

KAERI/TR-1349/99



KR9900227

조사 핵연료봉 산화층 두께 측정

시험기술개발

**Development of Examination Technique  
for Oxide Layer Thickness Measurement  
of Irradiated Fuel Rods**

한국원자력연구소

31-02

D

## 제 출 문

### 한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 1999년도 “사용후핵연료특성계량화기술개발” 과제의 기술 보고서로 제출합니다.

1999. 6.

주저자 : 선임연구원 구 대 서  
공저자 : 책임연구원 박 성 원  
          선임기술원 김 종 훈  
          책임연구원 민 덕 기  
          책임연구원 김 은 가  
          책임연구원 전 용 범  
          책임기술지원 서항석  
          선임연구원 방 경 식

## 요 약 문

### I. 제목

조사 핵연료봉에 의한 산화층두께 측정시험기술개발

### II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구의 목적은 연소도에 따른 조사후 핵연료봉 산화층 두께측정 시험기술을 개발함에 있다.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

조사후 핵연료봉의 산화층두께 측정시험기술개발 및 연소도에 따른 산화층 두께분석

### IV. 연구개발결과

개발한 산화층 측정시험기술에 의하여 핵연료봉 산화층 두께를 측정하고 분석하였다. 3주기연소 핵연료봉 외부 산화층 두께는 20~30 $\mu$ m 정도였고 내부 산화층의 두께는 0~10 $\mu$ m였으나 핵연료봉 피복관이 터진 내부 산화층 두께는 약 30 $\mu$ m였다. 4주기 연소 핵연료봉 산화층이 1주기 연소 핵연료봉 산화층보다 대체로 2배 정도 두껍게 형성되었으며 산화층은 핵연료봉 하부에서 얇게 형성되고 핵연료봉 상부로 진행함에 따라 증가하여 핵연료봉 하단 2500-3000mm 영역에서 산화층 두께가 최대였다가 감소하는 경향을 나타내었다.

4주기 연소 핵연료봉 내부 및 외부 산화층두께는 핵연료봉 하단 750mm에서 핵연료봉 상부 3500 mm 까지 내부 산화층 두께는 8 $\mu$ m정도인 반면 외부 산화층 두께는 핵연료봉 하단 750-1000mm에서 8 $\mu$ m 정도이며 핵연료봉 상부로 진행함에 따라 증가하여 핵연료봉 상부 3500mm에서 최대 22 $\mu$ m였다.

### V. 연구개발결과의 활용계획 및 건의사항

연소도에 따른 조사후 핵연료봉의 산화층 두께를 분석하여 핵연료봉의 안전성을 평가하고 핵연료의 노내거동연구에 활용될 것이다.

# SUMMARY

## I. Project Title

Development of thickness measurement technique of oxide layer on irradiated Fuel Rods

## II. Objective and Importance of the Project

Aim of the project is to develop thickness measurement technique of oxide layer on irradiated fuel rods.

## III. Scope and Contents of Project

Development of thickness measurement technique of oxide layer and analysis of oxide layer thickness due to burnup

## IV. Result of Project

Oxide layer thicknesses of irradiated fuels were measured, analyzed by developing thickness measurement technique of oxide layer. Outer oxide layer thicknesses of 3 cycle-irradiated fuel rods were 20~30 $\mu\text{m}$ , inner oxide layer thicknesses 0~10 $\mu\text{m}$  and inner oxide layer thicknesses on cracked cladding about 30 $\mu\text{m}$ .

Oxide layer thicknesses of 4 cycle-irradiated fuel rods were about 2 times as thick as those of 1 cycle-irradiated fuel rods. Oxide layer on lower region of irradiated fuel rods was thin and oxide layer from lower region to upper region indicated gradual increase in thickness. Oxide layer thickness from 2500 to 3000mm showed maximum and oxide layer thickness from 3000 to top region of irradiated fuel rods showed decreasing trend. Inner oxide layer thicknesses of 4 cycle-irradiated fuel rod were about 8 $\mu\text{m}$  at 750~3500mm from the bottom end of fuel rod. Outer oxide layer thicknesses were about 8 $\mu\text{m}$  at 750~1000mm from the bottom end of

fuel rod. These indicated gradual increase up to upper region from the bottom end of fuel rod and showed maximum,  $22\mu\text{m}$  in thickness at 3500mm from the bottom end of fuel rod

#### V. Proposal for Applications

Oxide layer thickness technique will apply analysis of oxide layer thickness to safety evaluation and study of reactor fuels.

# CONTENTS

CHAPTER 1 INTRODUCTION .....	8
CHAPTER 2 CURRENT STATUS OF TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN DOMESTIC AND FOREIGN COUNTRY .....	9
CHAPTER 3 CONTENT AND RESULT OF PROJECT .....	10
CHAPTER 4 ACHIVEMENT AND SERVICE OF PROJECT .....	25
CHAPTER 5 APPLICATIONS OF PROJECT .....	26
CHAPTER 6 REFERENCE .....	27

## 목 차

제 1 장 서 론 .....	8
제 2 장 국내외 기술개발현황 .....	9
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	10
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도 .....	25
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	26
제 6 장 참고문헌 .....	27

## 그림목차

Fig.1 Fine Cutting Machine .....	11
Fig.2 Hot Mouting Press .....	12
Fig.3 Drawing of Polishing Machine .....	13
Fig.4 Oxide Layer Thickness of 1 Cycle-Irradiated Fuel Rod .....	14
Fig.5 Oxide Layer Thickness of 4 Cycle-Irradiated Fuel Rod .....	14
Fig.6 Thickness of Inner and Outer Oxide Layer of 4 Cycle-Irradiated Fuel Rod .....	16
Fig.7 Oxide Layer on Outer Surface of Clad at 3,230mm from Bottom End of Fuel Rod J44-L12 .....	17
Fig.8 Oxide Layer on Inner Surface of Clad at 3,230mm from Bottom End of Fuel Rod J44-L12 .....	18
Fig.9 Oxide Layer on Outer Surface of Clad at 3,230mm from Bottom End of Fuel Rod J44-K12 .....	19
Fig.10 Oxide Layer on Inner Surface of Clad at 3,230mm from Bottom End of Fuel Rod J44-K12 .....	20
Fig.11 Oxide Layer on Outer Surface of Clad at 2,270mm from Bottom End of Fuel Rod J44-A03 .....	21
Fig.12 Oxide Layer on Inner Surface of Clad at 2,270mm from Bottom End of Fuel Rod J44-A03 .....	22
Fig.13 Oxide Layer on Outer Surface of Clad at 2,490~ 2,510mm from Bottom End of Fuel Rod J44-H08 .....	23
Fig.14 Comparison of Oxide Layer Thickness by both Eddy Current Testing and Metallographic Examination .....	24



## 제1장 서론

원자로의 핵연료는 중성자 선속, 원자로 선출력, 원자로 온도 및 압력등 원자로 운전 조건에 따라 핵연료의 이산화 우라늄이 핵반응을 통해서 많은 핵분열 에너지를 발생하게 되고 이 핵연료는 swelling 및 densification 같은 과정을 거치면서 핵연료의 조직변화가 발생한다. 원자로 핵연료의 거동 및 핵연료의 건전성을 평가하기 위하여 조사후 시험이 수행된다[1-4]. 조사핵연료 파괴 시험을 수행하여 핵연료봉 피복관 특성 및 조사 핵연료의 조직을 관찰하고 분석하게 된다[5-6].

본 실험에서는 조사 핵연료봉의 연소도에 따른 핵연료봉 산화층 두께를 분석하기 위하여 핵연료봉을 절단하여 시편을 제작하여 금속조직실험을 수행하여 핵연료봉 피복관 산화층두께를 측정하고 분석하였다.

## 제2장 국내외 기술개발현황

미국, 프랑스, 독일, 캐나다, 일본 등 원자력 선진국에서는 조사핵연료봉의 산화층 두께를 측정하여 핵연료 특성을 분석할 수 있는 산화층 두께측정시험기술을 보유하고 있다. 국내에서는 조사 핵연료를 취급할 수 있는 방사선 차폐시설이 거의 없는 관계로 조사 핵연료봉 산화층 두께시험기술이 부진한 상태였으나 본 실험실에서 조사 핵연료봉 산화층 두께를 측정하고 핵연료 특성을 분석할 수 있는 조사 핵연료봉 산화층 두께시험기술을 개발하였다.

### 제3장 연구개발 수행내용 및 결과

핫셀에서 사용하고 있는 그림 1의 핵연료봉 미세절단기는 미국 BUEHLER사에서 제작한 isomet low speed saw를 핫셀내에서 원격조종기로 사용할수 있도록 개조하였으며 미세절단기에 diamond blade 3"(0.15mm X 76mm), 4"(0.3mm X 102mm) 및 5"(0.4mm X 127mm)를 장착하여 사용할 수 있도록 하였다. 시편을 절단할 때 열과 마찰을 최소한으로 줄이기 위하여 습식방법으로 절단하고 또한 세척을 편리하게 하기 위하여 물을 윤활제로 사용하고 있으며 미세절단기 휠의 회전속도 700rpm으로 절단할 수 있는 시편의 최소 두께는 0.2mm 정도이다.

미세절단한 시편은 mounting press 기기를 이용하여 hot mounting을 수행하는데 그림 2의 hot mounting press기기는 덴마크 STRUERS사에서 제작한 DK-2610 predopress기기를 핫셀내에서 원격조종기로 취급이 용이하도록 개조하여 핫셀내부에 설치하였으며 hot mounting press 온도 150°C, 압력 3.5kpsi에서  $\phi 1\frac{1}{4}$ " pre-mold를 사용하였다.

시편의 hot mounting을 마치고 연마작업을 수행할 때는 grinding machine의 속도 150rpm, 하중 600g 중의 힘을 가하고 처음에 거친 연마제를 사용하고 점차로 고운 연마제를 사용하여 시편의 표면손상을 제거하였다. 미세절단에서와 같이 모든 연마작업도 습식으로 수행하여 시편조직에 어떠한 영향도 끼치지 않도록 하였으며 시편으로부터 제거되는 금속분말 loading 현상을 억제시켰다. 연마입자들 사이에 시편 금속표면에서 제거된 분말이 연마제 입자사이에 끼어들기 전에 물로 씻었으며 연마과정에서 생성된 시편표면 마찰열을 냉각시켰다.

시편의 연마작업을 마치고 그림 3과 같은 연삭기(polishing machine)를 사용하여 평면을 유지하고 흠이 없는 시편경면을 만들어 정확한 조직적인 해석이 가능하게 하였다. 연마제로는  $Al_2O_3$ , MgO,  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  및 diamond compound를 사용하고 있으나 본 시험에서는 diamond compound를 사용하였다. 연마는 15 $\mu$ m, 9 $\mu$ m, 6 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m, 및 1/4 $\mu$ m 순으로 수행하였으며 시편준비 작업이 끝나면 시편을 etching하고 현미경 630배 배율로 핵연료봉 피복관 산화층 두께를 측정하였다.

Fig. 4는 1주기 연소 핵연료봉의 산화층두께를 나타낸 것인데 핵연료봉 하단 500mm에서 3 $\mu$ m 정도이고 핵연료봉 상부로 진행함에 따라 산화층 두께는 증가하

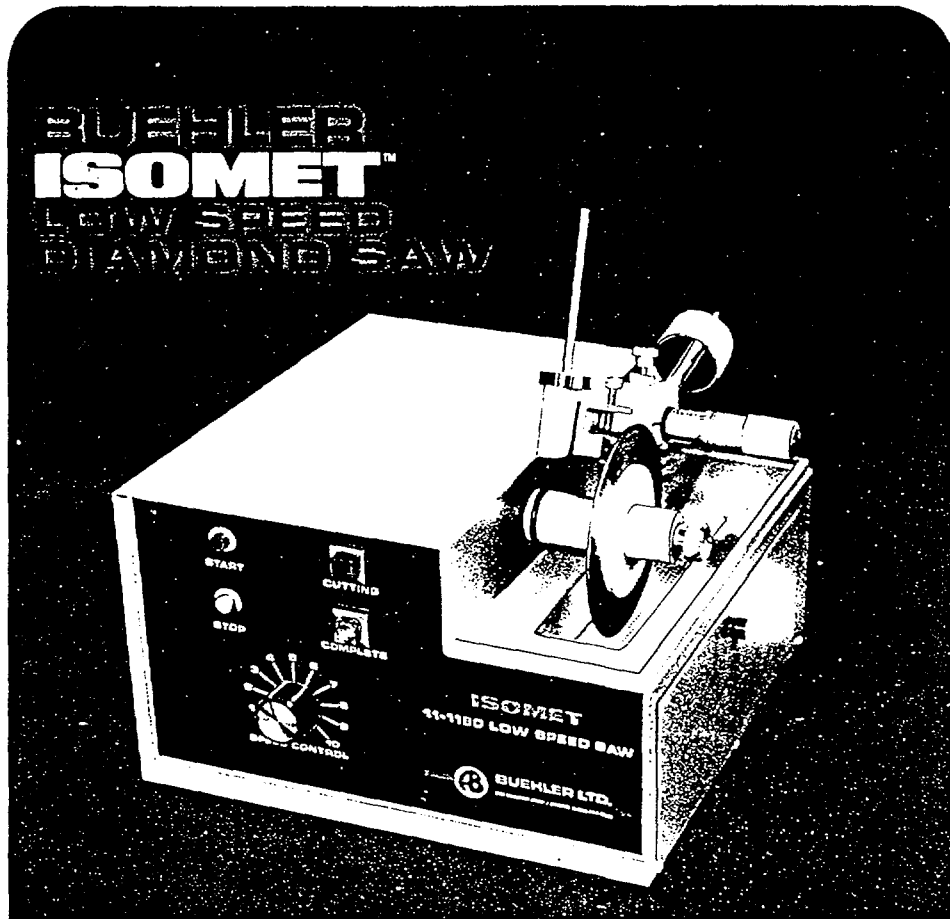


Fig.1. Fine Cutting Machine.



Fig.2. Hot Mouting Press.

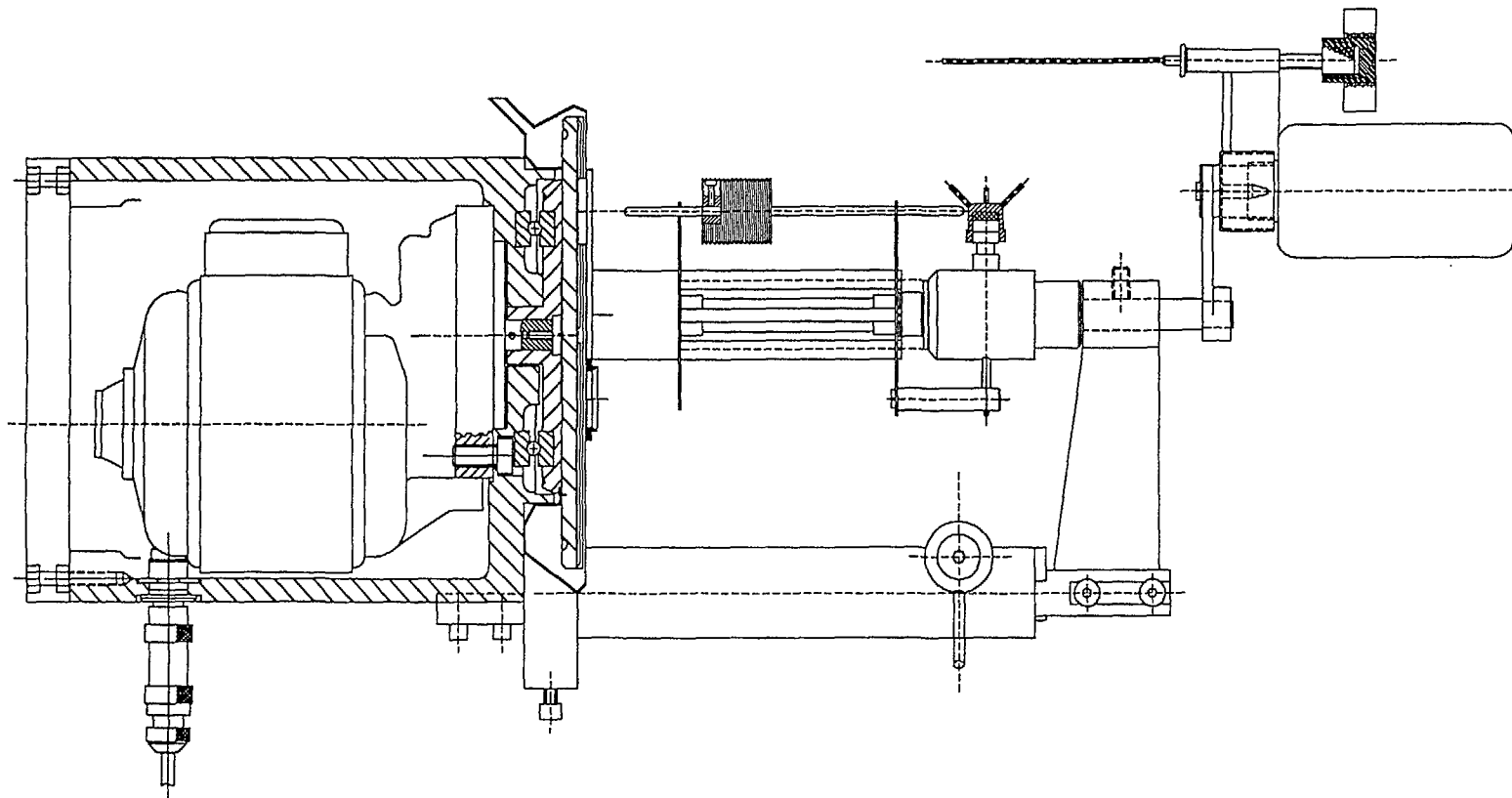


Fig.3. Drawing of Polishing Machine.

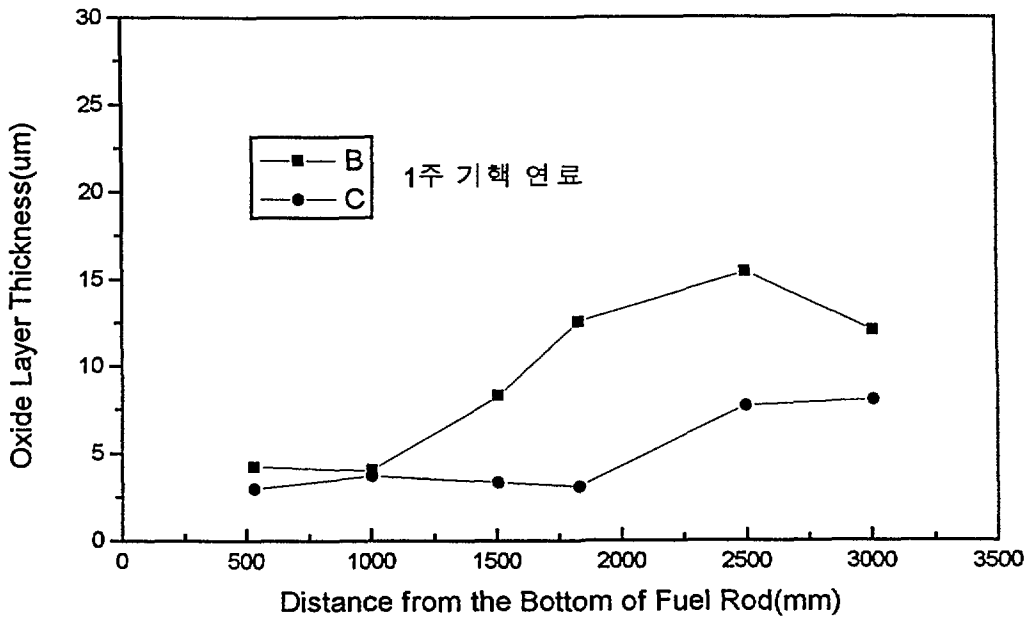


Fig. 4. Oxide Layer Thickness of 1 Cycle-Irradiated Fuel Rod.

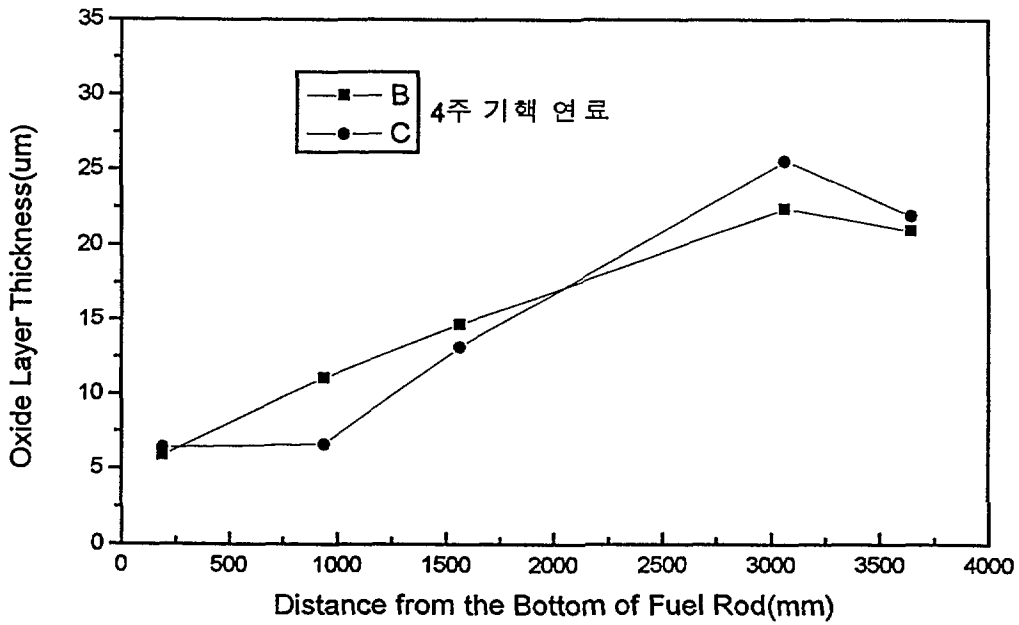


Fig. 5. Oxide Layer Thickness of 4 Cycle-Irradiated Fuel Rod.

여 핵연료봉 상부 2500mm에서 최대였다가 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 5는 4주기 연소 핵연료봉의 산화층두께를 나타낸 것인데 핵연료봉 하단 180mm에서  $6\mu\text{m}$  정도이고 핵연료봉 상부로 진행함에 따라 산화층 두께는 증가하여 핵연료봉 상부 3000mm에서 최대  $24\mu\text{m}$  정도였다가 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 6은 4주기 연소 핵연료봉 내부 및 외부 산화층두께를 나타낸 것인데 핵연료봉 하단 750mm에서 핵연료봉 상부 3500 mm 까지 내부 산화층두께는  $8\mu\text{m}$  정도인 반면 외부 산화층 두께는 핵연료봉 하단 750-1000mm에서  $8\mu\text{m}$  정도이며 핵연료봉 상부로 진행함에 따라 증가하여 핵연료봉 상부 3500mm에서 최대  $22\mu\text{m}$ 였다.

Fig. 7은 고리2호기 핵연료봉 J44-L12 하단으로부터 3230mm 횡단면과 4위치의 피복관 외부 산화층 두께를 나타낸 것이다. 산화층 두께는  $17\sim 20\mu\text{m}$  정도를 나타내었다. Fig. 8은 고리2호기 핵연료봉 J44-L12 하단으로부터 3230mm 횡단면과 4위치의 피복관 외부 산화층 두께를 나타낸 것이다. 핵연료봉 피복관 내부산화층 두께는 3곳은 0이고 한곳은  $9.5\mu\text{m}$  정도였으며 핵연료봉 피복관 외부산화층 두께보다 보다 훨씬 얇았다. Fig. 9은 고리2호기 핵연료봉 J44-K12 하단으로부터 3230mm 횡단면과 4위치의 피복관 외부 산화층 두께를 나타낸 것이다. 산화층 두께는  $27\sim 30\mu\text{m}$  정도를 나타내었다. Fig. 10은 고리2호기 핵연료봉 J44-K12 하단으로부터 3230mm 횡단면과 4위치의 피복관 내부 산화층 두께를 나타낸 것이다. 핵연료봉 피복관 내부산화층은 형성되지 않았다. Fig. 11은 고리2호기 핵연료봉 J44-A03 하단으로부터 2270mm 횡단면과 4위치의 피복관 외부 산화층 두께를 나타낸 것이다. 산화층 두께는  $17\sim 18\mu\text{m}$  정도를 나타내었다. Fig. 12은 고리2호기 핵연료봉 J44-A03 하단으로부터 2270mm 횡단면과 4위치의 피복관 외부 산화층 두께를 나타낸 것이다. 핵연료봉 피복관 내부산화층 두께는  $29\sim 32\mu\text{m}$  정도였으며 이 위치의 핵연료봉 피복관이 터져서 냉각수가 피복관안에 침투하여 산화층이 두껍게 형성된 것으로 추정된다.

Fig. 13은 고리2호기 핵연료봉 J44-H08 하단으로부터 2490~2510mm 횡단면과 핵연료봉 피복관 8곳의 피복관 외부 산화층 두께를 나타낸 것이다. 산화층 두께는  $16\sim 23\mu\text{m}$  정도를 나타내었다. Fig. 14은 고리2호기 핵연료봉 J44-H08 하단 2490~2510mm 피복관 외부 산화층 두께를 와전류시험기술에 의한 측정과 금속조직시험에 의한 측정결과를 나타낸 것이다. 두 방법에 의한 산화층 두께는  $2\sim 25\mu\text{m}$  정도를 나타내었다. 핵연료봉 하부에서 산화층 두께가 수  $\mu\text{m}$  정도였다가 상부로 진행함에 따라 산화층 두께가 증가하여 핵연료봉 하단 3000mm근방에서 최대  $25\mu\text{m}$  정도였다가 감소하는 경향을 나타내었다.



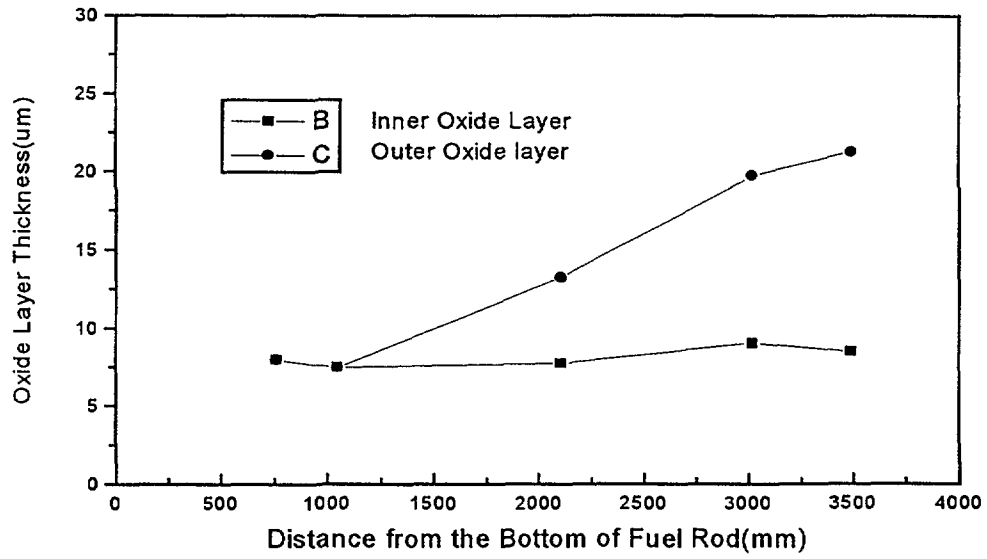


Fig.6. Thickness of Inner and Outer Oxide Layer of 4 Cycle-Irradiated Fuel Rod.

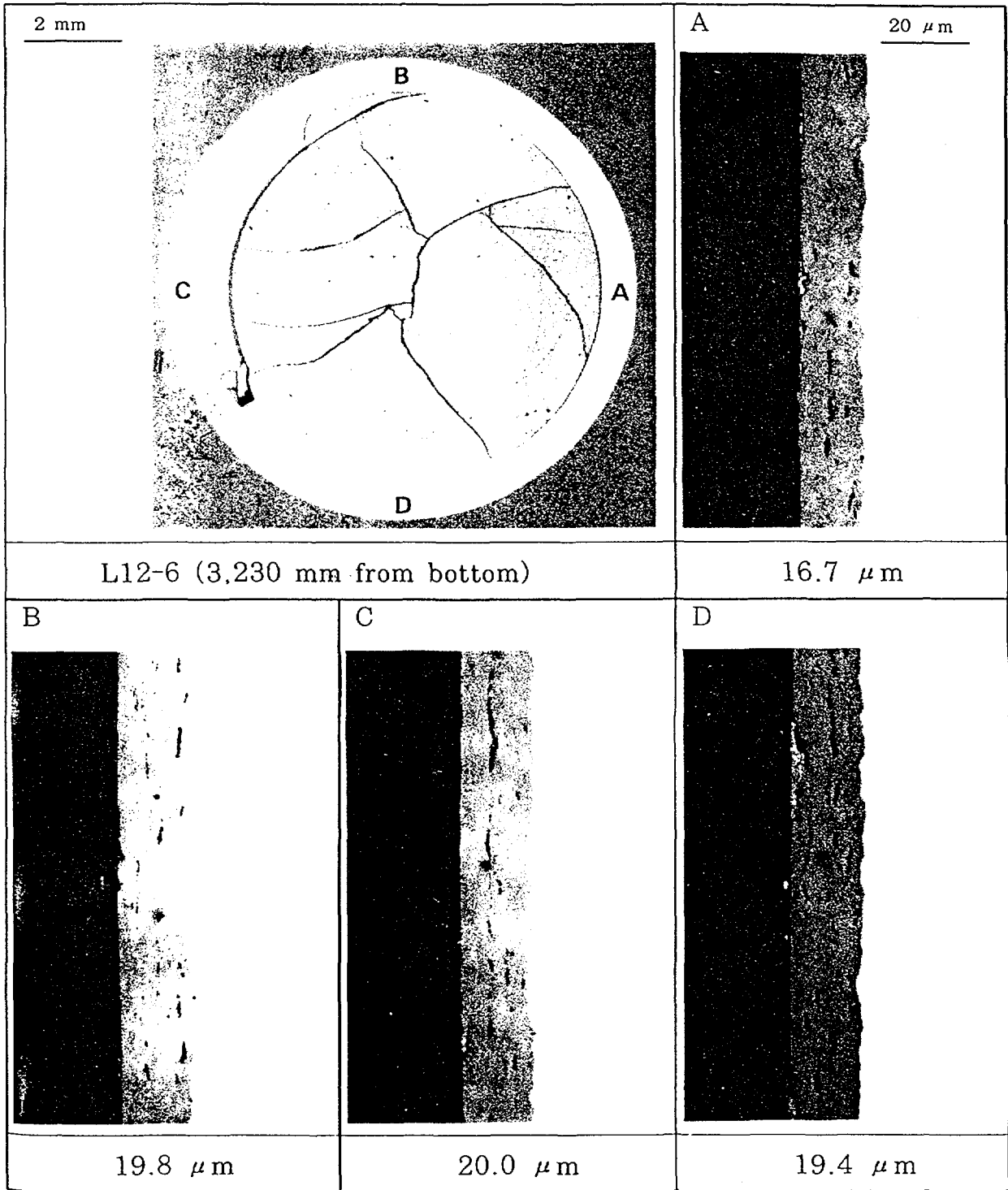


Fig. 7. Oxide Layer on Outer Surface of Clad at 3,230mm from Bottom End of Fuel Rod J44-L12.

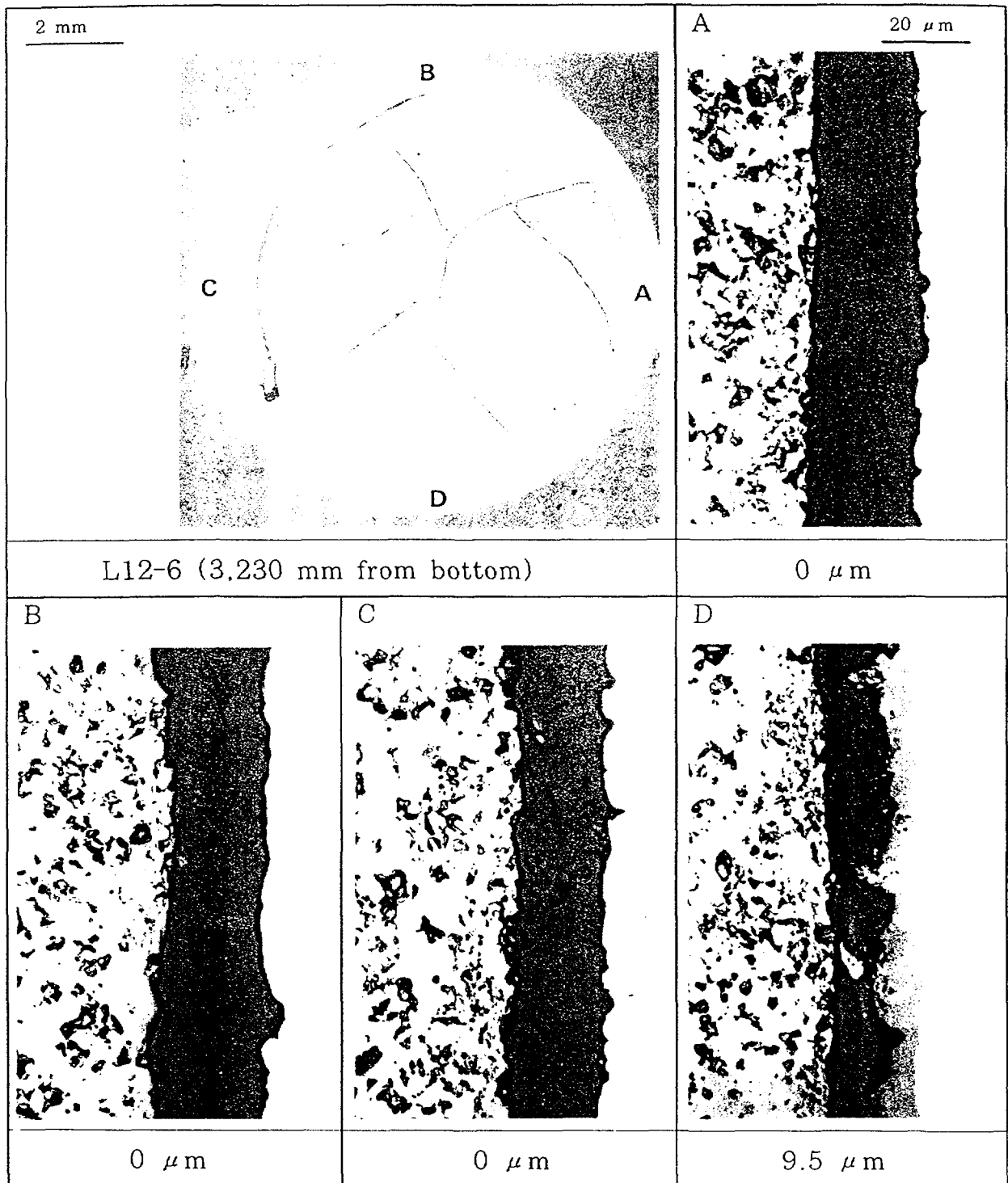


Fig. 8. Oxide Layer on Inner Surface of Clad at 3,230mm from Bottom End of Fuel Rod J44-L12.

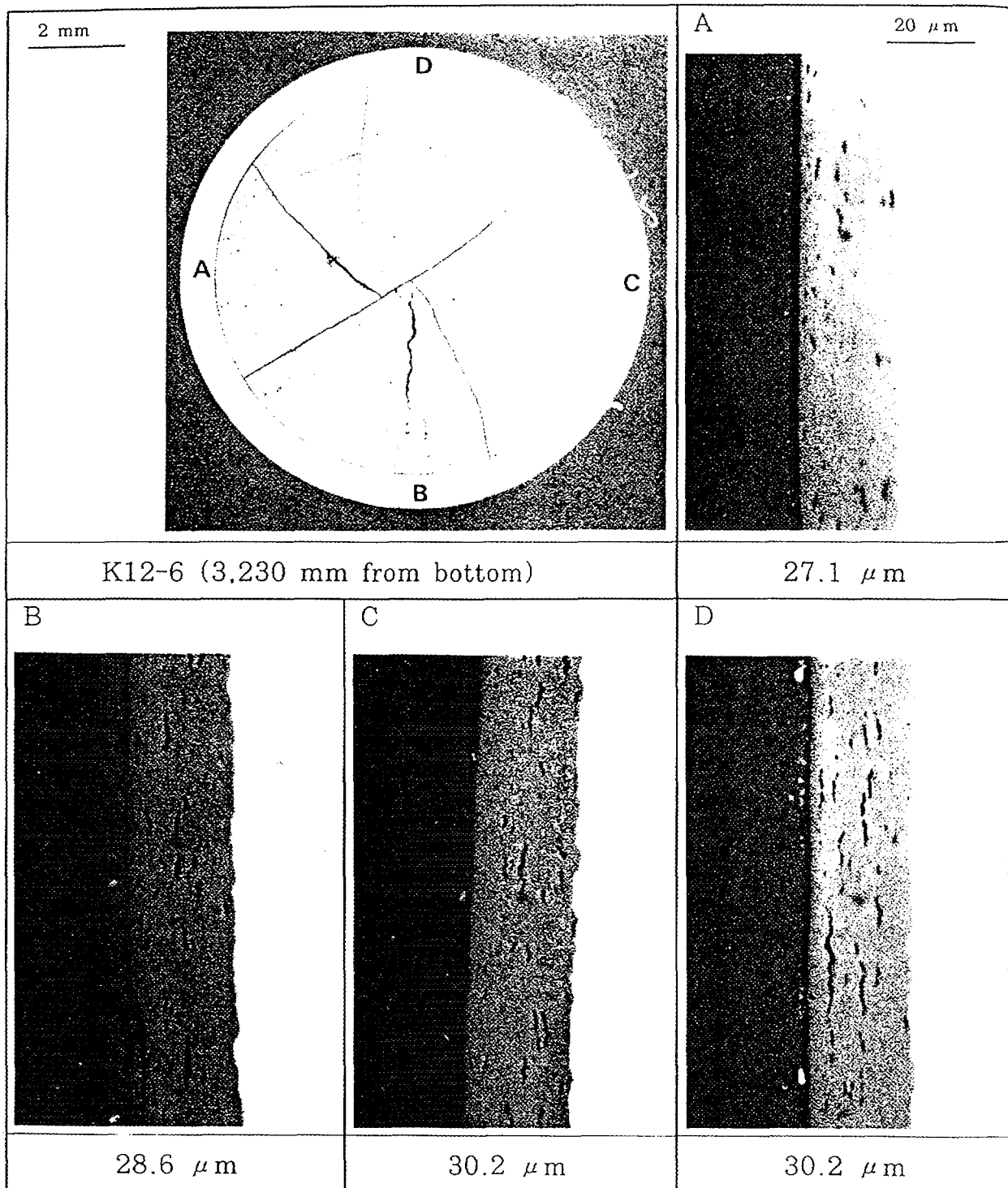


Fig. 9. Oxide Layer on Outer Surface of Clad at 3,230mm from Bottom End of Fuel Rod J44-K12.

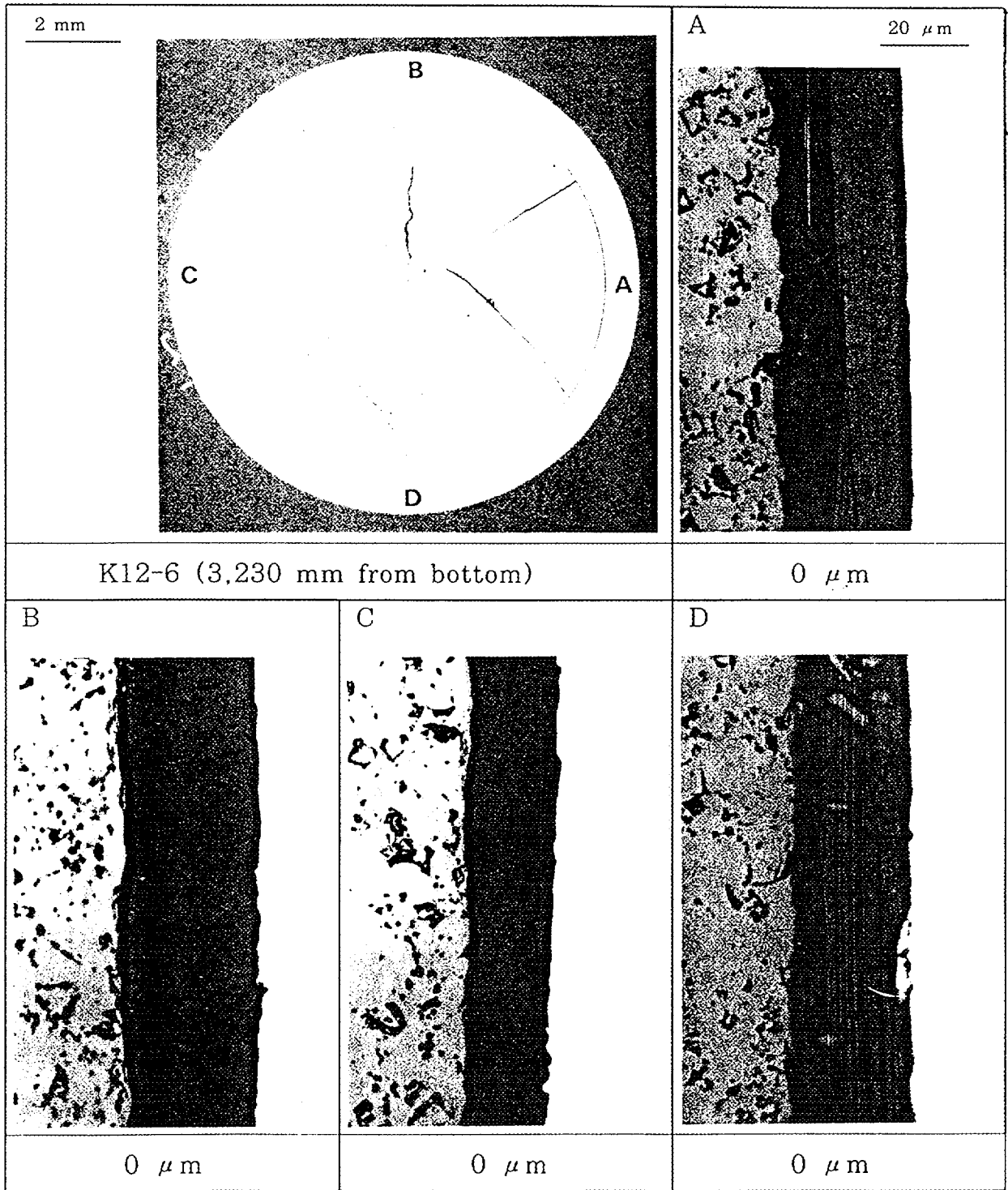


Fig.10. Oxide Layer on Inner Surface of Clad at 3,230mm from Bottom End of Fuel Rod J44-K12.

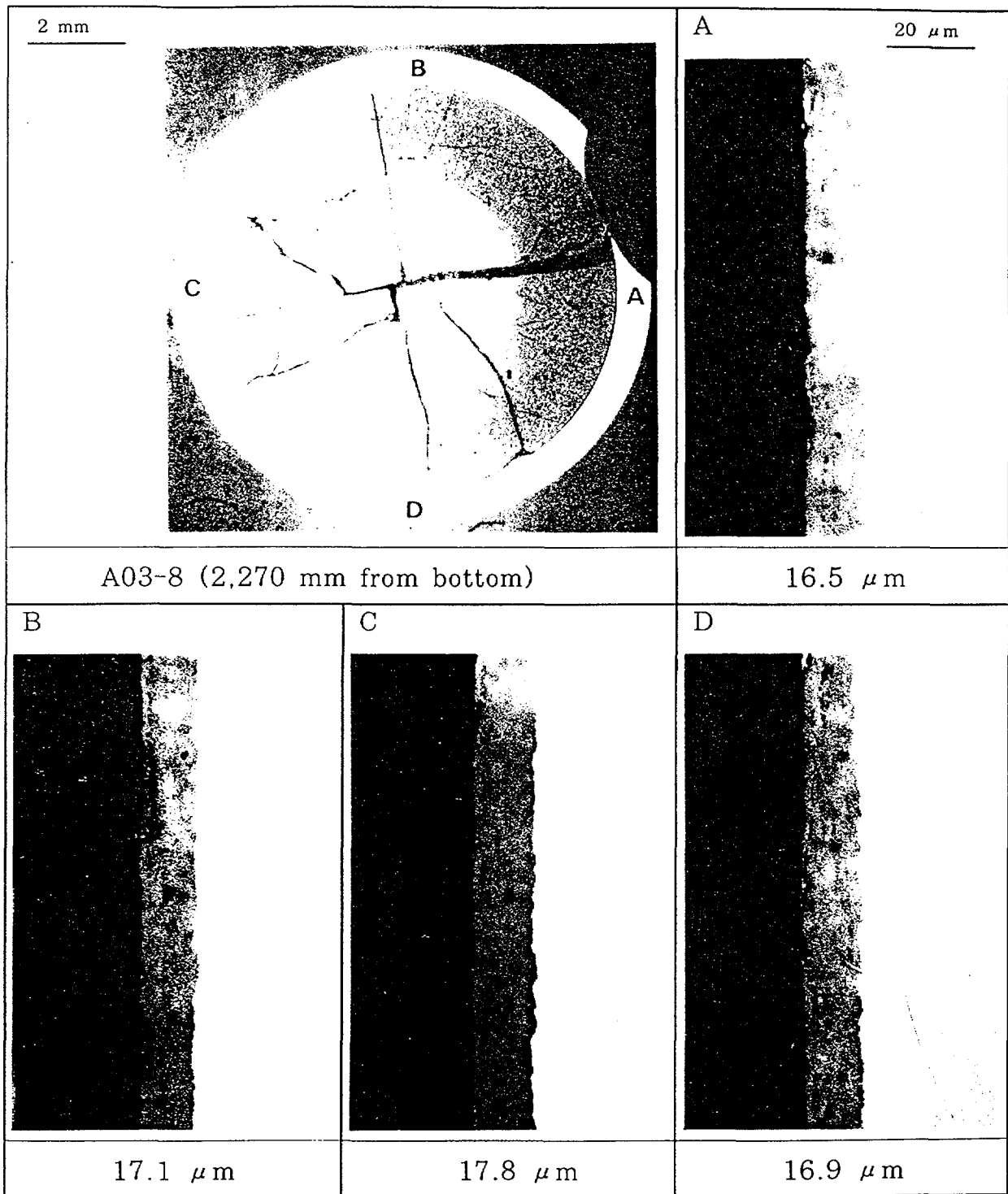


Fig.11. Oxide Layer on Outer Surface of Clad at 2,270mm from Bottom End of Fuel Rod J44-A03.

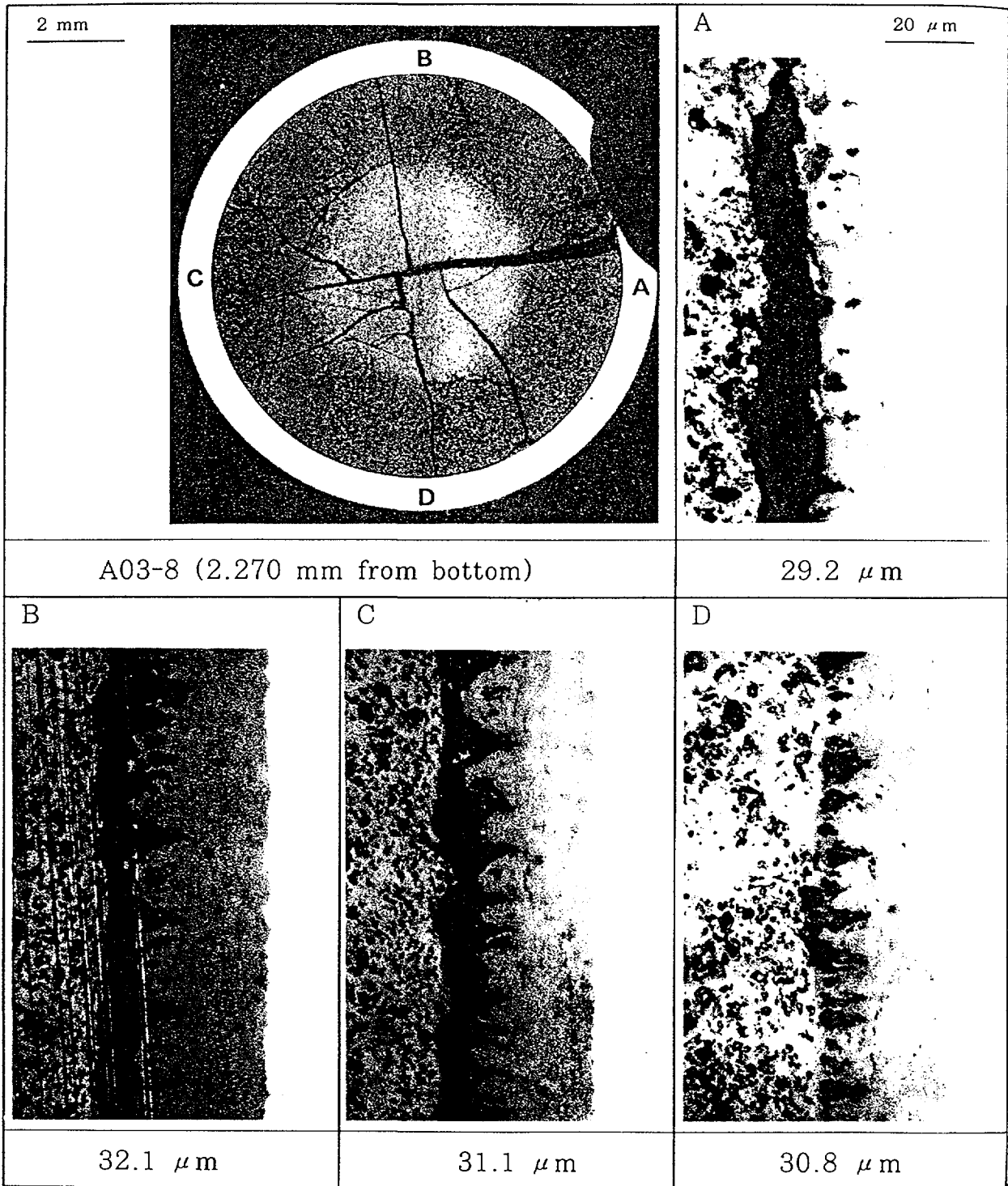


Fig.12. Oxide Layer on Inner Surface of Clad at 2,270mm from Bottom End of Fuel Rod J44-A03.

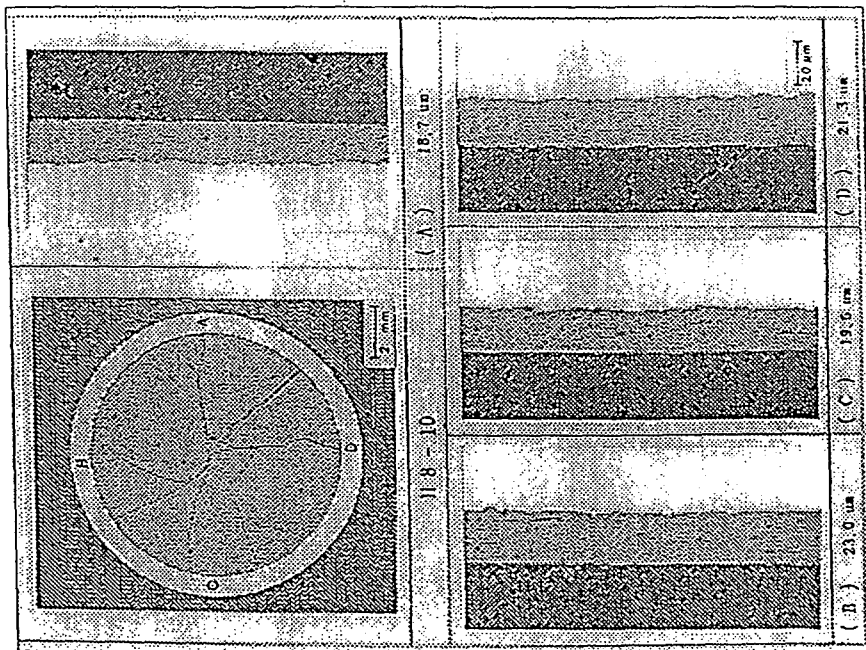
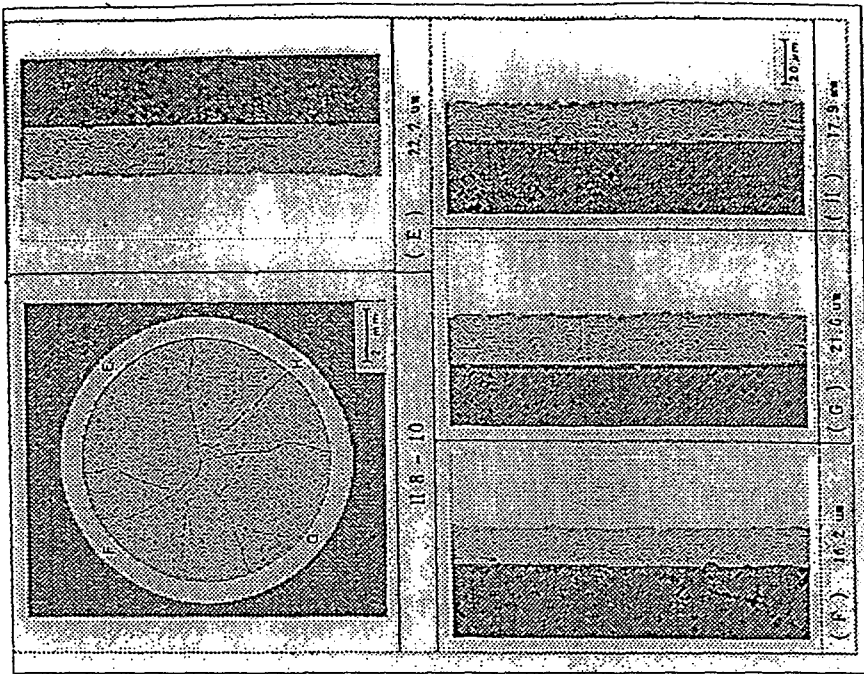


Fig. 13. Oxide Layer on Outer Surface of Clad at 2,490~2,510mm from Bottom End of Fuel Rod J44-H08.



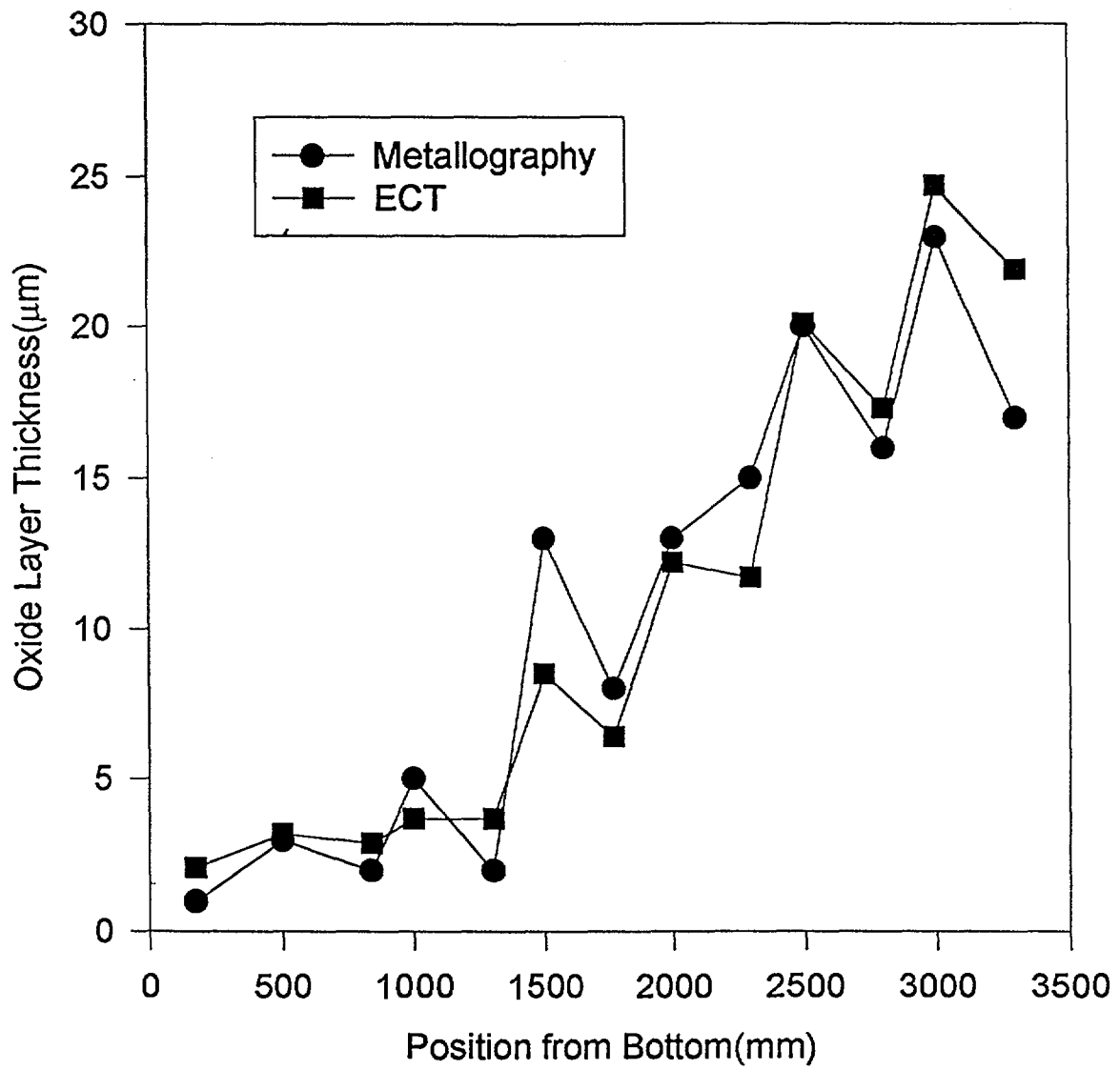


Fig.14. Comparison of Oxide Layer Thickness Measurements by both Eddy Current Testing and Metallographic Examination.

## 제4장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도

핵연료봉 산화층 두께측정시험기술을 개발함으로써 조사 핵연료봉 산화층 두께를 측정하고 연소도에 따른 산화층 두께를 분석하였다. 이로 같은 핵연료봉 산화층 두께시험을 수행하여 조사 핵연료 특성연구가 가능하였다.

## 제5장 연구개발결과의 활용계획

핵연료봉 산화층 두께측정시험기술을 이용하여 조사 핵연료봉 산화층 두께를 측정하고 연소도에 따른 산화층 두께를 분석함으로써 조사 핵연료봉 건전성평가 및 핵연료 특성연구에 활용될 것이다.

## 제6장 참고문헌

- [1] P. Barbero, " Post-Irradiation Analysis of the Gundremmingen BWR Spent Fuel," EUR-6301(1978).
- [2] L. A. Neima가 and H. Ocken, " Post-Irradiation Examination of Light Water Reactor Fuel: a United States Perspective," in Post Irradiation Examination, British Nuclear Energy Society, London(1980).
- [3] Ian J. Hastings et al., " Post-Irradiation Behavior of UO<sub>2</sub> Fuel II : Fragments at 175 to 275°C in Air," Nucl. technol., 68, 40(1985).
- [4] Ian J. Hastings et al., " Post-Irradiation Behavior of Naturally and Artificially Defected UO<sub>2</sub> Fuel Elements at 250°C in Air," Nucl. technol., 68, 418(1985).
- [5] J. B. Ainscough, B. W. Oldfield and J. O. Ware, " Isothermal Grain Growth Kinetics in Sintered UO<sub>2</sub> Pellets," J. Nucl. Mater., 49, 117(1973/74).
- [6] D. L. Douglass, " The Metallurgy of Zirconium," IAEA, p. 389(1971).

서지 정보 양식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-1349/99					
제목/부제					
조사 핵연료봉 산화층 두께측정시험기술개발					
연구책임자 및 부서명		박성원(사용후핵연료 특성 계량화 기술개발)			
연구자 및 부서명					
구대서(주저자, 사용후핵연료 특성 계량화 기술개발) 박성원(사용후핵연료 특성 계량화 기술개발) 김종훈(사용후핵연료 특성 계량화 기술개발) 서항석(조사후시험시설운영) 민덕기(핵연료주기시험팀) 김은가(조사후시험시설운영) 전용범(조사후시험시설운영) 방경식(사용후핵연료 특성 계량화 기술개발)					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1999. 6
페이지	p. 27	도 표	있음(○), 없음( )	크 기	29.7 cm
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비( ), ___급비밀			보고서종류	기술보고서
연구위탁기관				계약번호	
초록(15-20줄내외)					
<p>조사후 핵연료봉 산화층 두께를 측정하고 핵연료의 특성을 연구하기 위하여 핵연료봉의 산화층두께 측정시험기술을 개발하였다. 핵연료봉 산화층두께를 측정하고 분석하였다. 3주기연소 핵연료봉 외부 산화층 두께는 20~30<math>\mu</math>m 정도였고 내부 산화층의 두께는 0~10<math>\mu</math>m 였으나 핵연료봉 피복관이 터진 내부 산화층두께 약 30<math>\mu</math>m였다. 4주기 연소 핵연료봉 산화층이 1주기 연소 핵연료봉 산화층보다 대체로 2배 정도 두껍게 형성되었으며 산화층은 핵연료봉 하부에서 얇게 형성되고 핵연료봉 상부로 진행함에 따라 증가하여 핵연료봉 하단 2500-3000mm 영역에서 산화층 두께가 최대였다가 감소하는 경향을 나타내었다. 4주기 연소 핵연료봉 내부 및 외부 산화층두께는 핵연료봉 하단 750mm에서 핵연료봉 상부 3500 mm 까지 내부 산화층 두께는 8<math>\mu</math>m정도인 반면 외부 산화층 두께는 핵연료봉 하단 750-1000mm 에서 8<math>\mu</math>m 정도이며 핵연료봉 상부로 진행함에 따라 증가하여 핵연료봉 상부 3500mm에서 최대 22<math>\mu</math>m였다. 조사후 핵연료봉 산화층 두께측정기술은 핵연료봉의 안전성을 평가하고 핵연료의 노내거동연구에 활용될 것이다.</p>					
주제명키워드 (10단어 내외)					
조사핵연료, 산화층두께, 측정기술					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-1349/99					
Title/Subtitle		Development of Examination Technique for Oxide Layer Thickness Measurement of Irradiated Fuel Rods			
Project Manager and Department		S. W. Park(Department of Spent Fuel Examination Technology)			
Researcher and Dept.					
D. S. Koo(Main Writer, Department of Spent Fuel Examination Technology) S. W. Park(Department of Spent Fuel Examination Technology) J. H. Kim(Department of Spent Fuel Examination Technology) H. S. Seo(Department of Post Irradiation Examination Facility) D. K. Min(Nucler Fuel Cycle Examination Team) E. K. Kim(Department of Post Irradiation Examination Facility) Y. B. Chun(Department of Post Irradiation Examination Facility) K. S. Bang(Department of Spent Fuel Examination Technology)					
Pub. Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Pub. Date	1999, 6
Page	p.27	III & Tab.	yes(○), no( )	Size	29.7 cm
Note					
Classified	Open(○), Restricted( ), ___Class Document			Report Type	Technical Rep.
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)					
<p>Technique for oxide layer thickness measurement of irradiated fuel rods was developed to measure oxide layer thickness and study characteristic of fuel rods. Oxide layer thicknesses of irradiated fuels were measured, analyzed. Outer oxide layer thicknesses of 3 cycle-irradiated fuel rods were 20~30<math>\mu</math>m, inner oxide layer thicknesses 0~10<math>\mu</math>m and inner oxide layer thicknesses on cracked cladding about 30<math>\mu</math>m. Oxide layer thicknesses of 4 cycle-irradiated fuel rods were about 2 times as thick as those of 1 cycle-irradiated fuel rods. Oxide layer on lower region of irradiated fuel rods was thin and oxide layer from lower region to upper region indicated gradual increase in thickness. Oxide layer thickness from 2500 to 3000mm showed maximum and oxide layer thicknesses from 3000 to top region of irradiated fuel rods showed decreasing trend. Inner oxide layer thicknesses of 4 cycle-irradiated fuel rod were about 8<math>\mu</math>m at 750~3500mm from the bottom end of fuel rod. Outer oxide layer thicknesses were about 8<math>\mu</math>m at 750~1000mm from the bottom end of fuel rod. These indicated gradual increase up to upper region from the bottom end of fuel rod and showed maximum, 22<math>\mu</math>m in thickness at 3500mm from the bottom end of fuel rod. Oxide layer thickness technique will apply safety evaluation and study of reactor fuels.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)					
Irradiated Fuel Rods, Oxide Layer Thickness, Measurement Technique					