제 163 회 원자력안전위원회

의안번호	제 2 호	보고사항
보고일자	2022. 09. 15.	
공개여부	공개	

신한울 1호기 운영허가 조건사항에 따른 PAR 실험보고서 검토 결과

제 출 자	한국원자력안전기술원장
제출일자	2022. 09. 15.

목 차

1. 개 요 ····· 1

2. 수소제거율 평가 결과 검토 ····· 3

3. 발광입자 및 유발점화(수소연소)에 대한 검토 ····· 5

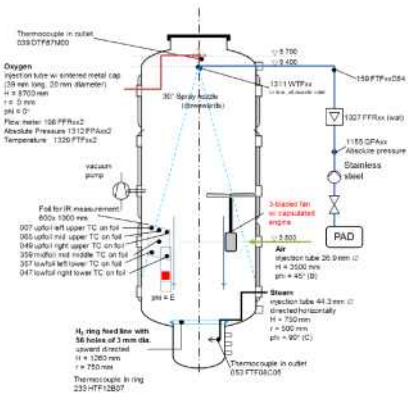
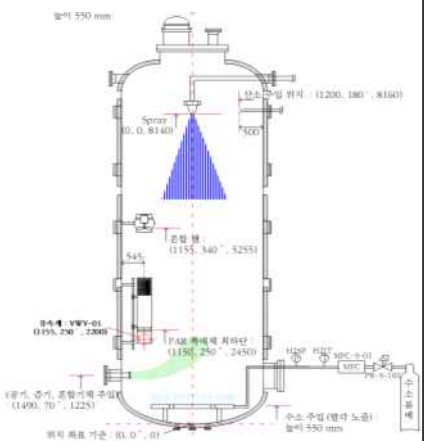
1. 개 요

❑ 신한울 1호기 운영허가('21.7.9) 조건 사항*에 따라 수행된 KNT社 피동촉매형수소재결합기(PAR)의 성능실험** 결과에 대해 KINS가 검토한 결과를 보고함

* … 독일 THAI 시설에서의 수소제거율과 촉매이탈 등 실험과 동등·유사한 실험을 한국원자력연구원에서 실시하고 … 제출하되, … 신한울 1호기에 납품된 PAR와 동일한 제품을 대상으로 … 필요시 후속조치를 이행할 것

** 원안위 소위원회의 감독하에 한국원자력연구원(KAERI)에서 실험을 수행

❑ [참고] THAI – SPARC 실험장치 비교

비교		THAI	SPARC
체적 및 크기		60 m^3 (높이: 9.2 m, 직경: 3.2 m)	80 m^3 (높이: 9.5 m, 직경: 3.4 m)
내부 실린더		유	무
내부 구역화		8 개	14 개
PAR 크기		1/2 소형	소형
계측기 종류 및 수량	수소 농도	16 개	14 개
	내부 기체 온도	21 개	14 개
	압력	2개	2 개
	습도	2개	14 개
용기 형상			

참 고 인허가 심사시 수소제어 관련 확인사항

□ (심사항목) 수소제어 관련 **①수소농도 평가, ②화염가속-연소폭발천이 평가, ③수소연소 압력 평가**를 통해 허용기준 만족 여부 확인

< 허용기준 >

① 설계기준사고의 경우 격납건물내 평균수소농도 4% 이내, 중대사고의 경우 평균수소농도 10% 이내로 유지

② 광범위한 화염가속(FA) 및 연소폭발천이(DDT) 현상이 발생하지 않아야 함

③ 수소연소 압력에 의한 하중이 발생하더라도 격납건물 건전성 유지

※ KINS 경수로형 원전 심사지침 19.2절 '중대사고 대처능력'

① 수소농도 평가

○ 중대사고 분석 시 보수적 가정*을 적용하더라도 격납건물 내 평균 수소 농도가 10% 이하로 유지됨을 확인

* 노심용융 상태에서 이론적으로 발생가능한 최대 수소량 발생 가정, 일괄적으로 25% PAR 성능저하 외에도 일정 산소농도 미만시 50% 성능저하 추가 가정 등

② 화염가속-연소폭발천이(FA-DDT) 평가

○ 격실별 수소농도 평가 결과를 바탕으로 화염가속 및 연소폭발천이 현상의 발생 가능성이 없음을 확인

※ 연소 발생을 가정하여 수소농도, 산소농도, 증기농도 등을 토대로 화염가속 발생 여부를 보수적으로 평가

③ 수소연소 압력 평가

○ 보수적인 방법론*으로 평가한 수소연소 압력에도 격납건물 구조적 건전성이 유지됨을 확인

* 이론상 발생 가능한 최대 수소 생성량 생성, 생성된 수소의 일시 완전연소 가정 등

2. 수소제거율 평가 결과 검토

❑ KAERI SPARC 실험결과 요약

- ㅇ (4% 수소제거율) 수소제거율(약 0.23~0.28g/s)이 구매규격(0.2g/s) 및 KNT 상관식(0.23g/s)을 만족
- ㅇ (5% 및 6% 수소제거율) 방법 1*에 의한 평가 결과는 KNT 상관식과 유사하나, 방법 2*에 의한 평가 결과는 KNT 상관식 불만족

* 방법 1, 2를 활용한 수소제거율 평가방법은 KAERI 실험결과보고서 참조

※ (PAR-SPARC-TR-03 보고서 51페이지) "6vol%의 경우는 유효한 데이터 개수가 35개로 4vol%의 356개보다 약 7배 정도 적어..."

- ㅇ (8% 수소제거율) 수소연소 발생으로 8% 실험을 수행하지 못함

❑ 검토 결과

- ㅇ (4% 수소제거율) 수소농도 4%일 때 수소제거율은 KNT 상관식과 NUKEM 상관식을 만족하므로, 설계기준사고 시 수소제어 분석 결과가 유효함
- ㅇ (5% 및 6% 수소제거율) 방법1과 방법2의 수소제거율 편차와 데이터 유효성 등 불확실성이 크므로, 수소제거율 재확인 필요
- ㅇ (8% 수소제거율) 현재 실험 절차로는 SPARC 장치에서 8% 이상의 고농도 실험 불가

❑ 조치 방안(안)

- ㅇ (실험방안 1) SPARC에서 8%에서의 수소제거율을 평가할 수 있는 방안 마련 후 실험 수행
- ㅇ (실험방안 2) KNT社 실험장치에서 8%에서의 수소제거율을 평가할 수 있는 방안 마련 후 실험 수행

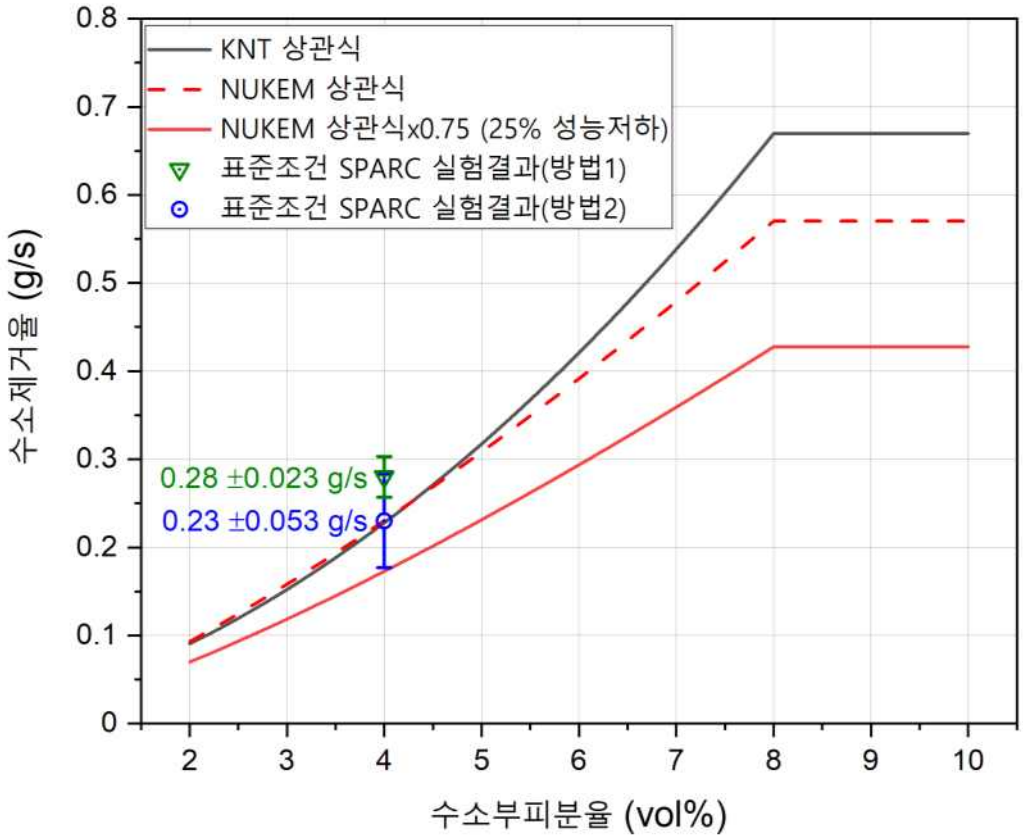
※ 수소농도 증가에 따라 수소제거율이 증가하는 PAR의 특성을 고려할 때, 8% 실험을 통해 수소농도 8% 이하 영역의 상관식 만족 여부 확인 가능

○ 조치방안에 따른 실험 결과 8%에서 NUKEM 상관식은 만족하나, KNT 상관식 불만족 시

- 한수원 품질 절차에 따른 조치 필요

○ 8%에서 기존 분석에 사용한 NUKEM 상관식 불만족 시

- 8% 실험 결과를 고려한 상관식 적용하여 중대사고 수소분석 재수행과 PAR 추가 설치 등 규제조치 마련



[그림 1] 수소농도에 따른 수소제거율 상관식 및 4% 실험 결과

3. 발광입자 및 유발점화(수소연소)에 대한 검토

❑ KAERI SPARC 실험결과 요약

○ KAERI에서 수행한 3회의 실험에서 모두 발광입자와 수소연소 현상이 발생되었고, 살수 여부에 따라 다른 결과가 관측됨

- (살수조건) 발광입자(수소농도 약 4%) 선행 후 수소연소 발생(수소농도 약 6%), 수소연소는 촉매에서 유발
- (미살수조건) 발광입자와 수소연소는 거의 동시에 발생(수소농도 약 5.8%), 수소연소는 발광입자에서 유발

[표 1] 발광입자 및 유발점화 발생 실험조건

구분	실험 조건		발광입자		수소연소		
	스커트 설치 유무	살수 여부	수소 농도[1]	촉매체 하부 최고온도	수소 농도[1]	촉매체 하부 최고온도	발생위치
1	○	○	4.01vol%	459℃	6.14vol%	637℃	PAR 하부
2	×	○	3.93vol%	452℃	6.05vol%	647℃	PAR 하부
3	×	×	발광입자 발생과 수소연소 발생시점 거의 유사		5.79vol%[2]	813℃	챔버 상부

1) 습식농도 기준, PAR 입구 수소농도

2) 챔버 상단부에서 측정된 최고 농도(PAR 입구 수소농도는 6.52 vol%)

❑ 검토 결과

○ KNT社 PAR에서의 발광입자 발생 및 유발점화에 의한 수소연소는 금번 실험을 통해 처음으로 확인되었음. 이에 따라 촉매체의 성능 유지 여부, 설비 손상 가능성 및 중대사고 수소분석의 재수행 필요성 등을 검토함

○ 세라믹 촉매체의 발광입자 발생 후 성능유지 여부

- 해외의 세라믹 촉매체인 NIS社 PAR에서도 발광입자 발생 현상이 관측된 바 있으며, 발광입자 발생 이후 촉매체 성능저하는 없었음 (OECD/NEA THAI 프로젝트 실험보고서)
- (확인 필요사항) 발광입자 발생을 경험한 촉매체를 이용한 성능시험을 통해 발광입자 발생 후 성능유지 여부를 확인할 필요가 있음

  ※ 성능저하가 확인되는 경우, 이를 고려한 수소분석 재평가 등 규제조치 마련

○ 중대사고 대처설비 손상 또는 2차 화재 발생 가능성

- 중대사고 대처설비는 수소연소를 고려한 고온조건에서의 기기생존성이 확인되었음
  - 격납건물 내부에 설치된 중대사고 대처설비의 케이블은 ASTM E-119 및 NFPA 251의 허용기준을 만족시키고 있는 1시간 등급 방화랩이 시공되어 있음
  - 격납건물 내부 전기관통부는 757~986℃에서 8시간의 기기생존성 시험이 수행되었음
  - 그 외 밸브 등 중대사고 대처설비들도 수소연소를 고려한 높은 온도에서의 기기생존성 시험이 수행되었음

  ※ 중대사고 대처에 이용되지 않는 격납건물 내부의 케이블은 IEEE 1202 요건에 따라 화염시험에 합격하였음
- (확인 필요사항) 발광입자 및 유발점화로 인한 환경조건을 확인하여 기존 기기생존성 평가 시 고려된 조건에 포괄되는지 검토 필요

  ※ 포괄되지 않는 경우, 기기생존성 재평가 등 규제조치 마련

○ 중대사고 수소분석의 재수행 필요성

- 중대사고 수소분석 시 중대사고 현상의 불확실성을 고려하여 보수적인 가정(이론상 최대 수소 생성량 등)을 적용하였음
  - 수소농도 평가 시 수소제어설비 외에는 수소감소 요인(누설, 연소 등)을 반영하지 않음
  - 격납건물 압력 평가 시 수소 일시 완전연소를 가정
  - 화염가속-연소폭발천이 평가 시에는 모든 격실을 대상으로 임의의 위치에서 언제든 연소가 시작될 수 있는 것으로 가정

- 발광입자가 격납건물 내 확산되어 일시 완전연소 또는 국부적인 다발성 연소를 일으키는 현상을 가정하여도, 새로운 수소분석은 필요하지 않은 것으로 확인
  - 수소연소 압력 평가 시 이미 일시 연소를 가정하고 있고,
  - 화염가속-연소폭발천이 평가가 격납건물 내 모든 격실을 대상으로 수행되었음
  - 격납건물 내 다수의 위치에서 산발적으로 수소연소가 발생하더라도 일시 완전연소로 인한 압력보다 낮음

- 또한, 발광입자 및 유발점화 현상이 기존 중대사고 수소분석에 미치는 영향을 검토한 결과, 기존 분석결과는 유효함을 확인함
  - [표 2]와 같이 점화원 및 연소 관점에서 기존 중대사고 수소분석 가정사항에 포함되거나 평가결과에 영향을 주지 않음

[표 2] 발광입자 및 유발점화가 기존 중대사고 수소분석 등에 미치는 영향

구 분	평가 시 점화원 및 연소 가정	발광입자 및 유발점화 반영 시 평가 결과 영향
수소농도 평가	• 생성된 수소는 수소점화기와 PAR에 의해서만 제거됨 (다른 점화원은 고려하지 않음)	• 추가적인 점화원으로서 생성되는 수소를 미리 제거하므로 격납건물내 수소농도가 낮아지는 영향
화염가속-연소폭발천이 평가	• 수소 연소를 가정하여 화염가속 및 연소폭발천이 발생 가능성 평가	• 연소조건에 도달하면 점화원이 있는 것으로 가정하므로 영향 없음
수소연소 압력 평가	• 생성된 수소가 격납건물 내부로 이동하는 과정에는 점화원이 없는 것으로 가정	• 수소를 미리 연소시키므로 격납건물 압력이 낮아지는 영향
	• 격납건물 내부에서 수소의 일시 완전연소 및 모든 에너지의 압력 전환 가정	• 수소를 미리 연소시키므로 격납건물 압력이 낮아지는 영향

〈 안건 담당자 〉

한국원자력안전기술원 안전평가단	
김 민 철 단장	(042) 868 - 0566
장 동 주 실장	(042) 868 - 0772