

제 133회 원자력안전위원회

의안번호	제 1 호	보 고 사 항
보고일자	2021. 2. 19.	
공개여부	공개	

KBS 보도관련 PAR 연구경과 및 내용
보고자료

제 출 자	한국수력원자력(주) 사장 정 재 훈
제출일자	2021. 2. 19.

■ 목 차 ■

I. KBS 보도관련 PAR 연구경과 및 내용	1
II. 가동원전 PAR 설비 설치 및 관리 현황	9

I. KBS 보도관련 PAR 연구경과 및 내용

1. 연구과제 개요

□ 전체 과제 개요

- 과제명 : 중대사고시 수소폭발에 대한 격납건물 안전성 평가 및 개선사항 도출
- 기간/예산 : '16.11 ~ '20.6 / 54.1억원 (집행예산 기준)
- 연구과제 목표
 - 원전 설계특성이 반영된 수소위협 실험 및 분석을 통한 국내원전 안전성 입증 및 개선사항 도출
 - (추진배경) 후쿠시마 원전 사고이후 원전 설계 건전성 위해 요소 및 중대사고에 대한 철저한 대응으로 원전 신뢰도 회복에 기여
- ※ 해당과제의 품질등급은 일반산업등급 'S' 임
- 연구결과 요약
 - 체계적으로 후쿠시마 원전과 국내원전의 설계특성 비교분석을 통해 수소폭발 위협에 대한 국내원전의 안전성 비교
 - 수소제어 능력을 위해 설치한 PAR설비의 유무와 상관없이 국내 원전 격납건물은 중대사고시 수소연소를 포함한 다양한 조건에서 안전함을 입증

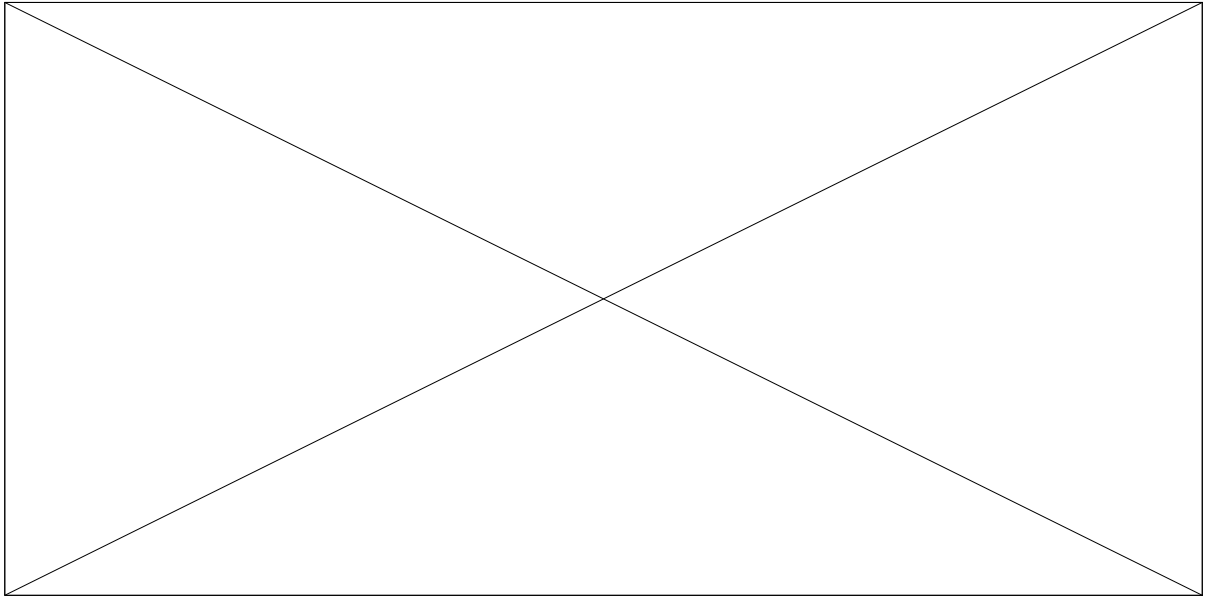
□ 연구과제 실험개요

- 실험 목적 : 수소위협 실증실험을 통한 격납건물 안전성 평가
 - 실험수행 기관/기간 : Becker Technology(독일) / '18.9.16~9.26
 - 실험내용 : 다양한 중대사고시 수소위협 특성 확인을 위해 14개 Case의 격납건물 안전성 연구
 - PAR 미작동시 격납건물 수소위협 실험 : 7 case
 - PAR 작동시 격납건물 수소위협 실험 : 7 case

* OECD NEA THAI 공동실험이나 금번의 한수원 독일실험은 각사의

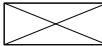
인허가를 획득한 상용품을 대상으로 PAR 설비의 가장 큰 단점으로 지칭되는 수소연소(발화원으로의 역할) 특성 등 다양한 설비특성 추가연구를 위한 것으로 인허가 취득을 위한 성격이 아님

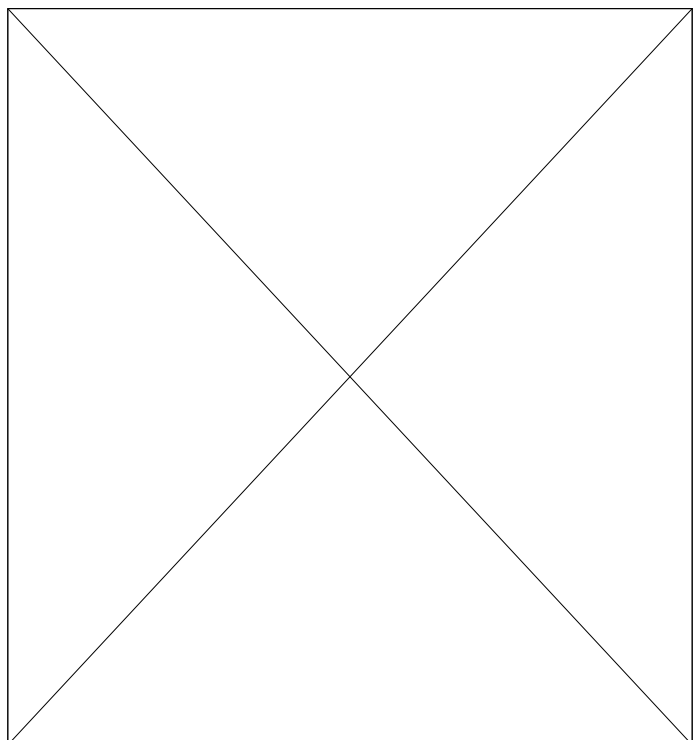
- 실험조건 및 실험종류 : 사업자가 임의로 작성한 구매규격 이상의 다양한 환경에서 7개 Case 실험

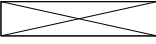
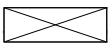
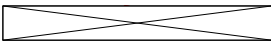
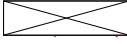


<실험에 활용된 PAR 설비>



<독일  실험장치>



- 실험 과정 및 결과(HR-6, 7 중심)
 - 수소제거 및 살수환경에서의 점화특성을 확인하는 실험으로 1단계 실험(PAR의 수소제거 확인) 및 2단계 실험(살수환경에서의 점화 특성 확인)을 연속하여 수행한 결과임
 - 실험시 2단계에서 수소연소가 발생하였으며, 촉매 dust가 확인되었음
 - ※ 촉매 dust 발생원인은 고온의 촉매체와 살수 액적이 접촉함에 따른 촉매 코팅 손상으로 추정됨
 - ※ 를 이용해서 PAR의 수소제거 특성을 확인하기 위한 실험은 
를 대상으로 수행된 바 있지만(HR-1~5), 고농도 수소조건에서 고온의 촉매체에 대한 은 본 실험(HR-6,7)이 세계 최초 실험임
 - 실험에서 수소연소가 발생한 후에도 수소농도가 지속적으로 감소하는 것을 확인하였음
 - 수소연소에 의해 HR-6, HR-7 각각 약 1.5bar 및 2bar의 압력이 상승한 것으로 확인하였음
 - PAR는 하우징 등 구조적 손상없이 건전성을 유지하였음

2. KBS 보도 관련 주요 이슈 설명

□ KBS 보도 관련 주요 이슈에 대한 설명


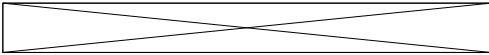
KBS 보도 관련 주요 이슈

- 한수원 독일 실험은 성능검증을 위한 실험이었는가?
- 독일실험시 수소제거율의 구매규격 불만족 여부
- 후속 세라콤사 추가실험시 수소제거율 구매규격 불만족 여부
- 수소연소 실험 중 촉매체 불티가 날리는 위험한 현상 발생
- 실험결과에 대한 은폐 지시 여부
- 발견사항에 대한 원안위 보고 누락

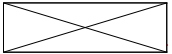
□ 2018년 9월 독일 실험이 PAR 성능검증을 위한 실험인지의 여부

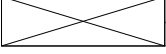
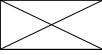
- 사고 상황에서 수소제거장치(PAR)가 제 역할을 하는지 검증하기 위해 독일에 실험을 의뢰한 것이 아님
- 해당 실험은 다른 PAR 실험과 같이 다양한 조건에서 수소와 증기 혼합, 물과 수소 혼합, 수소연소 등을 관찰하여 격납건물 안전성을 평가하기 위한 목적으로 수행됨

□ 독일실험시 수소제거율의 구매규격 불만족 여부

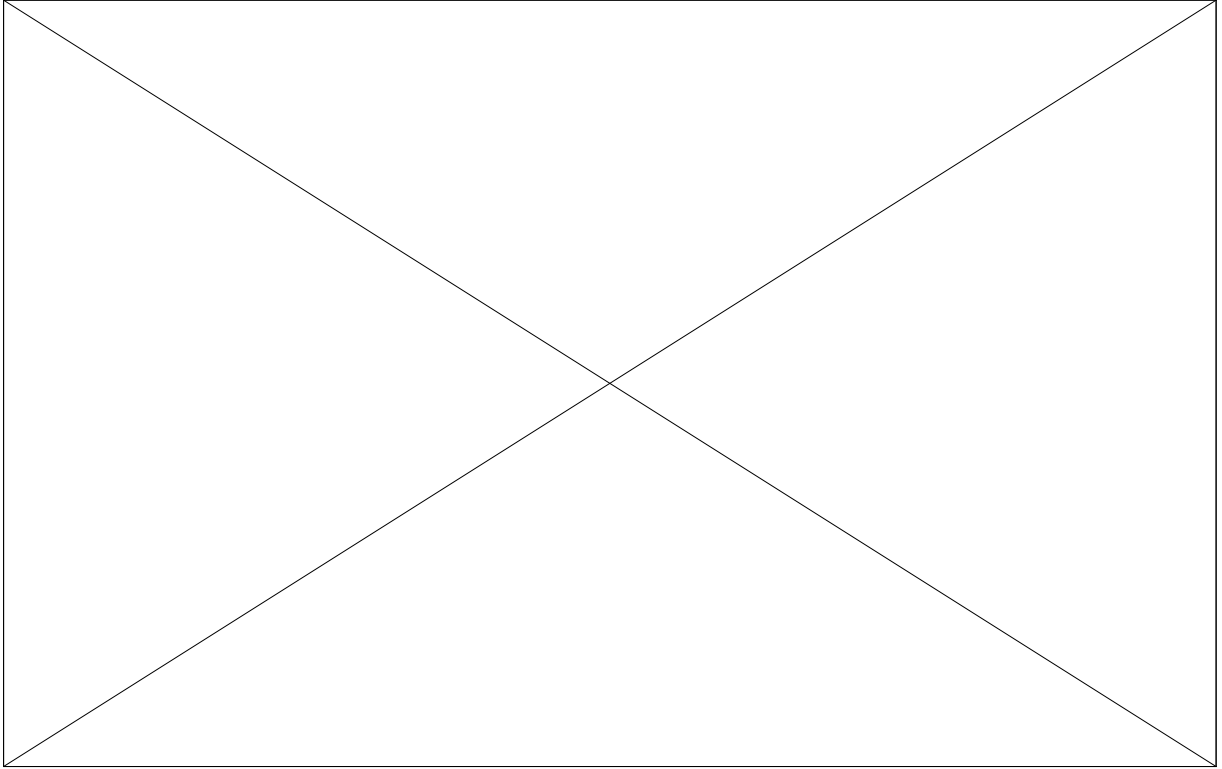
- 원전에 설치된 ‘수소제거장치(PAR) 구매규격’은  의 수소를 제거해야 함
- 수소 제거량이 30~60%로 보도된 실험은 ‘구매규격’ 환경과 전혀 다르며 혼합적, 유동적 조건에서 시행한 실험에서 도출된 결과임
- ☞ 수소 제거량 30~60%는 특정연구원(1인)의 제보를 토대로 한 방송사의 보도내용임
- 실험환경이 구매규격 환경과 다른 조건에서 측정한 실험결과만을 토대로 구매규격 만족여부를 판단할 수 없음

□ 후속으로 수행된 2019년 4월 세라콤사 추가실험에서도 구매규격의 50% 수준으로 평가되었다는 보도내용의 적절성 여부

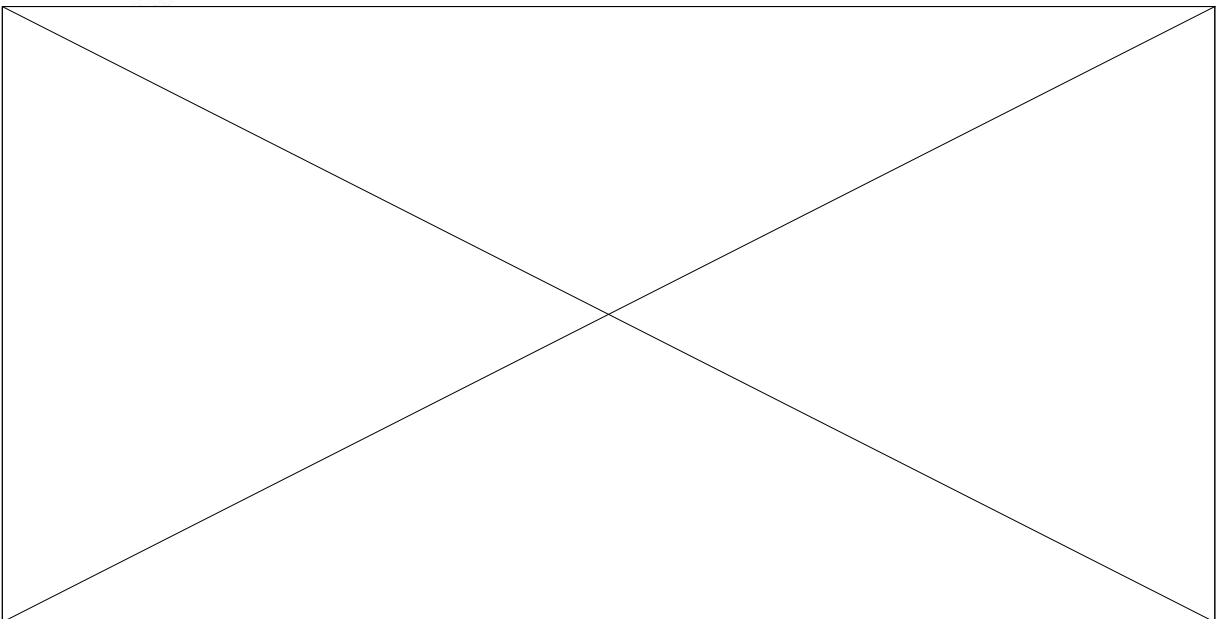
- ‘구매규격’ 환경에서도 독일에서 실험한 결과와 유사한 현상이 관측되는지 확인하기 위해 한수원은 2019년 4월 납품사인  협조 하에 확인시험을 수행했고, 구매규격에서 요구하는 수소제거율 이상임을 확인함
- 다만 이 과정에서 수소 제거율을 결정하는 수소농도를 평균농도와 입구농도 가운데 무엇으로 정의할 것인가에 대한 기술적 논의가 있었음

- 2019년 4월 시험에서 는 평균수소농도를 기준으로 평가를 했고, 캐나다 에서도 동일하게 적용되고 있는 방법임을 확인했음

<재시험 수소제거율 계산방법>

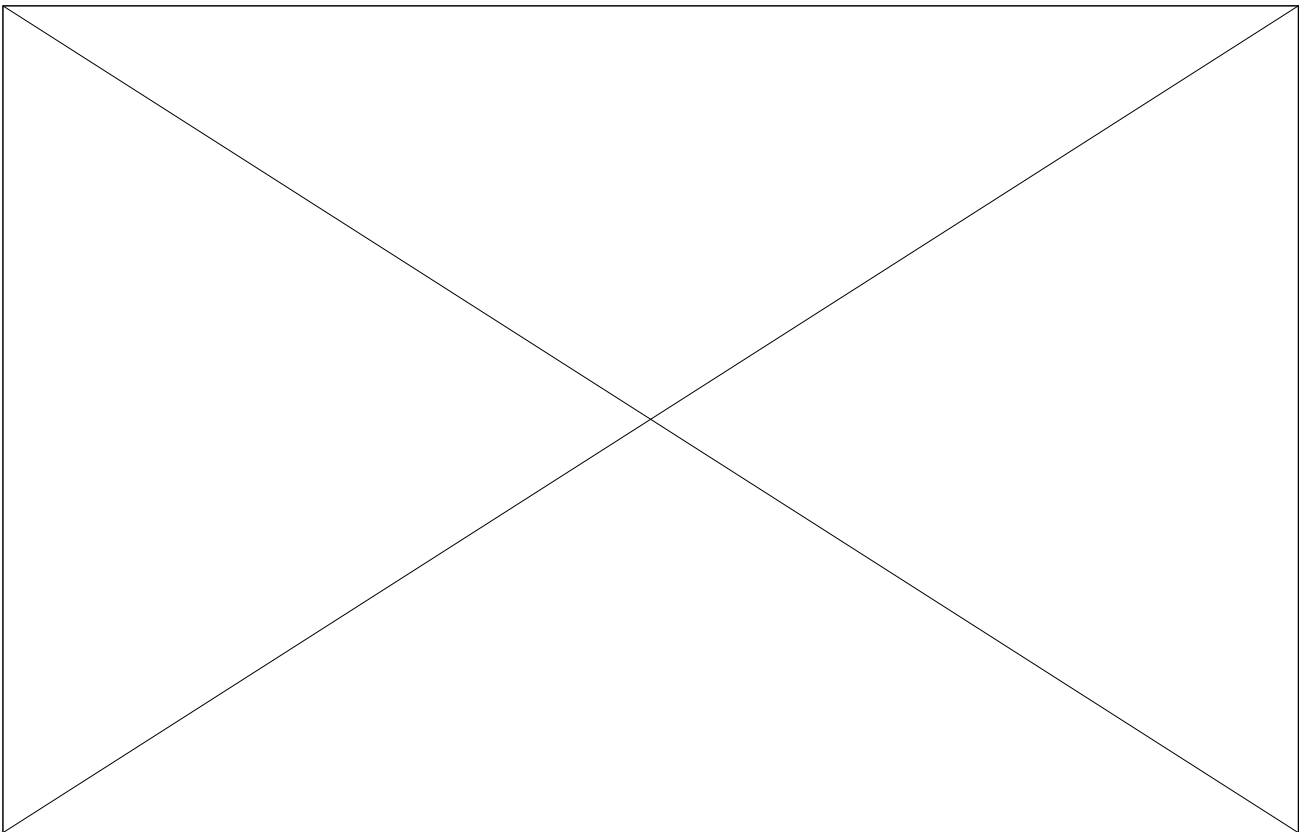


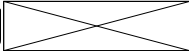
<재시험 수소제거율 결과>



□ 수소연소 실험중 PAR 촉매체의 불티가 날리는 위험한 현상 발생

- 해당 실험은 수소제거장치(PAR) 촉매체가 500도가 넘어가는 고온으로 달아오른 상태에서 살수 환경에 노출시킨 실험으로, PAR의 점화특성을 모의한 세계적으로 선행사례를 찾기 힘든 가혹환경의 실험이었음
- 실험에서 세라믹 재질인 수소제거장치의 촉매코팅 일부가 떨어져 가루로 흩날려 육안상 불티같은 형상이 확인 되었고 이는 촉매코팅이 손상되었던 것으로 추정됨
- 해당 실험은 다양한 실험조건 중 구매규격 이상의 특정 가혹조건(고온촉매체에 살수)에서 수행된 일부 실험의 결과이며, 이상 현상이 발견된 이후에도 PAR의 고유성능(수소제거)에는 영향이 없는 것으로 나타났음




- OECD 보고서에 따르면 해외 제작사의  실험에서도 고온촉매체의 불티 현상이 발생한 사례가 있었지만 여전히 사용되고 있음

□ 수소가 제대로 제거되지 않고, 고온의 불꽃 가루가 날아다니는 문제점이 최종보고서에는 축소되거나 누락되었는지 의혹

- 한수원은 실험 전반에 대해 보고서에 결과를 기술했으며, 의도적인 은폐나 누락은 없었음. 최종보고서는 과제 수행내역 전반에 대해 종합적으로 정리하고 있기 때문에 일부 내용에만 집중해서 작성한 것이 아님

□ 설계 변경 등의 추가 조치는 하지 않고, 원전 안전에 이상이 있을 경우 의무적으로 보고하게 되어있는 원자력안전위원회에도 보고하지 않은 사유

원자력안전법
[시행 2020. 6. 9] [법률 제17359호, 2020. 6. 9, 타법개정]

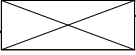

원자력안전위원회(안전정책과) 02-397-7264
원자력안전위원회(안전기준과) 02-397-7303
원자력안전위원회(방사선안전과) 02-397-7337
원자력안전위원회(생활방사선안전과) 02-397-7334

제15조의3(부적합사항 보고) 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자는 안전관련설비에서 제11조 및 제21조의 허가기준에 적합하지 아니한 사항을 발견하면 위원회가 정하여 고시하는 바에 따라 위원회에 보고하여야 한다.

1. 제10조제2항에 따라 허가신청서를 제출한 자
2. 발전용원자로설치자
3. 제15조의2에 따른 안전관련설비의 설계자·제작자(이하 “공급자”라 한다)
4. 제15조의2에 따른 안전관련설비의 성능검증을 수행하는 자(이하 “성능검증기관”이라 한다)

[본조신설 2014. 5. 21.]

- 안전관련설비의 부적합사항 보고 국내 법령은 원자력안전법 <제15조의 3>으로서 제11조(원전 건설 허가기준) 및 제21조(원전 운영 허가기준)에 적합하지 아니한 사항을 발견하면 위원회에 보고하도록 되어 있음
- PAR 설비는 전원전 설치에 필요한 인허가기준에 대한 검증과정을 이미 완료하고 지난 2015년까지 전량 현장 설치되어 현재 운영 중에 있는 설비임

- 독일에서 수행된 실험은 인허가기준 검증과정이 완료된 PAR 설비를 대규모 실험장치인  실험시설을 통해 다양한 변수에서 격납건물 안전성 여부를 확인 실험하는 사업자 자율연구로 규제기관 보고사항에 해당되지 않음. 해외에서도 인허가가 완료된 설비의 사업자 개별 연구 결과는 규제기관의 부적합사항 보고에 해당되지 않음

3. 종합의견

- 해당 과제는 후쿠시마 원전 사고와 같이 예상할 수 없었던 수소폭발 발생시 우리 원전의 격납건물이 파손될 것인지 검토하기 위하여 3차원 수소연소 전산분석과 국제 실험연구를 수행하였으며,
- 본 실험의 주 목적은 국제 실험시설을 이용하여 해당 설비의 성능을 검증하는 것이 아니고, 수소연소에 따른 격납건물 압력상승 효과를 평가하는 것이었음
- 해당 실험은 세계 최초로 수행된 혼합 환경 실험으로서 그 결과에 의거한 설비개선이나 원안위 부적합 보고 대상은 아님
- 전체 과제목적에 해당하는 연구 성과는 얻었으나, 중대사고 관련 실험중 일부 불확실한 현상에 대해 해석이 충분하지 않았다고 판단되므로,
⇒ 현재 진행 중인 원안위의 조사 결과를 토대로, 필요시 실험결과에 대한 추가검토 등 상세 현상규명을 위한 추가 연구를 수행하겠음

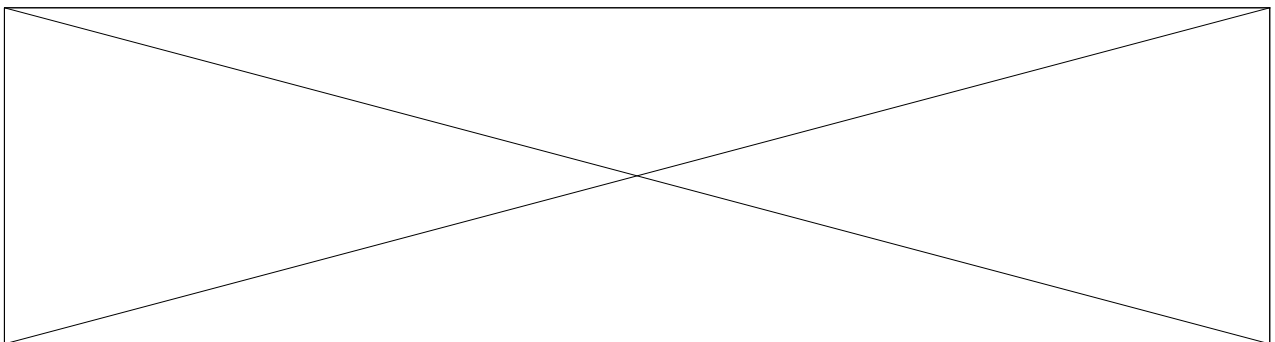
Ⅱ. 가동원전 PAR 설비 설치 및 관리 현황

1. 국내 PAR 설치배경 및 현황

- 후쿠시마 원전 사고 이후, 원자력안전위원회(당시 교과부)는 민관으로 구성된 국내원전 안전점검단의 조사('11.03~'11.04)를 실시하고, 전원없이 수소제거가 가능한 피동형수소제거기의 설치를 행정명령으로 요구함

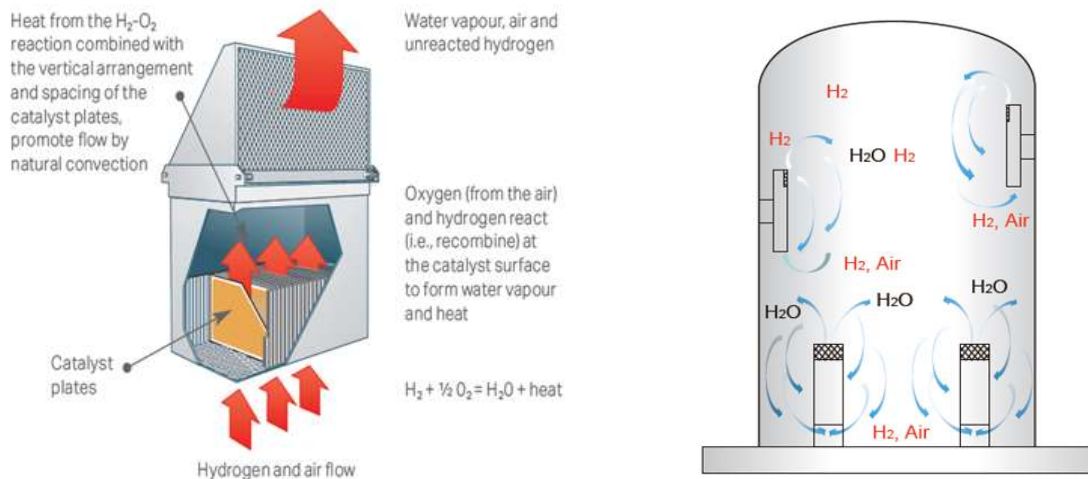
구 분	설 치 배 경(근거)
후쿠시마 사고 前	<ul style="list-style-type: none"> · (TMI 후속조치) PWR 노형에 설계기준사고(DBA)용 수소열 재결합기(TR : Thermal Recombiner) 설치 · (교과부 행정명령) 한울3,4호기 이후 건설원전에 중대사고용 수소점화기(IG : Ignitor) 설치 · (원안위 고시) 원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술기준 적용에 관한 지침 제8조 ⑧항*(가연성기체 연소에 의한 안전성 평가, '05년 제정) <p>* 계속운전 추진 원전(고리1·월성1) PAR 설치 기본계획 수립('08.2월)</p>
후쿠시마 사고 後	<ul style="list-style-type: none"> · (후쿠시마 후속조치) 후쿠시마 원전사고('11.3월) 이후 IAEA는 원전 중대사고시 수소폭발 위험에 대처하기 위한 설비확보 권고 → 민관으로 구성된 국내원전 안전점검단('11.3월 ~ 4월) 결과에 따라 피동 촉매형수소재결합기(PAR : Passive Autocatalytic Recombiner) 설치

□ PAR 설치 현황



* 피동형수소제거기(Passive Auto-catalytic Recombiner) : 상세 설치현황 붙임 1

< 피동형수소제거기 구성 및 배치 >



□ 국내·외 원전 PAR 관련 비교

- 국내 PAR 규제요건은 미국 신규원전 요건과 동일 수준이며, 일본이나 프랑스, 독일 등의 국가에 비해 다소 강한 규제요건임
- 국내 기준 대비해도 충분한 여유를 가지도록 전원전에 PAR를 설치


< 국내·외 PAR 설치관련 규제요건 비교 >

구분	유럽권	일본, 캐나다	미국권	한국
PAR 설치국가	프랑스, 핀란드, 스웨덴, 독일, 스페인, 벨기에, 스위스	일본, 캐나다	* 운영원전은 PAR 신설 안함 * 건설원전에 한해 PAR 설치	전원전 행정명령에 의거 설치
규제 기준	프랑스 : 8%, 10% 독일 : 4% (수치는 조금씩 차이가 있지만 규제방식은 동일)	일본 : 5%, 13% 캐나다 : 6%, 8% (수치는 조금씩 차이가 있지만 규제방식은 동일)	4%, 10%	미국과 동일
주요 제조사	AREVA, AECL, NIS	AREVA	*NIS (건설원전만)	AREVA, AECL, KNT, Ceracomb
구매규격	규제기준 만족을 위한 수소제거율을 여타 제조사 참고하여 사업자가 결정			
구매규격의 의미	격납건물 전체에 설치된 PAR 설비가 충분한 여유를 가지고 규제기준을 만족시킬 수 있는지 규제검증 시행			

2. PAR 인허가 검증(성능입증) 및 설치 경과(붙임 2)

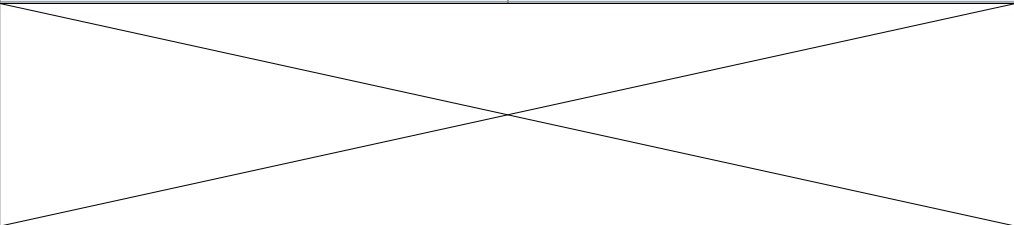
□ 사업자는 PAR 설비 설치 이전에 정부 규제기관 인허가를 득해야 하며, 인허가에 필요한 요건은 크게 2가지로 구분됨

① PAR 성능시험과 기기검증 결과

- 사고상황을 포괄할 수 있는 각종 온도, 압력, 수소농도에서 수소 제거율을 포괄적으로 분석하여 상관식을 만든 후,
- 특정 기준조건 으로 만족 여부 확인
- 더불어 기기검증(내방사선, 내진, 열화 등) 시험을 추가하여 품질 검사를 완료했으며 만족하였음

② PAR 성능미흡 등 최악상황을 고려해서 충분한 여유도를 가지고 격납건물 수소제어 능력 보유의 만족여부 검증

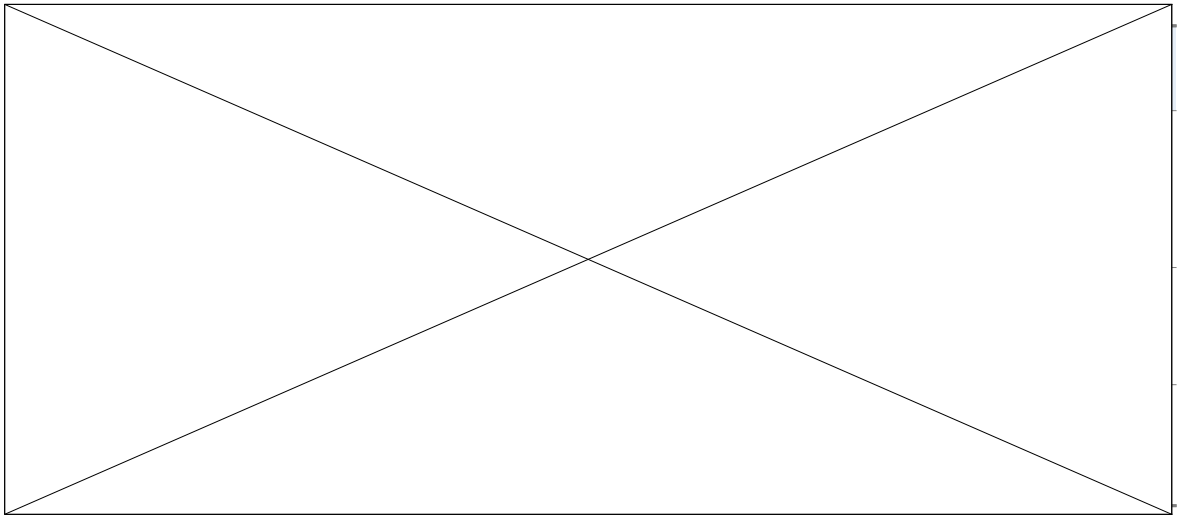
- 전원이 없다는 가정 하에 설계기준사고 조건에서 격납건물의 수소농도를 4% 이내, 중대사고조건에서 수소농도를 10% 이내로 제어할 수 있도록 설계해야 함
- 이러한 수소제어 성능요건을 만족시키기 위해 보수적 기준으로 발전소별 수소분석을 수행하여 PAR 설치 위치 및 수량을 선정함

구 분	설계기준사고(DBA)	중대사고(SA)
보수적 가정		
설 치	• 200% 용량으로 설치	-

□ 한수원은 상기 인허가 취득에 필요한 각종 성능검증과 충분히 여유를 가진 PAR 설치 대수 등에 대해 규제인증을 득한 후 2015년까지 전 원전에 피동형수소제거기(PAR)의 설치를 완료함

3. 가동중원전 정기적 성능시험(붙임 3)

- 계획예방정비시 운영기술지침서 점검요구사항이 반영된 정·주기시험 절차에 따라 육안점검 및 촉매체 성능시험 수행
 - (육안점검) 외함, 지지대 등 구조적 연결부위 및 촉매체 손상여부 점검
 - (성능시험) 개별 촉매체를 시험장비에 삽입한 후 수소가스를 주입하여 출구측에서 수소농도변화(수소제거율) 또는 촉매반응으로 인한 온도변화(촉매체 전·후단 온도차) 측정



* 세라컴 PAR 시험방법 변경 추진 중 , '20.6월)

** 매 주기 소형 PAR 촉매체 38개 중 3개, 중형 75개 중 6개 시험

- 촉매체 육안검사와 촉매체 기능(성능)시험을 수행하여 필요시 촉매체 교체를 수행하고 있음

붙임 1
가동원전 PAR 설치 현황

호기	설치기간
고리1	'09.12~'10.01
고리2	'15.01~'15.03
고리3	'12.09~'12.11
고리4	'13.01~'13.03
한빛1	'13.08~'13.11
한빛2	'13.02~'13.04
한빛3	'12.10~'13.06
한빛4	'13.11~'14.03
한빛5	'13.12~'14.03
한빛6	'12.11~'13.01
한울1	'13.10~'13.11
한울2	'13.04~'13.05
한울3	'12.07~'12.10
한울4	'13.03~'13.08
한울5	'13.05~'13.05
한울6	'12.11~'12.11
월성1	'11.06~'11.08
월성2	'14.07~'14.08
월성3	'13.06~'13.07
월성4	'13.02~'13.04
신고리1	'12.01~'12.02
신고리2	'11.07~'11.08
신월성1	'11.07~'11.08
신월성2	'12.10~'12.10
신고리3	'12.03~'12.07
신고리4	'12.05~'13.03
합 계	

1. PAR 성능요건

□ 성능기준 근거

○ 법령 및 지침

구 분	내 용
원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙	<ul style="list-style-type: none"> • (제23조) 원자로 격납건물 등 <ul style="list-style-type: none"> - 2항. 설계기준사고시 외부환경으로의 방사선 누출을 최소화하기 위한 핵분열 생성물의 농도저감 수단과 격납건물의 건전성 유지를 위협할 수 있는 격납용기 내부로 유출되는 가연성기체 제어수단을 구비할 것
경수로형 원전 안전심사지침 (개정3 '09년)	<ul style="list-style-type: none"> • (6.2.5절) 기술기준에 관한 규칙 제23조와 제12조 등을 만족시키기 위한 지침 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 가연성기체 제어계통은 다중성이 있고, 소내 또는 소외 전원상실의 경우에도 안전기능이 유지되도록 설계 - 가연성기체 제어계통의 설계기준 수립을 목적으로 RG 1.7의 표1에 제시된 변수의 허용값을 사용, 해석을 통해 허용값 이내로 유지됨을 확인 - 기초 및 지지물을 포함한 가연성기체 제어계통은 RG 1.29의 요건에 따라 내진범주 I로 설계

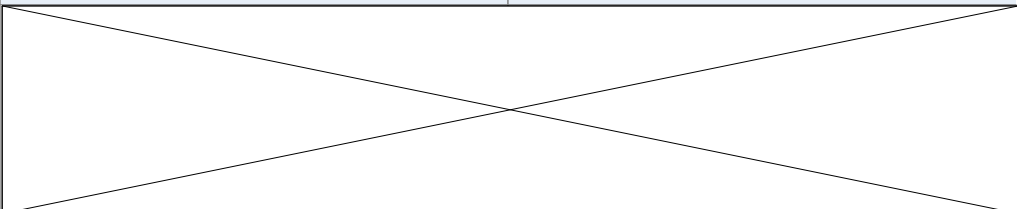
○ 설계기준

구 분	내 용
RG 1.7 (Rev.2, '78년)	<ul style="list-style-type: none"> • 설계기준사고(DBA) 시 : 수소농도 4% 이내 <p>Hydrogen concentration limit 4 v/o***</p> <p>Oxygen concentration limit 5 v/o. (This limit should not be exceeded if more than 6 v/o hydrogen is present.)</p> <p>* For water, boric acid, and boric acid alkaline solutions; for other solutions, data should be presented.</p> <p>** This fraction is thought to be conservative; further analysis may show that it should be revised.</p> <p>*** The 4 v/o hydrogen concentration limit should not be exceeded if burning is to be avoided and if more than 5 v/o oxygen is present in the containment. This amount may be increased to 6 v/o, with the assumption that the 2 v/o excess hydrogen would burn in the containment (if more than 5 v/o oxygen is present). The effects of the resultant energy and burning should not create conditions exceeding the design conditions of either the containment or the safety equipment necessary to mitigate the consequences of a LOCA. Applicants and licensees should demonstrate such capability by suitable analyses and qualification test results.</p>
10 CFR 50.34 ('03년)	<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고(SA) 시 : 수소농도 10% 이내 - Uniformly distributed hydrogen concentrations in the containment do not exceed 10% during and following an accident that releases an equivalent amount of hydrogen as would be generated from a 100% fuel clad metal-water reaction, or that the post-accident atmosphere will not support hydrogen combustion.

□ 성능요건

○ 설계 성능요건

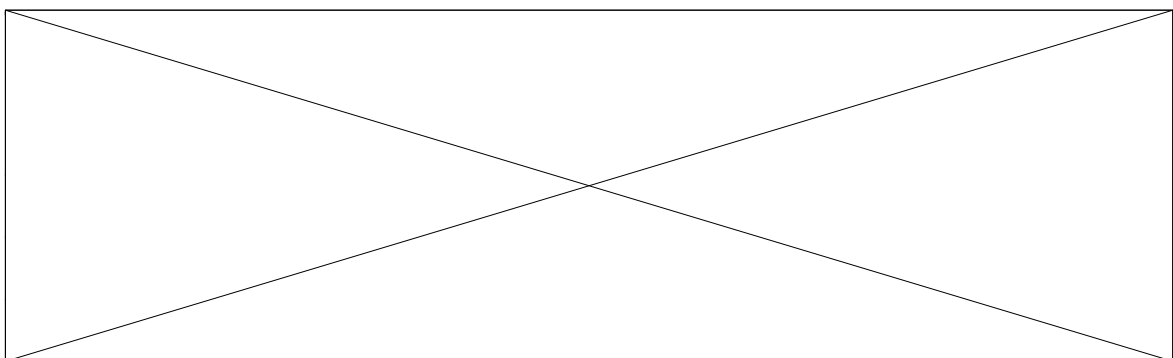
- 전원이 없다는 가정하에 설계기준사고 조건에서 격납건물의 수소농도를 4% 이내, 중대사고조건을 가정하여 격납건물 내 핵연료의 피복재 금속의 100%와 물의 반응에 의해 생성되는 수소농도를 10% 이내로 제어할 수 있도록 설계
- 이러한 설계 성능요건을 만족시키기 위해 보수적 기준으로 발전소별 수소분석*을 수행하여 PAR 설치 위치 및 수량을 선정함

구 분	설계기준사고(DBA)	중대사고(SA)
보수적 가정		
설 치		
	• 200% 용량으로 설치	-

* 상용화된 제품 중 수소제거율이 가장 낮게 나타나는 제품의 계산식 적용

○ 설비 성능요건

- 수소농도 · 압력 · 온도 등에 따른 PAR 제품별 수소제거율을 분석하여 특정조건 에서의 기준값을 설정함



※ 설비 성능요건은 발전소별 수소분석에 활용

2. PAR 성능시험 방법 및 검증결과

□ 성능시험 방법

○ 제작사 성능검증

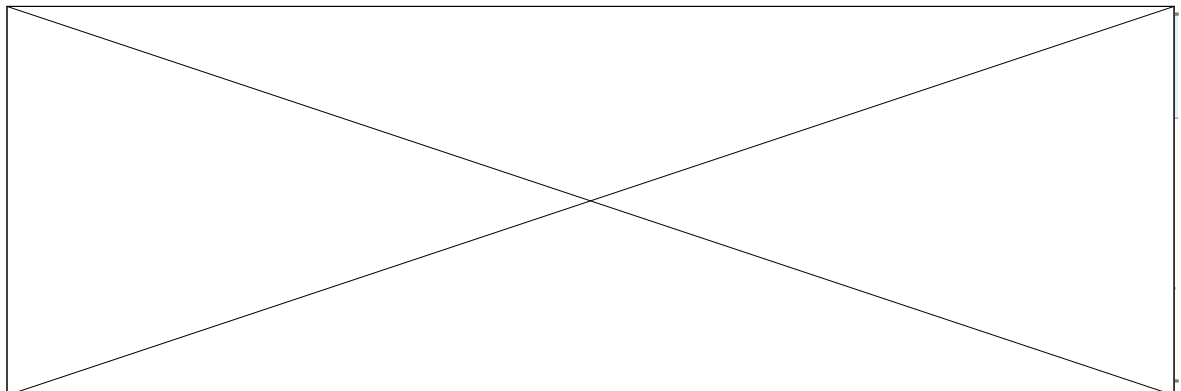
- 종합성능시험장치(실험용기)에 PAR를 설치하여 내환경검증, 중대 사고 환경에서 기능유지 가능성, 수소제거율 성능시험 수행
- 수소제거율 성능시험
 - 제작사가 보유한 실험용기로 소형 PAR에 대해 다양한 조건(수소농도·압력·온도·촉매체 수량 등)에서 실험을 수행하여 수소제거 성능 확인
 - 이후 성능실험 결과를 기반으로 해당제품의 수소제거율 계산식*을 도출하여 PAR의 수소제거 성능검증** 및 구매요건 만족 확인

* 온도·압력·수소농도·촉매체 수량 변화에 따른 수소제거율 계산식

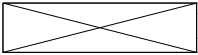
** 실제 수소제거율(R_t)이 계산식에 의한 수소제거율(R_c)보다 높음을 확인

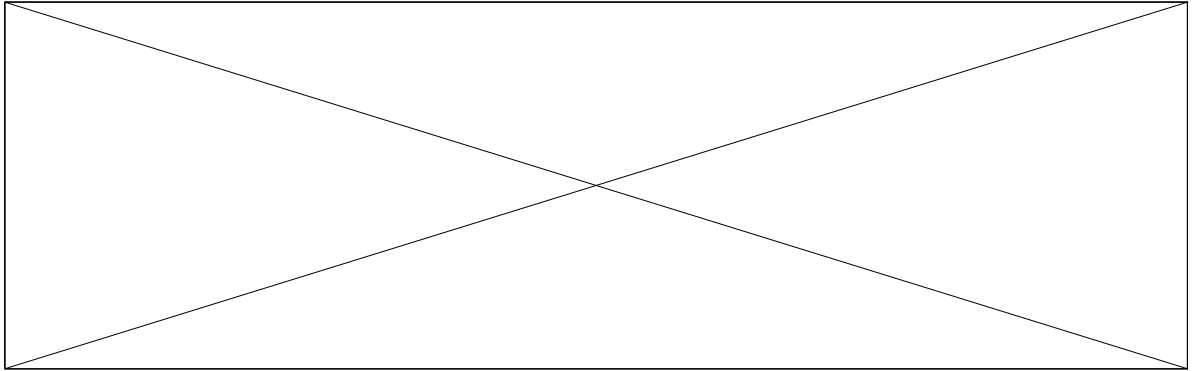
○ PAR 촉매체 납품전 성능시험

- 제작사별 고유의 시험방법 및 장치로 촉매체 수소제거율 성능검증

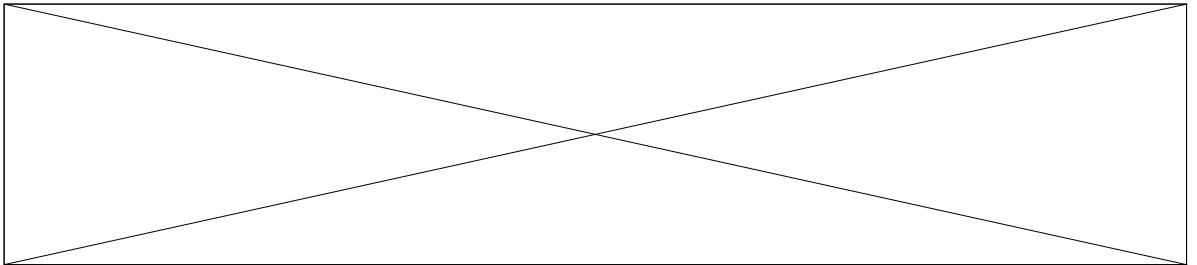


□ PAR 성능시험 결과

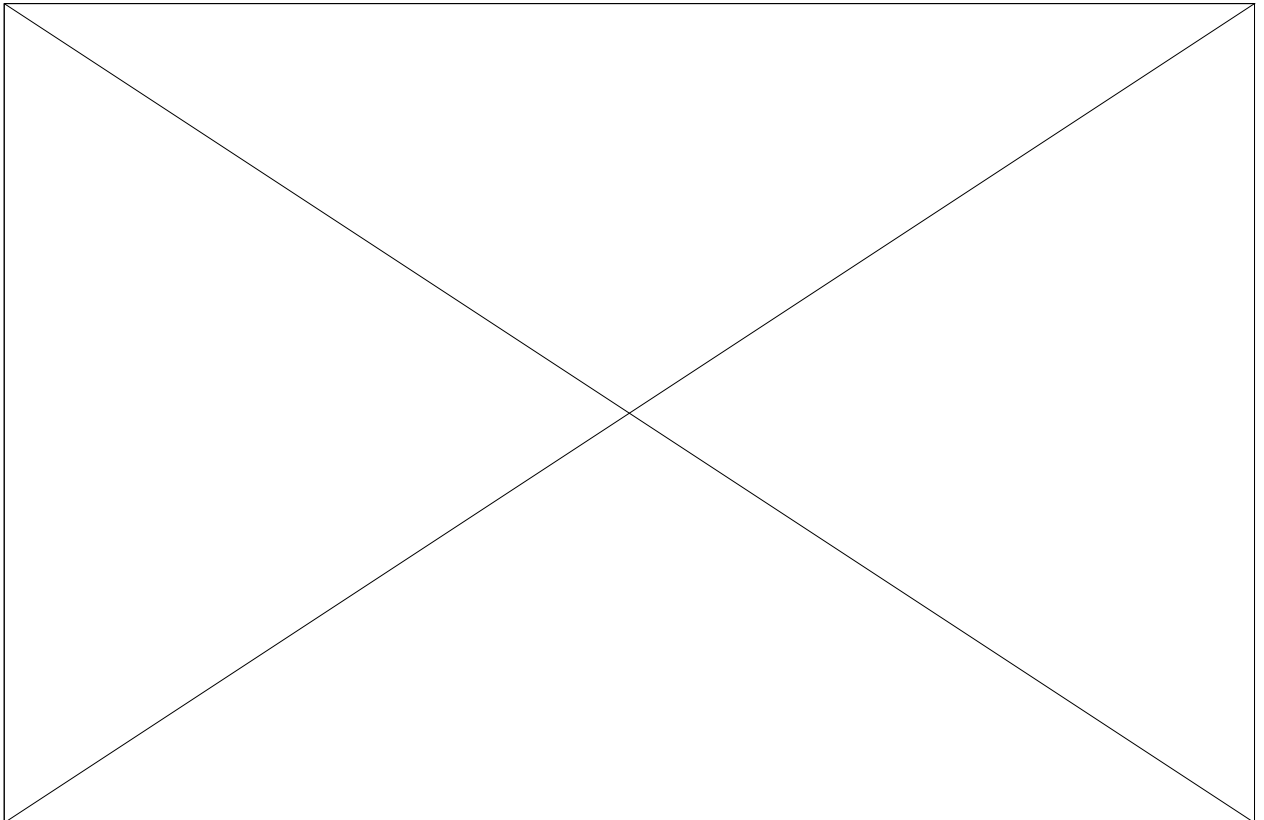
○ 구매요건 대비 제작사별 수소제거율(시험조건 : )



※ 수소제거율 상관식 도출을 위한 실험범위



□ 기기검증 결과



붙임 3

가동원전 PAR 성능시험 수행내역 및 결과

□ '17년 이후 가동원전 수소제거설비 성능시험 수행내역 및 결과

기간 : '17.1 ~ '20.12

구 분		시험	결과
			만족
고리2			만족
			만족
고리3			만족
			만족
고리4			만족
			만족
신고리1			만족
			만족
신고리2			만족
			만족
신고리3			만족
			만족
신고리4			만족
			만족
한빛1			만족
			만족
한빛2			만족
			만족
한빛3			만족
			만족
한빛4			만족
			만족
한빛5			만족
			만족
한빛6			만족
			만족

기간 : '17.1 ~ '20.12

구 분		험
		결과
월성2		만족
		만족
		만족
월성3		만족
		만족
		만족
월성4		만족
		만족
		만족
신월성1		만족
		만족
		만족
신월성2		만족
		만족
		만족
한울1		만족
		만족
		만족
한울2		만족
		만족
		만족
한울3		만족
		만족
		만족
한울4	만족	
	만족	
	만족	
한울5	만족	
	만족	
	만족	
한울6	만족	
	만족	
	만족	

〈 안전 담당자 〉

한국수력원자력 중앙연구원	
김창현 부장	(042) 870 - 5374
나장환 소장	(042) 870 - 5300