

제 133회 원자력안전위원회

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

신한울 1호기 운영허가 심의 관련
보고자료(6차)

제 출 자	한국원자력안전기술원 원장 손재영
제 출 자	한국수력원자력(주) 사장 정재훈
제출일자	2021. 2. 19.

■ ■ 목 차 ■ ■

I. 신한울 1호기 다중오동작분석 현황 1

[보고자 : 한수원 원전건설처장]

II. 신한울 1호기 다중오동작분석 심사 결과 .. 22

[보고자 : KINS 안전평가단장]

III. 신한울 1호기 피동축매형수소재결합기 현황 · 32

[보고자 : 한수원 원전건설처장]

IV. 신한울 1호기 피동축매형수소재결합기 심사 결과 · 44

[보고자 : KINS 안전평가단장]

[별첨 1] 신한울 1호기 운영허가 심사보고서

[별첨 2] 신한울 1호기 사용 전 검사보고서

I. 신한울 1호기 다중오동작분석 현황 [한수원]

□ 목적

- 발전소에 화재가 발생할 경우 다중오동작 조건에서 발전소 안전 정지 능력 확보 및 유지

□ 다중오동작(MSO ; Multiple Spurious Operation) : 화재로 인하여 케이블 피복 손상 등에 의한 다수의 회로고장으로 유발되는 한 개 이상 계통 또는 기기의 의도치 않은 작동

※ 다중오동작 예시

- ① 화재로 밸브 제어 전선에 단락(Hot Short) 발생
- ② 단락된 전선으로 전기가 공급됨.
- ③ 오동작으로 초기와 반대 방향으로 밸브가 닫힘 또는 개방됨

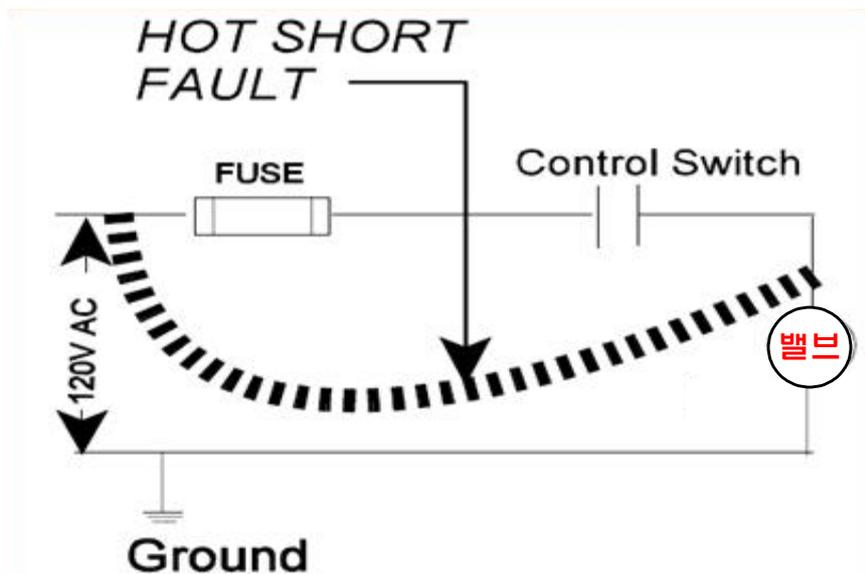


그림1. 다중오동작 영향 개념도

□ 규제 기준[붙임1 참조]

- 원자력안전위원회 고시 : 제2015-11호(화재위험도분석에 관한 기술기준, '15.12)
- NRC 규제지침 Reg. Guide 1.189 : Fire Protection for Nuclear Power Plants
 - ☞ 화재위험도분석 및 안전정지분석 결과에 따라 화재방호설비를 설치하도록 규정하고 있음.

○ 분석 방법론

- NEI¹⁾ 00-01(Rev. 2&3) Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Circuit Analysis

- 적용방법론은 NEI 00-01 Rev.2이며 발전소 고유 시나리오 선정에서 Rev.3에 기술된 시나리오를 추가 적용함.

* NRC 규제지침(RG 1.189)에서 NEI 00-01 방법론을 적용하고 있음

□ 설계 구현

- 화재방호 목표를 달성하기 위해 화재방호 심층방어 개념(①화재 예방, ②화재 조기 감지, 신속한 진화 및 확산 방지, ③안전정지 능력 확보 및 방사성물질 누출 방지)을 설계에 반영하였음.

□ 다중오동작 분석

- 분석 절차 : NEI 00-01, 4장



- 발전소(신한울1호기) 고유 시나리오 선정(①)[붙임2, 3 참조]

- NEI 보고서에 가압경수로형 다중오동작 시나리오 총 64건 제시

- * 발전소 안전성 증진을 위해 Rev. 3에서 제시한 3개의 시나리오를 추가(33b, 49.1, 56b)하여 분석함.

- 제시된 시나리오와 설계 차이점, 중복 제거 등을 통해 47개 시나리오를 선정함.

※ 해외 자문 : MSO 분석 도구와 분석 경험이 있는 전문가 참여

• 자문사 : EPM(Engineering Planning and Management, Inc.)

• 수행 기간 : '16.03.29 ~ '18.08.31

• 30년 이상 미국 원자력발전소 화재방호기준 개발 참여

• 미국 원전의 30%이상, 캐나다 원전의 80%이상 다수 발전소의 화재 후 안전정지분석 경험 보유

1) NEI : Nuclear Energy Institute(미국원자력협회)

- 분석 대상 : 방화지역 241개소, 발전소 안전정지에 필요한 기기 518개, 케이블 3,224개
- 기기 위치 및 케이블 경로 파악(②)[붙임4 참조]
 - 다중오동작 평가 전 화재후 안전정지에 필요한 기기 및 관련 케이블 식별
 - 기기 위치 : 일반 및 기기 배치도를 참조하여 SAFE 입력용 기기 위치 식별.
 - 케이블 경로 : 케이블관리시스템(KCMS : KEPCO E&C Cable Management System)의 DB를 활용함.
 - 다중오동작 분석 대상 기기 및 케이블의 배치 정보를 Data Base화함.
- 방화지역별 MSO 발생여부 평가(③)
 - 다중오동작분석 대상 기기를 SAFE 프로그램에 입력.
 - 방화지역별로 발전소 안전정지 확보, 달성 여부를 평가
- 해결방안 수립(④)
 - 다중오동작 분석결과 발전소 안전정지 요건이 불만족할 경우, ①화재방호체 설치(Fire Wrap), ②케이블 및 기기 이설, ③전원 분리, ④주제어실 운전원 조치 방안을 마련함.
 - 해결방안을 확정하고 설계 개선 또는 운전절차서에 반영함.

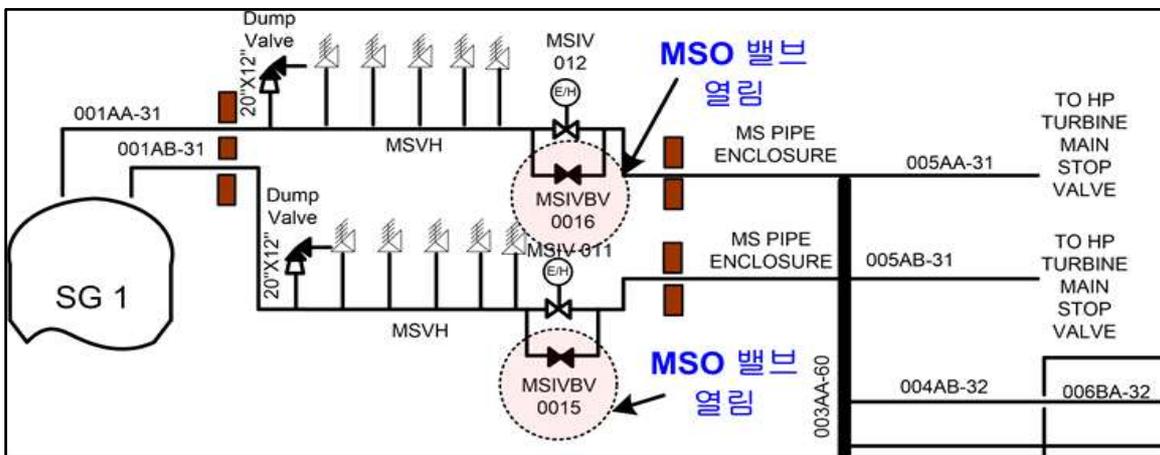
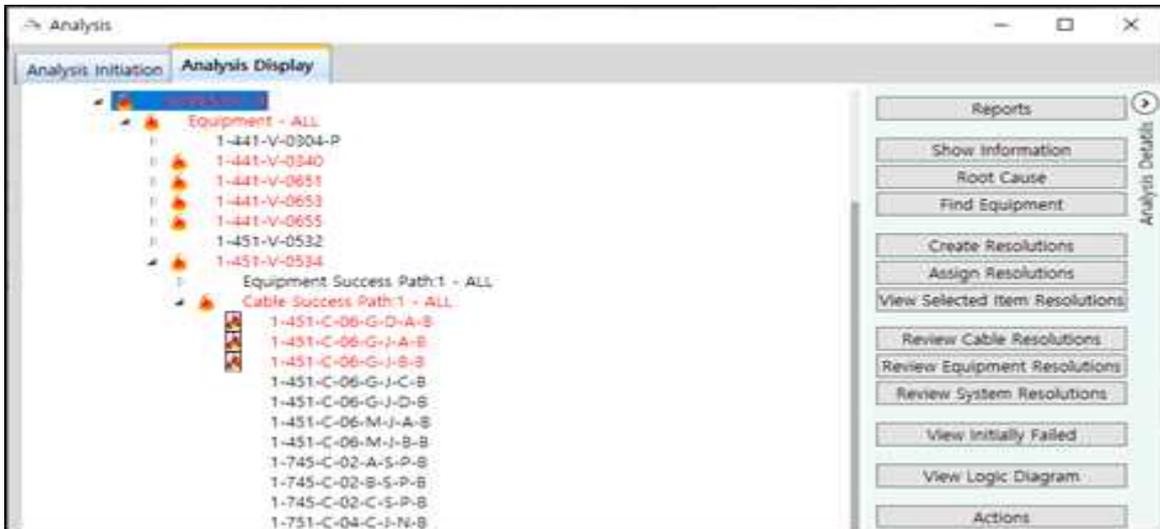


그림5 다중오동작 분석결과 불만족

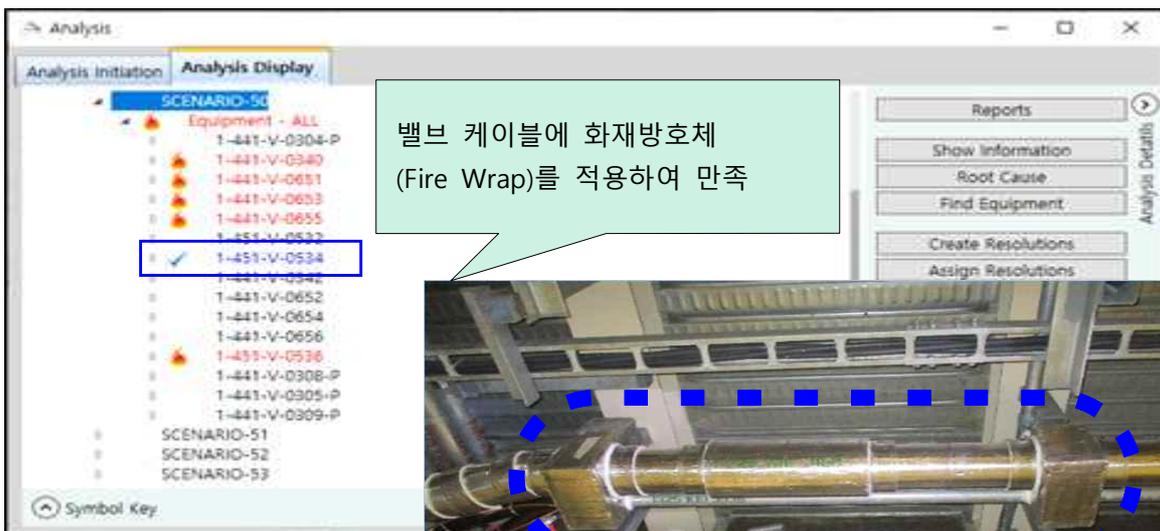


그림6. 해결방안 수립

□ 분석 결과 및 조치 내용[붙임5 참조]

○ 신한울 1호기 다중오동작 분석결과 설계 개선 []건, MCR 운전 조치 []건 등 총 []건을 조치하였음.

- 설계 개선 : []건(화재방호체 설치 []건, 케이블 및 기기 이설 []건, 전원 분리 []건)

계통 명	방호체 설치	케이블 및 기기 이설	전원 분리	합 계
원자로냉각재계통	[]	[]	[]	[]
안전주입계통	[]	-	-	[]
화학 및 체적제어계통	[]	[]	-	[]
증기발생기취출계통	[]	-	-	[]
기기냉각수계통	-	[]	-	[]
주증기계통	[]	-	-	[]
주급수계통	[]	-	-	[]
보조(지원)계통	[]	[]	-	[]
합 계	[]	[]	[]	[]

표2. 조치 유형별 설계 개선 수량

- MCR 운전원 조치 : []건[붙임6 참조]

* 비정상운전절차서([])에 반영

〈종합 의견〉

- 신한울1,2호기 다중오동작분석은 규제요건에서 제시한 신뢰성 있는 방법론을 적용하여 수행되었음.
- 다중오동작분석 결과에 따라 설계 개선 등의 조치를 통해 화재로 발생할 수 있는 다중오동작이 발전소 안전정지 달성 및 유지에 영향을 주지 않음을 확인함.

□ **국내 규제요건**

- 원자력안전위원회 고시 제2015-11호(화재위험도분석에 관한 기술기준, '15.12)
 - 제12조(화재안전정지분석 일반사항) 제3항 제4호 나목 : 방화지역 내의 다수 케이블 손상으로 인하여 화재안전정지계통 및 장비의 기능에 영향을 줄 수 있는 다중오동작분석이 포함된 회로분석

□ **미국 규제요건**

- Reg. Guide 1.189 Fire Protection for Nuclear Power Plants(Rev. 2, '09.10)
 - 5.3 Fire Protection of Safe-Shutdown Capabilities

The postfire safe-shutdown analysis should ensure that one success path remains free of fire damage for a single fire in any single plant fire area. Chapter 3 of industry guidance document NEI 00-01(Ref. 25) provides an acceptable deterministic methodology for the analysis of postfire safe-shutdown circuits, when applied in conjunction with this regulatory guide. The NRC has not fully endorsed NEI 00-01, Section 3.5.1.1, titled “Circuits for ‘Important to Safe Shutdown’ Components.” Specifically, the seventh bullet relates to concurrent hot shorts in circuits that are not sealed-in or latched.
 - 5.3.1(Identification and Evaluation of Postfire Safe-Shutdown Circuits) : The postfire safe-shutdown circuit analysis should address all possible fire-induced failures that could affect the safe-shutdown success path, including multiple spurious actuations.
- NEI 00-01(Rev. 2, '09. 5) : Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Circuit Analysis
 - Chapter 4 : Identification and Treatment of Multiple Spurious Operations
 - Appendix G : Generic List of Multiple Spurious Operations

붙임 2

경수로형 다중오동작분석 시나리오 목록(64건)

시나리오 번호	시나리오 명	적용 여부	미적용 사유
1	[]	[]	
2	[]	[]	
3	[]	[]	
4	[]	[]	
5	[]	[]	
6	[]	[]	
7	[]	[]	
8	[]	[]	
9	[]	[]	
10	[]	[]	
11	[]	[]	
12	[]	[]	
13	[]	[]	
14	[]	[]	
15	[]	[]	
16	[]	[]	
17	[]	[]	
18	[]	[]	
19	[]	[]	
20	[]	[]	
21	[]	[]	
22	[]	[]	
23	[]	[]	
24	[]	[]	
25	[]	[]	
26	[]	[]	
27	[]	[]	
28	[]	[]	
29	[]	[]	
30	[]	[]	
31	[]	[]	
32	[]	[]	

시나리오 번호	시나리오 명	채택 여부	미적용 사유
33a	[]	[]	
33b	[]	[]	
34	[]	[]	
35	[]	[]	
36	[]	[]	
37	[]	[]	
38	[]	[]	
39	[]	[]	
40	[]	[]	
41	[]	[]	
42	[]	[]	
43	[]	[]	
44	[]	[]	
45	[]	[]	
46	[]	[]	
47	[]	[]	
48	[]	[]	
49	[]	[]	
49.1	[]	[]	
50	[]	[]	
51	[]	[]	
52	[]	[]	
53	[]	[]	
54	[]	[]	
55	[]	[]	
56	[]	[]	
56a	[]	[]	
56b	[]	[]	
56c	[]	[]	
56d	[]	[]	
56e	[]	[]	
56f	[]	[]	

붙임 3**다중오동작분석 전문가 검토 내용**

- 참여 전문가 : 국내외 전문가 6명
 - 0 0 0 : KEPCO E&C Electrical Group Supervisor
 - 0 0 0 : KEPCO E&C Nuclear Group Engineer
 - 0 0 0 : EPM Lead Electrical & System Engineer
 - 0 0 0 : EPM Senior System Engineer
 - 0 0 0 : EPM Senior System Engineer
 - 0 0 0 : EPM Senior Technical Manager
- 수행 기간 : '16.03.29~'18.08.31
- 수행 직무
 - MSO 분석 관련 훈련 : MSO 분석 배경 및 지침
 - MSO 시나리오 적용성 검토 : NEI 00-01, Appendix G
 - MSO 시나리오 로직구성 : MSO 시나리오 성공경로 및 분석 대상기기 검토
 - 미해결 항목 도출 및 해결방안 수립: A/E 각 분야 검토 및 결과 자문사 송부
 - 전문가패널 검토 보고서 : Multiple Spurious Operations Expert Panel Report

			
KEPCO Engineering & Construction Co., Inc.			
Shin-Hanul Nuclear Power Plant Units 1 & 2			
EPM Project 2728: Multiple Spurious Operations Expert Panel Report			
Technical Report: P2728-0003-0001			
Revision 0 July, 2016			
Signature Block			
Prepared by: 	M. Delehanty Signature	M. Delehanty Print	7-8-2016 Date
Reviewed by: 	F. Yacoub Signature	F. Yacoub Print	7-8-2016 Date
Approved by: 	R. Rennie Signature	R. Rennie Print	7-8-2016 Date
			

붙임 4

다중오동작분석 대상 기기 및 케이블 수량

□ 기기 수량 : 총 518개

계통 명	기기 수량	주요기기
원자로냉각재계통(431)	49개	계측기, 제어기, 전동기, 밸브
원자로가스배기계통(433)	11개	밸브
안전주입계통(441)	51개	계측기, 제어기, 전동기, 밸브
격납건물살수계통(442)	12개	밸브
원자로건물내 재장전수 저장계통(447)	4개	밸브
화학 및 체적제어계통(451)	56개	계측기, 제어기, 전동기, 밸브
증기발생기취출수계통(455)	10개	밸브
1차기기냉각수계통(461)	41개	계측기, 제어기, 전동기, 밸브
1차기기냉각해수계통(462)	10개	전동기, 밸브
주증기계통(521)	38개	밸브
보조급수펌프 터빈계통(527)	6개	제어기, 밸브
주급수계통(541)	16개	계측기, 밸브
보조급수계통(542)	14개	제어기, 전동기, 밸브
비상디젤발전기계통(591)	2개	디젤엔진
주제어실공기조화계통(601)	11개	계측기, 댐퍼
비상디젤발전기 공기조화계통(602)	32개	댐퍼
필수냉수계통(633)	8개	계측기, 밸브
공학적인안전설비 기기제어계통(745)	44개	캐비닛
공정기기제어계통(746)	10개	캐비닛
주제어실계통(751)	4개	캐비닛, 대형정보표시반(LDP)
계측제어기기실(752)	15개	캐비닛
격납건물 감시계통(763)	8개	계측기
4.16kV Non 1E급 전력계통(822)	2개	차단기반
4.16kV 1E급 전력계통(823)	8개	차단기반
480V 1E급 저압차단기계통(825)	5개	차단기반
480V Non 1E급 전동기제어반 및 저압계통(826)	2개	차단기반
480V 1E급 전동기제어반 및 저압계통(827)	15개	차단기반
직류전류계통(841)	19개	충전기, 축전지, 차단기반
계측 및 제어전원계통(842)	12개	인버터, 정전압변압기
기타계통	3개	제어기

□ 케이블 수량 : 총 3,224개

계통 명	케이블 수량	계통 명	케이블 수량
원자로냉각재계통(431)	378개	원자로가스배기계통(433)	75개
안전주입계통(441)	260개	격납건물살수계통(442)	38개
원자로건물내 재장전수 저장계통(447)	20개	화학 및 체적제어계통(451)	224개
증기발생기취출수계통(455)	36개	1차기기냉각수계통(461)	206개
1차기기냉각해수계통(462)	53개	주증기계통(521)	208개
보조급수펌프 터빈계통(527)	43개	주급수계통(541)	120개
보조급수계통(542)	86개	보조급수저장 및 이송계통(543)	1개
비상디젤발전기계통(591)	303개	주제어실공기조화계통(601)	58개
비상디젤발전기 공기조화계통(602)	139개	전기 및 계측제어기기실 공기조화계통(603)	8개
필수냉수계통(633)	14개	화재방호계통(691)	20개
공학적안전설비(712)	8개	공학적안전설비 기기제어계통(745)	201개
공정기기제어계통(746)	223개	주제어실계통(751)	191개
격납건물 감시계통(763)	24개	고압 전력계통(821, 822, 823)	151개
480V 저압전력계통(825)	8개	480V 전동기제어반 및 저압계통(827)	47개
직류전류계통(841)	39개	계측 및 제어전원계통(842)	42개

붙임 5

다중오동작 분석 결과 및 조치 사례

□ 조치 유형 : 화재보호체(Fire Wrap) 설치 : 총 []건

<p>시나리오 번호</p>	<p>25. 부적절한 주증기 방출</p>
<p>방화 지역</p>	<p>보조건물 F137-A20A</p>
<p>분석 결과</p>	<p>○ 화재로 케이블이 손상될 경우 주증기격리우회밸브 개방</p>
<p>조치 내용</p>	<p>○ 케이블을 3시간 내화등급으로 설계</p>

□ 조치 유형 : 케이블 및 기기 이설 : 총 []건

<p>시나리오 번호</p>	<p>21. 원자로냉각재 과다 보충</p>
<p>방화 지역</p>	<p>보조건물 F120-A15B</p>
<p>분석 결과</p>	<p>○화재로 케이블이 손상될 경우 충전펌프 및 충전격리밸브 제어기 손상</p> <p>[]</p>
<p>조치 내용</p>	<p>○케이블 이설 및 제어캐비닛 분리 배치</p> <p>[]</p>

□ 조치 유형 : MCR 운전원 조치 : 총 []건

<p>시나리오 번호</p>	<p>1. 모든 원자로냉각재펌프 밀봉냉각 기능 상실</p>
<p>방화 지역</p>	<p>보조건물 F078-A19A</p>
<p>분석 결과</p>	<p>○화재로 케이블이 손상될 경우 RCP 밀봉수 공급밸브 오동작 단힘</p> <p>[]</p>
<p>조치 내용</p>	<p>[]</p>

붙임 6

MCR 운전원 조치사항 목록

No.	MCR 조치	조치사항	운전조치
1	[] [] []	[] [] []	[] [] [] [] [] [] [] [] [] []
2	[] [] []	[] []	[] [] [] [] [] [] [] [] [] []
3	[] [] []	[] [] []	[] [] [] [] [] [] [] [] [] []

No.	MCR 조치	조치사항	운전조치
7	[] [] []	[] [] []	[] [] [] [] [] [] [] [] [] []
8	[] [] []	[] [] []	[] [] [] [] [] [] [] [] [] []
9	[] [] [] [] [] []	[] [] []	[] []



[대단계]

M. 불임

[단계]

7. 화재 다중오동작 발생 시 손상기기 및 주제어실 운전조치사항

개요

- 4 S 화재 지역별 자동동작별 브록
- 5 S 이산화탄소 및 중성화약체 소회설비 설치장소
- 6 S 열부지 별브록 작동원리
- 7 S 화재 다중오동작 발생 시 손상기기 및 주제어실 운전조치사항
- 8 S 참조자료

주의

주의사항

화재로 인한 다중 오동작(MSO) 발생 시 주제어실 운전조치사항을 수행하여 발전소를 안정시킨다.
 주) MSO : Multiple Spurious Operation

1. 원자로건물(RCB) 내부 화재 발생 시

Room No. (내화지역)	종류	종류/종류	주제어실 운전조치	수행가능 절차서
CV-10261	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10262	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10263	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10264	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10466	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10467	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10468	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10469	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10222P	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10465	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10467	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10468	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10469	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10224	Open	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)

2. 보조건물(AB) 50'~ 55' 지역 화재 발생 시 (1/2)

Room No. (내화지역)	종류	종류/종류	주제어실 운전조치	수행가능 절차서
CV-10177	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10101	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10100	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10106	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10218P	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10107	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10216	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10111A	Stop	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10112	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10124	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10116	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10177	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
CV-10218P	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10466	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10467	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10468	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)
RC-10469	Close	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	1) 정상 : 100% 밀봉 상태	비정상-3691-01(발전소 화재시 운영)

다음장으로 계속



Ⅱ. 신한울 1호기 다중오동작분석 심사 결과 [KINS]

<심사보고서 p.999, 1000>

□ 규제 요건

<원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙>

▶ 제14조(화재방호에 관한 설계기준 등)

: 원자로시설내 어느 한 지역에서 화재가 발생하는 경우에도 원자로 안전정지·잔열제거 능력에 현저한 지장을 초래하지 아니하도록 설계

<원자력안전위원회 고시>

▶ 제2015-11호(화재위험도분석에 관한 기술기준)

: 방화지역 내의 다수 케이블 손상으로 인하여 화재안전정지계통 및 장비의 기능에 영향을 줄 수 있는 다중오동작분석 수행

□ 적용 방법론

- NEI 00-01(Rev.2), Guidance for Post-Fire Safety Shutdown Circuit Analysis
 - NRC 규제지침(Reg. Guide 1.189 Rev.2)에서 승인한 방법론
- 다중오동작분석 방법론(NEI 00-01, 제4장)
 - NEI 00-01 부록 G2)의 일반 다중오동작 시나리오를 기반으로 전문가패널 검토를 통하여 발전소 고유의 다중오동작 시나리오 선정
 - 다중오동작 시나리오를 구성하는 기기 및 관련 케이블을 선정하고, 기기의 위치정보와 케이블의 경로정보 확인
 - 단일 방화지역이 전소한다는 가정 하에 방화지역별로 다중오동작 시나리오 발생 여부 평가

2) NEI 00-01 부록 G: 가압경수로에 적용되는 일반 다중오동작 시나리오 제시

- 다중오동작 시나리오가 발생된다고 평가된다면 설계변경, 주제어실 운전원 조치 등의 해결방안 수립

□ 심사결과

○ 발전소 고유 다중오동작 시나리오 선정

- (심사내용) 다중오동작분석 보고서 및 전문가패널 보고서 검토
 - NEI 00-01 부록 G의 일반 다중오동작 시나리오에 기초하여 전문가패널 검토를 통해 선정하였음을 확인
 - 전문가패널 검토*에서는 해외자문사 EPM社(미국)와 한국전력기술(KEPCO E&C)이 협업하여 수행하였음을 확인
 - * 원자력, 전기, 계통 등 각 분야의 엔지니어가 전문가패널 검토에 참여
 - NEI 00-01 부록 G의 총 64개 다중오동작 시나리오 중 []개가 신한울 1호기 다중오동작 시나리오로 선정되었음을 확인
 - 신한울 1호기에 적용되지 않는 다중오동작 시나리오(17개)의 미적용 사유*가 적합함을 확인
 - * 신한울 1호기와의 설계 차이, 중복 시나리오 등
- (심사결과) 전문가패널 검토를 통해 신한울 1호기 고유 다중오동작 시나리오가 적합하게 선정되었음을 확인

○ 기기 위치 및 케이블 경로 정보

- (심사내용) 다중오동작분석 보고서 검토 및 현장심사 수행
 - 방화지역별 기기의 위치 및 케이블의 경로 정보는 케이블관리 시스템(KCMS)³⁾을 활용하였음을 확인
 - KCMS 정보와 현장의 일치성을 확인하기 위하여 현장심사* 수행
 - * 2차 현장심사 : '18.01.22.~25., 신한울 1호기 현장

3) KCMS: KEPCO E&C Cable and Raceway Management System

- (심사결과) 다중오동작분석에 사용되는 기기 위치 및 케이블 경로 정보(KCMS)가 현장과 일치함을 확인
- 방화지역별 다중오동작 발생여부 평가

- (심사내용) 다중오동작분석 보고서 검토 및 현장심사 수행
 - EPM社의 다중오동작분석 전산 프로그램(SAFE)⁴⁾을 사용하여 방화 지역별 다중오동작 발생여부를 평가하였음을 확인
 - SAFE 프로그램은 EPM社의 프로그램 확인 및 검증(V&V) 절차를 통해 적합성이 검토되었음을 확인
 - KCMS 정보가 SAFE 프로그램에 적절하게 반영되었는지 검토하기 위해 현장심사* 수행

* 1차 현장심사: '17.10.31.~11.02., KEPCO E&C(김천)

- (심사결과) SAFE 프로그램은 V&V 절차를 통해 적절성이 확인 되었으며, 다중오동작 관련 기기 및 케이블 경로 정보(KCMS)는 SAFE 프로그램에 적합하게 입력됨을 확인

○ 다중오동작 해결방안

- (심사내용) 다중오동작분석 보고서 및 비정상운전절차서 검토
 - []건의 설계변경사항과 []의 MCR 운전원 조치사항 도출
 - ※ 설계변경사항: 화재방호체 설치([]), 케이블 및 기기 이설([]), 전원 분리([])
 - ※ MCR 운전원 조치사항: 비정상운전절차서([])에 반영
- (심사결과) 화재로 인한 다중오동작이 안전정지·잔열제거 능력에 영향을 주지 않도록 해당 후속조치들이 완료됨을 확인

4) SAFE: System Assurance & Fire Protection Engineering

□ 결론

- 신한울 1호기 다중오동작분석은 Reg. Guide 1.189에서 승인한 NEI 00-01 방법론에 따라 적합하게 수행되었고,
- 설계변경, 운전원 조치 등 후속조치를 통해 화재로 인한 다중오동작이 원자로 안전정지·잔열제거 능력에 영향을 주지 않음을 확인
 - ☞ 관련 요건(원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제14조)을 만족

1. 심사 질의 이력

날짜	질의 번호	질의 제목	주요 내용
2015.01	FHA-DA-2.5-1 (서류적합성)	다중오동작분석 수행계획 제출	서류적합성 검토 시 다중오동작분석 수행계획 제출 요구
2017.08	FSAR-9.5.1-1-K4	신한을1,2호기 다중오동작분석보고서 제출	서류적합성 검토 답변에 근거하여 다중 오동작분석보고서 제출 요구
2017.09	FHA-II-02	신한을1,2호기 다중오동작분석방법론에 대한 적합성 검토	제출된 다중오동작분석보고서에 대한 적합성 검토 (12개의 세부 질의 및 중점확인사항 질의)

2. 세부질의 내용

- 질의 번호 : FHA-II-02
- 질의 제목 : 신한울1,2호기 다중오동작분석방법론에 대한 적합성 검토
- 세부 질의 : 12개의 세부 질의 및 5개의 중점확인사항 질의

	세부 질의 요약	사업자 답변	검토 결과
1	다중오동작에 대한 해결 방안으로 운전원수동조치를 활용하는 것은 수용할 수 없음 ※ 운전원수동조치: 화재 안전정지를 달성하고 유지하기 위해 주제어실 외부에서 기기와 장비를 조작하는 운전원에 의해 수행되는 조치.	다중오동작에 대한 해결방안으로 운전원수동조치를 활용하지 않고 설계변경 등으로 조치하겠습니다.	운전원수동조치를 활용한 해결 방안을 설계변경 등으로 변경하였으며 다중오동작보고서에 적절하게 반영되었음을 확인함.
2	다중오동작분석 관련 미해결 항목(Open Item)에 대해 해결방안을 수립하여 제시	해결방안을 수립하여 제시하겠습니다	미해결 항목에 대한 해결방안을 마련하였으며, 다중오동작보고서에 적절하게 반영되었음을 확인함.
3	다중오동작 시나리오 선별방법의 적절성을 확인할 수 있는 자료(전문가패널 구성 및 운영 등) 제출	전문가패널 회의 보고서를 제출함	전문가패널 검토에서는 해외자문사EPM社(미국)와 한국전력기술(KEPCO E&C)이 협업하여 수행하였음을 확인함. 해외자문사인 EPM社는 미국 원전의 다중오동작분석을 수행한 경험이 있음을 확인하였으며, 원자력, 전기, 계통 등 각 분야의 엔지니어가 전문가패널 검토에 참여하였음을 확인함. NEI 00-01 방법론에 따라 NEI 00-01 부록 G의 일반 다중오동작시나리오를 기초하여 신한울12호기다중오동작시나리오를 선정하였음을 확인함.

	세부 질의 요약	사업자 답변	검토 결과
4	다중오동작분석 프로그램(SAFE)의 적절성 검토	다중오동작분석 프로그램(SAFE)과 관련된 제품확인서(EPM)와 V&V 문서(EPM, KEPCO E&C)를 제출함	다중오동작분석 프로그램(SAFE)은 제공하는 업체인 EPM社와 제공받은 업체인 KEPCO E&C에서 V&V가 되었음을 확인함 ※ KEPCO E&C 현장심사 추가 수행
5	다중오동작분석보고서와 화재위험도분석보고서 간의 불일치 사항(방화지역별 격실 정보) 수정	불일치 사항을 수정하겠음	불일치 사항이 적절하게 수정되었음을 확인함.
6	영문 오기 수정 (Fire zone → Fire area)	해당 오기를 수정하겠음.	오기가 적절하게 수정되었음을 확인함.
7	다중오동작 시나리오 상세 검토를 위한 상세 분석결과(회로분석) 제출	관련 내용을 추후 제공하겠음	현장심사 수행 시 검토함.
8	다중오동작분석 대상 기기 조합에 대한 선정과 적합성을 검토하기 위한 계통 설명자료 제출	다중오동작분석 보고서에 작성된 대상 기기 조합에 대한 검토의견과 P&ID 표기로 시나리오 논리를 기술하는 것으로 충분한 정보를 제공하고 있음	사업자의 답변은 적절함
9	다중오동작 시나리오 #39(Fire Prevents Reactor Trips)가 선별 제거된 근거 제시	원자로 보호계통은 단일 고장시에도 제어봉구동장치들로부터 전기동력을 반드시 제거할 수 있도록 설계되어 있으므로 선별 제거함	사업자의 답변은 적절함
10	보고서 본문과 부록 간 불일치사항(선별 제거된 다중오동작분석 시나리오 정보) 수정 보고서에 추가 정보(다중오동작분석 시나리오 선별제거 근거) 기술	관련 내용을 반영하여 보고서를 수정하겠음	관련 내용이 보고서에 적절하게 반영되었음을 확인함.

	세부 질의 요약	사업자 답변	검토 결과
11	다중오동작분석 시 사용한 고장수목 기법과 관련하여 기기의 “실패“가 아닌 “성공“ 기준으로 분석한 것에 대한 적절성 검토	신한울 1,2호기 다중오작동분석은 시나리오가 발생하지 않음을 확인하기 위해 성공 경로를 검토하고 평가함. “성공“ 기준의 평가에서도 충분히 다중오작동에 의한 영향을 확인하기에 충분함.	사업자의 답변은 적절함
12	다중오동작 시나리오 #55(Valve Failure)가 선별 제거된 근거 제시	해당 시나리오는 MOV 오작동에 의해 사고 완화를 위한 추가적인 운전원 조치의 수행이 불가능한 기기의 물리적 손상을 검토하는 시나리오임. 각 시나리오 평가에 포함된 MOV를 검토하고 운전원 조치가 필요한 경우 관련 시나리오를 고려하여 운전원 조치가 가능함을 확인함.	사업자의 답변은 적절함
중점.1	Open Item 및 운전원수동 조치(OMA)에 대한 조치결과	다중오동작 재분석 및 추가 설계변경을 통하여 Open Item를 해결하고 운전원 수동조치 방안을 제거하였음.	다중오동작보고서에 관련 내용이 적절하게 반영되었음을 확인함.
중점.2	MCR Action에 대한 화재비정상운전절차서 수립	주제어실 내에서의 운전원 조치와 관련된 내용을 화재비정상운전절차서(비정상-3691-01)에 반영함.	화재비정상운전절차서에 관련 내용이 적절하게 반영되었음을 확인함.
중점.3	다중오동작분석의 입력자료(케이블 경로자료)에 대한 적합성 검토	KINS 현장심사 시 대표 시나리오 점검(#17, 41)을 통해 케이블 경로 정보와 현장 설계 시공 정보가 일치됨이 검토됨	현장심사 시 대표 시나리오(#17, 41)의 관련 기기의 케이블 경로 정보와 현장 설계 시공 정보가 일치함을 확인함.
중점.4	화재로 인해 손상된 광케이블에 따른 오동작 가능성	광케이블에서 오동작신호 발생하는 것은 불가능하다고 미국 산업계에 통용되고 있으며, APR1400 DC 과정에서 제출된 질의답변에서도 광케이블 자체의 손상으로 기기의 오동작을 발생시킬 수 없다고 답변한 바 있음.	사업자의 답변은 적절함

	세부 질의 요약	사업자 답변	검토 결과
중점.5	다중오동작분석 결과와 관련된 기타사항 등	기기의 현장 시공위치와 기기정보 데이터베이스 간 불일치(1건: 기기의 위치 정보)와 관련하여 MSO분석 보고서에 대한 영향은 없음 현장점검 이후 다중오작동분석에 포함된 기기에 대한 위치정보 입력사항을 점검하여 데이터베이스의 불일치사항을 수정함	사업자의 답변은 적절함

□ 현장심사

○ 1차 현장심사

- (장소 및 기간) KEPCO E&C(김천), '17.10.31.~11.02.
- (현장심사 내용) 케이블관리시스템(KCMS)과 다중오동작 전산 프로그램(SAFE)의 주요 정보가 일치하는지 검토

- ▶ 검토 대상 시나리오
 - 시나리오 17: Interfacing System LOCA
 - 시나리오 41: CCW to Credited Loads
- ▶ 현장심사 내용
 - 다중오동작 시나리오를 유발하는 기기조합(방화지역별)에 대한 검토
 - 다중오동작 시나리오를 유발하는 기기 및 관련 케이블의 위치 및 경로 정보 확인(KCMS 및 SAFE)

- (현장심사 결과) 케이블관리시스템(KCMS)과 다중오동작 전산 프로그램(SAFE)의 주요 정보가 일치함을 확인

○ 2차 현장심사

- (장소 및 기간) 신한울 1호기 현장, '18.01.22.~25.
- (현장심사 내용) 케이블관리시스템(KCMS)과 현장의 주요 정보가 일치하는지 검토

- ▶ 검토 대상 시나리오
 - 1차 현장심사 대상과 동일
- ▶ 현장심사 내용
 - 다중오동작 시나리오를 유발하는 기기 및 관련 케이블에 대한 현장 설치 상태 확인

- (현장심사 결과) 케이블관리시스템(KCMS)과 다중오동작 전산 프로그램(SAFE)의 주요 정보가 대부분 일치함을 확인하였으나, 1건의 기기 위치 정보가 불일치함을 확인

- (후속조치) 모든 다중오동작분석 관련 기기에 대한 위치정보 재검토 및 수정·완료

Ⅲ. 신한울 1호기 피동축매형수소재결합기 현황 [한수원]

□ 배경

○ 설치배경

1) APR1400은 설계 단계에서 피동축매형수소재결합기(PAR*) 및 수소점화기 (Igniter)를 채택

* PAR: Passive Autocatalytic Recombiner

2) 후쿠시마 원전사고('11.03) 이후 IAEA는 원전의 중대사고시 수소폭발 위험에 대처하기 위한 설비확보를 권고

3) 후쿠시마 후속조치를 위해 민관으로 구성된 국내원전 안전점검단 ('11.03 ~ '11.04)이 IAEA 권고안에 따른 이행계획으로서 전원 없이 수소 제거가 가능한 피동축매형수소재결합기 설치를 요구

○ (해외동향) 후쿠시마 사고 이후 피동축매형수소재결합기를 추가하는 추세

국가	발전소 형태 또는 발전소(상업운전일)	수소제어계통
캐나다	Point Lepreau('83)	PAR
	Bruce('77)	Igniter + PAR
	Pickering('73, '83~'86)	
	Darlington('90~'93)	
핀란드	Loviisa('77,'81)	Igniter + PAR
	Olkilutoto1&2('79,'82)	N2 inerting
	Olkilutoto3(건설)	PAR
프랑스	PWR900, 1300, 1450	PAR
	신형원전 (EPR)	PAR
독일	PWR KONVOI	PAR
	BWR-72	PAR
스페인	PWR-KWU-1000	PAR
	BWR	N2 inerting
벨기에	Doel('75,'82,'85)	PAR
	Tihange('75,'83,'85)	PAR
미국	가동원전(BWR 및 일부 PWR)	Igniter
	신형원전(AP1000 등)	Igniter + PAR

□ 신한울1호기 PAR 개요

○ 계약현황

1) PAR []대 (대형 []대/ 중형 []대/ 소형 []대)

- 대형 []대 / 중형 []대 (중대사고 + DBA : [] 등급)

- 대형 []대 / 중형 []대 / 소형 []대 (중대사고 : []등급)

2) 공급사 및 계약일: 한국원자력기술(KNT) / '11.10.10

○ (설계기준) 수소제어 관련 규제지침서(Reg. Guide 1.7) 및 10CFR50.34에 근거하여 수소제어분석 코드를 이용한 해석을 통해 PAR 설치 위치 및 수량 선정

1) 설계기준사고(DBA⁵⁾) : 수소농도 4%를 초과하지 않게 설계

- 보수적 설계 : 용량 200%[] 설치, PAR 성능 []% 발휘 가정

2) 중대사고(SA⁶⁾) : 수소농도가 10%를 초과하지 않게 설계

- 보수적 설계 : 핵연료 피복재와 물 반응(100%) 고려, PAR 성능 []% 발휘

○ (성능기준) 소형, 중형, 대형별 아래의 수소제거율 만족

([]bar / []°C)*

Size \ Condition	H ₂ depletion @ 4 vol.% H ₂	H ₂ depletion @ 8 vol.% H ₂
소형	> 0.2 g/sec	> 0.5 g/sec
중형	> 0.4 g/sec	> 1.0 g/sec
대형	> 0.9 g/sec	> 2.0 g/sec

* PAR의 수소제거율은 수소농도, 압력, 온도 등의 변수에 의해 연속적으로 변하여 특정 환경조건이 가지는 의미는 없음. 단, 상기의 조건은 PAR 설비 국산화과정에서 독일 AREVA사의 환경요건을 동일하게 준용함

○ 성능시험

1) (수소제거율 시험) 수소제거율 입증 및 수소농도에 따른 수소제거율을 제시

2) (내환경검증) 설계기준사고 환경조건에서 내환경검증 요건에 맞게 기능 입증

3) (기기생존성 시험) 중대사고 환경에서 PAR 기능 유지 및 운전성 입증

※ 2012년 수속폭발 위험 가능성이 제기되어 발화특성 및 폭발가능성 시험 추가 시행

5) DBA(Design Basis Accident)

6) SA(Severe Accident)

□ 신한울1호기 PAR 성능시험 결과

○ 제작사 성능검증

1) 시험 수행 및 3자검증

가) 최초 검증시험

- 시험수행 : 한국원자력기술(KNT)
- 3자검증 : 한국산업기술시험원(KTL)
- 검증완료일 : '11.06.17.

나) 수소제거율 상관식 재검증

- 3자검증 : 한국기계연구원(KIMM)
- 검증완료일 : '12.07.27

2) (시험설비) 내압 용기(직경 []m × 높이 []m, 부피 []m³), 히터, 수소농도 제어기/분석기 등으로 구성

[]

3) Test Matrix

평가항목	초기온도(K)	초기압력(bar)	수소농도(%)	상대습도(%)
온도변화	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]
압력변화	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]
농도변화	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]
	[]	[]	[]	[]

4) (수소제거율 상관식) 물리적인 경향을 반영할 수 있도록 이상기체 상태방정식 형태로 설정하여 비선형 회귀분석방법으로 도출

$$R = k \cdot N \cdot (a_1 + a_2 \cdot C + a_3 \cdot C^2) \cdot \left(\frac{P}{T}\right)$$

R: 수소제거율(g/sec), N: 용량별 PAR 모델 상수(소형: 1, 중형: 2, 대형: 4)
 a_1, a_2, a_3 : 상수, C: 수소농도(%), P: 압력(bar), T: 온도(K), k: 보수성인자

[]

출처 : KNT 수소제거율식(KNT-PAR-RE-01,2012.4.26.)

- 상관식 적용범위

변수	적용범위
온도 (°C)	[]
수소농도 (v/o)	[]
압력(bar, 절대압력)	[]

○ 공급품 출하전 성능시험

1) (수행자) 한국원자력기술(KNT)

2) 시험대상

종류	PAR 모델	PAR 수량	촉매체 수량/PAR
소형	KPAR-40	[]대	[]개
중형	KPAR-80	[]대	[]개
대형	KPAR-160	[]대	[]개

3) 시험조건 및 시험일

- 상온, 대기압, 수소농도 [] %
- 시험일 : '15.08.05 ~ '15.08.08

4) (시험설비) 대기압/상온 조건에서 PAR 전후단의 수소 농도를 측정하기 위해 대형 챔버, 수소공급장치, 수소농도분석기 등으로 구성

[]

5) (시험결과) 만족

형식	PAR	수소농도 (%)	압력 (bar)	온도 (°C)	수소제거율		실측값/상관식	판정 기준	결과
					실측값	상관식			
대형	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
중형	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
소형	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족
	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	만족

○ 촉매체 발화특성 및 폭발가능성 확인시험

1) 배경

- KNT PAR에 대한 폭발 가능성 의견이 제기되어 제3기관의 검증 추진

2) 3자 검증기관: 한국기계연구원(KIMM)

- 공급사가 수행하는 시험을 입회, 참관하고 ‘제3기관 검증 보고서’ 발행(12.7.27.)

- 용역기간 : '12.5.29. ~ '12.7.13.

3) 시험장치

	[]
PAR반응기 (촉매체 []개)	PAR 시험장치(KNT) (설계압력 []kg/cm ² , 체적 []m ³)

4) 촉매체 발화특성 시험

가) 건식시험(상온) : 수소농도 10%까지 발화안됨

시험	총시험 시간	압력용기 초기압력	압력용기 최대압력	촉매체 최대온도	수소공급 농도	발화여부
Test #1	[]	[]	[]	[]	10%	없음
Test #2	[]	[]	[]	[]	10%	없음
Test #3	[]	[]	[]	[]	10%	없음

※ 발화: 수소-공기 혼합물이 고온에 노출되어 순간적인 연소가 발생하는 현상

나) 습식시험(증기공급) : 2bar에서 수소농도 10%까지, 2.94bar에서 수소농도 8%까지 발화안됨

시험	총시험 시간	압력용기 초기압력	압력용기 최대압력	촉매체 최대온도	수소공급 농도	발화여부
Test #4	[]	[]	[]	[]	10%	없음
Test #5	[]	[]	[]	[]	10%	없음
Test #6	[]	[]	[]	[]	8%	없음
Test #7	[]	[]	[]	[]	8%	없음

5) 폭발가능성 확인시험

가) 시험방법(건식)

- 수소농도 8%까지 발화가 발생하지 않음을 확인
- 수소를 추가 주입하여 발화시 PAR 반응특성 파악
- 발화 후 폭발 발생여부 확인

※ 발화 시 수소주입 중단

나) 시험결과

- 발화 전후 압력 및 수소농도

발화전 압력(bar)	수소농도(%)	압력상승값(bar)
1.73	10.13%	+3.08

- 촉매체 육안검사 : 구조적인 변형 및 국부적인 변화 없음

[]	[]	[]
[]	[]	[]
[]	[]	[]
시험전(촉매체1)	미발화(촉매체2)	발화(촉매체 3)

6) 검토결과

구분	내용
8% 농도조건 발화특성	- 1.5bar, 60°C 시험조건에서 수소농도 8% 조건까지 발화가 일어나지 않았고, 폭발 역시 발생하지 않았음.
발화 시 폭발여부 및 발화에 따른 촉매체 영향	- 수소 추가 주입 시 발화가 발생하였으나, 발화가 일어나더라도 폭발이 발생하지 않음을 확인함. - 발화 발생 후 촉매체의 구조적인 변형 및 국부적인 변화는 관측되지 않았음.
PAR 폭발가능성 문서검토	- Ternary Diagram에서 수소농도 10%이하 작동조건에서는 공기/증기 농도와 무관하게 PAR에 의한 폭발 가능성은 없음.

※ 출처 : 피동촉매형 수소재결합기 제3기관 검증 보고서(KIMM)

○ 내환경검증

1) (검증기관) 한국에스지에스(SGS)* + KIMM(LOCA 시험)

* 한국에스지에스(SGS): 기기검증 전문기관

2) 검증방법

- IEEE 323 ‘Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Station’ 에 제시된 수행 방법 중 형식시험의 방법 적용

3) (검증결과) 실험 및 상관식을 이용하여 수소제거성능 검증

Sequence	시험설비	시험일자	단계별 시험 후 수소제거 성능*
초기성능시험	KNT	'18.10.02	만족 ([])
방사선조사	KAERI	'18.10.16	만족 ([])
열적노화시험	SGS	'18.10.22	만족 ([])
내진검증	SGS	'18.10.31	만족 ([])
LOCA/MSLB 모사 및 최종성능시험	KIMM/ KNT	'18.12.12/ '19.01.09	만족 ([])

* 각 단계별 수소제거 성능시험은 SGS 주관으로 제작사(KNT) 시험장비를 이용하여 상온, 대기압, 수소농도 []% 조건에서 수소제거율을 측정하고, 상관식을 이용하여 성능을 계산함 (판정기준 [] 이상)

○ 기기생존성 시험

1) (수행자) 한국원자력기술(KNT) / 시험기간 : ' 11.02.28 ~ ' 11.04.18

※ 방사선조사 시험은 KAERI가 수행

2) 중대사고 조건

Parameters	Conditions
Max. Press.	[]
Max. Temp.	[]
Radiation Total Integrated Dose(TID)	[]

3) (시험결과) 압력 []bar, 온도 []°C, 조사선량 []Gy의 중대사고 환경에서 기기의 기능이 유지됨을 확인하였고, 각 시험단계별 수소제거 성능은 아래와 같음

Qualification Sequence	단계별 시험 후 수소제거 성능
방사선조사 전	만족 ([])
방사선조사 후	만족 ([])
중대사고 환경 전	만족 ([])
중대사고 환경* 후	만족 ([])

* 중대사고 환경(온도, 압력) 하에서 기기 생존성 확인

- []bar, []°C 유지([]h)

- 수소 농도 []%, []%, []%에서 []회 강제 점화

- []bar, []°C 유지([]h)

☞ 발화점 이상으로 수소농도를 높이기 위해 PAR 내부로 수소가 유입되지 않도록 알루미늄테이프로 밀봉 (외부 강제점화 시 밀봉재가 탈락되어 촉매체는 고온 환경에 노출됨)

□ 결론

- 신한울1호기는 건설 설계단계에서 피동축매형수소재결합기(PAR)를 채택하여 보수적인 설계요건에 따라 설치용량을 결정하였으며,
- 구매 요건의 기술기준에 따라 성능시험 및 내환경시험을 수행하여 설계기준사고 시 수소제거능력을 입증하였고, 중대사고 환경에서의 생존성을 확인하였음

IV. 신한울 1호기 피동축매형수소재결합기 심·검사 결과 (KINS)

<심사보고서 p.538~545, p.551~571, p.1984>

<사용 전 검사보고서 p.388~391, p896~901>

□ 피동축매형수소재결합기(PAR*)의 구분 및 심사 기준

* PAR: Passive Autocatalytic Recombiner

- (설계기준사고용 PAR) 설계기준 냉각재상실사고시 생성될 수 있는 수소를 제거하기 위한 설비(12대)

▶ 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제23조 (원자로격납건물 등)

① 격납건물 및 관련계통은 설계에 고려되는 모든 사고조건에 대하여 격납건물 외부로의 방사성물질 누출이 최소화되도록 누설밀봉 방호벽기능을 갖도록 설치하여야 하며, 다음 각 호의 기준에 적합하여야 한다.

2. 설계기준사고시 외부환경으로의 방사선 누출을 최소화하기 위한 핵분열 생성물의 농도저감 수단과 격납건물의 건전성 유지를 위협할 수 있는 격납용기 내부로 유출되는 가연성기체 제어 수단을 구비할 것

▶ KINS/GE-N001, 경수로형 원전 안전심사지침 6.2.5 (격납건물내 가연성기체제어)

“가연성기체 제어계통이 RG 1.7의 표 1에 명시된 농도제한치 미만으로 수소와 산소의 농도를 유지하는 능력을 갖고 있음을 검증한다.”

- (중대사고용 PAR) 중대사고시 핵연료 피복재 금속의 100%와 냉각수가 반응하여 생성되는 수소를 제거하기 위한 설비(18대)

▶ 원자력발전소 중대사고 정책(2001년8월)

3. 중대사고 대처능력

“원자력발전소는 중대사고 예방을 위해 원자로 노심의 손상을 방지하는 능력을 갖추어야 한다. 또한 원자로 격납시설은 원자로 노심이 손상되더라도 사고결과(영향)를 완화할 수 있도록 구조적 건전성과 핵분열 생성물의 방출에 대한 방벽의 기능을 유지하여야 한다.

▶ KINS/GE-N001, 경수로형 원전 안전심사지침 19.2 (중대사고 대처능력)

“핵연료 피복재 금속의 100%와 물의 반응에 의해 생성된 수소가 방출되는 중대사고 기간과 그 후에 격납건물 내부의 균일분포를 가정할 경우 수소농도가 10%를 초과하지 않아야 함”

□ 신한울 1호기 「설계기준사고용 PAR」 심사

○ PAR를 활용한 수소 제어 분석 (한수원)

- (수소생성모델) USNRC Regulatory Guide 1.7 Rev.2(Control of Combustible Gas Concentrations in Containment Following a LOCA)에 근거하여 냉각재상실사고시 발생 가능한 수소* 생성량 계산 [붙임 10]
* 핵연료 피복재 금속과 물의 반응, 노심냉각수 및 집수조 방사분해, 원자로 격납건물내재장전수조 냉각수 방사분해, 원자로격납건물 재료 부식(알루미늄, 아연)
- (수소제거분석) 보수적인 분석 가정(① 실제 설치된 PAR 12대 중 6대만 작동하는 것으로 가정, ② 실제 PAR 성능보다 낮은 수소 제거율 상관식 가정, ③ 실제 PAR 기본성능의 []작동하는 것으로 가정, ④ 실제 PAR 작동 시점보다 늦게 작동하는 것으로 가정)을 적용하여 분석 수행 [붙임 11]
- (분석결과) PAR 작동 시 원자로격납건물 최대 수소 농도는 약 []이며 원자로격납건물내재장전수탱크 내 최대 수소 농도는 약 []로 평가

○ PAR를 활용한 수소 제어 분석 심사 (KINS)

- (수소생성모델의 적합성) 최종안전성분석보고서 제6.2.5절에 대한 검토 및 관련 질의 답변을 통해 NRC Reg. Guide 1.7 Rev.2의 표 1에 근거하여 수소 생성량을 계산하였음을 확인
- (수소제거분석의 적합성) 최종안전성분석보고서, PAR 성능입증 결과보고서 및 관련 근거 자료를 검토를 통해 수소 제거율 상관식 적용의 타당성을 확인하였으며, 분석에 적용된 가정이 실제 PAR 성능에 비해 보수적임을 확인
- (분석결과의 적합성) 실제 PAR 성능에 비해 보수적인 가정을 적용 하더라도 원자로격납건물 내 수소 농도가 허용기준(수소 농도 제한치 4 % 이내)을 만족함을 확인

□ 신한울 1호기 「중대사고용 PAR」 심사

○ PAR를 활용한 수소 제어 분석(한수원)

- (수소생성모델) 10CFR50.34(f) 요건 및 KINS 안전심사지침에 근거하여 원자로용기 파손 전 노내 핵연료 피폭재 금속의 100%와 냉각재가 반응하여 생성되는 수소와 사고 장기화시 원자로용기 파손 후 노의 노심용융물-콘크리트 반응에 의해 생성되는 수소를 고려하여 수소 생성량 계산 [붙임 12]
- (수소제거분석) 보수적인 분석 가정(① 실제 PAR 성능보다 낮은 수소 제거율 상관식 가정, ② 실제 PAR 기본성능의 [] 작동하는 것으로 가정, ③ 실제 PAR 작동 시점보다 늦게 작동하는 것으로 가정)을 적용하여 분석 수행
- (분석결과) PAR 작동 시 원자로격납건물 각 격실의 수소 농도는 약 []로 평가

○ PAR를 활용한 수소 제어 분석 심사(KINS)

- (수소생성모델의 적합성) 중대사고종합보고서 부록 A-1에 대한 검토를 통해 중대사고시 원자로격납건물 내 수소 생성 거동의 불확실성을 포괄하도록 100 %-MWR(Metal Water Reaction) 가정을 사용하였으며, 사고 장기화 가능성을 고려하여 추가적인 수소 생성을 계산하였음을 확인
- (수소제거분석의 적합성) 중대사고종합보고서 검토를 통해 수소제거 분석에 사용된 코드, 원자로격납건물 노드화, 수소 제거율 상관식, 중대사고 시나리오 선정 등의 적합성 확인
- (분석결과의 적합성) 실제 PAR 성능에 비해 보수적인 가정을 적용 하더라도 원자로격납건물 내 수소 농도가 허용기준(수소 농도 제한치 10 % 이내)을 만족함을 확인

□ 신한울 1호기 「설계기준사고 및 중대사고용 PAR」 검사

○ 사용 전 검사(설치검사)

- (검사방법) 예비안전성분석보고서, 품질 서류 검토 및 현장 점검
 - PAR 관련 품질보증서류의 설계제원 및 공장성능시험 결과가 예비안전성분석보고서에 제시된 설계제원* 및 성능**과 부합함을 확인
- * 설계기준사고용 PAR: 안전등급 3, 내진범주 I
중대사고용 PAR: 비안전등급, 내진범주 I
- ** []에서 대형 PAR의 수소제거 성능이 최소 [], 중형 PAR는 []
- 현장 점검을 통해 PAR가 설치절차서에 따라 설치되었으며 실제 설치 상태가 예비안전성분석보고서와 부합함을 확인
- (검사결과) 설계기준사고 및 중대사고용 PAR의 성능 및 설치 상태가 예비안전성분석보고서와 부합함을 확인 [붙임 13]

○ 사용 전 검사(상온기능검사)

- (검사방법) 예비안전성분석보고서, 시험 절차서 검토 및 현장 입회
 - PAR 성능시험 절차 및 허용기준이 운영기술지침서에 명시된 촉매체의 점검요구사항을 반영하여 작성되었음을 확인
 - 현장 입회를 통해 PAR 성능시험이 절차서에 따라 수행되었으며, 시험 결과가 허용기준([] 이내 초기 수소농도의 [] 이하로 감소)을 만족함을 확인
- (검사결과) 설계기준사고 및 중대사고용 PAR의 성능시험 절차가 적합하며 시험 결과가 허용기준을 만족함을 확인 [붙임 14]

1. 심사 질의 이력

연번	날짜	질의 번호	질의 제목
1	2015.01	FSAR-DR-6.2.5-1 (서류적합성)	가연성기체 안전분석 방법론의 타당성 검증자료 추가
2	2015.01	FSAR-DR-6.2.5-2 (서류적합성)	가연성기체 설계자료 추가 기술
3	2016.01	FSAR-6.2.5-1-K1	가연성기체 대처설비의 타당성 검토
4	2016.01	FSAR-6.2.5-2-K1	설계기준사고 가연성기체 안전해석의 타당성 검토
5	2016.01	FSAR-6.2.5-4-K1	중대사고 가연성기체 안전해석 보고서의 보완
6	2016.01	TS-I-3.6.7-1-K1	피동축매형수소재결합기의 작동 불능시 조치 제한시간의 재설정
8	2017.04	SAAR-II-A1-02	ECSBS* 작동에 따른 PAR 침수 가정의 일관성 확인
9	2017.04	SAAR-II-A1-06	중대사고 수소분석 가정사항 확인

* ECSBS: Emergency Containment Spray Backup System(비상원자로격납건물 살수 보조 계통)

2. 질의 세부내용

연번	세부 질의 내용	사업자 답변	검토 결과
1	안전해석에 적용한 PAR 성능 가정값(수소제거율 및 작동지연) 평가결과	선행호기에서 논의된 VOC에 의한 작동 지연을 반영하여 가연성기체 결과를 재평가하여 제출함.	제출된 자료를 참고하여 본심사에서 VOC 영향을 확인함.(4-2)
2	PAR 성능시험 결과 및 사고환경 하에서 PAR 성능평가 결과	PAR의 성능시험결과 및 사고환경 성능평가 결과를 제출함.	PAR의 성능시험 및 사고환경 성능평가 결과 허용 기준을 만족함을 확인함.
3	수소제어설비(PAR, 수소 감시기 등)에 대한 기기 검증 결과	피동촉매형수소재결합기(PAR)에 대한 내진검증보고서 및 중대사고 조건에서 성능 시험 결과를 제출함.	가연성기체 대처설비의 설계가 타당함.
4-1	가연성기체 안전해석 시 적용한 PAR의 수소제거율	설계기준사고 수소제어분석 시 PAR의 수소제거율은 NIS PAR 모델을 사용함.	수소제거율 모델의 보수성 및 적용범위가 적합함.
4-2	가연성기체 안전해석 시 VOC*에 의한 PAR의 작동 지연 고려방법	VOC의 영향을 고려하여 설계기준사고의 경우, 보수적으로 설치된 PAR의 절반만 가용하다고 가정하고, []시간의 작동지연 시간을 고려함.	선행호기 시험결과를 통해 사고조건에서 VOC로 인한 작동지연이 발생하지 않음을 확인함.
4-3	운영기술지침서 점검요구 사항에 따른 PAR 수소제거 기능시험의 적절성	PAR는 자연대류를 모사하여 수소제거율 상관식을 만족함을 확인하였으므로, 해외 사례와 같이 가동중시험장비를 이용하여 개별 촉매체의 정상적인 촉매 반응 여부만 확인함.	개별 촉매체 촉매반응 확인을 위한 기능시험으로서의 적절성을 확인함.
5	중대사고 가연성기체 안전해석 상세결과	결정론적 사고경위 및 확률론적 사고 경위에 따른 상세사항을 중대사고 종합보고서에 반영하여 개정함.	중대사고 종합보고서 검토를 통해 심사함.
6	PAR 운전제한조건 불만족시 조치 시, 제한시간 재설정 요구	기존의 제한시간을 운전모드 []에서 []일로 개정하고, 이에 따른 운전모드 변경을 기재한 불만족상태 2를 추가함.	질의의 의도에 부합되게 개정되었으므로 적합함.
8	중대사고 종합보고서 수소분석에서 ECSBS 작동에 따른 PAR 침수 가정 확인	2개의 노드에서 실제보다 늦게 PAR의 작동 불능이 되지만 전체적인 수소제어 성능평가 결과에 미치는 영향은 미미함.	침수가정을 확인하였으며, 분석 결과에 영향이 크지 않음을 확인함.
9	중대사고 수소분석에서 가정한 PAR 작동개시 조건 입증 자료 제출	휘발성 유기 화합물로 인한 지연 작동 분석 결과를 제출함.	분석을 검토하여 적합함을 확인함.

* VOC: Volatile Organic Compound(휘발성 유기 화합물)

1. USNRC Reg. Guide 1.7 Control of Combustible Gas Concentrations in Containment Following a LOCA (rev.2)

□ 개요

▶ 규제 입장

1. 가연성기체 제어계통은 냉각재상실사고 발생 후 격납건물 대기의 배기나 가압 없이 가연성기체인 수소농도의 계측 및 제어 능력과 대기혼합 능력을 보유하여야 한다.
2. 적절한 시간 내에 이용 가능하다면 부지내의 이동식 수소열재결합기를 공유할 수 있다. 또한 인근 부지의 설비를 사용할 수 있다면 부지에 다중의 이동식 가연성기체 제어계통이 항상 존재하지 않아도 된다. 그러나 이를 위해서는 적절한 설계, 절차 및 이동시험계획이 확보되어야 한다.
3. 가연성기체 제어계통 및 혼합, 계측, 시료채취의 수단은 내진범주 I급(RG 1.29 참고), 품질그룹 B(RG 1.26 참고)의 기준을 적용하여 설계, 품질보증, 다중성, 전원 및 계측 요건을 만족하여야 한다. 또한 계통 자체로서 격납 건물 건전성에 영향을 미칠 수 있는 안전성 문제를 일으키지 않아야 한다.
4. 냉각재상실사고 후에 격납건물의 대기와 수소를 환경으로 배기하는 격납 건물 배기 및 정화계통은 별도 계통이거나 타 계통의 일부이어도 된다. 이 계통 중 격납건물 경계부분 또는 여과기를 제외하고는 다중설계 및 내진 범주 I급의 설계일 필요는 없다.
5. 수소 및 산소 농도의 계산 및 관련계통의 설계 타당성 평가에 표 1의 “냉각재상실사고 후 가연성기체 생성량 평가에 허용되는 가정 사항”에 제시된 값을 사용하여야 한다. 그러나 이 값들은 타당한 실험적 근거 및 분석에 근거하여 변경될 수 있다.
6. 비상노심냉각수 및 살수 용액에 의한 부식으로 수소를 발생시킬 수 있는 격납건물 내부의 물질을 파악하고 이들 물질의 사용을 가능한 한 억제하여야 한다.

□ 표 1. 냉각재상실사고 후 가연성기체 생성량 평가에 허용되는 가정 사항

평가 변수	허용 값
핵분열생성물의 방사선 에너지 중에서 냉각재에 흡수되는 비율	1) 베타선 - 핵연료내 핵분열생성물의 베타선: [] - 냉각재와 혼합된 핵분열생성물의 베타선: [] 2) 감마선 - 핵연료 및 노심영역 냉각재내의 핵분열생성물의 감마선: [] - 냉각재와 혼합된 핵분열생성물의 감마선: []
수소 생성율	[] 분자/ [] eV
산소 생성율	[] 분자/ [] eV
금속-물 반응하는 핵연료피복관 양 및 방출 시간	비상노심냉각계통 성능분석시 생성량의 []배 또는 평균 [] mm ([] inch) 두께의 피복관 양에 의한 수소발생량 중에서 큰 값을 사용하고, 사고시점 []분 후에 방출됨.
염기성 용액에 노출된 알루미늄의 부식률	[] mm/년 ([] inch/년) (고온조건에서는 상향 조정되어야 함)
핵분열생성물 분포	- 노심내의 할로겐원소의 []%와 고체원소들의 []%가 냉각수에 바로 혼합됨. - 방사성 비활성기체 (noble gas)의 전량이 격납건물로 방출됨. - 나머지 핵분열생성물은 핵연료 내에 잔류함.
수소농도 제한치	[] v/o
산소농도 제한치	[] v/o (수소농도가 [] v/o를 초과하는 경우)

2. RG 1.7에 따른 설계기준사고 수소 생성량 분석 결과

□ 설계기준사고 수소 생성량 분석

○ 수소 생성원

생성원	메커니즘
핵연료 피복재 금속과 물의 반응	피복재(지르칼로이)의 산화
노심냉각수 및 집수조 방사분해	핵분열생성물 방사화 에너지에 방사분해
IRWST* 냉각수 방사분해	
원자로격납건물 재료 부식(알루미늄)	붕산수에 의한 금속 표면 부식
원자로격납건물 재료 부식(아연)	

* IRWST: In-containment Refueling Water Storage Tank(원자로격납건물내 핵연료재장전수 탱크)

○ 분석 결과(신한울 1,2호기 최종안전성분석보고서 그림 6.2.5-2)

<설계기준사고 수소 생성량>

[]

1. 신한울 1호기 PAR 설치 위치 및 분석 가정

신한울 1호기 PAR 설치 위치

설치격실	PAR (대)	비고
[]	[]	
[]	[]	설계기준사고용 PAR []대
[]	[]	
[]	[]	
[]	[]	
[]	[]	
[]	[]	
[]	[]	설계기준사고용 PAR []대
합계	[]	

※ 설계기준사고용 PAR([]대), 중대사고용 PAR([]대)

* IRWST: In-containment Refueling Water Storage Tank(원자로격납건물내 핵연료재장전수 탱크)

[]

<신한울 1호기 원자로격납건물 내 PAR 위치 개략도 >

[]

<실제 PAR 설치 사진>

□ 설계기준사고용 PAR 분석 가정

- 설계기준사고용 PAR에 대해 IRWST 내부 []대 중 []대, 상부격실 및 원자로건물 돔 []대 중 []대만 작동하는 것으로 가정(총 []대 중 []대만 작동하는 것으로 가정)

2. 신한울 1호기 설계기준사고용 PAR 수소 제거율 상관식

□ 수소 제거율 상관식

- 제작자가 제공한 실제 PAR의 수소 제거율 상관식([])보다 보수적인 상관식([])에 []의 성능저하 가정([])

[]

<수소 제거율 상관식 비교>

3. 신한울 1호기 설계기준사고용 PAR 작동 지연 가정

설계기준사고용 PAR 작동 지연 가정

- 휘발성 유기화합물에 의한 작동지연 영향가능성을 고려하여 수소농도 [] 도달 시점으로부터 []시간 후 촉매 반응이 시작되는 것으로 가정

4. 신한울 1호기 설계기준사고용 PAR 수소제거분석 결과

분석 결과(신한울 1,2호기 최종안전성분석보고서 그림 6.2.5-6)

[]

<설계기준사고 수소제거분석결과>

1. 분석대상 사고경위

□ 중대사고 분석 대상 사고 경위(신한울 1,2호기 중대사고 종합보고서)

- 신한울 1,2호기 확률론적안전성평가 결과를 활용하여 누적 노심 손상빈도 []를 포괄하도록 []개의 사고 경위를 선정하였으며, 추가적으로 결정론적 관점에서 []개의 사고 경위 선정

	선정방법	사고경위	100% MWR*	수소점화기 작동
1	[]	[]	[]	[]
2		[]	[]	[]
3		[]	[]	[]
4		[]	[]	[]
5		[]	[]	[]
6		[]	[]	[]
7		[]	[]	[]
8		[]	[]	[]
9		[]	[]	[]
10		[]	[]	[]
11		[]	[]	[]
12		[]	[]	[]
13	[]	[]	[]	[]
14		[]	[]	[]
15		[]	[]	[]
16		[]	[]	[]
17		[]	[]	[]

* MWR: Metal Water Reaction(핵연료 피복재 금속과 냉각재 반응)

** 분석대상 사고경위 중 수소 생성량 최대

2. 증기발생기세관파단사고(SGTR_032) 사고경위의 수소 생성량

□ 수소 생성량(신한울 1,2호기 중대사고 종합보고서)

[]

<현상별* 수소 생성량>

* []
[]
[]
[]

1. 성능시험 허용기준

수소전환율이 [] 이내에 []를 초과하여야 함

2. 성능시험 결과

HR01A, HR11A, HR14A 내 각 촉매체에 대한 성능시험 결과, 100% 수소전환율이 최대[]로, 허용기준을 충분히 만족함을 확인

PAR No.	촉매체 No.	수소농도		수소전환율		만족여부
		입구*(%)	출구(%)	Rate(%)	Time(min)	
1	[]	[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
[]	[]	[]	[]	만족		
2	[]	[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
3	[]	[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족
		[]	[]	[]	[]	만족

* 시운전 시험절차서 기준 입구 수소농도 유효 범위: []

〈 안전 담당자 〉

한국원자력안전기술원 안전평가단	
김윤일 단 장	(042) 868 - 0515
강영두 신한울 1,2 PM	(042) 868 - 0582
한국수력원자력(주)	
최일경 원전건설처장	(054) 704 - 7100
류동수 전기기술부장	(054) 704 - 7330
김종철 설계기술실장	(054) 704 - 7301