

FMF増設施設集合体試験装置の開発

— 「常陽」集合体の寸法測定・断面形状測定試験 —

(技術報告書)

2002年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2002

FMF 増設施設集合体試験装置の開発
—「常陽」集合体の寸法測定・断面形状測定試験—

(技術報告書)

佐々木新治* 阿部和幸* 永峯剛* 松元慎一郎*

要旨

大洗工学センターの照射燃料集合体試験施設には、既施設に加え、高速増殖炉「もんじゅ」などの大型集合体を取り扱うための増設施設が付設されている。そこに設置するために集合体縦型試験装置を開発し、これまでに高速実験炉「常陽」の集合体6体の寸法測定等を試験的に実施してきた。

本装置は多機能を有しており、外観検査と各種の寸法測定、さらには集合体の解体が可能である。寸法測定としては、集合体の全長、対面間寸法、頂角間寸法、曲がり、ねじれを同時に自動的に測定する機能を有する。さらに、新たに開発した専用の治具を用いることにより、集合体の断面形状の測定も行うことができる。

集合体の全長、対面間寸法および頂角間寸法の結果についてはFMF既施設に設置されている校正済みの集合体寸法測定装置の値と比較し、測定誤差内にあることを確認した。曲がりに関しては、最大で1mmを越える差が見られた。これは、両装置の測定方法の違いを考慮すれば、必ずしも有意な差ではないと考えられる。

新たに導入した断面形状測定については、寸法測定結果から算出された値と比較して、測定誤差範囲内で一致した。このデータはこれまでの装置では直接取得できないものであった。

*:燃料材料試験部 照射燃料集合体試験室 (FMS)

Development of Multipurpose Test Apparatus for Core Assemblies
in FMF-extension.

-Examination of Size and Cross section form Measurement
for Core Assemblies Irradiated in "JOYO"

(Technical Document)

S.SASAKI*, K.ABE*, T.NAGAMINE*, and S.MATSUMOTO*

ABSTRACT

In the place adjacent to the Fuel Monitoring Facility (FMF) in the O-arai Engineering Center, FMF-Extension was constructed to examine large subassemblies irradiated in the prototype fast breeder reactor "MONJU" and so on. Until now, in order to confirm the performances of subassembly vertical examination machine, which is one of main apparatus installed in FMF-Extension, it has been experimentally conducted to measure six subassemblies irradiated in the experimental fast reactor "JOYO".

This machine has multi-functions such as appearance inspection, various size measurements and dismantling a subassembly. As to the size measurements, it is possible to measure subassembly length, hexagonal wrapper tube face-to-face distance, corner-to-corner distance, bowing and twisting automatically. Furthermore, this machine has a function of grasping the cross section form of hexagonal wrapper tube, using a new special tool.

The results measured by this machine were compared with the data of the same subassemblies with the existing machine in FMF, which was calibrated already. For the data of subassembly length, hexagonal wrapper tube face-to-face distance and corner-to-corner distance, the difference of both machines was within a measurement error. In some results of bowing, the difference was over 1mm. It was thought that the difference was not a considerable error when taking into account the characteristics of these machines that the error was easy to propagate.

The results of cross section form of hexagonal wrapper tube newly introduced in this machine were in a good agreement within a measurement error, compared with the data calculated on the basis of size measurement results. The existing machine in FMF could not treat this cross section form measurement.

*: Fuel Monitoring Section, Fuel and Materials Division, O-arai Engineering Center, JNC.

目次

1. はじめに	1
2. 集合体縦型試験装置の寸法測定部と断面形状測定治具	2
2.1 全長寸法について	2
2.2 対面間寸法および頂角間寸法について	2
2.3 曲がり、ねじれについて	3
2.4 断面形状測定治具の仕様	3
2.5 既設寸法測定装置との相違	4
3. 集合体寸法測定試験結果	13
3.1 全長測定	13
3.2 対面間寸法、頂角間寸法および曲がり	14
3.3 断面形状測定	15
4. 考察	23
4.1 縦型試験装置の測定性能の評価	23
4.2 集合体の断面形状変化について	24
5. おわりに	30
6. 謝辞	30
7. 参考文献	30

図表目次

表 3-1	全長測定結果	13
図 2-1	縦型試験装置寸法測定概略図	6
図 2-2	全長測定原理図	7
図 2-3	「常陽」測定ヘッド概略図	8
図 2-4	対面間寸法・頂角間寸法測定原理	9
図 2-5	曲がり測定原理図	10
図 2-6	L 曲がり、B 曲がりの定義	11
図 2-7	断面測定治具概略図	12
図 3-1	「常陽」Mk-II 炉心燃料集合体 寸法測定結果	16
図 3-2	SVIR 対面間寸法 寸法測定結果(AD 間)	17
図 3-3	SMIR 寸法測定結果	18
図 3-4	C 型特殊燃料集合体 寸法測定結果	19
図 3-5	C 型特殊燃料集合体内側ラッパ管 曲がり測定結果	20
図 3-6	「常陽」Mk-II 炉心燃料集合体 断面形状測定結果	21
図 3-7	C 型特殊燃料集合体内側ラッパ管 断面形状測定結果	22
図 4-1	ラッパ管変形機構について	26
図 4-2(A)	ラッパ管断面の模式図	27
図 4-2(B)	ラッパ管平面部と R 部の関係	27
図 4-2(C)	断面形状データとスエリングおよびクリープの関係	27
図 4-3	対面間寸法と各面の膨れ量	28
図 4-4	膨れ量とワイヤ向き	29

1. はじめに

照射燃料集合体試験施設（以下 FMF と称す）の既設施設に隣接して、大型照射後試験施設（以下増設施設と称す）が建設された¹⁾。同施設は平成 11 年 6 月、高速実験炉「常陽」で照射された Mk-II 炉心燃料集合体を受け入れて操業を開始した。

増設施設は、FMF 既設施設（以下既設施設と称す）と比較して、以下の利点がある。

- ①「常陽」集合体のみならず、高速増殖炉「もんじゅ」燃料集合体等の大型集合体を受け入れることが可能である。
- ②主に非破壊試験を行うことから、汚染管理を β 管理とすることができる（既設施設に受け入れた試料は汚染管理を α 管理としなければならない）。

集合体縦型試験装置（以下縦型試験装置と称す）は、新たに開発して増設施設に設置されたもので、集合体の外観検査、寸法測定、照射後試験および集合体解体等の作業を遠隔操作で行うことができる。寸法測定機能は、集合体の全長、対面間寸法、頂角間寸法、まがり、ねじれの測定が含まれる。これらの測定項目は既設施設の集合体寸法測定装置（以下既設寸法測定装置と称す）と同じであるが、縦型試験装置の場合は各項目を同時に自動測定することができる。さらに専用治具を使用することにより、集合体の断面形状の詳細な測定も可能である。

縦型試験装置は、セル外性能試験²⁾を実施した後、増設施設に設置された。その後、高速実験炉「常陽」で照射された 6 体の集合体の寸法測定試験を実施した。本報告書は縦型寸法装置の集合体寸法測定結果をまとめ、その測定精度などを考察したものである。

2. 集合体縦型試験装置の寸法測定部と断面形状測定治具

縦型試験装置は、集合体の寸法測定試験を行う寸法測定部、集合体の解体を行う解体部、ITV カメラが設置されている外観検査部、集合体を冷却する集合体冷却部から構成されている。図 2-1 に縦型試験装置寸法測定部の概略図を示す。

寸法測定部は、集合体を固定する上部・中間・下部サポート、集合体の寸法を測定する測定ヘッドおよびコラムから構成される。縦型試験装置は「もんじゅ」に加え、「常陽」の集合体にも対応できるように、上部と中間のサポートは上下に移動できる。また、中間サポートと下部サポートは、各種集合体に対応したアタッチメントに遠隔で交換できるようになっている。測定ヘッドも同様に遠隔で交換することが可能になっており、現在測定ヘッドは「もんじゅ」燃料集合体用と「常陽」集合体（Mk-II 炉心燃料集合体、A～C 型特殊燃料集合体、各種材料照射用リグ等）用が各々製作されている。また、解体部に断面形状専用の治具を設置することで、「常陽」および「もんじゅ」集合体についてその測定が可能となる。現在までに照射後試験に用いたのは、「常陽」燃料集合体用測定ヘッドおよび断面形状測定治具である。

縦型試験装置は、取り扱う集合体の放射線を遮蔽するため、セル内に設置されている。そのため、試験および装置のメンテナンスは、全て遠隔操作により行うことができるようになっている。また、集合体を設置した後、コンピュータによる自動測定ができる機能を有しており、省力化が図られている。以下に各測定項目について詳しく述べる。

2.1 全長寸法について

図 2-2 に集合体の全長寸法測定の原理を示す。図 2-2 の右図に示すように、測定ヘッドには当金と呼ばれる全長測定の基準ポイントがある。測定に当たってはまず、ITV カメラと当金が水平になるよう調整する。次に当金をエントランスノズル最下端からハンドリングヘッド最上部まで移動させ、その間の距離を全長寸法とする。なお、縦型試験装置を用いた全長測定の測定誤差は±1mm である。

2.2 対面間寸法および頂角間寸法について

図 2-3 に、縦型試験装置で用いている「常陽」集合体用測定ヘッドの概略図を示す。測定ヘッドは、頂角部分を固定するガイドローラー、対面間寸法を測定する対面センサー(マグネスケール、ローラー接触式)を 10mm 間隔で 3 対 6 本(「もんじゅ」集合体用測定ヘッドでは 5 対 10 本)、頂角間寸法を測定する頂角センサーを 1 対 2 本有しており、集合体を挟むように配置されている。図 2-4 に対面間寸法測定および頂角間寸法の測定原理を示す。

寸法測定試験では、まずマスターゲージでセンサー調整を行う。次に、集合体を設置して頂角部分をガイドローラーで固定し、対面および頂角センサーを集合体に接触させる。さらに測定ヘッドを上昇させながら、指定した軸位置での各センサーの変位を測定する。

縦型試験装置を用いた対面間寸法および頂角間寸法の測定誤差は $\pm 0.1\text{mm}$ である。なお、「常陽」C 型特殊燃料集合体の内側ラッパ管は外径寸法が小さいため、「常陽」集合体用測定ヘッドの頂角間センサーと対面間センサーが干渉する。そのため、C 型特殊燃料集合体内側ラッパ管の頂角間寸法は、測定対象外となっている。

2.3 曲がり、ねじれについて

図 2-5 に曲がり測定の原理を示す。測定ヘッドはガイドローラーで集合体に密着しており、集合体の曲がりやねじれがある場合にもそれに追従して移動する。このときの曲がり量を曲がりセンサーによって、ねじれをエンコーダ(図 2-3 参照)によって測定する。

縦型試験装置では、図 2-6 に示す集合体下端の軸心からの振れ幅(L 曲がり)と定義する)だけではなく、集合体の上下端部を結ぶ弦からの振れ幅(これを B 曲がり)と定義する)について自動的に求めることができる。縦型試験装置を用いた曲がり測定の誤差は、L 曲がり、B 曲がりとも $\pm 0.5\text{mm}$ 、ねじれ測定の場合、誤差は $\pm 0.25^\circ$ である。

2.4 断面形状測定治具の仕様

従来行われてきた「常陽」集合体の対面間寸法測定は、集合体の面中央部分

および面中央部分から両側 15mm 分離れた 3ヶ所について軸方向に測定してきた。このため、集合体の軸方向の寸法変化については多くの測定データが得られるものの、集合体の面に沿った方向の寸法変化については、十分なデータを得ることができなかった。また、集合体の各面は、照射量や照射温度の相違からそれぞれの変化量に違いが生じると予想される。しかし、相対する面の変形は分離して測定することができなかった。

縦型試験装置は、図 2-7 に示すような専用の治具を利用することにより、集合体断面の形状を詳細に測定することができる。断面形状測定試験を行う際は、まず治具を配置し、集合体を外径用マグネスケールで挟む。その上で観察する面の水平方向に移動させることで面の凹凸を、また面に対して 30° 回転させた状態で測定することにより頂角間寸法を、それぞれ測定できる。

このように、本測定装置を用いることで、今まで不可能であった断面形状を測定し、非対称な集合体の変形についてデータとして提供することができるようになった。本治具による断面形状の測定誤差は±0.01mm である。

2.5 既設寸法測定装置との相違

縦型試験装置は、既設寸法測定装置と測定方法に関して以下の点で異なっている。

(1) 全長測定に関して

全長測定において、縦型試験装置では、測定値がそのまま全長となる。それに対し、既設寸法測定装置では、まず基準溝から上部リミットスイッチが作動するまでの距離を測定する。それに、エントランスノズル下端から基準溝および上部リミットスイッチから集合体上端までの距離として装置の設計値を足して、全長としている。

(2) 曲がりに関して

縦型試験装置では、ガイドローラーが集合体に密着し、曲がりには追従して測定部が移動する。この前後左右の移動量を直接曲がり量として測定している。それに対し、既設寸法測定装置では、まず各面に対し、集合体の変位量を求める。すなわち、接触子の左右の変位差が 0.05mm 以上になったときに、それが設置されている測定部を左右に移動させていく(前後方向の変位は測定されない)。

この測定部の移動量を全6面測定し、ベクトル合成することで曲がりを算出する。

(3)頂角間寸法に関して

縦型試験装置では、頂角間寸法を頂角センサーで測定することができる。既設寸法測定装置では、頂角間寸法の測定は本来対象外であった。しかし、円断面用接触子を用いて、頂角の周囲について一定の角度間隔で寸法測定を行うことで、頂角間の寸法測定を試みている。手順は以下のとおりである。

- ① 接触子を円断面測定用に交換する。
- ② 測定軸位置に測定部を移動させ、集合体を頂角付近である角度範囲回転させて、それぞれの角度での寸法を記録する。(本報告書での試験では頂角近傍の $\pm 5^\circ$ の範囲を 1° 間隔で測定している。)
- ③ ②で測定されたある測定軸位置での最大となる寸法を頂角間寸法とする。

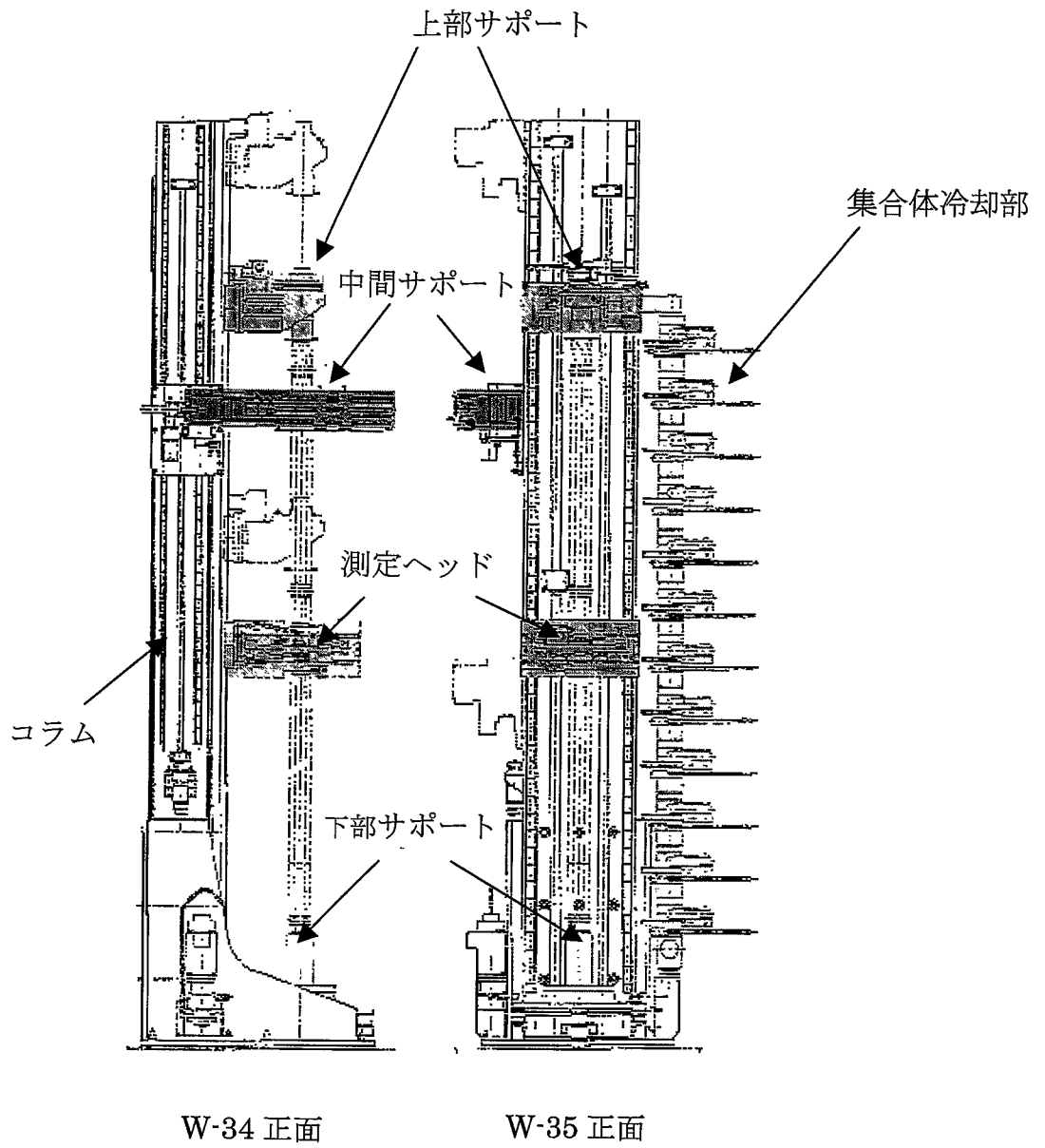
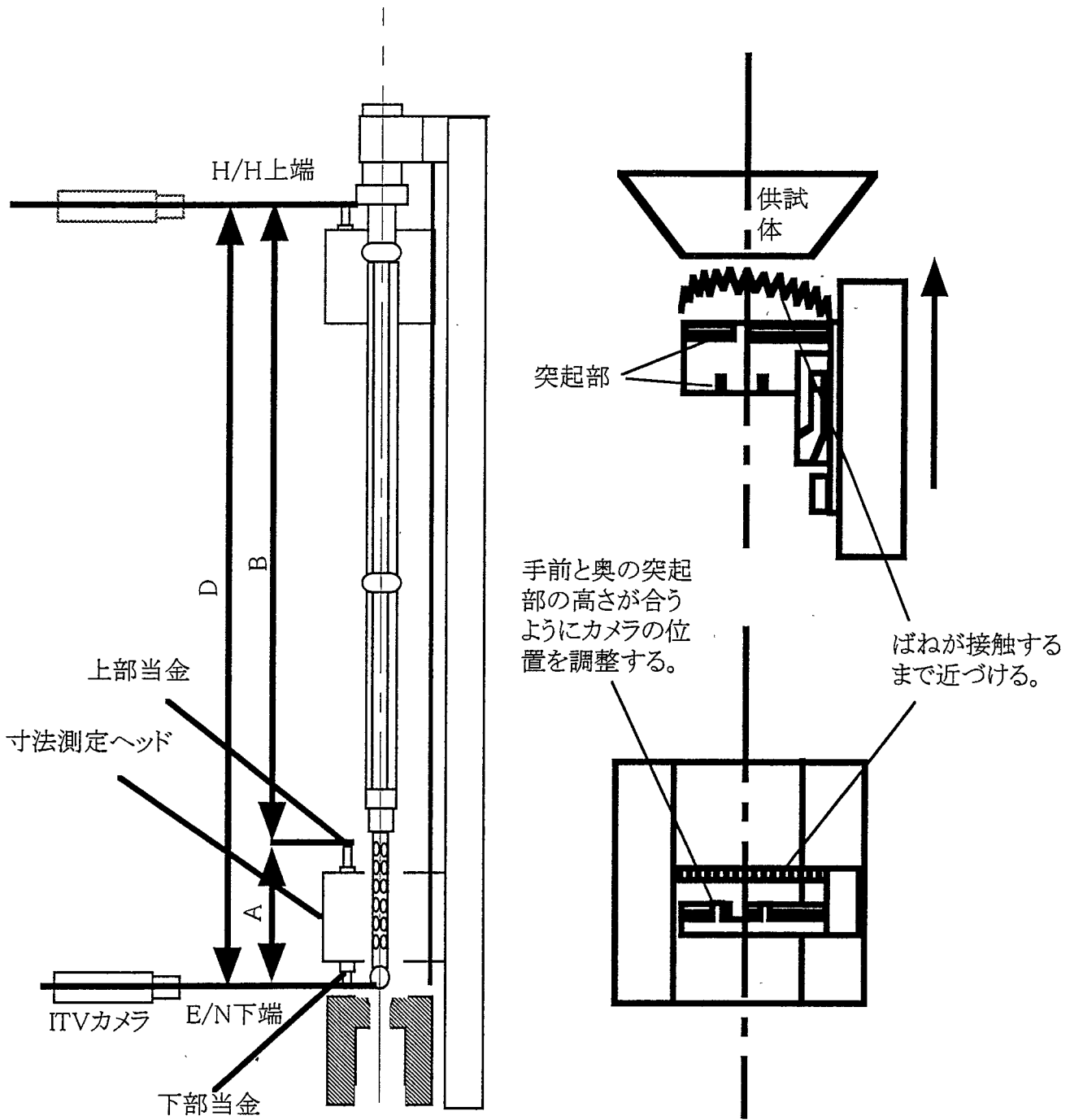


図 2-1 縦型試験装置寸法測定部概略図



D:全長
 A:上下の当金の距離
 B:H/H上端までの上部当金の移動量

当金部分
 上部から見た図(上)
 外観カメラから見た図(下)

図2-2 全長測定原理図

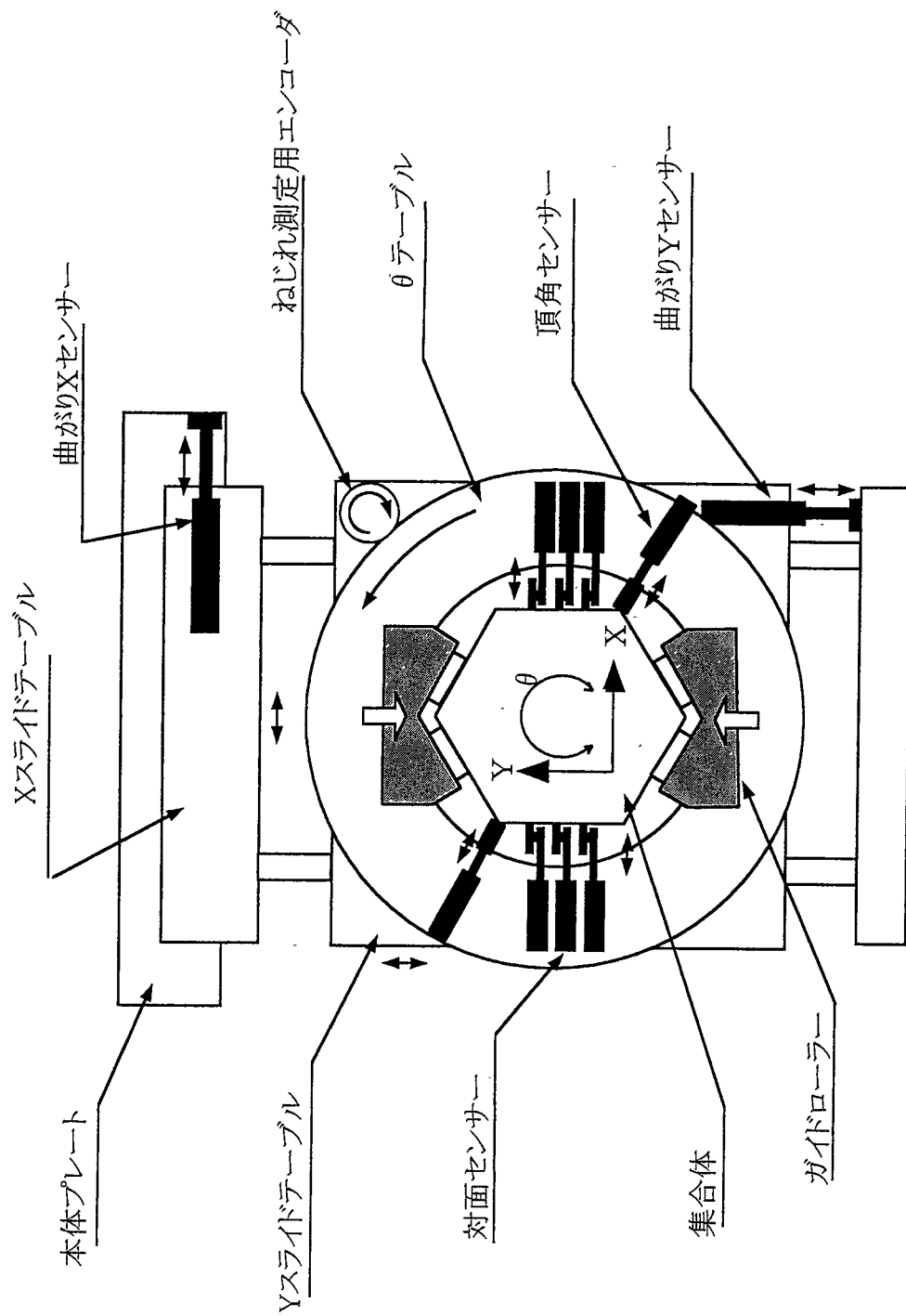
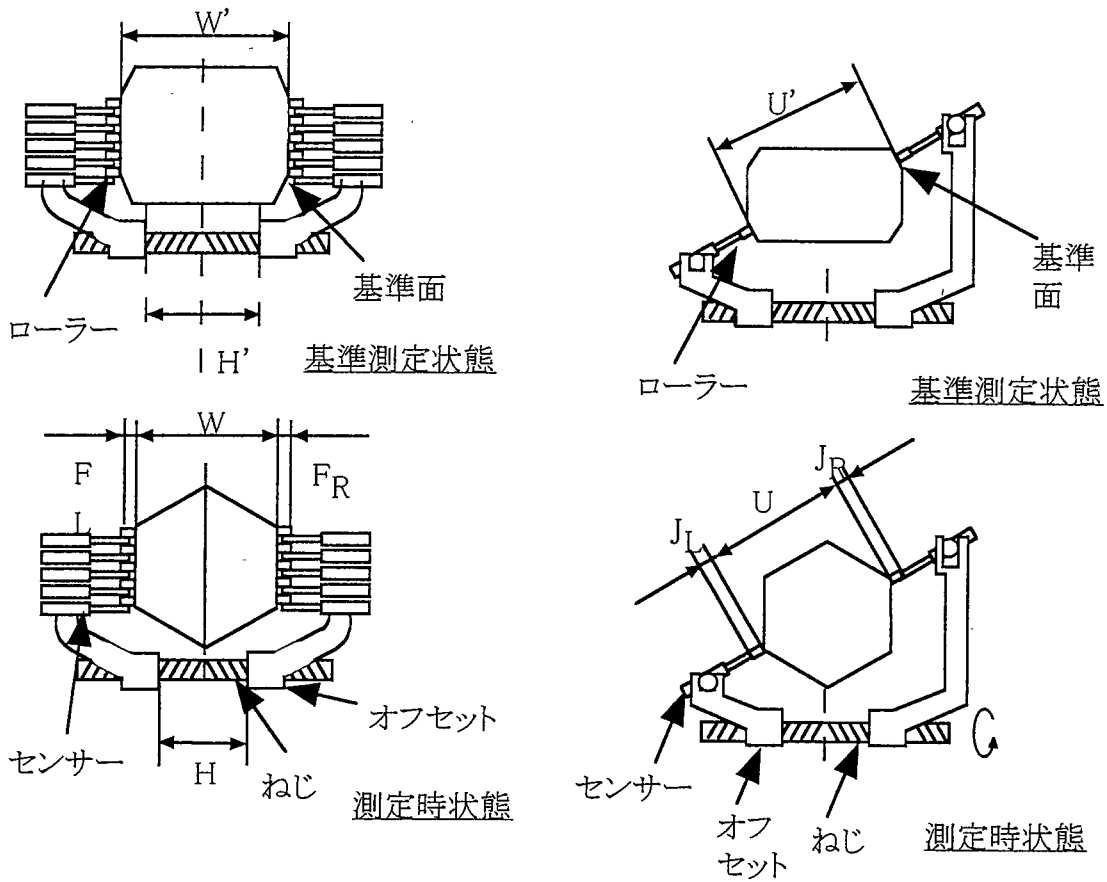


図2-3 寸法測定ヘッド概略図



W' :マスターゲージの寸法
 H' :マスターゲージ測定時のオフセット間隔
 F_L, F_R :マスターゲージ測定時と集合体測定時のセンサーの変位

W :集合体の対面間寸法
 $W = W' - (F_L + F_R) - (H' - H)$

U' :マスターゲージの寸法
 H' :マスターゲージ測定時のオフセット間隔
 J_L, J_R :マスターゲージ測定時を0としたときの集合体測定時のセンサーの変位

U :集合体の頂角間寸法
 $U = U' - (J_L + J_R) - (H' - H) / (\cos 30^\circ)$

図2-4 対面間寸法・頂角間寸法測定原理図

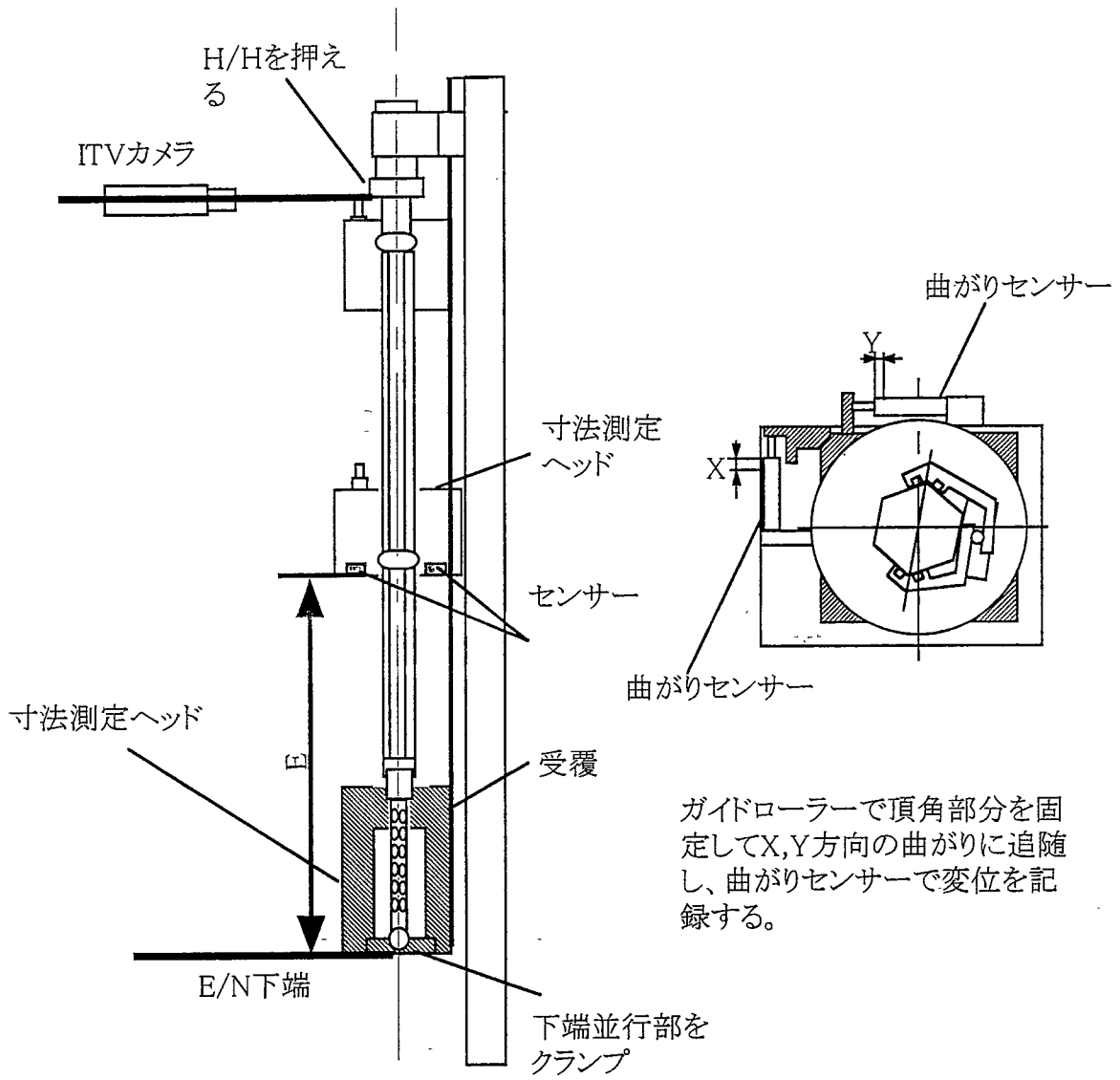


図2-5 - 曲がり測定原理図

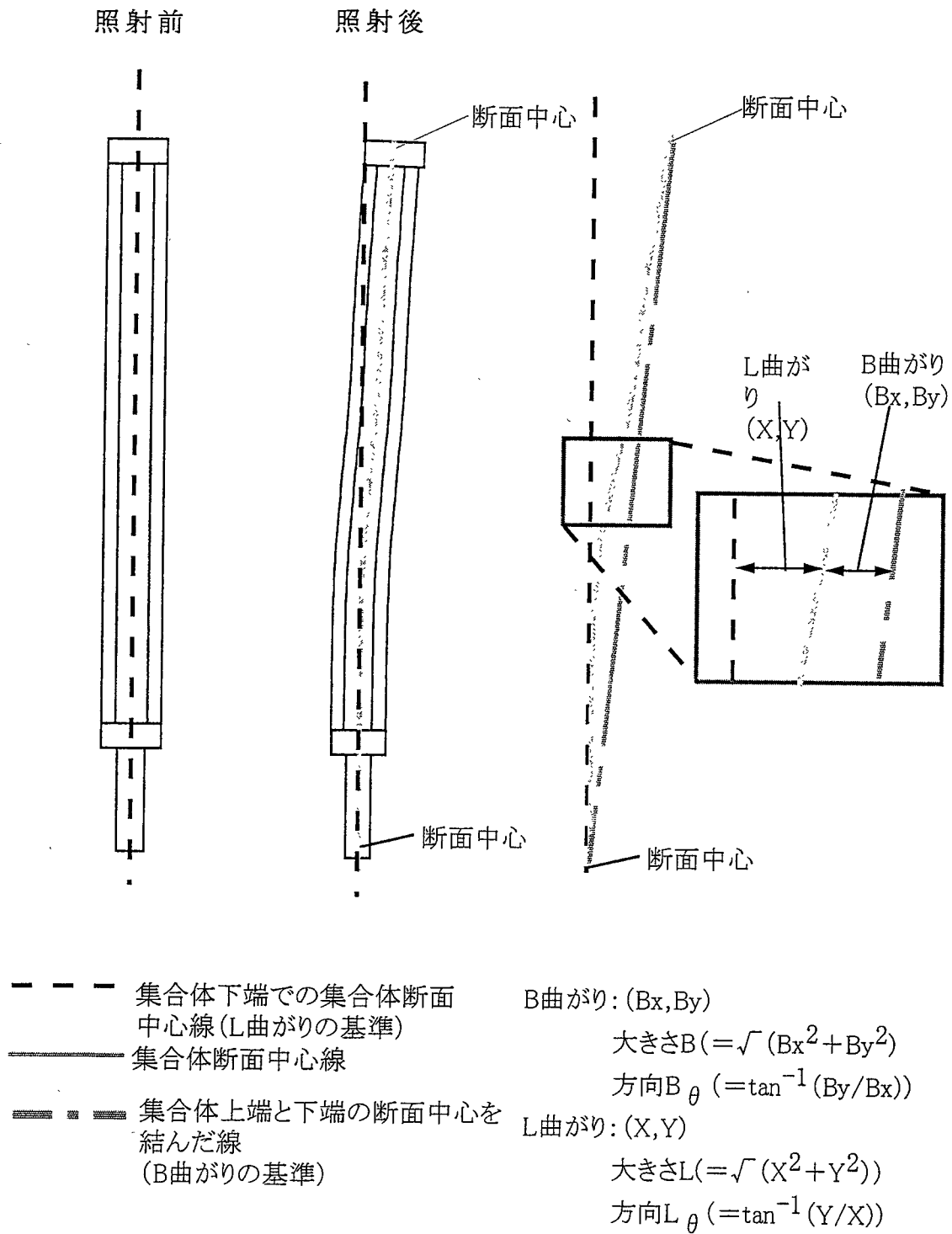


図2-6 L曲がり、B曲がりの定義

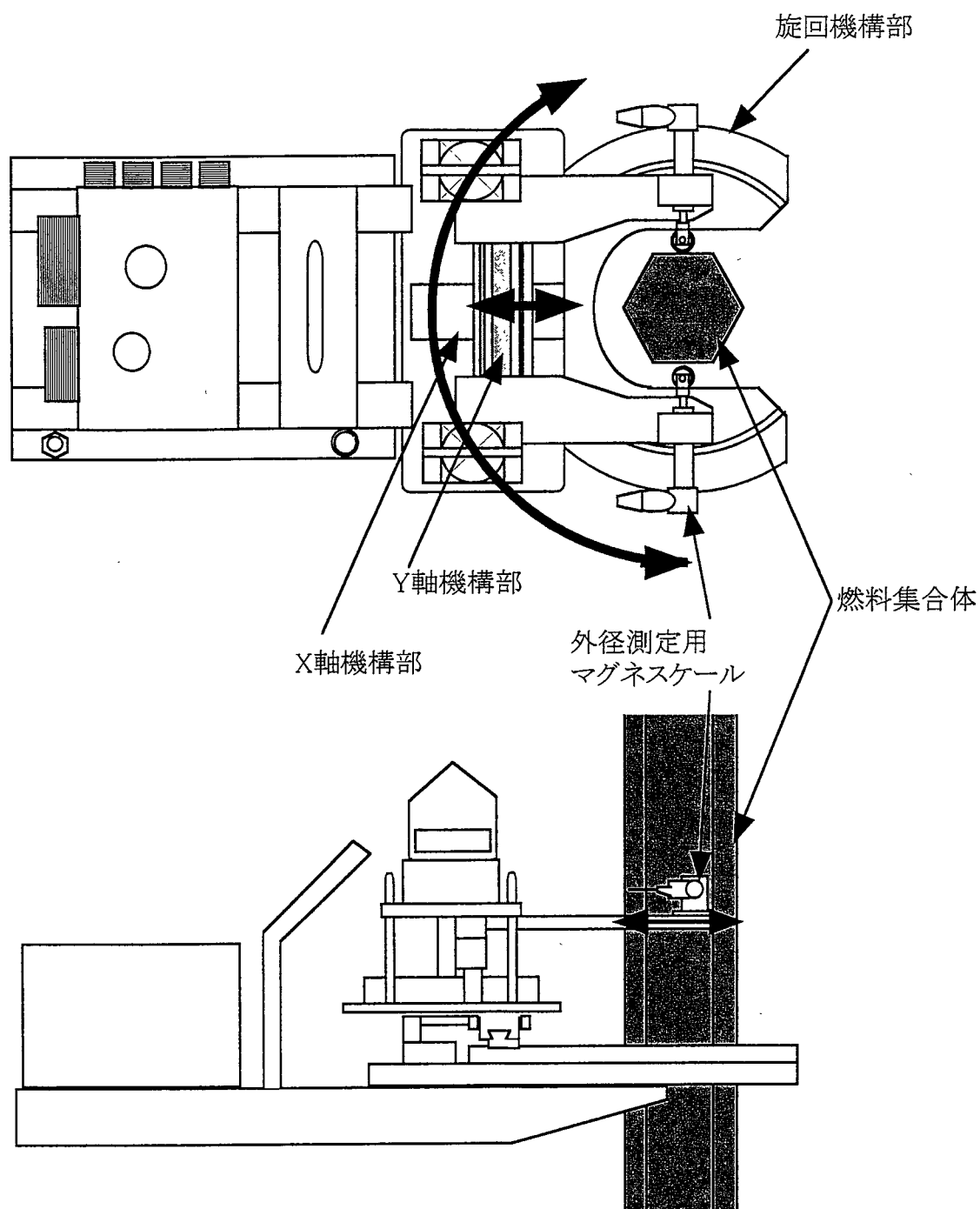


図2-7 断面形状測定治具概略図

3. 集合体寸法測定試験結果

現在までに縦型試験装置で測定を行った集合体は、「常陽」で照射された以下の6体である。

- ① MK-II 炉心燃料集合体(最大フルエンス $8.89 \times 10^{26} \text{n/m}^2$: $E \geq 0.1 \text{MeV}$ 、以下最大フルエンスはすべて $E \geq 0.1 \text{MeV}$ とする)
- ② SMIR (構造材料照射用リグ、最大フルエンス $4.1 \times 10^{26} \text{n/m}^2$)
- ③ SVIR (「常陽」材料照射用反射体、最大フルエンス $5.13 \times 10^{20} \text{n/m}^2$)
- ④ CMIR (炉心材料照射用リグ、最大フルエンス $4.19 \times 10^{26} \text{n/m}^2$)
- ⑤ SVIR (最大フルエンス $1.18 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$)
- ⑥ C型特殊燃料集合体 (最大フルエンス $2.23 \times 10^{27} \text{n/m}^2$)

これらの集合体の測定は、「常陽」集合体測定ヘッドおよび断面形状測定治具を利用して実施した。また、集合体を縦型試験装置に設置した後は、すべて自動運転で行った。測定に要した時間は、寸法測定試験では1対面あたり約40分(「常陽」集合体を10mmピッチ、パッド部5mmピッチで測定した場合)であった。また、断面形状測定治具を用いた測定では、ひとつの個所(一断面)について約40分を要した。以下に測定結果について示す。

3.1 全長測定

全長測定の代表例として、表3-1に「常陽」Mk-II炉心燃料集合体およびC型特殊燃料集合体内側ラッパ管の結果を示す。全長の測定誤差は既設寸法測定装置、縦型試験装置ともに $\pm 1.0 \text{mm}$ であり、両者の測定結果は測定誤差範囲内で一致している。

表3-1 全長測定結果

	「常陽」Mk-II 燃料集合体	C型特殊燃料集合体内側ラッパ管
(A) 増設縦型試験装置	2969.1mm	2801.9mm
(B) 既設寸法測定装置	2970.1mm	2801.9mm
(A) -(B)	-1.0mm	$\pm 0 \text{mm}$

3.2 対面間寸法、頂角間寸法および曲がり

図 3-1 に、「常陽」Mk-II 炉心燃料集合体の対面間寸法および頂角間寸法の測定結果を示す。図には、既設寸法測定装置および断面形状測定での測定結果も併せて示した。その結果判明した 2 つの問題点について、以下に示す対策を施した。

(1)測定値の周期的な増減

測定の対面間および頂角間寸法に関して、一定間隔で測定結果が増減し波状になる結果となった(増減幅は測定誤差範囲内)。既設寸法測定装置で対面間測定を行ったが、このように増減する結果にはならなかった。

測定結果の周期的な増減は軸方向に約 60mm 間隔で発生しており、集合体と接触するセンサーのローラー部の外周距離と一致する。このことから、ローラーの偏心が原因であると推定された。このため、SVIR (最大フルエンス $5.13 \times 10^{20} \text{n/m}^2$) を測定する際に、センサーのローラー部を交換した。その結果、対面間および頂角間寸法の増減幅が小さくなったことを確認した(図 3-2)。

(2)対面間・頂角間寸法と曲がりの特異な傾向

対面間・頂角間寸法と曲がりについて、縦型試験装置で測定した結果を、断面形状測定により求まる値および既設寸法測定装置の結果と比較した。その結果、対面間寸法に関しては、縦型試験装置の結果が断面形状の値や既設寸法測定装置の結果と比べて約 $200 \mu\text{m}$ 大きく測定されていた(図 3-1 上図参照)。また、頂角間寸法については、縦型試験装置の結果が断面形状の値と比べて約 $100 \mu\text{m}$ 小さく測定されていた(図 3-1 下図参照)。その後、SMIR (最大フルエンス $4.1 \times 10^{26} \text{n/m}^2$) の寸法測定でも同様の傾向が見られ、また曲がり測定に関して中間パッド部で特異な傾向が見られた(図 3-3、 0° の値)。

このため、面と接触子が接触する角度を変化させてこの集合体の寸法測定を行った。その結果、基準から $+4.2^\circ$ 回転させた場合では寸法測定の結果が断面形状と測定誤差範囲内で一致し、曲がりの測定に特異な傾向が現れないことを確認した(図 3-3、 4.2° の値)。

このことから、この問題の原因は、寸法測定時の基準の角度がずれており、ガイドローラーに頂角がセットされなかったために、接触子が面に垂直にあたっていなかったことであると推測された。この対策として、寸法測定試験の際には、接触子が面に垂直に当たっていることをその変位および目視で確認し、

角度調整を行うこととした。対策を行った後、C型特殊燃料集合体の外側ラッパ管および内側ラッパ管を測定した。その結果、対面間、頂角間ともに、断面形状測定および既設寸法測定装置の寸法測定の結果と、測定誤差範囲内で一致することを確認した(図3-4)。

曲がりに関しては、C型特殊燃料集合体の内側ラッパ管の測定を縦型試験装置と既設寸法測定装置で行ったところ、プロファイルの傾向は一致した。しかし、両者の測定値には1.15mmの違いが見られた(図3-5)。この違いの原因については、考察で述べる。

3.3 断面形状測定

得られた断面形状の例として、図3-6に「常陽」Mk-II燃料集合体の測定結果を、図3-7にC型特殊燃料集合体内側ラッパ管の測定結果を示す。図に示した断面データは、測定データとして頂角の位置を○、面の形状を実線で示している。また、六角の基準線はラッパ管の製造仕様値に基づいて描いたものである。

図3-6に示した燃料集合体においては、集合体下端から1850mmの位置で、頂角部分から面の中心に向けてわずかに内側に湾曲している。また、1350mmおよび1600mm(炉心中心付近)の位置では、面の中央付近に膨れが見られる。一方、図3-7に示したC型特殊燃料集合体の内側ラッパ管では、集合体下端から1300mmおよび1900mmの位置でほとんど変形が見られなかった。しかし、炉心中心付近の1600mm、1700mmの位置では、大きな膨れが見られた。なお、本測定は、各面毎の寸法変化をとらえているが、測定原理上六角断面の中心位置は正確には求められない。そのため、以下の手順にて仮想中心線を求め、データをプロットしている。例として、AD面におけるデータ整理手順を以下に示す。

- ① A、D面の測定データを各面毎に最小自乗法で整理して直線を求める。
- ② 2つの直線の間、中心線を描く。(仮想中心線)
- ③ 仮想中心線と測定データとの最短距離を求める。
- ④ 基準距離/2と③の値との差を求め、図上に基準線からの差としてプロットする。

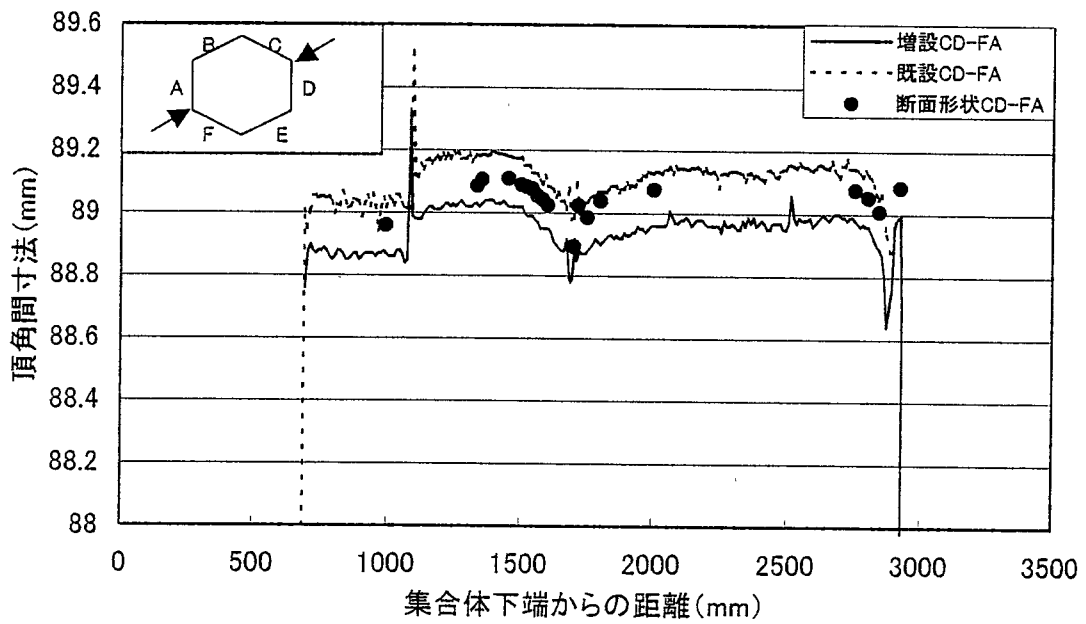
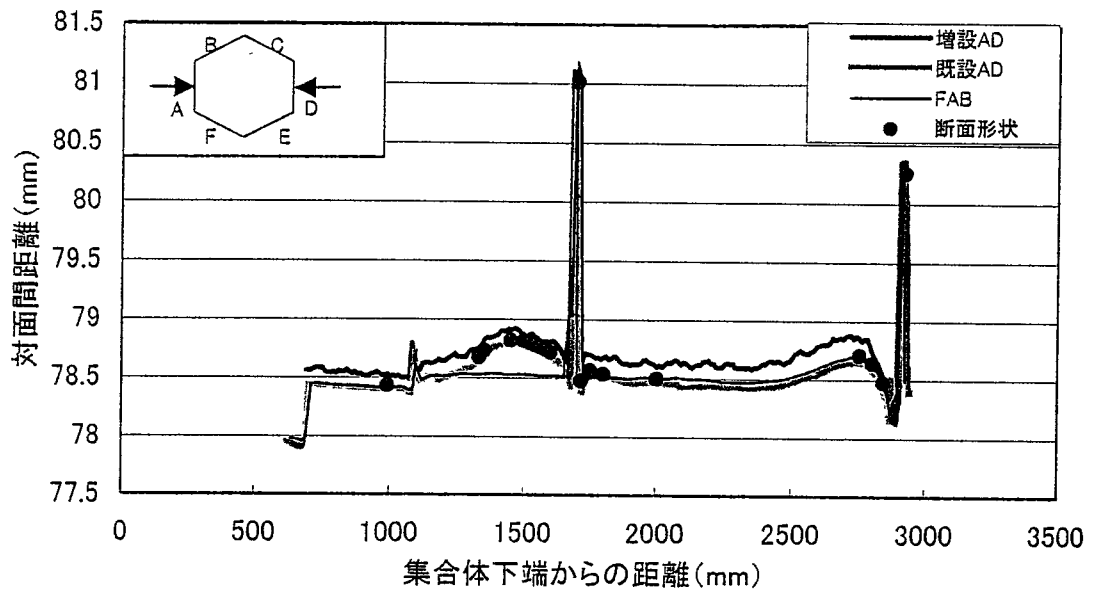


図3-1 「常陽」Mk-II炉心燃料集合体 寸法測定結果
上：対面間寸法 下：頂角間寸法

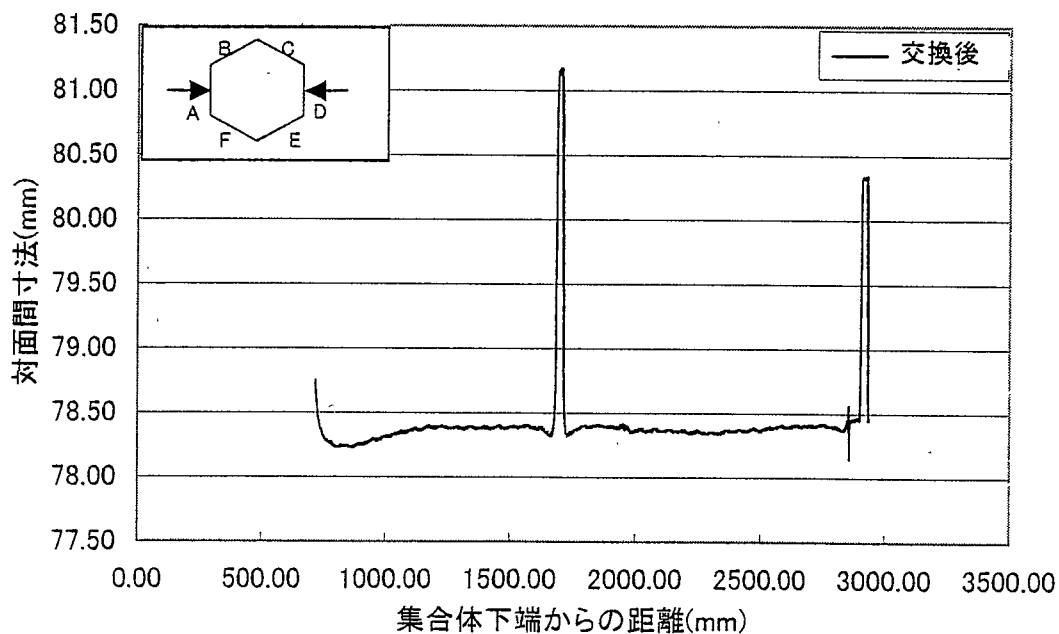
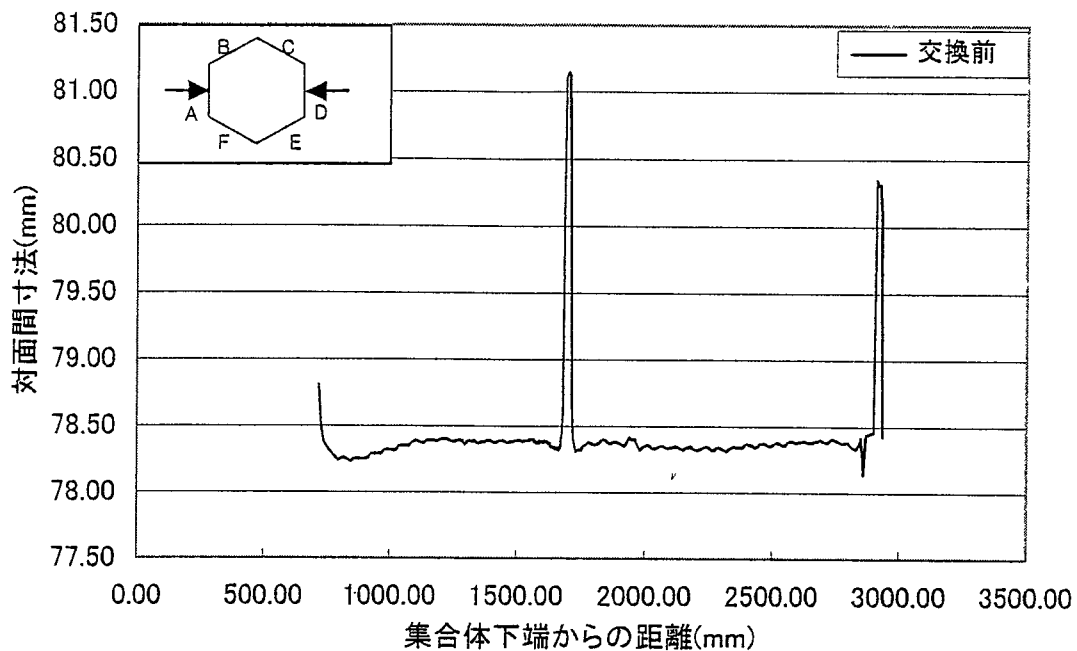


図3-2 SVIR 対面間寸法 寸法測定結果 (AD間)
 上：ローター交換前、下：交換後

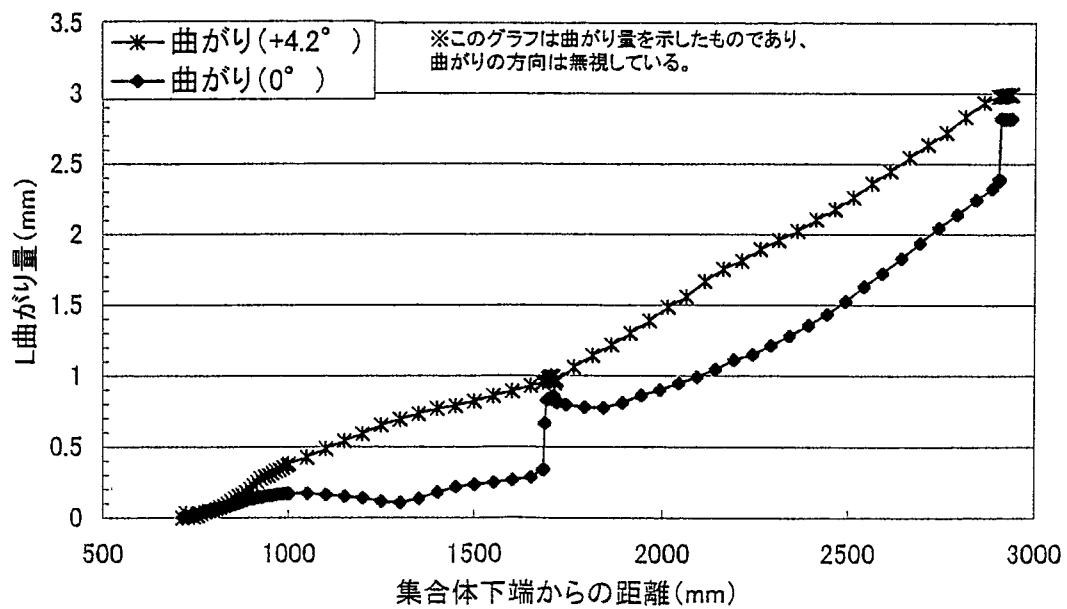
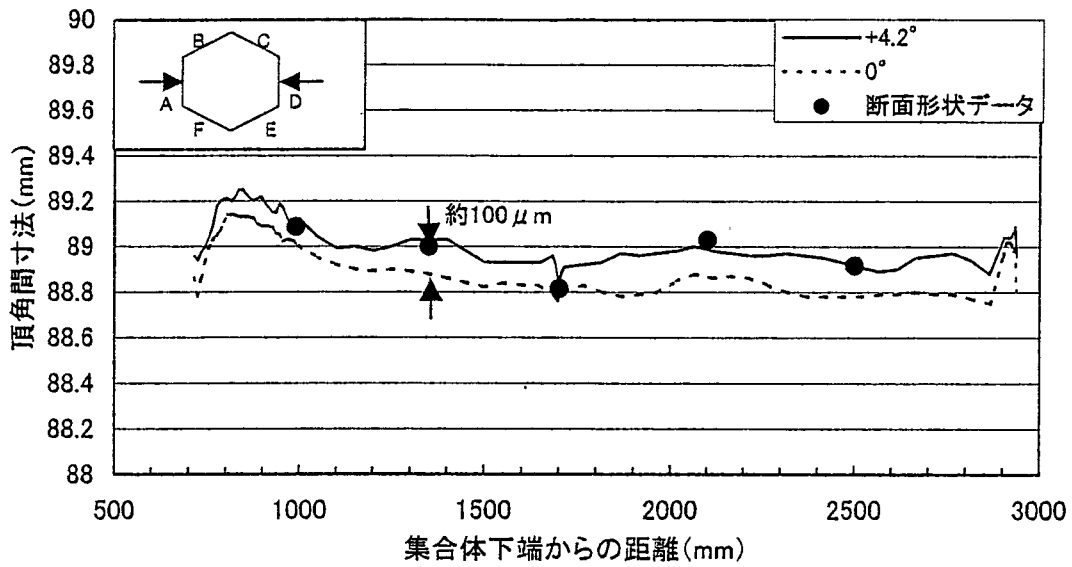
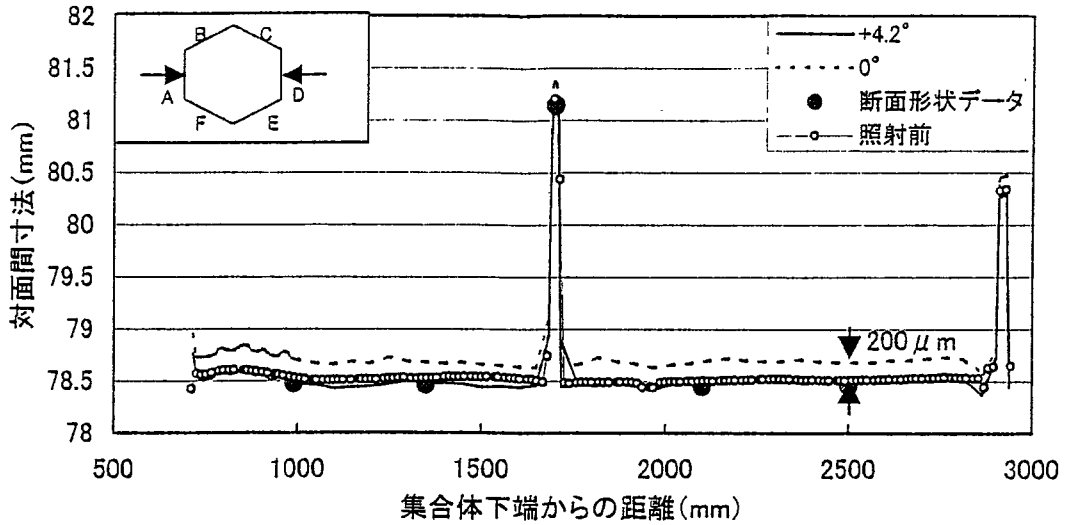


図3-3 SMIR 寸法測定結果
上：対面間寸法、中：頂角間寸法、下：L曲がり量

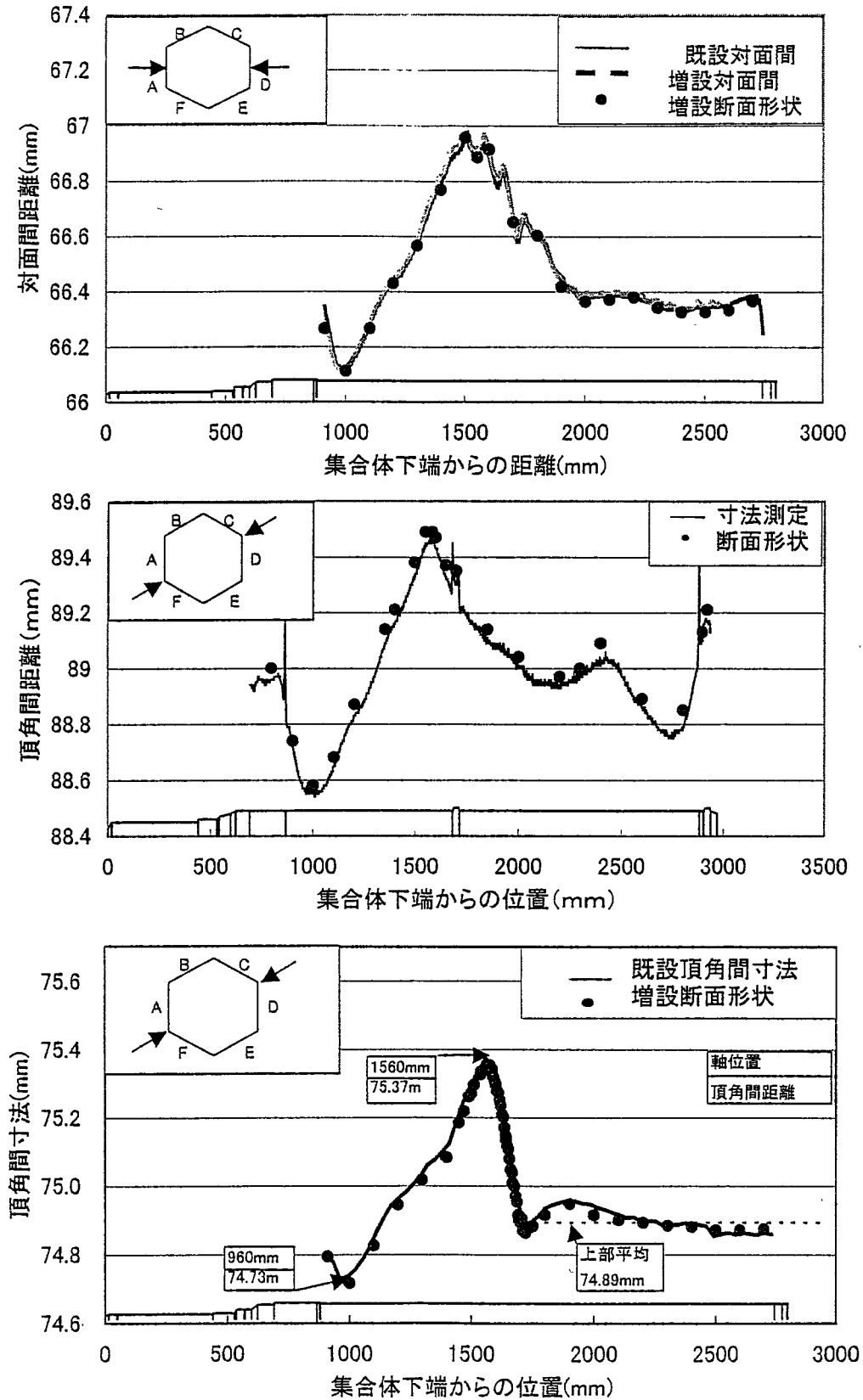


図3-4 C型特殊燃料集合体 寸法測定結果
 上：対面間寸法（内側ラップ管） 中：頂角間寸法（外側ラップ管）
 下：頂角間寸法（内側ラップ管）

※このグラフは曲がり量を示したものであり、
曲がりの方向は無視している。

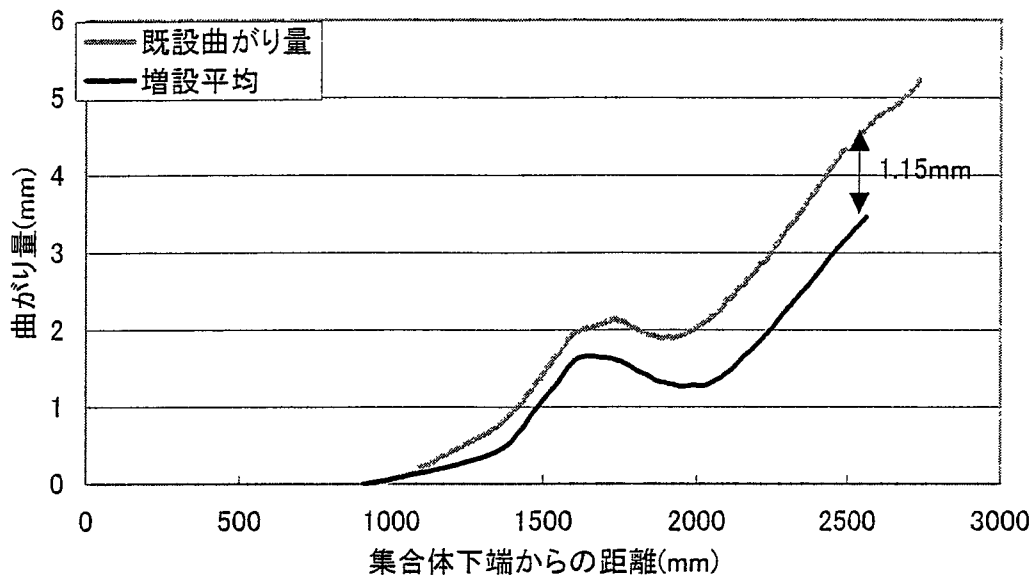
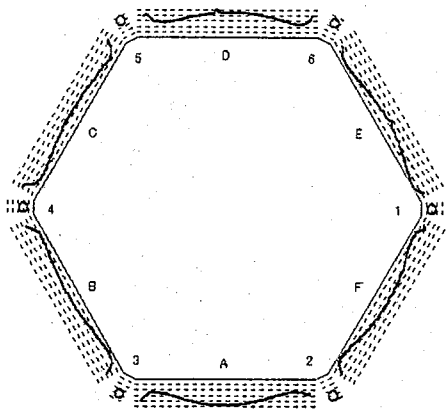
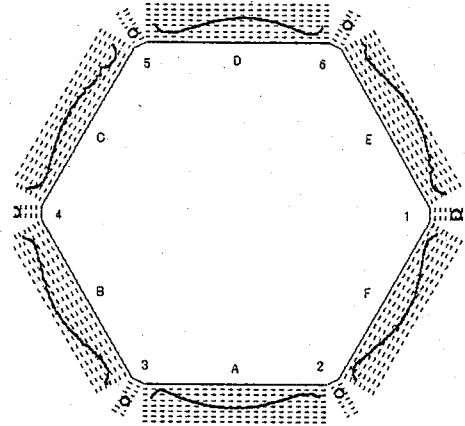


図3-5 C型特殊燃料集合体内側ラッパ管 曲がり測定結果

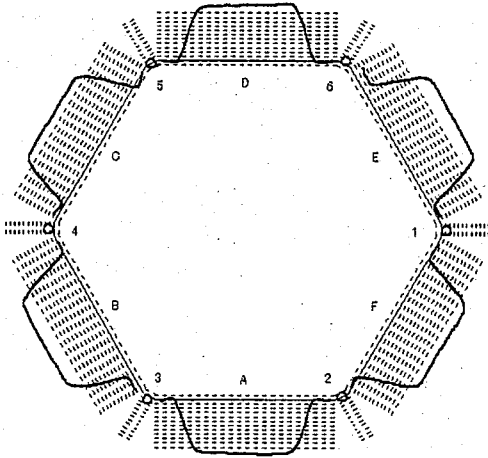
1350mm



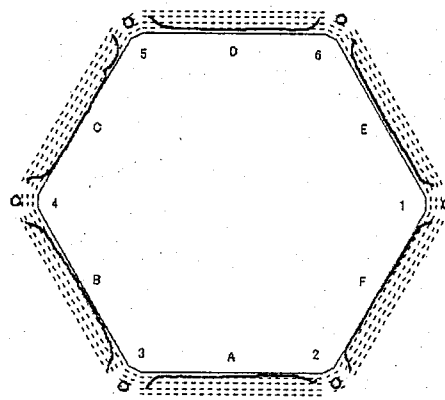
1600mm



1700mm(中間パッド部)



1850mm



スケール倍率 × 50倍
 (中間パッド部のみ×10倍)
 対面間基準距離78.5mm
 頂角間基準距離88.9mm
 スケール間隔 0.025mm
 (中間パッド部のみ0.1mm)

注) 1700mmのみ、スケール倍率が異なっている。

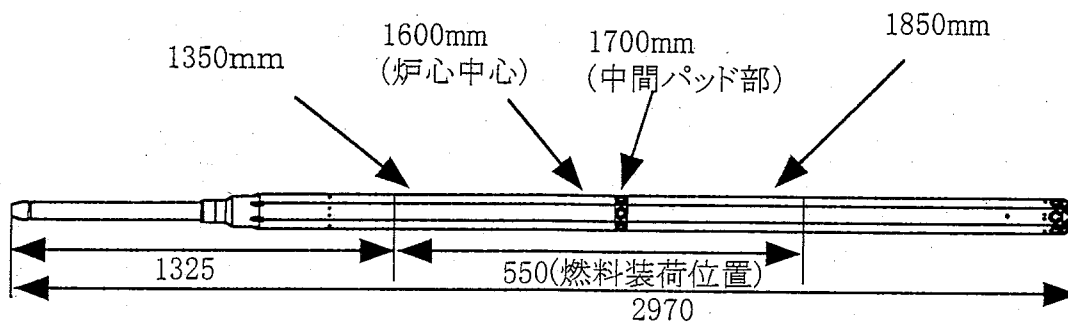
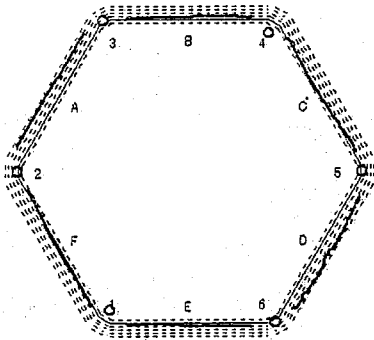
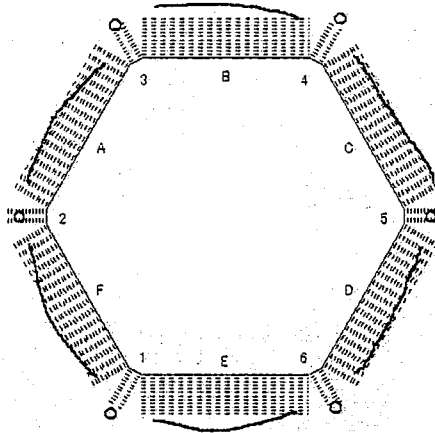


図3-6 「常陽」 Mk-II 燃料集合体 断面形状測定結果

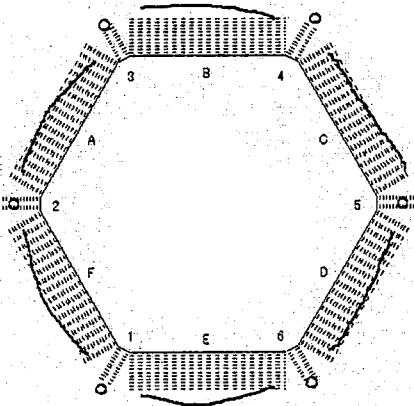
1300mm



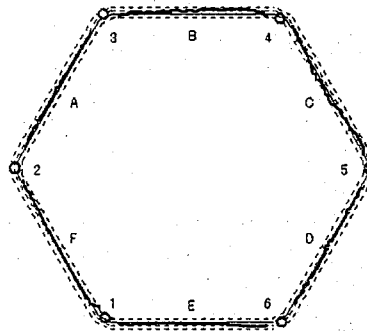
1600mm



1700mm



1900mm



スケール倍率 × 30倍
 対面間基準距離 66.4mm
 頂角間基準距離 74.9mm
 スケール間隔 0.025mm

注) 内側ラップ管には中間パッド部はない。

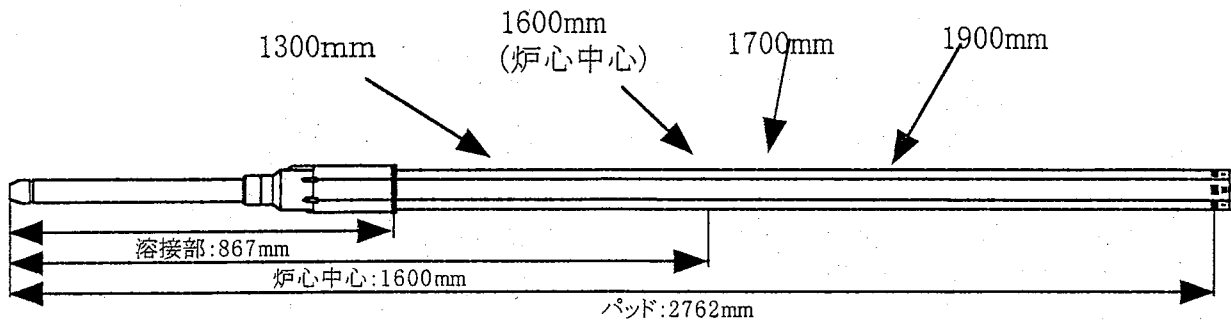


図3-7 C型特殊燃料集合体 内側ラップ管
 断面形状測定結果

4. 考察

縦型試験装置の測定性能の評価と集合体の断面形状について、以下のように考察した。

4.1 縦型試験装置の測定性能の評価

全長、対面間寸法、頂角間寸法および断面形状測定については、現在までに多くの測定実績⁽³⁾⁽⁴⁾がある既設寸法測定装置の結果と測定誤差範囲内で一致した。これらの測定項目に関して、縦型試験装置は十分な測定精度を有しているものと考えられる。

一方、曲がり測定に関しては、既設寸法測定装置と増設縦型試験装置で1mmを越える相違が見られた。既設寸法測定装置と増設縦型試験装置で比較できる測定データは、現在のところC型特殊燃料集合体内側ラッパ管のものしかないため、原因を特定することは難しい。

この原因の一つとしては、既設寸法測定装置と増設縦型試験装置の測定の違いが考えられる。既設寸法測定装置では、曲がりの測定誤差はひとつの面の測定に対して $\pm 0.5\text{mm}$ である。しかし、測定面に対して垂直方向の曲がりしか測定できないために、全6面の測定値を合成して方向と曲がり量を算出している。この場合、誤差伝播を計算すると6面を合成したときの曲がりの誤差は $\pm 0.67\text{mm}$ となる。縦型試験装置の測定誤差 $\pm 0.5\text{mm}$ を考慮すると、両者の曲がりの測定値は最大で 1.17mm 相違する可能性がある。この誤差伝播の影響を考慮すると、今回の 1.15mm の相違は必ずしも有意な差とはいえない。なお、縦型試験装置に関しては、セル外試験⁽²⁾において曲がりの測定誤差は $\pm 0.5\text{mm}$ 以下であることが報告されている。

本比較検討により、既設寸法測定装置と増設縦型試験装置の測定結果が装置の精度の範囲で測定結果が一致することが確認された。しかし、曲がりについては、装置の測定誤差範囲内とはいえ、ほかの項目と比べると両者の結果に差が見られた。

この問題については、比較データが少ないこともあり、原因を究明するには至っていない。今後、「常陽」Mk-IIIの集合体については既設寸法測定試験と縦

型試験装置の両者で測定が行なわれると想定される。その中で、さらに検討を進め、問題の解決を図っていく予定である。

4.2 集合体の断面形状変化について

図 3-6 に示した「常陽」Mk-II 燃料集合体の断面形状に関しては、集合体下端から 1850mm の位置では、面の部分が僅かに内側に湾曲する形状が見られた。この位置では、ラッパ管が変形するほどの照射量では無い。また、今回測定された湾曲の凹凸は最大で 0.1mm 程度であり製造時のラッパ管の公差内（ラッパ管の製造寸法は $78.5^{+0.1}$ mm）である。これらを考慮すると、この「常陽」Mk-II 燃料集合体は製造時からわずかに内側に湾曲している断面形状を有していた可能性が高い。

また、図 3-6 に示した「常陽」Mk-II 燃料集合体や図 3-7 に示した C 型特殊燃料集合体内側ラッパ管などに見られた炉心燃料部のラッパ管の膨れは、照射による変形の結果であると推測される。このような集合体の照射による形状変化は、スエリングと照射クリープにより生じる。これらの影響は図 4-1 に示すように頂角部分の変形は主にスエリングによるものであり、面中央付近における変形は照射クリープとスエリングの両方の影響を受けていると考えられる。

この C 型特殊燃料集合体内側ラッパ管の対面間寸法プロファイルには、図 3-4 に示したように、炉心燃料部（集合体下端から 1350～1900mm の位置）に特異なピークが発生している。これは、ラッパ管内面とラッピングワイヤとの接触による変形の可能性が指摘されている。しかし、対面間の寸法からは、対峙する各々の面の膨れ量の違いはわからない。

そこで、断面形状測定データより、各面の膨れ量について検討を行った。図 4-2(A)に変形したラッパ管断面の模式図を示す。断面形状測定データによる各面の変形プロファイルは、仮想中心線からの距離として求められる。図 4-2(B)にラッパ管の平面部と R 部の関係を示す。ラッパ管の頂角付近は丸みがついており（丸みがついている部分を R 部と呼ぶ）、ひとつの面の R 部と平面との境界の距離は、この C 型特殊燃料集合体では設計図面から約 32mm となる。

ここで、頂角部における変形は主にスエリングで生じることを考えると、R 部と平面部との境界の変形はスエリングによる変形が、平面部の中央ではスエ

リングとクリープによる変形が生じる。そのため、平面部を挟む2つのR部と平面部との境界での寸法を基準にして、平面部におけるデータとの差を求めることにより、クリープのみで生じた変形量を推定できる（図4-2(C)参照）。そこで、断面形状測定データにおいて面中心位置から±16mmのポイントをR部と平面部の境界と見なし、面中心部の最大変形量を求めて対面間寸法プロファイルと比較した。

対面間寸法と各面の膨れ量を図4-3に示す。図より、対面間寸法にて確認された特異なピーク位置において、対峙する2つの面の膨れ量は同じではなくどちらか一面の膨れが大きくなっている。それが対面間寸法変化として捉えられていたとわかる。また、図4-4にラッピングワイヤの向きと各面の膨れ量について比較した結果を示す。面が膨れている位置は、ワイヤがその面に向いている位置にほぼ等しい。このことから、ラップ管内面とワイヤの接触により特異な変形が生じた可能性が考えられる。

このように、縦型試験装置では今までの寸法測定試験では測定できなかった有用なデータを取得でき、今後さまざまな集合体で試験を行い、データを蓄積することが期待される。

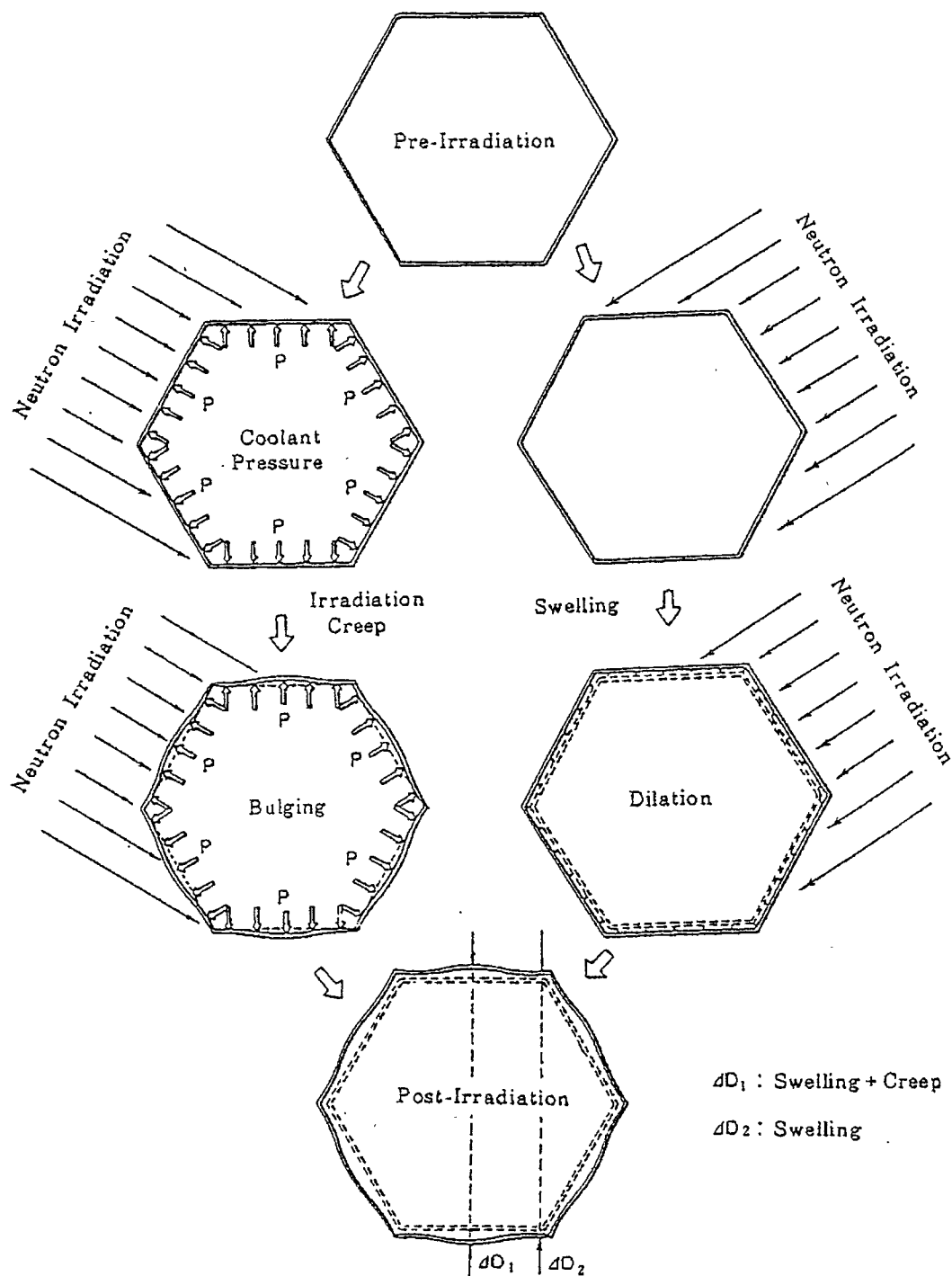


図4-1 ラップ管変形機構について

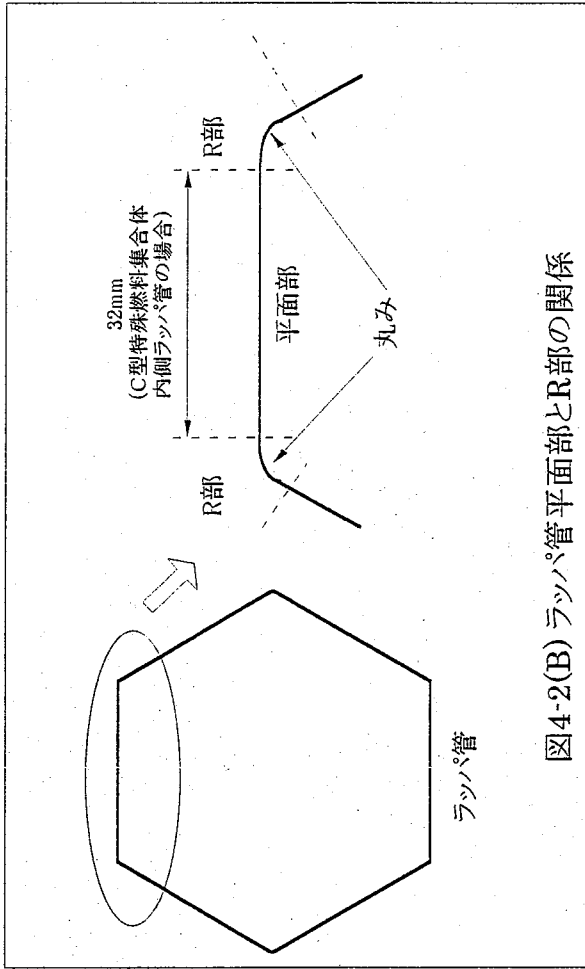


図4-2(B) ラップ管平面部とR部の関係

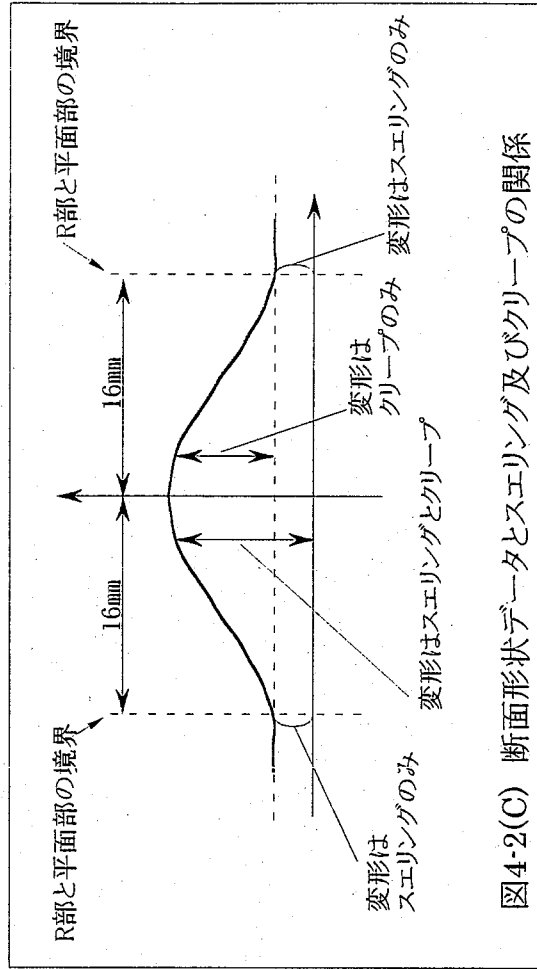


図4-2(C) 断面形状データとスエリング及びクリープの関係

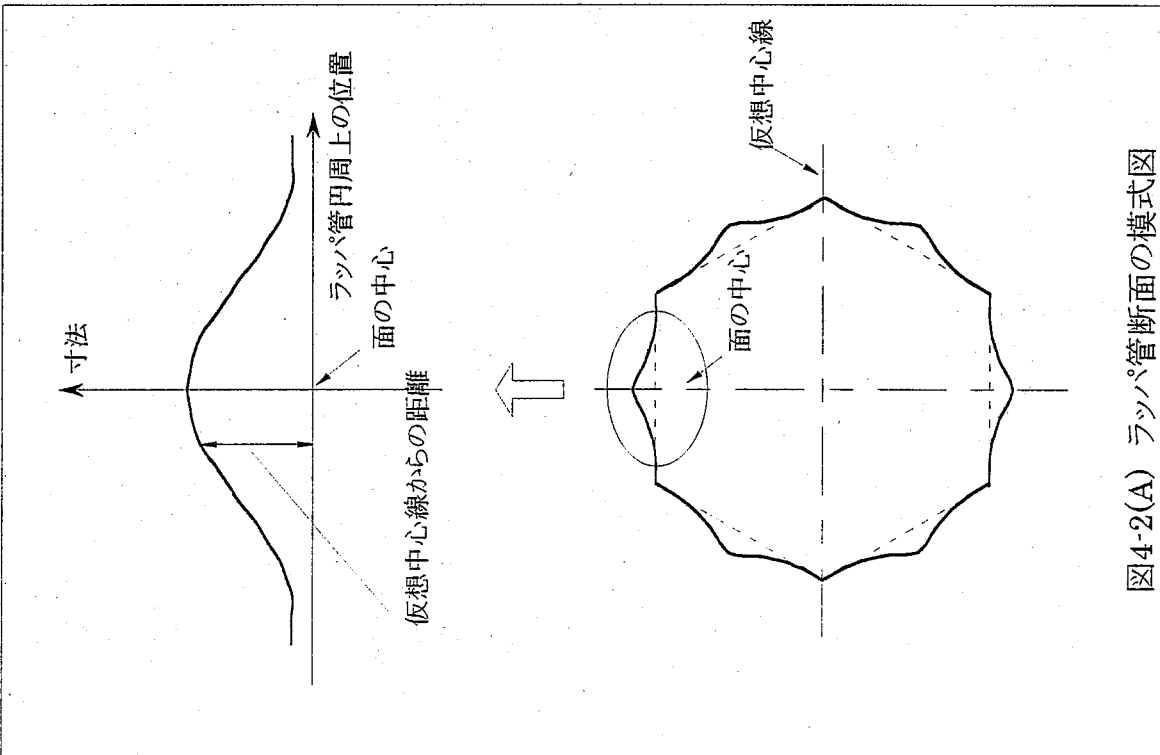


図4-2(A) ラップ管断面の模式図

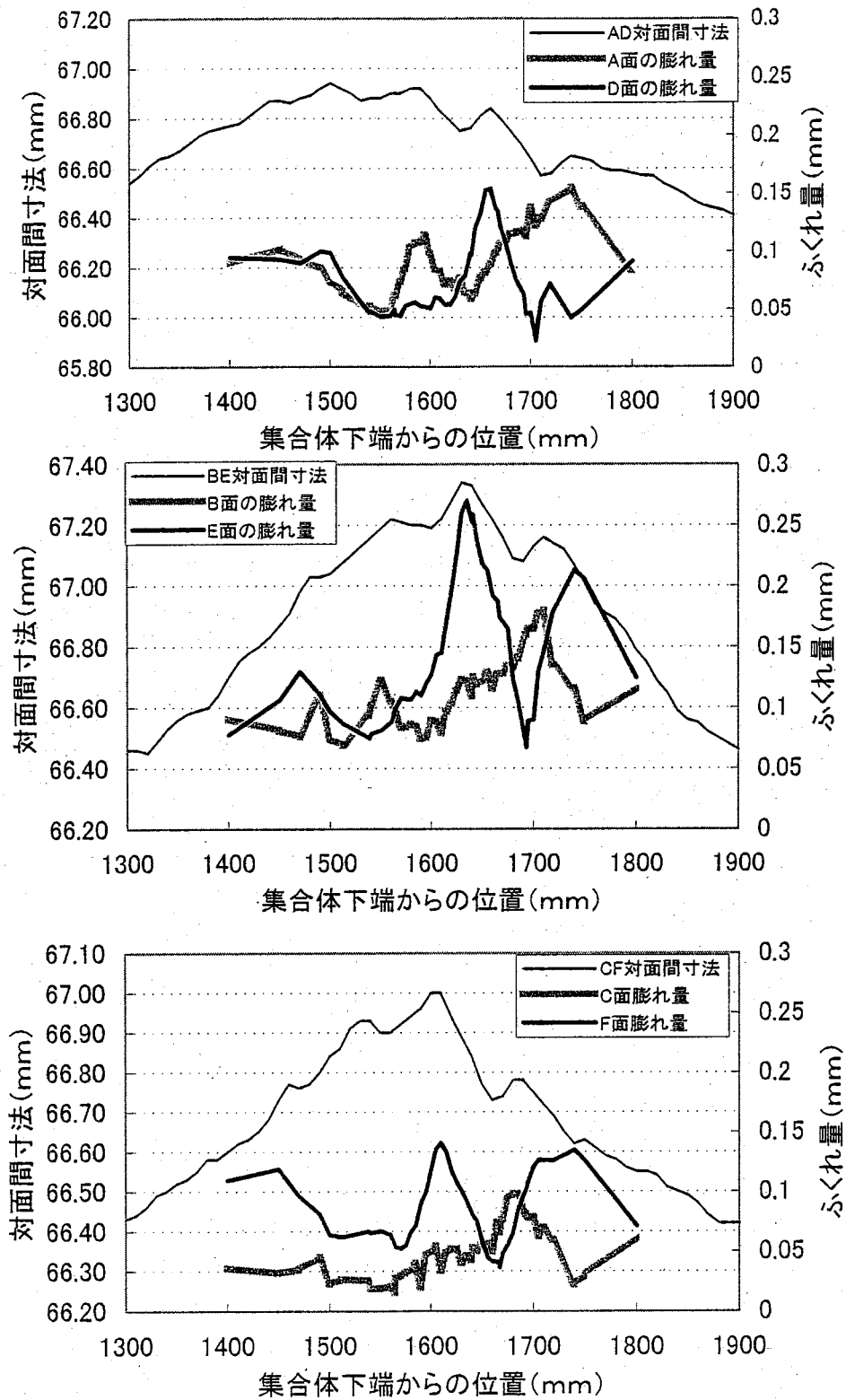


図4-3 対面間寸法と各面の膨れ量
(上：AD面、中：BE面、下CF面)

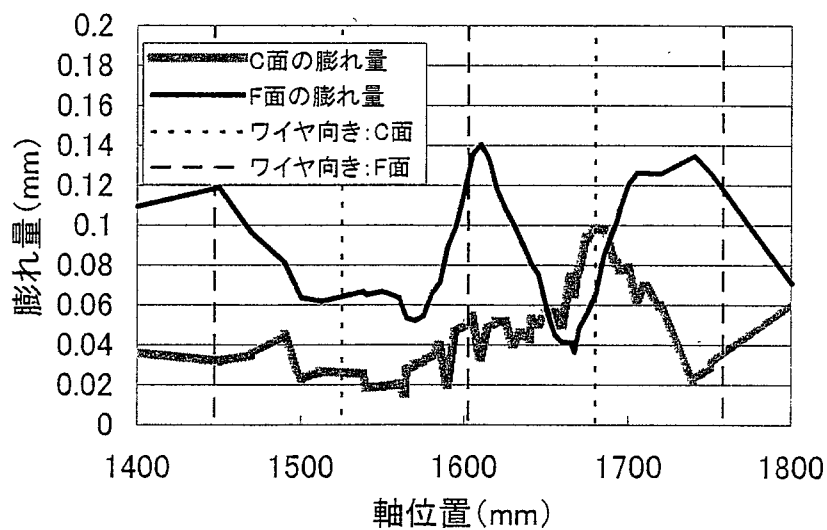
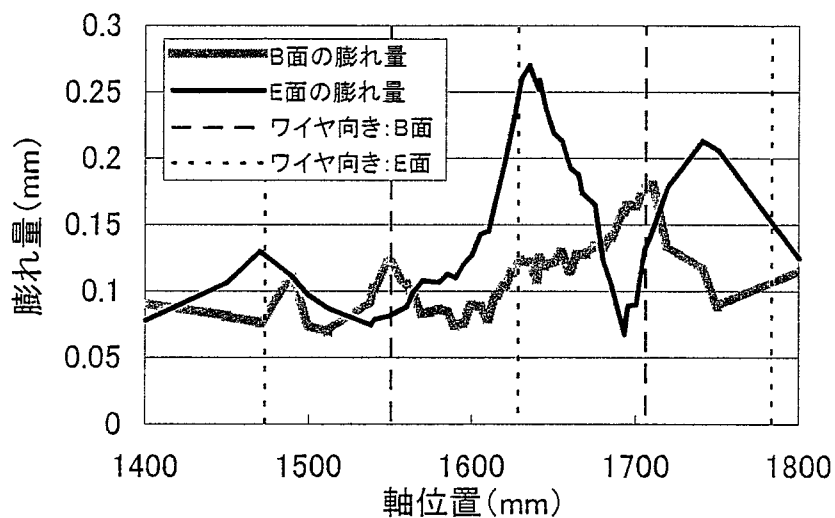
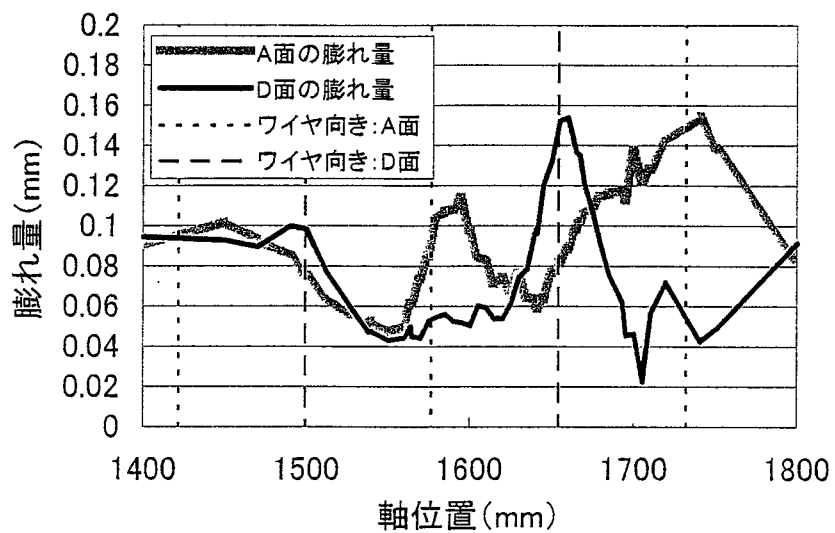


図4-4 膨れ量とワイヤ向き
(上：A,D面、中：B,E面、下：C,F面)

5. おわりに

増設施設に設置された縦型試験装置を用いて集合体の寸法測定試験および断面形状測定試験を行い、以下のことがわかった。

- ① セル内で実際の集合体を用い、自動測定にて寸法測定試験を行うことができた。
- ② 対面間および頂角間寸法測定試験に関しては、既設施設の寸法測定試験と結果を比較したところ測定誤差範囲内で一致した。曲がりに関しては1mmを越える機差が見られた。
- ③ 断面形状測定試験では、現在まで測定データが得られていなかった集合体の断面形状を測定することができた。また、断面形状測定の結果は集合体縦型試験装置の寸法測定試験の結果と測定誤差範囲内で一致した。

6. 謝辞

本報告書の作成にあたり、システム部燃料 Gr の上羽氏には変形の評価等で助言をいただきました。また、関連部署の方々においてご協力、ご指導いただいた方々に厚く感謝いたします。

7. 参考文献

- 1) 岡崎 哲治他：“「もんじゅ」燃料等の照射後計画と FMF 増設施設の建設”
日本原子力学会誌、Vol.36,No.9,PP.822～828(1994)
- 2) 永峯 剛 他：“FMF 増設施設試験装置の開発－セル外性能試験－”
JNC ZN9410 96-089
- 3) 井滝 俊幸他：“高速実験炉「常陽」MK - I 炉心燃料集合体の照射挙動”
日本原子力学会誌、Vol.27,No.5,PP.435～449 (1985)
- 4) 鹿倉 栄 他：“「常陽」MK - II 炉心燃料の照射挙動”
動燃技報、No.86,PP.20～33 (1993)
- 5) 堂野前貴子他：“「もんじゅ」型燃料集合体(MFA-1)の照射挙動評価”
JNC TN9400 2000-075