세슘 안전목표의 합리적 적용을 위한 정책제안서

2026년 11월

한국원자력학회
규제개선소위원회

목 차

정책제안서 요약 …… i

Ⅰ 서언 …… 1

Ⅱ PSA 개발현황 및 세슘 안전목표 …… 2

Ⅲ 현안진단 및 개선제언 …… 8

Ⅳ 결언 …… 14

작성자

위원장 문주현 단국대학교

위 원 김명섭 한국원자력연구원

박태진 한국방사선진흥협회

손희동 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단

이성복 한국원자력환경공단

이우상 한국수력원자력(주)

이지훈 두산에너빌리티

정책제안서 요약

○ 확률론적 안전성평가(PSA) 발전과 세슘 안전목표 도입

- '01년 중대사고 정책(안)을 통해 원전 사고로 인한 인근 주민의 위험도를 고려한 정량적 안전목표를 제시하였고, '09년 이를 확인하기 위한 성능목표로 노심손상빈도(CDF)와 대량조기방출빈도(LERF) 값을 설정함
  - CDF와 LERF값은 신규/기존 원전을 구분하여 제한치가 아닌 목표치 개념으로 활용하도록 설정
- '15년 사고관리계획서 법제화에 따른 고시 제정('16년)으로 세슘 안전목표(Cs-137 100TBq 초과 방출빈도 1.0×10^{-6}/년 미만)가 도입됨
- 최근 PSA 결과는 규제 의사결정뿐만 아니라 상시검사, 정비규정(MR) 등 안전성 향상을 위한 다양한 분야로 활용 확대되고 있음

○ 국내 세슘 안전목표와 해외 적용 사례의 차이에 따른 우려

- 해외에서는 일반적으로 신규 원전에 대해 목표치로 도입된 세슘 안전목표가 국내에서는 신규/기존 원전 구분 없이 전 원전에 제한치 개념으로 적용되고 있음
- 이에 따라 PSA 결과의 활용이 제한되고, 국내 PSA 분야의 학문적·기술적 발전이 저해될 우려가 있음
- 기존 원전은 도전적인 수준의 안전목표를 달성하더라도 안전여유도가 부족하여 리스크정보활용(RIA)이 현실적으로 어려움
- 사업자의 PSA 수행 목적이 정량적 제한치 충족에 집중돼 추가적이고 자발적인 안전성 개선 활동을 제약하고, 안전목표 달성 이후에는 PSA 기술개발 투자 축소와 신기술 도입에 대한 소극적 대처가 우려됨

○ 합리적인 세슘 안전목표 적용을 위한 정책 제언

- PSA 결과가 리스크정보 활용(RIA)과 안전성 증진계획 수립에 적극 활용되고, PSA 분야의 기술적 발전과 학문적 진화를 위한 연구 활동이 활발히 전개될 수 있도록 다음과 같은 제도 개선을 제안함
  - (목표치 명확화) 고시에 이미 목표치라는 문구가 있으나, 해석상 오해를 방지하기 위해 목표치 개념을 고시에 명확히 기술
  - (안전성증진계획 수립) 운전 기간 중 목표치 달성을 위한 합리적인 안전조치 개선사항을 도출·이행하고, 목표치 달성 이후에도 안전성을 지속 증진하도록 규정
  - (신규/기존 원전 분리) 해외 원전 사례와 국내 기존 PSA 안전목표(CDF, LERF)의 신규/기존 구분 기준을 고려하여 세슘 안전목표도 신규/기존 원전에 차등 적용

Ⅰ 서언

》 국내 원전 PSA의 기술 발전과 활용 분야가 지속 확대되고, 규제 패러다임 변화(상시검사, 정비규정 등)로 PSA 중요성 증대

》 사고관리계획서 법제화와 함께 세슘 안전목표(Cs-137 100TBq 초과 방출빈도) 신규 도입

》 해외 운영 사례와 비교하여 국내 세슘 안전목표 적용 체계에 차이 존재

❍ 확률론적 안전성평가(이하 “PSA”) 결과는 규제 의사결정뿐만 아니라, 안전성 향상을 위한 정책적·기술적·경제적 의사결정에 활용되고 있으며, 활용 분야가 지속 확대되는 추세

- 규제 패러다임의 변화와 원전 운영상 의사결정 및 우선순위 설정에 PSA로 도출된 리스크 정보를 적극 활용
- 이를 통해 안전성 기여도가 높은 분야에 자원을 집중하는 등 다양한 분야에서 PSA 활용도 증가
- 리스크 정보의 신뢰성과 활용성 확보를 위해서는 기술 수준 향상과 결과에 대한 통찰이 중요

❍ 국내 가동원전에 적용되는 Cs-137 100TBq 초과 방출빈도 기준(이하 “세슘 안전목표”)은 해외사례와 차이가 있어, 이에 따른 PSA 활용 영향에 대한 검토가 필요

- 해외에서는 세슘 안전목표가 신규원전에 대해 목표치로 도입된 반면, 국내에서는 신규/기존 원전 구분 없이 전 원전에 대해 제한치 개념으로 적용 중
- 기존 원전은 안전목표 달성이 도전적일 뿐 아니라 달성 시에도 안전여유도가 부족하여 PSA 기반의 리스크정보활용(Risk-Informed Application, RIA)이 현실적으로 어려움
- 결정론적 안전성 분석을 보완하여 원전의 종합적인 안전성을 평가하고, 기기·계통 등의 안전 중요도 결정과 안전성 향상 방안 도출에 리스크 정보를 제공하는 PSA 본래 취지에 부합하기 어려움
- 이에 국내 세슘 안전목표 적용 체계가 PSA의 본래 활용 목적과 부합하는지 검토 필요

Ⅱ PSA 개발현황 및 세슘 안전목표

》'01년 중대사고 정책으로 PSA 안전목표를 최초 제시하고, 이를 확인하기 위한 성능목표로 CDF와 LERF값 설정

》'15년 중대사고 관리 강화에 따라 세슘 안전목표(Cs-137 100TBq 초과 방출빈도) 도입

》안전목표 설정 배경과 활용성을 재검토하고, 원전 안전성 향상에 기여하도록 세슘 안전목표 개념 명확화 필요

1. 미국 PSA 추진 배경

❍ **결정론적 안전성 평가 방법의 한계 인식**

- 설계기준사고와 심층방어에 근거한 결정론적 안전성 평가는 원전의 안전을 보수적으로 확보하는 유용한 수단
- 그러나 극단적 사고결말 가정에 치중하고 사고 발생빈도 개념을 간과하여, 원전 운영 중 겪을 수 있는 실제 리스크 (발생빈도×사고영향)를 평가하기에는 한계
  - 예) 대형 냉각재상실사고(Large LOCA)보다 발생빈도가 높은 소형 냉각재상실사고(Small LOCA)가 실제 리스크 측면에서는 더 큰 위협이 될 수 있음

❍ **세계 최초의 PSA 보고서 WASH-1400(1975)**

- 이러한 한계 극복을 위해 미국 원자력위원회(AEC)는 최초의 종합적인 PSA 보고서인 WASH-1400를 발행하였으나, 발표 직후 확률론적 방법과 결과의 불확실성이 지적되어 큰 관심을 받지 못함

❍ **TMI 원전 사고(1979)**

- TMI 사고는 WASH-1400에서 중요하게 평가된 사고 시나리오가 현실에서 재현된 사건
- 결정론적 안전성 평가의 한계 극복을 위해 PSA 도입 필요성 대두

❍ **안전목표 정책성명(1986)**

- 안전목표 정책성명(1986, 51 FR 28044) — 정량적 보건목표(QHO)와 이를 확인하기 위한 정량적 안전목표를 제시하되, 안전목표는 인허가 요건이 아닌 정책 목표임을 명시(as corrected and republished at 51 FR 30028, 1986)

❍ PRA 정책 성명(1995)

- 원자력 규제체계를 리스크정보활용 규제(Risk-informed Regulation, RIR) 체계로 전환할 것을 천명
- 이후 리스크 정보활용 의사결정(Risk-informed Decision Making: RIDM)과 원전 성능감시를 통한 RIDM 결과 검증 체제 구축

※ RIR 체계 하의 PSA 수행 결과 활용 분야

·(규제 인허가 지원) 운영기술지침서(TS) 변경에 따른 현안의 정당화와 설계변경 등 인허가 활동에 활용

·(계속운전) 수명연장 기간 중 안전에 중요한 계통·기기를 식별하고 신뢰도를 확보하기 위한 프로그램 수립에 활용

·(리스크 관리) 가용 정보를 체계적으로 활용한 설계·운영 변경 방안 도출과 우선순위 설정을 통한 최적화된 리스크 관리

·(통합 안전 평가) 인허가·안전규제 문제의 통합 일정 수립과 규제현안 우선순위 결정을 통한 효율적 대응

2. 국내 PSA 현황

❍ PSA 도입(1990년대)

- 원자력안전정책성명(1994): “비용 효과를 고려하여 합리적인 안전규제를 도모하며, 리스크를 근거로 한 안전규제를 실시한다.”
- 가동 중인 원전의 잠재적 취약점 파악을 위해 고리 3·4 및 한빛 1·2호기에 대해 최초 PSA 수행

❍ 중대사고 정책(2001): 제17차 원자력안전위원회 의결

- 원전 위험도를 가능한 한 낮출 수 있는 방안을 찾기 위해 확률론적 방법으로 안전성을 평가하여야 함

❍ **중대사고 정책 이행(2001)**

- 중대사고 정책에 따라 모든 가동 중 원전에 대해 PSA 수행 및 리스크감시시스템(Risk Monitoring System, RIMS) 개발(2007년 완료)
- 건설원전은 건설·운영허가와 연계하여 PSA 수행(한빛 5호기 ~ 신한울 2호기)

❍ **PSA 기술 개발 및 리스크정보활용(2005~)**

- 원자로보호계통(RPS)/공학적안전설비작동계통(ESFAS) 정기점검 주기 연장 (고리 2~4 / 한빛 1~6 / 한울 1~4)
- 터빈 밸브시험 주기 연장(고리 2~4 / 한빛 1~6 / 월성 2~4 / 한울 3~6 / 신고리 1~4 / 신월성 1·2 / 신한울 1·2)
- 격납건물 종합누설률 시험주기 연장(고리 2~4 / 한빛 1~6 / 한울 1~6 / 신고리 1·2 / 신월성 1·2)

❍ **원자력안전법 시행령 개정(2014)**

- 제37조(주기적 안전성평가의 내용)에 확률론적 안전성평가에 관한 사항 신규 추가

❍ **원자력안전법 개정(2015)**

- 제20조(운영허가), 제21조(허가기준) 등에 사고관리계획서를 인허가 문서로 신규 추가
- 사고관리계획서에는 PSA를 포함하는 사고관리능력의 평가에 관한 사항이 포함되어야 함(원자력안전법 시행규칙)

❍ **사고관리계획서 법제화에 따른 PSA 수행 (2016~)**

- 가동중 모든 원전(고리 2호기 ~ 신한울 2호기)에 대해 사고관리계획서 법제화에 따른 PSA 수행
- 새울 3호기 운영허가 시 사고관리계획서 법제화에 따른 PSA 수행

3. PSA 안전목표 개념

❍ **안전목표 설정 배경**

- TMI 사고 교훈 : 원전의 리스크를 0으로 만드는 것은 불가능하며, 사회적으로 용인될 수 있는 안전목표 설정 필요성 부각

- 안전목표 정책성명(1986)

  · 정량적 보건목표(Quantitative Health Objectives, QHO)* 설정: 원전에 의한 Risk는 일반 Risk의 0.1% 이하로 유지

  * 조기사망: 원전 사고로 인한 인근 주민(부지경계 1마일 이내)의 평균 개별 조기사망 위험도는 다른 전체 대형사고(교통사고, 화재 등) 위험도의 0.1%를 넘지 않아야 함

  * 암사망: 원전 운영 및 사고로 인한 주변 주민(부지 경계 10마일 이내)의 평균 암사망 위험도는 다른 원인(질병, 식습관 등)으로 인한 미국 전체 암사망 위험도의 0.1%를 넘지 않아야 함

  · QHO 만족을 위한 공학적 목표(Surrogate Goal*) 제시(NUREG-1150, 1990)

  * 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF) < 1.0×10^{-4}/yr

  * 대량조기방출빈도(Large Early Release Frequency, LERF) < 1.0×10^{-5}/yr

❍ 국내 PSA 안전목표 현황

- 중대사고 정책성명 및 이행계획('01년)에 따라 정량적 안전목표와 성능목표 수립

  · 정량적 안전목표: 원전 사고로 인한 인근 주민의 위험도 기준* 설정

  * 초기사망 위험도는 기타 사고에 의한 전체 초기사망 위험도의 0.1% 미만

  * 암사망 위험도는 기타 원인에 의한 전체 암사망 위험도의 0.1% 미만

  · 성능목표: 안전목표 달성을 위해 노심 손상을 예방하고 격납시설에 의한 방사성물질의 방출을 저감하기 위한 성능목표 설정('09년)

  ※ 국내 PSA 이행결과와 위험도정보 구축을 고려하여 성능목표를 제시하였고, 원안위 보고 시, 제한치보다는 목표치 개념으로 활용하는 것으로 명시

- 원자력안전법 시행령 제37조(주기적안전성평가의 내용) 개정에 따라 PSA 포함('14년)

- 원자력안전법 제20조(운영허가), 21조(허가기준) 등에 따라 사고관리계획서(중대사고 관리계획) 법제화('15년) 및 관련 고시에서 세슘 안전목표 법제화('16년)

  · 신규 안전목표로 Cs-137 방출량을 고려한 세슘 안전목표 도입

구분	가동 원전	신규 원전
노심손상빈도(CDF)	1.0×10^{-4} / 년 미만	1.0×10^{-5} / 년 미만
대량조기방출빈도(LERF)	1.0×10^{-5} / 년 미만	1.0×10^{-6} / 년 미만
(신규) Cs-137 방출량 100TBq 초과 사건 빈도	**1.0×10^{-6} / 년 미만**	

❍ 세슘 안전목표 관련 법령

「원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙」(위원회규칙)

제85조의22(사고관리능력의 평가) ① 사고관리계획은 사고관리에 관한 설비, 사고관리 전략 및 이행체계 등 사고관리 능력을 평가하여 다음 각호를 달성하는 것을 목표로 수립되어야 한다.

1. 사고가 발생하더라도 부지 인근 주민의 건강상 위해를 주거나 장기간의 소외 오염을 초래하는 방사성물질의 대량 방출을 방지할 것
2. 발전용원자로 및 관계시설의 운영으로 인하여 부지 인근 주민의 건강과 환경에 미치는 위험도(risk)의 증가량을 극히 낮출 것

② 제1항 각 호의 목표가 달성되는지 여부에 대한 평가는 결정론적 방법 및 확률론적 방법으로 수행되어야 하며, 그 평가에 관한 세부 사항은 원자력안전위원회가 정하여 고시한다.

「사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정」(원안위 고시)

제9조(위험도 (risk) 평가) ① 확률론적 안전성평가의 기술적 적합성, 상세성 및 분석 범위는 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 100 TBq을 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.

❍ 신규 안전목표(Cs-137 100TBq 초과 방출빈도) 적용의 국제적 현황

- 신규/기존 원전에 대해 차등 적용 배경

・ Cs-137 방출량을 고려한 세슘 안전목표는 미국 안전목표 정책성명(1986)의 정량적 보건목표(QHO, 초기사망・암사망 리스크)에서 도출된 것이 아니라, 중대사고 시 광범위한 토지・수역 이용의 장기 제한을 방지하기 위한 환경・사회적 보호목표에서 유래

・ ‘Cs-137 100 TBq 기준’은 핀란드 정부령(1991)이 “광범위한 지역의 장기 이용 제한을 초래하지 않는 방출 한도“로 정의한 값으로, 핀란드 YVL이 이를 초과하는 방출의 빈도 목표(5×10^{-7}/년)를 부여[6]. 캐나다(REGDOC-2.5.2),

일본(NRA, 2013) 등은 WENRA 신규원전 안전목표(2010) O3(Accidents with core melt)가 요구하는 “대량 방출의 실제적 배제 및 장기 제한 없음“을 정량화하는 지표로 채택

- 이 기준은 중대사고 대처설비(격납건물 여과배기, 노심용융물 냉각 등)를 설계 단계부터 반영하여 달성하도록 신규 원전에 부여된 설계목표이며, 가동 원전에 대해서는 “합리적으로 실행 가능한 범위“에서의 개선을 요구하는 것이 WENRA와 STUK의 입장[7]

- 제한치 對 목표치

- Cs-137 도입 배경이 되는 규제기관 문서에서도 정량적 안전목표는 제한치가 아닌 목표치로 보는 것이 타당하며, 안전목표 초과도 허용함을 명시[1]
- 핀란드 가동 원전은 합리적으로 달성 가능한 최고 수준의 안전 원칙(safety as high as reasonably achievable, SAHARA)과 지속 개선 원칙(continuous improvement)을 적용[7]

Ⅲ 현안 진단 및 개선 제언

》 국내의 세슘 안전목표는 기존/신규 원전 구분 없이 전 원전에, 안전성 증진을 위한 목표치가 아닌 제한치 개념으로 일괄 적용

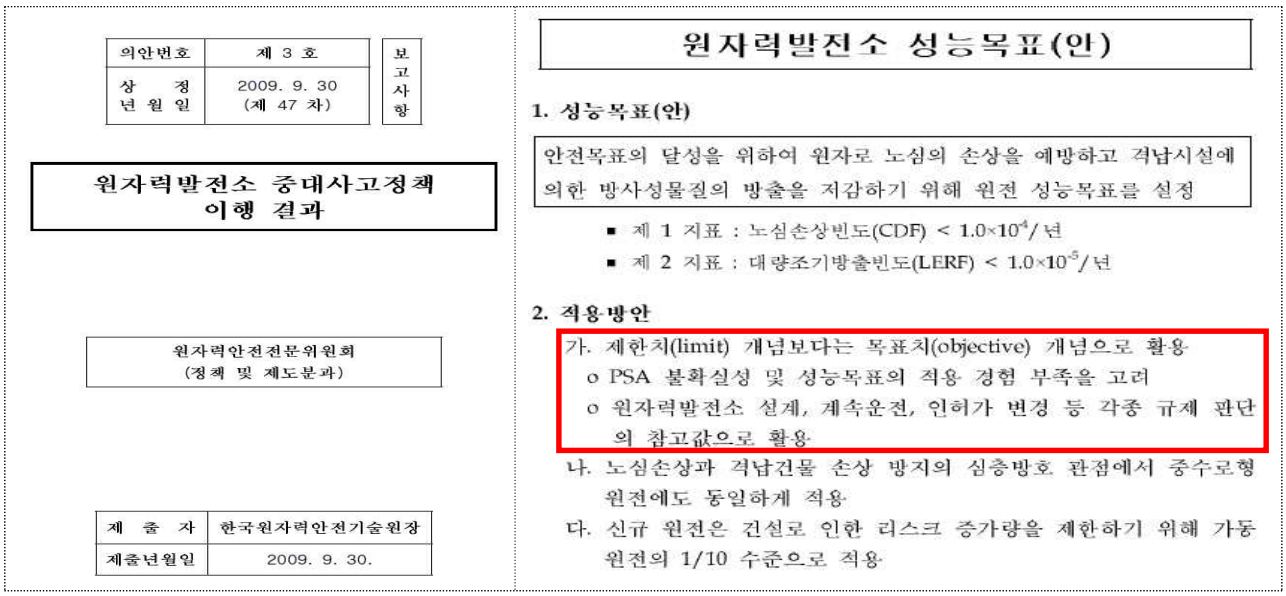
》 해외 대비 보수적인 적용으로 리스크정보활용(RIA)이 제한되고 PSA 분야의 학문적·기술적 발전 저해 우려

》 합리적인 세슘 안전목표 적용을 위한 제도 개선 필요

1. 현안 진단

❍ **(진단 1) 신규/기존 원전 구분 없이 모든 원전에 일괄 적용되고, 기존 원전에 대해 안전성 증진을 위한 목표치가 아닌 허가기준(제한치) 개념으로 적용 중**

- PSA 안전목표가 중대사고 정책성명의 최초 적용 취지에 따라 제한치가 아닌 목표치(Objective) 개념임은 당시('09년) 원안위에 보고된 원자력발전소 성능목표(안)에도 명시



의안번호	제 3 호	보고사항
상정 년 월 일	2009. 9. 30 (제 47 차)	

원자력발전소 중대사고정책 이행 결과

원자력안전전문위원회 (정책 및 제도분과)

제 출 자	한국원자력안전기술원장
제출년월일	2009. 9. 30.

원자력발전소 성능목표(안)

1. 성능목표(안)

안전목표의 달성을 위하여 원자로 노심의 손상을 예방하고 격납시설에 의한 방사성물질의 방출을 저감하기 위해 원전 성능목표를 설정

- 제 1 지표 : 노심손상빈도(CDF) < 1.0×10^{-4}/년
- 제 2 지표 : 대량조기방출빈도(LERF) < 1.0×10^{-5}/년

2. 적용방안

가. 제한치(limit) 개념보다는 목표치(objective) 개념으로 활용
  o PSA 불확실성 및 성능목표의 적용 경험 부족을 고려
  o 원자력발전소 설계, 계속운전, 인허가 변경 등 각종 규제 판단의 참고값으로 활용

나. 노심손상과 격납건물 손상 방지의 심층방호 관점에서 중수로형 원전에도 동일하게 적용

다. 신규 원전은 건설로 인한 리스크 증가량을 제한하기 위해 가동 원전의 1/10 수준으로 적용

- 사고관리계획서 하위법령 제정 당시 사업자-규제기관 협의 결과에 따라 고시에는 세슘 안전목표를 목표치로 기술하고 있으나, 현재 제한치 개념으로 적용되어 계속운전 원전 승인 및 재가동에 영향

- 또한, 기존 PSA 안전목표(CDF, LERF)는 신규 원전과 기존 원전에 대해 차이를 두고 규정하고 있으나, 신규 도입된 세슘 안전목표는 신규 및 기존 원전을 구분하지 않고 동일한 기준으로 적용

※ 신규 원전은 APR1400 노형인 신고리 3호기(現 새울 1호기) 원전부터, 기존 원전은 그 이전 원전을 지칭

[KINS 사고관리계획서 안전심사지침 제4.5절 확률론적 안전성평가]

확률론적 안전성평가 결과는 원자력안전위원회고시 제2017-34호(사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정) 제9조에 제시된 리스크 목표치를 만족해야 한다.

· 부지 인근 주민의 발전용원자로시설 사고로 인한 초기사망 위험도 및 암사망 위험도가 각각의 전체 위험도의 0.1% 이하이거나 또는 그에 상응하는 성능목표치를 만족할 것.

· 방사성 핵종 Cs-137의 방출량이 100 TBq을 초과하는 사고 발생 빈도의 합이 1.0×10^{-6}/년 미만일 것.

상기 성능목표치의 경우, 노심손상빈도는 1.0×10^{-4}/년 미만, 대량조기방출빈도는 1.0×10^{-5}/년 미만을 적용하며, 새울 1호기 이후 원전에 대해서는 상기 목표치의 1/10을 적용한다.

❍ **(진단 2) 세슘 안전목표를 도입한 캐나다, 핀란드는 신규 원전에 한해 목표치로 적용 중으로, 국내는 해외사례와 적용 체계에 차이**

- OECD/NEA 보고서에 따르면 국제적으로 세슘 안전목표는 신규 원전에 대한 목표값으로 활용[2]

- 일본은 국내와 같이 전 원전에 적용 중이나, 제한치 개념이 아닌 목표치로 사용

[국가별 세슘 안전목표 현황]

국가	평가 지표	안전목표	비고
한국	>100TBq of Cs-137	< 1.0×10^{-6}/yr	Objective for all plants
캐나다	>100TBq of Cs-137	< 1.0×10^{-6}/yr	Objective for new plants
핀란드	>100TBq of Cs-137	< 5.0×10^{-7}/yr	Objective for new plants
일본	>100TBq of Cs-137	< 1.0×10^{-6}/yr	Objective for all plants

※ Cs-137 방출 빈도를 안전목표로 적용한 국가만 정리함. 체코·슬로바키아에서는 안전목표를 정의하지 않음

- **(일본)** 규제기관(NRA)은 핵연료안전전문심사회를 통해 안전목표에 대한 논의를 정리·보고하면서, 안전목표가 기준이 아닌 목표이며 사고 발생확률을 심사에서 확인하지 않는다고 기재[3]

  · 2013년 대외 발표자료에서 안전목표의 활용성을 정의: 안전목표는 이를 만족하는 시설과 초과하는 시설의 차이점을 특정하는 데 사용되며, 개별 시설의 직접적인 규제 판단에는 활용되지 않음[4]

  · 2022년 보고서에서는 안전목표를 규제 추진 과정에서 달성을 지향하는 목표로 규정하고 사업자가 자발적으로 수행하는 안전성 향상 평가에 Cs-137 100 TBq 초과 사고 발생빈도 평가를 포함[5]

  · 센다이 1호기는 지진 PRA에 기반한 설비 개선으로 Cs-137 100 TBq 초과 방출빈도를 1.5×10^{-6}/년에서 6.3×10^{-7}/년으로 약 60% 저감하여, 안전목표가 자발적 개선의 동기로 작동한 사례[4]

- **(핀란드)** 규제지침(YVL A.7)을 통해 세슘 요건을 법제화[6]

  · 규제기관(STUK)은 별도 보고서에서 해당 요건이 신규 원전에 적용되며, 가동 원전은 목표치로서 지속적인 안전성 증진에 활용됨을 명시[7]

- **(국가별 현황)** 가동 원전에 대한 Cs-137 100 TBq 초과 방출빈도 평가결과, 세슘 안전목표 정량적 목표치(1.0×10^{-6}/년 미만) 미충족

구분		일본*			핀란드*		캐나다*
		겐카이4 (2020)	센다이2 (2021)	오이3,4 (2020)	Loviisa1,2 (2021)	Olkiluoto 1,2 (2021)	Pickering, Bruce 등
평가결과 (/yr)	내부	9.9×10^{-7}	2.4×10^{-7}	6.4×10^{-7}	3.0×10^{-6}	1.9×10^{-6}	$<1.0\times10^{-5}$
	지진	3.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}	4.8×10^{-7}			
	쓰나미	4.6×10^{-11}	4.0×10^{-9}	5.7×10^{-9}			

※ 일본은 내부사건, 지진 및 쓰나미에 대해 사건별로 격납건물 손상 모드별 Cs-137 초과 방출빈도를 합산하여 제시하며 총합은 미제시. 핀란드·캐나다 값은 전체 사건 합산값임.

❍ (진단 3) PSA 안전목표(치)에 대한 행정적 의미를 해석하면 제한치(Limit)가 아닌 장래에 최후로 달성하여야 할 목표(Objective) 개념으로 적용되는 것이 타당

[원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙] 기타규칙
제85조의22(사고관리능력의 평가)
① 사고관리계획은 사고관리에 관한 설비, 사고관리 전략 및 이행체계 등 사고관리 능력을 평가하여 다음 각 호를 달성하는 것을 **목표로 수립**되어야 한다.

[사고관리 범위 및 사고관리 능력 평가의 세부기준에 관한 규정] 고시
제9조(위험도 (risk) 평가)
② 제1항의 확률론적 안전성평가에 적용하여야 할 **목표치**는 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 $1.0x10^{-6}$/년 **미만일 것**

③ 제1항의 확률론적 안전성평가의 결과는 발전용원자로시설의 중대사고 예방 및 완화 능력을 **향상시키기 위하여** 활용되어야 한다.

[검토-1] 행정학용어사전 목표 정의: 조직이 달성하고자 하는 바람직한 장래의 상태

[검토-2] 행정목표 관련 판례

행정계획이란 행정에 관한 전문적·기술적 판단을 기초로 하여 특정한 **행정목표**를 달성하기 위하여 서로 관련되는 행정수단을 종합·조정함으로써 **장래의 일정한 시점**에 일정한 질서를 실현하기 위한 활동기준을 설정하는 것이다[대법원 2011. 2. 24. 선고 2010두21464 판결]

[검토-3] 규정 제9조 제3항「~향상시키기 위하여~」

안전성 평가의 결과가 **목표치에 미달한다는 것을 전제**로 하는 것. 즉, 현재 기준의 안전성 평가 결과가 목표치에 미달할 경우 그 결과를 목표치 달성을 위한 자료로 활용하여야 한다는 취지임

[검토-4] 행정기본법 제10조 비례(과잉금지) 원칙

행정작용은 행정목적을 달성하는 데 유효하고 적절하여야 하고(1호), 행정목적을 달성하는 데 필요한 최소한도에 그쳐야 하며(2호), (중략)

☞ 가동 중 개선된 설계를 반영하는 데 물리적인 한계가 있는 기존 원전에 세슘 안전목표를 제한치 개념으로 적용하는 것은 행정 목적 달성에 적절하지 않으며, 필요한 최소한도를 넘어서는 요구에 해당

☞ (시사점) 진단 1~3을 종합하면, 국내 세슘 안전목표는 ① 고시 문언상 목표치임에도 제한치로 운용되고 있고, ② 해외와 달리 신규/기존 원전 구분 없이 적용되며, ③ 행정법상 목표 개념과도 부합하지 않으므로, 목표치 개념의 명확화, 안전성증진계획과의 연계, 신규/기존 원전 차등적용 세 방향으로 제도개선 필요

2. 개선 제언

❍ **사고관리계획서 위험도 평가 관련 고시 개정**

- **(목표치 명확화)** 고시에 이미 목표치라는 문구가 있으나, 해석상 오해를 방지하기 위해 목표치 개념을 고시에 명확히 기술

- **(안전성증진계획 수립)** 운전 기간 중 목표치 달성을 위한 합리적인 안전조치 개선사항을 도출·이행하고, 목표치 달성 이후에도 지속적으로 안전성을 증진해 나가도록 규정

> **예시) 「사고관리 범위 및 사고관리 능력 평가의 세부기준에 관한 규정」 고시에 '확률론적 안전성평가 활용 방안' 조항 신설**
>
> 제9조(위험도 (risk) 평가)
>
> (신설) ④ 목표치 달성을 위해 합리적으로 달성 가능한 안전조치 개선사항을 도출하여 이행하고, 목표치 달성 이후에도 최고 수준의 안전성을 유지하고 증진시키기 위해 확률론적 평가 결과를 지속적으로 개선할 것

- **(신규/기존 원전 분리)** 국내·외에서 성능목표를 가동·신규 원전별로 구분하고 있으며, 세슘 안전목표를 신규 원전에만 부여한 해외사례를 참고하여 세슘 안전목표도 가동·신규 원전별로 구분하도록 관련 규정 개정

※ 차등적용을 위한 가동원전에 대한 정량적인 목표값은 KINS 규제지침에 명시

> **예시) 관련 고시 개정으로 세슘 안전목표에 대해 신규/기존 원전 차등 적용 근거 마련**
>
> (변경 전) 방사성핵종 Cs-137의 방출량이 100 TBq을 초과하는 사고 발생 빈도의 합이 1.0×10^{-6}/년 미만일 것
>
> (변경 후) 부지 인근 지역의 발전용원자로시설 사고로 인한 토양오염 등 환경적 영향을 고려하여 방사성핵종 Cs-137의 방출을 최소화하기 위한 성능목표치를 만족할 것. 이 경우 성능목표치는 2015년 10월 29일 전에 운영허가 받은 발전용원자로와 그 이후 받은 발전용원자로에 대해 차등하여 적용할 수 있다.

❍ 개선 타당성 검토

- 목표치 명확화 및 안전성증진계획 수립 의무화 타당성

· 현재의 PSA 결과는 사업자의 자발적인 안전성 증진을 통한 중대사고 완화 능력의 향상이 아닌 정량적 제한치 충족에 활용되는 경향

· 안전목표 설정 취지에 따라 PSA 결과는 사업자의 자발적인 안전성증진계획 수립과 비용-편익을 고려한 개선사항 이행에 활용 필요

· 해외 대비 강화되고 경직된 세슘 안전목표 적용은 사업자의 추가적이고 자발적인 안전성 개선의 여지를 오히려 축소시키고, PSA 분야의 지속적인 기술적 발달을 제한

· 원전 안전성 향상이라는 궁극적 목표 달성을 위해 PSA 분야의 학문적 진화, 지속적인 기술 발전 및 연구 성과를 이룰 수 있도록 제도 개선 필요

- 신규/기존 원전 구분한 차등적인 기준 적용의 타당성

· 기존 성능목표인 CDF, LERF는 KINS 심사지침에서 신규 원전과 기존 원전을 구분하여 목표치를 달리 하고 있어, 일관성 측면에서 세슘 안전목표도 신규/기존 원전을 구분하여 차등 적용하는 것이 타당

· 신규 원전은 설계 단계부터 PSA를 활용하여 정량적 안전목표 달성을 위한 개선된 설계를 반영할 수 있으나, 기존 원전은 가동 중 개선된 설계를 반영하는 데 물리적 한계

· Cs-137 100TBq 초과 방출빈도는 Level 2 PSA에서 대량조기방출빈도(LERF)를 포괄하는 값으로, 일반적으로 LERF 이상으로 평가되는 지표이나, 국내 가동 원전은 Cs-137 100TBq 초과 방출빈도가 LERF의 1/10로 오히려 더 엄격한 기준이 적용되고 있음

구분	Cs-137 방출빈도*	≫	LERF(대량조기방출빈도)
가동원전	< 1.0×10^{-6}/년	≪	< 1.0×10^{-5}/년
신규원전		=	< 1.0×10^{-6}/년

* Cs-137 100TBq 초과 방출빈도 = LERF + α(LCF 등)

- LERF : 조기격납건물파손빈도(ECF) + 격리실패(Isolation Fail) + 우회사고(Bypass)

- LCF : 후기격납건물파손빈도

Ⅳ 결언

❍ ’11년 후쿠시마 원전 사고 이후 ’15년 중대사고 관리 강화에 따른 규제체계 정립 과정에서 신규 PSA 안전목표인 Cs-137 방출빈도 기준이 도입되어 국내 원전에 적용 중

❍ 국내 세슘 안전목표는 본래 취지와 달리 제한치 개념으로 모든 원전 일괄 적용되어 해외 사례와 적용 방식에 차이

- (제한치 개념) 안전성 증진을 위한 목표치가 아닌 제한치 개념으로 적용
- (일괄 적용) 기존/신규 원전 구분 없이 전 원전에 적용

❍ 이는 사업자의 PSA 수행 목적을 정량적 제한치 충족에 집중시켜 추가적이고 자발적인 안전성 개선 활동을 제약하고, PSA 기술개발 투자 감소로 이어져 국내 PSA 분야의 학문적·기술적 성장에 부정적 영향 우려

- PSA 결과는 규제 적합성 확인뿐 아니라 리스크정보활용(RIA), 사업자의 자발적인 안전성증진계획 수립과 비용-편익 기반 의사결정에 적극 활용 필요

❍ PSA 안전목표는 규제 충족을 위한 제한치가 아닌 안전성 향상을 위한 목표치(Objective)로 활용하는 것이 본래 취지에 부합하며, KINS 심사지침과 해외 적용 사례를 고려할 때 신규/기존 원전을 구분하여 적용하는 합리적 체계 마련 필요

❍ PSA가 원전 안전성 향상과 리스크정보활용의 핵심 도구로 지속 활용되고 관련 연구 활동이 활발히 전개될 수 있도록, 세슘 안전목표의 합리적 적용을 위해 다음과 같이 제도개선을 제언함

- (목표치 명확화) 고시에 이미 목표치라는 문구가 있으나, 해석상 오해를 방지하기 위해 목표치 개념을 고시에 명확히 기술
- (안전성증진계획 수립) 운전 기간 중 목표치 달성을 위한 합리적인 안전조치 개선사항을 도출·이행하고, 목표치 달성 이후에도 지속적으로 안전성을 증진하도록 규정
- (신규/기존 원전 분리) 해외 사례와 국내 기존 PSA 안전목표(CDF, LERF)의 신규/기존 구분 기준을 고려하여 세슘 안전목표도 신규/기존 원전에 차등 적용

❍ 규제기관이 본 제언을 바탕으로 사업자·학계와 협의하여 고시 개정을 추진한다면, 제한치 충족 중심의 PSA 활용에서 벗어나 사업자의 자발적 안전성 증진을 유도하는 선순환 체계가 구축될 것으로 기대

❑ 참고문헌

[1] Jan-Erik Holmberg och Michael Knochenhauer “2007:06, Probabilistic Safety Goals — Phase 1 - Status and Experiences in Sweden and Finland,” 2007.

[2] OECD/NEA, “Use and Development of Probabilistic Safety Assessments at Nuclear Facilities,” 2019.

[3] NRA, “PRA の活用について, 1.(4) 炉安審・燃安審における議論の要約” 2024.
(PRA에 관하여, 1. (4) 원자로안전전문심사회 및 핵연료안전전문심사회에서의 논의)

[4] Toyoshi Fuketa, “How PSA Results are to be Utilized in New Nuclear Regulation in Japan,” Nuclear Regulation Authority, 2013.

[5] 原子力規制委員會, “実用発電用原子炉に係る新規制基準の考え方について (실용발전용원자로에 관한 신 규제기준의 사고방식에 대해서),“ 2022.

[6] STUK, “PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT AND RISK MANAGEMENT OF A NUCLEAR POWER PLANT,“ GUIDE YVL A.7, 2019.

[7] STUK, “Finnish report on nuclear safety,“ STUK-B 237, 2019.

❑ 부록: 출처 원문

* 출처[1]: SKI Report 2007:06, Probabilistic Safety Goals

[SKI Report 2007:06, Probabilistic Safety Goals(2007년2월)]

However, the SKI does not desire a situation where actions need automatically to be taken because of the violation of a safety goal, i.e., **it is not judged to be feasible to treat safety goals as absolute acceptance limits.** Fluctuations in PSA results over time are unavoidable (updates, extension) and sharp acceptance criteria might in fact be counterproductive.

Therefore it is judged reasonable to see safety goals as target values, and to treat exceedances as triggers for further analysis or planning of safety enhancing actions. Thus, while the fulfilment of the safety goals defined by the licensees is basically mandatory, the actual procedure is more flexible. **Exceedance of safety goals is allowed,** but should be accompanied by an evaluation stating the reason for the exceedance and — if needed — a plan for correction.

* 출처[2]: OECD/NEA 보고서, “Use and Development of PSA at Nuclear Facilities, 2019”

Table 3-3-3: Level 2 PSA numerical criteria

국가	평가지표	빈도	비고
캐나다	100TBq Cs-137	1.0×10^{-6}/yr	Objective for new plants
	>1% Cs-137	1.0×10^{-5}/yr	Limit for existing plants
	>1% Cs-137	1.0×10^{-6}/yr	Objective for existing plants
대만	Not defined	1.0×10^{-6}/yr	Objective
체코	Not defined	1.0×10^{-5}/yr	Objective for existing plants
		1.0×10^{-6}/yr	Objective for new plants
프랑스	Not defined	Negligible	Objective for new plants
핀란드	100TBq Cs-137	5.0×10^{-7}/yr	Objective for new plants
헝가리	Not defined	1.0×10^{-5}/yr	Limit for existing plants
		1.0×10^{-6}/yr	Limit for new plants
일본	Containment failure	1.0×10^{-5}/yr	Objective for all plants
	100TBq Cs-137	1.0×10^{-6}/yr	Objective for all plants
한국	LERF	1.0×10^{-5}/yr	Objective for existing plants
	LERF	1.0×10^{-6}/yr	Objective for new plants
	100TBq Cs-137	1.0×10^{-6}/yr	Objective for all plants
슬로바키아	Not defined	1.0×10^{-5}/yr	Limit for existing plants
	Not defined	1.0×10^{-6}/yr	Limit for new plants
슬로베니아	Not defined	5.0×10^{-6}/yr	Limit for existing plants
	Not defined	1.0×10^{-6}/yr	Limit for new plants
스웨덴	> 0.1% of core inventory	1.0×10^{-7}/yr	Objective
스위스	LERF	1.0×10^{-5}/yr	Limit for existing plants
		1.0×10^{-6}/yr	Objective for existing plants
영국	100 or more fatalities	1.0×10^{-5}/yr	Basic Safety Level
		1.0×10^{-7}/yr	Basic Safety Objective
	Effective off site dose > 1 Sv	1.0×10^{-4}/yr	Basic Safety Level
		1.0×10^{-6}/yr	Basic Safety Objective

* 출처[3]: PRA의 활용성(NRA, 2021)

１．安全の目標と規制基準との関係について

原子力規制委員会は、安全の目標を示し、現行の規制により達成される安全の水準と比較し、乖離を把握しつつ、規制の継続的改善に努める必要がある。安全の目標は、原子力規制委員会が規制基準の策定などに当たり参照すべきものであり、社会情勢に応じて変わり得るものである。

原子力規制委員会が示した安全の目標は、現在は、確率を用いて表現されている（例：Cs137 の放出量が 100TBq を超えるような事故の発生頻度は、100 万炉年に１回程度を超えないように抑制）。これに対し、規制基準の要求事項は、陽には確率を用いたものとはなっておらず（例：既往最大を上回るレベルの津波を想定し、それが起こることを前提に、敷地内に浸水させない対策を求める）、また規制基準に適合した施設における事故の発生確率そのものは審査で確認していない。

したがって、確率という尺度を用いて安全の目標と規制基準の要求事項により達成される安全の水準を単純に比較し、両者の乖離を議論することはできない。両者の関係は、確率論的リスク評価の結果に加え、安全余裕、決定論的手法による深層防護の有効性評価の結果、運転経験、組織的要因など、安全に関連する多面的な尺度を用いて議論する必要がある。

４．確率論的リスク評価の有効性について

安全を考える場合、リスクはゼロにならないことを前提にした確率論的リスク評価を用いることで合理的な議論が可能となる。しかしながら、確率論的リスク評価には不完全性（例：全てのリスクを網羅した評価となっていない）や不確実性（例１：自然現象についてその発生確率の不確かさが大きい、例２：事故時の運転員による操作の信頼性の確率は不確かさが大きい）がある。今後も自然現象を含め評価手法の改善を続けることは当然としても、確率論的リスク評価結果の絶対値（点推定値）のみを算出し、これを直接的に用いて、安全の目標などと一対一に大小を照らし合わせることで施設の安全性を判断することは適切ではない。

[번역]

1. 안전목표와 규제기준과의 관계에 관하여

(중략)

안전목표는 확률을 이용하여 표현되고 있으나, 규제기준의 요구사항은 확률을 이용한 것으로 되어 있지 않으며, 규제기준에 적합한 시설에서의 사고 발생 확률 자체는 심사에서 확인하지 않는다.

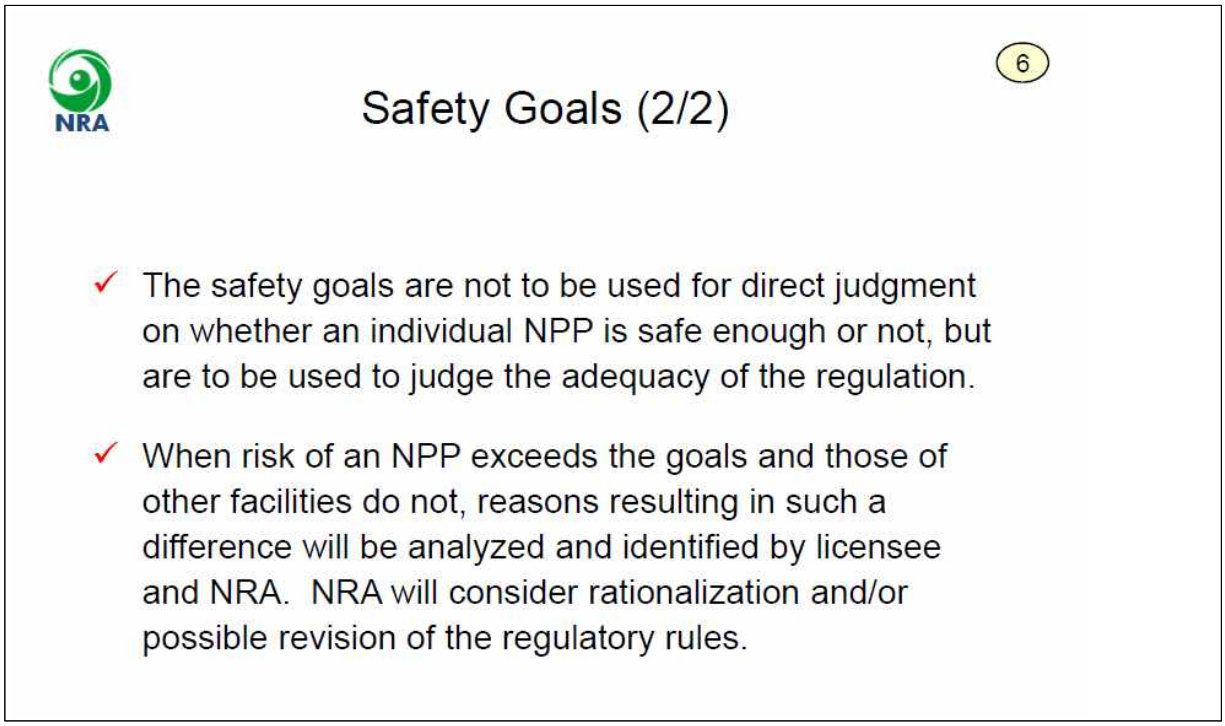
(중략)

4. 확률론적 리스크의 유효성에 관하여

(중략)

앞으로도 자연현상을 포함해 평가 방법의 개선을 계속하는 것은 당연하다고 해도 확률론적 리스크가 결과의 절대치(점 추정치)만을 산출하고, 이를 직접적으로 이용해 안전의 목표 등과 일대일 대소를 대조함으로써 시설의 안전성을 판단하는 것은 적절하지 않다.

* 출처[4]: How PSA Results are to be Utilized in New Nuclear Regulation in Japan(NRA, 2013)



【NRA 자료 중 발췌】

《川内１号機地震PRA評価結果》

	変更前	変更後	リスク低減割合
炉心損傷頻度（／炉年）	1.7×10^{-6}	8.5×10^{-7}	約50%減
格納容器機能喪失頻度（／炉年）	1.5×10^{-6}	6.3×10^{-7}	約60%減
事故時のCs-137 の放出量が100TBqを超えるような事故の発生頻度（／炉年）	1.5×10^{-6}	6.3×10^{-7}	約60%減

[번역]

<센다이1호기 지진PRA 평가 결과>

-	변경 전	변경 후	위험 감소 비율
노심손상빈도(/ry)	1.7×10^{-6}	8.5×10^{-7}	약 50% 감소
격납용기기능상실빈도(/ry)	1.5×10^{-6}	6.3×10^{-7}	약 60% 감소
사고 시 Cs-137 방출량이 100 TBq을 넘는 사고 발생 빈도(ry)	1.5×10^{-6}	6.3×10^{-7}	약 60% 감소

* 출처 : 규슈 전력 주식회사 홈페이지

* 출처[5]: 日 NRA ‘실용발전용원자로에 관한 신 규제기준의 사고방식에 대해서’(2022.12.14.)

（３） 新規制基準と安全目標の関係について 原子力規制委員会は、安全目標は、基準ではなく規制を進めていく上で達成を目指す目標であると位置付けた。 そして、原子炉等規制法の改正により新設された４３条の３の２９（発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価）により、発電用原子炉設置者は施設定期検査終了後６ヶ月以内に自ら、安全性の向上のための評価を実施し、その結果を原子力規制委員会に届け出ることとなる。この安全性向上のための評価には、炉心損傷頻度、格納容器機能喪失頻度及びセシウム１３７の放出量が１００テラベクレルを超えるような事故の発生頻度の評価が含まれており、原子力規制委員会は安全目標を参考にこの評価結果を踏まえ、必要な場合には、規制基準等の見直しを行い、発電用原子炉設置者に対策をさせることとなる。 こうした安全目標を参考とする取組みにより、発電用原子炉施設の安全性について継続的な向上を図ることができる。
(3) 신규 규제기준과 안전목표의 관계 원자력규제위원회는 안전목표를 규제기준 자체가 아니라, 규제를 추진해 나가는 과정에서 달성을 지향하는 목표로 위치 부여하였다. 또한, 원자로등 규제법 개정에 따라 신설된 제43조의3의29(발전용 원자로시설의 안전성 향상을 위한 평가)에 근거하여, 발전용 원자로 설치자는 시설의 정기검사 종료 후 6개월 이내에 스스로 안전성 향상을 위한 평가를 수행하고, 그 결과를 원자력규제위원회에 제출하여야 한다. 이 안전성 향상 평가에는 노심손상빈도, 격납용기기능상실빈도 및 세슘-137 방출량이 100 TBq을 초과하는 사고의 발생빈도에 대한 평가가 포함된다. 원자력규제위원회는 이러한 평가 결과를 검토함에 있어 안전목표를 참고기준으로 활용하며, 필요하다고 판단되는 경우에는 규제기준 등의 재검토를 실시하고 발전용 원자로 설치자에게 적절한 안전성 향상 대책을 요구하게 된다. 이와 같은 안전목표를 참조하는 체계를 통해 발전용 원자로 시설의 안전성을 지속적으로 향상시켜 나갈 수 있다.

* 출처[6]: GUIDE YVL A.7, PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT AND RISK MANAGEMENT OF A NUCLEAR POWER PLANT(STUK, 2019)

306. A nuclear power plant unit shall be designed in compliance with the principles set forth in Section 22 b of the Nuclear Energy Decree (161/1988) in a way that

a. the mean value of the frequency of a release of radioactive substances from the plant during an accident involving a cesium-137 release (Cs-137) into the atmosphere in excess of 100 TBq is less than $5 \cdot 10^{-7}$/year;

b. the accident sequences, in which the containment function fails or is lost in the early phase of a severe accident, have only a small contribution to the reactor core damage frequency.

Release assessments shall take into account all of the nuclear fuel located at the plant unit. A spent nuclear fuel storage external to the plant unit is considered a separate nuclear facility that must meet the requirement laid down in item a. [2019-02-15]

* 출처[7]: STUK-B 237, Finnish report on nuclear safety(STUK, 2019)

Guide YVL A.7 includes the following probabilistic safety goals:

- Core damage frequency less than $1 \cdot 10^{-5}$/year
- Large radioactive release (> 100 TBq Cs-137) frequency less than $5 \cdot 10^{-7}$/year.

In addition, it is also required that the accident sequences, in which the containment function fails or is lost in the early phase of a severe accident, have only a small contribution to the reactor core damage frequency.

These safety goals apply as such to new NPP units. For operating units, instead of the numerical safety goals, the SAHARA (safety as high as reasonably achievable) principle and the principle of continuous improvement are applied.

* 출처 : STUK-B 237, Finnish report on nuclear safety(STUK, 2019)