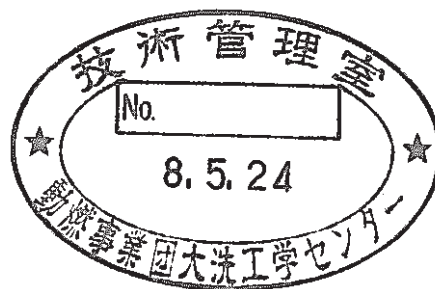


LEAPコード用反応ジェットコードの開発設計

1996年3月



株式会社 日立製作所

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)

1996年3月

LEAPコード用反応ジェットコードの開発設計

齋藤義則 (*), 床井博見 (*), 池田孝志 (*)

真野多喜夫 (**), 岡部綾夫 (***)

要 旨

次期大型炉蒸気発生器 (SG) 伝熱管の合理的設計基準水リーク率 (DBL) の選定にあたって、高温ラプチャによる破損伝播の可能性を定量的に評価する必要がある。

高温ラプチャを含む破損伝播挙動を適切に評価するためには、a) ブローダウン解析モデル、b) 高温ラプチャモデル (構造/破壊力学的モデル)、c) 反応領域温度分布解析のためのナトリウム-水反応ジェットモデルの開発が不可欠である。本報では、これら全体開発計画の中の、ナトリウム-水反応ジェット解析モデルを開発するために、解析モデルの検討を行ないコードを設計した。また、コード開発で必要となる、化学反応モデルと二流体モデルの試計算を行い、これらのモデルの妥当性を確認した。さらに、既往の解析コードとの比較によるコード間の比較検証を実施して、二相流解析で実績の多いSIMA/SMORCコードのモデルを基本に改修する方法が最適なコード開発手法であるとの見通しを得た。

本報告書は、(株)日立製作所が動力炉・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。

契約番号：07-C-2806

事業団担当部課室及び担当者：大洗工学センター安全工学部プラント安全工学室 浜田広次

* : 電力・電機開発本部原子力第3部

** : 日立工場高速増殖炉設計センター

*** : 日立エンジニアリング(株)コンサルティングエンジニアリング部原子力解析エンジニアリング Gr

Design development of sodium-water reaction jet code for the LEAP

Yoshinori Saito(*), Hiromi Tokoi(*), Takashi Ikeda(*),
Takio Mano(**), Ayao Okabe(***)

Abstract

In selecting the reasonable DBL on steam generator, it is indicated that the possibility of failure propagation due to overheating should be evaluated.

This study is concerned with the design development of sodium-water reaction jet code for the LEAP in the overall development plan for the next models to evaluate the reasonable DBL; a) blow down analysis models, b) overheating tube bursting models (structural/ fractural dynamics) and c) sodium-water reaction jet model for reaction zone temperature distribution analysis. In this study, sodium-water reaction jet code were designed with considering analytical models; two-fluid model and chemical reaction model. In order to check the application of the models, test analyses for two-fluid model & chemical reaction model were carried out. These results were physically reasonable. Comparing some typical developed codes for two-phase flow analysis, SIMA / SMORC codes are considered to be useful for two-phase flow analysis with chemical reaction and, therefore, are most available for developing new sodium-water reaction jet code.

Work performed by Hitachi,Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation.

PNC Liaison: Hirotsugu Hamada, FBR Plant Safety Section,
Safety Engineering Division, Oarai Engineering Center

* :Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Dep., Power & Industrial Systems R & D Division.

** : Fast Breeder Reactor Engineering Center, Hitachi Works.

*** :Consulting Engineering Dept. , Hitachi Engineering Co. ,Ltd.

目次

1.	目的・概要.....	1-1
2.	LEAPの概要.....	2-1
2. 1	背景.....	2-1
2. 2	開発内容.....	2-1
2. 3	LEAPの概要.....	2.2
3.	ナトリウム-水反応ジェット解析コードの設計 ...	3.1-1
3. 1	解析モデルの設計	3.1-1
3. 1. 1	解析モデルの素案	3.1-1
3. 1. 2	化学反応モデルの設計	3.1-6
3. 1. 2. 1	必要モデルの整理	3.1-6
3. 1. 2. 2	化学反応モデルの設計	3.1-8
3. 1. 2. 3	化学反応モデルの試計算.....	3.1-14
3. 1. 3	多流体モデルの設計.....	3.1-23
3. 1. 3. 1	必要モデルの整理.....	3.1-23
3. 1. 3. 2	二流体モデルの設計.....	3.1-25
3. 1. 3. 3	化学反応を考慮した二流体モデルの改良.....	3.1-28
3. 1. 3. 4	二流体モデルの試計算.....	3.1-29
3. 1. 4	検証方法・手順の調査検討.....	3.1-46
3. 2	計算方法の設計	3.2-1
3. 2. 1	機能	3.2-1
3. 2. 2	基礎式	3.2-3
3. 2. 3	解析手法.....	3.2-10
3. 3	プログラムの設計	3.3-1
3. 3. 1	計算モジュールの構成	3.3-1

3. 3. 2	サブルーチンの構成	3.3-3
3. 3. 3	インターフェイスの構成	3.3-5
3. 4	開発計画の設計	3.4-1
3. 4. 1	類似コードの調査	3.4-1
3. 4. 2	コード開発期間の比較	3.4-4
3. 4. 3	開発計画の設計	3.4-8
4.	まとめ	4-1
5.	あとがき	5-1
6.	謝辞	6-1
7.	参考文献	7-1

[付録]

付録A. MISTRALの概要(抜粋)

付録B. PHOENICSの概要(抜粋)

付録C. SIMAに関する公開文献

付録D. SMORCに関する公開文献

表一覧表

表3.1.1-1	主要現象	3.1-3
表3.1.1-2	反応ジェットの種類	3.1-5
表3.1.2.1-1	化学反応モデルの考慮要素	3.1-7
表3.1.2.2-1	反応式の考慮要件	3.1-9
表3.1.2.2-2	ナトリウム-水反応における化学種の種類	3.1-9
表3.1.2.2-3	総括反応式における各化学種	3.1-12
表3.1.3.1-1	気液二相流の解析モデルの比較	3.1-24
表3.1.3.3-1	二流体モデルの改良	3.1-28
表3.1.3.4-1	SIMA,SMORCの特徴	3.1-29
表3.1.3.4-2	解析条件の影響比較	3.1-38
表3.1.3.4-3	臨界流量の比較	3.1-39
表3.1.3.4-4	噴流外径の比較	3.1-39
表3.1.3.4-5	噴出流量の比較(蒸気混合飽和水の場合)	3.1-41
表3.1.3.4-6	噴出流量の比較(過熱蒸気の場合)	3.1-43
表3.1.4-1	不明量の検証	3.1-46
表3.2.1-1	本解析手法の機能	3.2-2
表3.2.2-1	境界条件	3.2-9
表3.2.3-1	時間積分方法の比較	3.2-12
表3.2.3-2	解析体系の空間離散化方法	3.2-14
表3.3.2-1	サブルーチンの機能	3.3-3
表3.4.1-1	既存コードの比較	3.4-3

図一覧表

図2.3-1	破損伝播現象モデル	2-3
図2.3-2	LEAPコードの構成要素間のつながり	2-4
図3.1.1-1	反応領域の現象予測図	3.1-3
図3.1.2.2-1	各相の分散モデル	3.1-10
図3.1.2.2-2	化学種の生成消滅のモデル	3.1-11
図3.1.2.2-3	化学反応モデルのフロー	3.1-13
図3.1.2.3-1	温度の経時変化(点近似解析モデル)	3.1-16
図3.1.2.3-2	線近似解析モデルの解析体系	3.1-18
図3.1.2.3-3	化学種密度・温度分布の経時変化	3.1-20
図3.1.2.3-4	温度分布経時変化のパラメータ依存性	3.1-21
図3.1.3.2-1	二流体モデルにおける検査体積(1次元体系)	3.1-25
図3.1.3.4-1	検査体積の保存量収支(SIMA/SMORC)	3.1-31
図3.1.3.4-2	FLIC(Fluid in Cell)法の概念	3.1-31
図3.1.3.4-3	SIMAコードの構成	3.1-33
図3.1.3.4-4	SIMA2DAコードの解析例	3.1-34
図3.1.3.4-5	比較実験(水中への高温高圧水の噴流)	3.1-36
図3.1.3.4-6	解析メッシュ	3.1-38
図3.1.3.4-7	噴流のボイド率分布(解析結果)	3.1-40
図3.1.3.4-8	噴流のボイド率分布(蒸気混合飽和水の場合)	3.1-42
図3.1.3.4-9	噴流のボイド率分布(過熱蒸気の場合)	3.1-44
図3.2.1-1	SG伝熱管周りの流れ	3.2-1
図3.2.2-1	基礎式の関連	3.2-4
図3.2.2-2	二流体モデルの概念図	3.2-5
図3.2.3-1	離散化体系	3.2-10
図3.2.3-2	解析体系空間離散化方法の適用事例	3.2-14
図3.3.1-1	本解析手法のモジュール構成	3.3-2
図3.3.2-1	プログラムのサブルーチン構成	3.3-4
図3.3.3-1	インターフェイスの構成	3.3-5

図3.4.2-1	反応ジェットコード開発の負荷量	3.4-7
図3.4.3-1	コード開発方法	3.4-8

式一覧表

式3.1-1	ナトリウム-水反応の第1素反応式	3.1-8
式3.1-2	ナトリウム-水反応の第2素反応式	3.1-8
式3.1-3	ナトリウム-水反応の第3素反応式	3.1-8
式3.1-4	ナトリウム-水反応の第4素反応式	3.1-8
式3.1-5	ナトリウム-水反応の一般素反応式	3.1-9
式3.1-6	ナトリウム-水反応の一般総括反応式	3.1-10
式3.1-7	ナトリウム-水反応の総括反応式	3.1-10
式3.1-8	ナトリウム-水反応の発熱量の評価式	3.1-10
式3.1-9	単位時間当たりの水素質量生成量の評価式	3.1-11
式3.1-10	各相への伝熱量の評価式	3.1-11
式3.1-11	化学種別の質量生成消滅量の評価式	3.1-12
式3.1-12	化学種の濃度保存式(点近似)	3.1-14
式3.1-13	エネルギーの保存式(点近似)	3.1-14
式3.1-14	発熱量の評価式(点近似)	3.1-14
式3.1-15	状態式(点近似)	3.1-14
式3.1-16	水素のモル生成消滅量(点近似)	3.1-14
式3.1-17	モル濃度と質量密度の換算式(点近似)	3.1-14
式3.1-18	各化学種の発熱量(点近似)	3.1-14
式3.1-19	化学種の濃度保存式(線近似)	3.1-17
式3.1-20	エネルギーの保存式(線近似)	3.1-17
式3.1-21	発熱量の評価式(線近似)	3.1-17
式3.1-22	水素の生成消滅量(線近似)	3.1-17
式3.1-23	各化学種の発熱量(線近似)	3.1-17
式3.1-24	質量保存式(1次元二流体モデル)	3.1-25
式3.1-25	運動量保存式(1次元二流体モデル)	3.1-25
式3.1-26	エネルギーの保存式(1次元二流体モデル)	3.1-25
式3.1-27	一般化された二流体モデルの保存式(SIMA2DA)	3.1-30
式3.1-28	保存量(SIMA2DA)	3.1-30

式3.1-29	フラックス(流束)(SIMA2DA)	3.1-30
式3.1-30	生成・消滅項(SIMA2DA)	3.1-30
式3.1-31	圧力算出式(SIMA2DA)	3.1-30
式3.1-32	空間積分された保存式(SIMA2DA)	3.1-31
式3.1-33	空間積分された保存量(SIMA2DA)	3.1-31
式3.1-34	空間積分された生成・消滅項(SIMA2DA)	3.1-31
式3.1-35	時間積分のために差分化された保存式(SIMA2DA)	3.1-32
式3.1-36	Euler陽解法による差分化保存式(SIMA2DA)	3.1-32
式3.2-1	質量保存式	3.2-5
式3.2-2	運動量保存式	3.2-5
式3.2-3	エネルギーの保存式	3.2-6
式3.2-4	全体の体積率の総和量の拘束条件	3.2-6
式3.2-5	気相の体積率の総和量の拘束条件	3.2-6
式3.2-6	液相の体積率の総和量の拘束条件	3.2-6
式3.2-7	全体の体積率の総和量の拘束条件	3.2-6
式3.2-8	相間保存式：質量移動量	3.2-6
式3.2-9	相間保存式：摩擦力	3.2-6
式3.2-10	相間保存式：速度	3.2-6
式3.2-11	相間保存式：伝熱	3.2-6
式3.2-12	界面面積濃度式	3.2-7
式3.2-13	摩擦力式(一般形)	3.2-7
式3.2-14	壁面摩擦力式：圧力損失係数	3.2-7
式3.2-15	壁面摩擦力式：摩擦係数	3.2-7
式3.2-16	壁面摩擦力式：レイノルズ数	3.2-7
式3.2-17	相間摩擦力式：圧力損失係数	3.2-7
式3.2-18	相間摩擦力式：抵抗係数	3.2-7
式3.2-19	相間摩擦力式：スリップ速度	3.2-7
式3.2-20	相間摩擦力式：スリップ速度係数	3.2-7
式3.2-21	浮力・重力の体積力式	3.2-7
式3.2-22	壁面熱伝達式：熱流束	3.2-7

式3.2-23	壁面熱伝達式：ヌセルト数	3.2-7
式3.2-24	壁面熱伝達式：ヌセルト数相関式	3.2-8
式3.2-25	壁面熱伝達式：レイノルズ数	3.2-8
式3.2-26	壁面熱伝達式：プラントル数	3.2-8
式3.2-27	界面熱伝達式：ヌセルト数相関式	3.2-8
式3.2-28	ナトリウム-水反応の総括反応式	3.2-8
式3.2-29	気液二相流の熱的状态式	3.2-8
式3.2-30	気液二相流の熱量的状态式：内部エネルギー	3.2-8
式3.2-31	気液二相流の熱量的状态式：温度	3.2-8
式3.2-32	物性値式：粘性係数	3.2-8
式3.2-33	物性値式：定圧比熱	3.2-8
式3.2-34	物性値式：熱伝導率	3.2-8
式3.2-35	一般化された二流体モデルの保存式	3.2-11
式3.2-36	保存量	3.2-11
式3.2-37	フラックス(流束)	3.2-11
式3.2-38	生成・消滅項	3.2-11
式3.2-39	空間積分された保存式	3.2-11
式3.2-40	空間積分された保存量	3.2-11
式3.2-41	空間積分された生成・消滅項	3.2-11
式3.2-42	検査体積の面境界	3.2-11
式3.2-43	検査体積の体積	3.2-11
式3.2-44	圧力算出式	3.2-11
式3.2-45	Euler陽解法による差分化保存式	3.2-12

記号表

A :	(断)面積(m^2)
ai :	気液界面面積密度(1/m)
B, b :	生成消滅量ベクトル
C :	化学種モル濃度(mol/m^3)
Cp :	定圧比熱(J/K)
De :	等価直径(m)
e :	比内部エネルギー(J/kg)
F :	水素/水モル転換比(-)
Fv, fv :	体積力(N/m^3)
Fs, fs :	面積力(N/m^3)
g :	重力加速度(m/s^2)
H :	化学反応エンタルピー(J/kg)
h :	熱伝達率($W/(m^2 \cdot K)$)
i :	比エンタルピー(J/kg)
K :	化学反応速度定数(m/s/mol)
L :	潜熱(J/kg)
m :	質量生成消滅量 (kg/s)
p :	圧力(Pa)
Q :	化学反応発熱量(W/m^3)
q :	発熱量(W/m^3)
S :	検査体積の界面(m)
T :	温度(K)
t :	時間(s)
u :	流速(m/s)
V :	検査体積の体積(m^3)
W :	分子量(g/mol)
X :	クォリテイ・気相質量比(-)
x, y, z :	デカルト空間座標(m)

α :	体積率(-)
β :	気液伝熱比(-)
Γ :	相変化質量 (kg/s)
Δ :	差分
ζ :	圧力損失係数(-)
η :	モル転換比(-)
θ :	気相伝熱比(-)
λ :	熱伝導率(W/(m · K))
μ :	粘性係数(Pa · s)
ξ :	相変化速度係数(-)
ρ :	質量密度(kg/m ³)
Φ, ϕ :	保存量ベクトル
Ψ, ψ :	流束(フラックス)ベクトル

※ベクトル値大文字の場合は検査体積内平均値とする

添字

c :	化学種 (反応物=s、生成物=e)
i :	気液界面
j :	タイムステップ
k :	流体(気相=g、液相=l、固相=s)
m :	検査体積の表面番号
n :	検査体積の番号
o :	基準
s :	飽和温度
w :	壁面

1. 目的・概要

実証炉等の大型炉用SGにおける安全性評価のためには、SG伝熱管の合理的設計基準水リーク率(DBL=Design Basis Leak)の選定は重要な課題である。このDBL決定のためには、水リーク時のSG状況とナトリウム-水反応現象を可能な限り忠実に模擬した破損伝播挙動の解析評価が必要である。

本LEAPコード用反応ジェットコードの開発設計では、DBLの選定に深く関わると予想されるナトリウム側の温度・熱伝達率を解析的に評価するため、水リーク時におけるナトリウム-水反応領域・反応ジェットを含むSG伝熱管群周りの流動解析手法の設計を実施した。

2. LEAPの概要

2. 1 背景

1987年の英国FBR過熱器大リーク事故では、高温ラプチャ現象(ナトリウム-水反応熱による伝熱管強度低下に起因した機械的破損現象)により多数の伝熱管が破損した。高温ラプチャは、伝熱管の寸法・材質を始めとする蒸気発生器(SG)の設計や運転条件(特にブローダウン時の水/蒸気状態)に強く影響される。実証炉以降の大型炉SGの場合には、水/蒸気系の高温・高圧化等が指向されていることから、設計条件如何によっては高温ラプチャを無視できなくなる可能性がある。従って、実証炉等SGの設計・運転条件を忠実に考慮した上で、高温ラプチャを含む破損伝播挙動を評価する必要がある。

2. 2 開発内容

実証炉等の大型炉用SGにおける安全性評価のためには、SG伝熱管の合理的設計基準水リーク率(DBL)の選定は重要な課題である。このDBL決定のためには、水リーク時のSG状況とナトリウム-水反応現象を可能な限り忠実に模擬した破損伝播挙動の解析評価が必要である。

従来の原型炉SGに対しては、大リーク総合評価コード(SWACS)とウェステージ型破損伝播モデルで開発した伝熱管破損伝播解析コード(LEAP)を用いてDBL評価を行っている。しかしながら、実証炉以降の大型炉SGでは、原型炉に比べナトリウムの高温化、水/蒸気の高圧化が指向されており、この設計運転条件を踏まえると、高温ラプチャ型破損現象も模擬可能なように、LEAPを以下の点で改良し高精度化を図ることが必要である。

- (1)伝熱管高温ラプチャ計算機能の付加
- (2)水/蒸気系ブローダウン計算機能の付加
- (3)ナトリウム-水反応ジェット計算機能の付加

本件においては、高温ラプチャを評価する上で重要となる、ナトリウム側の温度・熱伝達率を解析的に評価するため、LEAPに(3)の機能を付加すべくナトリウム-水化学反応、反応ジェット生成、並びにナトリウム流動計算モデルの開発及び本モデルのLEAPへの適用など、FBR用SG伝熱管水リーク時におけるナトリウム-水反応領域・反応ジェットを含むSG伝熱管群周りの流動解析手法

の設計を検討した。

2. 3 LEAPの概要

LEAPはFBRのSG伝熱管に発生した初期リークにより、自己拡大やウェステージでリーク規模が拡大していく破損伝播現象を解析するコードである。本コードでは、初期リークが発生してからリークを検出して水側をダンプし、ナトリウム水反応を完全に停止させるまでの一連の過程における水リーク率を主な計算対象としている。水リーク率の計算には、SGの出入口ヘッダとリーク孔を境界とする一次元定常モデルを用いており、伝熱管の自己拡大／ウェステージ率には実験式などを使用している。ただし、出／入口ヘッダの水／蒸気条件については、テーブルデータとして定常運転時及びブローダウン時の状態量が入力される。

図2.3-1に破損伝播現象のモデル、図2.3-2にコードの構成要素間のつながりを示す。

平成6年度においては、水リーク検知後の水／蒸気系ブローの安全保護動作(弁の開閉操作等)をコード内で取り扱い、ブローダウンによるナトリウム-水反応時の伝熱管内冷却効果の解析及び水／蒸気系ブロー時の2次、3次リーク時の破損口からの流出量をより精度良く解析できるよう、LEAPに前記2.2(2)の水／蒸気系ブローダウン計算機能を付加する上で基礎となる新規ブローダウンコードを開発している。

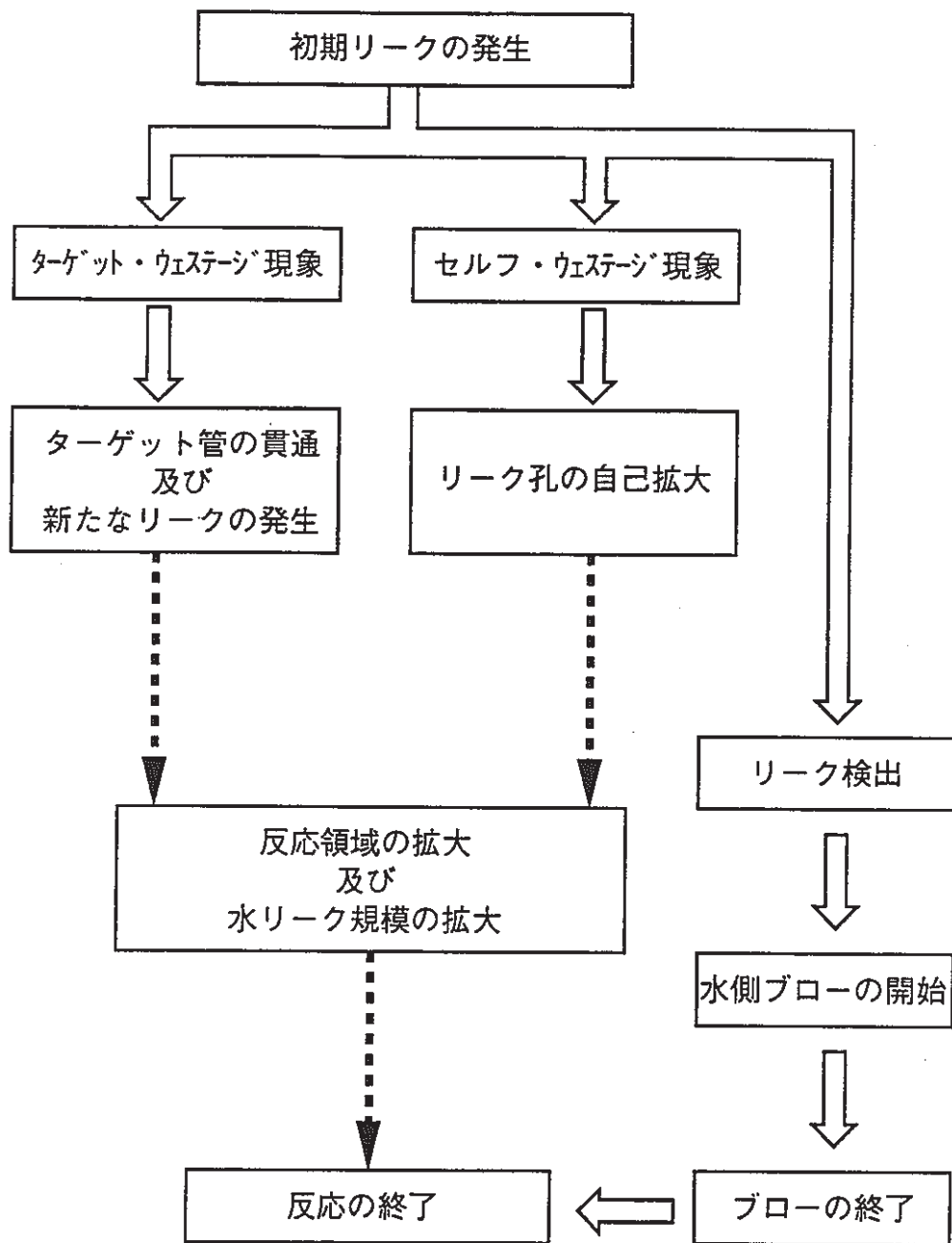


図2.3-1 破損伝播現象モデル

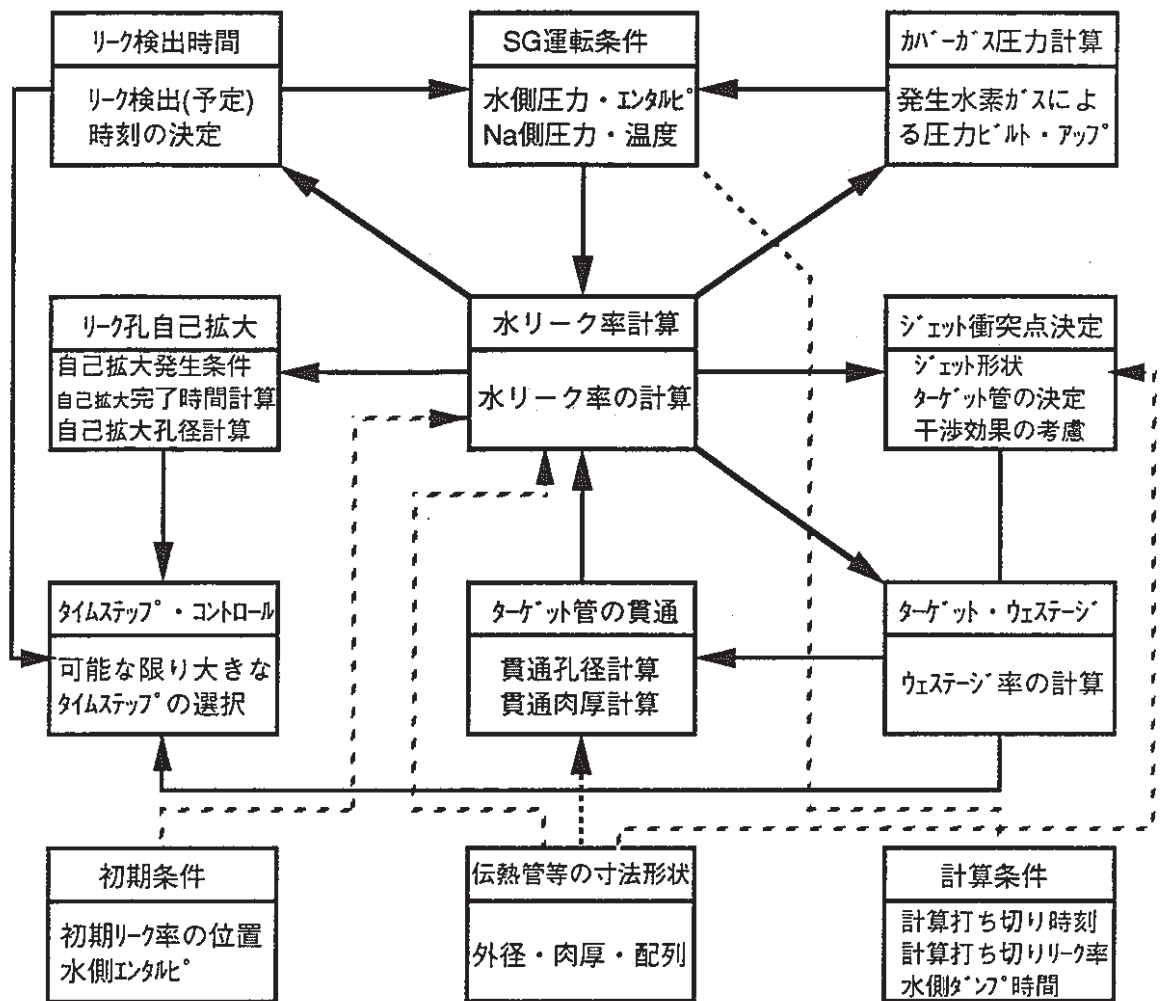


図2.3-2 LEAPコードの構成要素間のつながり

3. ナトリウム-水反応ジェット解析コードの設計

FBR用SG伝熱管水リーク時における、ナトリウム-水反応領域を含むSG伝熱管周りの流動解析、特にナトリウム-水反応領域の温度分布を適切に評価するために必要となる解析モデルを設計する。

3. 1 解析モデルの設計

伝熱管高温ラプチャ評価では、ナトリウム-水反応領域における温度分布及び反応領域(ナトリウム側)からSG伝熱管外表面への熱伝達率を精度良く評価することが重要である。また、反応領域の温度分布等の評価では、伝熱管から流出した水/蒸気とナトリウムの界面における化学反応を考慮するとともに、少なくとも蒸気(あるいは発生水素)とナトリウムの詳細な二相流流動解析が可能なモデルの導入が必要となる。そのため、これらの解析モデルについて調査及び設計を行う。なお、本節では概要にとどめ、その具体化は次節で述べる。

3. 1. 1 解析モデルの素案

まず、ナトリウム-水反応ジェットを取り扱うための解析モデルの素案について検討する。

図3.1.1-1に反応領域の現象予測の概観、表3.1.1-1に主要現象を示す。

SGでは、厚さ数mmの伝熱管壁を介して水・蒸気とナトリウムとが流れている。まず、何らかの原因でSG伝熱管よりリークした水(冷却水状態)・蒸気混合水(冷却水沸騰状態)・過熱蒸気(蒸気過熱状態)は、リーク孔からナトリウム中へ噴出・拡大する(噴流)。その際、伝熱管内外は大きな圧力差が生じるもののリーク流量は臨界流量で制限される。リークに水が混入する場合には水は減圧沸騰するので、最終的に噴流には蒸気が混合する(以降、蒸気・水の相状態を区別しない場合は H_2O と表す)。この噴流とナトリウムとの界面ではナトリウム-水反応が発生、反応物(H_2O ・Na)から生成物(H_2 ・NaOH・ Na_2O 等)への化学組成の変化と反応発熱がある。なお、ナトリウム-水反応では、特に重要な化学反応は次の2つである。

・ $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + 1/2\text{H}_2$: 水酸化ナトリウム(NaOH)生成反応

・ $2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2$: 酸化ナトリウム(Na_2O)生成反応

化学組成の変化に伴い局所的な濃度の違いにより各化学種の拡散が生じる。一方、発熱により反応領域では周囲に比べ高温(ジェットの先端部は1000度以上)となるので、反応界面から噴流側・周囲ナトリウム側それぞれへと熱伝達が生じる。なお反応ジェットコードでは、腐食性生成物(NaOH・ Na_2O)の一部や高温反応領域そのものが隣接伝熱管に衝突する場合にはウェステージが発生するが、ウェステージ現象そのものは既に解明・コード化されていることから、本解析モデルでは取り扱わない。その他、界面では相変化や摩擦・抗力なども発生する。このような反応を伴った噴流(反応ジェット)は、リーク孔からの H_2O と周囲からのNaの供給と圧力差により拡大し、また重力・浮力や周囲ナトリウム流動によりジェットが移動する場合も考えられる。

なお、注目領域にはSG伝熱管群等の構造物が存在している。このことから、反応ジェット構造は2次元以上の多次元現象となる。前述の破損伝播現象のモデルによれば、リーク発生から事象終結までの間には、伝熱管水リーク発生検知によるブローダウンとともに伝熱管内の流量・圧力は変化する。水リーク率変化により反応領域の広がり方が依存・変化すると予想される。また、二相流の持つ不安定性により、反応ジェットの流動乱れが大きいと推定される。さらに、化学反応は伝熱・流動より現象進行が速く時間スケールが異なることから、現象は本質的に非定常であると推定される。

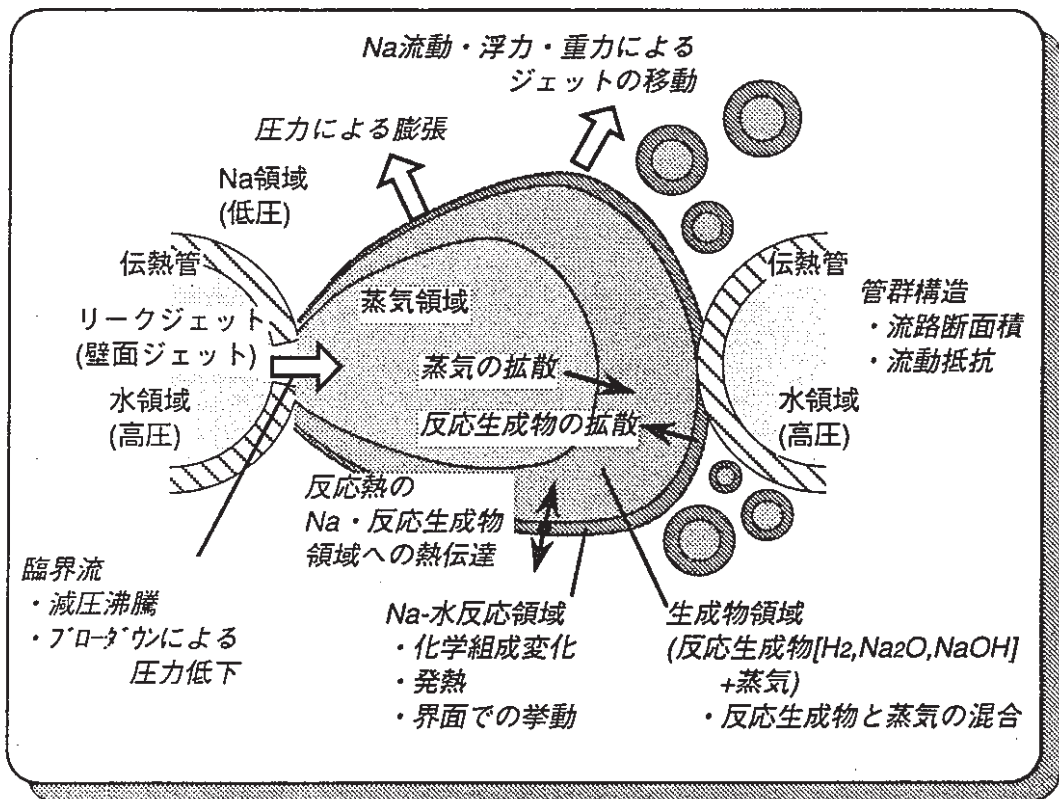


図3.1.1-1 反応領域の現象予測図

表3.1.1-1 主要現象

現象	考慮すべき項目
(1)臨界流	(a)減圧沸騰 (b)ブローダウンによる圧力低下
(2)化学反応	(a)化学組成の変化 (b)不均一反応：気液界面と反応生成物濃度に依存
(3)気液二相流	(a)気体(蒸気, H ₂)と液体(Na)の二相流 (b)密度差による重力・浮力
(4)界面現象	(a)熱伝達 (b)相変化 (c)摩擦・抗力 (d)物質拡散
(5)多次元現象	注目領域にはSG伝熱管群等の構造物の存在
(6)非定常現象	(a)リーク発生から事象終結まで (b)時間スケールの違い (化学反応は伝熱・流動より現象進行が速い)

表3.1.1-2に、反応ジェットの状態別分類を示す。伝熱管からの水リーク量により反応ジェットの強さ、即ちジェットの広がり方も異なると推定される。

リーク量が小さい場合には、ナトリウム-水反応はリーク孔近傍のみで生じ、反応ジェットが隣接伝熱管に達しないセルフ・ウェステージ現象である。これよりリーク量が多くなると反応領域も拡大し、隣接管に対するターゲット・ウェステージと損傷伝播現象、さらに複数の隣接伝熱管が反応領域に取り込まれるマルチ・ウェステージ現象が発生する。この時、反応物と生成物の拡散の仕方とジェット拡大形態により、表に示したような噴出孔からの距離の関数で反応領域が1次元的に近似される、反応ジェット内部近似モデルが考えられる。リーク規模がさらに大きくなると、反応による急激な圧力発生(初期スパイク圧と準定常圧力変動)と高温領域を伴う熱流動現象が重要となる。反応のない噴流では、噴出量が大きくなると噴流の分裂などの複雑な構造を見せることから、この時のジェット拡大形態は3次元的な構造であると推定される。

このように、水リーク規模によりナトリウム-水反応現象は異なるため、通常は以下のようにリーク率により分類される。

微小リーク：～0.1 g/s	=セルフ・ウェステージ現象
小リーク：0.1～10 g/s	=ターゲット・ウェステージ現象
中リーク：10～2000 g/s	=マルチ・ウェステージ現象
大リーク：2000～ g/s	=熱流動現象

以上の現象推定を踏まえて、次の(1)～(4)の構成による解析モデルの素案をまとめる。なお、将来の他のLEAPコード(伝熱管高温ラプチャ・水/蒸気系ブローダウン解析)とのカップリングを考慮もする。

- (1)解析体系：破損管と隣接管を含む領域を非定常・多次元解析
- (2)保存式：気液二相流の質量(化学組成)・運動量・エネルギー各保存式を考慮
- (3)構成式：相変化・摩擦・熱伝達・化学反応等の界面現象評価式を考慮
各化学種(反応物・生成物)の物性値/状態式を考慮
- (4)境界条件：SG伝熱管内外・リーク流動条件(圧力・流速・温度)と管群構造

このように、本解析モデルでは、気液二相流解析のための二相流モデルと化学反応モデルの設計が重要であり、次節以降に詳細設計を示す。

表3.1.1-2 反応ジェットの種類

分類	リーク	モデル図	現象の進行	解析
A	小		<ul style="list-style-type: none"> ○リーク微小→損傷部近傍のみで反応 ○生成物ガスがNa内へ膨張 	1次元近似
B	中		<ul style="list-style-type: none"> ○生成物(H₂)+蒸気は瞬時完全混合 ○混合領域の最外周に反応生成物領域 	1次元近似
C	中		<ul style="list-style-type: none"> ○蒸気領域の膨張 ○生成物領域を蒸気が拡散し、最外周で反応領域形成 ○界面面積Aiは時間と共に変化 (Aiは距離rの関数) 	1次元近似
		<p>(a)セクターモデル 開き角: θ 生成物領域 (H₂+蒸気) 反応領域 蒸気 Na 水 伝熱管 界面面積: $A_i = \theta \times r$ (セクター側面の反応無視)</p> <p>(b)コーンモデル 立体角: Ω 生成物領域 (H₂+蒸気) 反応領域 蒸気 Na 水 伝熱管 界面面積: $A_i = \Omega \times r$ (コーン側面の反応無視)</p> <p>(c)球モデル 生成物領域 (H₂+蒸気) 反応領域 蒸気 Na 水 伝熱管 $A_i = 4\pi r^2$</p>		
D	中、大		<ul style="list-style-type: none"> ○蒸気噴出後、気泡に分裂 ○気泡内で反応 → 反応生成物の気泡化 	3次元
E	中、大		<ul style="list-style-type: none"> ○蒸気ジェットの遠方拡大 ○ジェット脇に生成物領域 (蒸気ジェットにより反応部更新 → 生成物は脇へ押し出される) ○生成物領域へも蒸気拡散 → 微量反応 反応量: (a) > (b) 	3次元

3. 1. 2 化学反応モデルの設計

つぎに、ナトリウム-水反応領域の化学反応モデルを設計し、その概要を説明する。

3. 1. 2. 1 必要モデルの整理

解析対象とする実証炉2次冷却系の設計(SG構造、水/蒸気系統、ナトリウム系統、及びそれらの運転条件も含む)、反応領域近傍におけるナトリウム-水反応現象の支配因子等の調査・収集を行い、モデル化に必要な項目を表3.1.2.1-1にまとめる。これを踏まえて、化学反応をモデル化する。

まず、反応ジェットコードでは高温ラプチャ破損予測のためのナトリウム流動評価解析の必要があり、伝熱管群周りの3次元流動、また水リーク検出後のブローダウンによる水リーク率変化に伴う非定常流動も、ナトリウム-水反応領域を決定する主要現象となる。

加えて、SG伝熱管水リークで発生するナトリウム-水反応の主要現象は、気相(蒸気)と液相(Na)二相流の界面における化学反応であることから、気液不均一系反応であることに特徴がある。この気液不均一系反応においても、気体燃焼等に代表される均一系反応と同様に、反応物から生成物への化学組成変化量と反応発熱量が、反応現象を特徴づけるとともに支配因子となる。しかし均一系反応と異なるのは、気液不均一系反応が気液二相の領域および気液界面の特性量(気液混合状態や界面面積濃度等)によっても支配される点である。特に、気液二相流の持つ本質的な不安定性により、気液界面状態は多次元・非定常である。このため、気液不均一系反応現象の理論的解明や解析手法は、確立されたものが無い。

よって、ナトリウム-水反応現象を取り扱うための考慮要素は、(1)ナトリウム-水の反応式と、ナトリウム・水・反応生成物の各化学組成成分(物性テーブル等の作成も含む)を含む気液二相流のモデル化範囲、(2)ナトリウム-水反応式の圧力温度依存性、(3)リーク孔からの高温・高圧水噴出、(4)未反応水領域、水成分過剰領域又はナトリウム成分過剰領域の存在、(5)蒸気発生器の構造物(伝熱管・伝熱管支持構造物・内筒及び外筒)の存在、等が挙げられる。

表3.1.2.1-1 化学反応モデルの考慮要件

項 目	内 容
主要現象	<ul style="list-style-type: none"> ・ 気液(蒸気・Na)二相流の界面における化学反応：不均一反応 ・ 伝熱管群内部での3次元・非定常的な流動
支配因子	<ul style="list-style-type: none"> ・ 化学反応：反応物から生成物への化学組成変化と、反応発熱 ・ 気液二相の領域および気液界面
考慮要素	<ul style="list-style-type: none"> (1)化学反応式、各化学組成(物性)、気液二相流のモデル化範囲 (2)反応式の圧力・温度依存性 (3)高温高圧の水／蒸気のリーク孔からの噴出 (4)水／蒸気とNa領域の存在 (5)伝熱管・SG構造物の存在

3. 1. 2. 2 化学反応モデルの設計

上記を踏まえ、ナトリウム-水反応面の取り扱い、反応面内での化学反応等について開発モデルの設計を行う。

(A) 化学反応の仮定

気体燃焼等の均一反応の場合には反応物の混合が均一であるから、接触面積は非常に大きい。そのため、単位時間当たりの反応量(反応速度)は、反応物の濃度(相手側反応物との濃度差または濃度積)と混合の程度によって支配され、反応物濃度の混合程度で現象進行時間が支配される拡散律速の場合と、反応現象の速さ(反応速度定数)自体で現象進行時間が支配される反応律速の場合がある。いずれにしても、ほとんど無限の反応面積のために反応速度は非常に大きい。また、対象となる化学反応の正反応(順方向の反応)と逆反応(逆方向の反応)の両方を考慮する必要がある(反応の可逆性を考慮)。しかし、本問題のような不均一系反応の場合には、気液二相の反応物には有限の反応界面の介在があるため、反応現象は界面近傍に限られる。その反応速度は気液界面における流動拡散/混合時間または表面反応時間で決定し、反応速度は一般に均一系反応よりは小さい。また、反応により相変化を伴うので不均一系反応は大きくエントロピーが増大し、逆反応は正反応に比べて非常に小さい。さらに、公開されたナトリウム-水反応によるウェステージ基礎試験結果によれば、ナトリウム-水反応領域は厚さ1mm程度と狭いことが分かっている。

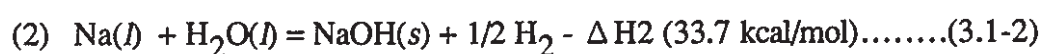
よって、本問題で取り扱うナトリウム-水反応では、次の仮定をする。

(A-1)反応は非可逆的。正反応のみを考慮し、逆反応を無視する。

(A-2)反応は全て気液界面近傍で起こる。

(A-3)反応速度は有限。

ナトリウム-水反応のうち、反応熱の大きいつぎの4反応のみを考慮する。



各素反応式を次のように一般化して、表3.1.2.2-1の①～⑥の要素を考慮する。



表3.1.2.2-1 反応式の考慮要素

変数	定数・構成式(パラメータ)	定数・構成式の評価方法
①各組成量	③反応速度(物質拡散)	チューニングパラメータ化→実験検証が必要
	④界面濃度(面積密度)	
②発熱量	⑤顕熱(定圧比熱・エンタルピー) ⑥潜熱(転移・融解熱)	既知データベース・状態式より

(B) 気液二相流の仮定

気液二相流のモデル簡単化のため表3.1.2.2-2のように、各化学種を分類し、4成分系二相流を仮定してそれぞれの組成の保存式を考慮する。

伝熱管内のH₂Oは、液相の水の場合(蒸発器の場合で、リーク時に水が放出する場合と減圧沸騰により湿り蒸気に変化する場合)と気相の水蒸気の場合(過熱器の場合)が想定される。よってH₂Oは、クォリティXの蒸気水混合の気相均質流(湿り蒸気)として取り扱う。Naは即反応するので蒸気拡散は考慮せず、Na蒸気泡も考慮しない。H₂は中間反応による分解は無いと仮定する。液相または固相が想定されるNaOH(l/s)とNa₂O(s)は、固相が混合した液相均質流として取り扱う。

表3.1.2.2-2 ナトリウム-水反応における化学種の分類

	反応物	生成物
気相	H ₂ O	H ₂
液相	Na	NaOH、Na ₂ O

それぞれの化学種では、反応生成熱や顕熱とともに相変化時の潜熱も考慮する。気液各相の分散は、図3.1.2.2-1に示すようにモデル化する。各相の反対相への相変化(溶解・拡散)は無視し、反対相への分散はあくまで相変化せずに行われるものとする。

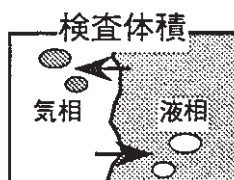
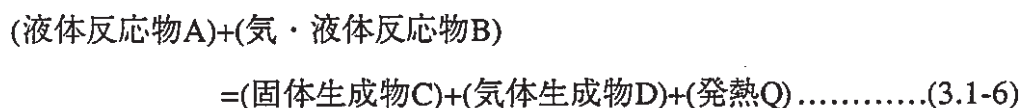


図3.1.2.2-1 各相の分散モデル

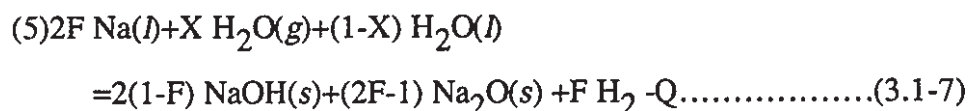
(C) 化学反応のモデル化

以上の仮定を基に、次の簡略化した化学反応モデルを構築する。これは、(a)未知量(パラメータ)を限定して実験によるチューニングを容易化するためのパラメータの低減、(b)二相流解析との整合性を取るために化学反応式を1つに限定して化学反応計算を簡略化(化学反応考慮による計算コスト増大の抑制)、(c)化学反応のタイムスケールを1つにまとめる、などの目的による。

まず、前記の4つの素反応をまとめた次の総括反応方程式を示す。



この総括反応方程式を、具体化すれば次の式(5)・(6)になる。ここで、Qは総括反応熱、mcは各化学種の生成消滅量、 ΔH_c は各化学種のエンタルピ(=反応生成熱+潜熱+顕熱)である。この潜熱+顕熱評価には、気液二相の不均一系反応を考える場合には、各相それぞれの温度を与える必要がある。



$$(6) Q = \sum \Delta H_c \cdot mc \dots\dots\dots(3.1-8)$$

・ 第1パラメータ：水素／水モル転換比F

また、Fは水素／水モル転換比であり、本モデルで導入される第1のパラメータである。F=0.5のときはNaOH生成反応のみ、F=1.0では

Na₂O生成反応のみとなり、F=0.5~1.0の値を取り得る。

総括反応方程式では、4素反応式のうち(1)、(2)のNaOH生成反応と、(3)、(4)のNa₂O生成反応の生起確率を同じと仮定しているが、その発生割合を気液の水の質量比(流れのあるときはクォリテイ)Xで重みづけている。

つぎに、単位時間当たりの水素質量生成量 m_{H2} を与える反応速度式を、下記のようにモデル化する。ここで、Cと ρ は各化学種のコル濃度と質量密度、Wは分子量、 a_i は界面面積濃度である。また、Kは水素反応速度定数であり、本モデルで導入される第2のパラメータである。

$$(7) m_{H2} = W_{H2} \cdot K \cdot a_i \cdot C_{Na} \cdot C_{H2O}$$

$$= W_{H2} \cdot K \cdot a_i \cdot \rho_{Na} / W_{Na} \cdot \rho_{H2O} / W_{H2O} \dots \dots (3.1-9)$$

・ 第2パラメータ：水素反応速度定数K

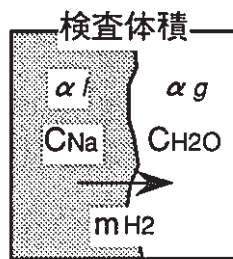


図3.1.2.2-2 化学種の生成消滅のモデル

(D) 二相流のモデル化

上記のモデルにより、各化学種の生成消滅量と発熱は次のように評価する。

まず、化学反応による各相への伝熱量 Q_k は次のように分配される。ここで β_k は発熱分配割合で気相では $\beta_g = \theta$ 、液相では $\beta_l = 1 - \theta$ 。ここで θ は気相伝熱比 $\theta = \text{気相伝熱量} / \text{全発熱量}$ であり、本モデルで導入される第3のパラメータである。

$$(8) Q_k = \beta_k \cdot Q [J/m^3/s] \dots \dots \dots (3.1-10)$$

・ 第3パラメータ：気相伝熱比 θ

つぎに、化学反応による単位時間当たりの化学種別の質量生成消滅量 m_c は、単位時間当たりの水素質量生成量 m_{H_2} により次のように与えられる。なお、モル転換比 η_c は、表3.1.2.2-3のとおり総括反応式(5)と H_2 との量論比に従う。

$$(9)m_c = \eta_c \cdot m_{H_2} \cdot W_c / W_{H_2} \text{ [kg/m}^3\text{/s]} \dots\dots\dots(3.1-11)$$

表3.1.2.2-3 総括反応式における各化学種

化学種c	Na	H ₂ O	NaOH	Na ₂ O	H ₂
分子量 W_c [g/mol]	23	18	40	62	2
総括反応量論比	-2F	-1	2(1-F)	(2F-1)	F
モル転換比 η_c	-2	-1/F	2(1-F)/F	(2F-1)/F	1

(E) 化学反応モデルのフロー

以上の化学反応モデルをまとめて、図3.1.2.2-3に化学反応モデルのフローを示す。フロー中の斜線部は化学反応モデルの主要部であり、この部分を、次節に述べる多流体モデルを用いた二相流流動解析コードに組み込めば、ナトリウム-水反応ジェット流動解析が可能となる。

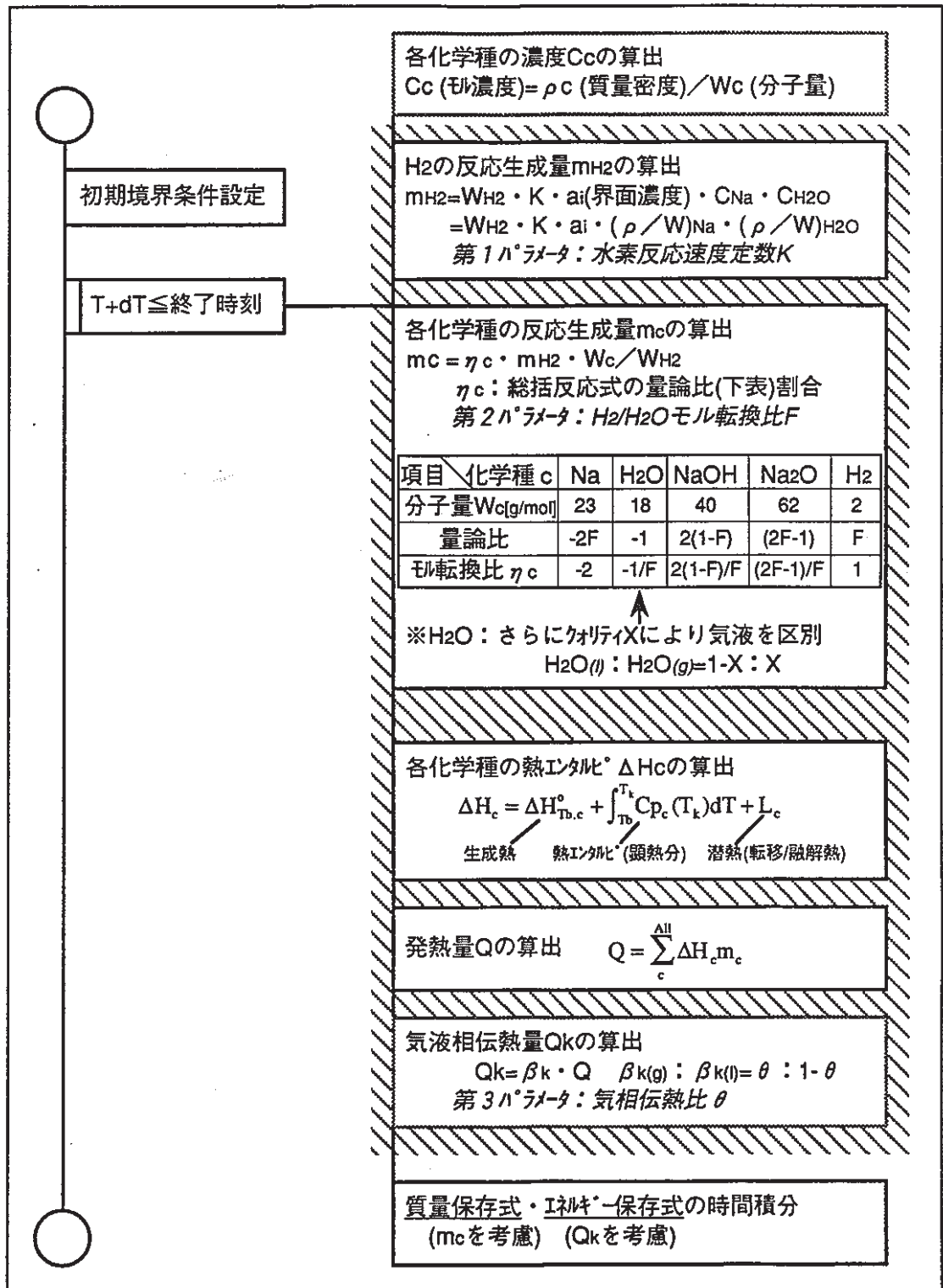


図3.1.2.2-3 化学反応モデルのフロー

3. 1. 2. 3 化学反応モデルの試計算

化学反応モデルの妥当性確認のため、次の簡略化された化学反応モデルを構築して試計算を行う。

(A) 点近似解析モデル

まず、点近似解析モデルによる化学反応モデル試計算を行う。点近似解析における仮定は次のとおりである。(1)温度も化学種濃度も空間的な分布の無い系を仮定。すなわち、対象領域内の伝熱／拡散／流動は無視した、化学反応界面を中心とする非定常0次元体系とする。(2)界面面積濃度は固定(=1)され気液二相流は均一混合(完全燃焼反応と同じ取り扱い)とする。(3)反応領域の圧力は一定(0.1MPa)の初期条件。(4)相変化や潜熱を無視して各化学種の物性値を単純化した。

次の基礎式を解いた。ここで C_c は各化学種のモル濃度、 ΔH_c^0 は反応生成熱、 ρ_o 、 C_o は全体の質量密度、モル濃度、 C_p は定圧比熱、 P_o 、 T_o は全体の圧力、温度、 R はガス定数である。

(1)化学種の濃度保存式

$$\frac{dC_c}{dt} = m_c \dots\dots\dots(3.1-12)$$

(2)エネルギーの保存式

$$\rho_o C_p \frac{dT_o}{dt} = -Q \dots\dots\dots(3.1-13)$$

$$Q = \sum_c^{All} \Delta H_c m_c \dots\dots\dots(3.1-14)$$

(3)状態式

$$C_o = \frac{P_o}{RT_o} \dots\dots\dots(3.1-15)$$

(4)水素のモル生成消滅量

(各化学種については前述のとおり)

$$m_{H_2} = K \cdot a_i \cdot C_{Na} \cdot C_{H_2O} \dots\dots\dots(3.1-16)$$

$$C_c \cdot W_c / 1000 = \rho_c \dots\dots\dots(3.1-17)$$

(5)各化学種の発熱量

$$\Delta H_c = \Delta H_{Tb,c}^0 + \int_{Tb}^{T_o} C_{p,c}(T_o) dT \dots\dots\dots(3.1-18)$$

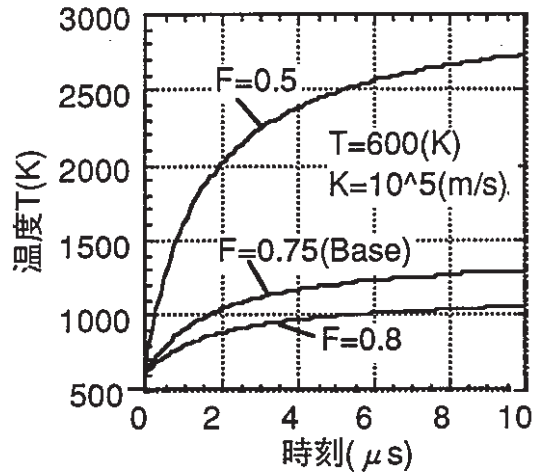
また、時間積分にはRunge-Kutta法を用いた。なお、実際の化学反応の計算問題は堅さ(Stiffness)が大きいので、タイムステップに十分注意する必要がある。本試計算では、タイムステップをいろいろ変えたが、発熱が比熱の小さい解析体系に即座に反映されるため、 $0.1\mu\text{s}$ 以下でないと解析できなかった。以下の結果では、タイムステップ $0.01\mu\text{s}$ で $10\mu\text{s}$ まで解析している。

図3.1.2.3-1に、温度の経時変化とモル転換比 F ・反応速度定数 K ・初期温度 T 依存性を示す。

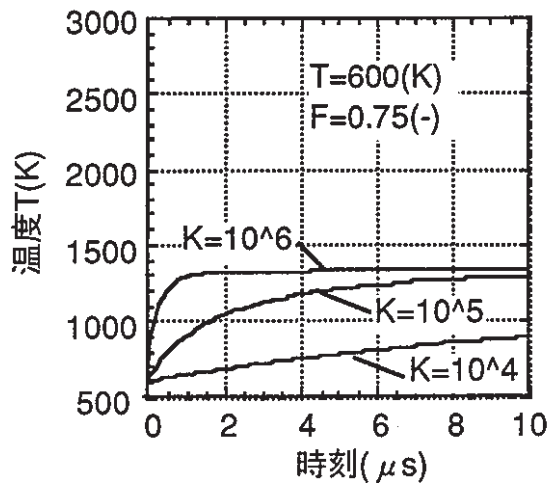
化学反応による発熱が大きいので、体系の温度上昇は急激である。これは、反応・生成物の潜熱を考慮していないことも原因している。この点については、次の線近似解析モデルでは改善している。

モル転換比 F が小さいほど温度上昇は大きい、これは Na_2O の生成熱が定量的に不明であったため、生成熱を $\text{NaOH}>\text{Na}_2\text{O}$ となるように設定したためである。反応速度定数 K が大きいほど時間当たりの温度上昇率大きい、 $K=10^6$ では $0.1\mu\text{s}$ で反応物が無くなるために温度上昇は停止する。初期温度 T が小さいほど温度上昇はやや大きくなるが、圧力一定の仮定としたので初期温度が小さいほどモル濃度は大きかったことに起因する。しかし温度依存性は小さい。

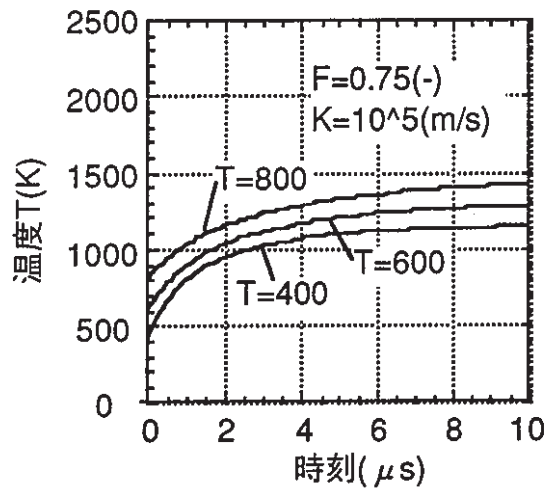
簡略化された点近似解析モデルの試計算により、結果の定性的傾向がおおむね確認された。



(a)水素/水モル転換比F依存性



(b)反応速度定数K依存性



(c)初期温度T依存性

図3.1.2.3-1 温度の経時変化(点近似解析モデル)

(B) 線近似解析モデル

つぎに、線近似解析モデルによる化学反応モデル試計算を行う。線近似解析における仮定は次のとおりである。(1)温度・化学種濃度分布は1次元的变化のみを系を仮定。すなわち、対象領域内の流動は無視した、化学反応界面を中心とする非定常1次元体系とする。(2)伝熱および化学種拡散(フーリエ則およびフィック則)を考慮する。(3)気液二相の運動は無く反応界面は固定。(4)気液完全分離で界面面積濃度は固定 $a_i=0.25$ (気液体積率 $\alpha=0.5$)。 (5)初期温度は気液相で同一温度。(6)体系は断熱の境界条件とする。

線近似解析モデルの試行と同時に、密度・定圧比熱・熱伝導率の物性値関数の整備を同時に検討した。本解析では、各化学種の密度・定圧比熱は圧力・温度依存の近似式を与えた。しかし、モデルの簡単化のため、熱伝導係数と物質拡散係数は固定値とした。

次の基礎式を解いた。この解析モデルでは、各化学種の質量密度(ρ_c)保存式を解くことで二相流解析に近い体系としたことが、先の点近似解析モデルとは異なる。ここで、不均一系反応を考えるので T_k は気液各相の温度、 D_c は質量拡散係数、 λ_k は各相の熱伝導率、 L_c は各化学種の潜熱である。各相への伝熱量 Q_k は、発熱量 Q を気相伝熱比 θ による分配で評価される。

(1)化学種の質量保存式

$$\frac{d\rho_c}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D_c \frac{d\rho_c}{dx} \right) + m_c \dots\dots\dots(3.1-19)$$

(2)エネルギーの保存式

$$\rho_k C_{p_k} \frac{dT_k}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_k \frac{dT_k}{dx} \right) - Q_k \dots\dots\dots(3.1-20)$$

$$Q = \sum_c^{All} \Delta H_c m_c \dots\dots\dots(3.1-21)$$

(3)水素の生成消滅量

(各化学種については前述のとおり)

$$m_{H_2} = W_{H_2} \cdot K \cdot a_i \cdot \rho_{Na} / W_{Na} \cdot \rho_{H_2O} / W_{H_2O} \dots\dots\dots(3.1-22)$$

(4)各化学種の発熱量

$$\Delta H_c = \Delta H_{Tb,c}^0 + \int_{Tb}^{T_k} C_{p_c}(T_k) dT + L_c \dots\dots\dots(3.1-23)$$

なお、解析方法は点近似解析モデルと同様である。空間刻みは5mmで、気

液相両方に10個の有限体積(コントロールボリューム)を体系に配置したメッシュ分割とした。タイムステップは $10\mu s$ で、解析時間0.1msまで解析している。

解析概念および空間離散化は図3.1.2.3-2に示すとおりである。気液界面(反応領域)は無微小の厚さとし、保存式を解く上では境界条件として処理されている。よって、反応領域自体の(気液相)温度と各化学種の質量密度は、隣接する気液各相の有限体積のものと同じとする。

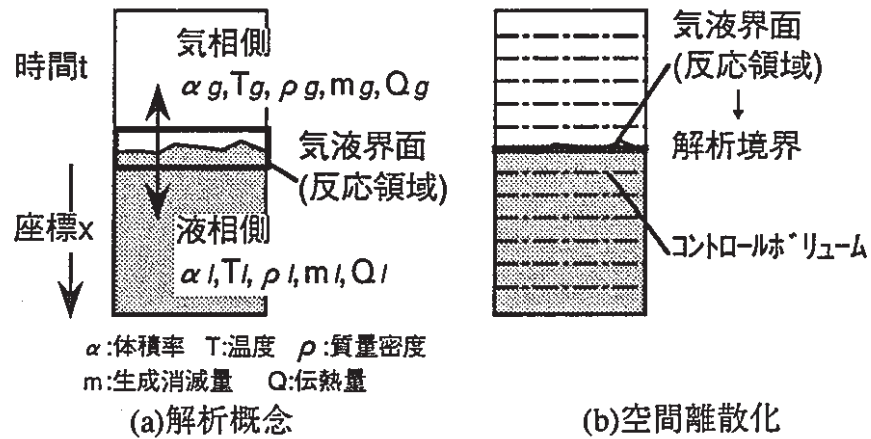


図3.1.2.3-2 線近似解析モデルの解析体系

図3.1.2.3-3に、各化学種の質量密度分布と温度分布の経時変化を示す。以降の解析では、図3.1.2.3-3に示す条件を基本条件としている。その根拠は次の通りである。反応発熱が静的に熱伝達されるのであれば熱容量(=密度 ρ ・定圧比熱 C_p)比程度に発熱が分配されるはずであるから、気相伝熱比 θ は、気液熱容量比(=1%程度)のオーダーに設定した。水蒸気の密度を大気圧より大きく(10気圧程度)設定している。熱伝導率 λ は、気相側は水と水素の平均値、液相側はナトリウム値のオーダーに設定した。物質拡散と温度拡散が同程度であるとする気体の静的拡散を仮定すれば、拡散係数 D は 10^{-5} のオーダーである。この値を液相に設定して、気体側はそれより大きな値を設定した。

ナトリウムに比べて水の質量密度が小さいために、反応面における水の消費割合は大きいことが分かる。また、気相側の拡散係数が大きいので、反応面での消費に伴う水・水素の物質移動変化も大きい。液相側に比べて水素/水モル転換比 $F=0.75$ は、 NaOH と Na_2O のモル生成割合が等しい条件であるが、質量比は $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{O}=40:62$ であるために Na_2O の方が質量生成量は NaOH より50%大きくなる。温度分布変化は、反応初期に大きい次第に変化が小さくなる。

しかし、反応面遠方への温度拡散は解析時間中には見られない。実際には反応ジェットの非定常的な流動による物質・温度の乱流拡散が支配的になるものと推定される。

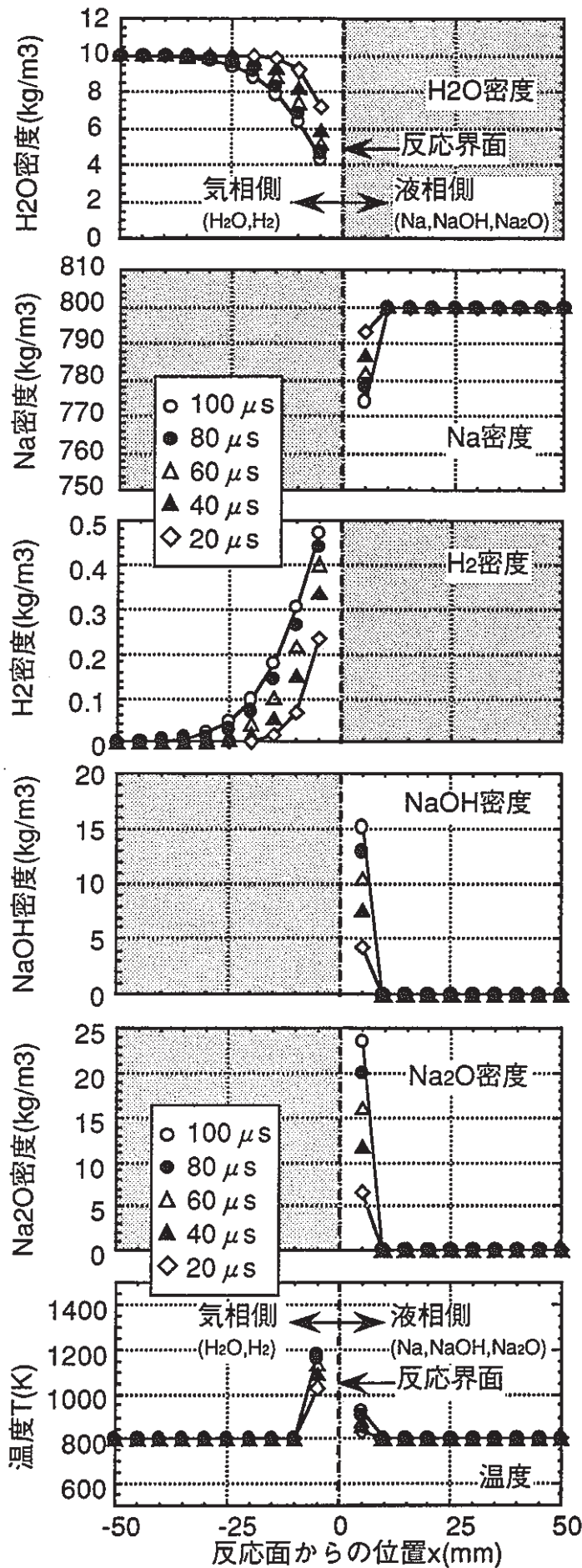
図3.1.2.3-4に、各化学種の質量密度分布と温度分布経時変化の、パラメータ依存性を示す。

モル転換比 F が小さいほど温度上昇は大きい、これは Na_2O の生成熱が NaOH より小さいためである。反応速度定数 K が大きいほど時間当たりの温度上昇率は大きくなる。初期温度 T が小さいほど温度上昇はやや大きくなるが、温度依存性は小さい。このように、 F 、 K 、 T 依存性は点近似解析モデルと同様の傾向である。

気相伝熱比 θ が大きいほど、熱容量の小さい気相側への伝熱量が大きくなるので温度上昇は大きくなる。しかし、 $\theta = 5\%$ では気相温度が液相側より4000K以上大きくなり、このような現象は考えにくい。気液の温度差が大きくなった場合には、生成物の H_2 が持ち出して行く発熱量を1次的伝熱量とみなせば、気相(H_2O 、 H_2)から液相(Na 、 NaOH 、 Na_2O)への温度勾配に伴う熱伝達や、液相側 Na の蒸発潜熱による吸熱等の2次的伝熱が生じて、実際には気相温度の上昇は低く抑えられるものと推定される。また、本解析では反応界面温度を隣接有限体積の気液温度と同一と仮定している。しかし、反応界面も有限の厚さと熱容量を有するために発熱による一定の温度上昇があり、気液各相の温度は反応界面の温度を越えないことも推定される。これらの2次的伝熱と反応界面をどのようにモデル化するかは、今後の検討課題である。

気相側の拡散係数が大きいほど、気相側の温度上昇は大きくなる。これは、反応・拡散の進展と共に気相側の密度、即ち熱容量が小さくなるためである。

このように、ナトリウム-水反応の線近似解析モデルにより、不均一系反応(気液反応)現象の概要を把握することができた。



解析条件

水素/水モル転換比 $F=0.75$

反応速度定数

$$K=4 \times 10^{-3} (\text{m/s})$$

気相伝熱比 $\theta = 1\%$

初期条件

温度 $T = 800\text{K}$

Na密度 $= 800\text{kg/m}^3$

H₂O密度 $= 10\text{kg/m}^3$

熱伝導率 λ

気相側 $\lambda_g = 0.1\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

液相側 $\lambda_l = 100\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

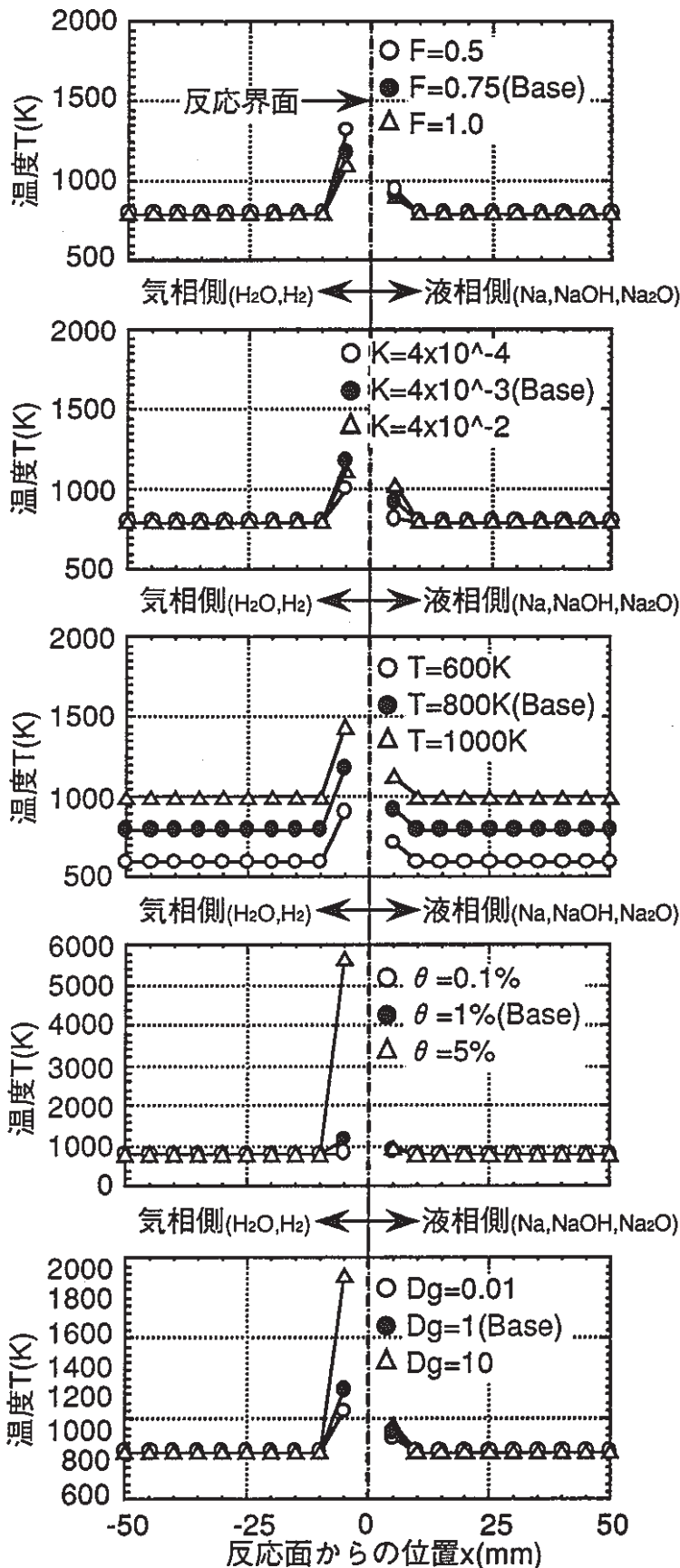
拡散係数 D

気相側 $D_g = 10\text{mm}^2/\text{s}$

(液相側の10万倍)

液相側 $D_l = 1\text{m}^2/\text{s}$

図3.1.2.3-3 化学種密度・温度分布の経時変化



解析条件(Base)
 水素/水モル転換比 $F=0.75$
 反応速度定数
 $K=4 \times 10^{-3}(m/s)$
 気相伝熱比 $\theta=1\%$
 初期条件
 温度 $T=800K$
 Na密度 $=800kg/m^3$
 H₂O密度 $=10kg/m^3$
 熱伝導率 λ
 気相側 $\lambda_g=0.1W/(m \cdot K)$
 液相側 $\lambda_l=100W/(m \cdot K)$
 拡散係数 D
 気相側 $Dg=10mm^2/s$
 (液相側の10万倍)
 液相側 $DI=1 m^2/s$
 時刻: $100 \mu s$

図3.1.2.3-4 温度分布経時変化のパラメータ依存性

(C) まとめ

設計した化学反応モデルを用いて、簡略化した点近似モデルおよび線近似モデル解析を行い、化学反応モデルのパラメータ依存性を調べた。その結果、本化学反応モデルの定性的傾向は合理的であると判断される。

ただし本化学反応モデルでは、気液相の熱伝達や蒸発潜熱等の2次的伝熱と、反応界面の熱容量を考慮していないために、気相伝熱比によっては大きな気液相温度差が生じる。これらの2次的伝熱と反応界面のモデル化は、今後の検討課題である。

その他として、(1)パラメータのオーダー評価、(2)ナトリウム-水反応ジェットの物理的イメージの把握、の検討課題がある。

(1)については、特に線近似モデル解析では温度・化学種濃度の時間変化と共に空間分布が評価できる。従って、ウェステージ基礎試験や伝熱管水リーク模擬試験(SWAT)等のSG基礎試験における温度分布と比較することで、化学反応モデルで導入のチューニングパラメータの、ナトリウム-水反応におけるオーダー評価を行う。これにより、二相流解析コードへの化学反応モデルの導入前に、化学反応モデルのみのコード開発と検証が可能である。(2)については、本化学反応モデルではナトリウム-水反応現象を考慮できているが、今後のSWAT検証試験結果との比較検証の中で、本解析コードでは取り扱わない高温ラプチャ現象とウェステージ現象の発生機構の説明が必要になると思われる。そのためには、これらの現象の物理イメージも念頭に置いた、ナトリウム-水反応ジェットモデルを検討する必要がある。

3. 1. 3 多流体モデルの設計

伝熱管からナトリウム中への水の噴出過程の解析に用いる、気液二相流解析モデル・手法を設計し、その概要を説明する。

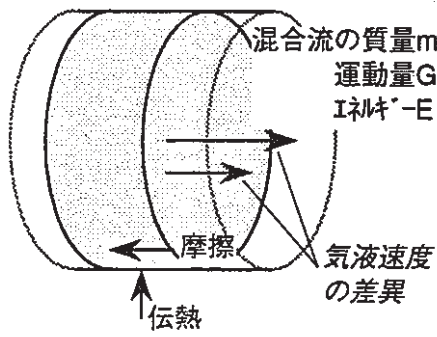
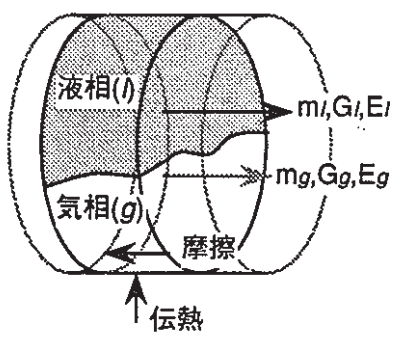
3. 1. 3. 1 必要モデルの整理

表3.1.3.1-1に気液二相流の解析モデルの比較を示す。

気液相の質量・運動量・エネルギーの各保存式を初期・境界条件の基に解けば、二相流流動の厳密解が求められる。しかし、二相流では相間の境界面は複雑に運動し、しかも各相の流れは境界面の運動に大きな影響を受けるために、これらを厳密に解くことは困難である。よって各保存式に時間的・空間的な平均化操作を加えた方程式と、時間的・空間的な相間のやり取りを評価する構成方程式とで構成される二流体モデルと、二相流を1つの混合体として保存式を立て、相間の速度差などに相関式を用いる混合体モデルの、2つに代表されるどちらかのモデルで二相流解析が行われている。

ナトリウム-水反応ジェットコードでは気液二相流の挙動は特に重要であり、ナトリウム-水反応領域近傍のナトリウムおよび水も考慮した解析が必要である。よって、より詳細な二相流流動の取り扱いが可能な二流体モデルを、ナトリウム-水反応ジェットコードの解析モデルに採用する。

表3.1.3.1-1 気液二相流の解析モデルの比較

	混合体モデル	二流体モデル
モデル図		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ○二相の混合流を1流体として保存式を解く。 (保存式：質量・運動量・エネルギー) ○相間速度差等に構成方程式(相関式)を与える。 <ul style="list-style-type: none"> (a)均質流モデル： 相間速度差は無いと仮定。 (b)スリップ流モデル： 相間速度比(スリップ比)の構成方程式を与える。 (c)ドリフトフラックスモデル： 混合流と各相の速度差(ドリフト速度)の構成方程式を与える。 ○解くべき式は少なく解析は容易。 ○二相流の詳細な構造は取り扱えない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○各相(流体)別に保存式を解く。 ○界面情報として構成方程式(相関式)を与える。 (モデル自体は界面情報を持たない) ○流体の数だけ保存・構成方程式必要。 ○詳細な二相流構造を取り扱える。 <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">現在最も進んだ二相流モデル</p>
適用例	<ul style="list-style-type: none"> ・噴霧流・燃焼流解析 ・多くの二相流解析 (SWACS-13/13Eなど) 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力安全解析コード(RELAP, TRAC) ・汎用二相流解析コード (α-FLOW, SIMA/SMORCなど)

3. 1. 3. 2 二流体モデルの概要

1次元流体系の場合を例に、二流体モデルにおける基礎式の概要・構成を以下に示す。

二流体モデルにおける基礎式は、気液相の(A)質量保存式、(B)運動量保存式、(C)エネルギー保存式、(D)構成式で構成される。これら保存式は、図3.1.3.2-1の検査体積内における単位時間当たりの保存量の収支を元に考えれば、次の通りである。ここでkは気相(g)と液相(l)の両方の場合について考えるので、それぞれの式は2倍ある。なお、3次元体系の場合には、3方向(3倍)の運動量の式を考える。

(A)質量保存式：

$$\begin{aligned}
 & \text{(検査体積内の質量の時間変化)} \\
 & = \text{(境界面からの流入量 - 流出量)} + \text{(相変化に伴う変化量)} \\
 & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k) A \Delta z = - \frac{\partial}{\partial z}(\rho_k \alpha_k u_k) A \Delta z + \Gamma_k A \Delta z \dots\dots\dots(3.1-24)
 \end{aligned}$$

(B)運動量保存式：

$$\begin{aligned}
 & \text{(検査体積内の運動量の時間変化)} = \text{(境界面からの流入量 - 流出量)} \\
 & \quad + \text{(作用力による力積の総和)} + \text{(相変化に伴う変化量)} \\
 & \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k u_k) A \Delta z = \\
 & - \frac{\partial}{\partial z}(\rho_k \alpha_k u_k u_k) A \Delta z + \left\{ -F_{w/k} - F_{i/k} - F_{v/k} - \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_k P_k) + P_{i/k} \frac{\partial}{\partial z} \alpha_k \right\} A \Delta z + \Gamma_k u_{i/k} A \Delta z \\
 & \dots\dots\dots(3.1-25)
 \end{aligned}$$

(C)エネルギー保存式：

$$\begin{aligned}
 & \text{(検査体積内のエネルギーの時間変化)} \\
 & = \text{(境界面からの流入量 - 流出量)} \\
 & \quad + \text{(作用力による仕事量の総和)} \\
 & \quad + \text{(相変化に伴う変化量)} + \text{(内・外部入熱量)} \\
 & \quad \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho_k \alpha_k \left(e_k + \frac{1}{2} u_k^2 \right) \right\} A \Delta z \\
 & = - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \rho_k \alpha_k \left(e_k + \frac{1}{2} u_k^2 \right) u_k \right\} A \Delta z
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left\{ -F_{w/k} u_k - F_{i/k} u_k - F_{v/k} u_k - \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_k P_k u_k) - P_{i/k} \frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \right\} A \Delta z \\
& + \Gamma_k \left(i_k + \frac{1}{2} u_{i/k}^2 \right) A \Delta z + (q_{i/k} + q_{w/k} + q_{s/k}) A \Delta z \dots\dots\dots(3.1-26)
\end{aligned}$$

保存式(A)~(C)の変数を求めるため、次の物理量を求める(D)の構成式が二流体モデルでは重要となる。

(D)構成式：

◎気液相間の収支式

- ・質量、運動量、エネルギーと体積率 α_k の相間保存
- ・相間圧力(通常は検査体積内圧力平衡を仮定。 $P_{i/k} = P_g = P_l = P$)

◎質量生成量 Γ_k

- ・相間質量移動量
- ・化学反応を考慮する場合は、生成消滅量

◎各相に作用する外力

- ・相間摩擦力 $F_{i/k}$
- ・壁面摩擦力 $F_{w/k}$
- ・浮力・重力等の体積力 $F_{v/k}$

◎各相の伝熱

- ・界面／壁面熱伝達 $\Gamma_k i_k$ (i_k は界面で輸送されるエンタルピ)
- ・化学反応を考慮する場合は、発熱と各相への伝熱量

◎界面濃度式(摩擦力・熱伝達等の界面現象を評価するために必要)

○状態式および物性値

二流体モデルでは、気液の両流体に対して上記(A)~(D)式をたてることから、単相流や混合体モデル解析と比較して解くべき式は多く、さらに、本解析手法では、境界条件(リーク孔の噴出・伝熱管形状模擬)や注目伝熱管周囲や反応ジェットを含めた必要範囲を多次元解析することが要求されるため、手法の解析量は非常に大きくなることが予想される。

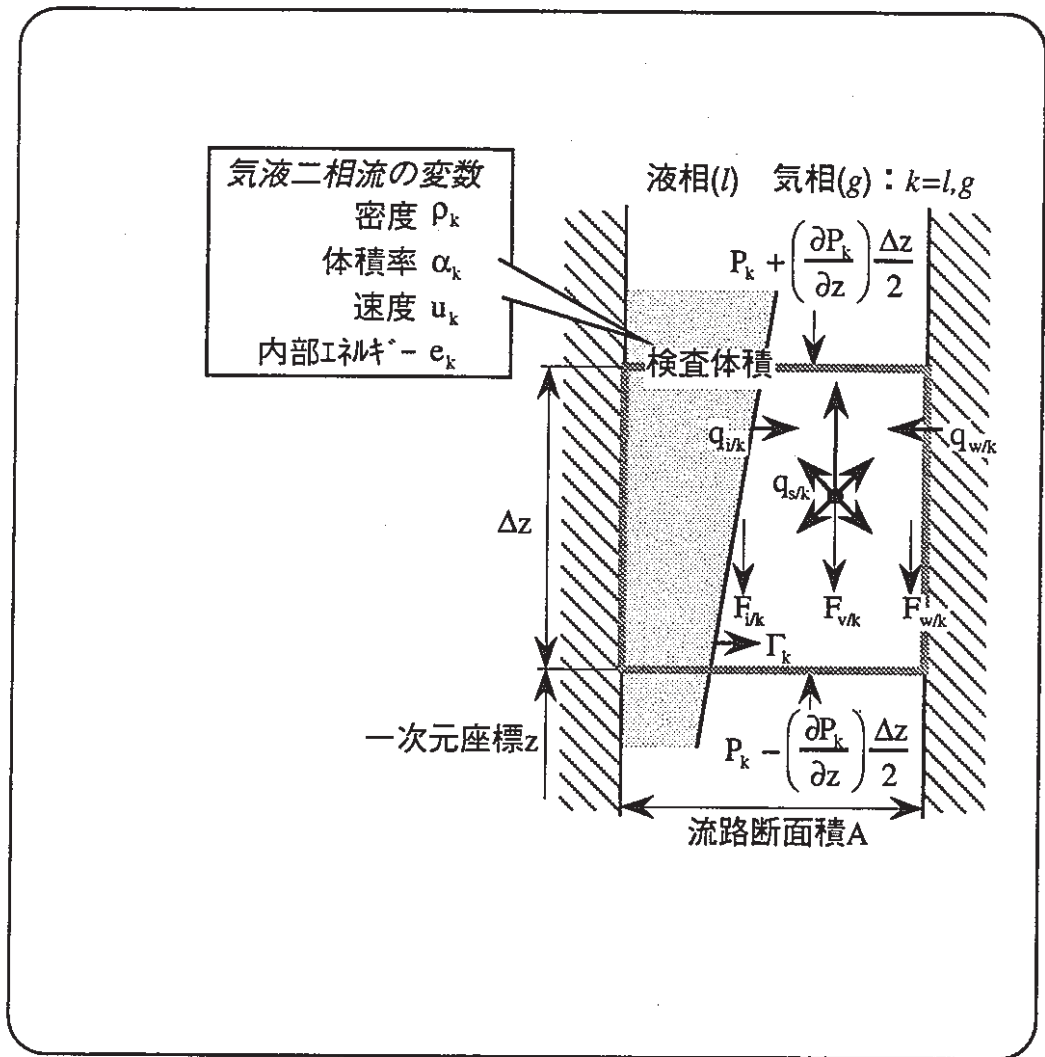


図3.1.3.2-1 二流体モデルにおける検査体積(1次元体系)

3. 1. 3. 3 化学反応を考慮した二流体モデルの改良

前節の二流体モデルに、化学反応モデルによる組成変化・発熱を考慮して、二流体モデルを表3.1.3.3-1のように改良する。

従来の二流体モデルでは、質量保存式は気液相2式であるのに対し、前記の化学反応モデルの反応物・生成物と気相・液相の組み合わせの4保存式が必要となる。他の運動量・エネルギー保存式の数の変更は必要ない。そのため解くべき基礎式(保存式)は、2式増えるのみである。また、化学反応による反応生成消滅量を質量保存式の生成項に、化学反応による発熱量をエネルギー保存式の生成項に、それぞれ付加する必要がある。

表3.1.3.3-1 二流体モデルの改良

	従来の二流体モデル	化学反応を考慮した二流体モデル
モデル図	<p>質量 m ・ 運動量 G ・ エネルギー E</p>	<p> 反応物質量 m_s ・ 生成物質量 m_e ・ 運動量 G ・ エネルギー E </p> <p> l_s : 液相反応物 l_e : 液相生成物 g_s : 気相反応物 g_e : 気相生成物 </p>
質量保存式	式の数 : 気液相2式 拘束条件 : 気液体積率の総和=1 生成項 : 相間質量移動量	式の数 : (気液相)×(反応・生成物)4式 拘束条件 : 全ての体積率の総和=1 生成項 : 相間質量移動 + 化学反応による反応生成消滅
エネルギー保存式	相間伝熱量	相間伝熱量 + 化学反応による発熱量
保存式数(3次元)	10	12
物性値	密度・内部エネルギー(状態式)、定圧比熱・粘性係数・熱伝導率...等	

3. 1. 3. 4 二流体モデルの試計算

二流体モデルによる気液二相流解析の概要と妥当性を見るため、化学反応の無い二流体モデルによる二相流流動解析コードを用いて試計算を行い、水中への高温高圧飽和水の噴流実験と比較検証した。

(A) 二流体モデル気液二相流流動解析コードSIMAの概要

多くの二相流流動解析コードが開発されているが、二流体モデルによる気液二相流解析が可能な汎用コードとしては、日立で開発されたSIMA, SMORCがある。以下に、SIMA, SMORCの特徴および構成をまとめ、紹介する。

SIMA, SMORCの特徴は、表3.1.3.4-1のとおりである。これらのコードは、二流体モデルを用いており、有限体積法とレギュラーメッシュの空間離散化方法に特徴がある。後述するように、この空間離散化方法は、他の二相流解析コードにはない特徴である。コード開発では、まず1次元二相流流動解析コードSIMAが完成し、多次元化と陰解法の時間積分による解析高速化が図られて発展した。SMORCは、機器構造の詳細な取り扱いを可能とするポーラス近似が組み込まれた3次元解析が可能な点に特徴がある。

表3.1.3.4-1 SIMA, SMORCの特徴

コード名	SIMA	SMORC
コード共通点	(a)二流体モデル (b)コントロールボリューム(有限体積)法による空間離散化 (c)全ての保存量を(c)の中心点で定義(レギュラーメッシュ)	
コード相違点		ポーラス近似
次元	1、2次元	3次元
時間積分	・陽解法 (非定常解析) ・陰解法 (定常解析)	・陽解法 (非定常解析) ・陰解法 (定常解析)
適用事例	・パイプブローダウン ・オリフィス臨界流 ・ATR圧力管破断	・BWR燃料集合体 ・給水加熱器

後述の試計算に使用する2次元非定常解析コードSIMA2DAを例に、コード構成を説明する。

SIMA2DAは、使用言語FORTRAN77でステップ数は約2kステップ、モジュ

ール数は、主要サブルーチン約10個+関数(物性値)約10個と、比較的小さいサイズのコードである。数値安定化法には、圧力不安定化対策としてGodunov法によるコントロールボリューム間の輸送修正が考慮されている。構成方程式には、流体依存の無い一般化された相間摩擦/相変化速度モデルを使用している。

コードの基礎式を示す。前述の二流体モデルによる質量・運動量・エネルギーの各保存式は、次のようなベクトル式に変形される。

◎一般化された二流体モデルの保存式

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi_k + \nabla \psi_k = b_k \dots\dots\dots(3.1-27)$$

◎保存量

$$\phi_k = \begin{bmatrix} \rho_k \alpha_k \\ \rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k \\ \rho_k \alpha_k (e_k + u_k^2/2) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.1-28)$$

◎フラックス(流束)

$$\psi_k = \begin{bmatrix} \rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k \\ \rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{u}_k \\ \rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k (e_k + u_k^2/2 + P/\rho_k) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.1-29)$$

◎生成・消滅項

$$b_k = \begin{bmatrix} \Gamma_k \\ \Gamma_k u_{i/k} + \{F_{w/k} + F_{i/k} + F_{v/k}\} + \nabla(\alpha_k P_k) - P_{i/k} \nabla \alpha_k \\ \Gamma_k (i_k + u_{i/k}^2/2) + \{F_{w/k} u_k + F_{i/k} u_k + F_{v/k} u_k\} \\ + \nabla(\alpha_k P_k u_k) + (q_{i/k} + q_{w/k} + q_{s/k}) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.1-30)$$

なお、圧力は独立変数ではなく、体積率の拘束条件(下式)より物性値の陰関数の形で求められることから、はさみうち法を使用して圧力を算出する。

$$\sum_k \langle \alpha_k \rho_k \rangle / \rho_k(p, e_k) = 1 \dots\dots\dots(3.1-31)$$

上記の式は、図3.1.3.4-1に示す検査体積の保存量収支を考えて、i j 番目の検査体積(cv)内の保存式として空間積分される。i j の検査体積区間平均値<>で保存量を代表すると、次のように表される。

$$\frac{d\langle\phi_k\rangle}{dt} = -\int \psi_k \cdot n_s dS_{cv} / V_{cv} + \langle b_k \rangle \dots\dots\dots(3.1-32)$$

$$\langle\phi_k\rangle = \int \phi_k dV_{cv} / V_{cv} \dots\dots\dots(3.1-33)$$

$$\langle b_k \rangle = \int b_k dV_{cv} / V_{cv} \dots\dots\dots(3.1-34)$$

この解析手法は、図3.1.3.4-2に示すFLIC(Fluid in Cell)法と同様の考え方である。FLIC法では、各計算セル内に各1個の流体粒子を仮想しこの粒子運動を解析するが、SIMA/SMORCでは二流体モデルを考慮しているために、気液各相の流体粒子を仮想していることになる。

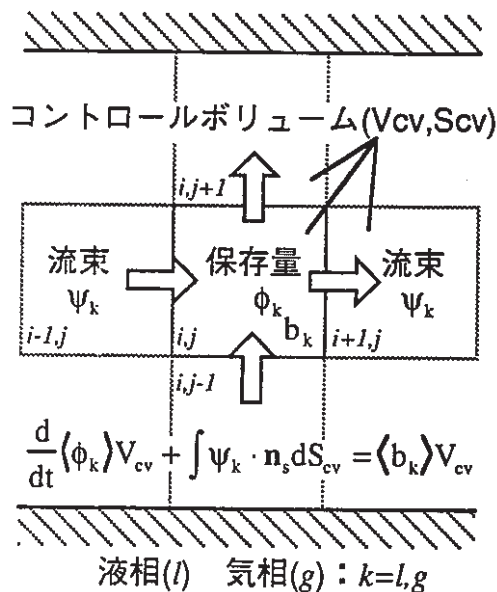


図3.1.3.4-1 検査体積の保存量収支(SIMA/SMORC)

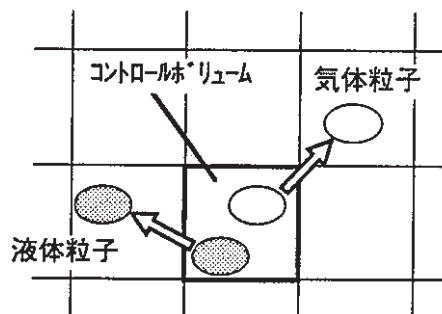


図3.1.3.4-2 FLIC(Fluid in Cell)法の概念

上記のコントロールボリュームの保存式を、次のように時間について差分化する。SIMA/SMORCでは、これを時間積分して二相流流動解析を行っている。

$$\langle \phi_k(t + \Delta t) \rangle_i = \langle \phi_k(t) \rangle_i + \frac{d\langle \phi_k(t) \rangle_i}{dt} \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots(3.1-35)$$

SIMA2DAでは、Euler陽解法で新しいタイムステップにおける保存量を計算し、次の式を時間積分する。

$$\begin{aligned} \langle \phi_k(t + \Delta t) \rangle_{i,j} = & \langle \phi_k(t) \rangle_{i,j} \\ & - (\psi_{k,i+1/2,j}(t) - \psi_{k,i-1/2,j}(t)) \cdot \Delta t - (\psi_{k,i,j+1/2}(t) - \psi_{k,i,j-1/2}(t)) \cdot \Delta t + \langle b_k(t) \rangle_{i,j} \cdot \Delta t \\ & \dots\dots\dots(3.1-36) \end{aligned}$$

SIMA/SMORCにおける計算手順すなわちコード構成を、図3.1.3.4-3に示す。

図3.1.3.4-4に、2次元非定常解析(SIMA2DA)を使用して過去日立で行った解析例を示す。この例は、低圧雰囲気中に高圧飽和水がオリフィスより噴出するオリフィス臨界流問題を解析したものである。この問題は、二相流解析の代表的なベンチマーク問題であり、小笠原らによる高温高圧飽和水放出実験が比較検証実験例として挙げられている。

解析では、実験体系を軸対称2次元流とにおいて、メッシュサイズ約85、タイムステップ1μsの条件で解析し、上記の実験との比較を行っている。解析では、蒸気のボイド率と圧力の断面分布やオリフィス放出流量が得られ、放出流量の解析結果は実験と良い一致を示している。

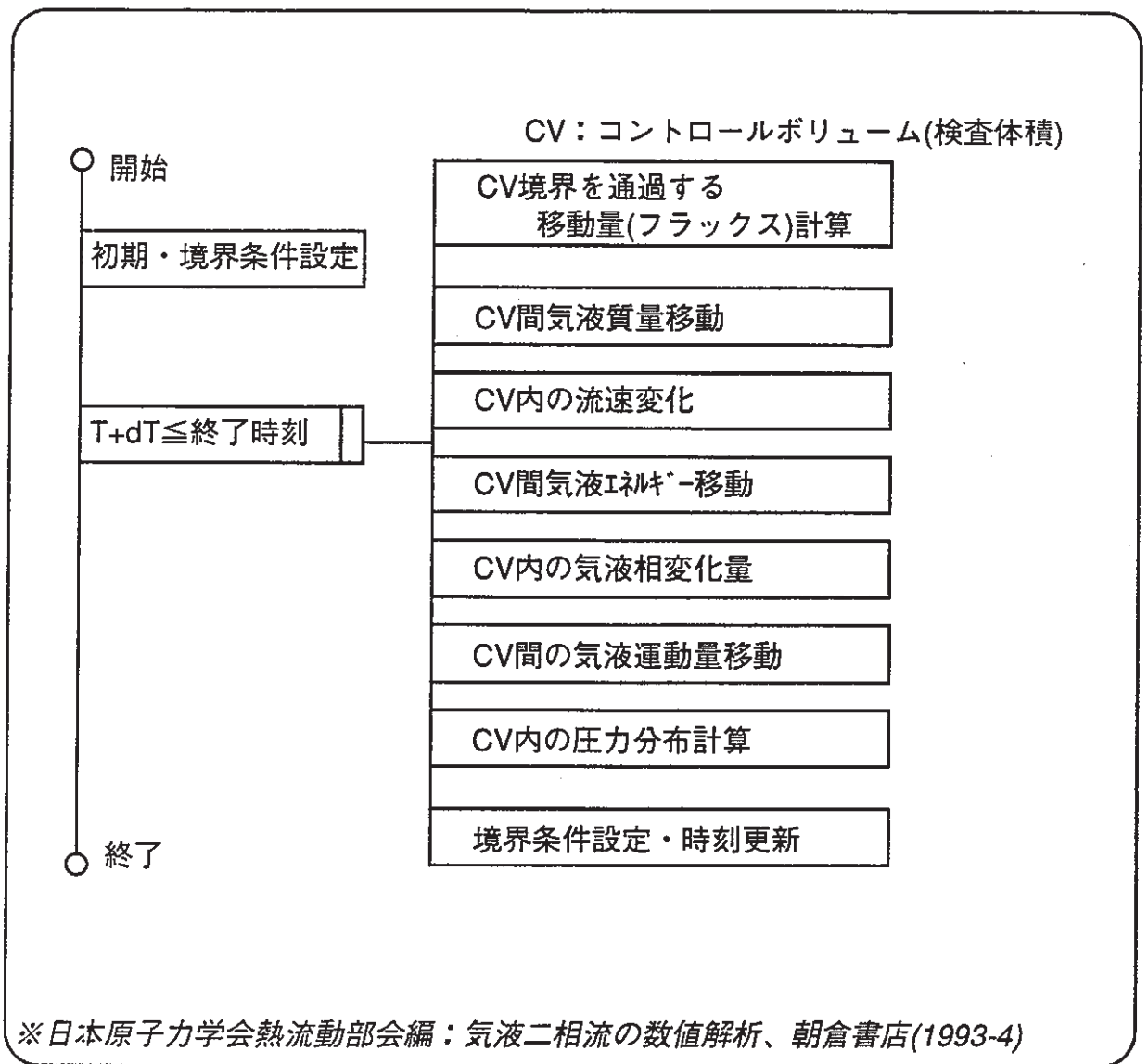
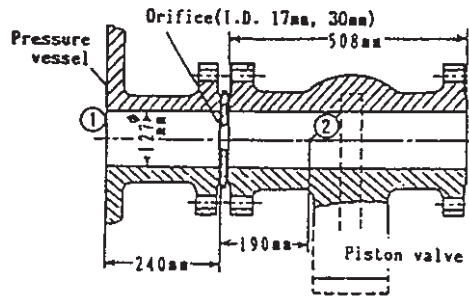
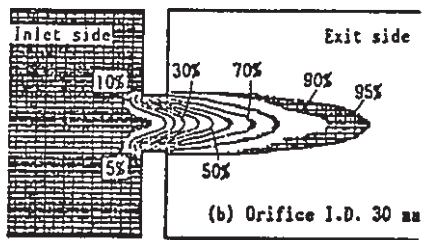
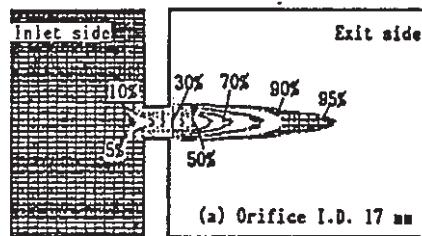


図3.1.3.4-3 SIMAコードの構成



(a)実験体系



Interval of lines : 5 %

(b)ボイド率分布

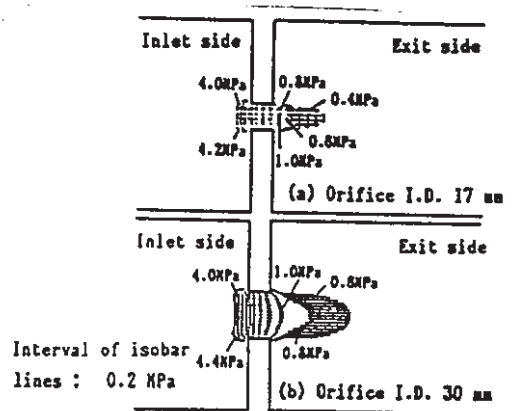
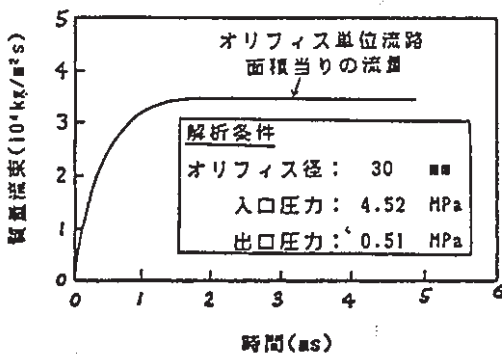
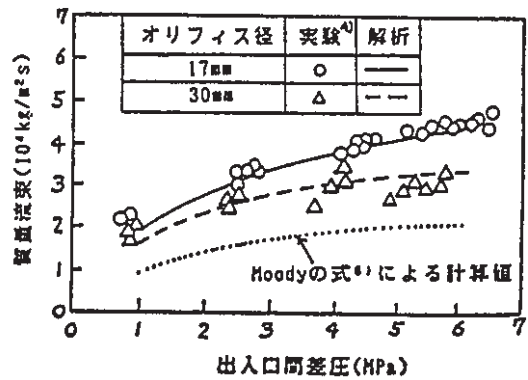


Fig. 9. Pressure distribution.

(c)圧力分布



(d)放出流量過渡変化



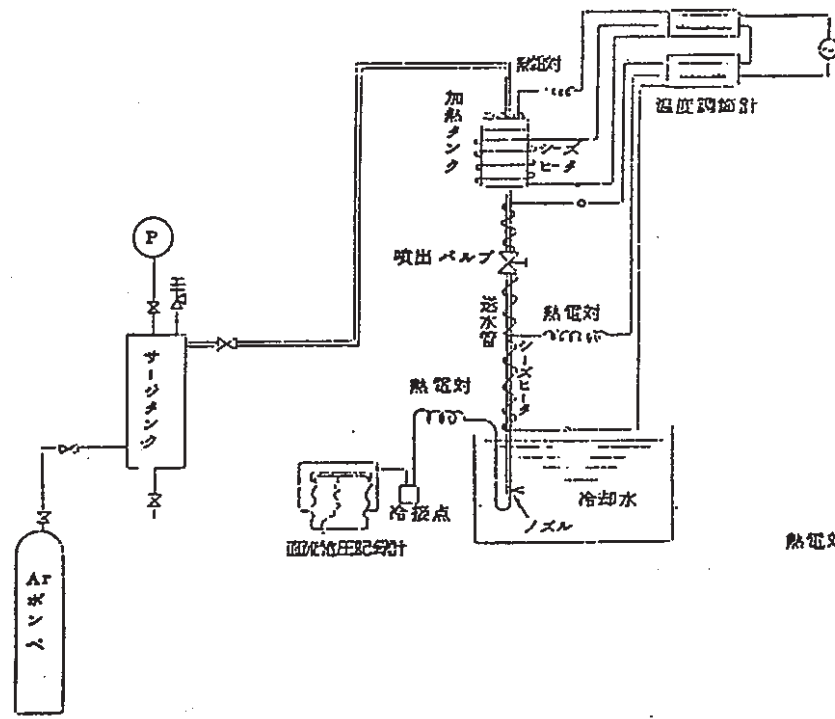
(e)実験と解析との比較

図3.1.3.4-4 SIMA2DAコードの解析例

(B) 検証試験の概要

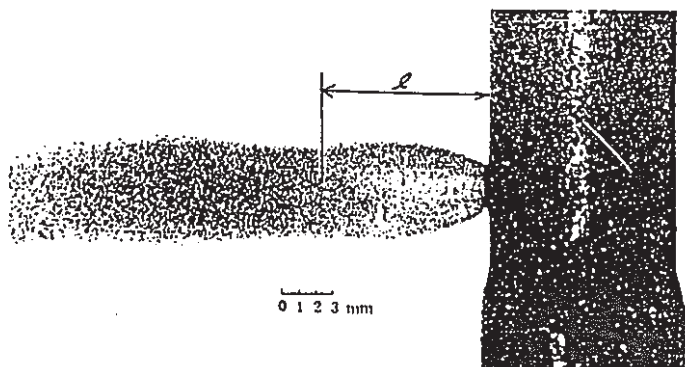
試計算結果を検証するための比較実験は、日立で行われた水中への高温高圧飽和水の噴流実験を採用した。この実験は、SG伝熱管水リーク時のナトリウム-水反応とウェステージ現象を解明する目的で行われた一連の実験で、反応噴流構造を解明するための対照実験である。

図3.1.3.4-5に実験概要を示す。上流は高温高圧の過飽和水(1~5MPa,140~180℃)、下流は常温常圧の水(0.1MPa,20℃)であり、この水プール中にφ0.3,0.5,1.0mm径のノズルが挿入され、噴流がプール水中へ放出される。写真判定により、噴流形状(太さ・長さ)と噴出流量が計測され、噴流構造を推定している。

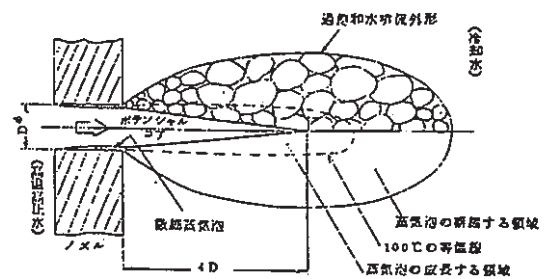


(a) 実験装置概観

(b) ノズル部詳細



(c) 噴流写真



(d) 噴流の構造

図3.1.3.4-5 比較実験(水中への高温高圧水の噴流)

(C) 試計算の概要

試計算にはATR圧力管破断やオリフィス臨界流解析などで多くの実績がある、2次元二相流解析コードSIMA2DAを採用した。試計算は、前記の水中への高温高圧飽和水の噴流実験と比較検証した。

この実験で検証される解析は次の条件で行った。噴出ノズル径は1mmとし、上流条件は高圧(圧力 P_{in})の過飽和度10Kの水、下流条件は常温常圧(0.1MPa・20℃)サブクール水とした。図3.1.3.4-6のように、解析メッシュはノズル開口部近傍で細かい軸対称2次元不等間隔メッシュである。タイムステップは計算安定(Courant)条件を満足している。主な構成方程式は壁面摩擦・相間摩擦・相変化(蒸発/凝縮)速度である。

解析の比較検証を行う前に、 $P_{in}=5\text{MPa}$ (臨界流量実験値 $=4.28\times 10^4(\text{kg/m}^2/\text{s})$)に解析条件を固定して、メッシュ数やタイムステップ等の解析条件の影響を、まず確認した。検討結果を、表3.1.3.4-2に示す。

メッシュ数が多いほど流量評価は大きい。またあるタイムステップで流量評価が極大となる。これは、解析精度と計算誤差双方が依存し、タイムステップが小さいほど解析精度の向上で流量評価が大きくなるが、同時に計算回数が多くなるため計算誤差の増加によって流量評価が小さくなったためと推定される。

本解析では、臨界流量実験値に近い結果を与えかつ解析コストが小さくなる最適解析条件は、メッシュ数約200・タイムステップ $0.05\mu\text{s}$ であることが分かり、以降の解析はこの条件で行った

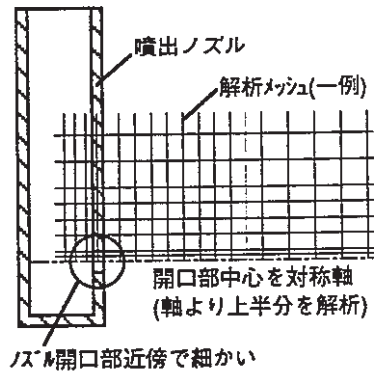


図3.1.3.4-6 解析メッシュ

表3.1.3.4-2 解析条件の影響比較

解析時間 0.1ms	臨界流量：解析 $G_{cs} \times 10^4 (\text{kg/m}^2/\text{s})$			
	タイムステップ(μs)			
メッシュ数	0.02	0.05	0.10	0.20
約100	3.27	3.99	4.07	3.20
約150	3.45	4.01	4.20	3.84
約200	3.49	4.14	4.14	4.02
約250	3.49	4.02	4.20	4.12

(D) 試計算の比較検証

表3.1.3.4-3に臨界流量の実験と解析の比較を示す。高圧条件では実験と解析の一致は良いが、低圧条件で差異の大きいことが分かる。前述の小笠原の実験と比較した臨界流解析でも同様の傾向を見せている。これは、上下流圧力差が小さいほど気液密度差は大きい、蒸発量評価式では気液密度差を考慮しておらず、低圧で解析と実験との誤差が大きくなったためと推定される。

表3.1.3.4-3 臨界流量の比較

上流圧力 Pin(MPa)	臨界流量：実験 Gce x10 ⁴ (kg/m ² /s)	臨界流量：解析 Gcs x10 ⁴ (kg/m ² /s)	臨界流量比 Gcs/Gce(%)
1.0	1.98	1.44	73%
2.5	3.12	2.66	85%
5.0	4.28	4.14	97%

図3.1.3.4-7に、ボイド率分布の解析結果を示す。実験では噴流中心に高圧水コアの存在が観察されたが、解析では噴出口直後での減圧沸騰により噴流中心に低蒸気量部分が存在しており、噴流構造(中心部のボイド率の違い)が見られる。しかし、圧力高いほどより高いボイド率の蒸気噴流が遠方へ拡大する定性的な傾向は解析できている。

表3.1.3.4-4に、噴流外径の比較を示す。解析における噴流外径は気泡塊限界の $\alpha > 30%$ ($\alpha < 30%$ は気泡流)で判定した。実験では噴流写真に見られるように回転楕円体の形状であるのに対し、解析では円錐体の形状であり、噴流形状に違いが見られる。しかし、噴流の広がりほぼ同じであることが分かる。

表3.1.3.4-4 噴流外径の比較

上流圧力 Pin(MPa)	最大噴流長さ		最大噴流半径	
	実験(写真判定)	解析($\alpha > 30%$)	実験(写真判定)	解析($\alpha > 30%$)
1.0	7mm	5mm	1mm	1mm
2.5	10mm	10mm	1mm	1.5mm
5.0	12mm	14mm	1mm	2mm

さらに、蒸気発生器の伝熱管リークで想定される「飽和蒸気・過熱蒸気の水の中への噴出」現象・体系でも解析可能かどうかを確認する。そのために、比較すべき実験結果は無いが、参考解析として次の解析を行った。

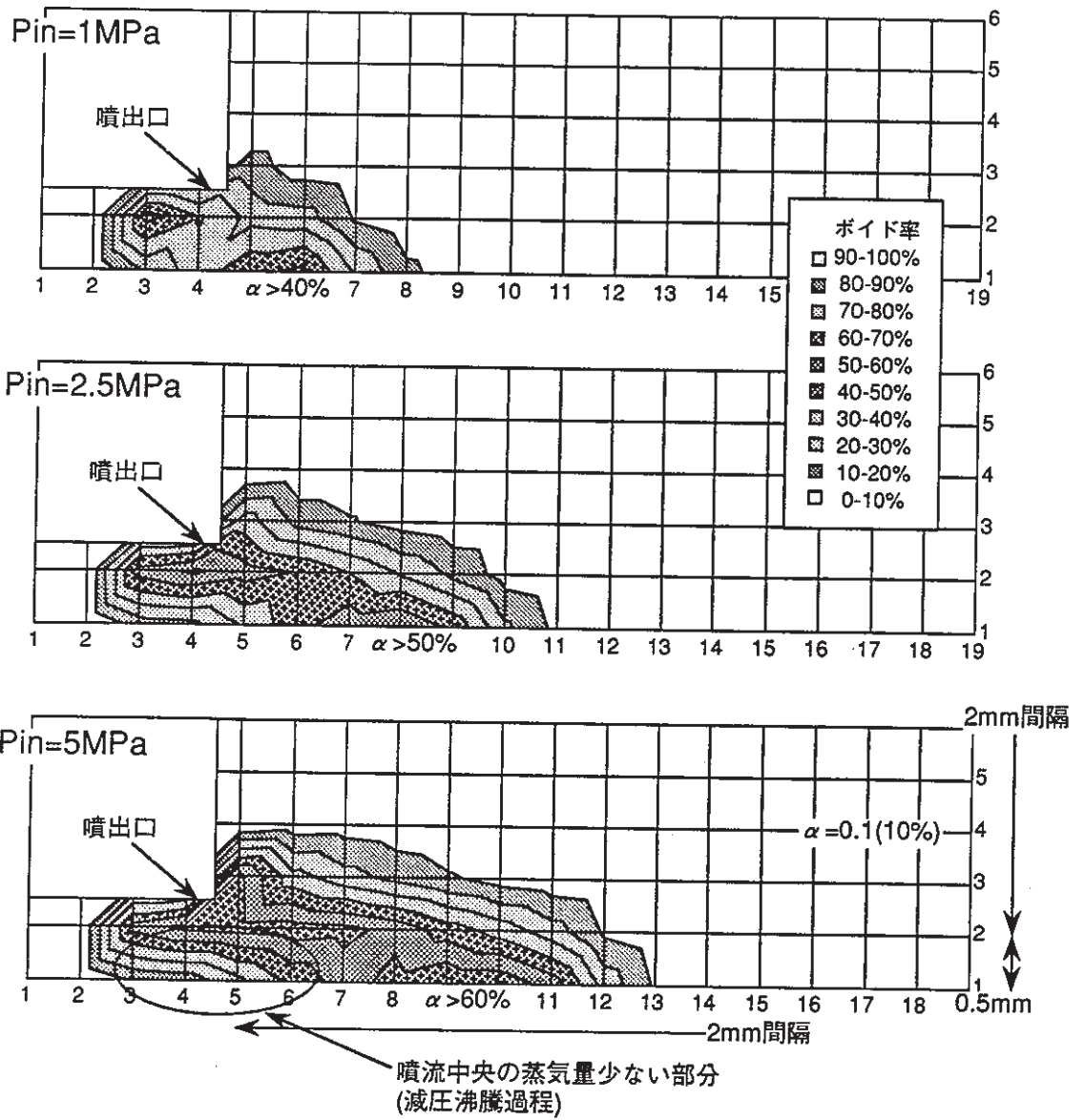


図3.1.3.4-7 噴流のボイド率分布(解析結果)

(E) 参考計算例：蒸気混合飽和水の場合

解析条件は、前記の「水中への高温高圧水の噴流実験」と同一体系を与える。解析メッシュ、タイムステップ、解析時間、および用いた構成方程式も、同一とする。解析の下流条件は常温常圧(0.1MPa・20C)のサブクール水であるが、上流側の水のボイド率条件を変えて、上流条件は圧力 P_{in} ・ボイド率 α_{in} の高圧蒸気混合飽和水であるとした。

表3.1.3.4-5に、噴出流量の比較を示す。上流圧力高いほど噴出流量は大きく、ほぼ圧力差の平方根に比例していることが分かる。この傾向はオリフィス流量計測等の单相流放出時の上流下流の差圧と流量の関係と類似しており、解析結果は妥当であると考えられる。また、上流ボイド率小さいほど噴出流量は大きい。これは気泡による流動抵抗が大きく、また流れの密度が小さいためである。

表3.1.3.4-5 噴出流量の比較(蒸気混合飽和水の場合)

解析結果	噴出流量：Gcs $\times 10^4$ (kg/m ² /s)				
	上流ボイド率 α_{in} (%)				
上流圧力 P_{in} (MPa)	0%	25%	50%	75%	100%
1.0	1.53	1.11	1.05	0.75	0.18
2.5	2.86	2.20	2.07	1.86	0.43
5.0	4.41	3.47	3.32	3.18	0.85

図3.1.3.4-8にボイド率分布の解析結果を示す。上流ボイド率が高いほど、より高いボイド率の蒸気噴流が、より遠方へ拡大していることが分かる。これは、上流ボイド率が高いほど噴流中の蒸気量が相対的に大きいため、水中での凝縮が遅れるためである。

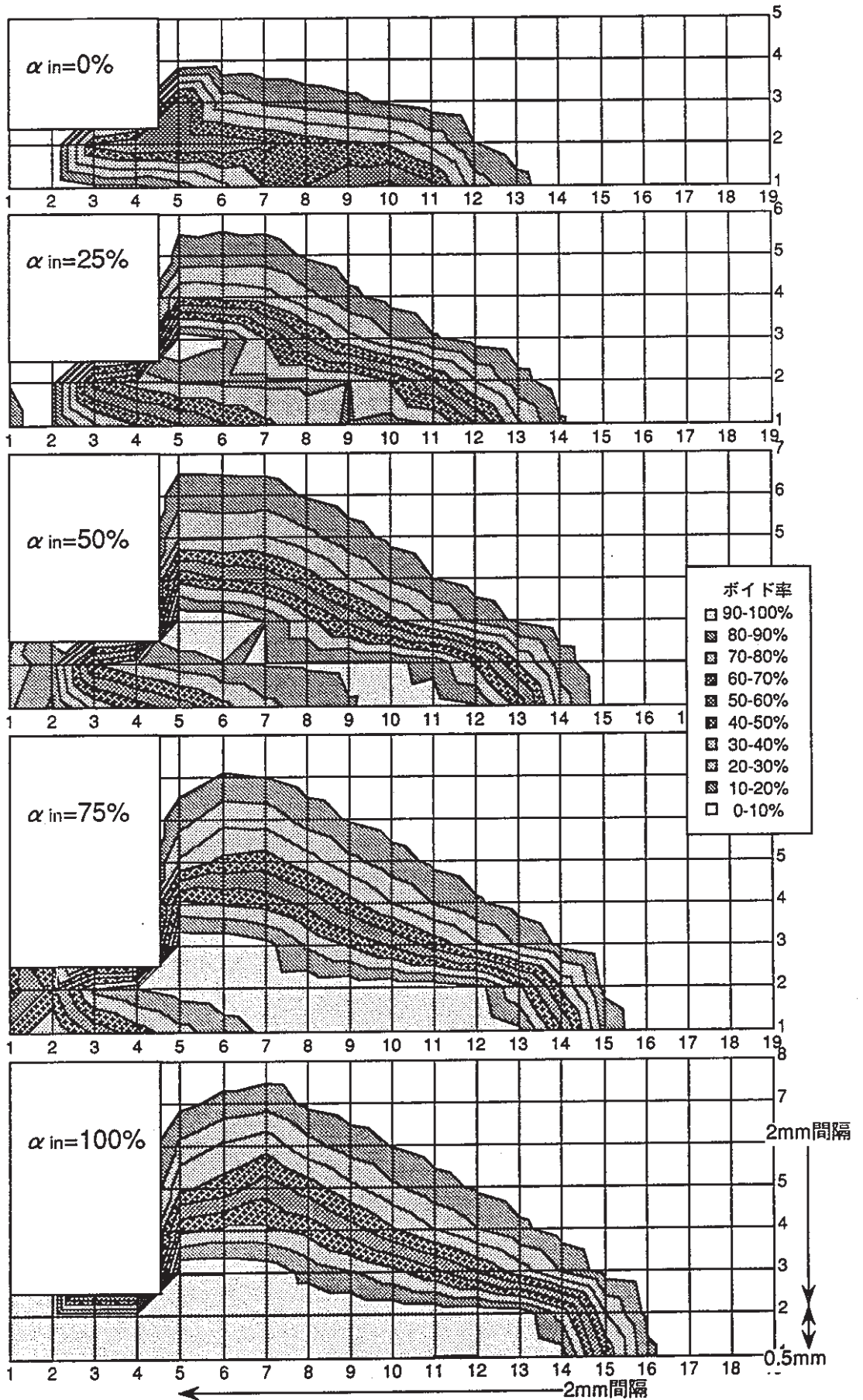


図3.1.3.4-8 噴流のボイド率分布(蒸気混合飽和水の場合)

(F) 参考計算例：過熱蒸気の場合

解析条件は、前記の「水中への高温高圧水の噴流実験」と同一体系を与える。解析メッシュ、タイムステップ、解析時間、および用いた構成方程式も、同一とする。解析の下流条件は常温常圧(0.1MPa・20C)のサブクール水であるが、上流側の蒸気の過熱度条件を変えて、上流条件は圧力 $P_{in}=5\text{MPa}$ 、ボイド率 $\alpha_{in}=100\%$ 、過熱度 $\Delta T_s=T_g-T_{gs}(\text{K})$ の高圧過熱蒸気であるとした。ここで、 T_g は蒸気温度、 T_{gs} は圧力 P_{in} における飽和温度である。

表3.1.3.4-6に、噴出流量の比較を示す。過熱度大きいほど、圧力一定条件では蒸気密度は小さいために、噴出流量は小さくなる傾向にある。また本解析では、過熱度による流量の違いは小さい。これは、本解析条件の範囲では、上流蒸気密度の違いは3%程度と、密度の差異が小さいことによる。

表3.1.3.4-6 噴出流量の比較(過熱蒸気の場合)

解析結果	上流蒸気の過熱度 $\Delta T_s=T_g-T_{gs}(\text{K})$				
	0K	50K	100K	150K	200K
噴出流量 $G_{cs} \times 10^3(\text{kg/m}^2/\text{s})$	8.50	8.46	8.42	8.37	8.31

図3.1.3.4-9にボイド率分布の解析結果を示す。過熱度による噴流形状の差異はほとんど見られない。これは、解析コードで用いている蒸発・凝縮量評価式は同一で、相変化量の過熱度依存性が相殺するためと、本解析条件の範囲では、上流蒸気密度の差異が小さいために蒸気の保有内部エネルギー(エンタルピー)の違いも小さいことによる。

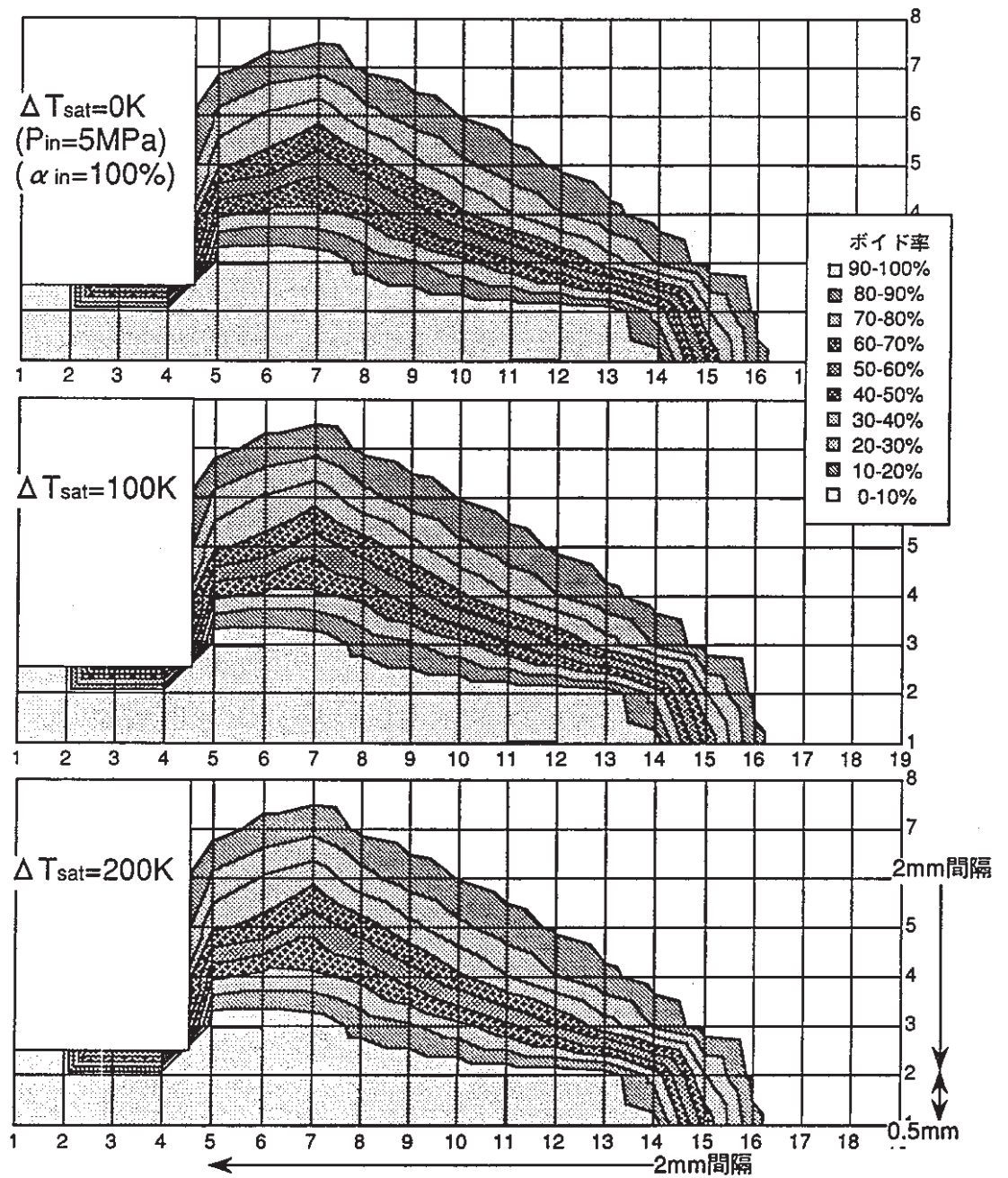


図3.1.3.4-9 噴流のボイド率分布(過熱蒸気の場合)

(G) まとめ

低圧雰囲気中への噴流放出問題は、質量の大きい水の下流側低圧雰囲気への拡大が容易であるために気液界面が安定する。また、減圧沸騰による蒸発の相変化のみを考慮すればよいことから比較的解析が容易とされ、解析例はSIMAを用いたものを含めて数例報告されている。しかし、水中への高温高圧水の噴流解析は、上流側の高温高圧水は減圧沸騰して質量の小さい蒸気に変化しつつ下流側の質量の大きい水へ放出することから拡大の気液界面が安定しにくい。また、減圧沸騰による蒸発とともに下流側の水による凝縮の相変化も考慮する必要があり相変化は複雑であり比較的解析が困難とされ、解析例の報告は無い。

今回の試計算により、二流体モデル2次元二相流解析コードSIMA2DAは、蒸気発生器伝熱管水リーク時に発生する飽和水・蒸気混合水・過熱蒸気の噴流現象を解析可能であることを示した。また、その解析結果は、比較実験を良く模擬できることが示された。

今後、(1)蒸発量評価式に見られたように、構成方程式精度の解析結果への影響が大きいことから、より物理イメージが近くかつ汎用的な構成方程式の整備を図ること、(2)圧力/相変化に伴い圧力計算の発散が生じやすいことから解析安定化を図ること、の2つの検討課題がある。

上記のように、本解析コードでは噴流中の水や蒸気の挙動は把握が可能である。しかし、蒸気混合水や過熱蒸気の噴流現象に関する実験例は現在のところ無い(公開されていない)ことから、蒸気混合水・過熱蒸気の噴流解析結果の詳細挙動や精度を要求される場合には、解析と比較可能な基礎実験が必要となる。

3. 1. 4 検証方法・手順の調査検討

前節の解析モデルの妥当性を確認するために必要な、検証方法・既往試験例・方法・コードの検証方法について、将来必要となる試験データ・実験式等を含めて検討する。

(A) 検証方法の整理設計

表3.1.4-1に示すように、化学反応モデルでは不明な量をチューニングパラメータとした。また、二流体モデルでも界面現象評価には界面面積濃度が必要となり、多くの実験的研究例があるが、広範囲の二相流流動条件に適用できる実験式は無い。そのため界面面積濃度も実験によるチューニングが必要と推定される。これらについては既往の試験結果による検証が必要となる。

表3.1.4-1 不明量の検証

モデル	不明量	検証手段 (既往試験例)	検証方法 (既往試験結果)	検証に必要な データ
二流体	界面面積 濃度 a_i	(水・蒸気系) 噴流現象の基礎実験	噴流形状	
化学 反応	水素/水 モル転換比F	・ Na-水反応 基礎試験 (ウェステージ基礎試験) ・ SG実機体系試験 (SWAT試験)	反応物の消滅量	生成物の生成量
	水素反応 速度定数K			単位時間当たりの 噴流体積変化量
	気相伝熱比 θ		Na温度上昇	気相(蒸気・水素) 温度上昇

(B) コードの検証方法

コード開発途上では、既往試験結果による解析検証が随時必要となる。既往試験結果によっても、開発コードの検証は可能である。しかし、既往試験には次のような問題点がある。表3.1.4-1のように各試験例では試験結果は少なく、パラメータサーベイは広範に行われていないことから、多くの試験と解析の比較検証による不明量の精度向上に難点がある。またナトリウム-水反応・ウェステージ基礎試験では、ウェステージ現象解明に重点が置かれ、発熱量や反応

物生成量等の計測結果は無いためにナトリウム-水反応現象自体の解明には不明点が多い。そのため、試験と解析の比較検証では化学反応モデルの妥当性確認は間接的とならざるを得ない。よって、表3.1.4-1の検証方法に留意されたSG実機体系試験が、今後計画のSWAT試験等では必要となる。

なお、コード開発完成時の最終チェックやサンプル計算問題は、過去のウェステージ基礎試験およびSWAT試験体系とし、この試験結果と比較検証する。

3. 2 計算方法の設計

前章で設計した解析モデル並びに各種基礎式を基に、プログラムを作成するに当たっての解析手法に必要な機能、基礎式(方程式・実験相関式)、解析手法の構成を設計する。特に、反応界面等においては密度変化が大きく計算が不安定となることが考えられるため、計算の安定化と高精度化を図るための数値計算方法についても設計する。ここでは、計算手法作成に必要な現象の近似法(モデル)、基礎式(方程式、実験相関式)、解析手法の構成を設計の範囲とする。

3. 2. 1 機能

表3.2.1-1に、本解析手法の機能をまとめる。対象とする流れは、図3.2.1-1に示すようにナトリウム-水反応領域を含む非定常・多次元の化学反応を伴う気液二相流である。解析モデル、数値解法、システムについての詳細は、次節以降に説明する。

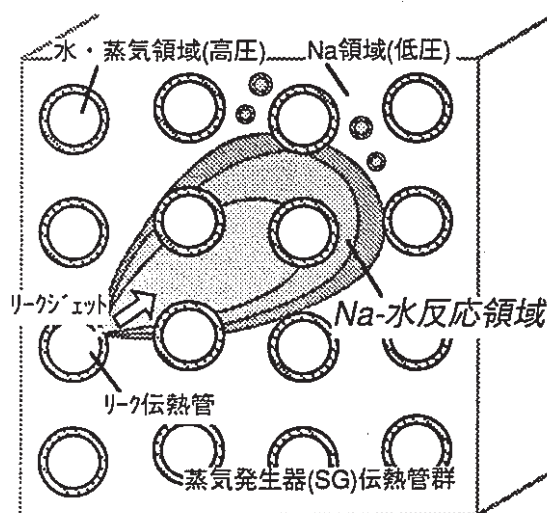


図3.2.1-1 SG伝熱管周りの流れ

表3.2.1-1 本解析手法の機能

項目		機能
解析対象		ナトリウム-水反応領域を含むSG伝熱管群周り流れ (非定常・多次元の化学反応を伴う二相流)
解析モデル	基礎方程式	3次元二流体モデル <ul style="list-style-type: none"> ・気相・液相の質量保存式 (反応物・生成物) ・気相・液相の運動量保存式 ・気相・液相のエネルギー保存式
	構成方程式	○二流体モデル <ul style="list-style-type: none"> ・界面面積濃度 ・壁面摩擦/相間摩擦 ・壁面熱伝達/相間熱伝達 ・相間質量移動量 ○化学反応モデル(不均一気液反応) <ul style="list-style-type: none"> ・化学種の質量移動量 ・発熱量
	状態式・物性値	水(蒸気)、Na、H ₂ 、NaOH、Na ₂ Oの状態量・物性値
	境界条件	<ul style="list-style-type: none"> ・リーク : 流入条件(ブローダウンコード/臨界流の式) ・SG構造 : 伝熱管群壁面(ノースリップ条件、熱伝達) ・自由 : 流出入条件
	座標系	3次元デカルト座標系
数値解法	離散化	有限体積法
	時間積分	オイラー陽解法
システム	インターフェイス	LEAPコード(ブローダウン・伝熱管高温ラプチャー)とのデータ授受
	ライブラリ	構成方程式・状態式・物性値のユーザー設定可能
	初期値	入力データファイル(流動境界条件・SG構造)
	主な出力項目	出力データファイルへの経時出力(指定時刻毎) (1)伝熱管群周り流動(流速・温度・圧力・化学種) (2)伝熱管表面温度

3. 2. 2 基礎式

基礎方程式、構成方程式、および境界条件の関係を図3.2.2-1に示す。構成方程式の多くは、ある特定の条件下での実験により求められたものであり、本解析手法では図3.2.2-1のように、必要とされる相間移動量を構成方程式より得て、また解析境界条件を与えて、流動状態(圧力・温度・流速等の気液相の物理量)を基礎方程式で解析する。

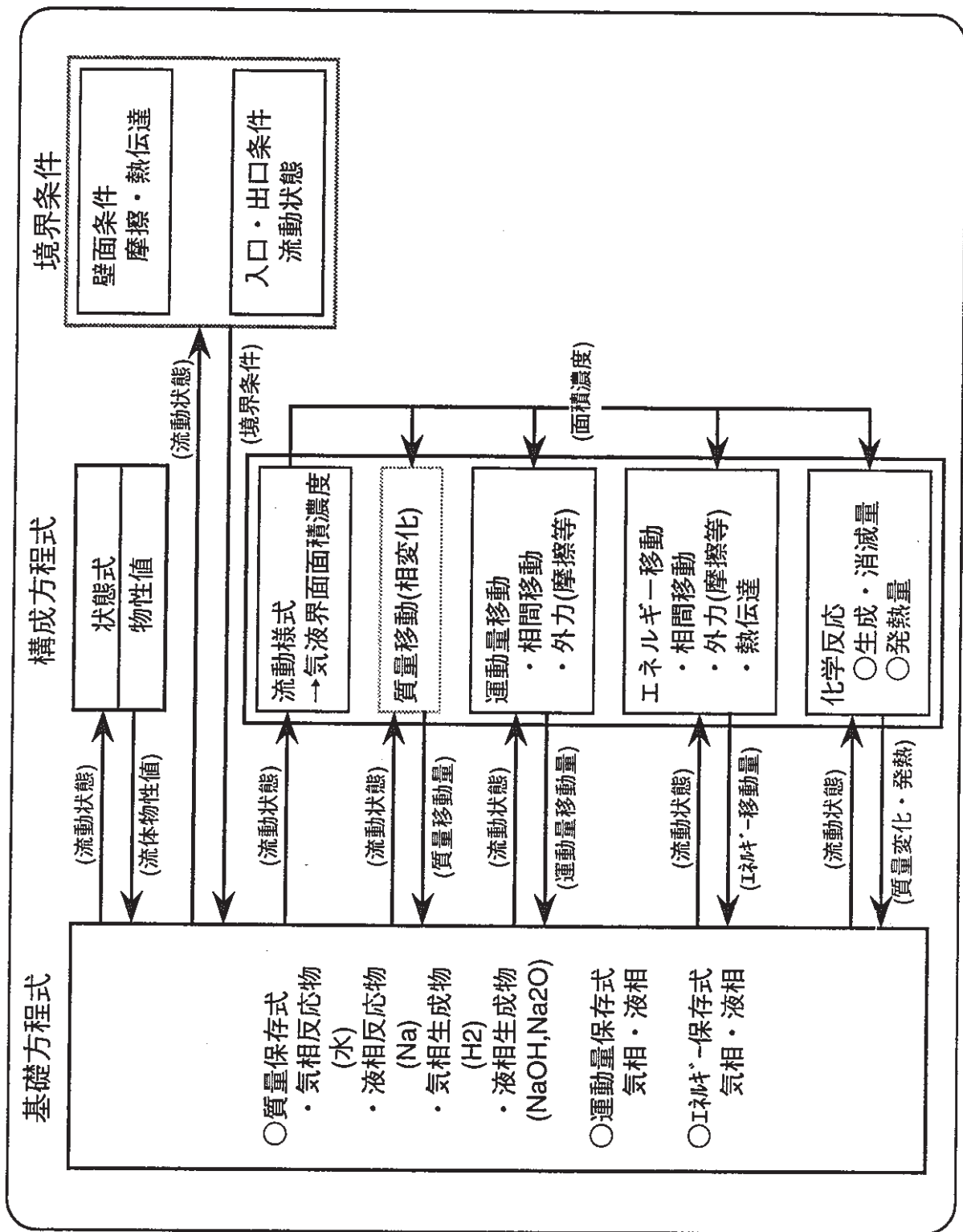


図3.2.2-1 基礎式の関連

(1) 基礎方程式

図3.2.2-2に示すように、3次元二相流の気相・液相(と化学反応物・生成物)に対して、次の12の二流体モデル保存式を解く。なお、座標系はデカルト座標系を用いる。

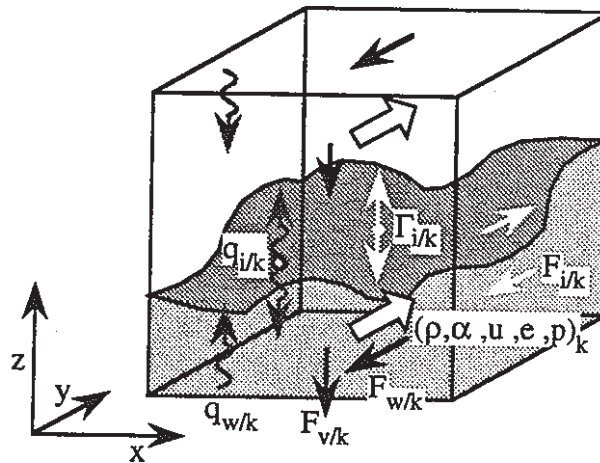


図3.2.2-2 二流体モデルの概念図

○質量保存式(4式)

α に体積率の拘束条件を与えることで、方程式系が閉じる。流速 u は k =気相(g)、液相(l)の各相の平均値であり、 α 、 ρ 、 m は kc =気相反応物(gs)、液相反応物(ls)、気相生成物(ge)、液相生成物(le)に区別されている。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{kc}\rho_{kc}) + \nabla(\alpha_{kc}\rho_{kc}\mathbf{u}_k) = m_{kc} \dots\dots\dots(3.2-1)$$

○運動量保存式(k =気相(g)、液相(l)の2式)

右辺の1~5項は、各々圧力、壁面摩擦、相間摩擦、体積力、相間質量移動に伴う運動量移動である。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k\rho_k\mathbf{u}_k) + \nabla(\alpha_k\rho_k\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{u}_k) = -\alpha_k\nabla p - \mathbf{F}_{w/k} - \mathbf{F}_{i/k} - \mathbf{F}_{v/k} - m_{kc}\mathbf{u}_{i/k} \dots\dots\dots(3.2-2)$$

○エネルギー保存式(k=気相(g)、液相(l)の2式)

右辺の1~7項は、各々圧力仕事、壁面摩擦・体積力仕事、相間摩擦仕事、相間質量移動に伴うエネルギー移動、壁面伝熱、相間伝熱、発熱である。 $i_{i/k}$ は界面で輸送されるエンタルピーである。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k (e_k + u_k^2/2)) + \nabla (\alpha_k \rho_k u_k (e_k + u_k^2/2 + p/\rho_k)) \\ & = -\alpha_k \nabla p u_k - (F_{w/k} + F_{v/k}) u_k - F_{i/k} u_{i/k} + m_k (i_{i/k} + u_{i/k}^2/2) + q_{w/k} + q_{i/k} + q_{v/k} \\ & \dots\dots\dots(3.2-3) \end{aligned}$$

(2) 構成方程式

保存式変数を求めるために次の関係式が必要である。なお◎は本モデルで新たに設定が必要なものである。

(A) 二流体モデル

○圧力条件

本モデルでは、気液相圧力は平衡(1圧力モデル)を仮定する。

○1 検査体積内の相間収支式(Jump-Conditions)。

・体積率の総和量の拘束条件

$$\alpha_{gs} + \alpha_{ge} + \alpha_{ls} + \alpha_{le} = 1 \dots\dots\dots(3.2-4)$$

$$\alpha_{gs} + \alpha_{ge} = \alpha_g \dots\dots\dots(3.2-5)$$

$$\alpha_{ls} + \alpha_{le} = \alpha_l \dots\dots\dots(3.2-6)$$

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \dots\dots\dots(3.2-7)$$

・相間保存(とびの条件)

質量移動量 $\sum_{kc} m_{kc} = 0 \dots\dots\dots(3.2-8)$

摩擦力 $\sum_k F_{i/k} = 0 \dots\dots\dots(3.2-9)$

速度 $\sum_k u_{i/k} = 0 \dots\dots\dots(3.2-10)$

伝熱 $\sum_k q_{i/k} = 0 \dots\dots\dots(3.2-11)$

○界面面積濃度

前述のように気液体積率の関数で流動様式に依存することから、チューニングパラメータとすることも想定される。

$$a_i = a_i(\alpha_k) \dots\dots\dots(3.2-12)$$

○相間質量移動量

液相の蒸発・気相の凝縮は考慮しない($m = \Gamma = 0$)。

○摩擦力の一般形

$$F_{w,i/k} = \zeta_s \frac{\rho_k}{2} |\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k'}| (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k'}) \dots\dots\dots(3.2-13)$$

○壁面摩擦力

乱流平板のBlasius式で与え、 L は代表長さ、 D_e は代表寸法である。

$$\zeta_i = fL/D_e \dots\dots\dots(3.2-14)$$

$$f = 0.3164\sqrt{Re} \dots\dots\dots(3.2-15)$$

$$Re = \rho_k D_e |\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k'}| / \mu_k \dots\dots\dots(3.2-16)$$

○相間摩擦力

気泡ドリフトモデルで与え、 V_{gj} は気泡ドリフト速度である。

$$\zeta_i = C_D a_i (\rho_{k'} - \rho_k) g / \rho_k V_{gj}^2 \dots\dots\dots(3.2-17)$$

$$C_D = 2.0 \dots\dots\dots(3.2-18)$$

$$|\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k'}| \equiv v_r = (1 - C_o \alpha_k / \alpha_{k'}) \mathbf{u}_k - C_o \mathbf{u}_{k'} \dots\dots\dots(3.2-19)$$

$$C_o = 1.0 \dots\dots\dots(3.2-20)$$

◎浮力・重力の体積力

二流体モデルでは、各相の重力を考慮することで間接的に浮力が考慮される。

$$F_{v/k} = \rho_k g \dots\dots\dots(3.2-21)$$

◎壁面熱伝達

液体金属強制対流を仮定し、 A は表面積、 $tube$ は伝熱管を表す。

$$q_w = h_{tube-Na} A_{tube} (T_{tube} - T_{Na}) \dots\dots\dots(3.2-22)$$

$$h_{tube-Na} = \frac{\lambda_{Na}}{D_{tube}} Nu_{tube} \dots\dots\dots(3.2-23)$$

$$\text{Nu}_{\text{tube}} = 1.125(\text{Re}_{\text{tube}} \cdot \text{Pr}_{\text{Na}})^{0.413} \dots\dots\dots(3.2-24)$$

$$\text{Re}_{\text{tube}} = \rho_{\text{Na}} D_{\text{tube}} |u_{\text{Na}}| / \mu_{\text{Na}} \dots\dots\dots(3.2-25)$$

$$\text{Pr}_{\text{Na}} = \mu C_p / \lambda \dots\dots\dots(3.2-26)$$

◎界面熱伝達

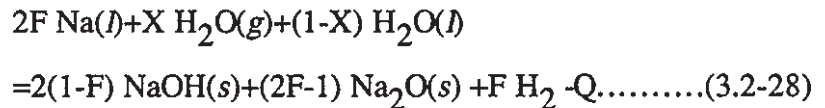
発熱支配のため反応界面では熱伝達を無視する。

非反応界面では、高レイノルズ数気泡球を仮定したモデルを使用し、 κ は気液粘性比である。

$$\text{Nu}_m = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \frac{1}{\text{Re}^{1/2}} (2.89 + 2.15\kappa^{0.64}) \right]^{1/2} (\text{Re} \cdot \text{Pr})^{1/2} \dots\dots\dots(3.2-27)$$

(B) 化学反応モデル

3. 1で述べたように、ナトリウム-水反応を次の総括反応方程式で取り扱う。第1パラメータ：水素モル転換比F、第2パラメータ：水素反応速度定数K、第3パラメータ：気相伝熱比 θ を導入し、化学反応に伴う各化学種の生成消費量と発熱量を評価する



(C) 状態式・物性値

○気液二相の熱的状态式

$$\rho_k = \rho_k(p, e_k) \dots\dots\dots(3.2-29)$$

○気液二相の熱量的状態式

$$e_k = e_k(p, T_k) \dots\dots\dots(3.2-30)$$

$$T_k = T_k(p, e_k) \dots\dots\dots(3.2-31)$$

○物性値(状態量の関数)

$$\mu_k = \mu_k(p, T_k) \dots\dots\dots(3.2-32)$$

$$C_{p_k} = C_{p_k}(p, T_k) \dots\dots\dots(3.2-33)$$

$$\lambda_k = \lambda_k(p, T_k) \dots\dots\dots(3.2-34)$$

など

(3) 境界条件

解析対象における境界条件は表3.2.2-1のとおり与える。なお、壁面境界条件の一部は、前述の構成方程式により与えられる。

表3.2.2-1 境界条件

種別	物理量	境界条件	指定方法
入口 (リーク箇所)	圧力、温度、流速 (流量・口径)	経時変化	入力ファイル
入口・出口 (伝熱管群間)	圧力、温度、流速	自由流出・時刻固定	入力ファイル
壁面 (伝熱管表面)	圧力	表面法線方向の勾配 =0	入力ファイル
	流速	ノースリップ	入力ファイル
	温度	熱流束(熱伝達)固定	構成方程式 (ユーザー関数)

3. 2. 3 解析手法

(1) 離散化方法

図3.2.3-1(a)に示すように、本解析手法では解析対象の空間をデカルト座標系で直交格子に分割し、各格子(セル)中央で全ての流体の変数を定義する(レギュラーメッシュ)。また有限体積法に基づき、前述の基礎方程式を1セル(1検査体積)内で積分する。

有限体積法の適用理由は、基礎方程式の変数(保存量)をそのまま扱うので、数値計算手順の物理的意味が明らかであり、境界条件の取扱い・構成方程式の導入も容易であることによる。また、レギュラーメッシュの適用理由は、二流体モデルによる二相流解析では気液相が不連続となる場合が想定されるが、このような計算点間の不連続性にも容易に対応可能であることによる。

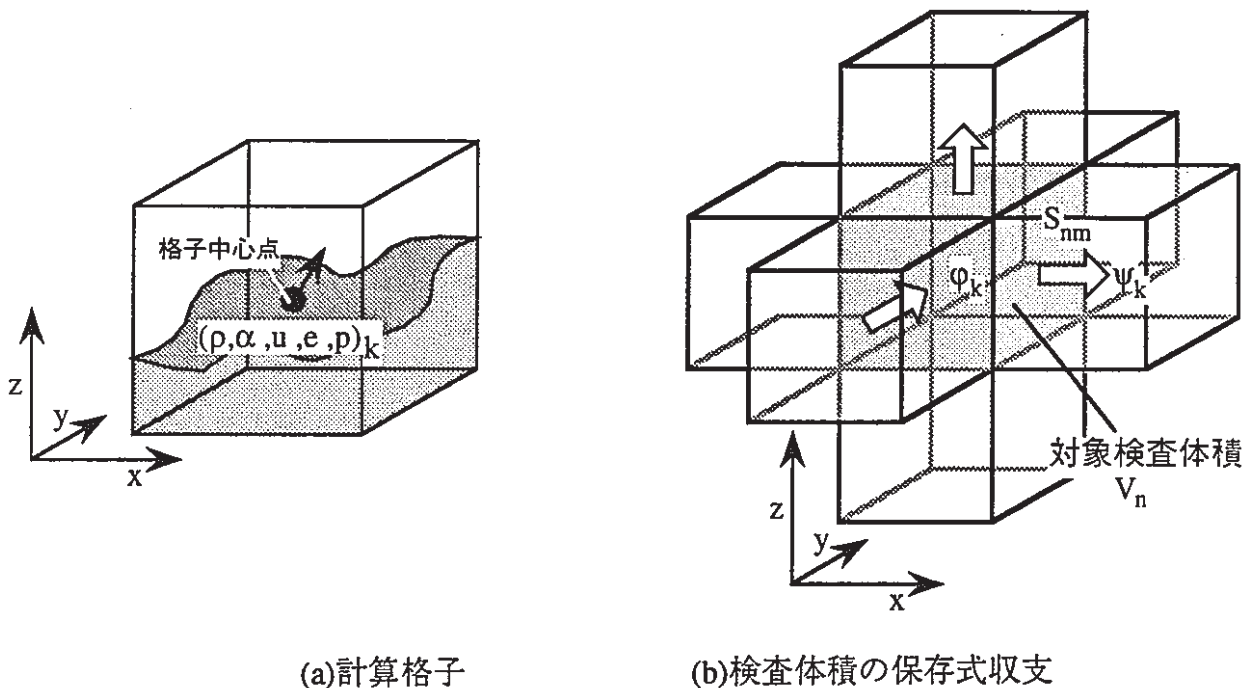


図3.2.3-1 離散化体系

図3.2.3-1(b)に示す計算格子と検査体積で離散化された保存式は次の通りである。基礎方程式のk=気相(g)、液相(l)、kc=気相反応物(gs)、液相反応物(ls)、気相生成物(ge)、液相生成物(le)を表す。

○一般化された二流体モデルの保存式

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi_k + \nabla \psi_k = b_k \dots\dots\dots(3.2-35)$$

○保存量

$$\varphi_k = \begin{bmatrix} \alpha_{kc} \rho_{kc} \\ \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \\ \alpha_k \rho_k (e_k + u_k^2 / 2) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.2-36)$$

○フラックス

$$\psi_k = \begin{bmatrix} \alpha_{kc} \rho_{kc} \mathbf{u}_k \\ \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{u}_k \\ \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k (e_k + u_k^2 / 2 + p / \rho_k) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.2-37)$$

○生成・消滅量

$$b_k = \begin{bmatrix} m_{kc} \\ -\alpha_k \nabla p - \mathbf{F}_{w/k} - \mathbf{F}_{i/k} - \mathbf{F}_{v/k} - m_{kc} \mathbf{u}_{i/k} \\ -\alpha_k \nabla p \mathbf{u}_k - (\mathbf{F}_{w/k} + \mathbf{F}_{v/k}) \mathbf{u}_k - \mathbf{F}_{i/k} \mathbf{u}_{i/k} + m_k (i_{i/k} + u_{i/k}^2 / 2) \\ + q_{w/k} + q_{i/k} + q_{v/k} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.2-38)$$

上記の式は、n番目の検査体積(cv)内の保存式として空間積分される。体積平均値<>で検査体積保存量を代表し、nのm方向の面境界における平均値を[]_{nm}とする。

$$\frac{d}{dt} \langle \varphi_k \rangle_n = - \sum_m [\psi_{km}]_{nm} S_{nm} / V_n + \langle b_k \rangle_n \dots\dots\dots(3.2-39)$$

$$\langle \varphi_k \rangle_n = \int_n \varphi_k dV / V_n \dots\dots\dots(3.2-40)$$

$$\langle b_k \rangle_n = \int_n b_k dV / V_n \dots\dots\dots(3.2-41)$$

$$S_{nm} = \Delta x_{m' \neq m} \Delta x_{m'' \neq m} \Big|_n \dots\dots\dots(3.2-42)$$

$$V_n = \prod_m \Delta x_m \Big|_n = \Delta x \Delta y \Delta z \Big|_n \dots\dots\dots(3.2-43)$$

圧力は独立変数ではなく、体積率の拘束条件(下式)より物性値の陰関数の形で求められることから、はさみうち法を使用して圧力を算出する。

$$\sum_k \langle \alpha_k \rho_k \rangle / \rho_k(p, e_k) = 1 \dots\dots\dots(3.2-44)$$

(2) 差分化方法

(1) の有限体積法での基礎方程式をEulerの陽解法で時間積分する。新しいタイムステップ $j+1$ における保存量を、古いタイムステップ j での値を元に計算する。

$$\begin{aligned} \langle \phi_k \rangle_n^{j+1} = & \langle \phi_k \rangle_n^j + \langle b_k \rangle_n \Delta t \\ & - [\psi_k(x_2) - \psi_k(x_1)]_n^j \Delta y \Delta z_n \Delta t - [\psi_k(y_2) - \psi_k(y_1)]_n^j \Delta z \Delta x_n \Delta t - [\psi_k(z_2) - \psi_k(z_1)]_n^j \Delta x \Delta y_n \Delta t \\ & \dots\dots\dots(3.2-45) \end{aligned}$$

Euler陽解法の使用理由は表3.2.3-1に示すとおりである。本解析手法では、解くべき方程式数が多いが、その場合でもプログラム構成が比較的簡単となる。二相流では単位時間当たりの生成消滅量が比較的小さい(時定数が大きい)が、化学反応では単位時間当たりの生成消滅量大きい(時定数が小さい)。そのため、化学反応流動解析では、小さいタイムステップが要求され、かつ長時間の解析・膨大な計算量が必要となる(Stiffness問題)。なお、プログラム開発の過程でコード高速化の検討を適宜検討する。

表3.2.3-1 時間積分方法の比較

	利点	欠点
陰解法	タイムステップ幅を比較的大きくとれる	大規模な連立方程式を解くため、 ・プログラムが複雑化 ・1タイムステップ当たりの計算量大きい
陽解法	プログラム構成が簡単	計算安定条件(Courant条件)による タイムステップの上限

(3) 計算の安定化方法

レギュラーメッシュでは、全ての流体変数を各セル中央で定義しているため、解析時に発生した圧力不安定が消失しづらい(チェッカーボード問題)。よって、プログラム開発過程で、圧力平滑化(1次精度TVD法であるGodunov法)方法や、二流体モデル安定化に用いられる仮想質量・数値拡散の導入等、必要に応じて数値安定化法を導入する。

また解析結果を高精度化するために、構成方程式・状態式・物性値式には、二相流研究(原子力分野)で実績のある相関式を適宜検討して導入する。

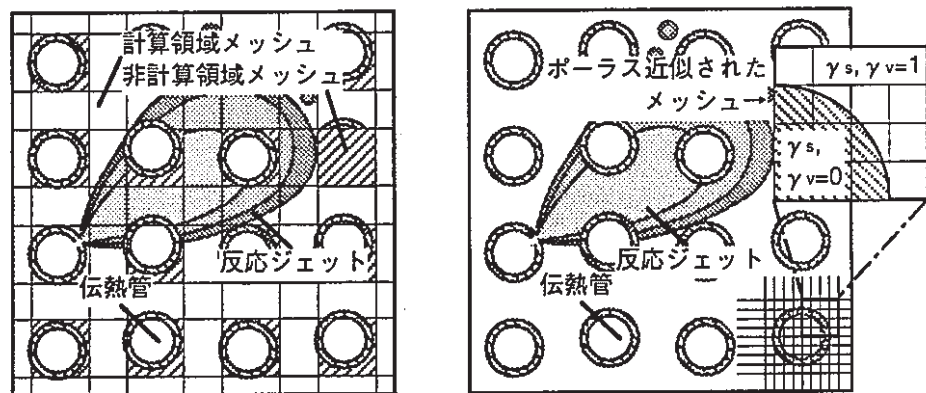
(4) 構造物の取り扱い方法

解析体系の空間離散化は(1)のように行うが、SG伝熱管等の流路中に置かれた構造物の取り扱い方法は、表3.2.3-2のように非計算領域化とポーラス近似の2つの方法が考えられる。また、SG伝熱管群への適用事例の模式図を、図3.2.3-2に示す。

図3.2.3-2より本問題は解析量が多いことが容易に予想されるので、できるだけ解析量の少ない非計算領域化法を適用するが、プログラム開発の過程でポーラス近似の適用を適宜検討する。

表3.2.3-2 解析体系の空間離散化方法

項目	非計算領域化 (一般的方法)	ポース近似 (有限体積法に特有)
概念	構造物を 非解析領域とする (非解析表面に壁面条件)	構造物を大きな領域内の 平均的な流路断面積と流動抵抗として取り扱う ↓ ・ 構造物の検査体積内占有割合を ポース(多孔体)近似 ・ 体積多孔率 γ_v ・ 面積通過率 γ_s を 各保存式に組み込み (ϕ, b の体積依存項には γ_v) (ϕ, b の表面依存項には γ_s)
欠点	・ 解析アルゴリズム複雑化 (非計算領域の処理) ・ 詳細構造の表現困難	・ メッシュ生成に手間がかかる ・ 解析メッシュ数が多い (不必要メッシュ含まれ非効率的) ↓ 解析量の増大
利点	・ 少数メッシュ数で 生成容易 ・ 解析量は比較的小	・ 詳細構造が取り扱える ・ 解析アルゴリズムは単純化



(a)非計算領域化

(b)ポース近似

図3.2.3-2 解析体系空間離散化方法の適用事例

3. 3 プログラムの設計

3. 1及び3. 2の設計を基に、ナトリウム-水反応ジェットコードの開発設計を行う。具体的には、次年度以降のコードの詳細設計やコーディング作業に反映するために、開発に必要なコードの構成要素としての計算モジュール、サブルーチンの構成と、これら各要素間の主要パラメータのインターフェイス(つなぎ)等の設計を行う。なお、開発するコードはLEAPとは独立した形で計算できるものを基本とするが、将来的にLEAPへのカップリングが容易に行えるよう十分に配慮された設計とする。

3. 3. 1 計算モジュールの構成

図3.3.1-1に、本解析手法のモジュール構成を示す。本解析手法は、入・出力モジュール、ナトリウム-水反応を伴う流動解析を行う中核モジュールと構成方程式モジュール、流体諸物性値等を供給する状態式・物性値ライブラリで構成され、これを制御モジュールで統括する。

化学反応を考慮した場合には、化学反応の無い一般の二相流解析コードと比較して、構成方程式モジュールと状態式・物性値ライブラリを新たに用意する必要がある。また、化学反応に伴う各化学種の生成消滅量や発熱量を、解くべき基礎式全般に考慮すべきことから、一般二相流解析コードと比較してモジュール全体の変更が要求される。

よって本解析手法は、一般二相流解析コードと比較して大幅に異なるので、コード開発負荷量が一般二相流解析コードよりも非常に大きくなる。

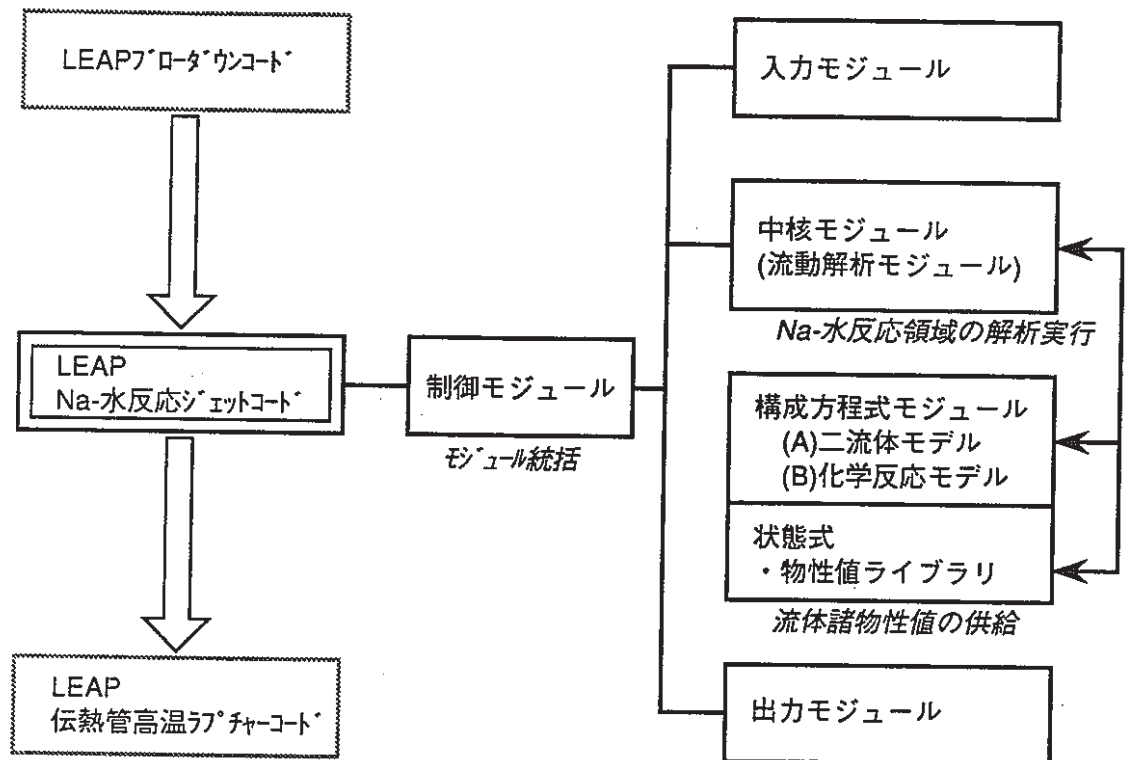


図3.3.1-1 本解析手法のモジュール構成

3. 3. 2 サブルーチンの構成

図3.3.2-1に、前節のモジュール構成に基づいたプログラムのサブルーチン構成を示す。

流動解析部のサブルーチン構成は、通常二相流解析コードと同じ構成である。また、フロー中の各サブルーチンの主な機能は、表3.3.2-1のとおりである。

表3.3.2-1 サブルーチンの機能

ルーチン名	主な機能
主制御	全体制御、計算状態モニタ、外部コードへの対応
入力部	解析対象判定、入力データ読み込み
前処理部	解析体系の格子生成
初期値計算部	初期流動状態の設定
流動計算部	基礎方程式に基づく流動計算(二流体モデル二相流流動) ○構成方程式：二流体・化学反応モデルによる変数間関係設定 ○状態式：熱的・熱量的状態量の設定 ○物性値：物性値設定
後処理部	計算結果受け取り、流動状態の換算
出力部	出力ファイルの書き出し、解析結果判定

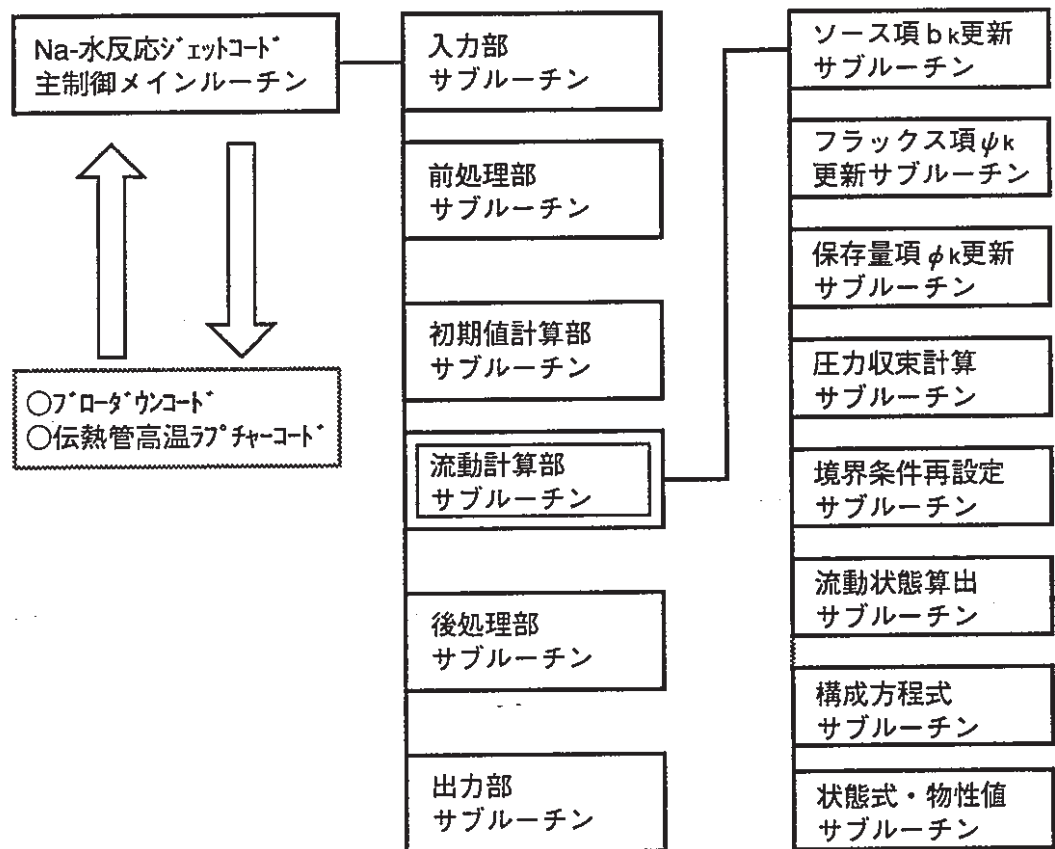


図3.3.2-1 プログラムのサブルーチン構成

3. 3. 3 インターフェイスの構成

図3.3.3-1に、インターフェイスの構成を示す。

本開発コードはスタンドアロンを基本とするが、将来的にLEAPへのカップリングが容易に行えるよう配慮されている。LEAPコードは、FBRのSG伝熱管に発生した初期リークにより、ウェステージ破損伝播現象を解析するコードである。LEAPでは、初期リーク発生から、リーク検出による水側ダンプ、ナトリウム-水反応を完全に停止させるまでの一連の過程における蒸気発生器内の流動を主な解析対象とする。本解析手法のナトリウム-水反応ジェットコードは、ブローダウン解析コードによる水リーク率と、同時にユーザーによる計算条件設定とSG条件を入力データとする。伝熱管高温ラプチャ解析コードへは、ナトリウム-水反応領域を含むSG伝熱管周囲の流動状態が与えられる。

なお、各入出力データは、固定長フォーマットによるテキストファイルで行う。モジュール間での主要パラメータ・変数授受は、ブロック整理されたCOMMON文で行う。

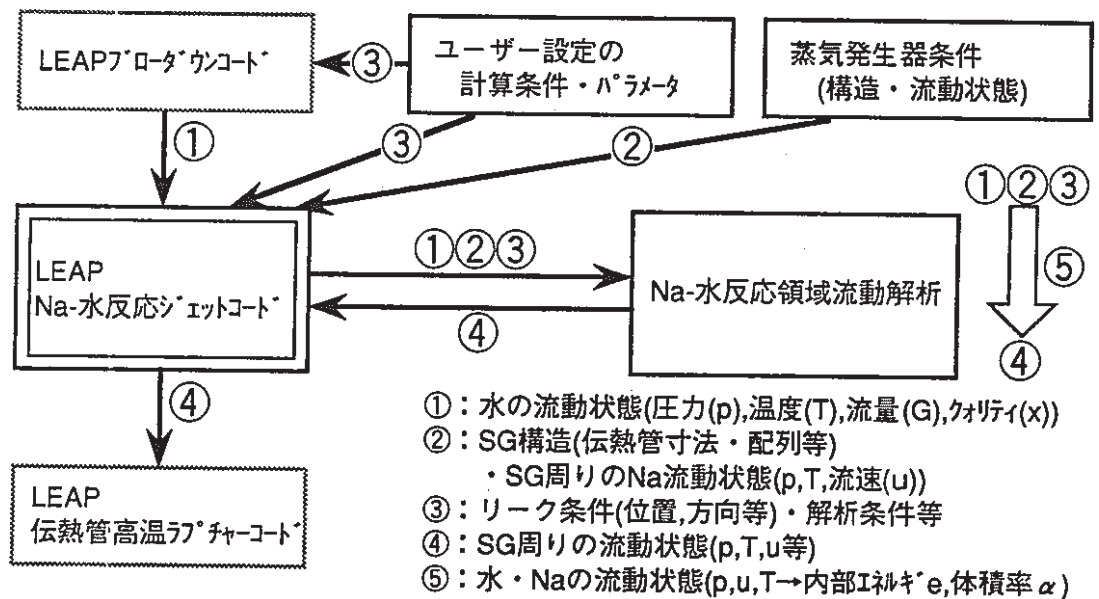


図3.3.3-1 インターフェイスの構成

3. 4 開発計画の設計

3. 3節の設計に基づき、解析コードを開発するための詳細計画を設計する。具体的には以下の設計内容を含む。(1)関連する類似コードの調査とその適用の可否、及び改修性(カップリング方法も含む)を整理・設計を行う。調査は、運動方程式等各種基礎式、数値解法、コードの機能、拡張性等をマニュアルあるいは文献等により行うものとする。(2)コードの開発期間及び作業量等を考慮した上で、新規にコードを開発する場合と前記(1)のコードを適用する場合との比較を行い、最適な開発方法を設計する。(3)前記(2)の提案を具体化するための詳細な開発計画を設計する。

3. 4. 1 類似コードの調査

文献に成果が公開されている気液二相流流動解析コードの概要・性能を調査し、その結果をまとめて表3.4.1-1に示す。

気液二相流解析研究が近年盛んであるが、現象自体が単相流と比較して桁違いに複雑で解析量も大きいため、これまで開発された気液二相流解析コードは、表3.4.1-1のように数えるほどしか無い。

FLOREA・PHOENICS(単相流)は燃焼解析コードであり、化学反応を取り扱えるが、対象となる化学反応は気体単相流中の均一系反応である。

MINCS-PIPEは、二流体モデルによる二相流解析コードでも数少ない、完全陰解法による解析手法を用いているが、二流体モデルの基礎式の複雑さから一次元のみ取り扱いとなり、ジェットのような多次元流動計算は不可能である。

K-FIXは、二流体モデル二相流解析コードの中でも早くから開発されてきた。元々原子力発電所の二相流流動解析用に開発されたが、あまり使用されておらず(理由は不明)、近年その役割は同一体系の解析が可能なTRACコードにシフトしている。そのため、実績はあまりない。

RELAP、TRACも、原子力発電所の二相流流動解析用に開発されたコードである。RELAPは一次元コードであり、多次元流動解析はできない。TRACは、実験関連式の確認等のための標準コードとして、最も有名な二相流解析コードである。いろいろな団体によりコードが改造されており、多くのバージョンが

ある。主に原子力発電所の巨視的なシステム解析に主眼があり、粘性項が省略されているなど詳細な二相流流動解析や、多次元流れ構造の解析には対応していない。

MISTRAL(α -FLOW)、PHOENICSは市販の汎用コードであり、非圧縮性粘性流体から圧縮性流体解析や二相流解析まで解析対象の範囲も広い。また構造を含む流体解析のモデルも考慮されているため、一般的な多次元解析には向いている。二相流解析手法は、单相流の非圧縮性流体解析と同じ解法である。そのため、主に低速の二相流解析が可能であり、超音速領域を含む圧力波や臨界流計算には適しない。

SIMA/SMORCは、原子力発電所の二相流流動解析用に開発されたコードで、対象に応じて異なるバージョンがある。非定常計算、特に超音速流れや圧力波を伴う臨界流で多くの実績を上げ、ATR圧力管破断解析なども行っている。近年では、給水加熱器などの低速二相流機器内の二相流定常解析でも実績を上げている。このように、あらゆる気液二相流解析が可能であり、原子力学会・混相流学会の研究委員会で、相関式評価用の標準コードとして採用されている。

これらの既存の気液二相流解析コードでは、本問題のナトリウム-水反応ジェットコードで発生する不均一系化学反応モデルを組み込んでおらず、このような不均一系化学反応を伴う気液二相流解析は、そのままでは不可能である。

表3.4.1-1 既存コードの比較

項目	二相流解析コード						
	FLOREA	MINCS -PIPE	K-FIX	RELAP .TRAC	PHOENICS	MISTRAL (α -FLOW)	SIMA /SMORC
開発者	日立	原研	LosAlamos等		CHAN	富士総研	日立
コード分類	開発コード	公開コード			市販コード		開発コード
体系	3次元	1次元	3次元	準1次元	3次元	3次元	1-3次元
二相流モデル (a)流動様式	噴霧流	気液二相流全般					
(b)モデル	混合体	二流体モデル(気液相の基礎方程式)					
(c)構成方程式	無	水/蒸気系の実験相関式			ユーザー指定		水/蒸気
化学反応モデル	燃焼流	×	×	×	燃焼流		×
構造物取り扱い		非計算領域(固定壁条件)			ホーラス近似		ホーラス近似 (SMORC)
離散化	差分	有限体積法					
変数定義方法	スタaggerドメッシュ						レギュラーメッシュ
時間積分	陽解法	陰解法	半陰解法(圧力計算を陰的に行う)			陽・半陰	
適用事例	燃焼解析	原子力安全解析			低速二相流機器		原子力機器

3. 4. 2 コード開発期間の比較

コードの開発期間及び作業量等を考慮した上で、新規にコードを開発する場合と、3. 4. 1のコードを適用する場合との比較を行い、最適な開発方法を設計する。3. 1～3. 3の設計を元に、反応ジェットコード開発の負荷量を検討し、図3.4.2-1に示す。

(1) 新規作成の場合

本問題の解析コードを新規作成する場合を100とする。その内訳は次の通りである。3. 1で設計した化学反応モデルを3. 3のプログラム構成の中で考えれば、各化学種の生成消滅量と発熱量の評価を解析の中核となる二相流流動解析モジュールに与える、構成方程式モジュールの一部分に相当する。よって、コード構成の中での二相流流動解析部分と構成方程式部分の比率はおよそ70：30となる。二相流流動解析部分は、気液二相の質量・運動量・エネルギーの保存式の解析に加えて、圧力解析部分も重要となる。これら4つの量の解析部分の比重はそれぞれ15ずつ占めており、残りの10は4つの量を解く方程式をカップリングする部分である。構成方程式部分の30のうち、各化学種の状態式・物性値ライブラリ関係が10で、二流体モデルと化学反応モデルの構成方程式の部分が20となる。

(2) SIMA/SMORCコード改修の場合

本問題の解析コードを、既存コード(SIMA/SMORC)の改修により作成する場合は、次のようになる。3. 2に示したように、化学反応を考慮した場合には、化学反応の無い一般の二相流解析コードと比較して、二流体モデルと化学反応モデルの構成方程式モジュールと、各化学種の状態式・物性値ライブラリを新たに用意する必要がある。また、3. 1示したように、化学反応に伴う各化学種の生成消滅量や発熱量を、解くべき質量・エネルギー保存式に考慮するべく改良が必要となる。また、一般二相流解析コードと比較してモジュール全体の変更が要求されるが、本化学反応モデルでは基礎式の増加量は小さいので、二相流流動解析部分における基礎式部分の改修負荷は小さい。以上を既存コードの改修の負荷量として具体化すれば、二相流流動解析部分70のうち、気液二

相の運動量・圧力解析部分の負荷はそれぞれ15から5程度へ、質量・エネルギー解析部分の負荷はそれぞれ15から10程度へ低減できる(化学反応を考慮した場合、質量・エネルギー保存式の変更が必要であるため、運動量・圧力解析部分よりも負荷量は大きい)。その場合でもカップリング部分の修正は必要なことから新規開発と同様の負荷量10とするので、全体負荷量は70となる。新規開発と比較して、既存コード改修の場合には30程度の負荷低減が図れる。

(3) SIMA/SMORC以外のコード改修の場合

SIMA/SMORC以外の既存コード(TRAC、PHOENICS、MISTRAL等)は、汎用化が図られているので、次の問題がある。(a)コード規模が大きく不要部分が多い等の冗長性がある。(b)コード改修の際に使用権の問題が生じる。(c)多次元二相流問題への適用実績が少ない。(d)Na-水反応流解析に当たっては、不均一(気液)化学反応モデルと物性値・構成方程式の新たな整備が必要である。

また、SIMA/SMORC以外の既存コードには次のような問題がある。これらの二相流解析手法では、単相流解析から二相流解析へと開発を進めたため、圧力と他の流体量定義点が異なるスタaggerドメッシュを用いている。スタaggerドメッシュは、前述のチェッカーボード問題は回避できるのであるが、有限差分法と同様に計算点間の連続性が必要であり、気液二相流間の不連続性に起因する圧力振動(Water-Packing現象)を解消するための解析手法は未だ確立していない。そのため、特に気液不連続面である液面形成の発生が想定される、多次元二相流解析での実績が無い原因となっているものと推定される。この問題は、ナトリウム-水反応ジェットでも発生すると推定される。

よって、SIMA/SMORC以外の既存コードの場合には、コードの改修は構成方程式部分の新規追加や二相流流動部分の改修にとどまらず全体に及ぶと考えられる。このときの負荷量は、二相流流動解析部分70のうち、気液二相の質量・運動量・エネルギー解析部分の負荷はそれぞれ15から10程度の低減、上記の問題解決を図るためには圧力解析部分の負荷は新規開発と同様15程度、全体負荷量は85で新規開発と比較して15程度の負荷低減にしかならない。特に汎用性が高いコードでは、その整備作業の負荷がさらに大きくなると考えられる。

(4) まとめ

日立開発のSIMA/SMORCは、(a)ソースコードの大きさは比較的小さいので改修性が良い。(b)レギュラーメッシュ採用のため、Water-Packing現象の問題などの対策も既に採られているので、前述の二相流解析で想定される気液相の不連続性への対応が図られている。(c)そのため、多次元二相流問題の使用実績が豊富である。

上記(b)の解決方法は、本問題の解析コードには本質的に必要なものであるが、既存コードの中では唯一、SIMA/SMORC特有のものである。このことから、ナトリウム-水反応ジェットコード開発における既存コード改修適用の場合、SIMA/SMORCコードは技術的にも最適なコードといえる。

以上のことからSIMA/SMORCでは、既存コード改修による負荷量低減のメリットが最大限生かせる。このことから、SIMA/SMORCを基本に、化学反応モデルと物性値・構成方程式の整備を行う改修方法は、他の既存コードを改修する場合と比較して、作業量は比較的小さくなると考えられる。よって、本問題のコード開発では、SIMA/SMORCを基本に改修する方法が最適である。

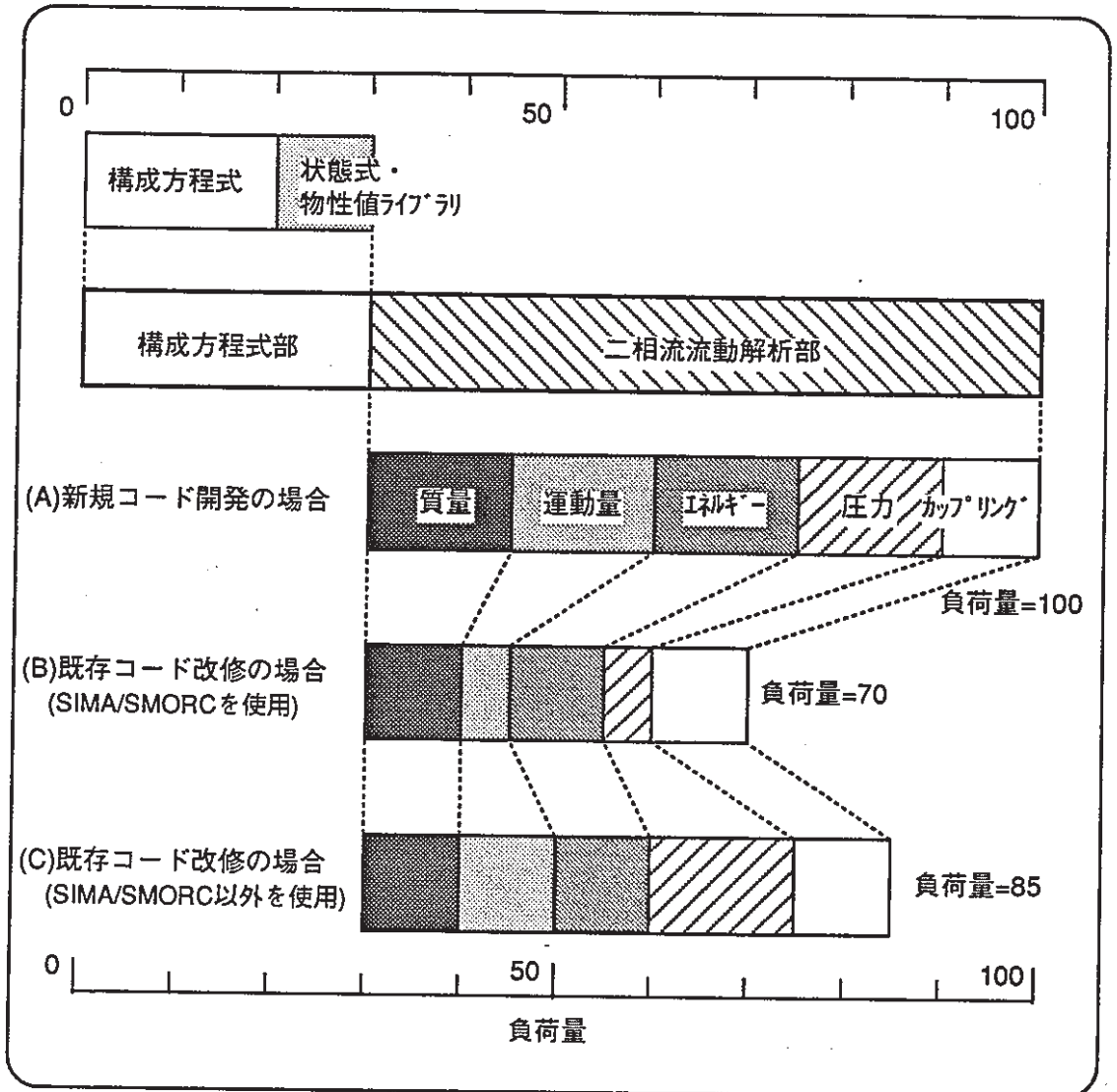


図3.4.2-1 反応ジェットコード開発の負荷量

3.4.3 開発計画の設計

3.4.2の提案を具体化するための詳細な開発計画を設計する。

蒸気噴流解析の実績豊富な2次元SIMAコードを基本コードに採用したナトリウム-水反応ジェットコード開発方法を、図3.4.3-1のように設計する。

開発方法は、化学反応の無い通常の二相流での検証を行う第1段階と、ナトリウム-水反応を伴う流動解析手法を開発する第2段階に分類した。

段階1：基礎解析

手順	開発内容	開発課題
(1)	作業環境での2次元SIMAコード動作確認	体系近似(噴流を軸対称2次元流近似)
(2)	より近い体系でのコードの動作確認	<ul style="list-style-type: none"> ・数値安定化法の改良(適宜検討) ・実験による解析検証 (公開文献：蒸気ジェットの実験)
(2-1)	低圧部蒸気(気体)を飽和水(液体)に置換 (高密度流体への噴流)	
(2-2)	高圧部飽和水(液体)を 飽和蒸気または過熱蒸気(気体)に置換 (高密度流体への低密度ジェット噴出)	

段階2：Na-水反応流動解析

(3)	Na-水反応ジェット問題の解析 下流側液相をナトリウムに置換	物性値・構成方程式の整備
(3-1)	化学反応モデルの試計算	化学反応モデル構築とコード化
(3-2)	検証解析：Na-水反応噴流現象を解析	Wastage基礎実験による解析検証
(4)	3次元化	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物の取り扱い ・詳細構造の格子生成 (ポラス近似は適宜検討)
(4-1)	検証計算：(2),(3)の問題で再検証	
(4-2)	実機解析：SG体系中の反応流動解析	<ul style="list-style-type: none"> ・SWAT試験による解析検証 ・パラメータのチューニング
(5)	高速化	<ul style="list-style-type: none"> ・化学反応モデルの改良 (Stiffness問題の緩和) ・時間積分方法の改良

図3.4.3-1 コード開発方法

4. まとめ

次期大型炉蒸気発生器 (SG) 伝熱管の合理的設計基準水リーク率 (DBL) の選定にあたって、高温ラプチャによる破損伝播の可能性を定量的に評価する必要がある。

本LEAP用ナトリウム-水反応ジェットコードの設計では、高温ラプチャを含む破損伝播挙動を適切に評価し、合理的なDBLを選定するために必要となるa) ブローダウン解析モデル、b) 高温ラプチャモデル (構造/破壊力学的モデル)、c) 反応領域温度分布解析のためのナトリウム-水反応ジェットモデルに関する全体の開発計画の中の、ナトリウム-水反応ジェット解析モデルの設計に関するものであり、解析モデルの検討を行ないコードを設計した。また、コード開発で必要となる、化学反応モデルと二流体モデルの試計算を行い、これらのモデルの妥当性を確認した。さらに、既往の解析コードとの比較によるコード間の比較検証を実施して、二相流解析で実績の多いSIMA/SMORCコードを基本に改修する方法が最適なコード開発であるとの見通しを得た。

5. あとがき

次期大型炉蒸気発生器 (SG) 伝熱管の合理的設計基準水リーク率 (DBL) の選定にあたって、高温ラプチャによる破損伝播の可能性を定量的に評価し、合理的なDBLを選定するために必要となるナトリウム-水反応ジェット解析モデルを設計した。

本報告の化学反応モデルでは、気液相の熱伝達や蒸発潜熱等の2次的伝熱と、反応界面の熱容量を考慮していないために、気相伝熱比によっては大きな気液相温度差が生じる。これらの2次的伝熱と反応界面のモデル化は、今後の検討課題である。

本報告の二流体モデルでは、(1)より物理イメージが近くかつ汎用的な構成方程式の整備を図ることと、(2)圧力計算の発散対策としての解析安定化を図ることの2つについては、今後の検討課題である。

今後本報告の設計に基づいてナトリウム-水反応ジェット解析コードの開発を行う際には、既存のナトリウム-水反応(ウェステージ)基礎試験やSWAT試験結果と解析との比較検証を、解析コードの各発展段階で行い、二流体モデルや化学反応モデルの検証や修正の検討を行う必要がある。同時に、計算コストは大きくなることが予想されるので、解析コードの高速化等を検討する必要がある。

解析コード開発後は、予定されているナトリウム-水反応試験設備SWATによる実験検証を行なうのに並行して、各種パラメータの影響等の必要な評価を行ない、ナトリウム-水反応ジェットに対する各種モデルの特性の把握が必要と考えられる。その上で、実機SG条件における高温ラプチャの見通しを明らかにするために、ナトリウム側温度、熱伝達率、発熱量あるいは管内冷却効果の影響等を評価し、解析面からの高温ラプチャ現象の的確な把握が必要と考えられる。

また、他のLEAPコード(ブローダウン解析コード・高温ラプチャ解析コード)へのカップリングの方法等について、具体的に検討して行くことが必要と考えられる。

6. 謝辞

本作業の遂行にあたり、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センタープラント安全工学室の田辺裕美室長、濱田広次氏、栗原成計氏をはじめ関係各位に御討論、御指導を頂くとともに各種の便宜をはかって頂くことにより本作業を達成することができました。ここにあらためて関係各位に対し謝意を表します。

7. 参考文献

- (1) 日立製作所：LEAPコード用ブローダウンモデルの開発：
PNC PJ9124 95-003 (1995年3月)
- (2) 富士総合研究所編：富士総研技報：Vol.3-No.1(1992)& Vol.4-No.1(1993)
- (3) CRC総合研究所編：PHOENICS概説書(入門編)：(1995)
- (4) 日本原子力学会熱流動部会編：気液二相流の数値解析：朝倉書店(1993)
- (5) 原子炉における熱流動数値解析の現状，日本原子力学会 (1986)
- (6) 日本機械学会編：気液二相流技術ハンドブック：コロナ社(1989年)
- (7) 湊, 村田：オリフィスから放出される高温高压水流の二次元数値解析：
第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1989-5),E322
- (8) 高森, 湊：給水加熱器内二相流および伝熱特性評価手法の開発：
日本機械学会論文集 No.59-Vol.568(1993-12)
- (9) 化学工学協会編：改訂四版化学工学便覧：丸善(1978)
- (10) 日本化学会編：改訂3版化学便覧－基礎編II：丸善(1984)
- (11) 保原, 大宮司 編：数値流体工学－基礎と応用：東京大学出版会(1992)
- (12) 根井, 堀：小リークNa-水反応によるウェステージ現象(反応温度とウェ
ステージ分布)：日本機械学会論文集 No.43-Vol.368(1977-4)
- (13) 根井, 橋口：小リークNa-水反応によるウェステージ現象(各種パラメー
タの影響)：日本機械学会論文集 No.44-Vol.383(1978-7)
- (14) 河原その他：高速増殖炉用蒸気発生器の開発：日立評論
Vol.56,No.9(1974-9)

[付録]

付録A. MISTRALの概要(抜粋)

付録B. PHOENICSの概要(抜粋)

付録C. SIMAに関する公開文献

付録D. SMORCに関する公開文献

【論文】

三次元気液二相流解析プログラム MISTRAL の開発

永野勝尋*, 渋木 尚**, 三橋利玄*, 小池秀輝***

コンピュータを用いた流体力学の数値シミュレーション,いわゆる CFD はスーパーコンピュータをはじめとするハードウェアの性能向上とともに,急速にその利用範囲が広がっている.特に,単相流の分野における数値シミュレーションは理工学の諸分野で広く利用されている.自動車为例にとれば,車体のデザインの段階で空力計算により C_d 値(抗力係数)の予測がある程度可能なレベルにまで達している⁽¹⁾.一方,二相流の分野に目を転じてみると,未だその利用は原子力発電プラントの安全解析等のごく一部に限られている.これは二相流が単相流に比べて現象が桁違いに複雑で,予測が極めて難しいためである.特に多次元の気液二相流解析においては,計算に膨大なコストを必要とするために,効率的な数値解法の開発が求められている.

このような状況から,三次元気液二相流の数値シミュレーションの実用化を目的として,気液二相流解析プログラム MISTRAL を開発した.本稿では,MISTRAL の機能,解析モデル,数値解法および適用例について述べる.

1. はじめに

単相流の分野における数値シミュレーションは,数値解法や乱流モデル等の精力的な研究とハードウェアの性能の急速な向上もあって,計算精度や計算コストの点から見て,工学的に十分実用に耐える所まで進歩してきている.一方,気液二相流の分野における数値シミュレーションは単相流に比べ現象が桁違いに複雑なため,実用化のためにはまだ多くの障害があるように思われる.例えば,流動形態が比較的単純な気泡流を考えてみても,気泡の形状は液相の流動の影響を受けて複雑に変化し,気泡の運動のスケールも数ミリから数ミクロンの広い範囲に及ぶ.このように複雑な気液二相流の挙動をシミュレーションで細部に至るまで完全に再現するのは,将来的にも極めて難しいと思われる.したがって,気液二相流の数値シミュレーションのためには,ある種の仮定を

設けて現象を簡略化した解析モデルを構築する必要がある.

現在,気液二相流の解析モデルとして考案されているものに表 1.1 に示すものがある⁽²⁾.このうち,二流体モデルは気相と液相の挙動を個別に取り扱うモデルで,気相と液相のおおのこの質量,運動量およびエネルギーの保存則を基礎とする.このため,気液各相の物理量の予測が可能で,非均質・熱的非平衡流にも適用できるなどのすぐれた特徴を持ち,気液二相流の解析モデルの中ではもっとも進んだモデルである.二流体モデルを採用した解析コードは原子力発電プラントの安全解析を目的として多数開発されているが,その多くは一次元流を対象としている.これは解析対象がプラント全体ということから,多次元での解析は実用的でないというほかに,二流体モデルによる多次元解析の困難さによる.二流体モデルは気液各相の保存則を個別に扱うため,表 1.1 に示した他

* 解析技術第 2 部

** 解析技術第 1 部 (旧・解析技術第 2 部)

*** 解析技術第 2 部 理学博士

(1993 年 5 月 17 日受理)

表 1.1 気液二相流の解析モデル

モデル	概 要
均質流モデル	・気液各相の速度が混合流の平均速度に等しいと仮定するもっとも簡単なモデル
スリップ流モデル	・均質流モデルで気液間の速度差をスリップ比やスリップ速度で考慮するモデル ・対向流や逆流での適用は難しい。
ドリフトフラックスモデル	・気相速度と混合流の体積中心速度の相対速度に注目したモデル ・均質流モデルの簡便さを残しつつ、気液間の速度差をもっとも一般的な形で取り入れている。
二流体モデル	・気液各相を個別に取り扱うモデル ・気液各相の物理量の手調が可能で、非均質、熱的非平衡でも適用できる。

の解析モデルに比べ解析が難しく、また計算コストがかかる。このため、これまでに開発された多次元二相流解析プログラムは数えるほどしかない。

しかしながら、二流体モデルによる三次元気液二相流シミュレーションが実用化されれば、多くの工学分野に恩恵をもたらすものと思われる。このような状況から、三次元気液二相流の数値シミュレーションの実用化に少しでも資するように、計算精度や計算の安定性および計算の効率化を追求した三次元気液二相流解析プログラム MISTRAL を開発した。本稿では MISTRAL の機能、解析モデル、数値解法および適用例について述べる。また、MISTRAL と従来の気液二相流解析プログラムの比較についても述べる。

2. MISTRAL の機能概要

MISTRAL の機能を表 2.1 に示す。MISTRAL の対象とする流れは垂音速の気液二相流である。解析モデルとして二相流の解析モデルの中でもっとも適用範囲の広い非均質・熱的非平衡二流体モデルを採用している。気相は凝縮相と非凝縮相の二成分を扱える。構成方程式や状態方程式はユーザ関数として与えることで、種々の気液二相流に対応できるようにしている。

3. MISTRAL の解析モデル

3.1 基礎方程式

二流体モデルでは、気液各相の質量、運動量およびエネルギーの各保存式を基礎方程式とする。以下に基礎方程式を示す。

表 2.1 MISTRAL の機能

項目	機 能	
解析対象	・垂音速の気液二相流	
モデル	座標系	・三次元デカルト座標系
	基礎方程式	・圧力・非均質・熱的非平衡二流体モデル ・気相の質量保存式 ・液相の質量保存式 ・非凝縮相の質量保存式 ・気相の運動量保存式 ・液相の運動量保存式 ・気相のエネルギー保存式 ・液相のエネルギー保存式
	構成方程式	・ユーザ関数で定義
	状態方程式	・ユーザ関数で定義
	境界条件	・流れについては流速固定、圧力固定、スリップ条件、ノースリップ条件、自由流入出が可能。 ・熱については温度固定、熱流束固定、断熱、熱伝達が可能。 ・時間依存の境界条件も可能。
数値解法	離散化	・差分法 ・差分スキームは対流項が 1 次精度の風上差分法、その他の空間微分項は 2 次精度の中心差分法 ・時間微分は半陰解法
	連立方程式の解法	・MILU-BiCGstab 法
	時刻刻み幅の制御	・自動タイム・ステップ機能 ・定常計算用の局所時刻刻み法

(質量保存式)

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k) = \Gamma_k \dots \dots \dots (3.1)$$

(運動量保存式)

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + (u_k \cdot \nabla) u_k = -\frac{1}{\rho_k} \nabla p + \frac{1}{\alpha_k \rho_k} \nabla \cdot (\alpha_k \sigma_k) + g - \frac{1}{\alpha_k \rho_k} (u_k - u_m) \Gamma_k - \frac{1}{\alpha_k \rho_k} K (u_k - u_m) \quad (3.2)$$

(エネルギー保存式)

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k h_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k u_k) = \nabla \cdot (\alpha_k \lambda_k \nabla T_k) + \frac{Dp}{Dt} - a_i h_{ik} (T_k - T_{li}) + h_{ki} \Gamma_k + Q_k \dots \dots \dots (3.3)$$

ただし、 α は体積率、 ρ は密度、 u は速度、 p は圧力、 σ はせん断応力、 g は重力加速度、 Γ は生成率、 K は気液間の摩擦係数、 h はエンタルピ、 λ は熱伝導率、 T は温度、 h_i は気液界面の熱伝達率、 Q は発熱密度である。添字 k は g のとき気相、 l のとき液相を示し、添字 m は k が g のとき l 、 k が l のとき g を取る。添字 i は気液界面を示す。

気液二相流の基礎方程式が単相流の基礎方程式と異なる点は、気液相間の保存量の移動を表す項が付加されていることである。(3.1)式の右辺は相変化(蒸発や凝縮)に伴う気液相間の質量の移動を表している。(3.2)式の右辺第四項は相変化による気液相間の運動量の移動を、同じく右辺第五項は気液界面における気液相間の摩擦抵抗による運動量の移動を表す。また(3.3)式の右辺第三項は

気液界面における気液相間の熱伝達を、同じく右辺第四項は相変化による気液相間のエンタルピの移動を表している。

3.2 構成方程式と状態方程式

前節で示した基礎方程式は変数の数が方程式の数に比べて多い。このため基礎方程式を閉じさせるためには、基礎方程式の他に変数間の関係式を与える必要がある。これを二流体モデルにおける closure problem という¹²⁾。関係式としては、気相と液相の体積率に関して成り立つ

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \dots\dots\dots (3.4)$$

のような自明な関係式や熱力学的な関係式(いわゆる状態方程式)、気液界面におけるとびの条件(jump condition)

$$\Gamma_g + \Gamma_l = 0 \dots\dots\dots (3.5)$$

のようなものがある。また気液界面や壁面での摩擦抵抗係数や熱伝達率、気液界面の面積濃度なども与える必要がある。これらの関係式は構成方程式と呼ばれる。基礎方程式と状態方程式や構成方程式の関係を図 3.1 に示す。構成方程式の多くは、ある特定の条件下での実験により求められたものであり、実際のプログラムでは図

3.1のように流動様式の判定をおこないながら、複数の構成方程式の中から適切な構成方程式を選択するという処理がおこなわれる。MISTRAL では、汎用プログラム化という目的からこれらの構成方程式や状態方程式はユーザ関数として取り扱うようにしている。

3.3 境界条件

MISTRAL では表 3.1 に示すような境界条件が使用できる。

表 3.1 境界条件

境界種別	物理量	境界条件	備考
入口境界	流速	流速固定	時間変化、ユーザ関数も可
	圧力	圧力固定	同上
	温度	温度固定	同上
出口境界	ボイド率	ボイド率固定	同上
	全物理量	自由流出	
壁境界	流速	スリップ、ノースリップ	
	圧力	法線方向勾配ゼロ	
	温度	断熱、熱流束固定	熱流束は時間変化、ユーザ関数も可
		熱伝達境界	壁面熱伝達率はユーザ関数

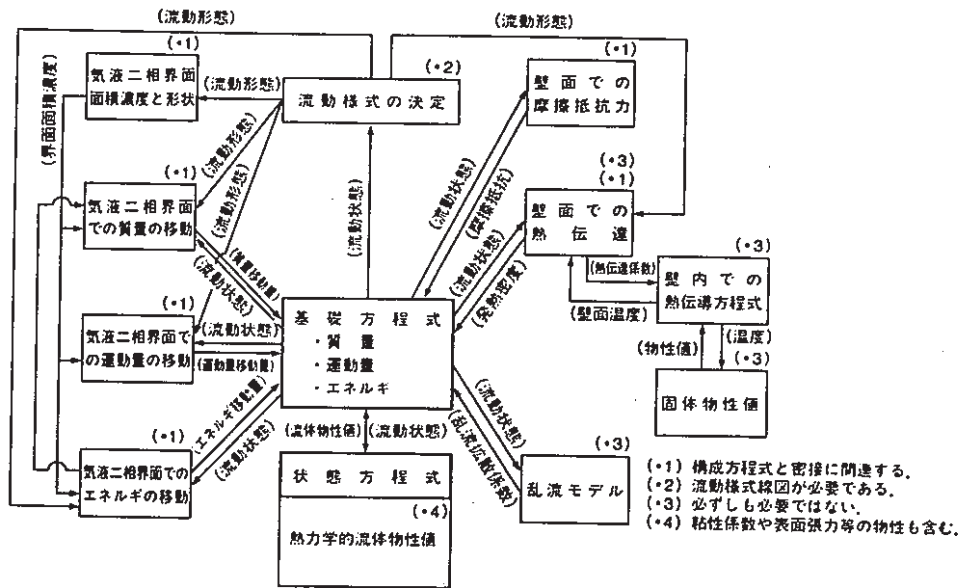


図 3.1 基礎方程式と構成方程式の関連¹³⁾

4. MISTRAL の数値解法

4.1 離散化の方法

変数の離散化はスタッガード格子を用いておこなう。図 4.1 に示すように、気相および液相の速度は計算セルの界面に定義し、その他の変数はすべて計算セルの中心に定義する。対流項の離散化には 1 次精度の風上差分法を用い、その他の空間微分項の離散化には 2 次精度の中心差分法を用いる。時間に関しては、質量保存式およびエネルギー保存式はすべての項を陰的に評価する。これは気液相間の相変化を扱う場合、質量保存式およびエネルギー保存式の相変化に伴う生成消滅項が大きく、陰的な取り扱いをしないと計算が不安定になるためである。運動量保存式は圧力勾配と気液相間の運動量の交換に関する項を陰的に評価し、慣性項や粘性項は陽的に評価する。慣性項は非線形な項であり、これも陰的に扱うとすると、慣性項に適切な線形化を施して運動量保存式も反復計算に含める必要がある。単相流では、この方法は SIMPLE 法⁽⁴⁾としてよく知られているが、二流体モデルは基礎方程式の数が多いため、すべての方程式を反復計算に含めると収束性が悪くなることが予想される。一方、慣性項を陽的に評価した場合にはタイム・ステップ幅が Cour-

ant 条件の制限を受けるが、実用上は許容できる範囲である。また 1 時間ステップ当たりの計算量が少ないので非定常計算では有利である。離散化の方法をまとめたものを表 4.1 に示しておく。

4.2 差分式の解法

運動量保存式は陰的に評価された速度 u_k^{n+1} に関する項を左辺に、その他の項を右辺にまとめることにより、

$$A \begin{pmatrix} u_{\alpha}^{n+1} \\ u_{\beta}^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{u}_{\alpha}^{n+1} \\ \bar{u}_{\beta}^{n+1} \end{pmatrix} - \Delta t \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho_{\alpha}^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_j} \\ \frac{1}{\rho_l^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_j} \end{pmatrix} \dots\dots (4.1)$$

$$\bar{u}_k^{n+1} = u_k^n + \Delta t F(u_k^n) \dots\dots (4.2)$$

のように書ける。ただし、 A は 2×2 の行列、 F は陽的に評価された項をまとめたものであり、添字 j は x, y, z の各方向を示す。単相流解析の場合は SMAC 法⁽⁵⁾のように (4.1) 式に相当する式を質量保存式に代入することにより圧力に関する Poisson 方程式を導き、これを解いて次の時間ステップの圧力および速度を求めている。二相流解析の場合は (4.1) 式を質量保存式に代入すると、気相および液相の体積率と圧力の積を含む二つの非線形方程式になり、これを解くには反復計算が必要である。

この反復解法として、現在二つの方法が提案されている。一つは Los Alamos 研究所(米)で開発された K-FIX⁽⁶⁾に採用されている方法で、気相および液相の質量保存式のうち、一方の質量保存式から気液各相の体積率を求め、もう一方の質量保存式から圧力を求めるものである。具体的な計算手順は次のようになる。

- (1) 一方の相の質量保存式からその相の体積率を求める。このとき速度は反復計算の前の値を用いる。
- (2) (1) で求めた体積率から (3.4) 式を用いてもう一方の相の体積率を求め、それをその相の質量保存式に代入する。さらに (4.1) 式を用いて質量保存式から速度を消去することにより圧力に関する Poisson 方程式を導く。
- (3) (2) で導いた圧力に関する Poisson 方程式を解いて圧力を更新する。また (4.1) 式から速度を更新する。
- (4) 二つの相の質量保存式が満足されるまで (1) ~ (3) を繰り返す。

K-FIX では体積率の小さい相(分散相)から体積率を求め、体積率の大きい相(連続相)から圧力を求めるようにしている。また (2) の圧力に関する Poisson 方程式

表 4.1 離散化の方法

空間に関する 離散化	対流項	・ 1 次精度の風上差分法
	その他の項	・ 2 次精度の中心差分法
時間に関する 離散化	質量保存式	・ すべての項を陰的に離散化する。
	運動量保存式	・ 圧力勾配項および気液相間の運動量伝達に関する項は陰的に離散化する。 ・ その他の項は陽的に離散化する。
	エネルギー保存式	・ すべての項を陰的に離散化する。

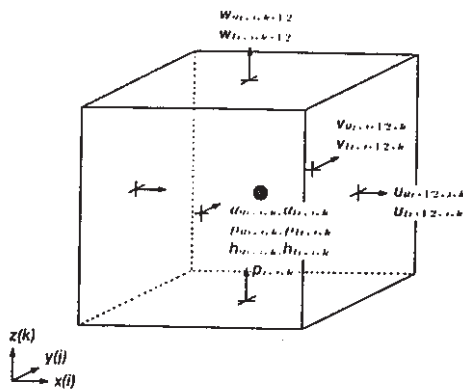


図 4.1 変数の定義位置

は SOLA 法⁽¹⁾のように速度と圧力の同時緩和により解いている。

もう一つの方法は IP-SA 法⁽²⁾と呼ばれ、質量保存式から求めた両相の体積率の和が 1 になるように速度と圧力を補正する方法である。各相の質量保存式から k 相の体積率は

$$\alpha_k = \frac{\Delta V \alpha_k^* \rho_k^* + \Delta t (\sum_{in} \alpha_k \rho_k u_k A + \Delta V \Gamma_k)}{\rho_k (\Delta V + \Delta t \sum_{out} A u_k)} \dots (4.3)$$

と表せる。ここで ΔV はセルの体積、 A はセル界面の面積、 \sum_{in} はセル内へ流入するセル界面についての総和、 \sum_{out} はセルから流出するセル界面についての総和である。また時間レベルが示されていない物理量は反復計算の前の値を用いる。今、

$$H = \sum_k \alpha_k - 1 \dots (4.4)$$

なる H を定義し、 H が 0 になるように圧力 p を補正する。これは

$$\frac{\partial H_{i,j,k}}{\partial p_{i,j,k}} \delta p_{i,j,k} + \sum_{nb} \frac{\partial H_{i,j,k}}{\partial p_{nb}} \delta p_{nb} = -H_{i,j,k} \dots (4.5)$$

から圧力の補正量 δp を求め、 $p + \delta p$ を新たに p と置き直すことによりおこなわれる。ただし、添字 i, j, k は着目

しているセルを、 nb はその周囲のセルを示す。反復は H が十分小さくなるまで繰り返される。

この方法は両相の質量保存式から体積率を消去して圧力だけの方程式を導き、これを解くとも解釈できる。この方法の計算手順をまとめると次のようになる。

- (1) 気相および液相の質量保存式から気相および液相の体積率を求める。このとき、速度および周囲の計算セルの気液相の体積率は反復計算の前の値を用いる。
- (2) (1) で求めた気相と液相の体積率の和が 1 になるように速度と圧力を更新する。圧力の更新は (4.5) 式によりおこなう。また速度の更新は (4.1) 式によりおこなう。
- (3) 更新した速度を用いて質量保存式から気相および液相の体積率を更新する。
- (4) 気相と液相の体積率の和が十分、1 に近くなるまで (1) ~ (3) を繰り返す。

二つの方法のうち、どちらがすぐれているとは言えない。Argonne 研究所(米)で開発された COMMIX-II⁽³⁾のように二つの方法を組み込んだコードもある。今回、MISTRAL では後者の方法を採用した。これは後者の方法が気相と液相の体積率の大小により二つの質量保存式の取り扱いを変える必要がなく、二つの相を統一的に扱えるからである。

図 4.2 に MISTRAL における各時間ステップでの計算手順を示す。

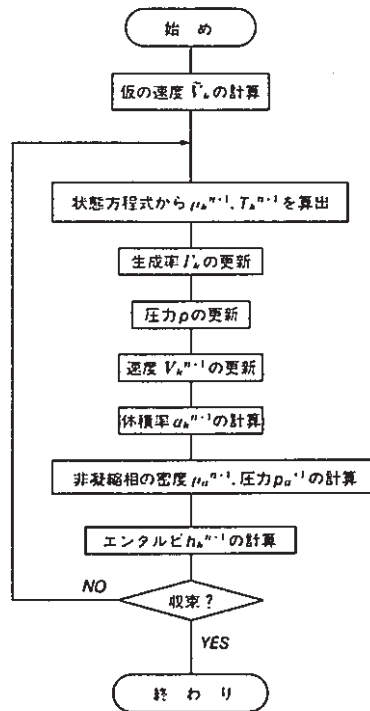


図 4.2 各時間ステップでの計算の処理の流れ

付録B. PHOENICSの概要(抜粋)

【計算機能】

PHOENICSでは以下の計算が可能です。

座標系

直交座標、円筒座標、BFC座標

計算格子(形状の表現)

構造格子のプログラムですが形状の作成に対し以下の多彩な機能があります。

- 1) Multi-Block、Grid-Refinement、Grid-Link
- 2) 移動格子機能 (moving-Grid, moving-boundary)

Flow-Pattern

あらゆるFlow-Patternの解析が可能です。

定常/非定常
非圧縮性/圧縮性、
層流～乱流、
ニュートン流体～非ニュートン流体
強制対流/自然対流

自由表面

SEM (Scalar Equation Method) とHOL (Height of Liquid Method) の2種類の解析手法を用意しています。

多相流

分散相-連続相の多相流 (GENTRA) だけでなく、機能としては、より高度な連続相-連続相 (IPSA法を使ったMulti-Phase) の多相流も可能です。

乱流モデル

K- ϵ モデル、RSM (レイノルズ応力モデル)、2流体モデル、K-Wモデル、K- Ω モデル、RNG乱流モデル、低レイノルズK- ϵ モデル、等、複数の乱流モデル

輻射

輻射境界条件の扱いに対して2つの方法を用意してあります。

- ・固体壁-固体壁間の輻射機能 (形態係数の自動計算)
- ・気体の熱放射の計算 (6フラックス輻射モデル)

燃焼、化学反応

総括反応.アレキウス則、EddyBreakupModel
素反応.CHEMKINコードのライブラリとのインターフェース

PHOENICS-2パッケージの内容

平成6年7月1日以降、PHOENICSパッケージには、以下のものが含まれます。また、オプション（別売り）についても下表に示します。

内容	スタンダード
機能	機能
<p>アプリプロセッサ(SATELLITE)</p> <ul style="list-style-type: none"> GUIによるメニュー方式 1000以上の組み込み例题の入力データライブラリ集 会話型 パッチ型 ユーザによるFORTRAN コーディングを許容 ヘルプ機能 他コードで作成したデータ (IDEASのSupertab, Patran等) による入力 (インターフェースは、有償にて販売) <p>ソルバー(EARTH)</p> <ul style="list-style-type: none"> 座標系、メッシュ 0-3次元直交/円筒/一般座標系 (DFC) リンク機能 (multi blockingはver2.1よりサポート) fine grid、moving grid 圧縮性/非圧縮性 定常、非定常問題 層流/乱流/非ニュートン流 K-ε、RSM、低レイノルズ、RNG-kε、2流体モデル等乱流モデル多数 2相流解析 IPSA (連続相-連続相)、ASM (連続相-分散相) トラッキング&ステアリング (粒子挙動) エキスパートシステム SIMPLEST法、1次風上法を基本とする安定した解法 新しく追加された計算アルゴリズム 豊富な物理モデル <ul style="list-style-type: none"> 固体-流体接触問題 自然対流 自由表面 (HOL, SEM) 化学反応、よく封 燃焼 ユーザによるFORTRAN コーディングを許容 	<p>ポストプロセッサ</p> <p>PHOTON</p> <ul style="list-style-type: none"> 流線図、ベクトル図、コンター図、アイソサーフェース セルフラッピング機能、メニュー入力、他機能多数 他コード (Supertab他) による出力 (インターフェースは別売) <p>AUTOPLOT</p> <ul style="list-style-type: none"> 実験結果、解析結果等のグラフ出力プログラム <p>オンラインマニュアル(POLIS)</p> <ul style="list-style-type: none"> CFD一般及びPHOENICSの基礎、Help機能 バージョンアップの内容や情報 解析方法のガイダンス 解析事例 PHOENICS辞書 関連書類の一覧 各種モジュールのマニュアル 検索機能 <p>アクティブデモ</p> <ul style="list-style-type: none"> 分野別例题集によりデータ作成から計算結果の出力までを自動表示 新機能の使用例 開発中の機能のデモンストレーション
マニュアル	<p>最小限のペーパーマニュアル</p> <ul style="list-style-type: none"> CHAM/TR/110 Instructions for Installing PHOENICS CHAM/TR/306 Welcome to PHOENICS
年間保守	初年度から別年度年間保守料がかかります
定例会	PHOENICS DAY 毎月末開催する紹介セミナー
別売り	PHOENICS-CVD-CVD用モジュール
オプション	<p>TESEUS—非構造格子対応汎用熱流体解析プログラム</p> <p>その他別ルールバー—CORA, PISA, LEARN</p> <p>関連モジュール—FLAIR, HOTBOX, TACT, CVD, FABULOUS, FLASH等</p> <p>他ソフトとのインターフェース (Ideas, Patran, AVis, FieldView, Alias, CAD/JGES等多数)</p>
その他	その他ご希望の方に受託解析を有償で行います。

PHOENICS-2 オプション

PHOENICS-2オプション

PHOENICS-2はパッケージ購入（フルオプション）の他、最低限の機能のものにオプションを追加して購入する方法があります。ユーザーは必要に応じて下記のオプションを自由に選択できます。

1. BFC

流体解析ではよく次のようなことが必要とされます：

船舶、航空機、自動車などの任意的な流線形の物体のまわりにある流れ
複雑な境界のある管内（例えば湾曲部分）

内部不連続流（例、曲線状の衝撃波、炎の前線、相の変化境界）

PHOENICSのこのBFCオプションは以上のように任意形状のメッシュを作成しなければならない流動解析に使用するよう作られています。

BFC (Body Fitted Coordinate) : 一般座標系メッシュ

直交メッシュを任意形状に写影変換したメッシュ

2. 二相流

二相流は、違った特性（例えば、速度、密度、温度、混合物等）を持つ2つの相（液体と気体など）から成り立ち、二相間において質量、運動量、その他の物理量を交換します。（例えば、液体の沸騰、圧縮された蒸気、雨、雹、石炭の燃焼等におけるエンタルピー） PHOENICSの二相流オプションはオイラリアン(Eulerian)テクニックを使い、この種の相間の条件を無視できない流れに対応できるよう整備されています。アルゴリズムはIPSA法(Inter Phase Slip Algorithm)と呼ばれ、このIPSA法は、1つの圧力場に同時に存在する二相を扱う計算方法です。

3. 多相流

PHOENICSは鑄型ファイリング、薄膜コーティング、波形成、槽内での液体など、自由表面の流れや運動量の小さな粒子が存在する内部流れにおいて、PHOENICSは、多種相モデルとしてSEM, ASM, HOL(Height of Liquid Method)の3種類のモデル持っています。

SEM(Scalar-Equation Method)は、自由表面で、流体(inter-fluid)の表面が転覆する場合に使われます。この方法では流体を区別するのあるスカラー量を以て表わし、輸送方程式は数値的拡散を防ぐため特別な補間法(the Van Leer Scheme)を使い積分し物理拡散は無視してあります。

ASM(Algebraic Slip Method)は、多相プロセスを簡易的にシミュレートするために提供されており、力学的に平衡状態にある連続相に対する相対速度を、代表的に計算できる分散した粒子（固体粒子、液滴あるいは気泡）を含む単一の連続相があるという仮定に基づいた手法です。

4. 化学反応

PHOENICSの化学反応オプションは石炭燃焼、石油やガス燃料、窒素酸化物系製品などに関連する進んだ化学反応モデルを提供します。又このオプションでは蒸反応を扱う、CREAKやCHEMKIM等のプログラムへのインターフェースも提供されます。

5. 数値解法

PHOENICSは、標準機能として有限体積方程式の対流項を解く風上法、ハイブリッド法や非定常問題における陰解法、陽解法をPHOENICSは備えています。PHOENICSの数値解法オプションはそれに付け加え、次の高精度、高解像度の解法、およびコロケートグリッドに対応した数値解法を提

供します。

- 対流項の離散化方法. . . . 中心差分法(Central Differencing scheme)、
QUICK法(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)
 - 時間微分項の離散化方法. . クランク・ニコルソン(the Crank-Nicholson)法
クーラン(Courant)数依方法
 - 拡散項の離散化方法. . . . CLDA法
 - その他. コロケートグリッドに対応した数値解法
- 注) 現在これらのスキーム中、スカラー変数のみに適用されるものがあります。

6. 輻射

PHOENICS標準機能の6-flux輻射モデルは、流体自身のガス放射における熱移動の過程にかかわる解析について、分析と解決に役立ちます。しかし多くの工学プロセスにおいて、流体自身は輻射に対し透明であり、壁面間の輻射熱の移動量を求めることのできるSTSR法(Surface-to-surface Radiation model)を必要とします。PHOENICSの輻射オプションのSTSRモデルでは、次のような計算条件で輻射による熱移動のシミュレーションができます。

- 定常または非定常
- 二次元計算又は三次元計算
- カーテシアンまたはBFC座標系
- 層流または乱流の流れの中のふく射熱 (移動)
- 固定熱流即束または固定温度熱境界条件のある表面 (均一なふく射特性を持つ表面)

7. 新乱流モデル

PHOENICS標準機能として提供されるk- ϵ 乱流モデル以外に、PHOENICSの新乱流モデルオプションでは、Chen-Kim, Van Driest, Larri-Bremhorst, RNG, LEVEL, 2-scale k- ϵ 乱流モデルおよび二流体乱流モデル, Reynolds stress Model を含んだより高精度とされる新しい乱流モデルが使用可能となります。

8. マルチブロック

PHOENICSはグリッドの再構成 (例えば、必要とされているシミュレーション領域の計算格子がよりよくフィットするために、構造格子の一部を他の一部と連結させる) を含んだ機能を提供します。

9. 固体熱応力解析

応力解析オプションは、流体解析と応力解析を連成して計算可能とするオプションです。ただし、現在2次元直交あるいは円筒座標で使用可能です。

10. 粒子挙動

GENTRAを使用したパーティクルトラッキング機能。衝突、成長することができる粒子を流体中に発生させそれらを追跡することができます。

PHOENICS計算機能とオプション

		PHOENICS計算機能	オプション名
空間の離散化		FVM	
形状表現	直交座標系	○	
	円筒座標系	○	
	BFC	opt1	BFC
	移動格子	opt1	BFC
	グリッドリンク	opt1+opt8	BFC+マルチブロック
	局所細分割メッシュ	opt1+opt8	BFC+マルチブロック
	マルチ・ブロック	opt1+opt5+opt8	BFC+新数値解法+マルチブロック
流体の種類	非圧縮性/圧縮性	○	
	k-ε乱流モデル	○	
	その他の乱流モデル	opt7	新乱流
	非ニュートン流体	○	
	二相流	opt2	二相流
	多相流	opt3	多相流
	自由表面	opt3	多相流
	粒子挙動	opt10	GENTRA
物質拡散		○	
化学反応		○/opt4	化学反応
燃焼	総括反応(Eddy Break Up)	○	
	素反応(CHEMKIN)	opt4	化学反応
伝熱	層流熱伝達/乱流熱伝達	○	
	熱伝導	○	
	固気連成問題	○	
	ガス放射	○	
	熱ふく射	opt6	ふく射
固体の応力解析		opt9	熱応力解析
定常/非定常解析		○	
解法	ハイブリッド/風上法	○	
	CLDA	opt5	新数値解法
	コロケートグリッド	opt5	新数値解法
	QUICK法	opt5	新数値解法
計算状況の監視と制御		○	

* ○印はオプション無しで実行できます。

付録C. SIMAに関する公開文献

E 322

オリフィスから放出される 高温高压水流の二次元数値解析

横正・原正 横 明彦(日立・I&D研)

横正・原正 村田 重人(日立・I&D研)

1. 緒言 高温高压水が配管を通じて低圧雰囲気へ放出されるとき、急激な圧力変化と減圧沸騰をともなう臨界二相流が発生する。臨界二相流は放出口近傍における減圧沸騰によって加速損失が急増し、放出流量がみかけ上閉塞(choke)される現象である。比較的長い配管から放出される臨界流は一次元近似がなりたち、理論的、実験的研究が多く行われてきた。

オリフィスの場合は一次元近似がなりたたなくなり、特に上流が飽和水またはサブクール水るとき、非平衡、圧縮性の関連した二次元、三次元効果が顕著であり、臨界流現象は極めて複雑になる。オリフィスは通常配管内に設置されているので、配管内の圧力損失も併せて考慮する必要がある。オリフィス下流側における圧力損失は配管形状に依存し、放出流量の予測は困難であった。本報では筆者等が開発した二流体モデルによる非平衡二次元二相流解析プログラム¹⁾を用いて数値解析を行った結果を報告する。

2. 数値計算の概要 二流体モデルの基礎方程式は質量、運動量及びエネルギーの保存則から構成される。オリフィス放出流は軸対称性を持つ二次元現象であるので、半径方向と軸方向の二次元解析を行う。未知数は気体と液体の半径方向と軸方向の速度、圧力、ボイド率、気体と液体の内部エネルギーの8つである。実際に数値計算を行うには、気液の相間摩擦、壁面摩擦、付加質量、渦動粘性係数、相変化に伴う質量、運動量、エネルギーの相間の移動の評価式を与える必要がある。これらの量を直接測定するのが困難でありデータが殆ど得られていないので、評価式はまだ確立されていない。このため個々の解析対象についてユーザが実験結果を参照しながら決定する必要がある。ここでは筆者等が配管からの放出流の解析を通じて経験的に得た構成方程式^{2), 3)}を利用することにする。蒸発速度評価式は特に重要であるので次に評価式を示す。

$$\Gamma_0 = \xi_{ev} \alpha_0 \alpha_1 v_0 \max(T_0 - T^{(s)}, 0) / T^{(s)} \dots\dots\dots (1)$$

蒸発速度係数 ξ_{ev} は、実験データと解析結果との比較から $50m^{-1}$ が適切な値であることが分かっている。壁摩擦は壁に接するコントロールボリューム内の各相において、単相流におけるせん断力の実験式を用いて計算した。

数値解法は、非スタガードメッシュを用いたコントロールボリューム法に基づく陽解法である。計算手順の詳細は既に報告されている^{1), 2)}。本計算法は、積分型の数値解法であり空間的な差分計算をおこなわないので、相変化にともなう不連続を安定に取り扱うことができる。また、ボイド率、圧力、流速など全てのパラメータを同じ位置(コントロールボリュームの中心)で与えているので、構成方程式におけるパラメータ間の関係を精度良く計算に取り入れることができる。

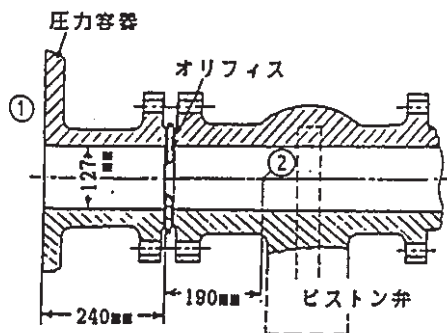


図1 テストセクション¹⁾
(①、②は圧力計測点)

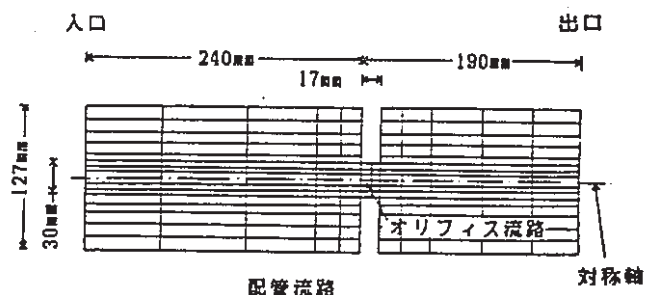


図2 コントロールボリューム分割

3. 解析条件 ここでは解析の対象とするのは図1に示すような内径127mmの配管内にオリフィスを設置した場合の高温高压飽和水放出流の実験^{4),5)}である。オリフィス口径の影響を検討するため、口径17mmと30mmのケースを取り上げ実験解析を行った。実験ではオリフィス前面から190mm下流で圧力を計測している。この圧力を下流側の境界条件とし、圧力容器に開口する配管入口からこの計測点までを解析領域とした。この計測位置は配管内であるが、解析領域の下流端であるので便宜上「出口」と称することにする。入口では圧力容器内の静圧を境界条件として用いた。以下オリフィス口径が30mmの場合を例に挙げて説明する。

解析領域のコントロールボリューム分割を図2に示す。実験では準定常状態で測定されているが、解析では直接定常状態を求めることができないので、オリフィス流路を破断口とみなして破断後の過渡解析を行い、定常流量が達成されている事を確認し、その定常流量と放出流量の実験結果と比較した。

4. 解析結果 オリフィス流路における流量の代表的な過渡解析結果を図3に示す。流路が短いので極めて短時間(2~3ms)で定常状態に到達する。圧力容器内圧力と出口(下流側圧力計測点)との圧力差をパラメータとし、実験と解析によるオリフィス流路における単位流路面積当りの放出流量の比較を図4に示す。オリフィス口径の大きい方が単位面積当りの流量が少ない。これは下流側の単位流路面積当りの流量が大きくなり、圧力損失が増加することが主な原因である。一次元熱平衡モデルに基づくMoodyの式⁶⁾を用いた解析結果も図4に示した。

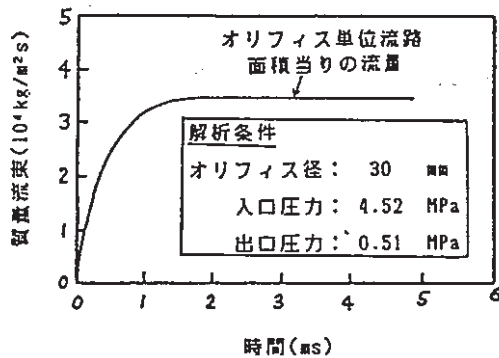


図3 放出流量過渡解析結果

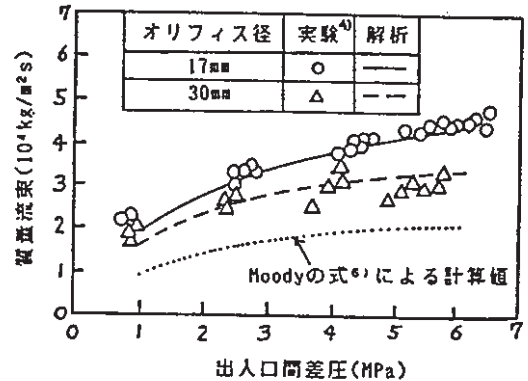


図4 放出流量の実験値と解析値の比較

解析結果は実験結果と比較して出入口差圧が2.5MPa以上の場合に実験データのばらつき(約10%)の範囲内にある。出入口差圧が1MPaのとき解析結果は実験値の平均と比べて20%過小評価である。圧力容器と出口の差圧が約4MPaのときの定常状態における解析結果を用いて流動状態の説明する。定常状態における気液の体積速度分布を図5と図6に示す。ここで体積速度 J_k は相 k の体積比 α_k と速度 v_k の積である。中心軸近傍

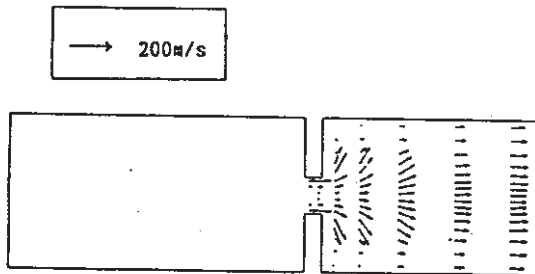


図5 蒸気の体積速度分布

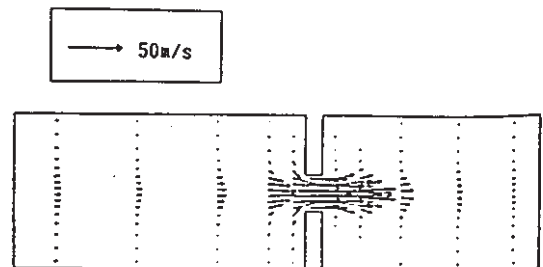


図6 水の体積速度分布

では水の割合の大きいコアが形成され、ジェットとなってオリフィス前方に噴出する。ボイド率分布を図7に示す。黒い点の密度は水の体積割合に比例している。配管の入口付近には、沸騰遅れによる圧力低下の

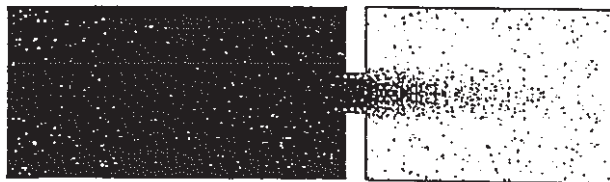


図7 ボイド率分布

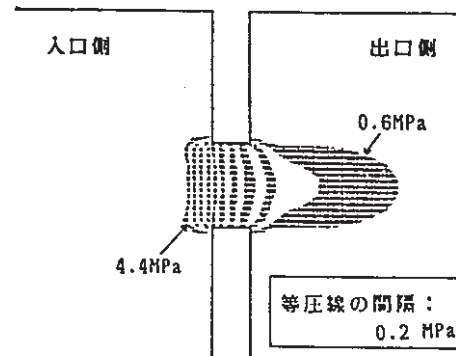


図8 オリフィス周囲の圧力分布

ため小規模な減圧沸騰によって発生したボイドが含まれている。圧力は図8のようにオリフィス前後の限られた領域で大きく変化する。

5. 結果の検討 オリフィスから高温高圧飽和水が放出されるとき流動の構造の解析結果は次のように説明できる。圧力容器から配管に流入するとき、流速増大による局所的な圧力の低下がありボイドが発生する。オリフィスに流入する水は周囲から回り込むので対称軸に向かう運動量を持ち、慣性効果によって対称軸付近は水の割合が大きい。蒸気流量は、オリフィス出口近傍では水のジェットの外周部に偏っているが、配管出口に近付くとしだいに一様な流れになる。

オリフィスに流入する水の流れが対称軸近傍に絞られるのは縮流効果であり、流量を低減させる。縮流によって気液分離するため気液の速度差は大きくなり、また気液界面面積が小さくなって蒸発を抑制し、逆に流量を増加させる効果がある。オリフィス下流のジェットが十分広がっていない範囲には壁近傍に蒸気流の剝離域が見られる。これは半径方向の流れが配管壁によって制限されているため発生したものであり、圧力損失を増加させる。オリフィスと配管の流路面積比が小さいほどオリフィス単位流路面積あたり同じ流量でも配管内の流速が大きくなり、壁摩擦の影響が大きくなる。圧力容器内圧力が低く、出入口差圧が小さいとき気液の密度差が大きくなり、蒸発速度評価の誤差の影響が顕著になり放出量の予測誤差が大きい。

6. 結言 二次元二流体モデル解析プログラムを用いて、配管内のオリフィスからの高温高圧水放出実験を解析し、オリフィスから高温高圧飽和水が放出されるとき次のような流動の二次元構造を解析できることを明らかにした。

(1)慣性効果によってオリフィス流路内の対称軸付近は水の割合が大きい。

(2)オリフィス下流に水のジェットが形成され、その外周部で減圧沸騰が顕著である。

出入口差圧が2.5MPa以上の場合、放出流量の解析結果はデータのばらつき(約10%)の範囲であった。しかし、差圧が減少し1.0MPaになると実験値の平均より20%程度過小評価した。

[記号] J :体積速度(m/s)、 v_{01} :蒸気分子飽速度(m/s)、 T :温度(K)、 α :体積比
 Γ_0 :蒸発速度(kg/m²·s)、 $\xi_{0.0}$:蒸発速度係数(m⁻¹)、 ρ :密度(kg/m³)

(添字) k:相(k=gのとき気体、k=lのとき液体)、(S):飽和状態

[参考文献](1)Minato, A., Kawabe, R.: J. Nucl. Sci. Technol., 25[12], 901, (1988)

(2)渡、内藤: 原子力学会誌, 29[4], 319, (1987)

(3)Minato, A., Murata, S.: Trans. ANS, 57, 125, (1988)

(4)小笠原: 機械学会論文集, 268, 2146, (1968)

(5)小笠原: "二相流臨界流の研究", 東京大学学位論文, (1967)

(6)Hoody, F. J.: Trans. ASME, Ser.C, 87, 134, (1965)

給水加熱器内二相流および伝熱特性評価手法の開発*
(凝縮伝熱を伴う気液二相流挙動の数値シミュレーション)高森 和英*¹, 湊 明彦*¹Evaluation Method for Two-Phase Flow and Heat Transfer
in a Feed-Water Heater
(Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase
Flow Behavior with Condensation Heat Transfer)
Kazuhide TAKAMORI and Akihiko MINATO

A multidimensional analysis code for two-phase flow using a two-fluid model was improved by taking into consideration the condensation heat transfer, film thickness, and film velocity, in order to develop an evaluation method for two-phase flow and heat transfer in a feed-water heater. The following results were obtained by a two-dimensional analysis of a feed-water heater for a power plant. (1) In the model, the film flowed downward in laminar flow due to gravity, with droplet entrainment and deposition. For evaluation of the film thickness, Fujii's equation⁽⁴⁾⁽⁵⁾ was used in order to account for forced convection of steam flow. (2) Based on the former experimental data, the droplet deposition coefficient and droplet entrainment rate of liquid film were determined. When the ratio at which the liquid film directly flowed from an upper heat transfer tube to a lower heat transfer tube was 0.7, the calculated total heat transfer rate agreed with the measured value of 130 MW. (3) At the upper region of a heat transfer tube bundle where film thickness was thin, and at the outer region of a heat transfer tube bundle where steam velocity was high, the heat transfer rate was large.

Key Words: Computational Fluid Dynamics, Multiphase Flow, Heat Transfer, Heat Exchanger, Condensation

1. 結 言

沸騰水型原子炉(BWR)や火力発電プラントでは給水加熱器が設置されており、タービンからの蒸気や高温ドレン水との熱交換により給水を加熱する。この給水加熱器の熱伝達率を向上させて小型化した高性能な給水加熱器の開発が望まれている。給水加熱器内の高温・高圧条件下での蒸気凝縮を伴う二相流は給水加熱器の特性に影響する。従来、伝熱量は実験値に基づき上段、下段の伝熱管群の平均伝熱量を評価しており、ボイド率や気液の流速分布が伝熱量分布に及ぼす影響など、詳細な伝熱特性は明らかにされていなかった。これまでに、一次元解析プログラムによる給水加熱器内の熱流動解析結果が報告されている⁽¹⁾。この研究では蒸気の凝縮熱伝達の実験式による加熱量評価に重点があり、給水加熱器内へ流入する二相流の流動については考慮されていない。このため、二流体モデルを用いた汎用二相流解析プログラム⁽²⁾に、給水加熱器内の蒸気、液滴、液膜の挙動と凝縮伝熱を計算できるように改良を加え、実機での熱通過率分布、伝熱量分布を評

価することにした。

本研究の目的は、高温、高圧下でのドレン水を伴う蒸気凝縮伝熱を考慮した二相流解析モデルを構築し、給水加熱器の特性評価手法を開発することである。

記 号

- C : 液滴濃度 kg/m^3
 C_0 : 分布パラメータ
 C_d : 液滴発生率 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$
 C_i : 上側伝熱管から直下に落下する液膜割合
 E : 相変化による相間のエネルギー伝達量 W/m^2
 E_c : メッシュ内の凝縮伝熱量 W
 e : 内部エネルギー J/kg
 F : 摩擦力 N/m^2
 g : 重力の加速度 m/s^2
 K : 相変化による相間の運動量伝達量 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^2)$
 K_0 : 液滴伝達係数 m/s
 K_i : 熱通過率 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
 L : 凝縮潜熱 J/kg
 l : メッシュ内の伝熱管の長さ m
 N : メッシュ内に含まれる伝熱管の本数

* 原稿受付 平成5年6月4日。

¹ 正員、(株)日立製作所エネルギー研究所 (〒319-12 日立市大みか町7-2-1)。

- P : 圧力 Pa
 - Q_{rv} : 上側伝熱管から直下の伝熱管への落下液膜流量 kg/s
 - Q_c : 蒸気凝縮による液膜生成量 kg/s
 - Q_o : 液滴付着量 kg/s
 - Q_x : 液滴飛散量 kg/s
 - q : 単位体積当たりの発熱量 W/m^3
 - R_1 : 伝熱管外面の凝縮の熱抵抗 $m^2 \cdot K/W$
 - R_2 : 伝熱管外面の液膜の熱抵抗 $m^2 \cdot K/W$
 - R_3 : 伝熱管材と管汚れの熱抵抗 $m^2 \cdot K/W$
 - R_4 : 伝熱管内面の熱抵抗 $m^2 \cdot K/W$
 - S : メッシュ内の伝熱管面積 m^2
 - T : 流動様式遷移の時定数 s
 - t : 時間 s
 - U : 流速 m/s
 - U_d : 局所ドリフト速度 m/s
 - U_e : ボイド率輸送速度 m/s
 - U_{dr} : ドリフト速度 m/s
 - u_m : 平均液膜流速 m/s
- ギリシャ文字
- α : ボイド率
 - Γ : 相変化による相間の質量伝達量 $kg/(m^2 \cdot s)$
 - γ_s : 多孔質の表面透過率
 - γ_o : 多孔質の流路体積率
 - δ : 液膜厚さ m
 - λ : 熱伝導率 $W/(m \cdot K)$
 - ν : 動粘性係数 m^2/s
 - ρ : 密度 kg/m^3
 - τ : 単位体積当たりのせん断応力 N/m^2

添字

- g : 気相(蒸気)
- l : 気液界面

k : 相 ($k=g$: 気相, $k=l$: 液相)

U : 上側伝熱管

w : 壁面

2. 給水加熱器の概要

発電プラントでは、図1に示すように、ボイラもしくは原子炉で発生した蒸気を使ってタービンを回転させ、発電機を駆動している。タービンから出た蒸気は復水器で凝縮されて水になり、ボイラもしくは原子炉に戻る。復水器を出た水(給水)は低温であり、給水加熱器を設けて、タービンから引き出した蒸気(抽気蒸気)によって給水を加熱し、熱効率を向上させている。給水加熱器は数段設けられており、後段の給水加熱器の高温ドレン水も、前段の給水加熱器の加熱源として利用される。ドレン水は、より低圧の給水加熱器に流入するので、減圧沸騰によって発生した蒸気が同伴され、水と蒸気の混じった気液二相流となる。その流動状態は給水加熱器の熱伝達特性に大きく影響する。

給水加熱器の構造の一例を図2に、図2中のA-A'断面を図3に示す。上部から高温の蒸気と水の二相流および抽気蒸気が流入し、横置きU字形の伝熱管内を流れる低温の給水を加熱する。蒸気が凝縮して生じた水は、下部のドレン管から外部に導かれる。二相流と蒸気の入口には、流入の衝撃を緩和するために、穴あきバッフル板が設けられている。

U字形の伝熱管は伝熱管の出口側である上部(高温側)と入口側である下部(低温側)に分けられる。管群内の配置はこの例では図1に示すように千鳥格子状にな

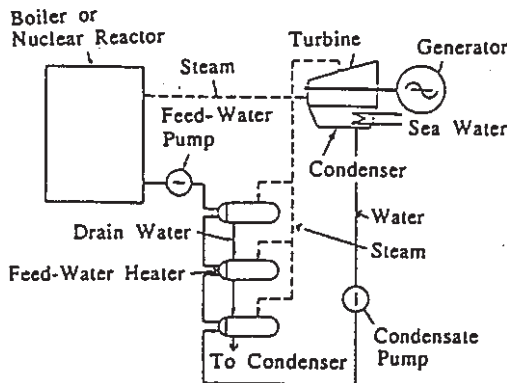


図1 発電プラントの系統図

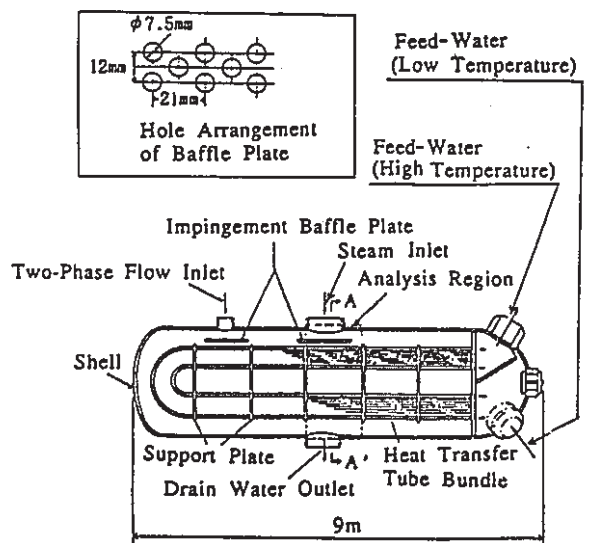


図2 給水加熱器の構造

っている。断面中心には不凝縮ガスを抜くためのベント管がある。また、蒸気が直接このベント管に吸入され熱効率を下げないように、ベント管案内板とサイドバップル板を設けている。

3. 計算方法

3.1. 基礎式 本研究で使用した汎用二相流解析プログラム⁽²⁾は、二流体モデルおよびボラスメディア近似を採用している。このため、複雑な形状の流路内において気液の速度差を考慮した二相流解析に適用できる。この基礎式を次式に示す。

(質量保存則)

$$\gamma_v \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k) + \nabla (\gamma_s \alpha_k \rho_k U_k) = \gamma_v \Gamma_k \dots \dots \dots (1)$$

(運動量保存則)

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k U_k) + \nabla (\gamma_s \alpha_k \rho_k U_k \cdot U_k) \\ = \gamma_v (-\alpha_k \nabla P_k + K_k + \alpha_k \rho_k g + F_{lk} + F_{wk} + \alpha_k \tau_k) \end{aligned} \dots \dots \dots (2)$$

(エネルギー保存則)

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} U_k^2 \right) \\ + \nabla \left\{ \gamma_s \alpha_k \rho_k U_k \left(e_k + \frac{1}{2} U_k^2 + \frac{P_k}{\rho_k} \right) \right\} \\ = \gamma_v \left(E_k - P_k \frac{\partial}{\partial t} \alpha_k + q_{lk} + q_{wk} + \alpha_k \rho_k U_k g \right) \end{aligned} \dots \dots \dots (3)$$

数値計算法として、コントロールボリューム法とSIMPLE法を用いている。

3.2 気液相間摩擦力の計算方法 本研究では気液界面の流れによる輸送で決定される相間摩擦力の空間分布を考慮するようにプログラムを改良した。相間摩擦の構成方程式は発達した定常状態での管内の実験

データに基づいている。この場合、相間摩擦評価は入口からの距離や時間に依存しない。しかし、実際には、例えば気泡流では気泡の合体を繰返すことにより、時間の経過あるいは下流に行くにしたがって気泡径の変化や他の流動パターンへの遷移を生じることが知られている。従来の構成方程式ではボイド率や流量があるしきい値を超えると同時に流動様式が遷移すると仮定していた。しかし、実際には流動様式の遷移する時間は10~100 msと推定され、この仮定は現実的ではないうえに計算の不安定の原因にもなっている。

従来の欠点を克服するため、構成方程式に輸送計算を取り入れる。局所的なドリフト速度 U_d を輸送量として選び、界面の移動と関係するボイド率輸送速度 U_o で輸送されると仮定する。生成、消滅項は、準定常状態で U_o の平衡値 \bar{U}_o に時定数 T で漸近するように決定する。これを式で表すと次式となる。

$$\frac{\partial U_o}{\partial t} + \nabla U_o U_o = -\frac{U_o - \bar{U}_o}{T} \dots \dots \dots (4)$$

$$U_o = f(\alpha, U_g, U_l, \rho_g, \rho_l) \dots \dots \dots (5)$$

$$U_d = (1-\alpha) U_g + \alpha U_l \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 T は流動様式遷移の時定数であり、現在のところ明らかではないが、気泡の速度の変動の時定数に近い0.01 sとした。式(4)からわかるように $U_o - \bar{U}_o$ は、その初期値から時間について指数関数的に減少するため、本解析の時間0.5 sでは時定数0.01~0.1 sのとき局所ドリフト速度の平衡値からのずれは0.1%のオーダーである。このため、本解析では時定数 T の解析結果に与える影響は小さい。平衡値 \bar{U}_o は、最も進歩したボイド率関係式であるドリフトフラックス理論から推定する。ドリフトフラックス理論では、流路断面内の気液速度とボイド率の分布の効果を分布定数 C_o の1からのずれで表している。多次元計

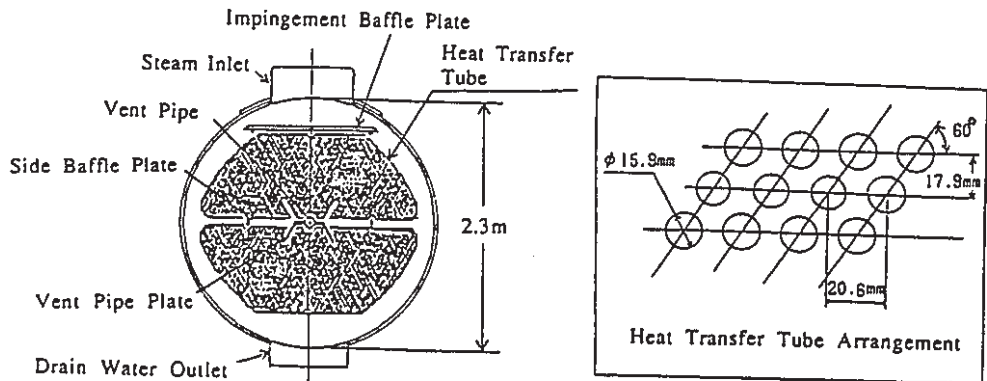


図3 給水加熱器の縦断面 (図2中A-A'断面)

算では分布の効果は自動的に計算されるので C_0 を 1 とする。また、 $\overline{U_m}$ は U_{D1} に等しい。本研究に用いた U_{D1} は Ishii の式¹³⁾である。

3-3 凝縮伝熱量計算モデル 本研究では、以下に示す凝縮伝熱量計算モデルを考慮した。凝縮伝熱量は、給水と蒸気の温度差、伝熱管の面積と熱通過率を用いて計算できる。図4に示すように、蒸気は伝熱管表面で凝縮して液膜を形成し、重力により落下する。

このときの熱通過率 K は次式で表せる。

$$K_t = 1 / (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 はそれぞれ伝熱管外面の蒸気凝縮の熱抵抗、液膜の熱抵抗、伝熱管材と管汚れの熱抵抗、伝熱管内面の熱抵抗である。原子力プラントの給水加熱器内では不凝縮ガスの濃度は 27 ppm 以下と非常に微量であるので不凝縮性ガスの影響は無視できる¹⁴⁾。この場合、伝熱管外面の蒸気凝縮の熱抵抗 R_1 は、他の熱抵抗 $R_2 \sim R_4$ より数けた小さく無視できる。

$$R_1 = 0 \dots\dots\dots (8)$$

伝熱管外面の液膜の熱抵抗 R_2 は次式で求めた。

$$R_2 = \delta_2 / \lambda_l \dots\dots\dots (9)$$

ここで δ_2 は液膜厚さである。この液膜厚さは図4に示すモデルを用いて求める。液膜は管外面に沿って流れ、伝熱管の間を膜状に落下すると仮定する。上側伝熱管から落下してくる液膜流量 Q_{FV} 、凝縮によって生成する液膜流量 Q_c 、液滴付着による液膜生成量 Q_D 、液滴飛散による液膜消滅量 Q_e 、下側伝熱管へ落下している液膜流量 Q_F が定常状態にあり、バランスしている

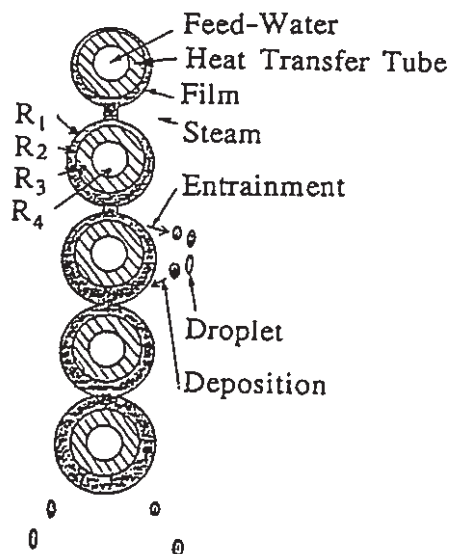


図4 伝熱の計算モデルと液膜モデル

と考える。

$$Q_F = Q_{FV} + Q_c + Q_D - Q_e = 2\rho_l u_m \delta l N \dots\dots\dots (10)$$

液膜平均流速は、液膜流が層流であると仮定すると、ヌッセルトの理論から次式で求められる。

$$u_m = 0.64 (g/3\nu_l) \delta^2 \dots\dots\dots (11)$$

式(10)と式(11)より液膜厚さは次式で与えられる。

$$\delta = \{ Q_F / (0.42 \rho_l g l N / \nu_l) \}^{1/3} \dots\dots\dots (12)$$

膜レイノルズ数 $(Re)_l = u_m \delta / \nu_l$ が 1600 より大きくなると乱流に遷移するが¹⁵⁾、あとで述べるように本計算では平均液膜流速 u_m 、液膜平均厚さ δ の最大値はそれぞれ 0.3 m/s、0.17 mm であり、そのときの膜レイノルズ数は 900 となる。この理由から液膜は層流と考えられる。一方、ドレン水のない場合の純粋静止蒸気中の液膜厚さ $\delta_0 [= \lambda_l / h(0)]$ に比べて蒸気流がある場合の液膜厚さ $\delta_l [= \lambda_l / h(Re)]$ は薄くなる。そこで、蒸気流(強制対流)の液膜厚さに及ぼす影響を Fujii の式¹⁶⁾で評価する。この式では水平伝熱管群の熱伝達率 $h(Re)$ に蒸気流のレイノルズ数 Re 依存性を考慮している。液膜の熱抵抗の評価に用いる液膜厚さ δ_2 は次式で求めた。

$$\delta_2 = \delta (\delta_l / \delta_0) \dots\dots\dots (13)$$

式(13)において、 δ はドレン水の効果を考慮した蒸気中の液膜厚さであるが、蒸気流の効果を考慮していないため、実際の液膜厚さより厚くなる。一方、 δ_0 , δ_l は Fujii の式においてドレン水の効果を考慮しない純粋蒸気中の液膜厚さであるが、 δ_0 は静止蒸気中のもの、 δ_l は蒸気流があるときのものである。そこで、ドレン水と蒸気流の効果を考慮した液膜厚さ δ_2 は、式(7)の右辺の δ_l / δ_0 に比例するものとした。

式(10)における上側伝熱管からの落下液膜量 Q_{FV} 、凝縮による液膜生成量 Q_c 、液滴付着量 Q_D 、液滴飛散量 Q_e はそれぞれ次式で表される。

$$Q_{FV} = 2C_1 \rho_l u_m \delta u_l N \dots\dots\dots (14)$$

$$Q_c = E_c l \dots\dots\dots (15)$$

$$Q_D = K_D C S \dots\dots\dots (16)$$

$$Q_e = C_e S \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 C_1 は上側伝熱管から直下の伝熱管に落下する液膜割合、 E_c はメッシュ内の凝縮伝熱量、 K_D は液滴伝達係数、 C_e は液滴発生率である。

式(10)~(17)を用いて、上流側の伝熱管から下流側の伝熱管への液膜の輸送、液膜流量の生成と消滅を計算することにより液膜厚さ分布と液膜流速分布が求められる。

本研究では、3600本の伝熱管をもつ給水加熱器を解析対象とした。式(7)において、実機の全熱抵抗の

平均の実測値は $2.80 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ であり、伝熱管材と管汚れの熱抵抗 R_1 は $8.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 、伝熱管内面の熱抵抗 R_2 は $7.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ である。この結果から液膜の平均熱抵抗を求めると $1.20 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ となり(液膜平均厚さ 0.082 mm)、全熱抵抗の 43% を占める。そこで、伝熱管外面の液膜が全伝熱量に及ぼす影響に関するパラメータサーベイを行った。液膜挙動に関するパラメータとして式(14)中の上側伝熱管から落下する液膜が直下の伝熱管の液膜に寄与する割合 C_1 、式(16)中の液滴伝達係数 K_D 、式(17)中の液滴発生率 C_E がある。このうち液滴伝達係数 K_D は Namie-Ueda の実験⁽⁹⁾ により推定した。Namie-Ueda の実験では液滴伝達係数 K_D は蒸気流速、液滴濃度に依存している。給水加熱器の計算結果によると、蒸気流速、液滴濃度の平均値はそれぞれ約 5 m/s, 7 kg/m³ であり、この場合 Namie-Ueda の実験では液滴伝達係数は約 0.10 m/s になる。液滴発生率 C_E は Ueda の実験式⁽¹⁰⁾ により推定した。Ueda の実験式では液滴発生率は界面せん断力と液膜流速に依存する。給水加熱器の計算結果によると、界面せん断力、液膜流速の平均値はそれぞれ約 12 N/m², 0.15 m/s であり、この場合 Ueda の実験式では液滴発生率は約 0.11 kg/(m²·s) になる。図 5 は $K_D=0.10 \text{ m/s}$, $C_E=0.11 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ としたときに落下液膜割合 C_1 を 0.5-0.8 の範囲で変えて全伝熱量に及ぼす影響を計算した結果

を示す。ここで、図 5 の縦軸を全伝熱量にした理由は実機で直接実測しているのは液膜の熱抵抗ではなく全伝熱量であることによる。図 5 で落下液膜割合を小さくすると、液膜は薄くなり、全伝熱量は増加する。落下液膜割合を 0.7 とした場合、全伝熱量の計算値は実測値(130 MW)と一致した。 C_1 は蒸気流量によって変わり得る。しかしながら、実測データが少ないので蒸気流量によって C_1 がどれだけ変わるか不明である。しかし、図 5 に示すように C_1 が 10% 変化しても全伝熱量には 3% しか影響を与えない。また、本研究の解析対象とした第 2 段給水加熱器とは別のドレン水のない第 1 段給水加熱器を $C_1=0.7$ の条件で解析した結果、全伝熱量の計算値は実測値(100 MW)を 7% 過大評価した。4 章では $C_1=0.7$ の条件での解析結果について説明する。

なお、Namie-Ueda の実験では蒸気流速が給水加熱器での条件より大きく、さらに液滴濃度が 0.8 kg/m³ より大きくなると液滴伝達係数 K_D は最小値 0.05 m/s に飽和している。液滴伝達係数を 0.10 m/s から 0.05 m/s に変えた場合、液膜厚さが薄くなり全伝熱量が約 7% 増加する。また、液膜流速が最大値 0.30 m/s のときの液滴発生率 C_E は最大値 0.22 kg/(m²·s) となる。液滴発生率を 0.11 kg/(m²·s) から 0.22 kg/(m²·s) に変えた場合、液膜厚さが薄くなり全伝熱量が約 2% 増加する。この結果によれば、液滴伝達係数 K_D が全伝熱量に及ぼす影響は大きい、液滴発生率 C_E が全伝熱量に及ぼす影響は小さい。

4. 二次元二相流解析

4.1 解析条件 解析対象としたのは実機給水加熱器である。二相流入口ではドレン水と蒸気が混合した後に流入するので、二相流入口条件は高ボイド率(99%)である。粗メッシュによる三次元解析によれば長手方向にほぼ均等に気相、液相が配分されるので、断面内の平均的な二次元流動解析により給水加熱器の特性が予測できると考える。このため、二相流入口でのドレン水と蒸気との混合流量に蒸気入口での蒸気流量を加えた全流量の解析領域分を入力し、図 2 中の A-A' 断面を含む二次元解析を実施した。この断面内のメッシュ分割を図 6 に示す。給水加熱器は左右対称の形状であることから、対称面から左側の部分のみを解析した。全メッシュ数は、832 メッシュである。バフフル板および伝熱管を含むメッシュはポーラスメディア近似により、体積および流路面積が等価な多孔質のセルとして扱った。入口境界条件と給水温度の条件をそれぞれ表 1, 2 に示す。入口圧力、温度はそれぞれ 1.38 ×

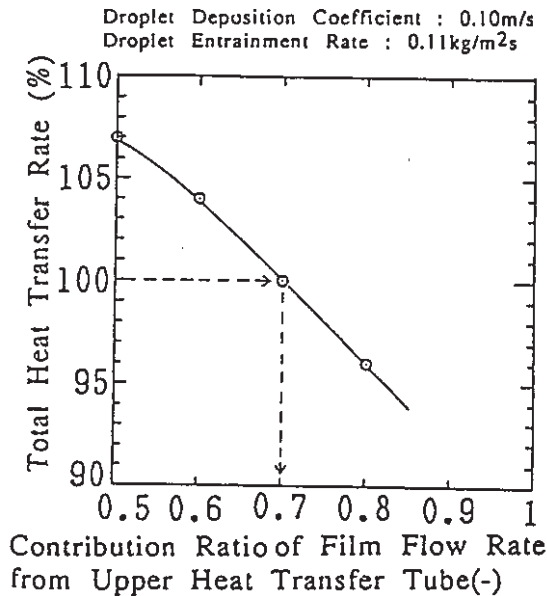


図 5 落下液膜割合の全伝熱量に及ぼす影響 (縦軸は実測値 130 MW を 100%)

10⁶ Pa, 194.4°C(飽和温度)の高温、高圧条件である。蒸気の体積流量比は99.2%であるが、蒸気と水の質量流量の割合は、それぞれ約50%となる。蒸気入口流速は、伝熱管群での実機の蒸気負荷量(蒸気消費量)から質量流量を算出し、この結果に基づいて求めた。また、水入口流速は、高温ドレン水の質量流量から求めた。給水温度については各セクションでの蒸気負荷量により入口給水温度からの温度上昇を計算し、各セクションでの平均温度を用いた。

4.2 解析結果と検討 蒸気、液滴、液膜の流速ベクトル分布を図7に示す。蒸気、液滴ともに、パッフル板と伝熱管群の上部に衝突するために、渦を生じている。給水加熱器胴体壁と管群の間の空間に沿って流速の大きい流れが生じている。また、伝熱管群の中では、蒸気凝縮により低圧になるので周囲から中央部への流

れが生じているが、管群の流路面積が小さくかつ流動抵抗が大きいことによって流速は小さい。ベント管の付近では、蒸気吸入による流れが若干見られる。液膜は垂直落下を仮定しているが、流速は伝熱管群の上部領域で小さく、下側では液膜厚さの増加に従って大きくなり、液膜流速の最大値は0.3 m/sである。これは後で述べるように伝熱管群上部領域では液膜厚さが小さく、式(11)で表されるように液膜の流速が小さくなるためである。

液膜厚さ分布を図8に示す。ここでは液膜流速分布との比較のために液膜厚さ δ を示した。伝熱管群上部領域では上側から落下して液膜生成に寄与するものがほとんどないため、液膜厚さは小さい。伝熱管群の下側に行くに従い上側から落下してくる液膜の量が大きくなるため液膜厚さは大きくなっている。液膜厚さの

表1 入口境界条件

	Pressure (MPa)	Temperature (°C)	Specific Enthalpy (kJ/kg)	Flow Rate (kg/s)
Steam	1.4	194	2787	68
Water	1.4	194	826	65

表2 給水温度の条件

	Feed Water Temperature (°C)
Upper Heat Transfer Tubes	187
Lower Heat Transfer Tubes	169

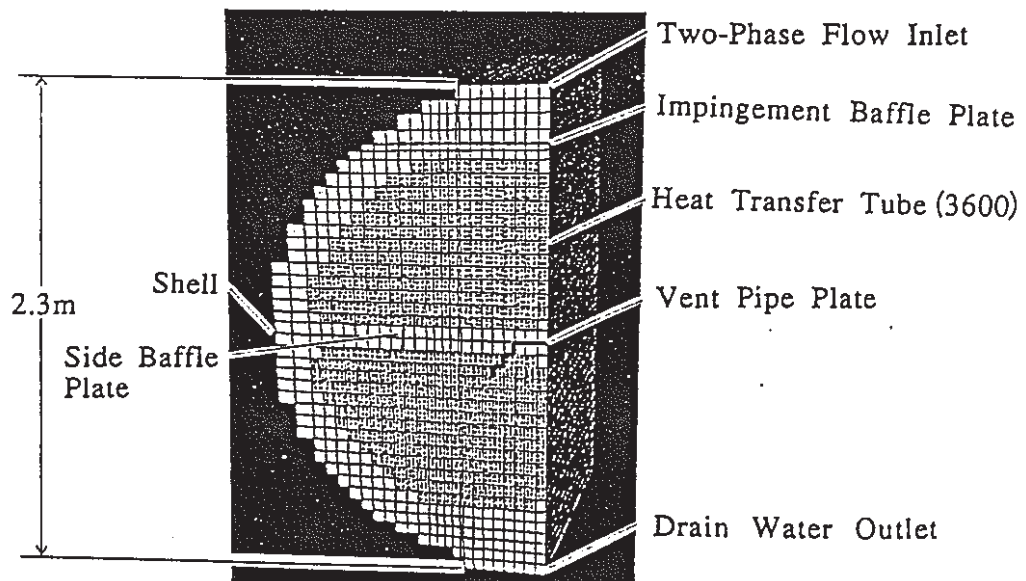


図6 給水加熱器のメッシュ分割図(1/2対称)

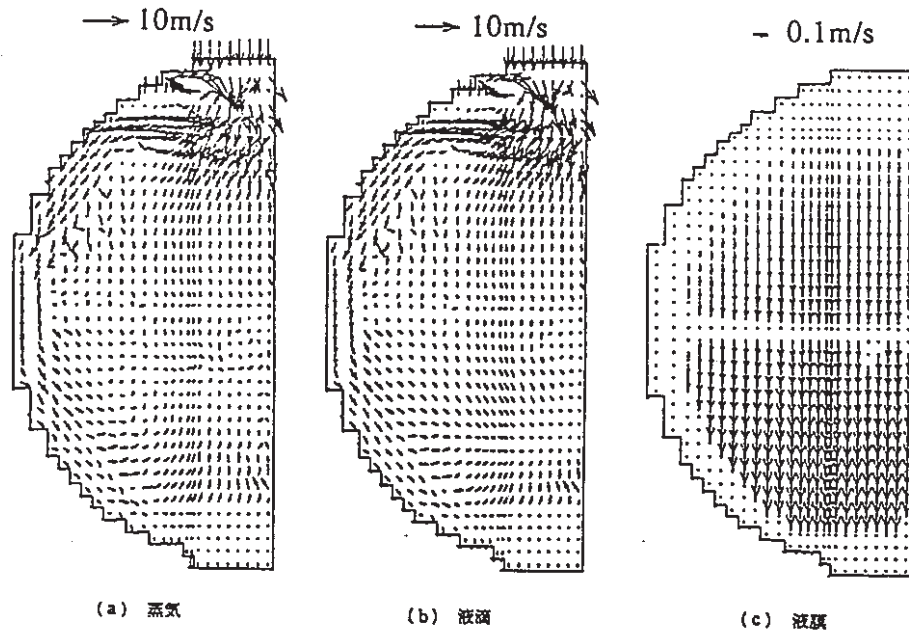


図7 流速ベクトル分布

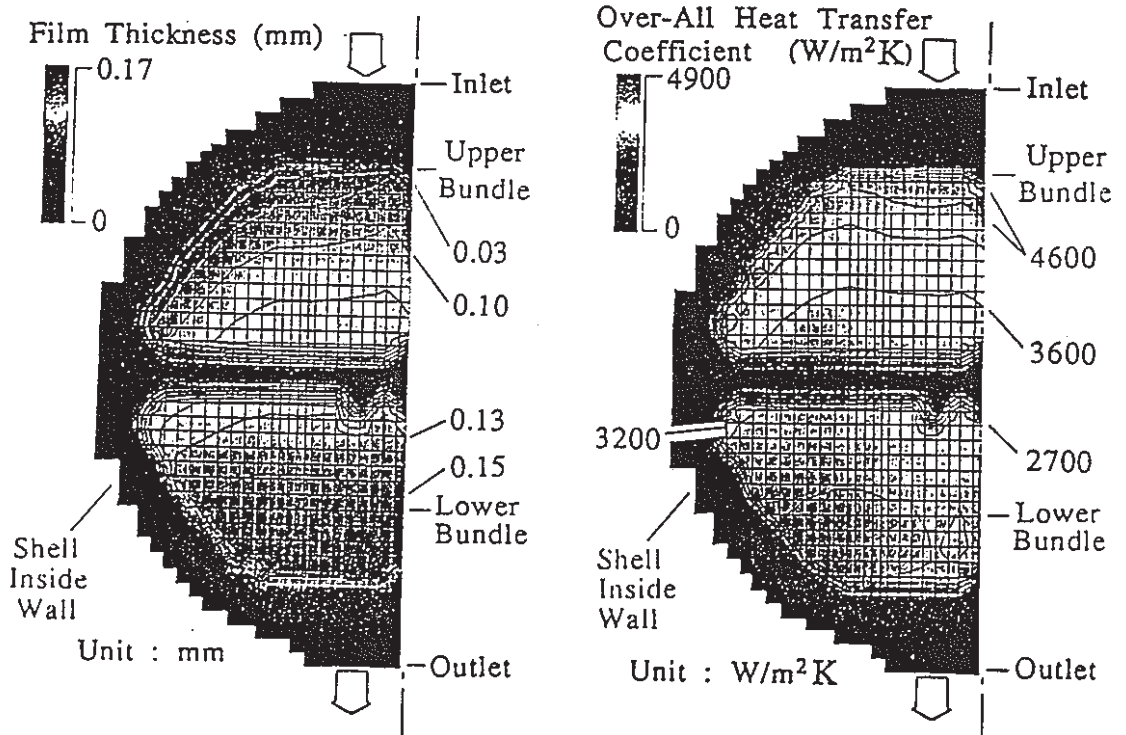


図8 液膜厚さ分布

図9 熱通過率分布

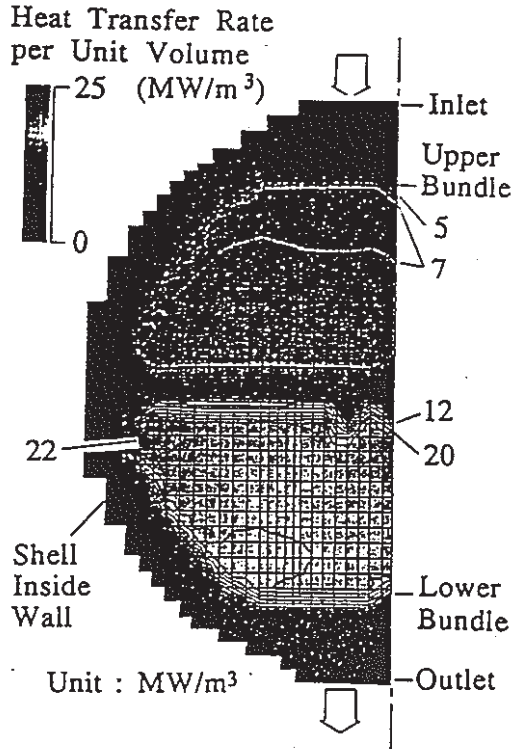


図 10 伝熱量分布

最大値は 0.17 mm である。特に、下部伝熱管群領域では上側かつ外側の領域で上側から落下してくる液膜の量が小さいため、液膜厚さは小さくなっている。

熱通過率の分布を図 9 に示す。液膜が薄く、かつ蒸気流速の大きい伝熱管群の上部と外側領域が熱通過率が大きい。実機の平均熱通過率は $3569 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であるが、熱通過率の最大値は $4900 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ である。

単位体積当たりの伝熱量分布を図 10 に示す。下部伝熱管群では給水温度が低いいため上部より伝熱量が大きい。また、上部、下部伝熱管群ともに上側が下側よりも液膜厚さが薄くなり液膜の熱抵抗が小さくなるので、上側が下側よりも伝熱量は大きい。特に、下部伝熱管群の上側かつ外側の領域は給水温度が低く、液膜厚さが薄く、しかも蒸気流速が大きいので、伝熱量が最も

大きい。

5. 結 言

発電プラントの給水加熱器内の二相流および伝熱特性を評価する手法を開発する目的で、二流体モデルを用いた汎用二相流解析プログラムを液膜厚さ分布、液膜流速分布を考慮した熱伝達を計算できるように改良した。このプログラムを用いて実機給水加熱器内の二相流挙動を解析した。その結果、以下の事項が明らかになった。

(1) 本計算モデルでは、液膜が層流で液滴の付着、飛散を伴いながら重力により落下するものとした。蒸気の強制対流による液膜厚さの変化は Fujii の式により考慮した。Namie-Ueda の実験より液滴伝達係数に 0.10 m/s を、Ueda の実験式より液滴発生率に $0.11 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ を使用し、上側伝熱管から直下の伝熱管に落下する液膜の割合を 0.7 とした場合、全伝熱管の計算値は実測値 (130 MW) と一致した。

(2) 入口の流れの衝突によりバッフル板の上部と伝熱管群の上部で蒸気、液滴ともに渦が発生している。蒸気は給水加熱器胴体壁と伝熱管群の間の空間に沿って流れ、周囲から伝熱管群に流入する。伝熱管群の中では流路面積が小さくかつ抵抗が大きいので流速は小さい。液膜厚さおよび液膜流速は伝熱管群上部で小さく、下側に行くに従い大きくなる。

(3) 下部伝熱管群の上側かつ外側の領域は給水温度が低く、液膜が薄く、かつ蒸気流速が大きいので伝熱量が最も大きい。

文 献

- (1) Boccardi, G., *Proc. 2nd Int. Symp. Condensers Condensation*, Univ. of Bath, United Kingdom, (1990-3), 28-30.
- (2) Murata, S., *JNST*, 28-11 (1991), 1029-1040.
- (3) 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, (1989), 39-40, コロナ社.
- (4) 甲藤, 伝熱概論, (1987), 272, 275, 養賢堂.
- (5) 藤井, 伝熱工学の進展, 1 (1975), 28, 33, 養賢堂.
- (6) Marto, P. J., *Heat Transf. Eng.*, 5-1/2 (1984), 31-60.
- (7) 関, 伝熱工学, (1988), 120, 森北出版.
- (8) 植田, 気液二相流, (1981), 148, 160, 養賢堂.