



# 高速炉保修線量評価システムの開発

飯沢 克幸 竹内 純\* 吉川 暁\* 漆原 広\*<sup>1</sup>

敦賀本部 国際技術センター

\*日立エンジニアリング株式会社

\*<sup>1</sup>茨城日立情報サービス株式会社

Development of Dose Rate Estimation System for FBR Maintenance

Katsuyuki IIZAWA Jun TAKEUCHI\* Satoru YOSHIKAWA\* Hiroshi URUSHIHARA\*<sup>1</sup>

International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office

\* Hitachi Engineering Company, Ltd

\*<sup>1</sup> Ibaraki Hitachi Information Service Co, Ltd

高速炉1次冷却系のナトリウムドレン後の点検保守時に被ばくをもたらす主な放射線源は放射性腐食生成物(CP)である。作業者の被ばくを予測し低減化を計画的に推進することを目的に、CP挙動解析コード(PSYCHE)の開発整備と遮蔽計算コード(QAD-CG)の利用が進められてきた。これら評価手法を実プラントの運転管理に利用しやすいものとするため、解析コードのユーザーインターフェースを改良し、コードを集約し、計算結果の線量率マップの可視化を含む高速炉保修線量評価システム「DORE」を開発した。これを用いて、「もんじゅ」定格運転1次ナトリウム冷却系CP沈着分布及び冷却系室線量率分布の予測評価と可視化を行い、システムの機能の検証を行った。

*During maintenance activities on the primary sodium cooling system by an FBR Personnel radiation exposure arises mainly from the presence of radioactive corrosion products (CP). A CP behavior analysis code, PSYCHE, and a radiation shielding calculation code, QAD-CG, have been developed and applied to investigate the possible reduction of radiation exposure of workers. In order to make these evaluation methods more accessible to plant engineers, the user interface of the codes has been improved and an integrated system, including visualization of the calculated gamma-ray radiation dose-rate map, has been developed. The system has been verified by evaluating the distribution of the radiation dose-rate within the Monju primary heat transport system cells from the estimated saturated CP deposition and distribution which would be present following about 20 cycles of full power operation.*

## キーワード

放射性腐食生成物, 放射性物質挙動解析コード, 遮蔽計算コード, 解析コードシステム, 線量率マップ, 可視化, 高速増殖炉, 「もんじゅ」

*Radioactive Corrosion Product, Radioactive Material Behavior Analysis Code, Shielding Analysis Code, Analysis Code System, Dose-Rate Map, Visualization, FBR, Monju*



飯沢 克幸

プラント機器技術開発グループ所属,  
副主任研究員  
高速炉放射線挙動評価・  
抑制技術の研究開発に従事



竹内 純

電力エンジニアリング第2  
部所属,  
副参事  
放射線遮蔽解析及び設計業  
務に従事  
放射線取扱責任者



吉川 暁

システム開発センター所属  
技師, 情報処理技術者  
(PE・NW・第1種)  
電子計算機システムの各種  
のソフトウェアシステム開  
発と設計に従事



漆原 広

システム解析部 ITセン  
ター長  
計算科学分野及びWeb構  
築技術に従事

## 1. はじめに

高速増殖炉(FBR)プラントの点検保守時における作業者の被ばくを予測し、低減対策を計画的、効果的に推進することを目的として、高速炉保線線量評価システムを構築し、高速増殖炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」)への適用化を実施した<sup>1)</sup>。本システムは、これまでに開発され利用されて来た、高速炉ナトリウム冷却系統における放射線源挙動解析コードと遮蔽計算コードを統合化したもので、「Dose Rate Estimation System for FBR Maintenance」を略してDOREと称する。DOREでは関連解析コードをプラントの設計や運転管理及び実プラントによる研究開発に利用しやすいものとするため、コードのユーザーインターフェースを対話形式の画面入力とした。また、計算結果である線量率分布をプラント配管機器形状に重ねて可視化表示し、結果の理解を容易なものとした。さらに、今後の技術者の世代交代にも備え、高度情報技術の活用により、当該分野の技術保存を容易に行えるようにし、技術継承を円滑に進める環境を整備した。

破損燃料を含まない通常運転下では、プラントの点検保守時に作業者に被ばくをもたらす主な放射線源は、<sup>54</sup>Mnや<sup>60</sup>Co、<sup>58</sup>Coなどの放射性腐食生成物(CP)、放射化ナトリウムのうちの<sup>22</sup>Na、及びトリチウムである<sup>2)</sup>。燃料破損発生時には、放射性希ガスや<sup>137</sup>Csなどの核分裂生成物(FP)核種も付け加わる。現状のDOREでは、プロトタイプ構築段階として、CP及び放射化ナトリウム線源までを取扱っている。今後、トリチウムやFP線源についても評価可能なようにシステムを拡張し、順次組込んでいく計画である。

高速炉CP挙動解析コードは動燃時代から開発されてきたPSYCHEコードで、「溶解・沈着モデル」(solution precipitation model)と称する挙動モデルにより、1次ナトリウム冷却系統におけるCPの発生(炉心材料の放射化と溶出)、ループ中の移行及び配管・機器管壁への付着分布を計算するものである<sup>3)9)</sup>。本コードは、高速実験炉「常陽」のMK II運転において、1次冷却系統のCPビルドアップが飽和に達するまで、10年余の期間をかけて行われた配管・機器管壁実測データを用いて検証され、計算値/測定値(C/E)として1.5が得られた<sup>4)5)</sup>。これを踏まえて、これまでに「もんじゅ」の予測評価に用いてきた<sup>6)</sup>。遮蔽計算コードには、

米国のLos Alamos研究所で開発された、いろいろな遮蔽形状を透過する線量を計算するQADコードを改良整備したQAD CGGP2コード(以下、QAD CG)<sup>6)20)</sup>を用いた。

DOREは、インターネットのWeb技術を利用したイントラネット上で、クライアント/サーバモデルに基づいて構築されたシステムである。サーバ側には、解析コードとユーザーインターフェースプログラム、及び入出力データを格納するデータファイルシステムがインストールされる。一方、クライアント側には、DOREのシステム制御や解析コードの入力データ設定を行うためのWebブラウザ、QAD CGコードの幾何形状入力データを視覚的に作成のためのCADソフト、計算結果の線量率マップを可視化するソフト、及び各種ドキュメントを作成するためのオフィスソフトがインストールされる。したがって、社内のイントラネット上であればどこからでも、上記のCAD、可視化、オフィスソフトをインストールしたクライアントを設置しておけば、WebブラウザによりDOREにアクセスし、いつでも利用することができる。

本報告では、第2章から第4章においてシステム構築について述べ、第5章において解析コードの概要を述べ、第6章において「もんじゅ」評価への適用結果について示す。

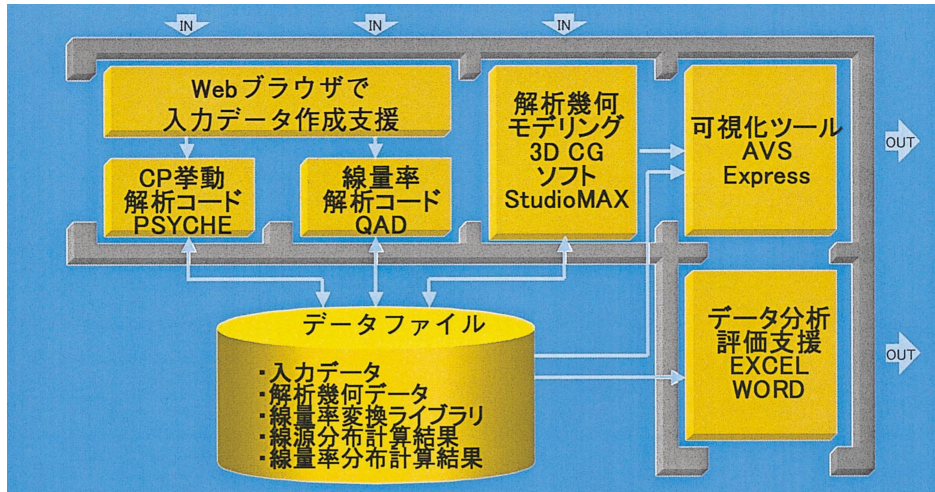
## 2. DOREの基本システム構成

### 2.1 機能とシステム構成

DOREはネットワーク上のワークステーション(WS)やパーソナルコンピュータ(PC)の環境において、Webの技術を利用したイントラネット上で稼働するシステムである。これはクライアント/サーバモデルに基づくものであり、急速なコンピュータ利用環境の変化やプラットフォームの変更においても、最少なシステム変更で稼働できるものである。本報告でのプロトタイプで使用したハードウェアは、操作のしやすさやシステムの統合、コストパフォーマンスの観点から、高性能PCを用いてサーバとクライアントを構築した。

図1(a)(b)にDOREの機能構成とシステム構成を示した。機能構成として、Web技術適用による対話型の解析コードユーザーインターフェース、CADソフトを使用したQAD CGコードの幾何形状入力データ作成と検証、線量率マップの可視化、解析結果のドキュメント作成などの特徴がある。

(a) 機能構成と処理の流れ



(b) システム構成

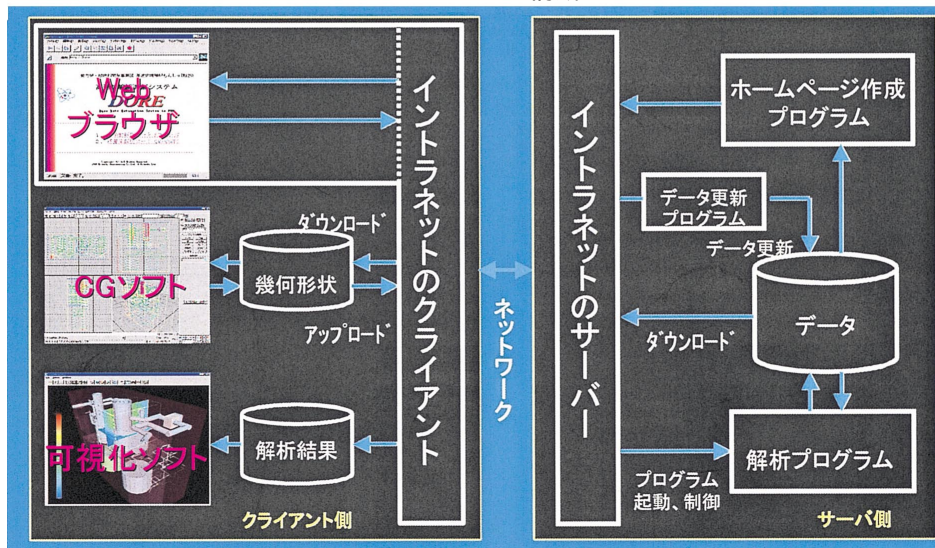


図1 DOREの基本システム構成

また、システムは、サーバ側にWebサーバ、CGI (Common Gateway Interface) で使用するPerl 言語開発環境、解析コード、及びその入力データや計算結果のデータファイルで構成されている。一方、クライアント側には、解析コードのユーザーインターフェース用に利用しているWebブラウザ、CADソフト、可視化ソフト、ワープロソフト、表計算ソフトがインストールされている。

## 2.2 オペレーティングシステムとソフトウェア

### (1) オペレーティングシステム (OS)

OSの選定においては、OSの安定性、使いやすさ、多くのパッケージソフトの利用、かつ、Webサーバが構築できるものとして、Microsoft社のWindows NTを採用した。

### (2) 開発環境ソフトウェア及び解析コード

解析コード開発環境として比較的廉価で計算の高速実行可能なFortran Compilerを採用した。DOREのプロトタイプに集約された解析コードは、CP挙動解析コード(PSYCHE10)、及び配管・機器周りの線量率分布ライブラリ(単位線源分布に対する各評価点における線量率)を計算するための遮蔽計算コード(QAD CG)である。

### (3) 汎用パッケージソフトウェア

PC上で利用できる可視化ソフト(AVS社 AVS/Express Viz:以下, AVS)、基本幾何形状(プリミティブ)のブーリアン演算可能なCADソフト(AutoDesk社 3D Studio MAX:以下, MAX)及びオフィスソフト(Microsoft Excel, Word, Power-Point)など、DOREとして必要な機能を満足しか

つ、コストパフォーマンスに優れ、汎用的でマルチプラットフォームに対応したパッケージソフトを採用した。また、WebブラウザソフトにはNetscape Communicatorを採用した。

### 2.3 ハードウェア

DOREのハードウェアには高性能PCを用いることとし、PC用プロセッサにIntel Pentium III 550MHz Xeonを搭載し、解析コードの高速実行を可能とした。また、メモリ、周辺装置などの処理性能・仕様において、優れたコストパフォーマンスを有し、信頼性の高い機種を採用することとした。さらに、高速描画処理可能とするためのグラフィックスボードを搭載し、AVS及びMAXによる描画の高速化を図ることとした。

## 3. プリプロセッサとポストプロセッサ

DORE構築において、解析コードは極力手を加えずに利用しシステム化することを方針とし、解析コードの入出力データ作成部のプリ/ポストプロセッサを構築した。

### 3.1 プリプロセッサ

#### (1) 機能概要

解析コードの改良・機能拡張や新たな解析コードの組み込みに際してDOREシステムの変更を最少限に抑えられるよう、各種解析コードの入力データを統一し、プリプロセッサに以下の機能を持たせた。

- ① 個々の解析コードが有する固有の入力形式のデータを、システムが定める中間形式のデータファイルに自動変換し、また、その逆を行う双方向データ変換コンバータを開発し組込んだ。
- ② 入力データのうち数値データは、インターネットで使用しているWebブラウザを利用し対話的にデータの設定、変更、削除を可能とするとともに、PCやWSの機種に依存しない操作環境を実現した。
- ③ QAD CGコード特有の幾何形状入力データの作成に対しては、CADソフトとの連動により画面上で図形を確認しながら入力データを作成できるようにした。また、QAD CGコードの幾何データとCADソフト間で双方向にデータ変換ができる機能を持たせることにより、既に作成された幾何形状入力データをCADソフトで図形表示し検証を容易とした。

#### (2) Webブラウザによるユーザインタフェース

DOREに組込んだ解析コードのユーザインタフェースのほとんどをWebブラウザを利用し作成した。ただし、解析コードの入力データのように、解析する問題により、入力データの個数が変更になる場合を考慮し、動的に画面のレイアウトが変更出来るような方法を取った。また、解析コードの入力データ設定画面はデータ項目が多いため、作成するWeb画面のページも多くなる。そこで、入力データ設定画面が容易に作成できるように簡単なデータ記述で動的な画面レイアウトに対応したHTMLが自動生成できる機能を持たせた。

#### (3) 解析コードの組み込みと入力データファイルとのデータ授受

解析コードのプリプロセッサとのシステム化は以下の基本方針によった。

- ① 解析コードの計算実行はネットワーク上のサーバ側で行うこと。
- ② 解析コードは基本的に変更しないこと。
- ③ 解析コードの改良・機能拡張に対して、プリプロセッサの変更が最少限で行えること。

本システムでは、データ授受の基本部分に中間データファイルを構築することにより、個々の解析コードが持っている固有の入力データ形式を吸収し、サーバのCGIプログラムとクライアントのブラウザの入力データ設定画面間でスムーズにデータ授受が行えるようにした。中間データファイルのデータ記述形式は、Fortran言語のNameList形式に近い仕様とした。

#### (4) MAXによる幾何形状の設定

QAD CGコードで使用する幾何形状入力データの作成においては、CADソフトとの連動により画面上で図形を確認しながら入力データを作成できるようにした。DOREでは、サーバ側にあるQAD CGコードの入力データをWeb画面によりクライアント側にダウンロードし、そのデータを使ってMAXにより幾何データの新規作成・追加・変更を行う。

QAD CGコードの入力データには、3次元幾何形状データ[遮蔽設備、線源領域、空間]が含まれており、Combinatorial Geometry (CG) という表現方法により、データの記述が行われるが、かなりの熟練を要する。CGでは、まず、直方体(RPP)・円形シリンダー(RCC)・直三角柱(WED)などの単純な立体型(プリミティブ)を定義し、



次に、それらを組み合わせてブール演算により目的幾何形状を生成する。MAXにCGとのデータ変換機能を持たせ、QAD CGコードの入力幾何形状データを自動生成できるようなプラグイン(モジュール)を作成した。これにはMAXにより作成した幾何形状データを、QAD CGコードのプリミティブ定義のカード及びブール演算定義のカードとしてファイルに出力するためのエクスポート機能、及び二つのカードを読む込むためのインポート機能も持たせ双方向のデータ授受を可能とした。

また、作成した幾何形状を3角形のパッチ情報としてAVSフォーマットでファイル出力するプラグインを作成し、可視化ソフトAVSにおけるプラント幾何形状の表示として利用できるようにした。図2に作成した「もんじゅ」1次冷却系幾何形状データのMAXによる検証例を示した。

## 3.2 ポストプロセッサ

### (1) 機能概要

解析コードによる計算結果は、サーバ側のデータファイルシステムに保存されるが、解析結果の分析、編集加工、可視化を行うため、必要に応じ

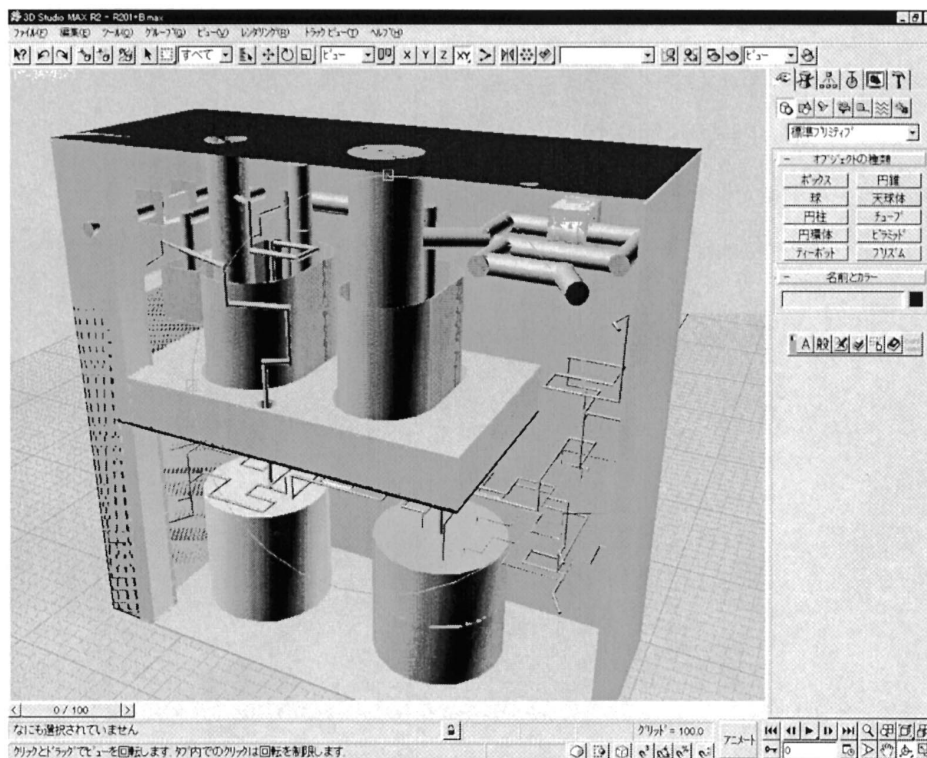
てクライアント側にダウンロードできるような機能を持たせた。この機能により、クライアント側に表計算ソフトや可視化ソフトを準備しておけば、計算結果の後処理が容易となる。

### (2) プロトタイプポストプロセッサの構成

プロトタイプのポストプロセッサは、図3に示すように個々の解析コードの計算結果を対象に、可視化や結果の分析、加工など個別の後処理用プログラムとして作成した。

まず、QAD CGコードの計算結果は、単位強度線源分布当たりの線量率を3次元評価点に対してライブラリとしてファイルに出力される。CPによる線量率分布は、この線量率ライブラリとPSYCHEコードの計算結果の線源強度分布を乗じて再規格化して求められる。そのため、プロトタイプでは編集・出力兼データ変換機能を持ったポストプロセッサとしてQADLISTコードを作成した。これは、線量率分布を再規格化するための編集機能と、可視化用ソフトAVSへデータを渡すためのデータ変換機能を有する。

また、MAXに対して、QAD CGコードの入力データから幾何形状データを抽出し、これらのカードの特別なデータフォーマットを解釈し、



「もんじゅ」1次主冷却系室とタンク室

図2 MAXによるQAD CG幾何形状データの検証例

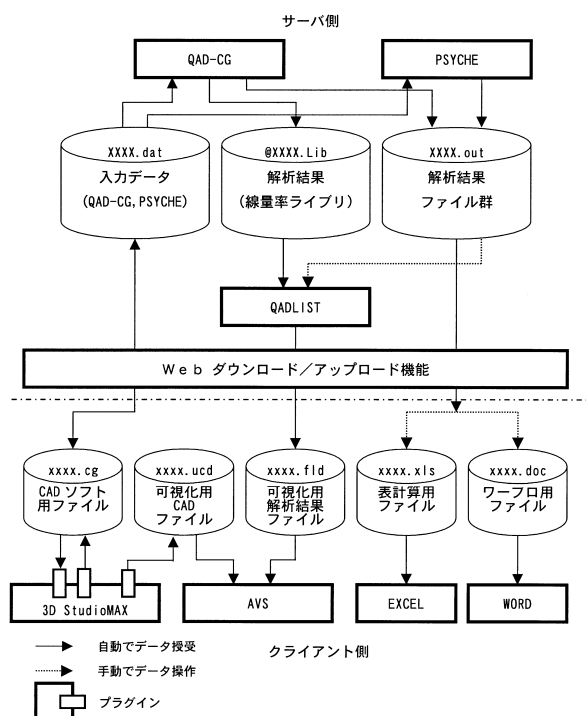


図3 プロトタイプポストプロセッサの概念図

MAXに取り込めるようなプラグインインターフェースを作成した。また、この幾何形状データを線量率分布と重ね合わせて表示できるようにするために、可視化用ソフトであるAVSへデータを渡すためのデータ変換機能を付加した。

可視化ツールはクライアント(PC)上で独立に起動して利用する形態とし、UNIX上で動作する世界標準ツールとして実績のあるAVSを使用した。上述したように、AVSによる線量率マップの可視化は、AVSのUCD及びフィールドフォーマットに変換されたMAXのプラント幾何形状出力(ファイル名 ucd)とQADLISTの線量率分布出力(ファイル名 fld)の取り込みによって行われる。

PSYCHEやQAD CGコードの計算結果のドキュメント化については、解析コードのユーザーインターフェースのWeb画面により計算結果をサーバ側からクライアント側にダウンロードし、フォルダ内の書類として保存した後、コピー&ペーストの操作でEXCELのセルなどに計算結果を貼り付けることで対応した。

## 4. システムの統合化

### 4.1 システム制御

#### (1) 制御の概要

図4に示すように、DOREの制御はイントラネ

ット環境上でクライアント側のWebブラウザを用いて実現しており、ネットワーク上でサーバ側のスクリプトやプログラムの起動にはWebサーバソフトのCGI機能を利用している。一方、MAXやAVS及びオフィスソフトは、クライアント側で、Webブラウザとは独立に直接これらのアプリケーションソフトを起動し利用する。

#### (2) システムの環境

DOREではWebサーバソフトにApacheを使用し、CGIスクリプト用言語には、Perlバージョン5を用いた。クライアントで使用するWebブラウザにはNetscape社のCommunicatorを用いた。

## 4.2 CGIプログラムによるデータ授受通信

### (1) CGIの概要

CGIは、Web環境においてサーバとクライアント間のデータ授受通信部のインターフェースである。DOREのCGIプログラムは、入力設定画面をHTML言語でサーバからクライアントに送信したり、クライアントの画面で設定した数値データをサーバ側に送信する通信プログラム、及び設定画面の遷移をコントロールする制御プログラムから構成される。CGIプログラムのほとんどはPerlと呼ばれるインタプリタ言語で作成した。

### (2) 画面設定

画面レイアウトを構築するためには、画面タイトル、入力データ項目、入力データの数値と解析コードで使用する変数名称との対応、配列要素(1, 2, 3次元変数)の場合の表形式などについて定義する必要がある。DOREでは入力属性データを画面単位で作成し、それをHTMLに解釈しやすい構造化HTML言語へ変換するCGIプログラムを作成した。また、解析コードの入力データの種類と値によっては画面レイアウトも変更しなければならない。そのためには動的に画面レイアウトを作り出せるような動的画面レイアウト生成CGIプログラムを作成した。例えば、PSYCHEコードの入力データで、炉心領域分割数を入力で変更すると、炉心領域に関するデータ項目に対して領域数だけの入力フィールドが自動的に生成される。図5にWebブラウザでの画面階層を示した。

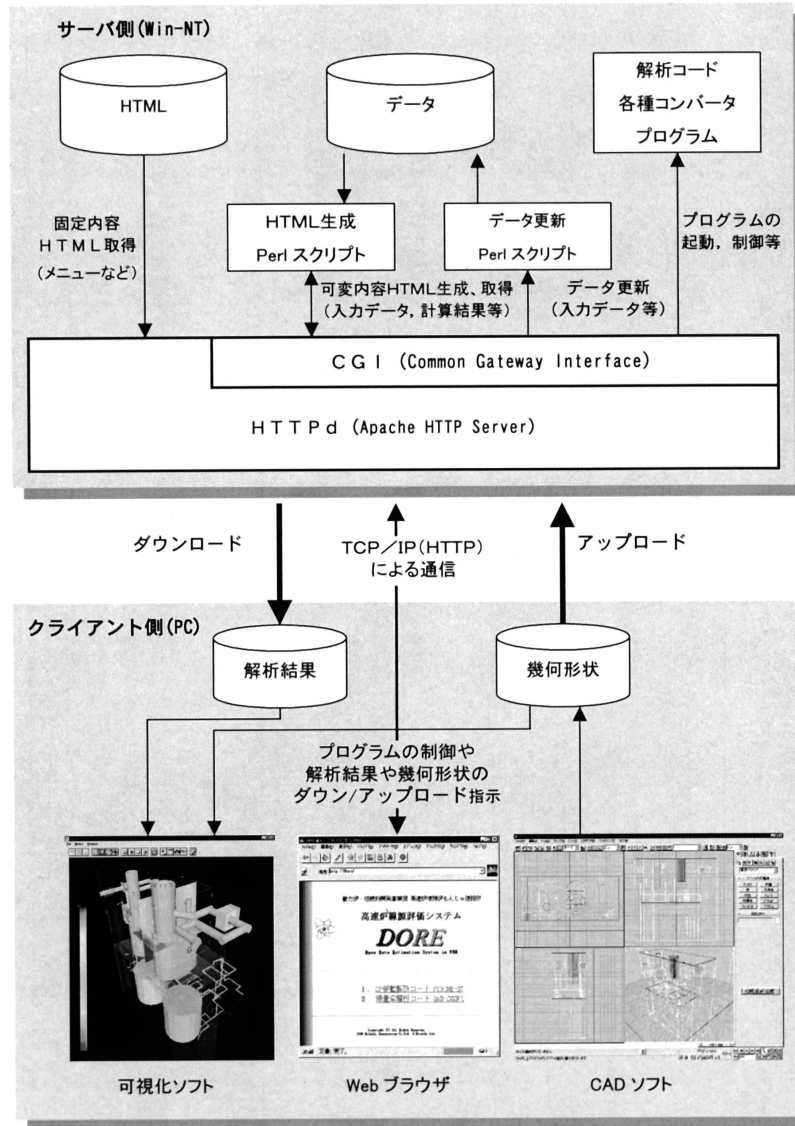


図 4 DORE システム制御概要図

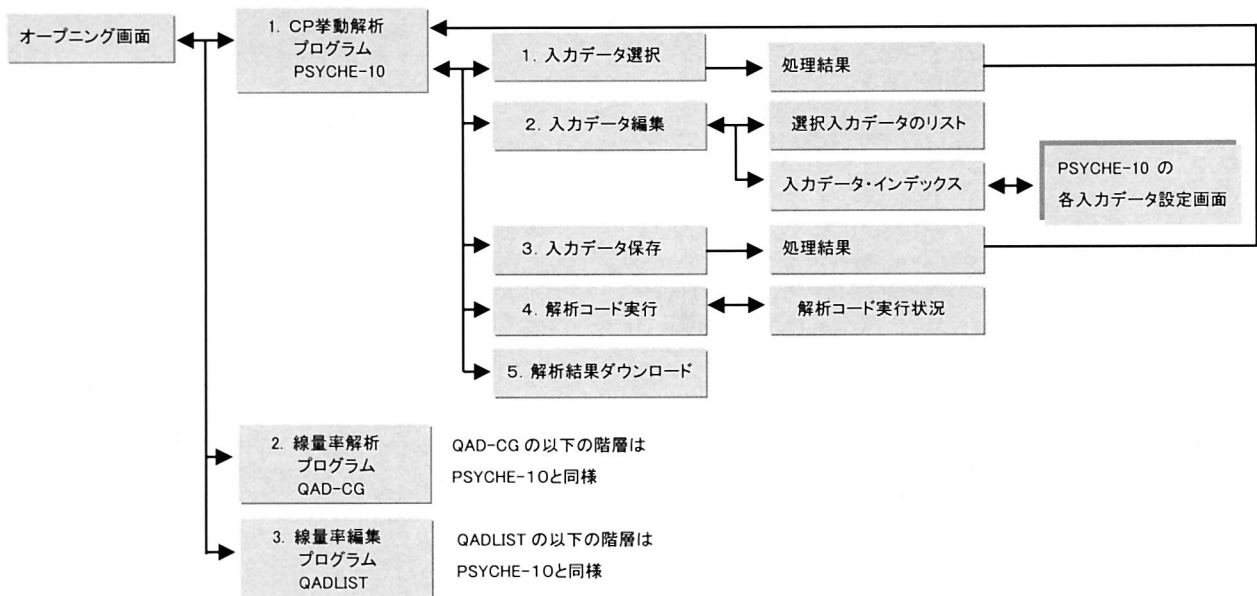


図 5 DORE の Web ブラウザでの画面階層

5. 解析コード

5.1 高速炉CP挙動解析コード (PSYCHE)

(1) 解析モデル

PSYCHEコードにおけるCP挙動の「溶解・析出モデル」(solution precipitation model)を図6に示した。これは、ステンレス鋼を浸漬して得られたCP移行試験データ<sup>7,8)</sup>を解析<sup>9-11)</sup>して構築されたものである。これまでに、「常陽」、「もんじゅ」の解析評価に用いられ<sup>3-6)</sup>、類似のものが米国のFFTFにも適用されている<sup>11-13)</sup>。このモデルでは、溶出側は被覆管の肉減りと管壁内部からの拡散による移行を考慮し、沈着側は管壁表面での析出と内部への拡散を考慮する。ナトリウム中での移行はナトリウム境膜中の拡散とループ中での輸送の質量保存を考慮する。

ナトリウムループ中の合金元素あるいはCP核種の質量移行現象は、下記の境界移動型拡散方程式と質量保存方程式により記述される。

拡散方程式：

左辺の符号 (+) : 界面後退 (減肉) の場合  
 (-) : 界面前進 (表面沈着) の場合  
 (溶出側)

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \pm u_c \frac{\partial C}{\partial x} + R = -\frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

ただし、放射性核種の中性子吸収断面積が大きい場合は (<sup>58</sup>Co, <sup>182</sup>Ta等) を + dE<sub>n</sub> に置き換える。

(沈着側)

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \pm u_d \frac{\partial C}{\partial x} - C = -\frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

境界条件 (溶出側, 沈着側で共通) :

$$D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} = \left( \frac{K'}{\text{or}} \mp u_{c \text{ or } d} \right) C_i - K' C' \quad (3)$$

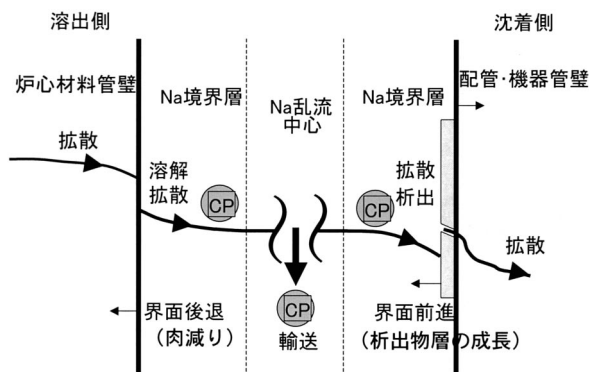


図6 PSYCHEコードにおけるCP挙動の「溶解・析出モデル」

右辺の符号 (-) : 界面後退 (減肉) の場合

(+) : 界面前進 (表面沈着) の場合

質量保存方程式 :

$$\frac{C'}{y} = 4 \frac{K'}{vd} \left( \frac{C_i}{\text{or}} - C' \right) \quad (4)$$

〔記号の説明〕

- C 濃度 [ atom/cc ]
- x 肉厚方向座標, y 流路方向座標 [ cm ]
- D 管壁中拡散係数 [ cm<sup>2</sup>/s ]
- k<sub>s</sub> 管壁表面ナトリウム中溶解速度定数 [ cm/s ]
- k' ナトリウム中からの析出反応速度定数 [ cm/s ]
- k' ナトリウム境膜中物質移行係数 [ cm/s ]
- ' 規格化ナトリウム中酸素濃度因子 [ - ]
- K' 総括物質移動係数 [ cm/s ]
- 又は \* 化学的分配パラメータ [ - ]
- u<sub>c</sub> 界面後退速度 (減肉速度) [ cm/s ]
- u<sub>d</sub> 界面前進速度 (管壁表面析出層成長速度) [ cm/s ]

- R 放射化生成速度 [ atom/s ]
  - 放射性崩壊定数 [ 1/s ]
  - 核反応断面積 [ cm<sup>2</sup> ]
  - 中性子フラックス [ n/cm<sup>2</sup>/s ]
  - v ナトリウム流速 [ cm/s ]
  - d 等価水力直径 [ cm ]
  - L 等温部長さ [ cm ]
  - Ox' Na中酸素濃度 [ ppm ]
  - D' Na中拡散係数 [ cm<sup>2</sup>/s ]
  - Re レイノルズ数
  - Sc シュミット数
  - R 気体定数 R = 1.987 × 10<sup>-3</sup> kcal/deg·mol
  - k<sub>B</sub> ボルツマン定数 k<sub>B</sub> = 8.617 × 10<sup>-5</sup> eV/deg
- 下付添字 i は界面を表す。  
 '付記号はナトリウム中の量を表す。

これらの連立偏微分方程式は非線形であるため厳密な解析解を得ることはできないが、幾つかの仮定を設けて線形化し、初期条件を与えて解析近似解を得ることが行われてきた<sup>9-11)</sup>。PSYCHEコードでは飯沢らの解析近似解<sup>9)</sup>を用いており、これはインベントリー数値積分計算のタイムメッシュ内での、ナトリウムループ中濃度の定常分布を仮定し質量保存を近似的に満足させたものである。一方、Polly<sup>10)</sup>とKuhn<sup>11)</sup>の解析近似解は溶出側で質量保存を考慮せず過大側の結果を与える。得られた



解により質量フラックス (J), 管壁中濃度 (C), ナトリウム中濃度 (C') などを表すことができる。

CP 挙動には化学種によって特徴があり, 表 1 に示すようにマンガントタイプとコバルトタイプに分類される。前者は溶出の酸素濃度依存性は弱く(肉減り速度の酸素濃度依存性からのみ生ずる)管壁中拡散による溶出の寄与が大きい。後者は酸素濃度依存性が強く, 肉減り速度に伴う溶出の寄与が大きい。また, コバルトタイプの界面移行は境膜拡散律速であるのに対し, マングントタイプではそれと界面反応律速の中間となる。ここで, モデルパラメータは CP 元素の管壁中拡散係数 (D), 総括物質移動係数 (K'), 化学的分配パラメータ (or \*), 境界移動速度 (u<sub>corr</sub>) であり, 表 2 に示し

表 1 ナトリウム中 CP 質量移行分類

分類	元素*	化学的分配パラメータ	総括物質移行係数
マンガントタイプ	Mn		$K' = \frac{k'k'_d}{k' + k'_d}$
	Ni		
	Ta		
コバルトタイプ	Co	*	$K' \approx k'$ for $k' < k'_d$
	Fe		
	Cr		

\* それぞれの放射性同位体を含む

表 2 モデルパラメータ (PSYCHE10)

記号 (単位)	名称	式
D (cm <sup>2</sup> /s)	実効拡散係数*1 (管壁中)	$D = 1.32 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{42.1}{RT}\right)$
u (cm/s)	界面移動速度	$u_c = 3.17 \times 10^{-12} O_x^{0.803}$ $\times \exp\left(12.63 - \frac{22}{RT} - 0.00591 \frac{L}{d}\right)$ $u_d = 3.17 \times 10^{-12} \times 0.0402 \exp\left(\frac{2.29}{RT}\right)^{*2}$
or *	化学的分配係数	(マンガントタイプ) $= 1.58 \times 10^6 \exp(2.13/RT)$ (コバルトタイプ) $*^{-12} = 9.93 \times 10^6 \exp(1.69/RT)$ $' = O_x'/12$
K' (cm/s)	総括物質移行係数	(マンガントタイプ) $K' = \frac{k'k'_d}{k' + k'_d}$ $k'_d = 5.05 \times 10^{-3} \exp(3.46/RT)$ (コバルトタイプ) $K' \approx k' = 0.023 \text{Re}^{0.83} \text{Sc}^{1/3} D'/d$ $D' = 5.1 \times 10^{-4} \exp(-0.032/K_6 T)$

\*1 本式に「常陽」データに適合して決定した補正係数を掛けて用いる。

\*2 本式に「常陽」データに適合して決定した時間依存型の補正係数を掛けて用いる。

た。\*には酸素濃度因子 ( $' = \text{酸素濃度} / 12$ ) が含まれているが, これは参照濃度 (モデルパラメータを決定したループ実験<sup>7)</sup>の酸素濃度 = 12 ppm) で規格化した濃度である。これらの式の値はループ実験での CP 核種沈着分布や管壁中濃度プロファイルの解析により決定され<sup>9)</sup>「もんじゅ」適用時に「常陽」実測データ解析により一部改良した<sup>6)</sup>。特に, 「常陽」MK II 炉心移行作業の影響を受けたと見られる, ナトリウム中酸素濃度変動に起因する, <sup>60</sup>Co 溶出速度の変動を再現するため, \*の酸素濃度依存次数を 1 次から 2 次に変更した。これは純鉄のナトリウム中質量移行試験で観察された鉄の腐食速度が酸素濃度の 2 乗に比例するという結果<sup>10)</sup>にも対応している。u<sub>c</sub> は挙動モデルで t の時  $J = u_c C_0$  (C<sub>0</sub>: 管壁中初期濃度) であるので, 材料の質量移行試験によるステンレス鋼の肉減り速度実験式(定常腐食速度)<sup>11)</sup>を適用できる。また, ナトリウム境膜中の物質移動係数 k' には Treybal<sup>14)</sup>の式を用いた。

## (2) 計算方法

PSYCHE コードの CP 挙動計算体系図を図 7 に示した。CP の発生(炉心材料の放射化とナトリウム中への溶出)は炉心部で起り, 冷却材の流れによって下部に運ばれ, 配管・機器管壁に沈着し, 冷却系点検保守時における作業者の被ばく原因となる。一方, ナトリウム中に残留する CP はごく少ない。管壁沈着は冷却系ループ中で起るだけではなく, 炉心部入口や周辺部の低温側でも生ずる。炉心部の燃料集合体や反射体表面などに沈着した腐食生成物は溶出した放射性核種を含むだけではなく, 中性子照射を受け強く放射化される。これらは, 使用済み取出し燃料のナトリウム洗浄時に廃液中へ離脱し, 廃液や洗浄設備の強い放射能汚染を引き起こす<sup>15)</sup>。PSYCHE コードでは配管・機器系統管壁における CP 沈着分布を計算するだけでなく, これら炉心部の放射化腐食生成物についても, 表面沈着物の化学組成(炉内に残されたコバルト基礎硬質被覆材であるステライトの影響が重要である)を与えて, 計算できる<sup>4, 6)</sup>。

計算は設定時間(運転時間)を多数の細かなタイムメッシュに分割して行い, 各メッシュ内ではナトリウム中 CP 濃度のループ回路に沿った分布は定常であると仮定する(ナトリウム中定常分布の仮定)。各タイムステップの CP 移行計算は解析近似解を用いて行い, 得られた計算結果のループ

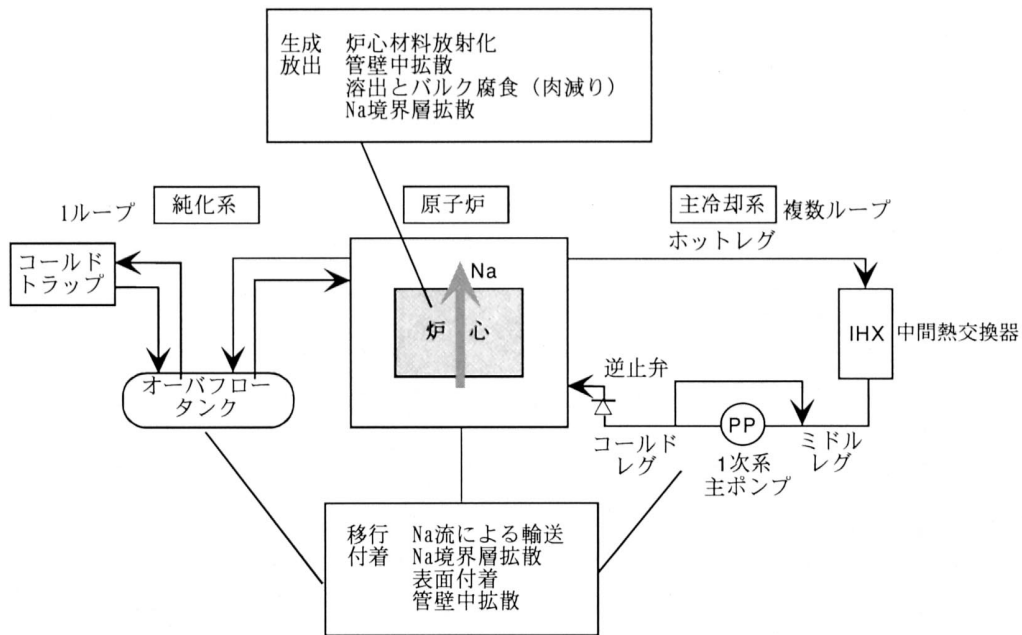


図7 PSYCHEコード計算体系模式図

各領域の管壁濃度及び炉心部入口ナトリウム中濃度を次のタイムステップの初期値とする。このようにして、ループ回路で近似的にマスバランスが保たれる。各タイムステップでの回路に沿った各領域での放出あるいは沈着の累積量は次式により計算する。

$$I_{n,i} = I_{n-1,i} \exp\left[-\{t - (n-1)t\}\right] + J_{n,i} \left[1 - \exp\left[-\{t - (n-1)t\}\right]\right] / n = 1, 2, 3...$$

及び、

$$\left. \begin{aligned} I_{0,i} &= 0 && \text{放射性核種放出の場合} \\ &= I_0 && \text{放射性核種沈着} \\ &&& \text{及び安定元素放出と沈着の場合} \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで、

- $I_{n,i}$  n番目のタイムステップにおける領域iでの放出ないし沈着の累積量 [atom/cm<sup>2</sup>]
- $J_{n,i}$  n番目のタイムステップにおける領域iでの放出ないし沈着のマスフラックス [atom/cm<sup>2</sup>/s]
- t タイムステップ幅 [s]

(3) 入力データ

表3にPSYCHEコードで解析可能な安定及び放射性同位体並びに生成核反応を示した。<sup>58</sup>Co及び<sup>182</sup>Taについては、それらの中性子吸収断面積が大きいので2重中性子捕獲まで考慮し計算され

表3 解析核種と生成核反応

(安定同位体)

No.	核種
1	<sup>50</sup> Cr
2	<sup>54</sup> Fe
3	<sup>58</sup> Fe
4	<sup>58</sup> Ni
5	<sup>60</sup> Ni
6	<sup>59</sup> Co
7	<sup>181</sup> Ta

(放射性同位体)

No.	核種	生成核反応
8	<sup>51</sup> Cr	<sup>50</sup> C(n, ) <sup>50</sup> Cr <sup>54</sup> Fe(n, ) <sup>51</sup> Cr
9	<sup>54</sup> Mn	<sup>54</sup> Fe(n p) <sup>54</sup> Mn
10	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Fe(n, ) <sup>55</sup> Fe
11	<sup>59</sup> Fe	<sup>58</sup> Fe(n, ) <sup>59</sup> Fe
12	<sup>58</sup> Co	<sup>58</sup> Ni(n p) <sup>58</sup> Co(α n, ) <sup>59</sup> Co(α C)
13	<sup>60</sup> Co(α A)	<sup>59</sup> Co(α n, ) <sup>60</sup> Co(α A) <sup>60</sup> Ni(n p) <sup>60</sup> Co(α A)
14	<sup>59</sup> Ni	<sup>58</sup> Ni(n, ) <sup>59</sup> Ni
15	<sup>182</sup> Ta	<sup>181</sup> Ta(n, ) <sup>182</sup> Ta(n, ) <sup>183</sup> Ta
16	<sup>60</sup> Fe	<sup>58</sup> Fe(n, ) <sup>59</sup> Fe(n, ) <sup>60</sup> Fe
17	<sup>59</sup> Co(α C)	<sup>58</sup> Ni(n p) <sup>58</sup> Co(α n, ) <sup>59</sup> Co(α C)
18	<sup>60</sup> Co(α B)	<sup>58</sup> Fe(n, ) <sup>59</sup> Fe(n, ) <sup>60</sup> Fe <sup>58</sup> Co(α B)
19	<sup>60</sup> Co(α C)	<sup>58</sup> Ni(n p) <sup>58</sup> Co(α n, ) <sup>59</sup> Co(α C)(n, ) <sup>60</sup> Co(α C)

る。また、 $^{60}\text{Co}$ については、主な生成ルートによる $^{60}\text{Co}$  (A) の他に、 $^{58}\text{Co}$ ルートの高次生成反応による $^{60}\text{Co}$  (C) 及び鉄のバーンナップによる $^{60}\text{Co}$  (B) ( $^{60}\text{Fe}$ との放射平衡により  $3 \times 10^5\text{y}$  の半減期となる) も評価可能である。

PSYCHE コードの入力データはユーザインターフェースのWeb ブラウザ入力により設定される。以下に入力データの概要を述べる。

#### ① CP 挙動モデルパラメータ

表 2 に示したものをを用いる。

#### ② プラントモデルデータ

プラントモデルデータは、放射化計算用核データ、幾何形状、伝熱・流動、材料組成の各データから成る。これらは、炉心及び冷却系統ループの各領域あるいは設定した空間メッシュ領域に対して与える。核データは炉心部の分割メッシュにおける中性子フラックスと放射化断面積から成る。幾何形状及び伝熱流動データは、炉心部と冷却系統ループに分かれ、分割メッシュあるいはループ領域に対して、領域長さ、等価水力直径、接液面積計算用直径、冷却材温度、冷却材流速から成り、炉心部では燃料被覆管表面温度の算出のため線出力密度及び熱伝達率が付け加わる。

#### ③ 運転条件データ

運転工程とナトリウム中酸素濃度である。

#### ④ 計算制御用パラメータ類

計算制御用パラメータは解析核種、計算タイムメッシュや出力指定、及びCPトラップ効果解析及び放射化ナトリウム (2 重中性子捕獲まで考慮した $^{24}\text{Na}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ) 計算など幾つかのオプション計算設定などである。

## 5.2 遮蔽計算コード (QAD CG)

### (1) 遮蔽設備幾何形状の記述

QAD CG コードでは、CG (Combinatorial Geometry) サブルーチンにより、三次元空間構造を直方体 (RPP)・円形シリンダー (RCC)・直三角柱 (WED) などのような単純な立体型幾何形状 (プリミティブ) の結合で表す。まず、対象空間を三つの特徴的なゾーン (線源、遮蔽体、空間) に分割し、それぞれのゾーンをプリミティブの一つ又は複数の組み合わせで表す。プリミティブは空間記述のため設定された X, Y, Z 座標に対して任意に置くことができる。幾何表現の基本は、プリミティブの「交差」と「結合」の関係により、

対象ゾーンの位置と形状を定義することである。

「交差」と「結合」の演算記号として、( + ), ( - ), (OR) を用いる。プログラムでは、これらの記号を用いて対象ゾーンの定義に関連する情報を記述する。プリミティブに ( + ) 記号を付けて表せば、対象ゾーンがそのプリミティブに含まれることを意味し、( - ) 記号ではそのプリミティブから外されることを意味する。(OR) は対象ゾーンがそこでのすべてのプリミティブに含まれることを表し、( + ), ( - ) によるサブゾーンのすべてを一つのゾーンとしてまとめて扱うという条件を意味する。CG の幾何形状の入力データは二つのカードで構成される。一番目のカードはプリミティブのタイプと位置を記述する。二番目のカードは対象ゾーンをプリミティブの「交差」と「結合」により記述する。DORE では CG 幾何形状設定は 3.1(4) 節で述べたところの MAX により行い、データは直感的な CAD 図形構成から自動生成できる。プロトタイプでは、「もんじゅ」の 1 次主冷却系室、タンク室、純化系室、IHX 上部室のデータを整備した。

### (2) ガンマ線遮蔽計算

QAD コードは、点減衰核法により、遮蔽領域を含む構成各領域におけるガンマ線の透過計算を行う。この方法は、任意の各評価点における線量率を、線源と評価点を結ぶ直線 (視線) 上を吸収や散乱を受けることなく、評価点に到達した光子 (エネルギー E) のフラックスとビルドアップ係数の結合により表す。ビルドアップ係数は、視線が遮蔽領域を貫通するような対象空間の配列構成において、評価点を通る散乱線の効果を補正するためのものである。この係数は、エネルギー E、配列、遮蔽材質の関数である。評価点における線量率は、広がりを持った線源の場合、それぞれのガンマ線エネルギー群に対して線源体積の積分となる。等方線源からの放射光子 S (単位時間、単位体積当たりのエネルギー E) による、任意の評価点における線量率 D は次式で表される。

$$D(E, r) = K_v \frac{\int_V S(E, r') \exp(-\mu |r - r'|) dv}{4 |r - r'|^2} \quad (7)$$

ここで、

r : 線量率評価点位置座標

r' : 体積 V 中線源ポイント位置座標

V : 線源領域体積

$\mu$  : エネルギー E の減衰係数の合計

$|r - r'|$  : 線源ポイントから評価点までの距離

$B(\mu|r - r'|, E)$ : エネルギー E の線量ビルドアップ係数

K : フラックスから線量率への変換係数

ビルドアップ係数はGoldstein Wilkinsモーメント法によるサブルーチンにより計算される<sup>16)20)</sup>。

### (3) 線源領域の記述

冷却系ループの線源ゾーンは円柱座標で記述し, CP の場合は管壁内面分布で  $r = 0$ ,  $z$  (軸方向), (円周方向) の分割を指定する。放射化ナトリウム及び希ガスFPや<sup>131</sup>I, <sup>137</sup>Csなど揮発性FPを扱う場合は, 円柱状の体積線源を扱うことになり,  $r$  に対しても分割数を指定する。DORE の計算は線源 / 線量率分布変換ライブラリ作成であるので, すべてのガンマ線エネルギー群に対し, 一様な単位線源分布 ( $1 \mu \text{ Ci/cm}^2$  or  $/\text{cm}^3$ ) として計算する。

### (4) 遮蔽体領域の判定

遮蔽体領域は, CG サブルーチンにおいて, 幾何形状入力データに基づき二次曲面領域境界方程式により表現される。次に, 線源から評価点に向けて, この視線上の点が含まれるゾーンについて, 代数幾何学的アルゴリズム<sup>16)20)</sup>により, 順次判定していく。このように, 視線上の各点のステップごとに, 評価空間内の全領域についてゾーン判定をすることになるが, これが線量率マップ作成用ライブラリの計算時間を膨大なものにする (1万点で約500h)。そこで, 計算の高速化の手段として並列計算システム化の試みも始まっている。これらの開発によって放射線遮蔽や線量率マップ評価のリアルタイム化が進み, プラント設計と運転保守管理分野やデコミショニング分野などでの利用効率が格段に高まると考えられる。

### (5) 入力データ

QAD CG コードの入力データはユーザインタフェースのWebブラウザ入力により設定される。以下に入力データの概要を述べる。

#### ① ガンマ線源関連データ

線源強度, ガンマ線エネルギー, 線源座標と形状, 線源物質組成と密度, 線源ゾーン分割方法

#### ② 遮蔽体関連データ

遮蔽体座標と形状, 遮蔽体物質組成及び密度

#### ③ 物理データ

線量率変換係数 ( $\text{mR/h/photon/cm}^2 \cdot \text{s}$ )

#### ④ 評価点関連データ

評価点座標と座標系タイプ

#### ⑤ ガンマ線質量吸収係数

コード内に保有しており, 核種の原子番号及び平均エネルギーの指定により使用する。

#### ⑥ ビルドアップ係数

水, コンクリート, 鉄及び鉛のビルドアップ係数は各エネルギー群に対してコードサブルーチンにより算出される。

## 5.3 線量率編集コード (QADLIST)

PSYCHE コードによるCP線源分布計算及びQAD CG コードによる線量率変換ライブラリ計算後に, これらの結果を用いて線量率分布計算及びマップ可視化作業を行う。QADLIST コードはこれらの作業を行うための編集コードでポストプロセッサに相当する。QADLIST コードの入力データは, ユーザインタフェースのWebブラウザ入力により3種類のもので作成される。室名\_QLSTLIB.dat はQAD CG 計算結果のライブラリをガンマ線エネルギー群 / 評価点の見やすいテーブルに編集し出力する。室名\_QLSTDOS.dat は, PSYCHE コードにより得られた線源分布を与えて線量率分布計算結果を出力する。ここで, 線源分布はPSYCHE の線源領域のものからQAD CG の線源領域のものへ調整しする必要がある。室名\_QLSTAVS.dat は, AVSソフトによる可視化入力データを作成する。

## 6. 「もんじゅ」への適用

### 6.1 概要

DORE を「もんじゅ」定格運転長期評価に適用し機能確認した結果について述べる。点検保守時の1次冷却系室線量率マップの計算と可視化には, PSYCHE を用い計算したCP線源分布を用いた。定格運転10年余で実質的に飽和に達すると予測される。線量率変換ライブラリはQAD CG コードにより計算し, マップ可視化用として, 1次主冷却系室, 1次オーバーフロータンク室, 1次ナトリウム純化系室の各全域, そのほか機器周り詳細などについて作成した。これらの線源分布と線量率変換ライブラリを用いて, QADLIST コードにより線量率マップを計算し, 可視化を行い, 冷却系室全域の線量場の把握が容易となることを確認した。

## 6.2 定格運転時におけるCP沈着分布の予測

### (1) 計算方法

点検保守時に冷却系室の放射線場形成に寄与する主なCP核種である $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{58}\text{Co}$ を評価対象線源とした。運転工程は、定格運転（原子炉熱出力714MWth）1～5サイクルまでは低燃焼度炉心、6サイクル以降は高燃焼度炉心で、54サイクル運転終了時（ほぼ30年経過後）までの1次冷却系配管機器管壁のCP核種の沈着濃度及び系統領域インベントリ分布などを計算した。プラントデータは定格運転に対する設計評価データを用いた。モデルパラメータは表2の値を用いたが、一部のパラメータ（ $^{54}\text{Mn}$ のDと $u_d$ ）については「常陽」実測データへの適合により補正したものを用いた。また、「常陽」運転経験から、燃料集合体や反射体洗浄廃液を除けば機器接触摺動部ステライト表面硬質被覆材からの $^{60}\text{Co}$ 発生の影響は少ないと考えられ、本予測にはその影響は含まれていない。

### (2) 予測計算結果

図8に定格運転でのCP飽和インベントリ分布予測結果を示した。 $^{54}\text{Mn}$ が $^{60}\text{Co}$ の約8倍の発生量であるが、 $^{54}\text{Mn}$ の半減期は0.85yと比較的短いので、FBRにおける冷却系統CP廃棄物からの負荷は軽減される。 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}$ の蓄積分布は、 $^{60}\text{Co}$ が $^{54}\text{Mn}$ に比べ若干高温側に偏るがほぼ同等で、IHX、主ポンプ、炉心部に90～95%のものが蓄積し、配管部には数%程度である。また、コールドトラップ（CT）はCP除去器としての機能は少ないことを示す。即ち、CP金属元素のナトリウム中溶解度は中高温部でも極く低いため、CTがCP濃度の決定機器とはならないことを示す。 $^{58}\text{Co}$ の発生量は少なく、しかも約8割のものが炉心部に沈着し止まり、炉外ループへの流出は少ない。

## 6.3 線量率変換ライブラリの作成

### (1) QAD CG配管・機器幾何形状モデルの作成

1次主冷却系室とオーバフロータンク室は、コンクリート遮蔽壁中間床を介して上階、下階の位置関係にあり、相互の線量率寄与を評価可能とするため、同一計算体系において幾何形状の作成を行った。図2に形状モデルデータのMAXによる検証結果を示した。同様に1次純化系室の形状モデルを作成した。

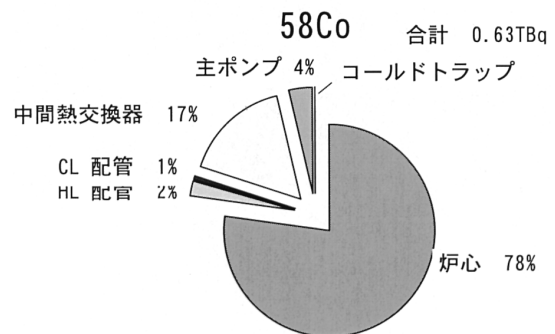
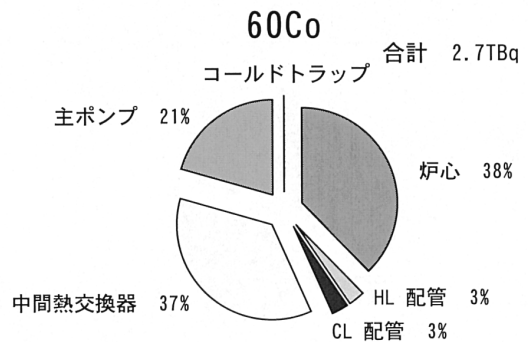
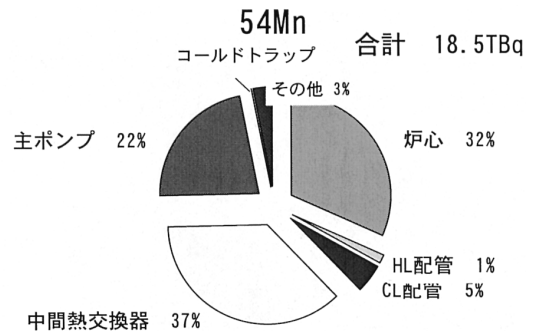


図8 「もんじゅ」定格運転CP飽和インベントリ分布予測

### (2) 線量率変換ライブラリの計算

前項で作成した各冷却系室配管機器の幾何形状モデルを用いて、CP（ $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ ）及び放射化ナトリウム（ $^{22}\text{Na}$ ）の単位線源（ $1\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 又は $1\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ）を与えた時の線量率マップ可視化用メッシュ格子点（50cm間隔）における線量率を計算し、各部屋におけるライブラリを作成した。また、代表的なCP沈着分布測定計画点や保守作業評価点に対するライブラリも作成した。

## 6.4 定格運転時における線量率分布予測結果

前節までの計算結果を用い、QADLISTにより計算した、HL及びCLスナバ配管保温材表面での線量率推移の予測結果を図9に示す。おおむね原



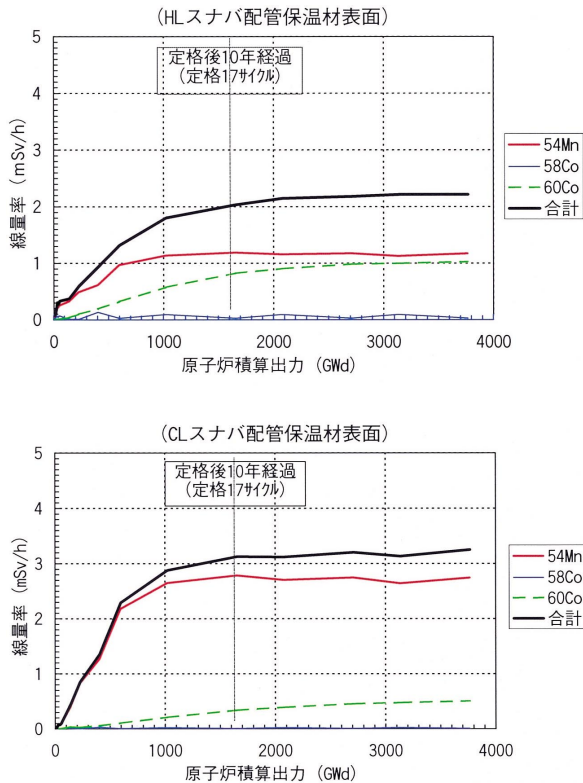


図9 「もんじゅ」定格運転線量率推移予測

子炉積算出力2,000GWd時点（定格運転13年経過）で飽和に達するものと予測される。飽和レベルはCLが3mSv/hでHLの2mSv/hより高く、線量率に対する核種の寄与はHLでは<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>Coがほぼ同等で、CLでは<sup>54</sup>Mnが大半を占める。幾つかの保守評価点における飽和線量率の予測値を表4に示した。スナバ位置の配管直接表面の線量率は

保温材表面に比べ0.5~1.5mSv/h程度高い。最大の線量率レベルは逆止弁近傍で5.6mSv/hとなる。通路部は1mSv/h前後と予測される。

6.5 線量率マップの可視化

「もんじゅ」1次冷却系各室の線量率マップの可視化結果を図10, 11に示した。いずれも定格運転プラント点検保守時におけるCP及び放射化ナトリウムの飽和線源によるものである。

線量率マップの可視化から得られる知見をまとめると以下のとおりである。

① 1次主冷却系室

IHX, ポンプ及びミドルレグ, コールドレグ配管機器表面近傍の線量率は4mSv/hレベルに達し、配管機器周辺部の空間線量率はおおむね2mSv/hレベルに達すると予測される。線量率に寄与するのは管壁に付着したCP線源である。

② 1次オーバーフロータンク室

オーバーフロータンク, ダンプタンクまわりの線量率は4mSv/hオーダに達し、タンク周辺部の空間線量率は1mSv/h以上に達すると予測される。線量率に寄与するのはほとんどがタンク内に残留した放射化ナトリウム (<sup>22</sup>Na) である。

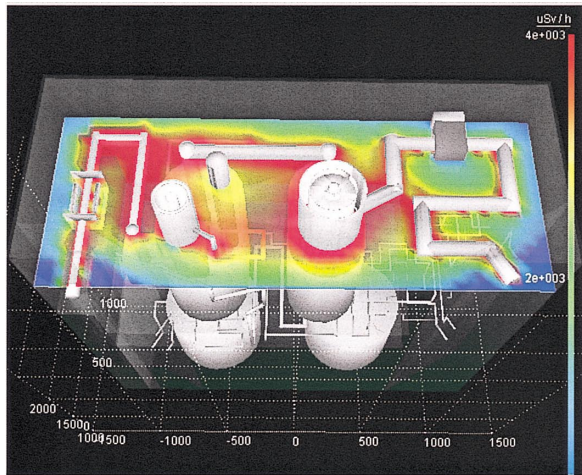
③ 1次ナトリウム純化系室

CTからは炭素鋼材による機器遮蔽体効果のため線量率寄与は少なく、配管, エコノマイザー管壁に付着したCPからの線量率寄与が大きくなる。線量率は高いところで3mSv/h程度に達する。配管, エコノマイザー周辺部及び供用中のCT A外表

表4 「もんじゅ」定格運転1次主冷却配管飽和線量率予測 (μSv/h)

予測位置	<sup>54</sup> Mn	<sup>58</sup> Co	<sup>60</sup> Co	合計	予測位置	<sup>54</sup> Mn	<sup>58</sup> Co	<sup>60</sup> Co	合計
HLスナバ配管直接表面	1.55E+03	3.46E+01	1.40E+03	2.98E+03	同左保温材表面	1.17E+03	2.35E+01	1.02E+03	2.21E+03
IHX入口配管直接表面	2.41E+03	3.70E+01	1.83E+03	4.28E+03	同左保温材表面	2.13E+03	2.77E+01	1.51E+03	3.67E+03
CLスナバ配管直接表面	4.05E+03	8.32E+00	7.31E+02	4.79E+03	同左保温材表面	2.74E+03	5.84E+00	5.04E+02	3.25E+03
1次主ポンプガードベッセル外面	2.37E+03	9.88E+00	8.78E+02	3.26E+03					
逆止弁近傍	4.13E+03	1.65E+01	1.46E+03	5.61E+03					
HL通路	5.35E+02	9.40E+00	4.07E+02	9.51E+02					
ML通路	9.84E+02	4.21E+00	3.73E+02	1.36E+03					
CL通路	6.28E+02	2.57E+00	2.56E+02	8.87E+02					

(コンタ:水平スライス)



(等値面及びコンタ:縦スライス)

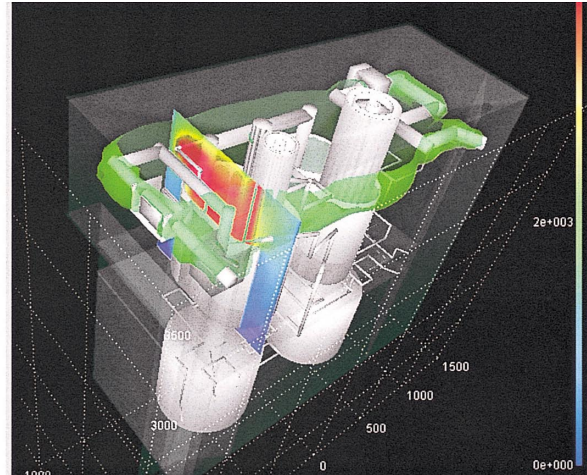
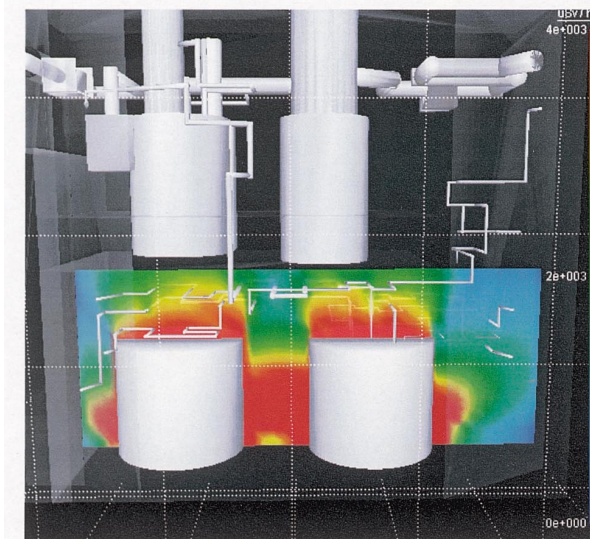


図10 「もんじゅ」1次冷却系室の飽和線量率マップ

(1次オーバーフロータンク室)



(1次ナトリウム純化系室)

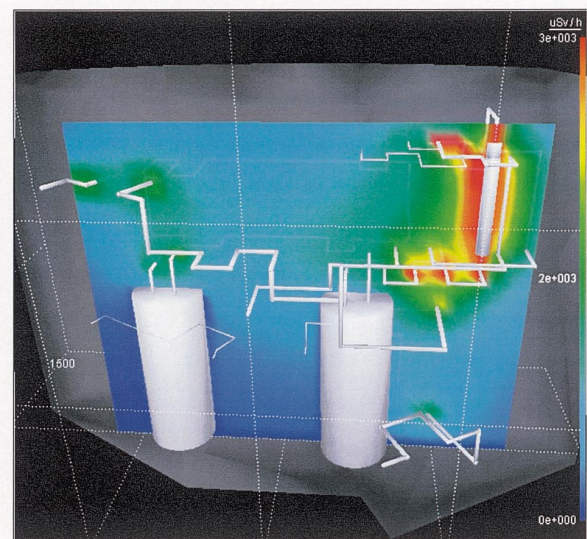


図11 「もんじゅ」1次オーバーフロータンク室及びナトリウム純化系室の飽和線量率マップ

面部は1mSv/h程度と予測される。

以上述べたように、線量率マップの可視化により、プラント点検保守時における1次冷却系室内の線量率分布の傾向を、直感的、全体的に把握し理解することが容易となった。今後「もんじゅ」運転再開により得られるCP実測データにより、解析コードの検証と改良を進め、実機データの解析ツールとして信頼性を向上させていかなければならない。また、DOREのプラント点検保守計画立案作業などへの適用を図り、プラント管理ツールとして改良を進めていくべきものと考えられる。

## 7. おわりに

高速炉保守線量評価システム(DORE)を開発した。これにより、1次ナトリウム冷却系における点検保守時のCP線源分布とこれによる冷却系室内の線量率分布の予測が、首尾一貫して解析評価できるようになり、また、結果を可視化表示し理解しやすいようになった。これまで、メインフレーム上で個々に利用されて来た関連解析コード(PSYCHE, QAD CG)はDOREに統合化され、評価技術の継承と保存をより容易に、かつ、確実に行えるようになった。同時に、コードの入力データを画面入力に対話的に作成可能としたの

で、開発者以外のエンジニアにも利用しやすいものとなった。DOREはWeb技術を利用したイントラネット上でサーバ/クライアントモデルに基づき構築されたシステムであるので、社内のイントラネット上であればどこからでもアクセス可能である。

本システムを「もんじゅ」に適用するため、1次冷却系配管機器幾何形状データ及びCP線源に対する各冷却系室の線量率変換ライブラリを整備した。これらを用いて定格運転時のCP線源分布及び線量率分布の予測、並びに飽和線源に対する線量率マップの可視化を行った。これにより点検保守時の線量率予測や低減対策立案に必要な放射線状況を直感的、全体的に把握し理解しやすくなることを確認した。

2001年度末までには、本システムに高速炉トリウム挙動解析コード(TTT)及びFP挙動解析コード(SAFFIRE)も組み込み、システム拡張を行い、高速炉運転保守時の放射線評価手法の集約と統合化を推進する計画である。

#### 参考文献

- 1) 飯沢克幸：“高速炉保修線量評価システム「DORE」の開発 - システム構築と「もんじゅ」への適用”，JNC TN4410 2001 001 (2001)
- 2) 飯沢克幸：“ナトリウム冷却材の不純物抑制と被ばく低減”，原子力工業，Vol. 33 No.11, p. 62 79 (1987)
- 3) 飯沢克幸，木村重人，他：“高速炉1次冷却系における放射性腐食生成物挙動解析コード(PSYCHE)の改良と整備 - アルファベット計画CP挙動解析・抑制技術開発 - ”，PNC TN9410 89 072 (1989)
- 4) 飯沢克幸，茶谷恵治，他：“高速炉における放射性腐食生成物挙動評価手法の整備 - 「常陽」における挙動評価と解析コードの検証 - ”，PNC TN9410 92 345 (1992)
- 5) K.Iizawa, K.Chatani et. al.：“Transport of Radioactive Corrosion Product in Primary Systems of a Sodium Cooled Fast Reactor”，Proc. Material Behaviour and Physical Chemistry in Liquid Metal Systems 2, Plenum Press, ISBN 0 306 45069 0, pp.9 26 (1995)
- 6) 飯沢克幸，広井博：“高速増殖炉における放射性腐食生成物挙動評価手法の整備 解析コード(PSYCHE 5)の検証と「もんじゅ」事前評価”，PNC TN2410 95 018 (1995)
- 7) N.Sekiguchi, K.Iizawa et. al.：“Behaviour of Corrosion Product from Irradiated Stainless Steel in Flowing Sodium”，Proc. Specialists' Meeting on Fission and Corrosion Product Behaviour in Primary Circuits of LMFBRs, Demitrovgrad p.82(1975)
- 8) W. F.Brehm：“Effect of Oxygen in Sodium upon Radionuclides Release from Austenitic Stainless Steel”，Proc. Specialists' Meeting on Fission and Corrosion Product Behaviour in Primary Circuits of LMFBRs, Demitrovgrad p.186(1975)
- 9) K.Iizawa, T.Kikuchi et. al.：“Calculational Model and Code for Corrosion Product Behaviour in Primary Circuits of LMFBRs, Karlsruhe, KfK 4279 IWGFR/64, p.191(1987)
- 10) M.V.Polley et. al.：“An Analysis of Radioactive Corrosion Product Transfer in Sodium Loop Systems”，J.Nucl.Mater., Vol.75, p.226 (1978)
- 11) W.L.Kuhn：“Activated Corrosion Product Radiation Levels in the FFTF Heat Transport System Cells and Closed Loop System Modules”，HEDL TME 76 10, (1976)
- 12) W.F.Brehm：“Measurement and Control of Radioactive Material Transport in the FFTF”，Proc. the 3rd International Conference of Liquid Metal Engineering and Technology for Energy Production, Oxford, p.493 (1984)
- 13) W.F.Brehm：“Transport of Radioactive Material in Liquid Sodium”，Proc. Material Behaviour and Physical Chemistry in Liquid Metal Systems2, Plenum Press, ISBN 0 306 45069 0,p.1 8 (1995)
- 14) R.E.Treybal, mass transfer operations, mcgraw hill, new york, 1965
- 15) 田村正昭，吉田英一，他：“FBRにおけるCP問題と対策 アルファベット計画 得られた成果と今後の展望(総合報告) - ”，PNC TN9410 88 047 (1988)
- 16) 坂本 幸夫，田中 俊一：“QAD CGGP2及びG33 GP2: 照射線量から周辺線量当量及び最大線量当量への換算係数を有するQAD CGGP及びG33 GPコードの改良バージョン”，JAERI M 90 110(日本原子力研究所) (1990)
- 17) 竹内 純，他：“高速増殖原型炉もんじゅ建設(その84) 1次冷却材ナトリウムの放射化量評価”，日本原子力学会1997年秋の年会予稿集，(1997).
- 18) A.W.Thorley：“The Corrosion of Iron in Sodium and the Influence of Alloying Elements on Its Mass Transfer Behaviour, Proc. Material Behaviour and Physical Chemistry in Liquid Metal Systems, Plenum Press, ISBN 0 306 40917 8, pp. 19 36 (1982).
- 19) 丸山昭，厚母栄夫，他：“高温ナトリウム中におけるオーステナイトステンレス鋼の腐食速度評価式”，日本原子力学会誌，Vol. 26 No. 4, p327 (1984).
- 20) “QAD CG a Combinational Geometry Version of QAD P5A a Point Kernel Code for Neutron and Gamma ray Shielding Calculations”，ORNL CCC 307 (1979).