

# 格納容器熱水力学解析コードGOTHIC

浜野 明千宏\* 吉岡 逸夫\* 森田 秀利\* 栗山 剛祐\*

## Overview of Containment Thermal-Hydraulic Analysis Code : GOTHIC

Achihiro Hamano\*, Itsuo Yoshioka\*, Hidetoshi Morita\* and Kousuke Kuriyama\*

GOTHIC は、米国で開発された格納容器熱水力学解析コードである[1][2]。われわれは GOTHIC を用いた解析に携わってきた。本稿では、GOTHIC の概要理解を目的として、われわれの経験に基づき GOTHIC の機能の特長、処理の流れ、使用方法の解説を行う。

Key word: 原子力安全解析、シビアアクシデント、原子炉格納容器、LOCA 解析、3 次元圧縮性多相流解析

### 1. はじめに

GOTHIC (Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containments) [1][2]は、米国電力研究所(EPRI)と NAI(Numerical Applications Inc.)社が 1989 年に開発した格納容器内圧挙動解析コードであり、新設プラント申請にも使用されている。具体的な適用例としては、格納容器破損防止対策の有効性評価、特に格納容器における水素濃度評価があげられる。GOTHIC では、破断流及び水素発生量などは他の熱水力学解析コードで解析した結果を境界条件として取り込み、格納容器内の過渡解析をする。それにより、格納容器内の水素濃度が爆轟濃度以下に維持され、かつリコンバイナ等の設置により長期的に水素濃度が抑えられることを評価する。[3]以下に、GOTHIC の機能の特長、処理の流れ、使用方法を解説する。

### 2. 機能および理論概要

質量・エネルギー・運動量の 3 保存則を気相・連続液相・液滴相の各流体場に適用して、それと状態方程式、熱伝導方程式、各種構成式及び相関式などにより、流体・構造体の相互作用、機器の作動を考慮した過渡解析を行う。

\*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

2<sup>nd</sup> Computational Science and Engineering Group,  
AdvanceSoft Corporation

特に、スプレイによる液滴相の挙動を評価するために、液滴相とそれ以外の液相を独立変数としていることが特長であり、さらにミストと氷も考慮している。気相に関しては、各種ガス組成の考慮が可能である。

各相の扱いを表 1 に示す。例えば、管内で下降する液膜や、液膜や気相と異なる流速で動く液滴が表現できる。気相、液滴、連続液相は異なる温度となりうる (温度非平衡)。これにより、例えばサブクール液滴スプレイと同じ領域に過熱プールが存在できる。

GOTHIC の熱流動計算の中核部分は、1973 年の COBRA-IV に由来し、COBRA コードのバージョンアップの経緯を経て、最終的には 1986 年の FATHOMS コードをベースとして発展したものである。

GOTHIC のモデル構成要素を表 2 に示す。空間はボリュームとしてモデル化し、それらをパス (流路) によって接続して体系モデルを構成する。ボリュームは COBRA コードと同様の集中定数系を基本とし、ユーザーの指定により一部のボリュームを細分して有限差分法による計算も行える。

また、ポンプ、弁、スプレイ、熱交換器、イグナイタ、水素再結合器といった機器設備の作動及び制御に対しても、組み込まれたコンポーネントモデルにより模擬が可能である。これらにより、想定した事故シーケンスに従って格納容器内の過渡状態を

計算することができる。

基礎方程式の数値解法は陰解法を採用し、次の選択肢が用意されている。

・SEMI-IMP：半陰解法（流速と圧力に関して陰解法を適用し、輸送量は陽に扱う）

・AUTO-IMP：全変数を陰に扱い、時間刻み幅は指定した下限値までの範囲で自動設定

・FRCD-IMP：全変数を陰に扱い、時間刻み幅は指定値に設定

表 1 GOTHIC の流体相

| 分類                        | 説明   |  |
|---------------------------|--|--|
| 気相<br>vapor               | <ul style="list-style-type: none"><li>・ 水蒸気＋非凝縮ガス成分（多成分）</li><li>・ （ボリューム単位で）温度と速度は同一</li></ul>              | <ul style="list-style-type: none"><li>・ 各々、ボリューム単位で質量・エネルギー・運動量収支を保つ</li><li>・ 圧縮性を仮定</li><li>・ 相間、壁との間の質量・エネルギー・運動量の移行を構成式で計算</li></ul> |
| 液滴<br>drop                | <ul style="list-style-type: none"><li>・ （ボリューム単位で）直径、温度、速度は同一</li></ul>                                      |  |
| 連続液相<br>continuous liquid | <ul style="list-style-type: none"><li>・ 液滴以外、液膜・プール等</li><li>・ 「<u>liquid</u>」と呼ぶ</li></ul>                  |  |
| ミスト<br>mist               | <ul style="list-style-type: none"><li>・ 気相流速で動く</li><li>・ 気相運動方程式で気相密度に加算</li><li>・ 温度は、水蒸気分圧の飽和温度</li></ul> |  |
| 氷<br>ice                  | <ul style="list-style-type: none"><li>・ 質量収支のみ保つ</li><li>・ 溶融まで初期温度を保つ</li></ul>                             |  |

表 2 GOTHIC のモデル構成要素

|             |   |
|-------------|---|
| コントロールボリューム | 1D(「0D」)、3D   |
| 流路パス        | 2つのコントロールボリュームを接続   |
| 熱構造体        | 壁や構造物、アイスコンデンサ  |
| コンポーネント（機器） | ポンプ・ファン、バルブ、ファンクーラー、熱交換器、スプレイ、水素リコンビナ(可燃性水素ガスを除去する装置)、イグナイタ(水素燃焼装置)、フィルタ等 |
| 境界          | 圧力・温度、流量等   |
| 制御変数        | 制御系   |

### 3. プログラム構成と概略の計算の流れ[3]

GOTHIC のシステム構成と連携ファイルを図 1 に示す。前処理を行う GOTHIC\_P、計算を行う GOTHIC\_S、結果処理を行う GOTHIC\_G の 3 つのモジュールで構成される。

これらは以下のファイルでデータをやりとりする。ただし、GUI が整備されているため、ユーザーはこれらの流れを意識する必要はない。

・GTH ファイル：プリプロセッサデータ、図やグラフなどの全情報。（これがあれば計算を再現で

きる）

- ・SIN ファイル：ソルバーの入力データ
- ・GIN ファイル：グラフィックの入力データ
- ・SGR ファイル：グラフィック用結果ファイル。計算のリスタート時にも入力
- ・GDT ファイル：グラフデータ
- ・その他、中間ファイルが多数ある。

計算の中心は、タイムステップの進行の中で、反復計算の中で呼ばれる OUTER というサブルーチ

ンであり、次の処理を実行している。

構造物の計算、熱交換器の計算、流速の計算、3D  
接続流の更新、乱流、運動方程式、質量・エネルギー

一の収支計算、圧力方程式の解法、陰解法または陽  
解法の後処理、外部ソースの更新

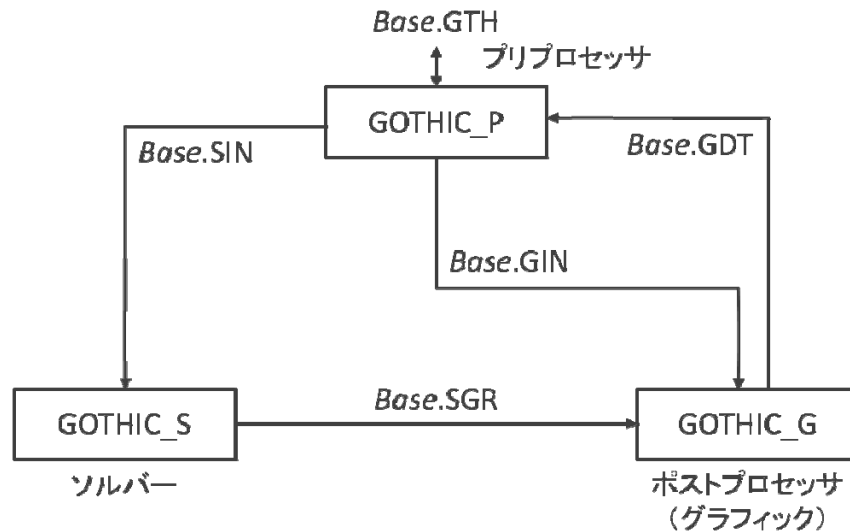


図 1 GOTHIC のシステム構成と連携ファイル

#### 4. 入力説明[2]

PC(Windiwos)用の専用 GUI で、入力データを作成できる。GUI の画面例を図 2 に示す。左上のラインメニューを選択することでサブメニューが現れ、適宜ノーディング図が表示されて、データ項目ごとの入力画面や表形式入力画面での数値入力と、ノーディング図上のマウス操作が基本となる。

既に作成したデータを利用して編集する場合は、「File > Open」によって修飾子 GTH のファイルを選択すればよい。フォルダを変えて作業する場合は、この GTH ファイルをコピーすればよい。GUI によりデータ設定ができる半面、入力データファイルはフォーマットが判読しづらいので、直接編集することは至難の業である。

GUI を用いたデータ作成は、次のようにする。

##### (1)形状モデル（流体）

形状モデルはメニューの「Build」によって作成する、サブメニューの「Control Volumes」により、コントロールボリューム（C.V.）を定義したり変更したりする。具体的には、GUI 上で四角で模式図を作成し、以下のデータを入力する。

表 3 ボリュームの入力項目

| 分 類   | データ項目                   |
|-------|-------------------------|
| ID    | ボリューム番号、説明              |
| 幾何データ | 体積、底部高さ、高さ(dz)、等価直径、L/V |

特定のコントロールボリュームを Subdivided Volume に指定すると、細分割し、その一部を障害物セルとして指定できる（後述）。

モデル図は模式的なものだが、マウスで図上指定した値がデフォルトとして採用される。モデル図のスケールを表示するには、サブメニューの「Control Volumes」の「Noding Diagram Scale」を選択する。

##### (2)形状モデル（熱構造体）

「Build」のサブメニューの「Thermal Conductors」により設定する。GUI 上で模式マークを作成しコントロールボリュームとの接続を指定し、「Conductor Number」に番号を入力しリターンし、以下のデータを入力する。

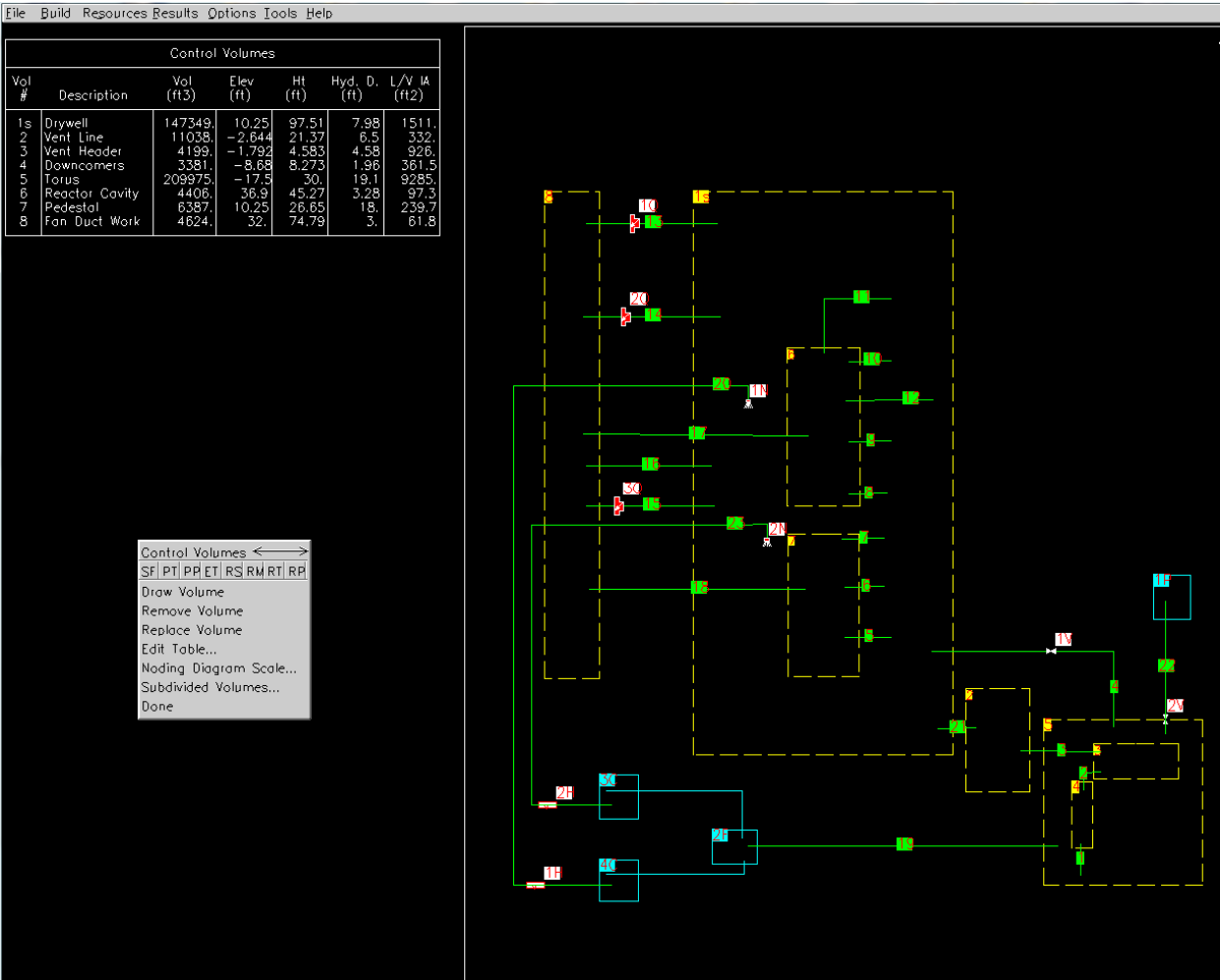


図 2 GOTHIC の GUI の画面例

表 4 熱構造体の入力項目

| 分 類   | データ項目             |
|-------|-------------------|
| ID    | 熱構造体番号、説明         |
| 伝熱データ | 表・裏の熱伝達タイプ、熱伝導タイプ |
| 幾何データ | 伝熱面積              |
| 初期条件  | 初期温度              |

このうち熱伝導タイプは、別途の表で設定し、次のデータを指定する。

表 5 熱伝導タイプの入力項目

| 分 類    | データ項目            |
|--------|------------------|
| ID     | タイプ番号、説明         |
| 幾何データ  | 円筒・壁・円柱の指定、厚さ、外径 |
| メッシュ分割 | 熱伝導方向のメッシュ分割数    |

「Define Region」メニューにより、メッシュ分割した領域ごとに、材質と座標を設定する。各材質の定義は「Resources」メニューで密度、熱伝導度、比熱の物性値を入力する。

(3)境界条件

境界ボリュームや流量境界を設定するには、「Build」のサブメニューの「Boundary Conditions」を選択する。境界条件は模式図上で設定して次のデータを入力する。

表 6 境界条件の入力項目

| 分 類 | データ項目                |
|-----|----------------------|
| ID  | 番号、説明                |
| 状態量 | 圧力、温度またはエンタルピー、流量、高さ |

圧力、温度、流量を時系列テーブルで指定することもできる。時系列テーブルはトップメニューの「Resources」のサブメニューの「Functions」を選択し、「Function Number」に番号（新規なら新しい番号）を入力、リターンしてデータを入力・修正する。テーブルをテキストファイルで用意しておいて取り込むこともでき、その場合は「Import Data」を選び、ファイルタイプを[All Files]にして、ファイルを指定すればよい。

#### (4)流路パス

「Build」のサブメニューの「Flow Paths」により設定する。GUI上でコントロールボリュームとの接続を指定し、次のデータを入力する。

表 7 流路パスの入力項目

| 分 類   | データ項目                                |
|-------|--------------------------------------|
| ID    | 流路パス番号、説明                            |
| 幾何データ | 両端それぞれのエレベーションと高さ(dz)、流路面積、水力直径、ベンド角 |
| 抵抗データ | 慣性長さ、摩擦長さ、順方向損失係数、逆方向損失係数            |

このうち高さは、パス上辺まで当該ボリュームに収まるように入力に注意を要する。

#### (5)流体機器

「Build」のサブメニューの「Component」で、さらに以下のメニューから選択して特性等を設定する。

- Pumps & Fans
- Valves & Doors
- Heat Exchangers
- Vacuum Breakers
- Spray Nozzles
- Cooler/Heaters
- Volumetric Fans
- H2 Recombiners
- Ignitors

- Isotope Filters
- RPVs

#### (6)初期条件

初期条件を設定するコントロールボリュームを指定し、次の入力データを指定する。

表 8 初期条件の入力項目

| 分 類 | データ項目                          |
|-----|--------------------------------|
| ID  | ボリューム番号                        |
| 状態量 | 圧力、気相温度、液相温度、相対湿度、液相体積率、液相成分割合 |

#### (7)作図項目

時系列の結果グラフを作図する対象を「Results > Line Graphs」により指定する。次の項目が指定できる。

- ・ボリューム別変数

圧力、飽和温度、飽和圧力、気相組成の体積割合・質量割合、相対湿度、液滴径、水位、液滴・液相の蒸発率、液相滴化率、氷溶融率、ミストの蒸発率・除去率、水素の燃焼率・発熱率、アイソトープ濃度

- ・同、相別変数

温度、密度、構造物伝熱量、体積割合、エンタルピー、乱流エネルギー・乱流エネルギー散逸率

- ・パス別変数

相別・方向別の流量・流速・圧力降下 （注）メッシュ分割時は X,Y,Z の方向別

- ・熱構造体別変数

A 面・B 面の温度・気相熱伝達係数・液相熱伝達係数・伝熱量・熱流束・氷厚さ

- ・流体機器の変数

ポンプの速度・揚程・トルク・発熱、弁の行程・損失係数・角速度、加熱器・冷却器の流量・発熱・相変化率、リコンバイナ発熱・水素 conv 等

- ・熱交換器の変数

1 次側・2 次側の入口温度・出口温度・流量、交換熱量、相変化率、体積ファンの流量・発熱

- ・RPV の変数

RPV ピストンの行程・速度、損失係数

- ・リークの変数

局所リークの質量率・体積率、全流入リーク質量率・体積率、全流出リーク質量率・体積率

- ・一部カーブ削除

左上の Results > Line Graphs > Modify Curve で Curve Number に番号を入れ、Remove Curve により削除する。

- ・カーブ追加

左上の Results > Line Graphs > Define Curves

EXCEL でグラフ化したい場合は「Results」メニューの「Data Files」でファイル指定し (File Number)、「Define File」、「Add Items」で項目指定で出力項目を指定する。

#### (8) ボリュームの細分割

メニューの「Build」のサブメニューの「Control Volumes」の「Subdivided Volumes」により、特定のコントロールボリュームを 3 次元で直交分割することができる。「Grid Lines」を選択し、「Direction」で X, Y, Z の方向を切換え、「\_Number」に追加分割数 (例えば 20 分割なら 19) を入力し、「Add」によりメッシュ線が追加される。これに付随して、次の操作が必要である。

- ・障害物の設定

例えば楕円球と円筒で構成される容器形状を表現する場合、それを包含する直方体でボリュームを定義して細分割し、球や円筒といった幾何形状を指定して流体セルを形成することができる。内部構造物を流体の障害物とすることも、同様に可能である。

- ・当該ボリュームに接続する流路パスのメッシュ位置の指定

Flow Path > Display Subvolumes > Position Flow Conn. で図中の「1a」等のマークを、パスを接続したいメッシュ位置にドラッグする。

- ・当該ボリュームに接続する熱構造体の位置の指定  
Thermal Conductors > Display Subvolumes > Span

#### Conductors

- ・当該ボリュームに接続するスプレイノズル位置の指定

Components > Spray Nozzles > Replace Components

- ・作図位置の再指定

作図位置は、ボリューム内のサブボリューム通し番号 (インデックス I,J,K ではなく 1 次元配列化したインデックス) で指定されているので、分割数を変えると、該当なしのエラーとなるか、思わぬ位置が作図されるので、再定義する。

Results > Line Graphs 等

#### (9) 時間設定

複数の時間範囲を指定し、その中の時間刻み幅や出力間隔を指定する。Build > Run Control > Time Domains

なお、入力データの表は逐一開かないと確認できないが、全体を画像ファイルで出力することができる。それには、「File」メニューのサブメニュー「Print...」を選択し、「Printer Setup」で画像のスケール等を設定の上、「Print」に戻って「Print All Used Tables」でファイル名を指定する。

### 5. 実行方法

PC (Windows) 用の GUI で、入力から計算実行、結果表示まで操作ができる。GUI で入力データを準備したら、そのまま続けて「File」メニューの「Run」を選択する。

計算プログラムの実行が終了後、その場で結果を確認するには、「Results」メニューの「Line Graphs」を選択し、「Graph Number」に番号を入力、リターンすることで時系列グラフが表示される。ここで、計算を実行しても以前のグラフが描画される場合があり、「Line Graphs」のメニューで「Replace Data」を選択すると確実である。

結果ファイルは、同じ「Results」メニューの

「Replace All Graph Data」により、修飾子 GOT のファイルとして出力される。これにより、「Data Files」で指定した項目の時系列結果ファイルも出力される（ファイル名は「Define File」の指定による）。

## 6. その他の注意事項

GOTHIC を使用する上での注意事項を以下に列挙する。

全て C 言語で書かれており、コンパイルできる環境（コンパイラ）が限られている。

入力データはテキスト形式だが、データブロック間の関連性が解読できず、直接編集は困難である。他コード用データを GOTHIC 用入力データに編集するツールの作成は難しい。

GUI の入力データ表の内容はコピーペーストできず、逐次キー入力が必要である。ただし、境界条件（破断流の時系列データ等）は、テキストファイルから GUI に読み込む機能が利用できる。

## 7. おわりに

GOTHIC について、機能と入出力項目を中心に紹介した。紙面の都合で概要説明にとどまったが、参考となれば幸いである。データの準備が間に合わなかったため、本稿では GOTHIC の具体的な使用事例を紹介することができなかったが、今後どんな形にせよ機会があれば紹介したい。

## 参考文献

- [1] Frank Rahn , “GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE TECHNICAL MANUAL Version 7.2b(QA)”, NAI 8907-06 Rev 17 (March 2009)
- [2] Frank Rahn , “GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE USER MANUAL Version 7.2b(QA)”, NAI 8907-02 Rev 18 (March 2009)
- [3] 原子力規制委員会「大飯発電所 3・4 号機の現状に関する評価会合」平成 25 年 5 月 2 日  
(<http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisy>)

[a/ooi\\_genjyou/data/20130502-ooi.pdf](http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisy/a/ooi_genjyou/data/20130502-ooi.pdf))

- [4] Frank Rahn , “GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE PROGRAMMERS GUIDE Version 7.2b(QA)”, NAI 9301-07 Rev 3 (March 2009)

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。（ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。）