

원자력발전소 중대사고 수소제어요건의 개발 및 적용 현황

Development and Application Status of the Severe Accident Hydrogen Control Requirements for the Korean Nuclear Power Plants

김한철, 이종인, 박재홍, 김병순
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요약

국내 경수로형 원전에서의 중대사고시 수소 제어에 관한 규제요건을 개발하여 한국표준형 원전의 인허가 심사시 시험적으로 적용한 결과, 수소 혼합 및 연소 분석방법론과 분석결과 및 수소점화계통의 설계기준이 타당하며, 연소시 격납건물 압력 증가가 내압 제한치 이내임을 확인하였다. 수소 연소에 따른 환경에서 안전관련 기기들의 생존성이 적절히 확보될 수 있는 것으로 평가되나, 일부 고온 격실 수소점화기의 작동이 불가능할 경우 화염의 가속에 따른 격실간 차압의 상승에 대해 상세한 평가가 필요한 것으로 판단된다. 원자력안전기술원에서는 연구, 인허가 심사 결과 및 산업계의 검토의견을 반영하여 중대사고 수소제어요건을 보완해 갈 것이다.

Abstract

Tentative regulatory requirements for hydrogen control during severe accident in PWR plants were developed and applied to the licensing review for the Korean Standard Nuclear Power Plants. The review results using the requirements show that the analysis methodology for hydrogen mixing and combustion and its results upon which the design criteria of hydrogen ignitor system was based were acceptable. It was found that the pressure rise due to the combustion is below the limit for containment integrity. While it was evaluated that the safety-related equipment could survive in the environment caused by hydrogen combustion, a detailed assessment may be necessary for the rise of differential pressure between compartments in some hot areas due to flame acceleration under the unavailable condition of hydrogen ignitors installed in those areas. Korea Institute of Nuclear Safety will further develop the hydrogen control requirements, based on the results from research and licensing review and also comments from the domestic nuclear industry.

1. 서론

'79. 3월에 발생한 TMI-2 사고시 금속-물 반응에 의해 생성된 수소가 격납건물내에서 연소됨으로써 약 28 psig의 압력 Spike가 발생하였다. 분석결과에 따르면 연소(Deflagration)가 발생했을 때 약 50%의 피복재-증기 반응이 있었고 격납건물 수소 농도가 8%에 이른 것으로 나타났다. '86. 4월에 발생한 체르노빌 사고에서도 상당한 노심 손상과 더불어 금속-물 반응이 일어났다. TMI-2 사고와 체르노빌 사고는 노심이 손상되는 중대사고시 수소 연소가 격납건물의 건전성에 중대한 위해 요소가 될 수 있음을 보였다. 이러한 설계기준초과사고에 대비하여 각국에서는 수소제어규정을 제정하는 한편 소형 격납건물에 대해 질소 충전으로 비활성화시키거나 수소점화기를 설치하였다. 대형건식 격납건물에 대해 종래에는 극한하중의 수

용 성능이 좋고 희석 체적이 크다는 점에 근거하여 특별한 조치를 취하지 않았으나, 수소 연소시 격납건물의 건전성에 미치는 위해에 대한 PSA 등의 연구결과에 따라 벨기에, 독일을 비롯한 수개국에서 피동형 촉매재결합기(PAR)를 설치했거나 설치계획을 가지고 있다.

국내 건설중인 CANDU-PHWR형 월성 2-4호기에서는 LOCA와 ECCS가 상실되는 사고에 대비하여 사고예상 격실과 격납건물 돔 주위에 수소점화기 44개를 설치하였다. 대형건식 격납건물형 경수로인 울진 3,4호기에 대해서는 중대사고시 격납건물내 수소농도가 분석되었고, 국부수소농도가 높은 일부 격실에 수소점화기 18개가 설치되었다. 울진 3,4호기를 비롯하여 국내에 건설중인 한국표준형 격납건물의 중대사고시 수소제어설비는 TMI 추가요건인 10 CFR 50.34(f)에 따라 설계되어 그 타당성에 대한 개괄적 검토가 대부분 종결되고 상세검토가 진행중이다. 이 과정에서 수소제어성능의 허용기준과 분석요건의 설정, 분석결과의 적용방안, 발전소 안전을 위한 필수 기기의 생존성 등에 대해 많은 논의가 있었으며, 관련 국내 규제요건과 평가기술의 확립이 요구되었다.

이러한 필요에 따라 원자력안전기술원에서는 종합적인 중대사고 대처방안의 개발과 아울러 중대사고 수소제어에 관한 규제기준의 설정과 관련 평가기술 개발을 추진해 왔다. 이를 위해 각국의 규제요건 및 규제동향, 주요연구현황, 기술배경 등을 분석하였고, CONTAIN이나 MELCOR 코드를 이용한 울진 3,4호기 및 월성 2-4호기 수소 농도 분포 분석을 수행하였으며 분석방법론의 타당성 확인을 위해 OECD ISP-35에 참여하여 NUPEC의 실험을 분석하였다. 또한 미국의 중대사고코드 평가 프로그램과 OECD의 수소완화기술 이행에 관한 워크숍 등에 참여하여 기술 현황을 파악하고 국내 신규 원전의 수소제어능력의 확보방안에 관한 인허가 심사에 반영해 왔다.[1,7]

아래에 국내 경수로형 원전에서의 중대사고시 수소 제어에 관한 규제요건 초안의 주요 내용과 한국표준형 원전의 인허가시 시험적으로 적용한 결과를 기술하였다.

2. 규제요건의 개발

가. 요건의 근거

한국원자력안전기술원은 규제기준 설정을 위한 기초 작업의 결과로서 상세안전요건(안)과 안전규제지침(안)을 작성하였다. 상세안전요건(안)은 주로 10 CFR 50.34 (f)와 OECD/NEA에서 발행한 수소완화계통 이행에 관한 워크숍 및 기술검토의견에 근거하였고, 안전규제지침(안)은 EPRI의 ALWR URD에 대한 USNRC의 검토보고서에 주로 근거하여 수소점화계통에 대해서만 작성하였다.[6-8] 중대사고시 안전에 필수적인 기계 및 전기 기기에 대해서는 기기검증과 달리 기기의 생존성을 합리적 수준으로 보증하는 기준을 적용하는 것이 적절해 보인다. 이에 대해서는 USNRC의 10 CFR 50.34(f), Regulatory Guide 1.155의 Appendix B, SECY-90-016, SECY-93-087 등과 System 80+ 원전에 대한 NRC의 검토보고서[9] 등을 참조하였다. 이 초안들은 새로 건설되는 원자력발전소의 심사시 내부검토지침으로 활용하였으나, 아직 국내 원전별로 적용 요건을 세분하지 않은 점, 피동형 수소 재결합기 등에 대한 요건이 설정되어 있지 않은 점 등에 관해 지속적인 보완이 필요한 상태이다.

나. 요건의 주요내용

중대사고에 대비한 수소제어설비의 설계에 관한 요건을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 100% 핵연료-피복재 금속과 물의 반응에 의해 생성되는 양에 증가하는 수소를 안전하게 수용할 수 있는 수소제어계통을 설치하되, 다양한 설계 개념을 고려
- 2) 수소제어계통과 관련계통의 성능 - 격납건물 전 체적의 균일분포 수소 농도 10% 미만, 사고후 의도하지 않은 수소 연소 방지, 핵심 안전구역에서의 가연농도 수소의 국부적 밀집 방지, 수소방출환경에서 안전필수기기의 안전기능 수행, 수소제어계통 오작동의 안전 수용 등
- 3) 수소제어 관련 계통의 성능을 보이기 위한 분석 방법론 - 타당한 사고 시나리오의 선정, 분석 종료시점, 3차원 코드의 보완 계산, 불확실성을 고려한 초기 및 경계조건, 기기의 이용도, 운전원 조치 등에 대한 최적분석과 분석모델에 대한 타당성 입증
- 4) 수소 연소에 따른 압력 증가시 격납건물 건전성 유지에 관한 ASME 요건의 만족
- 5) 수소점화계통의 가동중검사 및 시험 - 점화기 여기시 전류 및 온도 점검
- 6) 중대사고 조건에서의 설비 생존성 보장을 위한 발전소 정전사고 요건에 준하는 사고 완화 기기의 품질 보증 및 기기 규격의 적용, 완화계통의 작동 조건 평가

다. 산학계와의 토의

'98. 1월 관련 전문가들은 차세대 원전의 중대사고시 수소 제어와 관련하여 위 규제요건(안)과 평가방법론에 관한 회의를 통해 현안을 도출하였다. 분석방법론에 관해서는 100% 핵연료 피복재-물 반응 고려의 타당성 및 원자로용기 내외부 수소방출 결정 방법론, 분석코드와 3차원 분석의 필요성, 분석대상 사고추이의 선정 근거, 분석방법의 검증 방안 등이 현안으로 제시되었으며, 수소 제어 방법에 관해서는 격납건물 체적 기준의 타당성, 수소제어설비의 적합성, 격납건물 사고관리 측면에서의 압력과 수소 제어 관점의 병립성, 격납건물 건전성의 여유도, 국부 농도에 대한 허용기준의 필요성, 타당한 시료 채취점 수, 위 요건안의 기존 원전 및 개량형 원전에서의 적용성 등이 제시되었다. 개발된 규제요건(안)은 이 현안들을 중심으로 보완해 갈 예정이다. 또한 이 회의의 후속조치로서 위 요건(안)에 대한 관련 전문가들의 의견을 '98. 3월초까지 제시받아 그 결과를 위 요건 개정시 부분적으로 반영하였으며, 기존 원전에 대한 back-fitting 필요성 등과 같은 일부 요건에 대해서는 검토 중이다.

3. 한국 표준형 원전에서의 규제요건(안)의 적용

울진 3,4호기 건설사항에 따라 한국전력(한전)은 중대사고시 격납건물 수소농도 분석 보고서와 수소제어능력 확보방안('97.5)을 제출하였으며, 후속조치로서 수소점화기용 지지대와 전원, Conduit 용 관통부, 보조살수 노즐 및 배기구 등을 추가 설치하는 한편 수소감시기의 감시범위를 확대하였다. 인허가 과정에서 한전은 전문가 검토의견 등을 반영하여 수소제어설비의 설치를 결정하였고 수소연소 분석 및 제어설비 검토보고서 등을 추가 제출하였다. 원자력안전기술원은 수소제어 성능에 대한 인허가 검토에서 위 규제요건(안)을 시험적으로 적용하였다.

가. 수소 혼합 및 연소 분석

한전은 최적분석방법에 근거하여 LOCA와 Transient에 대한 사고추이 5개에 대하여 MAAP 4.01 코드로 수소 생성률을 계산한 후 CONTAIN 1.12 코드로 격납건물내 수소 농도 분포 및 연소 현상을 분석한 결과를 제출하였다. LBLOCA, MBLOCA, SBLOCA, SBO, TLOFW 사고에 대한 분석시 원자로용기 파손전 피복재의 금속-물 반응에 의한 수소의 방출량은 피복재 총 산화량의

26%, 34%, 69%, 48%, 54%로 각각 예측되었고, 원자로용기 파손후에는 용융노심-콘크리트 상호작용 (MCCI)에 의해 수소가 추가적으로 방출되는 양을 CORCON 모델로써 계산하여 피복재 100%의 금속-물 반응에 의한 수소 생성량에 해당하는 820 kg이 방출되는 것으로 모의하였다.

한전의 수소 농도 분석을 위한 CONTAIN 격납건물 모델에는 20개 노드가 사용되었다. 원자로용기 파손 전후의 수소와 수증기 방출률에 대해서는 국내외 분석 경험과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. 가압기 상부에서의 노즐 등 배관 파단의 경우 수소가 격납건물 상부로 방출됨으로써 성층화의 가능성이 있으나 수소 생성량은 비교적 적을 것으로 예상된다. 한전이 올진 3,4호기 CONTAIN 분석방법론의 Benchmarking을 위해 수행한 ISP-35 분석결과는 실험을 적절하게 모의하는 것으로 나타났다. 한전이 수소제어계통을 설치하지 않은 상태에 대해 24시간동안 분석한 결과는 표 1과 같다.

표 1. 수소 농도 분석결과 [2]

	LBLOCA	MBLOCA	SBLOCA	SBO ⁽¹⁾	TLOFW
최대수소농도(%)	19.5	17.5	11.3	27.3	12.5
발생위치	원자로공동	원자로공동	RDT실	원자로공동	원자로공동
사고후 발생 시점 (초) ⁽²⁾	15,000 (18,200)	24,000 (24,200)	52,000 (40,400)	18,500 (18,300)	55,500 (55,400)
고농도 격실	.Rx. 환형부: 9.5% .RDT실 9.3% (민감도: S/G, 공동입구, ICI 공동 >10%; 23,000s)	.ICI공동:9.4% (20,000s)	.환형구역 하부: 10.0%(64,000s) .환형구역,Reg. H.X.실,Rx.환형부(9~10%)	.공동입구:16.3% .RDT실:9.5% (민감도: ICI 공동 등>10%)	.RDT실:11.4% (20,800s)

(1) 수소점화기 설치시 경우임

(2) 팔호안은 원자로용기 후기 파손시각임

이와 같이 원자로 공동, 원자로배수탱크실 등 수개의 격실에서 사고후 수소 농도가 10% 이상으로 높게 나타났으므로, 수소 연소로 인한 격납건물 건전성의 상실이나 사고완화설비의 고장 발생을 방지하기 위해 수소 농도가 높은 지역에 수소제어설비가 필요한 것으로 판단되었다. 수소 방출이 예상되는 원자로 공동, 증기발생기 격실 2개소, RDT 등 4개 격실에 수소점화기를 설치하는 것으로 가정하여 위 5가지 사고후 2.9~4.6 일에 대해 한전이 분석한 결과에 따르면, 방출된 수소 총량의 43.7% (358 kg: TLOFW)~82.1% (675 kg: SBO)가 연소하고 장기적으로 거의 균일한 농도가 형성되어 연소 한계 이하인 6~6.9%에 도달함을 보였다. 수증기의 응축 속도는 완만하여 분석 종료시점에서 농도가 15~20% 정도에 도달함으로써 연소 가능한 수증기 농도 조건에서 수소점화기에 의한 연소 및 기체 혼합이 원활하게 이루어질 수 있음을 보였다. 즉 위 수소제어방안을 이행할 경우 원자로용기 파손 시점까지 단기적으로 수소 농도의 첨두치가 높고 수소점화기의 수소 제거량이 작더라도 수증기의 조성비가 연소 한계 이상으로 큼에 따른 비활성화 효과 때문에 폭발(Detonation) 가능성이 희박하며, 장기적으로는 수증기의 응축이 느리게 진행되면서 수소점화기에 의한 연소에 의해 폭발 한계 이하로 수소제어가 적절하게 이루어질 수 있음을 보이고 있다.

수소연소를 고려한 격납건물 건전성 분석은 영광 5,6호기 건설허가 신청시 100% 피복재 산화 조건에서 Adiabatic Isochoric Complete Combustion 모델을 사용하여 계산한 결과 격납건물의 내압 제한치 115.4 psia 이내인 99.4~108.5 psia로 계산되어 여유도가 있는 것으로 나타났다.

나. 수소 제어 능력 확보 방안

1) 수소제어설비 설계기준의 타당성

수소 농도 분포 및 연소 분석결과에 근거하여 한전은 System 80+의 설계기준과 NTS 실험 결과 등을 참조하고 격실간 수소 유동을 적절하게 고려하여 수소점화기를 원자로 공동에 3개, RDT 격실에 3개, 증기발생기 격실에 각각 6개 등 총 18개를 설치하는 방안을 확정하였다. System 80+ 설계와 100% 금속-물 반응시 생성 수소량과 격납건물 체적을 비교해 보면 울진 3,4호기의 설치개수가 작으나, 현재의 설계기준은 격납건물 내 국부 제어에 의한 수소 제거 효과를 타당하게 제시하였고 그 설계 목표가 발생 가능성이 매우 작은 사고추이에 대한 심층 방어 측면이라는 점을 고려하면 타당한 수준인 것으로 판단된다. 한전이 울진 3,4호기에서의 대표적 중대사고추이로서 SBLOCA와 SBO를 선정하여 원자로용기 파손 이전 단계에서 단기적으로 수소 농도가 상승할 경우 각각 원자로 환형부와 증기발생기격실에 대해 GOTHIC 코드에 의한 3차원 수소연소분석을 수행한 결과, CONTAIN 분석결과와 수소 농도 예측 경향이 일치하고 연소전이현상(DDT) 발생 가능성이 희박한 것으로 나타났다. 그리드 크기의 타당성 등 3차원 분석방법론에 대한 상세 검토는 후속기에서 계속될 예정이다.

참고문헌 2에는 위치선정기준과 성능기준이 타당하게 제시되어 있다. 전원공급에 대해서는 비상 디젤 및 AAC 발전기로부터 Class 1E 전원을 받을 수 있도록 설계하였으므로 타당하다. 수소 제어설비는 비안전 등급으로 설정되어 있으나 2 트레인 개념을 도입하여 다중성 측면을 고려하였고 품질 등급: T, 내진 설계: 범주 I, 이격 요건을 적용하여 설계하였으므로 타당한 것으로 판단된다. 또한 수소점화시스템의 생존성을 위해 계통 내 Transmitter와 전원공급장치를 격납건물 밖에 설치하였으므로 타당하다.

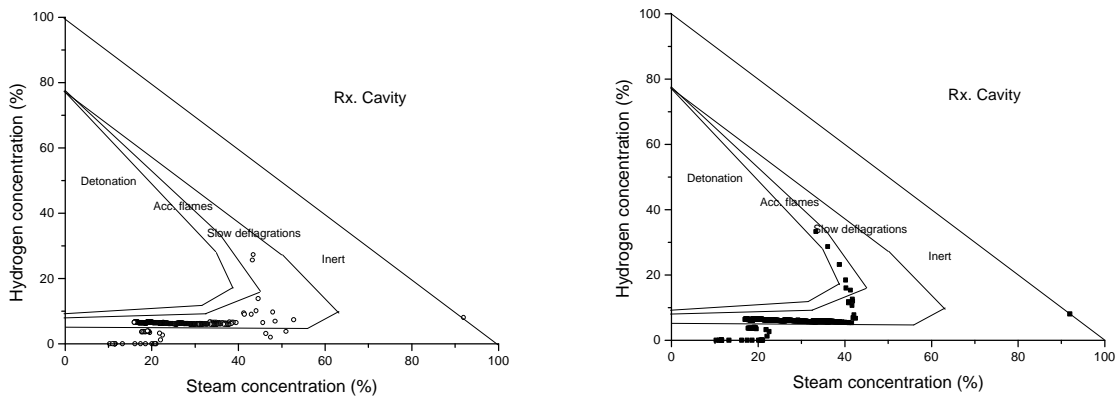
2) 수소 방출 및 연소 환경에서 필수 기기의 안전기능 확보

한전은 중대사고시 수소 방출 및 연소 조건에서 수소점화계통 및 안전관련기기의 현실적 생존성을 합리적으로 보장하기 위해 원자로용기 파손 전후 필수 안전기능을 각각 수소 생성 및 노심 손상 완화, 격납건물의 손상 방지 등으로 구분하여 필수 기기 및 계기를 파악하고 수소점화기의 연소에 따른 안전성을 파악하였다. 수소 연소 조건에서 안전관련 기기에 대한 검토결과, 필수 계통과 기기 및 계기가 적절히 파악되었으며, 수소 연소시 유사한 대상에 대한 EPRI의 NTS 실험, 듀크전력회사의 생존성 실험 및 기기별 환경 평가 등의 결과에 근거하여 온도감지기와 압력 전송기, 밸브 및 전선 등이 건전할 것으로 평가되는 점과 방사선 감시기, 격납건물 관통부 등이 수소점화기로부터 이격되어 있는 점 등의 사유로 생존성이 확보될 수 있는 것으로 평가되었다. 또한 수소점화계통에 대한 검토결과, 지진, 방사선, 설계수명, 살수, 침수 등에 대해서는 월성 원전에 대한 환경검증 및 동일 제작사 제품에 대한 실험과 재질 분석 및 중대사고 환경의 평가, 연결케이블의 화염시험, 전기적 격리 설계 등으로 내환경 성능이 보장되고 있는 것으로 평가되었다. 사용전 검사과정에서 수소점화기 전원 공급용 Junction Box 등의 품질요건 및 사고시 방수성에 대해 평가한 결과 위 요건이 타당하게 적용되었으며 Box 밀폐 여부에 대한 주기적 육안점검을 통해 기계적 건전성을 확보할 수 있을 것으로 평가되었다.

울진 3,4호기에 설치된 수소점화기는 동일제작자인 Tayco사의 점화기에 대한 미국 TVA사의 시험결과를 통해 일반적인 중대사고 환경에서 작동 가능함을 간접적으로 확인하였으나, 예상 격실최대온도가 시험온도 (655 K)를 초과하는 원자로공동 등의 수소점화기에 대해서는 타당한 생존 근거를 제시하거나 작동이 불가능하다고 가정하여 재분석해야 할 것으로 평가되었다. 이와 관련하여 수소점화계통이 원자로공동에서 사용 불가능하다는 가정 하에 발전소정전사고에 대해 수행한 연소분석결과에 대해 연소영역에 따라 평가한 결과, 점화계통의 생존시에 비해 원자로공동에

서 화염의 가속 가능성이 큰 것으로 나타났다(그림 1 참조). 즉 발전소 정전사고시 원자로 공동에서는 화염의 속도가 500 m/s 이상까지 도달하여 격실간 차압이 상당히 높아질 수 있을 것으로 보인다. 따라서 원자로공동에서의 연소 및 화염 가속에 따른 격실의 건전성 분석과 함께 고온 격실에서의 수소점화기의 생존성을 높일 수 있는 방안을 강구하는 것이 필요하다. [10]

그림 1의 두가지 경우에서 연소 영역에 포함되고 수소 농도가 높은 상태들에 대해 Breitung의 DDT Criteria ($D \geq 7 \lambda$)를 시험적으로 적용하여 평가하였다[10]. Detonation cell size λ 는 수소 농도와 수증기 농도로부터 구할 수 있는데, 위 판정기준에 적용되는 기체 혼합물의 온도는 올진 3,4 호기에상치보다 훨씬 낮은 100 °C라는 제한점이 있다. 원자로공동의 특징적 크기(D)는 해당 체적의 3체곱근으로부터 구하였다. 표 2에 나타낸 결과로부터 SBO 사고의 경우 원자로공동의 점화기가 건전할 경우에는 수증기 농도가 40% 이상으로 높아 DDT Criteria에 훨씬 미치지 못하며, 점화기 고장의 경우 이 기준에 접근하지만 여전히 폭발의 가능성은 없음을 알 수 있다. 그러나 후속 보완 분석시에는 사용가능한 수소점화기의 숫자가 더 줄어들 것으로 예상되므로 적절한 판정기준에 근거하여 DDT 발생 가능성을 평가해야 할 것이다.



(1) 원자로공동 점화기 가용시

(2) 원자로공동 점화기 고장시

그림 1. 발전소정전사고시 원자로공동 점화기의 생존여부에 따른 연소 영역의 변화

표 2. 올진 3,4호기 발전소정전사고시 화염가속영역 상태에 대한 DDT Criteria 적용 결과

경우	시간(초)	수증기 농도 (%:mole frac.)	수소 농도 (%:mole frac.)	당량비 (Φ)	폭발 셀의 크기 (λ)	특징적 크기 ($D=체적^{1/3}$:m)	$D/7 \lambda$
원자로공동 점화기 작동시	18400	43.21	25.68	1.97	$\gg 1$	6.89	$\ll 1$
	18500	43.44	27.34	2.23	$\gg 1$		$\ll 1$
	18900	44.56	13.86	0.80	$\gg 1$		$\ll 1$
원자로공동 점화기 고장시	18400	33.3	33.28	2.38	> 1		< 1
	18500	36.05	28.7	1.94	> 1		< 1
	19000	38.73	23.19	1.45	> 1		< 1

3) 수소제어설비의 운전 및 사고관리

수소점화계통은 운전원이 노심 노출 및 수소 농도의 상승을 감지하여 수동으로 작동하는 방식을 취하고 있으며 주기점검절차서는 타당하게 작성되었다. 차후 관련 사고관리절차서 개발 과정에서 살수 작동, 수소 방출량 과다시, SBO시 고농도 수소 축적 후 전원 회복 등의 경우에 DDT를 유발할 가능성에 대해 평가해야 할 것이다.

4. 결론 및 건의사항

국내 경수로형 원전에서의 중대사고에 대한 심층 방어 측면에서 격납건물내 수소 제어 능력 확보를 위해 규제요건(안)을 개발하였다. 이를 한국표준형 원전의 수소제어방안에 대한 인허가 심사에 시험적으로 적용한 결과, 수소 혼합 및 연소 분석방법론이 타당하고, 분석결과에 근거하여 설치하는 수소점화계통의 설계기준이 타당하며, 아음속 연소시 격납건물 압력 증가가 내압 제한치 이내임을 확인하였다. 수소 연소에 따른 환경에서 안전관련 기기들의 생존성이 적절히 확보될 수 있는 것으로 평가되었으나, 일부 고온 격실 수소점화기의 작동이 불가능할 경우 화염의 가속에 따른 격실 차압의 상승에 대해 심층 평가가 필요한 것으로 판단되었다. 한전은 3차원 수소 연소 분석, 민감도 분석 보완 등을 통해 설계 타당성을 재확인하고 있으며 향후 사고관리계획 수립시 수소점화계통의 역효과 발생 가능성을 고려함으로써 안전성이 제고될 것으로 판단된다. 원자력안전기술원에서는 산학계 토의를 통해 도출된 현안 중심으로 연구 및 인허가 심사 결과를 반영하여 중대사고 수소제어요건을 보완해 갈 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 한국원자력안전기술원, "원전 중대사고 수소제어 기술분석/심사지침", "원자력발전소 중대사고 평가 기술개발" 과제 별책보고서, KINS/AR-478, 1997. 7.
- [2] 한전기술주식회사, "울진 3,4호기 중대사고시 격납건물 수소농도분석 보고서," 1997. 4
- [3] 한전공사, "울진 3,4호기 장기 수소연소 보완분석결과," 1997. 12.
- [4] 한전기술주식회사, "울진 3,4호기 수소제어시 안전관련기기 생존성 평가결과," '98. 4.
- [5] 한전기술주식회사, "울진 3,4호기 수소점화기 기기생존성 보장 평가보고서," '98. 4.
- [6] U.S. Government, 10 CFR Part 50.34(f)
- [7] "The Implementation of Hydrogen Mitigation Techniques: Summary and Conclusions," NEA/CSNI/R(96)9, OECD Workshop, Winnipeg, Manitoba, Canada: 13-15 May 1996
- [8] U.S.NRC, "NRC Review of Electric Power Research Institute's Advanced Light Water Reactor Utility Requirement Document," NUREG-1242
- [9] U.S.NRC, "Final Safety Evaluation Report Related to the Design Certification of Combustion Engineering System 80+," NUREG-1462, February 1994.
- [10] W. Breitung et al., "A Mechanistic Approach to Safe Igniter Implementation for Hydrogen Mitigation," Proc. of the OECD/NEA/CSNI Workshop on the Implementation of Hydrogen Mitigation Techniques, Winnipeg, Manitoba, Canada, May 13-15, 1996, p.199.