

루프활용 핵연료 재계장 조사 시험

The Re-instrumented Irradiation Test of Nuclear Fuel using Fuel
Test Loop

KAERI

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2011년도 핵연료 하나로 조사시험과 관련하여 “핵연료 종합성능 검증 조사시험기술 개발” 과제에서 수행한 “루프 활용 핵연료 재계장 조사 시험”에 대한 기술현황 분석 보고서로 제출합니다.



2011년 7월

과 제 명 : 핵연료 종합성능검증 조사기술개발

주 저 자 : 이 철 용

공 저 자 : 정 창 용
홍 진 태
안 성 호
주 기 남

요 약 문

FTL를 대상으로 재계장된 연료봉에 대해 조사시험과 관련된 기술현황을 분석하였다. 이를 위해 노르웨이 HALDEN을 중심으로 개발된 재계장 기술현황과 국내에서 수행된 기술현황을 분석하였다.

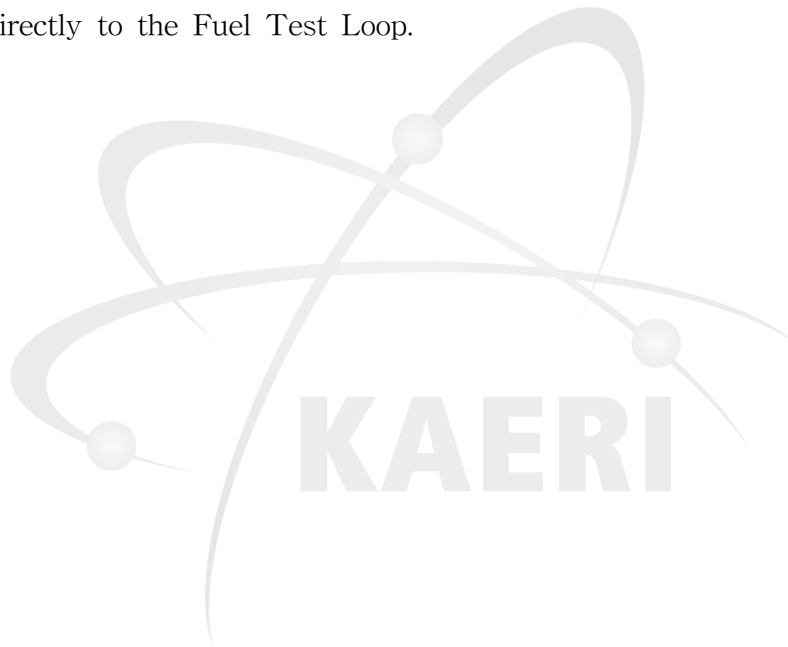
HALDEN 의 재계장 장비 중 천공장치는 최근에도 제작되었지만 재계장에 대한 연구는 90년대 후반 이후로 활발하게 진행되지 않는 실정이다. 한편 국내에는 재계장 기술 개발에 대한 연구가 일부 수행되었지만 실제로 조사시험까지는 진행되지 못하였다. 다만 재계장 조사시험과 유사한 DUPIC 핵연료 조사시험을 통해 축적된 경험과 기술은 앞으로 루프활용 재계장 조사시험에도 직접 활용될 수 있다.



Summary

This report is the status art report on re-instrumentation. The main techniques described in this report are technology that is developed in Norway HALDEN and domestic research facility.

Although re-instrumentation is not gone vigorously after 1990, HALDEN's re-instrumentation equipment was made until recently. In the meantime, re-instrumentation research was gone in domestic research facilities, but irradiation test did not performed actually. But DUPIC fuel irradiation that is similar to re-instrumented irradiation test, so the irradiation test can be utilized directly to the Fuel Test Loop.



CONTENTS

I. Introduction	1
II. Re-instrumented irradiation test of Foreign	2
1. Re-instrumentation of Norway HALDEN	2
2. Re-instrumentation of Japan JMTR	9
3. Re-instrumentation of Netherlands HFR	10
4. Re-instrumentation of France CEA	12
III. Re-instrumented irradiation test of Domestic	14
1. Re-instrumentation of Capsule Development	14
2. Re-instrumentation of DUPIC Fuel Development	16
IV. Consideration for Re-instrumented irradiation test	24
1. Transport of Fuel Rod	24
2. Hotcell for Handling of Fuel Rod	26
3. Manufacture device of Fuel Rod	27
V. Conclusions	31
Reference	32
Appendix	34

목 차

I. 서론	1
II. 외국의 핵연료 재조사시험 기술 현황.....	2
1. 노르웨이 HALDEN의 재조사시험	2
2. 일본 JMTR의 재조사시험.....	9
3. 네덜란드 HFR의 재조사시험.....	11
4. 프랑스 CEA의 재조사시험.....	12
III. 국내 핵연료 재조사시험 기술 현황.....	14
1. 조사시험용 캡슐개발에서의 재조사시험 기술.....	14
2. DUPIC 핵연료 개발에서의 재조사시험 기술.....	16
IV. 재조사시험 시 고려될 사항.....	24
1. 핵연료봉 이송	24
2. 핵연료 취급을 위한 핫셀.....	26
3. 연료봉 제조 장치	27
V. 결론	32
참고 문헌	33
부록	35

그 립 목 차

그림 1. Cutting and Grinding unit	6
그림 2. Freezing and Drilling unit	6
그림 3. Welding and Drying unit	6
그림 4. Encapsulation Bench	7
그림 5. Drilling Equipment for irradiated fuel rod	8
그림 6. Neutron radiography after drilling	8
그림 7. Welding equipment for irradiation fuel rod	9
그림 8. 열전대 설치과정	10
그림 9. JMTR의 Re-instrumented 핵연료봉	10
그림 10. HFR의 Refabricated LWR fuel rod	11
그림 11. 연료봉 천공	13
그림 12. 천공된 소결체	13
그림 13. UO ₂ 소결체 미세가공기기	15
그림 14. 조사후 천공 모의장치	15
그림 15. Diamond hollow drills	16
그림 16. 모의 소결체 천공장치	17
그림 17. 핫셀용 소결체 천공장치	19
그림 18. 모의 알루미나 소결체 천공.....	20
그림 19. 핫셀 소결체 천공 실험	20
그림 20. The damaged pellet in drilling	21
그림 21. 천공된 소결체	21
그림 22. Remote drilling of pellet in hotcell	22
그림 23. Drilled pellet	22
그림 24. Pellets for irradiation test	23
그림 25. 하나로 캐스크	25
그림 26. 이송용 basket	25
그림 27. 캐스크 내부로 바스켓 인입	26
그림 28. IMEF Hotcell	27
그림 29. Before mini-element welding	28
그림 30. After mini-element welding	28
그림 31. He-leak test	29
그림 32. 원격 캡슐 조립기	30
그림 33. The completed assembly of instrumented irradiation test rig	30
그림 34. The process of element assembly	31

I. 서론

재계장에 관한 연구는 고연소도 핵연료에 대한 연구에서 시작되었다. 이를 위해 장기간 연구용 원자로에서 조사시험을 수행하는 것 보다 상용로에서 일정기간 연소시킨 핵연료를 핫셀로 운반하여 열전대나 LVDT와 같은 센서를 장착 후 연구용 원자로에서 조사시험을 한다. 재 계장을 하여 조사시험을 통해 핵연료 중심온도, 핵분열 기체 방출, 핵연료 팽윤에 의한 PCMI 등과 같은 고연소도 핵연료의 열적 성능시험을 측정할 수 있다. 재 계장에 대한 연구는 노르웨이 HALDEN, 프랑스 CEA의 OSIRIS, 네덜란드 HFR, 일본의 JMTR에서 수행한 경험이 있지만, 그중에서 노르웨이 HALDEN 은 핵연료 중심온도, 핵연료 내압측정, 피복관 길이 및 소결체 길이 변화를 측정하기 위한 기술과 경험을 가장 많이 보유한 국가이다. 재계장하기 위한 기술로는 연료봉에 열전대를 설치하기 위한 소결체 천공장치, 열전대와 함께 봉단마개를 용접할 수 있는 용접장치가 중요 항목이다. HALDEN은 그동안 축적된 경험과 기술을 바탕으로 재계장이 필요한 외국으로부터 의뢰를 받아 장비를 개발하여 수출하고 있다. 국내에서는 고연소도 연구를 위한 재 계장 조사시험 경험은 없지만, 2000년부터 2006년도까지 5번의 DUPIC 핵연료 조사시험 경우와 같이 원격으로 핫셀에서 제조된 소결체를 계장하여 하나로에서 조사시험을 수행한 경험이 있다. DUPIC 원격핵연료 조사시험을 통해서 핵연료 중심온도 측정을 위한 소결체 천공장치 개발 및 천공시험과 레이저 장치를 이용한 원격 용접장치 개발 및 원격 캡슐 조립장치 등에 관한 경험을 축적하였다. 또한 조사시험용 캡슐과제에서는 핵연료 중심 천공장치와 용접장치에 대한 연구를 수행하였으며, 재계장 기기 개념설계 및 원격 조립용 모의 핵연료봉/캡슐의 설계제작을 하였지만 실제로 핫셀 적용은 못하였다[1-4].

본 루프활용 재 계장 조사시험 보고서에서는 그 대상을 조사시험 루프에 한정하지 않고 그동안 발표된 재 계장 조사시험에 대한 외국의 핵연료 재조사시험 기술현황과 국내에서 수행된 기술 현황을 정리하였으며, 국내에서 재 계장 조사시험 시 고려되어야 할 항목 등을 기술하였다.

II. 외국의 핵연료 제조사시험 기술 현황

1. 노르웨이 HALDEN의 제조사시험

노르웨이 HALDEN 은 일찍이 1970년부터 HRP(Halden Reactor Project)를 통해 계장 조사시험을 위한 기술 개발과 다양한 핵연료의 조사시험을 최근까지도 활발하게 수행하고 있다. 재 계장에 관한 연구는 1980년 중반부터 고연소도 연구를 수행하기 위해 기술 개발이 시작되었다. 초기 연구에서는 조사된 연료봉을 fission gas 손실 없이 그대로 천공하는 기술을 사용하였지만, 90년대 고연소도 연구에서는 봉단마개를 cutting 하고 fission gas 대체 물질로 Xe, Kr 가스를 충전 하고 재 계장 연료봉을 만들어 조사시험을 수행하였다. 이와 같이 HALDEN 은 제조사시험 기술과 경험을 가장 많이 보유하고 있으며, 다음과 같이 재계장에 관한 관련 자료를 정리하였다[5-9].

(1) Re-instrumentation process qualification for high burn-up rods : Gas pressure detection and fission gas release evaluation during power ramps(HWR-154, 1986, S.Granata)

LWR fuel의 extended burn-up(>30 MWd/kgUO₂) 에서 조사시험 중 연료봉 거동에 대한 연구가 필요하였다. 특히 FGR에 대한 in-pile 데이터가 주목적이었다. ENEA의 재정지원 하에 AGIP-Medicina Laboratories(Italy)에서 주요 기술이 개발되었으며, 압력센서를 조사된 연료봉의 한쪽 end plug에 용접하였다. 그리고 외부의 두 rotating magnets에 의해 구동된 micro-drill에 의해 hole을 만들었으며, 이 방법을 통해 내부 FGR의 손실 없이 압력측정용 LVDT를 부착하였다. 조사시험은 re-instrumented rod 에 대해 power ramp test를 하였다. 1983년 9월에 7.2MWd/kgUO₂ 의 re-instrumented rod 가 IFA-535 LWR test rig에 장전되었으며, 35MWd/kgUO₂ 의 re-instrumented rod 가 IFA-535 LWR test rig에서 ramp 실험을 수행하였다. 일부 연료봉은 welding 불량으로 정확한 실험값을 얻지 못하였지만, Gap이 작은(60 μ m) 연료봉은 PCI 로 인해 gap이 큰(350 μ m) 연료봉보다 작은 FGR 값을 보였다는 결과를 얻었다.

(2) Fuel thermocouple re-instrumentation of irradiation rods (HWR-314, 1991, T.Johnsen)

1991년 HRP는 고연소에서 소결체의 열적 거동 연구를 위해 연료봉에 열전대를 재 계장하였다. 연료봉 열전대 재 계장 연구는 2단계로 구분된다. 첫 단계는 cold condition에서의 기술을 개발하는 것으로 열전대 설치를 위한 중심 hole drilling 하는 과정이며, 다음 단계는 in-reactor testing 과정이다.

1단계 기술이 조사리그 IFA-409에서 44 MWd/kgUO₂ 연소도까지 조사된 2개의 연료봉에 대해 수행되었다. 첫 번째 in-reactor test는 IFA-533에서 2개의 in-core plug와 열전대 케이블이 연결되어 1991년 10월에 수행되었다. 재 계장을 위한 전반적인 요구사항은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 적당한 연소도의 연료봉 선정
- 2) 2000°C 까지 측정할 수 있는 고온용 열전대 선정
- 3) 축 방향으로 열전대 hot junction을 top end에서 중간위치인 약 4.5 번째 소결체 길이 (40-50mm)의 깊이에 위치시킨다.
- 4) 조사된 fuel의 원 pellet 조각은 그대로 유지시킨다.
- 5) 재 계장으로 부터 pellet crack과 입자 or gas로부터 fuel-cladding gap 오염을 피한다.
- 6) 열에 의한 fuel restructuring을 피하고 휘발성 fission product의 재 분포/방출을 피한다.
- 7) 재 계장 연료봉은 설계된 혼합 가스와 압력으로 채운다.

중심 hole 드릴 중 연료봉의 파손을 방지하기 위해 CO₂를 이용하며, CO₂ 제거 후 hole 보호를 위해 molybdenum tube를 사용한다. 열전대는 MgO 절연체와 tungsten rhenium 5%-tungsten rhenium 25% Wire와 Ta sheath 재료를 사용한다. 2개의 연료봉은 34bar, 240°C의 D₂O coolant natural circulation 조건에서 조사시켰다. 열전대의 성능 저하를 피하기 위해 hot junction 온도는 1200°C를 초과하지 말아야 한다(선출력이 33kW/m 에 해당됨). 이 기술은 Kjeller 연구소와 공동으로 개발하였다.

(3) Re-instrumentation of irradiated rods(NOS 807 and 808) with fuel thermocouples (HWR-316, 1992, T.Jonsen)

본 연구내용은 HWR-314 와 유사하다. 직경 2.5mm의 diamond drill 사용하였으며, 용접은 압력 챔버에서 TIG 용접방법을 사용하였다. 용접전 Purging을

위해 최소 3번의 진공과 He 가스를 충전하는 과정을 수행한다. hole drilling 후 압력 하에서 room temp로 천천히 가열한다. 이후 dry unit에서 300℃ 진공상태에서 72시간 수행한다. 다음 열전대와 함께 용접하고 용접 후 neutron radiography 검사를 통해 재계장 연료봉의 건전성을 확인한다.

(4) Re-instrumentation of pre-irradiated rods with fuel thermocouples (IFA-533.2) : Operation experience and results (HWR-352, 1993, J.J.Serna)

고연소도에서 gap 특성과 UO_2 의 thermal conductivity 가 변하므로 fuel thermal response 가 변한다. 이에 대한 연구목적으로 열전대 재계장 연구를 수행하였다. 44MWd/kg UO_2 까지 HBWR 에서 미리 조사된 2개의 연료봉을 재계장하여 200일 동안 49MWd/kg UO_2 조사시켰다. 처음 1개의 데이터는 in-core plug 에 문제가 있었으나 차후 수리를 하였다. Operation power 45 kW/m, 중심 온도 1600℃ 로 측정되었으며, 악조건에서도 센서의 신뢰성이 잘 유지됨을 알 수 있었다. Neutron flux 차이로 인해 두 개의 연료봉 온도 값은 약간의 차이를 보였으며, 고출력과 온도에서 연료봉은 더 많은 FGR을 발생하므로 그 차이는 더욱 증가되었다. 실험 결과에서는 연소도가 증가함으로 fuel conductivity 가 떨어졌지만, 2.2K.m/kW (MWd/kg UO_2) burn-up 계수를 사용하여 측정치와 모델에 의한 계산값이 잘 맞았다.

HWR-314 에서와 같이 HALDEN에서 개발된 re-instrumentation이 가장 중요한 기술로 중심 열전대를 조사 연료봉에 설치하는 방법이다. 이 기술은 덴마크의 국립 연구소에서 개발된 것으로 연구로에서 장기간 조사할 필요 없이 고연소도에서 핵연료 열적 성능에 관한 연구를 수행하기 위해 개발되었다. 조사 연료봉에 중심온도 열전대를 계장하는 과정은 다음과 같이 정리하였다.

- 소결체의 중심에 열전대의 hot junction이 위치를 파악하기 위해 연료봉의 중성자 radiography를 수행한다.
- 연료봉을 정해진 길이로 절단하고 봉단마개 설치를 위해 핵연료를 제거한다. 이때 피복관의 내부와 외부를 청소한다.
- 절연체(Al_2O_3), steering system, plenum spring 및 end sleeve 조립한다.
- 피복관에 end sleeve를 용접한다.
- 핵연료봉 챔버와 연료봉을 액체 CO_2 (압력 60bar)로 배출 및 재 충전 한다

다. 다음 드릴링 cell의 외부를 액체 N₂로 핵연료 소결체를 동결시킨다.

- 연료봉 stack에 중심 hole 드릴링하고, molybdenum tube를 삽입하여 드릴링된 소결체를 보호한다.

- 가압과 depressurize 하에서 room 온도로 천천히 가열한다. 이후 진공 상태의 300℃에서 72시간동안 가열한다.

- 연료봉 stack에 중심온도 열전대 설치

- 연료봉 봉단마개 용접. inert gas로 연료봉 내 충전한 후 밀봉 용접한다.

- He 누설 시험과 열전대의 건전성을 확인한다.

- 중성자 radiography 시험

위에서과 같이 재계장을 위해 사용된 장비는 그림 1과 같은 연료봉을 절단하기 위한 'Cutting and Grinding unit', 그림 2와 같은 중심온도 열전대 센서를 천공하기 위한 'Freezing and Drilling unit', 그림 3과 같은 봉단마개 TIG 용접을 위한 'Welding and Drying unit', 그림 4와 같은 유압식 'Encapsulation Bench' 가 필요하다[10]. 2004년 기준으로 Kjeller 핫셀에서는 조사된 130개 이상의 연료봉이 재 계장되었으며, 그들 중 33개가 중심온도 측정 열전대가 장착되었다. 그림 5는 최근 HALDEN에서 기존의 장치를 개선하여 새롭게 개발한 연료봉 천공장치이다[11]. UO₂/MOX fuel pellet을 천공하기위해 연료봉은 CO₂ 로 채우고, CO₂는 액체 N₂(-190℃)를 사용하여 동결시킨다. 그림 6은 연료봉을 천공하고 열전대를 설치한 후 Neutron radiography 한 결과 그림으로 열전대의 정확한 위치를 확인할 수 있다. 또한 그림 7은 전에 사용된 장비를 개선한 원격 용접장비로 이 장비는 TIG 용접방식을 사용한다. 부록에 HALDEN 의 재계장과 관련된 자료를 첨가하였다.



그림 1. Cutting and Grinding unit

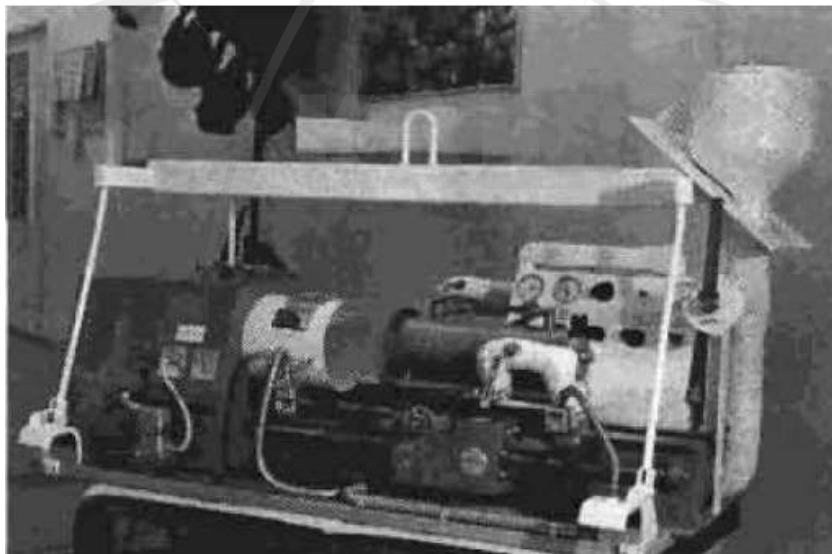


그림 2. Freezing and Drilling unit

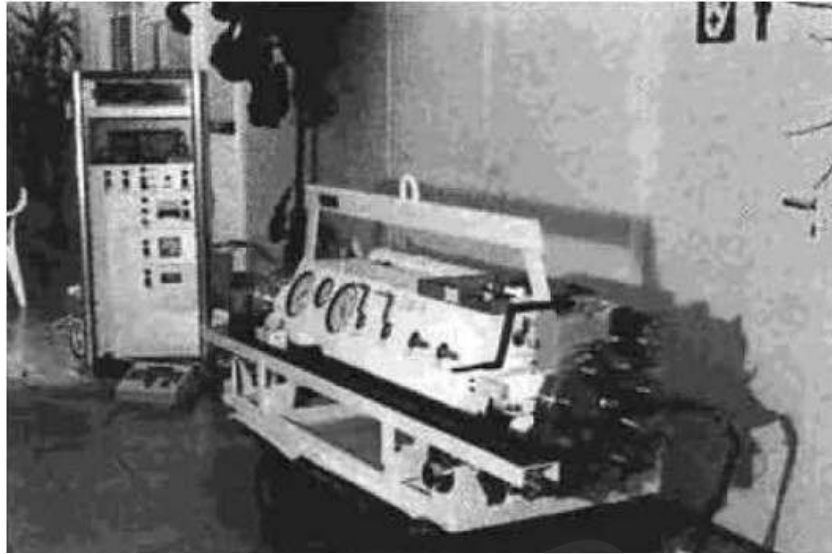


그림 3. Welding and Drying unit

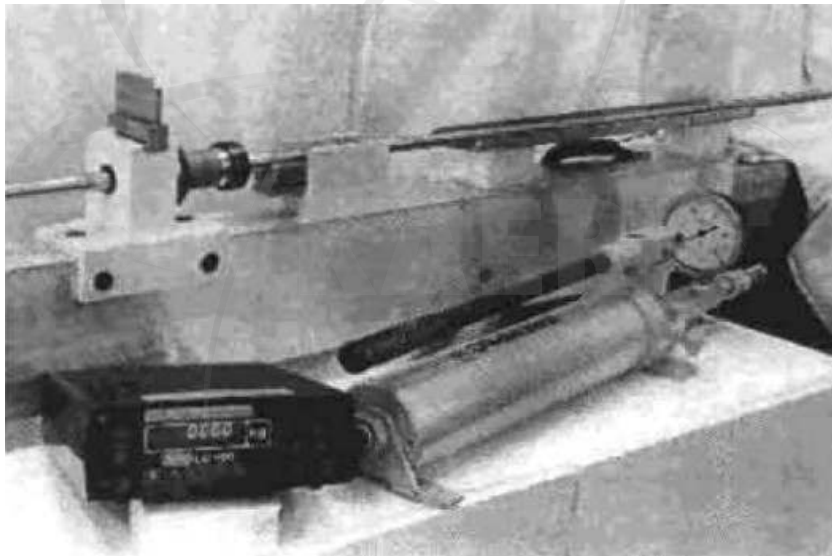


그림 4. Encapsulation Bench

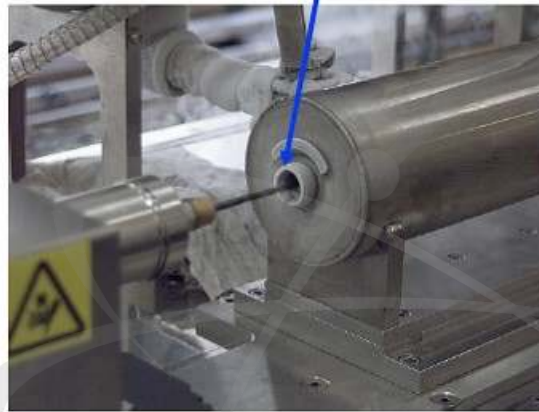
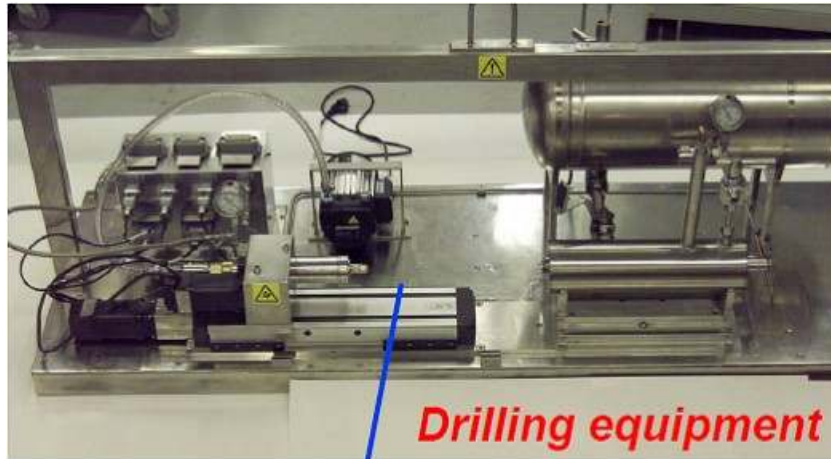


그림 5. Drilling Equipment for irradiated fuel rod

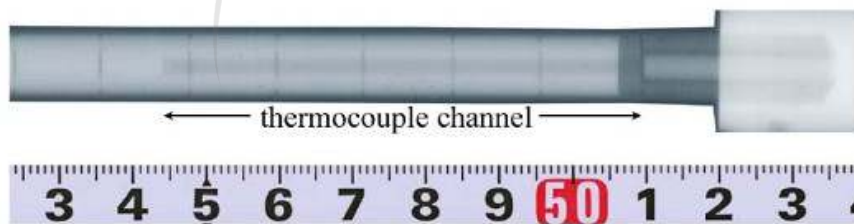


그림 6. Neutron radiography after drilling

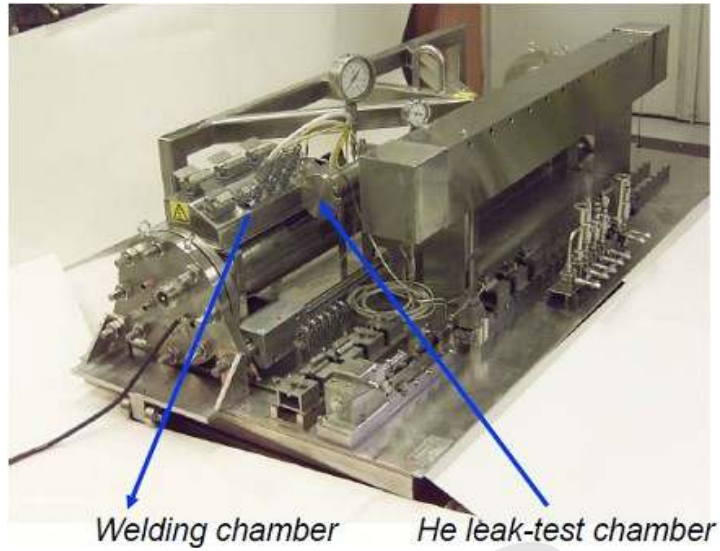


그림 7. Welding equipment for irradiated fuel rod

2. 일본 JMTR의 재조사시험

일본의 JMTR에서는 HALDEN의 재계장 기술을 활용하여 BOSA 캡슐에 고연소도 핵연료에 관한 연구를 수행하였다. 사용한 상용 핵 연료봉의 fuel stack 길이는 3.6m 이며, JMTR에서 가공하여 재조사시험 할 fuel stack 길이는 약 0.6m 이다. 연료봉에 중심온도 열전대를 설치하는 과정은 그림 9에서와 같이 HALDEN에서 사용하는 방법과 매우 유사하다[12].

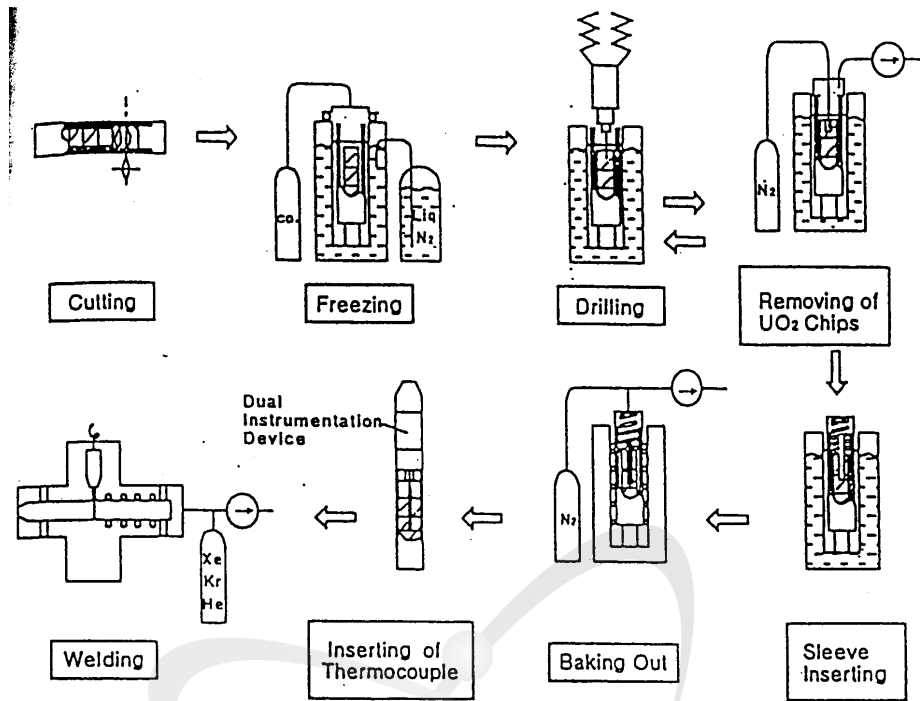


그림 8. 열전대 설치 과정

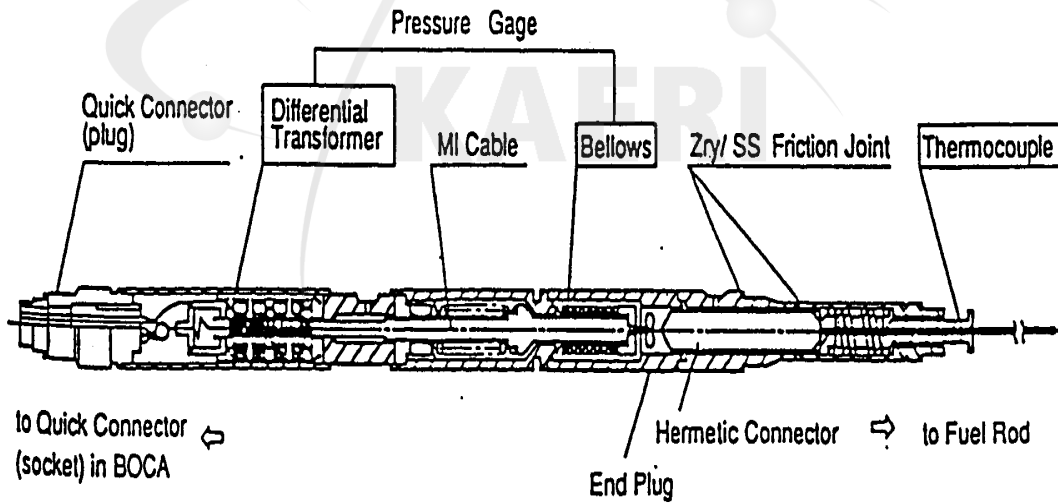


그림 9. JMTR의 Re-instrumented 핵 연료봉

3. 네덜란드 HFR의 재조사시험

네덜란드의 HFR(High Flux Teactor)에서는 HALDEN 및 JMTR 과 비슷하게 1992년부터 1차로 LWR 조사 핵 연료봉에 대해 새롭게 계장하여 재조사시키는 연구를 수행하였다. 기술 개발은 약 4.5m의 LWR 핵 연료봉을 Petten hot cell에서 절단하여 400mm로 fuel rod segment를 만들어 그림 10과 같이 재가공하였다. 그리고 HALDEN에서와 같은 과정으로 핵연료 봉에 온도센서와 압력센서를 re-instrumentation 하였다[13].

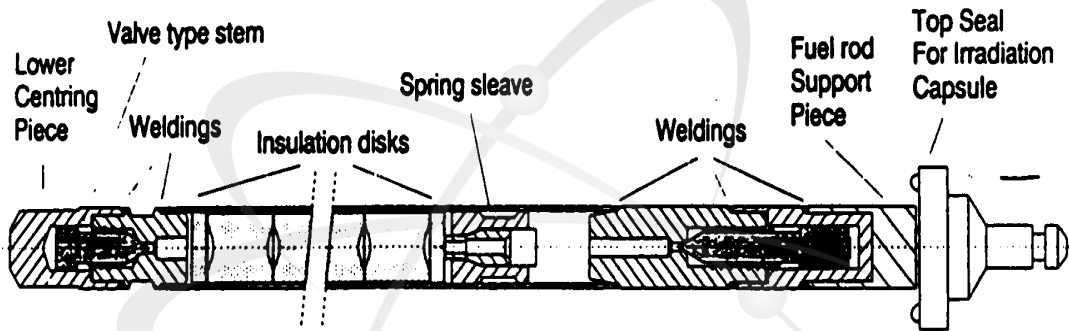


그림 10 . Re-fabricated LWR fuel rod

4. 프랑스 CEA의 재조사시험

프랑스 CADARACHE 에 있는 CEA/LECA 핫셀에서 고연소도 연구를 위한 재계장 기술개발을 수행하였다. 이중계장 연료봉(double-instrumented fuel rod)이라 불리는 연료봉은 중심온도 측정 열전대와 새로운 압력 측정 센서를 장착하여 OSIRIS 시험로에서 조사시험을 하였다. 70GWd/t 까지 연소된 PWR 연료봉을 재계장하기 위한 과정은 다음과 같다[14].

- 재계장할 적절한 연료봉을 선정하여 절단할 준비를 하고 알루미늄, 봉단마개 및 Fresh UO_2 를 삽입하기 위한 공간을 확보하기 위해 de-fuelling 한다. 그리고 용접부위 피복관의 내외부위 산화층을 제거한다.
- 열전대를 위치하기 위해 다이아몬드 드릴로 길이 50mm, 직경 2.5mm 천공한다.
- molybdenum tube를 천공된 소결체에 삽입하고 TIG 용접으로 하단 마개를 용접한다.
- 상단마개, 스프링을 준비하고 상단마개를 TIG 용접한다.
- TIG 용접에 의한 봉단마개는 확산 접합을 같이 사용한다. 사용되는 확산 접합부위는 열전대와 압력센서이다.
- FGR을 확인하기 위해 free volume 측정을 한다.
- 40bar He 압력으로 연료봉을 충전 하고 sealing 용접을 한다.
- 압력센서와 열전대에 대한 X-ray 검사 후 원자로 이송 전 제염을 한다.

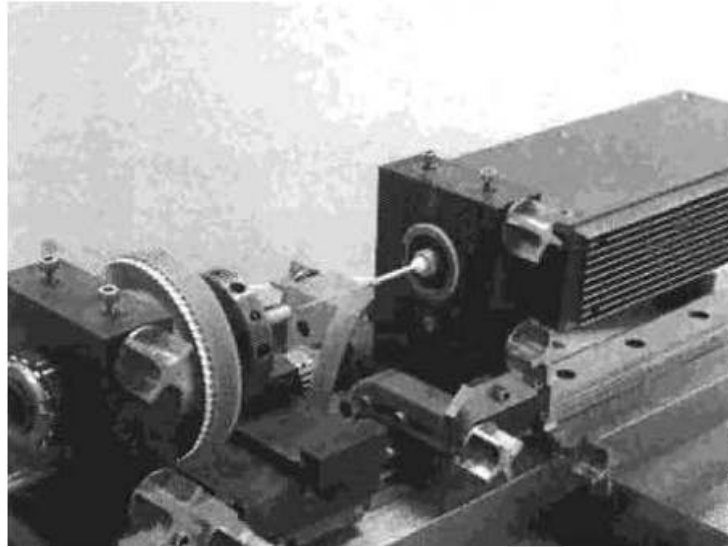


그림 11. 연료봉 천공

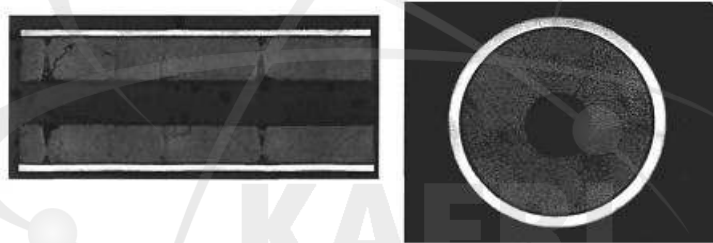


그림 12. 천공된 소결체

윗 연료봉 천공과정을 보면 HALDEN 의 방식과 다르게 액체 CO_2 로 연료봉을 동결하지 않고 천공하였다. 그 이유는 핫셀 내에 액체 CO_2 를 사용하기가 어렵기 때문이다.

III. 국내 핵연료 제조사시험 기술 현황

1. 조사시험용 캡슐개발에서의 제조사시험 기술

조사시험용 캡슐개발 분야에서는 고연소도 핵연료의 재계장에 대한 연구를 수행하였다[3-4]. 이를 위해 그림 13과 같은 UO_2 소결체 미세가공기연료봉 천공장치 개발하고 모의 핵연료에 대한 천공실험 및 제거 작업을 하였다. 또한 핫셀에서 사용 할 수 있는 조사후 핵연료 중심공 천공장치를 그림 14와 같이 개발하여 기본실험을 수행하였다. 천공실험에서는 핵연료 모의시편으로 조사후 핵연료의 경도(500~550HV)보다 큰 99.8%, 94%, 85%의 알루미늄을 이용하였다. 알루미늄은 제작공정에서의 순도에 따라 비커스 경도가 700~1600kg/mm²까지 변하는데, 순도 99.8%인 알루미늄은 비커스경도가 1540kg/mm²정도로 매우 경하며 순도 94%는 1000kg/mm² 정도이고 순도 85% 알루미늄은 비커스 경도가 700kg/mm²정도이다. 모의핵연료 실험시편으로 선정한 알루미늄은 경도가 너무 커서 드릴이 초기 위치를 잡지 못하고 파손되는 현상이 발생하였다. 이 문제점을 해결하기 위해서 노르웨이 HALDEN과 같이 조사후 핵연료와 성질이 유사한 DU(depleted uranium)을 실험 시편으로 사용하는 것이 가장 좋지만 실험실 여건상 DU사용이 불가하므로 일본에서 조사후 핵연료 천공장치를 cold lab에서 검증하기 위해서 실험시편으로 사용한 바륨페라이트(Ba_2FeO_3)를 이용한 모의 핵연료 천공실험을 실시하였다. 실험시편은 길이가 지름 8.3mm, 길이 10mm인 바륨페라이트 6개를 Zircaloy-4 피복관에 넣은 후 레진을 이용하여 고착시켜 제작하였다. 제작된 모의핵연료봉의 중심부에 지름 2.5mm, 깊이 50mm의 구멍(hole) 천공실험을 완료하였다. 천공 재연성 확인을 위하여 새로운 바륨페라이트 모의핵연료시편을 이용하여 추가실험을 실시하였다. 핵연료봉 중심에 열전대(thermocouple)를 설치하기 위하여 지름 2.5mm, 깊이 60mm의 hole을 만드는 공정을 천공공정(drilling process)이라고 하고 열전대가 삽입된 핵연료에 봉단마개(end plug)를 삽입하기 위해 깊이 10mm의 소결체를 제거하는 공정을 소결체 제거 공정(de-fuelling process)이라고 하는데 천공실험 후 수행할 소결체 제거실험을 위해서 총 60mm 천공실험을 수행하였다. 한편 다이아몬드 드릴에 대한 설계 및 제작에 대한 연구가 다음과 같이 진행되었다. 전착공법에 의해서 제작된 다이아몬드 드릴과의 성능 비교 실험을 통하여 용착법에 의해서 제작된 다이아몬드 드릴

의 우수성을 입증하였으나, 비교실험에 사용된 다이아몬드 드릴의 shaft는 40mm로 단축이고 중심부에 절삭 chip배출을 위한 구멍이 뚫려있지 않기 때문에 시중에서 재료를 구하기 용이하였으나, 본 실험에 사용된 다이아몬드 드릴은 70mm의 장축이고 중심부에 1.5mm 구멍을 뚫어야하므로 국내에서 구하기 어려웠고, 어렵게 구한 shaft도 S45C로 tip부분에 다이아몬드를 입히기 위해 가해지는 열 때문에 shaft의 강성이 약화되어 천공 실험 시 shaft가 휘어버리는 현상이 발생하였다. 그래서 독일 WINTER Werkzeug-maschinen사에서 주문 제작하여 수입한 그림 15와 같은 다이아몬드드릴을 떨림 현상 방지를 위하여 길이별로 3종류를 제작하여 절삭 깊이에 따라 교환하면서 사용하였다.

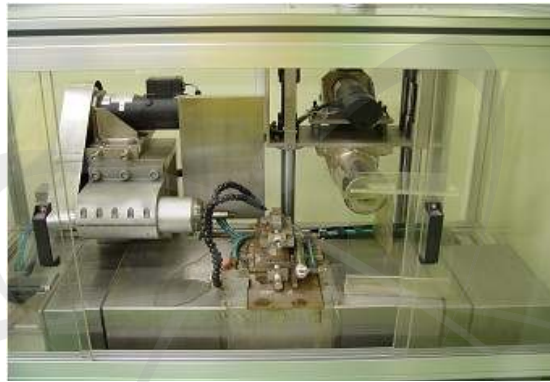


그림 13. UO_2 소결체 미세가공기기



그림 14 조사후 천공모의장치



그림 15. Diamond hollow drills

2. DUPIC 핵연료 개발에서의 재조사시험 기술

(1) 모의 소결체 천공장치 개발

DUPIC 소결체는 사용후 핵연료를 재사용하기 위한 것으로 핫셀에서 원격으로 제조되므로 재조사시험 기술과 매우 유사하다. 따라서 연구를 통해 개발된 원격 취급기술은 재조사 핵 연료봉 제조에 유용하게 사용될 수 있다. DUPIC 핵연료 개발 분야에서는 핫셀에서 제조된 소결체에 대해 하나로 조사시험을 수행하였는데 관련 내용은 다음과 같다. 본격적으로 DUPIC 핵연료의 계장 조사시험 전에 그림16과 같은 소결체를 천공하는 장치를 다음과 같이 1차적으로 개발하였다.

1) 장치 및 기본 성능시험

- 용도 : 캡슐 조사시험 시 소결체의 중심온도 측정을 위한 드릴링장치
- 제원 : 모터 회전속도 : 150 ~ 2,000 rpm, Feed 속도 : 1mm/min
드릴링 직경 : $\Phi 2\text{mm}$
- 구성 : 드릴링 unit, Cleaning unit
- 실험 : 상용화된 Diamond tip을 구입하여 Al_2O_3 봉의 중심을 2mm 직경으로 드릴링 실험과 드릴링 중 발생하는 chips 제거 성능실험을 수행하였는데 결과는 상당히 양호하였다.

2) 장비보완

- Freezing unit : 고체 CO₂와 액체질소를 사용하여 드릴링 시 DUPIC 소결체를 고정시킬 수 있는 방법이 강구되어야 한다.

- 소결체 원격취급 장치 : Hotcell 내에서 DUPIC 소결체를 원격으로 정확하게 중심 지점에 드릴링 할 수 있는 지그가 필요하다.



그림 16. 모의 소결체 천공장치

(2) 핫셀용 소결체 천공장치 개발 및 천공 실험

1) 핫셀용 소결체 천공장치

계장 조사시험을 위해서는 중심온도 측정 온도센서가 소결체 중심에 삽입될 수 있는 소결체가 필요하다. 그러나 중심에 홀이 있는 정확한 규격의 소결체를 만들기는 어려우며, 따라서 제조된 소결체 중심에 원하는 크기로 직접 천공하여야 한다. UO₂ 소결체나 알루미나(Al₂O₃) 소결체인 경우에는 작업자가 직접 다이아몬드 드릴 팁(tip)을 사용하여 상용 드릴링 장치로 드릴링 할 수 있으나, 건식 재가공 소결체와 같은 고방사성 소결체인 경우에는 방사성 차폐시설에서 사용할 수 있는 원격 기능을 갖는 드릴링 장치가 필요하다. 또한 기존의 드릴링 장치를 방사성 차폐시설에서 사용하게 되면 고장 발생 시 수리가 불가능하며, 사용

중 드릴 팁 교체가 매우 어렵다. 그리고 소결체를 수동으로 드릴링 할 때에는 드릴 팁에 인위적으로 일정한 힘을 인가하지만 장시간 작업하기가 어렵고, 특히 원격 드릴링 시 무리하게 소결체를 드릴링하기 쉬운데 이때 드릴 팁과 소결체가 손상되기 쉽다. 따라서 앞에서와 같이 모의 소결체 천공장치를 제작하였지만, 차폐시설에서 원격으로 고방사성 소결체를 천공하기 어렵다고 판단되어 원격 소결체 천공 장치를 개발하였다. 소결체 천공장치의 가장 중요한 요소로 원격성이다. 소결체 천공 시 사용되는 다이아몬드 드릴 팁은 원격 교체가 용이하고, 드릴 척이 연결되어 중심축을 회전시키는 모터는 고장 시 원격 교체가 가능하며, 드릴 팁은 소결체에 무리한 힘이 인가되지 않아야 한다. 또한 드릴링 시 드릴 팁에 의해 소결체에 인가되는 힘은 항상 일정하게 유지되도록 함으로써 결과적으로 드릴 팁을 보호하며, 동시에 천공되는 소결체도 무리한 힘에 의해 파손되지 않게 한다. 그리고 본 장치는 원격의 기능성을 최대한 반영하여 방사성 차폐시설에서 원격조작기로 용이하게 작동되도록 설계되었으며, 고방사성 소결체 드릴링 시 드릴 칩(chip)에 의한 주변 오염을 최소화되도록 하여야 한다. 따라서 소결체 원격 천공 장치는 사용이 용이하여 비방사성 소결체 뿐 만 아니라 원격취급이 요구되는 고방사성 소결체 드릴링 시 매우 유용하게 활용될 수 있는 장치이다.

드릴링 되는 소결체를 고정시키는 고정부, 소결체의 정확한 중심을 맞추는 위치 조정부, 원격으로 드릴 팁을 교체할 수 있는 드릴 척, 드릴 척의 중심과 기어로 연결되어 원격 교체가 가능한 DC 모터, 납추에 의해 상하로 움직이는 가이드 부분으로 구성되어 있다. 먼저 드릴링 장치의 상단부에는 드릴 팁에 무게를 인가하기 위해 납추 고정대에 납추가 고정되며, 중간부에는 납추 고정대와 함께 중심축 및 DC 모터가 기어로 연결되고 LM 가이드에 부착되는데, 이들의 무게는 상하단 스프링에 의해 유지된다. 그리고 중심축 하단에 다이아몬드 드릴 팁이 고정되는 드릴 척으로 구성된다. 한편 장치의 하단부에는 그림 17과 같이 드릴링 되는 소결체를 고정시키기 위한 바이스가 설치되는데, 이 바이스는 바이스 고정기에 의해 소결체 중심을 조정할 수 있도록 하였다. 한편 드릴링 중 발생하는 드릴 칩은 하단 면에 설치된 칩 수집 통에 모아지도록 개발되었다.

위와 같이 구성된 드릴링 장치를 사용하여 소결체를 드릴링 하는 과정은 다음과 같다. 먼저 바이스에 소결체를 위치시키고 바이스 핸들을 사용하여 고정한다. 다음 바이스 고정대에 바이스를 고정시킨다. 드릴 팁과 소결체 중심이 일치하는가를 확인한 후 소결체 위에 물을 조금 인가한다. 다음 DC 모터를 작동시키고 납추 고정대에 납추를 1개씩 인가하여 천공한다. 이때 납추의 무게는 소결체가 천

공되는 속도에 맞추어 인가되며, 소결체의 천공은 드릴 팁에 인가되는 납추 무게에 자동으로 수행된다. 한편 드릴링에 사용되는 다이아몬드 드릴 팁은 일정 시간 사용하면 드릴 팁을 교체하여야 하는데, 작은 드릴 팁을 원격으로 교체하기는 매우 어렵지만 드릴 팁 교체기를 이용하여 용이하게 사용하였다.



그림 17. 핫셀용 소결체 천공장치

2) 천공 실험

경도는 일정 하중으로 재료 표면을 압입할 때 나타나는 국부적인 저항으로 경도 값이 클수록 드릴링 하기 어렵다. 순도 99% 알루미나 소결체는 비커스 경도 값이 1500 kgf/mm^2 이며, UO_2 소결체는 600 kgf/mm^2 의 경도값을 가진다. 이 값을 기준으로 하면 UO_2 소결체는 알루미나 소결체 보다 2배 이상으로 쉽게 드릴링 할 수 있다. 조사시험 축소 연료봉에 space block 으로 직경 10mm, 길이 10mm의 순도 99% 알루미나 소결체가 사용된다. 따라서 알루미나 소결체와 건식 재가공 소결체가 드릴링 시험 시편으로 준비되었다. 이때 건식 재가공 소결체는 핫셀에서 사용 후 핵연료를 이용하여 제조된 소결체로 평균밀도 10.38 g/cm^3 , 평균 직경 10.65 mm, 평균 길이는 11.4~11.7 mm 로 측정되었다. 이와 같이 준비된 알루미나와 건식 재가공 소결체에 직경 1.2mm 온도센서를 부착하기 위해 직경 1.3mm 다이아몬드 드릴 팁을 사용하였다. 그림 18은 실험실에서 알루미나 소결체를 드릴링 하는 과정인데, 길이 10mm 1개를 드릴링 하기 위해서는 약 1시간 30분에서 2시간 정도 오랜 시간이 걸렸다. 그리고 1개를 드릴링 후에는 다이아몬드 팁 마모로 인해 드릴 팁을 교체하여야 하였다. 그림 19-그림 21은 핫셀

에서 소결체를 천공하는 그림으로 천공 시 매우 세심한 주의가 필요하다.



그림 18. 모의 알루미나 소결체 천공



그림 19. 핫셀 소결체 천공 실험

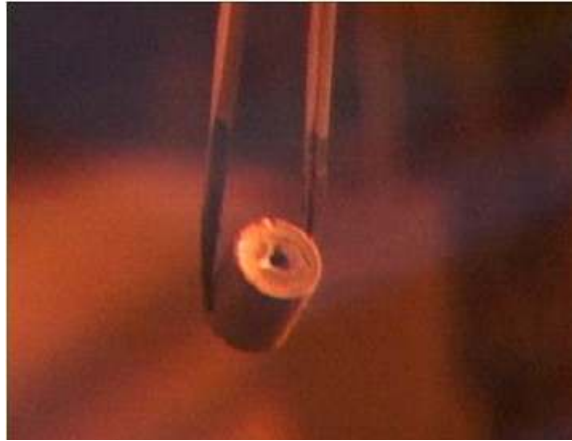


그림 20. The damaged pellet in drilling



그림 21. 천공된 소결체

2차 조사시험 축소 연료봉에는 핫셀에서 사용 후 핵연료를 이용하여 제조된 소결체로 평균 직경 10.49 mm, 평균 길이 11.3~11.6 mm 으로 측정되었다. 이와 같이 준비된 알루미나와 건식 재가공 소결체에 직경 1.2mm 온도센서를 부착하기 위해 직경 1.3mm 로 사용된 드릴 팁을 직경 1.4mm 로 변경하여 사용하였다. 5차 조사시험 소결체 천공은 상하로 나누어 2번에 걸쳐 드릴링 작업을 하였으나, 금번의 6차 소결체는 1번의 드릴링으로 관통하여 드릴링 시 소결체의 충격을 최소화하였다. 이것은 상하로 2번 에 걸쳐 드릴링 시 중심의 불일치 현상이 발생하였기 때문이다. 그림 22와 그림 23과 같은 핫셀 드릴링 1차 실험에서는 길이 11.5mm 한 개의 소결체를 천공하기 위해서 약 1시간가량 소요되었다. 그리고 하단부가 관통 시 드릴 팁에 집중되는 하중에 의해 하단 부 관통 부분이 약간

떨어져 나가는 현상이 발생하였다. 또한 소결체 가장자리가 매우 약해 쉽게 파손
되므로 매우 조심스럽게 취급하였다.



그림 22. Remote drilling of pellet at hotcell



그림 23. Drilled pellet



그림 24. Pellets for 6th irradiation test

한편 기존의 개발된 핵연료 성능평가 코드는 재계장 핵연료의 노내 거동을 평가할 수 없기 때문에 HALDEN의 조사시험 데이터를 사용하여 재계장 성능평가 코드에 대한 연구가 소내에서 일부 진행되었다[15-16]. INFRA 코드검증 연구에서는 HALDEN에서 재계장되어 조사시험을 수행한 측정 데이터를 가지고 사용하였다. 사용된 2개의 재계장 연료봉 중 1번의 연료봉으로 원자로에서 평균 연소도 59MWd/kgU까지 연소된 BWR 핵연료에 대해 핵연료 384mm를 절단하여 상단에 중심온도 측정용 열전대를 삽입하기 위해 지름 2.5mm, 길이 45mm의 천공을 하였다. 그리고 하단부위에는 압력측정 LVDT를 장착하였다. 또한 재계장된 2번의 연료봉은 PWR 핵연료로 평균 연소도 55.6MWd/kgU이었으며 핵연료 360mm를 절단하여 1번 연료봉과 동일한 계장을 하였다. 개선된 INFRA 코드 검증 항목은 핵연료 온도, 핵분열 기체 방출이었으며, 검증결과 70MWd/kgU 이상의 연소도까지 INFRA가 정확히 예측하는 것으로 나타났다. 혼합 핵연료의 인허가 프로그램의 일환으로 PWR 핵연료에 대해 재계장 후 조사시킨 데이터에 대해 COSMOS 코드 검증에 대한 연구가 진행되었다. PWR 핵연료는 약 50MWd/kgHM까지 연소한 혼합핵연료이고 일부를 절단하여 열전대와 압력측정 LVDT를 계장하였다. 재계장 연료봉은 HALDEN에서 조사시험을 수행하였는데, 1차로 모사된 PWR 분위기에서 연소도 증가시험과 2차적으로 출력 급증시험을 수행 후 얻어진 노내 시험 결과를 COSMOS 코드 검증을 하였다. 코드검증 결과로 정상상태 조사에서는 실제 노내 측정값하고 잘 일치하였으나, 2차 조사시험 시 상당한 핵분열 기체가 방출한 경우에는 상당한 차이가 있었다.

IV. 재조사시험 시 고려될 사항

1. 핵연료봉 이송

고방사선 핵연료의 이송은 하나로에서 조사된 핵연료가 조사재시험시설 (IMEF; Irradiated Material Examination Facility) 혹은 조사후시험시설(PIEF; Post Irradiation Examination Facility) 로 이동하거나, 반대로 IMEF 혹은 PIEF 에서 조사시험을 하기위해 하나로까지 운반하여야 한다. 조사시험 및 조사후 시험을 위해 핵연료봉 혹은 다발을 운반할 때는 그림 25와 같은 하나로 캐스크를 사용한다. 이때 캐스크 안에는 그림 26과 같은 이송용 바스켓을 이용한다. 그림 27은 캐스크 내부로 바스켓 인입과정을 나타낸 것으로서 캐스크는 습식 캐스크로 핵연료봉의 적재 및 하역은 하나로 수조 혹은 조사재시험시설(IMEF) 수조 물속에서 수행된다. 따라서 핵연료봉을 이송할 때에는 이송 바스켓의 내경과 길이를 반드시 고려하여야 한다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized, light gray graphic of a particle or atom with three spheres and curved lines, positioned above the word "KAERI" in a bold, sans-serif font.

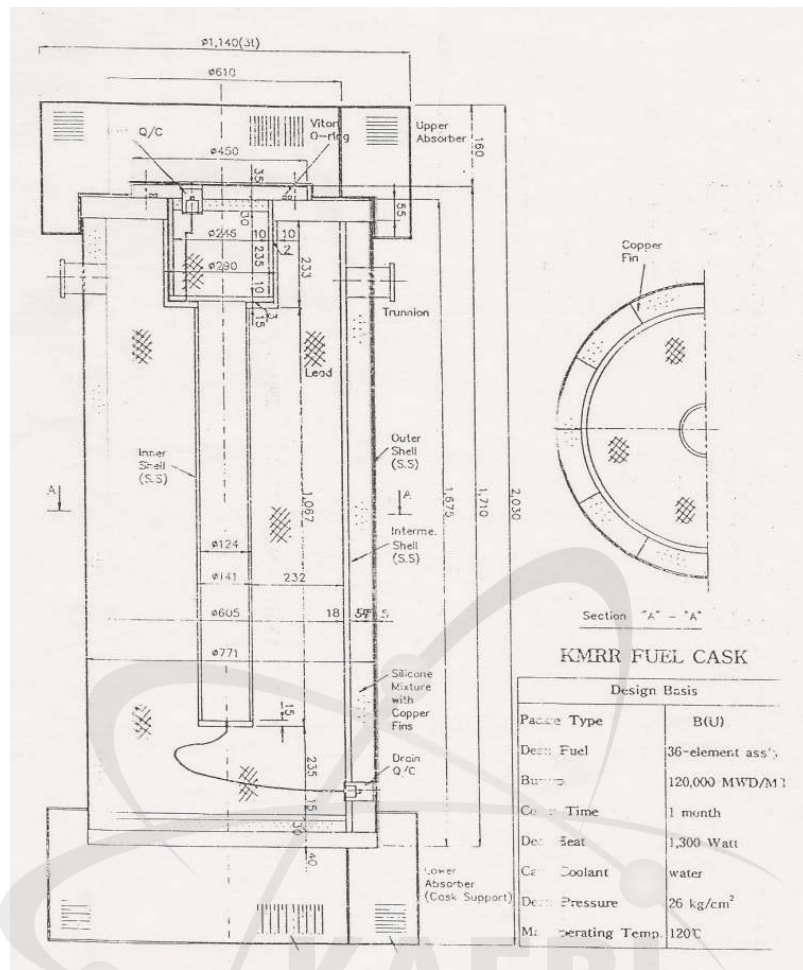


그림 25. 하나로 캐스크

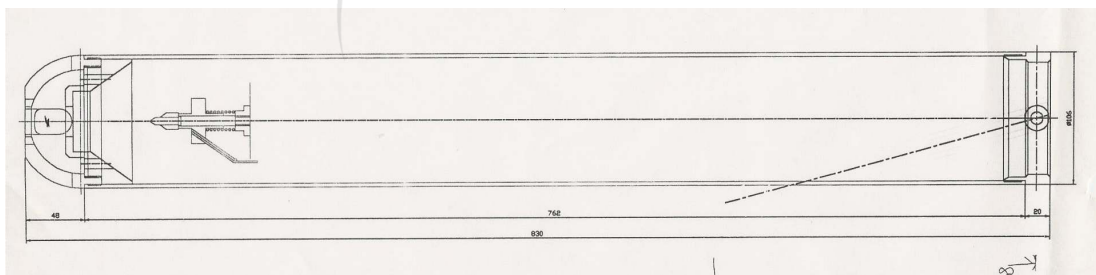


그림 26. 이송용 basket

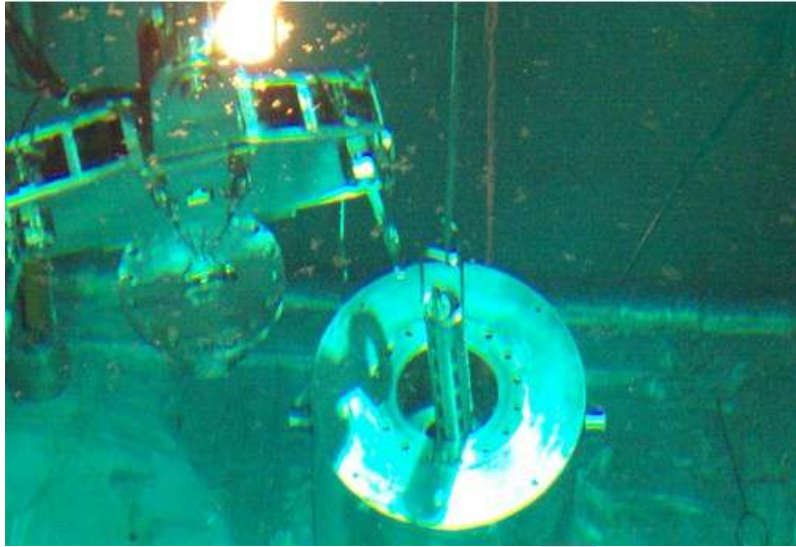


그림 27. 헬멧 내부로 바스켓 인입

2. 핵연료 취급을 위한 핫셀

연구원내 조사후시험시설로 연구용 원자로 하나로에서 중성자가 조사된 여러 핵연료 및 재료의 핫셀 시험을 위한 시설로 소내에 조사재시험시설(IMEF)과 상업용 발전소에서 발생된 핵연료에 대한 시험을 수행할 수 있는 그림 28과 같은 조사후시험시설(PIEF)이 있다. 이들 시설에서 수행할 수 있는 조사후시험 항목으로 비파괴시험(외관/제원측정, 산화층 측정, 와전류시험, 감마스캐닝, 핵연료 축방향 연소도 분포 측정 등)과 파괴시험(봉내압 측정, 핵분열생성기체 특성 및 방출률 측정, 소결체 조직시험, 피복관 수소함량 분석, 전자현미경 분석, 섹션 감마스캐닝, 밀도 시험 등)을 할 수 있다. 그러나 이들 핫셀을 재조사시험 연구 전용으로 활용하기는 어렵다. 재조사시험 연구를 위해서는 별도의 전용 핫셀이 반드시 필요하다.

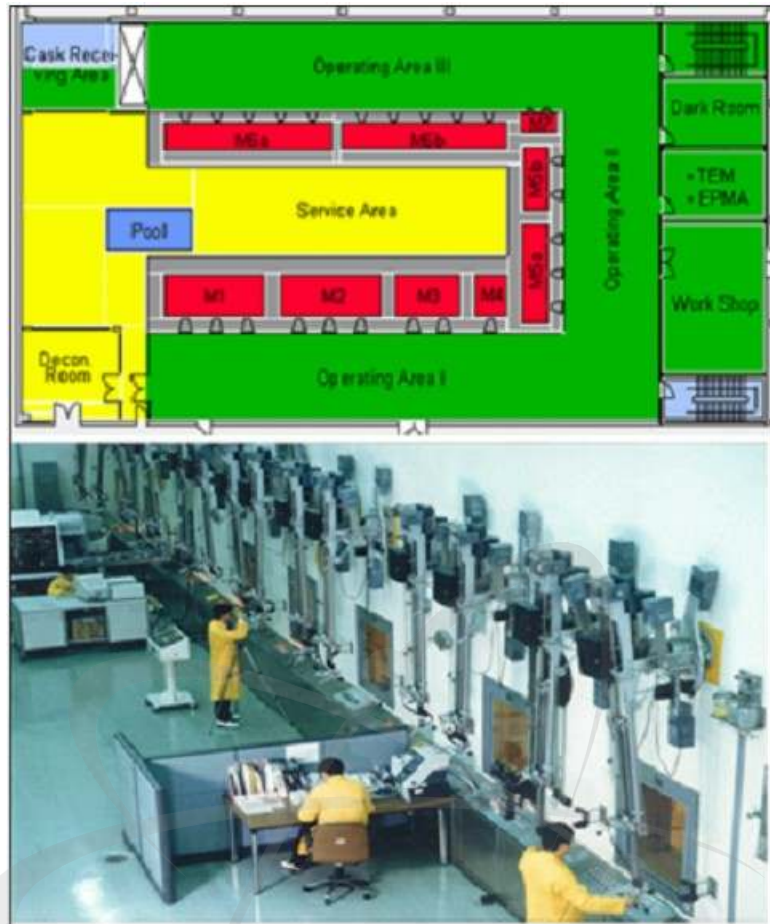


그림 28. IMEF Hotcell

3. 연료봉 제조 장치

(1) 연료봉 용접

재계장 연료봉을 제조하기 위해서 열전대를 삽입하고 봉단마개를 닫은 후 용접을 하여야 한다. 그림 29와 그림 30은 핫셀에서 수행된 연료봉 용접전후를 나타낸 것으로서 모든 과정은 핫셀에서 원격으로 가능하여야 하며, 소내에서는 DUPIC 핵연료 개발 시 원격 계장 핵연료 제조 경험이 있다. 이때 사용된 용접 장치는 펄스형 Nd:YAG 레이저 500W 급이며, 3개의 계장 연료봉 용접을 위한 작업된 절차는 다음과 같았다.

- 시편 5개를 준비하여 QA 절차에 의해 치수 측정을 하고 핫셀 밖에서 조

사연료봉 상단 면을 용접한 다음 양호한 연료봉 4개를 선정하였다.

- 제1 계장연료봉에 대한 용접을 핫셀에서 수행하였다. 상단 면이 용접된 연료봉에 스프링, space block 1개, DUPIC 소결체 5개, space block 6개를 삽입하고 용접 절차서에 의해 하단 부를 용접하였다.

- 제1 계장 연료봉 용접 후 제2계장 연료봉과 제3계장 연료봉에 대한 봉단마개 용접을 하였다.



그림 29 Before mini-element



그림 30 After mini-element welding

(2) He leak 시험

용접된 연료봉은 그림 31과 같이 He 누출검사를 수행하여 연료봉 용접의 건

전성을 확인하여야한다. 연료봉 용접 후 24시간이내 He leak 검사를 수행하고, He 가스 누출검사를 통해 누출되는 연료봉이 없음을 확인한다.



그림 31. He-leak test

(3) 연료봉 조립

재계장 연료봉이 제조되고 집합체 형태로 조립되려면 원격 조립장치가 필요하다. 그림 32는 핫셀에서 3개의 계장 연료봉을 조립하기위한 원격 조립장치로 이장치를 이용하여 그림 33과 같은 계장 조시시험 캡슐이 제조되었다.

그림 34는 천공된 소결체를 핫셀에서 계장 연료봉을 제조하기위한 대략적인 과정을 보여준다.

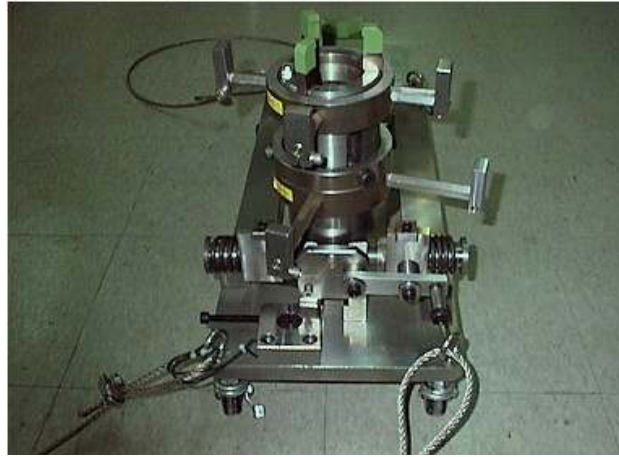


그림 32. 원격 캡슐 조립기



그림 33. The completed assembly of instrumented irradiation test rig

Element assembly process

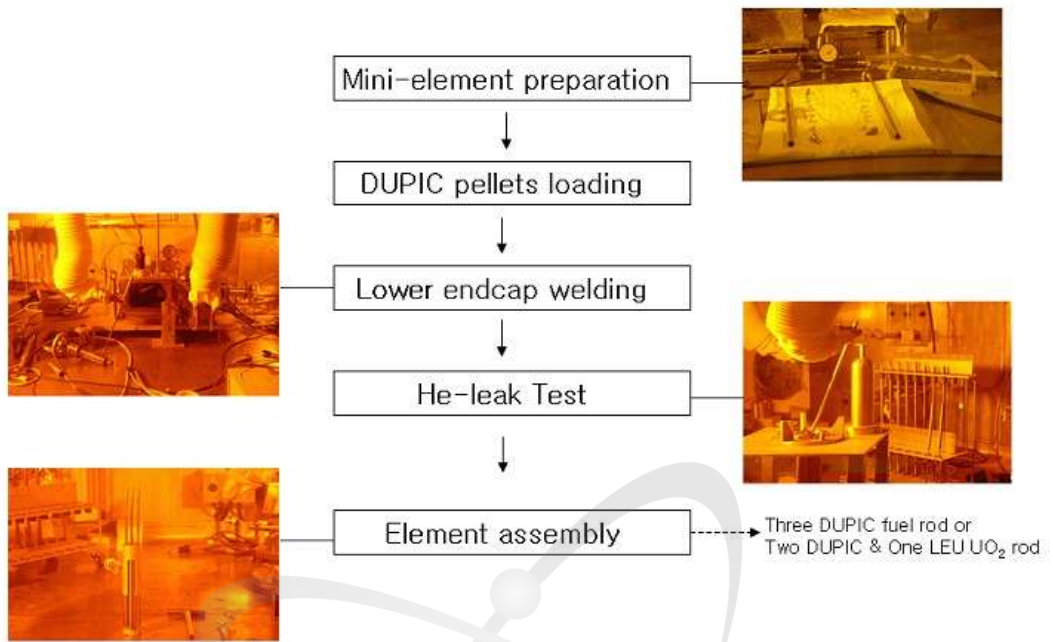


그림 34. The process of element assembly

KAERI

V. 결론

80년대 중반부터 시작된 고연소도 연구를 위한 재계장 기술개발은 중심온도 측정을 위해 연료봉을 천공하는 기술이 핵심이다. 초기에는 조사된 연료봉을 fission gas 손실 없이 그대로 천공하였으나 이후에는 fission gas 대체 가스로 충전 하여 재계장 연료봉을 제작하였다. 국내에서는 연료봉 천공기술을 개발하기 위해 HALDEN 의 설계도면과 자료를 참고하여 재계장 장치를 개발하였으나 실제 재계장 조사시험을 수행하지는 않았다. 그러나 국내 재계장 조사시험 기술 현황에서와 같이 연료봉 제조과정은 재계장 핵연료와 다르지만 모든 연료봉 제조 과정이 핫셀에서 수행되는 DUPIC 핵연료의 조사시험 기술과 경험은 재계장 조사시험에 직접 활용될 수 있다. 또한 국내 재계장시 핵연료 이송, 핵연료 취급을 위한 핫셀, 연료봉 조립장치 등과 같이 사항은 반드시 고려하여야할 사항이다.



KAERI

참 고 문 헌

1. 이철용 외, “DUPIC 핵연료의 조사시험을 위한 계장기술”, KAERI/TR-1484/2000, 2000. 02.
2. 이철용, “핵연료 계장조사시험 및 계장리그 설계/제작 기술습득”, KAERI/OT-1061/2003, 2003. 03.
3. 김재용 외, “모의 천공장치를 이용한 모의 핵연료 천공실험 및 조사후핵연료 천공장치 상세설계”, KAERI/TR-3315/2007, 2007. 7.
4. 김봉구 외, “조사시험용 캡슐 개발 및 활용 3단계 중간보고서”, KAERI/TR-3013/2005, 2005. 06.
5. S.Granata, “Re-instrumentation process qualification for high burn-up rods:gas pressure detection and fission gas release evaluation during power ramps”, HWR-154, 1986. 01.
6. T.Johnsen, “Fuel Thermocouples re-instrumentation of irradiated rods”, HWR-314, 1991. 05.
7. T.Johnsen, “Re-instrumentation of irradiation rods,(NOS 807 and 808) with fuel thermocouples”, HWR-316, 1992. 02.
8. J.J.Serna, “Re-instrumentation of pre-irradiated rods with fuel thermocouples : Operation experience and results”, HWR-352, 1993. 02.
9. O.Arrestad, “Fuel rod performance measurements and Re-instrumentation capabilities at HALDEN project”, In-core Instrumentation proceeding, 1996. 08.
10. H.Kleemann, “Re-fabrication and Instrumentation”, HOTLAB Plenary Meeting 2004, Halden, 2004.
11. W. Wiesenack, Summary on technical consultation, 2010.
12. H.Amanao, “Re-fabrication and Instrumentation technique on pre-irradiated LWR fuel rod”, IAEA Technical Committee Meeting, 1992. 08.
13. B.Fischer, “Re-fabrication and re-instrumentation of irradiated LWR fuel rods for irradiation testing at the HFR Petten”, INIS-m1-14976, 1992. 08.
14. K. Silberstein, “Refabricated and Instrumented Fuel Rods”, HOTLAB Plenary Meeting 2004, Halden, 2004.
15. 양용식 외, “재장전 핵연료 시험자료를 이용한 INFRA 검증”, KNS 2003 춘계학술대회, 2003.

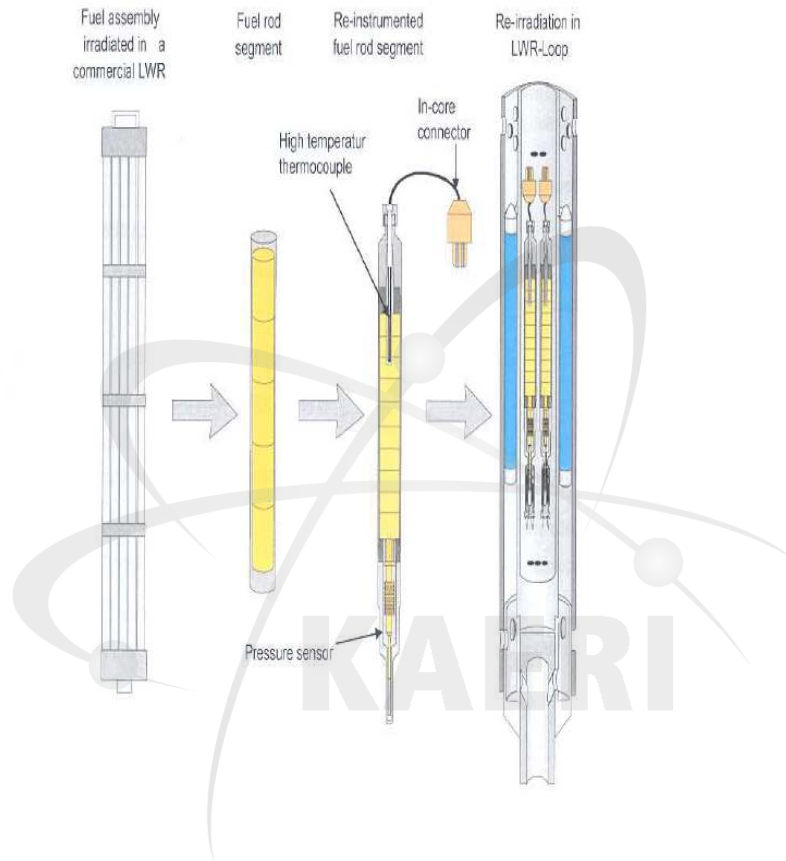
16. 이병호 외, “상용로, 계장 1차 및 2차 노내 시험자료를 활용한 COSMOS 코드 검증”, KNS 2004 춘계학술대회, 2004.



부 록 1. HALDEN의 재계장 자료



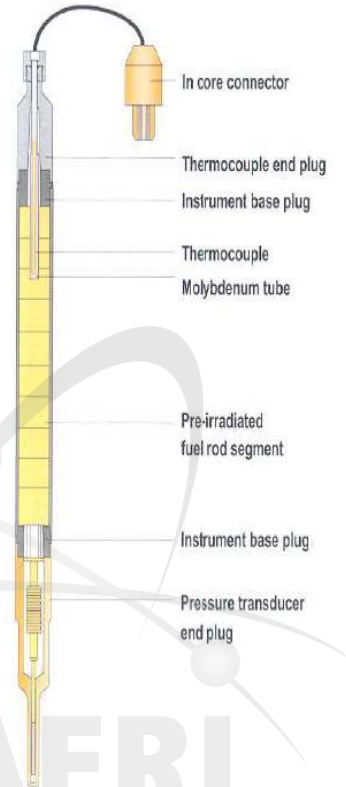
INSTRUMENTATION OF IRRADIATED FUEL RODS



RE-INSTRUMENTATION OF FUEL SEGMENTS

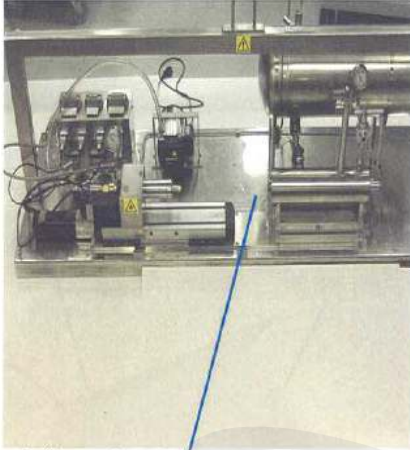
Re-instrumentation procedure:

- Inspection of fuel rod (includes neutron radiography)
- Fuel rod cut to length
- De-fuelling of fuel rod ends
- Oxide layer removed from cladding ends
- End plugs welded to fuel rod (pressure transducer and thermocouple base plugs)
- Fuel rod filled with liquid CO₂ and frozen with liquid N₂
- Drilling of centre hole (vacuum process)
- Assembly of Mo-tube
- Fuel rod dried at 300 °C for 72 hours (vacuum)
- Second part of pressure transducer end plug welded to fuel rod
- Second part of thermocouple end plug welded to fuel rod
- Measurement of fuel rod free-volume and gas flow properties
- Fuel rod evacuated, filled with He and seal welded
- He leak-test of fuel rod
- Check-out / testing of fuel rod instrumentation
- Final inspection of fuel rod (includes neutron radiography)





DRILLING EQUIPMENT FOR IRRADIATED FUEL RODS



Drilling equipment

CE- approved equipment designed for use in hot-cells.

Designed for handling by remotely operated manipulators and operated by a controller system (fabricated at Halden) with computer interface.

The equipment is used for drilling of holes for attaching high temperature thermocouples on irradiated fuel rods (irradiated in commercial nuclear power plants).

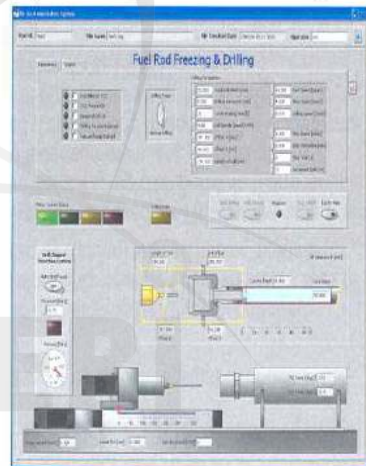
To be able to drill holes in fuel pellets (UO_2 / MOX), the fuel rod is filled with CO_2 in order to freeze the fuel pellets. The CO_2 is frozen by use of liquid N_2 ($-190^\circ C$).

The drilling is done by use of a hollow diamond drill. Particles and dust from the fuel is continuously being removed by a vacuum cleaning system through the hollow drill during drilling.



Drilling of hole in fuel rod for attaching high temperature thermocouple.

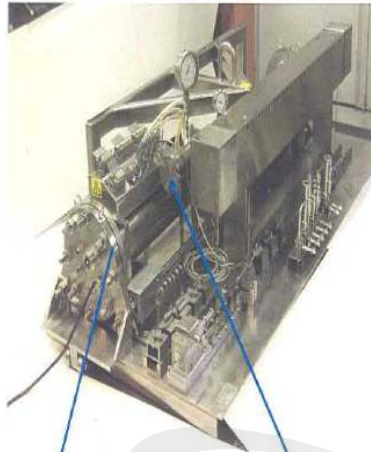
The high temperature thermocouples are operating up to $1800^\circ C$. The instrumented fuel rods are installed in loop system operating at 165 bar and $325^\circ C$.



User interface



WELDING EQUIPMENT FOR ATTACHING INSTRUMENTS AND END PLUGS ON IRRADIATED FUEL RODS



Welding chamber

He leak-test chamber



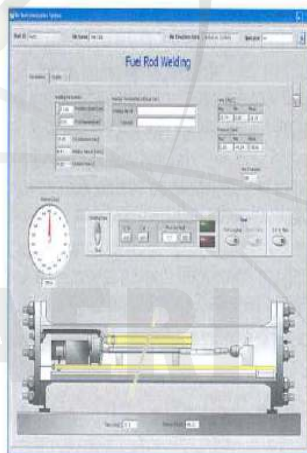
TIG-welding of instrumented end-plug onto a fuel rod.

CE- approved equipment designed for use in hot-cells.

Designed for handling by remotely operated manipulators and operated by a controller system (fabricated at Halden) with computer interface.

The equipment are used for TIG-welding instruments (pressure sensors, high temperature thermocouples, cladding extensometers, etc.) end plugs on irradiated fuel rods and materials. The instruments are operating at pressure from 1 – 150 bar and temperatures up to 1800°C.

The equipment are also used for he-leak testing / qualification of welds.



User interface



EQUIPMENT FOR PRESSURE AND FREE VOLUME MEASUREMENT ON IRRADIATED FUEL RODS



Measuring unit with store tanks



Puncturing unit

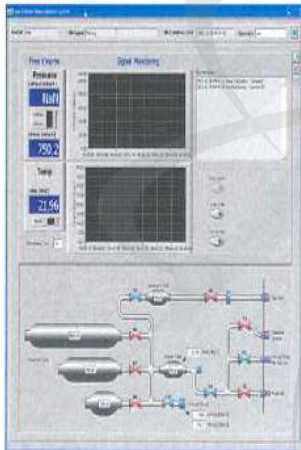
CE- approved equipment designed for use in hot-cells.

Designed for handling by remotely operated manipulators and operated by a controller system (fabricated at Halden) with computer interface.

The equipment are used for free volume and pressure measurement on irradiated fuel rods.

The puncturing unit drills a hole in the fuel rod, and the pressure is found by measuring the pressure difference by sending the gas between different storage tanks (with different volume). During this operation, both temperature and pressure are monitored on-line.

By pumping vacuum in the fuel rod, the free volume can be found by measuring pressure difference between the storage tanks.



User interface



Drill support

Drilling of hole on a fuel rod for pressure and free volume measurement.

Measuring range:

- Pressure: 0 – 200 bar
- Free volume accuracy $\pm 0.05 \text{ cm}^3$



COMPLETED INSTRUMENTED FUEL ROD WITH HIGH TEMPERATURE THERMOCOUPLE AND PRESSURE SENSOR



서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
KAERI/AR-890/2011					
제목 / 부제		루프활용 핵연료 재계장 조사 시험			
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		이철용 (조사기술 고도화 및 미래원자력 조사기술개발)			
연구자 및 부서명		정창용, 홍진태, 안성호(핵연료 종합성능검증 조사시험기술개발), 주기남(조사기술 고도화 및 미래원자력 조사기술개발)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2011
페이지	42p.	도표	있음(●), 없음()	크기	26 Cm.
참고사항					
공개여부	공개(●), 비공개()		보고서종류	기술현황분석보고서	
비밀여부	대외비(), _ 급비밀				
연구위탁기관				계약번호	
초록 (15-20줄내외)		<p>FTL를 대상으로 재계장된 연료봉에 대해 조사시험과 관련된 기술현황을 분석하였다. 이를 위해 노르웨이 HALDEN을 중심으로 개발된 재계장 기술현황과 국내에서 수행된 기술현황을 분석하였다.</p> <p>HALDEN 의 재계장 장비 중 천공장치는 최근에도 제작되었지만 재계장에 대한 연구는 90년대 후반 이후로 활발하게 진행되지 않는 실정이다. 한편 국내에는 재계장 기술 개발에 대한 연구가 일부 수행되었지만 실제로 조사시험까지는 진행되지 못하였다. 다만 재계장 조사시험과 유사한 DUPIC 핵연료 조사시험을 통해 축적된 경험과 기술은 앞으로 루프활용 재계장 조사시험에도 직접 활용될 수 있다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)		FTL, 재계장, 천공장치, 조사시험, 원격 조사시험			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No. INIS Subject Code	
KAERI/AR-890/2011					
Title / Subtitle		The Re-instrumented Irradiation Test of Nuclear Fuel using Fuel Test Loop			
Project Manager and Department (or Main Author)		Chul Yong Lee (Improvement of Irradiation Technology and Development of Irradiation Technology for Future Nuclear Reactors)			
Researcher and Department		C.Y Joung, J.T Hong, S.H Ahn, K.N Choo			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2011
Page	42 p	Ill. & Tab.	Yes(●), No ()	Size	26 Cm.
Note					
Open	Open(●), Closed()		Report Type	Technical Report	
Classified	Restricted(), ___Class Document				
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)		<p>This report is the status art report on re-instrumentation. The main techniques described in this report are technology that is developed in Norway HALDEN and domestic research facilities.</p> <p>Although re-instrumentation is not gone vigorously after 1990, HALDEN's re-instrumentation equipment was made until recently. In the meantime, re-instrumentation research was gone in domestic research facilities, but irradiation test did not performed actually. But DUPIC fuel irradiation is similar to re-instrumentation, so the irradiation test can be utilized directly to the Fuel Test Loop.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		FTL, Re-instrumentation, Drilling Equipment, Irradiation Test, Remote Irradiation Test			