

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

국내 원전 인간신뢰도분석 규제 현황

중대사고리스크평가실 PSA 그룹 이승우



Contents

I

서론

II

건설 원전(APR-1400) HRA 규제 현황

III

가동 원전 HRA 규제 현황

IV

사고관리계획서
안전심사지침서(안) 개발 현황

V

결론

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

I.서론

- KINS OPIS(Operational Performance Information System for nuclear power plants)에 따르면 1978년부터 2016년까지 발생한 국내 원전의 총 721건의 사고 중 130건의 사고 원인이 인적 실수(약 18%)임.

원인별 고장 현황

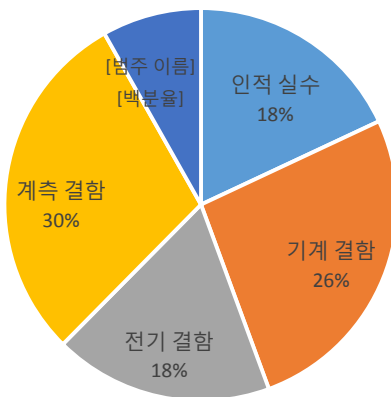


그림. 국내 원전의 원인별 고장 현황

연도별 전체 사건

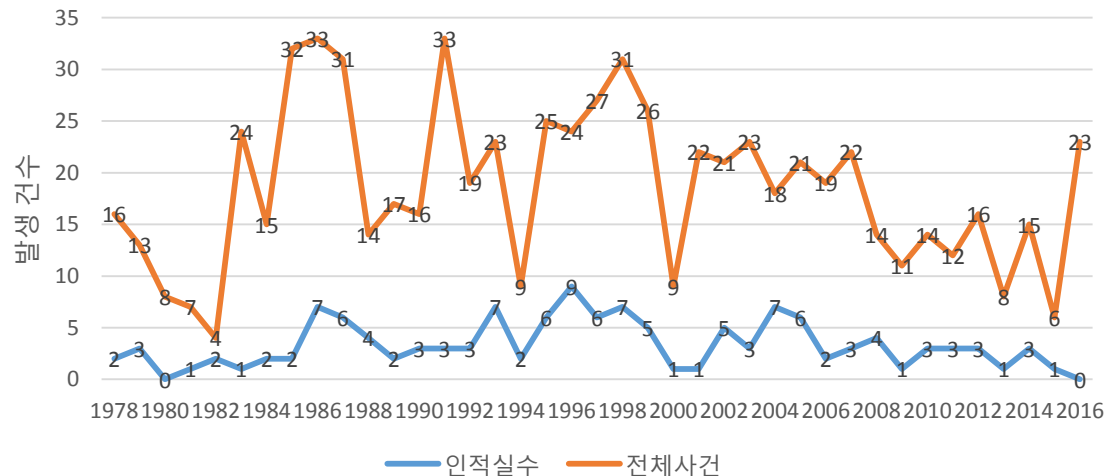


그림. 국내 원전의 연도별 전체 사건

- 원전의 안전성에 영향을 미치는 인적오류를 분석하기 위해 **두 가지 분석 기법**이 사용됨.

- **회고적 분석** : 오류의 종류와 원인 및 발생 메커니즘을 파악
- **예견적 분석** : 시스템 안전성 평가 관점에서 인적오류를 평가

- **인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis ; HRA)**은 인적오류 가능성을 **예견적으로 분석하는 활동**임.

- 시스템 안전성에 영향을 미치는 인적 오류를 파악하고, 평가하는 업무임.

* 신고리 3,4호기부터 인간공학 설계공정고도 연계된 활동으로 수행됨.

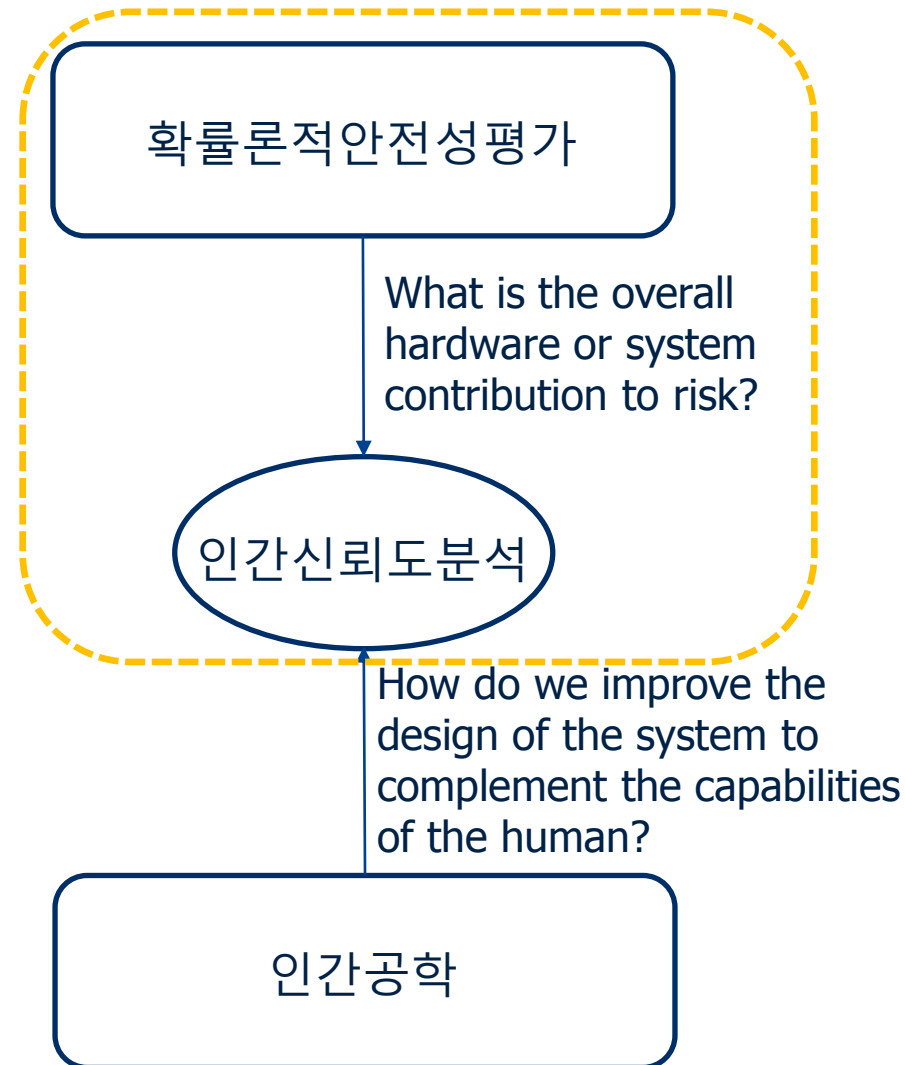


그림. 인간신뢰도분석의 역할

- 원전의 안전성은 기기 고장 및 인적 오류에 의해 영향을 받으며, 이 중 **인적 오류에 의한 영향을 평가하기 위해 인간신뢰도분석을 수행함.**

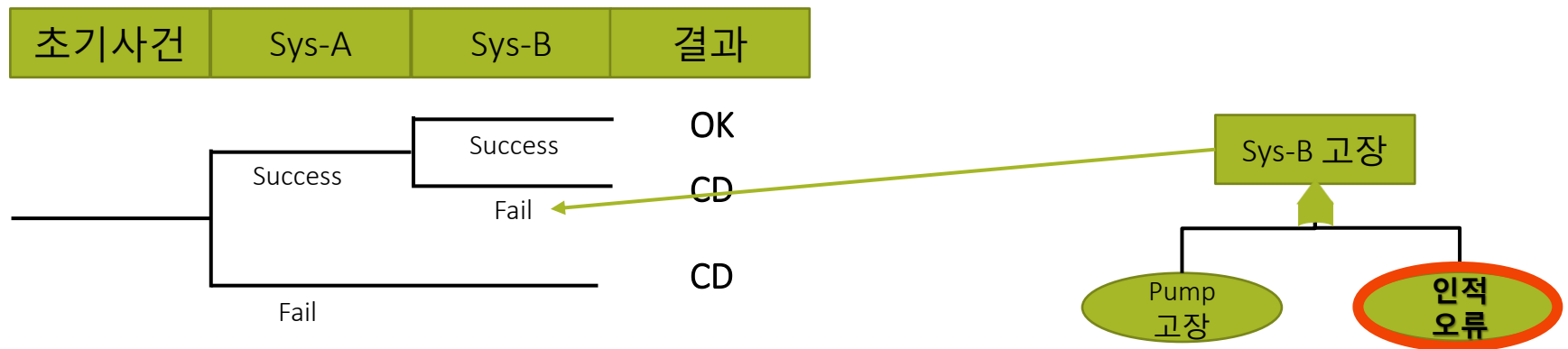


그림. PSA 수행 시 HRA

- 1980년대 이후 전 세계적으로 70여개의 HRA 방법론이 제안되었으며, 10여개의 HRA 방법론이 원전 PSA에 사용되었음.
- 1970년대와 1980년대 개발된 1세대 HRA 방법론은 운전원의 행위적 직무에 대한 평가에 목표를 두고 개발됨.
- 1세대 HRA 방법론이 인간의 인지적 특성을 반영하지 못하는 점을 개선하기 위해 2세대 HRA 방법론이 개발됨.

1st Generation HRA				2nd Generation HRA			
1983	1984	1986	1987	1997	1998	1999	2000
THERP (Swain)	HCR (Hannaman)	HEART (Williams)	ASEP (Swain)	HRMS (Kirwan)	CREAM (Hollnagel)	MERMOS (EdF)	ATHEANA (US NRC)
	SHARP (EPRI)						SPAR-H (US NRC)
	SLIM (Embrey)						

* Black color: 1st G. HRA method
Blue color: 2nd G. HRA method

그림. HRA 방법론

Plants	Type	PSA Scope (Internal & External Events)	Applied HRA Method	Completion date
Kori 1	WH 2-loop	Full Power(FP) Lv 1,2	ASEP/THERP	'07.05
Kori 2	WH 2-loop	FP Lv 1,2	ASEP/THERP	'07.06
Kori 3,4	WH 3-loop	FP Lv 1,2 LPSD Lv 1	K-HRA	'15.12(Under Review)
Hanbit 1,2	WH 3-loop	FP Lv 1,2	HCR/THERP	'03.12
Hanbit 3,4	CE	FP Lv 1,2 LPSD Lv 1	K-HRA	'15.12(Under Review)
Hanbit 5,6	KSNP	FP Lv 1,2 + Low Power/Shut Down(LPSD) Lv 1 Internal	ASEP	'05.12
Hanul 1,2	Framatom 3-loop	FP Lv 1,2	ASEP	'05.12
Hanul 3,4	KSNP	FP Lv 1,2	ASEP	'04.12
Hanul 5,6	KSNP	FP Lv 1,2 + LPSD Lv 1 Internal	ASEP	'06.06
Wolsong 1	CANDU 6	FP Lv 1,2	ASEP	'07.12
Wolsong 2,3,4	CANDU 6	FP Lv 1,2	ASEP	'06.12
Shin-kori 1,2	OPR1000	FP Lv 1,2 + LPSD Lv 1 Internal	THERP	'10.12
Shin-wolsong 1,2	OPR1000	FP Lv 1,2 + LPSD Lv 1 Internal	ASEP	'10.12
Shin-kori 3,4	APR1400	FP Lv 1,2,3 + LPSD Lv 1	ASEP/THERP	'13.01
Shin-hanul 1,2	APR1400	FP Lv 1,2,3 + LPSD Lv 1	ASEP/THERP	'15.12(Under Review)
Shin-kori 5,6	APR1400	FP Lv 1,2	ASEP/THERP	'15.01 (for CP)

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

II. 건설 원전(APR-1400) HRA 규제 현황

건설 원전(APR-1400) HRA 규제 현황

- ◆ 신고리 3,4호기 원전부터 APR-1400 노형에는 **디지털 계측제어시스템에 기반한 신형 주제어실을 도입함.**

- 신형 주제어실에 새로운 설계 특성(전산화 절차서, 소프트웨어기, LDP 등)이 도입됨.
- 새로운 설계 특성 도입으로 인해 발생 가능한 인적 오류 유형 등이 기존 주제어실과는 다를 것으로 예상됨.

- NUREG/CR-6634 (전산화 절차서에 관한 인간공학검토지침), NUREG/CR-6635 (소프트웨어기에 관한 인간공학검토지침), NUREG/CR-6684(차세대 경보시스템) 등의 보고서에서 **인간공학현안**, 인간공학검토지침등에 대한 정보를 제공함.

* 인간공학 관점에서의 정보를 제공하고 있으나, **NUREG-0711의 인간공학프로그램의 한 요소인 인간신뢰도분석과의 연계성 및 평가도 고려하고 있음.**



Conventional MCR



Advanced MCR



건설 원전(APR-1400) HRA 규제 현황

- APR-1400형 원전의 인적오류를 평가하기 위해 **SHARP의 분석 체계**를 **사용**하였으며, **THERP를 사용**하여 인적오류를 평가함.
 - 분석자에 따른 영향을 최소화하기 위해 **SHARP의 절차적 지침**을 **사용**함.
 - THERP의 방법론을 사용하여 **대상 작업을 단위동작으로 분해**한 후, 운전원의 스트레스 수준등과 같은 **환경적인 영향을 고려**하여 **대상 직무에 대한 오류 확률을 산출**함.

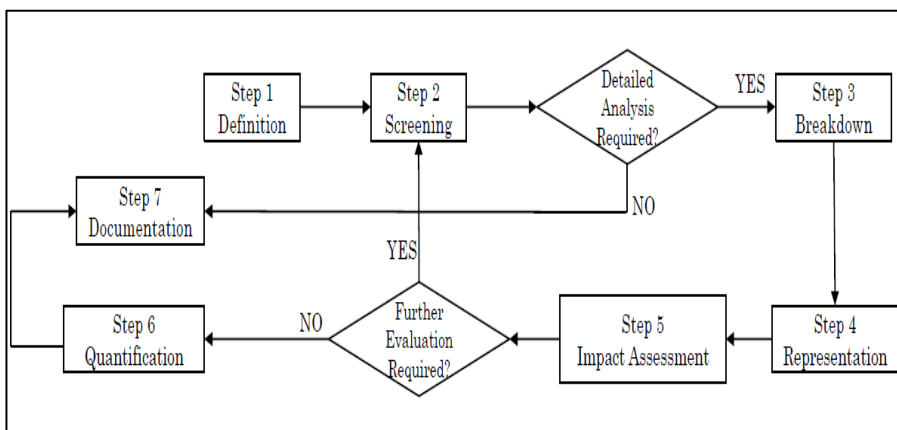


그림. SHARP 분석 절차

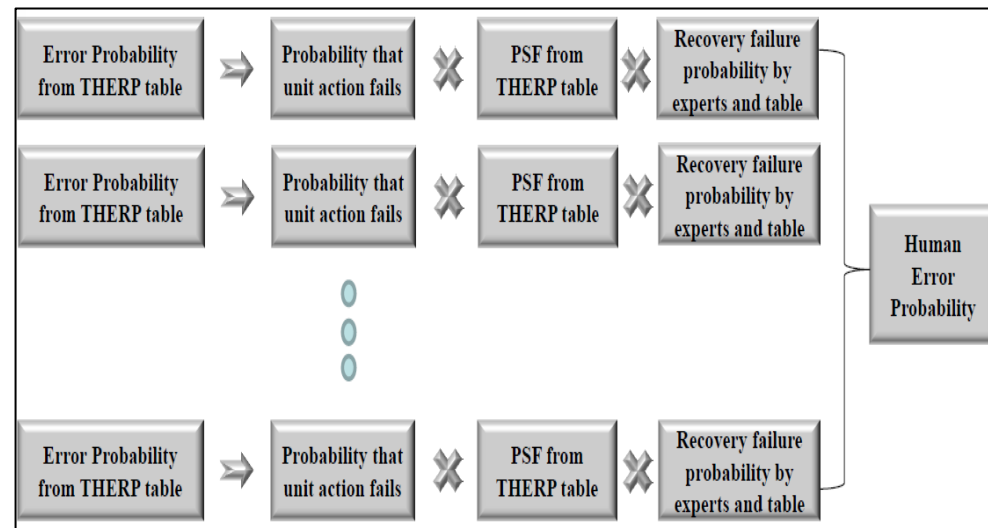


그림. THERP 분석 절차

건설 원전(APR-1400) HRA 규제 현황

- 신고리 3,4호기 인허가 심사는 주로 **인간공학프로그램의 한 요소로서 HRA의 적절성**을 검토함.

- 소프트웨어 사용과 관련된 인적 오류 유형 확인 및 발생확률 평가
 - * 신고리 3,4호기 PSA에서는 이러한 오류 유형 및 발생 확률이 반영이 안 됨.

- 디지털 MCR의 설계특성에 따른 수행특성인자의 확인
 - * 신고리 3,4호기 PSA에서는 새로운 수행 특성인자가 반영이 안 됨.

- 통합시스템검증(ISV)을 통한 주요 운전원 행위 가정사항의 확인

- 인간공학 관점에서의 Insight가 PSA 분야에 반영되지 않음.

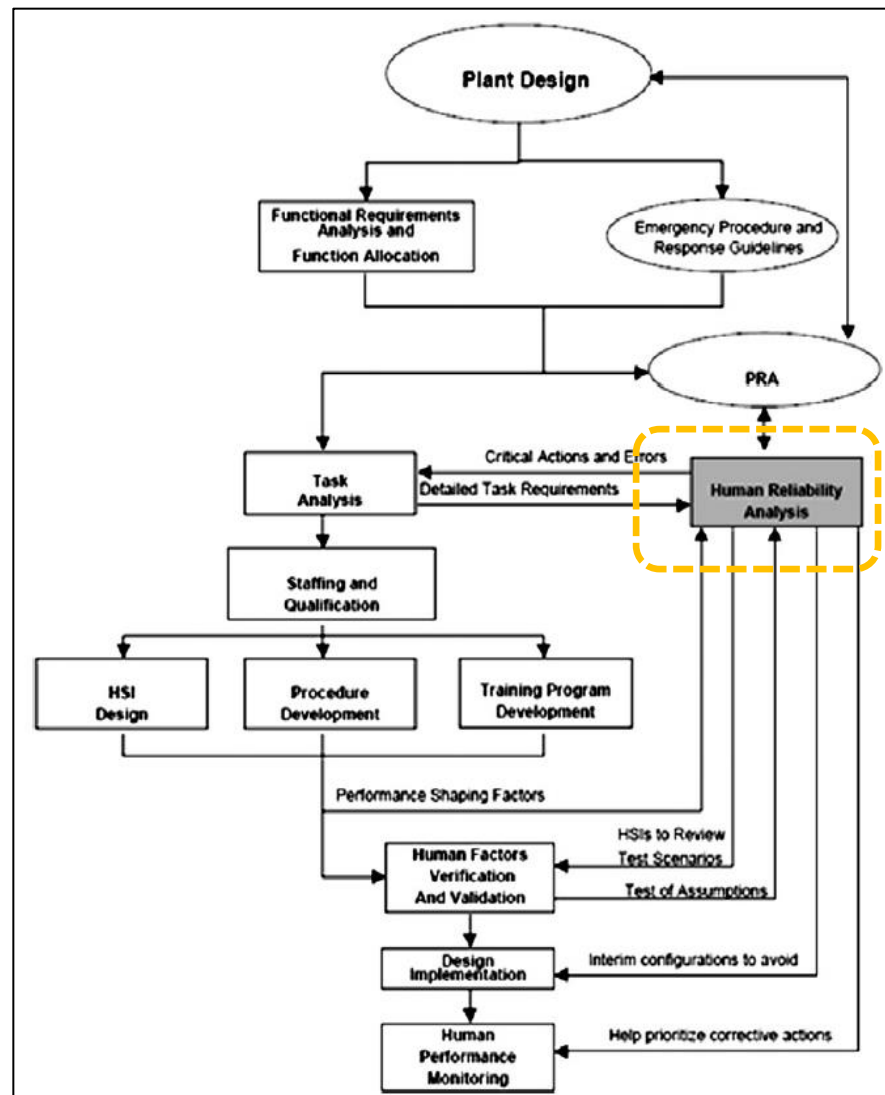


그림. 인간공학프로그램

건설 원전(APR-1400) HRA 규제 현황

- 신고리 5,6호기 인허가 심사 시 **PSA의 한 요소**로서의 디지털 MCR HRA 방법론의 적절성을 검토함.

- THERP에서 제공하는 **인적 오류 Database의 디지털 MCR HRA 적용성**
 - THERP에서 제공하는 **수행 오류 데이터**
 - THERP에서 제공하는 **진단오류곡선**
- **소프트 제어기 사용으로 인한 직무 실패 확률 평가**
 - 2차 직무 수행으로 인한 1차 직무의 실패 가능성
 - * 인간공학 관점에서 소프트 제어기 사용으로 인한 오류 유형 및 확률을 도출하여, 해당 설계의 개선에 사용하지만, 실제 PSA에서는 반영이 되지 않으므로 **리스크가 Optimistic하게 평가될 수 있음.**
- **수행특성인자의 정량화 수치(Multiplier)**
 - 구체적 근거를 통한 수행특성인자 정량화 값의 타당성
 - * 인간공학 관점에서 주요 운전원 행위에 적용된 수행특성인자에 대한 가정사항의 확인을 통해 운전원 오류 메커니즘 분석(Poor HSI 등)에 일부 활용이 가능하나, PSA 관점에서는 수행특성인자의 정량화 값이 HRA 결과에 큰 영향을 미치므로 값의 타당성이 중요함.

건설 원전(APR-1400) HRA 규제 현황

- 신한울 1,2호기 인허가 심사 시 계측전기평가실의 인간공학그룹과 협업하여 디지털 MCR HRA 방법론의 적절성을 검토중임.
 - 소프트웨어 오류 확률 평가 시 사용된 **HuRECA 방법론의 적절성**
 - HuRECA 방법론은 디지털 MCR의 일부 설계 특성(소프트 제어기, 전산화 절차서)을 반영하였으며, 실제 인허가에 사용된 경험은 없음.
 - 인간공학 관점에서의 HuRECA 사용에 따른 PSA 적용 가능성도 논의중임.
 - 통합시스템검증을 통한 **신고리 5,6호기 심사 질의 약속사항의 검증**
 - 신한울 1,2호기 인간공학검증 시 **신고리 5,6호기 PSA 심사 질의 약속사항(2차 직무, 인적오류 데이터, 수행특성인자)에 대한 검증을 협의중임.**
 - APR 1400형 원전에 대한 심사 경험을 통해 인간공학그룹과 인간신뢰도분석분야에 대해 협업 할 예정임.
 - 인허가 심사 시 도출된 규제 Insight의 HRA 반영 여부도 검토할 예정.
- * 신한울 1,2호기 Level 1 PSA의 개정과 같이 PSA 심사 과정에서 나온 정보를 인간공학그룹에 제공할 예정(예 : 주요 운전원 조치 개정).

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

III. 가동 원전 HRA 규제 현황

가동원전 HRA 규제 현황

- 고리 3,4호기, 한빛 3,4호기 주기적안전성평가의 평가 인자로서 PSA가 제출되었으며, 현재 심사 중임.(1차 질의 진행 중임.)
- 고리 3,4호기, 한빛 3,4호기 HRA를 수행하기 위해 KAERI에서 개발한 K-HRA 방법론을 사용함.
 - 분석자의 주관성을 최소화하기 위해 개발되었으며, THERP/ASEP HRA 방법에 기반함.
 - SMART PSA에도 적용한 경험이 있으나, 가동 원전에는 적용한 사례가 없음.

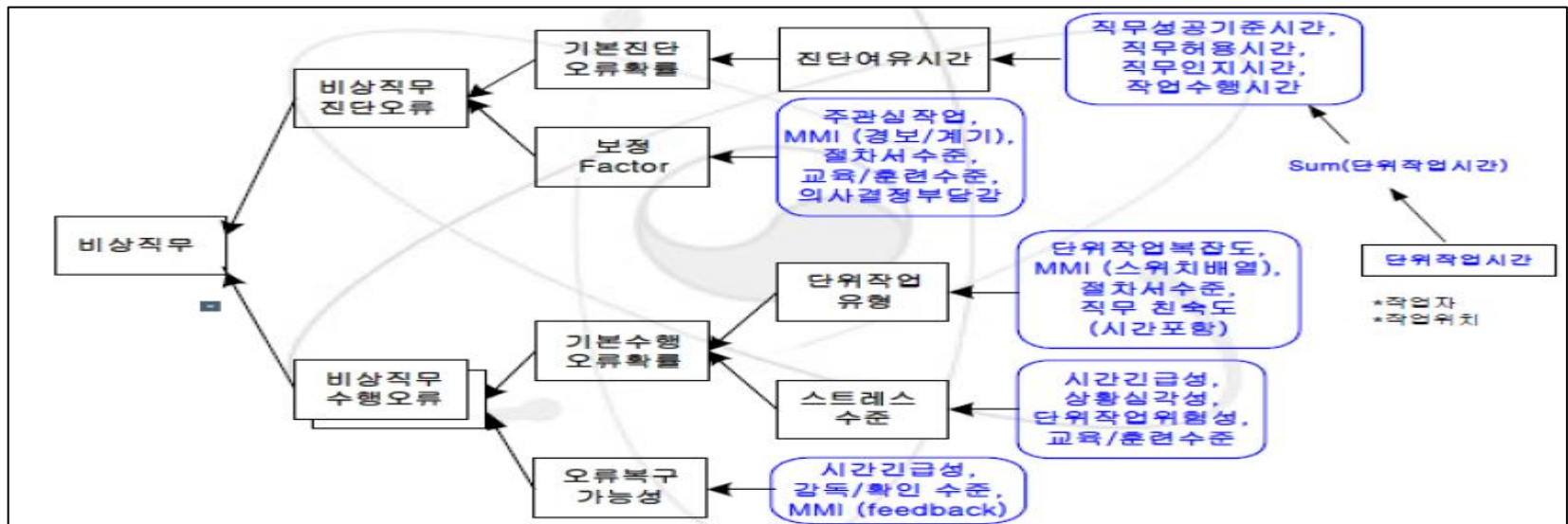


그림. K-HRA 분석체계

가동원전 HRA 규제 현황

- 현재 K-HRA 방법론에 대한 검토를 진행중이며, 다음의 사항을 포함하여 검토할 예정이다.
 - 전출력 사고전인적오류
 - 1) 오류영향인자의 정량화 값
 - 2) 상세분석 결과의 근거(예: 관련 절차서, 오류영향인자의 적용 근거 등)
 - 3) 수행오류확률값(전문가 판단으로 도출된 값)
 - 전출력 사고후인적오류
 - 1) 오류영향인자의 정량화 값
 - 2) 중속성 수준(THERP와의 차이점)
 - 3) 상세분석 결과의 근거(예 : 관련 절차서, 오류영향인자 적용 근거 등)
 - 4) 수행오류확률값(전문가 판단으로 도출된 값)
 - 5) 고려된 운전원 조치 시간
 - 정지/저출력 HRA 분석 시의 가정사항
- International HRA Empirical Study에서 도출된 K-HRA의 검증 결과를 참고 할 예정이며, 이 후 수행된 Empirical Study의 검증 방안(NUREG-2156)을 활용한 K-HRA 타당성 검증 방안도 고려중임.

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

IV. 사고관리계획서 안전심사지침(안) 개발 현황

사고관리계획서 안전심사지침(안) 개발 현황

• 규제기준 16.5 개정본

사고 전, 후 발생 가능한 인적오류의 분석을 위해 **인간신뢰도 모델링을 통하여 인적 오류가 어떻게 발생하는가를 묘사**해야 한다. 또한 사고 전, 후 인적 영향을 분석하기 위한 **인간-기계 연계를 반영한 직무분석, 행위분석 및 인적오류확률 평가가 수행**되어야 한다.

• 규제지침 16.5

1. 주요 인간오류 확률의 정량화에 대한 충분한 정보와 선택된 분석방법의 선정이유를 제시하여야 하며, 특정한 분석방법이 고려될 경우는 그 **방법론 사용에 대한 타당성이 입증**되어야 한다.
2. 주요 인간오류를 도출하고, 각 인간오류에 대한 **수행특성인자, 민감도분석 및 불확실성 분석 등**을 **평가결과에 포함**하여야 한다. 인간오류 항목의 중요도를 결정하는 지침과 주요 인간오류 항목의 평가근거를 제시하여야 한다.
3. 특별히 **공학적 판단이나 전문가의 의견이 반영된 사항에 대해서는 그 기술적 타당성을 제시**하여야 한다.

• 경수로형 원전 안전심사지침

모든 사고 상황에 대해 주요 **운전원 조치 오류가 적절하게 모델링**되고, 분석이 체계적인 절차 및 방법에 따라 **수행되었는지 검토**한다.

사고관리계획서 안전심사지침(안) 개발 현황

- 사고관리계획서 법제화에 따라 **사고관리계획서 안전심사지침(PSA 분야)을 개발**하고 있음.
- HRA 분야 심사지침 개발시 현재 ASME PRA Standard, NUREG-1792(Good Practice for Implementing Human Reliability), 심사경험(RAIs)등의 내용을 검토하여 내용을 개정 중임.

모든 사고 상황에 대해 주요 운전원 조치 오류가 적절하게 모델링되고, 분석이 체계적인 절차 및 방법에 따라 수행되었는지 검토한다.

개정전 안전심사지침



관련 계통 및 절차서 및 시뮬레이터 관찰 경험 등을 사용하여 발생가능한 운전원 오류가 적절히 도출되었는지 확인한다.
선별분석을 사용한 경우, 선별규칙의 타당성을 확인한다. 이 때 안전관련 계통 및 기기에 영향을 주는 운전원 오류가 선별되지 않았는지 확인한다.
주요 운전원 오류에 대해 **발전소 고유의 설계 특성(예 : 주제어실)**, 고유의 열수력분석 결과 등의 정보를 활용하여 상세분석을 수행하였는지 확인하며, 운전원의 환경적인 영향을 고려한 경우 **시뮬레이터 관찰 경험 또는 인간공학 분석기법(운전원 면담)** 등을 통해 평가되었는지 확인한다.
회복조치를 고려한 경우 절차서에 기재된 독료점검 또는 독립점검 등의 정보가 적절한지 확인하며, 중속성 분석을 한 경우, 사용된 중속성 규칙의 적절성을 확인한다.

개정후 안전심사지침(안)

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

V. 결론

• 건설 원전 확인 사항

- 소프트 제어기 사용에 따른 직무 실패 반영 여부
- THERP에서 제공하는 수행 오류 데이터, 진단오류곡선의 적용 가능성
- 수행특성인자의 타당성 검증(ISV 활용)을 통한 정량화 수치의 근거

• 가동 원전 확인 사항

- 오류영향인자의 타당성 검증 및 정량화 수치의 근거
- 수행오류확률값(전문가 판단으로 도출된 값)
- 상세분석 결과의 구체적인 근거
- 운전원 조치시간
- 정지/저출력 분석시의 가정사항

• 그 외 확인 사항

- 외부 사건 HRA 방법론 및 데이터(예 : 화재 PSA)

- 현재 국내 PSA에서는 THERP 또는 THERP를 기반으로 한 방법론을 사용하고 있으며, 건설 또는 가동 원전 심사 시 해결되지 않은 질의의 대부분은 **THERP 방법론 사용에 따른 제약사항으로 파악됨.**
 - 인적오류분석에 대한 단순한 가정으로 인해 새로운 설계특성을 고려하지 못함.
 - 제한적인 수행특성인자를 제공하고 있으며, 정량화 값의 근거가 부족함.
 - 데이터의 근거 및 적용 가능성에 대한 평가 결과가 부족함.
- PSA를 수행하기 위해서는 반드시 **운전원의 오류 확률을 평가**해야 하나, **인간에 대한 불확실성**으로 인해 인간의 오류 메커니즘을 단순화한 방법론을 사용하고 있음.
 - 이로 인해 **HRA 결과의 불확실성이 커지고**, PSA 결과의 불확실성을 초래할 수 있음.
- PSA 결과의 신뢰성을 제고하기 위해 **국내 HRA의 개선방향에 대한 중장기적인 대책 마련이 필요**하며, 이를 위해 산학연의 국내 HRA 전문가들(HRA Society)의 의견 수렴이 필요함.



Alan Swain, 1972

“There should have been many more changes had the research been done to develop more hard data on HEPs for human tasks. That failure has been a disappointment to me....I always said that the data tables in [THERP] were not written in stone, and I was not Moses coming down from a mountain with these tables so inscribed.”

감사합니다

