

SMR 운전환경에서의 인간공학설계 및 인적수행도 관련 규제 고려사항

- 원전 자동운전 기술 적용 시 인간공학설계 고려 사항



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS



❖ 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙

제25조

원자로제어실 등

- ① 원자로시설에는 원자로제어실을 설치하여야 한다.
- ② 원자로제어실에는 제어계통설비를 조작하는 장치, 비상노심 냉각장치 등 비상시에 원자로의 안전을 확보하기 위한 설비를 조작하는 장치, 원자로 및 1차 냉각계통을 구성하는 주요기기의 동작상태를 표시하는 장치, 주요계측장치의 계측결과를 표시하고 기록하는 장치, 그 밖에 원자로를 안전하게 운전하기 위한 주요장치를 집중시켜 설치하여야 한다.

제45조

인적 요소

- ① 원자로시설 종사자와 인간·기계의 연계와 관련된 원자로시설의 설계에는 인적 요소가 체계적으로 반영되어야 한다.
- ② 원자로시설의 설계에는 운전시 인적 오류의 발생을 최소화하기 위하여 다음 각호의 사항을 반영하여야 한다.

❖ 원자력안전법

제26조

운영에 관한
안전조치 등

- ③ 발전용원자로운영자는 원자로마다 제84조에 따라 원자로조종감독자면허를 받은 사람 및 원자로조종사면허를 받은 사람 각 1명 이상을 늘 원자로의 운전업무에 종사하게 하여야 한다.

❖ 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙

제54조

운영조직

3. 원자로조종감독자면허·원자로조종사면허·핵연료물질취급감독자면허 및 핵연료물질취급자면허 등의 소지자를 비롯한 유자격 종사자를 확보할 것

인간공학 관련 규제지침

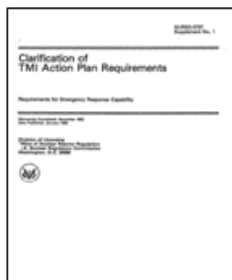
❖ 원전 인간공학분야 인허가 심사 주요 지침



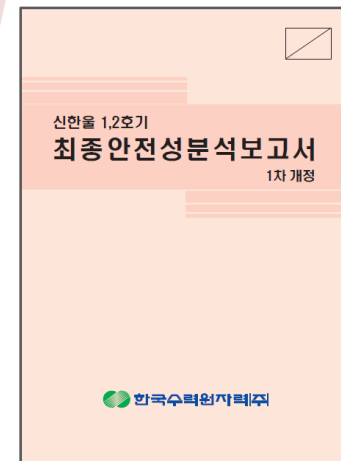
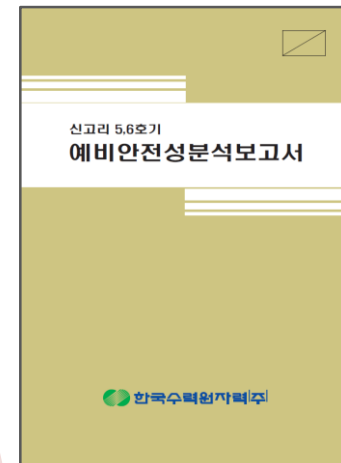
NUREG-0711 HFE Program Review Model



NUREG-0700 HSI Design Review Guidelines

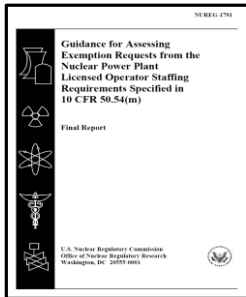


NUREG-0737, Suppl. No.1 Clarification of TMI Action Plan Requirements

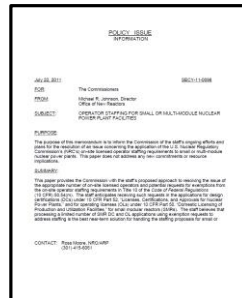


인간공학 관련 규제지침

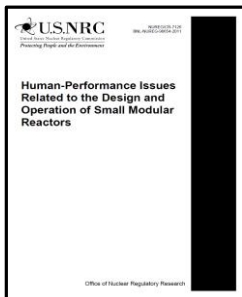
❖ 원전 인간공학분야 참고 지침/문서



NUREG-1791 Exemption Requests from Staffing Requirements in 10 CFR 50.54



SECY-11-0098 Staffing for Small or Multi-Module NPPs



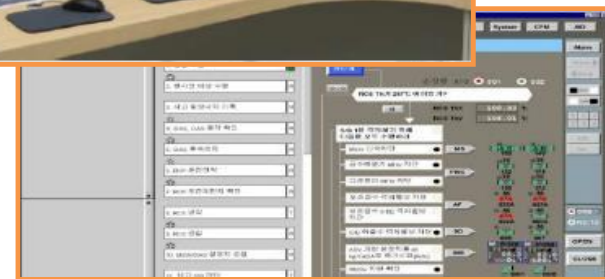
NUREG/CR-7126 HF Issues Related to Design and Operation of SMR

기술의 진화



기술의 진화

❖ 원전 주제어실



❖ 원전 자동화

수동운전



원전 수동운전

운전지원

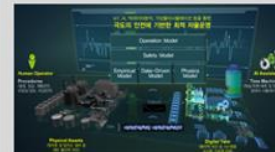


상태진단

고장예지

제어지원

부분자율운전



부분 자율운전 시스템

완전자율운전



완전 자율운전 시스템

원자력발전소 자율운전 적용

❖ Levels of Automation for NPP Application (NUREG-0700, rev.3)

Level	Automation Tasks	Human Tasks
(1) Manual Operation (수동운전)	No automation (자동화 x)	Operators manually perform all tasks. (모든 업무 수동)
(2) Shared Operation (부분 자동운전)	Automatic performance of some tasks (일부 업무 자동)	Operators perform some tasks manually. (일부 업무 수동)
(3) Operation by Consent (조건부 자율운전)	Automatic performance when directed by operators to do so, under close monitoring and supervision (운전원 지시에 의해, 감시/감독 하에서 자동)	Operators monitor closely, approve actions, and may intervene to provide supervisory commands that automation follows. (감시, 승인, 필요 시 개입)
(4) Operation by Exception (고수준 자율운전)	Essentially autonomous operation unless specific situations or circumstances are encountered (특정 상황 외에 자동)	Operators must approve of critical decisions and may intervene. (중요 결정 승인, 개입)
(5) Autonomous Operation (완전 자율운전)	Fully autonomous operation. System cannot normally be disabled but may be started manually (완전 자동, 시스템은 정상적으로 불능될 수 없으나 수동 개시)	Operators monitor performance and perform backup if necessary, feasible, and permitted. (수동 감시, 필요하고 허용가능한 경우 백업)

인간공학프로그램 검토 모델 (HFEPRM)

❖ 인간공학 프로그램 검토 모델 (HFE Program Review Model)

- NUREG-0711 (현재 rev.3, 2012.11)
- 지속적이고 체계적인 인간공학 활동을 문서화
 - 인간공학 활동의 요소가 부당하게 간과되지 않았음을 확인
 - 인간-기계 연계 설계에 인간공학 요건이 반영되었음을 확인
- HFEPRM의 최종 목적
 - 원전의 인간-기계 연계 설계 전 과정에서 인간공학 요건을 반영하여 인적오류를 최소화
 - 원전의 안전성과 운전성 향상

❖ 인간공학 프로그램의 적용 대상 (Design Product)

- 적용설비 : 주제어실, 원격정지실, 비상대응설비, 현장제어반
- 적용 운전모드 : 모든 운전, 사고 관리, 유지 및 보수, 시험, 검사, 감시 등
- 인간공학 설계조직 구성 및 요원 : 인간공학 전문가, 운전 전문가, 계통설계자, 원자력 전문가 등

인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ Human-System Interface Design Review Guidelines Rev.3 (NUREG-0700)

- Rev.2 (2002) → Rev.3 (2020) 개정
- 인간-시스템 연계 설계 시 고려해야 할 상세 지침 제시 (Rev.3, 총 563페이지)

❖ 주요 개정 내용

- Rev.2에서 Part I(Basic HSI Elements), Part II(HSI Systems), Part III(Workstation and Workplace Design)으로 구성되었으나, 구분이 사라짐.
- Rev.2에서 4페이지의 내용으로 구성되었던 "Computerized Operator Support System"이 Rev.3에서는 총 13페이지 "Automation System"으로 구성

9. Automation System (자동화 시스템)

- 9.1 Automation Displays (자동화 디스플레이)
- 9.2 Alerts, Notifications, and Status Indications (경보, 알림, 상태 표시)
- 9.3 Interaction and Control (상호작용 및 제어)
- 9.4 Automation Modes (자동화 모드)
- 9.5 Automation Levels (자동화 수준)
 - 9.5.1 Shared Control (공유 제어)
 - 9.5.2 Operation by Consent (동의를 의한 운전)
 - 9.5.3 Operation by Exception (예외 사항에서의 운전)
- 9.6 Adaptive Automation (적응형 자동화)
- 9.7 Computerized Operator Support Systems (COSS) (전산화 운전지원시스템)
- 9.8 HSI Integration (인간-시스템 연계 통합)

인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ NUREG-0700, “9. Automation system” 주요 내용

■ 9.1 Automation Display (자동화 디스플레이)

- 자동화 계통/기기 정확히 표현(자동화 연계 포함), 자동화 목표/진행상황 정보 포함
- 자동화/행위자 HSI 지시*

* 예) 발전소 기동 자동시스템의 경우, 일부 업무는 자동화, 다른 업무는 운전원에 의해 수행.
운전원 조치가 요구되는 직무는 운전원이 해당 조치를 수행해야함을 명확히 지시 필요.

■ 9.2 Alerts, Notifications, and Status Indications (경보, 알림, 상태 표시)

- 정의된 조건에서 알림 제공(자동화 충족 초기조건 상태 정보 포함)
- 자동화 구동 실패 알림, 중요 상태변화 알림
- 현재 상황에서 자동화 관련 주의/경고 제공
- 자동화 종료 조건 포함

인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ NUREG-0700, “9. Automation system” 주요 내용

- 9.3 Interaction and Control (상호작용 및 제어)
 - 필요 시 자동화 정지/제어권 확보
 - 명확한 피드백 제공
 - 자동화 조치/권고에 대한 근거(추적, 해석, 확인 등) 지원
 - 자동화는 운전원의 활동 감시를 통해 잠재적 발생가능한 오류 제공

- 9.4 Automation Modes (자동화 모드)
 - 자동화 모드 명시, 자동으로 모드 변경 시 알림 제공
 - 모드 변경 결과 제공 & 이로 인한 중요 결과 야기 시 운전원 검토 요구 필요
 - 운전원이 자동으로 모드 변경 조건 쉽게 이해 필요

인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ NUREG-0700, “9. Automation system” 주요 내용

- 9.5 Automation Levels (자동화 수준)
 - 9.5.1 Shared Control (공유 제어)
: 운전원 및 자동화가 공동 업무 수행 시 HSI 공유 활동 조율에 필요한 정보 포함
 - 9.5.2 Operation by Consent (동의에 의한 운전)
: 업무 상태에 관한 정보 제공
자동화가 현재 업무 지속하도록 승인하기 위한 조건이 충족되는지 결정하기 위해 필요한 정보 제공
업무 보류 시점에서의 유효한 옵션 및 결과 확인
 - 9.5.3 Operation by Exception (예외 사항에서의 운전)
: 예외조건 평가에 대한 정보 제공, 가능한 옵션 및 결과 확인
- 9.6 Adaptive Automation (적응형 자동화)
 - 적응형 자동화는 인간/기계의 역할/책임이 기 정의되어야 함
 - 자동화 변경을 위한 제어 제공
 - 운전원 의도가 아닌 자동화 변경 시 발생조건 및 자동화 변경 방식 확인

인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ NUREG-0700, “9. Automation system” 주요 내용

- 9.7 Computerized Operator Support Systems (COSS) (전산화 운전지원시스템)
 - 사용자의 직무요건과 일관성
 - (다양한) 지원전략의 선택
 - (대화형) 설명 기능(규칙, 지식기반, 문제해결 방안)
 - 분석의 정확성 및 확실성 명시
 - COSS 기능을 넘어서는 상황에 대한 알림
 - 사용자 요청 시 하드카피 이용 가능
- 9.8 HSI Integration (인간-시스템 연계 통합)
 - 사용자와 자동화의 상호작용은 절차에 기반(자동화 오류 상황 포함)
 - 자동화 HSI는 주요 HSI 및 기존 HSI와 설계 일관성 등을 고려하여 설계되고 통합되어야 함

인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ NUREG-0700, “Appendix B. Design process guidelines” 주요 내용

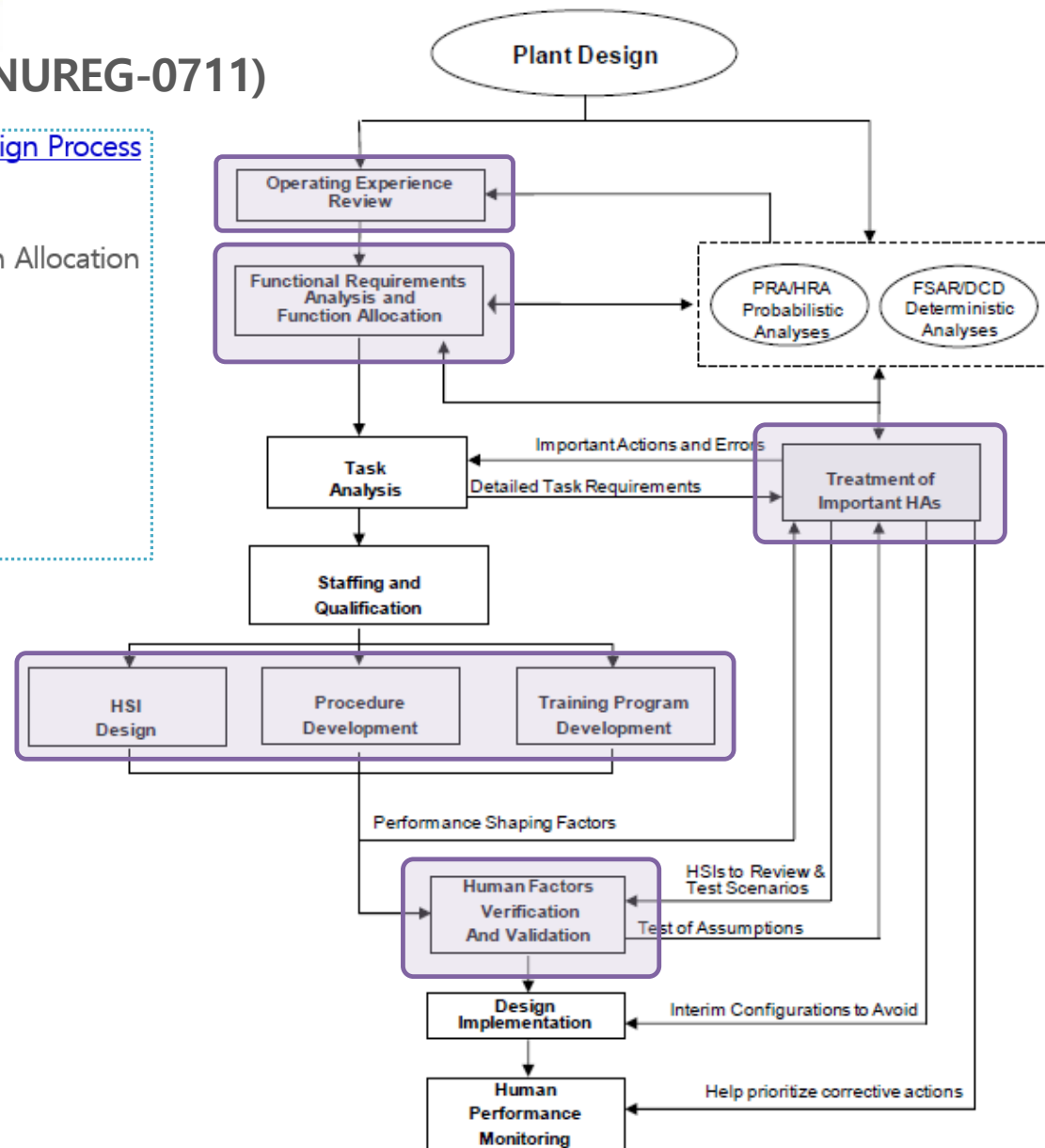
- B.1 Review Guidelines for the Information Display Design Process (정보표시 설계과정에 대한 검토 지침)
- B.2 Review Guidelines for the User Interface Interaction and Management Design Process (사용자 연계 상호작용과 관리에 대한 설계 과정의 검토지침)
- B.3 Review Guidelines for the Computer-Based Procedure System Design Process (컴퓨터 기반 절차 시스템에 대한 설계 과정의 검토지침)
- B.4 Review Guidelines for the Automation System Design Process (자동화 시스템 설계과정의 검토지침)
 - B.4.1 Operating Experience Review (운전경험 검토)
 - B.4.2 Functional Requirements Analysis and Function Allocation (기능요건분석 및 기능할당)
 - B.4.3 Treatment of Important Human Actions (중요 인적행위의 관리)
 - B.4.4 Human-System Interface Design (인간시스템연계 설계)
 - B.4.5 Procedure Development (절차서 개발)
 - B.4.6 Training Program Development (교육훈련 프로그램 개발)
 - B.4.7 Human Factors Verification and Validation (인적요소 확인 및 검증)
- B.5 Review Guidance for Degraded HSI and I&C Conditions Design Process (HSI와 I&C 기능이 저하된 상태에 대한 설계과정의 검토지침)

인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ HFE Program Review Model (NUREG-0711)

■ B.4 Review Guidelines for the Automation System Design Process

- B.4.1 Operating Experience Review
- B.4.2 Functional Requirements Analysis and Function Allocation
- B.4.3 Treatment of Important Human Actions
- B.4.4 Human-System Interface Design
- B.4.5 Procedure Development
- B.4.6 Training Program Development
- B.4.7 Human Factors Verification and Validation



인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ NUREG-0700, “Appendix B.4 Review Guidelines for the Automation System Design Process” 주요 내용

■ B.4.4 Human-System Interface Design (인간-시스템연계 설계)

✓ 인간-자동화 상호작용(Human-Automation Interaction)에 대한 일반 원칙

- 1) 자동화의 목적 정의
- 2) 권한의 중심 확립: 운영자가 자동화 담당 및 제어
- 3) 인간-기계 팀의 수행도를 최적화: 사용자가 수동적 감시가 아닌, 능동적 감시/제어에 관여하도록 설계
- 4) 자동화 이해: 자동화 능력/한계/목표를 명확히 이해, 자동화 조치 예측 가능해야 함.
- 5) 자동화 신뢰: 신뢰를 통해 (1) 자동화 의존 가능 상황, (2) 추가 감독이 필요한 상황, (3) 자동화가 적절하지 않은 상황을 이해해야 함.
- 6) 상황인식 유지: 자동화 목표, 현재/진척 상황 등 감시, 상황인식을 유지하기 위한 충분한 정보를 제공해야 함.
- 7) 상호작용과 제어 지원: 운영자는 목표 달성을 위해 자동화의 방향을 바꾸거나, 자동화를 무효화 하고 전체/부분에 대한 수동제어를 담당할 수 있어야 함.
- 8) 작업량 최소: 자동화 구성/감시/통신/지휘를 위한 최소한 작업량이 요구되어야 함.
- 9) 고장 관리: 자동화 오류 탐지, 잠재적 오류 상황에 대한 인적오류 최소화 필요

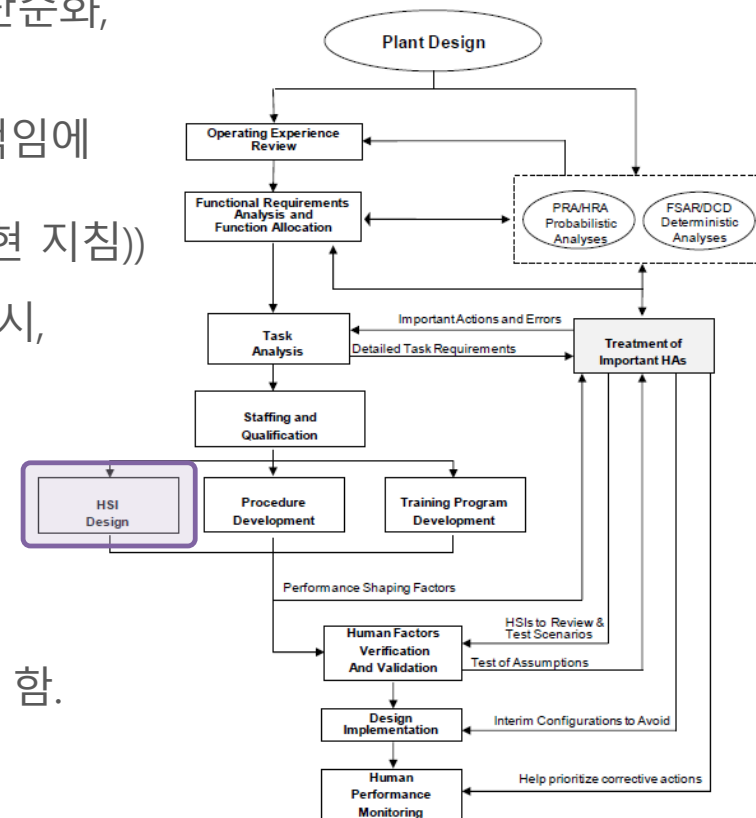
인간 시스템 연계 설계 지침 검토

❖ NUREG-0700, "Appendix B.4 Review Guidelines for the Automation System Design Process" 주요 내용

■ B.4.4 Human-System Interface Design (인간-시스템연계 설계)

✓ 인간-시스템연계 설계 시 고려사항

- **자동화의 상세설계:** 복잡도 최소화, 자동화 과정의 단순화, 모드의 수 최소화, 자동화의 수준 선택
- **HSI 설계요건:** 자동화 상호작용 시 운영자의 역할/책임에 대한 HSI 요건 분석이 수행되어야 함.
(NUREG-0711(설계과정 검토), NUREG-0700(설계구현 지침))
- **팀 수행도에 대한 자동화의 영향 결정:** 자동화 도입 시, 팀의 조화에 부정적인 영향 가능성 고려해야 함.
- **타 기능과의 상호작용 평가:** 새로운 자동화 설계 시, 다른 도구, 계통기능, 직무와의 가능한 상호작용이 평가되어야 함.
- **정상/고장모드의 시험:** 정상모드 및 고장모드, 기능저하 상태(degraded condition)에서 시험되어야 함.



Thank You

