



# 原型炉ブランケット設計用 2次元核熱連成コード DOHEAT の開発

宇藤 裕康, 飛田 健次, 染谷 洋二

日本原子力研究開発機構

(論文受付: 2010年11月1日 / 論文受理: 2010年12月17日)

核融合炉におけるブランケットは、TBRの確保とブランケットの構造強度、ブランケット内の核発熱の除熱という複数の相反する要求を同時に満足するものでなくてはならず、TBRの評価に加え、ブランケット内の温度分布評価を適切に行うためのブランケット体系に対応した核・熱解析コードが必須となる。今回新たに、ブランケット設計解析用として2次元輸送計算コードDOT3.5と2次元伝熱解析コードを組み合わせることで、2次元体系に対して核解析と熱解析を連結して行える2次元核熱連成コードDOHEATを開発した。DOHEATコードの概要といくつかの解析例を示す。

## Keywords:

blanket, nuclear analysis, thermal analysis, DOT3.5, nuclear heating rate, TBR

## 1. 序論

核融合炉におけるブランケットは、①燃料となるトリチウムの生成、②中性子エネルギーの熱への変換、③放射線遮蔽という重要な機能を担い、発電実証を行う原型炉以降の炉では、ブランケットの成立性が炉設計において特に重要となる。原型炉ブランケットの概念設計例としてDEMO 2001[1]やSlimCS[2]において検討されているが(図1参照)、冷却水条件と材料の共存性、製造過程における成立性など課題点もある。ブランケット設計の難しさは、トリチウム増殖比(Tritium Breeding Ratio: TBR)の確保とブ

ランケットの構造強度、ブランケット内の核発熱の除熱という複数の相反する要求を同時に満足するものでなくてはならない点にある。十分なTBRを得るためには、リチウムセラミックス( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ )などの増殖材やベリリウム(Be)などの増倍材の領域を増やすことになる。一方で、限られた空間の中で、これらの増殖材や増倍材、構造材料である低放射化フェライト鋼(F82H)などのブランケット構成材料の健全性が維持される温度を保つため、十分な冷却配管領域を確保する必要がある。このように、ブランケット設計においては核解析によるTBR等の評価に加え、核発熱や第一壁への表面熱流束を含めた熱解析による温度分布の評価も重要となる。

図2に、ブランケット初期設計段階における設計フローを示す。基本構造の決定後、増殖層の厚みなどから計算モデルを作成し、その計算モデルに対して核解析を行い、核発熱やTBRなどを求める。得られた核発熱分布より熱解析を行い、使用上限温度を満たしているかを判定する。一部でも超過している場合には、各層の厚みを再調整し、同様の解析を始めから行う。温度を満たしている場合には、TBRを比べ、最大のTBRとなる構成を1次案とする。TBRの確保と除熱性能を満足するブランケット概念を構築するためには、図2に示すフローを多数回、繰り返さなくてはならない。そのため、核解析と熱解析を連続的に行える連成コードはブランケット設計において有効なツールであり、温度やTBRなどの解析精度も求められる。

従来は、ブランケット設計用の核熱連成コードとして日本原子力研究開発機構にて開発された1次元核熱解析連成コードANIHEATがあった。ANIHEATは、1次元輸送コードANISN[3]およびJENDL-3.1[4]を基にした群定数ライブラリーFUSION-40[5]を用いて輸送計算を行い、得

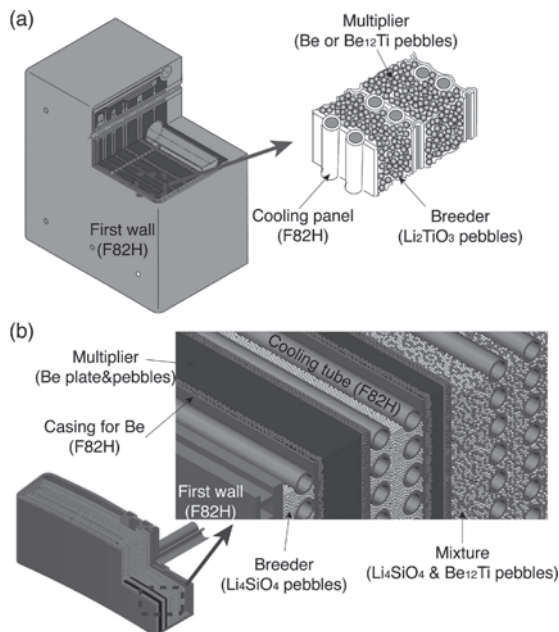


図1 (a)DEMO2001と(b)SlimCSのブランケット設計例。

DOHEAT: Two-Dimensional Nuclear-Thermal-Coupled Analysis Code for DEMO Reactor Blanket Design

UTOH Hiroyasu, TOBITA Kenji and SOMEYA Youji

corresponding author's e-mail: uo.hiroyasu@jaea.go.jp

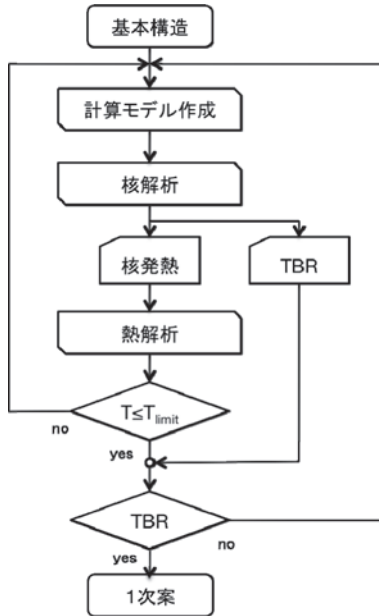


図2 ブランケット設計フロー.

られた中性子およびガンマ線スペクトルから APLE-3[6] を介して、核発熱率や TBR 等の物理量を計算する。ANIHEAT のような 1次元コードでは、当然のことながら円管なども 1次元化して解析することになる。1次元化の方法には様々あるが、一般的には図3に示すような各材料の面積比に応じて1次元厚さに変換する。このようなモデル化では、2次元体系を正確に模擬することはできず、図中に示したような配管間のギャップ位置での温度評価は実際とは異なってくる。図1に示した原型炉ブランケットの概念設計例のように、現在検討されているブランケットでは冷却配管に円管を用いる場合が多い(これは、150気圧を超える高圧水を冷却材に用いる場合に円管が最も少ない量の構造材で済むからである)。このように実際のブランケットは基本的に2次元的な構造であり、ANIHEATで近似する1次元モデルでは対応しきれないことが多い。そこで、これらの状況に対応しうる解析コードが必要であった。

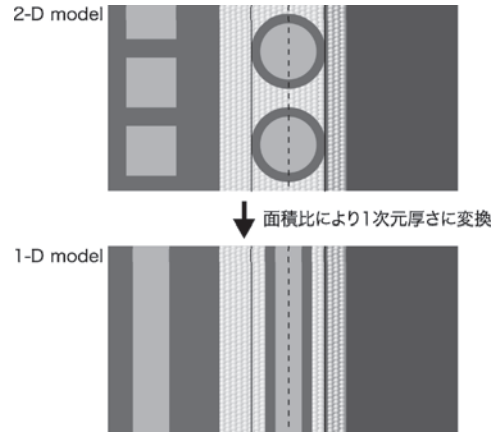


図3 1次元モデルへの変換例.

## 2. DOHEAT

### 2.1 コード概要

2次元体系を考慮した核・熱解析を行えるようにするため、2次元核熱連成コード DOHEAT を開発した。DOHEAT は、Sn 法に基づく 2次元輸送計算コード DOT3.5 [7]と APLE-3、2次元定常伝熱解析を組み合わせただけでなく新しい解析コードである。DOHEAT を用いることにより、図4に示すとおり、これまで1次元の層状に並んだモデルでの解析を実際の体系に非常に近いモデルのままでの解析が可能になる。

図5にDOHEATの解析構造を示す。DOHEATの入力インターフェイス画面により、ブランケットモデルと構成材料の組成データ、解析条件等を入力する。選択された材料の組成データに合わせて、核データライブラリー FUSION-40を参照して、DOT3.5および APLE-3用の入力雛形データを自動作成する。DOT3.5にて計算された中性子およびガンマ線束を用いて、APPLE-3内で核発熱定数 KERMA ファクター[8]を対象の個数密度[g/cm<sup>3</sup>]と DOT 3.5から計算された中性子およびガンマ線束に乗ずることによって核発熱率を、同様に JENDL-3.1に基づく各種の反応率を中性子およびガンマ線束に乗ずることによって TBR、弾き出し損傷 (displacement per atom: DPA)、線量

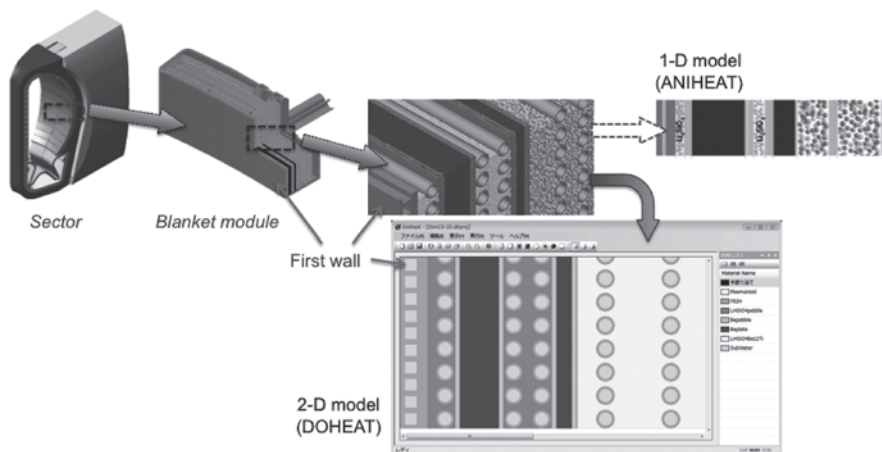


図4 ブランケットモデルと解析モデルへの変換.

当量率を計算する。熱解析は APPLE-3 により計算された核発熱分布を基に、各材料の熱伝導率を用いて定常熱解析を行う。

図 6 内にある DOHEAT の解析体系入力画面のように、DOHEAT の特徴の一つは、直感的なユーザーインターフェイスの導入であり、ツールバーとして表示されているように予め用意された基本オブジェクトを基に、描画形式で解析体系を構築することができる。体系は直交座標系であり、基本的に無限平板モデルとし、核解析時には入力画面左側に中性子源となるプラズマを付加する。基本図形には角柱、円管など 8 種類が用意されており、各図形要素に対して、位置、寸法、構成材料を入力して、解析体系を構築する。

## 2.2 解析方法

DOHEAT における解析方法を以下に順を追って説明する。DOHEAT では一連の計算を「プロジェクト」として一つのディレクトリで管理し、解析毎に新たなプロジェクトを作成する。既存の体系、材料、計算条件を参照する場合には、「インポート機能」を使用することができる。

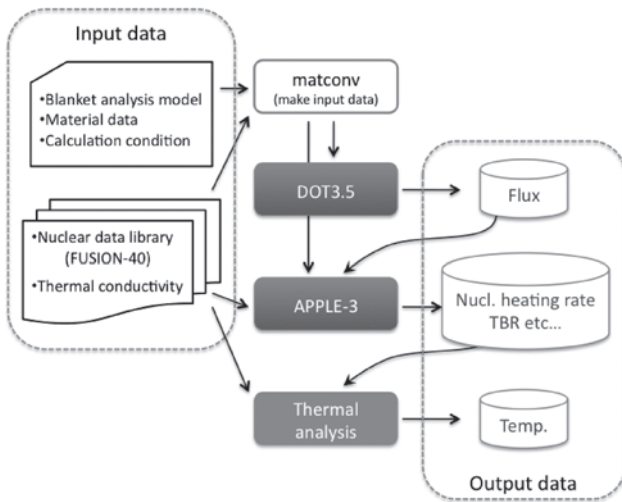


図 5 DOHEAT の解析構造。

## 2.2.1 材料データの作成

まず、使用する材料を予め用意した材料組成データリストから選択する(図 7 参照)。材料組成データは、材料の密度と組成(各種名および重量比)から成り、別途、追加および編集が可能である。解析プロジェクト内での材料名と対応する色を任意で選択後、熱解析用パラメータとして、熱伝導か内部境界かを選択する。熱伝導率を選択した場合、主なブランケット構成材料毎に用意された熱伝導率の温度依存性データテーブルを使用するか、定数として入力するかを選択する。内部境界は主に冷却材の境界条件として用いられ、

断熱、温度、熱流束、線形熱伝達、放射熱伝達

の 5 つから選択することになる。以上の過程を、使用する材料毎に繰り返し行う。設定された材料は、DOHEAT 画面内の右側「材料リスト」欄にて確認できる(図 6 参照)。

## 2.2.2 計算体系の作成

解析体系は予め用意された基本オブジェクトを基に、描画形式で構築する。用意された基本図形は、

板、角柱、角管、角穴、円柱、円管、円穴、溶接部

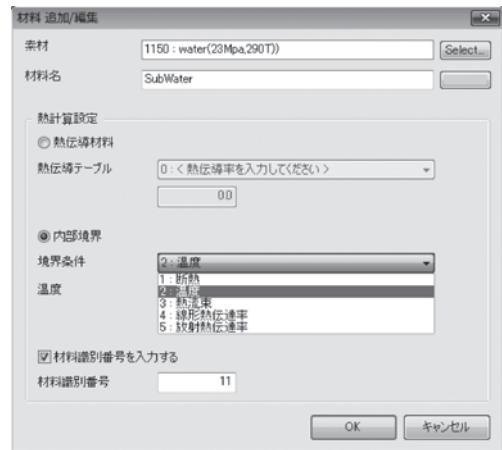


図 7 材料データ作成画面。

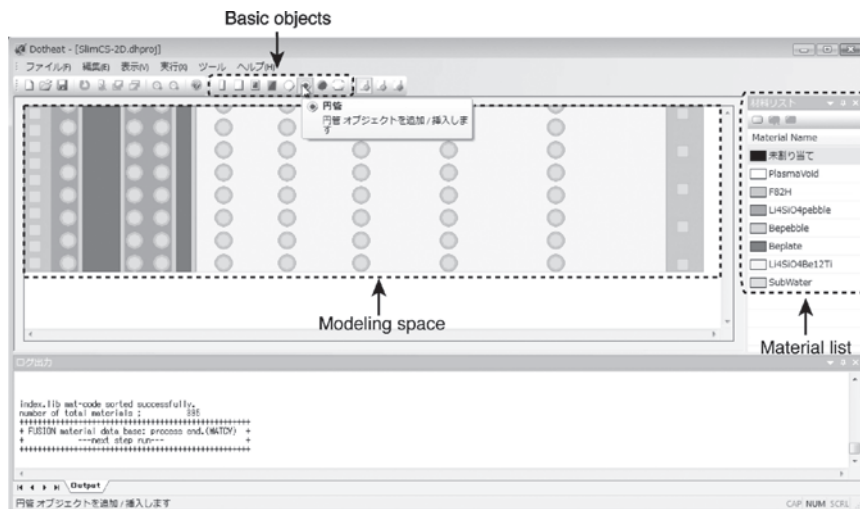


図 6 DOHEAT 入力画面。

の8種類であり、各図形要素に対してそれぞれ、位置、寸法、構成材料を設定する(図8参照)。さらに「複製」機能を用いてピッチとその方向を指定することにより、要素の繰り返し設定(層状に配置された冷却管を模擬する場合などに有効)も可能である。各図形要素は作成順にレイヤー構造になっており、上下下位は別途変更でき、解析時の解析体系としては各位置において最上位にある材料が構成材料として認識される。

2.2.3 メッシュモデルの作成

解析体系を構築後、計算メッシュを作成する。DOHEATでは、コード内で自動的にメッシュが作成される。メッシュ形状は、等幅の正方メッシュであり、メッシュ幅をユーザー側で設定する。入力最小単位は0.1 mm、コードの総メッシュ数の上限は200,000である。メッシュ数が増加すると、それにほぼ比例して計算時間が増加することから、必要に応じた解析体系のサイズ、メッシュ幅を設定する必要がある。(3.1節を参照)円管等のオブジェクトで示された部分に関しては、各メッシュの中心点上の材料をそのメッシュにおける構成材料として認識し、自動的に設定される。メッシュモデル作成後は、各メッシュの材料をユーザーが手動で変更することが可能である。

2.2.4 核計算

先に述べたように、DOHEATにおける核計算は2次元中性子輸送コードDOT3.5およびAPPLE-3を用いて行われる。中性子源は、ブランケット体系に対し平板上に配置され、中性子源強度は体系のプラズマ側の表面(概して第一壁表面)での中性子壁負荷を入力値とし、以下の式より求めた値を用いる。

$$f_n = \frac{P_n}{14.06 \times 1.602 \times 10^{-19}} \cdot S \tag{1}$$

$$S = Y \times 1.0 \times 10^{-4} \tag{1'}$$

ここで、 $f_n$  は中性子束規格化定数 [n/sec],  $P_n$  は中性子壁負荷 [MW/m<sup>2</sup>],  $Y$  は計算体系の  $y$  方向長さ (高さ方向) [cm],  $S$  は  $z$  方向 (解析体系の奥行き方向) の長さを 1 cm とした場合のプラズマを臨む面積 [m<sup>2</sup>] を示す。核解析上の設定値としては、

- ・ Sn 角度分点の次数: 8, 16
- ・ ルジャンドル展開 (PI) 次数: 5
- ・ 収束精度
- ・ λ2 緩和係数
- ・ 中性子壁負荷
- ・ 境界条件 (上/下/左/右)

である(図9参照)。境界条件ではそれぞれ以下の中から選択する。

真空, 反射, 周期, ホワイト, アルベド

DOHEATでは基本的に外部中性子源を用い、作成した計算体系の左側に中性子源(プラズマ)とギャップ(SOL領域)を  $x$  方向に1メッシュずつ付加する。ここで設定す



図8 オブジェクト設定画面(円管の場合)。



図9 核計算条件の設定画面。

る幅は仮想的な幅であり、この幅を大きく設定した場合には、体系上側からの中性子の漏れが多くなる。解析体系の  $y$  方向長さ、メッシュサイズによって異なるが、これらの幅が1 mmの場合には中性子の漏れ率が0.1%以下になることが確認されており、1 mm程度が妥当である。以下のような手順で核解析を実行することにより、各メッシュでの以下のパラメータが出力される。

- ・ 中性子およびガンマ線束 [n/cm<sup>2</sup>/sec]
- ・ 核発熱率 [W/cm<sup>3</sup>]
- ・ トリチウム増殖比 (TBR)
- ・ 弾き出し損傷 [dpa/sec]
- ・ 線量当量率 [μSv/hour]

以上の計算結果は2.2.6節で示すポスト処理時に確認することができる。

2.2.5 熱解析

DOHEATの熱解析では、直交座標系の2次元定常伝熱方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{Q} = 0 \tag{2}$$

を逐次過緩和法 (Successive over relaxation: SOR) 法を用いて解く。ここで、 $k$  は熱伝導率 [W/mK],  $\dot{Q}$  は内部発熱量 [W/m<sup>3</sup>] を示す。熱計算の設定値としては、

- ・SOR法の加速係数
- ・温度初期値
- ・収束判定条件
- ・最大繰り返し計算数
- ・境界条件 (上/下/左/右)

である (図10参照)。境界条件では2.2.1節と共通の以下の5つから選択可能であり、それぞれ境界面において以下の条件が付加される。

- ・断熱：境界熱流束  $q_B = 0$
- ・温度：境界温度  $T_B = T_{B0}$
- ・熱流束：境界熱流束  $q_B = q_{B0}$
- ・線形熱伝達率：境界熱流束  $q_B = h_B (T_{B0} - T_1)$
- ・放射熱伝達率：境界熱流束  $q_B = \sigma \epsilon (T_{B0}^4 - T_1^4)$

ここで、

- $T_{B0}$ ：境界面における温度 (設定値) [K]
- $q_{B0}$ ：境界面における熱流束 (設定値) [W/m<sup>2</sup>]
- $T_1$ ：境界面から1番目の格子点における温度 [K]
- $h_B$ ：境界熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>K]
- $\sigma$ ：ステファンボルツマン係数 [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]
- $\epsilon$ ：放射率

である。これらの条件を用いることにより、ブランケット設計で想定される境界条件は概ね反映できる。例えばプラズマからの輻射で第一壁に1 MW/m<sup>2</sup>の熱入力がある場合は、第一壁に相当する面の境界条件を  $q_B = 10^6$  [W/m<sup>2</sup>] とすればよい。

### 2.2.6 ポスト処理

ブランケット設計における最適化作業においては、解析した結果を容易に確認できるツールが必要になる。DO-HEATでは、ポスト処理としてユーザーが希望する解析結果を読み込み (データの出力)、グラフとして表示するアプリケーションを備える。図11にポスト処理アプリケーションの画面を示す。グラフ表示は、

- ・3D カラー分布
- ・2D カラー分布
- ・線グラフ

に対応しており、核解析による対象ブランケットの TBR

や温度を容易に確認し、最適化に反映させることが可能である。

## 3. 解析結果

### 3.1 計算時間

多くの計算量を必要とするブランケット設計の最適化作業では、解析時間も重要な要件の一つとなる。図12に DO-HEAT における総メッシュ数と計算時間の関係を示す。動作環境は、

- ・CPU：Core2 Duo 2.93 GHz
- ・メモリ：1 GB

である。計算時間は、体系や収束条件等により異なるが、ここでは図に示すような体系での評価結果を示している。メッシュ上限である20万では、核熱合わせて2時間程度かかることになる。メッシュ数20万の目安としては、450 mm × 110 mm の体系を0.5 mm サイズでメッシュ化して計算した場合である。メッシュ幅1 mm の場合には、最大で450 mm × 440 mm の体系を計算できることになり、およそブランケットモジュール1個丸ごと計算することも可能である。図にあるように、y方向に周期性がある体系の場合には、高さ方向を短くして解析することも可能であり、その場合には数分程度で2次元核熱計算を行える。

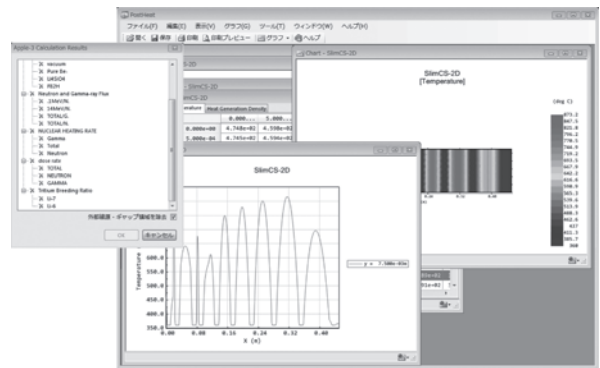


図11 ポスト処理画面。



図10 熱計算条件の設定画面。

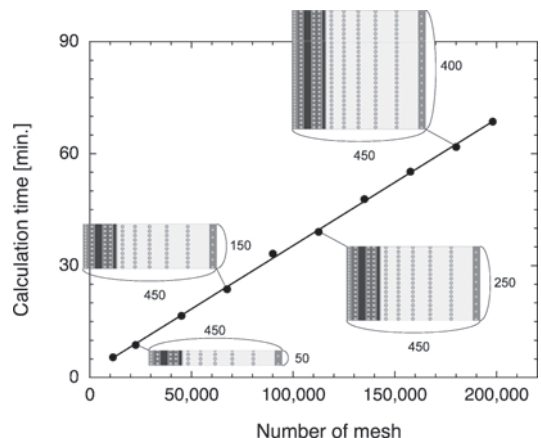


図12 メッシュ数と計算時間の関係。

### 3.2 ANIHEAT との比較

#### 3.2.1 冷却配管ギャップ幅依存性

ブランケット設計において、冷却配管のサイズおよびレイアウトは TBR や温度成立性 (除熱性能) と強く関係する重要な要素である。冷却配管のパラメータとなるのは、円管径や冷却層間の距離に加え、冷却層内の間同士のギャップ幅がある。ブランケットの核・熱設計では、異なる中性子壁負荷環境下にあるブランケットモジュールにおいて、冷却材出口温度を一定にするようにため、冷却配管のギャップ幅を調整し、1本あたりの配管が受け持つ除熱量と核発熱量をバランスさせなくてはならない。ここでは、従来までの1次元コード ANIHEAT との比較として、単純に冷却配管のギャップ幅を変化させた場合のブランケット内温度について評価し、その傾向について調べた。解析体系は図13に示すとおりであり、1次元計算における冷却管幅は図3で説明されているように、面積比により設定している。図中薄い色で示した円管および対応する1次元モデル、濃い色で示した円管および対応する1次元モデルは、それぞれ冷却管ギャップ幅0 mm と 40 mm の場合に対応する。ギャップ幅が増えると対応する1次元冷却管幅が減少することがわかる。本比較ではどちらの解析コードでも増殖材と中性子増倍材として両者の混合ペブル ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  と  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ ) を用い、冷却材 (管径はすべて 10 mm) の温度 360 °C を内部境界として計算した。核データおよび材料の熱伝導率は共通であり、中性子壁負荷 ( $=5 \text{ MW/m}^2$ )、表面熱負荷 ( $=1 \text{ MW/m}^2$ ) は同じである。ギャップ幅を 0 mm から 40 mm まで変化させた場合の、ブランケット内最高温度の依存性を図14に示す。各条件での TBR の値は、ANIHEAT の方がおよそ 0.05 過大評価しており、ブランケット内最高温度の評価値はギャップ幅 40 mm の場合にはおよそ 700 °C もの差がある。DOHEAT を用いた場合には、ギャップ幅が増加するに従って最高温度も比例して増加しているが、ANIHEAT ではギャップ幅 5 mm から温度上昇が飽和する傾向がある。これは、1次元モデルではギャップ幅の増加に対応する増殖領域の増加分が、図13の矢印が示すように最大でも円管半径の範囲でしかなく、本計算例のようにギャップ幅が円管半径よりも大きくなると、熱解析の体系 (冷却管同士の距離) を反映しきれなくなるためである。ANIHEAT は、ギャップ幅が 22 mm 以下 (=円管

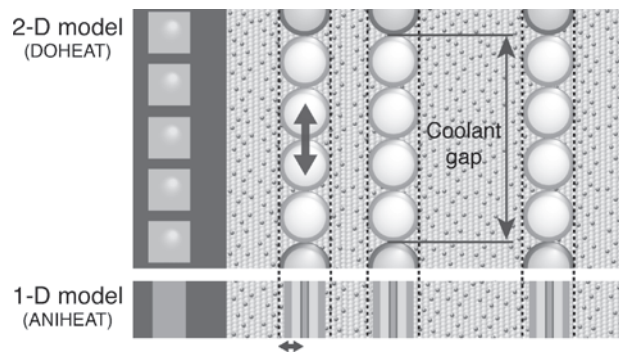


図13 ギャップ幅の依存性検証用解析モデル図と対応する1次元モデル図。

径のおよそ2倍) では温度を過大評価し、22 mm 以上では過小評価しており、これらは最適値と比べてそれぞれ冷却配管領域の過多、過少を招き、TBR 評価にも影響を与えることになる。このように、内部に多数の冷却配管を持つブランケット設計では、DOHEAT のような2次元解析での評価が非常に重要となる。

#### 3.2.2 冷却配管が隔壁で繋がっているモデルの場合

DOHEAT を用いた解析例の一つとして、DEMO2001 において採用されている冷却配管が隔壁と繋がり、冷却パネルとなっている体系での解析例を示す。モデル図を図15に示す。本体系では、増殖材 ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  ペブル) と増倍材 (Be ペブル) が層状に配置され、それらを隔離する F82H 製隔壁が、同じく層状に配置された冷却管をつなぐ形で形成されている。ANIHEAT では、図15中下のように隔壁は冷却配管に相当する厚みに付加する形でモデル化した。図16に DOHEAT における解析結果として、冷却材温度 360 °C を内部境界とした場合の2次元温度分布と、比較のため ANIHEAT での解析結果を並べた1次元の温度分布を示す。DOHEAT では、図中の線上 ( $y = 15 \text{ mm}$ ) での分布で

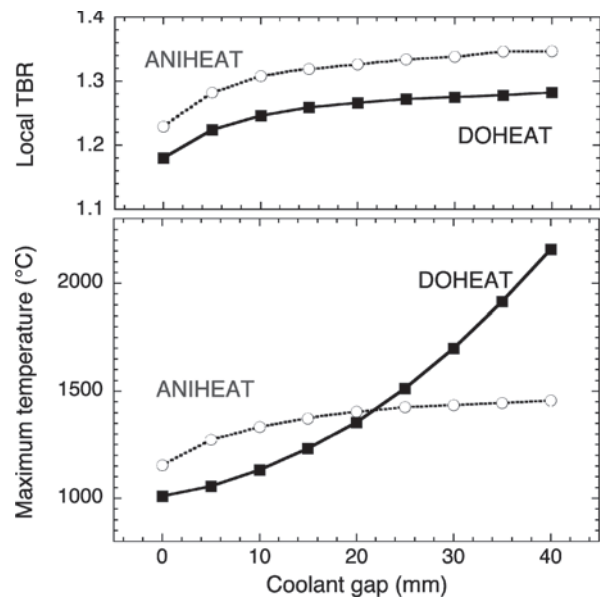


図14 DOHEAT と ANIHEAT の TBR およびブランケット最高温度の冷却配管ギャップ幅依存性。

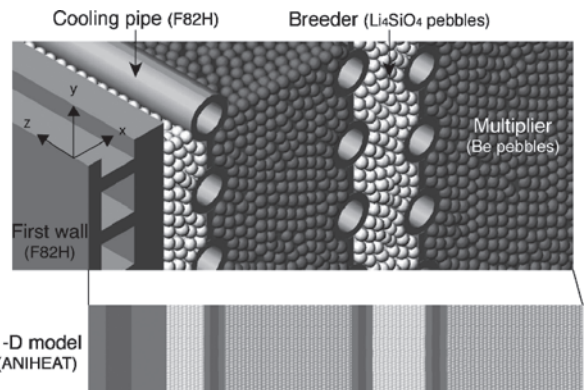


図15 冷却配管が隔壁で繋がったブランケット体系図と対応する1次元モデル図。

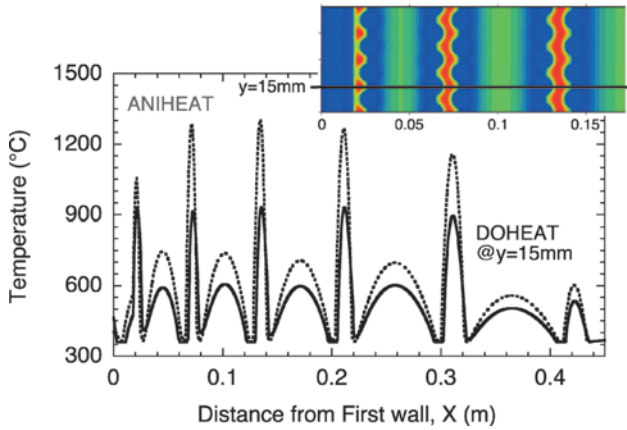


図16 隔壁モデルにおける DOHEAT と ANIHEAT の温度分布比較.

ある。1次元の ANIHEAT では温度が過大評価されていることがわかる。これは、DOHEAT では円管を2次元としてモデルどおり反映させた点と機械的に接している隔壁を冷却パネルとして利用した効果を解析に反映させることができたためである。

3.2.3 積層構造の場合

ブランケットの概念例には、これまで示してきたような第一壁から増殖材、冷却パネル、増倍材、と径方向に中性子束に対して垂直に配置された構造以外にも、例えば EU の動力炉設計 PPCS model B[9] のブランケット設計例のように増殖材と増倍材が第一壁に対して垂直 ( $x-z$  面に対して平行) に積層構造とした例もある (図17参照)。DEMO 2001 のように垂直に配置された構造では1次元コードにおいてモデル化が可能であるが、平行に配置された積層構造では1次元コードでは一つの混合材として解析せざるをえず、ANIHEAT では正確に取り扱うことができない。一方、2次元体系を扱う DOHEAT では、このような構造のブランケットにおいても適切に扱うことが可能である。図17のように増殖材領域、増倍材領域それぞれ幅 10 mm, 40 mm の間に冷却チャンネルを有する冷却パネルが配置された体系に対して、DOHEAT を用いた積層体系における温度解析結果を図18に示す。ここでは冷却材にヘリウムを用い、内部境界温度を 300°C としている。PPCS model B の構造のように、ブランケットモジュール内でさらに箱形に仕切られた奥行き方向に連続ではない3次元構造の場合には MCNP のような3次元コードによる解析が必要となるが、奥行き方向に一樣な積層構造と仮定すれば、DOHEAT で近似的な扱いが可能になる。

4. まとめ

多様なブランケットについて、より適切なモデル化で核熱設計を行うため、2次元輸送計算コード DOT3.5 と2次元伝熱解析コードを組み合わせた2次元核熱連成コード DOHEAT を開発した。DOHEAT には、描画形式で計算体系を構築できるユーザーインターフェイスを導入し、2次元に配置された内部構造を模擬し、解析することが可能

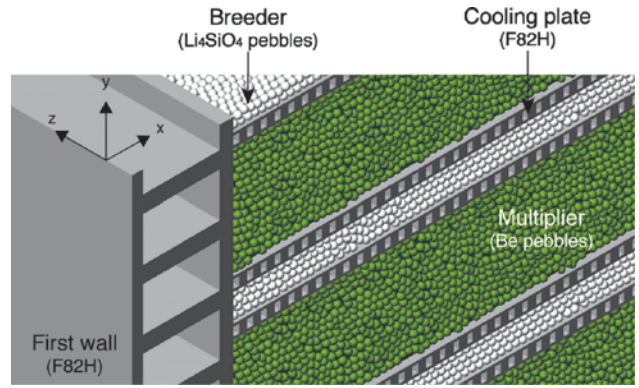


図17 積層構造のブランケット設計例.

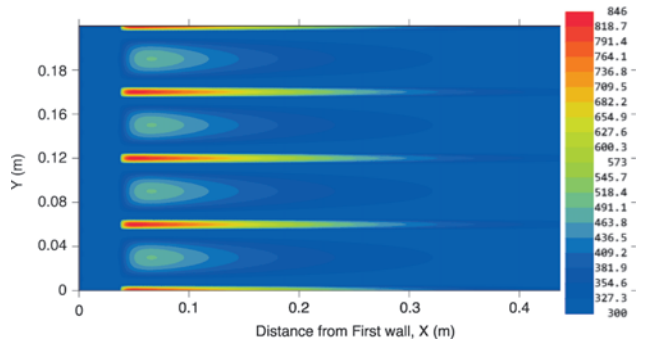


図18 積層モデルにおける DOHEAT の温度分布.

となった。非常に多くの計算回数を要する増殖材および増倍材等の量の最適化では、計算時間が短い ANIHEAT で当たり計算を行ったのち、DOHEAT で詳細検討を行うことが有効であり、これにより様々なブランケット概念設計が効率良く進められると考えられる。

謝 辞

本コードは、BA 原型炉設計活動の一環として、開発された。本コード開発するにあたり、日本原子力研究開発機構の佐藤聡氏、関洋治氏に貴重な助言をいただいた。飯田浩正氏 (元日本原子力研究開発機構) には、本コードのデバッグにおいて大変有益なコメントをいただいた。この場を借りて、感謝申し上げる。

参考文献

- [ 1 ] M. Enoda *et al.*, Nucl. Fusion 43, 1837 (2003).
- [ 2 ] K. Tobita *et al.*, Nucl. Fusion 49, 075029 (2009).
- [ 3 ] W.W.Engle, K-1693, Union Carbide Corporation, Computing Technology Center (1967).
- [ 4 ] K. Shibata *et al.*, JAERI 1319 (1990).
- [ 5 ] K. Maki *et al.*, JAERI-M91-072 (1991).
- [ 6 ] H. Kawasaki, JAERI-M91-058 (1991).
- [ 7 ] W.A. Rhoades and F.R. Mynatt, ORNL/RSIC/CCC-276 (1975).
- [ 8 ] K. Maki *et al.*, JAERI-M91-073 (1991).
- [ 9 ] PPCS overall report (2004).