

自然対流型キャプセル内の熱流動挙動 に関する数値解析

Numerical Analysis on Thermal-Hydraulic Behavior
in Natural Convection Capsules

稻葉 良知 小川 光弘 山浦 高幸 飛田 正浩

Yoshitomo INABA, Mitsuhiro OGAWA, Takayuki YAMAURA and Masahiro TOBITA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

July 2009

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政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 (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2009

自然対流型キャップセル内の熱流動挙動に関する数値解析

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター

照射試験炉センター

稲葉 良知、小川 光弘⁺、山浦 高幸⁺、飛田 正浩^{+※}

(2009年4月24日受理)

材料試験炉（JMTR）において実施する軽水炉燃料の燃料異常過渡試験では、キャップセル型の試験装置（燃料異常過渡試験用キャップセル）を用いるが、キャップセル内の熱流動挙動を評価するため、多次元二流体モデルコード ACE-3D により数値解析を行うこととしている。そこで、まず ACE-3D の機能拡張を行い、入力データの作成や解析結果の図示を容易にできるようにした。次に、ACE-3D の検証のため、既に JMTR で試験実績のある BWR 出力較正試験用キャップセルをモデル化し、ACE-3D による BWR 出力較正試験を模擬した数値解析を行った。試験データと解析結果とを比較したところ、両者は比較的良好く一致した。その結果、燃料異常過渡試験用キャップセル内の熱流動解析に ACE-3D を適用できる見通しが得られた。さらに、自然対流型キャップセルによる燃料異常過渡試験を模擬した数値解析を ACE-3D により行い、キャップセル内の熱流動挙動について検討した。

本報告書は、経済産業省原子力安全・保安院からの受託事業「平成19年度軽水炉燃材料詳細健全性調査」として、(独)日本原子力研究開発機構が実施した成果の一部である。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

＋ 原子炉施設管理部

※ 特定課題推進員

Numerical Analysis on Thermal-Hydraulic Behavior in Natural Convection Capsules

Yoshitomo INABA, Mitsuhiro OGAWA⁺, Takayuki YAMAURA⁺ and Masahiro TOBITA^{+※}

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 24, 2009)

The fuel transient tests for light water reactors are to be carried out in the Japan Materials Testing Reactor (JMTR), and the capsule-type test facilities (fuel transient test capsules) are to be used in the tests. In order to investigate the thermal-hydraulic behavior in the capsules, the multi-dimensional two-fluid model code ACE-3D is used. At first, the functions of ACE-3D were expanded for the pre-process and the post-process. Then, the BWR power calibration test capsule, which had been tested in JMTR, was modeled, and the BWR power calibration tests were simulated numerically for the verification of ACE-3D. The numerical results agreed well with the test data. As a result, it was found that ACE-3D is applicable to the thermal-hydraulic analysis in the fuel transient test capsules. In addition, the fuel transient tests with natural convection capsules were simulated numerically with ACE-3D, and the thermal-hydraulic behavior in the capsules was investigated.

Keywords: Numerical Simulation, Light Water Reactor, Fuel Transient Test, Capsule, Natural Convection, Boiling, Thermal-Hydraulic Behavior

This study was conducted under a contract with the Nuclear and Industrial Safety Agency of the Ministry of Economy, Trade and Industry.

⁺ Department of JMTR Operation

[※] Special Topic Engineer

目 次

1. 緒 言.....	1
2. ACE-3D の概要と機能拡張	2
2. 1 機能と特徴.....	2
2. 2 基礎式.....	2
2. 3 機能拡張.....	3
3. キャプセル内熱流動解析への ACE-3D の適用.....	6
3. 1 検証解析.....	6
3. 1. 1 解析モデル.....	6
3. 1. 2 解析条件.....	6
3. 1. 3 解析ケース.....	7
3. 1. 4 解析結果及び考察.....	7
3. 2 燃料異常過渡試験を模擬した数値解析.....	8
3. 2. 1 解析モデル.....	8
3. 2. 2 解析条件.....	9
3. 2. 3 解析ケース.....	9
3. 2. 4 解析結果及び考察.....	10
4. 結 言.....	14
謝 辞.....	15
参考文献.....	15

Contents

1. Introduction	1
2. Outline and Expanded Functions of ACE-3D	2
2. 1 Functions and Features	2
2. 2 Basic Equations	2
2. 3 Expanded Functions	3
3. Application of ACE-3D to Thermal-Hydraulic Analysis in Capsules	6
3. 1 Verification Analysis	6
3. 1. 1 Analytical Model	6
3. 1. 2 Analytical Conditions	6
3. 1. 3 Analytical Cases	7
3. 1. 4 Analytical Results and Discussions	7
3. 2 Numerical Simulations of Fuel Transient Tests	8
3. 2. 1 Analytical Models	8
3. 2. 2 Analytical Conditions	9
3. 2. 3 Analytical Cases	9
3. 2. 4 Analytical Results and Discussions	10
4. Concluding Summary	14
Acknowledgements	15
References	15

1. 緒 言

(独) 日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、経済産業省原子力安全・保安院の特会受託事業である燃料異常過渡試験の実施を計画している。燃料異常過渡試験では、出力急昇条件下で燃料試料を照射する出力急昇試験及び冷却材流量減少による沸騰遷移条件下で燃料試料を照射する過渡沸騰遷移試験があり、異常過渡時における軽水炉燃料の健全性等を調べることを目的としている。そのため、材料試験炉（Japan Materials Testing Reactor : JMTR）のシュラウド照射設備（Oarai Shroud Facility-1 : OSF-1）にキャップセル型の燃料異常過渡試験装置（自然対流型キャップセル、強制対流型キャップセル及びドライアウトキャップセル）を新たに設計・製作して装荷し、照射試験を実施する予定である。自然対流型キャップセル及び強制対流型キャップセルは、軽水炉燃料の出力急昇試験を行うための装置である。また、ドライアウトキャップセルは、BWR 燃料の過渡沸騰遷移試験を行うための装置である。

自然対流型キャップセルは、JMTR における 8×8 型 BWR 燃料の出力急昇試験において、沸騰水キャップセル（Boiling Water Capsule : BOCA）として十分な実績を有していることから、従来の構造を踏襲して設計される。本キャップセルを用いた試験では、従来の BWR 出力急昇試験と同様に、燃料試料の最高線出力を 600 W/cm とするが、燃料試料を従来型の 8×8 型 BWR 燃料（燃料被覆管外径 12.27 mm ）から 10×10 型 BWR 燃料（燃料被覆管外径 9.5 mm ）に変更するため、 10×10 型 BWR 燃料の最高熱流束が 8×8 型 BWR 燃料で得られている限界熱流束（DNB (Departure from Nucleate Boiling) 熱流束）に近づく。従って、核沸騰から膜沸騰への遷移が生じる可能性があり、キャップセル内の熱流動や燃料試料の挙動について、新たに評価・検討する必要がある。

強制対流型キャップセルは、多くの照射実績を有する自然対流型キャップセルの機能に加え、キャップセル内で加圧水を循環させることによって、より実機に近い熱流動環境下で燃料を照射できる装置である。また、ドライアウトキャップセルは、過渡的な沸騰遷移（燃料被覆管表面が液膜（冷却水）で覆われている状態（通常の沸騰状態）から、液膜が消失する状態へ移行すること）が生じた場合における BWR 燃料の健全性を調べることができる装置である。強制対流型キャップセル及びドライアウトキャップセルは、これまでの試験実績が無いため、新たに開発される。従って、キャップセル内の熱流動や燃料試料の挙動について、新たに評価・検討する必要がある。

燃料異常過渡試験で用いる自然対流型キャップセル、強制対流型キャップセル及びドライアウトキャップセル（燃料異常過渡試験用キャップセル）内の熱流動挙動を詳細に把握することは、キャップセルの設計や燃料異常過渡試験で得られるデータを評価する上で重要である。そこで、二相流を取り扱える数値解析コードとして実績のある多次元二流体モデルコード ACE-3D⁽¹⁾ を整備し、ACE-3D の燃料異常過渡試験への適用性を検討することにした。

本研究では、ACE-3D のユーザーインターフェースに関する機能拡張を行った後、実測値がある BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体直径 12.26 mm ）について解析モデルを構築し、実測値と ACE-3D による解析値との比較から ACE-3D の検証を行った。さらに、BWR 出力較正試験用キャップセルの発熱体直径を 9.5 mm にしたキャップセル及び燃料異常過渡試験用キャップセル（自然対流型キャップセル）について解析モデルを構築し、ACE-3D による熱流動解析を行って、キャップセル内の熱流動挙動について調べた。

2. ACE-3D の概要と機能拡張

本章では、数値解析で使用した ACE-3D の概要⁽¹⁾ とそのユーザーインターフェース改善を目的とした機能拡張について述べる。

2.1 機能と特徴

ACE-3D は、多次元二流体モデルの基礎式を有限差分法によって解く。対流項には風上差分、拡散項には中心差分が適用される。時間進行には、半陰解法が用いられる。乱流モデルとして、二相 $k - \varepsilon$ 乱流モデルが導入されている。解析体系として直交座標系または円筒座標系が選択でき、流体として空気-水または蒸気-水が選択できる。任意位置に熱伝導体を設置でき、3次元または1次元の熱伝導解析との連成解析を行うことが可能である。熱伝導体壁面では、沸騰曲線を考慮できる。

2.2 基礎式

ACE-3D で扱う基礎方程式⁽¹⁾ は、二流体モデルによる3次元方程式であり、以下に示す式が採用されている。座標系として、3次元の直交座標系または円筒座標系を取り扱うことができる。

- ・気相の質量保存式

$$\frac{\partial \alpha_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{V}_g) = \Gamma \quad (2.1)$$

- ・液相の質量保存式

$$\frac{\partial \alpha_l \rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{V}_l) = -\Gamma \quad (2.2)$$

- ・気相の運動方程式

$$\frac{\partial \vec{V}_g}{\partial t} + \vec{V}_g \cdot \nabla \vec{V}_g = -\frac{1}{\rho_g} \nabla P - \frac{\vec{\tau}_{ig}}{\alpha_g \rho_g} - \frac{\Gamma^+}{\alpha_g \rho_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) + \frac{\nabla \vec{\tau}_g}{\alpha_g \rho_g} + \vec{g} \quad (2.3)$$

- ・液相の運動方程式

$$\frac{\partial \vec{V}_l}{\partial t} + \vec{V}_l \cdot \nabla \vec{V}_l = -\frac{1}{\rho_l} \nabla P - \frac{\vec{\tau}_{il}}{\alpha_l \rho_l} - \frac{\Gamma^-}{\alpha_l \rho_l} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) + \frac{\nabla \vec{\tau}_l}{\alpha_l \rho_l} + \vec{g} \quad (2.4)$$

- ・気相のエネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g e_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g e_g \vec{V}_g) = -P \left[\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \vec{V}_g) \right] + q_{wg} + q_{ig} + \Gamma h_{sg} + \nabla \cdot (a_{tg} \rho_g C_{pg} \nabla T_g) \quad (2.5)$$

・液相のエネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l e_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l e_l \vec{V}_l) = -P \left[\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \vec{V}_l) \right] + q_{wl} + q_{ll} - \Gamma h_{sl} + \nabla \cdot (a_{tl} \rho_l C_{pl} \nabla T_l) \quad (2.6)$$

上式中において、添え字 g : 気相、添え字 l : 液相、 α_k : k 相 ($k=g, l$) の体積率、 ρ_k : k 相の密度、 \vec{V}_k : k 相の速度、 P : 両相の圧力、 $\vec{\tau}_{ik}$: k 相の界面に働く応力、 \vec{g} : 重力加速度、 e_k : k 相の内部エネルギー、 h_{sk} : k 相の飽和エンタルピー、 a_{tk} : k 相の乱流熱拡散率、 C_{pk} : k 相の定圧比熱、 T_k : k 相の温度及び q_{wk} : k 相の壁面熱流束を示す。

ACE-3D では、熱構造体を設定可能である。熱構造体は、流体の領域が直交座標系ならスラブとして扱われ、流体が円筒座標系ならば円筒として扱われる。非定常 3 次元の熱伝導方程式は、円筒座標系の場合、以下の式となる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (2.7)$$

ここで、 ρ : 密度、 C_p : 定圧比熱、 λ : 热伝導率及び q : 発熱密度である。3 次元熱伝導を考える場合の境界条件は、熱構造体の上面及び下面では断熱とし、内面及び外面では熱伝達率を与える。流体と接する面での熱伝達率は、一定値とすることもできるが、各種相関式によっても計算でき、その場合には沸騰曲線も考慮できる。

2.3 機能拡張

本節では、ACE-3D の機能拡張として、配列の拡張、各格子における沸騰状態の表示、リスタート機能の拡張、入力支援プログラムの整備及び解析結果可視化プログラムの整備について述べる。

(1) 配列の拡張

ACE-3D による解析モデル作成に当たり、プロトタイプ（メッシュ形状のパターン）の最大数を、以下のように 10 から 1,100 に拡張した。

rhtst1.f ファイル 13 行目

旧	parameter (max_prot = 10)
---	-----------------------------

↓

新	parameter (max_prot = 1,100)
---	--------------------------------

(2) 沸騰状態表示機能の整備

ACE-3D のプログラム内で沸騰状態を示す配列変数は $ridreg(r, z)$ であり、引数 r 及び z が r 方向及び z 方向のメッシュ番号を示す。また、サブルーチン $dumpf$ の 157 行において、ボイド率 $alpn$ 、流体温度 tln 等のパラメータを格子の書式で出力している。ここに、 $ridreg(r, z)$ を出力する改良を加えることで、 $alpn$ 、 tln 等のパラメータのように沸騰状態を知ることができる。

$\text{ridreg}(r, z)$ 配列変数の値は、以下の意味を持つ。

- ridreg = 2 : 核沸騰
- 3 : 遷移沸騰
- 4 : 膜沸騰

(3) リスタート機能の拡張

ある時点の解析結果を初期値として、燃料ピン出力、流量、温度及び熱伝導率を再設定した計算（リスタート+異なった解析条件での再計算）を実行できるように改良した。

リスタートの場合、ACE-3D では前回計算時のダンプファイルをサブルーチン `rdumpf` で読み込み、リスタートの開始タイムステップは、入力ファイルから読み込む。元来のリスタートは、前回と同じ入力値を使うため、入力ファイルではタイムステップの変更のみが使用される。そこで、入力ファイルにおいて、燃料ピン出力、流量、温度及び熱伝導率も再設定し、ダンプファイルの読み込み後に、これらのパラメータ値を内部で置き換える修正を行った。

(4) 入力支援プログラムの整備

入力支援プログラムは、以下のパラメータの入力を容易にすることを目的とする。

- ①炉内管内径、外筒（内外径）及び内筒（内筒の有無の入力、内外径）の寸法
 - ②外筒冷却水境界条件（入口温度、流量（熱伝達率）等）
 - ③供給水の初期水温、圧力及び流量
 - ④燃料ピンの寸法及び高さ方向位置
 - ⑤給排水管の数、寸法及び位置
 - ⑥仕切り管の有無、位置及び寸法
 - ⑦各構造物の材質（内筒有りの場合、外筒－内筒間の雰囲気を考慮）
 - ⑧ γ 発熱の有無及び発熱量（標準の γ 発熱率（最大 1 W/g）のデータから最小二乗法により発熱率の分布曲線を求め、增幅値を乗じて高さ方向に分布させる。）
 - ⑨燃料ピン発熱量（ γ 発熱無しの場合：ヒーターピンとして、高さ方向に一律の線出力を入力する。
 γ 発熱有りの場合：トータルの発熱量を入力し、その発熱量を γ 発熱率分布曲線の燃料ピン高さで分配する。）
 - ⑩熱電対等の障害物の挿入（障害物の伝熱を考慮）
- また、以下の表示・計算機能を持つものとする。
- ⑪常温の加圧水温度と流速から、流入時の流量を算定
 - ⑫各セルのアスペクト比の表示

ただし、プログラム化するより体系パターンの種類を増やして対応した方が効率的な場合や、計算上効果が余り無い場合も想定される。ここでは、上記のうち①④⑤⑥⑧⑨⑩を実現した入力支援プログラムを作成した。このプログラムでは、対象とする体系（キャプセル）の類似性から、以下に示す ACE-3D 入力ファイルの作成自動化を実現している。

- ・メッシュデータ : 個々のメッシュの座標値を入力する。
- ・障害物 : 障害物を構成する個々のメッシュを定義する。

- ・熱構造体 : 個々のプロトタイプを設定する。

(5) 解析結果可視化プログラムの整備

ACE-3D には Aceplot 及び Aceplot2d というグラフ作成プログラムが添付されているが、今回は MS-Excel、フリーソフトの GMT（グラフ作成ソフト）及び Gsview（グラフ表示ソフト）を用いてグラフの視認性を向上させると共に、今後の拡張作業に対応可能となる解析結果可視化プログラムを整備した。

解析結果可視化プログラムは、ACE-3D の出力ファイルから、見たい解析結果を抽出するポストプロセッサー、ポストプロセッサーが生成した抽出データファイルを読み込んでグラフを生成する GMT、GMT が生成した画像ファイルを表示する Gsview 及びポストプロセッサーが生成した指定メッシュの温度・ボイド率・加圧水圧力の時間変化データをグラフ化する MS-Excel から構成される。これらを使用した可視化結果は、第3章の解析結果として示されている。また、解析で得られた温度や速度の時間変化をアニメーションで示すには、フリーソフトである Imagemagick を使用することができる。

3. キャプセル内熱流動解析への ACE-3D の適用

本章では、BWR 出力較正試験用キャップセル及び燃料異常過渡試験用キャップセル（自然対流型キャップセル）内の熱流動解析に ACE-3D を適用し、ACE-3D の検証と燃料異常過渡試験の予備評価を行った結果について述べる。

3.1 検証解析

JMTR で試験実績があり、ACE-3D による解析値と比較可能な試験データのある BWR 出力較正試験用キャップセル（ヒーターピン直径 12.26 mm）について解析モデルを構築し、BWR 出力較正試験を模擬した数値解析を ACE-3D により行い、実測値と解析値との比較から ACE-3D の検証を行った。なお、BWR 出力較正試験用キャップセルは、BWR 燃料の出力を較正するための試験装置であり、キャップセル中央に挿入される発熱体には燃料ピンに替えてヒーターピンが使用されている。

3.1.1 解析モデル

Fig. 3.1 に、BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体従来径）の概略を示す。また、Fig. 3.2 に、BWR 出力較正試験用キャップセルの解析モデルを示す。BWR 出力較正試験用キャップセルの形状を簡略化し、熱電対位置及び主要な構造物に関しては、実際の配置と同じになるように解析モデルを構築した。

解析モデルの座標系には、キャップセルの形状から円筒座標系を適用し、半径方向 (r 方向) 一円周方向 (θ 方向) 一軸方向 (z 方向) の 3 次元非定常解析とした。メッシュ分割数は、 r 方向に 7 分割、 θ 方向に 16 分割及び z 方向に 34 分割で、合計 3,808 メッシュとした。

キャップセル及びキャップセル内の構造物として、ヒーターピン（直径 12.26 mm、発熱部高さ 360 mm、材質 Ni 及び MgO）、給水管（外径 6.4 mm、内径 4.0 mm、材質 SUS316）、排水管（外径 3.2 mm、内径 1 mm、材質 SUS316）及び外筒（外径 32 mm、内径 27 mm、材質 SUS316）をモデル化した。なお、加圧水が流れる給水管に関しては、精密に表すことが困難であったため、給水管出口から指定した温度の水を放出し、外形を障害物として設定することとし、熱構造としての設定を省略した。

温度等の測定点として、実測値の測定点と同じ位置に HTC1、HTC2、HTC3（ヒーターピン表面）及び TC1、TC2、TC3（加圧水）を設置した。さらに、発熱部上端のメッシュ位置に TC4 を、その上部のメッシュ位置に TC5 を設置した。TC4 及び TC5 は、後述の燃料異常過渡試験用キャップセルの解析でボイドが発生する位置であり、比較のためこれらの位置を選択した。

3.1.2 解析条件

Table 3.1 に、BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体従来径）モデルの解析条件を示す。また、Table 3.2 及び Table 3.3 に、解析で使用した物性値及び γ 発熱率を示す。液相粘性係数に関しては、通常 2~10 の範囲で設定し、実測値と解析値とのバランスを取る方法があり、本解析では予備計算の結

果から 7 とした。 γ 発熱率に関しては、最大 2.2 W/g となる增幅値を用いた。

3.1.3 解析ケース

Table 3.4 に、BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）モデルを用いた数値解析の解析ケースを示す。発熱部線出力（ヒーターピン線出力）をパラメータとし、発熱部線出力 200 W/cm、400 W/cm 及び 600 W/cm の合計 3 ケースの解析を行った。なお、解析は、測定点温度等が定常状態になるまで行った。

3.1.4 解析結果及び考察

BWR 出力較正試験（発熱体従来径）を模擬した数値解析を ACE-3D により行い、BWR 出力較正試験用キャプセルにおける温度、流速及びボイド率を求めた。以下に、解析結果及び考察を述べる。

（1）温 度

BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における温度の経時変化を Fig. 3.3（発熱部線出力 200 W/cm）、Fig. 3.4（発熱部線出力 400 W/cm）及び Fig. 3.5（発熱部線出力 600 W/cm）に示す。解析値と比較するため、これらの図には温度の実測値（JMTR130 サイクル運転における出力急昇試験のデータ）も同時に示した。実測値に関しては、Table 3.5 を参照のこと。なお、実測値はある時点で測定されたものであるが、図中では比較しやすいように横方向に延長して示した。

発熱部線出力 200 W/cm の場合（Fig. 3.3 参照）に示されるように、100 秒まで計算すると定常状態に達している。この時、実測値と解析値の間で、発熱部（ヒーターピン）表面の測定点 HTC1～3 における温度では 0.3°C～12.4°C（実測値に対して 0.1%～4.2%）の差が、加圧水の測定点 TC1～3 における温度では 10.1°C～14.4°C（実測値に対して 8.0%～10.1%）の差が認められる。発熱部線出力 400 W/cm の場合（Fig. 3.4 参照）、実測値と解析値の間で、HTC1～3 における温度では 0.1°C～8.3°C（実測値に対して 0%～2.8%）の差が、TC1～3 における温度では 0.5°C～20.5°C（実測値に対して 0.2%～10.3%）の差が認められる。発熱部線出力 600 W/cm の場合（Fig. 3.5 参照）では、計算がエラーによって停止することがあり、23 秒で計算の継続を断念した。ただし、Fig. 3.5 からわかるように、発熱部表面の温度は、既にほぼ定常状態である。加圧水の温度は、他の解析ケースとも比較すると 23 秒付近でほぼ定常状態になると推定できる。この時、実測値と解析値の間で、HTC1～3 における温度では 0.6°C～12.1°C（実測値に対して 0.2%～4.1%）の差が、TC1～3 における温度では 4.2°C～28.6°C（実測値に対して 1.8%～8.8%）の差が認められる。

以上のように、解析値は発熱部において最大約 4% の、加圧水部で最大約 10% の誤差があるが、実測値には温度測定の誤差を含み、解析値は簡略化された解析モデルによる結果であることを考えると、実測値と解析値は良く合っていると言える。

BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における $r\theta$ 断面及び rz 断面の温度分布を Fig. 3.6（発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒）、Fig. 3.7（発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒）及び Fig. 3.8（発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 23 秒）に示す。なお、 $r\theta$ 断面は発熱部の上端位置、

rz 断面は方位 6 (Fig. 3.2 参照) におけるもので、以下の $r\theta$ 断面図及び rz 断面図は全て同じ位置におけるものである。

これらの図より、発熱量の増加に伴って、温度が上昇していることがわかる。Fig. 3.6 及び Fig. 3.7 の $r\theta$ 断面中央部は、円形でバランスの良い温度分布をしている。これは、対応する定常部の温度変動がほとんど無いからであると考えられる (Fig. 3.3 及び Fig. 3.4 参照)。Fig. 3.8 の $r\theta$ 断面中央部の発熱部には、右上に向けて出っ張った部分がある。これは、指定した経過時間で断面図を描くため、時間による温度変動 (Fig. 3.5 参照) を拾ったものであると考えられる。

(2) 流速

BWR 出力較正試験用キャップセル (発熱体従来径) における $r\theta$ 断面及び rz 断面の流速分布を Fig. 3.9 (発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)、Fig. 3.10 (発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒) 及び Fig. 3.11 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 23 秒) に示す。

Fig. 3.9 の rz 断面を見ると、発熱部の向かって左側では全面的に上昇、右側では全面的に下降している。また、 $r\theta$ 断面を見ると、回転方向 (θ 方向) への移動がある。このように、水の上下間の移動は、回転方向への移動を含んでいるということがわかった。

(3) ボイド率

BWR 出力較正試験用キャップセル (発熱体従来径) におけるボイド率の経時変化を Fig. 3.12 (発熱部線出力 600 W/cm) に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面のボイド率分布を Fig. 3.13 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 23 秒) に示す。

ボイドは、発熱部線出力 600 W/cm でのみ発生した。ボイド率は、最大で 0.3 程度であった。なお、発熱部線出力 600 W/cm の場合において、計算がエラーにより停止したのは、このボイド発生により温度等の挙動が不安定となり、解の収束に影響したことが原因であると推測される。

3. 2 燃料異常過渡試験を模擬した数値解析

3. 1 節において ACE-3D の検証ができたことから、まず BWR 出力較正試験用キャップセルの発熱体直径を 12.26 mm から 9.5 mm に変更したキャップセルモデルを用いて ACE-3D による数値解析を行い、燃料異常過渡試験において燃料試料の細径化による影響や γ 発熱の影響を検討した。次に、燃料異常過渡試験用キャップセル (自然対流型キャップセル) について解析モデルを構築し、燃料異常過渡試験を模擬した数値解析を ACE-3D により行い、燃料異常過渡試験への ACE-3D の適用性を確認すると共に、仕切り管や加圧水圧力の影響を検討した。

3. 2. 1 解析モデル

(1) BWR 出力較正試験用キャップセル (発熱体細径)

BWR 出力較正試験用キャップセル (発熱体細径) の解析モデルは、BWR 出力較正試験用キャップセル (発熱体従来径) モデル (Fig. 3.2 参照) の発熱体直径を 12.26 mm から 9.5 mm に変更したものであり、

その他は両者で同様である。

(2) 燃料異常過渡試験用キャップセル

Fig. 3.14 に、燃料異常過渡試験用キャップセルの概略を示す。また、Fig. 3.15 に、燃料異常過渡試験用キャップセルの解析モデルを示す。燃料異常過渡試験用キャップセルの形状を簡略化し、主要な構造物に関しては、実際の配置と同じになるように解析モデルを構築した。

解析モデルの座標系には、キャップセルの形状から円筒座標系を適用し、半径方向 (r 方向) 一円周方向 (θ 方向) 一軸方向 (z 方向) の 3 次元非定常解析とした。メッシュ分割数は、 r 方向に 7 分割、 θ 方向に 16 分割及び z 方向に 34 分割で、合計 3,808 メッシュとした。

キャップセル及びキャップセル内の構造物として、燃料ピン（直径 9.5 mm、発熱部高さ 400 mm、材質 Ni 及び MgO）、給水管（外径 5 mm、内径 4 mm、材質 SUS316）、排水管（外径 3.2 mm、内径 1.2 mm、材質 SUS316）、仕切り管（外径 16 mm、内径 14 mm、上端位置 630 mm、下端位置 73.5 mm、長さ 556.5 mm、材質 SUS316）及び外筒（外径 32 mm、内径 27 mm、材質 SUS316）をモデル化した。なお、加圧水が流れる給水管に関しては、BWR 出力較正試験用キャップセルと同様に、給水管出口から指定した温度の水を放出し、外形を障害物として設定することとし、熱構造体としての設定を省略した。また、仕切り管径を拡大した解析ケース（3. 2. 3 (2) 参照）では、仕切り管の外径 18 mm、内径 16 mm 及び外筒の外径 34 mm、内径 29 mm とした。

温度等の測定点 HTC1、HTC2、HTC3（燃料ピン表面）及び TC1、TC2、TC3（加圧水）の位置は、発熱部中心からの距離を BWR 出力較正試験用キャップセルに合わせて設置した。さらに、発熱部上端のメッシュ位置に TC4 を、その上部のメッシュ位置に TC5 を設置した。

3. 2. 2 解析条件

(1) BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）

BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）モデルの解析条件、解析で使用した物性値及び γ 発熱率は、BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体従来径）モデルと同様である。

(2) 燃料異常過渡試験用キャップセル

Table 3.6 に、燃料異常過渡試験用キャップセルモデルの解析条件を示す。また、解析で使用した物性値及び γ 発熱率は、BWR 出力較正試験用キャップセルモデルと同様である。

3. 2. 3 解析ケース

(1) BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）

Table 3.7 に、BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）モデルを用いた数値解析の解析ケースを示す。発熱部線出力及び γ 発熱をパラメータとし、 γ 発熱有りで発熱部線出力 200 W/cm、400 W/cm、600 W/cm 及び γ 発熱無しで発熱部線出力 200 W/cm、400 W/cm、600 W/cm の合計 6 ケースの解析を行った。 γ 発熱有りのケースを BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）-1、 γ 発熱無しのケー

スを BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）-2 とする。なお、解析は、測定点温度等が定常状態になるまで行った。

（2）燃料異常過渡試験用キャップセル

Table 3.8 に、燃料異常過渡試験用キャップセルモデルを用いた数値解析の解析ケースを示す。発熱部線出力、仕切り管位置及び加圧水圧力をパラメータとし、発熱部線出力 200 W/cm、400 W/cm、600 W/cm、発熱部線出力 600 W/cm で仕切り管径を拡大（仕切り管内外半径及び外筒内外半径を 1 mm 拡大）及び発熱部線出力 600 W/cm で加圧水圧力を増大（BWR 条件の 7.33 MPa から PWR 条件の 15 MPa に増大）の合計 5 ケースの解析を行った。発熱部線出力をパラメータとしたケースを燃料異常過渡試験用キャップセル-1、仕切り管径を拡大したケースを燃料異常過渡試験用キャップセル-2、加圧水圧力を増大したケースを燃料異常過渡試験用キャップセル-3 とする。

3.2.4 解析結果及び考察

BWR 出力較正試験（発熱体細径）及び燃料異常過渡試験を模擬した数値解析を ACE-3D により行い、BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）及び燃料異常過渡試験用キャップセルにおける温度、流速及びボイド率を求めた。以下に、解析結果及び考察を述べる。

Table 3.9 に、BWR 出力較正試験（発熱体細径）及び燃料異常過渡試験を模擬した数値解析によって得られた各測定点での温度（定常値）を示す。

（1）BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）

①温 度

BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）-1 における温度の経時変化を Fig. 3.16（発熱部線出力 200 W/cm）、Fig. 3.17（発熱部線出力 400 W/cm）及び Fig. 3.18（発熱部線出力 600 W/cm）に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面の温度分布を Fig. 3.19（発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒）、Fig. 3.20（発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒）及び Fig. 3.21（発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 26 秒）に示す。BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）-2 における温度の経時変化を Fig. 3.27（発熱部線出力 200 W/cm）、Fig. 3.28（発熱部線出力 400 W/cm）及び Fig. 3.29（発熱部線出力 600 W/cm）に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面の温度分布を Fig. 3.30（発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒）、Fig. 3.31（発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒）及び Fig. 3.32（発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 68 秒）に示す。

BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）-1 及び 2 において、温度の実測値（Table 3.5 参照）と解析値は合理的な範囲で合っている。発熱部表面（HTC 1～3）の温度が実測値と合っていることから、発熱量の設定が正しかったと言える。

発熱体細径化の影響に関しては、発熱体従来径と比較して、発熱部表面温度の上昇は数度程度であり、各部温度が急上昇するようなことは無く、発熱体細径化によって核沸騰から膜沸騰への遷移は生じないと考えられる。

γ 発熱が与える温度への影響に関しては、 γ 発熱有りのケース (BWR 出力較正試験用キャプセル-1) では γ 発熱無しのケース (BWR 出力較正試験用キャプセル-2) と比べてやや温度が高くなつたが、ばらつきや大小に格段の差は認められなかつた。発熱部線出力 600 W/cm における断面図には、極端に温度の高い部分が認められるが、加圧水温度の時間変動が激しく、指定した抽出時間に極端な値があつたものと考えられる。

②流速

BWR 出力較正試験用キャプセル(発熱体細径)-1 における $r\theta$ 断面及び rz 断面の流速分布を Fig. 3.22 (発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)、Fig. 3.23 (発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒) 及び Fig. 3.24 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 26 秒) に示す。BWR 出力較正試験用キャプセル(発熱体細径)-2 における $r\theta$ 断面及び rz 断面の流速分布を Fig. 3.33 (発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)、Fig. 3.34 (発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒) 及び Fig. 3.35 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 68 秒) に示す。

流速分布の傾向は、前述した BWR 出力較正試験用キャプセル(発熱体従来径) と同様である。ただし、発熱部線出力 600 W/cm における rz 断面の流速 (Fig. 3.24 参照) は他のケースに比べて速く、流体が活発に移流していることがわかる。

③ボイド率

BWR 出力較正試験用キャプセル-1 におけるボイド率の経時変化を Fig. 3.25 (発熱部線出力 600 W/cm) に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面のボイド率分布を Fig. 3.26 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 26 秒) に示す。BWR 出力較正試験用キャプセル-2 におけるボイド率の経時変化を Fig. 3.36 (発熱部線出力 600 W/cm) に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面のボイド率分布を Fig. 3.37 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 68 秒) に示す。

ボイドは、発熱部線出力 600 W/cm でのみ発生した。これらの図より、ボイド率は最大で 0.2 程度であった。

(2) 燃料異常過渡試験用キャプセル

①温度

燃料異常過渡試験用キャプセル-1 における温度の経時変化を Fig. 3.38 (発熱部線出力 200 W/cm)、Fig. 3.39 (発熱部線出力 400 W/cm) 及び Fig. 3.40 (発熱部線出力 600 W/cm) に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面の温度分布を Fig. 3.41 (発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)、Fig. 3.42 (発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒) 及び Fig. 3.43 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 95 秒) に示す。燃料異常過渡試験用キャプセル-2 における温度の経時変化を Fig. 3.49 (発熱部線出力 600 W/cm) に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面の温度分布を Fig. 3.50 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 100 秒) に示す。燃料異常過渡試験用キャプセル-3 における温度の経時変化を Fig. 3.54 (発熱部線出力 600 W/cm) に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面の温度分布を Fig. 3.55 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 100 秒) に示す。

燃料異常過渡試験用キャプセル-1 において、発熱部表面温度の実測値 (BWR 出力較正試験用キャ

プセルの実測値で、Table 3.5 を参照) と解析値 (HTC 1～3 における温度) は、合理的な範囲で合っている。発熱部表面の温度が実測値と合っていることから、発熱量の設定が正しかったと言える。加圧水温度の測定点 (TC1～3) 位置が、仕切り管の外側となったことから、TC1～3 における温度の解析値は実測値より低くなつた。なお、発熱部線出力 600 W/cm の場合、経過時間 100 秒近くになつたところで、発熱部のうち HTC1 及び HTC2 の温度が急上昇している (Fig. 3.40 参照)。これは、後述のボイド率と関係があると考えられる。ただし、定常状態に達した後での急な変化であるため、数値計算上の問題である可能性がある。温度分布図を見ると、仕切り管内側及び上方で温度が上昇しており、仕切り管によって自然対流が促進された効果であると考えられる。仕切り管上端部付近の加圧水における測定点 TC4 及び TC5 では、仕切り管の無い BWR 出力較正試験用キャップセル (発熱体細径) -1 と比べて、86°C 及び 47°C の温度上昇が認められた (発熱部線出力 600 W/cm の場合)。

燃料異常過渡試験用キャップセル-2 (発熱部線出力 600 W/cm で、仕切り管内外半径及び外筒内外半径を 1 mm 拡大したケース) では、燃料異常過渡試験用キャップセル-1 に比べて、加圧水温度が 20°C～30°C 低下した (Table 3.9 及び Fig. 3.49 参照)。これは、仕切り管径拡大の効果である可能性がある。

燃料異常過渡試験用キャップセル-3 (発熱部線出力 600 W/cm で、加圧水圧力を 7.33 MPa から 15 MPa に増大したケース) では、飽和温度の上昇 (289°C から 342°C に上昇) に伴い、燃料異常過渡試験用キャップセル-1 に比べて発熱部表面温度が約 50°C 上昇した (Table 3.9 及び Fig. 3.54 参照)。

②流速

燃料異常過渡試験用キャップセル-1 における $r\theta$ 断面及び rz 断面の流速分布を Fig. 3.44 (発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)、Fig. 3.45 (発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒) 及び Fig. 3.46 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 95 秒) に示す。燃料異常過渡試験用キャップセル-2 における $r\theta$ 断面及び rz 断面の流速分布を Fig. 3.51 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 100 秒) に示す。燃料異常過渡試験用キャップセル-3 における $r\theta$ 断面及び rz 断面の流速分布を Fig. 3.56 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 100 秒) に示す。

全てのケースにおいて、仕切り管の内側で上昇、外側で下降の流れが発生している。また、回転方向の流れはほとんどない。燃料異常過渡試験用キャップセル-2 では、燃料異常過渡試験用キャップセル-1 に比べて、仕切り管上側の速度ベクトルの乱れがなくなっている (Fig. 3.51 参照)。これらの挙動は、仕切り管の効果であると考えられる。

③ボイド率

燃料異常過渡試験用キャップセル-1 におけるボイド率の経時変化を Fig. 3.47 (発熱部線出力 600 W/cm) に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面のボイド率分布を Fig. 3.48 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 95 秒) に示す。燃料異常過渡試験用キャップセル-2 におけるボイド率の経時変化を Fig. 3.52 (発熱部線出力 600 W/cm) に、 $r\theta$ 断面及び rz 断面のボイド率分布を Fig. 3.53 (発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 100 秒) に示す。

ボイドは、燃料異常過渡試験用キャップセル-1 及び 2 (加圧水圧力 7.33 MPa のケース) では、発熱部線出力 600 W/cm でのみ発生した。燃料異常過渡試験用キャップセル-1 (仕切り管内径 14 mm のケース) では、発熱部上端の TC4 においてボイド率 0.6 の定常状態を維持した後、100 秒近くで突然ボイド率

0.9 に上昇している。これが①温度で述べた発熱部の温度急上昇と関係していると考えられるものの、数値計算上の不具合である可能性もある。

燃料異常過渡試験用キャプセル-2（仕切り管内径 16 mm のケース）では、TC4 におけるボイド率が 0.1 前後で推移した。仕切り管の内側及び外側で水の上昇及び下降が潤滑に起こっており、温度を下げる効果も認められる。ただし、仕切り管内径 2 mm の差によるボイド率の差が大きく、実際のキャプセル組み立て精度によって、ボイド発生量に大きなばらつきが生じる可能性がある。この点に関しては、更なるパラメータサーベイや実験による確認が必要と考えられる。

燃料異常過渡試験用キャプセル-3（加圧水圧力を 7.33 MPa から 15 MPa に増大したケース）では、加圧によって飽和温度が上昇したため、発熱部線出力 600 W/cm でもボイドは発生しなかった。

（3）発熱部表面温度に関する評価

Fig. 3.57 に、BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 及び燃料異常過渡試験用キャプセル-1～3 での発熱部線出力に対する発熱部表面温度の変化を示す。

Table 3.9 に示されるように、各線出力における発熱部表面の軸方向温度（HTC1～3）はほぼ一定であり、Fig. 3.37 には HTC1～3 の平均温度を示した。200, 400, 600 W/cm の各線出力において、発熱部表面温度は飽和温度（圧力 7.3 MPa の場合 289°C、圧力 15 MPa の場合 342°C）を超えている。このことから、燃料異常過渡試験用キャプセル（自然対流型キャプセル）を用いることで、BWR の通常出力時及び出力過渡時における被覆管表面温度条件を達成できる見通しが得られた。

4. 結 言

燃料異常過渡試験用キャプセル（自然対流型キャプセル）内の熱流動挙動を詳細に把握するため、多次元二流体モデルコード ACE-3D の機能拡張と検証及び自然対流型キャプセルへの適用を行った。

ACE-3D の機能拡張として、配列の拡張、各格子における沸騰状態表示機能の整備、リスタート機能の拡張、入力支援プログラムの整備及び解析結果可視化プログラムの整備を行い、使用性を向上させた。

ACE-3D の検証のため、既に JMTR で試験実績のある BWR 出力較正試験用キャプセルのモデル化を行い、ACE-3D による BWR 出力較正試験を模擬した熱流動解析を行った。試験データと解析結果とを比較したところ、両者は比較的良く一致した。その結果、燃料異常過渡試験の熱流動解析に ACE-3D を適用できる見通しが得られた。

さらに、自然対流型キャプセルによる燃料異常過渡試験を模擬した数値解析を ACE-3D により行い、燃料試料細径化、 γ 発熱、仕切り管及び加圧水圧力の影響並びに発熱部表面温度の変化について調べた。その結果、次のことがわかった。

- ・燃料試料の細径化による影響は、発熱体（燃料ピンやヒーターピン）表面温度がわずかに上昇する程度である。
- ・ γ 発熱が発熱体表面温度に与える影響は、発熱体自身の発熱が与える影響に比べてわずかである。
- ・仕切り管によって自然対流が促進され、仕切り管の管径によってボイド率が変化する。
- ・BWR 条件（加圧水圧力 7.3 MPa）だけでなく、PWR 条件（加圧水圧力 15 MPa）でも、ACE-3D を適用できる。
- ・発熱部表面温度は 200, 400, 600 W/cm の各線出力で飽和温度（圧力 7.3 MPa）を超え、BWR の通常出力時及び出力過渡時における被覆管表面温度条件を達成できる。

今後は、ACE-3D の強制対流型キャプセルへの適用性について検討を行う。

謝 辞

原子力機構照射試験炉センターの石原正博副センター長には、本報告書をまとめるにあたり御助言を頂きました。ここに明記し、謝意を表します。

参考文献

- (1) 大貫 晃, 加茂英樹, 秋本 肇: 「多次元二流体モデルコード ACE-3D の改良と受動的余熱除去系水プール内熱流動解析への適用」, JAERI-Data/Code 99-038, (1999).

Table 3.1 BWR 出力較正試験用キャプセルモデルの解析条件

項目	数値	備考
冷却水流量 (m^3/h)	1.9	
外筒表面熱伝達率 ($\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$)	2.33	
冷却水温度 (°C)	計算値	冷却水入口温度及び熱伝導率から算出。
加圧水压力 (MPa)	7.33	BWR 条件。
加圧水流量 (cm^3/s)	0.9	
加圧水流入温度 (°C)	40	
ヒーターピン線出力 (W/cm)	200, 400, 600	
γ 発熱率 (W/g)	2.2 (最大値)	Table 3.3 の値から最小二乗法により算出。
液相粘性係数	7	予備計算から推定。

Table 3.2 キャプセル内構造物の物性値

温度 (°C)	Ni (密度 8.9 g/cm ³)		MgO (密度 3.9 g/cm ³)	
	熱伝導率 (W/(m·K))	熱容量 (J/(kg·K))	熱伝導率 (W/(m·K))	熱容量 (J/(kg·K))
300	90.5	439.06	60.5	921.98
350	—	—	50.7	988.85
400	80.1	490.52	43.1	1055.72
500	—	—	26.6	1126.18
600	65.5	590.19	9.93	1171.58
700	65.3	517.61	—	—
800	—	—	—	—
1,000	71.8	556.11	—	—

Table 3.3 キャプセル内の γ 発熱率

高さ方向位置 (mm)	γ 発熱率 (W/g)	
	標準値 (最大 1 W/g)	増幅値 (最大 2.2 W/g)
400	0.26	0.57
375	0.30	0.66
350	0.35	0.77
325	0.40	0.88
300	0.46	1.01
275	0.51	1.12
250	0.56	1.23
225	0.62	1.36
200	0.67	1.47
175	0.73	1.61
150	0.78	1.72
125	0.83	1.83
100	0.87	1.91
75	0.91	2.00
50	0.94	2.07
25	0.96	2.11
0	0.98	2.16
-25	0.99	2.18
-50	1.00	2.20
*-75	1.00	2.20
-100	1.00	2.20
-125	0.98	2.16
-150	0.96	2.11
-175	0.93	2.05
-200	0.90	1.98
-225	0.86	1.89
-250	0.82	1.80
-275	0.77	1.69
-300	0.71	1.56
-325	0.65	1.43
-350	0.58	1.28
-375	0.50	1.10
-400	0.43	0.95

* : 燃料ピン中心位置。

Table 3.4 BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体従来径）モデルの解析ケース

ケース No.	キャップセル	発熱部線出力 (W/cm)	発熱体直径 (mm)	γ 発熱	仕切り管	加圧水圧力 (MPa)
1	BWR 出力較正試験用 (発熱体従来径)	200	12.26	有	無	7.33
2		400				
3		600				

Table 3.5 BWR 出力較正試験（発熱体従来径）における温度の実測値と解析値の比較

項目	温 度 (°C)				
	ヒーターピン線出力				
	測定点	200 W/cm	400 W/cm	600 W/cm	
ヒーターピン表面温度	HTC1	実測値	296.0	300.0	303.0
		解析値	283.6	300.2	303.6
	HTC2	実測値	286.0	292.0	292.0
		解析値	291.3	300.3	304.1
	HTC3	実測値	292.0	300.0	302.0
		解析値	291.7	300.1	303.4
加圧水温 度	TC1	実測値	142.0	202.0	231.0
		解析値	156.4	202.5	259.6
	TC2	実測値	142.0	199.0	238.0
		解析値	156.2	219.5	233.8
	TC3	実測値	127.0	179.0	218.0
		解析値	137.1	189.0	198.9
	TC4	解析値	126.4	188.1	241.1
	TC5	解析値	126.7	187.8	225.4

Table 3.6 燃料異常過渡試験用キャップセルモデルの解析条件

項目	数値	備考
冷却水流量 (m^3/h)	1.9	
外筒表面熱伝達率 ($\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$)	2.33	
冷却水温度 (°C)	計算値	冷却水入口温度及び熱伝導率から算出。
加圧水圧力 (MPa)	7.33, 15	7.33 MPa : BWR 条件、15 MPa : PWR 条件。
加圧水流量 (cm^3/s)	1	
加圧水流入温度 (°C)	40	
燃料ピン線出力 (W/cm)	200, 400, 600	
γ 発熱率 (W/g)	2.2 (最大値)	Table 3.3 の値から最小二乗法により算出。
液相粘性係数	7	予備計算から推定。

Table 3.7 BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）モデルの解析ケース

ケース No.	キャップセル	発熱部線出力 (W/cm)	発熱体直径 (mm)	γ 発熱	仕切り管	加圧水圧力 (MPa)		
1	BWR 出力較正試験用 (発熱体細径) -1	200	9.5	有	無	7.33		
2		400						
3		600						
4		200		無				
5		400						
6		600						

Table 3.8 燃料異常過渡試験用キャップセルモデルの解析ケース

ケース No.	キャップセル	発熱部線出力 (W/cm)	発熱体直径 (mm)	γ 発熱	仕切り管	加圧水圧力 (MPa)
1	燃料異常過渡試験用-1	200	9.5	有	仕切り管・ 外筒径拡大	7.33
2		400				
3		600				
4	燃料異常過渡試験用-2	600		有		
5	燃料異常過渡試験用-3	600		有	15	

Table 3.9 BWR 出力較正試験（発熱体細径）及び燃料異常過渡試験を模擬した数値解析によって得られた各測定点における温度（定常値）

項 目		温 度 (°C)		
		発熱部線出力		
測定点	解析ケース（キャプセル）	200 W/cm	400 W/cm	600 W/cm
HTC1	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-1	292.8	301.7	304.9
	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-2	292.8	301.6	304.7
	燃料異常過渡試験用-1	296.4	301.8	304.7
	燃料異常過渡試験用-2	—	—	302.4
	燃料異常過渡試験用-3	—	—	354.3
HTC2	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-1	295.2	301.8	304.8
	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-2	292.8	301.6	304.5
	燃料異常過渡試験用-1	295.5	301.9	304.8
	燃料異常過渡試験用-2	—	—	302.8
	燃料異常過渡試験用-3	—	—	354.6
HTC3	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-1	295.7	301.8	304.6
	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-2	294.0	301.6	304.4
	燃料異常過渡試験用-1	294.1	301.8	305.1
	燃料異常過渡試験用-2	—	—	302.9
	燃料異常過渡試験用-3	—	—	355.0
TC1	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-1	167.4	225.0	246.9
	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-2	147.1	222.2	196.0
	燃料異常過渡試験用-1	118.4	161.8	204.3
	燃料異常過渡試験用-2	—	—	174.3
	燃料異常過渡試験用-3	—	—	208.1
TC2	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-1	154.9	200.7	230.9
	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-2	151.4	202.5	221.4
	燃料異常過渡試験用-1	100.9	135.4	174.1
	燃料異常過渡試験用-2	—	—	152.8
	燃料異常過渡試験用-3	—	—	173.5
TC3	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-1	130.9	170.0	187.6
	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-2	126.5	160.5	184.0
	燃料異常過渡試験用-1	85.5	117.4	149.9
	燃料異常過渡試験用-2	—	—	130.5
	燃料異常過渡試験用-3	—	—	147.9
TC4	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-1	120.2	228.7	202.1
	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-2	120.4	205.0	239.4
	燃料異常過渡試験用-1	210.3	274.4	288.1
	燃料異常過渡試験用-2	—	—	284.9
	燃料異常過渡試験用-3	—	—	323.2
TC5	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-1	119.1	216.8	213.8
	BWR 出力較正試験用(発熱体細径)-2	115.4	226.5	232.7
	燃料異常過渡試験用-1	167.7	227.2	260.8
	燃料異常過渡試験用-2	—	—	272.1
	燃料異常過渡試験用-3	—	—	298.2

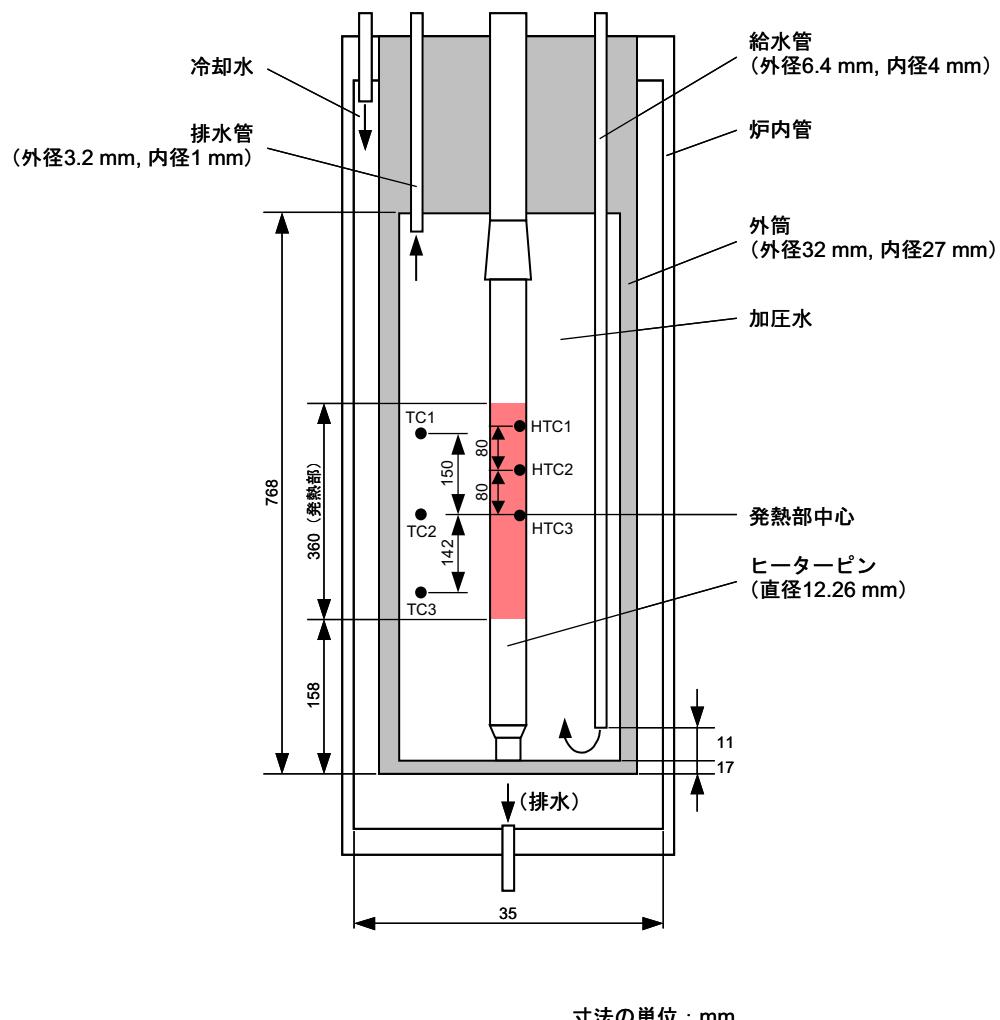


Fig. 3.1 BWR 出力較正試験用キャップセル (発熱体従来径) の概略

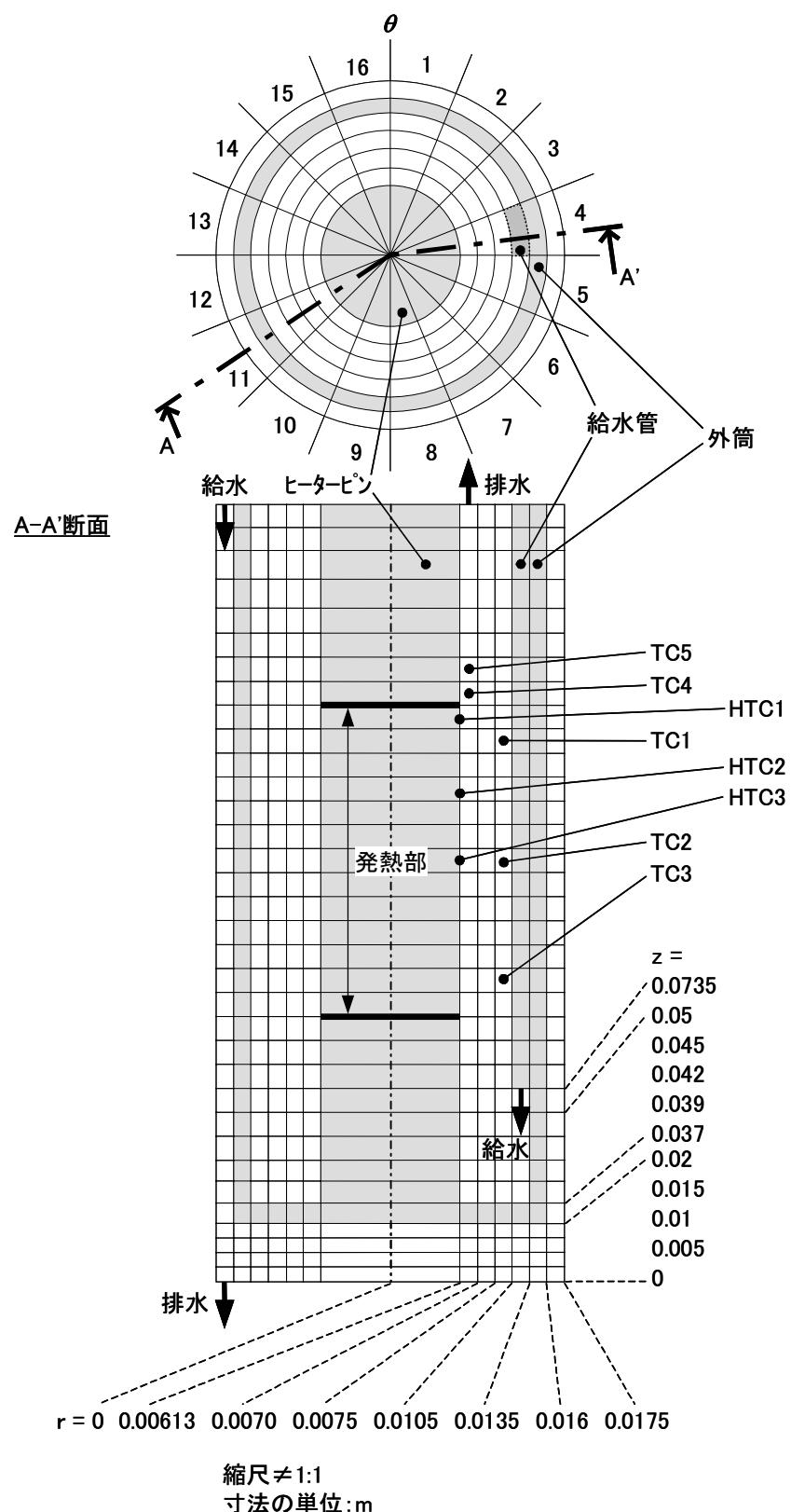


Fig. 3.2 BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体従来径）の解析モデル

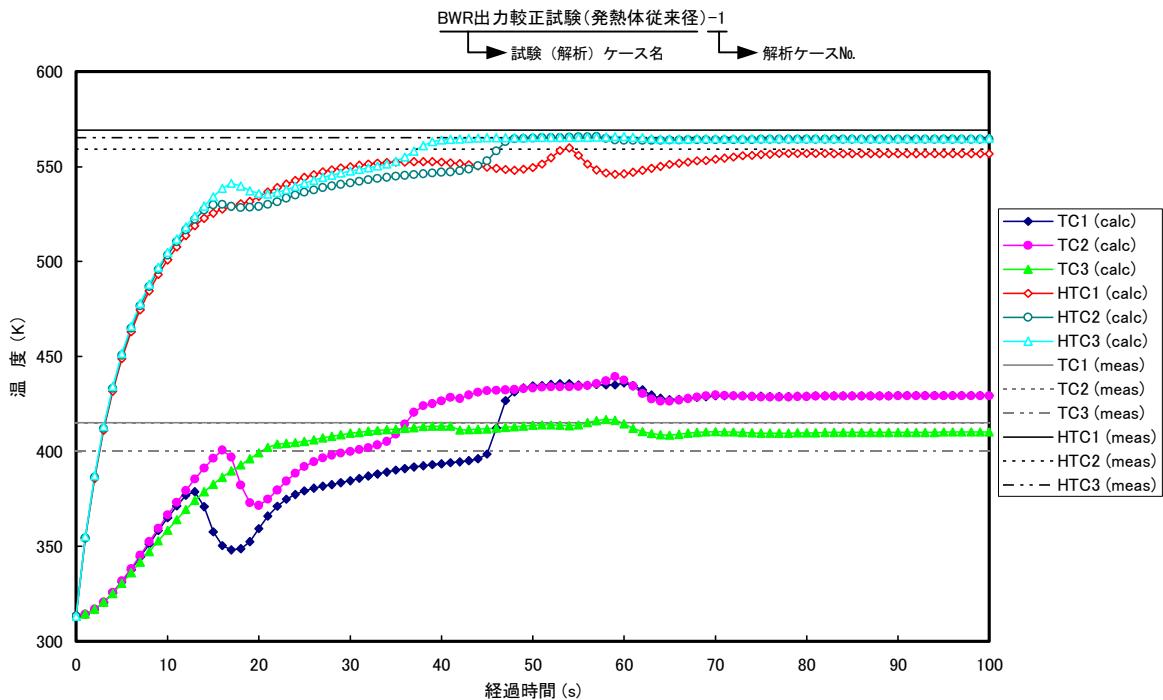


Fig. 3.3 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における温度の経時変化
(発熱部線出力 200 W/cm)

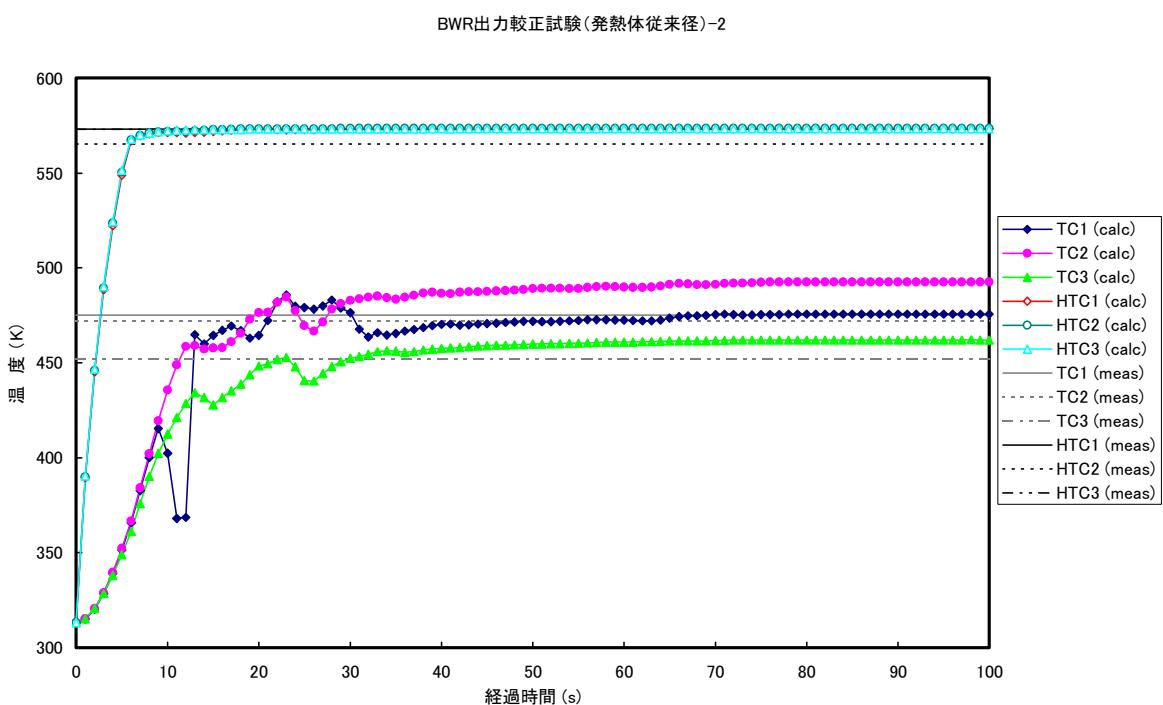


Fig. 3.4 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における温度の経時変化
(発熱部線出力 400 W/cm)

BWR出力較正試験(発熱体従来径)-3

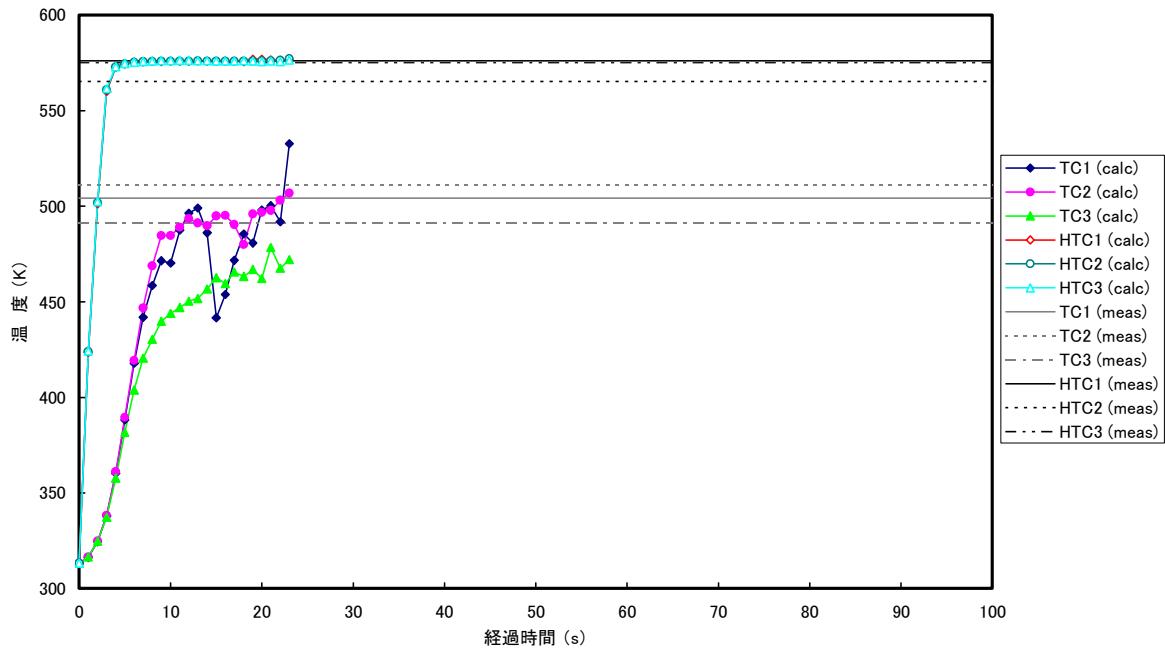


Fig. 3.5 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における温度の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm)

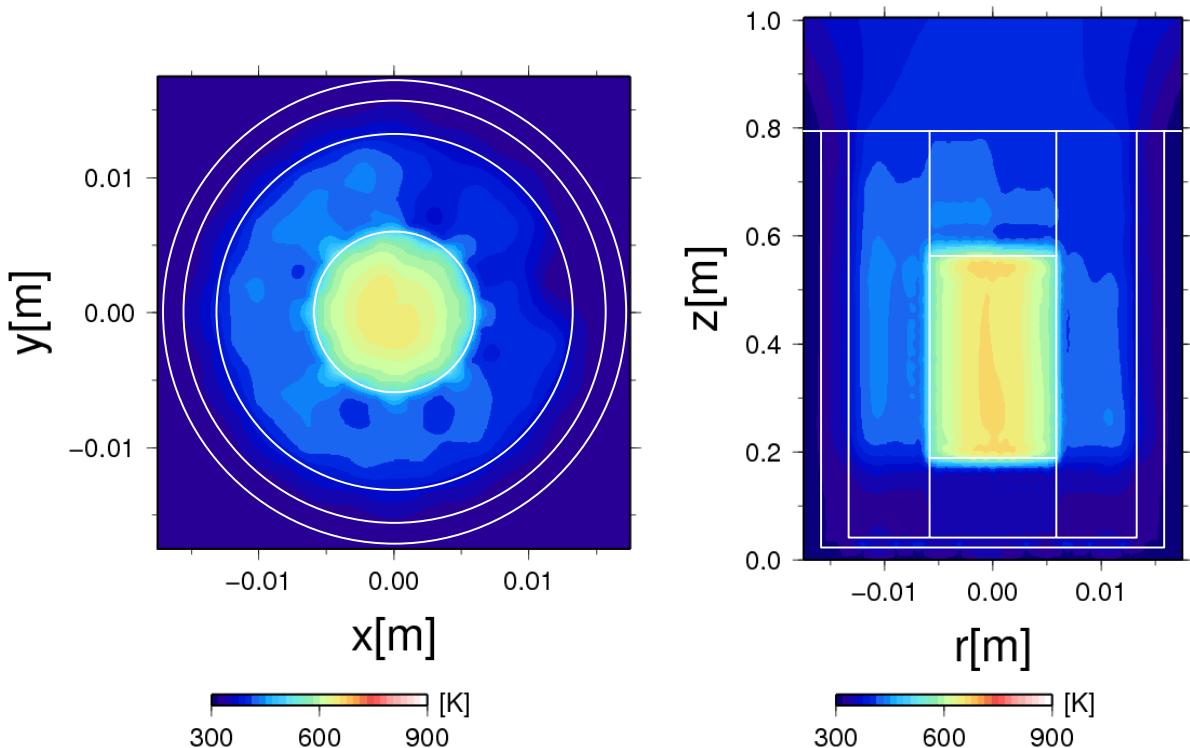


Fig. 3.6 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における温度分布
(発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)

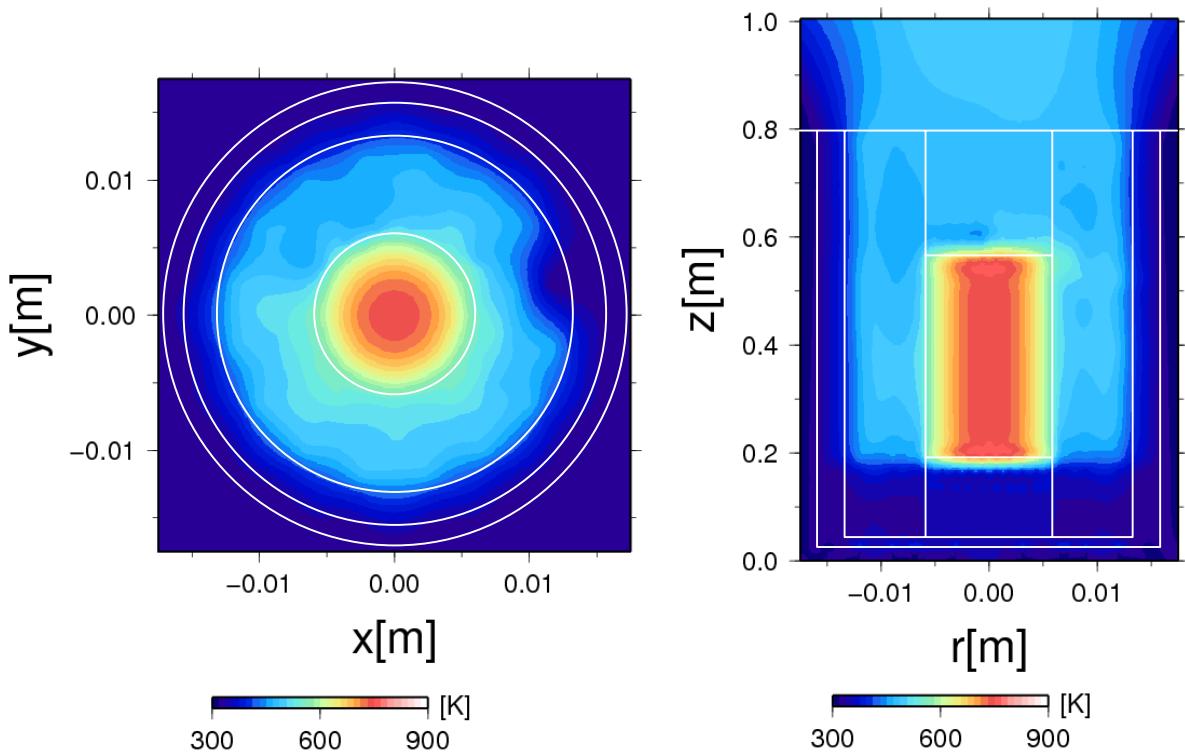


Fig. 3.7 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における温度分布
(発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒)

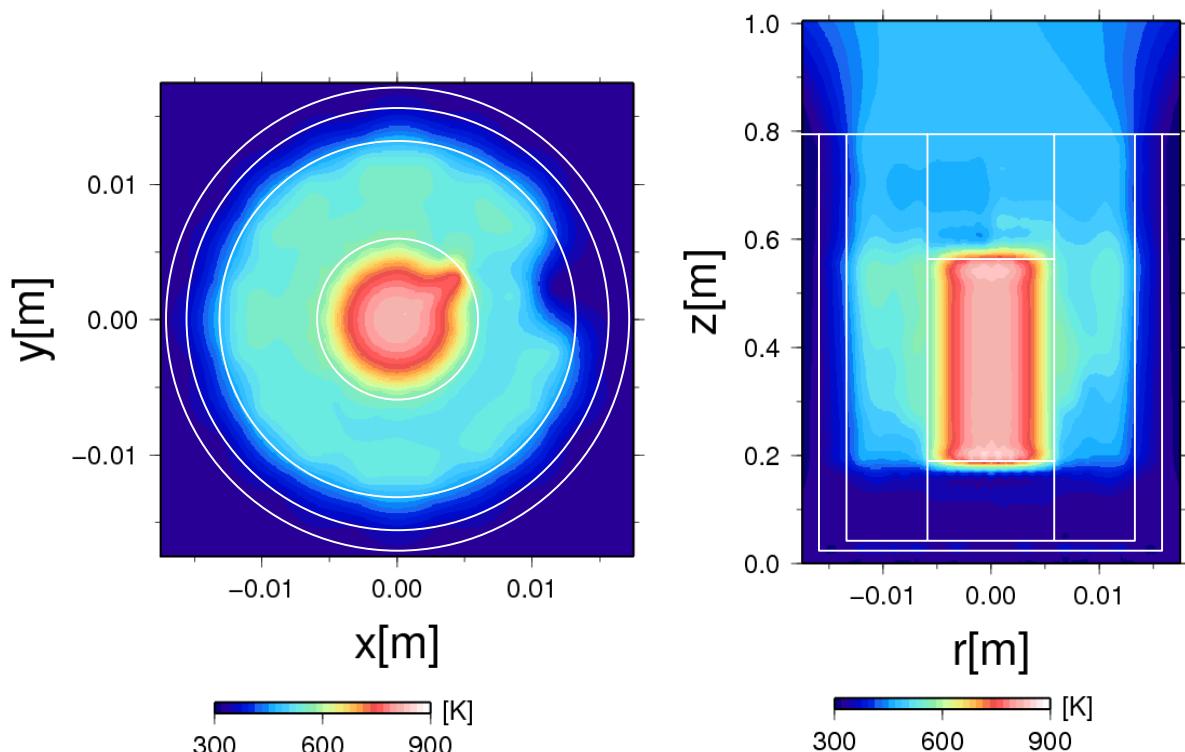


Fig. 3.8 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における温度分布
(発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 23 秒)

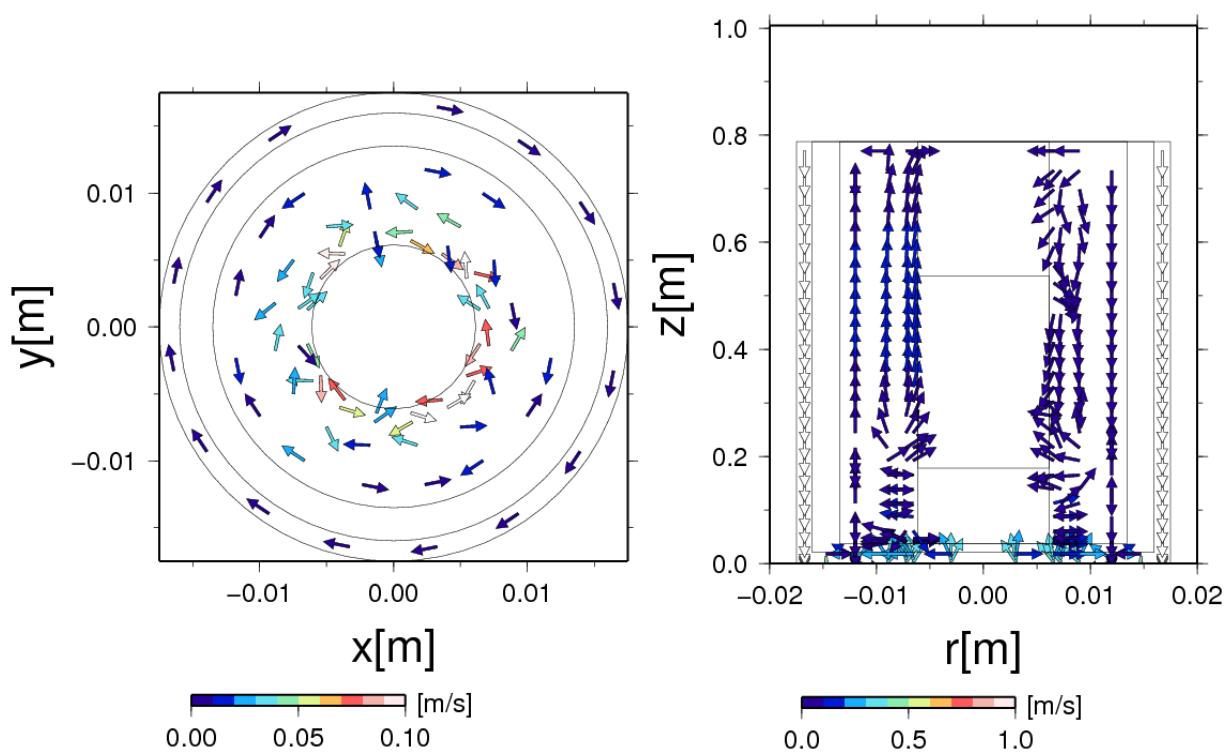


Fig. 3.9 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における流速分布
(発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)

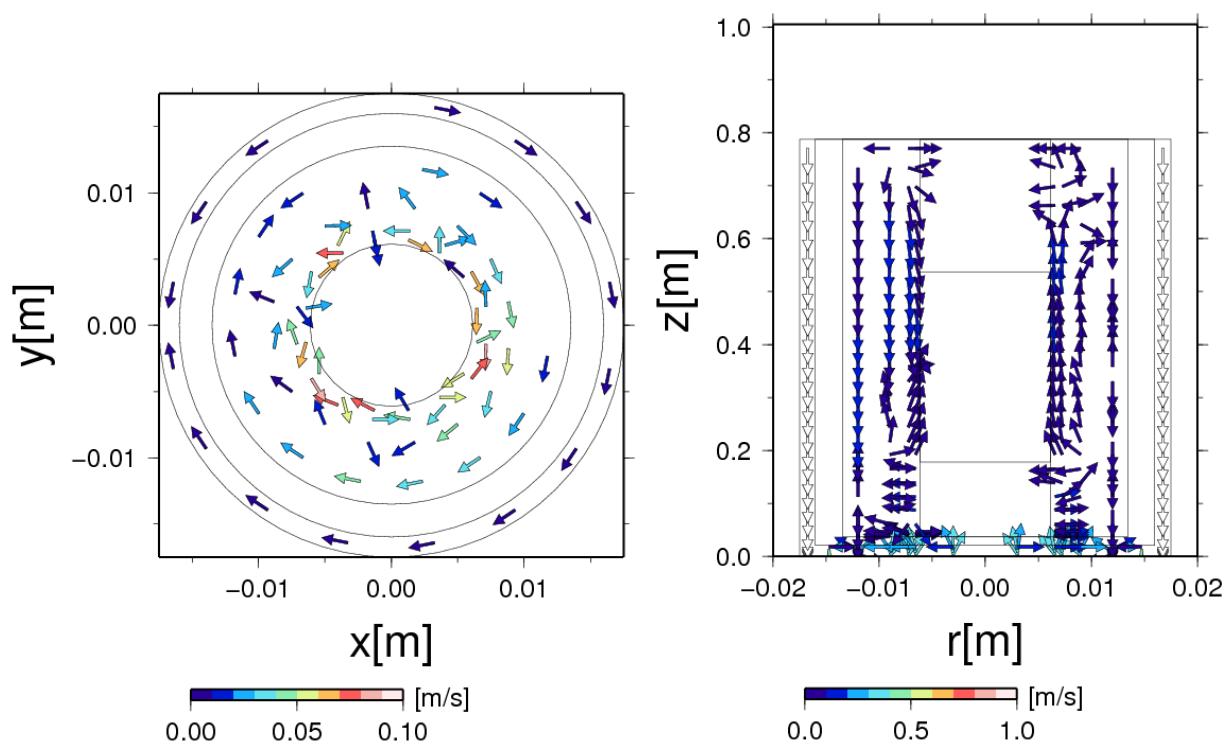


Fig. 3.10 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における流速分布
(発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒)

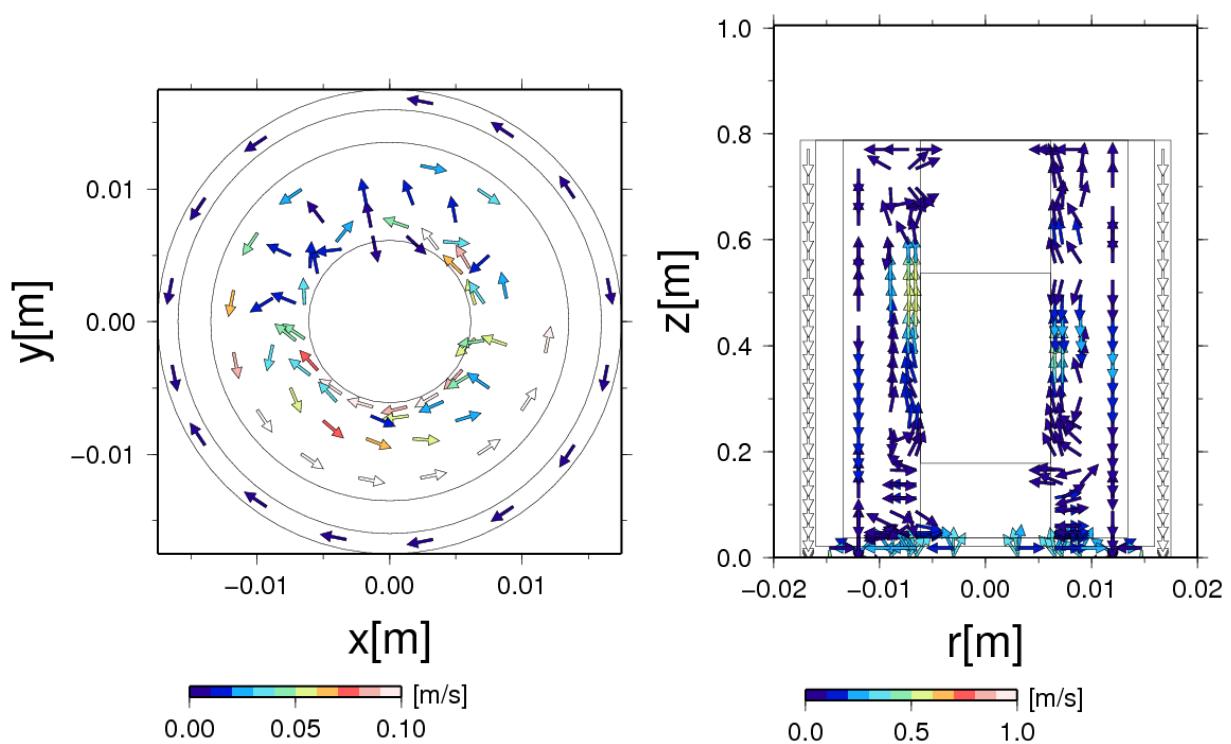


Fig. 3.11 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）における流速分布
(発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 23 秒)

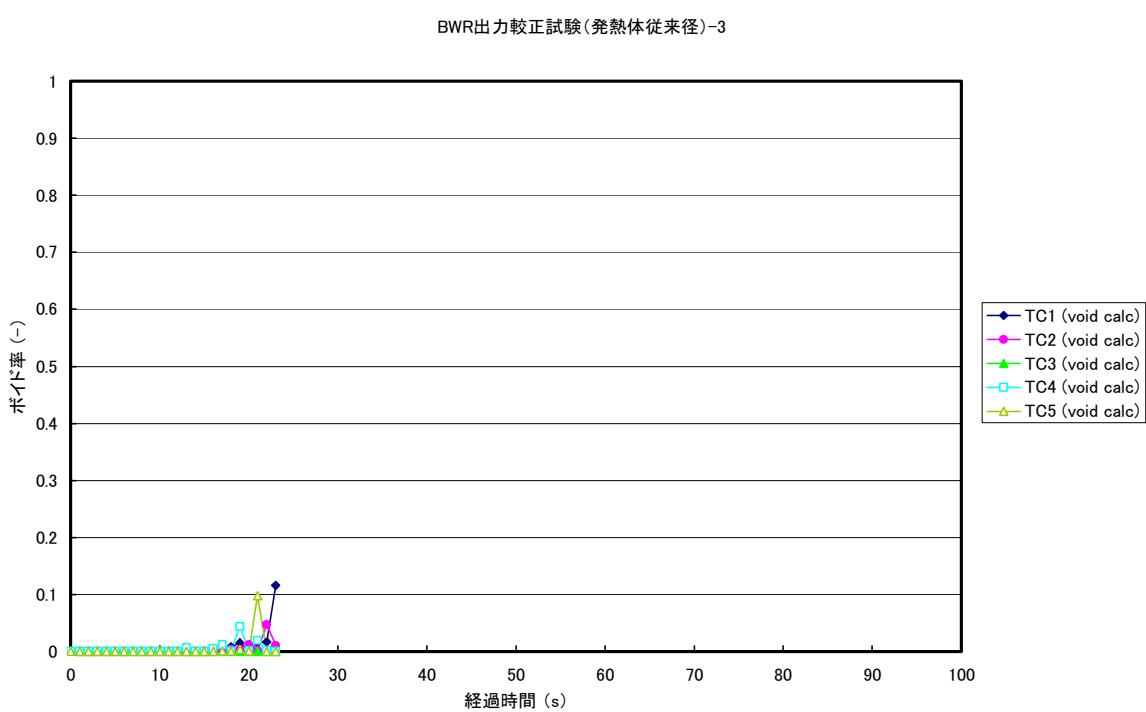


Fig. 3.12 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体従来径）におけるボイド率の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm)

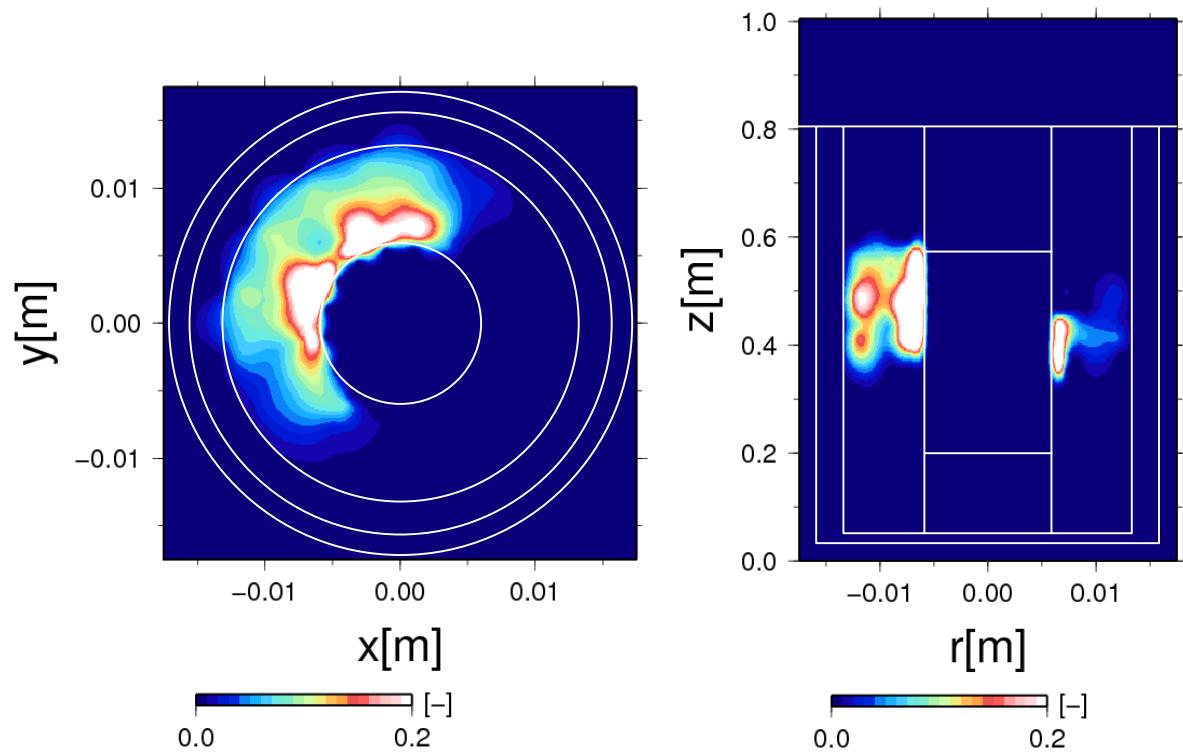


Fig. 3.13 BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体従来径）におけるボイド率分布
(発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 23 秒)

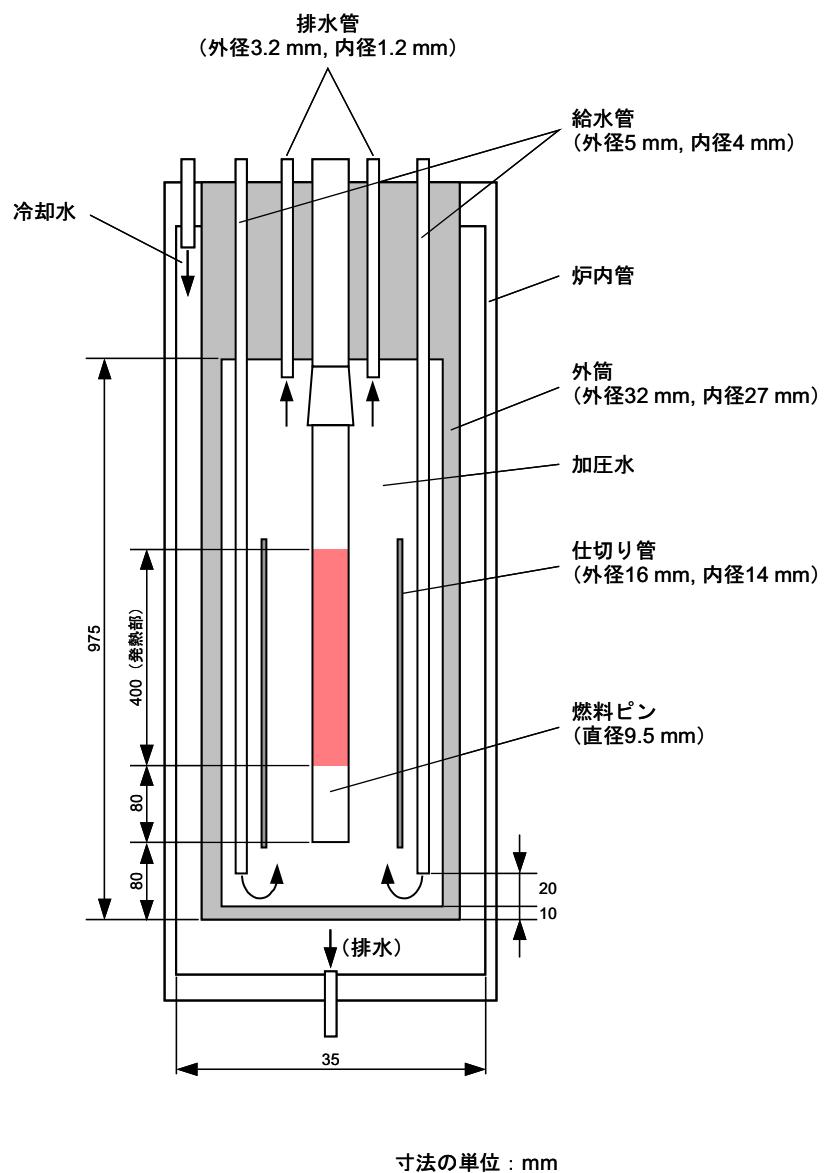


Fig. 3.14 燃料異常過渡試験用キャップセルの概略

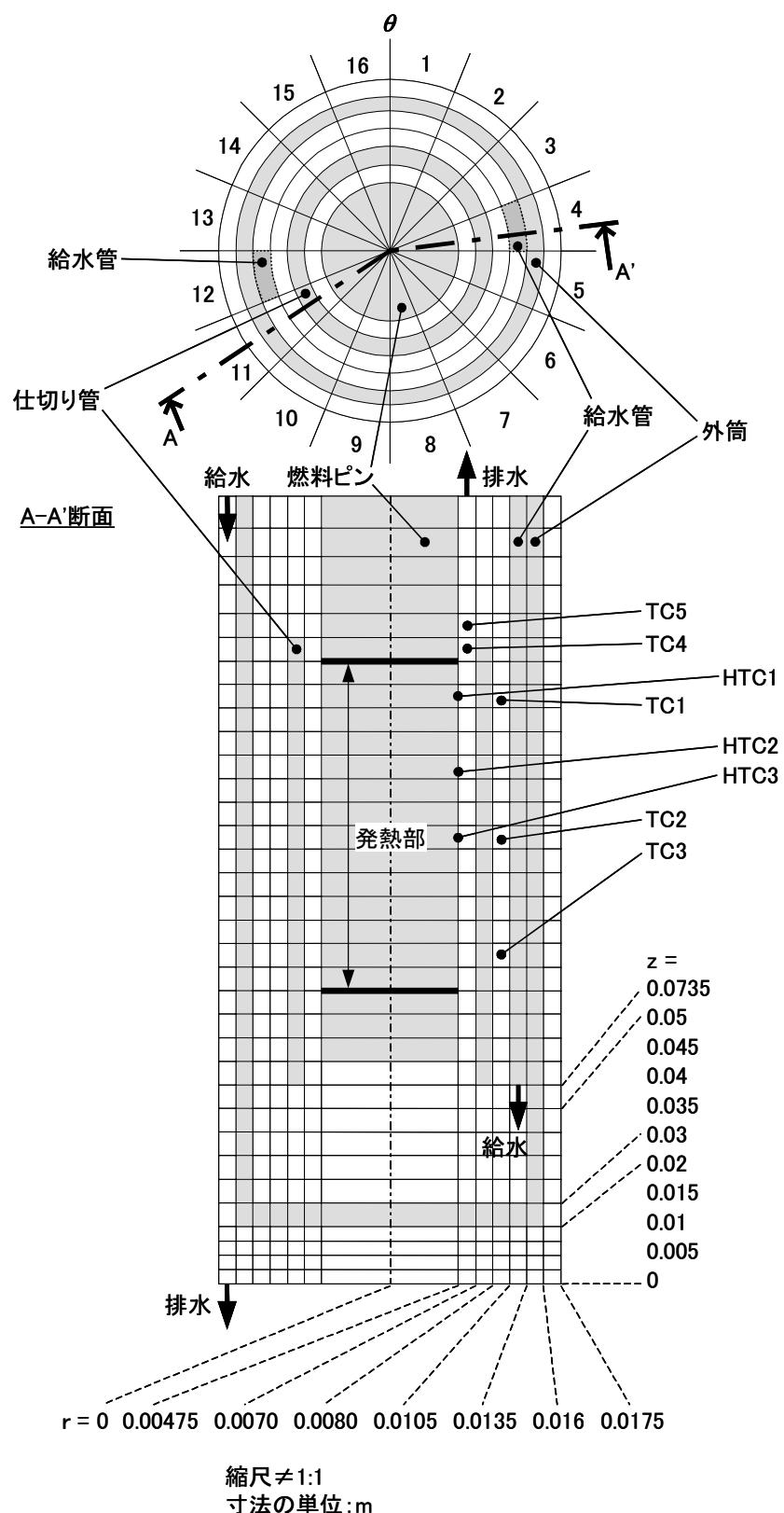


Fig. 3.15 燃料異常過渡試験用キャップセルの解析モデル

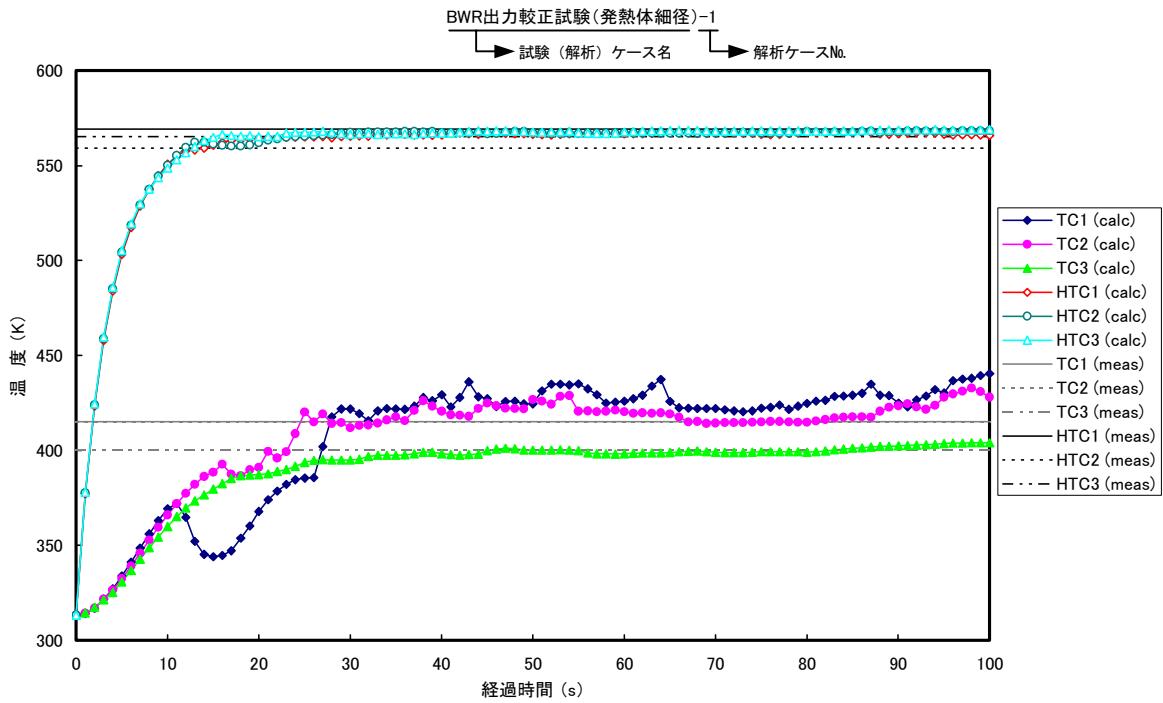


Fig. 3.16 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における温度の経時変化
(発熱部線出力 200 W/cm)

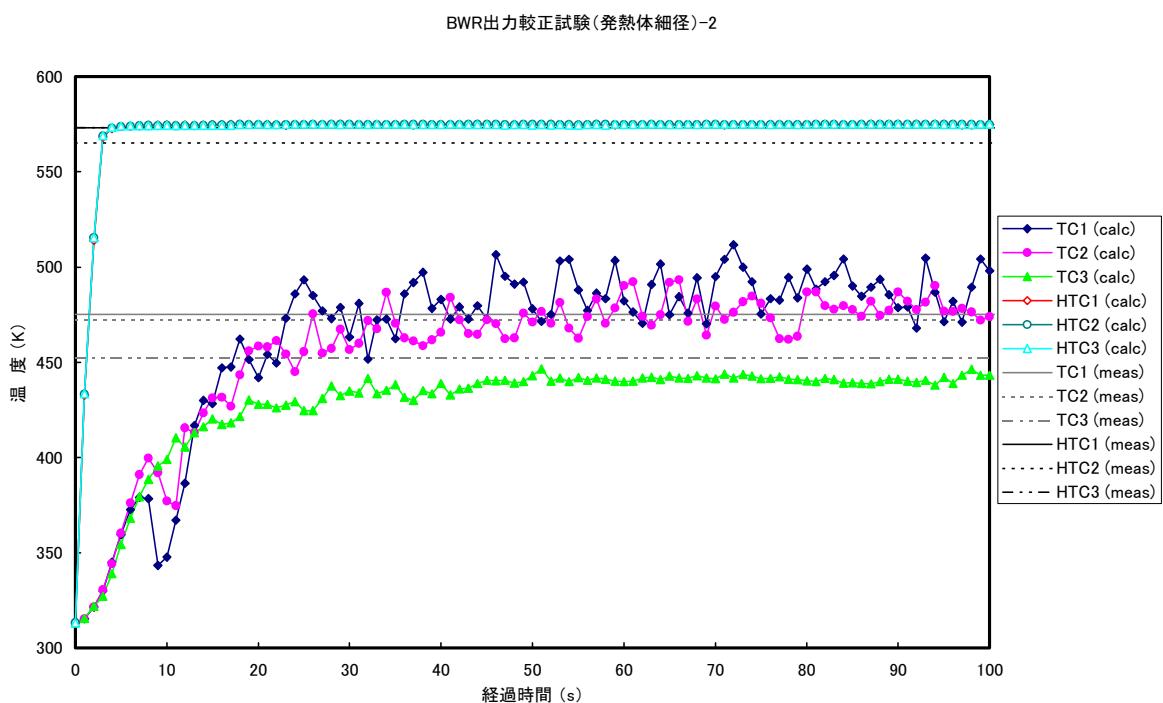


Fig. 3.17 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における温度の経時変化
(発熱部線出力 400 W/cm)

BWR出力較正試験(発熱体細径)-3

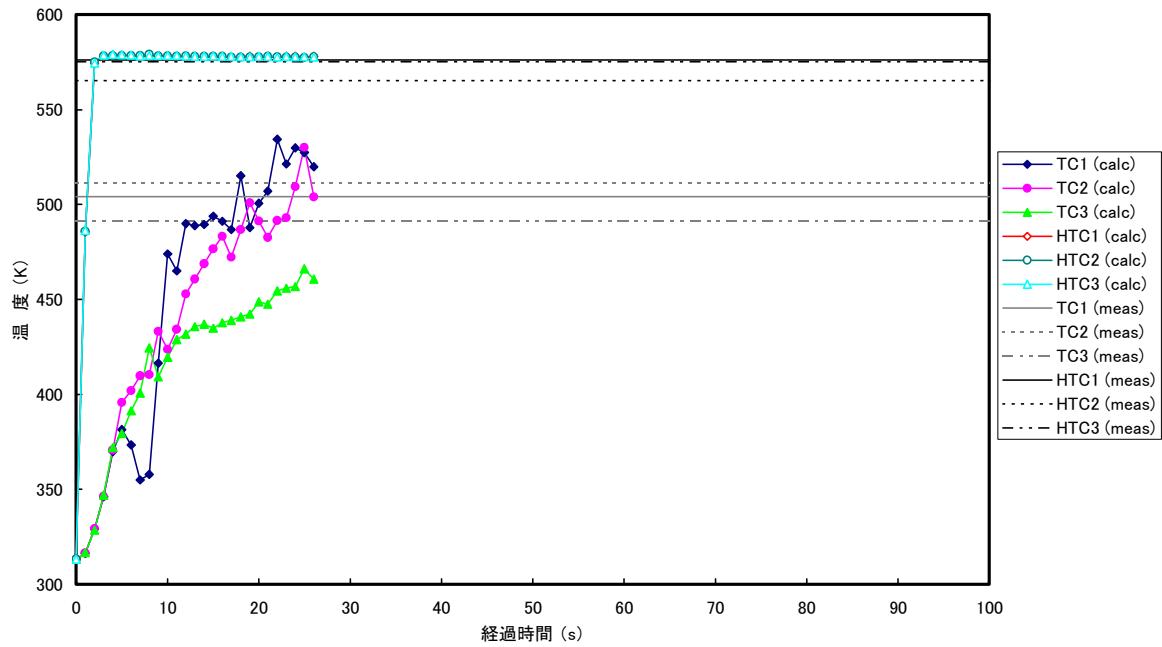


Fig. 3.18 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における温度の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm)

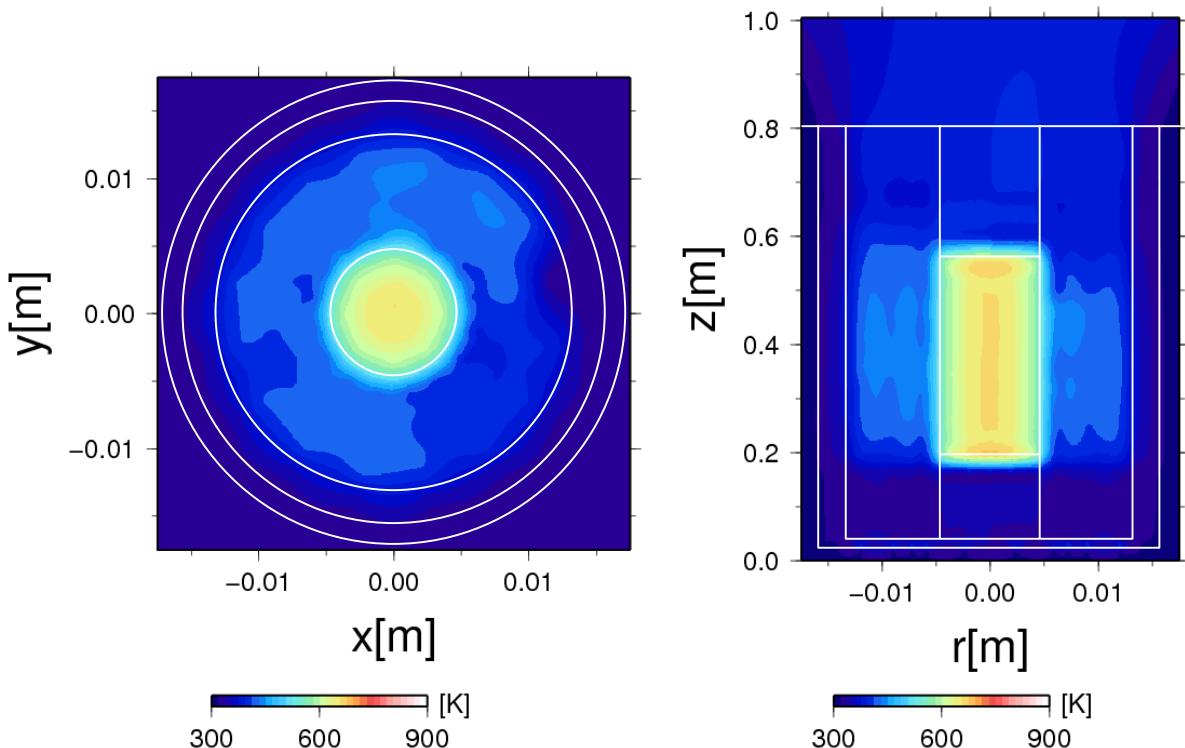


Fig. 3.19 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における温度分布
(発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)

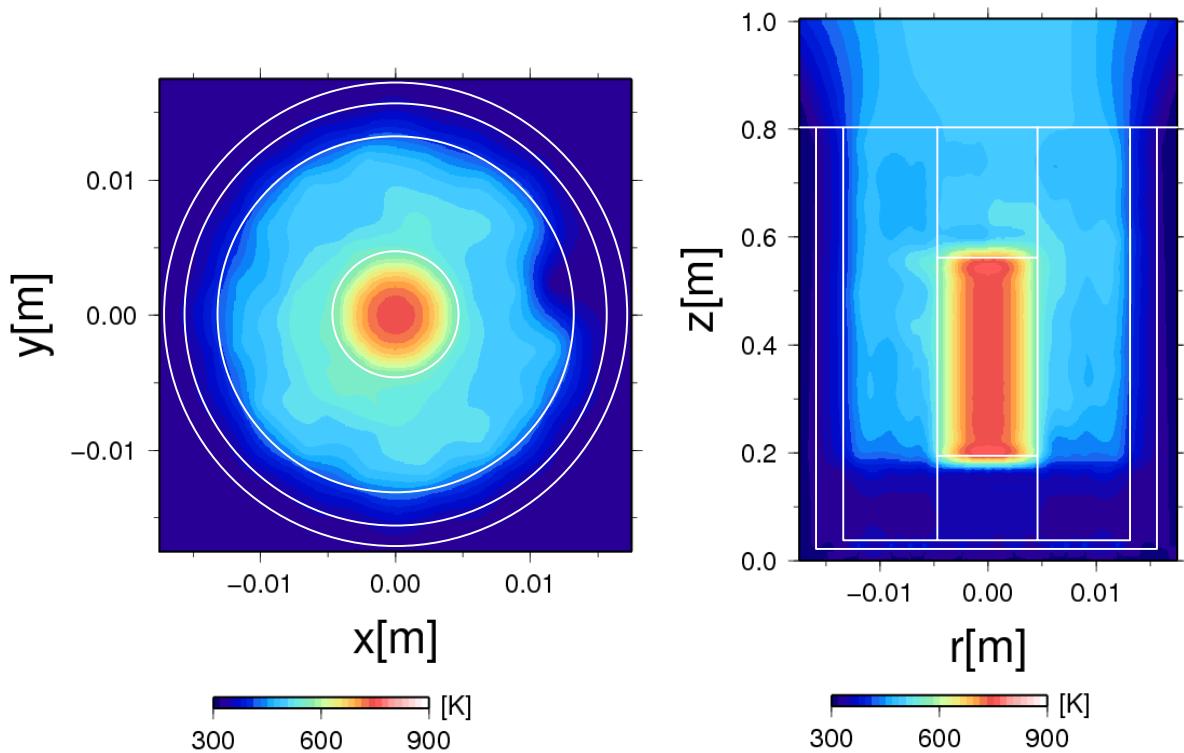


Fig. 3.20 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における温度分布
(発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒)

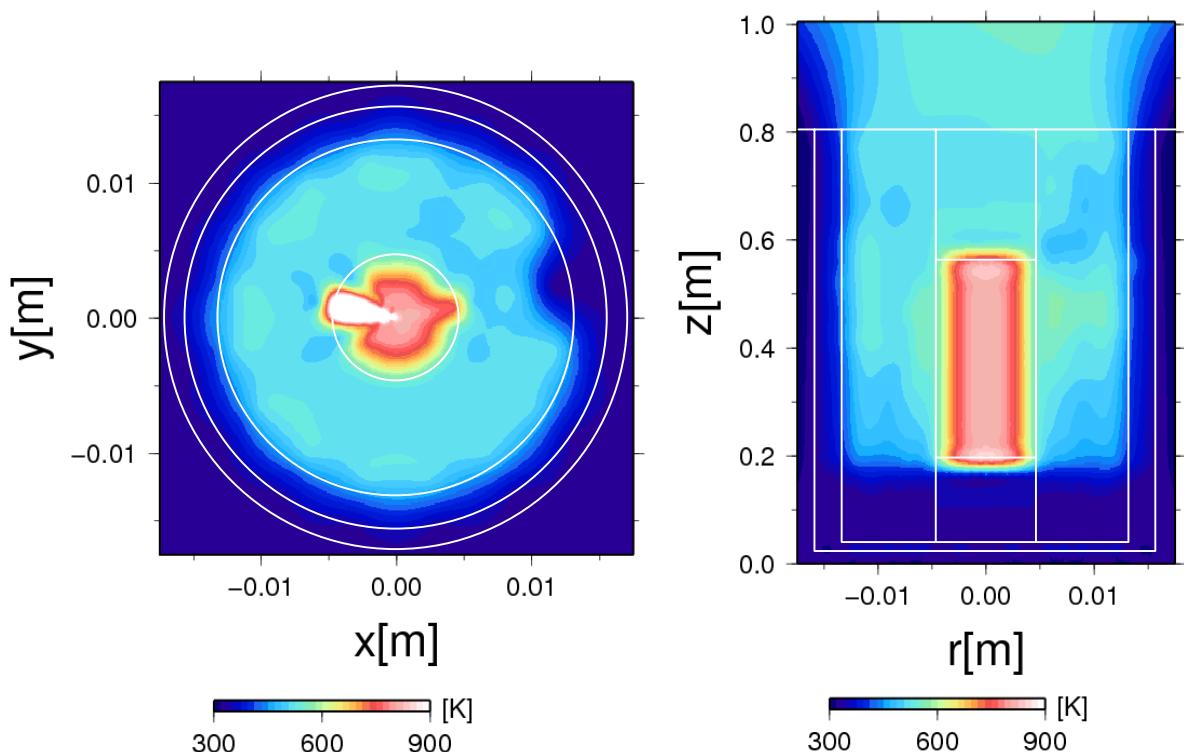


Fig. 3.21 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における温度分布
(発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 26 秒)

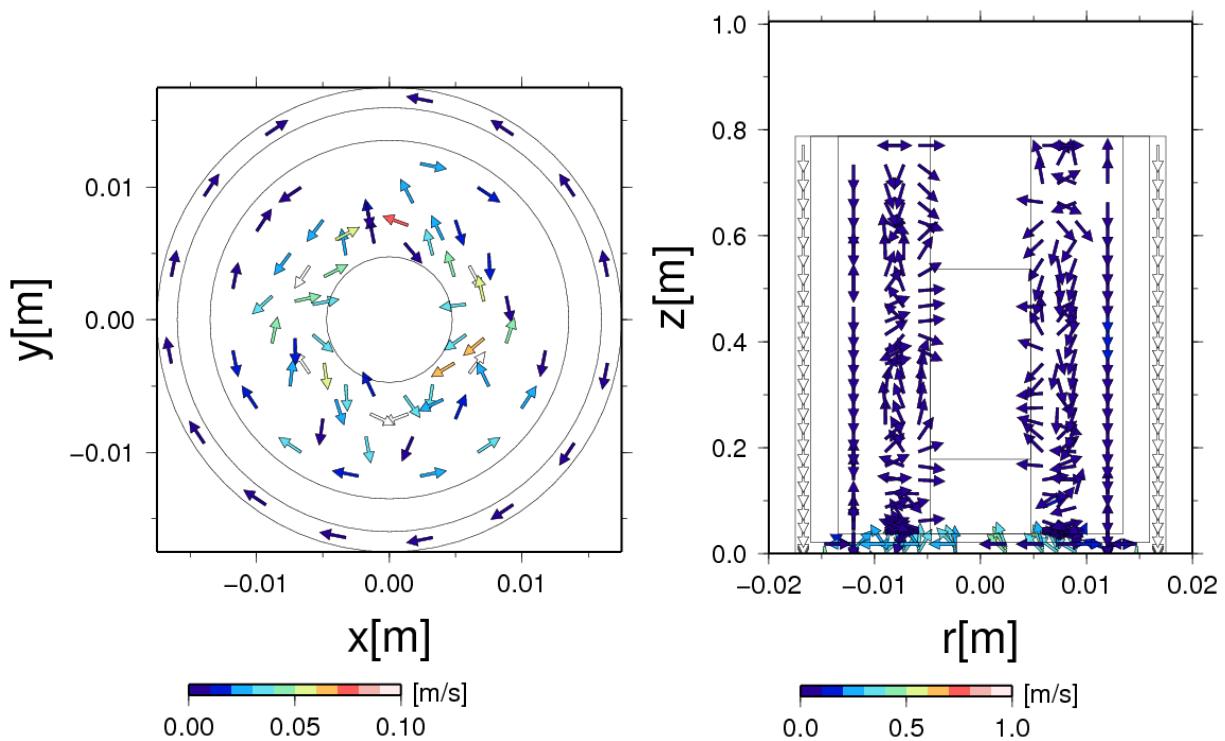


Fig. 3.22 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における流速分布
(発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)

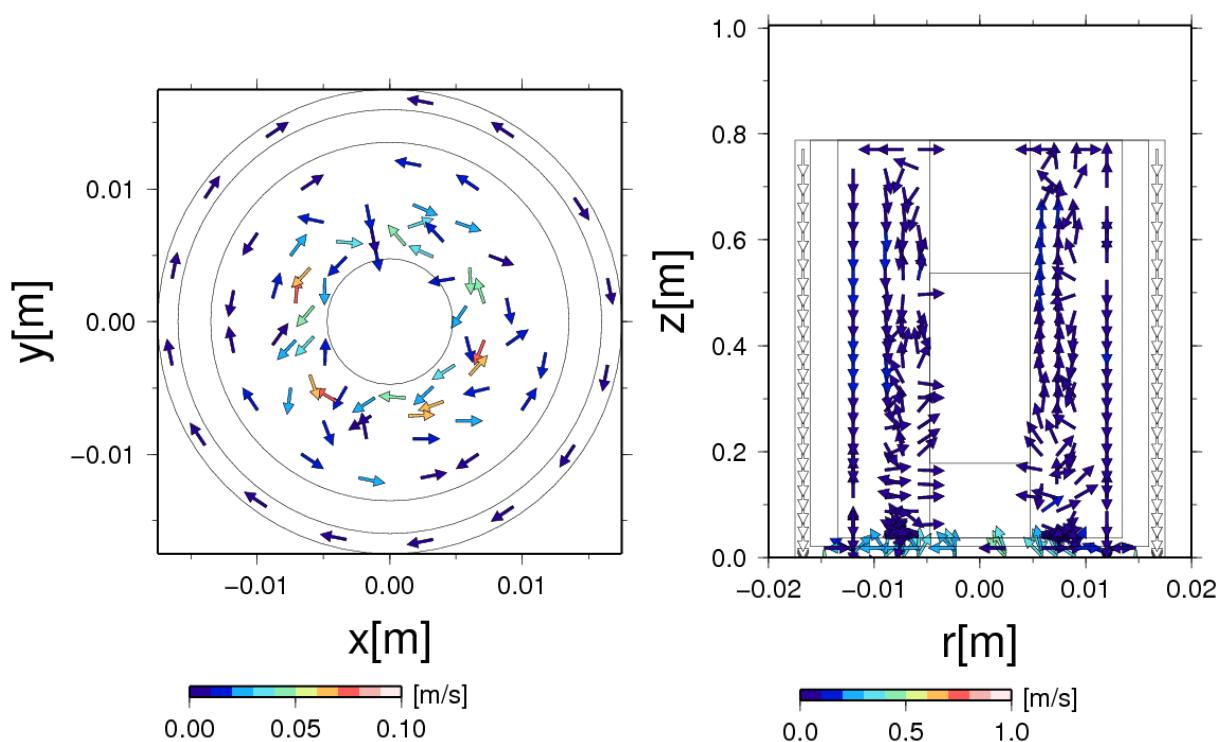


Fig. 3.23 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における流速分布
(発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒)

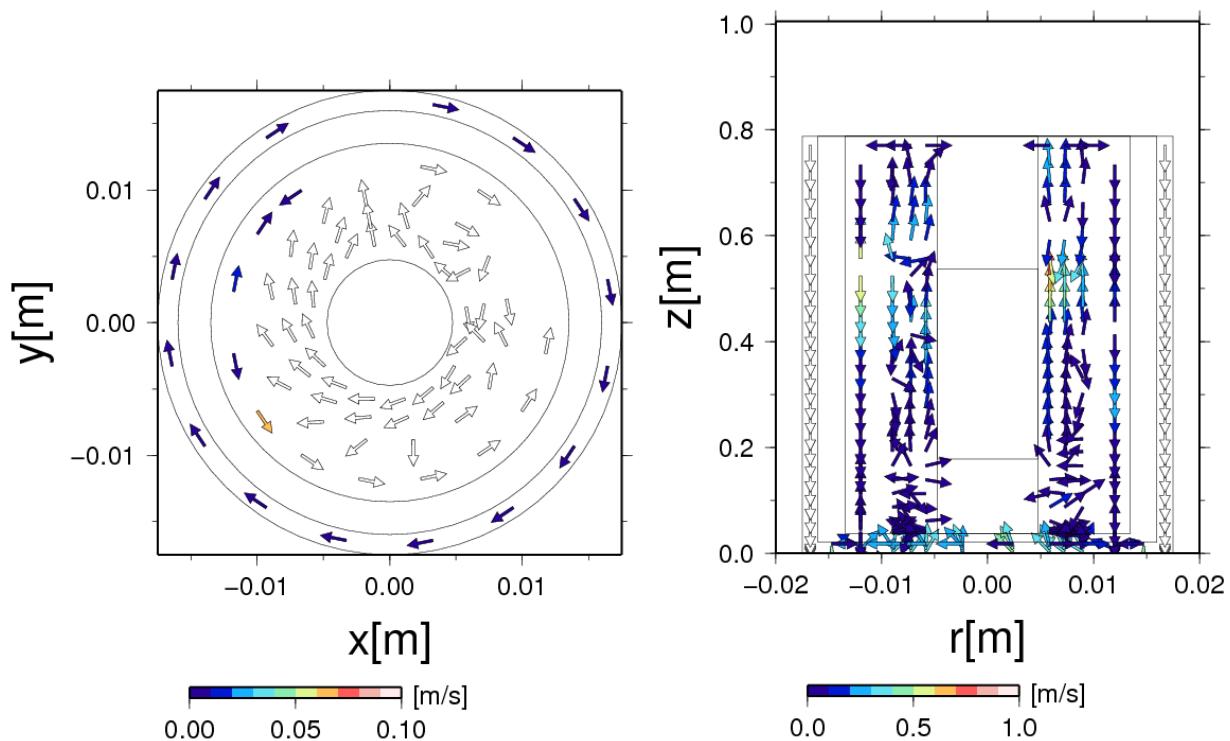


Fig. 3.24 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 における流速分布
(発熱部線出力 600 W/cm 、経過時間 26 秒)

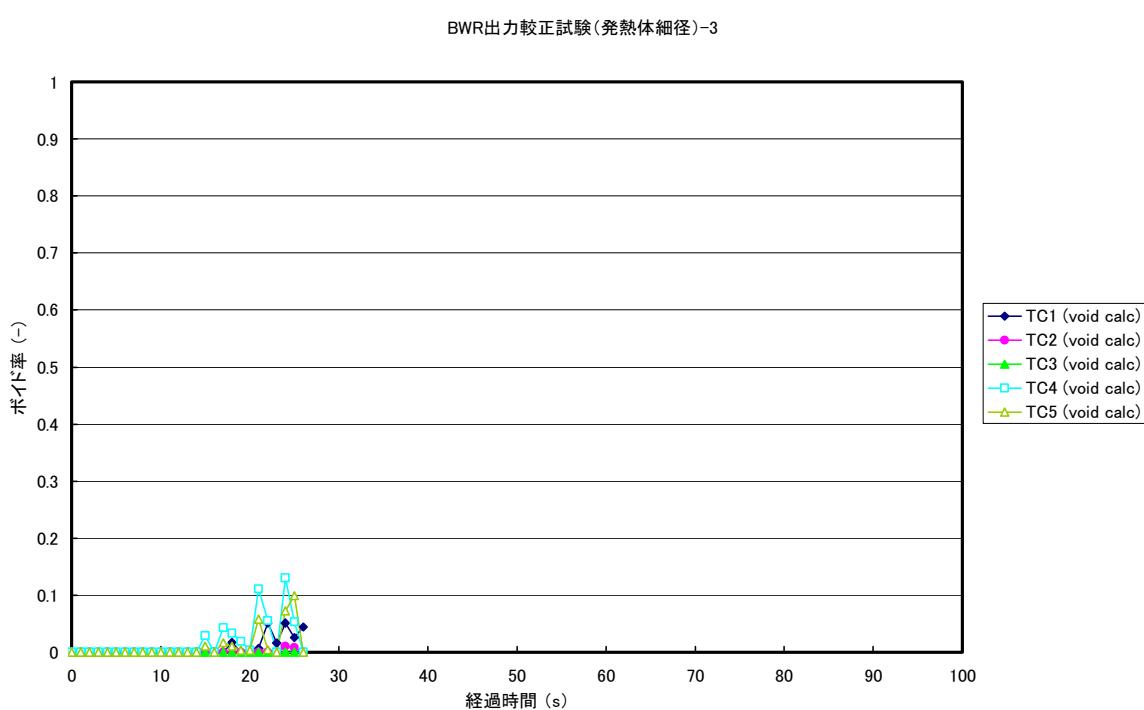


Fig. 3.25 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 におけるボイド率の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm)

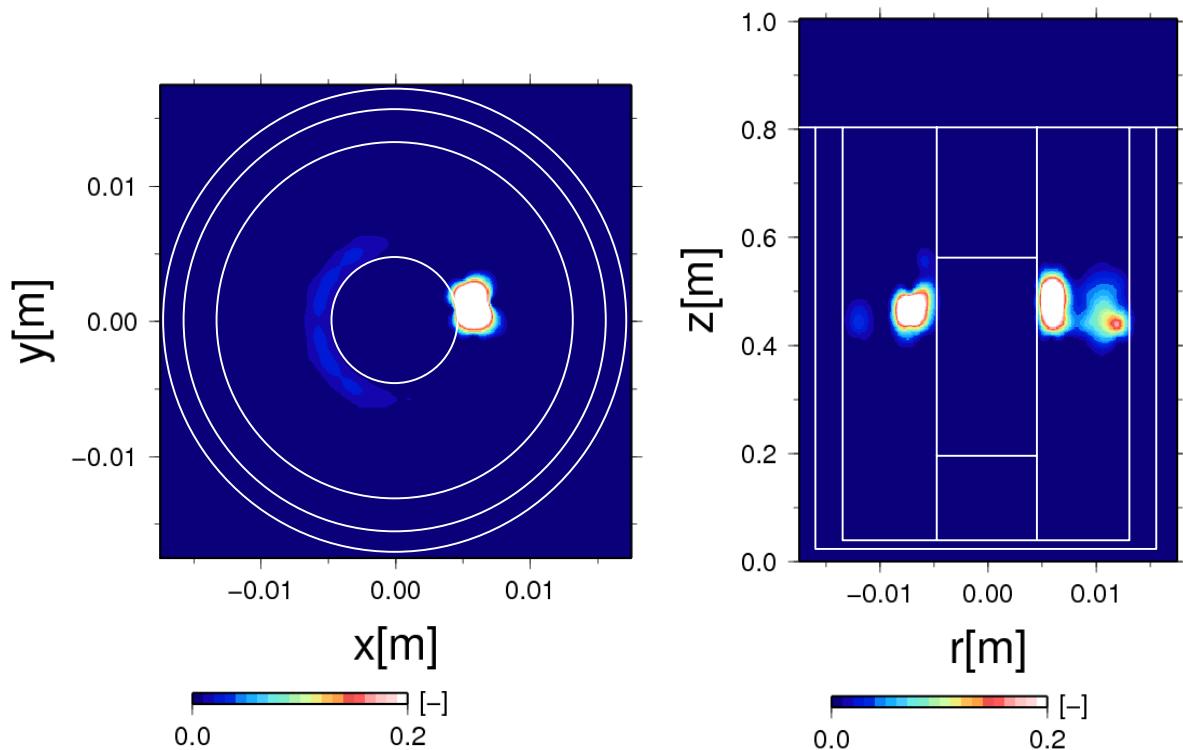


Fig. 3.26 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-1 におけるボイド率分布
(発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 26 秒)

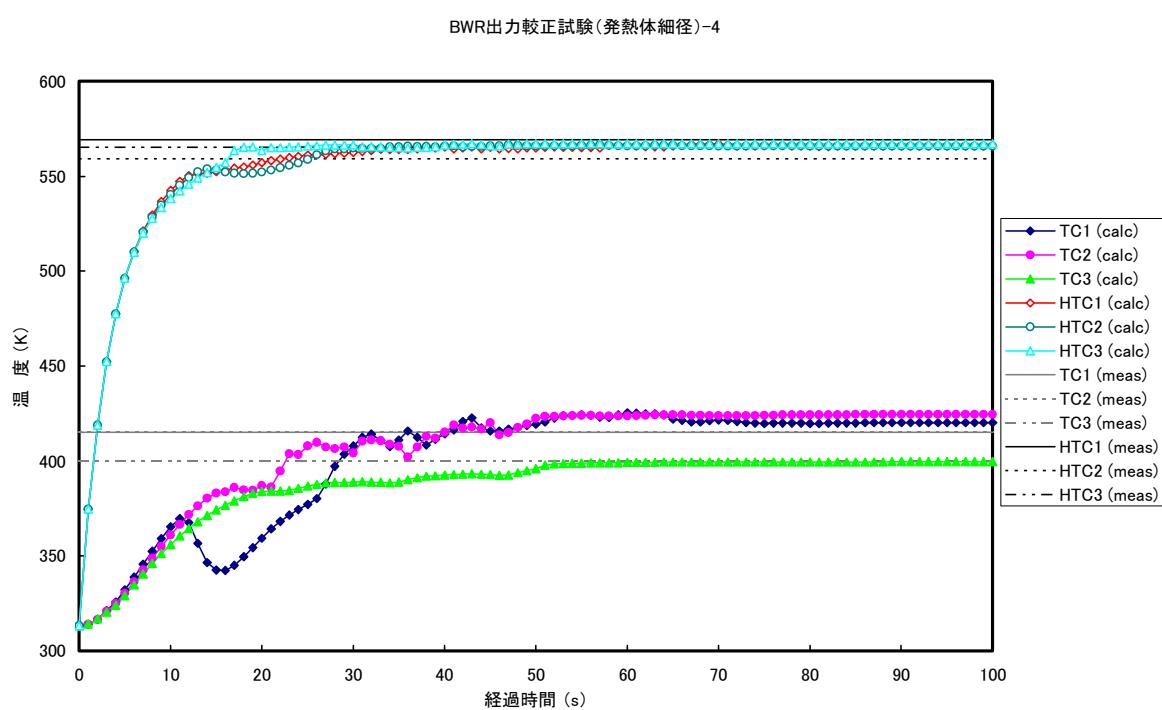


Fig. 3.27 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における温度の経時変化
(発熱部線出力 200 W/cm、 γ 発熱無し)

BWR出力較正試験(発熱体細径)-5

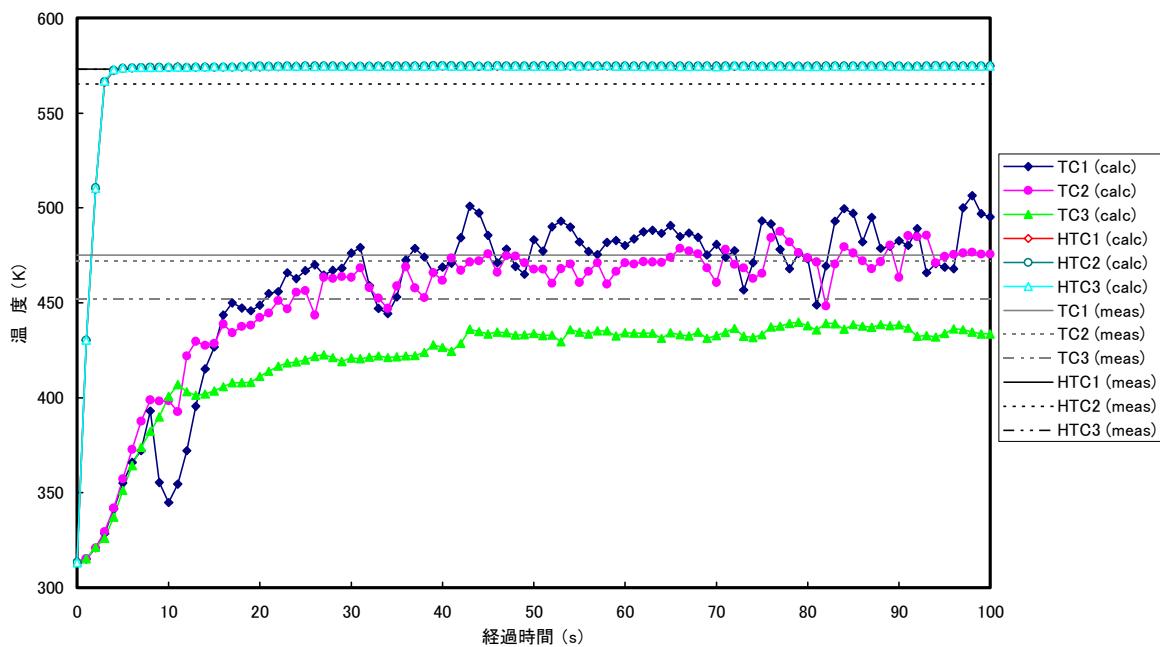


Fig. 3.28 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における温度の経時変化
(発熱部線出力 400 W/cm、 γ 発熱無し)

BWR出力較正試験(発熱体細径)-6

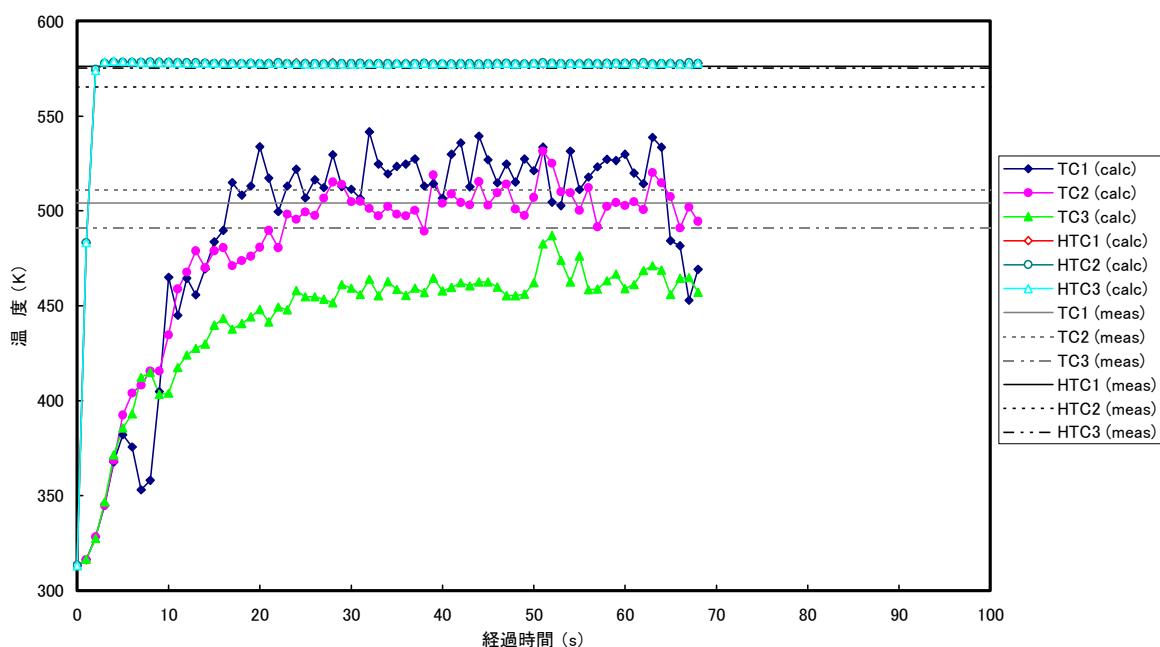


Fig. 3.29 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における温度の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm、 γ 発熱無し)

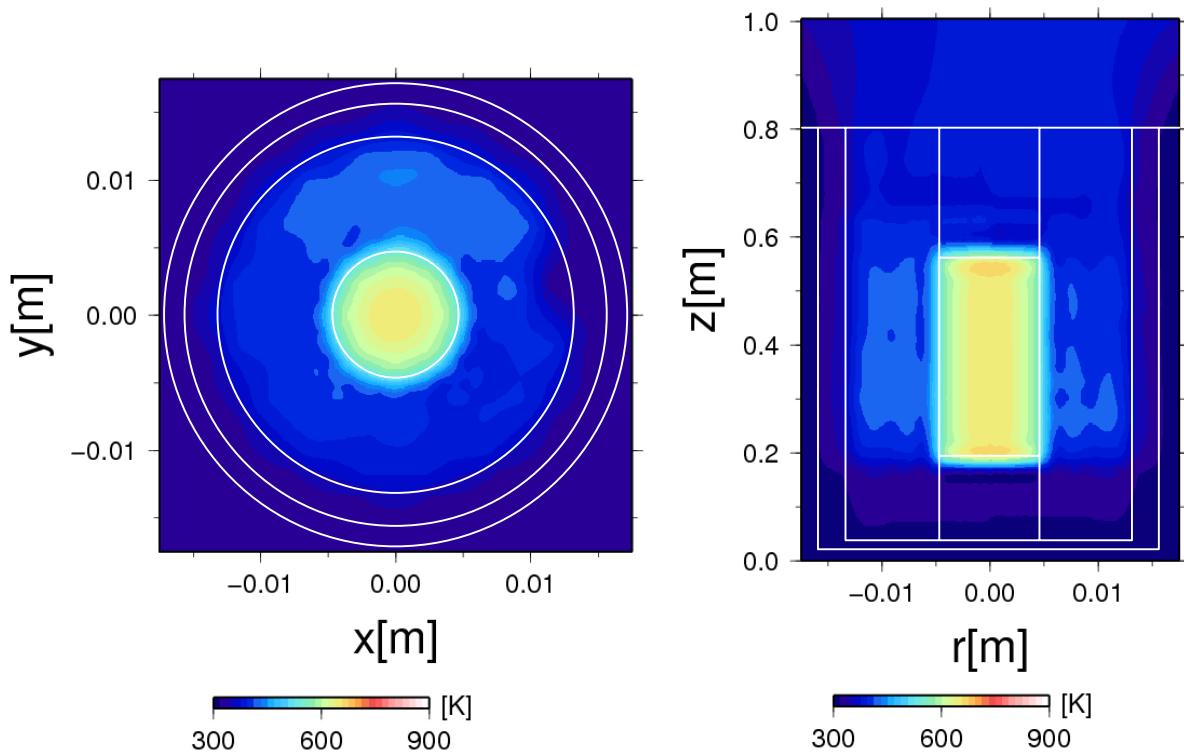


Fig. 3.30 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における温度分布
(発熱部線出力 200 W/cm、 γ 発熱無し、経過時間 100 秒)

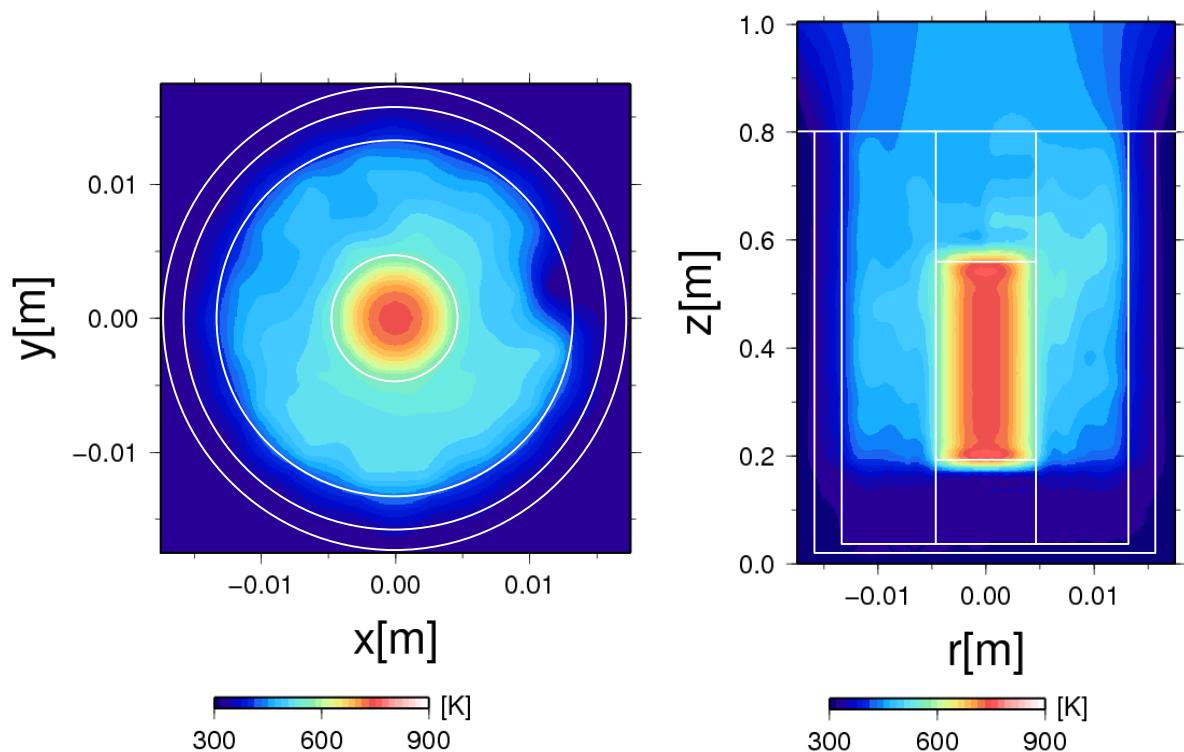


Fig. 3.31 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における温度分布
(発熱部線出力 400 W/cm、 γ 発熱無し、経過時間 100 秒)

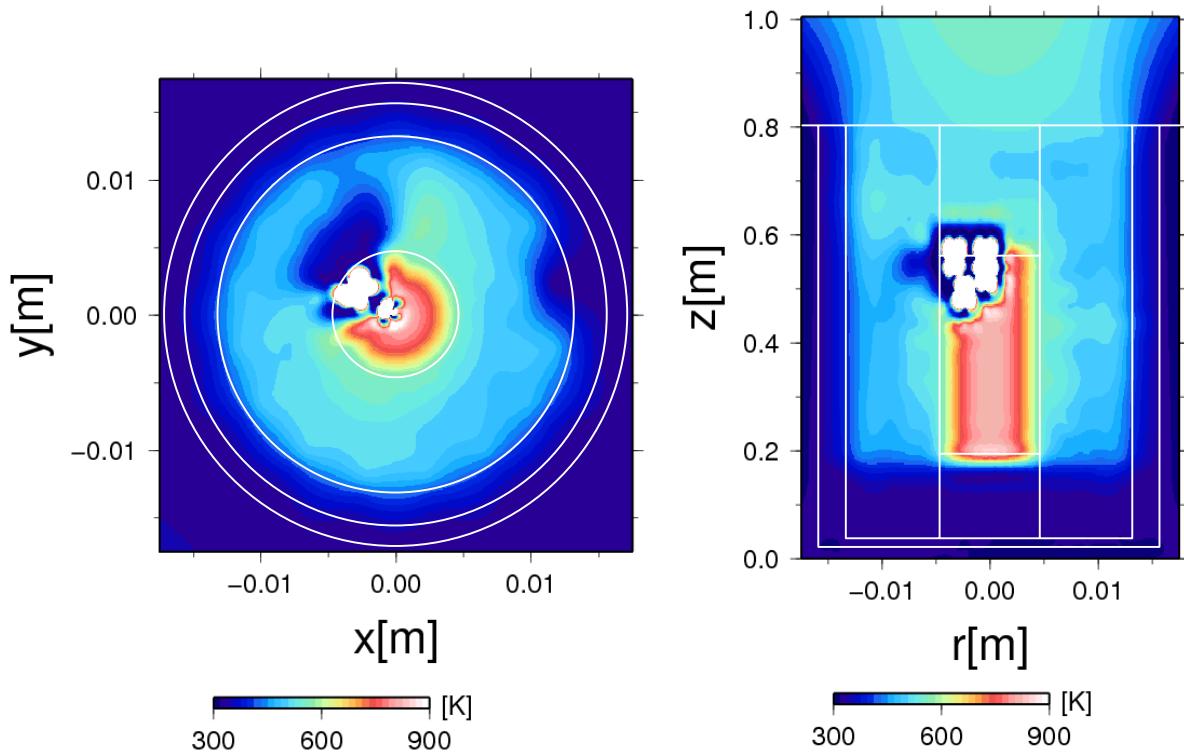


Fig. 3.32 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における温度分布
(発熱部線出力 600 W/cm、 γ 発熱無し、経過時間 68 秒)

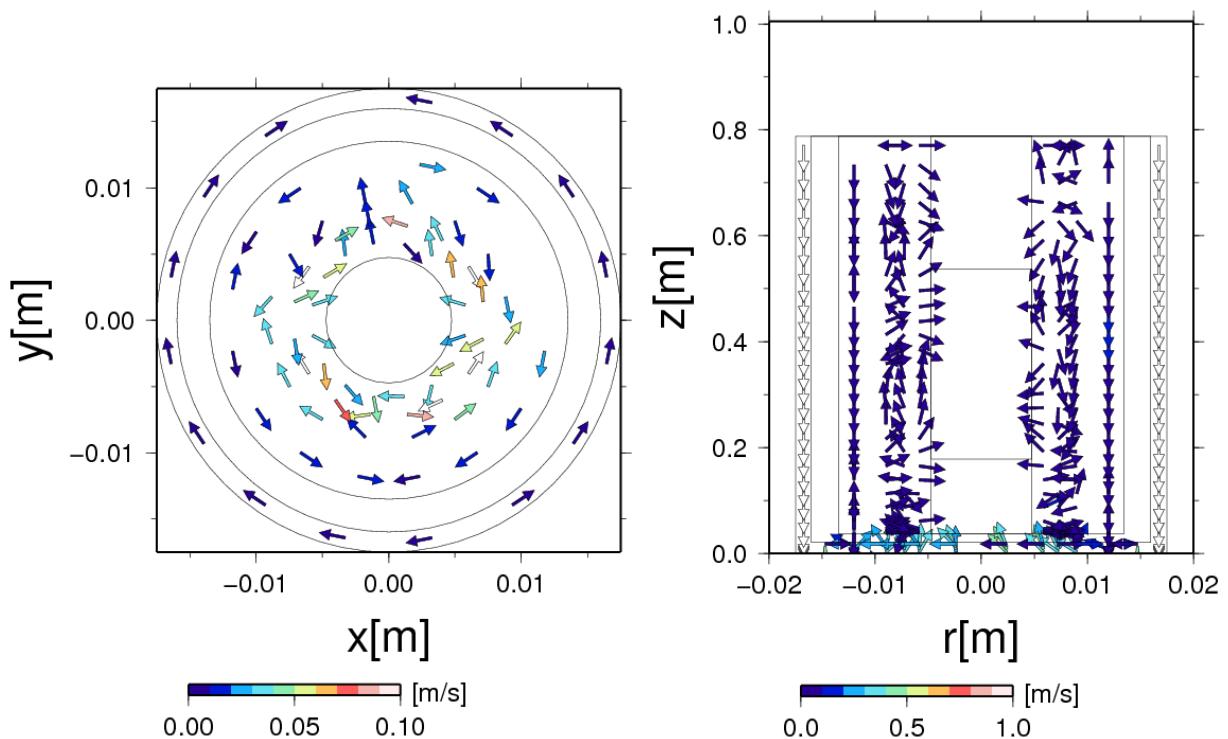


Fig. 3.33 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における流速分布
(発熱部線出力 200 W/cm、 γ 発熱無し、経過時間 100 秒)

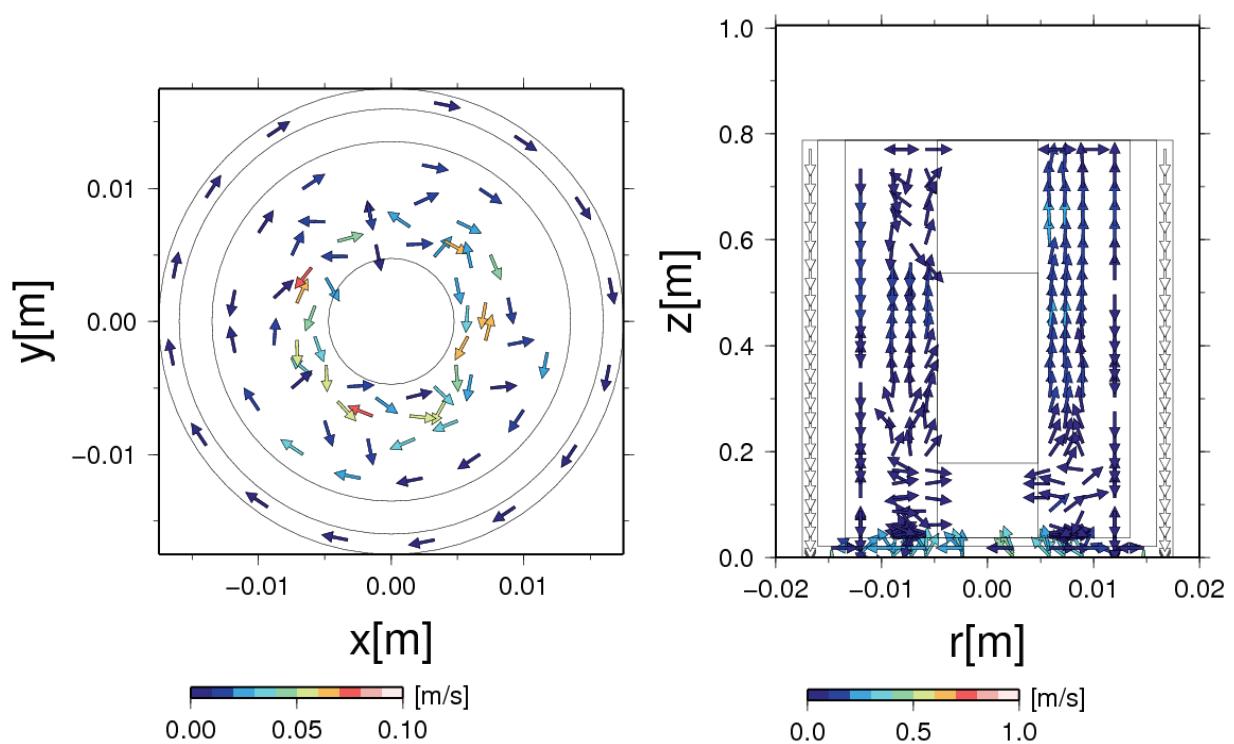


Fig. 3.34 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における流速分布
(発熱部線出力 400 W/cm 、 γ 発熱無し、経過時間 100 秒)

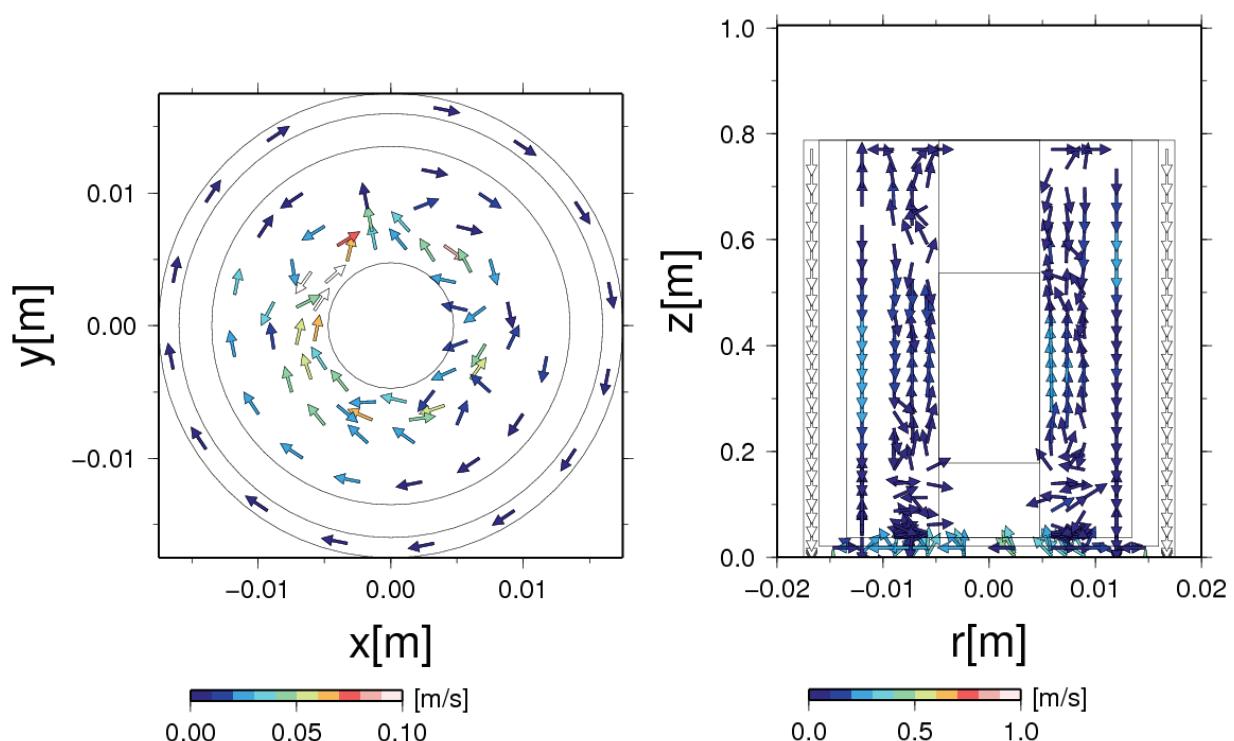


Fig. 3.35 BWR 出力較正試験用キャプセル（発熱体細径）-2 における流速分布
(発熱部線出力 600 W/cm 、 γ 発熱無し、経過時間 68 秒)

BWR出力較正試験(発熱体細径)-6

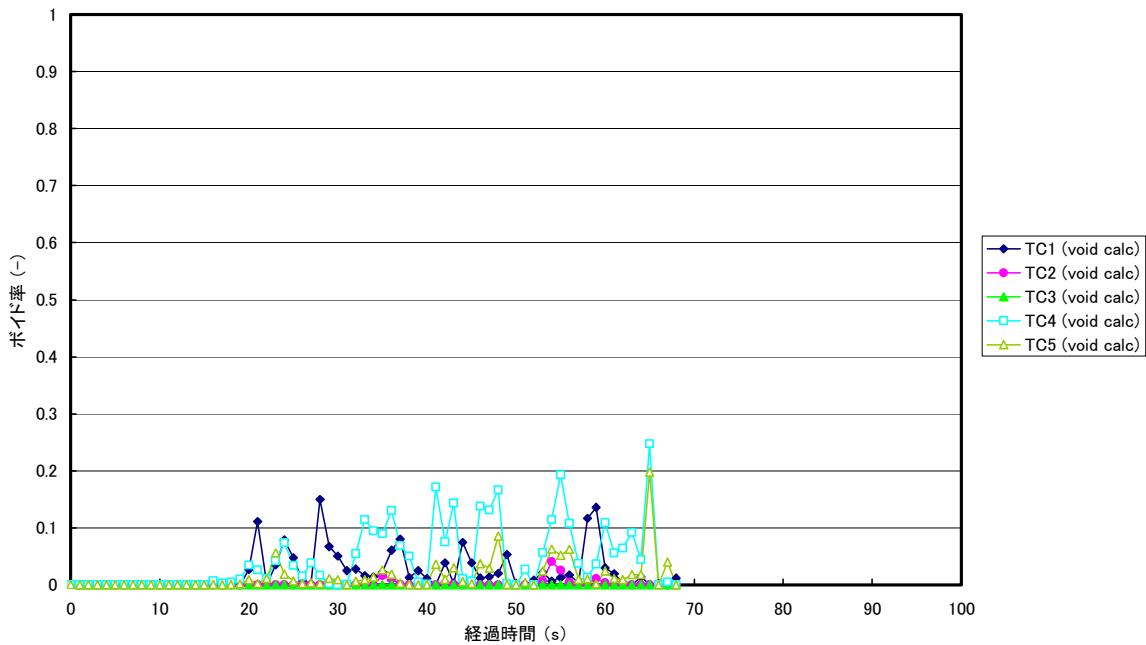


Fig. 3.36 BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）-2 におけるボイド率の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm、 γ 発熱無し)

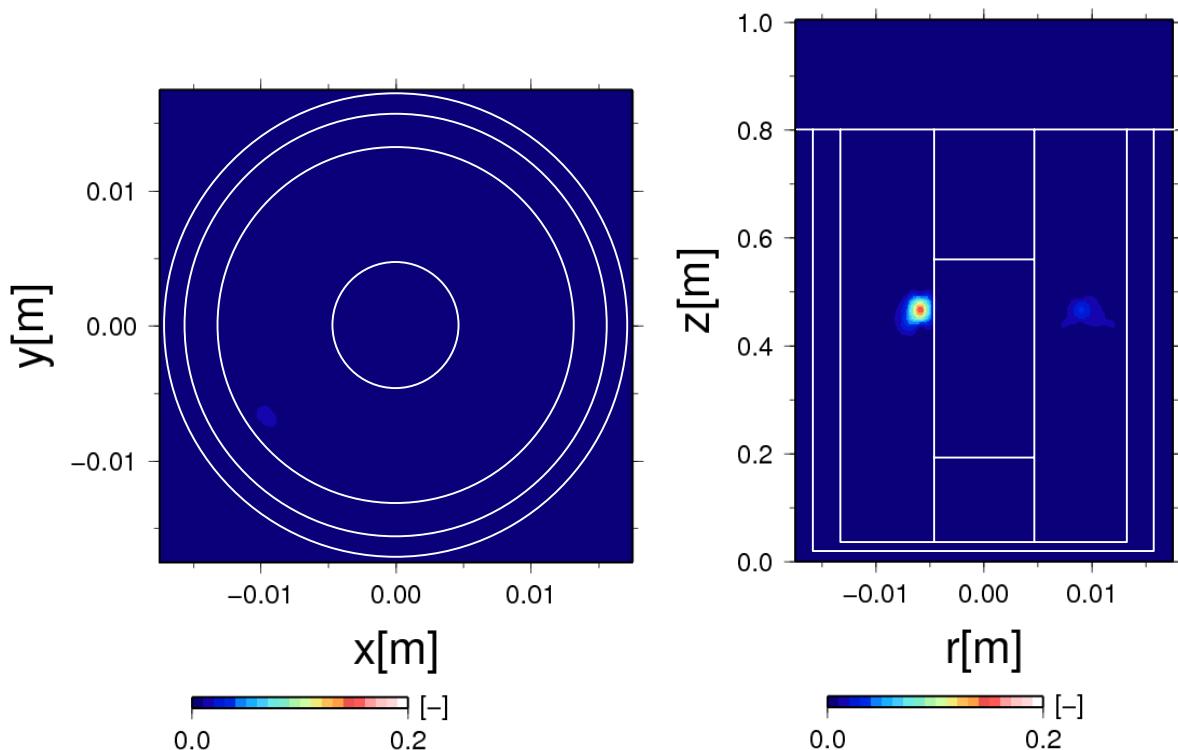


Fig. 3.37 BWR 出力較正試験用キャップセル（発熱体細径）-2 におけるボイド率分布
(発熱部線出力 600 W/cm、 γ 発熱無し、経過時間 68 秒)

燃料異常過渡試験-1

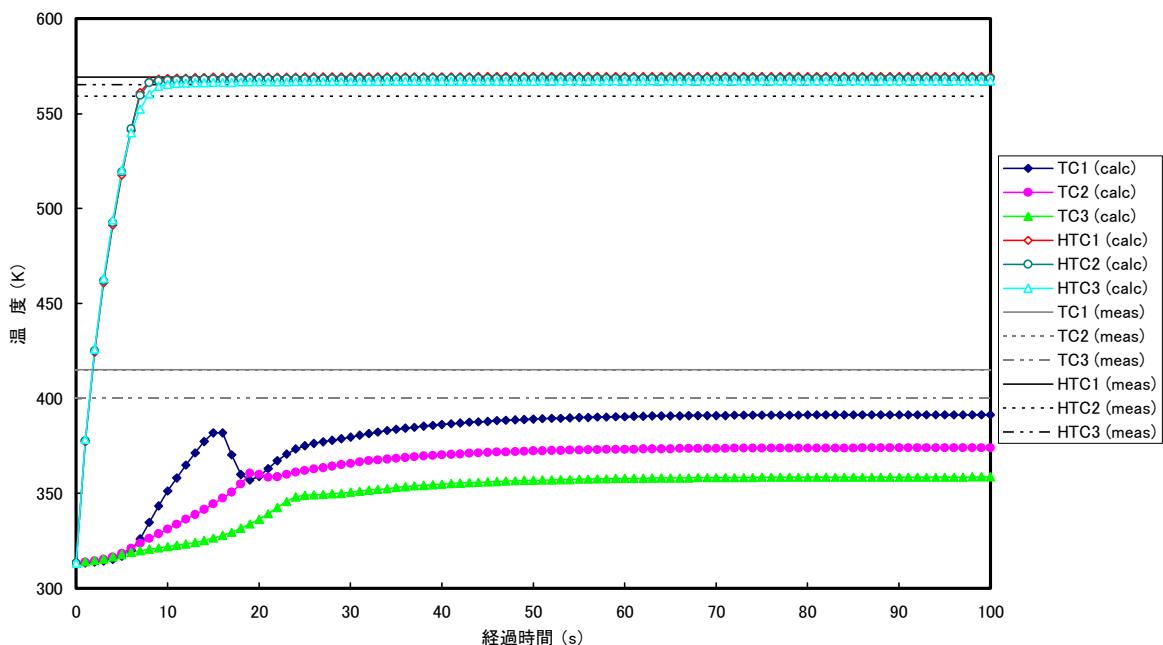


Fig. 3.38 燃料異常過渡試験用キャップセル-1における温度の経時変化
(発熱部線出力 200 W/cm)

燃料異常過渡試験-2

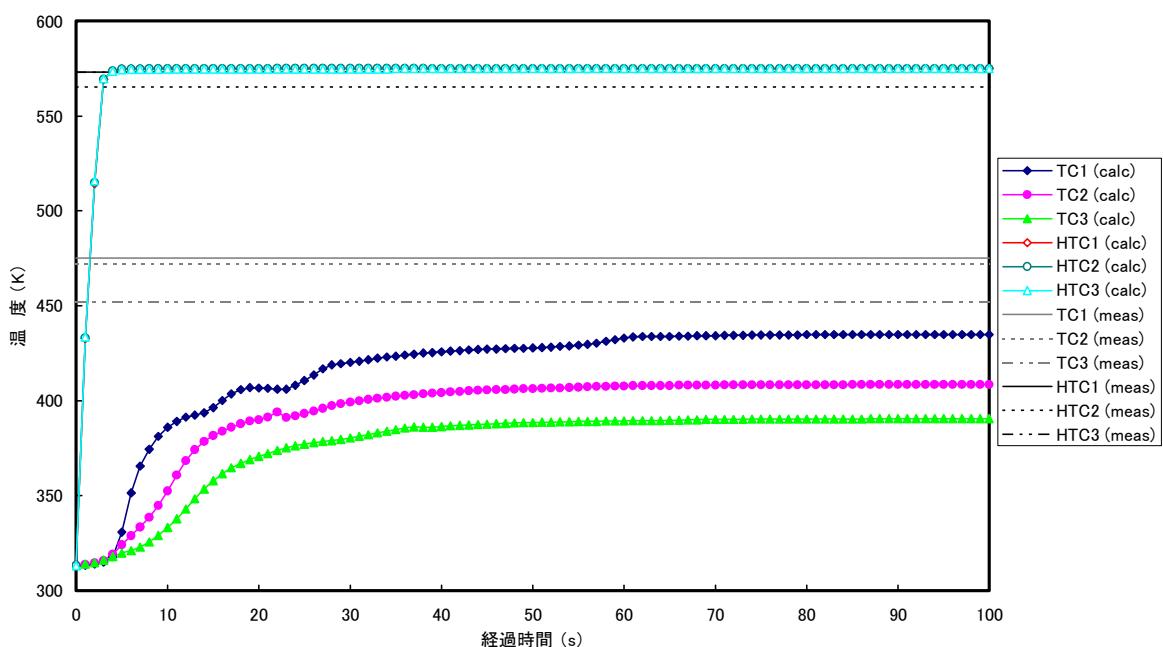
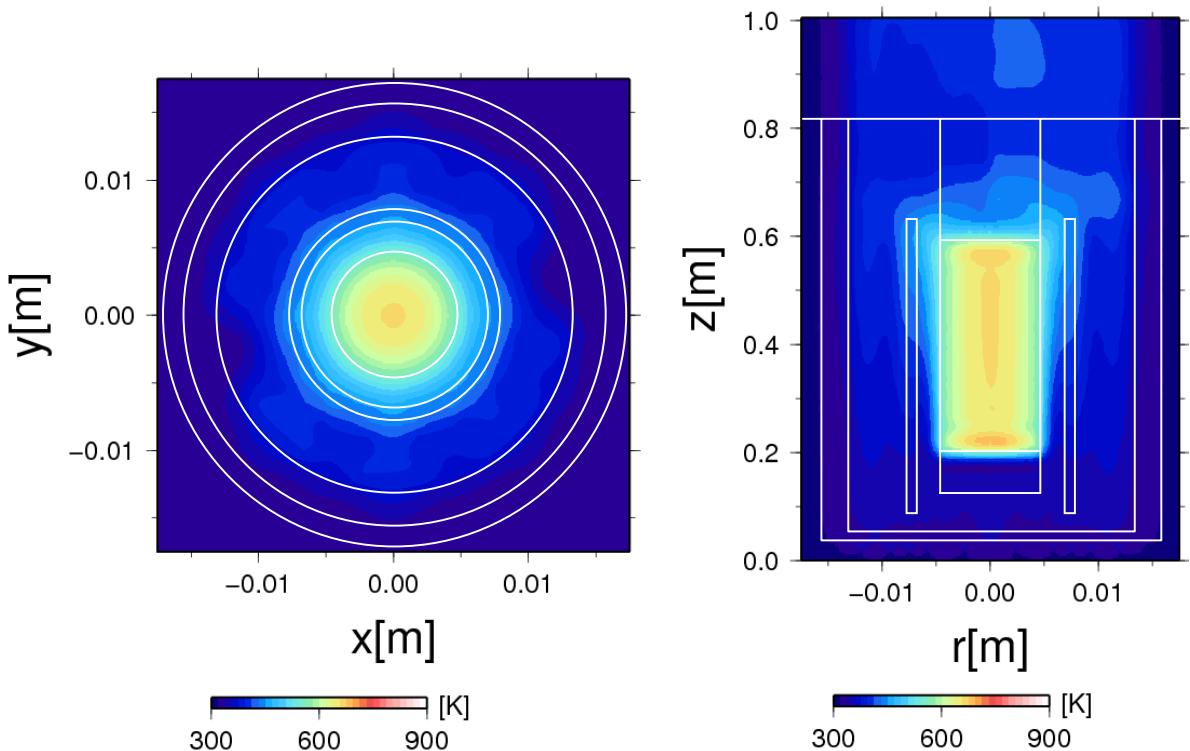
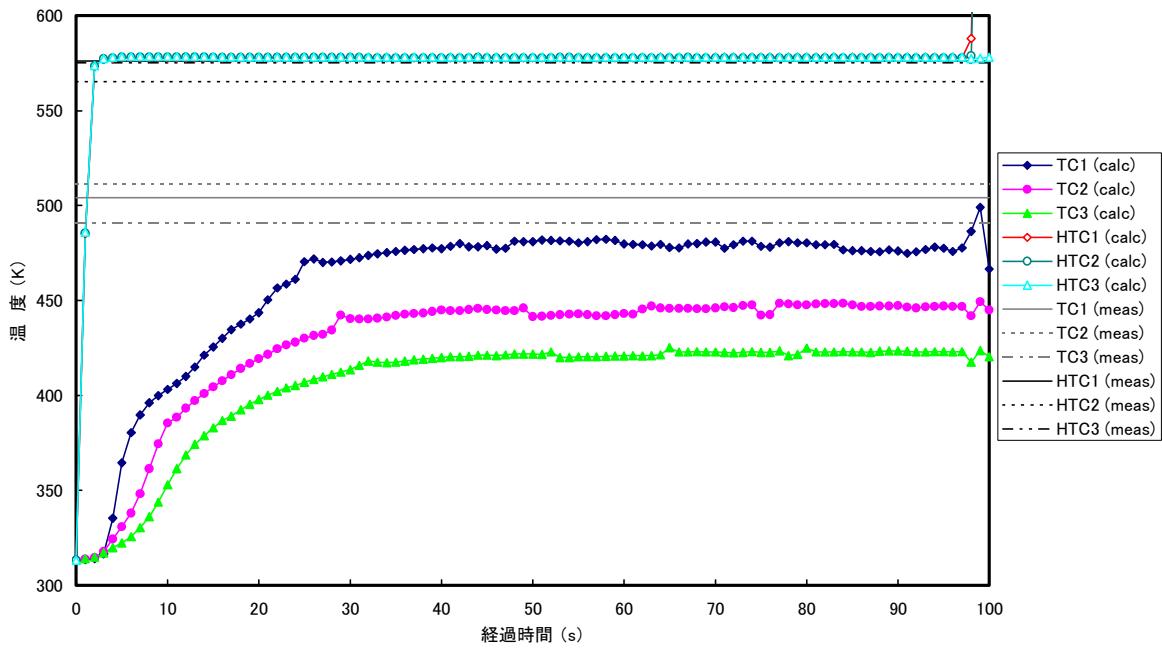


Fig. 3.39 燃料異常過渡試験用キャップセル-1における温度の経時変化
(発熱部線出力 400 W/cm)

燃料異常過渡試験-3



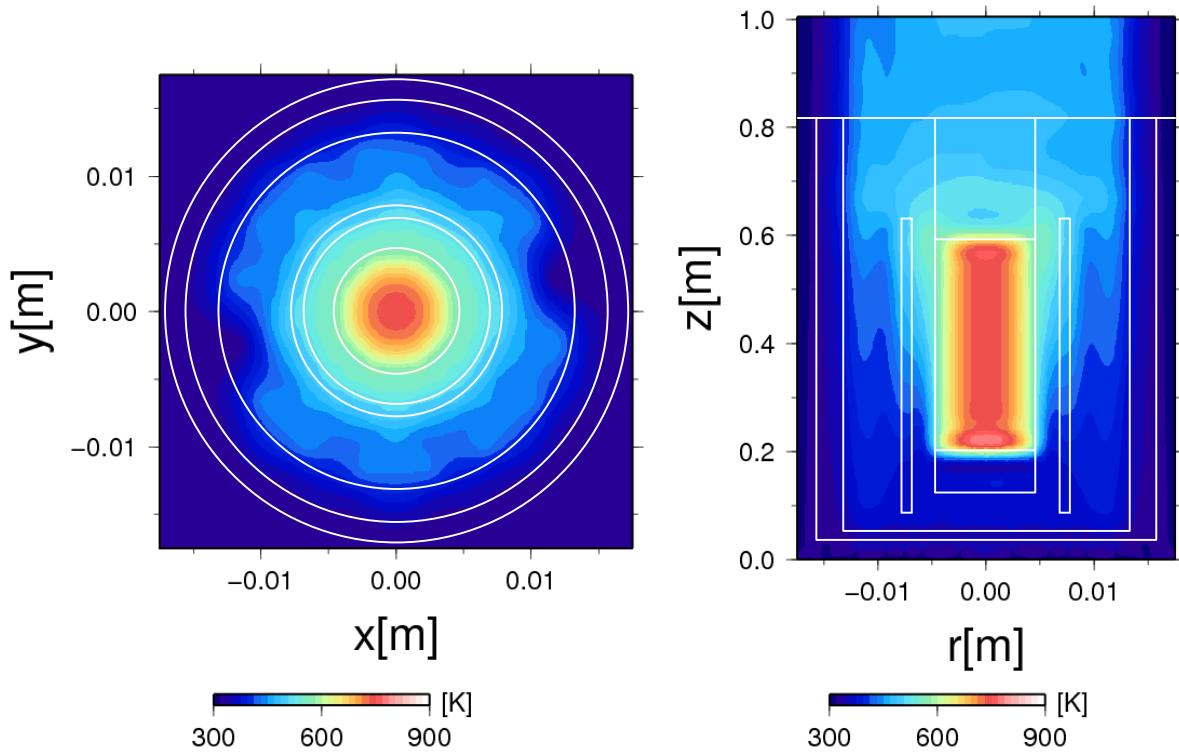


Fig. 3.42 燃料異常過渡試験用キャプセル-1 における温度分布
(発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒)

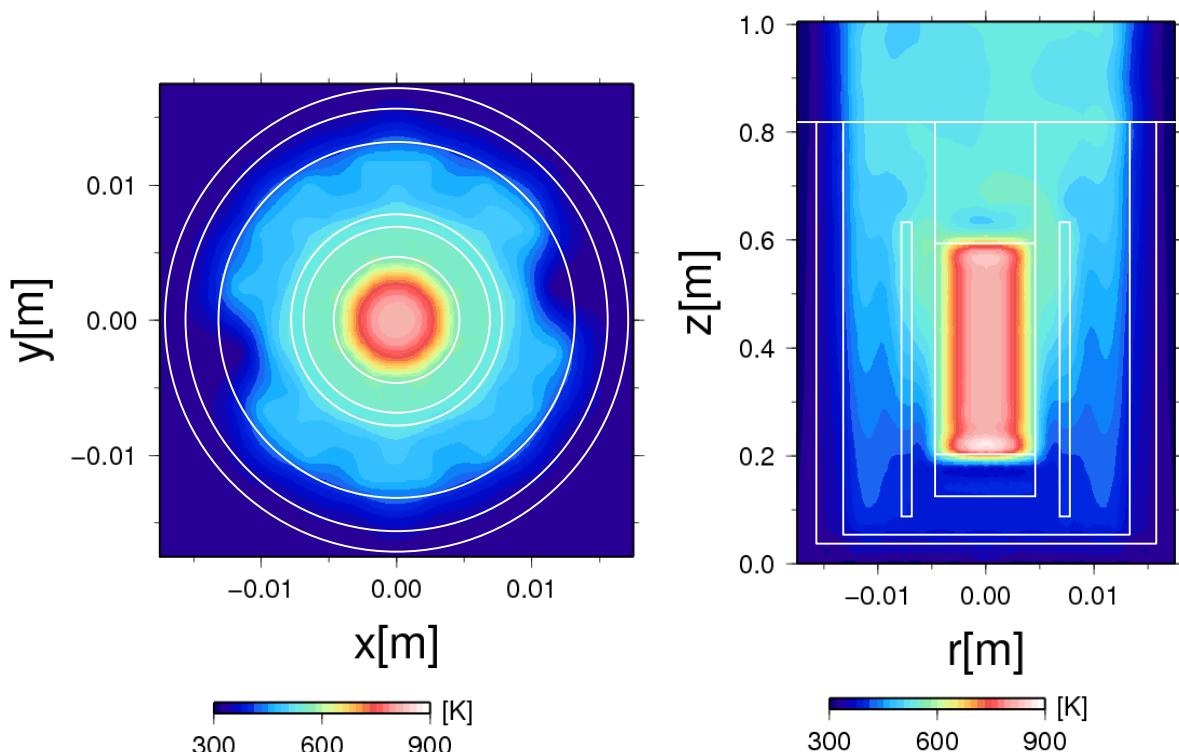


Fig. 3.43 燃料異常過渡試験用キャプセル-1 における温度分布
(発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 95 秒)

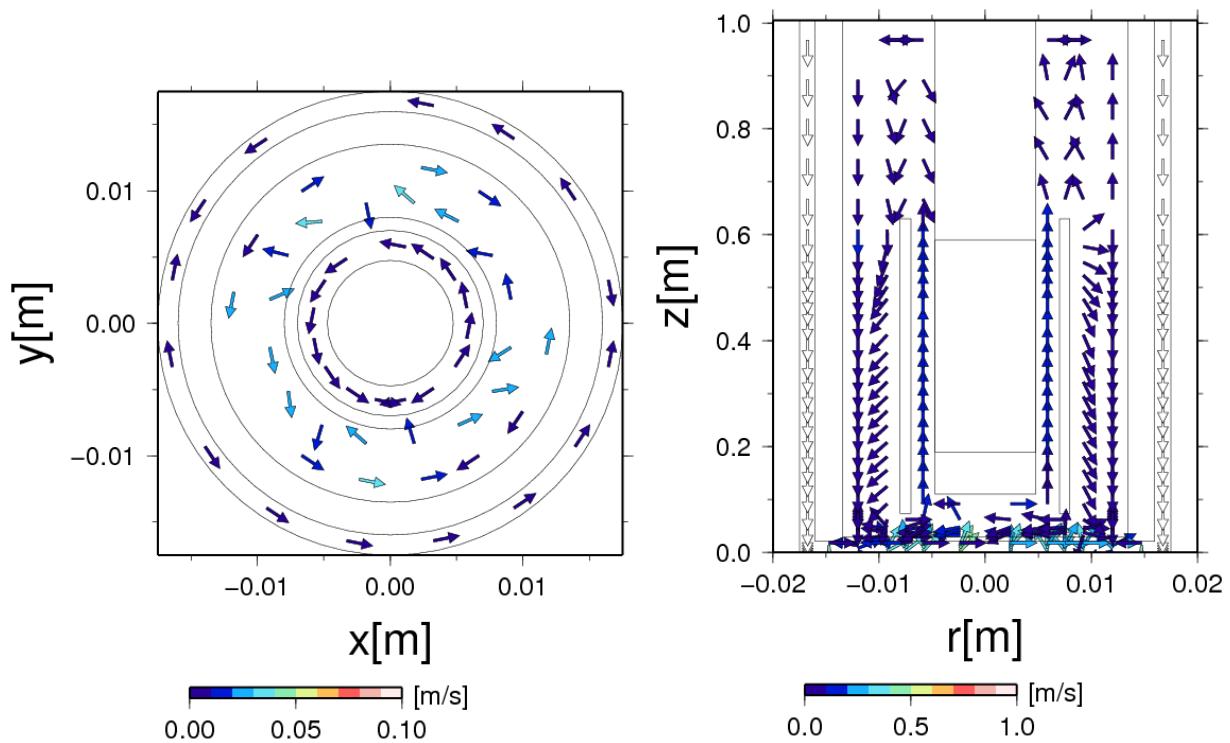


Fig. 3.44 燃料異常過渡試験用キャプセル-1における流速分布
(発熱部線出力 200 W/cm、経過時間 100 秒)

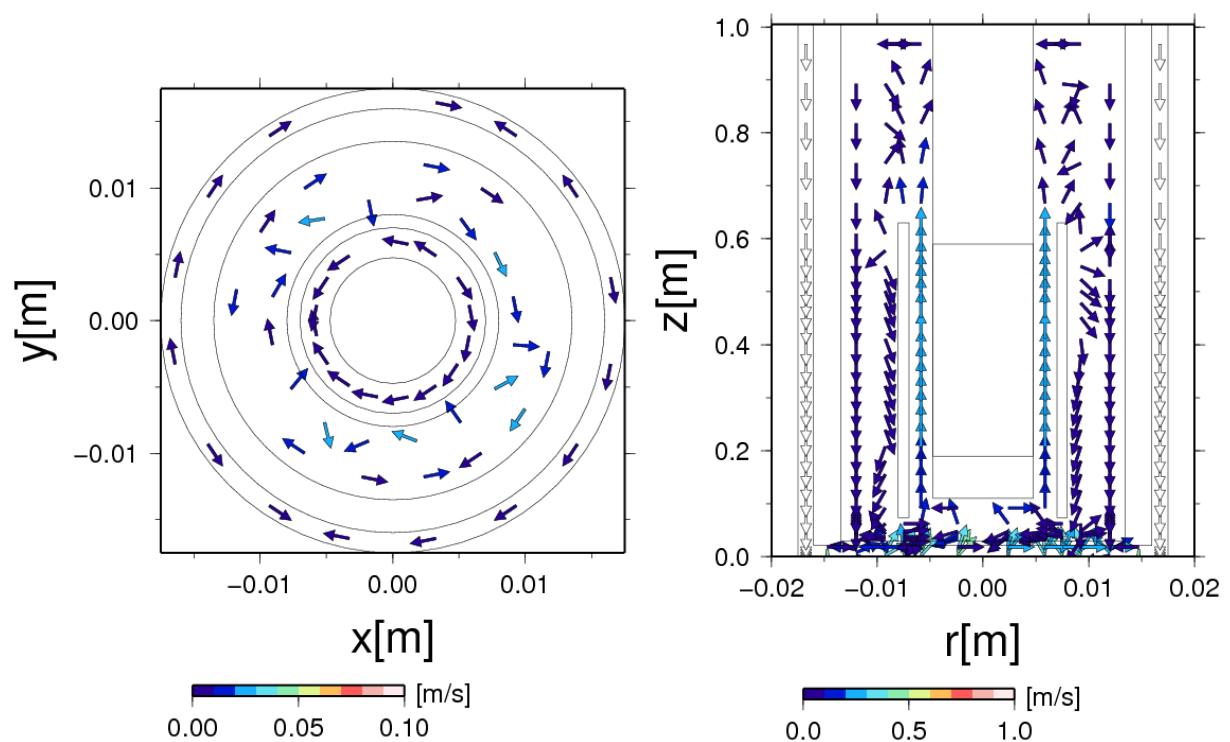


Fig. 3.45 燃料異常過渡試験用キャプセル-1における流速分布
(発熱部線出力 400 W/cm、経過時間 100 秒)

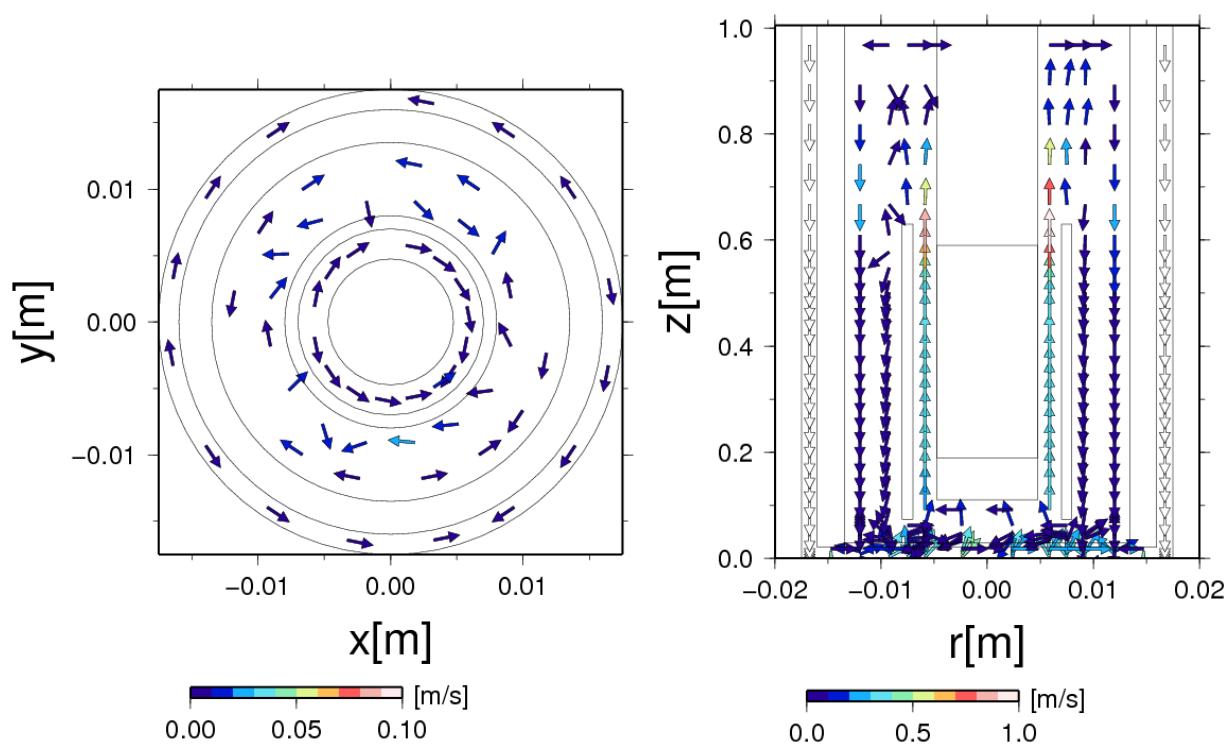


Fig. 3.46 燃料異常過渡試験用キャップセル-1における流速分布
(発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 95 秒)

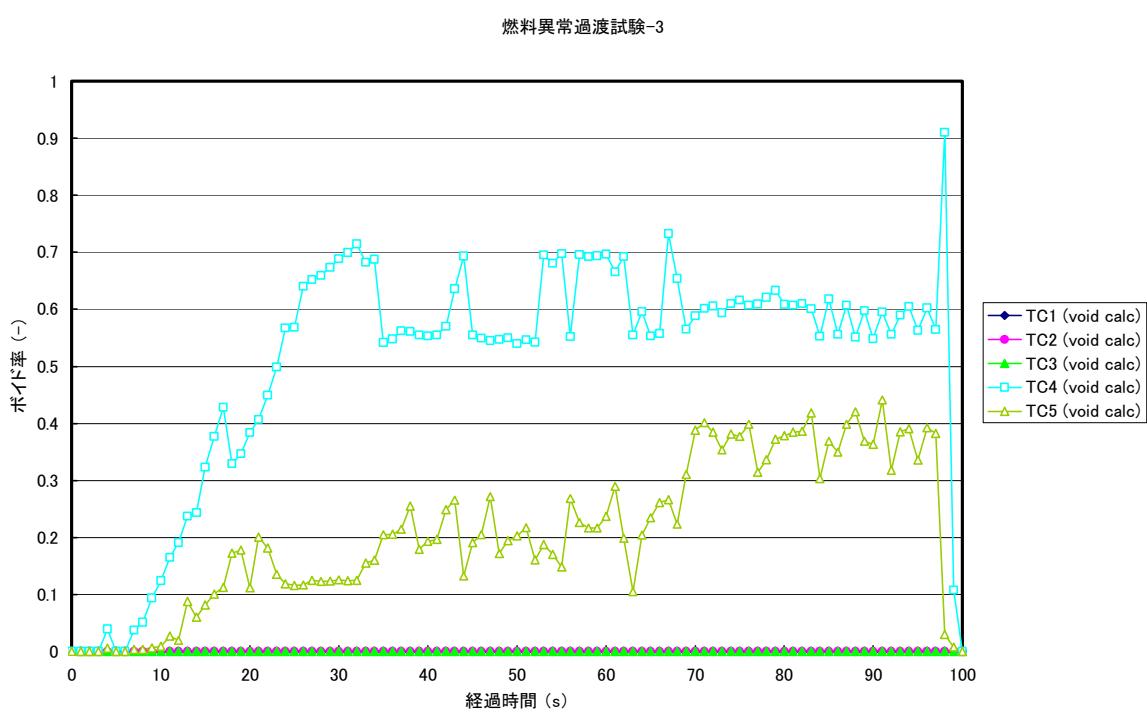


Fig. 3.47 燃料異常過渡試験用キャップセル-1におけるボイド率の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm)

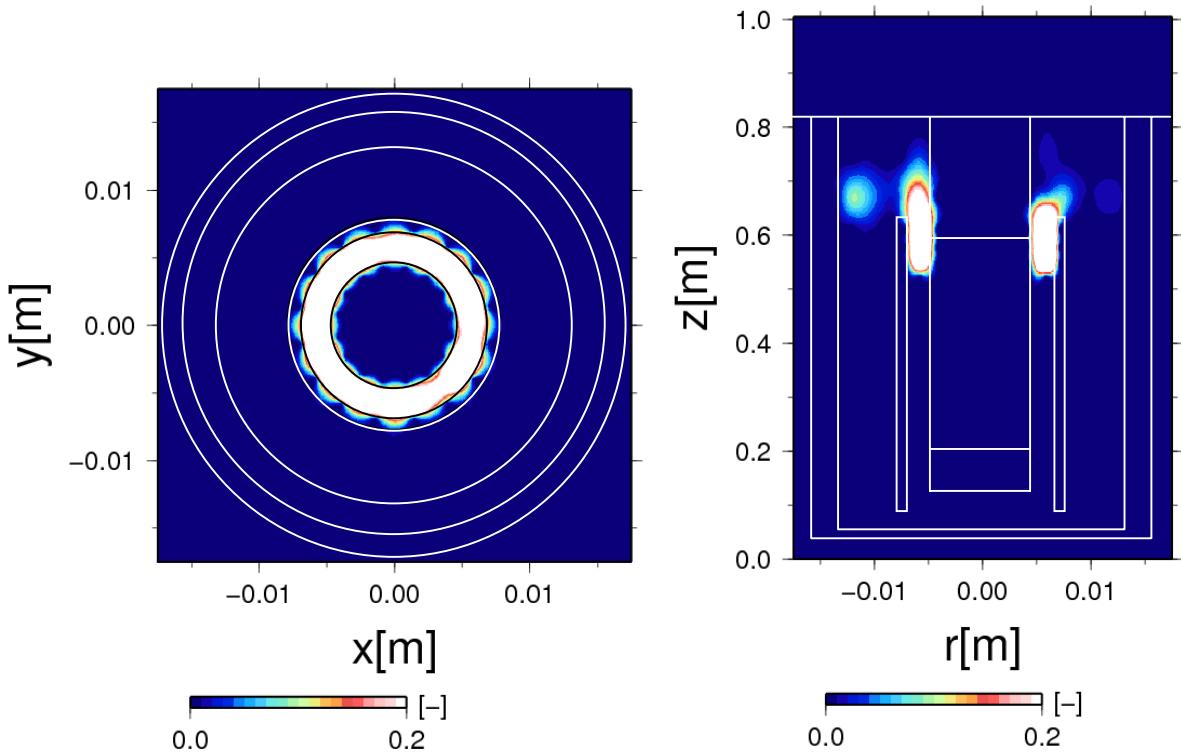


Fig. 3.48 燃料異常過渡試験用キャップセル-1におけるボイド率分布
(発熱部線出力 600 W/cm、経過時間 95 秒)

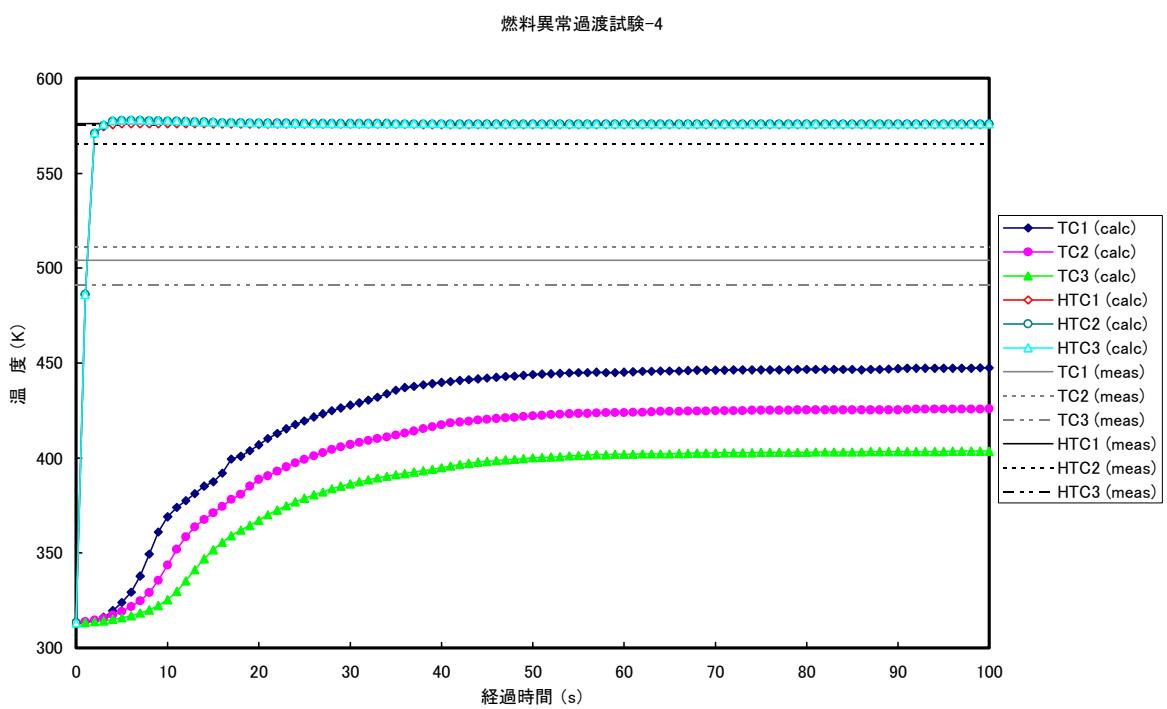


Fig. 3.49 燃料異常過渡試験用キャップセル-2における温度の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm、仕切り管径拡大)

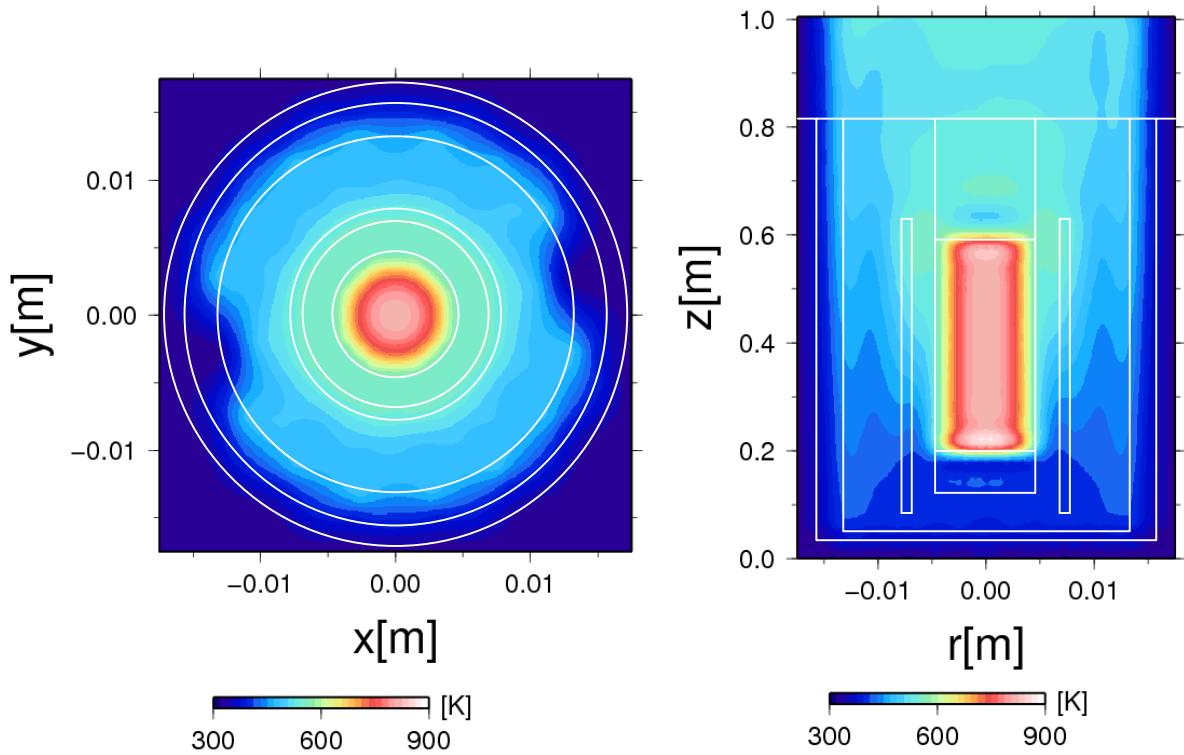


Fig. 3.50 燃料異常過渡試験用キャプセル-2における温度分布
(発熱部線出力 600 W/cm、仕切り管径拡大、経過時間 100 秒)

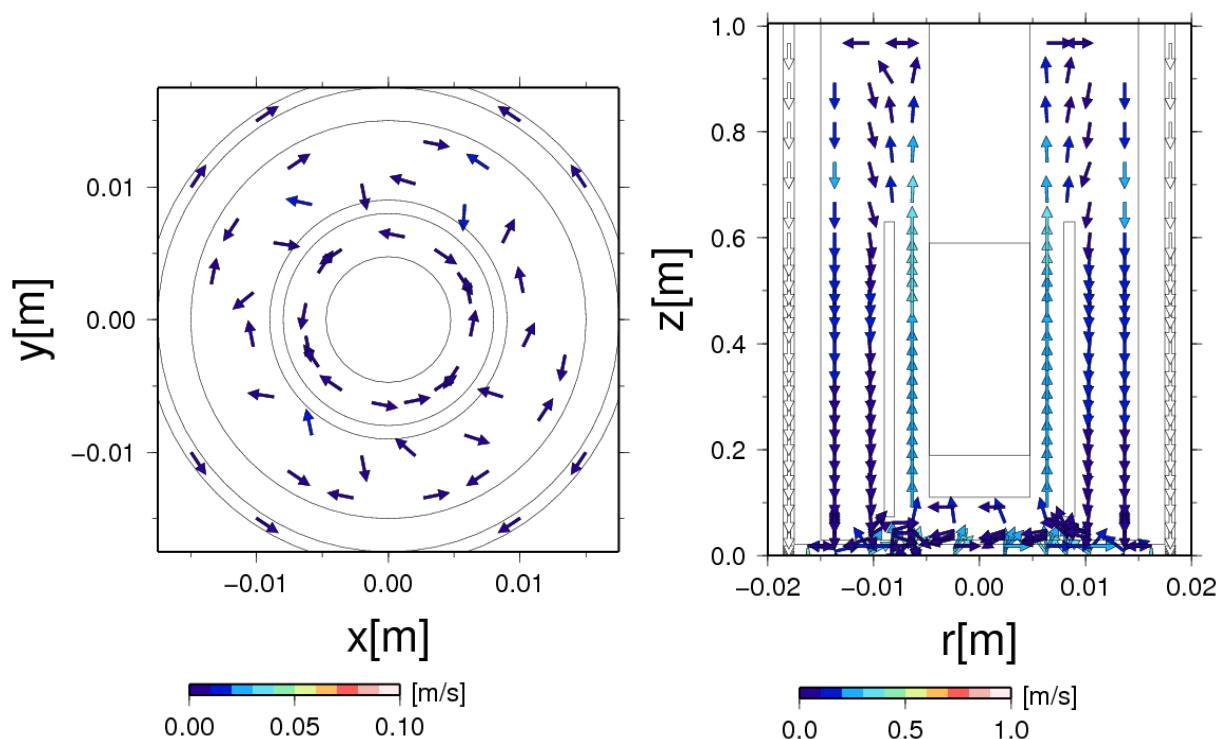


Fig. 3.51 燃料異常過渡試験用キャプセル-2における流速分布
(発熱部線出力 600 W/cm、仕切り管径拡大、経過時間 100 秒)

燃料異常過渡試験-4

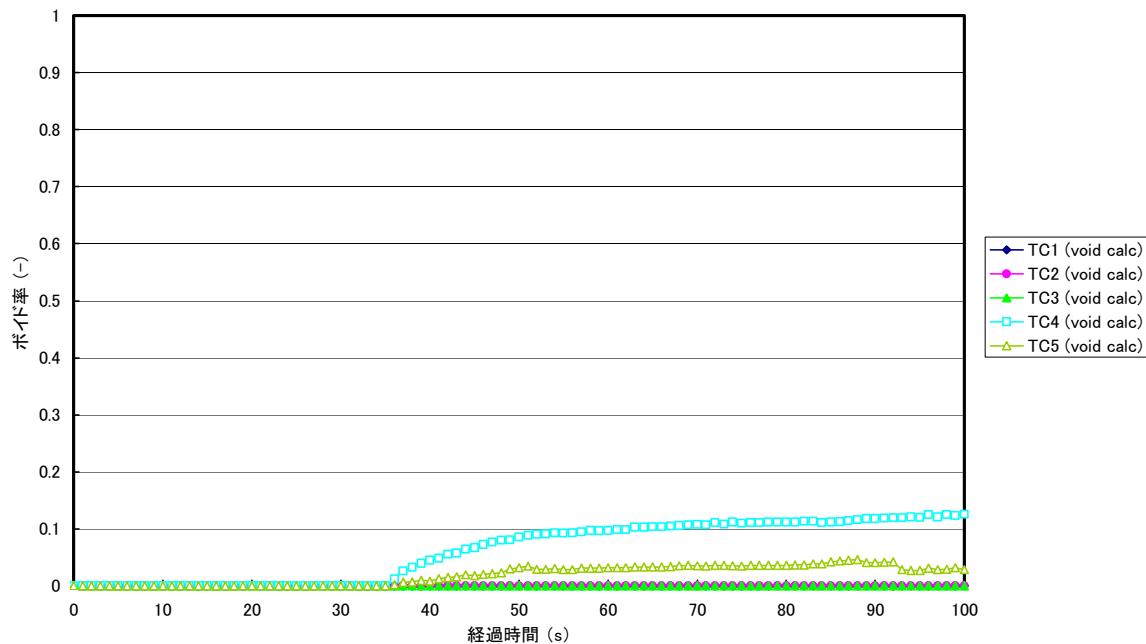


Fig. 3.52 燃料異常過渡試験用キャップセル-2におけるボイド率の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm、仕切り管径拡大)

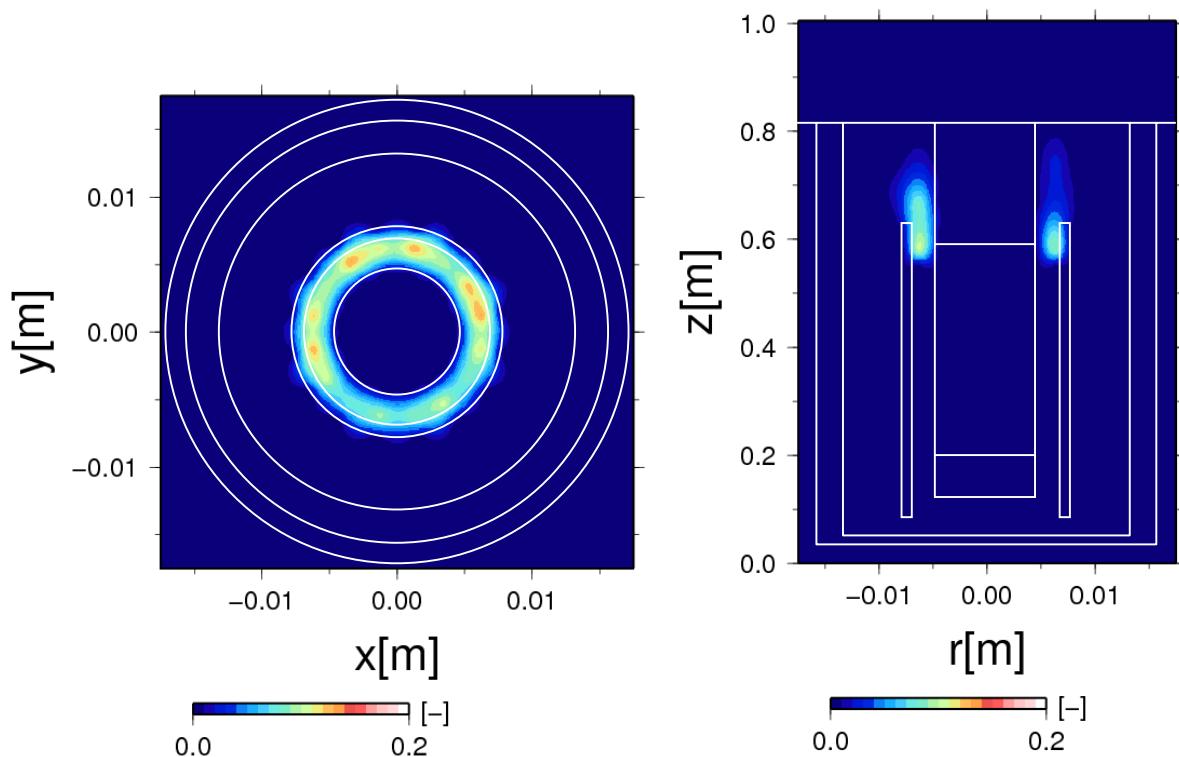


Fig. 3.53 燃料異常過渡試験用キャップセル-2におけるボイド率分布
(発熱部線出力 600 W/cm、仕切り管径拡大、経過時間 100 秒)

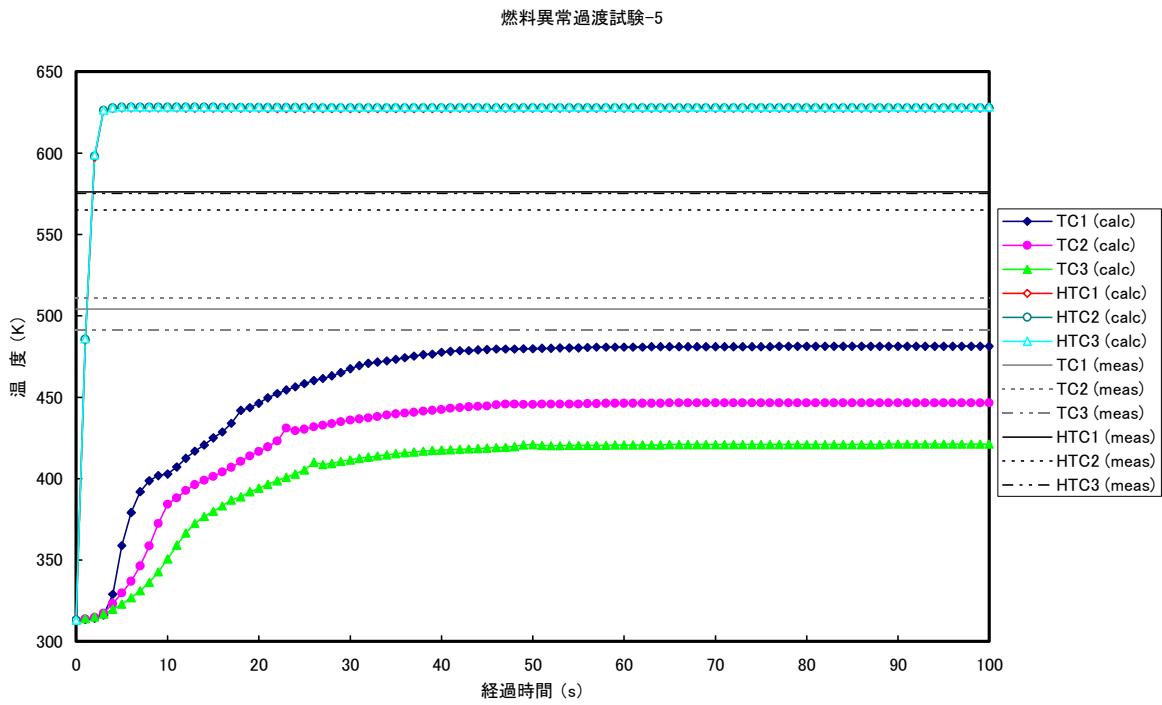


Fig. 3.54 燃料異常過渡試験用キャプセル-3 における温度の経時変化
(発熱部線出力 600 W/cm、加圧水圧力 15 MPa)

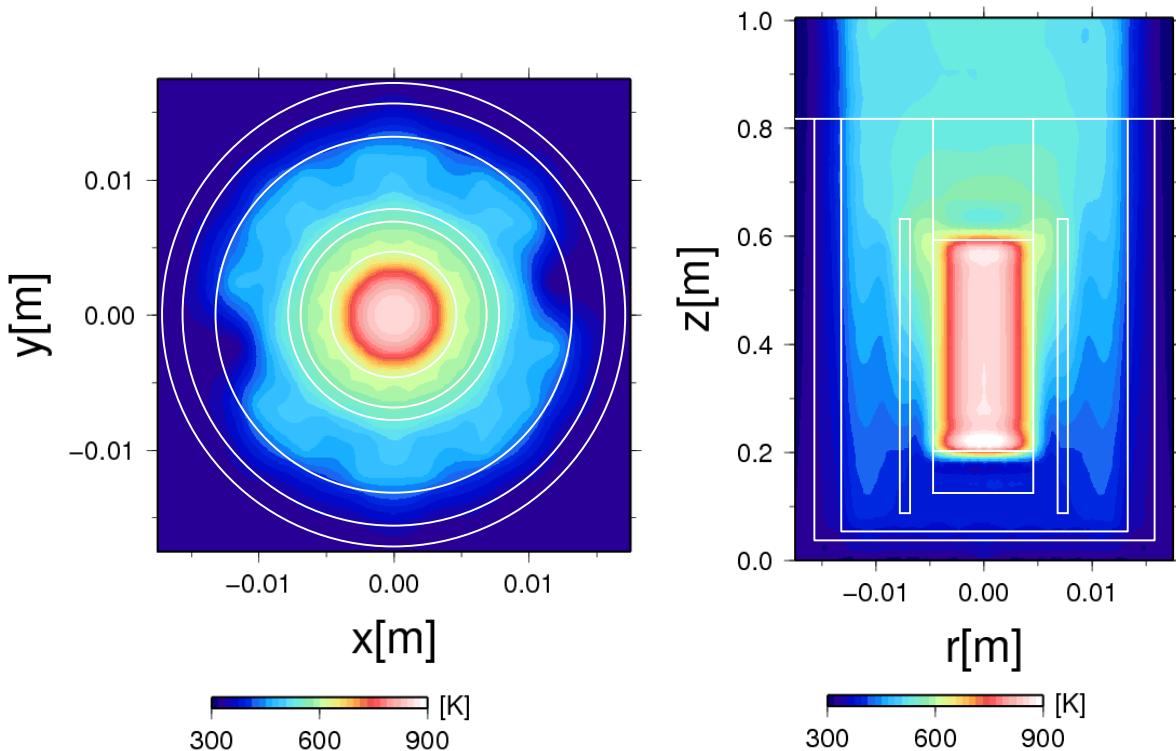


Fig. 3.55 燃料異常過渡試験用キャプセル-3 における温度分布
(発熱部線出力 600 W/cm、加圧水圧力 15 MPa、経過時間 100 秒)

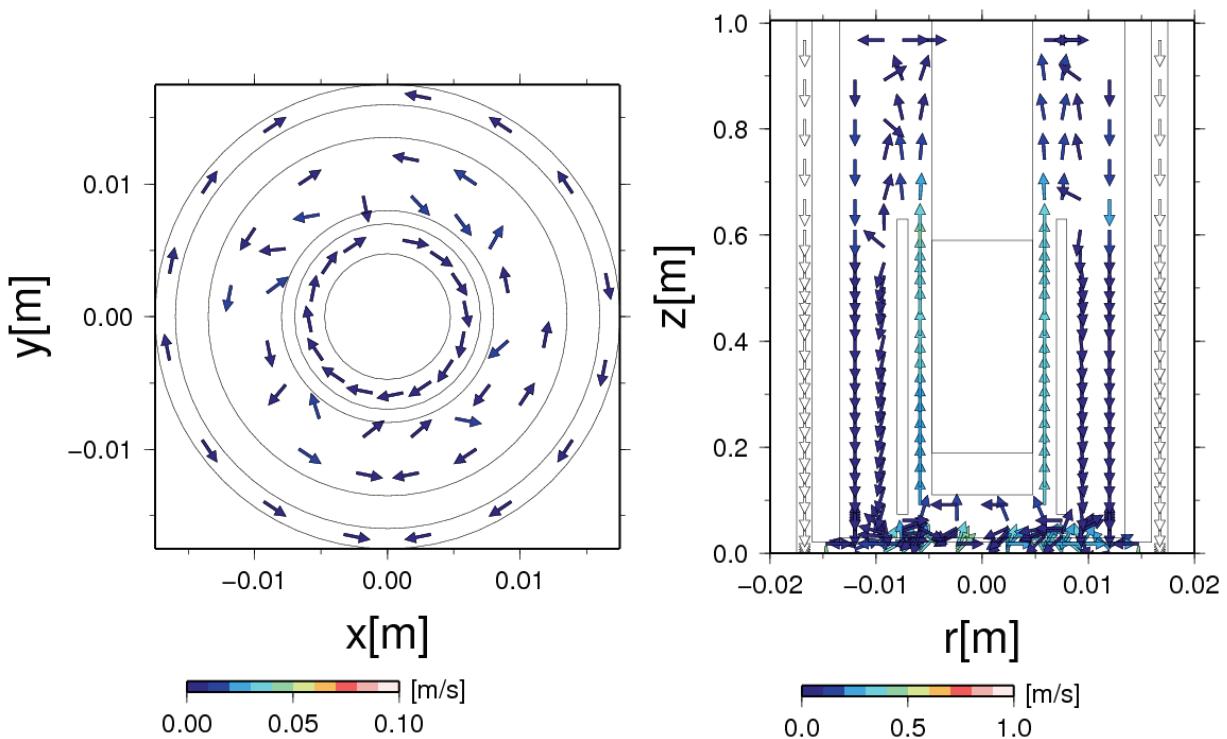


Fig. 3.56 燃料異常過渡試験用キャプセル-3における流速分布
(発熱部線出力 600 W/cm、加圧水圧力 15 MPa、経過時間 100 秒)

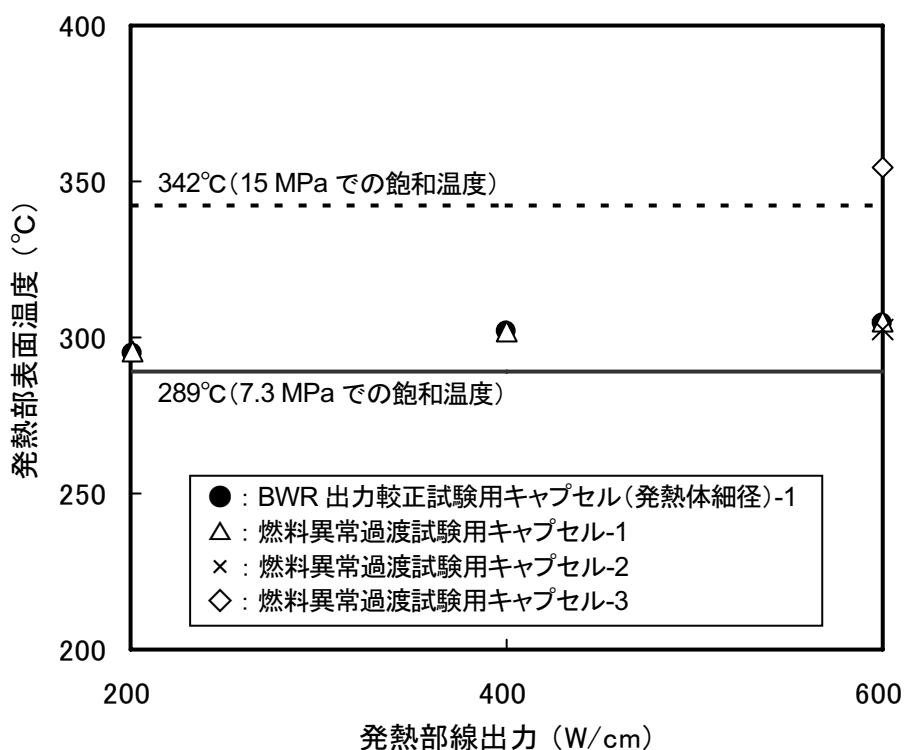


Fig. 3.57 発熱部線出力に対する発熱部表面温度の変化

This is a blank page.

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
物質量	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 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
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
比體積	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
質量濃度 ^(a)	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度 ^(b)	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	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床医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 ^(c)	$1^{(b)}$	m^2/m^2
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s^{-1}
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^2$
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C		$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラード	F		C/V
電気抵抗	オーム	Ω		$m^2 \cdot kg \cdot s^3 \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	シーメンス	S		A/V
磁束密度	テスラ	Wb		$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T		Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H		$kg \cdot s^2 \cdot A^{-1}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		Wb/A
光束度	ルーメン	lm		K
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		$cd \cdot sr^{(c)}$
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy		cd
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		lm/m^2
酸素活性	カタール	kat		$m^2 \cdot cd$

(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、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前と記号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
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 \cdot kg \cdot s^2$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^2$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
比熱容量、比エンタルピー	ジュール每キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
比エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	$m^3 \cdot s^{-2}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	$kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^2$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$kg \cdot s^3 \cdot A^{-1}$
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot sA$
表面電荷密度	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot sA$
電束密度、電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot sA$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg \cdot s^{-4} \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^2 \cdot A^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^2 \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー、モル熱容量	ジュール每モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot sA$
吸収線量(率)	グレイ毎秒	Gy/s	$m^3 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	$m^2 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} \cdot s^{-1} \cdot mol$

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	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}	ビ	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}	ゼット	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=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4 m^2$
リットル	L	$1L=1dm^3=10^3 cm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$

表7. SIに属さないが、SIと併用される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	$1eV=1.602 \cdot 176 \cdot 53(14) \times 10^{-19} J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660 \cdot 538 \cdot 86(28) \times 10^{-27} kg$
統一原子質量単位	u	$1u=1 Da$
天文単位	ua	$1ua=1.495 \cdot 978 \cdot 706 \cdot 91(6) \times 10^{11} m$

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
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10^5 Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1 mmHg=133.322 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=100 pm=10^{-10} m$
海里	M	$1 M=1852 m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=(10^{-12} cm)^2=10^{-28} m^2$
ノット	kn	$1 kn=(1852/3600) m/s$
ネバ	Np	$SI \text{単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。}$
ベル	B	
デジベル	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	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s \cdot cm^{-2}=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2 \cdot s^{-1}=10^4 m^2 \cdot s^{-1}$
スチールズ	sb	$1 sb=1 cd \cdot cm^{-2}=10^4 cd \cdot m^{-2}$
フォント	ph	$1 ph=1 cd \cdot sr \cdot cm^{-2} \cdot 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm \cdot s^{-2}=10^{-2} ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=1 G \cdot cm^2=10^{-8} Wb$
ガウス	G	$1 G=1 Mx \cdot cm^{-2}=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \approx (10^{1/4} n) A \cdot m^{-1}$

(c) 3元系のCGS単位とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関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	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^4 C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
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	fm	$1 \text{フェルミ}=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 \text{ Torr} = (101.325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm = 101.325 Pa$
カロリ	cal	$1 cal=4.1868 J ((15^\circ C) \text{カロリー}), 4.1868 J ((IT) \text{カロリー})$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$

