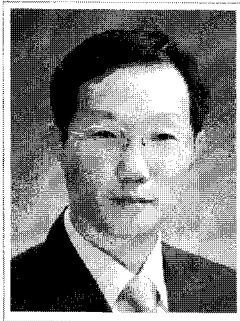


# 원자력발전소 종합적 안정성 평가 국제 동향

박 윤 원

한국원자력안전기술원 국제원자력안전학교장



서울대 기계설계학과 학사, 석사  
프랑스 Ecole Centrale Paris 기계공학 박사  
한국원자력안전기술원 공학연구실장, 안전규제부장  
OECD/NEA 원자력규제위원회 위원  
ASME 규제자기술검토위원회 위원

## 배 경

전 세계적으로 원전 안전에 대한 관심이 증가되면서 개별적인 안전성 평가가 지속적으로 시행되고 있다. 그러나 원전의 총체적이고 종합적인 안전성 평가에 대한 관심은 아직 부족한 형편이다.

그러므로 이에 대한 효과적인 커뮤니케이션 수단의 확보가 필요하고 또한 규제 효과성/효율성의 증대가 요구되고 있다.

자원은 한정되어 있고 그것을 확대하는 데는 한계가 있으므로 선택과 집중의 필요성이 대두되고 있으며 규제 완화 등 전반적인 환경 변화에 대응이 필요하다.

현재 국내적으로 종합적 안전성 평가와 관련하여 여러 활동들이 진행되고 있으나 그 지향하는 점에는

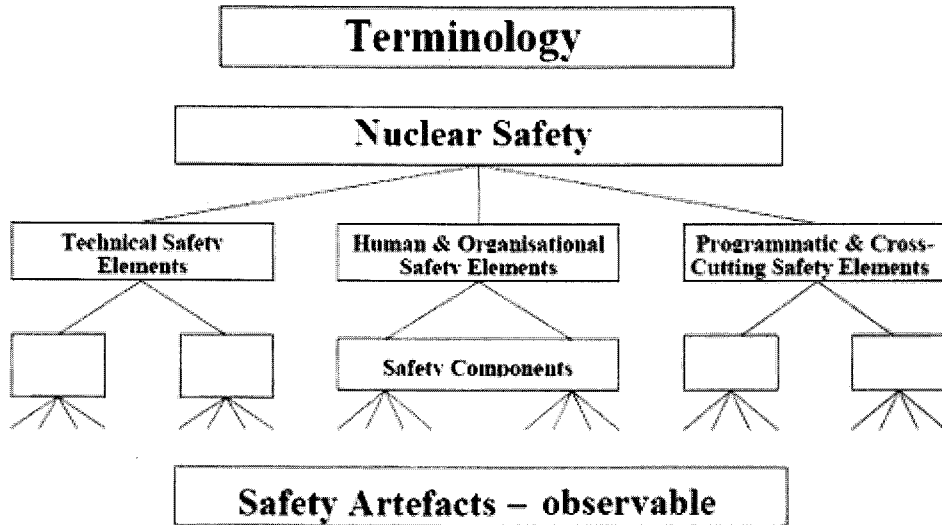
차이가 존재하므로 공통의 접근 방법, 평가 방법, 지표 등에 대한 공감대 형성이 필요하다.

이러한 인식하에 향후 활발한 논의의 출발점을 제공한다는 측면에서 원전의 종합적 안전성 평가에 대한 국제 동향을 살펴보고 이를 분석한 후 미래를 전망해보고자 한다.

## 해외 동향

### 1. FANS 2007

OECD/NEA는 2007년 6월 CNRA 주관으로 FANS(Forum on Assuring Nuclear Safety)를 개최하였다. 이 포럼은 안전 규제 관련 특정 주제에 대한 CNRA의 견해를 담은 Green Booklet로서 '원자력 안전의 보장이라는 규제 목표' 개발



〈그림 1〉 FANS 2007에서 제시한 종합적 안전평가 기본틀

의 일환으로 개최되었다.

15개국 2개 국제 기구 19명의 전문가로 구성된 WG의 작업 결과에 대한 심층 토의가 이루어졌는데 이 포럼에서는 2일에 걸쳐 주요 국가의 규제 기관장 등이 참여하였다.

이 Green Booklet의 초점은 원자력 시설이 수용 가능한 안전 수준을 충족하고 있는지를 어떻게 보장할 것인가, 안전 정보의 수집 및 종합적인 분석 방안, 최종적인 안전 수준의 판단 등이며 종합적 안전성 평가 방안을 제안하고 있다.

이는 원자력 안전성을 구성 요소(element)들로 분해하고 규제 활동을 통해 각 요소를 측정하며 각 요소의 허용 기준 충족 여부를 판단하고 각 요소의 점수를 가중 합산하여 최종 평가한다는 것이다.

이 회의 결과, 대부분의 국가는

종합적 안전성 평가의 필요성과 문서에서 제시하고 있는 목적에 대해 동의하였으나, 각 요소별 가중치 부여와 이를 종합하는 세부 과정에 대해서는 각국의 규제 제도 및 환경에 따라 상이할 수 있음을 인식하였다.

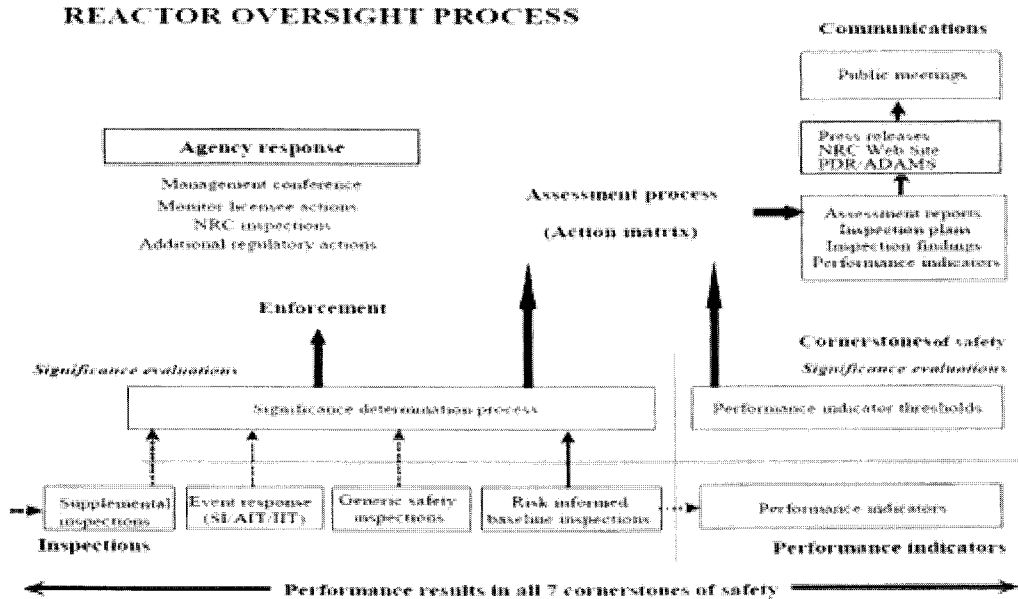
이 Green booklet에서 제시하고 있는 종합적 안전성 평가의 요소들은 다음 〈그림 1〉에서 보여지듯이 원자력 안전을 기술적 안전 요소, 인적 및 조직적 안전 요소, 프로그램 및 공통 안전 요소의 3개로 나누고 이들을 다시 하부의 안전 컴포넌트들로 나누었으며, 이들을 다시 관측 가능한 안전의 가시적 인자(safety artefacts)들로 나눈다는 개념이다.

## 2. 미국의 원자로 감독 프로세스 (ROP: Reactor Oversight Process)

미국의 ROP는 다음과 같이 구성 운영된다. 즉 사업자는 3개의 전략 성능 분야(strategic performance area), 7개의 측정 가능한 상위 목표(cornerstone), 다수의 성능 지표(performance indicator)로 구성하여 안전성능을 평가하여 4단계의 color-coding으로 표시한다.

규제 기관은 검사 지적(finding) 사항에 대해서 SDP를 수행하고 3개 공통 분야(cross-cutting 분야)에 대한 검사를 시행하며 4단계의 color-coding으로 평가한다.

원전 안전성에 대한 종합적인 판단은 Action matrix를 사용하여 graded approach를 적용하게 된다.



〈그림 2〉 미국 NRC의 원자로 감독 프로세스(ROP)

### 3. 캐나다의 안전성 평가

캐나다에서 시행되고 있는 안전 영역에 대한 평가는 다음과 같다. 규제 기관에서는 매년 규제 활동을 계획할 때 안전 영역, 프로그램에 대한 검토를 통해 등급을 부여(A-E)하며 규제 기관의 주재 검사원은 위의 결과를 반영하여 계획된 검사 프로그램에 따라 사업자에 대한 검사를 수행한다(〈표 1〉).

안전 성능 지표 평가로서는 17개의 안전 관련 성능 지표를 설정하고 경향을 분석하여 규제 기관의 자원 배분 등에 활용하고 있으며 안전에 중요한 사건에 대한 분석은 독립적인 규제 기관이 근본원인 분

석을 시행하고 안전 성능평가에 있어 주요 입력 자료로 활용한다(〈표 2〉).

### 4. 스위스의 안전성 평가

스위스에서는 평가 대상으로 검사 결과, 사업자의 인허가 자료 및 사건 정보 등을 사용하며 앞으로 성능 지표, 사업자 보고서, 발전소 설계 변경 등에 대한 검토로 확장할 예정이다.

〈표 3〉에 따라 평가하며 양호, 보통, 개선 필요, 이상 상태, 1-7등급(INES 원용)으로 분류하고, 이상 상태 이상은 사건으로 간주하고 개선 필요 이상의 등급에 대해서는

시정 조치를 필요로 한다.

종합적인 평가로는 제시된 표에 따라 평가된 결과에 대해 설계 및 운전 요건, 발전소 거동, 인적 및 조직적 대응 등에 대한 정성적인 종합 평가를 독립적으로 수행하며 규제 기관의 고위 책임자들이 정량적, 정성적 평가 결과에 근거하여 발전소의 종합적인 안전성에 대해 평가한다.

규제 기관인 HSK는 매년 개별 발전소에 대하여 종합 안전성 평가를 실시하며 그 결과는 국가 기관의 보고서에 반영되며 차년도 규제 계획에도 반영된다.

<표 1> 캐나다의 안전성 평가 영역과 프로그램

안전 영역	프로그램
Operating performance	- Organization and plant management - Operation - Occupational health and safety
Performance assurance	- Quality management - Human factors - Training, examination, certification
Design and analysis	- Safety analysis - Safety issues - Design
Equipment fitness for service	- Maintenance - Structural integrity - Reliability - Equipment qualification
Emergency preparedness	- Emergency preparedness
Environmental performance	- Environmental management system - Effluent and environmental monitoring
Radiation protection	- Radiation protection
Site security	- Site security
Safeguards	- Safeguards

### 5. 스웨덴의 안전성 평가

스웨덴은 SKI-Forum을 운영하고 있으며 매년 원전의 종합 안전성 평가를 실시한다.

발전소 정주기 시험 결과, 검사 결과, 성능 지표, 안전성 검토, 운전 경험 등을 총체적으로 활용하고 15개 분야를 대상으로 안전 정보를 활용하여 평가한다. 설계 및 건설, 운영 및 조직, 경쟁력과 인력 안전성 검토, 운전 경험 등이 그 대상이다. 심층 방호 기준, 물리적 방벽 기준을 활용하여 안전 중요도를 분석

한다.

종합 안전성 평가 결과 판단으로서는 검사 부서에서 15개 분야에 대한 보고서를 작성하고 규제 전문가와 관리자들이 이를 검토하며 최종적인 결과는 규제 기관의 고위 책임자에 의해 승인되며 Forum 이후에 개별 발전소 경영층과 논의한다.

종합 안전성 평가의 활용과 관련하여 이는 국가 기관의 보고서에 반영되며 규제 기관의 규제 계획 수립에 활용된다.

### 국내 현황

국내의 가동 원전 안전성 평가 현황을 살펴보기로 한다.

안전 심사 활동으로는 운영 변경/경미한 사항 변경 심사, 주기적 안전성 평가(PSR) 심사, 확률론적 안전성 평가(PSA) 등이 있으며 안전 검사 활동으로는 기기 및 계통에 대한 성능, 운영 기술 능력, 인적 요소 등에 대한 정기검사, 품질 보증 검사, 일상 검사, 특별 검사가 있고 기타 원전 안전성 확인으로는 안전성 지표(SPI), 원전 사고/고장 원

<표 2> 캐나다가 사용하는 17개 안전 관련 성능 지표

Safety Area	Program	P or I	Nuclear Power Plant					
			Bruce		Darling-Pickering		Gen- tilly-2	Point Lepreau
			A	B	A	B	A	B
<b>Operating Performance</b>		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B
Organization & Plant Management		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B
Operations		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B
Occupational Health & Safety (Non-Radiological)		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B
<b>Performance Assurance</b>		P	B	B	B	B	B	B
		I	C	B	B	B	C	B
Quality Management		P	C	C	B	B	B	B
		I	C	B	B	B	C	B
Human Factors		P	B	B	B	B	B	C
		I	C	C	B	B	B	C
Training		P	B	B	B	B	B	B
		I	C	B	B	B	C	B
<b>Design and Analysis</b>		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	C	B	B
Safety Analysis		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B
Safety Issues		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B
Design		P	B	B	B	B	B	B
		I	C	B	B	C	B	B
<b>Equipment Fitness for Service</b>		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	C	B	B
Maintenance		P	B	B	B	B	B	B
		I	C	B	B	C	B	B
Structural Integrity		P	B	B	B	B	B	C
		I	B	B	B	B	B	B
Reliability		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	C	B	B
Equipment Qualification		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	C	B	B	B
<b>Emergency Preparedness</b>		P	A	A	A	A	A	A
		I	A	A	A	A	B	B
<b>Environmental Protection</b>		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B
<b>Radiation Protection</b>		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B
<b>Site Security</b>	Protected Information							
<b>Safeguards</b>		P	B	B	B	B	B	B
		I	B	B	B	B	B	B

**Legend:**

- > A = Exceeds requirements
- > B = Meets requirements
- > C = Below requirements
- > D = Significantly below requirements
- > E = Unacceptable

〈표 3〉 스위스의 안전성 평가 방법

Subject	Requirements		Operational experience	
	Design requirements	Operational requirements	State and behaviour of the plant	State and behaviour of man and organisation
<b>Goals</b>				
<b>Safety functions</b>	Controlling reactivity			
	Cooling the fuel			
	Confining radioactive materials			
	Limiting exposure to radiation			
<b>Levels of defence in depth</b>	<b>Level 1</b> Prevention of abnormal operation and failures			
	<b>Level 2</b> Control of abnormal operation			
	<b>Level 3</b> Control of accidents within the design basis			
	<b>Level 4</b> Control of severe plant conditions			
	<b>Level 5</b> Mitigation of the radiological consequences of significant external releases			
<b>Barrier integrity</b>	Fuel integrity			
	Integrity of the primary cooling system boundary			
	Containment integrity			

인 조사 등이 있다.

국내의 가동 원전 안전성 평가 방법을 살펴보면 개별 안전 규제 활동을 통해 해당 분야에 대한 안전성을 확인하고 분야별 불만족시 시정 조치를 위한 활동을 전개하며 일부 안전성 평가 결과의 피드백도 이루어진다.

이것에는 정기 검사시 안전 심사 결과의 반영 및 조치 내용 확인, PSA와 PSR의 연계, 리스크 평가 결과의 정기 검사 반영(RIPI: Risk-Informed Periodic Inspection),

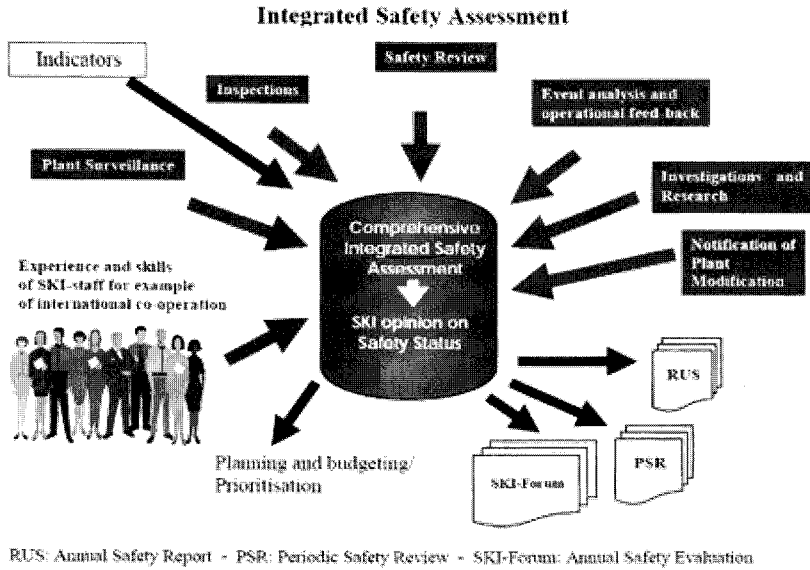
그리고 인적 요소에 대한 정기 검사(HuPI: Human Performance Periodic Inspection) 등이 포함된다.

주기적 안전성 평가에 대하여 살펴본다. 이것은 그 목적이 원전의 현재 상태의 안전성을 확인하고 장기간 안전성을 유지하기 위한 대책이 수립되어 있는가를 종합적으로 평가하는 것이다.

대상은 가동중 원전이고 적용 기술 기준은 현재 유효한 기술 기준이며 실시 주기는 운영 허가를 받은 날로부터 매 10년이다.

평가 내용은 현재의 물리적 상태 등 11개 안전 인자를 평가하며 IAEA 지침에 근거를 둔다.

안전성 증진 활동으로는 최신 기술 기준을 참조하여 안전성 증진을 위한 세부 이행 사항을 도출하는데 사업자 자체 도출 및 규제 기관의 권고가 있다. 현재까지의 평가 결과(2008. 12. 현재)를 살펴보면 11개 호기에 대한 평가가 완료되었고(고리 1,2,3,4호기, 월성 1호기, 영광 1,2,3,4호기, 울진 1,2호기) 월성 2호기가 심사 중이다.



<그림 3> 스웨덴의 안전성 평가 개념도

지금까지 심사 결과를 보면, 모든 원전은 현재의 기술 기준을 만족하고 있어 안전성이 확보되어 있으며 안전성 증진을 위해 필요한 조치를 도출하여 순차적으로 계획을 수립하여 이행하고 있다고 평가된다.

안전성 증진 사항 도출 건수는 고리 1(40건), 월성 1(27건), 고리 2(23건), 고리 3,4(22건), 영광 1,2(25건), 영광 3,4(16건), 울진 1,2(18건)이다.

사업자의 이행 조치 계획 수립 후 반기별로 이행 상태를 확인 중이며 고리 1호기의 경우 100% 조치를 완료하였다.

안전 성능 지표(SPI)는 그 목적이 안전 성능 지표를 설정하여 지표를 통해 개략적으로 원전의 안전성을 확인하고 안전 성능에 대한 추이 분석을 실시하기 위한 것이며

그 대상은 가동중 원전이다.

1995년 그 개발에 착수하여 2002년 안전 성능 지표 체계를 수립하였으며 2002년 12월부터 시범 적용하여 2005년 2분기부터 모든 안전 성능 지표에 대해 평가를 수행 중이다.

지표의 구성을 보면 영역 지표(2), 범주 지표(5), 세부 지표(11)로 구성되어 있으며(<표 4>) color-coding을 적용(4개 등급)한다.

평가 방법으로는 분기별로 사업자의 결과 보고를 활용하며 규제 기관이 검토를 거쳐 인터넷에 게시한다.

원전 종합 안전성 평가 관련 안전 연구 현황으로는 종합 안전 성능 평가(ISPA: Integrated Safety Performance Assessment)가 있는데, 이는 리스크 정보 활용 규제

(RIR) 연구의 일환으로 수행되며 원전 안전성/성능 결과에 따른 차등 정기 검사 이행과 관련되며 KINS 안전연구부가 주관하고 있다.

CISAS: CANDU Integrated Safety Assessment System(중수로 안전성 평가 통합 운영 시스템)는 중수로 원전에 대한 종합적 안전성 평가를 위한 것으로서 역시 KINS 안전연구부가 주관하여 수행하고 있다.

### 국제 동향 및 국내 현황 분석

이상을 종합적으로 분석하면 다음과 같다. 국제적으로 여러 나라와 국제 기구에서 종합적 안전성 평가에 대한 이해가 확산되고 있고 이의 적용이 시행되고 있다. 이는 보다 holistic한 approach로 이행하

는 세계 trend와 일치한다고 할 수 있다.

국내에서는 다양한 평가 방법을 통해 안전성을 확인하고 있으며 안전성 확인 항목은 해외와 유사하거나 또는 더 다양하다고 할 수 있다. 그리고 안전성 확인의 심도는 해외에 비해 상대적으로 우위에 있으며 지금까지 원전 안전성도 충분히 확보된 것으로 평가되는데 우수한 운전 실적 및 안전성을 보이고 있는 것이 그 증거이다.

한편 앞으로 개선이 필요 사항으로서의 다음과 같은 것들이 있다.

먼저 안전 문화, 조직 체계 등 소프트웨어 측면의 평가가 빈약하다. 지금까지 하드웨어적인 자료에 중점을 두어왔으며 리스크 정보, 성능 정보 등 정량적인 평가 요소 비중이 높았다고 평가된다.

그리고 종합적인 판단 체계가 빈약하여 개별 항목별로 만족 여부를 판단하는 1차원적 접근법이 주를 이루었다고 할 수 있다. 즉 전문가 집단의 다중/종합 평가 체계가 빈약하였다고 할 수 있는데 '구슬이서 말이라도 꿰어야 보배'라는 속담을 명심하고 이에 대한 개선 노력을 경주하여야 할 것이다.

**향후 전망과 정책 방향**

이상에서 살펴본 국제 안전성 종합 평가 국제 동향과 국내 현황 분석 결과를 바탕으로 향후를 전망하

<표 4> 우리나라의 안전 성능 지표

영역	범주	지표
원자로 안전	안전 운영	비계획 원자로 정지 비계획 출력 변동
	안전 설비 신뢰도	안전 주입 계통 비상발전기 계통 보조 급수 계통
	안전 방벽	핵연료 건전성 1차 냉각재 계통 건전성 격납 건물 건전성 비상 대책
방사선 안전	소내 방사선 안전	소내 방사선 선량
	소외 방사선 안전	소외 방사선 준위

면 다음과 같다.

앞으로 보다 많은 규제 기관이 더욱 원자력 시설의 안전성을 종합적으로 평가, 판단하는 노력을 경주할 것으로 예상된다.

그리고 이 종합 안전성 평가 결과를 규제 자원의 적절한 배분을 위하여 사용하여 나갈 것으로 전망된다.

현재의 안전성 평가 결과의 피드백이 제한적인 점, 즉 그 평가 결과가 원전 제임계 허용 여부 등 제한적으로만 활용되는 것을 개선하여, 안전성 수준에 따라 규제 기관의 규제 행위의 범위를 조정하고 규제 자원 배분을 합리적으로 시행하는 것이 필요하다.

이를 통하여 사업자의 자발적인 안

전성 증진 유도가 가능해질 것이다.

앞으로 원전 종합 안전성 평가에 대한 정책 방향으로서는 개별적 안전성 확인 활동의 집중화 및 체계화, 제반 평가 요소의 유기적인 결합 및 상호 관계 정립 및 평가 요소의 우선 순위 및 가중치 확립, 그리고 종합 안전성 평가 결과의 직접적인 피드백 등을 들 수 있다.

이를 통하여 객관적인 평가에 따른 선택과 집중으로 규제의 효율성/효과성을 제고하며 더 나아가서 원전 안전성의 전반적인 향상을 기대할 수 있을 것이다. ☉