

JAERI - M  
94-043

FCAにおける高温ドップラー効果測定(1)  
—サンプル加熱・反応度値測定法測定装置の開発—

1994年3月

大井川宏之・岡嶋 成晃・向山 武彦・佐藤 邦雄  
菱田 誠・早野 瞳彦\*・工藤 文夫・笠原 芳幸\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1994  
編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

FCAにおける高温ドップラー効果測定(1)  
—サンプル加熱・反応度値測定法測定装置の開発—

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
大井川宏之・岡嶋 成晃・向山 武彦・佐藤 邦雄  
菱田 誠<sup>†</sup>・早野 瞳彦<sup>\*</sup>・工藤 文夫<sup>\*</sup>・笠原 芳幸<sup>\*</sup>

(1994年2月7日受理)

高速炉の高温でのドップラー効果の予測精度向上に資することを目的として、高速炉臨界実験装置(FCA)を用いて2000°Cまでの<sup>238</sup>Uドップラー効果を測定できる装置を開発した。装置はサンプル加熱・反応度値測定法(1500°Cまで)に供するものと、箔加熱・反応率測定法(2000°Cまで)に供するものの2つで構成され、ここでは前者の開発について述べる。

サンプル加熱・反応度値測定法は従来からFCAを含む世界の臨界実験装置で800°C程度までの測定に用いられてきた。今回の開発は、旧装置を大幅に改良・更新することにより、測定できる温度領域を1500°Cまで広げるものであり、これにより酸化物燃料高速炉の運転時燃料平均温度(約1200°C)から最高温度(約2200°C)に近い領域のドップラー効果が測定できるようになった。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

<sup>†</sup> 高温工学部

<sup>\*</sup> 三菱原子力工業株式会社

Measurement of Doppler Effect Up to 2000°C at FCA (1)  
- Development of Experimental Device for Doppler Reactivity  
Worth Measurement with Small Sample Heated Up to 1500°C -

Hiroyuki OIGAWA, Shigeaki OKAJIMA, Takehiko MUKAIYAMA, Kunio SATOH  
Makoto HISHIDA<sup>+</sup>, Mutsuhiko HAYANO<sup>\*</sup>, Fumio KUDOGH<sup>\*</sup> and Yoshiyuki KASAHARA<sup>\*</sup>

Department of Reactor Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 7, 1994)

A new experimental device for the measurement of  $^{238}\text{U}$  Doppler effect up to 2000°C was developed for the Fast Critical Assembly (FCA) of Japan Atomic Energy Research Institute with the intention to improve the Doppler effect analysis at high temperature in fast reactors. The measurement method consists of two different techniques; one is the reactivity worth measurement with using a small sample heated up to 1500°C, the other is the reaction rate measurement with using a foil heated up to 2000°C. In the present work, the development and measurement for the former technique is described.

The technique itself had been used in critical assemblies around the world, including FCA, for the measurement up to 800°C. The present new device was developed by improving the old device throughoutly to extend the sample temperature up to 1500°C which is hot enough for us to evaluate the Doppler effect in the MOX-fuel fast reactor.

Keywords: Doppler Effect Measurement, Uranium-238, FCA, Reactivity Worth, High Temperature, Small Sample, Experimental Device

---

<sup>+</sup> Department of High Temperature Engineering

<sup>\*</sup> Mitsubishi Atomic Power Industries, INC.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 装置の開発 .....	2
2.1 測定方法と設計条件 .....	2
2.2 モックアップ試験 .....	3
2.3 実証試験 .....	5
3. 装置の構造 .....	10
3.1 UO <sub>2</sub> サンプル .....	10
3.2 サンプル加熱容器 .....	10
3.3 ドップラー引出し及び駆動機構 .....	11
3.4 真空系及び冷却系 .....	12
3.5 制御盤及び電源 .....	12
4. 温度特性 .....	24
4.1 測定結果 .....	24
4.2 热解析 .....	24
4.3 热膨張による反応度価値の評価 .....	25
5. 測定手順と測定例 .....	34
5.1 測定前準備 .....	34
5.2 測 定 .....	35
5.3 ドップラー反応度価値の算出 .....	36
6. まとめ .....	42
謝 辞 .....	43
参考文献 .....	43
付 錄 .....	44

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Development of Device .....	2
2.1 Experimental Method and Design Condition .....	2
2.2 Mockup Test .....	3
2.3 Demonstration Test .....	5
3. Structure of Device .....	10
3.1 UO <sub>2</sub> Sample .....	10
3.2 Sample Heating Container .....	10
3.3 Doppler Drawer and Driving Mechanism .....	11
3.4 Vacuum System and Cooling System .....	12
3.5 Control Panel and Electric Source .....	12
4. Temperature Characteristics .....	24
4.1 Measured Results .....	24
4.2 Calculation .....	24
4.3 Evaluation of Expansion Reactivity Worth .....	25
5. Experimental Procedure and Example .....	34
5.1 Preparation .....	34
5.2 Measurement .....	35
5.3 Derivation of Doppler Reactivity Worth .....	36
6. Summary .....	42
Acknowledgments .....	43
References .....	43
Appendix .....	44

## 1. はじめに

高速炉の安全性に大きな影響を及ぼす反応度フィードバック効果のうち、 $^{238}\text{U}$ のドップラー効果は炉心設計にあまり依存せず、燃料固有の即効性のものであることから最も重要であるといえる。このため、世界の臨界実験装置で $^{238}\text{U}$ のドップラー効果の測定が行われてきたが、それは酸化物燃料高速炉の運転時燃料平均温度（約1200°C）及び燃料最高温度（約2200°C）に比べて非常に低い800°C近辺までのものであり、それ以上の温度における解析精度は800°Cまでの測定に基づいて外挿することにより推定しているにすぎなかった。

そこで、高温領域（800°C以上）での $^{238}\text{U}$ ドップラー効果の解析精度を検証することを目的として、高速炉臨界実験装置(FCA)を用いて2000°Cまでの $^{238}\text{U}$ ドップラー効果を測定できる装置（高温ドップラー効果測定装置）を開発した。

本装置は、サンプル加熱・反応度価値測定法と箔加熱・反応率測定法の2つの方法の組み合せにより、 $^{238}\text{U}$ の2000°Cまでのドップラー効果を測定するものである。前者では酸化ウランサンプルをFCA炉心中で1500°Cまで加熱して反応度価値を測定し、後者では酸化ウラン箔をFCA炉心中で2000°Cまで加熱して中性子捕獲反応率の変化を測定する。

装置には2つの測定法それぞれに固有の部分と、両測定法に共通な部分がある。本報告書では、サンプル加熱・反応度価値測定法に関する開発、装置の構造、性能等について、両測定法に共通な部分も含めて述べる。さらに、本装置を用いた $^{238}\text{U}$ のドップラー反応度価値の測定法を実例を示しながら説明する。

## 2. 装置の開発

### 2.1 測定方法と設計条件

ここでは、サンプル加熱・反応度価値測定法による<sup>238</sup>U ドップラー効果測定の概略と装置の基本的な設計条件について述べる。

サンプル加熱・反応度価値測定法<sup>1)~3)</sup>は、数百グラム以上のサンプルを加熱することによる反応度変化を測定するものである。<sup>238</sup>Uを多く含むサンプルの場合、温度上昇に伴って捕獲断面積の共鳴構造がドップラー効果により広がるため、共鳴自己遮蔽因子が大きくなり、サンプルの実効的な捕獲断面積が大きくなる。よってサンプル部分の中性子捕獲量が増加し、原子炉全体から見れば負の反応度が印加されることになる。

本方法の特長は、炉心全体を加熱する方法に比べて装置が簡便で高温領域の測定が行い易いこと及びドップラー効果以外の温度効果が入ってこないことがある。その半面、反応度変化が小さいため高精度の反応度価値測定技術が要求される。そのため、加熱するサンプルはある程度大きいもの（<sup>238</sup>Uにして数百グラム以上）である必要がある。また、800℃までの測定に使用している旧装置用サンプルからの継続性を考慮すると、長さ15cm直径1.5~2.5cmの円筒形の二酸化ウラン( $\text{UO}_2$ )を使用することになる。

次に、FCAでは高精度で反応度価値を測定する手法として、加熱するサンプルと原子炉の過剰反応度ドリフト補正用の基準サンプル(常温)を交互に炉心に挿入し、原子炉の出力を一定に保つ微調整棒の位置を測定してその位置の変化から反応度価値を求める手法をとっている（第5章参照）。そのため、加熱するサンプルは基準サンプルと共に概略寸法5cm×5cm×2mの特殊な引出し（ドップラー引出し）に収納され、正方断面5.52cm×5.52cmのFCA格子管内を往復できる機構が必要となる。

また、FCAではポリエチレン、ナトリウム等低融点の模擬物質板を使うため、「炉心温度は40℃を越えてはならない」という制限があり、サンプルを高温に加熱する一方炉心の他の部分は低温に抑える必要がある。このため、加熱するサンプルは加熱容器と呼ばれる加熱・断熱・冷却・測温を行う容器に収納する必要がある。

一方、加熱容器にサンプルを収納すると、サンプルの加熱に伴う反応度変化はサンプルの温度上昇による寄与と加熱容器の温度変化による寄与の和となり、<sup>238</sup>Uのドップラー反応度価値のみの測定にはならない。そこで、サンプルの入っていない空の加熱容器の温度変化による寄与を測定し、サンプル入りの測定から差し引いてサンプル正味のドップラー効果を求めなくてはならない。

以上まとめると、装置の基本的な設計条件は以下の4項目となる。

- (1) サンプルは長さ15cm直径1.5~2.5cmの円筒形の $\text{UO}_2$ でU量が多いほど良い。
- (2) 加熱容器はサンプルを1500℃に保つ一方その外側を40℃以下に保たなければならない。
- (3) 加熱容器は5cm×5cm×2mのドップラー引出しに収納され、格子管内を往復する。

## (4) サンプル入りの測定と空容器の測定の2回の測定を行う。

即ち、温度に関する条件は「断面5cmx5cmの加熱容器は、直径2cm程度のサンプルを1500°Cに保持する一方、容器の表面を40°C以下に保たなければならない」となる。この条件の達成には相当の困難が予想されたので、装置の設計・製作に先立ってモックアップ試験用及び実証試験用の2つの加熱容器を順次製作し、技術的な見通しを得てから次のステップに移ることとした。

## 2.2 モックアップ試験

材料、熱遮蔽法、冷却法等の検討の後、加熱容器を試作し、工場にて実際に1500°Cまで昇温し、種々の試験を行った。サンプル温度1500°Cに対する材料の健全性、熱遮蔽法及び冷却法の有効性等の高温部の取扱いに関する基礎データを得ると共に、熱計算による装置の温度分布解析の妥当性を検証することを目的とした。また、モックアップ試験用加熱容器設計の時点で、直径25mmのサンプルで前項の条件を達成することは不可能であると予測されたため、サンプルの直径は20mmとした。

材料の選定

1500°C以上の高温に耐える構造材料はタングステン、タンタル、モリブデン等の高融点金属とセラミックである。これらのうち、ヒータ、熱遮蔽板等の構造材としては比較的中性子断面積の小さなタングステンを使用し、ヒーターの支持及び電気絶縁にはアルミナを用いた。タングステンは1350°Cを超えると再結晶し、結晶粒粗大化の為に脆くなる危険性がある。そこで、数回の昇温後、タングステンの健全性を確認することを本モックアップ試験の主目的のひとつとした。その他、低温の部分はステンレス鋼を用いることとした。

試験用加熱容器

モックアップ試験に用いた加熱容器の構造図をFig.2.1に示す。サンプルとしてはUO<sub>2</sub>と似た熱的特性を持つアルミナ (20mm<sup>4</sup> × 150mm<sup>4</sup>) を用いた。サンプルはタングステン製の被覆管に封入され容器の一方（図の左方）から支持される。タングステンヒータは3本のくし状のアルミナ製ヒータサポートにより支持され、その回りをタングステン製熱遮蔽板が5重に巻かれている。これらは一体となってサンプルの支持とは逆の方向（図の右方）から支持される。これらサンプル、ヒータ、熱遮蔽板等はステンレス鋼製真空容器に格納されており、外部に設置した真空ポンプ（ロータリーポンプ及びターボ分子ポンプを連結）により真空断熱される。加熱容器の最外側となる冷却容器と真空容器の間には冷却用空気を流し、漏れ出て来る熱を除去する。

各部分の温度を熱電対及び接触式温度計により計測した。サンプルについては中心軸上3点（中心及び両端）並びに中央外側の4点、他の構造材については、タングステン製熱遮蔽板、サンプル支持部、冷却容器中央外表面に熱電対を配置し、その他外側から触れる部分は随時接触

式温度計にて測温した。

### 試験項目と結果

#### (a)耐衝撃性試験

加熱容器は地震やFCA格子管内を移動する際の衝撃に耐えなければならない。そこで、加熱容器を振動台に固定し、最大加速度0.8Gで加振した。その後分解したところ、クラック等の損傷は認められなかった。

#### (b)昇温試験

1200°C 2回、1400°C、1500°Cそれぞれ1回の計4回昇温を行った。2回の1200°C昇温ではヒータ出力、各部温度等の再現性が良いことが示された。1500°Cにはヒータ出力約580Wで到達したが、加熱容器外側に露出している真空フランジ部で100°Cを超える部分があることが判った。1500°C保持の時の測定データをFig.2.2に示す。

#### (c)安全性試験

加熱中に電源が喪失すると冷却風が停止し、装置の健全性が損なわれる可能性がある。ここでは、電源喪失を想定して、冷却系停止後（但し真空は保持、ヒータはOFF）の温度変化を測定した。1500°C保持時に行った試験では冷却停止後約8分で冷却容器外表面温度が最高の243°Cに達したが、真空中等に大きな影響はなく、装置の健全性が保たれることができた。

#### (d)加熱後分解

上記の各加熱の後、加熱容器を分解し、熱遮蔽板、ヒータサポート等の状況を観察した。その結果、真空容器内面、ヒータサポート、タンクステン製熱遮蔽板に黒く変色した部分が見られたが、各部分とも顕著な強度の低下や脆化は見られなかった。但し、1500°C昇温後には酸化タンクステンと見られる物質によりサンプル支持部がかなり黒く変色しており、1500°Cの保持はできるだけ短時間に納めるべきであると考えられる。

#### (e)加熱後耐衝撃試験

タンクステンは再結晶により1500°C昇温後には脆くなると考えられるため、1500°C昇温後室温まで冷却してから(a)項と同様の加振を行ったが、異常は認められなかった。

以上の各試験で得られた知見及び次のステップへの方策をまとめると。

- ・ 1500°C昇温は可能である。
- ・ サンプル軸方向温度差は200°Cとかなり大きい。これは、ヒータの巻ピッチの工夫及びサンプル保持方法の工夫により解決を図る。
- ・ タンクステンは1500°Cの昇温にも十分耐え得るが、変色による断熱性能の低下が懸念される。よってタンクステンの酸化を防ぎ断熱にも寄与する真空中等の確保が重要となる。
- ・ 冷却容器の外表面温度は制限値をもかなり超えている。これは、遮蔽板配置の工夫、真空フランジの冷却、サンプル保持方法の工夫、冷却空気の流量増加等により解決を図る。

### 計算との比較

加熱容器に装備できる熱電対の数は限られているため、サンプルの軸方向温度分布や加熱容器中の温度分布を知るためにには計算に頼らざるをえない。また、設計上の工夫や変更等の効果・影響を評価するためにも精度の良い計算は不可欠である。

計算には汎用有限要素法解析コード「MSC/NASTRAN(Vr.64A)」<sup>4)</sup>及び「ANSYS」<sup>5)</sup>を使用した。モックアップ試験時(1200~1500°C保持)の定常温度分布解析の結果をTable 2.1に示す。計算によると、実際よりも少ない入熱でサンプル中心温度が1500°Cに達しており、サンプル軸方向温度分布も測定結果より平坦になっていることから、熱の漏れを過小評価していることが分かる。

### 2.3 実証試験

モックアップ試験により得られた知見に基づいて、2.1節の各条件を満たすこと目標に、Fig.2.3に示した加熱容器を製作し、昇温試験を行った。

### 主な改良点

- ・サンプルの軸方向温度分布を平坦化するために、サンプルの支持をヒータ等の支持と同じ方向から行い、熱の逃げを一方向に限定する。
- ・冷却風の流量を大きくできるように、冷却容器を円筒形から角を落とした矩形（変則六角柱状）にする。
- ・真空フランジのOリング（2箇所）には高温に比較的強い金線を用いる。
- ・冷却風量を約2倍にし、かつクーラーにより冷却風入口温度を約7°Cまで下げる。

### 昇温試験

上記の方針に従って設計された実証試験用加熱容器を新たに製作し、モックアップ試験と同様に UO<sub>2</sub>サンプルの代わりにアルミナを装填して1500°Cまでの昇温を数回行った。各部分の温度等の測定結果をFig.2.3に示す。

モックアップ試験と同様約580Wで1500°Cに到達した。軸方向のサンプル温度分布を見るとサンプルを支持しているのとは逆の側（図の左方）で温度低下が著しいことが判る。また、図の左方の冷却容器外表面温度が高くなっていること、軸方向リフレクタ等の高温の部分が真空容器に接触して熱漏洩が大きくなっている可能性が考えられる。

全体としては冷却風の低温化及び增量により冷却容器の外表面中央部の温度は40°C以下を達成でき、実機製作の見通しを得ることができた。実機の設計に反映すべき点としては次の3点が挙げられる。

- ・真空系側の軸方向リフレクタは熱漏洩を小さくするためにサンプルと非接触の構造とする。
- ・軸方向リフレクタ等高温部の真空系側先端は真空容器と点接触の構造とする。
- ・フランジへの伝熱を小さくし、かつ、フランジの冷却も行う。

Table 2.1 Comparison of calculated and measured results of mockup test

Temperature of sample center		Temperature of sample edge		Electric power	
Measurement	Calculation	Measurement	Calculation	Measurement	Calculation
1200 °C	1205 °C	1065 °C	1092 °C	267 W	230 W
1314 °C	1316 °C	1145 °C	1200 °C	350 W	297 W
1400 °C	1408 °C	1220 °C	1292 °C	472 W	364 W
1493 °C	1504 °C	1300 °C	1388 °C	575 W	446 W

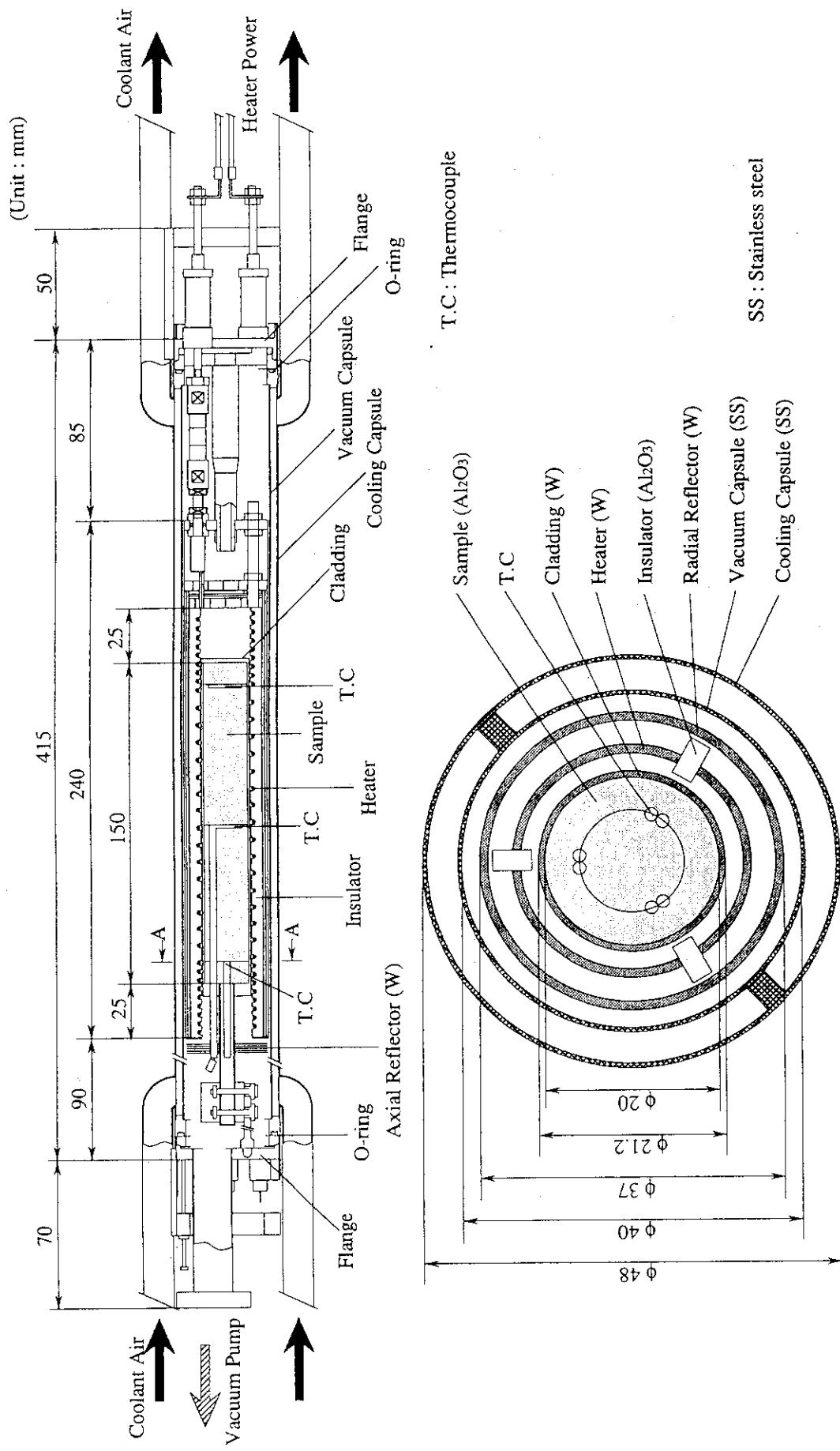


Fig. 2.1 Sample heating container for mockup test.

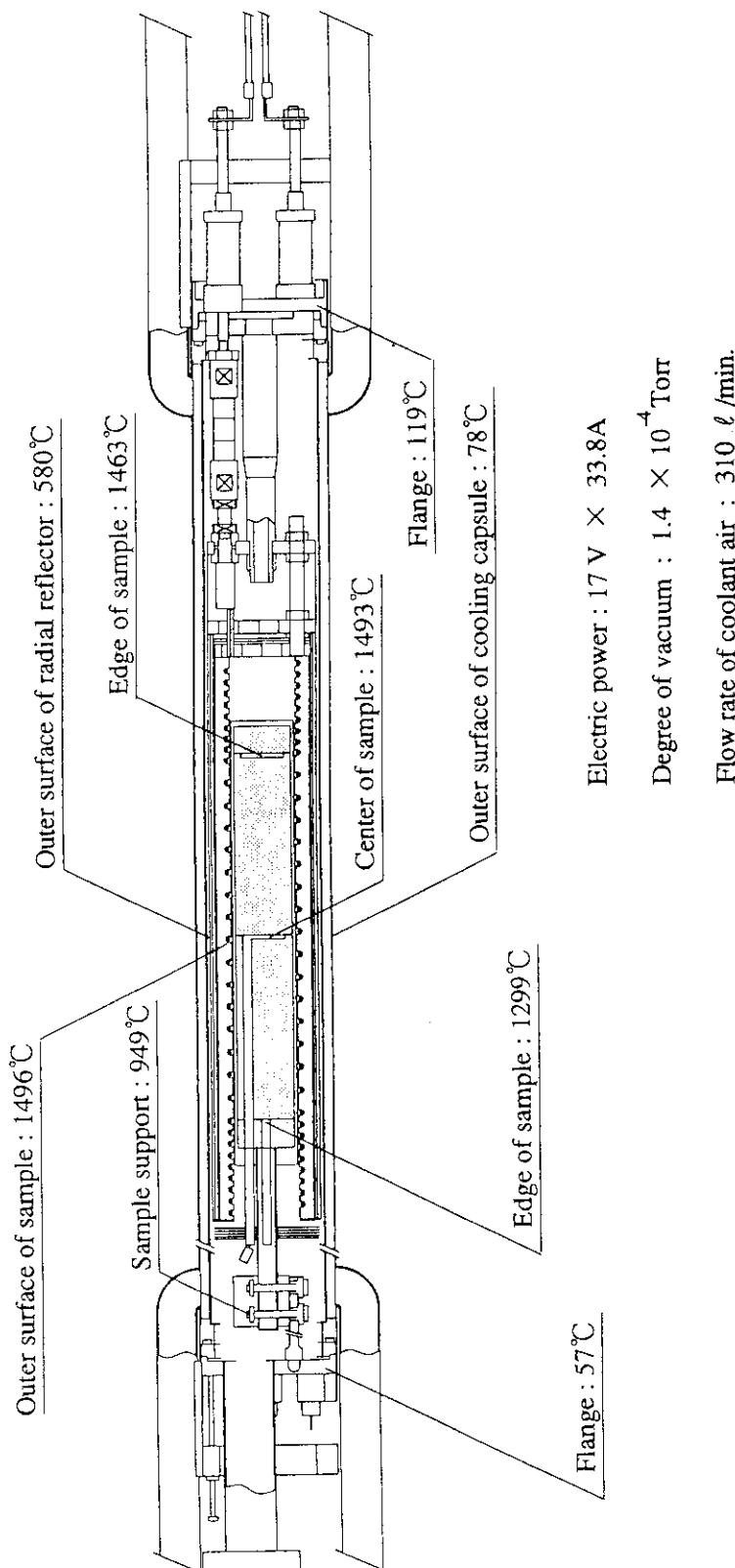


Fig. 2.2 Results of mockup test.

Electric power : 17 V × 33.8A

Degree of vacuum :  $1.4 \times 10^{-4}$  Torr

Flow rate of coolant air : 310 ℓ/min.

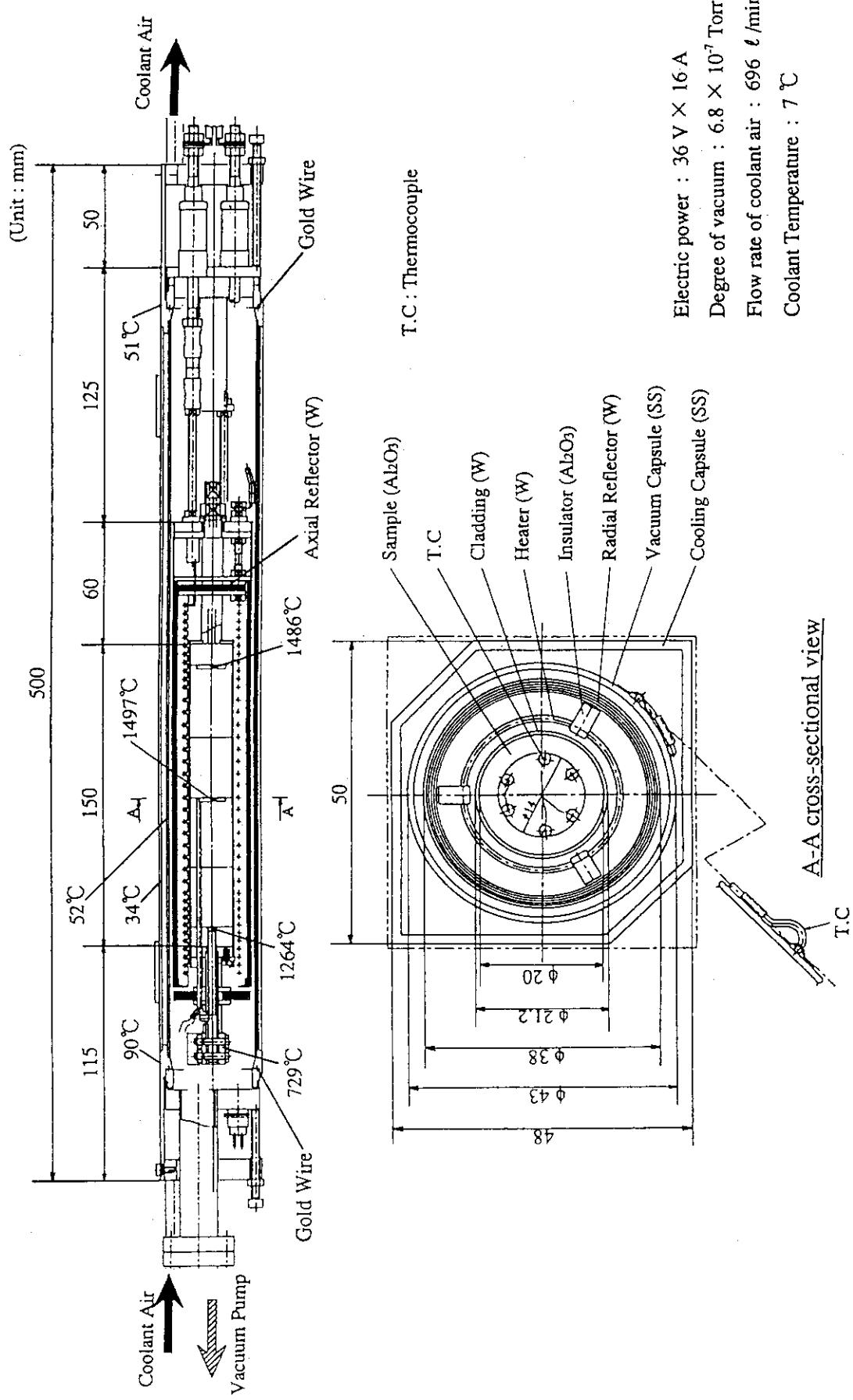


Fig. 2.3 Sample heating container for demonstration test.

### 3. 装置の構造

前章で述べた各試験により得た知見に基づき設計・製作した実機装置の構造について述べる。実機装置はFig.3.1に示したように、 $\text{UO}_2$ サンプル、加熱容器、ドップラー引出し並びにそれらと結合する駆動機構、真空系、冷却系、制御盤、電源から成る。

#### 3.1 $\text{UO}_2$ サンプル

$\text{UO}_2$ サンプルは $19.8\text{mm}^{\varnothing} \times 25.0\text{mm}^L$ の劣化ウラン酸化物ペレット6個から成る。各ペレットの中心には熱電対挿入用の孔( $5.9\text{mm}^{\varnothing}$ )がある。6個のペレットを合わせると全長は $150.0\text{mm}$ 、 $\text{UO}_2$ 質量は441.62gとなった。その他 $\text{UO}_2$ サンプルの諸元をTable 3.1に示す。

ペレットはFig.3.2に示したようにタンクステン製被覆管に封入する。被覆管は片側から支持できるようになっており、サンプル中心及び先端部の温度測定の為の孔が用意されている。ペレットと被覆管は温度上昇に伴ってそれぞれ異なる熱膨張を呈するため、モリブデン製のコイルバネによってペレットを拘束する。

タンクステン製被覆管は $\text{UO}_2$ ペレットを封入しないもの(ダミーサンプル)も製作したが、これにはコイルバネを装着していない。

#### 3.2 サンプル加熱容器

加熱容器はサンプルを収納し、 $1500^{\circ}\text{C}$ まで加熱保持すると共に、外部への熱漏洩を抑制するための断熱及び冷却機能を有する容器である。2.1節の条件(4)で示したようにサンプル入りの測定と空の測定の2つの測定を行うためには、一つの加熱容器を使って $\text{UO}_2$ サンプルとダミーサンプルを交換する方法と、それぞれのサンプルが入っている二つの加熱容器を製作する方法の2通りがある。前者の方法では交換の度に真空シールを行わなければならない。また、脆くなっていると考えられる加熱容器内の構造物に力が加わり破損の原因になることも考えられる。そこで、各部の構造・重量が同一で $\text{UO}_2$ ペレットの有無のみが異なる二つの加熱容器を製作する後者の方法を採用した。

加熱容器の構造をFig.3.3に示す。加熱容器は (1)加熱炉 (2)真空容器 (3)冷却容器 の3要素から成る。

#### 加熱炉

加熱炉はタンクステン製ヒータ、アルミナ製ヒータサポート、タンクステン製径方向及び軸方向熱遮蔽板等を一体に組み立てたものである。タンクステン製被覆管に封入されたサンプル(又はダミーサンプル)は加熱炉に固定される。加熱炉は一方向からのみ支持し、この支持棒を可能な限り長くすることにより、高温部からの熱伝導による熱漏洩を極力制限している。

サンプルの軸方向温度分布を平坦化するために、ヒータはサンプル端部で巻ピッチを細かくしてある。ヒータは裸のタンクスチレン線であるためサンプル、熱遮蔽板等に漏電しないように3本のアルミニウム製ヒータサポートで電気絶縁した。

径方向熱遮蔽体は径の異なる円筒状の2本のタンクスチレン製遮蔽体とその間隙に挿入した薄いシート状のタンクスチレンを数重に巻いたものから成る。シート状のタンクスチレンは、タンクスチレン同志の接触面積を減らして熱伝導による熱漏洩を抑えるように、小さな突起を多数備えたものを使用した。軸方向熱遮蔽体は小さな突起のある薄いタンクスチレン製円板を数枚重ねたものである。

### 真空容器

真空容器はSUS304L製の円筒型容器であり、サンプル及び加熱炉を収納し、容器内を真空に保つバウンダリーとなる。真空容器はその外側の冷却容器により支持されるが、両者は比較的低温の容器端部のみで結合する構造とし、熱伝導による熱漏洩を抑えている。真空を確保しつつ、熱電対及びヒータ用のケーブルを容器内に導入するためにフランジ2コを使用しており、この部分の気密を保つために金線のOリングを用いている。真空排気側（図の左方）にはくびれを設け、高温の部分からフランジへの輻射熱伝達を抑えると共に、この部分の冷却促進を図っている。

### 冷却容器

冷却容器はSUS304L製の変則六角柱状の容器であり、前述の真空容器を収納して加熱容器の最外周となる。冷却容器と真空容器の間の間隙には冷却風を流して真空容器から漏洩した熱を軸方向に逃がし、加熱容器外表面の温度上昇抑制を図る。冷却風入口付近の真空容器外表面には冷却風の流れに垂直にフィンが設けられており、冷却風の流れを乱すことにより冷却の促進を図る。冷却容器の断面を変則六角形にしたのは、冷却容器を収納するドップラー引出しとの間にヒータ及び熱電対用リード線を通す間隙を設けるためである。

### 3.3 ドップラー引出し及び駆動機構

ドップラー引出し(Fig.3.4)は概略寸法5cm×5cm×2mのSUS304製の引出しである。ドップラー効果測定時には引出しの内に加熱容器及び反応度バランス用模擬物質（天然ウラン金属板、アルミニウム板等）を入れ、FCA固定側集合体の冷却室で駆動機構と結合し格子管内を往復させる。

駆動機構は、FCA既設の微小反応度価値測定装置の駆動機構を改造したものであり、駆動軸先端に結合したドップラー引出しを停止位置再現性0.2mmで最大ストローク1.7m内の任意の2つの位置の間を出し入れさせることができる。駆動源はDCサーボモータで、駆動速度は8.33mm/secから200mm/secの間で5段階に可変である。また、ドップラー引出し内の加熱容器や模擬物質が引出しの出し入れに伴って移動・破損しないように、加速及び減速時の駆動加速度は0.1G以下に設定している。駆動装置はFCA炉室及び制御室に設置された中継盤及び制御盤により制御する。

本測定装置の製作に際して行なった駆動機構に対する改造は、駆動軸の太径化及びターボ分子ポンプの設置の2点である。後述する真空系、冷却系の各配管及びヒータ、熱電対のリード線等は駆動軸の中を通して炉外から引出し内へ導かれる。このため、駆動軸の直径を27.2mmから48mmに太径化した。また、高真空度の確保の為、ターボ分子ポンプはできるだけ加熱容器近くに設置する必要があり、駆動機構上部に同ポンプを搭載し、引出しの駆動と共にポンプも移動する設計とした。

### 3.4 真空系及び冷却系

#### 真空系

真空系は、荒引き用のロータリーポンプ及び高真空保持用のターボ分子ポンプの2段の真空ポンプとそれらと加熱容器を結ぶ配管、バルブ類、並びにピラニー真空計及び電離真空計から成り、加熱容器中の真空容器内部を高真空( $10^{-3}$  torr以下)に保つものである。Fig.3.5に真空系の系統図を冷却系のものと共に示す。真空の保持は断熱性能の確保のみならず高温になっているタンクステンの酸化防止にも必要であり、停電時にも真空が保てるようにバルブは冷却系のコンプレッサーからの圧縮空気で作動する設計とした。機器の安全に関するシーケンスは制御盤の項で詳述する。

#### 冷却系

冷却系は、加圧した空気を送り出すコンプレッサー、空気を乾燥・冷却する冷凍式エアドライヤ及びバルブ、配管、各種フィルターから成り、加熱容器の真空、冷却両容器の間隙に乾燥した冷却風を流すものである。Fig.3.5に系統図を示す。コンプレッサーは630 l/minの空気を吐き出す能力がある。コンプレッサーに付属する空気タンクは170 lの容積を持ち、停電時には冷却を止めて、空気タンク内の圧縮空気で真空保持用のバルブを閉める機能を有する。

### 3.5 制御盤及び電源

#### 制御盤

制御盤はFCA制御室に置かれ、加熱コントロール、真空系・冷却系の操作及び監視、各種インターフェース等の機能を持つ。また、制御盤と各機器の間には炉室中継盤を置き、真空系及び冷却系の操作が炉室でもできるようになっている。以下、項目毎に制御盤及び中継盤の機能を説明する。

#### 加熱コントロール

制御盤は、新たに製作した1500°C用加熱装置だけではなく800°C用旧加熱容器にも使えないくなってしまったため、1500°C用及び800°C用の2つの系統を持つ。各系統の略図をFig.3.6に示す。1500°C用の場合、制御盤の加熱コントローラが供給した電力は中継盤で変圧した後、中継盤の1500°C-800°C切り換えスイッチを経て加熱容器へ至る。1500°C用加熱コントローラはサンプル中心に設置したB熱電

対（白金・ロジウム-白金・ロジウム）の電位差を温度に変換して表示すると共に、自動制御選定時にはサンプル中心温度を一定の設定温度に保つようにPID制御する機能も持つ。さらにヒータに流れている電流・電圧を表示することができる。安全機能としては真空・冷却・温度等の条件が整っていない場合は電力を供給できないようにインタロックが設けられている。800°C用加熱系統の場合は中継盤で変圧しないこと及びK熱電対（クロメル-アルメル）を使用することを除いて1500°C用と同様である。

### 真空・冷却系の制御

真空系・冷却系の制御は制御盤及び中継盤の両方でできるが、中継盤では各種インタロックが働くことに注意する必要がある。

ピラニー真空計及び電離真空計の読みは中継盤で数値化され、前者は中継盤で設定できる2つの設定値を満足しているか否かの信号のみが、後者は同様の信号及び数値化した真空度の読みがそれぞれ制御盤に送られる。制御盤からはロータリーポンプ及びターボ分子ポンプの起動・停止、冷却系の電磁バルブ(SV1, SV2)の開閉、真空系の圧空バルブ(V1, V2, LV1, LV2)の開閉を行うことができる。また、圧空バルブを開閉するのに必要な圧縮空気の圧力及び冷却風の圧力も圧力スイッチによりそれぞれ設定値を満足しているか否か監視している。

### 温度表示及びレコーダ

サンプルや加熱容器の温度を正確に把握し常に監視することは、実験精度の観点からだけでなく、加熱容器の不具合などによりFCA本体に熱的影響が及ぶのを未然に防ぐ意味からも重要なことである。Table 3.2に温度監視用熱電対の設置場所と種類をまとめた。1500°C用加熱容器の場合、制御盤にはサンプル中心温度の他に、サンプル先端温度、真空容器外表面温度、冷却容器外表面温度がそれぞれ常時表示される。これらは加熱容器の熱電対から補償導線で直接制御室まで導いた電位差をそれぞれの表示装置内で温度に変換したものである。冷却容器外表面温度は設定値を超えると加熱インタロックが働く。

レコーダは6つのチャンネルを持ち、1500°C用加熱容器の場合、真空度、冷却風温度、サンプル中心温度、サンプル先端温度、真空容器外表面温度、冷却容器外表面温度を記録する。800°C用の場合第4チャンネルがサンプル中心温度となり、第3、第5、第6の各チャンネルは空白となる。1500°C用及び800°C用はトグルスイッチで切り換えられるようになっている。レコーダはRS232Cコネクタを備えており、小型コンピュータに上記6つのチャンネルの情報を伝送することができる。

### インタロック機構

これまでにもいくつか触れてきたように、制御盤には装置の安全性を確保するためのインタロック機構及び警報が備わっている。Table 3.3には各機器を作動させるためのインタロック条件を、Table 3.4には異常検知時の警報の種類と連動する動作を示す。これらインタロック及び警報の基本的な考

え方は以下の通りである。

- ・真空、冷却、温度等のすべての条件が整わなければ加熱できない。
- ・加熱中に上記の条件が一つでも満足できなくなった場合は直ちに加熱を停止する。
- ・異常時には真空の確保を全てに優先させる。これはモックアップ試験で示されたように真空さえ確保すれば冷却を停止しても問題がないことが分かっているからである。

#### 電源

制御室に設置した制御盤にはFCA機械室より非常用電源(三相200V)が、炉室の中継盤には常用電源(三相200V)が供給されている。炉室に設置された機器では、駆動機構が常に非常用電源で、コンプレッサーが停電時のみ非常用電源で作動する。停電時の装置の挙動は以下の通りである。

- (1) 加熱停止 真空系バルブ全閉 真空ポンプ及びコンプレッサー停止
- (2) 約40秒で非常用発電機が稼働 この時点で制御盤に給電が始まる
- (3) ドップラー引出し緊急引き抜き
- (4) ドップラー引出し引き抜き完了後にコンプレッサー再始動
- (5) 制御盤からの遠隔操作にてSV1を開けて冷却を開始

このうち(1)～(4)は自動的に行われる。

Table 3.1 UO<sub>2</sub> sample

Diameter	19.8 mm
Length	150.0 mm
Diameter of hole	5.9 mm
Mass	441.62 g
Density	95.8 %TD
U containment	88.15 %
Isotope ratio	
<sup>235</sup> U	0.264 %
<sup>238</sup> U	99.730 %

Table 3.2 Position of thermocouples

Position	Type of thermocouple
Sample center	B <sup>a)</sup>
Sample edge	B
Outer surface of vacuum capsule	K <sup>b)</sup>
Outer surface of cooling capsule	K
Coolant air inlet	K

a) Pt-Rh(30%) alloy - Pt-Rh(6%) alloy

b) Chromel - Alumel

Table 3.3 Interlock

Operation of device <sup>a)</sup>	Interlock signals		
	Permission to operate		Inhibition to operate
R.P on		Air pressure low <sup>b)</sup>	R.P trip
V2 open	R.P on	LV1 close	Air pressure low
V1 open	V2 open	P.G<0.1Torr <sup>b)</sup>	Air pressure low
T.M.P on	V2 open	P.G<0.1Torr <sup>b)</sup>	Air pressure low
I.G on	V1 open	T.M.P normal	
LV1 open	V2 close	T.M.P stop	I.G off
SV1 open			Air pressure low <sup>c)</sup>
Heater on	I.G<10 <sup>3</sup> Torr	I.G<10 <sup>4</sup> Torr <sup>b)</sup>	V1 open
	T.M.P normal		Sample center temperature high
			Vacuum capsule temperature high
			Cooling capsule temperature high
			Air pressure low
			COMP trip
			Air pressure low <sup>c)</sup>

a) Name of device is explained in Fig.3.5.

b) Initial interlock.

c) Air pressure of coolant. The others are air pressure for valve operation.

Table 3.4 Alarm

Alarm	Interlock action		
R.P trip by overload	Heater off	T.M.P stop	V1 close
COMP trip by overload	Heater off	SV1 close	
T.M.P abnormal	Heater off	T.M.P stop	V1 close
Sample center temperature high	Heater off		V2 close
Vacuum capsule temperature high	Heater off		
Cooling capsule temperature high	Heater off		
Air pressure low	Heater off	T.M.P stop	V1 close
Coolant pressure low	Heater off	SV1 close	V2 close

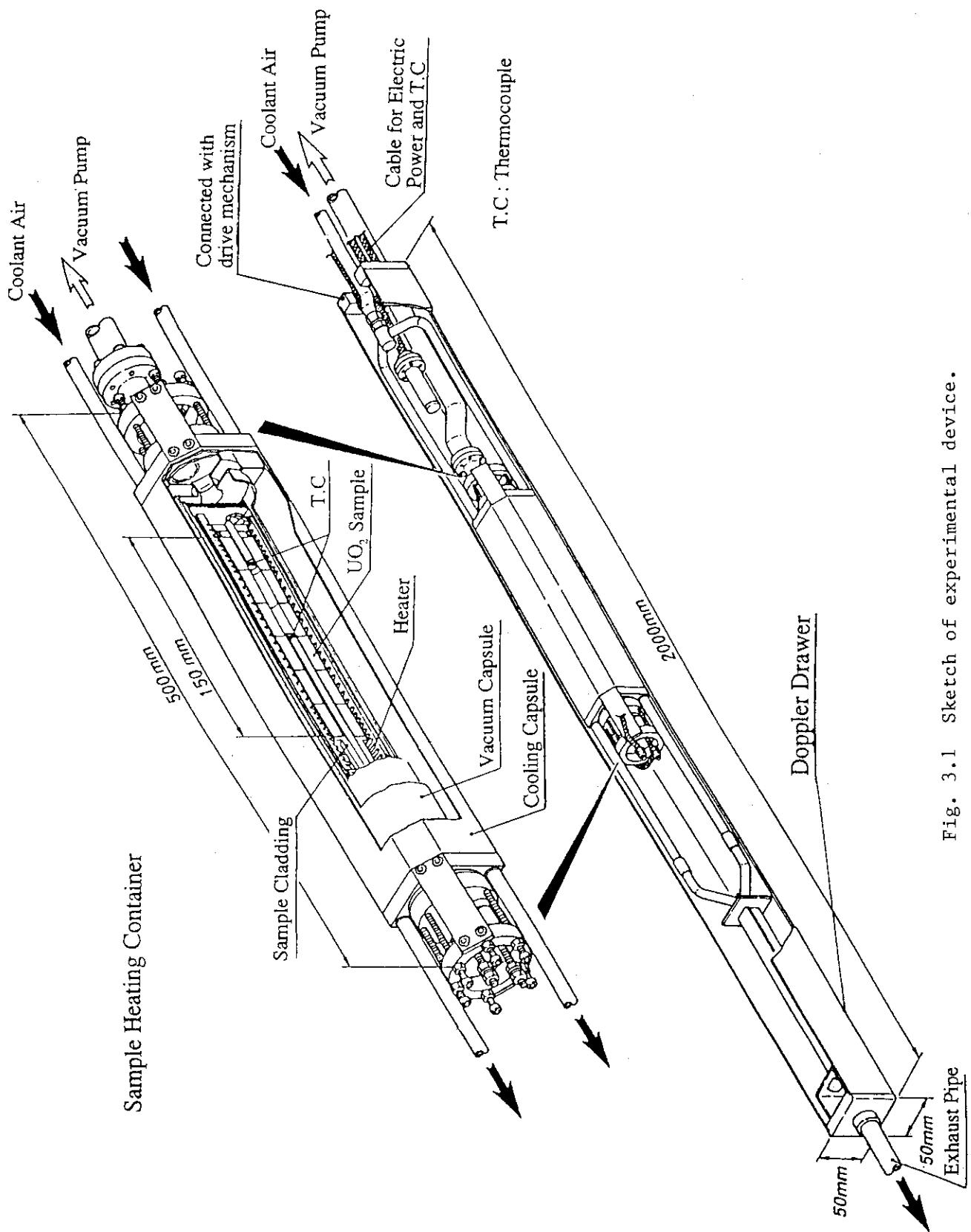
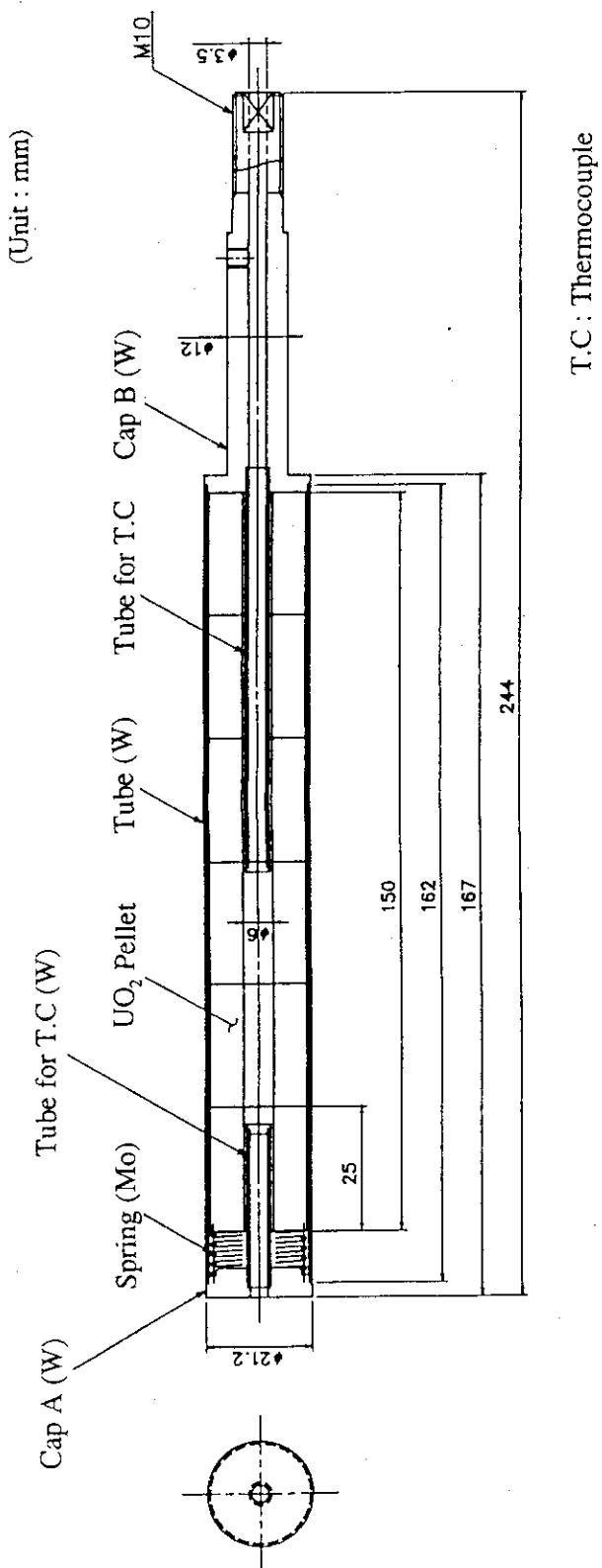


Fig. 3.1 Sketch of experimental device.

Fig. 3.2 UO<sub>2</sub> sample. (Pellets and cladding)

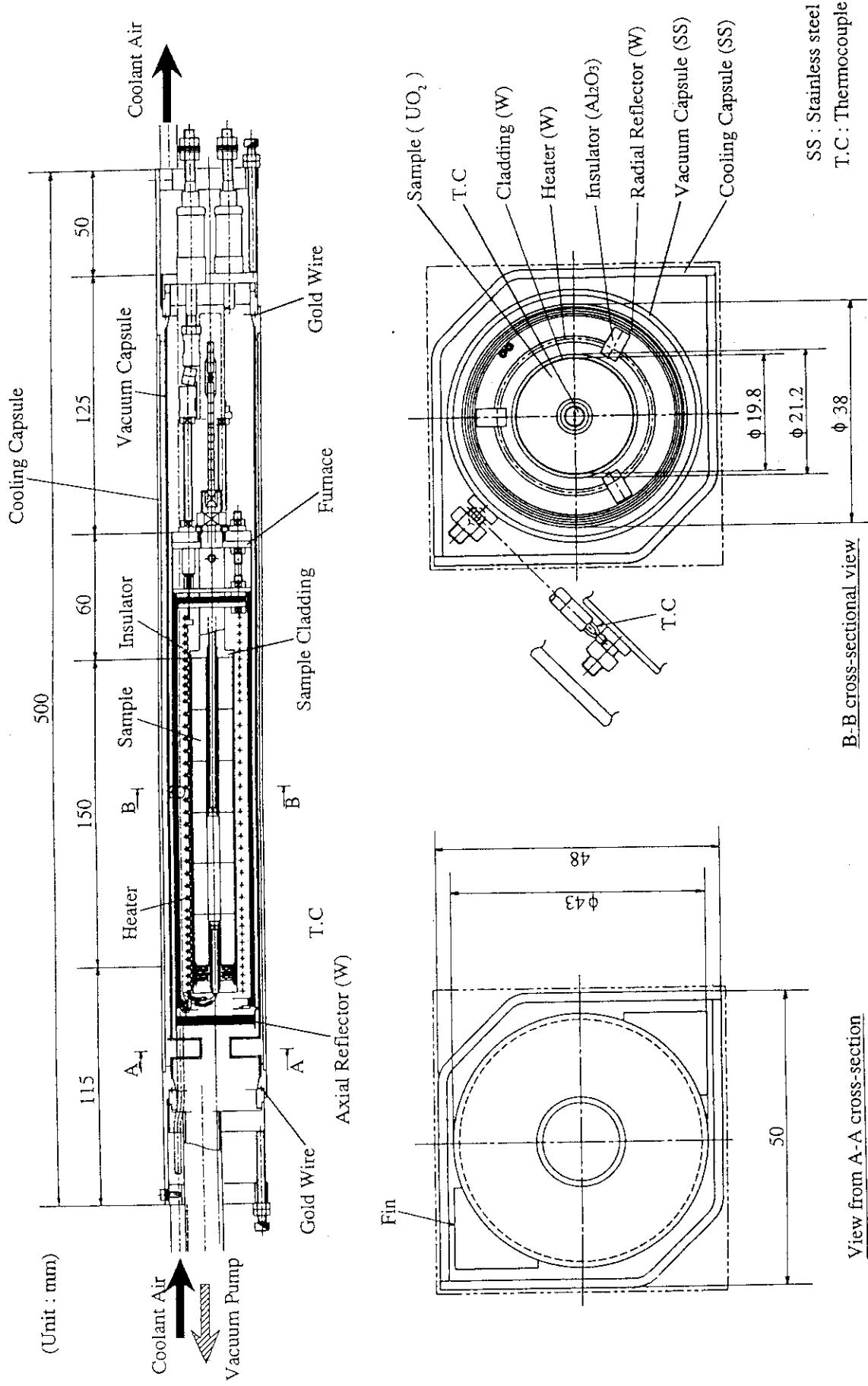
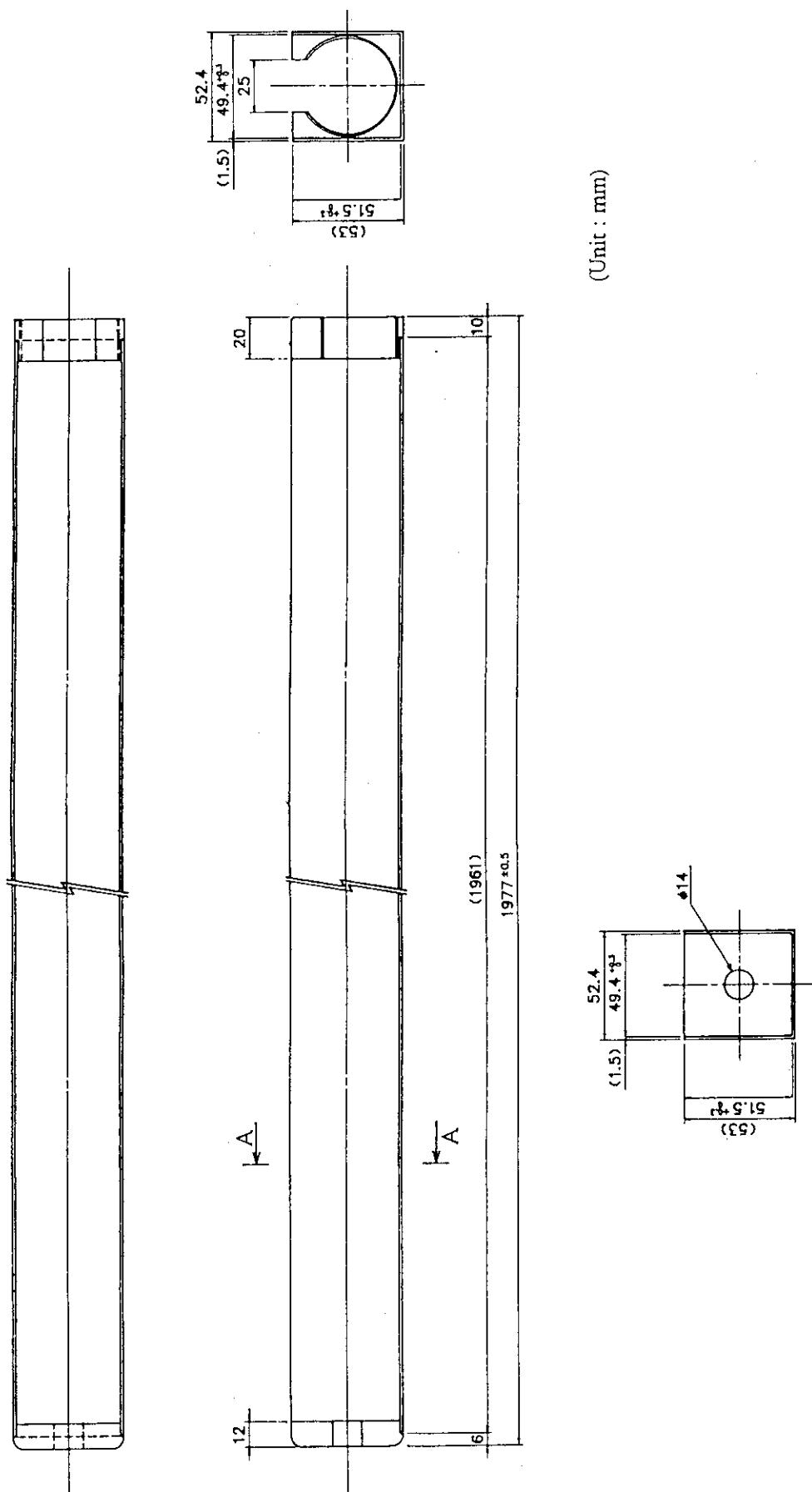


Fig. 3.3 Sample heating container.



View from A-A cross-section

Fig. 3.4 Doppler drawer.

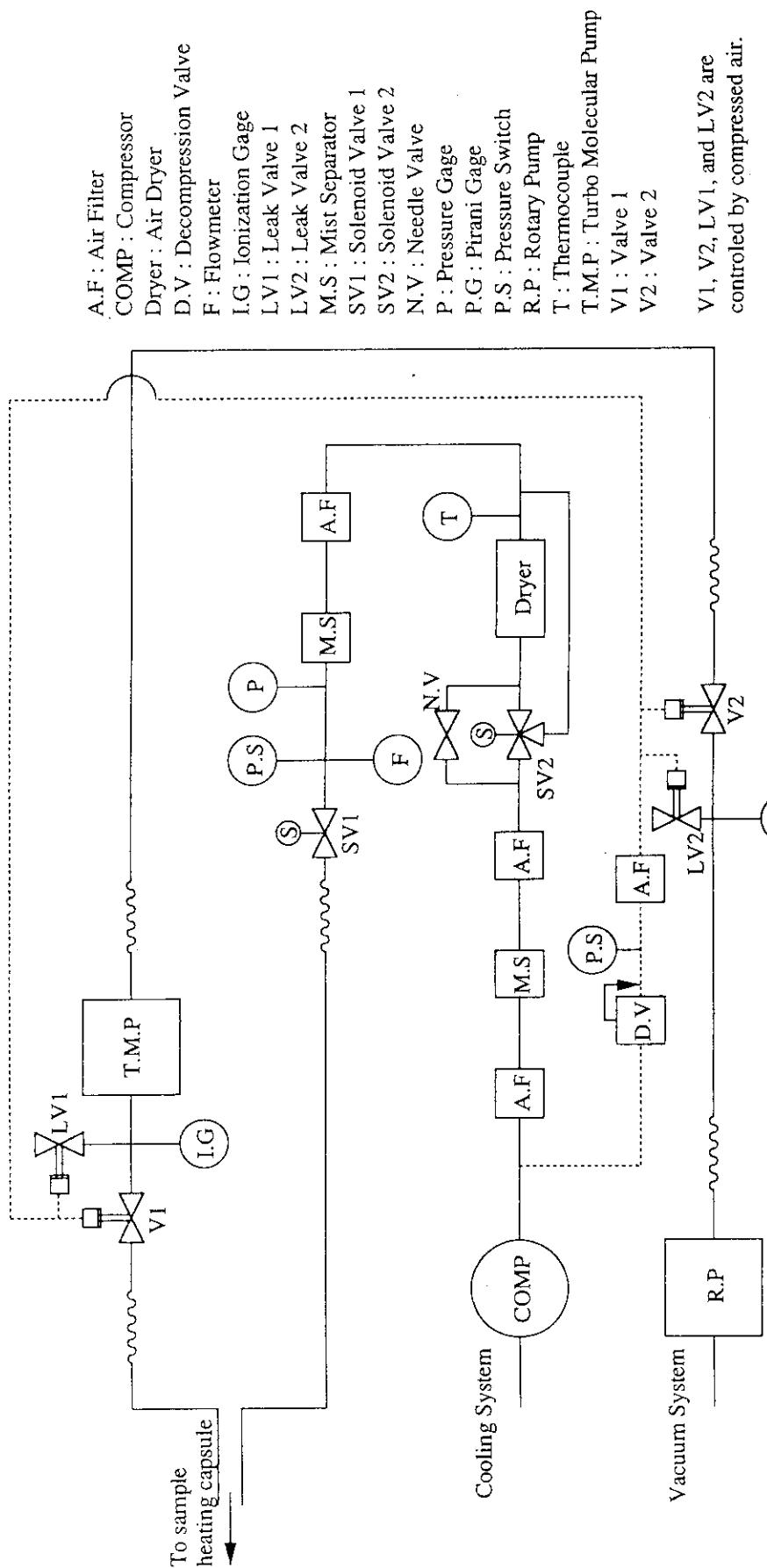


Fig. 3.5 Block diagram of cooling and vacuum system.

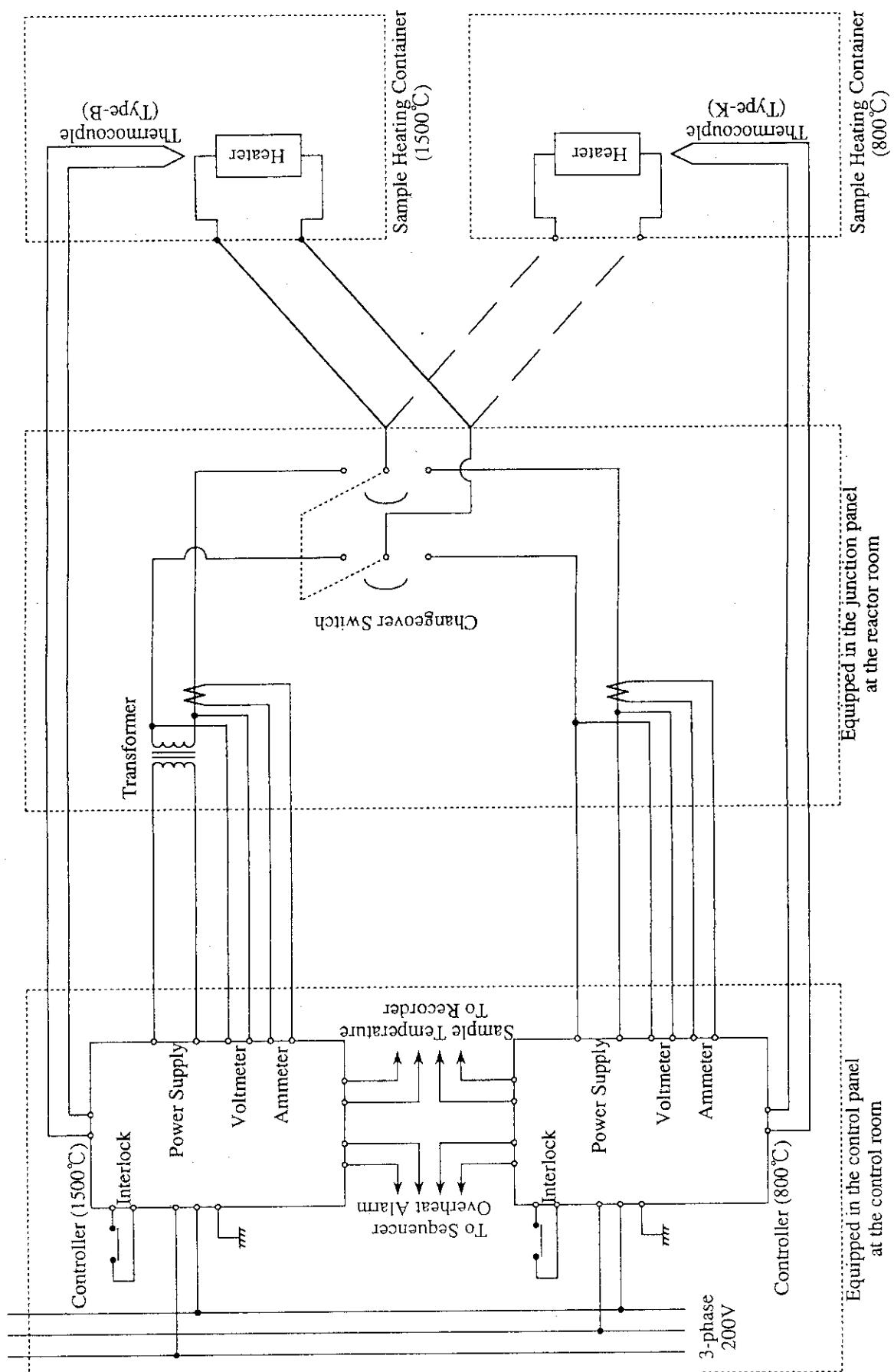


Fig. 3.6 Circuit diagram of heating system.

## 4. 温度特性

ここでは昇温試験及び実際のドップラー効果測定実験での装置の温度特性について述べ、結果を第2章で述べたものと同様の計算と比較する。

### 4.1 測定結果

Table 4.1に1990年4月から1992年9月までの昇温データを示す。データは550°Cから1500°Cまでで一定温度制御を行った時のものである。

まず、サンプル中心温度とサンプル先端温度の差に注目すると、800°C以下の低温時には先端温度の方が高く、それ以上では中心温度の方が高くなっていることが判る。しかし、1500°Cの場合でも温度差は50°C程度であり、モックアップ試験及び実証試験で見られたサンプル先端での温度降下は大きく改善されている。

冷却容器外表面温度は高い時でも39°C以下であり、40°C以下の制限を満たしている。また、冷却容器外表面温度は測定時の加熱容器の位置や環境（炉心密着時か分離時か、炉心へ挿入時か引き抜き時か、回りの引出しの有無、炉室温度等）により変化する。

サンプルを一定温度に保つのに必要な電流、電圧は表に示した期間内ではほぼ一定であり、良い再現性を示している。真空度も一定温度到達後の経過時間等により変化するため一概に比較できないが  $10^5 \sim 10^6$  Torr の範囲で安定しており、装置の気密性が保たれていることが判る。

各データ共に  $\text{UO}_2$  サンプル入り及びダミーサンプル入りの2つの加熱容器で差は見られない。

### 4.2 热解析

热計算は汎用有限要素解析コードANSYS<sup>5)</sup>により行った。計算モデルはFig.4.1に示したように2次元軸対称要素（リング要素）で構成し、加熱容器のサンプル、ヒータ等を模擬した。多層のタンクステン薄板熱遮蔽体は輻射熱伝達と等価な熱通過量を与える（温度依存の）熱伝導率を用いた。その他、輻射係数、熱伝達率の等の値はモックアップ試験及び実証試験の結果に基づいて設定した。以上の条件の下にヒータへの投入電力を昇温試験と等しくして加熱容器の各部の温度を求めた。

サンプルの軸方向温度分布についての計算結果と昇温試験の結果をFig.4.2に示す。1500°C等高温時のサンプル先端温度を計算は過大評価する傾向にあるが、試験データに見られた800°C以下のサンプル中心温度とサンプル先端温度の逆転現象を計算は非常に良く再現している。計算結果より、サンプル平均温度は、サンプル中心温度が1000°C以下の時はほぼサンプル中心温度に等しく、それ以上の時はサンプル中心温度よりも若干低いと考えられる。例えば中心温度1500°Cの時のサンプル平均温度は1450°C程度であると考えられる。

#### 4.3 热膨張による反応度価値の評価

サンプルの温度を上げていくと、サンプル支持部等の热膨張によりサンプルが移動し、さらにサンプル自体も热膨張する。これらによる反応度変化が測定値に印加される。このドップラー効果以外の反応度変化はサンプルが入っていない場合は現れないので、ダミーサンプルの測定では補正できない。ここでは热計算によって得た加熱容器内の温度分布を用いてサンプルの変位と膨張を予測し、热膨張による反応度価値の大きさ及びその相殺方法について考察する。

热膨張を考えるモデルはFig.4.3に示したように直列に並んだステンレス鋼製サンプル支持部、タンゲステン製サンプル被覆管の一部、 $\text{UO}_2$ サンプルが真空容器内の方で支持され、真空容器の他端が固定されているものである。Fig.4.4には計算によって得た入熱に対する各部分の温度変化を示した。この温度と热膨張率を用いてサンプル温度に対するサンプル端の位置変化 $\Delta a$ 及びサンプルの伸び $\Delta L$ を示したのがFig.4.5である。例えばサンプル温度1500°Cの場合、真空容器、サンプル支持部、被覆管及び $\text{UO}_2$ サンプルの室温からの平均線膨張率はそれぞれ

$$\alpha_{\text{sus}}(20 \rightarrow 120^\circ\text{C}) : 1.6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{\text{sus}}(20 \rightarrow 830^\circ\text{C}) : 1.9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_w(20 \rightarrow 1280^\circ\text{C}) : 5.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{\text{uo}_2}(20 \rightarrow 1500^\circ\text{C}) : 1.1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

であり、それぞれの長さ415mm、125mm、60mm及び150mmより

$$\Delta a = -(1.6 \times 10^{-5}) \times 100 \times 415 + (1.9 \times 10^{-5}) \times 810 \times 125$$

$$+ (5.4 \times 10^{-6}) \times 1260 \times 60 = 1.7 \text{ mm}$$

$$\Delta L = (1.1 \times 10^{-5}) \times 1480 \times 150 = 2.5 \text{ mm}$$

となる。

これらの膨張により原子炉に印加される反応度価値を評価する。Fig.4.3に示したように原子炉密着面をX軸の原点とする1次元モデルを考える。サンプルはFig.4.3の右方から支持され、サンプルの右端は座標のaにあり、サンプルの長さはLとする。サンプルを構成する物質の無限小反応度価値は原点について対称な2次関数で表現でき、その積分がサンプルの反応度価値であると仮定すると、室温の時のサンプル反応度価値 $\rho_1$ は次式で表される。

$$\rho_1 = \int_a^{a+L} (px^2 + q) dx \quad (4-1)$$

次にサンプル温度が上昇して、サンプル左端がaから $a+\Delta a$ に変位し、サンプル長さがLから $L+\Delta L$ に膨

張した時のサンプル反応度価値 $\rho_2$ は次式で表される。

$$\rho_2 = \int_{a+\Delta a}^{a+\Delta a+L+\Delta L} \frac{L}{L+\Delta L} (px^2+q) dx \quad (4-2)$$

ここでサンプルの径方向の膨張は無視した。よって温度変化に伴う反応度変化 $\Delta\rho$ は

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = p \times L \times A / 3 \quad (4-3)$$

$$A = (a + \Delta a + L + \Delta L)^2 + (a + \Delta a + L + \Delta L)(a + \Delta a) \\ + (a + \Delta a)^2 - 3a^2 - 3aL - L^2$$

で示される。微小変化 $\Delta a$ 及び $\Delta L$ の2次の項を無視すると、

$$A' = 6a\Delta a + 3a\Delta L + 2L\Delta L + 3L\Delta a \quad (4-4)$$

と近似できる。

サンプル支持部の膨張が無い場合は、 $\Delta a=0$ とできて $A'$ は次の様に簡単になる。

$$A' = (3a + 2L)\Delta L \quad (4-5)$$

この場合、 $a=-2L/3$ の位置にサンプルをセットすれば、近似的に膨張による反応度価値を相殺することができる<sup>(2)</sup>。一方、 $\Delta a$ が無視できない時でも $\Delta a/\Delta L$ がほぼ一定だとすると

$$A' = \{a(6c + 3) + L(3c + 2)\} \Delta L \quad (4-6)$$

$$c = \Delta a / \Delta L$$

と簡略化でき、 $a=-(3c+2)L/(6c+3)$ の位置にサンプルをセットすれば良いことが分かる。Fig.4.5には $c=\Delta a/\Delta L$ の値も示したが、概ね $c=0.7 \sim 0.8$ 程度であり、 $L=15cm$ であるから $a=-8.5cm$ の位置にセットすれば良い。Table.4.2には $a=-15, -7.5, -8.5$ 及び $0cm$ の時のサンプル反応度価値 $\rho_1$ に対する $\Delta\rho$ の比を示した。また、 $\rho_1$ に対するドップラー反応度価値の比( $\rho_{DOP}/\rho_1$ )も示した。ここで $\Delta\rho/\rho_1$ の計算では、無限小物質反応度価値に炉心中心から $25cm$ 離れると反応度価値が半分になるような2次関数を仮定した。 $\rho_{DOP}/\rho_1$ の値は原型炉級MOX燃料高速炉模擬体系FCA XVII-1集合体<sup>(6)</sup>での測定値である。

図より、 $a=-8.5cm$ の位置にセットすれば膨張による反応度価値はドップラー反応度価値の1%以内に抑えることができる事が判る。また、比較的予想が難しいと考えられる $\Delta a$ の値が実際はかなり大きな場合(Table 4.2の最下段)でも膨張による反応度価値は1%以下となる。

以上の議論はサンプル反応度価値分布に原子炉中心で対称であるやかな2次関数分布を仮定しており、炉心中心以外で測定する場合や中性子束分布が大きく変化する場所等での測定等には適用できないと考えられる。これらの場合には実験又は計算による補正が必要であろう。

Table 4.1 Temperature characteristics

Sample center	Temperature (°C) Sample edge	Vacuum capsule	Cooling capsule	Controller power	Electric power (A)	Voltage (V)	Degree of vacuum (Torr)	Sample	Date
550	563	20.7	22.3	6%	6.5	5.0	$5.4 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	91.05.31
549	560	-	16.6	-	-	-	$1.1 \times 10^{-6}$	Dummy	91.06.05
550	572	16.2	-	6%	6.4	5.0	$6.0 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	92.09.03
553	578	17.3	17.7	5%	6.0	4.0	$3.4 \times 10^{-7}$	Dummy	92.09.10
798	818	19.1	19.8	14%	-	-	$1.1 \times 10^{-5}$	$\text{UO}_2$	90.04.06
800	805	32.2	17.1	-	7.5	10.0	$1.0 \times 10^{-5}$	Dummy	90.04.24
800	816	18.0	17.9	14%	8.0	10.5	$4.8 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	90.05.09
800	803	22.5	22.9	13%	7.8	10.5	$7.1 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	91.05.28
800	802	23.0	23.7	14%	8.0	10.5	$4.6 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	91.05.31
800	798	-	18.6	13%	7.5	10.0	$9.2 \times 10^{-7}$	Dummy	91.06.05
800	822	18.5	-	14%	7.5	11.0	$5.6 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	92.09.03
800	802	18.6	18.4	12%	7.5	10.0	$7.1 \times 10^{-7}$	Dummy	92.09.10
1100	1090	36.4	18.9	28%	10.0	17.5	$1.8 \times 10^{-5}$	Dummy	90.04.25
1099	1079	23.8	21.8	31%	10.0	18.5	$3.3 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	90.05.09
1099	1072	28.2	27.9	30%	10.0	18.5	$5.4 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	91.05.28
1099	1070	28.8	27.3	30%	10.2	18.5	$4.4 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	91.05.31
1100	1085	-	20.0	29%	10.0	18.0	$1.4 \times 10^{-6}$	Dummy	91.06.05
1100	1092	24.1	22.8	31%	10.4	19.0	$5.6 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	92.09.03
1100	1077	22.4	19.4	28%	10.5	17.0	$1.4 \times 10^{-6}$	Dummy	92.09.10
1200	1166	28.0	26.4	37%	11.0	21.5	$1.6 \times 10^{-5}$	$\text{UO}_2$	90.04.06
1300	-	32.3	22.9	47%	12.0	26.0	$1.7 \times 10^{-5}$	$\text{UO}_2$	90.04.13
1301	1251	29.2	22.2	-	-	-	$2.1 \times 10^{-5}$	$\text{UO}_2$	90.04.20
1511	1467	44.6	38.3	63%	14.0	33.0	$1.3 \times 10^{-4}$	$\text{UO}_2$	90.04.04
1503	1440	44.0	36.8	65%	14.5	33.0	$5.3 \times 10^{-5}$	$\text{UO}_2$	90.04.06
1500	1470	-	30.0	67%	14.0	34.0	$4.8 \times 10^{-5}$	Dummy	90.04.25
1500	1423	43.6	33.7	70%	14.5	34.0	$2.2 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	90.05.09
1500	1418	48.8	38.7	70%	14.3	35.0	$5.0 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	91.05.31
1499	1459	-	29.4	69%	14.0	32.0	$2.7 \times 10^{-6}$	Dummy	91.06.05
1499	1444	45.3	28.6	74%	15.2	36.0	$3.8 \times 10^{-6}$	$\text{UO}_2$	92.09.03
1500	1449	36.8	25.6	62%	15.2	33.0	$2.5 \times 10^{-6}$	Dummy	92.09.10

Table 4.2 Reactivity worth caused by sample displacement and expansion

Sample temperature (°C)	$\Delta a$ (mm)	$\Delta L$ (mm)	Estimated worth <sup>a)</sup> : $\Delta \rho / \rho_1$ (relative to sample worth)			Doppler worth <sup>b)</sup> : $\rho_{Dop} / \rho_1$ (relative to sample worth)
			$a = -15\text{cm}$	$a = -8.5\text{cm}$	$a = -7.5\text{cm}$	
550	0.52	0.60	$1.2 \times 10^{-3}$	$7.9 \times 10^{-6}$	$-1.8 \times 10^{-4}$	$-1.6 \times 10^{-3}$
800	0.82	1.04	$2.0 \times 10^{-3}$	$-1.2 \times 10^{-5}$	$-3.2 \times 10^{-4}$	$-2.6 \times 10^{-3}$
1100	1.23	1.60	$3.0 \times 10^{-3}$	$-4.2 \times 10^{-5}$	$-5.0 \times 10^{-4}$	$-4.0 \times 10^{-3}$
1500	1.75	2.50	$4.3 \times 10^{-3}$	$-1.4 \times 10^{-4}$	$-8.2 \times 10^{-4}$	$-5.9 \times 10^{-3}$
	5.00 <sup>c)</sup>	2.50	$9.5 \times 10^{-3}$	$2.6 \times 10^{-4}$	$-1.2 \times 10^{-3}$	$-1.2 \times 10^{-2}$

a) Small sample worth distribution  $f(x)$  is approximated by  $f(x) = px^2 + q$ , where  $x$  is distance from core center, and  $f(\pm 25\text{cm}) = q/2$ .b) Measured values in FCA XVII-1 assembly<sup>6)</sup>.

c) This is an imaginary case to estimate the influence of unexpected displacement of the sample.

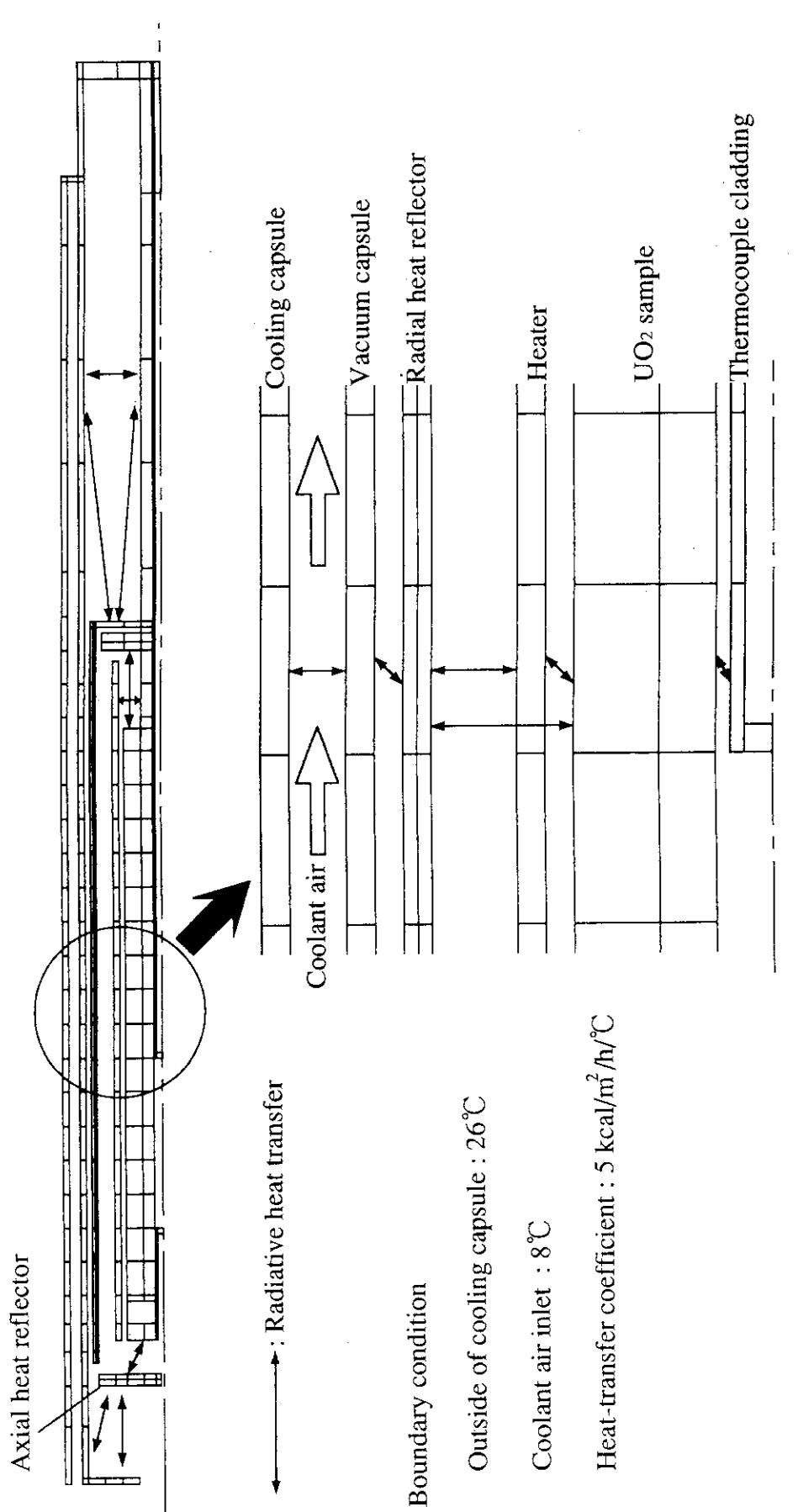


Fig. 4.1 RZ model for heat transfer calculation.

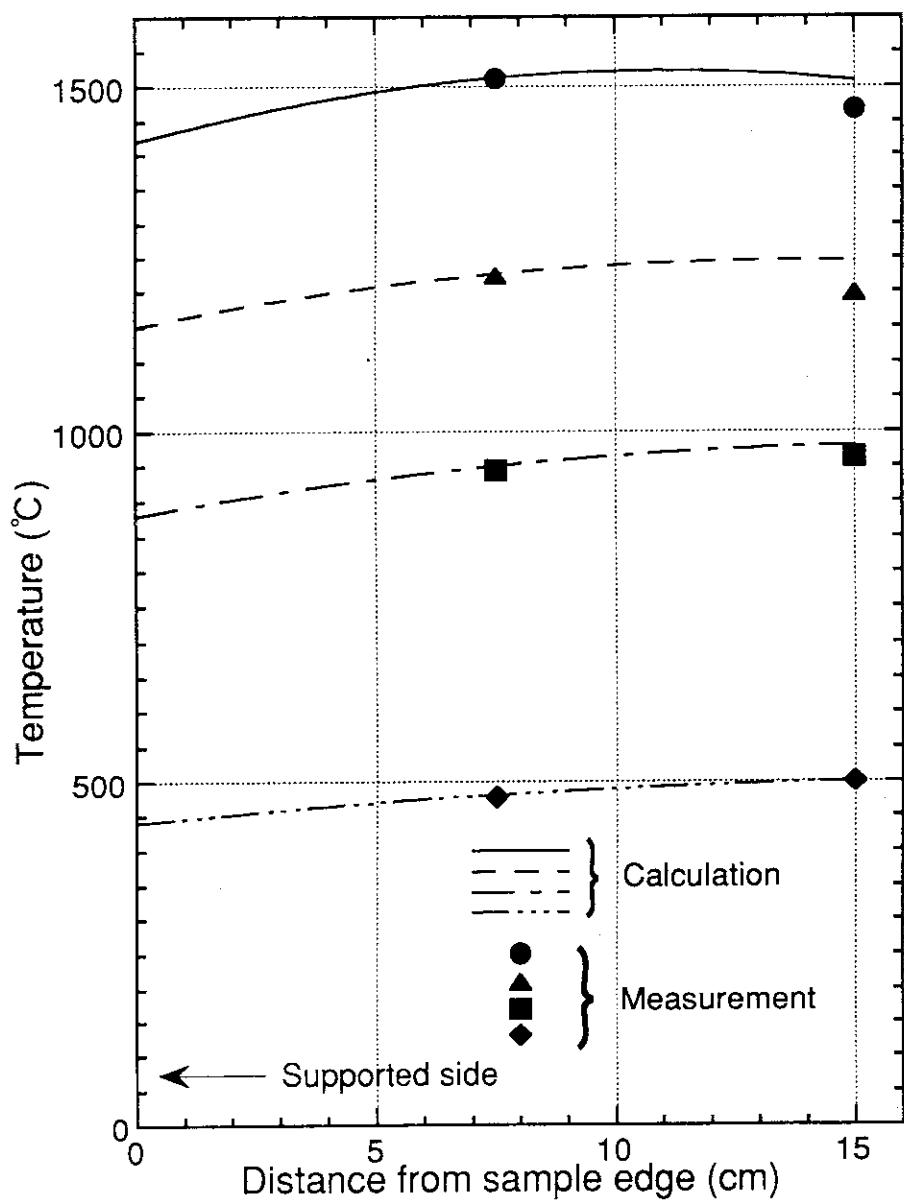


Fig. 4.2 Comparison between measured and calculated temperature along sample axis.

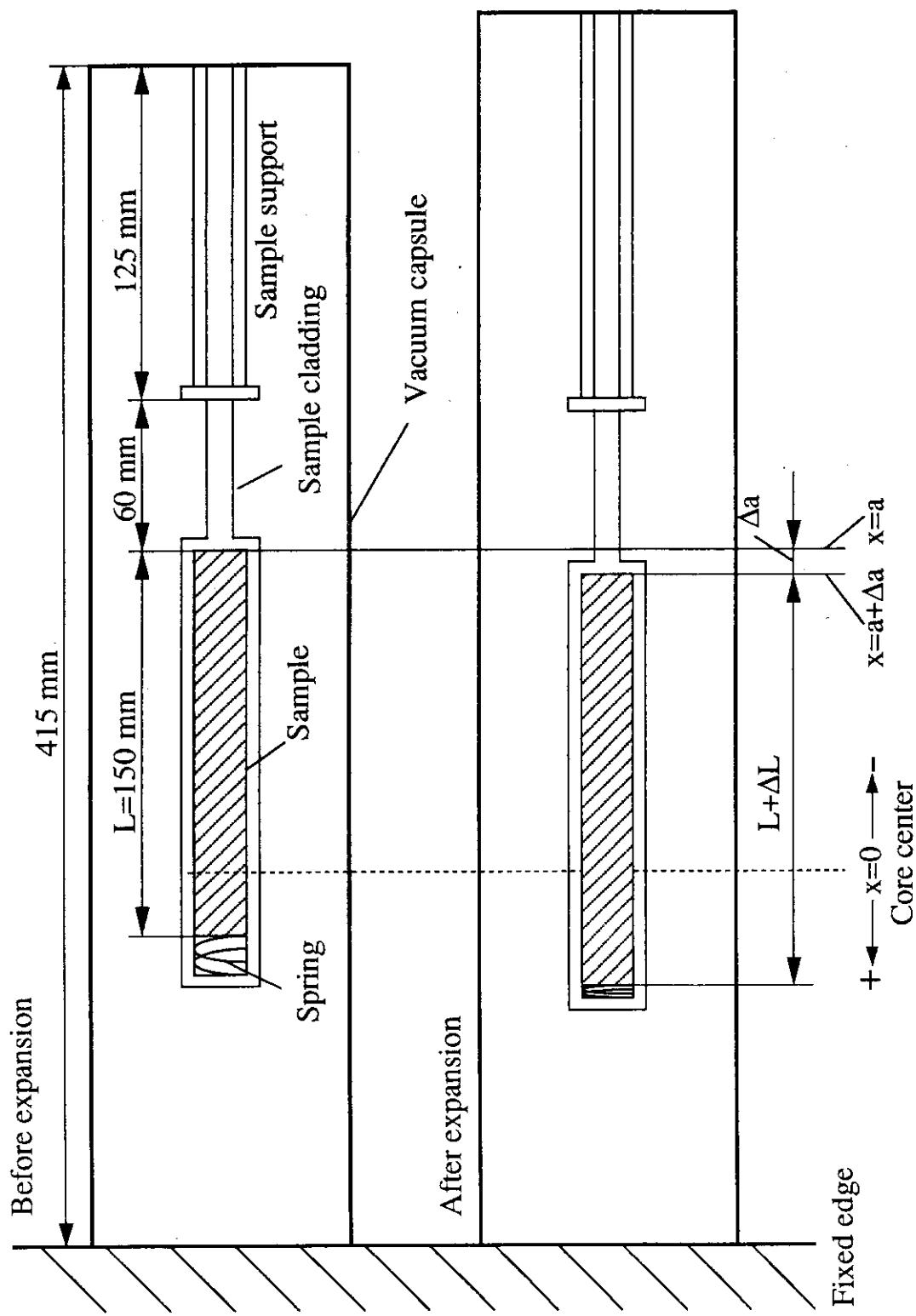


Fig. 4.3 Estimation model for sample displacement and expansion.

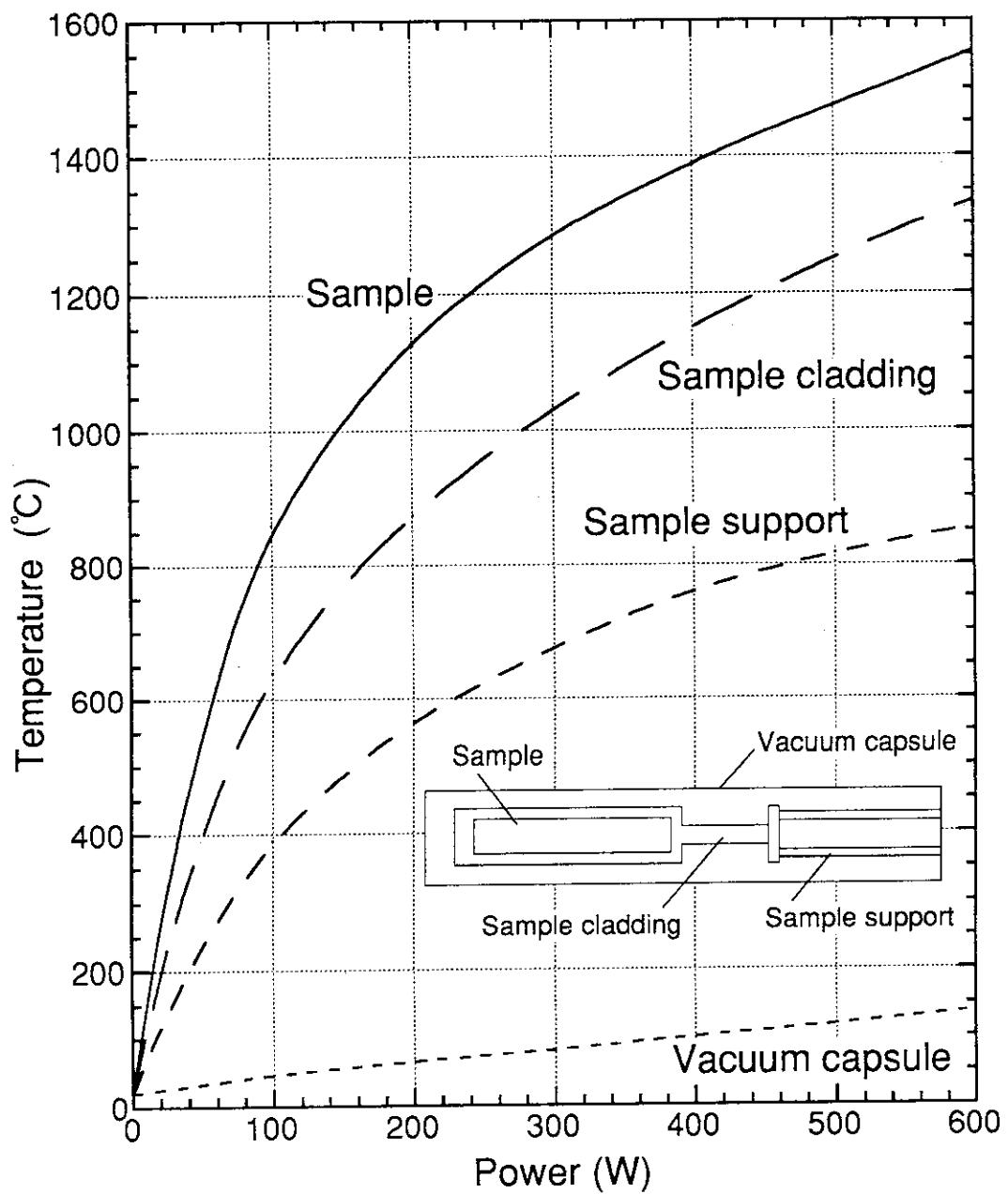


Fig. 4.4 Calculated temperature in sample heating container.

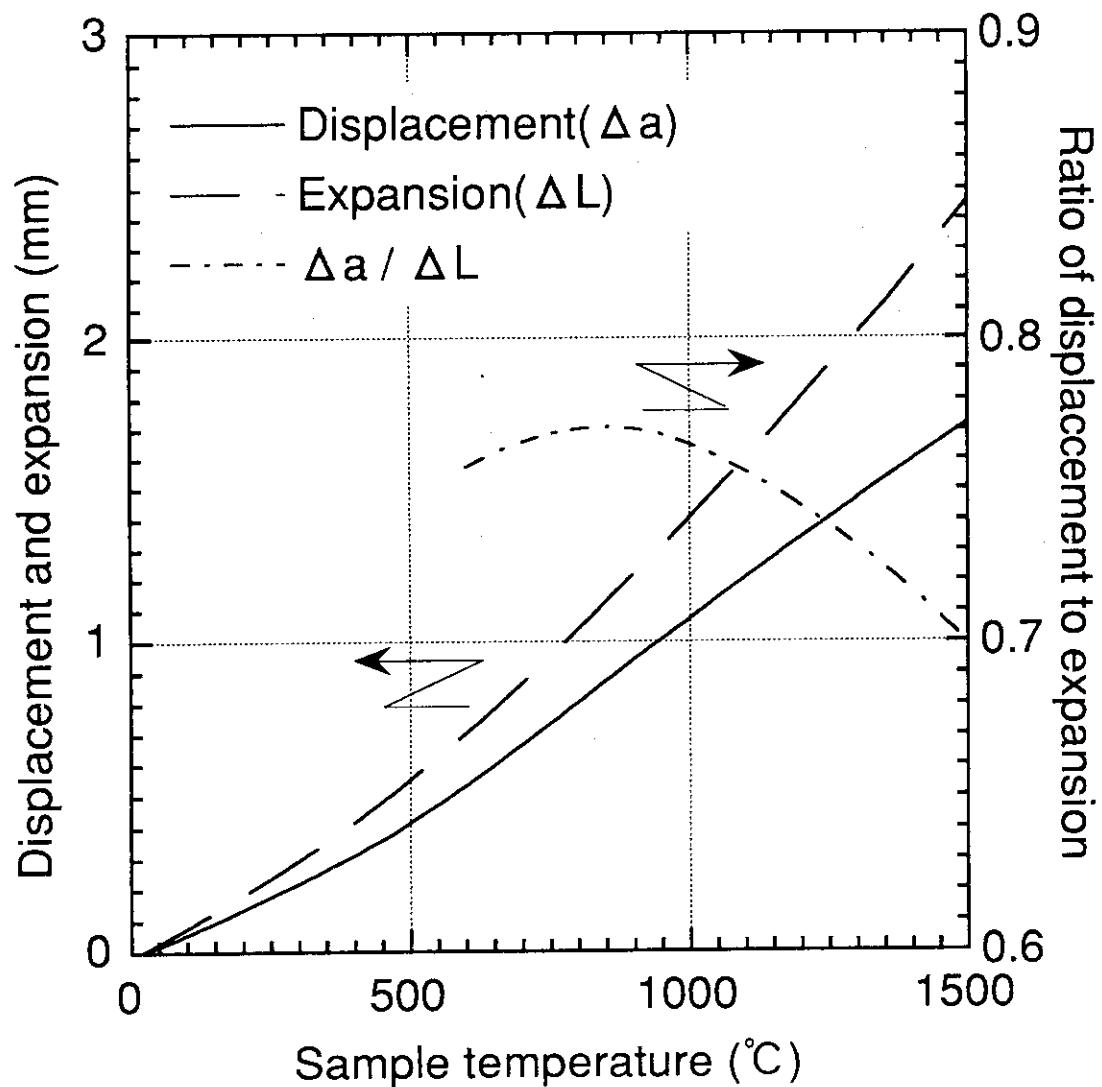


Fig. 4.5 Temperature dependence of sample displacement and expansion.

## 5. 測定手順と測定例

ここでは本装置を使ったドップラー反応度価値の測定方法及び測定例を述べる。

### 5.1 測定前準備

#### 炉心まわりの準備

本装置を使って測定するドップラー反応度価値は $\sim 10^6 \Delta K/K$ 程度であり、通常の制御棒（微分反応度価値 $\sim 10^6 \Delta K/K/mm$ ）では精度が上がらないため、通常の制御棒を1/10程度に薄めた微調整棒を使用する必要がある。微調整棒の較正は通常の制御棒との差し換えによって行う。

ドップラー引出しの駆動機構は固定側集合体の中心引出しの位置に据え付ける。この時、駆動軸と格子管が厳密に平行になっていないと測定中のドップラー引出しと格子管の間の摩擦が大きくなるので注意を要する。

固定側及び移動側集合体ともに中心引出しを抜いた状態で体系が臨界になるように余剰反応度を調整しておく。移動側集合体では中心引出しのストッパーを取り外し、冷却室背後の壁にドップラー引出しの冷却風排出パイプが当たらないように孔を設ける。

#### ドップラー引出しのセット

Fig.4.1に示したようにドップラー引出しに加熱容器をセットする。引出し内の排出パイプを引出し端に差し込み、さらに加熱容器の冷却風出口（2箇所）をそのパイプの他端に差し込む。引出し内排出パイプには断熱用アルミナ管を数個はめ、その上からカバーで覆う。カバーで覆った部分には反応度バランス用の模擬物質板を並べる。Fig.5.1に模擬物質板の配置例を示す。図に示したように5cm長さの模擬物質板を18パック入れる構造であり、排出パイプ側より9パック目の中心に基準サンプル部分を設けている。

次に、ドップラー引出しを固定側集合体中心格子管に挿入し、冷却室内で駆動軸と結合する。この部分では、真空系、冷却系の各配管、各熱電対及びヒーターへの電線も結合する必要がある。駆動軸と引出しは駆動軸にネジ込んだ取付治具により結合する。

最後に、電線結合部にカバーを掛け、真空漏れのないことのチェック並びにドップラーサンプル中心及び基準サンプル中心がFCAの密着面にある時の駆動機構の位置表示の確認を行う。

#### 反応度バランスの調整

ドップラー反応度価値の測定ではドップラーサンプル測定位置（サンプル中心が密着面にある時よりも10mm移動側集合体方向へ移動した位置）即ち"Sample in"と基準サンプル測定位置（基準サンプル中心が密着面にある位置）即ち"Sample out"における臨界微調整棒位置を多数回交互に測定するため、両測定位置間でドップラー引出しを移動した時に原子炉の出力が落ち着くのに時間がかかると測

定に要する時間を浪費することになる。そこでドップラー引出し内の模擬物質板配列位置の上にさらに模擬物質板を置き、両測定位置間での過剰反応度の変化ができるだけ小さくなるように調整する。Fig.5.2にこの調整を行った例（FCA XVII-1集合体でのUO<sub>2</sub>サンプル入り加熱容器）を示した。旧装置では加熱容器が小さかったためにはほぼ平坦な反応度バランスが得られたが、新装置ではかなりの起伏が残る。しかし、引出しの駆動速度を約100mm/sと速くし、過剰反応度の山の部分と谷の部分の割合をほぼ等しくすることで出力の落ちつきを早めることができる。図の例では、1回目には基準サンプル近辺で過剰反応度の落ち込みが見られたのを、2回目には基準サンプルの天然ウラン板を除去することにより持ち上げ、3回目には第17セルの天然ウラン板を除去することにより山の部分と谷の部分の割合をほぼ等しくしたものである。

## 5.2 測定

測定は次の手順により行う。

- (1) ドップラー引出しの測定位置確認。
- (2) FCA プラットホーム閉。冷却風排出パイプ取り付け。
- (3) 冷却系・真空系の作動。
- (4) 集合体密着。約3時間集合体の温度分布安定を待つ。
- (5) 制御棒を適当な位置に止め、微調整棒で臨界にする。
- (6) 90%の負のバッキングカレントを線型出力型の1系統（チャンネル6）に加え、微調整棒を自動運転にする。
- (7) ドップラー引出しを基準サンプル測定位置にセットし、出力が落ち着くのを待ち微調整棒位置の自動読み取りを行う。
- (8) ドップラー引出しをドップラーサンプル測定位置にセットし、出力が落ち着くのを待ち上と同様の測定を行う。
- (9) 手順(7)及び(8)を繰り返す。
- (10) サンプル温度を変えて(7)～(9)の手順を行う。

手順(7)における微調整棒位置の自動読み取りでは、0.5秒毎の位置をミニコンピュータにより160回読み取り、これを1セットとし、位置の読みに異常の無いことを確認しながらそれを5～7回繰り返す。Fig.5.3にドップラー反応度価値測定の一例を示したが、図中の●及び▲がそれぞれの引出し位置における5～7セットの平均値に相当する。図のように、ひとつの温度で3～5回手順(7)、(8)を繰り返して次の温度へ移る。図の20時30分に微調整棒位置が階段状に変化しているのは、微調整棒1mm当たりの反応度価値（微分反応度価値）が一定である範囲（ここでは50～90mm）で測定を行うために、制御棒を動かしたためである。

### 5.3 ドップラー反応度価値の算出

ここまでで得られた微調整棒位置からドップラー反応度価値を算出する。

Fig.5.4はFig.5.3の一部を模式化して拡大したものである。Sample out時の微調整棒の位置は炉心温度の変化等により時刻と共に変化しているため、Sample out時とSample in時の反応度差 $\Delta\rho$ は

$$\Delta\rho_i(T_j) = \frac{[\rho(X^{OUT}_i, T_j) + \rho(X^{OUT}_{i+1}, T_j)]}{2} - \rho(X^{IN}_i, T_j)$$

$\rho(X^{OUT}_i, T_j)$  : サンプル温度 $T_j$ の時の微調整棒位置 $X^{OUT}_i$  (sample outの*i*番目の測定を示す) に対応する炉心の過剰反応度

で求まる。 $\Delta\rho_i(T_j)$ はある温度 $T_j$ に対する反応度差であり、その温度で複数個求まる。それらの平均を $\Delta\rho(T_j)$ とする。 $T_0$ を室温とするとサンプルの温度変化による反応度変化 $\Delta\rho(T_0 \rightarrow T_j)$ は

$$\Delta\rho(T_0 \rightarrow T_j) = \Delta\rho(T_j) - \Delta\rho(T_0)$$

で求まる。この $\Delta\rho(T_0 \rightarrow T_j)$ には $UO_2$ サンプル入り加熱容器の場合はサンプルのドップラー反応度価値及び加熱容器の温度変化の寄与の2つの成分が含まれている。一方ダミーサンプル入り加熱容器の場合は後者の成分のみなので、正味のドップラー反応度価値 $\Delta\rho_{DOP}(T_0 \rightarrow T_j)$ は

$$\Delta\rho_{DOP}(T_0 \rightarrow T_j) = \Delta\rho(T_0 \rightarrow T_j, UO_2) - \Delta\rho(T_0 \rightarrow T_j, Dummy)$$

で求めることができる。

Table 5.1にドップラー反応度価値算出の一例としてFCA XVII-1炉心での測定結果を示した。但し、この測定では測定に供した範囲内で微調整棒の微分反応度価値が一定であるとして、上述のように反応度価値 $\Delta\rho$ でデータ処理を進めるのではなく、微調整棒位置の変化 $\Delta x$ でデータ処理を進め、最後に反応度価値に変換したものである。誤差は $\Delta x_i(T_j)$ のばらつきから求めたものを伝播させたものであり、1500°Cで約4%の精度となっている。

Table 5.1 Results of Doppler reactivity worth measurement  
(Assembly XVII-1)

Temperature (°C)	UO <sub>2</sub> sample		Dummy sample		Doppler worth <sup>a</sup> (10 <sup>-6</sup> Δk/k)	
	Δx <sup>b</sup> (mm)	Δx-Δx(20°C) (mm)	Δx (mm)	Δx-Δx(20°C) (mm)		
20	-6.147 -6.155 -6.195 -6.174 <u>Av</u> -6.168 ±0.021 <sup>c</sup>		2.805 2.947 2.938 2.655 <u>Av</u> 2.701 ±0.021			
550	-16.527 -16.718 -16.508 <u>Av</u> -16.584 ±0.106		-3.865 -4.272 <u>Av</u> -4.072 -4.040 ±0.176		-6.849 ±0.221	4.40 ±0.31
800	-19.593 -19.556 -19.514 <u>Av</u> -19.554 ±0.040		-6.321 -6.372 <u>Av</u> -6.215 -6.303 ±0.080		-9.112 ±0.155	5.27 ±0.21
1100	-22.417 -22.465 -22.525 <u>Av</u> -22.469 ±0.054		-8.422 -8.385 <u>Av</u> -8.274 -8.360 ±0.077		-11.169 ±0.154	6.32 ±0.21
1500	-25.373 -25.382 -25.378 -25.555 <u>Av</u> -25.422 ±0.089		-10.472 -10.648 -10.744 <u>Av</u> -10.681 -10.636 ±0.117		-13.445 ±0.177	7.16 ±0.26

a) Differential worth of fine control rod is given at a constant value:  
 $(1.232 \pm 0.012) \times 10^{-6} \Delta k/k/\text{mm}$

b) Δx : Difference of fine control rod positions between sample in and sample out.

c) Experimental errors are evaluated from the standard deviation of measured values.

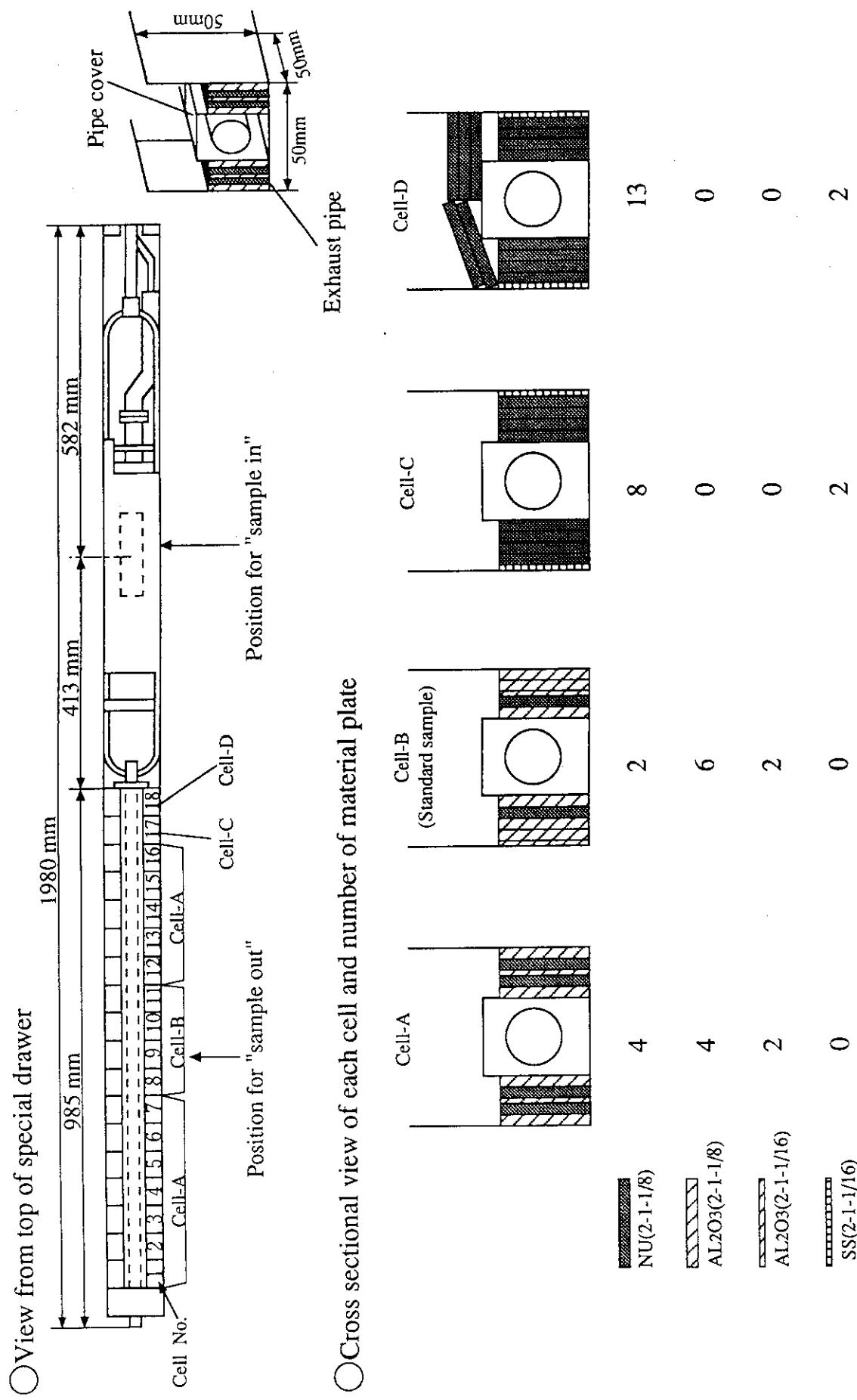


Fig. 5.1 Plate arrangement in a Doppler drawer.

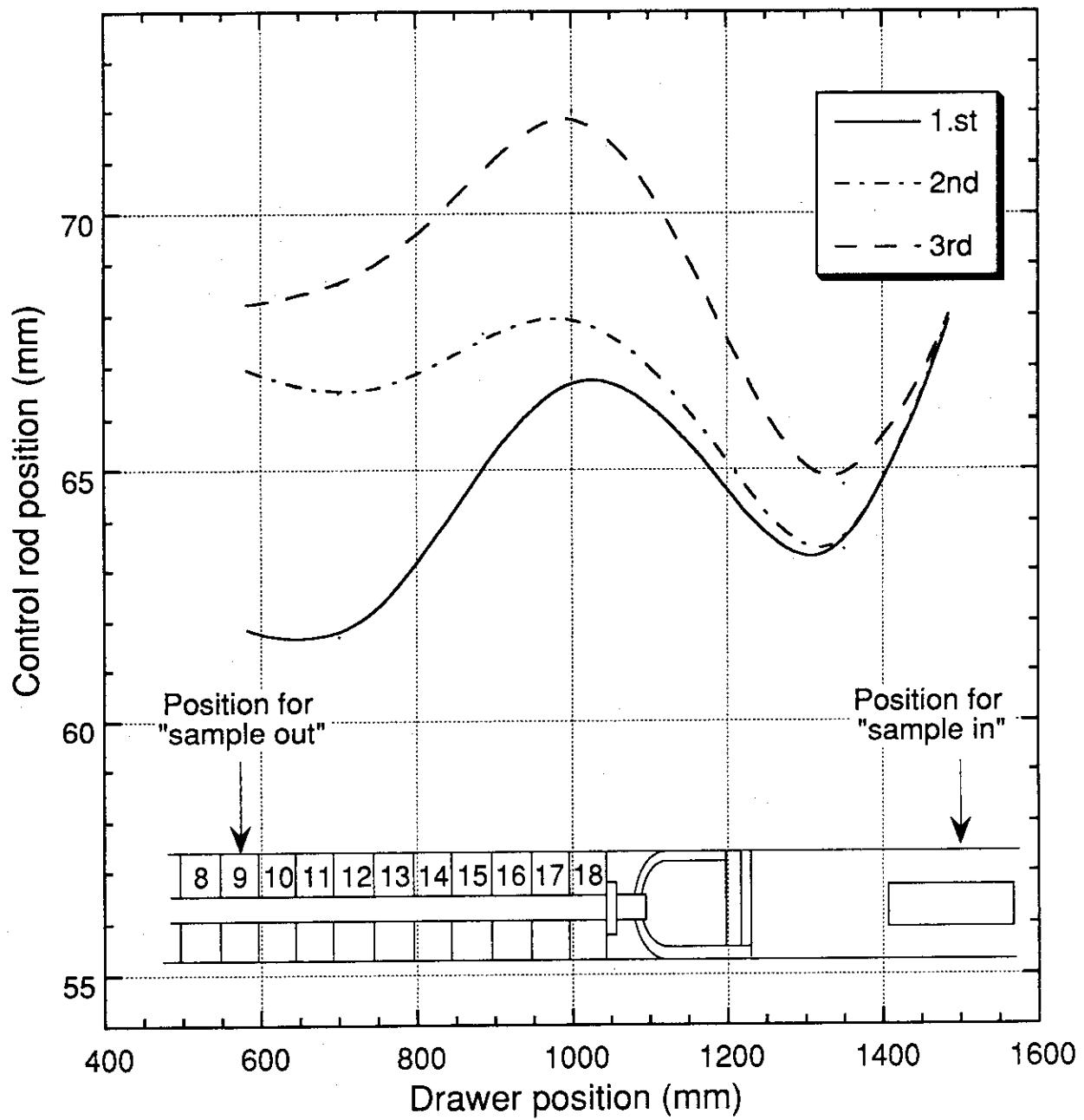


Fig. 5.2 Adjustment of excess reactivity between "sample in" and "sample out".

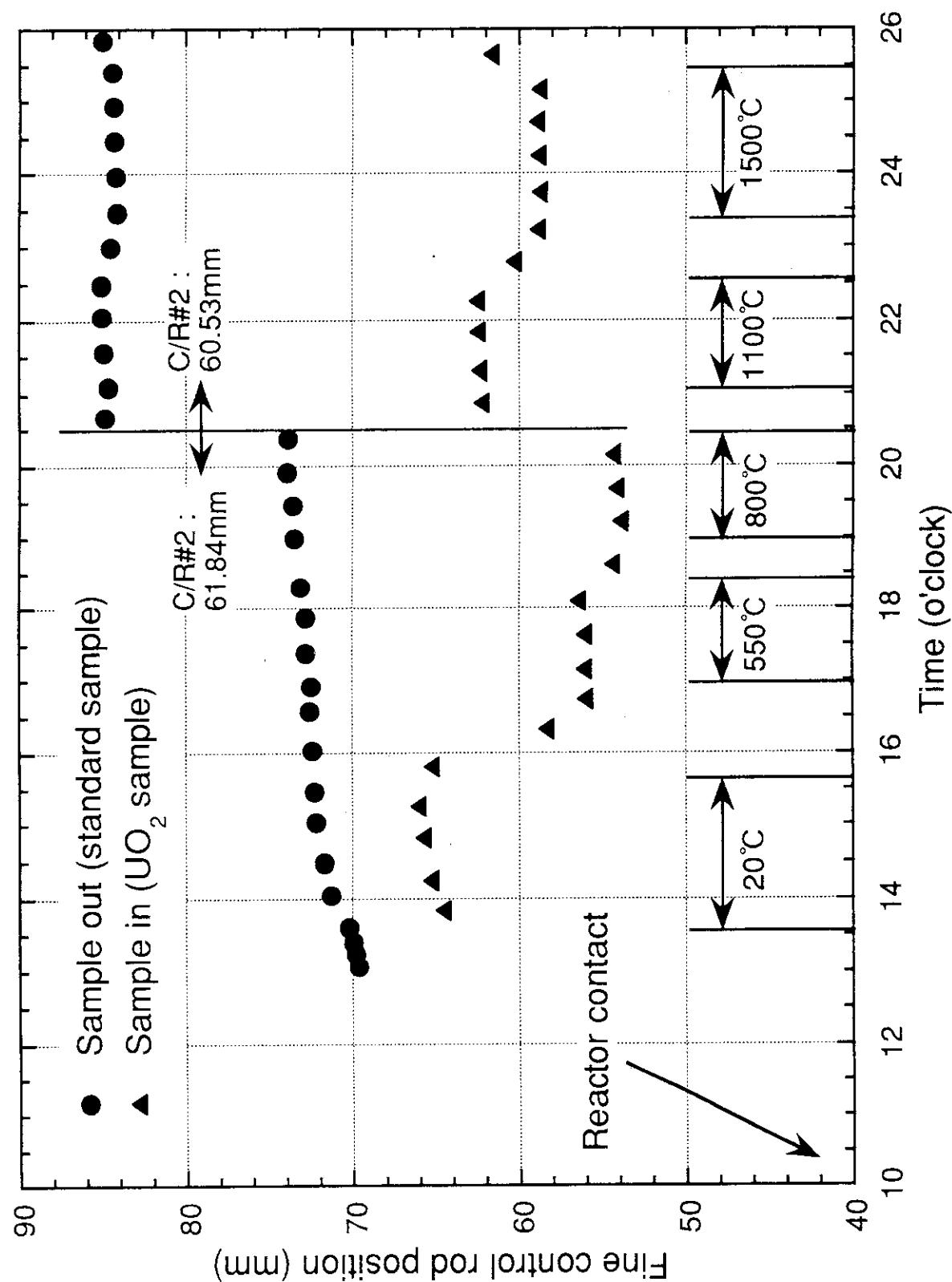


Fig. 5.3 Raw data of the measurement for  $\text{UO}_2$  sample in FCA XVII-1 assembly<sup>6)</sup>.

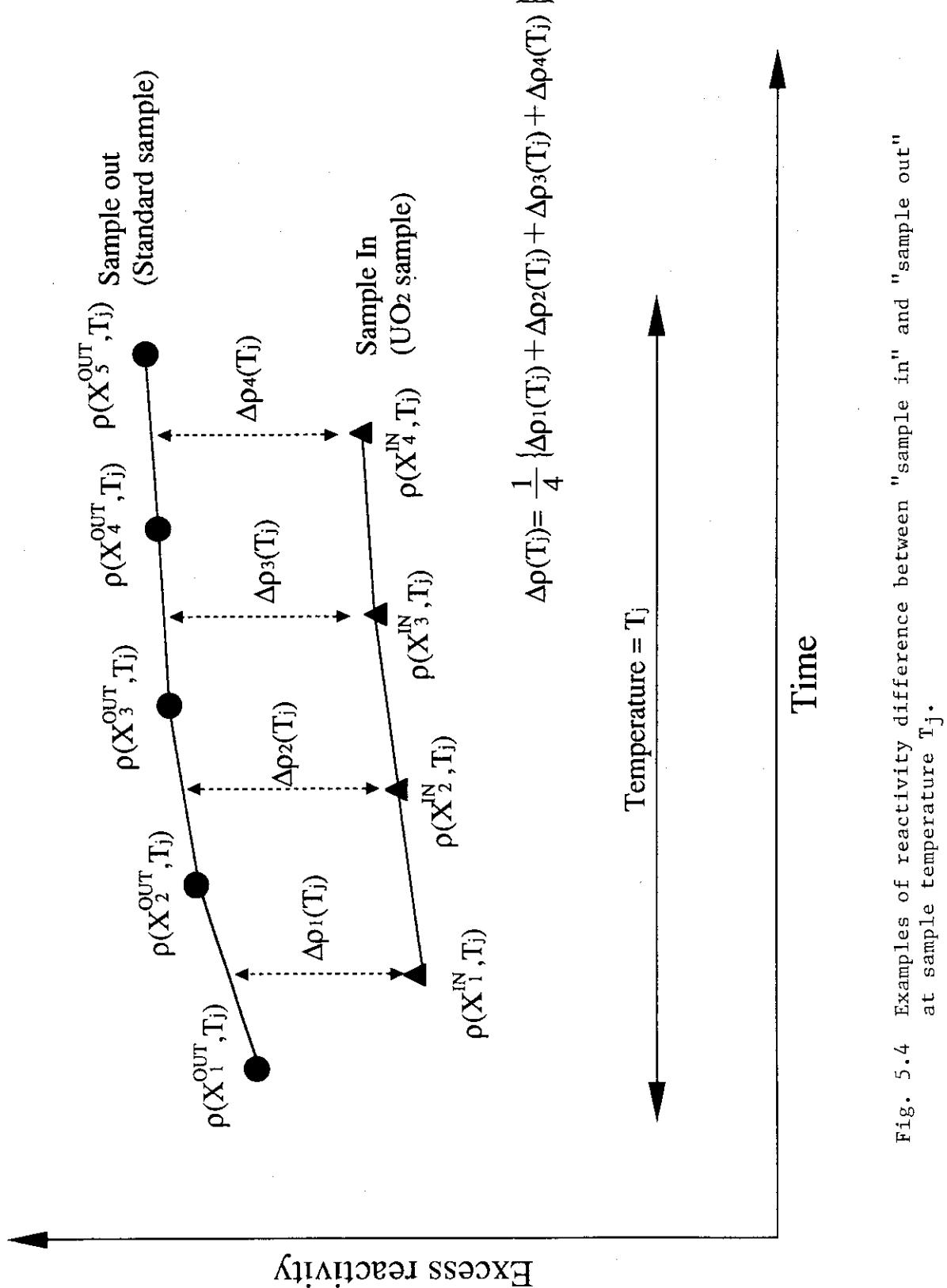


Fig. 5.4 Examples of reactivity difference between "sample in" and "sample out" at sample temperature  $T_j$ .

## 6. まとめ

FCAにおいてサンプル加熱・反応度値測定法により1500°Cまでの<sup>238</sup>Uのドップラー反応度効果を測定できる装置を開発した。本装置は、FCA格子管内(断面積：5cm×5cm)という非常に特殊な環境下で高温を取り扱うものであり、その開発には相当の困難が予想されたため、試験装置を2回試作して性能の確認、設計法の改良を繰り返しながら開発を行なった。800°Cまで昇温可能であった旧装置に比べて改良・変更した主な点を以下に示す。

- ・ヒータ、サンプル被覆管等高温になる部分は耐熱材料であるタンクステンを用いた。
- ・サンプル軸方向温度分布を平坦化するためにサンプルは片側支持とし、ヒータの巻ピッチに工夫を加えた。
- ・熱遮蔽体を多量に用いた。
- ・高真空度を確保し、タンクステン等内部構造物の酸化を抑制するために、駆動装置上にターボ分子ポンプを設けた。
- ・冷却風の流量を確保するために加熱容器の冷却風流路を広げた。
- ・温度監視点を増やした。

以上のようにして設計・製作を行なった実機装置は、当初目的としたサンプル中心温度1500°C、サンプル平均温度1450°Cを良い再現性を持って達成でき、この時のFCA格子管温度も40°C以下に抑える性能を持つことが示された。

今後、本装置と2000°Cまで測定できる箔加熱・反応率測定法装置を用いて、高速炉の安全性に重要な<sup>238</sup>Uドップラー効果の高温領域における挙動を研究していく予定である。

## 謝 辞

装置開発の初期段階で、熱解析や高温材料の分野で多くの有益な助言を戴いた関昌弘氏（核融合工学部・炉構造研究室室長）に深く感謝致します。また、本研究を進めるに当たって多くの有益な助言と激励を戴いた高速炉物理研究室前室長中野正文氏に感謝致します。最後に、装置の設計及び据えつけ工事、実験の遂行等の面で種々のご協力を戴いた大野秋男氏をはじめFCA管理機関員の諸氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- (1) Yasuno T., Nakano M., Mukaiyama T., Iijima T., and Hirota J. : J. Nucl. Sci. Technol., 7, 271 (1970).
- (2) 岡嶋成晃,向山武彦 :"FCA X-3およびXI-1集合体におけるドップラー効果の測定",  
JAERI-M 84-086 (1984).
- (3) Mukaiyama T. and Okajima S. : J. Nucl. Sci. Technol., 22, 243 (1985).
- (4) MSC/NASTRAN : Application Manual, The MacNeal-Schwendler Corporation, April/May 1982.
- (5) ANSYS : User's Manual, Swanson Analysis Systems, INC., June 1, 1985.
- (6) 飯島進,他 :"FCA XVII-1 集合体 ",公刊予定

## 謝 辞

装置開発の初期段階で、熱解析や高温材料の分野で多くの有益な助言を戴いた関昌弘氏（核融合工学部・炉構造研究室室長）に深く感謝致します。また、本研究を進めるに当たって多くの有益な助言と激励を戴いた高速炉物理研究室前室長中野正文氏に感謝致します。最後に、装置の設計及び据えつけ工事、実験の遂行等の面で種々のご協力を戴いた大野秋男氏をはじめFCA管理機関員の諸氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- (1) Yasuno T., Nakano M., Mukaiyama T., Iijima T., and Hirota J. : J. Nucl. Sci. Technol., 7, 271 (1970).
- (2) 岡嶋成晃, 向山武彦 : "FCA X-3およびXI-1集合体におけるドップラー効果の測定",  
JAERI-M 84-086 (1984).
- (3) Mukaiyama T. and Okajima S. : J. Nucl. Sci. Technol., 22, 243 (1985).
- (4) MSC/NASTRAN : Application Manual, The MacNeal-Schwendler Corporation, April/May 1982.
- (5) ANSYS : User's Manual, Swanson Analysis Systems, INC., June 1, 1985.
- (6) 飯島進, 他 : "FCA XVII-1 集合体", 公刊予定

## 付 錄

### 実験解析用計算モデル及び原子数密度

ここでは本装置を使ったドップラー反応度価値の実験解析に使用する計算モデルと原子数密度を示す。実験は通常FCA中心軸上で行われるため、サンプルが中心軸上にあるFig.A.1のような2次元RZモデルでサンプル及び加熱容器を模擬する。

$\text{UO}_2$ サンプルの領域（領域1）は $^{238}\text{U}$ の共鳴自己遮蔽効果に影響を及ぼさないようにサンプルペレットだけから成るものとし、領域半径はペレットのものを使用した。ペレットが持つ熱電対挿入用の孔は無視し、全体で原子数が保存されるように考慮した。

半径方向にサンプルを取り巻く部分（領域2）は、熱電対挿入管を含むサンプル被覆管、ヒータ、ヒータサポート、径方向熱遮蔽体、真空容器及び冷却容器の一部、ドップラー引出しの一部から成り、サンプル径方向の環境を保存するように考慮した。

領域1及び領域2を軸方向に挟む領域（領域3）は、領域2に含めなかった加熱容器の残りの部分とドップラー引出しから成る。領域の軸方向長さは冷却容器の全長に相当し、真空系及び冷却系の配管等それ以外の部分は除外した。

Table A.1に加熱容器各部の組成と質量を示す。各部の質量加熱容器組立前にそれぞれ量ったものであり、 $\text{UO}_2$ サンプル入りとダミーサンプル入りとの間に相違はなかった。

最後に、Table A.1の質量を各領域の体積で割り、原子量とアボガドロ数を使用して原子数密度を求めた。結果をTable A.2に示す。 $\text{UO}_2$ サンプルの反応度価値を求める時には、ダミーサンプル入り加熱容器の原子数密度が必要になる。この場合に使用すべき原子数密度をTable A.2に併せて示す。これは領域1がボイドになることを防ぐために、領域2のタンゲステンのうち熱電対挿入管を含むサンプル被覆管を領域1に移したものである。

### サンプル加熱容器の各配線の電気抵抗値

実験準備の一環として、サンプル加熱容器のヒータ及び熱電対の電気抵抗値を測定し、配線が断線していないことを確認しなければならない。Table A.3に $\text{UO}_2$ サンプル用及びダミーサンプル用の各加熱容器についてそれぞれ電気抵抗の測定結果を示す。

Table A.1 Composition and mass of heating capsule

Parts	UO <sub>2</sub> <sup>a)</sup>	Tungsten <sup>b)</sup>	Stainless steel <sup>c)</sup>	Alumina <sup>d)</sup>
UO <sub>2</sub> pellet	441.62 g			
Sample cladding for region 2		306.4 g		
for region 3		154.8 g		
		151.6 g		
Heating container for region 2		993.4 g	2161.6 g	42.1 g
for region 3		482.9 g	469.7 g	24.5 g
		510.5 g	1691.9 g	17.6 g
Special drawer			18.46 g/cm	

a) UO<sub>2</sub> contains 88.15w/o of uranium. Isotope composition of uranium :  
<sup>235</sup>U / <sup>238</sup>U=0.264 / 99.73.

b) Natural tungsten. Isotope composition : <sup>182</sup>W/<sup>183</sup>W/<sup>184</sup>W/<sup>186</sup>W=26.3/14.3/30.8/28.6

c) Composition of stainless steel : Cr/Mn/Fe/Ni=18.46/1.15/70.36/10.03.

d) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Table A.2 Atomic number density ( $10^{24}$ atoms/cm<sup>3</sup>)

Nucleus	Region 1 (46.19cm <sup>3</sup> )	Region 2 (410.9cm <sup>3</sup> )	Region 3 (1067cm <sup>3</sup> )
<sup>238</sup> U	2.12659E-2 <sup>a)</sup>		
<sup>235</sup> U	5.70118E-5		
O	4.26534E-2	1.05787E-3	2.91925E-4
Al		7.05253E-4	1.94613E-4
Mn		2.27111E-4	2.74002E-4
Ni		1.98080E-3	2.38978E-3
Cr		3.64562E-3	4.39833E-3
Fe		1.38952E-2	1.67642E-2
W		5.08394E-3	2.03354E-3
<sup>182</sup> W		1.33708E-3	5.34821E-4
<sup>183</sup> W		7.27003E-4	2.90796E-4
<sup>184</sup> W		1.56585E-3	6.26330E-4
<sup>186</sup> W		1.45401E-3	5.81592E-4
for dummy sample			
O		1.05787E-3	2.91925E-4
Al		7.05253E-4	1.94613E-4
Mn		2.27111E-4	2.74002E-4
Ni		1.98080E-3	2.38978E-3
Cr		3.64562E-3	4.39833E-3
Fe		1.38952E-2	1.67642E-2
W	1.09807E-2	3.84958E-3	2.03354E-3
<sup>182</sup> W	2.88793E-3	1.01244E-3	5.34821E-4
<sup>183</sup> W	1.57024E-3	5.50490E-4	2.90796E-4
<sup>184</sup> W	3.38206E-3	1.18567E-3	6.26330E-4
<sup>186</sup> W	3.14049E-3	1.10098E-3	5.81592E-4

a) Read as  $2.12659 \times 10^{-2}$

Table A.3 Electric resistance of heater and thermocouples in both containers.

Position	Electric resistance ( $\Omega$ )	
	UO <sub>2</sub> sample	Dummy sample
Heater	2.2	0.6
Sample center	0.6	1.0
Sample edge	0.9	1.3
Outer surface of vacuum capsule	2.3	6.2
Outer surface of cooling capsule	58	60

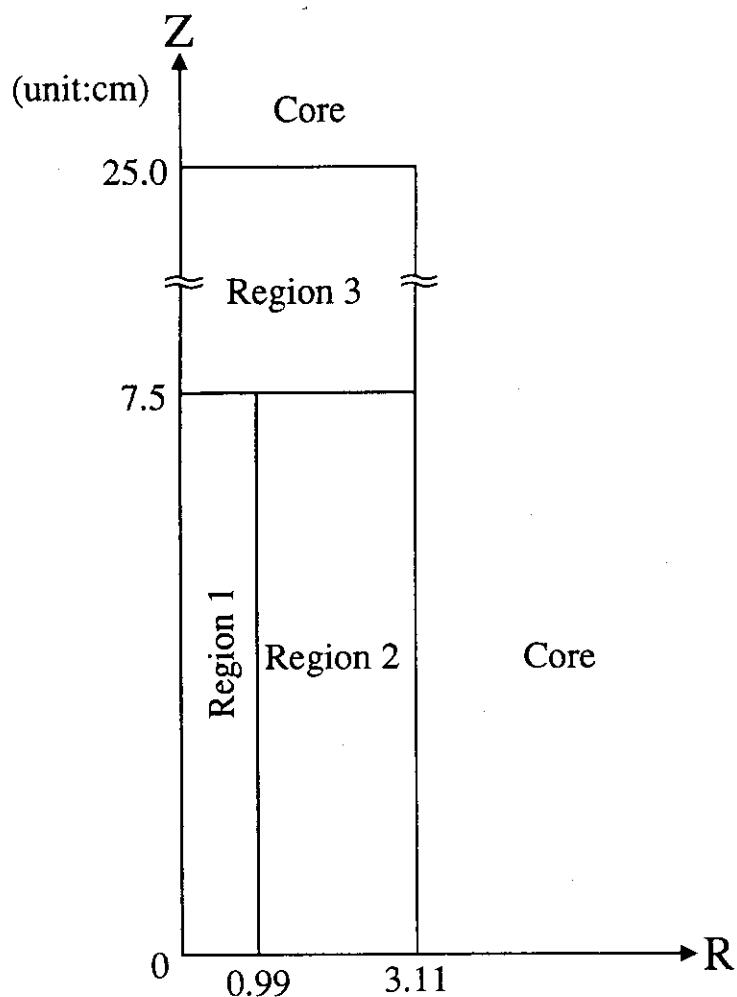


Fig. A.1 Calculational model for Doppler experiment.