



제4세대 원자력 시스템의 핵확산 저항성 및 물리적 방호 특성 평가 활동

양 명 승

한국원자력연구소 핵연료주기기술개발단 건식재가공핵연료기술개발부장
GIF PR/PP WG 위원

배 경

제4세대 원자력 시스템(Generation IV Nuclear Energy System, Gen IV)은 에너지 공급의 지속성, 안전성, 신뢰성 및 경제성 확보라는 목표뿐만 아니라 핵무기 제조를 위한 핵물질의 전용 혹은 테러에 대한 원자력 시스템의 보호를 위한 핵확산 저항성 및 물리적 방호(Proliferation Resistance & Physical Protection : PR & PP)를 중요한 기술적 목표로 제시하고 있다.

이에 따라, 핵확산 저항성 및 물리적 방호 관점에서 원자력 시스템을 정량적으로 평가하기 위한 PR & PP 평가 방법론 개발의 필요성이 Gen IV Roadmap을 통해 제기되었으며, 2002년 12월에 PR & PP 평가 방법론 개발을 위한 전문가 그룹의 활동이 시작되었다.

핵확산 저항성 평가는 미래 원자력 시스템 뿐만 아니라 가동중인 원

자로의 평가에 대해서도 일반적으로 광범위하게 적용될 수 있는 평가 방법론조차 개발되지 못한 상태이다.

물리적 방호 분야는 2001년 9월 11일 미국 뉴욕 무역센터 빌딩의 테러 이후 사보타지나 테러 행위에 대해 Gen IV 원자력 시스템이 강건하게 유지되어야 함이 크게 강조되어 왔다.

따라서 핵확산 저항성 및 물리적 방호 분야는 Gen IV 원자력 시스템의 핵확산 저항성 및 물리적 방호에 대한 체계적이고 정량적인 평가 방법론을 개발하여 시스템에 직접 적용 및 평가하고 이를 바탕으로 미래 원자력 에너지 시스템에 대한 설계 개선 및 보완을 제시함을 목표로 하고 있다.

Gen IV에 대한 PR 및 PP 전문가 회의에서는 미국 Brookhaven National Lab.에 근무하는 Bari, UC Berkeley 대학 교수인 Peter son, 그리고 캐나다 AECL에 근무

하는 Nishimura 등 세 명의 공동의장을 두고 있으며, Argonne National Lab.에 근무하는 Roglans이 본 회의의 간사를 맡고 있다.

주요 참가국 및 참가자들로는 미국 측의 연구소·학계·산업계 등 약 20인이 참가하고 있으며, 한국을 위시하여 캐나다·영국·불란서·일본·IAEA 등으로부터 약 10인이 참가하여 현재까지 7차의 전문가 회의를 개최하였다.

국내에서는 한국원자력연구소의 양명승(건식재가공핵연료기술개발부장), 오근배(정책연구부장) 및 박주환(책임연구원)이 참석해 왔다.

핵확산 저항성 및 물리적 방호 분야의 전문가 그룹의 단계별 추진 계획은 다음과 같다.

● 제1단계 : 2002. 12 ~2003. 12 (1년)

- PR 및 PP 관련 평가 요건(Metrics) 및 평가 방법론(Methodology) 개발



- 제2단계 : 2004. 1. ~ 2004.12. (1년)
 - 평가 Metrics 및 평가 방법론의 ESFR(Example Sodium Fast Reactor) 적용성 검토
 - PR 및 PP 평가 방법론 보고서 완성
- 제3단계 : 2004. 10. ~ 2006. 9. (2년)
 - Demo case에 대한 PR 및 PP 평가
 - 평가 분석 도구 개발
- 제4단계 : 2006. 10. ~ 2008. 9. (2년)
 - Gen IV case에 대한 PR 및 PP 평가

핵확산 저항성 및 물리적 방호 평가 방법론

PR & PP 전문가 그룹은 Gen IV 원자력 에너지 시스템에 대한 핵확산 저항성 및 물리적 방호 평가 방법론 개발을 위해 평가 항목(Metrics) 보고서와 평가 방법론 보고서를 개발하였다.

Metrics 보고서에서는 PR 및 PP 평가시 사용되는 평가 척도(Measures)와 평가 항목(Metrics)에 대한 주요 내용들이 기술되어 있다.

두 번째 보고서인 평가 방법론 보고서에서는 PR 및 PP 평가를 위한 접근 방법, 위협 공간 (Threat

〈표 1〉 PR 저항 인자 및 특성 -Material Barriers

Barrier type	Barrier	Attributes
Material barriers	Isotopic	-Critical mass -Degree of isotopic enrichment -Spontaneous neutron generation +Heat generation rate -Difficulty presented by radiation to weapons design
	Chemical	-Degree of difficulty in refining weapons material
	Radiological (dose to humans)	-Degree of remote handling normally required
	Mass and bulk	-Concentration of material, ease of concealment
	Detectability	-Degree of passive detection capability -Active detection capability +Hardness of radiation signatures -Uncertainties in detection equipment

Space)의 정의, 시스템 내 핵물질 흐름 경로에 해당하는 각 설계 요소에 대한 핵확산 및 물리적 방호 반응의 평가를 주요하게 다루고 있다.

1. 주요 용어 정의

가. Gen IV 시스템의 PR 및 PP 평가 방법론 개발 목표

Gen IV 원자력 에너지 시스템은 핵무기급 물질의 전용 혹은 절취에 대해 매우 비매력적이고도 가장 바람직하지 않는 루트를 핵확산 시도자에게 제공하고 있다는 확신을 제공해야 하며, 어떤 테러리즘의 행위에 대해서 향상된 물리적 방호를 제공하여야 함

나. 위협 공간(Threat Space)

잠재적 위협이 있는 시나리오들의 모든 스펙트럼

다. 핵확산 저항성(Proliferation Resistance)

국가가 핵무기 혹은 타 핵폭발 위협 기구를 취득하기 위해 핵물질의

전용, 비공개 생산 및 기술의 오용을 방해하는 원자력 시스템의 특성 라. 물리적 방호(Physical Protection)

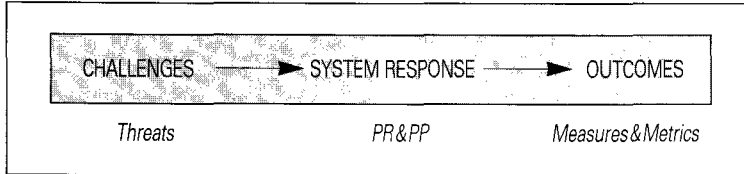
반국가 단체에 의해 핵폭발 혹은 방사선 확산 무기(Radioactive Dispersal Device : RDD)에 적합한 물질 그리고 시설 및 운송 사보타지 등을 통한 절취를 방해하는 원자력 시스템의 특성

마. 핵확산 저항성의 위협(PR Threats)

- 공개된 핵물질 흐름 혹은 저장고에서부터 비밀리에 핵무기급 물질로 전용하여 핵무기를 취득하고자 하는 국가 혹은 단체(핵물질의 전용)

- 공개된 시설 내에서 비밀리에 핵무기급 물질을 생산하여 핵무기를 취득하고자 하는 국가 혹은 단체 (시설의 오용)

- 공개된 장비 혹은 시설의 비밀 모사 혹은 격리된 비밀 프로그램에



(그림 1) 핵확산 저항성 및 물리적 방호 평가 단계

의해 핵무기를 취득하고자 하는 국가 혹은 단체(비밀 복제)

- 핵보유 가능 국가가 핵비확산 조약의 탈퇴 후 핵무기 프로그램을 통한 핵무기급 물질, 시설 및 장비를 확보할 능력이 Gen IV 시스템에 미치는 영향 (Abrogation)

바. 물리적 방호의 위협 (PP Threats)

- 원자력 시스템의 시설 및 운송으로부터 핵무기급 물질의 절취(핵무기에 사용되는 물질의 절취)

- 핵확산 무기에 사용되는 시설 혹은 운송으로부터 유해한 방사능 물질의 절취(유해 방사능 물질의 절취)

- 일반 대중에 해를 주거나, 시설의 손상 및 운전 방해로 통해 방사능 물질 방출 가능성 있는 시설 및 운송에 대한 내/외부 사보타지 (사보타지)

사. 평가 척도(Measures)

PR 혹은 PP를 표현하기 위해 사용될 수 있는 상위 레벨의 척도 가능 변수

아. 평가 항목(Metrics)

PR 혹은 PP에 영향을 주는 하위

레벨 인자 혹은 특성

2. PR 및 PP 평가 척도(measures)

PR & PP 전문가 그룹에서 핵확산 저항성을 평가하기 위해 다음과 같은 여섯 개의 measures와 물리적 방호를 위한 여섯 개의 measures를 제시하였다.

가. PR measures

- 핵확산 기술적 어려움 (Proliferation Technical Difficulty)

- 핵확산 자원 (Proliferation Resources)

- 핵확산 시간 (Proliferation Time)

- 핵분열 물질의 질 및 양 (Fissile Material Quality and Quantity)

- 탐지 시간 (Detection Time)

- 탐지 자원 (Detection Resources)

나. PP measures

- 운전 접근성 (Operational Accessibility)

- adversary delay

- 잠재적 결과 및 완화 (Consequences and Mitigation Potential)

- 탐지 시간 (Detection Time)

- 방해 연기 (Interruption Delay)

- 물리적 방호 자원 (Physical Protection Resources)

3. PR & PP 평가 방법론

PR & PP 평가는 원자력 에너지 시스템 전체를 대상으로 하며, NPAM 보고서[1]에 제시된 방법론을 주로 따르고 있다.

(그림 1)은 PR & PP의 전반적인 평가 방법론의 개념도이며, 주어진 시스템이 잠재적인 핵확산자나 반국가 단체에 의해 위협을 받는 도전(challenge)들을 정의하고 이에 대한 시스템의 PR & PP 반응(response)이 결정되면 시스템의 핵물질 흐름 경로에 따른 각 설계 요소들에 대한 measures와 metrics를 평가하여 결론을 도출함을 의미한다.

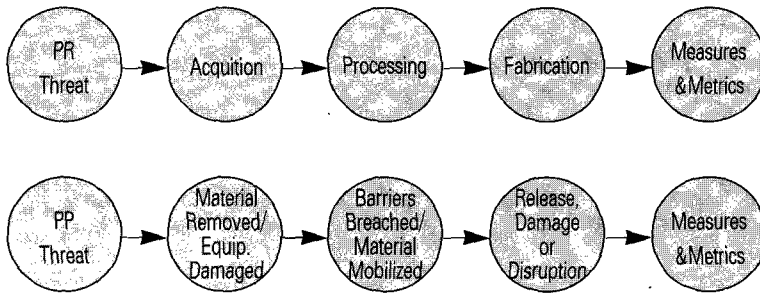
평가 방법의 개략적인 경로는 (그림 2)에 보인 바와 같다. 이들 각 평가 경로들의 평가 항목들은 각 설계 요소들에 대한 해석이 진행됨에 따라 각 설계 요소를 평가하는 세부 평가 요건으로 나누어진다.

이들 세부 평가 요건들은 저항 인자들로 표현되는데, 핵확산 주요 저항 인자들인 material barrier,



〈표 2〉 PR 저항 인자 및 특성 -Technical Barriers

Barrier type	Barrier	Attributes
Technical barrier	Facility unattractiveness (degree of difficulty of production of weapons material inherent in a facility)	-Complexity of required modifications -Cost of modifications -Safety implications of modifications -Time required to modify -Facility throughput -Effectiveness of observable environmental signatures
	Facility accessibility	-Difficulty and time to perform operations -Need for specialized equipment -Manual versus automatic, remote operation -Frequency of operational opportunity to divert
	Available mass	-Amount of potentially weapons useable material at a given point in a fuel cycle
	Diversion detectability	-Type of material and processes with respect to accountability -Uncertainties in detection equipment -Form of material as amenable to counting
	Skills, expertise and knowledge	-Dual-use skills and knowledge -Applicability of dual-use skills -Availability of dual-use information
	Time	-Time materials in a facility of process are available to proliferant access



〈그림 2〉 PR & PP의 기능적인 경로 개략도

를 제시하였으며, 이들은 안전 조치, 접근 조치 및 보안 (access control and security), 핵물질이 놓여 있는 위치 등 세 가지의 특성으로 나누어지며, 이들도 material 혹은 technical barrier와 마찬가지로 다양한 특성을 갖는다.

technical barrier 및 extrinsic barrier에 대한 각각의 저항 인자의 예를 〈표 1 ~ 3〉에 보였다.

〈표 1〉에 제시한 바와 같이 material barrier에는 isotope 특성, chemical form 특성, 방사선

세기 특성, 질량 및 부피에 대한 특성 및 탐지에 대한 특성 등 다섯 가지로 나누어지며, 각 저항 인자들은 또다시 〈표 1〉에 제시된 바와 같이 다양한 속성들로 나누어진다.

〈표 3〉에는 Extrinsic barrier

이러한 속성들은 〈그림 3〉과 같은 PR & PP 평가 방법론의 평가 단계를 통해 시스템 고유의 핵물질 흐름 경로에 따른 각 설계 요소들에 대해 평가를 통하여 궁극적으로 원자력 에너지 시스템의 전체에 대한 평가가 이루어진다.

향후 추진 계획

지난 2002년 12월부터 PR & PP 평가를 위한 방법론 개발 전문가 그룹의 활동을 시작으로 2003년 4월에 PR & PP 평가 요건 보고서 및 2004년 6월 PR & PP 평가 방법론 보고서가 개발되어 미국 에너지성 (Department of Energy)에 제출되었다.

현재 GIF에 참여하고 있는 각 국가별 검토자를 선정하여 평가 방법론 보고서를 검토중에 있으며, 국내에서도 검토 전문가를 추천하여 평가 방법론 보고서를 검토중에 있다.

2004년 11월 평가 방법론 보고서의 검토 내용을 반영하여 최종 보고서가 작성 완료될 예정이며, 2004년 11월에 Gen IV PR & PP 전체 그룹 회의가 미국 워싱턴에서 개최되어 확정할 예정이다.

이와 더불어 향후 2005년부터는 개발된 평가 방법론을 근간으로 가상 원자력 시스템의 대한 PR & PP 평가 연구가 진행될 예정이다.

2006년부터는 현재 작성된 방법론 보고서의 취약점과 보완 사항을 수정 개선하여 2006년부터는 현재 GIF에서 선정한 6개의 Gen IV 원자력 에너지 시스템에 대한 본격적인 PR & PP 평가가 이루어질 전망이다.

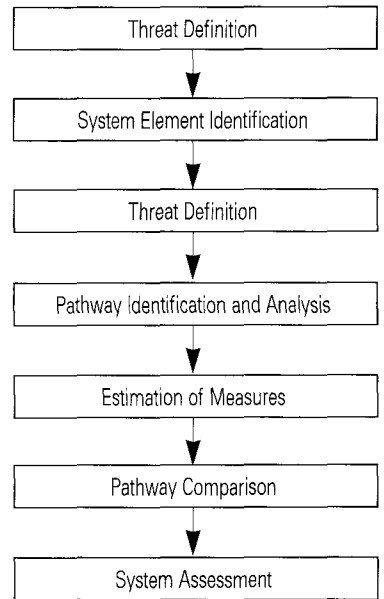
우리 나라는 2002년 11월 초창기부터 지금까지 PR & PP 평가 방

〈표 3〉 PR 저항 인자 및 특성 -Extrinsic Barriers

Barrier type	Barrier	Attributes
Extrinsic (Institutional) barriers	Safeguards	-Availability and access to information -Minimum detectability limits for material -Ability to detect illicit activities -Response time of detectors and monitors -Precision and frequency of monitoring -Degree of incorporation into process design and operation
	Access control and Security	-Administrative steps for access -Physical protection and security arrangements -Existence of effective back-up support -Effectiveness of access control and security
	Location	-Remoteness and/or co-location of facilities

법론 개발 전문가 회의에 꾸준히 참여해 왔으며, 이를 통해 우리나라가 고려하고 있는 Gen IV 관련 원자력 시스템에 대한 핵확산 저항성 및 물리적 방호를 평가할 뿐만 아니라, 평가 결과를 바탕으로 국내에서 고려되고 있는 원자력 시스템의 핵확산 저항성 및 물리적 방호를 최대한 보장하기 위한 설계 자료의 검토 및 설계 개선 사항을 도출하여 Gen IV 원자력 시스템의 기술적 목표인 에너지 공급의 지속성, 안전성, 신뢰성 및 경제성과 더불어 핵확산 저항성 및 물리적 방호가 충분히 고려된 미래의 원자력 시스템을 설계하게 될 것으로 보인다.

이와 더불어 Gen IV PR & PP 전문가 그룹 회의 및 활동에 적극 참여함으로써 나아가서는 우리나라의 핵비확산 정책에 대한 굳은 의지를 표명하게 될 수 있을 것으로 보인다. ☺



(그림 3) PR & PP 평가 흐름도

〈참고 문헌〉

[1] Guidelines for the Performance of Nonproliferation Assessments, Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-14294, May 200