

다수기 쓰나미 PSA 수행 방법 및 현안

- Method and Issues of Multi-Unit Tsunami PSA -

한상훈 / 한국원자력연구원

2018. 5. 16

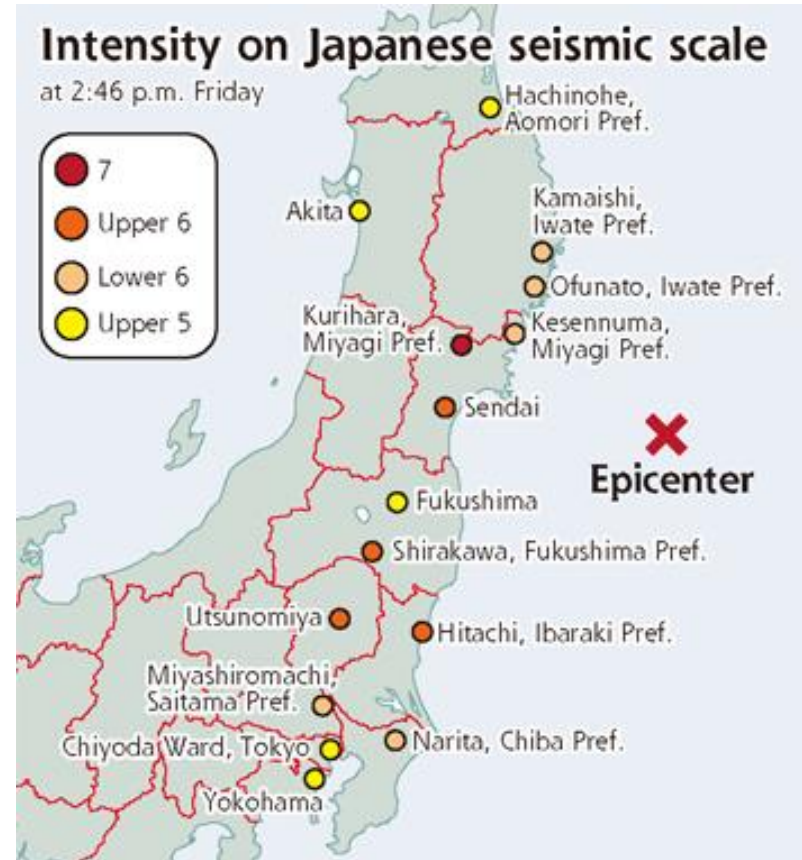
목 차

1. 개요
2. 쓰나미 재해도
3. 쓰나미 취약도
4. 쓰나미 PSA
5. 다수기 쓰나미 PSA
6. 결론

개요

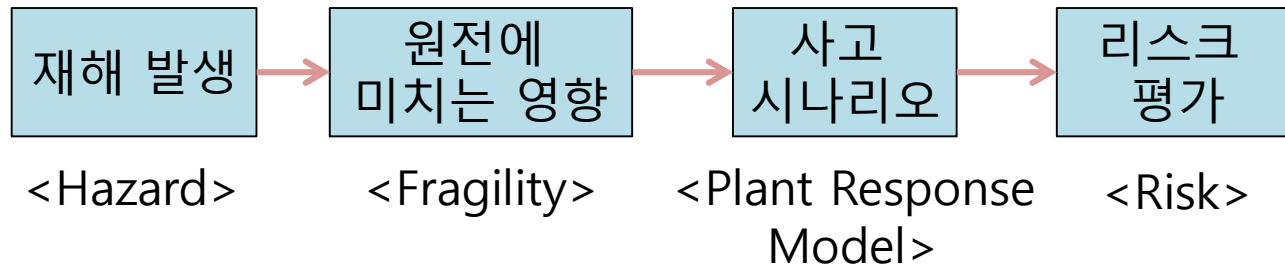
개요

- 후쿠시마 원전 사고
 - 동일본 대지진 : 미야기현 동남쪽 130km 해저 약 24km 지점에서 발생
 - 약 규모 9.0의 지진
 - 약 15m 높이의 쓰나미 발생
 - 후쿠시마 원전 사고
- 쓰나미 정의
 - 쓰나미는 해저지진 등 대규모 지반활동에 의해 해양에서 발생하는 일련의 파랑작용
 - 쓰나미는 수심이 얇은 해안선 부근에 도달하면 천수효과에 의해 파장과 이동속도는 감소하고 파고는 급격히 증가
 - 주로 판 경계에서 발생하는 역단층의 활동에 의해 쓰나미 발생
- 쓰나미의 영향
 - 처오름 (Run-up) : 침수, 범람, 파력, 중량물 충돌, debris(쓰레기, 모래 등)
 - 처내림 (Draw-down) : 취수설비 고장 및 취수능력 저하 등



쓰나미 PSA 개요

- 외부재해 리스크



- 쓰나미 재해도 평가 (Hazard)
 - 쓰나미 재해도곡선 : 쓰나미 파고별 발생 빈도
 - 쓰나미 취약도 평가 (Fragility)
 - 구조물 및 기기의 침수/파손 확률
 - 발전소 대응 모델 구축 (Plant Response Model)
 - 쓰나미 사고 시나리오 분석 (Event Tree)
 - 안전계통 손상 모델 분석 (Fault Tree)
 - 리스크 정량화 (Risk)
 - 노심손상 및 누출확률 산정
- 지진, 토목/구조 공학 분야
- 원자력, PSA 분야

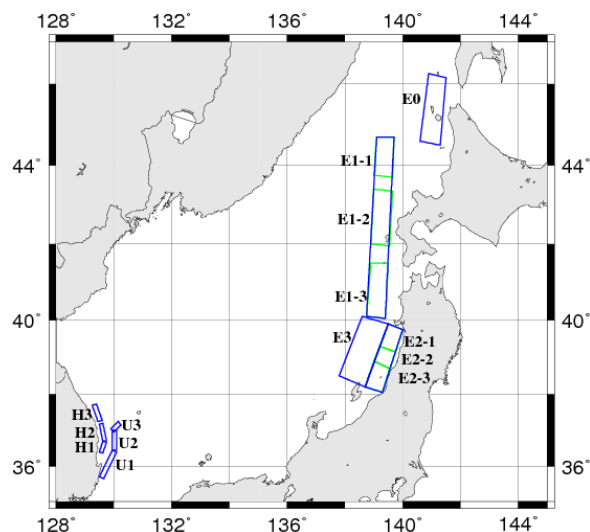
다수기 쓰나미 PSA 시범 평가

- **본 연구의 목적**
 - 쓰나미 PSA 전반적인 방법론 개발
 - 쓰나미 PSA 시범 적용
 - 다수기 PSA 방법론 적용 및 시범 평가
 - 규제기관/사업자에 쓰나미 리스크 평가 방법론 제공
 - 실제 쓰나미 리스크 정량화는 추후 사업자/규제기관에서 수행
- **가정**
 - 한울 부지의 OPR1000 원전 → 쓰나미 PSA 모델 개발
 - 울진 부지에 6개의 동일한 OPR1000 원전 가정 → 다수기 PSA 평가
- **분석 전산체계**
 - PSA 분석용 소프트웨어
 - AIMS-PSA, FTREX
 - 다수기 분석용 소프트웨어
 - SiTER, FTeMC
 - 쓰나미 시뮬레이션 소프트웨어
 - COMCOT

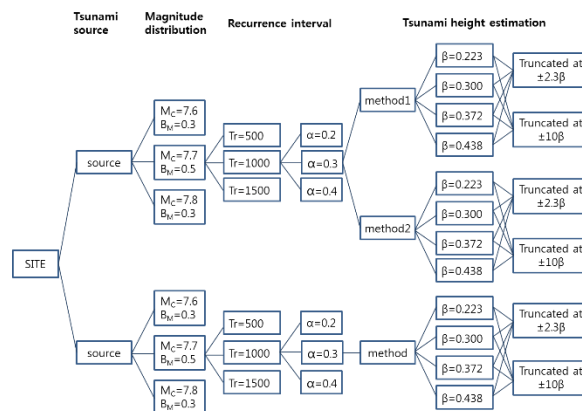
쓰나미 재해도

확률론적 쓰나미 재해도 분석 개요

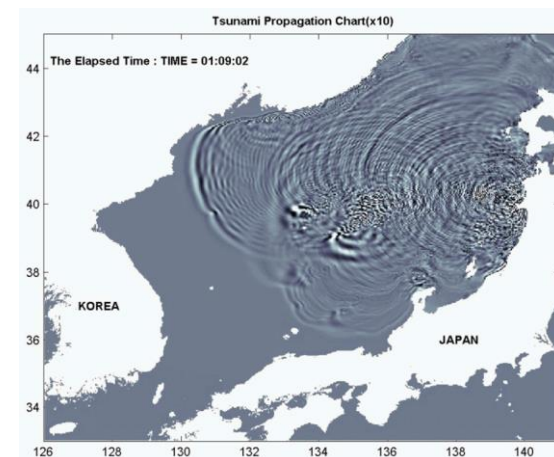
- 지진원 조사
- Logic Tree를 이용하여 다양한 지진원 및 지진규모/빈도, 쓰나미 발생 높이 평가
- 수치 모델을 이용한 쓰나미 발생 높이 평가
- 쓰나미 재해도 분석



<Seismic Source for Tsunami>



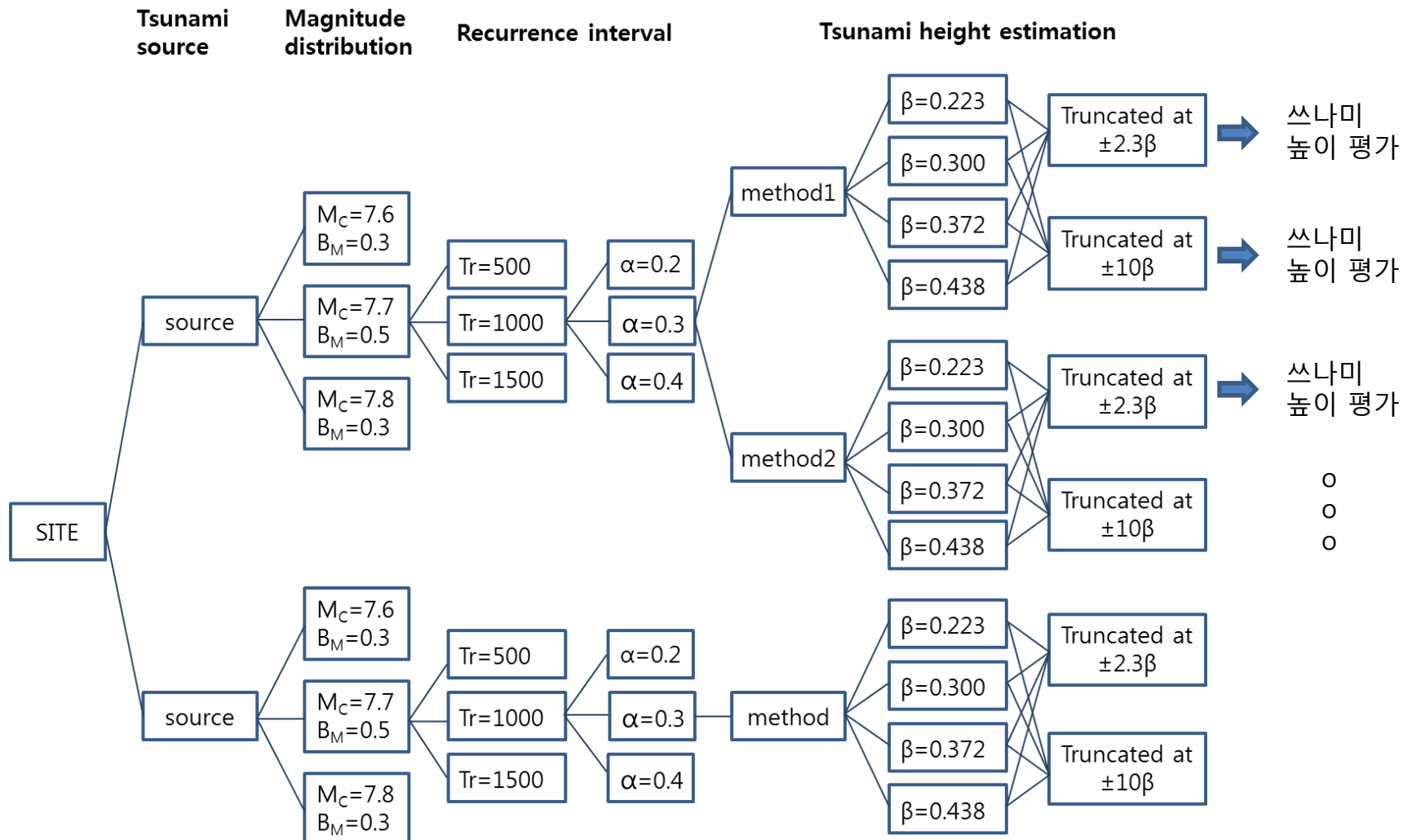
<Logic Tree Analysis>



<Tsunami simulation using COMCOT>

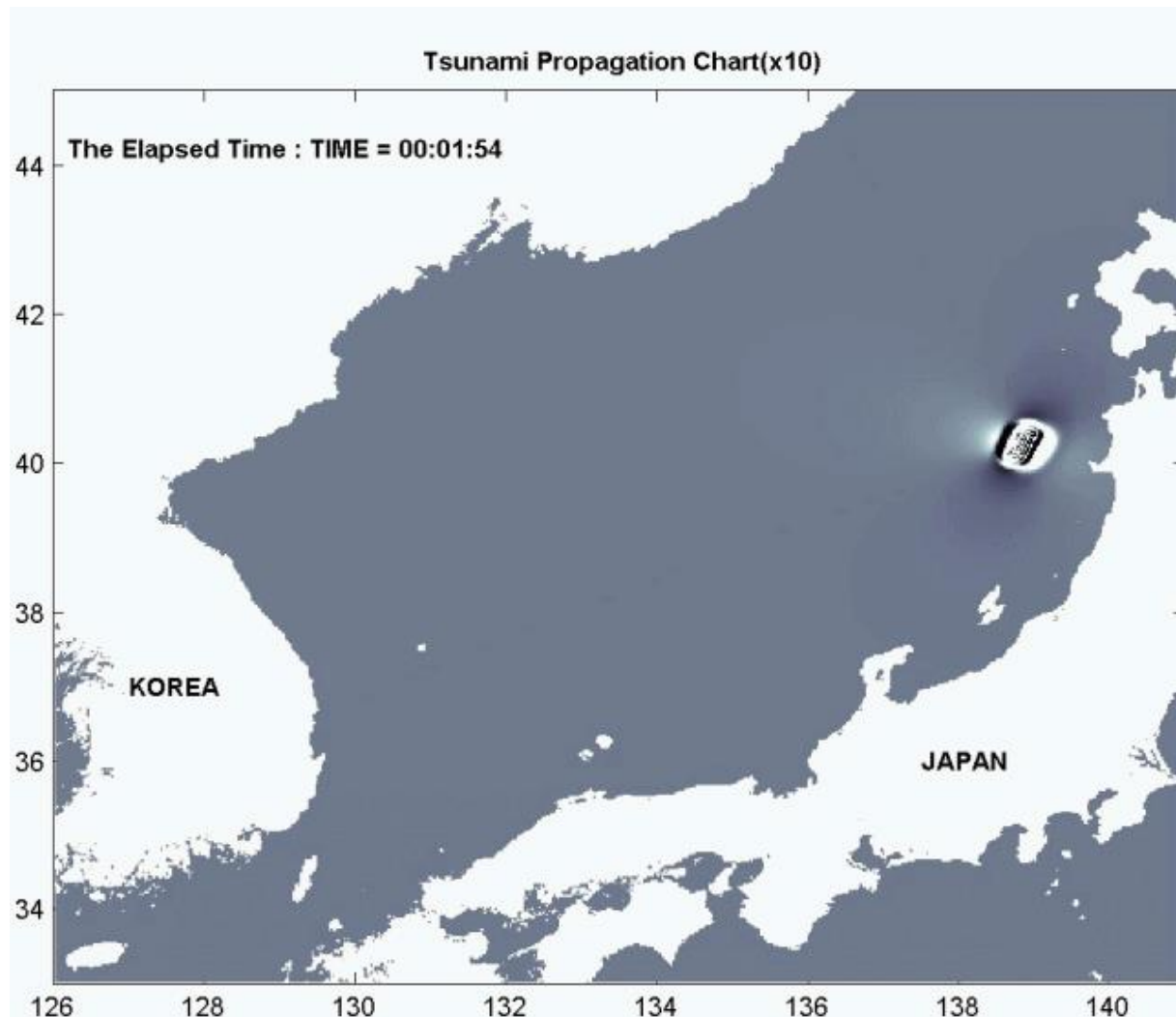
Logic Tree 평가

- 지진원 – 지진 규모 및 발생 빈도 – 평가 방법 별 쓰나미 높이 추정



쓰나미 시뮬레이션

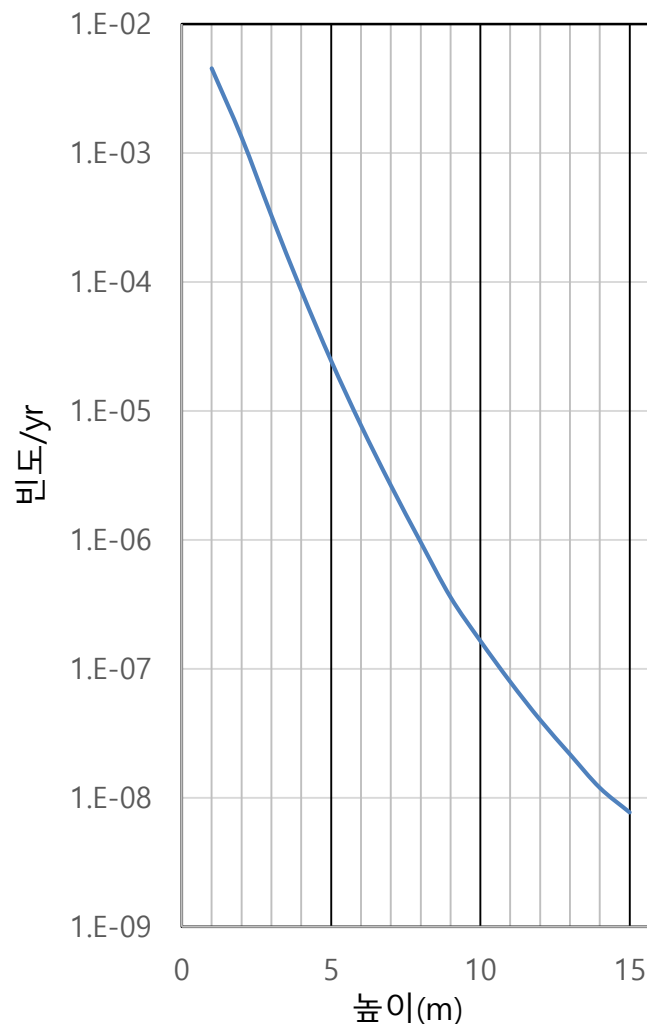
- 쓰나미 시뮬레이션 소프트웨어 이용
 - KI-COMCOT (미 코넬대 개발한 COMCOT을 국내 개선)
 - TSUNAMI 1.0 (JNES)
- 특정 지진이 발생하였을 때, 수치 모델을 이용한 쓰나미 전파 분석



쓰나미 재해도 분석 결과

- 지진원, 쓰나미 수치 해석, Logic Tree를 결합
- 위 방법을 적용한 첫번째 쓰나미 재해도 평가 결과
- 장기적인 연구 필요

높이(m)	빈도/yr
1	4.5E-03
2	1.3E-03
3	3.3E-04
4	8.6E-05
5	2.4E-05
6	7.7E-06
7	2.6E-06
8	9.6E-07
9	3.6E-07
10	1.6E-07
11	7.9E-08
12	4.0E-08
13	2.2E-08
14	1.2E-08
15	7.7E-09



쓰나미 취약도

쓰나미 취약도 평가

• 쓰나미 취약도 평가

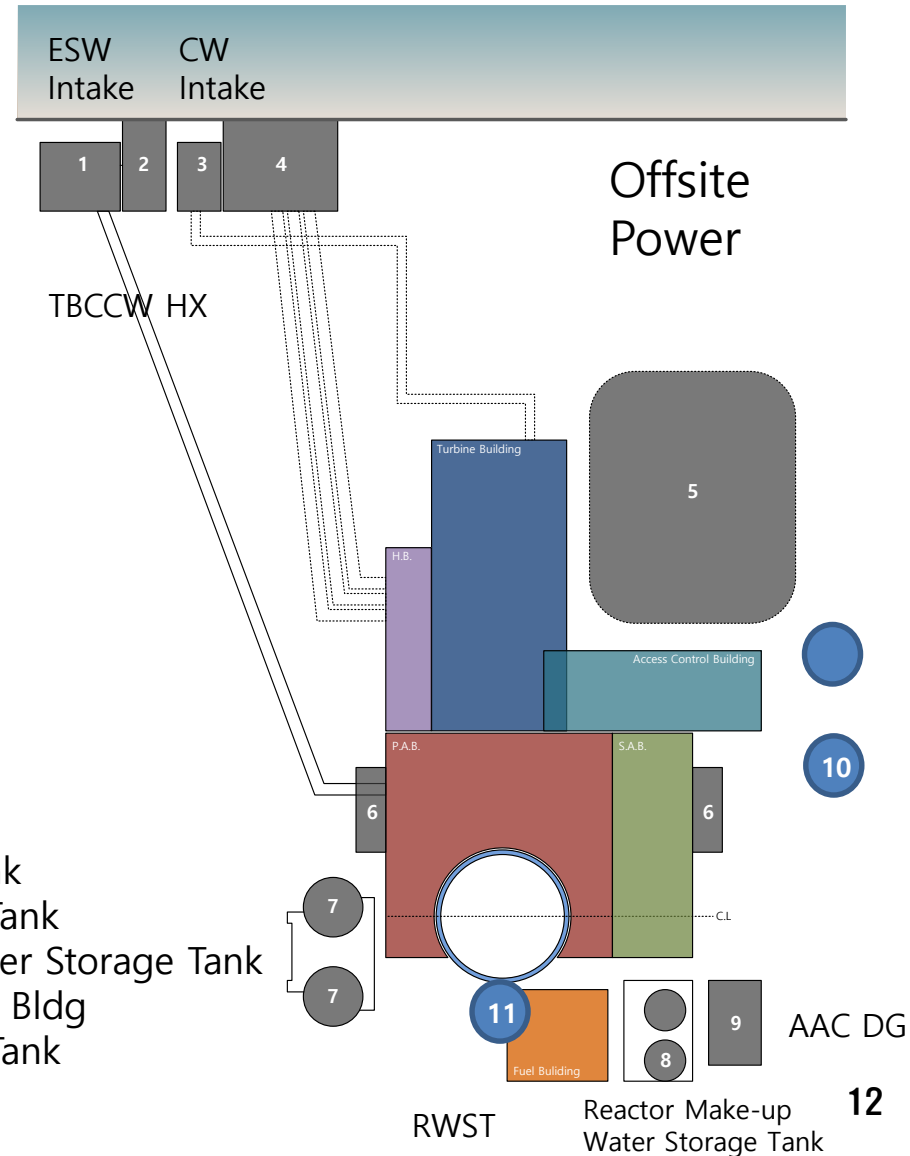
– Out-Door (Direct Damage)

- Breakwater
- Intake Structure
- Off-site transformer
- Condensate storage tank
- EDG, AAC DG

– In-Door (Indirect Damage)

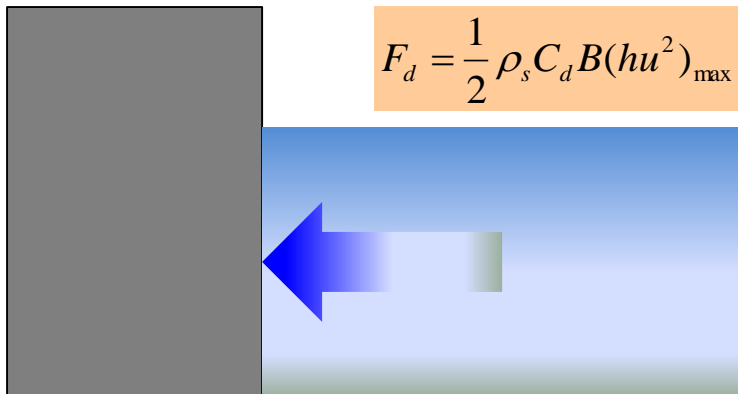
- PAB
- SAB

1. CCW HX Bldg.
2. ESW Intake Structure
3. TBCCW HX Room
4. CW Intake Structure
5. Offsite Power
6. Diesel Oil Storage Tank
7. Condensate Storage Tank
8. Reactor Make-up Water Storage Tank
9. AAC Diesel Generator Bldg
10. Demi Water Storage Tank
11. Refueling Water Tank

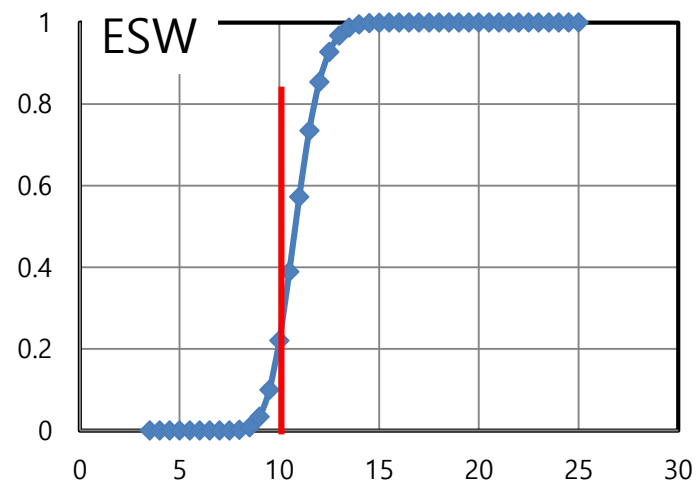
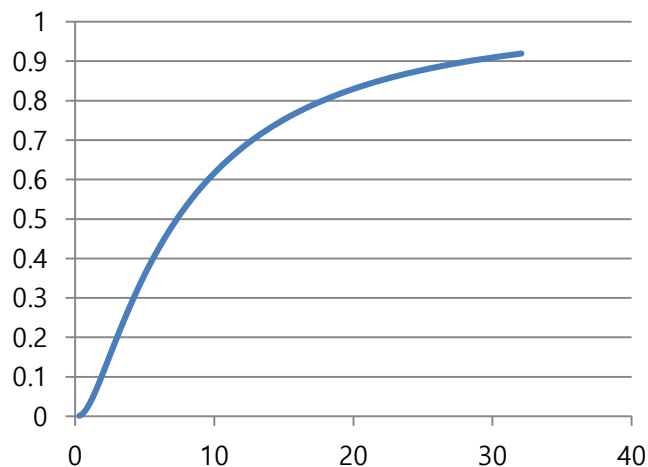


주요 SSC 쓰나미 취약도 시범 평가

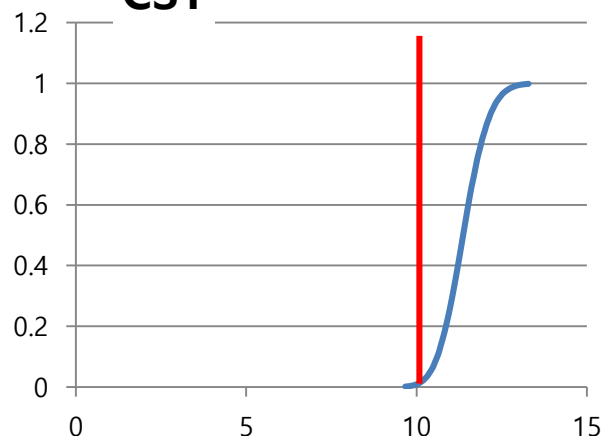
- Hydrodynamic force에 의한 구조물 파손 시범 평가



Breakwater



CST



SSC별 쓰나미 주요 파손 모드 검토

계통	파손 모드 검토	비고
필수해수계통	<ul style="list-style-type: none"> Pump house (환기구, 창문) 손상/침수 부유물 등에 의한 ESW Intake 파손 	<ul style="list-style-type: none"> Ground Level에서 1m
AAC DG 건물	<ul style="list-style-type: none"> 출입문 파손 환기구/창문 침수 	<ul style="list-style-type: none"> 방수문 약 2.5m
EDG 실	<ul style="list-style-type: none"> 출입문 파손 환기구/창문 침수 Diesel Oil Storage Tank 파손 	<ul style="list-style-type: none"> 외벽은 방수문 약 2.5m 지하에 있으며 파손 가능성은 없음
일차 보조건물	<ul style="list-style-type: none"> 출입문 파손 	<ul style="list-style-type: none"> Ground Level에서 50cm 이며 방수문 아님
이차 보조건물	<ul style="list-style-type: none"> 출입문 파손 	<ul style="list-style-type: none"> Ground Level에서 50cm 이며 방수문 아님
터빈건물	<ul style="list-style-type: none"> 출입문 파손 환기구 침수 	<ul style="list-style-type: none"> 방수문 아님 거의 바닥에 환기구가 다수 있음
주변압기	<ul style="list-style-type: none"> 침수 	<ul style="list-style-type: none"> Ground Level에서 50cm
CST	<ul style="list-style-type: none"> 해일에 의한 파손 	<ul style="list-style-type: none"> 해일이 부지를 넘으면 파손 가능
기타	<ul style="list-style-type: none"> 부지 높이 	<ul style="list-style-type: none"> 10m

쓰나미 높이별 취약성 예비 평가

- 재해도 빈도가 낮아 보수적으로 가정
- 방수문 설치는 고려하지 않은 예비 평가 단계

Tsunami 높이	해당 SSC	비고
< 5m	N/A	- 발전소 영향 없는 것으로 가정
5m ~ 10m	ESWS	- 해일에 의한 ESWS intake 막힘 또는 파손(*) - Breakwater (방파제) 파손(*)시 ESWS intake 파손 가정 - Drawdown시 ESWS pump cavitation (고려하지 않음)
10m ~ 11m	Main transformer (~ 50cm) ESWS (~ 1m) PAB (~ 50cm) SAB (~ 50cm) TB (< 50cm) CST	- Main transformer 침수 → 소외전원 상실 (침수 가정) - ESWS 창문 넘으면 침수로 ESWS 손상 (침수 가정) - PAB, SAB, TB는 침수 가능성 있음(**) - CST 파손 가능성 평가(*) - AAC DG/EDG 는 방수문으로 침수 가능성 적음 - 터빈 건물은 침수 가정 (2차측 전기 및 MFWS 이용불능)
11m ~ 12m	PAB, SAB, TB 침수 가능성(**) CST 파손 가능성 커짐(*)	- PAB 침수시 PAB 100' 내의 소내 전원계통 상실 및 복구 불능
12m ~ 13m	EDG (환기구 ~ 2.5m) AAC DG (환기구 ~ 2.5m)	- EDG는 ESWS 손상으로 이용불능 → 별도 평가 불필요 - AAC DG Room 침수 - 12m 이상 쓰나미에 모두 침수 가정

*) 취약도 평가 결과 이용

**) 보수적으로 파손 확률 가정

쓰나미 PSA

쓰나미 시나리오 분석

- Tsunami 파고에 따른 2개의 사고 경위 분석
 - 5m 이상 10m 이하
 - ESW Intake 손상 가능성 (ESW, Breakwater 취약도 평가 결과)
 - 10m 이상
 - 10m 이상
 - Main Transformer 침수 → 소외전원 상실 / 비안전계통 이용불능 가정
 - ESW 침수 가정
 - 10~12m
 - PAB 침수 가능성 (침수 확률 가정)
 - CST 파손 가능성 (취약도 평가 결과)
 - 12m 이상
 - 보수적으로 모든 안전계통 이용 불능 가정 → 직접 노심손상 발생
- 주요 가정 사항
 - 쓰나미 빈도가 낮아, 취약도를 보수적으로 간단하게 가정
 - 5m 이하에서는 발전소 손상기기 없는 것으로 가정
 - Portable Generator로 DC 충전 가능한 것으로 가정
 - CST Refill 가능한 것으로 가정

쓰나미 시나리오 분석

- 1차 시나리오 개발 : 쓰나미에 영향받는 주요 SSC 모두 표시
 - 쓰나미에 의한 전반적인 SSC 영향을 평가하는 시나리오 개발
 - 일부 시나리오는 바로 노심손상 (Sequence 5, 6, 7)
 - 일부 시나리오는 추가 시나리오 개발 (Sequence 2, 3, 4)

Tsunami	ESWS	Flood over yard	Tsunami over AAC	Offsite Power	Emergency DG	PAB Flooded (SI, AFW, Battery)	AFWS CST	AAC DG	Seq #	State
Tsunami	ESWS	YARD	HIGH-TS	EP	EDG	PAB	CST	AAC		
<div> <div>%TS</div> <div> <div>TS-ESWS</div> <div> <div>TS-YARD</div> <div> <div>TS-HIGH</div> <div> <div>TS-Y-PAB</div> <div>TS-Y-CST</div> <div>TS-Y-AAC</div> </div> </div> </div> </div> </div> <div>부지고 이상</div> <div>12~13m 이상</div>									1	ok
									2	to TLOCCW
									3	to TLOCCW, SBO
									4	to TLOCCW, TSBO
									5	cd
									6	cd
									7	cd

주요 가정

- 2차 비안전 계통은 모두 상실되는 것으로 가정
- ESWS 상실이 아닌 경우, 발전소에 큰 영향 없으므로 분석에서 제외
- ESWS 상실시
 - AFW TDP 외의 주요 펌프들은 냉각 상실로 운전 불능. EDG 역시 운전 불능
 - Switchgear room 등의 냉각은 portable fan으로 수행 가능
 - PAB Flood 되면, 모든 주요 SSC 손상 (SI, AFW 등 펌프들, 배터리 등 침수)

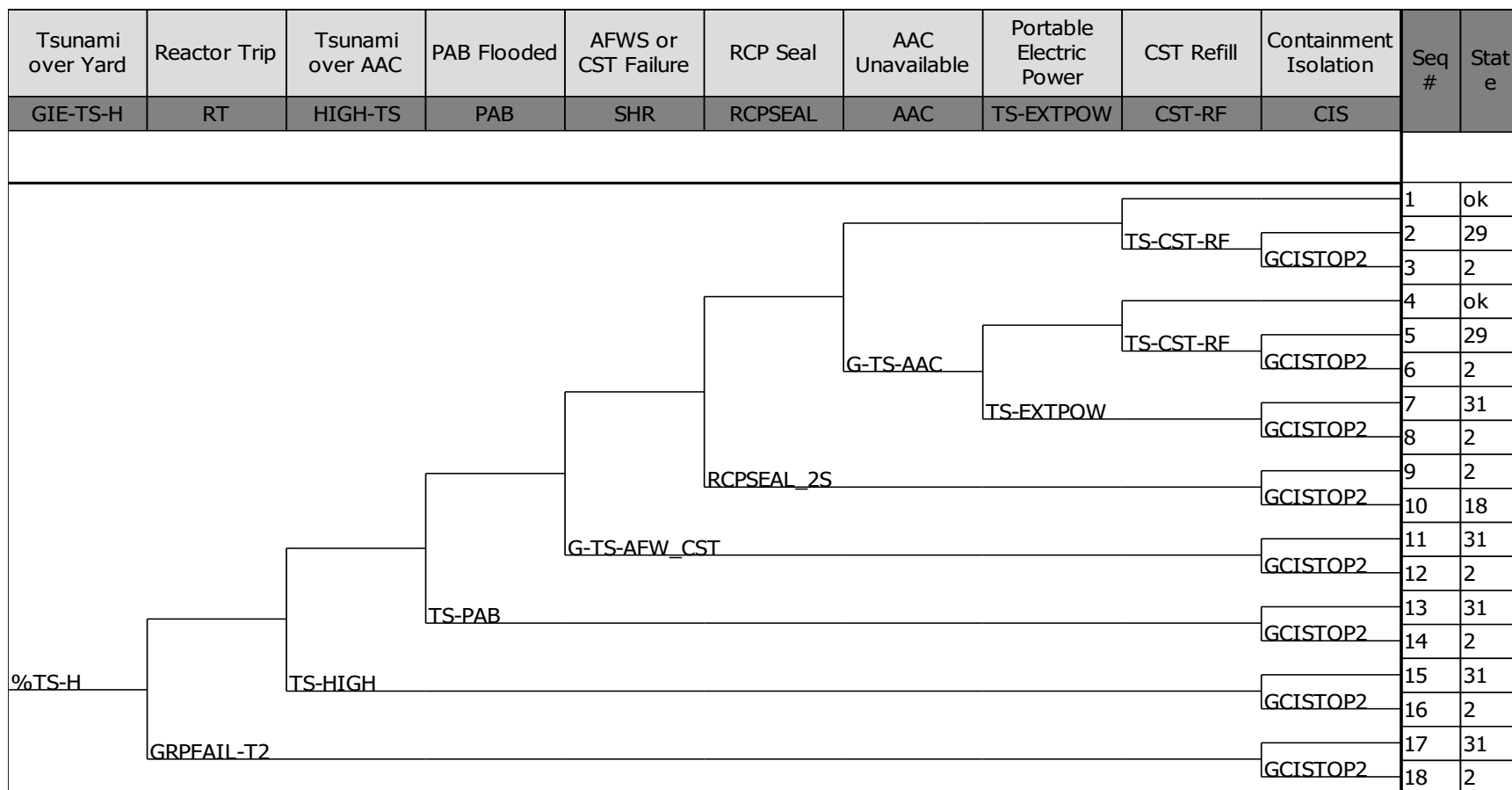
쓰나미 시나리오 분석

- TS-L 초기사건 : 쓰나미 파고 5m 이상 10m 이하
 - 내부사건 Total Loss of ESW/CCW와 동일한 사고 시나리오

Tsunami below Yard	ESWS Failure	Reactor Trip	Deliver AFW Using TDPs	RCP SEAL	Containment Isolation	Seq #	State
GIE-TS-L	ESWS	RT	SHR	RCPSEAL	CIS		
<pre> graph TD TS_L["%TS-L"] --> TS_ESWS["TS-ESWS"] TS_L --> GRPFAIL_T2["GRPFAIL-T2"] TS_ESWS --> GSHR5["GSHR5"] TS_ESWS --> RCPSEAL_2S["RCPSEAL_2S"] GSHR5 --> GCISTOP2_1["GCISTOP2"] RCPSEAL_2S --> GCISTOP2_2["GCISTOP2"] GRPFAIL_T2 --> GCISTOP2_3["GCISTOP2"] </pre>						1	OK
						2	OK
						3	18
						4	2
						5	31
						6	2
						7	31
						8	2

쓰나미 시나리오 분석

- TS-H 초기사건 : 쓰나미 파고 10m 이상
 - PAB 침수 가능성
 - AAC 침수 가능성, Portable 전원 고려
 - CST 파손 가능성 (부유물로 인한 손상)
 - CST 고갈 후 외부 충수 (CST Refill)



쓰나미 PSA 정량화 결과

• 주요 시나리오

- 10m 이상 쓰나미 발생, PAB 침수 : 50.6%
- 12m 이상 쓰나미 발생 : 26.6%
- 5~10m 쓰나미 발생, AFW TDP 상실 : 12.6%
- 10m 이상 쓰나미 발생, CST 파손 : 4.5%
- 10m 이상 쓰나미 발생, CST Refill 실패 : 3.4%
- 5~10m 쓰나미 발생, RCP Seal 파손 : 1.9%

쓰나미 높이	발생빈도	CDF (%)
%TS-H ($\geq 10\text{m}$)	1.60E-7	85.5%
%TS-L (5~10m)	2.40E-5	14.5%

• Insight

- 부지고를 넘는 경우
 - 쓰나미 높이가 지배적 (주요 SSC 손상 가능성 높음)
 - 전원 복구, CST 충수 필요
 - 방수문 유무가 중요
- 부지고를 넘지 않아도, ESWS 손상으로 인한 CDF가 15% 정도 차지

*) CDF : 노심손상빈도

다수기 쓰나미 PSA

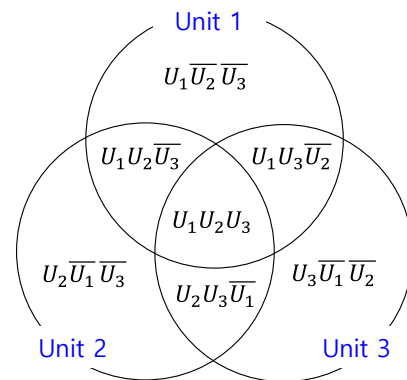
다수기 쓰나미 PSA

- 다수기 쓰나미 PSA 시범 분석
- 주요 가정
 - 한 부지에 6개의 동일한 OPR1000 원전
 - 부지고 : 10m 동일
- 분석 방법
 - KAERI 개발 다수기 PSA 방법론

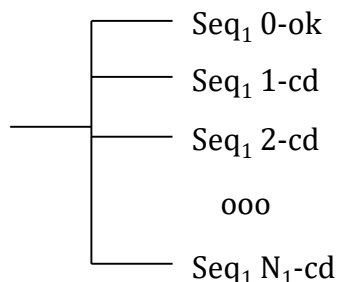
다수기 PSA 방법론 개요

• 다수기 PSA

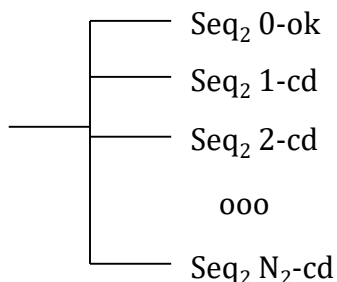
- 호기별 사고경위의 모든 조합 평가
- 주요 시나리오 도출
- 실패하는 호기수별 / 주요 시나리오 노심손상빈도 평가



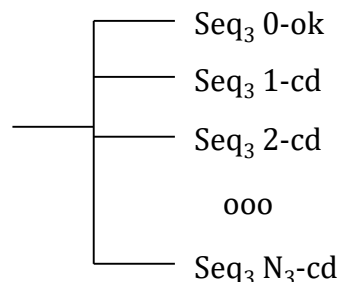
Unit 1 Sequences



Unit 2 Sequences



Unit 3 Sequences



다수기 PSA 모델의
상위 논리

각 호기 PSA 모델

호기간 의존성
(초기사건, 공유계통,
공통원인고장,
지진상관성, 인적요인 등)

다수기 PSA 모델

시나리오 빈도
정량 분석

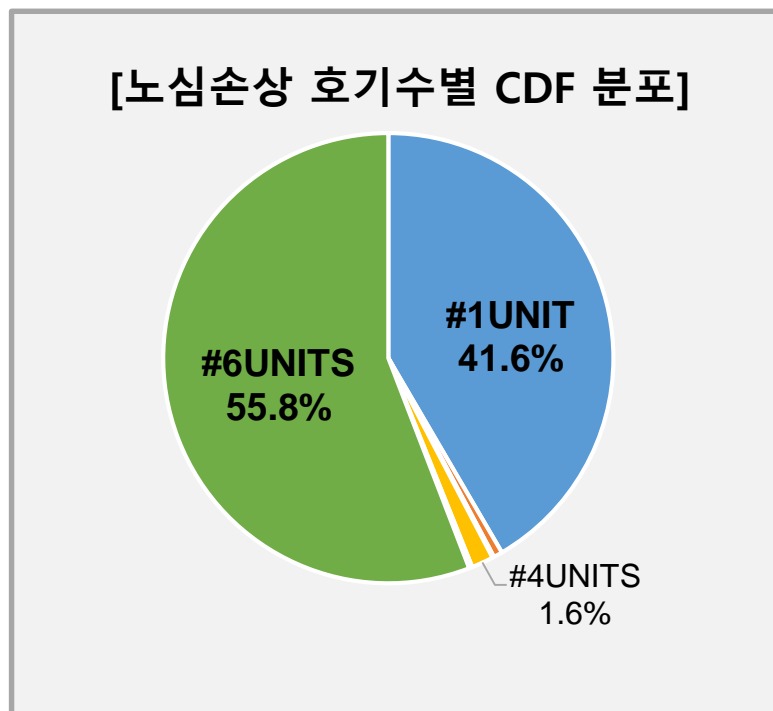
(1단계 다수기 시나리오 :
Unit # + Scenario #)

다수기 쓰나미 PSA 모델링 및 가정사항

- 다수기 PSA 모델링
 - 동일 노형의 6개 원전 모델 결합
 - 호기간 의존성 모델 추가
 - 각 호기에 동일한 쓰나미 발생
 - 5~10m 쓰나미, 10m 이상 쓰나미로 분리하여 평가
- 가정 사항
 - 호기간 종속성 가정
 - 5~10m 쓰나미로 인한 ESWS 손상확률, 10m 이상 쓰나미로 인한 PAB 침수, CST 파손, CST Refill 실패, 이동형 전력 이용 실패확률은 6개 호기 완전 종속으로 가정
 - 호기간 공통원인고장 (CCF)
 - 단일 호기 모델의 중요도(F-V) 결과를 반영하여 보조급수 터빈구동펌프, 보조급수 터빈 증기공급밸브(MS-109/110), 보조급수 터빈구동 기동밸브(AT-009/010)에 대해 모델 추가 (CCCG=12)
 - AAC 전원
 - Unit 1와 Unit 3에만 연결 가능한 것으로 가정 (한울 부지: U1~2, U3~6 1개씩 공유)

다수기 쓰나미 PSA 정량화

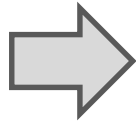
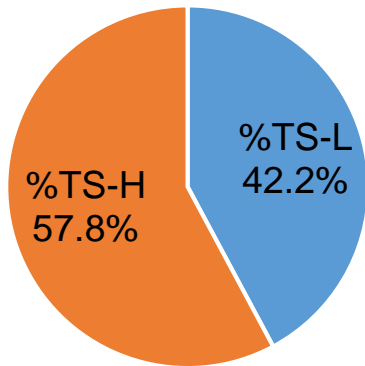
- 다수기 쓰나미 모델 정량화 결과
 - 6개 호기 동시 쓰나미 발생으로 인한 노심손상빈도 (CDF)
 - 정량화 코드 (AIMS-PSA Release 2, FTREX 1.8)
 - Cutoff Value = $1e-14$
 - 전체 CDF = 단일호기 쓰나미 CDF 대비 약 2.2배 수준
 - 매우 보수적인 취약도 가정 → 6개호기 실패 빈도 높음



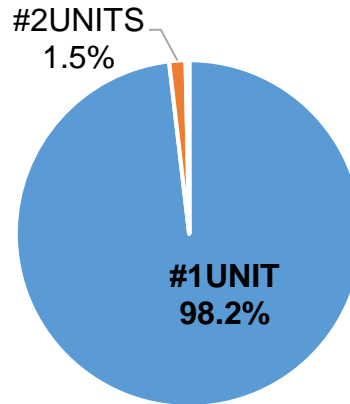
다수기 쓰나미 PSA 정량화

- 다수기 쓰나미 PSA 정량화 결과
 - 초기사건별 CDF 및 노심손상 호기수 분포
 - 5~10 m 쓰나미(%TS-L)의 경우, 1개 호기만 노심손상되는 비율이 약 98%
 - 10 m 이상의 쓰나미(%TS-H)의 경우, 6개 호기 모두 노심손상되는 비율이 약 97%

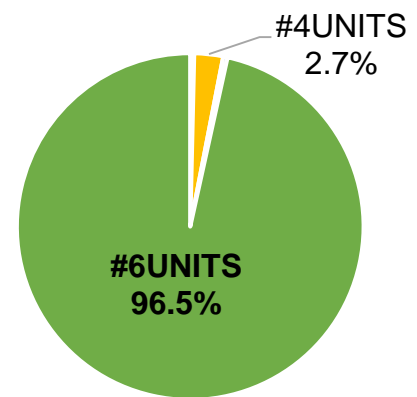
[초기사건별 CDF 분포]



[%TS-L (5~10m)]



[%TS-H (10m 이상)]



결론

결론

- **쓰나미 PSA를 위한 기반 구축 및 시범 평가**
 - 다수기 쓰나미 PSA 전반적인 평가 방법 구축
 - 쓰나미 재해도, 쓰나미 취약도, 쓰나미 PSA, 다수기 쓰나미 PSA
 - 제한점
 - 첫번째 쓰나미 재해도 연구
 - 낮은 재해도를 고려하여 간단하게 보수적으로 취약도 가정
 - 후쿠시마 후속대책 고려하지 않음
- **장기 연구 필요**
 - 쓰나미 재해도
 - 확률론적 쓰나미 재해도 연구
 - 각 부지별 쓰나미 재해도 평가
 - 쓰나미 취약도
 - 방수문 설치 등 후쿠시마 후속대책 반영
 - 주요 SSC의 취약도 평가

감사합니다.
