

실제적 사고 관리를 위한 제언

2019. 05. 24

중앙대학교 정동욱

[내 생각은/정동욱]신고리 안전성 논란, 사고관리계획으로 풀어야

신고리 5, 6호기 건설 허가가 6월 23일 원자력안전위원회를 통과했다. 그런데 같은 부지에 여러 기의 원전이 들어서는 것에 대해 안전성 검토가 충분히 이루어졌는지를 두고 논란이 일고 있다. 우리나라는 한 부지에 여러 기를 두고 있다. 해외의 많은 원전도 두 기 이상을 동일한 부지에 두고 있다.

고리 원전 지역에 신고리 5, 6호기가 건설되면 10기의 원전이 들어서게 돼 세계 최대라고 한다. 그런데 고리, 신고리라고 해서 모두 동일 부지인가 하는 점도 생각해 보아야 한다. 인접 지역이라고 해서 모두 같은 부지라고 볼 수만은 없기 때문이다. 무엇보다 원전 안전성은 하나하나의 원전이 충분한 안전성을 확보하고 있는가가 중요하다. 만에 하나 인접한 원전에 이상이 발생했을 경우, 옆의 원전으로 전파될 수 있는가를 보아야 한다.



정동욱 중앙대 에너지시스템공학부 교수

원전의 안전에 영향을 주는 모든 설비는 인접한 원전에 상관없이 독립적으로 구성하게 되어 있다. 그런데 두 기의 원전이 같이 있다면, 독립적인 설비 외에도 지원 설비를 받는 데 유리할 수도 있다. 실제로 일본 후쿠시마 5, 6호기에서는 5호기의 비상전원을 6호기에서 공급받을 수 있었다. 다만, 두 기의 원전 사이에 안전성 간섭은 없어야 한다. 이는 법령에도 명시돼 있는 사항이다.

원전의 입지는 자연재해의 영향을 감안해 선정하고 설계는 기록된 자연재해의 최고치에 보수성을 더해 방비할 수 있도록 하고 안전심사를 거치도록 돼 있다. 하지만 새로운 자연재해의 가능성이 보인다면, 이에 대한 대비가 추가로 필요하다.

최근 발생한 울산 동부 해저지진에도 인접 지역의 원전들이 모두 정상가동한 것을 보면, 상당한 안전 여유를 가지고 있는 것으로 보이나, 더 큰 지진 발생 가능성이 없는지 살펴보아야 할 것이다. 2015년 6월 중대 사고에 대한 관리계획이 원자력안전법에 반영됐고, 사고관리에 대한 기술 기준이 올 3월 원자력안전위원회에서 제정됐다. 이 기준에 따르면, 원전 사업자는 극한 자연재해를 고려해 사고관리 계획서를 수립해야 하고 동일 부지 내 다수 원전의 영향을 고려하도록 돼 있다. 불시의 사고에 대해서도 철저한 대비를 의무화하고 있는 것이다. 사고관리계획은 설비뿐 아니라 원전 주변 지역의 피해를 방지하기 위함이다.

후쿠시마 원전 사고 당시 그에 인접한 오나가와 발전소에는 후쿠시마 원전보다 더 큰 쓰나미가 몰려왔다. 오나가와 원전을 관리하는 동북전력은 안전에 미리 투자해 예상되는 쓰나미보다 더 높게 방벽을 쌓았다. 그 결과 발전소가 안전했을 뿐만 아니라 주변 지역 주민들이 발전소로 대피했다. 안전경영에 대한 관점이 중요한 것이다.

이번 울산 동부 지진을 분석하면서 동해 남부 해저의 단층도 살펴보고 안전경영을 더욱 강화해야 할 것이다.

제53회 원자력안전위원회

의안번호	제 1 호	심의 의결 사항
의결일자	2016. 3. 24.	
공개여부	공개	

사고관리 관련 『원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙』 및 고시 제·개정(안)

제 출 자	위원장 이 은 철 (원자력안전위원회)
제출일자	2016. 3. 24.

사고관리계획 관련 법규

원자력안전법 제2조

25. "사고관리"란 원자로시설에 사고가 발생하였을 때 사고가 확대되는 것을 방지하고 사고의 영향을 완화하며 안전한 상태로 회복하기 위하여 취하는 제반조치를 말하며, [원자력안전위원회에서 정하는](#) 설계기준을 초과하여 노심의 현저한 손상을 초래하는 사고(이하 "중대사고"라 한다)에 대한 관리를 포함한다.

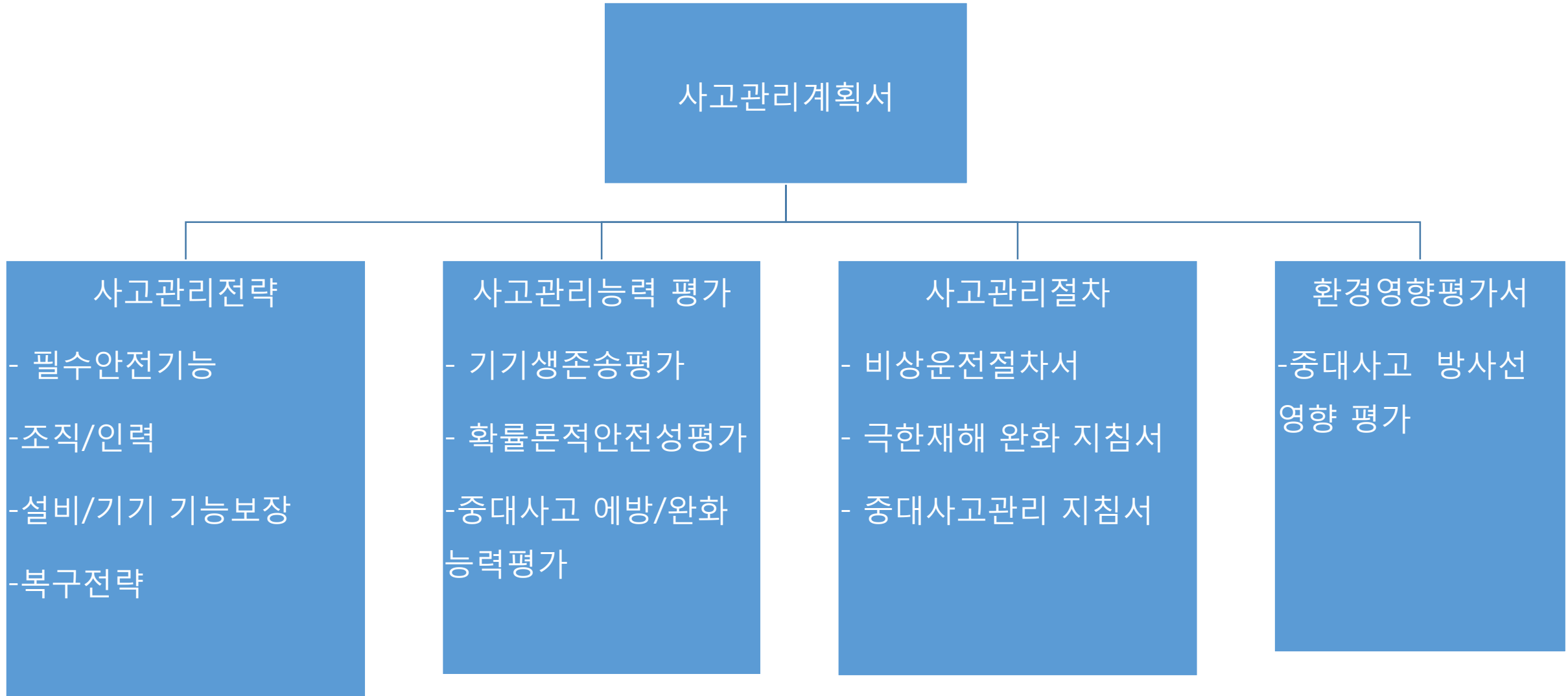
원자력안전법 제20조

② 제1항의 허가를 받으려는 자는 허가신청서에 발전용원자로 및 관계시설에 관한 운영기술지침서, 최종안전성분석보고서, 사고관리계획서(중대사고관리계획을 포함한다)

관련 규칙 및 고시

- 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 – 중대사고 정의 (다중고장사고 등), 사고 대처설비, 사고관리전략 등
 - * 제85조21의5 : 해당 부지에 다른 원자로시설이 존재하는 경우 다수기에 관한 사항을 고려할 것
- 사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준 규정 – 다중고장사고, 극한자연재해 등 사고 유형 및 관리목표
 - * 제9조 2항 – 초기사망 위험도 및 암사망 위험도 (전체 위험도의 0.1%이하) 또는 그에 상응하는 성능목표
 - Cs-137 100 TBq 초과 사고 발생빈도 $10E-6/RY$ 이하.
- 사고관리계획서 작성방법에 관한 규정 – 사고 목록, 관련 설비, 사고관리능력 평가(확률론적 안전성평가 포함), 비상운전절차서, 사고관리전략, 중대사고관리지침서, 극한재해 완화지침서 등
- 방사선환경영향평가서 작성 규정 – 중대사고로 인한 방사선영향 평가 요구
- 기타 원자로의 안전에 관계되는 시설에 관한 규정, 사용전 검사에 관한 규정, 정기검사 규정 – 중대사고 설비 포함.

사고관리계획서 포함 범위



다중 고장에 의한 사고

구분	사고의 종류
필수적으로 고려하여야 하는 사고	<ul style="list-style-type: none"> • 정지불능예상운전과도 • 발전소 교류전원 완전상실사고 • 증기발생기 전열관 다중파단사고 • 급수완전상실사고 • 계통간 냉각재상실사고 • 정지냉각기능 상실사고 • 최종열제거원 상실사고 • 소형냉각재상실사고와 동시에 발생하는 안전 주입 또는 재순환 상실사고 • 사용후핵연료저장조 냉각기능 상실사고
추가적으로 고려하여야 하는 사고	<p>확률론적 안전성평가 등을 통하여 위의 필수적으로 고려하여야 하는 사고와 유사한 수준의 발생 가능성 및 영향을 가지는 것으로 평가된 사고</p>

노심손상 이후 발생하는 위협요인

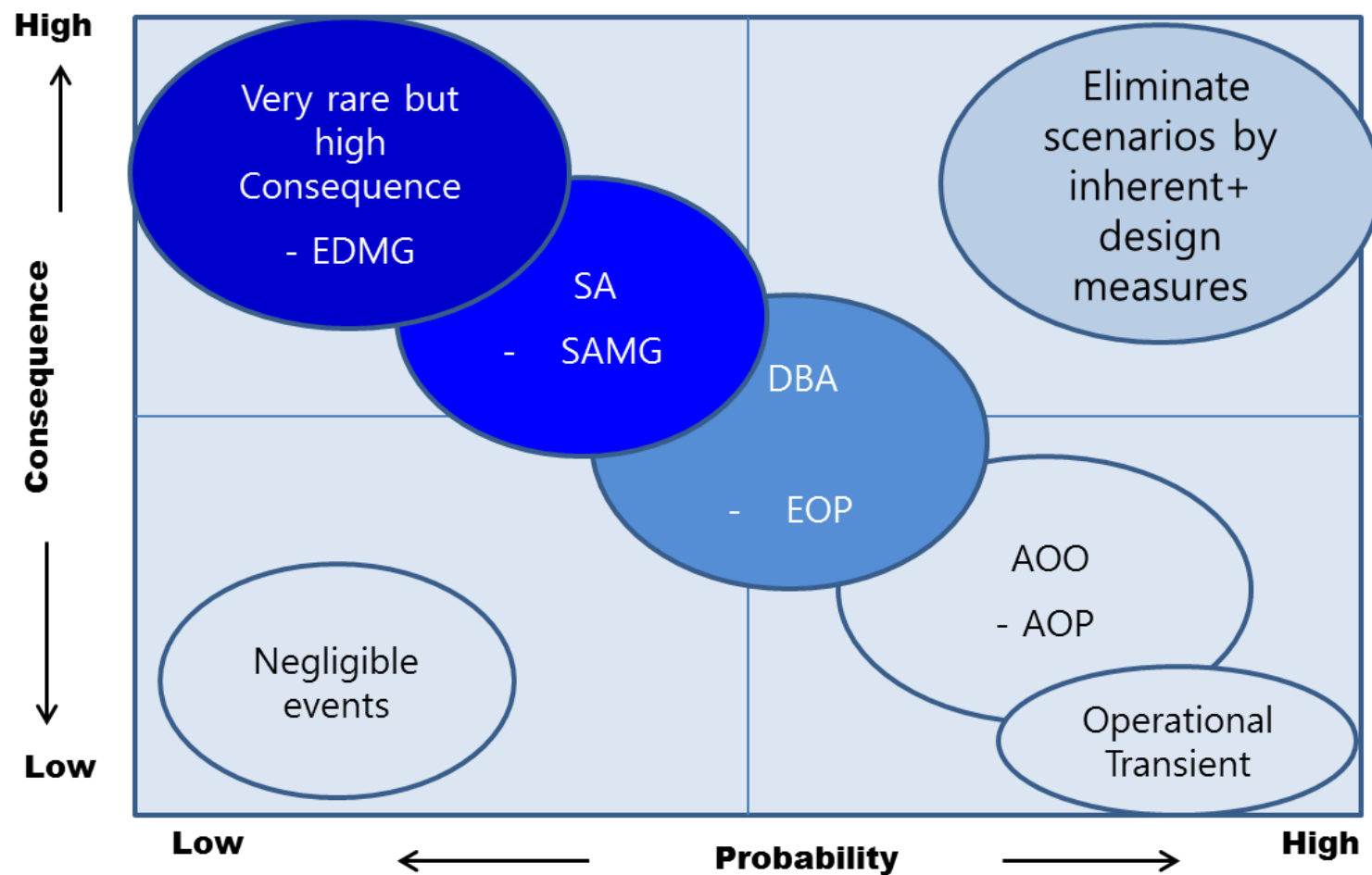
구분	위협요인
필수적으로 고려하여야 하는 위협요인	<ul style="list-style-type: none"> • 가연성기체 연소 또는 폭발 • 원자로격납건물 고온 또는 과압 • 노심용융물과 콘크리트의 반응 • 노심용융물의 고압 분출 • 원자로격납건물 직접가열 • 노심용융물과 냉각수의 반응 • 증기발생기 전열관 크리프 파손 등 원자로격납건물 격리경계 우회
추가적으로 고려하여야 하는 위협요인	<p>확률론적 안전성평가 등을 통하여 위의 필수적으로 고려하여야 하는 위협요인과 유사한 수준의 발생 가능성 및 영향을 가지는 것으로 평가된 위협요인</p>

일본 신안전법 사고관리 범위 정의

사고시퀀스그룹	주요 시퀀스(일본 센다이원전 자료)
2차 냉각계로부터의 제열기능 상실	주급수 유량 상실 + 보조급수 실패
전교류 동력 전원상실	외부전원 상실 + 비상용 소내 교류전원 상실
원자로 보조기기 냉각기능 상실	원자로 보조기기 냉각기능 상실 + RCP 밀봉 LOCA
원자로 격납용기의 제열기능 상실	중파단 LOCA + 격납용기 스프레이 주입 실패
원자로 정지기능 상실	원자로 트립이 필요한 기인사건 + 원자로 트립 실패
ECC 주수기능 상실	중파단 LOCA + 고압주입 실패
ECC 재순환기능 상실	대파단 LOCA + 저압재순환 실패
격납용기 바이패스	IS-LOCA 및 SGTR+증기발생기의 격리 실패
붕괴열 제거기능 상실 (정지중)	잔열제거기능 상실
전교류 동력전원 상실 (정지중)	외부전원 상실 + 비상용 소내 교류전원 상실
원자로 냉각재의 유출 (정지중)	원자로 냉각재압력 경계기능 상실
반응도의 오투입 (정지중)	반응도의 오투입

격납용기 파손 모드	주요 시퀀스(일본 센다이원전 자료)
<ul style="list-style-type: none"> 격납용기 대기 압력·온도에 의한 정적 부하 (격납용기 과압, 과온) 	LBLOCA + LPSI 실패 + 살수 실패 LOOP + DG 실패
<ul style="list-style-type: none"> 고압용융물 방출 / 격납용기 대기압 직접 가열 	LOOP + DG 실패 (AFW 실패 고려)
<ul style="list-style-type: none"> 원자로 압력용기 밖의 용융연료 일차냉각재 상호작용 	LBLOCA + LPSI 실패 + 살수 재순환실패 (HPSI 실패도 고려)
<ul style="list-style-type: none"> 수소연소 	LBLOCA + LPSI 실패
<ul style="list-style-type: none"> 용융노심·콘크리트 상호작용 	LBLOCA + LPSI 실패 + 살수 실패

리스크 개념과 원전 사고 대응



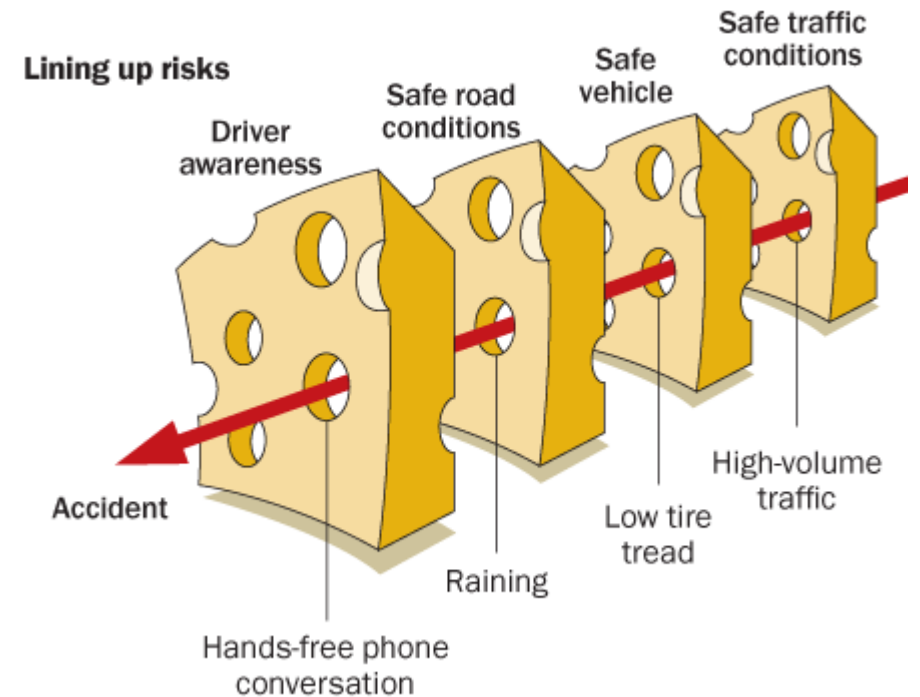
- 원자력 안전 개념

- Defense in Depths
- Diversity and Redundancy
- Inherent Safety Features
- Automatic Actuation
- Response Procedures
 - prevention – protection – mitigation – evacuation

Background Assumptions for Safety Design Concepts
Errors in design
Equipment occasionally fails
People make mistakes

그럼에도 불구하고.....

SWISS CHEESE FAILURE MODEL



원전 사고 관리의 기본 개념

- 전통적인 다중 방어 전략 (Defense-In-Depth)은 사고 방어 계통/기기, 절차 실패에 대비하여 Add-on 개념으로 추가의 방어 설비/절차를 도입
 - EDG A, EDG B, AAC
 - SIS, Ex-Vessel Cooling, Containment Cooling
 - 다중 방호벽
 - AOP, EOP, SAMG
 - Swiss Cheese의 대표적인 사례는 다중 방어 설비의 동시 실패
 - 다중 설비의 common mode failure (인적 오류도 가능)
 - 지진, 쓰나미, 태풍과 같은 자연재해
 - Add-on의 한계와 동시 다발적인 다중방어 설비의 손상 대처를 위해 FLEX (이동형장비 활용 방어) 전략 도입
- Accident Resilience (사고 회복력)를 사고관리에 반영 필요 – 복구 자원 (인적, 물적), 복구 시간, 복구 방법 등
 - 예) EDG 고장 시 몇 시간안에 복구할 수 있는가. 방사선 오염 시 복구할 수 있는가 등
 - Add-on 개념으로 DID를 확보할 수 없는 Backbone System (CCWS, Power Distribution Line)에 중요

Concept of System Resilience

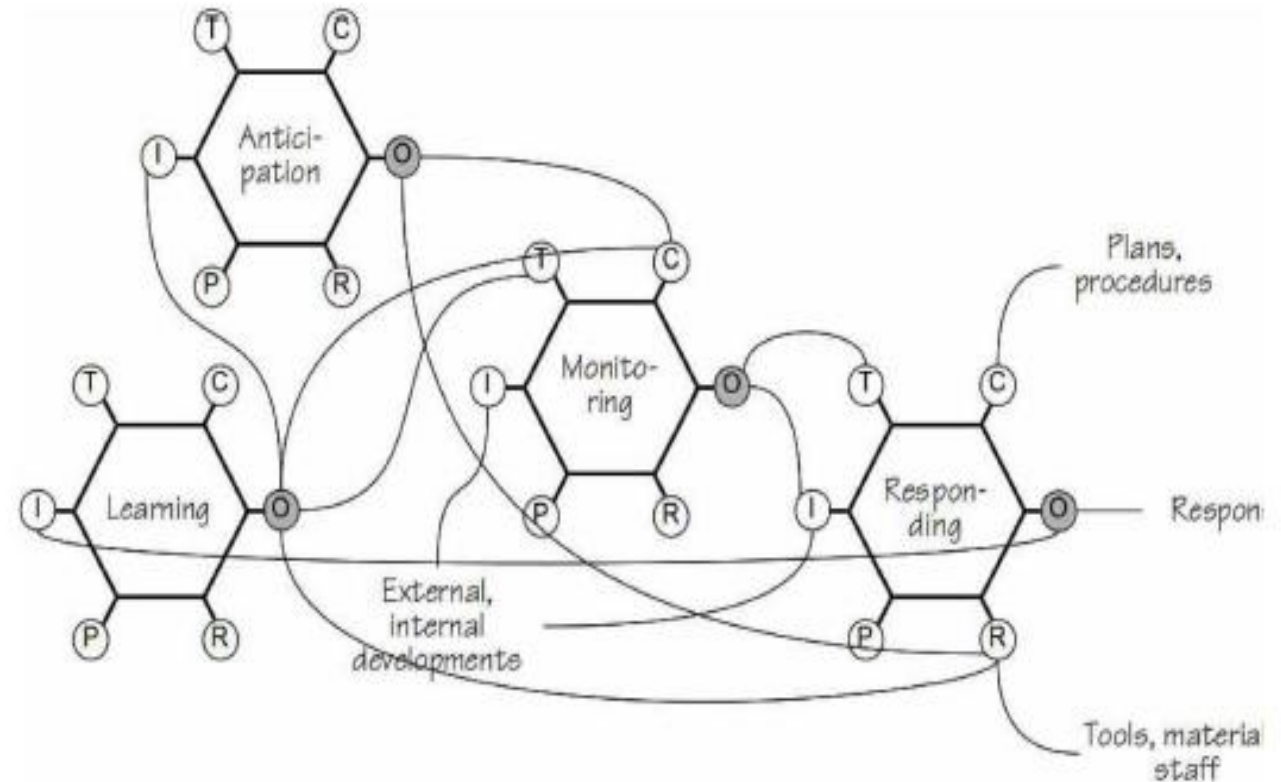
4 Functions for Resilience

- Responding
- Monitoring
- Learning
- Anticipating

To be resilient, a system must respond quickly, monitor the situation, learn from experience and have a capability to anticipate what to happen

6 Attributes of Resilience Functions

Input(I), Output(O), Precondition(P), Resource(R), Control(C), and Time(T)



(source: E. Hollnagel and Y. Fujita, "The Fukushima Disaster – Systematic Failures As the Lack of Resilience")

사고 관리 관점에서 Resilience 능력

비정상 상황 (사고 상황)에 대응하는 조직/시스템의 사고 대응 복원력 (Resilience)을 구성하는 4요소

- 학습능력 (Learning) – 과거의 사례, 경험을 내재화하여 긴급 비정상상황에 대한 판단 능력
 - * 사건/사고 경험 데이터의 축적/분석과 학습의 일상화
- 예측능력 (Anticipating) – 학습능력을 바탕으로 비정상 상황의 전개 추이를 추론하는 능력
 - * 다양한 사고 시나리오의 분석과 분석 도구(전산 시뮬레이션 Tool 등)의 확보
- 감시능력 (Monitoring) – 전조 증상의 감지, 이상 상태의 측정, 사고 진행 상황의 파악 능력
 - * 다양한 계측방법/도구의 확보, 기기 감시 계측 데이터 분석, 사고 조건에서의 계측기 생존성 등
- 대응능력 (Responding) – 학습, 예측, 감시를 바탕으로 적절한 대응 조치 능력
 - * 대응 방법/수단, 절차, 팀웍, 리더쉽 등

사고 발생 후 조치 관점 (mitigation)에서는 안전기능의 회복 능력이 중요

More specifically, resilience in nuclear safety is the ability to recover the function to the level necessary to maintain the pre-determined safety or risk conditions

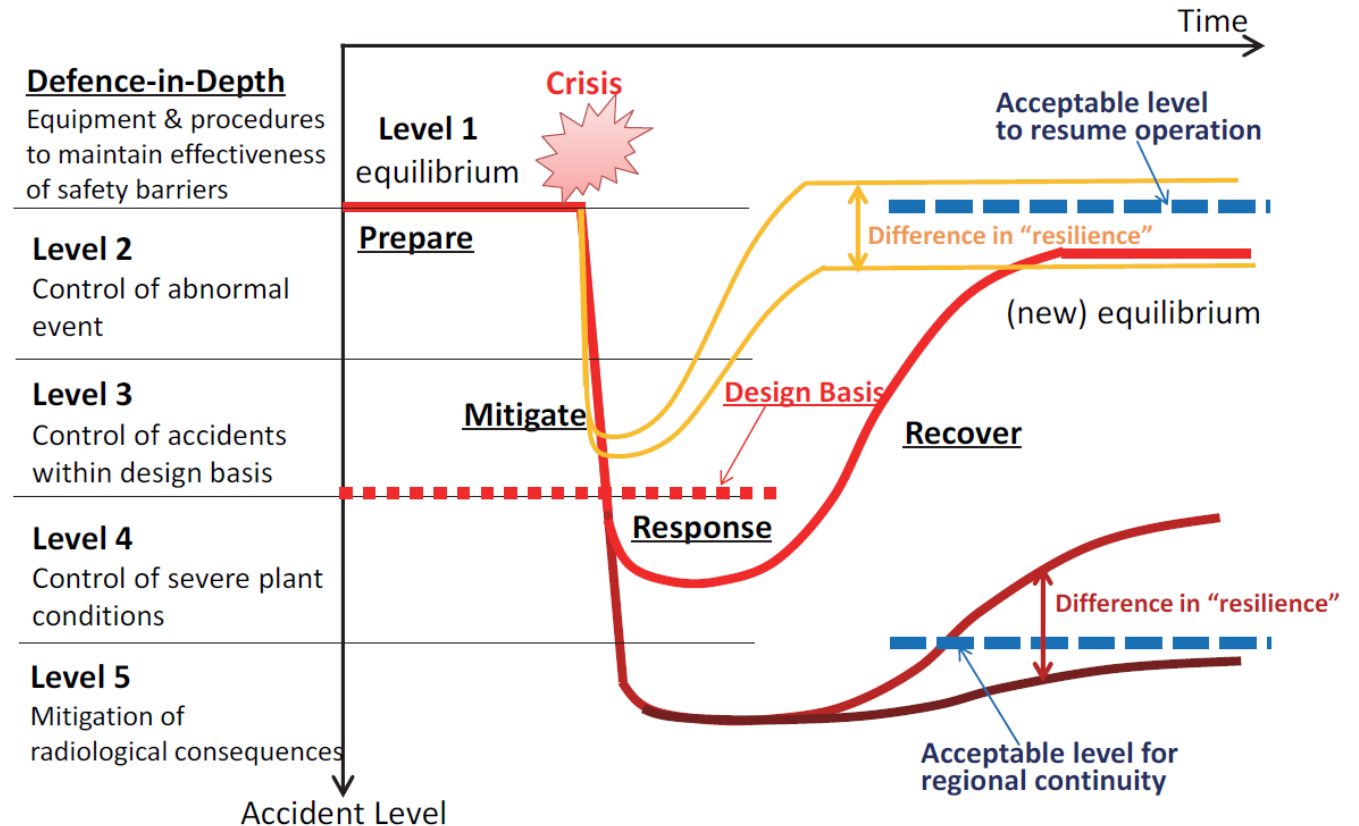
-Redundancy

-Diversity

-Restorableness : accessibility,
repair time, teamwork efficiency

Resilience: Extension of Defence-in-Depth

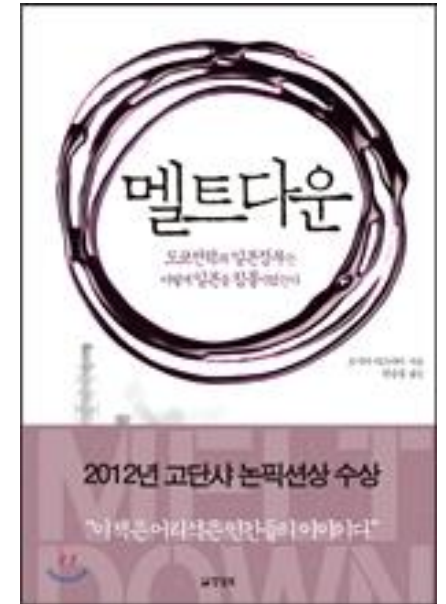
- Response to & Recover from the accident
- Preparation for the accident considering all phases (prevention, mitigation, response , recovery)



되돌아 보는 후쿠시마 사고 경험의 시사점

- 지진으로 인한 도로 파손 – 이동형 지원장비 (발전기)의 현장 접근 불가
헬기 사용 불가 – 발전기 무게를 감당할 수 없었다고 함.
- 발전소 모니터링 시스템 붕괴로 사고 상황 파악 불가
Instrumentation, Lighting, Accessibility, Status identification
깜깜이 속에서 사고대응 결정(사고관리 절차서는 계측기가 정상작동 한다는
가정 하에 작성됨)
- 유무선 통신라인 파손(위성전화기 6대만 가용) – **통신, 통신, 통신**
- 전원 케이블 Hook-up 단자 불일치로 케이블 체결 지연
- 현장 보다 본사, 정부의 지시 대기로 중대 결정 지연 – **전문가, 전문가**
- 발전소 수동 운전 설비 위치 파악 지체 – 평상 시 사용하는 기기가 아님으로
숙지하기 쉽지 않음 – **Training, Training, Training**
- ERF (내진안전동)과 발전소 현장 이격으로 현장 작업원 이동 시 상당 시간
소요 (도보 이동만 가능)

*** 후쿠시마 사고 당시 현장에서의 다양한 경험, 기록에 대해 학습관점에서 검토 필요**



후쿠시마 사고 후 재가동을 위한 타카하마 원전의 사례(1,2('74,'75) 및 3,4('85)호기 준공 826~870 MWe)

Overview of the New Regulatory Standards

Conventional regulatory standards

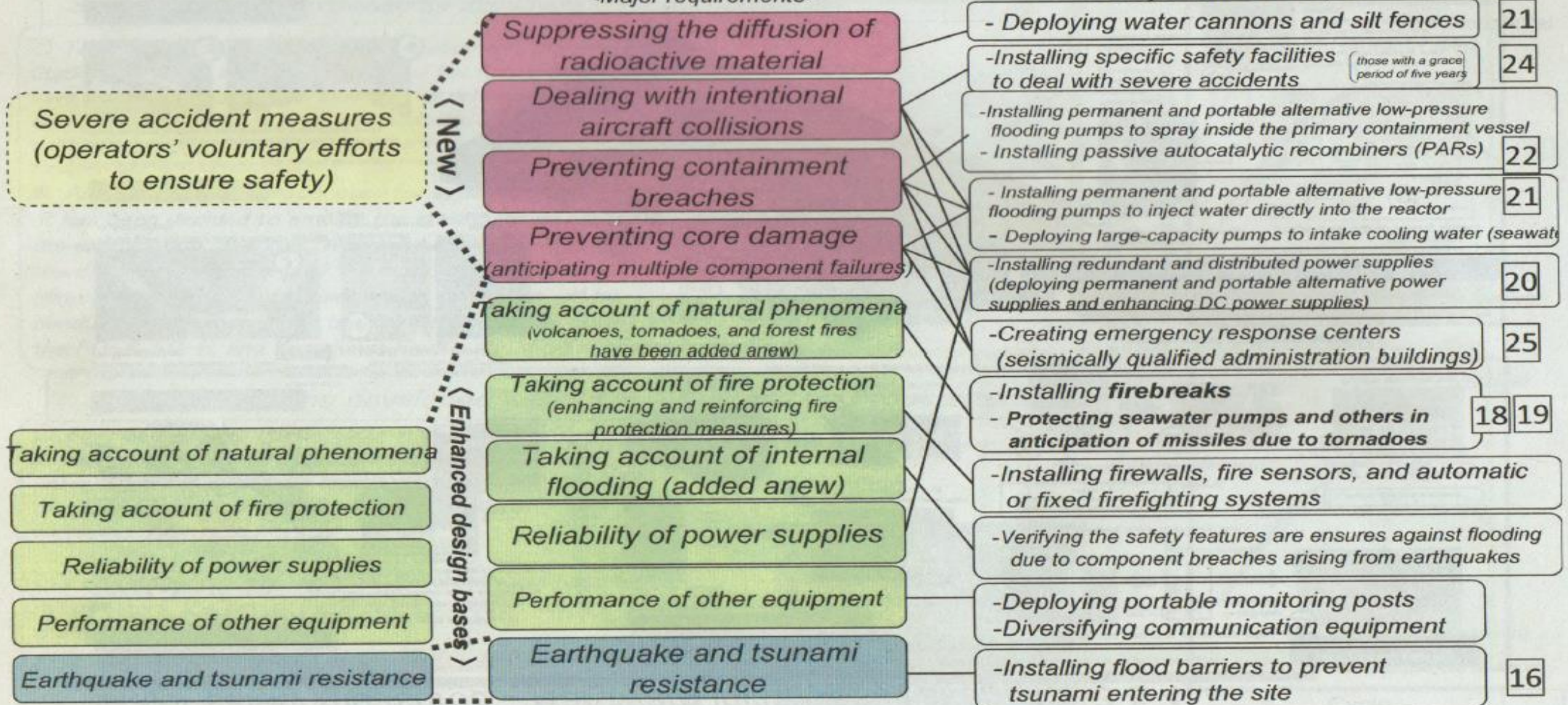
No core damage is postulated.
(Only single failures are postulated, etc.)

New regulatory standards (enforced in 2013.7)

Design bases have been enhanced to prevent severe accidents and new standards have been developed to deal with severe accidents and terrorist attacks should they ever occur.

<Major requirements>

<Major action examples>



Measures against Fires

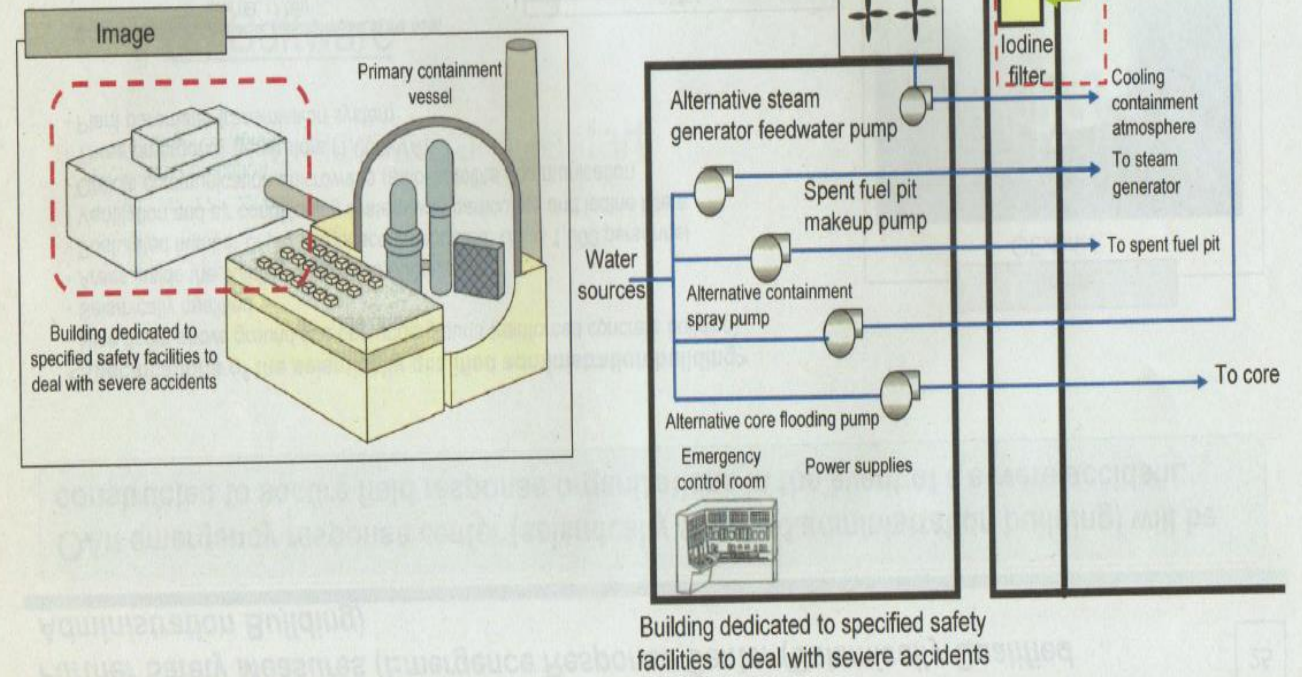


Further Reinforcement Measures (Specified Safety Facilities to Deal with Severe Accidents)

○ Specified safety facilities to deal with severe accidents will be installed, which are necessary to prevent containment breaches in the event significant core damage occurs due to loss of features, including core cooling features, as a result of an intentional aircraft collision, etc.

○ As specified safety facilities to deal with severe accidents, a permanent emergency control rooms, pumps and power supplied required for core cooling, and others will be installed in a dedicated building

[With a five-year grace period]



타카하마 원전 시사점

- 일견 과도할 정도의 안전성 보강 투자
 - * 전원공급: 고정형 전원공급 2대/호기, 이동형 전원공급 2대/호기 + Backup 추가
 - * 원전 부지 주변에 산불진입방지 구역 공사 (폭 18 m의 firebreak 구역 확보)
 - * 중대사고 대응 전용 제어빌딩 및 대체 냉각계통설비 추가
- 사고 대응 팀을 발전소 직원 뿐 아니라 인접지역 발전소 직원 및 용역업체, 발전소 설계/제작 업체를 포함하여 구성
- 발전소 공급자인 미쓰비시 중공업은 인접 도시인 고베에 별도의 사고대응 센터를 구성 지원
- CEO를 포함한 대규모 훈련 실시
- 70명의 발전소 주재 초기 대응팀 구성
- 총 900여명의 사고 대응 조직 – 효율적인 대응 관리는 검토 필요

실제적 사고관리를 위한 제언

사고관리계획의 의의와 기대 효과

- 중대사고의 규제요건화
 - 원전 안전 평가에 고려해야 하는 사고 범위의 확대
 - 사고관리 목표의 구체적 설정
 - 사고관리의 체계적 구성 : 조직체계, 인적요소, 설비요소
 - 사고 대응 절차의 통합적 고려
- > 원전 사고 대응 능력을 한단계 업그레이드 할 것임

사고관리계획의 발전 방향

- 분석/평가 보다 실제적 효과를 타겟
 - * 프랑스 Hardened Safety Core 개념
궁극적으로 최종 열침원과 전원 확보에 초점
 - 자연재해의 영향 (광역 사고)에 대한 고려
 - 현장 대응 훈련, 전문가, 조직 리더십에 초점
 - 안전 기능의 복구 능력에 대한 평가 필요
- > Resilience (회복력) 개념의 도입

결 언

- 안전규제는 기본적인 준수지침으로 사업자는 규제요건 충족 이상을 목표로 하여 안전성 확보 추진 요망
- 복잡한 의사결정 구조(X) 신속한 안정에 초점을 둔 단순한 사고관리 전략 권고
- 현장 중심 사고관리, 전문가 양성, 훈련(야간 훈련도 필요), Feedback과 지속적인 개선
- 안전성 강화는 필요한 투자. 안전성을 강화하면서도 원전의 강점인 경제성을 어떻게 유지할 것인가에 대한 고민이 필요

감사합니다.

Hurricane Florence No Match for Nuclear Energy's Resilience

NEWS RESILIENCY

CHRIS CHARLES | September 20, 2018



- Nuclear power plants are among the most robust in the U.S. civilian infrastructure
- These critical national assets help bring back power quickly to storm-ravaged communities
- All the reactors weathered the hurricane with no damage or safety issues

(source: NEI website)