

A Study on the Relationship between Human Errors and the Anthropometric Dimensions of the Control Room Design Factors in Nuclear Power Plants

Kyung-Sun Lee, Yong-Hee Lee

I&C/Human Factors Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon, 305-353

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to investigate the relationship between human errors and anthropometry dimensions of the main control room (MCR) design factors in nuclear power plants (NPPs). **Background:** The condition of MCR should be suitable to the works of the crews in NPPs. The suitability of MCR closely depends on the anthropometric dimensions and ergonomic factors of the user population. Especially, the MCR workspace design in NPPs is important due to the close relationship with operating crews and their work fails. Many documents and criteria have recommended that anthropometry dimensions and their studies are one of the foremost processes of MCR design in NPPs. It should be included in the suitability verification during the design V&V. If not considering these factors properly, users can feel burdened about their works and the human errors that might happen. **Method:** Investigations on the important anthropometric dimensions were conducted into the surveys and the interviews with 3 experts of NPPs and 9 ergonomists. The first set of investigation items are 16 design factors of MCR and 34 anthropometry dimensions. The 3 experts and 9 ergonomist rated the items according to the relationship with any kind of human error potentials. **Results:** We propose a set of 14 anthropometry dimensions and their relationships with human errors about standing consoles, sitting consoles, vertical panels, and others in MCR. The selected 14 dimensions are stature, sitting height, eye height from floor, eye height above seat, visual field, arm length, functional reach, extended functional reach, radius of reach, hyperopia/myopia/astigmatism, color blindness, auditory acuity, finger dexterity and hand function. **Application:** The proposed set of anthropometry dimensions can be integrated into a managerial index for the anthropometric suitability of the operating crews for more careful countermeasures to human errors in NPPs.

Keywords: anthropometry, main control room (MCR), human error, suitability, guideline, nuclear power plants(NPPs)

1. Introduction

원자력발전소(이하 원전) 주제어실(main control room)은 운영의 효율성, 연계기기와의 관계, 기기의 유지/보수, 기기 시험보수 및 반/출입 등을 종합적으로 고려하여 설계해야 한다(IAEA, 2000). 주제어실은 가동을 위한 감시 및 제어뿐만 아니라 보수, 시험, 검사를 위한 정보수집, 계획, 의사결정 등을 수행하는 장소이기 때문에 다른 어떤 시스템보다도 특별히 안전성이 강조된다. 주제어실은 설비의 신뢰도와 함께 이를 감시하고 제어하는 운전원의 인

적오류(human error)와 직접적으로 관련된다.

주제어실은 작업자가 주어진 임무를 성공적으로 수행할 수 있도록 모든 설비를 효율적으로 사용할 수 있어야 한다. 이를 위해 기능적 배치의 적합할 뿐만 아니라 다양한 인간공학적 기준을 최적으로 만족해야 한다. 현재 원자력법 시행령 제299조와 시행규칙 제115조에서는 종사자의 업무적합성 기술 기준을 제시하고 있다. 그러나 건강진단 항목만으로 건강상의 문제만을 대비하고 있다. 미국에서도 원전 종사자의 업무적합성 관리를 위한 법규(10CFR26, Fitness-For-Duty Program)를 따르고 있지만, 인체 적합성은 명확히 고려하지 못하고 있다.

원전 주제어실의 설계, 선정 및 설치 시 고려해야 하는 기술기준으로 현재 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission; NRC)는 인간공학 지침(Human-System Interface Design Review Guidelines, NUREC-0700)을 제시했다. 이 문서에서는 주제어실의 모든 조건은 운전원에 적합해야 하는데, 특히 최신 디지털 기술을 도입한 주제어실 제어반과 워크스테이션(workstation) 설계에서 직무수행의 성공을 위해 먼저 사용자 집단의 인체측정학(anthropometry)적 특성치에 부합해야 한다고 권고하고 있다.

원전 이외에도 시스템이 복잡하거나 위협의 강도가 높은 대형 시스템 산업 분야에서는 인적 수행도를 제고하고 사고 및 재해를 예방하기 위한 일환으로 신체 적합성을 판정하고 있다. 항공분야에서는 ‘항공신체검사증명’ 제도를 운영하여, 항공근무자의 신체적 기준의 세부사항으로 체중, 키, 시정각기능, 운동능력을 비롯하여 기타 인체계통 모두를 점검하고 있다(Ministry of Land, 2013). 산업안전분야에서도 이와 유사하게 사업장에 관한 인간공학적 인증제도를 도입하려는 노력을 하고 있다(Park et al., 2013). 현재까지는 컴퓨터를 사용하는 사무작업을 대상으로 하고 있지만 점차 확대될 것으로 예상하고 있다.

위에서 언급했듯이 원자력 분야에서는 NUREC-0700 문서에서 인체측정학적 특성치를 설계에 적용해야 한다고 권고하고 개별적인 설계고려사항으로만 제시되고 있다. 이 권고사항은 공학적 접근방법으로 설계 과정에 적용하고 있지만, 실제 종사자의 적합성 판단에는 적용하지 않고 있다. 따라서 여전히 주제어실 운전원의 인적오류에 영향을 주고 있다. 원자력 분야에서도 항공 및 산업안전분야와 유사하게 종사자의 신체 적합성을 평가하여 관리적(management) 보완 방안을 적용할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 원전에서 인적오류를 방지하기 위한 선제적 조치의 일환으로 주제어실 근무자를 대상으로 종사자의 신체적합성 관리 지침을 개발하는 것이다. 이를 위해 1) 인적오류 측면에서 주제어실 설계 변수와 인체치수 변수의 관계를 설문 및 면담을 통하여 조사하고, 2) 관련성이 높은 항목에 대한 신체적합성 관리지침을 제안하였다.

2. A Survey on the relationship between human errors and the anthropometric dimensions for MCR

2.1 Design variables and anthropometry dimensions

원전에서 주제어실의 다양한 설비 중 인체측정학적 특성치를 가장 많이 적용하고 있는 항목은 제어반 패널과 워크스테이션이다. 따라서, 본 연구에서는 NUREC-0700에서 제시하는 주제어실의 패널과 워크스테이션 설계변수와 그에 해당하는 인체측정 변수들을 조사대상으로 선정하였다.

제어반의 종류는 입식콘솔, 좌식 콘솔, 수직 패널로 3가지로 구분하였다. 세부 설계 변수는 총 16개로 구성하였으며, 그에 따른 인체측정 변수는 총 34개(중복되는 인체측정학적 변수를 제외하면 총 16개)의 인체측정학적 변수를 후보로 선정하였다(Table 1).

Table 1. Design variables and anthropometry dimensions for MCR

No	Type	Design variable	Anthropometry dimension	
1	Stand-Up Console	Console Height	Arm length	
2		Control Height	Stature	
3			Radius of reach	
4		Benchboard Slope	Radius of reach	
5		Maximum Distance of Controls from the Front Edge of the Console	Extended functional reach	
6		Display Height and Orientation	Eye height from floor	
7			Visual field	
8		Location of Frequently Monitored Displays	Visual field	
9		Location of Infrequently Monitored Displays	Visual field	
10		Equipment (Standing)	Stature	
11			Eye height from floor	
12			Functional reach	
13			Finger tip height	
14			Extended functional reach	
15			Shoulder height	
16			Elbow height	
17		Equipment (Sitting)	Eye height above seat	
18			Functional reach	
19			Sitting height	
20			Shoulder height above seat surface	
21			Extended functional reach	
22			Knee height	
23			Buttock-popliteal length	
24		Thigh clearance height		
25		Sit-Down Console	Console Height	Sitting height
26			Control Height	Radius of reach
27			Benchboard Slope	Functional reach
28			Display Height and Orientation	Visual field
29			Lateral Spread of Controls and Displays	Visual field
30				Extended functional reach
31		Vertical Panels	Control Height	Stature
32			Display Height	Arm length
33				Visual field
34				Eye height from floor

2.2 Subjects

선정한 주제어실의 설계변수와 그에 따른 인체측정학 변수들에 대하여 인적오류 측면에서의 관계를 파악하기 위하여 설문과 면담 조사를 실시하였다. 설문대상은 원전 주제어실에서 근무한 경력이 있는 원전 운영 전문가 3인과 원전 주제어실 설계 및 평가 경력이 있는 인간공학 전문가 9인 등 총 12명이며, 평가 후 면담으로 정성적 의견을 수집하였다.

주제어실 설비 중 운전원의 인적오류와 관련이 가장 높을 것으로 보이는 제어반 콘솔과 워크스테이션의 주요 설계변수에 따른 인체측정학 변수들의 관계를 검토하여, 설계 치수 혹은 인체측정 치수가 서로 부적합할 경우, 직무수행 중 인적오류 발생에 영향을 줄 가능성이 어느 정도인지를 상, 중, 하로 평가하도록 하였다.

또한 1차 조사 결과의 타당성을 확인하기 위하여 추가적으로 분석결과 도출된 인체측정항목 및 설계변수를 재검토 받았다.

2.3 Data analysis

인체 적합성 평가를 위한 세부항목을 선정하기 위하여 상, 중, 하로 평가된 전문가 평점을 분석하였다. 평가항목의 선정 기준은 (1)식의 값이 70% 이상으로, 상, 중 빈도의 비율이 전체 70% 이상을 차지하는 항목이다(1).

$$\text{평가항목 비율(\%)} = (\text{상빈도} + \text{중빈도}) / N \times 100 \quad (1)$$

(*N: 평가 총수)

2.4 Selection of the anthropometry dimensions

2.3의 평가항목 기준을 적용하여 인체 적합성 평가의 세부항목을 선정하였다. 인체측정항목은 키, 앉은 키, 선 눈 높이, 앉은 눈 높이, 시각 범위, 시야, 팔 길이, 기능적 팔 뻗침 범위, 최대 팔 뻗침 범위, 팔 회전반경 등 총 10개 항목이었다. 그러나 디지털 기반 주제어실에서 추가로 고려해야 할 항목 및 인적오류 관리 측면에서 실무적인 적용성을 평가한 결과, 일부 항목을 조정하고 원/근/난시, 색깔, 청력, 손가락 기민성, 손 기능 등 5항목을 추가하였다. 인체 적합성 평가를 위한 인체측정항목으로 최종적으로 14개의 선정하였다.

3. Development of the management guideline for the anthropometry suitability

종사자의 인체 적합성 관리를 위해 필요한 업무를 Figure 1과 같이 제안하였다. 제안된 인체 적합성 관리는 1) 인체 적합성 평가 항목 선정, 2) 인체 적합성 평가 항목의 측정, 3) 인체 적합성 평가 기준 설정, 4) 인체 적합성 평가, 5) 인체 적합성 평가 등급 관리 등으로 구성된다.

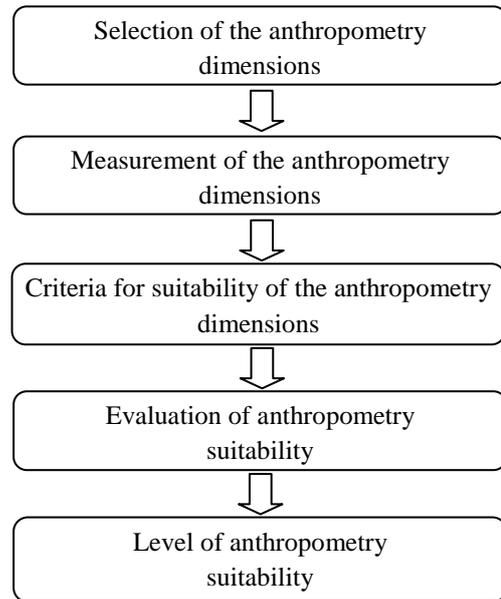


Figure 1. Proposed steps for the management of anthropometry suitability of MCR crews

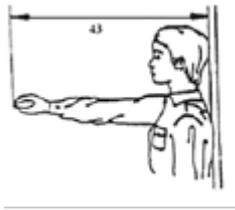
3.1 Selection of the anthropometry dimensions

특정 원전에서 종사자의 인체 적합성을 평가하기 위해서는 주제어실의 근무경험자와 관련 인간공학자의 평가를 거쳐 인체측정항목을 재검토해야 한다. 특히 인적오류 정지/고장사고 사례를 검토하여 관련된 핵심설비를 반영해야 한다. 따라서 2절에서 제안한 방법을 따르되, 선정기준은 조정할 수 있다.

3.2 Measurement of the anthropometry dimensions

인체 적합성 평가를 위한 자료를 확보한다. 각 항목에서 동일한 기준으로 정확한 측정값을 얻기 위하여, 측정 항목의 정의, 측정자세, 측정기준, 측정 방법 및 실무 등을 지침으로 제공하였다(Table 2).

Table 2. Measurement of the anthropometry dimensions
(Example: *Functional reach*)

Anthropometry dimension	Functional reach
Define	The horizontal distance from the wall to the tip of the thumb
Posture	Anatomical standing posture
Measurement method	Measure with the subject's forward, and the index finger touching the tip of the thumb
Figure*	

* Source: Stephen Pheasant (1996)

3.3 Criteria for suitability of the anthropometry dimensions to the MCR in NPPs

본 연구에서 인체 적합성 평가에 적용된 기준은 Table 3에 예시한 것과 같이 NUREC-0700에서 주 제어실 설계에서 고려하도록 요구한 평가항목별 인체 기준치를 적용하였다.

치수 이외에 시청각 및 손/손가락 기능을 추가하였다. 시청각의 경우 원/근/난시 검사와 방사선 지표 검사를 따르며, 색각 이상에는 적녹시 색맹검사표를 따른다. 청력검사의 기준은 순음청력검사 기준을 따른다. 또한 손가락 기민성(finger dexterity) 검사는 O'Connor 손가락 기민성 검사의 기준을 따르며(Corlett et al., 1971), 손 기능 검사는 Jebsen-Taylor의 Hand function test 기준을 채택하였다(Jebsen et al., 1969).

Table 3. Criteria for suitability of the anthropometry dimensions (Example: *Functional reach*)

No	Type	Design variable	Anthropometry dimension		Criteria
1	Sit-Down Console	Bench-board Slope	Upper arm	Functional reach	More than 64.0cm

* Source: NEREC-0700

3.4 Evaluation of anthropometry suitability

인체 적합성은 3.3절의 기준에 의거하여 개별적인 항목별로 적합과 부적합의 2가지 척도로 평가한다. 항목별로 인체 적합성을 평가한 후, 적용 가능한 대응조치의 형태에 따라 최종 판정을 결정하도록 하였다. 대응조치는 공학적 대응(Category-E)과 관리적 대응(Category-M)으로 양분하고, 공학적 대응은 보조기계 및 기구의 사용, 설비의 일부 변경 등으로 세분하며, 관리적 대응은 체조/스트레칭, 감독, 보조 지원, 업무 재구성, 근무변경 등을 포함한다. Table 4는 인체 적합성 평가 항목이 3.3절의 기준에 부적합한 것으로 평가되었을 때 적용할 수 있는 보완 및 개선 방법의 유형(Category) 구분을 예시한 것이다.

Table 4. Anthropometry dimension and improvement

No.	Anthropometry dimension	Improvement method
1	Stature	Engineering (Category-E)
2	Sitting height	
3	Eye height from floor	
4	Eye height above seat	
5	Visual field	
6	Arm length	
7	Functional reach	
8	Extended functional reach	
9	Radius of reach	
10	Hyperopia/Myopia/Astigmatism	Management (Category-M)
11	Color blindness	
12	Auditory acuity	
13	Finger dexterity	
14	Hand function	

3.5 Level of anthropometry suitability

인체 적합성의 실무적인 관리를 위하여 평가의 최종 등급은 I, II, III 등급으로 구분하였다(Table 5). I 등급은 모든 평가 항목에서 적합하고, II등급은 Table 4에서 제시한 공학적 개선으로 부적합을 해소하거나 오류발생을 대처할 수 있는 경우로, 주 제어실 종사자로 적합함을 의미한다. III등급은 공학적 개선만으로는 부적합함을 예방할 수 없는 항목으로써, 주 제어실 근무자로서 관리적 개선이 적용되어야 하는 등급이다.

Table 5. Level of anthropometry suitability

Level	Criteria	Suitability /possibility
I	All suitability	Suitability in MCR
Non-suitability of management improvement essential dimension	Non-suitability in MCR	

No.	평가항목별 세부 검사 기준 및 측정표	기준	계항	부차항
1	일시관송 정립인계(standing) 키	1) 키 152.4~188.7cm 이내		
2	일시관송 관송의 높이	2) 앉은 키 147.3cm 이상		
3	일시관송 정립인계(standing) 키	3) 선 눈 높이 143.5~176.0cm 이내		
4	일시관송 정립인계(seating) 키	4) 앉은 눈 높이 104.1~177.0cm 이내		
5	일시관송 정립인계(seating) 키	5) 시가 범위 87.6~93.3cm 이내		
6	일시관송 정립인계(seating) 키	6) 시야각 범위 75도 이상		
7	일시관송 정립인계(seating) 키	7) 시야각 범위 75도 이내		
8	일시관송 정립인계(seating) 키	8) 시야각 범위 91도 이상		
9	일시관송 정립인계(seating) 키	9) 시야각 범위 91도 이상		
10	일시관송 정립인계(seating) 키	10) 팔 길이 39		
11	일시관송 정립인계(seating) 키	11) 어깨 너비 84.0cm 이상		

4. Discussions for the application to NPPs

3절에서는 인체 적합성 관리지침 개발을 위한 일반적인 체계를 제안하였다. 따라서 실제 발전소에 적용하기 위해서는 위에서 제안한 전체적인 체계를 따르되, 발전소 상황을 고려해야 한다. 먼저, 인체측정변수의 선정은 적용하려는 발전소의 핵심설비, 기계/기구를 검토하고, 기존 인적오류 정지/고장사고 사례를 반영해야 한다. 또한 선정된 변수에 대한 측정 및 기준 성립은 적합여부를 결정하는 중요한 단계이기 때문에 정확한 기준을 성립하고 측정 및 관리자를 대상으로 별도의 교육훈련이 필요하다. 마지막으로, 선정된 인체 적합성 평가 항목에 대하여 실제 현장에서 적용 가능한 대응조치의 형태를 결정하기 위하여 대상 현장의 특성에 대한 인간공학 조사가 이루어져야 한다. 인체 적합성의 종합적인 등급은 단지 관리적인 편의를 위한 것으로 종사자의 인사적 평가나 선정 및 배치를 위한 필수정보는 아니다. 그러나 인적오류 대처가 중요시되는 직무 및 상황에서는 세부 항목에 따라 적절한 보완 조치를 적용하도록 연계하는 정보가 된다.

다음 Figure 2는 현재 개발중인 원전 종사자 인체 적합성 관리 지침(안)을 예시한 것이다.

기침서 번호	제 목	개정번호	페이지		
KAERI-TR-000	원전 종사자 인체 적합성 관리 지침	00	52/52		
9.3 인체 적합성 평가 항목 측정표(일부 판인 시)					
○ 측정일자: 20년 월 일 / 대상자: (서명) 측정자: (서명) 평가 종류: 평가(), 특별(), 기타() 평가 사유:					
번호	대항목	구분	측정항목	측정기준	비고
1	키	키	키	152.4~188.7cm	
2	관송의 높이	관송의 높이	관송의 높이	147.3cm 이상	
3	선 눈 높이	선 눈 높이	선 눈 높이	143.5~176.0cm	
4	앉은 눈 높이	앉은 눈 높이	앉은 눈 높이	104.1~177.0cm	
5	시가 범위	시가 범위	시가 범위	87.6~93.3cm	
6	시야각 범위	시야각 범위	시야각 범위	75도 이상	
7	시야각 범위	시야각 범위	시야각 범위	75도 이내	
8	시야각 범위	시야각 범위	시야각 범위	91도 이상	
9	시야각 범위	시야각 범위	시야각 범위	91도 이상	
10	팔 길이	팔 길이	팔 길이	39	
11	어깨 너비	어깨 너비	어깨 너비	84.0cm 이상	

Figure2. Guideline for the management of the anthropometry suitability of NPP personnel: MCR (draft for information with example pages)

개별 현장에서는 종사자별로 주의해야 하는 특정 설비 및 관련된 특정 인체측정 항목의 선정은 물론 적합성 불충분에 대한 대응조치를 전략적으로 다양하게 재구성할 수 있을 것이다.

목 차	
1.0 목적	1
2.0 적용범위	2
3.0 용어 및 약어	2
4.0 용어 및 약어	2
5.0 주제어실 사용자 인체 적합성 기준	4
6.0 피원 선반 시 인체 적합성 관리	9
7.0 피원 제어 시 인체 적합성 관리	11
8.0 업무 관리 시 인체 적합성 관리	15
9.0 별첨	19

5. Conclusion

본 연구에서는 원전 주제어실 종사자를 대상으로 인체 적합성의 기준 및 관리 절차를 제시하였다. 이는 원전에서 발생할 수 있는 인적오류를 선제적(proactive)으로 저감하기 위하여 수행되는 원전 종사자 인체 적합성 관리 지침 개발의 일환이다. 인적오

류 측면에서 주제어실의 설계변수와 인체측정변수의 관계를 전문가 설문 및 FGI를 통해 분석하였다. 그 결과 공통적인 제어반 패널과 워크스테이션과 관련하여 14개의 평가항목을 제안하였다. 이를 기반으로 1) 인체 적합성 평가 항목 선정, 2) 인체 적합성 평가 항목의 측정, 3) 인체 적합성 평가 기준 설립, 4) 인체 적합성 평가, 5) 인체 적합성 평가 등급 관리 등으로 구성되는 인체 적합성 관리 지침(안)을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 인체 적합성 관리지침은 원전에서 주제어실 운전원의 인적 수행도를 향상시킬 수 있으며, 최종적으로는 인체특성상의 부적합으로 발생할 수 있는 희귀성 인적오류를 사전에 예방하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 제안된 인체적합성 기준 및 관리방법은 원전 종사자의 선발, 배치 및 업무 할당 등에 활용 가능하며, 평가 결과를 데이터베이스화하여 필요한 경우 적절한 교육훈련 및 관리적 지원도구를 개발하기 위한 근거자료로 활용할 수 있을 것이다.

Acknowledgements

This research was supported by the nuclear energy research and development project (Grant. 2012M2A8A-4004256) funded by the Ministry of Education, Science and Technology..

References

- Corlett, E.N., Salvendy, G and Seymour, W.D., Selecting operators for fine manual tasks: A study of the O'Connor finger dexterity test and the purdue pegboard, *Occupational Psychology*, 45(1), 57-65, 1971.
- IAEA, Safety of nuclear power plants: design, Safety Standards Series No. NS-R-1, 2000.
- Jebsen, R.H., Taylor, N., Trieschmann, R.B., Trotter, M.J. and Howard, L.A., An objective and standardized test of hand function, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 50(6), 311-319, 1969.
- Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Development report for work suitability criteria, 2010.
- Lee, K.S. and Lee, Y.H., *Guideline for the management of the anthropometry suitability of NPP personnel: MCR*, Technical Report (draft for information), KAERI, 2014. (in Korean)
- Ministry Government Legislation, Enforcement decree of the atomic energy act 299(Medical examination), 2013
- Ministry Government Legislation, Enforcement decree of the atomic

- energy regulation 115(Medical examination), 2013
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Aeromedical licensing system, 2013.
- Park, H.S., Jeong B.Y. and Jung M.C., "A study on the licensing program For Ergonomic suitability place", *Conference on The Ergonomics Society of Korea*, 2013.
- Pheasant, S., *Body space; anthropometry, ergonomics and the design of work*, 2nd Ed., Taylor & Francis, 1996.
- Size Korea Home Page, <http://sizekorea.kats.go.kr> (retrieved Dec. 1, 2011).
- URNRC, *10CFR26, Fitness-For-Duty (FFD) Program*, 2009.
- URNRC, *Human-System Interface Design Review Guidelines, NUREC-0700*, rev.2, 2011.

Author listings

Kyung-Sun Lee: kslee@kaeri.re.kr

Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, Ajou University

Position title: Senior Researcher, I&C Human Factors Research Division, Korea Atomic Energy (KAERI)

Areas of interest: Biomechanics, WMSDs, Work design, Product design, Human Error

Yong-Hee Lee: yhlee@kaeri.re.kr

Highest degree: MS, Department of Industrial Engineering, Seoul National University

Position title: Principal Researcher, I&C and Human Factors Research Division, Korea Atomic Energy (KAERI)

Areas of interest: Cognitive System Engineering, Human Interface Design, Human Error, System Safety, Safety Culture