

管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet

秋村 友香*

Advance/FrontNet

Yuka Akimura*

1次元解析を利用した原子力安全解析は1970年頃から米国で発達し、解析目的に応じたさまざまな用途のプログラムが開発されてきた。その中でも特に有名なものが、前稿でも紹介している気液二相流解析をターゲットとしたRELAPシリーズであり、これは原子力安全解析コードとしてよく知られている。ただし、単相流の解析についてはあまりよく知られていないのが現状である。本稿では、アドバンスソフト株式会社が開発を行っている単相流をターゲットとした1次元解析ソフトウェアの発電プラント安全解析への応用およびソフトウェアの入出力の例について紹介する。

Key word: 管路系流体解析、1次元流れ、Advance/FrontNet、過渡解析、定常解析、水撃、ポンプトリップ、液柱分離、復水器、冷却塔、ポンプ、タービン、熱交換器、制御系、冷却系、除熱系、フレアスタック、感度解析

1. はじめに

発電施設は流体機器と配管から成るシステムであり、機器の特性とシステム全体の熱流動バランスが安全面で重要である。実験を安易に行うことができない電源喪失や機器のトリップなどの危険事象を想定してシミュレーションを行うことにより、危険事象下においても、システムが安全かどうか、対策が必要かどうかの知見を得ることができる。管路系流体解析は、3次元詳細解析に比べて計算負荷の点から、このようなプラントのシステム全体の挙動を調べるのに適している。

アドバンスソフト株式会社では、液体管路系の水撃現象を扱うAdvance/FrontNet/Ω、単相流の過渡現象を扱うAdvance/FrontNet/Γ、気液二相流の過渡現象を扱うAdvance/FrontNet/TP、単相流の定常解析用のAdvance/FrontNet/Λの管路系流体解析ソフトウェアを開発している[1]。

本稿では単相用のソフトウェアに的を絞って、これらのソフトウェアを使った発電施設の安全

解析について解析対象の例や入出力の具体例を紹介する。

2. 管路系液体過渡解析ソフトウェア

ソフトウェアAdvance/FrontNet/Ωは水撃のような圧縮性に起因する急激な圧力上昇・圧力波伝播を解くことを目的に開発されている。

2.1. 機能紹介

表1にソフトウェアの機能をまとめた。基礎方程式を2本とし、状態方程式を解いていない、つまり温度を一定としている。圧縮性の影響は考慮しているが、流動による密度変化は無視できるほど小さいという近似を用いている。数値解法は特性曲線法であり、陽解法的であるため水撃のような圧力波の伝播の解析に優れている。圧力が飽和蒸気圧以下に低下したときに起こるキャビテーション（液柱分離）モデルが実装されており、ポンプトリップ時に起こる液柱分離・再結合時の圧力上昇を考慮することができる。

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

表 1 Advance/FrontNet/Ω 機能

基礎方程式	圧縮性を考慮した 質量保存式と運動量保存式
数値解法	特性曲線法
物理モデル	摩擦損失係数モデル(層流から乱流 までを統一的に取り扱う)
	キャビテーションモデル (液柱分離モデル)
	加振計算機能、FFT ※ソルバーのみ
境界条件	流量指定境界または圧力指定境界
流体機器	管 (勾配を考慮)
	弁 (開度変化を入力で与える ONOFF 弁、制御弁)
	ポンプ、タンク

2.2. 適用実績

本ソフトウェアの適用実績を表 2 に示す。ソフトウェアの取り扱う流体が液体に特化されていることから、水や LNG に関するものが多い。現象としてはバルブ操作に伴う水撃（液撃）解析やポンプトリップ解析が挙げられる。

表 2 Advance/FrontNet/Ω 実績

分野	主要実績
エネルギー プラント	<ul style="list-style-type: none"> 冷却系 ON-OFF 弁の応答解析 地熱発電所ポンプトリップ解析 地震時を想定した加振応答解析
水道・設備	<ul style="list-style-type: none"> 浄水場ポンプトリップ解析 ビル施設内ポンプトリップ解析
農業	<ul style="list-style-type: none"> 農業用パイプライン水撃解析 (樹枝状パイプライン、管網)
ガス分野	<ul style="list-style-type: none"> LNG 水撃解析 LNG パイプライン制御系解析
海洋分野	<ul style="list-style-type: none"> 情報伝送システム解析
ビル設備	<ul style="list-style-type: none"> ビル施設内ポンプトリップ解析
原子力	<ul style="list-style-type: none"> 液体リチウムターゲット施設の 水撃解析

2.3. 発電施設の安全解析への応用例

Advance/FrontNet/Ω は液体用の解析ソフトウェアであり、ポンプトリップや水撃現象が解析タ

ーゲットである。発電施設における液体管路系の例としては復水器～冷却塔の間のポンプ系統や、冷却系統が挙げられる。以下にその 2 例について紹介する。

2.3.1. 復水器～冷却塔のポンプトリップ解析

図 1 は、冷却塔から復水器への流路と、復水器で冷やされた水が 3 台のポンプで昇圧され冷却塔へと圧送される管路系を模式的に示した図である。例えばポンプトリップが起こった場合の圧力および流量変化をシミュレーションすることができる。このとき、復水器の水位変化や制御弁の場合は弁の開度変化を調べることができる。

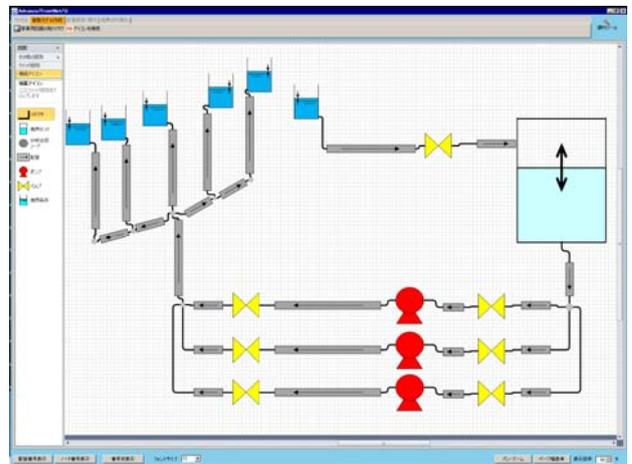


図 1 復水器～冷却塔とポンプ

Advance/FrontNet/Ω では温度変化を考慮できないため、本事例では、冷却塔から復水器をある温度の解析、復水器から冷却塔を別の温度の解析として仮定する必要がある。本事例の計算時の入力と出力を表 3 にまとめる。

2.3.2. 加振応答解析

Advance/FrontNet/Ω 1.0 では、2013 年に加振計算解析機能を導入した[2]。例えば、図 2 のような発電プラント内の対象管路系に対し加振計算を行い、図 3 のように液柱分離発生時の圧力上昇を計算することができる。さまざまな管路系に対して解析を行うと液柱分離は管路延長が長いほど起こりやすい傾向があることが分かる。また、

垂直配管は加振の影響を押さえる効果があることが分かる。

本事例の計算時の入力と出力を表 4 にまとめる。

表 3 入力/出力

入力	出力
①境界条件	
・圧力または流量	—
②配管	
・長さ、直径、勾配 ・粗度、配管材質	・圧力/流量の時間変化と分布
③バルブ	
・開度と Cv 値の関係 ・開閉速度 ・制御系の各数値	・バルブ開閉に伴う配管内圧力/流量の影響 ・制御弁の場合は開度の時間変化
④ポンプ	
・慣性 ・定格情報（吐出流量、定格揚程、定格効率） ・逆止弁の有無	・回転数の時間変化 ・揚程の時間変化 ・トリップによって液柱分離が発生するかどうか
⑤復水器	
・形状（容積線図） ・底面積	・水位変化

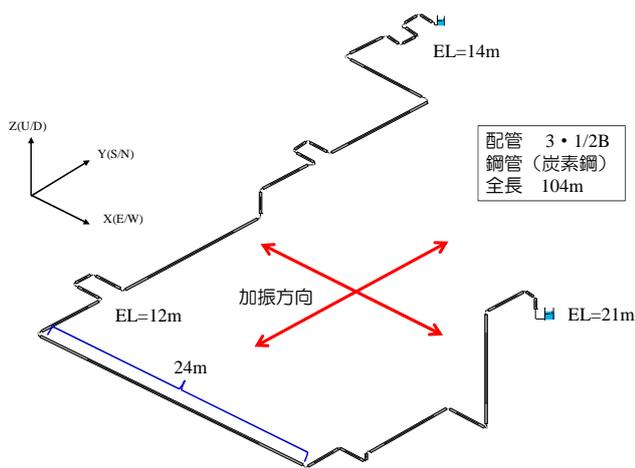


図 2 対象管路系

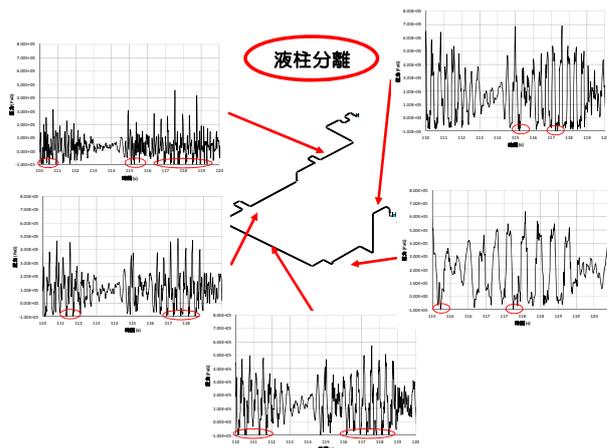


図 3 管内圧力変動（10 秒間）

表 4 入力/出力（表 3 以外のもの）

入力	出力
①配管	
・座標情報 ・加振情報	・加振の影響

3. 管路系流体過渡解析ソフトウェア

ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ は圧力波伝播や熱流動、流体組成の過渡変化を解くことを目的に開発されている。

3.1. 機能紹介

表 5 にソフトウェアの機能をまとめた。状態方程式は数値データ群としてデータベース化された実流体物性または理想気体に対する状態方程式から選択することができる。

表 5 Advance/FrontNet/Γ 機能

流体の基礎方程式	圧縮性を考慮した ①質量保存式（オプションで多成分系を選択） ②運動量保存式 ③エネルギー輸送式
基本変数	密度、内部エネルギー
流体の状態方程式	①実流体物性 ②単成分・混合成分の理想気体
流体の格子スキーム	スタガード格子
流体の時間発展スキーム	Euler 予測子修正子法（陽解法）

流体の対流項スキーム	1次精度風上差分	
固体の基礎方程式	1次元非定常熱伝導方程式	
物理モデル	①壁面摩擦損失モデル ②臨界流モデル ③流体固体間対流熱伝達モデル ④固体間の輻射熱伝達モデル	
境界条件	圧力、温度、流量	指定値使用または勾配なしの条件
流体機器	配管	直管（勾配を考慮）
	弁	開度変化を入力で与える(ONOFF弁)
		制御弁
	送風機	流量に応じて昇圧
タービン	流量に応じて減圧 エネルギー降下	

本ソフトウェアでは、「流路」と「固体（構造物）」の概念があり、流路を流体が流れ、固体（構造物）内では熱伝導方程式が解かれる。流体と固体では対流による熱伝達をすることができ、固体同士では輻射熱伝達をする。これらの接続関係は複雑となるため GUI を使って入力設定を行う。

3.2. 実績

表 6 に適用実績をまとめた。適用分野としてはエネルギーガス分野が多い。総延長が数十キロオーダーのパイプラインに対する圧力波伝播解析や、混合成分から成る天然ガスの過渡応答についての実績がある。熱流動解析については原子力分野が挙げられる。また、顧客特化機能として開発されたエンジン動力バランス解析などに実績がある。

表 6 Advance/FrontNet/Γ 実績

分野	主要実績
ガス	<ul style="list-style-type: none"> ・管路のガス漏えい解析 ・都市ガス管路内圧力波解析 ・バッファタンク機能解析 ・熱量調整施設の起動/停止時の混合ガス組成応答解析 ・ガス管路制御弁応答解析

航空宇宙	<ul style="list-style-type: none"> ・エンジンバランス解析 ・ハザード解析
原子力	<ul style="list-style-type: none"> ・定常時炉心熱流動解析 ・ビームトリップ時の熱応答解析 ・原子力施設内火災時換気系解析[3]

3.3. 発電施設の安全解析への応用例

Advance/FrontNet/Γ はガス・超臨界などの单相流体の解析ソフトウェアであり、ガス組成の変動や熱流動の過渡解析がターゲットである。発電施設における対象管路系は火力発電所における燃料ガス系統や、相変化を考慮しない冷却系統となる。以下に例を紹介する。

3.3.1. 火力発電所の燃料の熱量解析

福島原発事故をきっかけに近年火力発電所の稼働が活発となり、火力発電の燃料となる天然ガス (NG) と液化石油ガス (LPG) の混合設備の解析が増えている。図 4 は NG と LPG の一般的な混合施設の例を模式的に表したもので、混合器 DV&M を使った液ガス混合方式を想定している [4]。ここでは NG 流量に対して必要な LPG 流量を PID 制御し、また、熱量変動に対し、熱量計からのフィードバック制御を行っている。この仕組みを単純化し、Advance/FrontNet/Γ でモデリングしたものが図 5 である。ここでは、臨界状態の LPG とガス状態の NG は完全ガス化することを想定している。例えば、起動および停止時を想定して熱量の解析を行うことができる。火力発電所などでは熱量を調整した燃料ガスを燃焼器で燃やしてタービンの動力とするが、燃焼器は燃料ガスの熱量の変化に対して敏感なため、どの程度の変動が起こるかなどのシミュレーションを行うことができる。また、図 5 では緊急時のためにフレア放出系統が準備されており、緊急時に管内に燃料を滞留させないように大気開放を行う場合、圧力差によっては臨界流となるようなシミュレーションも行うことができる。

本事例の計算時の入力と出力を表 7 にまとめる。

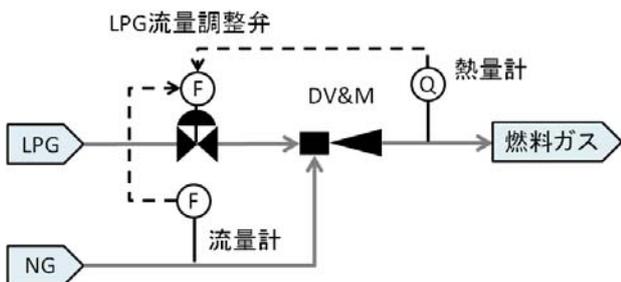


図 4 NG と LPG の混合施設

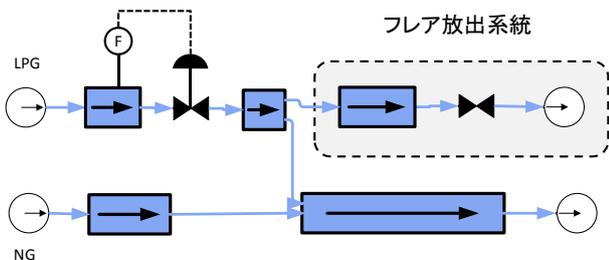


図 5 Advance/FrontNet/G の管路系モデル

表 7 入力/出力

入力	出力
①境界条件	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧力または質量流量 ・ 温度 ・ 組成 	大気開放の場合、臨界流の影響
②配管	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 長さ、直径、勾配 ・ 粗度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧力/流量/温度/組成/熱量の時間変化と分布
③バルブ	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 開度と Cv 値の関係 ・ 開閉速度 ・ 制御系の各数値 (1 次遅れ、比例ゲイン、積分時間、微分時間、設定熱量、計測熱量) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ バルブ開閉に伴う配管内圧力/流量の影響 ・ 制御弁の場合は開度の時間変化

3.3.2. 熱交換器の解析

Advance/FrontNet/G は、構造物との熱伝達および構造物内の熱伝導解析機能を有している。一般的な熱交換器の解析のほか、流路および構造物の接続関係が任意のため、例えば、図 6 のような母管および枝管内の流れと構造物との熱伝導を解析することができる。

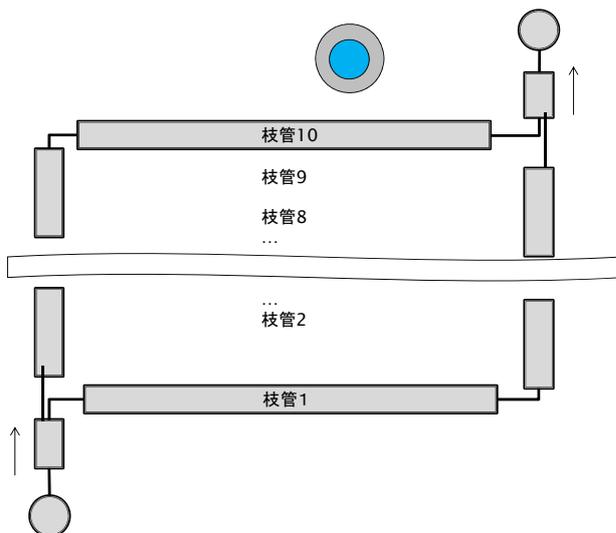


図 6 熱交換器の例

図 6 の Advance/FrontNet/G による計算モデリングは図 7 のようになる。Advance/FrontNet/G では、構造物は異なる材質から成る何層のものでも考慮でき、流路内の流体との熱伝達または外気との熱伝達（断熱条件も含める）を考慮することができる。ここで、構造物の層とは、実際の配管構造物のほか、保温材やコーティングなどが挙げられる。

構造物の形状は図 8 に示すように円筒型と板型を考慮できる。また、左側（円筒型では内側を意味する）と右側の概念を持ち、どちらの側面も流路と熱伝達させることができる自由度を持っている。

流路直径と等価直径は異なる数値を入力できるため、図 9 のように流路が複数本ある計算対象に対し、代表流路 1 本を使って計算をすることができる。流路形状が矩形であり、複雑な形状の場合（円形でない場合）は、流路直径と等価直径に異なる数値を設定することによって、流量と摩擦損失の形状による影響を考慮する。

本解析による入出力の例を表 8 にまとめる。特に発熱密度を設定して核燃料などを対象に計算を行う場合、冷却材の温度変化や温度分布を調べることができる。

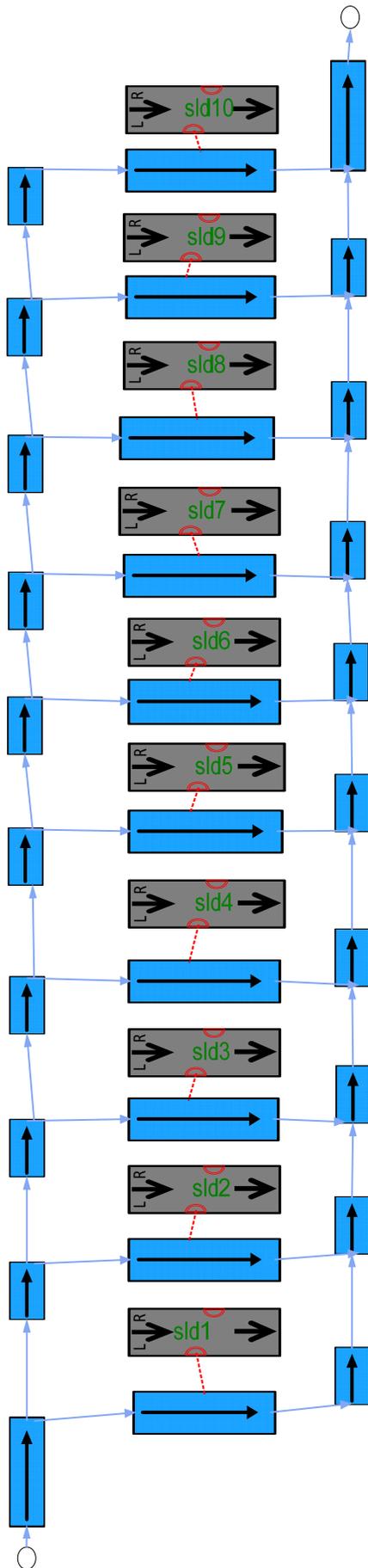


図 7 Advance/FrontNet/ Γ の管路系モデル

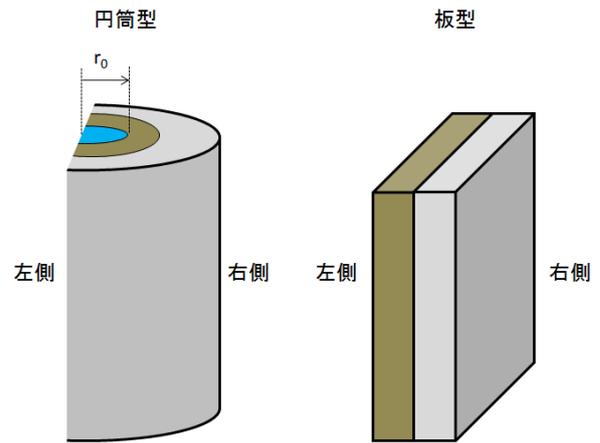


図 8 構造物の形状と「左側/右側」の概念

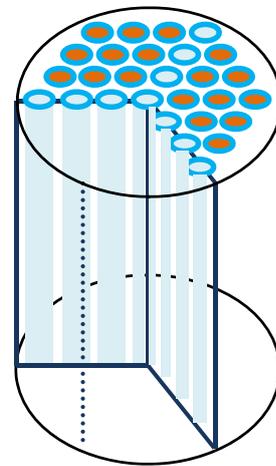


図 9 流路が複数本ある計算対象

表 8 入力/出力 (表 7 以外)

入力	出力
①熱伝達モデル	
・Dittus-Boelter モデル ・入力値	管内流体への伝熱の度 合い
②構造物	
・形 (板側/円筒) ・長さ、厚み、 ・材質 (熱伝導率、比 熱、密度)	・構造物内の温度の時 間変化、温度分布
③発熱密度	
・発熱密度	流体の温度変化、流体 の流量分配

4. 管路系流体定常解析ソフトウェア

ソフトウェア Advance/FrontNet/Λは管路系の定常解析を高速に行うことを目的に開発されている。特に、パラメータ感度を見るための解析などを念頭に置いている。

4.1. 機能紹介

表 9 にソフトウェアの機能をまとめる。現在は単相流体に対する仕様となっている。陰解法のため、計算は瞬時に終了する。そのため、パラメータ感度を調べるための解析などに応用できる。管路系流体過渡解析ソフトウェア

Advance/FrontNet/Γは圧力波を精度よく解析するために陽解法ベースで開発されているが、陽解法はタイムステップが音速に制限されるため、長時間の解析には計算コストがかかる。また、音速が大きい液体に対してもタイムステップが大きくとれないという欠点がある。この欠点を補うためにも、圧力波よりも緩やかな現象を解析する目的や、液体パイプラインに対する熱流動解析を実施するには、Advance/FrontNet/Λを使用することは1つの手段になると考えられる。

表 9 Advance/FrontNet/Λ機能

流体の基礎方程式	①質量保存式 ②質量流量と圧損の関係式 ③エネルギー保存式 (オプションで時間依存性も考慮可)	
基本変数	圧力、エンタルピー	
流体の状態方程式	実流体物性	
数値解法	陰解法、行列解法は直接法	
流体の差分スキーム	1次精度風上差分	
物理モデル	・壁面摩擦損失モデル ・構造物伝熱解析モデル (総括熱伝達係数 U を使用)	
境界条件	圧力、温度、流量	指定値または外挿
流体機器	配管	直管 (勾配を考慮)
	熱交換器	厚み、材質を考慮
	抵抗要素	バルブ、オリフィス

4.2. 適用実績

本ソフトウェアの適用実績を表 10 に示す。

表 10 Advance/FrontNet/Λ実績

分野	主要実績
航空宇宙	・エンジンバランス解析
ビル設備	・建物内の温水配管の 24 時間温度低下評価解析

4.3. 発電施設の安全解析への応用例

原子力発電施設において、出力密度や冷却材流量などを何パターンにも渡って設計検討することを想定する。このとき、例えば図 10 のように Advance/FrontNet/Λを使って炉心の一部をモデリングする。構造物内には核燃料があるとして出力密度を設定し、発熱させる。冷却材は構造物から熱を奪い、温度を上昇させる。例えば、流体の圧損モデルや熱伝達率モデルなど計算モデルにも不確実性がある場合は、これらについても何パターンにも渡って検討する必要がある。

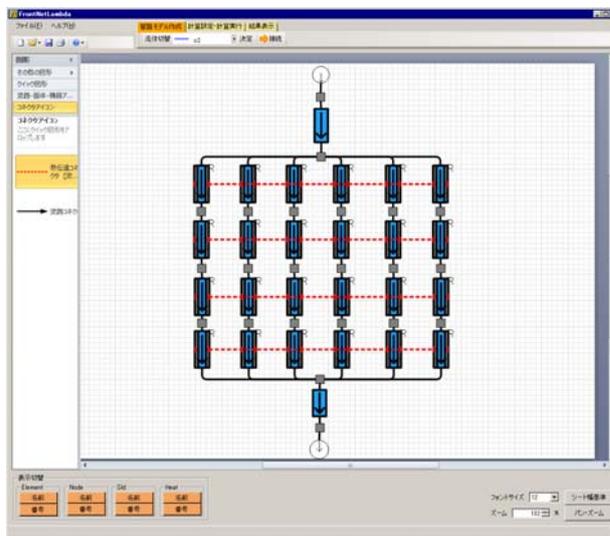


図 10 炉心構造物と冷却材の解析モデルの例

このような解析を行う場合の入力と出力について表 11 にまとめる。

5. まとめ

アドバンスソフト株式会社で開発している管路系流体解析ソフトウェアを使った発電施設の

解析についていくつか想定し、ソフトウェアの使い方や入出力についてまとめた。

ここで想定された例はごく一部であり、実際はさまざまな解析ニーズや応用があると考えられるが、開発側が思い至っていないような解析ニーズや応用対象があればぜひとも一報いただきたい。

今後もより一層、設計や安全解析に貢献できるようにソフトウェアの開発に努めていく。

表 11 入力/出力 (表 7、表 8 以外)

入力	出力
①各パラメータのふり幅	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 運転条件 (境界条件) ・ 冷却材種類 (物性) ・ 構造材種類 (物性) ・ 出力密度 ・ 計算モデル (摩擦モデル、熱伝達モデル、輻射モデル) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造物最高最低温度 ・ 冷却材最高最低温度 ・ 冷却材最高最低圧力 ・ 冷却材の流量配分 など

参考文献

- [1] 秋村「管路系流体過渡解析ソフトウェアの紹介」、アドバンスシミュレーション Vol. 18
- [2] 三橋、浜野「地震時の管路系流体解析」、アドバンスシミュレーション Vol. 18
- [3] 秋村、三橋、浜野、吉岡「換気系を考慮した急激火災解析－EVE SAYFA の換気系モデルの機能強化－」アドバンスシミュレーション Vol. 6
- [4] 松島英雄, 豊嶋弘幸, “簡単な操作で省エネルギーを測る都市ガス熱量調整設備”, 日立評論 74(4), P344, 1992-4

※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。)