

한국원자력학회2024춘계
워크샵 H (장기 가동원전의 계속운전 추진현황 및 안전성 제고)

인간과 시스템 연계(HSI) 분석을 포함한 인적요소 평가

(주)미래와도전
이용석

CONTENTS

- 1 인적요소와 인간-시스템 연계
- 2 PSR 인간-시스템 연계 평가
- 3 계속운전 PSR 인간-시스템 연계 평가
경험

1

인적요소와 인간-시스템 연계

IAEA, SSG-25 문서의 인적요소(Human Factor)와 인간-시스템연계(HSI)

Safety factors relating to the plant

- (1) Plant design;
- (2) Actual condition of structures, systems and components (SSCs) important to safety;
- (3) Equipment qualification;
- (4) Ageing.

Safety factors relating to safety analysis

- (5) Deterministic safety analysis;
- (6) Probabilistic safety assessment;
- (7) Hazard analysis.

Safety factors relating to performance and feedback of experience

- (8) Safety performance;
- (9) Use of experience from other plants and research findings.

Safety factors relating to management

- (10) Organization, the management system and safety culture;
- (11) Procedures;
- (12) Human factors; 인적요소
- (13) Emergency planning.

Safety factors relating to the environment

- (14) Radiological impact on the environment.

Safety factor 12: Human factors

5.129. The review of human factors should consider the procedures and processes in place at the nuclear power plant to ensure the following:

- Adequate staffing levels exist for operating the plant, with due recognition given to absences, shift working and restrictions on overtime;
- Qualified staff are available on duty at all times;
- Adequate programmes are in place for initial training, refresher training and upgrading training, including the use of simulators;
- Operator actions needed for safe operation have been assessed to confirm that assumptions and claims made in safety analyses (for example, PSA, deterministic safety analysis and hazard analysis) are valid;
- Human factors in maintenance are assessed to promote error-free execution of work;
- Adequate competence requirements exist for operating, maintenance, technical and managerial staff;
- Staff selection methods (for example, testing for aptitudes, knowledge and skills) are systematic and validated;
- Appropriate fitness for duty guidelines exist relating to hours, types and patterns of work, good health and substance abuse;
- Policies exist for maintaining the know-how of staff and for ensuring adequate succession management in accordance with good practices;
- Adequate facilities and programmes are available for staff training.

5.130. The following aspects of the human-machine interface should also be reviewed:

- Design of the control room and other workstations relevant to safety;
- Human information requirements and workloads;
- Clarity and achievability of procedures.

1 인적요소와 인간-시스템 연계

국내 PSR 법령과 SSG-25 비교

▶ 원자력안전법 시행규칙 제20조(주기적

안전성평가의 세부내용)

12. 인적 요소에 관한 사항

가. 교대근무 및 초과근무 제한을 포함한
직원관리수준

나. 자격이 있는 직원이 상시 임무수행을
수행하는지의 여부

다. 모의제어반의 사용을 포함한 초기 재교육
및 능력향상을 위한 훈련계획

라. 인적 정보요건과 업무량에 대한 분석

마. 인간과 기계의 연계체제 분석

Safety factor 12: Human factors

5.129. The review of human factors should consider the procedures and processes in place at the nuclear power plant to ensure the following:

- 가 — Adequate staffing levels exist for operating the plant, with due recognition given to absences, shift working and restrictions on overtime;
- 나 — Qualified staff are available on duty at all times;
- 다 — Adequate programmes are in place for initial training, refresher training and upgrading training, including the use of simulators;
 - Operator actions needed for safe operation have been assessed to confirm that assumptions and claims made in safety analyses (for example, PSA, deterministic safety analysis and hazard analysis) are valid;
 - Human factors in maintenance are assessed to promote error-free execution of work;
- 나 — Adequate competence requirements exist for operating, maintenance, technical and managerial staff;
- 나 — Staff selection methods (for example, testing for aptitudes, knowledge and skills) are systematic and validated;
- 가 — Appropriate fitness for duty guidelines exist relating to hours, types and patterns of work, good health and substance abuse;
 - Policies exist for maintaining the know-how of staff and for ensuring adequate succession management in accordance with good practices;
- 다 — Adequate facilities and programmes are available for staff training.

5.130. The following aspects of the human-machine interface should also be reviewed:

- 마 — Design of the control room and other workstations relevant to safety;
- 라 — Human information requirements and workloads;
 - Clarity and achievability of procedures.

1 인적요소와 인간-시스템 연계

캐나다 PSR 사례 (Pickering 원전) – Human Factors (1/3)

2.0 SCOPE OF REVIEW

2.1 Review Task Assessments

The Pickering PSR2 Safety Factor 12 Review Tasks are defined in Reference [1]. Details of the derivation of these Review Tasks from CNSC REGDOC-2.3.3 [2] and IAEA SSG-25 [3] are shown in Reference [5]. The Safety Factor 12 Review Tasks are:

- 1) Confirm that there are procedures to ensure that a minimum number of qualified staff, appropriate to the operating state of the plant, is available at all times.
- 2) Confirm that adequate staff training facilities, training staff and training programs exist.
- 3) Confirm that the method of selecting staff for new positions and for promotions involves systematic and validated staff selection methods and a method for succession planning.
- 4) Confirm that there are appropriate programs for initial, refresher, and upgrade training. For operating staff, this should include the use of simulators.
- 5) Establish that there is training in safety culture, including for management staff, that includes work supervision practices and internal communication practices and expectations.
- 6) Confirm there are fitness for duty guidelines relating to hours of work, health and substance abuse.

1 인적요소와 인간-시스템 연계

FNC Technology Co., Ltd.

캐나다 PSR 사례 (Pickering 원전) – Human Factors (2/3)

- 7) Confirm that the human-machine interface is considered in the design of the control room and other workstations, that analysis of human information requirements and task workload is performed, and that there is linkage to the Probabilistic Safety Assessment, Deterministic Safety Analyses and Hazard Analysis. This review should include a discussion of how guidance such as U.S. NRC NUREG-0700 Revision 2, "Human-System Interface Design Review Guidelines" [6], and NUREG-0711 Revision 2, "Human Factors Engineering Program Review Model" [7], identified in CNSC REGDOC-2.5.2 are relevant to the design of Pickering Units 1,4 and Units 5-8. (Note: Review Task #7 is addressed in the Plant Design Safety Factor report.)
- 8) Confirm the style and clarity of procedures provides an appropriate level of detailed guidance for staff through a review of plant events identifying inadequate procedures as a contributing cause.

캐나다 PSR 사례 (Pickering 원전) – Human Factors (3/3)

4.1.1 Review Task #1: Procedures to Ensure Minimum Number of Qualified Staff

Confirm that there are procedures to ensure that a minimum number of qualified staff, appropriate to the operating state of the plant, is available at all times.

P-INS-09100-00003, "Pickering Minimum Shift Complement" [14] is the procedure that defines the Minimum Shift Complement (MSC) staffing requirements to ensure safe conditions are maintained during normal operations along with the capability to be able to respond to all station emergencies. Per P-INS-09100-00003 [14], MSC is the minimum number of qualified workers who shall be present at all times to ensure the safe operation of the Pickering facility, respond to all credible events, and to ensure adequate emergency response capability for the most resource intensive conditions. P-INS-09100-00003 [14] is written to comply with CNSC guidelines G-323, "Ensuring the Presence of Sufficient Qualified Staff at Class I Nuclear Facilities – Minimum Staff Complement" and G-278, "Human Factors Verification and Validation Plans".

The MSC for the Operations Work Group (Shift Management Team and Operators), Emergency Response Team (Emergency Response Management, Maintenance, Chemistry, Stores), and the Emergency Response Organization (ERO) (Emergency Response Management, Shift Management, Operations, Maintenance, Fuel Handling, Plant and Resource Coordinators) is defined in Tables 1-1, 1-2, and 1-3 of P-INS-09100-00003 [14], respectively.

...

Conclusion:

The conclusion of this Review Task assessment is that OPG has programs and procedures in place to ensure that minimum staffing levels of qualified staff are available for all modes of operation. The intent of Review Task #1 is met and therefore Pickering NGS is compliant.

2

PSR 인간-시스템 연계 평가

2 PSR 인간-시스템 연계 평가

인간공학(Human Factors Engineering) 관련 규제지침

➤ KINS 규제지침

: 신규원전 설계에 적용, 가동원전의 경우 설계변경 시 적용

→ 가동원전 설계변경 시, 현행 인간공학 기준에 따라 평가

- 15.1 인간공학 계획 (KINS/RG-N15.01, Rev.2, 2016)
 - ✓ NUREG-0711(Rev.3) 적용
- 15.2 인간공학 분석 (KINS/RG-N15.02, Rev.2, 2016)
 - ✓ NUREG-0711(Rev.3) 적용
- 15.3 인간공학 설계 (KINS/RG-N15.03, Rev.2, 2016)
 - ✓ NUREG-0700(Rev.2), NUREG-0711(Rev.3) 적용
- 15.4 인간공학 확인 및 검증 (KINS/RG-N15.04, Rev.2, 2016)
 - ✓ NUREG-0700(Rev.2), NUREG-0711(Rev.3) 적용
- 15.5 설계이행 및 인적수행도 감시 (KINS/RG-N15.05, Rev.2, 2016)
 - ✓ NUREG-0711(Rev.3) 적용
- 15.6 설계기준초과사고 및 중대사고 관련 인간공학 적용 (KINS/RG-N15.06, Rev.0, 2017)
 - ✓ NUREG-0711(Rev.3) 적용

2 PSR 인간-시스템 연계 평가

FNC Technology Co., Ltd.

계속운전 신청 원전에 대한 HSI 분야 규제방향

➤ (규제방향1) NUREG-0700 & NUREG-0711 Revision 3

- 고리2,3,4호기, 한빛1,2호기, 한울1,2호기는 건설당시 인간공학이 적용되지 않았으나, 계속운전은 최신기술기준을 준용한다는 원칙 하에 NUREG-0700(Rev.3) 및 NUREG0711(Rev.3) 활용

➤ (규제방향2) '일관성' 원칙에 부합하는 HSI 설비 유지, 관리

- 가동중 수행한 인간-시스템연계설계변경((예) 지시계, 기록계, 제어기 등 교체)과 기존설비 및 기기의 일관성 유지 여부를 평가하고 개선필요 시 설비개선

➤ (규제방향3) 교육·훈련용 시뮬레이터 설비 적합성

- ANSI/ANS-3.5에 부합하도록 HSI 개선 등 계속운전 심사결과를 최종반영한 교육·훈련용 시뮬레이터의 물리적·기능적 충실도 확보

➤ (규제방향4) 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제45조 부합성

- 건설당시 인간공학 적용대상이 아닌 발전소라 할지라도 『원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제45조 (인적요소)』에 어떻게 부합할 것인지를 고민

* 2023 원자력안전규제정보회의, KINS 발표자료 참조

2 PSR 인간-시스템 연계 평가

FNC Technology Co., Ltd.

가동 원자로 시설 PSR에 대한 HSI 분야 규제방향

▶ (규제방향1) 평가자 전문성

- PSR에 참여한 인간공학, 계측제어, 운전분야의 전문가는 NUREG-0711에 명시된 자격요건(Minimum Qualification & Typical Contributions)에 부합함을 확인

▶ (규제방향2) HSI 평가 대상

- 주제어실, 원격정지실, 기술지원실, 비상운전설비 및 안전등급 현장제어반에 설치된 설비((예) 안전변수지시계통, 경보계통, 정보계통, 제어계통, 제어실배치, 운전환경 등)를 모두 포함

* 2023 원자력안전규제정보회의, KINS 발표자료 참조

2 PSR 인간-시스템 연계 평가

캐나다 PSR 사례 (Pickering 원전) – HSI (1/4)

4.1.5 Review Task #5: Design for Human-Machine Interfaces

Human Factors Engineering (HFE) evaluates the role of humans in human-machine systems and how systems can be designed to work well with people, particularly in terms of safety and efficiency. Pickering NGS was originally designed to the standards of the day and designers relied on best design practices in addition to incorporation of operations and maintenance experience (e.g., for Pickering Units 1-4, experience was

- Pickering 원전 1~4호기 (A) : 인간공학 설계 미적용 원전
- Pickering 원전 5~8호기 (B) : 인간공학 설계 적용 원전

Since 2000, HFE has been explicitly considered for all design changes at Pickering NGS, resulting in continuous improvements to the human-machine interfaces

- 2000년부터 모든 설계변경에 대한 인간공학 적용

When required, Human Factors Engineering Program Plans (HFEPP) are prepared in accordance with N-MAN-06700-10002, "Guide for OPG Human Factors Engineering Process" [54], which describes OPG's HFE processes and approach to the conduct of HFE activities and OPG's expectations for performing HFE activities. Per Section 2.2.1 of N-MAN-06700-10002 [54], the HFEPP meets the requirements of the following CNSC guides:

- G-276, "Human Factors Engineering Program Plans" [55]; and
- G-278, "Human Factors Verification and Validation Plans" [56].
- 발전소에서 인간공학프로그램(HFEPP) 운영

2 PSR 인간-시스템 연계 평가

캐나다 PSR 사례 (Pickering 원전) – HSI (2/4)

4.1.5 Review Task #5: Design for Human-Machine Interfaces

throughout the plant. In terms of design changes to the control room and other work stations, the following governance exists¹²:

Pickering Units 1,4

- 주제어반 등 설계변경 시 분야별 세부 인간공학 지침 적용

- 44RS-06700-HFP-004, "Human Factors Design Guideline: Maintenance, Inspection, and Testing [45]: This design guide addresses the human factors aspects of equipment and components that field personnel maintain, test or inspect.
- 44RS-66000-HFP-001, "Human Factors Minor Change Design Guideline: Pickering 'A' Main Control Room Unit Panels and Field Control Panels" [46]: This design guide provides Human Factors guidance for detailed design of human-system interface changes to panel-mounted operator instrumentation on main control room unit panels and field control panels.
- 44RS-66000-HFP-002, "Human Factors Minor Change Design Guideline: Pickering 'A' CRT-Based Displays" [47]: This design guide provides basic display guidelines to be used in making minor modifications to Cathode Ray Tube (CRT) based displays within the main control room at Pickering Units 1,4.
- NA44-MAN-60300-00001, "Annunciation Design Guide Pickering A, Units 1 and 4" [48]: This manual provides human-system interface design guidance to assist designers, human factor specialists and system engineers in implementing changes involving annunciation, which includes local field annunciation and main control room annunciation.

2 PSR 인간-시스템 연계 평가

캐나다 PSR 사례 (Pickering 원전) – HSI (3/4)

4.1.5 Review Task #5: Design for Human-Machine Interfaces

CNSC REGDOC-2.5.2, "Design of Reactor Facilities: Nuclear Power Plants" [57] refers to U.S. NRC NUREG-0711, "Human Factors Engineering Program Review Model" [58] in terms of guidance for the development of HFEPPs. Per Section 2.2.1 of N-MAN-06700-10002 [54], the HFEPP is expected to meet the intent of NUREG-0711 [58] (Section 2.4 Review Criteria). Also, Figure 2 of N-MAN-06700-10002 [54] identifies the NUREG-0711 [58] HFE Program Elements (i.e., Planning and Analysis, Design, Verification and Validation, Implementation and Operation). CNSC REGDOC-2.5.2 [57] also refers to U.S. NRC NUREG-0700, "Human-System Interface Design Review Guidelines" [59] for guidance relating to the design of human-system interfaces. As part of the Pickering B ISR, OPG agreed to complete a high level review against NUREG-0700 [59] if refurbishment was pursued [60]. This is not a gap for PSR2 since refurbishment is not being considered as part of Pickering NGS operation beyond 2020. As discussed earlier, Pickering NGS was originally designed to the standards and best design practices of the day. Many years of operation of Pickering NGS have demonstrated that the plant layout and facilities provide a safe working environment. Improvements based on operation and maintenance experience have been

- Pickering B 원전은 계속운전 설비개선(refurbishment) 관련 NUREG-0700에 따른 인간공학평가(high level review) 이행 동의
- 가동원전 PSR의 경우, 설계변경(design change) 시 인간공학 적용여부를 확인하는 수준의 평가 (별도의 NUREG-0700 기준 주제어반 등 인간공학 평가는 확인되지 않음)

2 PSR 인간-시스템 연계 평가

캐나다 PSR 사례 (Pickering 원전) – HSI (4/4)

4.1.5 Review Task #5: Design for Human-Machine Interfaces

In terms of analysis of human information requirements and task workload, Task Analysis is performed as part of the HFEPP for modifications with a significant HFE impact. Task Analysis identifies the specific tasks needed to accomplish human actions and the information, control and task support required to complete those tasks. The following two reports provide recent examples of modifications for which Task Analysis has been performed:

- NA44-REP-41170-00006, "Human Factors Engineering Summary Report – Pickering NGS Units 1,4 Turbine Governor System Upgrade" [61]; and
 - NK30-REP-41220-10002, "Human Factors Engineering Summary Report – PB Main Generator Automatic Voltage Regulator (AVR) Replacement Project" [62].
- ‘인적정보요건과 업무량 평가’는 HSI 평가에 포함 (중요 설계변경 시 인간공학 평가에 직무분석(task analysis)이 포함되었는지 여부 확인)

3

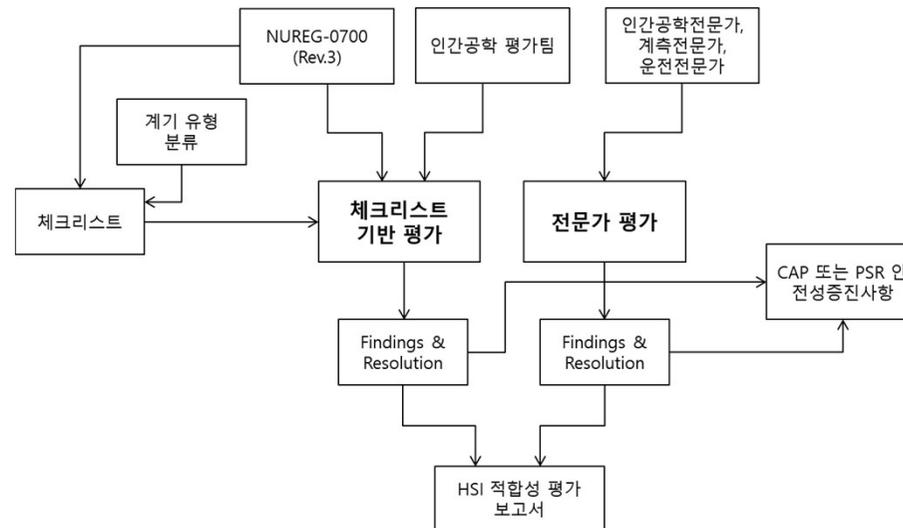
계속운전 PSR 인간-시스템 연계 평가 경험

3 계속운전 PSR 인간-시스템 연계 평가 경험



평가 개요 (1/2)

- [평가 목적] 평가 대상 설비에 대한 인간공학적 관점의 개선필요사항을 도출하고 개선방안을 제시
 - ✓ 운전성 향상 및 인적오류 최소화
- [평가 절차] '체크리스트 평가'와 '전문가 평가'로 구성
 - ✓ 체크리스트 평가 : NUREG-0700(Rev.3) 기반 체크리스트를 사용한 평가
 - ✓ 전문가 평가 : 전문가 개인의 지식 및 경험을 토대로 주관적 판단 (체크리스트 평가 보완 역할)



[평가 흐름도]

3 계속운전 PSR 인간-시스템 연계 평가 경험



평가 개요 (2/2)

- ▶ [평가 원칙] 계속운전 신청 원전은 건설당시 인간공학 설계개념이 적용되지 않았으므로, 최신 인간공학 설계기준을 일관성 있게 적용하기에는 한계가 있음.
 - ✓ 따라서, 기존 설계의 일관성을 우선으로 평가하고, 관련 인간공학 기준으로 NUREG-0700(Rev.3)을 활용.

OO호기 고유 설계 특성 예시

제어반 배치

- 좌측에 2차측 제어반(TO), 우측에 1차측 제어반(RO) 위치

계통 구분

- 계통 경계선 구분 없음 (개별 제어기 Bezel 색상으로 계통 구분)
- 유체 흐름이 아닌 계통별 계기 배치

상태등, 운전상태표시등

- 거울형(Mirror) 배치 설계

명판 배치

- 지시계 하단, 제어기 상단 배치

3 계속운전 PSR 인간-시스템 연계 평가 경험



평가 방법 (1/2)

▶ [평가용 체크리스트] 세부 계기유형별 (경보기, 제어기, 지시기, 기록계 등) 적용

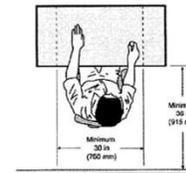
- ✓ NUREG-0700(Rev.3) 평가 항목 활용
- ✓ 평가결과 : Yes(평가항목 만족), No(평가항목 불만족), N/A(적용대상 아님)

분야	체크리스트명	
1. 제어실 및 부대시설 배치	1. 제어실 배치 HSI 체크리스트	
2. 환경 조건	2. 환경 조건 HSI 체크리스트	
3. 제어반 구조	3. 제어반 구조 HSI 체크리스트	
4. 계측기형식	경보기	4.1 경보기 HSI 체크리스트
	제어기	4.2 제어기(공통) HSI 체크리스트
		4.2.1 제어기_원형 푸쉬버튼 HSI 체크리스트
		4.2.2 제어기_명각 푸쉬버튼 HSI 체크리스트
		4.2.3 제어기_슬라이드 스위치 HSI 체크리스트
		4.2.4 제어기_토글 스위치 HSI 체크리스트
		4.2.5 제어기_로커 스위치 HSI 체크리스트
		4.2.6 제어기_J형 제어기 HSI 체크리스트
		4.2.7 제어기_열쇠 제어기 HSI 체크리스트
		4.2.8 제어기_조일 제어기 HSI 체크리스트
		4.2.9 제어기_쌍철 제어기 HSI 체크리스트
	4.2.10 제어기_회전선택 제어기 HSI 체크리스트	
	지시기	4.3 지시계(공통) HSI 체크리스트
		4.3.1 지시계_아날로그 HSI 체크리스트
4.3.2 지시계_지시등 HSI 체크리스트		
4.3.3 지시계_계수기 HSI 체크리스트		
4.3.4 지시계_디지털 HSI 체크리스트		
기록계	4.3.5 지시계_기록계 HSI 체크리스트 (아날로그)	
	4.3.4 지시계_디지털 HSI 체크리스트 (디지털)	
5. 제어반 및 계측기 배치	5. 계기 배치 HSI 체크리스트	
6. 컴퓨터 계통	5.1 명판 HSI 체크리스트	
	6. 컴퓨터 표시 HSI 체크리스트	
7. 통신 계통	6.1 SPDS HSI 체크리스트	
	7. 통신 HSI 체크리스트	

[체크리스트 목록]

1. 제어실 배치 HSI 체크리스트

번호	분류	세부항목	Yes	No	N/A	비고	(NUREG-0700, Rev.3)
1	제어실 배치	주제어실의 접근 및 이동은 인가된 자에 한해 지정된 구역 내로 제한해야 한다.					12.1.1.1-3
2	제어실 배치	안전원 책상과 콘솔은 사용자가 기본 작업 영역에서 수행되는 작업에 대해 주제어실의 모든 정보 및 디스플레이를 모두 볼 수 있도록 배치되어야 한다.					12.1.1.2-3
3	제어실 배치	안전원 책상과 콘솔은 주요 작업 영역의 어느 지점에서나 기본 작업 영역에 있는 사용자의 음성 통신 및 관찰을 용이하게 할 수 있도록 배치되어야 한다.					12.1.1.2-5
4	제어실 배치	안전원 책상과 콘솔은 제어실 전체에서 자유롭게 이동할 수 있도록 배치되어야 한다.(사용자는 넘어질 위험, 파달 캐비닛 또는 보관 액, 유지 관리와 같은 장애물없이 접근할 수 있어야 한다.)					12.1.1.2-6
5	제어실 배치	안전원이 의자를 자유롭게 사용할 수 있도록 사용자와 사용자 뒤의 표면 또는 고정 물체 사이에 적절한 공간이 있어야 한다.					12.1.1.2-7



[체크리스트 예시]

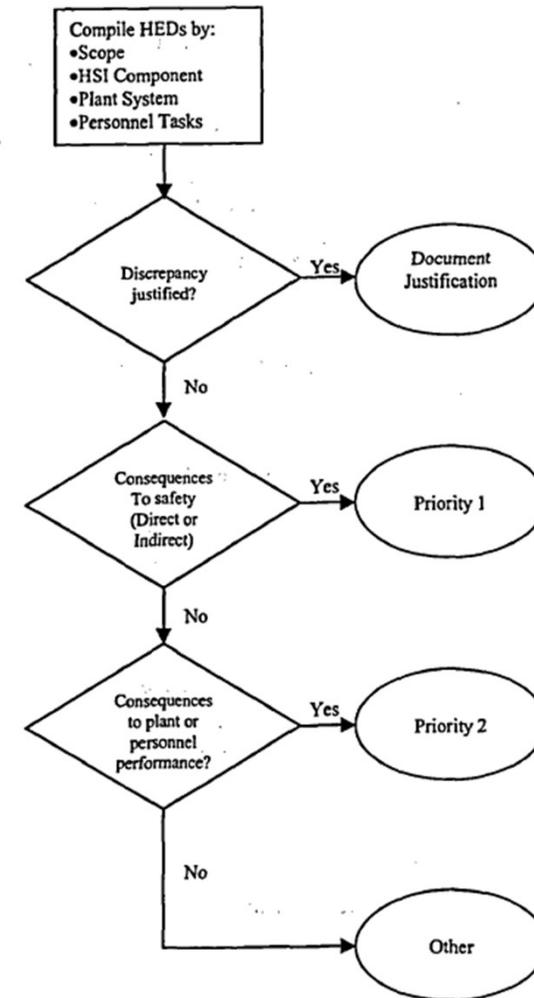
3 계속운전 PSR 인간-시스템 연계 평가 경험

평가 방법 (2/2)

> [개선범위 선정] NUREG-0711, 11.4.4절

평가기준 참고

- ✓ 개선 대상에서 제외할 HED : 결함의 정당화가 가능한 항목 (Discrepancy Justified)
- ✓ 우선 순위 1 HED : 안전에 직간접적 또는 잠재적인 결말을 초래하는, 안전에 중대한 영향을 미치는 HED (Priority 1)
- ✓ 우선 순위 2 HED : 안전에 중대한 영향을 미치지 않지만, 발전소성능 또는 인적성능에 영향을 미치는 HED (Priority 2)
- ✓ 기타 HED : 위 3개 항목에 포함되지 않는 HED (Other)



3 계속운전 PSR 인간-시스템 연계 평가 경험



평가 결과

➤ 개선범위안(예시)

✓ 제어반

- 경보창 교체 (표준약어 사용, 글자크기, 글자 수 등 일관성)
- 명판 교체 (표준약어 사용, 글자크기, 글자 수 등 일관성, 안전/비안전 구분 등)
- 계기 교체 (디지털/아날로그 혼재, 동작/지시방향의 고정관념과의 불일치 등) 등

✓ 모의제어반

- 주제어반과의 일치성 확보
- 미설치된 시뮬레이터 (원격정지제어반 시뮬레이터) 설치 등

✓ 절차서 개선 등

➤ 인적오류 유발 최소화를 위하여, 일관성 확보에 중점을 두고 개선

- ✓ 개선에 따라 추가적인 인적오류가 발생하지 않도록, 설계변경 시 인간공학 평가 및 운전원 교육훈련 필요

THANK YOU



FNC TECHNOLOGY CO., LTD.

