

**LVDT에 의한 사용후 핵연료봉 제원측정**  
**Dimensional Measurement of Spent Fuel Rods using LVDT**

구대서, 박광준, 구정희, 김종훈, 박성원, 김은가, 엄성호

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150  
박윤규  
원자력환경기술원

**요약**

LVDT에 의하여 사용후 핵연료봉의 직경을 측정하기 위하여 표준계이저를 제작하고 개인용 컴퓨터를 통하여 자료를 획득하고 분석할 수 있는 핵연료봉 직경측정시험기술을 개발하였다. 핵연료봉의 직경 및 난형도를 측정하고 분석하였다. 핵연료봉의 하단부영역과 3,000mm 이상 영역의 핵연료봉 직경의 감소는 이 영역을 제외한 핵연료봉 직경감소보다 적었다. 4주기 동안 연소한 핵연료봉의 직경감소가 2주기 동안 연소한 핵연료봉의 직경감소보다 0.3% 정도 더 크게 나타났다.

**Abstract**

The standard gauge was fabricated and the technology of dimensional measurement examination was developed to measure the dimension of spent fuel rods using LVDT. The diameter and ovality of spent fuel rods were measured and analyzed. The decrease of diameter in lower region near bottom of fuel rods and upper region beyond 3,000mm from the bottom of fuel rods was smaller than that in middle region of fuel rods. The decrease of diameter in 4 cycle-irradiated-fuel rod was smaller by 0.3% than that in 2 cycle-irradiated-fuel rod.

**1. 서론**

핵연료봉은 원자로내에서 연소됨에 따라 증성자조사, 원자로의 온도 및 압력등 원자로 운전조건에 따라서 핵연료 제원변화가 수반 되는데 첫째 속 증성자에 의한 핵연료 크립(creep) 및 핵연료 성장에 의한 것과 둘째 연료소자와 피복관의 상호작용에 의한 것이 있다[1-5]. 사용후 핵연료봉의 제원을 측정하면 원자로에서 핵연료의 성능 및 특성을 분석할 수 있

다.

본 실험은 사용후 핵연료봉 제원측정시험기술을 개발하기 위하여 핵연료봉 직경 측정용 표준 게이지를 제작하고 선형 차동변압기 센서를 사용하여 사용후 핵연료봉 직경 및 난형도를 개인용 컴퓨터 제어에 의하여 측정하고 그 결과를 저장하고 분석할 수 있는 사용후 핵연료봉의 제원측정시험기술을 개발하였다. 개발한 직경측정시험기술에 의하여 2주기, 3주기 및 4주기 연소한 핵연료봉 직경 및 난형도(ovality)를 각각 측정하고 비교분석하였다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

Fig. 1은 핵연료봉 제원측정장치를 나타낸 것이다. 이 제원측정장치는 핵연료봉의 직경과 휨을 측정하는 장치로써 1개의 선형차동변압기(LVDT) 센서가 핵연료봉 양쪽에 물리어 연동적으로 움직이는 두 센서간격을 측정하도록 구성되어 있으며 이 센서 개폐는 스텝모터에 의하여 이루어진다. 휨 측정용 선형차동변압기 센서는 직경측정장치의 왼쪽센서와 함께 연결되어 있다. 이 선형차동변압기들은 각각 핫셀외부에 있는 선형차동변압 조절기와 디지털 표시기에 연결되어 있다. LVDT(linear variable differential transformer) conditioner에서 나오는 신호는 digital voltmeter를 통하여 숫자로 나타나며 2채널 레코더를 통하여 기록된다. 아울러 12 비트 A/D변환기와 개인용 컴퓨터를 사용하여 시험과정을 제어하고 데이터를 획득하였다.

사용후 핵연료봉 제원측정장치의 기기교정, 정밀도 측정 및 디지털 지시기의 환산표 작성을 위하여 표준게이지를 2개 제작하여 핫셀 내부 및 외부에 각각 1개씩 설치하였다. 이 표준 게이지의 재질은 게이지용강(SKS-3) 이었으며 정밀도는 외경공차  $\pm 0.002\text{mm}$ , 진원도  $\pm 0.002$ 이었다. 제작한 표준 게이지에 의하여 측정시스템을 교정하고 LVDT 전압과 핵연료봉 직경의 관계식

$$\text{직경(mm)} = 10.700 + (\text{측정전압} - 1.31) \times 0.05 / 0.16 \quad (1)$$

을 사용하여 핵연료봉의 직경을 측정하였다.

제작한 표준봉과 핵연료봉을 어댑터로 직접 연결하여 사용후 핵연료봉 제원측정오차를 줄이고 핵연료봉 직경 및 난형도를  $\pm 15\mu\text{m}$  정밀도로 측정하였다. 핵연료봉에 대한 제원측정은 핵연료봉 하단으로부터 70mm위치에 LVDT 측정센서가 오도록 한 다음 핵연료봉을 등속도로 내리고 약 1 mm 이동마다 직경을 읽었다. 그 후 10mm마다 수집된 직경의 평균값과 그 표준편차를 계산하였다. 핵연료봉 임의의 원주방향을  $0^\circ$  으로 잡아 이 방향에 대한 직경을 D1으로 정하고 핵연료봉을  $90^\circ$  회전시켜 이때의 직경을 D2로 하였다. 이 두 방향에서 얻은 직경으로부터 핵연료봉의 난형도(D1-D2)를 구하였다. 핵연료봉 난형도가 큰 부위에서 핵연료봉을  $360^\circ$  회전시켜  $1^\circ$  마다 핵연료봉 직경을 구하였다.

### 3. 결과 분석 및 논의

Fig. 2는 2주기동안 연소한 핵연료봉의 직경을 나타낸 것이다. 핵연료봉의 하단과 3,000mm 이상 영역은 핵연료봉의 직경감소가 적었으며 핵연료봉의 이 영역을 제외한 핵연료봉의 직경은 핵연료봉의 직경설계치 대비하여 0.4 % 정도 감소하였다. Fig. 3은 3주기동안 연소한 핵연료봉의 직경을 나타낸 것이다. 핵연료봉의 하단과 3,000mm 이상 영역은 핵연료봉의 직경감소가 적었으며 핵연료봉의 이 영역을 제외한 핵연료봉의 직경은 핵연료봉의 직경설계치 대비하여 0.6 % 정도 감소하였다.

Fig. 4는 4주기동안 연소한 핵연료봉의 직경을 나타낸 것이다. 연소전 핵연료봉 직경보다 전 핵연료봉의 70% 정도에 대한 직경이 0.7% 정도 감소하였다. 핵연료봉 직경은 핵연료봉의 하단에서 급격히 감소하여 1000mm까지 진행하고 핵연료봉 하단에서 1500mm 근방에서 최대로 감소하였다. 핵연료봉 하단 2000mm정도에서 핵연료봉의 직경이 감소하여 3000mm근방에서 직경의 감소는 급격히 감소하였으며 핵연료봉 상단의 직경은 조사전 핵연료봉의 직경에 근접함을 알 수 있다. 이는 핵연료가 원자로에서 핵분열 반응을 일으킬 때 핵연료봉의 중간영역이 하단 및 상부영역보다 더 많은 핵분열 에너지에 의하여 핵연료의 swelling 및 densification에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 5는 2주기동안 연소한 핵연료봉의 하단 240mm, 330mm, 2720mm 및 3269mm 에서 난형도를 나타낸 것이다. 실선이 측정한 핵연료봉의 직경 profile을 나타낸다. 연소전 핵연료봉 직경 10.72 mm보다 핵연료봉의 핵연료봉 직경이 감소함을 알 수 있다. Fig. 6은 3주기동안 연소한 핵연료봉의 하단 100mm, 1000mm, 2000mm 및 3000mm 에서 난형도를 나타낸 것이다. 실선이 측정한 핵연료봉의 직경 profile을 나타낸다. 연소후의 핵연료봉 직경이 연소전 핵연료봉 직경 10.72 mm보다 감소함을 알 수 있다. 핵연료봉 하단부 직경의 감소가 이 영역을 제외한 핵연료봉 직경 감소보다 작았다. 3주기 연소한 핵연료봉 직경감소가 2주기 연소한 핵연료봉 직경(Fig. 5)보다 크게 나타났다.

이상에서 살펴본 바와 같이 핵연료를 고연소함에 따라 직경감소가 커지는 경향을 나타내었으며 핵연료봉 하단부 및 상부의 직경감소는 이 영역을 제외한 핵연료봉 직경감소보다 작았다. 이는 핵연료가 원자로에서 핵분열 반응을 일으킬 때 핵연료봉 중앙부 영역이 하단 및 상부영역보다 더 많은 핵분열 에너지에 의하여 핵연료의 swelling 및 densification에 기인한 것으로 생각된다. 핵연료봉 직경 profile으로부터 고연소 핵연료봉 직경감소가 저연소 핵연료봉 직경감소보다 크게 나타남을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

1. 핵연료봉 직경측정용 표준 게이지를 제작하고 개인용 컴퓨터에 의하여 자료를 획득하고 분석할 수 있는 사용후 핵연료봉의 제원측정시험기술을 개발하였다.

2. 개발한 제원측정시험기술에 의하여 사용후 핵연료봉의 직경과 난형도를 측정하고 분석하였고 4주기 연소한 핵연료봉의 직경이 2주기 연소한 핵연료봉의 직경보다 0.3% 정도 더 감소하였다
3. 사용후 핵연료봉 직경측정자료는 핵연료의 안전성 평가 및 노내 핵연료거동연구에 활용될 것이다.

### 감사의 글

본 연구가 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음

### 참고문헌

- [1] R. Manzel, H. Knaab, et al., " The Dimensional Behavior of LWR Fuel," Proc. Special Meet., IWGFPT/22, p. 174(1985).
- [2] V. Pasupathi, J. S. Perrin, " Study of Pellet Clad Interaction Defects in Dresden-3 Fuel Rods," Proc. Inter. Top. Meet., ANS., pp. 141-147(1979).
- [3] R. Manzel, et al., " Fuel Rod Behavior at Extended Burnup," Proc. Inter. Top. Meet., ANS., pp. 335-342(1994).
- [4] E. F. Ibrahim, R. A. Holt, " Anisotropy of Irradiation Creep and Growth of Zirconium Alloy Pressure Tubes," J. Nucl. Mat. V, 19, pp. 311-321(1980).
- [5] E. Kohn, M. G. Wright, "Axial Strains in Fuel Cladding Associated with Creep and fast Neutron Irradiation," J. Nucl. Mat., V. 98, pp. 247-258(1981).

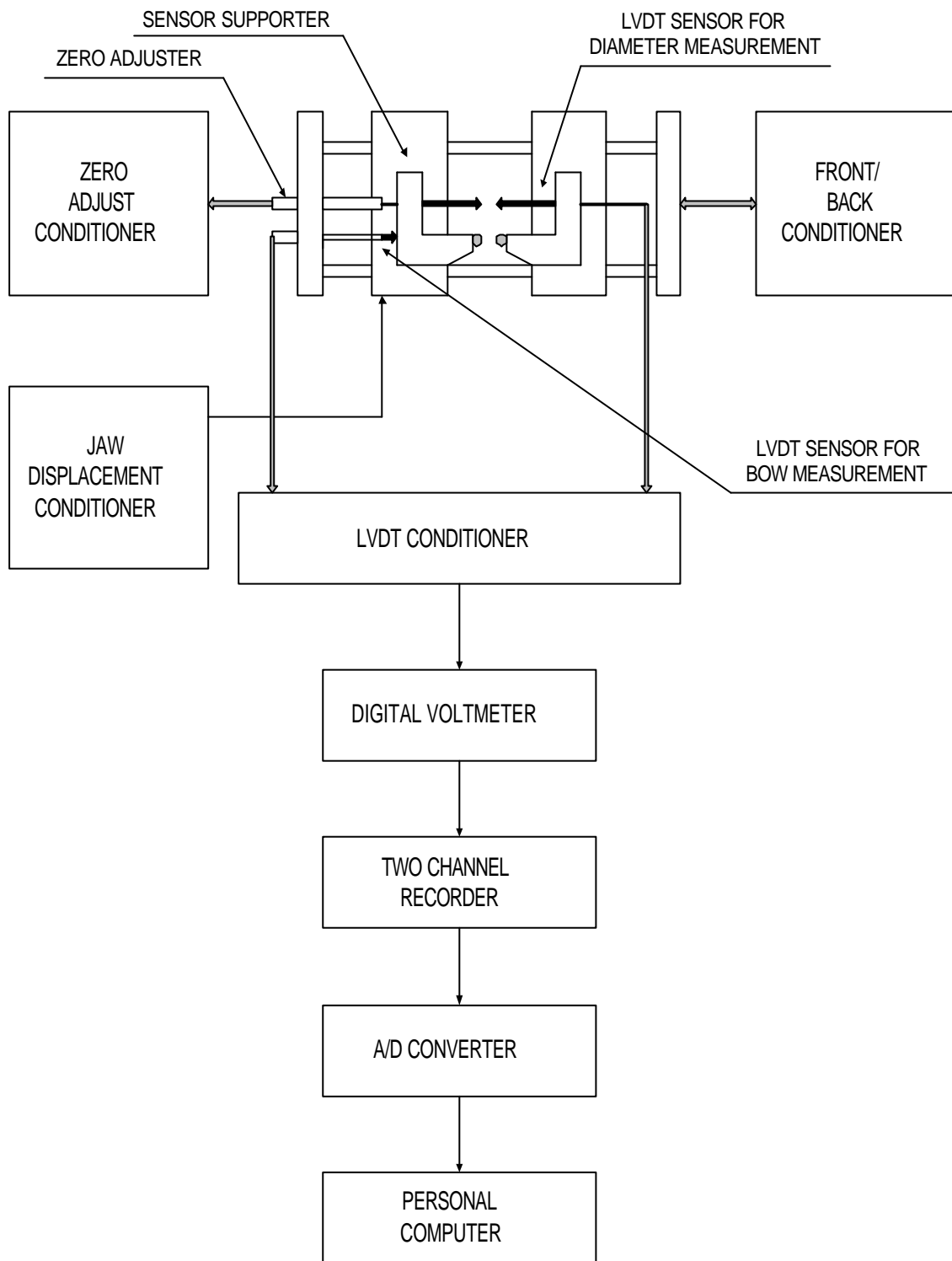


Fig. 1. The Device of Dimensional Measurement.

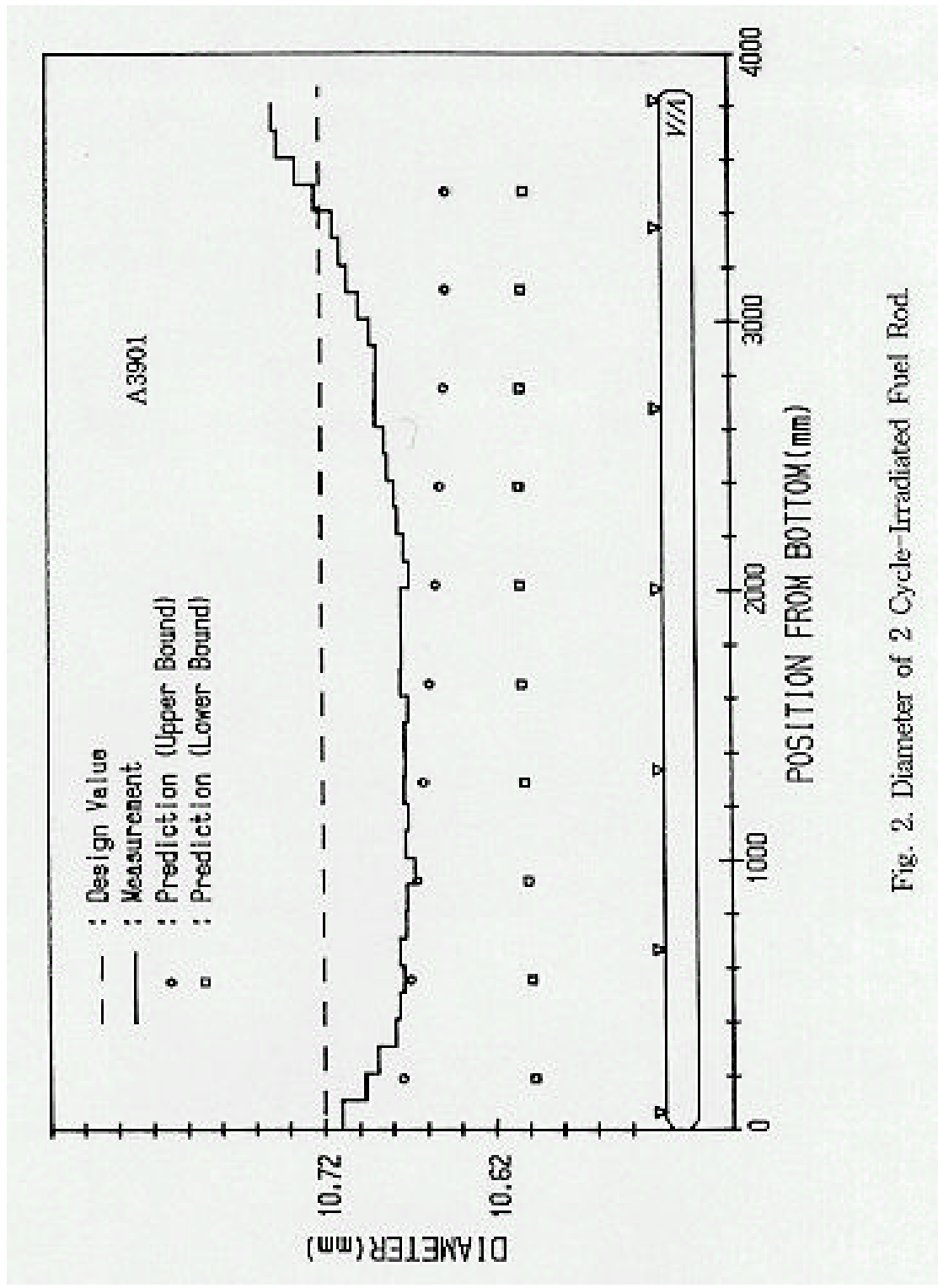


Fig. 2. Diameter of 2 Cycle-Irradiated Fuel Rod.

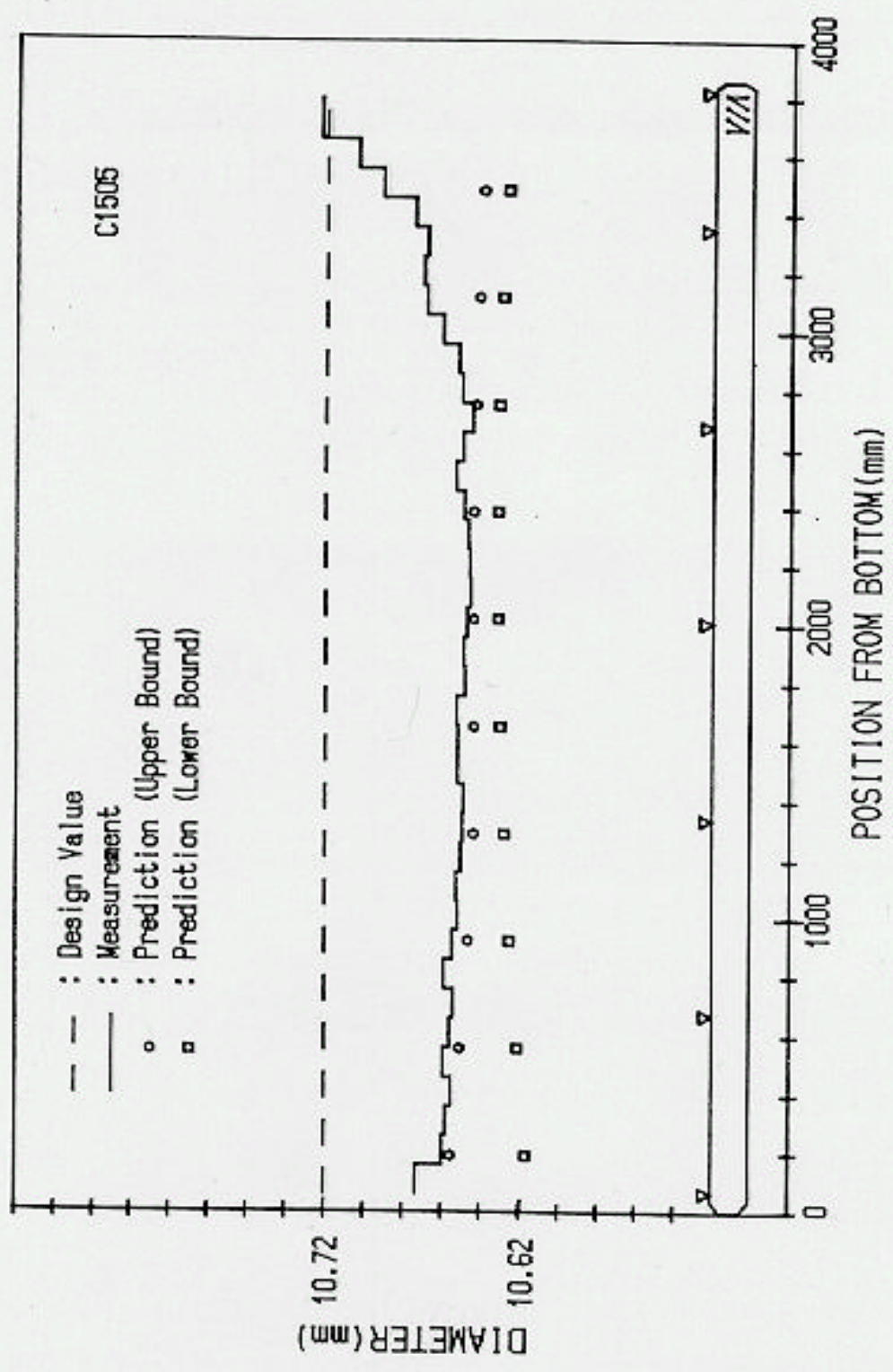


Fig. 3. Diameter of 3 Cycle-Irradiated Fuel Rod.

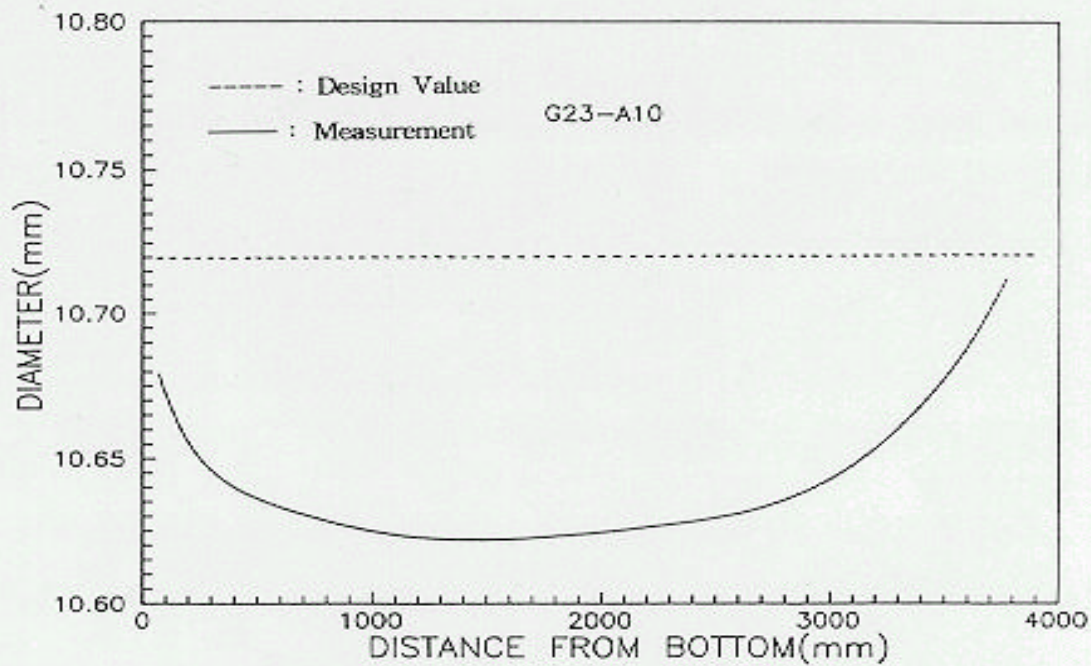


Fig. 4. Diameter of 4 Cycle-Irradiated Fuel Rod.

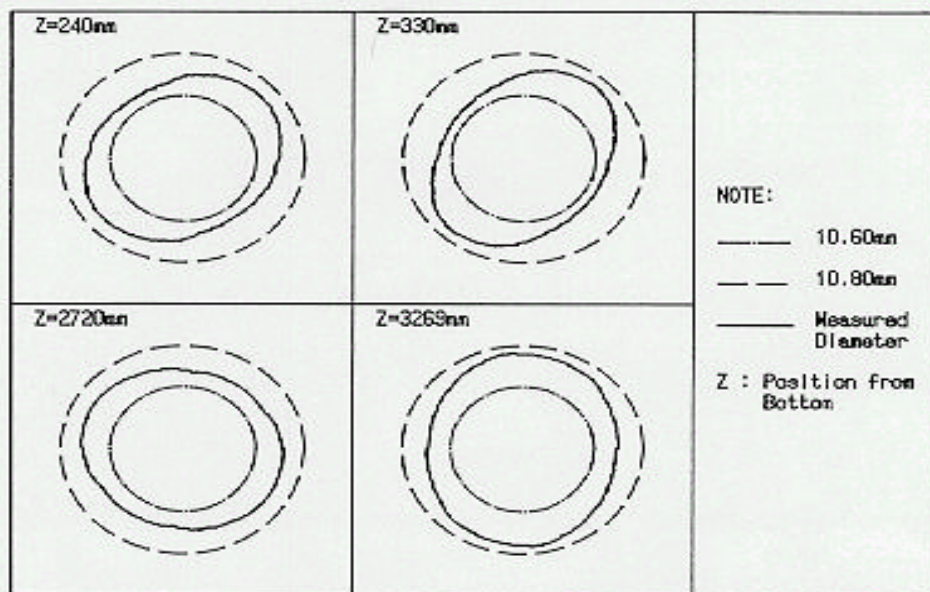


Fig. 5. Ovality of 2 Cycle-Irradiated Fuel Rod.



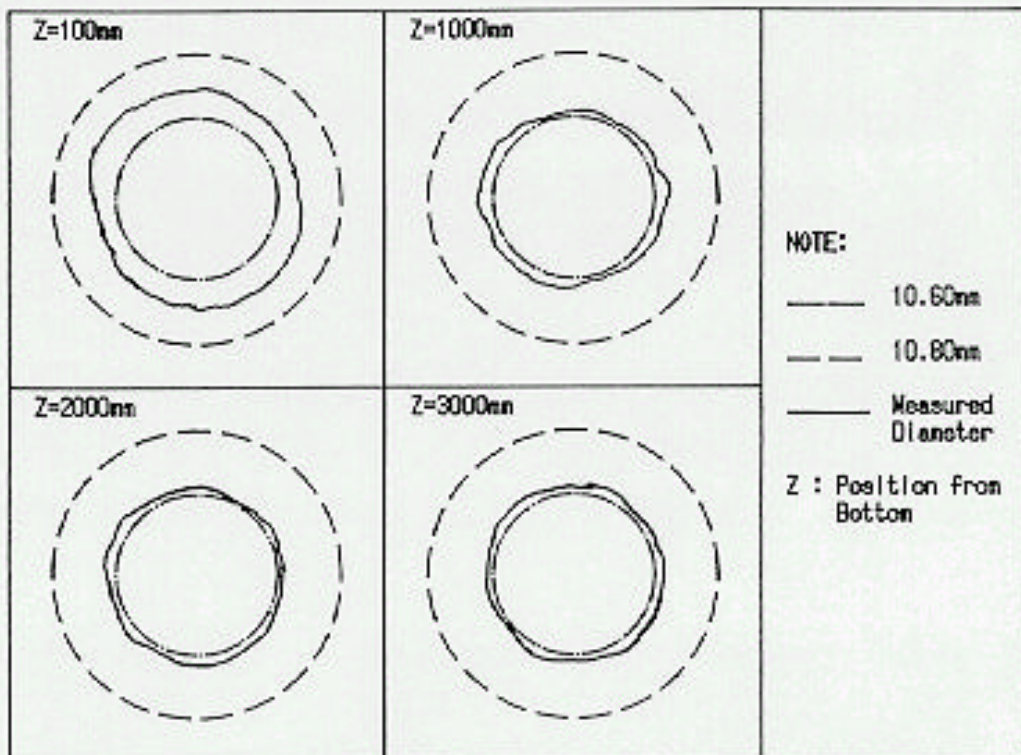


Fig. 6. Ovality of 3 Cycle-Irradiated Fuel Rod.