについては機器構造を具体化したうえで構造材重量とナトリウム重量を算出する。

なお、平成2年度検討結果に基づいて作成したIHXとSGの構造図を図1と図2に示す。

また、構造材とナトリウムの各重量算出に用いた密度を以下に記す。

①SUS304 7922 kg/m<sup>3</sup>

②Mod. 9Cr-1Mo 7740 kg/m<sup>3</sup>

③ナトリウム

$$(0.95 + ((5.638E-12 \times T_x - 1.4605E-8) \times T_x - 2.2977E-4) \times T_x) \times 1000 \text{kg/m}^3$$

T<sub>x</sub> : 温度 (°C)

④その他 プラント工学室作成資料(LF-90-176)に準ずる

#### 1.4 計算結果

各機器の構造材重量およびナトリウム重量を表1に示す。

また、各重量の内訳と算出方法については次項を参照されたい。

### 2. 構造材重量とナトリウム重量の内訳

#### 2.1 炉容器上部プレナム ; MN (1)

(1) 炉壁重量  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times H \times \rho$

$$= (8.5^2 - 8.4^2) \pi / 4 \times 6.5 \times 7922 = 68.349 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(2) 内部構造物重量

炉容器上部プレナムの内部構造物に該当する構造材重量は、プラント工学室が作成した技術資料(LF-90-174)から抜粋した。内訳は次の通り。

①UCS (接液部)  $61.128 \times 10^3 \text{ [kg]}$

②上部炉心拘束枠  $4.820 \times 10^3 \text{ [kg]}$

③ホットレグ配管レストレント  $22.542 \times 10^3 \text{ [kg]}$

④熱遮蔽板  $16.880 \times 10^3 \text{ [kg]}$

内部構造物の合計重量は、上記①～④より  $105.37 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

(3) ナトリウム重量

①プレナム内  $246.330 \times 10^3 \text{ [kg]}$

②UCS

a)制御棒案内管内部  $18.282 \times 10^3 \text{ [kg]}$

b)継胴内部  $44.718 \times 10^3 \text{ [kg]}$

炉上部プレナム内のナトリウム重量は、上記①と②の合計から  $309.33 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

#### 2.2 炉容器下部プレナム ; MN (2)

(1) 炉壁等の重量

①炉壁（基準板厚部）	$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times H \times \rho$
	$= (8.5^2 - 8.4^2) \pi / 4 \times 4.575 \times 7922 = 48.107 \times 10^3 \text{ [kg]}$
②胴・鏡テーパ部	$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times H \times \rho$
	$= (8.5^2 - 8.4^2) \pi / 4 \times 0.2 \times 7922 = 3.144 \times 10^3 \text{ [kg]}$
③円筒胴下部増厚部	$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times H \times \rho$
	$= (8.5^2 - 8.3^2) \pi / 4 \times 0.05 \times 7922 = 1.045 \times 10^3 \text{ [kg]}$
④鏡部（板厚50mm）	$W = W_u + W_L$
	$= 27.467 \times 10^3 + 34.157 \times 10^3 = 61.624 \times 10 \times 10^3 \text{ [kg]}$

$W_u$  : 鏡部上端への負荷荷重 (LF-90-174より抜粋)

$W_L$  : 鏡部下端への負荷荷重 (LF-90-174より抜粋)

⑤耐震振れ止め	$2.348 \times 10^3 \text{ [kg]}$
---------	----------------------------------

炉壁等の合計重量は、上記①～⑤より  $116.268 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

## (2) 内部構造物重量

上部プレナムと同様に内部構造物の主な構造材重量は、プラトン工学室が作成した技術資料(LF-90-174)から抜粋した。内訳は次の通り。

①炉心槽	$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times H \times \rho$
	$= (5.4^2 - 5.3^2) \pi / 4 \times 3.75 \times 7922 = 24.965 \times 10^3 \text{ [kg]}$
②下部炉心拘束枠	$4.820 \times 10^3 \text{ [kg]}$
③炉心支持構造物および同取付架台	$75.415 \times 10^3 \text{ [kg]}$
④炉内支持構造物重量	$14.031 \times 10^3 \text{ [kg]}$
⑤炉内構造物取付ボルトおよびカラー	$9.482 \times 10^3 \text{ [kg]}$
⑥炉心槽熱遮蔽板	$38.557 \times 10^3 \text{ [kg]}$
⑦受皿	$31.901 \times 10^3 \text{ [kg]}$

内部構造物の重量は、上記①～⑦を合計した  $326.171 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

## (3) ナトリウム重量

①プレナム内	$1749 \times 10^3 \text{ [kg]}$
②連絡管内	$161 \times 10^3 \text{ [kg]}$
③高圧プレナム内	$10.569 \times 10^3 \text{ [kg]}$
④低圧プレナム内	$8.125 \times 10^3 \text{ [kg]}$
⑤受け皿内	$6.616 \times 10^3 \text{ [kg]}$

炉容器下部プレナム内のナトリウム重量は、前記①～⑤を合計して  $204.22 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

## 2.3 炉心構成要素 ; RF (1)

以下の各重量は、プラント工学室が作成した技術資料(LF-90-176)から抜粋した。

## (1) 燃料集合体重量 (単体/合計)

①SUS	$230.0 / 66.24 \times 10^3$ [kg]
②燃料ペレット	$92.9 / 26.76 \times 10^3$ [kg]
③軸方向ブランケットペレット	$68.3 / 19.67 \times 10^3$ [kg]
④B <sub>4</sub> C	$13.3 / 3.83 \times 10^3$ [kg]

(2) SUS遮蔽体重量 (単体/合計)  $538.2 / 74.27 \times 10^3$  [kg](3) B<sub>4</sub>C集合体重量 (単体/合計)

①SUS	$273.5 / 68.92 \times 10^3$ [kg]
②B <sub>4</sub> C	$82.7 / 20.84 \times 10^3$ [kg]

## (4) 制御棒集合体重量 (単体/合計)

①SUS	$217.5 / 5.44 \times 10^3$ [kg]
②吸収ペレット	$17.2 / 0.43 \times 10^3$ [kg]

## (5) ナトリウム重量 (単体/合計)

①燃料集合体内	$20.53 / 5.91 \times 10^3$ [kg]
②SUS遮蔽体内	$15.80 / 2.18 \times 10^3$ [kg]
③B <sub>4</sub> C集合体内	$15.80 / 3.98 \times 10^3$ [kg]
④制御棒集合体内	$34.10 / 0.85 \times 10^3$ [kg]
⑤集合体間	$- / 4.20 \times 10^3$ [kg]

炉心部のナトリウム重量は上記①～⑤を合計して  $17.12 \times 10^3$  [kg] となる。

## 2.4 1次系配管

## 2.4.1 H/L配管 ; LN(1)～LN(3)

## (1) 鉛直配管 (下部)

$$\begin{aligned} \text{①配管重量} \quad W_p &= (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times l \times \rho \\ &= (0.8128^2 - 0.7826^2) \pi / 4 \times 2.0 \times 7922 = 599.6 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{②ナトリウム重量} \quad W_s &= D_i^2 \pi / 4 \times l \times \rho \\ &= 0.7826^2 \pi / 4 \times 2.0 \times 824.96 = 793.7 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

## (2) 鉛直配管 (中部)

$$\begin{aligned} \text{①配管重量} \quad W_p &= (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times l \times \rho \\ &= (0.8128^2 - 0.7716^2) \pi / 4 \times 3.0 \times 7922 = 1218.5 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{②ナトリウム重量} \quad W_s &= D_i^2 \pi / 4 \times l \times \rho \\ &= 0.7716^2 \pi / 4 \times 3.0 \times 824.96 = 1157.3 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

## (3) 鉛直配管(上部)

①配管重量  $W_p = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= (1.1^2 - 1.04^2) \pi / 4 \times 1.5 \times 7922 = 1198.3 \text{ [kg]}$

②ナトリウム重量  $W_s = D_i^2 \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= 1.04^2 \pi / 4 \times 1.5 \times 824.96 = 1051.2 \text{ [kg]}$

## (4) 水平部

## ①増厚部

a)配管重量  $W_p = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= (1.18^2 - 1.04^2) \pi / 4 \times 2.0 \times 7922 = 3867.5 \text{ [kg]}$

b)ナトリウム重量  $W_s = D_i^2 \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= 1.04^2 \pi / 4 \times 2.0 \times 824.96 = 1401.6 \text{ [kg]}$

## ②標準板厚部

a)配管重量  $W_p = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= (1.1^2 - 1.04^2) \pi / 4 \times 4.0 \times 7922 = 3195.6 \text{ [kg]}$

b)ナトリウム重量  $W_s = D_i^2 \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= 1.04^2 \pi / 4 \times 4.0 \times 824.96 = 2803.2 \text{ [kg]}$

1 ループあたりの配管重量は、上記(1)～(4)を合計して  $10.08 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。  
同じくナトリウム重量は  $7.207 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

## 2.4.2 C/L配管; LN(4)～LN(6)

## (1) X/L配管

①配管重量  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= (0.7620^2 - 0.7366^2) \pi / 4 \times 16 \times 7922 = 3.789 \times 10^3 \text{ [kg]}$

②配管支持用バンド  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times W \times \rho$   
 $= (0.832^2 - 0.762^2) \pi / 4 \times 0.33 \times 7922 = 229.1 \text{ [kg]}$

## ③バンドクランプ突起部(保温表面より70mm突起)

$$\begin{aligned} H &= (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚} \\ &= 0.15 + 0.07 - 0.035 = 0.185 \text{ [m]} \\ W &= (L \times W \times H) \rho \times N \\ &= (0.073 \times 0.33 \times 0.185) 7922 \times 2 = 70.6 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

## ④サポート用ラグ(保温表面より70mm突起)

$$\begin{aligned} H &= (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚} \\ &= 0.15 + 0.07 - 0.035 = 0.185 \text{ [m]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= (S \times H \times \rho) \times N \\ &= (0.28 \times 0.03 + 0.255 \times 0.03) \times 0.185 \times 7922 \times 2 = 47.0 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

⑤ナトリウム重量  $W = D_1^2 \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= 0.7366^2 \pi / 4 \times 16.0 \times 860.89 = 5.870 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

ナトリウム重量を除いたX/L配管の合計重量は、上記①～④より  $4.136 \times 10^3$  [kg] となる。

## (2) C/L配管

①配管重量  $W = (D_o^2 - D_1^2) \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= (0.7620^2 - 0.7366^2) \pi / 4 \times 20.4 \times 7922 = 4.831 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## ②配管支持構造物重量

前記(1)項の②～④が3式設置する想定では、 $W = (229.1 + 70.6 + 47.0) \times 3 = 1040.1$  [kg] となる。

上記①と②からC/L配管部の合計重量は  $5.871 \times 10^3$  [kg] となる。

③ナトリウム重量  $W = D_1^2 \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= 0.7366^2 \pi / 4 \times 20.4 \times 860.89 = 7.484 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## 2.5 IHX

## 2.5.1 1次側入口プレナム；MN(3)～MN(5)

## (1) 鏡板

## ①主要部位の体積

a) 2次側出口孔  $V_1 = (1.016 - 2 \times 0.0143)^2 \pi / 4 \times 0.0.031 \text{ [m}^3]$

b) 鏡部容積  $V_2 = 4/3 \times \pi \times r_1^2 \times h / 2$

$$= 4/3 \times \pi \times (3.23/2 - 0.04)^2 \times (0.65 - 0.04) / 2$$

$$= 3.169 \text{ [m}^3]$$

c) 鏡部体積  $V_3 = 4/3 \times \pi \times r_0^2 \times h \times 0.5$

$$= 4/3 \times \pi \times (3.23/2)^2 \times 0.65 \times 0.5 = 3.551 \text{ [m}^3]$$

②鏡板重量  $W = [V_3 - (V_2 + V_1)] \rho = 0.351 \times 7922 = 2.781 \times 10^3 \text{ [kg]}$

③ナトリウム重量  $W = [V_2 - 1.016^2 \pi / 4 \times (0.65 - 0.04)] \times 824.96$

$$= 2.206 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## (2) ケーシング

①円筒部重量  $W_1 = (D_o^2 - D_1^2) \pi / 4 \times h \times \rho$

$$= (3.23^2 - 3.15^2) \pi / 4 \times 2.0 \times 7922 = 6.351 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## ②1次側入口孔（くり貫き分）

$$W_2 = D_1^2 \pi / 4 \times t \times \rho \\ = 1.04^2 \pi / 4 \times 0.04 \times 7922 = 269.2 \text{ [kg]}$$

## ③上部プレナム・本体胴部コーン

## a)平均周長および傾斜部高さ

平均周長  $L = (3.23\pi + 2.71\pi)/2 = 9.331 \text{ [m]}$

$$h = [0.5^2 + ((3.23 - 2.71)/2)^2]^{0.5} = 0.564 \text{ [m]}$$

b)構造物重量  $W_3 = (L \times h \times t) \rho$ 

$$= (9.331 \times 0.564 \times 0.04) \times 7922 = 1.664 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## ④ナトリウム重量

a)円筒部  $W = (D_0^2 - D_1^2) \pi / 4 \times h \times \rho \\ = (3.15^2 - 1.016^2) \pi / 4 \times 2.0 \times 824.96 = 11.520 \times 10^3 \text{ [kg]}$

b)コーン部 (平均直径 :  $D = L / \pi = 2.97 \text{ m}$ )

$$W = D^2 \pi / 4 \times h \times \rho \\ = 2.97^2 \pi / 4 \times 0.5 \times 824.96 = 2.858 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

ケーシングの合計重量は上記①～③より  $W = W_1 + W_2 + W_3 = 7.746 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

また、ナトリウム重量は④のa)とb)を合計した  $14.378 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

## (3) 上部管板

## ①各部面積

a)管板 (無垢扱い)  $A_1 = 2.575^2 \pi / 4 = 5.208 \text{ [m}^2]$

b)2次側フローホール  $A_2 = 1.016^2 \pi / 4 = 0.811 \text{ [m}^2]$

c)伝熱管流入孔  $A_3 = 0.0197^2 \pi / 4 \times 5250 = 1.6 \text{ [m}^2]$

②管板重量  $W = [A_1 - (A_2 + A_3)] \times t \times \rho \\ = [5.208 - (0.811 + 1.6)] \times 0.1 \times 7922 = 2.216 \times 10^3 \text{ [kg]}$

③ナトリウム重量  $W = A_3 \times t \times \rho = 1.6 \times 0.1 \times 824.96 = 132 \text{ [kg]}$

## 2.5.2 1次側出口プレナム ; MN(6)～MN(8)

## (1) 外シュラウド部鏡板

## ①主要部位の体積

a)体積  $V_1 = 4/3 \times \pi \times r_0^2 \times h \times 0.5 \\ = 4/3 \times \pi \times (2.575/2)^2 \times (0.5 + 0.012) \times 0.5 \\ = 1.778 \text{ [m}^3]$

b)容積  $V_2 = 4/3 \times \pi \times r_1^2 \times h \times 0.5 \\ = 4/3 \times \pi \times (2.575/2 - 0.012)^2 \times 0.5 \times 0.5$

$$= 1.704 \text{ [m}^3\text{]}$$

c) 1次側出口孔（くり貫き分）

$$\begin{aligned} V_3 &= (0.762 - 2 \times 0.0127)^2 \pi / 4 \times 0.012 \\ &= 5.114 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

②鏡板重量

$$W = [V_1 - (V_2 + V_3)] \times \rho = 546 \text{ [kg]}$$

③ナトリウム重量

$$W = V_2 \times \rho = 1.704 \times 860.89 = 1.467 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## (2) ケーシング部鏡板

①主要部位の体積

a) 体積

$$h = (0.5 + 0.012 + 0.0375 + 0.03) = 0.58 \text{ [m]}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= 4/3 \times \pi \times r_0^2 \times h \times 0.5 \\ &= 4/3 \times \pi \times (2.71/2)^2 \times 0.58 \times 0.5 = 2.23 \text{ [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

b) 容積

$$\begin{aligned} V_2 &= 4/3 \times \pi \times r_1^2 \times h \times 0.5 \\ &= 4/3 \times \pi \times (2.71/2 - 0.03)^2 \times (0.58 - 0.03) \times 0.5 \\ &= 2.022 \text{ [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

c) 1次側出口孔（くり貫き分）

$$\begin{aligned} V_3 &= (0.762 - 2 \times 0.0127)^2 \pi / 4 \times 0.03 \\ &= 0.013 \text{ [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

②鏡板重量

$$\begin{aligned} W &= [V_1 - (V_2 + V_3)] \cdot \rho \\ &= [2.23 - (2.022 + 0.013)] \times 7922 = 1.545 \times 10^3 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

## (3) 円筒部重量

①ケーシング重量

$$\begin{aligned} W &= [2.71^2 - (2.71 - 2 \times 0.03)^2] \pi / 4 \times 0.55 \times 7922 \\ &= 1.101 \times 10^3 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

②外シュラウド重量

$$\begin{aligned} W &= [2.575^2 - (2.575 - 2 \times 0.012)^2] \pi / 4 \times 0.55 \times 7922 \\ &= 421 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

③ナトリウム重量

$$a) 外シュラウド容積 \quad V_1 = (2.575 - 2 \times 0.012)^2 \pi / 4 \times (0.2 + 0.25) = 2.3 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$b) ダウンカマ胴体積 \quad V_2 = 1.288^2 \pi / 4 \times 0.2 = 0.261 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$c) ダウンカマ鏡体積 \quad V_3 = 4/3 \times \pi \times (1.288/2)^2 \times 0.5/2 = 0.434 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$d) ナトリウム重量 \quad W = [V_1 - (V_2 + V_3)] \times 860.89 = 1.382 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## (4) 下部管板

①各部面積

$$a) 管板（無垢抜い） \quad A_1 = 2.575^2 \pi / 4 = 5.208 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$b) ダウンカマ取付部 \quad A_2 = 1.288^2 \pi / 4 = 1.303 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$c) 伝熱管流出孔 \quad A_3 = 0.0197^2 \pi / 4 \times 5250 = 1.6 \text{ [m}^2\text{]}$$

②管板重量

$$W = [A_1 - (A_2 + A_3)] \times t \times \rho$$

$$= [5.208 - (1.303 + 1.6)] \times 0.1 \times 7922 = 1.826 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

③ナトリウム重量

$$W = A_3 \times t \times \rho = 138 \text{ [kg]}$$

## 2.5.3 2次側出口プレナム ; MN(9)~MN(11)

(1) ケーシング

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (2.71^2 - 2.65^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 7922 = 1.0 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(2) 外シュラウド

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (2.525^2 - 2.551^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 7922 = 383.0 \text{ [kg]}$$

(3) 伝熱管 (非伝熱部 ; L=0.5m)

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho \times N_t$$

$$= (0.0217^2 - 0.0197^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 7922 \times 5250$$

$$= 1.352 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(4) 40<sup>B</sup> 直管

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (1.016^2 - 0.9874^2) \pi / 4 \times (0.5 + 2.0 + 0.65 + 0.04) \times 7922$$

$$= 1.109 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## (5) ナトリウム重量

## ①各部断面積

a)外シュラウド内側  $A_1 = 2.551^2 \pi / 4 = 5.111 \text{ [m}^2\text{]}$

b)伝熱管  $A_2 = 0.0217^2 \pi / 4 \times 5250 = 1.942 \text{ [m}^2\text{]}$

c)レジューサ (平均)  $A_3 = (0.7112^2 \pi / 4 + 1.016^2 \pi / 4) / 2 = 0.604 \text{ [m}^2\text{]}$

## ②ナトリウム重量

a)レジューサ廻り

$$W_1 = [A_1 - (A_2 + A_3)] \times h \times \rho$$

$$= [5.111 - (1.942 + 0.604)] \times 0.5 \times 830.97$$

$$= 1.066 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

c)直管部

$$W_2 = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (0.9874^2 - 0.7112^2) \pi / 4 \times 3.25 \times 830.97$$

$$= 995 \text{ [kg]}$$

## 2.5.4 2次側入口プレナム ; MN(24)~MN(26)

(1) ダウンカマ部内管 (26<sup>B</sup>)

①内管重量

$$W^B (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (0.6604^2 - 0.635^2) \pi / 4 \times 3.25 \times 7922 = 665 \text{ [kg]}$$

②ナトリウム重量

$$W = D_i^2 \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= 0.635^2 / 4 \times 3.25 \times 873.98 = 900 \text{ [kg]}$$

## (2) ダウンカマ部レジューサ

## ①各部断面積

## a) 上流側断面積

$$\text{構造物} : A_1 = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 = (0.6636^2 - 0.635^2) \pi / 4 = 0.029 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{流路} : A'_1 = D_i^2 \pi / 4 = 0.635^2 \pi / 4 = 0.317 \text{ [m}^2\text{]}$$

## b) 下流側断面積

$$\text{構造物} : A_2 = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 = (1.1176^2 - 1.089^2) \pi / 4 = 0.050 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{流路} : A'_2 = D_i^2 \pi / 4 = 1.089^2 \pi / 4 = 0.931 \text{ [m}^2\text{]}$$

## c) 平均断面積

$$\text{構造物} : A = (A_1 + A_2) / 2 = 0.0395 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{流路} : A' = (A'_1 + A'_2) / 2 = 0.6240 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{②レジューサ重量} \quad W = A \times h \times \rho = 0.0395 \times 0.7 \times 7922 = 219 \text{ [kg]}$$

$$\text{③ナトリウム重量} \quad W' = A' \times h \times \rho = 0.624 \times 0.7 \times 873.98 = 382 \text{ [kg]}$$

(3) ダウンカマ (4 4<sup>B</sup>)

$$\begin{aligned} \text{①直管部重量} \quad W &= (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho \\ &= (1.1176^2 - 1.093^2) \pi / 4 \times 4.2 \times 7922 = 1.664 \times 10^3 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{②ナトリウム重量} \quad W &= D_i^2 \pi / 4 \times h \times \rho \\ &= 1.089^2 \pi / 4 \times 4.2 \times 873.98 = 3.419 \times 10^3 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

## (4) フローホール

## ①構造物重量

$$\begin{aligned} \text{a) 内シュラウド} \quad W &= (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho \\ &= (1.288^2 - 1.264^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 7922 = 191 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) スリット} \quad W &= (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times (1 - \alpha) \times \rho \\ &= (1.288^2 - 1.264^2) \pi / 4 \times 0.5 \times (1 - 0.8) \times 7922 = 38 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

上記a)とb)の合計重量は229 [kg] となる。

$$\begin{aligned} \text{②ナトリウム重量} \quad W' &= D_i^2 \pi / 4 \times h \times \rho \\ &= 1.264^2 \pi / 4 \times 1.0 \times 873.98 = 1.097 \times 10^3 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

## (5) ダウンカマ下部鏡板

## ①体積および容積

$$\begin{aligned} \text{a) 体積} \quad V_1 &= 4/3 \times \pi \times r_o^2 \times h \times 0.5 \\ &= 4/3 \times \pi \times (1.288/2)^2 \times 0.25 \times 0.5 = 0.217 \text{ [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

$$\text{b) 容積} \quad V_2 = 4/3 \times \pi \times r_i^2 \times h \times 0.5$$

$$=4/3 \times \pi \times (1.264/2)^2 \times (0.25-0.012) \times 0.5 = 0.199 \text{ [m}^3\text{]}$$

②構造物重量  $W = (V_1 - V_2) \rho = (0.217 - 0.199) \times 7922 = 143 \text{ [kg]}$

③ナトリウム重量  $W' = V_2 \times \rho = 0.199 \times 873.98 = 174 \text{ [kg]}$

### 2.5.5 伝熱部 ; HX(1)~HX(3)

(1) 内シュラウド ( $h=4.2\text{m}$ )  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$   
 $= (1.288^2 - 1.264^2) \pi / 4 \times 4.2 \times 7922 = 1.601 \times 10^3 \text{ [kg]}$

(2) 外シュラウド ( $h=5.1\text{m}$ )  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$   
 $= (2.575^2 - 2.551^2) \pi / 4 \times 5.1 \times 7922 = 3.904 \times 10^3 \text{ [kg]}$

(3) ケーシング  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$   
 $= (2.71^2 - 2.650^2) \pi / 4 \times 5.1 \times 7922 = 10.205 \times 10^3 \text{ [kg]}$

(4) バッフル板

①内シュラウド～外シュラウド間断面積

$$A_1 = (D_o^2 - D_i^2) \times \pi / 4 = (2.551^2 - 1.288^2) \times \pi / 4 = 3.808 \text{ [m}^2\text{]}$$

②伝熱管貫通部面積

$$A_2 = D_o^2 \times \pi / 4 \times N_t = 0.0217^2 \times \pi / 4 \times 5250 = 1.942 \text{ [m}^2\text{]}$$

③バッフル板投影面積

$$A = (A_1 - A_2) \times (1 - \alpha) = (3.808 - 1.942) \times (1 - 0.25) = 1.3995 \text{ [m}^2\text{]}$$

④重量  $W = A \times t \times \rho \times N_B$

$$= 1.3995 \times 0.019 \times 7922 \times 9 = 1.893 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(5) 伝熱管 ( $L=5.6-0.5$ )  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho \times N_t$   
 $= (0.0217^2 - 0.0197^2) \times \pi / 4 \times 5.1 \times 7922 \times 5250$   
 $= 13.794 \times 10^3 \text{ [kg]}$

(6) ナトリウム重量

①1次側  $W_1 = D_i^2 \pi / 4 \times L \times \rho \times N_t$   
 $= 0.0197^2 \pi / 4 \times 5.1 \times 842.96 \times 5250 = 6.880 \times 10^3 \text{ [kg]}$

②2次側  $W_2 = [(A_1 - A_2) \times L - A \times t \times N_B] \times \rho$   
 $= [(3.808 - 1.942) \times 5.1 - 1.3995 \times 0.019 \times 9] \times 852.53$   
 $= 7.909 \times 10^3 \text{ [kg]}$

### 2.6 2次系配管

#### 2.6.1 主冷却系H/L配管

(1) IHX出口～IRACS分岐点 ; LN(7)～LN(9)

①配管重量  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= (0.7112^2 - 0.6858^2) \pi / 4 \times 15 \times 7922 = 3.312 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## ②配管支持構造重量

a)配管支持用バンド  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times W \times \rho$   
 $= (0.7812^2 - 0.7112^2) \pi / 4 \times 0.31 \times 7922 = 201.5 \text{ [kg]}$

b)バンドクランプ突起部(保温表面より70mm突起)

$$H = (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚}$$
 $= 0.2 + 0.07 - 0.035 = 0.235 \text{ [m]}$ 
 $W = (L \times W \times H) \rho \times N$ 
 $= (0.073 \times 0.31 \times 0.235) \times 7922 \times 2 = 84.3 \text{ [kg]}$

c)サポート用ラグ(保温表面より70mm突起)

$$H = (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚}$$
 $= 0.2 + 0.07 - 0.035 = 0.235 \text{ [m]}$ 
 $W = (S \times H \times \rho) \times N$ 
 $= (0.24 \times 0.03 + 0.27 \times 0.03) \times 0.235 \times 7922 \times 2$ 
 $= 57.0 \text{ [kg]}$

配管支持構造の一式あたりの重量はa)~c)を合計して342.8 [kg]となる。

また、本対象区間で想定している2式分の支持構造の総重量は685.6 [kg]となる。

③ナトリウム重量  $W = D_i^2 \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= 0.6858^2 \pi / 4 \times 15 \times 830.97 = 4.604 \times 10^3 \text{ [kg]}$

(2) I R A C S 分岐点～S G 入口 ; LN(10)～LN(12)

①配管重量  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= (0.7112^2 - 0.6858^2) \pi / 4 \times 10 \times 7922 = 2.208 \times 10^3 \text{ [kg]}$

## ②配管支持構造重量

前記(1), ②と同一仕様の支持構造を3式配置する想定である。したがって、支持構造の総重量は $1.028 \times 10^3 \text{ [kg]}$ となる。

③ナトリウム重量  $W = D_i^2 \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= 0.6858^2 \pi / 4 \times 10 \times 830.97 = 3.07 \times 10^3 \text{ [kg]}$

2.6.2 X/L配管 ; LN(13)～LN(15)

(1) 配管重量  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$   
 $= (0.6604^2 - 0.6350^2) \pi / 4 \times 17 \times 7922 = 3.48 \times 10^3 \text{ [kg]}$

## (2) 配管支持構造重量

a)配管支持用バンド  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times W \times \rho$

$$= (0.7304^2 - 0.6604^2) \pi / 4 \times 0.285 \times 7922 = 172.6 \text{ [kg]}$$

b) バンドクランプ突起部 (保温表面より 70mm 突起)

$$H = (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚}$$

$$= 0.15 + 0.07 - 0.035 = 0.185 \text{ [m]}$$

$$W = (L \times W \times H) \times \rho \times N$$

$$= (0.073 \times 0.285 \times 0.185) \times 7922 \times 2 = 61.0 \text{ [kg]}$$

c) サポート用ラグ (保温表面より 70mm 突起)

$$H = (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚}$$

$$= 0.15 + 0.07 - 0.035 = 0.185 \text{ [m]}$$

$$W = (S \times H \times \rho) \times N$$

$$= (0.22 \times 0.03 + 0.27 \times 0.03) \times 0.185 \times 7922 \times 2$$

$$= 43.1 \text{ [kg]}$$

配管支持構造の一式あたりの重量は a)～c) を合計して 276.7 [kg] となる。

また、X/L 配管で想定している 3 式分の支持構造の総重量は 830.1 [kg] となる。

(3) ナトリウム重量  $W = D_1^2 \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= 0.635^2 \pi / 4 \times 17 \times 873.98 = 4.705 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

### 2.6.3 C/L 配管 ; LN(16)～LN(18)

(1) 配管重量  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= (0.6604^2 - 0.6350^2) \pi / 4 \times 20 \times 7922 = 4.094 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(2) 配管支持構造重量

X/L 配管と同一仕様の支持構造を 2 式配置する想定である。したがって、支持構造の総重量は 553.4 [kg] となる。

(3) ナトリウム重量  $W = D_1^2 \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= 0.635^2 \pi / 4 \times 20 \times 873.98 = 5.536 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

### 2.6.4 I R A C S 配管

(1) H/L 配管 ; LN(19)～LN(21)

① 配管重量  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= (0.3556^2 - 0.3334^2) \pi / 4 \times 33 \times 7922 = 3.141 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

② 配管支持構造重量

a) 配管支持用バンド  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times W \times \rho$

$$= (0.4196^2 - 0.3556^2) \pi / 4 \times 0.175 \times 7922 = 54.0 \text{ [kg]}$$

b) バンドクランプ突起部（保温表面より70mm突起）

$$\begin{aligned}
 H &= (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚} \\
 &= 0.2 + 0.07 - 0.032 = 0.238 \text{ [m]} \\
 W &= (L \times W \times H) \times \rho \times N \\
 &= (0.064 \times 0.175 \times 0.238) \times 7922 \times 2 = 42.2 \text{ [kg]}
 \end{aligned}$$

c) サポート用ラグ（保温表面より70mm突起）

$$\begin{aligned}
 H &= (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚} \\
 &= 0.2 + 0.07 - 0.032 = 0.238 \text{ [m]} \\
 W &= (S \times H \times \rho) \times N \\
 &= (0.175 \times 0.025 + 0.15 \times 0.025) \times 0.238 \times 7922 \times 2 \\
 &= 30.6 \text{ [kg]}
 \end{aligned}$$

配管支持構造の一式あたりの重量はa)～c)を合計して126.8 [kg] となる。

また、H/L配管で想定している3式分の支持構造の総重量は380.4 [kg] となる。

③ナトリウム重量  $W = D_1^2 \pi / 4 \times L \times \rho$

$$= 0.3334^2 \pi / 4 \times 33 \times 830.97 = 2.394 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(2) C/L配管 ; LN(22)～LN(24)

①配管重量  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$

$$\begin{aligned}
 &= (0.3556^2 - 0.3334^2) \pi / 4 \times 31 \times 7922 = 2.950 \\
 &\quad \times 10^3 \text{ [kg]}
 \end{aligned}$$

②配管支持構造重量

a) 配管支持用バンド  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times W \times \rho$

$$= (0.4196^2 - 0.3556^2) \pi / 4 \times 0.175 \times 7922 = 54.0 \text{ [kg]}$$

b) バンドクランプ突起部（保温表面より70mm突起）

$$\begin{aligned}
 H &= (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚} \\
 &= 0.15 + 0.07 - 0.032 = 0.188 \text{ [m]} \\
 W &= (L \times W \times H) \times \rho \times N \\
 &= (0.064 \times 0.175 \times 0.188) \times 7922 \times 2 = 33.4 \text{ [kg]}
 \end{aligned}$$

c) サポート用ラグ（保温表面より70mm突起）

$$\begin{aligned}
 H &= (\text{保温厚} + \text{突起高}) - \text{バンド板厚} \\
 &= 0.15 + 0.07 - 0.032 = 0.188 \text{ [m]} \\
 W &= (S \times H \times \rho) \times N \\
 &= (0.175 \times 0.025 + 0.15 \times 0.025) \times 0.188 \times 7922 \times 2 \\
 &= 24.2 \text{ [kg]}
 \end{aligned}$$

配管支持構造の一式あたりの重量はa)～c)を合計して111.6 [kg] となる。

また、C/L配管で想定している4式分の支持構造の総重量は446.4 [kg] となる。

$$\begin{aligned} \text{③ナトリウム重量} \quad W &= D_1^2 \pi / 4 \times L \times \rho \\ &= 0.3334^2 \pi / 4 \times 31 \times 873.98 = 2.365 \times 10^3 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

## 2.7 SG

### 2.7.1 入口プレナム ; MN(15)～MN(17)

#### (1) 上部鏡板

##### ①主要部位の体積

$$\begin{aligned} \text{a)体積} \quad V_1 &= 4/3 \times \pi \times r_o^2 \times h \times 0.5 \\ &= 4/3 \times \pi \times (2.97/2)^2 \times 0.6 \times 0.5 \\ &= 2.771 \text{ [m}^3\text{]} \\ \text{b)容積} \quad h &= 0.6 - 0.045 = 0.555 \text{ [m]} \\ V_2 &= 4/3 \times \pi \times r_i^2 \times h \times 0.5 \\ &= 4/3 \times \pi \times (2.97/2 - 0.045)^2 \times 0.555 \times 0.5 = 2.41 \text{ [m}^3\text{]} \\ \text{c)入口ノズル孔} \quad V_3 &= D_1^2 \times \pi / 4 \times t = 0.9652^2 \times \pi / 4 \times 0.045 = 0.033 \text{ [m}^3\text{]} \\ \text{②鏡板重量} \quad W &= [V_1 - (V_2 + V_3)] \times \rho \\ &= [2.771 - (2.41 + 0.033)] \times 7740 = 2.539 \times 10^3 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

#### (2) 上部熱遮蔽板

##### ①主要部位の体積

$$\begin{aligned} \text{a)体積} \quad V_1 &= 4/3 \times \pi \times r_o^2 \times h \times 0.5 \\ &= 4/3 \times \pi \times (2.97/2 - 0.045)^2 \times (0.6 - 0.045) \times 0.5 \\ &= 2.41 \text{ [m}^3\text{]} \\ \text{b)容積} \quad h &= 0.555 - 0.01 = 0.545 \text{ [m]} \\ V_2 &= 4/3 \times \pi \times r_i^2 \times h \times 0.5 \\ &= 4/3 \times \pi \times (2.97/2 - 0.045 - 0.1)^2 \times 0.545 \times 0.5 \\ &= 2.334 \text{ [m}^3\text{]} \\ \text{c)入口ノズル孔} \quad V_3 &= D_1^2 \pi / 4 \times t = 0.9652^2 \pi / 4 \times 0.01 = 7.317 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{②構造材重量} \quad W &= [V_1 - (V_2 + V_3)] \times \rho \\ &= [2.41 - (2.334 + 7.317 \times 10^{-3})] \times 7740 = 532 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

$$\text{③ナトリウム重量} \quad W' = V_2 \times \rho = 2.334 \times 830.97 = 1.94 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

#### (3) ケーシング (上部プレナム該当部高さ ; h=1.25-0.5/2=1.0m)

##### ①標準板厚部重量

$$(h' = h/2 = 0.5 \text{ m}) \quad W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$= (2.97^2 - 2.89^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 7740 = 1.425 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

②増厚部重量

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$= (2.97^2 - 2.85^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 7740 = 2122 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

③ナトリウム重量

a)標準板厚部

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$= (2.89^2 - 0.9^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 830.97 = 2.461 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

b)増厚部

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$= (2.85^2 - 0.9^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 830.97 = 2.386 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(4) 内シラウド (上部プレナム該当部高さ ;  $h=0.6+1.25-0.5/2=1.6\text{m}$ )

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (0.9^2 - 0.84^2) \pi / 4 \times 1.6 \times 7740 = 1.015 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## 2.7.2 出口プレナム ; MN(18)～MN(20)

(1) 下部鏡板

①体積および容積

a)体積

$$V_1 = 4/3 \times \pi \times r_o^2 \times h \times 0.5$$

$$= 4/3 \times \pi \times (2.97/2)^2 \times 0.6 \times 0.5 = 2.771 \text{ [m}^3]$$

b)容積

$$h = 0.6 - 0.03 = 0.57 \text{ [m]}$$

$$V_2 = 4/3 \times \pi \times r_i^2 \times h \times 0.5$$

$$= 4/3 \times \pi \times (2.97/2 - 0.03)^2 \times 0.57 \times 0.5 = 2.527 \text{ [m}^3]$$

②鏡板重量

$$W = (V_1 - V_2) \times \rho$$

$$= (2.771 - 2.527) \times 7740 = 1.889 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(2) 下部上部熱遮蔽板

①体積および容積

a)体積

$$V_1 = 4/3 \times \pi \times r_o^2 \times h \times 0.5$$

$$= 4/3 \times \pi \times (2.97/2 - 0.03)^2 \times 0.57 \times 0.5 = 2.527 \text{ [m}^3]$$

b)容積

$$h = 0.57 - 0.01 = 0.56 \text{ [m]}$$

$$V_2 = 4/3 \times \pi \times r_i^2 \times h \times 0.5$$

$$= 4/3 \times \pi \times (2.97/2 - 0.03 - 0.01)^2 \times 0.56 \times 0.5 = 2.449 \text{ [m}^3]$$

②構造材重量

$$W = (V_1 - V_2) \times \rho$$

$$= (2.527 - 2.449) \times 7740 = 603.7 \text{ [kg]}$$

③ナトリウム重量  $W' = V_2 \times \rho = 2.449 \times 873.98 = 2.140 \times 10^3 \text{ [kg]}$

(3) ケーシング (下部プレナム該当部高さ ;  $h=1.25-0.5/2=1.0\text{m}$ )

①標準板厚部

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$(h' = h/2 = 0.5\text{m}) \quad W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 7740 = 1.425 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

②増厚部

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$= (2.97^2 - 2.85^2) \pi / 4 \times 0.5 \times 7740 = 2.122 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## ③ナトリウム重量

a)標準板厚部

$$W = D_i^2 \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$= 2.89^2 \pi / 4 \times 0.5 \times 873.98 = 2.867 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

b)増厚部

$$W = D_i^2 \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$= 2.85^2 \pi / 4 \times 0.5 \times 873.98 = 2.788 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(4) 内シュラウド (上部プレナム該当部高さ ;  $h = 0.6 + 1.25 - 0.5/2 = 1.6\text{m}$ )

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (0.9^2 - 0.84^2) \pi / 4 \times 1.6 \times 7740 = 1.015 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(5) 上昇管 (26<sup>B</sup>, Sch20)

①配管重量

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$$

$$= (0.6604^2 - 0.635^2) \pi / 4 \times 17.0 \times 7740 = 3.4 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

②ナトリウム重量

$$W' = D_i^2 \pi / 4 \times L \times \rho$$

$$= 0.635^2 \pi / 4 \times 17.0 \times 873.98 = 4.75 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## 2.7.3 伝熱部 ; SG(1)~SG(3)

(1) ケーシング (該当高さ ;  $h = 2.25 + 2.0 + 10.634 + 1.2 + 0.9 + 0.25 = 15.234\text{m}$ )

①標準板厚部

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h' \times \rho$$

$$(h' = 10.634\text{m}) \quad = (2.97^2 - 2.89^2) \pi / 4 \times 10.634 \times 7740 = 30.305 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

## ②増厚部

a)円筒胴

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times (h - h') \times \rho$$

$$= (2.97^2 - 2.85^2) \pi / 4 \times 4.6 \times 7740 = 19.862 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

b)給水室・出口蒸気室連絡孔 ( $D_i = 0.3668\text{m}$ ; 平面扱い)

$$W = D_i^2 \pi / 4 \times t \times \rho \times n$$

$$= 0.3668^2 \times \pi / 4 \times 0.06 \times 7740 \times 8 = 392.6 \text{ [kg]}$$

増厚部の重量はa)から連絡孔分を差し引いて  $19.469 \times 10^3 \text{ [kg]}$  となる。

(2) 内シュラウド (該当高さ ;  $h = 2.25 + 2.0 + 10.634 + 1.2 = 14.084\text{m}$ )

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (0.9^2 - 0.84^2) \pi / 4 \times 14.084 \times 7740 = 8.938 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(3) 外シュラウド (該当高さ ;  $h = 10.634 + 1.0 = 11.634\text{m}$ , 1.0:支持部)

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times h \times \rho$$

$$= (2.79^2 - 2.75^2) \pi / 4 \times 11.634 \times 7740 = 15.672 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(4) 分配板 ( $D=2.79\text{m}$ ,  $t=0.01$ , 開口率=0.25)

## ①主要部位の投影面積

a) 外シュラウド流路断面積  $A_1 = D_o^2 \pi / 4 = 2.79^2 \times \pi / 4 = 6.114 \text{ [m}^2]$

b) 内シュラウド貫通部面積  $A_2 = D_i^2 \pi / 4 = 0.9^2 \times \pi / 4 = 0.636 \text{ [m}^2]$

c) 分配板投影面積  $A = (A_1 - A_2) \times (1 - \alpha)$

$$= (6.114 - 0.636) \times (1 - 0.25) = 5.637 \text{ [m}^2]$$

## ②重量

$$W = A \times t \times \rho = 5.637 \times 0.01 \times 7740 = 436.3 \text{ [kg]}$$

(5) サポート用ラグおよび吊り金具

$h$ : ラグおよび吊り金具の高さ  $0.2\text{m}$

$t$ : ラグおよび吊り金具の板厚  $0.05\text{m}$

$N$ : ラグおよび吊り金具の数 各12

①サポート用ラグ  $W = (L \times h \times t) \times \rho \times N$

$$(L: 0.3\text{m}) \quad = (0.3 \times 0.2 \times 0.05) \times 7740 \times 12 = 279 \text{ [kg]}$$

②吊り金具  $W = (L \times h \times t) \times \rho \times N$

$$(L: 0.925\text{m}) \quad = (0.925 \times 0.2 \times 0.05) \times 7740 \times 12 = 859 \text{ [kg]}$$

(6) 伝熱管

①ヘリカルコイル部  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \operatorname{cosec} \theta \times \rho \times N$

$$= (0.0318^2 - 0.0254^2) \pi / 4 \times 10.634 \times \operatorname{cosec} 8.7 \times 7740 \times 351$$

$$= 54.914 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

②直管部  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho \times N$

$$= (0.0318^2 - 0.0254^2) \times \pi / 4 \times (2 + 1.2 + 0.9) \times 7740 \times 351$$

$$= 3.203 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(7) 伝熱管サポート

## ①代表仕様

- サポート本数  $(18+1) \times 6 = 114$  [本]

- ベース寸法  $t: 0.0182, W: 2D_i = 0.0636, L: 11.634(10.636+1)$  [m]

- スペーサー 充填率: 0.5

②ベース重量  $W = W \times L \times t \times \rho \times N$

$$= 0.0636 \times 11.634 \times 0.0182 \times 7740 \times 114 = 11.882 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

③スペーサー重量  $W = W \times L \times D_i \times \alpha \times \rho \times N$

$$= 0.0636 \times 11.634 \times 0.0318 \times 0.5 \times 7740 \times 114$$

$$= 10.381 \times 10^3 \text{ [kg]}$$

(8) 給水室・出口蒸気室

①増厚部 ( $L=0.2+0.1+0.1+0.2=0.6m$ )

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$$

$$= (0.5^2 - 0.3668^2) \pi / 4 \times 0.6 \times 7740 = 421 [kg]$$

② 18<sup>B</sup>, Sch160部 ( $L'=0.8+0.2-L=0.4m$ )

$$W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times L \times \rho$$

$$= (0.4572^2 - 0.3668^2) \pi / 4 \times 0.4 \times 7740 = 181 [kg]$$

③管板部

a)伝熱管内流路面積  $A_1 = D_i^2 \pi / 4 \times N / 4$

$$= 0.0254^2 \pi / 4 \times 351 / 4 = 44.464 \times 10^{-3} [m^2]$$

b)室内流路面積  $A_2 = D_o^2 \pi / 4 \times N / 4$

$$= 0.3668^2 \pi / 4 = 105.67 \times 10^{-3} [m^2]$$

c)管板部重量  $W = (A_2 - A_1) \times t \times \rho = 95 [kg]$

④フランジ重量

a)ノズル側  $W = (D_o^2 - D_i^2) \pi / 4 \times t \times \rho$

$$= (0.7^2 - 0.3668^2) \times \pi / 4 \times 0.05 \times 7740 = 108 [kg]$$

b)盲板  $W = D_o^2 \pi / 4 \times t \times \rho = 0.7^2 \pi / 4 \times 0.05 \times 7740 = 149 [kg]$

一式あたりの重量は①～④を合計して954 [kg] となる。本SGでは、給水室と出口蒸気室をそれぞれ4式取付けるため、合計重量は $7.632 \times 10^3$  [kg] となる。

## (9) スカート

①主要部位の寸法

a)傾斜部長さ  $L_1 = h / \cos \theta = 2 / \cos 20 = 2.13 [m]$

b)ケーシング側周長  $L_2 = D_c \times \pi = 2.97 \times \pi = 9.331 [m]$

c)床側周長  $L_3 = [2 \times (L_1^2 - 2^2)^{0.5} + 2.97] \times \pi = 13.934 [m]$

②重量  $W = L_1 \times (L_2 + L_3) / 2 \times t \times \rho$ 

$$= 2.13 \times (9.331 + 13.934) / 2 \times 0.04 \times 7740 = 7.671 \times 10^3 [kg]$$

## (10) ナトリウム重量

①外シュラウド容積( $D_i=2.75m, h=15.334m$ )

$$V_1 = D_i^2 \pi / 4 \times h = 2.75^2 \pi / 4 \times 15.334 = 91.07 [m^3]$$

②ケーシング容積( $D_i=2.89m, h=0.925m$ )

$$V_2 = D_i^2 \pi / 4 \times h = 2.89^2 \pi / 4 \times 0.925 = 6.07 [m^3]$$

③伝熱管体積( $D_o=0.0318m, l=77.5m, N=351$ )

$$V_3 = D_o^2 \pi / 4 \times l \times N = 0.0318^2 \pi / 4 \times 77.5 \times 351 = 21.605 [m^3]$$

④内シュラウド体積( $D_o=0.9m, h=15.334m$ )

$$V_4 = D_o^2 \pi / 4 \times h = 0.9^2 \pi / 4 \times 15.334 = 9.755 [m^3]$$

⑤上昇管体積( $D_0=0.6604\text{m}$ ,  $h=0.925\text{m}$ )

$$V_5 = D_0^2 \pi / 4 \times h = 0.6604^2 \pi / 4 \times 0.925 = 0.317 [\text{m}^3]$$

⑥分配板(開口率  $\alpha=0.25$ ,  $t=0.01$ )

a)外シユラウド流路断面積

$$A_1 = D_1^2 \pi / 4 = 2.79^2 \pi / 4 = 6.114 [\text{m}^2]$$

b)内シユラウド貫通部面積

$$A_2 = D_1^2 \pi / 4 = 0.9^2 \pi / 4 = 0.636 [\text{m}^2]$$

c)分配板投影面積

$$A = (A_1 - A_2) \times (1 - \alpha) = (6.114 - 0.636) \times (1 - 0.25) = 5.637 [\text{m}^2]$$

$$V_6 = A \times t = 5.637 \times 0.01 = 0.056 [\text{m}^3]$$

⑦吊り金具( $L=0.925$ ,  $h=0.2$ ,  $t=0.05$ ,  $N=6 \times 2$ )

$$V_7 = (h \times t \times L) \times 12 = 0.111 [\text{m}^3]$$

⑧伝熱管支持構造( $W=0.0636$ ,  $L=10.634+1.0$ ,  $N=114$ )a)ベース( $t=0.0182$ )

$$V_8 = (W \times t \times L) \times 114 = 1.535 [\text{m}^3]$$

b)スペーサー(充填率  $\alpha=0.5$ ,  $t=0.0318$ )

$$V_9 = (W \times t \times L) \times \alpha \times (N-6) \\ = (0.0636 \times 0.0318 \times 11.634) \times 0.5 \times 108 = 1.271 [\text{m}^3]$$

## ⑨ナトリウム容積

$$V_0 = V_1 + V_2 - (V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 + V_8 + V_9) \\ = 91.07 + 6.07 + (21.605 + 9.755 + 0.317 + 0.111 + 1.535 + 1.271) \\ = 62.546 [\text{m}^3]$$

## ⑩ナトリウム重量

$$W = V_0 \times \rho = 62.546 \times 852.53 = 53.322 \times 10^3 [\text{kg}]$$

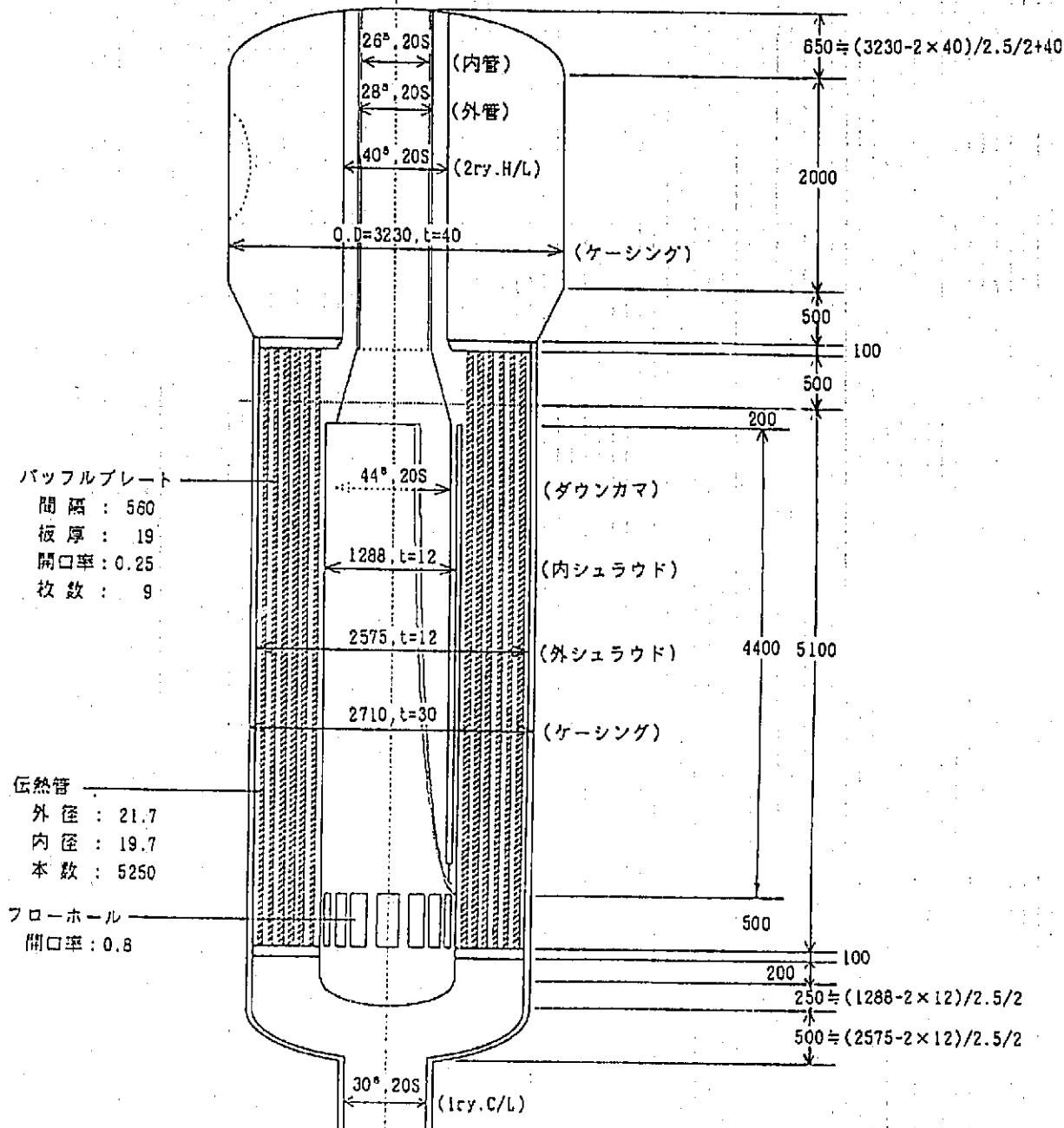


図1 中間熱交換器構造図

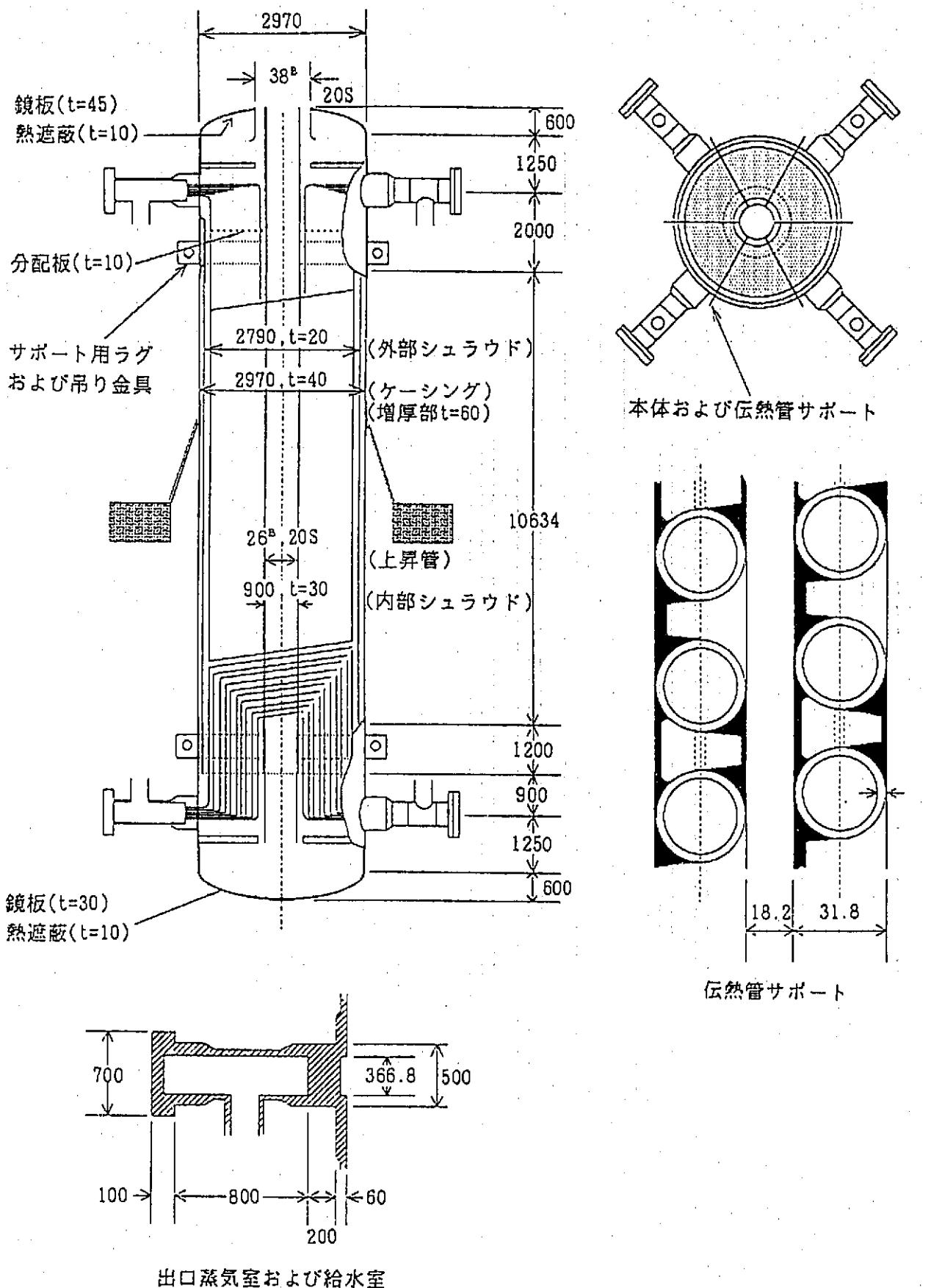


図2 蒸気発生器構造図

表1 構造材重量とナトリウム重量の計算結果

単位 : × 10<sup>3</sup> (kg)

機器名称	計算モジュール	側部重量	内部重量	Na重量
(1) 原子炉容器				
①上部プレナム	MN(1)	68.349	105.370	309.330
②下部プレナム	MN(2)	116.268	326.171	204.220
(2) 炉心構成要素	RF(1)	—	286.400	17.120
(3) 1次系配管				
① H/L配管	LN(1) ~ LN(3)	10.080	—	7.207
② C/L配管	LN(4) ~ LN(6)	10.007	—	13.354
(4) IHX				
① 1次側入口プレナム	MN(3) ~ MN(5)	10.527	2.216	16.716
② 1次側出口プレナム	MN(6) ~ MN(8)	2.646	2.793	2.987
③ 伝熱部	HX(1) ~ HX(3)	10.205	21.192	6.88/7.909
④ 2次側出口プレナム	MN(9) ~ MN(11)	—	3.844	2.061
⑤ 2次側入口プレナム	MN(24) ~ MN(26)	—	2.920	5.972
(5) 2次系配管				
① H/L配管				
a. IHX出口～IRACS分岐	LN(7) ~ LN(9)	3.998	—	4.604
b. IRACS分岐～SG入口	LN(10) ~ LN(12)	3.236	—	3.070
② X/L配管	LN(13) ~ LN(15)	4.310	—	4.705
③ C/L配管	LN(16) ~ LN(18)	4.647	—	5.536
④ IRACS				
a. H/L配管	LN(19) ~ LN(21)	3.521	—	2.394
c. C/L配管	LN(22) ~ LN(24)	3.396	—	2.365
(6) SG				
① 入口プレナム	MN(15) ~ MN(17)	6.086	1.547	6.787
② 伝熱部	SG(1) ~ SG(3)	65.077	106.564	53.322
③ 出口プレナム	MN(18) ~ MN(20)	5.436	5.019	12.545