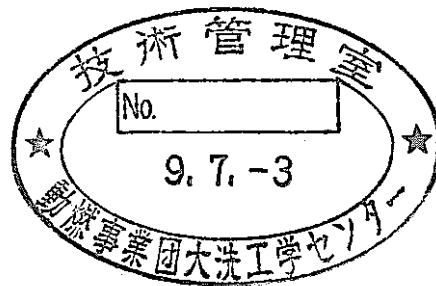


# ナトリウム—水反応ジェット 解析用基本コードの開発

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997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)

1997年3月

## ナトリウム-水反応ジェット解析用基本コードの開発

齋藤義則 (\*), 床井博見 (\*), 糸岡聡 (\*\*)

岡部綾夫 (\*\*\*) , 池崎利弘 (\*\*\*)

## 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のための基本となる解析コードを開発した。解析に必要な化学反応モデルと二相流 (二流体) モデルを構築し、さらにこれらのモデルをカップリングさせた反応ジェット解析用の基本コードを開発して、各モデルの妥当性を試計算により確認した。開発コードは、ナトリウム-水反応を伴う二相流噴流の流動解析評価への適用が可能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：08C3425

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 濱田広次

\* : 電力・電機開発本部原子力第1部

\*\* : 日立工場原子力開発技術センター

\*\*\* : 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第1部

MARCH,1997

## Development of basic code for sodium-water reaction jet

Yoshinori Saito(\*), Hiromi Tokoi(\*), Satoshi Itooka(\*),  
Ayao Okabe(\*\*\*) , Toshihiro Ikezaki(\*\*\*)

### 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, basic code for sodium-water reaction jet were designed & developed with considering analytical models; two-fluid model and chemical reaction model. Reasonable results were obtained with test analyses for the two models. Basic code coupled with the models were developed. Test analyses with the code were carried out. This codes are considered to be useful for two-phase flow analysis with chemical reaction and, therefore, are most available for estimation of flow behavior on sodium-water reaction jet.

---

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 Power Systems Dep., Power & Industrial Systems R & D Division.

\*\* :Advanced 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-水反応ジェット基本コードの開発 .....	3.1-1
3. 1	開発コードのモデル仕様 .....	3.1-1
3. 1. 1	ナトリウム-水反応ジェットの現象推定 .....	3.1-1
3. 1. 2	化学反応モデルの仕様 .....	3.1-4
3. 1. 2. 1	化学反応モデルの概要 .....	3.1-4
3. 1. 2. 2	化学反応モデルの内容 .....	3.1-6
3. 1. 2. 3	化学反応モデルの試計算 .....	3.1-12
3. 1. 3	二流体モデルの仕様.....	3.1-27
3. 1. 3. 1	二流体モデルの概要.....	3.1-27
3. 1. 3. 2	二流体モデルの内容.....	3.1-29
3. 1. 3. 3	二流体モデルの試計算.....	3.1-38
3. 2	計算方法の仕様 .....	3.2-1
3. 2. 1	計算方法の概要 .....	3.2-1
3. 2. 2	計算方法の内容 .....	3.2-3
3. 3	プログラムの構成 .....	3.3-1
3. 3. 1	概要 .....	3.3-1
3. 3. 2	開発コードの概略構成 .....	3.3-1
3. 3. 3	開発作業 .....	3.3-7
3. 3. 3. 1	概略 .....	3.3-7
3. 3. 3. 2	開発コードの構成 .....	3.3-8
3. 3. 3. 3	化学反応に伴う生成項評価モジュールの追加・変更.....	3.3-11

3. 3. 3. 4	物性値計算関数の変更 .....	3.3-17
3. 3. 3. 5	気液二相流の相平均物性値の算出 .....	3.3-31
3. 3. 3. 6	入出力部分の変更 .....	3.3-33
3. 3. 3. 7	モジュール連結部の変更 .....	3.3-35
3. 3. 3. 8	COMMON変数の追加変更 .....	3.3-36
3. 3. 3. 9	備考 .....	3.3-37
3. 4	コード開発手順 .....	3.4-1
3. 5	反応ジェット基本コードの試計算 .....	3.5-1
3. 5. 1	ナトリウム-水反応ジェットの解析(動作確認) .....	3.5-1
3. 5. 2	化学反応モデルパラメータの依存性の確認 .....	3.5-8
3. 5. 3	ナトリウム-水反応ジェットの長時間現象の解析(動作確認)	3.5-22
3. 5. 4	既存試験結果による試計算の検証 .....	3.5-28
3. 5. 5	まとめ .....	3.5-31
3. 6	コードの使用方法説明 .....	3.6-1
3. 6. 1	計算条件設定方法 .....	3.6-1
3. 6. 2	出力方法 .....	3.6-13
3. 6. 3	変数の説明 .....	3.6-15
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. 計算入力ファイルのサンプル (Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合).....	A-1
付録B. 解析結果ファイルのサンプル (Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合).....	B-1
付録C. 入力ファイル作成用 シェルスクリプトのサンプル (Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合).....	C-1
付録D. パラメータサーベイ用 実行シェルスクリプトのサンプル (Na中への蒸気の噴流：反応有りの場合).....	D-1
付録E. コード使用時の注意.....	E-1

## 表一覧表

表3.1.1-1	主要現象	3.1-2
表3.1.2.1-1	化学反応モデルの考慮要件	3.1-5
表3.1.2.2-1	反応式の考慮要件	3.1-7
表3.1.2.2-2	ナトリウム-水反応における化学種の分類	3.1-7
表3.1.2.2-3	総括反応式における各化学種	3.1-10
表3.1.3.1-1	気液二相流の解析モデルの比較	3.1-28
表3.1.3.2-1	二流体モデルの改良	3.1-32
表3.1.3.2-2	SIMAの特徴	3.1-33
表3.1.3.3-1	臨界流量の比較	3.1-40
表3.1.3.3-2	噴流外径の比較	3.1-41
表3.1.3.3-3	噴出流量の比較(蒸気混合飽和水の場合)	3.1-44
表3.1.3.3-4	噴出流量の比較(過熱蒸気の場合)	3.1-47
表3.1.3.3-5	噴出流量の比較(ノズル径依存性)	3.1-50
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	3.2-8
表3.2.2-2	時間積分方法の比較	3.2-11
表3.3.2-1	サブルーチンの機能	3.3-3
表3.3.3-1	Na-水反応系の5化学種7成分の化学種の物性値式	3.3-17
表3.3.3-2	化学種・成分の分類	3.3-37



## 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	噴流現象の推定	3.1-3
図3.1.2.2-1	各相の分散モデル	3.1-8
図3.1.2.2-2	化学種の生成消滅のモデル	3.1-10
図3.1.2.3-1	線近似解析モデルの解析体系	3.1-13
図3.1.2.3-2	化学種密度・温度分布の経時変化(A)	3.1-15
図3.1.2.3-3	温度分布経時変化のパラメータ依存性(A)	3.1-16
図3.1.2.3-4	化学種密度・温度分布の経時変化(B-1)	3.1-19
図3.1.2.3-5	温度分布経時変化のパラメータ依存性：その1(B-1)	3.1-20
図3.1.2.3-6	温度分布経時変化のパラメータ依存性：その2(B-1)	3.1-21
図3.1.2.3-7	化学種密度・温度分布の経時変化(B-2)	3.1-23
図3.1.2.3-8	温度分布経時変化のパラメータ依存性：その1(B-2)	3.1-24
図3.1.2.3-9	温度分布経時変化のパラメータ依存性：その2(B-2)	3.1-25
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)	3.1-31
図3.1.3.2-2	検査体積の保存量収支(SIMA)	3.1-35
図3.1.3.2-3	FLIC(Fluid in Cell)法の概念	3.1-35
図3.1.3.2-4	SIMAコードの構成	3.1-37
図3.1.3.3-1	比較実験(水中への高温高圧水の噴流)	3.1-39
図3.1.3.3-2	解析メッシュ	3.1-39
図3.1.3.3-3	等圧線(水中への高温高圧水の噴出：時刻10ms後)	3.1-41
図3.1.3.3-4	等ボイド率線：分割メッシュ(水中への高温高圧水の噴出)	3.1-42
図3.1.3.3-5	等ボイド率線：等間隔(水中への高温高圧水の噴出)	3.1-43
図3.1.3.3-6	等ボイド率線：分割メッシュ(水中への蒸気混合飽和水の噴出)	3.1-45
図3.1.3.3-7	等ボイド率線：等間隔(水中への蒸気混合飽和水の噴出)	3.1-46
図3.1.3.3-8	等ボイド率線：分割メッシュ(水中への過熱蒸気の噴出)	3.1-48
図3.1.3.3-9	等ボイド率線：等間隔(水中への過熱蒸気の噴出)	3.1-49
図3.1.3.3-10	等ボイド率線：分割メッシュ(噴出量依存性)	3.1-51

図3.1.3.3-11	等ボイド率線: 等間隔(噴出量依存性)	3.1-52
図3.2.1-1	ナトリウム-水反応ジェット周りの流れ	3.2-1
図3.2.2-1	基礎式の関連	3.2-3
図3.2.2-2	二流体モデルの概念図	3.2-4
図3.2.2-3	離散化体系	3.2-9
図3.3.2-1	本解析手法のモジュール構成	3.3-2
図3.3.2-2	プログラムのサブルーチン構成	3.3-4
図3.3.3-3	インターフェイスの構成	3.3-6
図3.3.3-4	反応ジェット基本コードの構成	3.3-10
図3.3.3-5	ACTモジュールの構成	3.3-13
図3.3.3-6	物性値の比較: 質量密度	3.3-23
図3.3.3-7	質量密度の圧力・温度依存性(気相H <sub>2</sub> O)	3.3-24
図3.3.3-8	質量密度の圧力・温度依存性(気相Na)	3.3-25
図3.3.3-9	質量密度の圧力・温度依存性(H <sub>2</sub> )	3.3-26
図3.3.3-10	物性値の比較: 粘性係数	3.3-27
図3.3.3-11	物性値の比較: 定圧比熱	3.3-27
図3.3.3-12	物性値の比較: 熱エンタルピー	3.3-28
図3.3.3-13	物性値の比較: 比熱比	3.3-28
図3.3.3-14	物性値の比較: 熱伝導率	3.3-29
図3.3.3-15	物性値の比較: 音速	3.3-29
図3.3.3-16	物性値の比較: 飽和温度	3.3-30
図3.3.3-17	物性値に関するモジュール関連	3.3-32
図3.3.3-18	解析体系における初期条件	3.3-34
図3.4-1	コード開発方法	3.4-2
図3.5-1	試計算における解析体系	3.5-2
図3.5-2	等ボイド率線(Na中への蒸気の噴出: 反応無しの場合)	3.5-3
図3.5-3	等ボイド率線(Na中への蒸気の噴出: 反応有りの代表例)	3.5-5
図3.5-4	相平均温度線(Na中への蒸気の噴出: 反応有りの代表例)	3.5-6
図3.5-5	水素質量分率線(Na中への蒸気の噴出: 反応有りの代表例)	3.5-7
図3.5-6	等ボイド率線(Na中への蒸気の噴出・反応有り: K依存性)	3.5-10

図3.5-7	相平均温度線(Na中への蒸気の噴出・反応有り：K依存性)	3.5-11
図3.5-8	水素質量分率線(Na中への蒸気の噴出・反応有り：K依存性)	3.5-12
図3.5-9	等ボイド率線(Na中への蒸気の噴出・反応有り：F依存性)	3.5-13
図3.5-10	相平均温度線(Na中への蒸気の噴出・反応有り：F依存性)	3.5-14
図3.5-11	水素質量分率線(Na中への蒸気の噴出・反応有り：F依存性)	3.5-15
図3.5-12	等ボイド率線(Na中への蒸気の噴出・反応有り： $\theta$ 依存性)	3.5-16
図3.5-13	相平均温度線(Na中への蒸気の噴出・反応有り： $\theta$ 依存性)	3.5-17
図3.5-14	水素質量分率線(Na中への蒸気の噴出・反応有り： $\theta$ 依存性)	3.5-18
図3.5-15	等ボイド率線(Na中への蒸気の噴出・反応有り： $\eta$ 依存性)	3.5-19
図3.5-16	相平均温度線(Na中への蒸気の噴出・反応有り： $\eta$ 依存性)	3.5-20
図3.5-17	水素質量分率線(Na中への蒸気の噴出・反応有り： $\eta$ 依存性)	3.5-21
図3.5-18	等ボイド率線(Na中への蒸気の噴出・反応無しの場合：1秒まで)	3.5-24
図3.5-19	等ボイド率線(Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：1秒まで)	3.5-25
図3.5-20	相平均温度線(Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：1秒まで)	3.5-26
図3.5-21	水素質量分率線(Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：1秒まで)	3.5-27
図3.5-22	既存試験結果(根井・掘)	3.5-29
図3.5-23	既存試験結果(河原その他)	3.5-30
図3.6-1	粗メッシュ分割規約	3.6-7
図3.6-2	細メッシュ分割規約	3.6-7
図3.6-3	メッシュ情報	3.6-8
図3.6-4	SETUPにおける境界条件＝セル隣接情報設定	3.6-12

## 式一覧表

式3.1-1	ナトリウム－水反応の第1素反応式	3.1-6
式3.1-2	ナトリウム－水反応の第2素反応式	3.1-6
式3.1-3	ナトリウム－水反応の一般素反応式	3.1-7
式3.1-4	ナトリウム－水反応の一般総括反応式	3.1-8
式3.1-5	ナトリウム－水反応の総括反応式	3.1-8
式3.1-6	ナトリウム－水反応の発熱量の評価式	3.1-9
式3.1-7	単位時間当たりの水素質量生成量の評価式	3.1-9
式3.1-8	各相への伝熱量の評価式	3.1-10
式3.1-9	化学種別の質量生成消滅量の評価式	3.1-10
式3.1-10	化学種の質量保存式(線近似)	3.1-12
式3.1-11	エネルギーの保存式(線近似)	3.1-12
式3.1-12	発熱量の評価式(線近似)	3.1-12
式3.1-13	水素の生成消滅量(線近似)	3.1-12
式3.1-14	各化学種の生成消滅量(線近似)	3.1-12
式3.1-15	各化学種の発熱量(線近似)	3.1-13
式3.1-16	質量保存式(1次元二流体モデル)	3.1-29
式3.1-17	運動量保存式(1次元二流体モデル)	3.1-29
式3.1-18	エネルギーの保存式(1次元二流体モデル)	3.1-29
式3.1-19	一般化された二流体モデルの保存式(SIMA2DA)	3.1-33
式3.1-20	保存量(SIMA2DA)	3.1-33
式3.1-21	フラックス(流束)(SIMA2DA)	3.1-33
式3.1-22	生成・消滅項(SIMA2DA)	3.1-34
式3.1-23	圧力算出式(SIMA2DA)	3.1-34
式3.1-24	空間積分された保存式(SIMA2DA)	3.1-34
式3.1-25	空間積分された保存量(SIMA2DA)	3.1-34
式3.1-26	空間積分された生成・消滅項(SIMA2DA)	3.1-34
式3.1-27	時間積分のために差分化された保存式(SIMA2DA)	3.1-36
式3.1-28	Euler陽解法による差分化保存式(SIMA2DA)	3.1-36

式3.2-1	気液二相流の質量保存式	3.2-4
式3.2-2	気液二相流の運動量保存式	3.2-4
式3.2-3	気液二相流のエネルギーの保存式	3.2-5
式3.2-4	各化学種の質量保存式	3.2-5
式3.2-5	全体の体積率の総和量の拘束条件	3.2-5
式3.2-6	気液相別の体積率の総和量の拘束条件	3.2-5
式3.2-7	相間保存式：質量移動量	3.2-5
式3.2-8	相間保存式：摩擦力	3.2-6
式3.2-9	相間保存式：速度	3.2-6
式3.2-10	相間保存式：伝熱	3.2-6
式3.2-11	界面面積濃度式	3.2-6
式3.2-12	相間質量移動量	3.2-6
式3.2-13	摩擦力式(一般形)	3.2-6
式3.2-14	相間摩擦力式(ドリフトモデル)	3.2-7
式3.2-15	ナトリウム-水反応の総括反応式	3.2-7
式3.2-16	気液二相流の熱的状态式	3.2-8
式3.2-17	気液二相流の熱量的状态式	3.2-8
式3.2-18	物性値式(一般形)	3.2-8
式3.2-19	一般化された二流体モデルの保存式	3.2-10
式3.2-20	保存量	3.2-10
式3.2-21	フラックス(流束)	3.2-10
式3.2-22	生成・消滅項	3.2-10
式3.2-23	空間積分された保存式	3.2-10
式3.2-24	圧力算出式	3.2-10
式3.2-25	Euler陽解法による差分化保存式	3.2-11
式3.3-1	一般化された気液二相流の基本式(保存式)	3.3-8
式3.3-2	Naと水の気相質量率	3.3-11
式3.3-3	水素生成量	3.3-12
式3.3-4	各化学種生成量	3.3-12
式3.3-5	気液相への伝熱量	3.3-12

式3.3-6	気液相変化量	3.3-14
式3.3-7	化学種の質量保存量の変更	3.3-15
式3.3-8	気液相の質量保存量の変更	3.3-15
式3.3-9	気液相の運動量保存量の変更	3.3-15
式3.3-10	気液相の内部エネルギー保存量の変更	3.3-16
式3.3-11	質量密度	3.3-18
式3.3-12	粘性係数	3.3-18
式3.3-13	定圧比熱	3.3-19
式3.3-14	熱エンタルピー	3.3-20
式3.3-15	比熱比	3.3-20
式3.3-16	熱伝導率	3.3-20
式3.3-17	音速	3.3-21
式3.3-18	水・Naの飽和温度	3.3-22
式3.3-19	相平均温度の探索関数	3.3-31

## 記号表

A :	(断)面積( $m^2$ )
a :	音速(m/s)
$a_i$ :	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( $mol/m^3$ )
$C_p$ :	定圧比熱(J/K)
D :	物質拡散係数( $m^2/s$ )
$D_e$ :	等価直径(m)
e :	比内部エネルギー(J/kg)
E :	計算セルの内部エネルギー保存量(J)
F :	水素／水モル転換比(-)
$F_v, f_v$ :	体積力( $N/m^3$ )
$F_s, f_s$ :	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 (速度) (kg/s)
p :	圧力(Pa)
Q :	化学反応発熱量( $W/m^3$ ), 計算セルの質量保存量(kg)
q :	発熱量( $W/m^3$ )
S :	検査体積の界面(m)
T :	温度(K)
t :	時間(s)
UM, VM :	計算セルの運動量保存量( $kg \cdot m/s$ )
u, v :	流速(m/s)

V : 検査体積の体積(m<sup>3</sup>)  
W : 分子量(kg/mol)  
X : モル分率(-)  
x : 質量分率(クォリテイ・気相質量比)(-)  
x, y, z : デカルト空間座標(m)

$\alpha$  : 体積率(-)  
 $\beta$  : 気液伝熱比(-)  
 $\Delta$  : 差分  
 $\Delta H$  : 熱エンタルピー(J/kg)  
 $\zeta$  : 圧力損失係数(-)  
 $\eta$  : モル転換比(-), 相変化速度定数(m/s)  
 $\theta$  : 気相伝熱比(-)  
 $\kappa$  : 比熱比(-)  
 $\lambda$  : 熱伝導率(W/(m·K))  
 $\mu$  : 粘性係数(Pa·s)  
 $\xi$  : 相変化速度係数(-)  
 $\rho$  : 質量密度(kg/m<sup>3</sup>)  
 $\Phi, \phi$  : 保存量ベクトル  
 $\Psi, \psi$  : 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・成分 (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

化学種 (本報告書中のモデルで分類される相)

Na : ナトリウム (液相=l、気相=g)  
H<sub>2</sub>O : 水 (液相：水=l、気相：水蒸気=g)  
H<sub>2</sub> : 水素 (気相)  
NaOH : 水酸化ナトリウム (液相)  
Na<sub>2</sub>O : 酸化ナトリウム (液相)

## 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基本コードの開発では、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の基本となる解析手法、すなわち水リーク時におけるナトリウム-水反応領域および反応ジェット周りの流動解析手法の開発を実施した。

## 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

平成6年度においては、水リーク検知後の安全保護動作として行われる水蒸気ブロー過程をLEAPコードで取り扱うため、ブローダウン時の伝熱管内減圧・冷却効果及び2次、3次破損口からの水リーク量を精度良く解析できるよう、LEAPコードに上記(1)の水系ブローダウン計算機能を付加する上での基礎となるブローダウンコードを開発した。また、平成7年度においては、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コードに上記(3)のナトリウム-水化学反応計算機能を付加する上での基礎となるナトリウムと水の化学反応を考慮した反応ジェット並びにナトリウム流動解析コードを設計した。

本件においては、平成7年度に実施したコード設計の成果を踏まえ、基本となる解析コードを開発した。具体的には、解析に必要となる化学反応モデルと二相流（二流体）モデルを構築し、さらにこれらのモデルをカップリングさせた反応ジェット解析用の基本コードを開発して、各モデルの妥当性を、試計算により確認した。

### 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。

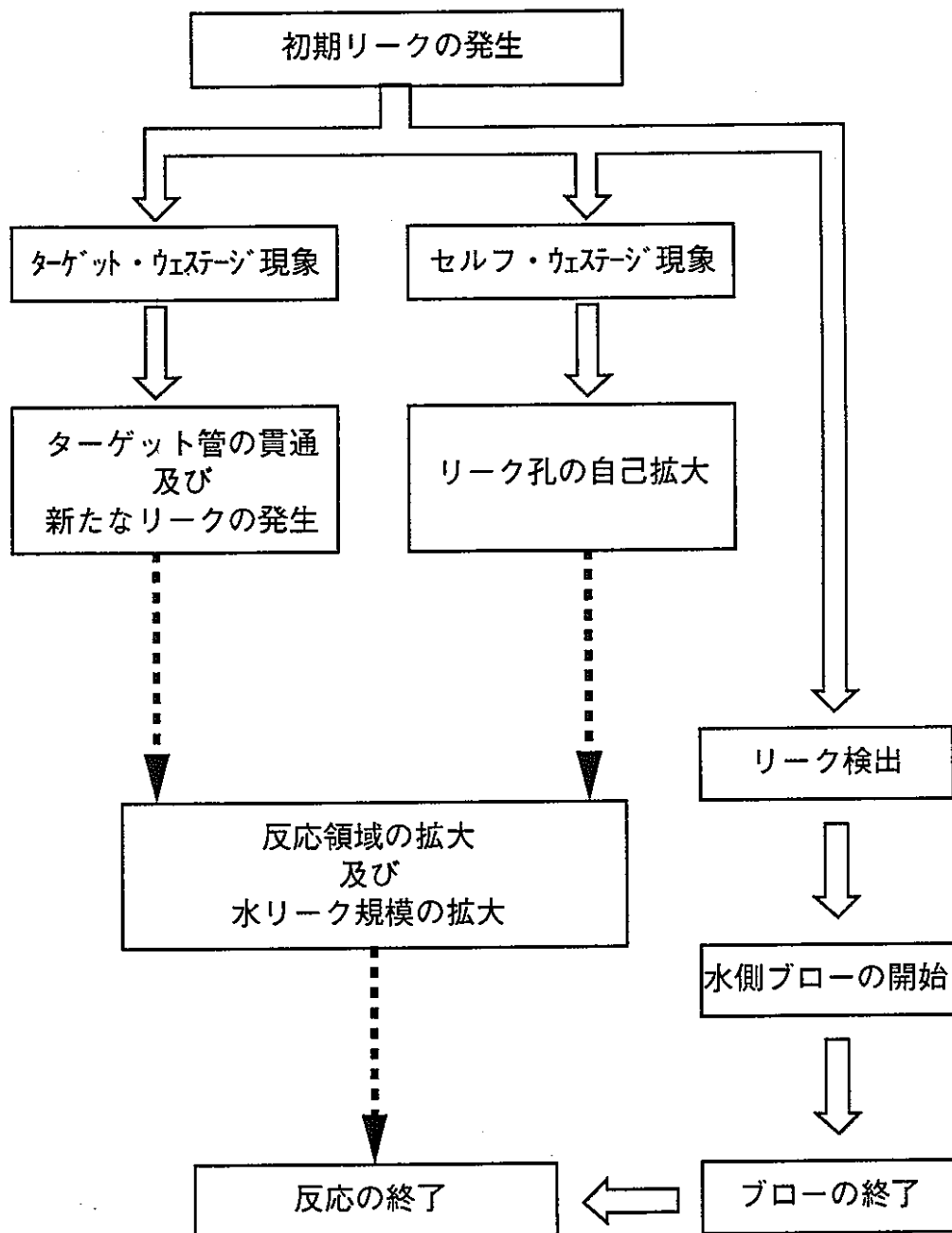


図2.3-1 破損伝播現象モデル

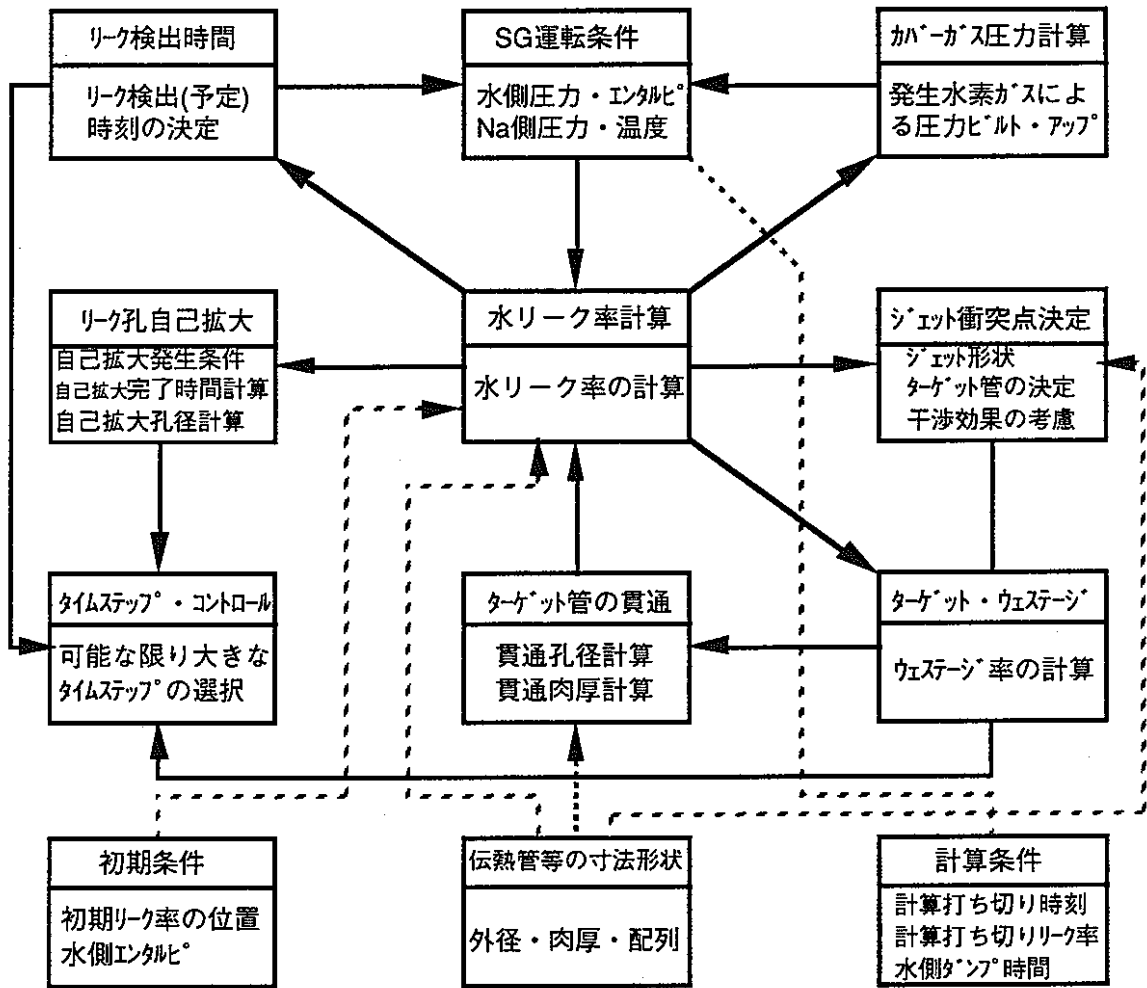


図2.3-2 LEAPコードの構成要素間のつながり

### 3. ナトリウム-水反応ジェット基本コードの開発

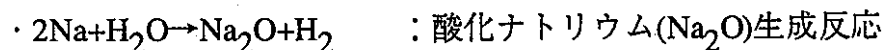
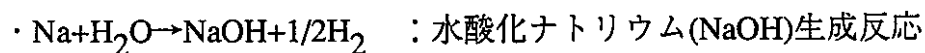
FBR用SG伝熱管水リーク時における、ナトリウム-水反応領域周りの流動解析を適切に評価するための基本となるコードを開発する。

#### 3. 1 開発コードのモデル仕様

##### 3. 1. 1 ナトリウム-水反応ジェットの現象推定

まず、ナトリウム-水反応ジェットを取り扱う解析モデルを構築するための対象現象について検討する。

図3.1.1-1にナトリウム-水反応ジェットおよび反応ジェットに類似の反応のない噴流現象の推定の概観、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(噴流を形成)。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( $H_2O \cdot Na$ )から生成物( $H_2 \cdot NaOH \cdot Na_2O$ 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。



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( $NaOH \cdot Na_2O$ )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。さらに、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<sub>2</sub>O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は依存・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。

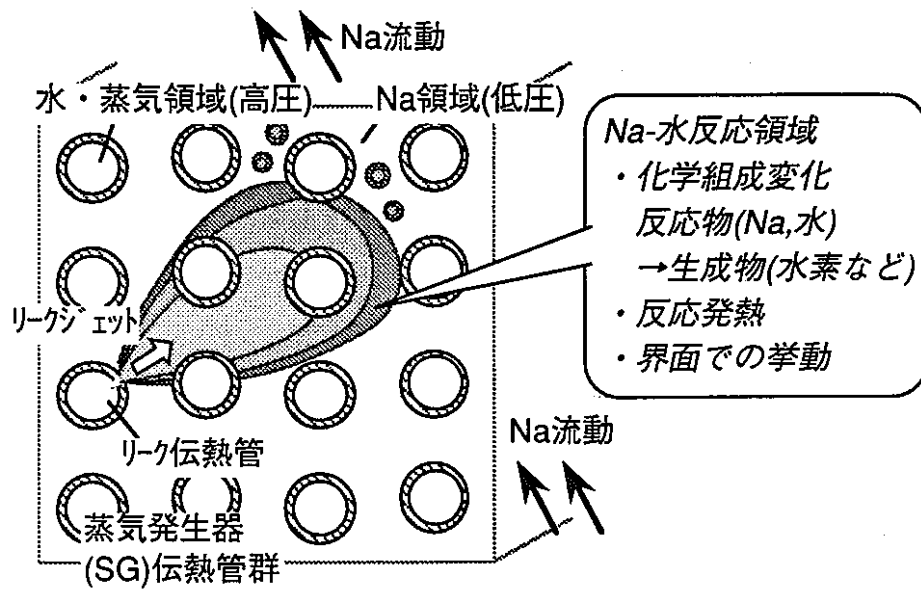
本開発コードでは反応領域のみの現象に注目する目的から、周囲のナトリウム流動や伝熱管群による流動抵抗などの実機体系による効果、重力・浮力の二相流へ作用する外力の効果、ブローダウンによる伝熱管内の圧力・噴出流量の変化については考慮せず、軸対称2次元体系を簡略化した仮定の下でコードを開発する。

本解析モデルでは、化学反応を伴う気液二相の噴流解析のための二相流モデルと化学反応モデルの構築が重要である。上記現象をより詳細に取り扱うため、開発する基本コードのモデルには化学反応モデルと二流体モデルを採用する。次節以降に2つのモデルの構築を検討し、その詳細仕様を示す。

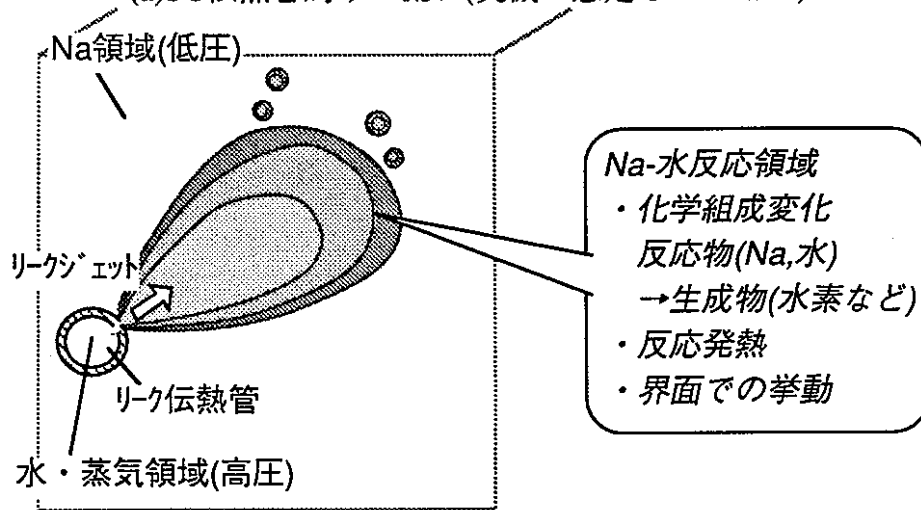
表3.1.1-1 主要現象

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 <sub>2</sub> )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(反応は伝熱・流動より現象進行が速い)

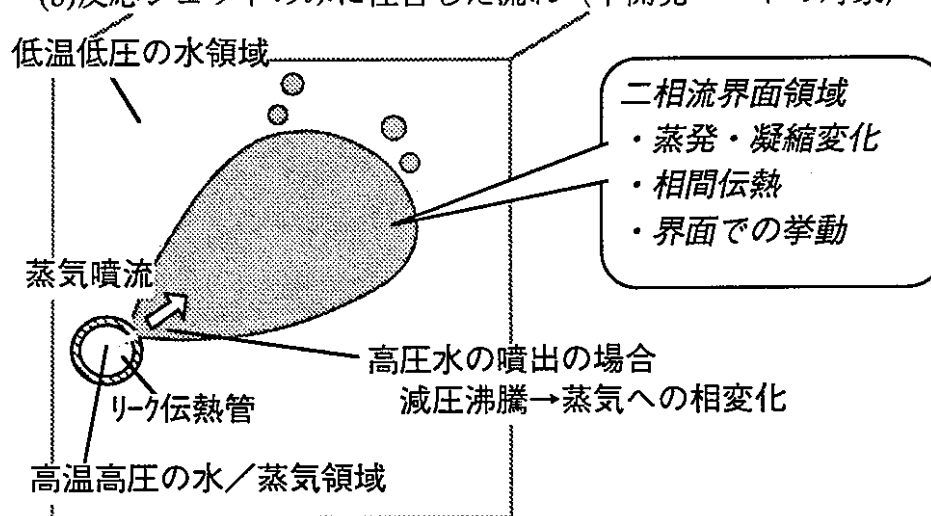




(a)SG伝熱管周りの流れ(実機で想定される流れ)



(b)反応ジェットのみ注目した流れ(本開発コードの対象)



(c)反応のない噴流(水中への高温高圧の水/蒸気の噴流)

図3.1.1-1 噴流現象の推定

### 3. 1. 2 化学反応モデルの仕様

#### 3. 1. 2. 1 化学反応モデルの概要

まず、ナトリウム-水反応領域の化学反応モデルの概要を説明する。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にまとめた。これを踏まえて化学反応をモデル化する。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。

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2次元以上の多次元流動、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、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(水蒸気)と液相(ナトリウム)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(水蒸気、ナトリウム)から生成物(NaOH、Na<sub>2</sub>O等)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・非定常となる。しかし、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ため、基礎試験結果によるモデルの検証が必要となる。

よって、このような複雑な不均一系化学反応を単純化すると共に、より詳細な化学反応の取り扱いが可能な化学反応モデルを、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が、このモデルでは、(1)発熱量の大きい

NaOHとNa<sub>2</sub>Oの生成反応を考慮し、(2)上記反応式(複数の素反応式)を総括反応式にまとめ、(3)モデルパラメータは検証実験でチューニング可能とする、等の仕様を満たすものとする。

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"> <li>・気液(蒸気・Na)二相流の界面における化学反応：不均一反応</li> <li>・伝熱管群内部での3次元・非定常的な流動</li> </ul>
支配因子	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・気液二相の領域および気液界面</li> </ul>
考慮要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>(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</li> <li>(2)反応式の圧力・温度依存性</li> <li>(3)高温高圧の水／蒸気のリーク孔からの噴出</li> <li>(4)水／蒸気とNa領域の存在</li> <li>(5)伝熱管・SG構造物の存在</li> </ul>

### 3. 1. 2. 2 化学反応モデルの内容

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

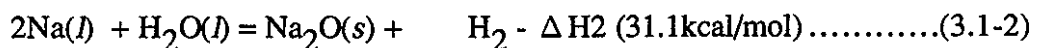
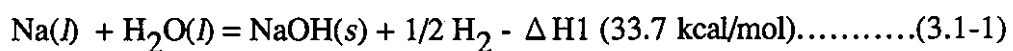
気体燃焼等の均一反応の場合には反応物の混合が均一であるから、接触面積は非常に大きい。そのため、単位時間当たりの反応量(反応速度)は、反応物の濃度(相手側反応物との濃度差または濃度積)と混合の程度によって支配され、反応物濃度の混合程度で現象進行時間が支配される拡散律速の場合と、反応現象の速さ(反応速度定数)自体で現象進行時間が支配される反応律速の場合がある。いずれにしても、ほとんど無限の反応面積のために反応速度は非常に大きい。また、対象となる化学反応の正反応(順方向の反応)と逆反応(逆方向の反応)の両方を考慮する必要がある(反応の可逆性を考慮)。しかし、本問題のような不均一系反応の場合には、気液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)反応は全て気液界面近傍で起こり、反応速度は有限(反応速度を考慮)。

(A-2)反応は非可逆的(正反応の速度定数のみを考慮し、逆反応を無視)。

ナトリウム-水反応のうち、反応熱の大きい次の水酸化ナトリウム生成反応と酸化ナトリウム生成反応の2反応を考慮する。ただし、下記の2式については、 $\text{Na} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ともに液相(*l*)の場合のみを記載した。



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。

$$(\text{反応物A}(i)) + (\text{反応物B}(i)) = (\text{生成物C}(i)) + (\text{生成物D}(i)) + (\text{発熱Q}(i)) \dots (3.1-3)$$

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
②発熱量	④界面濃度(面積密度) 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単純化のため表3.1.2.2-2のように、各化学種を分類し、下記の4化学種・7成分系・気液二相流を仮定して、それぞれの化学種の質量保存式を考慮する。

伝熱管内の $H_2O$ 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。また、化学反応による温度上昇は $1000^\circ C$ 以上となることも想定されるため、Naの気化(蒸発)の場合もあり得る。よって気相と液相の $H_2O$ とNaはそれぞれ別の成分と見なして取り扱う。このときの気相質量率(密度比)は、 $H_2O$ の場合では $x_H$ 、Naの場合では $x_N$ と表す。 $H_2$ には中間反応による分解は無いと仮定する。高沸点で液相または固相が想定される $NaOH(l/s)$ と $Na_2O(s)$ は、固相が混合した液相均質流として取り扱う。

反応式(3.1-1)・(3.1-2)における $Na \cdot H_2O$ では、実際は次の気液相の組み合わせの反応が考えられることから、2つの生成反応式×4つの組み合わせ=8つの素反応式の考慮が必要である。

- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| (1)液相Naと液相 $H_2O$ の反応 | (2)液相Naと気相 $H_2O$ の反応 |
| (3)気相Naと液相 $H_2O$ の反応 | (4)気相Naと気相 $H_2O$ の反応 |

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	Na(g)	$H_2O(g)$	$H_2$		
液相	Na(l)	$H_2O(l)$		NaOH(l/s)	$Na_2O(s)$

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。各相の反対相への溶解・拡散による相変化は無視し、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。

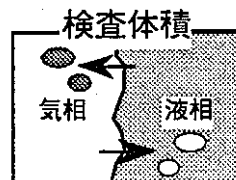
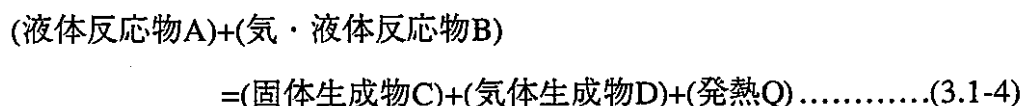


図3.1.2.2-1 各相の分散モデル

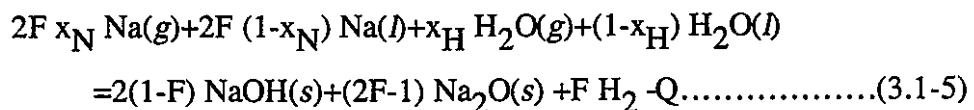
### (C) 化学反応のモデル化

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。

前記の8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(3.1-5)・(3.1-6)になる。ここで、Qは総括反応熱、m<sub>c</sub>は各化学種の生成消滅量、ΔH<sub>c</sub>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。



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

・ 第1パラメータ：水素／水モル転換比F

各化学種の熱エンタルピー $\Delta H_c$ は、一般に標準温度298(K)における標準生成熱、標準温度298(K)からの温度変化による顕熱、および相変化による潜熱の総和で評価される。ただし、本コードのモデルでは、Na, H<sub>2</sub>Oの相変化を後述のモデルで別に取り扱い、標準生成熱と顕熱の和を「熱エンタルピー」と呼ぶ。

全化学種の熱エンタルピーの総和をもって、反応式の発熱量は一般に評価される。このとき反応熱の温度による影響は、反応経路によらず(Kirchhoffの法則)、その温度における各化学種の顕熱分を考慮すればよい。すなわち、反応による生成熱－反応に関わる全化学種の顕熱の総和＝発熱量とすればよい。

上記の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Na<sub>2</sub>O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、2つの生成反応式のうち(3.1-1)のNaOH生成反応と、(3.1-2)のNa<sub>2</sub>O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相の質量比(気相の場合x、液相の場合1-x)で重みづけ、それぞれの組み合わせにより8つの反応式を考慮している。

単位時間当たりの水素質量生成量 $m_{H_2}$ を与える反応速度を、式(3.1-7)のようにモデル化する。ここで、Cと $\rho$ は各化学種のモル濃度と質量密度、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。

$$\begin{aligned} m_{H_2} &= W_{H_2} \cdot K \cdot a_i \cdot C_{Na} \cdot C_{H_2O} \\ &= W_{H_2} \cdot K \cdot a_i \cdot (\rho / W)_{Na} \cdot (\rho / W)_{H_2O} \dots \dots \dots (3.1-7) \end{aligned}$$

・ 第2パラメータ：水素反応速度定数K

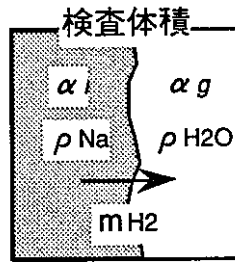


図3.1.2.2-2 化学種の生成消滅のモデル

(D) 化学反応による生成量のモデル化

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。

化学反応による各相への伝熱量 $Q_k$ は式(3.1-8)のように分配される。ここで $\beta_k$ 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 $\theta$ 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。

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

・ 第3パラメータ：気相伝熱比  $\theta$

7成分の化学反応におけ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 $m_{H_2}$ により式(3.1-9)のように与えられる。なお、モル転換比 $\eta_c$ は、表3.1.2.2-3のとおり総括反応式(3.1-5)と $H_2$ との量論比に従う。

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

表3.1.2.2-3 総括反応式における各化学種

化学種c	Na(g)	Na(l)	H <sub>2</sub> O(g)	H <sub>2</sub> O(l)	NaOH	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>
分子量 $W_c$ [kg/mol]	23	23	18	18	40	62	2
総括反応 量論比	$-2F x_N$	$-2F (1-x_N)$	$-x_H$	$-(1-x_H)$	$2(1-F)$	$(2F-1)$	F
モル転換比 $\eta_c$	$-2x_N$	$-2(1-x_N)$	$-x_H/F$	$-(1-x_H)/F$	$2(1-F)/F$	$(2F-1)/F$	1



### (E) Na・H<sub>2</sub>Oの相変化のモデル化

蒸発等の相変化による気液相間の質量移動量（速度） $m_v(\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}))$  = 相変化に寄与する熱量 $\Delta Q_v$  / 潜熱 $L(\text{J}/\text{kg})$ の関係があり、 $\Delta Q_v$ 、または $m_v$ の評価式(構成方程式)を必要とする。

後述の二流体モデルを用いたコード(二相流解析コードSIMA)では、水の蒸発速度式 $m_v(\text{H}_2\text{O})$ を利用して $m_v$ を評価しており、本開発コードでもこの相変化モデルを採用する。

相変化に伴う保存量の移動量は次のように評価される。

- ・元の相(液相)の速度を維持して運動量移動
- ・移動先の相(液相)の飽和エンタルピーを伴ってエネルギー移動  
(気液相の飽和エンタルピーの差異を潜熱と見なして考慮)

### (F) 気液二相流中の化学種挙動のモデル化

反応ジェットを含む領域においては、反応による化学種・成分の質量変化を伴いながらの気液二相流を解析対象とする。よって、後述の気液二相流の質量保存式とともに、7成分系の各化学種の質量保存式を考慮する。

各化学種の対流速度は、それぞれが含まれる気液相の速度に一致しているものと仮定する。

### 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、次の反応体系が簡略化された線近似体系による化学反応モデルを構築して試計算を行う。

#### (A) 反応界面が固定された線近似解析モデル

本解析モデルでは次のように仮定する。(1)領域内の気液二相流動を無視した反応面を中心とする非定常1次元体系。(2)伝熱・化学種拡散(フーリエ・フィック則)を考慮。(3)反応界面は固定で気液完全分離。界面面積濃度は固定  $a_i=0.25$ (気液体積率=0.5)。(4)気液相初期温度は同一で、体系は断熱の境界条件とする。

本解析モデルの試計算と同時に、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( $\rho_c$ )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、 $\lambda_k$ 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 $\theta$ による分配で評価される。

#### (1)化学種の質量保存式

$$\frac{d\rho_c}{dt} = \frac{d}{dx} \left( D_c \frac{d\rho_c}{dx} \right) + m_c \dots\dots\dots(3.1-10)$$

#### (2)エネルギーの保存式

$$\rho_k C p_k \frac{dT_k}{dt} = \frac{d}{dx} \left( \lambda_k \frac{dT_k}{dx} \right) - Q_k \dots\dots\dots(3.1-11)$$

$$Q = \sum_c^{All} \Delta H_c m_c \dots\dots\dots(3.1-12)$$

#### (3)水素の生成消滅量(速度)

$$m_{H_2} = W_{H_2} \cdot K \cdot a_i \cdot \rho_{Na} / W_{Na} \cdot \rho_{H_2O} / W_{H_2O} \dots\dots\dots(3.1-13)$$

#### (4)各化学種の生成消滅量(速度)

$$m_c = \eta_c \cdot m_{H_2} \cdot W_c / W_{H_2} \dots\dots\dots(3.1-14)$$

#### (5)各化学種の発熱量( $T_{b,c}$ は基準温度=298.15K)

$$\Delta H_c = \Delta H_{T_b,c}^\circ + \int_{T_b}^{T_0} C_{p,c}(T_0) dT \dots\dots\dots(3.1-15)$$

時間積分にはRunge-Kutta法を用いた。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3.1.2.3-1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。

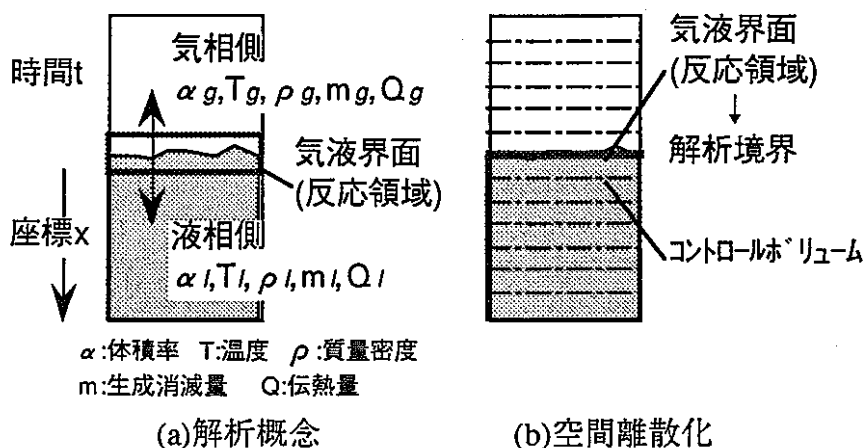


図3.1.2.3-1 線近似解析モデルの解析体系

図3.1.2.3-2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3.1.2.3-2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 $\rho$ ・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 $\theta$ 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 $\lambda$ は、気相側は水と水素の平均値、液相側はナトリウムの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 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 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1000万倍も大きな値を設定した。これは気相の対流による拡散を物質拡散に置き換えて拡散項(質量保存式の右辺第1項)の影響を見るためである。

ナトリウムに比べて水の質量密度が小さいために、反応面の水の消滅量割合

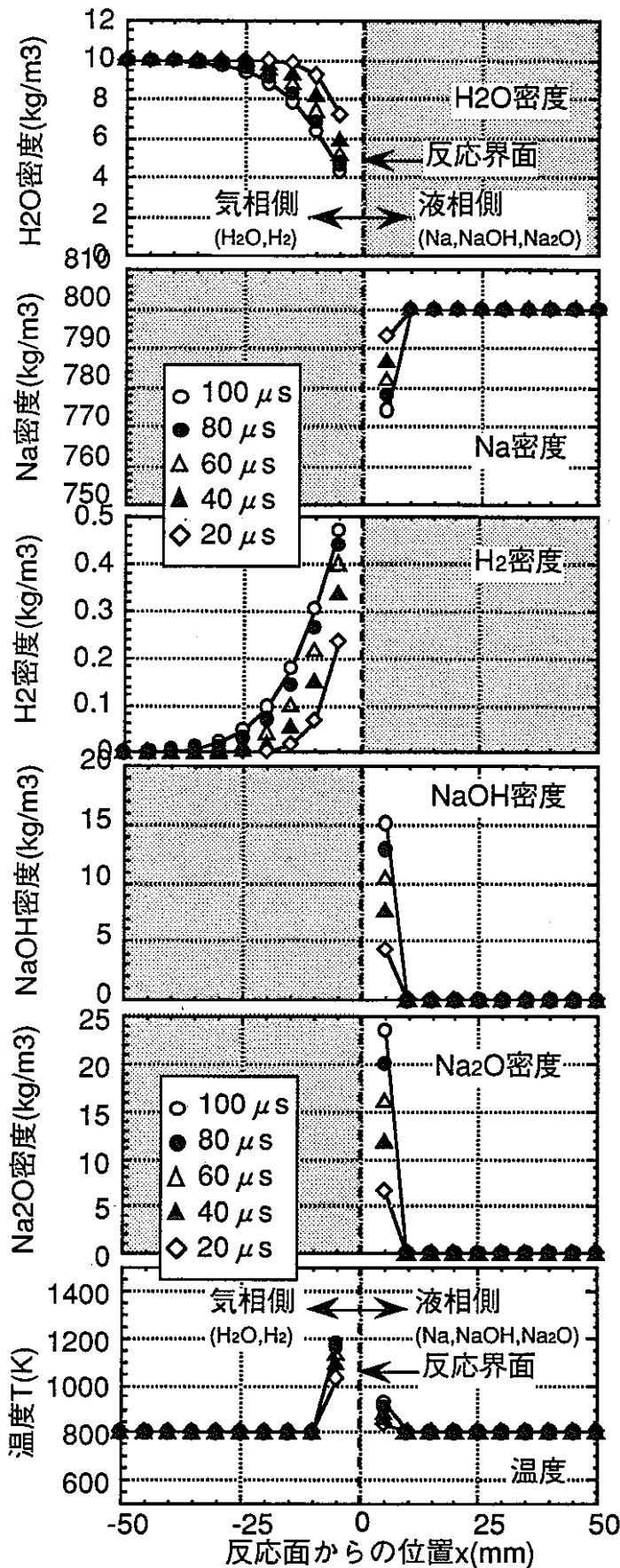
は大きい。また気相側の拡散係数が大きいので水・水素の物質移動変化は大きいことが分かる。水素／水モル転換比 $F=0.75$ はNaOHとNa<sub>2</sub>Oのモル生成割合が等しい条件であるが、質量比はNaOH：Na<sub>2</sub>O=40：62のためにNa<sub>2</sub>Oの方が質量生成量はNaOHより約5割大きい。反応初期に大きいのが次第に温度分布変化は小さくなる。しかし、反応面遠方への温度拡散は解析時間中には見られない。実際には反応ジェットの流れ・対流に伴う物質・温度の拡散が支配的になると推定される。

図3.1.2.3-3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。

Na<sub>2</sub>Oの生成熱がNaOHより小さいため、 $F$ が小さいほど温度上昇は大きい。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。気相伝熱比 $\theta$ が大きいほど、熱容量の小さい気相側への伝熱量が大きいので温度上昇は大きくなる。気相密度(熱容量)は小さいため、気相側の拡散係数が大きいほど気相温度上昇は大きくなる。

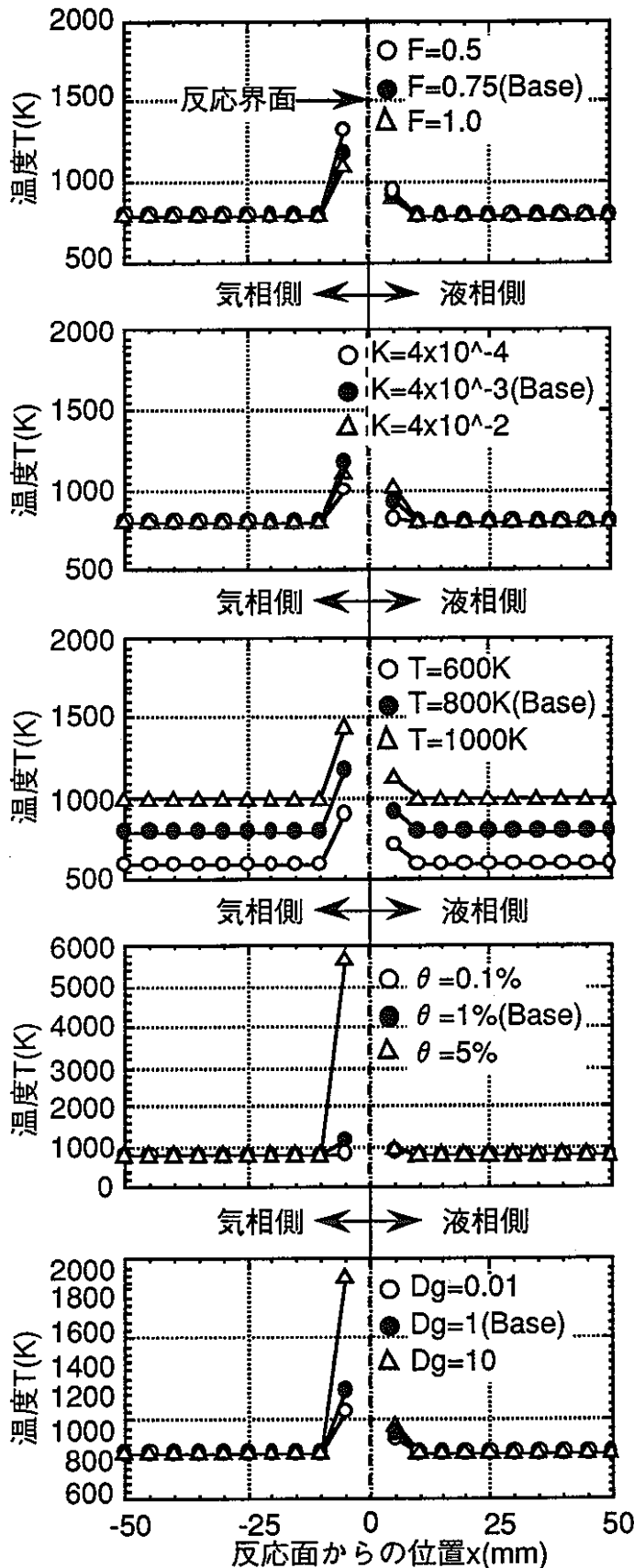
$\theta = 5\%$ では気相温度が液相側より4000K以上大きくなり、非現実的な気相温度上昇である。気液の温度差が大きくなった場合には、生成物のH<sub>2</sub>が持ち出しに行く発熱量を1次的伝熱量とみなせば、気相(H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>)から液相(Na、NaOH、Na<sub>2</sub>O)への温度勾配に伴う熱伝達や、液相側Naの蒸発潜熱による吸熱等の2次的伝熱が生じて、実際には気相温度の上昇は低く抑えられるものと推定される。また、本解析では反応界面温度を隣接有限体積の気液温度と同一と仮定している。しかし、反応界面も有限の厚さと熱容量を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。



**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  $= 800\text{kg/m}^3$   
 H<sub>2</sub>O密度  $= 10\text{kg/m}^3$   
 熱伝導率  $\lambda$   
 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3.1.2.3-2 化学種密度・温度分布の経時変化(A)



### 解析条件

水素/水モル転換比  $F=0.75$

反応速度定数

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

気相伝熱比  $\theta=1\%$

初期条件

温度  $T=800K$

Na密度  $=800kg/m^3$

H<sub>2</sub>O密度  $=10kg/m^3$

熱伝導率  $\lambda$

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3.1.2.3-3 温度分布経時変化のパラメータ依存性(A)

## (B) 反応界面が固定されていない線近似解析モデル

つぎに、解析体系内で反応界面が固定されておらず、全ての解析セルで気液二相流が考慮された線近似解析モデルについて試計算する。

本モデルでは、(1)領域内の気液二相流動を無視した非定常1次元体系、(2)伝熱・化学種拡散を考慮し、(3)Na・水双方が存在すれば反応界面は領域内において任意（気液完全分離ではない）とし、(4)1次元体系の両端は断熱の境界条件と仮定する。本モデルにおいても、式(3.1.11)と(3.1-12)の各化学種の質量(密度)と気液相のエネルギー保存式を解く。初期条件として、気液相のNaと水の密度と温度分布を与える。各化学種の密度・定圧比熱には圧力温度依存の近似式、熱伝導率 $\lambda$ と物質拡散係数 $D$ には一定値を与えた。

本モデルでは、さらに次のようにモデルを簡略化した。界面面積濃度 $a_{il}$ は反応速度定数 $K$ に含めて考え、この積をパラメータとした。また、相変化温度に達した液相のNa・水は、相変化割合 $\eta$ で質量密度が液相から気相に移り、質量移動量 $\times$ 気相の飽和エンタルピ(相変化温度に対する液相の熱エンタルピ)が相変化に伴うエネルギー移動量とする。この相変化(蒸発)温度は、Naでは1154.6K、水では373.15Kとする。1次元体系を空間刻み0.1m間隔に21の有限体積に分割し、タイムステップ $1\mu s$ で $100\mu s(0.1ms)$ まで解析した。

### (B-1) 初期反応物の分布が分離している場合

反応界面を固定した従来モデルの体系に近い、解析開始時の反応物(Na・水)が分離した分布である場合について、まず解析する。次の条件を代表解析条件とした。水素/水モル転換比 $F=0.75$ 、界面面積濃度を含めた反応速度定数 $Kx_{ai}=0.001(1/s)$ 、気相伝熱比 $\theta=1\%$ 。また初期分布は、水温度300K、Na温度800K、水密度 $=10kg/m^3$ 、Na密度 $800kg/m^3$ 、水の気相質量率 $=99\%$ 、Naの気相質量率 $=1\%$ として、図の $0\mu s$ (計算開始)のように11番セルのみに界面を設定した。なお、気相質量率を100%および0%にしていないのは、存在しない相の温度を要求する時に発生する物性値計算エラーを防止するためである。液相の拡散係数 $=10\mu m^2/s$ は液体一般の値のオーダーとしたが、気相の拡散係数は対流効果の代用として液相の100万倍の $10m^2/s$ とした。

図3.1.2.3-4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。

(A) 質量密度：図3.3.3-6～9を参照(DENS)..... (3.3-11)

・液相H<sub>2</sub>O：気液二相流の数値解析：日本原子力学会熱流動部会編<sup>(3)</sup>。

内部エネルギー  $e = 417400 + 4434 \times (T - 373.15)$  のとき、

$$\text{DENS} = 1000 - 2\text{E-}5 \times e - 1.5\text{E-}10 \times e \times e + 6.57\text{E-}12 \times P$$

ただし、DENSは700を下回らない(下限制約)。

・気相H<sub>2</sub>O：理想気体の状態式  $\text{DENS} = P / 461.906 / T$

・液相Na：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>より近似。

$$\text{DENS} = 1017.9 - 0.24048 \times T$$

ただし、DENSは500を下回らない(下限制約)。

・気相Na：理想気体の状態式  $\text{DENS} = P / 361.491 / T$

・H<sub>2</sub>：理想気体の状態式  $\text{DENS} = P / 4157.15 / T$

・NaOH：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$\text{DENS} = 2069 - 0.48 \times T$$

・NaOH：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の固定値。

$$\text{DENS} = 2270$$

(B) 粘性係数：図3.3.3-10を参照(VISC)..... (3.3-12)

・液相H<sub>2</sub>O：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$\text{VISC} = \left( ((287.2 - T) + \text{SQRT}(((287.2 - T))^2 + 4 \times 0.016856 \times 25532)) / (0.016856 D_0 \times 2) \right) \times 1\text{E-}6$$

・気相H<sub>2</sub>O：サザランドの式：理科年表 東京天文台編纂<sup>(16)</sup>。

$$\text{VISC} = 1.28\text{E-}6 \times ((373.15 + 650) / (T + 650)) \times (T / 373.15)^{1.5}$$

・液相Na：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$\text{VISC} = 1.4628 \times T^{(-1.3087)}$$

・気相Na：動燃大洗工学センター編 N941 75-19, 1975-3<sup>(18)</sup>

(B.I. Stefanov et al, "Viscosity and Thermal Conductivity of the Vapors of Sodium and Potassium", High Temperature, 4, 131-2, 1966) より。

$$\text{VISC} = 2.6693\text{E-}6 \times (22.989 \times T)^{0.5} / (3.46^2) \times 1.02\text{E-}2 \times 9.80665$$

・H<sub>2</sub>：サザランドの式：理科年表 東京天文台編纂<sup>(16)</sup>。

$$\text{VISC} = 8.8\text{E-}7 \times ((293.15 + 72) / (T + 72)) \times (T / 293.15)^{1.5}$$



- ・ NaOH : 伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$\text{VISC} = 1\text{E-}3 \times (160.06 - 0.5948 \times T + 0.000752\text{D}0 \times T^2 - 3.2\text{E-}8 \times T^3)$$

ただし、VISCは 0.001を下回らない(下限制約)。

- ・ NaOH : 仮想値。

$$\text{VISC} = 0.001$$

(C) 定圧比熱：図3.3.3-11を参照(CPS)..... (3.3-13)

- ・ 液相H<sub>2</sub>O：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$\text{CPS} = 0.757 \times T + 3982$$

- ・ 気相H<sub>2</sub>O：B-605<sup>(17)</sup>。

$$\text{CPS} = 1667 + 0.595 \times T + 1860000 / T^2$$

- ・ 液相Na：B-605<sup>(17)</sup>。

$$\text{CPS} = 1651 - 0.8329 \times T + 0.0004623 \times T^2$$

ただし、CPSは 1000を下回らない(下限制約)。

- ・ 気相Na：PNC<sup>(18)</sup>。

$$\text{CPS} = (0.21598 + 6.054 \times \text{Exp}(-20708 / T)) \times 4187$$

- ・ H<sub>2</sub> : B-605<sup>(17)</sup>。

$$\text{CPS} = 13650 + 1.633 \times T + 25120000 / T^2$$

- ・ NaOH : 伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の固定値。

$$\text{CPS} = 2140$$

- ・ NaOH : B-605<sup>(17)</sup>。

$$\text{CPS} = 1060 + 0.3646 \times T$$

上記の式の出典について、略号は次の通り。

B-605：Bulletin 605, Bureau of Mines Thermodynamic Properties of 65 Elements - Their Oxides, Halides, Carbides, and Nitrides C.E.Wicks and F.E.Block , United States Government Printing Office, Washington, 1963<sup>(17)</sup>

PNC：動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター編「ナトリウム物性値の実用計算式 1972年までの公表文献に基づく液体と蒸気の物性値」N941 75-19,

1975-3<sup>(18)</sup> ( J.P.Stone et al,"High Temperature Properties of Sodium",  
C AD 622, 191, (NRL Report 6241)(1965))

(D) 熱エンタルピー：図3.3.3-12を参照(HEAT)..... (3.3-14)

熱エンタルピーは、顕熱( C ) より算出される定圧比熱の標準状態からの温度  
定積分)+標準生成熱で求められる。

・液相H<sub>2</sub>O

$$\text{HEAT} = (-1221000 + 0.757 / 2 \times T^2 + 39820 \times T) - 15880000$$

・気相H<sub>2</sub>O

$$\text{HEAT} = (1926000 + 1667 \times T + 0.2977 \times T^2 - 1860000 / T) - 13430000$$

・液相Na

$$\text{HEAT} = (-356700 + 1651 \times T - 0.4164 \times T^2 + 0.0001547 \times T^3) + 115000$$

・気相Na

$$\text{HEAT} = (904.3083 \times T - 269619.5077) + 4665000$$

・H<sub>2</sub> :      HEAT = (-4058000 + 13650 × T + 0.8163 × T<sup>2</sup> - 25120000 / T)

・NaOH :    HEAT = (-638041 + 2140 × T) - 10640000

・NaOH :    HEAT = (-332200 + 1060 × T + 0.1823 × T<sup>2</sup>) - 6680000

(E) 比熱比：図3.3.3-13を参照(DKAP)..... (3.3-15)

固体・液体の比熱比は1.0、気体の比熱比は分子状態より決まる固定値とする。

・液相H<sub>2</sub>O・液相Na・NaOH・Na<sub>2</sub>O : DKAP=1.0

・気相H<sub>2</sub>O (多原子分子) : DKAP=4/3

・気相Na (単原子分子) : DKAP=5/3

・H<sub>2</sub> (2原子分子) :      DKAP=1.4

(F) 熱伝導率：図3.3.3-14を参照(TCOND)..... (3.3-16)

・液相H<sub>2</sub>O : 伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$\text{TCOND} = (-0.0064482 \times T^2 + 5.2912 \times T - 397.63) \times 1E-3$$

ただし、TCONDは0.5を下回らない(下限制約)。

- ・気相H<sub>2</sub>O：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$TCOND = -0.0021 + 5.369E-6 \times T + 4.576E-10 \times T^2$$

- ・液相Na：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$TCOND = 104.91 - 0.04863 \times T$$

- ・気相Na：動燃大洗工学センター編N941 75-19,1975-3<sup>(18)</sup> (G.H.Golden et al, "Thermophysical Properties of Sodium", ANL-7323, 1967)

Tf = 1.8 × (T - 273.15) + 32のとき、

$$TCOND = 1.16 \times (2.44E-3 + 5.918E-7 \times Tf - 1.44E-9 \times Tf^2)$$

- ・H<sub>2</sub>：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$TCOND = 0.04289 + 4.897E-5 \times T - 8.818E-10 \times T^2$$

- ・NaOH：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>の粗い近似。

$$TCOND = 0.2796 + 9.36E-6 \times T$$

- ・NaOH：推定値 TCOND = 0.1

(G) 音速：図3.3.3-15を参照(SONIC)..... (3.3-17)

- ・液相H<sub>2</sub>O：機械工学便覧：日本機械学会編(A5-6)<sup>(24)</sup>。

TT = T - 273.15の時、

$$SONIC = 1404.4 + 4.8215 \times TT - 0.047562 \times TT^2 + 1.3541E-6 \times TT^3$$

ただし、SONICは1600を下回らない(下限制約)。

- ・気相H<sub>2</sub>O：理想気体の一般関係式より。

$$SONIC = \text{SQRT}(4/3 \times 461.906 \times T)$$

- ・液相Na：Kleppaによる試験結果より。

$$SONIC = 2400 - 0.3 \times (T - 371.15)$$

ただし、SONICは1500を下回らない(下限制約)。

- ・気相Na：理想気体の一般関係式より。

$$SONIC = \text{SQRT}(5/3 \times 361.491 \times T)$$

- ・H<sub>2</sub>：理想気体の一般関係式より。

$$SONIC = \text{SQRT}(1.4 \times 4157.15 \times T)$$

- ・NaOH：液体・固体の推定値。

SONIC = 1000

- ・ NaOH：推定値液体・固体の推定値。

SONIC = 1000

(H) 水・Naの飽和温度：図3.3.3-16を参照(TSAT)..... (3.3-18)

相変化を考慮する水・Naの飽和温度については、圧力  $p$  の関数で与える。

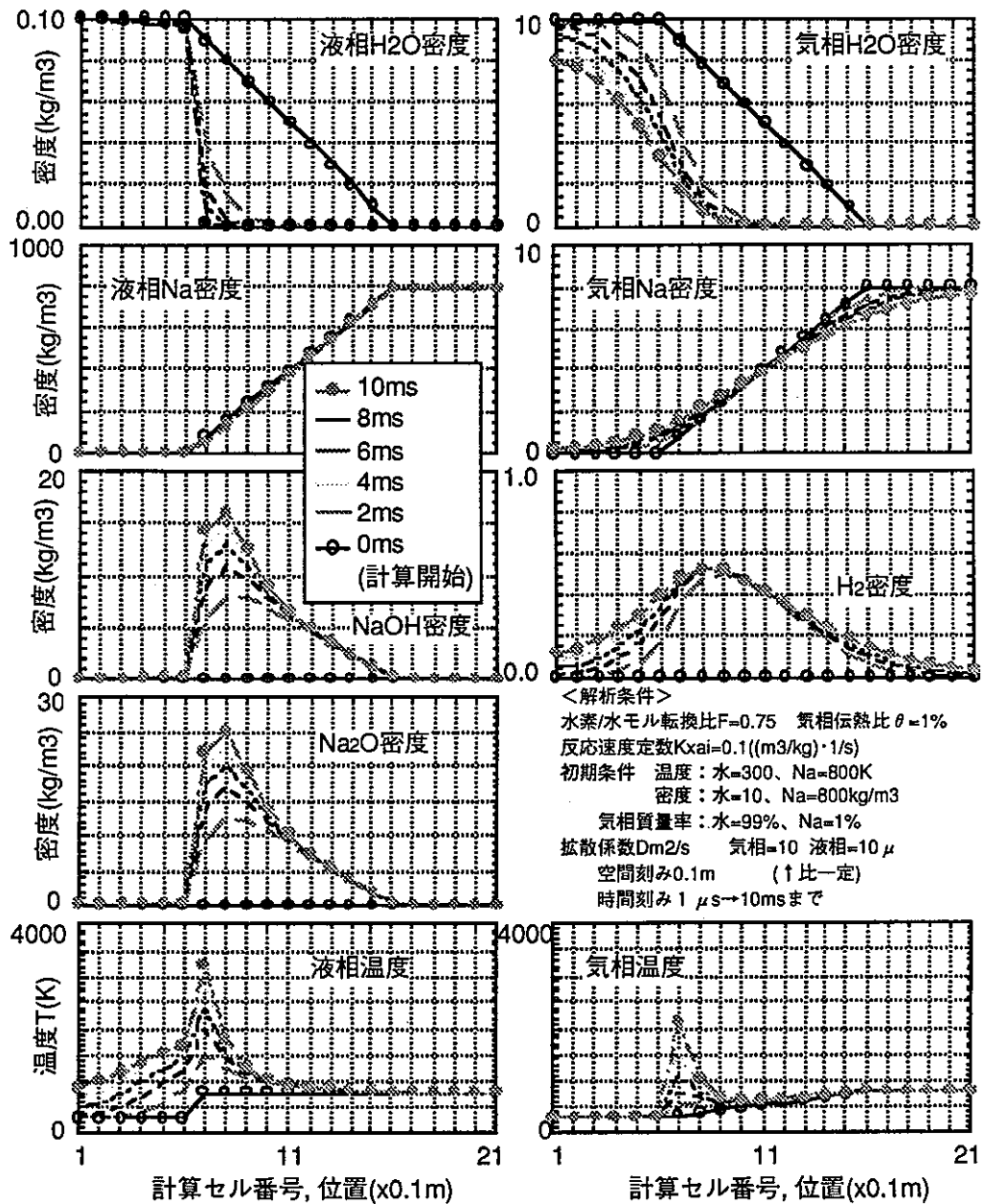
- ・ 水：気液二相流の数値解析：日本原子力学会熱流動部会編<sup>(3)</sup>。

$$TSAT(K) = 117.8 \times (p \times 10E-5)^{0.223} + 225.35$$

- ・ Na：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会<sup>(14)</sup>

飽和温度を水の場合の式の形で近似して与えた。

$$TSAT(K) = 485.71 \times (p \times 10E-6)^{0.11278} + 322.23$$



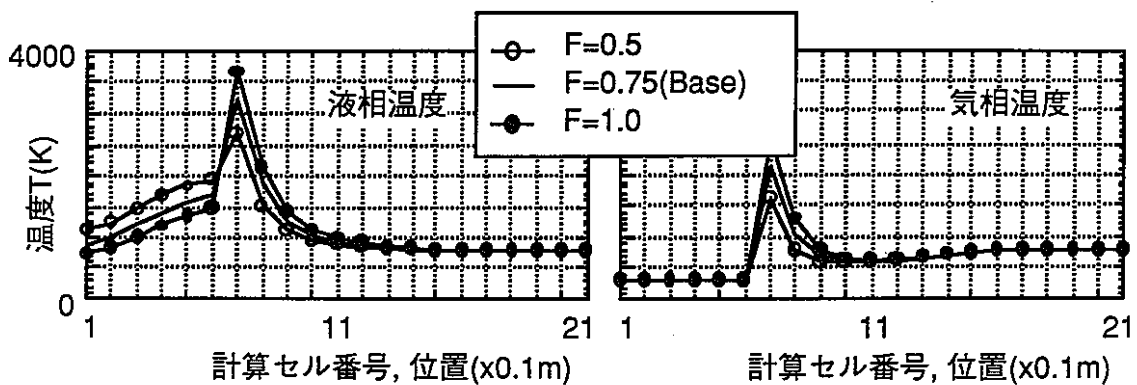
(a)化学種密度・温度分布の経時変化  
(液相側)

(b)化学種密度・温度分布の経時変化  
(気相側)

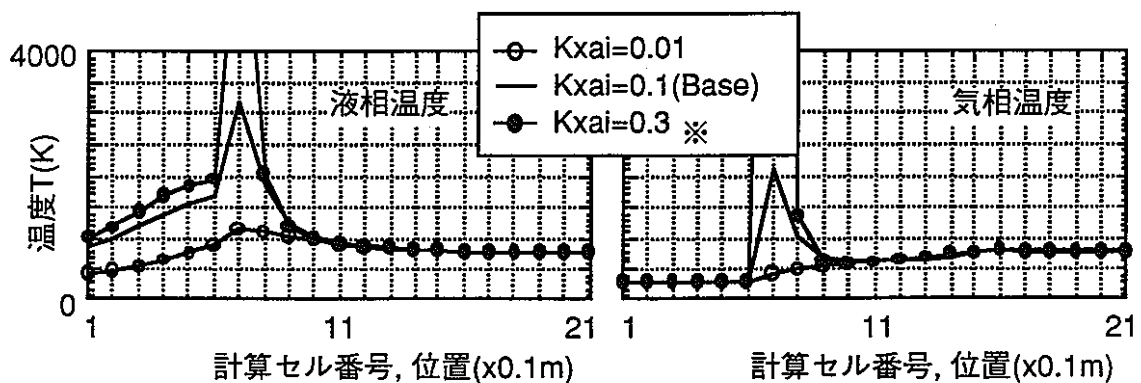
(a)液相側分布の経時変化

(b)気相側分布の経時変化

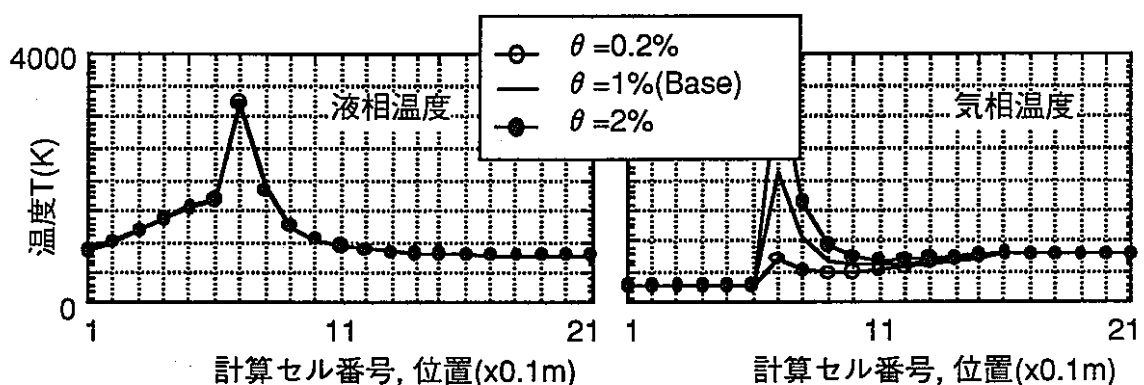
図3.1.2.3-7 化学種密度・温度分布の経時変化(B-2)



(a)水素/水モル転換比F依存性：時刻10ms

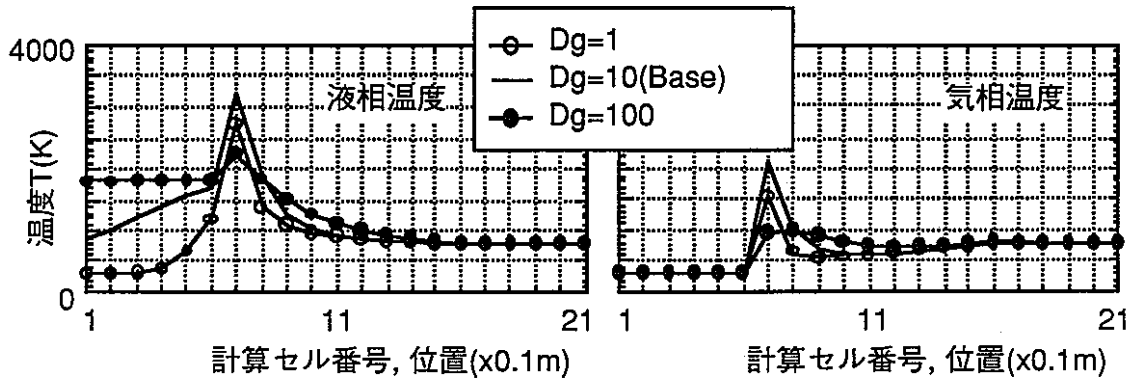


(b)反応速度定数Kxai依存性：時刻10ms

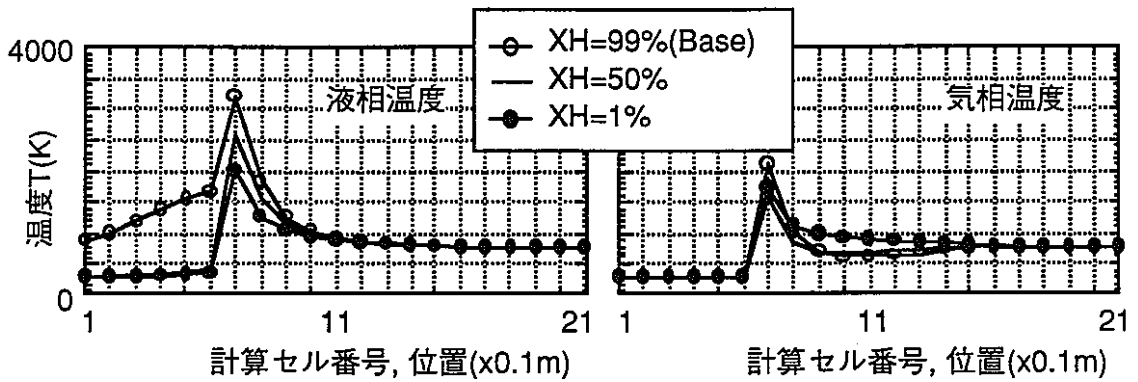


(c)気相伝熱比 $\theta$ 依存性：時刻10ms

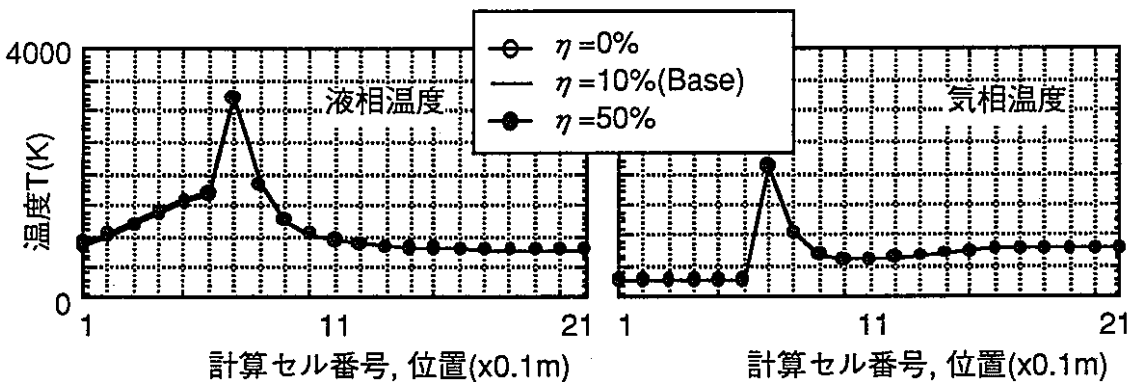
図3.1.2.3-9 温度分布経時変化のパラメータ依存性：その1 (B-2)



(d) 拡散係数 $D$ (気:液=100万:1)依存性:時刻10ms



(e) 初期の $H_2O$ 気相質量率 $x_H$ 依存性:時刻10ms



(f) 蒸発変化割合 $\eta$ 依存性:時刻10ms

図3.1.2.3-9 温度分布経時変化のパラメータ依存性:その2(B-2)

### (C) まとめ

構築した化学反応モデルを用いて、簡略化した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。気液二相流を考慮したナトリウム-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。

しかし、簡略化された化学反応モデルには、次の課題がある。

蒸発の相変化に伴うエネルギー移動では潜熱を考慮していなかったため、今回導入の蒸気変化割合  $\eta$  の温度変化への影響は小さかった。これは、従来の二相流解析の気液相界面の相変化に伴うエネルギー移動(熱伝達)では、今回の簡略化モデルのような取り扱いをしていたためである。この点については、改良の余地がある。

気相伝熱比の大きい場合では、非現実的に大きな気相温度上昇である。実際は、上記の熱伝達や蒸発潜熱等の2次的伝熱が生じて、気相温度の上昇は小さいと推定される。本解析では反応面での気液相の温度はそれぞれの相温度と仮定している。しかし、反応面の熱容量により気液相温度は反応面の温度を大きく越えないことも推定される。これらについては、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 二流体モデルの仕様

#### 3. 1. 3. 1 二流体モデルの概要

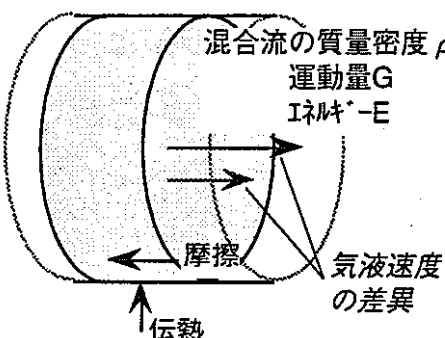
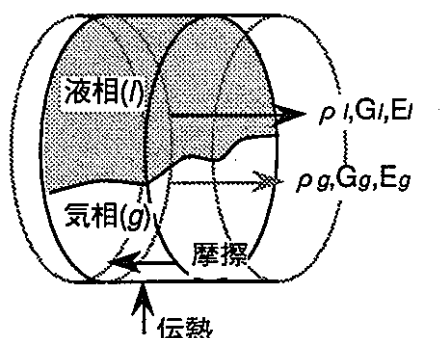
表3.1.3.1-1に気液二相流の解析モデルの比較を示す。

ナトリウム-水反応領域の近傍の流れには、気相（水蒸気、水素）と液相（ナトリウム／反応生成物）の気液二相流を考慮した解析が必要である。また、反応ジェットは、気液二相が空間的に広がり（空間分布）を持った流れであることから、2次元以上の多次元を取り扱える解析が必要である。

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、(a)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、(b)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、一般に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が、このモデルは、(1)2次元(軸対称または平面2次元)で解析可能とし、(2)注目する反応ジェットの周囲の必要な範囲を対象として、(3)境界条件には、SG伝熱管からの水リーク条件を与えられる、等の仕様を満たすものとする。

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"> <li>○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)</li> <li>○相間速度差等に構成方程式(相関式)を与える。</li> <li>(a)均質流モデル： 相間速度差は無いと仮定。</li> <li>(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。</li> <li>(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。</li> <li>○解くべき式は少なく解析は容易。</li> <li>○二相流の詳細な構造は取り扱えない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○各相(流体)別に保存式を解く。</li> <li>○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)</li> <li>○流体の数だけ保存・構成方程式必要。</li> <li>○詳細な二相流構造を取り扱える。</li> </ul> <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"> <li>・噴霧流・燃焼流解析</li> <li>・多くの二相流解析 (SWACS-13/13Eなど)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子力安全解析コード(RELAP, TRAC)</li> <li>・汎用二相流解析コード (α-FLOW, SIMA/SMORCなど)</li> </ul>

### 3. 1. 3. 2 二流体モデルの内容

#### (A) 二流体モデルの基礎

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、2次元体系の場合には2方向(2倍)の運動量の式を考える。

(A)質量保存式：(検査体積内の質量の時間変化)

= (境界面からの流入量 - 流出量) + (相変化に伴う変化量)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k) A \Delta z = -\frac{\partial}{\partial z}(\rho_k \alpha_k u_k) A \Delta z + m_k A \Delta z \quad \dots\dots\dots(3.1-16)$$

(B)運動量保存式：(検査体積内の運動量の時間変化)

= (境界面からの流入量 - 流出量)

+ (作用力による力積の総和) + (相変化に伴う変化量)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k u_k) A \Delta z = \\ & -\frac{\partial}{\partial z}(\rho_k \alpha_k u_k u_k) A \Delta z + \left\{ -F_{w/k} - F_{i/k} - F_{v/k} - \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_k P_k) + P_{i/k} \frac{\partial}{\partial z} \alpha_k \right\} A \Delta z + m_k u_{i/k} A \Delta z \\ & \dots\dots\dots(3.1-17) \end{aligned}$$

(C)エネルギー保存式：

(検査体積内のエネルギーの時間変化) = (境界面からの流入量 - 流出量)

+ (作用力による仕事量の総和) + (相変化に伴う変化量) + (内・外部入熱量)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho_k \alpha_k \left( e_k + \frac{1}{2} u_k^2 \right) \right\} A \Delta z \\ & = -\frac{\partial}{\partial z} \left\{ \rho_k \alpha_k \left( e_k + \frac{1}{2} u_k^2 \right) u_k \right\} A \Delta z \\ & + \left\{ -F_{w/k} u_k - F_{i/k} u_k - F_{v/k} u_k - \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_k P_k u_k) - P_{i/k} \frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \right\} A \Delta z \\ & + m_k \left( i_k + \frac{1}{2} u_{i/k}^2 \right) A \Delta z + (q_{i/k} + q_{w/k} + q_{s/k}) A \Delta z \quad \dots\dots\dots(3.1-18) \end{aligned}$$

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  $\alpha_k$  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  $m_k$

- ・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  $m_k i_k$  ( $i_k$  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。

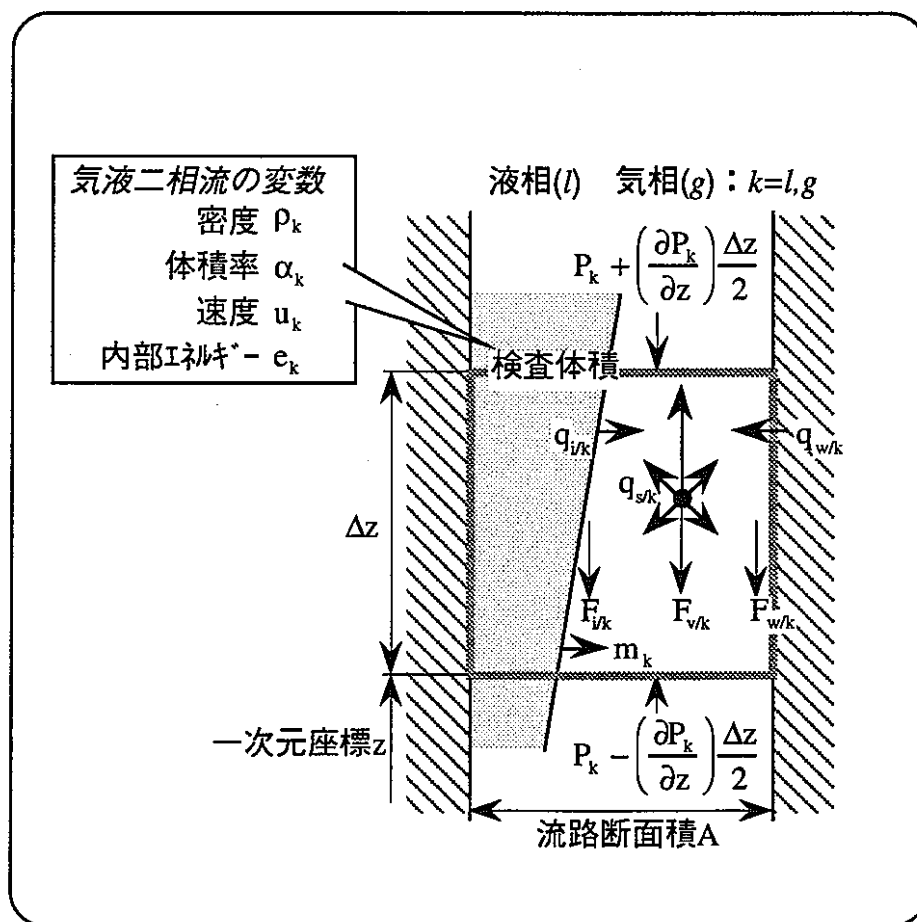


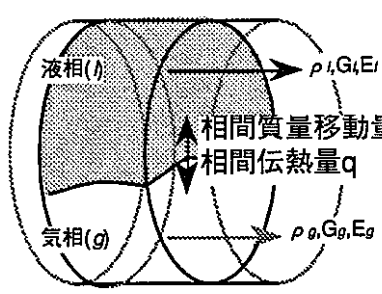
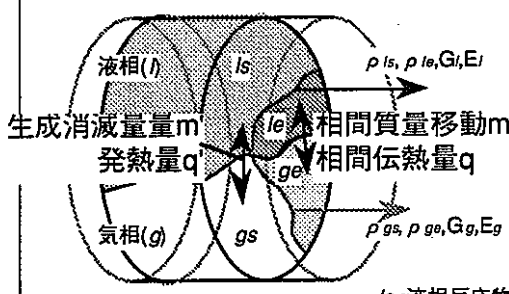
図3.1.3.2-1 二流体モデルにおける検査体積(1次元体系)

### (B) 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3.1.3.2-1のように改良する。

質量保存式は、従来の二流体モデルでは気液相2式であるのに対し、さらに前記の化学反応モデルで示したように、気液相の $\text{Na} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、水素、水酸化ナトリウム、酸化ナトリウムについての質量保存式の7式が必要となる。気液相それぞれに反応物と生成物が混在するが、気液相それぞれに含まれる反応物・生成物については、気液二相流解析としては各相一括して考え、気液二相流の質量・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、考慮すべき化学種・成分の数の分(7式)増える。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3.1.3.2-1 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>質量密度 <math>\rho</math> ・ 運動量 <math>G</math> ・ エネルギー <math>E</math></p>	 <p>           反応物質量密度 <math>\rho_s</math>            ・ 生成物質量密度 <math>\rho_e</math>            ・ 運動量 <math>G</math> ・ エネルギー <math>E</math> </p> <p> <math>l_s</math>:液相反応物  <math>l_e</math>:液相生成物  <math>g_s</math>:気相反応物  <math>g_e</math>: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 : ・ 2 (気液二相流の質量保存式) ・ 7 (各化学種・成分の質量保存式) 拘束条件 : 全ての体積率の総和=1 生成項 : 相間質量移動量 + 各化学種の生成消滅量
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 (2次元)	8	15
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	

(C) 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コードがある。以下に、SIMAの特徴および構成をまとめる。

SIMAの特徴は、表3.1.3.2-2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。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。

表3.1.3.2-2 SIMAの特徴

項目	SIMA(SIMA2DA)の特徴
モデル	気液二流体モデル (平面・軸対称 2次元)
空間離散化法	・コントロールボリューム(CV:有限体積)法 ・全ての保存量をCVの中心点で定義 (レギュラーメッシュ法:急激な流体諸量の変化に対応可能)
時間積分法	オイラー陽解法による非定常解析
適用事例	パイプブローダウン・オリフィス臨界流・ATR圧力管破断等

SIMA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

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi_k + \nabla \psi_k = b_k \dots\dots\dots(3.1-19)$$

◎保存量

$$\phi_k = \begin{bmatrix} \rho_k \alpha_k \\ \rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k \\ \rho_k \alpha_k (e_k + u_k^2 / 2) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.1-20)$$

◎フラックス(流束)

$$\psi_k = \begin{bmatrix} \rho_k \alpha_k u_k \\ \rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{u}_k \\ \rho_k \alpha_k u_k (e_k + u_k^2 / 2 + P / \rho_k) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.1-21)$$

◎生成・消滅項

$$b_k = \left[ \begin{array}{l} m_k \\ m_k u_{i/k} + \{F_{w/k} + F_{i/k} + F_{v/k}\} + \nabla(\alpha_k P_k) - P_{i/k} \nabla \alpha_k \\ m_k (i_k + u_{i/k}^2 / 2) + \{F_{w/k} u_k + F_{i/k} u_k + F_{v/k} u_k\} \\ + \nabla(\alpha_k P_k u_k) + (q_{i/k} + q_{w/k} + q_{s/k}) \end{array} \right] \dots\dots\dots(3.1-22)$$

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。

$$\sum_k \langle \alpha_k \rho_k \rangle / \rho_k(p, e_k) = 1 \dots\dots\dots(3.1-23)$$

上記の式は、図3.1.3.2-2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。

$$\frac{d\langle \phi_k \rangle}{dt} = - \int \psi_k \cdot n_s dS_{cv} / V_{cv} + \langle b_k \rangle \dots\dots\dots(3.1-24)$$

$$\langle \phi_k \rangle = \int \phi_k dV_{cv} / V_{cv} \dots\dots\dots(3.1-25)$$

$$\langle b_k \rangle = \int b_k dV_{cv} / V_{cv} \dots\dots\dots(3.1-26)$$

この解析手法は、図3.1.3.2-3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て、この粒子運動を解析する。一方、SIMA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。



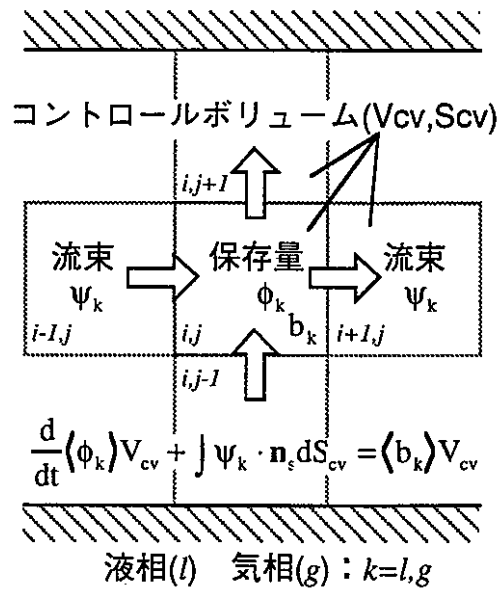


図3.1.3.2-2 検査体積の保存量収支(SIMA)

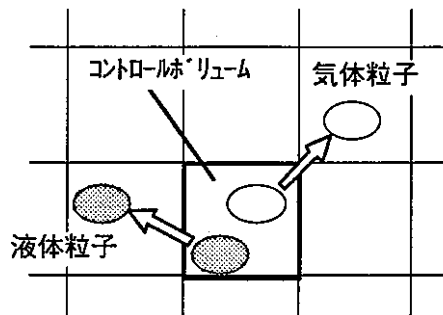


図3.1.3.2-3 FLIC(Fluid in Cell)法の概念

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。下式を時間積分して二相流の非定常流動解析を行う。

$$\langle \phi_k(t + \Delta t) \rangle_i = \langle \phi_k(t) \rangle_i + \frac{d\langle \phi_k(t) \rangle_i}{dt} \cdot \Delta t \dots\dots\dots(3.1-27)$$

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。

$$\begin{aligned} \langle \phi_k(t + \Delta t) \rangle_{i,j} = & \langle \phi_k(t) \rangle_{i,j} \\ & - (\psi_{k,i+1/2,j}(t) - \psi_{k,i-1/2,j}(t)) \cdot \Delta t - (\psi_{k,i,j+1/2}(t) - \psi_{k,i,j-1/2}(t)) \cdot \Delta t + \langle b_k(t) \rangle_{i,j} \cdot \Delta t \\ & \dots\dots\dots(3.1-28) \end{aligned}$$

SIMAにおける計算手順すなわちコード構成を、図3.1.3.2-4に示す。

後述の試計算に使用する2次元非定常解析コードSIMA2DAにおける、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。

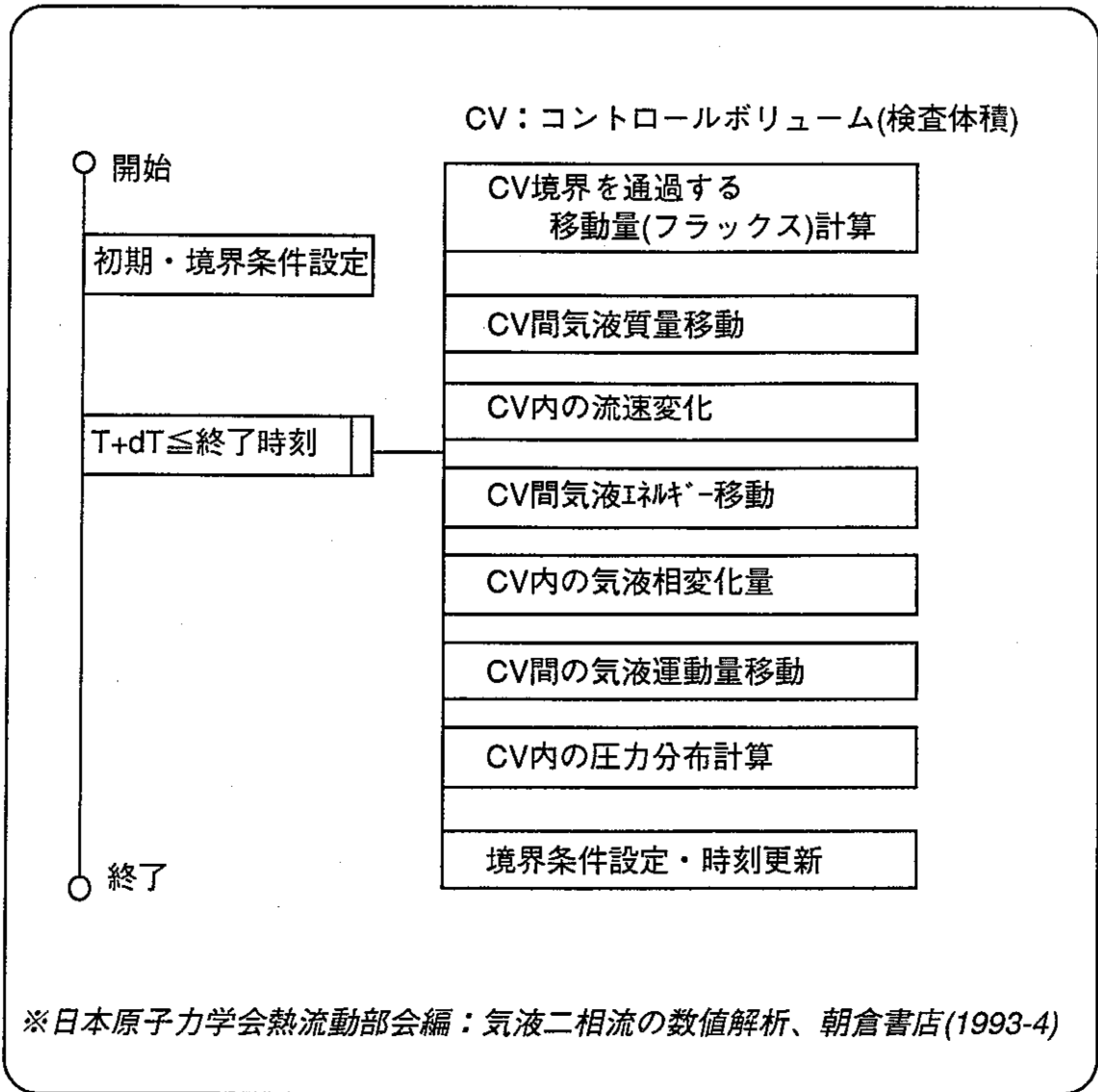


図3.1.3.2-4 SIMAコードの構成

### 3. 1. 3. 3 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う。水リーク時に発生するナトリウム-水反応ジェット現象に類似した、化学反応の無い飽和水・蒸気混合水・過熱蒸気の噴流現象において、本開発の基礎とする二相流解析コードの解析可否・評価妥当性を検証した。

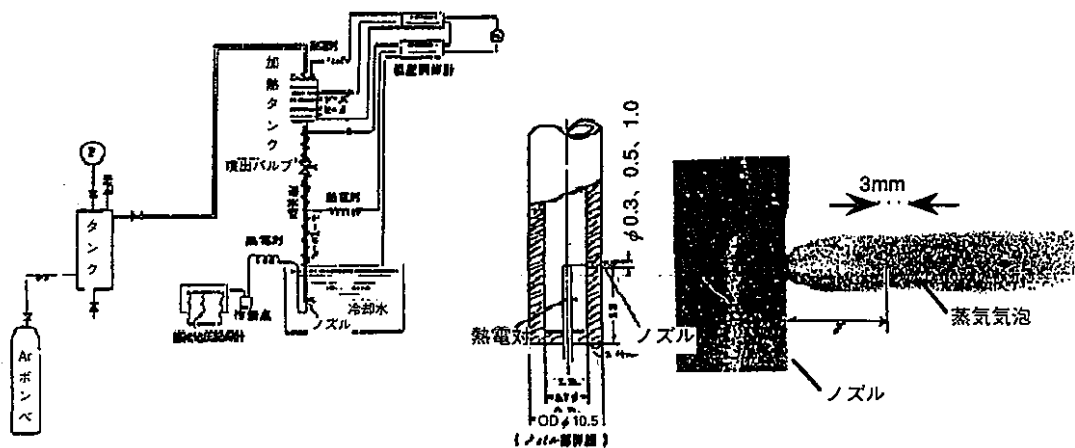
#### (A) 検証試験と解析体系の概要

二流体モデルによる気液二相流解析の概要と妥当性を示す目的で、水・蒸気噴流実験結果と二相流流動解析結果とを比較した。解析対照とした実験は、サブクール水中への高温高圧飽和水の噴流実験(日立実施)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3.1.3.3-1に実験概要を示す。上流は高温高圧の過飽和水(1~5MPa,140~180℃)、下流は常温常圧のサブクール水(0.1MPa,20℃)であり、この水プール中に $\phi$ 0.3,0.5,1.0mm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。

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3.1.3.3-2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。解析時間は10msまでとし、実機解析で想定される1m程度の体系を解析体系とする。

解析の比較検証を行う前に、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。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0.02 $\mu$ sであることが分かり、以降の解析はこの条件で行った。



(a) 実験装置概観

(b) ノズル部詳細

(c) 噴流写真

図3.1.3.3-1 比較実験(水中への高温高压水の噴流)

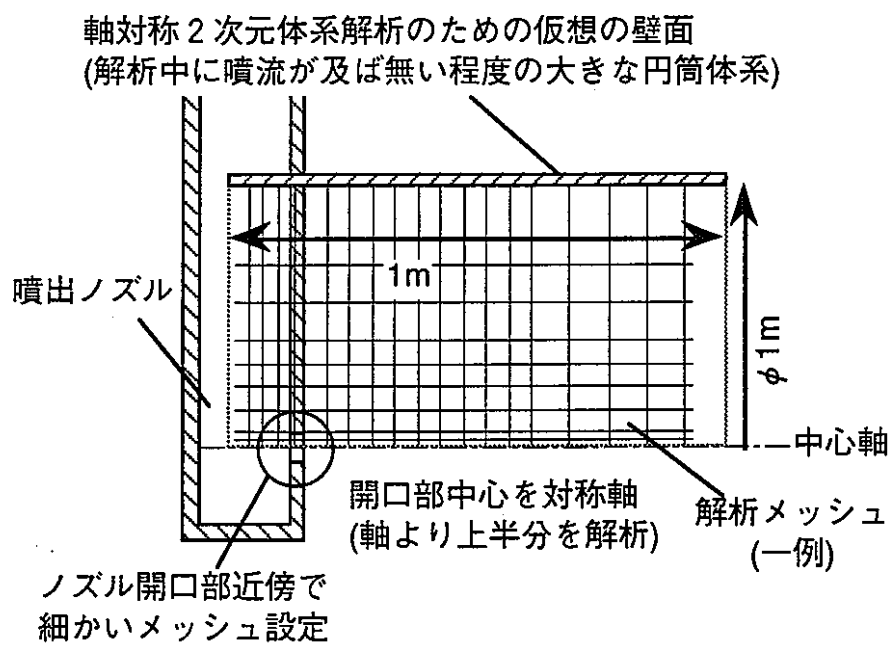


図3.1.3.3-2 解析メッシュ

(B) 水中への高温高压水の噴出 (試計算の比較検証)

表3.1.3.3-1に臨界流量の実験と解析の比較を示す。高压条件では実験と解析の一致は良いが、低压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、低压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3.1.3.3-1 臨界流量の比較

上流圧力 Pin(MPa)	臨界流量：実験 Gce x10 <sup>4</sup> (kg/m <sup>2</sup> /s)	臨界流量：解析 Gcs x10 <sup>4</sup> (kg/m <sup>2</sup> /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3.1.3.3-3に、高压条件での圧力分布の解析結果を示す。噴出口よりリークした水は、臨界流となって急激に減圧するため、噴出口上流側の高い圧力は下流まで及ばない。

図3.1.3.3-4、図3.1.3.3-5に、ボイド率分布の解析結果を示す。以降のボイド率分布解析結果の表現として、「分割メッシュ座標表現」と「等間隔座標表現」の両方の座標で表現する。これは、解析結果を分割メッシュ座標上で補間して等値線を表示すると、メッシュの細かい噴出口近傍での流体諸量(特にボイド率)の変化が大きいため、うまく補間されずに噴流形状の変化が捉え難くなることを避けるためである。メッシュ分割の座標情報を無視して等間隔座標上で表現すれば、各計算セルの数値をそのまま等値線表現に反映でき、分割メッシュ座標表現を補助できる。

実験では噴流中心に高压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3.1.3.3-2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 $\alpha > 30\%$ ( $\alpha < 30\%$ : 気泡流としての流動形態の限界。 $\alpha > 30\%$ 気泡塊またはスラグ流)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、噴流の広がりにはほぼ同じであることが分かる。

表3.1.3.3-2 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

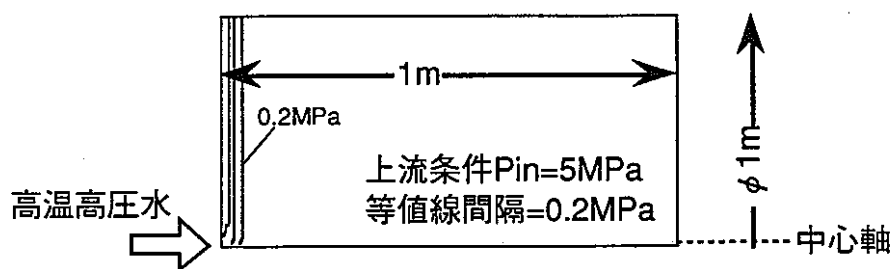


図3.1.3.3-3 等圧線(水中への高温高压水の噴出：時刻10ms後)

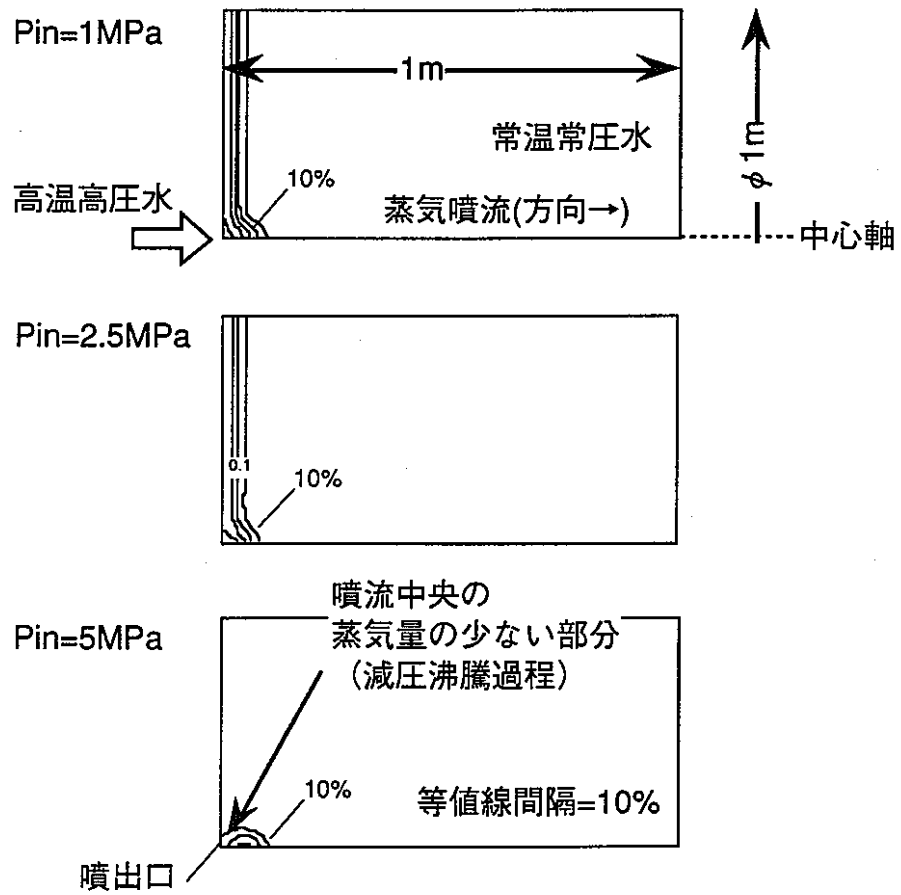


図3.1.3.3-4 等ボイド率線：分割メッシュ座標表現  
 (水中への高温高压水の噴出・時刻10ms後)



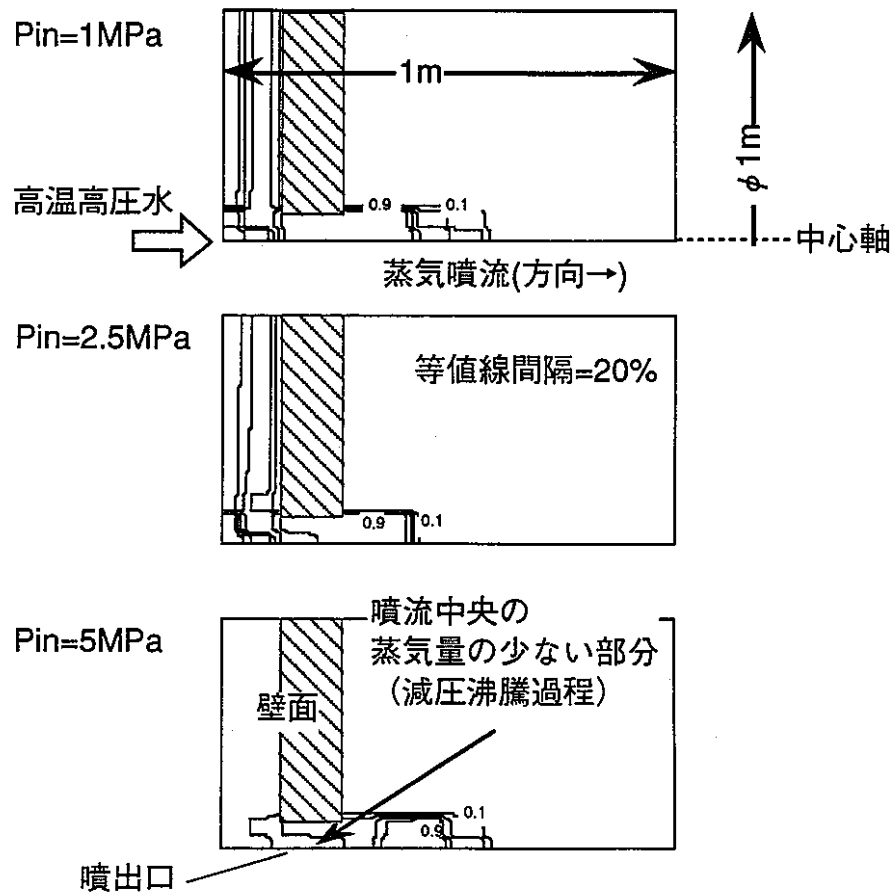


図3.1.3.3-5 等ボイド率線：等間隔座標表現  
 (水中への高温高压水の噴出・時刻10ms後)

### (C) 水中への蒸気混合飽和水の噴出

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の水中への噴出体系でも解析可能かどうかを確認する。

解析条件および解析方法は、前記の(B)と同一体系を与える。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 $\alpha_{in}$ の高圧蒸気混合飽和水であるとした。

表3.1.3.3-3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3.1.3.3-3 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 <sup>2</sup> /s)				
	上流ボイド率 $\alpha_{in}$ (%)				
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3.1.3.3-6、図3.1.3.3-7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。

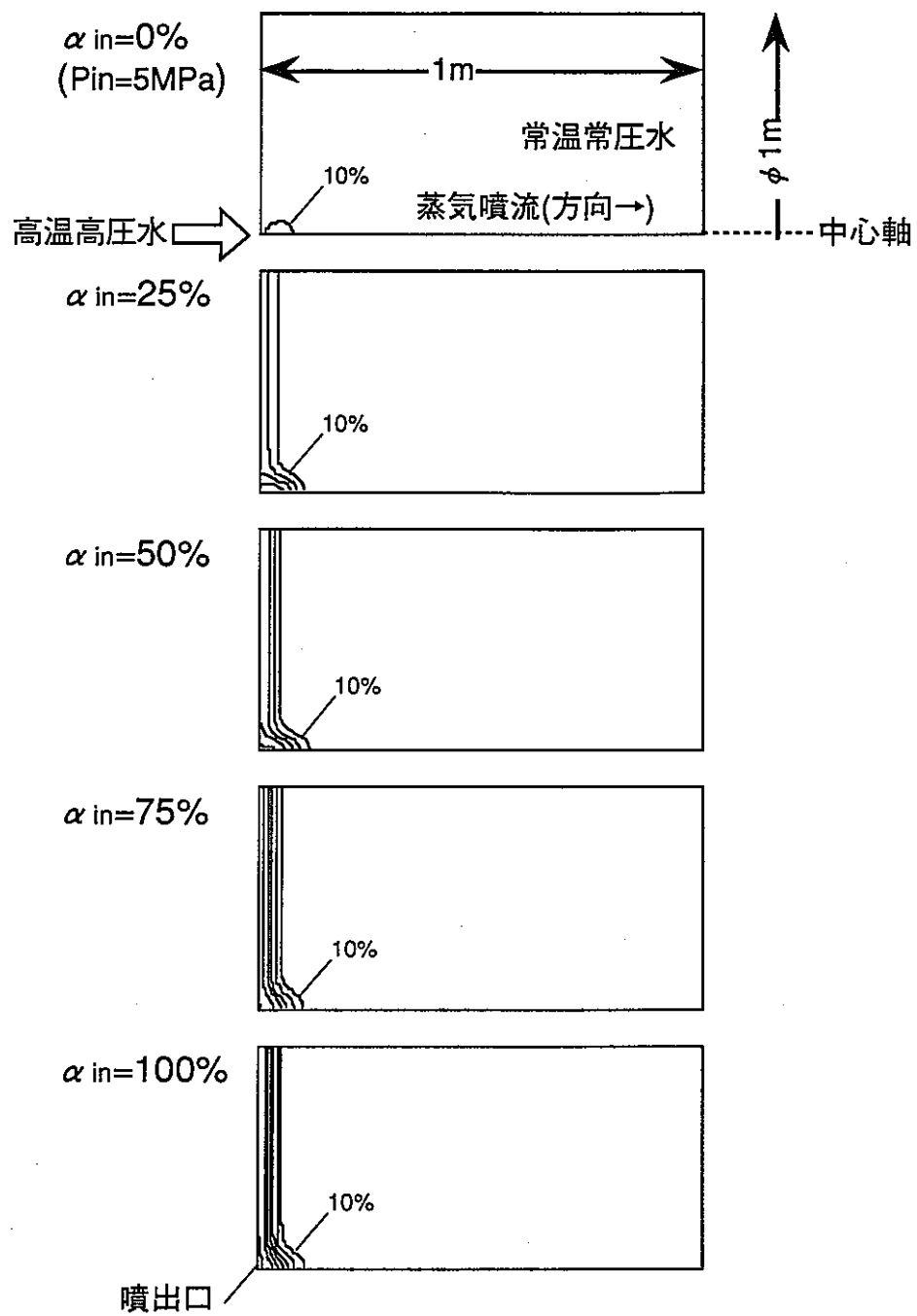


図3.1.3.3-6 等ボイド率線：分割メッシュ座標表現  
 (水中への蒸気混合飽和水の噴出・時刻10ms後)

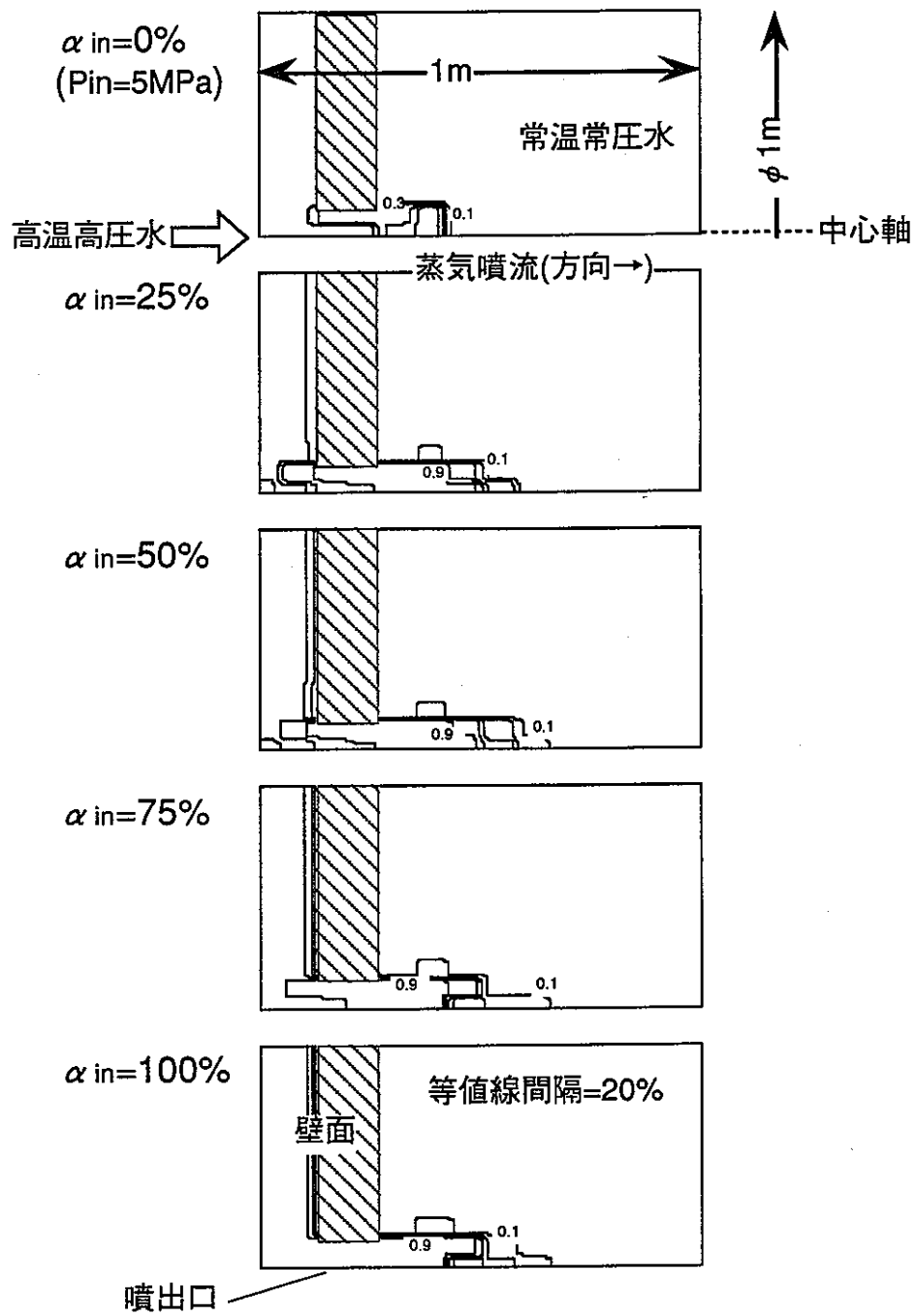


図3.1.3.3-7 等ボイド率線：等間隔座標表現  
 (水中への蒸気混合飽和水の噴出・時刻10ms後)

(D) 水中への過熱蒸気の噴出

(C)と同様に、蒸気発生器の伝熱管リークで想定される過熱蒸気の水中への噴出体系でも解析可能かどうかを確認する。

解析条件と解析体系は、前記の(B)および(C)と同一体系を与える。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3.1.3.3-4に、噴出流量の比較を示す。過熱度大きいほど、圧力一定条件下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3.1.3.3-4 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3.1.3.3-8、図3.1.3.3-9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。

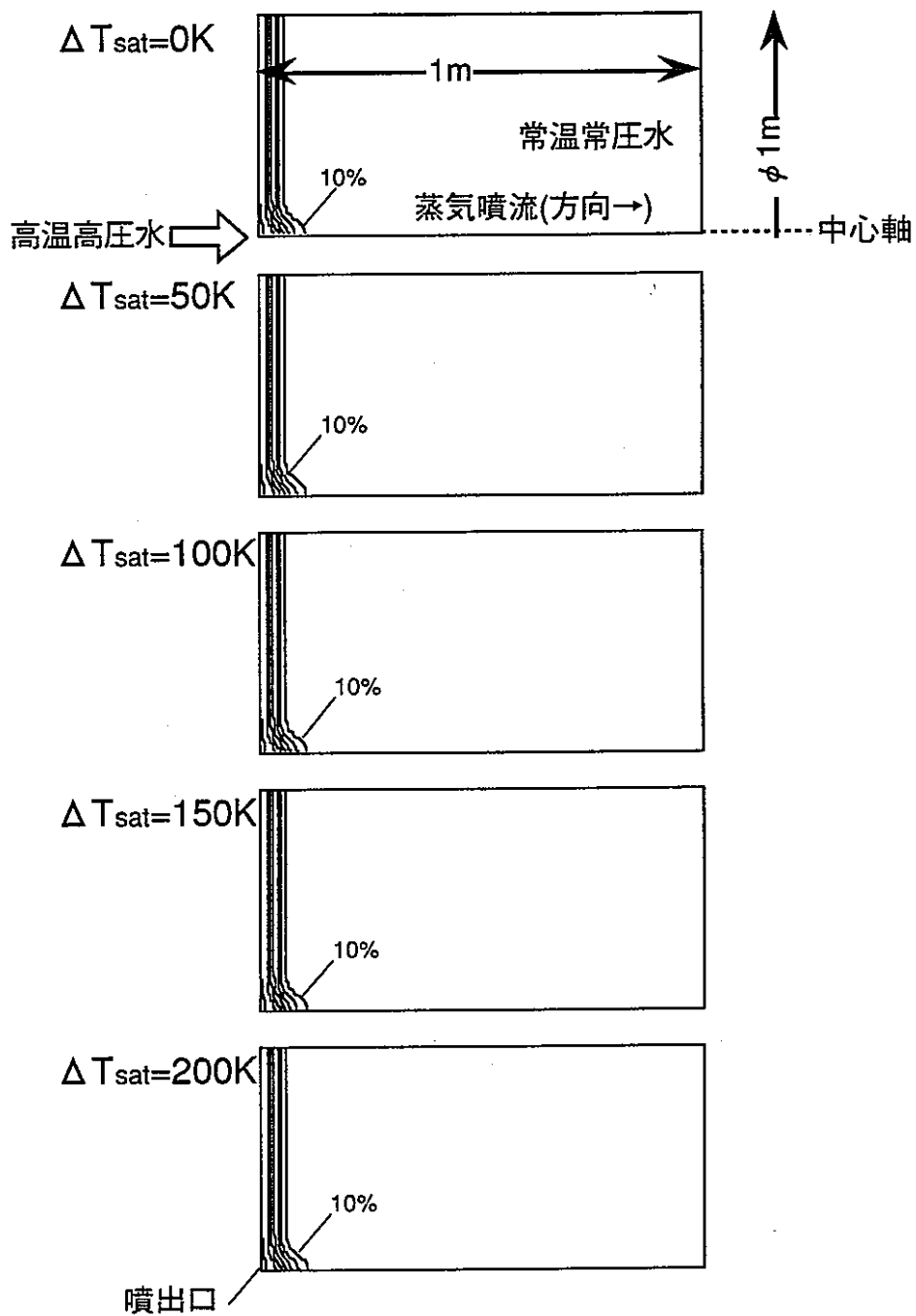


図3.1.3.3-8 等ボイド率線：分割メッシュ座標表現  
 (水中への過熱蒸気の噴出・時刻10ms後)

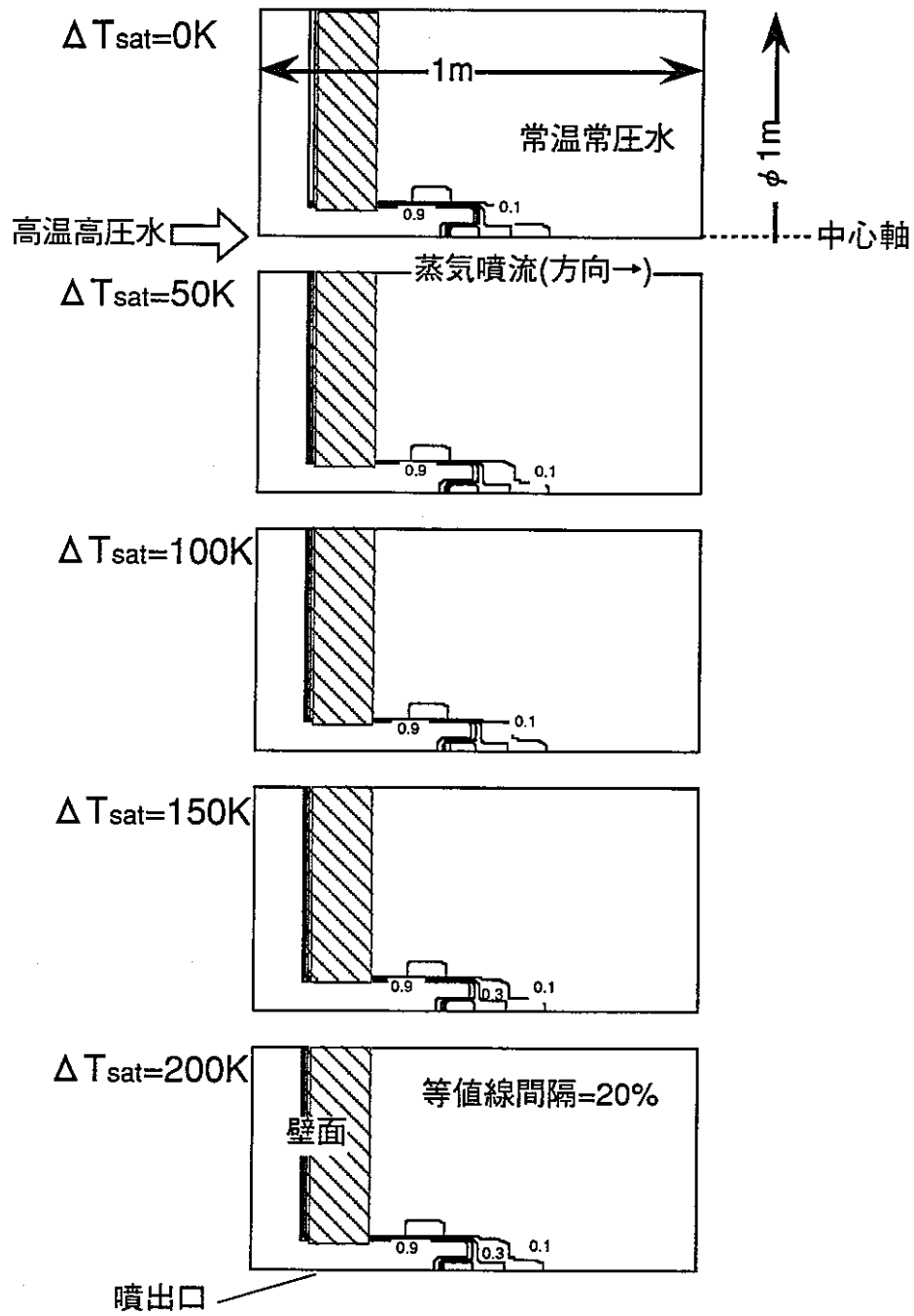


図3.1.3.3-9 等ボイド率線：等間隔座標表現  
(水中への過熱蒸気の噴出・時刻10ms後)

(E) 水中への蒸気混合水の噴出(噴出量依存性)

蒸気発生器の伝熱管リーク時の噴出流量は、噴出口上流・下流の圧力差と共に、噴出口面積にも依存する。そこで、この噴流で想定される過熱蒸気の水中への噴出体系でも解析可能かどうかを確認する。

解析条件と解析体系は、前記の(B)および(C)と同一体系を与える。解析条件は、上流側は圧力16MPa・ボイド率100%の飽和蒸気、下流側は圧力0.3MPa・常温常圧(20C)のサブクール水で、上下流圧力条件は実機蒸気発生器とほぼ同一に設定した。

表3.1.3.3-5に、噴出量とノズル径(噴出口径)の関係を示す。上下圧力差は一定としているので、ノズル径のほぼ2乗に比例して噴出量(臨界流量)は増加する。

表3.1.3.3-5 噴出流量の比較(ノズル径依存性)

噴出量 W(kg/s)	0.01	0.1	1.0	10	20
ノズル径 φ d(mm)	1.0	2.6	8.0	30	44

図3.1.3.3-10、図3.1.3.3-11にボイド率分布の解析結果を示す。同一時刻で比較すると、ノズル径すなわち噴出流量の大きい方がより蒸気噴流が遠方へ拡大する。噴出流量の小さい場合では噴出口の対称軸に沿って噴流の広がりが見られるが、噴出量の大きい場合では拡散により径方向への広がりも見られる。いずれの場合でも、噴出動圧の影響が大きい対称軸方向への広がり方が大きい。



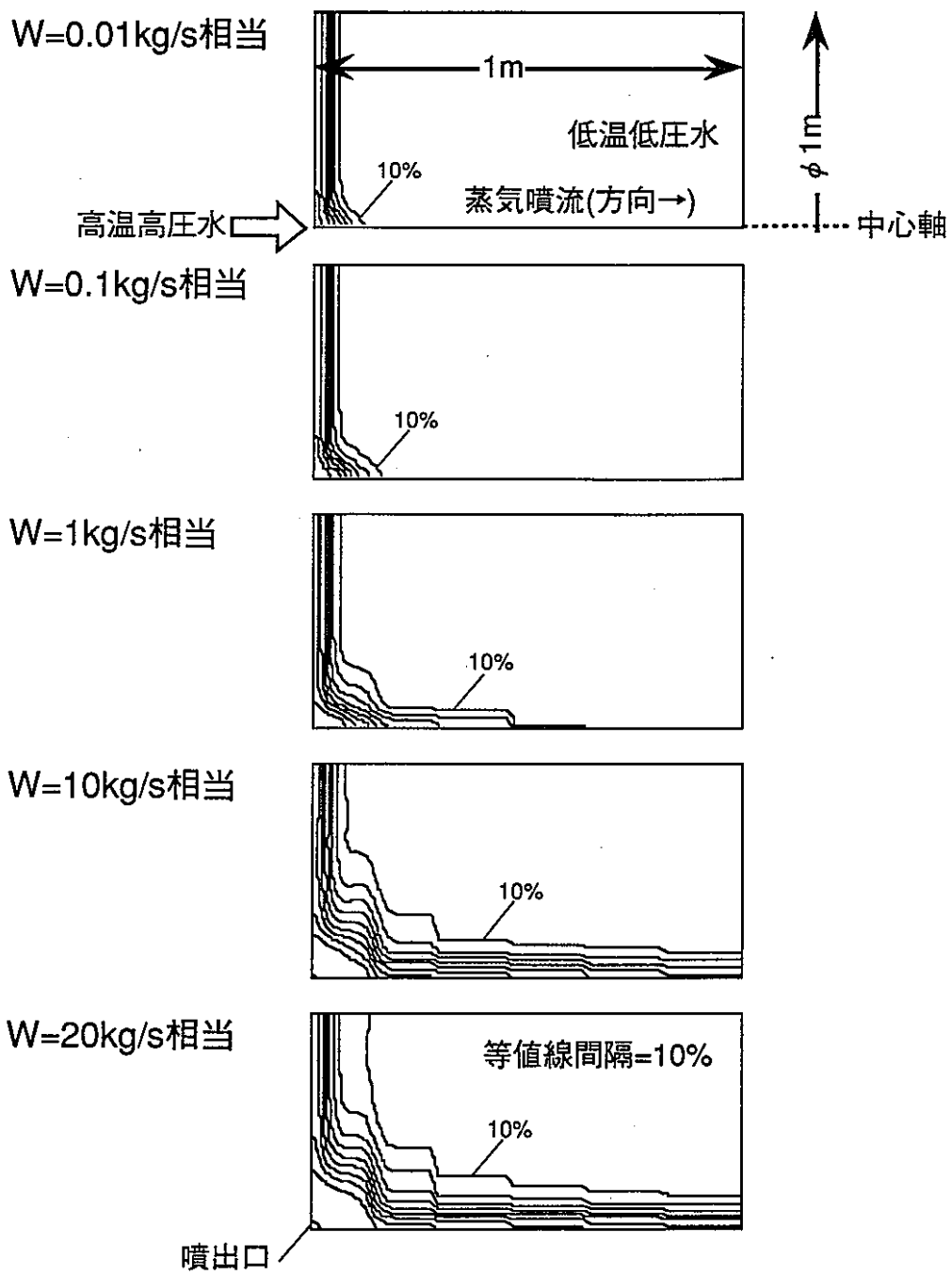


図3.1.3.3-10 等ボイド率線：分割メッシュ座標表現  
 (水中への蒸気混合水の噴出：噴出量依存性・時刻10ms後)

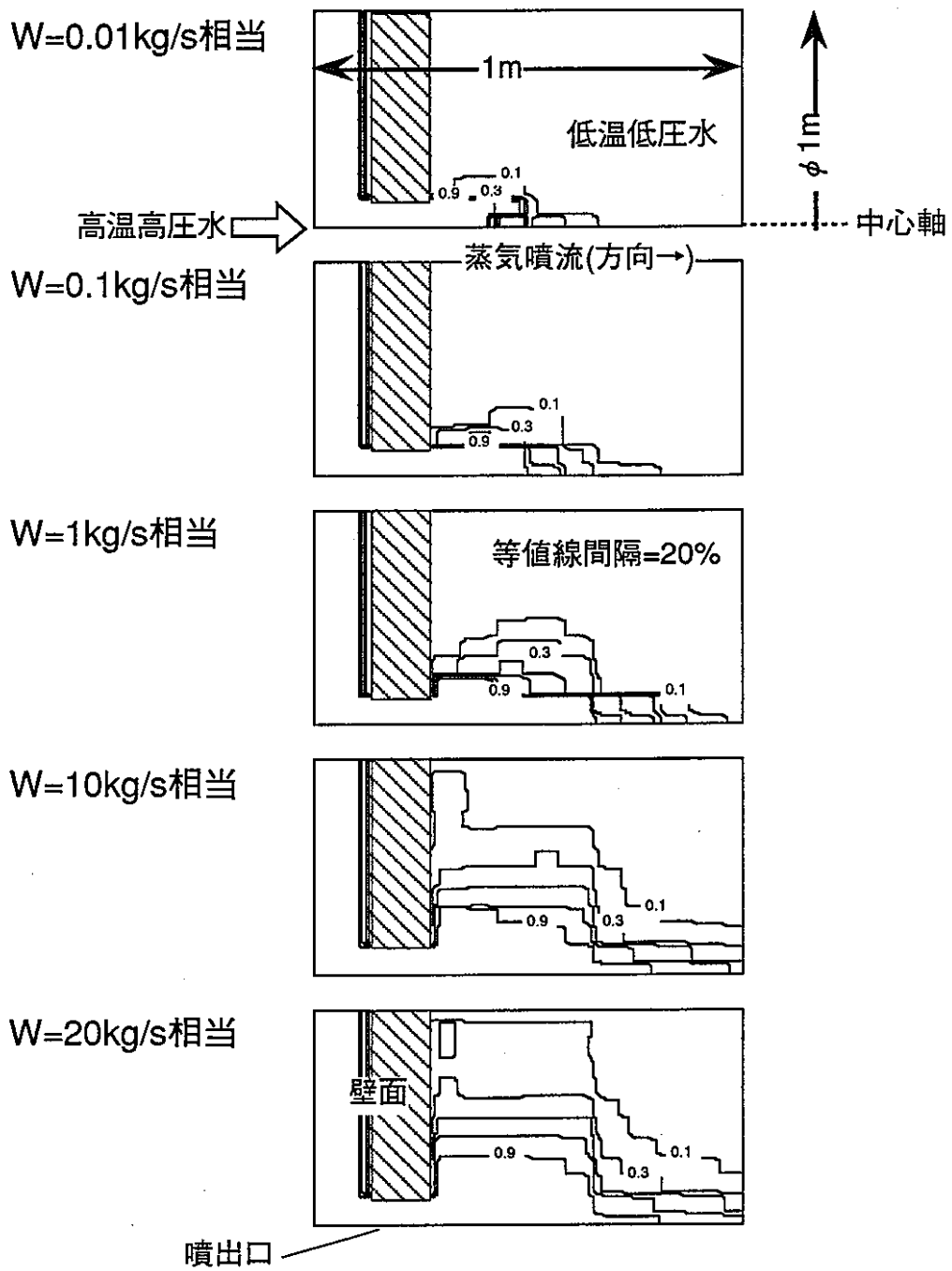


図3.1.3.3-11 等ボイド率線：等間隔座標表現  
 (水中への蒸気混合水の噴出：噴出量依存性・時刻10ms後)

(F) 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や、噴出時の上下流の圧力・温度条件だけでなく噴出口依存性を与えたような、蒸気発生器伝熱管破損水リーク時に広く想定される条件でも解析可能であることを示した。それらの解析結果は、比較実験を良く模擬できることが示された。

このように、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、または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. 2 計算方法の仕様

#### 3. 2. 1 計算方法の概要

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)、解析手法の構成の仕様を決める。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考慮する。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)、解析手法の構成を仕様の範囲とする。

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。

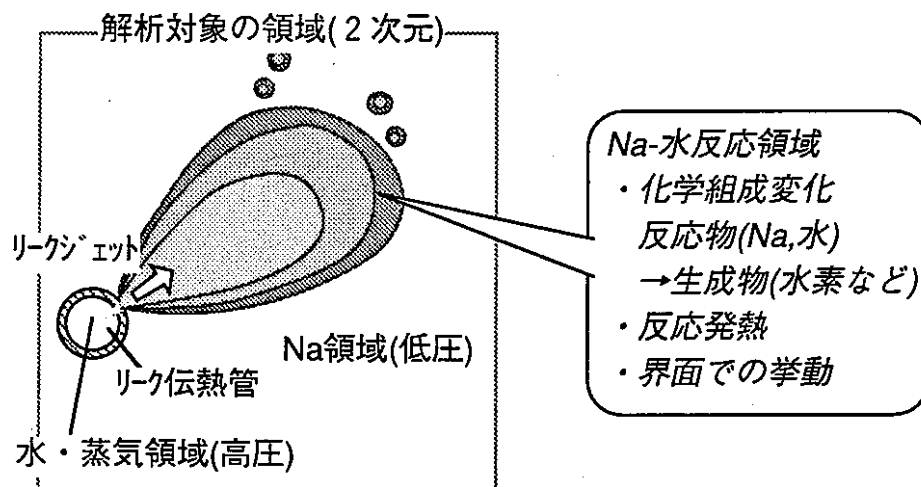


図3.2.1-1 ナトリウム-水反応ジェット周りの流れ

表3.2.1-1 本解析手法の機能

項目		機能
解析対象		蒸気発生器伝熱管水リーク時の ナトリウム-水反応領域を含む流れ (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	2次元二流体モデル ・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 ・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) ・化学種の質量移動量 ・発熱量
	状態式 ・物性値	水(蒸気)、Na、H <sub>2</sub> 、NaOH、Na <sub>2</sub> Oの状態量・物性値
	境界条件	・SG1次系(水・蒸気) : 圧力・温度・クオリティ ・SG2次系(Na) : 圧力・温度 ・SG伝熱管 : 壁面(ノースリップ条件)
	座標系	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

### 3. 2. 2 計算方法の内容

#### (A) 基礎式の関連

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。

なお、斜線部分は従来の二流体モデル二相流解析手法から、化学反応を考慮する場合に変更が必要となる部分である。

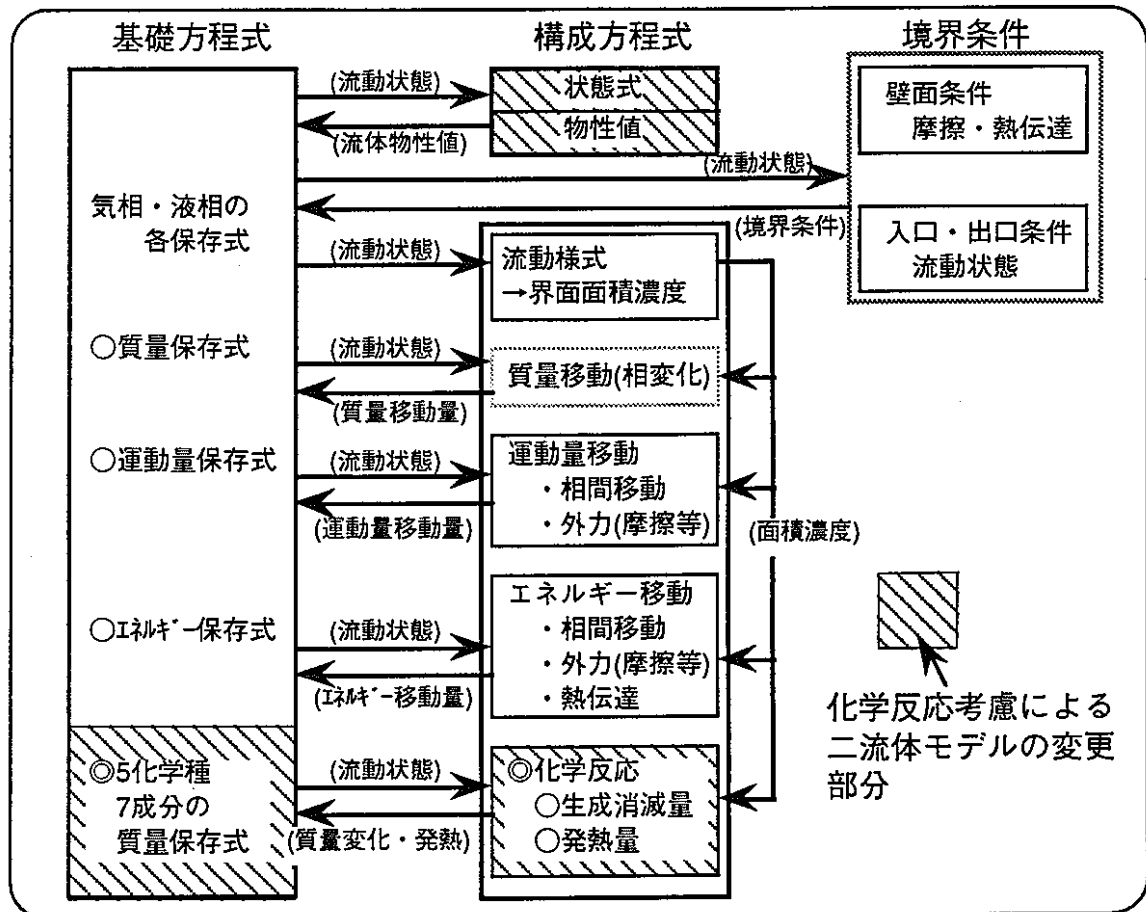


図3.2.2-1 基礎式の関連

(B) 基礎方程式

図3.2.2-2に示すように、2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。

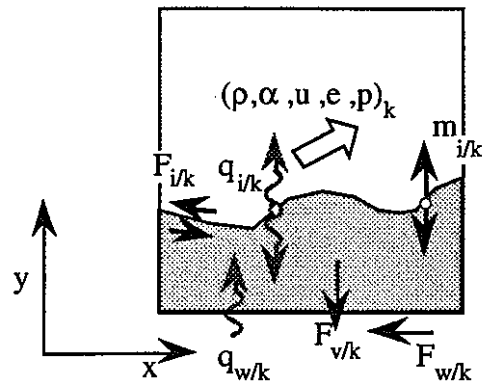


図3.2.2-2 二流体モデルの概念図

○質量保存式(k=気相(g)、液相(l)の2式)

$\alpha$ に体積率の拘束条件を与えることで、方程式系が閉じる。体積率 $\alpha$ 、密度 $\rho$ 、流速 $u$ はk=気相(g)、液相(l)の各相の平均値であり、生成量(速度) $m$ は気液各相に含まれる化学種の質量生成量と相変化による質量変化量との総和である。

検査体積内の時間変化(時間変化+境界面流出入量)=生成・消滅量

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla(\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k) = m_k \dots\dots\dots(3.2-1)$$

○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。

検査体積内の時間変化=

圧力+壁面摩擦+相間摩擦+体積力+相変化量に伴う運動量移動量

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

○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。なお、

$i_{i/k}$ は界面で輸送されるエンタルピーである。

$$\begin{aligned}
 & \text{検査体積内の時間変化=} \\
 & \text{圧力仕事+壁面摩擦・体積力仕事+相間摩擦仕事} \\
 & \text{+相変化量に伴うエネルギー移動量} \\
 & \text{+発熱・伝熱(壁面熱伝達+相界面熱伝達+反応発熱)} \\
 & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k (e_k + u_k^2/2)) + \nabla(\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k (e_k + u_k^2/2 + p/\rho_k)) \\
 & = -\alpha_k \nabla p \mathbf{u}_k - (\mathbf{F}_{w/k} + \mathbf{F}_{v/k}) \mathbf{u}_k - \mathbf{F}_{i/k} \mathbf{u}_{i/k} + m_k (i_{i/k} + u_{i/k}^2/2) + q_s \\
 & \dots\dots\dots(3.2-3)
 \end{aligned}$$

○各化学種の質量保存式(7式)

流速  $u$  は  $k$ =気相( $g$ )、液相( $l$ )の各相の平均値であり、 $\alpha$ 、 $\rho$ 、 $m$ は化学種 $c$ 別に区別されている。

$$\begin{aligned}
 & \text{検査体積内の時間変化=反応による化学種の質量生成消滅量(速度)} \\
 & \frac{\partial}{\partial t} \rho_c + \nabla(\rho_c \mathbf{u}_k) = m_c \\
 & \dots\dots\dots(3.2-4)
 \end{aligned}$$

(C) 構成方程式

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

(C-1) 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)。

・気液全体の体積率の総和量の拘束条件

$$\sum_k \alpha_k = 1 \dots\dots\dots(3.2-5)$$

・気液相別の体積率の総和量の拘束条件

$$\sum_c \alpha_c = \alpha_k \dots\dots\dots(3.2-6)$$

・相間保存(とびの条件)

$$\begin{array}{l}
 \text{質量移動量} \\
 \sum_{kc} m_{kc} = 0 \dots\dots\dots(3.2-7)
 \end{array}$$



$$\text{摩擦力} \quad \sum_k F_{i/k} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.2-8)$$

$$\text{速度} \quad \sum_k u_{i/k} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.2-9)$$

$$\text{伝熱} \quad \sum_k q_{i/k} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.2-10)$$

◎界面面積濃度

下記の式のように気液体積率の関数で流動様式に依存することが考えられるが、ここではチューニングパラメータと見なし、解析の簡単化のため  $a_i=1$  に設定する。

$$a_i = a_i(\alpha_k) \quad \dots\dots\dots(3.2-11)$$

○相間質量移動量

$k$  相から  $k'$  相への相変化量(速度)は、気液相の飽和温度  $T_{sat}$  に対する過冷却度・過熱度に比例し、また化学反応速度論を参考とした気相(蒸気)分子の熱速度にも比例すると仮定した。気液界面の相互作用の量は気液相の体積率の積に比例すると考え、相変化量を下記の式で表した。ここで  $\xi$  は相変化速度定数で、ここでは  $10 \sim 100$  の範囲に設定した。

なお、この評価式はSIMAコードで使用されている。

$$m_{k-k'} = \xi_{k-k'} a_i \rho_k |T_k - T_{k,sat}| / T_{k,sat} \quad \dots\dots\dots(3.2-12)$$

○摩擦力の一般形

$$F_{w,i/k} = \zeta_s \frac{\rho_k}{2} |u_k - u_{k'}| (u_k - u_{k'}) \quad \dots\dots\dots(3.2-13)$$

○壁面摩擦力

摩擦係数は  $\zeta = 0.003$  の一定値を仮定する。ただし摩擦係数の関数による付与も考慮されるものとする。

○相間摩擦力

二相流のドリフトフラックス理論によれば、二相流における流路内の気液の速度差の平均値は、流路断面の相分布と速度分布の相関と、局所的な気液の速

度差(ドリフト速度)に依存する。分散する気泡流のような流速が小さいときにはドリフト速度は気相に働く浮力と液相との界面摩擦力との釣り合いで決定される。

この理論に基づく単位体積当たりの相間摩擦力は、下記の気泡ドリフトモデルの式で与えられる。 $V_{gj}$ は気泡ドリフト速度である。

なお、この評価式もSIMAコードで使用されている。

$$\zeta_i = C_D a_i (\rho_{k'} - \rho_k) g / \rho_k v_{gj}^2, \quad C_D = 2.0$$

$$|u_k - u_{k'}| \equiv v_r = (1 - C_o \alpha_k / \alpha_{k'}) u_k - C_o u_{k'}, \quad C_o = 1.0 \dots\dots\dots(3.2-14)$$

○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。しかし、解析対象は2次元であり反応を伴う噴流に注目することから、解析の簡単化のために重力・浮力の体積力は考慮しない。

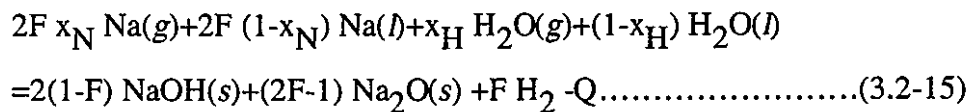
○壁面熱伝達

解析対象内には伝熱管群等、熱の授受を行う構造物は考慮しないので、壁面熱伝達を無視する。

○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。

(C-2) 化学反応モデル

ナトリウム-水反応の化学反応モデル式については、前章に述べたように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 $\theta$ を導入し、化学反応に伴う各化学種の生成消滅量と発熱量を評価する



(C-3) 状態式・物性値

○気液二相の熱的状态式：圧力  $p$  と内部エネルギー  $e$  または温度  $T$  の関数。

$$\rho_k = \rho_k(p, e_k), \text{ または } \rho_k = \rho_k(p, T_k) \dots \dots \dots (3.2-16)$$

○気液二相の熱量的状态式：圧力  $p$ 、内部エネルギー  $e$  および温度  $T$  の関係。

$$e_k = e_k(p, T_k), \text{ または } T_k = T_k(p, e_k) \dots \dots \dots (3.2-17)$$

○物性値(状態量の関数)：一般の物性値  $A$  は圧力  $p$  と温度  $T$  の関数。

$$A_k = A_k(p, T_k) \dots \dots \dots (3.2-18)$$

(D) 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。

全ての計算条件は、入力ファイルにより与えられるものとする。

表3.2.2-1 境界条件

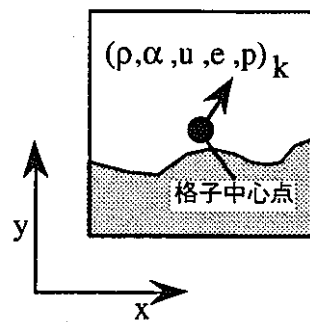
種別	物理量	境界条件	指定方法
噴出口 (リーク箇所)	口径	時刻固定	入力ファイル
入口・出口 (噴出口上下流)	圧力、温度、 流速、密度	自由流出 ・時刻固定	入力ファイル
固定壁面(伝熱管)	圧力	表面法線方向 の勾配=0	入力ファイル
固定壁面(伝熱管)	流速	ノースリップ	入力ファイル

(E) 解析手法

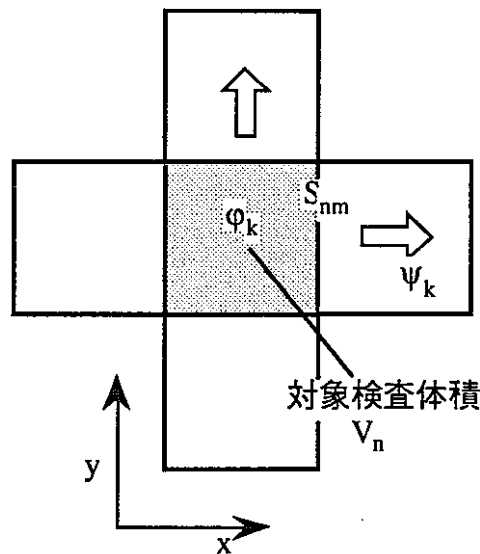
(E-1) 離散化方法

図3.2.2-3(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。



(a)計算格子



(b)検査体積の保存式収支

図3.2.2-3 離散化体系

図3.2.2-3(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。基礎方程式の添字kは気液相：気相(g)、液相(l)、cは化学種・成分を表す。

○一般化された二流体モデルの保存式

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi_k + \nabla \psi_k = b_k \dots\dots\dots(3.2-19)$$

○保存量

$$\varphi_k = \begin{bmatrix} \alpha_k \rho_k \\ \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \\ \alpha_k \rho_k (e_k + \mathbf{u}_k^2 / 2) \\ \rho_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.2-20)$$

○フラックス

$$\psi_k = \begin{bmatrix} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \\ \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \cdot \mathbf{u}_k \\ \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k (e_k + \mathbf{u}_k^2 / 2 + p / \rho_k) \\ \rho_c \mathbf{u}_k \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.2-21)$$

○生成・消滅量

$$b_k = \begin{bmatrix} m_k \\ -\alpha_k \nabla p - \mathbf{F}_{w/k} - \mathbf{F}_{i/k} - \mathbf{F}_{v/k} - m_k \mathbf{u}_{i/k} \\ -\alpha_k \nabla p \mathbf{u}_k - (\mathbf{F}_{w/k} + \mathbf{F}_{v/k}) \mathbf{u}_k - \mathbf{F}_{i/k} \mathbf{u}_{i/k} + m_k (i_{i/k} + \mathbf{u}_{i/k}^2 / 2) + q_s \\ m_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.2-22)$$

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[ ]<sub>nm</sub>とする。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \langle \varphi_k \rangle_n &= - \sum_m [\psi_{km}]_{nm} S_{nm} / V_n + \langle b_k \rangle_n \\ \langle \varphi_k \rangle_n &= \int_n \varphi_k dV / V_n, \quad \langle b_k \rangle_n = \int_n b_k dV / V_n \\ S_{nm} &= \Delta x_{m' \neq m} \Delta x_{m'' \neq m} \Big|_n, \quad V_n = \prod_m \Delta x_m \Big|_n = \Delta x \Delta y \Delta z \Big|_n \dots\dots\dots(3.2-23) \end{aligned}$$

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。

$$\sum_k \langle \alpha_k \rho_k \rangle / \rho_k(p, e_k) = 1 \dots\dots\dots(3.2-24)$$

### (E-2) 差分化方法

(E-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。

$$\begin{aligned} \langle \phi_k \rangle_n^{j+1} = & \langle \phi_k \rangle_n^j + \langle b_k \rangle_n \Delta t \\ & - [\psi_k(x_2) - \psi_k(x_1)]_n^j \Delta y \Delta z_n \Delta t - [\psi_k(y_2) - \psi_k(y_1)]_n^j \Delta z \Delta x_n \Delta t - [\psi_k(z_2) - \psi_k(z_1)]_n^j \Delta x \Delta y_n \Delta t \\ & \dots\dots\dots(3.2-25) \end{aligned}$$

Euler陽解法の使用理由は表3.2.2-2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が多い(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)。

表3.2.2-2 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

### (E-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の、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した。

### 3.3 プログラムの構成

#### 3.3.1 概要

前章までの仕様を基に、ナトリウム-水反応ジェット基本コードを開発する。具体的には、コーディング作業に反映するためのコード開発時の詳細構造や、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(つながり)等の構成を決定する。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(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十分に配慮された設計とする。

#### 3.3.2 開発コードの概略構成

##### (A) モジュール構成

図3.3.2-1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。

そのため本解析手法は、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。

平成7年度に実施したコード設計における開発計画の設計の検討では、前述の二流体モデルに基づく二相流解析コードSIMAを基本コードとして、化学反応モデルと物性値・構成方程式の整備を行う改修によるコード開発作業が、新規コード開発や他の既存コードを改修する場合と比較して、作業量が小さくなるために最適であるとの結論を得ている。

よって、反応ジェット基本コードの開発においては、SIMAを基本コードに採用して、化学反応モデルのカップリングおよび物性値式・構成方程式等の整備作業を実施する。

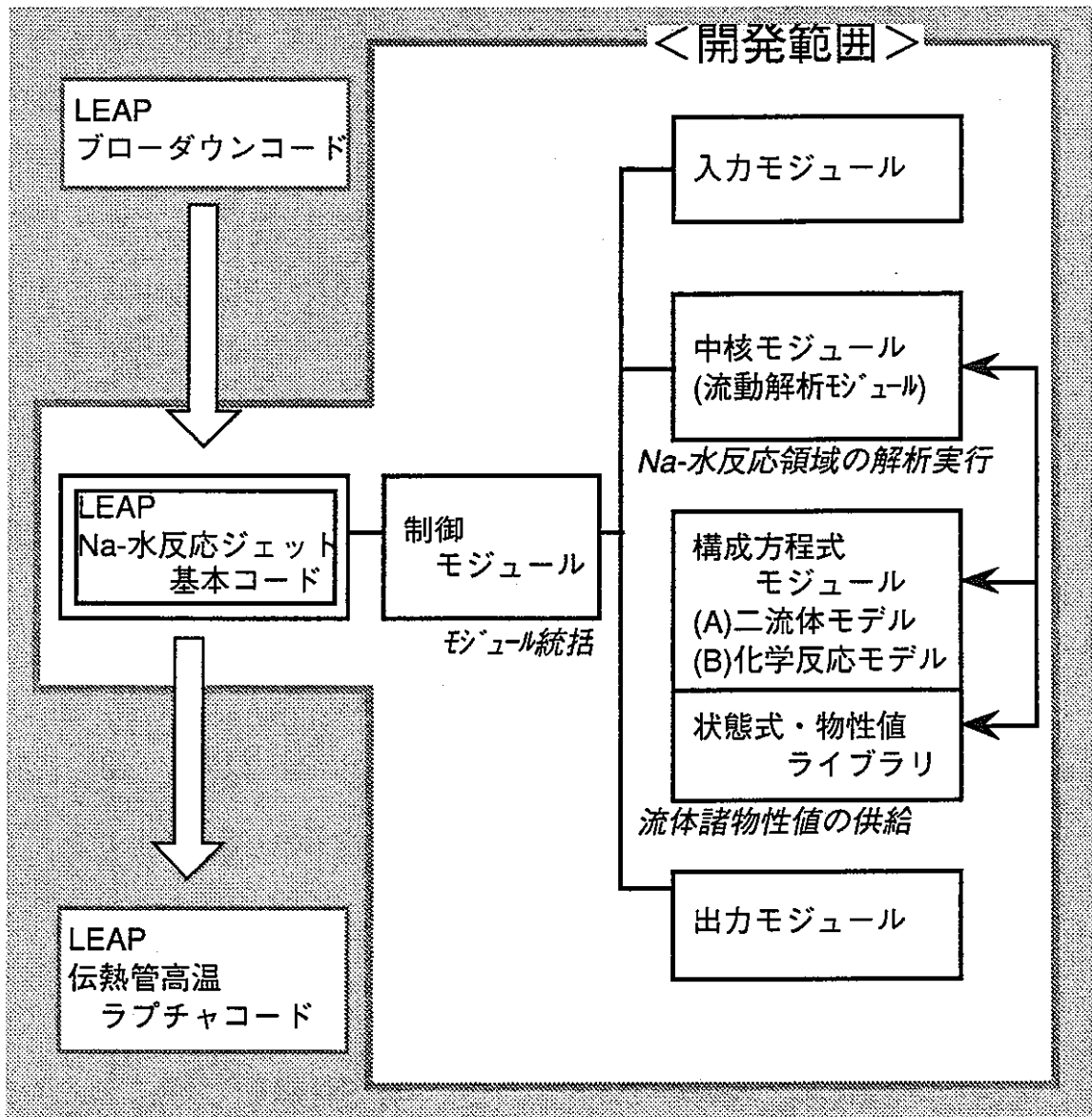


図3.3.2-1 本解析手法のモジュール構成



(B) サブルーチンの構成

図3.3.2-2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 (想定：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

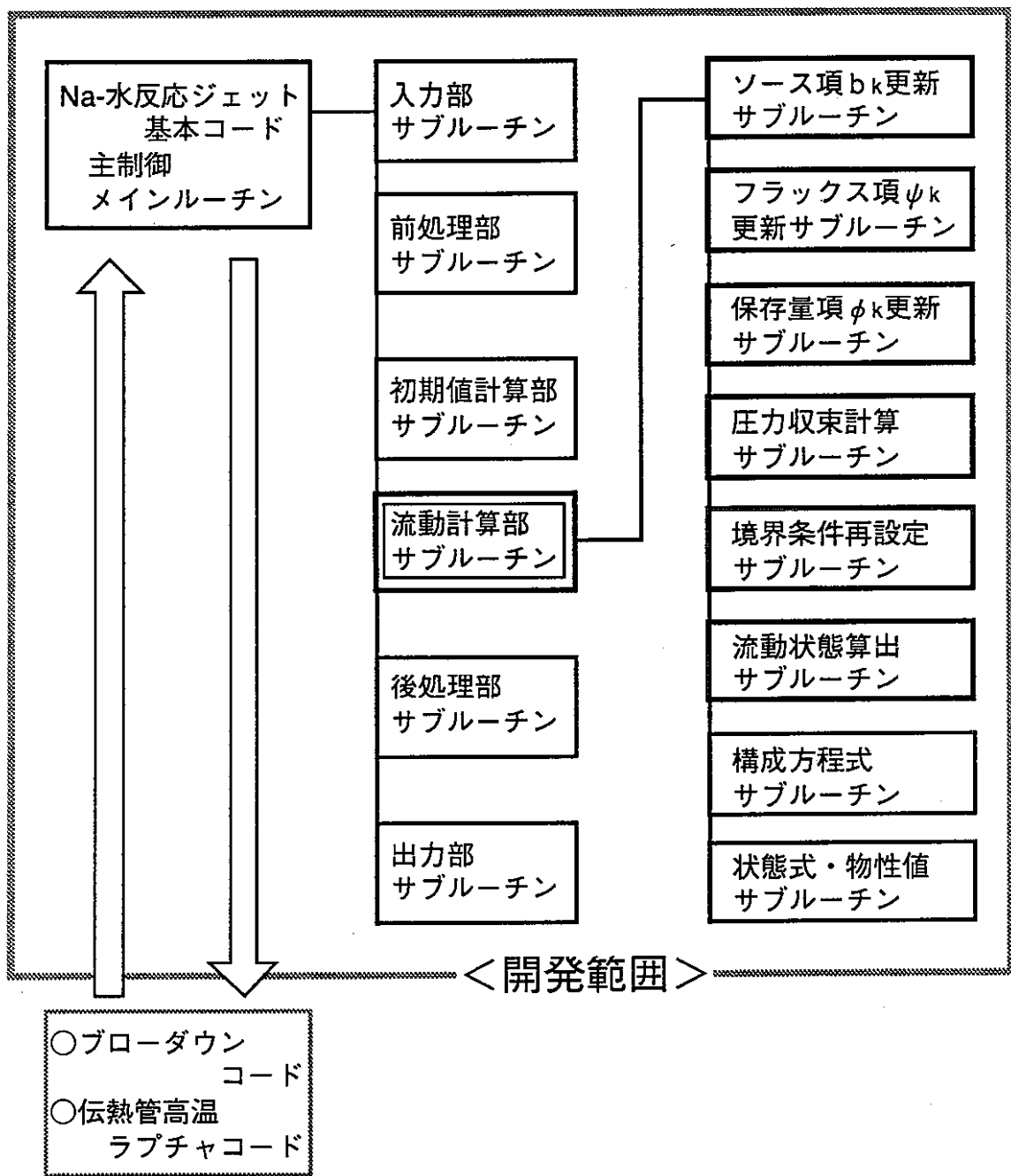


図3.3.2-2 プログラムのサブルーチン構成

### (C) インターフェイスの構成

図3.3.2-3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の蒸気発生器(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。

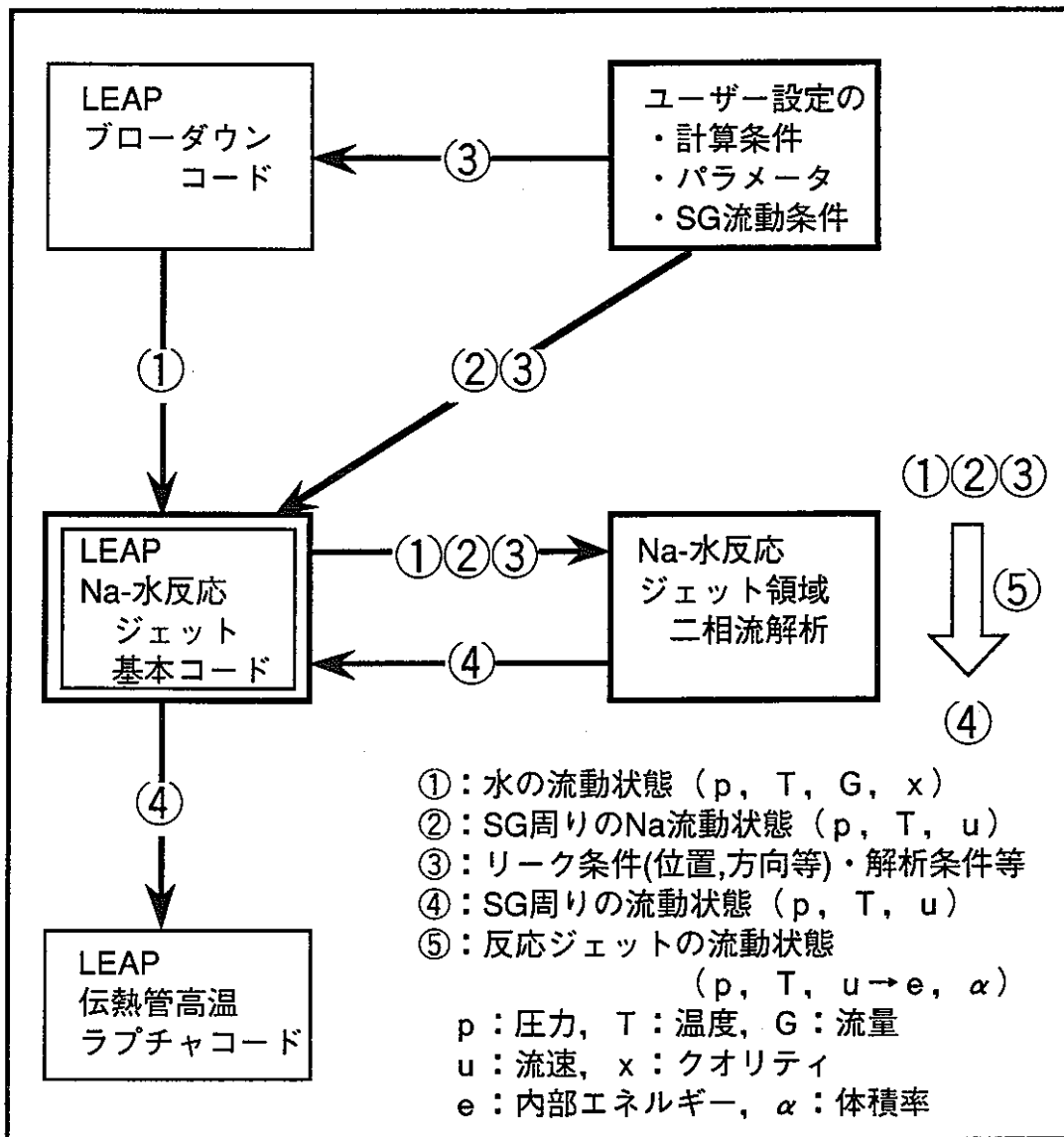


図3.3.2-3 インターフェイスの構成

### 3. 3. 3 開発作業

#### 3. 3. 3. 1 概略

気液二相流解析コードSIMAでは、二流体モデルに基づき、次の流体諸量を評価していた。

- ・各計算セルの圧力 ( $p$ ) と気相体積率 (ボイド率  $\alpha$ ) 。
- ・各計算セルの気液相  $k$  の密度 ( $\rho$ ) ・流速ベクトル ( $u$ )、温度 ( $T$ )。

今回作業では、SIMAに化学反応モデルをカップリングする。それにより、上記流体諸量に加えて化学反応に伴う次の諸量も評価する。

- ・各計算セルの化学種  $c$  の密度。
- ・各計算セルの気液相  $k$  の質量生成量、発熱量。

本基本コードにおいては、二流体モデルと化学反応モデルとの整合性を取るために、下記の様に解析する。

- ・空間離散化の一致：計算（空間分割）単位セルを一致させる。
- ・時間離散化の一致：時間積分におけるタイムステップも一致させる。

具体的なコード開発作業内容は下記の通りである。下記の項目に基づいて以降に詳細を記す。

- (1) 化学反応に伴う質量生成量と発熱量の付加：二相流保存式の生成項へ
- (2) Na/水の相変化の考慮：相変化評価部へ
- (3) 物性値計算関数切り替え  
水・蒸気（1化学種2成分）→Na-水反応（5化学種7成分系）
- (4) 流体諸量計算部（物性値関数の使用部分）の変更
- (5) 入出力部分の変更
  - ・計算条件入力、結果出力
  - ・リスタート用ファイル入出力モジュールの変更
- (6) モジュール連結部の変更
  - ・初期処理部分
  - ・COMMON等の変数の追加変更

### 3. 3. 3. 2 開発コードの構成

図3.3.3-4に、二流体モデルを用いたSIMAコードを基本として、化学反応モデルによる化学種の質量変化と発熱を考慮した反応ジェット基本コードの構成を示す。

SIMAでは、前章に示した気液二相流の基本式（保存式）の対流項・拡散項・生成項を、それぞれ別々のサブルーチン(モジュール)にて算出する特徴がある。流体保存量Aに対する一般化された基本式(微分方程式)は、下記の通りである。ここでtは時間、xは空間座標、uは対流(輸送)速度、Bは拡散係数、Cは生成量である。

$$dA/dt + u \cdot dA/dx = B \cdot d^2 A/dx^2 + C \dots \dots \dots (3.3-1)$$

(時間項) + (対流項) = (拡散項) + (生成項)

SIMAの二相流流動計算部CHANGEにおける、計算セル(前述のコントロールボリューム)内の保存式に基づく保存量は、各モジュールにおいて次の通り補正されている。各モジュールで必要となる構成式(構成方程式・物性値)については、随時呼び出されている。

- |                                   |                   |
|-----------------------------------|-------------------|
| (1) 流体諸量の算出                       | : STATE2          |
| (2) (気液相の対流)速度分布(運動方程式)           | : MOVE→VELOC      |
| (3) 気液相の質量保存式の対流項                 | : MASTRS          |
| (4) 化学種の質量保存式の対流項                 | : CMSTRS          |
| (5) 気液相の運動量保存式の対流項                | : MOMTRS          |
| (6) 気液相のエネルギー保存式の対流項              | : ENGTRS          |
| (7) 化学反応モデルに基づく<br>化学種の生成量・発熱量の算出 | : ACT             |
| (8) 相変化による気液相の質量生成項               | : PHCHG           |
| (9) 気液相変化量に伴う<br>質量・運動量・エネルギー輸送量  | : MMTRAN          |
| (10) 粘性による運動量拡散項                  | : MIXING          |
| (11) 熱伝導によるエネルギー拡散項               | : CONDUCT         |
| (12) 速度分布による圧力の算出                 | : PRESSD-PRSX-VTP |
| (13) 流体諸量の算出                      | : STATE2          |

(14) 境界条件設定・時刻更新

: STATE

今回作業においては、化学反応を考慮するに当たって必要となる、次の機能への変更・付加が必要となる。

(a) 7成分系の各化学種の質量保存式を解く機能として、気液相の質量保存式の関連モジュールに類似の機能を付加。

(b) 化学反応に伴う質量生成量・発熱量の評価機能の付加。

(c) 7成分系の各化学種物性値と気液相平均物性値の算出機能の付加。

機能付加に伴い修正・追加されたモジュールを次に説明する。

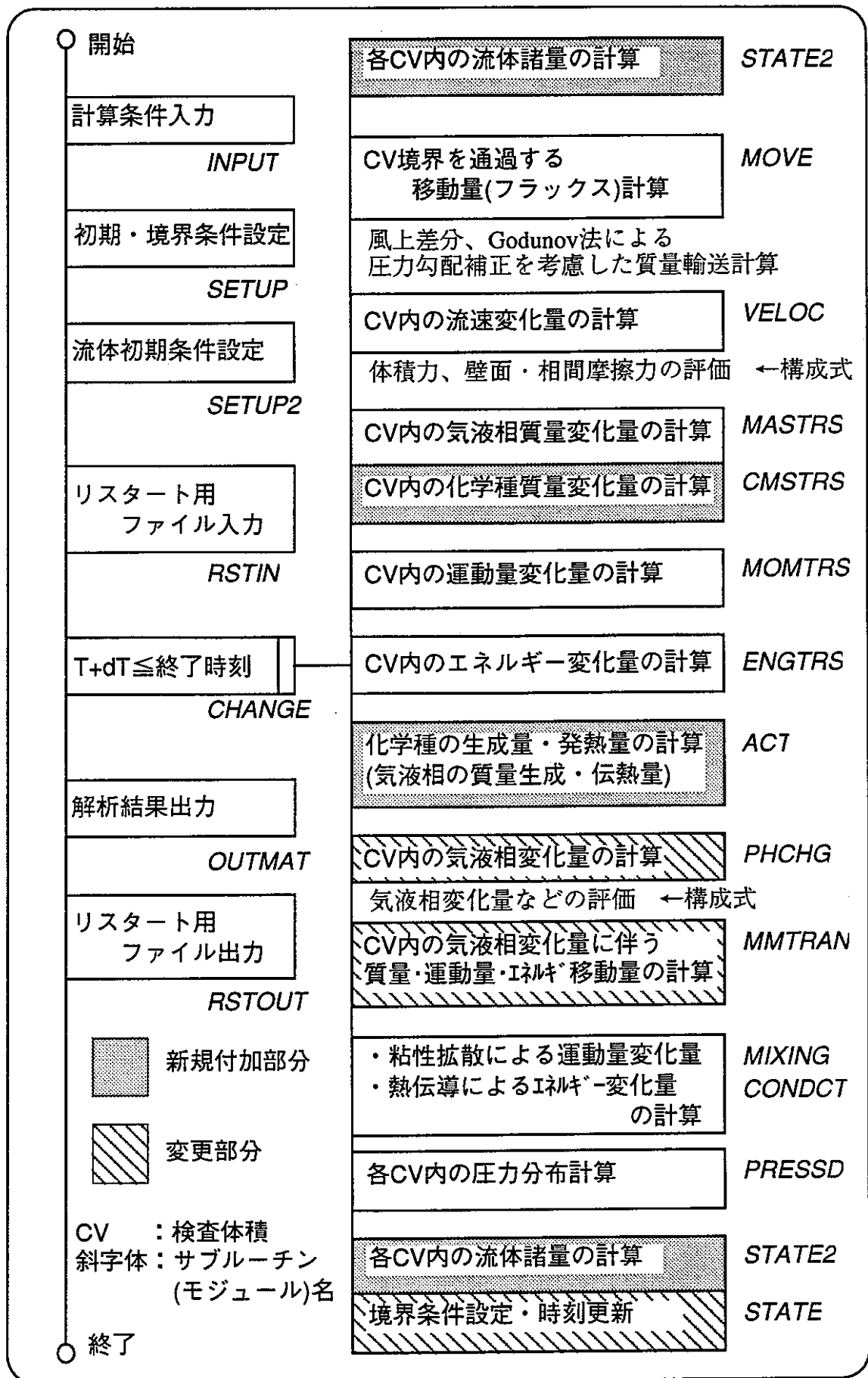


図3.3.3-4 反応ジェット基本コードの構成



### 3. 3. 3. 3 化学反応に伴う生成項評価モジュールの追加・変更

従来のSIMAにおける相変化生成項モジュール(PHCHG)では、二相間の相変化に伴う質量・運動量・エネルギー移動量のみを評価していたが、改良コードでは、化学反応に伴う各化学種間の質量・運動量移動量と、エネルギー移動量(発熱に伴う気液相への伝熱量)も評価する。

相変化生成項モジュール(PHCHG)の内部構成は次のように変更される。

- (A) 化学反応による気液相の質量移動量・エネルギー移動量の算出。
- (B) Na・水の気液相間の相変化による質量移動量の算出。
- (C) 質量・運動量・エネルギー移動量を元にした気液二相流の保存量の算出。

#### (A) 化学反応による生成項算出モジュールACT

図3.3.3-5に、前述の化学反応モデルに基づく生成項モジュールACTの構成を示す。

まず引き渡される変数・パラメータは、(a) 各セルの化学種  $c$  の密度  $\rho$ 、モル分率  $X$ 、質量  $Q$ 、気液相  $k$  の温度  $T$ 、(b) 化学反応パラメータ(水素/水モル転換比  $F$ 、水素反応速度定数  $K a_i$ 、気相伝熱比  $\theta$ 、化学種  $c$  の分子量  $W_c$ ) である。

なお、気液界面面積濃度  $a_i$  については次のように考える。相間摩擦力の評価では従来SIMAと同様の気泡流を仮定したドリフトフラックスモデルの式を用いることから、 $a_i$  の関数は不要となる。また、相変化量(速度)の評価でも従来SIMAと同様の相変化速度式を用い、ここでは気液相の体積率の積で  $a_i$  を表して与えているので不要である。水素反応速度定数  $K$  については、前章までは  $a_i$  と分離して取り扱っていた。しかし、今回開発のコードにおいては  $a_i = 1$  と置いた。このことは、 $K \times a_i$  を1つのパラメータとみなして設定たことに相当する。

質量生成項SOMは次のように算出される。

まず、Naと水の気相質量率  $x_N$ 、 $x_H$  を評価する。

$$x_N, x_H = \text{気相密度} / (\text{気相密度} + \text{液相密度}) \dots \dots \dots (3.3-2)$$

つぎに水素生成量  $m_{H2} = W_{H2} \times K a_i \times A \times (\text{時間刻み} DT)$  を評価する。

$$A = (\rho / W)(\text{Na液相}) \times (\rho / W)(\text{H2O液相})$$

$$\begin{aligned}
&+(\rho/W)(\text{Na液相}) \times (\rho/W)(\text{H}_2\text{O気相}) \\
&+(\rho/W)(\text{Na気相}) \times (\rho/W)(\text{H}_2\text{O液相}) \\
&+(\rho/W)(\text{Na気相}) \times (\rho/W)(\text{H}_2\text{O気相}) \dots\dots\dots(3.3-3)
\end{aligned}$$

次に各化学種生成量  $m_c$  を評価する。

$$m_c = \eta_c (\text{モル転換比}) \times m_{\text{H}_2} \times W_c / W_{\text{H}_2} \dots\dots\dots(3.3-4)$$

気液相  $k$  の質量生成項  $\text{SOM}_k = (k \text{ に分類される } m_c \text{ の総和}) \times (\text{セル体積})$  で算出される。

発熱項  $\text{SOT}$  は次のように算出される。まず化学種  $c$  の温度  $T_c$  を、 $c$  を含む気液相  $k$  の温度  $T_k$  と定義する。

つぎに、本モジュールより熱エンタルピー関数を直接呼び出して、化学種  $c$  の熱エンタルピー  $H_c$  を求める(熱エンタルピー関数は、他のモジュールでは使用されない)。

セル内の全発熱量  $q$  は、 $H_c \times m_c$  の全化学種の総和である。

気液相への伝熱量  $q_k$  を次のように算出する。ここで  $\beta_k$  は  $\theta$  で表される。

○注目相とは反対の相の密度が無い場合： $q_k = q$

○注目相とは反対の相の密度が有る場合： $q_k = q \times \beta_k \dots\dots\dots(3.3-5)$

気液相  $k$  の熱生成項  $\text{SOT}_k = q_k \times (\text{セル体積})$  で算出される。

他計算モジュールへは、化学種の質量保存量  $Q_c$  (変数名  $QC$ )、気液二相流の質量生成項  $\text{SOM}_k$ 、気液二相流の発熱項  $\text{SOT}_k$  が変更された後に引き渡される。なお、 $\text{SOM}_k$ 、 $\text{SOT}_k$  は、計算時間刻み間隔での変化量 = 時間積分量である。

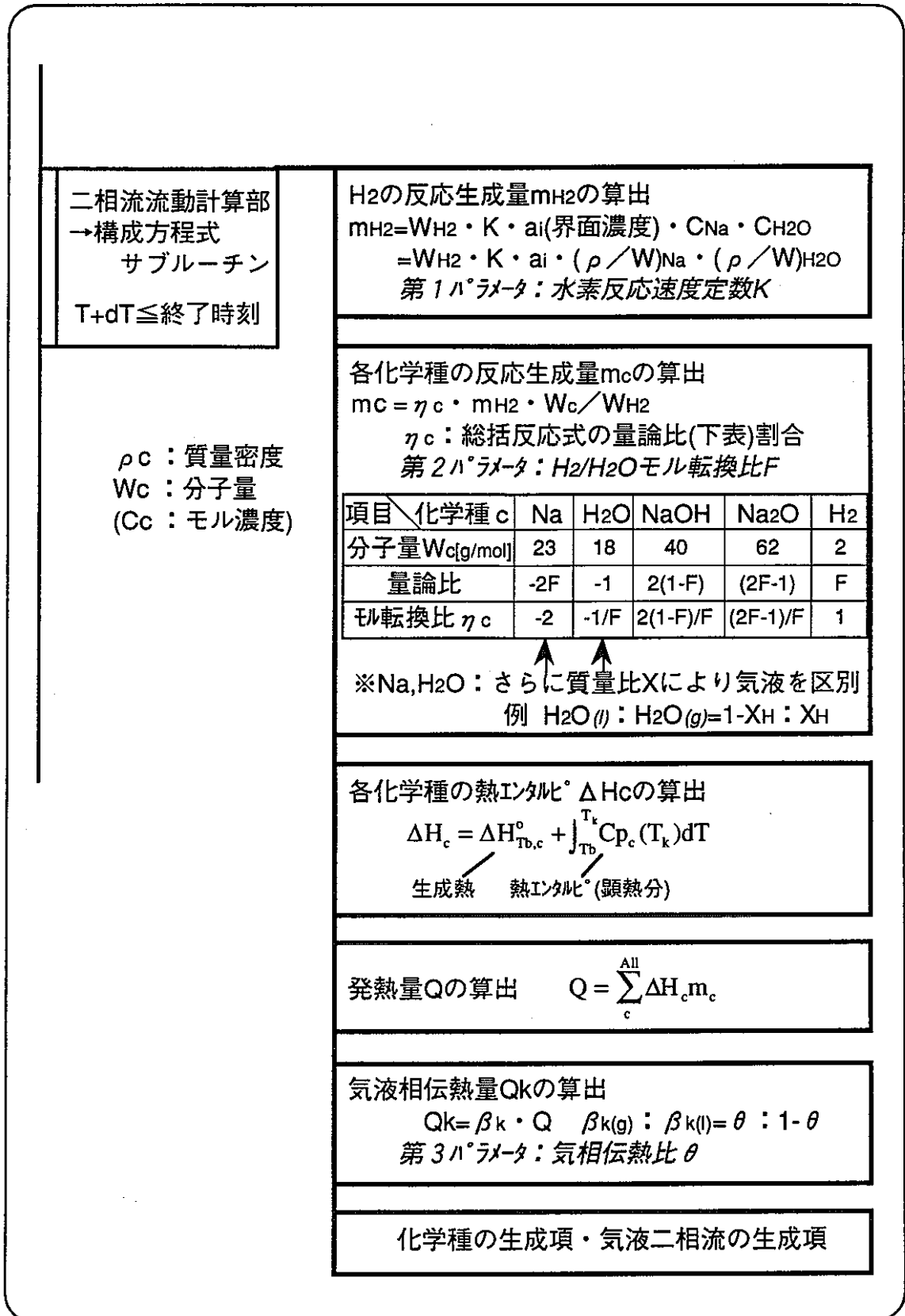


図3.3.3-5 ACTモジュールの構成

(B) Na・水相変化による質量移動量の算出モジュールPHCHG

まず引き渡される変数・パラメータは、(a) 化学反応生成量 $Q_c$ 、(b) Na/水の気液各相の温度 $T_k$ 、エンタルピー $h_k$ 、(c) Na/水の気液各相の飽和温度 $T_s$ 、密度 $\rho_s$ 、エンタルピー $h_s$  ( $h_k = \text{Na/水の両方の化学種の気液相の飽和エンタルピー}$ ) と、相変化速度定数等の相変化モデルにおけるパラメータである。

まず、気液相の質量有無で場合分けして、気液相の状態量(温度 $T$ 、ボイド率)と、飽和量(温度 $T_s$ 、密度 $\rho_s$ 、エンタルピー $h_s$ )を定義する。

相変化量 $GSW/GWS$ を、次のように算出する。

- (a) 前述の相変化モデルに基づき相変化速度係数 $S$ を算出。
- (b) 気液相の質量有無で相変化量を算出するかどうかを場合分けする。
- (c) 相変化量は、下記の相変化量と質量保存量 $Q_k$ の小さい方とする。

$$\begin{aligned} \text{○液} \rightarrow \text{気相変化量 } GWS &= (\text{相変化速度定数}) \times (\text{係数 } S) \times (\text{セル体積}) \\ &\quad \times (\text{液相飽和密度}) \times (\text{液相温度} - \text{飽和温度}) \\ &\quad / (\text{飽和温度}) \times (\text{時間刻み } DT) \dots\dots\dots (3.3-6) \end{aligned}$$

○気 $\rightarrow$ 液相変化量 $GSW$ ：上記の気液状態量を入れ替えた式

他の計算部へは、Na/水の相変化量 $GSW/GWS$ が引き渡される。なお、 $GSW/GWS$ も、計算時間刻み間隔での変化量=時間積分量である。

(C) 移動量を元にした気液二相流の保存量の算出モジュールMMTRAN

まず引き渡される変数・パラメータは、(a) 化学反応生成量： $Q_c$ 、 $SOM_k$ 、 $SOT_k$ 、(b) Na/水の相変化量 $G_{SW}/G_{WS}$ 、(c) 各計算セルのNa/水の気液各相の飽和温度エンタルピー $h_s$ 、(d) 気液相の流体諸量(x・y方向速度u, v)、そして気液相の流体保存量(質量Q、x・y方向運動量UM, VM、内部エネルギーE)である。

化学種の質量保存式に基づき、生成項により化学種の質量保存量QCを下記のように変更する。

$$QC = QC + SOM_c \dots\dots\dots(3.3-7)$$

気液相の質量保存式に基づき、生成項により気液相の質量保存量QS, QWを下記のように変更する。

- ・気相Q(QS) = 気相Q + SOM(気相)  
+  $G_{WS}(Na+H_2O) - G_{SW}(Na+H_2O)$
- ・液相Q(QW) = 液相Q + SOM(液相)  
-  $G_{WS}(Na+H_2O) + G_{SW}(Na+H_2O) \dots\dots\dots(3.3-8)$

気液相の運動量保存式に基づき、気液相の運動量保存量UM, VMを下記のように変更する。ここで下記の式は、x方向速度Uに伴う運動量UMの補正であるが、y方向速度Vに伴う運動量VMについても、UMと同様である。

- ・気相運動量UM = UM  
+  $(G_{WS}(Na+H_2O) + SOM(気相)) \times U(液相速度)$   
-  $(G_{SW}(Na+H_2O) + SOM(液相)) \times U(気相速度) \dots\dots\dots(3.3-9)$
- ・液相運動量UM：上式の気液状態量を入れ替えた式

気液相のエネルギー保存式に基づき、気液相の内部エネルギー保存量ES, EWを下記のように変更する。ここで、運動エネルギー =  $(U \times U + V \times V) / 2$ である。

- ・気相内部エネルギーE(ES) = E + SOT(発熱の気相への伝熱量)

$$\begin{aligned}
& + \{GWS \times (\text{気相飽和エンタルピ} + \text{液相運動エネルギー})\}(\text{Na}) \\
& + \{GWS \times (\text{気相飽和エンタルピ} + \text{液相運動エネルギー})\}(\text{H}_2\text{O}) \\
& - \{GSW \times (\text{液相飽和エンタルピ} + \text{気相運動エネルギー})\}(\text{Na}) \\
& - \{GSW \times (\text{液相飽和エンタルピ} + \text{気相運動エネルギー})\}(\text{H}_2\text{O}) \dots \dots (3.3-10) \\
& \cdot \text{液相エネルギー } E(\text{EW}) : \text{上式の気液状態量を入れ替えた式}
\end{aligned}$$

他の計算部へは、変更後の気液相の流体保存量(質量 $Q$ 、 $x \cdot y$ 方向運動量  $UM$ ,  $VM$ 、内部エネルギー $E$ )が引き渡される。

### 3. 3. 3. 4 物性値計算関数の変更

解析にて使用すべき各化学種の物性値の定義式を、従来コードの「水・蒸気の2成分系」から「Na-水反応の7成分系」へ切り替える。

なお、従来コードでは水・蒸気系で良く使用される内部エネルギー  $e$  で定義関数であったが、本コードでは温度で定義された式を与える。これは、一般化学種の物性値式には  $e$  はなじまないためである。

表3.3.3-1に示すように、Na-水反応系の5化学種7成分の化学種の物性値の温度  $T$  (単位K)、圧力  $p$  (単位Pa) による関数を定義する。

これらの関数式は次のように与えた。関数式は別モジュールで与えており、式は随時変更可能である。

- (a) 文献の代表物性値：下記の (b) ~ (d) に該当しない物性値
- (b) 改良・再定義式：定圧比熱・熱エンタルピー・熱伝導率、液体の粘性係数
- (c) 理論式による定義：気体の密度・粘性係数、主な気液の音速
- (d) 固定値：比熱比、NaOH・Na<sub>2</sub>Oの主な物性値

後述のように、解析の簡単のため、物性値関数には単純多項式または単調関数をなるべく与えるように配慮した。

表3.3.3-1 Na-水反応系の5化学種7成分の化学種の物性値式

物性値	関数名	物性値番号 PROFにて使用
密度 $\rho$	DENS	1
粘性係数 $\mu$	VISC	2
定圧比熱 $C_p$	CPS	3
熱エンタルピー $\Delta H$	HEAT	4
比熱比 $\kappa$	DKAP	5
熱伝導率 $\lambda$	HCOND	6
音速 $a$	SONIC	7
飽和温度	TSAT	水・Naのみ

(A) 質量密度：図3.3.3-6~9を参照(DENS)..... (3.3-11)

・液相H<sub>2</sub>O：気液二相流の数値解析：日本原子力学会熱流動部会編。

内部エネルギー  $e = 417400 + 4434 \times (T - 373.15)$  のとき、

$$\text{DENS} = 1000 - 2\text{E-}5 \times e - 1.5\text{E-}10 \times e \times e + 6.57\text{E-}12 \times P$$

ただし、DENSは700を下回らない(下限制約)。

・気相H<sub>2</sub>O：理想気体の状態式  $\text{DENS} = P / 461.906 / T$

・液相Na：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会より近似。

$$\text{DENS} = 1017.9 - 0.24048 \times T$$

ただし、DENSは500を下回らない(下限制約)。

・気相Na：理想気体の状態式  $\text{DENS} = P / 361.491 / T$

・H<sub>2</sub>：理想気体の状態式  $\text{DENS} = P / 4157.15 / T$

・NaOH：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$\text{DENS} = 2069 - 0.48 \times T$$

・NaOH：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の固定値。

$$\text{DENS} = 2270$$

(B) 粘性係数：図3.3.3-10を参照(VISC)..... (3.3-12)

・液相H<sub>2</sub>O：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$\text{VISC} = ( ((287.2 - T) + \text{SQRT}(((287.2 - T))^2$$

$$+ 4 \times 0.016856 \times 25532)) / (0.016856 D_0 \times 2) ) \times 1\text{E-}6$$

・気相H<sub>2</sub>O：サザランドの式：理科年表 東京天文台編纂。

$$\text{VISC} = 1.28\text{E-}6 \times ((373.15 + 650) / (T + 650)) \times (T / 373.15)^{1.5}$$

・液相Na：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$\text{VISC} = 1.4628 \times T^{(-1.3087)}$$

・気相Na：動燃大洗工学センター編 N941 75-19, 1975-3

( B.I. Stefanov et al, "Viscosity and Thermal Conductivity of the Vapors of

Sodium and Potassium", High Temperature, 4, 131-2, 1966) より。

$$\text{VISC} = 2.6693\text{E-}6 \times (22.989 \times T)^{0.5} / (3.46^2) \times 1.02\text{E-}2 \times 9.80665$$

・H<sub>2</sub>：サザランドの式：理科年表 東京天文台編纂。

$$\text{VISC} = 8.8\text{E-}7 \times ((293.15 + 72) / (T + 72)) \times (T / 293.15)^{1.5}$$



- ・ NaOH : 伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$\text{VISC} = 1\text{E-}3 \times (160.06 - 0.5948 \times T + 0.000752\text{D}0 \times T^2 - 3.2\text{E-}8 \times T^3)$$

ただし、VISCは 0.001を下回らない(下限制約)。

- ・ NaOH : 仮想値。

$$\text{VISC} = 0.001$$

(C) 定圧比熱: 図3.3.3-11を参照(CPS)..... (3.3-13)

- ・ 液相H<sub>2</sub>O: 伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$\text{CPS} = 0.757 \times T + 3982$$

- ・ 気相H<sub>2</sub>O: B-605。

$$\text{CPS} = 1667 + 0.595 \times T + 1860000 / T^2$$

- ・ 液相Na: B-605。

$$\text{CPS} = 1651 - 0.8329 \times T + 0.0004623 \times T^2$$

ただし、CPSは 1000を下回らない(下限制約)。

- ・ 気相Na: PNC。

$$\text{CPS} = (0.21598 + 6.054 \times \text{Exp}(-20708 / T)) \times 4187$$

- ・ H<sub>2</sub> : B-605。

$$\text{CPS} = 13650 + 1.633 \times T + 25120000 / T^2$$

- ・ NaOH : 伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の固定値。

$$\text{CPS} = 2140$$

- ・ NaOH : B-605。

$$\text{CPS} = 1060 + 0.3646 \times T$$

上記の式の出典について、略号は次の通り。

B-605: Bulletin 605, Bureau of Mines Thermodynamic Properties of 65 Elements - Their Oxides, Halides, Carbides, and Nitrides C.E.Wicks and F.E.Block, United States Government Printing Office, Washington, 1963

PNC: 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター編「ナトリウム物性値の実用計算式 1972年までの公表文献に基づく液体と蒸気の物性値」N941 75-19, 1975-3 (J.P.Stone et al, "High Temperature Properties of Sodium", C AD 622, 191, (NRL Report 6241)(1965))

(D) 熱エンタルピー：図3.3.3-12を参照(HEAT)..... (3.3-14)

熱エンタルピーは、顕熱( (C) より算出される定圧比熱の標準状態からの温度定積分)+標準生成熱で求められる。

・液相H<sub>2</sub>O

$$\text{HEAT} = (-1221000 + 0.757 / 2 \times T^2 + 39820 \times T) - 15880000$$

・気相H<sub>2</sub>O

$$\text{HEAT} = (1926000 + 1667 \times T + 0.2977 \times T^2 - 1860000 / T) - 13430000$$

・液相Na

$$\text{HEAT} = (-356700 + 1651 \times T - 0.4164 \times T^2 + 0.0001547 \times T^3) + 115000$$

・気相Na

$$\text{HEAT} = (904.3083 \times T - 269619.5077) + 4665000$$

・H<sub>2</sub>： HEAT = (-4058000 + 13650 × T + 0.8163 × T<sup>2</sup> - 25120000 / T)

・NaOH： HEAT = (-638041 + 2140 × T) - 10640000

・NaOH： HEAT = (-332200 + 1060 × T + 0.1823 × T<sup>2</sup>) - 6680000

(E) 比熱比：図3.3.3-13を参照(DKAP)..... (3.3-15)

固体・液体の比熱比は1.0、気体の比熱比は分子状態より決まる固定値とする。

・液相H<sub>2</sub>O・液相Na・NaOH・Na<sub>2</sub>O：DKAP=1.0

・気相H<sub>2</sub>O (多原子分子)：DKAP=4/3

・気相Na (単原子分子)：DKAP=5/3

・H<sub>2</sub> (2原子分子)：DKAP=1.4

(F) 熱伝導率：図3.3.3-14を参照(TCOND)..... (3.3-16)

・液相H<sub>2</sub>O：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$\text{TCOND} = (-0.0064482 \times T^2 + 5.2912 \times T - 397.63) \times 1E-3$$

ただし、TCONDは0.5を下回らない(下限制約)。

・気相H<sub>2</sub>O：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$\text{TCOND} = -0.0021 + 5.369E-6 \times T + 4.576E-10 \times T^2$$

・液相Na：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$TCOND = 104.91 - 0.04863 \times T$$

- ・気相Na：動燃大洗工学センター編N941 75-19,1975-3 (G.H.Golden et al, "Thermophysical Properties of Sodium", ANL-7323, 1967)

$$Tf = 1.8 \times (T - 273.15) + 32 \text{ のとき、}$$

$$TCOND = 1.16 \times (2.44E-3 + 5.918E-7 \times Tf - 1.44E-9 \times Tf^2)$$

- ・H2：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$TCOND = 0.04289 + 4.897E-5 \times T - 8.818E-10 \times T^2$$

- ・NaOH：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会の粗い近似。

$$TCOND = 0.2796 + 9.36E-6 \times T$$

- ・NaOH：推定値  $TCOND = 0.1$

(G) 音速：図3.3.3-15を参照(SONIC)..... (3.3-17)

- ・液相H<sub>2</sub>O：機械工学便覧：日本機械学会編(A5-6)。

$$TT = T - 273.15 \text{ の時、}$$

$$SONIC = 1404.4 + 4.8215 \times TT - 0.047562 \times TT^2 + 1.3541E-6 \times TT^3$$

ただし、SONICは1600を下回らない(下限制約)。

- ・気相H<sub>2</sub>O：理想気体の一般関係式より。

$$SONIC = \text{SQRT}(4/3 \times 461.906 \times T)$$

- ・液相Na：Kleppa による試験結果より。

$$SONIC = 2400 - 0.3 \times (T - 371.15)$$

ただし、SONICは1500を下回らない(下限制約)。

- ・気相Na：理想気体の一般関係式より。

$$SONIC = \text{SQRT}(5/3 \times 361.491 \times T)$$

- ・H2：理想気体の一般関係式より。

$$SONIC = \text{SQRT}(1.4 \times 4157.15 \times T)$$

- ・NaOH：液体・固体の推定値。

$$SONIC = 1000$$

- ・NaOH：推定値液体・固体の推定値。

$$SONIC = 1000$$

(H) 水・Naの飽和温度：図3.3.3-16を参照(TSAT)..... (3.3-18)

相変化を考慮する水・Naの飽和温度については、圧力  $p$  の関数で与える。

・水：気液二相流の数値解析：日本原子力学会熱流動部会編。

$$TSAT(K) = 117.8 \times (p \times 10E-5)^{0.223} + 225.35$$

・Na：伝熱工学資料(改訂第4版)日本機械学会

飽和温度を水の場合の式の形で近似して与えた。

$$TSAT(K) = 485.71 \times (p \times 10E-6)^{0.11278} + 322.23$$

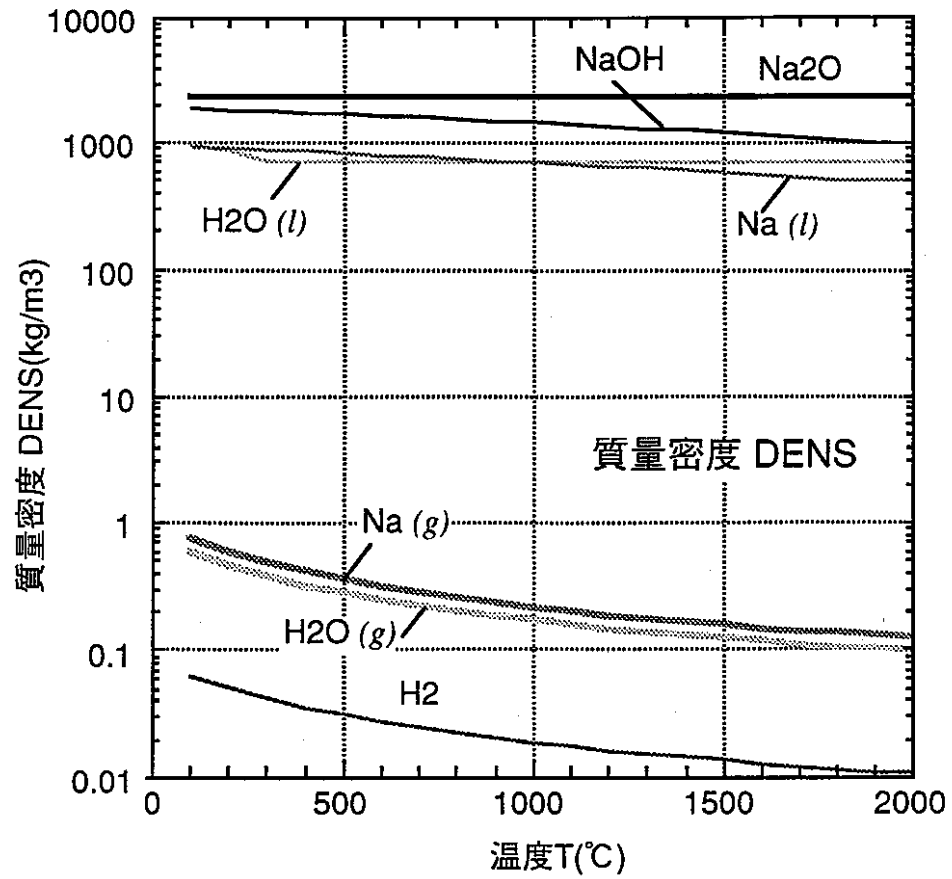


図3.3.3-6 物性値の比較：質量密度

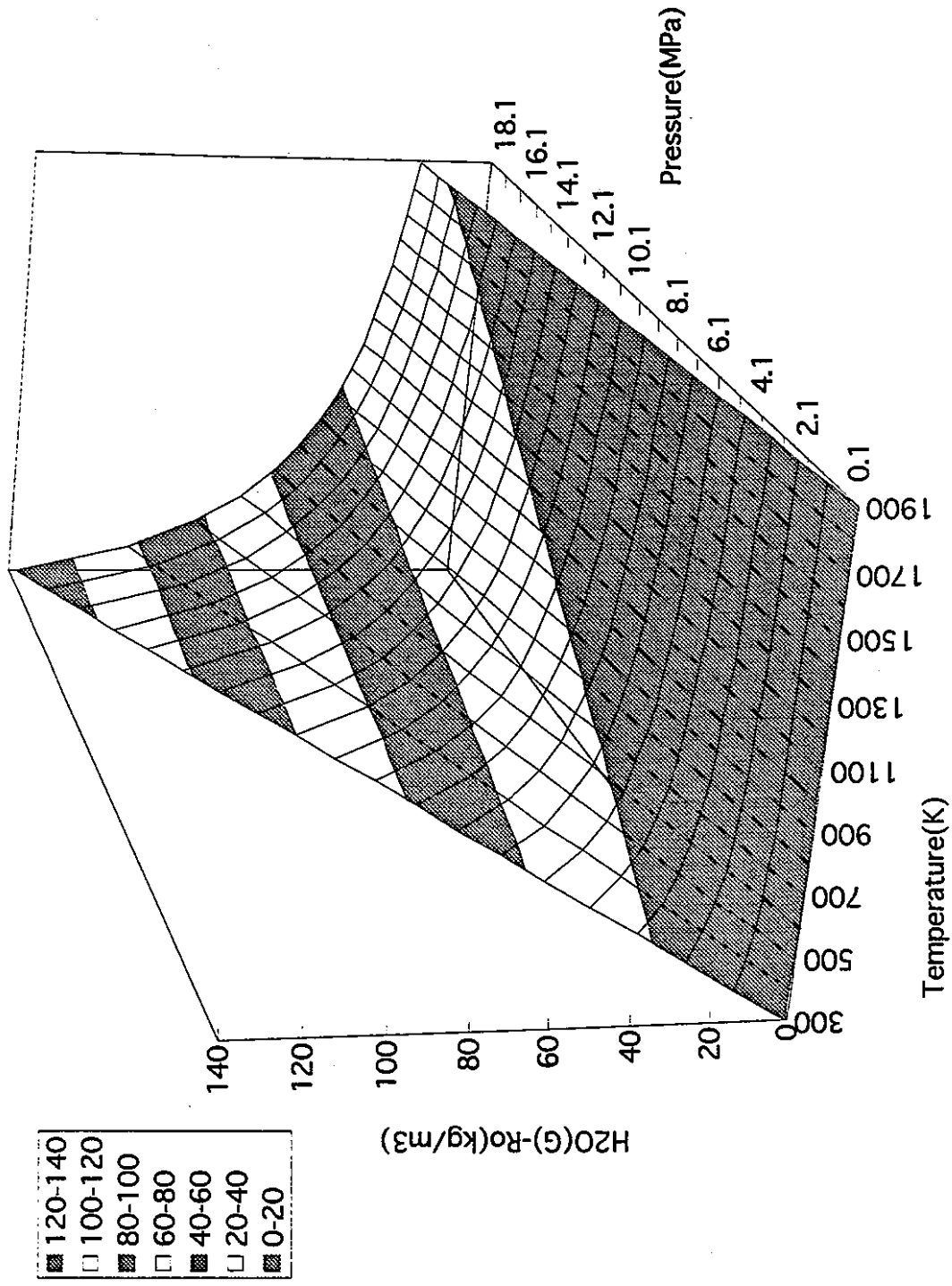


図3.3.3-7 質量密度の圧力・温度依存性(気相 $H_2O$ )

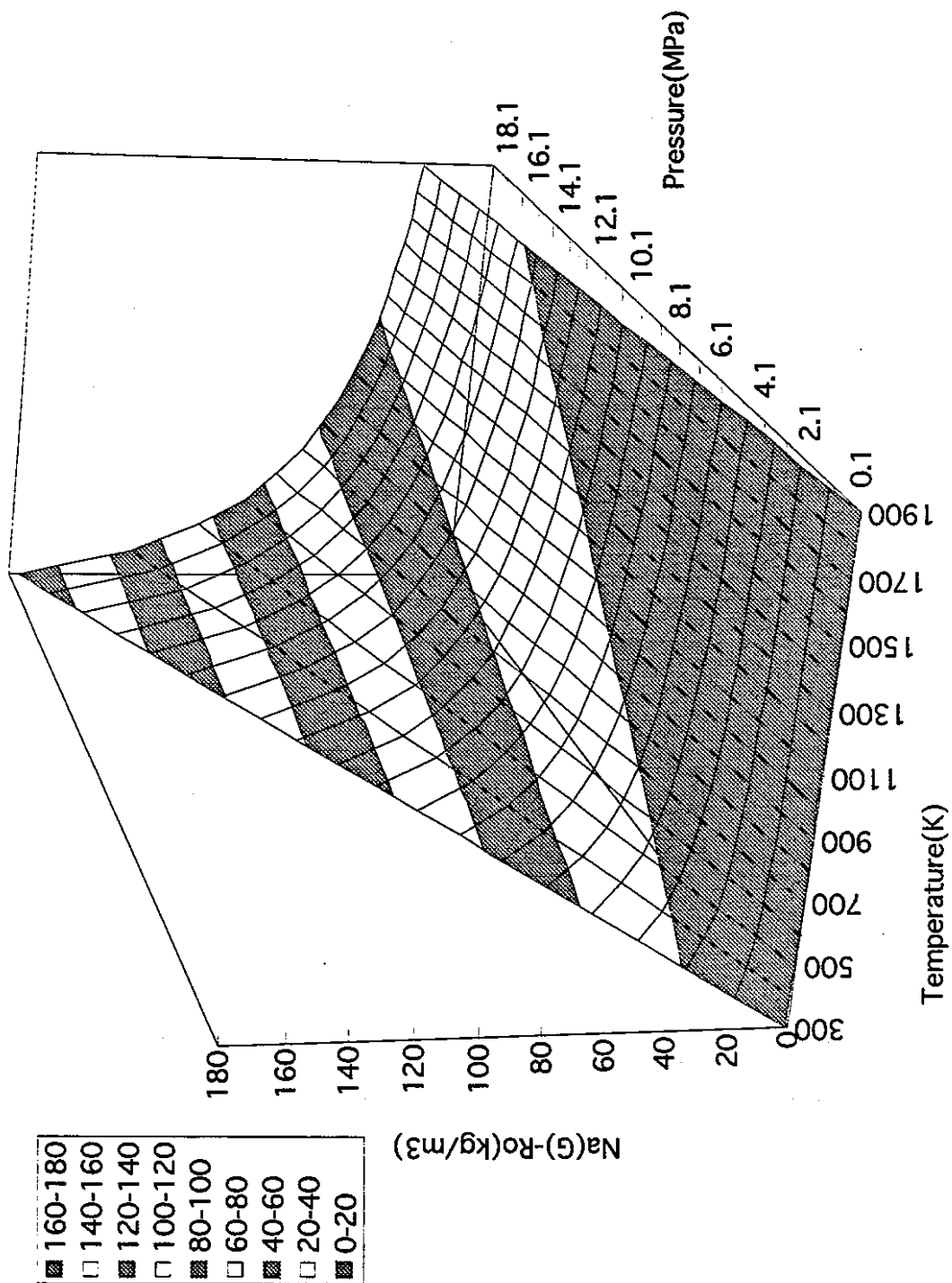


図3.3.3-8 質量密度の圧力・温度依存性(気相Na)

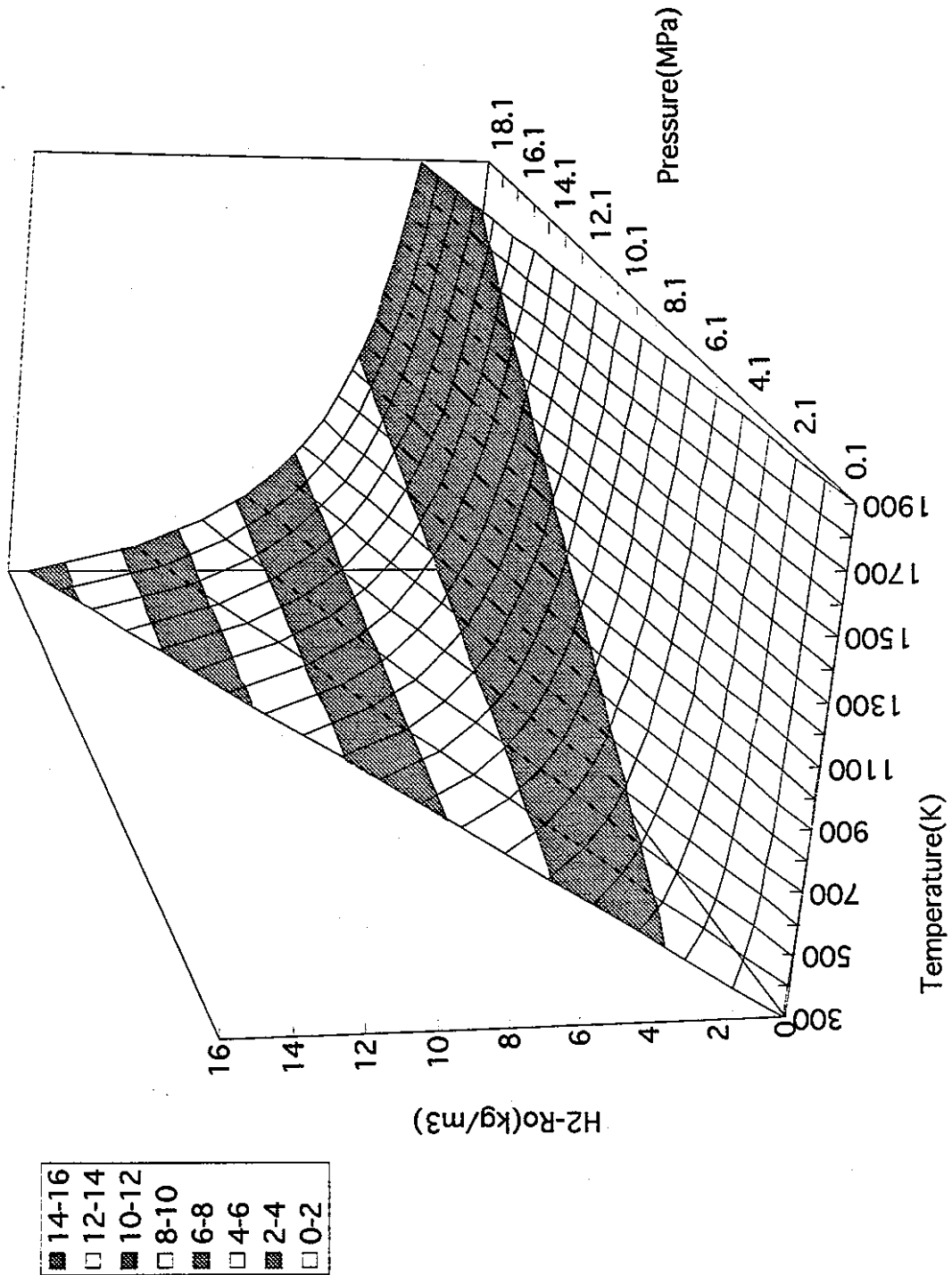


図3.3.3-9 質量密度の圧力・温度依存性( $H_2$ )



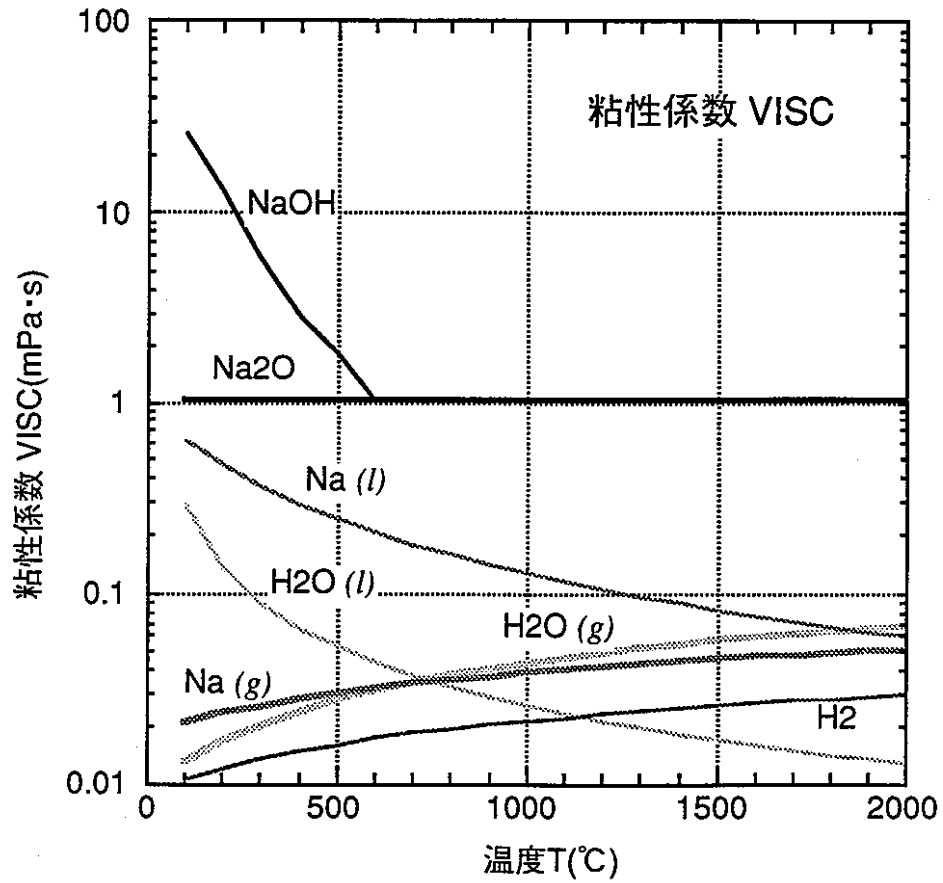


図3.3.3-10 物性値の比較：粘性係数

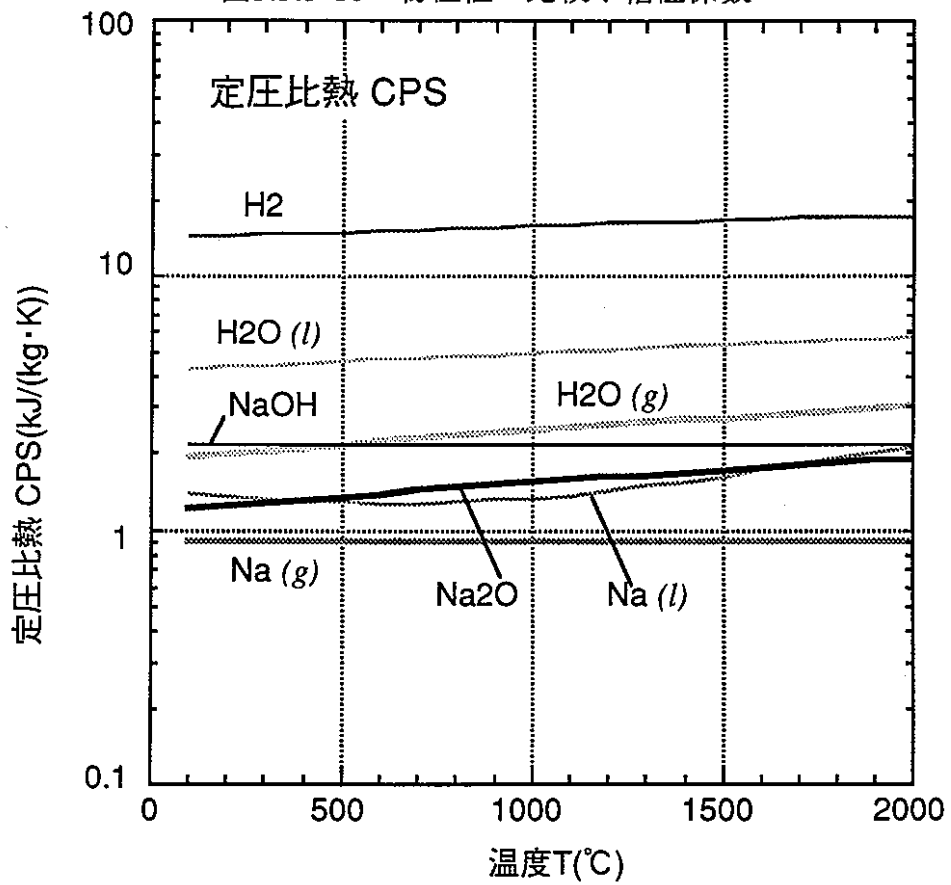


図3.3.3-11 物性値の比較：定圧比熱

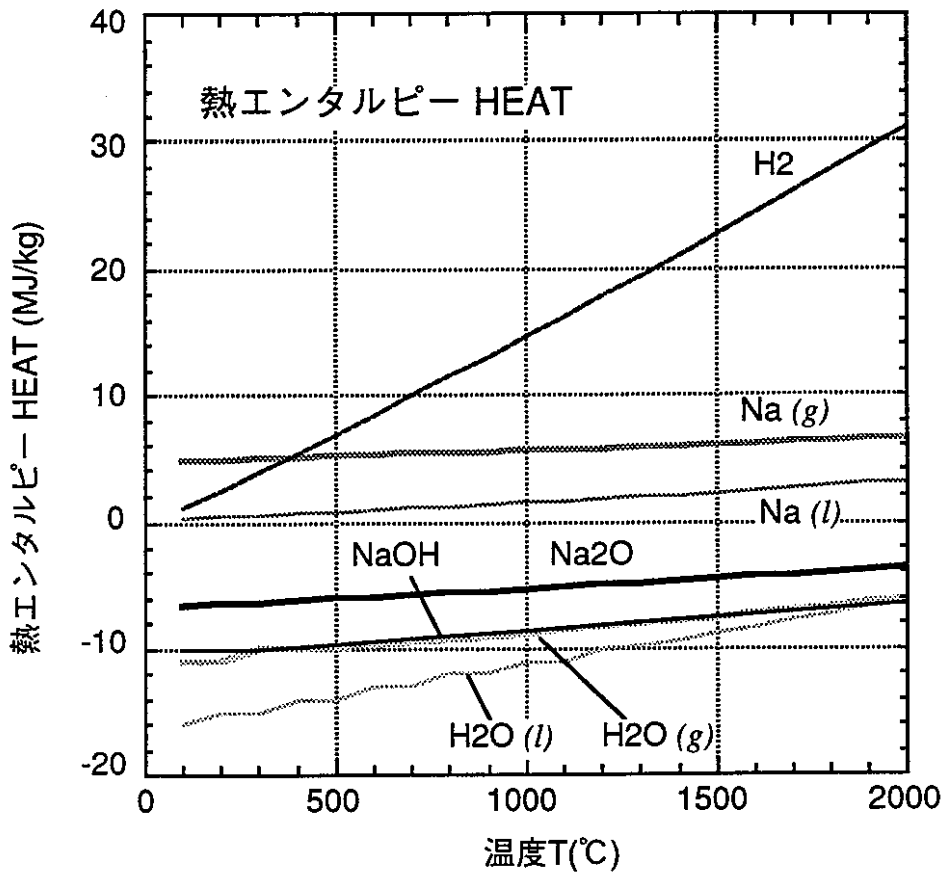


図3.3.3-12 物性値の比較：熱エンタルピー

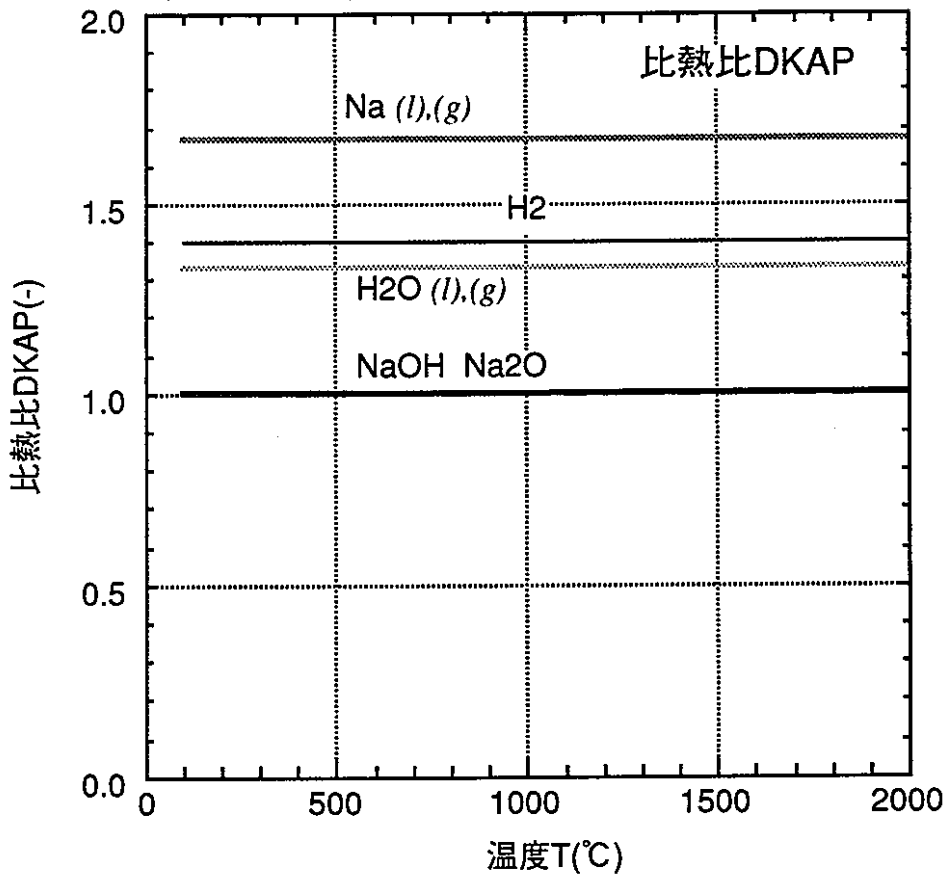


図3.3.3-13 物性値の比較：比熱比

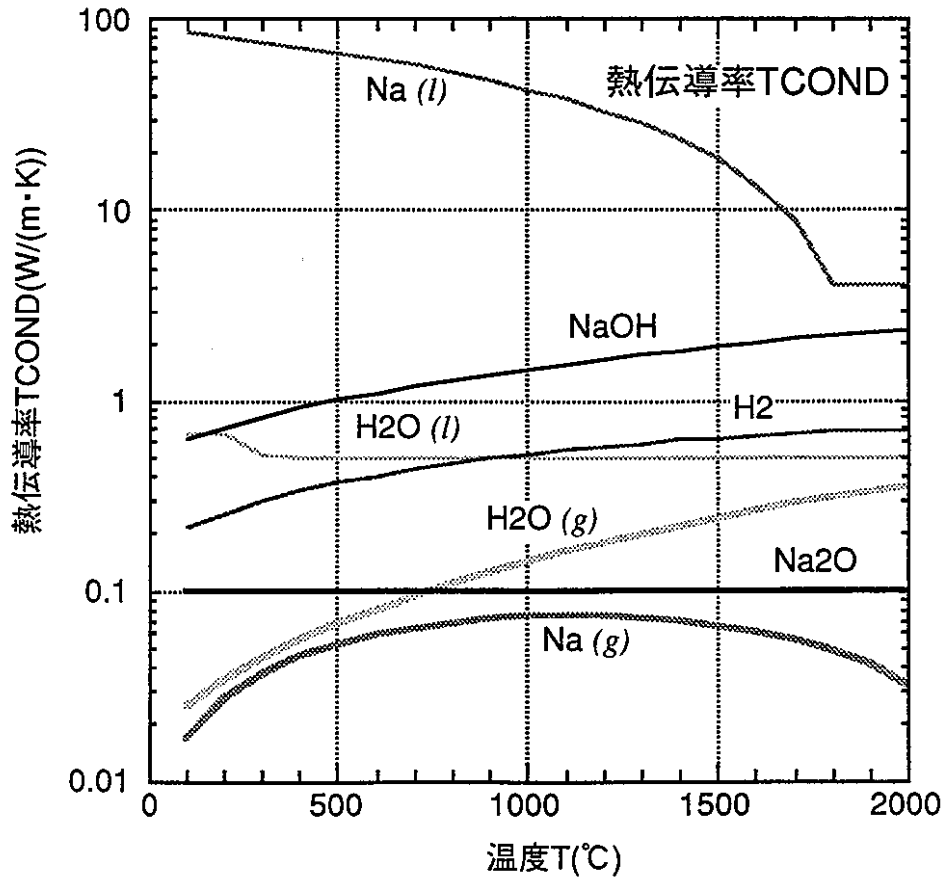


図3.3.3-14 物性値の比較：熱伝導率

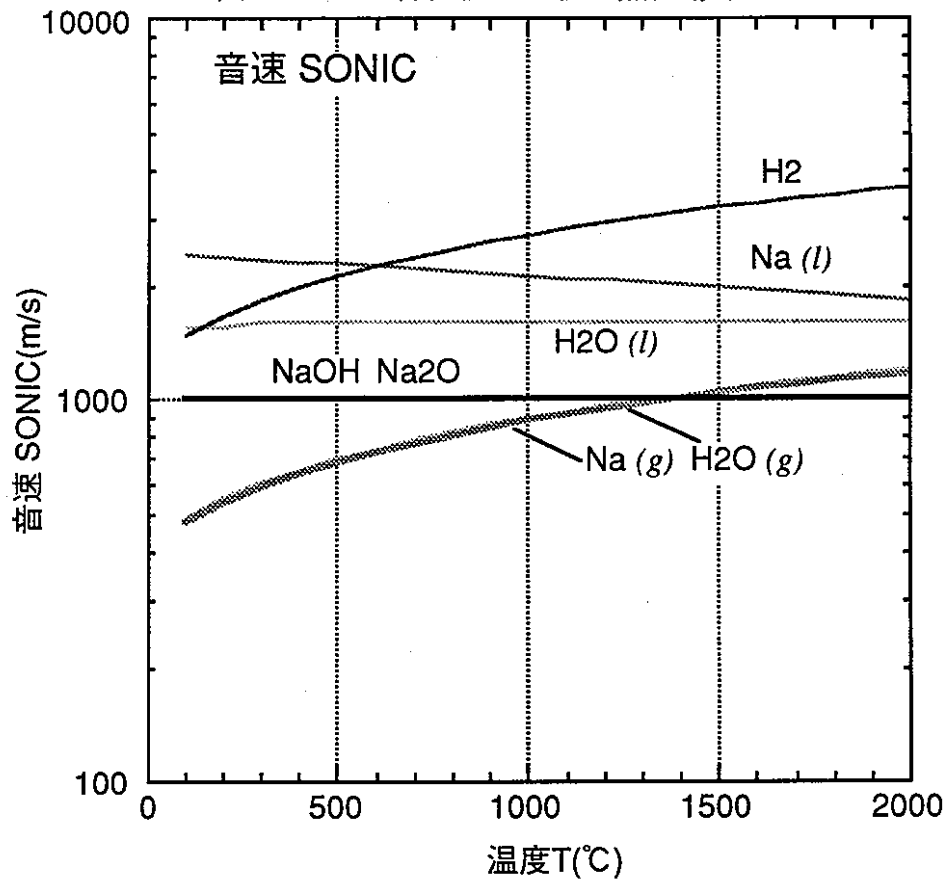


図3.3.3-15 物性値の比較：音速

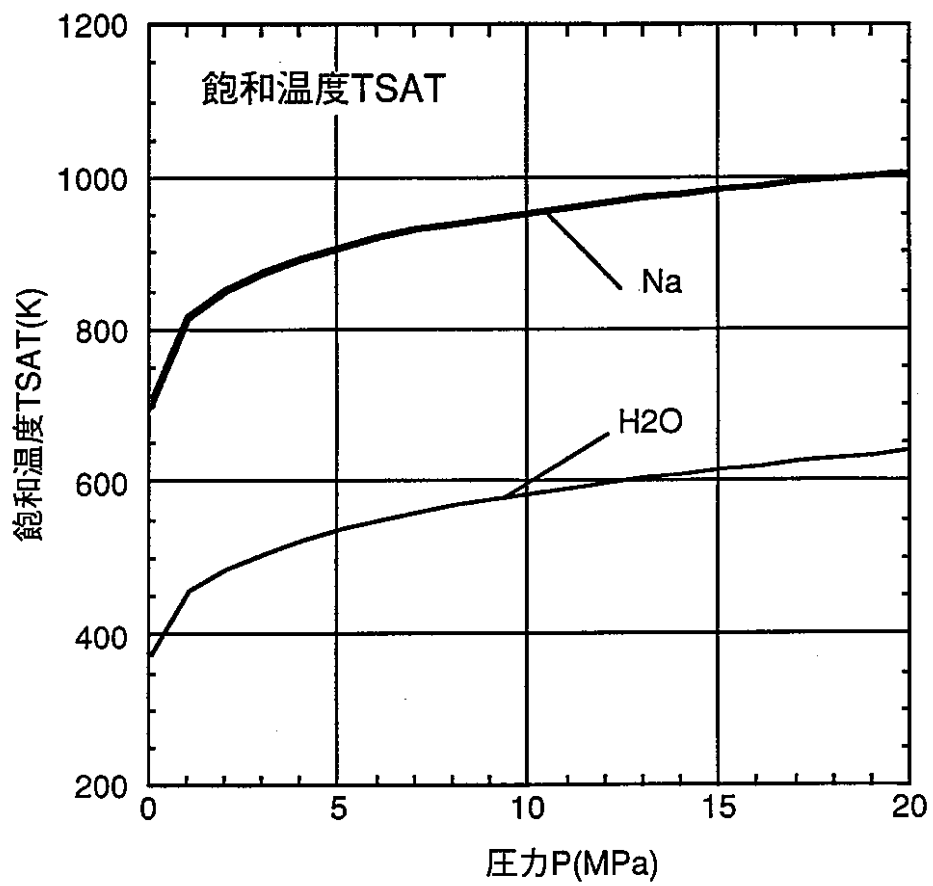


図3.3.3-16 物性値の比較：飽和温度

### 3. 3. 3. 5 気液二相流の相平均物性値の算出

7成分系の各化学種は、気液二相流の何れかの相に属しており、気液各相平均物性値は下記のモジュール(EVT・PROF)にて次のように算出される。

二相流流動計算部の圧力算出モジュール(PRESSD-PRSX-VTP)では、圧力分布算出時に随時密度を参照するために、直接PROFモジュールを呼び出す。

#### (1) 気液相平均温度 $T_m$ の算出

##### (a) 相平均温度 $T_m$ の探索関数 EVT

引き渡しされる変数(圧力  $p$ 、気液各相の内部エネルギー  $e$ 、各化学種のモル分率  $X$ )と  $T$  との関係式は、下記のように表される。この非線形方程式  $EVT=0$  となる温度  $T$  が  $T_m$  である。

$$EVT = e - \text{各相の}(X \times C_p(p, T) / \kappa(p, T) \times T) \text{ 総和} \dots \dots (3.3-19)$$

##### (b) 非線形方程式解の探索モジュール LIT・BIT

本コードにおいて探索モジュールは2つ用意している。LITは割線法(数値微分係数によるニュートン-ラフソン法)により、また、BITは二分法とはさみうち法の併用によって、非線形方程式( $EVT=0$ )の解  $T_m$  を探索する。

前述の物性値関数は全て単調関数を与えたため、どちらのモジュールを使用しても解の探索は比較的容易であるが、物性値関数の性質によっては探索モジュールを切り替えられるように配慮した。

#### (2) 気液相平均の物性値 $A_m$ の算出モジュール PROF

引き渡しされる変数(圧力  $p$ 、気液各相の内部エネルギー  $e$ 、各化学種モル分率  $X$ )より、各化学種の物性値  $A_c = A_c(T_m, p)$  および各相平均の物性値  $A_k$  を算出する。

気液相別々の平均物性値は、気液別々のモル分率による重み平均で算出される。すなわち、 $k$ 相に属する物性は( $k$ 相の各化学種のモル分率) $\times$ (各化学種物性値)の総和で算出される。燃焼解析などでは、質量分率  $x$  を用いる方法とモル分率  $X$  を用いる方法の2つのどちらかの方法が用いられているが、本コードではモル分率  $X$  を用いる方法を採用する。

ただし、物性値の算出方法に下記の違いがある。

- (a) 密度の場合：k相に分類される密度の総和  
(密度自身に各化学種に対するモル分率の情報が含まれているため)
- (b) 密度以外：k相に分類される(気液別々のモル分率 $X \times A_c$ )の総和

図3.3.3-17に、以上の物性値に関するモジュール関連をまとめる。

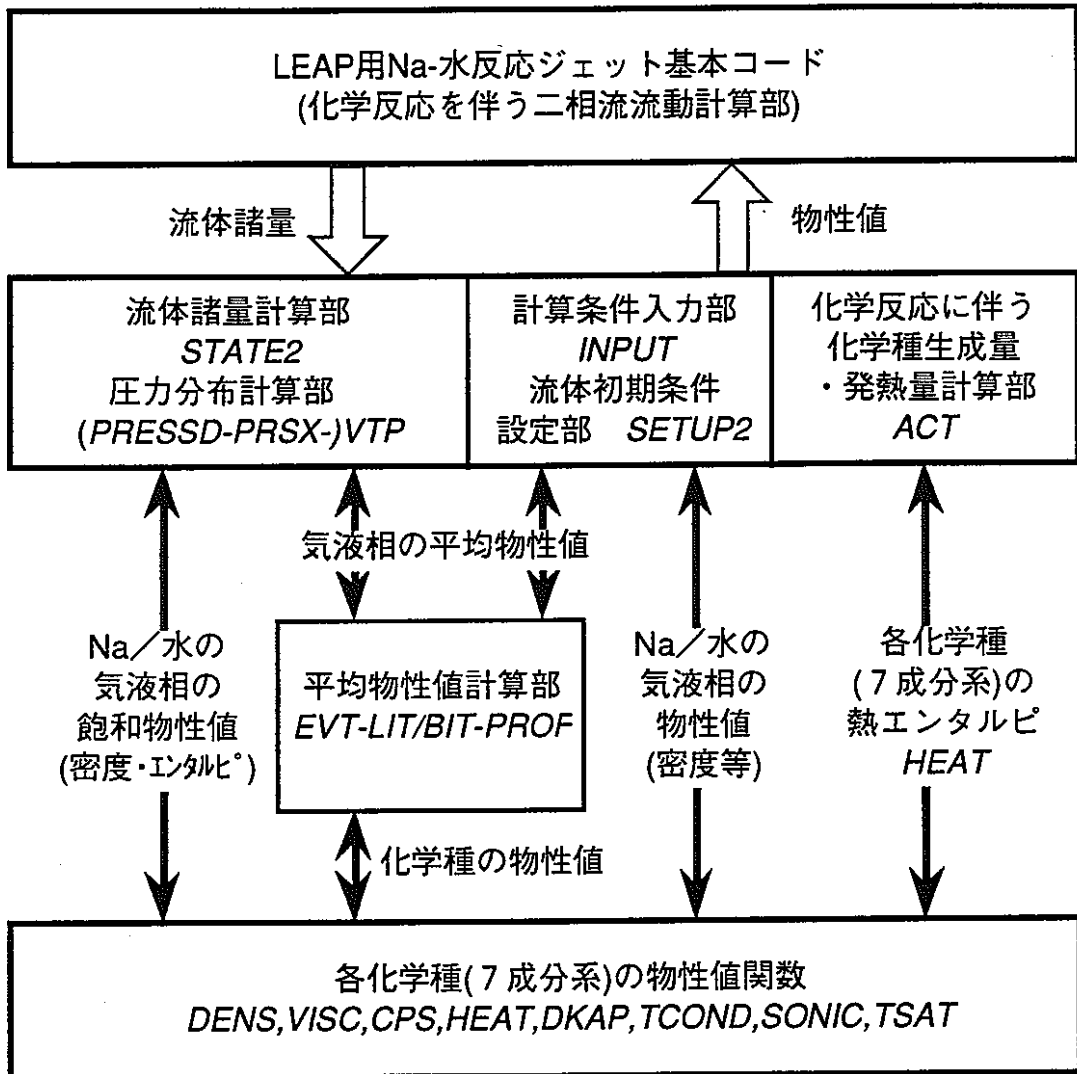


図3.3.3-17 物性値に関するモジュール関連

### 3. 3. 3. 6 入出力部分の変更

#### (1) 計算条件入力部 INPUT

図3.3.3-18に、開発コードの解析体系における初期条件の模式図を示す。

上流境界条件(INLET)および、下流境界条件(EXIT)設定部分の入力構造の変更は無い。従来のSIMAコードでは気液相のみであったが、開発コードでは、さらに化学種についての設定も必要である。よって、次のように計算条件入力部に設定を追加する。

(A) 上流境界条件(INLET)：気液相の $H_2O$ の密度・体積率を設定。

(B) 下流境界条件(EXIT)：気液相のNaの密度・体積率を設定。

(C) 化学反応パラメータ：F, K,  $\theta$ , 化学種の数, 各化学種の分子量

今回のモデルでは、Na-水反応中で発熱量の大きい8反応式(= 2 : NaOH/ $Na_2O$ 生成反応 $\times$ Na 2相 $\times$ 水 2相)を考慮している。しかし、今後実施の試験結果に対応して、気相Na(,液相 $H_2O$ )を考えないときには成分数の削減が、他の化学種を追加するときには成分数の増加が、それぞれ想定される。よって、化学種数については、今回の化学反応モデルの成分数(7成分)の変更も想定して、化学種に関する保存用配列変数の配列拡張性を与え、7より大きく設定しておく。

#### (2) 計算結果出力部 メインモジュール, MATOUT

従来のSIMAコードで出力していた圧力 $p$ 、体積率 $\alpha$ 、気液速度 $u/v$ に加えて、下記の項目を出力可能とする。

(A) 各化学種の諸量：密度 $\rho$ 、モル分率 $X$ 、質量分率 $x$ 等

(B) 気液相温度 $T$

(C) 流体平均温度 $T_m$ (気液相温度の平均温度：本コード解析では最重要値)

#### (3) リスタート用ファイル入出力部 RSTIN, RSTOUT

リスタート時には、初期設定部INPUT/SETUPモジュールを通過しないので、追加COMMON変数の保存の追加は必要である。ただし入出力の書式は、既存変数精度と同一とする。

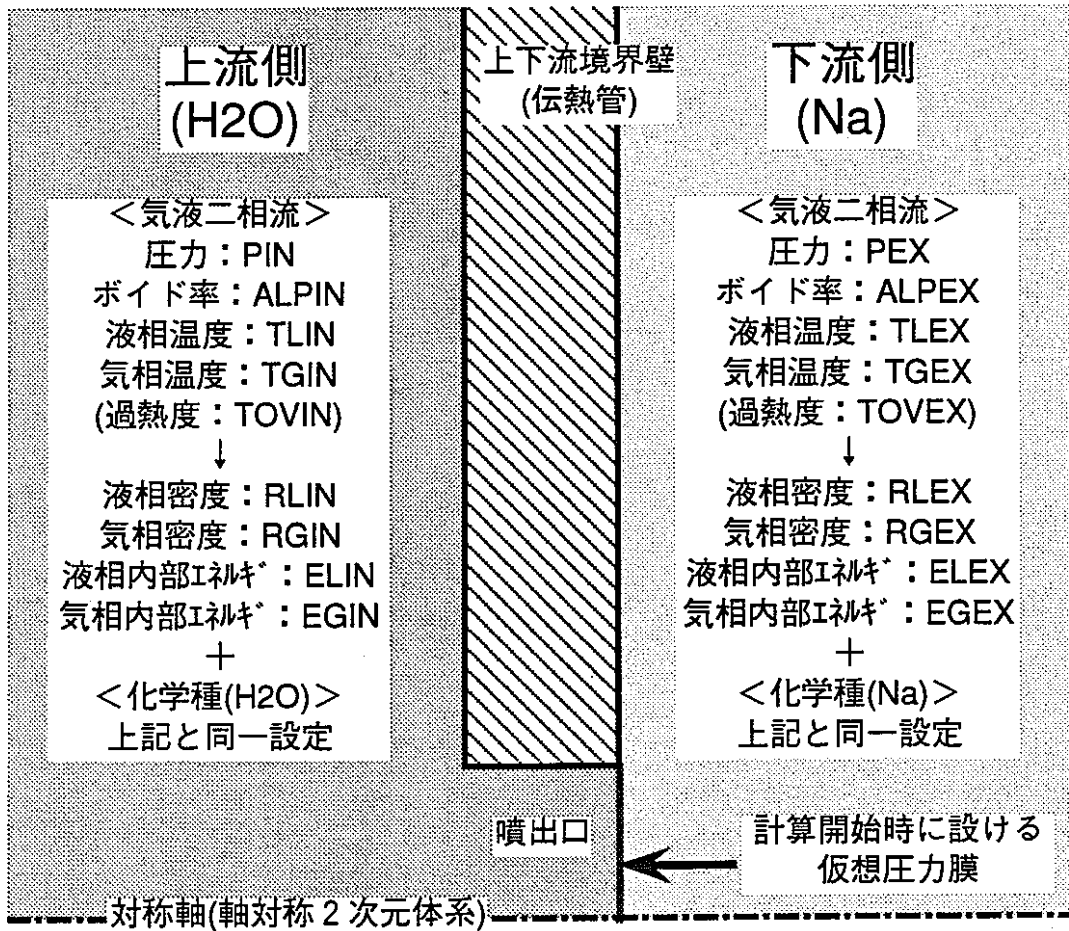


図3.3.3-18 解析体系における初期条件



### 3. 3. 3. 7 モジュール連結部の変更

#### (1) 初期処理部：INPUT

前述のように、上流・下流境界における流体諸量(圧力  $p$  ・気相体積率  $\alpha$  ・密度  $\rho$  ・温度  $T$  ・内部エネルギー  $e$ )を設定する。

- ・噴出口の上流側：水・水蒸気 ( $H_2O$ )
- ・噴出口の下流側：Na (液相)

#### (2) 初期設定部：SETUP2

(1) の結果を受ける化学種質量  $Q_C$  の初期設定を追加する。

計算セルの各化学種の質量保存量  $Q_C$  = 各化学種の (密度  $\times$  セル体積)

#### (3) 各計算時刻における流体諸量の更新部：STATE/STATE2

1つのタイムステップ終了時には、気液二相 ( $k = S/W$ ) の保存量 ( $Q$ ,  $UM$ ,  $VM$ ,  $E$ ) と同時に、化学反応計算に関する以下の変数の再計算を行う。

##### (A) 化学種 $c$ の質量保存量 $Q_C$

- (a) 初期値：初期処理部SETUP2の変更。
- (b) 変化量：CMSTRS, ACT, PHCHG, MMTRANの追加・変更。

(各化学種の質量保存式に基づく変化量)

(B) 物性値計算の変更：気液各相の平均温度から気液相の物性値を算出。

### 3. 3. 3. 8 COMMON変数の追加変更

従来のSIMAコードのCOMMON変数に加えて、開発コードでは下記の変数を追加する。

なお、密度RHO, RHC, RSAはあくまで温度・圧力から算出される物性値であり、計算セル中の質量保存量QS, QW, QCから算出されるセル内の質量密度とは異なることに注意されたい。

#### (1) 気液相の(平均)物性値

- ・ RHO：密度
- ・ AST：音速
- ・ TCN：熱伝導率
- ・ CPT：定圧比熱
- ・ UMT：粘性係数

#### (2) 化学反応に関連するパラメータ

- ・ CFF：水素/水モル転換比F
- ・ CTH：気相伝熱比 $\theta$
- ・ NCS：化学種の数
- ・ CRR：水素反応速度定数K
- ・ WEC：化学種分子量 $W_c$
- ・ IC(2,0:KMC)：化学種・成分の気液分類番号

#### (3) 各計算セルの化学種の保存量

- ・ RHC：化学種密度
- ・ XLC：化学種モル分率
- ・ QC：化学種質量
- ・ XSC：化学種質量分率

#### (4) 化学反応による生成項

- ・ SOM(2)：気液各相の質量移動量
- ・ SOT(2)：気液各相の伝熱量

#### (5) Na/水の気液相変化生成量の評価に関する変数

- ・ TSA(2)：飽和温度(各物質で1つ)
- ・ HSA(4)：気液相の飽和エンタルピー
- ・ RSA(4)：気液相の飽和温度における密度(飽和密度)
- ・ GSW(2)：気相→液相の相変化による質量移動量
- ・ GWS(2)：液相→気相の相変化による質量移動量

上記(5)の変数引数については、次の規約がある。

RSA/HSA(4)の「4」とは、(Na/水の化学種の数=2)×(気液相の数=2)である。引数の番号規約は化学種の番号規約と同一で、1-液相

H<sub>2</sub>O、2-気相H<sub>2</sub>O、3-液相Na、4-気相Naである。

TSA(2)の「2」とは、(Na/水の化学種の数=2)である。番号規約は1-H<sub>2</sub>O、2-Naと設定する。なお、各化学種に対して1つの飽和温度に気液相の飽和エンタルピが存在する。例えば、大気圧・100℃のH<sub>2</sub>Oに水・水蒸気が存在し、各相の飽和エンタルピは異なる。

### 3.3.3.9 備考

#### (1) 相・化学種・成分の分類規約

○相の分類                   : 相番号 k = 1 液相、k = 2 気相

○化学種・成分の分類: 7成分の気液相への分類は下表の通り。

表3.3.3-2 化学種・成分の分類

気相に分類される化学種	気相のH <sub>2</sub> O	気相のNa	H <sub>2</sub>	
成分番号 c	2	4	5	
液相に分類される化学種	液相のH <sub>2</sub> O	液相のNa	NaOH	Na <sub>2</sub> O
成分番号 c	1	3	6	7

#### (2) 用語の表記と意味

「過熱度」と「過飽和度」についての表現には、次の違いがある。どちらも「飽和温度に対する温度差」の意味がある。過熱度は気液相両方に使用する。それに対して過飽和度は、蒸発(飽和)温度以上となっても液相のまま保持される場合の温度差を意識した表現である。

「生成速度」と「生成量」についての表現には、次のように意味の違いがある。「生成速度」は計算タイムステップ間あたりの生成量(変化量)である。(生成)量/時間の次元を持つので「速度」と表記する。一方、「生成量」はタイムステップ間の生成速度の時間積分量である。これは生成速度×時間(タイムステップ)=生成量の次元を持つ。

#### (3) SIMAにおける保存量

SIMAでは有限体積法を採用しているため、気液二相流の保存量を(保存量)×

(セル体積  $V$ )の単位で、保存量(密度  $\rho$ ，運動量  $\rho u$ ，内部エネルギー  $e$ )を保存している。

#### (4) 単位系の違い

従来のSIMAコードでは、MKS単位系(温度セルシウス $^{\circ}\text{C}$ )であったが、今回の反応基本コード開発作業時に完全SI単位系(温度ケルビン $\text{K}$ )に移行した。その理由は、一般に各化学種の物性値はSI単位系で記述されることが多いためである。

ただし、入出力時には $^{\circ}\text{C}$  -  $\text{K}$ 相互の変換に対応できるようにする。

### 3. 4 コード開発手順

ナトリウム-水反応ジェット基本コードの開発手順を図3.4-1に示す。ここでは、平成7年度に実施した反応コードの開発設計における、下記の開発計画の設計の成果を踏まえて記載している。

蒸気噴流解析の実績豊富な日立開発の2次元SIMAコードは、(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コードは技術的にも最適なコードといえる。また、(a)の特徴からSIMA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を基本に改修する方法が最適であると、コード開発設計では判断された。

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、化学反応モデルの検証を行う第2段階、これらのモデルをカップリングさせた反応ジェット基本コードの開発を行う第3段階、ナトリウム-水反応に関する基礎実験により開発コードの試計算を行う第4段階に分類される。

段階 1：二流体モデルの検証

手順	開発内容	開発課題
(1)	二流体モデルを用いた 二相流解析コードの試計算 (水・蒸気系の噴流問題) (a)水中への高温高圧水の噴出 (b)水中への飽和・過熱蒸気の噴出	<ul style="list-style-type: none"> <li>・数値安定化法の改良(適宜検討)</li> <li>・実験による解析検証 (公開文献：蒸気ジェットの実験)</li> </ul>
↓		
段階 2：化学反応モデルの検証		
(2)	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
↓		
段階 3：基本コードの開発		
(3)	基本コードの開発と Na-水反応ジェットの解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデルのカップリング</li> <li>・二相流流動解析部分のコード改造</li> <li>・物性値・構成方程式の整備</li> </ul>
↓		
段階 4：試計算		
(4)	Na-水反応噴流現象の解析	Wastage基礎実験等の試計算

図3.4-1 コード開発方法

### 3. 5 反応ジェット基本コードの試計算

#### 3. 5. 1 ナトリウム-水反応ジェットの解析(動作確認)

2つのモデルのカップリングにより、解析モデルの非線形性は強くなることが予想される。Na・水の流動条件を広範囲に亘って変化させてコードを動作確認し、解析条件に対するコードの安定性を確認する。

蒸気発生器水リーク時に発生が想定されるナトリウム-水反応ジェット現象に類似した水・蒸気の噴流体系において、本開発の基礎とする二相流解析コードの解析可否・評価妥当性を確認する。

図3.5-1に解析体系を示す。解析条件は3. 1の試計算条件と同様である。上流条件は圧力16MPa、ボイド率 $\alpha_{in}=100\%$ の飽和水蒸気、下流は圧力0.3MPaのNaで、上流・下流ともに500℃を設定した。この条件は、実機蒸気発生器でも想定される範囲の条件である。

解析メッシュおよびタイムステップについては、次のように定めた。まず、実機体系程度の $\phi 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ の範囲を、解析体系とした。解析開始より噴出口からの流量が安定になったのち、解析体系内でジェットがある程度発達するまで、すなわちある程度の数の解析メッシュの範囲(約0.1m)に噴流が発達するまでに要する時間は、噴出速度を音速のオーダー(100m/s)と仮定すれば、1ms程度と推定される。この時間までの解析コスト(計算機稼働時間)をなるべく小さくするためには、より大きなタイムステップで計算安定条件を満足させる必要がある。この理由により、解析メッシュサイズが最小値である噴出口の寸法を大きく設定し、噴出口径は3. 1の試計算条件よりやや大きい $\phi 8\text{ mm}$ とした。以上の設定により、タイムステップ $=0.5\mu\text{ s}$ で解析できた。

以降の解析結果の表現として用いるボイド率等の等値線分布では、先の3. 1. 3. 3に述べた「等間隔座標表現」で解析結果を表現する。これは、解析結果を分割メッシュ座標上で補間して等値線を表現すると、メッシュの細かい噴出口近傍での流体諸量の変化が大きいため、うまく補間されずに噴流形状の変化が捉え難くなることを避けるためである。メッシュ分割の座標情報を無視して等間隔座標上で表現すれば、各計算セルの数値をそのまま等値線表現に反映でき、解析結果を容易に確認・検討できる。

(1) Na中への蒸気噴出問題（反応無しの場合）

仮定の反応のないNa-水噴流体系を解析する。今回のコード開発では、Na-水反応7成分系の各化学種物性値と気液相平均物性値の算出部分に変更がある。そのため、本基本コード開発後の追加・修正部分の動作確認を、まずこの体系で行う。

まず、噴出口からの噴出流量を確認したところ、下流にサブクール水を設定した場合と同様に、噴出口φ8mmからの噴出流量は約1kg/s(0.9kg/s)であった。これは、下流のNaとサブクール水では密度がほぼ同程度であり、さらに噴出口では臨界流で流出していることから、下流の影響を受けないためと考えられる。

図3.5-2に等ボイド率線を示す。経過時間と共に蒸気噴流が遠方へ拡大する。噴出口近傍では拡散により広がりが見られるが、遠方部では噴流太さが小さく、噴出口径程度の太さである。これは、対称軸近傍では噴出動圧の影響が大きく、下流側受圧面=噴出口断面積が小さいことに起因するものと推定される。

このように、臨界流量や噴流外径の解析結果が従来解析に類似した結果を得ており、コード改修後の物性値・気液二相流流動計算には問題のないことを確認した。

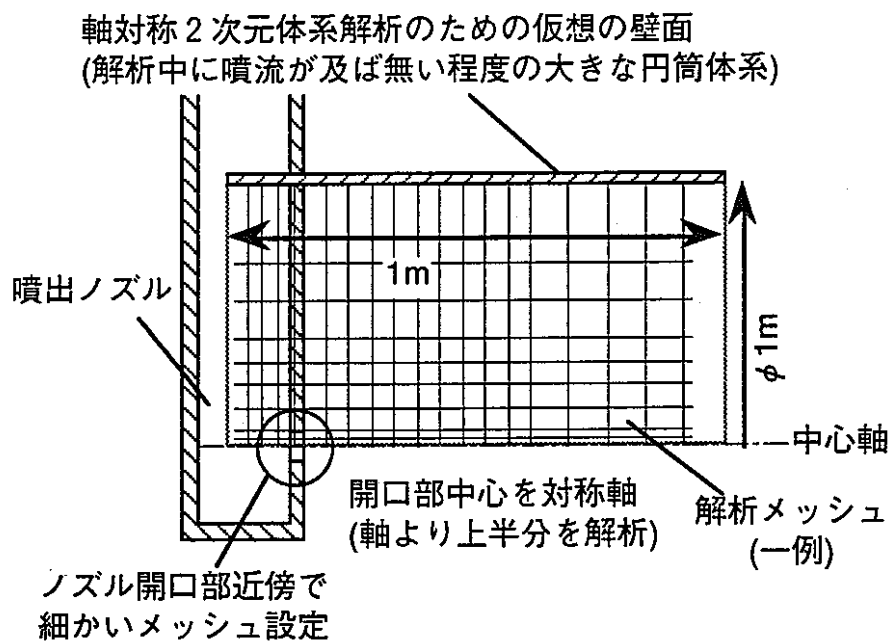


図3.5-1 試計算における解析体系



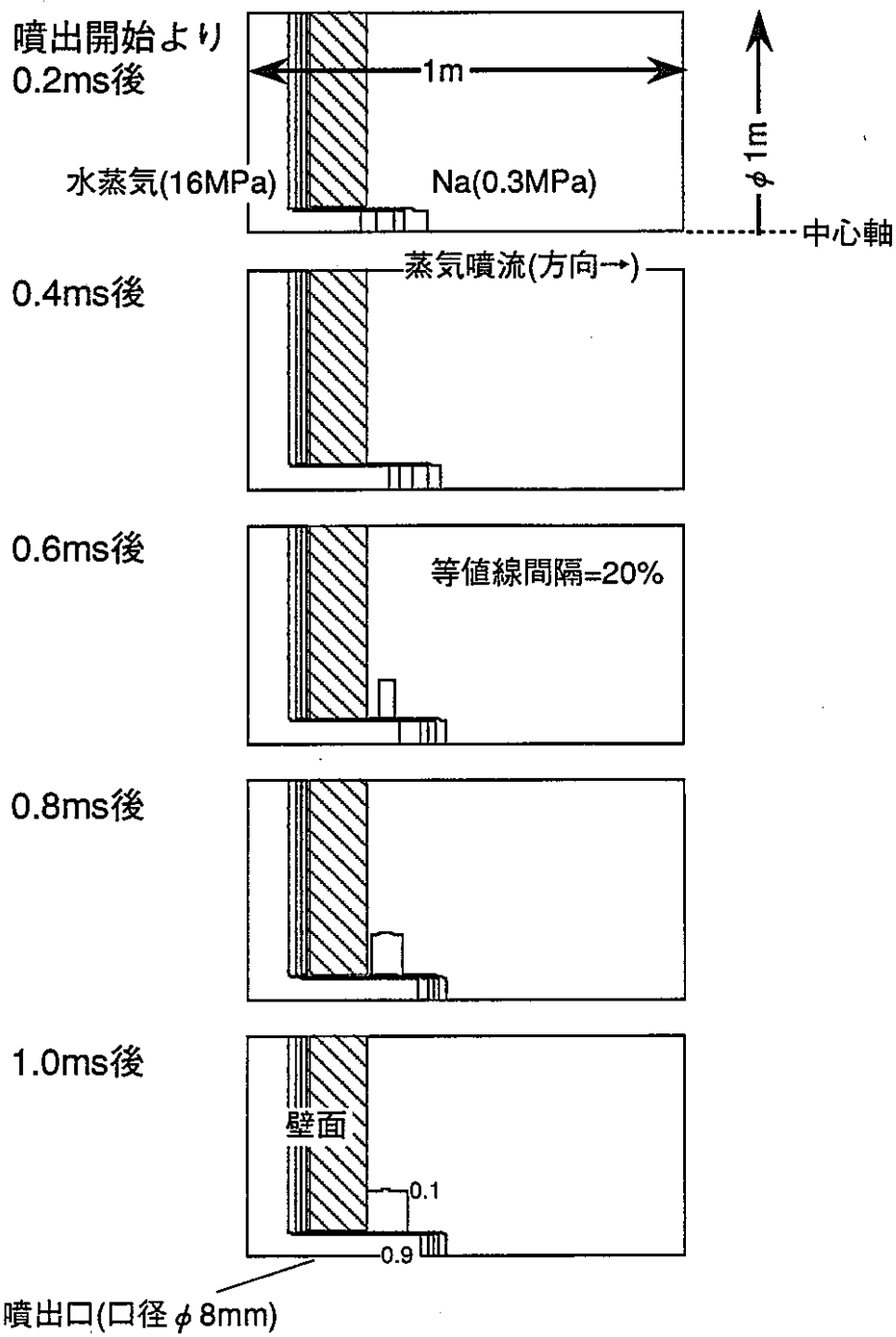


図3.5-2 等ボイド率線：等間隔座標表現  
(Na中への蒸気の噴出・反応無しの場合)

## (2) Na中への蒸気噴出問題 (反応有りの場合)

次に反応の有るNa-水噴流体系を解析する。今回のコード開発では、化学反応モデルのカップリングに大きな特徴と追加・変更があることから、(1)の動作確認後に化学反応モデルの考慮に伴う追加・修正部分の動作確認をする。

図3.5-3にボイド率、図3.5-4に気液相平均の温度、図3.5-5に気相中に占める水素の質量分率の、それぞれの分布の時間変化を示す。解析条件は、水素反応速度定数 $K=0.01$ 、水素/水モル転換比 $F=0.75$ 、気相伝熱比 $\theta=1\%$ 、相変化速度定数 $\eta=0$ と設定した。なお、この条件を、以降の化学反応パラメータ依存性を確認するための試計算における代表条件に設定している。噴出流量は臨界流であるため、反応のない場合と同じ値であった。しかし、仮に反応が上流へ遡及することがあれば、この値も変化すると考えられる。

図3.5-3の等ボイド率線には、反応のない場合と同様に経過時間と共に蒸気噴流が遠方へ拡大する傾向が見られる。今回の解析では、反応のない場合と比較して噴流形状の顕著な違いは見られなかった。これは、本解析条件では、反応による噴出水蒸気の体積低下と水素発生との、気相体積変化の相殺効果が現われたためであると考えられる。

図3.5-4の気液相平均温度には、対流拡散項の作用が大きいため、反応ジェットの広がりによって、周囲温度(500℃)よりも高い温度領域=反応部分の遠方への拡大が時間経過と共に見られる。すなわち、本解析では流動・対流に伴う物質・温度の拡散が支配的となると推定される反応ジェット現象を解析できているといえる。また、反応領域の温度は700~800℃程度であり、簡略化モデルで見られた1000℃以上の高温領域の発生は見られない。これは、対流による温度(内部エネルギー)拡散効果が大きいためと考えられる。

図3.5-5の水素の質量分率分布には、水素濃度の高い領域が時間経過とともに噴流下流への移動の様子が見られる。このことから、化学種の質量保存式の解析機能も動作していることを確認した。

以上の結果より、反応ジェットの構造は次のように推定される。

上流 (水蒸気) 側 ←-----→ 下流 (Na) 側

高圧水蒸気・・・反応領域=高温部・・・水蒸気・水素拡散領域・・・Na

つまり、水素濃度の高い領域は、高温部よりもやや下流側に広がる傾向が見られる。

このように、ナトリウム-水反応の化学反応モデルのカップリング動作を確認し、不均一系反応(気液反応)現象が本コードにより解析可能であることを確認出来た。

水素反応速度定数 $K=1.0e-2$   
 水素/水モル転換比 $F=0.75$   
 気相伝熱比 $\theta=1\%$   
 相変化速度定数 $\eta=0$

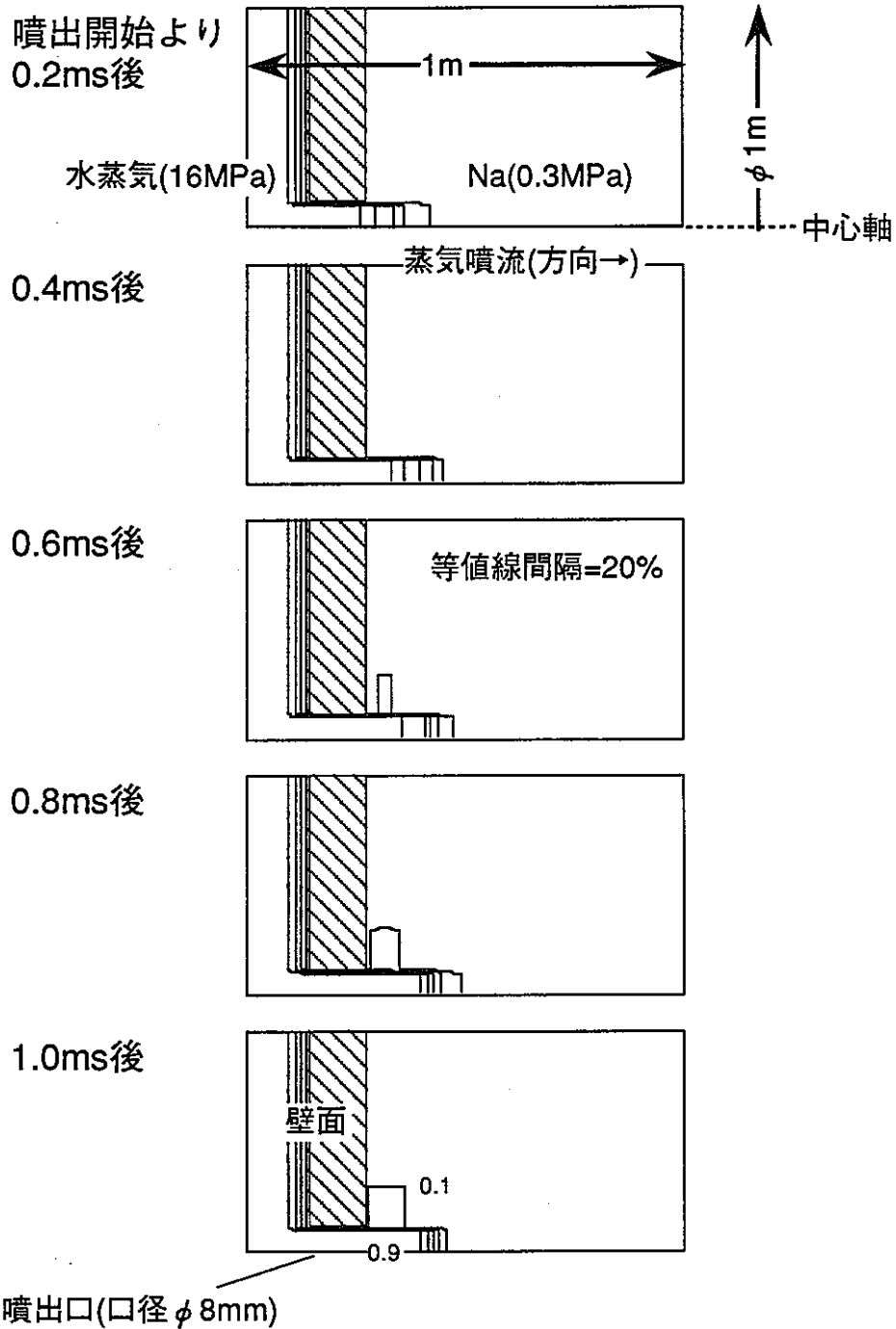


図3.5-3 等ポイド率線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合の代表例)

水素反応速度定数 $K=1.0e-2$   
 水素/水モル転換比 $F=0.75$   
 気相伝熱比 $\theta=1\%$   
 相変化速度定数 $\eta=0$

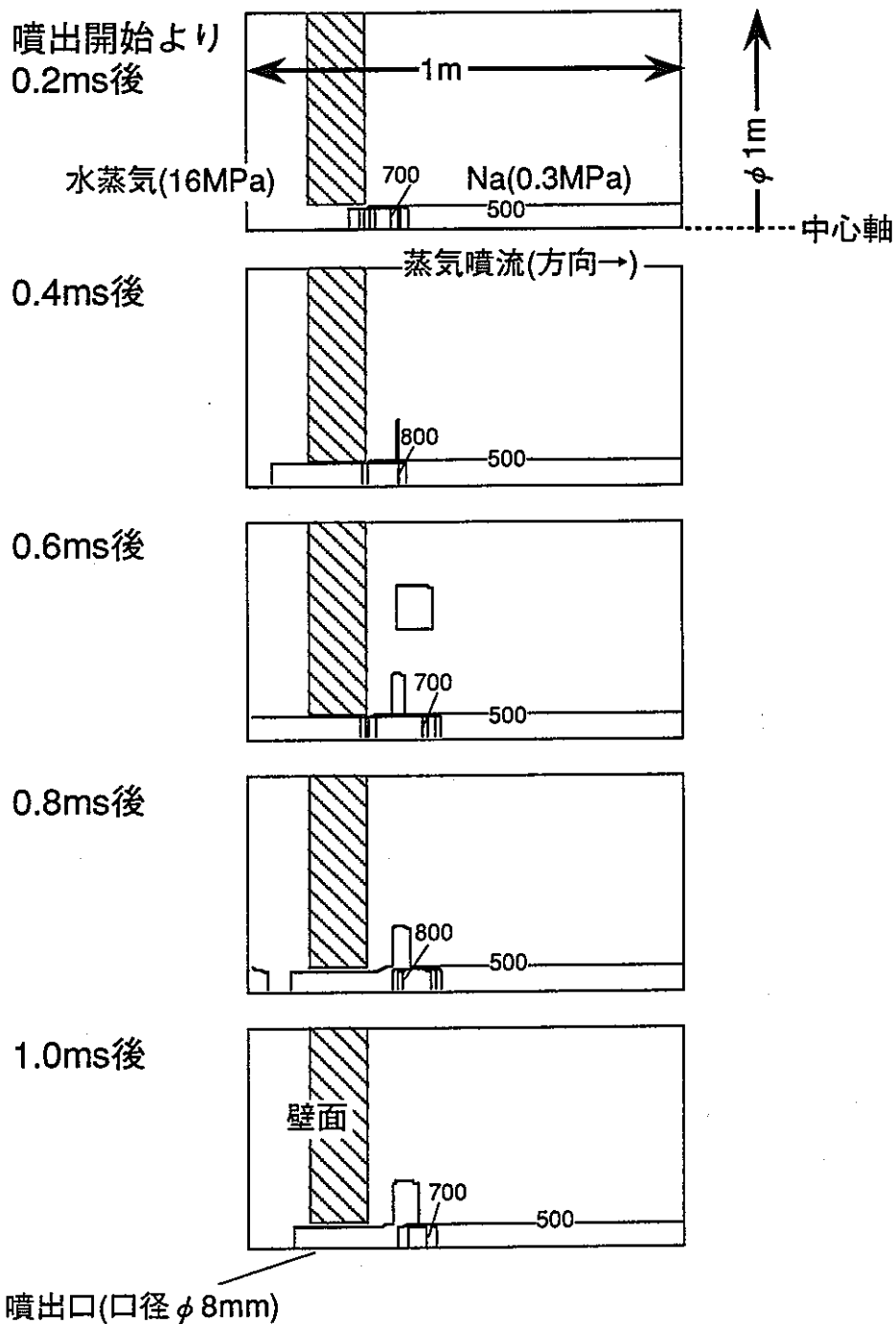


図3.5-4 気液相の平均温度の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合の代表例)

水素反応速度定数 $K=1.0e-2$   
 水素/水モル転換比 $F=0.75$   
 気相伝熱比 $\theta=1\%$   
 相変化速度定数 $\eta=0$

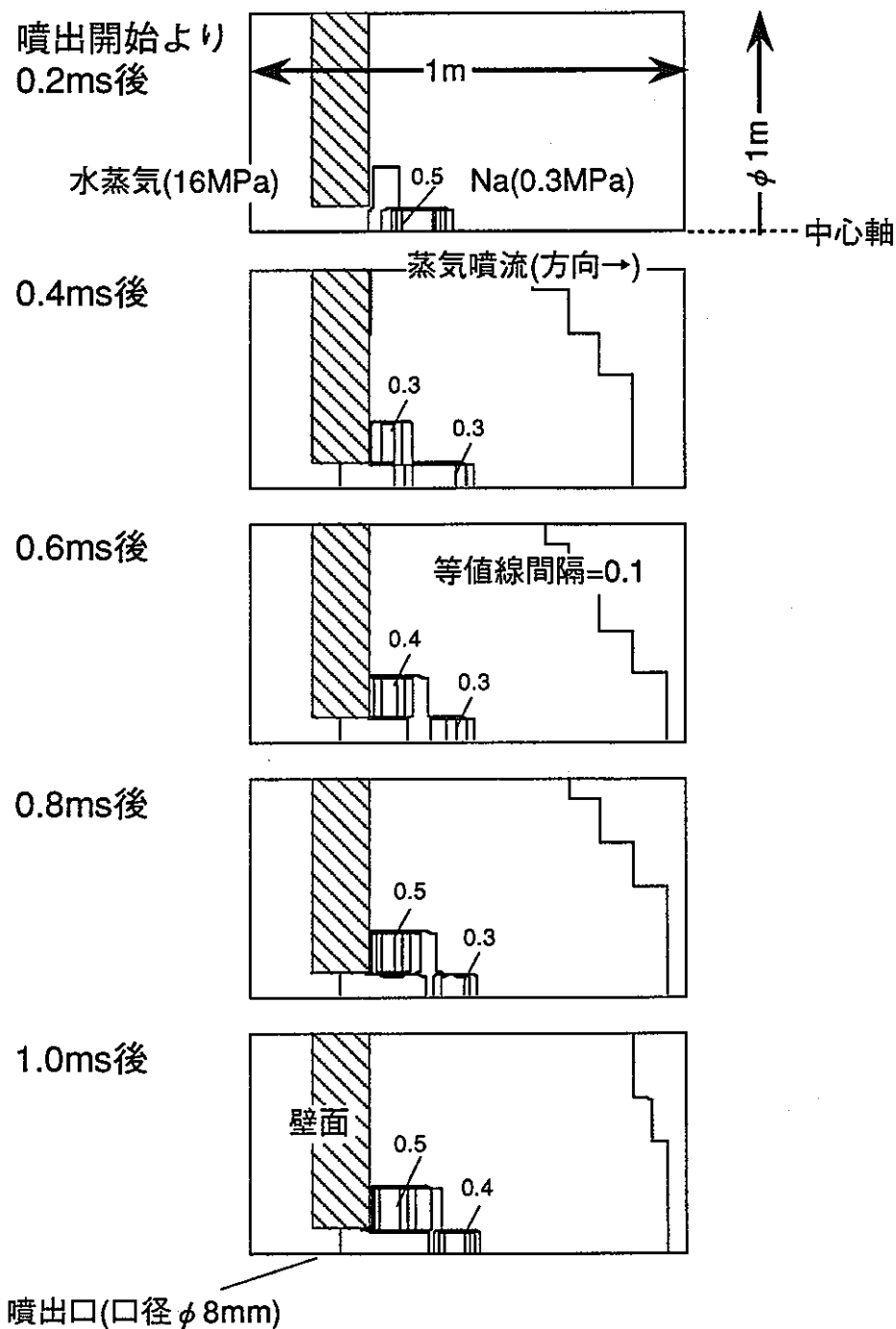


図3.5-5 気相中の水素の質量分率の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合の代表例)

### 3. 5. 2 化学反応モデルパラメータの依存性の確認

化学反応モデルには、水素/水モル転換比 $F$ 、反応速度定数 $K$ 、気相伝熱比 $\theta$ のチューニングパラメータとした不明量が含まれている。簡略化された化学反応の試計算と同様、コード動作確認とともに上記のパラメータの解析結果への影響を広範囲に確認しておく必要がある。化学反応モデルで導入した3つのパラメータ（水素/水モル転換比 $F$ 、水素反応速度定数 $K$ 、気相伝熱比 $\theta$ ）のうち、その大きさの検討が付けにくい $K$ について、まずパラメータサーベイしたのち、その他のパラメータについても広範囲に動作確認を行った。

#### (A) 水素反応速度定数 $K$ の依存性

図3.5-6にボイド率、図3.5-7に気液相の平均温度、図3.5-8に気相中の水素の質量分率の、時刻1 msにおける水素反応速度定数 $K$ 依存性の比較結果を示す。代表解析条件は、水素/水モル転換比 $F=0.75$ 、気相伝熱比 $\theta=1\%$ 、相変化速度定数 $\eta=0$ と設定した。

ボイド率分布には顕著な変化は見られないが、 $K$ が大きいほど時間当たりの反応量は大きくなるため、時間当たりの平均温度上昇と水素発生量は大きいことが分かる。 $K=10^{-6}$ では、水素発生により反応の進行は確認されるが、噴流の動圧(運動エネルギー)に内部エネルギーの一部が変わることによる静温度低下と相殺するために平均温度の上昇は小さく、等値線では補足されていない。一方 $K=10^{-2}$ では、反応による温度上昇が顕著に現われた。また、噴流の対称軸方向への温度拡散が大きいですが、半径方向への温度拡散は小さくなっている。これは、温度拡散に対して、大きな速度を持った噴流の対流拡散の効果が熱伝導効果より大きく現われたためであると考えられる。

短時間の解析ではあるが $K=0\sim 10^{-2}$ の範囲において動作を確認したが、以降の試計算では、 $K=10^{-2}$ を基準条件として他の化学反応パラメータに対する動作を確認する。

#### (B) 水素/水モル転換比 $F$ の依存性

図3.5-9にボイド率、図3.5-10に気液相の平均温度、図3.5-11に気相中の水素の質量分率の、時刻1 msにおける水素/水モル転換比 $F$ 依存性の比較結果を示す。代表解析条件は、水素反応速度定数 $K=10^{-2}$ 、気相伝熱比 $\theta=1\%$ 、相変化速度定数 $\eta=0$ と設定した。

ボイド率分布には顕著な変化は見られないが、 $F$ が大きいほど水素生成量も大きいことが分かる。また、 $\text{Na}_2\text{O}$ の生成熱が $\text{NaOH}$ より小さいために $F$ が小さいほど温度上昇は大きいことも分かる。このように、本コードによる解析におけるパラメータ $F$ の依存性は、前

述の簡略化された化学反応モデル同様であることを確認した。

### (C) 気相伝熱比 $\theta$ の依存性

図3.5-12にボイド率、図3.5-13に気液相の平均温度、図3.5-14に気相中の水素の質量分率の、時刻 1 msにおける気相伝熱比  $\theta$  依存性の比較結果を示す。代表解析条件は、水素反応速度定数  $K=10^{-2}$ 、水素/水モル転換比  $F=0.75$ 、相変化速度定数  $\eta=0$ と設定した。

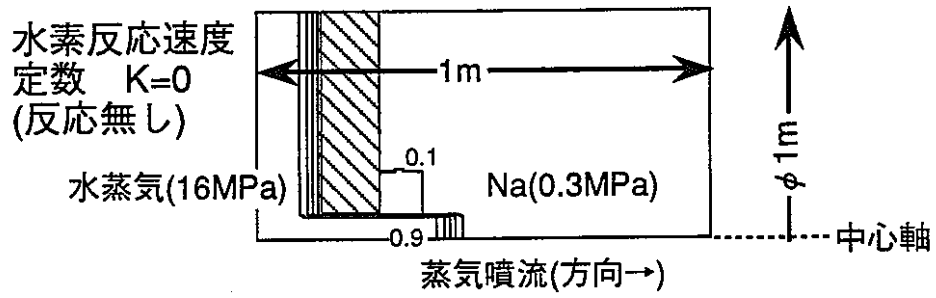
$\theta$  を変化させても、ボイド率分布、水素の分布には顕著な変化は見られなかった。これは、 $\theta$  の変化範囲が小さいために気液各相への熱の分配の変化が小さいために、反応ジェット内/外部の双方の領域における温度変化が顕著に現われないためであると推定される。 $\theta$  が小さいほど、平均温度の計算セルにおける最大値はやや大きい傾向が見られる。しかし、等値線の形状の差異は小さい。このように、本コードによる解析におけるパラメータ  $\theta$  の依存性は、前述の簡略化された化学反応モデル同様であることを確認した。

### (D) 相変化速度定数 $\eta$ の依存性

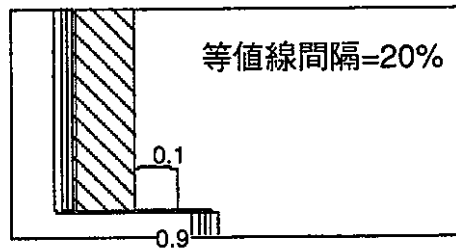
図3.5-15にボイド率、図3.5-16に気液相の平均温度、図3.5-17に気相中の水素の質量分率の、時刻 1 msにおける相変化速度定数  $\eta$  依存性の比較結果を示す。代表解析条件は、水素反応速度定数  $K=10^{-2}$ 、水素/水モル転換比  $F=0.75$ 、気相伝熱比  $\theta=1\%$ 設定した。

$\eta$  を変化させても、ボイド率分布、水素の分布には顕著な変化は見られなかった。今回の試計算の温度/圧力条件においては、相変化の効果は水側(反応ジェット上流の高圧状態から噴出=減圧時に、液相の水側の相変化=蒸発効果)に顕著に現われると推定される。しかし、本条件では上流側に液相の水がほとんど無いために、 $\eta$  による相変化の影響が顕著に現われないためであると推定される。また、図示した解析よりも大きな  $\eta$  設定した場合は、二流体モデルにおける一方の相の消滅(水の蒸発)による計算不能が発生したために、途中で解析不能となった。今後、上記の問題が起こらないような相変化モデルの改良を検討する必要がある。

このように、短時間の試計算によりコードの動作を確認し、コード動作安定性のパラメータ依存性やパラメータの解析結果への影響を確認できた。

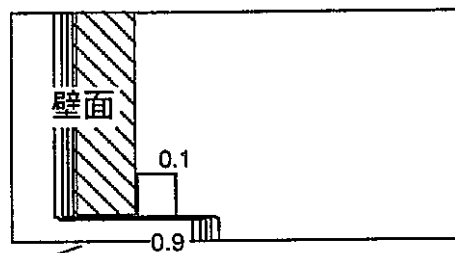


$K=1.0e-6$



水素/水モル転換比  $F=0.75$   
 気相伝熱比  $\theta=1\%$   
 相変化速度定数  $\eta=0$

$K=1.0e-2$



噴出口(口径  $\phi 8\text{mm}$ )

図3.5-6 等ポイド率線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：K依存性)



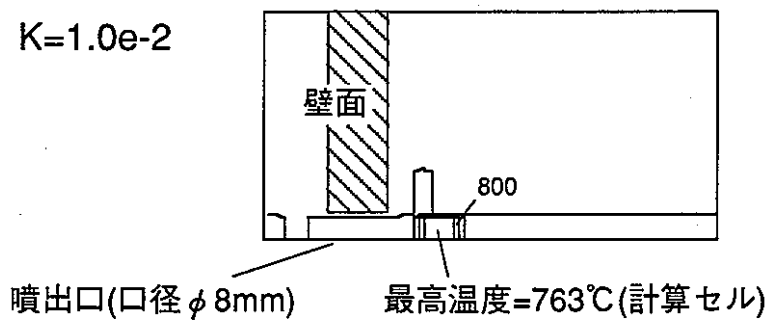
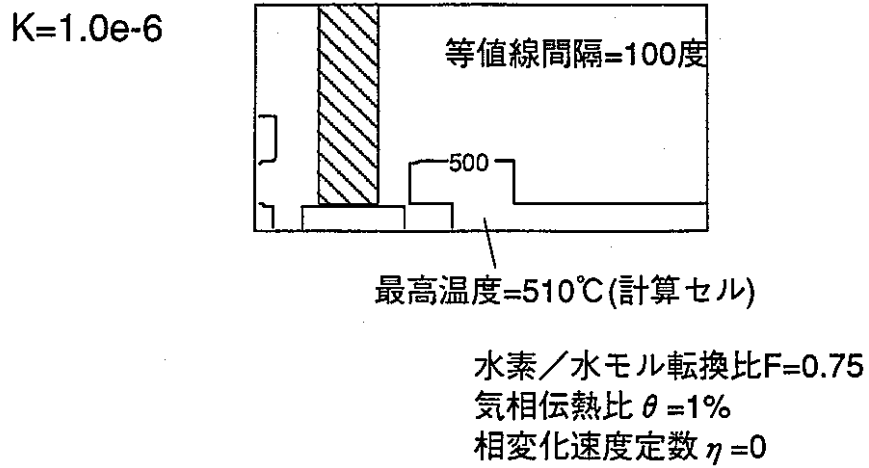
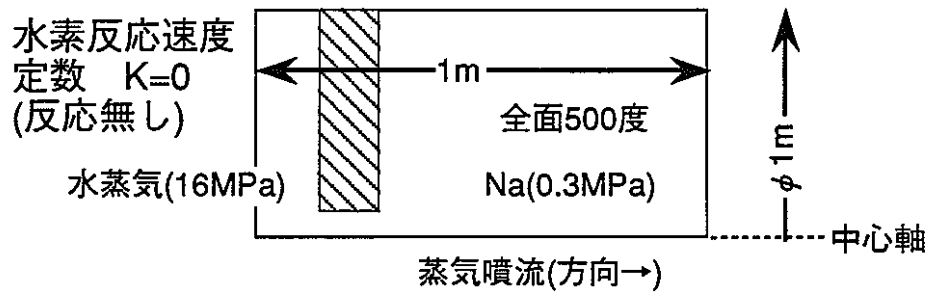
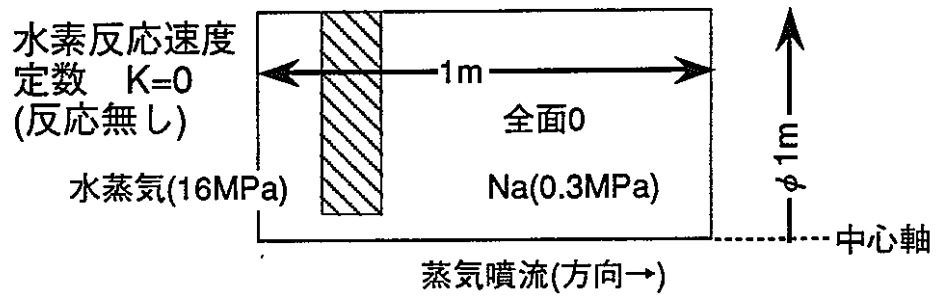
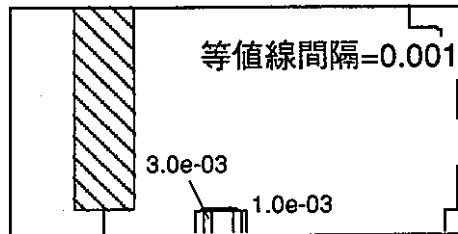


図3.5-7 気液相の平均温度の等値線：等間隔座標表現  
(Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：K依存性)

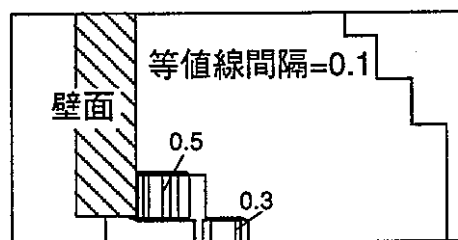


$K=1.0e-6$



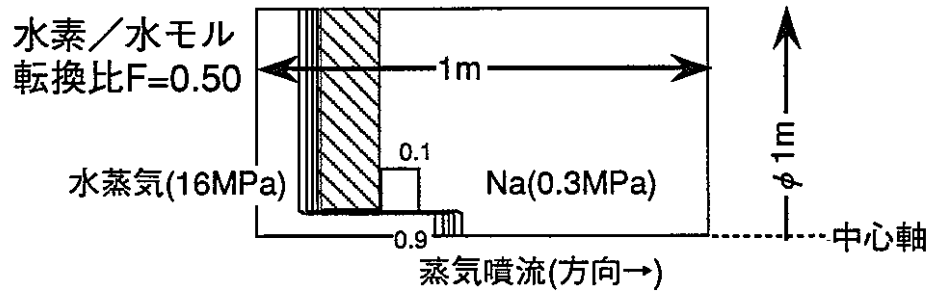
水素/水モル転換比  $F=0.75$   
 気相伝熱比  $\theta = 1\%$   
 相変化速度定数  $\eta = 0$

$K=1.0e-2$

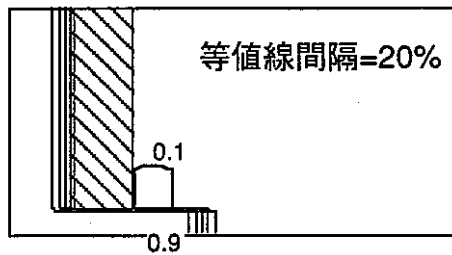


噴出口(口径  $\phi 8mm$ )

図3.5-8 気相中の水素の質量分率の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：K依存性)

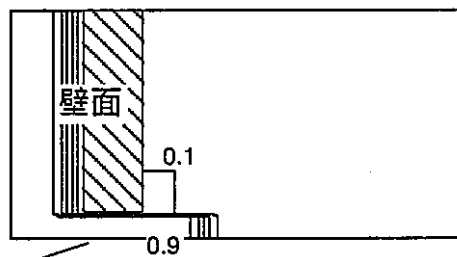


$F=0.75$



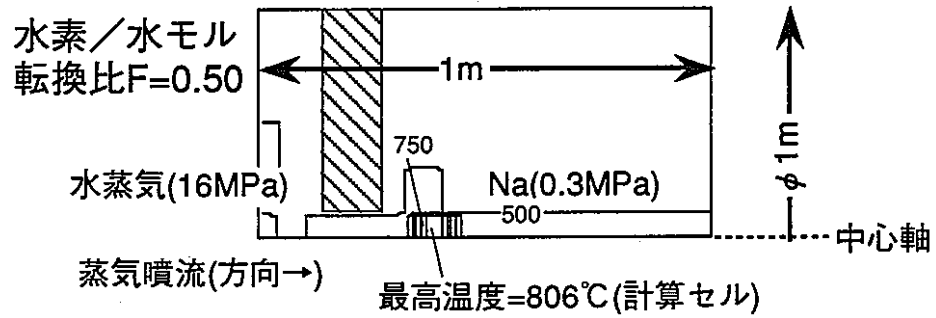
水素反応速度定数 $K=1.0e-2$   
 気相伝熱比 $\theta=1\%$   
 相変化速度定数 $\eta=0$

$F=1.0$

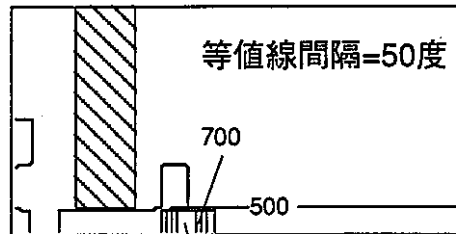


噴出口(口径 $\phi$  8mm)

図3.5-9 等ボイド率線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：F依存性)



$F=0.75$



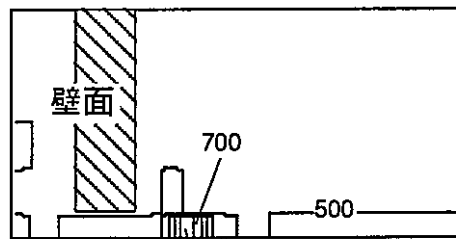
最高温度=763°C(計算セル)

水素反応速度定数  $K=1.0e-2$

気相伝熱比  $\theta = 1\%$

相変化速度定数  $\eta = 0$

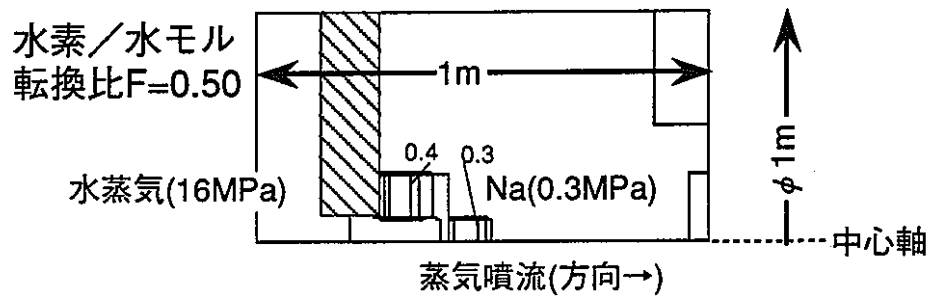
$F=1.0$



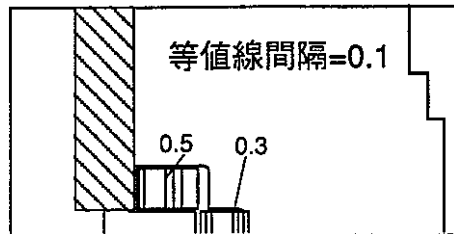
噴出口(口径  $\phi 8mm$ )

最高温度=738°C(計算セル)

図3.5-10 気液相の平均温度の等値線：等間隔座標表現  
(Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：F 依存性)

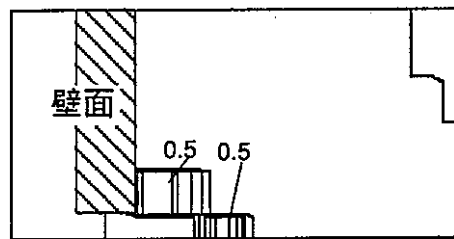


F=0.75



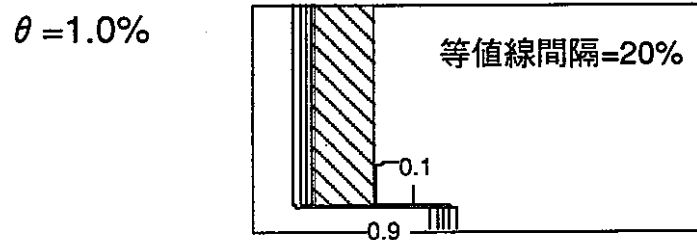
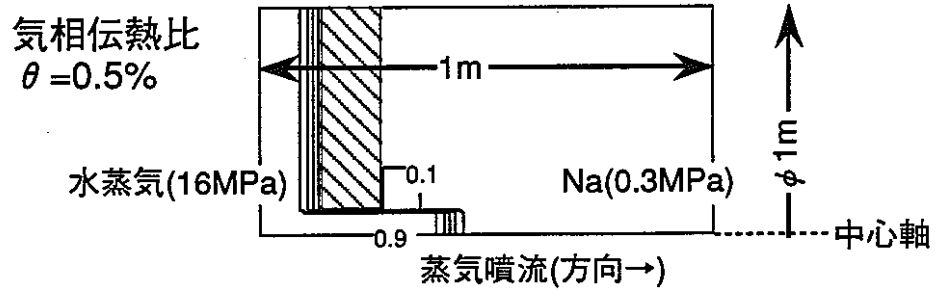
水素反応速度定数  $K=1.0e-2$   
 気相伝熱比  $\theta=1\%$   
 相変化速度定数  $\eta=0$

F=1.0



噴出口(口径  $\phi 8\text{mm}$ )

図3.5-11 気相中の水素の質量分率の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：F依存性)



水素反応速度定数  $K=1.0e-2$   
 水素/水モル転換比  $F=0.75$   
 相変化速度定数  $\eta=0$

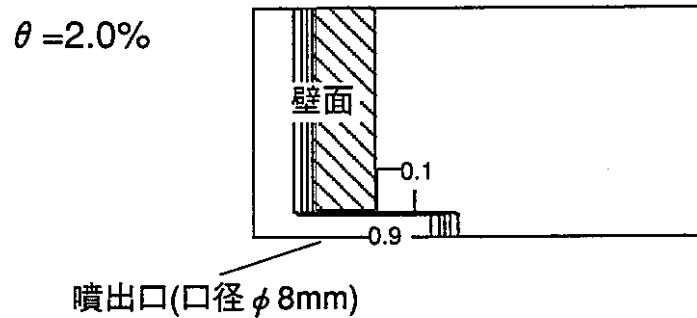
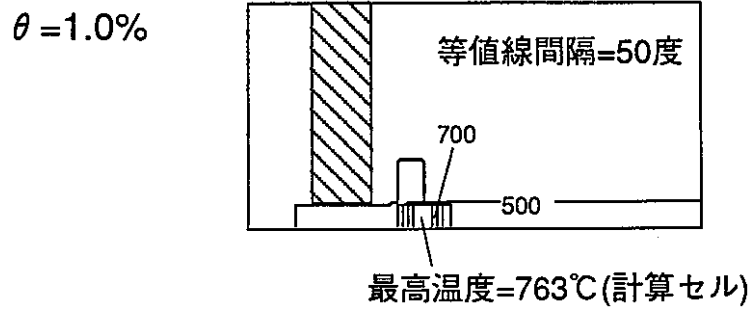
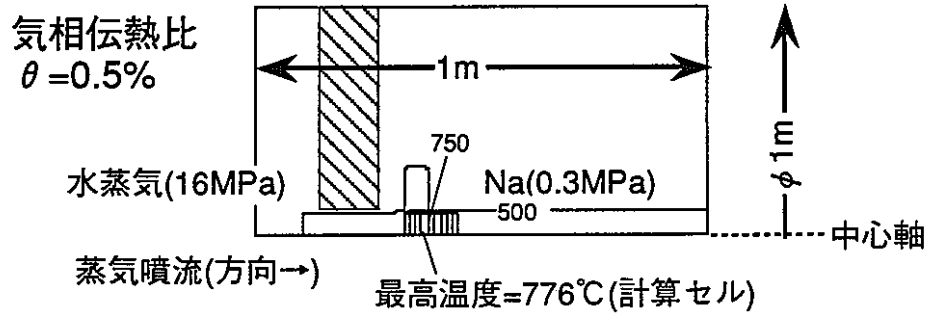


図3.5-12 等ボイド率線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合： $\theta$ 依存性)



水素反応速度定数  $K=1.0e-2$   
 水素/水モル転換比  $F=0.75$   
 相変化速度定数  $\eta=0$

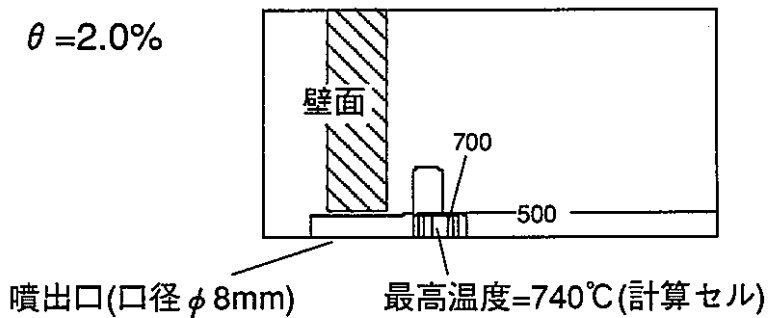
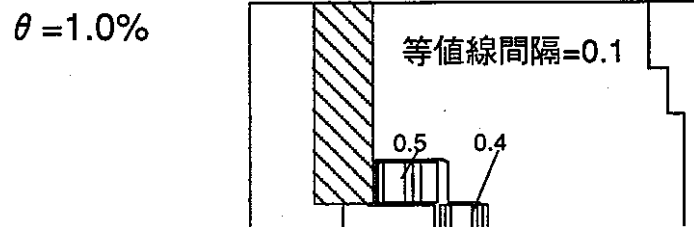
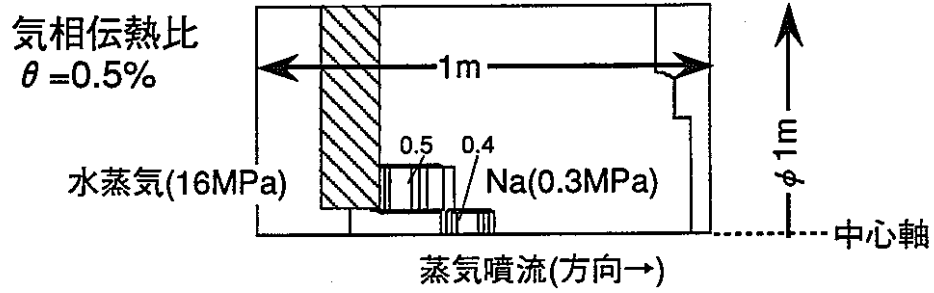
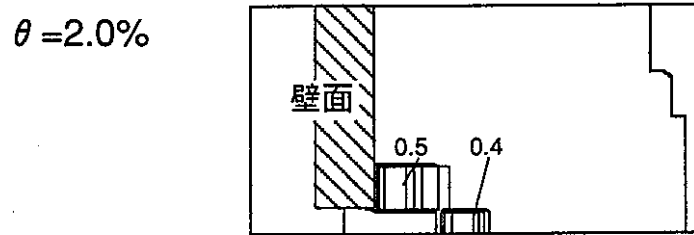


図3.5-13 気液相の平均温度の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合： $\theta$ 依存性)



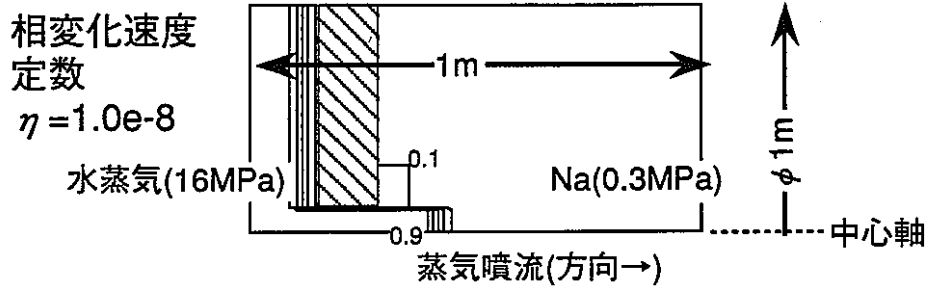
水素反応速度定数  $K = 1.0e-2$   
 水素/水モル転換比  $F = 0.75$   
 相変化速度定数  $\eta = 0$



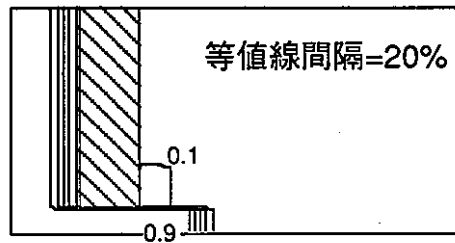
噴出口(口径  $\phi 8\text{mm}$ )

図3.5-14 気相中の水素の質量分率の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合： $\theta$ 依存性)





$\eta = 1.0e-6$



水素反応速度定数  $K = 1.0e-2$   
 水素/水モル転換比  $F = 0.75$   
 気相伝熱比  $\theta = 1\%$

$\eta = 1.0e-4$

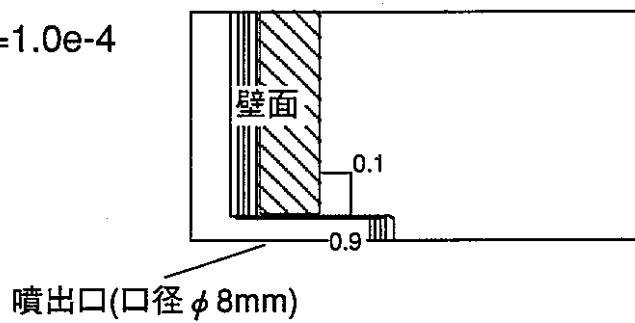
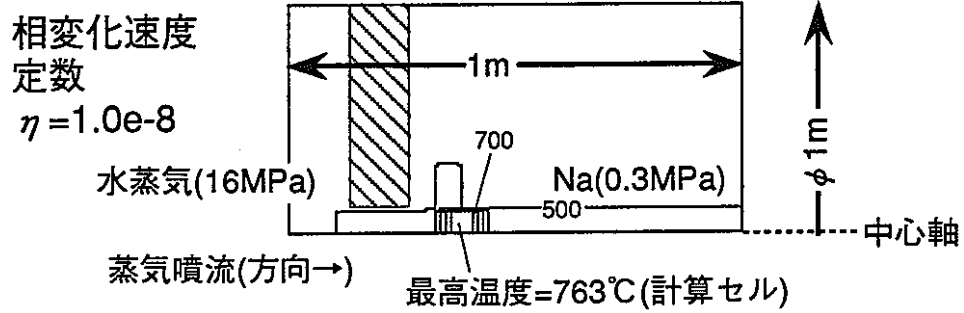
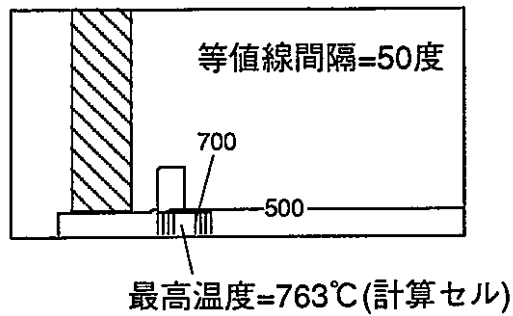


図3.5-15 等ボイド率線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合： $\eta$ 依存性)



$\eta = 1.0e-6$



水素反応速度定数  $K = 1.0e-2$   
 水素/水モル転換比  $F = 0.75$   
 気相伝熱比  $\theta = 1\%$

$\eta = 1.0e-4$

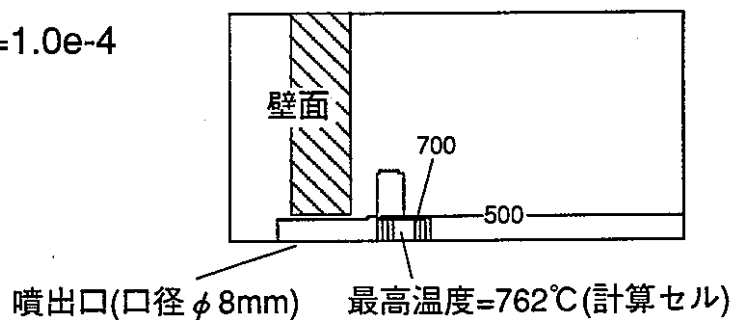
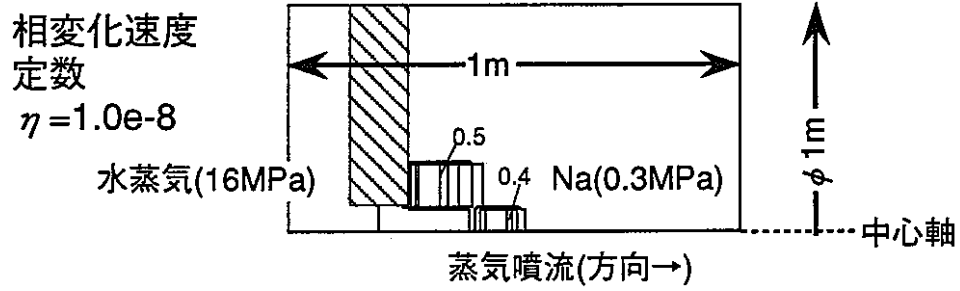
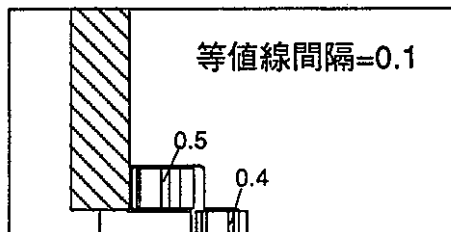


図3.5-16 気液相の平均温度の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合： $\eta$ 依存性)



$\eta = 1.0e-6$



水素反応速度定数  $K = 1.0e-2$   
 水素/水モル転換比  $F = 0.75$   
 気相伝熱比  $\theta = 1\%$

$\eta = 1.0e-4$

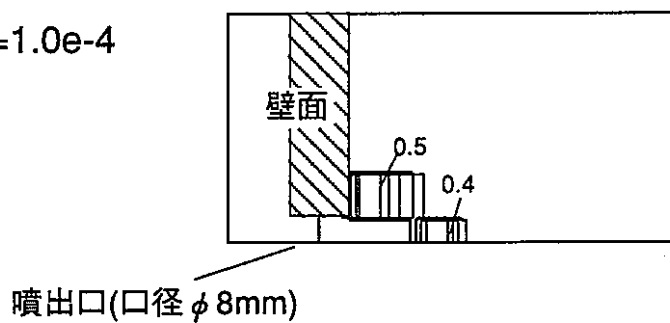


図3.5-17 気相中の水素の質量分率の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合： $\eta$  依存性)

### 3. 5. 3 ナトリウム-水反応ジェットの高時間現象の解析(動作確認)

前節までの短時間の試計算では、解析コード自身の安定性は確認できていない。そのため、実機蒸気発生器におけるリーク事故発生から終了までの事象進行時間(1~10秒)程度の長時間解析を実施して、コードを動作確認してコード自身の安定性を確認する。

解析条件は次のように決定した。

まず、解析時間は1秒に設定した。解析メッシュおよびタイムステップについては、次のように定めた。まず、前節よりも大きな $\phi 1\text{ m} \times 5\text{ m}$ の範囲を、解析体系とした。この体系の大きさであれば、解析時間1秒における反応ジェットの発達の様子が十分補足できると推定される。この時間までの解析コスト(計算機稼働時間)をなるべく小さくするためには、より大きなタイムステップで計算安定条件を満足させる必要がある。この理由により、解析メッシュサイズが最小値である噴出口の寸法を大きく設定し、3. 5. 1より大きい噴出口径 $\phi 40\text{ mm}$ とした。以上の設定により、タイムステップ $=5\mu\text{ s}$ で解析できた。

解析時間中に解析体系内に反応ジェットが大きくはみ出さないように、噴出口 $\phi 40\text{ mm}$ からの噴出流量を $1\text{ kg/s}$ 程度に設定し、3. 5. 1より上流圧力を小さく設定した。上流条件は圧力 $1.3\text{ MPa}$ 、ボイド率 $\alpha_{in}=100\%$ の飽和水蒸気、下流は圧力 $0.3\text{ MPa}$ のNaで、上流・下流ともに $500^\circ\text{C}$ を設定した。解析の結果、噴出口 $\phi 40\text{ mm}$ からの噴出流量は $1\text{ kg/s}$ 程度( $2.5\text{ kg/s}$ )であった。

#### (1) Na中への蒸気噴出問題 (反応無しの場合)

仮定の反応のないNa-水噴流体系を解析する。図3.5-18に等ボイド率線を示す。経過時間と共に蒸気噴流が遠方へ拡大する。動圧の影響が大きいために軸方向への噴流の拡大は大きい、短時間解析と異なり、噴流の発達に伴って噴流の半径方向への拡大も見られる。

このように、長時間解析により大きな体系への噴流の拡大が解析可能であることを、本コードにおいて確認した。

#### (2) Na中への蒸気噴出問題 (反応有りの場合)

次に反応の有るNa-水噴流体系を解析する。図3.5-19にボイド率、図3.5-20に気液相平均の温度、図3.5-21に気相中に占める水素の質量分率の、それぞれの分布の時間変化を示す。代表解析条件は前述の試計算と同じで、水素反応速度定数 $K=0.01$ 、水素/水モル転

換比  $F=0.75$ 、気相伝熱比  $\theta=1\%$ 、相変化速度定数  $\eta=0$  と設定した。噴出流量は臨界流であるため、反応のない場合と同じ値であった。

反応のない場合と比較した時の噴流形状の顕著な違いは見られなかった。短時間解析とは異なり、噴流の発達に伴う反応高温部分と水素濃度の高い領域の噴流下流への拡大と拡散が見られる。ただし、この結果でも対流によるエネルギー拡散効果が大きいため、簡略化モデルにおける  $1000^{\circ}\text{C}$  以上の高温領域は見られない。

このように、1秒の長時間解析におけるコードを動作確認して、本コード自身の安定性を確認することが出来た。

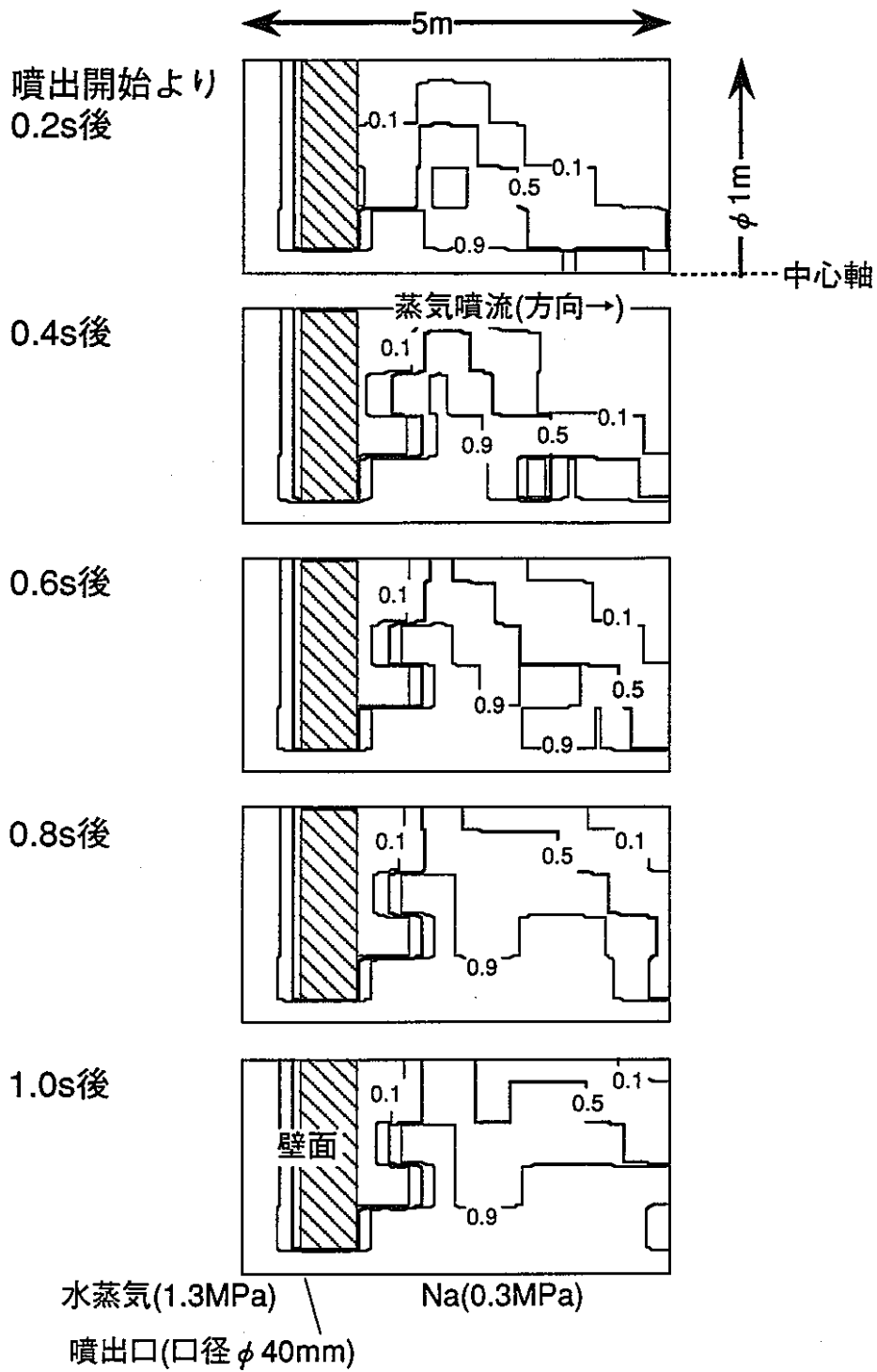


図3.5-18 等ボイド率線：等間隔座標表現  
(Na中への蒸気の噴出・反応無しの場合：1秒まで)

水素反応速度定数 $K=1.0e-6$

水素/水モル転換比 $F=0.75$

気相伝熱比 $\theta=1\%$

相変化速度定数 $\eta=0$

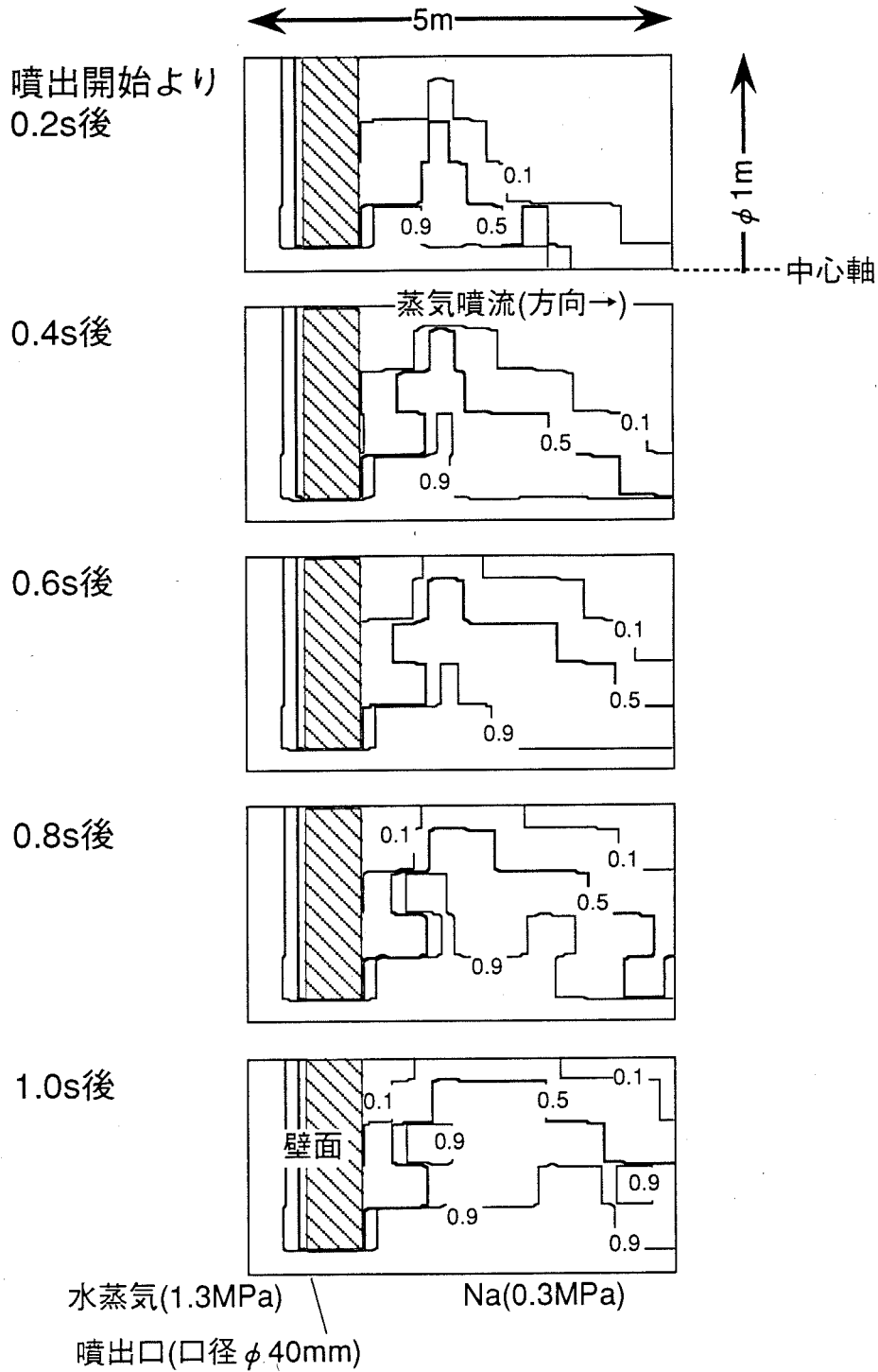


図3.5-19 等ボイド率線：等間隔座標表現

(Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：1秒まで)

水素反応速度定数 $K=1.0e-6$   
 水素/水モル転換比 $F=0.75$   
 気相伝熱比 $\theta=1\%$   
 相変化速度定数 $\eta=0$

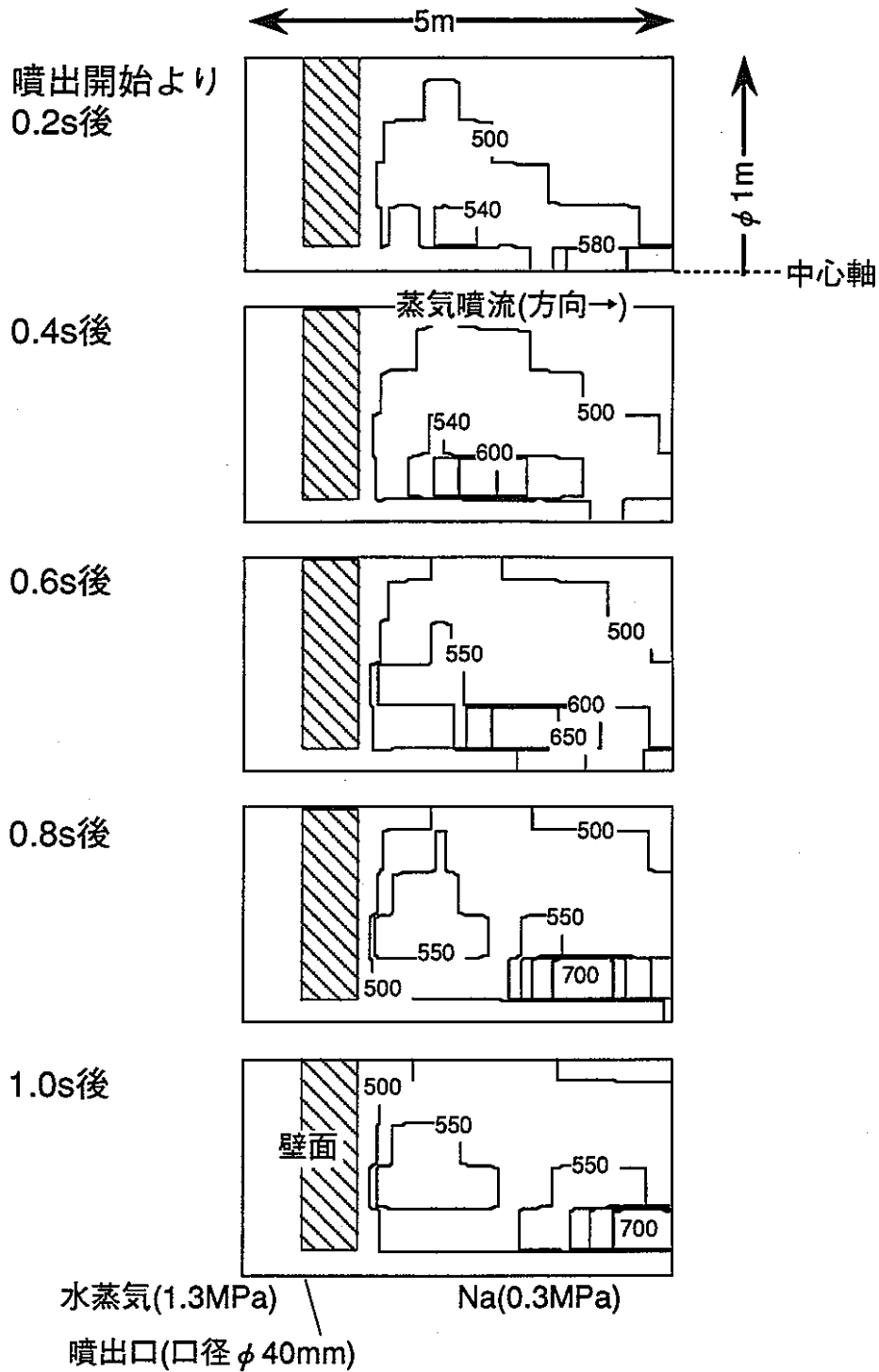


図3.5-20 気液相の平均温度の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：1秒まで)



水素反応速度定数 $K=1.0e-6$   
 水素/水モル転換比 $F=0.75$   
 気相伝熱比 $\theta=1\%$   
 相変化速度定数 $\eta=0$

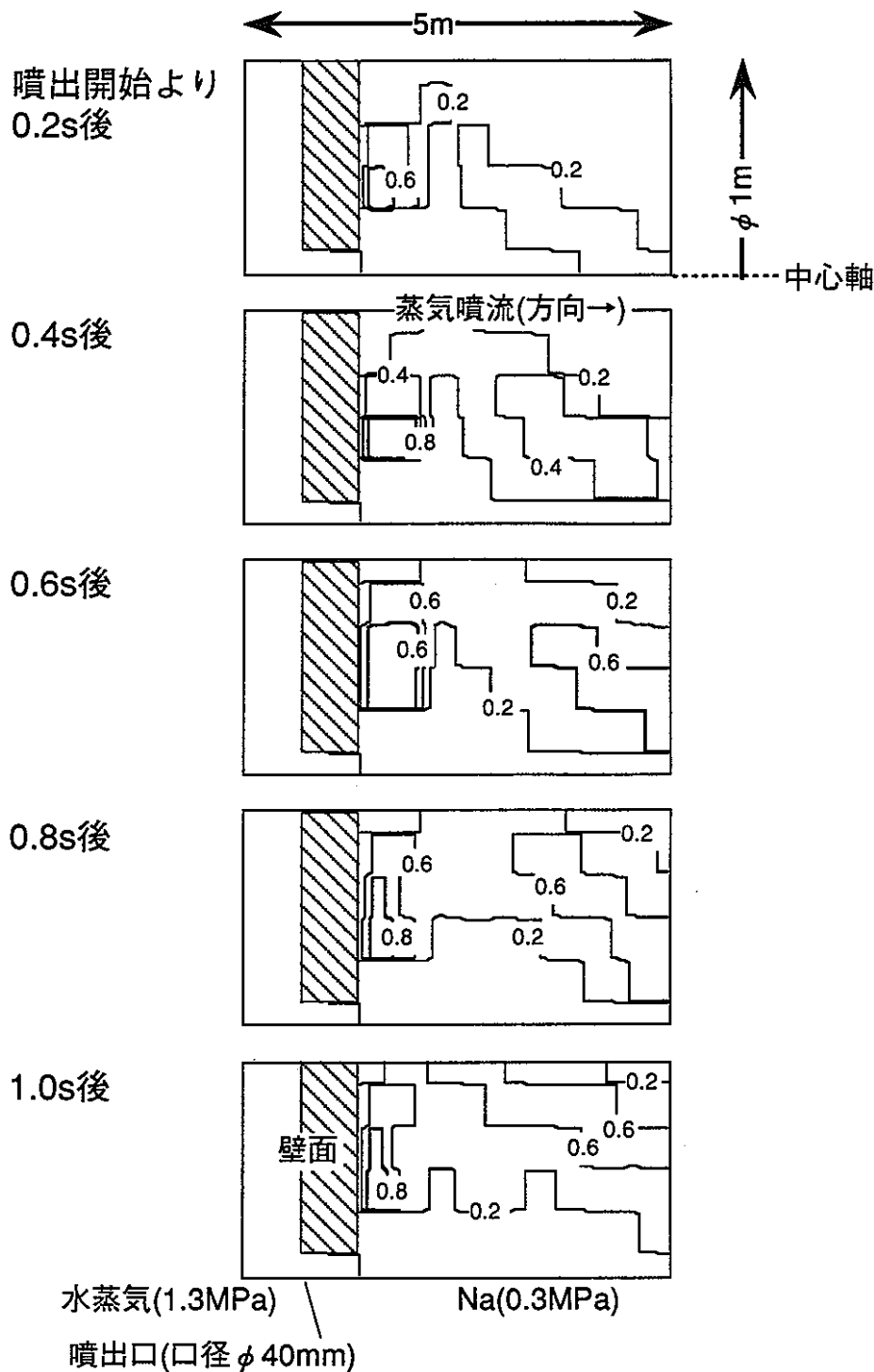


図3.5-21 気相中の水素の質量分率の等値線：等間隔座標表現  
 (Na中への蒸気の噴出・反応有りの場合：1秒まで)

### 3. 5. 4 既存試験結果による試計算の検証

図3.5-22と図3.5-23に、既存試験結果を示す。過去に実施・公開された下記のWastage基礎試験では、実機蒸気発生器の伝熱管損傷を想定した試験を実施し、ターゲット材におけるWastage形状(間接的にナトリウム-反応ジェット形状に相当)や温度分布の実験結果が得られている。

#### Wastage基礎試験例

(a)根井・堀 : 日本機械学会 43-368 (1977-4) (窒素噴流基礎試験例を含む)

(b)根井・橋口 : 日本機械学会 44-383 (1978-7)

(c)河原その他 : 日立評論 Vol.56, No.9, (1974-9) (蒸気噴流基礎試験例を含む)

前節までの試計算における条件・体系は上記の既存試験の条件に近いことから、双方の結果を比較することが出来、化学反応モデルパラメータの調整やモデルの妥当性をある程度検討できる。比較すべき反応ジェットの部分は、既存試験(a)(図3.5-22)の反応部の温度分布の測定位置は噴出口より17.5mm下流であるのに対し、試計算では解析体系はやや大きいものの解析結果で捕捉されている噴出口下流の数メッシュ程度(約0.1~0.2m)に拡がる高温部分に対応している。

反応ジェット領域の温度上昇を比較してみると、実験では800℃程度までの温度上昇が測定されているのに対し、解析では700~800℃の温度上昇が見られる。また、試験では高温領域の直径が数ミリ(~5mm)程度であるのに対し、解析ではほぼノズル径( $\phi$  8 mm)にとどまっており、試験/解析双方共に、噴流の高温領域は半径方向へ余り広がっていない。なお、上記の噴流周りの温度拡散の違いはWastage基礎試験では不明であったが、解析では前節に示したように熱伝導より対流熱拡散の方が大きいことが原因であることが明かとなった。このように、解析では既存試験結果では不明な反応ジェットの現象を推定することも可能である。

以上のことから、Wastage基礎試験と試計算の比較の観点から、本コードを用いた反応ジェット解析は、温度分布等の反応ジェットに伴う現象模擬がある程度可能であることが確認された。また、これまでの反応ジェット基本コードの開発方針の妥当性も確認された。ただし、前節に示したように化学反応モデルにおけるパラメータ(K、F、 $\theta$ )と相変化モデ

ルにおけるパラメータ  $\eta$  の選択による解析結果への影響は大きい。このことに留意した適切なパラメータ選択が、解析では重要である。

表 1 試験条件

	温度分布試験	ウェステージ試験
ノズル径 mm	0.5	0.3, 0.5, 0.7, 1.5
ターゲット mm	1.0φインコネルシース 熱電対	26.5φ2-1/4Cr-1Mo 鋼管
ノズル-ター ゲット間距離 mm	17.5	17.5
Na/水温度 °C	330~530	280~540
水圧力 atg	100	80~130

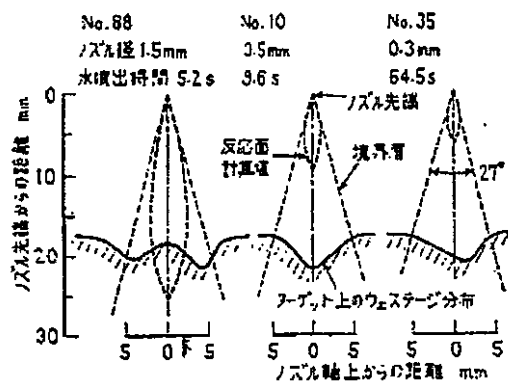
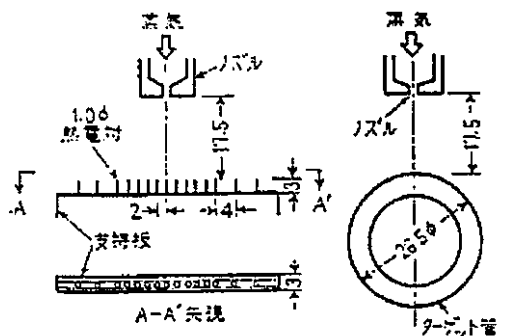


図 3 ウェステージ分布の実験例と反応境界層の計算値



(b) 温度分布測定用 (a) ウェステージ試験用  
図 2 Na-水反応試験部

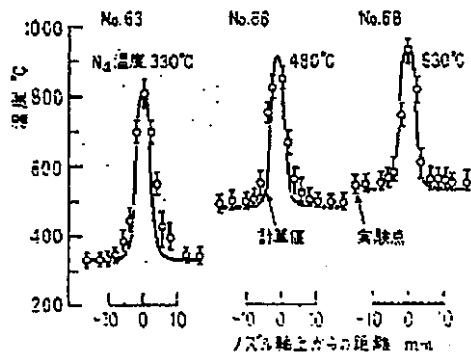


図 4 反応部の温度分布と Na 温度

図3.5-22 既存試験結果

根井・堀 : 日本機械学会 43-368 (1977-4)

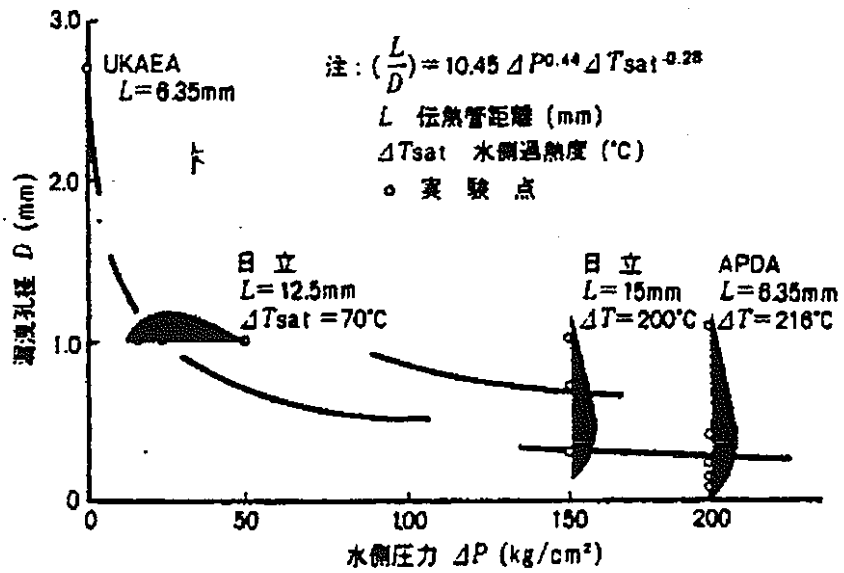


図10 材料損耗データと材料損耗最大条件式の関係

図3.5-23 既存試験結果

河原その他：日立評論 Vol.56, No.9, (1974-9)

### 3. 5. 5 まとめ

開発した反応ジェット基本コードを用いて、コードの動作確認および試計算を行い、化学反応モデルのパラメータ依存性を調べた。

ナトリウム-水反応の化学反応モデルのカップリング動作を確認し、本コードによる不均一系反応(気液反応)現象が解析可能であることを確認することが出来た。また、基準ケースを含めた今回の試計算のパラメータ設定範囲では化学反応の進行は十分ではないものの、コード動作安定性のパラメータ依存性やパラメータの解析結果への影響はある程度確認できた。

コード開発後の今後の課題を、以下に記す。

#### (1) コード検証のための試験における課題

上記の各Wastage基礎試験例では、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おらず、試験条件などの不明量・パラメータの精度向上に難点がある。またWastage現象解明に重点が置かれているため、発熱量や反応物生成量等の化学反応現象を直接確認する計測結果は無い。このことから、化学反応モデルの妥当性確認は、ターゲット材の温度分布やWastage形状などから反応領域を推定するなど、間接的な反応ジェット現象の確認とならざるを得ない。また、これまで実施されたSWAT試験では、模擬蒸気発生器の内部管群の管表面温度が主な計測項目であり、リーク管近くのNa中に発生する反応ジェットの温度分布を正確に計測できているとは言い難い。

本コードに導入されたモデルの妥当性の検討を深めるため、また、モデルのパラメータのチューニングによる解析精度の向上のためには、反応ジェットの拡がり情報に関する試験結果を得ることが重要である。そのためには、反応ジェット領域の多次元温度分布計測やボイド計による反応ジェット形状の計測は、今後のSG実機体系試験(SWAT試験)では必要である。

#### (2) コードの検証解析

本報告書では、実機蒸気発生器の代表条件における化学反応モデルにおけるパラメータ(K、F、 $\theta$ )と相変化モデルにおけるパラメータ $\eta$ 依存性について、試計算を実施した。しかし、実機蒸気発生器におけるリーク事故発生から終了までの事象進行中では、反応ジェットの上流側の管内冷却水と下流側のナトリウムの圧力/温度/ボイド率の流体条件も広

範囲に変化すると想定される。これらの流体条件に対する本コードの検証解析も、今後必要である。

### (3) 実機対応のためのコード改良

本コードは2次元体系を取り扱える。しかし、管群構造を含む3次元解析体系の取り扱いや、ナトリウム流動(流速)やリーク部の水流出における速度境界の取り扱い等、実機体系における反応ジェット解析に想定される必要のある取り扱いには、十分に対応できていない。今後、実機体系に対応できるようなコードの改良が必要である。

また、今回の試計算では1秒までの反応ジェットの現象進行を、エンジニアリングワークステーション(EWS)を使用して解析した。しかし、本コードは陽解法であるため、さらに長時間の現象を解析するには、EWSでは解析負荷が大きすぎると考えられる。このような本コードにおける解析コストの低減のためには、(a)スーパーコンピュータやメインフレームの大型機、EWSより高速な機種による実行速度の向上、(b)陰解法の導入によるタイムステップ条件の緩和による解析コスト低減が考えられる。しかし、(a)については、実機のような大きな体系を解析するためにメッシュを増加させた場合の負荷増大に注意する必要がある。(b)については、一般には化学反応の特性時間は流動の特性時間に比べて小さいため、陰解法の導入を図ってもタイムステップを大きくとることができずに、意図した通りの解析コスト低減が不可能になる場合も考えられる。

### 3. 6 コードの使用手法説明

#### 3. 6. 1 計算条件設定方法

解析条件の大部分は固定フォーマット方式のテキストファイルによるが、解析体系の境界条件の設定のみ、コード中のSETUPモジュールに埋め込まれている。

##### (1) 入力変数の意味

入力方式は、固定フォーマットによるテキストファイル入力としている。以下に入力変数の意味を示す。

IRST	: リスタート実行パラメータ(1 : リスタート実行)
FILERS	: リスタート用入力ファイル名
DT	: タイムステップ
TMAX	: 計算の終了時間
DTPRNT	: 計算結果のプリンタ出力時間間隔
DTPLT	: 計算結果のプロッタ出力時間間隔
ITAU	: 出口圧力変化の時定数 (タイムステップの倍数)
PY	: 円周率
GR	: 重力加速度
BOLTZ	: ボルツマン定数
AVO	: アボガドロ数
TKO	: °C - K 換算数(237.15) : 0に設定すると K 単位で出力
OMG	: 数値計算安定化定数(-)
CSQ	: 付加質量係数(-)
AIMOM	: 圧損係数(-)
VB	: ドリフト速度(m/s)
EATA	: 蒸発速度時定数(s)
CHM	: 気液界面面積を表す係数(-)
CWF	: 壁面摩擦係数(-)
EDDY	: 渦粘性係数(-)
----- INLET	

PIN	: 入口圧力(Pa)
ALPIN	: 入口ボイド率(-)
TLIN	: 液相入口温度(Kまたは℃:TKO指定に依存)
TGIN	: 気相入口温度(Kまたは℃:TKO指定に依存)
TOVIN	: 入口過熱(過飽和)温度(Kまたは℃:TKO指定に依存)
----- EXIT	
PEX	: 出口圧力(Pa)
ALPEX	: 出口ボイド率(-)
TLEX	: 液相出口温度(Kまたは℃:TKO指定に依存)
TGEX	: 気相出口温度(Kまたは℃:TKO指定に依存)
TOVEX	: 出口過熱(過飽和)温度(Kまたは℃:TKO指定に依存)
----- CHEMICAL-REACTION PARAMETER	
CFF	: 水素/水モル転換比F
CRR	: 水素反応速度定数K
CTH	: 気相伝熱比 $\theta$
NCS	: 化学種の数
WEC(KMC)	: 化学種分子量 $W_c$
IC(1,0:KMC)	: 液相に分類される化学種・成分の数/分類番号
IC(2,0:KMC)	: 気相に分類される化学種・成分の数/分類番号
----- MESHES	
NPXA	: (質量流束計算時の) x方向粗メッシュ指定範囲
NPXB	: (質量流束計算時の) x方向粗メッシュ指定範囲
MX	: 粗メッシュ分割数(x方向)最大10
NPX1~4	: (境界条件計算時の) x方向粗メッシュ指定範囲
MY	: 粗メッシュ分割数(y方向)最大10
NPY1~4	: (境界条件計算時の) y方向粗メッシュ指定範囲
J	: (ダミー番号)
XX(I)	: 粗メッシュノード点の座標(x方向)最大11(m)
J	: (ダミー番号)
YY(I)	: 粗メッシュノード点の座標(y方向)最大11(m)



J : (ダミー番号)  
MESHX(I) : 細メッシュ分割数(x 方向)  
J : (ダミー番号)  
MESHY(I) : 細メッシュ分割数(y 方向)

(2) 入力方法 (付録のサンプル入力ファイルも参照のこと)

本コードでは、解析の最初に入力ファイル名 (8文字) の指定を要求する。  
この名前は、出力ファイル名およびリスタート用ファイル名と兼ねている。

以下は、「INPUT」モジュールにおける入力部を抜き出したものである。入力ファイルの最初から3行は、入力ファイル自身のコメント分を記載する部分(10文字以上)である。また、各入力変数の前1行は、各変数に関するコメントを記載する部分(10文字以上)である。

なお、OPEN文中の「TYPE」オプションは、コード開発に使用したEWS固有のオプションであり、他の処理系では必要ないため削除のこと。

```
OPEN( UNIT=30, FILE=FILEIO, STATUS='OLD', TYPE='TEXT' )  
DO 100 J = 1, 3  
    READ(30,1200) FI  
100 CONTINUE  
    READ(30,1200) FI  
    READ(30,1000) IRST  
    READ(30,1200) FI  
    READ(30,1050) FILERS  
1050 FORMAT( 2X, A8 )  
    READ(30,1200) FI  
    READ(30,1100) DT, TMAX, DTPRNT, DTPLT  
    READ(30,1200) FI  
    READ(30,1000) ITAU  
    TAU = DBLE( ITAU ) * DT  
    POW = DBLE( INT( LOG10( TMAX/DT ) ) ) - 1.0D0
```

```

      IF ( ( DTPRNT .GT. TMAX ).OR.( DTPLT .GT. TMAX )
& .OR.( ( DTPRNT*DTPLT ) .LE. 0.0D0 ) ) THEN
          DTPRNT= DT * 10.0D0 ** POW
          DTPLT = DT * 10.0D0 ** POW
      END IF
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1100) PY, GR, BOLTZ, AVO, TKO
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1100) OMG, CSQ, AIMOM, VB, EATA
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1100) CHM, CWF, EDDY
C----- INLET
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1100) PIN, ALPIN, TLIN, TGIN, TOVIN
C----- EXIT
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1100) PEX, ALPEX, TLEX, TGEX, TOVEX
C----- CHEMICAL-REACTION PARAMETER
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1100) CFF, CRR, CTH
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1000) NCS
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1100) (WEC(I),I=1,NCS)
C----- 1997.02.21
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1000) IC(1,0),(IC(1,I),I=1,IC(1,0))
      READ(30,1200) FI
      READ(30,1000) IC(2,0),(IC(2,I),I=1,IC(2,0))
C----- MESHES

```

```

READ(30,1200) FI
READ(30,1000) NPXA, NPXB
READ(30,1200) FI
READ(30,1000) MX, NPX1, NPX2, NPX3, NPX4
READ(30,1200) FI
READ(30,1000) MY, NPY1, NPY2, NPY3, NPY4
READ(30,1200) FI
DO 200 I = 1, MX
    READ(30,1300) J, XX(I)
200 CONTINUE
    READ(30,1200) FI
    DO 210 I = 1, MY
        READ(30,1300) J, YY(I)
210 CONTINUE
    READ(30,1200) FI
    DO 220 I = 1, MX-1
        READ(30,1000) J, MESHX(I)
220 CONTINUE
    READ(30,1200) FI
    DO 230 I = 1, MY-1
        READ(30,1000) J, MESHY(I)
230 CONTINUE
    CLOSE( 30 )
C
1000 FORMAT( 5I10 )
1100 FORMAT( 5E10.3 )
1200 FORMAT( A10 )
1300 FORMAT( I10, E10.3 )

```

### (3) 計算セルのメッシュ分割規約

メッシュ情報入力について、以下に説明する。

図3.6-1に(2)に記載の粗メッシュ分割に関する規約を、図3.6-2に細メッシュ分割に関する規約を示す。

本コードでは、解析領域をブロック毎に分け、このブロック境界を「粗メッシュ」と呼ぶ。各粗メッシュ(解析領域ブロック)はさらに細かいメッシュに分割されて、これを「細メッシュ」と呼ぶ。各細メッシュの一つ一つがコードにおける解析セルとなる。入力するのは粗メッシュ座標 $XX$ ,  $YY$ とその数 $MX$ ,  $MY$ (最大10)、そして各粗メッシュ内の細メッシュ分割数 $MESHX$ ,  $MESHY$ である。この情報を元に、SETUPでメッシュ分割される。

本コードでは、計算セルに関する配列情報を1次元(添字 $K$ )で管理する「一連管理方式」に特徴がある。これによりメモリーの節約が図れ、高次元化への拡張性が保てる。細メッシュの $x$ 方向(添字 $I$ )と $y$ 方向(添字 $J$ )の分割番号 $I$ ,  $J$ と $K$ との変換は、(1)  $I$ ,  $J$ から $K$ へは配列 $KIJ(I,J)$ の情報で、(2)  $K$ から $I$ ,  $J$ へは配列 $IXK(K) \cdot JYK(K)$ の情報の参照による。

セル情報の詳細を図3.6-3に示す。セルの形状情報は、 $x$ ,  $y$ 方向にセルの幅 $DX \cdot DY$ 、セルの中心座標は $XC \cdot YC$ 、セル境界座標は $X \cdot Y$ である。 $K$ 番目のセルの上下左右(東西南北)方向の隣接番号は変数NEXTの参照により知ることが出来る。

ただし、NEXTには境界情報も含まれており、下記のように決められている。

- ・ NEXT=-1 : 壁面(速度=0、法線方向の圧力勾配=0)
- ・ NEXT=-2 : 入口境界(入口条件INLETを指定)
- ・ NEXT=-3 : 出口境界(出口条件EXITを指定)
- ・ NEXT=-4 : 自由流出境界(内側圧力を直線外挿)

境界情報の指定方法については、次に説明する。

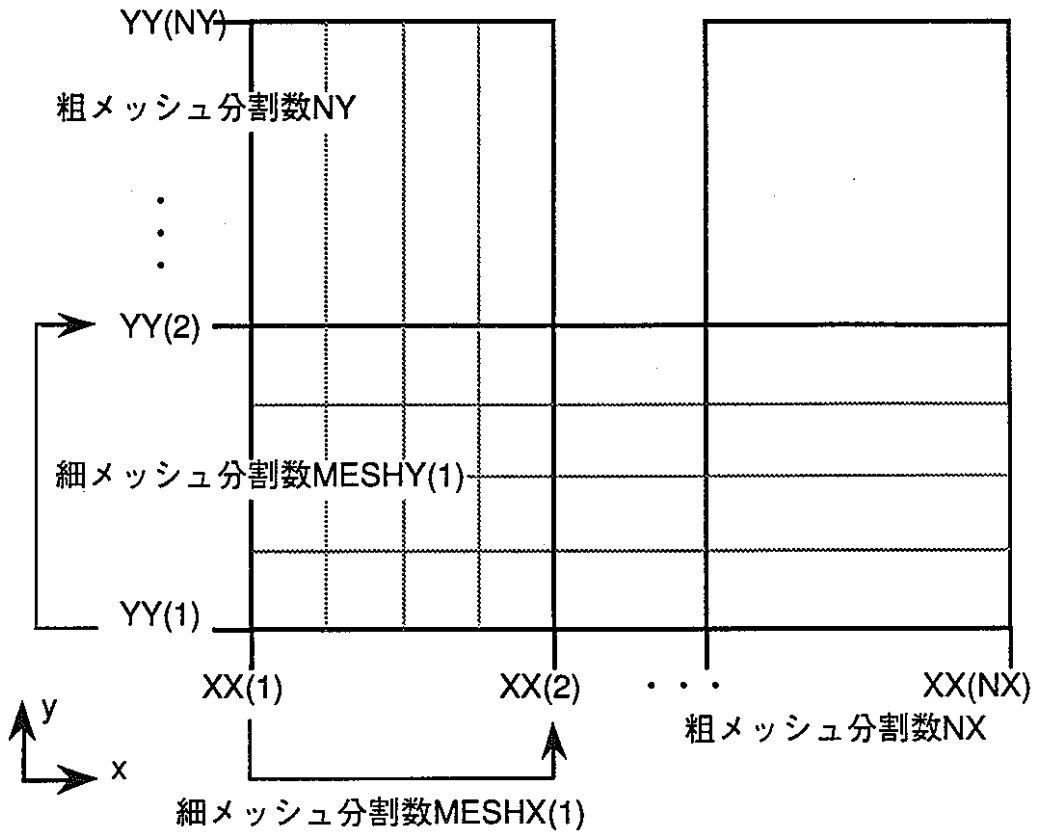


図3.6-1 粗メッシュ分割規約

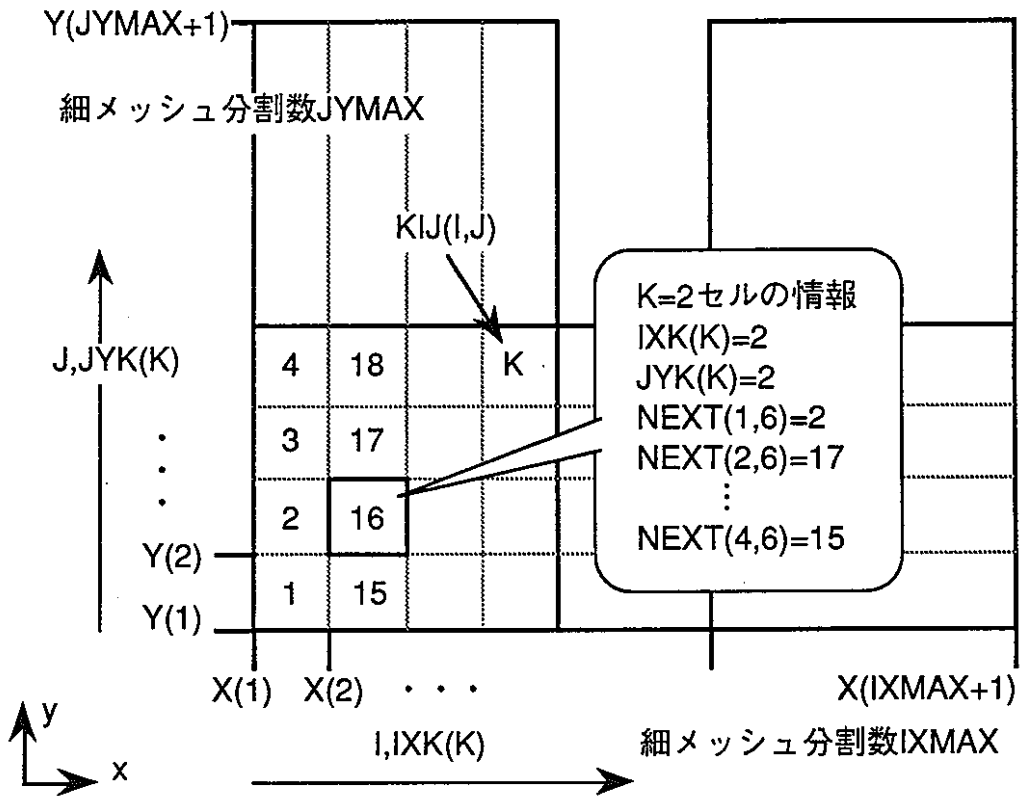


図3.6-2 細メッシュ分割規約

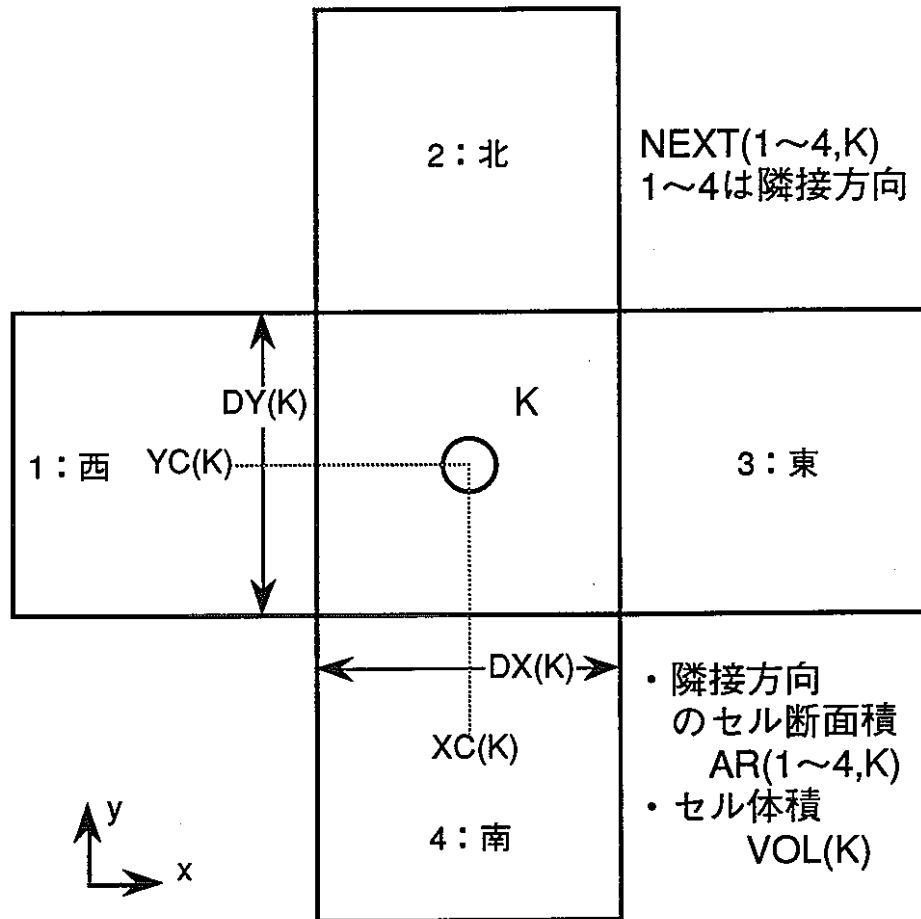


図3.6-3 メッシュ情報

(4) 境界条件指定方法：SETUPモジュール

図3.6-4に、試計算で用いた解析体系の境界設定の模式図を示す。

以下は「SETUP」モジュールにおける境界条件指定を抜き出したものであるが、<>付き番号は、図3.6-4の境界に対応する指定である。

```
C---5 7-10-----20-----30-----40-----50-----60-----70
IF (I.LE.NPXA) THEN
C
C AREA IN PRESSURE VESSEL
C
      K=K+1
      IXK(K)=IX
      JYK(K)=JY
      KIJ(IX,JY)=K
      XC(K)=0.5D0*(X(IX+1)+X(IX))
      DX(K)=X(IX+1)-X(IX)
      YC(K)=0.5D0*(Y(JY+1)+Y(JY))
      DY(K)=Y(JY+1)-Y(JY)
      AR(1,K)=2.0D0*PY*YC(K)*DY(K).....軸対称2次元体系
      AR(2,K)=2.0D0*PY*Y(JY+1)*DX(K).....における
      AR(3,K)=AR(1,K).....各計算セル断面積
      AR(4,K)=2.0D0*PY*Y(JY)*DX(K).....(セル側面積)
      VOL(K)=AR(1,K)*DX(K)
      KBREAK(K)=0
      IF (IX.EQ.1) THEN
          NEXT(1,K)=-2 .....< 1 >
      ELSE
          NEXT(1,K)=KN+JY
      END IF
      IF (J.EQ.NPY4 .AND. MM.EQ.MY) THEN
          NEXT(2,K)=-1 .....< 2 >
```

```

ELSE
    NEXT(2,K)=K+1
END IF
IF (IX.GE.2) NEXT(3,KN+JY)=K
IF (I.EQ.NPXA .AND. J.GE.NPY2 .AND. M.EQ.MX) NEXT(3,K)=-1
.....< 3 >
IF (JY.EQ.1) THEN
    NEXT(4,K)=0 .....< 4 >
ELSE
    NEXT(4,K)=K-1
END IF
CC
ELSE
C
C AREA IN PIPE AND JET
C
IF (I.LE.NPX2 .AND. J.GE.NPY2) GO TO 300
K=K+1
IXK(K)=IX
YK(K)=JY
KIJ(IX,JY)=K
XC(K)=0.5D0*(X(IX+1)+X(IX))
DX(K)=X(IX+1)-X(IX)
YC(K)=0.5D0*(Y(JY+1)+Y(JY))
DY(K)=Y(JY+1)-Y(JY)
C
C..... CROSS-SECTION FOR 2-DIMENSIONAL CYLINDRICAL COODINATION
AR(1,K)=2.0D0*PY*YC(K)*DY(K)
AR(2,K)=2.0D0*PY*Y(JY+1)*DX(K)
AR(3,K)=AR(1,K)

```



```

AR(4,K)=2.0D0*PY*Y(JY)*DX(K)
CC
CC
VOL(K)=AR(1,K)*DX(K)
IF (I.EQ.NPX2+1 .AND. J.GE.NPY2 .AND. M.EQ.1) THEN
    NEXT(1,K)=-1 .....< 5 >
ELSE
    NEXT(1,K)=KN+JY
    IF (NEXT(3,KN+JY).NE.-1) NEXT(3,KN+JY)=K
END IF
IF (I.GT.NPX1 .AND. J.EQ.NY .AND. MM.EQ.MY) THEN
C    NEXT(2,K)=-4 .....<自由境界としたい場合はこちら>
    NEXT(2,K)=-1 .....< 6 >
ELSE
    NEXT(2,K)=K+1
END IF
IF (I.LE.NPX2 .AND.J.EQ.NPY1 .AND. MM.EQ.MY) NEXT(2,K)=-1
    .....< 7 >
IF (I.EQ.NX .AND. M.EQ.MX) NEXT(3,K)=-3 .....< 8 >
IF (JY.EQ.1) THEN
    NEXT(4,K)=0 .....< 9 >
ELSE
    NEXT(4,K)=K-1
END IF
IF (I.EQ.NPX2.AND.J.LE.NPY1.AND.M.EQ.MX) THEN
    KBREAK(K)=-5.....< 1 0 >
ELSE
    IF (I.EQ.NPX2+1.AND.J.LE.NPY1.AND.M.EQ.1) THEN
        KBREAK(K)=-6.....< 1 1 >

```

```

ELSE
    KBREAK(K)=0
END IF
END IF
CC
END IF

```

なお、解析開始時よりセル境界で大きな圧力差を与えた場合に解析が不安定となりやすいので、本コードでは仮定の圧力膜を設ける。圧力膜を設けるセルの上流側をKBREAK=-5に、下流側をKBREAK=-6にSETUPにて指定する。入力変数ITAU×タイムステップDTに相当する時定数の指数関数で、圧力膜間の圧力差を徐々に回復させる。

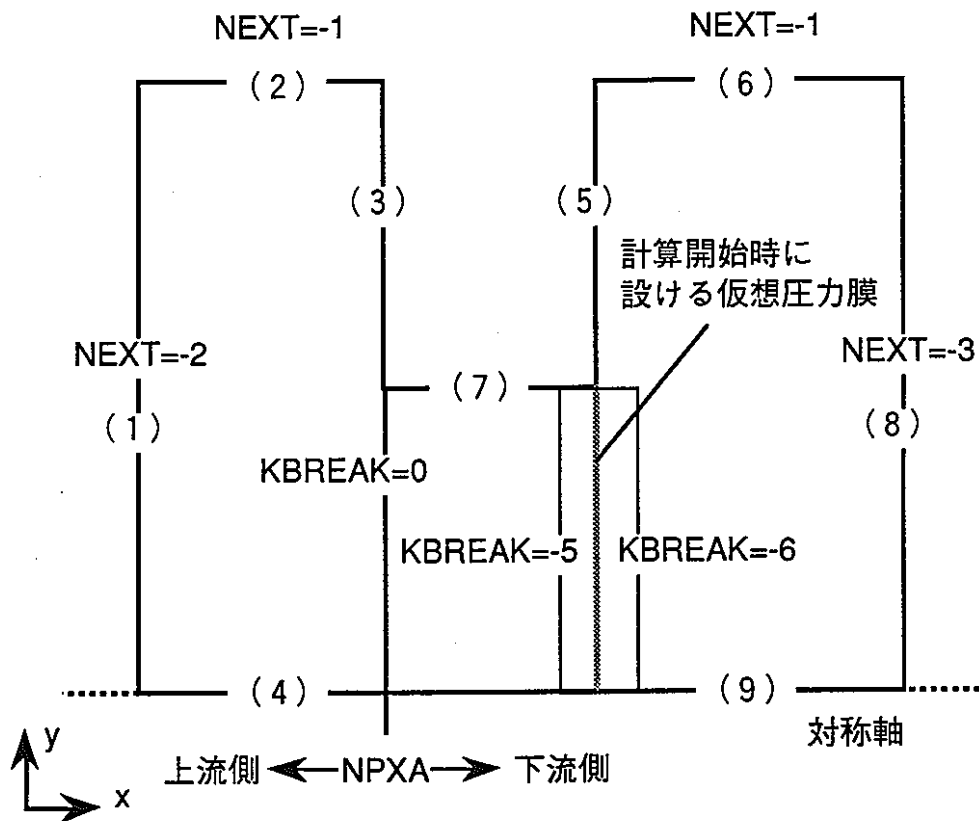


図3.6-4 SETUPにおける境界条件=セル隣接情報設定

### 3. 6. 2 出力方法

主要な計算結果は、リストおよびプロッタのためのテキストファイルにて出力する。出力時間間隔は入力ファイルにて指定する。

#### (1) 途中経過出力

出力装置番号4のリスト出力である。

ファイル名は、入力ファイル名+「. 04」

出力の時間間隔はDTPRNTで指定する。代表点(x, y方向の分割数の最大値)のみの流体諸量を出力する。

#### (2) 解析結果出力：付録を参照のこと

出力装置番号5のプロッタ出力である。

ファイル名は、入力ファイル名+「. 05」

出力の時間間隔はDTPLTで指定する。次の情報を出力する。

(a) x, y方向メッシュ番号とメッシュ中心座標XC, YC。

(b) 出力時刻、サイクル数、および注目噴出口における質量流束。

(c) 二相流の流体諸量：圧力・体積率・速度・温度・密度

(d) 化学種・成分の流体諸量：密度・質量分率・モル分率等

なお、(b)～(d)については、出力間隔毎に出力する。

#### (5) リスタート用ファイル入力・出力 : RSTIN・RSTOUT

出力装置番号10、11の固定フォーマットによるテキスト出力である。

ファイル名は、入力ファイル名+「. RS」

入力ファイルのリスタートフラグにより入力の有無を判定し、解析終了時には、リスタート時に必要な次の情報を必ず出力する。

- ・ COMMON /A/
- ・ COMMON /E,K/
- ・ COMMON /D/
- ・ COMMON /F/
- ・ COMMON /G1,G2/

- ・ COMMON /I/
- ・ COMMON /J/
- ・ COMMON /O,P,Q/
- ・ COMMON /W/
- ・ COMMON /AA/
- ・ COMMON /AA2/
- ・ COMMON /AB/
- ・ COMMON /AC1/
- ・ COMMON /AC2/
- ・ COMMON /AD/
- ・ COMMON /AE/
- ・ COMMON /AF/
- ・ COMMON /AG/

これらのCOMMON変数については、次に説明する。

### 3. 6. 3 変数の説明

#### (1) COMMON変数

本コードで使用されているCOMMON変数をCOMMONブロック毎に説明する。  
なお、CVはコントロールボリューム(計算セル)を表す。

#### PARAMETER

KMS=2000	: 最大細メッシュ数
KML=100	: 最大細メッシュ分割数 (x, y 方向)
KMC=10	: 最大化学種・成分数
KMP=KMC*5	: 最大出力数

#### COMMON /A/

ICYCLE	: 計算回数 (=TMAX/DT)
ICS	: (リスタート時) 計算開始サイクル数
ICE	: (リスタート時) 計算終了サイクル数
NX	: 粗メッシュ分割数(x 方向)
NY	: 粗メッシュ分割数(y 方向)
KMAX	: セルの一連番号最大値
IXMAX	: x 方向ノード最大値
JYMAX	: y 方向ノード最大値
NPX	: x 方向粗メッシュ最大値 (未使用)
NPY	: y 方向粗メッシュ最大値 (未使用)

#### COMMON /B/

IXK(KMS)	: x 方向ノード番号
JYK(KMS)	: y 方向ノード番号
KIJ(KML,KML)	: セルの一連番号

#### COMMON /C/

X(KML)	: x 方向ノード点座標(細メッシュ)
Y(KML)	: y 方向ノード点座標(細メッシュ)
XC(KMS)	: セル中心座標(x 方向)
YC(KMS)	: セル中心座標(y 方向)
DX(KMS)	: x 方向セル長さ

DY(KMS)	: y 方向セル長さ
COMMON /D/	
UG(KMS)	: x 方向流速 (気相)
VG(KMS)	: y 方向流速 (気相)
UL(KMS)	: x 方向流速 (液相)
VL(KMS)	: y 方向流速 (液相)
COMMON /E/	
DT	: タイムステップ
TMAX	: 計算時間の最大値
TAU	: 出口圧力変化の時定数
GR	: 重力加速度
PY	: 円周率
OMG	: 数値計算安定化定数
EDDY	: 渦粘性係数
CWF	: 壁面摩擦係数
CSQ	: 付加質量係数
CHM	: 気液界面面積の下限值
EATA	: 蒸発速度係数
VB	: 相間摩擦係数
AIMOM	: 圧力損失係数
COMMON /F/	
PQ(KMS)	: 圧力(各相共通: 1 圧力モデル)
FQ(KMS)	: 各相の体積率
PR(4,KMS)	: コントロールボリュームCV境界面 (4 面) の圧力
QS(KMS)	: 質量保有量 (気相)
QW(KMS)	: 質量保有量 (液相)
COMMON /G1/	
DNG(4,KMS)	: CV内の質量の増分(BNの正值) (気相)
DNL(4,KMS)	: CV内の質量の増分(BNの正值) (液相)

COMMON /G2/

BNG(4,KMS) : CV内の質量の増分 (気相)

BNL(4,KMS) : CV内の質量の増分 (液相)

COMMON /H/

NEXT(4,KMS) : 隣接セルの一連番号(正值)・境界条件パラメータ(0・負値)

MESHX(10) : 細メッシュ分割数(x方向)

MESHY(10) : 細メッシュ分割数(y方向)

COMMON /I/

UMS(KMS) : x方向運動量 (気相)

VMS(KMS) : y方向運動量 (気相)

UMW(KMS) : x方向運動量 (液相)

VMW(KMS) : y方向運動量 (液相)

COMMON /J/

ES(KMS) : 内部エネルギー (気相)

EW(KMS) : 内部エネルギー (液相)

EG(KMS) : 内部エネルギー×セル体積 (気相)

EL(KMS) : 内部エネルギー×セル体積 (液相)

TG(KMS) : 温度 (気相)

TL(KMS) : 温度 (液相)

COMMON /K/

TPLOT : 計算結果プロット出力用時間

DTPLT : プロット出力時間間隔

TPR : 計算結果プリント出力用時間

DTPRNT : プリント出力時間間隔

COMMON /L/

XX(10) : x方向ノード点座標(粗メッシュ)

YY(10) : y方向ノード点座標(粗メッシュ)

FRICX(KMS) : x方向壁面摩擦係数(VELOC/SETUPで使用)

FRICY(KMS) : y方向壁面摩擦係数(VELOC/SETUPで使用)

COMMON /O/

- FLGXM(KMS) : x 方向相間摩擦力(VELOC内部計算で使用)  
FLGYM(KMS) : y 方向相間摩擦力(VELOC内部計算で使用)

COMMON /P/

- FLXM(KMS) : x 方向体積作用外力(VELOC内部計算で使用) (液相)  
FLYM(KMS) : y 方向体積作用外力(VELOC内部計算で使用) (液相)  
FGXM(KMS) : x 方向体積作用外力(VELOC内部計算で使用) (気相)  
FGYM(KMS) : y 方向体積作用外力(VELOC内部計算で使用) (気相)

COMMON /Q/

- ALXM(KMS) : x 方向加速度(VELOC内部計算で使用) (液相)  
ALYM(KMS) : y 方向加速度(VELOC内部計算で使用) (液相)  
AGXM(KMS) : x 方向加速度(VELOC内部計算で使用) (気相)  
AGYM(KMS) : y 方向加速度(VELOC内部計算で使用) (気相)

COMMON /R/

- VOL(KMS) : セル体積  
AR(4,KMS) : セル断面積(各方向)

COMMON /S/

- GFLUX : (注目する噴出口における)質量流束  
BOLTZ : ボルツマン定数  
AVO : アボガドロ数  
EMS : (水・蒸気の)分子量  
TKO : 絶対温度変換値(273.15K)  
T : 計算時刻 (T+DT)

COMMON /T/

- NPX1,NPX2,NPX3,NPX4 : (境界条件計算時の) x 方向粗メッシュ指定範囲  
NPY1,NPY2,NPY3,NPY4 : (境界条件計算時の) y 方向粗メッシュ指定範囲  
NPXA : (質量流束計算時の) x 方向粗メッシュ指定範囲  
NPXB : (質量流束計算時の) x 方向粗メッシュ指定範囲

COMMON /U1/

- EGIN : 入口エンタルピ (気相)



ELIN : 入口エンタルピ (液相)  
EGEX : 出口エンタルピ (気相)  
ELEX : 出口エンタルピ (液相)  
RGIN : 入口密度 (気相)  
RLIN : 入口密度 (液相)  
RGEX : 出口密度 (気相)  
RLEX : 出口密度 (液相)

COMMON /U2/

PIN : 入口圧力  
PEX : 出口圧力  
ALPIN : 入口ボイド率  
ALPEX : 出口ボイド率  
TGIN : 入口温度 (気相)  
TLIN : 入口温度 (液相)  
TGEX : 出口温度 (気相)  
TLEX : 出口温度 (液相)  
TOVIN : 入口過熱 (過飽和) 温度  
TOVEX : 出口過熱 (過飽和) 温度

COMMON /V/

KBREAK(KMS) : 噴出部の圧力仮想膜設定番号 (-5:上流側、-6:下流側)

COMMON /W/

DNGEX(4,KMS) : 出口(圧力境界)質量移動量 (気相)  
DNLEX(4,KMS) : 出口(圧力境界)質量移動量 (液相)

以降のCOMMONブロックは、今回のコード開発における変更・追加部分。

COMMON /AA/

RHO(2,KMS) : (気液相の)質量密度  
CPT(2,KMS) : (気液相の)定圧比熱  
AST(2,KMS) : (気液相の)音速  
UMT(2,KMS) : (気液相の)粘性係数

TCN(2,KMS)	: (気液相の)熱伝導率
COMMON /AB/	
TSA(2,KMS)	: (Na/水の)飽和温度(各物質で1つ)
HSA(4,KMS)	: (Na/水の)気液相の飽和エンタルピー
RHS(2,KMS)	: (Na/水の)気液相の飽和温度における密度(飽和密度)
COMMON /AC0/	
ROCIN(KMC)	: (各化学種・成分の)入口条件における質量密度
ROCEX(KMC)	: (各化学種・成分の)出口条件における質量密度
ALCIN(KMC)	: (各化学種・成分の)入口条件における体積率
ALCEX(KMC)	: (各化学種・成分の)出口条件における体積率
COMMON /AC1/	
QC(KMC,KMS)	: CV内の各化学種・成分の質量保有量
XMC(KMC,KMS)	: CV内の各化学種・成分の気液相における質量分率
COMMON /AC2/	
RHC(KMC,KMS)	: CV内の化学種・成分の質量密度
XLC(KMC,KMS)	: CV内の化学種・成分のモル分率
XSC(KMC,KMS)	: CV内の化学種・成分の質量分率
COMMON /AD/	
CFF	: 水素/水モル転換比 F
CRR	: 水素反応速度定数 K
CTH	: 気相伝熱比 $\theta$
WEC(KMC)	: 化学種分子量 $W_c$
NCS	: 化学種の数
IC(2,0:KMC)	: 化学種・成分の気液分類番号
COMMON /AE1/	
RSA(4,KMS)	: (Na/水の)気液相の飽和温度における密度(飽和密度)
COMMON /AE2/	
SOM(2,KMS)	: 化学種・成分の質量移動に伴う気液各相の質量移動量
SOT(2,KMS)	: 化学反応に伴う気液各相の伝熱量
GSW(2,KMS)	: 気相→液相の相変化による質量移動量

GWS(2,KMS) : 液相→気相の相変化による質量移動量

COMMON /AF/

DNCEX(KMC,4,KMS) : 出口(圧力境界)質量移動量 (化学種・成分)

COMMON /AG/

TPM(KMS) : CV内の気液相の平均温度

次のブロックは、コード開発に使用したEWS独自の解析時間/CPU使用時間表示のための拡張機能に関するものである。他の処理系を利用の際には、本COMMON変数を利用するメインモジュール部分削除で対応すればよい。

COMMON/CLCK/

CPUTM : CPU時間

CTM : CPU時間

TCLOCK(2) : 動作ブロック毎のCPU時間保存変数

ICLOCK(2,2) : 動作ブロック毎のCPU時間保存変数

## (2) モジュールにおける主な使用変数

以下は、本コードの入出力・計算制御部分等のモジュール(サブルーチン)および今回変更された物性値関数と関連モジュールである。なお、引き渡される変数を右側に示した。

<main.f>

・メインモジュールPROGRAM S2DJO7

・SUBROUTINE OUTMAT

( T1,T2,IXMAX,JYMAX,KMP,KMS,KML,KIJ,DD,NN )

・SUBROUTINE CHANGE

・SUBROUTINE STATE2

・SUBROUTINE STATE

<io.f>

・SUBROUTINE INPUT

( FILEIO,FILERS,IRST )

・SUBROUTINE SETUP

- SUBROUTINE SETUP2
  - SUBROUTINE RSTIN ( FILERS, IER, TS )
  - SUBROUTINE RSTOUT ( FILEIO )
- <func.f>
- SUBROUTINE BIT (X, FUNC, XL, XR, EPS, ITR, IR, IER, JER)
  - SUBROUTINE LIT ( FUNC, X1, X2, EPS, ITR, IR, IER, JER )
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION DENS (IP, TX, PX, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION VISC (IP, TX, PX, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION CPS (IP, TX, PX, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION HEAT (IP, TX, PX, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION DKAP (IP, TX, PX, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION TCOND (IP, TX, PX, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION SONIC (IP, TX, PX, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION TSAT (IPX, PX, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION EVT (TT, IER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION PROF (IP, IK, PX, TX, IC, XCM, IER)

以下は、本コードの流動解析本体部分で、左に示す変数は「補正計算される配列変数」、右に示す変数は「使用する配列変数」である。なお、各サブルーチンのローカル変数、関数名は小文字で示した。

- <ph.f>
- SUBROUTINE ACT
 

ro[nc]	QC[nc]
so[nc]	ro[nc]
dh[nc]	<-heat(PQ,TG/TL)
xi[nc]	ro,so,dh[nc]
qq	so,dh
so[nc]	qq
QC[nc]	QC,so[nc]
SOM,SOT[g/l]	so[nc]

· SUBROUTINE PHCHG

spe,spc	QC,RHC
vst	TSA
GWS[g/l]	spe,vst,RSA[l],TL,TSA
GSW[g/l]	spc,vst,RSA[g],TG,TSA

· SUBROUTINE MMTRAN

QC	GWS,GSW
QS,QW	GWS,GSW,SOM,SOT
UMS,VMS,UMW,VMW	GWS,GSW,SOM,UL,VL,UG,VG
ES,EW	GWS,GSW,HSA,UG,VG,UL,VL

<cal.f> : SIMAコード本体部分

· SUBROUTINE VELOC

FGXM,FGYM,FLXM,FLYM	PR,RHO,QS,QW,UG,VG,UL,VL
ALXM,ALYM,AGXM,AGYM	FGXM,FGYM,FLXM,FLYM
UL,VL	ALXM,ALYM
UG,VG	AGXM,AGYM
UMS,VMS,UMW,VMW	QS,QW,UG,VG,UL,VL

· SUBROUTINE RENRIT (A11,A12,A21,A22,B1,B2,X1,X2)

· SUBROUTINE MOVE

dgg,dll	PR,PQ
BNG,BNL	QS,QW,UG,VG,UL,VL,dgg,dll
DNG,DNL	DNG,DNL,QS,QW
DNGEX,DNLEX	UG,VG

· SUBROUTINE MIX

· SUBROUTINE MIXING

UMS,VMS,UMW,VMW	FQ,RHO,UMT[g/l],UMS,UMW,VMS,VMW
-----------------	---------------------------------

· SUBROUTINE CONDCT

ES,EW	FQ,RHO,CPT[g/l],TCN[g/l],ES,EW
-------	--------------------------------

· SUBROUTINE PRESSD

- PQ                      PRSX(QS,QW,ES,EW,UG,VG,UL,VL)
- PR                      PQ
- SUBROUTINE MOMTRS
    - UMS,VMS,UMW,VMW            UG,VG,UL,VL,DNGEX,DNLEX,DNG,DNL
  - SUBROUTINE ENGTRS
    - ES,EW                      PQ,UG,VG,UL,VL,RHO,DNG,DNL,DNGEX,DNLEX
  - SUBROUTINE MASTRS
    - QS,QW                      QS,QW,DNG,DNL,DNGEX,DNLEX,UG,UL
  - SUBROUTINE CMSTRS
    - QC                          QC,XMC,DNG,DNL,UG,UL
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION VTP (K,PR,QSX,ESX,QWX,EWX,JER)
  - DOUBLE PRECISION FUNCTION PRSX (K,VOL,QS,ES,QW,EW,PBFR)

#### 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のための基本となるコード開発に関するものである。解析に必要となる化学反応モデルと二相流(二流体)モデルの開発・検討を行ない、さらに2つのモデルをカップリングさせた反応ジェット解析用の基本コードを開発して、各モデルの妥当性を試計算により確認した。開発コードは、ナトリウム-水反応を伴う二相流噴流、すなわち反応ジェットの流動解析評価が可能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を選定する上で必要となる、ナトリウム-水反応ジェット解析のための基本となるコードを開発した。

本報告の化学反応モデルでは、気液相熱伝達等の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。

今後は、本報告で開発した基本コードを用いて、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実施する中で、モデルで導入されたパラメータの影響評価を行い、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、開発コードの高速化等についても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、北浦義和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) 真野多喜夫, 岡部綾夫, 石井孝信, 藤又和博, 国井誠,  
LEAPコード用ブローダウンモデルの開発: PNC PJ9124 95-003 (1995)
- (2) 齋藤義則, 床井博見, 池田孝志, 真野多喜夫, 岡部綾夫, LEAPコード用  
反応ジェットコードの開発設計: PNC PJ9124 96-005 (1996)
- (3) 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, 東京  
(1993)
- (4) 日本原子力学会編, 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)
- (5) 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社, 東京 (1989)
- (6) 湊明彦, 村田重人, オリフィスから放出される高温高圧水流の二次元数  
値解析: 第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集, E322 (1989-5)
- (7) 高森和英, 湊明彦, 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)
- (8) 化学工学協会編, 改訂四版化学工学便覧, 丸善, 東京 (1978)
- (9) 日本化学会編, 改訂3版化学便覧-基礎編II, 丸善, 東京 (1984)
- (10) 保原充, 大宮司久明 編, 数値流体工学-基礎と応用, 東京大学出版会,  
東京(1992)
- (11) 根井弘道, 堀雅夫, 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)
- (12) 根井弘道, 橋口功, 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)
- (13) 河原愈, 八巻秀雄, 桜間直樹, 加藤洋明, 鈴置昭, 幡谷文雄, 小笠原英雄,  
高速増殖炉用蒸気発生器の開発: 日立評論, Vol.56, No.9 (1974-9)
- (14) 日本機械学会編, 伝熱工学資料 改訂第4版, 日本機械学会, 東京  
(1986-10)
- (15) 日本機械学会編, 技術資料 流体の熱物性値表, 丸善, 東京 (1983)
- (16) 東京天文台編纂, 理科年表, 丸善, 東京 (1995)

- (17) C.E.Wicks and F.E.Block,"Bulletin 605, Bureau of Mines Thermodynamic Properties of 65 Elements - Their Oxides, Halides, Carbides, and Nitrides", United States Government Printing Office, Washington, (1963)
- (18) 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター編, ナトリウム物性値の実用計算式 1972年までの公表文献に基づく液体と蒸気の物性値 N941 75-19 (1975-3)
- (19) 富士総合研究所編, 富士総研技報, Vol.3-No.1 (1992)
- (20) 富士総合研究所編, 富士総研技報, Vol.4-No.1 (1993)
- (21) CRC総合研究所編, PHOENICS概説書(入門編) (1995)
- (22) 河村洋・土方邦夫, 熱と流れのシミュレーション, 丸善, 東京 (1995-3)
- (23) 渡部力・名取亮・小国力, FORTRAN77による数値計算ソフトウェア, 丸善, 東京 (1989)
- (24) 日本機械学会編, 機械工学便覧 基礎編・応用編, 日本機械学会・丸善, 東京 (1987)

## [付録]

付録A. 計算入力ファイルのサンプル

(Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合)

付録B. 解析結果ファイルのサンプル

(Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合)

付録C. 入力ファイル作成用シェルスクリプトのサンプル

(Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合)

付録D. パラメータサーベイ用実行シェルスクリプトのサンプル

(Na中への蒸気の噴流：反応有りの場合)

付録E. コード使用時の注意

付録A. 計算入力ファイルのサンプル  
(Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合)

入力ファイル名：97030105

```

C---5---10---15---20---25---30---35---40---45---50---55---60---65---70
C 97030105 SIMA CAL. CONDITIONS FOR SWR JET (1997.03.01)
C---5---10---15---20---25---30---35---40---45---50---55---60---65---70
  IRST
    0
  FILERS
  97030105
    DT      TMAX      DTPRNT      DTPLT
  1.000D-8  1.000D-4  1.000D-5  1.000D-5
  ITAU
    20
    PY      GR      BOLTZ      AVO      TKO
  3.1416D  9.80665D0  1.381D-23  6.022D+23  273.15D0
    OMG     CSQ     AIMOM     VB      EATA
  2.500D0  0.100D0  0.500D0  0.200D0  0.000D+0
    CHM     CWF     EDDY
  0.010D0  3.002D-3  5.500D0
    PIN     ALPIN    TLIN     TGIN     TOVIN
  16.300D6  0.999D+0  5.000D2  5.000D2  1.000D0
    PEX     ALPEX    TLEX     TGEX     TOVEX
  3.000D5  1.000D-2  5.000D2  5.000D2  1.000D0
    CFF     CRR     CTH
  0.750D0  1.000D-2  0.010D0
  NCS
    7
  WEC(I)
  0.018D0  0.018D00  0.023D0  0.023D0  0.002D0
  0.040D0  0.062D00
  NO(IK=1)  IK=1(1)  IK=1(2)  IK=1(3)  IK=1(4)
    4      1      3      6      7
  NO(IK=2)  IK=2(1)  IK=2(2)  IK=2(3)  IK=2(4)
    3      2      4      5
  NPXA      NPXB
    2      1
  MX      NPX1      NPX2      NPX3      NPX4
    7      3      4      5      6
  MY      NPY1      NPY2      NPY3      NPY4
    4      1      2      3      3
----- I      XX(I)
    1      0.000D0
    2      0.010D0
    3      0.020D0
    4      0.021D0
    5      0.022D0
    6      0.100D0
    7      1.000D0
----- J      YY(J)

```

	1	0.000D0
	2	5.00D-4
	3	0.200D0
	4	0.600D0
-----	I	MESHX(I)
	1	1
	2	1
	3	1
	4	1
	5	5
	6	5
-----	J	MESHY(J)
	1	2
	2	5
	3	5
C	5	10
	15	20
	25	30
	35	40
	45	50
	55	60
	65	70

付録B. 解析結果ファイルのサンプル  
(Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合)

入力ファイル97030105に対応した解析出力：97030105.05

```

----- SIMA2D -----
.....<XC出力>
  14 5.000E-03 1.500E-02 2.050E-02 2.150E-02 2.980E-02 4.540E-
02 6.100E-02 7.660E-02 9.220E-02 1.900E-01 3.700E-01 5.500E-01
7.300E-01 9.100E-01
.....<YC出力>
  12 1.250E-04 3.750E-04 2.045E-02 6.035E-02 1.002E-01 1.401E-
01 1.801E-01 2.400E-01 3.200E-01 4.000E-01 4.800E-01 5.600E-01
.....<I,Jに対応するK番号情報出力>
   0   1   2   3   4   5   6   7   8   9  10
11  12  13  14
   1   1  13  25  27  29  41  53  65  77  89
101 113 125 137
   2   2  14  26  28  30  42  54  66  78  90
102 114 126 138
   3   3  15   0   0  31  43  55  67  79  91
103 115 127 139

   12  12  24   0   0  40  52  64  76  88  100
112 124 136 148
.....<途中経過出力>
97030105 TIME= 1.005D-05 CYCLE= 200 GFLUX= 3.666D+03
97030105 TIME= 2.005D-05 CYCLE= 400 GFLUX= 6.513D+03
97030105 TIME= 3.005D-05 CYCLE= 600 GFLUX= 7.941D+03
97030105 TIME= 4.005D-05 CYCLE= 800 GFLUX= 8.893D+03
97030105 TIME= 5.005D-05 CYCLE= 1000 GFLUX= 9.567D+03
97030105 TIME= 6.005D-05 CYCLE= 1200 GFLUX= 1.002D+04
97030105 TIME= 7.005D-05 CYCLE= 1400 GFLUX= 1.033D+04
97030105 TIME= 8.005D-05 CYCLE= 1600 GFLUX= 1.054D+04
97030105 TIME= 9.005D-05 CYCLE= 1800 GFLUX= 1.070D+04
97030105 TIME= 1.001D-04 CYCLE= 2000 GFLUX= 1.081D+04
.....<圧力>
  PQ          14          12
           1           2           3           4           5
6          7          8          9          10          11          12
13         14
   1 1.630E+07 1.627E+07 1.474E+07 1.303E+07 1.291E+06
5.149E+05 1.117E+05 3.190E+05 2.969E+05 2.999E+05 3.000E+05
3.000E+05 3.000E+05 3.000E+05

   12 1.630E+07 1.630E+07 0.0          0.0          3.000E+05
3.000E+05 3.000E+05 3.000E+05 3.000E+05 3.000E+05 3.000E+05
3.000E+05 3.000E+05 3.000E+05

```

.....<ボイド率>

FQ		14		12								
		1		2		3		4		5		
6		7		8		9		10		11		12
13		14										
	1	9.990E-01	9.990E-01	9.991E-01	9.993E-01	9.968E-01	7.176E-					
01	1.177E-01	5.466E-03	9.644E-03	1.000E-02	1.000E-02	1.000E-02	1.000E-02					
	1.000E-02	1.000E-02										

	12	9.990E-01	9.990E-01	0.0	0.0	1.000E-02	1.000E-
02	1.000E-02	1.000E-02	1.000E-02	1.000E-02	1.000E-02	1.000E-02	1.000E-02
	1.000E-02	1.000E-02					

.....<気液二相流の流速、温度、密度>

UL		14		12
VL		14		12
UG		14		12
VG		14		12
TL		14		12
TG		14		12
ROL		14		12
ROG		14		12

.....<気液相の平均温度>

TPM		14		12								
		1		2		3		4		5		
6		7		8		9		10		11		12
13		14										
	1	4.999E+02	4.962E+02	4.959E+02	4.956E+02	6.220E+02						
	5.594E+02	5.010E+02	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02					
	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02									

	12	5.000E+02	5.000E+02	0.0	0.0	5.000E+02
	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02
	5.000E+02	5.000E+02	5.000E+02			

.....<化学種の密度・各相における質量分率>

.....<液相H<sub>2</sub>O>

ROCL:H2O		14		12
XMCL:H2O		14		12

.....<気相H<sub>2</sub>O>

ROCG:H2O		14		12
XMCG:H2O		14		12

.....<液相Na>

ROCL:NA		14		12
XMCL:NA		14		12

.....<気相Na>

ROCG:NA		14		12
XMCG:NA		14		12

.....<H<sub>2</sub>>

ROCG:H2		14		12								
XMCG:H2		14		12								
		1		2		3		4		5		
6		7		8		9		10		11		12



13		14							
	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.697E-04	9.293E-	
02	4.367E-01	2.146E-02	4.067E-04	2.047E-10	3.084E-16	6.752E-24			
	0.0	0.0							

	12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0									

.....<NaOH>

ROCL:NAOH	14	12
XMCL:NAOH	14	12

.....<Na<sub>2</sub>O>

ROCL:NA2O	14	12
XMCL:NA2O	14	12

付録C. 入力ファイル作成用シェルスクリプトのサンプル  
(Na中への蒸気の噴出：反応有りの場合)

入力ファイル97030105を含むパラメータサーベイ用  
ファイル名：FI970301

```
#
# < FI970301 > InputData : for PNC (SIMA2DA with SWR )
# PARAMETER
# A0-2: PIN, ALPIN, TL/GIN
# B0-2: PEX, ALPEX, TL/GEX
# C1-4: CFF, CRR, CTH, EATA
# G:MOUSE RADIUS
# X: Run Number & File Name
#
echo 'C---5---10---15---20---25---30---35---40---45---50---
55---60---65---70' > iii
echo 'C XXXXXXXX SIMA CAL. CONDITIONS FOR SWR JET
(1997.03.01)' >> iii
echo 'C---5---10---15---20---25---30---35---40---45---50---
55---60---65---70' >> iii
echo '      IRST' >> iii
echo '      0' >> iii
echo '      FILERS' >> iii
echo '      XXXXXXXX' >> iii
echo '      DT      TMAX      DTPRNT      DTPLT' >> iii
echo '      1.000D-8  1.000D-4  1.000D-5  1.000D-5' >> iii
echo '      ITAU' >> iii
echo '      20' >> iii
echo '      PY      GR      BOLTZ      AVO      TKO' >>
iii
echo '      3.1416D  9.80665D0  1.381D-23  6.022D+23  273.15D0' >>
iii
echo '      OMG      CSQ      AIMOM      VB      EATA'
>> iii
echo '      2.500D0  0.100D0  0.500D0  0.200D0 CCCCCCCC4'
>> iii
echo '      CHM      CWF      EDDY' >> iii
echo '      0.010D0  3.002D-3  5.500D0' >> iii
echo '      PIN      ALPIN      TLIN      TGIN      TOVIN'
>> iii
echo '      AAAAAAAA0  AAAAAAAA1  AAAAAAAA2  AAAAAAAA2  1.000D0'
>> iii
echo '      PEX      ALPEX      TLEX      TGEX      TOVEX'
>> iii
echo '      BBBBBBBB0  BBBBBBBB1  BBBBBBBB2  BBBBBBBB2  1.000D0'
>> iii
echo '      CFF      CRR      CTH' >> iii
echo '      CCCCCCCC1  CCCCCCCC2  CCCCCCCC3' >> iii
```

```

echo '      NCS' >> iii
echo '      7' >> iii
echo '    WEC(I)' >> iii
echo '    0.018D0 0.018D00 0.023D0 0.023D0 0.002D0'
>> iii
echo '    0.040D0 0.062D00' >> iii
echo '    NO(IK=1)  IK=1(1)  IK=1(2)  IK=1(3)  IK=1(4)'
>> iii
echo '      4      1      3      6      7'
>> iii
echo '    NO(IK=2)  IK=2(1)  IK=2(2)  IK=2(3)  IK=2(4)'
>> iii
echo '      3      2      4      5' >> iii
echo '    NPXA      NPXB' >> iii
echo '      2      1' >> iii
echo '    MX      NPX1      NPX2      NPX3      NPX4' >>
iii
echo '      7      3      4      5      6' >>
iii
echo '    MY      NPY1      NPY2      NPY3      NPY4' >>
iii
echo '      4      1      2      3      3' >>
iii

```

```

echo '----- I      XX(I) for Kudo( at HITACHI )
Experiment' >> iii
echo '      1  0.000D0' >> iii
echo '      2  0.010D0' >> iii
echo '      3  0.020D0' >> iii
echo '      4  0.021D0' >> iii
echo '      5  0.022D0' >> iii
echo '      6  0.100D0' >> iii
echo '      7  1.000D0' >> iii
echo '----- J      YY(J)' >> iii
echo '      1  0.000D0' >> iii
echo '      2  GGGGGGG' >> iii
echo '      3  0.200D0' >> iii
echo '      4  0.600D0' >> iii
echo '----- I  MESHX(I)' >> iii
echo '      1      1' >> iii
echo '      2      1' >> iii
echo '      3      1' >> iii
echo '      4      1' >> iii
echo '      5      5' >> iii
echo '      6      5' >> iii
echo '----- J  MESHY(J)' >> iii
echo '      1      2' >> iii
echo '      2      5' >> iii
echo '      3      5' >> iii
echo 'C---5---10---15---20---25---30---35---40---45---50---

```

55---60---65---70' >> iii

### Setup

```
# A0-2: PIN, ALPIN, TL/GIN = 16.3D6, 99.9%, 500/500
# B0-2: PEX, ALPEX, TL/GEX = 3.0D5, 1.00%, 500/500
# G:MOUSE RADIUS = 0.5mm
# C1-4: CFF, CRR, CTH, EATA = 0.75, ??? , 1.0%, 0.0
sed -e 's/AAAAAAAAA0/ 16.300D6/g' -e 's/AAAAAAAAA1/
0.999D+0/g' -e 's/AAAAAAAAA2/ 5.000D2/g' -e 'sBBBBBBBBB0/
3.000D5/g' -e 'sBBBBBBBBB1/ 1.000D-2/g' -e 'sBBBBBBBBB2/
5.000D2/g' -e 's/GGGGGGG/5.00D-4/g' iii > i0
```

```
sed -e 's/CCCCCCCC1/ 0.750D0/g' -e 's/CCCCCCCC3/
0.010D0/g' -e 's/CCCCCCCC4/ 0.000D+0/g' i0 > i1
sed -e 's/CCCCCCCC2/ 0.000D+0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030101/g'
i1 > 97030101
sed -e 's/CCCCCCCC2/ 1.000D-8/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030102/g'
i1 > 97030102
sed -e 's/CCCCCCCC2/ 1.000D-6/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030103/g'
i1 > 97030103
sed -e 's/CCCCCCCC2/ 1.000D-4/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030104/g'
i1 > 97030104
sed -e 's/CCCCCCCC2/ 1.000D-2/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030105/g'
i1 > 97030105
rm i1
```

```
# C1-4: CFF, CRR, CTH, EATA = ???, 1.0D-6, 1.0%, 0.0
sed -e 's/CCCCCCCC2/ 1.000D-6/g' -e 's/CCCCCCCC3/
0.010D0/g' -e 's/CCCCCCCC4/ 0.000D+0/g' i0 > i1
sed -e 's/CCCCCCCC1/ 0.500D+0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030111/g'
i1 > 97030111
sed -e 's/CCCCCCCC1/ 0.600D+0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030112/g'
i1 > 97030112
sed -e 's/CCCCCCCC1/ 0.750D+0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030113/g'
i1 > 97030113
sed -e 's/CCCCCCCC1/ 0.900D+0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030114/g'
i1 > 97030114
sed -e 's/CCCCCCCC1/ 1.000D+0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030115/g'
i1 > 97030115
rm i1
```

```
# C1-4: CFF, CRR, CTH, EATA = 0.75D0, 1.0D-6, ???, 0.0
sed -e 's/CCCCCCCC1/ 0.750D+0/g' -e 's/CCCCCCCC2/ 1.000D-
6/g' -e 's/CCCCCCCC4/ 0.000D+0/g' i0 > i1
sed -e 's/CCCCCCCC3/ 0.001D0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030121/g'
i1 > 97030121
sed -e 's/CCCCCCCC3/ 0.005D0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030122/g'
i1 > 97030122
sed -e 's/CCCCCCCC3/ 0.010D0/g' -e 's/XXXXXXXXX/97030123/g'
i1 > 97030123
```

```
sed -e 's/CCCCCCCC3/ 0.020D0/g' -e 's/XXXXXXXX/97030124/g'  
i1 > 97030124  
sed -e 's/CCCCCCCC3/ 0.050D0/g' -e 's/XXXXXXXX/97030125/g'  
i1 > 97030125  
rm i1
```

```
# C1-4: CFF, CRR, CTH, EATA = 0.75D0, 1.0D-6, 1.0%, ???  
sed -e 's/CCCCCCCC1/ 0.750D+0/g' -e 's/CCCCCCCC2/ 1.000D-  
6/g' -e 's/CCCCCCCC3/ 0.010D0/g' i0 > i1  
sed -e 's/CCCCCCCC4/ 1.000D-2/g' -e 's/XXXXXXXX/97030131/g'  
i1 > 97030131  
sed -e 's/CCCCCCCC4/ 1.000D-1/g' -e 's/XXXXXXXX/97030132/g'  
i1 > 97030132  
sed -e 's/CCCCCCCC4/ 1.000D+0/g' -e 's/XXXXXXXX/97030133/g'  
i1 > 97030133  
sed -e 's/CCCCCCCC4/ 1.000D+1/g' -e 's/XXXXXXXX/97030134/g'  
i1 > 97030134  
sed -e 's/CCCCCCCC4/ 1.000D+2/g' -e 's/XXXXXXXX/97030135/g'  
i1 > 97030135  
rm i1
```

```
rm i0  
rm iii
```

付録D. パラメータサーベイ用実行シェルスクリプトのサンプル  
(Na中への蒸気の噴流：反応有りの場合)

入力ファイル97030105を含むパラメータサーベイ用  
ファイル名：FX970301

```
#!/bin/sh
#
# < FX970301 > Execute Shell : for PNC (SIMA2DA with SWR )
# PARAMETER
# A0-2: PIN, ALPIN, TL/GIN
# B0-2: PEX, ALPEX, TL/GEX
# C1-4: CFF, CRR, CTH, EATA
# G:MOUSE RADIUS
# X: Run Number & File Name
#
echo '97030101' > int
s80 < int > 97030101.OX
echo '97030102' > int
s80 < int > 97030102.OX
echo '97030103' > int
s80 < int > 97030103.OX
echo '97030104' > int
s80 < int > 97030104.OX
echo '97030105' > int
s80 < int > 97030105.OX

grep TIME 97030101.05 >T01
grep TIME 97030102.05 >T02
grep TIME 97030103.05 >T03
grep TIME 97030104.05 >T04
grep TIME 97030105.05 >T05
compress 970301*.O?

echo '97030111' > int
s80 < int > 97030111.OX
echo '97030112' > int
s80 < int > 97030112.OX
echo '97030113' > int
s80 < int > 97030113.OX
echo '97030114' > int
s80 < int > 97030114.OX
echo '97030115' > int
s80 < int > 97030115.OX

grep TIME 97030111.05 >T11
grep TIME 97030112.05 >T12
grep TIME 97030113.05 >T13
grep TIME 97030114.05 >T14
```

```
grep TIME 97030115.05 >T15
compress 970301*.O?
```

```
echo '97030121' > int
s80 < int > 97030121.OX
echo '97030122' > int
s80 < int > 97030122.OX
echo '97030123' > int
s80 < int > 97030123.OX
echo '97030124' > int
s80 < int > 97030124.OX
echo '97030125' > int
s80 < int > 97030125.OX
```

```
grep TIME 97030121.05 >T21
grep TIME 97030122.05 >T22
grep TIME 97030123.05 >T23
grep TIME 97030124.05 >T24
grep TIME 97030125.05 >T25
compress 970301*.O?
```

```
echo '97030131' > int
s80 < int > 97030131.OX
echo '97030132' > int
s80 < int > 97030132.OX
echo '97030133' > int
s80 < int > 97030133.OX
echo '97030134' > int
s80 < int > 97030134.OX
echo '97030135' > int
s80 < int > 97030135.OX
```

```
grep TIME 97030131.05 >T31
grep TIME 97030132.05 >T32
grep TIME 97030133.05 >T33
grep TIME 97030134.05 >T34
grep TIME 97030135.05 >T35
compress 970301*.O?
```

## 付録E. コード使用時の注意

### (1) FORTRAN処理系による変更点

以下の事項は、コード開発と試計算に使用したEWS(日立製3050RX)に固有の処理である。よって、他の処理系への導入に当たっては変更が必要である。

OPEN文中の「TYPE」オプションは、他の処理系では削除が必要である。

COMMON/CLCK/ブロックは、EWS独自の解析時間・CPU使用時間表示のための拡張機能に関するものである。他の処理系では、メインモジュールにおけるCOMMON/CLCK/ブロックの変数を使用する部分の削除が必要である。

### (2) タイムステップの制約

本コードではEuler陽解法を使用しているため、流動中の物性値伝播速度=音速によりタイムステップが制約される。この場合、タイムステップの大きさは(最小計算セル寸法)/(流体の音速)以下の基準を満たせばよいが、さらに気液二相流の保存式を連立して解くための不安定性回避のため、上記基準より数分の1以上小さいタイムステップが望ましい。

なお試計算体系では、タイムステップの基準は( $10^{-3}$ mのオーダー)/(音速= $10^3$ m/sのオーダー)=( $10^{-6}$ sのオーダー)となるが、これより10分の1程度小さいタイムステップで解析した。

### (3) 解析速度の改善について

本コードでは、気液相の平均温度算出時の非線形方程式の解の探索(収束計算)のために、2つの探索モジュールLIT(割線法)、BIT(二分法・はさみうち法の併用法)を用意している。LITでは、初期値の制約はないものの初期値により収束速度が大きく依存する。一方のBITでは、求める解(方程式の零点)を挟むように2つの初期値を与える必要があり、収束速度は余り高くない。このように、2つの探索法には一長一短があるが、物性値関数の性質を見極めてモジュール・初期値の設定を変更すれば、解析速度の向上がある程度期待できる。

今回用意した物性値関数は単調変化のため、初期値制約の無いLITを用いている。