

JAERI - M  
91-003

沸騰水型キャプセルの熱解析

1991年2月

原山 泰雄・松並 清隆・石井 忠彦  
中村 仁一・内田 正明

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 いばらき印刷(株)

沸騰水型キャプセルの熱解析

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

原山 泰雄・松並 清隆・石井 忠彦

・中村 仁一<sup>+</sup>・内田 正明<sup>+</sup>

(1991年1年5日受理)

沸騰水キャプセル (BOCA: Boiling Capsule) 内部の熱的挙動の全体像を把握することを目的に熱解析が行われた。沸騰水キャプセルとは、材料試験炉 (JMTR) において軽水炉燃料セグメントの出力急昇試験に使用している照射試験装置としてのキャプセルの一型式である。

解析を通じキャプセル各部の熱伝達率の推定等が行われた。燃料セグメントの線出力密度が  $600\text{W/cm}$  の時、キャプセル外筒内面の熱伝達率は  $0.71\text{W/cm}^2\text{K}$  ( $1250\text{Btu/h ft}^2\text{°F}$ ) 程度であることが明らかになった。さらに、燃料セグメント部で発生した熱量のうち10%程度の熱量は燃料ペレットスタックの上側部分に移動し、冷却されると考えねばならないことが判明した。

得られた解析結果は、沸騰水キャプセルの設計、今後の照射試験、水を注入する他の型式のキャプセルの設計や水を扱う試験装置の設計に対し有用な情報を与えると考えられる。

Thermal Analysis of Boiling Water Capsule

Yasuo HARAYAMA, Kiyotaka MATSUNAMI, Tadahiko ISHII  
Jinichi NAKAMURA<sup>+</sup> and Masaaki UCHIDA<sup>+</sup>

Department of JMTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1991)

Thermal analysis was carried out in order to grasp thermal behavior of Boiling Water Capsule (BOCA). BOCA is a unit in the Irradiation Facility which is used for power ramp tests of the LWR fuel segments in the JMTR (Japan Material Testing Reactor).

Heat transfer coefficients on each location of BOCA were estimated from the analysis. It was found that the coefficient was approximately  $0.71 \text{ W/cm}^2\text{K}$  ( $1250 \text{ Btu/h ft}^2\text{°F}$ ) at inner surface of capsule casing of BOCA, when linear heat rate of fuel segment was at  $600 \text{ W/cm}$ , and further that about 10 percent of heat generated in fuel segment pellet stack should be transported to upper regions over the pellet stack with injected water and cooled there.

It is expected that obtained results will provide valuable informations for design of BOCA, irradiation technique of BOCA, design of other type capsule in which water is injected, and design of irradiation test device which deals with water.

Keywords: BOCA, OSF-1, JMTR, SATCAP, Power Ramp Test, Irradiation,  
LWR Fuel, Heat Transfer Coefficients

---

<sup>+</sup> Department of Fuel Safety Research, Tokai Research Establishment

## 目 次

1. はじめに	1
2. BOCA試験設備	2
2.1 JMTR出力急昇試験設備 (BOCA/OSF-1)	2
2.2 注入水の流れと熱的考察	3
3. BOCAキャプセル注入水の熱解析	7
3.1 解析上の仮定	7
3.2 解析手段	7
3.3 解析対象キャプセル	8
3.4 解析結果	8
3.4.1 解析結果	8
3.4.2 解析に採用したパラメータおよびモデル	10
4. 検討ならびにBOCAキャプセル熱挙動の特性	24
4.1 BOCAキャプセルにおける熱挙動	24
4.1.1 熱伝達率	24
4.1.2 燃料セグメント上端部 (プレナム部分) における注入水の加熱	25
4.1.3 その他の特性	26
4.2 飽和温度型式キャプセルとの比較	26
4.3 プログラムSATCAPのBOCAキャプセル熱解析への適用性	28
4.4 実機軽水炉燃料棒の状態と試験装置内の燃料セグメントの状態の相違点	28
5. むすび	33
謝 辞	36
参考文献	36
付 録 解析に使用した注入水 (圧力水) 温度測定値	37

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Power Ramp Test Facility (BOCA/OSF-1) .....	2
2.1 BOCA/OSF-1 .....	2
2.2 Flow of injected water and heat balance .....	3
3. Thermal analysis of injected water in BOCA .....	7
3.1 Assumptions on calculation .....	7
3.2 Calculation method .....	7
3.3 Capsules used on calculations .....	8
3.4 Calculation results .....	8
3.4.1 Calculation results .....	8
3.4.2 Parameters and model adopted in calculations .....	10
4. Discussion and thermal behavior of BOCA .....	24
4.1 Thermal behavior of BOCA .....	24
4.1.1 Heat transfer coefficients .....	24
4.1.2 Heating of injected water at section of gas plenum of fuel segment .....	25
4.1.3 Other features .....	26
4.2 Comparison BOCA with Saturated Temperature Capsule .....	26
4.3 Applicability of program SATCAP to thermal analysis of BOCA .....	28
4.4 A difference on thermal behavior between LWR fuel rod and fuel segment within BOCA .....	28
5. Concluding Remarks .....	33
Acknowledgments .....	36
References .....	36
Appendix Measured temperature of injected water .....	37

## 1. はじめに

この熱解析の目的は、沸騰水キャプセル（BOCA : Boiling Water Capsule , この報告書では、BOCAキャプセルと称する）内部の熱的挙動の全体像を把握することである。BOCAキャプセルは、材料試験炉（JMTR）において軽水炉燃料セグメントの出力急昇試験に使用している照射試験装置としてのキャプセルの一型式である。ただし、BOCAキャプセルに装荷の試料としての燃料セグメントの熱的挙動の解析を意図するものではない。主としてBOCAキャプセル内部に注入の水（以下注入水と呼ぶ）の温度変化から推定できる熱的な状態変化を解析した。解析には計算機プログラムを利用したが、今後のBOCAキャプセル熱解析へのプログラム利用可能性の検討をも目的の一つとした。

解析を通じキャプセル各部の熱伝達率、例えばキャプセル外筒内面の熱伝達率等の推定等を行った。キャプセル内部の注入水温度はこの伝達率ではほぼ決定される重要なパラメータである。このような、注入水の温度変化を含む熱的挙動の解析評価は困難であると考えられてきた。理由は、BOCAキャプセルではその内部に導水管により水を注入するが、導水管内の下降流の温度変化を考慮しなければならず、その内部の水の温度変化は簡単に評価できないと考えられてきたためであった。導水管とはキャプセルの下部への注水に使用している管で、注入水はその内部を下側へ流れる。これにより、燃料セグメントで発生した熱の一部はキャプセル下部へ運ばれる。

解析の結果、燃料セグメントの線出力密度が600W/cmの時、キャプセル外筒内面の熱伝達率は0.71W/cm<sup>2</sup>K(1250Btu/hft<sup>2</sup>°F)程度であることが明らかになった。さらに、燃料セグメント部で発生した熱量のうち10%程度の熱量は燃料ペレットスタックの上側部分に移動し、冷却されることが考えねばならないことが判明した。

この解析を通じ得られた解析結果は、BOCAキャプセルの今後の設計やその照射試験に有効に利用し得ると考えられる。また、水を注入する他の型式のキャプセル、飽和温度型式キャプセル（第4.3節参照）等の設計に参考となろう。逆に、飽和温度型式キャプセルの照射挙動と比較することにより、BOCAキャプセルの熱的特性をさらに明確にすること等が可能となろう。この解析結果および利用した解析手法は、BOCAキャプセルを含む試験装置の改良等にも有用な情報を与えると考えられる。

## 2. BOCA試験設備

### 2.1 JMTR出力急昇試験設備 (BOCA/OSF-1)

BOCA試験設備の使用目的は、軽水炉燃料セグメントの出力急昇試験を行うことである。正式には、JMTR出力急昇試験設備、BOCA/OSF-1と称されている。その設備の概要については「JMTR照射ハンドブック」<sup>1)</sup>を参照されたい。BOCA/OSF-1は、BOCA照射設備 (Boiling Water Capsule Irradiation Facility : BOCA)とOSF-1照射設備 (Oarai Shroud Irradiation Facility-No.1 : OSF-1)から構成される。

要約すれば、照射試料の燃料セグメントを装荷したBOCAキャプセルと<sup>3</sup>He出力制御装置を組み合わせた装置である。<sup>3</sup>He出力制御装置は、<sup>3</sup>He (n, p) <sup>3</sup>H反応を利用して、局所的な中性子束を原子炉全体の出力とあまり関係なく抑制する。

キャプセル挿入位置の外側に、アルミニウム合金製の二重管 (<sup>3</sup>Heヘリウムガス・スクリーン) が設置され、その空隙に<sup>3</sup>Heガスが最大40気圧まで加圧して装填される。照射試料の燃料セグメントの出力は、ヘリウムガス・スクリーン内の<sup>3</sup>Heガス圧力を調整して、供試燃料セグメントに対する熱中性子束を変化させて制御される<sup>2)</sup>。

BOCAキャプセルとは、狭義にはBOCA/OSF-1装置の炉内管の中に挿入されるキャプセルを意味する。この報告書ではこの狭義の意味で使用した。

JMTRのOSF-1装置およびその中に挿入されるBOCAキャプセルの炉心内に配置される主要試験部の概略図をFig.2.1に示す。また、この解析に利用した照射試料としての燃料セグメントおよびその上、下の取り付け部材の概略をFig.2.2に示す。

#### (1) BOCA試験設備

OSF-1装置の試験部の概略はFig.2.1に示した通りである。BOCAキャプセルは、OSF-1内に装荷される。BOCAキャプセルの内部には照射試料の燃料セグメント (Fuel Segment) を含む。

照射試料としての燃料セグメントは、通常、燃料ペレット・スタック中心がJMTR炉心中心位置から7.5cm下方に位置するように装荷される。これはこの位置が平均して中性子束の最も高い位置であるからである。OSF-1内側の仕切管 (Partition Tube) の一部にヘリウムガス・スクリーン (He-3 Gas Screen) が設けられている。ヘリウムガス・スクリーンが設けられている位置は、試料としての燃料セグメント装荷部に相当する部分の周囲である。

#### (2) BOCAキャプセル

BOCAキャプセルは、OSF-1内に装荷される。BOCAキャプセルの照射試料 (燃料セグメント) を収納する部分はキャプセル下方部でこの部分は仕切り部 (中間端栓 : Middle End Plug) で仕切られキャビティーを構成する。このキャビティーに照射試料としての燃料セグメントが装荷される。キャビティー内には軽水炉照射条件を実現するため水が注入される。キャビティーに水を注入するための給水、排出管 (Inlet/Outlet Tube) は中間端栓を貫通してい



る。キャビティー（BOCAキャプセル）内への水の注水は、キャビティーの上方から下方まで給水管を延長した導水管（Injection Tube）による。

燃料セグメントの出力は、別途電気ヒータを装荷したキャプセル（出力校正用ヒータ・ロッド）から得た値を処理して評価される。出力校正用ヒータ・ロッドは、BOCAキャプセルによる燃料セグメントの出力急昇試験に先立ち、OSF-1ループに挿入される。キャプセル内の試料部に相当する部分は電気ヒータでその出力は制御可能である。電気ヒータの出力とOSF-1ループ水の試験部入口温度と出口温度との温度差が計測され、ヒータ出力とループ水の温度変化の関係が求められる。実際に照射試験される燃料セグメントの出力は、直接測定することが困難なことから、ヒータ・ロッドによる電気ヒータ出力とOSF-1ループ水の温度変化の関係を利用して評価される。このヒータによる校正試験は、原子炉on power状態で実施される。なお、ヒータの出力分布は軸方向について一様（フラット）である。

照射中のキャプセル内注入水温度は、熱電対（Termocouple）により測定される。この温度はレコーダに記録され、保存される。燃料セグメント挿入位置を中心に5箇所の温度を測定する。通常、熱電対が5段に分けられ、計6個の熱電対が取り付けられている。各熱電対は燃料セグメントとキャプセル外筒間の薄肉の円板状スペーサに取り付けている。5段の熱電対は燃料セグメントプレナム部の頂部、燃料ペレット・スタック中心から15cm上側、スタック中心（2本）、スタック中心から15cm下側および導水管放出口の上部に相当する位置に取り付けられ、それらの部分に接する注入水温度を測定する。熱電対番号は、上側から番号が付され#1～#6で表示される。#3と#4は、スタック中心位置の2本の熱電対である。

出力校正用ヒータ・ロッドにも、キャプセル内の注入水の温度を測定するための熱電対を取り付けている。ただし、熱電対は3箇所3個で、その取り付け位置は、加熱部中心（炉心中心から7.5cm下側）とその15cm上側および15cm下側である。

### (3) 照射燃料セグメント

照射試料の燃料セグメントはBOCAキャプセル用に製作される。有効長は約400mm以内である<sup>3)</sup>。これにキャプセル内に固定するための部材等が上下に取り付けられる。

この解析に利用した照射試料としての燃料セグメントおよびその上、下の取り付け部材の概略はFig.2.2に示した通りである。

## 2.2 注入水の流れと熱的考察

キャプセル内に水を流し内部を水で満たす目的は、軽水炉燃料棒の照射条件（環境）を実現することである。試料に発生する熱を外筒外のキャプセル冷却水に伝達させるが、試料等の冷却を積極的に行うものではない。

キャプセルは炉外装置に接続される。キャプセル内のキャビティーへの注入水は、炉外装置から圧力74kg/cm<sup>2</sup>a（飽和温度288℃）の加圧水で送られ、上方から中間端栓を貫通した導水管で注入される。注入水は、キャビティー下方で放出される。試料部を上昇した注入水は中間端栓を再び貫通しキャプセル外に引き出され、炉外装置へ送られる。注入水は、水質の維持を主目的に、流量はきわめて小さく押さえられて約1g/secで給・排水されるonce through方式である。キャ

プセル内の水はほとんど滞留した加圧水となる。

キャプセル内の試料およびキャプセル構造材等で発生した熱の冷却は、主としてキャプセルの外壁（外筒(Capsule Casing)と呼んでいる）を介してOSF-1に流れるループ水によって行われる。すなわち、冷却はキャプセル周囲のOSF-1のループ水によるため、キャプセル内に発生した熱は径方向に流出する。ループ水（冷却水）は、OSF-1の上方からキャプセル外表面に沿って流れキャプセルを冷却した後、下部で流れの方向を変え、ループ外側の炉内管内面に沿って上昇し炉外装置に導かれる。OSF-1の流量は、通常1.9ton/hに維持されている。この時、キャプセル主要部周りの流速は約5m/sである。

OSF-1は第一義的には原子炉冷却水によって冷却されるが、炉プール水によっても冷却される。

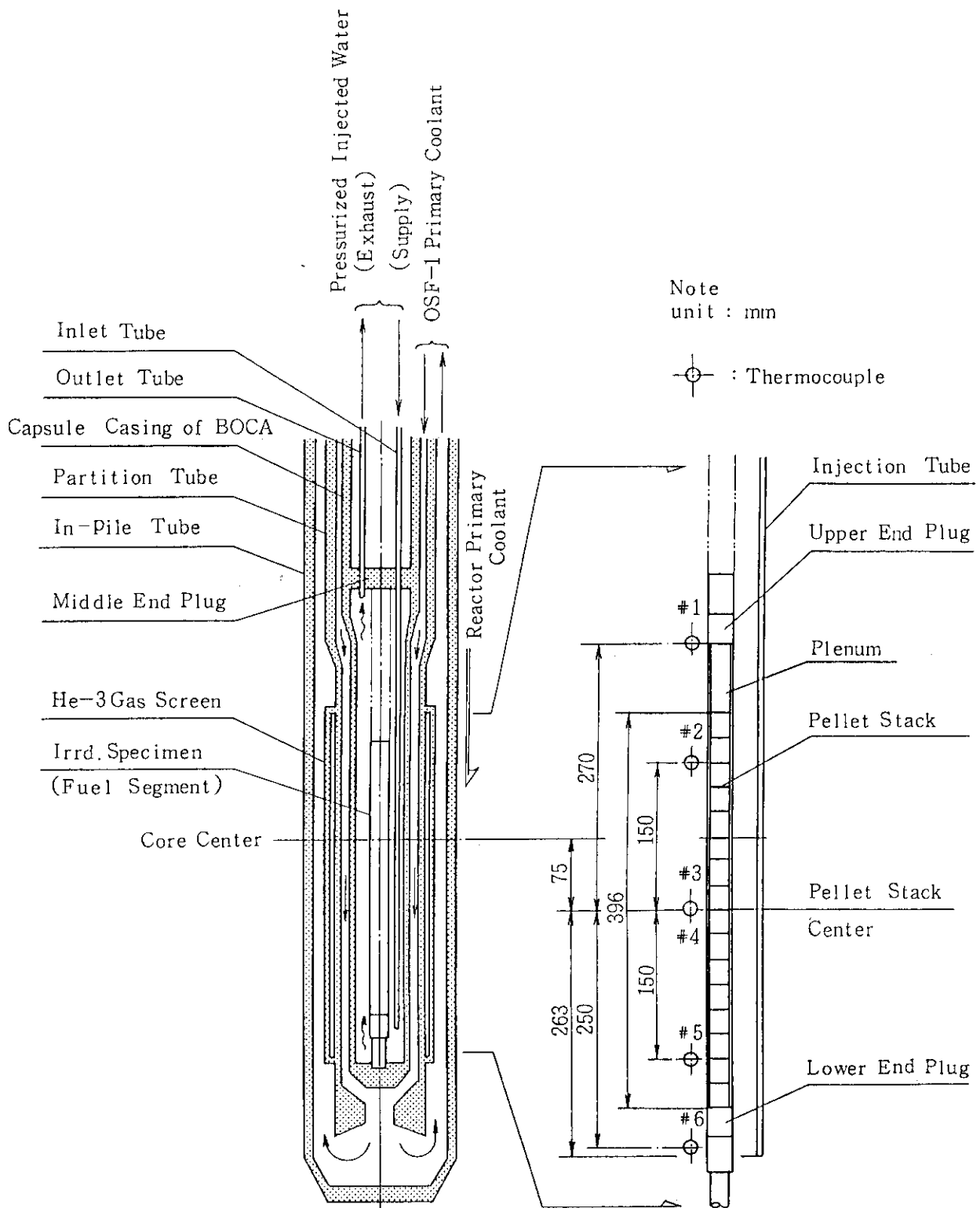
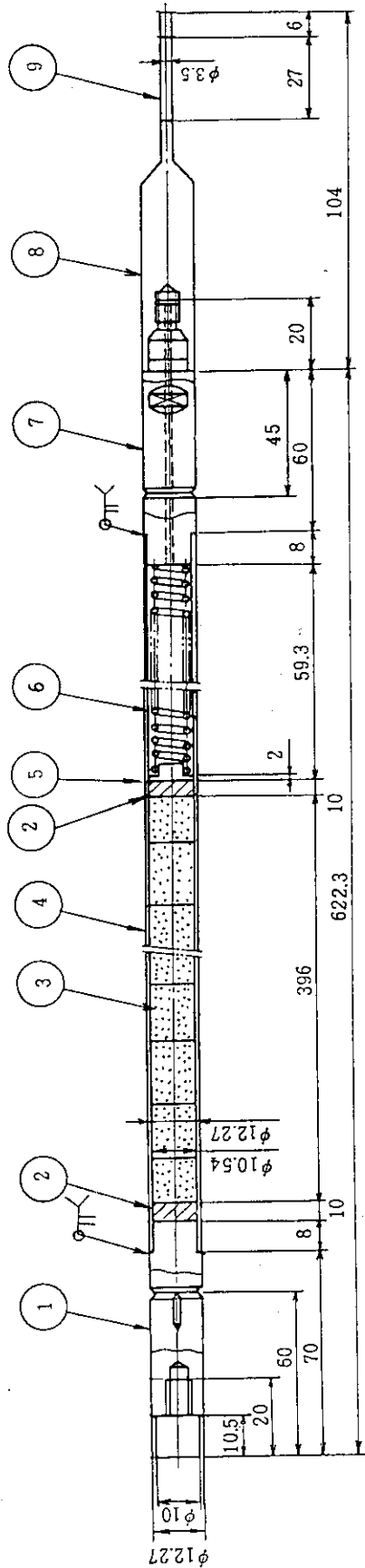


Fig. 2.1 Schematic diagram of BOCA/OSF-1 in core



No.	PARTICULARS	MATERIAL
9	Core of Differential Transformer	SUS403
8	Stay for Core	SUS304L
7	Top End Plug	Zry-2
6	Plenum Spring	Inconel-600
5	Stopper	Inconel-600
4	Clad	Zry-2
3	Pellet	UO <sub>2</sub> φ 10.5×12
2	Thermal Insulator	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	Bottom End Plug	Zry-2

Fig. 2.2 Fuel segment

### 3. BOCAキャプセル注入水の熱解析

#### 3.1 解析上の仮定

BOCAキャプセルを含んだ試験装置主要部の概略は、Fig.2.1に示した通りである。この解析における計算対象範囲は、長手方向についてキャプセル・キャビティー上部の中間端栓の下側とキャプセル下部端栓の上側の間とし、径方向の境界として、キャプセル外筒外のOSF-1内の内側のループ水までとした。試験装置に発生した熱の径方向の冷却は、最終的に最も外側の原子炉冷却水によって冷却される。仮に試験装置外側の原子炉冷却水温度のみが既知であるとする、熱解析の境界条件の一つはこの原子炉冷却水温度とすべきである。しかしながら、径方向の境界はキャプセル外筒外のOSF-1のループ水までとした。理由は、試料を含むキャプセル長手部分は $^3\text{He}$ スクリーンでこの部分からの径方向の熱流が少ないと考えられること、OSF-1の出入り口温度差が小さいことによる。

照射試料の燃料セグメントを含んだキャプセル自体の冷却はOSF-1に流すループ水による。キャプセルより径方向に流出する熱はキャプセル外側のOSF-1ループ水に与えられる。OSF-1のループ水は仕切管の内側を上方から下方にキャプセル外面に沿って流れる。ループ水の返り流れは下方から上方に外側の炉内管内面に沿って流れる。ループ水の流れは向流を形成している。一般的に向流はその境界板や管等の内外面の温度差により肉厚方向に熱の流れが発生し、温度の平坦化を起こす。しかし、このBOCAキャプセルの場合、最も高温となる試料の燃料セグメント装荷部位置の周囲の向流を形成させる仕切管部にヘリウムガス・スクリーンが設けられている。スクリーン内部はガス層になっている。ガス層は熱的な遮蔽効果を持つことから、径方向の熱流はきわめて小さいと考えられる。また、このループ水のキャプセル外面に沿った上方と下方の温度は測定されているが、その温度差は通常 $15^{\circ}\text{C}$ 以内であり大きくない。ここで、径方向の熱流を無視しうるならば、熱的解析においてキャプセル外のループ水温度を温度に関する境界条件として採用しうると判断した。

#### 3.2 解析手段

この熱解析ではプログラムSATCAPを利用した。SATCAPはJMTRで利用しているキャプセルのうち、内部に水を注入する型式のキャプセルの熱設計を目的に開発を進めてきたプログラムである<sup>4), 5)</sup>。径方向にOSF-1等までを計算対象に含んでの解析は可能ではない。しかし、先に述べたようにOSF-1ループ水温度を径方向の境界条件として考えることが可能ならば利用できる。

このプログラムは飽和温度キャプセルの設計に当たり最初に利用された。飽和温度キャプセルは新たな型式のキャプセルであったことより、設計に参照しうるデータの不足から開発途中のプログラムSATCAPが大幅に利用された。その後、飽和温度キャプセル内の注入水の熱的挙動評価の正確さを期すことが必要となり、修正が加えられた。特に、キャプセル各部の熱伝達率を推

定するモデルが重点的に追加されてきた。

今回、BOCAキャプセルの熱解析を実施するに当たり、主として次のようなモデルの追加およびプログラムの修正を行った。なお、詳しくは別途報告書を参照されたい<sup>6)</sup>。

- (1) キャプセル外筒外表面を流れる冷却水の温度上昇を考慮可能とした。

先の仮定により、キャプセル外面のOSF-1ループ水温度が既知ならば、温度計算の境界条件が定まり、プログラムの使用が可能となる。キャプセル外のループ水温は測定されており、入口と出口で温度差を有しているが、この温度差はそれ程大きくない。平均値を採り一定値として与えることもできる。しかし、熱解析をさらに詳細に追求可能とするため、OSF-1ループ水温度の変化（上昇）を考慮可能とした。ループ水温度は、入口と出口で測定値が得られているが、その軸方向途中の温度は測定されていない。そこで、軸方向途中のループ水温はキャプセル外筒上方からの積算流出熱量に比例して単調に増加し、出口で出口測定温度に一致するモデルを仮定した。

- (2) 照射試料の出力を線出力密度として取り扱えるようにした。

BOCAキャプセル内の照射試料は燃料セグメントである。その発熱率は線出力密度で取り扱った方が便利なので線出力密度で取扱い可能とした。

### 3.3 解析対象キャプセル

熱解析対象BOCAキャプセルとして、JMTRにおけるキャプセル名87BF-40AA, 87BF-38AD並びに出力校正用の電気ヒータ・キャプセル87BM-3Jを選んだ。解析対象としたキャプセルの要目をTable3.1に示す。それらの主要寸法はほとんど同じである。これらキャプセルの選定理由は、多くのBOCAキャプセルによる測定値があるが、先に選んだキャプセルについての測定値は公開可能なデータであるためである。主たる解析計算対象はキャプセル87BF-40AAとした。キャプセル87BF-40AAの照射試験は最近実施された。また、測定データは、計測手段の改善により、信頼性が高く、一通りの測定値が揃っている。この解析に使用した各キャプセル等の出力とその時の注入水等の温度の記録は付録に収録した。

### 3.4 解析結果

#### 3.4.1 解析結果

計算上採用したキャプセルの軸（長手）方向の分割等をFig.3.1に示す。分割点は総数25ノードとした。これらの分割点は種々のテスト・ランより決定した。解析結果の図、Fig.3.2～3.9において計算結果の注入水温度は、キャプセル内の上昇流を実線で、導水管中の下降流を点線で、測定値は記号△で示す。場合により一点鎖線で燃料セグメント等発熱体の表面温度を表す。解析結果の図の左側に燃料セグメント等の装荷位置を記入している。燃料セグメント等の端栓、発熱部分の有効長、プレナム部の位置関係を模式的に示す。

解析計算は、熱電対による5段の注入水温度測定がすべて揃っているキャプセル87BF-40AAを中心にした。

炉心内でガンマ加熱により発熱体となるキャプセル内部の構造材のスペーサ等についても熱発生計算に考慮した。しかし、OSF-1の炉心内設置位置は炉心の周辺部のため、構造材等のガンマ加熱率は小さい。これらによる発熱量は燃料セグメントの発熱量に比較し小さい。解析にさいしてのテスト・ランにおいて、キャプセル内部の構造材のスペーサ等の発熱量が注入水の温度変化に与える効果を検討したが、ほとんど効果はなく、無視してもよい程度であった。そのため、解析においては、燃料セグメント等の上下の取り付け金具等は同一径のステンレス鋼の丸棒で近似した。なお、外筒に発生した熱はその外側に流れ、注入水の加熱には影響しない。

#### (1) キャプセル87BF-40AAの解析結果

キャプセルに装荷された燃料セグメントの線出力密度295, 399, 584W/cm時の解析結果をFig.3.2~3.4に示す。解析は線出力密度状態に応じた外筒内面熱伝達率を設定して計算した結果である。設定した外筒内面熱伝達率はそれぞれの図のタイトルに記載している。

解析結果の図より、一般的に次のことが見られる。注入水は導水管内を下降している間に加熱され温度上昇する。この高温の注入水はキャプセル・キャビティー下部で放出される。下降流の温度上昇が始まる位置はキャプセルの上側の燃料セグメントのプレナム部に相当する付近の位置である。燃料セグメント有効長部分を通過するとき加熱される。この位置での温度上昇が最も大きい。燃料セグメント有効長の下部付近で温度は最高となる。しかし、注入水が有効長部分を下降している間の温度上昇率（単位長さ当たりの温度上昇）は、ほぼ一定と考えられる。

キャプセル内の上昇流は、例えば、燃料セグメント線出力密度584W/cmのとき（Fig.3.4参照）、下部における計算温度は70℃から137℃まで変動している。高温となっている箇所は、導水管が下方で注入水を放出している位置である。測定された最下部の注入水温度は約98℃である。ほぼ一致していると考えて良いであろう。燃料セグメント有効長部分になり急激な温度上昇を起こす、燃料ペレット・スタック中心付近で最高温度となる。燃料セグメントプレナム部分において温度低下が起こる。この理由は、この部分での注入水加熱熱量に比較し、外筒を介しての流出熱量が大きいためである。上昇流はキャプセル上部でさらに冷却されて、キャプセルより排出される。計算値は良く測定温度変化の傾向を表わしている。

導水管内を下降した注入水はキャプセルの燃料セグメント有効長部分で受け取った熱をキャプセル下部で放出する。下降してきた注入水は、下部の放出口を出た箇所でただちに温度低下を起こす。これは、低温の下部の水との混合による。注入水下降による熱の移動は、発生熱量を発熱部の下方に拡散させる効果を持っている。しかし、燃料セグメント線出力密度584W/cmの場合の計算結果でも、放出口での放出熱量は約455W程度で全体の発熱量の約21,000Wに比較し、それ程大きなものではない。

キャプセル下部部分において、下降流の温度が上昇流温度より高い部分は下降流が上昇流を加熱していることを意味する。

#### (2) キャプセル87BF-38ADの解析結果

キャプセル87BF-38ADの幾何学的寸法等は先の87BF-40AAと同じくした。このキャプセルに関する燃料セグメントの線出力密度229, 492W/cm時の注入水温度解析結果をFig.3.5, 3.6に示す。このキャプセルの温度測定結果のうち、最下部の注入水温度の測定値（#6の熱電

対測定温度)は出力変動にもかかわらず、殆ど約50℃の一定値になっており、熱電対の不具合を示していた。このため、この解析においては、最下部の注入水温度は計算値と実測値の比較対象から除いた。また、上方から第3段目(燃料有効長さ中心位置)の熱電対2本の内の1本の熱電対(#3)は明らかに断線した状態を示していた。

計算結果の温度分布の変化の傾向および測定値との一致性は、先のキャプセル87BF-40AAと同じである。このキャプセルについては、低出力(線出力密度229W/cm)の状態における測定がなされており、低出力時のキャプセル熱挙動を考察する上で貴重な情報であった。

### (3) キャプセル87BM-3Jの解析結果

キャプセル87BM-3Jは、燃料セグメントの出力校正用ヒータ・ロッドである。このキャプセルの電気ヒータ部における線出力密度、96.8, 193, 579W/cm時の注入水温度解析結果をFig.3.7~3.9に示す。このキャプセルによる注入水温度の測定は、先に述べたように加熱部(電気ヒータ)の中央、中央から±7.5cm上下の3箇所である。なお、この解析に利用した測定結果は、JMTR第92サイクルにおける値である。

計算結果の温度分布は、良く測定値の傾向を把握している。ヒータの軸方向出力分布は一様であるが、最高温度の位置は発熱部中心よりやや下側にある。そして、上側に行くほど温度はわずかであるが、低下する傾向を持つ。先に見た燃料セグメント(軸方向出力分布一様でない)の場合と温度分布の傾向が異なる。この理由は、出力分布が一様であることとキャプセル外筒外のOSF-1ループ水温度が下方になるほど温度上昇するため、ループ水への熱の流出が悪くなることによる。Fig.3.9の図中に示す1点鎖線で示す線は、外筒外のOSF-1ループ水温度を軸方向に沿って一定値(48.5℃)とした計算結果である。注入水温度はほとんど一定になる。多少の変動は、外筒のガンマ加熱率が軸方向に分布をもつためである。

### (4) 外筒内面熱伝達率

上記の解析において、外筒内面熱伝達率は各線出力密度状態において変更した。この値をまとめるとTable3.2のようになる。表には、この報告書に収録しなかった出力校正用ヒータ・ロッドの線出力密度、289, 386, 483W/cm時等の外筒内面熱伝達率推定値をも収録した。

外筒内面熱伝達率の変化を燃料セグメント等の加熱体線出力密度で整理し図にすると、Fig.3.10のようになる。すなわち、線出力密度約600W/cmにおいて約1250Btu/hr.ft<sup>2</sup>F, 400W/cmにおいて約600Btu/hr.ft<sup>2</sup>F, そして、300W/cmにおいて約500Btu/hr.ft<sup>2</sup>F, 100W/cmにおいて約200Btu/hr.ft<sup>2</sup>Fとなった。外筒内面熱伝達率の変化傾向は燃料セグメントでも、ヒータの場合でもほとんど変わらない。この図から、外筒内面の熱伝達は二つのメカニズムを有しているように見える。

## 3.4.2 解析に採用したパラメータおよびモデル

### (1) 軸方向出力

キャプセル87BM-3Jは、出力校正用ヒータ・ロッドであり、その電気ヒータ部の軸方向出力分布は一様と考えて良い。他のキャプセルに装荷の燃料セグメントは軸方向出力分布を持つ。解析において燃料セグメントの軸方向出力は、一般のキャプセル設計に使用する設計出力分布曲線を使用した。BOCAキャプセルの周囲にはヘリウムガス・スクリーンがあることから、



この燃料セグメントについて適用可能かどうかは分からないが、熱解析の軸方向出力分布としては設計用曲線で十分のようである。しかし、ヘリウムガス・スクリーン内の軸方向分布を一度、再検討してみる必要があるであろう。

## (2) 熱伝達率の選定

### (a) 外筒外面の熱伝達率

外筒外面の熱伝達率は、約 $4100\text{Btu/hr}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}$ の一定とした。この値はJMTRキャプセルの熱設計一般に使用の値である。仮に、Dittus-Boelter相関式でこの熱伝達率の評価を考えると、まず、キャプセル周りの流路形状に大きな変化はなく、流速もほぼ一定になると考えてよい。次に、キャプセルを冷却するOSF-1ループ水温度は、87BF-40AAの場合、入口で約 $36^\circ\text{C}$ 、出口の最大で約 $53^\circ\text{C}$ とその温度差が小さい。平均して温度が低く、この程度の温度差では物性値の変化も小さい。その結果、Re数、Pr数の変動も大きくない。流速の変動、温度変化の程度も小さいものでは、熱伝達率の値として一定値を使用しても大きな誤りは発生しないと判断した。

### (b) 外筒内面の熱伝達率

解析にさいし、外筒内面の熱伝達率は燃料セグメント等の各出力状態に応じた一定値を使用した。燃料セグメント等の各線出力密度状態において、外筒内面の熱伝達率を変更し測定値にほぼ一致する値を採用した。この理由は、当初のテスト・ランにおいて、飽和温度キャプセルの熱解析と同様、プログラム組み込みの水の自然対流熱伝達モデルで外筒内面の熱伝達率を評価したが、測定値との一致が得られなかったことによる。原因は、 $400\text{W/cm}$ 以上の出力で、プログラム評価の外筒内面の熱伝達率が小さ過ぎることにある。

自然対流熱伝達モデルによる熱伝達率評価は、このBOCAキャプセルの場合一般的に低すぎ、例えば、燃料セグメントの線出力密度約 $600\text{W/cm}$ の場合、外筒内面の熱伝達率の値として、組み込みの自然対流熱伝達モデルによる熱伝達率評価値の約1.5倍程度の熱伝達率でなければならないことが判明したためである。

### (c) 試料表面熱伝達率

試料表面温度が飽和温度に達しない場合、試料表面熱伝達率は燃料棒安全性評価プログラムGAPCON THERMAL-1<sup>7)</sup>に使用のモデルによって評価することとした。これは、照射試料が軽水炉の燃料棒を模擬した燃料セグメントであることからの選択である。ただし、燃料セグメント等の表面温度が飽和温度以上となれば、表面温度は未飽和沸騰熱伝達を用いて計算される。

### (d) 導水管内外面熱伝達率

導水管内外面で必要な熱伝達率は、次のようにした。外面は水の自然対流熱伝達モデルで評価した。導水管内面の熱伝達率は、 $200\text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}$ の一定値とした。

導水管内外面熱伝達率が小さいと、導水管下端出口で注入水は温度上昇しない。当初のテスト・ランにおいて、導水管内面の熱伝達率をDittus-Boelter相関式で評価を試みたが、熱伝達率が小さく、導水管下端出口で注入水はほとんど温度上昇しないという結果になった。この理由は、導水管内の流量が小さくRe数が非常に小さくなるためであった。さらに、Dittus-Boelter相関式のRe数の適用範囲を下回ることも判明した。

導水管内外面熱伝導率が大きいと、注入水は導水管内を下降している間に加熱され温度上昇する。この高温の注入水はキャプセル・キャビティー下部で放出され、キャプセル下部の導水管放出口での温度が高くなる。下降流の放出口での温度が高いと、下部での注入水の温度は高くなるが、下部の水の温度を上昇させ、この箇所での外筒を通しての流出熱量も大きくなる。

先にも述べたように、例えば、Fig.3.4（燃料セグメント線出力密度584W/cm）の下部における計算温度は70℃から137℃まで変動している。この高温となっている箇所は、導水管が下方で注入水を放出している位置である。一方、測定された最下部の注入水温度は約98℃である。導水管内の流速は約8cm/secであり、キャプセル内部の上昇流の平均流速は約0.2～0.33cm/sec程度である。導水管から放出される注入水は下方に向かい下部の滞留水と完全な混合はしないであろう。最も下側の熱電対は、導水管とは同一垂直線上に取り付けられていないので、導水管内を下降してきた注入水の温度を測定しているのではなく、むしろキャプセル下部の滞留水の温度を測定している可能性が大きいと推測される。さらに、比較し得る他の値が欠如している。出力校正用ヒータ・キャプセルでは燃料を装荷したキャプセルと異なり、最下点の温度は測定されていない。また、87BF-38ADでは最下点の熱電対の不具合により測定値が信頼できない。

そこで、キャプセル87BF-40AAの最も下側の測定値が計算値の変動幅内に在ることを一応の判断基準にとり、内面熱伝達率は200～300Btu/h.ft<sup>2</sup>F程度の値（導水管外面熱伝導率を自然対流熱伝達モデルで評価して）と推定した。この計算においては200Btu/h.ft<sup>2</sup>Fを選択した。仮に、導水管内の注入水が50℃から288℃まで温度上昇したとしても、その熱量は最大限約1.3kWで、燃料セグメントの全発熱量約21kWに比較し、小さい。この温度が多少狂ったとしてもキャプセル全体の熱バランスに大きな影響はなく、注入水の温度計算には大きな効果はないと判断した。

なお、自然対流で評価する場合、熱伝達率評価に必要な（グラスホッフ数の算出等）水力学的長さ（熱伝達の代表長さ）はキャプセル下部端栓上側からの計算対象位置までの距離とした。ただし、長さは $3 \leq x \leq 50$ cmに制限した。これは、計算値の安定化のための処置として行った。

### (3) 測定データとの一致を得るために採用したモデル

この解析にさいし、測定データとの一致を得るため燃料セグメントの燃料プレナム部分（Fig.3.1の分割図でセクション番号17～20の部分）に相当する軸方向位置に注入水を加熱する熱量の流入があったとした。この理由は、以下の通りである。

例えば、燃料セグメントプレナム部での熱の発生が被覆と内部のスプリングのみとした時の計算結果はFig.3.11に示す通りである。計算条件はFig.3.4と同様であるが、有効長部分での測定温度をほぼ一致させるため、外筒内面熱伝達率を1500Btu/h.ft<sup>2</sup>Fに設定した。この計算では、燃料セグメントプレナム内のスプリング材（材質：インコネル）のガンマ加熱率はステンレス鋼とほぼ同じとした。発熱体が被覆と内部のスプリングのみとした時の計算結果は、計算値と測定値で全体の温度分布の傾向が異なる。特に、燃料セグメントの有効長を過ぎた箇所より急激に注入水の温度低下が始まり、プレナム上部の箇所では約52℃となる。しかし、この箇所での温度測定値は、約162℃である。計算値と測定値との相違が大きく約110℃の温度差がで

きる。

計算における相違発生の原因は、上部プレナム部分で計算上評価される発生熱量に比しキャプセル外筒を通して外側のループ水に流れる熱量が大きいためである。この部分での測定データとの一致を得ることのみを目的とすれば、一つの方法としてこの部分のキャプセル内面の熱伝達率を小さくすれば、一致させることも不可能ではない。しかし、プレナム部周りの外筒内面の局所的な熱伝達率のみが極端に小さいとする理由はない。後に述べるように、キャプセル内面の熱伝達率を自然対流モデルと一定値とした二つの計算値はほぼ一致し、大きな相違はない (Fig.3.7, 3.8およびFig.4.1(a)(b)参照)。

いま一つの方法として、測定データと一致させるため、例えばプレナム部に相当する箇所に注入水を加熱する熱量があると仮定し、この部分に熱量 $\sim 2000\text{kW}$ を追加して見ると、結果はFig.3.12のようになる。プレナム上部でも測定値と計算値が近づく。さらに、計算値と測定値の温度分布の傾向も似通ってくる。これらの結果から、燃料セグメント有効長の上端からプレナム部までの間に注入水温度を著しく低下させない熱量が加わると考えねばならないと判断した。

スプリング材 (材質: インコネル-600) の重量は、 $12.2\text{g}$ 程度と推定される (ターン数15  $\times$  コイル中心直径 $10\text{mm}$   $\phi$   $\times$  線径 $2\text{mm}$   $\phi$ , 密度 $=8.23$  (g/cc) と仮定)。ガンマ加熱率をステンレス鋼に相当する ( $\sim 10$  (W/g)) とし、全発熱率は最大に見積もっても $122\text{W}$ に過ぎない。この熱量では、先の約 $2000\text{kW}$ を説明することはできない。

そこで、燃料有効長部分で発生した熱の一部が燃料セグメントプレナム部分に移動し、プレナム部分で注入水を加熱すると言うモデルを採用した。加熱の割合は、燃料セグメント全出力の約10%に相当するとした。解析においては、プレナム部分に相当する軸方向位置に注入水を加熱する熱が存在するとし、その加熱する熱量は燃料セグメント有効長部分で発生した熱量が移動すると仮定した。その計算手段として、プレナム部分に熱の存在を仮定するが、この熱量に見合う必要熱量は燃料セグメント有効長部分での発生熱量の一部だとし、これを減少させることにした。燃料セグメント有効長での発生熱量を減少させる方法として、例えば燃料セグメントの有効長を計算上減らす等の手法が考えられたが、燃料セグメント有効長部分の線出力密度から全体として10%の割合で減少させる方法を採用した。

キャプセル87BM-3J (出力校正用ヒータ・ロッド) でも、加熱部発生熱の熱の上部への移動があるとして解析した。出力校正用ヒータ・ロッドは、加熱部上部の注入水温度を測定していないので、上に述べたモデルが成立するかの直接の判断はできない。しかし、加熱が電気ヒータであろうが、燃料セグメントであろうが、キャプセル内の注入水の加熱状態が変わることは考えられない。また、ヒータ等の発熱部の上部で、プログラムで予想する程注入水温度が低下しない傾向は、飽和温度キャプセル設計のために行ったヒータを用いた炉外熱特性試験においても既に見られた<sup>8)</sup>現象であった。その当時はプログラム開発の初期の段階であり、プログラム内に問題があると考えられていた。今回、それらの実験値を分析した結果、出力校正用ヒータ・ロッドの加熱部の上部に発生熱量の一部が移動し、注入水を加熱する現象があるとした。このことは、燃料セグメントを含むキャプセルと同様な方法で解析した出力校正用ヒータ・ロッドの解析結果が、燃料セグメントのキャプセルの結果と、外筒内面熱伝達率の値に見るように

整合性を持っていることから正しいと考えられる。

同様な燃料セグメントで発生した熱の移動は、燃料ペレット・スタックの下部でも考えられる。すなわち、熱伝導により下側の端栓部に熱が回り込むことが考えられる。しかし、この解析ではこの効果は考慮しないこととした。

Table 3.1 BOCAキャプセル要目

	87BF-40AA 87BF-38AD	87BM-3J
外筒 主要部寸法 (mm)		
外径	32	32
肉厚	2.5	2.5
キャビティー長さ	860	843
上部太径部寸法 (mm)		
外径×長さ	45×30	45×30
肉厚	5	5
外筒材質	SUS-304	SUS-304
導水管		
外径×肉厚 (mm)	5×0.5	5×0.5
材質	SUS-304	SUS-304
燃料棒/電気ヒータ		
有効長/加熱部 長さ (mm)	396	360
被覆直径	12.27	12.26
被覆材質	Zry-2	Inconel-600

Table 3.2 外筒内面熱伝達率推定値(Btu/h ft<sup>2</sup>°F)

線出力密度 (W/cm)	87BF-40AA	87BF-38AD	87BM-3J
96.8	-	-	230.
193.1	-	-	400.
229.	-	450.	-
289.4	-	-	500.
294.7	500.	-	-
309.	-	500.	-
385.8	-	-	600.
399.2	620.	-	-
482.5	-	-	900.
491.8	900.	-	-
492.	-	900.	-
579.4	-	-	1200.
583.8	1200.	-	-

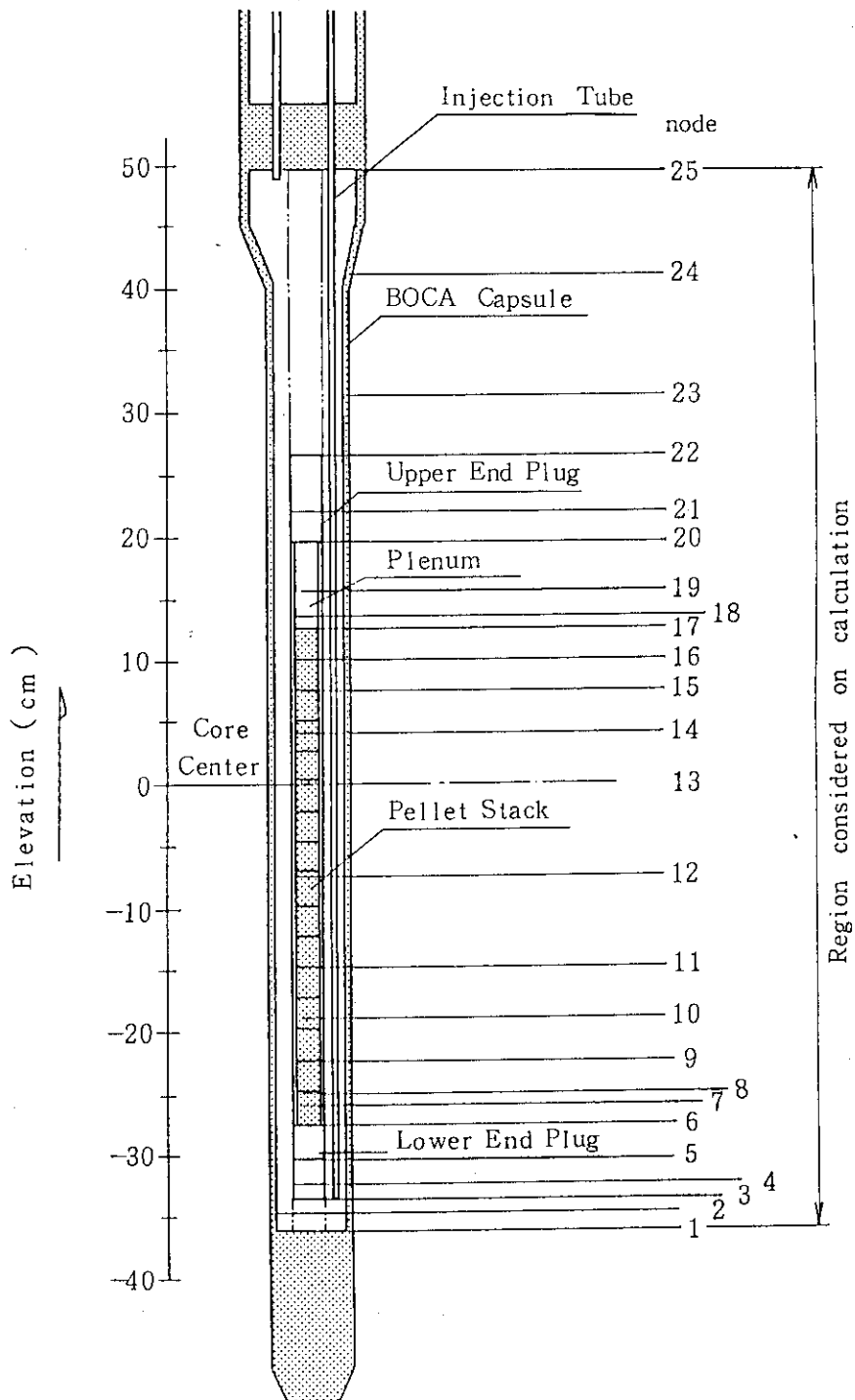
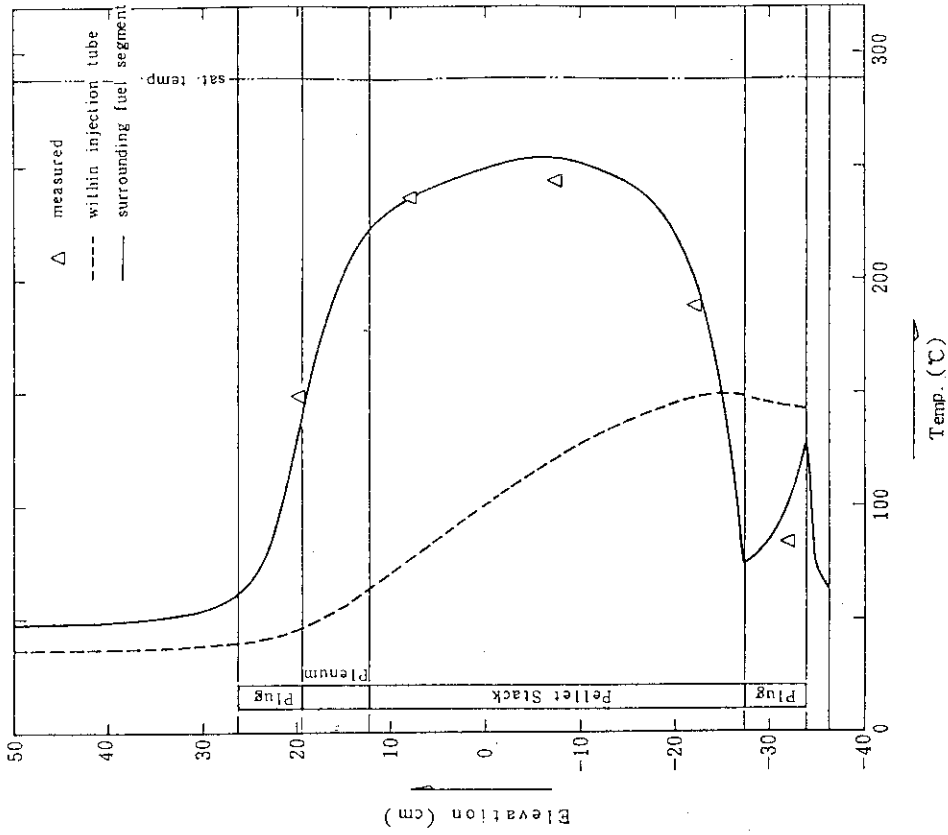
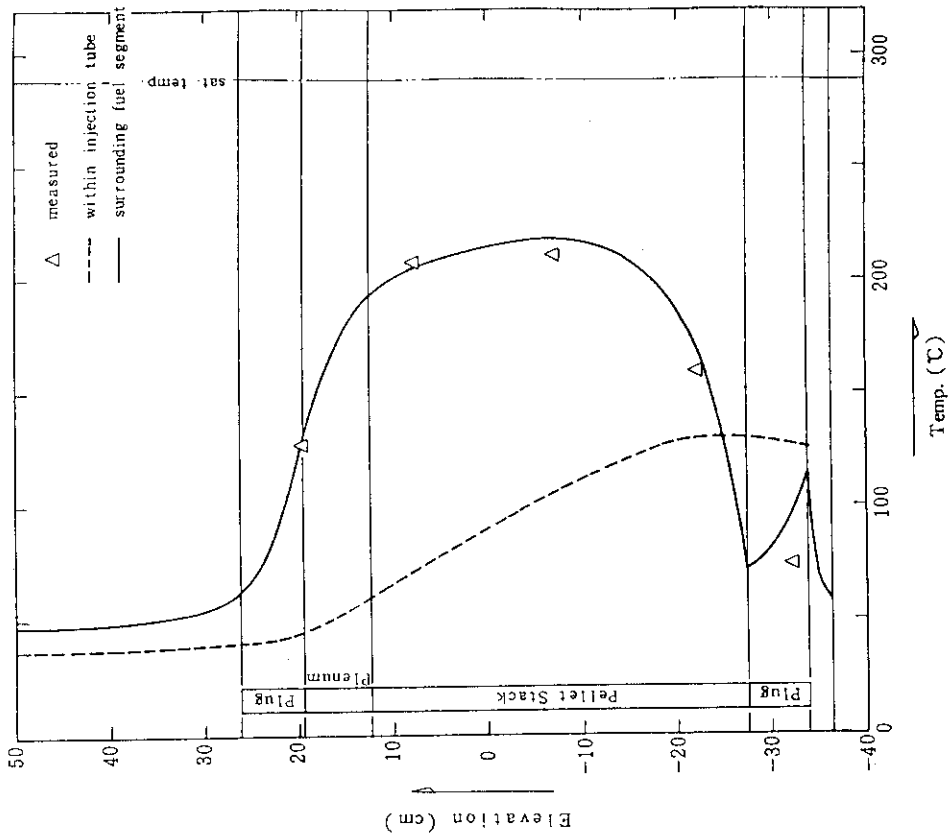


Fig. 3.1 Axial division of capsule on calculation



Heat transfer coefficient was assumed 620 Btu/hft<sup>2</sup>·F  
at capsule casing inner surface

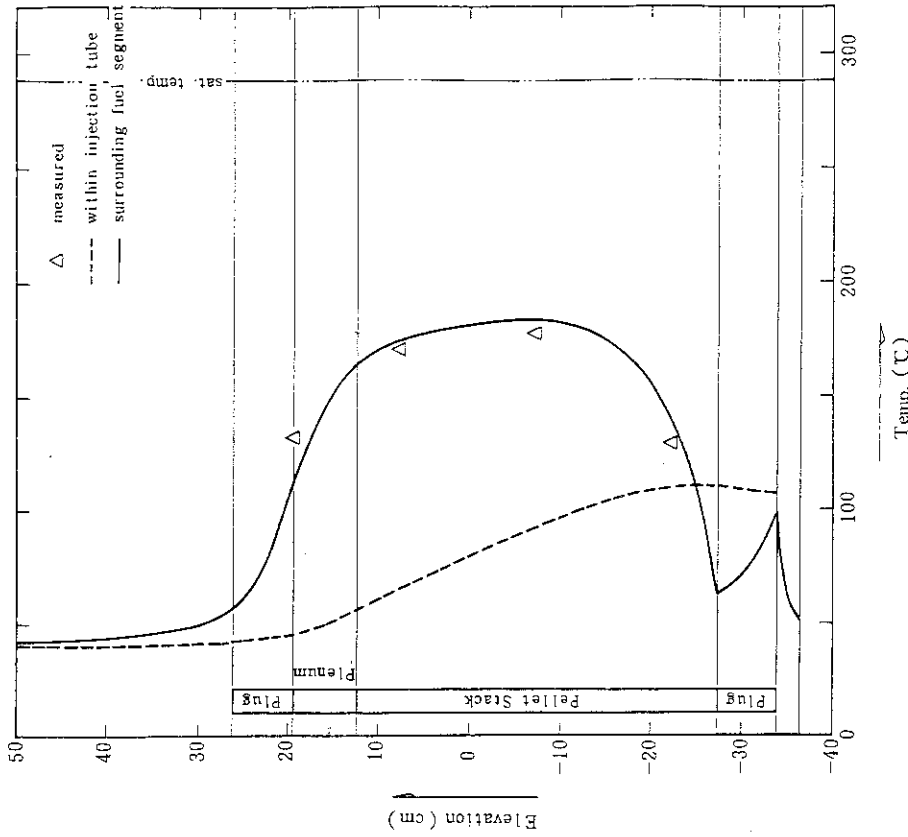
Fig. 3.3 Calculated temperature profile  
of 87BF-40AA under linear heat  
rate of 399 W/cm



Heat transfer coefficient was assumed 500 Btu/hft<sup>2</sup>·F  
at capsule casing inner surface

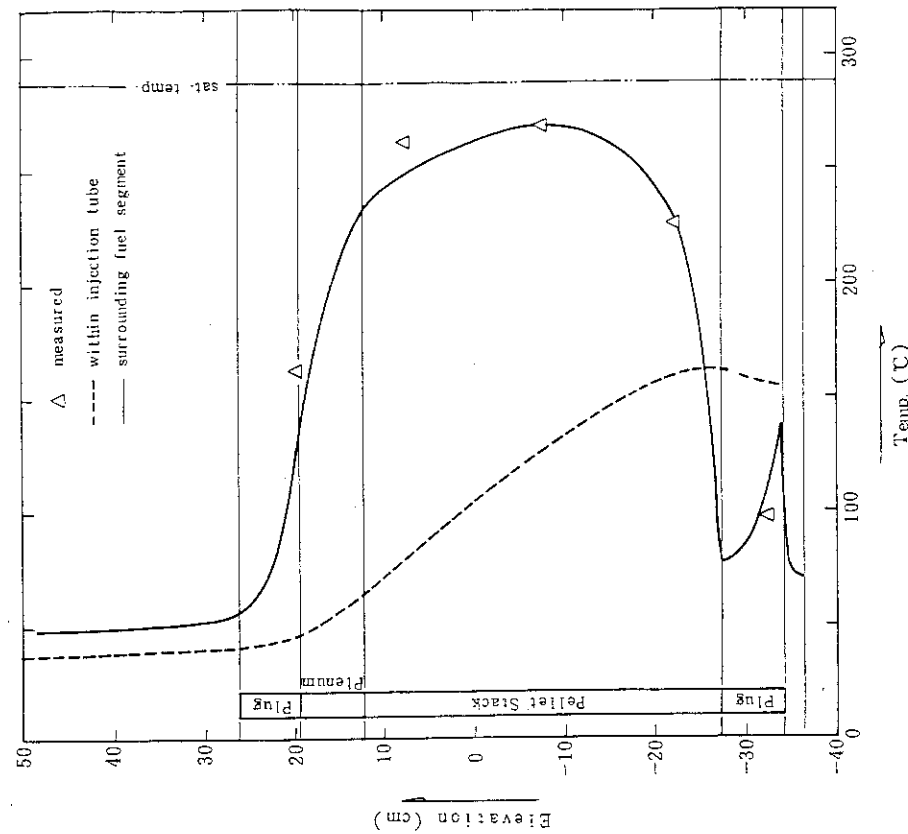
Fig. 3.2 Calculated temperature profile  
of 87BF-40AA under linear heat  
rate of 295 W/cm





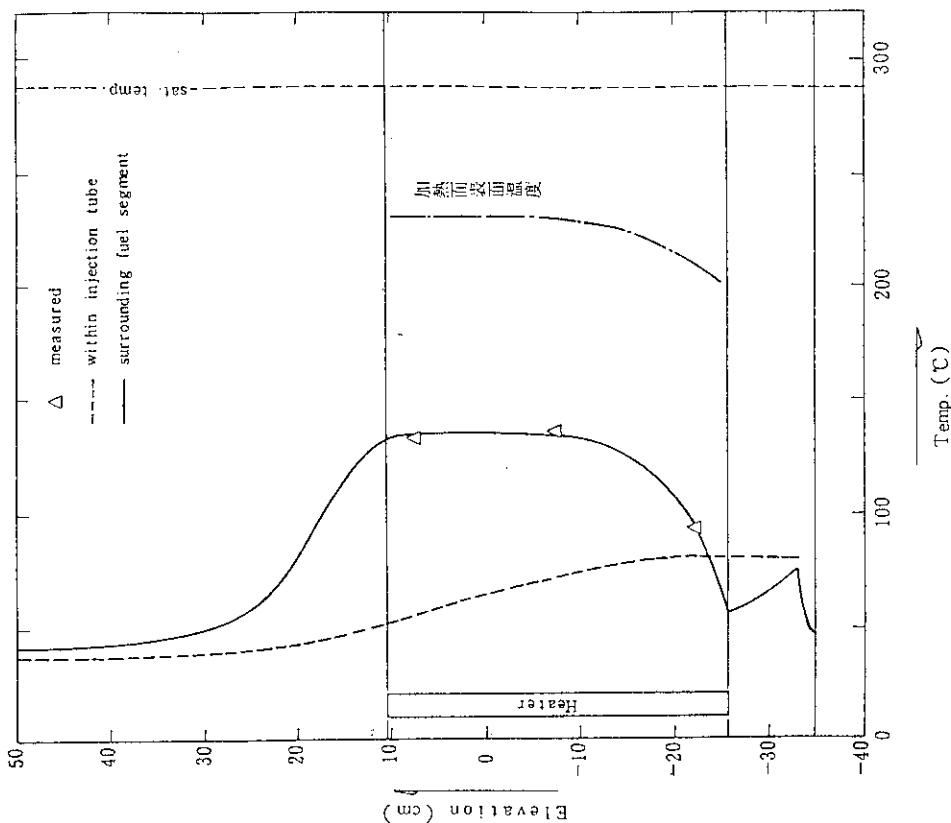
Heat transfer coefficient was assumed 1200 Btu/hft<sup>2</sup>°F at capsule casing inner surface

Fig. 3.4 Calculated temperature profile of 87BF-40AA under linear heat rate of 584 W/cm



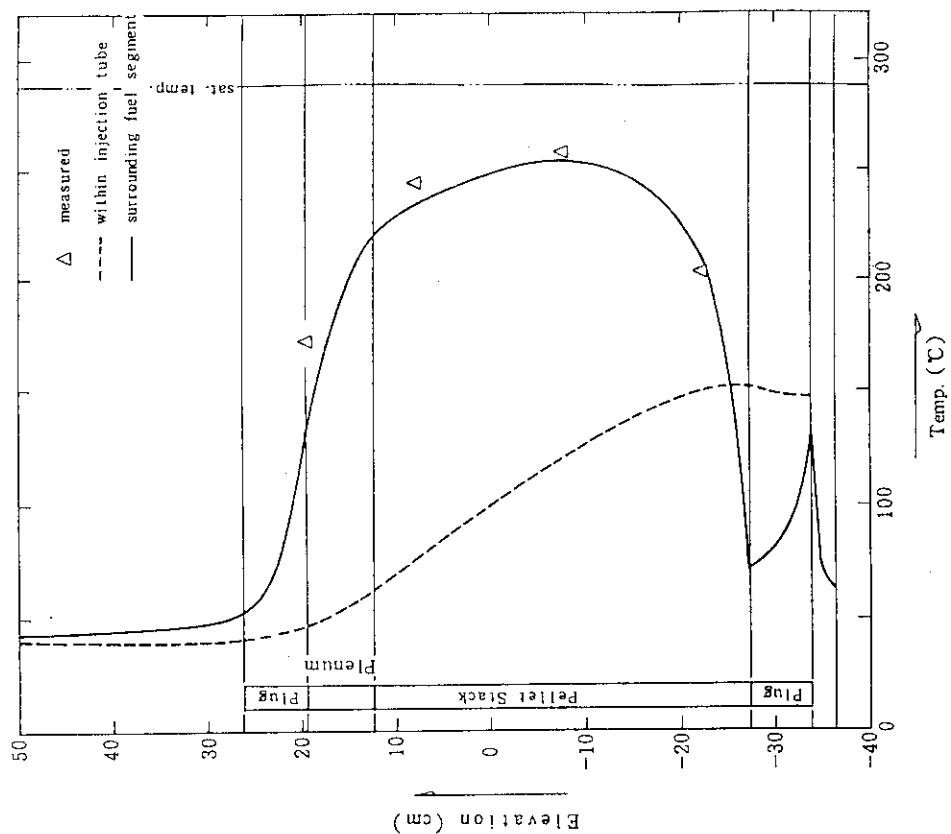
Heat transfer coefficient was assumed 450 Btu/hft<sup>2</sup>°F at capsule casing inner surface

Fig. 3.5 Calculated temperature profile of 87BF-38AD under linear heat rate of 229 W/cm



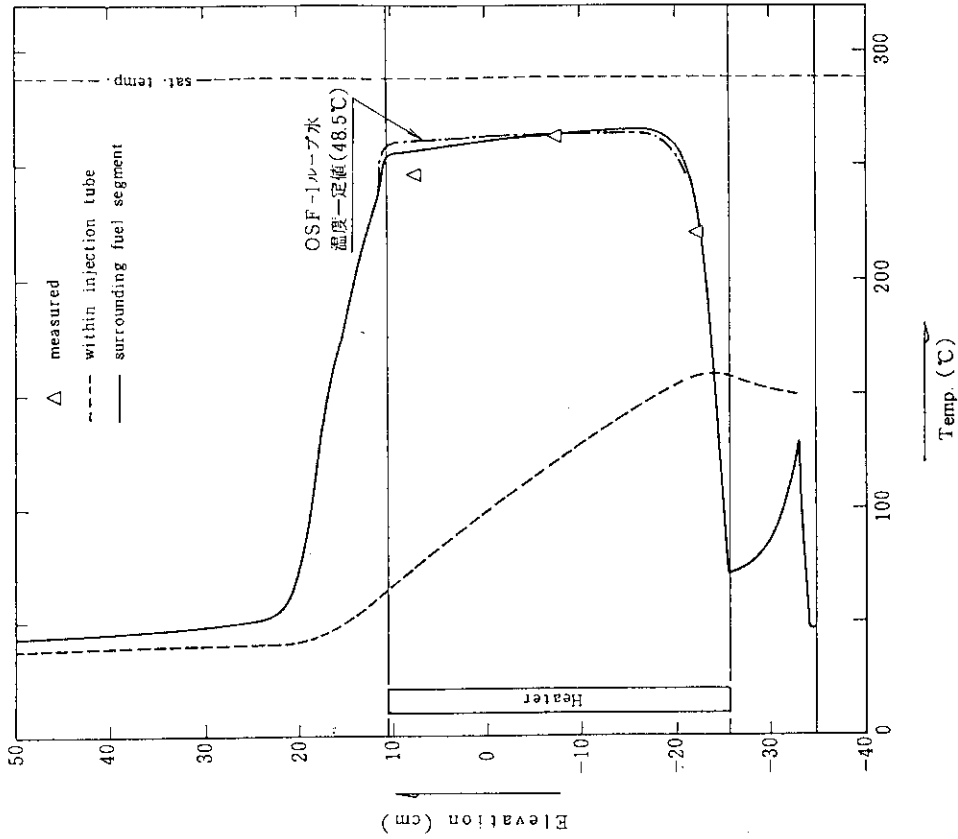
Heat transfer coefficient was assumed 230 Btu/hft<sup>2</sup>°F at capsule casing inner surface

Fig. 3.7 Calculated temperature profile of 87BM-3J under linear heat rate of 96.8 W/cm



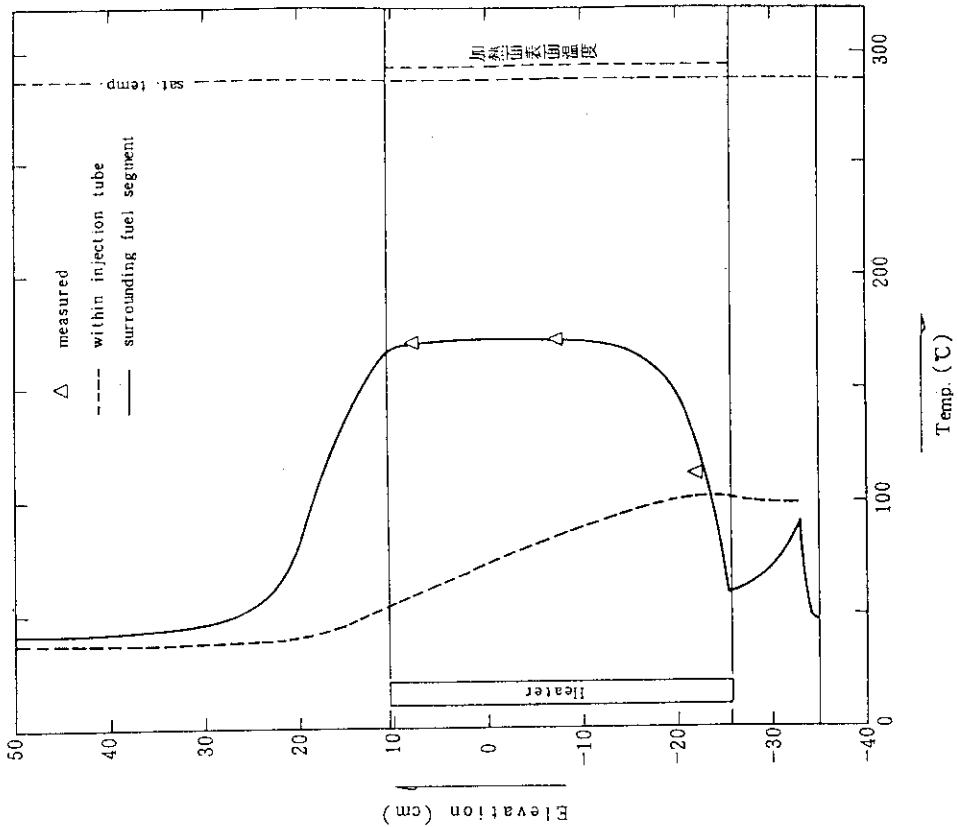
Heat transfer coefficient was assumed 900 Btu/hft<sup>2</sup>°F at capsule casing inner surface

Fig. 3.6 Calculated temperature profile of 87BF-38AD under linear heat rate of 492 W/cm



Heat transfer coefficient was assumed 1200 Btu/hft<sup>2</sup>°F at capsule casing inner surface

Fig. 3.9 Calculated temperature profile of 87BM-3J under linear heat rate of 579 W/cm



Heat transfer coefficient was assumed 400 Btu/hft<sup>2</sup>°F at capsule casing inner surface

Fig. 3.8 Calculated temperature profile of 87BM-3J under linear heat rate of 193.1 W/cm

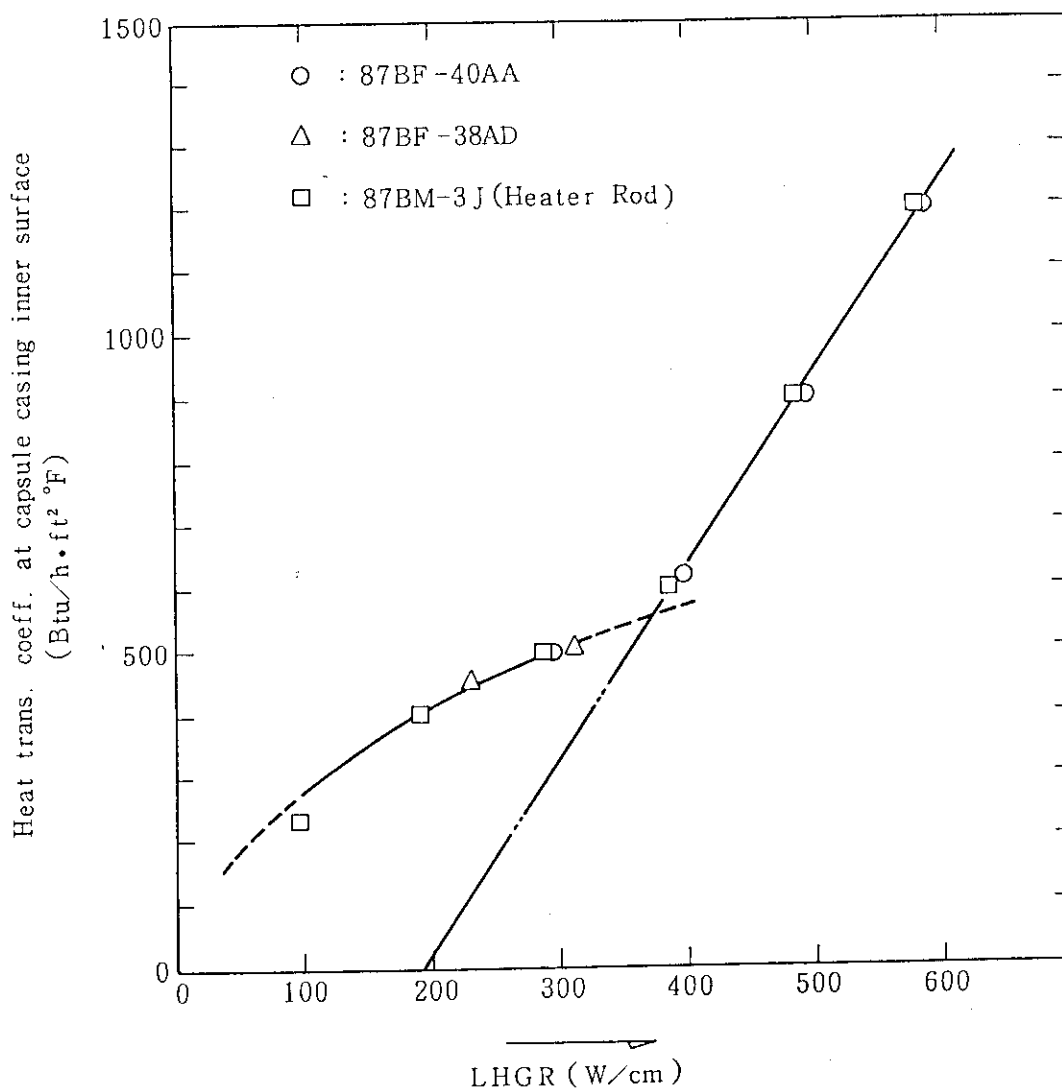
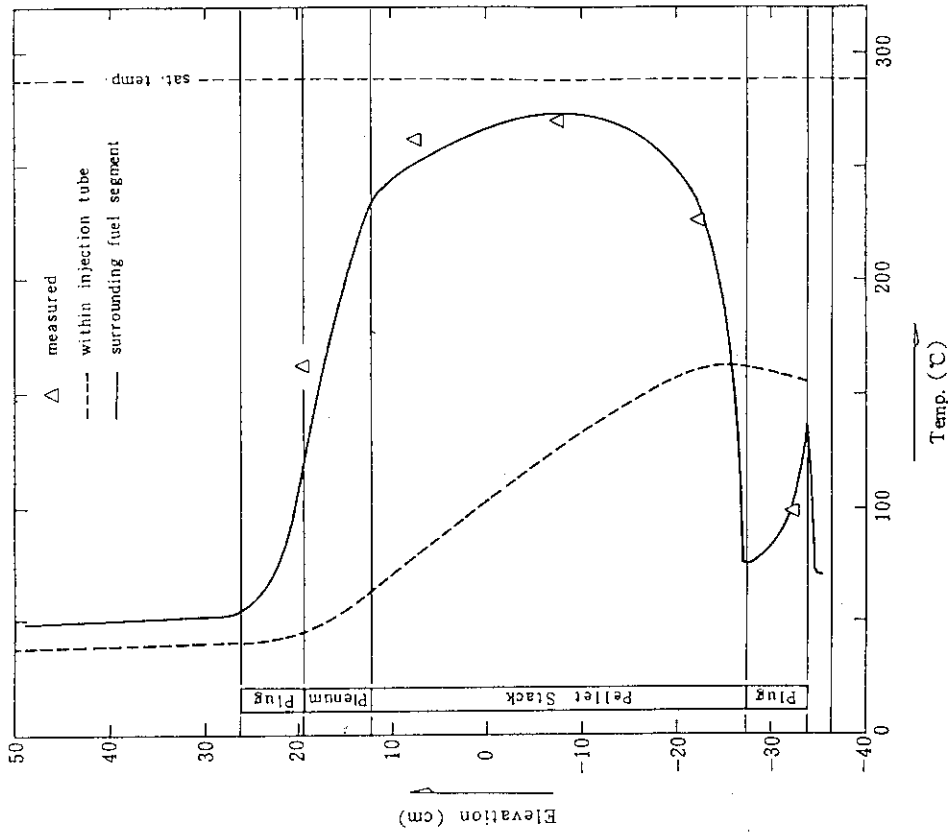
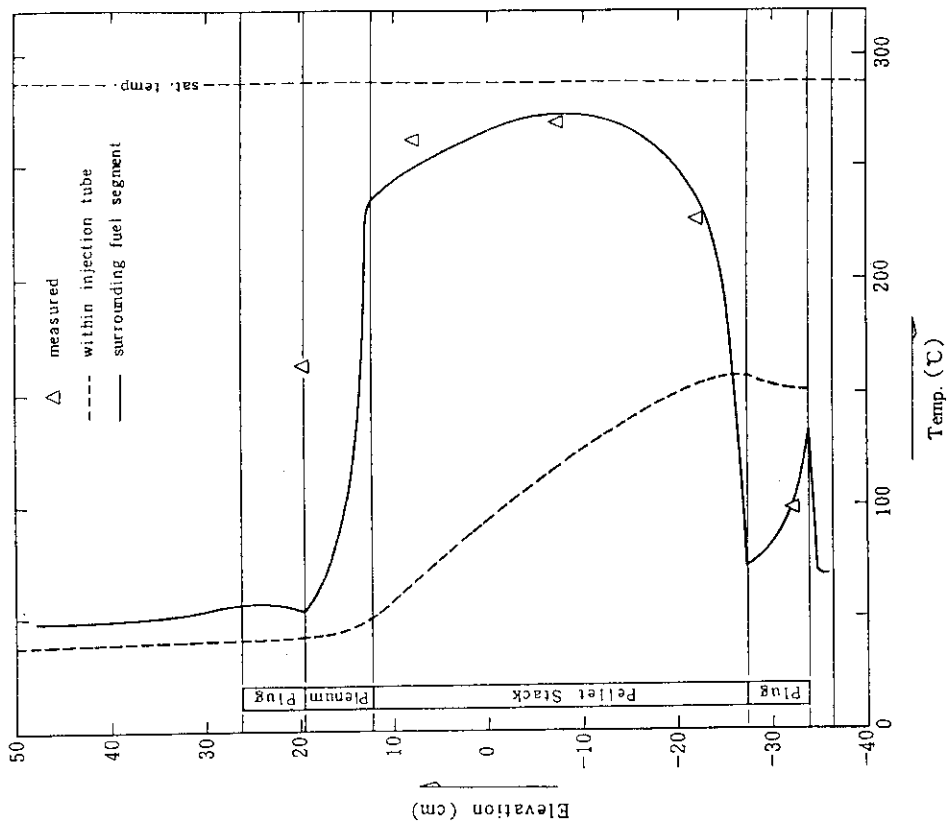


Fig. 3.10 Heat transfer coefficient at capsule casing inner surface against to LHGR



Heat transfer coefficient was assumed 1500 Btu/hft<sup>2</sup>·F at capsule casing inner surface

Fig. 3.11 Calculated temperature profile of 87BF-40AA under linear heat rate of 584 W/cm



Heat transfer coefficient was assumed 1500 Btu/hft<sup>2</sup>·F at capsule casing inner surface

Fig. 3.12 Calculated temperature profile of 87BF-40AA under linear heat rate of 584 W/cm

## 4. 検討ならびにBOCAキャプセル熱挙動の特性

### 4.1 BOCAキャプセルにおける熱挙動

#### 4.1.1 熱伝達率

##### (1) 外筒内面熱伝達率

外筒内面における熱伝達率を整理した図, Fig.3.10から, 外筒内面の熱伝達は二つのメカニズムを有しているように見える。

線出力密度300W/cm以下時の外筒内面の熱伝達率は, 線出力密度と共に増加するが, それ程大きく増加せず, ある値で飽和するように見える。一方, 線出力密度400W/cm以上の熱伝達率は線出力密度との間にほぼ直線性を持つ。外筒内面熱伝達率の変化傾向は燃料セグメントでも, ヒータの場合でもほとんど変わらない。線出力密度300~400W/cmの間は, 値が無いので詳細は不明であるが, 300W/cm以下時の熱伝達率の外挿線上にあると思われる。

線出力密度に対して外筒内面熱伝達率 ( $h$ , Btu/h.ft<sup>2</sup>.°F) を近似的に表示すると, 次のようになる。

$$\text{線出力密度300W/cm以下, } h=710\sqrt{q}$$

$$\text{線出力密度400W/cm以上, } h=1850q-600$$

ここで,  $q=(\text{燃料セグメント等の線出力密度, W/cm}) / (600\text{W/cm})$  とする。

線出力密度300W/cm以下の低出力時の熱伝達率は外筒内面に形成される自然対流による熱伝達であると考えられる。プログラム組み込み自然対流熱伝達モデルを使用し87BM-3Jキャプセル (ヒータ・ロッド) の低出力状態 (線出力密度97と193W/cm) の計算を行うと, 結果はFig.4.1(a)(b)の如くなる。この結果は, 測定値にほぼ一致している。この時の計算の熱伝達率は, 位置によって変動しているが, ヒータ加熱部の上部付近でそれぞれ約264, 375Btu/h.ft<sup>2</sup>.°F程度である。先に推定した熱伝達率の値と大きな相違はない。

BOCAキャプセルにおいて未飽和沸騰が開始される線出力密度は約200W/cm付近であることが示されている<sup>2),9)</sup>。これはヒータ被覆等に取り付けた熱電対の温度観測結果からの推定である。計算結果の加熱面の表面温度も, 線出力密度約100W/cmまでは飽和温度に達しないが, 約200W/cmになるとすでに全加熱面が飽和温度以上になることを示している (Fig.3.7, Fig.3.8参照)。先の外筒内面熱伝達率400W/cm以上の近似式で $h=0$ となる $q$ は $q=0.3243$ で, 線出力密度にすると約200W/cmとなる。これは加熱部表面で未飽和沸騰が開始されることと何等かの物理的關係があるのかもしれない。

外筒内面熱伝達には, 線出力密度の増加とともに燃料セグメント表面で未飽和沸騰が開始され, その状態が活発になるにつれ, 熱伝達を良くする要因が加算されると考えられる。線出力密度400W/cm以上で外筒内面の熱伝達率が自然対流熱伝達モデル (管壁に沿って垂直に発達した層を考えている) による熱伝達率で評価した値より大きくなる理由は, 同一平面での注入水内にも温度の分布があり, 試料表面の高温部と外筒内面の低温部との間には部分的な対流を

発生するためと推測される。フロンを用いた炉外実験の観測によると沸騰状態では電気ヒータ表面と外筒内面間に局所的な渦が形成され、全体として螺旋を描きながら上昇するのが観察されたと言う<sup>10)</sup>。

参考として、キャプセル内の注入水の最高温度を線出力密度で整理した図をFig.4.2に示す。注入水の最高温度は線出力密度約350W/cm付近まで出力との間にはほぼ直線性的関係を持っている。注入水の加熱はキャプセル外筒内部の燃料セグメント等の発熱体による。キャプセル外筒のガンマ加熱による発熱を計算結果から見ると、その比は（キャプセル内発熱量には内部の構造材の発熱量を含む）、

$$\text{外筒発熱量} / (\text{キャプセル内発熱量} + \text{外筒発熱量}) \sim 0.1$$

である。このキャプセル外筒のガンマ加熱による発熱は注入水の加熱には効果はないが、発熱率が高ければ外筒内部の温度差が大きくなるので、注入水の温度には影響を与える。この結果、注入水の温度はキャプセルの発熱率の増減に依存する。Fig.4.2はこの関係を表わしている。注入水の温度上昇は外筒内面との間の温度差が高くなることから、外筒を介しての流出熱量が大きくなり、注入水温度上昇率が緩和される。先の外筒内面熱伝達率の推定が正しいとすると、線出力密度約350W/cm以上の場合、さらにキャプセルの発熱率の増加は外筒内面の熱伝達率をも促進していると考えなければならないことになる。

## (2) 導水管内外面熱伝達率

導水管内外面の熱伝達率は下降流の出口温度におおきな影響を与えるが、導水管から放出された高温の注入水はただちに冷却されるので、上昇流の温度には大きな影響を持たない。導水管内外面熱伝達率を推定できるだけの測定値の不足と導水管内を下降してきた注入水温度を直接測定しているのかどうかの判断がつかないため、導水管内外面の熱伝達率を詳細に推定することは困難であった。今後何等かの方法で導水管出口の注入水温度を測定する必要がある。

ただし、キャプセル下部で計算温度範囲に測定値が収まると言う判断基準で推定した導水管内面熱伝達率200~300Btu/h.ft<sup>2</sup>°Fがそれ程狂っていなければ、導水管に関する総括熱伝達率は、線出力密度600W/cmのとき燃料セグメント有効長中心位置で149~199 Btu/h.ft<sup>2</sup>°F (0.085~0.13W/cm<sup>2</sup>K) 程度に算出される。

### 4.1.2 燃料セグメント上端部（プレナム部分）における注入水の加熱

この解析においては、燃料セグメント・プレナム部の注入水が加熱される熱量が加わるとした。燃料セグメント等、加熱部で発生した熱量の約10%が加熱部の上部に移動すると仮定した。これは、燃料セグメント有効長の上部の注入水温度測定値が1点であり、これに計算値が一致するように設定したためである。今後、有効長上部の注入水温度に関する測定値など詳細な情報が蓄積されれば、移動熱量の割合も変更さるべきである。さらに、その割合が変われば外筒内面熱伝達率の推定値も変更さるべきである。もし、熱量が10%以上であれば、線出力密度約300W/cm以上の外筒内面熱伝達率の推定値は小さくならねばならない。

このキャプセル上部で注入水が加熱される要因として次のような事項が考えられる。

(a) 試料表面が飽和温度以上となり未飽和沸騰状態に達すると、未飽和沸騰とは言え気泡が発生する。この時、燃料セグメント等からの熱は注入水に伝えられ、注入水全体のエンタルピー

は確かに上昇するが、この状態で発生した蒸気気泡は、必ずしもその部分でただちに凝縮し、熱量がその場所での注入水の温度上昇に使用されとは限らない。気泡は浮力や水の加熱により起こる密度変化の上昇流れに乗り、上方に移動する。気泡が上昇した部分で凝縮するとすれば、その部分の液相の飽和温度以下の注入水を加熱することになる。一方、解析に使用したプログラムは注入水温度が飽和温度に達したときのみ、気泡が発生すると仮定しているので、このような効果を評価していない。

(b) 解析に使用したキャプセル87BM-3J（ヒータ・ロッド）では、加熱部上部の注入水温度は測定されていない。このキャプセルの線出力密度約100W/cmでは今だ加熱面の表面温度は飽和温度に達していないと考えられる。しかし、計算は他の計算の場合と同様注入水の加熱があるとして解析した。これは、加熱部上部への熱の移動があるとして計算された外筒内面熱伝達率が他の値と連続性を持っている等のことから（Fig.3.10参照）何等かの形で熱の移動があると推測した結果である。これが正しいとすると、上記のように気泡で熱が移動するだけでないことを意味している。キャプセル内の熱の移動は気泡によるばかりではないと考えられる。この場合は加熱体の表面で加熱された注入水の密度変化により同一平面内に発生する不均一流れにより上方に熱が運ばれることがあると考えた方がよいようである。高温になった注入水の部分的な上昇流の影響もあり得ると考えられる。一方、プログラムは長手方向に分割したセクション内でのヒート・バランスのみを考え、セクション内での局所的な加熱流体の動きまでは考慮していない。

#### 4.1.3 その他の特性

(a) 導水管により下方への熱が運ばれる外、気泡ないし同一平面内での不均一流れにより上方への熱の移動がある。このため、キャプセル内の燃料セグメント部で発生した熱は有効長の部分ばかりでなく、その上・下に分散し冷却される。

(b) 構造材等のガンマ加熱率が小さいので、全体の出力はほとんど燃料セグメントの出力で決定される。キャプセル内の燃料セグメント等、加熱部分での注入水の軸方向温度分布は有効長の下側を除きほとんど与えられた燃料セグメント等の出力分布によって決定される。

(c) 導水管内の注入水は大部分導水管周りの注入水の冷却として作用するが、下部では加熱側に作用し導水管内の熱流の方向が逆転する。

## 4.2 飽和温度型式キャプセルとの比較

飽和温度型式キャプセルは金属材料（ステンレス鋼）の軽水炉環境条件での照射試験（照射目標温度290℃）を目的に設計・製作された。BOCAキャプセルと同様キャプセル内に水を注入する。キャプセル内部に仕切板を有し、注入水は仕切板により向流を形成する。注入水は、キャプセル上部より注入され、外筒内面と仕切板の間のキャプセル内の外周部を下降する。下部に達した注入水は、下部端栓上部で上向き流れとなり、照射試料が配された仕切板内部のキャプセル中央部を上昇し、キャプセル上部より排出される（Fig.4.3中の構造概略図参照）。

飽和温度型式キャプセルの一つ86M-44Jの注入水温度計算の一例をFig.4.3に示す。熱伝達率



はすべて自然対流モデルによって計算している。この解析で行った如き熱伝達率を変更し測定値との一致等の手段は採っていない。また、計算には、この解析におけるような上部における注入水の加熱モデルは採用していない。

飽和温度キャプセルとBOCAキャプセルとを比較すると、次のような相違がある(以下、Table4.1参照)。

飽和温度型式キャプセルの内部に注水する注入水流量は、BOCAキャプセルより大きい。これは、キャプセルの安定な運転を得るために決められた流量である。注入水の部分的な高温化を図ることのみならば、流量は少なくてもよいが、キャプセルに装荷の材料試料の一定温度照射のための試料温度の平坦化を実現し、かつ安定な運転を得るためにはかなりの流量を必要としている。

飽和温度型式キャプセルとBOCAキャプセルとでは炉心装荷の照射孔位置が相違する。飽和温度型式キャプセルは、炉心中央部に装荷されガンマ加熱率が大きい、試料発熱量は小さい。試料の照射目標温度290℃を実現するために、構造材等のガンマ加熱の発熱量を有効に利用し上昇流温度を高くしている。一方、BOCAキャプセルは炉心周辺部に装荷され、ガンマ加熱率が小さく、飽和温度型式キャプセルに比較すると構造材等のガンマ加熱による発熱量が小さく、その出力は燃料セグメントでほぼ決定される。燃料セグメントは炉外実験等の場合の電気ヒータと同じ作用である。

飽和温度型式キャプセルとBOCAキャプセルの注入水温度変化と比較すると、次のような相違が見られる。

飽和温度型式キャプセルの下降流の温度変化は、BOCAキャプセルの場合とほぼ同じであるが、キャプセル下部における上昇流はかなり高温であり、BOCAキャプセルにおける程温度低下しない。飽和温度型式キャプセルの注入水出口温度はそれ程温度低下せず、かなり高温でキャプセルより排出される。しかし、BOCAキャプセル出口の注入水はほとんど冷却され入口温度近くまで温度低下する。BOCAキャプセルは上昇流に対する冷却能力が強力である。この相違の原因は、

- ①飽和温度型式キャプセルは仕切板を有し、上昇流の周囲が下降流による水ジャケットとなり、上昇流がBOCAキャプセルの如く外筒を介してのキャプセル冷却水に接しないため冷却されない、
- ②飽和温度型式キャプセルはガンマ加熱率が大きく、外筒内などにおける温度差が大で、熱遮蔽の効果がある、

ことによるためと考えられる。

飽和温度型式キャプセルのこれまでの熱解析結果は、BOCAキャプセルに見られるような熱伝達率がある出力状態から大きく変化するようなことはないことを示した。また、BOCAキャプセルのように気泡等による熱の上方へのシフトは当然あり得るが、飽和温度キャプセルではBOCAキャプセルほど顕著でないと思われる。原因は試料発熱量が小さいことによると考えられる。

飽和温度型式キャプセル内の上昇流の温度を正確に予測することは、上昇流とキャプセル冷却水の間には4箇所の熱伝達層が存在することから、それ程簡単ではない。それにもかかわらず、飽和温度型式キャプセルに対するプログラムの温度予測結果は、かなり良く、少なくとも温度変化の傾向を把握している。なお、飽和温度型式キャプセルの熱解析においては、計算温度は上昇流の下部で測定値を下回ることを一般的に示した。BOCAキャプセルの解析の計算温度は、そのような傾向を示さない。

#### 4.3 プログラムSATCAPのBOCAキャプセル熱解析への適用性

この解析の目的の一つとして、プログラムSATCAPの今後のBOCAキャプセル熱解析への適用性の検討をも考えた。計算結果は先に第3.4節に記載したように測定値との一致を得ることができることから、プログラムはBOCAキャプセルの熱解析に有効な手段であることを示している。ただし、適切なパラメータやモデルを設定して、使用すべきである。

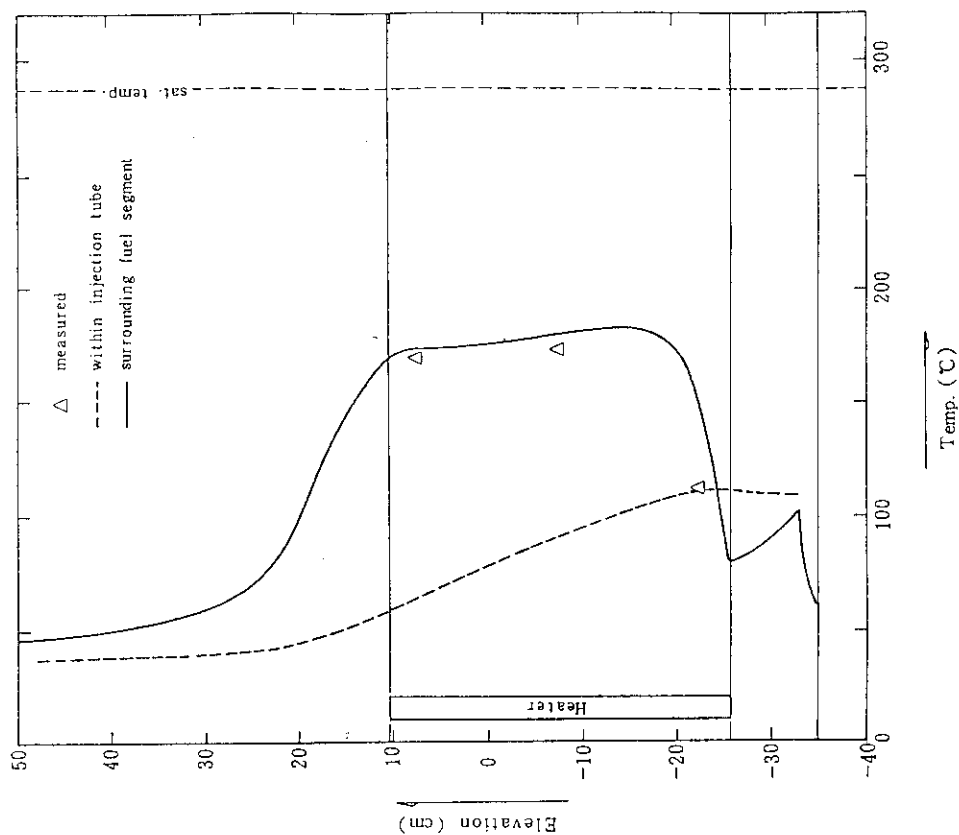
プログラムはキャプセルの出力変動を含む照射履歴に追従して計算可能になっている。この意味で本来のプログラム性能を發揮させるためには、特定の出力下のキャプセルの状態を計算推測することではなく、出力変動下のキャプセル内部の状態を照射履歴に追従して計算可能とすべきである。そのためには、この解析で行ったような外筒内面熱伝達率を一定値に設定し特定の出力下の状態を計算するのではなく、外筒内面熱伝達率を推定可能な熱伝達モデルをプログラム内に組み込む必要がある。BOCAキャプセルに関して、外筒内面熱伝達率はキャプセル内部の注入水温度に最も影響が大きい。BOCAキャプセルの照射条件を現状のままに固定するなら、例えば、第4.1節に記載した外筒内面熱伝達率の近似式をそのまま組み込んでも利用可能である。また、キャプセルの燃料セグメント等加熱部分からその上部へシフトする熱量は、この解析では発熱量の10%としたが、この熱量は多分注入水の流量に依存している可能性も考えられる。これらが何等かの方法で推定可能にならなければ、流量を変更した場合等のキャプセル内部の注入水温度変化は予測できない。さらに、水を扱う新しい型式のキャプセルや装置の熱解析にプログラムの利用を計画する場合、上部へのシフト熱量の割合や熱伝達率の値の程度には特に留意する必要がある。

#### 4.4 実機軽水炉燃料棒の状態と試験装置内の燃料セグメントの状態の相違点

軽水炉内の燃料棒では通常の場合、原子炉冷却水は燃料棒下端からの出力の積算値に応じてエンタルピーの上昇があり、かつ冷却水温度も単調に上昇する。その結果、燃料棒プレナム部周囲の冷却水温度はほぼ一定と考えられる。しかし、この試験装置内の燃料セグメントはキャプセル自体が径方向に冷却されることから燃料セグメント・プレナム部周囲の注入水温度が低下し、プレナム部上・下で周囲の注入水の温度差が増加する。この温度差のため、プレナム部内での封入ガスの自然対流は実機の軽水炉燃料棒のプレナム部におけるより大きいと考えられる。このことは、このBOCA試験装置の特質の一つであろう。特に、照射状態の燃料セグメント内圧を評価する場合などは、状態の相違に留意しておく必要がある。

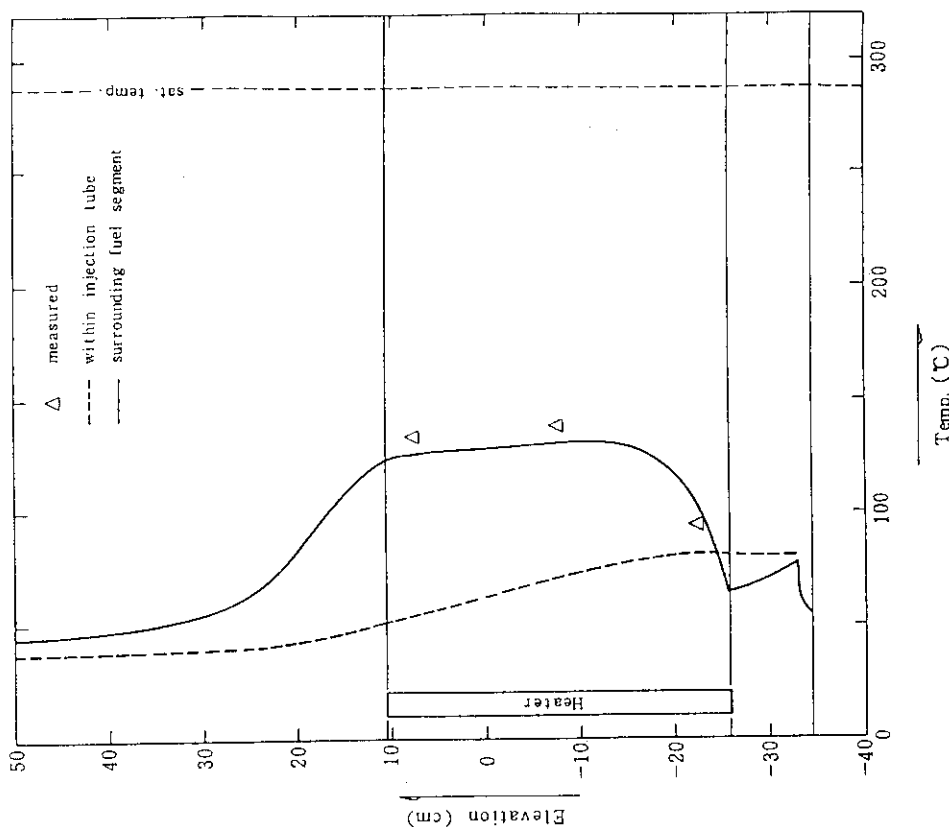
Table 4.1 BOCA キャプセルと飽和温度型式キャプセルの比較

	BOCAキャプセル	飽和温度型式キャプセル
キャプセル構造	導水管型	仕切板型
照射試料	燃料セグメント	鉄鋼 (ステンレス鋼)
キャプセル装荷照射孔	炉心周辺部	炉心中心部
キャプセル主要部寸法 (mm)	32φ×2.5t	60φ×3t
キャプセルの冷却	OSF-1ループ水	原子炉炉心冷却水
キャプセル注入水 注水法 流量 (gr/min) 脱気純水供給、 注入後排出	導水管方式 ~60	仕切板外側に上方から 最大 1000
発熱量の割合 (%) 試料発熱量/総発熱量 外筒発熱量/総発熱量	~84.6 ~9.8 発熱量はほとんど 燃料棒で決まる。	~6.1 ~42.1 試料その他すべての 構造材が同様の発熱率
注入水 (上昇流) と キャプセル冷却水の間 に存在する熱伝達層	二層	四層
外筒内面熱伝達率	自然対流熱伝達 に従わず。	自然対流熱伝達



Heat transfer coefficient at capsule casing inner surface was calculated by natural convection model.

Fig. 4.1(b) Calculated temperature profile of 87BM-3J under linear heat rate of 193.1 W/cm



Heat transfer coefficient at capsule casing inner surface was calculated by natural convection model.

Fig. 4.1(a) Calculated temperature profile of 87BM-3J under linear heat rate of 96.8 W/cm

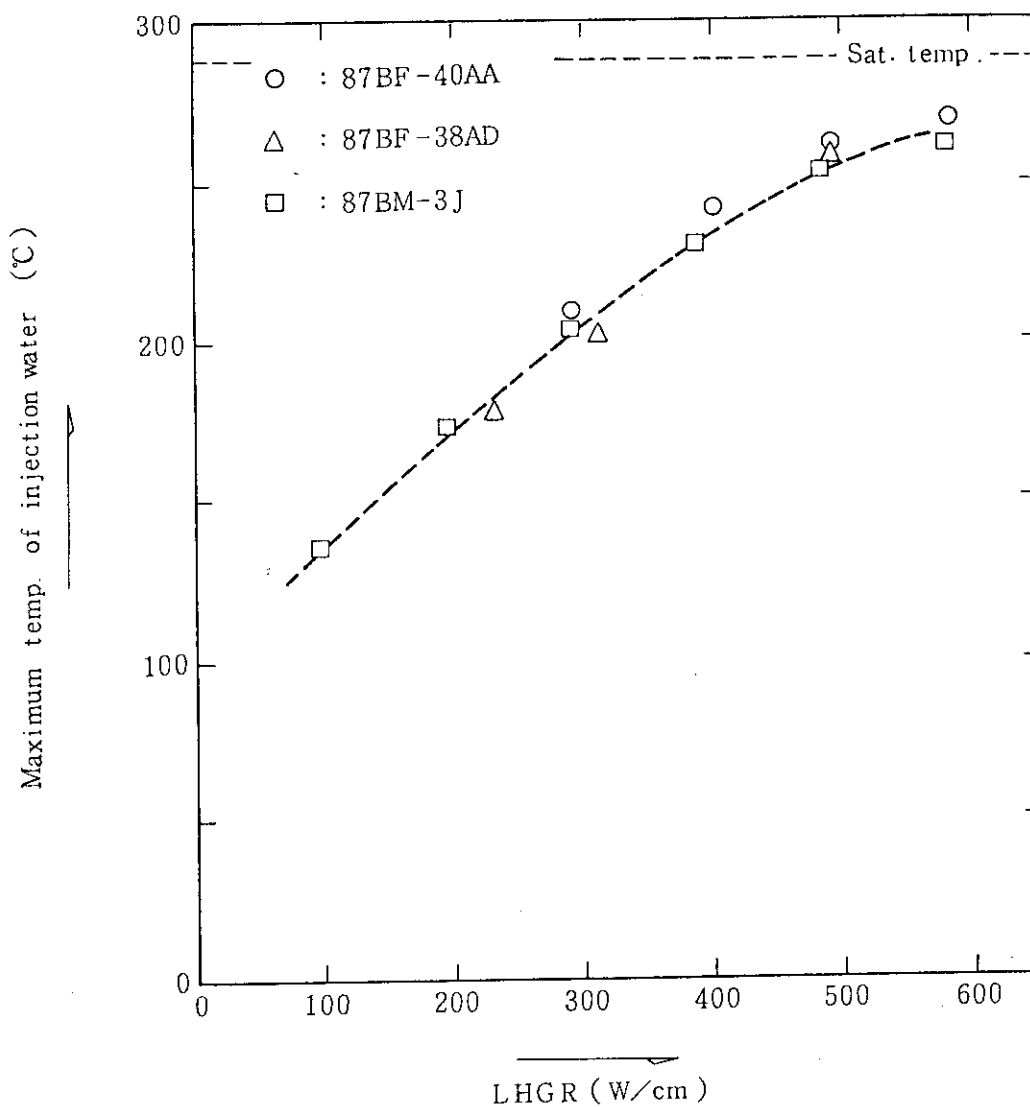


Fig. 4.2 Maximum temperature of injection water against to LHGR

出力 50 MW(100%)  
 キャプセル圧力 76 kg/cm<sup>2</sup>A  
 流量 0.86 l/min

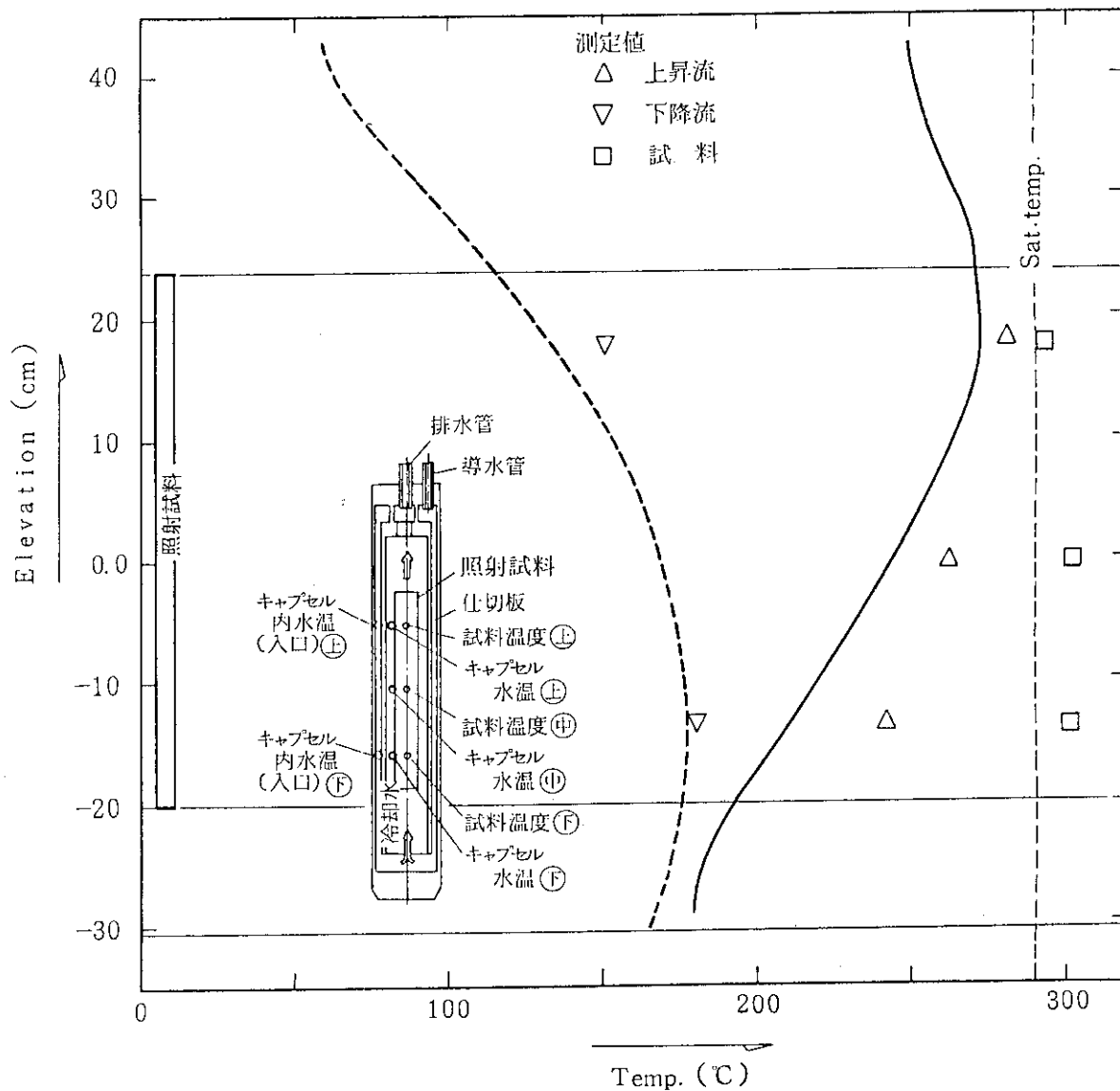


Fig. 4.3 Example of thermal analysis of Saturated Temperature Capsule

## 5. む す び

### A. 熱伝達率

#### (1) 外筒内面熱伝達率

この解析から推定したBOCAキャプセルの外筒内面熱伝達率は、Fig.3.10に示すような値であった。線出力密度300W/cm以下時の外筒内面の熱伝達率は、線出力密度と共に増加するが、それ程大きく増加せず、ある値で飽和するようである。一方、線出力密度400W/cm以上の熱伝達率は線出力密度との間にほぼ直線性を持つ。熱伝達率の変化傾向は燃料セグメントでも、ヒータの場合でもほとんど変わらない。

線出力密度に対して外筒内面熱伝達率( $h$ , Btu/h.ft<sup>2</sup>F)を近似すると、次のようになる。

線出力密度300W/cm以下,  $h=710\sqrt{q}$

線出力密度400W/cm以上,  $h=1850q-600$

ここで、 $q=(\text{燃料セグメント等の線出力密度, W/cm})/(600\text{W/cm})$ とする。

線出力密度300W/cm以下の場合は、自然対流熱伝達と考えられる。線出力密度400W/cm以上の場合は、未飽和沸騰ながら熱伝達を良くする要因が加算される結果熱伝達率が大きくなると考えられる。

ただし、この結果は、発熱部分の上側（燃料セグメント・プレナム部分に相当する位置）に燃料セグメント有効長総出力の約10%の熱量が移動すると仮定したときの推定値である。当然、移動熱量の割合が変われば、熱伝達率の推定値も変更さるべきである。

これらの結果は、BOCAキャプセルの設計、今後の照射試験、水を扱う新しい型式のキャプセルや装置の設計に対し有用な情報であると考えられる。

#### (2) 導水管内外面熱伝達率

導水管内の下降流の温度は熱伝達率で決定される。小さければ温度上昇は小さい。大きければ温度上昇も大きくなる。導水管内外面熱伝達率を推定できるだけの測定値の不足と導水管内を下降してきた注入水温度を直接測定しているのかどうかの判断がつかないため、導水管内外面の熱伝達率を詳細に推定することは困難であった。

ただし、キャプセル下部で計算温度範囲に測定値が収まると言う判断基準で推定した導水管内面熱伝達率200~300Btu/h.ft<sup>2</sup>Fがそれ程狂っていなく、他の熱伝達率が計算値通りだとすれば、導水管に関する総括熱伝達率は、線出力密度600W/cmのとき燃料セグメント有効長中心位置で149~199Btu/h.ft<sup>2</sup>F(0.085~0.13W/cm<sup>2</sup>K)程度の範囲内にあると推定される。

### B. 燃料セグメント上端部（プレナム部分）における注入水の加熱

この解析において、解析結果と測定値から発熱部分の上側、燃料セグメント・プレナム部分に相当する位置に注入水を加熱する熱量が加わるとした。その割合は、燃料セグメント有効長総出

力の約10%に相当すると仮定した。このように考える時、解析と測定値の一致が得られる。なお、プレナム内のペレット押さえのスプリング等のガンマ加熱による発生熱はあるが、これらはその値が小さく先の熱量に達せず、プレナム部における加熱量を説明することは出来ない。この加熱の要因として次のような事項が考えられる。

試料表面が飽和温度以上となり未飽和沸騰状態に達すると、未飽和沸騰とは言え気泡が発生する。この時、燃料セグメント等よりの熱は注入水に伝えられ、注入水の全体のエンタルピーは確かに上昇するが、この状態で発生した蒸気気泡は、必ずしもその部分でただちに凝縮し、その熱がそこでの注入水の温度上昇に使用されるとは限らない。気泡は浮力や水の加熱による密度変化の上昇流に乗り、上方に移動すると考えられる。気泡が上昇した部分で凝縮すればその部分の液相である未飽和温度の注入水を加熱する。

また、加熱面表面温度が飽和温度に達しなくとも、加熱部上部への熱の移動があるとも推測される。この場合は加熱体の表面で加熱された注入水の密度変化により同一平面内に不均一流れが発生し、高温になった注入水の部分的な上昇流により上方に熱が運ばれるのではないかと考えられる。

水を扱う新しい型式のキャプセルや装置の設計に当たっては、熱伝達率の値の外、この上部へのシフト熱量には特に留意する必要がある。この熱量の見積り如何によっては、熱伝達率の値の推定も変わることになる。

#### C. 解析用プログラムと今後の課題

この解析に利用したプログラムSATCAPは、適切な使用により測定値との一致を得ることができる。この事実は、BOCAキャプセルの熱解析に有効な手段であることを示す。プログラムによるBOCAキャプセルの熱解析を今後とも計画するならば、キャプセル内部の温度に最も影響があるBOCAキャプセルに関する外筒内面熱伝達率を推定可能な熱伝達をプログラム内に組み込むことが課題となる。また、今後の新しい型式のキャプセルや装置の熱解析にプログラムを利用する場合、熱伝達率の値の程度や上部へのシフト熱量の見積りが課題となる。

#### D. 実機軽水炉燃料棒の状態と試験装置内の燃料セグメントの状態の相違点

軽水炉炉内の燃料棒周りの冷却水は下方より燃料棒からの発生熱を吸収し上昇する。このため冷却水温度（正確にはエンタルピー）は単調に増加する。その結果、実機燃料棒のプレナム部周囲はほぼ一定温度と考えられる。しかし、BOCAキャプセルに使用している試験装置では試料燃料セグメントに発生する熱の大部分は半径方向に流出する。この結果、BOCAキャプセル下部からの上昇流の注入水温度は単調に増加せず、BOCAキャプセル中の燃料セグメント・プレナム部周りの水温は軸方向に沿って一定でなく、燃料セグメント上部のプレナム部周囲では上部ほど温度が低下する。

このことは、プレナム部内の温度にかなり相違をもたらす。プレナム内のガス対流の駆動力が上下の温度差による封入ガスの密度差に基づくことを考慮すると、BOCAキャプセル中の燃料セ



グメントのプレナム部のガス対流は軽水炉内での燃料棒より大きいと考えなければならない。この点、実機の軽水炉燃料棒の状態とかなり異なると考えられる。これは、BOCA試験装置で燃料セグメントを照射する場合の特質の一つであろう。

さらに、照射状態の燃料棒の内圧を評価する場合、内圧は燃料棒内部の空間の温度分布に依存している<sup>11)</sup>ことから、十分な注意をしておく必要がある。

## 謝 辞

加島洋一氏, 中崎長三郎氏, (材料試験炉部) は, この解析にさいし有用な情報を提供された。小室忠男氏 (原子力エンジニアリング株) は膨大な試験データの中からこの解析に使用した注入水温度の記録などを探し出していただいた。新見素二氏 (材料試験炉部) からはこのキャプセルと同様に水を注入する飽和温度キャプセルの特性について教示を得た。染谷博之氏 (材料試験炉部) には各種材料のガンマ加熱率, 密度の値が必要となり調査を依頼した。ここに, その氏名を記して謝意を表わす。

試験装置は大型の装置であり, その設計・製作・改修等を含む装置開発とその運転は二村嘉明氏 (材料試験炉部長) をはじめとする材料試験炉部の多くの職員の共同作業によっている。また, BOCAキャプセルの設計・製作や照射試験は市橋芳徳氏 (照射第1課長) をはじめとする材料試験炉部・照射第1課, 第2課等の職員の努力によっている。これら装置開発, 照射試験に努力された関係各位に併せて謝意を表わす。

## 参考文献

- 1) 材料試験炉部編, 「JMTR照射ハンドブック」(第4版), (1987年3月)
- 2) 内田正明, 他, 「JMTR・BOCA装置による燃料の出力急昇試験」, JAERI-M 88-202 (1988年10月)
- 3) 加島洋一, 他, 「JMTR(#83サイクル)における軽水炉燃料の出力急昇試験」(ジルカロイ被覆管の応力腐食炉内実験: 87BF-38AD(R22)) private communication (1990年1月)
- 4) 原山泰雄, 小林敏樹, 他, (SATCAP: 飽和温度キャプセル熱設計用プログラム), JAERI-M 88-013 (1988年2月)
- 5) 原山泰雄, 染谷博之, 他, 「SATCAP-B: 飽和温度キャプセル熱設計用プログラム」, JAERI-M 89-187 (1989年11月)
- 6) 原山泰雄, 「SATCAP-C: 水注入型キャプセル熱設計用プログラム (仮題)」, (to be published in JAERI-M)
- 7) 原山泰雄, 泉文男, 他, 「FREG-3: 照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム」, JAERI-M 7278 (Sep. 1977)
- 8) 新見素二, 染谷博之, 他, 「飽和温度キャプセルに関する熱特性試験」, JAERI-M 89-099 (1989年8月)
- 9) 中田宏勝, 他, 「 $^3\text{He}$ -BOCA出力急昇試験設備の開発1」, JAERI-M 8533 (1979年11月)
- 10) 中崎長三郎, private communication, (1990年10月)
- 11) 原山泰雄, 「軽水炉燃料の設計」(原子炉研修所・核燃料工学短期講座テキスト), (1989年7月)

## 謝 辞

加島洋一氏, 中崎長三郎氏, (材料試験炉部) は, この解析にさいし有用な情報を提供された。小室忠男氏 (原子力エンジニアリング科) は膨大な試験データの中からこの解析に使用した注入水温度の記録などを探し出していただいた。新見素二氏 (材料試験炉部) からはこのキャプセルと同様に水を注入する飽和温度キャプセルの特性について教示を得た。染谷博之氏 (材料試験炉部) には各種材料のガンマ加熱率, 密度の値が必要となり調査を依頼した。ここに, その氏名を記して謝意を表わす。

試験装置は大型の装置であり, その設計・製作・改修等を含む装置開発とその運転は二村嘉明氏 (材料試験炉部長) をはじめとする材料試験炉部の多くの職員の共同作業によっている。また, BOCAキャプセルの設計・製作や照射試験は市橋芳徳氏 (照射第1課長) をはじめとする材料試験炉部・照射第1課, 第2課等の職員の努力によっている。これら装置開発, 照射試験に努力された関係各位に併せて謝意を表わす。

## 参考文献

- 1) 材料試験炉部編, 「JMTR照射ハンドブック」(第4版), (1987年3月)
- 2) 内田正明, 他, 「JMTR・BOCA装置による燃料の出力急昇試験」, JAERI-M 88-202 (1988年10月)
- 3) 加島洋一, 他, 「JMTR(#83サイクル)における軽水炉燃料の出力急昇試験」(ジルカロイ被覆管の応力腐食炉内実験: 87BF-38AD(R22)) private communication (1990年1月)
- 4) 原山泰雄, 小林敏樹, 他, (SATCAP: 飽和温度キャプセル熱設計用プログラム), JAERI-M 88-013(1988年2月)
- 5) 原山泰雄, 染谷博之, 他, 「SATCAP-B: 飽和温度キャプセル熱設計用プログラム」, JAERI-M89-187(1989年11月)
- 6) 原山泰雄, 「SATCAP-C: 水注入型キャプセル熱設計用プログラム(仮題)」, (to be published in JAERI-M)
- 7) 原山泰雄, 泉文男, 他, 「FREG-3: 照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム」, JAERI-M 7278(Sep. 1977)
- 8) 新見素二, 染谷博之, 他, 「飽和温度キャプセルに関する熱特性試験」, JAERI-M 89-099(1989年8月)
- 9) 中田宏勝, 他, 「 $^3\text{He}$ -BOCA出力急昇試験設備の開発1」, JAERI-M 8533(1979年11月)
- 10) 中崎長三郎, private communication, (1990年10月)
- 11) 原山泰雄, 「軽水炉燃料の設計」(原子炉研修所・核燃料工学短期講座テキスト), (1989年7月)

## 付録 解析に使用した注入水(圧力水)温度測定値

## (1) 87BF-40AA 圧力水温度

期 間	燃料棒 線出力 (W/cm)	0SF-1 冷却水温度 (°C)		熱電対指示値 (°C)					
		入 口	出 口	#1	#2	#3	#4	#5	#6
12.12, 9:00~ 9:30	292.6	35.8	46.4	128.9	207.5	210.3	210.3	160.1	74.3
12.18, 6:00~ 6:30	294.7	35.7	46.3	127.4	207.6	210.0	209.9	159.5	73.5
12.18, 11:00~ 11:30	399.2	36.8	49.3	149.4	235.9	241.7	242.7	186.7	83.2
12.18, 17:00~ 17:30	491.8	36.6	50.9	147.4	247.8	261.4	263.9	207.7	89.5
12.18, 18:20~ 18:50	583.8	36.9	52.9	161.5	260.8	266.9	269.4	225.5	97.5

## (2) 87BF-38AD 圧力水温度

期 間	燃料棒 線出力 (W/cm)	0SF-1 冷却水温度 (°C)		熱電対指示値 (°C)					
		入 口	出 口	#1	#2	#3	#4	#5	#6
11. 4, 15:00~ 15:30	229	37.3	46.6	131.3	169.7	—	177.4	129.2	—
11. 4, 16:20~ 16:40	309	37.9	48.7	148.0	193.0	—	201.8	150.6	—
11. 4, 19:00~ 20:00	492	39.4	53.8	169.2	238.0	—	257.4	204.6	—
11. 7, 6:00~ 7:00		38.9	53.0	170.7	242.1	—	257.6	203.1	—

(注) #3, #6熱電対は不具合により, 測定出来ず。

## (3) 87BM-3J 圧力水温度

期 間	*) ヒータ 線出力 (W/cm)	OSF-1 冷却水温度 (°C)		熱電対指示値 (°C)					
		入 口	出 口	#1	#2	#3	#4	#5	#6
10.11, 9:25~ 9:30	193.1 (6.952)	39.25	47.80	/	168.7	172.6	/	112.2	/
10.11, 9:50~ 9:55	385.8 (13.890)	40.50	52.50	/	223.1	229.4	/	175.8	/
10.11, 10:20~ 10:25	579.4 (20.858)	41.59	57.11	/	245.4	261.3	/	219.6	/
10.11, 10:40~ 10:45	482.5 (17.371)	41.24	55.01	/	238.6	253.1	/	198.6	/
10.11, 11:10~ 11:15	289.4 (10.417)	40.33	50.58	/	199.2	204.3	/	153.5	/
10.11, 11:40~ 11:45	96.8 (3.484)	39.06	45.89	/	132.6	135.9	/	93.8	/

\*) カッコ内は全出力 (kW) を示す。