

ATR中小型炉の自然循環重水系の検討

成 果 報 告 書

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1993年3月

三菱原子力工業株式会社

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)

1993.3.22

A T R 中小型炉の自然循環重水系の検討*

岸田雅子**吉岡直樹**内田正治**

[要旨]

A T R の重水冷却系は、1次系より発生した熱を2次側と交換し、重水温度を下げるカランドリアタンク内へ循環される。先行炉の設計では、この重水の循環は、ポンプによる強制循環であったが、本研究では自然循環による冷却の可能性を検討した。下記に、本研究の実施内容の要旨を示す。

(1)重水冷却系圧力低減方策の検討

ATRECSコードによる解析に先立ち、発生する自然循環流量を概略把握し、重水冷却系圧力損失低減方策を検討した。

(2)解析モデルの設定とATRECSコード用入力データの作成

圧力損失低減方策に基づき、重水冷却系の設備・構造概念を定めると共に解析モデルを設定し、解析用入力データを作成した。

(3)A T R 重水系自然循環解析

カランドリアタンクからの重水出口温度および重水冷却器高さをパラメータとした定常解析を行い、重水流動に対する影響をサーベイした。

(4)重水冷却器2次側の検討

事故時の重水冷却器2次側のヒートシンクについて、自然放熱等を利用した方策を検討した。

本報告書は、上記研究の成果報告をまとめたものである。

*本報告書は三菱原子力工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

**三菱原子力工業株式会社 新型炉統括部

目 次

要旨	i
図表リスト	iii
1. 概 要	1
2. 重水冷却系圧力損失低減方策の検討	2
2.1 検討条件	2
2.2 自然循環ヘッド	2
2.3 系統圧損と圧損低減方策の効果	3
3. 解析モデルの設定とATRECS用入力データの作成	9
3.1 重水冷却系設備・構造概念の設定	9
3.2 圧損係数	10
3.3 解析方法と解析モデル	14
3.4 ATRECSコード用入力データの作成	15
4. ATRECSによる重水系自然循環解析	28
4.1 パラメータサーベイ解析	28
4.2 定常解析	29
5. 重水冷却器2次側の検討	45
6. まとめ及び今後の課題	48
7. 謝辞	50
8. 参考文献	51
付録-1 管群圧損式	付-1
付録-2 圧損係数と代表流路形状での換算	付-3

A T R 中小型炉の自然循環重水系の検討 一図表リスト一

表リスト

- 表2 - 1 各部圧損データと圧損低減効果
- 表3 - 1 重水冷却系形状(1ループ当たり)
- 表3 - 2 重水冷却系圧損係数(1ループ当たり)
- 表3 - 3 設備・構造概念設定データに基づく重水冷却系の圧損
- 表3 - 4 ATRECS入力データ(パラメータサーベイ、代表ケース)
- 表3 - 5 ATRECS入力データ(定常計算、ケース1)
- 表3 - 6 ATRECS入力データ(定常計算、ケース2)
- 表3 - 7 ATRECSプログラムの改修

図リスト

- 図2 - 1 重水冷却系統構成図
- 図3 - 1(a) A T R 実証炉カランドリアタンク管配列
- 図3 - 1(b) 中小型A T R カランドリアタンク構造概念図
- 図3 - 2 中小型A T R 重水冷却系配置配管概念図
- 図3 - 3 ATRECS解析モデル図
- 図4 - 1 パラメータサーベイ解析結果: 自然循環流量の変化
- 図4 - 2 パラメータサーベイ解析結果: 除熱量の変化
- 図4 - 3 自然循環流量静定状況(冷却器高さ15m, 重水出口温度110 °C)
- 図4 - 4 自然循環流量静定状況(冷却器高さ20m, 重水出口温度106 °C)
- 図4 - 5 自然循環流量静定状況(冷却器高さ30m, 重水出口温度100 °C)
- 図4 - 6 定常解析結果 :自然循環流量静定状況(ケース1)
- 図4 - 7 定常解析結果 :自然循環温度静定状況(ケース1)
- 図4 - 8 定常解析結果 :自然循環流量静定状況(ケース2)
- 図4 - 9 定常解析結果 :自然循環温度静定状況(ケース2)
- 図4 - 10 定常解析結果 :自然循環流量静定状況(ケース3)
- 図4 - 11 定常解析結果 :自然循環温度静定状況(ケース3)
- 図4 - 12 定常解析結果 :自然循環流量静定状況(ケース4)
- 図4 - 13 定常解析結果 :自然循環温度静定状況(ケース4)

1. 概 要

ATRの重水冷却系は、下記の様な、カランドリアタンク内での発熱及び同タンクへの入熱を除去し、2次側に伝えることにより、減速材としての重水を所定温度に維持する。

- ・カランドリア（カランドリアタンク及びカランドリア管等）並びに重水の γ 線吸収による発熱及び中性子減速による発熱
- ・炭酸ガス層を通した圧力管からの伝熱による入熱
- ・（制御棒及び）重水中のほう酸の燃焼による発熱

先行炉の設計では、この重水の循環は、ポンプによる強制循環であったが、本研究では自然循環による冷却の可能性を検討した。

本報告書は、先行炉をベースとした重水冷却系圧力損失低減方策の検討、自然循環重水冷却系設備構成と解析モデルの設定、ATRECSによる重水系自然循環解析及び、重水冷却器2次側の検討についてまとめたものである。

2. 重水冷却系圧力損失低減方策の検討

ATRECSによる解析に先立ち、発生する自然循環流量を概略把握し、重水冷却系圧力損失低減方策を検討する。

2.1 検討条件

発生する自然循環能力はポンプによる循環能力に比べて小さいと考えられることから、成立性見極めの検討に際しては、得られる自然循環能力は大きく、かつ、系統内の圧力損失は小さくなる様、下記条件で考える。尚、見通しが得られた段階で、条件を緩和することを考える。

(a) 重水のカランドリアタンク入口温度は50°C (A T R 原型炉の場合50.9°C

$$\left[= \frac{1355 \times 51 + 20.5 \times 47.5}{1355 + 20.5} \right] , \text{ 出口温度は} 90^{\circ}\text{C}, 110^{\circ}\text{C} \text{も考える。}$$

[90°C, 110°C として、成立見通しを得た後、ATRECSによる詳細解析では]
70°C, 80°Cについても検討する。

(b) 重水冷却器の高さは20m(最大)とする。

(c) 圧力損失低減策として、重水を制御棒案内管に通さないことも考える。

(d) 重水冷却系の各部圧損データについては、先行炉の設計データ²⁻¹を参考とする。

2.2 自然循環ヘッド

50°C～110°C近傍での重水の比重は以下の通り。

320° K	1097.1 kg/m ³	380° K	1057.7 kg/m ³
(飽和蒸気圧 : 0.123 MPa)			
340° K	1086.5 kg/m ³	400° K	1040.1 kg/m ³
(飽和蒸気圧 : 0.237 MPa)			
360° K	1073.2 kg/m ³		

一方、カランドリアタンク伝熱中心～重水冷却器伝熱中心高さ20mとすると、得られる自然循環ヘッドは概略、次の様に評価できる。

カランドリアタンク出口温度 (°C)	Δ T (°C)	比重差 (kg/m ³)	自然循環ヘッド (kg/cm ²)	自然循環ヘッド (m)*1
70	20	10.6	0.0212	約0.20
90	40	23.9	0.0478	約0.45
110	60	39.4	0.0788	約0.74
130	80	57.0	0.114	約1.10

*1) 出口温度での比重で換算

2.3 系統圧損と圧損低減策の効果

先行炉の重水冷却系の概略系統構成を図2-1に示す。また、各系統構成要素の圧損データを表2-1に示す。これは、実証炉規模のもので中小型ATRのものと異なるが、圧損評価上は、出力規模に依らず、ほぼ同様と考えられる為、ここでは、圧損低減見通しを得る目的で参考として用いるものとする。

表2-1によれば、定格運転時重水冷却系の圧力損失は、トータル $6.63\text{kg}/\text{cm}^2$ である。一方、前項で見られる通り自然循環ヘッドは、 $0.1\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下であり、必要流量を得る為には、大巾な圧損低減が必要である。

以下、可能と考えられる圧損低減策と効果について述べる。

(a) 弁の削除

自然循環を利用するため、ポンプは削除され、これに伴い、ポンプ出入口の止弁、逆止弁は削除可能である。

また、本系統の機能達成のためには、主系の流量を調節することは、必須のものではなく、この意味での流量調節弁は削除する。但し、分岐の設け方によっては流量配分調整が必要になる可能性があるため、^{*1)} 系統構成上出来るだけ、そうした分岐は設けないこととし、更に、止むを得ない場合には、流量調節用オリフィスを設置することとし、流量配分調節用の弁も削除する。

(*1：試験段階で仮設の流量計により配分を確認することで対応可能)

更に、メンテナンス用弁についても削除する。ポンプ削除により、補修の頻度は格段に小さくなると考えられるが、もし、重水冷却器等の故障の場合には、プラント停止後、主循環ラインは全てドレンした後、補修するものとする。

以上から、重水冷却系主循環ラインの全ての弁は削除する。

これによる圧損低減は、 $1.91\text{kg}/\text{cm}^2$ である。

(b) 制御棒(C/R)案内管冷却の廃止

これによる圧損低減は $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ である。

尚、これに伴い、多数のC/R案内管への細管での分岐を止めることも可能であり、設計段階での詳細評価により、圧損低減につながるならば、数本の分岐管で直接カランドリアタンク底部に導き、多孔板を通してカランドリアタンク内の冷却の均一性を確保することも考えられる。

(c) 流量計型式の変更

オリフィスタイプの流量計の圧損は、 $0.4\text{kg}/\text{cm}^2$ で無視できない。これを電磁流量計に代替して圧損を低減する。

尚、電磁流量計は、水に対しても広い範囲で使用されており、サイズ的にも精度的（±1%）にも問題ない。但し、精度を維持できる測定下限流速は、約0.3m/sであるため、必要な場合には、流量計近傍のみサイズの小さい配管を用いることとする。（流量は、本系の機能確認というより、熱精算のために必要と考えられる。）

(d) カランドリアタンク出口温度上昇による流量低減 (70°C→90°C)

カランドリアタンク出口の重水温度を70°C→90°Cにすることにより、冷却に必要な流量は約½となる。圧損 \propto （流速）²の関係が成立するものと考えると、各部圧損は、約¼となる。

(e) 配管口径の増大

配管口径を1.5倍（ATR原型炉ベースで、最大口径配管400A→600A）とし、流速を½とすることにより配管部の圧損を低減する。
これにより、配管部の圧損は、約¼に低減される。
但し、当然のことながら、本対策は、物量の増加を伴う。

(f) 重水冷却器圧損低減

先行炉設計によれば、圧損は定格時1.4kg/cm²であった。これについて検討を加える。

重水冷却器の主な仕様を以下に示す。

伝熱管寸法	19φ×2t
伝熱管型式	Uチューブ
〃 本数 (Nt)	2784本
管側流量 (Gt)	1800m ³ /h (50°C→70°Cの時の定格時流量)
必要伝熱面積 (At)	2340m ²
管側パス数 (Np)	4

これら仕様より、管側圧損を概略評価する。

$$\text{管長さ } L_t = \frac{At}{\pi \cdot d_0 \cdot Nt} = \frac{(2340)}{\pi (0.019) (2784)} = 14.1\text{m} \\ \Rightarrow 16\text{m (U部を見込15%増)}$$

$$\text{管内流速 } v = \frac{Gt/3600}{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot Nt} = \frac{1800/3600}{\frac{\pi}{4} (0.015)^2 \cdot (2784)} = 1.02\text{m/s}$$

摩擦損失係数

$$f = 0.015$$

$$\text{管内圧損 } \Delta P_t = \frac{Np}{2} \cdot \frac{fL}{d_i} \cdot \frac{rv^2}{2g} = \frac{4(0.015)(16)(1000)(1.02)^2}{2(0.015)(2)(9.8)} \\ = 1700 \text{ kg/m}^2$$

出入口プレナム

$$\Delta P_p = Np \cdot 4 \cdot \frac{rv^2}{2g} = \frac{4(4)(1000)(1.02)^2}{2 \cdot (9.8)} \\ = 849 \text{ kg/m}^2$$

(通常、1パス当たり、速度水頭の4倍程度)

従って、管側圧損は

$$\Delta P = \Delta P_t + \Delta P_p = 1700 + 849 = 2549 \text{ kg/m}^2 \\ \Rightarrow 0.255 \text{ kg/cm}^2$$

となる。これより、設計値 1.4 kg/cm^2 は、十分な余裕を持っていることが考えられる。

以上の検討より、ここでは、重水冷却器の目標圧損を 0.4 kg/cm^2 ($50^\circ\text{C} \rightarrow 70^\circ\text{C}$) とする。(本値については、今後、もう少し詳しく検討し、成立性を判断する。)

以上の各圧損低減策を採用した場合の圧損見通しをまとめて、表 2-1 に合わせて示す。

(a)～(f)の低減策を全て採用したとしても、系統の圧力損失は、得られる自然循環ヘッドを 5 倍程度上回っており、成立のためには、更なる圧損低減、自然循環ヘッドの増大が必要である。

ここでは、更に、次の対策を考える。

(g) カランドリアタンク出口温度の上昇 ($90^\circ\text{C} \rightarrow 110^\circ\text{C}$)

- ① 配管引廻しによる簡素化
- ② カランドリアタンク入口部の圧損低減
- ③ カランドリアタンク出口温度の上昇 ($90^\circ\text{C} \rightarrow 110^\circ\text{C}$)

これらのうち、①、②については、ある程度可能と考えられるが、全圧損低減に対する寄与は大きくできない。③については、出口温度を上昇させると重水の飽和蒸気圧が高くなるため沸騰を生じ、炉心核設計上問題となる。これに対しては、サージタンクカバーガス圧を増加し、重水系を加圧する対策が考えられる。この場合の最大の制限条件は、カランドリア管の外圧座屈限界圧力と考えられる。この点、先行炉設

計では次の様に考えられている。

カランドリア管座屈限界圧力	3.7 kg/cm ²
許容外圧	1.23kg/cm ² (安全率3)
下管板上面圧力	0.8 kg/cm ² (水頭) + 0.3 kg/cm ² (カバーガス圧) = 1.1 kg/cm ²

[下管板上面圧力<許容外圧で構造的に成立している。]

ところで、自然循環除熱を狙う場合、重水冷却器はカランドリアタンクより~20m高い位置に設置することになる。この場合、従来のカバーガス圧では、重水冷却器近傍では負圧となり沸騰を生じて、自然循環パスが切れる結果となる。これを避けるためには重水冷却器近傍でも、約 0.3 kg/cm²g に加圧する必要がある。その結果、カランドリアタンク内の圧力は、約 2.9 kg/cm²g (= 0.3 + (1097 kg/m³ * 24 m / 10⁴)) となる。これは、カランドリア管座屈圧力 3.7 kg/cm²に近いもので、カランドリア管設計上、従来の構造では成立しない。従って、管肉厚を増やす等の対策が必要である。

但し、本問題は、単に、カランドリアタンク出口重水温度の上昇によると言うよりも自然循環に伴う基本的な問題であり、別途、調整の為の検討がなされるものとして議論を進める。

以上のことから、上記①、②、③の圧損低減効果を合わせて表2-1に示す。

いずれも目標で、今後、より詳しい検討を要するが、これで圧損合計が約0.076kg/cm²、一方、期待できる自然循環ヘッドが約 0.0788 kg/cm²となり、両者がほぼ等しくなる。

表 2-1 各部圧損データと圧損低減効果

単位 : kg/cm²

系統構成要素	先行炉設計 (重水温度 49→70°C)	圧損低減策導入後の圧損					
		弁削除 (50→70°C)	C/R案内管 冷却なし (50→70°C)	流量計型式 変更 (50→70°C)	重水温度 (50→90°C) + 配管口径 1.5倍	重水冷却器 圧損低減 (50→90°C)	重水温度 (50→110°C)
重水冷却系 配管及び弁等	3.91 内訳 流調弁3ヶ 止弁 3ヶ } 1.91 逆止弁1ヶ 流量計 0.4 その他 1.6	2.0	2.0	1.6	$1.6 \times \frac{1}{4}^{\ast 6} \times \frac{1}{4}^{\ast 4}$ $= 0.1$	0.1	$1.6 \times \frac{1}{2}^{\ast 1} \times \frac{1}{4}^{\ast 6} \times \frac{1}{9}^{\ast 5}$ $= 0.022$
重水冷却器	1.4	1.4	1.4	1.4	$1.4 \times \frac{1}{4}^{\ast 3}$ $= 0.35$	$0.4 \times \frac{1}{4}^{\ast 4}$ $= 0.1$	$0.4 \times \frac{1}{9}^{\ast 5}$ $= 0.044$
制御棒案内管重 水分配管・カラ ンドリアタンク	1.32 (C/R案内管 1.02)	1.32	0.30	0.30	0.075	0.075	0.01 ^{*2)}
合 計	6.63	4.72	3.7	3.3	0.525	0.275	0.076

*1) 配管引廻し簡素化により圧損係数を1/2にすることを目標

*2) カランドリアタンク入口構造に工夫をして、圧損低減することを目標

*3) 重水冷却器の設計圧損値は充分な余裕があるので、0.4とすることを目標

*4) ΔT が2倍になるのでWは1/2、従って圧損は1/4*5) ΔT が3倍になるのでWは1/3、従って圧損は1/9

*6) 配管口径が1.5倍になるのでWは1/2、従って圧損は1/4

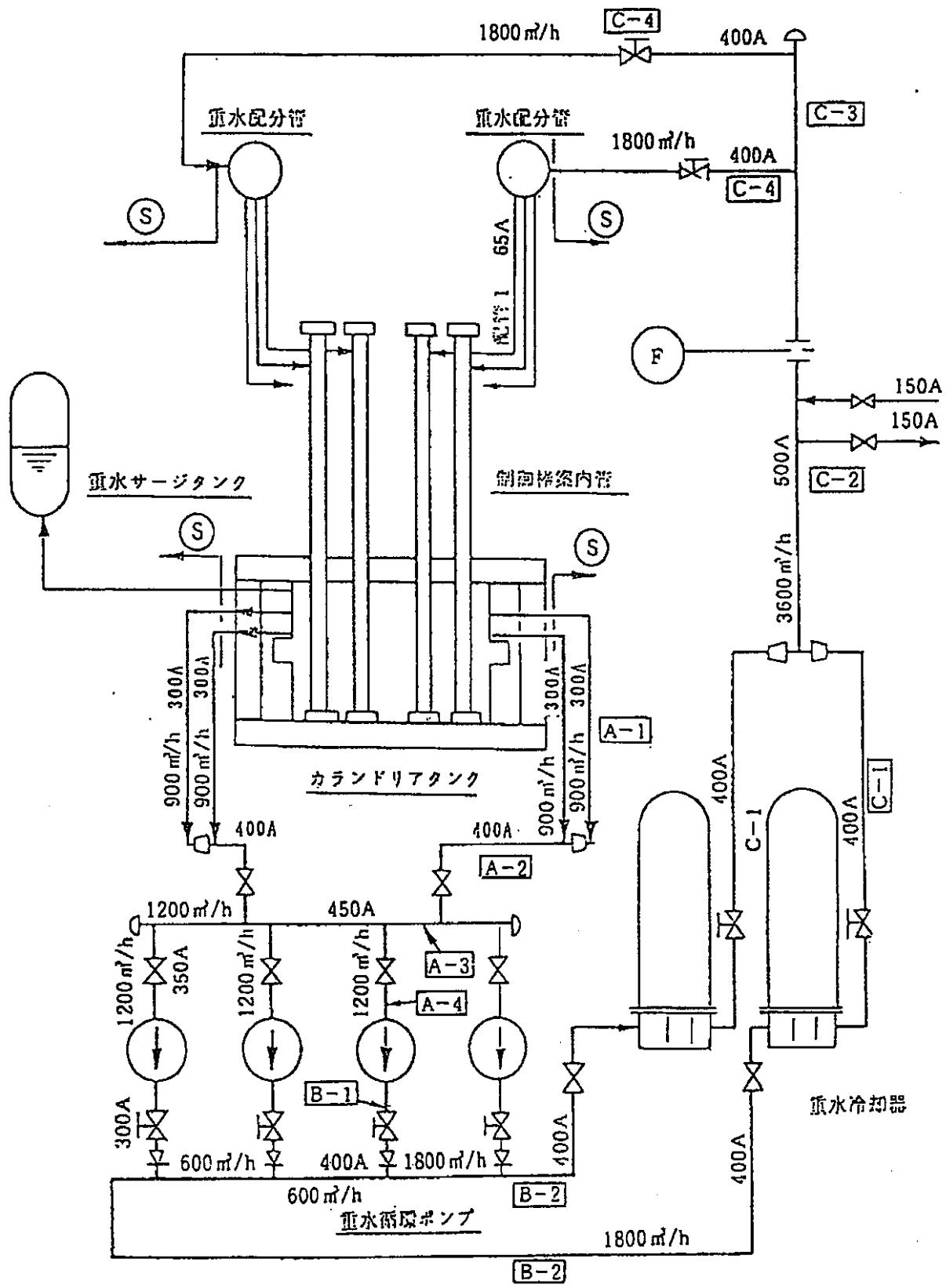


図 2-1 重水冷却系統構成図

3. 解析モデルの設定とATRECS用入力データの作成

自然循環冷却系設備の圧損低減方策を実証炉ベースに検討した結果、弁の削除、制御棒案内管冷却の廃止、重水冷却器圧損の見直し、配管系の口径増大及び引き回しの簡素化等の他、カランドリア出口の温度上昇（重水の出入口温度差増大:50 → 110°Cと循環流量減少）で、圧損の合計と自然循環ヘッドがほぼ等しくなることが判った。

ここでは、ATRECSコードによる自然循環解析を実施する為に、圧損低減方策に基づき重水冷却系の設備・構造概念、解析モデルを設定し、ATRECSコード解析用入力データを作成する。

3.1 重水冷却系設備・構造概念の設定

(1) 前提条件

- ・炉心熱出力 1 0 0 0 MWt (5 0 0 MWt × 2 ループ構成)
- ・燃料ピン×高さ 5 4 本クラスタ／1体 × 3.2 m
- ・圧力管本数×内径 2 8 0 本／ループ × 1 1 7.8 mmφ
- ・重水側伝熱量 5 0 MWt

(2) 構造データ

(1)の前提条件及びATR実証炉をベースに重水冷却系設備の構造を設定した。

重水冷却系も2ループ構成とする。

(a) カランドリアタンク

図3-1 (a)に示すATR実証炉のカランドリアタンクの管配列より1層（最外層）を減らす。従って胴径(Do)は2ピッチ分減らし、

$$Do = 7800 - 2 \times 240 = 7320 \phi$$

とした。

高さは燃料長さ=3.7mを3.2mと仮定し、ATR実証炉のカランドリアタンクの高さより、燃料長さの差(0.5m)を減らし、逆に新たに設ける重水下部プレナム部高さ(0.2mと仮定)を加え、

$$4470 - 500 + 200 = 4170$$

とした。

図3-1 (b)に中小型ATRカランドリアタンク構造概念図を示した。

(b) 重水冷却系配管

重水冷却器の高さを20m程度とした。図3-2に配管引回し概念図(1ループ分)を示し、表3-1にデータをまとめた。

(c) 重水冷却器

重水冷却器除熱量 2 5 MWt × 2 基

重水冷却器の仕様は、圧力低減方策検討での仕様と同様とする。

伝熱管寸法 $19\phi \times 2t$

伝熱管本数 2784本

2次側出入口温度 $42^{\circ}\text{C} / 32^{\circ}\text{C}$

但し、有効伝熱管長は、重水系自然循環流量／温度と熱的にバランスする値を定常解析のパラメータサーベイより求めることとする。

3.2 圧損係数

(1) 配管部

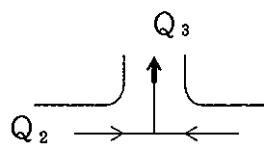
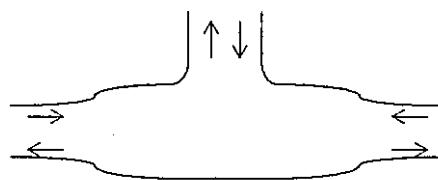
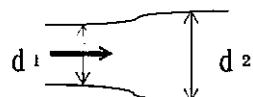
3-1

図3-2 に示す配置配管概念図に従い、エルボ、分岐及び合流部の圧損係数を設定する。（管内摩擦はコードに含まれる。）以下、太線矢印が代表流速であり、 Q は体積流量（ m^3/h ）を表す。

$$\text{①エルボ圧損係数 } (\xi) \times \text{エルボ個数} = 0.17^* \times 20 = 3.4$$

②合流管／分岐管

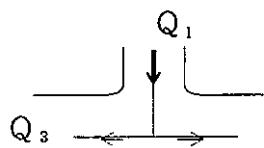
拡大及び合流の損失



$$\xi_{\text{拡大}} = 0.1$$

$$\xi_{\text{合流}} = 0.4 \quad (Q_2/Q_3 = 0.333)$$

③縮小及び分岐の損失



$$\xi_{\text{分岐}} = 0.7 \quad (Q_3/Q_1 = 0.333)$$



$$\xi_{\text{縮小}} = 0.025 \approx 0.03$$

ここで、注*1) 配管Re数 $= 6. \times 10^5$

(2) 重水冷却器圧損係数 (ξ_x)

圧力低減方策検討の重水冷却器圧損減をベースに以下の如くとする。即ち、

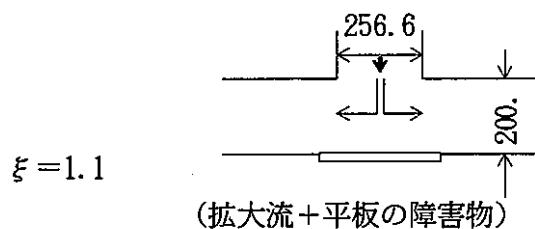
$$\text{重水冷却器圧損 } (\Delta P_x) = 440.0 \text{ kg/m}^2 \text{ (50°C} \rightarrow 110^\circ\text{Cの時)}$$

であるから、16B配管代替で圧損係数を与える。

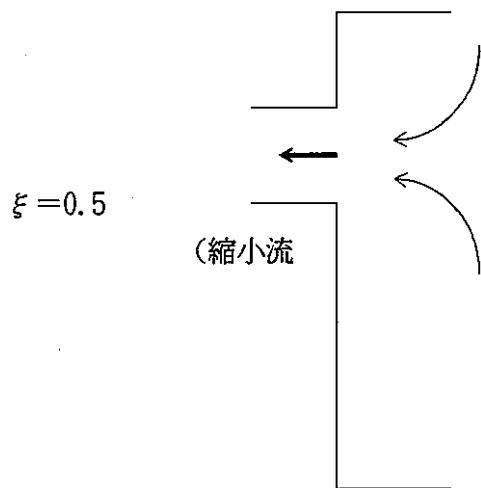
$$\xi_x = \Delta P_x / \frac{\rho V^2}{2g} = 440.0 / 33.1 = 13.3$$

(3) カランドリアタンク部

① 重水管出口

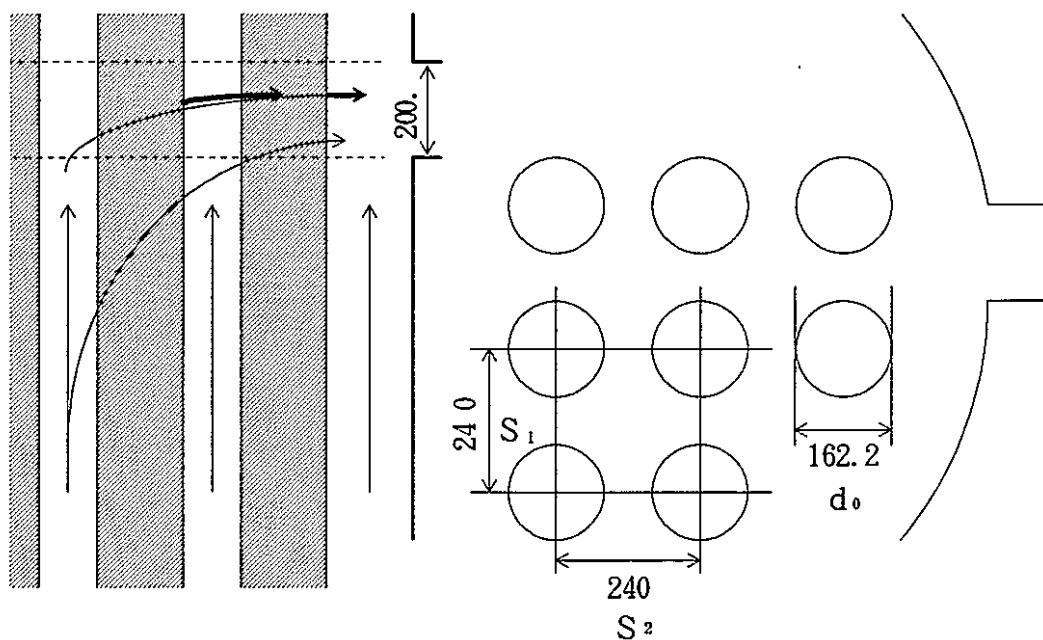


② 重水管入口



③ 圧力管群の横切り圧損係数

カランドリアタンク上部の出口に向かう流れ及び、カランドリアタンク底部の流れに対して以下の様な圧損係数を考慮する。（付録-1参照）



・圧力管の段数（Z）は、次式で与える。

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1}{4} \times \text{段数} \\ &= \frac{1}{4} \times 26 \\ &= 6.5 \end{aligned}$$

$$\cdot \frac{S_1 - d_0}{S_2 - d_0} = 1.0 \quad \therefore a_1 = 1.52$$

$$c_1 = 1.53$$

$$m = -0.2$$

$$\cdot A = a_1 \times b_1 = 2.33$$

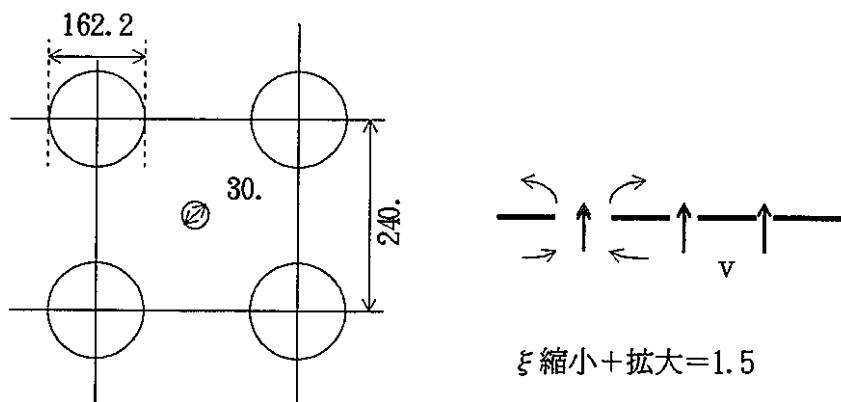
$$\cdot \phi = 1.0 \quad \cdots \text{直交性} \quad (60^\circ \text{ の時}, \phi = 0.82)$$

$$\cdot \xi = \phi \cdot A \cdot R e^m \cdot Z + \underline{\Delta \xi_t}$$

温度上昇効果 = 0.0

$$\begin{aligned} \therefore \xi &= 2.33 \times R e^{-0.2} \times 6.5 \\ &= 15.1 \times R e^{-0.2} \end{aligned}$$

④重水底部多孔板



(4) ATRECSコードへの適用

ATRECS コードでは、重水冷却系の分岐配管や複雑な流路形状となるカランドリアタンク部を、リンクと呼ばれる等価の代表流路でモデル化する。このため、前記の形状圧損係数の内、カランドリアタンク部の係数を等価断面積に換算して用いることとした。（付録-2参照）

表3-2 に、重水冷却系の形状圧損係数を区分毎にまとめた。

ここで、ATRECSによる解析を実施する前に、表3-1 および表3-2 の重水冷却系の構造検討データおよび、形状圧損係数を基に一巡圧損を計算して、表3-3 にまとめた。

表3-3 に、計算結果を示す様に、 ΔT (50-110°C) の条件*で、

配管部圧損	285.9 kg/m ²
重水冷却器圧損	443. kg/m ²
カランドリアタンク圧損	63.5 kg/m ²
合計圧損	792.4 kg/m ²

となり、これらの値は表2-1 の各部圧損とほぼ同等の値となる。従って、前章の低減方策の検討結果（圧損）と本章で設定した構造および形状圧損係数等のデータは整合性が取れていることが確認できた。

注 *)ここで用いた、基準流量は、

$$W = Q / (C_p \times \Delta T)$$

$$\begin{aligned} Q &= 25 (\text{MW}) = 25 \times 10^3 \times 859.9 / 3600 (\text{Kcal/s}) \\ &= 5971.5 \end{aligned}$$

$$C_p = 1.$$

$$\Delta T = 110 - 50 = 60.$$

$$\therefore W = 5971.5 / 60 = 99.5 \approx 100 \text{kg/s} = 360 \text{t/h}$$

3.3 解析方法と解析モデル

ATRECSを用いた解析では、先ず、重水出口温度および重水冷却器高さをパラメータとしたサーベイ解析を行う。この時、配管部の重水温度分布を与えて発生する自然循環流量を求める。熱交換量は流量と温度差の積で算出できる。次に、パラメータサーベイの結果より、ループ当たりの除熱量が25MWとなる重水出口温度および重水冷却器高さを条件として与え、熱交換器モデルを考慮した定常計算を実施する。

(1) パラメータ

パラメータサーベイは、次のパラメータの組み合わせで行う。

重水出口温度 (T_x) 70°C, 80°C, 90°C, 100°C, 110°C

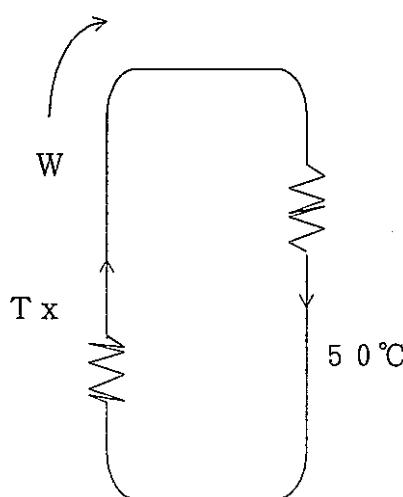
重水冷却器高さ 15m, 20m, 30m

重水戻り温度 50°C

(2) モデル

解析モデルは図3-3に示す様に、重水配管系を2リンク、2ジョイントのモデル体系を基本とする。ジョイントは配管部の分岐および合流点で取り、数値解析上、境界ジョイントを設ける。重水冷却器は境界熱交換器モデルで2次側流量および入口温度を与える。カレンドリアタンク部入熱は、定常時25MWを与える。定常解析では、自然循環流量および温度分布が静定するまで2400秒程度の解析を行う。

尚、パラメータサーベイ解析では、配管内重水温度分布を与えるので、境界熱交換器モデルおよびカレンドリアタンク部入熱を省略したモデルとして、流動解析のみ、自然循環流量が静定するまでの100秒間程度の解析を行う。



ここで、
W : 自然循環流量
Tx : 重水出口温度

3.4 ATRECSコード用入力データの作成

3.1～3.3 の検討に従って、ATR 重水系自然循環解析用の ATRECS コード用入力データを作成した。

(1) パラメータサーベイ用入力データ

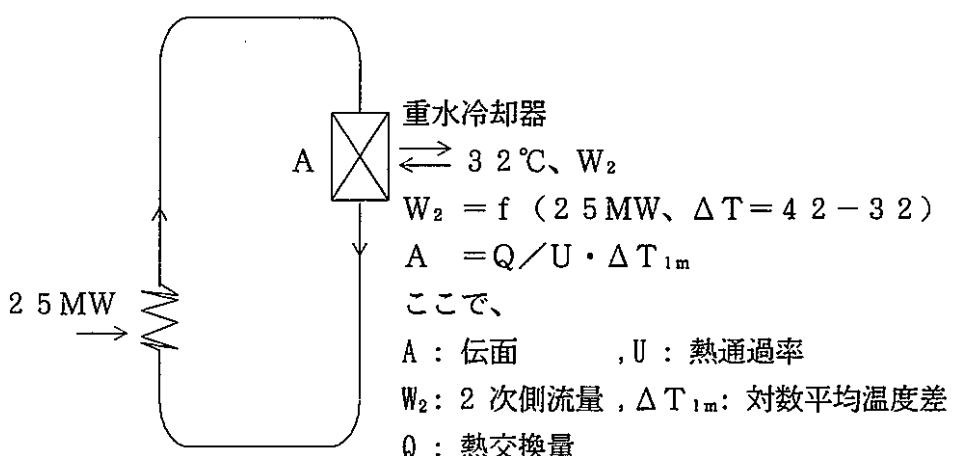
表3-4 にATRECSパラメータサーベイ用入力データ(代表ケース)を示す。

(2) 定常解析用入力データ

圧損低減方策のパラメータサーベイ解析結果より、成立点を前提条件として与える。

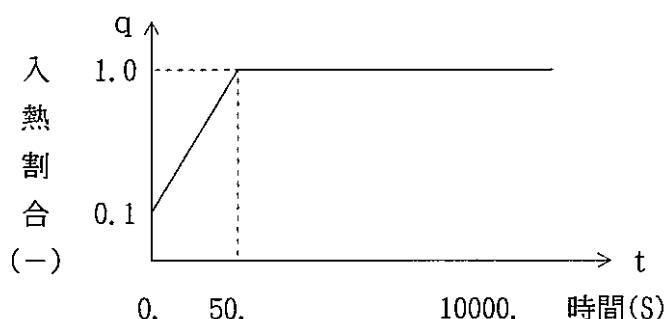
(a)前提条件

重水出口温度	χ °C
重水冷却器高さ	20 m
重水冷却器	2 次側入口温度 32 °C
	2 次側流量 2150 ton/h
重水戻り温度	50 °C
1 次系入熱	50 MW / 2 ループ = 25 MW

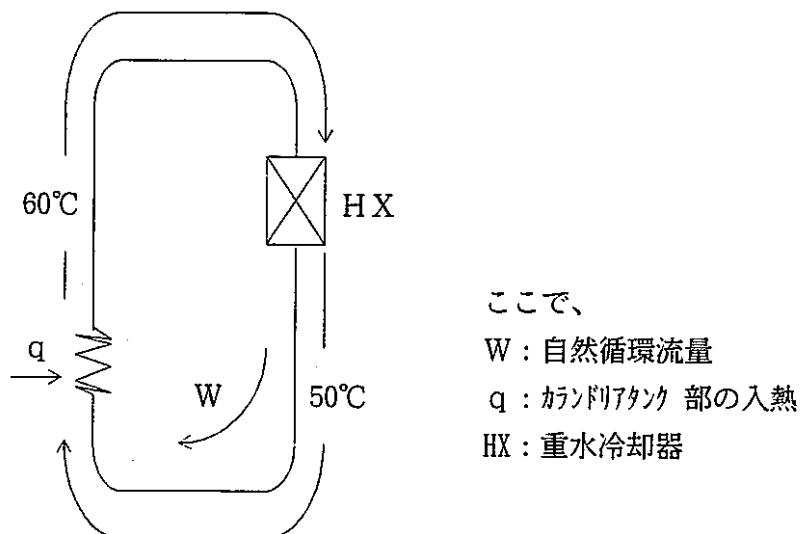


(b)計算手順及び入力データの作成

①カランドリアタンクの入熱変化を次図の条件で与える。



②配管系の初期温度分布を次図の条件で与え、熱計算の前に初期流動計算を行い
重水出口温度=60°Cにバランスする自然循環流量を得る為に負の計算開始時刻
(-100秒程度)を与える。



③熱交換器の出口温度が50°C程度になる様な2次側境界流量、温度を与え、1200秒程度まで定常解析を実施し、入熱qと解析値（重水出口温度および自然循環流量の整合性をチェックする。

④改めて①、②の条件で HX（熱交換器）モデルの伝面をパラメータとして、重水出口温度が50°Cになる点を捜す。定常計算は-100秒～2400秒までとする。
入力データリストを、表3-5、表3-6に示す。

(c)特記事項

①定常解析を行うにあたり、"ATRECS"コードを以下の様に改良した。

- i) 重水比重量を考慮する。
- ii) カランドリタンク内の入熱を考慮する。

表3-7にプログラムの改良ルーチンを示す。

②カランドリタンク入熱計算用入力データは以下の様に与えた。

$$QD(1) = 500.0 \quad (\text{MW/ループ})$$

$$QDATA(1, 1, 1) = 0.0, 0.1, 50.0, 1.0, 10000.0, 1.0 \quad (50\text{秒間で}100\% \text{入熱})$$

$$RLOSS = 0.05 \quad (500 * 0.05 = 25\text{MW/ループ})$$

$$QBUNP(1, 1) = 10 * 1.0 \quad (\text{入熱分布一様、ノード分割数}=10)$$

$$IQDOPT = 0.0$$

$$IGR = 1.0$$

$$NC(1) = 10 \quad (\text{重水入熱部のサブリンクノード分割数に一致させる})$$

$$NHXD20 = 1$$

$$ND20DA(1) = 203 \quad (\text{重水入熱部のサブリンク番号})$$

その他、圧力管冷却モデルを流用する上で零割り等を避けるため、ダミー入力が必要となる。（表3-7 備考参照）

表3-1 重水冷却系形状(1ループ当たり)

No.	機器配管名	数量	呼径	内径 (mm)	長さ (m)	始点高さ (m)	終点高さ (m)	高低差 (m)	1流路扱いの 等価径(mm)	形状抵抗係数
1	カントリア出口～合流ヘッド	3	10B	254.6	16.53	3.77	5.3	1.53	441.0	
2	合流ヘッド～重水冷却器入口	1	16B	390.6	47.7	5.3	26.0	20.7	390.6	
3	重水冷却器出口ヘッド～分岐ヘッド	1	16B	390.6	59.5	26.0	10.0	-16.0	390.6	
4	分岐ヘッド～重水分配管出口	3	10B	254.6	19.0	10.0	0.0	-10.0	441.0	
5	カントリアタンク・重水底部	1/2	—	(De=0.2)	1.8	0.0	0.0	0.0	1400.0	表3-2 参照
6	カントリアタンク・重水上部	1/2	—	(=0.357)	3.57	0.0	3.57	3.57	4220.0	
7										
8										
9										
10										

表3-2 重水冷却系圧損係数（1ループ当たり）

No.	機器配管名	数量	呼径	内径 (mm)	長さ (m)	代表流路断面積 (m ²)	エル個数× 圧損係数、他	分岐／ 合流	拡大／縮小	合計
1	カンドリア出口～合流ヘッダ	3	10B	254.6	16.53	0.1527	4*0.17=0.68	—	* ¹ * ² 0.5+0.1=0.6	1.28
2	合流ヘッダ～重水冷却器入口	1	16B	390.6	47.7	0.1193	6*0.17=1.02	0.4	—	1.42
3	重水冷却器出口ヘッダ～分岐ヘッダ	1	16B	390.6	59.5	0.1193	7*0.17=1.19	0.7	—	1.89
4	分岐ヘッダ～重水分配管出口	3	10B	254.6	19.0	0.1527	3*0.17=0.51	—	* ³ * ⁴ 1.1+0.03=1.13	1.64
5	カンドリアタンク・重水底部	½	—	(De=0.2)	1.8	1.58	70.+95.5=165.5 ^{*5}	—	—	165.5
6	カンドリアタンク・重水上部	½	—	(=0.357)	3.57	14.0	— ^{*6}	—	—	—
7	重水冷却器(圧損計算用)		16B 代替	390.6	—	0.1193	13.3	—	—	13.3

注) * 1) 重水管入口(カンドリアタンク部)
 * 2) 合流ヘッダ拡大
 * 3) 重水分配管出口(カンドリアタンク部)
 * 4) 分岐ヘッダ縮小
 * 5) (管群クロスフロー+多孔板部)換算相当値 (底部と上部)
 * 6) 16B管で換算相当値

表 3-3 設備・構造概念設定データに基づく重水冷却系の圧損

注) () 内の値は形状損失分とは別の、管摩擦相当値

No.	T (°C)	ρ (kg/m³)	W₁ (kg/s)	A (m²)	Q (m³/s)	V (m/s)	$\frac{\rho V^2}{2 g}$	ξ	圧損の内訳(含む摩擦) (kg/m²)			
									配管	重水冷却器	ガンドリタンク	全体
1	110	1060.	100.0	0.1527	0.094	0.62	20.6	1.28 (0.5)	26.6		10.4	36.6
2	110	1060.	"	0.1193	0.094	0.79	33.7	1.42 (1.6)	101.9			101.9
3	50	1095.	"	0.1193	0.091	0.77	33.1	1.89 (2.2)	134.9			134.9
4	50	1095.	"	0.1527	0.091	0.60	20.1	1.64 (0.64)	22.9		22.1	45.0
5	50	1095.	"	1.58	0.091	0.0576	0.19	165.5			31.	31.
6	80	1075.	"	14.0	0.093	0.0066	0.0024	—			—	—
7	80	1075.	"	0.1193	0.093	0.78	33.3	13.3	443.			443.
合計									285.9	443.	63.5	792.4

表3 - 4 ATRECS入力データ(パラメータサーベイ、代表ケース)

```

ATR NATURAL CIRCULATION ANALYSIS FOR HEAVY WATER COOLING SYSTEM 93.02.15
      o   o   o   o
&CINP1
  MENOST : 99999, KTEND = 50,
  IDPRNT : 10, 300, 200, 200, 500, 100, 100, 100, 100,
  IDPLOT : 3, 3, 3, 3, 10, 10, 10, 10,
  KTSTOY : 0, KWREST = 0,
&END
&CINP2
  TIME    : -100.0,
  DTCHAN[1] : 0.0, 600.0, 800.0, 1200.0, 10000.0,
  DOTIME[1] : 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
  TEND    : -0.1,
&END
&HUMINP
  NLINK : 3, NJOIN : 2, NCCL  : 0, NBCJ  : 1, NSUBL : 2,
  NMVAL : 0, NCVAL : 0, NSCVAL : 0, NPUMP : 0, NHX  : 0,
  NHXBC : 0, ILOOP : 0, JDX0  : 1,
&END
&SYSDA
  INL[1]  : 1, 2, 3,
  INUJ[1] : 1, 2, -1,
  INDJ[1] : 2, 1, 1,
  IHJ[1]  : 1, 2,
  IHBCJ[1] : -1,
  INSUBL[1] : 1, 2,
  INSLD[1] : 3, 4,
&END
&STRIP
  DZPIPE[1,1] : 1.0, 6.0, 6.0, 7.0, 8.0,
                 4.0, 8.7, 9.0, 1.0, 2.5,
                 9.0, 10.0, 4.0, 7.0, 12.0,
                 8.0, 6.0, 1.0,
  DZPIPE[1,2] : 2.0, 3.0, 6.0, 8.0, 8.0,
                 3.77, 3.0, 6.0, 6.0, 1.53,
  DZPIPE[1,3] : 10.0,
  DHPIPE[1,1] : 0.0, 5.0, 0.0, 0.0, 6.0,
                 0.0, 8.7, 0.0, 0.0, 0.0,
                 0.0, -10.0, 0.0, 0.0, 0.0,
                 0.0, -6.0, 0.0,
  DHPIPE[1,2] : -2.0, 0.0, 0.0, -8.0, 0.0,
                 3.77, 0.0, 0.0, 0.0, 1.53,
  DHPIPE[1,3] : 0.0,
  SDIAM[1,1] : 0.3906, 0.3906, 0.3906,
  SDIAM[1,2] : 0.441, 1.4, 4.22, 0.441,
  SDIAHO[1,1] : 0.4064, 0.3906, 0.4064,
  SDIAHO[1,2] : 0.460, 1.41, 4.23, 0.460,
  SDIAME[1,1] : 0.3906, 0.3906, 0.3906,
  SDIAME[1,2] : 0.441, 0.2, 0.357, 0.441,
  SLENG[1,1] : 47.7, 1.0, 59.5,
  SLENG[1,2] : 19.0, 1.8, 3.57, 16.53,
  STUETK[1,1] : 1.42, 13.3, 1.87,
  STUETK[1,2] : 1.64, 98.3, 0.0, 1.28,
  NODESL[1,1] : 8, 1, 9,
  NODESL[1,2] : 4, 1, 1, 4,
  TFLOW[1,1] : 9*10.0, 10*50.0,
  TFLOW[1,2] : 6*50.0, 5*110.0,
  TFLOW[1,3] : 2*110.0,
  TPIPE[1,1] : 9*10.0, 10*50.0,
  TPIPE[1,2] : 6*50.0, 5*110.0,
  TPIPE[1,3] : 2*110.0,
  THEAD[1] : 2*1,
  ELEV[1] : 5.3, 10.0,
  SELEY[1,1] : 26.0, 26.0,
  SELEY[1,2] : 0.0, 0.0, 3.77,
  WIN[1] : 100.0, 100.0, 1.0E-10,
  DIAM[3] : 1.0,
  DIAMO[3] : 1.0,
  DIAME[3] : 1.0,
  ALEN[3] : 10.0,
  TUETK[3] : 100.0,
  NODEL[3] : 1,
  NHX020 : 0,
&END
&CINP
  PBDAIN[1,1,1] : -1000.0, 1.0, 10000.0, 1.0,
  TBDA[1,1,1] : -1000.0, 110.0, 10000.0, 110.0,
&END
&CYINP
&END
&CVINP
&END
&HXINP
&END
&MYINP
&END
&PUMPIN
&END
&CORDA1
&END
&CORDA2
&END
&CORSTA
&END
&COROT
&END
&SD
&END
&TUPUMP
&END

```

表3-5 ATRECS入力データ(定常計算、ケース1)

```

ATR NATURAL CIRCULATION ANALYSIS FOR HEAVY WATER COOLING SYSTEM 93.03.03
o   o   o
SCINP1
  MENDST = 99999, KTEND = 50,
  IDPRNT = 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100,
  IDPLOT = 5, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10,
  KTSTOY = 0, KWREST = 0,
AEND
SCINP2
  TIME = -100.0,
  DTCHAN[] = 0.0, 800.0, 1200.0, 2400.0, 3600.0, 10000.0,
  DTIMEC[] = 6x2.0,
  TEND = 2400.0,
AEND
SHUMIN
  NLINK = 3, NJDNK = 2, NSCL = 0, NSCJ = 1, NSUBL = 2,
  NMVAL = 0, NCVAL = 0, NSCYAL = 0, NPUMP = 0, NMX = 1,
  NMHBC = 1, ILLOOP = 0, JD20 = 1,
AEND
SSYSDA
  INL[] = 1, 2, 3,
  INUJ[] = 1, 2, -1,
  INDJ[] = 2, 1, 1,
  INJ[] = 1, 2,
  INSCJ[] = -1,
  INSUBL[] = 1, 2,
  INSLD[] = 3, 4,
AEND
ASTRIMP
  DZPIPE[1,1] = 1.0, 6.0, 6.0, 7.0, 6.0,
  4.0, 8.7, 9.0, 1.0, 2.5,
  9.0, 10.0, 4.0, 7.0, 12.0,
  8.0, 6.0, 1.0,
  0.0, 8.0, 0.0, 0.0, 0.0,
  0.0, -10.0, 0.0, 0.0, 0.0,
  0.0, -8.0, 0.0,
  DZPIPE[1,2] = 2.0, 3.0, 6.0, 8.0, 5.0,
  10x0.377, 3.0, 6.0, 6.0, 1.53,
  DZPIPE[1,3] = 10.0,
  DHPIPE[1,1] = 0.0, 6.0, 0.0, 0.0, 6.0,
  0.0, 8.7, 0.0, 0.0, 0.0,
  0.0, -10.0, 0.0, 0.0, 0.0,
  0.0, -8.0, 0.0,
  DHPIPE[1,2] = -2.0, 0.0, 0.0, -8.0, 0.0,
  10x0.377, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.53,
  DHPIPE[1,3] = 0.0,
  SDIAM[1,1] = 0.3805, 0.3805, 0.3805,
  SDIAM[1,2] = 0.441, 1.0, 4.23, 0.441,
  SDIAM[1,1,1] = 0.4064, 0.3805, 0.4064,
  SDIAM[1,1,2] = 0.440, 1.41, 4.23, 0.440,
  SDIAM[1,1,3] = 0.3805, 0.3805, 0.3805,
  SDIAM[1,2,1] = 0.441, 0.2, 0.357, 0.441,
  SDIAM[1,2,2] = 0.441, 1.0, 59.5,
  SLENG[1,1] = 47.7,
  SLENG[1,2] = 18.0, 1.8, 3.57, 16.53,
  SLENG[1,3] = 1.62, 13.3, 1.67,
  STURTH[1,2] = 1.64, 98.3, 0.0, 1.28,
  MODESL[1,1] = 8,
  MODESL[1,2] = 4, 1, 10, 4,
  TFLOW[1,1] = 8x80.0, 10x50.0,
  TFLOW[1,2] = 8x50.0, 14x50.0,
  TFLOW[1,3] = 2x108.0,
  TPIPE[1,1] = 18x50.0,
  TPIPE[1,2] = 20x50.0,
  TPIPE[1,3] = 2x108.0,
  IHEAD[] = '2=1,
  ELEV[1] = 5.3, 10.0,
  SELEV[1,1] = 26.0, 26.0,
  SELEV[1,2] = 0.0, 0.0, 3.77,
  WIN[1] = 100.0, 100.0, 1.0E-10,
  DIAM[3] = 1.0,
  DIAM[2] = 1.01,
  DIAM[1] = 1.0,
  ALENG[3] = 10.0,
  ALENG[2] = 100.0,
  ALENG[1] = 100.0,
  MODEL[3] = 1,
  NMHD20 = 1,
  NMHD20A = 1,
  NMHD20A[] = 203,
  PDPO = 0.162,
  KD20 = 1,
  IND20 = 1,
  AIND20 = 1.0E-10,
  HZPHI = 0,
  ALD20 = 1.0,
  PFACT = 1.0E-10,
AEND
SSCINP
  PDATA[1,1,1] = -1000.0, 1.0, 100000.0, 1.0,
  TDOA[1,1,1] = -1000.0, 110.0, 10000.0, 110.0,
AEND
ACVIMP
AEND
ASCVIMP
AEND
AEND
SHVIMP
  NHDA[1,1] = -1, 102,
  TXDA[1,1,1] = 0.0, 100.0, 300.0, 2150.0, 10000.0, 2150.0,
  TXDA[1,1,2] = 0.0, 32.0, 100000.0, 32.0,
  TINHDX[1,1] = 32.0, 42.0,
  MMX[] = 5,
  MTMX[] = 2784,
  DOHX[] = 0.019,
  DHMX[] = 0.015,
  ZLMX[] = 7.5,
  AHX1[] = 0.717,
  AHX2[] = 0.492,
  DEHX1[] = 0.01722,
  DEHX2[] = 0.015,
  AHXC[] = 1.246,
  FOUL[] = 2.78,
  FOUL2[] = 1.4,
  FHKS[] = 1.0E-5,
  AHKS[] = 0.60,
  ALFHKS[] = 1.0E-5,
AEND
SHVIMP
AEND
SPUMPIN
AEND
ACORDAT
  NC[] = 10,
  BETLIM = 1.0,
  TAUDNG = 1.0,
  TMXIDNG = 1.0,
AEND
ACORDA2
AEND
ACORSTA
AEND
ACORDT
  QD[1] = 500.0,
  QDATA[1,1,1] = 0.0, 0.1, 50.0, 1.0, 10000.0, 1.0,
  RLOSS[] = 0.05,
  QUMP[1,1] = 10x1.0,
  IODOPT = 0,
  ICR = 1,
  KMP = 1,
  NMUMP = 1,
AEND
ASD
  QWL[1] = -1.0E10,
AEND
ATUPUMP
AEND

```

表3 - 6 ATRECS入力データ(定常計算、ケース2)

```

ATR NATURAL CIRCULATION ANALYSIS FOR HEAVY WATER COOLING SYSTEM 93.03.04
 0   0   0   0
*CINP:
  KREST = 19999, KTEND = 50,
  LOPROT = 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100,
  LOPLOT = 9, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10,
  KRESTY = 0, KRESTZ = 0.
*END
*CTIMP2
  TIME = -100.0,
  DTCHAN[1] = 0.0, 600.0, 1200.0, 2400.0, 3600.0, 10000.0,
  DOTIME[1] = 612.0,
  TEND = 2400.0.
*END
*ANUMIP
  NHLINK = 3, NJOIN = 2, NECL = 0, NECJ = 1, NSUBL = 2,
  NMVAL = 0, NCVAL = 0, NSCVAL = 0, NPUMP = 0, MHX = 1,
  NHBC = 1, ILOOP = 0, JD20 = 1.
*END
*SYSDA
  INL[1] = 1, 2, 3,
  IRU[1] = 1, 2, -1,
  IMU[1] = 2, 1, 1,
  IHJ[1] = 1, 2,
  IHBCJ[1] = -1,
  INSUBL[1] = 1, 2,
  INSLD[1] = 3, 4,
*END
*STRIMP
  DZPIPE[1,1] = 1.0, 8.0, 8.0, 7.0, 8.0,
  4.0, 3.7, 9.0, 1.0, 2.5,
  9.0, 5.0, 4.0, 7.0, 12.0,
  8.0, 8.0, 1.0,
  DZPIPE[1,2] = 2.0, 3.0, 6.0, 8.0, 8.0,
  10=0.377, 3.0, 8.0, 8.0, 1.53,
  DZPIPE[1,3] = 10.0,
  DHPIPE[1,1] = 0.0, 8.0, 0.0, 0.0, 8.0,
  0.0, 3.7, 0.0, 0.0, 0.0,
  0.0, -5.0, 0.0, 0.0, 0.0,
  0.0, -8.0, 0.0,
  DHPIPE[1,2] = -2.0, 0.0, 0.0, -8.0, 0.0,
  10=0.377, 0.0, 0.0, 0.0, 1.53,
  DHPIPE[1,3] = 10.0,
  SDIAM[1,1] = 0.3806, 0.3806, 0.3806,
  SDIAM[1,2] = 0.441, 1.4, 6.72, 0.441,
  SDIAMO[1,1] = 0.4084, 0.3806, 0.4084,
  SDIAMO[1,2] = 0.450, 1.41, 4.23, 0.450,
  SDIANE[1,1] = 0.3806, 0.3806, 0.3806,
  SDIANE[1,2] = 0.441, 0.2, 0.357, 0.441,
  SLENG[1,1] = 47.7, 1.0, 59.5,
  SLENG[1,2] = 18.0, 1.6, 3.57, 16.83,
  STUETK[1,1] = 1.42, 12.3, 1.87,
  STUETK[1,2] = 1.64, 99.3, 0.0, 1.28,
  NODESL[1,1] = 4, 1, 9,
  NODESL[1,2] = 4, 1, 10, 4,
  TFLOW[1,1] = 8=80.0, 10=80.0,
  TFLOW[1,2] = 8=80.0, 14=80.0,
  TFLOW[1,3] = 2=110.0,
  TPIPE[1,1] = 8=80.0,
  TPIPE[1,2] = 20=80.0,
  TPIPE[1,3] = 2=110.0,
  IHEAD[1] = 2*1,
  ELEV[1] = 5.3, 10.0,
  SELEV[1,1] = 26.0, 26.0,
  SELEV[1,2] = 0.0, 0.0, 3.77,
  WIN[1] = 100.0, 100.0, 1.0E-10,
  DIAM[3] = 1.0,
  DIAMO[3] = 1.01,
  DIANE[3] = 1.0,
  ALENC[3] = 10.0,
  TUETK[3] = 100.0,
  NODEL[3] = 1,
  NHXD20 = 1,
  ND20GA[1] = 203,
  PDPG = 0.162,
  KZ20 = 1,
  IND20 = 1,
  AIND20 = 1.0E-10,
  N2PHI = 0,
  RLD20 = 1.0,
  PFACT = 1.0E-10,
*END
*BCIMP
  TBDA[1,1,1] = -1000.0, 1.0, 100000.0, 1.0,
  TBDA[1,1,2] = -1000.0, 110.0, 10000.0, 110.0,
*END
*CYIMP
*END
*SCIMP
*END
*XIIMP
  NHXA[1,1] = -1, 102,
  FXDA[1,1,1] = 0.0, 100.0, 300.0, 2150.0, 10000.0, 2150.0,
  TXDA[1,1,1] = 0.0, 32.0, 100000.0, 32.0,
  TINBCX[1,1] = 32.0, 42.0,
  MHX [1] = 5,
  MTRX [1] = 2784,
  OOHX [1] = 0.019,
  OHX [1] = 0.015,
  ZLHX [1] = 7.45,
  AHX1 [1] = 0.717,
  AHX2 [1] = 0.492,
  DEHXT [1] = 0.01722,
  DEHXZ [1] = 0.015,
  AHXC [1] = 1.286,
  FOUL1 [1] = 2.78,
  FOUL2 [1] = 1.4,
  PHXS [1] = 1.0E-5,
  AHAS [1] = 0.80,
  ALPHXS[1] = 1.0E-5,
*END
*HVIMP
*END
*PUMPIN
*END
*CORDA1
  NC[1] = 10,
  BETLIM = 1.0,
  TAUDNS = 1.0,
  TMXDNS = 1.0,
*END
*CORDA2
*END
*CORSTA
*END
*COROT
  ODT[1] = 500.0,
  RDATA[1,1,1] = 0.0, 0.1, 50.0, 1.0, 10000.0, 1.0,
  ROLOSS = 0.05,
  OSUMP[1,1] = 10=1.0,
  IODOPT = 0,
  ICR = 1,
  NUHPIP = 1,
*END
*ASD
  OWL[1] = -1.0E10,
*END
*TUPUMP
*END

```

表3-7 ATRECSプログラムの改修

ルーチン名	改修内容
INPUT	入力追加 JD20 (=1の時、重水比重量を選択する、デフォルト=0) PFACT (配管材の伝面補正係数、デフォルト=1.0)
LIST	FORTRAN77仕様に変更 (CHARACTER文 ← DATA文)
MAIN *	再循環系モデル無しでも、カランドリアタンク内入熱計算ができるよう に改修。但し、伝熱量=0.0となる
MPIPE	配管部伝面補正係数を入力で与えることにより、冷却材と配管材との熱 交換を無視する
NETDX1*	MAINと同様 (NHXD20=1のみで判定し、LDX2(J1,1)にインデックスを設定)
OCHAN *	NCT1 → NC(1)
ROH	重水比重量計算の追加

(備考)

注*) 重水系のカランドリアタンク部入熱を、従来の圧力管冷却モデルの中性子
直接加熱による入熱で代替できるように修正した。

**) 零割り等を避けるためダミー入力が必要。

```

&STRINP の中で、

NHXD20      =      1,
ND20DA(1)   =    203,
PDPO        =  0.162,
KD20        =      1,
IND20       =      1,
AIND20     = 1.0E-10, ]** 
H2PHI       =      0,
RLD20       =      1,
PFACT       = 1.0E-10,
&END

&CORDAT
      HC(1) = 10,
      BETLIM = 1.0,
      TAUDNS = 1.0,
      YMKDNS = 1.0, ]** 
&END
&CORDA2
&END
&COSTA
&END
&CORDT
      QD(1) = 500.0,
      QDATA(1,1,1) = 0.0, 0.1, 50.0, 1.0, 10000.0, 1.0,
      RLOSS = 0.05,
      QBUMP(1,1) = 10E1.0,
      IDOPT = 0,
      IGR = 1,
      NUMPIP = 1, ]** 
&END
&SO
      QWL(1) = -1.0E10, ]** 
&END
&TOPUMP

```

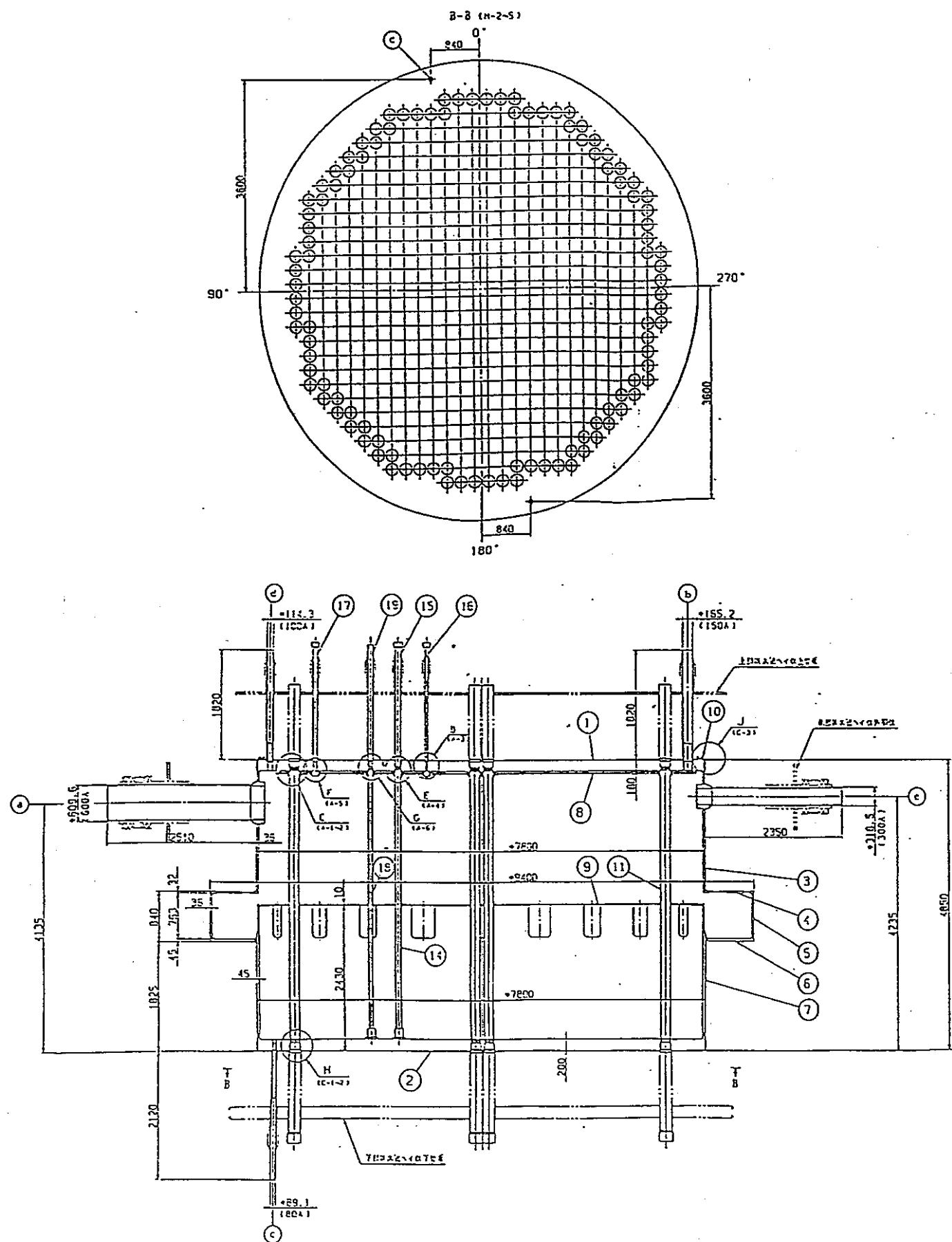


図 3 - 1(a) ATR実証炉カランドリアタンク管配列

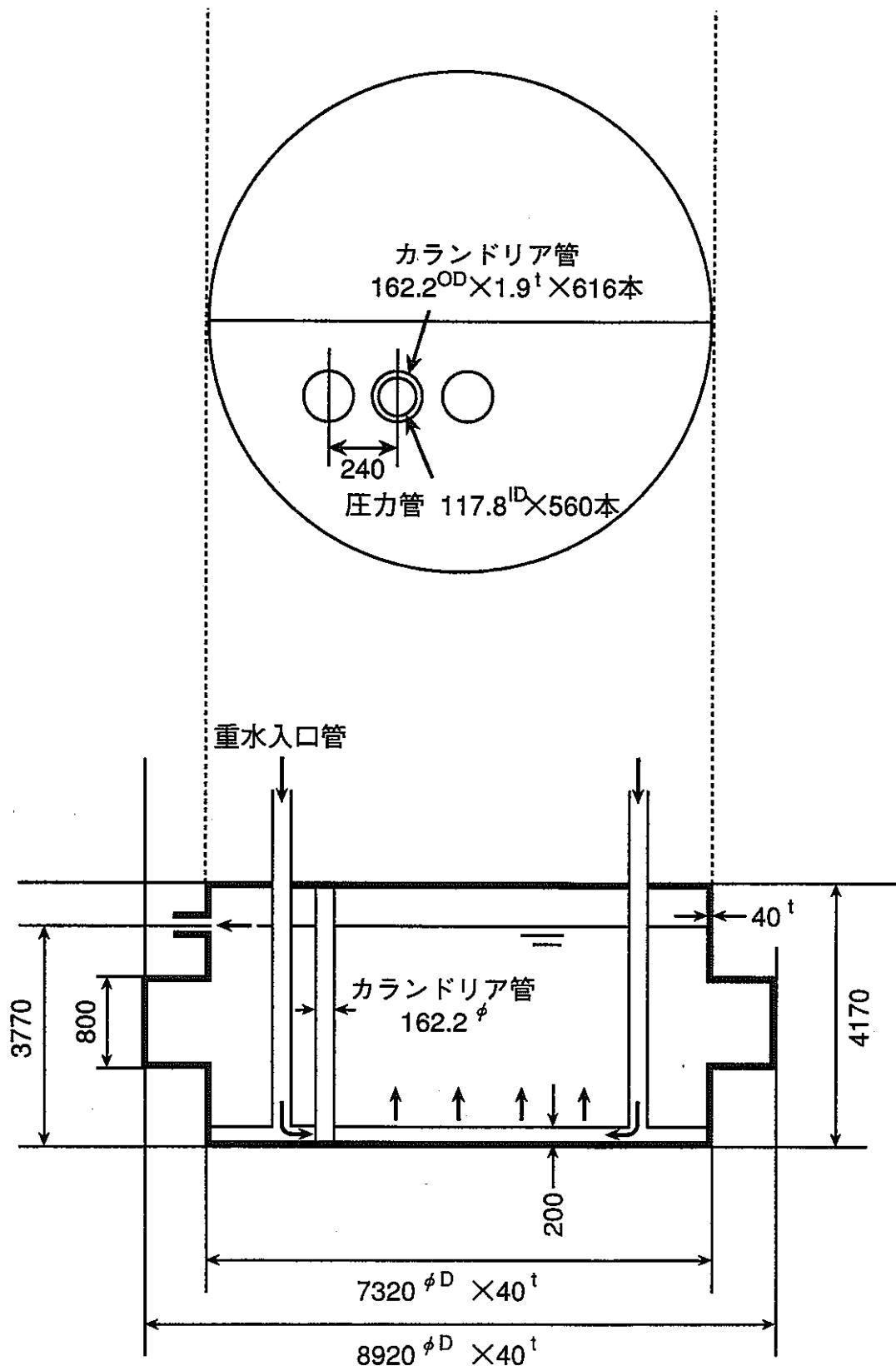


図3-1(b) 中小型ATRカーランドリアタンク構造概念図

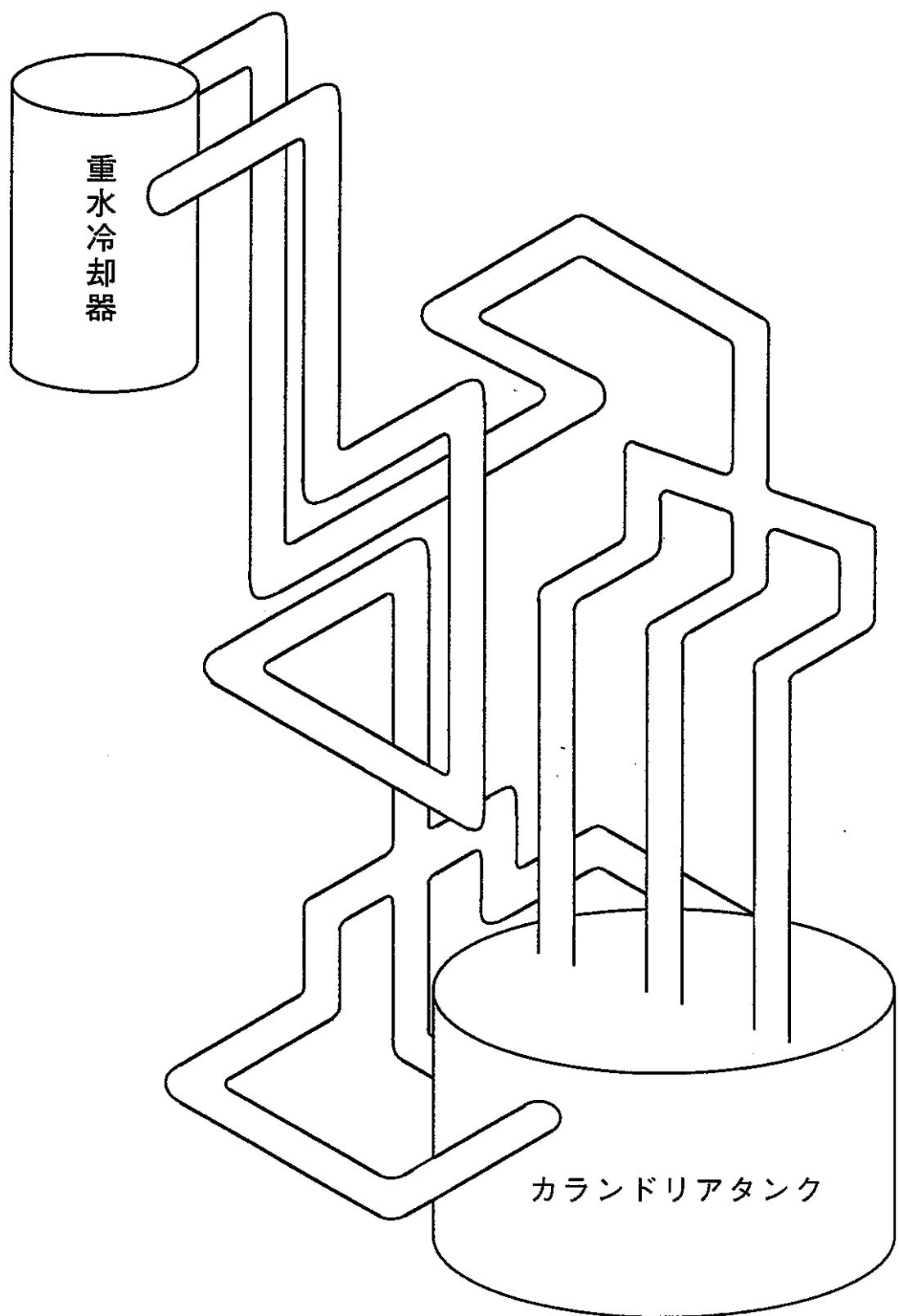
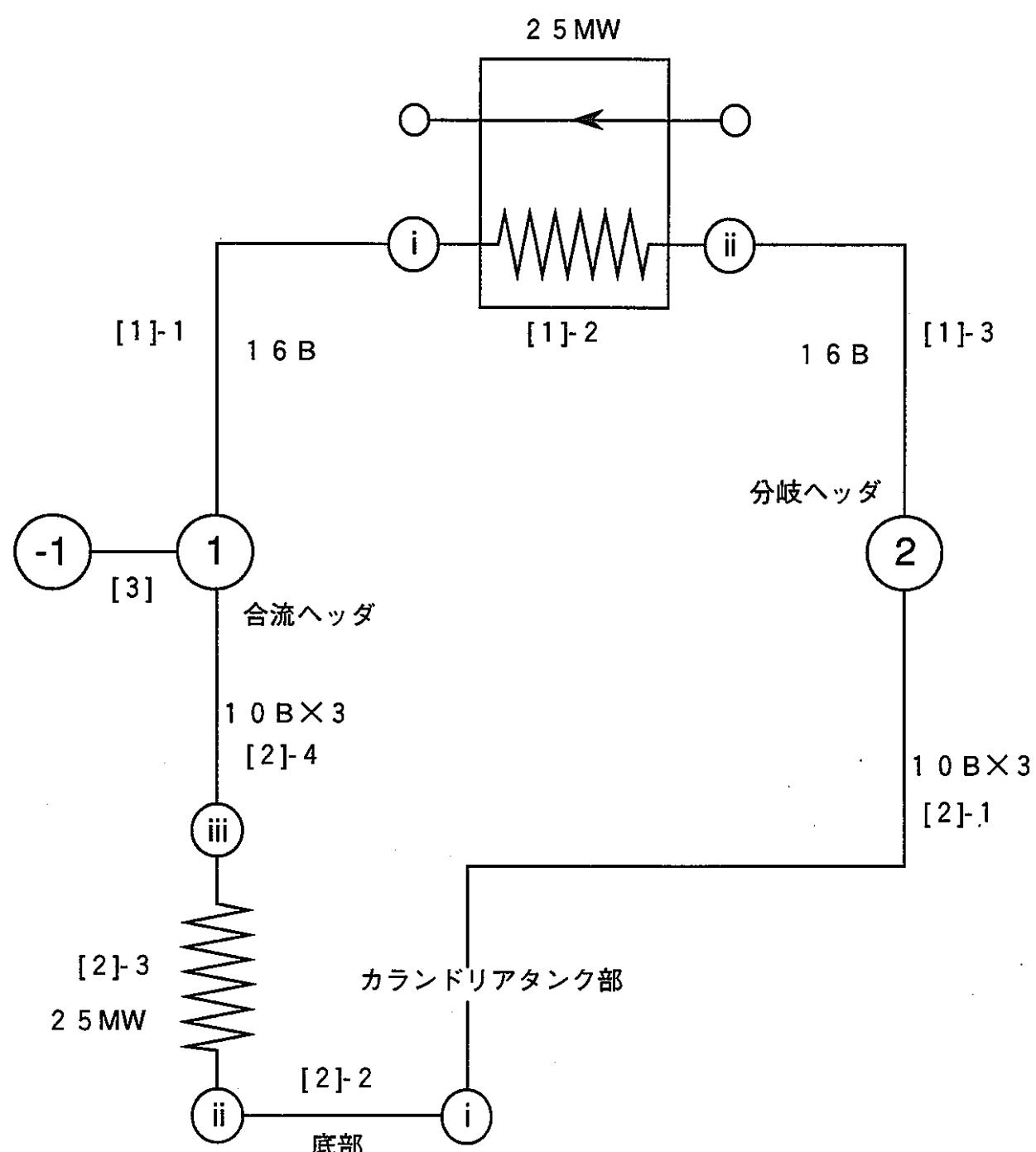


図3-2 中小型ATR重水冷却系配置配管概念図



ここで、
重水冷却系 1 ループ分
(除熱量 2.5 MW)

図3-3 ATRECS解析モデル図

4. ATRECSによる重水系自然循環解析

4.1 パラメータサーベイ解析

前章の解析モデルで述べたように、温度を固定して流動解析のみ実施し、計算時間は-100～0 秒の負の時間帯で計算して、自然循環流量の静定値を求めた。

(1) 解析ケース

重水出口温度 70 °C、80 °C、90 °C、100 °C、110 °C

重水熱交換器高さ 15 m、20 m、30 m

重水戻り温度 50 °C

上記の 3 つのパラメータを組み合わせ、15 ケースの計算を行った。

(2) 解析結果及び検討

パラメータサーベイの解析結果を自然循環流量および除熱量について整理して、

表4-1 および図4-1、図4-2 にまとめた。ここで、除熱量は次式で計算した。

$$\text{除熱量}(Q) = \text{自然循環流量}(W) * \text{比熱}(C_p) * \text{重水出口温度と戻り温度の差} (\Delta T)$$

1 ループ当たりの必要な除熱量は 25 MW ということから、図4-2 に示す通り除熱量 25 MW の直線と重水冷却器高さをパラメータとした除熱量の解曲線との交点から、成立点の重水出口温度が求まる。○のポイントが 25 MW 除熱の成立点となる。また、除熱量が 20 MW で成立すると仮定すれば□のポイントとなり、重水出口温度を下げることも可能となる。

○成立点での重水出口温度

1ループ当たりの除熱量 重水熱交換器高さ	25 MW	20 MW
15 m	110 °C	102 °C
20 m	106 °C	99 °C
30 m	100 °C	94 °C

尚、25 MW 成立点における-100～0 秒間の自然循環定常流量値の静定状況を、図4-3～図4-5 に示した。

4.2 定常解析

(1) 解析ケース

パラメータサーベイ解析結果で得た成立点のうち、次の2ケースについて定常解析を行った。解析条件は、前章3.4(2)に示した。

	重水冷却器高さ(m)	重水出口温度(°C)
ケース1	20	106
ケース2	15	110

(2) 解析結果

定常解析結果より、重水戻り温度が50°Cとなる重水冷却器の有効伝熱管長さは、

ケース1 7.50m

ケース2 7.45m

であった。

尚、本解析値より定常自然循環流量／温度は／除熱量は、

	流量 t/h	重水出口温度°C	重水戻り温度°C	除熱量MW
ケース1	385.0	106	50	25
ケース2	358.2	110	50	25

となり、パラメータサーベイモデルによる結果と同一のものとなった。ケース1、ケース2における自然循環流量および温度の静定状況を図4-6から図4-9に示す。

(3) 追加解析

上記の定常解析では重水戻り温度50°Cを、前提条件として、重水冷却器の伝熱管有効長をパラメータとしたサーベイ解析を行った。求まった重水冷却器の伝熱管有効長は先行炉の設計から見ると、かなりコンパクトとなる。この理由は、重水冷却器の2次側流量/ 温度条件にもよるが、重水温度レベルが先行炉の設計に比べて高くなることにより、重水冷却器の対数平均温度差が大きくなるからと考えられる。

ここで、重水冷却器に余裕が見られることから、重水温度レベルに対する影響サーベイとして、これまで前提条件としていた重水戻り温度50°Cの条件をはずし、伝熱管有効長をパラメータとした追加解析を行った。

(a)追加解析ケース

上記ケース1 をベースに、次の2ケースについて追加定常解析を行った。

解析条件

	重水冷却器高さ(m)	伝熱管有効長 (m)
ケース3	20	10
ケース4	20	15

(b)追加解析結果

追加定常解析結果より、重水冷却器の有効伝熱管長さによる影響をまとめた。
定常自然循環流量/ 温度/ 除熱量は、

	有効長	流量 t/h	重水出口温度°C	重水戻り温度°C	除熱量MW
ケース1	7.5 m	385.0	106.0	50.0	25.
ケース3	10.0 m	379.0	101.0	44.0	25.
ケース4	15.0 m	371.0	96.6	38.3	25.

となり、重水冷却器の有効伝熱管長さを1.33倍すると、重水出口温度は5°C低下し2倍すると、9.4 °C低下することが分かった。

ケース3、ケース4における自然循環流量および温度の静定状況を図4-10から図4-13に示す。

表4-1 パラメータサーベイ 解析結果

重水出口温度 (°C)	重水熱交換器高さ 15 m		重水熱交換器高さ 20 m		重水熱交換器高さ 30 m	
	流量(t/h)	熱量(MW)	流量(t/h)	熱量(MW)	流量(t/h)	熱量(MW)
70.0	188.0	4.37	209.9	4.88	246.4	5.73
80.0	238.0	8.30	265.9	9.27	312.4	10.90
90.0	281.3	13.08	314.23	14.62	369.3	17.18
100.0	322.1	18.73	359.8	20.92	422.9	24.59
110.0	359.5	25.08	401.2	27.99	472.3	32.95

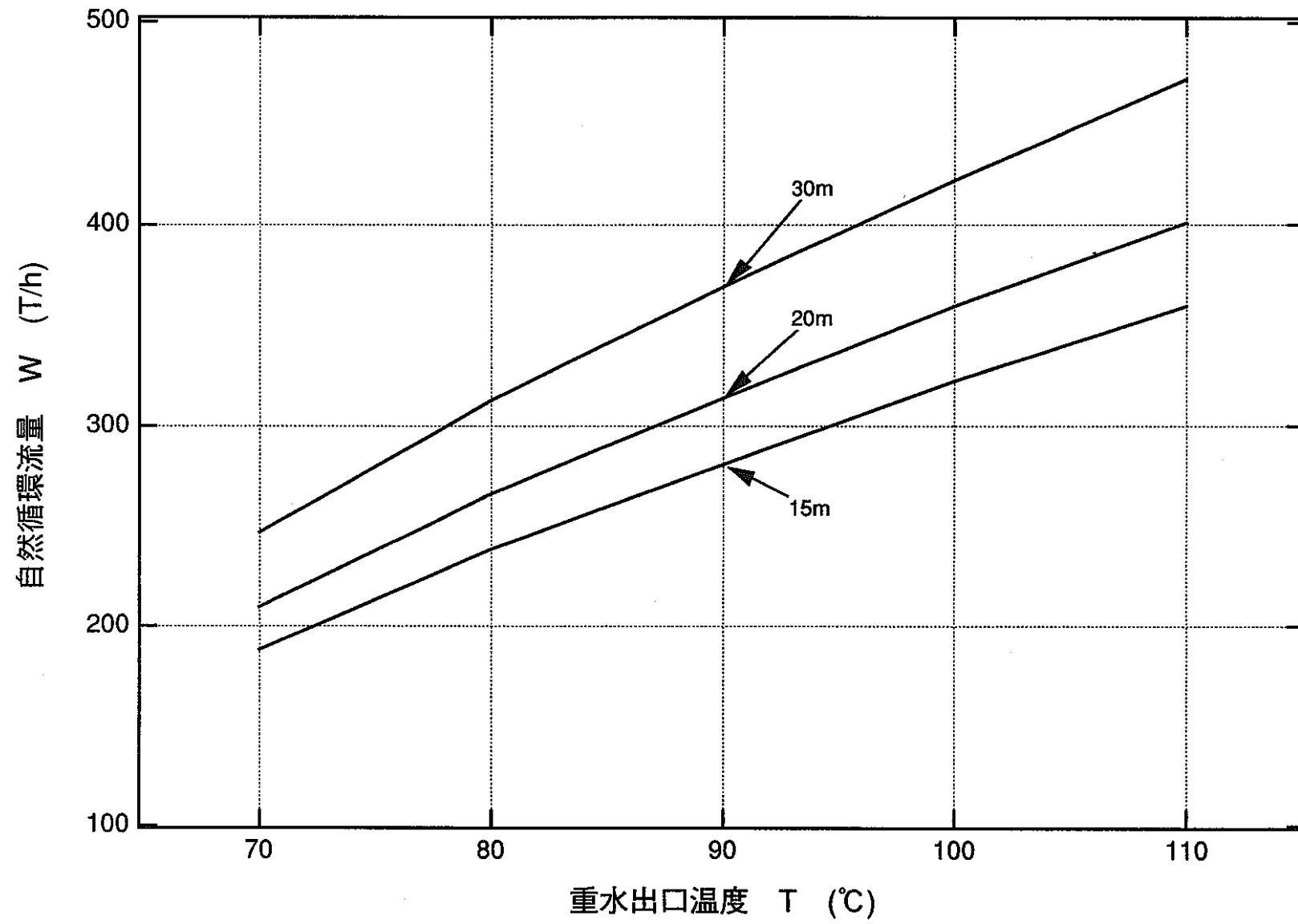


図4-1 パラメータサーベイ解析結果：自然循環流量の変化

ここで、○は25MW/ループ除熱ポイントとなる。
□は20MW/ループ除熱ポイントとなる。

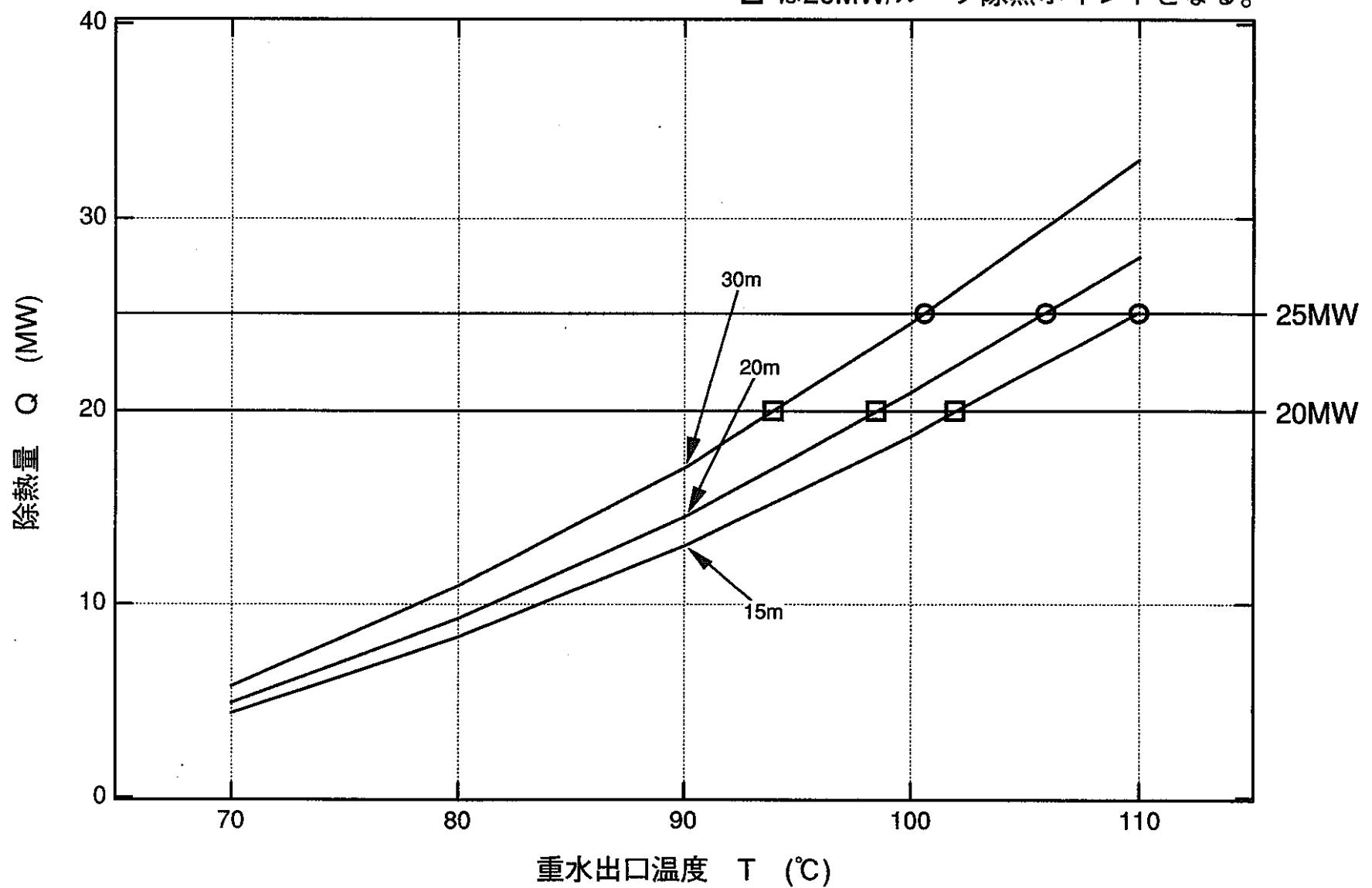


図4-2 パラメータサーベイ解析結果：除熱量の変化

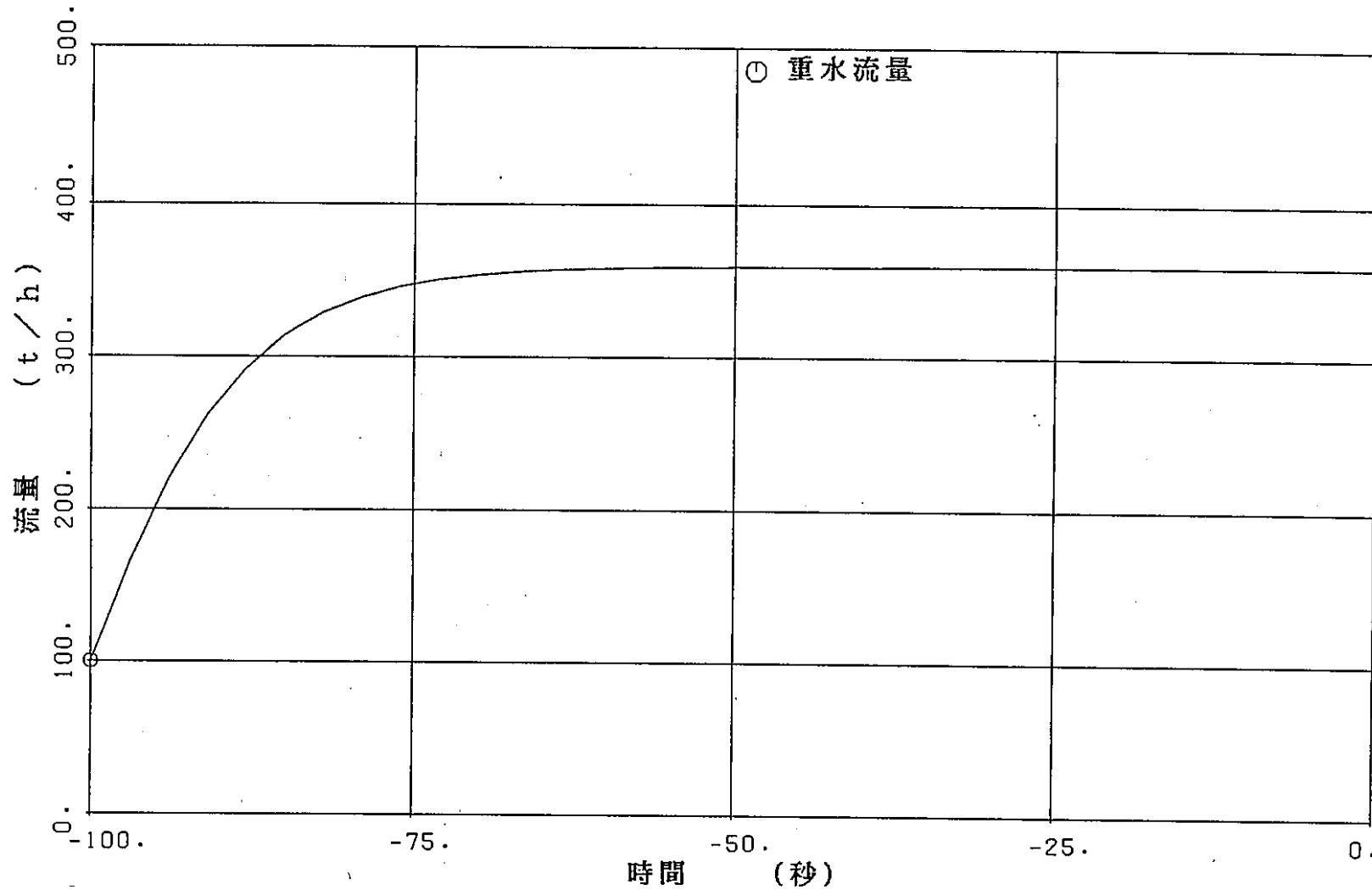


図4-3 自然循環流量静定状況(冷却器高さ15m 重水出口温度110 °C)

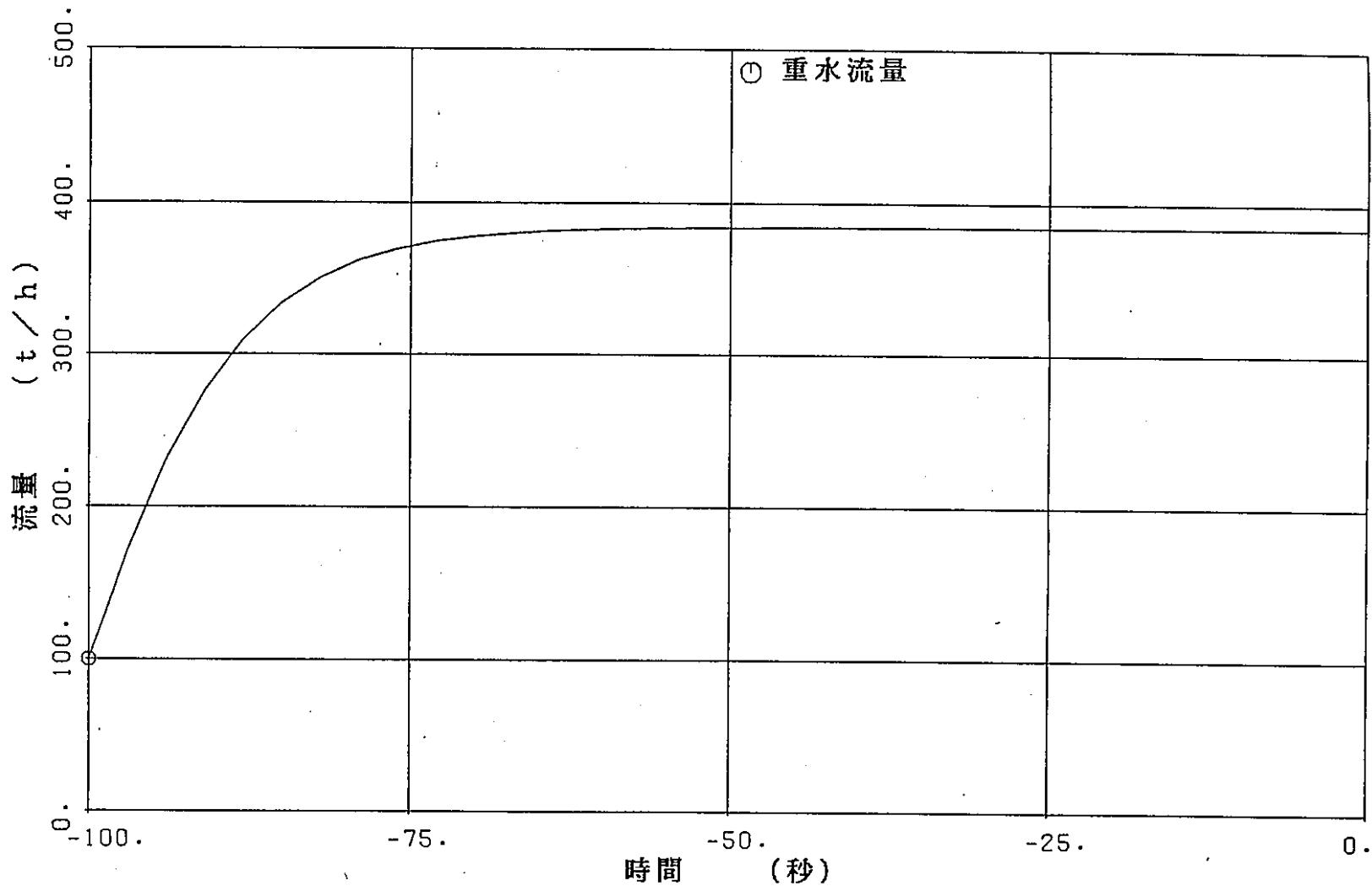


図4-4 自然循環流量静定状況(冷却器高さ20m, 重水出口温度106 °C)

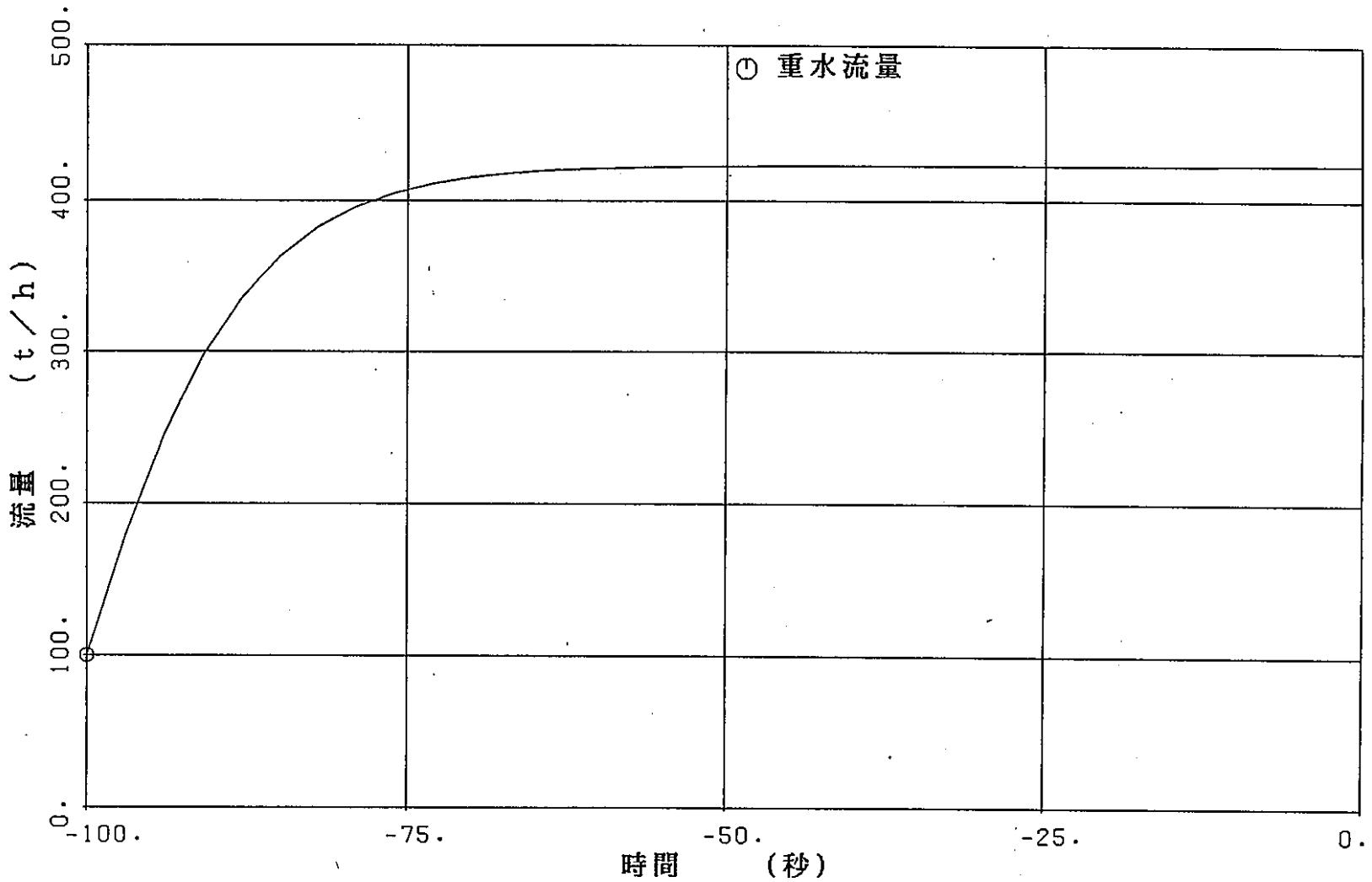


図4-5 自然循環流量静定状況(冷却器高さ30m 重水出口温度100 °C)

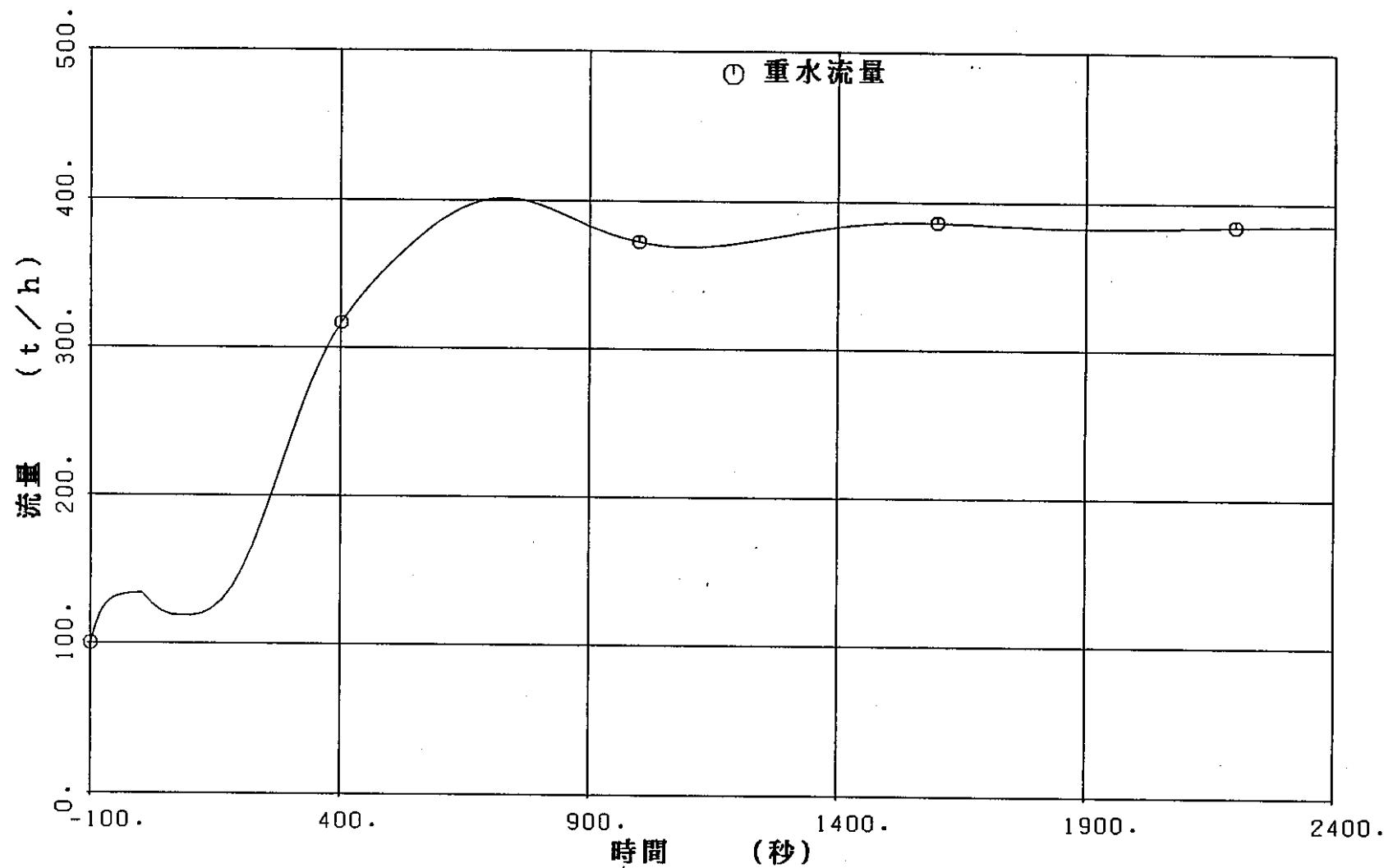


図4-6 定常解析結果：自然循環流量静定状況(ケース1)

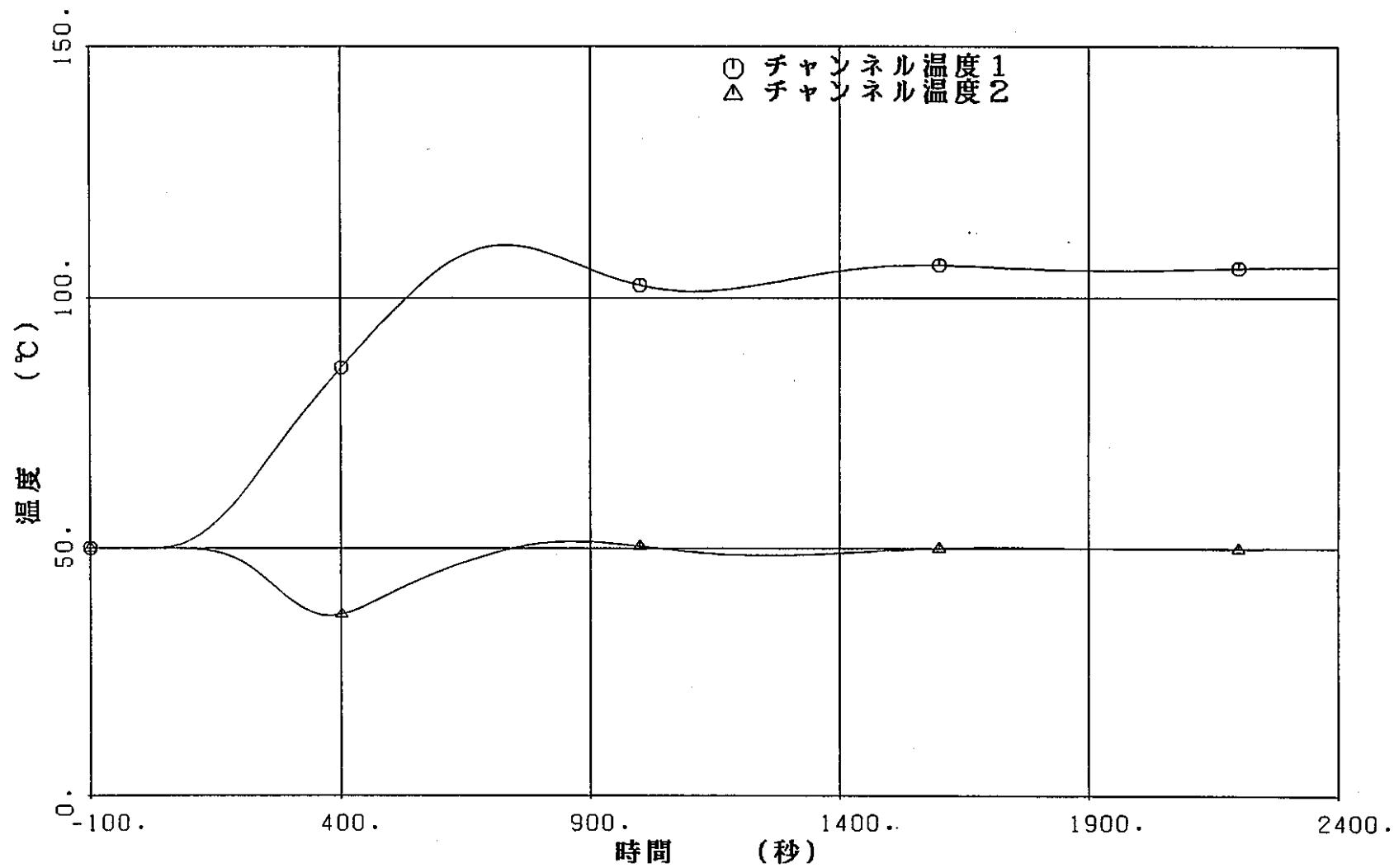


図4-7 定常解析結果：自然循環温度静定状況(ケース1)

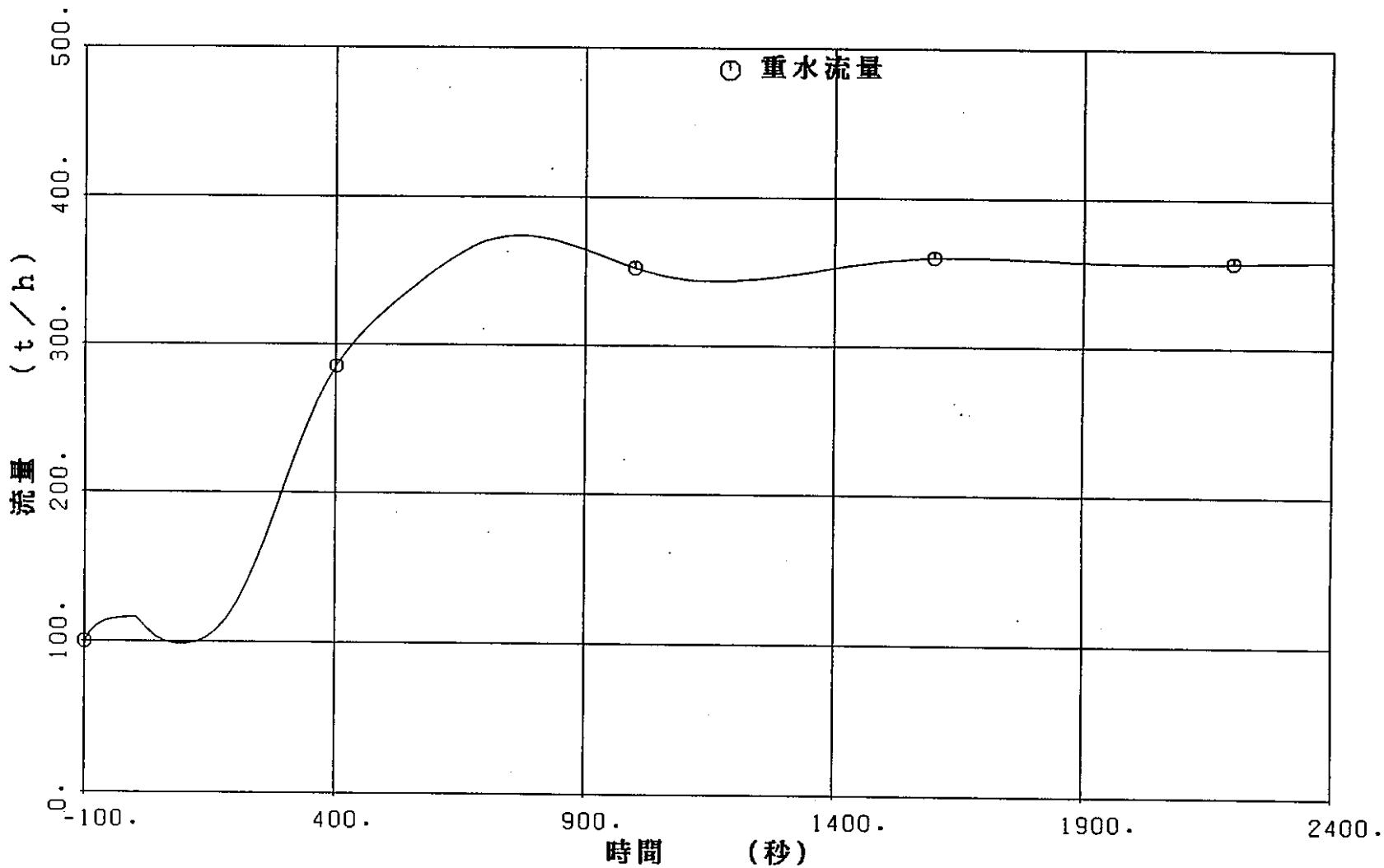


図4-8 定常解析結果：自然循環流量静定状況(ケース2)

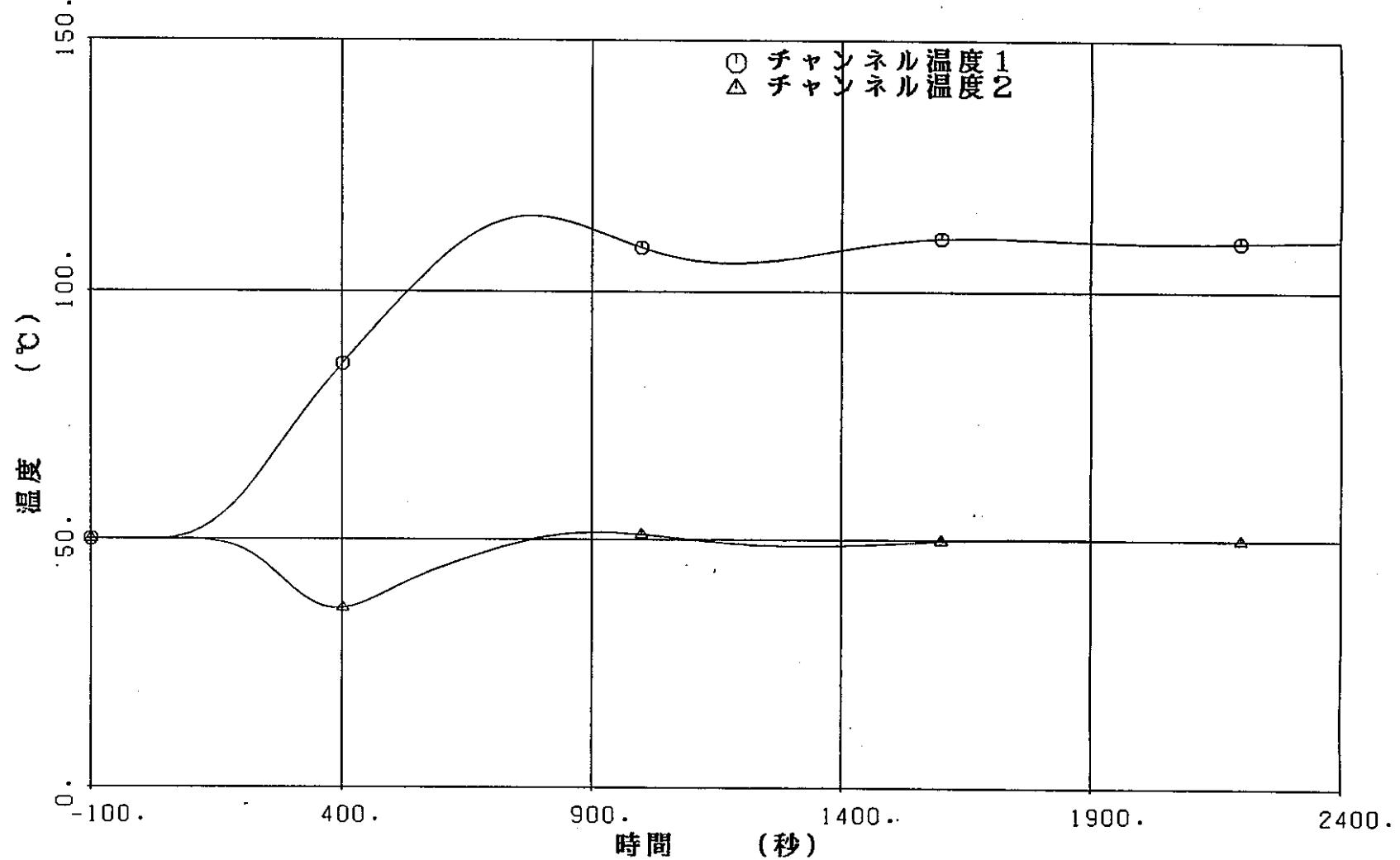


図4-9 定常解析結果：自然循環温度静定状況(ケース2)

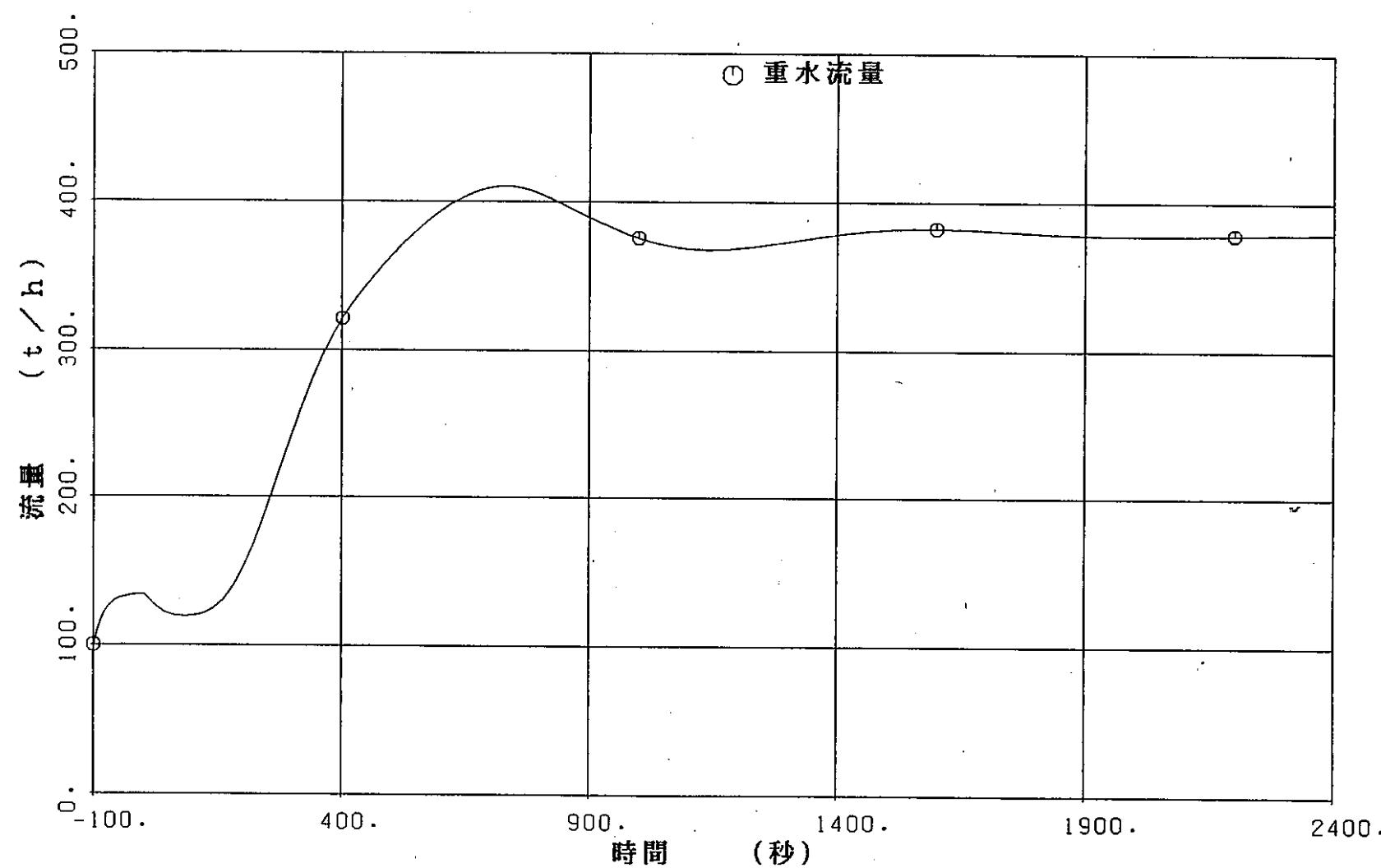


図4-10 定常解析結果：自然循環流量静定状況(ケース3)

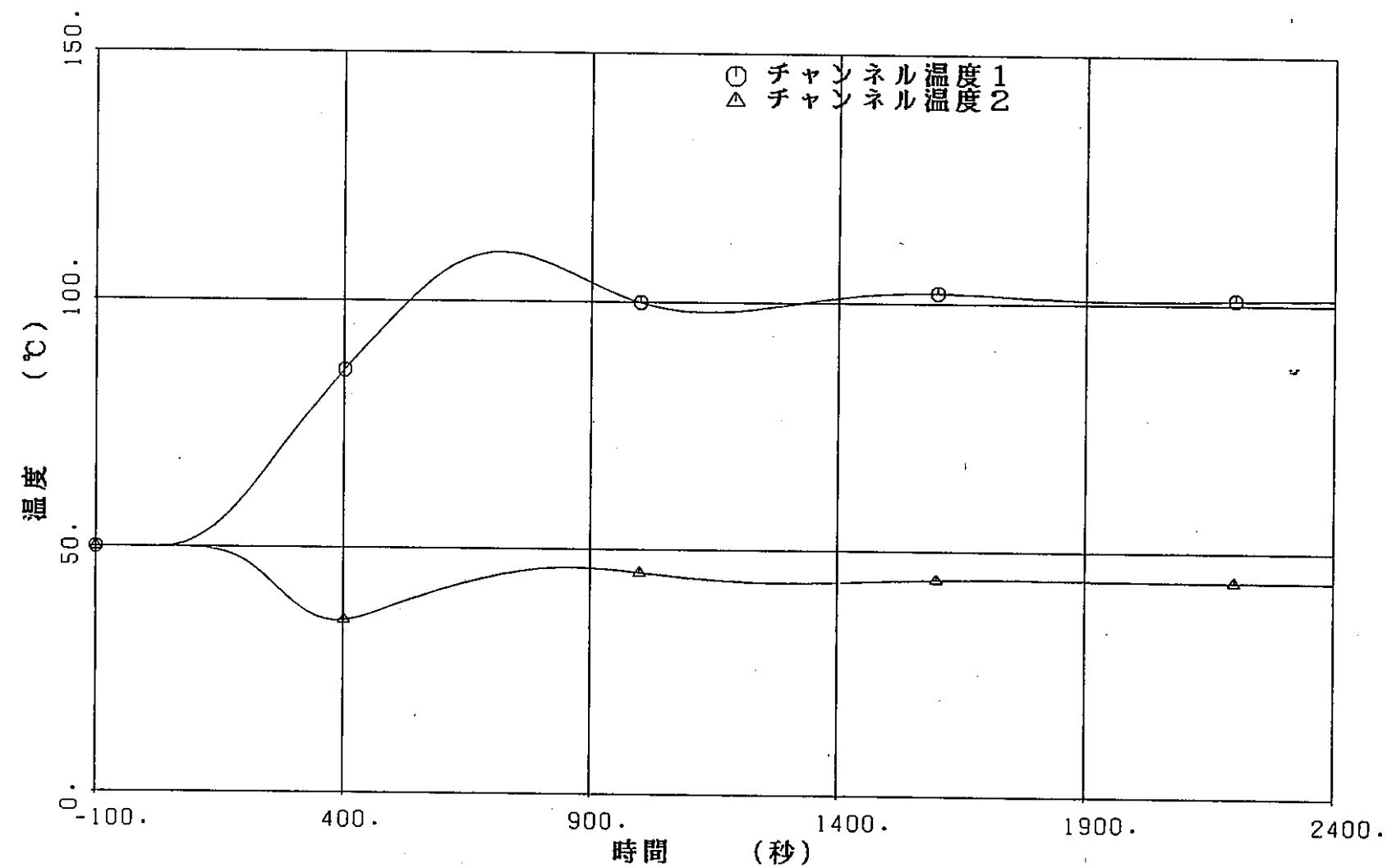


図4-11 定常解析結果：自然循環温度静定状況(ケース3)

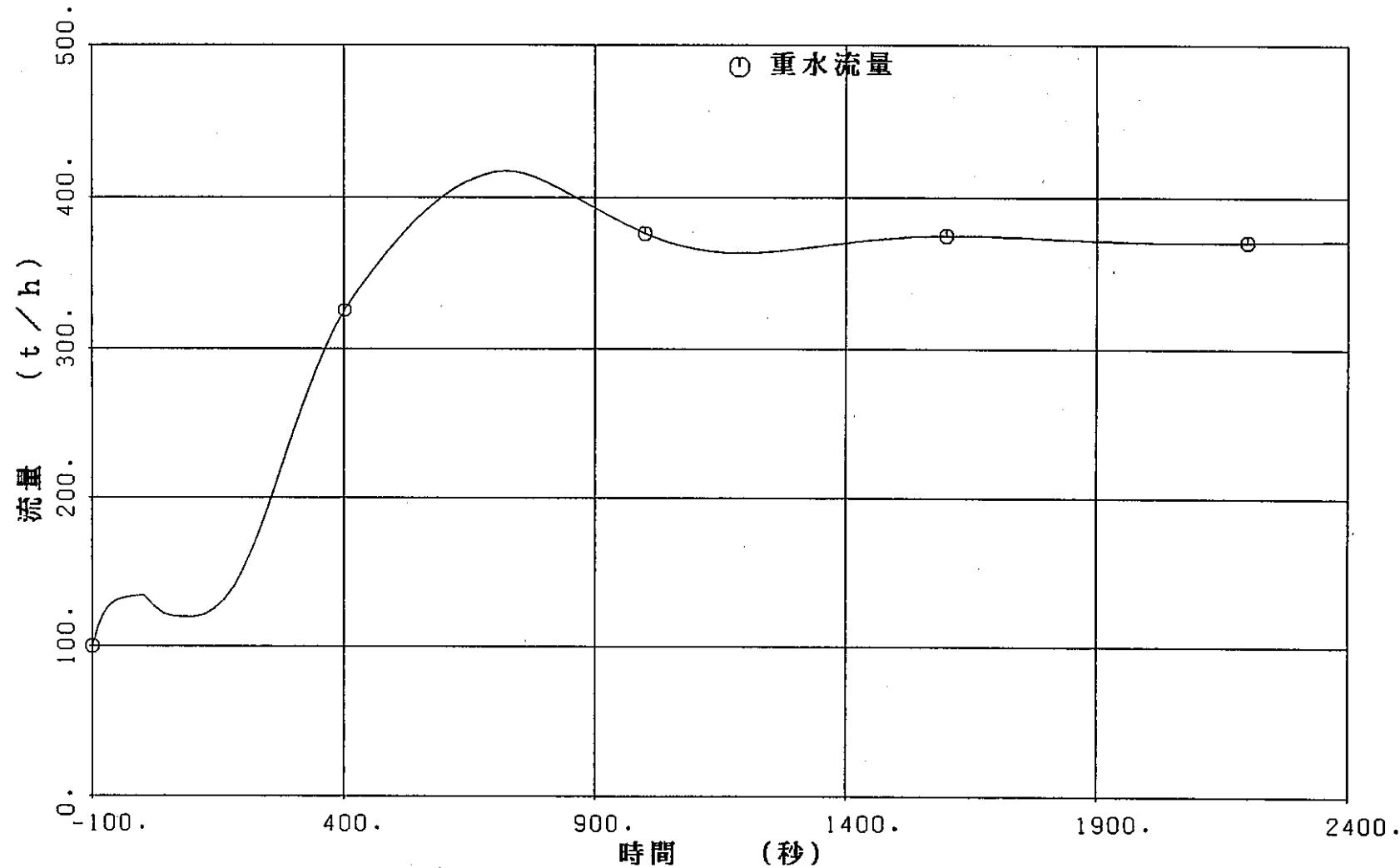


図4-12 定常解析結果：自然循環流量静定状況(ケース4)

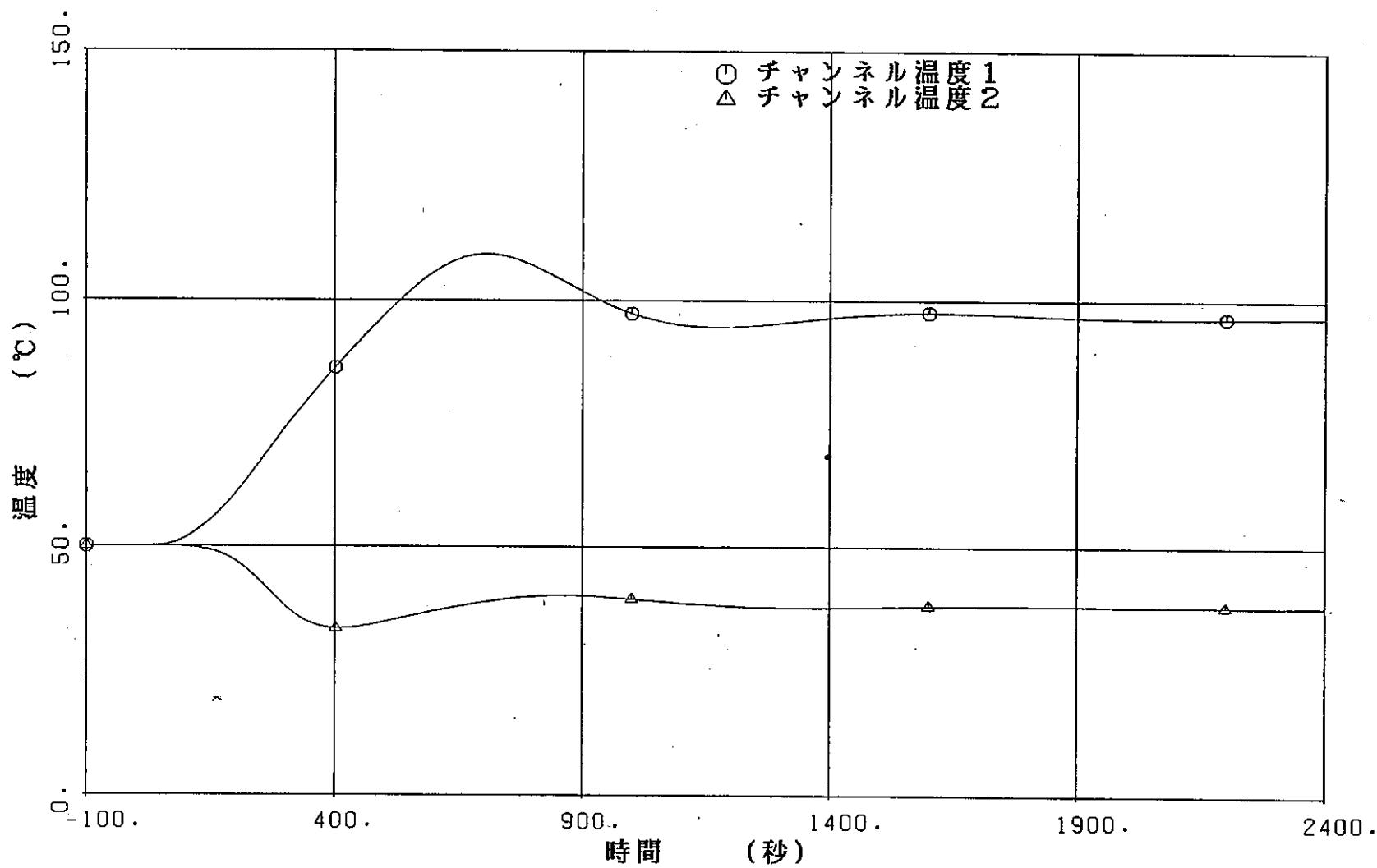


図4-13 定常解析結果：自然循環温度静定状況(ケース4)

5. 重水冷却器 2 次側の検討

先行プラントでは重水冷却器 2 次側は強制循環によって冷却されており、外部電源喪失時（のスクラム後）にも熱負荷を除去できる様に非常用補機冷却系で冷却されることになっている。

これまで、1 次系の自然循環除熱の見直しを検討してきたが、外部電源喪失時だけでも、2 次系の自然循環除熱が可能であれば、重水冷却系にかかる系統は単純なものとなり、コスト低減の可能性も生ずる。

本項では、外部電源喪失時の重水冷却器 2 次側の除熱について自然放熱等を利用した方策を検討する。

(1) 検討条件

- ① 自然循環力をを利用する場合、2 次熱交換器は、1 次熱交換器（重水冷却器）より、高位置に配置する必要がある。本研究の重水冷却器は、1 次系を自然循環除熱とするため、格納容器内高所に設置している。従って、2 次熱交換器は、これよりも高くする必要があるため、最終ヒートシンクは大気とする。従って 2 次熱交換器は空気冷却式とする。
- ② 重水冷却器は格納容器内に設置され、空気冷却器は格納容器外に設置する場合があることから、2 次側冷却配管は、格納容器を貫通せざるを得ない。
貫通部には、格納容器隔離弁設置基準に基づき、外側に 1 個の隔離弁を設ける。
- ③ 重水冷却器と空気冷却管の高低差は 10~20m 程度と想定する。
- ④ 外部電源喪失時（原子炉スクラム直後）の除熱量は、先行炉プラントの例(17 MW (スクラム直後) / 96MW (定格時) = 1/5)を参考として 5 MW とする。

(2) 2 次側冷却系の系統概念

上記条件を満たすものとして、図5-1 の様な系統概念が考えられる。この概念設定には、以下の点を考慮している。

- ① 通常運転時の重水冷却器の 2 次側除熱は、常用補機冷却系により行う。外部電源喪失時には、空気冷却器にて除熱する。
- ② 空気冷却器は、常用補機冷却系からバイパスしたラインに設ける。この際、重水冷却器～格納容器貫通部までは、通常除熱ラインとの共用を考え、分岐点は、隔離弁より外側とする。

尚、これには、口径の比較的に大きな隔離弁を共用化することにより、自然循環時の圧損を低減する狙いも含めている。

- ③ 流量調整用の弁は、自然循環を妨げない様に、分岐点よりポンプ側に設ける。

④ 2次側配管の寸法は、 ATR原型炉設計を基に下記のように設定した。

[共用部]

	除熱量	重水冷却器 2次側入出口	2次側流量	配管口径
ATR原型炉	35.3MW	32°C / 53.3°C	720×2 =1440t/h	16B
ATR中小型炉	25MW/ループ	32°C / 53.3°C (42.0°C)	$1440 \times \frac{25}{35.3}$ =1017t/h/ループ	$16 \times \sqrt{\frac{1017}{1442}}$ =14B

なお、3.4 節で作成した定常解析用データの場合は以下に示す 2次側配管の寸法となる。

$$25\text{MW}/\text{ループ} \quad 32^\circ\text{C} / 42.0^\circ\text{C} \quad =2150\text{t/h/ループ} \quad \text{約}20\text{B}$$

[空気冷却器側]

圧損低減を考慮して、10B程度とする。

(3) 今後の課題

外部電源喪失時、重水冷却器 2次系を自然循環除熱することに伴う、配置上の条件等を考慮して、空気冷却器を用いた系統概念を設定した。外部電源喪失時の除熱量は、定格時の除熱量の~1/5 程度であり、必要流量も同程度となることから、圧損も小さく、自然循環除熱も成立するものと期待される。

詳細には、今後、1次系と同様な解析評価を行い、確認する必要がある。

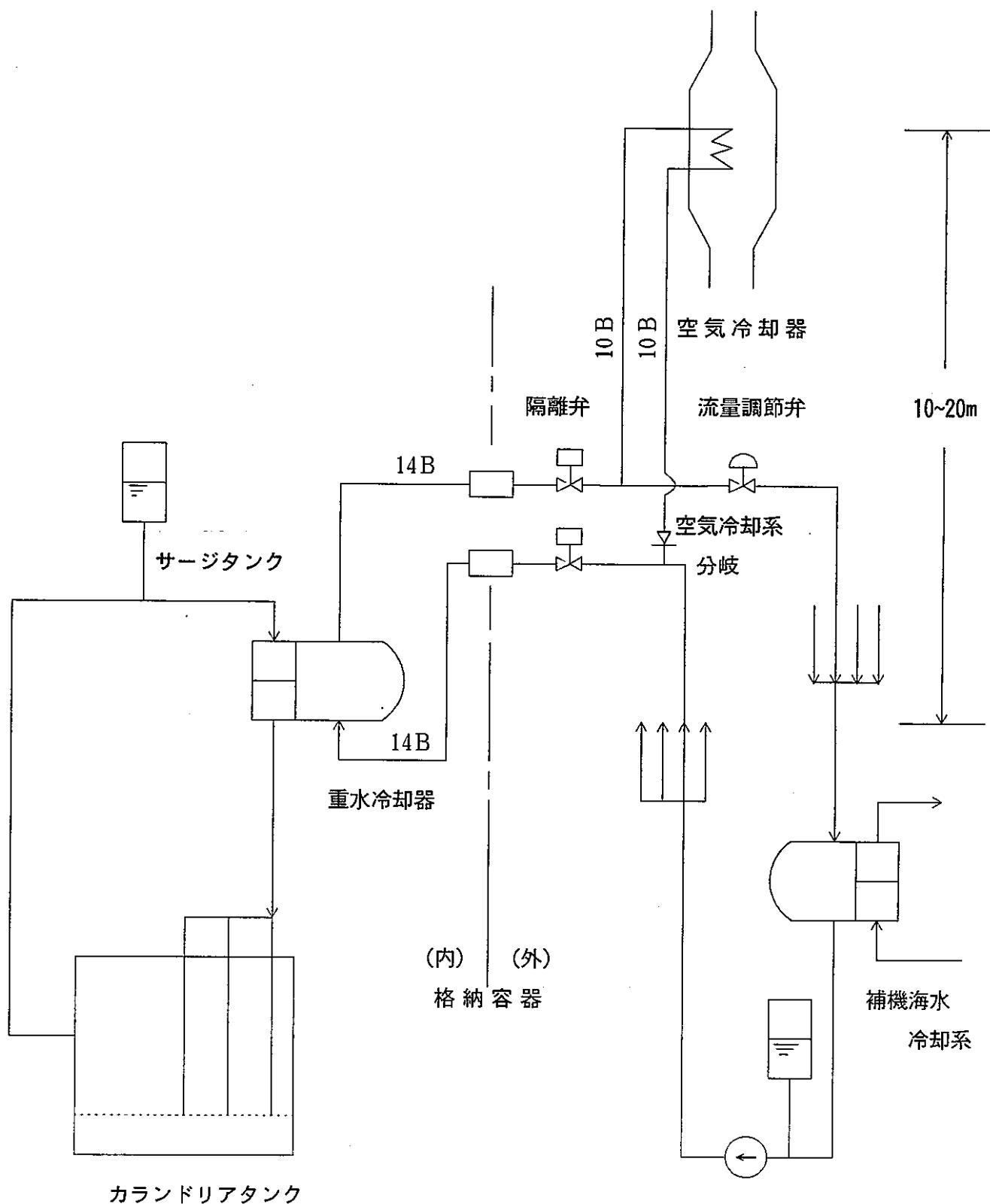


図 5-1 重水冷却系 1次／2次側系統概念

6. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

ATRの重水冷却系は、1次系より発生した熱を2次側と交換し、重水温度を下げてカランドリアタンク内へ循環される。先行炉の設計では、この重水の循環は、ポンプによる強制循環であったが、本研究では自然循環による冷却の可能性を検討した。

①重水冷却系圧力低減方策の検討

○ATRECSコードによる解析に先立ち、発生する自然循環流量を概略把握し、重水冷却系圧力損失低減方策を検討した。

○自然循環冷却系設備の圧損低減方策を実証炉ベースに検討した結果、弁の削除、制御棒案内管冷却の廃止、重水冷却器圧損の見直し、配管系の口径増大及び引き回しの簡素化等の他、カランドリア出口の温度上昇（重水温度差増大:50 → 110°Cと流量減少）で、圧損の合計と自然循環ヘッドがほぼ等しくなることが判った。

②解析モデルの設定とATRECSコード用入力データの作成

○圧力損失低減方策に基づき、重水冷却系の設備・構造概念を定めると共に解析モデルを設定し、解析用入力データを作成した。

③ATR重水系自然循環解析

○カランドリアタンクからの重水出口温度および重水冷却器高さをパラメータとした定常解析を行い、重水流動に対する影響をサーベイし、自然循環除熱の見通しを得た。

○定常解析結果より、重水戻り温度を50°Cとすると、自然循環流量／温度／除熱量は、以下のようになる。
(重水冷却器の有効伝熱管長：約7.5m)

	冷却器高さm	流量 t/h	重水出口温度°C	重水戻り温度°C	除熱量MW
ケース 1	20.	385.0	106.	50.	25.
ケース 2	15.	358.2	110.	50.	25.

○追加定常解析結果より、重水冷却器の有効伝熱管長さによる影響をまとめた。

定常自然循環流量／温度／除熱量は、以下のようになる。
(重水冷却器高さ：20m)

	有効長	流量 t/h	重水出口温度°C	重水戻り温度°C	除熱量MW
ケース 1	7.5 m	385.0	106.0	50.0	25.
ケース 3	10.0 m	379.0	101.0	44.0	25.
ケース 4	15.0 m	371.0	96.6	38.3	25.

重水冷却器の有効伝熱管長さを1.33倍すると、重水出口温度は5°C低下し、2倍すると、9.4°C低下することが判った。

④重水冷却器2次側の検討

○事故時の重水冷却器2次側のヒートシンクについて、自然放熱等を利用した方策を検討した。

(2) 今後の課題

- ①自然循環除熱を狙う場合、重水冷却器はカランドリアタンクより～20m高い位置に設置することになる。重水冷却器近傍での負圧を防止するためには重水冷却器近傍でも約 $0.3 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ に加圧する必要があり、カランドリアタンク内の圧力が上昇する。従って、カランドリア管の肉厚を増やす等の対策が必要である。
- ②外部電源喪失時、重水冷却器 2 次側においても、自然循環除熱に対する成立性を本研究と同様な解析評価を行い確認する必要がある。
- ③完全自然循環運転による重水冷却系検討の他、通常運転時はポンプ+自然循環力による運転として、崩壊熱除去時等は自然循環によるとする重水冷却系の検討評価が必要である。
- ④再循環系と重水系を連立させた解析による崩壊熱除去時の過度特性の検討評価が必要である。

7. 謝辞

本研究の実施に当たって、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター安全工学部の
望月弘保室長、並びに高部幸弘氏には数々のご指導並びにご助言をいただきました。
ここに深く感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 2-1 新型転換炉実証炉設計書および設計決定根拠書
- 2-2 新型転換炉原型炉ふげん設計書
- 3-1 「管路、ダクトの流体抵抗」 日本機械学会
- 3-2 「HANDBOOK OF HYDRAULIC RESISTANCE」 I. E. IDELCHIK

Bundle of circular tubes in vertical columns. $3 \cdot 10^4 < Re_m = \frac{w_m d_{out}}{\nu} < 10^5$

Section VIII
Diagram 8-11

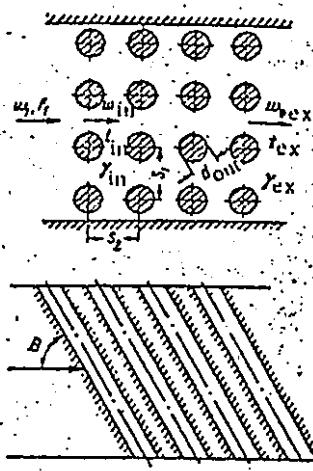
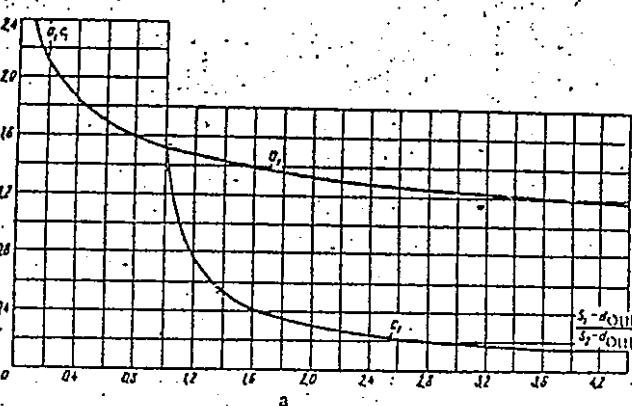


TABLE 8-3

θ°	30	45	60	90
ψ	0.30	0.54	0.82	1.0



$$\zeta = \frac{\Delta H}{T_m w_0^2 m} = \frac{4 A R e^m z + \Delta \zeta_p}{2 g}$$

$$1) \text{ at } \frac{S_1}{d_{out}} < \frac{S_2}{d_{out}}: \\ A = a_1 b_1;$$

$a_1 = 1.52 \left(\frac{S_1 - d_{out}}{S_2 - d_{out}} \right)^{-0.2}$ is determined from the curve

$$a_1 = f \left(\frac{S_1 - d_{out}}{S_2 - d_{out}} \right) \text{ of graph a;}$$

$b_1 = \left(\frac{S_1}{d_{out}} - 1 \right)^{-0.5}$ is determined from the curve

$$b_1 = f \left(\frac{S_1}{d_{out}} \right) \text{ of graph b;}$$

$$m = -0.2;$$

$R e^m$ is determined from the curve $R e^m = f(R e)$ at $\frac{S_1 - d_{out}}{S_2 - d_{out}} = 1.0$ on graph c;

$$2) \text{ at } \frac{S_1}{d_{out}} > \frac{S_2}{d_{out}} \\ A = c_1 b_1;$$

$$c_1 = 0.32 \left(\frac{S_1 - d_{out}}{S_2 - d_{out}} - 0.9 \right)^{-0.68} \text{ is determined}$$

from the curve $c_1 = f \left(\frac{S_1 - d_{out}}{S_2 - d_{out}} \right)$ on graph a;

$$m = - \frac{0.2}{\left(\frac{S_1 - d_{out}}{S_2 - d_{out}} \right)^2};$$

$R e^m$ is determined from the curves $R e^m = f(R e)$ for diff. $\frac{S_1 - d_{out}}{S_2 - d_{out}}$ on graph c;

ψ is taken from Table 8-3 as a function of θ ;

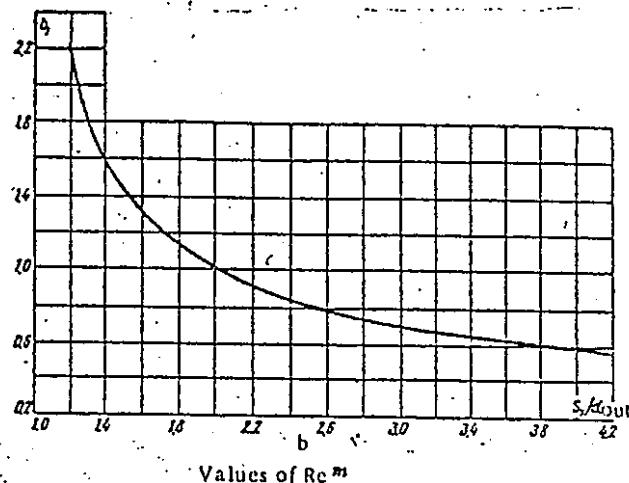
$\frac{S_1 - d_{out}}{S_2 - d_{out}}$	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.2
a_1	2.40	2.10	1.82	1.70	1.58	1.52	1.46	1.38	1.32	1.28	1.23	1.20	1.18	1.15	1.14
c_1	—	—	—	—	—	1.53	0.72	0.41	0.30	0.24	0.21	0.17	0.15	0.14	0.14

Bundle of circular tubes in vertical columns, $3 \cdot 10^3 < Re_m = \frac{w_{mid,out}}{\nu} < 10^4$
(continued)

Section VIII

Diagram 8-11

S/d_{out}	1.2	1.4	1.6	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2
b_1	2.24	1.58	1.30	1.12	0.91	0.78	0.71	0.65	0.60	0.56



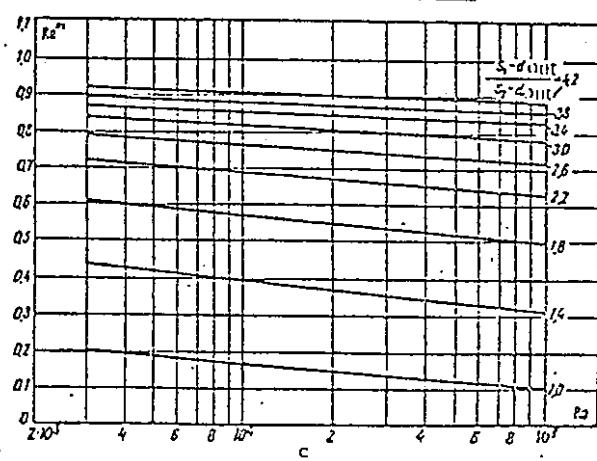
$\frac{S_1 - d_{out}}{S_1 + d_{out}}$	Re								
	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	10^4	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$
1.0	0.20	0.19	0.18	0.17	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10
1.4	0.44	0.43	0.41	0.40	0.39	0.36	0.34	0.32	0.31
1.8	0.61	0.60	0.59	0.57	0.56	0.54	0.52	0.51	0.50
2.2	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.66	0.65	0.64	0.63
2.6	0.79	0.78	0.78	0.77	0.76	0.75	0.73	0.72	0.71
3.0	0.84	0.83	0.83	0.82	0.81	0.80	0.80	0.79	0.78
3.4	0.87	0.87	0.86	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.82
3.8	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86
4.2	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88

$$U_i = 2 \frac{t_{ex} - t_{in}}{273 + t_{in}} ; \quad t_{in} = \frac{t_{in} + t_{ex}}{2} ;$$

$$T_m = \frac{T_0}{1 + \frac{T_{in}}{273}} ; \quad w_{0,m} = w_0 \ln \frac{273 + t_{in}}{273 + T_{in}} ;$$

2: number of transverse rows of tubes in the bundle;

* taken from § 1-3, b as a function of t_{in} .
Foaled bundles $\zeta \approx 1.35$



付録 - 2 圧損係数と代表流路形状での換算

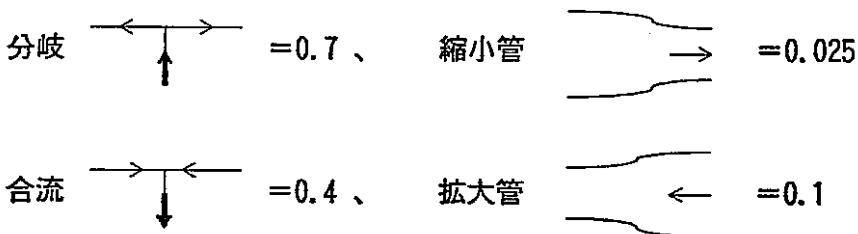
(1) 形状圧損係数 (ξ) と基準流量

① 「管路・ダクトの流体」(機械学会)等を参考に形状圧損係数を設定した。
要約すると以下の通りである。

エルボ $\xi = 0.17$

重水出口(底部) = 1.1、重水底部多孔板 = 1.5

縮小流 = 0.5



圧力管群クロスフロー $\xi = 15.1 \times R e^{-0.2}$

熱交換器(実証炉ベース) $\xi = \xi_{\text{入口+出口ルネ}} + \xi_{\text{管束部}} = 13.3$
但し、配管流速代表とした。

② 基準流量

$$W = Q / C p \times \Delta T$$

$$\begin{aligned} Q &= 25 \text{ (MW)} = 25 \times 10^3 \times 859.9 / 3600 \text{ (Kcal/s)} \\ &= 5971.5 \end{aligned}$$

$$C p = 1.$$

$$\Delta T = 110 - 50 = 60.$$

$$\therefore W = 5971.5 / 60 = 99.5 \approx 100 \text{ kg/s} = 360 \text{ t/h}$$

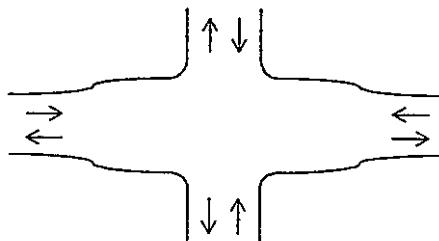
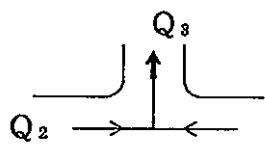
(2)配管部

図2に示す配置配管概念図に従い、エルボ、分岐及び合流部の圧損係数を設定する。（管内摩擦はコードに含まれる。）

$$\text{①エルボ圧損係数} (\xi) \times \text{エルボ個数} = 0.17^* \times 20 = 3.4$$

②合流管／分岐管

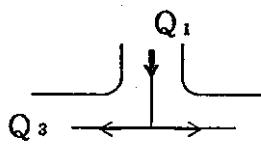
拡大及び合流の損失



$$\xi_{\text{拡大}} = 0.1$$

$$\xi_{\text{合流}} = 0.4 \quad (Q_2/Q_3 = 0.333)$$

③縮小及び分岐の損失



$$\xi_{\text{分岐}} = 0.7 \quad (Q_3/Q_1 = 0.333)$$

$$\xi_{\text{縮小}} = 0.025 \approx 0.03$$

ここで、注*1) 配管Re数 = $6. \times 10^5$

(3)重水冷却器圧損係数 (ξ_x)

ここではリンクデータのみ対象として、流動（圧損）計算用データのみ設定する。（伝熱計算用データは、熱交換器用データとして別に設定する。）

圧力低減方策検討の重水冷却器圧損減をベースに以下の如くとする。即ち、

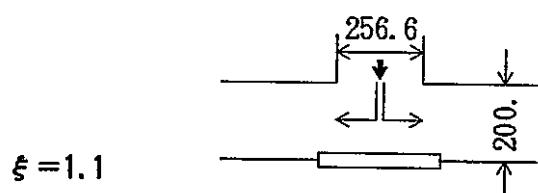
$$\text{重水冷却器圧損 } (\Delta P_x) = 440.0 \text{ kg/m}^2 \text{ (50°C} \rightarrow 110^\circ\text{C の時)}$$

であるから、16B配管代替で圧損係数を与える。

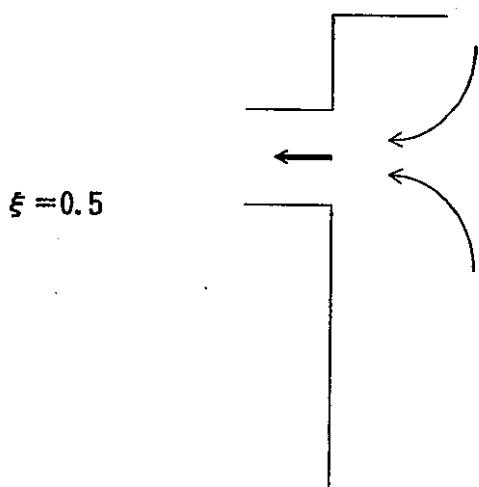
$$\xi_x = \Delta P_x / \frac{\rho V^2}{2g} = 440.0 / 33.1 = 13.3$$

(4)カランドリアタンク部

①重水管出口

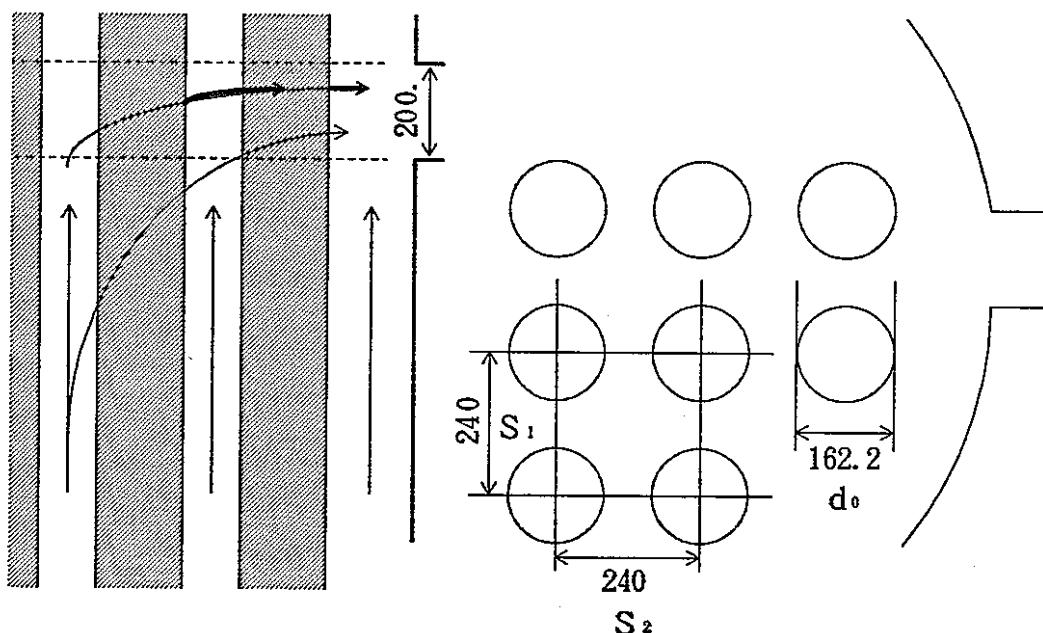


②重水管入口



③圧力管群の横切り圧損係数

カランドリアタンク上部の出口の向かう流れ及び、カランドリアタンク底部の流れに対して以下の様な圧損係数を考慮する。(添付1参照)



・圧力管の段数 (Z) は、次式で与える。

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1}{4} \times \text{段数} \\ &= 4 \times 26 \\ &= 6.5 \end{aligned}$$

$$\frac{S_1 - d_0}{S_2 - d_0} = \frac{1.0}{1.53} \quad \therefore a_1 = 1.52$$

$$m = -0.2$$

$$\cdot A = a_1 \times b_1 = 2.33$$

$$\cdot \psi = 1.0 \cdots \text{直交性} \quad (60^\circ \text{ の時}, \psi = 0.82)$$

$$\cdot \xi = \psi \cdot A \cdot R e^m \cdot Z + \underline{\Delta \xi_t}$$

温度上昇効果 = 0.0

$$\begin{aligned} \therefore \xi &= 2.33 \times R e^{-0.2} \times 6.5 \\ &= 15.1 \times R e^{-0.2} \end{aligned}$$

ここで、代表Re数を以下の如くとする。代表流路はカランドリアタンク下部と同一とする。(A=1.58m²)

$$W = 100 \text{kg/s}$$

$$V = \frac{W}{\rho \cdot A} = \frac{100}{1055 \times 1.58} = 0.060 \text{m/s}$$

$$Re = \frac{d e \cdot V}{\nu} = \frac{0.162 \times 0.06}{0.3 \times 10^{-6}} = 32400.$$

$$\xi = 15.1 \times Re^{-0.2} = 15.1 \times 32400^{-0.2} = 1.89$$

参考)

Re	ξ	
3000	$\xi = 15.1 \times 0.20 =$	3.02
6000	$\xi = 15.1 \times 0.18 =$	2.72
10000	$\xi = 15.1 \times 0.17 =$	2.57
20000	$\xi = 15.1 \times 0.15 =$	2.27
100000	$\xi = 15.1 \times 0.10 =$	1.51

○カランドリアタンク部の代表流速の与え方

・重水底部 (水平方向流れで代表)

$$V = \left\{ \frac{\pi}{4} (7.32 - 2 \times 0.04)^2 - 616 \times \frac{\pi}{4} (0.162)^2 \right\} \times 0.2 \times \frac{1}{2}$$

(1 ループ分)

$$= (41.17 - 12.70) \times 0.1$$

$$= 2.85 \text{m}^3$$

$$L = 7.32 / 4 \approx 1.8 \text{m}$$

$$A = V / L = 1.58 \text{m}^2$$

$$D = \left(\frac{4}{\pi} \cdot A \right)^{1/2} \approx 1.4 \text{m}$$

$$D_e = 0.2 \text{m}$$

・重水上部 (上昇流)

$$V = (41.17 - 12.70) \times (3.77 \times 0.2) \times \frac{1}{2} = 50.8 \approx 50. \text{m}^3$$

$$A = (41.17 - 12.7) \times \frac{1}{2} \approx 14. \text{m}^2$$

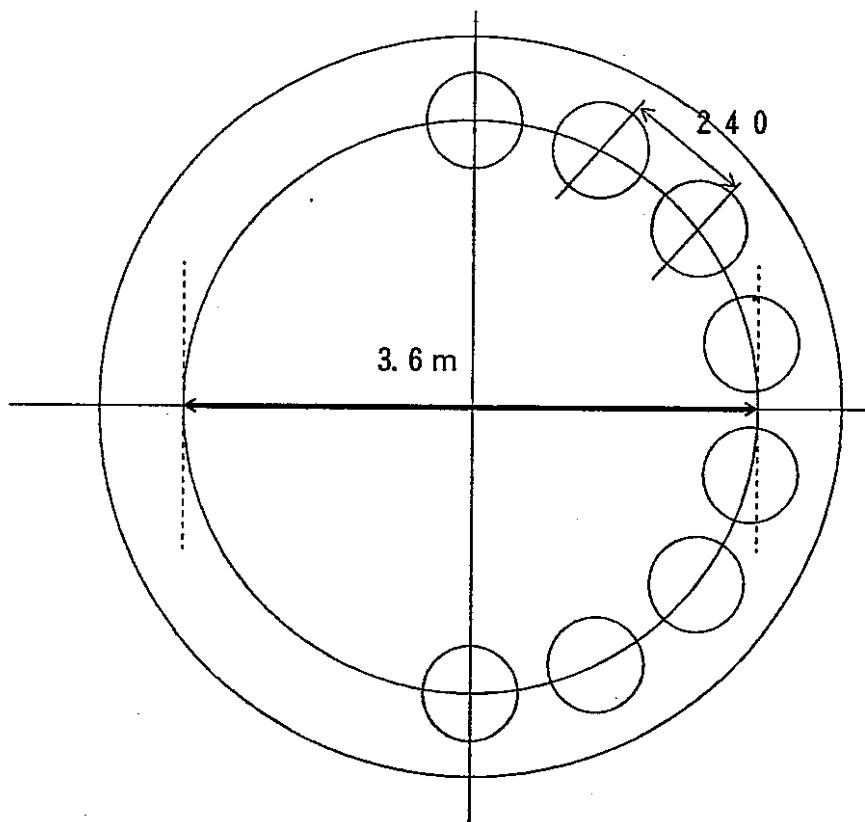
$$L = V / A = 3.57 \text{m}$$

$$D = 4.22 \text{m}$$

$$D_e = \frac{4A}{l} = \frac{4 \times 14.}{616 / 2 \times \pi \times 0.162} = 0.357 \text{m}$$

○流路断面の取方による換算（1ループ=半分）

$A_1 = A_{mn}$ (クロスフローの代表面積)



$$h \times \pi D \times \frac{240 - 162.2}{240} \times \frac{1}{2} = 0.2 \times 1.833 \\ = 0.367 \text{ m}^2$$

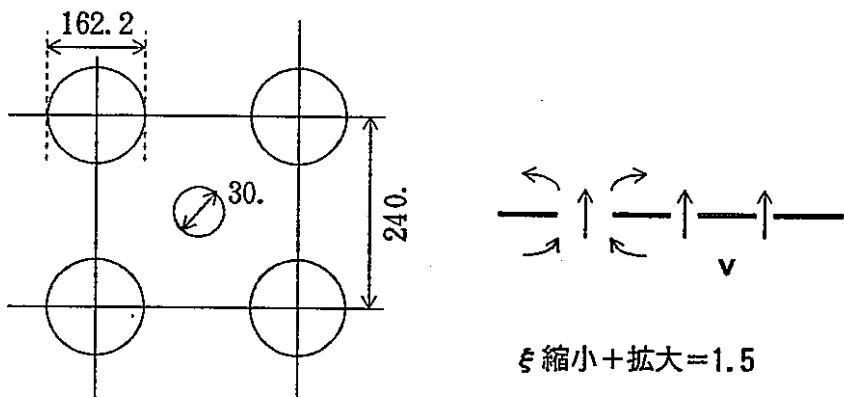
$$\xi_1 V_1^2 = \xi_2 V_2^2$$

$$\xi_2 = \xi_1 \frac{V_1^2}{V_2^2} = \xi_1 \frac{A_2^2}{A_1^2} = 1.89 \times \frac{1.58^2}{0.367^2} = 35.$$

管群出口もクロスフローで扱えば、

$$\xi_{\text{上部}+\text{下部}} = 35 + 35 = 70. //$$

④重水底部多孔板



$$\begin{aligned}
 \text{多孔部流路面積 (A)} &= \frac{\pi}{4} d_1^2 \times N \times \frac{1}{2} \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 0.03^2 \times 280 \\
 &= 0.198 \text{m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{多孔部流路流速 (v)} &= \frac{W}{\rho \cdot A} = \frac{100}{1095 \times 0.198} \\
 &= 0.46 \text{m/s}
 \end{aligned}$$

○多孔部流速を重水底部流速代表で圧損係数を換算する。

$$\Delta P = \xi_1 \frac{\rho V_1^2}{2g} = \xi_2 \frac{\rho V_2^2}{2g}$$

$$\begin{aligned}
 \xi_1 V_1^2 &= \xi_2 V_2^2 \\
 \xi_2 &= \xi_1 \frac{V_1^2}{V_2^2} = \xi_1 \frac{A_2^2}{A_1^2} \\
 &= 1.5 \times \frac{1.58^2}{0.198^2} = 95.5 \approx
 \end{aligned}$$