



원자력시스템의 ‘핵확산 저항성’ 개념 분석

강정민

한국과학기술원 원자력및양자공학과 초빙교수



· 서울대 원자핵공학 학사, 석사
· 일본 도쿄대 시스템양자공학 박사

· 기초전력연구원 원자력정책센터 연구위원
· 미 프린스턴대, 스탠포드대, 존스 홉킨스대 객원연구원 역임
· KAIST 원자력및양자공학과 초빙 교수(2011~)

서론

미래 원자력시스템은 경제성, 안전성과 더불어 시스템 설계 초기 단계부터 핵비확산성을 만족시킬 것이 요구되고 있다. 국내 원자력계도에 발맞추어 차세대 원자력시스템에 대한 핵비확산성 평가의 중요성을 인식하여 핵비확산성 핵연료주기(이하 ‘핵주기’) 기술 개발을 원자력진흥종합계획의 정책 목표 중 하나로 채택하였고, 원자력 중장기과제에서도 핵비확산성 평가방법론 개발을 중요시하고 있으며, 국내 원자력시스템에 대한 핵비확산성 평가방법론 모델 개발을 위한 연구를 진행해오고 있다.

그런데 원자력시스템 별 다양한 특성으로 인해 핵비확산성을 정량적으로 비교 평가하기는 어려운 점이 있어서, 현재 다양한 방법론이 제안되고 있음에도 불구하고 아직 국제적인 기준이 없는 것이 현실이다.

세계적으로는 미국 중심의 제4세대원자력시스템국제포럼(GIF)과 국제원자력기구(IAEA) 중심의 혁신원자로및핵주기국제프로젝트(INPRO)에서 원자력시스템의 핵비확산성에 대해 정량적인 평가 방법론을 개발해오고 있다.

상기의 배경 아래 본 글은 원자력시스템의 핵비확산성 평가에 있어서 가장 기초가 되고 중요한 개념인 ‘핵확산 저항성’에 대해 분석하였다.



핵확산 저항성 개념

1. 배경

1950년대 원자력의 민간 이용이 시작될 때부터, 민간용일지라도 우라늄 농축 및 재처리 같은 민감 기술과 핵물질이 핵무기 획득으로 연결될 수 있으므로 민간용 원자력 기술의 핵확산 가능성에 대해서 널리 인지되어 있었다. 그럼에도 국제 사회는 IAEA의 안전조치가 핵확산 위험을 잘 관리할 수 있다고 적어도 1974년 이전까지는 믿었다. 그러나 1974년 인도가 민간용 원자력 시설을 이용하여 생산한 플루토늄으로 핵실험을 성공한 후, 미국의 핵비확산 정책은 일대 전환을 맞게 된다.

1977년 4월 지미 카터 미 대통령은 미국의 상용 재처리 및 플루토늄 재활용을 전면 금지하고, 핵주기에 대해 미국과 국제 사회가 심층적인 연구를 수행할 것을 제안하였다. 이를 계기로 1976년 말 미 에너지부(DOE)는 핵비확산 대안시스템 평가프로그램(Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program: NASAP)을, 1977년 10월 IAEA는 국제핵주기평가(International Nuclear Fuel Cycle Evaluation: INFCE)에 착수하였다.¹⁾

2. 핵확산 저항성 개념의 창안

상기의 배경 속에 1970년대 중반 미 프린스턴대학의 해럴드 페이버슨(Harold Feiveson) 박사와 프랭크 반히펠(Frank von Hippel) 교수는 방수(water-resistance) 개념에 착안하여 원자력시스템의 핵확산 저항성(proliferation-resistance) 개념을 창안하였다.²⁾ 그들은 핵확산 전용 방지에 완벽한 원자력시스템이란 없으므로 핵비확산성을 평가하기 위한 기준으로 핵확산 저항성을 강조한 것이다.

페이버슨 박사는 핵확산 저항성에 대해 다음과 같이 정의하고 있다.³⁾ “핵확산 저항성이란 국가 또는 비국가 그룹이 민간용 원자력 시설을 핵무기 생산용으로 전용하는 데 있어서 어렵고, 시간 걸리고, 발각되게끔 만들기 위해 원자로 및 핵주기에 적용된 개념이다”

페이버슨 박사는 핵확산 저항성을 내재적 방벽, 즉 원자력시스템의 기술적 특성과 외재적 방벽, 즉 제도적 조치, 예를 들어 IAEA 안전조치 또는 물리적 방호 등의 조합으로 보았으며, 핵확산 방지를 위해서는 내재적 방벽 또는 외재적 방벽 어느 한 가지만이 아니라 양쪽 모두가 필수적이라고 보았다.

또한 페이버슨 박사는 핵확산 저항성 대책으로 다음 세 가지 넓은 범위의 모든 위험에 대처해야 한다고 보았다. 첫째, 국가 또는 비국가 그룹에 의한 핵물질의 핵무기 전용으로의 위험.

1) Jungmin Kang, "Analysis of Nuclear Proliferation Resistance," Progress in Nuclear Energy, Vol. 47, Issue 1-4, pp. 672-684, 2005.

2) Private communication, Harold Feiveson and Frank von Hippel, November 2011.

3) Harold Feiveson, "The Search for Proliferation-Resistant Nuclear Power," F.A.S. Public Interest Report, Vol. 54, No. 5, September/October 2001.

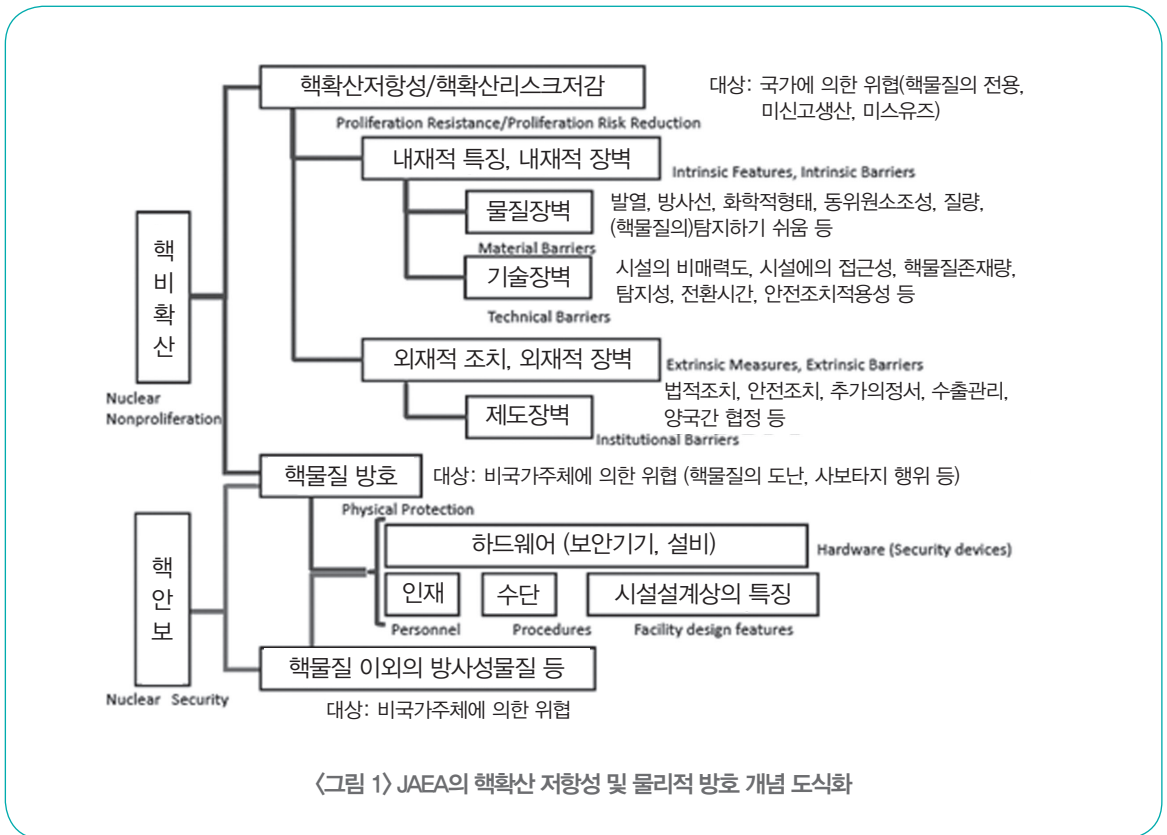
둘째, 상용로, 연구로, 재처리 시설, 우라늄 농축 시설 등 민간용 원자력 시설과 훈련된 일단의 핵 과학자, 공학자, 기술자들이 핵무기 획득의 열망으로 핵무기 프로그램에 이용되는 위험.

셋째, 테러 그룹이 핵시설에 또는 수송중인 방사성물질에 직접적인 공격을 가하여 인구 밀집 지역에 방사성물질을 살포하는 위험.

현재 대부분의 핵확산 저항성에 관한 연구는 주로 상기의 첫째 범위의 위험에 초점을 맞추고 있다.

3. 일본원자력기구(JAEA)의 핵확산 저항성 및 물리적 방호 개념 해석

핵확산 저항성 및 물리적 방호 개념 관련하여 일본의 JAEA는 <그림 1>과 같이 해석하였다. JAEA는 핵비확산성은 핵확산 저항성과 물리적 방호로 구성되어 되며, 국가에 의한 핵확산 위협에 대응하는 것이 핵확산 저항성 개념, 테러그룹 등 비국가 그룹에 의한 핵물질 탈취 등 위협에 대응하는 것이 물리적 방호 개념이라고 본다.





JAEA는 핵확산 저항성의 내재적 특성을 원자력시스템의 기술적 설계상의 특징으로, 외재적 조치에 대해서는 원자력시스템에 관한 국가적 조치, 예를 들어 안전조치, 양국 간 협정 등으로 해석하고, 원자력시스템의 핵확산 저항성의 정도는 이들의 조합으로 결정된다고 본다.⁴⁾

4. IAEA의 핵확산 저항성 및 물리적 방호 개념 정의

2002년 10월 IAEA가 개최한 회의에서 핵확산 저항성 개념은 다음과 같이 정의되어 문서화되었고, 이후 GIF와 INPRO에 받아들여져 공식적으로 사용되고 있다.⁵⁾ “핵확산 저항성이란 국가가 핵무기 또는 핵폭발장치를 획득할 목적으로 핵물질의 전용, 미신고 생산 또는 기술 오용을 방해하기 위한 원자력시스템의 특성이다.”⁶⁾

이 정의에 의해 호스트 국가에 의한 국가적 핵확산 위협이 비국가 그룹에 의한 잠재적 핵보안 위협과 구별되게 되었으며, 후자의 경우, 핵확산 저항성의 개념보다는 물리적 방호 개념에서 별도로 다루어지게 되었다.

IAEA는 물리적 방호를 다음과 같이 정의하고 있다. “물리적 방호는 비국가 그룹 또는 적대적인 비호스트 국가에 의한 핵폭발장치 또는 방사성물질 살포장치(RDD)에 적합한 물질의 탈취, 그리고 시설과 수송의 사보타주를 방해하기 위한 원자력시스템의 특성이다.”⁷⁾

핵확산 저항성 관련 기존 연구

1. 핵비확산 대안 시스템 평가 프로그램(Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program: NASAP)

평화적 목적으로 제공된 원자력 시설과 그로부터 생산한 플루토늄을 사용한 인도의 1974년 핵실험으로 인해 미국은 핵비확산 정책에 대해 전면적인 재검토를 하게 되었다. 그 결과 원자로 및 핵주기의 핵확산 저항성에 대한 분석이 주목적인 핵비확산 대안 시스템 평가 프로그램(Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program: NASAP)을 1976년 후반부터 미국 자체적으로 수행하였다.⁸⁾

4) Naoko Inoue, “Introduction,” JAEA-GIF PR&PP Workshop, 22 February 2011.

5) George Pomeroy et al., “Approaches to Evaluation of Proliferation Resistance of Nuclear Energy Systems,” Proceedings of INMM 49th Annual Meeting, Nashville, Tennessee, 13-17 July 2008.

6) “Proliferation resistance is that characteristic of a nuclear energy system that impedes the diversion or undeclared production of nuclear material or misuse of technology by States in order to acquire nuclear weapons or other nuclear explosive devices,” IAEA STR-332, Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems, December 2002.

7) “Physical protection (robustness) is that characteristic of an NES that impedes the theft of materials suitable for nuclear explosives or radiation dispersal devices (RDDs) and the sabotage of facilities and transportation by sub-national entities or other non-Host State adversaries,” IAEA STR-332, Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems, December 2002.

8) U.S.DOE, “Nuclear Proliferation and Civilian Nuclear Power Report of the Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program: Volume II: Proliferation Resistance,” DOE/NE-0001/2, 1980.

핵확산 저항성 평가는 NASAP의 중점 이슈였다. NASAP는 핵확산 저항성을 핵주기 시설 또는 핵물질을 민간용에서 군사용으로 전용하는 것을 방해 또는 방지하는 원자력 시스템의 자체 능력으로 보았다. 핵확산 저항성이란 핵확산을 시도하는 국가 또는 비국가 그룹에게 불리함을 주는 원자력 시스템의 기술적 및 제도적 특색의 조합에 의해 정해지는 것으로 보았다.

NASAP가 분석에 있어서 고려한 핵확산 위험성 평가 항목은 다음과 같다.⁹⁾

- 핵무기 개발 결정 시점부터 획득까지의 시간
- 핵물질 전용 시점부터 핵무기 획득까지의 시간
- 하부구조 및 기술적 기반 확충의 필요성
- 민감한 핵물질 및 시설의 안전조치 능력
- 핵무기 개발 활동의 탐지성 및 개입성
- 핵무기 개발에 필요한 자원
- 핵물질 전용에 방해되는 고유한 물질적 특성
- 핵물질의 재고
- 민감한 기술과 소재지에 대한 접근성
- 민간용 핵시설의 핵무기용으로의 전환

핵무기에 직접 사용될 수 있는 핵물질이 추출되지 않는다는 이유 때문에 비순환 핵주기가 가장 핵확산 저항성이 크다고 평가한 NASAP의 핵확산 저항성 관련 주요 결론은 다음과 같다.¹⁰⁾

- 모든 핵주기들은 핵확산 위험 가능성을 어느 정도 수반한다.
- 핵주기 간 차이에서 발생하는 핵확산 저항성의 차이는 핵무기 비보유국에 도입될 경우 더욱 크질 것이다.
- 기술적 그리고 제도적 방벽 개선은 핵확산 저항성을 향상시킨다.
- 비국가 그룹에 의한 핵확산 위협의 수준은 핵주기에 따라 다르다.

NASAP는 핵확산 저항성 개선을 위해 다음과 같이 정리하였다.¹¹⁾

- 핵확산 전용에 대해 저항성이 있는 물질과 기술의 사용
- 불필요한 민감 핵물질 및 시설의 기피
- 효과적인 수출 통제 시스템
- 민감 핵물질 및 시설의 공동 사용 또는 국제 통제
- 경고와 대처를 위한 전면 안전조치 및 적절한 국제 시스템

9) 이재설 외, “핵확산저항성 핵연료주기 기술동향: 경.중수로 연계 핵연료주기(DUPIC) 기술과 관련하여,” KAERI/AR-522/99, 한국원자력연구소, 1999, 2, 28.

10) I. Spiewak and J.N. Barkenbus, “Nuclear Proliferation and Nuclear Power: A Review of the NASAP and INFCE Studies,” Nuclear Safety 21, 691-702, 1980.

11) Ibid.



2. 국제 핵주기 평가(International Nuclear Fuel-Cycle Evaluation: INFCE)

지미 카터 미 대통령의 제의로 IAEA가 주축이 되어 66개국과 5개 국제기구의 참여 아래 핵확산 방지의 관점에서 핵주기를 국제적으로 평가한 국제 핵주기 평가(International Nuclear Fuel-Cycle Evaluation: INFCE) 프로그램을 1977년 10월부터 2년 여간 수행하였다. INFCE의 목적은 원자력의 혜택을 부정하지 않으면서 핵확산 저항성을 평가하는 것이었다. NASAP와 유사하게 자원, 시간, 탐지성을 핵확산 저항성의 주요 요소로 본 INFCE는 이에 더하여 안전조치성(safeguardability)을 강조하였다.¹²⁾

INFCE가 분석에 있어서 고려한 핵확산 위험성 평가 항목은 다음과 같다.¹³⁾

- 감시 대상 핵물질의 분포 수
- 플루토늄 수송의 필요성
- 플루토늄의 양
- 플루토늄의 화학적 형태 및 접근성
- 플루토늄의 질 (동위원소 조성비)
- 전용에 소요되는 자원
- 전용에 소요되는 시간
- 전용의 탐지성
- 제도적 조치의 실현성
- 플루토늄의 안전조치성

INFCE는 국가의 핵무장을 근본적으로 방지할 기술적 수단은 없으며, 어떤 경우에는 가능할 수도 있지만 핵무기 물질을 획득하기 위해 민간용 핵주기 시설을 전용하는 것은 쉽지도 효율적이지도 않다고 보았다.

그리고 민간용 우라늄 농축 기술은 잠재적으로 핵확산 위험이 따르며, 재처리, 플루토늄 저장, MOX 제조 등은 정치적 위험성이 따르므로 핵확산 위험의 방지를 위해 플루토늄의 국제 저장, 그리고 지역 핵주기센터를 권장하였다.

INFCE의 핵확산 저항성 평가 관련 주요 결론은 다음과 같다.¹⁴⁾

- 핵무기물질 생산을 위한 목적으로 민간용 원자력시설의 전용은 선호되지 않는 방법이다.
- 장기적으로는 비순환 핵주기와 재순환 핵주기 사이의 핵확산 저항성의 실질적인 차이는 없다.
- 국제 안전조치 협정은 핵확산을 상당히 감소시킬 수 있으며, 세계 원자력산업의 중요 부분이 되어야 한다.

INFCE는 핵확산 저항성을 개선시키는 방안으로 물리적 방호의 중요성을 강조하였으며 환경적, 방사선적, 경제적 손

¹²⁾ Ibid.

¹³⁾ 이재설 외, “핵확산저항성 핵연료주기 기술동향 : 경.중수로 연계 핵연료주기(DUPIC) 기술과 관련하여,” KAERI/AR-522/99, 한국원자력연구소, 1999, 2, 28.

¹⁴⁾ I. Spiewak and J.N. Barkenbus, “Nuclear Proliferation and Nuclear Power: A Review of the NASAP and INFCE Studies,” Nuclear Safety 21, 691-702, 1980.

실 등의 이유로 고방사선 방출 물질의 첨가에 의한 방사선 방벽 향상 방법으로 핵물질 획득을 어렵게 하는 방법 등에 대해서는 소극적이었다.

NASAP와는 대조적으로 INFCE는 특정의 핵주기(비순환 핵주기)가 타 대안들보다 내재적으로 핵확산 저항성이 있다는 주장을 지지하지 않았으며, 민간용 핵주기 시설이 핵확산 의도자에 의해 전용될 것인지 여부와 관련하여 기술적 요인보다는 제도적 요인이 더욱 결정적이라고 보았다.

3. 사용후핵연료 기준(Spent Fuel Standard: SFS)

1990년대 들어 미국과 러시아 간 전략핵무기감축조약(START) I&II의 실행에 따라 양국이 보유한 전략 핵무기를 대량으로 감축하게 되었다. 그 결과 발생하는 핵무기급 플루토늄의 처분 과정에서 발생할 수도 있을 핵확산 위험을 우려하여 미국 국립아카데미의 국제안보 및 군축통제위원회는 잉여 플루토늄의 처분에 따른 핵확산 위험을 줄이기 위하여 잉여 플루토늄의 처분 대안의 최종 결과물의 핵확산 저항성 정도를 판단하기 위한 기준으로 '사용후핵연료 기준(Spent Fuel Standard: SFS)' 개념을 1994년 보고서에서 처음 도입하였다.¹⁵⁾

SFS는 잉여 플루토늄 처분의 최종 결과물이 SFS에서 정하고 있는 내재적 방벽 기준을 만족하지 못할 경우는 아무리 공학적·제도적 조치로 보강한다 할지라도 그것은 SFS를 만족하지 못한다고 보았다.¹⁶⁾

SFS에서 고려하고 있는 내재적 방벽으로는 플루토늄을 포함하는 최종 결과물의 물리적 형태, 방출되는 방사선 세기, 플루토늄을 분리하기 위한 화학적 분리 요구 정도, 포함되어 있는 플루토늄의 동위원소 조성비 등이 있다.

SFS의 만족 여부는 이들 방벽 성질들의 적절한 조합에 근거하여 최종 결과물의 핵확산 저항성 정도가 기존의 경수로 사용후핵연료의 경우와 비슷하게끔 만드는 정도에 따른다.

예를 들어 핵무기의 핵심인 플루토늄 피트(Pit)를 다른 내재적 방벽 없이 도난의 여지가 없는 튼튼한 저장고에 저장하고 삼엄한 경비와 경보 장치를 설치한다 하더라도 이는 SFS를 만족하지 못한다는 것이다. SFS에서 고려하고 있는 내재적 방벽은 핵확산 위험의 주체에 따라 핵확산 저항성 정도가 달라진다.¹⁷⁾

4. 민간 원자력시스템의 핵확산 저항성을 증가시키기 위한 기술적 대안(Technical Opportunities for Increasing the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems: TOPS)

15) National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, "Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium," Washington, D.C., National Academy Press, 1994.

16) National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, "Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium: Reactor-Related Options," Washington, D.C., National Academy Press, 1995.

17) National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, "The Spent-Fuel Standard for Disposition of Excess Weapons Plutonium: Application to Current DOE Options," Washington, D.C., National Academy Press, 2000.



1999년 미 에너지부는 민간 원자력시스템의 핵확산 저항성을 증가시키기 위한 기술적 대안(Technical Opportunities for Increasing the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems: TOPS)을 찾기 위해 태스크포스 팀을 설립하였다.¹⁸⁾

TOPS의 핵확산 저항성 개념은 기본적으로 SFS의 내재적 방벽 개념에 근거하고 이를 확대 발전시킨 것으로, 핵확산 저항성에 있어서 중요 속성들을 물질적·기술적·제도적 세 가지 측면에서의 방벽 개념으로 분류하여 분석하였다.

물질적 방벽은 SFS와 같이 물리적 형태, 방출 방사선 세기, 화학적 분리 여부, 플루토늄 조성비 등의 속성으로 이루어진다. 기술적 방벽은 플루토늄의 전용을 위해 기존의 시설이나 공정을 변경 또는 개조하는 데 있어서의 어려운 정도를 나타내는 개념으로, 시설의 비매력도, 시설에의 접근, 핵물질 전용의 탐지, 전문적 기술 및 지식, 그리고 시간 등의 속성으로 이루어진다. 제도적 방벽은 물질적·기술적 방벽을 보완하기 위한 것으로 물리적 방호를 포함하여 안전조치, 수출 통제 등이 있다.

SFS와 마찬가지로 TOPS도 내재적 방벽이 핵확산 위협의 주체에 따라 핵확산 저항성 정도가 달라진다고 보고 있다. 핵확산 위협 주체에 따른 물질적·기술적 방벽의 핵확산 저항성 수준을 기술한 내용을 <표 1>에 나타내었다. <표 1>에서 알 수 있듯이 핵확산 저항성은 비국가 그룹에게는 효과가 있으나 전용의 의도를 가진 국가에게는 별 효과가 없음을 알 수 있다.

<표 1> 핵확산 위협 주체에 따른 물질적·기술적 방벽 수준¹⁹⁾

	Sophisticated State, Overt	Sophisticated State, Covert	Unsophisticated State, Covert	Subnational Group
Material Barriers				
Isotopic	Moderate	Low	Moderate to high	High
Chemical	Very low	Very low	Moderate to high	High
Radiological	Very low	Low	Moderate	High
Mass and Bulk	Very low	Low	Low	Moderate
Detectability	Not applicable	Moderate	Moderate	High
Technical Barriers				
Facility Unattractiveness	Moderate	Moderate	High	Very low
Facility Accessibility	Very low	Low	Low	Moderate
Available Mass	Moderate	Moderate	High	High

18) U.S.DOE, TOPS Task Force of the Nuclear Energy Research Advisory Committee, "Technical Opportunities for Increasing the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems (TOPS)," 2001.

19) Ibid.

	Sophisticated State, Overt	Sophisticated State, Covert	Unsophisticated State, Covert	Subnational Group
Diversion Detectability	Very low	Moderate	Moderate	Moderate
Skills, Expertise, and Knowledge	Low	Low	Moderate	Moderate
Time	Very low	Very low	Moderate	High

TOPS는 민간용 핵물질의 전용 가능성을 최소화하기 위해 핵확산 저항성 개선 방안으로 다음 사항들에 대해서 제안하였다.²⁰⁾

- 플루토늄 및 고농축 우라늄의 생산량과 이용도를 줄일 것
- 고연소도의 핵연료를 지향함으로써 단위 에너지 당 생산되는 플루토늄량을 줄이고 플루토늄-239 이외의 플루토늄 동위원소 비율을 높일 것
- 플루토늄을 재순환시킴으로써 플루토늄 생산의 총량을 줄이고 플루토늄-239 이외의 플루토늄 동위원소 비율을 높일 것
 - 분리된 플루토늄의 생산을 피할 것
 - 분리된 플루토늄의 생산을 방지하기 위해 플루토늄과 우라늄을 함께 처리할 것
 - 방사선 방벽을 제공하고 분리의 어려움을 증가시키기 위해 플루토늄을 핵분열 생성물과 완전히 분리시키지 말 것
 - 기존의 재처리 시설로는 플루토늄의 분리가 어렵고 심층 처분에 적합한 핵연료를 사용할 것
 - 우라늄의 경우 고농축 우라늄이 되지 않게 할 것
 - 기존의 분리된 플루토늄 또는 고농축우라늄의 재고를 줄일 것
 - 분리된 플루토늄 및 고농축 우라늄의 원자로 외부에서의 저장량 및 저장 기간을 최소화할 것
 - 분리된 플루토늄 및 고농축 우라늄의 취급 및 수송을 최소화할 것
 - 분리된 플루토늄 및 고농축 우라늄의 국제적 중앙집중식 저장 시설을 도입할 것
 - 분리된 플루토늄 및 고농축 우라늄을 세슘-137 등 강력한 방사성 물질을 첨가함으로써 방사선 방벽을 제공할 것
 - 분리된 플루토늄 및 고농축 우라늄을 화학적 분리가 필요하고 및 물리적으로 전용하기 어려운 형태로 만들 것
 - 분리된 플루토늄 및 고농축 우라늄에의 접근을 어렵게 만들고 계량 파악이 쉽게 할 것
 - 분리된 플루토늄은 MOX 핵연료로 빨리 전환시키고 MOX 핵연료는 빨리 연소시킬 것
 - 핵비확산 투명성을 높이기 위해 핵사찰과 계량이 쉬우며 측정 불가능한 공정을 최소화할 것
 - 핵비확산 투명성을 높이기 위해 시기적절한 핵사찰이 가능하게끔 핵주기에 있어서 여러 국가들이 관여할 것
 - 우라늄광, 저농축 우라늄, 사용후핵연료 등 전용 가능 소스 물질에 대한 접근을 통제하고 감시할 것
 - 사용후핵연료를 빨리 심층 처분할 것

20) Ibid.



- 전용된 핵물질은 추적 가능하게끔 하여 전용 재발의 가능성을 최소화할 것
- 우라늄 농축이나 재처리 등 민감 기술은 피할 것
- 우라늄 농축이나 재처리 등 민감 기술의 국지화를 최소화할 것
- 우라늄 농축이나 재처리 등 민감 기술을 통제하기 위해 기존의 국제적 시설을 충분히 이용할 것

TOPS는 미국 정부에게 타 국가와 연계하여 다음 세 가지 분야의 새로운 연구개발에 착수할 것을 권고하였다.

- 내재적 방벽과 제도적 방벽의 조화에 근거하여, 원자력시스템의 핵확산 저항성 평가를 위한 개선된 방법론 개발
- 안전조치와 핵물질 방호, 통제, 계량(MPC&A)을 강조하고 핵확산 방지를 위한 제도적 방벽의 적용을 강화하기 위한 기술의 개발과 적용
- 핵확산 방지를 위해 원자력시스템의 내재적 방벽을 개선하기 위한 신기술 개발을 추구하고 국제 핵비확산 체제를 업그레이드하여 제도적 방벽을 강화함

5. 제4세대 원자력시스템 국제포럼 (GIF)

GIF 회의는 2000년 1월 미 에너지부가 GEN-IV 원자력시스템 개발의 국제 협력을 논의하기 위해 9개국 정부 대표 그룹을 소집함으로써 시작되었다. 핵확산 저항성 개념은 GEN-IV가 추구하는 4가지 목표(Sustainability, Safety and Reliability, Economic, Proliferation resistance and physical protection) 중 하나이다.

GEN-IV 원자력 시스템의 선정 평가에 사용된 기준은 제안된 원자로 개념의 수명 주기 동안 고유 방벽 및 외부 방벽을 포함한 상대적인 핵확산 저항성을 다루고 있다. 핵확산에 대한 평가가 수송 과정도 포함하여 전반적인 시스템에 대하여 이루어졌으며 수명 주기 동안의 핵물질 통제·계량(MC&A), 물리적 방호 및 국제적 안전조치를 제공하기 위해 요구되는 재원을 측정하고 최소화함으로써 향상된 핵확산 저항성을 가질 수 있는 시스템을 추구하고 있다.²¹⁾

GIF 핵확산 저항성 평가 방법론에서는 다음과 같은 사안들을 호스트 국가에 의한 핵무기 획득의 위협으로 간주한다.²²⁾

- 신고된 핵물질 흐름과 재고로부터 핵물질의 비밀리 전용
- 신고된 핵물질 흐름과 재고로부터 핵물질의 공공연한 전용
- 신고된 시설에서의 핵물질의 비밀리 생산 또는 처리
- 신고된 시설에서의 핵물질의 공공연한 생산 또는 처리
- 비밀 시설에서 신고된 장비의 복제 장비에 의한 핵물질의 비밀리 생산 또는 처리

21) U.S.DOE, Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, "Generation IV Roadmap: Final System Screening Evaluation Methodology R&D Report," 2002.

22) The Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Expert Group Of the Generation IV International Forum, "Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems Revision 6," GIF/PRPPWG/2011/003, September 15, 2011.

GIF 핵확산 저항성 평가방법론은 원자력시스템의 핵확산 저항성에 관하여 위협, 시스템 응답, 결과 등을 고려하여, 다음과 같은 6가지 평가지표(Measure)로 표현하고 있다.

- Technical Difficulty (TD) : 핵확산에 요구되는 기술적 어려움
- Proliferation Cost (PC) : 핵확산에 소요되는 비용
- Proliferation Time (PT) : 핵확산에 소요되는 시간
- Fissile Material Type (MT) : 핵분열성 물질 종류
- Detection Probability (DP) : 탐지 확률
- Detection Resource Efficiency (DE) : 탐지 자원 효율성

6. 혁신 원자로 및 핵주기 국제프로젝트 (INPRO)

미국 주도하의 GIF와 별개로, 원자력과 지속적인 발전에 관한 IAEA의 과학포럼, 핵연료 및 원자력발전 연구개발자 문위원회의 권고에 따라 2000년 9월 IAEA 총회의 결의에 의거하여 IAEA 주도 아래 혁신 원자로 및 핵주기 국제프로젝트(INPRO)가 추진되고 있다.²³⁾

혁신 원자력시스템의 핵확산 저항성 향상을 위한 INPRO의 기본 원칙은 다음과 같다.²⁴⁾

- 원자력시스템의 내재적 특성과 외재적 조치는 핵무기용 핵물질 생산에 전용되기에는 매력적이지 않개끔 원자력 시스템의 전 수명주기에 걸쳐 수행되어야 한다.
- 혁신 원자력시스템의 내재적 특성과 외재적 조치는 모두 필수적이며 어느 한쪽만으로는 충분하지 못하다.

INPRO는 원자력시스템의 핵확산 저항성을 개선시키기 위해서 ① 기술적 특성으로 핵주기 기술이 고유의 핵비확산성을 가져야 하며, ② 원자력시스템이 제도적으로 정비된 체제하에서 개발·건설·운영되어야 하며, ③ 지방·국가·지역 및 국제기관에 의한 통제와 검증이 이루어져야 함을 제안하고 있다.

결론

관련 기존 연구들로부터 원자력시스템의 핵확산 저항성 개념에 대해 다음과 같은 시사점을 얻을 수 있다.

- 핵확산 위험에서 자유로운 원자력시스템은 없다.
- 원자력시스템의 핵확산 저항성의 정도는 그 시스템을 이루는 물질적 특성과 기술적 특성으로 구성되는 내재적 방벽과 그 시스템의 물리적 방호, IAEA 안전조치 및 수출 통제 등의 제도적 방벽의 조합에 의해 결정된다.

²³⁾ IAEA, "Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles Report of Phase 1A of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)," IAEA-TECDOC-1362, 2003.

²⁴⁾ IAEA, "Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, INPRO Manual — Proliferation Resistance," IAEA-TECDOC-1575 Rev.1, November 2008.



• 원자력시스템의 내재적 방벽의 강화는 물리적 방호의 강화와 더불어 비국가 그룹에 의한 핵물질 탈취 위협은 막을 수 있지만, 호스트 국가 차원에서의 핵확산은 막을 수 없다.

• 호스트 국가 차원의 핵확산 방지를 위해서는 내재적 방벽 강화로 유의미한 핵물질의 전용에 필요한 시간 및 비용의 증가와 더불어, IAEA 안전조치의 탐지성을 증가시키는 등 제도적 방벽 강화를 통해 호스트 국가의 핵확산 시도 가능성이 줄이는 것이 중요하다. 🌐

〈참고 문헌〉

George Pomeroy et al., "Approaches to Evaluation of Proliferation Resistance of Nuclear Energy Systems," Proceedings of INMM 49th Annual Meeting, Nashville, Tennessee, 13-17 July 2008.

Harold Feiveson, "The Search for Proliferation-Resistant Nuclear Power," F.A.S. Public Interest Report, Vol. 54, No. 5, September/October 2001.

IAEA, "Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles - Report of Phase 1A of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)," IAEA-TECDOC-1362, 2003.

IAEA, "Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, INPRO Manual - Proliferation Resistance," IAEA-TECDOC-1575 Rev.1, November 2008.

IAEA, "Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems," IAEA STR-332, December 2002.

I. Spiewak and J.N. Barkenbus, "Nuclear Proliferation and Nuclear Power: A Review of the NASAP and INFCE Studies," Nuclear Safety 21, 691-702, 1980.

Jungmin Kang, "Analysis of Nuclear Proliferation Resistance," Progress in Nuclear Energy, Vol. 47, Issue 1-4, pp. 672-684, 2005.

Naoko Inoue, "Introduction," JAEA-GIF PR&PP Workshop, 22 February 2011.

National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, "Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium," Washington, D.C., National Academy Press, 1994.

National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, "Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium: Reactor-Related Options," Washington, D.C., National Academy Press, 1995.

National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, "The Spent-Fuel Standard for Disposition of Excess Weapons Plutonium: Application to Current DOE Options," Washington, D.C., National Academy Press, 2000.

The Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Expert Group Of the Generation IV International Forum, "Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems Revision 6," GIF/PRPPWG/2011/003, September 15, 2011.

U.S.DOE, Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, "Generation IV Roadmap: Final System Screening Evaluation Methodology R&D Report," 2002.

U.S.DOE, "Nuclear Proliferation and Civilian Nuclear Power - Report of the Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program; Volume II: Proliferation Resistance," DOE/NE-0001/2, 1980.

U.S.DOE, TOPS Task Force of the Nuclear Energy Research Advisory Committee, "Technical Opportunities for Increasing the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems (TOPS)," 2001.

이재설 외, "핵확산저항성 핵연료주기 기술동향: 경.중수로 연계 핵연료주기(DUPIC) 기술과 관련하여," KAERI/AR-522/99, 한국원자력연구소, 1999. 2. 28.

〈사 사〉

본 연구는 원자력안전위원회와 한국방사선안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업("미래 원자력시설의 핵확산저항성 및 물리적방호 평가기법개발")의 연구 결과이다.