
원전의 확률론적 안전성평가

한국전력기술주식회사
종합안전성평가처
강 선 구



차례

- 개요
- 내부사건분석
- 외부사건분석
- Level 2 분석
- Level 3 분석
- PSA 응용분야

개요

□ 원자력발전의 특징

◆ 잔열

- 발전소 정지후에도 원자로에서는 열이 계속 발생.
- 잔열 제거를 위한 지속적인 원자로 냉각이 필요함
- (정지시 정상출력의 7%, 1시간후 1.3%, 1일후 0.4%, 1주일후 0.2%)

◆ 원전사고의 심각성

- 대중에의 방사능 피폭
- 주변 주민들의 집단 소개/이주
- 광범위한 지역에 대한 환경 오염
- 제염시 경제적 손실 막대
- 사고 발생 가능성은 아주 낮으나 한번 사고가 발생할 때에는 그 피해가 막대함. 잠재적 위협요소로 인식함

개요

□ 원전 설계의 안전성 (개요)

◆ Defense in Depth (심층 방어)

- 다중의 방호벽(Multiple Barrier) 에 의한 안전성 확보
 - 핵연료/피복재/원자로냉각재계통/원자로 용기/격납건물 설치
- 계통 구성 및 기기의 고신뢰도 확보로 사고 발생 가능성을 없앴.
- 그럼에도 불구하고 사고 발생을 고려하여 사고를 완화하기 위한 안전설비 확보

◆ Single Failure Criteria

- 가상사고 발생과 동시에 사고완화에 필수적인 계통 하나가 사용할 수 없다는 가정하에 원전설계
- 안전계통의 다중성 확보 설계

안전설계개념

(Diversity)		() ()
(Redundancy)	가	:50% 3
(Independency)		(Train A&B) 2
(Fail-Safe)		
(Inter-Lock)	가	

개요

□ PSA 수행배경

- ◆ 원전의 방사능 누출 사고는 국민 대중에게 심각한 피해를 입힐 수 있음.
- ◆ 원전의 안전은 원자력법등 법률로 명시하고 각 사업자들의 의무적 규정 준수를 명시
- ◆ 우주, 항공산업등에서 사용되던 확률론적 평가 기법을 원전의 안전성 평가 기법으로 사용함.
- ◆ WASH-1400 (1975) 이 원전 PSA효시
- ◆ WASH-1400 에서 TMI-2 원전사고의 원인 예측

□ 수행 효과

- ◆ 발전소의 안전성 유지를 위한 체계적인 관리 가능
- ◆ 국민들의 안전을 위한 규제 기관의 효율적 관리가 가능

개요

□ PSA 수행 현황

- ◆ 국내 (가동중 16기, 건설중 4기, 건설전 설계 4기)
 - 가동중 원전 : 11기 수행, 1기 진행중
 - 건설중 원전 : 4기 수행중
 - 건설전 설계 원전 : 4기 수행중
- ◆ 미국
 - NRC GL 88-20 : 전 원전에 대한 IPE 수행 요구
 - PRA Policy Statement (1995) : 규제업무에 PSA 적극 활용
 - PSA Application 활발 (RIR)


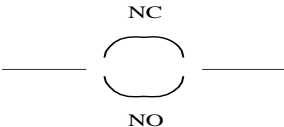
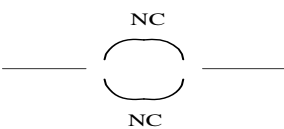

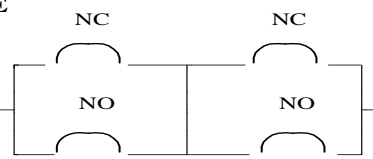
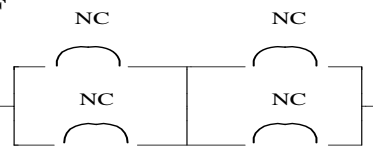
□ 전망

- ◆ 국내에서도 Deterministic Analysis와 Probabilistic Assessment의 상호 보완을 통한 설계 개선/경제성 향상 및 안전성 향상을 목표로 적극 활용 예상



1)	·	·
2)	·	· 가 가
3) 가	· Single Failure Criteria	· Multiple Failure
4)	·	·
5)	· ,	·
6)	·	· , ,
7)	· 가	· Feedback
8)	·	· 가
	·	·

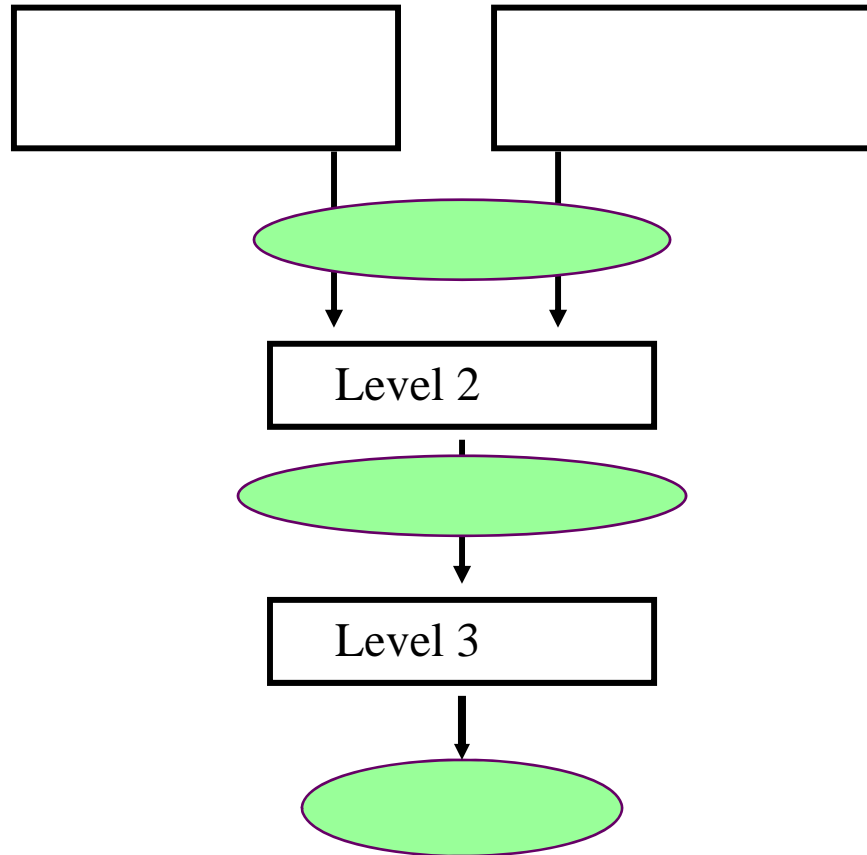
이용율 및 안전성을 고려한 설계의 예(차단기)

	/	
A 	-	-
B 		A
C 		
D 		
E 	가	
F 	가	

개요

□ PSA 수행 체계

- ◆ 전출력과 정지저출력으로 구성



내부사건분석

□ 정의

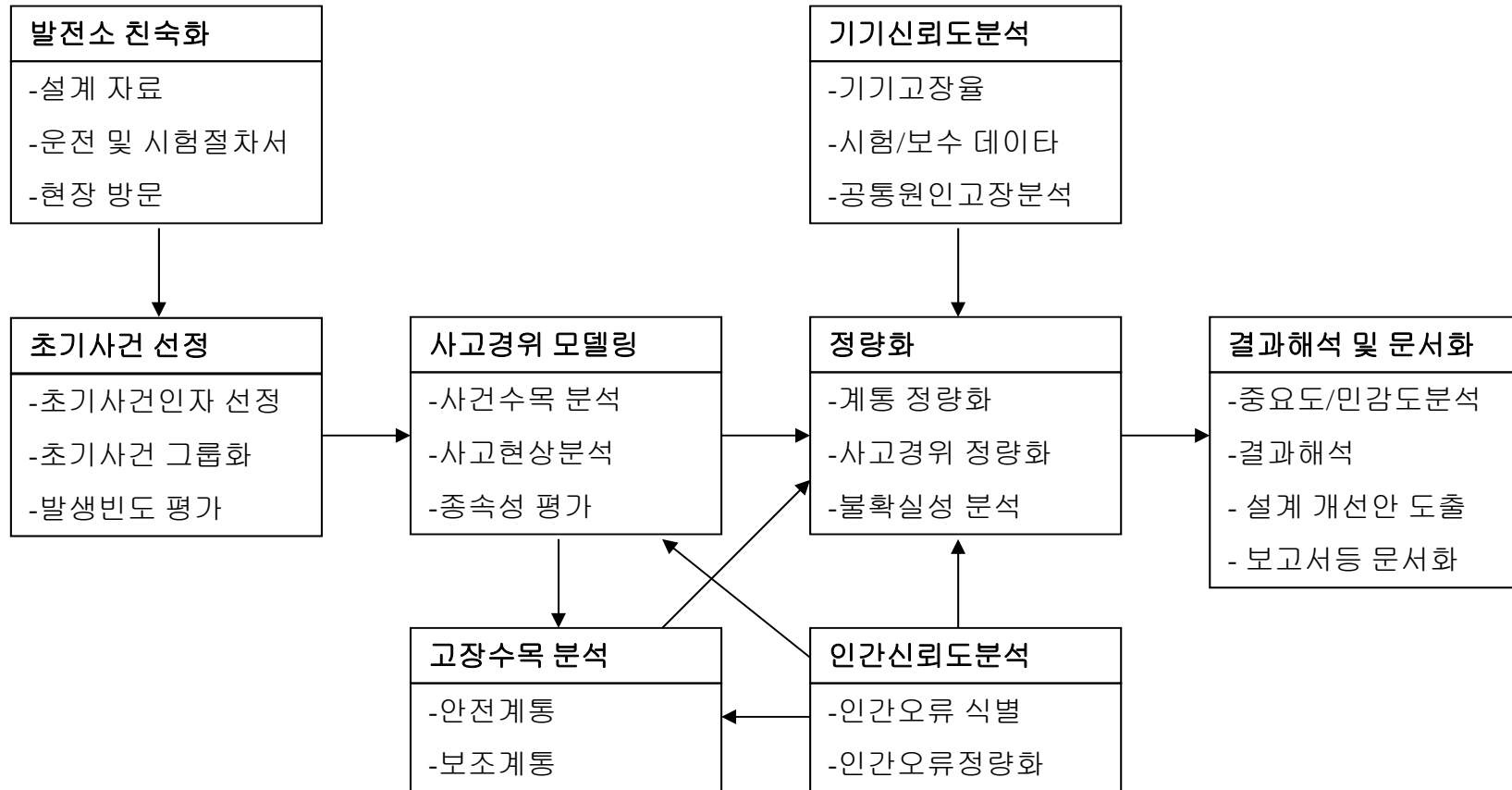
- ◆ 발전소 정상 출력 운전중 발전소 계통 및 기기의 이상 또는 운전원/보수 요원의 오류로 인한 발전소 불시 정지시 원자로의 잔열제거실패로 노심손상이 발생하는 사고 시 나리오를 개발하고 노심손상의 정량적 수치 도출

□ 분석 대상 사고

- ◆ 원자로냉각재상실 (대형/중형/소형)
- ◆ 증기발생기세관파단사고
- ◆ 주증기배관파단사고
- ◆ 주급수배관파단사고
- ◆ 원자로정지불능사고
- ◆ 발전소 정전사고 외 다수

내부사건분석

□ 수행 개요



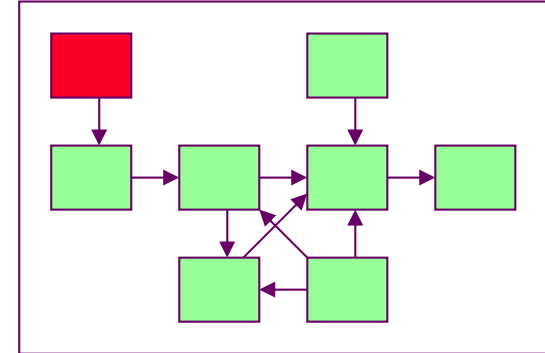
내부사건분석 - 발전소 친숙화

□ 개요

- ◆ 내부사건분석에 필요한 발전소 정보 수집 및 파악
- ◆ 모든 분석의 기본적 정보 제공

□ 수행 내용

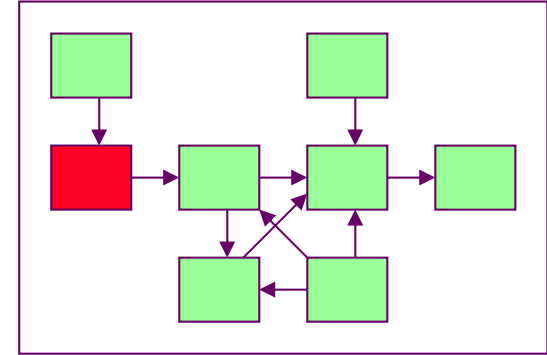
- ◆ 설계 문서 수집 및 검토
- ◆ 분석 대상 혹은 참조 원전의 방문 조사
- ◆ 운전, 시험 및 보수 정보 수집 조사
- ◆ 사고시 발전소 거동 파악
- ◆ 계통 운전 절차 및 운전원 면담을 통한 계통 숙지



내부사건분석 - 초기사건 선정

□ 개요

- ◆ 원전의 노심손상을 초래할 수 있는 사고 원인 선정
- ◆ 계통 및 기기의 이상, 운전원 오류 등
- ◆ 환경 요인들은 외부사건분석 대상임.



□ 수행 방법

- ◆ Master Logic Diagram 작성을 통한 사고 기인자 도출
- ◆ 선행 경험에 의한 사고 기인자 도출.
 - PSA 수행보고서
 - FSAR 등 사고해석 보고서
- ◆ 유사한 사고 기인자들을 그룹화
- ◆ 초기사건의 발생빈도 평가 (경험 데이터, FT모델링 등)

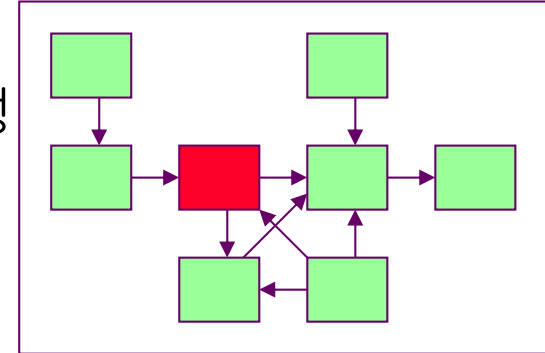
내부사건분석 - 사고경위 모델링

□ 개요

- ◆ 선정된 초기사건에 대한 사건수목 구성
- ◆ 노심손상을 초래하는 사고경위 파악

□ 수행방법

- ◆ 초기사건별로 노심의 건전성을 유지하기 위한 안전 기능 파악
- ◆ 안전 기능을 수행하기 위한 계통 및 운전원 조치를 사건 수목의 표제로 정의
- ◆ 각 표제의 성공, 실패에 대한 사고 시나리오 전개
- ◆ 사고 진행 시간, 기기 작동 시점 및 운전 시간등의 정보가 필요
- ◆ 사고의 종결 시점에 대한 정의 필요



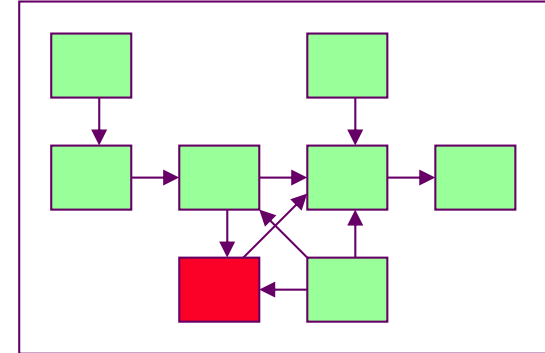
내부사건분석 - 고장수목 분석

□ 개요

- ◆ 사건수목에서 표제로 정의한 계통의 신뢰도를 평가하기 위한 분석

□ 수행방법

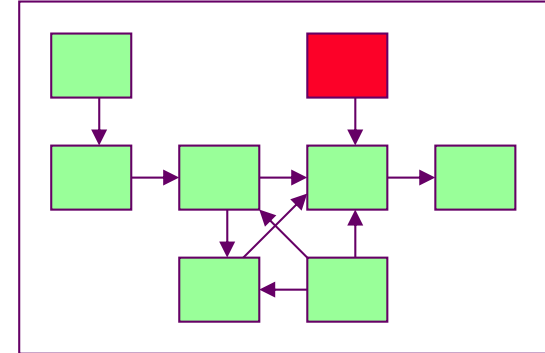
- ◆ 기기의 기계적 고장, 공통원인고장, 인간 오류, 보수 및 시험 이용불능도등으로 구성
- ◆ 사건수목의 표제 기능을 수행하지 못하는 것을 정점사건으로 정의하고, 이 정점사건이 발생하기 위한 계통내 기기들의 운전 실패를 AND, OR 논리로 모델
- ◆ 계통 설계, 운전 절차서, 시험 및 보수, 타 계통과의 연계성등의 파악이 필요
- ◆ 계통의 성공기준을 요구되는 안전 기능에 따라 결정



내부사건분석 - 기기신뢰도분석

□ 개요

- ◆ 구성된 사건수목과 고장수목의 정량화를 위한 기기 데이터 제공
- ◆ 기기고장율/ 공통원인고장율/ 보수 및 시험이용불능도
- ◆ 발전소 Specific Data 와 일반(Generic)데이터



□ 수행방법

- ◆ 기기의 물리적 경계 및 고장 모드 정의
- ◆ 해당 데이터의 수집 또는 적용 근거
- ◆ 해당 데이터의 산출에 적용한 통계적 모델, 절차 및 가정 사항
- ◆ 불확실성분석

내부사건분석 - 인간신뢰도분석

□ 개요

- ◆ 사고경위 전개과정에서 발생가능한 운전원 오류를 파악, 모델 및 정량화

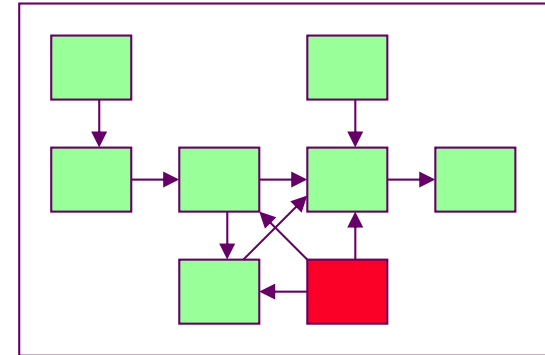
□ 수행방법

◆ 대표적 방법론

- THERP (Technique of Human Error Rate Prediction)
- SHARP (Systematic Human Action Reliability Procedure)

◆ 수행절차

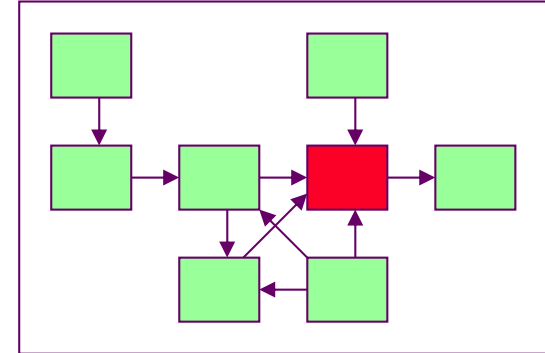
- 인간오류 파악 : 발생가능한 운전원 오류 파악
- 선별분석/작업분석 : 상세분석 대상 선정 및 정보 수집
- 모델링 : 다각도의 오류 발생 모델 작성
- 정량화 : 진단오류 및 수행 오류로 구분, 각 단위 작업 평가
- 문서화 : 충분한 검토가 가능하도록 분석 내용을 기술



내부사건분석 - 정량화

□ 개요

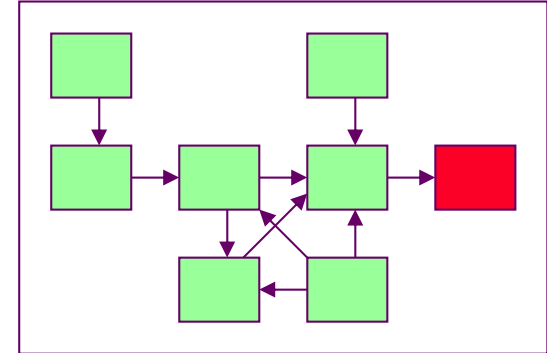
- ◆ 사건수목,고장수목,데이터를 통합, 노심손상을 초래하는 조합 도출
- ◆ 정량화 항목
 - 노심손상빈도 도출
 - 노심손상 최소단절집합
 - 불확실성 분석
- ◆ 정량화 코드
 - SAREX (Safety And Reliability Evaluation eXpert)
 - 정량화 엔진 (FORTE)과 사건수목모듈(ETA), 고장수목 모듈(FTA)등으로 구성
- ◆ 주의사항
 - 정량화 절단값 / Non-Sense Cutset의 제거



내부사건분석 - 결과해석 및 문서화

□ 개요

- ◆ 수행 결과를 해석
- ◆ 중요도/민감도분석 수행 및 결과 해석
- ◆ 설계 취약점 도출 및 개선안 제시
- ◆ 모든 수행 결과의 문서화 작업



□ 중요도 분석

- ◆ 설계 취약점 및 설계 개선안 도출을 위한 필수 요소
- ◆ 분석 방법
 - F-V 중요도 : 총 노심손상빈도에 대한 기본사건의 기여도
 - RRW(Risk Reduction Worth) : 기본사건의 실패가 발생하지 않는다고 가정할 때 전체 노심손상빈도의 감소정도
 - RAW(Risk Achievement Worth) : 해당 기본사건이 실패한다고 가정할 때 전체 노심손상빈도의 증가정도

외부사건분석

□ 개요

- ◆ 발전소 계통 내부적 요인에 의한 사고가 아닌 외부적 요인에 의한 사고로 정의
- ◆ 초기사건 발생과 동시에 사고 완화계통들도 기능상실

□ 분석 대상 외부사건

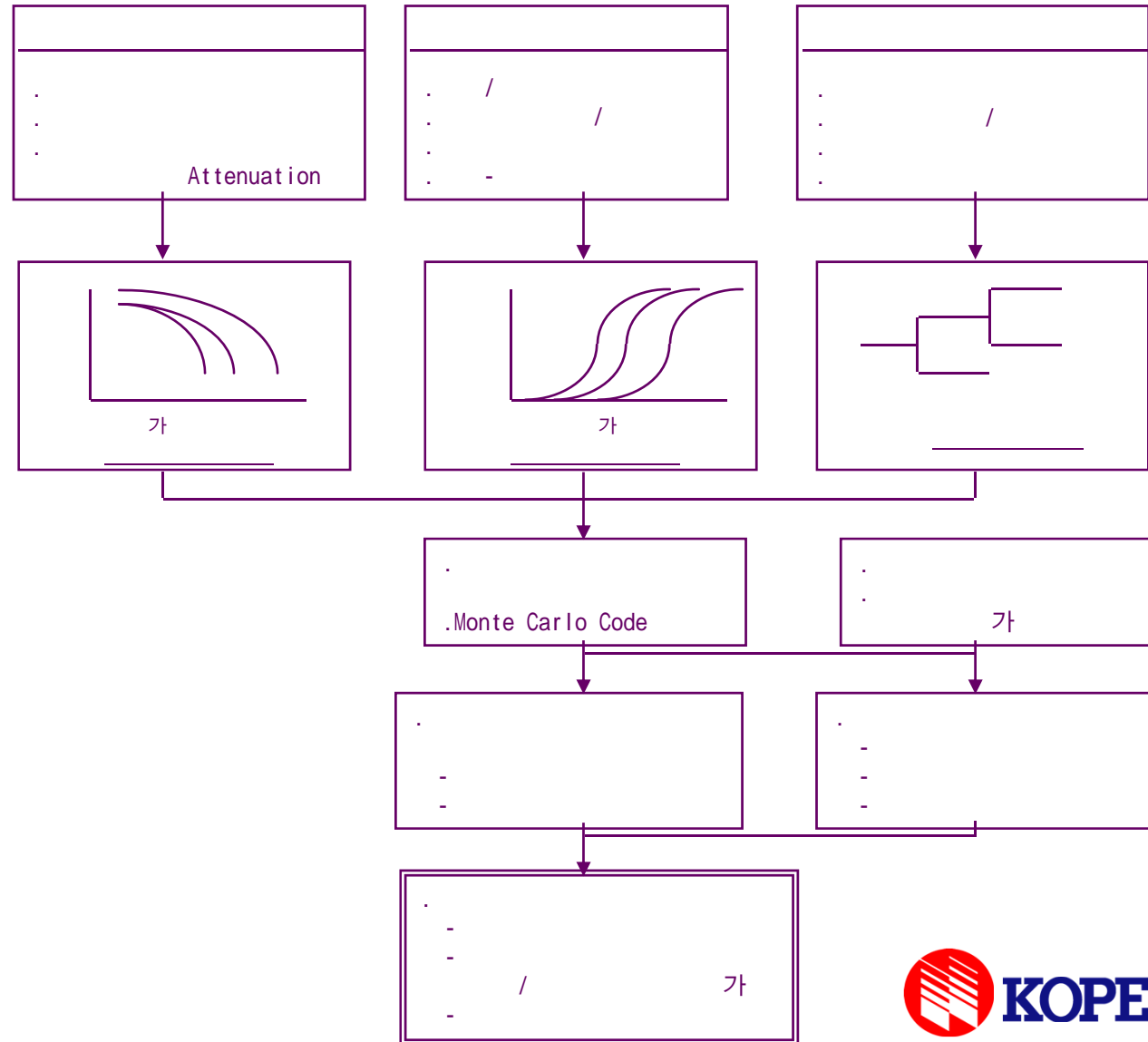
- ◆ 지진사건
- ◆ 내부화재사건
- ◆ 내부침수사건
- ◆ 기타 외부사건
 - 화재/홍수/해일/태풍/극대풍
 - 항공사고/운송사고/폭발물사고
 - 화산/우주비산물/한파(눈 태풍)

외부사건분석

□ 일반적 수행 절차

- ◆ 재해도분석: 특정 외부사건 크기별 발생 빈도계산
(예, 화재 구역별 발생빈도, 지진 가속도별 발생빈도등)
- ◆ 취약도분석: 외부사건의 크기에 따른 기기/구조물의 고장 가능성 평가
- ◆ 사고경위분석: 기기/구조물 고장에 따른 사고 Scenario 분석 (ET/FT방법)
- ◆ 정량화: 사고추이를 정량화하여 종합

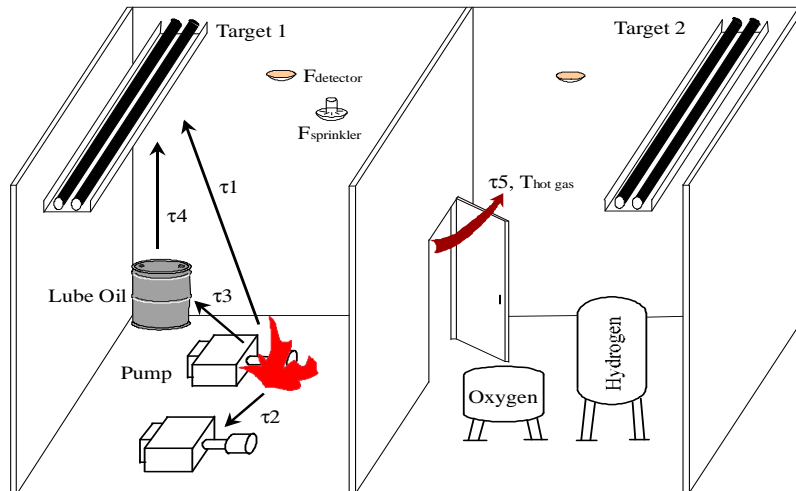
외부사건 - 지진분석



외부사건 - 화재분석

□ 화재분석 정보

- ◆ 구역내 기기/전기배선
/점화원/가연성 물질 양
- ◆ 구역간 화재 격리(방호체)
- ◆ 구역내 화재방호설비
- ◆ 발전소 화재방호 대책 및 인력



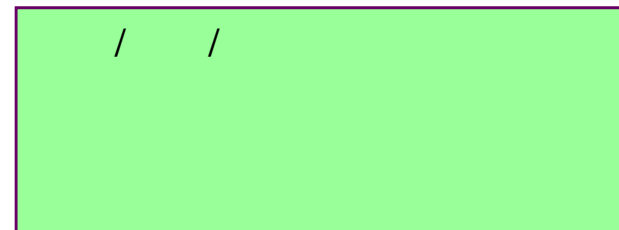
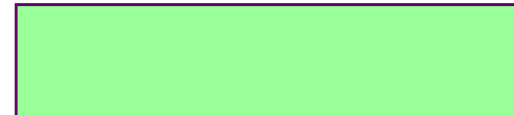
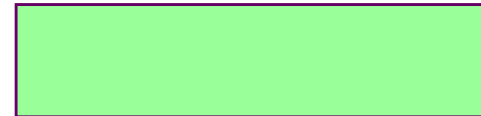
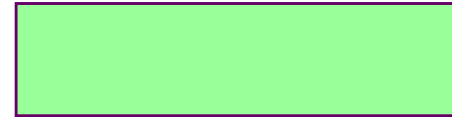
가

/ /

외부사건 - 침수사건

□ 침수분석 정보

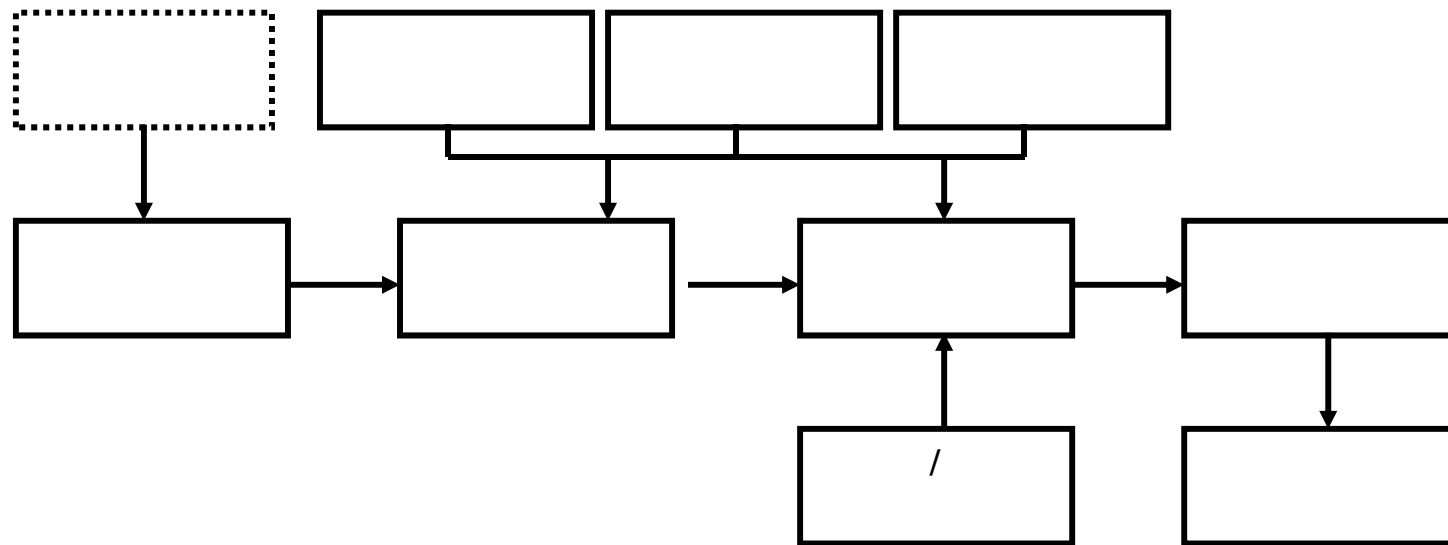
- ◆ 구역내 위치 기기
- ◆ 구역내 배관 정보
- ◆ 유체 탱크등의 침수원 및 용량
- ◆ 구역내 배수설비
- ◆ 구역간 전파 가능성
- ◆ 구역내 침수 방호체
- ◆ 수위 경보등 사고 경보체계



Level 2 분석

□ 개요

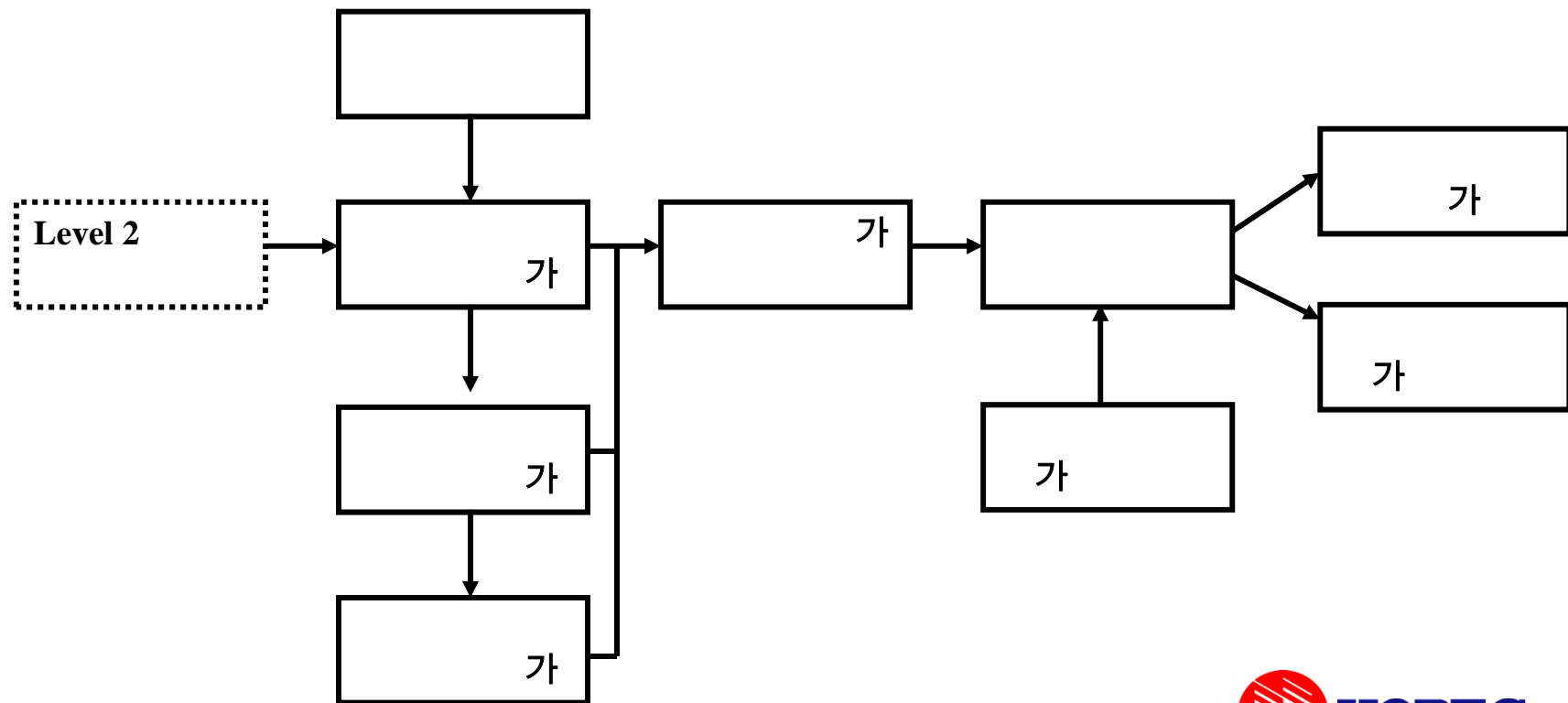
- ◆ 노심손상등의 이유로 누출된 방사성물질이 격납건물 외부 환경으로 방출될 가능성, 방출량 및 방출 시기를 분석



Level 3 분석

□ 개요

- ◆ 소외로 방출된 방사능이 대중에 미치는 영향을 평가
- ◆ 비상 대응에는 주민 비상 소개, 이주등이 있음.



PSA 응용 분야

□ RAM(이용율분석)

□ RCM

□ Risk Informed Regulation

◆ Risk Informed Inspection/Test/Maintenance/Operation

◆ Graded QA/ Improved Tech. Spec(AOT/STI)

◆ Risk monitoring system

□ 기타

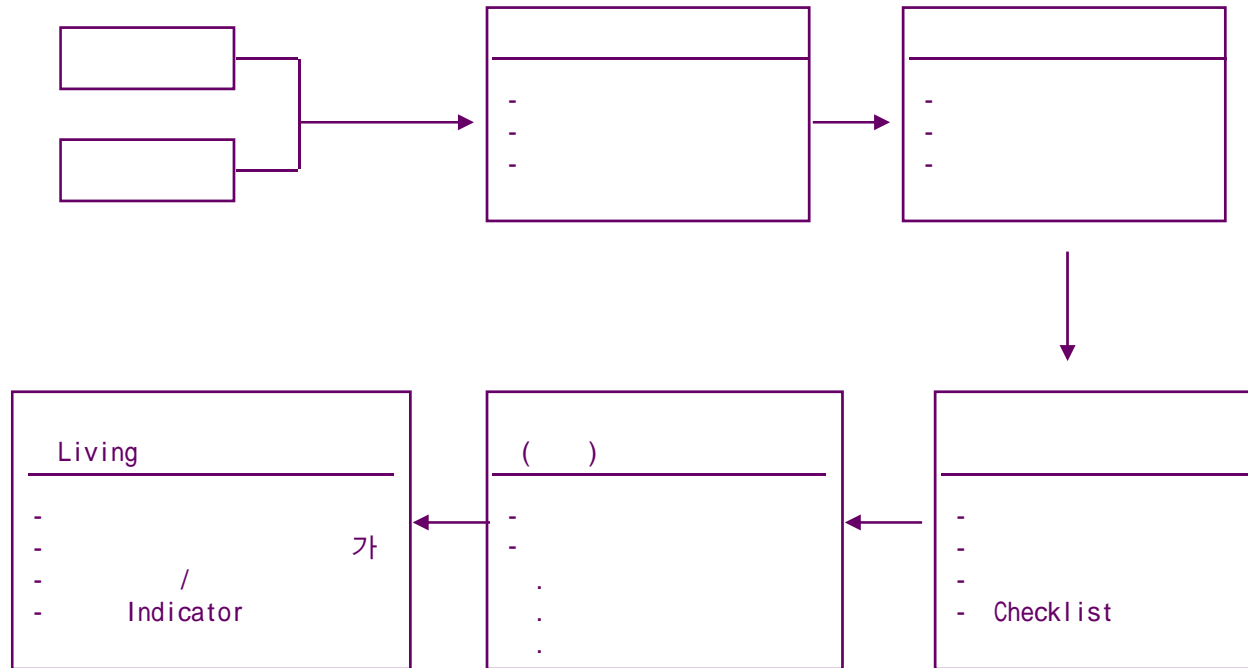
◆ 환경영향평가

◆ Missile 분석

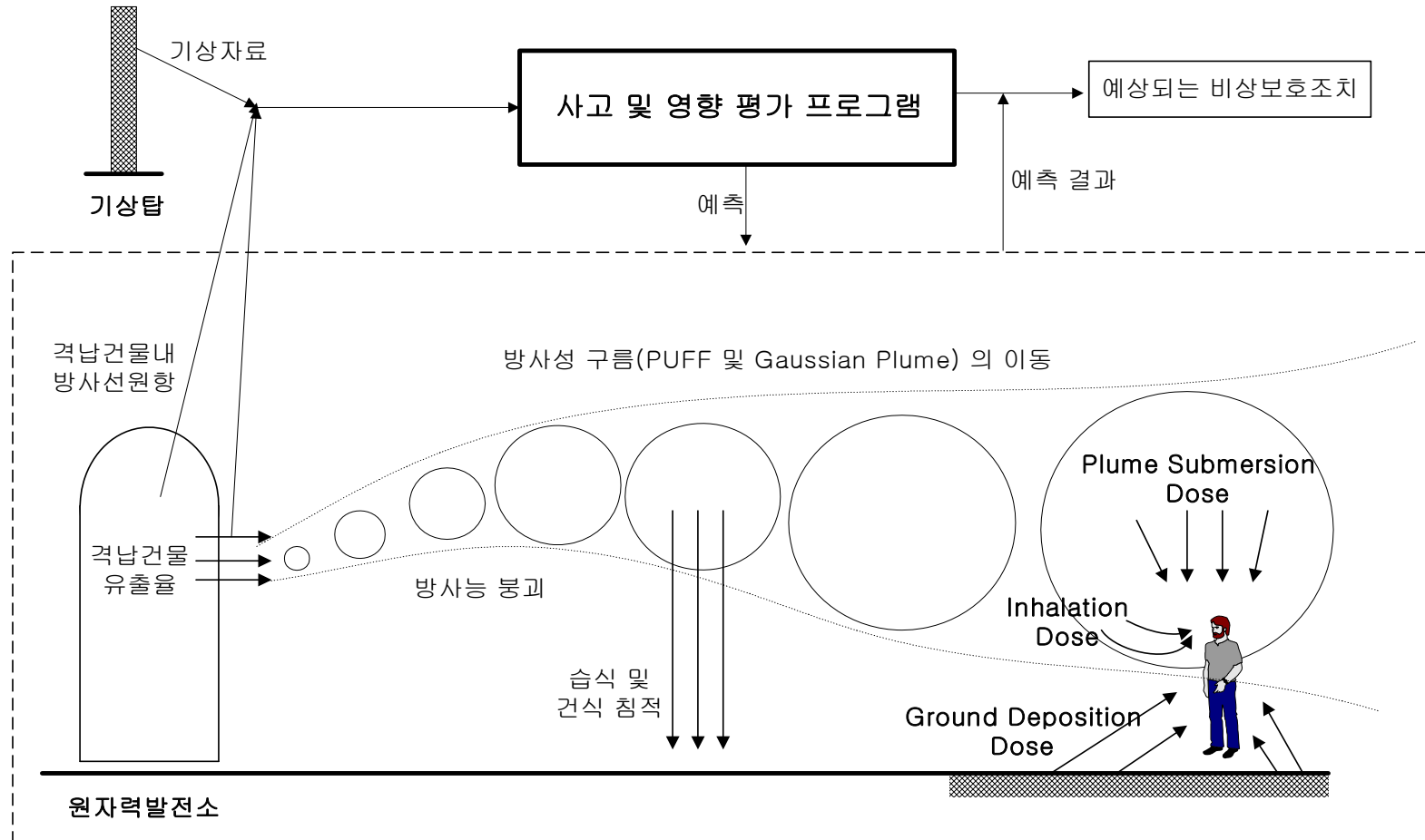
◆ 중하물분석

◆ Habitability 분석

RCM



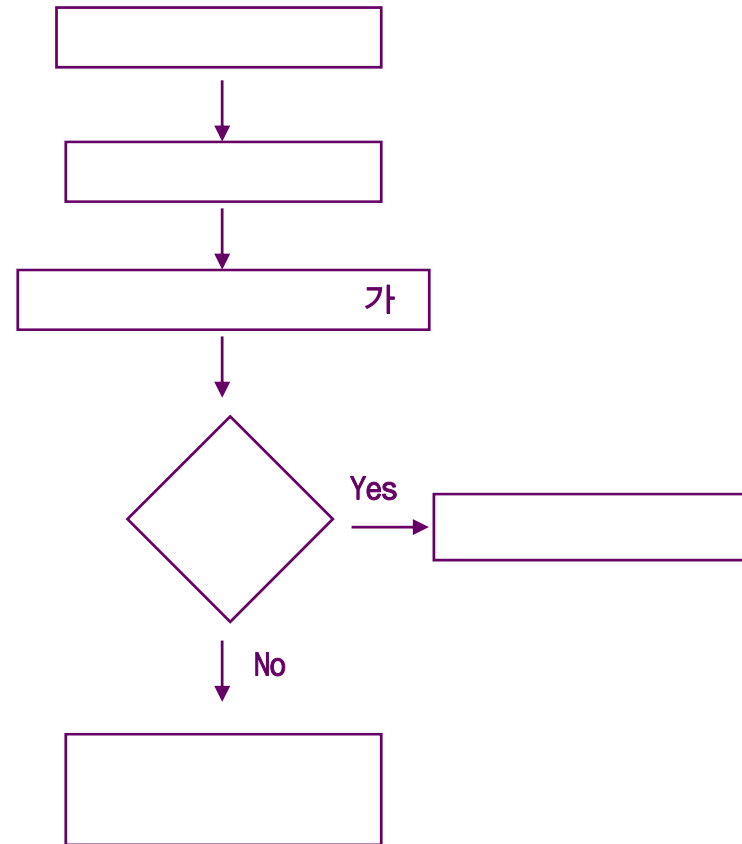
환경영향평가



비산물(Missile)분석

□ 분석 사고 종류 및 내용

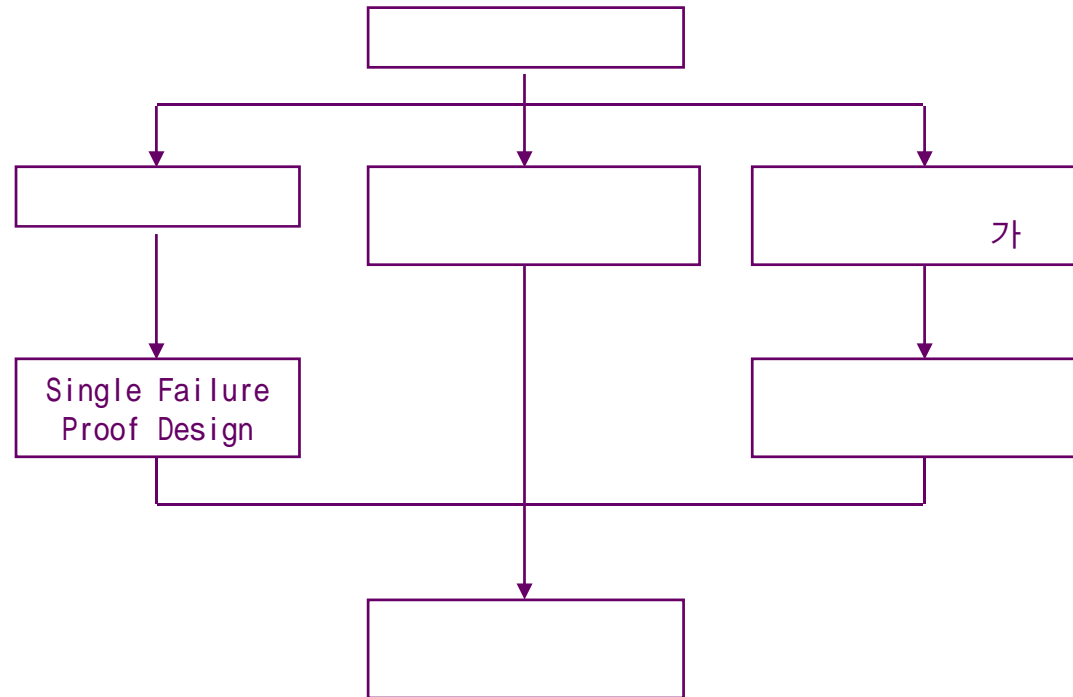
- ◆ 회전기기의 과속에 의한 하우징 파손
- ◆ 압력 용기의 과압에 의한 파손 및 비산물
- ◆ 회전기기 하우징 두께 여유도 평가
- ◆ 주변 인원/기기 영향 평가



중하물 분석

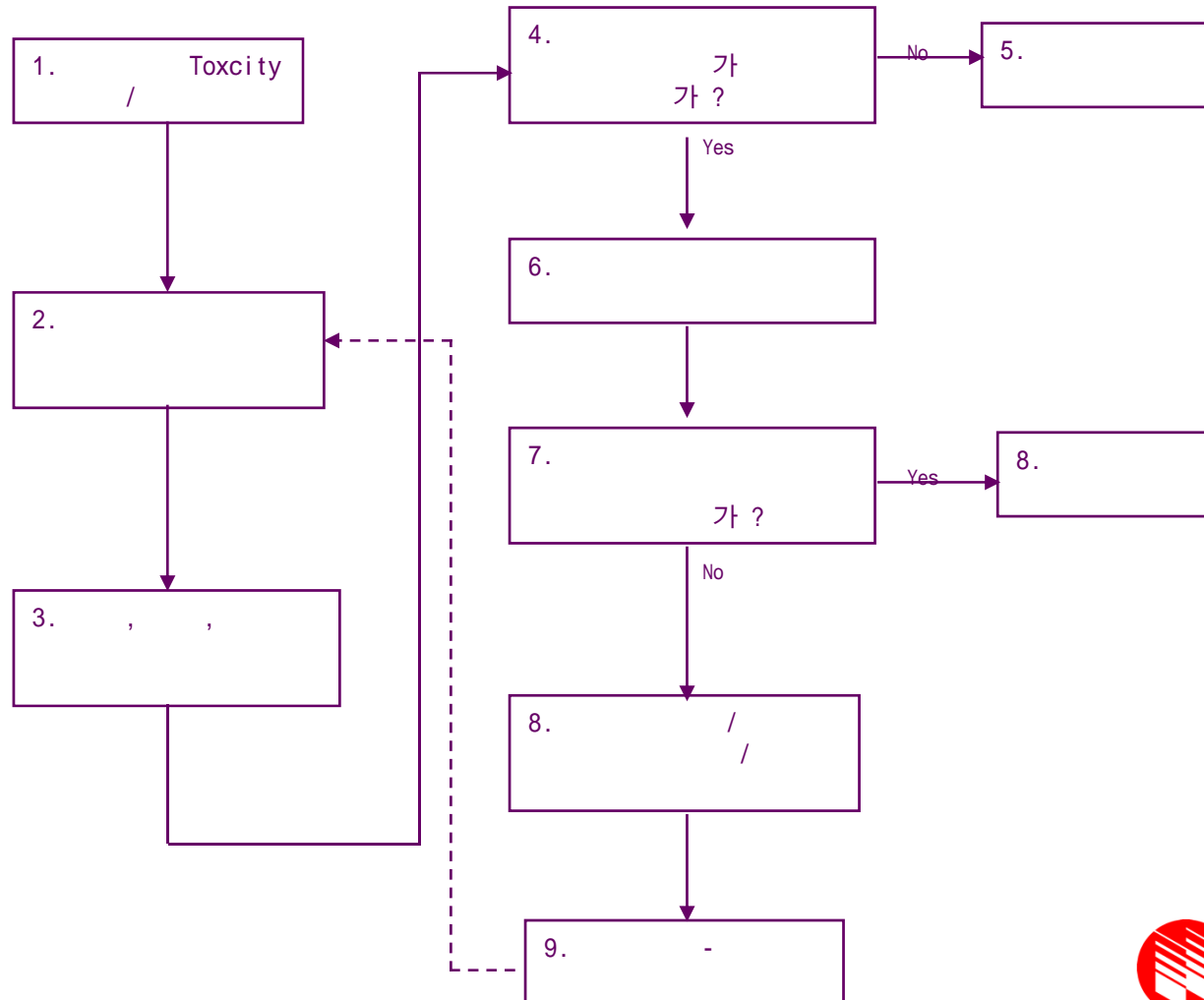
□ 개요

◆ 중하물 추락 영향 평가



Habitability 분석

☐ 독성물질 방출 빈도 및 환경/주조종실 영향 평가



기술개발

□ Forte 개발

- ◆ 세계에서 가장 빠른 정량화 엔진
- ◆ 현 미국, 스페인, 멕시코등 10여개 기관에 판매
- ◆ 현 NASA등 7개 기관과 판매 협의중

□ SAREX 개발중

- ◆ Forte 기능을 최대한으로 살린 통합 PSA Tool
- ◆ 내부, 지진, 화재, 홍수, L2

□ RIMS 개발예정

- ◆ 가동중 정비에 따른 위험도평가로 정비 일정 조정가능

Forte 계산속도

