

다수기 리스크 평가기술 연구현황

-The status of Research for Multi-unit Risk Assessment Methodology-

한국원자력연구원
리스크환경안전연구부

임호곤

2018. 5. 16

목 차

1. 배경
2. 4차 원연사 연구 요약
3. 5차 원연사 연구 계획 및 현황
4. 결론

배경

- 일본 후쿠시마 원전 사고의 경험
(2011년 3월)
- 우리나라의 경우, 모든 원전 부지(고리, 월성, 한빛, 한울)가 6기 이상의 다수기 부지에 해당
 - 국내 원전 부지에서 어떠한 유형의 다수기 사고가 어느 정도의 빈도로 발생 가능하고, 그 결과는 어떠한지를 이해할 필요가 있음.
 - 국내에서 다수기 리스크가 무시할만한 수준이 아니라면, 리스크를 줄이기 위한 해결방안을 마련해야 함.



다수기 PSA 주요 현안

- Level-1 PSA 관점
 - 시나리오의 조합 + 정량화
 - 다수기 사고 시나리오를 어떻게 표현하고 모델할 것인가?
 - 수많은 시나리오의 조합을 어떻게 정량화할 것인가?
 - Dependency
 - 자원 공유 모델 (여러 호기가 공유하는 계통 - AAC DG 등)
 - 공통원인고장
 - Seismic Correlation, CCF (Inter-Unit, Intra-Unit)
 - Human performance (HRA, Organizational Factor)
 - Dynamics
 - 다양한 사고시나리오의 시간 종속성
 - 전출력 + 정지저출력 운전모드 조합(부지 운전모드)
 - 선행호기 사고에 따른 타호기의 영향(dependency)
- Risk 관점
 - $N \times \text{Source term} \rightarrow N \times \text{Risk} ?$
 - Safety Goal, Risk Metrics
 - Uncertainty, Too conservative approach

4차 원자력 기술개발 사업의 다수기 평가기술개발 결과 요약

다수기 리스크의 주요 이슈

Selected from <Summary Report of the CNSC International Workshop on Multi-unit PSA>
Ottawa, Canada, 2014

Technical Area	Technical Issues and Challenges
MUPSA infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of experience and guidance for performing MUPSA
Accident sequence modelling	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-unit CCF and casual dependencies, including functional, human and spatial dependencies • CCF models and supporting data analysis to address interunit and intra-unit CCFs • Adverse impacts of single reactor accident on other units • Operator actions may be adversely affected by multi-unit interactions • Human reliability models and analyses for multi-unit accidents • Proliferation of multi-unit combinations • Limitations of static PSA modelling approaches
Accident progression and source term characterization	<ul style="list-style-type: none"> • Severe accident models to treat multi-unit and fuel storage accidents • New release categories that adequately describe the releases from multi-unit accidents
Evaluation of radiological consequences	<ul style="list-style-type: none"> • Consequence models to describe releases from multi-unit and multi-facility accidents • Different points of release from the plant, possible differences in time of release and release energies for plume rise considerations

다수기 리스크의 주요 이슈

Selected from <Summary Report of the CNSC International Workshop on Multi-unit PSA>
Ottawa, Canada, 2014

Technical Area	Technical Issues and Challenges
Site-based safety goals, risk metrics, risk integration and Interpretation	<ul style="list-style-type: none">• Additional risk metrics• Aggregating risk contributions across different reactor units and facilities, single- and multi-unit and facility accidents, hazard groups and operating states• Differences in level of realism/conservatism, level of detail in modelling, and uncertainty treatment• Methods for comparing calculated risks against existing and new site-based safety goals.• Multi-unit site-based acceptance criteria for evaluating the integrated risks from a multi-unit site PSA.

부지 리스크 모델의 상위 구조

- 부지 손상 사건(site damage event)은 부지 내 1개 이상의 호기에 손상을 일으키는 사건으로 정의됨.

- $U_i = U_i(E_i, E_c)$

- U_i : i 호기의 손상 사건
- E_i : i 호기만 관련된 독립 사건 집합
- E_c : 부지 내 다른 호기들과 관련된 종속 사건 집합

- $S = \sum_{i=1}^n U_i$ (* 여기서 합계는 불리안(Boolean) 합에 해당)

- S : 부지 손상 사건
- U_i : i 호기의 손상 사건 ($i = 1, 2, \dots, n$)
- $f(x)$ 가 사건 x 의 발생빈도일 때, $f(S) = f(\sum_{i=1}^n U_i)$

- 1단계 및 2단계 PSA 부지 손상 사건

- 1단계 부지손상사건: U_i 가 노심손상사건으로 정의될 경우
- 2단계 부지손상사건: U_i 가 방사선원향 방출사건으로 정의될 경우

다수기 사건의 분해

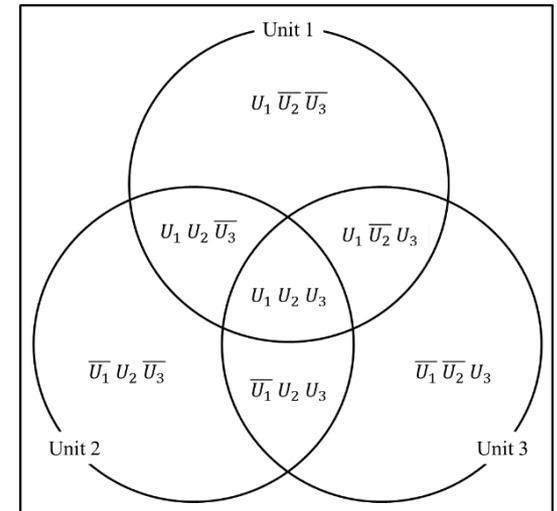
- 부지 손상 상태

- 다수기 동시 사고를 찾기 위해서는 각 사고시나리오를 배타적 사상으로 분해할 필요가 있음.
- 단일호기에서 사용하는 고장수목 정량화 방식에서는 이를 찾기 어려움

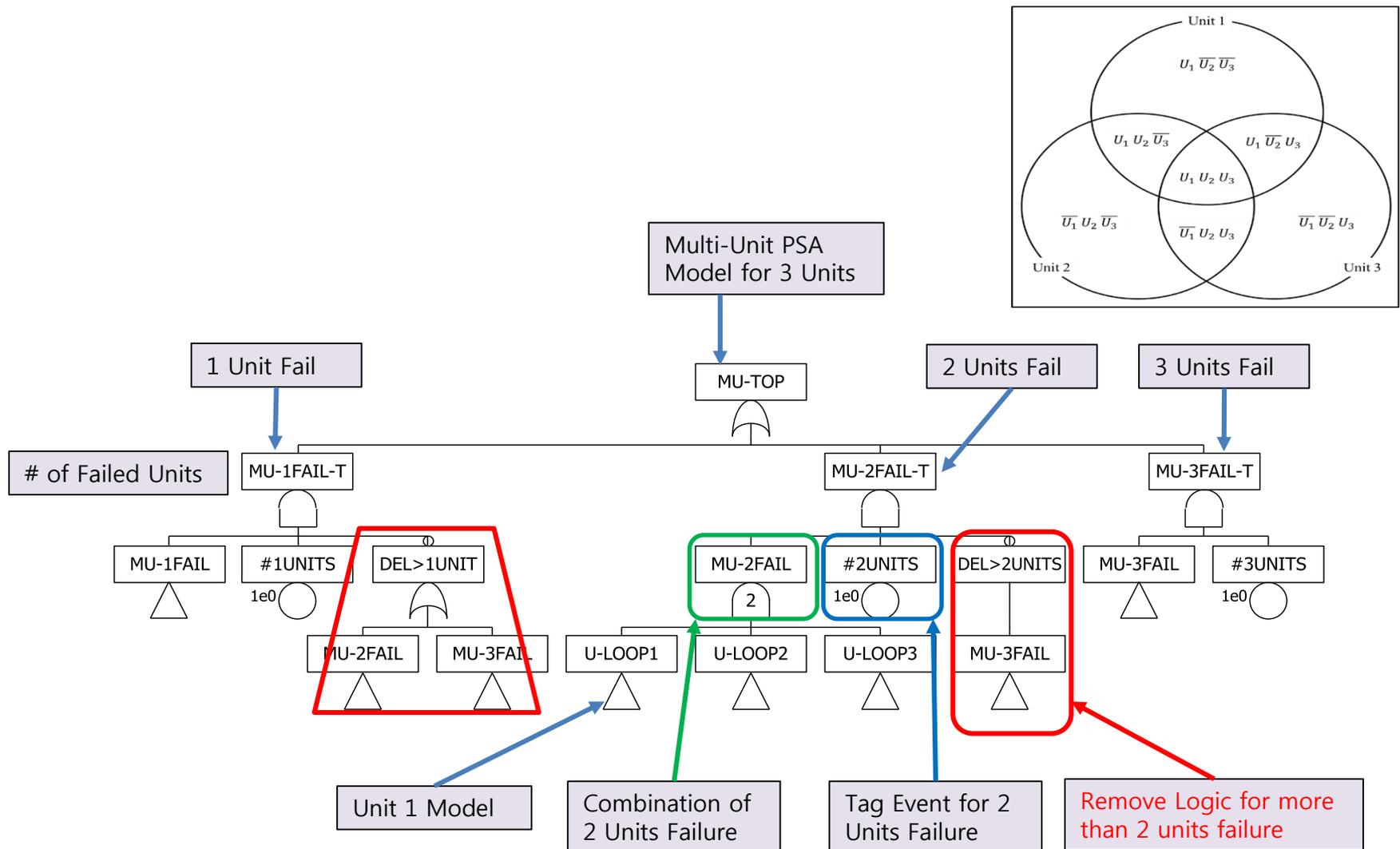
$$U_1 + U_2 = U_1 \cdot \bar{U}_2 + U_2 \cdot \bar{U}_1 + U_1 \cdot U_2$$

- 고장수목(불리안 식)의 배타적 분해

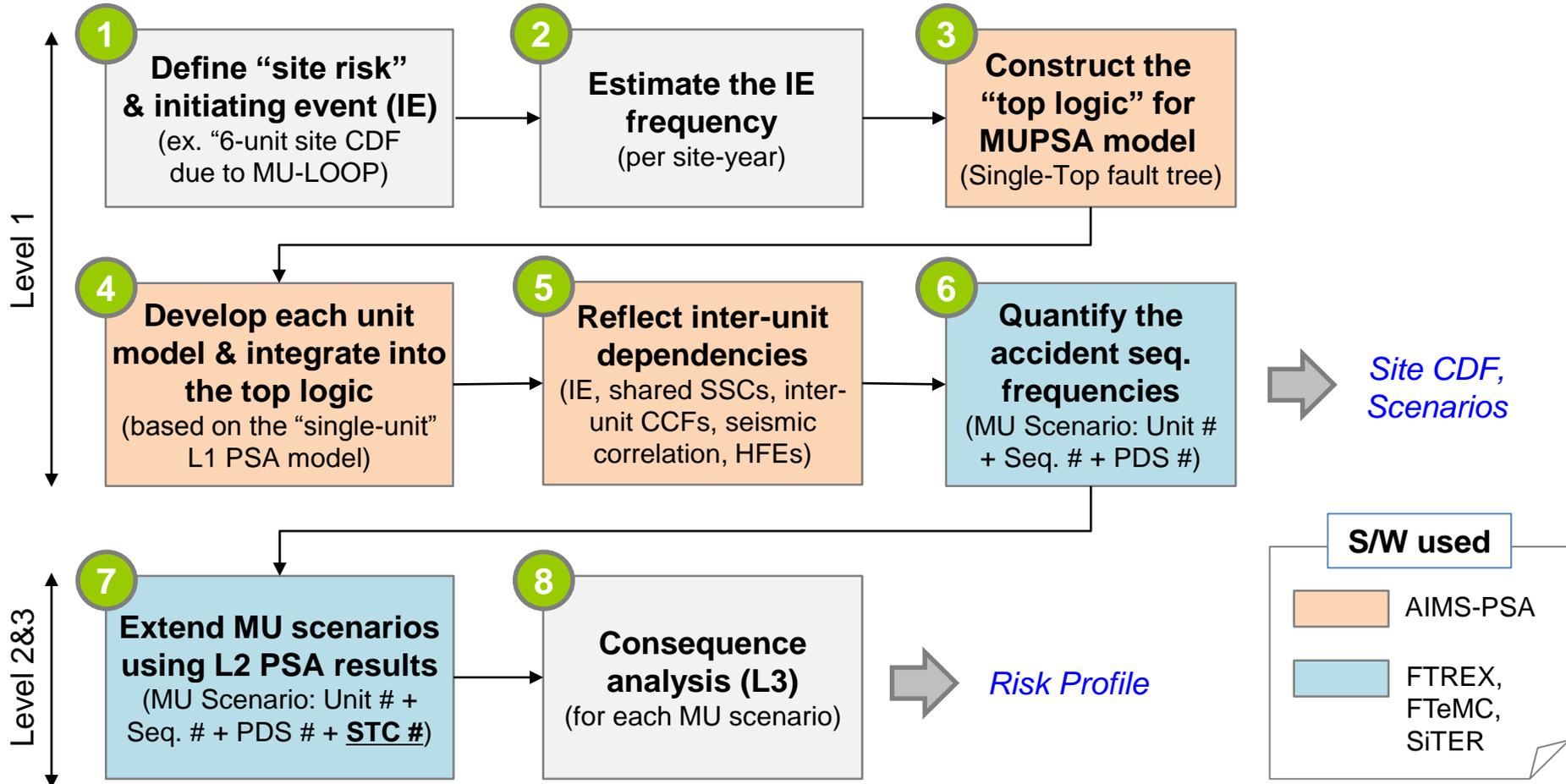
$$\begin{aligned}
 S &= \sum_{i=1}^m U_i \\
 &= \sum_{i=1}^m \left(U_i \cdot \prod_{\theta \neq i} \bar{U}_\theta \right) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \left(U_i \cdot U_j \cdot \prod_{\theta \neq i,j} \bar{U}_\theta \right) + \dots \\
 &\quad + \sum_{i=1}^m \dots \sum_{l=k+1}^m \prod_{\rho=i}^l U_\rho \cdot \prod_{\theta \neq i, \dots, l} \bar{U}_\theta + \dots + \prod_{\rho=1}^m U_\rho
 \end{aligned}$$



고장수목을 이용한 표현



다수기 리스크 평가 절차



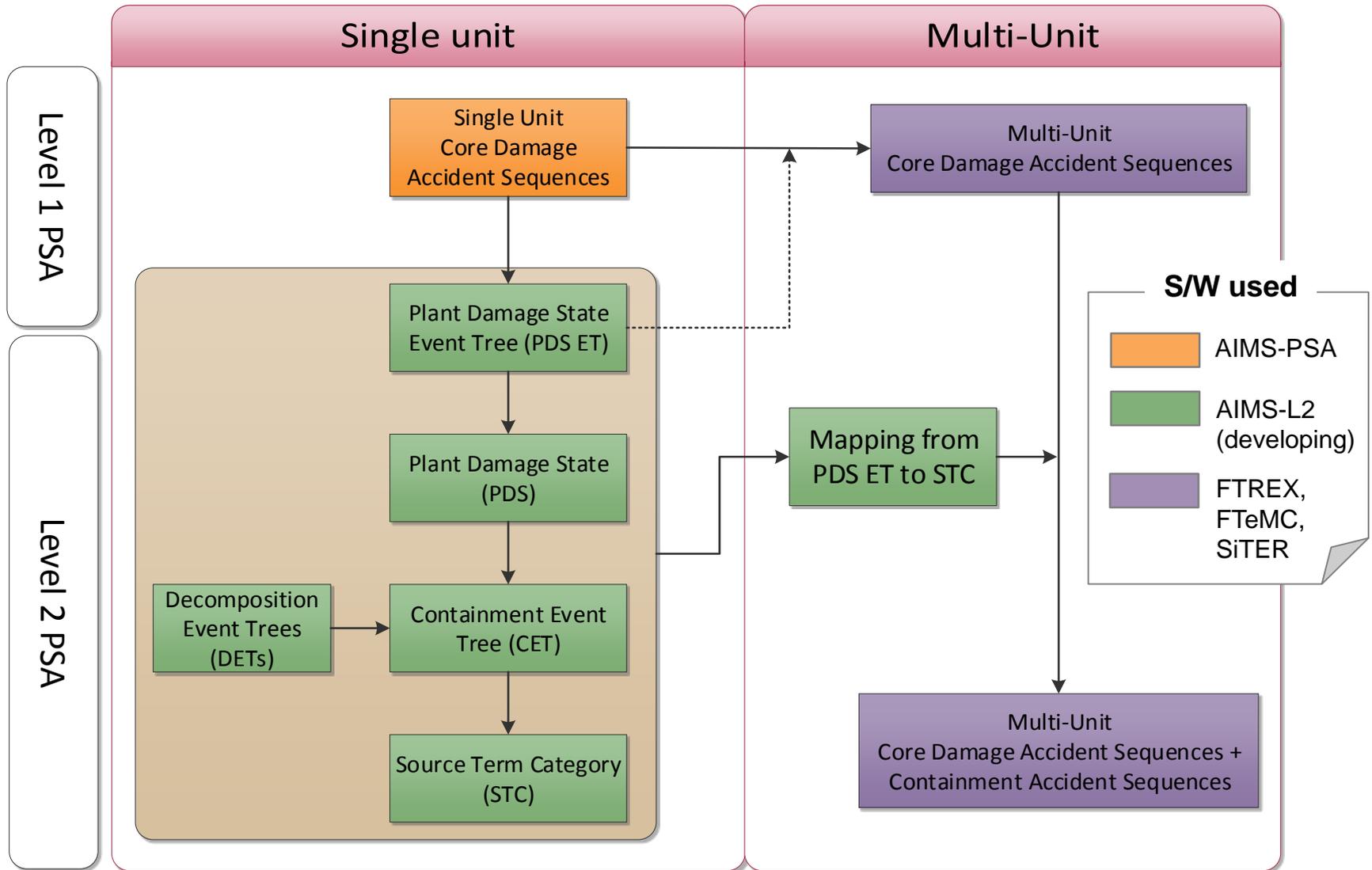
* SSCs: Structure/System/Components; CCFs: Common Cause Failures; HFEs: Human Failure Events

* FTeMC (Fault Tree estimation by Monte-Carlo); SiTER (Splitter and integrator for Total Estimation of site Risk)

호기간 종속성 처리

- 다수기 리스크 모델의 주요 종속성 반영 요구 분야
 - 공통초기사건 (ex. Seismic or Tsunamic)
 - 공유 기기, 시스템, 구조물
 - 공통원인고장 (CCF)
 - 공유자원 및 다수기 인간 신뢰도
- 공통 초기사건
 - For most of common IE, all unit in a site was treated to experience the event simultaneously
 - %S * unit 1 failure, %S * unit 2 failure
- 공유 기기, 시스템, 구조물
 - AAC DG, Discharger, Intake
- 공통원인고장
 - Inter-unit CCF
 - Correlated Fragility of SSC

다수기 Level 2 PSA 방법)



다수기 L3 PSA 방법

- 다수호기 리스크 종합 평가 기술 개발 (Development of the Integrated Risk Assessment Technology for Multiple Units), KAERI/RR-4225/2016, 2017.

Index No.	SUM CDF %									
10,000	100.0%									
Index No.	CDF %	# of CD Units	Top1	Top2	Top3	Top4	Top5	Top6	Top7	
1	15.0%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S12							
2	12.9%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S8							
3	12.1%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S2							
4	10.5%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S14							
5	9.5%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S10							
6	6.6%	1	#GIE-TS-L-3-P19-S2							
7	1.3%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S6							
8	0.9%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S4							
9	0.8%	1	#GIE-TS-L-3-P19-S10							
10	0.7%	1	#GIE-TS-L-3-P19-S14							
11	0.7%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S15							
12	0.6%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S21							
13	0.4%	1	#GIE-TS-L-3-P19-S15							
14	0.3%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2				
15	0.2%	1	#GIE-TS-L-3-P19-S8							
16	0.1%	1	#GIE-TS-L-3-P19-S12							
17	0.1%	1	#GIE-TS-L-5-P34-S16							
18	0.1%	1	#GIE-TS-H-11-P34-S12							
19	0.1%	6	#GIE-TS-H-02-P32-S2	#GIE-TS-H-02-P32-S2	#GIE-TS-H-05-P32-S2	#GIE-TS-H-05-P32-S2	#GIE-TS-H-05-P32-S2	#GIE-TS-H-05-P32-S2		
20	0.1%	1	#GIE-TS-L-3-P19-S16							
21	0.1%	1	#GIE-TS-H-11-P34-S8							
22	0.1%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
23	0.1%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
24	0.1%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
25	0.1%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
26	0.1%	1	#GIE-TS-H-11-P34-S2							
27	0.1%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S12	#GIE-TS-L-5-P34-S12						
28	0.1%	1	#GIE-TS-H-11-P34-S14							
29	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S8	#GIE-TS-L-5-P34-S12						
30	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S12	#GIE-TS-L-5-P34-S8						
31	0.0%	1	#GIE-TS-H-11-P34-S10							
32	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S2	#GIE-TS-L-5-P34-S12						
33	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S12	#GIE-TS-L-5-P34-S2						
34	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
35	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
36	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
37	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S12	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
38	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S8	#GIE-TS-L-5-P34-S8						
39	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
40	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
41	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
42	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S10	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2			
43	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S12	#GIE-TS-L-5-P34-S14						
44	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S14	#GIE-TS-L-5-P34-S12						
45	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S2	#GIE-TS-L-5-P34-S8						
46	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S8	#GIE-TS-L-5-P34-S2						
47	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S2	#GIE-TS-L-5-P34-S2						
48	0.0%	4	#GIE-TS-L-5-P34-S10	#GIE-TS-L-5-P34-S12						
49	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S12	#GIE-TS-L-5-P34-S10						
50	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S8	#GIE-TS-L-5-P34-S14						
51	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S14	#GIE-TS-L-5-P34-S8						
52	0.0%	1	#GIE-TS-H-09-P19-S2							
53	0.0%	1	#GIE-TS-L-3-P19-S6							
54	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S2	#GIE-TS-L-5-P34-S14						
55	0.0%	2	#GIE-TS-L-5-P34-S14	#GIE-TS-L-5-P34-S2						
56	0.0%	4	#GIE-TS-H-07-P32-S2	#GIE-TS-H-07-P32-S2						

빈도와 결말의 mapping

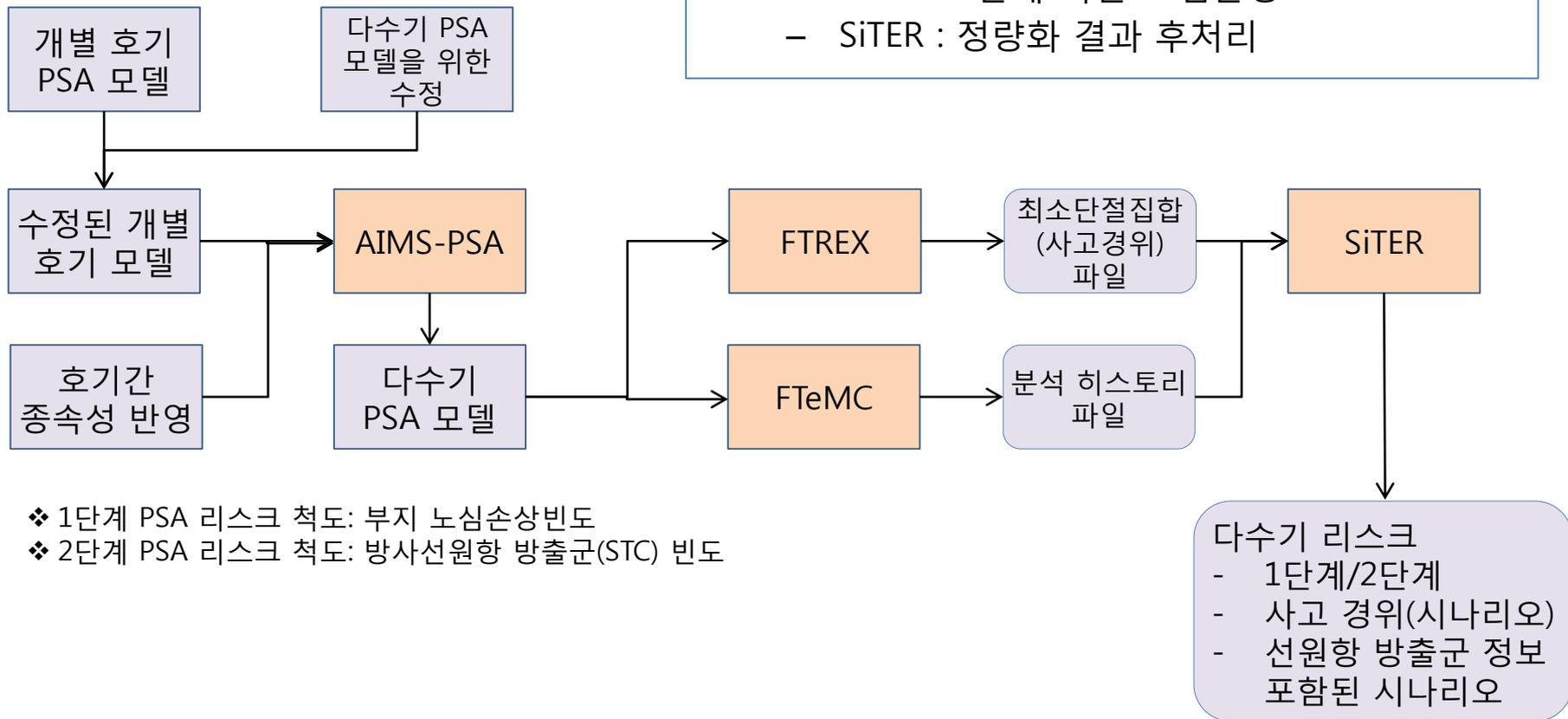
현실적인 노력을 들여 구축해 놓은 결말표

각 시나리오 리스크의 총합으로 한 초기사건의 부지 리스크 계산 가능

1&2단계 PSA로부터 계산된 빈도

다수기 리스크 분석용 전산체계

- 다수기 리스크 평가 핵심 소프트웨어
 - AIMS-PSA : 모델 개발 (사건수목/고장수목)
 - FTREX : 사고경위별 발생빈도 계산
 - FTeMC : 몬테-카를로 샘플링
 - SiTER : 정량화 결과 후처리



시범 부지 다수기 리스크 평가

- 시범 부지: 부지 내 6개 호기가 존재하며, 동해안에 위치함
 - 이 중 2개 호기는 프랑스 프라마툼(Framatome) 노형 원전
 - 나머지 4개 호기는 국내 표준형 원전 (OPR-1000)
 - 부지 근처에 2개 호기 추가로 건설 중
- 평가 대상 다수기 초기사건
 - 2개 이상 호기에서 독립적인 초기사건의 연속 발생(72시간 이내)
 - 다수기 소외전원상실사고 (Loss of offsite power)
 - 다수기 최종열제거원상실사고 (Loss of ultimate heat sink)
 - 다수기 지진 (Earthquake)
 - 다수기 쓰나미 (Tsunami)
- 부지 내 6개 호기 모두 “국내 표준형 원전(OPR-1000)”이라고 가정하고 평가함
 - 이는 OPR-1000 원전에 대한 PSA 모델만 가용했기 때문이며, 현재의 방법을 적용해 서로 다른 노형의 원전이 포함된 부지의 리스크를 평가하는 것도 가능함.

다수기 리스크 모델에 사용된 단위 PSA 모델

초기사건	전출력 PSA			정지저출력 PSA		
	1단계	2단계	3단계	1단계	2단계	3단계
내부사건	사용됨			이용 가능		
지진						
내부화재						
내부침수						
쓰나미						
태풍						
사용후핵연료 저장조						

* 정지저출력 PSA의 경우, 다수기 소외전원상실사고(LOOP) 발생에 의한 노심손상빈도 평가에만 시범적으로 활용함. (다른 다수기 초기사건 모델에서는 고려하지 않음)

독립사건 연속발생에 의한 다수기 리스크

- 호기 간 “완전 독립” 가정 시,
k개 호기 모두 노심손상되는 빈도

$${}_6P_k \times \left(\sum_{i=1}^n f(IE_i) \times CCDP_i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n Pr(IE_i) \times CCDP_i \right)^{k-1}$$

- 호기 간 “완전 종속” 가정 시,
k개 호기 모두 노심손상되는 빈도

$${}_6P_k \times \left(\sum_{i=1}^n f(IE_i) \times CCDP_i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n Pr(IE_i) \times 1 \right)^{k-1}$$

<극한 가정하에서 독립사고의 다수기 리스크 예시>

노심손상 호기수	경우의 수 (${}_6P_k$)	1개 호기 노심손상빈도 대비	
		완전 독립 가정 시	완전 종속 가정 시
1	6	-	-
2	30	< 0.0001%	3.58%
3	120	< 0.0001%	0.10%
4	360	< 0.0001%	< 0.01%
5	720	< 0.0001%	< 0.01%
6	720	< 0.0001%	< 0.01%

❖ 상세분석 수행 (2개 호기 독립사고)

- 공유하는 설비 조사 및 반영
- 운전원 행위 종속성(소외전원상실시 회복 조치)
- 공통원인고장에 대한 영향 반영

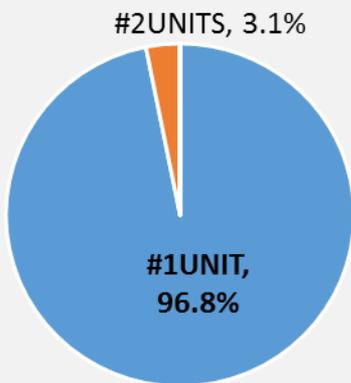
❖ 분석 결과

- 발전소 정전사고(SBO)가 주요 원인
- 1개 호기 노심손상빈도의 **0.0025% (매우 낮음)**

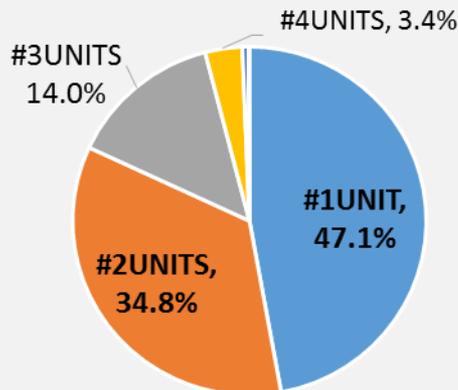
지진사건 다수기 리스크

- 평가 결과 (* 아래 그래프는 호기간 상관계수 0.3 가정 시의 결과)
 - 지진 크기가 클수록 다수기 노심손상 사고경위의 비중 커짐 (예. 0.2~0.4g 구간: 97%가 1개 호기만 노심손상, 1.0~1.2g 구간: 85%가 6개 호기 모두 노심손상)
 - 호기간 상관계수가 0.3보다 커지면, 다수기 노심손상 사고경위 비중이 더 커짐.

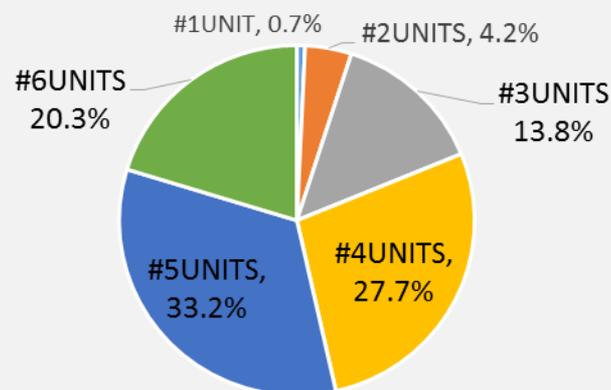
[최대지반가속도: 0.2~0.4 g]



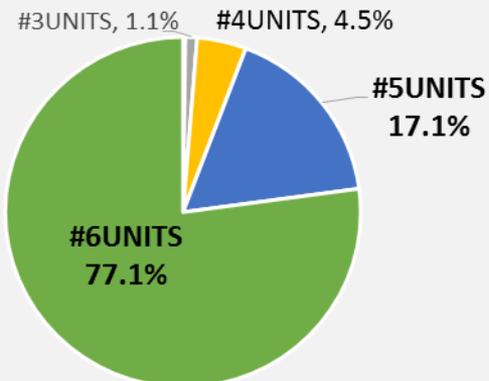
[0.4~0.6 g]



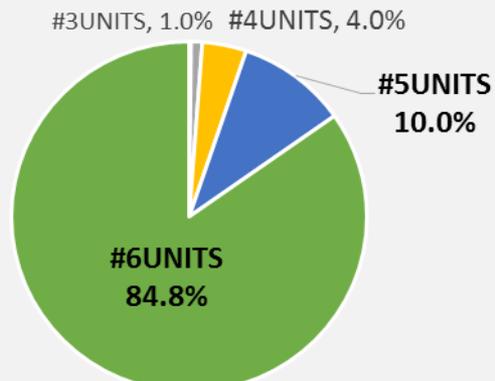
[0.6~0.8 g]



[0.8~1.0 g]

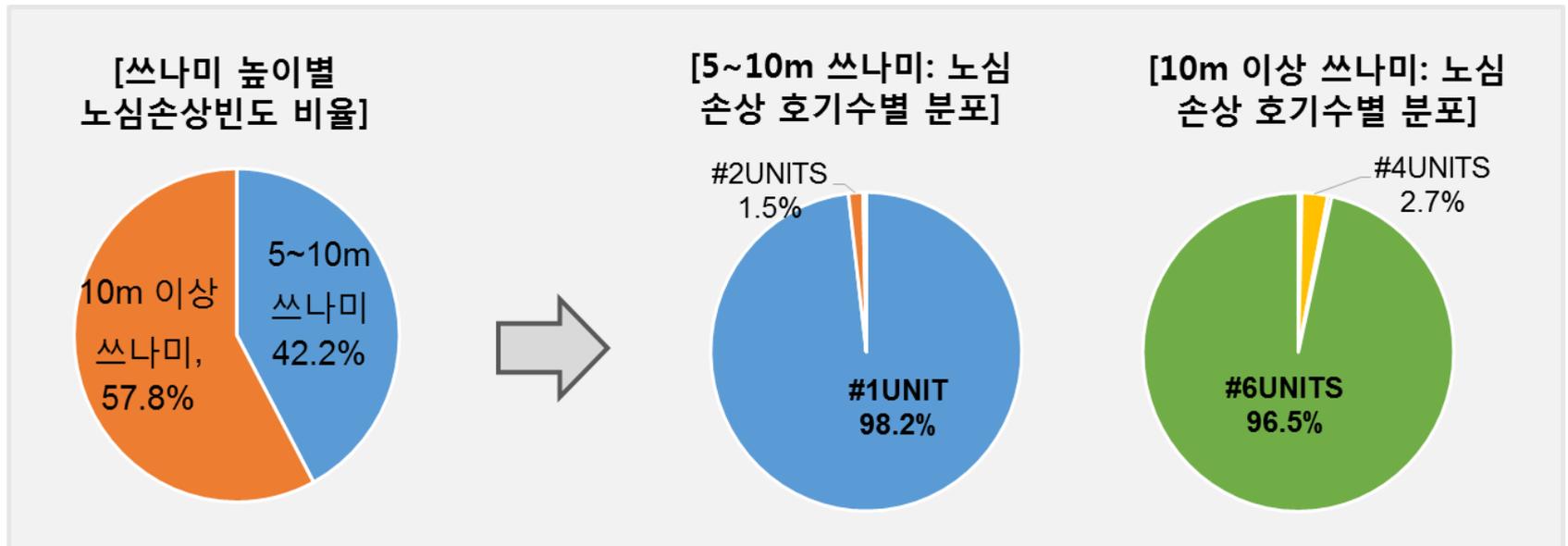


[1.0~1.2 g]



쓰나미 다수기 리스크

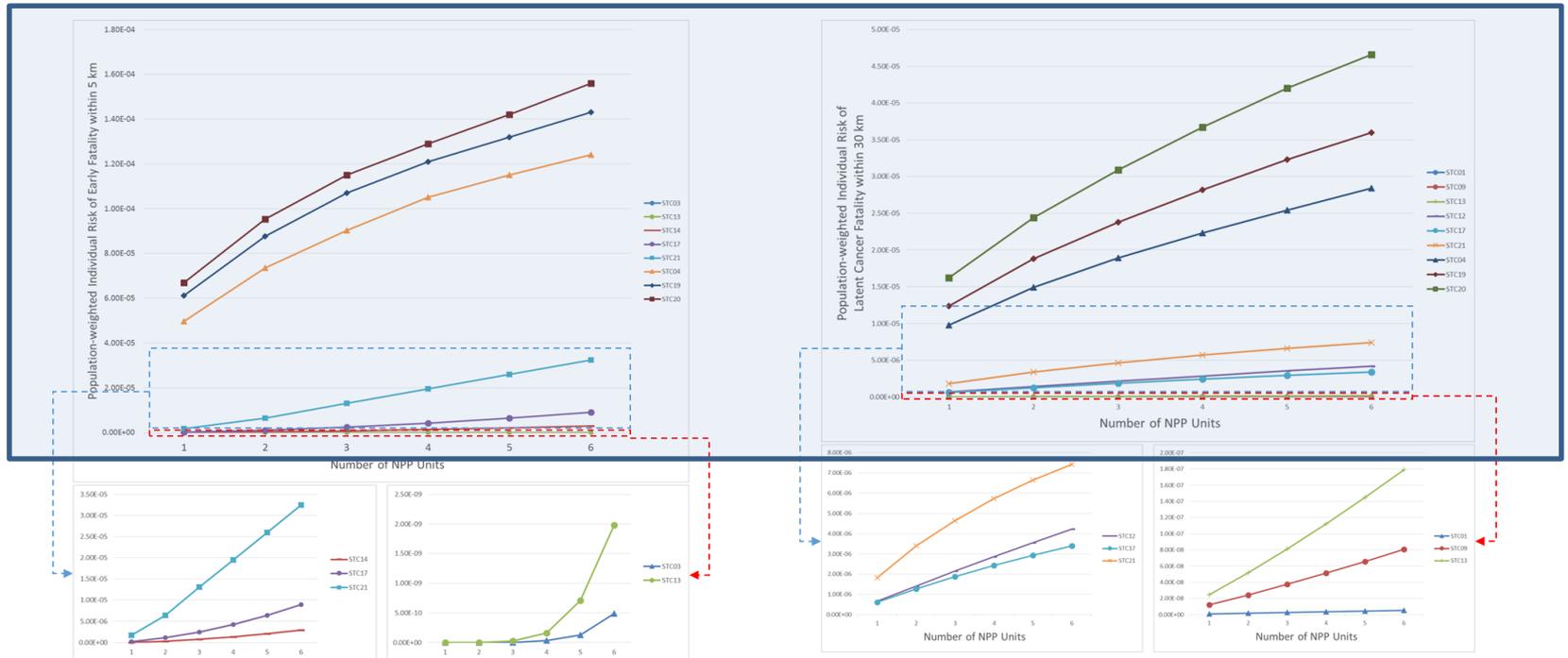
- 모델 방법 및 가정사항
 - 지진 리스크 평가와 동일한 접근방법 사용
 - 6개 호기의 각 구조물/기기가 위치한 높이가 모두 동일하며, 침수시 파손 가정
- 평가 결과
 - 10m 이상 쓰나미 발생빈도: $2.4E-07$ /년으로 평가 → 불확실성 수준 높음
 - 5~10m 쓰나미의 경우, 98%가 1개 호기만 노심손상 발생 (1차기기냉각해수계통 손상 등 원인)



다수기 사고에 의한 결말분석

• 다수기 3단계 PSA를 위한 접근방법

- 단일호기 PSA에서 가장 결과가 심각한 선원항 방출군이 손상된 호기 수를 곱한 양만큼 누출된다고 가정
- 보다 현실적인 결과를 얻기 위해서는 3단계 PSA 전산코드 및 일부 입력 데이터의 고유화 (localization)가 필요함.



조기사망: 보건영향평가 이론 및 모델에 근거하여 저선량에서는 증가 추이가 높고 고선량에서는 증가추이가 포화(saturation) 되는 경향을 보임

암사망: 문턱없는 선형비례(LNT: linear no-threshold) 모델에 기반을 두고 있는 만큼 조기사망에 비하여 상대적으로 선형적인 추이를 보임

5차 원연사 연구계획 및 현황

5차 원연사 다수기 분야 연구개발 목표 및 내용

최종 연구개발목표 및 연차별 연구 내용

최종 목표	<ul style="list-style-type: none"> • <u>다수기 리스크</u> 최적 평가기술 및 동 기술이 적용된 전산체계 개발 • <u>리스크 안전목표</u> 최적 평가기술 및 동 기술이 적용된 전산체계 개발 	연구 필요성	<ul style="list-style-type: none"> • 후쿠시마 사고 이후, 다수기 리스크 최적평가 필요성 증가 • 원자력안전법 개정 이후 리스크안전목표 충족을 위한 최적평가 기술 확보 시급
--------------	---	---------------	--

연구 내용	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년
다수기 리스크 최적 평가	다수기 종속성 최적평가방법 개발 대형 고장수목 최적화/정량화 방법 개발	다수기 사고의 등적특성 분석방법 호기별 운전모드를 반영한 다수기 리스크 평가방법	다수기 리스크 평가용 종합 전산체계 개발	다수기 리스크 평가용 종합 전산체계 검증 및 개선	
리스크 안전목표 최적 평가	1단계 PSA 최적 모델링 방법 구축			심층방호 기반 안전성 개선기술 개발	
	2단계 PSA 신 방법 개발				
	리스크 평가용 신뢰도데이터 최적 평가방법 개발 및 검증				
	리스크 안전목표 최적평가 전산체계 개발 및 검증				

5차 원연사 다수기 분야 연구개발 현황

1차년도(2017년) 연구수행 내용 → 수행 완료

연구 내용	연구 결과	비고
다수기 종속성 최적평가방법 개발	<ul style="list-style-type: none"> 10기(unit) 이상의 원전 부지에도 적용 가능한 “호기간 공통원인고장(CCF) 분석방법” 개발 및 사례 연구를 통한 분석방법 검증 	한수원 MUPSA 과제에 적용 예정
	<ul style="list-style-type: none"> 지진 데이터 기반의 동일 구조물/기기 간 “지진 취약도 종속성 평가방법” 개발 및 사례 연구를 통한 평가방법 검증 	KNS 발표 예정 (5/18)
다수기 리스크 평가용 고장수목 최적화/정량화 방법 개발	<ul style="list-style-type: none"> Monte-Carlo 샘플링에 기반한 고장수목 최적화 및 정량화 방법 개선 (FTeMC Ver. 2.0 개발) → 기존에 비해 계산 속도 약 5~15배 향상 	KNS 발표 예정 (5/18)
	<ul style="list-style-type: none"> 고장수목 최소단절집합 정량화 방법 개선 (FTREX Ver 1.9 개발) → 대형 고장수목을 1E-13/년 이하의 절삭치에서도 충분히 계산 가능함을 확인 	FTREX 개선은 세종대 (정우식 교수) 자문

2차년도(2018년) 연구수행 내용 → 수행 중

연구 목표	연구수행 내용	비고
다수기 사고의 동적 특성 분석방법 개발	<ul style="list-style-type: none"> 선행 호기 사고에 따른 다수기 리스크 분석방법 개발 방사선원향의 시간 특성을 반영한 Level 3 PSA 분석방법 개발 	
호기별 운전 모드를 반영한 다수기 리스크 평가방법 개발	<ul style="list-style-type: none"> 정지저출력/전출력 운전의 조합에 따른 다수기 리스크 평가방법 개발 정지저출력 운전모드를 반영한 다수기 고장수목 모델링 방법 개발 	

호기간 CCF 분석방법 개발

○ CCF 모델링 방법

- **Intra-unit CCF** (동일 호기내 기기 간): **단일호기 PSA 모델 유지**
 - ✓ 일반적으로 모든 가능한 CCF 조합을 모델
 - ✓ CCCG Size가 5 이상인 경우, 단순화시켜 모델하기도 함.
- **Inter-unit CCF** (다른 호기의 기기 간): **“호기” 수준에서 모든 호기 조합 모델**
 - ✓ 호기별로 1개의 기기만 존재하는 것처럼 간주하고, 모든 가능한 조합을 모델
 - ✓ 각 호기에서 일부의 기기만 고장하는 호기간 CCF 조합은 모델하지 않음.

○ 상기 모델링 방법의 장점

- 1) 개별 호기 모델에서 Intra-unit CCF 모델을 수정할 필요 없음.
- 2) 모든 CCF 조합을 모델하는 경우에 비해 CCF 기본사건의 수가 대폭 감소하며, 이 수는 호기 내 CCCG size에 영향을 받지 않음. (10개 호기일 때, 약 1,000개)
- 3) 기존의 단순화된 방법(Beta-factor, Simplified MGL 등)을 적용할 경우와 비교할 때, 노심손상 호기수별(1, 2, ..., n) CDF/LRF의 상대적인 비율을 얻을 수 있음. (*단순화된 방법의 경우, 1개 호기만 손상이거나 전체 호기 모두 손상인 경우가 대부분을 차지)

호기간 CCF 분석방법 개발(1)

호기간 CCF 분석방법 검증: 사례연구 범위 및 방법

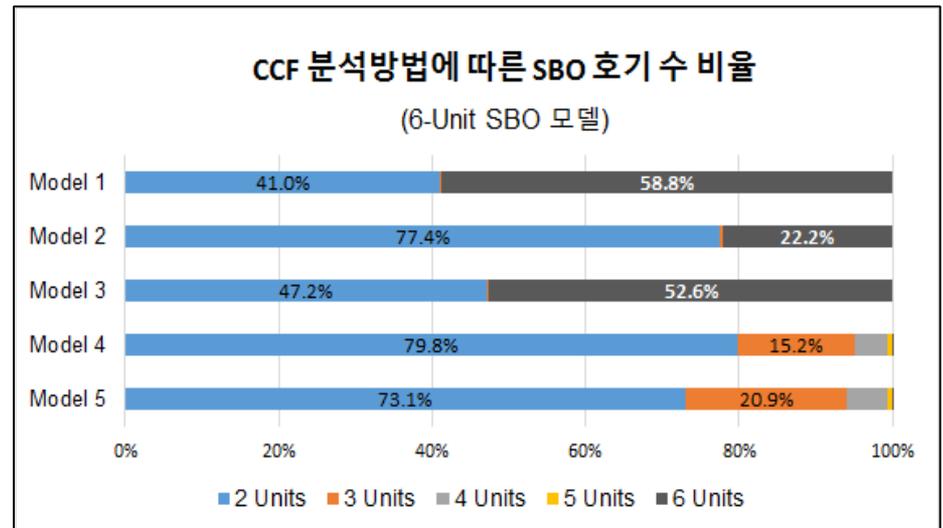
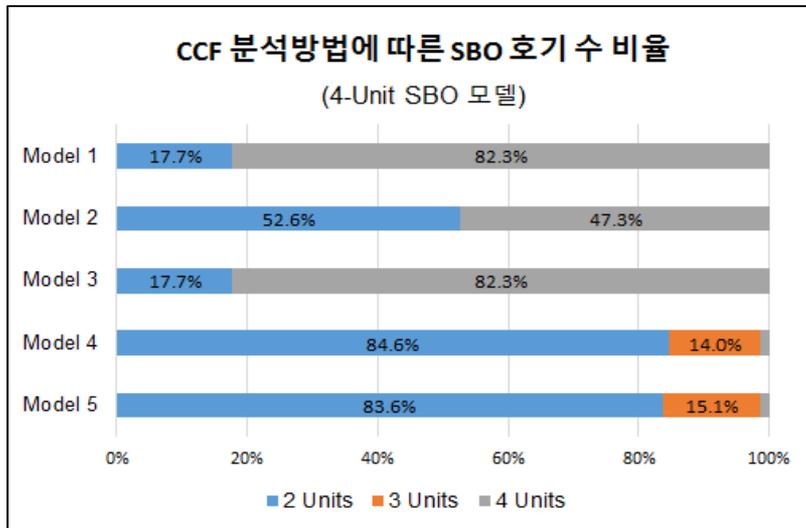
- 호기간 CCF 모델링 및 모수 추정방법 → 아래 5가지 방법 적용, 결과 비교
 - Model 1: Beta-factor 방법을 적용한 모델 (n-of-n CCF 1개만 모델)
 - Model 2: Two-tiered Beta-factor 방법을 적용한 모델 (Seabrook PSA)
 - Model 3: Simplified MGL 방법을 적용한 모델 (4개 이상 조합은 n-of-n CCF 1개로 모델)
 - Model 4: Alpha-factor 방법을 적용한 모델 (가능한 CCF 조합 모두 포함된 모델)
 - Model 5: 본 연구에서 개발한 방법을 적용한 모델
- 상기 5가지 방법 비교 (예. 호기별 2 Trains, 3개 호기를 고려할 경우)

고장 기기수	모델링 방법에 따른 CCF 기본사건(BE) 조합				
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
2/6 CCF	-	AB, CD, EF	AB, AC, ... , EF	AB, AC, ... , EF	AB, CD, EF
3/6 CCF	-	-	ABC, ABD, ... , DEF	ABC, ABD, ... , DEF	-
4/6 CCF	-	-	-	ABCD, ... , CDEF	ABCD, ABEF, CDEF
5/6 CCF	-	-	-	ABCDE, ... , BCDEF	-
6/6 CCF	ABCDEF	ABCDEF	ABCDEF	ABCDEF	ABCDEF
총 CCF BE 수	1개	4개	31개	57개	7개

호기간 CCF 분석방법 개발(2)

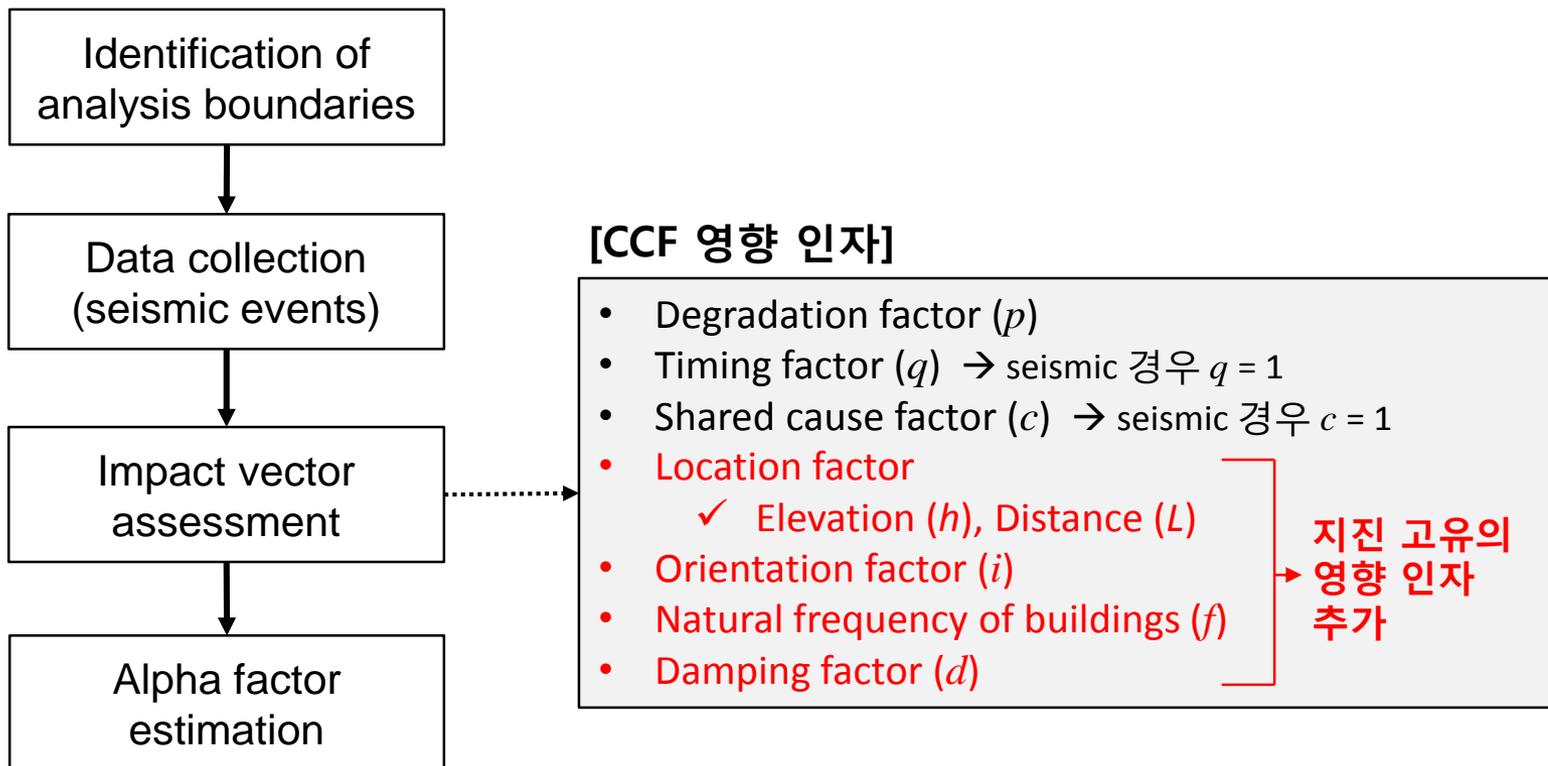
호기간 CCF 분석방법 검증: 사례연구 결과 (2/2)

- CCF 분석방법에 따른 결과 비교 예시 (각각 부지 내 4기, 6기 고려 시)
- "다수기 사고경위" (2개 이상의 호기가 SBO 발생)만 포함할 경우의 결과



데이터 기반 지진취약도 종속성 평가방법 개발

- “데이터 기반” 지진 취약도 종속성 평가방법 개발
 - 가용한 지진 데이터가 있을 경우에 적용 가능한 종속성 평가방법을 개발
 - 일반적인 CCF alpha factor 추정방법 (NUREG/CR-5485)을 기반으로 하고, “지진 고유의 특성”을 반영하여 개발



데이터 기반 지진취약도 종속성 평가방법 개발

○ 지진취약도 종속성 평가방법 검증: 사례 연구

- 미국의 지진사고 데이터(SQUG)를 활용, 2개 이상의 동일기기 고장 사고 5건 (단 일호기 사건 2건, 다수기 사건 3건)을 선별하여 개발한 방법을 적용함.
 - ✓ 각 사건은 CCF 모수 추정에 필요한 형태로 데이터 정리 (*아래 표 예시 참조)
 - ✓ 주어지지 않은 정보(기기별 손상 정도, 설치 방향, 건물 고유진동수 등)는 적절히 가정함.
- 지진사건 데이터가 존재할 때, 이를 기반으로 다수기 지진 PSA에 필요한 동일 구조물/기기의 조합별(예. 1-of-5, 2-of-5, ..., 5-of-5 손상) 지진 유발 파손확률이 계산 가능함을 확인함.

[사례연구 결과 예시]

Earthquake Data Sheet							
Plant	Plant C		Year	1991			
Earthquake	Costa Rica Earthquake		Magnitude	7.4			
Component	Diesel Generators		Total number	5			
			Damaged number	5			
Location	Concrete Pedestals - Ground level						
Cause	Pipe fractures due to settlement of the base slabs put Nordberg diesels out of service, including the one damaged by misalignment						
Elevation factor (h)	1.0		Distance factor (L)	0.5/0.1/ 0.01/ 0.001			
Orientation factor (i)	1.0						
Natural frequency (f)	1.0/0.5		Damping factor (d)	1.0			
Component Degradation Values (P)							
	P	Date	Time		P	Date	Time
1	0.01	4/23/91	14:00	4	1	4/23/91	16:00
2	0.01	4/23/91	14:40	5	0.5	4/23/91	16:40
3	0.5	4/23/91	15:20				



alpha	추정치(MLE)
α_{s1}	0.8948
α_{s2}	9.85E-02
α_{s3}	6.71E-03
α_{s4}	6.65E-06
α_{s5}	6.69E-09

대형고장수목 정량화 방법 개발(FTeMC)

- **FTeMC 용도**
 - Monte Carlo 방법을 이용하여 Fault Tree Top Event의 확률을 계산
- **기존 버전(1.1B)의 문제점**
 - 많은 계산 시간 : 일부 경우 ~ 10일
 - Old Style C Program : 개선 및 장기적인 유지보수에 불리
- **FTeMC 개선 (Version 2.0)**
 - Compiler 측면 최적화 (약 2배 속도 개선 효과)
 - Language 비교 : C++, C#, VB
 - Compiler Option, C/C++ 특성 활용, Class 사용 구조화
 - 방법론 개선 (약 5배 속도 개선 효과)
 - FT Restructuring 기법 (Merge Gate, Duplicate child 삭제, Compact FT, Modularization 등)
 - 계산 Logic 개선 및 최적화 (Circular Logic 가진 Model의 분석 최적화)
 - Uncertainty Bound 출력
- **계산 시간 비교**

Case	Version 1.1b	Version 2.0	Ratio	Remark
K3	491 sec	89 sec	5.5	PSA 모델 (Circular Logic 없음), n=1e+7
U34	651 sec	58 sec	11.2	PSA 모델 (Circular Logic 포함), n=1e+5
S03	335 sec	25 sec	13.4	다수기 Seismic 모델, n=1e+5

FTREX 성능 개선

• FTREX

- PSA 정량화 엔진 (Fault Tree의 Minimal Cut Set 계산 소프트웨어)
- 현존 최고 수준의 고장수목 정량화 엔진
 - AIMS-PSA, SAREX, EPRI's CAFTA 에 사용중

• 성능 개선

- Circular Logic이 복잡해지는 경우에 계산 시간 기하급수적으로 증가
- → Fault Tree 단순화 알고리즘 개선

Model	FTREX Version 1.9		FTREX Version 1.8	
	Gate 개수(*)	run time	Gate 갯수(*)	run time
A1	103,555	16s	631,911	75s
A2	71,447	3s	2,783,563	163s
MU1-Tlocw	29,694	18s	115,184	19s
MU2-Seis05	360,630	34s	1,246,100	Fail
MU3-Loop	143,168	61s	575,137	74s

(*) Circular Logic을 제거하면서 생성되는 Gate 갯수

• 기능 개선

- BDD Algorithm 도입
 - 계통 fault tree 수준의 모델을 Exact한 Solution 계산 가능

결론

- 4차 원자력연구개발사업을 통해 다수기 리스크 평가를 위한 기본 방법론의 성공적 개발 완료
- 5차 원자력연구개발사업을 통해 다수기 리스크의 최적 평가를 위한 연구 수행 중
- 연구의 가치중립성 유지

감사합니다