

원전 사고사례 분석과 대응전략 개선 방향

원전사고관리계획서 개발 워크숍
2016. 5. 11 춘계원자력학회

중앙대학교 에너지시스템공학부

원전사고대응 안전연구센터장 정 동 욱 교수





1. 국내 원전 사건사고 사례 분석

원전 사고 DB 분석 개요

- ❑ 분석대상 : KINS 발행 OPIS 보고서 681건(경수로 553건, 중수로 95건) 및 미국 LER 보고서 144건
- ❑ 분석코드 : NUREG-5750과 IAEA IRS(Incident Reporting System) 활용 사고DB 코드 구축 및 적용
- ❑ 분석방법 : 초기사건고장 (IPF) 및 기능적영향 (FI) 항목 분석 및 기타 현안사항 등 분석
- ❑ 분석구분 :
 - 일반과도사건(GT)과 초기고장(IPF)간에는 보편적 분포인 80:20에 근접
 - PHWR원전과 NUREG-5750은 일반과도사건 발생비율이 높게 나타나고 있음(PHWR은 분석대상이 적음)

구분	대상기간	유효분석 건수	GT		IPF/FI		GT+FI 발생비율 합계	비고
			발생건수	발생비율	발생건수	발생비율		
국내 PWR원전	1978~2014년	553건	460건	83.18%	93/111건	16.82/20.1%	103.3%	IPF와 FI가 동시 에 발생하는 사 건이 있어 100%초과
국내 PHWR 원전	1983~2015년	95건	84건	88.4%	11/11건	11.6/11.6%	100%	
미국 LER(WH/CE)	2006~2015년	144건	112건	77.8%	32/35건	22.2/24.14%	102.04	
NUREG-5750	1987~1995년	1327건	1184건	89.2%	143/276건	10.8/23.3%	112.5%	

- ☞ 일반과도사건(GT) : 원자로 정지만 유발하는 사건(원자로정지, 터빈정지, 복수 및 급수 부분상실 등)
- ☞ 기능적 영향사건(FI) : 열제거 기능에 영향을 주는 사건(1,2차측 냉각기능 상실, LOOP, LOCA, SGTR 등)
- ☞ LER : Licensee Event Report

국내 원전 사건 주요 특징 분석

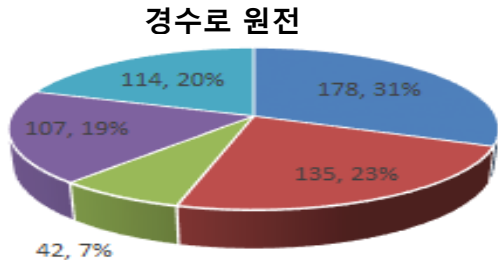
□ 경수로 원전

- 2차 계통(416건) > 1차 계통(160건), 자동정지(437건) > 수동정지(101건)
- 사고원인: 계측 > 기계 > 전기 > 인적 > 외부

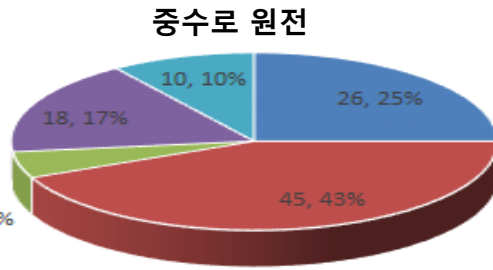
□ 중수로 원전

- 1차계통 (65건) > 2차계통(39건), 수동정지(48건) > 자동정지(38건)
- 사고원인 기계 > 계측 > 인적 > 전기 > 외부

사고 원인 별 발생비율



■ 계측 ■ 기계 ■ 외부 ■ 인적 ■ 전기

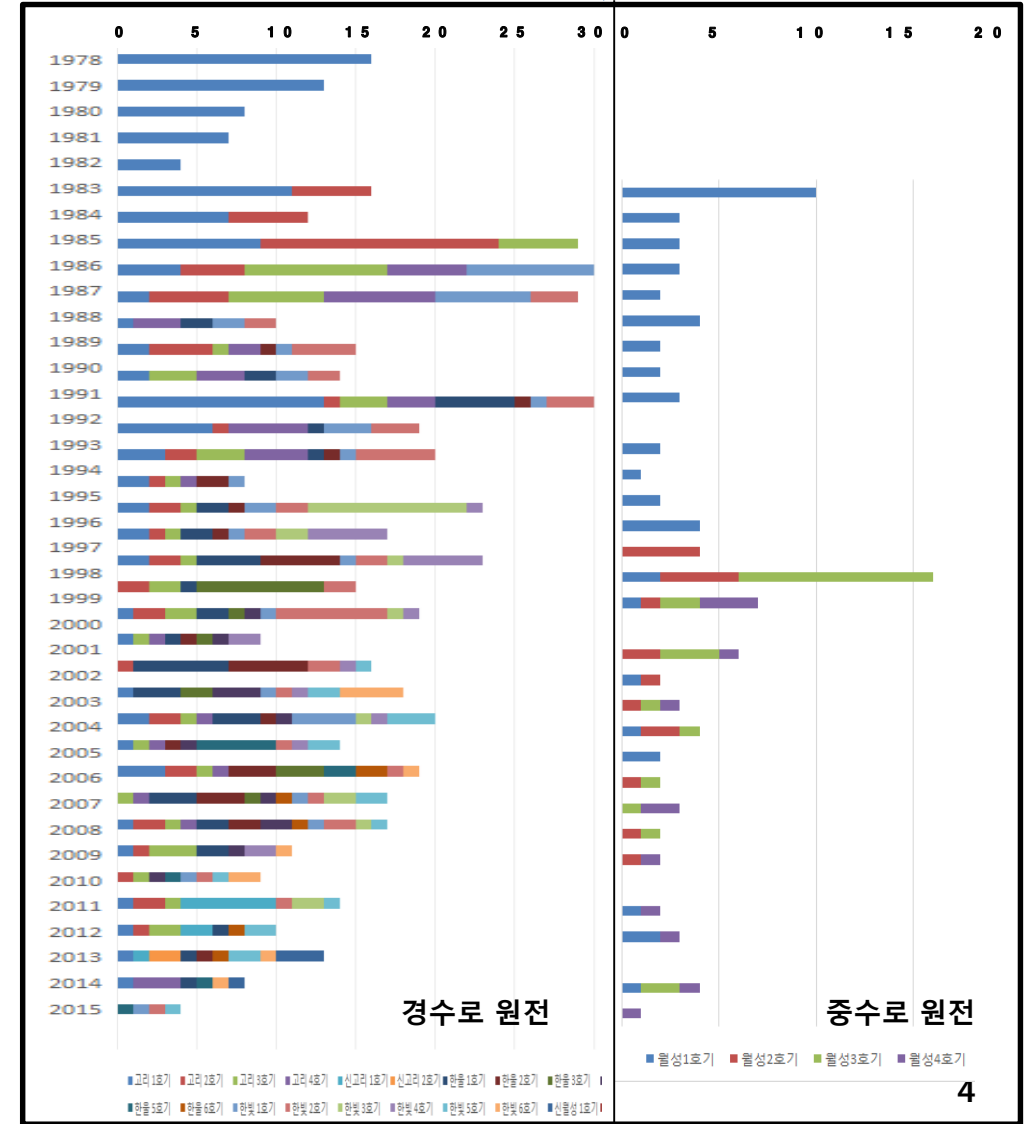


■ 계측 ■ 기계 ■ 외부 ■ 인적 ■ 전기

□ 특징

- 상업 운전이 개시되는 발전소가 있을 경우 전체 고장 발생 건수 크게 증가
- 경수로에는 계측, 중수로에는 기계 고장이 가장 큰 원인

연도별 원전 사고 발생 건수



원전 사고 DB 분석 결과

□ 한국과 미국원전의 발생 순위별 중요사건(기능적영향 관점)

발생순위	국내 PWR OPIS	국내 PHWR OPIS	미국 LER	미국 NUREG-5750(PWR)
1	복수기열제거상실사건	중수누설사건	복수기열제거상실사건	주급수유량완전상실사건
2	주급수유량완전상실사건	태풍, 소외전원상실사건	소외전원상실사건	복수기열제거상실사건
3	태풍사건	복수기열제거상실사건 낙뢰사건	주급수유량완전상실사건	화재사건
4	낙뢰사건		낙뢰사건	소외전원상실사건
5	소외전원상실사건		안전모션상실사건	계측제어공기상실사건

- 미국과 한국 PWR 원전의 사건사고 발생대상과 순위가 매우 유사한 수준으로 분석됨
 - 공통적으로 가장 많은 사건은 복수기열제거기능상실사건, 주급수유량완전상실사건
 - 소외전원상실사건과 낙뢰사건도 큰 부분을 차지(국내원전은 태풍 발생빈도가 매우 높음)
- PHWR 원전은 중수누설사건이 가장 발생빈도가 높은 것으로 분석(전체 발생건수중 4.21% 차지)
 - PHWR 원전에서 10GPM 이상 누설은 4회, 10GPM 미만 누설은 17회 발생한 것으로 분석
 - PHWR 원전도 태풍과 소외전원상실사건 발생비율이 매우 높으나 주급수유량완전상실사건의 발생사례는 없음
- 미국의 LER 분석결과 많은 부분에서 NUREG-5750분석 당시보다 많은 개선이 이루어졌음(화재, HELB 등)

주요 사고 유형 분석결과

□ 소외전원 상실 사건(LOOP : Loss Of Offsite Power)

기능적 영향사건 구분	PWR OPIS		PHWR OPIS		LER (WH/CE)		NUREG-5750	
	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율
Loss of Offsite Power	8	1.45%	2	2.1%	7	4.83%	24	1.81%

□ 안전모선 상실 사건(Loss of Safety Related Bus)

기능적 영향사건 구분	PWR OPIS		PHWR OPIS		LER (WH/CE)		NUREG-5750	
	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율
Loss of Safety Related Bus	7	1.08%	0	0	2	1.38%	7	0.53%

□ 복수기 열제거기능 상실사건

기능적 영향사건 구분	PWR OPIS		PHWR OPIS		LER (WH/CE)		NUREG-5750	
	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율
Total Loss of Condenser Heat Sink	31	5.61%	1	1.05%	11	7.6%	76	5.73%

□ 주급수유량상실사건

기능적 영향사건 구분	PWR OPIS		PHWR OPIS		LER (WH/CE)		NUREG-5750	
	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율	발생건수	발생비율
Loss of Feedwater Flow	22	3.98%	0	0	4	2.76%	107	8.06%

주요 원인 분석 결과

국내 및 미국 원전 LOOP 발생 구분

구 분	OPIS PWR		OPIS PHWR		LER WH/OPR	
	정상 운전	O/H	정상 운전	O/H	정상 운전	O/H
외부영향	4				2	
인적영향		4		2		
기기고장					3	2

국내 및 미국 원전 인적요인 발생 비교

PWR OPIS	PHWR OPIS	LER 최근 10년
17.9%(99건)	17.9%(17건)	14.6%(21건)

국내 및 미국 원전 원인별 인적 요인 발생 구분

구 분	PWR OPIS	PHWR OPIS	PWR LER
조작미숙	70%(71건)	58.8%(10건)	48%(10건)
설비문제	9%(9건)	11.7%(2건)	19%(4건)
절차미흡	18%(18건)	29.5%(5건)	33%(7건)
환경요인	1%(1건)		
계	99건	17%	21

- 태풍은 태풍 경로인 고리본부와 월성본부에서 각각 14건과 2건 발생(최근 10년간 큰 태풍 발생 없음)
- 낙뢰는 국내(12회)와 미국(4회) 모두 발생빈도가 높은 사건(국내 12회중 6회 한빛본부 고리본부 4회)
- 국내에서 LOOP는 총 10회(PWR 8회, PHWR 2회), 미국도 7회 발생되고 발생빈도가 줄지 않는 사건
 - 국내 LOOP 발생특징은 정상운전중에는 태풍 등 외부사건, 정지-저출력중운전중에는 인적원인으로 발생
 - 국내에서 부지원전 전부가 정지된 사건은 고리본부에서 태풍 셀마와 매미로 인해 2회 발생
 - 2호기 정지 Dual Unit Trip 10회 (한울본부 7회중 해양생물로 4회 발생)
- 인적요인 내재사건 O/H중 인적오류 발생비율이 1/3로 LOOP, SBO, CV살수사건 등 대형사건 유발 원인으로 작용

분석 주요 특이사항

□ 외부사건 발생현황

- 국내에서 외부사건은 총 48회 발생
- 발생구분별로 태풍과 해양생물 발생비율이 29.2%로 가장 크고 낙뢰가 25%, 화재, 홍수 순으로 발생하였음
- 태풍영향은 고리본부, 낙뢰영향은 한빛본부
해양생물 영향은 한울본부, 화재영향은 한울본부가 가장 크게 받은 것으로 분석되었음
- 외부사건에 의한 사건별 영향은 소외전원상실사건이 4회, 복수기열제거기능 상실사건이 15회, 기타 원자로정지 등을 유발한 것으로 분석되었음
 - 소외전원상실사건 4건은 모두 태풍과 강풍으로 유발되었고 복수기 열제거기능 상실사건은 태풍이 1건 [취수구내 오물 유입], 14건은 해양생물 유입(해파리, 새우, 가시고기떼)으로 발생한 것으로 분석되었다

구분	태풍		낙뢰		해양생물		화재		홍수		지진	
	건수	비율	건수	비율	건수	비율	건수	비율	건수	비율	건수	비율
고리본부	12	86%	4	33.3%	2	14%	2	40%	2	70%		
한빛본부	1	7%	6	50%	0	0	0	0	1	30%		
한울본부	1	7%	1	8.3%	12	86%	3	60%	0	0		
월성본부	0		1	8.3%	0	0	0	0	0	0		
계	14	29.2%	12	25%	14	29.2%	5	10.4%	3	6.3%		

다수호기 파급사건

- 국내에서 발생한 다수호기 정지는 총 14건 발생
 - 14건중 2건은 부지전체정지사건(고리본부 2건)
 - 발생구분은 내부사건이 4건 외부사건이 10건 차지
 - 발생원인별로 태풍 3건, 해양생물 4건, 낙뢰 2건, 지락 2건, 산불 인적오류, 기기 오작동 각 1건씩 차지
 - 본부별로는 고리본부가 6건, 한울본부가 6건, 한빛본부가 2건 발생
 - 한울본부 발생원인의 대부분은 해양생물이 차지함(산불, 지락)
- 미국 경수로의 최근 10년간 발생한 다중호기 정지는 총 3건
 - 3건중 내부사건인 지락과 전력망 간섭 각1건, 외부사건인 지진 1건
 - 지진발생시 North Anna 1,2호기에 소외전원상실사건 발생

국내 및 미국 2호기 이상 정지사건

발생구분	발생호기	발생일시	발생원인	
부지전체 정지사고	고리1,2,3,4	1987.7.15	태풍 셀마	외부사건
	고리1,2,3,4	2003.9.12.~13	태풍 매미	외부사건
국내 2호기 정지사고	고리1,2	1987.04.21	회오리돌풍	외부사건
	한울1,2	1993.11.23	단로기지락	내부사건
	한울1,2	1997.2.1	해양생물	외부사건
	한울1,2,	1997.4.24	해양생물	외부사건
	한울1,2	1997.12.28	해양생물	외부사건
	한울1,2,	2007.4.7./4.11	산불	외부사건
	한빛5,6	2002.11.3	낙뢰	외부사건
	한울1,2	2006.5.18	해양생물	외부사건
	고리3,4	2009.01.1	SUT오작동	내부사건
	한빛1,2	2009.06.24	지락	내부사건
	고리1,2	2010.7.17	낙뢰	외부사건
	고리3,4	2011.04.19	인적오류	내부사건
발생구분	발생호기	발생일시	발생원인	
미국 2호기 정지사고	North Anna1,2	2011.08.23	지진	외부사건
	Millstone 1,2	2014.05.25	지락	내부사건
	Calver Cliff 1,2	2015.04.07	소외전력망간섭	9내부사건

출력운전 및 정지-저출력 초기사건 빈도 분석결과

● 분석결과

초기사건교장 발생빈도 비교표

초기 사건	발생빈도 (/critical year)			
	미국 (NUREG-5750)	미국 NRC (1987-2005)	한국(KAERI/ TR-2957)	현재 연구
소외전원상실	0.024	~0.05	0.031	0.025
안전모션 상실		0.0083	0.15	0.019
계측제어공기상실		0.0084	-	0.013
1차기냉각수상실		-	0.015	0.009
증기발생기제관파단		0.0028	0.007	0.003
복수기열제거기능상실	0.042	0.08	0.17	0.082
주급수유량완전상실	0.085	0.095	0.17	0.054

구 분	초기사건 빈도값	
	출력운전	정지-저출력
소외전원상실 사건	0.0126(4건)	0.084(4건)
원자로냉각수상실 사건	0	0.042(2건)
화재	0.0126(4건)	0.021(1건)

- 정지-저출력 사고는 특정 유형의 사고만 발생하였으며 운전의 리스크가 출력운전보다 더 높았음
- 일부 데이터값에 차이가 나는 것은 기관별로 적용코드 및 분석자의 판단기준 차이로 인해 발생함
 - 소외전원상실이나 안전모션 상실과 같은 전력계통의 사건은 사건내용이 복잡하고 원전의 전력계통에 대한 전문적 지식이 없는 경우 분석자의 판단에 따라 사건종류가 달리 분류될 수 있음

□ 종합 분석 의견

- 사고 DB 분석결과 중수로원전이 경수로원전에 비해 초기사건고장 발생 항목이 적은 것으로 분석되었음
- 미국과 한국 경수로원전은 모두 유사한 초기사건고장 및 기능적 영향 발생빈도와 경향을 보이는 것으로 분석되었음
- 2차측 열제거원 상실사건 발생율이 경수로에서 한국과 미국 모두 가장 높은 것으로 분석되었음
- 국내원전은 태풍, 해양생물, 낙뢰와 같은 외부사건 발생비율이 크며 이들이 소외전원상실사건이나 Dual Unit Trip, 복수기 열제거기능 상실 등을 유발시켜 리스크를 상승시키는 요인으로 작용할 수 있음
- 중수로 원전은 중수 누설사건의 발생비율이 가장 높고 중수 소량누설사건도 많이 발생하였음 (탈기응축기와 가압기 연결배관에 설치된 밸브들인 과압보호밸브외 방출밸브의 기기고장이 주요한 원인임)
- 한국과 미국의 경수로 및 중수로 모두 리스크가 큰 소외전원상실사건과 송전선로 및 변압기 등과 같은 전력계통의 사건 발생율이 적지 않은 것으로 분석되었음

□ 사건사고 DB 분석결과 향후 고려 필요 요소

- 정전사고: 소외전원상실사건 및 안전모션상실사건 등의 발생율이 줄지 않음
- 복수기 열제거 상실 사고 : 국내는 물론 미국의 PWR 원전에서 초기고장 발생율이 가장 높은 사건중 하나
- 급수완전상실사고: 최근 발생빈도는 줄었지만 한국/미국 모두 초기고장 발생율이 가장 높은 사건중 하나
- 부지단위 리스크관리 : 대형 리스크를 초래하는 전 원전 발전정지나 Dual Unit Trip 발생요인 사전 제거
- 외부사고 : 부지별로 특성에 따른 관리필요 - 고리(태풍), 영광(낙뢰), 울진(해양생물, 산불)
- 계획예방정비기간중 인적요인 관리 및 규제강화(O/H 리스크와 인적요인의 밀접한 연관성)
 - 정지중 사고관리 강화: LOOP는 계획예방정비기간중 발생빈도가 출력운전보다 9배 높음.
- 중수누설관리 : 사회적 파장이 큰 중수누설 유발관련 설비/계통 검사 및 정비 강화



2. 후쿠시마 사고 교훈과 중대사고 대응 개선 방향

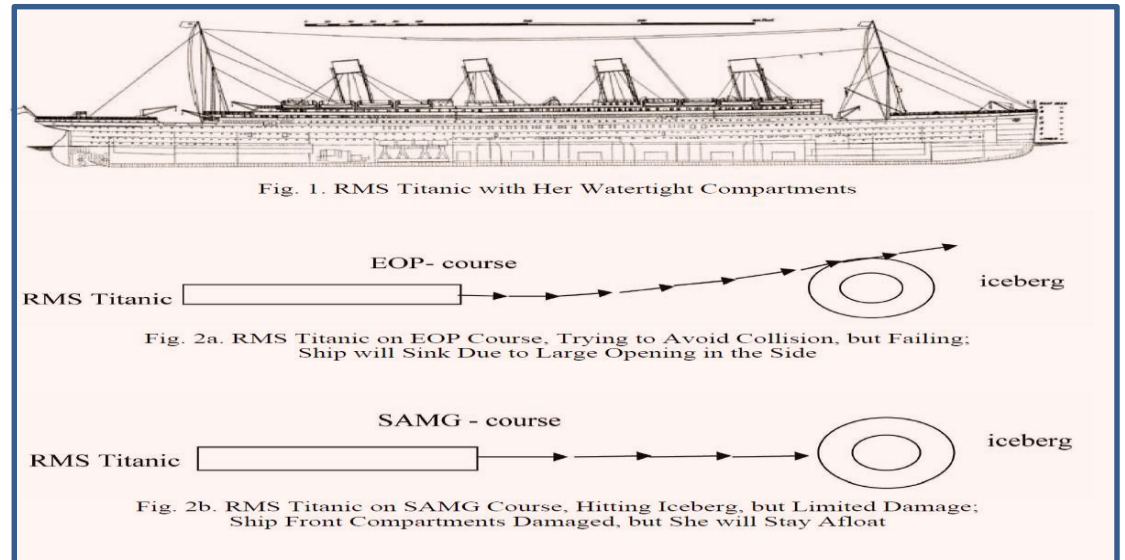
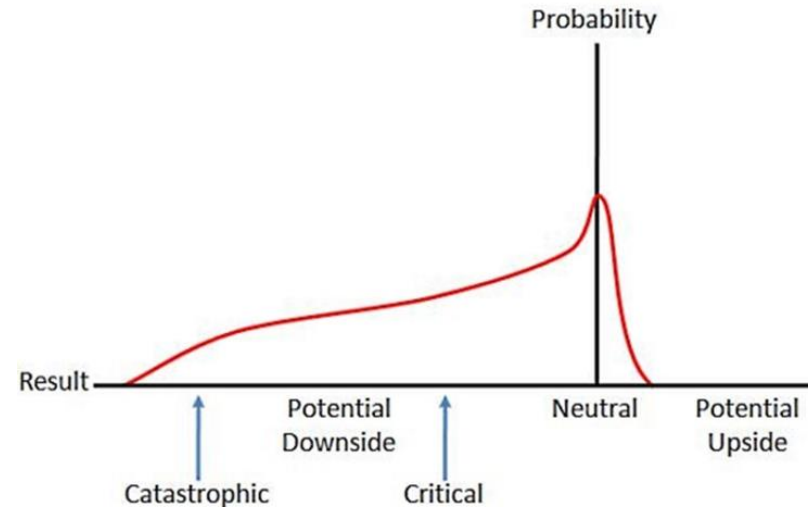
예측한 가능성과 실제 가능성? 사고의 방어가 최선의 결과를 만드는가?

Consideration of Tail Risk

“According to the normal distribution, each of the market crises observed over the past decade should only have occurred once every 1,000 years or so. Clearly, the normal distribution completely misses the likelihood of market crisis and therefore provide risk estimates that dangerously underestimate true risk.” – FinAnalytica, 2010

Accident Management

- Golden Time
- Leadership with Expertise
- Communications
- **Manuals Effectiveness**
-



후쿠시마 사고 진행 경과

- 3. 11 14:26 East Japan Earthquake Initiated
- 3. 11 15:35 15 m high tsunami stroke the site
- 3. 11 16:36 Nuclear Accident Emergency Announced
- 3.11 20:49 Evacuation within 2 km area initiated
- 3.11 21:23 Evacuation with 3 km and sheltering with 10 km was announce
- 3.11 21:51 Access to Rx building was banned due to radiation
- 3.11 23:50 Containment vessel pressure was found 600 kPa (Design pressure is 427 kPa)
- 3.12 02:30 Containment vessel pressure reached 840 kPa
- 3.12 06:50 Containment vessel vent was ordered by the government
- 3.12 09:04 Containment vent was initiated manually, 14:00 vent was successfully done
- 3.12 15:36 Fukushima Dai-ichi Unit 1 containment building collapsed due to H explosion
- 3.12 18:25 Evacuation area was expanded to 20 km region
- 3.12 19:04 Sea water injection to Unit 1 began
- 3.13 02:42 Unit 3 lost cooling and 05:10 loss of cooling was reported
- 3.14 11:01 Unit 3 containment building was collapsed
- 3.14 13:38 Unit 2 cooling was lost
- 3.14 18:00 Unit 2 depressurization was initiated and 19:24 sea water inject began
- 3.15 06:00 Unit 4 spent fuel building was collapsed

□ 국내외 연구동향

- 국내 원전 EOP/SAMG 연계체계, 사고관리 전략평가
 - IAEA는 EOP와 SAMG를 통합한 Integrated Accident Management의 중요성을 제기
 - AREVA는 원자로계통의 압력에 비례하는 SAMG 전환 CET 온도 설정
 - LOFT, PKL 실험에서 CET가 피복재 손상을 반영하는데 상당한 온도차로 지연이 발생
- 중대사고 전개 및 노심용융물 냉각의 불확실성 저감 필요
- 기기생존성 불확실성/필수정보 간접예측 개념 개발
 - IAEA는 기계적 혹은 전원 실패 시 사고관리 필수변수에 대한 간접적 예측에 의한 추정(inference) 방법의 필요성을 제기
- WOG에서는 SAMG를 보다 구체화하여 EOP와 같은 수준으로 만드는 노력 추진

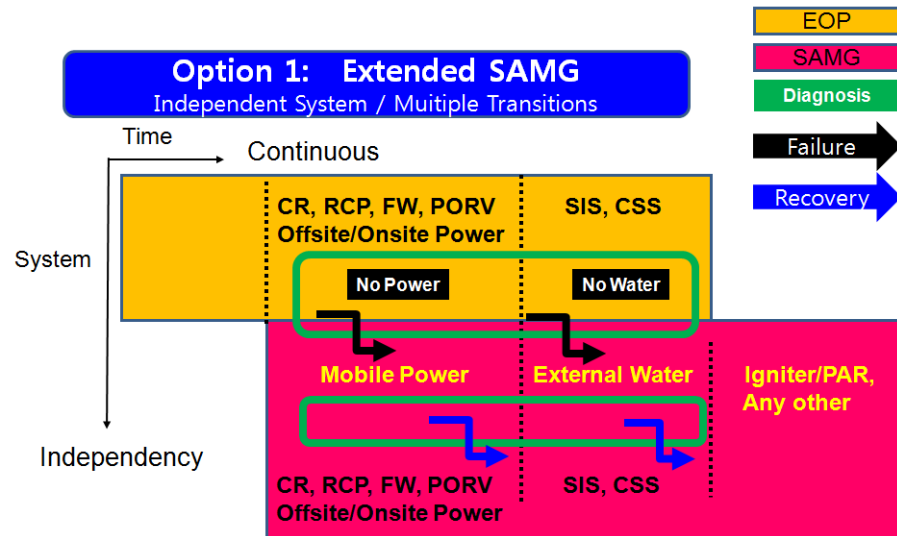
– 현 사고관리의 개선 필요 사항

- EOP와 동일 기기를 사용하는 SAMG의 사고완화 기능의 한계
- 외부 지원을 제한시키는 다수 호기 손상 상황
- EOP에서 SAMG 전환의 의사결정을 위한 보다 종합적인 상황 판단 기준 필요
- 이동식 기기/장비 동원의 세부 지침서, 실패 유형 및 대비책 필요
- DC 상실을 가정 한 조치 부재: DC 없이 계기 판독, 주요 밸브(감압, 격리밸브) 수동 작동 및 필수 기기 접근성 분석 필요
- SAMG 조치에 잠재되어 있는 부정적 영향을 감소시키는 판단 기준 명료화, 애매한 상황의 자의적 판단 가능성 배제
- Shutdown SAMG 등 발전소 정비 중 사고, 사용후연료저장조 손상 에 대한 조치 부재
- 발전소, 설계 및 제작, 정비전문가 등을 포함하는 긴급 대응 지원 조직의 구성 필요
- 제3자 지원을 계약 혹은 규정화를 통한 지원 의무 부여 고려
- 소내+소외 합동의 연계 훈련, 참여하는 모든 기관 및 인력에 대한 심층 교육훈련

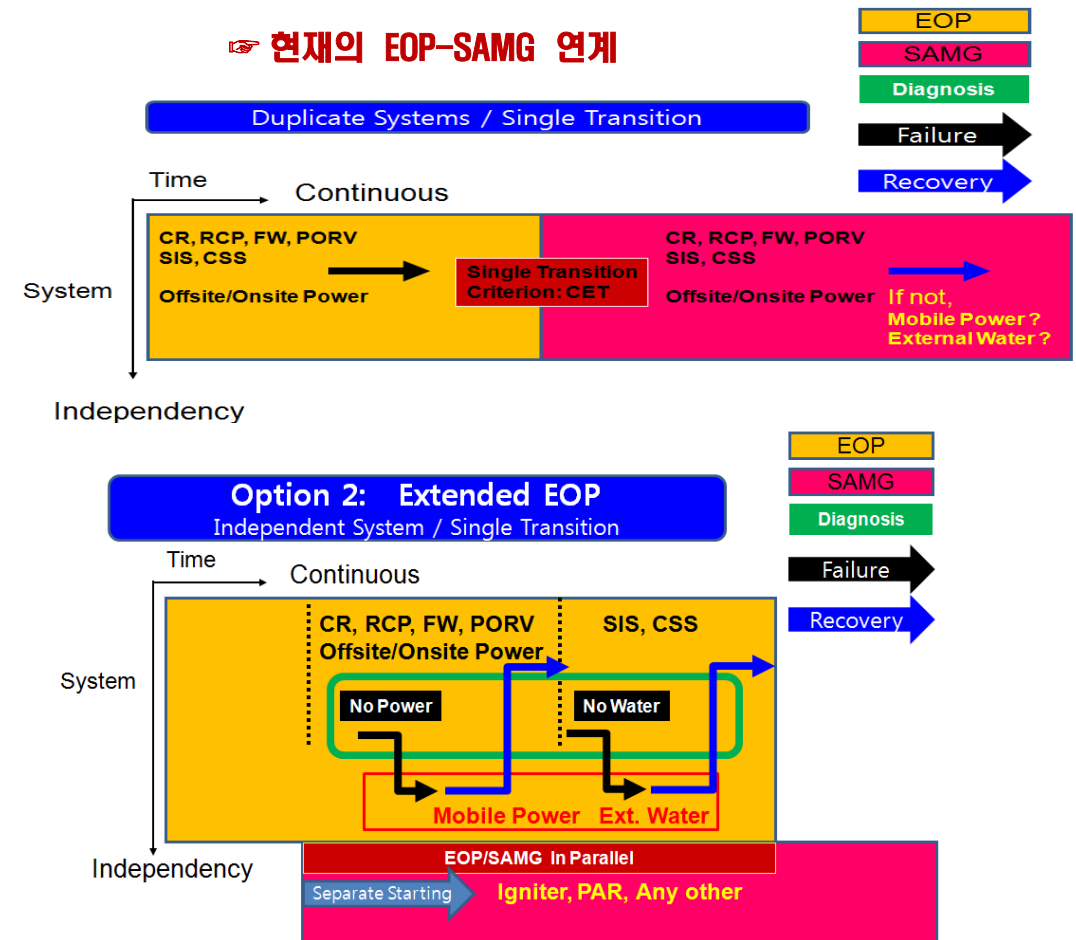
□ EOP와 SAMG 연계 개선 방안

● 현재의 One-Way, One-Parameter (CET) 방식의 한계점, EOP 기기 사용에 대한 제한점 극복 방안

- 전원 부재시 EOP 기기 부재 상황 반영
- 노심 과열 없는 격납건물 과압/우회사고 시나리오 반영



EOP에서 SAMG로의 초기 전환시에는 EOP에서 실패한 기기를 다시 SAMG에서 Check하지 않고 바로 외부 기기를 적용하는 전략으로 바로 진입하도록 하고 EOP 기기가 회복되면 SAMG 내에서 이들 기기를 작동하도록 하는 방안.

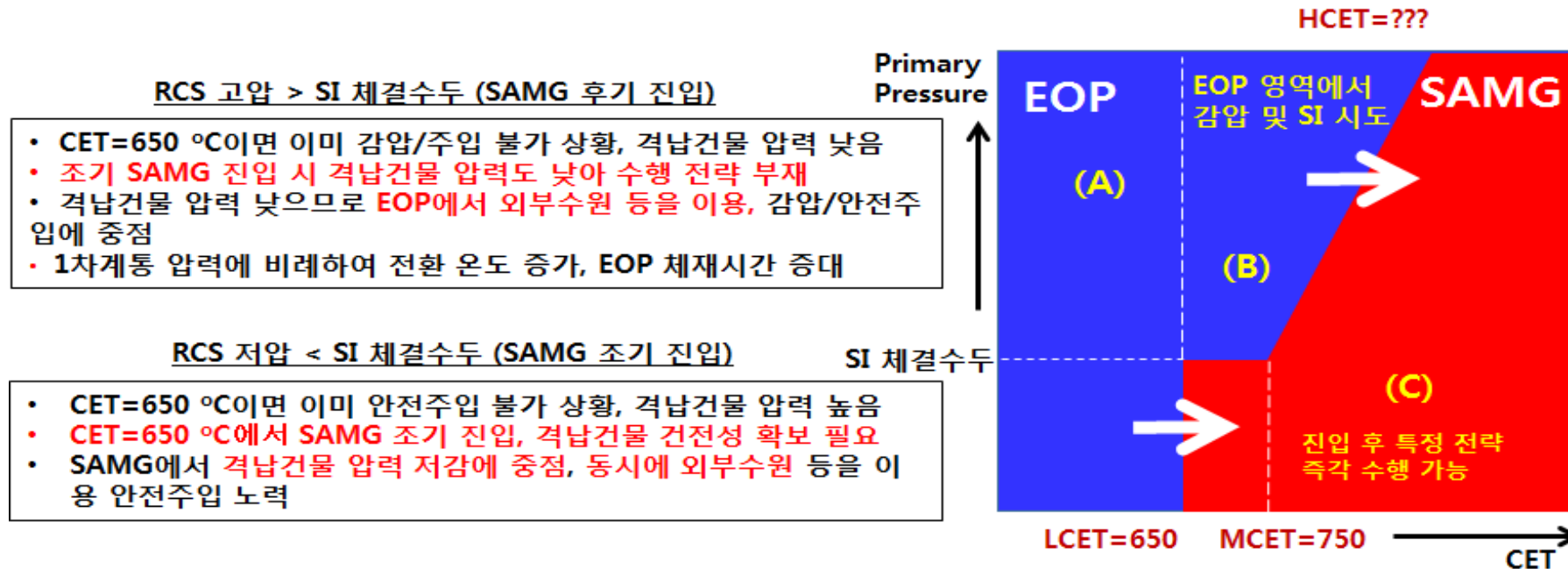


EOP와 SAMG에 완전히 독립적 계통 반영, 노심냉각, 전원과 관련된 기존 안전계통과 외부기기 모두를 EOP에 반영, SAMG에는 수소제어 등 피동계통이나 격납건물여과배기계통과 같은 전용설비만 반영, 계통 운전과 격납건물 건전성을 연계한 판단을 배제하는 방안.

□ 국내원전 EOP/SAMG 연계체계 및 사고관리 전략 평가 사례

● EOP/SAMG 연계 불확실성

- 원전의 사고 시나리오에서 예상되는 압력의 범위는 최소 대기압에서 과압보호 압력인 2,500 psia(167기압)에 이르는 광범위한 영역이며 같은 CET 온도라 하여도 압력에 따라 노심의 상태는 충분히 다르기 때문이다.
- 즉, 저압에서는 650 °C가 너무 높아 SAMG 전환이 너무 늦으며, 고압에서는 너무 낮아 조기에 SAMG로 진입하여 EOP를 사용하지 않는 경우에는 SAMG에 진입하여도 수행할 조치가 없을 수 있다는 것이다.

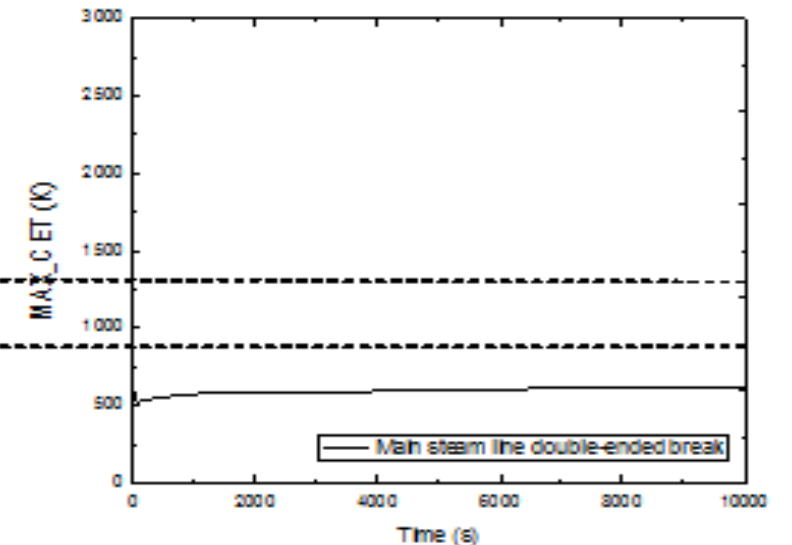
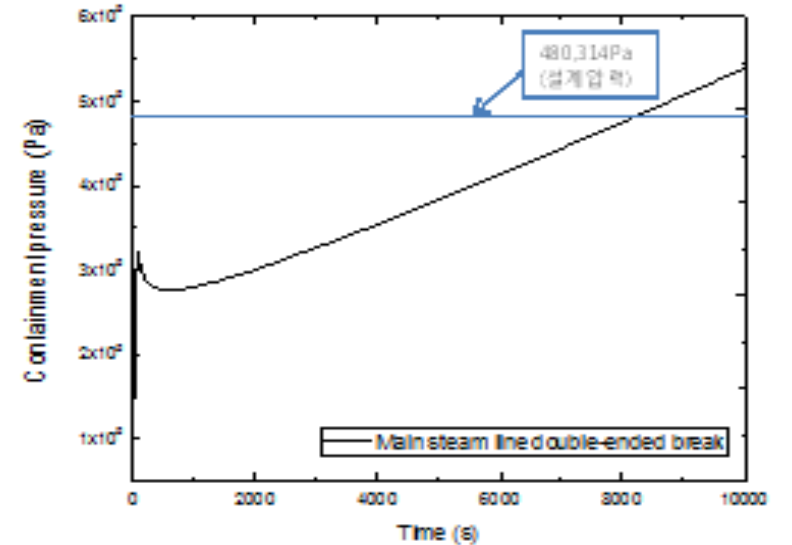


● EOP/SAMG 연계 불확실성 평가사례

- 낮은 노심 온도에서 격납건물 과압 시나리오 발생
 - 중대사고 시나리오 중에서 특정 조건에서는 격납건물의 압력이 설계압을 초과하나 CET는 650 °C가 안 되는 상황이 발생할 수 있다. (MSLB+격납건물 냉각 상실)
 - 고리 3,4호기의 안전해석 결과를 보면 MSLB 후 155.7초에 격납건물의 최대압력은 56.8 psia에 도달하고 있으며 (격납건물 설계압력인 69.7 psia 보다 12.9 psi 낮음), 이때 핵연료피복재의 최대온도는 약 400 °F(204 °C)에 불과. 살수 불능 시나리오에서 핵연료피복재 온도는 여전히 650 °C 보다 훨씬 낮은 상태에서 격납건물은 설계압을 초과

-> 격납건물 과압 측면에서 SAMG 진입이 필요

고리 3,4호기 중대사고 해석



□ 기기생존성 불확실성 극복 위한 필수정보 추정 방안 개발

- 전원불가용시 상호 대체 정보를 이용한 상황진단에 활용함이 목적

- IAEA [1.1.2]는 기계적 혹은 전원 실패 시에 사고관리 필수 변수에 대한 간접적 예측에 의한 추정(inference) 방법의 필요성을 아래와 같이 제기: "3.76. In the development of the SAMGs, ... **The ability to infer** important plant parameters from local instrumentation or from unconventional means should also be considered. For example, the steam generator level can be inferred from local pressure measurements on the steam line and steam generator blowdown lines."

- 사고관리 필요 변수(예)

사고관리 변수	생존성 및 필수성 평가	대체 필요성/가능성 평가
노심 온도	고온관 저항식온도검출기가 노심출열전대보다 생존성 높음. 1차 계통 압력 대비 필수성 낮음.	대체 방안 없음.
원자로냉각재계통 압력	가압기 압력지시계가 생존성 높음.	격납건물 압력과 연관성 큼.
증기발생기 수위	1차계통 압력 대비 필수성 낮음.	1차계통 압력(격납건물 압력)으로 대체 가능하나 대체 필요성 낮음.
제어봉 위치	원자로정지는 필수이므로 필수성 낮음	대체 필요성 없음.
재장전수탱크 수위	원자로 외부에 있어 정보 가용성 높음.	-
격납건물 압력	필수성이 가장 높음.	격납건물 팽창 변위 측정으로 대체 가능
격납건물 온도	원자로건물 압력 대비 필수성 낮음 온도에 의한 격납건물 손상 가능성 낮음.	대체 필요성 낮음.
격납건물 수소농도	PAR만 있는 경우 수소농도를 알아도 조치 방안 없음.	1차냉각재 재고량 및 격납건물 압력과 연관성 큼.
격납건물 방사선	1차계통 압력, 원자로건물 압력대비 필수성 낮음	대체 방안 없으나 소외 방사선과 연관성 큼.

결언: 중대사고 대응 강화를 위한 제언

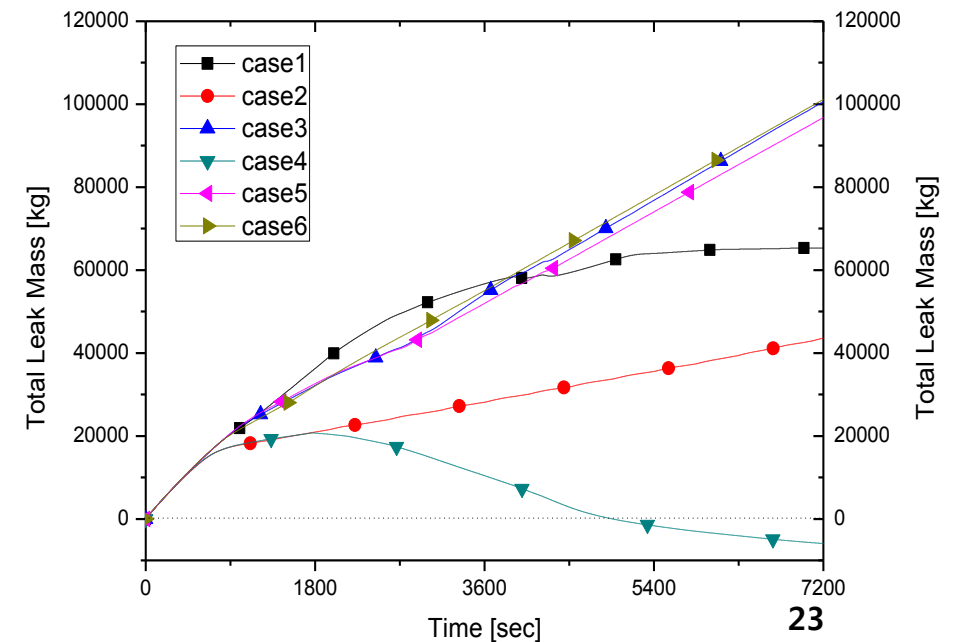
- 중대사고관리계획의 개선 방향
 1. 다수호기 사고의 발생 가능성 (특히 Site SBO 가능성)
 2. EOP – SAMG의 연계성 강화
 3. 중대사고의 진행 속도를 고려한 절차의 구체화 및 TSC의 신속한 결정을 위한 지원 Tool의 현장설치
 4. 정지 중 사고에 대한 관리 강화
 - 정지중 중대사고관리계획의 특수성 – 격납건물, SFP의 격리, 현장 인력의 소개 등 출력 중 SAMG에서는 고려할 필요 없는 조치에 대한 분석 및 대응
 - 정지저출력 EOP 개발도 필요
- 중대사고가 발생할 수 있다는 가정하에 대응조치를 포괄적으로 고려하여야 함
- 중대사고는 복잡한 발전소 상태를 유발함으로 중대사고 현상과 불확실성을 동반
 - 발전소 운전원(또는 안전요원)을 비롯하여 발전소 핵심 간부의 중대사고 현상에 대한 숙지 필요
- 발전소 비상상황에 대응할 수 있는 조직적 체계 강화 필요
 - 전문성 보강을 위한 Shadow team 필요 (발전소, 본부, 본사 및 연구원을 연계한 전문가 조직)
 - 설계엔지니어링, 전문연구기관, 기기제작사, 정비업체 등 협력업체를 포함하여 구성이 필요

참고: Shutdown EOP 필요성- 한울 4호기 SGTR 사고 (2002. 4 발전소 정지 중 발생) 분석 사례

Case	관점	결 과
Case 1	실제사고 Benchmark	
Case 2	노심 손상에 관점을 둔 분석 (Worst Case)	16시간 이후 노심 노출이 발생하기에 PSA 에서는 중요한 사건으로 분류되지만 DSA 분석결과로는 노심노출 관점에서는 중요한 사건이 아닐 수 있음
Case 3	비상운전절차서의 유효성 확인을 위한 분석	운전원의 조작에 의한 수동 작동을 통한 HPSI 결과보다 분석을 통한 자동으로 HPSI 가 작동했을 경우 냉각재 유출량이 적은 것으로 확인
Case 4	HPSI 운전 영향 분석	분석결과를 통해 HPSI를 사용하지 않고, 건전측 증기발생기를 이용한 RCS 냉각이 2차측으로의 누출량 관점에서 효과적 , 다만, 급수의 1차측으로 역류가 발생할 수 있어 건전측 증기발생기를 이용하되 적절한 감압 전략 필요
Case 5	ADV 운전 영향 분석	ADV 의 영향은 별 차이 없는 것으로 판단
Case 6	RCP 운전 영향 분석	RCP 정지에 의해 가압기 살수 불가 및 자연순환에 의한 냉각으로 인하여 1차 측 압력이 높아져 유출량이 많을 것으로 예상했지만 Decay heat 이 낮아 온도 상승이 낮은 만큼 냉각재 유출량의 차이는 없는 것으로 판단

□ 분석 결론

- SGTR 사고의 경우 전출력 EOP를 참고 할 수 있지만, Case 4~6 을 종합하여 볼 때 Shutdown EOP를 별도로 만들 필요가 있음
- Case 4에서 도출되었듯이 전출력 EOP와는 다르게 정지저출력 EOP에서는 HPSI 의 운전을 배제하고, 건전측 증기발생기를 이용한 RCS 열제거에 중점을 두는 것이 필요
- Shutdown 시에는 EOP에서 ADV, RCP 의 운전은 중요하지 않은 변수로 판단



감사합니다.