

Practical Application of PSA Model for the Evaluation of DID



원자력연구원 리스크평가연구실

임호곤 / 2022.05.

CONTENTS ● ● ● ●

» Introduction

» DID 1&2 evaluation

- › DID 1&2 and PSA model
- › 초기사건 고장수목에서의 DID 분리
- › DID 1, 2단계 분리방법
- › 예제계산

» DID 3 evaluation

- › DID 3단계 분해 및 평가
- › DID 3단계 세부 분리의 문제
- › DID 3단계 분리방법 제안
- › 예제계산

» Conclusion

Introduction(1)

■ 안전성 평가 패러다임 변화

- 원자력 안전성의 평가는 1960대 이후 30여 년간의 결정론적/규정적 평가를 거쳐 1990년대부터 리스크 평가를 이용한 리스크정보의사결정(Risk Informed Decision Making)방식으로 급격하게 변동하고 있음
 - 기존 규정과의 부합
 - **심층방어 철학과의 일관성**
 - 적절한 안전여유도의 유지
 - 허용 가능한 수준의 리스크 변화
 - 기 정의된 성능측정 전략의 이행
- 미국, 일본 및 대부분의 유럽이 RIDM방식을 규제에 도입함

■ 정성적 평가 요소에 대한 주관성 배제 필요

- 정성적 안전성 평가 요소는 주관성을 가질 가능성 높음
- 리스크 모델(예, PSA)을 이용한 정성적 요소의 정량적 평가 방법에 대한 연구 지속

■ 심층방어는 리스크 평가의 불확실성을 보조하는 핵심적 안전평가 요소

- 가동원전의 현안 및 인허가 변경에서 중요한 의사결정자료로 활용 가능
- 신형원전의 설계에서 RI-D(Risk Informed Design) 설계의 중요한 플랫폼으로 활용 가능

Introduction(2)

■ 심층방어 모델의 기본 심층방어 구조

- 초기 심층방어 개념에서의 물리적 방벽(연료봉/RCS/격납건물) 및 이를 보조하는 시스템은 전반적인 심층방어의 일부 요소
- 본 연구에서는 **IAEA INSAG-10**에 따라 추상적 개념의 5단계 심층방어 구조를 기본 틀로 사용
- 초기사건의 발생과 방어에서 방사선 사고 대비까지의 5단계

단계	목적	주요 수단	관련 계통(예)
1	비정상 운전 방지	강건한 설계 및 높은 품질의 설계, 운영, 관리에 대한 요건	없음(초기 기인자 빈도)
2	비정상 운전 제어	보호계통의 제어, 감시 및 검사	설계의 다중성, 다양성 및 보호계통
3	설계기준 사고로 제어(노심손상 방지)	필수 안전기능을 담당하는 시스템	일차 냉각수 보충계통 등
4	중대사고 완화	격납건물 안전기능 담당 안전계통	격납건물 스프레이 등
5	방사선 사고 완화	공중 및 환경을 위한 관련 당국(기관)의 효과적인 연계	경보, 소개 절차 등

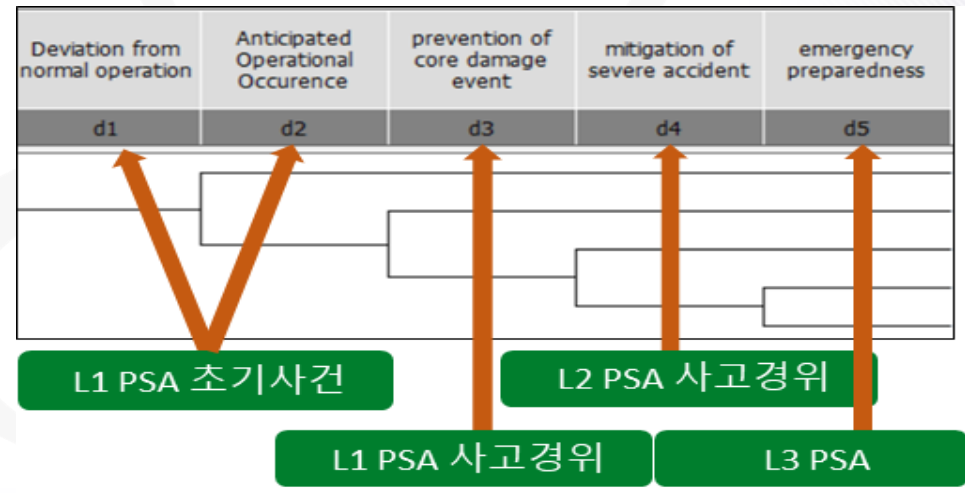
DID structure using risk model(2)

■ 심층방어 평가를 위한 PSA 모델의 변환 구조

- 심층방어의 각 단계는 일반적인 PSA 모델의 구조를 이용하여 각 단계의 심층방어 구조를 모델하는 데 사용할 수 있음

■ 모델 개발 시 고려사항

- 1/2단계의 심층방어 구조의 분리는 현재의 PSA 모델에서 구현하기 어려우며, 초기사건 고장수목을 사용할 경우 해결 가능
- 3단계의 심층방어 구조는 핵심적인 영역으로, 사용되는 필수 안전기능을 분리하여 상세 분석을 고려할 수 있음
- 4단계는 현재의 PSA모델 구조에서 단계 종속성의 평가가 어려울 수 있으며, 고장수목 방식의 L2 PSA모델에서 종속성 구현 가능



심층방어 모델의 정량화

■ 심층방어 사건수목 정량화 방법

- 각 단계별 심층방어 단계는 상호 종속성을 가지므로, 매 단계를 최종상태로 가정한 단계적 정량화를 수행해야 하며, 사고시나리오에 아래의 수식으로 도출됨

$$Df_i = \bigcap_{j=1}^i d(j)$$

Df_i : 심층방어 i단계까지의 실패사건

$d(j)$: j단계 심층방어의 실패사건

- 각 심층방어 단계는 상호 종속성을 가지므로 정확한 빈도 정량화는 아래의 수식으로 표현됨.

$$p(Df_i) = p\left(\bigcap_{j=1}^i d(j)\right) = p(d(1)) \cdot p(d(2)|d(1)) \cdots p\left(d(i) \mid d\bigcap_{j=1}^{i-1} d(j)\right)$$

$p\left(d(i) \mid d\bigcap_{j=1}^{i-1} d(j)\right)$: i-1 이하 단계 심층방어와의 종속성이 고려된 i단계 심층방어 실패확률

- 각 단계의 심층방어 단계 확률은 상호 종속성을 가지므로 수식 내에서는 구할 수 없으며, 순차적인 전체 시나리오 정량화를 통하여 다음의 식으로 도출

$$p\left(d(i) \mid d\bigcap_{j=1}^{i-1} d(j)\right) = \frac{p(Df_i)}{p(Df_{i-1})}$$

DID 1&2 and PSA model

■ DID 1,2는 PSA 모델로부터 구할 수 없다.

- 대부분의 PSA에서는 특정 초기사건은 발전소에 유사한 위협을 가하는 사건들의 집합으로써, 인과관계를 고려하지 않고 단순 사건으로 취급
- PSA의 초기사건이 DID 1,2단계를 포괄적으로 표현
- 전기 또는 냉각수와 같이, 필수 자원을 공급하는 계통의 실패에 의해 생기는 초기사건은 이 계통의 실패를 고장수목 등의 논리모델로 평가 가능
 - 기기냉각수 상실사고, 교류/직류 전원상실 등
 - 냉각수 상실사고
 - DID 1(재질 특성 + ISA,...) +DID2 (사고 전 탐지 실패, LBB)

1	비정상 운전 방지	강건한 설계 및 높은 품질의 설계, 운영, 관리에 대한 요건	없음(초기 기인자 빈도)
2	비정상 운전 제어	보호계통의 제어, 감시 및 검사	설계의 다중성, 다양성 및 보호계통

초기사건 고장수목에서의 DID 분리

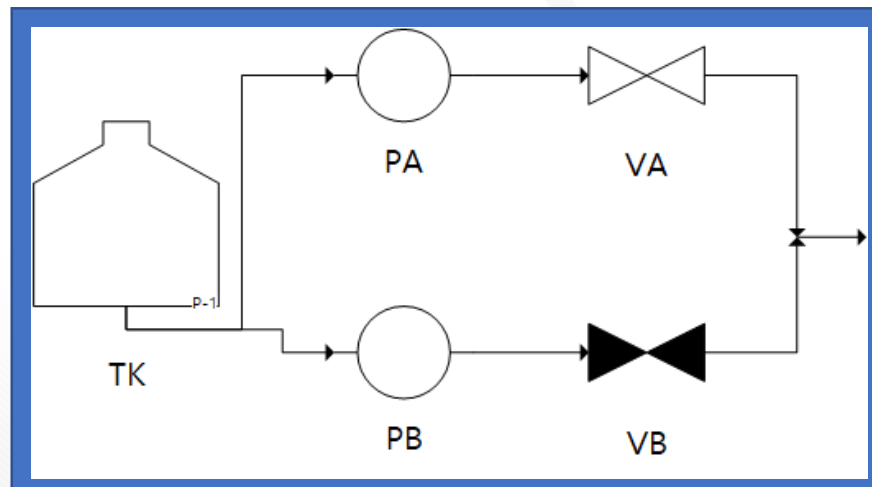
■ DID 1&2

- 1/2단계 심층방어의 실패는 (1) 최초 비정상을 유발하는 사건의 발생 및 (2)비정상 사건의 복구 실패에 해당
- 고장수목은 기본적으로 불리안 논리식이며, 단절집합에서 사건 분리 가능

■ 비정상과 복구사건의 분리

$$\text{System failure} = TK + (PA + VA) \cdot (PB + VB)$$

$$= TK + PA \cdot PB + PA \cdot VB + VA \cdot PB + VA \cdot VB$$



DID 1, 2단계 분리방법

■ 초기사건이 고장수목으로 표현된 경우의 심층방어 분리

- 초기사건 고장수목은 최초의 비정상사건과 이에 대한 다중성(있을 경우)을 가지는 기능의 연결에 의해 구성되며, 최종적으로 최소단절집합으로 나타낼 수 있음

■ 초기사건 고장수목을 정량화하여 다음의 형태를 가지는 최소 단절집합으로 일반화됨

$$Df_2 = IE = \sum_{i=1}^n a_i b_i \quad p(IE) = p\left(\sum_{i=1}^n a_i b_i\right)$$

여기서, a_i 는 초기 비정상사건이고, b_i 는 완화기능의 실패이며, 완화기능이 존재하지 않을 경우 $b_i = 1$

초기사건	빈도 평균 (/rcy ³)	오차 인자	근거
대형 냉각재상실사고	2.89E-06	19.4	NUREG-1829, Table 7.19 (과단 크기 정의에 맞게 재계산)
중형 냉각재상실사고	1.62E-04	18.4	NUREG-1829, Table 7.19 (과단 크기 정의에 맞게 재계산)
소형 냉각재상실사고	3.49E-04	8.4	NUREG/CR-6928 (IE-SLOCA)
증기발생기 세관 파단	4.92E-03	3.3	국내원전 경험(1993-2012년)
제압단계부 냉각재상실사고	1.01E-08	17.2	고유 분석
원자로 용기 파손	3.44E-08	67.5	NUREG-1829, Table 7.19
적남건을 내부 주증기관 파단	3.49E-04	8.4	NUREG/CR-6928 (IE-SLBIC)
적남건을 외부 주증기관 파단	7.32E-03	1.6	NUREG/CR-6928 (IE-SLBOC)
주급수 상실	4.10E-02	1.5	국내원전 경험(1993-2012년)
복수기전공 상실	7.38E-02	1.4	국내원전 경험(1993-2012년)
1차측 기기냉각수 부분 상실	4.92E-03	3.3	국내원전 경험(1993-2012년)
1차측 기기냉각수 완전 상실	2.12E-04	5.0	고유 분석 (EF는 가정)
IE급 416kV 교류모선 상실	4.31E-03	1.9	NUREG/CR-6928 (IE-LOAC 4160V) + 국내원전 경험
IE급 125V 직류모선 A 상실	2.46E-03	5.5	국내원전 경험(1993-2012년)
IE급 125V 직류모선 B 상실	2.46E-03	5.5	국내원전 경험(1993-2012년)
소외전원 상실	2.36E-02	1.7	국내원전 경험(상임운전-2012년)
일반 과도사건	7.06E-01	1.1	국내원전 경험(1993-2012년)
발전소 정전 (EDG 기동 실패)	8.14E-06	-	소외전원상실 사건수목에서 전이됨
발전소 정전 (EDG 운전중 고장)	3.68E-05	-	소외전원상실 사건수목에서 전이됨
정지불능 예상 과도사건	1.49E-06	-	원자로정지를 포함한 사건수목에서 전이됨

한울3,4호기 초기사건 목록 및 빈도

심층방어 단계별 계산-DID 1 and 2 (2)

- DID 1단계는 비정상 상태로 전이하는 경우 이므로, 1단계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D(1) = \sum_{i=1}^n a_i$$

- DID 1단계는 위의 불리안 수식의 확률을 구하면 쉽게 구할 수 있다

$$p(D(1)) = p\left(\sum_{i=1}^n a_i\right)$$

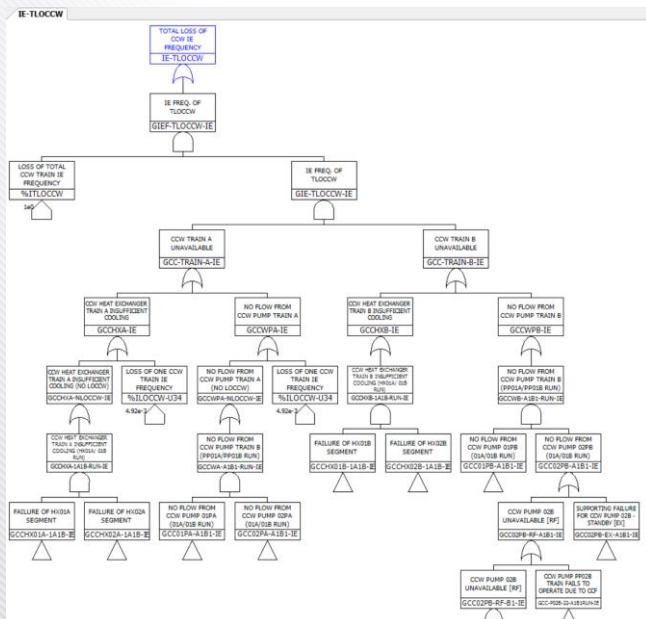
- 대부분의 사건이 값이 커서 희소사건 사상이 맞지 않으므로, MCUB를 이용하여 정확한 값을 구할 수 있음

$$p\left(\sum_{i=1}^n a_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p(a_i))$$

- 단, 초기사건 고장수목에서 a_i 를 적절하게 찾을 수 있어야 함(시범 계산 참고)

DID 1/2단계 분리 시범 분석

- TLOCCW의 초기사건 고장수목을 이용하여 DID 1/2 단계를 분리함
 - 현 한울 3,4 PSA 초기사건 FT 사용
 - 2만여개의 MCS로 구성
 - 분석에서는 수작업인 관계로 상위 100개만 사용함
 - 2.234e-4 / 21849
 - 2.09E-04 /100



No	Value	F-V	Acc.	BE#1	BE#2	BE#3	BE#4	BE#5	BE#6	BE#7	BE#8
1	4.547e-5	0.203580	0.203580	%ITLOCCW	SWMPK4Q-1A1B2						
2	3.710e-5	0.166099	0.369679	%ITLOCCW	CWCUK4Q-1A2A1	HCRE					
3	2.743e-5	0.122817	0.492495	%ITLOCCW	CCMPK4Q-1A2A1I						
4	1.725e-5	0.077225	0.569720	%ITLOCCW	CWCUK4T-1A2A2I	CWCUR001B-IE	HCRE				
5	1.725e-5	0.077225	0.646945	%ITLOCCW	CWCUK4T-2A1B2I	CWCUR001A-IE	HCRE				
6	6.577e-6	0.029443	0.676388	%ITLOCCW	HCCQK2D-CCWPA	HCRE					
7	5.596e-6	0.025055	0.701442	%ITLOCCW	HCCQRCCPA-IE	HCCQRCCPB-IE	HCRE				
8	3.315e-6	0.014841	0.716283	%ITLOCCW	CWCUR001B-IE	CWCU002B-IE	HCCQRCCPA-IE	HCRE			

21844	1.003e-13	0.000000	1.000000	%ITLOCCW	CCCW4T-10012-	CCMPR001PA-IE	CCMPR001PB-IE	CXPMACMP02B-I			
21845	1.003e-13	0.000000	1.000000	%ITLOCCW	CCCW4T-10012-	CCMPR001PA-IE	CCMPR001PB-IE	CXPMACMP02A-I			
21846	1.001e-13	0.000000	1.000000	%ITLOCCW	CCCVQ4D-10024-	CCMPK4D-1A1B-II	CXPMACMP02A-I				
21847	1.001e-13	0.000000	1.000000	%ITLOCCW	CCCVQ4D-10023-	CCMPK4D-1A1B-II	CXPMACMP02A-I				
21848	1.001e-13	0.000000	1.000000	%ITLOCCW	CCCVQ4D-10014-	CCMPK4D-1A1B-II	CXPMACMP02B-I				
21849	1.001e-13	0.000000	1.000000	%ITLOCCW	CCCVQ4D-10013-	CCMPK4D-1A1B-II	CXPMACMP02B-I				

DID 1단계 사건분리 및 정량화

- 상위 100개의 cut-set중 초기 비정상사건(그림의노란색)를 식별하고 나머지 기본사건은 DID 2단계의 사건이 됨

1	4.55E-05	0.20358	0.20358	%ITLOCCW	SWMPK4Q-1A1B2A2B-IE	HCRE				
2	3.71E-05	0.166099	0.369679	%ITLOCCW	CWCUK4Q-1A2A1B2B-IE					
3	2.74E-05	0.122817	0.492495	%ITLOCCW	CCMPK4Q-1A2A1B2B-IE					
4	1.73E-05	0.077225	0.56972	%ITLOCCW	CWCUK4T-1A2A2B-IE	CWCUR001B-IE	HCRE			
5	1.73E-05	0.077225	0.646945	%ITLOCCW	CWCUK4T-2A1B2B-IE	CWCUR001A-IE	HCRE			
6	6.58E-06	0.029443	0.676388	%ITLOCCW	HCCQR2D-CWPPAB-IE	HCRE				
7	5.60E-06	0.025055	0.701442	%ITLOCCW	HCCQRCCPA-IE	HCCQRCCPB-IE	HCRE			
8	3.32E-06	0.014841	0.716283	%ITLOCCW	CWCUR001B-IE	CWCUS002B-IE		HCRE		
9	3.32E-06	0.014841	0.731124	%ITLOCCW	CWCUR001A-IE	CWCUS002A-IE		HCRE		
10	2.61E-06	0.01168	0.742893	%ITLOCCW	CWCUM002B-IE	CWCUR001B-IE		HCRE		
11	2.61E-06	0.01168	0.754483	%ITLOCCW	CWCUM002A-IE	CWCUR001A-IE		HCRE		
12	1.96E-06	0.008791	0.763274	%ITLOCCW	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	CWCUS002A-IE	CWCUS002B-IE	HCRE	
13	1.55E-06	0.006918	0.770192	%ITLOCCW	CWCUM002A-IE	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	CWCUS002B-IE	HCRE	
14	1.55E-06	0.006918	0.77711	%ITLOCCW	CWCUM002B-IE	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	CWCUS002A-IE	HCRE	
15	1.22E-06	0.005445	0.782555	%ITLOCCW	CWCUM002A-IE	CWCUM002B-IE	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	HCRE	
16	1.21E-06	0.005435	0.78799	%ITLOCCW	SWMPK4T-2A1B2B-IE	SWMPR001PA-IE				
17	1.21E-06	0.005435	0.793425	%ITLOCCW	SWMPK4T-1A2A2B-IE	SWMPR001PB-IE				
18	1.21E-06	0.005401	0.798826	%ITLOCCW	CWCUR001B-IE	CWCUR002B-IE	HCCQRCCPA-IE	HCRE		
19	1.21E-06	0.005401	0.804227	%ITLOCCW	CWCUR001A-IE	CWCUR002A-IE	HCCQRCCPB-IE	HCRE		
20	1.11E-06	0.004988	0.809216	%ITLOCCW	HCRE	HFBABK4Q-1A2A1B2B-IE				
21	8.52E-07	0.003813	0.813028	%ITLOCCW	CWCUK4D-1A2A-IE	HCCQRCCPB-IE	HCRE			
22	8.52E-07	0.003813	0.816841	%ITLOCCW	CWCUK4D-1B2B-IE	HCCQRCCPA-IE	HCRE			
23	7.18E-07	0.003212	0.820053	%ITLOCCW	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	CWCUW4D-2A2B-IE	HCRE		
24	7.15E-07	0.003199	0.823252	%ITLOCCW	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	CWCUR002A-IE	CWCUS002B-IE	HCRE	
25	7.15E-07	0.003199	0.826451	%ITLOCCW	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	CWCUR002B-IE	CWCUS002A-IE	HCRE	
26	6.71E-07	0.003003	0.829454	%ITLOCCW	CWCUK4D-1A2B-IE	CWCUR001B-IE	HCCQRCCPA-IE	HCRE		
27	6.71E-07	0.003003	0.832458	%ITLOCCW	CWCUK4D-2A1B-IE	CWCUR001A-IE	HCCQRCCPB-IE	HCRE		
28	6.02E-07	0.002693	0.835151	%ITLOCCW	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	CWCUW4Q-1A2A1B2B-IE	HCRE		
29	5.62E-07	0.002518	0.837669	%ITLOCCW	CWCUM002B-IE	CWCUR001A-IE	CWCUR001B-IE	CWCUR002A-IE	HCRE	

DID 1 단계 정량화

- 위 그림의 파란색 행의 노란 부분이 최초 비정상사건이며(빨간색은 동일한 비정상사건임), 다음과 같이 REA 및 MCUB의 값을 도출함

- REA DID 1단계 빈도 : 1.82

- MCUB DID 2단계 빈도 : 0.965

- 연간 1회 정도 초기 비정상사건이 발생함.

$$p\left(\sum_{i=1}^n a_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p(a_i))$$

DID 2 단계 정량화

- DID 2단계 실패확률 : 2.17E-04

$$p((D2|D1)) = \frac{p(D1 \cdot D2)}{p(D1)} = \frac{p(\sum_{i=1}^n a_i b_i)}{p(\sum_{i=1}^n a_i)}$$

DID 3단계 분해 및 평가

■ DID 3단계

- 초기사건이 발생하였을 경우, 이에 대응하여 초기사건이 원자로 핵연료가 손상되는 중대사고로 발전하지 않도록 제어하는 기능

■ DID 3단계의 차별성

- 원자력발전소의 설계에서 대부분의 안전 자원은 이부분에 할당
 - 발전소정지/냉각/압력제어 등

■ 핵심안전 기능을 모두 만족해야 달성 가능

- 원자로 반응도 제어
- 원자로 계통 압력 제어
- 원자로 계통 냉각재 재고량 유지
- 원자로 계통 열제거
- 격납건물 압력 제어

■ 대부분의 핵심안전 기능은 다중 시스템으로 구성

- 심층방어를 실제적으로 평가하기 위해 적절한 분리를 통해 심층방어의 상태를 세부적으로 평가할 필요 있음.

DID 3단계 세부 분리의 문제

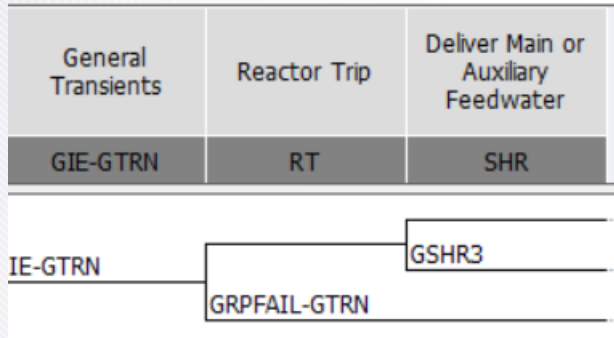
- 2개의 핵심안전 기능을 가지며 각각 2개의 시스템이 각 핵심안전 기능을 담당하는 경우의 심층방어 상태 전이
 - 핵심안전 기능 1 → (S_{11}, S_{12})
 - 핵심안전 기능 2 → (S_{21}, S_{22})
 - 최대 3가지의 심층방어 상태를 가짐
 - $(S_{11}, S_{21}) \rightarrow (S_{12}, S_{21}) \rightarrow (S_{12}, S_{22})$
- M개의 핵심안전기능과 각각 N개의 담당 시스템을 가지는 경우, 심층방어의 상태 개수
 - 최대 $M \cdot N - 1$ 개
- 가능한 모든 상태를 반영할 경우, 심층방어를 지나치게 과장
 - 심층방어 단계의 정성적 속성을 왜곡

DID 3단계 분리방법 제안

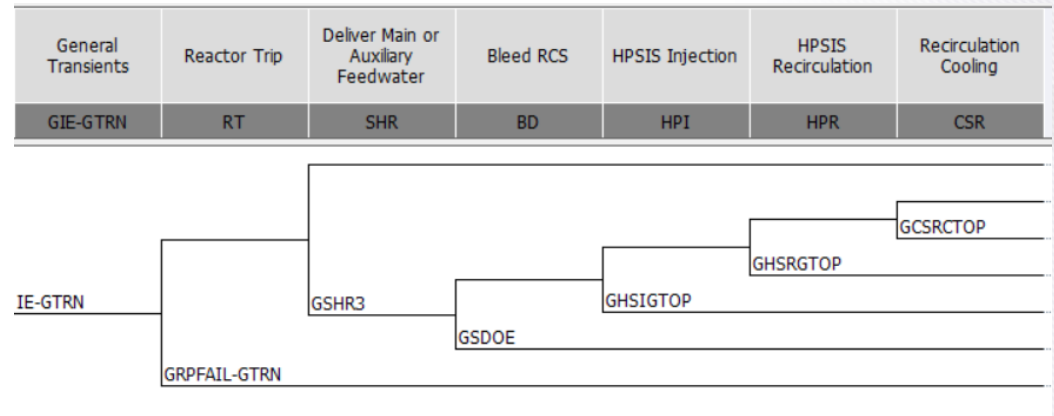
- 다중의 안전기능을 수행할 수 있는 안전기능을 선택하여, 이를 기준으로 세부 심층방어 단계를 분리
 - 원자로 계통의 열제거 기능은 통상적으로 압력 제어 및 냉각재 재고량 유지를 포괄적으로 지원
 - 냉각재 상실의 위험이 없는 경우, 보조급수를 통한 열제거는 반응도 제어를 제외한 모든 핵심안전 기능을 만족함
 - 표준원전에서는 보조급수 및 Feed & Bleed 기능이 이에 해당함
- 분리규칙
 - 3단계 세부 심층방어의 1층
 - 제1 원자로 열제거 계통의 실패 또는 기타 핵심 안전기능 유지 계통의 완전 실패(가능한 계통의 전수 실패)
 - 3단계 세부 심층방어의 2층
 - 제2 원자로 열제거 계통의 실패 또는 기타 핵심 안전기능 유지 계통의 완전 실패
 - ~
 - 3단계 세부 심층방어의 n층
 - 제n 원자로 열제거 계통의 실패 또는 기타 핵심 안전기능 유지 계통의 완전 실패

DID 3단계 세부 분리된 사건수목의 예

■ 일반과도 사고(2차측 냉각+주입방출운전)

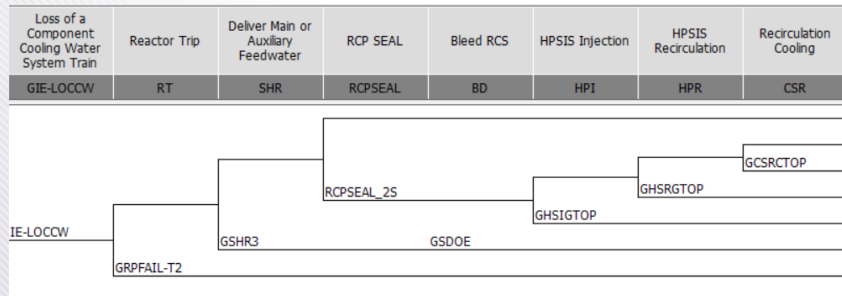


일반과도 사고의 DID 3.1 단계

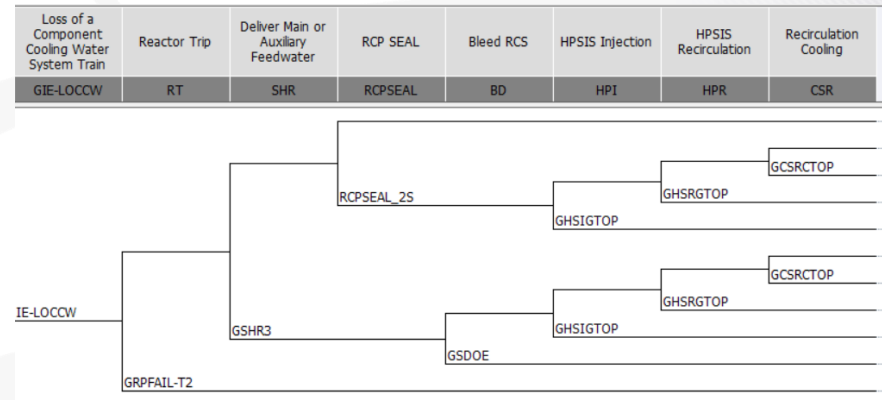


일반과도 사고의 DID 3.2 단계

■ 기기냉각수 상실사고(2차측냉각*냉각수주입+주입방출운전)



기기냉각수 상실사고의 DID 3.1 단계

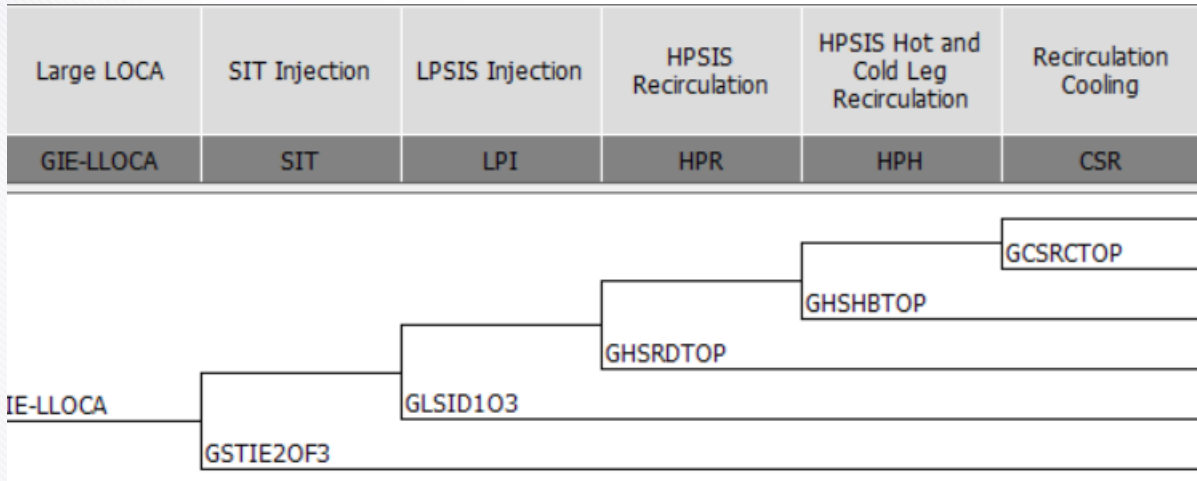


기기냉각수 상실사고의 DID 3.2 단계

하나의 단계만 가지는 DID 3단계

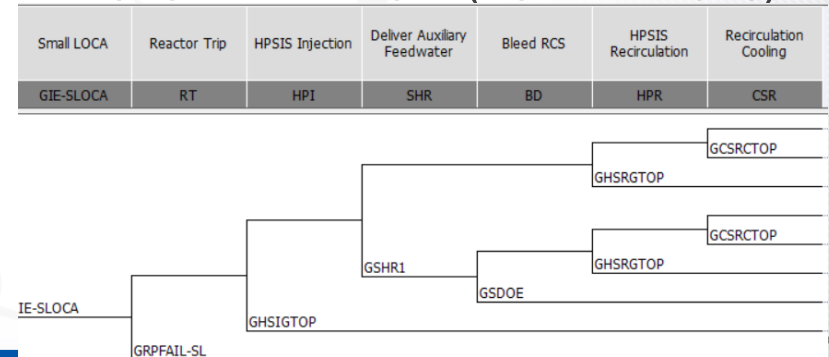
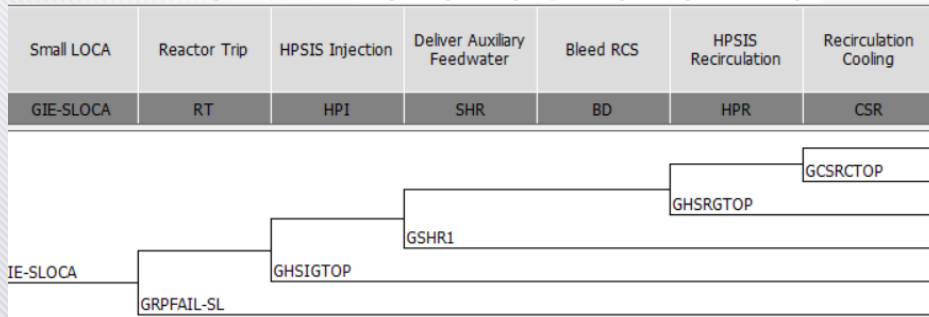
■ 대형 냉각재 상실사고

- 원자로 냉각재 계통의 파열로 2차측 냉각을 안전기능으로 이용할 수 없음



■ 소형 냉각재 상실사고

- 원자로 냉각재 계통이 파열되었으나, 2단계의 DID를 가짐(복합 열제거)



심층방어 3단계 정량화

■ 시범원전의 DID 3단계 구조

- 일부 사건에서 3.2단계의 역할이 존재하나 많은 초기사건에서 3.2단계의 역할이 미미함
- 3.2단계의 향상을 위한 체계적 접근 필요



Conclusion

- 심층방어를 1,2,3 단계를 실제적으로 평가하기 위한 방법을 제안함
 - 초기사건 고장수목을 이용한 DID 1,2 단계의 평가
 - 핵심 안전기능의 효과적 분리를 통한 심층방어 3단계의 분리 및 평가
- 가동원전의 심층방어의 전반적 체계에 대한 시범분석에 대한 발표 및 논의 예정
 - 표준원전에 대한 심층방어 체계의 전반적 분석 및 평가
 - DID 4,5 단계 평가 방법에 대한 논의
 - 신형원전 설계에서의 활용성 논의

Future Works

■ 신형원전 설계를 위한 PSA 기술 개발

- iSMR의 설계 목표는 노심손상빈도 1.0E-9 이하
- 초기사건 이후 사고 시나리오를 완화하는 수준으로 달성 어려움
- 초기사건 저감 기술의 개발이 필수적이며, 이를 위해 **PSA에서 초기사건을 보다 상세히 점검할 수 있는 기술의 개발**이 필요
 - 고장수목을 이용한 초기사건 모델
 - 재료의 설계 특성, ISI 등의 관리조치, 및 누설 탐지 능력이 반영된 냉각재 상실사고의 초기사건 빈도 평가 모델
 - 외부 재해 발생에 따른 초기사건의 체계적 발생 메커니즘 모델

■ RIDM 기술 개발

- 대부분의 실제적 현안에 대해, RIDM 5원칙은 상호 독립적이지 않고, 얽혀있음.
- 필수적인 원칙, RIDM에서 리스크 분석의 전반적인 역할 등에 대한 연구 필요

참고자료

The background is a solid blue color. It features several faint, light blue decorative elements: two curved lines that sweep across the lower half of the page, and two circular nodes. One node is located at the bottom left, and the other is at the top right. These elements are connected by thin lines, creating a sense of flow and connectivity.

DID 4단계 정량화 예제

- 4단계 DID는 TLOCCW PDS 사건수목 시나리오의 STC 전이관계를 파악하여, STC 3번에서 21번으로 전이되는 값을 LRF로 계산함
 - TLOCCW LRF = $4.75E-7 - 1.46E-7 = 3.29E-7$
 - 종속관계가 없다고 가정하면, $P(D4) = 3.29E-7 / 4.75E-7 = 0.693$

STC	Initiator Seq. No	Frequency	per(%)	소계	분율	STC	Initiator Seq. No	Frequency	per(%)	소계	
1						11					
2	IE-TLOCCW 10	6.38E-08	4.27			12	IE-TLOCCW 10	7.81E-08	70.53		
	IE-TLOCCW 8	4.64E-08	3.11				IE-TLOCCW 4	4.76E-09	4.3		
	IE-TLOCCW 4	3.61E-08	2.41	1.46E-07	30.8		IE-TLOCCW 8	3.37E-09	3.04		
3					13						
4	IE-TLOCCW 10	4.78E-09	63.83			14	IE-TLOCCW 10	5.20E-08	46.51		
	IE-TLOCCW 4	9.00E-10	12.03				IE-TLOCCW 8	1.43E-08	12.84		
	IE-TLOCCW 8	2.06E-10	2.75	5.88E-09	1.2		IE-TLOCCW 4	3.27E-09	2.93		
5					15						
6	IE-TLOCCW 10	3.69E-09	37.82			15	IE-TLOCCW 10	3.45E-09	18.45		
	IE-TLOCCW 4	6.95E-10	7.13				IE-TLOCCW 8	3.29E-09	17.58		
	IE-TLOCCW 8	1.82E-10	1.86	4.56E-09	1.0		IE-TLOCCW 4	1.02E-09	5.46		
7					16						
8	IE-TLOCCW 10	6.76E-08	66.02			16	IE-TLOCCW 10	4.94E-10	17.87		
	IE-TLOCCW 4	8.45E-09	8.25				IE-TLOCCW 4	9.31E-11	3.37		
	IE-TLOCCW 8	2.91E-09	2.85	7.89E-08	16.6		IE-TLOCCW 8	7.02E-11	2.54	6.57E-10	0.1
9					17						
10	IE-TLOCCW 10	4.95E-08	41			19	IE-TLOCCW 11	7.44E-11	11.16		
	IE-TLOCCW 8	1.70E-08	14.06				IE-TLOCCW 9	1.83E-11	2.74		
	IE-TLOCCW 4	5.69E-09	4.71	7.22E-08	15.2		IE-TLOCCW 5	1.40E-11	2.1	1.07E-10	0.0
					20						
					21	IE-TLOCCW 10	3.27E-09	1.41	3.27E-09	0.7	

$$p(Df_i) = p(d(1)) \cdot p(d(2)|d(1)) \dots p(d(i) | \cap_{j=1}^{i-1} d(j))$$

$$p(d(i) | \cap_{j=1}^{i-1} d(j)) = \frac{p(Df_i)}{p(Df_{i-1})}$$

Df_i : 심층방어 i단계까지의 실패사건

$d(j)$: j단계 심층방어의 실패사건

$p(d(i) | \cap_{j=1}^{i-1} d(j))$: 종속성을 고려한 i단계 심층방어 실패 확률

DID 5단계 계산 예

■ L2 “PSA TLOCCW PDS-ET” to STC 및 암사망 확률 계산

- TLOCCW의 STC 분율 및 STC별 조기/후기 암사망 확률을 활용하여 5단계 DID 계산
- 암사망은 “암사망자수/총인구”로 방사능 사고가 발생하였을 경우, 사고의 영향을 받는 개인인 경우, 암사망 확률이며, 이를 DID 5 단계의 척도로 사용함
- TLOCCW DID 5단계는 전단계와 완전 독립을 가정하여 4.51E-4의 실패확률을 가짐

STC	Initiator Seq. No	Frequency	per(%)	소계	분율	STC	Initiator Seq. No	STC	원자로건물파손유형	전이 분율	노외노심용융물냉각	후기살수계통	내부사건	비율	조기사망 ¹	암사망 ²	상대기여		
1						11		1	비파손 (원자로용기파손전 노심용융물 냉각)				5.213E-07	20.72%	0.00E+00	1.19E-06			
2	IE-TLOCCW 10	6.38E-08	4.27			12	IE-TLOCCW 10	2	비파손 (원자로용기파손)	30.8			1.128E-06	44.84%	0.00E+00	5.87E-05	1.81E-05		
	IE-TLOCCW 8	4.64E-08	3.11		IE-TLOCCW 4		3	조기 격납건물 누설 파손 (Leak)			성공	1.088E-08	0.43%	0.00E+00	2.37E-05	0.00E+00			
	IE-TLOCCW 4	3.61E-08	2.41	1.46E-07	30.8		IE-TLOCCW 8		4		1.2		실패	3.155E-09	0.13%	0.00E+00	4.51E-03	5.58E-05	
3							5	조기 격납건물 파손 (RUPTURE)				성공	1.811E-08	0.72%	0.00E+00	1.06E-04	0.00E+00		
4	IE-TLOCCW 10	4.78E-09	63.83			14	IE-TLOCCW 10	6	후기 격납건물 누설 파손 (Leak)	1.0			실패	7.064E-09	0.28%	0.00E+00	5.64E-03	5.41E-05	
	IE-TLOCCW 4	9.00E-10	12.03		IE-TLOCCW 8		7				냉각	성공	0.000E+00	0.00%	-	-			
	IE-TLOCCW 8	2.06E-10	2.75	5.88E-09	1.2		IE-TLOCCW 4	8			16.6		냉각	실패	4.079E-08	1.62%	0.00E+00	1.25E-04	2.08E-05
5							9	후기 격납건물 파손 (RUPTURE)				성공	1.603E-12	0.00%	0.00E+00	7.02E-06	0.00E+00		
6	IE-TLOCCW 10	3.69E-09	37.82			15	IE-TLOCCW 10		10		15.2		냉각실패	실패	6.948E-08	2.76%	0.00E+00	3.34E-04	5.07E-05
	IE-TLOCCW 4	6.95E-10	7.13		IE-TLOCCW 8		11					냉각	성공	0.000E+00	0.00%	-	-		
	IE-TLOCCW 8	1.82E-10	1.86	4.56E-09	1.0		IE-TLOCCW 4	12		18.1		냉각	실패	4.248E-08	1.69%	0.00E+00	2.89E-04	5.24E-05	
7						16	IE-TLOCCW 10	13	후기 격납건물 파손 (RUPTURE)				성공	5.345E-13	0.00%	0.00E+00	3.03E-05	0.00E+00	
8	IE-TLOCCW 10	6.76E-08	66.02				IE-TLOCCW 4	14			14.6		냉각실패	실패	6.886E-08	2.74%	0.00E+00	3.59E-04	5.25E-05
	IE-TLOCCW 4	8.45E-09	8.25				IE-TLOCCW 8	15			1.6		원자로공동기초판용융관통 (BMT)		1.401E-08	0.56%	0.00E+00	6.73E-03	1.10E-04
	IE-TLOCCW 8	2.91E-09	2.85	7.89E-08	16.6	16		알파(α)-유형 파손	0.1			4.263E-09	0.17%	0.00E+00	1.10E-02	1.52E-05			
9							17	원자로용기 파손전 격납건물 파손				3.694E-07	14.68%	0.00E+00	1.29E-03	0.00E+00			
10	IE-TLOCCW 10	4.95E-08	41			19	IE-TLOCCW 11	18	격리 실패			성공	2.688E-09	0.11%	0.00E+00	2.84E-04	0.00E+00		
	IE-TLOCCW 8	1.70E-08	14.06		IE-TLOCCW 9		19			0.0		실패	7.567E-10	0.03%	0.00E+00	1.11E-02	2.49E-06		
	IE-TLOCCW 4	5.69E-09	4.71	7.22E-08	15.2		IE-TLOCCW 5	20			저압경계부 냉각재상실사고 (우회사고)			1.010E-08	0.40%	0.00E+00	4.70E-03	0.00E+00	
							21	증기발생기 세관파단사고 (우회사고)	0.7			2.042E-07	8.12%	0.00E+00	2.80E-03	1.92E-05			
						21	IE-TLOCCW 10	합계		100							4.51E-04		

DID structure using risk model(4)

■ 심층방어 척도(1)

■ 심층방어 강건도(Toughness)

- 초기사건에 i 에 대해, 단계 방어 확률의 불확실성을 고려한, 실패빈도의 역수

$$T(Df_i) = \log(p(Df_i))^{-1}$$

$$T(d(i)) = \log \left(p \left(d(i) \left| \bigcap_{j=1}^{i-1} d(j) \right. \right) \right)^{-1}$$

■ 심층방어 적용(Coverage) 수(Number) (or uncoverage number)

- 초기사건에 i 에 대해, 심층방어 단계의 누적 방어 단계의 수
- 예로, 격리불가능한 ISLOCA는 2 (초기사건+방사능 누출)
- 심층방어 사건수목의 표제 tagging 방법을 이용하여 구할 수 있음

*** 강건도와 누적실패값을 2차원으로 도시함으로서 전반적인 발전소의 심층방어 수준 표현 가능**

Example calculation for DID measure

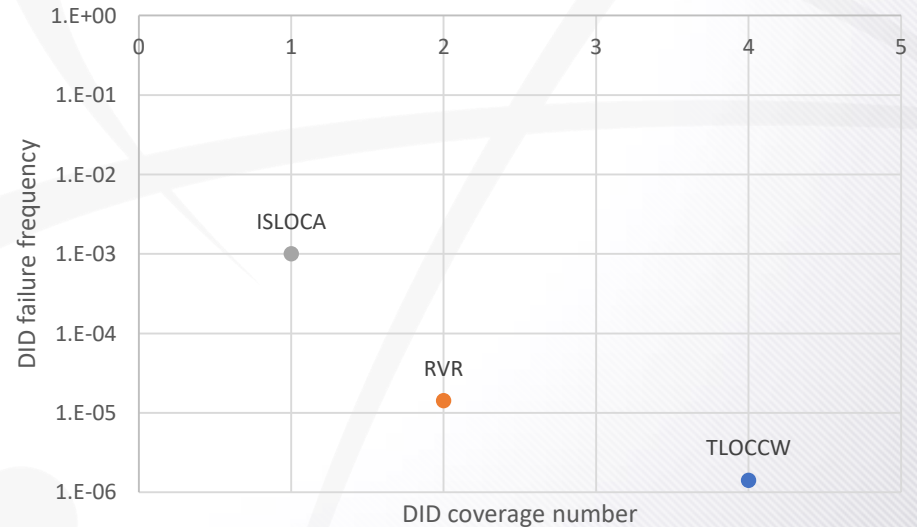
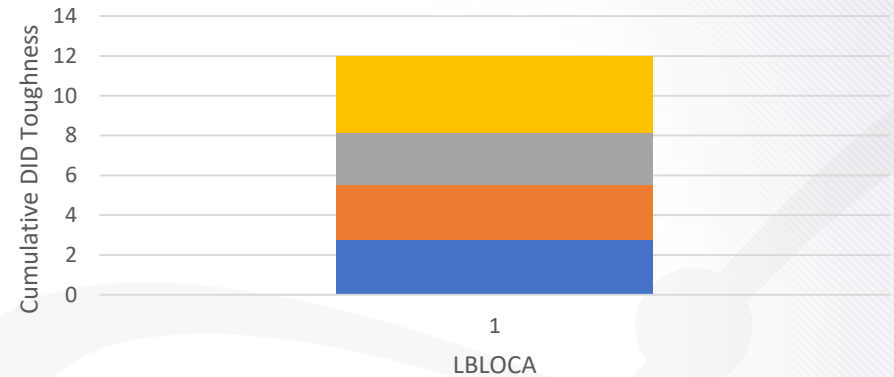
Large LOCA의 DID toughness

- 참조 발전소에 대한 단계별 및 전체 DID toughness
- 현재의 PSA모델에서는 DID 1/2단계의 분리가 불가능하므로, 둘은 초기사건 빈도에서 균일하게 나눔
- 잠정적인 계산 결과임

DID toughness .vs. coverage number

- 심층방어의 정성적/정량적 상태를 잘 표현할 수 있음
- 높은 Coverage number와 낮은 failure frequency(우하변)이 발전소의 좋은 상태를 의미
- 잠정적인 값

Large LOCA DID structure



DID structure using risk model(5)

■ 심층방어 척도(2)

■ 누적 심층방어 실패 빈도(frequency)

- 모든 초기사건에 대한 심층방어 실패빈도의 합
- 총 CDF와 유사한 개념. 단, 단계실패확률의 제한치를 가정함

$$DFF_j = \sum_{i=1}^m p(Df_{ij})$$

■ 프로그램 비의존 비율(fraction)

- 특정 초기사건에 대해, 심층방어의 프로그램(인적행위)의 비의존 비율을 나타냄

$$PIF_i = \frac{p(Df_i | \forall Hep_j, Hep_j = 1)}{p(Df_i)}$$