

리스크정보활용 대국민 수용성 확보방안

- 리스크정보활용 및 활용체계 도입방안 -

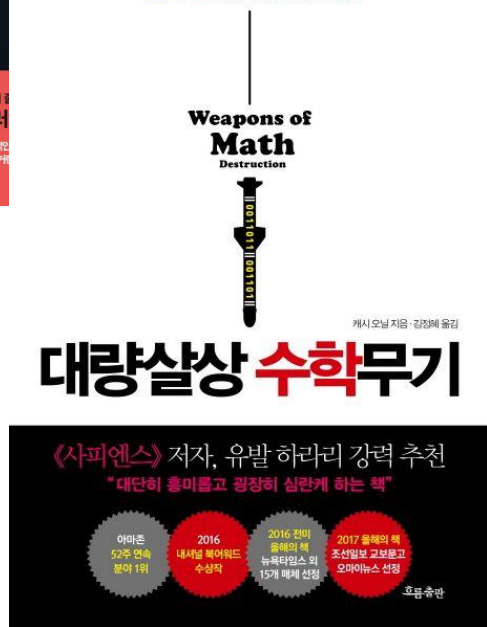
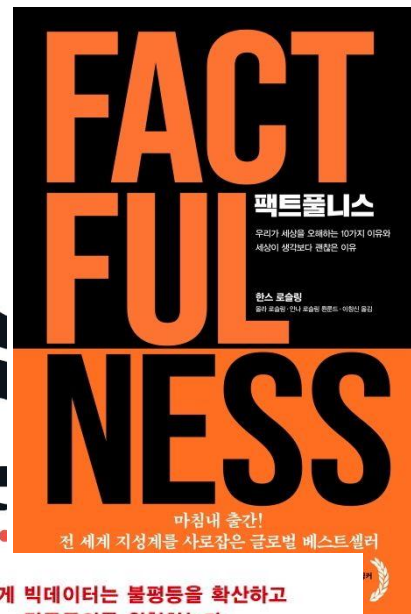
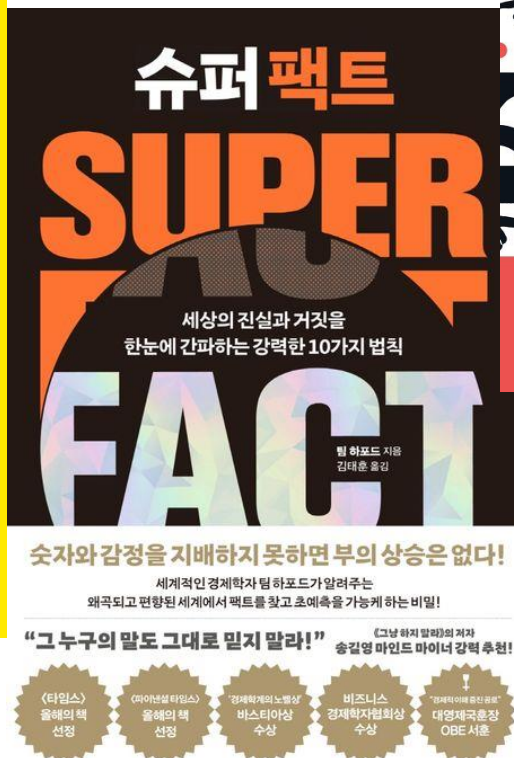
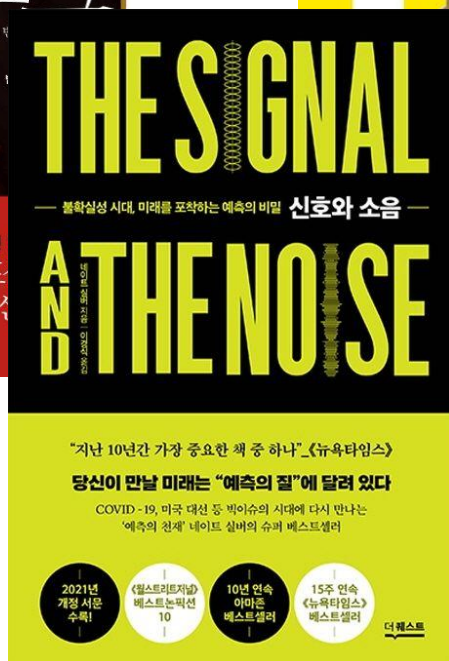
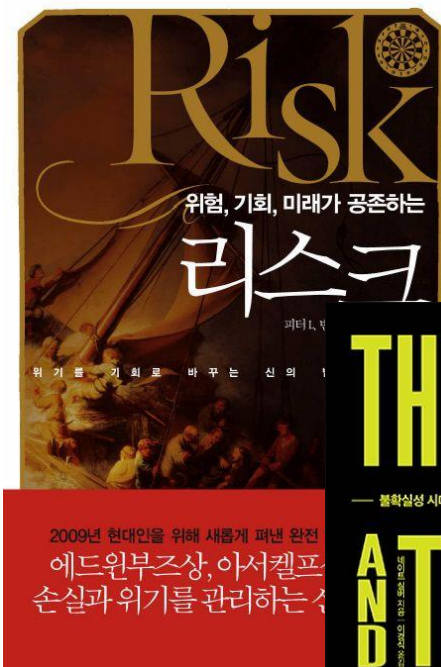
한국원자력학회 추계 학술대회

2023년 10월 25일

경희대학교

허균영

직관(直觀)과 확률/통계의 괴리



신뢰성(Reliability)



$$R(t) = \Pr(T \geq t|C) = \int_t^{\infty} f_T(x)dx$$

- $R(t)$
 - Reliability of the item at time t after which the mission time T is completed under stated conditions
- T
 - Designated period of time (i.e., mission time or life time)
- t
 - Time to failure (i.e., Random variable)
- C
 - Designated conditions such as environmental conditions

- 최초의 신뢰성

- 1816년 Samuel Coleridge (낭만주의 시인)

- He inflicts none of those small pains and discomforts... while on the contrary he bestows all the pleasures, and inspires all that ease of mind on those around him or connected with him, with perfect consistency, and absolute reliability.
 - 그분은 작은 고통이나 불편함도 전혀 주는 적이 없습니다... 반대로 그는 완벽한 일관성과 절대적인 신뢰성을 바탕으로 주변 사람들이나 자신과 관련된 사람들에게 큰 즐거움을 주고 마음의 편안함을 불어넣습니다.

reliability engineering

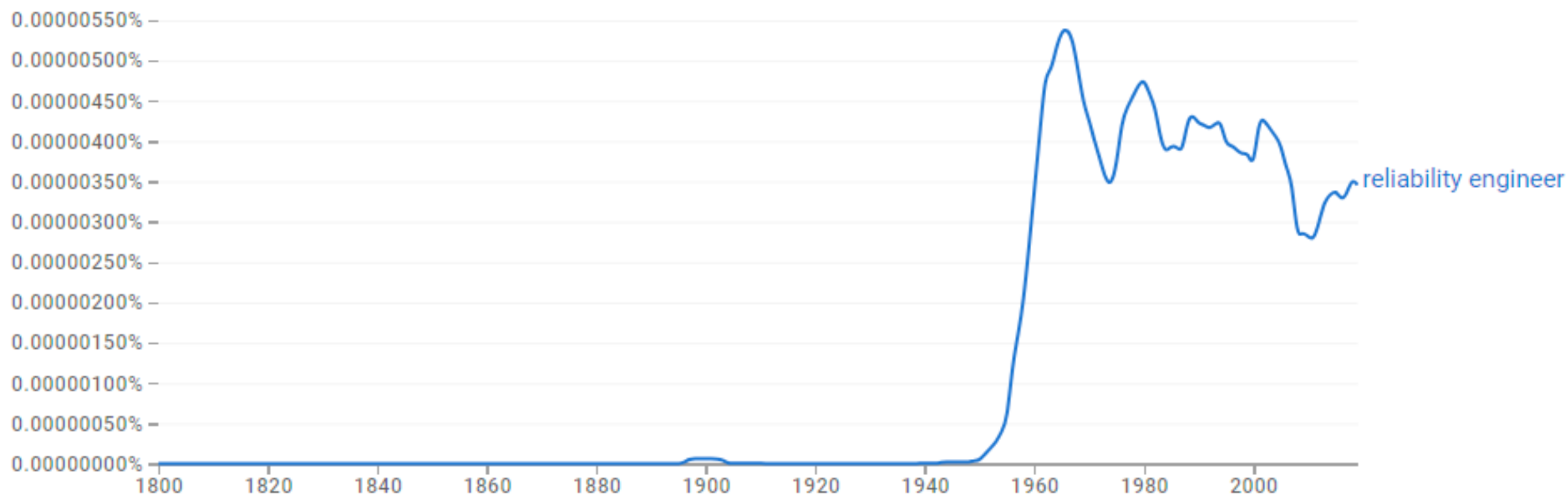


1800 - 2019

English (2019)

Case-Insensitive

Smoothing of 0



reliability engineer

(click on line/label for focus)

신뢰성 공학의 동기부여

- 확률/통계
 - 1654. Pascal과 Fermat의 도박에 관한 질문: 도박을 하면서 게임을 일찍 끝내기를 원하는 사람이 있을 때, 각자가 게임에서 승리할 수 있는 확률에 따라 공평하게 판돈을 나누는 방법 → 기대값 개념 도입 (1812. Laplace가 해결)
- 대량생산
 - 1893. 미국 남북전쟁시 Springfield armory에서 연간 300,000 정의 소총 생산 → 대규모 생산물자에 대한 품질관리 → 통계적품질관리 (1920년대)
- 진공관
 - 1906. Forest 진공관. 2차대전 즈음하여 진공관을 중심으로 하는 전자부품에 대한 품질관리가 중요하게 대두. 연합국에 승리에도 기여 → 미국 국방부에서 신뢰성 공학에 대한 관심

신뢰성 공학의 성장

- 산업혁명 초기
 - 위험한 시설, 잦은 사고
 - 신뢰성을 높이기 위한 방법으로서 통계적인 방법과 안전에 대한 새로운 표준의 도입
- 1920~30년대 Shewhart, Dodge, Romig 등. 통계적품질관리를 제조업에 처음으로 적용 (Economic Control of Quality of Manufactured Product, 1931년 논문)
 - 하지만, 우연의 법칙으로 과학적 생산방식에 영향을 준다는 생각은 당시에는 인정받지 못함 ('...deep-seated conviction of American production engineers. that laws of chance have no proper place among scientific production methods')
 - 2차 세계대전이 발발하면서 통계적품질관리가 급속도로 확산되고, 그 이후 신뢰성 공학으로 발전

- 통계적 품질관리의 맹점

- 다수의 부품으로 구성된 제품은 개별 고품질 부품으로 구성되었음에도 불구하고 신뢰성이 낮음을 확인 (사례: 독일의 V-1 로켓은 고도의 품질을 유지하는 부품을 사용하였으나, 임무실패 확률이 높았음)
- Robert Lusser는 '구성요소의 곱 확률 법칙'을 발견. 즉, 시스템의 신뢰성은 시스템을 구성하는 개별 구성 요소의 신뢰성을 곱한 것과 동일하며, 시스템이 많은 수의 부품으로 구성되면 개별 부품의 신뢰성이 높더라도 시스템 신뢰성이 다소 낮을 수 있음을 확인

- 1914-1918 제1차 세계대전
 - 처음으로 신뢰성이 기술적 의미로 등장
 - 신뢰성은 비행시간당 사고건수로 측정
- 1939-1945 제2차 세계대전
 - 항공산업의 호황 → 안정적인 엔진과 구성요소
 - 초기에는 원인분석, 고장물리, 부품 신뢰성 향상에 초점
 - 효과성이 입증된 뒤, 자동차, 전자 산업에서 채택
- 1952 AGREE(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) 설립. 미 국방부와 미국 전자산업협회로 구성. 신뢰성 공학을 공식적으로 '공학'의 한 Discipline으로 명명

- 1954 IEEE Transactions on Reliability 발행
 - 소련의 스푸트니크 발사 성공. 미국은 Mercury 및 Gemini 프로그램과 관련된 대륙간 탄도 미사일 및 유인 우주선 연구에 집중
 - 우연의 법칙이 과학적 생산방식에 영향을 주기 시작
- 1960년대. 통계기법(Bayesian, Markov Chain 등), 고장물리(Physics of Failure), 구조건전성(Structural Reliability) 등의 분야가 급속도로 성장하고, 군용목적의 고신뢰성 부품에 대한 연구도 추진
 - 부품 중심의 신뢰성이 시스템 중심의 신뢰성으로 옮겨가는 시기
 - 신뢰성은 임무시간 내에 작동할 확률의 개념에서 수명주기 비용에 대한 평가의 개념으로 이동

- 1970년대. 진공관에서 트랜지스터, IC로의 전환
 - 시스템 중심의 신뢰성 정착 시기 (원자력분야 WASH-1400)
 - PRA라는 명칭의 등장. 이후 화학분야에 QRA, 해양분야에 FSA 등으로 확산
 - 석유파동으로 인해 석유 및 가스 파이프라인, 화공분야에서의 신뢰성 향상 주목
 - 소프트웨어 신뢰성 부상. 정부의 신뢰성 보상 정책 실시
 - 여전히 신뢰성 공학에 대한 부정적 의견 상존
 - "The factor of 10 by which reliability has improved in the past years is far less attributable to our papers on reliability than to the invention [of new technologies]."
 - "지난 몇 년간 신뢰성이 10배 향상된 요인은 신뢰성에 관한 우리의 논문보다는 [신기술의] 발명에 의한 것입니다."

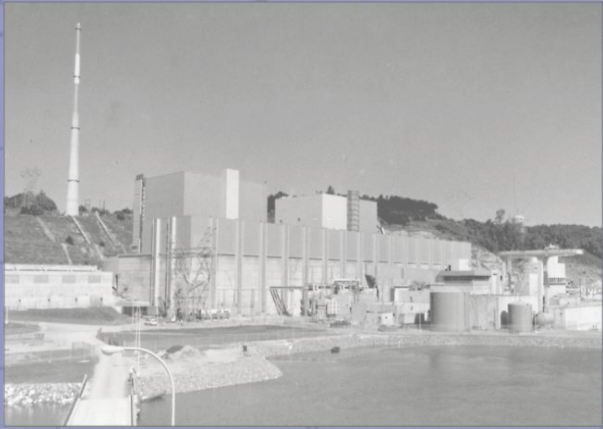
- 1980년대

- 반도체 산업의 호황에 따른 전자산업에의 신뢰성 도입
- 컴퓨터 프로그램이 복잡해 지면서 소프트웨어 신뢰성 기술의 중요성 상승
- 체르노빌 재해로 인해 신뢰성 엔지니어링에 대한 새로운 도전 국면

- 1990년대

- 신뢰성 공학의 디지털 시대로의 전환
- 사물인터넷, 빅데이터, AI 기술 등 자율주행 시대로 접어들면서 신뢰성 공학 분야의 중요성 증가

The Reactor Safety Study의 시작



WASH-1400

The Reactor Safety Study

The Introduction of Risk Assessment to the Regulation of Nuclear Reactors

NUREG/KM-0010

- 의회는 원자로 안전에 대한 합리적인 평가를 지속적으로 요구
 - 국외적으로는 구소련과의 원자력 산업 경쟁 관계에 있었으나,
 - 국내적으로는 늘어나는 원전에 대한 시민의 불만이 증가
- The Reactor Safety Study(WASH-1400, 1972년 착수)
 - 독립적이고 객관적인 평가를 위해 외부 프로젝트로 발주



Norman
Rasmussen



Saul Levine

리스크 평가를 위한 세가지 요소(Risk Triplet)

What can go wrong?

How likely is it?

What are the consequences?



How confident are we in our answers to these three questions?

- WASH-1400의 기술적 의의
 - 사건수목(Event Tree)을 도입함으로써, 당시의 부족한 컴퓨팅 환경 속에서도 엄청난 규모의 사건경위를 타임라인에 따라 확인할 수 있도록 체계화
 - 최신 기술을 동원하여 고장확률, 고장모드(Failure Mode), 인적오류(Human Error Probability) 등을 최대한 합리적으로 산출
 - 내부사건(Internal Event) 분석을 집중적으로 수행하였고, 이를 통해 대표적인 PWR, BWR의 주요한 사건경위에 대한 1,2,3단계 PSA 결과를 도출하여 많은 시사점을 제공

참고

AEC의 규제기능을 분리한 현재의
U.S. NRC(Nuclear Regulatory Commission)가 새롭게 창립(1975년)
따라서 WASH-1400은 AEC에서 발주하였으며, 최종보고서는 NRC로 접수됨

Lewis Committee Report

- WASH-1400이 원자력산업에 편파적이었다고 주장하면서 연구결과에 대한 감사 청구
- Lewis 교수를 위원장으로 하는 감사위원회 발족(1978년)
 - NUREG/CR-0400, "Risk Assessment Review Group Report to the U.S. Nuclear Regulatory Commission."

...[The Lewis Committee] also was very blunt about how although the methods were terrific [in WASH-1400] and the insights were important, the executive summary was way overstating what you could get from this. Crucially, they studied only two reactors...Way overstated it...Also [the Lewis Committee] also said that although they struggled to estimate uncertainties in the study, they had underestimated them by a good deal.

The Review Group will provide an advice and information final report of the Reactor Safety Study, WASH-1400.... This advice and information will assist the Commission in establishing policy regarding the use of risk assessment in the regulatory process, in improving the basis for the use of such assessments. It will also clarify the achievements and limitations of the Reactor Safety Study.

WASH-1400 was largely successful in at least three ways: in making the study of reactor safety more rational, in establishing the topology of many accident sequences, and in delineating procedures through which quantitative estimates of the risk can be derived for those sequences for which a data base exists.

- Lewis 위원회의 주요 결론
 - 연구방법론은 우수하나, 요약문에 제시된 결론은 과장
 - 신뢰도데이터의 품질 문제
 - 방사성물질 확산 모델, 대피 모델의 불확실성
 - 지진, 화재, 인적오류에 대한 부적정성
 - 전출력(Full Power) 운전에 대한 분석에 한정



위의 모든 지적사항은 심지어는 지금도 PSA의 중요한 현안

- 과도사건(Transient), ATWS, 또는 소형냉각재상실사고/인적오류(Small break loss of coolant)의 심각함을 기존 규제 체계에서 과소평가 하고 있음

in the Executive Summary. Probably the most important criticism of the report was not about the report itself, but rather how the report was being used: 'There have been instances in which WASH-1400 has been misused as a vehicle to judge the acceptability of reactor risks. In other cases it may have been used prematurely as an estimate of the absolute risk of reactor accidents without full realization of the wide band of uncertainties involved. Such use should be discouraged'.

WASH-1400이 원자로 리스크의 수용 가능성을 판단하는 수단으로 오용된 사례가 있었습니다. 또는 관련된 광범위한 불확실성을 완전히 인식하지 못한 채 원자로 사고의 절대적 리스크 추정치로 선불리 사용되었을 수도 있습니다.

이런 사용은 지양되어야 합니다.

- 결국 U.S.NRC는 최종보고서에 서명하지 않음



'75 Report on Reactor Safety Is Called Unreliable by NRC

By **J. P. Smith**
January 20, 1979

The Nuclear Regulatory Commission yesterday repudiated the findings of the government's most widely accepted report on the safety of nuclear reactors, a study concluding that there is essentially no chance of an atomic power plant disaster.

After a second review of the 1975 Rasmussen report, as the study is known, the NRC concluded that it was misleading and unreliable. "The commission does not regard as reliable the Reactor Safety Study's numerical estimate of the overall risk of reactor accident," the five-member commission said.

The NRC also called for a staff analysis of its nuclear licensing decisions to determine whether they were affected by an overreliance on the Rasmussen report, and said it would decide "where regulatory modifications are appropriate."

The NRC oversees nuclear licensing and safety.

리스크활용 의사결정의 성장

- TMI 사고 이후 U.S. NRC의 WASH-1400 공식 승인(1979년)
- 확률론적안전성평가의 확대 노력
 - 당시 현안을 반영한 내/외부사건을 추가적으로 실시
 - NUREG-1150, "Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants," 1990
 - WASH-1400 이후의 최신 지식으로 업데이트되었는데, 기존 결과보다 원자로가 안전하는 결론에 도달

- U.S. NRC 정책성명(Safety Goal Policy Statement)
 - 정성적/정량적 안전목표를 제시하는 정책 성명(1986년)

정성적(Qualitative) 안전목표

- 원전 운영의 결과로 개인의 생명과 건강에 중요한 추가 리스크(Significant additional risk)가 더해지지 않도록 방호 조치를 취해야 한다.
- 원전 운영의 결과로 발생하는 생명과 건강에 대한 사회적 리스크는 현실적인 다른 경쟁수단과 비교하여 비슷하거나 작아야 하며, 다른 사회적 리스크들에 추가되는 리스크가 크지 않아야 한다.

정량적(Quantitative) 안전목표

- (조기 사망) 원전 사고로 인한 원전 인근 주민의 조기(초기) 사망 리스크가 다른 사고들로 인한 미국인 총 사망 리스크의 0.1% 이하여야 한다.
- (암 사망) 원전 운전으로 인한 원전 인근 주민의 암 사망 리스크가 모든 다른 요인들에 의한 총 암 사망 리스크의 0.1% 이하여야 한다.

- U.S. NRC 정책성명(Use of PRA Methods in Nuclear Regulatory Activities)
 - 리스크정보활용을 확대하여 결정론적 방법과 심층방어를 지원하겠다는 정책 선언(1995년)
 - Regulatory Guide 1.174, "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis," 1998
 - Regulatory Guide 1.200, "An Approach for Determining the Technical Adequacy of Probabilistic Risk Assessment Results for Risk-Informed Activities," 2004

The use of PRA technology should be increased in all regulatory matters to the extent supported by the state of the art in PRA methods and data, and in a manner that complements the NRC's deterministic approach and supports the NRC's traditional defense-in-depth philosophy.

증거기반정책(Evidence Based Policy)

- 객관적인 증거에 기반하여 정책적인 결정을 하려는 시도
 - 정책이 실증적 자료나 증거보다는 직관, 경험, 가치 등에 바탕을 두고 이루어져왔다는 점에 대한 비판으로 등장
 - 예산의 효과적 사용에 부합하며, 데이터의 수집 및 분석 기술이 발전함에 따라 그 실효성이 높아짐
- 정책과 관련된 지식이 모두 정량적으로 평가될 수 있는 것은 아니기 때문에 정책근거 평가 방법 및 도구에 대한 논쟁이 발생
- ‘증거합치(Evidence Informed) 정책’이라는 용어를 통해 증거 자체에 대한 개선(증거의 질이나 엄밀성)의 여지를 강조

증거기반
정책

리스크기반
규제

예산의 효과적 사용/데이터 기술에 따른 실효성
평가 방법 및 도구에 대한 논쟁

증거합치
정책

리스크
정보활용
규제

제안

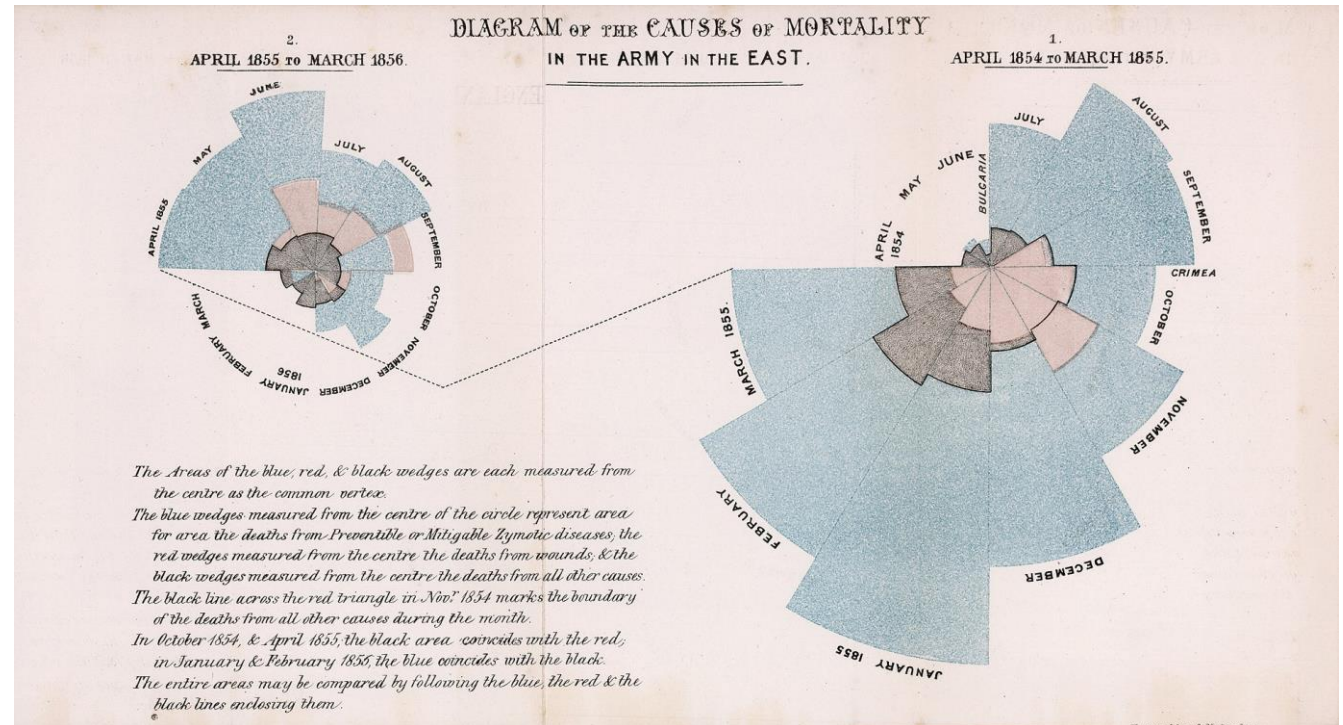
- 리스크활용 의사결정 도입을 위한 시급성 또는 당위성 (이것이 없으면 안되는 이유)
 - 신뢰성 공학/WASH-1400의 도입과정과 성장통에 대한 교훈
 - 원자력안전규제가 엄격하게 검증된 객관적 증거를 통해 정책결정이 이루어져야 한다는데 반론의 가능성은 낮아 보임
- 외부환경의 변화로 인한 불가피한 과정(?)
 - 원자력안전위원회의 설립
 - 중대사고정책, 스트레스테스트, 다수기 PSA 예비수행, 사고관리계획, 미국의 10 CFR Part 53 등에 대한 도입
 - 원자력 안전/안보 규제현안에 리스크 개념의 요건이 차츰 반영되는 중



- 리스크활용 의사결정의 이해를 위한 저변 부족
 - 정확히 무엇이고, 어디가 어떻게 변화되는가?
 - 리스크 커뮤니티에서의 아웃리치 활동 필요
- 기술적인 성숙도에 대한 자신감
 - 인력, 데이터, 모델, 독립검토 역량에 대한 준비상태
 - “정책과 관련된 지식이 모두 정량적으로 평가될 수 있는 것은 아니기 때문에 정책근거 평가 방법 및 도구에 대한 논쟁이 발생”

확률/통계를 직관의 영역으로...

- 장미도표(Rose Diagram) 1858-1859
 - 보건에 대한 중요성을 강조하기 위하여 전쟁당시 위생 문제에 인한 사망건수와 전장에서 사망건수를 직관적 이미지로서 표현함으로써 당국의 정책변화를 유도



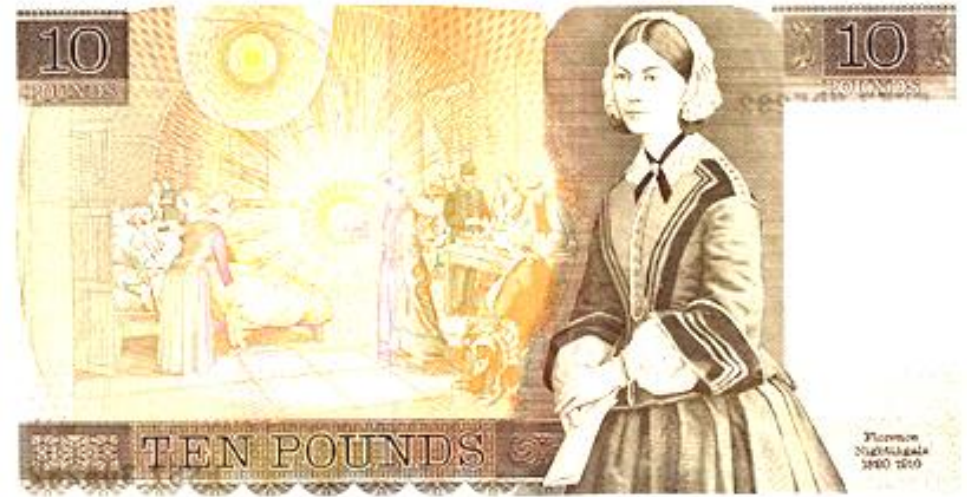
1975

The Florence Nightingale £10 note

The first historical woman to feature on one of our notes was Florence Nightingale (1820-1910). She is known as the founder of modern nursing. Nightingale appeared on the £10 note between 1975 and 1992.

Nightingale became famous for her treatment of wounded troops during the Crimean War (1853-1856). She was called 'the lady with the lamp' because she carried a light with her on her night-time rounds of field hospitals.

After her return to Britain, Nightingale became a powerful social reformer. She used both her personal influence and statistical analysis to drive change.



‘58년 영국 왕립통계학회
최초의 여성회원

<https://www.bankofengland.co.uk/>

참고문헌

- U.S,NRC (2016), WASH-1400 The Reactor Safety Study The Introduction of Risk Assessment to the Regulation of Nuclear Reactor, NUREG/KM-0010
- Keller and Modarres (2005), A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry: a tribute to the late Professor Norman Carl Rasmussen
- Saleh and Marais (2006), Highlights from the early (and pre-) history of reliability engineering
- Azarkhail and Modarres (2012), The Evolution and History of Reliability Engineering: Rise of Mechanistic Reliability Modeling
- The Fascinating History of Reliability Engineering
 - <https://assetmanagementassociates.com.au/thought-leadership/f/the-fascinating-history-of-reliability-engineering>
- A brief history of reliability
 - https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Extras/reliability_history/
- 그리고 2페이지의 저서들