

보고서 번호 : 2004-07호(040618W2)

## 원전 사고 · 고장 조사 보고서

제목 : 월성 2호기 결함연료탐지계통 누설 보수를 위한  
원자로 수동정지(사건발생일 : 2004. 6. 18)

2004. 6. 21



한국원자력안전기술원

사건 제목 : 월성 2호기 결합연료탐지계통 누설  
보수를 위한 원자로 수동정지

조 사 자 : 운영기술분석실 책임연구원 김 갑  
금속재료실 책임연구원 정구갑  
방사선평가실 선임연구원 정규환

검 토 자 : 운영기술분석실장 책임연구원 금오현

조사기간 : 2004. 6. 18 ~ 6. 21

# 원전 사고 · 고장 조사 보고서

보고서 번호 : 2004-07호(040618W2)

제 목 : 월성 2호기 결합연료탐지계통 누설 보수를 위한 원자로 수동정지

발생 호기 : 월성 2호기

발생 일시 : 2004. 06. 18 05:10

원자로형 : PHWR 2Loops

설 계 자 : AECL

원자로출력 : 730MWe

상업운전일 : '97. 7. 1

발전소 운전모드, 상태 : Mode 1, 안정

## 사건 요약

월성 2호기 100% 원자로출력에서 원자로건물내 공기중 삼중수소 농도가 2004년 6월 17일부터 증가하기 시작함에 따라 원인을 조사한 결과, 원자로냉각재계통에서 소량의 냉각재 누설이 있음을 확인하고 보수를 위하여 6월 18일 05:10에 원자로를 수동으로 정지하였음.

정지후 점검결과 누설부위는 결합연료탐지계통 시료채취배관(C-9 채널)에서 마모에 의한 Pin Hole을 통해 냉각재가 누설되었음을 확인함. 한수원은 손상된 시료채취배관을 정비하고, 이후 현장점검팀이 원자로건물 내부를 정밀 조사하였으나 추가 누설 부위가 없음을 확인하였음.

현장조사 결과, 원자로냉각재 누설률은 최대 8.3 kg/hr로서 기술지침서 제한치(200 kg/hr) 이내이며 이번 사건으로 인한 외부로의 방사성물질 (삼중수소) 방출량은 일일 최대 3.44 TBq로써, 이는 일일 관리기준치 (11.1TBq)의 약 31%정도임을 확인함. 금번 사건에 의한 방사성 물질 방출에 따른 환경으로의 영향은 거의 없었으며, 원자로는 안전한 상태로 유지되었음을 확인함.

## 1. 개 요

월성 2호기 원자로건물내 공기중 삼중수소 농도가 2004년 6월 17일부터 증가하기 시작함에 따라 원인을 조사한 결과 결합연료탐지계통의 시료채취배관에서 소량의 누설이 있음을 확인하고 보수를 위하여 100% 원자로출력에서 6월18일 03:00부터 출력감발을 개시하여 6월 18일 04:34에 발전기 계통병해, 05:10에 원자로를 수동으로 정지하였음.

원자력안전기술원은 냉각재누설의 원인 및 후속조치 등을 조사하고 원자로냉각재계통 건전성과 원자로건물내 삼중수소 농도 증가에 따른 영향평가를 수행하였음.

## 2. 사건 경위

‘04.6.17 06:00 경부터 원자로건물 핵연료교환기실(R-108)의 공기중 삼중수소농도의 증가를 감지한 이후 사건경위는 다음과 같음.

### 6. 17

06:00~ 삼중수소농도 분석결과 농도상승추세 확인 및 원자로 건물 내 중수 누설 탐지절차 수행

11:27~15:41 전일 교체된 연료채널 연료관 마개 점검

- T-16 CH : A/C side 차폐마개 교체

- H-07 CH, J-22 CH : C side 차폐마개 교체

18:12 주감속재 P/P#2 정지, P/P#1 기동

22:50~24:00 Camera 이용 결합연료탐지계통 시료채취배관 누설점검

### 6. 18

03:00~03:40 원자로 출력감발 (100%FP → 60%FP)

03:40~04:10 발전기 출력감발 (400MWe → 150MWe)

04:10~04:34 소내부하 절체 및 계통병해(6/18 04:34)

04:34~05:10 원자로 정지 (05:10)  
05:10~06:00 원자로 고온 상태 원자로건물 점검  
06:00~10:00 냉각재 냉각 (260 → 54℃)  
10:00~12:00 원자로 냉각 상태 원자로건물 점검

### 3. 조사내용 및 확인사항

#### 가. 사건발생 원인

냉각재 누설은 그림 1에 나타난 바와 같이 결함연료탐지계통 시료채취배관의 Pin Hole을 통하여 발생한 것으로 확인됨. 배관 Pin Hole의 발생원인을 조사한 결과, 고온·고압의 원자로계통 운전상태에서의 위치 변형(그림 2 참조)에 따라 배관간에 접촉이 발생하였으며 원자로 계통의 고유진동과 원자로건물 내의 냉방 및 환기를 위한 지역냉방기에서 발생하는 고속의 공기 유동(손상배관 주변 최대 풍속 : 7.3 m/s)에 의한 진동에 따라 배관간 상호 접촉면 마찰로 인한 마모 손상으로 판단됨. Pin Hole이 발생한 배관은 상부의 C-9배관이며 상대측은 하부의 H-8배관으로서 H-8배관도 마모된 상태이었음. C-9배관은 접촉부위에 접촉에 의한 마모를 방지하도록 비석면 내열테이프를 '99년도에 설치하였으나, 이번 사건의 경우 내열테이프까지도 손상되었음.

결함연료탐지계통 시료채취배관의 마모손상에 의한 냉각재 누설 사례는 '86년 이후에 월성 1호기에서 수차례 발생한 사례가 있어 후속기인 월성 2,3,4호기에서는 배관간의 이격을 넓히는 등 설계가 개선되었으나, 2004년 5월에 월성 3호기에도 유사 사건이 발생한 바 있음.

#### 나. 배관 손상 내용

- 손상 위치

DN 계통 손상튜브 위치는 핵연료 교환기실(A측)의 R-108 Room 상부지역에 위치하고 있음. 손상 튜브 다발 지역은 4대의 지역공기냉방기에서 직접 바람을 받는 지역에 위치하고 있음. 손상 시료채취배관 C-9은 상부에 위치

하고 H-8은 하부에 위치하며 두 배관은 약 60° 각도로 교차됨.

DN 계통 손상 튜브는 지지대로부터 멀리 떨어진 부위로서 냉방기의 바람에 의한 영향으로 튜브의 진동이 일어날 수 있는 자유단임.

- 손상 현상

손상 부위(C-9 배관)는 0.62 x 0.22 mm 크기의 1개 핀홀과 16.14 mm의 길이방향으로 몇 단의 턱을 진 마모로서 이는 접촉 부위가 이동한 것으로 추정됨. 두개의 시료채취배관중 H-8 시료채취배관은 길이 방향으로 비교적 넓은 면적(약 19~20 mm)에서 마찰이 이루어진 반면, C-9은 H-8과 약 60° 각도로 좁은 면적에서 집중적으로 마찰이 발생하여 C-9의 마모량이 많은 것으로 판단됨.

- 손상 배관의 접촉원인

냉각재계통 냉각상태에서(계획예방정비기간)는 간극측정 결과 약 9 mm정도로 서로 접촉되지 않으나 가열상태에서는 냉각재공급자관(Feeder)의 열팽창에 의한 위치변형에 따라 시료채취배관 C-9이 H-8과 접촉되는 것으로 추정됨. 원자료가 정상운전 상태가 되면 크램프로 시료채취배관을 잡고 있는 Insulation Cabinet이 하향으로 3/8" (9.5 mm) 이동하여(그림 2 참조) C-9 배관이 같이 이동되나 배관지지대 위에 놓여있는 H-8 시료채취배관은 고정단에 구속되어 위치변동이 없기 때문에 접촉되는 것으로 판단됨.

#### 다. 결합연료탐지계통 시료채취배관

결합연료탐지계통은 그림 3과 같이 결합 연료관의 위치를 확인하는 계통으로서 연료 결합시 냉각재 내로 방출되는 지발중성자 모 핵종(I-137, Br-87)을 검출하여 연료결합 채널을 판별하는 계통임. 결합연료탐지계통의 시료채취배관은 냉각재공급자관에서 분기되어 결합연료탐지계통으로 냉각재 시료를 이송하는 배관으로서 총 380개가 설치되어 있으며 직경은 3/8 인치의 소구경임.

결합연료탐지계통 시료채취배관 (재질: SS304L)은 좁은 공간에 복잡하게 배치되어 있는 관계로 배관과 지지대 또는 배관간의 상호진동으로 접촉되어 마모로

인한 손상 가능성이 있음. 이러한 마모손상을 방지하기 위해 접촉이 예상되는 부위의 양면에 유사재질의 얇은 덧씌우개 (Wear ring, 재질: SS301) 또는 내열 테이프를 장착하게 되어 있음.

#### 라. 사건발생시 발전소 운전상태의 적합성

원자로건물내 삼중수소 농도는 최대 590.6 DAC (6월 18일 04:50, R-108)이며 냉각재 누설은 표 1과 같이 최대 8.3 kg/hr 정도로 운영기술지침서 제한치 (200kg/hr)의 6.7% 정도였음. 또한 일일 삼중수소 배출량은 최대 3.44TBq/day로서 표 2와 같이 자체설정 관리기준 (월간 제한치 338TBq의 1/30인 11.1TBq)의 31% 이내로 유지되었음.

표 1. 냉각재계통 중수 누설률

|       | kg/hr |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 일 자   | 6/11  | 6/12 | 6/13 | 6/14 | 6/15 | 6/16 | 6/17 | 6/18 | 6/19 |
| 중수누설율 | 0.3   | 0.5  | 0.3  | 0.2  | 0.2  | 0.2  | 3.2  | 8.3  | 3.4  |

표 2. 일일 삼중수소 배출량

| 일 자                 | 6.14 | 6.15 | 6.16 | 6.17 | 6.18 | 6.19 | 6.20 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 배출량(TBq)            | 0.21 | 0.17 | 0.22 | 3.44 | 2.36 | 0.73 | 0.26 |
| 일일 배출관리기준치 대비 분률(%) | 1.9  | 1.5  | 2.0  | 31.0 | 21.2 | 6.6  | 2.3  |

#### 마. 사건관련 발전소 주요변수 추이

- 원자로건물내 삼중수소 농도의 최대치

표 3. 원자로건물내 삼중수소 최고농도(6월 18일 04:50시 기준)

| 위치      | R501  | R107(C측) | R108(A측) | F/C(C측) | F/C(A측) |
|---------|-------|----------|----------|---------|---------|
| 농도(DAC) | 197.3 | 203.7    | 590.6    | 229.9   | 252.7   |

- 월성2호기의 삼중수소 농도가 월성3호기 경우보다 높은 이유  
 월성2호기의 원자로 건물중 삼중수소 농도 증가폭이 유사한 고장을 일으켰던 월성3호기의 경우보다 높았던 이유는 다음과 같은 원인에 기인한 것으로 판단됨.
  - 냉각재내 삼중수소 농도의 차이 : 월성2호기의 냉각재내 삼중수소 농도 (1.56 Ci/kg)가 월성3호기의 냉각재내 삼중수소 농도 (0.75 Ci/kg, 2004. 5. 25. 09:00 기준) 보다 2배 이상 높았음.
  - Pin Hole의 크기 차이 : 월성2호기에서 발생한 Pin Hole 크기 (0.62 X 0.22 mm)가 월성3호기에서 발생된 Pin Hole의 크기 (직경 0.35 mm hole)보다 약 40% 가량 더 크기 때문에 거의 동일한 냉각재 온도와 압력 조건에서 월성 2호기에서 짧은 시간에 더 많은 양의 중수 (삼중수소)가 누설되었을 것으로 추정됨.
  - 원자로 건물 공기 공급/배기 유량의 차이 : 월성2호기의 공기 공급/배기 유량은 각각 8,676 CFM, 15,090M<sup>3</sup>/hr인데 반하여 월성3호기의 경우 공기 공급/배기 유량이 각각 11,615 CFM, 17392M<sup>3</sup>/hr임. 따라서 공기조화설비 (이슬점 온도는 영하 40도 내외로 월성2호기와 월성3호기가 서로 비슷함) Discharge Flow에 의해 공급되는 공기량과 원자로 건물 Vent Exhaust Line을 통해 배출되는 공기의 절대적인 양에서 차이가 남.
  - 시료채취관의 이격 거리 차이 : 월성2호기의 시료채취관 입구와 고장 발생지점까지의 거리(1.5 m)가 월성3호기의 경우(약 10 m)보다 가까움. 따라서 확산의 정도에서 차이가 발생하므로 월성2호기에서 삼중수소의 농도가 높게 평가되었을 가능성이 있음.
- 월성2호기 원자로건물내 삼중수소 농도의 변동 (Fluctuation) 이유  
 핵연료 종단마개 (Closure Plug) 누설점검을 위해 Shielding Door를 열고 닫음으로 인해 공기의 유로가 바뀌어 측정치에 영향을 준 것으로 추정되며 이는 지난 월성3호기의 경우에서도 유사한 현상을 관찰할 수 있었음. 또한 순간 방출량이 많을수록 풍량의 변화에 따른 측정치 변동폭이 커진 것으로



추정됨. 따라서 측정값의 변동은 분석, 측정상의 오차나 불확도에 기인한다고 보다는 공기유로의 변화로 추정됨.

#### 바. 사업자 조치의 적합성

##### 1) 원자로 정지 전

‘04.6.17 06:00 경 원자로건물 보일러실 지역의 공기중 삼중수소농도의 증가를 인지한 이후 사업자는 점검지침서<sup>1)</sup>에 따라 다음의 조치를 취하였음.

- 가) 공기시료채취 주기 단축(8시간 → 4시간 → 2시간 또는 1시간)
- 나) 출력운전중 원자로건물내 접근가능지역(지하 지역) 누설여부 점검
- 다) 누설부위 확인을 위해 주감속재 펌프 정지(#2) 및 기동(#1)
- 라) 전일 교체된 핵연료채널에 대한 핵연료 연료관마개 점검 및 누설검사, A, C Side 차폐 마개 교체
- 마) Dryer 회수 중수 농도 분석 등 중수증기회수계통 감시 강화
- 바) 원자로건물내 CCTV를 통해 누설지역 확인

상기 확인조치에도 불구하고 누설지역내 정확한 누설부위 확인이 불가능하여 사업자는 원자로를 정지시킨 후 누설부위 확인 및 정비를 수행하기로 결정하였음.

6.18 05:10시 원자로 정지 및 냉각/감압을 실시한 후 현장 점검결과, 결합연료탐지계통 시료채취배관(C-9 채널) 부위에서의 누설을 확인하였고, 이에 따라 누설부위를 정비하고 원자로건물 내부 전체에 대하여 세부점검을 실시하였음.

상기와 같은 누설관련 사업자 조치에 대해 평가한 결과,

- 누설관련 점검절차에 따른 확인절차를 이행하였으며,
- 월성 2호기 운영기술지침서 운전제한조건 3.4.7.2, “운전중 누설”의 미확인 누설률(제한치 200 kg/hr)의 4.1% 정도와 원자로건물 내 삼중수소 농도

---

1) 운전-008(원자로건물내 삼중수소농도 증가시 점검)

증가후 누설확인 및 보수를 위해 절차서에 따라 원자로 정지조치가 수행 되었으므로, 방사성물질의 외부누설 최소화 및 미확인누설의 확대방지 측면에서 평가할 때 적절하였음.

## 2) 원자로 정지 후

원자로 정지후 확인된 사항 및 조치사항은 다음과 같음.

가) 결합연료탐지계통 시료채취배관(C-8, H-8 채널) 누설부위 확인 및 정비  
- 손상배관의 절단 및 제거후 Swagelok 체결방식으로 연결(그림 4참조)

나) 원자로건물 내부 추가 누설 여부 점검

- 정비한 시료채취배관(C-9, H-8 채널)을 포함한 원자로 건물내부에서 누설이 없음을 확인

다) 기존에 설치된 내열 테이프 전량 상태 점검 및 교체 보강

- 내열 테이프만 설치된 357개 중 138개를 신품으로 교체하고 219개는 Wear ring으로 대체 설치(신품 내열테이프로 교체한 138개소는 곡관부위로서 Wear ring 설치가 어려움)  
- 기존 Wear ring 설치부분 431개소에 내열테이프 신규추가 설치

라) 시료채취배관 교차부위 1,747개소(직관부위)에 대해 전량 점검 및 미설치 개소 추가설치

- Wear ring 기설치 개소 : 1,049개소  
- Wear ring 추가설치 : 397개소(대체설치 219 및 추가설치178)  
- 시료채취배관 교차 간격이 20 mm 이상인 개소 건전성 확인 : 301개소

마) 기 설치된 Wear ring 중 개선이 요구되는 225개소 전량 교체(위치이동 및 회전부위 65개소 및 접촉흔적부위 160개소)

이상과 같이 원자로 정지후 누설점검 및 보완조치를 실시하였으며, 제반조치의 적절성 확인을 위해 원자로 승압 후 재확인을 하였으므로 사업자의 조치는 적절한 것으로 평가됨.

## 2) 보수의 적절성

### 1) 손상된 배관의 보수방법

- 결합연료탐지계통 시료채취배관의 연결방법으로 건설 시에는 자동용접 (GTAW)으로 수행되지만, 운전 중에는 배관 보수방법으로 자동용접방법 이외에 스웨지락(swagelok)에 의한 보수를 허용하고 있음(설계자인 AECL은 스웨지락의 피팅연결을 허용하고 있으며 인증을 위한 누설시험을 수행한 바 있음).
- 동 보수방법은 '04. 5월 월성3호기에서 발생한 유사 손상 배관에도 이를 적용하여 그 성능이 입증된 바 있음(시험성적서 확인).

### 2) DN 계통 배관의 건전성 확인 및 조치방법

- 손상이 발생한 부위와 유사한 조건(고정되지 않은 자유단, 배관간 근접으로 진동시 접촉 가능부위)의 부위를 조사하여 교차되는 배관의 개소와 간격을 파악하고 설치된 Wear ring의 이탈여부, 내열 테이프의 변형여부를 파악하였음(KINS 권고의견 반영)
- 점검 결과, 교차 배관의 간격이 20 mm이하 부위, Wear ring 이탈 부위, 내열 테이프 변형부위, 배관 마모 부위에 대한 보강조치 작업을 수행하였음.
- 월성2호기의 손상된 배관에 대한 보수방법은 적절한 것으로 판단됨.

## 4. 안전성 평가

냉각재 누설률은 최대 8.3 kg/hr 정도로 운영기술지침서 제한치 이내였으며, 원자로건물 삼중수소 최대농도도 590.6 DAC이었음. 또한 외부로의 방사성 물질(삼중수소) 방출량은 일일 최대 3.44 TBq로서 이는 일일 자체 관리기준치 (11.1 TBq)의 31 %이내였음.

### 가. 냉각재 누설

냉각재 누설률은 최대 8.3 kg/hr로 운영기술지침서 제한치 200 kg/hr 대비 4.1% 정도의 매우 낮은 수치로서 원자로의 안전성에 미치는 영향은 없었음.

#### 나. 작업종사자 피폭량

- 월성3호기 냉각재 누설과 관련하여 원자로건물의 삼중수소 농도가 증가되었던 2004년 6월 17일 06:00 부터 6월 21일 09:00까지 이번 건과 관련된 작업을 수행한 작업자는 총 71명이었음.
- 이들 작업자에 대한 집단선량은 총 72.42 man-mSv (외부 69.56 + 내부 2.86 man-mSv)로 평가되었으며 동 작업자들에 대해 개인선량계(ADR)로 평가된 외부피폭 방사선량의 경우, 최고 피폭자의 선량은 5.66 mSv였음.
- 또한 동 작업자들의 소변시료 측정결과에 의한 내부피폭 선량평가 결과는 최고 피폭자의 선량이 0.71 mSv로 평가되었음.
- 방사선작업관리는 방사선작업계획서에 근거하여 수행되었으며 고농도의 삼중수소 오염구역 출입 작업자에게는 휴대용 자가호흡기, 공기공급형 등 적절한 호흡보호구를 지급하였으므로 적절하였음.

#### 다. 방사성물질 (삼중수소) 방출량

냉각재가 누설되기 전인 6월 14일부터 발전소를 정지한 6월 18일까지 원자로 건물 외부로의 일일 삼중수소 배출량 평가결과에 근거하여 제한구역경계에서의 주민피폭선량 계산결과는 최대개인에 대하여 0.0423  $\mu$ Sv로 잠정 평가되었으며 이 값은 일반인의 선량한도인 1 mSv의 0.0042 %에 해당되는 값으로 환경에 미친 영향은 거의 없었음.

### 5. 개선 및 보완요구사항

금번 사건의 보완조치 후속확인 및 재발방지를 위해 다음의 후속조치가 요구됨.

- 가. 결합연료탐지계통 시료채취배관 손상을 확인하고 보수할 수 있는 최적의 정비 및 관리절차서를 개발할 것.
- 나. 계획예방정비시마다 시료채취라인 및 각종 신호 도압관에 대한 육안점검 실시 및 배관지지 상태 보강과 접촉부 해소 작업 수행
- 다. 결합연료탐지계통 시료채취배관간의 진동을 방지할 수 있도록 고속의 공기 유동을 제거할 수 있는 방안을 강구할 것.
- 라. 동일 설계의 월성 1,3,4호기에 대해서 상기와 동일한 보완조치를 수행할 것.

마. 장기적 대책으로 결합연료탐지계통 시료채취배관의 이격을 유지할 수 있는 근원적 방안을 강구할 것.

## 6. 결론

금번 월성 2호기 냉각재 누설 및 원자로 수동정지 사건에 대한 현장조사결과, 냉각재 누설에 따른 원자로냉각재계통의 건전성 저하는 발생되지 않았으며 방사선 작업종사자 피폭방사선량은 낮은 수준이었고 방사성 물질의 방출 등은 일일 관리 기준치 이하로서 환경에 미치는 영향은 거의 없었음

다만, 동일 유형의 사건 재발방지를 위해 상기에서 제시한 보완요구사항에 대하여 적절한 대책수립이 요구됨.

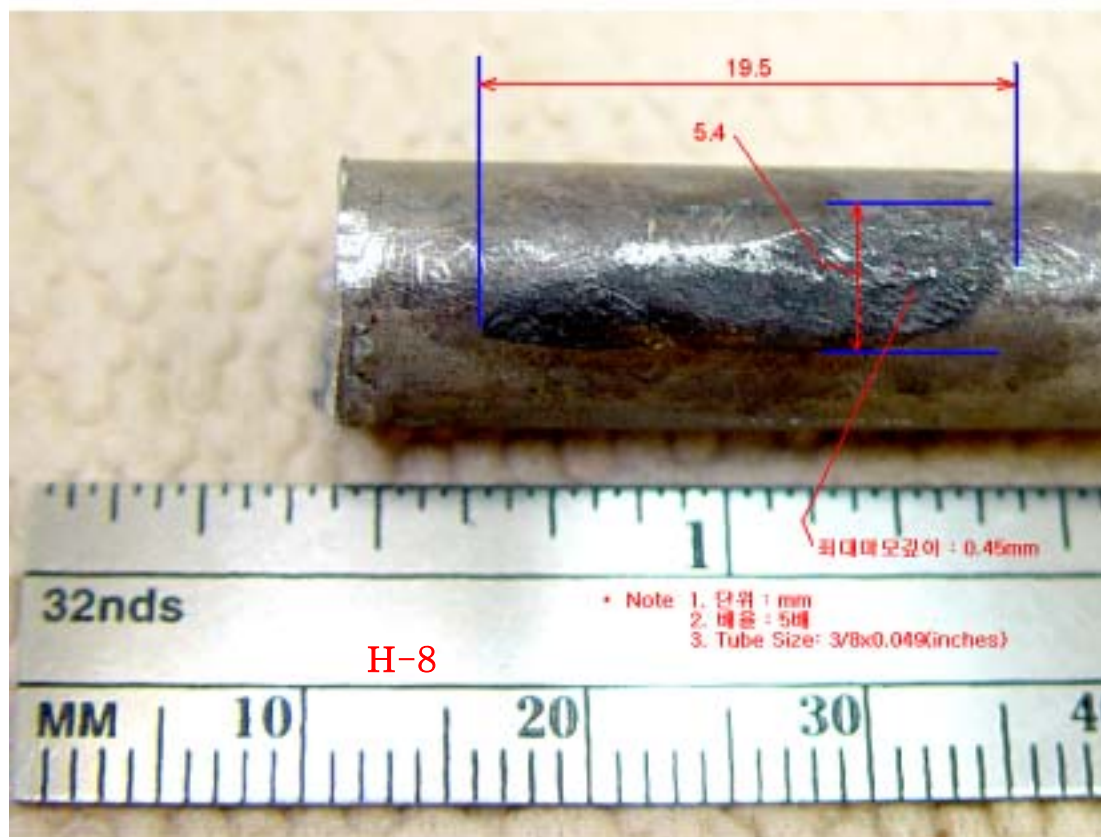


그림 1. 시료채취배관의 손상부위

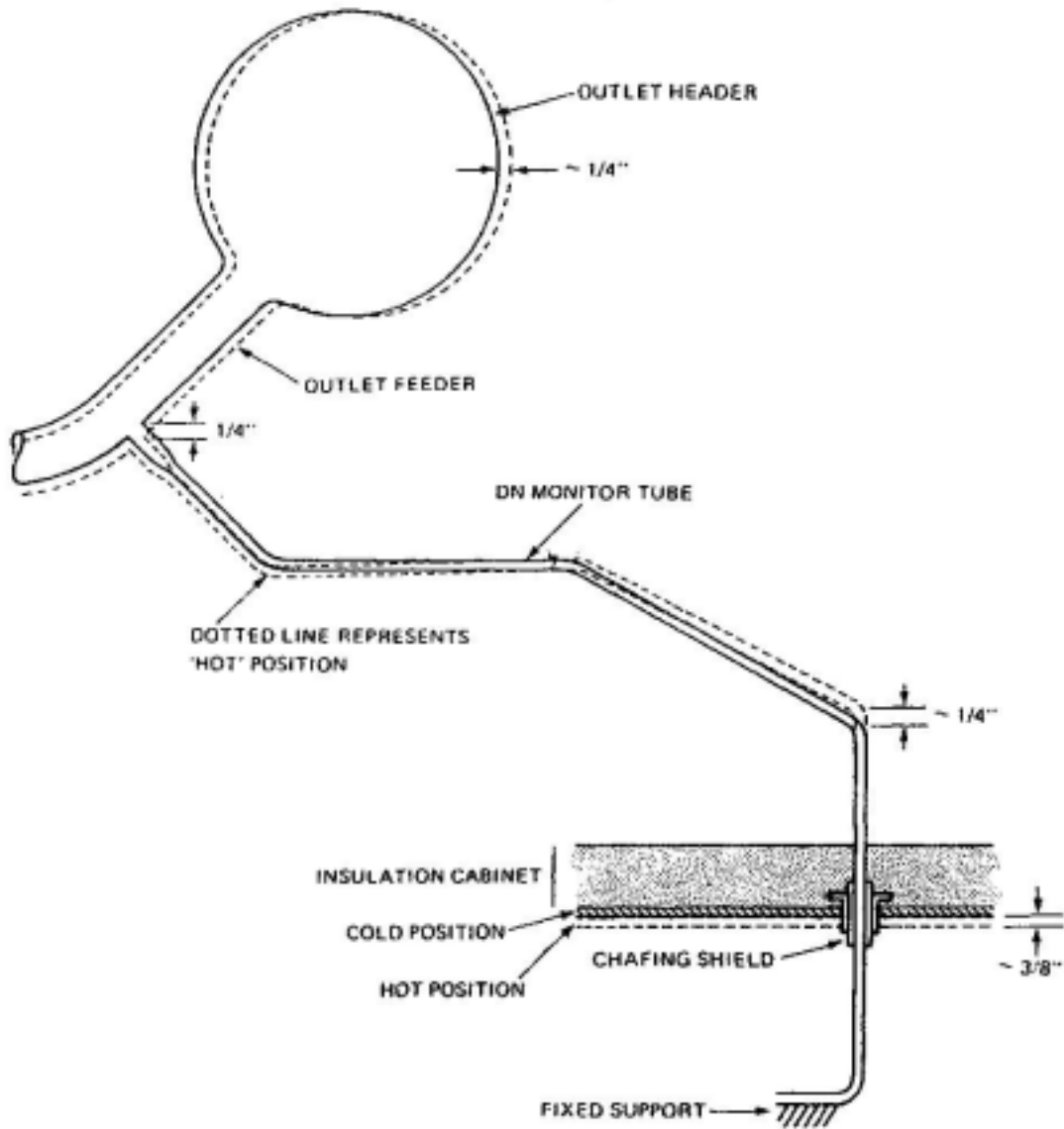


FIGURE 3 CHANGE IN THE SHAPE OF DN TUBING  
DUE TO THERMAL EXPANSION

그림 2. 원자로 정상운전시 결합연료탐지계통 시료채취배관 변형  
(CANDU 설계매뉴얼)

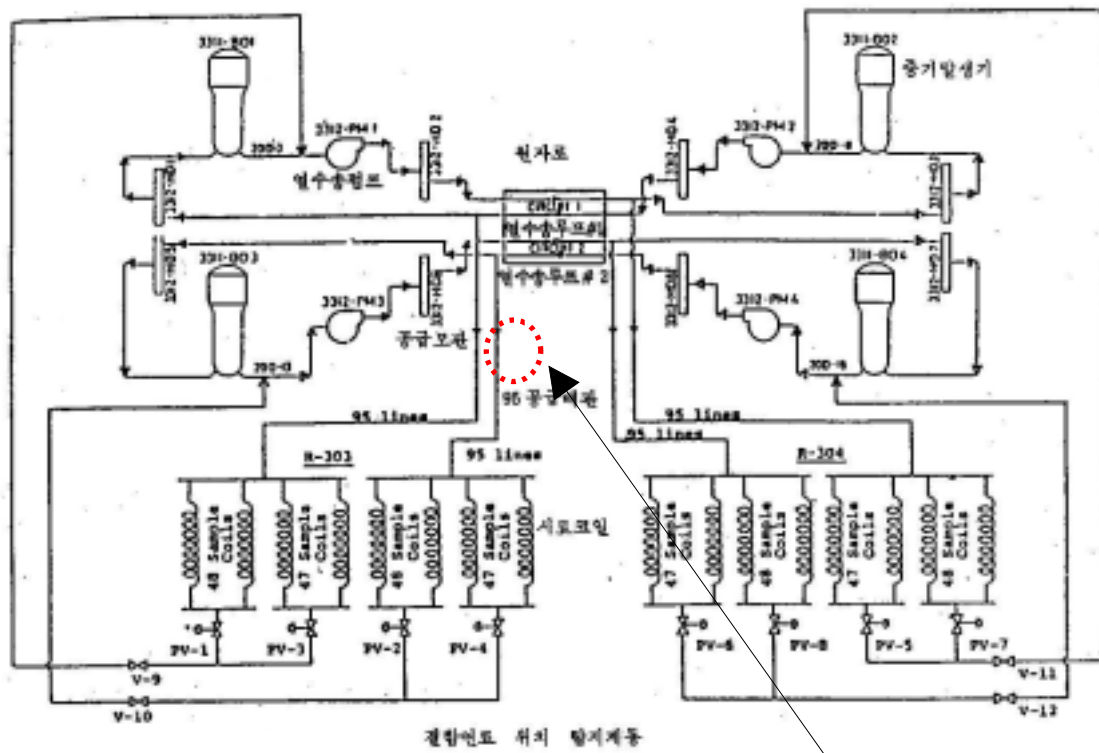


그림 3. 결합연료 탐지계통 손상부위



그림 4. 절단후 새로 연결한 부분(Swagelok)





그림 5. 접촉가능부위 추가 덧씌우개 설치

삼중수소 농도변화

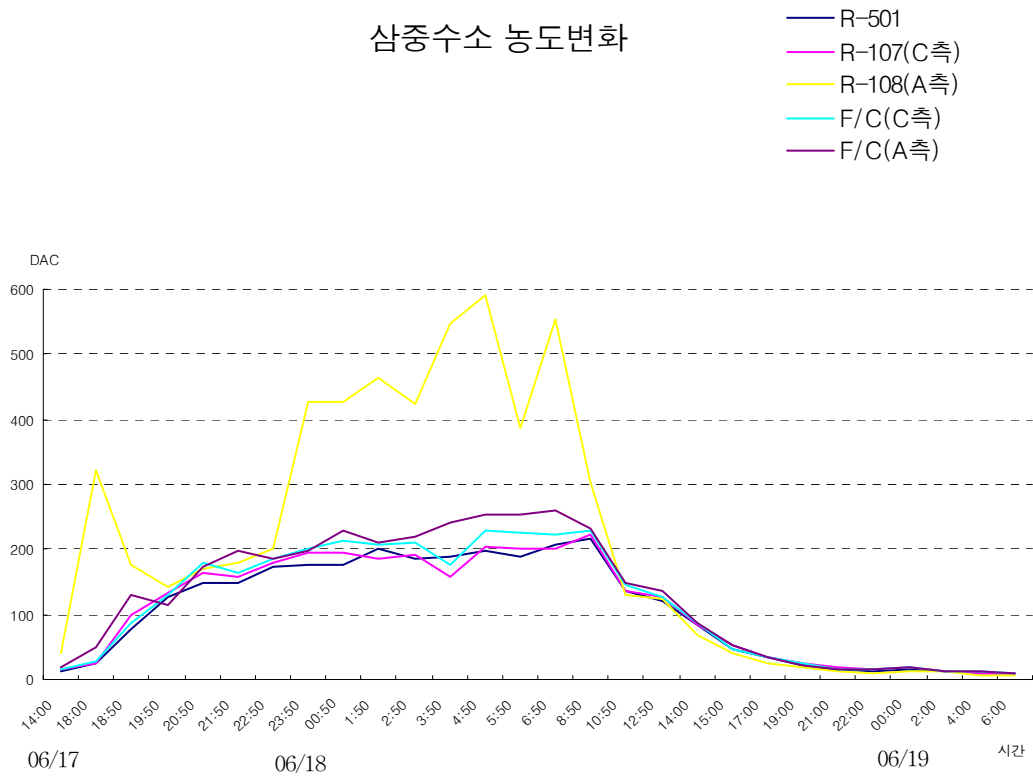


그림 6. 원자로건물 공기중 삼중수소 농도 변화 추이

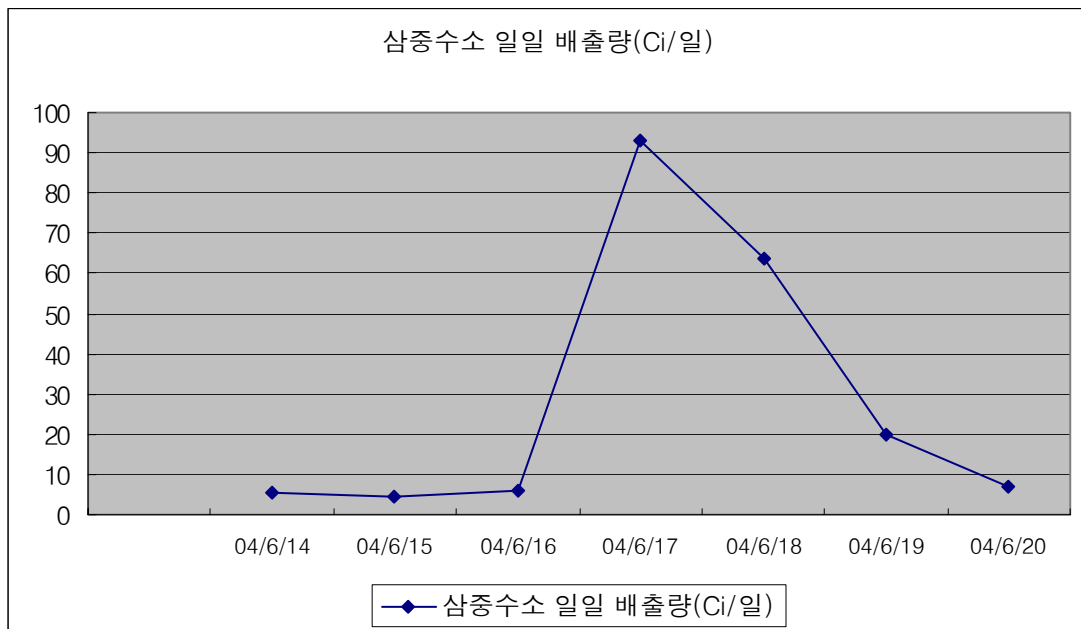


그림 7. 삼중수소 배출량 추이

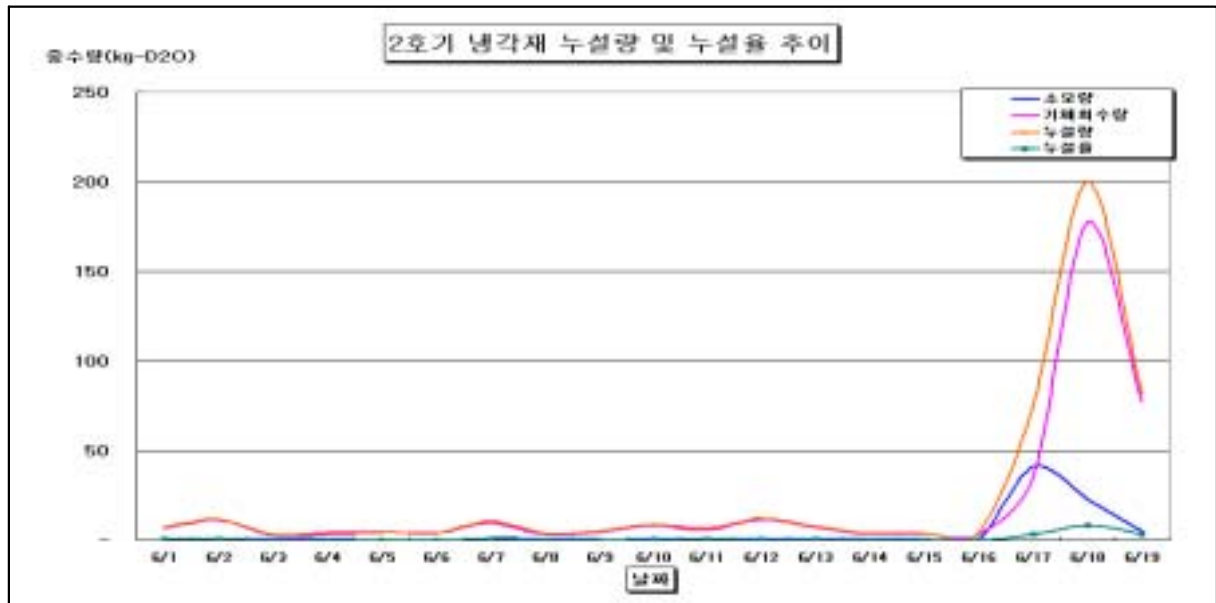


그림 8. 냉각재 누설량 및 누설율 추이



그림 9. 현장조사팀 원자로건물내 조사



그림 10. 손상배관에 설치되었던 내열테이프