

# 회 의 록

|         |   |
|---------|---|
| 세 미 나 명 | 한국원자력학회 원자력 열수력 및 안전 연구부회, 중대사고연구회 공동주최<br>“국내 원전 중대사고 관리 전략 (후쿠시마 원전사고에 대응하여)” 워크숍   |
| 장 소     | 2011. 5. 25, 13:00 ~ 19:00, 오투리조트(강원 태백)  |
| 참 석 자   | 국내 원자력 관련 인사 194명   |
| 회 의 내 용 | <p>1. 개요</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 목적: 일본 후쿠시마 원전 사고관련 국내 원전 중대사고 관리 전략에 대한 주제발표 및 토의</li> <li>- 내용: <ul style="list-style-type: none"> <li>· 일본 사고현황 및 분석결과 소개/토의</li> <li>· 국내 중대사고관리에 대한 규제입장 및 해외 규제사례 소개</li> <li>· 국내 원전의 중대사고 관리전략 소개/토의</li> </ul> </li> </ul> <p>2. 발표별 논의 내용 (Q(질의)/A(답변)/C(의견)으로 구분)</p> <p>● <b>개회사 (류용호)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 후쿠시마 사고를 계기로 현재 국내 원전의 중대사고 완화전략을 되짚어 보고, 국내 원전의 설비보완 등 필요한 추가조치 사항들에 대해 논의하고자 함</li> </ul> <p>● <b>발표 1 : 후쿠시마 원전 사고 전개/전망 (송진호)</b></p> <p>Q: 사용후연료저장조(SFP) 및 노심에서의 재임계 가능성은 없나? (이재승)</p> <p>A: SFP에 대한 내부 평가 결과 재임계는 일어나지 않은 것으로 평가되었으며, 노심에서는 봉산수로 인해 큰 문제가 없을 것으로 봄</p> <p>Q: 배기(vent) 전략에 대한 견해는? (이종호)</p> <p>A: 중요한 것은 감압수단임. 후쿠시마 원전의 경우 drywell이 불활성화(inert)된 상태인 것으로 판단했던 것으로 추정됨. Mark-I 격납용기에 대한 배기 관련 설계오류 등에 대한 조치나 대비가 부족했다고 생각함</p> <p>Q: 후쿠시마 원전에 수소제어설비가 있었는가? (강화성)</p> <p>A: 전혀 없음</p> <p>● <b>발표 2 : MELCOR Simulation for BWR SBO Accident Scenarios (김태운)</b></p> <p>C: 4호기 SFP의 폭발이 3호기의 수소로 인해 야기되었다는 결론은 아직 이르며, SFP의 냉각재 고갈로 연료가 용융되어 수소가 발생했을 가능성도 있음 (KAERI 구양현)</p> <p>A: 미확인된 부분이므로 의견에 동의함</p> <p>Q: Peach Bottom 분석결과 관련, 현재 사용한 MELCOR 코드의 모델 개선은 충분한가? (방광현)</p> <p>A: 원(Peach Bottom) 데이터를 사용하여 MELCOR 1.8.5로 계산하였음. MELCOR 코드는 1.8.6에서 많은 부분의 모델 개선이 있었으나, 중요한 부분의 개선이 많이 이루어진 것 같지 않음</p> <p>● <b>발표 3 : Accident Simulation (Fukushima Daiichi Unit 1,2,3) (박수용)</b></p> |

Q: IC, RCIC 등을 사용한 냉각이 안 될 때 배기전략을 수행하여 감압 후 물을 주입할 수 있을 것으로 생각됨. 이와 관련하여 1,2,3호기의 경우 용융이 시작된 이후에 물을 주입했는데, 일본의 중대사고 관리전략은? (이종호)

A: 일본에도 관련 지침서가 있는 것으로 알고 있으며, 사고시 배기의 수행이 중대사고관리전략 측면에서 이루어졌다고 보지 않음. 실제 상황에서 현장 요원들이 충분한 관련 지식을 갖고 있기는 어렵다고 생각하며 중대사고 요원들에 대한 교육, 시스템 개선 등이 필요하다고 봄

● 발표 4 : 일본 후쿠시마 원전 사고와 국내원전의 안전성 (이춘우)

Q: BWR 대비 PWR의 장점은 증기발생기를 이용한 자연순환 냉각이나, 이는 일차계통 압력, 증기발생기 가용성 등 몇 가지 조건이 필요함. 연구결과에 따르면 PWR도 후쿠시마와 같은 조건에서 자연순환에 대한 어려움이 있는데, 이러한 부분에 대한 고민은 했는가? (안광일)

A: SBO를 가정하여 검토했으며 자연순환이 잘 될 것으로 봄. LOCA 등으로 일차계통 압력이 낮아지는 경우에는 충전유출(feed-and-bleed)운전도 가능함. 가장 큰 관건은 자연순환을 위한 이차측 냉각수 주입 방안임

Q: SBO시 터빈구동보조급수펌프는 2~4시간 정도 운전가능하며, 결과적으로 PWR의 노심용융이 더 빠를 수 있음. 그러나 현재의 절차/지침에는 SBO시 수원확보 관련 절차가 없음. 이와 관련하여 한수원에서 SBO를 분석한 결과는 없는가? (이석호)

A: 제어전원이 4시간(표준원전)/8시간(APR) 가용함. 이후에는 수동으로 Air dump를 수행하면서 주입이 가능하며, 터빈구동보조급수펌프도 수동으로 제어 가능하므로 제어전원 고갈 이후에도 지속적으로 운전할 수 있음. 계산 결과 탱크의 물만으로도 5일 정도 유지가 가능하며 외부수원을 추가로 사용한다면 충분히 유지할 수 있음. 다만, 이 부분은 아직 절차서에 반영이 안 되어 있음. EOP와 SAMG의 중간 단계에 비상운전지침서 등을 개발을 구상하고 있음. 후쿠시마 정도의 SBO에도 사고관리가 가능함

● 발표 5 : SAMG Regulatory Review after Fukushima NPP Accidents (김도삼)

Q: 사고관리전략 중 격납건물 배기에 대한 KINS의 규제입장 및 안전점검 결과로 도출된 격납건물 감압/배기에 대한 핵분열생성물 관련 기준과 접근방법은? (김상백)

A: 최종열제거원이 확보되어 배기하지 않고도 살수등을 이용한 격납건물 열제거 및 감압이 가능하면 되지만 추가 검토가 필요함. 또한 핵분열생성물 제어를 위한 여과배기를 고려시 면밀히 검토할 필요가 있음

Q: SAMG의 개선과 관련하여 징후기반 또는 시나리오기반으로 고려하는지? 또한 설계기준초과 자연재해는 어느 수준까지 고려하고 있는지? (안광일)

A: 후쿠시마와 같은 사고의 경우 현재의 징후기반 SAMG가 문제가 있을 수 있으므로 시나리오기반 SAMG의 필요성을 인식하고 있음. BDBA의 범위에 대해서는 아직 검토되지 않았으나 미국의 EDMG 수준의 절차가 만들

어진다면 어떠한 경우의 재해에 대해서도 유용한 전략이 될 수 있을 것임  
Q: 향후 국내원전 설비개선 관련, 안전성 점검 결과에 대해서만 action item을 진행할 것인지? (방광현)

A: 점검결과는 큰 개념을 설정한 것으로 세부사항에 대한 추가 검토가 필요함

Q: '안전변수 감시기능 확보'는 강화된 기기를 의미하는가 또는 다중성 개념의 대체수단 확보를 의미하는가? (본인소개 안함)

A: SBO시에도 사용가능한 계측기를 의미함.

C: SBO 상황에서 기존 전원 이외의 전원이 공급되어야 하고, 중대사고 환경에서도 작동 가능함을 보일 수 있는 계측기이어야 할 것임 (이종호)

● 발표 6 : 냉각수 주입에 의한 노심 잔열제거 (김형택)

Q: RCS 냉각수 주입에 대한 열전달 계산에 노심 용융으로 인한 다양하고 복잡한 형상(geometry)을 고려하는가? (방광현)

A: 노심내 현상이 매우 불확실하므로 관련 연구가 계속 진행되고 있음. 열전달 관련한 기술이 SAMG 기술배경서에 상세히 기재되어 있으며, 현재는 노심 형상이 손상되었다고 판단되면 냉각수 주입 유량을 몇 % 강화하도록 하는 지침이 마련되어 있음

Q: 충전펌프로 냉각수를 주입하는 경우 장기 붕괴열 제거가 가능한가? (장영식)

A: 유량만 확보되면 충전펌프로 가능함. 만약 충전펌프로 부족한 경우 추가 유량을 확보할 필요가 있음

● 발표 7 : 중대사고시 수소 제어 (문영태)

Q: PAR와 점화기가 있는 APR1400과 달리, 고리1호기의 경우 PAR만 설치하였는데, 수소제어 전략이 기존의 PAR-점화기 병행 설치에서 PAR만 설치하는 것으로 변경되었는지? 또한 안전점검 후속조치로 전원전 PAR를 설치하는데 기존 점화기가 있는 발전소에 대한 PAR 설치방안은? (김상백)

A: 가장 중요한 점은 PAR나 점화기 같은 수소제어설비로만 수소제어를 하는 것이 아니라 대형 격납건물 자유체적을 갖는 점임. APR1400에서도 PAR만으로 수소제어가 가능하며, PAR만 설치하여도 규제요건은 만족함. 점화기와의 병행설치 등은 전략적으로 검토되어야 하는 부분임.

● 발표 8 : 중대사고시 격납건물 내 핵분열생성물 거동 및 확산 제어 (김상백)

- 질의 없음

● 발표 9 : 비상계획 현황 및 발전방향 (이세열)

Q: 후쿠시마 사고와 같은 상황이 발생하는 경우, 방사능방호기술지원본부의 역할은? (안광일)

A: 방재법에 역할이 기술되어 있으며, 기술적 분류에 따라 대책반이 구성됨. 실제 상황이 발생하면 KINS 본부와 현장방재센터에 파견하여 현장 방재센터장이 중요 결정시 지원하게 됨

● 발표 10 : Perspectives on Nuclear Reactor Safety (이재승)

Q: “APR1400의 passive system이 적다”라는 발언의 의미는? (김희동)

A: Fluidic device, POSRV 등 passive system이 있지만, 미국 경험상 노심에 서의 각종 중대사고 진행이 일어나면 이미 늦은 것으로 간주할 수 있음. AP1000의 경우 IRWST가 상대적으로 높아 노심 손상이전에 중력으로 냉각을 할 수 있음. 이와 같은 중력 등을 이용한 passive system은 일반 대중이 이해할 수 있도록 설명하기도 쉬울 뿐만 아니라 안전성도 높음. 그렇지 않으면 원자력의 장래는 어려울 것으로 봄. 가장 중요한 것은 노심을 피동으로 냉각하는 것(passive cooling of the core)임

3. 패넬토의 내용 (사회: 방광현, Q(질의)/A(답변)/C(의견)으로 구분)

● 주제-1

Q: 지진과 지진해일 관련 한국원전 안전성에 대한 기준은? 한수원 분석은 지진과 지진해일을 동시에 고려하지 않고 있어 국민 납득이 어려울 수 있어보임. (이보욱)

A: 현재의 국내외 원전 설계는 후쿠시마와 동일 상황을 고려할 때 안전하다고 할 수 없음. 기존 사고관리 전략과 상황에 따른 추가적 전략을 고려하여 사고관리를 이행할 수 있을 것으로 봄. 후쿠시마의 경우 충수가 너무 늦은 측면이 있음. 국내 원전은 BWR과 달리 증기발생기 충수를 이용하므로 전략이 복잡하지 않으며, SBO시 터빈구동보조급수펌프를 이용하므로 전원 복구 등의 조치 시간에 비교적 여유가 있는 편임. 현재 지진 및 지진해일 등 관련 안전점검 후속조치를 반영하기 위한 검토를 수행하고 있으며, 쓰나미에 대한 분석 및 지진 자동정지 시스템의 구축 등을 예정하고 있음 (김형택)

C: 설계기준초과사고에 대한 적절한 수준의 'realistic bounding calculation'을 수행할 필요가 있으나, 이 경우에도 국민들을 이해시킬 수 없는 부분이 있을 수 있음. 국민들을 이해시키는 최선의 방법은 중력 등을 이용한 'passive system'으로 설명해야 할 것임 (이재승)

C: 후쿠시마 사고 관련 다중호기 사고나 극한사고 등에 대한 검토나 연구가 진행될 것으로 보며, 극한 상황을 고려하되 적절한 현실성의 반영도 필요할 것임 (방광현)

● 주제-2

Q: NRC는 TMI-2와 체르노빌 사고에 따라 PSA 분석을 수행해 왔으나 PSA의 정량적인 결과에 대한 신뢰도가 낮다고 보는 견해가 많은데, 지진이나 쓰나미 등의 외부사건을 제대로 고려하지 않았기 때문인지, 그렇다면 왜 아직 제대로 반영이 안되어 있는지 설명이 필요함 (홍성완)

A: 첫째는, PSA는 불확실성이 매우 크며 이를 줄이기도 쉽지 않은 상황임. 예로써, NUREG-1150에서도 불확실성이 큰 부분에서는 전문가 판단을 고려하고 있으며, 여기에 지진 등 외부사건은 거의 다루지 않음. 그 이후의 IPE를 수행하면서도 지진에 대한 검토범위가 크지 않았음. 둘째로, 현재의 엔지니어링 수준에서도 계통 취약성(system vulnerability)을 제대로 알 수

없음. PSA는 매우 복잡한 분석과정을 거치므로 '왜?' 라는 질문에 대한 설명이 쉽지 않으며 이러한 부분이 PSA의 결점임. 계통 취약성을 분석하기 위해서는 PSA 만큼 강력한 툴이 없다고 생각함. 다만, PSA의 한계를 고려해야 할 것임 (이재승)

C: Passive system이 중요하다고 하나, passive system이 있다고 해서 문제를 다 해결하는 것은 아니라고 생각함 (송진호)

C: IC나 RCIC는 passive system 인데 왜 제대로 작동하지 않았는지에 대해 아직 설명이 안되는 부분이 있음. 이는 설계상의 오류가 있었을 것으로 판단함. 설계 개선(upgrade)이 필요한데, 사실 일본도 설계 개선을 다 수행하였음. 그러나 IC나 RCIC의 설계 자체의 오류일 수 있음 (이재승)

### ● 주제-3

Q: DBA와 BDBA의 한계나 의미에 대해 생각할 상황이라고 생각되나, 대중에게는 상황과 조치사항을 설명하기가 어려움. 기술자 입장에서 DBA와 BDBA의 한계 및 의미에 대해 설명바람 (송철화)

A: 'realistic bounding calculation'의 방법이 문제임. bounding case는 realistic 하지 않을 수도 있으나, upper limit을 고려하고 이에 대처할 수 있는 passive system이 있어야 한다고 생각함. 이러한 부분이 우리 기술자들의 사명이라고 생각하며, 그렇지 않으면 앞으로 원자력산업이 쇠퇴할 수도 있을 것임 (이재승)

### ● 주제-4

Q: 원전 사고로 소개령이 내려졌을 때 소개 방안 및 소개 이후 보상/배상 등에 대한 우리나라의 대책은 무엇인가? (백춘선)

C: 원전관련 훈련시 주민들의 참여도가 매우 떨어짐. 원자력의 필요성이나 신뢰도가 주민들이 이해할 수 있는 수준이어야 훈련도 참여가 가능하다고 봄. 이에 대한 KINS나 정부의 적극적인 대책이 있어야 할 것임 (방광현)

### ● 주제-5

Q: WENRA에서 진행중인 stress test는 각국의 입장 때문에 원활하게 이루어지지 않는 듯함. 미국은 후쿠시마 이후에 stress test라는 조치를 취하고 있는지와 국내에서 수행한 원전 안전성점검이 일종의 stress test로 볼 수 있는 것인지? (안광일)

A: 미국은 NRC에서 지속적인 조치를 취하고 있으며, 규제기관의 실수를 최소화하기 위해 서두르지 않고 면밀한 검토를 수행하고 있음. 미국의 경우도 SBO의 상황은 동일하다고 생각함. NAS(National Academy of Science)에서 검토하고 있음 (이재승)

A: 국내 원전점검 결과가 비교적 빨리 수행되었기 때문에 참고할 만한 해외 원전의 조치가 없는 상태에서 사업자 입장에서는 국내 원전 조치사항이 충분하지는 않으나 최대한으로 고려하다고 판단하며, 현재의 조치사항과 향후 일본 등 해외 조치사항을 참고하여 보완하면 안전성이 어느 정도는 확보될 수 있다고 생각함 (김형택)

Q: 다호기 동시고장 또는 다중고장 사고에 대한 고려가 별로 이루어지지

많은 것 같은데, 미국과 한국에서 고려하고 있는 수준은 어느 정도인가?  
(안광일)

A: 미국의 경우는 후쿠시마 이후에 아직 다호기 고장에 대한 방안이 나와 있지 않은 상태이며 향후 과제로 남아있다고 생각함 (이재승)

A: 현재 국내의 사고관리는 소내 자원만을 활용한 단일호기 기준으로 되어 있으나, 이 부분은 2~3년 내에 전호기에 대한 대처 방안이 마련될 예정임 (김형택)

#### ● 주제-6

C: 이번 사고를 계기로 미국에서도 원전 안전성을 재확인하기 위한 연구가 진행중임. 최근 원자력의 르네상스라 불리며 안전성이 개선된 많은 원전들이 개발되어 왔으나, 원전 안전성에 대해 어디까지 확인을 해야하는 지에 대한 고민이 필요함 (S.T. Revankar)

C: 원자력에서 안전성은 최우선해야 하는 과제라 생각함. 일반 대중이 원자력이 안전하지 않다고 생각하도록 해서는 안되며, 이는 실제 많은 실수가 있었던 TMI사고나 이번 후쿠시마 사고가 우리에게 주는 교훈임. 후쿠시마 원전에 해수를 주입하는 등의 결정은 수백만 달러에 상당하는 매우 어려운 의사결정으로 이러한 상황까지 가기 전에 노심냉각을 할 수 있는 신뢰도를 확보하는 것이 중요함 (이재승)

C: 원전이 궁극적인 안전성을 확보하고 있다고 생각하지 않음. 'How safe is safe enough?'에 대한 정의를 다시 생각해야 함. 예를 들어, 격납건물 건전성이 24시간 동안 확보되어야 한다는 요건도 후쿠시마 사고를 고려하여 재검토가 필요하다고 생각함 (송진호)

#### ● 패널토의 정리 (방광현)

- 이번 후쿠시마 사고를 계기로 원자력이 더욱 안전해지는 전화위복이 되길 바람

#### 4. 폐회사 (류용호)

- 후쿠시마 원전 사고와 관련하여 국내 원전의 중대사고관리 전략과 관련하여 해야 할 일이 많으며 원전 안전성에 대해 면밀한 재검토가 필요함
- 이재승 교수가 노심용융을 방지하기 위한 passive system을 강조하였는데, EPR의 경우 노심용융을 허용하되 용융물의 냉각성을 확보하고 격납건물 건전성을 강화하여 사고시 주민의 이주 개념을 없앴음. 노심용융 예방 및 방지를 위한 passive system의 개발 및 개선은 신형 원전 설계에 반영되어야 할 사항이라고 생각되며, 추후 이에 대한 기술적 논의가 많이 있어야 할 것으로 생각함