

*Korean Nuclear Society Spring Meeting  
May 13-14, 2021*

2021. 5. 14

# **Risk-Based Approach for Determining Shutdown of Operating Nuclear power Plants in an Earthquake**

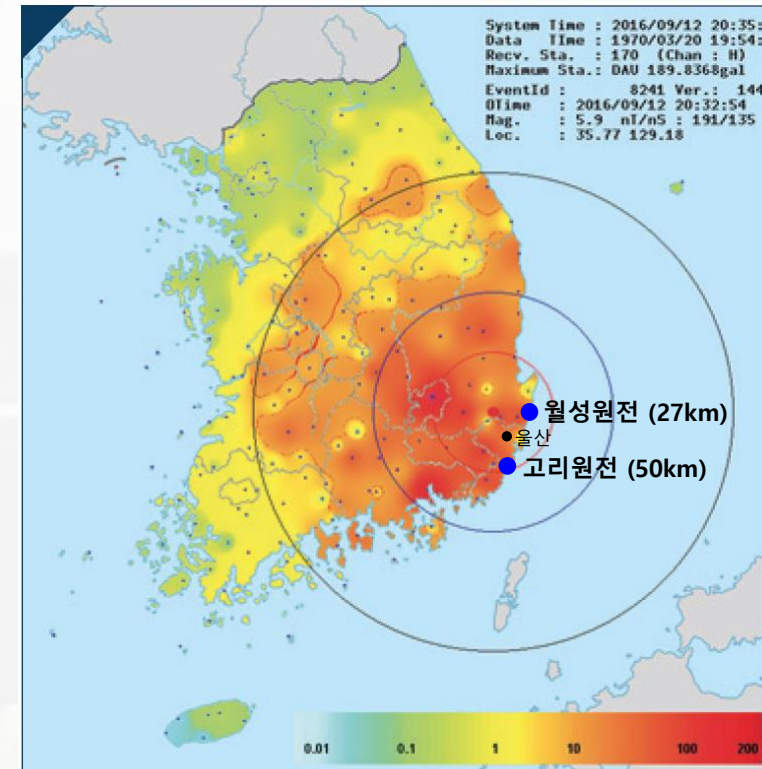
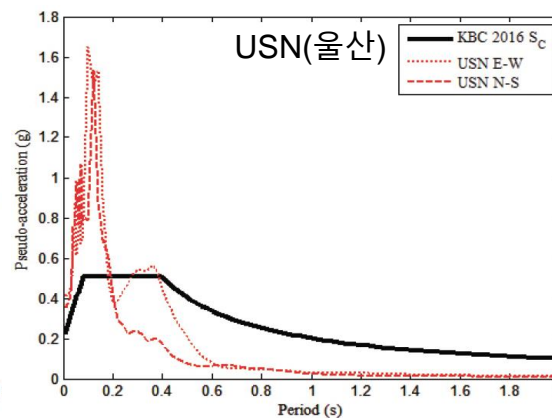
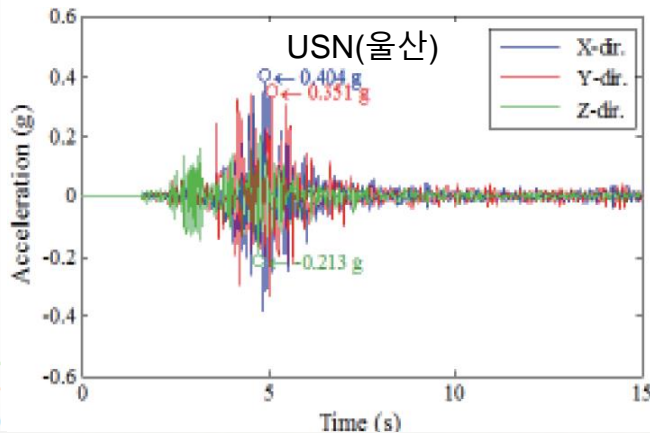
**Young-Sun Choun, Tae-Hyun Kwon**  
*Korea Atomic Energy Research Institute*

# 2016 경주지진

- 발생일시: 2016년 9월 12일 20시 32분 54초
- 진앙: 경주시 남남서쪽 8km 지역, 깊이 15km 지점
- 규모: 5.8
- 진도: VI(경주, 대구), V(부산, 울산, 창원)

관측소	진앙거리 (km)	지반분류	최대지반가속도 (g)		
			동서	남북	수직
MKL(명계리)	5.86	S <sub>B</sub>	0.285	0.257	0.088
USN(울산)	8.23	S <sub>C</sub>	0.404	0.351	0.213
DKJ(덕정리)	22.15	S <sub>B</sub>	0.078	0.092	0.057

S<sub>B</sub>(보통암 지반), S<sub>C</sub>(매우 조밀한 지반)



출처: 912지진 백서

# 월성원전 지진대응

- 지진감시설비 계측기록 분석

- 최대가속도

- 1호기: 0.0424g(전진), 0.0981g(본진, 수평), 0.0394g(본진, 연직) < 0.1g
- 2호기: 0.0425g(전진), 0.0832g(본진) < 0.1g

- 응답스펙트럼(본진)

- 1호기(보조건물 기초): 0.426g (7.3Hz) > 0.3g (OBE응답스펙트럼)
- 1호기(원자로건물 외벽 EL.111.6m):  
0.723g (16.8Hz 부근) > 0.55g (DBE응답스펙트럼)
- 2호기(자유장): 0.330g (7.1Hz) > 0.285g (OBE응답스펙트럼)

# 월성원전 지진대응

- 비정상절차서 적용

- 주요 운전변수 확인
- 주요설비의 건전성 확인을 위한 현장점검 실시
- OBE응답스펙트럼 초과 판단
- 1~4호기 수동정지, 비상운전절차서 수행



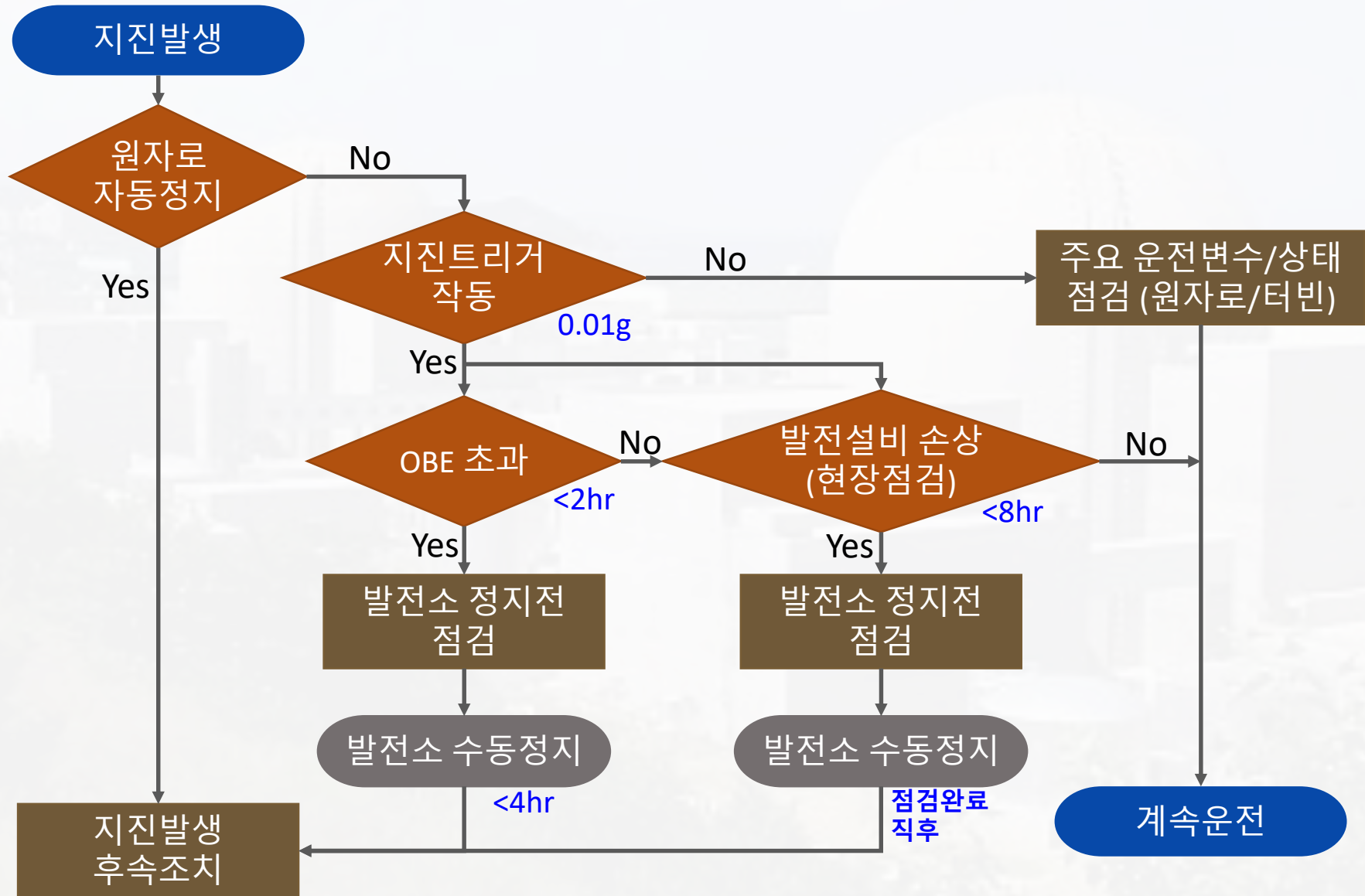
# 월성원전 지진대응

- 2016.09.12 19:44, M5.1 경주지진(전진) 발생
- 2016.09.12 20:33, M5.8 경주지진(본진) 발생
  - 계측지진 응답스펙트럼 분석 결과 운전기준지진(OBE) 응답스펙트럼 초과 확인
  - 1-4호기 원자로 수동정지 결정
- 2016.09.12 23:56, 1호기 원자로 수동정지 **D+(3:23)**
  - 05:45 냉각/감압 완료
  - 12:33 원자로 보증정지 도달
- 2016.09.13 00:04, 2호기 원자로 수동정지
  - 06:05 냉각/감압 완료
  - 13:15 원자로 보증정지 도달
- 2016.09.13 00:10, 3호기 원자로 수동정지
  - 09:35 냉각/감압 완료
  - 10:53 원자로 보증정지 도달
- 2016.09.13 00:15, 4호기 원자로 수동정지 **D+(3:42)**
  - 09:30 냉각/감압 완료
  - 11:00 원자로 보증정지 도달

# 월성원전 지진대응

- 수동정지 후 재가동을 위한 안전성 점검 및 평가  
→ 손상규모 '0'등급 확인
- 원자로 재가동

# 원전 가동정지전 대응절차



# 규제지침

- OBE 초과기준 (KINS/RG-N04.18, Rev.2)

‘지진발생 전 계획 및 지진발생 직후 원자력발전소 운전원 조치사항’

- 최대지반가속도 점검

- 3방향 자유장 지반운동 성분 중 어느 한 성분의 최대가속도 값이 OBE 최대지반가속도보다 크면 OBE 초과

- 응답스펙트럼 점검

- 3방향 자유장 지반운동 성분 중 어느 한 성분이라도 5% 임계 감쇠비에 대한 응답스펙트럼이 다음 값보다 크면 OBE 초과
  - ❖ 2~10Hz의 진동수 범위에 대하여 해당 설계응답스펙트럼 가속도값 (OBE가 설계에 사용되었으면 OBE 스펙트럼, 그렇지 않은 경우는 SSE 스펙트럼의 1/3) 또는 스펙트럼 가속도 0.2g 중 큰 값, 또는
  - ❖ 1~2Hz의 진동수 범위에 대하여 해당 설계응답스펙트럼 속도값 (OBE가 설계에 사용되었으면 OBE 스펙트럼, 그렇지 않은 경우는 SSE 스펙트럼의 1/3) 또는 스펙트럼 속도 6in/sec (15.24cm/s) 중 큰 값



# 규제지침

- OBE 초과기준 (KINS/RG-N04.18, Rev.2)
  - 자유장 지진계측기가 설치되어 있지 않거나 계측기 또는 데이터 처리 하드웨어, 소프트웨어가 작동 불능인 경우
    - 구조물 기초에서 계측한 자료만 적용 가능한 경우
      - ❖ 구조물 기초에서 계측한 자료와 그에 대응하는 OBE 기준값 비교
    - 자유장 지반과 구조물 기초에 설치된 계측기에서 지진 데이터가 계측되지 않거나, 데이터 처리 불능으로 최대지반가속도 및 응답스펙트럼 점검이 불가능한 경우
      - ❖ 다음 조건 중 하나라도 해당되면 OBE 초과
        - ✓ 발전소로부터 5km 이내 지역에서 MMI VI 이상의 지진 발생
        - ✓ 발전소에서 지진을 감지하고 규모 6.0 이상인 경우
        - ✓ 발전소로부터 200km 이내 지역에서 규모 5.0 이상의 지진 발생

# 규제지침

- 가동정지기준 (KINS/RG-N04.18, Rev.2)

- OBE 초과

- 최대지반가속도 및 응답스펙트럼을 점검한 결과 둘 중 하나라도 기준값을 초과한 경우 OBE 초과로서 발전소 정지
- 발전소가 자동정지 되었을 때에도 OBE 초과 여부 결정

- 손상

- 현장검사 결과 손상을 발견한 경우 발전소 정지
- 현장검사 평가는 지진발생 후 8시간 이내에 완료
- OBE를 초과하지는 않았으나 발전소에 손상이 발생했을 경우 적시에 발전소의 안전정지 계획 수립 및 정지

# 규제지침

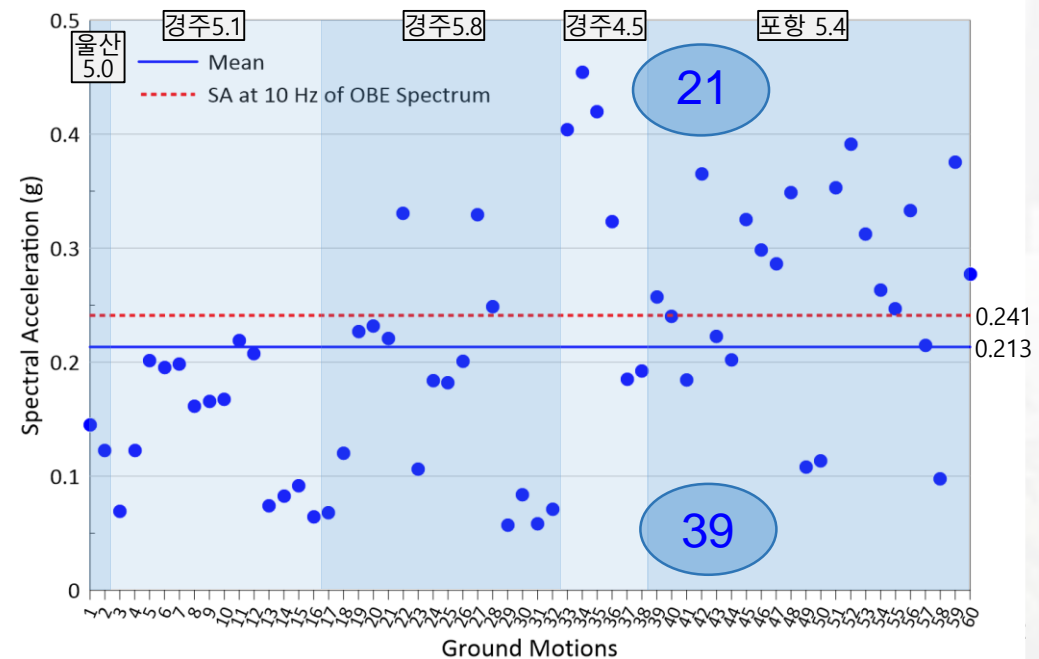
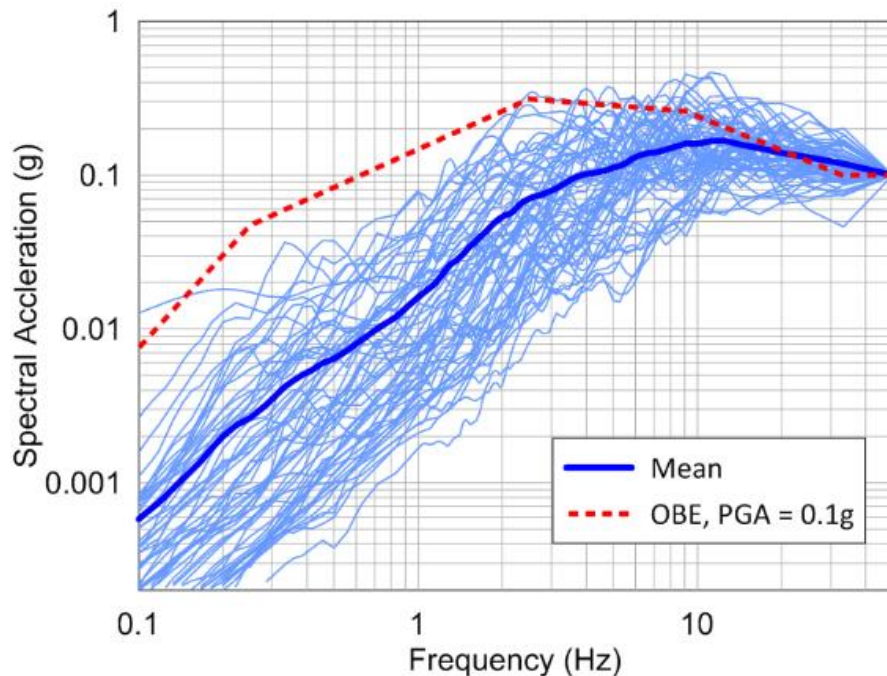
## • 규제지침 비교

지진대응지침	KINS RG-N04.18 (2017)	USNRC RG 1.166 (1997) & EPRI 3002005284 (2015) & ANSI/ANS-2.23 (2016)
OBE 초과기준	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최대지반가속도 점검</li> <li>• 응답스펙트럼 점검</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 응답스펙트럼 점검</li> <li>• CAV 점검</li> </ul>
가동정지 기준	점검 결과 중 하나가 기준치 초과 시 OBE 초과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 두 점검 모두 초과 시 OBE 초과</li> <li>• 두 점검 중 하나가 기준치를 초과하지 않으면 OBE 초과하지 않음</li> <li>• 하나의 점검만 수행 시 나머지 점검은 OBE 초과</li> </ul>

# 국내지진동에 대한 OBE 초과기준 평가

## • 국내지진동의 특성

지진	규모	지진동 개수	진앙거리 (km)		PGA (g)	
			최대	최소	최대	최소
울산(2016)	5.0	2	59	59	0.009	0.005
경주(2016)	5.1	14	57	6	0.415	0.011
경주(2016)	5.8	16	58	7	0.431	0.026
경주(2016)	4.5	6	26	7	0.079	0.014
포항(2017)	5.4	22	78	8	0.274	0.004

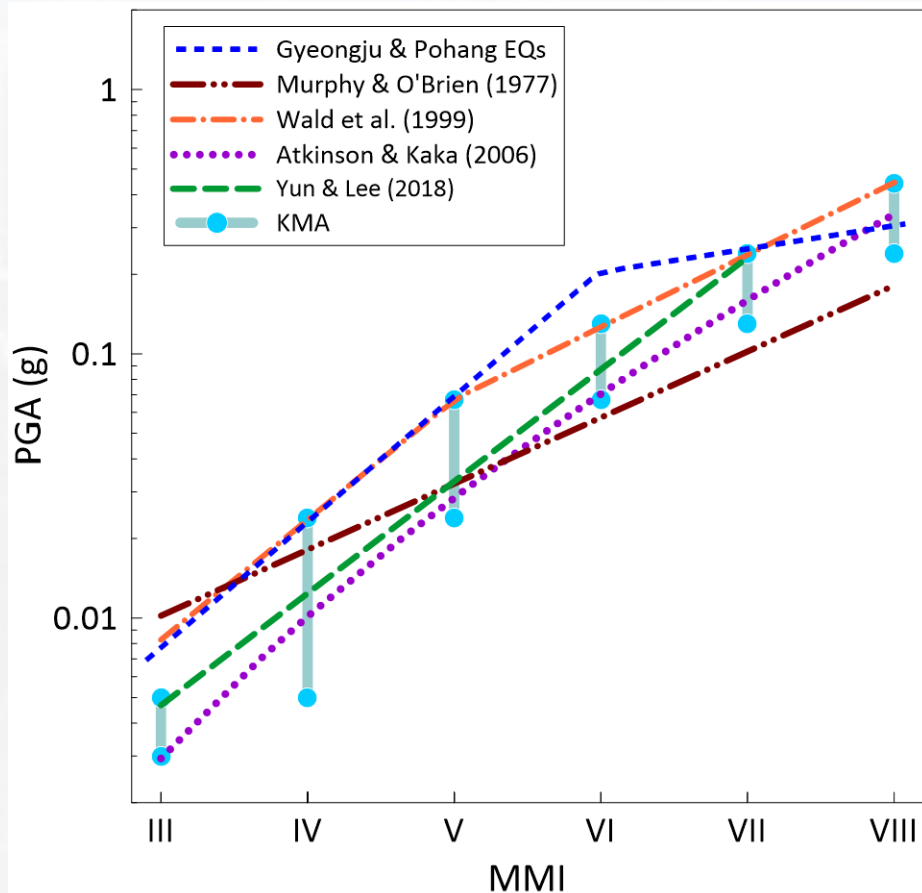




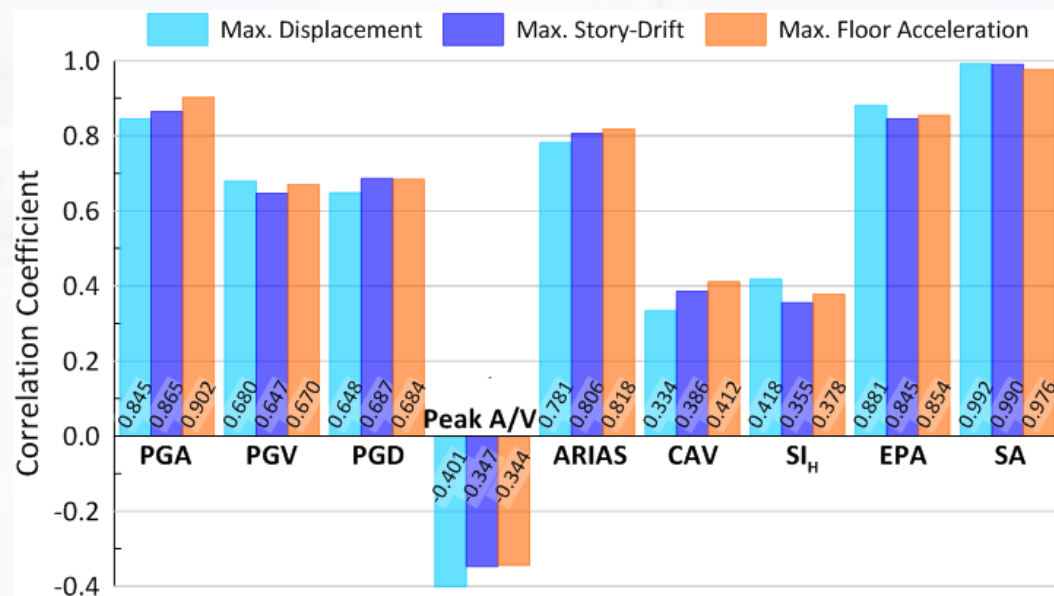
# 국내지진동에 대한 OBE 초과기준 평가

## • 국내지진동의 특성

### MMI vs. PGA



### 구조물 응답 vs. 지진강도변수 (보조건물에 대한 Pearson 상관계수)



- ✓ 고진동수 성분 탁월 (>10Hz, 특히 20Hz 이상)
- ✓ 동일 진도(MMI)에서 높은 PGA 수준
- ✓ 구조물 응답 관련 주요 지진강도 변수는 SA, PGA (SA>PGA)

# 국내지진동에 대한 OBE 초과기준 평가

Ground Motion No.	PGA (g)	Peak SA (g) @2-10Hz, Horizontal	CAV (g.s), Horizontal	PGA Check (1)	SA Check @2-10Hz (2)	CAV Check (3)	Exceed OBE By USNRC (2) and (3)	Exceed OBE By KINS (1) or (2)	Remarks
1	0.101	0.286	0.26	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
2	0.101	0.292	0.37	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
3	0.101	0.277	0.47	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
4	0.101	0.296	0.26	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
5	0.101	0.296	0.24	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
6	0.101	0.277	0.32	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
7	0.101	0.269	0.18	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
8	0.101	0.286	0.29	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
9	0.101	0.325	0.48	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
10	0.101	0.316	0.47	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Design Spectrum
11	0.101	0.069	0.04	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
12	0.101	0.122	0.04	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
13	0.101	0.201	0.04	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
14	0.101	0.195	0.03	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
15	0.101	0.198	0.10	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
16	0.101	0.162	0.05	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
17	0.101	0.166	0.06	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
18	0.101	0.167	0.05	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
19	0.101	0.219	0.11	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
20	0.101	0.207	0.16	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
21	0.101	0.074	0.26	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
22	0.101	0.082	0.15	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
23	0.101	0.091	0.12	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
24	0.101	0.064	0.20	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
25	0.101	0.068	0.04	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
26	0.101	0.120	0.05	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
27	0.101	0.227	0.06	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
28	0.101	0.232	0.07	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
29	0.101	0.221	0.07	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
30	0.101	0.331	0.08	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
31	0.101	0.106	0.06	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
32	0.101	0.184	0.07	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
33	0.101	0.182	0.09	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
34	0.101	0.201	0.08	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
35	0.101	0.329	0.11	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
36	0.101	0.248	0.10	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
37	0.101	0.057	0.16	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
38	0.101	0.084	0.11	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
39	0.101	0.058	0.16	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
40	0.101	0.071	0.19	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion

# 국내지진동에 대한 OBE 초과기준 평가

Ground Motion No.	PGA (g)	Peak SA (g) @2-10Hz, Horizontal	CAV (g.s), Horizontal	PGA Check (1)	SA Check @2-10Hz (2)	CAV Check (3)	Exceed OBE By USNRC (2) and (3)	Exceed OBE By KINS (1) or (2)	Remarks
41	0.101	0.404	0.05	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
42	0.101	0.454	0.05	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
43	0.101	0.420	0.04	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
44	0.101	0.323	0.03	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
45	0.101	0.185	0.03	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
46	0.101	0.193	0.07	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
47	0.101	0.145	0.10	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
48	0.101	0.122	0.13	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
49	0.101	0.257	0.04	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
50	0.101	0.240	0.05	>OBE	≤0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
51	0.101	0.185	0.18	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
52	0.101	0.365	0.11	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
53	0.101	0.223	0.30	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
54	0.101	0.202	0.18	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
55	0.101	0.325	0.23	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Recorded Motion
56	0.101	0.299	0.12	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
57	0.101	0.287	0.11	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
58	0.101	0.349	0.20	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Recorded Motion
59	0.101	0.108	0.35	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
60	0.101	0.113	0.25	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
61	0.101	0.353	0.28	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Recorded Motion
62	0.101	0.391	0.44	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Recorded Motion
63	0.101	0.313	0.26	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Recorded Motion
64	0.101	0.263	0.19	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Recorded Motion
65	0.101	0.247	0.21	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Recorded Motion
66	0.101	0.333	0.15	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
67	0.101	0.215	0.26	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
68	0.101	0.098	0.46	>OBE	≤0.241@10Hz	>0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
69	0.101	0.375	0.12	>OBE	>0.241@10Hz	≤0.16	FALSE	TRUE	Recorded Motion
70	0.101	0.277	0.18	>OBE	>0.241@10Hz	>0.16	TRUE	TRUE	Recorded Motion

## • OBE 초과기준 점검 결과

입력지진동		KINS RG	USNRC RG
PGA = 0.101g	설계지진	10/10	10/10
	국내지진	60/60	8/60

국내지진의 경우

※ OBE PGA 초과: 60

※ OBE스펙트럼 가속도 초과: 21 15

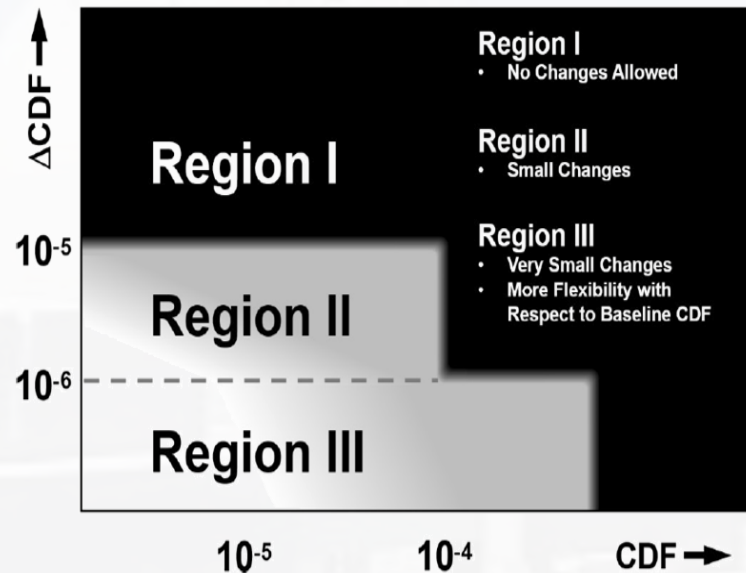
# 규제지침에 대한 질문

- PGA 점검 결과만으로 OBE기준 초과 여부를 판단하는 것이 과연 타당한가?
  - 동일 진도에 대해 국내 지진동의 PGA가 상대적으로 크다.  
→ PGA의 크기에 비해 낮은 손상수준
  - 국내 지진동 특성 상 PGA보다 SA가 구조물의 응답에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. → SA 우선 고려
- 지진 시 원자로 가동정지기준은 타당한가?
  - PGA 및 응답스펙트럼 점검 결과 중 하나라도 기준값을 초과하면 정지 → 보수적 의사결정
  - 현장검사에서 손상 발견 시 정지 → 내진여유, 안전중요도 무시

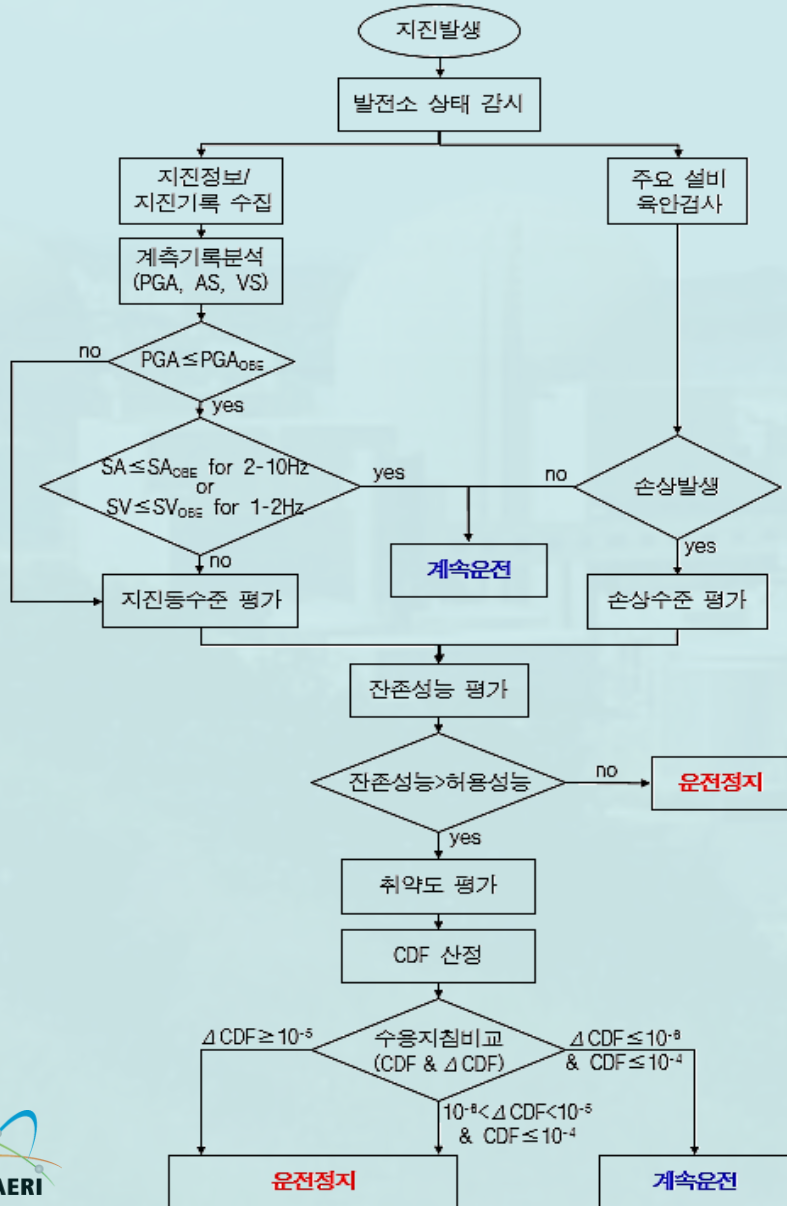


# 리스크 기반 수용 기준

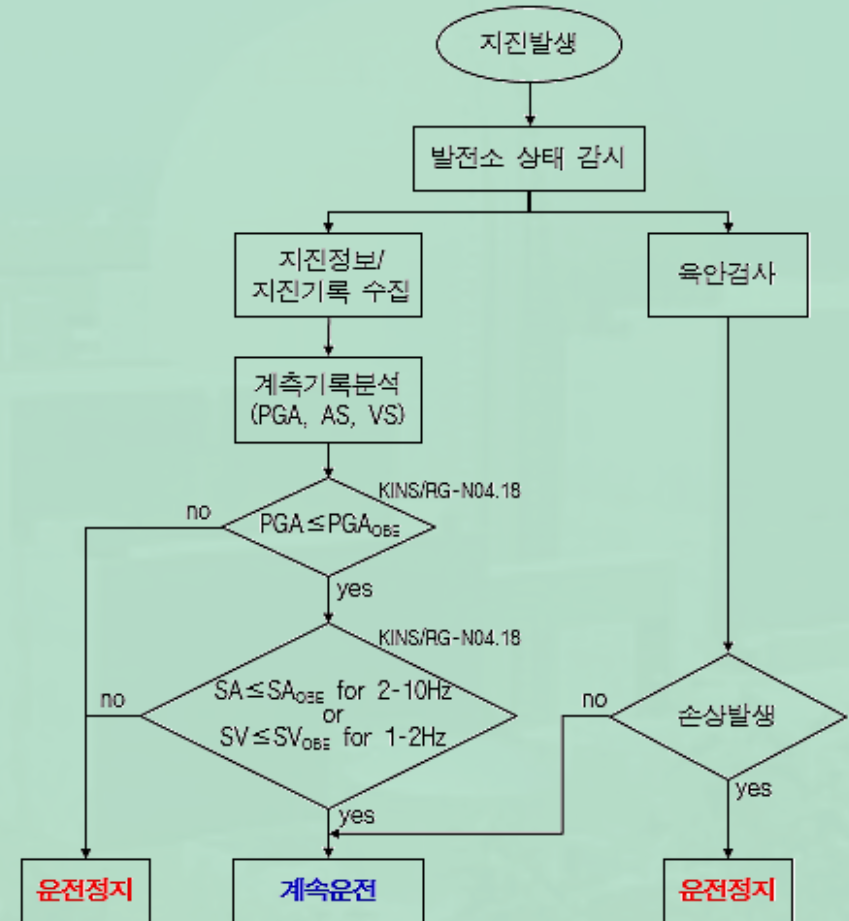
- USNRC RG 1.174 (2018)
  - $\Delta\text{CDF} < 10^{-6}/\text{RY}$  (Region III):  
총CDF 산정과 무관하게 수용 가능
  - $10^{-6}/\text{RY} < \Delta\text{CDF} < 10^{-5}/\text{RY}$  (Region II):  
총CDF  $< 10^{-4}/\text{RY}$ 의 경우 수용 가능
  - $\Delta\text{CDF} > 10^{-5}/\text{RY}$  (Region I):  
일반적으로 수용 불가



# 리스크 기반 가동정지 절차



## 현행절차 (KINS/RG-N04.18)



# 리스크 기반 가동정지 절차

1. 부지에서 지진동 감지 시 발전소 운전상태 감시
2. 지진정보 수집 및 지진동 계측기록 수집/분석
3. 지진동 분석과 동시에 주요 설비의 지진손상 여부를 확인하기 위한 육안 검사 실시
4. 계측된 지진동 기록의 OBE 수준 초과 여부 판단
5. 지진동이 OBE 수준보다 작고 주요 설비에서 지진으로 인한 손상이 발생되지 않은 것으로 확인된 경우 계속 운전
6. 지진동이 OBE 수준을 초과하거나 주요 설비에서 지진손상이 발생된 것으로 확인된 경우 지진동수준 및 설비의 손상수준을 정량적으로 평가
7. 손상수준 평가 결과를 기반으로 손상된 설비의 잔존성능 산정

# 리스크 기반 가동정지 절차

8. 손상설비의 잔존성능이 요구성능 수준을 만족시키지 못할 경우 원자로 가동 중지
9. 손상설비의 잔존성능이 요구성능 수준을 초과하는 경우 손상설비의 지진 취약도 평가 및 CDF,  $\Delta$ CDF 산정
10. 최종적으로 리스크 수용지침에 따라 원자로의 가동정지 여부 결정
  - $\Delta$ CDF >  $10^{-6}/RY$  : 원자로 가동정지
  - $\Delta$ CDF  $\leq$   $10^{-6}/RY$  : 운전 계속
11. 원자로의 정상적인 가동정지에 요구되는 모든 계통의 사용 및 작동 가능성을 확인하기 위한 운전정지 전 검사 실시
12. 운전정지 절차의 적절성 판단
13. 안전정지장치 및 전원의 사용 가능성 확인 후 정지작업 실시



# 결론

- 경주지진으로 인한 원전 수동정지 이후 신속한 지진대응체계 요구
- 신속하고 효율적인 지진대응조치를 위한 발전소 고유의 지진대응 지침 및 절차 필요
- 국내 고유의 지진동 특성을 반영한 OBE 초과기준 및 수동정지기준 재설정 검토 필요
- 합리적 지진대응을 위한 리스크 기반 수동정지 절차 제시
  - 리스크에 근거한 정량화된 분석 결과에 따라 원자로 가동 정지 결정
  - 지진동수준, 손상수준, 잔존성능 평가를 통한 기술적 판단
  - 원전 설비 및 구조물의 안전 중요도에 집중



*Thanks for Attention!*