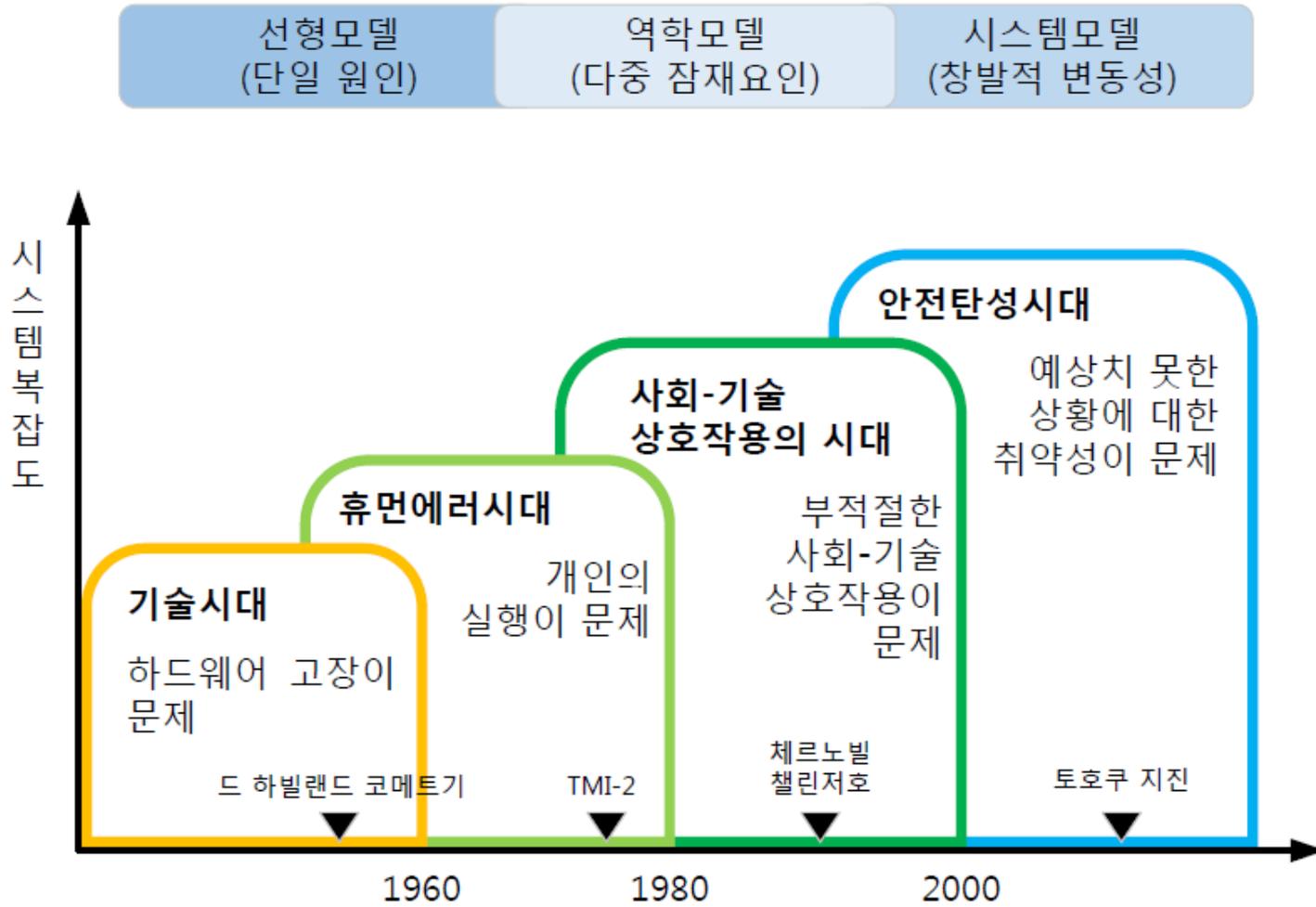


사고관리 동향과 추진방향

정 용 훈

Nuclear and Quantum Engineering
KAIST

사고모델



← Plant design envelope →

Operational states		Accident conditions	
NO	AOO	DBAs	Design Extension Conditions
			Without significant fuel degradation
			With core melting (severe accidents)
Loads and conditions generated by External & Internal Hazards (for each plant state)			
Criteria for functionality, capability, margins, layout and reliability (for each plant state)			
Design basis of equipment for Operational states	Design Basis of Safety Systems including SSCs necessary to control DBAs and some AOOs	Design Basis of safety features for <u>DECs</u> including SSCs necessary to control DECs	
		Features to prevent core melt	Features to mitigate core melt (Containment systems)

심층방어

Levels of Defence	Objective	Essential Means
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures	Conservative design and high quality in construction and operation
Level 2	Control of abnormal operation and detection of failures	Control limiting and protection systems and other surveillance features
Level 3	Control of accidents within the design basis	Engineered safety features and accident procedures
Level 4	Control of severe plant conditions, including prevention of accident progression and mitigation of the consequences of severe accidents	Complementary measures and accident management
Level 5	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive materials	Off-site emergency response

Level of defence Approach 1	Objective	Essential design means	Essential operational means	Level of defence Approach 2
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures	Conservative design and high quality in construction of normal operation systems, including monitoring and control systems	Operational rules and normal operating procedures	Level 1
Level 2	Control of abnormal operation and detection of failures	Limitation and protection systems and other surveillance features	Abnormal operating procedures/emergency operating procedures	Level 2
Level 3	3a Control of design basis accidents	Engineered safety features (safety systems)	Emergency operating procedures	Level 3
	3b Control of design extension conditions to prevent core melt	Safety features for design extension conditions without core melt	Emergency operating procedures	4a Level 4
Level 4	Control of design extension conditions to mitigate the consequences of severe accidents	Safety features for design extension conditions with core melt. Technical Support Centre	Complementary emergency operating procedures/severe accident management guidelines	4b
Level 5	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive materials	On-site and off-site emergency response facilities	On-site and off-site emergency plans	Level 5

사고관리계획

- ❖ 건설허가 신청 시 예비사고관리계획 제출
- ❖ 표준설계인가 신청 시 예비사고관리계획 제출
- ❖ 운영허가를 위해서 사고관리계획(AMP) 제출 (중대사고 포함)
 - 사고의 범위와 관리를 위한 설비
 - 사고관리 전략
 - 사고관리 적용 방안
 - 사고관리능력의 평가(DSA 및 PSA 모두 활용)
 - 장기적 영향을 미치는 대량소외방출 방지
 - 부가적인 위험도는 극히 낮아야 함
 - 교육과 훈련
- ❖ 사고관리계획은 원안위가 제시하는 허용기준을 만족하여야 함
- ❖ 운영중인 원전의 경우 2019년 6월까지 사고관리계획을 제출해야 함

사고관리계획의 역할과 내용

안전성분석보고서

- 사고대처설비의 설계
- 사고 분류별 사고해석
- 확률론적 안전성평가

방사선환경영향평가서

- 사고분류별 방사선 영향 평가

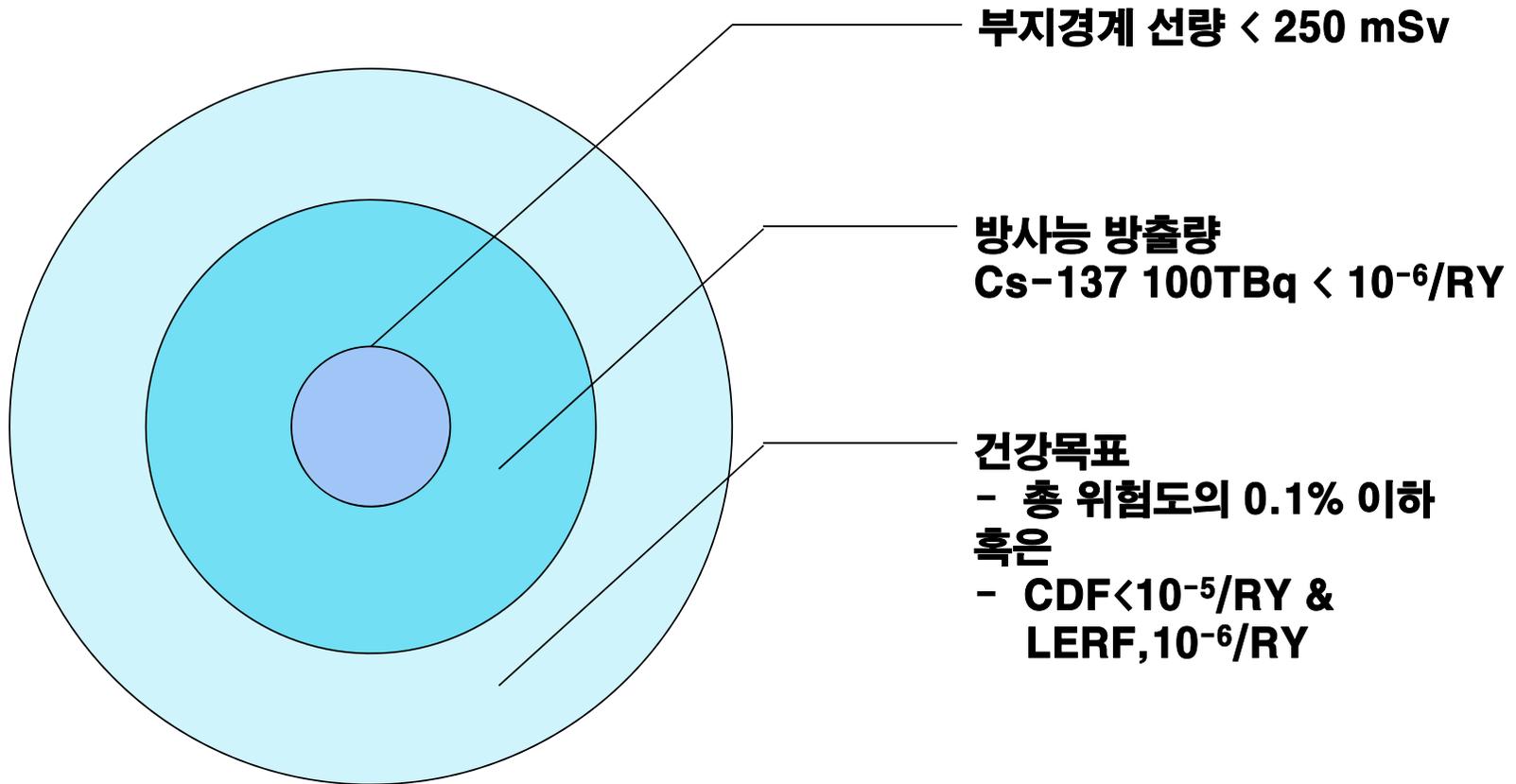
EOG/.../SAMG

- 사고관리절차
- 사고관리지침(안전기능, 대처설비, 운전원조치,...)

사고관리 계획서

- 사고관리의 안전목표
- 관리대상 사고 선정 및 분류
- 사고 분류별 대책 목적 및 수단

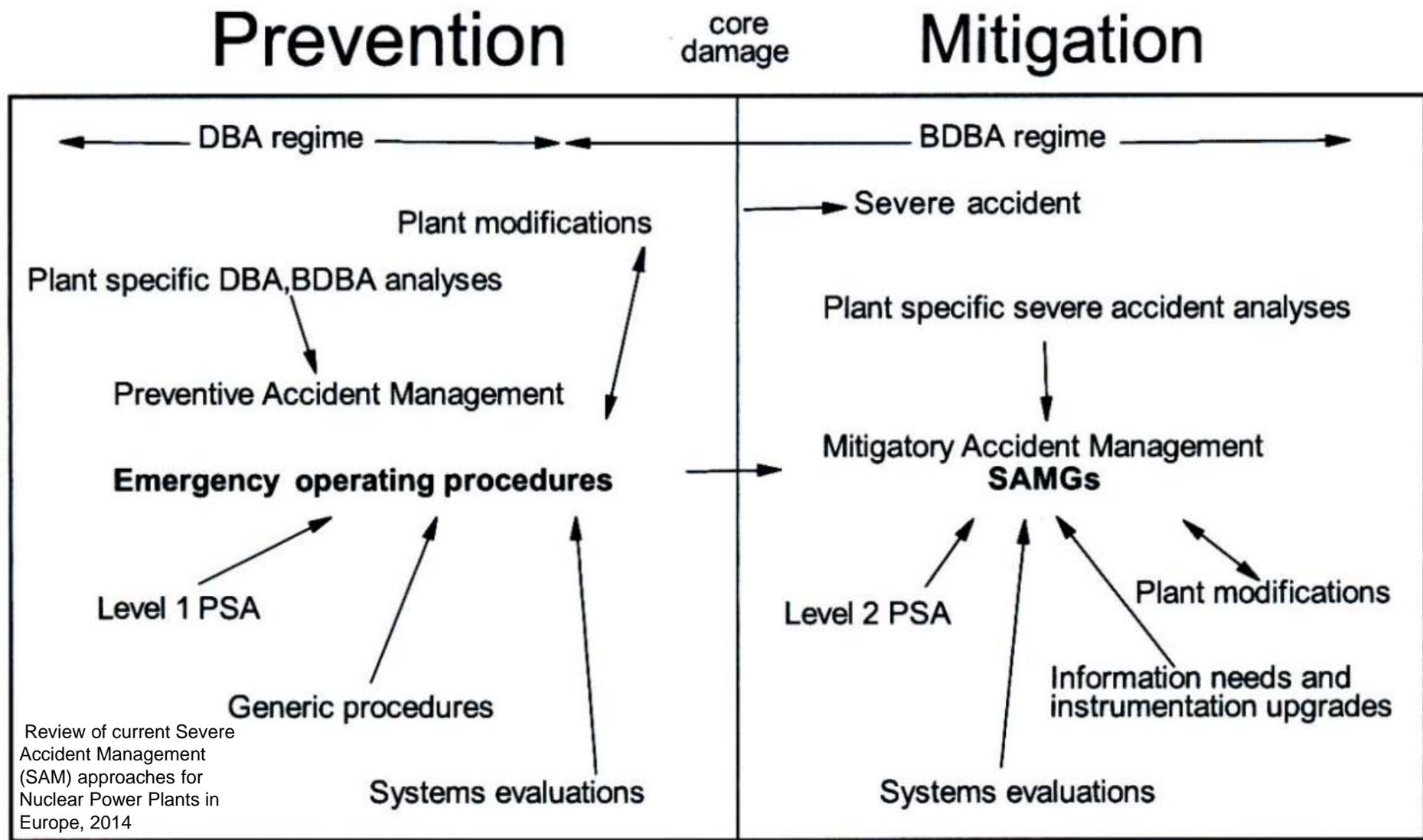
안전목표



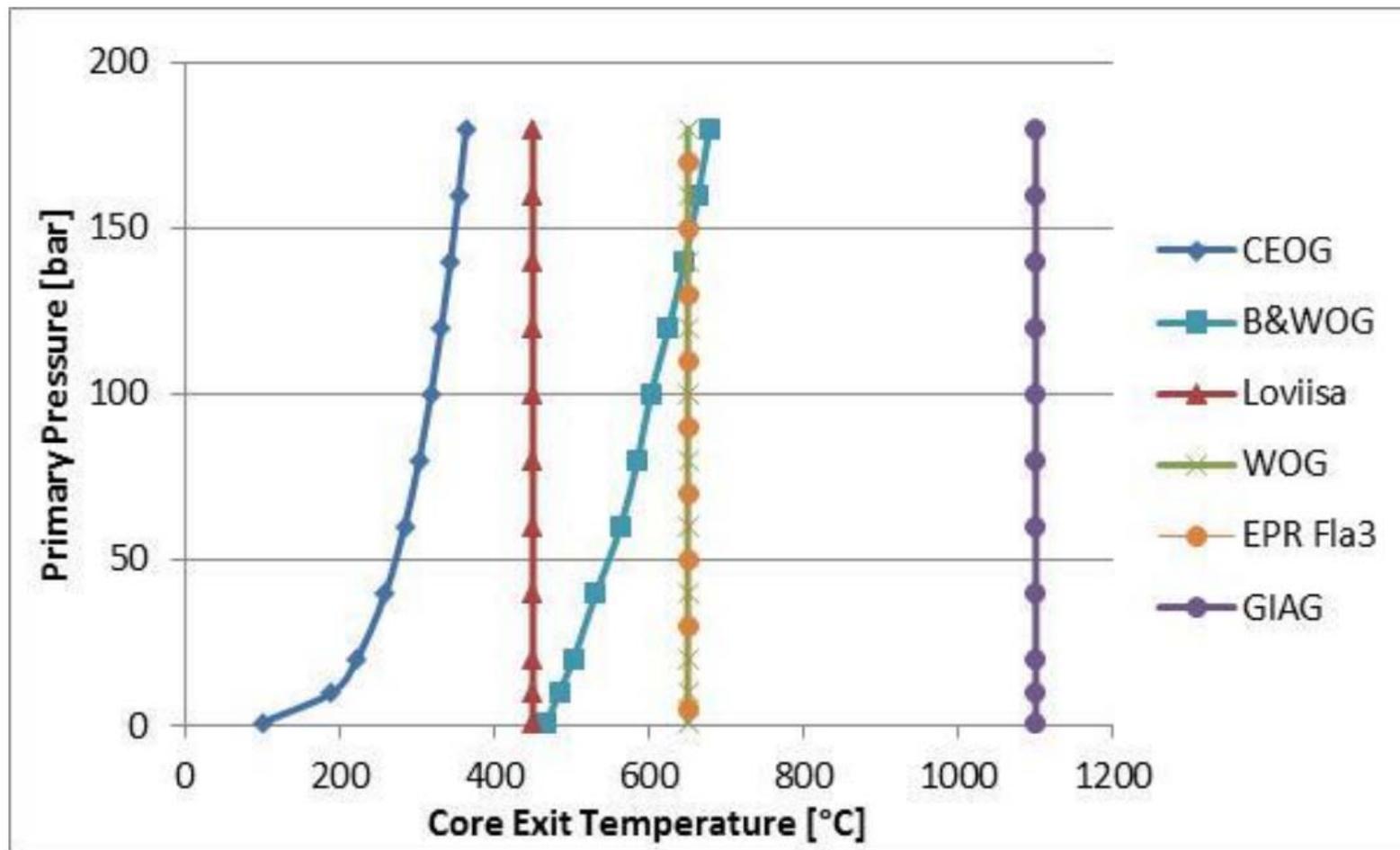
사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정

제9조(위험도(risk) 평가)

- ① 확률론적 안전성평가의 기술적 적합성, 상세성 및 분석범위는 발전용원자로시설의 사고로 인한 위험도(risk)를 종합적으로 평가하기에 적합하여야 한다.
- ② 제1항의 확률론적 안전성평가에 적용하여야 할 목표치는 다음 각 호와 같다.
 - 1. 부지 인근 주민의 발전용원자로시설 사고로 인한 초기사망 위험도 및 암사망 위험도가 각각의 전체 위험도의 0.1% 이하이거나 또는 그에 상응하는 성능목표치를 만족할 것
 - 2. 방사성핵종 Cs-137의 방출량이 100TBq을 초과하는 사고 발생 빈도의 합이 1.0×10^{-6} /년 미만일 것
- ③ 제1항의 확률론적 안전성평가의 결과는 발전용원자로시설의 중대사고 예방 및 완화 능력을 향상시키기 위하여 활용되어야 한다.



KAI Figure 1. Relationship between different components of an AMP [IAEA04]. Quantum ing



Review of current Severe Accident Management (SAM) approaches for Nuclear Power Plants in Europe, 2014

Figure 2. A comparison of SAMG entry criteria (from [PRI09] and [RAI13])

주요한 차이점들

❖ 주요 이슈

- 중대사고 영역을 얼마나 EOP에 반영할 것인가?
- 언제 SAMG가 EOP에서 시도한 것과 다른 시도를 본격적으로 시작할 것인가?
- 위기대응팀 (혹은 TSO)이 언제 관여하고, 권한과 책임을 인수할 것인가?

❖ 공통점들

- EPRI Technical Basis Report (1992)
- CHLAs identified in (1992),

❖ 다른 점들

- 조직문제: 책임, 의사결정, 전문가 지식
- SAM 진입기준, EOP/SAMG
- 손상상태 평가 방법
- 노형별로 상이한 CHLA
- 중대사고연구결과 적용 (손상노심의 침수 등)

IAEA 안전목표

❖ IAEA: Vienna Declaration on Nuclear Safety (2015. 2. 9)

1. 신규 원자력발전소는 시공 및 운전시 사고 발생을 방지하고, 사고가 발생할 경우, 소외에서 장기간 오염을 초래할 방사성물질의 방출 가능성을 완화하고, 방사성물질의 조기방출 및 소외비상대응·조치가 요구되는 방사능물질 대량방출을 배제하는 것을 목표로 설계, 부지선정 및 건설하도록 한다.
2. 가동중 원자력발전소에 대해서는 상기 안전목표의 달성을 지향하는 안전성 개선사항을 도출하기 위해 운영기간 동안 주기적이고 정기적인 종합적·체계적 안전성평가를 수행하도록 한다. 합리적으로 실행 가능하거나 달성가능한 안전성 개선사항은 적시에 적용하도록 한다.
3. 원자력발전소의 전수명기간에 걸쳐 상기 안전목표를 반영하는데 필요한 각국의 규제요건 및 규정에는 IAEA의 관련 안전기준 및 기타 모범사례 (특히, CNS 검토회의에서 도출된 사례)를 고려하도록 한다.

미국의 안전 목표

❖ Safety Goal Policy Statement (1986)

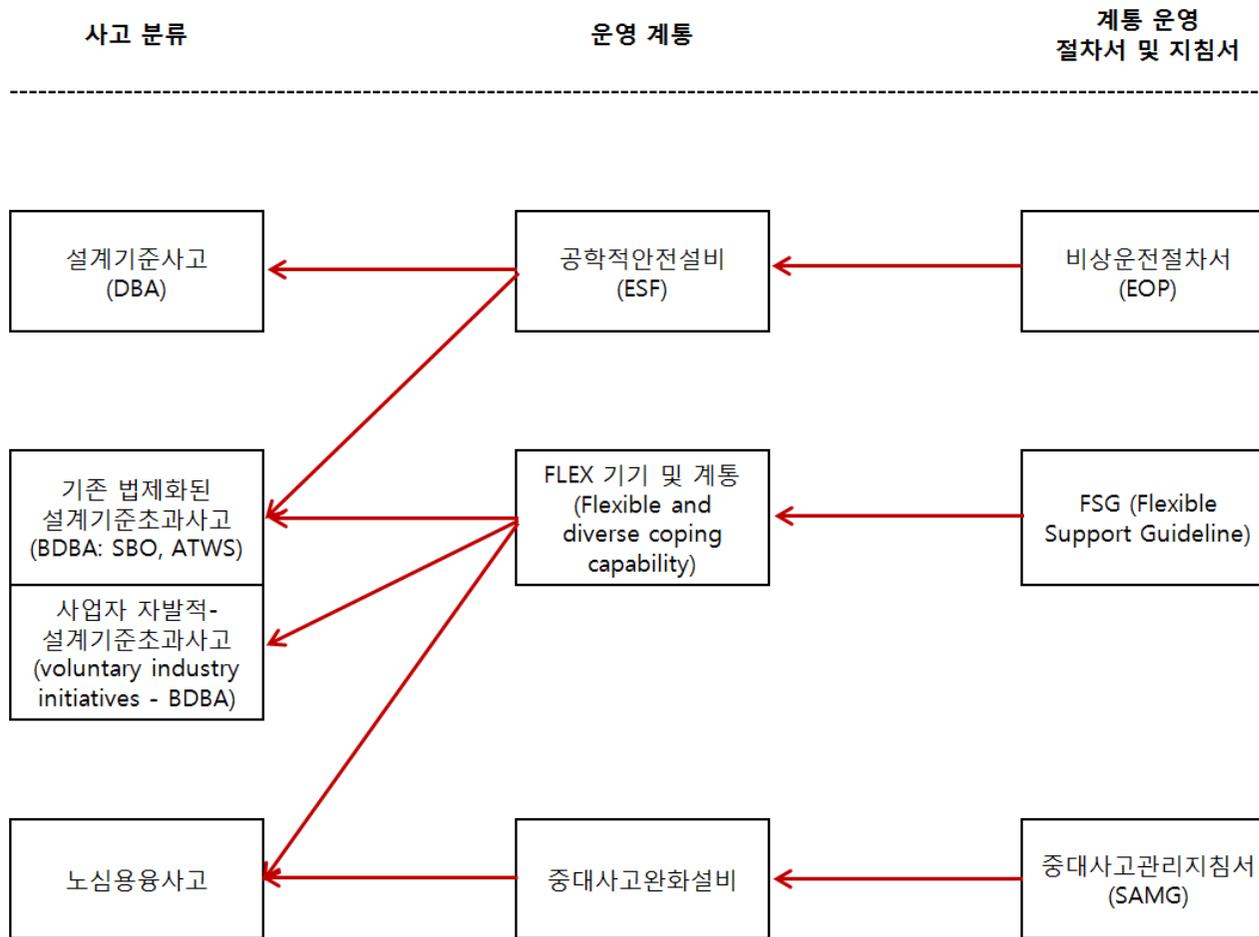
❖ 정성적 안전목표

- 원전 운영에 따른 개인의 생명과 건강에 대한 사회적 리스크는 다른 방식의 발전원에 의한 리스크보다 작아야 하며, 기타 요인에 의한 사회적인 리스크에 추가적으로 심각한 리스크를 부가하지 않을 것

❖ 정량적 안전목표

- 원전 사고로 인한 부지 인근 평균 개인의 초기사망리스크는 미국 주민의 일반적인 기타 사고에 의한 전체 초기사망리스크의 0.1% 이하일 것
- 원전 주변지역의 주민 집단이 원전 운전으로 인해 받을 수 있는 암사망리스크는 기타 원인에 의한 전체 암사망리스크의 0.1% 이하일 것

미국의 FLEX 전략

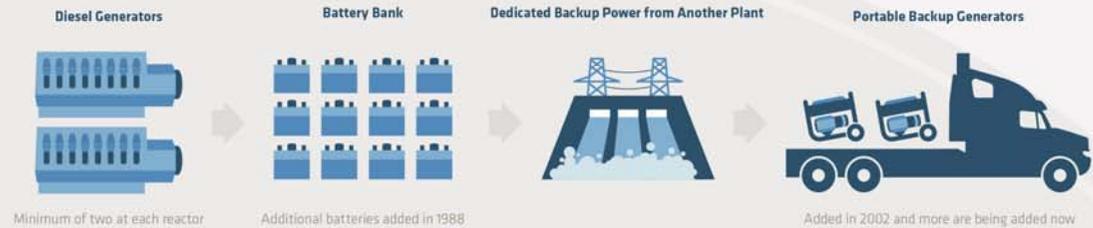


MAKING SAFE NUCLEAR ENERGY SAFER AFTER FUKUSHIMA

FLEX is a flexible and diverse strategy developed by the nuclear energy industry to quickly and effectively implement the Nuclear Regulatory Commission (NRC's) Fukushima task force recommendations. The FLEX protection strategy addresses the main safety challenges at Fukushima—the loss of cooling capability and electrical power resulting from a severe natural event that exceeded the plant's design basis—to make U.S. facilities even safer. It builds on safety steps taken by industry during the past three decades by providing a fast, effective and efficient way to apply the lessons learned from Japan's experience.

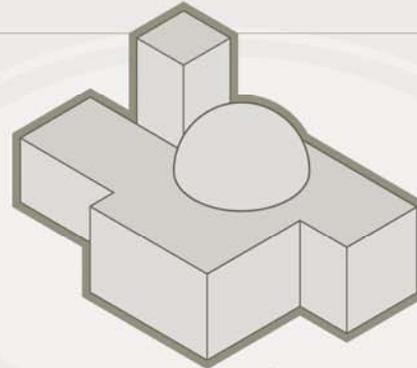
MULTIPLE LAYERS OF POWER SUPPLY

Backup generators provide reliable electrical power and cooling capability if an extreme event disables the normal plant equipment. Additional battery banks provide electrical power and cooling capability if an extreme event disrupts regular and other backup power supply.



ADDITIONAL SPENT FUEL MONITORING

Additional equipment in spent fuel storage pools will provide another layer of monitoring to ensure temperature and water levels are maintained.



ADDITIONAL PUMPS

To ensure cooling procedures are maintained during and after an extreme event, additional pumps can supply water where needed.



PREPARING OUR PEOPLE

Nuclear plant and emergency response workers will use the FLEX approach to support key safety functions across multiple reactors. Capabilities and training will be verified for nuclear plant workers to assure the continued viability and reliability of equipment. Communications capabilities will be expanded to include satellite phones and equipment to connect personnel at the plant with government emergency communications networks. Specific strategies include the following:

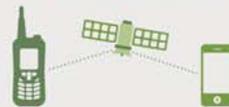
Enhanced Training



Expanded Maintenance and Testing of Equipment



Satellite Communications



PUBLIC OPINION

74%

of Americans believe that U.S. nuclear power plants are safe and secure

80%

of Americans believe U.S. nuclear power plants have been made safer as we've learned from experience and added technology

REGIONAL CENTERS

Additional emergency equipment will be stationed in off-site support centers to provide another layer of safety and ensure prolonged reliable operation.



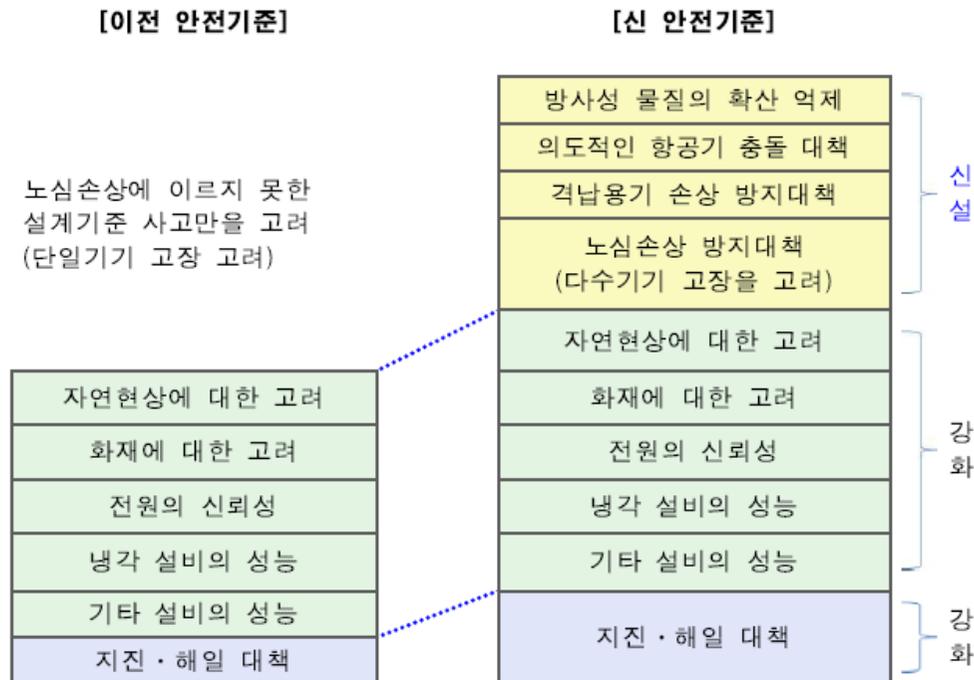
Blackwell Research Inc. with GFK Roper survey of 1,000 U.S. adults in February 2012

Copyright 2012 Nuclear Energy Institute

일본의 안전목표

❖ 2003년 원자력안전위원회 (정량적 안전목표 제안)

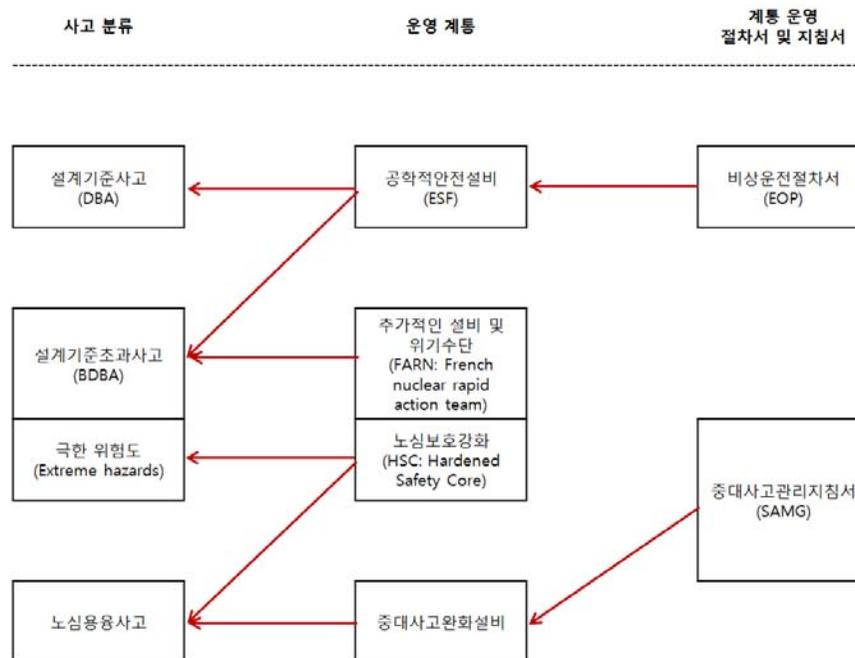
- [주민보호] 원자력의 이용으로 인해 주민의 건강에 미치는 위험도의 증가는 미미한 수준으로 제한되어야 한다.
- [환경보호] Cs-137 100TBq 이상 방출가능성이 있는 사고의 발생확률은 $10^{-6}/\text{yr}$ 이하이어야 한다.



유럽의 안전목표

❖ WENRA RHWG (2009.12) Safety Objectives

1. Normal operation, abnormal events and prevention of accidents
2. Accidents without core melt : no off-site radiological impact
3. Accidents with core melt : early or large releases have to be practically eliminated
4. Independence between all levels of defense-in-depth



교육훈련의 중요성

TABLE I. EMPHASIS ON VARIOUS TYPES OF TRAINING FOR THE FUNCTIONAL STAFF GROUPS

	Decision makers	Evaluators	Implementers
Knowledge-oriented training	**	****	*
Skill-oriented training	*	***	***
Efficiency-oriented training	***	*	*

The scale of emphasis is from '*' (meaning that only the basics needs to be trained) to '*****' (meaning that the main emphasis should be here).

긴급 주민보호조치의 결정기준

[별표 4] <개정 2014.11.24.>

긴급 주민보호조치의 결정기준 (제15조제1항 관련)

1. 대피·소개 및 갑상선방호약품배포 등의 결정기준

긴급 주민보호조치	결정기준
대 피	10mSv
소 개	50mSv
갑상선방호약품배포	100mGy
일 시 이 주	30mSv/처음 1개월, 10mSv/그 다음 1개월
영 구 정 착	1Sv/평생

비 고

- 1) 결정기준은 유효선량(인체 각 조직간 선량분포에 따른 위험정도를 하나의 양으로 나타내기 위하여 각 조직의 등가선량에 해당조직의 가중치를 곱하여 이를 모든 조직에 대해 합산한 양을 말한다)을 기준으로 한다.
- 2) 대피는 2일을 초과할 수 없다.
- 3) 소개는 1주일을 초과할 수 없다.
- 4) 1개월은 30일을 기준으로 한다.
- 5) 평생은 70년을 기준으로 한다.

2. 음식물 섭취제한 기준

구분		육류·어 류·곡물 (Bq/kg)	야채·과 일 (Bq/kg)	물·우유 (Bq/l)	유아식품 (Bq/kg)	
방사성 핵종	1군	Cs-134, Cs-137, Ru-103, Ru-106, Sr-89	2,000	1,000	200	100
	2군	I-131, Sr-90	1,000	500	100	10
	3군	U-235, U-238	100	100	20	10
	4군	Am-241, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242	10	10	10	1
	5군	H-3			100kBq/l	

체르노빌과 후쿠시마의 교훈

Process Safety and Environmental Protection 1 1 2 (2 0 1 7) 16-49

- ❖ 체르노빌 사고 후 장기 소개된 335,000명 중, 정당화 가능한 인원은 9~22% 수준
 - 1986년 소개된 115,000명 중 26~62%만 정당화 가능
 - 1990년 이후 소개된 220,000명은 정당화 될 수 없음
- ❖ 후쿠시마 사고 후 장기 소개된 160,000명 중 정당화 가능한 인원은 없음.
- ❖ 합리적 수준의 소개기준 마련 필요

- ❖ 우리나라 노형에서 기대되는 중대사고의 경우 TMI-2 사고와 유사할 가능성이 가장 크므로 지나친 우려를 완화할 수 있도록 선원항과 외부영향에 대한 최적평가를 강화할 필요 있음

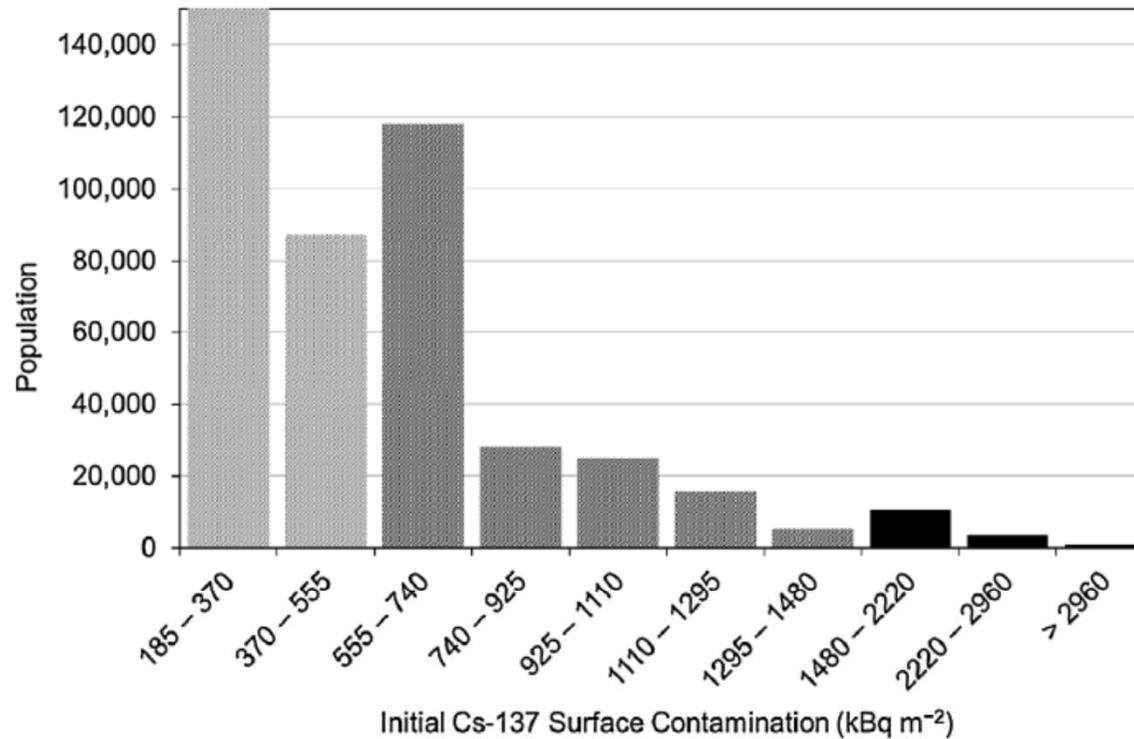


Fig. 1 – The population distribution as a function of ¹³⁷Cs surface contamination in 1990. Black indicates the official relocation limit at >1480 kBq m⁻² while the effective limit of >555 kBq m⁻² is shown in dark grey, corresponding to the strict control zone. The vertical scale has been truncated in order to emphasize the distribution at high activity levels.

Table 4 – Effective doses and loss of life expectancy within each contamination band over 1990–2060 for the combined populations of the three Republics, in the absence of relocation.

¹³⁷ Cs surface contamination kBq m ⁻²	Effective cumulative dose mSv	Loss of life expectancy days
185–370	50	9.6
370–555	74	14.4
555–740	99	19.2
740–925	124	24.0
925–1110	149	28.8
1110–1295	173	33.6
1295–1480	198	38.4
1480–2220	260	50.5
2220–2960	359	69.8
>2960	458	89.0

Table 6 – Population, loss of life expectancy and J-values for relocating people from the areas with ^{137}Cs contamination in 1990 above the limits given in column 1.

^{137}Cs contamination kBq m^{-2}	Population	Average loss of life expectancy days	J-value
>185	705,600	14.8	17.5
>370	293,800	22.1	11.7
>555	206,600	25.3	10.2
>740	88,700	33.4	7.8
>925	60,600	37.8	6.9
>1110	35,700	44.1	5.9
>1295	20,000	52.3	5.0
>1480	14,700	57.3	4.5
>2220	4300	73.8	3.5
>2960	900	89.0	2.9

Table 12 – Estimates of the averted doses during the first year for eighteen representative communities relocated within Fukushima Prefecture (adapted from UNSCEAR, 2013, p. 191, Table C11), together with the gain in life expectancy from averting the first-year dose. (LLE = loss of life expectancy).

Locality	Destination	Dose in First Year (mSv)			LLE averted (days)
		Without relocation	With relocation	Averted	
Tomioka Town	Koriyama City	51	3.3	48	21.7
Okuma Town	Tamura City	47	1.5	45	20.4
Futaba Town	Saitama	38	1.1	37	16.7
Naraha Town 1	Tamura City	7	3.7	3	1.4
Naraha Town 2	Aizumisato Town	7	2.5	4	1.8
Namie Town 1	Nihonmatsu City	25	5	20	9.1
Namie Town 2	Nihonmatsu City	25	7	18	8.1
Tamura City	Koriyama City	2	3.5	(2) ^b	(0.9) ^c
Minamisoma City 1	Fukushima City	4	5.7	(2) ^b	(0.8) ^c
Minamisoma City ^a 2	Minamisoma City ^a	4	4.8	(1) ^b	(0.4) ^c
Hirono Town	Ono Town	4	1.3	3	1.4
Kawauchi Village	Koriyama City	2	3.3	(1) ^b	(0.6) ^c
Katsurao Village 1	Fukushima City	6	4.3	2	0.9
Katsurao Village 2	Fukushima City	6	6	0	0.0
Iitate Village 1	Fukushima City	11	7.8	3	1.4
Iitate Village 2	Fukushima City	11	8	3	1.4
Kawamata Town ^a	Kawamata Town ^a	2	9.3	(7) ^b	(3.3) ^c

^a The 20-km relocation zone bisected Minamisoma City and Kawamata Town, and some residents were relocated to other areas of the city/town that were outside the zone.

^b Parentheses indicate groups that received a higher estimated dose after relocation than had they remained in place.

^c Parentheses indicate a loss of life expectancy as a result of resettlement.

Table 13 – J-value assessment of the cost effectiveness of providing mental anguish payments and prefabricated temporary housing, assumed to be used until return when the dose in the home location has fallen to 20 mSv per year. (LLE = loss of life expectancy).

Dose averted in year 1 (mSv)	Number of years until home dose rate $\leq 20 \text{ mSv y}^{-1}$	Locations	LLE averted (days)	J-value
48	6	Tomioka Town	82	1.5
45	5	Okuma Town	69	1.5
37	4	Futaba Town	49	2.1
20	1	Namie Town	9	11.6