



한국원자력학회 2017 춘계 학술대회 워크숍  
- 국내 원전 인간신뢰도분석 현안 -

# 디지털 주제어실 Level 1 HRA 국내 연구현황 및 계획

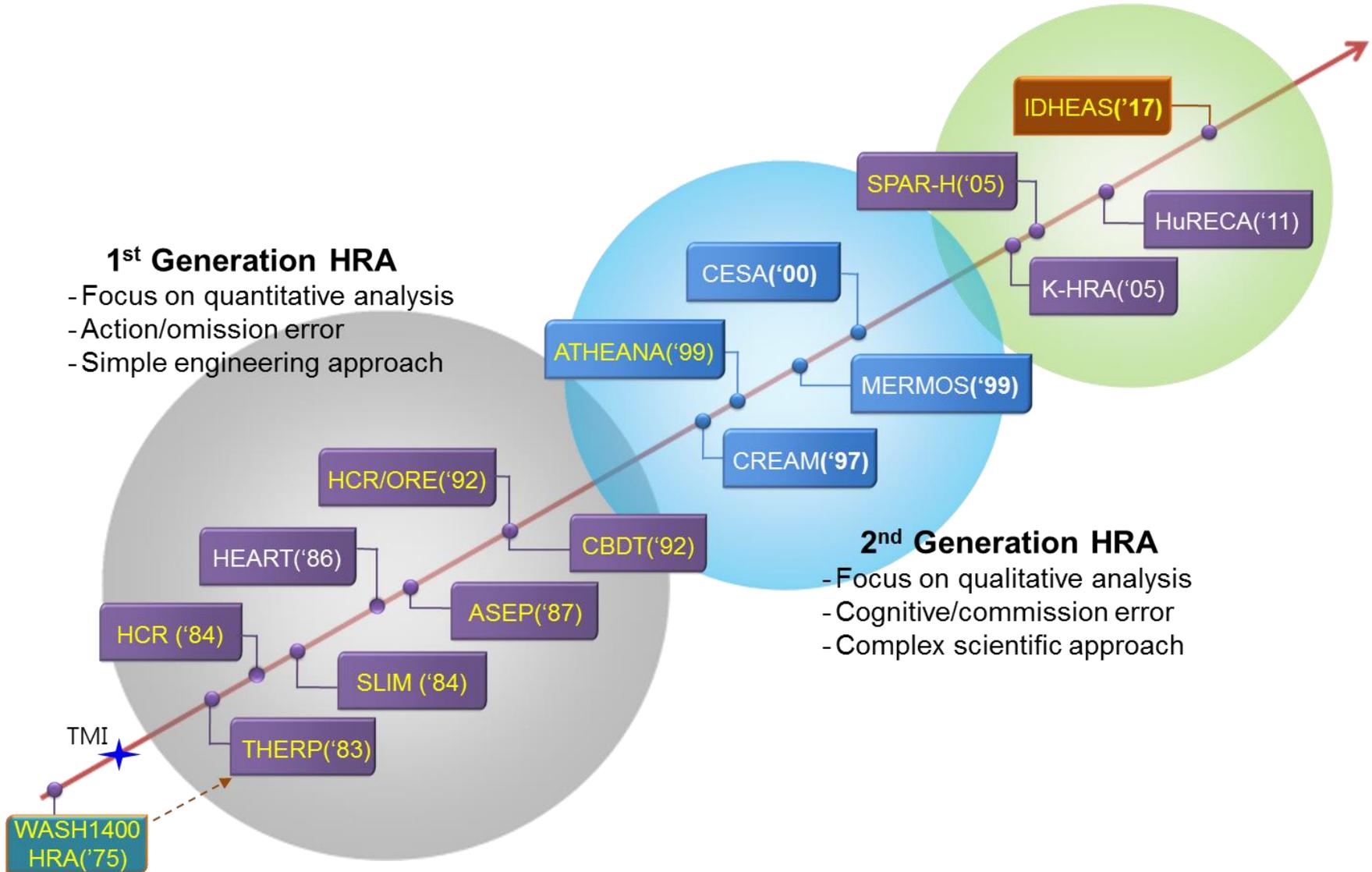
2017. 5. 17

정원대  
한국원자력연구원

# 발표 순서

1. 서론
2. 디지털 주제어실 특성 및 HRA 현안
3. 디지털 HRA 관련 선행 연구
4. HuREX 체계를 이용한 HRA data 수집
5. 디지털 주제어실 HRA 연구 계획
6. 결론

# HRA 방법론



# 국내 PSA HRA 현황

No	발전소 및 호기	노형	HRA 방법 (2015 이전)	HRA 방법 (2015년 이후)
1	고리1발 (1,2호기)	WH600	ASEP/THERP	K-HRA (L1 FP/LPSD PSA)
2	고리2발 (3,4호기)	WH900	HCR/THERP	
3	한빛1발 (1,2호기)	WH900	HCR/THERP	
4	월성1발 (1호기)	CANDU	ASEP/THERP	
5	한울1발 (1,2호기)	FRAMATOM	ASEP/THERP	
6	한빛2발 (3,4호기)	OPR1000	ASEP/THERP	
7	한울2발 (3,4호기)	OPR1000	ASEP/THERP	
8	한빛3발 (5,6호기)	OPR1000	ASEP/THERP	
9	월성2발 (2,3,4호기)	CANDU	ASEP/THERP	
10	한빛3발 (5,6호기)	OPR1000	ASEP/THERP	
11	신고리1발 (1,2호기)	OPR1000	ASEP/THERP	
12	신월성1발 (1,2호기)	OPR1000	ASEP/THERP	
13	신고리2발 (3,4호기)	APR1400	THERP	
14	신한울1발 (1,2호기)	APR1400		THERP
15	신고리3발 (5,6호기)	APR1400		THERP

# 국내 HRA 현안

- HRA 기술적 품질
  - PSA 법제화 : 사고관리계획서 제출 및 정량적 리스크 안전목표 만족
  - HRA 신뢰성 확보 및 제고
- 디지털 주제어실 HRA
  - APR1400 주제어실 설계 특성을 반영한 HRA method
  - APR1400 운전경험을 반영한 HRA data

# 주제어실의 진화

- 신형 주제어실 도입
  - 신고리3,4호기 (2016년 상업운전시작)

1세대



2세대



3세대



# 디지털 주제어실 특성

- APR1400 주제어실 설계 특성
  - 컴퓨터 기반 Human System Interface (HSI)
    - Large Display Panel (LDP), Soft Control (SC), Integrated Graphic Display
  - 전산화된 운전지원시스템
    - Computerized Procedure System (CPS), Advanced Alarm System
    - Safety Parameter Display System (SPDS) / Bypass & Inoperable Status Indicator (BISI) System

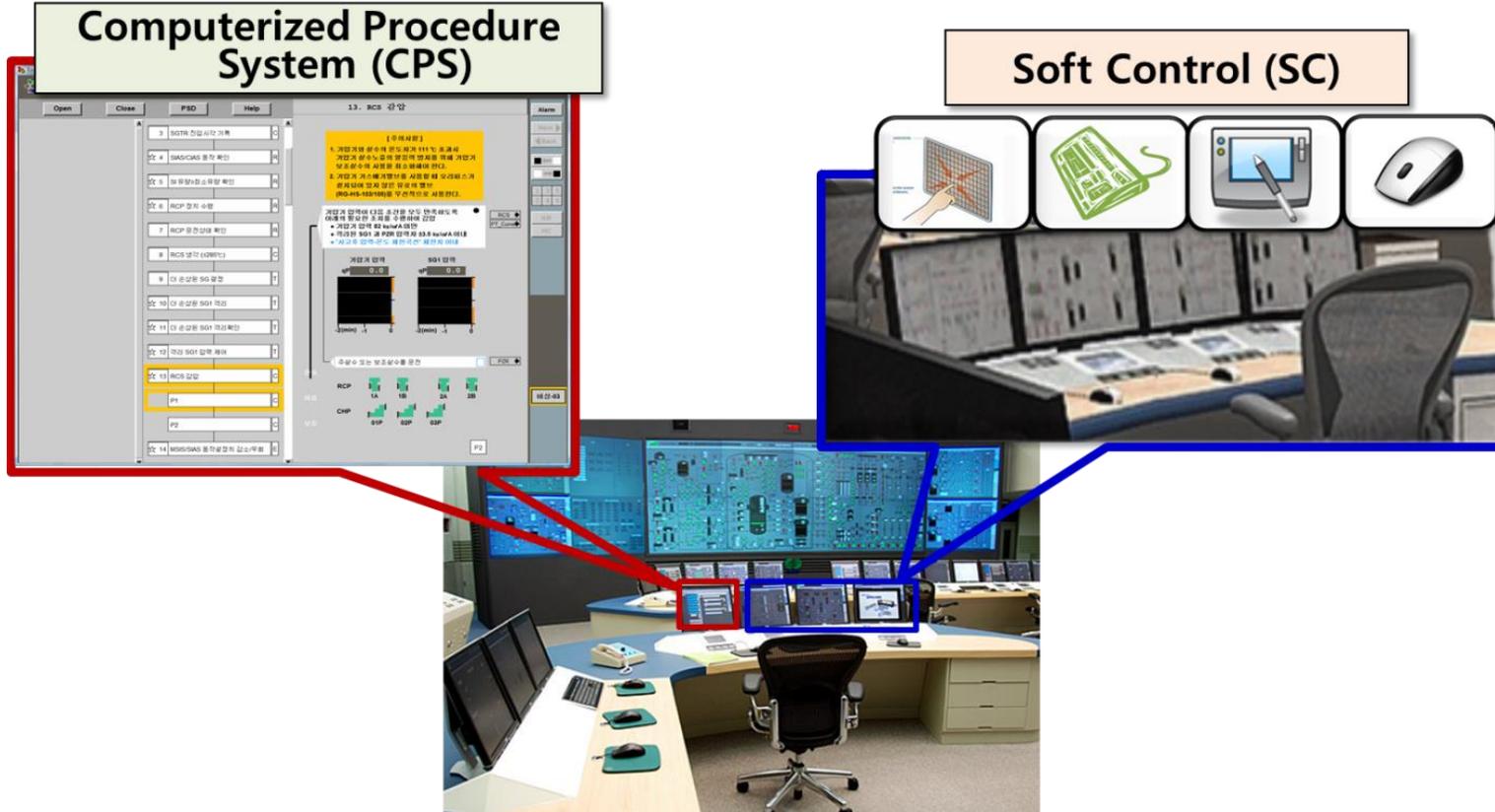


Conventional MCR



Advanced MCR

# 디지털 주제어실 특성



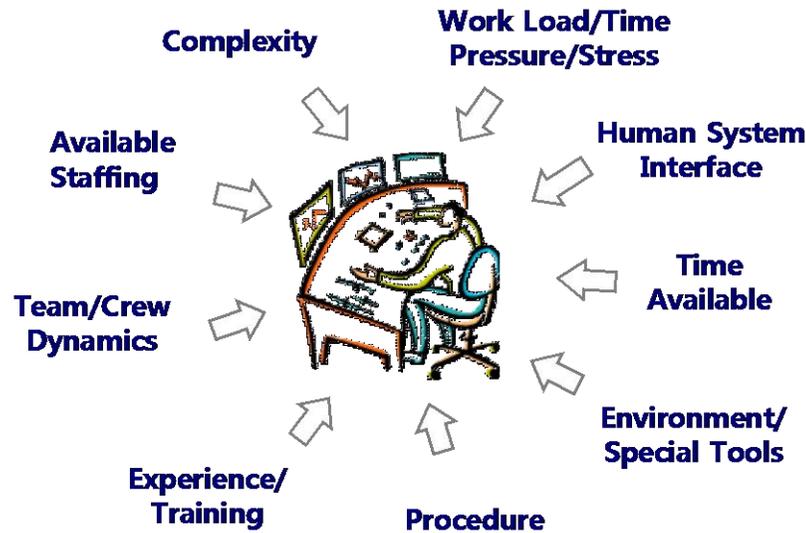
# 디지털 주제어실 HRA 현안

- 디지털 HSI HRA 현안
  - 오류유형
  - 오류발생 메커니즘 및 영향인자
  - 오류확률 데이터
- 오류유형 및 영향인자
  - 디지털 HSI 특성으로 새롭게 나타나는 오류유형 및 오류영향인자
  - Errors of Commission (부적절한 조치 오류)

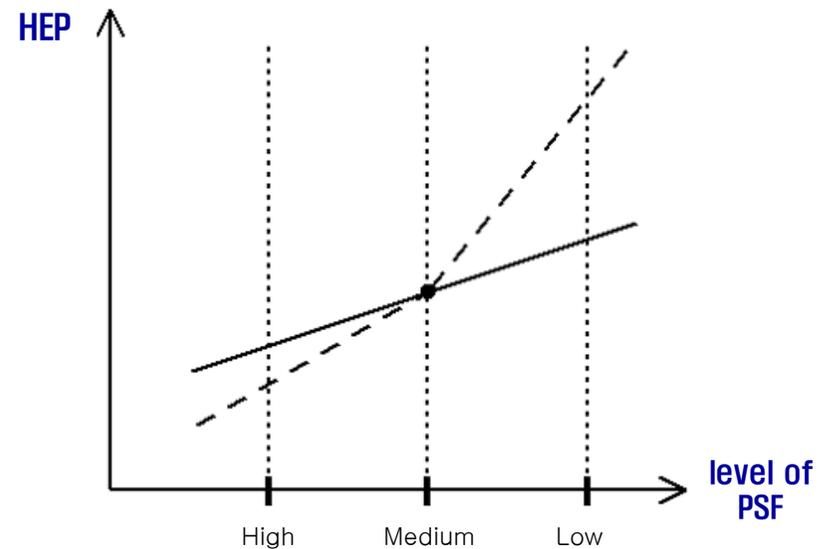
설계 특성	대표 오류유형	설계 특성	대표 오류유형
CPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부적절한 절차서 or 경로 선택</li> <li>• 부적절한 조치 or 절차 누락</li> <li>• 계속단계 감시 누락</li> </ul>	Information Display	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 정보 확인/감시 실패</li> <li>• 오정보 수집</li> <li>• 동시작업 시 상태감시 실패</li> </ul>
Soft Control	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부적절한 대상 선택</li> <li>• 조작 누락 or 부적절한 조작 (양)</li> <li>• 조작 시간 지연</li> </ul>	Alarm System	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 경보인식 누락 or 지연</li> </ul>

# 디지털 주제어실 HRA 현안

- PSFs (Performance Shaping Factors)
  - 오류발생에 영향을 미치는 PSFs
  - PSFs level 평가 기준 및 방법
  - PSFs의 오류확률 영향 평가 방법



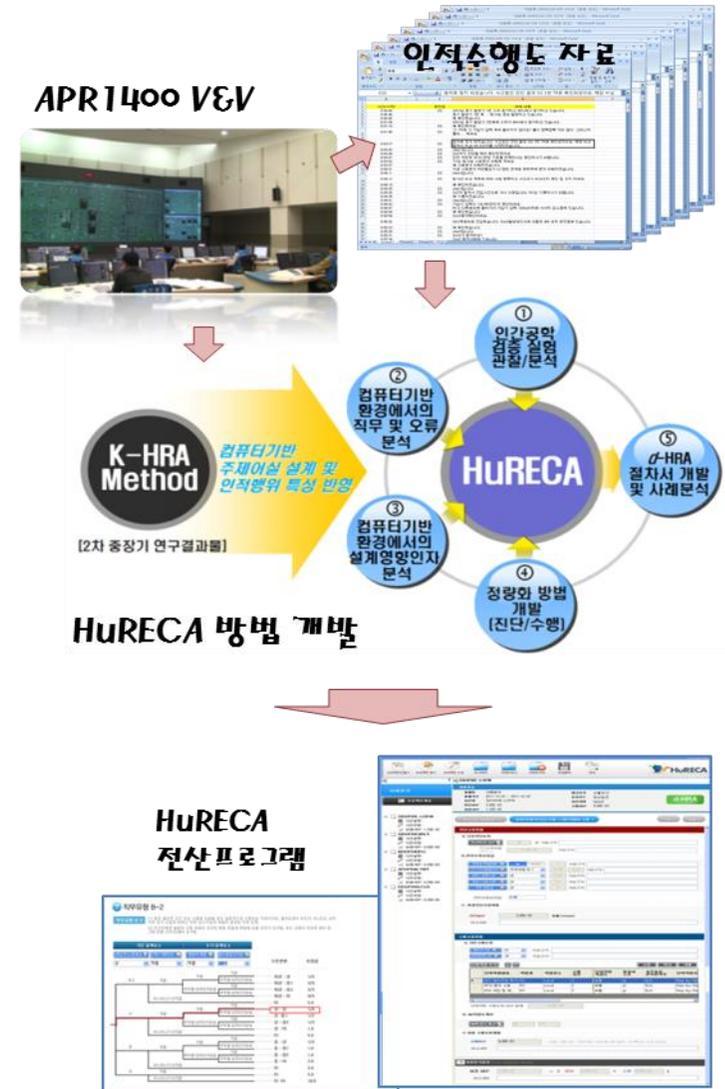
HRA Good Practices (NUREG-1792)



HEP에 미치는 PSFs 영향 평가

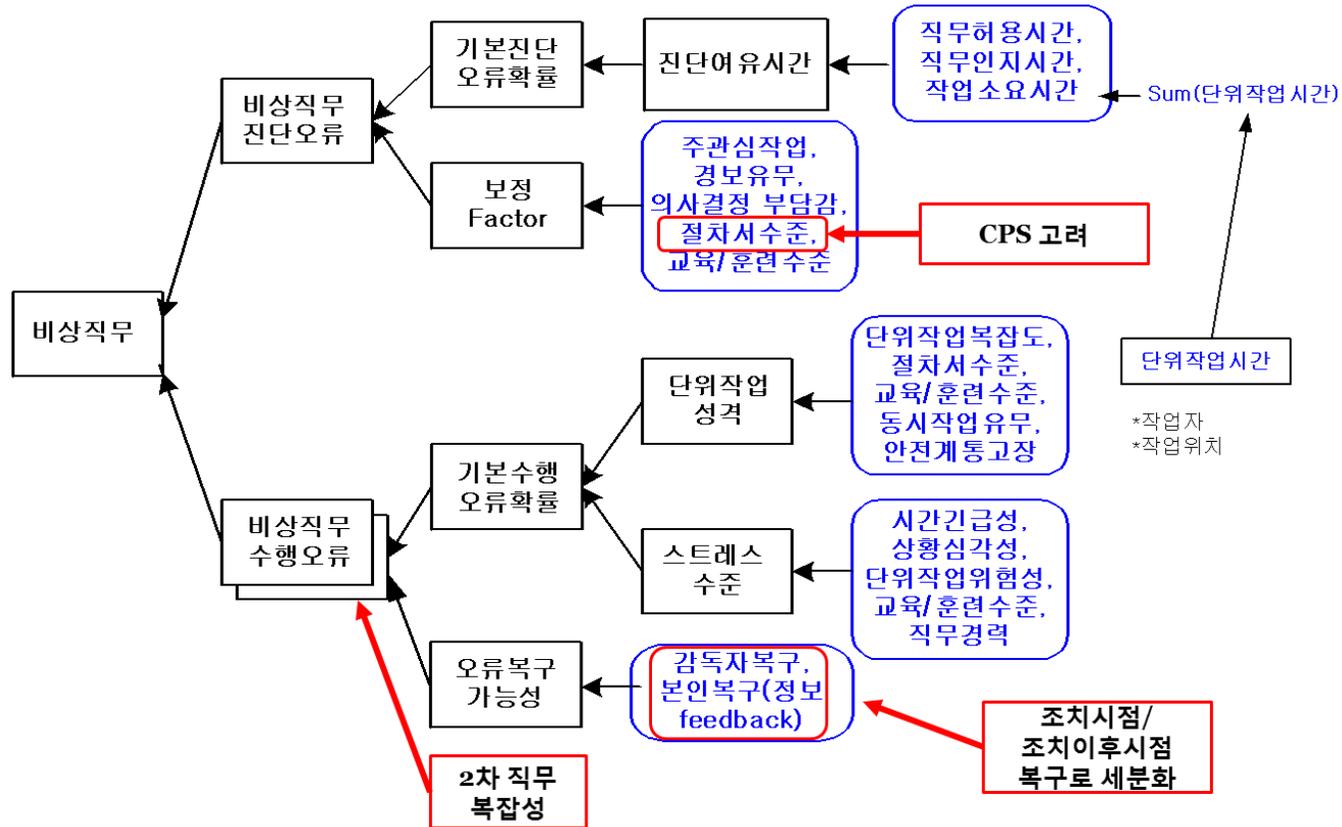
# (1) HuRECA 방법 개발

- APR1400 주제어실 설계 특성 및 운전 직무분석
  - HRA 관점에서 디지털 HSI 설계특성 분석
  - APR1400 주제어실 설계 V&V 자료 분석
  - CPS 및 SC 운전 직무분석
    - CPS 직무유형 및 오류분석 (EOP 대상)
    - SC 직무유형 및 오류분석 (EOP 150 여 개 SC 직무 대상)
- 디지털 주제어실 HRA를 위한 HuRECA 방법 개발
  - HuRECA (Human Reliability Evaluator for Control Room Actions)
  - K-HRA 기반으로 APR1400 설계 특성을 반영하여 오류확률 정량화 규칙 개발



# (1) HuRECA 방법 개발

- K-HRA 기반으로, CPS와 SC 설계특성 반영하여 HEP 평가 규칙 개발



# (1) HuRECA 방법 개발

NEA/CSNI/R(2015)1

Table 3: Summary of HRA method evaluations

Method	1. Availability of information relating to the technical basis	2. Technical Basis of the Method (Theory)	3. Technical Basis of the Method (Data)	4. Internal Consistency	5. Qualitative Assessment	6. Factors influencing Human Reliability Considered by the Method			7. Human Error Dependency	8. Deviations and Progressions in Accident Sequences		9. Cognitive Error	10. Statistical Uncertainty	11. Organisational Issues	
						6.1 Adequacy of PSPs	6.2 Quantitative Sensitivity	6.3 Interaction between factors		8.1 Deviations	8.2 Fault Progression			11.1 Safety-Culture Factors	11.2 Process Factors
THERP															
ASEP															
Enhanced Bayesian THERP															
ATHEANA															
MERMOS															
NARA															
SPAR-H															
HCR/ORE															
CBDT															
CREAM															
FLIM															
HURECA															

Method	12. Empirical Validity			15. computer Models and Software tools	14. Reliability and Traceability			15. Definition of Scope	16. Qualitative Outputs	17. Qualitative Uncertainty and Quantitative Conservatism	18. Availability of User Documentation	19. Use of limiting values	20. Resources
	12.1 Statistical Evidence	12.2 Verification / Peer Review	12.3 Application / Maturity		14.1 Within-Analyst Consistency / Reliability	14.2 Between-Analyst Consistency / Reliability	14.3 Traceability						
THERP				N/A									
ASEP													
Enhanced Bayesian THERP				N/A									
ATHEANA				N/A									
MERMOS				N/A									
NARA				N/A									
SPAR-H				N/A									
HCR/ORE													
CBDT													
CREAM				N/A									
FLIM				N/A									
HURECA													

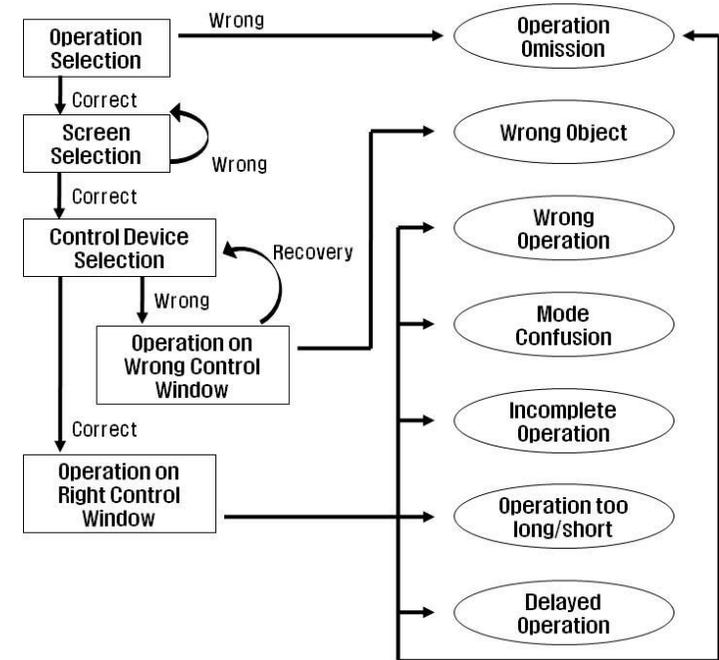
Rating Scale
High
Intermediate
Low

## (2) SC 오류 유형 및 확률 분석

### • Soft Control (SC) 오류유형 및 영향인자 분석

- SC 오류유형 및 영향인자 분석
  - 7개 오류유형 및 발생경로 파악
  - 오류영향인자 도출
    - SC의 유사성, 근접성 및 제어기 설계 방식
    - SC 조작행위의 수 등

SC 오류유형	오류영향인자
Omission	절차서에서 해당 절차를 전체를 누락 반복되는 작업 속에 해당 직무를 누락
Wrong object	비슷한 제어 패널 사이에서 헛갈림 SC 유사성, 근접성 때문에 발생
Wrong operation	다른 버튼을 누름 (단순실수) 버튼 크기나 다른 버튼과의 배열에 의한 영향
Mode Confusion	같은 제어 패널을 쓰는 모드들간의 혼동
Incomplete operation	여러 운전을 동시에 수행하는 경우 다른 운전원이나 환경에 의한 interruption
Too long/short	부적절한 feedback 때문에 조작을 너무 조금/많이 수행
Delayed operation	전 단계에서의 지체로 인한 운전 수행시간 지연 화면 찾기, 재 선택 등으로 인한 시간지연 등



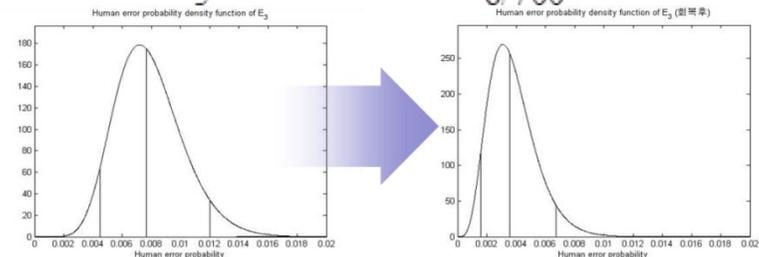
## (2) SC 오류 유형 및 확률 분석

- SC 오류확률 평가를 위한 pilot study
  - 신형 제어실 mockup (KAIST CNS) 활용
  - SC 오류유형 분석 및 DB 구축
    - SGTR 시나리오, 48명의 대학원생 대상
    - 숙련도 및 절차서 수준 구분 실험
  - SC 오류확률 평가 및 DB 구축
    - 오류유형별 오류확률 추정



Compact Nuclear Simulator

Human error modes	Before error recovery	Error recovery	After error recovery
	Errors/ Opportunities		Errors/ Opportunities
E <sub>0</sub> (Operation selection omission)	5/1274	0	5/1274
E <sub>1</sub> (Operation execution omission)	15/5171	10	5/5171
E <sub>2SS</sub> (Wrong screen selection)	43/2062	39	4/2062
E <sub>2DS</sub> (Wrong device selection)	20/2494	10	10/2494
E <sub>3</sub> (Wrong operation)	11/1458	6	5/1458
E <sub>4</sub> (Mode confusion)	22/648	17	5/648
E <sub>5</sub> (Inadequate operation)	11/700	5	6/700



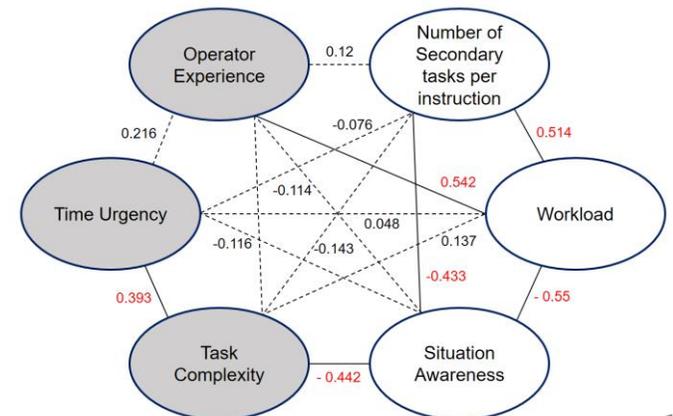
# (3) PSFs vs 인적수행도 연관성 분석

- 인적수행도에 미치는 PSFs 영향 분석
  - APR1400 mockup (KINGS 시뮬레이터) 활용
  - 시뮬레이터 실험
    - 6개 시나리오, 6개 운전조 대상
    - 숙련도 및 절차서 수준 구분 실험 계획
  - 수행시간/오류확률과 PSFs간의 회귀분석
    - 2개 인적수행도(Time, Error Prob.), 6개 PSFs (Experience, Urgency, Complexity, Secondary task, Workload, Situation awareness)
  - 주요결과
    - Experience, Secondary task, Workload가 수행 시간과 상관관계 있는 것으로 나타남
    - 6개 PSFs와 오류확률간에 유의한 상관관계 발견 못함
    - 일부 PSFs간에 상관관계 있는 것으로 나타남



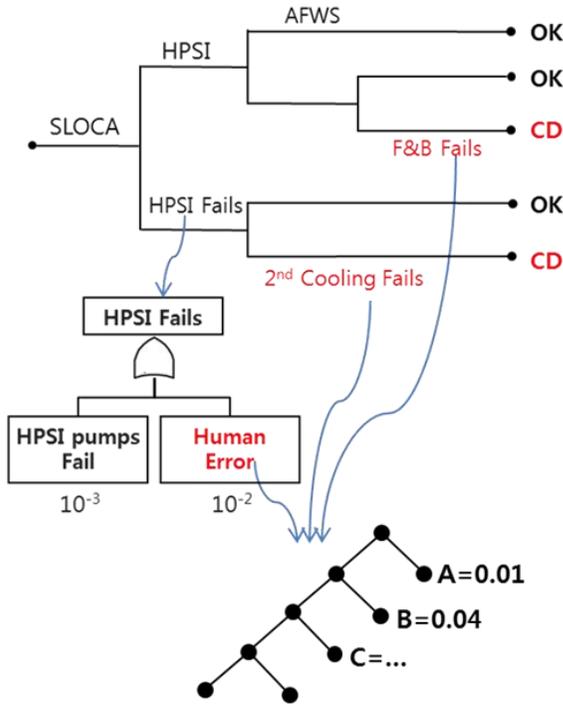
디지털 주제어실 환경 시뮬레이터 (KINGS)

번호	시나리오	PSFs 특성
1	ADV Open + LOOP	EOP, 30분 이내
2	SGTR + N16 고장	EOP, 30분 이내, 정보 Masking
3	SBLOCA + SI 고장	FRP, 30분 이내
4	ISLOCA (Small)	EOP, 30분 이상
5	ESDE + N16 고장	EOP, 30분 이상, 정보 Masking
6	Loss of All Feedwater	FRP, 30분 이상



# 고유 HRA database 구축

PSA



HRA

Event	HEP	Source
A : Control room operator omits ordering the following tasks	0.01	THERP Handbook OR Expert Judgment
B : Operator omits verifying the position of HPSI pump switch	0.04	
C : ...	...	

- 1960~'70 data
- Industry data in USA
- Analog MCR

## Simulator-based HRA Data Bank



OPR1000 Simulator



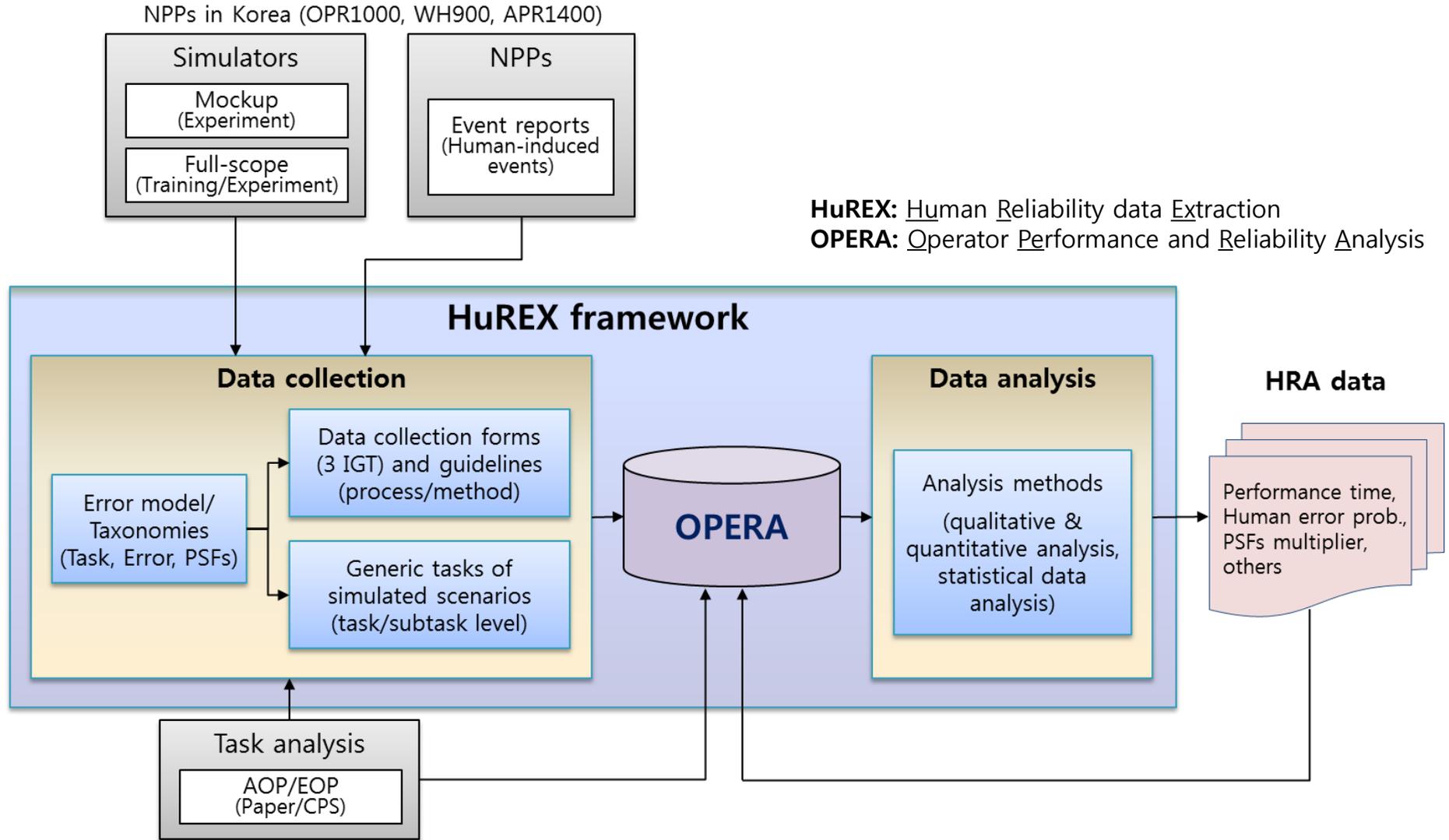
APR1400 Simulator

- Korean specific HRA data
- Analog & Digital HMIs

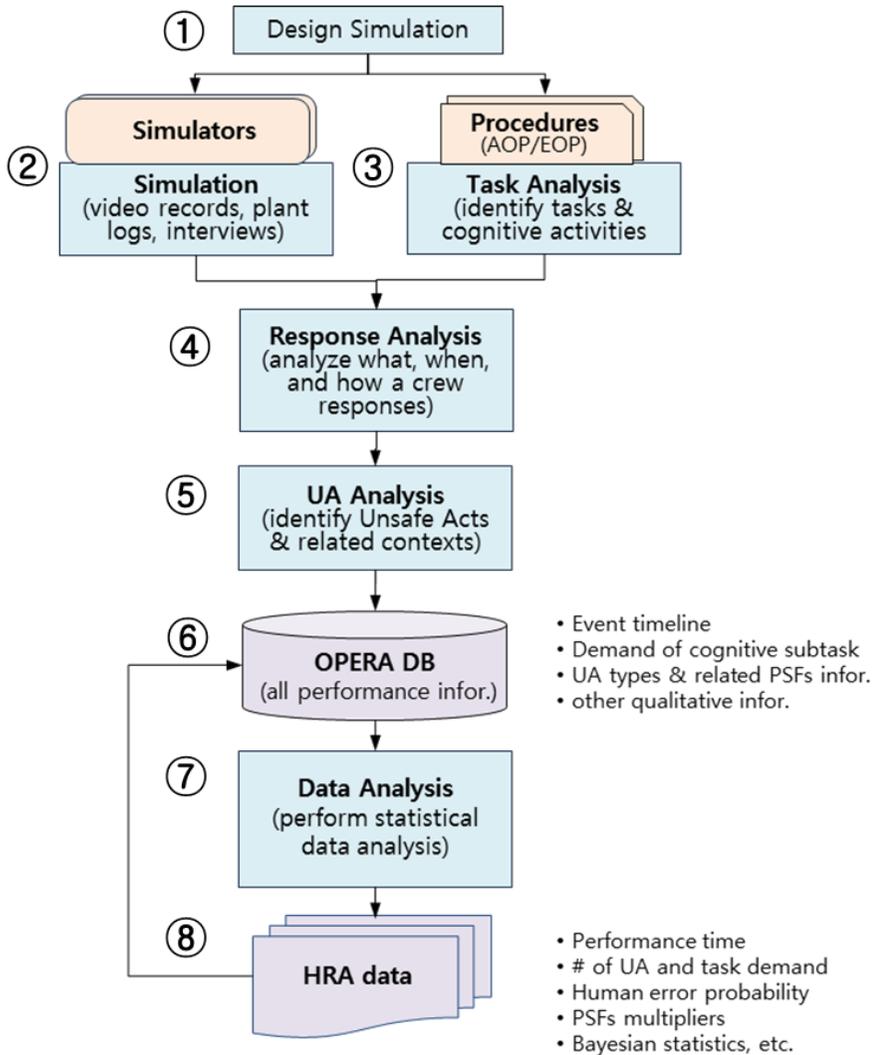


Replace & Update Technical bases for HRA

# HuREX 체계 개발



# HuREX - 시뮬레이터 자료 분석



No	HuREX Process
①	Design scenarios, and define expected procedural paths & key operator tasks
②	Perform simulation, observation & interview
③	Identify generic tasks & cognitive activities
④	Analyze observed operator responses & performance
⑤	Analyze unsafe act & related context information
⑥	Store collected data in OPERA DB
⑦	Analyze the collected data statistically to generate HRA data
⑧	Customizing HRA data

# HuREX - 시뮬레이터 자료 분석

- 시뮬레이터 자료 분석 시스템

**Response IGT**

ID	Scen	GT_JD	Proced	Step	Substep	Contents	Skipped	TaskType	SutTaskType
320	151204	27	ECA-3.1	1	0-	SI 신호를 RESET 한다.	<input type="checkbox"/>	RI	Entering
321	151204	27	ECA-3.1	1	0-cb-1	SB-HS-101	<input type="checkbox"/>	RI:MA	Manipulation;
322	151204	27							
371	151204	33							
372	151204	33							
373	151204	33							
374	151204	33							
375	151204	33							
376	151204	34							
377	151204	34							
378	151204	34							
379	151204	34							
380	151204	34							
381	151204	34							
382	151204	34							
383	151204	34							
384	151204	34							
385	151204	34							
387	151204	34							
388	151204	34							
389	151204	34							
391	151204	34							
1236	151204	120							

**UA IGT**

Field	Value
Key	090921_ISLOCA.T2
UA code	UA-2
UA overall description	E-0 19.0 (만일 1대의 RCP가 운전중이면 RCS 평균온도가 297.1도 근처에 안정되고 있거나 그 다음 안정되고 있는지 확인해서 RCS 온도를 확인 할때 SS가 RCS 온도를 측정하여 만약 불이 난고 추세를 발견하지 않아 RPO가 관련 매달려있을 때 RCS 온도는 잠깐이어서 RNO상황으로 RNO를 수행하여 해야 수행하지 않았음.
UA type	
UA effect	deviation from an expected EOP strategy
Component ID	
Recovered UA	N
Recovery timing	N/A
Related UA/Recovery Code	N/A
Reporting UA	N/A
Instruction UA	Wrong instruction
Manipulation UA	N/A
UA Performer	SS
Related Operator (Causality)	SS-B0-SS
Failed system/component	N/A
Failed alarm/indicator/display	N/A
Failed switch/controller	N/A
Time pressure	UA occurred before the completion of diagnosis during EOP operation
Task familiarity	simulator training
UA occurred during the performance of a contingency action part	N

# HuREX – Preliminary Study

- 분석 시뮬레이터 자료

Plant type	Event category	Scenario (# of simulation)	Supplementary information	Remark
OPR1000 (2-loop PWR)	Abnormal event	Diverse abnormal scenarios (205)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Communication logs</li> <li>• Process parameter logs</li> <li>• Event logs</li> <li>• Action logs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collected from 2008 to 2011</li> </ul>
WH900 (3-loop PWR)	DBA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISLOCA (10)</li> <li>• Multiple events (MSLB * SGTR) (8)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Communication logs</li> <li>• Process parameter logs</li> <li>• Event logs</li> <li>• Action logs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collected from 2009 to 2010</li> </ul>

# HuREX – Preliminary Study

- Estimated HEP (KAERI/TR-6649)

Bayesian update에 의해 계산된 UA 유형별 HEP

Cognitive Activity	Abb. Task Type	UA opp.	UA# (EOO)	5% 분위수 (EOO)	50% 분위수 (EOO)	95% 분위수 (EOO)	UA# (EOC)	5% 분위수 (EOC)	50% 분위수 (EOC)	95% 분위수 (EOC)
Information gathering and reporting	IG-alarm	453	1	3.000E-04	2.600E-03	8.601E-03	0	3.000E-04	2.600E-03	8.601E-03
	IG-indicator	2282	2	2.000E-04	9.001E-04	2.400E-03	0	1.000E-04	5.001E-04	1.700E-03
	IG-synthesis	120	0	1.400E-03	9.801E-03	3.260E-02	0	1.400E-03	9.801E-03	3.260E-02
	IG-value	121	0	1.400E-03	9.801E-03	3.240E-02	1	1.400E-03	9.801E-03	3.240E-02
	IG-comparison	395	0	4.000E-04	2.900E-03	9.801E-03	6	7.501E-03	1.560E-02	2.830E-02
	IG-graph	20	0	8.801E-03	5.811E-02	1.795E-01	0	8.801E-03	5.811E-02	1.795E-01
	IG-abnormality	371	0	4.000E-04	3.100E-03	1.050E-02	0	4.000E-04	3.100E-03	1.050E-02
	IG-trend	391	0	4.000E-04	3.000E-03	9.901E-03	7	9.301E-03	1.840E-02	3.200E-02
Response planning and instruction	RP-entry	624	2	9.001E-04	3.500E-03	8.901E-03	-	-	-	-
	RP-procedure	253	1	6.001E-04	4.601E-03	1.540E-02	0	6.001E-04	4.601E-03	1.540E-02
	RP-step	71	4	2.370E-02	5.851E-02	1.150E-01	0	2.400E-03	1.650E-02	5.371E-02
	RP-information	2885	10	2.000E-03	3.500E-03	5.701E-03	4	6.001E-04	1.400E-03	2.900E-03
	RP-manipulation	830	40	3.690E-02	4.841E-02	6.211E-02	13	9.701E-03	1.590E-02	2.420E-02
	RP-notification	523	9	9.701E-03	1.750E-02	2.880E-02	1	3.000E-04	2.200E-03	7.401E-03
Situation interpreting	SI-diagnosis	30	0	5.801E-03	3.890E-02	1.230E-01	8	1.531E-01	2.693E-01	4.120E-01
Execution	EX-discrete	712	11	9.201E-03	1.570E-02	2.470E-02	2	8.001E-04	3.000E-03	7.801E-03
	EX-continuous	25	0	7.001E-03	4.661E-02	1.460E-01	0	7.001E-03	4.661E-02	1.460E-01
	EX-dynamic	150	0	1.100E-03	7.901E-03	2.610E-02	1	1.100E-03	7.901E-03	2.610E-02
	EX-notification	512	3	2.100E-03	6.201E-03	1.370E-02	3	2.100E-03	6.201E-03	1.370E-02
Other	OT-manipulation	12	-	-	-	-	12	-	-	-

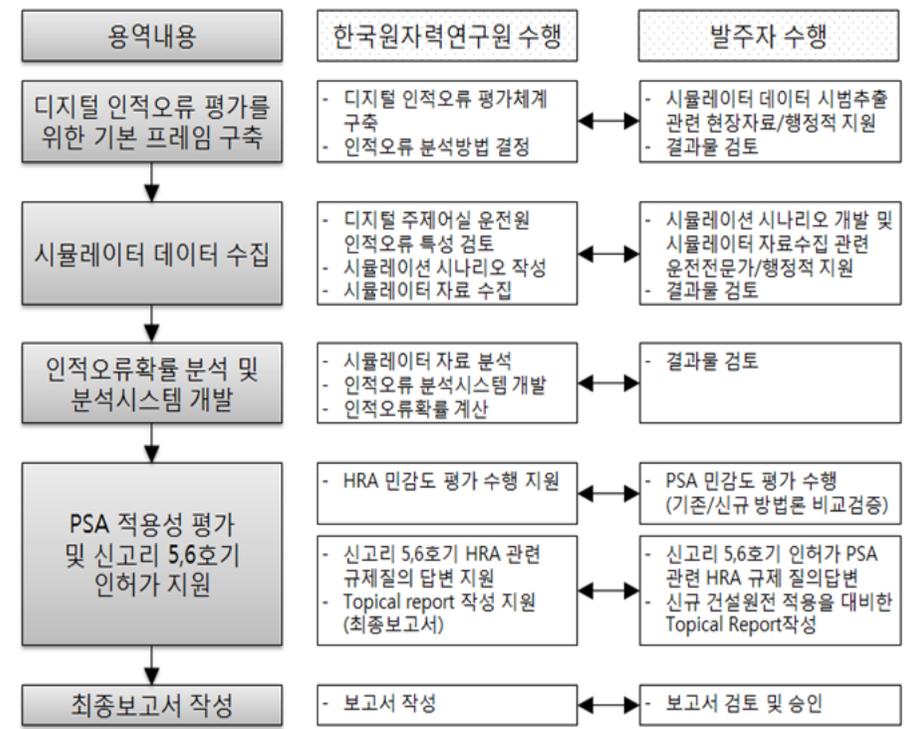
# APR1400 고유 HRA database 구축

- 한수원 과제 개요
  - 과제명: 디지털 환경의 인적오류확률 및 안전소프트웨어 신뢰도 평가
  - 과제기간: 2016.12~2019.6 (30개월)
  - 과제목표: (1) 디지털 주제어실 환경에서의 인적오류확률 평가체계 구축  
(2) 원자로 보호계통 안전소프트웨어의 정량적 신뢰도평가 및 리스크 영향 분석체계 구축
- HRA 연구 내용/결과
  - APR1400 시뮬레이터 자료 수집/분석 (HuREX 체계 적용)
  - 디지털 주제어실 설계/운전 특성 반영한 고유 HRA data 제공

# APR1400 고유 HRA database 구축

## • 연구 수행 계획

번호	용역내용	16년	17년				18년				19년			
		12	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
1	디지털 인적오류 평가를 위한 기본 프레임 구축	■	국내·외 선행연구 검토 및 자료수집·분석 기본 프레임 구축											
2	디지털 인적오류 평가를 위한 시뮬레이터 데이터 수집	■ 디지털 원전 주 제어실 시뮬레이터 자료 수집												
3	디지털 주 제어실 환경에서의 인적오류 확률 분석 및 분석 시스템 개발	■ 디지털 원전 주 제어실 시뮬레이터 자료 분석 및 분석 시스템 개발												
4	활론론적 안전성 평가 (PSA) 적용성 평가 및 신고리 5,6호기 인허가 지원	■ 사례분석 및 민감도 분석을 통한 PSA 적용성 평가 지원												
5	최종보고서 작성	■ 최종보고서 작성												



# HRA 방법 개발 방향

	1st G. HRA	2nd G. HRA
기존 주제어실	<p>THERP/ASEP, HCR/ORE, CBDT, K-HRA</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정량적/행위적 오류분석 위주</li> <li>- 기존 HSI 대상</li> <li>- 적용 쉬움, 이론적 취약</li> </ul>	<p>CREAM, ATHEANA, IDHEAS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정성적/인지적 오류분석 강조</li> <li>- 기존 HSI 대상</li> <li>- 이론적 충실, 적용 어려움</li> </ul>
신형 주제어실	<p>HuRECA</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 디지털 HSI 특성 반영</li> </ul>	<p>New Method</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 디지털 HSI 특성 반영</li> </ul>

## 디지털 환경 HRA 방향은?

1. 기존 방법 사용 - HRA Calculator, THERP
2. 기존 방법 개선 - HuRECA 개선
3. 새로운 방법 개발 - New method



Ref. NuPIC 2009, W. Jung

# HRA 방법론 특성 비교

HRA 방법	개발자	인지적 특성 반영	실증자료기반	사용성	디지털MCR 특성 반영
THERP	US NRC	Low	Medium	Low	Low
ASEP	US NRC	Low	Low	High	Low
SPAR-H	US NRC	Low	Low	High	Low
ATHEANA	US NRC	High	Low	Low	Low
IDHEAS	US NRC	High	Low	Low	Low
HCR/ORE	EPRI	Low	High	High	Low
CBDTM	EPRI	Medium	Low	High	Low
K-HRA	KAERI	Low	Low	High	Low
HuRECA	KAERI	Low	Low	High	Medium
<b>New Method</b>	<b>KAERI</b>	<b>High</b>	<b>High</b>	<b>High</b>	<b>High</b>

# 향후 연구계획

년도	연구목표	연구내용
2017	디지털 환경 HRA 영향요소 도출	디지털 주제어실 인간공학요소 검토
2018	디지털 주제어실 HRA 영향인자 구분	디지털 주제어실 HRA 영향인자 분석
2019	디지털 주제어실 HRA 정량화 방법 개발	디지털 주제어실 HRA 정량평가 규칙 개발

연구내용	2017											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3. 디지털 환경 인간 신뢰도 영향요소 도출												
o HRA 개발 요건 자료 (what is (or what makes) a good HRA method?)												
o Human reliability issues in Digital environment												
o Reviews of previous HRA methods including HRA methods considering digital issues												
o 신뢰도영향인자 목록 도출												
o 진단오류 특성분석												
o Reporting												

# 결론

- 국내 HRA 현안
  - PSA 법제화에 따른 HRA 품질 향상
  - APR1400 HRA method/data
  - 외부사건, L2, 다수기 HRA
- 국내 HRA 연구 현황
  - HRA method: K-HRA, HuRECA
  - HRA data: HuREX 체계
    - 시뮬레이터 기반 HRA 자료 수집/분석 -> HRA data 제공
- 디지털 환경 HRA 연구 계획
  - APR1400 시뮬레이터 자료 분석을 통해 고유 HRA data 제공
  - 수집된 HRA data를 바탕으로 디지털 환경 HRA 방법 개발



감사합니다!

Q&A