

조사된 핵연료봉의 핫셀비파괴시험 평가

Evaluation of Hot Cell NDE Results of Irradiated Nuclear Fuel Rods

김은가, 엄성호, 구대서, 유길성, 민덕기

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

김경덕, 신상운, 이명찬

원자력환경기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력발전소에서 연소된 3개 결함징후 핵연료봉에 대한 손상 원인규명을 위해서 핫셀 비파괴시험을 수행하였다. 연료봉의 비파괴시험은 외관검사, 치수측정, 와전류시험, 감마 스캐닝, X-선 라디오그래피시험 등으로 이루어지며, 시험결과에서 연료봉의 결함위치와 형태, 직경변화, 피복관 내부결함, 핵연료 유실현상 및 결함부위의 피복관 함몰현상 등을 확인할 수 있었다.

Abstract

Nondestructive examination(NDE) on three defective fuel rods irradiated in nuclear power plant has been performed to conform the failure causes at the hot cell of post-irradiation examination facility in KAERI. NDE on the fuel rod includes visual inspection, dimensional measurement, eddy current test, axial gamma scanning, and X-ray radiography. The NDE results on the fuel rods reveal that the position and shape of defects, diameter variation, cladding defects, fuel loss, and cladding deformation near defect hole could be verified.

1. 서 론

원자력발전소에서 타고난 핵연료에 대해서 성능과 건전성을 평가하기 위해서는 조사 후시험을 수행하여야 한다. 핵연료봉의 조사후시험은 핫셀비파괴시험과 파괴시험으로 이루어지며 연료봉의 비파괴시험결과를 평가하여 연료봉의 절단부위, 시편채취부위, 핵연료 조직 및 특성시험부위 등을 결정한다. 핫셀비파괴시험은 외관검사, 치수측정, 와전류시험,

축방향감마스캐닝, X-선 라디오그래피시험 등으로 이루어지며 시험결과에서 연료봉의 결함유무, 변형 및 치수변화, 소결체의 장전상태, 연소도 분포 등을 확인할 수 있다[1~3].

시험대상 연료봉은 17x17 PWR 연료봉으로 발전소 현장에서 핵연료보수 중에 인출한 L 및 A 손상연료봉 2개와 K 손상징후 연료봉 1개이며 L과 K 연료봉은 한 집합체내에 인접해 있었던 연료봉이다. 이 연료봉들은 발전소 현장에서 한국원자력연구소 조사후시험시설로 운반된 후 비파괴시험셀내에 있는 비파괴시험 벤취에 거취된 다음 상,하이동 또는 회전상태에서 일련의 비파괴시험이 수행되었다. 제원측정에서는 연료봉 전장의 길이측정과 함께 연료봉 직경의 변화를 측정하였으며, 결함부위의 주변에 대해서는 연료봉 직경의 난형도를 정밀하게 측정하여 결함주위 피복관의 함몰현상 여부를 확인하였다.

## 2 시험 방법 및 절차

원자력발전소에서 연소된 핵연료봉을 핫셀 비파괴시험 벤취의 연료봉 홀더에 체결한 후 비파괴시험 전에 시험대상 연료봉들의 핵연료집합체내에 있었던 위치를 연료봉 표면의 스프링과 덤플 등의 흔적과 핵연료 현장검사시의 외관검사 자료 등을 종합하여 결정한다. 외관검사는 페리스코프 및 내방사선 카메라를 사용하여 연료봉의 외부표면상태를 관찰한다. 외부 손상상태와 피복관의 색깔변화, 손상부위를 중심으로 부식상태 및 변형상태를 관찰하고, 이상부위에 대해서는 폴라로이드 사진촬영과 VTR 녹화를 하였다. 외관검사는 봉의 전장에 대해서 360도 전방향을 90도 간격으로 4회로 나누어 수행하며, 이상부위 및 주요 검사위치에 대해서는 정밀 외관검사를 수행한다. 와전류시험은 피복관의 결함상태와 위치 및 유형을 확인하기 위하여 수행하며, 관통, 내부 및 외부결함의 표준시험봉을 이용하여 장치에 대한 교정을 수행한 후 대상 연료봉을 검사한다. 축방향 감마스캐닝에서는 연료봉의 길이방향으로 전 감마선, Cs-137 및 Nb-95 핵종에 대한 감마선을 측정하여 연소도 분포를 측정한다. X-선 라디오그래피는 핫셀 뒷편에 설치된 X-선 카메라를 이용하여 연료봉 손상부위에 소결체의 변형과 균열상태를 확인하며, 봉단 용접부 등에 대한 결함상태와 소결체 장전상태, 내장 핵연료 길이, 상단 스프링상태 등을 확인한다. 제원측정은 교정용 표준봉과 측정 시험연료봉을 연결한 후 표준봉을 기준으로 측정장치를 교정한 후, 연료봉의 직경변화 및 난형도를 측정한다. 측정장치는 핫셀 비파괴시험 벤취에 설치된 encoder와 LVDT를 이용하며, 원주방향을 두 부분으로 나누어 0-180도, 90-270도 사이의 직경분포 변화를 길이방향으로 스캐닝하면서 측정한다. 특히 결함이나 손상부위에서는 손상부위 상,하부를 잘게 구분하여 정밀측정하였으며, 길이방향으로도 연료봉을 회전시키면서 손상부위 주위의 늘림이나 찌그러짐의 흔적 등을 구체적으로 확인하였다. 표 1에 핵연료봉의 핫셀 비파괴시험 항목과 방법을 간략히 기술하였다.

## 3 시험 결과 및 토의

### 가. 외관검사

핵연료봉의 외관검사를 통해서 연료봉 표면에 보이는 결함부위의 위치와 형상을

확인하였다. 그림 1은 L 연료봉의 하부쪽 외관검사 사진이며, 연료봉 하단으로부터 1,167 mm 위치, 즉 3번 그리드 아래쪽에 폭 1.36 mm, 길이 3.18 mm의 관통결함이 관찰되었다. 이 관통결함 바로 밑 1,138 mm 위치에 또 하나의 홀킨자국 형태의 결함이 관찰되었다. 그림 2의 K 연료봉에서도 이 와 비슷한 위치에 홀킨결함 흔적이 보였다. 이 두 연료봉은 집합체 내에서 인접한 위치에 있었으므로, 두 연료봉에 생긴 결함은 동일한 외부물체와 접촉하여 손상을 일으킨 것으로 추정된다. 연료봉의 하단으로부터 3,002mm 지점, 즉 연료봉 상부 7번 그리드 아래쪽에 외견상 2차 수소화 현상으로 보이는 손상이 관찰되었으며 그림 3에 나타나 있다[4].

#### 나. 와전류시험

그림 4는 K 연료봉의 와전류시험 측정결과이다. 1,150 mm 지점 부근에서 2개의 피크 신호가 나타났으며, 그림 5에서의 위상각을 볼 때 이 두 결함은 관통결함이 아닌 표면결함으로 볼 수 있다. 일반적으로 위상각 평가에서 위상각이 45도이면 관통결함, 0도에 가까우면 외부결함, 90도 방향에 가까우면 내부결함으로 본다[5]. 그림 6은 A 연료봉의 시험결과이다. 연료 하단부 30 mm 위치의 결함은 그림 7에 나타난 위상각을 볼 때 관통결함으로 볼 수 있으며, 상부관통 결함에서 약 200 mm 아래에 나타난 2개의 피크신호는 그림 8에서 볼 때 내부결함 신호이며, 실제 결함유무의 확인은 파괴시험 결과 내부균열에 의한 피크로 입증되었다.

#### 다. 축방향 감마스캐닝

그림 9는 3개 연료봉에 대한 전 감마스캐닝 측정 분포도이다. 그림에서 3개 연료봉 공히 피크가 나타나고 있는데, 동일 집합체의 인접연료봉인 L과 K 연료봉의 경우 감마선 피크 위치 및 두 피크 간의 간격이 동일하며 피크 크기도 비슷하다. A 연료봉의 경우 약간의 피크 위치 변화는 있지만, 피크점 간의 간격은 앞의 두 연료봉과 동일한 경향을 보여주었다. 일반적으로 연소된 핵연료봉에서는 그리드가 있는 부위에서 연소도가 감소하는 현상이외에 이와 같은 피크가 나타나는 현상은 거의 볼 수 없으며, 이 현상의 규명을 위해서는 동일 발전소에서 같은 주기 및 동일 위치에서 연소한 다른 핵연료의 조사후시험이 요구된다.

#### 라. 제원측정

핵연료봉이 원자로내에서 조사될 때 외부 냉각수 압력과 증성자 조사로 인하여 크립 변형을 하게 된다. 즉, 핵연료봉이 원자로 내에서 조사가 진행되면서, 핵연료봉의 직경은 감소하고 난형도는 증가하게 되며, 이 현상은 피복관과 소결체가 접촉할 때까지 계속된다. 일단 피복관이 소결체와 접촉하게 되면 더 이상의 직경감소는 둔화 또는 억제되고 난형도는 최대가 된다. 그림 10은 시험대상 3개 연료봉의 직경분포에 대한 측정결과를 보여주고 있다. 여기에서 관통결함을 가진 L 및 A 연료봉은 공칭 직경 9.5 mm 값에서 큰 변화가 없으므로 연료봉의 직경수축이 거의 없었던 것으로 볼 수 있다. 이것은 관통결함

내로 침투한 냉각수로 인한 봉 내,외부압력 차이의 감소 때문이다. 그러나 견전 연료봉인 K는 관통결함이 없었으므로 직경수축 현상을 나타내었다. 연료봉의 길이변화는 L 연료봉이 5 mm, K 연료봉이 6 mm, 그리고 A 연료봉이 4 mm 정도 늘어 났으나, 연료봉 전체 길이에 비해 미소한 값이므로 관통결함이 있는 연료봉과 견전 연료봉 간의 길이변화 차이는 거의 없는 것으로 볼 수 있다.

그림 11은 L 연료봉 결함부위에서의 난형도 분포곡선이다. 1,137 mm 위치의 비관통결함부근의 직경은 변화가 없이 원형을 유지하고 있으며, 바로 위에 있는 1,167 mm 위치의 관통결함 부위의 직경은 난형을 보이고 있으나, 직경 팽창현상은 나타나지 않았다. 상부 3,002 mm 위치의 결함부근의 직경은 크게 팽창되어 있음을 알 수 있다. 그림 12는 연료봉을 2도씩 회전시키면서 길이방향으로 측정된 직경값인데 1,167 mm 위치에 있는 관통결함 주위의 피복관이 함몰되어 있음을 보여주고 있다. 그림 13은 결함부위의 거시단면사진인데 여기에서도 결함부근에서 피복관이 찌그러져 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 연료봉을 회전시키면서 길이방향으로 측정된 직경의 난형도 측정으로 결함주위의 피복관 함몰현상을 확인할 수 있음이 입증되었다. 기타 연료봉의 X-선 라디오그래피 사진에서는 관통결함부위에서 내부 핵연료의 유실현상을 보여주는 것 외에는 특이한 현상은 관찰되지 않았다.

#### 4 결론

조사된 핵연료봉의 핫셀 비파괴시험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 연료봉의 직경측정에서 견전 연료봉은 직경 수축현상을 나타내고 있으나, 관통결함을 가진 연료봉의 직경은 수축현상이 일어나지 않았다. 반면에 연료봉의 길이신장은 견전 연료봉이나 결함 연료봉에서 거의 차이가 나지 않았다.
- 나. 연료봉의 직경난형도를 측정하여 결함부위에서 핵연료봉의 직경변화를 확인할 수 있었으며, 결함부위 부근의 피복관에 대한 난형도를 미세하게 측정함으로써 결함주위 피복관의 함몰현상을 확인할 수 있었다.
- 다. 핵연료봉의 와전류시험에서 피복관에 존재하는 내부결함, 관통결함, 외부결함의 결함유형을 확인할 수 있었으며, X-선 라디오그래피시험을 통해 연료봉 내 핵연료의 장전상태와 결함부근에서 핵연료의 유실현상을 확인할 수 있었다.
- 라. 축방향 전 감마스캐닝시험으로 연료봉의 길이방향에 대한 연소도 분포현상을 확인하였으며, 측정된 감마 스펙트럼에서 일반적으로 조사후 핵연료봉에서 보이지 않는 두 개의 감마선 피크를 관찰할 수 있었다. 이러한 특이 피크현상은 파괴시험 및 추가 연료봉 핫셀 시험으로 그 원인이 규명되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

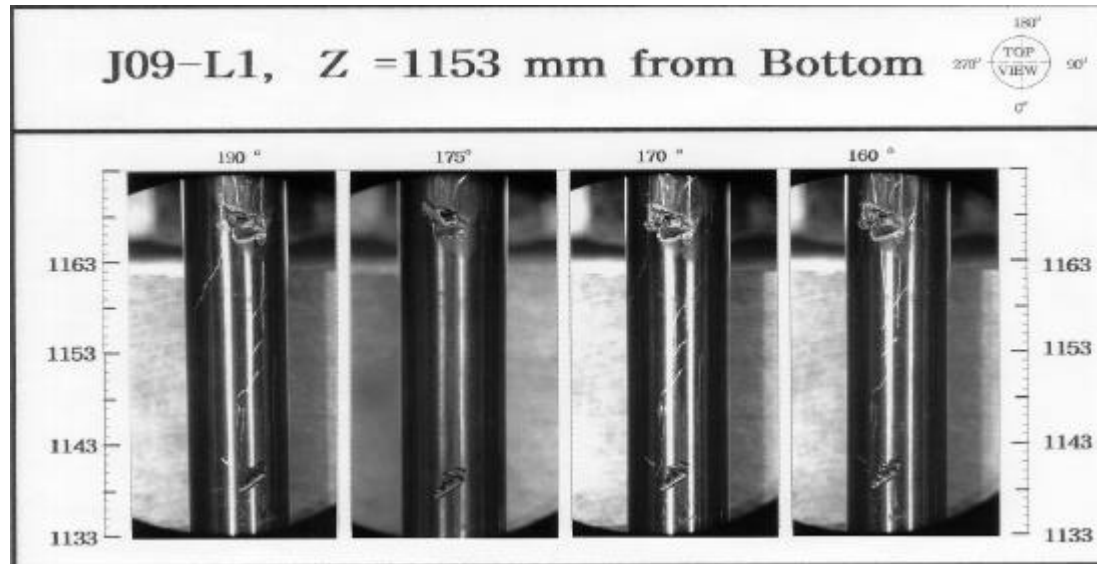
본 연구는 한국전력공사로부터 연구비를 지원받아 추진한 과제의 일부결과입니다. 이 과제를 추진토록 지원해 준 관계자 여러분에게 심심한 사의를 표합니다.

## 참고문헌

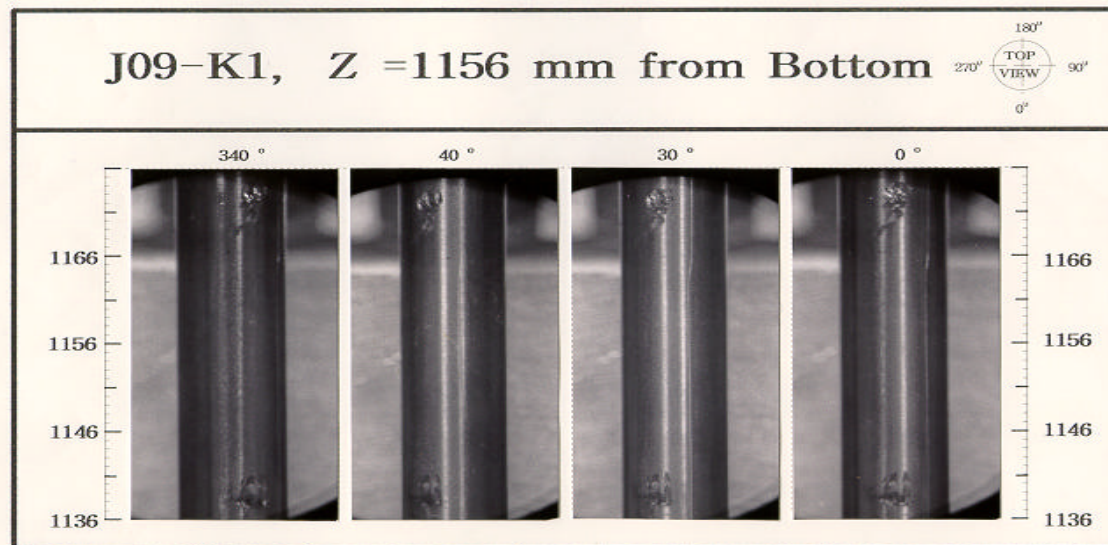
1. 노성기외, "조사후핵연료시험평가기술개발", KAERI/RR-1127/92, 과학기술처(1992).
2. "Guidebooks on Non-Destructive Examination of Water Reactor Fuel", TR-322, IAEA(1991).
3. 김은가외, "영광4호기 결함연료봉 조사후시험", KAERI/TR-739/96, 한국원자력연구소(1996).
4. D.R.Olander and S. Vakhin, "Secondary Hydriding of Defected Zircaloy-Clad Fuel Rods", EPRI TR-101773(1993).
5. "Eddy-Current Cladding Integrity Testing and Data Analysis", Hot Cell Examination and Maintenance Equipment, ANS, 33, 906(1979).

표 1. 핵연료봉 핫셀비파괴시험 항목 및 방법

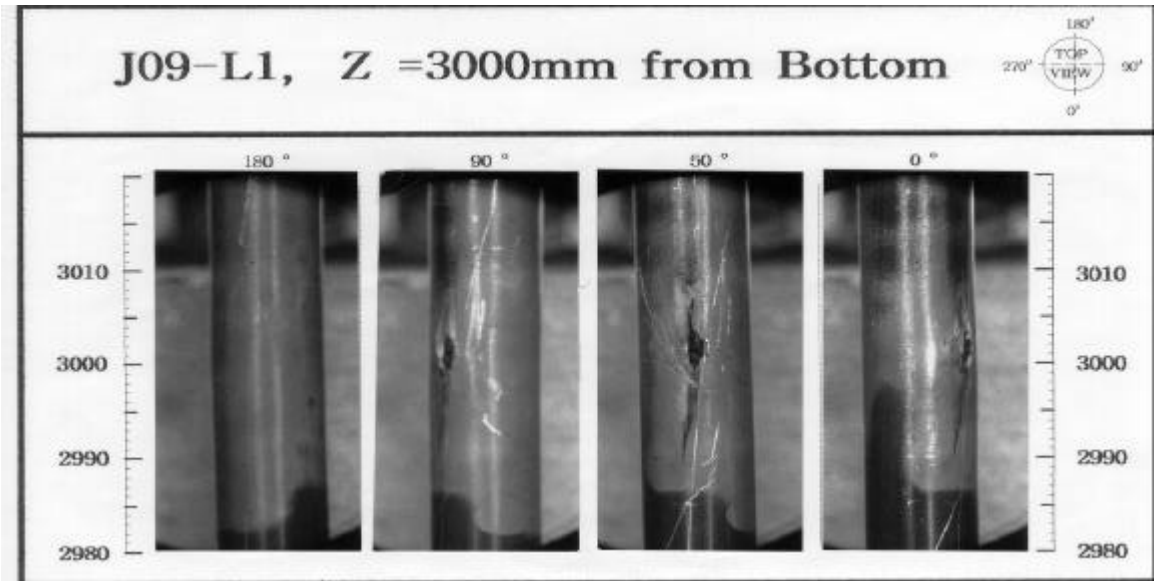
검사항목	검사장비	내 용	비 고
외관검사	◇ NDT Bench ◇ Periscope ◇ Anti-Rad. Camera	-연료봉 orientation -표면 외관검사	-Full Scale Exam. -Rotation -Polaroid
와전류시험	◇ 환상형 코일 Probe	-피복관 결함탐상 -산화층두께 측정	Full Scale Scanning
X-선 검사	◇ X-ray Radiography	-봉단 용접부 검사 -Pellet Stack 검사 -피복관 검사	Full Scale Scanning
Profilometry	◇ NDT Bench (LVDT)	-Length -Diameter -Ovality	Full Scale of Rod 90° Angle
Gamma Scanning	◇ HPGe Detector ◇ MCA(Canberra,etc)	-전 감마선세기 분포 -주요 핵종별 분포	Full Scale Scanning



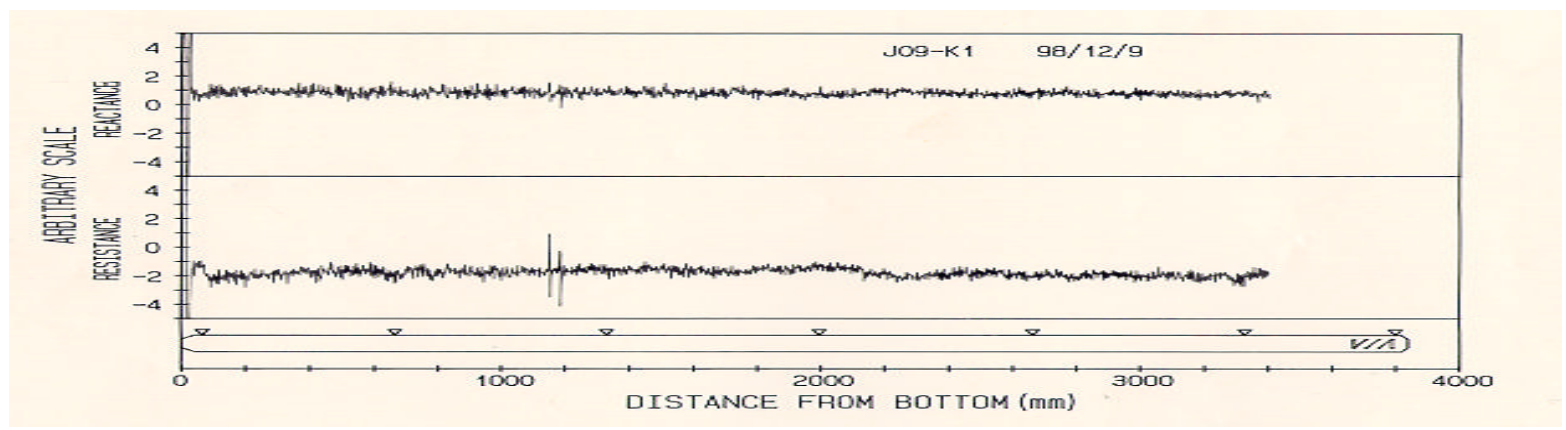
1. L



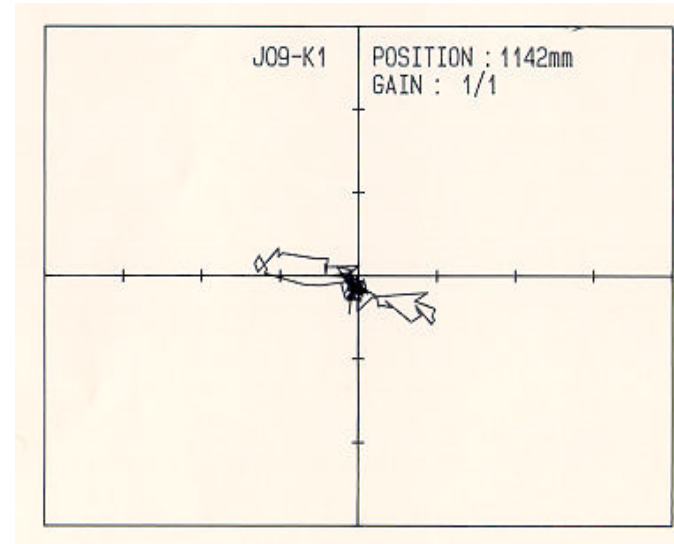
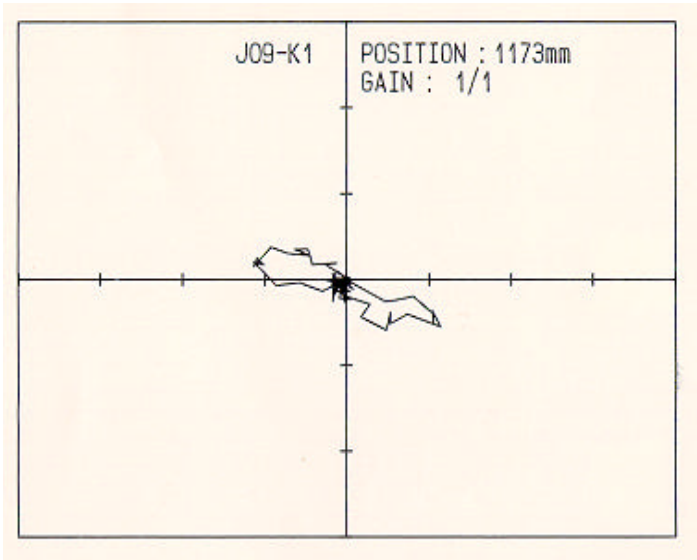
2. K



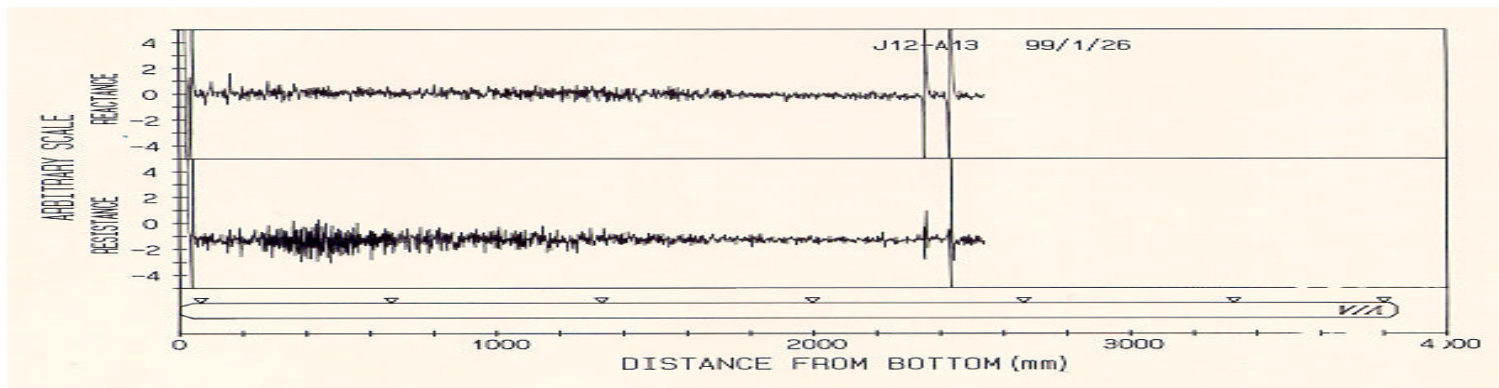
3. L



4. K

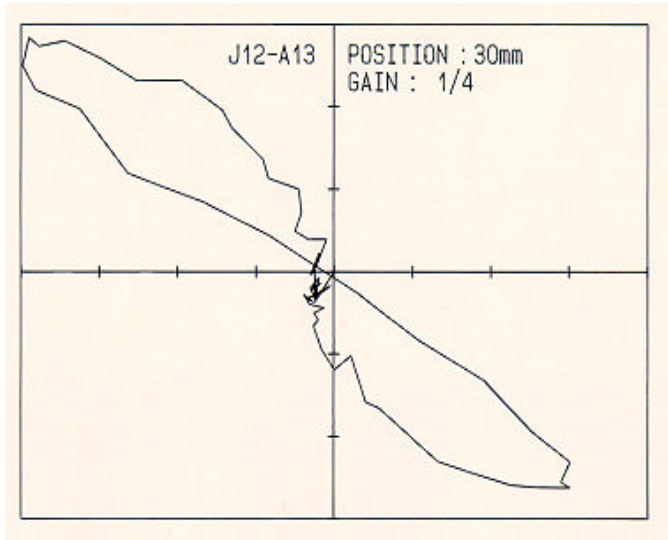


5. K

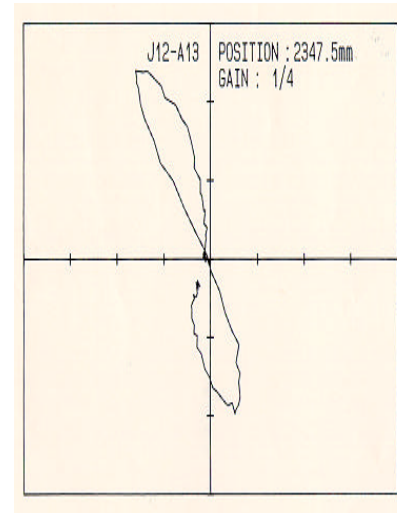


6. A

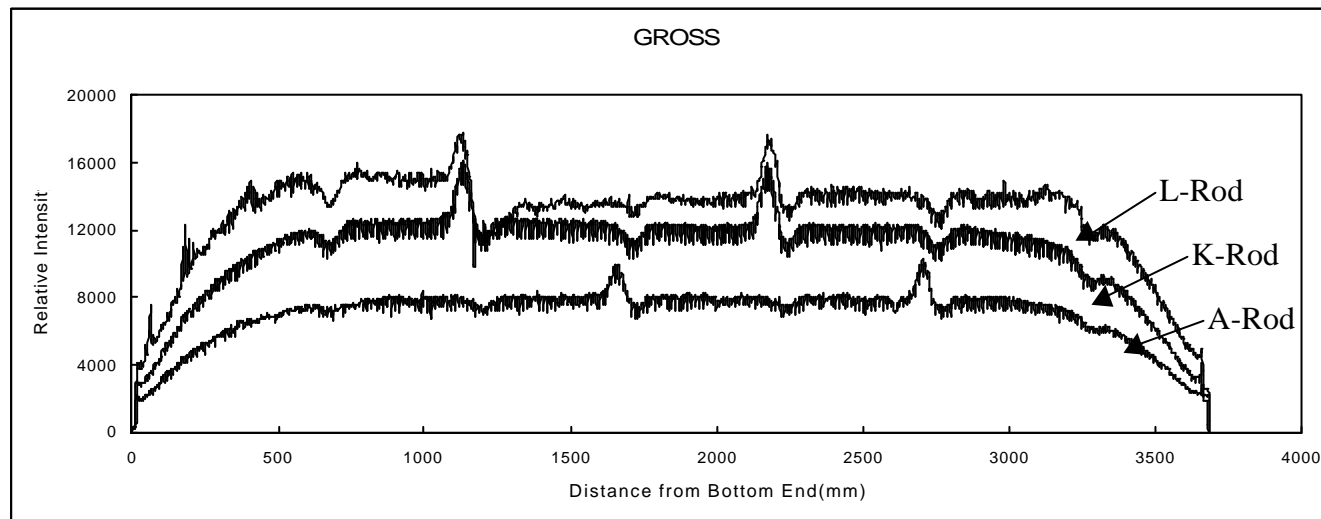
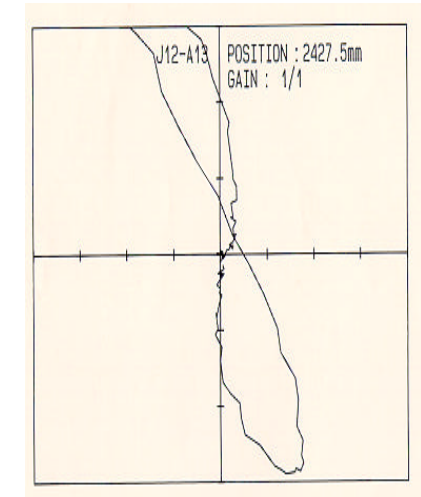




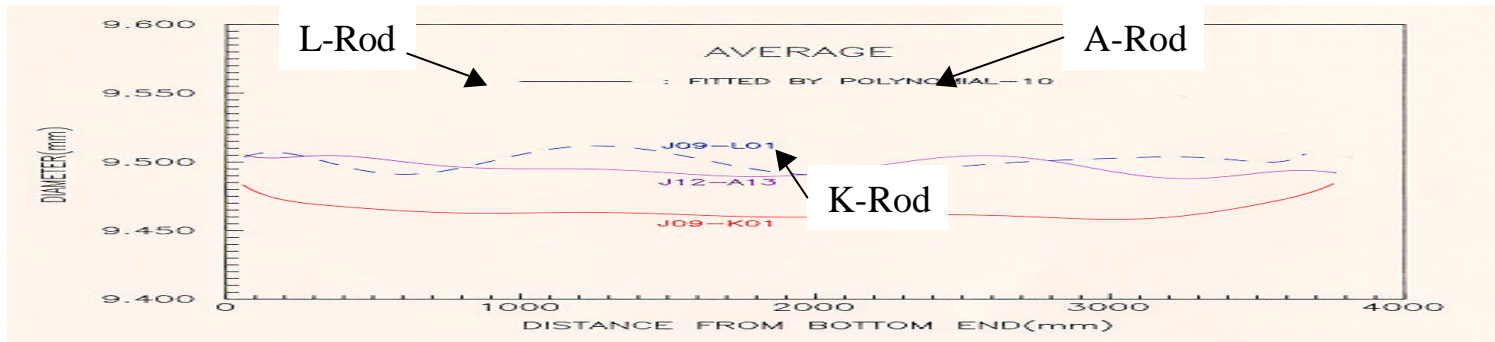
7. A 30mm



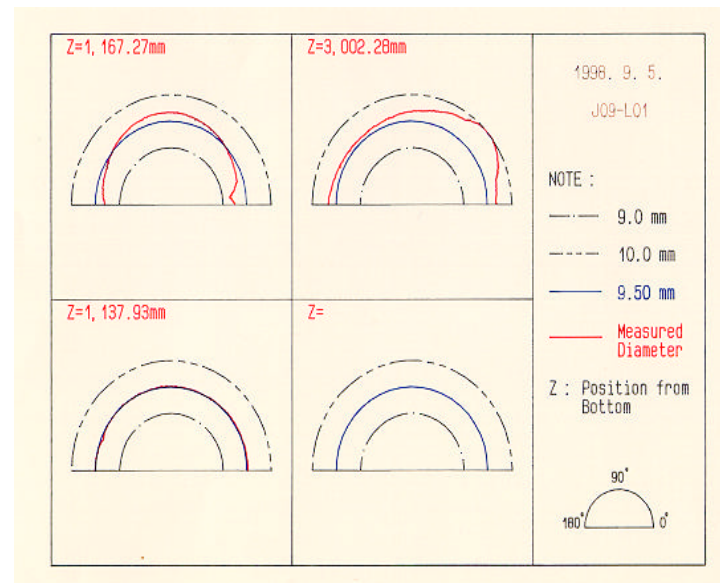
8. A



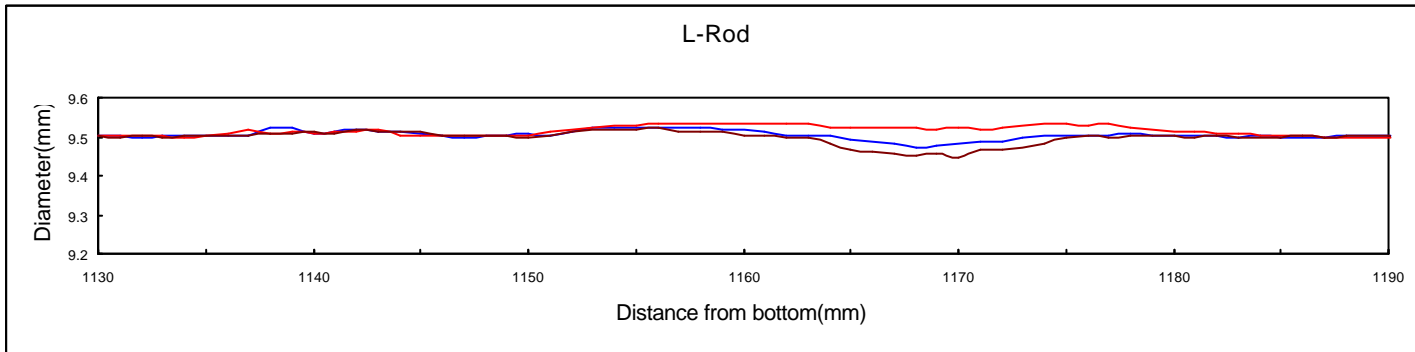
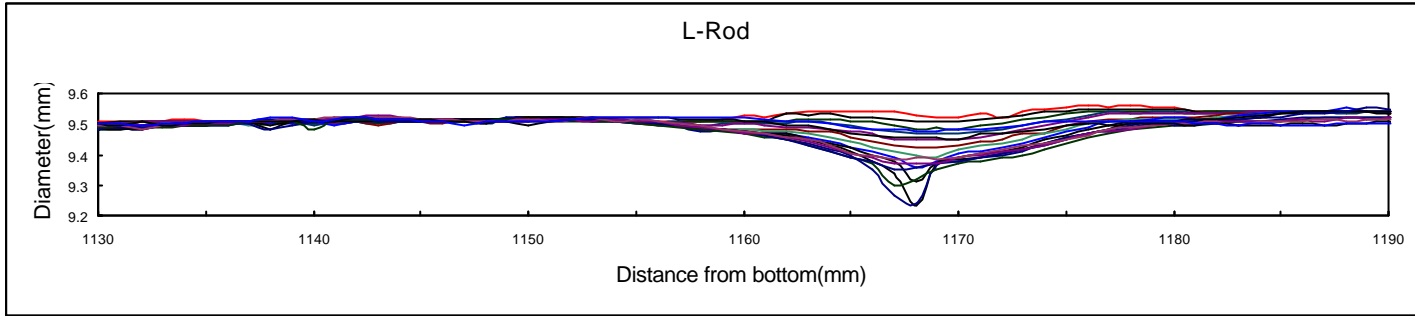
9. Gross Gamma Scanning Profile.



10. L, A K



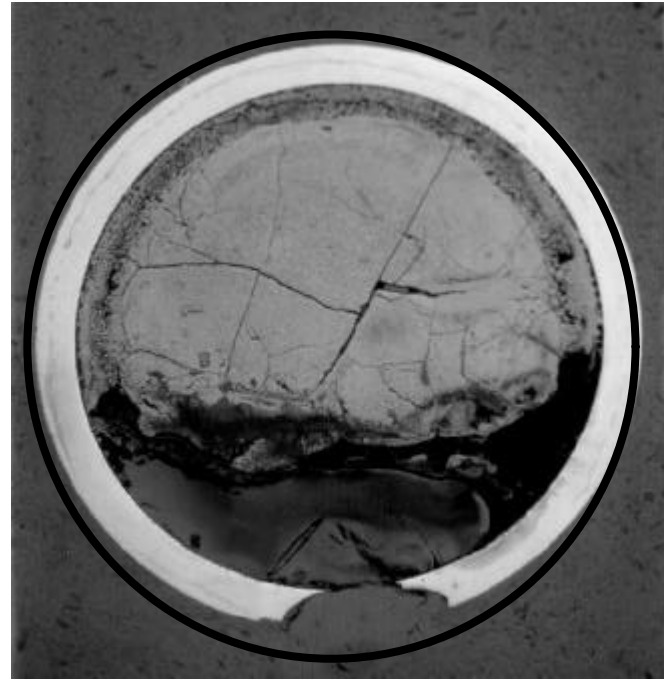
11. L



12. L



1166.7 mm



1166.9 mm