

일체형연구로 안전현안 도출 및 해결 기술개발 Identification and Resolution of Safety Issues for Integral Type Research Reactor

김웅식, 조종철, 윤영길, 김효정

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

본 논문은 일체형연구로의 인허가를 위한 안전현안의 도출 및 해결 기술개발 연구의 중간결과를 제시한다. 안전현안은 (1) 인허가절차 또는 제도 관점에서 의사결정이 필요한 정책현안, (2) 신규요건의 개발 또는 기존요건의 수정/보완이 필요한 기술현안, 그리고 (3) 안전성 확인이 필요한 기타 기술현안 등을 포함한다. 본 연구는 일체형원자로에 대한 사전연구 결과로부터 도출된 현안의 적용성 평가, 국외 신형원자로 설계 및 인허가 경험의 분석을 통한 안전현안 도출과 일체형연구로 설계 검토, 그리고 안전현안의 해결방안 개발과 일체형연구로 규제기술요건 개정 및 인허가 심사에의 적용방안 개발 등으로 구성된다. 연구결과로서 일체형원자로 사전연구로부터 14개 현안, 국외 사례 및 경험 분석으로부터 4개 현안, 일체형연구로 설계검토로부터 10개 현안 등 총 28개 현안이 도출되었다. 이중 10개 현안의 해결방안이 마련되었으며, 나머지 현안에 대한 해결방안 개발 연구가 수행중이다.

Abstract

This paper presents the interim results of a study on the identification and resolution of safety issues for licensing of an integral type research reactor. The safety issues discussed in this paper include (1) policy issues for which decision-makings are needed for the procedural requirements of licensing system in the regulatory policy point of view, (2) technical issues for which either development of new requirements or amendment of some existing requirements is needed, or (3) other technical issues for which safety verifications are required. The study covers (a) the assessment of applicability of the issues identified from the previous studies to the case of the integral reactor, (b) identification of safety issues through analysis of the international experiences in the design and licensing of advanced reactors, and technical review of the integral type research reactor design, and (c) development of the resolutions of safety issues, and application of the resolutions to the amendment of regulatory requirements and the licensing review of the integral type research reactor. As the results of this study, a total of twenty eight safety issues was identified: fourteen issues from the previous studies; four issues from the foreign practices and experiences; and ten issues by the integral type research reactor design review. Ten issues of them have been already resolved and the succeeding study is under way to resolve the remaining ones.

1.

우리나라에서는 중소형 규모의 다목적 일체형원자로를 개발하고 있으며, 이 원자로의 안전성 및 성능입증을 위하여 1/5 규모의 일체형연구로를 개발하고 있다. 일체형연구로는 일체형 및 모듈화 설계개념, 고유 안전설비, 피동안전설비 등 기존 발전용 원자로와 다른 새로운 설계개념을 채택함에 따라, 기존의 가압경수형원자로와 다른 안전현안이 잠재할 수 있다. 향후 일체형연구로 인허가에 대비하여 원자로 설계의 안전성이 사전에 확보될 수 있도록 설계개발단계에서 잠재적 안전현안을 도출하고, 그 기술적 해결방안을 강구하여야 한다. 안전현안의 조기 확인 및 해결방안의 개발은, 설계 수정·보완 등 설계자에게는 사전대처 기회를 제공하는 한편, 규제자에게는 기술기준의 보완 또는 신설에 필요한 기술적 근거 및 요건을 확보할 수 있게 하며, 인허가심사의 효율적 추진을 위한 관련 규제기술기반을 구축할 수 있게 한다. 본 논문에서 토의되는 안전현안은 (1) 인허가절차 또는 제도 관점에서 의사결정이 필요한 정책현안, (2) 신규요건의 개발 또는 기존요건의 수정/보완이 필요한 기술현안, 그리고 (3) 안전성 확인이 필요한 기타 기술현안 등을 포함한다. 본 연구는 일체형원자로에 대한 사전연구 결과로부터 도출된 현안의 적용성 평가, 국외 신형원자로 설계 및 인허가 경험의 분석을 통한 안전현안 도출과 일체형연구로 설계 검토, 그리고 안전현안의 해결방안 개발과 일체형연구로 규제기술요건 개정 및 인허가심사에의 적용방안 개발 등으로 구성된다. 본 논문에서는 일체형연구로의 안전현안 도출 및 해결방안 기술개발의 중간결과로서 안전현안의 도출과정과 도출된 현안중 해결방안이 마련된 10개 현안에 대한 개략적인 해결방향을 소개하였다.

2.

2.1 안전현안의 정의 및 분류

일체형연구로 안전현안이란 동 원자로의 안전성 확보를 위하여 정책적 의사결정이 필요하거나, 현행의 규제심사체계로는 그 안전성의 보장성에 대한 확인이 어려워져 추가로 안전성의 확인평가 및 보장대비가 요구되는 사항으로 정의되며, 다음의 사항들이 안전현안에 포함된다.

- 원자로 인허가 절차 또는 제도 관점에서 정책적 의사결정이 필요한 사항
- 현행 규제기술요건을 충족하지 못하는 사항
- 규제기술요건의 신설 또는 보완이 필요한 사항
- 기타 규제기술요건으로 다루어지지 않으나, 안전성 확인이 필요한 기술적 사항

일체형연구로에 적용될 수 있는 안전현안의 도출, 관리 및 해결방안 개발의 효율성을 제고하기 위하여 현안을 배경 및 특성에 따라 분류하여 관리할 필요가 있다. 표 1은 본 연구를 수행하는 데 있어서 사용한 안전현안의 분류방법을 나타낸다. 안전현안 도출

및 해결연구는 그림 1에서 보는 바와 같이 현안의 도출, 분류와 해결방안 개발 등 3단계로 구성된다.

표 1 안전현안의 분류 방법

	PM	
	RD	
	RM	
	SE	

주) PM : Policy Making, RD : Requirement Deviation, RM : Rule Making, SE : Safety Evaluation

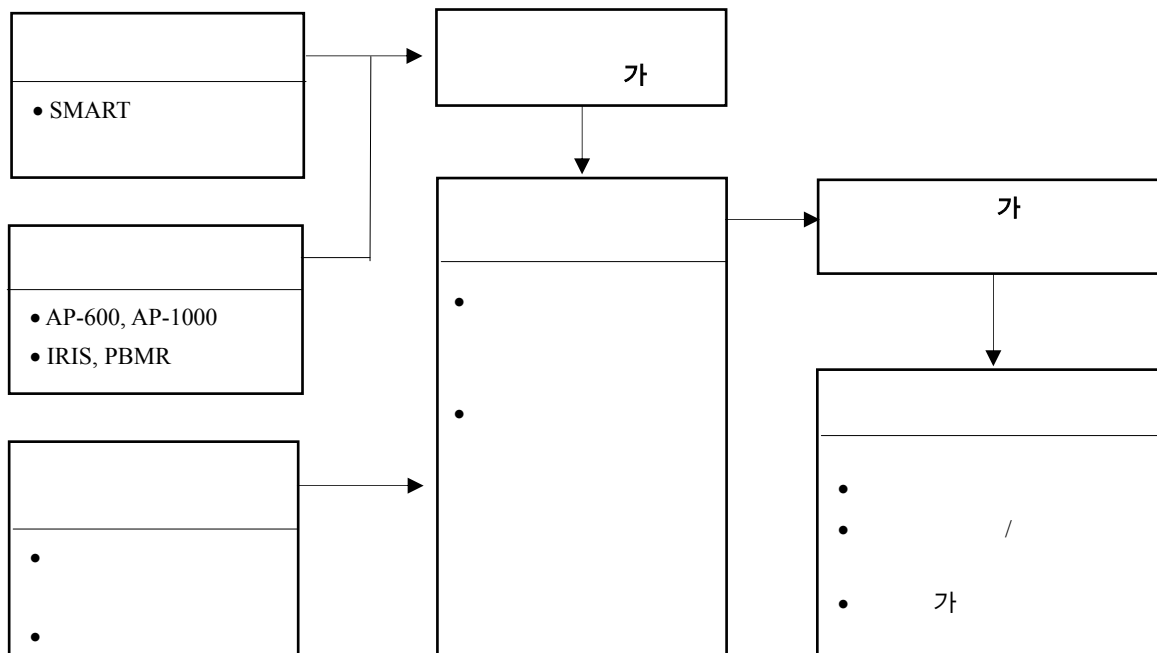


그림 1 일체형연구로 안전현안 도출 및 해결방안 개발체계

2.2 안전현안의 도출

중소형 일체형원자로의 안전성을 입증할 목적으로 일체형연구로의 설계를 추진하고 있으며, 일체형원자로에 대해서는 이미 안전특성 평가 및 안전현안의 해결과 관련한 선행연구가 이루어졌다. 따라서, 일체형원자로에 대해 기-도출된 안전현안중 일체형연구로에 적용할 필요가 있는 현안을 선별하는 것이 현안 도출의 효율성 관점에서 매우 중요하다. 선행연구 [1-3] 를 통해 총 21개의 일체형원자로 안전현안이 기 도출되어 있으며, 이 중 일체형원자로와 일체형연구로와의 설계차이로 인한 항목과 타 현안에의 통합 항목 등을 고려하면 다음 표2 와 같이 총 14개 현안들이 일체형연구로에 적용 가능한 것으로 나타났다.

표 2 일체형원자로 안전현안중 일체형연구로에 적용가능한 안전현안

▪ 설계안전목표 설정	▪ 설계기준초과사고 대처	▪ 디지털기반 I&C 현안
▪ 입증기술의 사용	▪ 연계설비의 안전성	▪ 제어실인간공학설계현안
▪ 심층방어 전략의 강화	▪ 피동계통의 신뢰성	▪ 소외비상계획의 적절성
▪ 설계기준사건분류	▪ 사고선원항의 계산	▪ 신형 I&C 환경검증
▪ 과도/사고해석 허용기준	▪ 비안전계통의 규제	

국외 관련 인허가 및 설계 경험을 반영하기 위하여 국외에서 설계가 진행중이거나, 인허가과정에 있는 일체형/피동형 원자로에 대한 안전현안을 분석하여 일체형연구로에의 적용성을 검토하였다. 분석 및 검토대상에는 AP-600 및 AP-1000을 포함하는 피동형원자로 안전계통의 안전성 검증을 위한 시험 및 해석코드의 적용 [4], 국내에서 개발중인 일체형원자로와 유사한 설계개념을 채택하고 있는 IRIS 원자로에 대한 위험도정보 인허가 절차와 장주기 (48개월) 정비계획 채택에 따른 기존 규제요건 부합성 [5], 그리고 PBMR 원자로의 기기 안전등급 분류와 설계기준 사고의 도출 [6] 등이 포함되었다. 이상의 국외 신형원자로 설계 및 인허가 경험을 검토하여 일체형연구로에 적용할 필요가 있는 4개의 현안을 도출하였다.

표 3 국외 일체형/피동형원자로 안전현안의 일체형연구로 적용성 평가

번호	현안	적용성	평가	영향
1.	가	○	- PSA가 , 가 PSA	PM
2.		○	- 가 LWR	SE
3.	/	○	- 36 / / 가	RD
4.		○	- /	SE

주) PM : Policy Making, RD : Requirement Deviation, RM : Rule Making, SE : Safety Evaluation

일체형연구로가 기존 가압경수형 원자로와 다른 새로운 설계 개념을 채택하고 있음은 주지의 사실이다. 기존 설계와 비교적 크게 차이가 나는 부분은 일체형 개념의 채용과 피동안전계통의 사용이다. 설계를 추진하는 과정에서 설계자에 의해 몇 가지 안전현안이 도출되었다. 표 4에는 설계검토를 통해 도출된 현안과 설계자 제안현안의 적용 근거 또는 사유가 제시되어 있다.

표 4 설계검토를 통해 도출된 일체형연구로 고유 안전현안

1.	2	-			RD	
2.	가	-	가	가	RD	
3. ECCS		-	ECCS	가	RM	
4.		-			RD	
5.		-			SE	
6.		-	가		RD	
7. RPV 가	P-T	-	P-T		RD	
8.		-			RM	
9.	(PT-7M)	-	PT-7M		SE	
10.	가	-	1	가, 2	가	SE

) PM : Policy Making, RD : Requirement Deviation, RM : Rule Making, SE : Safety Evaluation

3. 도출된 안전현안의 해결방안 개발

일체형원자로 안전현안의 일체형연구로 적용성 평가와 일체형연구로 자체의 고유 안전현안의 도출 결과를 종합하면 표 5에서 보는 바와 같이 총 28개의 안전현안으로서 정리된다. 안전현안 평가 결과, 일부 현안은 관련 기술요건을 새로이 개발해야 하는 것으로 나타났으며, 기존 규제요건에 부합하지 못하여 추가의 상세한 평가가 필요한 경우도 나타났다. 따라서, 현안 해결방안에는 설계변경 제안, 신규요건 개발 및 기존요건의 수정/보완 등이 포함된다. 28개 현안중 해결방안이 수립된 항목은 총 10개이며, 18개 현안이 미해결 상태로 남아 있어서 향후 해결방안을 개발해 나가야 한다. 해결방안이 수립된 10개 현안에 대한 배경, 내용 및 해결방향은 다음과 같다 [7].

일체형연구로 안전목표

안전목표 설정에 대한 규제요건이 수립되어 있지는 않지만 원자력안전위원회에서 의결된 중대사고정책 [8]은 우리나라의 모든 발전용 원자로에 대하여 안전목표를 설정하도록 권고하고 있다. 일체형연구로가 우리나라에서 개발하고 있는 일체형원자로의 안전성과

성능을 입증하기 위한 연구개발용 원자로임을 감안할 때 일체형연구로에 대하여 별도의 안전목표를 설정하는 것은 필요하지 않을 것으로 평가하였다. 이 현안은 추가의 조치 없이 해결되었다.

표 6 일체형연구로 안전현안 도출 종합 및 검토 (2004. 3. 31일 현재)

				()
	PM-01 PM-02 PM-03	가		3
	RD-01 RD-02 RD-03 RD-04 RD-05 RD-06	가 / / RPV 가 P-T		6
	RM-01 RM-02 RM-03 RM-04 RM-05	ECCS		5
	SE-01 SE-02 SE-03 SE-04 SE-05 SE-06 SE-07 SE-08 SE-09 SE-10 SE-11 SE-12 SE-13 SE-14	I&C I&C (PT-7M) 가		14
				28

주) PM : Policy Making, RD : Requirement Deviation, RM : Rule Making, SE : Safety Evaluation

소외 비상계획

기존 규정에 따르면 연구용 원자로에 대해서는 비상계획의 수립을 요구하지 않는다. 그러나, 일체형연구로의 예비평가 결과, 일반대중에 미치는 방사선학적 영향은 발전용 원자로 보다는 훨씬 낮지만 기존의 타 연구용 원자로에 비해 높은 것으로 나타났다. 그러므로, 일체형연구로 인허가단계에서 비상계획의 제출이 요구된다. 운영허가 신청자가 비상계획을 제출하도록 서류제출요건을 개정하여야 할 것이다. 이 현안은 운영허가 신청과 관련된 현행 규제요건을 개정하는 것으로 하여 해결방안이 수립된 것으로 본다.

위험도정보 인허가

위험도정보 인허가는 PBMR, GT-MHR 및 IRIS 등 미국의 신형원자로 사업자들이 제안한 것으로서, 개념은 설계기준사고 및 허용기준 선정, 그리고 설계기준이 수립되어야 하는 설비의 결정 등에 있어서 위험도정보를 활용하는 것이다. 일체형연구로에 대하여 설계자에 의하여 PSA가 수행되고 있지만, 원자력시설 규제에 위험도정보를 사용하는 것이 국가정책으로서 아직 공식적으로 받아들여져 있지 않으므로 이를 이용한 새로운 인허가 방안을 일체형연구로에 적용하는 것은 곤란하다. 이 현안은 추가의 조치 없이 해결되었다.

입증기술의 사용

입증되지 않은 기술을 원자로 설계에 사용하는 경우 우선 적절한 연구 프로그램, 또는 타 분야 적용사례에 근거한 경험을 통해 설계의 적합성이 입증되어야 한다. 일체형연구로는 기존 원자로와는 다른 여러 가지 설계설비를 채용하고 있다. 이러한 관점에서 입증기술의 사용에 관한 규제요건이 개발되어야 한다. 이 현안은 입증기술의 사용과 관련한 신규요건 개발하는 것으로 하여 해결되었다.

해수담수화 설비 등 연계설비의 안전성

다목적 원자로로는 전기생산시설 뿐만 아니라 해수담수화 장치 등의 설비와 연결하여 운영된다. 일체형연구로를 건설하는 목적 중의 하나는 담수를 생산하는 능력을 입증하는 것이다. 해수 담수화를 위해 사용되는 원자로로는 모든 운전조건에서 원자로시설로부터 담수화 장치로 방사성물질이 이송되지 않도록 설계되어야 한다. 따라서, 연결되는 설비들 간의 연계시스템의 규제를 위한 신규 요건의 개발이 필요하다. 이 현안은 연계시스템 안전성과 관련한 신규요건을 개발하는 것으로 하여 해결되었다.

심층방어 전략의 강화

미래의 신형원자로에 있어서 보다 높은 신뢰성을 가지고 발전소 종사자와 일반대중을 잠재적인 방사선 재해로부터 적절히 보호하기 위해서는 심층방어 철학은 더욱 중요해진다. 일체형연구로는 대형 파단 냉각재상실사고 가능성을 제외시키기 위하여 일체형 설계와 같은 새로운 안전개념을 채택하고 있고 가상의 사고조건에서 원자노심으로부터의 잔열을 제거하기 위하여 피동 잔열제거시스템을 사용한다. 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 (이하 기술기준규칙) [9]은 심층방어의 강화에 필요한 규정들을 포함하고 있으므로, 이를 준수하는 것으로 보고, 추가의 조치 없이 이 현안은 해결되었다.

피동안전시스템의 신뢰성

피동시스템은 그 단순성과 운전편의성에도 불구하고 시스템 신뢰도를 보장하기가 용이하지 않다. 기술기준규칙 [9]의 일반요건은 발전소 수명기간중 성능의 유지가 필요한 부품은 적절한 방법으로 검증을 거친 후 설치해야 한다고 규정하고 있다. 일체형연구로 피동안전시스템에 대하여 수명기간동안의 시스템 신뢰성을 입증하기 위한 상세 입증시험이 수행되

어야 한다. 이 현안은 입증기술의 사용관련 현안과 같은 방식인 신규요건을 설정하는 것으로 하여 해결되었다.

디지털기반 I&C 현안

발전소 보호 및 제어계통에 디지털 I&C 기술이 사용되는 경우 설계 및 프로그램 과정에서 오류로 인한 공통모드 고장을 고려하여야 한다. 공통모드 고장을 피하도록 하기 위하여, 기술기준규칙 [9] 은 소프트웨어를 사용하는 디지털 I&C 계통에 대하여 공통모드 고장이 발생하더라도 계통의 안전기능이 발휘될 수 있도록 심층방어 및 다중 설계개념을 적용할 것을 요구하고 있다. 따라서, 기존의 규정이 디지털 I&C 계통의 공통모드 고장에 대비하여 적절한 방어체계를 제공한다는 결론 하에 이 현안은 추가의 조치 없이 해결되었다.

제어실 인간공학 설계 적합성

발전소 설계 초기단계부터 인간-기계 연계에 대하여 체계적으로 접근함으로써 인적오류로 인한 사고 발생 가능성을 최소화할 수 있다. 기술기준규칙 [9] 은 제어실의 인간-기계 연계 설계를 다루는 규정을 두고 있어서, 이 규정에 따라 일체형연구로 설계에 인적요인이 적절히 고려되어야 한다. 따라서, 기존의 규정이 제어실 내부 인간-기계 연계 적합성을 보증하기 위한 적절한 체계를 제공한다는 결론 하에 이 현안은 추가의 조치 없이 해결되었다.

신형 I&C 환경검증

디지털 I&C 또는 신형 아날로그 계통은 기존의 아날로그 계통 보다 온도, 습도, 전자기 간섭 및 방사선과 관련된 환경조건에 상대적으로 더 민감할 수 있다. 따라서, 제한된 환경조건에서 계통의 운전가능성을 입증하기 위하여 환경검증이 필요하다. 일체형연구로는 설계 초기단계에 제어봉 구동장치와 타 제어요소 사이에 전자기 간섭현상의 발생이 예상된 바 있다. 이에 대해 전자기 간섭이 발생하지 않도록 제어봉 구동장치의 설치위치를 변경하여 간섭문제를 해결하였다. 이 현안은 설계자에 의한 설계변경으로 해결되었으며, 추가의 규제조치는 필요하지 않다.

4. 결 론

일체형연구로의 인허가심사를 위한 규제체계 구축의 일환으로서 안전현안 도출 및 해결기술 개발 프로그램이 추진되고 있다. 사전연구를 통해 도출된 현안의 조사, 신형원자로 인허가 및 설계에 대한 국외 경험의 조사, 그리고 일체형연구로 설계 검토 등을 통해 총 28개의 안전현안이 도출되었다. 이 중에서 해결방안이 마련된 10개 현안에 대한 배경, 현안의 내용과 해결방향이 본 논문을 통해 제시되었다. 해결방안에는 설계변경 제안, 신규요건의 개발과 기존 요건/지침의 수정/보완이 포함된다. 일체형연구로의 조기 안전성 확보 및 인허가성 향상을 위하여 향후 추가로 도출되는 현안과 미해결 현안의 해결방안

기술개발이 지속적으로 추진될 예정이다. 본 연구에서 개발되는 안전현안 해결방안 기술은 일체형연구로의 인허가 및 안전심사 시에 직접적으로 활용될 것이며, 향후 상용화 될 일체형원자로의 인허가 심사시에도 직접 적용 또는 참조 활용이 가능할 것으로 기대 된다.

용어설명

ECCS : Emergency Core Cooling System

GT-MHR : Gas Turbine Modular Helium Reactor

I&C : Instrumentation and Control

IRIS : International Reactor Innovative and Secure

PBMR : Pebble Bed Modular Reactor

PSA : Probabilistic Safety Assessment

참고문헌

- [1] “중소형 일체형 원자로의 안전특성 평가”, 김효정 외, 한국원자력안전기술원, KINS/GR -129, 1997. 7.
- [2] “일체형원자로 안전현안 평가 (연차보고서)”, 설광원 외, 한국원자력안전기술원, KINS/ GR-201, 2000. 3. 31.
- [3] “일체형원자로 안전현안 평가 (최종보고서)”, 김웅식 외, 한국원자력안전기술원, KINS/ RR -116, 2002. 3.
- [4] Presentation Material for USNRC, Code Review for AP1000, Jan. 23, 2002, Westinhouse
- [5] Presentation to NRC, International Reactor Innovative and Secure (IRIS), May 7, 2002, Westinghouse
- [6] Letter to the USNRC from Excelon Company, Revision of Excelon Generation Company's Proposed Licensing Approach for the Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) in the US, March 15, 2002, Excelon Company
- [7] “일체형원자로 규제기술개발 (I-1)”, 조종철 외, 한국원자력안전기술원, KINS/ GR -265, 2003. 6.
- [8] 중대사고 정책, 2001, 원자력안전위원회/과학기술부
- [9] 과학기술부령 제31호, 원자로시설등의 기술기준에 관한 규칙, 2001. 7, 과학기술부