

大型過渡事象シミュレーションコード用の ポストプロセッサの製作法

Post-processor Coding for Large-scale Transient Simulation Computer Codes

吉川 信治

Shinji YOSHIKAWA

福島研究開発部門

福島研究開発拠点

廃炉国際共同研究センター

炉内状況把握ディビジョン

Accident Progression Evaluation Division

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science

Fukushima Research Institute

Sector of Fukushima Research and Development

March 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

大型過渡事象シミュレーションコード用のポストプロセッサの製作法

日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点
廃炉国際共同研究センター 炉内状況把握ディビジョン

吉川 信治

(2019年12月12日受理)

原子力の諸分野における研究開発には、対象とする現象の過渡変化をコンピュータでシミュレーションするソフトウェアを利用することが多い。そのようなソフトウェアの中には、内包するモデルの多さ、アルゴリズムの複雑さ等の理由から、古くから用いられているものを新たな知見に照らして部分的な修正を加えながら使い続けているものがある。そのようなソフトウェアは、出力される情報が多岐で膨大な量であるにも関わらず、ユーザーが閲覧できるものはテキストファイルとパラメータの時間変化を表すグラフのみであることが多い。この場合、計算機内で再現されている現象の全体像をユーザーが把握することは困難である。

本報告書は、軽水炉の過酷事故解析コードである RELAP/SCDAPSIM、及び MELCOR のテキスト出力ファイルを読み込んで、解析結果をユーザーが容易に把握できる情報を表示するポストプロセッサを製作する上で獲得したノウハウを、他分野のシミュレーションコードにも適用できるようまとめたものである。

Post-processor Coding for Large-scale Transient Simulation Computer Codes

Shinji YOSHIKAWA

Accident Progression Evaluation Division,
Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 12, 2019)

In various R&D field of nuclear energy, computer codes are often used for transient simulations of target phenomena. Some of the codes were developed many years ago and have been revised with newly acquired findings, because of many encompassed numerical models and complexity of algorithms. In many cases, available outputs for users are output text files and graphs showing temporal variations of parameters, despite diversified and huge number of output information items are posing difficulty to the users in grasping the whole picture of the reproduced phenomena.

This report compiles a series of know-hows in building a post-processor software for large simulation codes which serves as an interactive tool for code users in understanding the reproduced consequence with visually understandable information items. These know-hows are acquired through post-processor developments for LWR severe accident simulation codes RELAP/SCDAPSIM and MELCOR.

Keywords: Personal Computer, Interactive Tool, RELAP/SCDAPSIM, MELCOR

目次

1	はじめに.....	1
2	出力テキスト中の表示項目の選択法.....	1
3	データ構造.....	2
3.1	変数属性.....	2
3.2	変数.....	3
3.3	見出し.....	3
4	データ抽出処理.....	4
5	画面レイアウト.....	4
5.1	RELAP/SCDAPSIM 用プロセッサのレイアウト.....	4
5.2	MELCOR 用プロセッサのレイアウト.....	6
5.3	レイアウトの設定について.....	9
5.4	表示される情報の保存.....	9
5.5	グラフのグリッドの設定方法.....	9
6	さらなる改良.....	10
6.1	リスタート出力ファイルの結合.....	10
6.2	Component 間の接続関係の表示の改良.....	10
6.3	制御系及び安全保護系の論理構造の可視化.....	10
6.4	パラメータの 2 次元分布図への等高線の表示.....	10
7	今後へ向けて.....	11
	参考文献.....	11
	付録 CD-ROM.....	11

Contents

1. Introduction.....	1
2 Picking-up method of items in an output text file.....	1
3 Data structure.....	2
3.1 Properties of variables.....	2
3.2 Variables.....	3
3.3 Headings.....	3
4 Data extraction.....	4
5 Window layout.....	4
5.1 Window layouts of post processor for RELAP/SCDAPSIM.....	4
5.2 Window layouts of post processor for MELCOR.....	6
5.3 Settings for window layouts.....	9
5.4 Save of displayed information.....	9
5.5 Grid settings for graphs.....	9
6 Further improvements.....	10
6.1 Addition of restart output files.....	10
6.2 Improvement of inter-component connection display.....	10
6.3 Logical structures visualization of control variables and trip signals.....	10
6.4 Contour drawing on 2-dimensional parameter distribution.....	10
7 For the future.....	11
Reference.....	11
Appendix CD-ROM.....	11

図リスト

図 1	出力情報空間	12
図 2	テキスト出力ファイルの基本構成	13
図 3	テキストの 1 行を文字列配列に変換するアルゴリズム	14
図 4	チャンネルと軸方向ノード毎に定義されたパラメータのシートを表示した状態	15
図 5	炉心各部の被覆管とチャンネルボックスの酸化割合及び水素と水蒸気のモル比率を表示するシート	15
図 6	炉内の冷却材流量を示すシートが表示された状態	16
図 7	下部プレナムの温度分布を表示した状態	16
図 8	チャンネル 1 の 13 番目（燃料有効部上端）のチャンネルボックスの制御ブレードに接する部分の温度を示した例	17
図 9	RELAP/SCDAPSIM の入力データから生成した解析体系図	17
図 10	Ring 毎の集合体数の設定と出力ファイル読み込みボタンが配置されたシート	18
図 11	炉心の状態を表示するシート	18
図 12	Ring1 から 4、軸法ノード 13 から 16 までの温度を詳細に表示した状態	19
図 13	冷却材の状態を表示するシート (<HydroDynamic>)	19
図 14	ノード間の接続部の状態を表示するシート (<Flow Path>)	20
図 15	炉心の崩壊状態を表すシート	20
図 16	Heat Structure に定義された節点の温度変化を表示するシート	21
図 17	冷却材を保持する部品 (Component) 間の接続関係を表示するシート (<Component Connection>)	21
図 18	RELAP/SCDAPSIM で用いられるトリップ信号の論理構造の例	22

This is a blank page.

1 はじめに

本報告書で対象とする古くから用いられてきた大型解析コードでは、ユーザーに情報を提供する手段はラインプリンタとプロッタのみに限定されていることが多い。詳細な情報はラインプリンタから出力されるテキストに記載される。ユーザーは基本的にこれを時間を追って読むことで再現された現象を理解するよう努めていた。現在は、大きな記憶容量、高速情報処理能力、高解像度のディスプレイを備えたパーソナルコンピュータが普及している。

過渡シミュレーションの結果には、図 1 に示すように、時間、空間位置、物理量の種類という 3 つの次元がある。多くの大型解析コードが開発された時代には、ユーザーは紙に印刷されたテキストを時間軸に沿って読み進むことのみが可能であった（本報告書で例にした RELAP/SCDAPSIM では 1 タイムステップ当たりの行数は 1 万を超える）が、現在はパーソナルコンピュータに主要な出力情報を全て吸収させて、ユーザーはこの 3 次元の空間を様々な断面で切りながら詳細に観察する点を自由に選ぶことができる。

本報告書で述べるポストプロセッサの基本機能は、テキストファイル上の数値の羅列を理解が容易なイメージに可視化して、図 1 に示した空間内の自由な探索を可能にすることである。

このような用途のソフトウェアは、大型解析コードのような、入力データを与えて一定時間の計算が終了してから解を得るというバッチ型ではなく、ユーザーが画面から得られる情報によって次に行う処理を順次選んでいく対話型であるので、プログラミング言語もこれに適したものが必要となる。本報告書で紹介する 2 つのソフトウェアはオブジェクト型 Pascal に基づいた、Embarcadero 社の Delphi[®]を用いている。

2 出力テキスト中の表示項目の選択法

「1. はじめに」で述べた機能の実現のためには、テキストファイルに記載された各項目を選択することが不可欠である。本報告書で対象とした RELAP/SCDAPSIM 及び MELCOR ではテキストファイルの基本構成は図 2 に示すものとなっており、これは多くの大型解析コードにも踏襲されていると考えられる。

この中の特定の情報を選択するには、対象の時刻、物理量の種別、対象の部品名、その中の位置（ノード）番号を決めれば良いことが分かる。この選択をソフトウェア上の文字列処理で実現するための具体的な方法を述べる。

各個別情報毎に以下の項目を設定する。

- ・ On 文字列
- ・ Off 文字列
- ・ Target 文字列

- ・行数
- ・項目番号

これを用いて、各タイムステップ毎に、
 <On 文字列>が現れて以後、<Off 文字列>が現れる以前に現れた<Target 文字列>から
 <行数>行目の<項目番号>番目能力項目を選ぶ、という処理をすれば図 2 のフォーマッ
 トの任意の項目を選ぶことができる。例えば物理量グループ②の部品(B)の位置(b)の数値 2
 であれば、

- ・On 文字列：物理量グループ②の見出し
- ・Off 文字列：物理量グループ②の見出し
- ・Target 文字列：部品(B)の情報であることを示す文字列
- ・行数：2
- ・項目番号：3

と設定すれば目的の項目を選択できる。

この選択のためには、テキストファイルから読み込んだ行を、項目の列に変換する機能が
 必要になる。図 3 にそのためのアルゴリズムを示す。行中の各項目はスペースかカンマで
 区切られていると想定する。

3 データ構造

上述した方法でテキストファイルから時刻、種類、位置に沿って、データを読み込むこと
 になるが、その処理手順をソフトウェアとして構築する上でデータ構造が重要となる。大型
 解析コードの後処理という機能の性格上、運用経験の蓄積に伴って処理対象データの拡大、
 機能の追加の要望がユーザーから提示され、これに応じて行く過程でソフトウェアは次第
 に大型化する。内部のデータが見通しの良い整理された構造を持つことが、この大型化の作
 業を迅速、確実にする上で不可欠である。

現在使用されているプログラミング言語では複数の型の変数を含む構造体を定義できる
 ものが多い（本報告書で例とするソフトウェアではオブジェクト指向パスカルを用いてい
 る）。この構造体はデータ構造を見通しの良いものにする上で有益である。大型解析コード
 の製作、拡充を迅速・確実にする上で効果的であると認められた構造体を以下に記す。

3.1 変数属性

プロセッサで扱う各変数に次の属性を設定して、可能な限り共通のアルゴリズムで処理
 できるようにする。

- ① 変数名：文字列
- ② 2章で述べた On 文字列の番号：整数
- ③ 2章で述べた Off 文字列の番号：整数

- ④ 2章で述べた **Target** 文字列の番号：整数
- ⑤ 単位：文字列
- ⑥ **Target** 文字列のある行からの行数：整数
- ⑦ その行における対象項目の番号：整数
- ⑧ 最小値：実数
- ⑨ 最大値：実数

以下に各属性について説明する。

①変数名

グラフ表示、テーブル表示等でどの物理量を指すかユーザーが分かりやすいものを定義しておく。

②③④文字列の番号

2章で述べた **On**, **Off**, **Target** の文字列は複数の変数に適用され、またある変数に対する **On** 文字列が別の変数の **Off** 文字列として作用することもあるので、このような文字列の配列を 3.3 節で後述するように設けておいて、変数の抽出の際にはその番号で参照することが効率的である。

⑤単位

変数を抽出した後にこれをグラフ化、テーブル化する際、単位も表示できることが望ましい。これを文字列データとして登録しておく。

⑥⑦行数と項目番号

2章で述べた処理に用いる。

⑧⑨最小値、最大値

この 2 つの変数も定義しておいて、テキストファイルから値を読み込む毎に更新する処理も行うようにするとグラフ表示処理を含めてソフトウェアが簡潔になる。

実際には、一つの解析コードの中に扱い方の異なる複数の変数グループが混在することが多く、上述のような構造体をこのグループの数だけ宣言する必要がある。

3.2 変数

変数番号、時刻番号、位置番号の 3 次元の浮動小数点型変数を設ける。位置については水平位置と垂直位置の 2 次元で定義されるものもあるので、その場合は 4 次元の浮動小数点型変数を設ける。

3.3 見出し

図 2 の「物理量グループ××の見出し」に該当する文字列を文字列配列として定義しておく。こうすることで、「**On** 文字列」と「**Off** 文字列」を番号で記述できるので、コーディングに要する労力の小さい、見通しの良いコードを作成することができる。文字列の同数の **boolean** 変数配列を定義しておき、各文字列毎に既に現れたか否かの情報を保存すると各時

点で読み込んだ行がどの変数の値を記したものが判定できる。この配列はタイムステップが更新される毎に全て「偽」に設定する。

4 データ抽出処理

出力テキストファイルの情報を対話形式で閲覧するソフトウェアの動作の仕方として、最初にテキストファイルにある閲覧対象の情報を全て読み込んでから対話型操作に移行する方法と、解析上の時刻と場合によっては特定の重要な情報（炉心最高温度等）のみ全て読み込んでから、ユーザーが閲覧したい時刻、あるいは特定の時間帯を指定してこれに含まれる情報をその度にファイルから読み込む方法がある。本報告書では前者の方式について述べるが、仕様するパーソナルコンピュータのメモリに比して扱う情報量が大きい場合は後者の方法も検討に値する。

実際にテキストファイルを読んで各種変数の配列をパーソナルコンピュータ内に構築するにあたっては、1行ずつ処理していくので、「どのグループを読んでいるか」「現在何番目まで読み終わっているか」という、「現在の作業経過」に関する情報は変数の値として保存しておく必要がある。

5 画面レイアウト

解析コードにおいては、対象となるシステムの各部の状態を表す種々のパラメータの変化が出力となり、それらはユーザーの理解のためにグループ分けされている場合が多いと考えられる。

1章で述べた「図1に示した空間内の自由な探索を可能にする」という目的に沿ったレイアウトが望ましい。

RELAP/SCDAPSIM 及び MELCOR で採用したレイアウトを参考に示す。

5.1 RELAP/SCDAPSIM 用プロセッサのレイアウト

図4から図8に RELAP/SCDAPSIM 用プロセッサのレイアウトを示す。画面上部に配置された横方向に伸びたスクロールバーは表示時刻を操作するためのもので、画面の大部分を占めるタグ付きの各表示は全てこのスクロールバーで決められる時刻の状態を対象とする。

このプロセッサでは解析結果を以下のグループに分けてそれぞれタグ付きの独立したシートに表示し、これらを切り替えて閲覧する方式を採用している。

このプロセッサでは解析結果は以下の各シートに分割して表示される。

- ① <chan-ax>variables 炉心のチャンネルと軸方向ノード毎に定義されているパラメータの表形式の表示

② <chan-ax>graphs 炉心のチャンネルと軸方向ノード毎に定義されているパラメータのグラフ形式の表示

この2つのシートに表示される変数は:

- ・チャンネルボックス (BWRの燃料集合体を包む柱形状の筒) に関するもの:

温度、酸化比率、健全部の Zr 及び ZrO₂ の質量、移動してきた Zr と ZrO₂ の合計、酸化ステンレス、Fe,Cr,Ni の合計、B₄C の質量、熱流束

- ・制御ブレードに関するもの:

ステンレス被覆の温度、健全部の酸化ステンレス、Fe,Cr,Ni の合計、B₄C の質量、移動してきた酸化ステンレス、Fe,Cr,Ni の合計、B₄C の質量

- ・冷却材に関するもの:

温度、水 (水蒸気) モル比率、水素モル比率、非凝縮性ガスのクオリティ、

燃料に関するもの:

酸化発熱量、崩壊熱量

- ・流路閉塞に関するもの

流路断面積、制御ブレードに接する部分の閉塞の有無、制御ブレードに接しない部分の閉塞の有無

③ <comp-ax>variables 炉心のコンポーネントと軸方向ノード毎に定義されているパラメータの表形式の表示

④ <comp-ax>graphs 炉心のコンポーネントと軸方向ノード毎に定義されているパラメータのグラフ形式の表示

この2つのシートに表示される変数は:

冷却材流量、圧力、液相の体積比率、気相温度

⑤ Core Degradation

このシートには、チャンネルの各軸方向ノード毎に健全、溶融プール、デブリの混在、等崩壊の段階を示すが、この情報は次の<Core Oxidation>シートに統合している。

⑥ <Core Oxidation>

このシートが表示された状態を図5に示す。各チャンネル毎に左から被覆管の酸化割合(赤い部分)、チャンネルボックス内側の水素のモル比率(青い部分)、チャンネルボックスの制御ブレードに接する部分及び接しない部分の酸化割合及びチャンネルボックス外側の非凝縮ガスのクオリティが示される。これに合わせて健全性が失われた部分には多孔性デブリ(緑)、閉塞を伴う溶融プール(赤)、及びボイド(白)が示される。

⑦ 冷却材流量

炉内の冷却材流量を図示するシートが表示された状態を図6に示す。

各チャンネルの軸方向ノード毎に定義された冷却材流量を、下側にチャンネルボックスの内側、上側にチャンネルボックスの外側について図示している。流量を示す矢印の水平位置がずれているのは重なりを防ぐためである。また上側のチャンネル間の水平方向の矢印はチャネ

ル間で交換される流量を示す。流量は時刻によって大きく変動するので、流量と矢印の長さの比を固定することは適切ではない。ここではシート上方の中央に参照となる矢印とその長さに相当する流量を表示している。

⑧ 下部プレナムの状態 (<COUPLE>)

RELAP/SCDAPSIM では、炉心の物質が炉心支持板を通過して下部プレナムに達してからの熱的挙動がそれ以降の事象進展に重要な影響を与えることから、下部プレナムには R-Z2 次元の差分法による詳細モデルを適用している。このモデルで導かれる温度等のパラメータを表示するのがこのシートで、温度を表示した例を図 7 に示す。

⑨ パラメータの時間変化を表示するシート (<Temporal>)

- ① <chan-ax>variables 及び②<comp-ax>variables で任意の箇所、任意のパラメータを示すセルをクリックすると、そのパラメータの時間変化がこのシートに表示される。チャンネル 1 の 13 番目（燃料有効部上端）のチャンネルボックスの制御ブレードに接する部分の温度を示した例を図 8 に示す。

⑩ 内部に冷却材を含むコンポーネント間の接続関係を表示する機能

大型の解析コードを用いる場合、他のプラントを対象として既に用いられた入力データを基に、自分の目的に沿った改修を順次加えていくことが多い。この際、解析体系図がドキュメント化されている場合もあるが、実際の入力ファイルから生成された情報があることが望ましい。RELAP/SCDAPSIM においては、出力ファイルからこの情報を読み取ることより入力ファイルから読み取る方が容易であるので、ここでは入力ファイルを対象に解析体系情報を可視化する機能を示す。（後に述べる MELCOR については、この体系図も出力ファイルから生成する。）

RELAP/SCDAPSIM では上流側の Component、下流側の Component とこの両者を接続する Junction が出力ファイルに現れるので、体系図を可視化する機能をユーザーに供するに先立って体系図がこれと整合することを確認することが必要である。

図 9 がこの機能によって生成されたシートである。このシートでは、冷却材を含むコンポーネント（RELAP/SCDAPSIM では pipe, branch, annulus 等。valve, junction 等の容積の無いコンポーネントは含まない）が互いの接続を示す直線で結ばれた図が生成される。この図はユーザーがコンポーネントをドラッグしてレイアウトを変更することができ、そのレイアウトに名前を付けて保存することができる。画面左上の窓に番号を入力すると、該当するコンポーネントの文字が赤になってその位置と接続している他のコンポーネントを確認することができる。

5.2 MELCOR 用プロセッサのレイアウト

図 10 から図 17 に MELCOR 用プロセッサのレイアウトを示す。画面上部に配置された横方向に伸びたスクロールバーは表示時刻を操作するためのもので、画面の大部分を占めるタグ付きの各表示は全てこのスクロールバーで決められる時刻の状態を対象とする点で

RELAP/SCDAPSIM 用プロセッサと同様である。

① Settings

MELCOR では標準的に炉心を 4 領域に分割して解析が行われており、各領域を Ring と呼ぶ。Ring 毎の集合体数は出力の解釈には必要だがこれを出力ファイルから読むことはできないので、出力ファイルを読む前にこれをユーザーが指定する方式を採用した。従ってこの Ring 毎の集合体数を設定するシートに出力ファイルを読み込むボタンを配置している (図 10)。

② 炉心の状態を表示するシート (Core Display)

Ring と軸方向ノード毎に定義されたパラメータを表示するシートを図 11 に示す。このパラメータには燃料、チャンネルボックス、冷却材の温度、U, Zr, ZrO₂ 等の成分の質量等が含まれる。

MELCOR については、研究協力を行っている大学でのプロセッサ使用を前提として作成したので、操作方法の説明を口頭でしなくてもマニュアルだけで理解が容易なように、グラフ表示と数値表示を同じシートに配置している。なお、炉心の特定部分だけを詳細に見たい場合には、右の Ring と軸方向ノードの表を左上から右下に向かって対象領域をマウスで選択すると、該当する Ring と軸方向ノードでのパラメータ時間変化が公述する CoreParamChange シートに表示される機能を有する。例えば Ring1 から 4、軸法ノード 13 から 16 までを詳細に見るために図 11 の赤い四角をマウスで選ぶと図 12 のようにその場所だけを表示したグラフが CoreParamChange シートに表示される。

このシートでは更に、グラフ左側の Ring と軸方向ノードの表で任意の場所をマウスで選ぶとその場所に関するグラフが太線で表示される機能、さらにグラフの任意の線をマウスで選ぶ (実際はマウスボタンを押下した時のアイコンの矢印の先に最も近い線が選ばれる) とこれに該当する Ring と軸方向ノードの場所の四角形の中央が白抜きに表示される機能が付加されている。

③ 冷却材の状態を表示するシート (<HydroDynamic>)

図 13 に冷却材の状態を表示するシートを示す。左端にノードの名前、この右側に物理量の一覧が表示され、マウスでクリックすると任意のノードの任意の物理量の時間変化がその右側の表とさらに右側のグラフに表示される。

グラフは詳細に見たい時間帯と物理量の値の範囲をサブグリッドをマウスで左上から右下にドラッグするとその範囲のグラフが再表示される機能を有する。このように 2 つのパラメータ (この場合は時間と圧力) の特定の範囲をグラフに描く場合、範囲内にある線のみを描画する処理をコーディングするよりは、全て描画した後に範囲外を塗りつぶしてその上にグラフのタイトル、軸のタイトル、数字を描くように処理する方がコーディングの労力が小さい。

④ ノード間の接続部の状態を表示するシート (<Flow Path>)

図 14 にノード間の接続部の状態を表示するシートを示す。ノード間の接続部は

MELCOR では Flow Path と呼ばれる。このシートの左端に Flow Path の名前の一覧が、その右側に Flow Path で定義される物理量（液相流速、気相流速等）の一覧が表示され、マウスで選んだ任意の組み合わせに応じて時間変化の表とグラフが表示される。グラフの詳細表示については Hydrodynamic と同等の機能を有する。

⑤ 炉心の崩壊状態を表示するシート (<Core Degradation>)

図 15 に炉心の崩壊状態を表示するシートを示す。このシートは、Ring1 から 4 について、最下端から最上端までの軸方向ノードを表しそれぞれの健全部及び他所から移動してきた（MELCOR では Conglomerate と呼ぶ）部分での、 UO_2 、Zr、 ZrO_2 、Fe、 FeOx の質量と、炉心の水位を表示する。読み込んだテキストファイルから、その解析ケースの対象時刻における炉心崩壊の全体像が一目で把握できる中心的な役割を有する。画面上部の Movie ボタンをクリックすると、読み込んだ解析ケースが表す炉心崩壊過程がアニメーション表示される。任意の時刻で Movie ボタンを再クリックするとアニメーションは停止する。また画面下部の Temperature Profile というチェックボタンにチェックを入れると各 Ring の冷却材の温度分布が重ねて表示される。

図 15 では、Ring1 及び 2 で炉心にあった UO_2 が下部プレナムに落下し、炉心の水位は燃料有効部下端（BAF）の僅か上まで低下し、Ring3 も UO_2 の一部が溶融して BAF 付近まで落下している状態が見てとれる。軸方向ノードの高さは一定ではないが、各部の物質の質量と表示される四角形の図中の面積は比例するように調整される。

⑥ 熱構造体 (<Heat Structures>)

図 16 に Heat Structure に定義された節点の温度変化を表示するシートを示す。MELCOR では冷却材とバウンダリや内部構造との熱交換を扱うために、熱伝達率や熱伝導率を設定できる固体モデルが Heat Structure として定義されており（RELAP/SCDAPSIM も同様）、この温度も解析結果を検討する上で重要になることがある。この目的から図 16 のように任意の Heat Structure を選択するとそこに定義された節点各所の温度変化を表示するシートを設けている。

このグラフも任意の時間範囲、温度範囲に絞ったグラフを再表示する機能を有している。

⑦ 冷却材を保持する部品 (Component) 間の接続関係を表示するシート (<Component Connection>)

解析対象全体の冷却材のネットワークを把握することは解析結果の検討において重要となる。冷却材を保持する部品 (Component) の数が多いとこのネットワークの把握が困難になる。この問題を緩和するために、Component を全て表示して、相互の接続を表示するシートを設けている（図 17）。各 Component について、他 Component との接続の最も高い位置を最上端、最も低い位置を最下端として表示し、冷却材の流れは基本的に画面左側から右側へ向かうよう配置されている。Flow Path は画面左から右へ向かうものは赤で、右から左へ向かうものは青で表示される。Component 間の水平方向距離を反映することは不可能で

はないが、全体系の中で詳細に解析する部分（この場合は炉心）は **Component** の密度が高く、それ以外の部分は密度が低いので、ネットワークの把握が却って困難になる場合が多い。

これは解析結果ではなく、入力データの可視化であるが、入力データが解析コードによってユーザーの意図に沿って解釈されたことを確認するという意味でコードの実行結果の可視化機能として組み込んでいる。

5.3 レイアウトの設定について

ポストプロセッサの各種の文字、表、グラフの大きさや位置は、画面全体の幅や高さに対する比で設定し、この設定をするサブルーチンが画面の大きさを変更する度に実行されることが望ましい。このようなアプリケーションは同じパーソナルコンピュータで他に報告用の書類を作成しながら用いることが考えられ、異なる解析ケース間の比較を行うために複数起動させて用いることも想定されるため、画面の幅や高さを変更しても各種の情報が正常に表示されることが必要であるからである。本報告書で述べている。

RELAP/SCDAPSIM 用、MELCOR 用のプロセッサにおいては、**layout** と名付けられたサブルーチンが画面の各種の情報の表示される位置を画面の高さや幅に対して相対的に設定し、このサブルーチンはウィンドウの大きさに変更が加わる **OnResize** というイベントのハンドラで起動するように設定されている。

5.4 表示される情報の保存

このようなプロセッサが表示するグラフや表は報告書等で用いる場合を想定して独立したファイルとして保存する機能があることが望ましい。前述の 2 つのプロセッサ共、グラフはビットマップで、表は **Microsoft Excel**® で扱える形式で保存することが可能である。ファイルを保存する際にはウィザードが起動するが、ファイル名の拡張子の前の部分は物理量と対象箇所の名称等からデフォルトの文字列が生成され、そのまま保存しても他のファイルとの混同が無い設定となっている。

5.5 グラフのグリッドの設定方法

以上、変数の時間変化や空間分布を折れ線グラフで表すシートを複数紹介したが、ここで共通して必要となるのが、値の変化の把握を容易にするためのグリッドの設定である。読みやすいサブグリッド間隔は 10 の整数乗、10 の整数乗×2、10 の整数乗×5 のいずれかであるので、以下の方法で表示範囲の最大値、最小値、グリッド間隔を定める。ただしグリッド間隔の見やすさは個人によって異なるので、以下の場合分けの仕方は多少の変更を加えても良い。

- 1) 変数の最大値から最小値を引いた値（範囲）を超えない最大の 10 のべき乗を **d** とする。
- 2) 範囲/d が 2 未満の場合はグリッド間隔は **d/10**
範囲/d が 2 以上 5 未満の場合はグリッド間隔は **d/5**

範囲/d が 5 以上の場合はグリッド間隔は d/2

グラフの下端はグリッド間隔の整数倍で変数の最小値を超えない最大のもの、
 グラフの上端はグリッド間隔の整数倍で変数の最大値を下回らない最小のものと設定する。

6 さらになる改良

今回紹介して 2 例のポストプロセッサには組み込んでいないが、ユーザーにとって望ましいと思える機能について以下に述べる。

6.1 リスタート出力ファイルの結合

本報告書で紹介する過酷事故解析コードでは、途中で想定するプラントの状態を変更したり、異常終了した解析を途中から解析条件を変えて継続実行したりすることがある。このような場合に、連続して実行して得られた出力ファイルをポストプロセッサ内で結合して一つの解析ケースとして扱うことが望まれる場合が考えられる。前後の解析で時間帯が重複する場合が考えられるが、その時間帯には新たな解析による情報を採用すれば良い。

6.2 Component 間の接続関係の表示の改良

RELAP/SCDAPSIM の Component 間接続情報の表示 (図 9) はユーザーにレイアウトの試行錯誤を依存している。図 17 では、鉛直方向に重ならない Component も独立に水平位置を与えているために、Component が密集して表示されている。表示空間を有効に活用して視覚的に把握容易な表示アルゴリズムの材用が望ましい。

6.3 制御系及び安全保護系の論理構造の可視化

図 9 及び図 17 にそれぞれ RELAP/SCDAPSIM と MELCOR のコンポーネント間の接続情報を可視化した図を示したが、入力データが実際に解析コードにユーザーの意図に沿って解釈されたかを確認するという意味では、制御系や安全保護系の論理構造の可視化も望ましい機能である。図 18 に RELAP/SCDAPSIM を用いたある解析で用いられるトリップ信号の論理構造を示すが、このような構造を入力データのテキストから把握することは容易ではない。また RCIC、ADS 等の安全保護機能が原子炉トリップ後のある時刻に動作を停止したりする条件での解析では、その時点からこのような論理構造を変更して計算をリスタートする手法が用いられることが多いので、元の論理構造がリスタート用の入力でどのように変更されるのかを可視化することも望まれる。

6.4 パラメータの 2 次元分布図への等高線の表示

図 7 には RELAP/SCDAPSIM による R-Z2 次元メッシュ領域における温度の節点の温度

を示しているが、ここに等温線を表示すればこの領域における温度分布を視覚的に把握することが一層容易になる。節点に温度を数値で表示することに比して計算負荷は大きくなるが、この程度の節点数であれば処理速度に問題を生じることとは無いと考えられる。

7 今後へ向けて

本報告書で紹介したポストプロセッサは、古くから使い続けられた大型シミュレーションコードの結果を把握するためのものであるが、今後開発されるシミュレーションコードでは、結果はテキストではなく、データベースに格納されて、図 1 に示す情報の空間をユーザーが自由に閲覧できることが望ましい。そのためにも本報告書で紹介した様々な機能を製作して使用経験を積むことが有用と考えられる。パーソナルコンピュータの処理速度が大きくなると、処理負荷の大きなインターフェースも問題無くリアルタイムで使うことが可能になるので、従来の発想に縛られずに対話型ソフトウェアを作成して解析業務の迅速化を図ることが望ましい。

参考文献

- 1) Delphi Basics, <http://www.delphibasics.co.uk/>, (Accessed 2019/12/12).

付録 (CD-ROM 収録)

本報告書に付属する CD-ROM には次のファイルが収められている。

- ① postproc.exe : RELAP/SCDAPSIM 用ポストプロセッサ
- ② RELAP_SCDAPSIM_Sample_Output.o : RELAP/SCDAPSIM の出力テキストファイル
- ③ Melcor_Processor.exe : MELCOR 用ポストプロセッサ
- ④ MELCOR_Sample_Output.txt : MELCOR の出力テキストファイル

RELAP/SCDAPSIM 用ポストプロセッサの使い方

postproc.exe を起動後、画面中央上部の [ReadInput] をクリックし、RELAP_SCDAPSIM_Sample_Output.o を選択する。ファイルの読み込みが終了すると [ReadInput] の右側にシミュレーションの最終時刻が表示されるので、本報告書に記載の各種機能を確認できる。

MELCOR 用ポストプロセッサの使い方

Melcor_Processor.exe を起動後、[Settings] タブにある [Read Output] をクリックし (Ring1~4 の数字はそのまま)、MELCOR_Sample_Output.txt を選択する。[Read Output] が [Reading] になって再び [Read Output] に戻ると本報告書に記載の各種機能を確認できる。

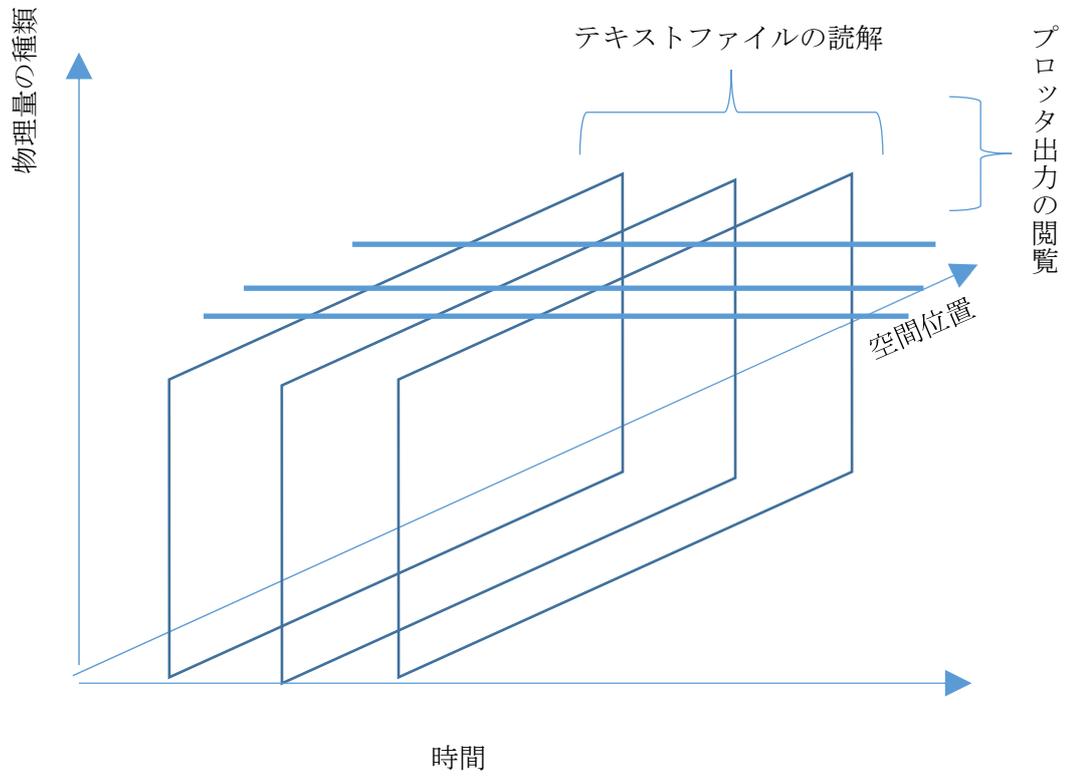


図1 出力情報空間

```

i 番目のタイムステップであることを示す文字列+時刻表示
物理量グループ①の見出し
  部品(A)の情報であることを示す文字列
    位置(a)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    位置(b)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    位置(c)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    :
  部品(B)の情報であることを示す文字列
    位置(a)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    位置(b)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    位置(c)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    :
物理量グループ②の見出し
  部品(A)の情報であることを示す文字列
    位置(a)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    位置(b)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    位置(c)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    :
  部品(B)の情報であることを示す文字列
    位置(a)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    位置(b)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    位置(c)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
    :
物理量グループ②の見出し
  位置(a)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
  位置(b)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
  位置(c)   数値 1   数値 2   数値 3   . . . . .
  :
  :
  :
i+1 番目のタイムステップであることを示す文字列+時刻表示
物理量グループ①の見出し
  :
  :
  :

```

図 2 テキスト出力ファイルの基本構成

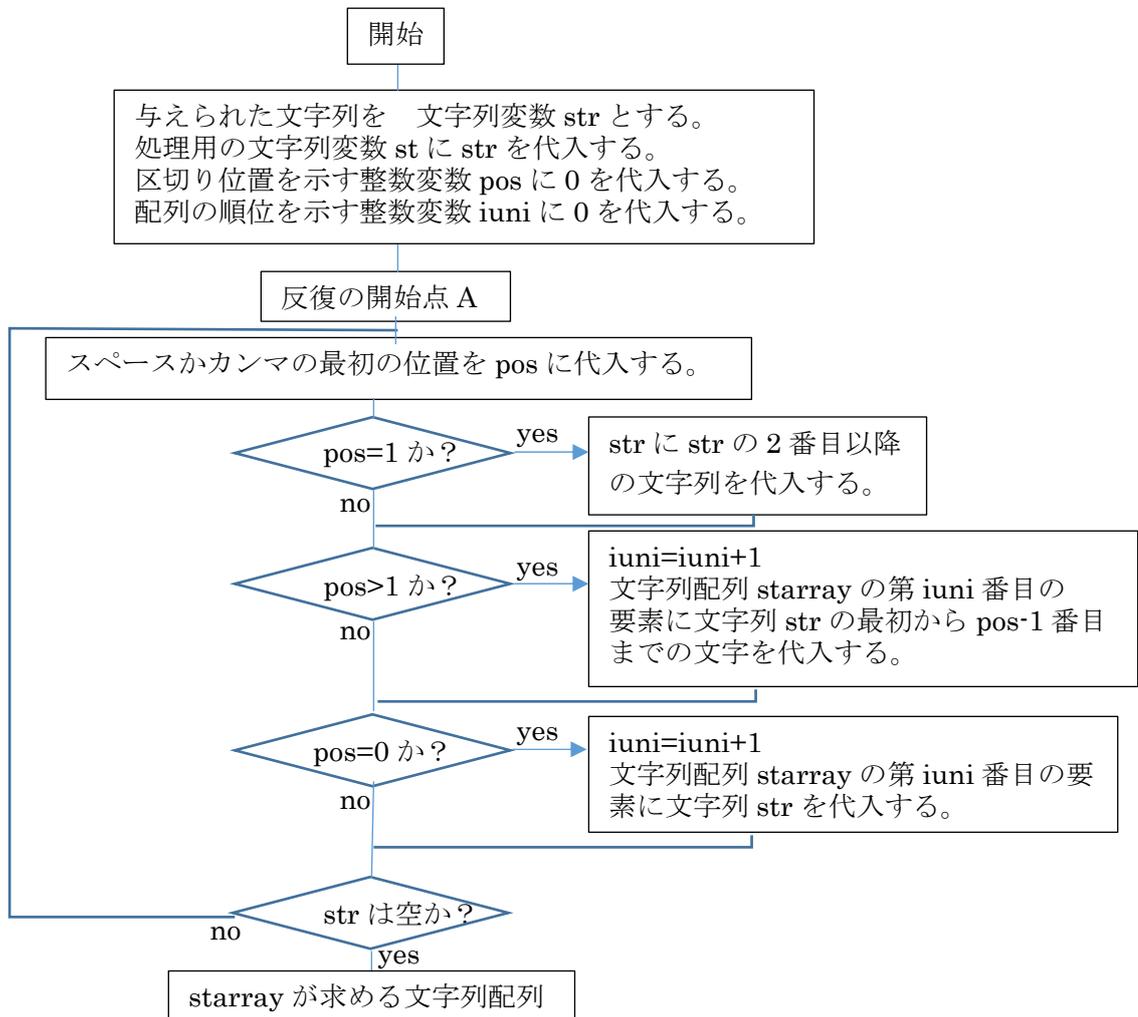


図3 テキストの1行を文字列配列に変換するアルゴリズム

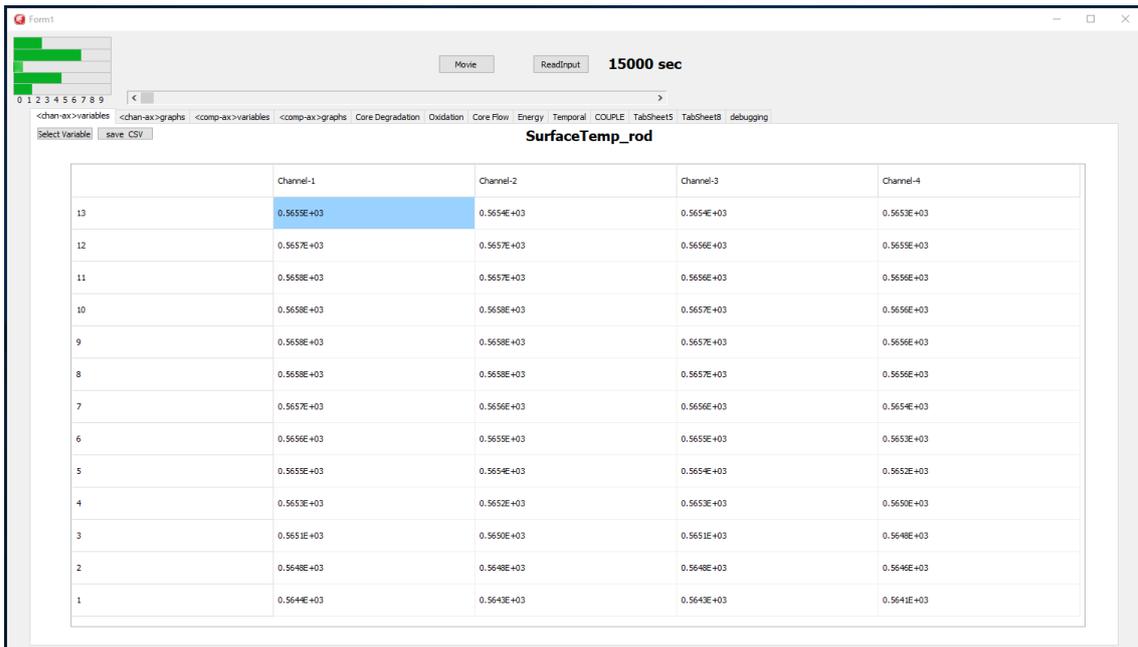


図 4 チャンネルと軸方向ノード毎に定義されたパラメータのシートを表示した状態

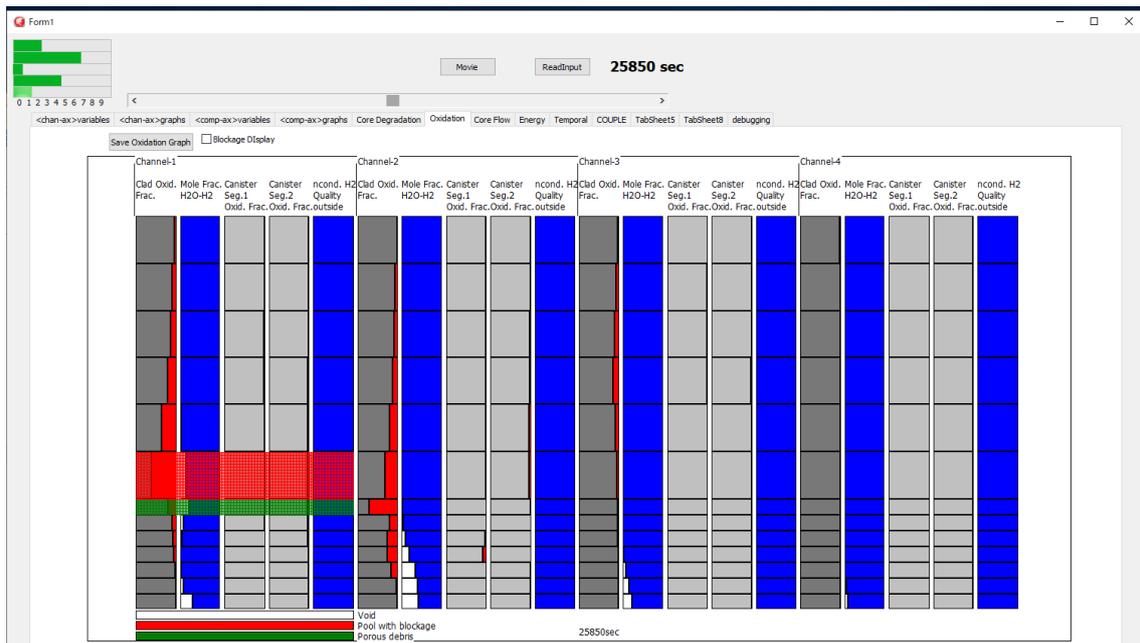


図 5 炉心各部の被覆管とチャンネルボックスの酸化割合及び水素と水蒸気の本モル比率を表示するシート

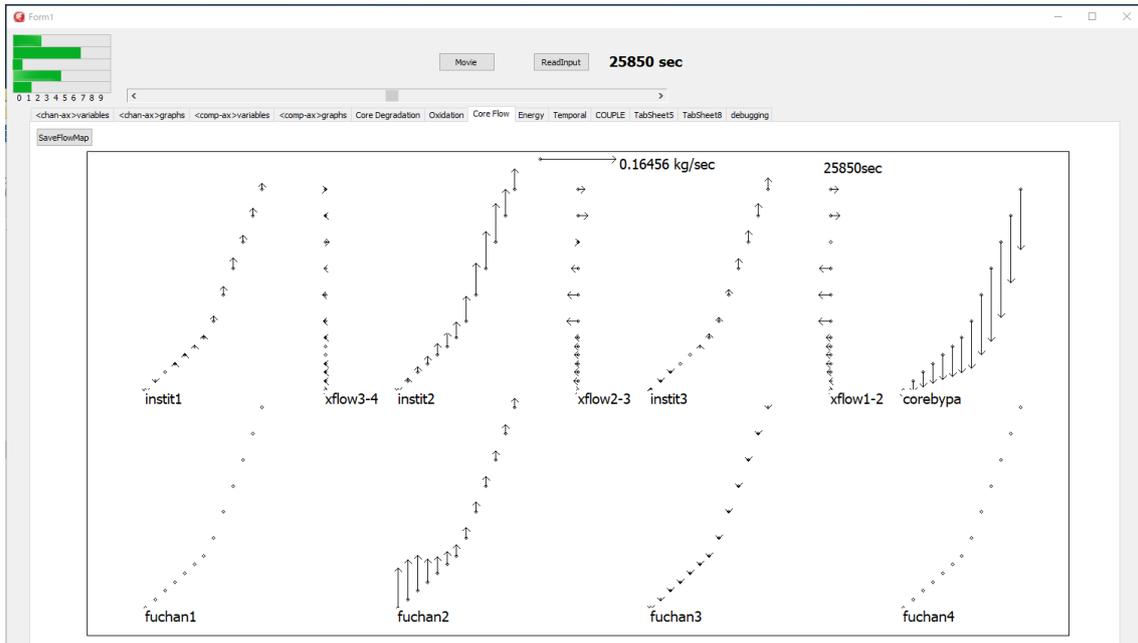


図 6 炉内の冷却材流量を示すシートが表示された状態

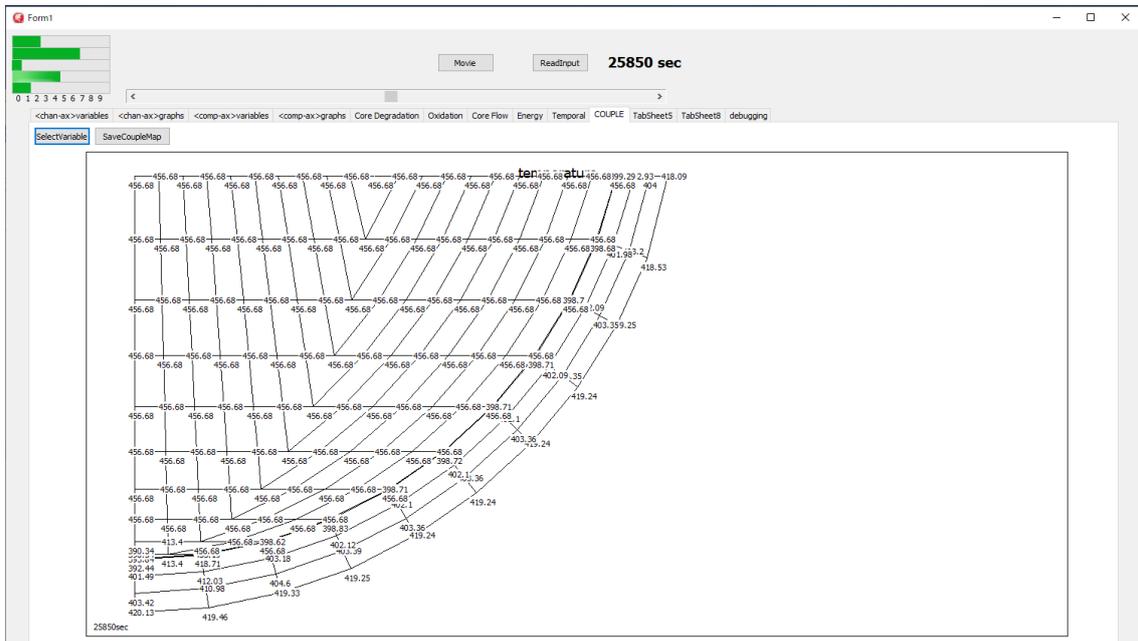


図 7 下部プレナムの温度分布を表示した状態

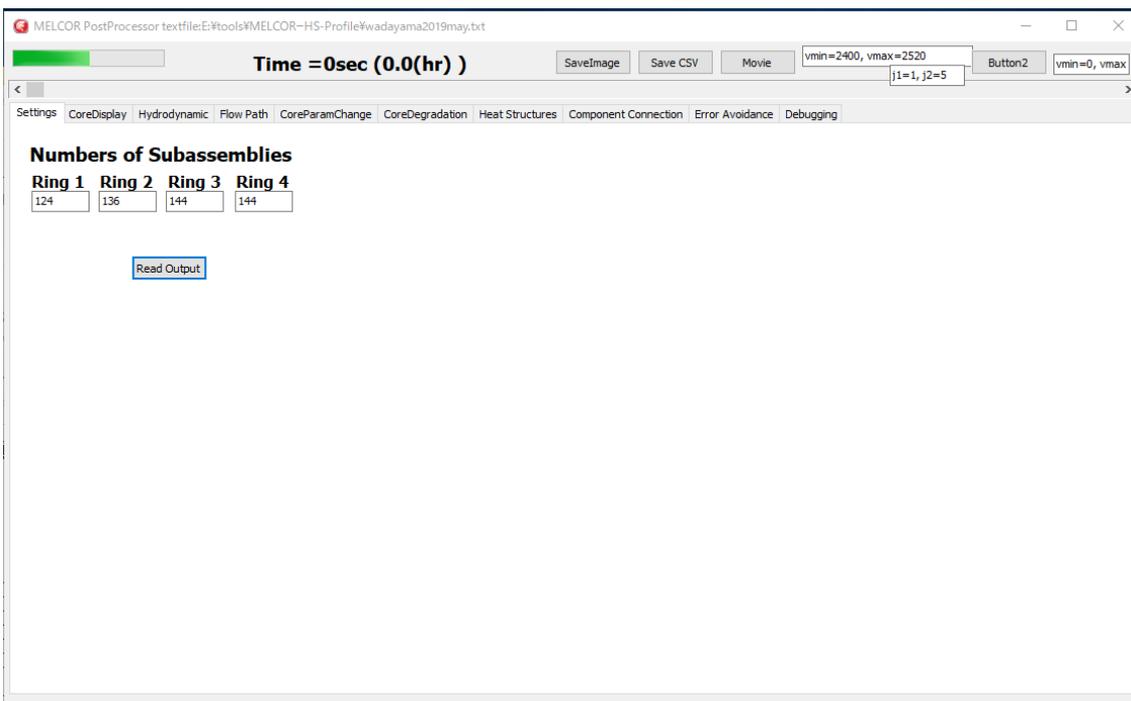


図 10 Ring 毎の集合体数の設定と出力ファイル読み込みボタンが配置されたシート

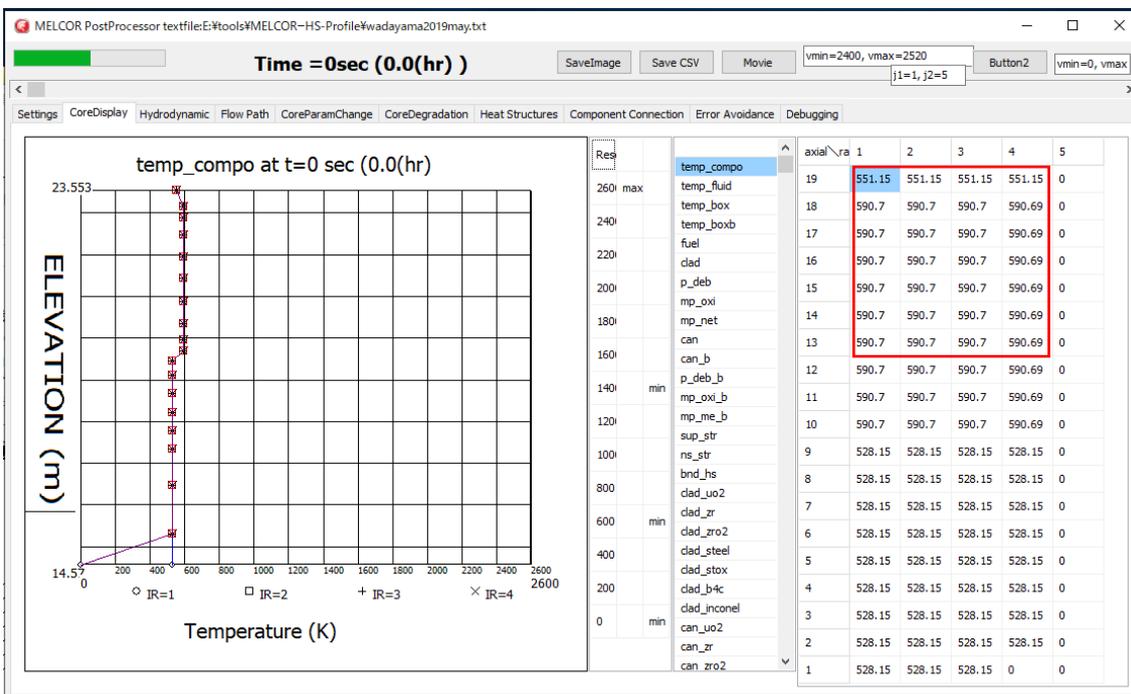


図 11 炉心の状態を表示するシート

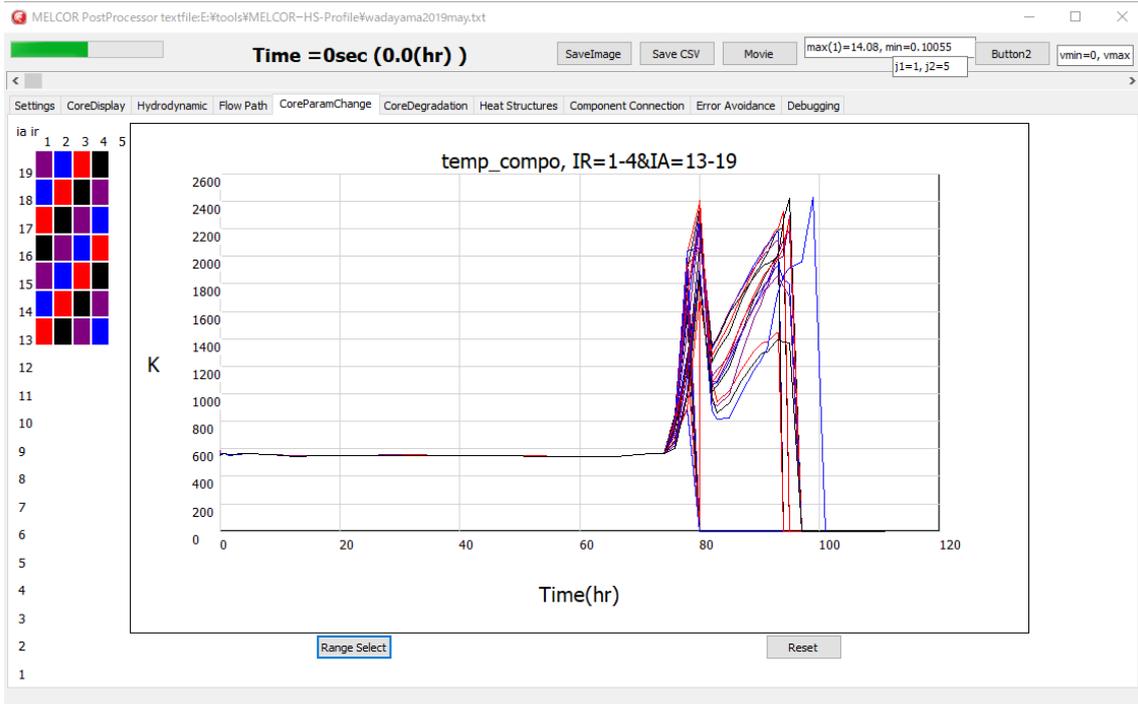


図 12 Ring1 から 4、軸法ノード 13 から 16 までの温度を詳細に表示した状態

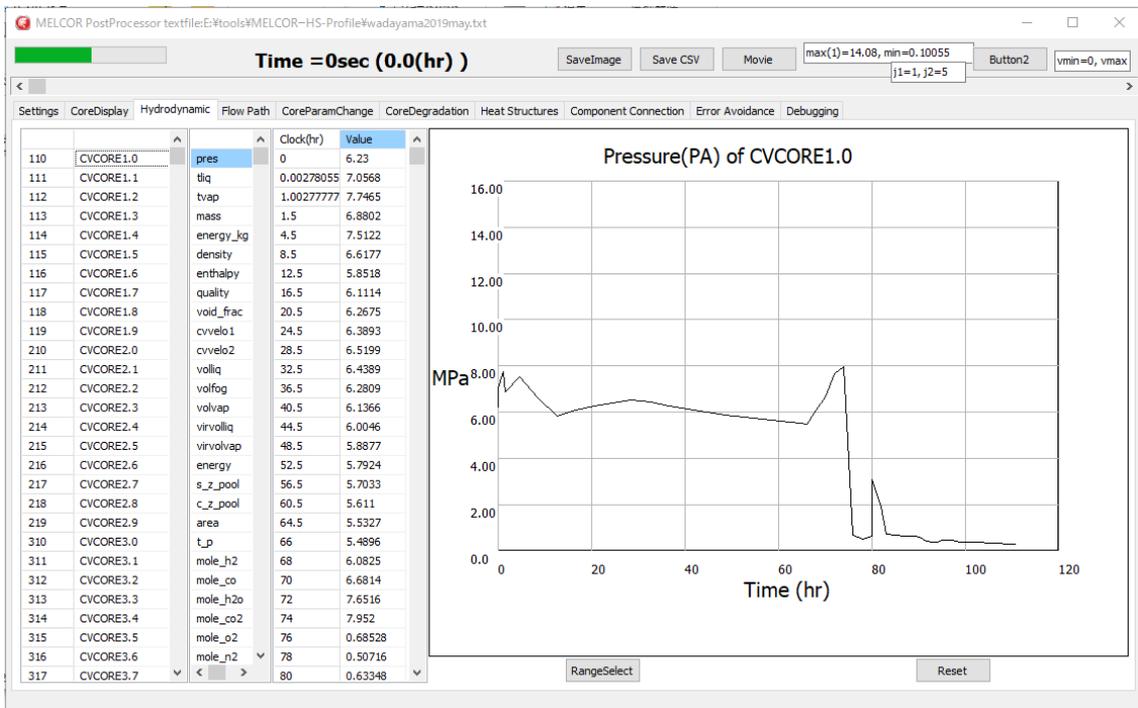


図 13 冷却材の状態を表示するシート (<HydroDynamic>)

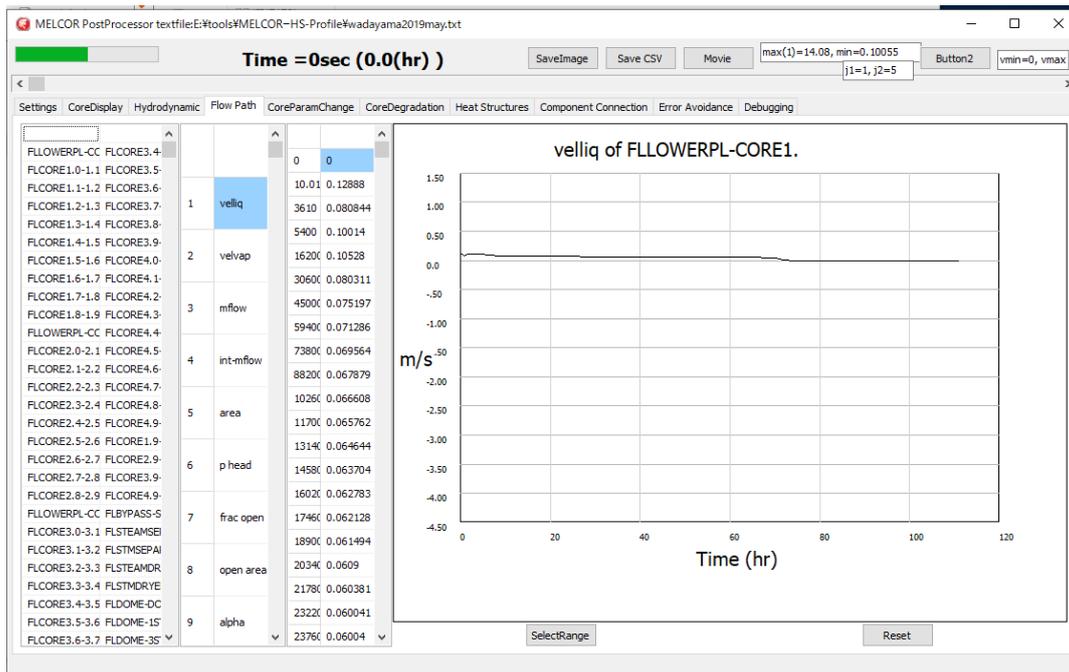


図 14 ノード間の接続部の状態を表示するシート (<Flow Path>)

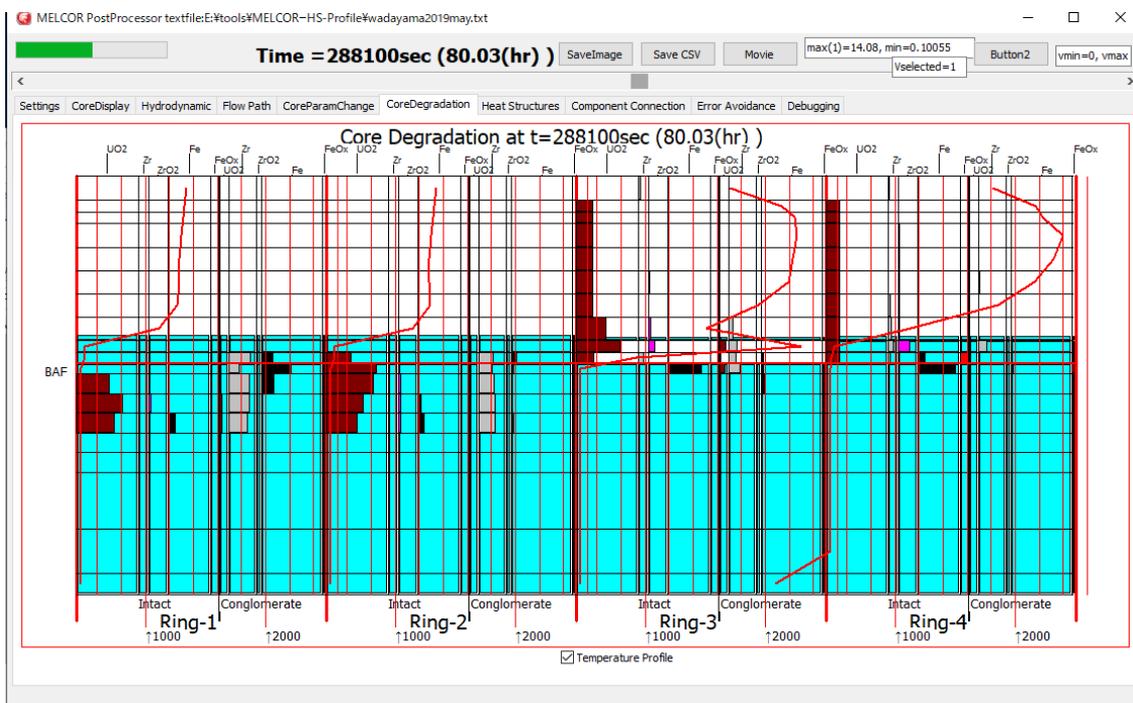


図 15 炉心の崩壊状態を表すシート

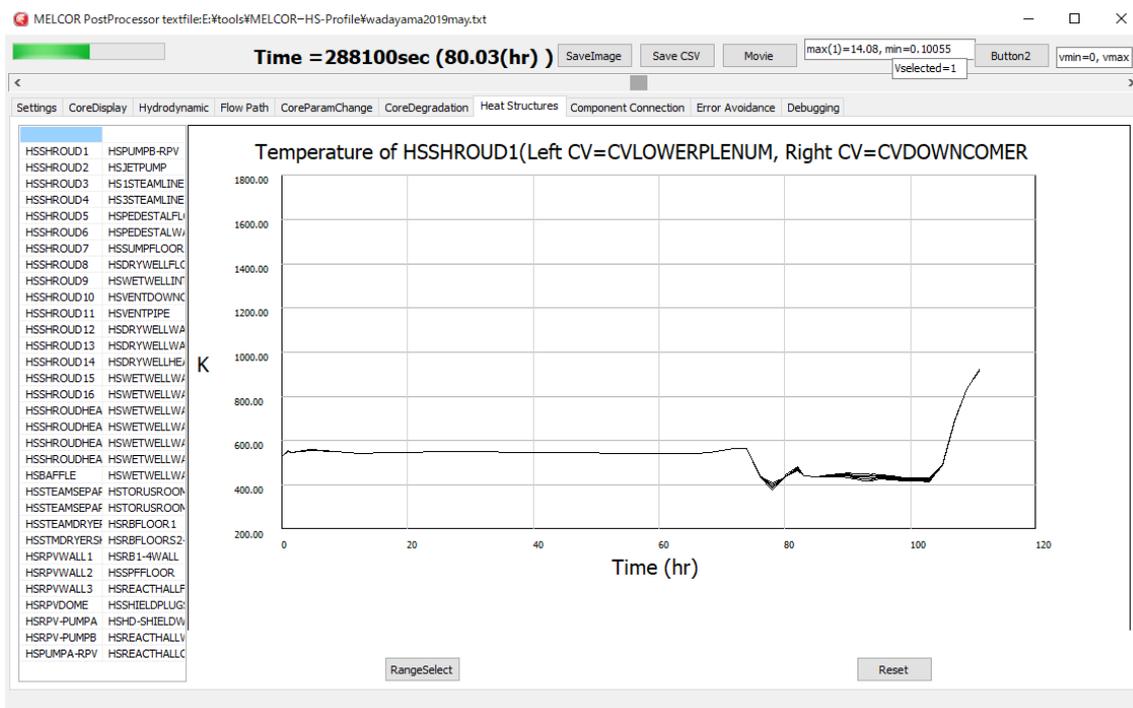


図 16 Heat Structure に定義された節点の温度変化を表示するシート

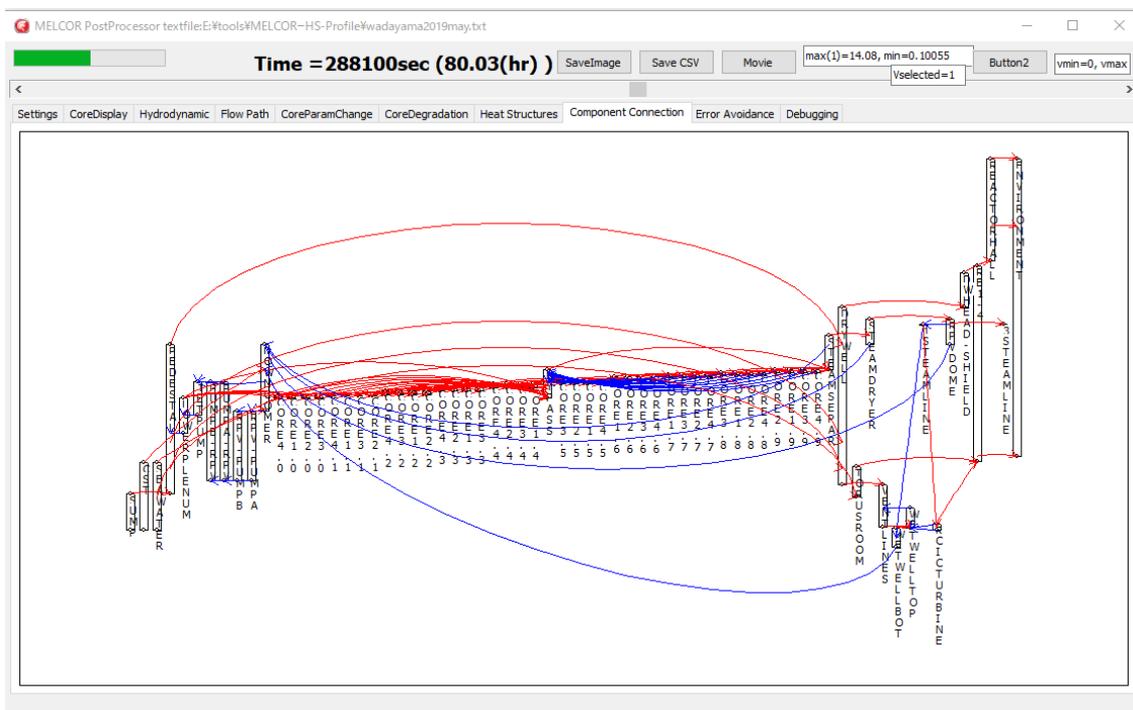


図 17 冷却材を保持する部品 (Component) 間の接続関係を表示するシート (<Component Connection>)

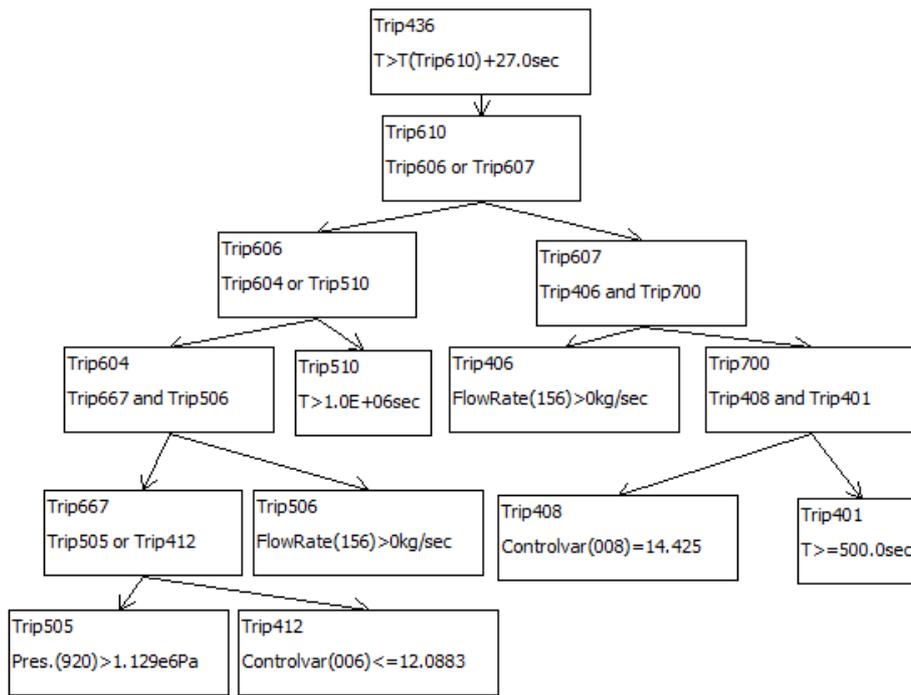


図 18 RELAP/SCDAPSIM で用いられるトリップ信号の論理構造の例

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

