

2次系削除プラント安全評価手法の開発

—水素気泡溶解挙動評価コードの改良と評価—

1993年11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)

2次系削除プラント安全評価手法の開発

－水素気泡溶解挙動評価コードの改良と評価－

浜田広次*, 田辺裕美*

要旨

2次系削除型FBRの蒸気発生器(SG)において、微小～小リークで発生する水素気泡の冷却材中での溶解・移行挙動を解析する計算コードHYBAC2 (Hydrogen-bubble Behavior Analysis Code)に循環ポンプモデル、系内の循環流量や圧力分布計算モデル等を付加したHYBAC2Pを開発した。

新コードの解析機能を評価するために行った試計算では、計算結果の物理的な妥当性を確認するとともに、気泡の溶解挙動に及ぼすパラメータ(初期気泡半径、循環ポンプの運転状態、系内の圧力分布など)の影響を把握し、以下のような結論を導いた。

SG内に発生する水素気泡に関しては、気泡径が小さいほど溶解速度が早いことから、リーク時の気泡径を極力小さくする設計上の工夫が必要である。冷却系内では、流速が遅く、浮力と流れが逆向きになるSG内で特に溶解が顕著となるが、流速の早い配管内では十分な溶解効果を期待できず、SGを出た気泡は炉心部へ到る可能性が高い。しかしながら、早期なトリップ操作により気泡の炉心部への流入を抑制できる。循環ポンプに関しては、気泡の攪拌により気液接触面積が拡大すると気泡の溶解が促進されることから、循環ポンプは気泡の攪拌効果が十分に得られる設計(機械式など)であることが望ましい。付加した新モデルに関しては、ポンプの吐出圧や流体の流れによる圧力変化を考慮すると、最終的な気泡径は小さく、溶解割合は大きくなったことから、系内の流況を現実的に考慮したモデルを用いた方が合理的な評価が可能となる。

今後は、本コードの検証を積極的に進めていくとともに、モデルの更なる高度化を経て、安全評価のための解析ツールとして整備していく予定である。

*) 機器構造開発部 機器システム開発室

Development of Safety Analysis Code for Primary Steam Generator

- Modification and analysis of the HYBAC code -

H.Hamada^{*)}, H.Tanabe^{*)},

ABSTRACT

The computer program HYBAC2, which was developed for a primary steam generator (SG) plant system to evaluate the dissolution and transportation behavior of hydrogen bubbles in the coolant sodium, was modified and the new version HYBAC2P was released by incorporating several models such as a pump calculation model and a pressure distribution model.

The parameter calculation using the new code gave physically reasonable result and it could lead to the following conclusion:

Design that could minimize the initial bubble size is preferable for the primary SG because a small bubble is relatively easy to dissolve. Though the dissolution effect in a piping is relatively low, fast pump trip could avoid the bubble entering the reactor core. Bubble dispersion effect in a pump is expectable to accelerate the dissolution effect: therefore, design that could maximize the bubble dispersion effect is desired for the pump. As for the realistic evaluation, it's effective to consider pressure distribution and flow rates in primary SG system.

In order to make HYBAC2P more useful as a safety analysis tool, the code needs additional modification and validation using test data.

^{*)} Systems and Components Development Section, Systems and Components Division, O-arai Engineering Center

目次

	Page
要旨	I
Abstract	II
目次	III
図表目次	IV
1. 緒論	1
2. モデル改良	2
2.1 循環ポンプモデル	2
2.2 圧力計算モデル	5
2.3 気泡溶解モデル	8
3. コード記述	14
3.1 コードの概要	14
3.2 入力マニュアル	14
3.3 出力マニュアル	18
3.4 プロット出力	21
3.5 JCLマニュアル	22
3.6 プロッタマニュアル	23
4. 試計算及び考察	38
4.1 プラント概要	38
4.2 計算モデル	38
4.3 入力データ	38
4.4 結果・考察	39
4.5 まとめ	43
5. 結言	65
参考文献	66
謝辞	67

図表目次

	Page
表2.1 ポンプ回転数とポンプトルク補正係数、ポンプ効率の関係	9
表2.2 ポンプQ-H特性（揚程特性）表	10
表2.3 ポンプQ-T特性（トルク特性）表	11
表3.1 気泡形状補正係数	30
表3.2 リスト出力形式	31
表3.3 HYBAC2P用JCLの例	32
表3.4 HYBAC2Pのプロット用データ番号	33
表3.5 X-Yデータのプロット用データ番号	33
表4.1 プラントの基本仕様	44
表4.2 実用炉のプラントデータ	45
表4.3 計算パラメータ表	46
表4.4 試計算用入力データ	47
表4.5 実用炉の計算結果	48
図2.1 ポンプの2相劣化係数	12
図2.2 2相完全劣化時のポンプ揚程	13
図3.1 計算の流れ	34
図3.2 プログラム構成	35
図3.3a~b プロット出力例	36
図4.1 試計算のプラント体系	54
図4.2 試計算用計算モデル	55
図4.3a~d 試計算結果：初期気泡半径の影響	56
図4.4a~b 試計算結果：界面積増倍係数の影響	58
図4.5a~b 試計算結果：ポンプ回転数の力係数の影響	59
図4.6a~b 試計算結果：ポンプトリップの影響	60
図4.7a~b 試計算結果：圧損計算法の影響	61
図4.8a~b 試計算結果：圧損計算法（IC=1）の影響	62
図4.9a~b 試計算結果：圧損計算法（IC=2）の影響	63
図4.10a~b 試計算結果：ポンプ特性	64

1. 緒論

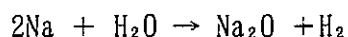
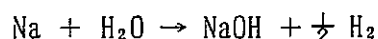
高速増殖炉（FBR）の1次系に蒸気発生器（SG）を設置する2次ナトリウム系削除型プラントでは、建設や運転に関わるコストの低減が期待できる。一方、従来のFBRとは設計思想が異なるため、新たな安全論理も構築する必要がある。

SG内で、万が一、伝熱管リークによりナトリウム-水反応が起こると、反応生成物である水素（ H_2 ）、 Na_2O 、 $NaOH$ 等が発生し⁽¹⁾、冷却系から炉心部及び各機器へと移行することが予想される。水素気泡に関しては、炉心部へ輸送されると炉心のボイド反応度に影響する可能性があるため、安全評価上、特に考慮すべき項目の一つと言える。しかしながら、水素気泡は冷却材中へ溶解する性質も有するため、気泡の炉心部への移行の可能性を判断するには、その冷却材中での溶解・移行挙動及び炉心部への移行量を定量的に評価することが不可欠である。

本研究に関しては、昭和62年度に簡易モデルを用いてHYBAC(Hydrogen-bubble Behavior Analysis Code)コードを作成し、試算を行った。これは、ナトリウム-水反応で発生した単気泡の水素が原子炉容器入口に至るまでの挙動を評価したものである。その後、昭和63年度に解析モデルの見直し・詳細化を計り、径の異なる気泡を同時に複数扱えるように改良したHYBAC2コードを平成元年度に完成し、実用化プラントを対象として予備解析を行った^(1, 2)

本報では、HYBAC2コードの解析機能を強化、高度化すべく循環ポンプモデル、系内の循環流量や圧力分布計算モデル等について改良を加えHYBAC2Pバージョンを開発したので、その結果を報告する。以下では、第2章で改良したコードの解析モデルを、第3章で改良コードの使用マニュアルを、第4章でコードを用いた試算の結果を、第5章で全体の結言を述べる。

(1) ナトリウム-水反応における主な化学反応式は以下のとおり。



2. モデル改良

前報^[1]で記述したHYBAC2は、気泡流状態の水素が流体中で溶解(拡散)し、気泡の大きさによりキノコ笠、楕円、球状に形を変えながら冷却系内を移行する過程を解析するコードである。本コードでは、気泡の移行を重力と流体抵抗を考慮した1次元運動方程式から求め、また単気泡及び径の異なる気泡を同時に扱う(多気泡モデル)ことも可能である。この多気泡モデルの概念にはGal-Orらの気泡群モデル^[4, 5]を用いる。気泡の溶解には、球面の非定常拡散から導かれるHigbieの浸透説モデルや気体の一次不可逆反応を考慮した軸対象拡散方程式モデルを気泡と流体の相対速度に依存して選択できる。

今回行ったコード改良では、実プラントでの気泡挙動を忠実に模擬するため、主に循環ポンプ(メカニカルポンプ)の起動・トリップモデルや、それに伴うループ内の流量・圧力の計算モデルを新たに追加した。この章では、これら新モデルの概要を述べる。以下では、2.1節で循環ポンプに関するモデル、2.2節で流量・圧力の計算に関するモデル、最後に2.3節で気泡の溶解に関するモデルについて記載する。

2.1 循環ポンプモデル

導入した循環ポンプモデルによりポンプの起動、トリップをシミュレートすることで、過渡時及び定常時の解析が可能となった。ポンプモデルには以下の3種類を付加しており、コードでは入力データITRQにより選択できる。

2.1.1 ITRQ=0のモデル

これは「もんじゅ」の1次系循環ポンプモデルに相当し、ポンプの運動方程式を以下のように表す。

$$\frac{J}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt} = T_D - T_L \quad (2.1)$$

ここで、

J : ポンプ回転慣性 ($G D^2, \text{kg m}^2$)

N : ポンプ回転数 (rpm)

T_D : 駆動トルク (kgm)

T_L : ポンプトルク (kgm)

ポンプトルク T_L は、ポンプトルクに関する完全特性式から、トルク比 τ とポンプの定格トルク T_R の積として

$$T_L = \tau T_R \quad (2.2)$$

で求められるが、完全特性式の中では、いわゆる「摩擦トルク」のような機械損失が考慮されていない。そこで、機械損失によるポンプ効率の低下を考慮した補正係数 β を用いて、完全特性式から求まるポンプトルクを次のように補正する。

$$T_L = \beta (\tau T_R) \quad (2.3)$$

補正係数 β はポンプ回転数に依存する値で、表2.1に示す「もんじゅ」の1次系ポンプモデルを採用する。

Q-H特性の完全特性式は、流量と回転数の関係により8領域に分け、5次の多項式で近似する。そして、過渡解析の過程で得られる流量Qとポンプ回転数Nとから、流量比qと回転数比nを求め、qとnの関係から揚程比h、更に揚程が $H = h H_R$ (H_R : 定格揚程) により求まる。なお、Q-T特性も上記Q-H特性の完全特性式の考え方とほぼ同様の手続きで求まる。現在、Q-H特性やQ-T特性の近似式には、表2.2、表2.3に示すような「もんじゅ」1次系ポンプの特性式を用いる。

2.1.2 ITRQ=1のモデル

これは「もんじゅ」2次系ポンプモデルに相当し、ポンプの運動方程式は機械損失によるブレーキを考慮して以下のように表す。

$$\frac{J}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt} = T_D - T_L - T_f \quad (2.4)$$

ここで、

J : ポンプ回転慣性 ($GD^2, \text{kg m}^2$)

N : ポンプ回転数 (rpm)

T_D : 駆動トルク (kgm)

T_L : ポンプトルク (kgm)

T_f : 摩擦トルク (kgm)

ポンプトルク T_L は、前記①と同様にポンプトルクに関する完全特性式から

$$T_L = \tau T_R$$

として求められる。摩擦トルク T_r は入力データで与え、ポンプの回転数にかかわらず一定値とする。

2.1.3 ITRQ=2のモデル (ポンプの動特性式)

ポンプ効率を利用したポンプの動特性式を用いる。循環流量が連続可変となるようにモータ回転数が制御され、その要求回転数に見合ったモータ軸動力特性カーブを計算する。ポンプの動特性式は以下に示す。

$$\frac{J}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt} = T_D - \frac{H\rho Q}{2\pi\eta N} - T_r \quad (2.5)$$

ここで、

- N : ポンプ回転数 (rpm)
- J : ポンプ本体とモータの回転慣性 ($GD^2, \text{kg m}^2$)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- T_D : 駆動トルク (kgm)
- H : ポンプヘッド (m)
- ρ : 流体密度 (kg/m^3)
- Q : 体積流量 (m^3/min)
- η : 摩擦を含まないポンプ効率 (—)
- T_r : 摩擦トルク (kgm)

摩擦トルク T_r は入力データで与え、ポンプの回転数にかかわらず一定値とする。ポンプ効率は、表2.1に示す「もんじゅ」1次系ポンプモデルを用いる。

2.1.4 ポンプ2相流モデル

流体が2相流となってポンプに入ると、ポンプの揚程が单相流の場合に比べ劣化してくる。この2相流状態の揚程 H^* を、单相時のポンプ揚程 H_1 と2相完全劣化時のポンプ揚程 H_2 とを用いて、次式により求める。

$$H^* = H_1 - M(\alpha) (H_1 - H_2) \quad (2.6)$$

ここで、Mは2相劣化係数であり、ボイド係数： α の関数として実験データから得られる値である。ここでは、図2.1に示す実験データをテーブル化して使用する。また2相完全劣化時のポンプ揚程 H_2 は、図2.2に示す実験データをテーブル化して用いる。

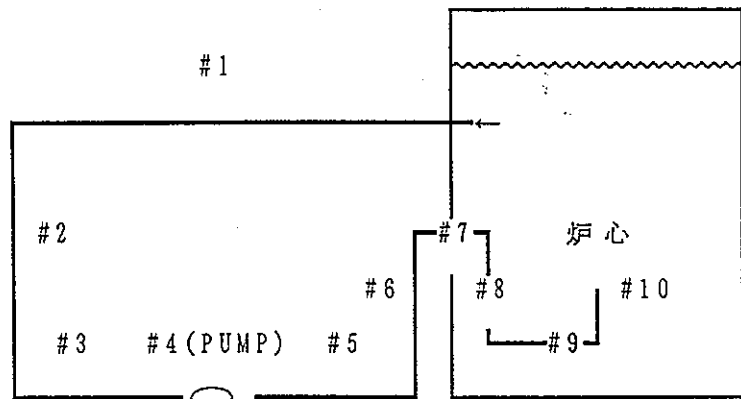
2.2 圧力計算モデル

2.2.1 定常時の流量計算

HYBAC2ではパイプの分岐を考慮しない^[1]ため、全て一次元でパイプを結合したモデルを考える。ここでは、以下に示すように、NP個のパイプを結合してパイプ4を循環ポンプにモデル化した簡単なループ体系を想定し、圧力や流量の計算モデルを説明する。

まず、ここでの変数を以下のように定義する。

- パイプの数：NP (=10)
- 各パイプの断面積： A_i
($i=1\sim NP$)
- 各パイプの長さ： L_i
($i=1\sim NP$)
- 各パイプの直径： D_i
($i=1\sim NP$)
- 各パイプの摩擦係数： f_i ($i=1\sim NP$)
- 各パイプの形状圧損： e_i ($i=1\sim NP+1$)
- パイプ1の入口面とパイプNPの出口面のヘッド差： Δh (m)
- パイプ内の循環流量： Q (m^3/s)



このとき、系内の摩擦による全圧力損失： ΔP_f (m^2/s^2) は以下の式となる。

$$\begin{aligned} \Delta P_f &= \sum_{i=1}^{NP} \{0.5(Q/A_i)^2 \times 4 f_i L_i / D_i\} \\ &= Q^2 \times \sum_{i=1}^{NP} \{0.5(1/A_i)^2 \times 4 f_i L_i / D_i\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

同様に、系内の形状による全圧力損失： ΔP_g は、

$$\begin{aligned} \Delta P_g &= \sum_{i=1}^{NP} \{0.5 e_i (Q/A_i)^2\} + 0.5 e_{NP+1} (Q/A_{NP})^2 \\ &= Q^2 \times \left[\sum_{i=1}^{NP} \{0.5 e_i (1/A_i)^2\} + 0.5 e_{NP+1} (1/A_{NP})^2 \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

系内のヘッドによる全圧力損失： ΔP_H は、

$$\Delta P_H = g \Delta h \quad (2.9)$$

循環流量： Q の場合のポンプのヘッドを $h_P(Q)$ とすると、吐出圧： ΔP_P は、

$$\Delta P_P = g h_P(Q) \quad (2.10)$$

で表せる。従って、これらの圧力がバランスするためには以下の式が成り立つ必要がある。

$$\Delta P_f + \Delta P_g + \Delta P_H = \Delta P_P \quad (2.11)$$

(2.7)式～(2.10)式を(2.11)式に代入すると、 Q に関する方程式が得られ、

$$a Q^2 + g \Delta h = g h_P(Q) \quad (2.12)$$

となる。ただし、変数 a は以下の式である。

$$a = \sum_{i=1}^{NP} \{0.5(1/A_i)^2 \times 4 f_i L_i / D_i\} + \sum_{i=1}^{NP} \{0.5 e_i (1/A_i)^2\} + 0.5 e_{NP+1} (1/A_{NP})^2 \quad (2.13)$$

ここで、 Q についての非線形関数 $F(Q)$ を以下の式で定義すれば、

$$F \equiv a Q^2 + g (\Delta h - h_P(Q)) \quad (2.14)$$

$F = 0$ となる解を数値的に求めることで、定常時の循環流量 Q が求められる。

2.2.2 過渡時の流量計算

例えば、ポンプの起動やトリップ時のように、時間的にポンプの回転数や吐出圧が変化する場合には、系内の循環流量も過渡的に変化する。このような場合の循環流量： Q を計算する。

系内(パイプ1～NP)の全メカニカルエネルギー： $K(j)$ は、パイプの径方向座標を r 、軸方向座標を l 、流体密度を ρ とすると、次のように表せる。

$$K = \int_0^L \int_0^R 0.5 \rho v^2 \times 2 \pi r dr dl \quad (2.15)$$

上式を計算体系に当てはめると、以下のように記述できる。

$$K = \sum_{i=1}^{NP} (0.5 \rho v_i^2 \times \pi R_i^2 L_i) \quad (2.16)$$

$v_i = Q/A_i$, $A_i = \pi R_i^2$ 関係より、上式は簡単に以下で表せる。

$$K = 0.5 \rho Q^2 \sum_{i=1}^{NP} (L_i/A_i) \quad (2.17)$$

メカニカルエネルギーの時間的な変化割合は、

$$dK/dt = \rho Q (dQ/dt) \sum_{i=1}^{NP} (L_i/A_i) \quad (2.18)$$

であるから、(2.17) 式と(2.18) 式を用いて、循環流量の過渡変化を表す方程式は以下となる。

$$(dQ/dt) \sum_{i=1}^{NP} (L_i/A_i) + F = 0 \quad (2.19)$$

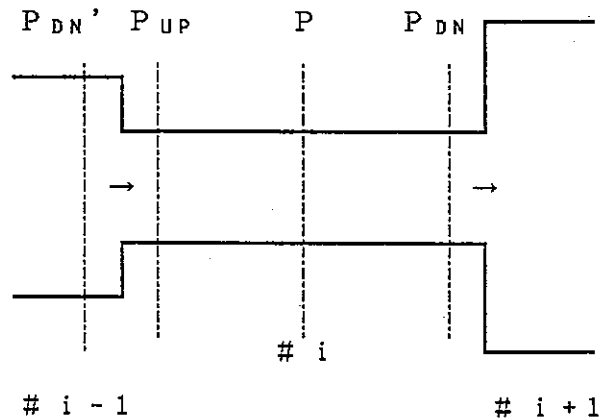
すなわち、

$$dQ/dt = -F / \sum_{i=1}^{NP} (L_i/A_i) \quad (2.20)$$

この微分方程式を解いて、循環流量Qを計算する。

2.2.3 圧力分布計算

HYBAC2に追加した圧力分布計算モデルを右の図により説明する。流体がパイプ $i-1$ からパイプ $i+1$ と流れている場合のパイプ i の中での上流側圧力 (P_{UP}) と下流側圧力 (P_{DN}) を考える。上流側パイプ $i-1$ での下流側圧力 ($P_{DN'}$) と、循環流量Qが既知と仮定すると、パイプ $i-1$ とパイプ i との接続点における形状圧損は、



$$\Delta P_s = 0.5 e_i (Q/A_{i-1})^2 \quad (2.21)$$

となるから、パイプ i の上流側圧力は、

$$P_{UP} = P_{DN}' - \Delta P_g = P_{DN}' - 0.5 e_i (Q/A_{i-1})^2 \quad (2.22)$$

となる。また、パイプ i での摩擦による圧損は、

$$\Delta P_f = 0.5 (Q/A_i)^2 \times 4 f_i L_i / D_i \quad (2.23)$$

となるから、パイプ i の下流側圧力は、

$$\begin{aligned} P_{DN} &= P_{UP} - \Delta P_f \\ &= P_{DN}' - 0.5 e_i (Q/A_{i-1})^2 - 0.5 (Q/A_i)^2 \times 4 f_i L_i / D_i \end{aligned} \quad (2.24)$$

で表せる。さらに、パイプ i-1 での流動圧損を $\Delta P_{flow}'$ とすると、パイプ i での流動圧損は、

$$\Delta P_{flow} = \Delta P_{flow}' - 0.5 (Q/A_i)^2 \quad (2.25)$$

となる。以上の圧損を用いて、パイプ i の代表圧を次式で定義した。

$$P = (P_{UP} + P_{DN}) / 2 + \Delta P_{flow} \quad (2.26)$$

2.3 気泡溶解モデル

ポンプ内では、回転翼の運動により激しい気泡の攪乱と、攪はん液表面からのガスの巻き込みによる界面積の増加が生じる。気泡の界面積の増加は、回転翼の速度のべき数に比例すると考えられるため、ポンプでの界面積増倍係数 ϕ_p (－) を用いて、ポンプでの溶解挙動を評価する。すなわち、 ϕ_p を次式で定義する。

$$\phi_p = (\phi_{pMAX} - 1) N^n + 1 \quad (2.27)$$

ここで、N は無次元化したポンプの回転数 (－)、 ϕ_{pMAX} (－) は定格回転数での界面積増倍係数、n は回転数に対する補正係数 (－) である。

表2.1 ポンプ回転数とポンプトルク補正係数、ポンプ効率の関係

ポンプ回転数		ポンプトルク補正係数	ポンプ効率
N (rpm)	n (-)	公称値 β (-)	公称値 η (-)
837	1.0	1.0	0.770
700	0.836	1.013	0.760
600	0.717	1.027	0.750
500	0.597	1.048	0.735
400	0.478	1.077	0.715
350	0.418	1.108	0.695
300	0.358	1.149	0.670
250	0.299	1.242	0.620
200	0.239	1.467	0.525
150	0.179	1.974	0.390
100	0.119	3.208	0.240
80	0.096	4.278	0.180
60	0.072	6.417	0.120
40	0.048	11.0	0.070

表2.2 ポンプQ-H特性（揚程特性）表

領域		領域	n — q	q — n	近似式	近似式の係数					
						C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
通常ポンプ領域 (正回転、正流)	n ≥ 0	①	0 ≤ — ≤ 1	q	$\frac{h}{q^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{n}{q}\right)^{i-1}$	-0.580	0.972	-0.286	0.934	-0.040	0.0
	q ≥ 0	②	0 ≤ — ≤ 1	n	$\frac{h}{n^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{q}{n}\right)^{i-1}$	1.264	-0.065	0.118	-0.531	0.090	0.124
エネルギー消散領域 (正回転、逆流)	n ≥ 0	③	-1 ≤ — ≤ 0	n	$\frac{h}{n^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{q}{n}\right)^{i-1}$	1.264	-0.065	0.118	-0.531	0.090	0.124
	q ≤ 0	④	-1 ≤ — ≤ 0	q	$\frac{h}{q^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{n}{q}\right)^{i-1}$	0.680	-0.443	0.398	-0.423	0.0	0.0
通常タービン領域 (逆回転、逆流)	n ≥ 0	⑤	0 ≤ — ≤ 1	q	$\frac{h}{q^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{n}{q}\right)^{i-1}$	0.680	-0.442	0.603	0.159	0.0	0.0
	q ≤ 0	⑥	0 ≤ — ≤ 1	n	$\frac{h}{n^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{q}{n}\right)^{i-1}$	0.645	0.144	-0.098	0.309	0.0	0.0
逆ポンプ領域 (逆回転、正流)	n ≥ 0	⑦	-1 ≤ — ≤ 0	n	$\frac{h}{n^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{q}{n}\right)^{i-1}$	0.645	0.397	-1.949	-0.901	0.0	0.0
	q ≥ 0	⑧	-1 ≤ — ≤ 0	q	$\frac{h}{q^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{n}{q}\right)^{i-1}$	-0.580	0.752	0.791	0.327	-0.306	-0.373

表2.3 ポンプQ-T特性(トルク特性)表

領域		領域	n, q -, - q n	近似式	近似式の係数					
					C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
通常ポンプ領域 (正回転、正流)	n ≥ 0	①	$0 \leq \frac{n}{q} \leq 1$	$\frac{\tau}{q^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{n}{q}\right)^{i-1}$	-0.452	1.750	-1.949	2.826	-1.175	0.0
	q ≥ 0	②	$0 \leq \frac{q}{n} \leq 1$	$\frac{\tau}{n^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{q}{n}\right)^{i-1}$	0.471	0.486	0.526	-0.552	0.013	0.056
エネルギー消散領域 (正回転、逆流)	n ≥ 0	③	$-1 \leq \frac{q}{n} \leq 0$	$\frac{\tau}{n^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{q}{n}\right)^{i-1}$	0.471	0.486	0.526	-0.552	0.013	0.056
	q ≤ 0	④	$-1 \leq \frac{n}{q} \leq 0$	$\frac{\tau}{q^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{n}{q}\right)^{i-1}$	0.792	-0.223	-0.101	-0.329	-0.800	-0.577
通常タービン領域 (逆回転、逆流)	n ≤ 0	⑤	$0 \leq \frac{n}{q} \leq 1$	$\frac{\tau}{q^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{n}{q}\right)^{i-1}$	0.792	-0.287	-0.197	0.147	0.0	0.0
	q ≤ 0	⑥	$0 \leq \frac{q}{n} \leq 1$	$\frac{\tau}{n^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{q}{n}\right)^{i-1}$	-0.690	1.411	-0.447	-0.350	0.605	-0.074
逆ポンプ領域 (逆回転、正流)	n ≤ 0	⑦	$-1 \leq \frac{q}{n} \leq 0$	$\frac{\tau}{n^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{q}{n}\right)^{i-1}$	-0.690	1.420	-1.928	0.414	3.547	2.368
	q ≥ 0	⑧	$-1 \leq \frac{n}{q} \leq 0$	$\frac{\tau}{q^2} = \sum_{i=1}^6 C_{i-1} \left(\frac{n}{q}\right)^{i-1}$	-0.452	2.149	-0.372	0.300	0.0	0.0

注) 実証炉ポンプの比速度は $360 \text{ rpm} \cdot (\text{m}^3/\text{min})^{1/2} / \text{m}^{3/4}$ である。

● ANQの実験データ (比速度 139)

△ CE社の実験データ (比速度 630)

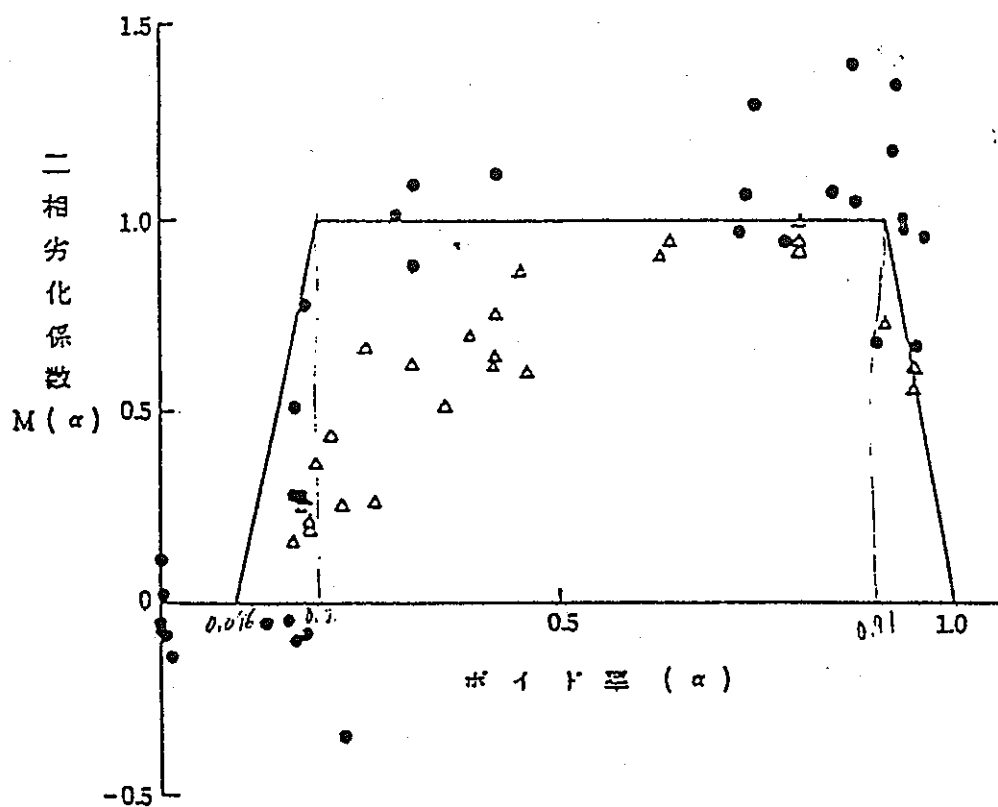


図2.1 ポンプの2相劣化係数

注) 実証ポンプの比速度は $360 \text{ rpm} \cdot (\text{m}^3/\text{min})^{1/3} / \text{m}^{1/3}$ である。

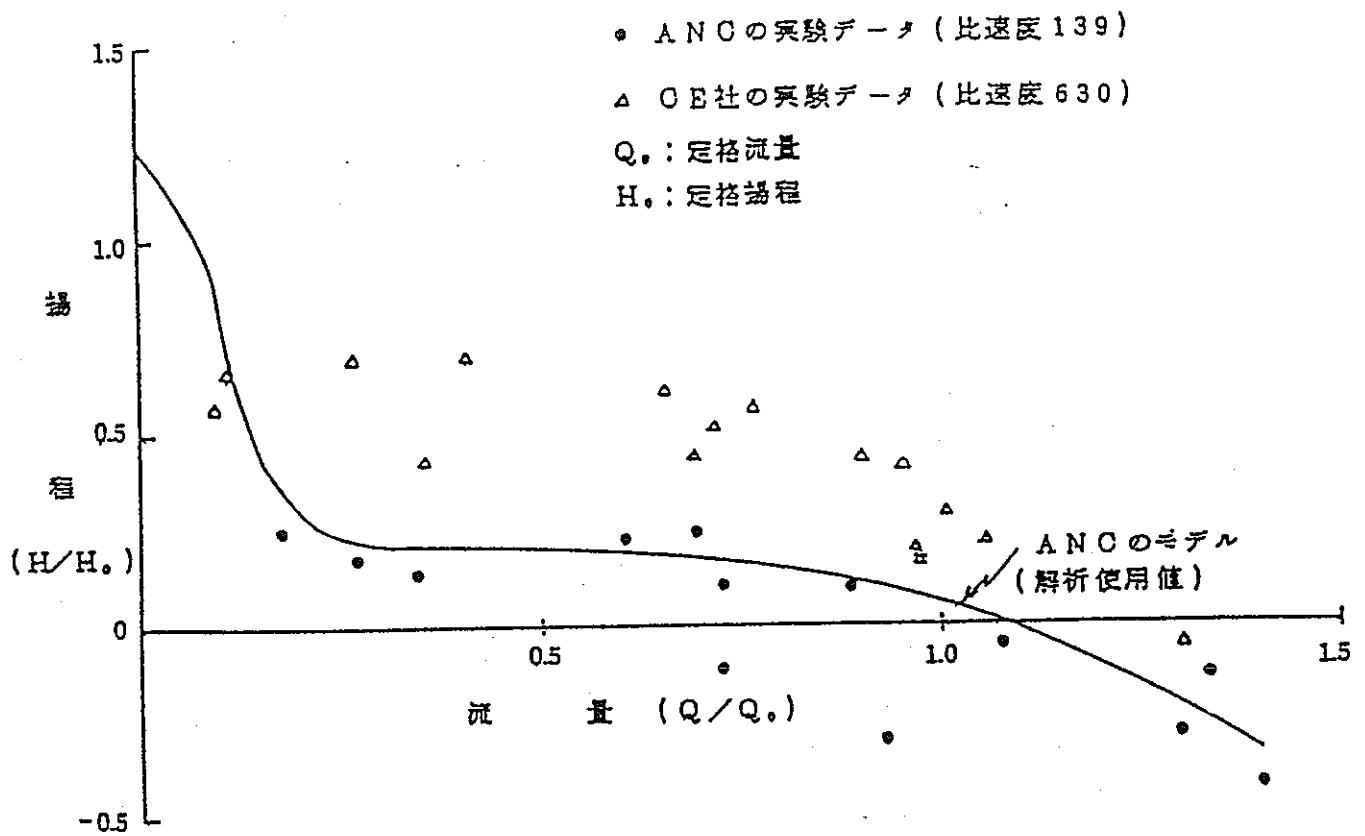


図2.2 2相完全劣化時のポンプ揚程

3. コード記述

3.1 コードの概要

解析コードの計算の流れを図3.1に、プログラム構成を図3.2に示す。コードの計算手順の詳細は報告書⁽¹⁾に示されているので、ここでは割愛する。なお、ここで記述したコードは、現在以下のデータセット名で大型計算機上に登録している。

POD1B13. HYBAC2P1. FORT

3.2 入力マニュアル

解析コードを使用する場合、以下の順番で入力データを作成する。

3.2.1 計算タイトルカード

#TITLE 計算タイトル (72文字以内の文字列)

3.2.2 スカラー整数用カードデッキ

(1) 計算制御用フラグカード

#IINICN, ICASE

IINICN : R K計算の初期条件の定め方に関するフラグ

0 = 各仮想領域の気体の体積流量 QG_j ($j=1, 2, \dots, NR$)を入力する。

1 = 気体の全体積流量 QG を入力する。

ICASE : 気泡拡散方程式の境界条件に関するフラグ

0 = 半径 r_E のところで

1 = 半径 r_E のところで $C = C_0$ 。

(2) プロブレム・ディメンション・カード

#NR, NP, N

NR : 仮想領域の個数

NP : 容器の個数

N : 気泡の外側の区間 $[r_B, r_E]$ の分割数

(3) 初期位置番号カード

#IPIPO 気泡の発生した容器の番号

(4) 出力間隔カード

#NPRINT, NGRF

NPRINT: プリント出力間隔 (タイムステップ数)

NGRF : プロット出力間隔 (タイムステップ数)

(5) 最大繰り返し回数カード (IINICN ≠ 1 のときはスキップする。)

#NMAX IINICN = 1 のときの ravg を定めるための繰り返し回数の最大値

3.2.3 スカラー実数用カードデッキ

(1) 時間制御カード

#DELT, TEND, TBEF

DELT: RK 計算のタイムステップ幅 (単位: 秒)

TEND: RK 計算時間の最大値 (単位: 秒)

TBEF: 気泡拡散方程式の計算でさかのぼる時間幅 (単位: 秒)

(2) 計算パラメータカード

#TAU, URCRT, QL, D, AK, CO, XO

TAU: 気泡滞留時間の補正係数 τ (単位: 無次元)

URCRT: 相対速度のしきい値 U_{rcrt} (単位: m/s)

QL: 液体の体積流量 (単位: m^3/s)

D: 気体のナトリウム中拡散係数 (単位: m^2/s)

AK: 気液反応係数 (単位: s^{-1})

CO: 気泡から十分離れた位置での気体濃度 (単位: mol/m^3)

XO: 気泡発生位置の気泡発生容器内での相対座標 (単位: m)

(3) 気泡形状データカード

#IPEOP

IPEOP: 気泡形状の補正係数 (ϕ , ψ) の定め方に関するフラグ。

- 1 = PSI_i, ETA_i (i=1, 2, 3) を入力として与える。

0, 1 = ASPECT, HEIGHT, THETAC を用いた内部計算により、PSI_i

ETA_i (i=1, 2, 3) を求める。

(IPEOP=0, 1 の場合の PSI、ETA の計算式を表 3.1 にまとめる。)

(以下は IPEOP=0, 1 のとき入力し、それ以外はスキップする。)

#ASPECT, HEIGHT, THETAC

ASPECT : アスペクト比、気泡楕円の長軸に対する短軸の比
(単位 : 無次元)

HEIGHT : キノコ笠状気泡のキノコ笠の高さ (単位 : m)

THETAC : キノコ笠状気泡のキノコ笠の曲率中心からキノコ笠をみこむ角
(単位 : ラジアン)

(以下はIPEOP=-1のとき入力し、それ以外はスキップする。)

#PSI(i) (i=1, 2, 3) 気泡形状に関する補正係数 ϕ (単位 : 無次元)

#ETA(i) (i=1, 2, 3) 気泡形状に関する補正係数 ϕ (単位 : 無次元)

(4) R K計算の初期条件設定用カード (IINICN=1のときはスキップする)

#QG, ERAVG

QG : 気体の全体積流量の初期値 (単位 : m^3/s)

ERAVG : ravg計算の相対誤差の許容値 (単位 : 無次元)

(5) 循環ポンプの初期条件設定用カード

#MPUMP

MPUMP : 循環ポンプ考慮の有無を示すフラグ

0 = ポンプを考慮しない

1 = ポンプを考慮する

(以下#EPSまではMPUMP=1のとき有効。それ以外はスキップする。)

#INP, ITRIPS, IRGKT, ITRQ

INP : 循環ポンプのある配管番号

ITRIPS : ポンプのトリップ (又は起動) の指定

1 = 起動状態からトリップする

2 = トリップ状態から起動する

IRGKT : ポンプ回転数の計算方法

0 = 4次のルンゲクッタにより計算する

0 ≠ 繰り返し法により計算する。この時、

IRGKTにはその最大繰り返し数を与える

ITRQ : ポンプの運動方程式中にある摩擦トルクの定義方法を指定する。

0 = 2.1節に示されたITRQ=0のモデル

1 = " ITRQ=1 " (通常使用)

2 = " ITRQ=2 "

#IC, ITRMAX

IC : 圧損 (摩擦損失係数、形状圧損係数) 計算法のフラグ
 0 = 内部計算で求めた圧損係数を使用する
 1 = 入力データの圧損係数を使用する
 (圧損係数は、実数データのFPIP, EPIPで与える)
 2 = 入力データの圧損係数を使用して系内の圧力分布を計算する (このとき入力データ : P(L)に静圧を与える)
 ITRMAX : 計算の最大繰り返し数。

#TRIPT ポンプをトリップ又は起動させる時刻 (単位 : 秒)

#FAIMAX, PUMPN

FAIMAX : 定格回転数の時の界面積増倍係数 (単位 : 無次元)
 PUMPN : ポンプ回転数のべき数 (単位 : 無次元)

#GD2, QP, RNP, HRP

GD2 : ポンプの本体 + 回転体の慣性定数 (単位 : kg m^2)
 QP : ポンプの定格質量流量 [= 体積流量 \times 密度] (単位 : kg/s)
 RNP : ポンプの定格回転数 (単位 : rps)
 HRP : ポンプの定格ヘッド (単位 : m)

#TF, HEAD

TF : ポンプの摩擦トルク (ITRQ=1, 2のとき有効) (単位 : kg m)
 HEAD : PIPE 1 の入口部とポンプ出口部のヘッド差 (単位 : m)

#RS, EPS

RS : 流体の密度 (単位 : kg/m^3)
 EPS : 定常時の循環流量を繰り返し計算する際の許容誤差
 (単位 : kg/s)

3.2.4 ベクトル整数用カードデッキ

#IG(L) (L=1, 2, ..., NP)

IG : 容器の傾きについてのフラグ
 + 1 = 上昇管
 0 = 水平管
 - 1 = 下降管

3.2.5 ベクトル実数用カードデッキ

#ALP(L) (L=1, 2, ..., NP)	各容器の長さ (単位: m)
#AP(L) (L=1, 2, ..., NP)	各容器の断面積 (単位: m ²)
#T(L) (L=1, 2, ..., NP)	各容器の流体温度 (単位: °C)
#P(L) (L=1, 2, ..., NP)	各容器の流体圧力 (単位: MPa) [ただしIC=2の場合は、流体の静圧 を与える]
#RJ(J) (J=1, 2, ..., NR+1)	仮想領域の境界の半径 (単位: m)
#UB(J) (J=1, 2, ..., NR)	各仮想領域の気泡の初期速度 (単位: m/s)
#FAC(I) (I=1, 2, ..., N)	区間 [r _B , r _E] の分割比。総和が1になる 必要がある。(単位: 無次元)

(以下の配列はIINICN ≠ 0 のときスキップする。)

#QGJ(J) (J=1, 2, ..., NR)	各仮想領域の気体体積流量の初期値 (単位: m ³ /s)
---------------------------	---

(以下の配列はMPUMP=1かつIC=0のとき有効。それ以外はスキップする。)

#FPIP(L) (L=1, NP)	配管の摩擦係数 (単位: 無次元)
#EPIP(L) (L=1, NP+1)	配管の形状圧損係数 (単位: 無次元)

(以下の配列はMPUMP=1のとき有効。それ以外はスキップする。)

#DPIP(L) (L=1, NP)	配管の相当直径 (単位: m)
--------------------	-----------------

3.2.6 注意事項

- (1) 入力タイトルカードを除きフリーフォーマットであり、72桁を越える場合は次の行(カード)以降に継続して記入できる。
- (2) 第1桁目がアスタリスク(*)である行はコメント行とみなされる。
- (3) データ行中にも/*...*/の形でコメントを挿入できる。(…部分はコメント)

3.3 出力マニュアル

プリンターの出力は、出力順に次のような三つの部分に分けられる。

3.3.1 入力変数の出力

入力したデータをそのまま出力するもので、サブルーチンRDCARDによる単なる数値の出力とサブルーチンINPUTによる変数の意味の説明付きの出力の二つからなる。

3.3.2 XBND、FBの出力

初期化ルーチンINITで処理されたデータで各々次のような意味を持つ。

XBND(L) : L番目の容器座標境界の位置を表す。

FB(J) : J番目の仮想領域の気泡発生頻度を表す。

3.3.3 R K法の計算結果の出力

(1) 出力すべき変数

((a) スカラー変数 1

TITLE

TIME, NSTEP, DELT, IPIP, PRES, UL, H

((b) ベクトル変数

IVEL(J), IACMP(J), IVANSH(J), ISHAPE(J), Y(1, J), Y(2, J), Y(3, J),

UB(J), TIMEP(J), DELTP(J), PHI(J)

((c) スカラー変数 2

AVG

(2) 有効数字

実数型変数の有効数字は6桁でプリントする。ただし、PHI(J)及びAVGは有効数字を3桁とする。

(3) 出力形式

出力は表3.2のような形式で行う。

(4) 出力変数の意味

TITLE : 計算タイトル

TIME : 全仮想領域の基準となる計算時間 (単位 : s)

(基準タイムステップ幅DELTの倍数となる。)

NSTEP : R K法計算の繰り返しステップ数

DELT : 基準タイムステップサイズ (単位 : s)

IPIP : 現在の容器番号

PRES : 流体圧力 (単位 : MPa)

UL : 液体速度 (単位 : m/s)

H : 気体のボイド率 (単位 : 無次元)

J: 仮想領域の番号

IVEL(J): J 番目の仮想領域における相対速度 U_{rj} が臨界速度 U_{rCRT} より大きい
小さいかを表すグラフ

0: $U_{rj} \geq U_{rCRT}$

1: $U_{rj} < U_{rCRT}$

IACMP(J): J 番目の仮想領域の IPIP における RK 法の計算が完了したかどうか
を示すフラグ (注意 1)

0: 完了していない。

1: 完了した。

IVANSH(J): J 番目の仮想領域の気泡が消滅したかどうかを示すフラグ

0: 消滅していない。

1: 消滅した。(あるいは、気泡が逆流した。)

ISHAPE(J): J 番目の仮想領域の気泡形状

1: 球状気泡

2: 楕円状気泡

3: キノコ笠状気泡

XB(J) [=Y(1, J)]: J 番目の仮想領域の気泡の位置

UR(J) [=Y(2, J)]: J 番目の仮想領域の気泡の相対速度

RB(J) [=Y(3, J)]: J 番目の仮想領域の気泡の半径

UB(J): J 番目の仮想領域の気泡の速度

TIMEP(J): J 番目の仮想領域の気泡の本当の経過時間

DELTP(J): J 番目の仮想領域の気泡の RK 法の計算に実際に使われたタイムス
テップ幅

PHI(J): J 番目の仮想領域の気泡の溶解割合

AVG: 溶解割合 PHI(J) (J=1, 2, ..., NR) の平均値

(5) 注意事項

(a) 計算完了の条件

完了の条件は次のいずれかである。

- ① 気泡が容器の境界に達した。
- ② 気泡が消滅した。
- ③ 気泡が逆流した。

気泡が容器の境界に達した場合には容器が変わるとフラグはゼロに戻される、気泡が消滅した
場合と気泡が逆流した場合には容器が変わってもフラグはゼロに戻されない。

(b) 溶解割合の計算

各仮想領域内で、水素気泡の温度を T 、圧力を P 、体積を $V (= 4\pi r^3/3 ; r$ は気泡半径)とすると、初期の状態：1 (添字で示す) の気泡が溶解して状態：2 になった場合の溶解割合：PHIは以下の式で計算する。

$$\begin{aligned} \text{PHI} &= 1 - V_2 P_2 T_1 / (V_1 P_1 T_2) \\ &= 1 - (r_2 / r_1)^3 \times (P_2 / P_1) \times (T_1 / T_2) \end{aligned}$$

AVGは、各仮想領域内での溶解割合：PHI_j、流入気泡の発生頻度 f_{Bj} (単位：個/s) について平均した値とした。すなわち、以下の計算で求める。

$$\text{AVG} = \frac{\sum_{j=1}^{\text{NR}} f_{Bj} \times \text{PHI}_j}{\sum_{j=1}^{\text{NR}} f_{Bj}}$$

3.4 プロット出力

3.4.1 出力フォーマット

プロット出力は、ユニットIPLTにフリーフォーマットで書き出す。書き出し方は以下である。

```
IF(TIMEP(1).EQ.0.0) WRITE(IPLT,*) NR, NPUMP
DO 10 J=1, NR
    WRITE(IPLT,*) TIMEP(J), Y(1, J), Y(2, J), Y(3, J), UB(J), PHI(J)
10 CONTINUE
IF(NPUMP.NE.0) THEN
    WRITE(IPLT,*) T, (RN(I), I=1, NPUMP), (Q(I), I=1, NPUMP),
+           (HR(I), I=1, NPUMP)
ENDIF
ENDIF
```

3.4.2 変数の意味

NR : 仮想領域の個数
 NPUMP : ポンプの個数
 TIMEP(J) : J 番目の仮想領域の気泡の本当の経過時間
 Y(1, J) [=XB(J)] : J 番目の仮想領域の気泡の位置
 Y(2, J) [=UR(J)] : J 番目の仮想領域の気泡の相対速度
 Y(3, J) [=RB(J)] : J 番目の仮想領域の気泡の半径
 UB(J) : J 番目の仮想領域の気泡の速度

PHI(J): J 番目の仮想領域の気泡の溶解割合
T: 現在の計算時間
RN(I): I 番目のポンプの回転数
Q(I): I 番目のポンプの流量
HR(I): I 番目のポンプのヘッド

3.5 JCL マニュアル

3.5.1 DD 名の意味

本プログラムの起動に必要な DD 名は次の 4 つである。

FT01F001: サブルーチン RDCARD で処理した入力データを一旦書き出すためのワークファイル用 DD 名
(レコード形式は FB、論理レコード長は 72)
FT05F001: 入力データ用 DD 名
(レコード形式は FB、論理レコード長は 80)
FT06F001: プリンター出力用 DD 名
FT011F001: プロット出力用 DD 名

3.5.2 ENTRY 名

メインプログラムの PROGRAM 文でプログラム名を HYBAC2 としているため、ENTRY 名は HYBAC2 となる。

3.5.3 JCL 例

JCL の例を表 3.3 に示す。

3.6 プロッタマニュアル

3.6.1 概要

SWACSコードの計算結果を図示するためにSWACS. PLOTが開発された。本プログラムはCALCOMPプロッタ用に作成されたもので、横軸を時間に任意のスケールで計算結果をプロットでき、その出力形式は、1枚の用紙に1枚の図示を行う形式-1と1枚の用紙に10枚の図示が可能な形式-2の2種類が用意されている。プロットの重ね書き本数： n に制約はなく、太さの異なる5種類の線種を順次使用するが、 n が6本以上と大きくなると最初の線種に戻り再度繰り返す。またコードでの計算結果と実験データ(X-Yデータ)を同時に図示する機能も用意されている。

このSWACS. PLOTにHYBAC2用のプロット機能を追加することで、水素の溶解割合： ϕ (%)、ポンプ回転数： N (rps)、ポンプでの質量流量： W (kg/s)、ポンプヘッド： H (m)などを出力可能とした。以下でその機能を紹介する。

3.6.2 入出力手続き

プロットプログラムのコントロールデータはFT05F001で入力し、プリントアウトはFT06F001で出力する。そのため、プロッタデータファイルはFT05F001とFT06F001以外の任意の番号で入力する。(なお、FT60F001～FT69F001及びFT90F001は、初期スパイク圧/圧力波伝播(SWAC57R)計算結果用のデータファイルに予約されているため、HYBAC2データでは使用できない。)

入力データは、コードの実行で作成されたプロッタ用データファイルまたは実験データのテーブルファイルであり、ファイルは磁気テープ(MT)上、あるいはディスク上に保存されていることを前提とする。

3.6.3 プロット形式

3.6.3.1 プロット形式-1

図3.3aにプロット形式-1の例を示す。タイトル文字はグラフの上部あるいは下部に書くことができる。

ここで、

①共通タイトル(コメント)	:	カード入力
②グラフタイトル	:	"
③Y軸タイトル	:	プログラムが選択
④X "	:	TIME (SEC) あるいは DISTANCE (M)

3.6.3.2 プロット形式-2

図3.3bにプロット形式-2の例を示す。ここでは、タイトル文字はすべてグラフ内上部に固定される。

ここで、

① グラフタイトル	: カード入力
② Y軸タイトル	: プログラムが選択
③ X軸タイトル	: TIME (SEC) あるいは DISTANCE (M)

3.6.4 コントロールデータ・カードデックの構成

コントロールデータのカードデックは、整数カードとモジュールカードから成る。整数カードは、コントロールカードの最初に必ず入力する必要がある。モジュールカードは必要の数だけ入力する。1つのモジュールが、1枚のグラフに対応する。各モジュールカードの区切れは、ゼロを入力した1枚のモジュール終了カードで識別する。以下では、整数カードとモジュールカードの説明をする。

3.6.4.1 整数カード

通常のプロット用の整数カードで、データカードデックの最初に入れる。データ形式を以下に示す。

COM(1)	~	COM(20)	(A80)
XLENG	YLENG	IPTYPE	IPRINT ITTY IGRID ICASE IAUTO(2E12.5, 6I6)

COM(1) ~COM(20) : データ・カードのタイトル (非実行文)

XLENG : X軸の長さ (cm)

YLENG : Y軸の長さ (cm)

IPTYPE = 0 : グラフ上部にタイトル文字を入れる

= 1 : グラフ下部にタイトル文字を入れる

IPRINT = 1 : SOLA-LOOPコードのプロットデータをプリントアウトする

= 0 : " しない

ITTY = 0 : CALCOMPによる出力

= 1 : TEKTRONディスプレイによる出力 (マニュアル)

= 2 : TEKTRONディスプレイによる出力 (オート)

= 3 : 標準プロッタ出力

- IGRID = 0 : 図面に格子線を入れる
 = 1 : " 入れない
- ICASE : プロット・ファイル形式の指定
- = 1 : SWACSに対応 形式-1
 = 2 : SWAC57Rに対応 形式-1
 = 3 : SWAC13Eに対応 形式-1
 = 5 : HYBAC2Pに対応 形式-1
-
- = 6 : SWACS/REG43に対応 形式-1
 = -1 : SWACSに対応 形式-2
 = -2 : SWAC57Rに対応 形式-2
 = -3 : SWAC13Eに対応 形式-2
 = -5 : HYBAC2Pに対応 形式-2
-
- = -6 : SWACS/REG43に対応 形式-2
- IAUTO ≠ A : BLOCK1で指定のXSTR, XLST, NDXとBLOCK2で指定のYSTR,
 YLST, NDYが横軸、縦軸の開始、終了時間、分割数となる。
 = A : 横軸、縦軸のスケールを自動設定する。

(注意)

IAUTO=Aで重ね書きをする場合には、最初のプロットデータのスケールがとられる。

3.6.4.2 モジュール単位のカード構成

(1) BLOCK1の構成 (2枚)

NMOD	NDX	XSTR	XLST	M1	(216, 2E12.5, 16)
C(1)	~C(20)				(A80)

- NMOD = 5 : 圧力波伝播計算モジュール
 = 7 : 初期スパイク圧計算モジュール
 = 11 : 水噴出率計算モジュール
 = 13 : 準定常圧計算モジュール
 = 52 : ダウンスマ圧力波伝播計算モジュール
 = 98 : 水素気泡溶解計算モジュール(HYBAC2P)
-
- = 99 : SOLA-LOOPコード
 = 0 : プログラム終了 (必ずカードの最後に入れる)
- NDX : X軸 (時間軸) の分割数 ≥ 2

- XSTR : X軸の左端の値 (プロットさせたい開始時間) (sec)
- XLST : X軸の右端の値 (プロットさせたい終了時間) (sec)
- M1 : ユニット番号
- C(1) ~C(20) : 共通タイトル (80文字)
 グラフの上部(IPTYPE=1の場合は下部)の1行目にかくタイトル文字で、そのモジュール中の全部のプロットに共通して同じタイトルをかく。

(注意)

1. NMOD=0はプログラム終了カードとみなす。
2. X軸をNDXで分割し、その分割点にX軸の値をかくので(XLST-XSTR)とNDXはうまく割り切れるようにする。
 例) NDX=5, XSTR=0.0, XLST=1.0のときX軸値は、0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0と分割されることになる。
3. X軸のスケールは、XSCALE=(XLST-XLST)/XLENG (sec/cm) となる。

(2) BLOCK2の構成 (2枚)

1本のグラフについて次の2枚のカードが必要となる。従ってN本のグラフをかかせるには2×N枚がBLOCK2のカード枚数となる。ただし、重ね書きをする時は2枚目のカードは不要でありその分だけ枚数は減る。

NA	NB	NC	NPP	NDY	YSTR	YLST	(516, 2E12.5)
CC(1)	~		CC(20)				(A80)

- NA, NB, NC : データを指定するパラメータ (表3.4参照)
- NPP = 1 : 紙送りを行い新しい座標軸をかきプロットする
- = 0 : 前回プロットした座標に同スケールで重ねてプロットする
 (NDY, YSTR, YLSTは無効となる。また、CC(1)~CC(20)も不要で2枚目カードはいらぬ。)
- NDY : Y軸の分割数 ≥ 2
- YSTR : Y軸下端の値 (プロットの最小値)
- YLST : Y軸上端の値 (プロットの最大値)
 Y軸スケール=(YLST-YSTR)/YLENG

CC(1)～CC(20) : グラフの上部 2 行目に入るタイトル文字で、そのグラフに対するコメント等を記入する (80文字)
(NPP=0の場合このカードは不要)

(注意 1) 実験結果との重ね書き

計算結果と実験結果を重ね書きする場合の指定は、以下となる。

NA : 重ね書きする指定パラメータ (表3.5参照) にマイナス(-)をつける

NB := -99 (固定)

NC : 実験データファイルを指定するユニット番号

その他の指定は同じである。なお、実験データファイルのフォーマットは、X-データとY-データを空白あるいはコンマ(,)で区切って並べた行を、必要回数だけ繰り返して入力する。

例) 0.0, 1.0
0.2, 2.0
0.3, 3.0
: :

(注意 2) 計算結果の重ね書き(1)

(一つの計算結果の重ね書き)

一つのプロットデータファイル内での計算結果の重ね書きをする場合、重ね書きしたい本数だけBLOCK2のカードを繰り返せばよい。従って、N本のグラフをプロットしたい場合は、N回の繰り返しとなる。(ただし、2本目以降のグラフについてはNPP=0を指定する)

例) 7 4 0.0 0.08 60 (BLOCK1の1枚目カード)
COMMENT-1 (BLOCK1の2枚目カード)
10 8 1 1 5 0.0 50.0 (BLOCK2の1枚目カード)
COMMENT-2 (BLOCK2の2枚目カード)
10 10 1 0 (BLOCK2の1枚目カード)
10 20 1 0 "
: : : : :
0 (モジュール終了カード)

(注意3) 計算結果の重ね書き(2)

複数の計算結果(複数のプロットファイル)の重ね書きは、BLOCK1のカードとBLOCK2のカードを重ね書きしたい本数だけ繰り返す。(ただし、各プロットファイルには異なるユニット番号を指定し、また、2本目以降のグラフについてはNPP=0を指定する)

例)	7	4	0.0	0.08	60		(BLOCK1の1枚目カード)
	COMMENT-1						(BLOCK1の2枚目カード)
	10	8	1	1	5	0.0	50.0 (BLOCK2の1枚目カード)
	COMMENT-2						(BLOCK2の2枚目カード)
	0						(モジュール終了カード)
	7	4	0.0	0.08	61		(BLOCK1の1枚目カード)
	COMMENT-1						(BLOCK1の2枚目カード)
	10	10	1	0			(BLOCK2の1枚目カード)
	0						(モジュール終了カード)
	7	4	0.0	0.08	62		(BLOCK1の1枚目カード)
	COMMENT-1						(BLOCK1の2枚目カード)
	10	10	1	0			(BLOCK2の1枚目カード)
	:	:	:	:			:
	0						(モジュール終了カード)

(3) モジュール終了カード

0	(I6)
---	------

ゼロカードを読むとモジュール終了とみなし、次のモジュールに移りBLOCK1のカードを読む。

(4) プログラム終了カード

0	(I6)
---	------

データカードの最後にゼロ・カードを入れてプログラムを終了させる。従ってプログラムを終了する場合には、モジュール終了カードとプログラム終了カードの2枚のゼロカードが連続して並ぶことになる。

3.6.5 プロットデータの指定方法

プロットするデータの選択はBLOCK2の1枚目カードのNA, NB, NCの3つの整数で指定を行う。なお、NA, NB, NCで存在しないデータの番号を指定した場合は、それを無視しエラー・メッセージを出力し次のデータのプロットに移る。

表3.1 気泡形状補正係数

気泡形状	項目	計算式	記号	IPEOP = -1	IPEOP = 0	IPEOP = 1	備考
球状	接触時間	$t = \eta (2r/v)$	η	入力値	$(\pi/2)^2$	1	
	界面面積	$S = \phi (4\pi r^2)$	ϕ	↑	1	←	
だ円状	接触時間	$t = \eta (2r/v)$	η	↑	$\frac{\pi}{2} \alpha^{-1/3} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-\beta^2 \sin^2 \theta} d\theta$	$\alpha^{2/3}$	$\alpha = b/a$; 楕円外比 a ; 長軸長さ b ; 短軸長さ $\beta = \sqrt{1-\alpha^2}$
	界面面積	$S = \phi (4\pi r^2)$	ϕ	↑	$\frac{\alpha^{-2/3}}{2} \left[1 + \frac{\alpha^2}{2\beta} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} \right]$	←	
きのこ笠状	接触時間	$t = \eta (2r/v)$	η	↑	$\frac{1}{18} \left(\frac{\theta}{2} \right)^2 \left[\frac{b}{r} \right] \left[4 \left(\frac{r}{b} \right)^3 + 1 \right]^2$	$(3\alpha^{-2}/4+1)^{-1/3}$	$\alpha = b/a$ a ; キノコ笠長さ b ; キノコ笠高さ θ ; キノコ笠の曲率中心からキノコ笠を挟む角度 r ; 気泡半径
	界面面積	$S = \phi (4\pi r^2)$	ϕ	↑	$\frac{1}{6} \left[\frac{b}{r} \right]^2 \left[4 \left(\frac{r}{b} \right)^3 + 1 \right]$	←	

表3.2 リスト出力形式

タイトル

TIME=00 , NSTEP=00 , DELT=00 , IPIP=00 , PRES=00 , UL=00 , H=00

REG. NO. (J)	IVEL	IACCOMP	IVANSH	ISHAPE	XB Y(1,J)	UR Y(2,J)	RB Y(3,J)	UB	TIMEP	DELTP	PHI(%)
1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
.
.
.
N _R	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
									(AVERAGE)=		---

表3.3 HYBAC2P用 J C L の例 例

PROJECT.LIBRARY.TYPE(MEMBER) : POD1BA3.HYBAC2P.DATA(¥HYB2P1)

OFF LEVEL : 01.15

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----+-----8
001 //POD1BA3B JOB (FBR),HYBAC2P,MSGCLASS=X,NOTIFY=POD1BA3,MSGLEVEL=(1,0),
001 // CLASS=B,TIME=0005
001 //FORT EXEC FORTECLG,
001 //* PARH.FORT='NOS,ISN(D),LANGLVL(77),DEBUG(SUBCHK,ARGCHK,UNDEF)',
001 // PARH.FORT='NOS,LANGLVL(77),ISN(D)',
001 // REGION.FORT=512K,PARH.LKED='NOLIST,NOMAP,LET'
001 //FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=Z
001 /*FORT.SYSIN DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT
001 //FORT.SYSIN DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@CALPRE)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@CDVAL)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@CIRCQ)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@CLDV)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@COEFF)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@DIFFUS)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@DIFINI)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@DISTR1)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@GRF)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@HYBAC2)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@INARRY)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@INICON)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@INIFAC)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@INIT)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@INPUT)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@HATPRP)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@OUTPUT)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@PINIT)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@PSIETA)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@PUMP)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@RDCARD)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@RGKTC)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@TRAN)
001 // DD DISP=SHR,DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.FORT(@@TRISLV)
001 //LKED.SYSPRINT DD SYSOUT=X
001 //LKED.SYSUT1 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(20,2),RLSE)
001 //LKED.SYSLIB DD DSN=SYS2.FORTLIB,DISP=SHR
001 //GO.FT01F001 DD DISP=(NEW,DELETE),SPACE=(TRK,(5,5),RLSE),UNIT=SYSDA,
001 // DCB=(RECFM=FB,LRECL=72,BLKSIZE=2880)
001 /*+++++
001 //GO.SYSIN DD DSN=POD1BA3.HYBAC2P1.DATA(RUNB01),DISP=SHR
001 //GO.FT06F001 DD SYSOUT=X
001 /*GO.FT11F001 DD DUMMY
001 //GO.FT11F001 DD UNIT=SYSDA,DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(TRK,(100,50),RLSE),
001 // DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200),DSN=POD1BA3.aRUNB01.PLOT
001 //

```

表3.4 HYBAC2Pのプロット用データ番号

No	データ名称	単位	NA	NB	NC	
1	気泡の位置	m	1	仮想領域No	-	1
2	気泡の相対速度	m/s	2	↑	-	1
3	気泡の半径	m	3	↑	-	1
4	気泡の速度	m/s	4	↑	-	1
5	水素溶解割合	%	5	↑	-	1
6	ポンプの回転数	rps	6	ポンプNo.	-	
7	ポンプの質量流量	kg/s	7	↑	-	
8	ポンプのヘッド	m	8	↑	-	

- 注意) 1. HYBAC2Pコードを使用して、ポンプモデルを用いた場合のみ、
NA=6、7、8が指定可能である。
2. NC=1を指定すると横軸に気泡の位置 [=リーク点からの移動距離] (単位:m) が設定される。

表3.5 X-Yデータのプロット用データ番号

NA	NB	NC
指定パラメータにマイナス(-)を付ける	= -99 (固定)	X-Yデータファイルの指定ユニット番号

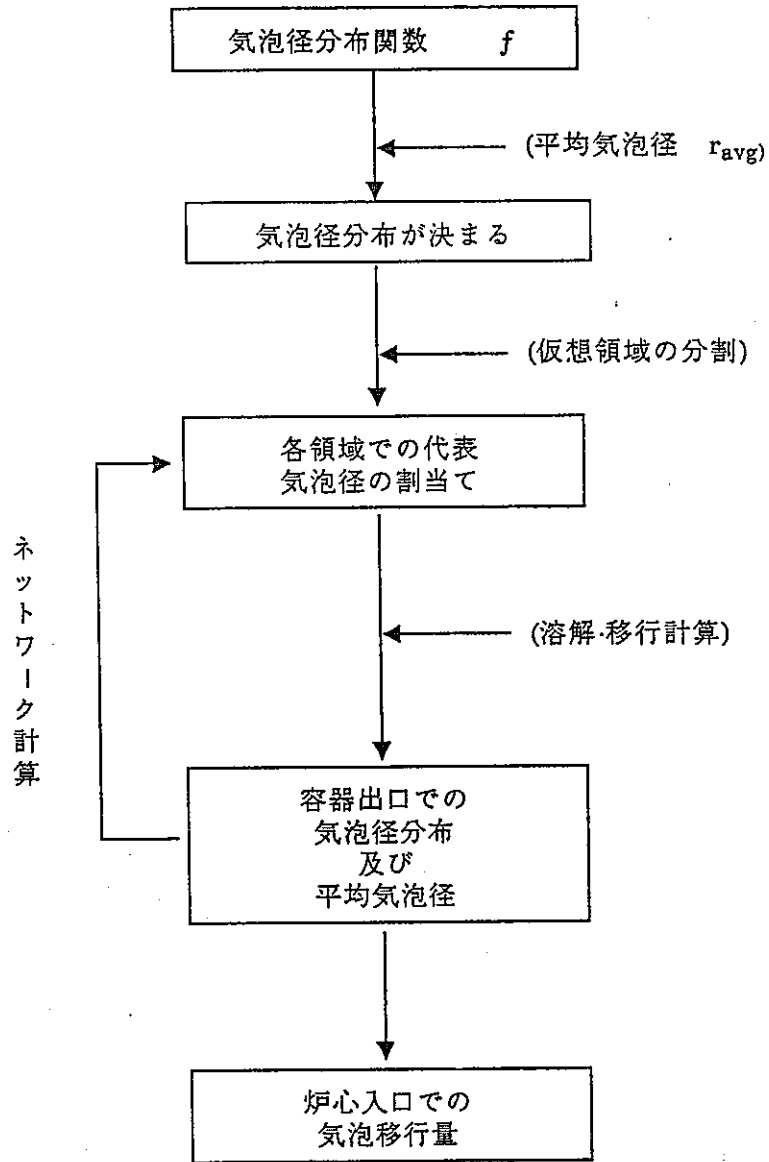


図3.1 計算の流れ

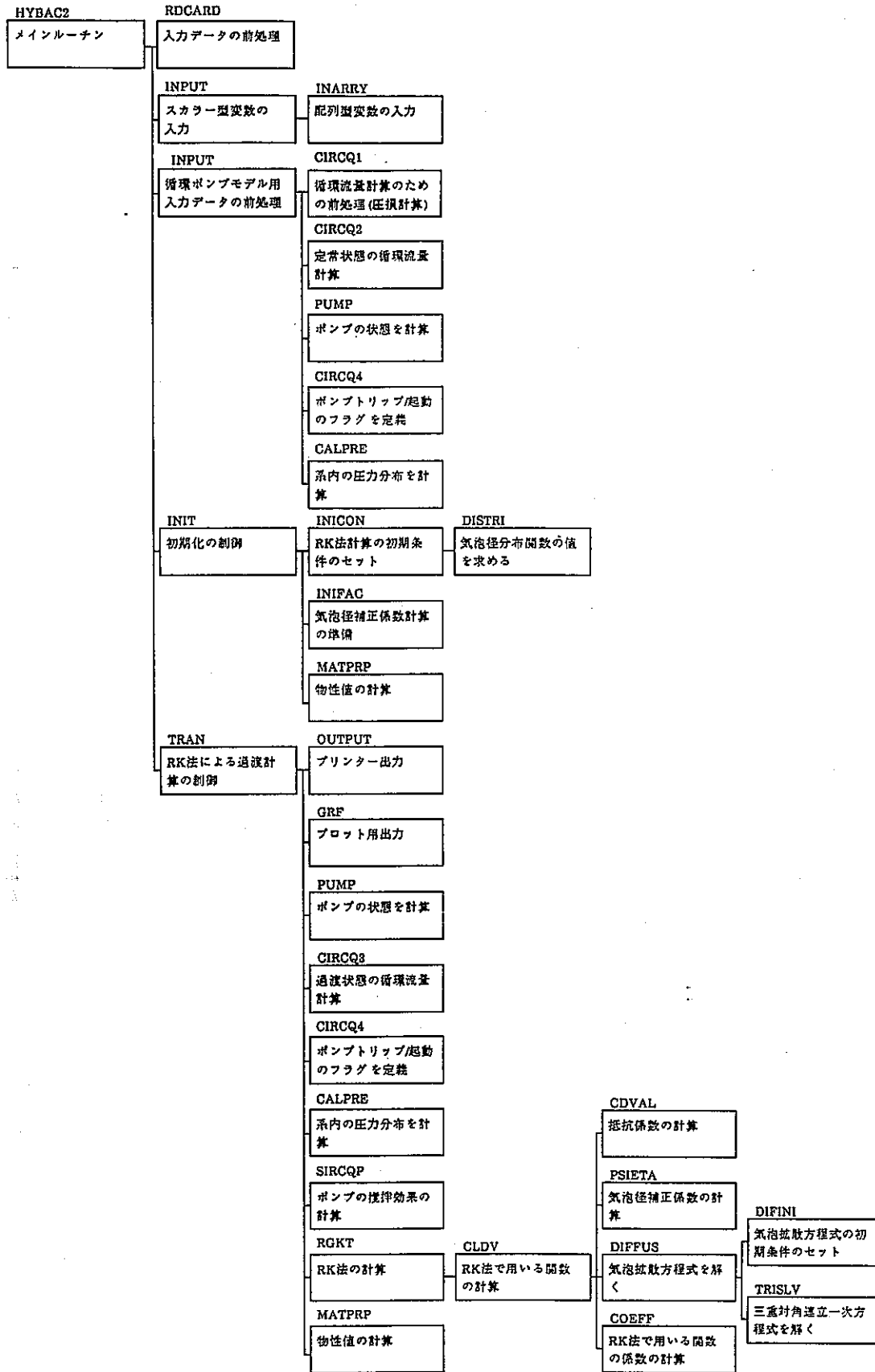
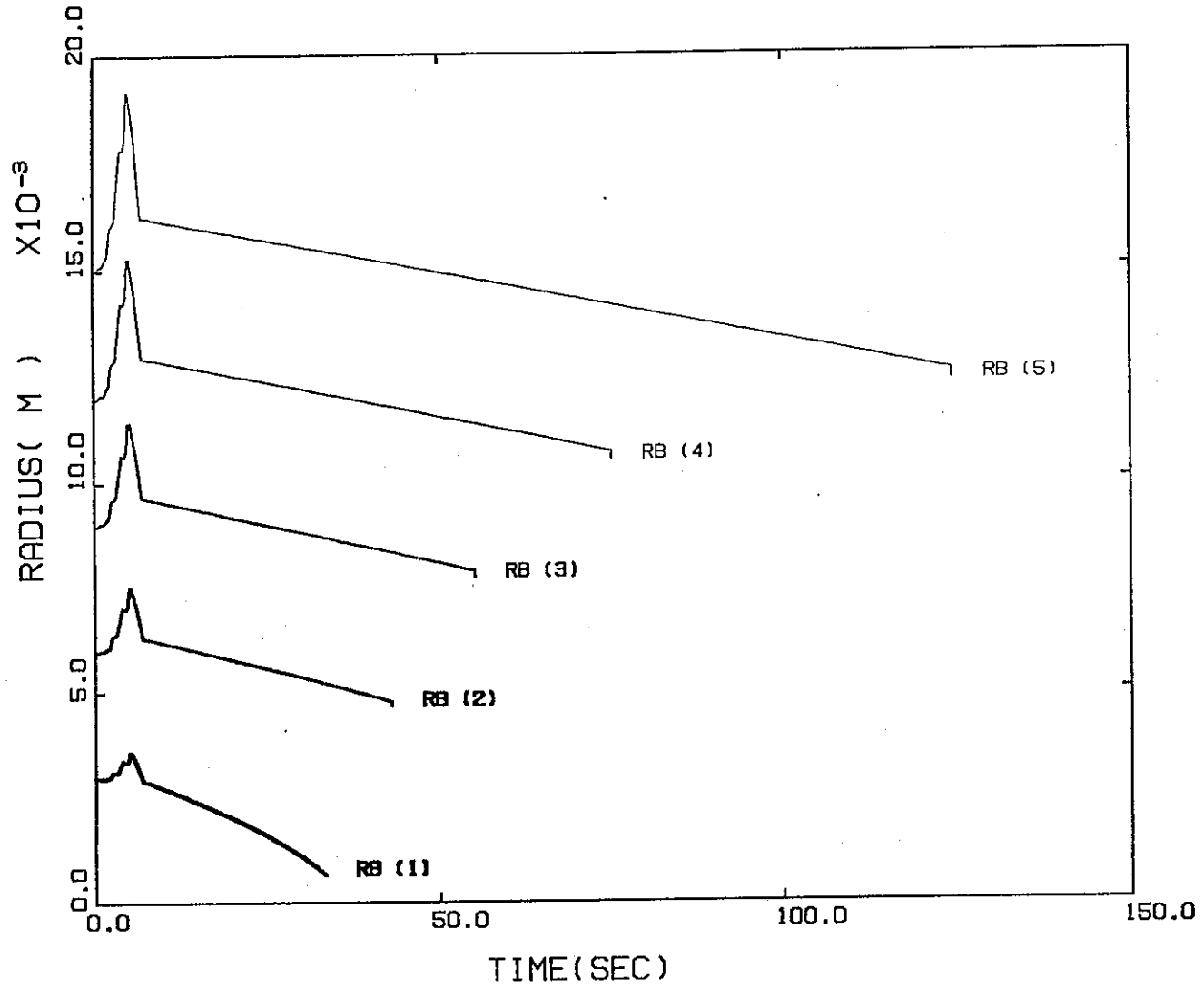


図3.2 プログラム構成



HYBAC2P ANALYSIS (RUN101)
FIG 1.1 H2 BUBBLE RADIUS (M)

図3.3a プロット出力例 (形式-1)

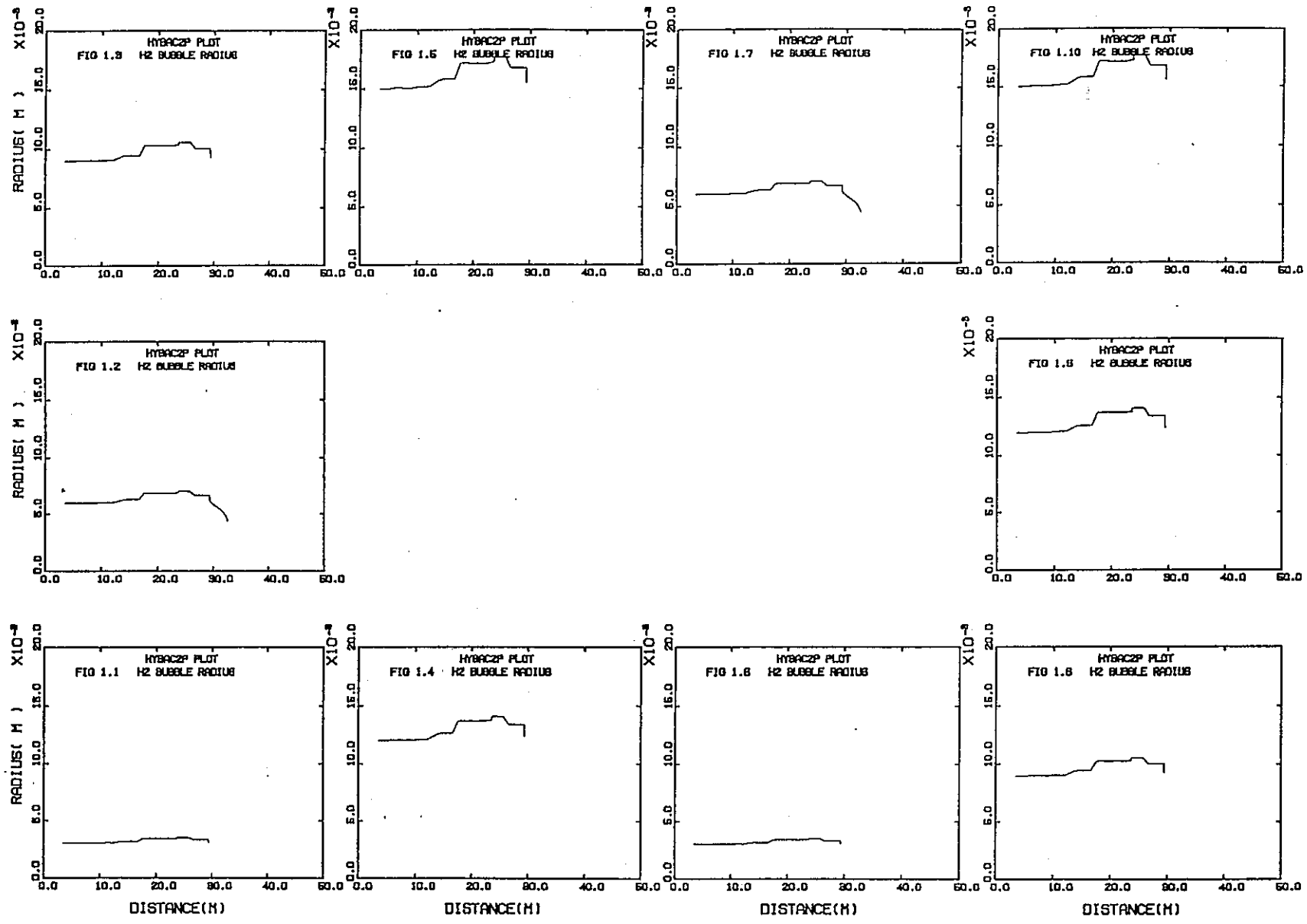


図3.3b プロット出力例 (形式 - 2)

4. 試計算及び考察

4.1 プラント概要

試計算での解析対象は、燃料にプルトニウム・ウラン混合酸化物（MOX）燃料を用いた電気出力150万kWクラスで、2005～2010年着工を前提として各種革新技术を導入した2次Na系削除型FBR実用炉プラント^[6]とした。

プラント体系を図4.1に、基本仕様を表4.1に示す。本プラントの1次系は配管の引き廻しが約63m弱で、Na温度は相対的に高く炉心の入口／出口で395／550℃の設計である。またループ内でのNa流速も、38Bのホットレグ及びミドルレグで管内流速8m/s、36Bのコールドレグで管内流速10m/sと相対的に早い。蒸気発生器は外胴径／高さが3.2／20mの一体貫流直管型無液面式を、循環ポンプはコールドレグ設置の単段片吸込型メカニカルポンプを採用している。

4.2 計算モデル

解析で使用した計算モデルを図4.2に、各PIPEでのプラントデータを表4.2に示す。プラント体系は径の異なる箇所毎に計20個の配管でモデル化しており、ホットレグの入口配管をPIPE1、蒸気発生器内の伝熱管管束部をPIPE5、循環ポンプをPIPE12、コールドレグの出口配管をPIPE20とする。蒸気発生器（PIPE5）の上端を水リーク点と仮定し、そこで初期気泡半径は0.26、0.75、3.0、7.5、15.0mmの5種類を入力した。コールドレグ配管（PIPE20）の出口は原子炉容器の下部プレナム部に設置され、そこに到達した水素気泡が炉心部へ流入するものとする。計算に用いた拡散係数には、推定式^[1]より得たNa温度395℃に対する値： $6.74 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ を使用した。

4.3 入力データ

計算は表4.3に示す全12ケースを実施した。そのうちのRUN7の入力データを表4.4に示す。ここでは前報^[1]の解析例を参考に、仮想領域は5つで、注入水素量に $QG (= 5.713 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$ を入力（IINICN=1）し、気泡拡散方程式の境界条件はICASE=0とする。気泡拡散方程式のメッシュ分割数は5つで等分割とし、その廻り時間は0.005secとした。気泡滞留時間の補正係数には1.0、気液反応係数には 0 sec^{-1} 、気泡から離れたところでの気体濃度には $0 \text{ mol}/\text{m}^3$ を与える。気泡形状の補正係数はIPEOP=1で計算し、気泡楕円のアスペクト比に0.1、キノコの高さに 10^{-3} m 、曲率中心からキノコを見こむ角に1.05を用いる。また、初期気泡速度は全ての仮想領域とも $UB = 0 \text{ m}/\text{s}$ とする。

ここでは、コード改良により新たに追加した計算機能を確認することを主目的とするため、リファレンスに対するパラメータを、トリップ時間 (TRIPT)、圧損計算法の選択フラグ (IC)、ポンプでの気液界面の増倍係数 (PHIMAX)、及びポンプ回転数のべき数 (N) とした。RUN 1 のリファレンスでは、トリップ時間に300秒 (気泡が炉心部に至るまでの間ポンプトリップを生じないように考慮した値) を与え、配管各部での循環流量を内部計算 (IC=0) で求め、ポンプでの気泡界面積増倍係数PHIMAXに1 (攪拌効果を考慮しない値) を、さらにポンプ回転数のべき数Nに1 (攪拌効果の回転数への依存性を考慮しない値) を与えた。

4.4 結果・考察

計算結果を表4.5及び図4.3~4.10に示す。表にはSG出口、ポンプ出口、炉心入口での気泡半径と気泡溶解割合のデジタル値を示した。以下で、各パラメータの計算結果に及ぼす影響を検討する。

4.4.1 初期気泡半径の影響

RUN 1における水素気泡半径の時間履歴を図4.3aに示す。図中の細線から太線は、それぞれ気泡半径の大から小に対応する。解析結果からは、気泡径が小さいほど早く溶解して気泡が消滅する (気泡径の減少する勾配からも判るように、溶解速度は気泡径が小さいほど大きい) ことが確認できる。

気泡の溶解割合の時間履歴を図4.3bに示す。図からは、気泡半径が小さい (太線) と溶解割合は極短時間でゼロから100%まで変化するが、気泡半径が大きい (細線) と溶解割合の時間的変化は緩慢になることがわかる。この理由は、以下のように説明できる。

球状気泡の体積Vは、半径rを用いて $4\pi r^3/3$ で表せる。気体の密度 ρ を一定 (すなわち圧力一定) と仮定すれば、気泡中のガスの質量Wは ρV に等しいから、気泡質量の減少割合は、Wを時間で微分して以下で表せる。

$$\partial W / \partial t = \rho \partial V / \partial t = 4\pi \rho r^2 \partial r / \partial t \quad (4.1)$$

上式を変形すれば、半径rの時間的な変化量が得られ、

$$\partial r / \partial t = \rho^{-1} \{ (4\pi r^2)^{-1} \partial W / \partial t \} = -\phi / \rho \quad (4.2)$$

となる。 $4\pi r^2$ は球状気泡の表面積に等しいから、上式の {} 内は気泡界面から溶解す

る水素の質量流束 ϕ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) に相当すると考えられる。すなわち、気泡半径の減少割合は界面からの質量流束に比例することがわかる。本解析条件では、気泡と流体の相対速度が入力データのしきい値 ($=0.01\text{m/s}$) よりも大きくなるため、気泡からの物質移動は液体輸送支配のモデル^[1]が用いられる。この場合には、気泡からの物質移動量: N_{AVG} を次式で計算する。

$$N_{\text{AVG}} = C_0 (4D/\pi t)^{0.5} \quad (\text{単位: moles}/\text{m}^2\text{s}) \quad (4.3)$$

C_0 は液体表面の水素濃度、 D は拡散係数、 t は気液接触時間である。気泡と液体の相対速度を v とすれば、接触時間 t は r/v に比例することから、

$$-\partial r / \partial t = \phi / \rho \propto N_{\text{AVG}} (v/r)^{0.5} \quad (4.4)$$

と書くことができる。上式より、相対速度が大きい気泡径が小さいほど、気泡半径の減少速度、すなわち溶解速度は大きくなることがわかる。

図4.3cに気泡半径、図4.3dに溶解割合の位置的な変化を示す。計算ではホットレグ配管入口(炉容器出口)からコールドレグ出口(炉容器入口)までをモデル化しており、前者の位置が基準点となるため、気泡の発生点(SG上部)は16.6mの位置となる。初期気泡半径が3mm以下では気泡はSG内で全て溶解するが、7.5mmではポンプ出口付近で消滅する。初期半径が15mmの場合には、約6.4mmの気泡が路容器入口に到り、そこでの溶解割合は約49.3%である。以上の計算結果から、気泡はSG内で溶解する効果が最も大きいと言える。SG内は下降流であり、流路断面積も広いいため流体の流速も配管部に比べ相対的に小さい。気泡は浮力により上部への速度ベクトルが生じるために、気泡の滞在時間が長くなり、SG内での溶解が顕著になったと考えられる。このことは、流速が早い配管内では気泡の溶解する効果を期待できないことを示唆している。ポンプ出口では気泡径が急激に小さくなっているが、これは、流体の圧力が高くなることに起因した現象である。

4.4.2 界面積増倍係数の影響

初期半径15mmにおける気泡径及び溶解割合の位置的な変化を、RUN1とRUN2で比較してそれぞれ図4.4a、図4.4bに示す。図の細線はリファレンスRUN1で、太線は界面増倍係数(第2.3節2.23式を参照のこと)のみを1から10に変えたRUN2を表す。解析結果では気泡半径及び溶解割合ともポンプ入口までは一致しているが、ポンプ入口以降では両ケースに違いが見られ、RUN2の方が半径は小さく、溶解割合は大きくなることからわかる。表

4.3に示す溶解割合のデジタル値を見ると、RUN 2はポンプ入口で47.8%から55.6%と7.8%大きく、炉心入口で49.3%から57.0%と7.7%大きくなっている。界面積増倍係数の効果はポンプ部でのみ生じることから、ポンプ出口以降では溶解割合の差はほとんど変化しないと考えられる。

4.4.3 ポンプ回転数のべき数の影響

初期半径15mmにおける気泡径及び溶解割合の位置的な変化を、RUN 2～RUN 4で比較してそれぞれ図4.5a、図4.5bに示す。図の細線～太線は、べき数（第2.3節(2.27)式を参照のこと）のみをRUN 2の1からRUN 3の0.5、RUN 4の2.0に変えた場合に対応しているが、計算結果としては有意な違いが見られない。この理由は、本計算条件では流体は定格流量で流れているため、(2.27)式のポンプの回転数 N は1となることから、そのべき数の効果が生じないことに起因する。すなわち、べき数はポンプの回転数が変化するポンプコーストダウン時や、部分負荷運転条件の場合などに顕著になるものと考えられる。

4.4.4 ポンプトリップの影響

初期半径15mmにおける水素気泡径及び溶解割合の位置的な変化を、RUN 1、RUN 5～6で比較してそれぞれ図4.6a、図4.6bに示す。図の細線～太線は、それぞれトリップ時間をRUN 1の300秒（本計算条件では、トリップ無しに相当）からRUN 5の12秒、RUN 6の5秒に変えた場合に対応している。トリップの無い場合には、リーク後17.9秒で半径6.43mmの気泡が炉心入口に到達するが、トリップ時間12秒では、気泡は半径5.78mmでPIPE15内、すなわち逆止弁手前位置、に留まることがわかる。5秒でトリップを起こすと、水素気泡はPIPE 5、すなわちSG内、に留まり、流体の流れに逆らって上昇するようになる。上昇開始時の気泡半径は11.1mmとなった。以上の結果より、炉心部への気泡流入を阻止するためには、より早急なトリップ操作が必要であることがわかる。

4.4.5 圧損計算法の影響

RUN 1、RUN 7、RUN10で比較した初期半径15mmにおける気泡径及び溶解割合の位置的变化をそれぞれ図4.7a、図4.7bに示す。図の細線～太線は、圧損計算フラグICをそれぞれRUN 1のゼロ（＝圧力分布は計算せず、入力データで与えるヘッドのみを考慮して循環流量を計算）、RUN 7の1（＝圧力分布は計算せず、入力データで与える形状圧損のみを考慮して循環流量を計算）、RUN10の2（＝系内の循環流量、圧力分布を2.2節のモデルにより計算）と変えたものである。RUN 1とRUN 7を比較すると、後者の方が最終の気泡半径は大きく、溶解割合は小さくなるが、両者の違いは小さいことがわかる。RUN 1とRUN10を比

較すれば、後者の方が最終的な気泡半径は小さく、溶解割合は大きくなる。また気泡半径の位置的な変化も顕著となる。前者は静圧のみにより気泡径が変化するモデルであるが、後者は静圧に加えポンプの吐出圧及び流体の流れによる圧力も考慮したモデルであることから生じたものである。計算結果からは、系内の圧力分布を考慮した方が、気泡の溶解効果を期待できると言える。

圧損計算フラグを1として、ポンプのトリップ時間を変えた場合の比較を図4.8a、図4.8bに、同様に圧損計算フラグを2とした場合を図4.9a、図4.9bに示す。圧損計算フラグをゼロとした図4.6aと図4.8aを比べると、トリップ5秒では両者ともSG内に気泡が留まるが、トリップ12秒では前者は炉心部入口の手前に気泡が留まり、後者は炉心部まで気泡が到ることがわかる。SG内の流速を調べると後者の方が大きくなっているため、この違いから生じたものと言える。図4.6aと図4.9aを比較すると、トリップ5秒では前者はSG内に気泡が留まり、後者は炉心部入口の手前に気泡が留まる。トリップ12秒では、前者は炉心部入口の手前に気泡が留まるが、後者は炉心部へ気泡が到ってしまう。この違いも流速の影響として説明することができる。

4.4.6 ポンプ特性

ポンプの回転数と循環流量の時間的履歴の一例をそれぞれ図4.10a、図4.10bに示す。図の太線から細線は、それぞれトリップを300秒（本計算条件では、トリップ無しに相当）、12秒、5秒と変えたRUN 7、RUN 8、RUN 9の計算結果である。5秒でトリップするケースでは、気泡はSG内で一部溶解するが、残りの気泡はポンプコストダウンによる緩やかな流れによってSG内から配管部に到り、下降管であるPIPE 9の中で気泡が停止する。このケースでは、ポンプの回転数や循環流量は5秒で急激に減少を始めるが、気泡の停止までの時間が長くなるため、ポンプの過渡変化は50秒程度まで継続している。12秒でトリップするケースでは、気泡の一部がポンプ出口を出た直後でトリップが生じることから、ポンプコストダウン初期の比較的流れの早い時期にそれらの気泡が炉心部に到るため、トリップ後数秒で計算は終了する。従って、図ではコストダウン曲線が短くなる。トリップなしでは、気泡はリーク後14秒強で炉心部に到るため、ポンプのコストダウンは見られず、計算時間は他のケースに比べ最も短くなる。

4.5 まとめ

以上の結果をまとめると以下のようなになる。

4.5.1 気泡の溶解挙動

半径が小さいほど気泡の溶解挙動は顕著（溶解速度が大きく）になる。これは半径を r 、気泡と液体の相対速度を v とした場合、半径の減少割合 ($-\partial r / \partial t$) が $(v/r)^{0.5}$ に比例することで説明される。

気泡の溶解効果は、流速が小さく、浮力と流れが逆向きになる SG 内で特に顕著となるが、逆に流速が早い配管内では十分な溶解効果を期待できない。

4.5.2 ポンプでの溶解挙動

ポンプを通過する気泡に対しては、界面積増倍係数が大きいほど溶解効果が大きくなる。ポンプ回転数のべき数は、ポンプの回転数が変化するポンプコストダウン時や、部分負荷運転条件の場合などに顕著になると予測できる。

4.5.3 トリップモデル

SG を出た気泡は炉心部へ到る可能性が高いが、より早急なトリップ操作により気泡の流入を抑制することが可能である。本試計算では、現象的に妥当と考えられるポンプ特性（コストダウン曲線など）が得られた。

4.5.4 圧力分布計算モデル

ポンプの吐出圧や流体の流れによる圧力変化を考慮したモデルを用いると、気泡半径の位置的な変化は顕著で、最終的な気泡半径は小さく、溶解割合は大きくなったことから、系内の圧力分布を考慮した方が気泡の溶解効果を期待できると考えられる。

表4.1 プラントの基本仕様

○原子炉（実用化クラス）

出力規模： 150万kWe（4ループ構成）

○熱輸送系（1ループ当たり）

SG型式： 一体貫流無液面式（1基）

SG寸法： 外胴径/高さ 3.2/20 m

伝熱管： 密着2重管/直管型（改良9Cr-1Mo鋼）

定格温度： Na側 入口/出口 550/395 °C

定格流量： Na側 17.2×10^6 kg/hr

配管口径： ホットレグ 38B（管内流速8m/s）

コールドレグ 36B（管内流速10m/s）

循環ポンプ： コールドレグ設置（単段片吸込型）

表4.2 実用炉のプラントデータ

(1/2)

PIPE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na温度 (°C)	550	←	←	←	550 395	395 395	←	←	←	←
Na圧力 (MPa)	0.185	0.15	0.125	0.10	0.10 0.20	0.20 0.19	0.19 0.16	0.16 0.16	0.16 0.19	0.19 0.19
流路長 (m)	7.00	5.95	2.325	1.375	13.65	1.375	2.325	2.996	5.000	1.8288
内径 (mΦ)	0.9652	0.8826	2.226	2.102	2.004	2.102	2.226	0.8826 (38B)	←	←
Na流速 (m/s)					1.81	1.61	1.43	9.11	←	←
流れ方向 (-)	1	0	1	0	-1	0	1	0	-1	0
Na流量 (kg/h)	17.2 ×10 ⁶	←	←	←	←	←	←	←	←	←

(2/2)

PIPE	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Na温度 (°C)	395 395	←	←	←	←	←	←	←	←	←
Na圧力 (MPa)	0.19 0.14	0.15	0.88 0.875	0.875 0.80	0.80 0.76	←	0.76 0.76	0.76 0.80	0.80 0.80	0.80 0.81
流路長 (m)	6.500	2.70	2.200	7.30	1.600	1.500	1.600	9.80	2.725	2.50
内径 (mΦ)	0.8826 (38B)	2.000	0.8922 (36B)	←	←	←	←	←	←	←
Na流速 (m/s)	9.11	1.77	8.92	←	←	←	←	←	←	←
流れ方向 (-)	1	1	0	1	0	0	0	-1	0	-1
Na流量 (kg/h)	17.2 ×10 ⁶	←	←	←	←	←	←	←	←	←

表4.3 計算パラメータ表

ケース	トリップ時間 TRIPT (s)	圧損計算フ ラグ IC(-)	気泡界面積増倍 係数 PHIMAX(-)	ポンプ回転数の 力係数 N(-)
RUN 1	300	0	1	1
RUN 2	300	0	10	1
RUN 3	300	0	10	0.5
RUN 4	300	0	10	2.0
RUN 5	12	0	1	1
RUN 6	5	0	1	1
RUN 7	300	1	1	1
RUN 8	12	1	1	1
RUN 9	5	1	1	1
RUN 10	300	2	1	1
RUN 11	12	2	1	1
RUN 12	5	2	1	1

表4.4 試計算用入力データ

```

HYBAC2 CALCULATION (JITUYO RO, RUN07)
*
/*IINICN*/ 1 /*ICASE*/ 0
*
/*NR*/ 5 /*NP*/ 20 /*N*/ 5
*
/*IPIPO*/.5
*
/*NPRINT*/ 500 /*NGRF*/ 2000
*
/*NMAX*/ 100
*
/*DELT*/ 5.E-4 /*TEND*/ 40.0 /*TBEF*/ 0.005
*
/*TAU*/ 1.0 /*URCRT*/ 0.01 /*QL*/ 5.708 /*D*/ 6.74E-10
/*AK*/ 0.0 /*CO*/ 0.0 /*X0*/ 0.0
*
/*IPEOP*/ 1
/*ASPECT*/ 0.1 /*HEIGHT*/ 0.001 /*THETAC*/ 1.05
*
/*QG*/ 5.713E-3 /*ERA VG*/ 1.0E-3
*
*----- PUMP DATA -----
/*MPUMP*/ 1
/*I-PUMP1*/ 12 1 0 1
/*I-PUMP2,IC,ITRMAX*/ 1 50
/*R-PUMP1,TRIPT*/ 300.0
/*R-PUMP2,FAIMAX,PUMPN*/ 1.00 1.00
/*R-PUMP3*/ 5000.0 4886.048 13.95 94.0
/*R-PUMP4*/ 20.0 0.0
/*R-PUMP5*/ 856.00 1.E-5
*ARRAY CARDS
*
*IG
  1 0 1 0 -1
- 0 1 0 -1 0
  1 1 0 1 0
  0 0 -1 0 -1
*ALP-
  7.00 5.90 2.325 1.375 13.65 1.375 2.325 2.996 5.00 1.8288
  6.50 2.70 2.200 7.300 1.600 1.500 1.600 9.800 2.725 2.5000
*AP
  0.732 0.612 3.892 3.470 3.154 3.470 3.892 0.612 0.612 0.612
  0.612 3.142 0.625 0.625 0.625 0.625 0.625 0.625 0.625 0.625
*T
  4*550.0 472.5 15*395.0
*P
  0.185 0.15 0.125 0.10 0.15 0.195 0.175 0.16 0.175 0.19
  0.165 0.521 0.8775 0.8375 0.78 0.78 0.76 0.78 0.80 0.805
*RJ
  2.0E-5 5.0E-4 1.0E-3 5.0E-3 1.0E-2 2.0E-2
*UB
  5*0.0
*FAC
  0.1 0.2 0.2 0.2 0.3
*----- PUMP ARRAY DATA -----*
*FPIP
  20*0.005
*EPIP
  0.45 0.650 1.600 1.600 1.600
  1.600 1.600 1.600 0.650 0.650
  0.650 0.050 0.360 0.650 0.650
  0.200 0.00 0.650 0.650 0.650
  1.0
*DPIP
  0.9652 0.8826 2.226 2.102 2.004
  2.102 2.226 0.8826 0.8826 0.8826
  0.8826 2.000 0.8922 0.8922 0.8922
  0.8922 0.8922 0.8922 0.8922 0.8922
    
```

表4.5 実用炉の計算結果

(1 / 1 2)

R U N 1													
仮箱領域	初期径 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				炉心入口 ³⁾			
		半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s
I	0.26	-	100.	(0.59)	0.34	-	-	-	-	-	-	-	-
II	0.75	-	100.	(0.99)	0.63	-	-	-	-	-	-	-	-
III	3.0	-	100.	(5.26)	3.53	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	7.5	3.91	85.8	13.65	8.92	-	100.	(33.7)	12.9	-	-	-	-
V	15.0	12.2	46.6	13.65	9.48	7.51	47.8	36.37	14.5	6.43	49.3	65.60	17.9

(2 / 1 2)

R U N 2													
仮箱領域	初期径 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				炉心入口 ³⁾			
		半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s
I	0.26	-	100.	(0.59)	0.34	-	-	-	-	-	-	-	-
II	0.75	-	100.	(0.99)	0.63	-	-	-	-	-	-	-	-
III	3.0	-	100.	(5.26)	3.53	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	7.5	3.91	85.8	13.65	8.92	-	100.	(33.7)	12.9	-	-	-	-
V	15.0	12.2	46.6	13.65	9.48	7.11	55.6	36.37	14.7	6.09	57.0	65.60	17.9

1) PIPE5 の出口部, 2) PIPE12 の出口部, 3) PIPE20 の出口部

(3 / 1 2)

R U N 3 .													
仮箱領域	初期半径 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				炉心入口 ³⁾			
		半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s
I	0.26	—	100.	(0.59)	0.34	—	—	—	—	—	—	—	—
II	0.75	—	100.	(0.99)	0.63	—	—	—	—	—	—	—	—
III	3.0	—	100.	(5.26)	3.53	—	—	—	—	—	—	—	—
IV	7.5	3.91	85.8	13.65	8.92	—	100.	(33.7)	12.9	—	—	—	—
V	15.0	12.2	46.6	13.65	9.48	7.12	55.6	36.37	14.7	6.09	57.0	65.60	17.9

(4 / 1 2)

R U N 4													
仮箱領域	初期半径 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				炉心入口 ³⁾			
		半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s
I	0.26	—	100.	(0.59)	0.34	—	—	—	—	—	—	—	—
II	0.75	—	100.	(0.99)	0.63	—	—	—	—	—	—	—	—
III	3.0	—	100.	(5.26)	3.53	—	—	—	—	—	—	—	—
IV	7.5	3.91	85.8	13.65	8.92	—	100.	(33.7)	12.9	—	—	—	—
V	15.0	12.2	46.6	13.65	9.48	7.12	55.6	36.37	14.7	6.09	57.0	65.60	17.9

1) PIPE 5 の 出口部, 2) PIPE 12 の 出口部, 3) PIPE 20 の 出口部

(5 / 1 2)

R U N 5													
仮積領域	初期径 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				PIPE15			
		半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s
I	0.26	-	100.	(0.59)	0.34	-	-	-	-	-	-	-	-
II	0.75	-	100.	(0.99)	0.63	-	-	-	-	-	-	-	-
III	3.0	-	100.	(5.26)	3.53	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	7.5	3.91	85.8	13.65	8.92	1.91	93.2	36.37	16.0	0.47	99.9	55.11	37.1
V	15.0	12.2	46.6	13.65	9.48	7.43	49.5	36.37	16.6	5.78	64.4	57.65	49.0

(6 / 1 2)

R U N 6													
仮積領域	初期径 mm	PIPE5											
		半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s
I	0.26	-	100.	(0.59)	0.34	-	-	-	-	-	-	-	-
II	0.75	-	100.	(0.99)	0.63	-	-	-	-	-	-	-	-
III	3.0	-	100.	(5.26)	3.53	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	7.5	1.64	98.9	11.10	12.7	-	-	-	-	-	-	-	-
V	15.0	11.1	59.4	10.15	12.9	-	-	-	-	-	-	-	-

1) PIPE5 の出口部, 2) PIPE12 の出口部, 3) PIPE20 の出口部

(7 / 1 2)

R U N 7													
仮積領域	初期 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				炉心入口 ³⁾			
		半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s	半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s	半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s
I	0.26	-	100.	(0.75)	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-
II	0.75	-	100.	(1.25)	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-
III	3.0	-	100.	(6.60)	3.55	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	7.5	4.74	74.8	13.65	7.13	2.70	80.6	36.37	11.5	2.27	80.6	36.38	11.5
V	15.0	12.8	38.2	13.65	7.50	7.94	38.5	36.37	11.8	6.81	39.9	65.60	14.5

(8 / 1 2)

R U N 8													
仮積領域	初期 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				炉心入口 ³⁾			
		半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s	半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s	半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s
I	0.26	-	100.	(0.75)	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-
II	0.75	-	100.	(1.25)	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-
III	3.0	-	100.	(6.60)	3.55	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	7.5	4.74	74.8	13.65	7.13	2.70	80.6	36.37	11.6	2.27	80.6	36.38	11.5
V	15.0	12.8	38.2	13.65	7.50	7.94	38.5	36.37	11.9	6.77	41.0	65.60	16.7

1) PIPE5 の出口部, 2) PIPE12 の出口部, 3) PIPE20 の出口部

(9 / 1 2)

R U N 9													
仮損領域	初期 半径 mm	S G 出口 ¹⁾				PIPE9							
		半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s	半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s	半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s
I	0.26	—	100.	(0.79)	0.36	—	—	—	—	—	—	—	—
II	0.75	—	100.	(1.29)	0.64	—	—	—	—	—	—	—	—
III	3.0	—	100.	(6.83)	3.55	—	—	—	—	—	—	—	—
IV	7.5	3.80	86.7	13.65	9.14	—	100.	(23.7)	30.0	—	—	—	—
V	15.0	11.0	60.1	13.65	13.1	7.32	83.8	24.98	47.9	—	—	—	—

(1 0 / 1 2)

R U N 1 0													
仮損領域	初期 半径 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				炉心入口 ³⁾			
		半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s	半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s	半径 mm	溶解 割合 %	移動 距離 m	時間 s
I	0.26	—	100.	(0.24)	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—
II	0.75	—	100.	(0.45)	0.24	—	—	—	—	—	—	—	—
III	3.0	—	100.	(3.08)	1.65	—	—	—	—	—	—	—	—
IV	7.5	—	100.	(13.2)	6.95	—	—	—	—	—	—	—	—
V	15.0	10.4	66.7	13.65	7.44	4.62	75.8	36.37	11.8	3.91	77.0	65.60	14.5

1) PIPE5 の出口部, 2) PIPE12 の出口部, 3) PIPE20 の出口部

(1 1 / 1 2)

R U N 1 1													
仮積領域	初期半径 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				炉心入口 ³⁾			
		半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s
I	0.26	-	100.	(0.24)	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-
II	0.75	-	100.	(0.45)	0.24	-	-	-	-	-	-	-	-
III	3.0	-	100.	(3.08)	1.65	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	7.5	-	100.	(13.2)	6.95	-	-	-	-	-	-	-	-
V	15.0	10.4	66.7	13.65	7.44	4.48	75.8	36.37	11.8	3.72	90.1	65.60	16.5

(1 2 / 1 2)

R U N 1 2													
仮積領域	初期半径 mm	S G 出口 ¹⁾				ポンプ出口 ²⁾				PIPE18			
		半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s	半径 mm	溶解割合 %	移動距離 m	時間 s
I	0.26	-	100.	(0.24)	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-
II	0.75	-	100.	(0.45)	0.24	-	-	-	-	-	-	-	-
III	3.0	-	100.	(3.08)	1.65	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	7.5	-	100.	(12.9)	7.95	-	-	-	-	-	-	-	-
V	15.0	9.47	74.9	13.65	11.6	3.70	93.8	36.37	53.7	2.54	97.0	50.47	15.3

1) PIPE 5 の出口部, 2) PIPE12 の出口部, 3) PIPE20 の出口部

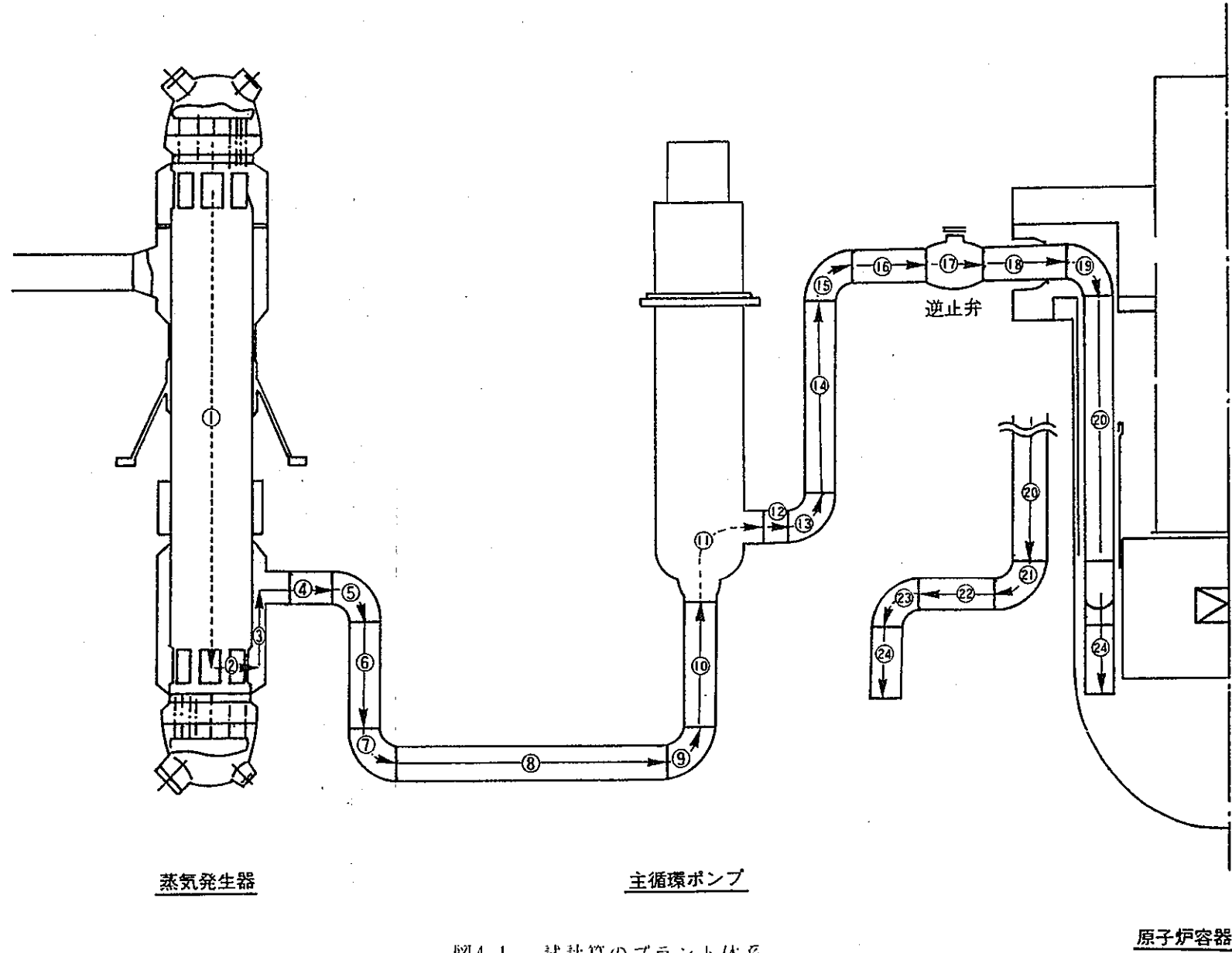


図4.1 試計算のプラント体系

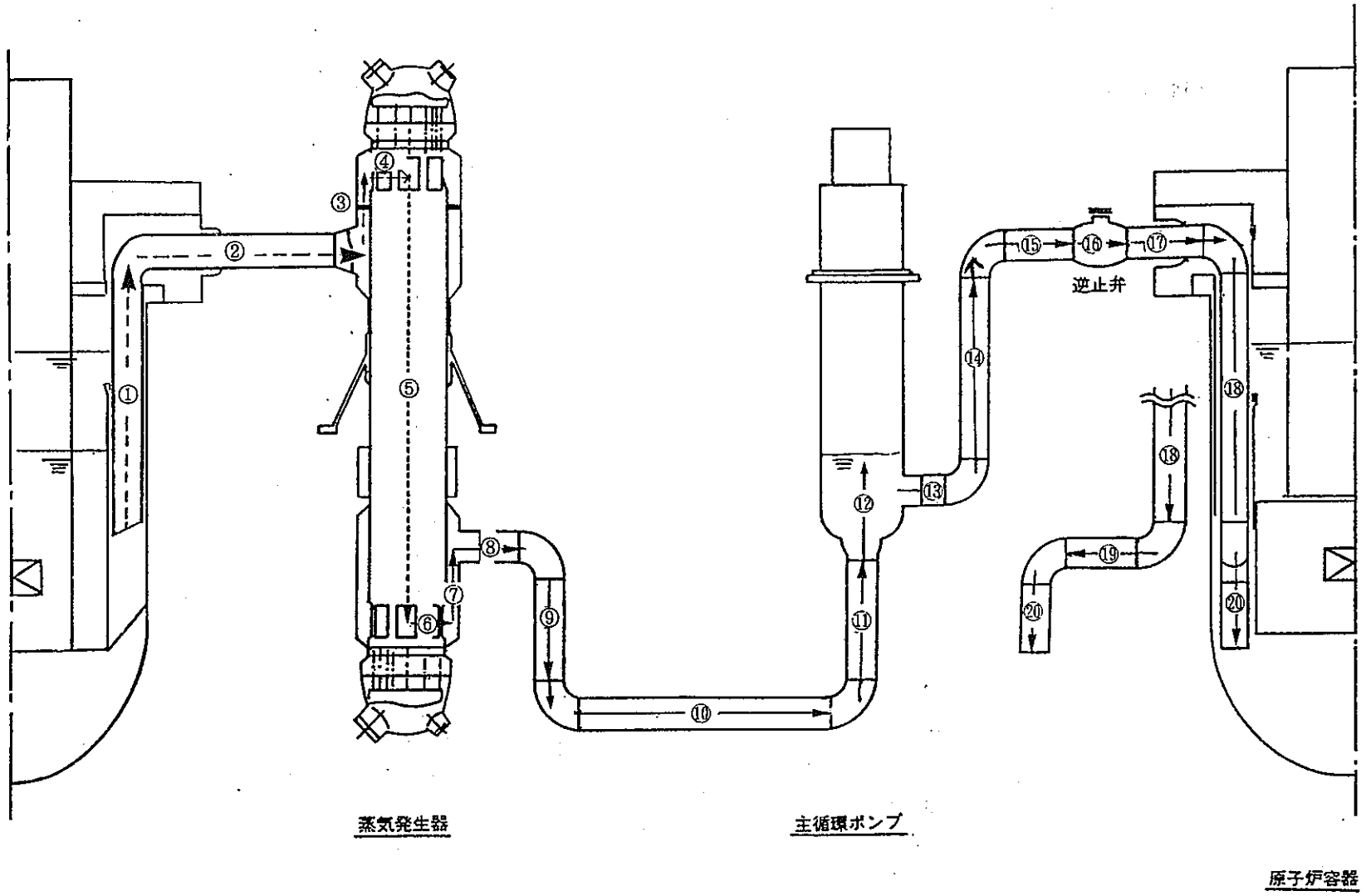


図4.2 試計算用計算モデル

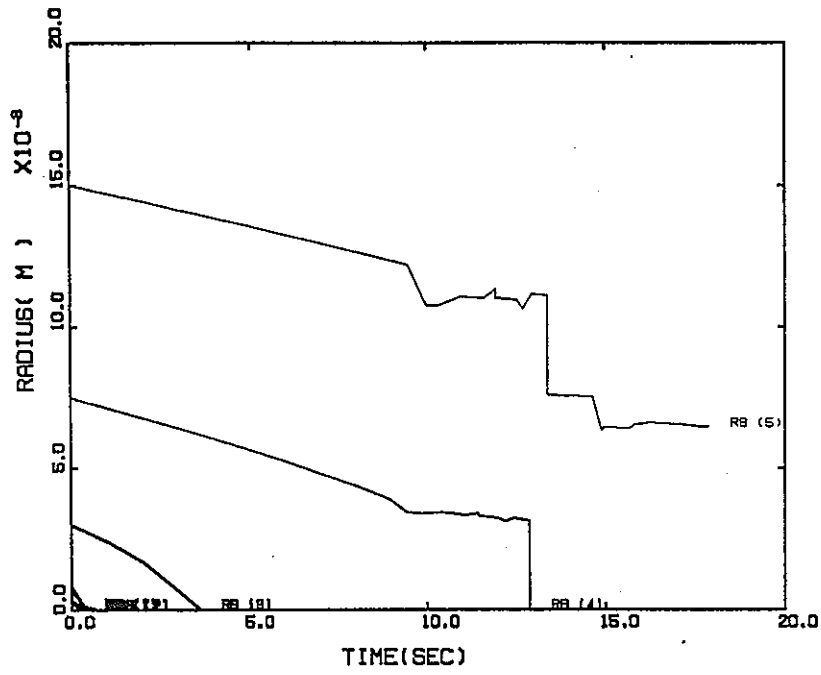


図4.3a 試計算結果：初期気泡半径の影響 (1/4)

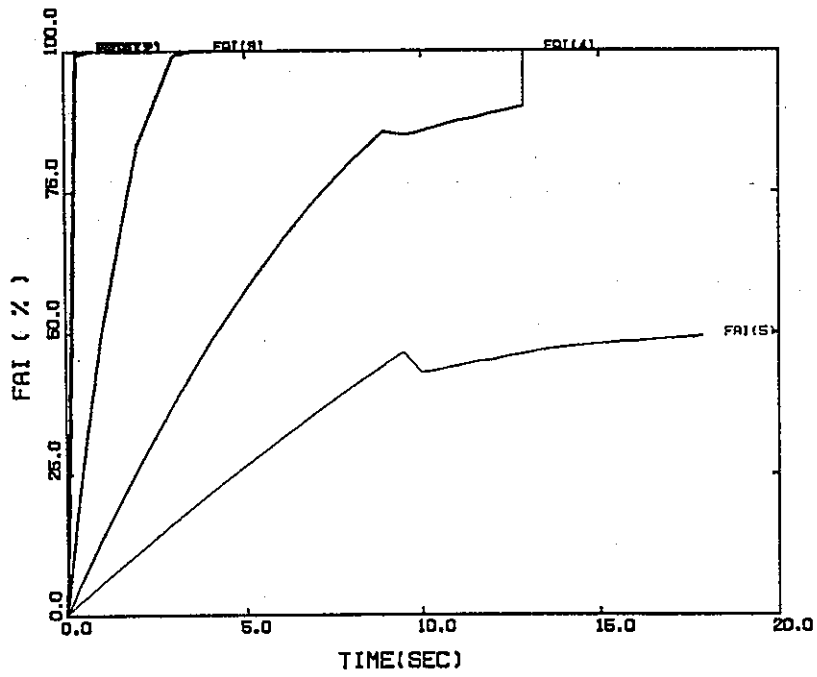


図4.3b 試計算結果：初期気泡半径の影響 (2/4)

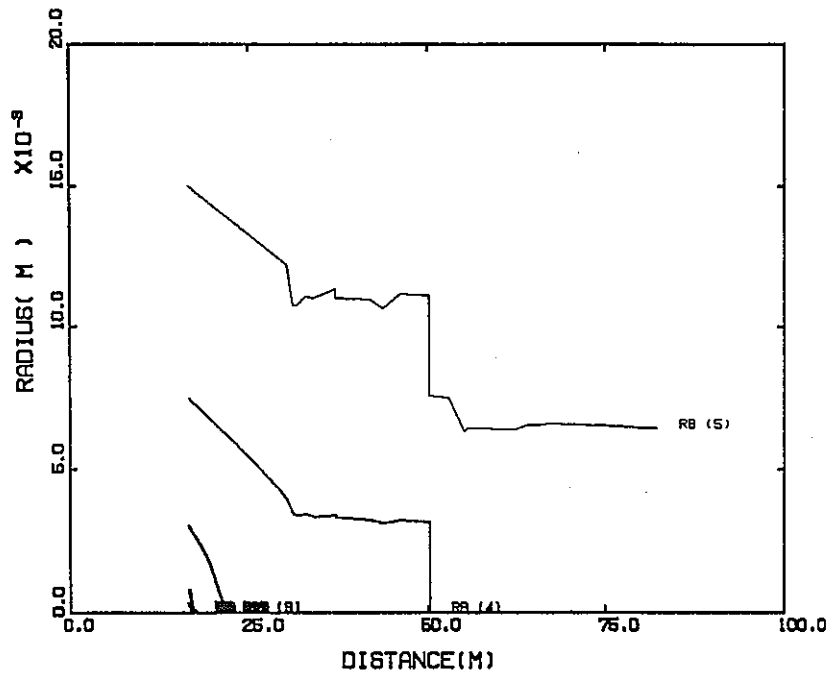


図4.3c 試計算結果：初期気泡半径の影響 (3/4)

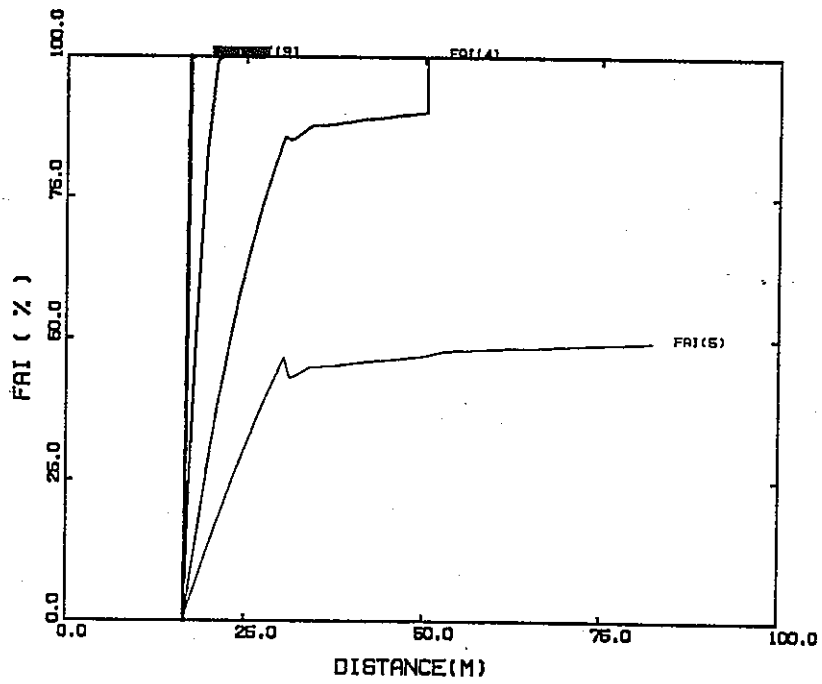


図4.3d 試計算結果：初期気泡半径の影響 (4/4)

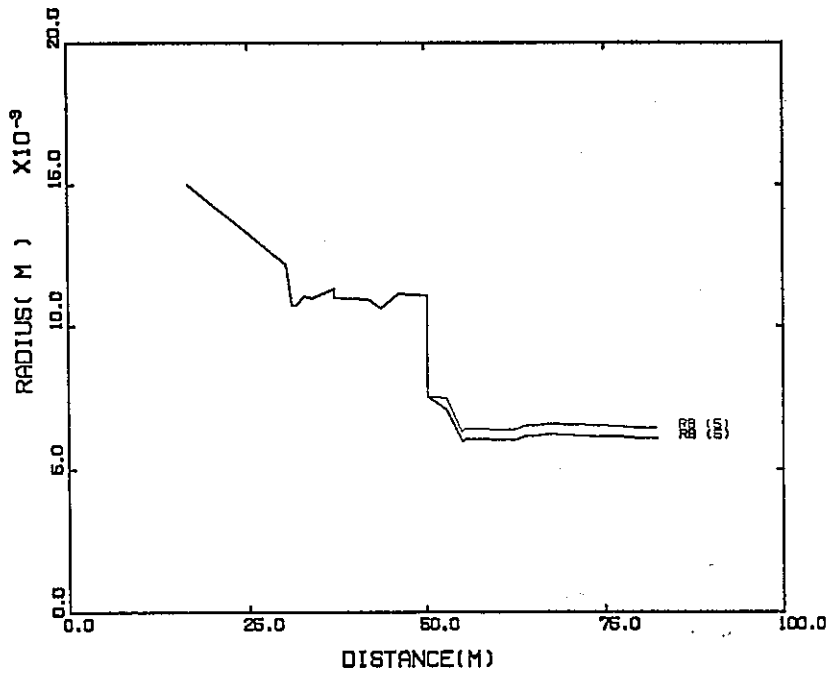


図4.4a 試計算結果：界面積増倍係数の影響 (1/2)

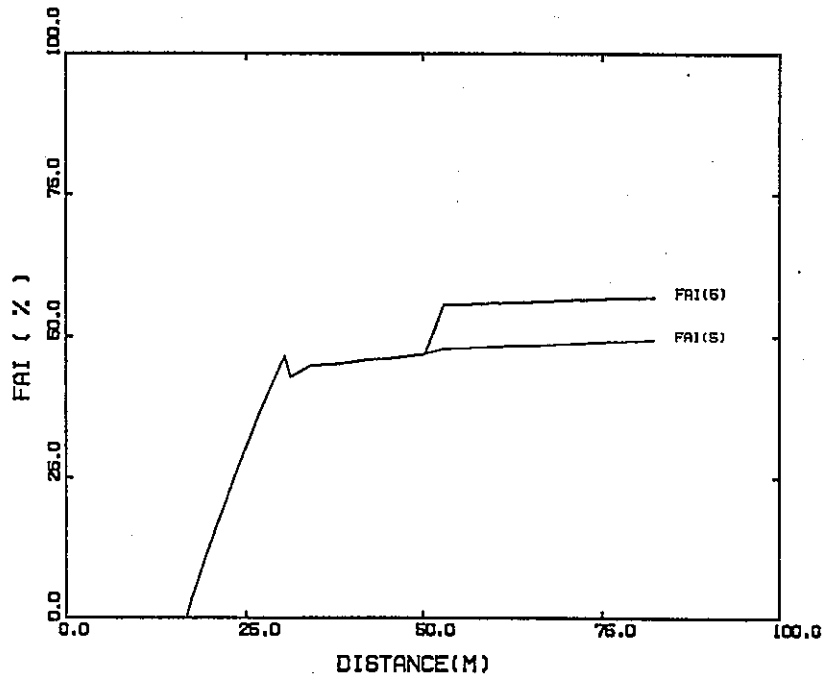


図4.4b 試計算結果：界面積増倍係数の影響 (2/2)

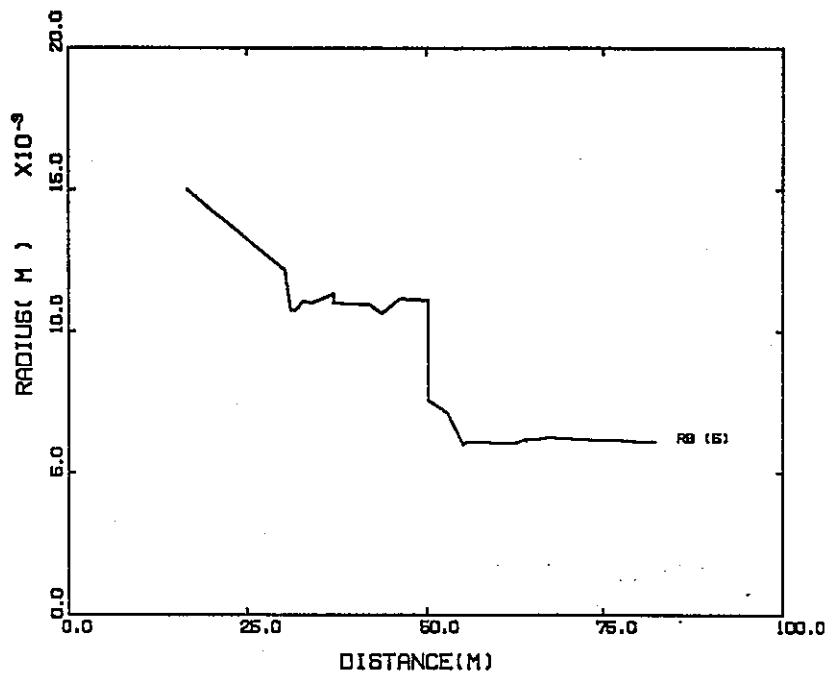


図4.5a 試計算結果：ポンプ回転数の力係数の影響 (1/2)

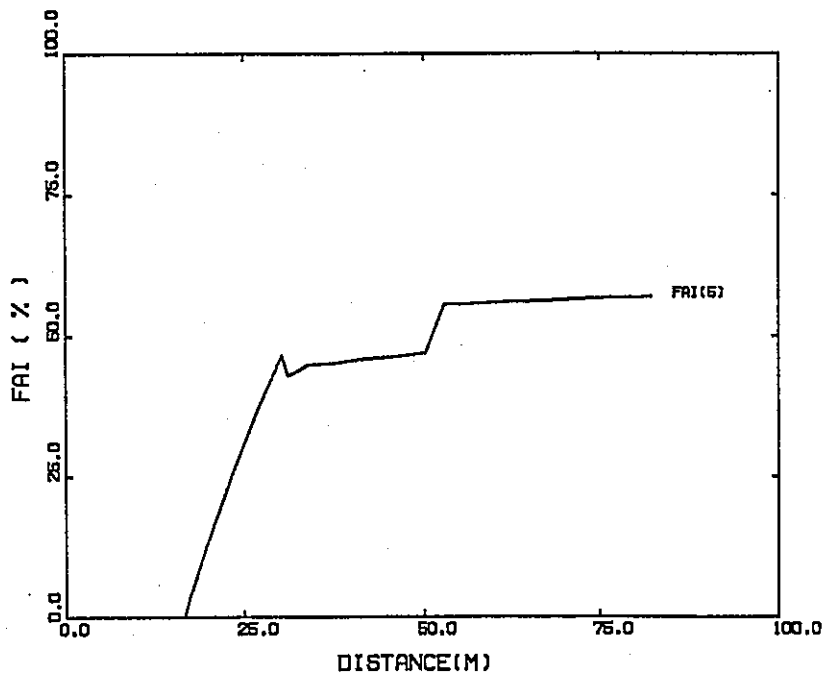


図4.5b 試計算結果：ポンプ回転数の力係数の影響 (2/2)

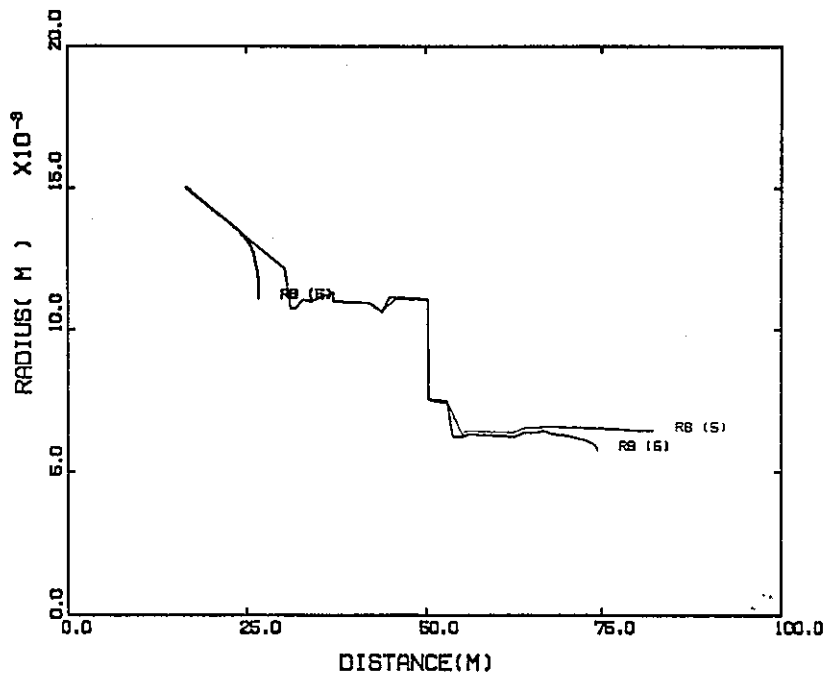


図4.6a 試計算結果：ポンプトリップの影響 (1/2)

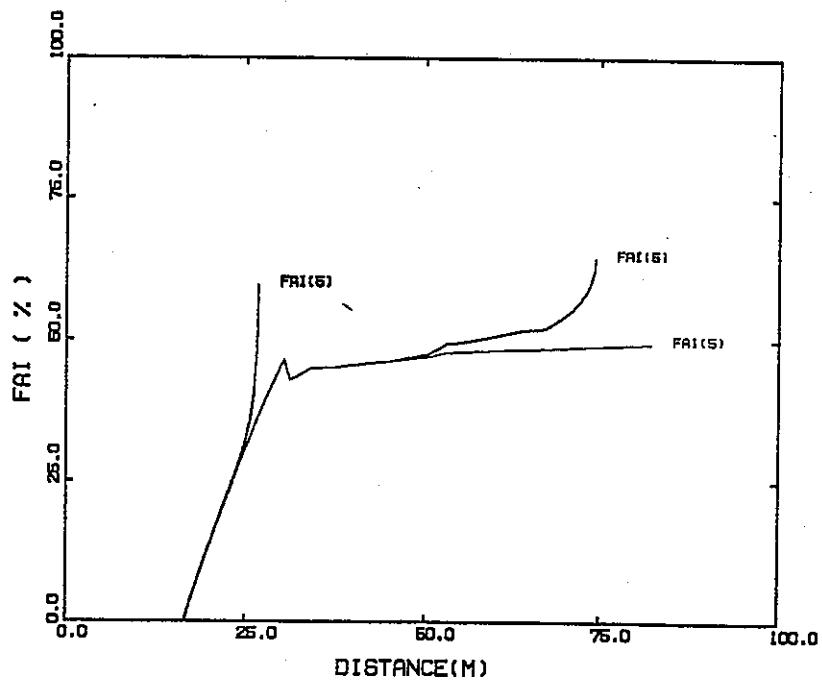


図4.6b 試計算結果：ポンプトリップの影響 (2/2)

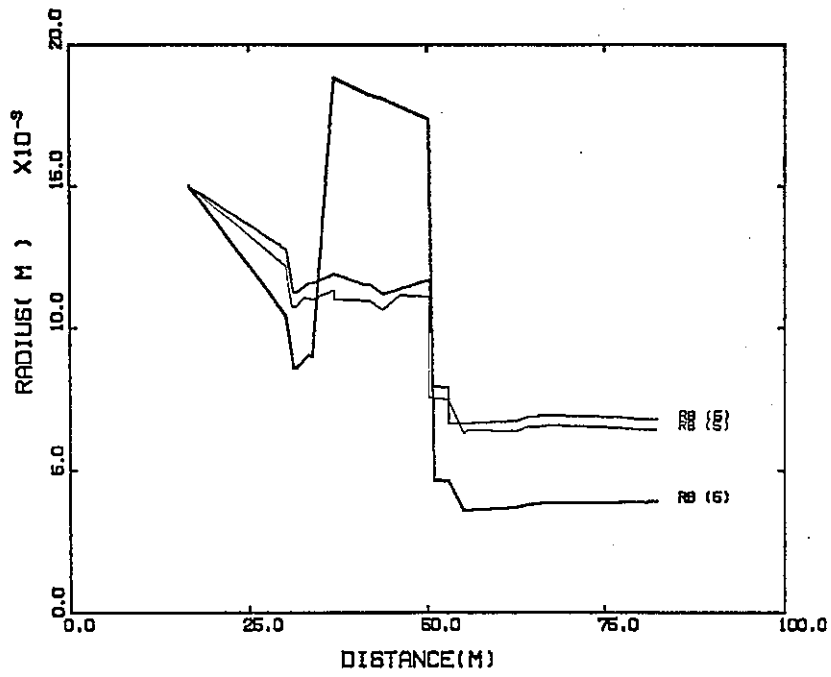


図4.7a 試計算結果：圧損計算法の影響 (1/2)

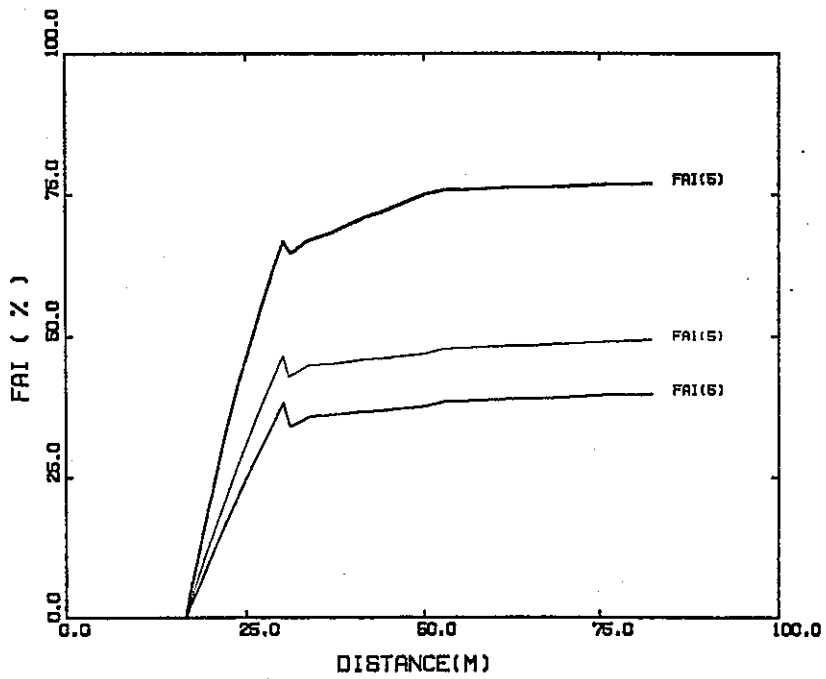


図4.7b 試計算結果：圧損計算法の影響 (2/2)

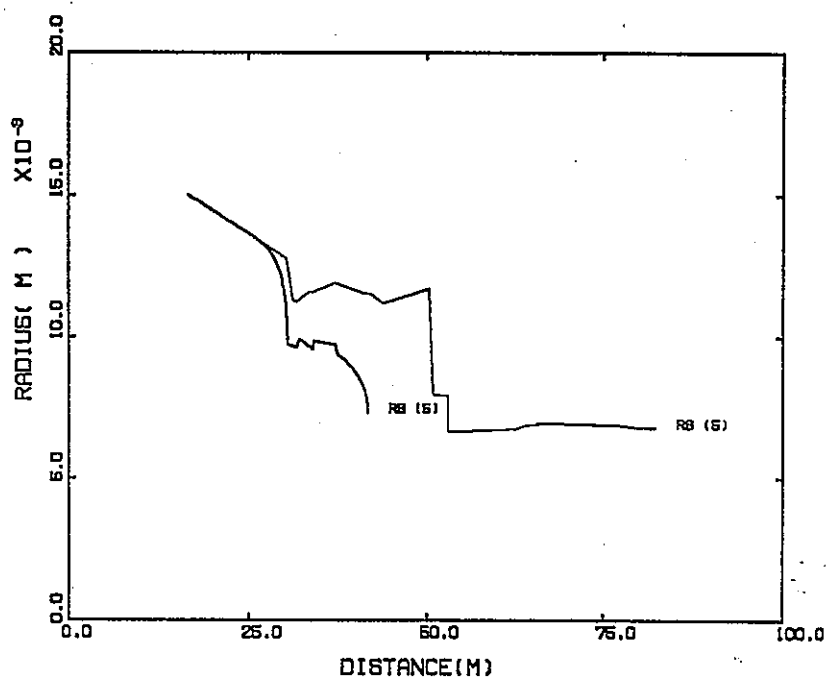


図4.8a 試計算結果：圧損計算法 (IC=1) の影響 (1/2)

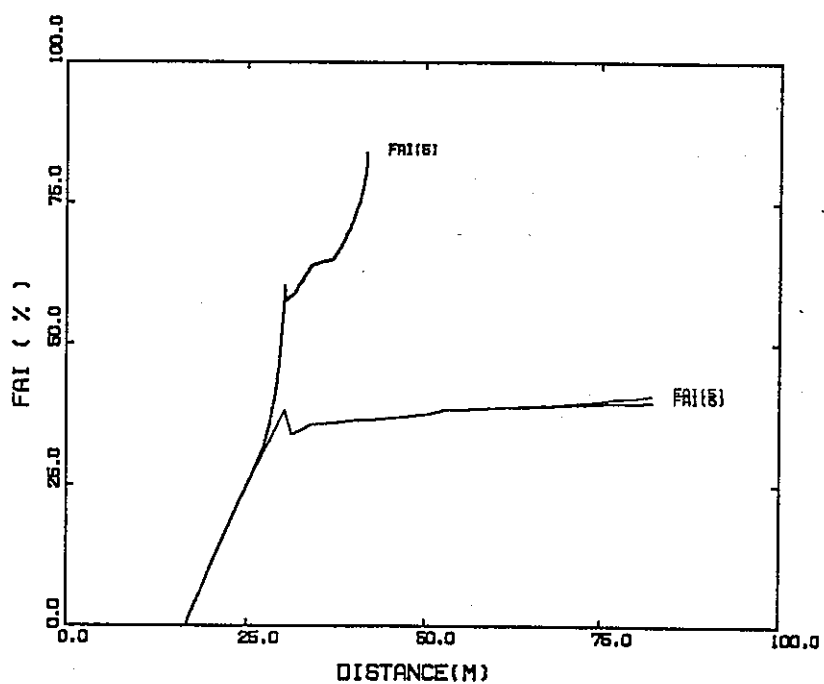


図4.8b 試計算結果：圧損計算法 (IC=1) の影響 (2/2)

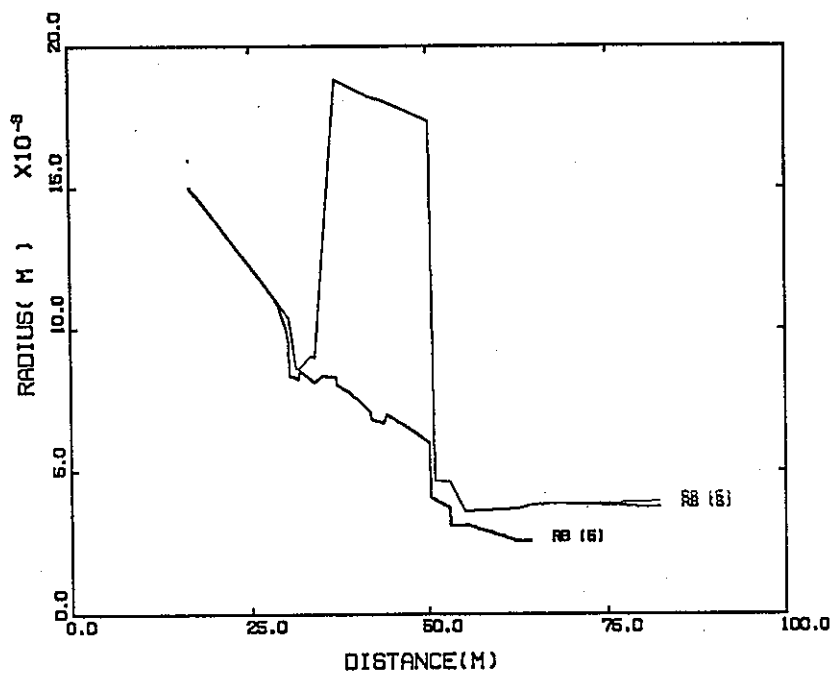


図4.9a 試計算結果：圧損計算法 (IC=2) の影響 (1/2)

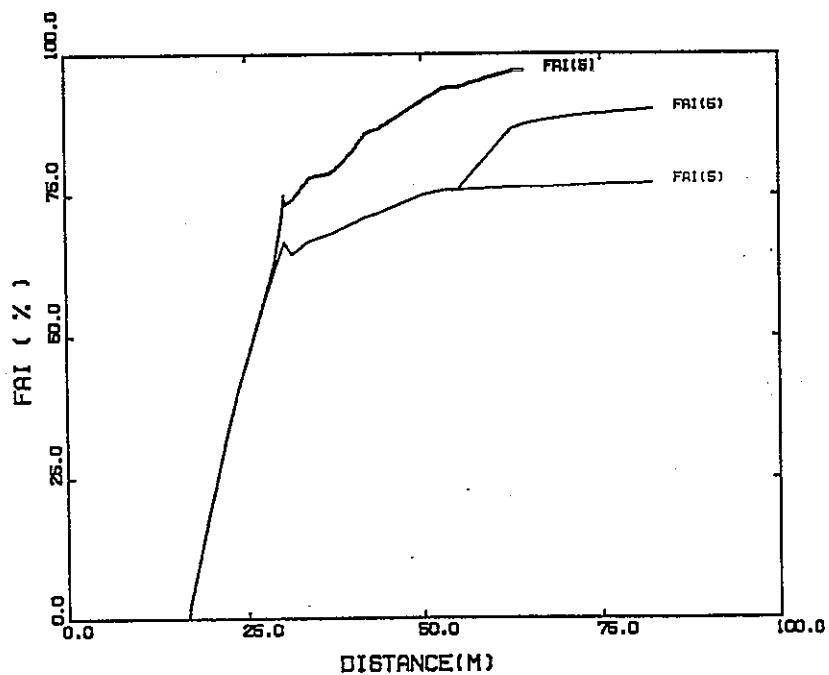


図4.9b 試計算結果：圧損計算法 (IC=2) の影響 (2/2)

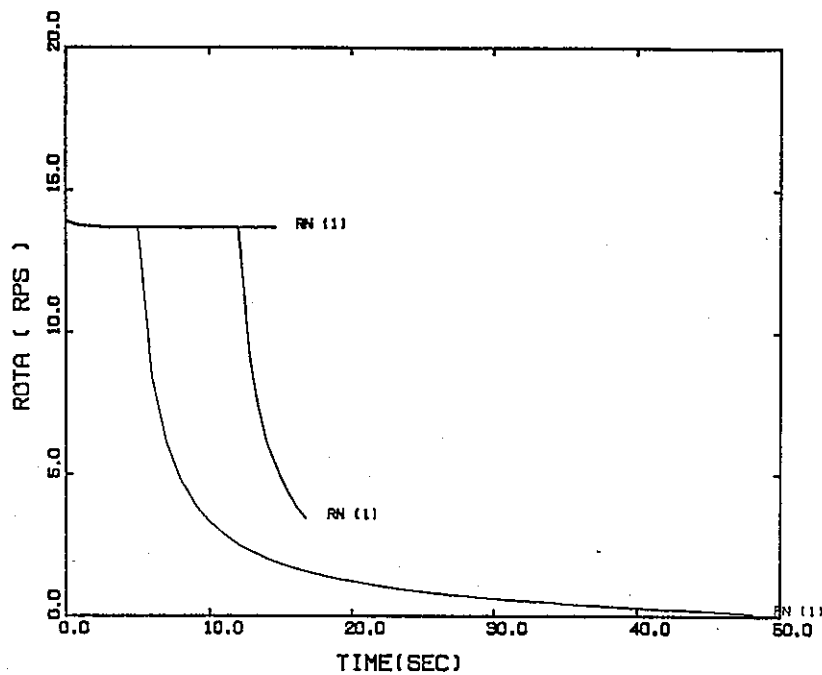


図4.10a 試計算結果：ポンプ特性 (1/2)

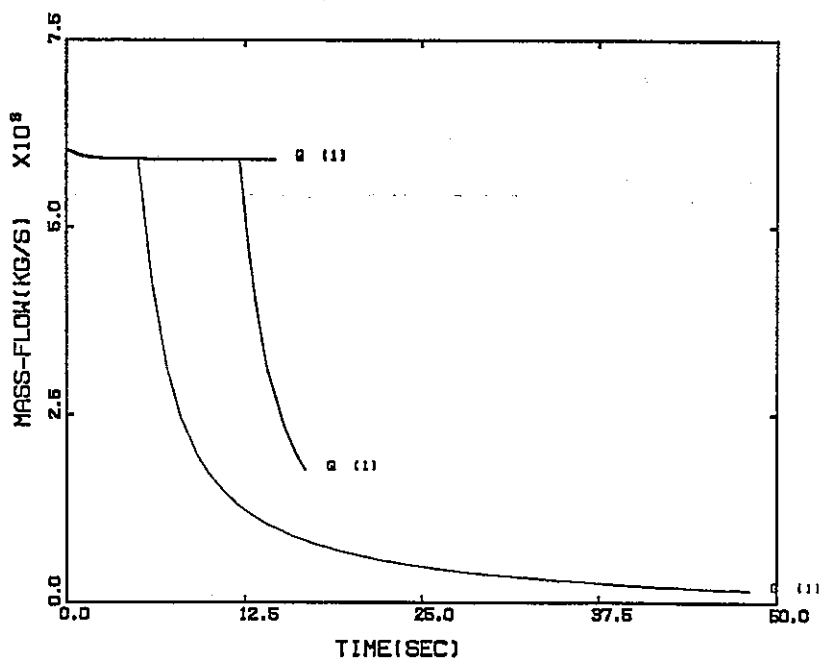


図4.10b 試計算結果：ポンプ特性 (2/2)

5. 結言

ナトリウム-水反応事故に対する安全評価項目の一つとして、炉心のボイド反応度に影響を及ぼす可能性のある水素気泡の冷却材中での溶解・移行挙動の解明がある。そのために開発された計算コードHYBAC2を高度化し、循環ポンプモデル、系内の循環流量や圧力分布計算モデル等を付加して実機への適用性を向上させたHYBAC2Pを開発した。

改良コードの解析機能を評価するために試算を実施し、計算結果の物理的な妥当性を確認するとともに、溶解挙動に及ぼすパラメータ（初期気泡半径、循環ポンプの運転状態、系内の圧力分布など）の影響を把握することができた。その結果から、以下のような結論が導ける。

S G内に発生する水素気泡に関しては、気泡径が小さいほど溶解速度が早いことから、リーク時の気泡径を極力小さくする設計上の工夫が必要である。また冷却系内では、流速が遅く、浮力と流れが逆向きになるS G内で特に溶解効果が顕著となるが、流速の早い配管内では十分な溶解効果を期待できずS Gを出た気泡は炉心部へ到る可能性が高い。しかしながら、より早期なトリップ操作により気泡の炉心部への流入を抑制できる。循環ポンプに関しては、気泡の攪拌により接触面積が拡大する（界面積増倍係数が大きくなる）と、気泡の溶解が促進されることから、循環ポンプは気泡の攪拌効果を十分に得られる設計（例えば機械式ポンプなど）とすることが望ましい。解析モデルに関しては、ポンプの吐出圧や流体の流れによる圧力変化を考慮すると、最終的な気泡径は小さく、溶解割合は大きくなったことから、系内の流況を現実的に考慮したモデルを用いた方が合理的な評価が可能となる。

なお本コードの計算モデルや機能に関しては、まだ実験的に検証されていないため、現段階で安全評価コードとして使用に耐えるとは言い難い。従って、今後コードの検証を積極的に進めていくとともに、モデルの更なる高度化を経て、安全評価のための解析ツールとして整備する必要がある。具体的な項目としては、気泡の溶解速度（拡散係数）を定めるための基礎試験による検証、過去に行われた50MWSGでの注水素/注水試験データによる検証、気泡の相互作用（分裂・合体）モデル、配管の分岐・合流点における計算モデル、微小・小～大リークまでを通して計算できるモデルの付加等が挙げられる。

参考文献

- [1] 浜田、田辺、「2次系削除プラント安全評価手法の開発 -水素気泡溶解挙動評価コードの開発と検証-」、PNC ZN9410 91-274 (1991.5)
- [2] 浜田、田辺、「2次系削除型FBR用水素気泡溶解挙動評価コードの開発」、日本原子力学会 1993年春の年会 F50 (1993.3)
- [3] 「高速増殖炉もんじゅ発電所 原子炉設置許可申請書 本文及び添付書類 (一～十一)」、(1986.11)
- [4] B. Gal-Or and H. E. Hoelscher, "A Mathematical Treatment of the Effect of Particle Size Distribution on Mass Transfer in Dispersions", A. I. Ch. E. Journal, 1966, Vol. 12, No. 3, pp499-508
- [5] B. Gal-Or and W. Resnick, "Mass transfer from gas bubbles in an agitated vessel with and without simultaneous chemical reaction", Chemical Engineering Science, 1964, Vol. 19, pp653-663
- [6] 三菱原子力工業(株)、「FBRプラント設計研究 実用化炉に関する設計研究 役務 -2次系削除プラント-」、PNC SJ2214 89-003(2) (1989.7)

謝 辞

本作業を実施するにあたり、入力データの作成、解析を実施して頂いた
原子力システム(株)小野功氏に感謝致します。