제2호 안건 관련 보고

# 가동원전 안전등급설비 FSAR 불일치 조사 중간현황 및 향후계획

2023.01.12(목) 한국수력원자력(주) 설비기술처

## Ⅰ 개 요

□ 그간 **안전등급설비 허가서류 불일치 사례**('17 ~ '21년)가 여러 차례 확인됨에 따라, **후속조치 일환으로 가동원전 확대점검*을 진행 中**임

* 제136회 원자력안전위원회에 불일치 개연성이 있는 FSAR 3·4·5·6·10장 점검계획 보고('21.4월)

**< FSAR 불일치 점검 주요 경과 >**

◇ (**'19년 ~ '21년**) FSAR 표3.11 기기검증 대상 설비 조사

◇ (**'21.4월 ~**) FSAR 3·4·5·6·10장 가동중 보수교체 품목에 대해 조사 中

- (**'22.11월**) 한빛4호기 정기검사 중 원자로용기 스터드·너트*(건설시 설치품 등) 정보가 FSAR과 불일치함이 확인되어 스터드류 집중 점검 진행 中

  * 원자로헤드와 원자로본체를 체결하는 부품으로 호기별 각각 48 ~ 58개(안전1등급)

## Ⅱ 점검 현황

□ **(점검내용)** 원자로용기, 증기발생기(SG) 및 가압기의 스터드·너트 조사

○ **(불일치)** FSAR에 기재된 정보가 제작당시 품질서류 및 현장 설치품의 정보와 일치하는지 조사

– 원자로용기 : 총22기* 중 **6기 실물 확인 완료**, 16기**는 도래하는 계획예방정비 일정에 따라 실물 확인 후 조사 보완예정

* 중수로(월성2·3·4호기) 원전 제외(원자로용기에 헤드가 없어 스터드·너트 미설치)

** 한울1·2·3·4·6, 한빛2·3·5, 신월성1·2, 고리2·3·4, 신고리1·2, 신한울1

– SG·가압기 : 총25기 중 **5기**(신고리2, 신월성1, 한빛1·6, 한울5) **완료**, 20기 품질서류 조사 中

○ **(부적합)** 품질서류의 시험 결과 등이 허가기준에 만족하는지 조사

**< 원자로용기 스터드·너트 점검내용 >**

◇ (**현장 실물**) 스터드·너트 표면에 각인된 식별 정보(부품번호, 열처리번호 등)

◇ (**FSAR**) 제5장에 기재된 스터드·너트 식별정보 및 재료 물성치 정보

◇ (**품질서류**) 재료시험성적서 등에 기재된 식별정보, 열처리번호, 인장·충격 시험값 등

□ (점검결과)

○ **(불일치)** 현재까지 **원자로용기 767개, SG·가압기 129개** 확인

– **(원자로용기)** 가동원전 22기에 설치된 스터드·너트 총 2,412개(각 1,206개)를 조사한 결과, **불일치 767개** 확인

– **(SG·가압기)** 계획예방정비 중인 5기에 설치된 스터드·너트 총 2,448개를 조사한 결과, **불일치 129개**가 확인됨

| 구 분 | 발생 원인 유형별 수량(개) | | | | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 유형ⓐ | 유형ⓑ | 유형ⓒ | 소 계 | |
| 원자로용기 | 11 | 224 | 532 | 767 | |
| SG·가압기 | - | - | 129 | 129 | |

※ **(유형 ⓐ)** 부품 교체시 해당정보 FSAR 미반영(경미한 사항 변경신고 미수행)
**(유형 ⓑ)** 부품 교체시 해당정보 FSAR 미반영(경미한 사항 변경신고 후 개정 미흡)
**(유형 ⓒ)** 건설당시 FSAR 작성 미흡(오기, 누락 등)

**【한울5호기 FSAR과 품질서류 불일치 예시】**

| FSAR | | | | | | | 품질서류 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 홀번호 | 부품번호 | 일련번호 | 항복강도 (ksi) | 인장강도 (ksi) | 흡수에너지 (ft-lb) | 횡팽창량 (mils) | 일련번호 |
| 1 | 79-101-01 | VF 7171-010 | 142 | 155 | 53 | 28 | VF 7171-010 |
| 2 | 79-101-02 | VF 7171-020 | 142 | 155 | 53 | 28 | VF 7171-020 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | 식별정보 불일치 |
| 52 | 79-101-52 | VF 7171-**520** | 142 | 156 | 59 | 33 | VF 7171-**550** |
| 53 | 79-101-53 | VF 7171-**530** | 142 | 156 | 59 | 33 | VF 7171-**560** |

| FSAR | | | | | 품질서류 (시험값) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 스터드 번호 | 항복강도 (ksi) | 인장강도 (ksi) | 흡수에너지 (ft-lb) | 횡팽창량 (mils) | 항복강도 (ksi) | 인장강도 (ksi) | 흡수에너지 (ft-lb) | 횡팽창량 (mils) |
| #1~#6 | 142 | 155 | **53** | 28 | 142 | 155 | **52** | 30 |
| | | | | | | | 재료물성치 불일치 | 28 |
| | | | | | | | 55 | 34 |

○ **(부적합)** 한울5호기 원자로용기 스터드 6개의 재료 물성치가 기술규격*(ASME)에 미달함

* 충격시험 횡팽창량 값이 24mils로 허용기준(25mils)보다 1mils만큼 하회함(가동원전 원자로용기 스터드·너트 재료시험성적서 총 225장 중 1장 미흡)

## Ⅲ 원인 분석

< FSAR 불일치 발생 원인 유형 >

◇ (**유형ⓐ**) 부품 교체시 해당정보 FSAR 미반영(경미한 사항 변경신고 미수행)
◇ (**유형ⓑ**) 부품 교체시 해당정보 FSAR 미반영(경미한 사항 변경신고 후 개정 미흡)
◇ (**유형ⓒ**) 건설당시 FSAR 작성 미흡(오기, 누락 등)

□ (**불일치**) 건설 및 운영 과정에서 **FSAR 개정·관리 미흡**

○ (**유형 ⓐ,ⓑ**) 과거 보수교체 활동 **프로세스 전반에 대한 이해도가 낮아, FSAR에 교체품목 정보 반영 미흡**

※ (개선사항) '17.5월부터 가동원전 보수교체 프로그램(표준정비-4022) 운영

○ (**유형 ⓒ**) 대다수의 불일치 사항 유발 원인으로 건설시 **명확한 FSAR 작성 지침이 없어, 불필요한 정보*(홀 번호, 부품번호) 및 일관성 없는 재료 물성치가 기재**됨

* 설비 안전성과 무관한 사항으로 향후 FSAR 작성기준 표준화 필요

□ (**부적합**) 한울5호기 원자로용기 스터드 6개는 건설시('01년) **제작사의 재료시험성적서 발행·공급이 미흡**하였고,

○ **한국수력원자력**은 구매·설치 과정에서 기술기준 요건 적합성 검토를 제작사 및 전문기관에 의뢰하는 프로세스였기 때문에 **품질서류 검토**가 **미흡**했음

※ (개선사항) '19.8월부터 제작검사 전문조직 신설 등 품질문제 예방 프로세스 운영 中

## Ⅳ 조치 방안

□ (**불일치**) FSAR에 기재된 정보가 제작당시 품질서류 및 현장 설치품의 정보와 일치되도록 개정

※ 정상운전 중인 원전의 경우, 도래하는 계획예방정비시 스터드·너트를 점검하고 현재까지 조사된 사항을 보완 후 불일치 해소 조치 예정

□ (**부적합**) 한울5호기의 **부적합 스터드 6개는 신규 스터드로 교체**

○ 이를 위해 운영변경허가 신청('22.12.9. ~ )

## Ⅴ 향후 계획

□ 안전등급기기 재료분야 FSAR 적합성 점검 및 조치 계속

○ 현재 조사 중인 보수교체 품목과 최근 불일치 사항이 확인된 스터드류*(원자로용기, SG, 가압기)의 조사는 '23.2월까지 시행

* 단, 분해점검을 통해 실물 확인이 가능한 원자로용기 스터드·너트는 호기별 계획예방정비 일정에 따라 조사 시행 예정

○ FSAR 3·4·5·6·10장 중 품질서류의 식별정보 및 기계적 성질(Mechanical Property)이 기재되어 불일치 개연성이 있는 안전등급 기기에 대해 단계별 점검계획 별도 검토·수립 예정

| 현재 조사 | 개선 방안(향후 검토 예정) |
|---|---|
| • 보수교체 품목에 대해 조사 | • 식별정보 및 기계적 성질이 기재된 안전등급기기 단계별 점검 (우선순위* 지정 등) |

* ① 원자로용기, ② 원자로냉각재배관, ③ 가압기, ④ 증기발생기, ⑤ 원자로냉각재펌프, ⑥ 증기 및 동력변환계통 등

□ 주기기 제작사 원전 생애주기 정비품질 제고 추진

○ 다중방어 체계 구축 등 프로세스 개선을 통해 인적오류 저감화

○ 원자로용기 스터드·너트 등 FSAR 기재내용 작성 지침·절차 개선(표준화) 등. 끝.

# 붙임 1 안전등급기기 재료분야 FSAR 적합성 점검 개요

## □ 점검대상 기기 선정

○ 재료분야 불일치 개연성이 있는 FSAR 3·4·5·6·10장

| 구분 | 제목 | 대상 기기 | 주요 점검내용 |
|---|---|---|---|
| 3장 | 구조물, 부품, 기기 및 계통의 설계 | 제어봉 집합체, CLP, 구조형 형강, 볼트 | • 재료규격, 제작요건 등 |
| 4장 | 원자로 | 제어봉구동장치, 원자로내부구조물 | • 원자로 구성품의 재료규격, 제작요건 |
| 5장 | 원자로냉각재계통 및 관련계통 | 원자로, 가압기, 증기발생기, RCP, RCS 배관, MSSV, PSV | • 주기기 구성품의 재료규격 및 제작정보(Heat No. CMTR No.)<br>• 주기기의 체결장치 재료규격, 제작정보<br>• 안전밸브 구성품의 재료규격<br>• 압력경계 기기용 용접재료 정보 |
| 6장 | 공학적 안전설비 | 공학적 안전계통, 밸브, 배관, 튜브 등 | • 기기 제작 시 ASME 규격 |
| 10장 | 증기 및 동력변환계통 | 배관 등 | • 주증기/주급수계통 배관 재료규격 |

## □ (점검방법) SAP 기반으로 점검 대상 기기별 **보수·교체 이력 점검**

① 점검대상으로 선정된 안전등급기기의 "**정비오더**" 내용

② "**보수·교체 프로그램**", "**설계변경**"으로 수행된 정비내용

③ "**NCR, CAR** 처리절차"에 따라 수행된 정비내용

**【본부별 점검 수량】**

| 구 분 | 고리 | 새울 | 월성 | 한빛 | 한울 | 합계 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 정비오더 | 129,965 | 8,725 | 67,352 | 332,003 | 111,542 | 649,587 |
| 보수/교체 | 445 | 77 | 219 | 314 | 655 | 1,710 |
| 설계변경 | 2,222 | 41 | 839 | 2,160 | 1,814 | 7,076 |
| NCR | 1,266 | 110 | 1,077 | 1,827 | 1,820 | 6,100 |
| CAR | 557 | 203 | 437 | 2,803 | 2,371 | 6,371 |
| 합계 | 134,455 | 9,156 | 69,924 | 339,107 | 118,202 | 670,844 |

※ 점검대상 기간 : '03.3월 ~ '21.3월

# 붙임 2 한울5호기 원자로용기 스터드 기술규격 불만족 내용

## □ (기술규격) ASME Sec.Ⅲ NB-2300

○ (**충격시험 합격요건**) 볼트재료에 대한 세 개의 시험편의 충격시험 결과는 Table NB-2333-1에 따라 흡수에너지 45ft-lb 및 횡팽창량 25mils 이상이여야 함

**ASME Sec.Ⅲ NB-2333 및 Table NB-2333-1**

**NB-2333 Bolting Material**

For bolting material, including studs, nuts, and bolts, test three $C_v$ specimens at a temperature no higher than the preload temperature or the lowest service temperature, whichever is less. All three specimens shall meet the requirements of Table NB-2333-1.

**Table NB-2333-1**
**Required $C_v$ Values for Bolting Material**

| Nominal Diameter, in. (mm) | Lateral Expansion, mils (mm) | Absorbed Energy, ft-lb (J) |
|---|---|---|
| 1 (25) or less | No test required | No test required |
| Over 1 to 4 (25 to 100), incl. | 25 (0.64) | No requirements |
| Over 4 (100) | 25 (0.64) | 45 (61) |

## □ (불만족 사항)

| 구 분 | #7 ~ #12 스터드 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 항복강도 (ksi) | 인장강도 (ksi) | 흡수에너지(ft-lb) | 횡팽창량 (mils) |
| **허용기준** | **Min. 130** | **145~175** | **Min. 45** | **Min. 25** |
| 재료성적서 (F9805-110) | 149 | 161 | 46 | **24** |

인 장 시 험 Tensile Test

| 시편위치 Specimen Location | 시편종류 Specimen Type | 시험온도 Temp. ( °F ) | 항복강도 0.2%Y.S (KSI) | 인장강도 T.S (KSI) | 연신율 EL % | 단면수축율 R/A % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SPEC. | ASME | Room Temp. | Min. 130 | 145 ~170 | Min. 12 | Min. 40 |
| 7AF1 (Axial) | SA370 Fig.5 | 75 | 150 | 164 | 15 | 45 |
| 7BT1 (Axial) | GL:2" | | 149 | 161 | 18 | 55 |

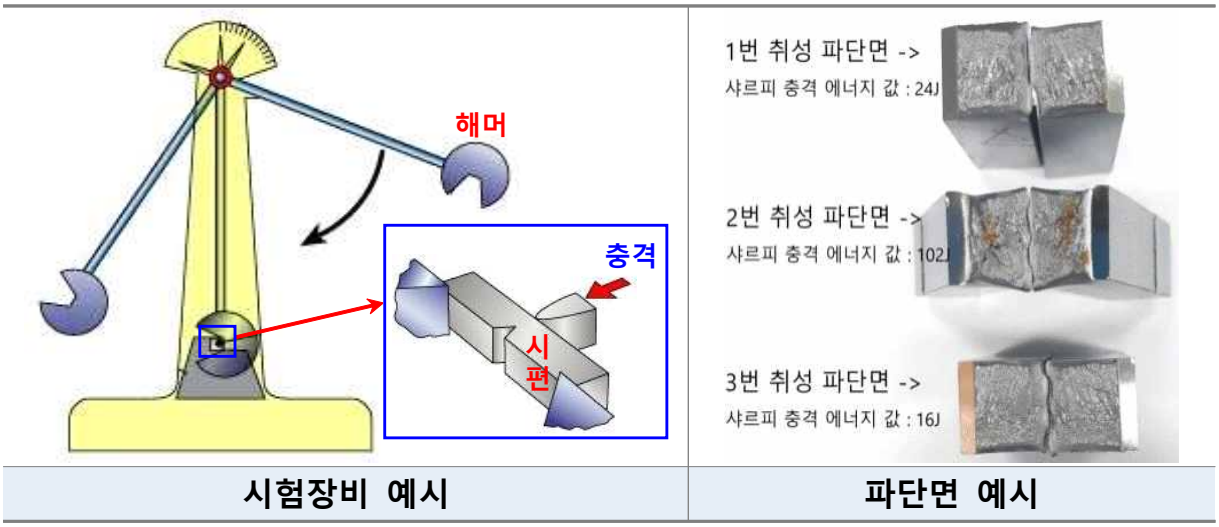
충 격 시 험 Impact Test

| 시편위치 Specimen Location | 시편종류 Specimen Type | 시험온도 Temp. ( °F ) | 흡수에너지 Abs Energy(ft-lbs) 1 | 2 | 3 | Lateral Expansion(Mils) 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SPEC. | ASME | Max. 40 | Min. 45 | Min. 45 | Min. 45 | Min. 25 | Min. 25 | Min. 25 |
| 7AV (Axial) | SA370. Fig.11 (a) | 40 | 46 | 46 | 50 | 24 | 26 | 31 |
| 7BV (Axial) | | | 62 | 61 | 66 | 38 | 36 | 39 |

## 별첨 1 재료 충격시험 횡팽창량 개요

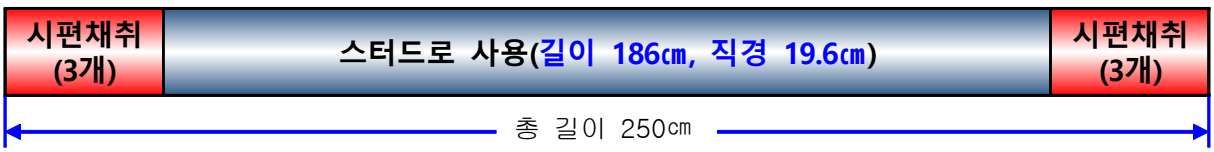
### □ 충격시험

○ (목적) 재료의 점성, 혹은 무른 정도를 판정하기 위해 소정의 시험편에 충격 하중을 가해 파단시키고, 그에 소요된 에너지량, 파단면의 양상 등을 측정



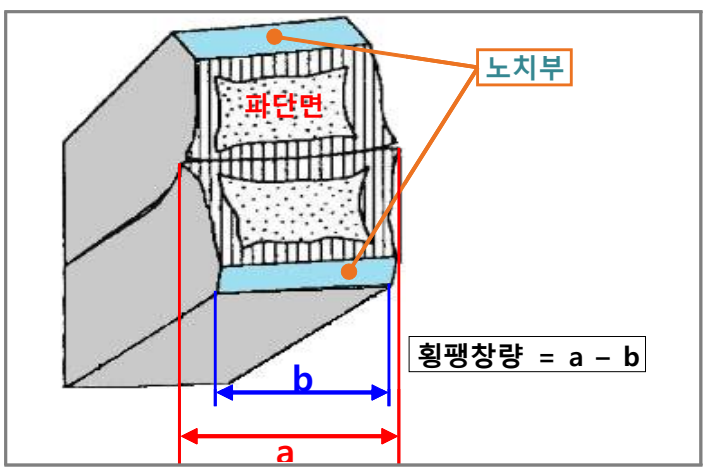

시험장비 예시 | 파단면 예시

○ (시편채취) 길이 약 1.9m ~ 2.5m의 봉강 7개(총 중량 4,540kg 이내)를 같은 열처리로에서 열처리 후 그 중 봉강 1개의 양 끝단에서 각각 3개씩 시편을 채취(총 6개)하여 시험함 ※ 한울5호기 6개 중 1개 불만족




### □ 횡팽창량(가로팽창량)

○ 노치부 반대편 파면 폭에 대한 측정값으로 원치수(노치부) 폭 대비 증가량을 나타냄(a−b)



## 별첨 2 원자로용기 스터드 개요(표준형 기준)

□ (재질 / 수량 / 길이) ASME SA540 / 54개 / 186㎝

□ (개요도)

# 붙임 3 한수원 구매자재 품질 체계 비교표

**현재 한수원은 원자력안전위원회(제94회) 보고된 안전등급 모의후열처리 부적합 재발방지 대책*('18년) 기반으로 품질문제 예방 프로세스 운영 중**

* 모의후열처리 부적합(18년), FSAR 3.11 불일치(20년), 방사선감지기 불일치(21년)

☞ **(과거) 계약자 책임 중심 ➜ (현재) 한수원 재검토·모니터링 강화**

## □ 품질문제 예방 체계 비교 (①구매 → ②제작 → ③인수/설치 단계별)_한울#5 스터드 기준

| 구분 | 주체 | 과거(2014년 이전) | 현재('18년 재발방지 대책 수립 이후) |
|---|---|---|---|
| ①구매단계 | 한수원 | ○ **(기술규격서)** 기술기준(적용 Code)만 명시<br>ex) ASME NB 1994 Ed. 1995 Add<br>○ **(재료검증보고서)** 재질적합성 평가자료 제출 미요구(인수검사 대체)<br>○ **(설계변경서)** 설계변경서 작성 및 구매·설치 시 인허가사항(FSAR) 검토 절차 미흡 | ○ **(기술규격서)** 기술기준 상세 작성, 운영<br>☞ 모의후열처리, 충격시험 등 **필수요건 명시**<br>○ **(재료검증보고서)** 1차 건설원전 제출요구 ('14~), 2차 **가동원전 확대 적용 요구**('18~)<br>○ **(설계변경서)** 구매단계 인허가 사항 **검토 절차 강화**<br>ex) AI 기반 FSAR 개정 누락 방지시스템 구축 |
| | 제작사 | ○ 기술규격서 기술기준 검토 역량 부족<br>- 제작사 필수 교육이수 요건 없음<br>○ 계약사 감사 시 품질시스템 위주 점검 | ○ 유자격 공급사 심사 **교육요건 강화**(한수원)<br>☞ 재료/용접 등 기술기준 교육이수 요구('19~)<br>○ 감사 시 기술기준 준수 중점점검(한수원) |
| | 설계사 | ○ 제작사 제공한 입찰서 검토 시 인허가 문서(PSAR) 비교·검토 절차 없음 | ○ 입찰서-인허가 문서 비교·확인 절차 수립<br>☞ 제작사 문서, 규격서 등 **정합성 확인** |
| | ◈ (한수원) 기술기준 명기, 재료 적합성 검증요구, 인허가 요건 검토 강화, 설계/제작인력 필수교육 요구, 기술요건 준수 중점점검 수행<br>◈ (설계사) 인허가 문서 비교/확인으로 인허가 요건 확인 강화 | | |
| ②제작단계 | 제작사 | ○ 재료시험성적서(CMTR 등) 품질증빙서류 **수기** 입력<br>○ 재료시험성적서 등 검토항목 미운영<br>○ **(재료검증보고서)** 재질적합성 미평가 | ○ 재료시험성적서(CMTR 등) 품질증빙서류 **전산화** 작성 ☞ "불만족" 시 RED 자동표시<br>○ 재료시험성적서 **자체 Check List 운영**<br>○ **(재료검증보고서)** 재료적합성 평가 후 한수원 제출 |

<table>
<tr><th>구분</th><th>주체</th><th>과거(2014년 이전)</th><th>현재('18년 재발방지 대책 수립 이후)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">2<br>제작<br>단계</td><td>한<br>수<br>원</td><td>○ (제작검사) 제작사 품질검사계획에 따라, 시험 등 입회점 선정 후 입회검사 수행<br>○ (전문성) 사업소 정비품질 검사자가 제작검사 수행으로 전문성 저하<br>○ (출하승인) 제작검사 입회 등으로, 출하 전 외관검사 및 서류첨부 적절성 확인</td><td>○ (제작검사) 공정 입회검사 체계로 전환<br>ex) 시험(자격/시험절차/시험 등 공정 전체 확인)<br>○ (전문성) 제작검사 업무 전문조직 이관<br>☞ "사업소 검사부서" → "제작품질부"<br>○ (조직신설) 압력유지재료 확인 전담조직 "PRM검증부" 신설<br>☞ 압력유지재료 전수 적합성 확인<br>○ (재료검증보고서) 안전등급 기자재의 재료적합성 확인<br>○ (출하승인) 안전등급 기자재 재료검증보고서 검토여부 확인 후 출하승인</td></tr>
<tr><td colspan="3">◈ 압력유지재료(PRM) 기술요건 적합성 검증 전문조직 신설로 제작단계 시험성적서 오류예방, 제작검사 전담조직 이관으로 전문성 강화, 제작검사를 검사점 뿐만아니라, 자격/서류검토 등 해당공정 전체 적절성에 대하여 확인</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3<br>인수<br>설치<br>단계</td><td>한<br>수<br>원</td><td>○ (인수검사) 인수검사 수행 시 수량, 외관, 서류제출 및 ASME 코드 Stamp 여부만 확인<br>○ (설치전 검사) 별도 자재검증 절차 없음</td><td>○ (인수검사) 압력유지재료의 경우 PRM 검증 결과 및 기록 확인<br>○ (설치전 검사) 가동원전 보수교체 프로그램에 따라, 압력유지 품목 교체전 재료시험 성적서 등 적합성 점검 수행</td></tr>
<tr><td colspan="3">◈ 기자재의 발전소 입고 시 인수검사 단계에서 재료적합성 검증여부 확인, 실제 발전소 설치 시 설비에 대한 재료시험성적서 등 최종확인 후 교체·설치 수행</td></tr>
</table>

※ 한울5호기 원자로헤드 스터드 기술기준 미흡 문제의 경우, 현재의 예방 프로세스를 적용하게 되면, ① **재료검증보고서 작성, 제작공인검사단계**, ② **제작검사 및 PRM 검증단계**, ③ **인수검사 단계**, ④ **설치전 검사 단계**에서 예방할 수 있음