

SMR 운전관련 국내 인간공학/인적수행도 현안

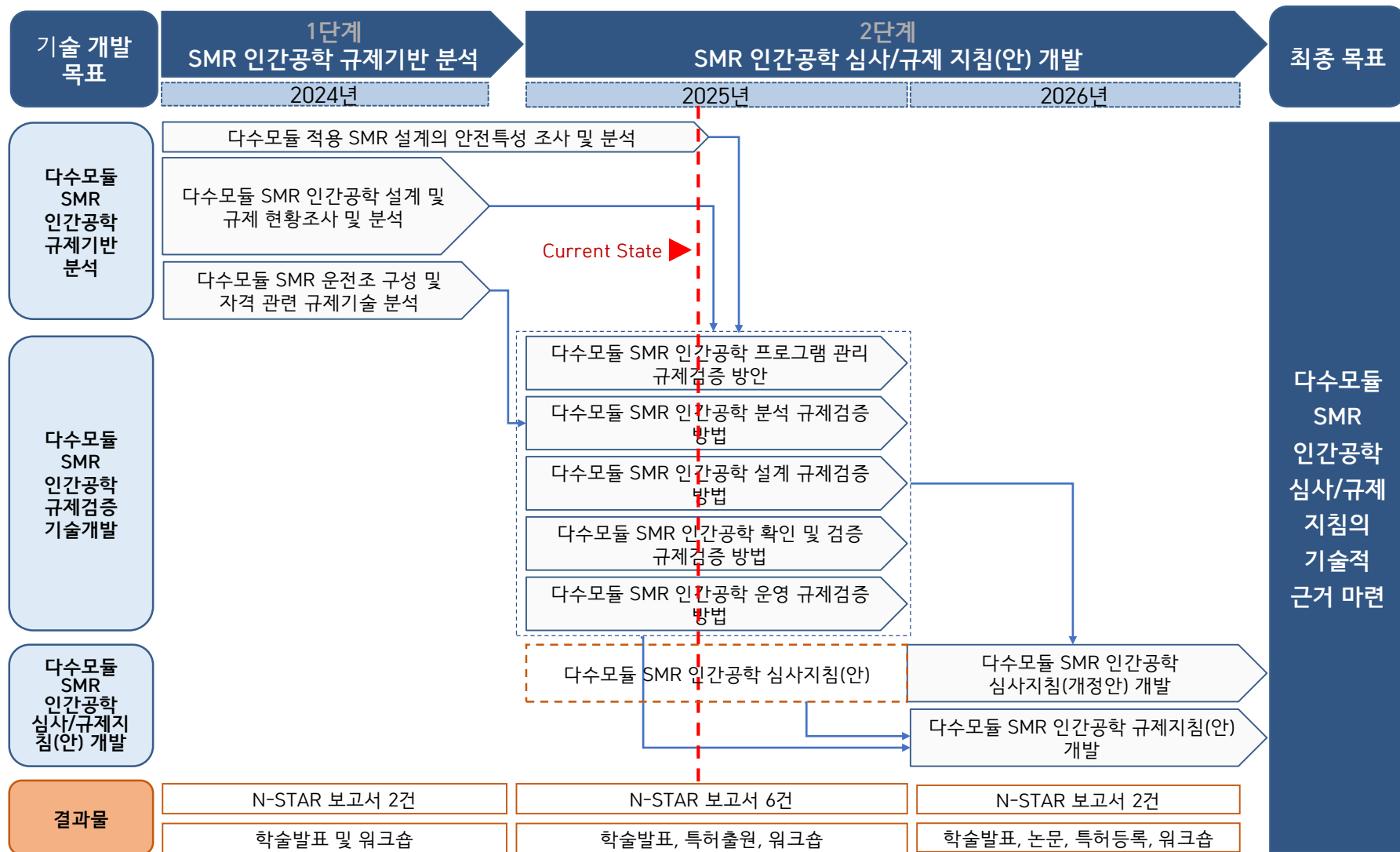
경수형 SMR 다수모듈 통합 운영 안전성평가 규제기반기술 개발 현황

김사길, 한국원자력연구원

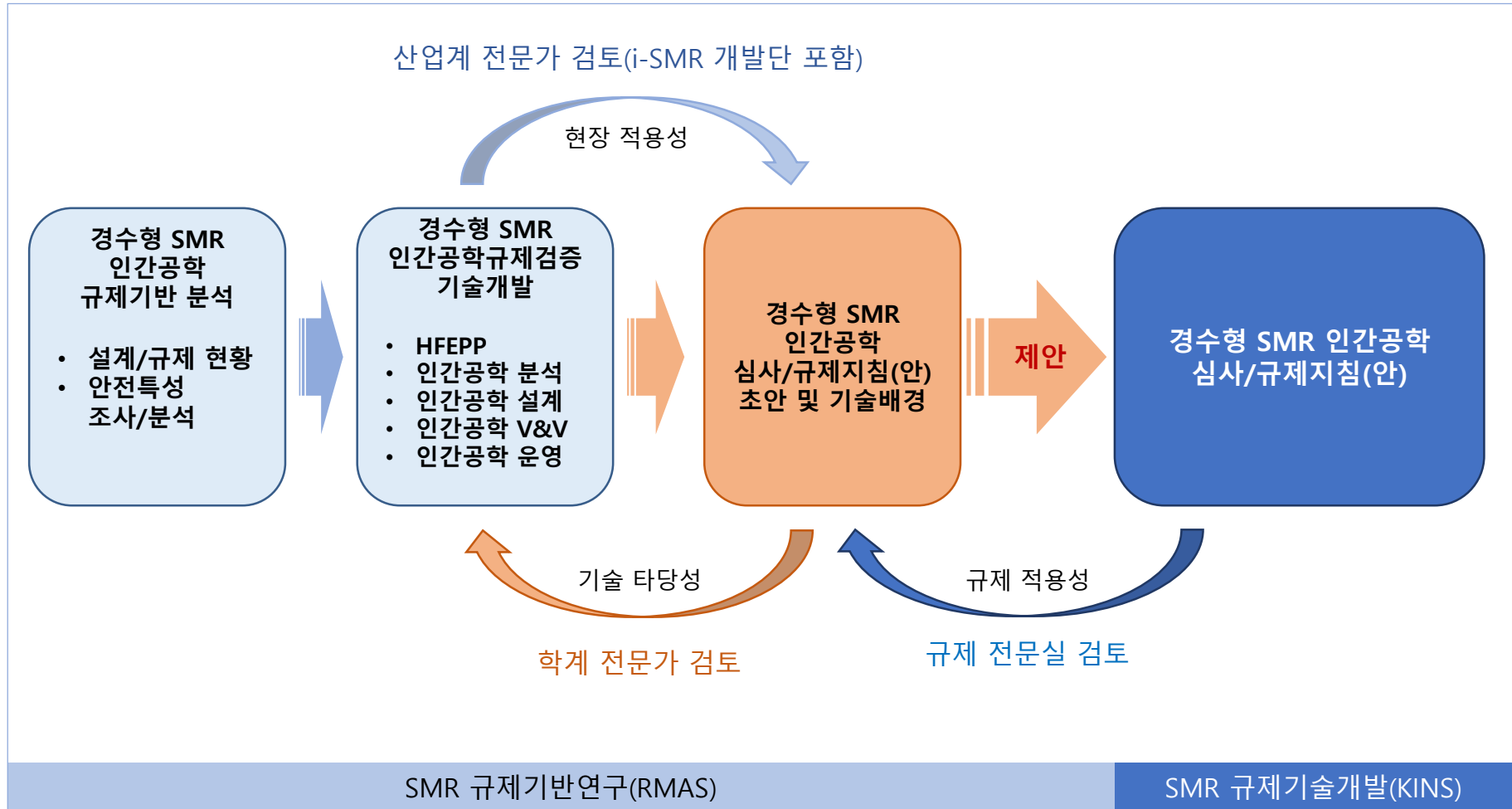
2025. 05. 21.



1. 마일스톤



2. 추진체계



3. 기본방향

❖ 보완 원칙(Principles Of Supplement; POS)

- ✓ **(POS 1)** 국내외에 개발되었거나 개발 중인 경수형 SMR의 주요 설계특성에 따른 안전특성이 인적수행도에 미치는 영향을 고려한다.
- ✓ **(POS 2)** 기존 인간공학 심사 및 규제 체계와 일관성을 유지한다.
- ✓ **(POS 3)** 국내 경수형 SMR 규제 경험을 반영하고 현장 적용성을 고려한다.
- ✓ **(POS 4)** 국내 혁신형 SMR(i-SMR)의 사전설계검토 결과를 고려한다.
- ✓ **(POS 5)** 기존 심사 및 규제 지침을 개정하는 방식이 아니라 별도의 보완적 심사 및 규제 지침(안)의 형태로 개발한다.

4. 연구현황 – 설계/안전특성 분석

❖ 다수모듈 SMR 설계특성 및 갭분석(1/2)

구분		대형원자로	다수모듈 SMR
안전특성	계통		
	원자로 보조계통	단일 원자로를 위한 집중형 보조계통	모듈별 독립 보조계통과 일부 다수모듈 공용 계통
		유지보수를 위한 단일 대규모 배관망과 다중 시스템	유지보수를 위한 다수의 소규모 배관망과 다수의 보조 기기
		단일 기기의 고장에 따른 발전소 전체의 가동중단	단일 모듈의 개별기기 고장에 대한 다른 모듈의 독립성
		드럼 타입의 증기발생기 – 안정적인 제어	헬리컬 타입의 증기발생기 – 2차계통 제어 난이도 증가
		붕산운전	무붕산운전 – 제어봉 운전으로 인한 핵연료 건전성 악화 가능성
	공학적 안전설비	능동형 안전계통 – 교류전력 및 외부동력 필요	피동형 안전계통 – 교류전력 및 외부동력 필요 없음
		비상노심냉각계통의 복잡성 – 운전원 조치 필요	비상노심냉각계통의 단순화 – 운전원 조치 필요 없음
		대형 격납건물을 적용한 방사성 물질 유출 방지	본질적 안전설계 및 개별 격납용기로 방사성 물질 유출 저감

4. 연구현황 – 설계/안전특성 분석

❖ 다수모듈 SMR 설계특성 및 갭분석(2/2)

구분		대형원자로	다수모듈 SMR
운전특성	계통		
	N/A	단일제어실에서 단일 원자로 운전	통합제어실에서 다수의 모듈원자로 운전
		낮은 자동화 수준	높은 자동화 수준
		개별 계통을 이용한 단일 원자로 운전 수행	모듈별 독립 보조계통과 일부 다수모듈 공용 계통으로 다수모듈 운전 수행
		원자로냉각재펌프를 통한 가열운전 수행	가열운전 시, 별도의 가열계통 필요 및 다수 모듈 공용 계통의 필요 가능성
		제어봉 인출 및 봉산농도 조절을 통한 기동 운전 수행	제어봉 인출을 통한 기동운전 수행 – 개별 모듈의 노심 반응도 제어
		전출력운전	높은 빈도의 부하추종운전
		단일 원자로 상시 가열 및 냉각 운전 수행 가능	다수모듈 동시 가열 및 냉각 운전 수행 불가(예상)
		비상 냉각 운전 시 적절한 운전원 조치가 필요	설계기준사고 기준으로 운전원 조치가 72시간 동안 필요 없음

4. 연구현황 – 인적수행도 현안 도출

- ❖ **다수모듈 SMR 설계특성 갭분석에 따른 인적수행도 현안 확인 및 도출**
 - 경수형 SMR 계통의 안전특성 및 운전특성 갭분석을 바탕으로 인간공학 측면 고려사항/현안 여부 판단
 - 인간공학 활동 요소별 잠재적 인적수행도 현안 도출
 - ✓ SMR 안전특성 및 설계특성에 따라 인간공학 규제관점에서 검토가 필요한 현안 도출
 - ✓ 도출된 현안은 인간공학 활동 요소별 검토기준이 아닌 경수형 SMR에 특정한 검토기준 마련에 고려가 필요한 현안
 - ✓ 경수형 SMR 인간공학 규제입장 구체화 및 규제 방법론 개발에 활용
- ❖ **인적수행도 현안 확인 및 도출 방법론**
 - IAEA의 TECDOC-2003, 규제자포럼(RF) 보고서 또는 NUREG/CR-7202 등의 문헌 참조
 - ✓ 국외 규제기관의 경수형 SMR에 대한 인간공학 규제 고려사항/현안 확인
 - 인간공학 전문가 검토
 - ✓ 국내 i-SMR에 특정한 현안 여부 판단 및 도출

4. 연구현황 – 인적수행도 현안 도출

❖ 인적수행도 현안 예시

- SMR의 일반적인 설계특성에 따른 인간공학 활동 요소별 인적수행도 현안
 - 설계 및 운전 특성 기반
 - 94개의 잠재적 인적수행도 현안 도출

높은(향상된) 자동화 수준 (자동화)	- 기존 상용 원전 대비 높은 자동화 수준을 통해 정상운전 및 안전운전의 자동화 - 운전원에게 기능할당을 감소시켜 수동 운전원 조치를 줄이고 다수모듈 운전에 대한 직무부하 감소	FRA/FA	인허가 신청자의 인간공학 프로그램은 높은 자동화 수준과 관련된 인적수행도 현안을 어떻게 해결하였는가?
		TA	자동화 기능에 대한 운전원의 책임에 관하여 운전원 직무가 어떻게 식별되고 분석되었는가?
			높은 자동화 수준은 운전원의 직무를 지원하는가?
			높은 수준의 자동화 시스템은 운전원의 기능적인 상태에 어떤 영향을 미치는가?
		S&Q	높은 자동화 수준에 따라 운전원의 자격에 변화가 있는가?
			자동화 수준이 운전조작권 수에 영향을 미치는가?
		HSI Design	상대적으로 줄어든 수동 제어 행위와 늘어난 감시 행위에 따른 운전원의 수행도 저하를 최소화 하는가?
			HSI가 운전원의 자동화 시스템에 대한 지나친 신뢰를 유발하지 않는가?
			HSI는 자동화 계통과 상호작용하는 운전원의 직무 수행도를 지원하기 위해 어떻게 설계되었는가?
		HF V&V	자동화 수준과 관련하여 운전원 직무가 성공적인 수행도를 보장하기 위해 어떻게 검증되었는가?
			높은 자동화 수준과 관련된 인적수행도 고려사항이 해결되었는지 보장하기 위해 어떻게 검증되었는가?

<인적수행도 현안 도출 예시>

4. 연구현황 – 주요 인적수행도 현안(1/5)

❖ 모드인식 오류(Mode Confusion)

- 대형원전에서 모드인식 오류는 주로 자동/수동 모드 인식오류에 국한되나, 다수모듈 SMR의 경우 다음의 인식오류 가능성 고려해야 함
 - 원자로모듈별 이질적 운전모드 인식 오류
 - 자동화 모드(자동, 자동-수동 연계, 수동모드) 인식 오류
 - 인터페이스 모드(제어모드, 감시모드, 진단모드 등) 인식 오류



다수 모듈형 설계를 가진 발전소에서는 기능할당 및 직무분석시 운전원이 동시에 관리해야 하는 **원자로모듈의 수와 운전모드의 다양성**을 고려해야 하며, 여러 모듈에서 비정상 상황이 동시 발생할 경우의 누적 인지적 부담도 함께 평가되어야 함.

이러한 인지적 부담은 **모드인식 오류(Mode Confusion)**이나 **자동화 놀람(Automation Surprise)**으로 이어질 수 있으므로, 기능할당 및 직무분석 과정에서는 운전원이 높은 인지 요구 상황에서도 상황인식을 유지하고 각 모드에 적절한 결정을 내릴 수 있는 능력을 갖추고 있는지를 고려해야 함.

4. 연구현황 – 주요 인적수행도 현안(2/5)

❖ 자동화 놀람(Automation Surprise)

- 자동화 시스템의 현재 상태나 향후 동작을 예상하지 못해 놀라거나 혼란을 겪는 현상을 의미함. 사용자의 정신모형과 시스템 작동 간의 부정합성이 주요 원인으로 경수형 SMR의 경우 다음의 환경이 자동화 놀람 발생을 증가시킬 수 있음.
 - 다수모듈 운전, 이상상태 빈도 감소, 복잡한 자동화 로직 등
 - 시각적 정보가 과도하게 제시되어 정보의 우선순위 불명확
 - 자동화 시스템의 작동 상태 파악이 어려워 추론에 의지하는 경향이 높아지는 현상 등

다수모듈 정보가 하나의 디스플레이에 통합되는 경우, **정보 그룹핑과 시각적 구분**에 대한 요구(예: 동일한 유형의 변수라도 모듈 우선순위에 따라 시각적 강조 방식을 차별화하는 방식 등)가 HFE 설계 및 평가에 반영되어야 함.

높은 자동화 시스템에 대한 ISV 수행시, **Automation Surprise** 가능성을 평가 항목에 포함하여야 함. 예를 들어, "정보 우선순위 불명확으로 인해 운전자가 잘못된 판단을 할 위험 여부"를 점검 항목으로 명시해야 하며, 시나리오 기반 ISV에서 **의도적으로 정보 과부하 조건을 삽입**하여 운전원의 주의집중 실패 및 인지오류 여부를 평가하여야 함.

4. 연구현황 – 주요 인적수행도 현안(3/5)

❖ 직무부하 변동성(Taskload Fluctuations)

- 다수모듈 상호운전, 고수준 자동화 운전 등의 특성에 따라 운전원의 직무부하는 다음의 원인으로 인해 시간에 따라 변동할 가능성이 높음.
 - 다수모듈 다중 경보상황 발생
 - 자동-수동 상호작용 직무(예, Adaptive Automation Tasks) 증가
 - 다수모듈 이질적 운전모드의 지식기반 운전직무 증가 등



인간과 자동시스템에 기능을 할당할 때 자동시스템에 대한 **운전원의 주기적/적기 개입**을 고려하고, **지속적인 경계를 보장**하기 위한 운전전략을 수립해야 함.

특히, 다수모듈 동시 혹은 순차적 이벤트는 수동 개입이나 감시 및 의사결정 업무가 중첩되어 운전원에게 **과도한 직무부하가 순간적으로 발생할 우려**가 있는 경우, 해당 기능은 자동화로 재배치되거나 시스템 보조 기능을 통해 분산되어야 하며, 그 판단은 기능할당 및 직무분석, 인간 신뢰도 분석(HRA)의 결과에 근거하여 수행되어야 함.

4. 연구현황 – 주요 인적수행도 현안(4/5)

❖ 다수모듈 병렬 직무분석(Multi-module Parallel Task Analysis)

- 경수형 SMR과 같은 다수모듈 기반 발전소의 운전은 다음과 같은 모듈간 병렬적 운전 가능성이 높아 다수모듈 병렬 직무분석이 요구됨.
 - 다수모듈 동시 혹은 순차적 감시 및 제어 운전
 - 모듈간 직무 영향성을 고려한 에너지 밸런스 유지 운전
 - 모듈간 상호 의존성에 따른 조건 혹은 시간 기반 운전 등



직무분석은 직무수행에 요구되는 경보, 정보, 제어장치, 작업 지원 요소를 정의할 수 있을 정도로 충분히 구체적이어야 함. 다수모듈 운전 환경에서는 **부하의 지속 시간, 직무 간 시간 중첩, 판단 전환 빈도, 자원 충돌 가능성 등 복합적인 상황**을 함께 고려하여야 함. 또한 다수모듈 운전 환경에서는 **절차 간 시간 충돌, 우선순위 판단 지연, 흐름 간섭, 조건 중속 충돌 등의 위험**이 발생할 수 있으므로, 이러한 관계도 함께 식별되어야 함.

Time Overlay, Task Newtwork Model 등 방법론을 활용하여 다수모듈 간의 **병렬 직무의 상호 의존 관계를 식별**하여야 함.

4. 연구현황 – 주요 인적수행도 현안(5/5)

❖ 직무전환 부담(Task Switching Cost)

- 직무전환은 운전원이 하나의 직무에서 다른 직무로 주의를 전환하고 인지적 자원과 행동을 재조정하는 과정임. 정상상황에서는 점검, 유지보수, 순차적 감시와 같이 일정한 흐름 속에서 이루어지지만, 비정상 상황에서는 경보 발생이나 비상 대응 등 다음의 급박한 조건에서 신속하고 복잡한 전환이 요구될 수 있음.
 - 모드간 전환
 - 운전상태 전환
 - 제어상태 전환 등



직무분석 시, 운전원에게 높은 직무부하가 예상되는 경우, 예를 들어 시간 여유가 거의 없거나 발전소 감시에 필요한 주의력을 저해할 수 있는 행정 업무, **직무전환 부담** 등을 포함하여야 함.

모드 간 전환, 운전 상태 전환, 제어 수준 전환이 단독 또는 조합되어 발생하는 직무전환은 **기능요건분석 단계에서 식별**되어야 함. 또한 다수모듈 운전환경에서는 직무전환이 빈번하게 발생하므로, 전환 관련 요소들도 **PSF로 명확히 식별하고 평가**하여야 함.

4. 연구현황 – 심사지침 보완 및 검토

❖ 경수로형 안전심사지침 18장 인간공학의 보완 및 검토

- 18.1절 인간공학 프로그램 적용에 있어 경수로형 SMR의 인적수행도 현안 해결을 위한 규제 보완점 도출 및 제안
- 인간공학 규제지침 측면의 기술기준 보완점 도출 및 제안(필요시 안전심사지침으로 흡수)

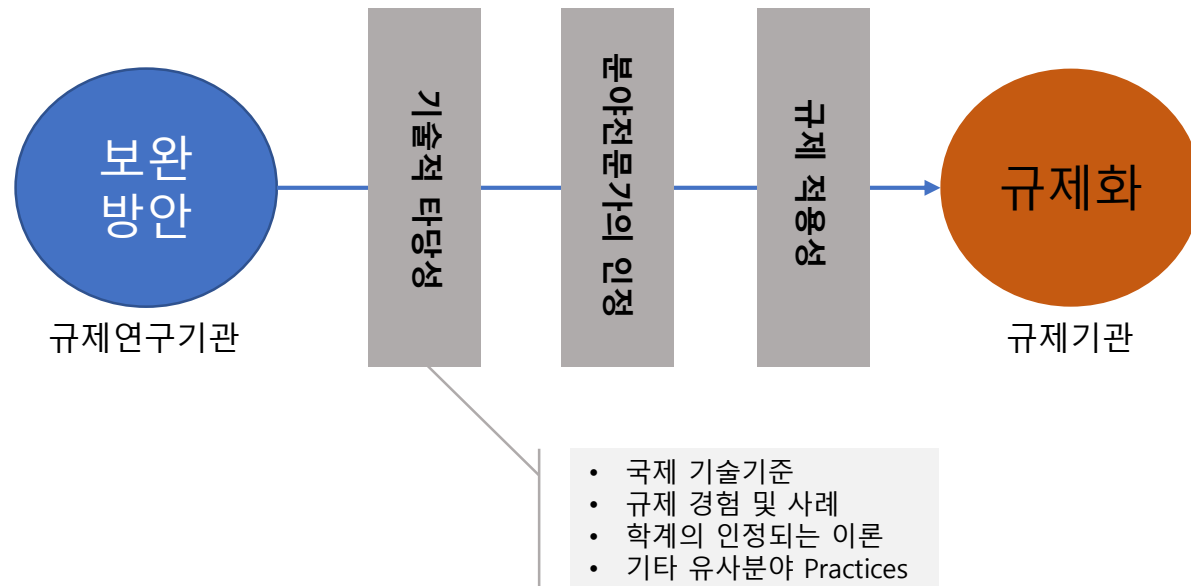
경수로형 SMR 안전심사지침 18.1절 (제안)	작성 근거 및 배경
<p>1. 신규 발전소의 인간공학검토</p> <p>가. 인간공학 프로그램 관리</p> <p>본 검토의 목적은 인허가 신청자가 인간공학의 역할 및 인간공학 활동을 완수하기 위한 수단을 적절히 고려하였음을 확인하는 데 있다. 본 검토에서는 다음 사항을 확인하여야 한다.</p>	<p>[근거] 경수로형 안전심사지침 준용</p> <p>[배경] 원자력발전소 설계시 보장되어야 하는 공통사항</p>

<안전심사지침 제안 예시>

5. 논의 및 협의사항

❖ 심사지침(안) 및 규제지침(안) 개발지원

- ✓ 경수형 SMR 인간공학 안전심사지침 및 규제지침 보완 방안을 제시할 예정
- ✓ i-SMR 표준설계인가 심사에 활용될 수 있는 방안을 KINS 인간공학 전문실과 협의 중
- ✓ 국내외 전문가 검토를 통해 지속적인 지침(안) 개정하고 규제 적용성을 검증할 예정





감사합니다