

## 제어봉이탈사고시의 핵연료봉 거동 분석 (Analysis of Fuel Rod Behavior under Rod Ejection Accident)

이찬복, 김오환, 임익성, 유호식, 정진곤  
한국원자력연구소

### 요 약

제어봉이탈사고시의 핵연료봉 거동을 연구로에서의 반응도사고 모사실험 결과와 기존의 핵연료 손상기준을 비교하여 분석하였다. 반응도사고시 고연소도 핵연료의 손상은 주로 PCMI 기구로 발생하는데, 고연소도에서의 피복관의 부식 및 수소화 그리고 방사선조사에 의한 연성감소와 산화층 박리로 인한 수소화합물의 국부적인 집중화로 인한 피복관의 현저한 연성감소가 주요 원인이었다. 기존의 핵연료 손상기준에서 DNB가 일어날때 핵연료 손상이 발생한다는 가정은 낮은 핵연료엔탈피에서 핵연료 손상이 일어나는 것과 동일함을 확인하였으며, 현재까지 발표된 실험자료와 핵연료손상기구의 분석을 통해 연소도에 따른 반응도사고시의 핵연료손상기준을 예비적으로 유도하였다. 핵연료손상은 낮은 연소도에는 DNB로 발생하고 고연소도에서는 PCMI로 발생할수 있기 때문에, 과도상태에서의 고연소도 핵연료의 건전성 유지를 위해서는 피복관 산화층의 박리로 인한 수소화합물의 집중화로 피복관의 연성이 감소되는 것을 방지할 필요가 있다.

### 1. 개요

1994년 프랑스의 CABRI 원자로에서 수행된 연소도 63 MWD/KGU 핵연료에 대한 반응도사고 모사 실험에서 매우 낮은 핵연료 엔탈피인  $\sim 30$  cal/gm에서 핵연료 손상이 발생한 것으로 보고된 후[1], 고연소도 핵연료의 반응도 사고시의 거동에 대해 세계적인 관심이 집중되었다. 그리하여 1995년 9월에는 프랑스의 Cadarache에서 OECD/NEA가 주관한 "Specialist Meeting on Transient Behavior of High Burnup Fuel"이 열려서 이 문제에 대한 각국의 연구기관, 규제기관 및 핵연료 설계/제조사들이 모여 서로의 연구 결과를 발표하고 의견을 교환하였다. 이 회의 결과, 반응도 사고시 고연소도 핵연료가 기존의 예상보다는 낮은 에너지에서 손상이 일어날 수 있지만, 이로 인해 현재 가동중인 원자로의 안전성에는 크게 문제가 되지 않는다고 의견이 모아졌다. 그러나 고연소도 핵연료에의 거동에 대한 이해가 현재 충분하지 않은 상태이기 때문에, 상용핵연료의 연소도를 앞으로 증가시키기 위해서는 고연소도 핵연료에 대한 실험 및 성능자료의 생산이 필요하며, 기존의 핵연료 손상 한계를 연소도의 영향을 고려하여 재평가하는 것이 필요한 것으로 인식되었다.

여기서는 가압경수로에서 제어봉이탈사고시의 핵연료 거동을 과도상태 핵연료봉성능분석코드인 FRAP-T6[2]를 사용하여 예측하고, 그 동안 발표된 반응도 사고시의 핵연료 거동과 관련된 실험 자료를 통해 기존의 핵연료 손상기준을 재평가하고, 연소도 증가에 따라 핵연료 손상이 일어나는 기구가 변하는 것을 도출하여 예비적인 연소도에 따른 핵연료손상기준을 유도하였다.

### 2. 제어봉이탈사고시의 핵연료봉 거동

#### 2.1 반응도 사고시의 핵연료 손상

가압경수로에서 제어봉이탈사고시 핵연료봉출력은 급격히 증가하는데, 과도상태 핵연료봉성능분석코드인 FRAP-T6로 묘사한 HZP(Hot Zero Power) 및 HFP(Hot Full Power) 조건에서의 제어봉이탈사고시의 핵연료 중심온도, 핵연료 엔탈피 및 피복관 변형률 변화는 각각 그림 1 및 2와 같다. 핵연료 과도출력 펄스의

폭은 HZP의 경우 약 35 msec, HFP의 경우 0.8 sec로써 매우 짧으며, 핵연료 엔탈피 및 피복관 응력은 짧은 시간내에 급격히 증가함을 알 수 있다.

제어봉이탈사고해석시 기존에 사용되고 있는 핵연료 손상기준은[3,4] 조사되지 않았거나 낮은 연소도까지 조사된 핵연료의 실험자료에 근거한 것으로써, 가압 경수로의 설계에서는 핵연료반경방향평균엔탈피가 200 cal/gm 이상이거나 DNB가 발생할때 핵연료 손상이 일어나는 것으로 가정하고 있다. 그러나 최근의 실험결과에 의하면 고연소도 핵연료의 손상은 현재의 기준보다 낮은 핵연료엔탈피에서 손상이 일어날수 있는 것으로 보고되었는데, 그림 3은 연구로에서 수행된 반응도사고 모사실험 결과를 정리한 것이다. 연소된 핵연료에 대한 실험중에서 일부는 PCMI(PelletCladding Mechanical Interaction) 손상기구에 의해 연소도 및 실험 조건에 따라 각각 85 cal/gm(CDC 실험), 60 cal/gm(NSRR HBO-1 실험) 혹은 30 cal/gm(CABRI Na-1 실험)에서 손상이 일어났다. 연소된 핵연료는 피복관의 연성감소 및 소결체와 피복관의 반응 등으로 인해 PCMI 기구로 낮은 에너지에서 핵연료 손상이 발생하였다. 한편 일본에서는 CDC 실험에서[3] 85 cal/gm에서 핵연료 손상이 발생한 것에 따라 핵연료 손상기준을 85 cal/gm으로 이미 사용하여 왔으며, 그 후 JAERI의 NSRR 원자로에서 반응도 사고시의 핵연료 거동에 대한 실험을 계속하여 왔다.

제어봉이탈사고시의 또 다른 핵연료 손상기준은 DNB(Departure from Nucleate Boiling) 발생이다. 제어봉이탈사고시 핵연료의 급격한 출력 증가로 인해 피복관과 냉각수 사이의 열전달에 이상이 일어나는 DNB가 발생한다. 연료봉의 높은 열속으로 인해 DNB가 일어나면 피복관의 온도가 급격히 증가하게되며, 피복관의 국부적인 온도 증가로 인해 핵연료 손상이 일어날 수 있다. 그러나 DNB가 발생한다고 해서 핵연료 손상이 바로 일어나지는 않는 것으로 실험 결과 밝혀졌다[5]. DNB가 일어나는 조건은 연료봉의 출력 및 열속, 냉각수의 온도, 유량, 압력 등의 운전조건에 영향을 받기 때문에 원자로 및 핵연료 설계조건에 따라 변한다. 1000 MWe급 한국 표준형 PWR에서 제어봉이탈사고시의 핵연료엔탈피에 따른 DNBR은 그림 4와 같다. DNBR이 1.3 이하일때 DNB가 발생한다고 가정할 때, DNB가 일어나는 핵연료엔탈피를 보면, HZP 조건에서는 초기 엔탈피 17.1 cal/gm에서 최종 엔탈피 64 cal/gm으로 증가하면 DNB가 발생하였고, HFP 조건에서는 최종엔탈피 75 ~ 80 cal/gm에서 DNB가 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 DNB가 발생할때 핵연료 손상이 일어난다고 가정하는 것은 기존의 다른 핵연료 손상기준인 핵연료엔탈피 200 cal/gm보다 상당히 낮은 핵연료 엔탈피에서 손상이 일어나는 것으로 가정할 것과 같으며, 1000 MWe급 한국 표준형 PWR에서는 일본에서 적용하고 있는 핵연료엔탈피 85 cal/gm의 핵연료 손상기준보다도 보수적으로 낮은 기준을 사용하고 있음을 알 수 있다.

## 2.2 Pellet Cladding Mechanical Interaction

반응도사고 연구로 모사실험 결과, 연소된 핵연료는 PCMI로 인해 손상될수 있는 것으로 밝혀졌다. PCMI로 핵연료가 손상되는지 여부는 연소도에 따른 피복관의 연성 감소가 주요 변수다. 연구로에서 수행된 반응도사고 모사실험 결과는 그림 3에 요약되어 있다. 피복관의 연성이 충분한 경우에는 피복관 소성 변형률 2~3% 까지도 핵연료 손상이 일어나지 않는 반면에, CABRI의 Na-1의 경우 낮은 피복관의 변형률에서 핵연료 손상이 일어났다[6]. CABRI Na-1의 핵연료 피복관은 산화층 박리가 심하게 일어난 것으로 이로 인해 국부적인 수소화가 진행되어 피복관의 연성이 현저히 낮아졌을 가능성이 높다. 또한 동일한 연소도(63 MWD/KGU)이면서 산화층의 박리가 일어나지 않은 핵연료에 대한 실험에서 핵연료엔탈피 95 cal/gm(Na-4 실험) 및 105 cal/gm(Na-5 실험)에서 핵연료가 손상되지 않은 것으로 볼때 고연소도 소결체의 Rim Effect에 의한 영향은 크지 않은 것으로 보인다[8].

피복관의 연성은 피복관의 부식, 수소함량 및 속중성자 조사량 등의 영향을 받는다. 그러나 반응도사고의 설계해석에 적용하기 위해서는 최종적으로 연소도에 따른 피복관의 연성변화를 유도하는것이 바람직하다. 속중성자 조사량은 핵연료의 노내 거주기간에 비례하여 증가하며, 피복관의 부식과 수소함량은 서로 직접 관련이 있는 인자들로써, 피복관의 부식으로 인해 생성된 수소중 일부가 피복관에 흡수되어 수소화합물을 형성하기 때문에 부식이 증가할수록 피복관의 평균수소함량도 증가한다. 피복관에 흡수된 수소는 열확산으로 인해 낮은 온도 영역으로 모이게 되는데, 특히 소결체 사이의 온도가 낮은 영역에서 수소 농도가 높은 것으로 밝혀졌으며, 산화층의 박리가 일어나면 산화층에 의한 열전달 저항이 없어지게 되어 그 부위의 피복관 온도가 주위보다 매우 낮아져서 확산에 의해 수소가 집중적으로 모이게 된다. 피복관의 부식은 피복관의 규격 및 제조조건과 노내에서의 운전 조건에 따라 서로 다를 수 있다. 연소도에 따른 피복관의 부식을 피복관 별로 개략적으로 나타내면 그림 5와 같다. 가압 경수로형 핵연료의 설계에서 피복관의 부식은 대개

100-120  $\mu\text{m}$  까지만 허용하고 있다. 그림 6은[7] 피복관의 산화층 두께에 따른 수소함량을 보여주는데, 100-120  $\mu\text{m}$  산화층 두께일때 수소함량은 최대로 500 ~ 700 ppm 정도임을 알수 있다. 피복관의 연성은 피복관 부식, 수소함량 및 속중성자조사량 외에 피복관내의 수소화합물의 국부적인 분포에 따른 영향도 있음이 밝혀졌다. Garde의 실험결과에 따르면[8], 산화층의 박리가 일어난 피복관에 대해 Burst 시험을 한 결과, 피복관평균수소농도가 731 ppm일때 Total Plastic Circumferential Elongation이 0.58 %, Uniform Plastic Elongation 이 0.05 %로써 매우 낮았다.

### 2.3 분석 및 토의

PCMI로 인한 피복관의 변형률 변화는 핵연료 엔탈피와 핵연료 겹이 주요 변수다. 그림 7은 핵연료 연소도에 따른 핵연료 겹의 변화를 나타내는데, 빠른 경우에는 연소도 24 MWD/KGU 이상에서 핵연료 겹이 사라질수 있음을 알수 있다. 그림 8는 핵연료 출력별로 핵연료가 HZP 상태로 되었을때 소결체와 피복관의 열팽창 차이로 인해 형성되는 핵연료 겹을 계산한 것이다. 노심 평균출력 상태에서 핵연료의 소결체와 피복관이 접촉한후, 연료봉의 출력이 영출력이 될때는 약 15 $\mu\text{m}$ 의 반경방향 겹이 형성되며 이는 피복관의 변형률에서 약 0.3% 차이를 준다. 피복관의 변형률 0.3 %는 산화층의 박리가 일어난 피복관의 연성과 비교하면 무시하지 못할 크기이기 때문에, 연료봉의 반응도사고 모사 실험의 결과 해석에서 초기의 핵연료 겹 크기가 정확히 고려될 필요가 있다. 그림 9는 핵연료겹과 핵연료엔탈피에 따른 피복관의 변형률 변화를 나타내는데, 피복관의 연성이 결정되면 이를 통해 PCMI로 핵연료 손상이 일어날 수 있는 핵연료엔탈피의 크기를 결정할 수 있다.

CABRI Na-1 실험 결과를 분석하면, 핵연료엔탈피 30 cal/gm - 초기엔탈피 15 cal/gm 및 엔탈피증가량 15 cal/gm - 에서의 PCMI 핵연료 손상은 피복관 변형률 0.2 %이하에서 발생한 것으로 추정된다. 이는 산화층의 박리가 일어난 피복관에 대한 Garde의 Burst 시험결과와도[8] 일치하는 것으로써, 산화층의 박리가 일어나면 수소화합물의 집중화가 발생하여 피복관의 연성이 현저하게 감소함을 알수 있다. 이를 토대로하여 반응도사고시의 예비적인 핵연료손상기준을 도출하면 표 1과 같다. 연소도 30 MWD/KGU 이상에서는 방사선 조사 및 피복관 산화로 인한 피복관의 연성 감소뿐만 아니라 산화층의 박리로 인한 수소화합물의 집중화에 따른 연성 감소가 고려되었으며, PCMI로 인한 피복관의 변형률 예측에서 피복관의 크립에 의한 핵연료 겹의 감소를 최대로 가정함으로써 보수성을 주었다. 연소도 30 MWD/KGU 이하에서 DNB 외에 핵연료엔탈피 85 cal/gm 조건을 둔 것은 핵연료 설계 및 원자로의 운전 조건에 따라 85 cal/gm 이상에서 DNB가 일어나는 경우에 대비한 것이며, HFP 조건의 손상기준에서 엔탈피 증가량이 HZP와 다른 이유는 HFP 경우에는 과도상태 초기에 이미 핵연료 겹이 없기 때문이다. 따라서 가압경수로의 제어봉이탈사고시 핵연료손상은 낮은 연소도에는 DNB로 발생하고, 피복관의 연성이 감소하고 핵연료겹이 사라지는 높은 연소도에서는 PCMI로 발생할수 있기 때문에, 고연소도핵연료의 과도상태에서의 건전성 유지를 위해서는 내부식성의 피복관이 사용되어 산화층의 박리로 인한 수소화합물의 집중화로 피복관의 연성이 감소되는 것을 방지할 필요가 있다.

### 3. 결론

제어봉이탈사고시의 핵연료 거동을 연구에서의 반응도사고 모사실험 결과를 기존의 핵연료 손상기준과 비교하여 분석하였다. 기존의 핵연료 손상기준에서 DNB로 인해 핵연료 손상이 발생한다는 기준은 낮은 핵연료 엔탈피에서 핵연료 손상이 일어나는 것과 같음을 확인하였다. 고연소도 핵연료의 손상은 PCMI 기구로 일어날 수 있는데, 고연소도에서의 피복관의 부식 및 수소화 그리고 방사선조사에 의한 연성감소와 산화층 박리로 인한 수소화합물의 국부적인 집중으로 인한 현저한 연성감소가 주요 원인이었다. 현재까지 발표된 자료에 근거하여 예비적인 연소도에 따른 반응도사고시의 핵연료손상기준을 유도하였으며, 핵연료손상은 낮은 연소도에는 DNB로 발생하고, 고연소도에서는 PCMI로 발생할수 있기 때문에, 고연소도핵연료의 과도상태에서의 건전성 유지를 위해서는 피복관 산화층의 박리로 인한 수소화합물의 집중화로 피복관의 연성이 감소되는 것을 방지할 필요가 있다.

### 참고문헌

- (1) F. Schmitz et al., "Investigation of the behavior of high burnup PWR fuel under RIA conditions

- in the CABRI test reactor", 22nd Water Reactor Safety Information Meeting, October 24-26, 1994
- (2) L.J. Siefken et al., "FRAP-T6 : A computer code for the transient analysis of oxide fuel rods", NUREG/CR-2148, 1981.
  - (3) P.E. Macdonald et al., "Assessment of Light-water-reactor fuel damage during a reactivity-initiated accident". Nuclear Safety, Vol.21-No.5, 1980.
  - (4) U.S. NRC, Assumptions used for evaluating a control rod ejection accident for pressurized water reactors, Reg. Guide 1.77, May 1974.
  - (5) R. V. Houten, Fuel Rod Failure as a Consequence of Departure from Nucleate Boiling or Dryout, NUREG-0562, USNRC, 1979.
  - (6) J. Papin et al, The behavior of irradiated fuel under RIA transients : interpretation of the CABRI experiments, OECD Specialist Meeting on Transient Behavior of High Burnup Fuel, Cadarache, France, 12-14 Sept. 1995.
  - (7) A. Garde, Effects of irradiation and hydriding on the mechanical properties of Zircaloy-4 at high fluence, Zirconium in the Nuclear Industry : Eighth International Symposium, ASTM STP 1023, pp. 548-569, 1989.
  - (8) A. Garde et al., Effects of hydride precipitate localization and neutron fluence on the ductility of irradiated Zircaloy-4, Zirconium in the Nuclear Industry : Eighth International Symposium, ASTM STP 1295, Sept. 11-14, 1995(to be issued).

Table 1. Preliminary fuel failure limits

Initial condition	Burnup (MWD/kgU)	Fuel failure limit
HZP	0 - 30	DNB or fuel enthalpy 85 cal/gm
	> 30	fuel enthalpy increase 15 cal/gm
HFP	0 - 30	DNB or fuel enthalpy 85 cal/gm
	> 30	fuel enthalpy increase 7 cal/gm

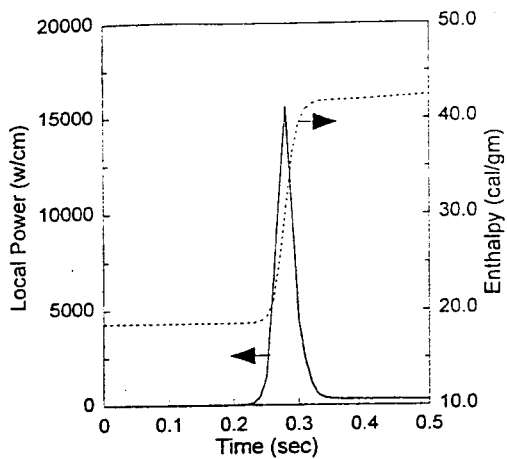


Fig. 1 Predicted transient fuel behavior during the HZP rod ejection transient

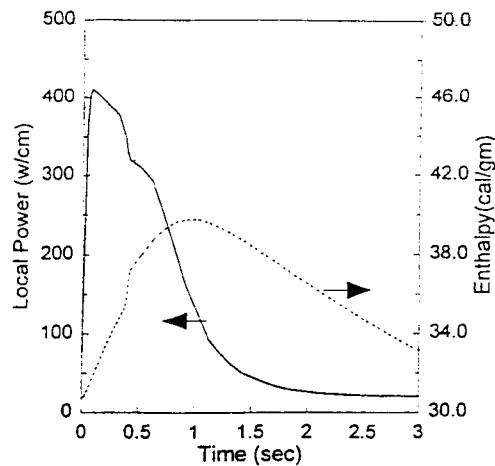


Fig. 2 Predicted transient fuel behavior during the HFP rod ejection transient

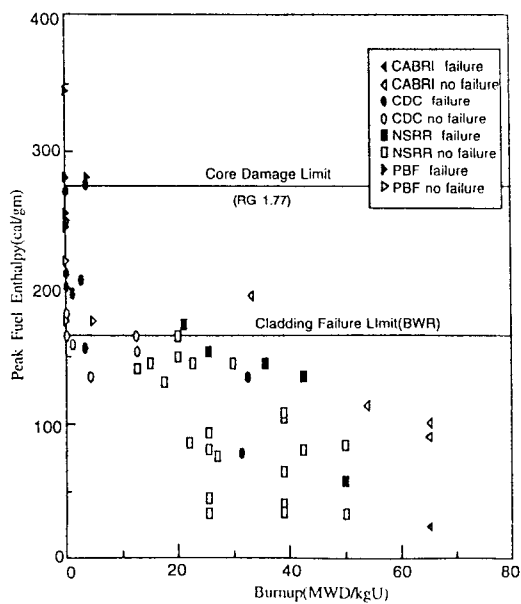
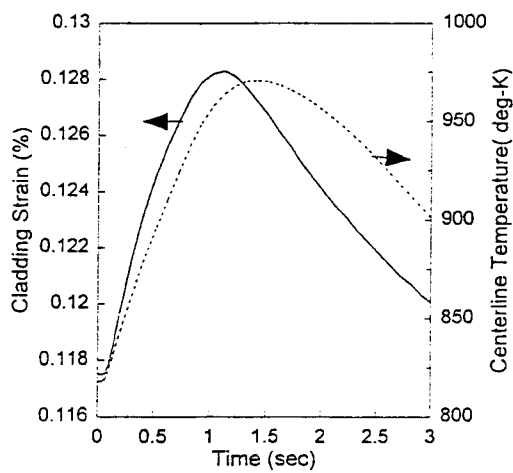
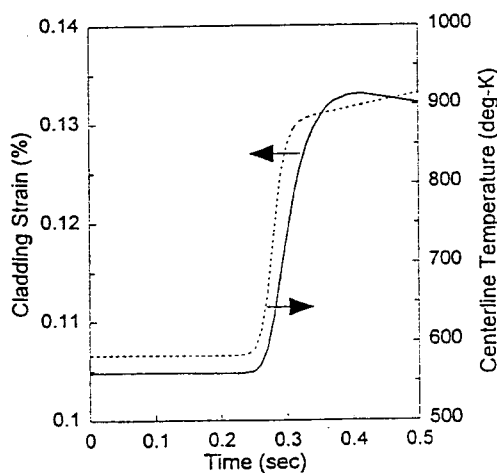


Fig. 3 Simulated RIA test results in the research reactor

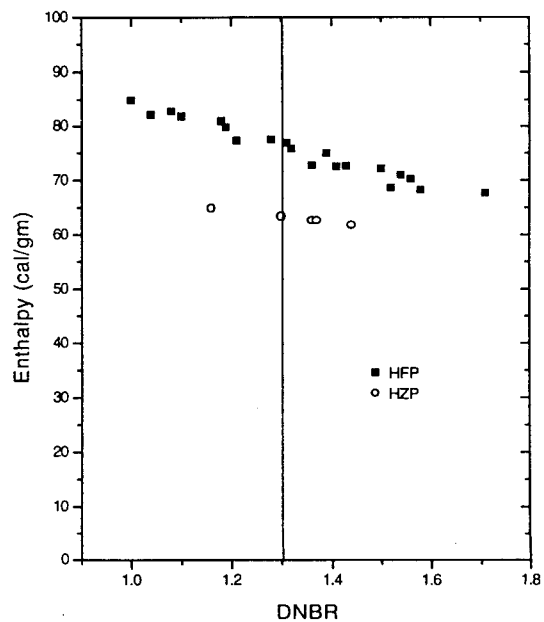


Fig. 4 Fuel enthalpy versus DNBR in 1000MWe Korea PWR

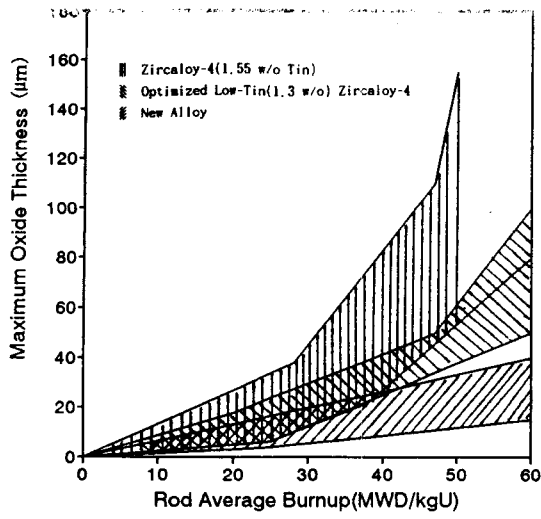


Fig. 5 Schematic view of cladding maximum oxide thickness as a function of burnup

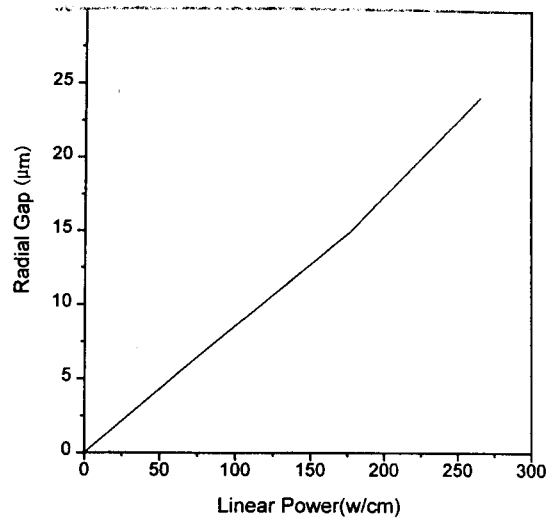


Fig. 8 Fuel radial gap in the cold condition as a function of linear power at fuel gap closure

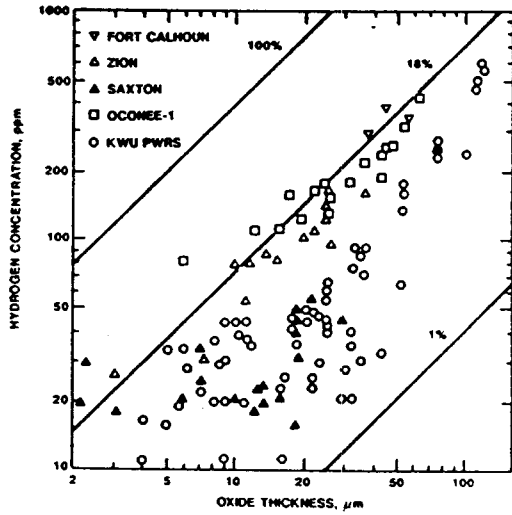


Fig. 6 Hydrogen uptake as a function of oxide thickness for Zircaloy-4 cladding irradiated in PWR

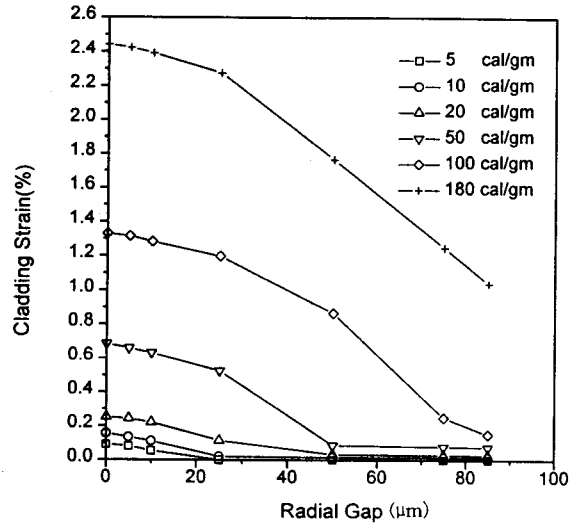


Fig. 9 Cladding strain as a function of fuel enthalpy increase and fuel radial gap

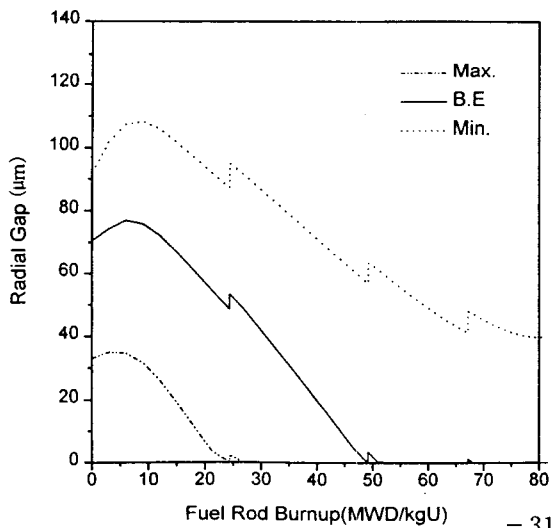


Fig. 7 Variation of fuel radial gap with burnup