

차세대원자로 안전규제요건 개발

이재훈, 고창석, 김웅식, 설광원, 운영길, 윤문원, 윤원효, 이재성
한국원자력안전기술원

대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

본 연구는 차세대원자로 기술개발의 일환으로 수행되고 있는 차세대원자로 안전규제기술개발 사업의 추진현황을 요건체계 구축 및 주요 구성요소 관점에서 논의하였다. 설정된 차세대원자로 안전규제요건 체계중 안전목표/원칙, 일반안전요건 등의 요건항목들이 가지고 있는 안전성 증진과 관련된 특징적인 요소들을 분석하였다.

1. 서 론

미국의 TMI 및 소련의 체르노빌 원전사고로부터의 교훈을 토대로 세계 원자력산업을 주도하는 몇몇 선진국가들은 기존원전 보다 안전하고, 높은 신뢰도를 가지며, 경제적인 신형원자로를 개발하고 있다. 이러한 국제적 추세에 맞추어 우리 나라 정부 및 산업계도 한국형 차세대원자로의 기술 개발을 위한 국가연구개발사업을 1992년에 착수하였다. 한국형 차세대원자로는 일부 피동형 안전설비를 갖춘 개량형경수로로서 2007년에 상업운전을 개시할 예정이다. 한편, IAEA 및 선진외국의 규제기관은 향후 개발될 신형원자로의 효율적 규제를 위하여 규제요건을 개발하고 있으며, 한국원자력안전기술원에서도 차세대원자로의 규제 및 인허가를 위하여 안전규제요건을 개발하고 있다. 최근에는 안전규제요건의 체계 및 체계별 안전규제요건을 개발 중에 있는데, 개발내용들은 향후 국내 전문가들의 평가 및 검토를 통하여 최종 확정될 예정이다. 본 연구에서는 안전목표, 안전원칙, 일반안전요건, 상세안전요건 및 안전규제지침으로 구성되는 안전규제요건에 대한 전반적인 개발현황을 소개하며, 차세대원자로의 안전성 확보를 위하여 최근의 안전성 현안인 중대사고 대처방안, 계통의 신뢰성 확보방안 등에 대한 안전규제요건 체계 내의 반영 현황을 논의하고자 한다.

2. 차세대원자로 안전규제요건 개발

차세대원자로에 대한 안전규제요건 개발은 현재 개발중인 차세대원자로의 안전성을 향상시키고 일반대중에 대한 위협도를 최소화하며 차세대원전에 대한 대국민 신뢰를 증진시키기 위하여 기존 원자로에 적용되어온 규제요건에 추가하여 적용되어야 할 요건을 도출하고 반영시키는 작업이라고 할 수 있다. 그림 1 은 신형원자로의 안전규제요건 수립과정을 나타내고 있는데 고려되어야 할 중요 인자들이 제시되어 있다.

차세대원자로 기술개발의 일환으로서 한국원자력안전기술원은 차세대원자로에 적용할 안전규제요건을 1992년부터 개발해 오고 있는데, 국내 여건에 적합한 규제요건 체계를 개발하고, 각 체계별 요건 후보 요소들을 도출하기 위하여 1단계 사업기간중에 다음과 같은 현안들이 중점적으로 평가되었다[1].

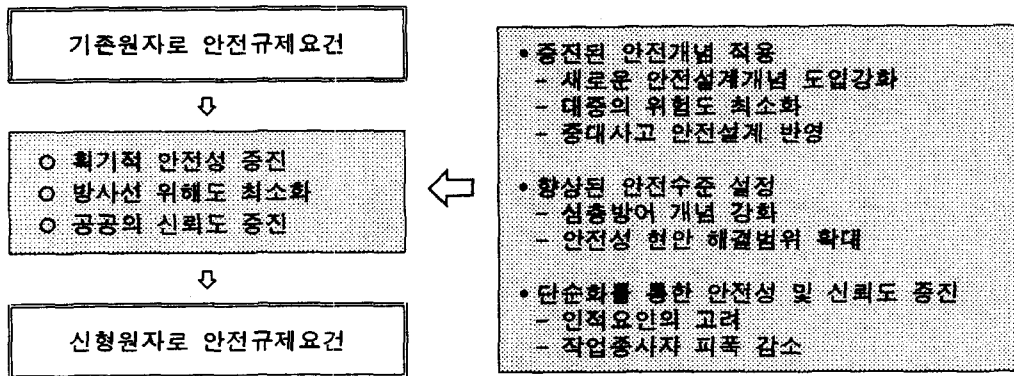


그림 1 기존원자로와 신형원자로의 안전규제요건의 연계성

- 기존원자로 및 향후원자로의 설계에 근거한 안전설계 요건 분석·평가
- IAEA 및 각국의 안전원칙, 안전목표 및 기타 현안 분석·평가
- 운전경험으로부터 제기된 안전성 현안 분석·평가
- 기존 규제요건 체계 평가를 통한 차세대원자로에 대한 최적의 규제요건체계 도출
- 기존 및 향후원자로에 대한 안전규제요건 현황 분석을 통한 개발방향 정립

원자력시설의 안전규제요건은 크게 절차/서류요건과 기술요건으로 분류할 수 있다. 안전규제 기술요건은 다시 필수적 요건인 기본기술요건 및 세부기술요건과 선택적 요건인 규제지침으로 구분할 수 있다. 요건개발의 핵심부분인 기술적 요건들은 6단계, 즉 안전목표, 안전원칙, 일반안전요건, 상세안전요건, 안전규제지침 및 안전심사지침 등의 체계로 구성되어 있다[2]. 그림 2 는 차세대원자로 안전규제요건 체계를 보여주고 있는데 그림에서 보는 바와 같이 연구사업의 최종단계에서 요건의 체계는 법제화 과정을 거쳐 각 요건 내용별로 해당 원자력법령 체계에 반영될 것이다.

2.1 안전목표 및 안전원칙

차세대원자로에 대한 안전목표는 일반안전목표, 방사선방호목표 및 기술안전목표로 구성되는데 그림 3 에서 보는 바와 같이 일반안전목표는 방사선 방호 및 기술적 관점을 다루는 두 가지 보조목표를 가지는 최상위 목표이다. 차세대원자로 안전목표는 IAEA의 Safety Fundamentals[3]와 INSAG-3[4]에서 제시하고 있는 사고의 예방 및 완화를 위한 기술안전목표를 반영하여 기존 우리나라의 원자력법 제 12조와 제 22조에서 건설·운영허가 기준으로 제시하고 있는 인체, 물체 및 공공의 재해방지와 국민의 건강 및 환경상의 위해방지 정신을 보완하는 형태를 가지고 있다. 차세대원자로 안전목표는 설계자가 지향하여야 하는 기본방향을 정성적으로만 제시하고 있다. 정량적 목표를 제시하지 않은 것은 정량적 안전목표를 규제요건으로 공포하였을 때 수치적 목표달성만을 내세워 정성적 안전목표가 내포하고 있는 각종의 안전성 증진 노력이 등한시 될 수 있는 가능성과 정량적 안전목표의 접근방법인 확률론적 평가방법이 가지고 있는 불확실성을 함께 고려하여야 하는 대한 설정방향연구를 수행중에 있기 때문이다. 그러나 기존의 원자력법 정신에 기술안전목표를 보완하였으므로 정성적 안전목표만으로도 중대사고 및 확률론적 안전성평가에 대한 규제요건의 설정근거를 충분히 마련하였다고 할 수 있다.

안전원칙은 상기의 안전목표를 성취하는데 필요한 안전규제요건의 기본 철학을 제공하도록 하였다. 차세대원자로 안전원칙중 부지선정에서 해체에 이르기까지 준수되어야 할 원칙들은 일반안전원칙으로, 부지선정, 설계, 운전의 각 분야에서 준수되어야 할 원칙들은 각각 부지, 설계, 운전

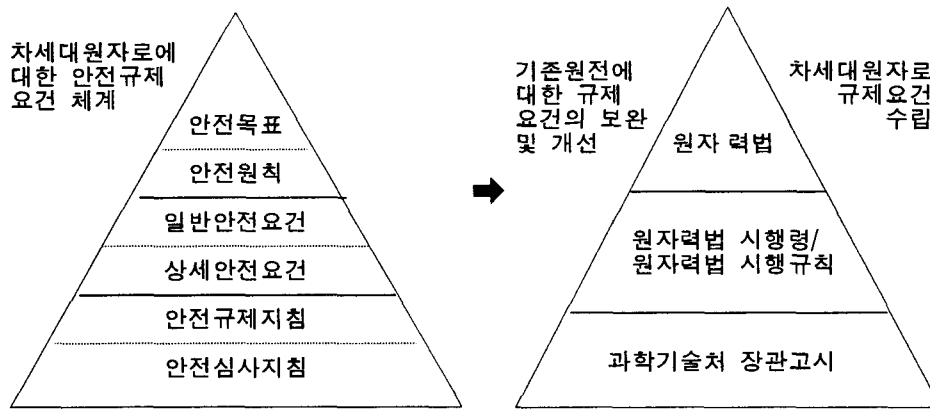


그림 2 차세대원자로 규제요건 개발결과의 원자력법령체계에서의 반영

일반안전목표	
방사선재해를 충분히 방어하여 개인, 사회 및 환경을 보호	
보조안전목표	
방사선보호목표	기술안전목표
<ul style="list-style-type: none"> • 작업종사자 및 일반대중의 피폭 ALARA • 선량한도 초과금지 • 사고의 방사선학적 영향 완화 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 신뢰도로 사고예방 • 설계기준사고 예방 및 완화 • 중대사고의 원인대처 및 영향 최소화

그림 3 차세대원자로 안전목표

안전원칙으로 설정하였으며 각각의 안전원칙 구성내용은 그림 4 에서 보는 바와 같다. IAEA의 차세대원자로 안전원칙[5], 원자력안전협약[6]의 기술안전원칙과 USNRC의 신형로 정책성명[7]에서 제시하는 입증기술의 사용 등 9개 원칙 및 유럽의 신형로 EPR을 위해 설정된 독,불합작의 GPR/RSK Proposal[8]에서의 강화된 심층방어 등을 분석, 검토하여 안전원칙을 설정하였다. 개발한 13개 안전원칙의 특징은 안전목표의 달성을 위해 필요한 안전 기본철학들을 체계적으로 재구성하였으며, 인적요인의 고려와 운전경험의 반영을 원칙수준으로 설정하여 인적오류에 의한 사고와 반복적 사고의 가능성을 감소시키므로써 차세대원자로의 안전성을 향상시키고자 하였다.

2.2 일반안전요건 및 상세안전요건

일반안전요건은 안전원칙을 일반적 관점에서 준수하기 위한 기본적 기술기준을 제공하는 것으로서 안전성을 확신하기 위한 일반적이고 포괄적인 개념의 필수기술요건이다. 국내법, 외국의 사례 및 현재까지 보편적으로 수행되어온 안전성평가 관행에 따라 그림 5 에서 보는 바와 같이 일반안전요건은 부지/환경, 설계, 운전, 해체 및 품질보증 등 5개 분야로 분류하여 구성하였으며, 설계분야 34개 항목을 설정하였고, 부지/환경 및 나머지 분야는 설정을 위하여 연구 중이다.

설계일반안전요건의 항목설정은 그동안 국내 기존 원전의 규제에 적용되어온 미국 10 CFR 50 Appendix A 일반설계기준(GDC)을 모델로 하였으나, 상세수준 및 내용의 평가를 토대로 일부 상세한 요건들은 일반안전요건에 반영하지 않고 일반안전요건의 하위요건인 상세안전요건에 반영하

일반안전원칙		
<ul style="list-style-type: none"> • 품질보증계획 수립 및 이행 • 인적요인의 고려 	<ul style="list-style-type: none"> • 안전성의 평가 • 비상대책 	<ul style="list-style-type: none"> • 방사선방호 • 운전경험의 반영
부지안전원칙	설계안전원칙	운전안전원칙
<ul style="list-style-type: none"> • 부지적합성의 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 심층방어의 강화 • 입증기술의 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 운전제한치의 설정 • 운전절차서의 수립 • 보수, 시험 및 검사 • 운영 및 기술지원조직

그림 4 차세대원자로 안전원칙

I. 부지/환경	II. 설계 (계속)	III. 설계 (계속)
<ol style="list-style-type: none"> 1. 외적요인의 평가 2. 부지관련 설계기준 설정 3. 방사선학적 영향의 평가 4. 비상계획의 실현성 5. 최종열침원 6. 다수기 건설 	<ol style="list-style-type: none"> 10. 신뢰도 11. 기동/정지/저출력운전 12. 시험, 감시, 검사 및 보수 13. 비상대응시설 및 설비 14. 원자력시설의 해체 15. ALARA 16. 원자로설계 17. 노심의 건전성 18. 원자로 고유보호 19. 원자로 출력진동 억제 20. 계속 및 제어 21. 반응도 제어계통 22. 보호계통 23. 원자로냉각재 압력경계 24. 원자로냉각재계통 설계 25. 격납용기 설계 26. 잔열제거 27. 비상열제거 28. 최종열침원으로 열수송 	<ol style="list-style-type: none"> 29. 전력공급 30. 제어실 31. 방사선방호 설비 32. 방사성물질 제어, 처리, 저장 33. 핵연료취급 및 저장 34. 선량한도
II. 설계		III. 운전
<ol style="list-style-type: none"> 1. 안전기능 2. 설계기준 3. 중대사고 4. 품질기준 5. 외적요인 설계기준 6. 화재방호 7. 환경적/동적 설계기준 8. 설비의 공유 9. 인간공학 		(추후설정)
		IV. 해체
		(추후설정)
		V. 품질보증
		(추후설정)

그림 5 일반안전요건의 구성

였다. 대표적인 예로서는 보호계통 및 반응도제어계통에 관한 요건과, 주요 계통(원자로냉각재 압력경계, 비상노심냉각계통, 격납용기 열제거계통 및 대기정화계통, 냉각수계통 등)에 대한 상세한 시험 및 검사 요건, 그리고 격납용기 격리 기능 관련 요건 등이 있다. 또한, 일부 중복되는 요건들은 통합하여 하나의 요건으로 설정하였는데, 그 예로서 각 계통 및 기기의 신뢰성 확보를 위한 신뢰도 요건과 구조적 건전성 및 기능수행능력의 보장을 위한 시험/감시/검사/보수 요건 등이 있다. 한편, 일반안전요건 수준의 상세도를 갖는 IAEA 요건[5,9] 및 다른 원전 선진국(독일 및 일본)의 요건[10,11]에 대한 평가를 통하여, 미국 일반설계기준(GDC)에는 명시되어 있지 않지만 차세대 원자로의 안전성 확보 및 향상을 위하여 요구되는 요건들을 도출하여 반영하였다. 그 예로서는 안전기능요건, 설계기준요건, 외적요인설계기준 중 발전소 출입통제 및 외부 인위사건 대비 설계요건, 중대사고요건, 인간공학요건, 신뢰도요건의 신뢰도목표 수립 및 시험·검사요건, 기동/정지/저출력운전 요건, 비상대응시설 및 설비 요건, 원자로해체, ALARA요건, 노심의 건전성요건, 선량한도

요건 등이 있다. 특히, 이들 요건중 중대사고요건, 인간공학요건, 기동/정지/저출력운전요건, 신뢰도요건, 선량한도요건은 차세대원자로의 향상된 안전성 수준의 설정을 위한 신규요건들이다.

일반안전요건은 차세대원자로 안전원칙을 충실히 반영하면서 상세안전요건의 설정 근거가 될 수 있도록 개발하여 기존의 규제요건 보다 포괄적이면서도 요건의 완비성을 갖출 수 있도록 하였다. 개발된 설계분야 일반안전요건의 주요 특성을 안전원칙과 연계하여 기술하여 보면 다음과 같다.

원자력시설내의 구조물, 계통 및 기기 등이 고장으로 이어질 수 있는 중요한 경로들을 체계적으로 검토하고 고장으로 인한 결말을 도출하여 적절한 안전성 수준이 유지될 수 있음을 보증하기 위하여 설정된 안전성평가원칙의 이행을 위해서 일반안전요건에서 설계기준 요건, 신뢰도 요건, 중대사고 요건, 화재방호 요건, 인간공학 요건, 기동/정지/저출력 요건 등을 개발하였다. 심층방어 원칙은 원자력발전소의 안전을 보장하기 위한 기본적인 개념으로서 기존 원전에서도 이미 적용되어 왔지만, 차세대원자로의 안전성 증진을 위해 노심의 용융 및 주변 환경으로의 방사성물질 대량 누출 등의 중대사고에 대비한 사고억제 및 사고결말의 완화 등과 관련된 요건이 추가적으로 고려됨으로써 보다 강화되었다. 인적요인의 고려원칙은 원자력설비가 인적오류를 초래하지 않는 범위 내에서 인간능력의 발휘를 요구해야 하며 인간능력의 한계를 초과하는 행위의 수행을 요구하지 않아야 한다는 원칙으로 일반안전요건의 인간공학 요건의 개발에 반영되어 인적오류에 의한 원자력시설의 안전에 대한 잠재적 위협을 방지하도록 하였다.

방사선방호원칙은 작업종사자 및 일반대중에 대한 방사선피폭을 합리적으로 달성가능한 한 낮게 유지하기 위한 원칙으로 일반안전요건의 원자력시설의 해체 요건, ALARA 요건, 방사선방호 설비 요건, 선량한도 요건 등에 반영되었다.

상세안전요건은 안전원칙 및 일반안전요건을 상세하게 충족시키기 위하여 제시되는 필수기술 요건으로서 차세대원자로 규제요건 체계에서 강제성을 갖는 최하위 요건체계이다. 이 상세안전요건은 안전규제지침 및 심사지침에 의해 보조를 받는데 그 구성은 그림 6 에 제시되어 있다. 현재 까지 5개 분야 23개 장의 539개 항목 중 20% 정도가 개발된 상태이다.

I. 부지/환경	II. 설계 (계속)	II. 설계 (계속)
제 1장 부지 제 2장 환경방사선	3.12 건물 및 격실배치 3.13 ALARA 3.14 방사선원항 3.15 화재방호	제16장 사고해석 제17장 중대사고 평가
II. 설계		III. 운전
제 3장 설계공통요건 3.1 등급분류 3.2 적용규격 및 기준 3.3 원전조건 분류 3.4 외부요인 3.5 기기검증 3.6 신뢰성 3.7 시험, 검사 및 보수 3.8 재료 3.9 계통간 냉각재상실사고 3.10 완전 전원상실사고 3.11 저출력 및 정지운전	제 4장 구조설계 제 5장 원자로심 제 6장 원자로냉각재계통 제 7장 공학적안전계통 제 8장 격납계통 제 9장 계속제어계통 제10장 전력계통 제11장 보조계통 제12장 동력변환계통 제13장 방사성폐기물계통 제14장 방사선방호 제15장 인간공학	제18장 운전 제19장 초기시험 제20장 기술지침서 제21장 비상대책 IV. 해체 제22장 해체 V. 품질보증 제23장 품질보증

그림 6 상세안전요건의 구성

2.3 안전규제지침 및 심사지침

안전규제지침은 규제요건을 충족하는데 있어서 선택적인 방법론 및 사양을 제시하는데 법적 요건으로 설정하기 어려운 항목들에 대한 지침을 제공하게 된다. 안전심사지침은 심사범위 및 방법 등에 대한 한국원자력안전기술원의 내부 지침을 제시하는 것으로서 추가적인 규제요건은 기술하지 않는 내부 업무지침 형태가 될 것이다.

3. 결 론

차세대원자로 안전규제기술개발 연구의 중간결과에 근거하여 안전규제요건 개발 현황을 소개하였다. 증진된 안전성 개념에 기초한 규제요건 개발개념과 규제요건 체계별로 중요 안전성 증진 관점을 제시하였고 기본기술요건인 설계일반안전요건의 특성을 논의하였다. 차세대원자로 안전규제 기술개발 연구사업을 통해 개발되어질 규제요건은 국외 선진외국에서 개발되고 있는 신형원자로 규제요건과 동등이상의 수준을 갖게 될 것이며 국제원자력기구가 제시하는 신형원자로 관련 표준을 충족하게 될 것이다. 따라서, 향후 완성될 안전규제요건은 우리 나라 차세대원자로의 안전성증진을 촉진하게 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] "Approach to the Development of Regulatory Technical Requirements for Next Generation Reactor", KINS/GR-090, KINS, 1994
- [2] "Development of Safety and Regulatory Requirements for Korean Next Generation Reactor", KINS/GR-112, KINS, July, 1996
- [3] "Safety Fundamentals : The Safety of Nuclear Installations", Safety Series No. 110 , IAEA, May, 1988
- [4] "Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants", Safety Series No. 75-INSAG-3, IAEA, 1988
- [5] "Development of Safety Principles for the Design of Future Nuclear Power Plants", TECDOC-801, IAEA, 1995
- [6] "Convention on Nuclear Safety", IAEA, 1994
- [7] "Regulation of Advanced NPPs : Statement of Policy : Final Policy Statement", 51 FR 24643, USNRC, July, 1986
- [8] "GPR/RSK Proposal for a Common Safety Approach for Future PWRs" May, 1993
- [9] "Code on The Safety of Nuclear Power Plants: Design", Safety Series No.50-C-D (Rev.1), IAEA, 1988.
- [10] "Nuclear Power Plant Safety Criteria", Safety Codes and Guides Edition 13/78, BMI, Germany, October, 1977.
- [11] "개정6판 원자력안전위원회 안전심사 지침집", 일본 대성출판사, 1991.1.10.