

위험도정보활용 규제기술 연구개발 성과와 전망

Current Products and Future Plan of Regulatory Technology R&D for Risk-Informed Regulation and Applications

성계용, 이창주, 김웅식, 정대욱, 김효정
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

국내 위험도정보활용 규제 도입에 대비하여 수행된 안전규제 기술개발과제의 1단계 연구가 종료되었다. 그 연구결과로서 위험도정보활용 일반 원칙, 안전목표(안)을 비롯하여 사업자 PSA 수행 결과의 높은 품질을 확보하고 타당성을 확인하기 위한 PSA 분야별 검토 지침을 개발하였다. 한편으로는 가동중시험, 가동중검사, 모터구동밸브 및 기술지침서 등 분야에서 위험도정보를 이용한 사업자의 인허가 요건 변경신청에 대비한 관련 규제지침을 제시하였다. 이에 대한 규제 기술을 제고하기 위하여 시범원전 적용연구도 수행하였다. 또한, 규제 검사체제에 적용하기 위한 것으로서 원전 위험도기준 검사지침서와 정비효율성에 대한 국내 이행지침(안)을 제시하였다. 올해부터 시작되는 2단계연구는 위험도정보-성능기준에 대한 규제제도화 방안 연구와 위험도정보 활용 규제검증기반 구축 연구의 두 가지 과제로 나누어 수행될 예정이다.

Abstract

The first phase of a R&D project for risk-informed regulation (RIR) and applications (RIA) has been finished. Various results which would be useful for preparing domestic RIR system were accomplished, in areas of safety goals and general principles of RIR, which provide fundamental bases for establishment of RIR system as well as regulatory review guides, which ensure the quality for PSA. RIA guidelines for ISI, IST, MOV, Tech.-Spec. also have been developed, implementing some pilot plant applications. As essential documents for actual RIR inspection, risk-informed inspection guides and implementation guide for maintenance effectiveness were prepared. In the second phase of R&D, two projects on RIR area will be performed. One is to study on institutionalization of RIR and performance-based regulation, another is to develop a PSA model for regulatory audit as well as regulatory technology for risk monitoring.

1. 서론

과학기술부 중장기연구인 원전 규제기술 개발과제의 세부과제 중의 하나로 위험도기준 규제기술 개발 과제를 수행하였다. 본 연구는 '97년부터 시작하여 총 10년 동안의 3단계 과정으로 수행할 예정이며 본 논문의 연구결과는 1단계('97~'01, 5년) 연구결과이다. 위험도기준 규제기술 1단계 연구는 크게 위험도정보 활용(Risk-Informed : R-I) 관련 규제기술 개발과 계통/기기 성능평가에 대한 연구로 대별될 수 있으며 본 논문에서는 위험도정보 활용에 대한 결과만 기술하고자 한다.

USNRC는 '95년 "PSA 이용에 대한 정책 성명"[1]을 발표하고 검사를 비롯한 규제활동의 전반적인 방향에 R-I 를 적용하여 개선하였다. '98년에는 위험도정보 활용 규제 적용에 대한 일반 지침(Reg. Guide 1.174)[2]을 비롯하여 위험도정보활용 가동중검사(RI-ISI)[3], 가동중시험(RI-IST)[4] 및 기술지침서변경(RI-Tech. Spec.)[5] 등에 대한 규제지침서를 발행하여 사업자의 위험도정보활용 기술의 적용을 적극적으로 허용하고 있다. 또한, 위험도 정보의 규제활동에의 적용성에 대한 연구를 계속하여 '00년부터 원전 규제 이행 프로그램인 원자로감독프로그램(Reactor Oversight Program)[6]이 전면적으로 적용되고 있다. 또한, 위험도정보/성능기반 규제의 첫 시도로 정비규정[7]을 법제화하여 원전 정비 및 운전과 관련하여 안전에 영향을 주는 모든 원전 설비의 성능을 감시하도록 하였으며, 정비 및 점검에 의해 유발될 수 있는 운전 중 위험도 변화를 계속 감시할 수 있도록 하였다. 최근에는 일부 원전에 위험도 정보를 이용한 안전등급 재 설정에 대한 차등 품질보증 요건을 허가하고[8], 10CFR50의 제반 규정을 위험도 정보를 통해 보다 합리화하려고 연구 중에 있다[9]. 또한, 운전 중 위험도감시가 가능해짐에 따라, 운영 기술지침서의 보수적인 제한 사항들을 개선하려는 추세에 있다[10]. R-I의 기반 기술인 확률론적 안전성평가(PSA) 분야는 '76년 WASH-1400이후, '88년 Individual Plant Examination (IPE) 수행[11] 등을 통해 각 원전 고유의 PRA모형을 확보하고, 계속 개선하여, R-I에 적절히 활용할 수 있도록 갖춰놓았다. 최근에는 ASME 및 ANS에 의한 PRA 표준화[12], 사업자 PRA에 대한 전문가검토(peer review) 등을 통하여 PRA의 품질 및 신뢰성을 높이고 있다.

국내의 경우에도 '89년 영광 3,4호기 인허가부터 사고관리계획을 고려한 IPE가 수행된 이후, '92년 이후 각 원전에서 PSA를 시작하였다. '94년에는 과기부 안전정책성명[13]을 통해 확률론적 평가기법을 이용하여 종합적 안전성 평가를 실시하고 위험도에 근거한 안전규제를 실시할 것을 표명한 바 있으며 이에 따라 관련 기관에서 방법론과 활용에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그 후 미국에서 위험도정보 활용 규제가 활발해지면서 국내의 관련 기관들도 활발한 연구가 수행되었고 PSA 결과를 이용한 신규 원전의 설계 개선 및 운전 중 원전의 기술지침서 STI/AOT 개선에 이미 적용되었다. 최근 정부의 중대사고 정책 수립('01. 8. 29)에 따라 '06년까지 전 원전에 대하여 2단계 PSA 수행 및 일부 원전에 대하여는 1단계 PSA를 재평가하도록 하고, '07년까지 위험도 감시체제를 구축토록 하였다[14]. 이러한 세계적인 추세에 보조를 같이하여 우리나라의 원자력 규제제도 개선방안의 일환으로 그리고 사업자의 인허가 요청에 대한 규제기술 확보 차원에서 우리나라의 규제기관에서도 위험도기준 규제 기술을 제고하고 관련 규제지침 개발하는 것이 절실히 필요하게 되었다. 아울러, 위험

도정보 규제 체제 수립에 대비하여 충분한 기술적 근거를 확보하고 정보를 제공하는 것도 매우 중요한 일일 것이다.

1 단계 연구에서는 R-I의 세계적인 흐름에 부응하고, 국내 도입에 대비하여 R-I 관련 규제기술을 제고하고 규제지침을 개발하였다. 본 논문에서는 1단계 연구로 수행한 결과를 정리하고, 차후 수행 될 2단계연구('02~'04)에 대한 계획을 기술하고자 한다.

2. 1단계 중장기 연구 개발 성과

'97년부터 '01년까지 5년 동안 수행한 중장기 연구 분야는 위험도정보활용 규제(RIR) 분야 및 계통 기기 성능 규제 기술 분야로 구성되어있지만 본 논문에서는 RIR 분야에 대해서만 언급 할 것이다. RIR 분야의 세부 연구 분야는 표 1과 같이 RIR 체제의 근간이 되는 원칙, 안전목표 등을 마련하고, RIR 관련 규제 기반 기술을 확보하는데 중점을 두었다.

표 1. 1단계 연구개발 주요 내용

연구 분야	주요 연구 내용
RIR 체제 기반 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위험도기준 원칙 및 일반 지침 ○ 정성적, 정량적 안전목표
PSA 규제기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1단계 PSA 검토지침 ○ 2단계 PSA 검토지침 ○ 저출력/정지중 PSA 검토지침
RIR 요건 및 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위험도기준 MOV 우선순위 규제지침 ○ 위험도기준 IST 적용 규제지침 ○ 위험도기준 ISI Pilot Plant 적용 방안 ○ 정비효율성 평가지침 ○ 위험도기준 기술지침서 방법론 ○ 표준원전 위험도기준 검사지침서

가. RIR 체제 기반 개발

1) RIR 원칙 및 일반지침 개발

종합적 안전성평가 실시 및 위험도에 근거한 안전규제를 실시할 것을 천명한 과기부의 안전정책 성명('94)에도 불구하고, RIR에 대한 준비 및 이행은 구체화되지 못하였다. 그 이유는 전반적 규제방법 및 체제 변경에 따른 종합적이고 체계적인 접근 및 인식 전환이 부족하였고, 현 규제체제와 RIR 체제의 전환에서 규제자/사업자의 혼선에서 올 수 있는 규제 기능 저하 우려 등이었다. 이에 따라 결정론적인 접근방법에 위험도정보 접근 방법을 부가하는데 따른 전환과정의 토대를 제공하고, 위험도정보의 규제활용에 따른 혼선 및 시행착오를 최소화하도록 기본 방향을 제시하기 위하여 다음과 같이 위험도 정보 활용의 8 원칙이 제시되었다[15].

- ① 위험도 정보 활용 개념은 기존의 심층방호원칙을 대체하는 것이 아니며, 위험도 정보를 활용하여 원자력 시설의 전반적인 심층방호원칙에 대비한 다양한 안전성 특성들의 중요도를 평가하여야 한다.
- ② 위험도 정보 활용사안은 기존의 규제요건을 적용하여 평가되어야 하며, 그 결과는 충분한 안전 여유도를 가지고 있음을 보여야 한다.
- ③ 위험도정보 활용사안의 적용 결과로서 파생된 위험도 영향은 무시할 수 있을 만큼 아주 적거나 감소되어야 한다.
- ④ 위험도 정보 활용사안들의 누적된 직접적인 위험도 변화량은 제한되고 가능한 한 일 상적으로 감시되어야 한다.
- ⑤ 위험도 정보는 결정론적 고려사항을 보완하는 측면에서 모든 규제 의사결정에 반영되어야 하며, 이를 위해 정보의 신빙성을 명확히 확보하여야 한다.
- ⑥ 위험도 정보는 전반적인 평가방법론, 분석 범위 및 데이터에 대한 성숙된 현재의 기술수준을 바탕으로 하여야 한다.
- ⑦ 위험도 정보에 내재되어 있는 불확실성은 그 근본적인 원인을 일관되게 고려하여 규제 의사결정에 미치는 영향을 최소화하여야 한다.
- ⑧ 기존의 규제요건, 지침 및 프로그램은 위험도 정보를 활용하여 필요시 수정, 보완되어야 한다.

또한, NRC의 RG-1.174에 준하는 RIR 적용시 의사결정을 위한 일반지침(초안)이 제시되었다. 일반지침은 사업자가 위험도정보를 활용하여 인허가 요건을 변경하고자 할 때 규제 의사결정을 위한 기술적, 전략적 지침을 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 개발된 일반지침의 주요 내용은 다음과 같다 [16].

- o 위험도정보활용 인허가 요건 변경 기본 원칙
 - 기본원칙: 성능기준규제 반영, 안전성 목표의 개별적 적용, 기존 위험도 수준의 유지 및 경미한 증가의 조건부 허용
 - 안전성원칙: 심층방호 요건 및 안전성 여유도 유지
- o 안전성 척도 사용
 - 인허가 변경에 따른 위험도의 척도로 노심손상빈도 (CDF) 및 대량 초기방출빈도 (LERF) 사용
- o 위험도정보의 수준
 - 가능한 한 Full Scope PSA (전출력, 저출력 및 정지상태, 내부 및 외부사건)의 결과를 평가하여 총체적인 위험도 영향을 평가. 사안에 따라서는 제한적인 PSA 결과의 평가만으로도 허용 가능
- o 위험도정보의 활용
 - 공학적 평가: 심층방호 및 안전여유도, 불확실성 취급을 포함한 위험도 영향 평가
 - 위험도 허용성: (상세 지침은 별도로 설정)
 - . 평균 CDF 가 $10^{-4}/ry$ 이상 또는 평균 LERF가 $10^{-5}/ry$ 이상인 발전소의 경우, 위험도의 증가는 가능한 한 억제되어야 함

- . 평균 CDF 가 $10^{-4}/\text{ry}$ 이하인 발전소의 경우, 평균 LERF 지침과 조합해서 결정
- 불확실성 분석 : 변수, 모델, 완전성 불확실성 고려
- o 종합적인 의사결정
 - 위험도 평가를 포함한 공학적 분석 결과들을 종합적으로 고려

2) 안전목표(안) 개발 [17]

원전 안전목표는 원전이 얼마나 안전하면 충분히 안전한가라는 것에 대해 국제수준과 사회적 수용성에 근거하여 확률론적 지표를 근간으로 제시되었다. 특히 원자력발전소 중대사고정책 (원자력안전위원회, '01)에서 보건목표를 설정한 이후, 규제자/사업자가 원전의 종합적 안전성을 판단하고 결정하기 위해서는 보다 구체적이고 세분화된 척도가 필요하게 되었다. 본 연구에서 수행한 안전목표 개발은 가장 상위 수준(top tier)의 정성적 목표를 규정하고 이 정성적 목표 구현을 위한 한 단계 낮은 수준의 정량적 목표로서 보건목표(QHO)와 원전 성능목표를 계층적으로 구성하였다 (그림 1 참조). 정량적 목표는 심층방어 원칙을 단계별로 구현할 수 있도록 수립하되, 위험도정보 활용(RIA) 문제에서의 규제 의사결정 지원을 위한 부가적 기준으로 RIA 허용기준을 제안하였다.

가) 정성적 안전목표

정성적 안전목표는 앞으로 제시되는 정량적 안전목표인 원전 보건목표와 원전 성능목표를 정립하기 위한 기본적이고 원칙적인 사항들이 고려되어 다음과 같이 제안되었다.

- ① 원전의 운영에 의한 위험도는 전체 사회적 위험도에 비해 충분히 작아야 한다.
- ② 일반 개인의 사고로 인한 사망이나 상해 위험도는 원전 운영으로 인한 부가적인 위험도로 인해 크게 증가되지 않아야 한다.
- ③ 원전의 운영으로 인한 주변 주민의 방사선 위험도는 다른 전력생산시설에 의해 야기되는 위험도에 비해 크지 않아야 한다.
- ④ 원전 사고로 인해 주변 환경의 방사선학적 영향이 크게 증가되지 않도록 하기 위하여 노심의 심각한 손상을 유발하는 원전 사고의 발생 가능성은 가능한 한 낮아야 한다.

여기서 위험도란 이는 사회적 활동으로 인해 일반 개인 혹은 집단이 받을 수 있는 위해 요인에 의한 사망, 상해 등을 의미한다.

나) 정량적 안전목표 개발

정량적 안전목표(안)으로는 표 2에서 제시된 바와 같은 원전 보건목표 및 이 원전 보건목표를 구체적으로 확인하기 위한 다단계의 원전 성능목표가 제안되었다. 원전 성능목표로서는 중대사고 대비 성능목표, 보조 성능목표 및 RIA 허용기준이 제시되었다. 각 목표에 대한 세부 기준치는 표 3 과 같다.

원전 성능목표는 제시된 목표치적 척도가 어느 정도 수준으로 달성되는지 혹은 이를 위한 평가기반은 어떠한지 확인하기 위한 목적으로 부여한다. 이를 위해 제반 원전 성능목표의 달성 수준 확인 및 평가과정에서는 통상적으로 인증된 방법론을 적용한다. 또한 성능목표 확인에 포함되는 사건 및 발전소운전형태는 불확실성을 감안하되 정량화가 꼭 필요한

범위까지 적용한다. 이에 관한 세부 지침은 별도로 제시될 것이다. 보조 성능목표는 원전 성능목표를 지원하기 위한 부차적인 목표로서 설정하며, 원전 성능목표의 확인만으로는 충분치 않다고 판단되는 경우 활용함을 원칙으로 한다. 위험도정보 활용기준은 비록 원전 성능목표에서 제시된 척도들을 사용하지만 원전 성능목표의 설정 목적과 달리 그 적용 필요성이 파생된 각 활용 경우(application case)별로 허용성을 판단하는데 이용된다. 이 기준은 규제자가 종합적인 의사결정을 내리는데 있어 보조 판단자료로서 적용한다.

나. PSA 규제기술 개발 [18]

1) 1단계 PSA 검토지침(안) 개발

1단계 PSA는 모든 PSA의 근간이 되지만 아직도 불확실한 분야가 많이 존재하고 그 적용대상이 광범위하기 때문에 본 과제에서는 우선 현재까지의 국내외 기술현황을 조망할 수 있는 국내외 기술문서들을 조사하였으며, 1단계 PSA 관련 용어들의 개념과 정의를 정립하여 지침에 반영하였다. 또한 광범위한 1단계 PSA 수행분야 혹은 활용 분야별로 혼선을 빚지 않고 일관성 있게 지침을 적용하기 위한 검토의 목적, 범위 및 목표를 설정하였다. 세부 기술지침은 일반사항에 관한 내용과 각 분야별 내용을 구분하여 작성하였다. 일반사항 부분에서는 문서화, 독립 검토, 품질보증, 의사결정 지원 등의 활용성 등과 같은 항목들에 대한 검토지침이 작성되었다. 검토지침에 포함된 주요 내용은 다음과 같고 세부적인 내용은 참고문헌에 제시되어 있다.

- 보고되는 표준형태, 일반적 분석절차와 정보 취합 과정에 대한 적절한 표준 방식 제시
- 초기사건분석, 일반 사고경위분석, 특수 사고경위분석 및 최적 거동평가 단계별로 분석에서 고려되어야 하는 기술적 사항 제시
- 발전소 고유자료분석, 일반자료분석, 인간신뢰도분석, 종속고장분석, 회복조치분석 등과 같은 사고 경위 정량화단계에서 고려되어야 하는 기술적 사항들을 종합적으로 제시
- 세부기술지침과 더불어 발전소 안전성의 고유 특징을 파악하고 개선사항을 도출하는데 있어 고려되어야 하는 일반적 사항 명시

표 2. 정량적 보건 목표

목 표	내 용	설정치	NRC기준
초기사망 위험도 (목표치)	원전의 사고로부터 부지 인근의 주민 개인이 받을 수 있는 초기사망 위험도는 기타 사고에 의한 전체 초기사망 위험도의 0.1%를 초과하지 않아야 한다	4.0E-7/yr	5.0E-7/yr
암사망 위험도 (목표치)	원전 주변지역의 주민 집단이 원전의 운전으로 인해 받을 수 있는 암사망 위험도는 기타 원인에 의한 전체 암사망 위험도의 0.1%를 초과하지 않아야 한다.	1.0E-6/yr	2.0E-6/yr

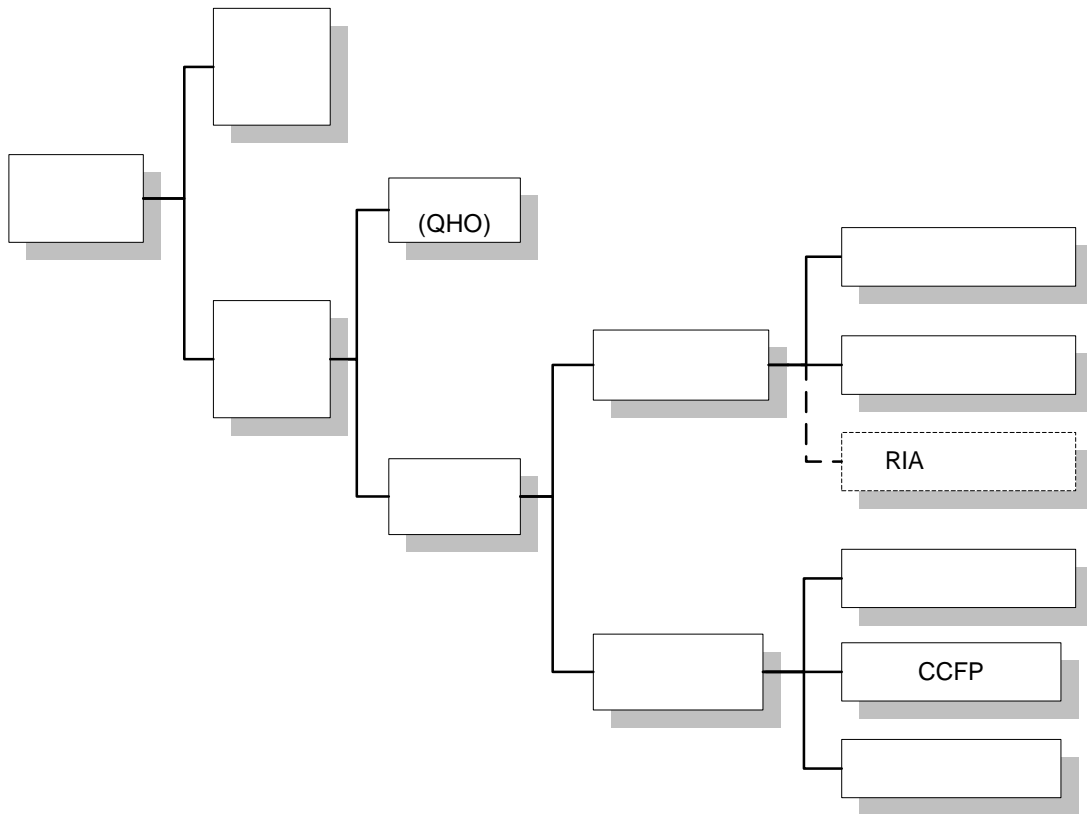


그림 1. 안전목표 전체 설정 구조

2) 2 단계 PSA 검토지침(안) 개발

2 단계 PSA는 격납건물 거동을 예측하고 사고시나리오의 가능성을 평가하여 정량화하는 과정으로 1단계 PSA 영역보다도 더 불확실한 분야가 많이 존재하기 때문에 본 과제에서는 우선 이런 불확실한 분야가 가능한 한 객관적으로 정리된 현재까지의 국내외 기술문서들을 조사하였으며, 2단계 PSA 관련 용어들의 개념과 정의를 정립하여 지침에 반영하였다.

2 단계 PSA 수행결과에의 심층 확인을 위해 준비되어야 할 종합적인 부분으로서 검토의 목적, 범위, 목표와 검토 팀 구성방안을 제시하였다. 세부 기술지침은 일반사항에 관한 내용과 각 분야별 내용을 구분하여 작성하였다. 일반사항 부분에서는 문서화, 분석결과 활용성, 동반 검토, 품질보증, 유지관리요건 등과 같은 항목들에 대한 검토지침이 작성되었다. 각 평가분야별 부분에서는 사고관리전략 평가와의 연계성 확인과 불확실성/민감도분석이 중점적으로 취급되었으며, 그 외에 격납건물 성능특성, 물리적 사고 전개과정 모델, 발전소 손상상태 계열화 및 사건수목 개발/정량화 등 항목들의 분석에서 고려되어야 하는 기술적 사항들이 제시되었다. 세부기술지침과 더불어 발전소 안전성의 고유 특징을 파악하고 개선사항을 도출하는데 있어 고려되어야 하는 일반적 사항들이 또한 작성되었다. 지침의 주요 내용인 격납건물 거동 및 방사성 물질방출 분석 지침 내용은 다음과 같이 구성되며, 세부 내용은 참고문헌에 제시되어 있다

표 3. 원전 성능목표(안)

성능목표 구분	세부 구분	기준치
중대사고 대비 성능목표	노심손상빈도 (CDF)	- CDF < 1.0E-4/yr - 신규 도입원전은 보다 강화된 요건 요구 가능
	초기대량방출빈도 (LERF)	- LERF < 1.0E-5/yr - 신규 도입원전은 보다 강화된 요건 요구 가능
보조 성능목표	단일사고경위 빈도	(전출력 또는 정지중형태와 같은 각 운전형태별로 계산된) - 노심손상 단일 사고경위 < 총 CDF의 1/10
	조건부 격납건물 손상확률	(전출력 내부사건에 의한) - 격납건물 손상빈도 < 평균 CDF의 1/10
	안전계통신뢰도	- CCF를 제외한 주요 안전계통의 이용불능도 < 1.0E-3
	비상급수 이용불능도	- 비상급수기능 이용불능도 < 1.0E-4
	신뢰도지표	- RRW 혹은 RAW가 큰 계통과 기기에 대해 개발
위험도정보 활용기준	ΔCDF	- 기저노심손상빈도 (CDF ₀)가 1.0E-4/yr 이하인 경우 . 허용불가영역: ΔCDF > 1.0E-5/yr . 상세평가영역: 1.0E-5/yr < ΔCDF ≤ 1.0E-6/yr . 허용가능영역: ΔCDF ≤ 1.0E-6/yr
		- CDF ₀ 가 10E-4/yr 보다 큰 경우 . 허용불가영역: ΔCDF > 1.0E-5/yr . 상세평가영역: ΔCDF ≤ 1.0E-5/yr
		- CDF ₀ 가 1.0E-6/yr 보다 작은 경우 . 허용불가영역: ΔCDF > 10×CDF ₀ . 상세평가영역: CDF ₀ < ΔCDF ≤ 10×CDF ₀ . 허용가능영역: ΔCDF ≤ CDF ₀
	ΔLERF	ΔCDF 설정과 유사한 형태로 설정 (1/10 수준)
Risk Monitoring	순간노심손상빈도(ICDF) 및 조건부 노심손상확률 증가치 (ICCDP)를 적용. 세부 허용기준은 2단계연구에서 수행	

- 일반 사항
- 격납건물 성능 특성
- 물리적 사고전개과정 분석 모델
- 발전소 손상상태의 계열화
- 격납건물 고장/파손 특성
- 격납건물 사건 수목
- 사고진행분석 및 격납건물 사건수목 정량화
- 방사성 물질의 유출 특성
- 민감도 분석 및 불확실성 분석

3) 정지 및 저출력 PSA 검토지침(안) 개발

정지 및 저출력 운전 상태에서의 위험도는 전출력 운전상태에서의 위험도와 대비하여 결코 낮지 않은 수준을 보인다. 따라서 그 평가 결과의 타당성 및 취약점 개선 항목의 적합성을 확인하기 위한 검토지침 개발은 전세계적인 현안이다. 본 연구에서는 미국, 프랑스 등과의 국제협력(COOPRA, 한-불협력프로그램)을 포함하여 현재까지의 국내외 기술문서들을 조사하여 지침을 개발하였으며, 정지 및 저출력 PSA의 일관성 있는 적용을 위한 검토의 배경 및 목적을 설정하였다. 세부 기술지침은 다음과 같은 사항에 관한 내용에 대해 중점 개발하였고 세부 내용은 참고문헌에 제시되어 있다.

- 발전소 운전상태(POS)의 정의: 분류 및 그룹핑, 참조 POS 설정 등
- 초기사건분석: 사건 선정, 그룹핑, 빈도 결정, 참조 가능 조건 설정 등
- 사고추이 개발 및 정량화: 개발방식, 성공기준 결정 고려사항, 인적신뢰도 고려사항 등
- 발전소손상상태 정의: 격납건물내 물리적 현상 및 방사선원향 영향의 고려사항, 격납 건물 격리상태의 분류 등

다. 위험도 정보활용 규제 요건 및 기술 개발

1) 위험도정보활용 모터구동벨브(RI-MOV) 우선순위 규제지침(안) 개발 [19]

본 연구내용은 MOV의 설계기준 안전성 평가를 위한 성능시험을 수행할 때, 안전성 중요도에 따라 MOV 시험우선순위를 결정하는 방법에 대한 규제지침을 개발하였다. MOV를 안전성에 따라 분류하는 목적은 안전성에 중요한 MOV에 대해서 관리를 집중함으로써 안전성을 효율적으로 향상시키고자 함이다. 이를 위해 확률론적인 방법(위험도)과 결정론적인 방법(운전여유도)이 동시에 활용되는데, 본 연구에서는 확률론적인 평가방법인 PSA를 이용한 MOV 중요도 분류 방법에 대해서만 기술하였다. 외국의 위험도분류 방법으로 BWR Owners Group, Westinghouse Owners Group 및 NUMARC 93-05를 포함한 관련 자료들을 참고하였다. 주요 연구내용은 다음과 같고 세부 내용은 참고문헌에 기술되어 있다.

- PSA의 중요도 척도 선정
 - 중요도 척도의 활용에 대한 제한점 및 고려 사항 : FV, RAW, RRW
 - RIR에 적용되는 중요도 분류 기준 검토
- Pilot Plant(영광 5,6호기) 적용 계산

- MOV 관련 PSA 결과에 대한 규제 고려사항 도출
- 위험 중요도 분류 과정에 대한 규제 고려 사항 도출
- o MOV 위험 중요도 분류 규제 지침(초안) 개발

상기 위험도중요 기기 분류 방법에 대하여 관련 참고 문헌 검토 및 시범 적용 결과를 근거로 하여, MOV 위험 중요도 분류에 대한 규제 지침 초안을 개발하였다. 초안 내용은 다음과 같고 상세 내용은 참고문헌에 기술되어 있다

- 일반 사항: 전문가위원회, 발전소 고유정보, MOV 범위 등
- MOV 위험도 분류: 분류기준, PRA 분류방법, PRA 완결성, 전문가 위원회 분류기준, 전문가 위원회 구성

2) 위험도정보활용 가동중시험(RI-IST) 적용 규제지침(안) 개발 [19]

본 연구는 가동중시험(IST)에 위험도 평가 결과를 적용하여 합리적인 가동중시험 계획을 수립·시행할 수 있도록 규제지침(안)을 개발하는 것을 최종 목적으로 하며 이는 향후 규제 수요에 대비하고자 하는 것이다. 기존의 IST는 기기의 안전 중요성보다는 안전 관련성에 기준을 두고 확률적으로 일정 수준의 IST를 수행할 것을 요구하고 있으나, RI-IST는 개별 기기의 확률론적 안전성 중요도에 비례하여 자원을 분배함으로써 비용-효과를 높이고자 하는 것이다. 본 연구에서 미국 기계학회 기기 안전 중요도 분류기준(ASME OMN-3 Code case)에 대한 연구를 통해 국내 적용이 가능하도록 기술기준을 개발하였으며, 이것이 전력 산업기술기준(KEPIC) 2001년 추록에 적용사례(MON-3)로 채택되었다. 연구 결과를 종합하여 국내 규제지침(안)을 개발하였으며, 규제지침의 주요 내용은 PRA 요건, 고안전성 중요기기(HSSC)와 저안전성 중요기기(LSSC)에 대한 가동중시험 전략, 중요도 척도 적용, 민감도 분석 요건, 기기 안전 분류, 총 위험도 평가, 가동중시험 주기 및 계획, 성능 감시, 반영 및 시정 조치 등을 포함하고 있다

3) 위험도정보활용 가동중검사(RI-ISI) Pilot Plant 적용 방안 [20]

위험도정보활용 가동중검사(RI-ISI)는 현재 미국 원전에서 70%이상 수행하는 대표적인 위험도기준 적용 사례로서 국내사업자도 2004년 국내 인허가 취득을 위하여 준비하고 있는 분야이다. 따라서 이 분야에 대한 국내 적용성, 검토 규제기술 및 기술지침 개발에 대한 연구를 수행하였고 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- o RI-ISI 관련 법적, 기술적 요건 평가
 - 국내 ISI 관련 법 규정 및 고시 검토
 - 미국 10CFR 50.55a의 개정안 검토
- o RI-ISI 방법 평가
 - 확률론적 배관건진성 평가방법 평가
 - 배관손상 평가 방법 비교(EPRI 및 WOG 방법)
- o RI-ISI Pilot Plant 적용 연구
 - 배관 손상 사례 및 손상 기구 조사

- 국내·외 강화 가동중점검(Enhanced ISI) 조사
- RI-ISI 규제 지침(초안) 개발
- 초음파 기량검증(PD) 평가 방법 및 평가 절차 개발

4) 정비효율성 평가지침(안) 개발 [21]

정비규정(Maintenance Rule)은 위험도정보 활용 규제의 본격적 활용을 위하여 필수적으로 도입되어야 할 규제제도 중의 하나이며, 국내에서도 위험도 정보를 운전 및 규제에 활용하기 위해서는 정비규정과 유사한 규정을 도입할 필요가 있고 이에 대비한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 위험도정보/성능기준 규제의 대표적인 사례인 미국의 정비규정에 대하여, 정비규정 이행 내용에 대한 미국 사업자 이행지침 및 이행 절차들을 검토하였고 미국 규제기관인 NRC의 검사 지침, 검사 절차서 등을 검토하였다. 이 결과를 바탕으로 정비규정의 국내 수행 시 규제 업무에 활용될 수 있도록 “국내 정비효율성 감시 이행 지침”의 초안을 개발하였다. 이행지침의 주요 내용은 예방정비 효율성 감시 수행, 대상 원전 설비 범위 및 분류, 성능기준 수립, 성능 감시, 성능기준 불 만족시 조치, 목표 설정 및 감시, 정비 위험도 증가 평가, 주기적 정비효율성 평가, 정비자료의 수준, 정비효율화 감시의 문서화, 신규건설 원전 적용 등을 포함하고 있다.

5) 위험도정보활용 기술지침서 변경 규제검토 기술 [22]

결정론적 분석과 공학적 판단에만 기반을 두고 있는 현 기술지침서의 허용정지시간(AOT) 및 감시점검주기(STI) 요구사항들을 위험도정보를 이용하여 개선하는 것이 미국에서는 일반화 되어있고 국내에서도 일부 원전에 인허가를 해 준 경험이 있다. 이러한 개선사항을 체계적으로 규제 검토하기 위하여 사업자와 규제기관의 입장에서의 의사결정 과정을 수립하였다. 기술지침서 변경을 위해 사업자가 수행해야 할 요소들을 제안된 기술지침서 변경의 정의, 공학적 분석의 수행, 이행 감시프로그램, 문서의 작성 및 제출의 단계적 접근방법으로 제시하였다. 규제기관의 측면에서는 변경이 제안된 기술지침의 변경이유에 대한 승인여부, 현 규제요건과의 일치여부, 그리고 제안된 변경이 심층방어를 만족하는지의 여부를 확인하고, 안전 여유도를 공학적으로 평가하기 위한 절차의 적절성을 평가하는 체계를 제시하였다.

6) 표준원전 위험도기준 검사지침서(안) 개발 [16]

안전계통 및 안전관련계통에 대하여 결정론적으로 정해진 현행 규제 검사항목을 위험도에 중요한 계통, 기기 및 운전원 행위를 중심으로 개선하고 검사자원을 효율적으로 분배하기 위하여, 국내 표준 원전(울진 3,4호기 및 영광 5,6호기)의 PSA 결과를 이용하여, 위험도기준 검사지침서를 개발하였고 주요 내용은 다음과 같다.

- o 주요 공통원인고장 사건 및 주요 운전원 실수 사건 도출
- o 각 분야별 검사항목 도출 : F-V 중요도 순으로 결정
 - 사고완화를 위해 비상운전절차서에 규정된 운전원 조치 실수 분야
 - 계통 분야 : HPSI, AFWS, SDS, CSS, LPSI, SCS, MFWS 등

o 각 검사항목에 대한 개별 검사지침 개발

3. 2단계 중장기 연구 계획

1단계 중장기 연구 결과로 RIR 원칙, 안전목표, PSA 검토지침 및 각종 RIR 규제지침 등을 개발하여 국내 RIR 이행을 위한 기반 기술을 수립하였다. 아울러 정부의 RIR 체제로의 전환 의지와 중대사고 정책 이행에 따른 위험도정보를 이용한 사업자의 다양한 인허가변경 요청이 예상되므로, 2단계 연구('02-'04)에서는 이에 대비하여 RIR 검증 및 체계 적용 기술에 대한 기반연구와 RIR 정책 방향 결정에 대한 두 가지 연구로 수행될 예정이다.

표 4. 2단계 중장기 연구 주요 내용

1단계 연구분야	2단계 연구분야	
	주요 연구분야	세부연구내용
RIR 체제기반 개발 (1단계) ↓ RIR 제도화 방안 개발 (2단계)	기본개념 및 적용성 평가	국내·외 적용사례분석
		개념 및 본질 정립
		적용대상 범위, 기술수준 및 능력평가
	규제모델	모델 도출, 장단점 분석 및 최적모델 개발
	설정/규제영향 평가	기존규제와의 연계성 평가
		규제체계 변화에 따른 영향 분석
제도화방안 수립	관련 법령개선 방향 분석	
		기본 지침서 개발
PSA 규제 기술 개발	위험도검증	규제검증용 PSA 모델 개발
	규제기반기술	PSA 품질 인증 기준 수립
	안전성감시	성능지표(초기사건, 계통신뢰도) 설정기준 수립
	지표설정기술	Significance Determination Process 결정절차 수립
RIR요건 및 기술 개발	위험도감시	위험도감시 프로그램 검증기술 수립
	규제기반기술	위험도감시 규제 요건 개발
	성능기준정비	성능기준 설정 검토기술 개발
	체계규제기술	정비기준 세부 규제 이행 지침 개발

가. RIR 검증 및 체계 적용 기술 개발

1 단계 연구결과를 바탕으로 2 단계 연구에서는 규제 체계 개선에 적용될 수 있는 분야와 RIR의 기반기술인 PSA 분야의 규제기술 제고에 중점을 두었다. 미국의 RIR은 ROP를 중심으로 전개되는데 이의 핵심은 원전 운전에 대한 성능인자(Performance Indicator) 감시 및 검사(Inspection)에 대한 위험도정보 활용이다[23]. 미국에서 규제 체계의 효율화를 추구

하기 위하여 위험도정보활용/성능기반 기술이 도입된 만큼, ROP에 적용된 위험도정보활용 세부기술에 대하여 국내에서도 연구가 필요하리라 판단한다. 표 4와 같이 2단계 연구에서는 첫째로 RIR 기반정보인 사업자 PSA 결과를 독립적으로 검증할 수 있는 규제 검증용 모델을 개발하고, PSA기술의 신뢰성을 제고할 수 있도록 PSA 품질인증 기준을 수립하고자 한다. 둘째로, ROP 세부기술, 즉 안전심각도 결정절차(Significance Determination Process: SDP) 수립 및 성능지표(Performance Indicator: PI) 감시 등을 국내 Pilot Plant에 적용하는 연구가 수행될 것이다. 이와 더불어 국내 위험도감시 및 성능기반 규제 등과 같은 규제 수요에 대비하여 국내 이행지침 및 검토지침을 개발할 예정이다

나. 위험도정보/성능기반 규제 제도화방안 연구

미국에서 도입중인 위험도정보 활용 규제제도에 기초하여, 국내 원전사업자는 위험도정보를 활용하여 선택적으로 인허가 변경신청을 하거나, 향후 변경신청이 예상되고 있다. 한편, 정부의 중대사고 정책에 의거 2006년까지는 원전 종합안전성 평가가 완료되어 원전별로 위험도정보가 확보될 예정이다. 이와 같이 위험도정보의 규제활용 분위기는 성숙되어 가고 있으나, 동 규제기법의 전면적 시행을 위한 제도적 장치가 마련되어 있지 않으므로 우리나라 고유의 규제환경을 고려한 적절한 제도화 모델을 개발하기 위한 연구를 수행할 예정이다. 동 연구에는 표4의 RIR 제도화방안 개발 항과 같이 기본개념 및 적용성평가, 규제모델 설정, 제도화 방안 수립 및 기존 규제에 미치는 영향평가 등이 포함된다.

4. 결 론

우리나라 현재 상태에서 미국과 같은 위험도정보 활용규제가 가능한 것인가라는 물음에 답변하기는 쉽지 않은 문제이다. 하지만 규제기술 개발 측면에서는 비록 언제인지는 예측할 수 없어도 그 규제가 가시화될 가능성에 대비하여 관련 원칙, 기준, 지침 및 규제요건을 제시할 수 있도록 준비하여야 할 것이다. 따라서 이는 결코 몇몇 사람의 일시적인 아이디어나 추진방안의 마련만으로 해결될 수 있는 문제가 아니며, 꾸준한 연구개발을 요구하는 문제이다. 안전규제기술개발 과제의 일환으로 지금까지 수행된 위험도정보 활용 규제기술개발 1단계연구는 상기의 당면한 현안을 해결하기 위한 몇 가지 가시적인 성과를 이루었다고 자부한다. 구체적인 성과로서는 안전목표(안), 다수의 PSA 검토지침, 다수의 RIA 적용 규제지침 개발 등을 들 수 있을 것이다. 하지만 이와 같은 연구결과만으로는 아직도 관련 규제 기반을 충분히 제공하는데 부족한 면이 많은 것으로 판단되므로 보다 구체적인 기반기술을 구축하고 제도와 체제를 갖추어나가는 노력을 기울여야 할 것이다. 이는 안전규제기술개발 과제의 2단계 연구로서 이루어질 것이다.

후 기

이 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발 중장기연구개발사업중 원자력안전규제 기

술개발과제의 세부과제인 위험도기준규제 기술개발과제의 일부분으로 수행한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] U.S. NRC, "Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Activities," Final Policy Statement, Federal Register, Vol. 60, p. 42622, August 16, 1995.
- [2] U.S. NRC, Regulatory Guide 1.174, "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis," July 1998.
- [3] U.S. NRC, Regulatory Guide 1.178, "An Approach for Plant-Specific Risk-Informed, Decision-making: Inservice Inspection of Piping," August 1998.
- [4] U.S. NRC, Regulatory Guide 1.175, "An Approach for Plant-Specific Risk-Informed, Decision-making: Inservice Testing," August 1998.
- [5] U.S. NRC, Regulatory Guide 1.177, "An Approach for Plant-Specific Risk-Informed, Decision-making: Technical Specification," August 1998.
- [6] U.S. NRC, SECY-99-007, "Recommendation for Reactor Oversight Process Improvements," Jan. 1999.
- [7] U.S. 10 CFR 50.65, "Requirements for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants," July 1991.
- [8] R. Grantom, "Use of PRA-STP Nuclear Operating Company," IAEA Risk-Informed Decision -Making Workshop, Nov. 2001.
- [9] U.S. NRC, SECY-01-0133 "Status Report on Study of Risk-Informed Changes to the Technical Requirements of 10CFR Part 50 (Option 3) and Recommendations on Risk-Informed Changes," 2001.
- [10] Y. H. In, "Risk-Informed Regulation Status in USA", IAEA National Workshop on Risk-Informed Optimization of NPP Operation, Dec. 2001.
- [11] U.S. NRC Generic Letter 88-20, "Individual Plant Examination on for Severe Accident Vulnerabilities-10CFR 50.54(f)," Nov. 1988.
- [12] U.S. NRC, Presentation to WOG, "Status of Current RI Initiatives at NRC, " Mar. 2002.
- [13] "원자력안전 정책 성명", 과학기술부, 1994. 9.
- [14] "원자력발전소 중대사고정책", 과학기술부, 2000. 8. 29.
- [15] 이창주, "안전규제에서의 위험도정보활용 원칙", 제5회 원자력안전기술정보회의, KINS, 1999. 12.
- [16] 성계용 외, "위험도기준 규제기술개발", 중장기 연구최종 보고서, KINS/GR-239, KINS, 2002. 5.
- [17] 이창주 외, "원전 안전목표 및 위험도정보활용 허용기준 설정에 대한 규제기술개발", 중장기연구 보고서, KINS/RR-117, KINS, 2002. 3.

- [18] 이창주 외, “원전 확률론적 안전성평가 검토지침 설정에 대한 규제기술개발”, 중장기연구보고서, KINS/RR-118, KINS, 2002. 3.
- [19] 성계용 외, “국내 원전의 위험도기준 적용에 대한 규제기술 개발”, 중장기연구보고서, KINS/RR-113, KINS, 2002. 4.
- [20] 최영환 외, “위험도정보 가동중검사 Pilot Plant 적용 연구”, 중장기연구보고서, KINS/RR-120, KINS, 2002. 4.
- [21] 성계용 외, “국내 원전 정비효율성감시 이행을 위한 규제기술 개발”, 중장기연구보고서, KINS/RR-096, KINS, 2002. 1.
- [22] 제무성 외, “위험도기준 기술지침서개선 연구”, 중장기연구 위탁보고서, KINS/HR-429, 한양대, 2002. 4.
- [23] 윤원영 외, “미국의 개정된 원자로 안전성 감독절차 시행결과 고찰”, 2001 추계학술발표회, 한국원자력학회.