



[2023 KEPIC-Week]

EQ 대상기기 수명연장 평가를 위한 방법론

[Methodology for Evaluating the Life Extension of EQ Equipment]

2023.09

목 차

- 1 계속운전 현황
 - 2 검증수명(Qualified Life)의 연장
 - 3 수명연장 방법
 - 4 수명연장 방향
 - 5 Q & A
-

1 계속운전 현황

■ '30년까지 설계수명이 만료되는 10개 호기의 계속운전 추진

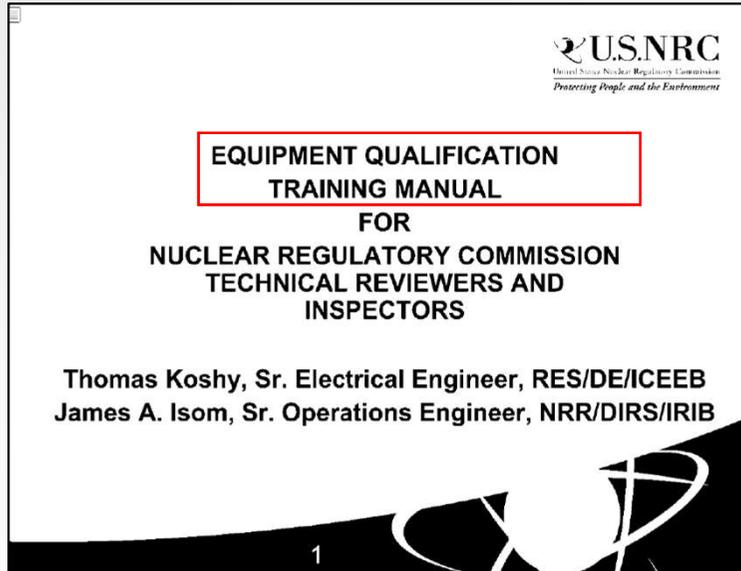
발전소 수명만료	23년	24년	25년	26년	27년	28년	29년
고리#2	■ '23.04						
고리#3	■	■ '24.09					
고리#4	■	■	■ '25.08				
한빛#1	■	■	■	■ '25.12			
한빛#2	■	■	■	■	■ '26.09		
한울#1	■	■	■	■	■	■ '27.12	
한울#2	■	■	■	■	■	■	■ '28.12
월성#2	■	■	■	■	■ '26.11		
월성#3	■	■	■	■	■	■ '27.12	
월성#4	■	■	■	■	■	■	■ '29.02

■ 고리#2/3/4, 한빛#1/2 내환경검증 용역 진행 중

- 계속운전 기간을 고려한 내환경검증 대상기기 검증유효성 재평가

- ❖ **IAEA Safety Reports Series No.3** (Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plants)
 - **Ongoing Qualification 프로그램으로 수명을 연장하는 것은 가속열화가 대부분 보수적이므로 정상 환경조건과 비교평가를 사용**
- ❖ **NRC Regulatory Guide 1.89** (Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants)
 - **Ongoing Qualification을 활용하여 추가적인 수명을 입증할 수 있으면 수명연장이 가능**
- ❖ **IEEE Std 323** (Qualifying Class-1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations)
 - **실제 조건이 초기 설정된 조건들보다 가혹하지 않다는 것이 확인될 수 있으면 이런 과정을 통해 검증수명은 조정될 수 있음**

2 검증수명(Qualified Life)의 연장



- 기존 가정사항 및 기타 기술방법들의 검토를 기반으로 검증수명이 변경되거나 조정될 수 있음을 확인

- 미국 NRC는 2016년에 모든 원자력발전소에 대한 일련의 기기검증 검사를 수행했고, 그 후 NRC 직원을 대상으로 EQ Training Manual을 발행

Extension of Qualified Life

U.S. NRC
United States Nuclear Regulatory Commission
Protecting People and the Environment

- Initial environmental qualification of an equipment may yield a qualified life that is less than the anticipated service life of the equipment. The qualified life of the equipment may be extended by the following methods:
- Retain and continue aging the test sample from the initial program or begin aging a new sample while the qualified item is in service. Subsequent demonstration of equipment safety function performance during applicable DBEs increases the qualified life by the additional life simulated.
- Install additional equipment in identical service conditions, remove before the end of the qualified life of equipment in service, and type test with further age conditioning to establish additional qualified life.
- Evaluation of conservatisms in original assumptions for environmental conditions, failure criteria, and acceleration factors may identify that actual conditions are less severe, and the qualified life may be adjusted accordingly.
- Identify age-sensitive components and replace them with new components (that were qualified).

52

6.3.5 검증수명의 연장(extension of qualified life)

단위 기기(a piece of equipment)의 검증수명은 다음과 같이 연장될 수 있다.

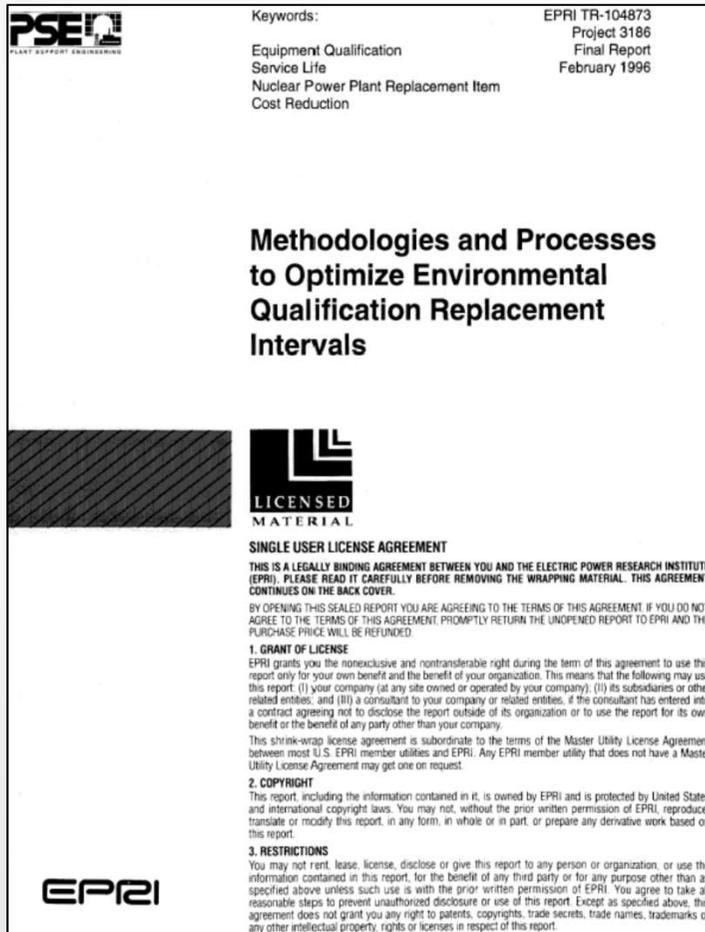
- (1) 기기가 실제로 노출되는 환경의 보수성에 대한 평가
- (2) 아레니우스 활성화 에너지와 같이 검증수명을 결정하기 위해 사용된 보수성에 대한 평가
- (3) 운전 중인 기기의 실제 조건이 설계기준사건 적용 전의 검증 시에 입증된 환경보다 가혹하지 않다는 것에 대한 입증
- (4) 더 긴(a longer) 검증수명을 가진 검증된 기기와의 유사성
- (5) 설치된 기기의 검증수명보다 더 길게 노화 처리된 기기와 동일 또는 유사한 설계 및 구조를 가진 단위 기기에 대한 형식시험
- (6) 설치된 기기의 환경보다 더욱 가혹한 환경에서 자연 노화되어진 기기와 동일 또는 유사한 설계 및 구조를 가진 단위 기기에 대한 형식시험. 검증수명은 최초 확립된 검증수명을 초과하는 자연 노화된 기간만큼 연장할 수 있다.
- (7) 설치된 기기의 검증수명보다 더 길게 자연 노화와 노화 처리의 조합을 수행한 기기와 동일 또는 유사한 단위 기기에 대한 형식시험. 자연노화와 노화처리 순서는 무관할 수 있다.

Copyrighted material licensed to khnp on 2023.4.3 22:20:14 for license's use only.
Copyrighted and Authorized by Korea Electric Association. Copying and networking prohibited.

IEEE 323(KEPIC END 1100)

■ 근거문서 : EPRI TR-104873(February 1996)

▪ Methodologies and Processes to Optimize Environmental Qualification Replacement Intervals



■ 검증수명 최적화 방안 소개(11가지)

- 불필요한 보수성 확인 및 제거
- 기기(부품)의 운전주기, 운전비율, 누적된 운전내역의 평가
- 설계온도 데이터 대신 실제 온도의 사용
- 설계부하 대비 실제부하 평가
- 상태평가 및 모니터링 사용
- 노화 스트레스를 줄이기 위한 기기(부품)의 재배치와 차폐
- 노화에 덜 민감한 재질 또는 부품으로 교체
- 수명이 긴 기기로의 교체
- 발전소 환경조건 수정
- 재검증

1. Identification and removal of unnecessary conservatisms

- 대부분의 기기 검증평가에 적용가능
- 설계과정에서 적용된 불필요한 보수성을 제거하기 위해서는 설계기준 문서들을 검토해야 하고, 설계시 계산된 값과 가정사항등을 평가해서 보수성을 제거

■ Example

- PWR 발전소의 보조건물 기기를 100°F(38°C)의 설계온도 기준으로 검증수명평가

→ HVAC 계산을 검토한 결과, 계산에서 임의로 100°F로 증가된것을 확인하고 계산된 최고온도는 94°F(34°C)임을 확인하여 검증수명 연장

- 또 다른 발전소에서는 디젤건물 125°F(52°C), 보조건물 120°F(49°C)를 설계온도 기준으로 설정

→ 작동조건 및 외부공기온도를 기반으로 월별 온도를 재계산하여 적용

Month	Temperature (°F)	
	Diesel Building	Auxiliary Building
January	80°F, 1 day @ 110°F	80°F, 1 day @ 110°F
February	90°F, 1 day @ 110°F	80°F, 1 day @ 110°F
March	90°F, 1 day @ 125°F	80°F, 1 day @ 120°F
April	100°F, 1 day @ 125°F	90°F, 1 day @ 120°F
May	100°F, 1 day @ 125°F	90°F, 1 day @ 133°F
June	115°F, 1 day @ 125°F	106°F, 1 day @ 133°F
July	115°F, 1 day @ 125°F	106°F, 1 day @ 133°F
August	115°F, 1 day @ 125°F	106°F, 1 day @ 133°F
September	115°F, 1 day @ 125°F	106°F, 1 day @ 133°F
October	100°F, 1 day @ 125°F	90°F, 1 day @ 120°F
November	100°F, 1 day @ 125°F	90°F, 1 day @ 120°F
December	80°F, 1 day @ 110°F	80°F, 1 day @ 110°F

EPRI TR-104873 발췌

2. Evaluation of the Component Duty Cycle, Cycle Rate, and Cumulative Cycles

- 작동주기가 있는 모든 EQ 기기에 적용 가능
- 발전소 정상운전 중 많은 EQ기기(부품)는 지속적으로 작동하지 않고 운전주기, 운전시간 간격 등을 기준으로 작동하며, 간헐적 작동기기 및 사고시 안전정지를 위해 운전대기중인 기기 존재

■ Example

- BWR 발전소의 전동기 제어반(MCC)에 있는 370개 릴레이의 검증수명이 온도 상승이 포함되어 14년으로 평가되었으나 관련 회로를 검토한 결과, 300여개의 릴레이가 MCC에 의해 제어되는 전동기 밸브가 작동 중일때만 전원이 공급되는 것을 확인

→ 통전으로 인한 온도상승을 제거함으로써 수명을 40년 이상으로 연장함

→ 정비부서는 이를 통해 발전소의 남은 수명동안 자재 및 직접 인건비에 약 \$1,000,000 절약한 것으로 추정

System/Device Requirements	Time Energized
Energize only on test	A small percent
De-energize only on test	Almost constant
Motor Operated Valves (MOV's) (motors - energized only when the valve actuator is in motion)	A small percent
Large Fan Motors (2 with 100% sizing) (3 with 50% sizing)	Approximately half* Approximately 2/3*
Room Cooler Fan Motors	0-100%**

EPRI TR-104873 발췌

3. Use of actual temperature instead of design temperature data

- 대부분의 기기 검증평가에 적용가능
- 설계온도 도출에는 많은 보수성이 포함되며 최악의 조건을 기반으로 설계
- 발전소에 다양한 격실의 실제 온도는 설계 최대온도보다 20°F 또는 그 이상으로 낮을 수 있음

■ Example

- 제어건물의 설계온도는 100°F(38°C)이나, 여름철 기온조사시 최고기온은 80~90°F(27~32°C)
 - 여름 오후시간 1~2주 동안 온도모니터링, 최고온도를 평년기온의 기초로 사용
 - 나머지 기간동안은 더 낮은 기온으로 인해 보수성을 확보
- 설계온도 120°F(49°C), 8개의 솔레노이드 밸브 데이터 기록
 - 실제값을 기반으로 한 온도로 수명연장

<u>Month</u>	<u>SOV Temperatures (°F)</u>
December 1994	58.5 - 62.9
January 1995	58.4 - 72.7
February	Data not retrievable
March	66.2 - 84.5
April	82.8 - 99.1
May	78.1 - 103.9
June	87.4 - 112.9

4. Evaluation of Actual Versus Design Loads

- 상당한 자체발열이 유발되며, 지속적으로 또는 자주 전원이 공급되는 EQ 기기에 적용
- 설계부하보다 실제부하로 인한 낮은 온도상승으로 더 긴 검증수명 평가 가능

■ Example

- 전동기 설계부하가 200hp이고 이때의 권선 온도상승은 40°C
 - 실제 전동기는 133hp 부하에서 작동하는것으로 조사됐으며, 모터의 소비전류는 부하에 비례하고 온도상승은 전류의 제곱에 비례하기 때문에
 - $(133^2 \times 40) / 200^2 = 18$
 - 실제 권선의 온도상승은 18°C를 적용하여 전동기 수명연장

5. Evaluation aging limits and parameters

- 대부분의 기기 검증평가에 적용가능
- 활성화에너지, Theshold value, 시너지 효과와 관련된 매개변수의 평가
- 재질의 활성화에너지나 Theshold value를 증가시키거나, 시너지효과의 감소를 통해 수명연장

■ Example

- 검증시 비금속재질의 선정은 일반 나일론66(즉, Zytel 101, Celanex 1000-2 또는 Vlaydyne 21)에 대한 활성화에너지 활용(0.84 eV)
 - 추가 조사를 통해 재질이 실제로 35% 짧은 유리섬유 충전재가 있는 열 안정화 Zytel 70635HSL 인 특정 나일론임을 확인.
 - 이 재질은 1.24 eV 활성화에너지값을 적용하여 검증수명을 연장

6. Use of condition assessment and monitoring

- 노화모델이 나타내는 속도와 다른속도로 노화가 진행되는 기기의 검증수명을 연장하는데 사용
- 노화 진행상황을 평가할 수 있는 기준값이 있어야하며, 재질의 정량화가 가능한 변수들의 평가가 필요하기 때문에 충분한 정보가 있어야 함
- 상태감시 모니터링을 통해 긴 수명을 달성할 가능성이 없는 기기는 실용적이지 않으며, 모니터링 비용이 기기 교체비용보다 훨씬 낮아야 바람직

■ Example

- 4kV 모터의 상태 모니터링
 - 초기검사, 주기적인 절연저항/권선저항/진동 등 신호분석의 조합

7. Relocation and/or shielding of components to reduce aging Stresses

- 자주 교체해야 할 정도로 가혹한 환경의 기기에 적용
- 가혹한 환경에서 덜 가혹한 환경(or 온화한 환경)으로 기기 이설 or 차폐
- 교체빈도에 의해 발생하는 비용이 이설/차폐비용보다 커야 바람직
- 그 외 고려사항
 - 기기나 시스템의 기능에 영향을 주지 않고 쉽게 이동하거나 차폐할 수 있는지?
 - 차폐가 다른 기기 및 구성요소에 미치는 악영향은 없는지?
 - 재배치(이설)이나 차폐를 통한 경제적 타당성이 있는지?

■ Example

- 방사선량을 줄이기 위한 차폐벽 설치, EQ목록에서 MCC를 제거
- 의도적인 밸브 위치 선택(온화한 지역에서 바이패스 SOV 배치)
- 방사선에 민감한 전자부품의 재배치, 온화한 환경으로 이설 등

8. Replacement with less aging-susceptible materials and components; Refurbishment

- 기기를 구성하는 부품 중 다른부품에 비해 노화에 아주 민감한 부품이 있으면, 덜 민감한 부품(재질)으로 교체를 통해 수명을 연장
- 새로운 부품(재질)은 검증수명의 분석, 테스트, 운전경험 등의 조합을 통해 검증되어야 하며, 검증없이 더 좋은 부품(재질)로 교체하는 것은 허용되지 않음

■ Example

- 노화에 덜 민감한 재질로 교체 : 특정발전소에서는 검증수명을 늘리기 위해 고분자 재질로 구성된 세라믹 바디와 절연체의 스냅스위치로 대체

9. Replacement Devices with Longer-Lived Devices

- 검증수명이 더 긴 기기로 교체하여 교체빈도를 줄임
- 교체기기의 호환성 여부 확인 필요

■ Example

- Age-Sensitive 전송기 교체
- Organically Insulated 케이블을 Mineral Insulated 케이블로 교체

10. Modification of actual plant normal environmental conditions

- 기기 주변의 실제 온도/방사선의 가혹한 환경을 줄이기 위해 HVAC, 배관 및 구조의 추가 및 수정
- 열 및 방사선원이 기기의 검증수명을 크게 제한할 만큼의 가혹한 환경에 적용

■ Example

- HVAC에 부스터팬/냉각기 추가, 공기흐름 방향을 바꾸는 배플설치
- MSIV 액츄에이터에 냉각공기를 공급, 정상온도를 낮추는 HVAC 설치 등

11. Requalification

- 사고시 안전기능에 심각한 악영향을 미치지 않으면서 기존 검증에서 수행된 것보다 더 많은 가속노화를 수행할 수 있는 경우

■ Example

- MSIV 리미트 스위치는 85°C의 환경에서 6개월 검증 → 6년 검증수명을 갖는 검증계획을 수립 후 성공적으로 완료
- “R only” 구역의 온도스위치는 방사선분석 재수행 대신 재시험수행(분석을 다시 수행하는 것보다 적은 비용으로 시험수행)

- ❖ 설계온도 데이터 대신 실제 온도의 사용
 - 실제 발전소 운전조건 적용(온도모니터링 데이터)
- ❖ 자체발열이 유발되는 기기류의 실제 운전조건을 반영
 - 케이블 (일반적으로 운전온도 70°C ~ 90°C 검증)
 - 전동기 (일반적으로 운전온도 100°C ~ 130°C 검증)
- ❖ 기기의 주기적 교차운전(A계열, B계열) 고려
 - 상시 운전되는 케이블, 전동기라 할지라도 설계수명 40년중 20년만 정상운전
 - 6개월 주기로 상시운전되는 케이블
 - 6개월은 설치격실 최대온도 50°C
 - 6개월은 운전온도 90°C
 - 만약 상시운전되지 않는 케이블 및 전동기라면??
 - 사고완화를 위해 평상시 스탠바이상태로만 대기중인 케이블 및 전동기
 - 설치격실 최대온도 적용(50°C) → 수명연장

Q & A

감사합니다.