2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

PSA에서 최적의 일반 신뢰도자료 활용: 자료원 선별 및 민감도분석

Application of Optimized Generic Reliability Data to PSA: Source Screening and Sensitivity Analysis

이창주, 성계용
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

양준언, 한상훈
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원전 PSA 기본 입력 정보로서 신뢰도자료는 매우 중요하다. 하지만 전세계적으로 다양한 자료원 존재로 인해 신뢰도 자료분석은 보다 복잡해지게 되며 PSA 결과에서 바람직스럽지 못한 불확실성을 유발할 가능성이 있다. 따라서 신뢰도 자료원의 적절한 선별 적용을 통해 PSA 결과의 신빙성을 보다 높이는 것이 바람직하다. 이를 위해 본 연구에서는 적용 가능한 모든 자료원에 대해 도식적 상관관계를 파악하고 적용 범주별로 선별 지침을 제시하였다. 또한 자료 선정의 결과가 신뢰도 자료의 매개변수에 많은 영향을 미치는 것을 민감도분석을 통해 확인하였다.

Abstract

Reliability data, which is regarded as fundamental information to probabilistic safety assessment (PSA) of nuclear power plants, is very important. However, due to the diverse appearance of generic reliability database of the world, the data analysis itself tends to be more complex, and results in a possibility of undesirable uncertainty in PSA results. It is highly desired, therefore, to enhance the credibility of PSA results by selecting the reliability database appropriately. For doing so, this study has identified the schematic inter-relationship for all databases, and provided the guide for screening of each application category. We have confirmed that, by way of sensitivity analysis, the screening results might greatly affect to the parameters of reliability data.

1. 서론

리스크 정보 활용 문제에서 가장 핵심되는 사항은 얼마나 리스크평가 관련 기술이 성숙되어 있는가 하는데 있으며, 이 중에서도 기본 입력이 되는 신뢰도자료는 더더욱 이와 관련된 논쟁에 직면하게 된다. 원전 PSA 기본 입력 정보로서 신뢰도자료는 보통 국내외에서의 다양한 실제 운전이력을 바탕으로 생산되거나 전문가 판단에 의해 결정된다. 이런 신뢰도 자료분석에서 우리가 결정하고자 하는 사항은 PSA에 모델된 각종 기본사상의 확률값이나 발생빈도를 추정하는 데 사용되는 매개변수(parameter)이다. 왜냐하면 대상 원전의 리스크가 어느 정도인가 추정하는 것은 모델링된 각 매개변수 분포들을 전파(uncertainty propagation)시킴으로써 얻어지기 때문이다.

PSA 분석 특성상 자료 자체가 충분히 가용하다면 가급적 발전소 고유 (plant-specific) 신뢰도자료만을 사용하는 것이 좋다. 하지만 발전소 고유 신뢰도자료가 가용하지 않은 경우 외부의 일반적인 자료, 즉 일반 신뢰도자료 (generic DB: GDB)를 대부분 참조하여 사용한다. 대규모 PSA가 처음 시작된 1975년 WASH 연구 이후 전세계적으로 많은 일반 신뢰도자료들이 적용되고 논의되었는데 현 시점에서는 너무 많은 이런 일반 신뢰도자료들이 오히려 분석의 품질 확보에 저해가 되고 불확실성을 크게 하는 상황에 이르렀다. 이와 같은 자료 품질 현안 (data quality issue)은 너무 오래된 자료의 사용, 동일한 자료의 중복 적용, 다른 그룹/기기 자료의 오용, 자의적 해석, 자료 Update 처리 미숙, 발전소 고유 자료와의 무분별한 혼용 등에 의해 발생한다.

신뢰도자료의 적절한 취급과 적용은 PSA 품질 확보를 위해 매우 중요하다. 현재 이를 위한 몇 가지 지침들이 제시되어 있으며, 이에 대표적인 것으로는 ASME standard [1] 및 NEI Guidance[2]가 있다. 예로서 NEI Guidance DA-1항에 따르면 다음 요건이 제시되어 있다.

> "갱신과정을 포함한 데이터 분석에 대한 과정을 정립한 특정의 지침서가 이용 가능하여야 한다. 대상 발전소 데이터를 초기사건 빈도, 기기 고장율, 공통원인고장 데이터에 통합하는 지침을 제공해야 한다. 데이터 지침서는 산업계 자료원으로부터 일반 자료를 선정하는 지침을 제공해야 한다. (이하 생략)"

본 연구는 1998년의 일반 신뢰도자료 실태 조사 및 DB 구축연구[3]를 통해 정리된 기존 연구결과를 우선적으로 활용하였다. 기존 연구에서는 해외의 가용한 신뢰도 자료원을 모두 조사하고 각 자료원마다 약 20개 항목에 이르는 데이터들을 기록하였다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 하되 일반 신뢰도자료를 선별하고 적절히 활용하기 위한 보다 일반화된 지침을 마련하고자 하였다.

2. 신뢰도자료 분류

일반 신뢰도자료는 최근 NRC 분류방식[4]을 참조하면 다음과 같이 5가지 종류로 분류할 수 있다.

(1) NRC 후원에 의해 마련된 GDB
(2) DOE 후원에 의해 마련된 GDB
(3) 산업체 후원에 의해 마련된 GDB
(4) 미국 이외 국가에 의해 마련된 GDB
(5) 비원자력 분야에 의해 마련된 GDB

본 연구에서는 이 중에서 (1)항 내지 (3)항의 GDB를 중심으로 신뢰도자료의 적용 가능성을 평가하였다. 단, 초기사건, 공통원인고장, 인간실수확률, 기타 전문가 판단자료 등의 기기 단순 고장과 직접 관련이 없는 신뢰도자료분석 분야는 본 연구범위에서 제외되었다.

NRC 후원에 의해 마련된 GDB는 다시 현재 시점에 사용 가능한 GDB (current GDB)와 과거에 사용하였던 GDB (historical GDB)로 나누어진다. 현재 시점에 사용 가능한 GDB는 PSA 및 리스크정보 활용에 적합하다고 판단되는 GDB로서 간주된다. 단 이 GDB들에서 얻어진 정보들이 어떤 특정 분석에 적합한지 여부를 판단하는 것은 사용자의 몫임이 강조되고 있다. 이런 GDB로 가장 대표적인 자료원들은 표 1에 제시되어 있으며, 본 논문에서는 각각의 참조 자료원, 자료 제공 형태 및 사용상 약점을 설명하였다.

과거에 NRC 후원에 의해 마련되었으나 현재는 적용 타당성이 없다고 판단되는 소위 historical GDB로는 다음과 같은 4개 자료원이 대표적이다. 따라서 이와 같은 자료원을 포함하여 너무 오래된 자료원은 가급적 사용하지 않는 것이 바람직하다.

(1) IPRDS (in-plant reliability database system; NUREG/CR-2886, 3831)
(2) NREP (nuclear reliability evaluation program; NUREG/CR-2815)
(3) IREP (interim reliability evaluation program; NUREG/CR-2728)
(4) NUCLARR (nuclear computerized library for assessing reactor reliability; NUREG/CR-4639)

DOE 후원에 의해 마련된 GDB는 크게 두 가지로서 기기 외부 누설 및 파손빈도 추정에 관한 자료원 (EGG-SSRE-9639)과 다수의 기기 신뢰도자료에 대해 INEL이 모은 자료원 (EGG-SSRE-8875)들이 있으나 대부분이 국내에 가용하지 못하다. 산업체 후원에 의해 마련된 GDB로는 EQE/PLG, EPRI 및 SAIC 등에서 만든 것들이 있는데, 이 중 국내 PSA에 가장 많이 사용되는 것은 EPRI가 ALWR을 대상으로 만든 DB이다. 이 자료원에 대한 설명도 표 1에 제시하였다.

3. 자료원 상관관계 분석

수집된 자료원들을 그림 1에 제시된 모든 GDB간 상관도(relationship flowchart)에 나타내고 각 자료원간의 연계성과 의존성을 일차로 파악하였다. 그림 1에는 자료원의 특성에 따라 다음과 같이 총 4가지 종류의 도형/색상 별로 구분하였다.

(1) Raw DB
(2) Analysed DB
(3) Raw + Analysed DB
(4) Expert Opinion DB

상관관계는 각 자료원을 잇는 실선으로 나타내었는데 연관성이 약한 자료원간에는 점선이 사용되었다. 그림 1을 보면 주로 1차 자료원으로서 LER, plant Raw 자료와 WASH-1400이 사용되고 이를 토대로 재생산된 2차 자료원으로서 각종 발전소 고유 PSA 보고서와 NREP 또는 NUREG-1150 등이 적용됨을 알 수 있다. 만약 각 자료원의 고장자료를 알고 있다면 이를 제시된 DB간 상관도(relationship flowchart)에 대입해 봄으로써 신뢰도 자료 적용의 변화 추이를 파악할 수 있으며 이런 과정을 통해 어떤 자료원들이 사용상 부적절한지 여부를 판단할 수 있을 것이다.

그림 1에서 앞에서 언급되었던 IEEE 500, NUREG/CR-2728 (IREP), NUREG/CR-4639 (NUCLARR), NREP D/B 및 Old PWR Reactor에 관한 자료원과 같은 historical GDB와 non- PWR 자료원을 배제하고 간략화하면 그림 2와 같은 상관성을 갖는 GDB 자료원간 연계도가 나타난다. 즉, 만약 우리가 한국표준원전과 같은 PWR을 대상으로 일반 신뢰도 DB 자료원을 구하고자 할 때 오래된 DB, 종속 DB들을 제외하는 등 현실적인 작업을 수행한다면 그림 2에서 보는 바와 같이 가용한 GDB는 극히 적은 숫자가 될 것으로 판단된다.

4. 적용 범주별 선별지침

일반 신뢰도자료 최적 선별 및 활용지침 정립을 위해 2가지 범주에 대한 예제분석이 수행되었는데 하나는 작동요구시 고장사례로서 “MOV fail to operate”를, 또 하나는 작동중 고장사례로서 “EDG fail to run”를 선정하였다.

4.1. 작동요구시 고장확률 자료 선별 (예제 1: MOV fail to operate in demand)

가) 상대적으로 오래되거나 신뢰성이 저하된 자료원은 가급적 적용하지 않는다.

나) PWR에서 자체 생산한 자료만 GDB(generic database)로 사용한다. 여기서 CANDU (HWR) 원자로형 자료도 자료 선정의 적절성 유지 측면에서 제외한다. 또한 적용 대상에서 보편적이지 않은 특정 사양을 갖는 기기를 대상으로 한 GDB는 가능한 한 배제하여야 한다.

다) 유사한 종류를 나타내는 기기의 경우는 대표적인 것만을 선정한다. 예로서 Source Code FRENCH 자료원의 경우는 VA, VL, VP와 같은 밸브 유형이 모두 동일한 Location Parameter 값을 가지므로 이를 한 종류로 취급한다.

라) 가능하다면 command faults가 배제되어 있는 Data Source를 활용한다. 이는 자료원의 일관성 유지를 목적으로 한다.

마) 하나의 자료원에서 여러 가지 다른 operating experience를 가진 기록이 제시되어 있을 경우 가장 최신의 것 혹은 가장 demand 수가 많은 경우를 선정한다.

바) 단순화하기 위해서 분석목적에 맞는 기기의 고장모드별로 처리하여야 한다. 예로서 “fail to operate” 고장모드의 경우는 GDB에서 다음과 같은 고장모드만 적용하는 것이 적절하다.

① FC: fail to close
② FC: fail to open
③ FF: Fail to Operate on demand
④ FY: Fail to Operate, Fail to Continue Operating

또한 하나의 자료원에서 여러 가지 다른 failure mode를 가진 기록이 제시되어 있을 경우 보편적으로 적용가능한 것 순으로 선택한다. 예로서 당 사례의 경우는 FF, FC/FO 등의 순서에 따른다. 만일 FC 고장모드와 FO 고장모드 Source 두 가지가 모두 존재하고 양 쪽 자료가 동일한 증거(evidence)를 갖는다면 이 중에서 하나만 선택한다.

사) Error Factor (EF) 값을 적용하여야 할 경우, 만약 Data Source에서 분포에 의한 계산 값이 제시되어 있다면 이 중에서 가장 최대치를 선정한다. 계산 값이 제시되어 있지 않다면 realistic assumption을 사용한다.

아) median 값으로 제시되어 있는 Location Parameter는 일관성을 주기 위해 분포함수로서 대수정규분포를 가정하는 다음 공식에 근거하여 mean 값으로 변환한다.

$$Mean = Median \times \exp\{1/2 \cdot (\frac{\ln EF}{1.645})^2\} \qquad (1)$$

4.2. 작동중 고장 자료 선별 (예제 2: EDG fail to run[FTR] continuously)

여기서는 작동요구시 고장확률 자료 선별지침에서 공통적으로 적용되는 사항 이외에

작동중 고장자료나 대상 기기에 관한 선별에만 해당되는 지침을 제시한다.

가) 특정 기기만을 대상으로 GDB를 간추려야 하며, 따라서 Diesel generator만이 관심의 대상이 된다. Gas turbine generator 관련, steam turbine generator 관련, Motor driven generator 관련 자료원은 적용되지 않는다.

나) 동일한 디젤 구동형 (동일 형태) 기기인 경우 특별히 원자로형을 구분하지 않고 유사 기기로 간주하여야 한다.

다) 한 Source에서 제시된 중복 DB를 제외하고 대표적인 것만을 선정한다. 예로서 NUREG/CR-1362 (LER) GDB는 총 12개가 제시되어 있으나 이는 원자로형을 owner's group별로 나누고 시험 간격을 주간 및 월간으로 가정하였기 때문이다. 보수적으로 월간 시험을 가정한 모든 노형 DB (고장율=2.6E-2/hr) 하나만을 선정한다.

라) 유사 DB의 경우에는 population이 큰 것을 선정하여야 한다. 예로서 NUREG/CR-3831 (IPRDB)의 경우 서로 다른 3개 record가 같은 source로부터 제시되었으나 population이 큰 후자를 선정한다. 기타 DB도 대표적인 것을 적절히 선정한다.

마) 서로 다른 record가 같은 source로부터 제시되었으나 고장율 외에 다른 차이점을 파악할 수 없을 때는 보수적으로 고장율이 큰 것으로 선정한다. 이는 예로서 FRENCH DB의 경우가 그러하다.

5. 각 범주별 활용성 평가

5.1. 작동요구시 고장확률 민감도분석

4절에 제시된 일반 신뢰도자료 선별지침을 MOV fail to operate의 경우를 첫 번째 대상으로 하여 민감도분석을 수행하였다. 이 기기 고장모드의 경우 처음 일반 자료원은 총 141개로 구성되어 있었다. 이를 4.1절의 지침을 적용하여 선별한 결과, 아래와 같이 최종적으로 11개의 source만이 남게 되었다. 여기서 4.1절 (가)항의 지침을 적용하여 IEEE 500, NUREG/CR-2728 (IREP), NUREG/CR-4639 (NUCLARR), NREP D/B 및 Old PWR Reactor 에 관한 5가지 자료원이 제외되었음에 주목하여야 한다. 또한 표 2에 제시된 ALWR URD에서 총 5가지 자료원을 풀어 쓰고 이 중에서 중복되어 나타난 자료원은 제외하였다.

1) ALWR URD의 5개 자료원 (즉, NUREG/CR-4550, NUREG/CR-1363, Oconee PRA, Seabrook PSS, 5 plant-specific Evidence)
2) French DB
3) Midland PSA
4) Millstone PSS, "Millstone Unit 3 Probabilistic Safety Study" Part 4 of 4, Volume 6 (1983. 8)
5) Swedish NPP, "RKS 85-25 Reliability Data Book for Components in Swedish Nuclear Power Plants," RKS, SKI (1985)
6) Wash-1400 (1975.10)
7) Zion Probabilistic Safety Study (1981.12)

총 11개 자료원에 대해 분석을 수행한 결과 산술 평균치는 3.31E-3으로, 표준편차는 1.83E-3으로 나타났다. 여기서 산술 평균치를 구한 이유는 상기 11개 자료원이 대부분 현 시점 대비 10년 이전의 자료들로서 특정의 한 자료원이 두드러지게 취사선택될 가능성이 적었기 때문이다. 만약 다수의 자료원 중에 상대적으로 최신의 외국 GDB가 있을 경우에는 그 최신의 GDB를 그냥 사용하는 것이 바람직할 수 있다. 한편 최신의 GDB가 없다 하더라도 상기 자료원 중에서 분석자의 판단에 의해서 하나의 자료원 만을 대표값으로 사용하는 방안도 고려할 수 있는데 여기서는 각각의 자료원에 대한 신뢰수준이 모두 동일하다는 가정하에서 산술평균을 취하였다. 따라서 필요에 따라 각 자료원의 신뢰수준을 비교평가하여 가중산술평균 (weighted arithmetic mean)을 구하는 것도 또 다른 자료분석 방법이 될 것으로 여겨진다.

참고로 이 5가지 자료원을 제외하지 않은 16개 자료원에 대해 분석을 수행한 결과, 산술 평균치는 3.10E-3으로, 표준편차는 1.63E-3으로 나타났다. 따라서 오래된 자료원 존재로 인해 평균값이 약간 낮아지는 경향을 보였다. 표 3에서 보는 바와 같이 ALWR URD 자료원만으로는 산술 평균치가 4.0E-3이 되므로 상기 자료원 중에서 ALWR URD 자료원이 상대적으로 최신의 자료원 (1990년) 임을 감안하면 오래된 자료원 존재로 인해 평균값이 약간 낮아지는 경향이 있는 것 처럼 보인다. 하지만 최신의 연구결과인 NUREG/CR-1715 [5]에서는 각 안전계통별로 1987년에서 1998년 사이 LER에 의해 얻어진 PWR MOV demand failure 평균값을 제시하고 있는데 이에 따르면 최대값 (5.5E-3)이나 최소값(1.5E-3)을 제외하고 대부분 평균 2.1E-3 에서 2.6E-3 사이의 값을 보이고 있다. 따라서 자료원 생성년도와 고장확률 간에는 일정한 상관관계가 존재하는 것은 아닌 것으로 보인다.

5.2. 작동중 고장 자료 민감도분석

일반 신뢰도자료 선별지침을 EDG fail to run의 경우에 대해 두 번째로 적용하여 민감도분석을 수행하였다. 이 기기 고장모드의 경우 처음 일반 자료원은 총 37개로 구성되어 있었다. 이를 4절의 지침을 적용하여 선별한 결과, 아래와 같이 최종적으로 11개의 자료원 만이 남게 되었다.

1) NUREG/CR-4550, 1st ALWR source
2) NUREG/CR-1362, 2nd ALWR source
3) ALWR URD (= NUREG/CR-2989, 3th ALWR source)
4) Seabrook PSS, 4th ALWR source
5) WASH-1400 (1975.10)
6) German RS
7) Zion Probabilistic Safety Study (1981.12)
8) EPRI NP 2433
9) Midland PSA
10) French DB
11) Swedish NPP, "RKS 85-25 Reliability Data Book for Components in Swedish Nuclear Power Plants," RKS, SKI (1985)

상기 자료원 몇 가지는 ALWR URD 자료와 중복되고 있으나 실제적으로 ALWR URD 에서는 NUREG/CR-2989 자료원 만을 대표로 적용하였기 때문에 각 자료원 간 뚜렷한 종속성은 존재하지 않는 것으로 판단된다. 총 자료원에 대해 분석을 수행한 결과 산술 평균치는 6.93E-03으로, 표준편차는 7.60E-3으로 나타났다. 이는 ALWR URD 에서 채택한 자료원이 2.4E-03인 데 비해 상당히 높은 수치인 것으로 보인다. 이에 따라 그림 2에 제시된 적용 가능한 GDB간 상관도(relationship flowchart)에 각자의 고장율을 대입하여 수치 적용 변화 추이를 파악하였다. 적용성 평가결과 LER 자료인 NUREG/CR-1362는 너무 오래된 (1980.3) 자료이고 다른 대다수 자료와 1승 이상 편차가 큰 것으로 나타나 임의로 배제하였다. 따라서 최종적으로 산술 평균치는 5.02E-3으로, 표준편차는 4.45E-3으로 계산되었다.

한편 각 자료원에 언급된 발전소 실제 경험자료는 표 4와 같이 보고되어 있으므로 이 전체에 대한 산술평균을 계산하여 상기 값과 비교하고자 하였다. 표 4에서 보는 바와 같이 우도함수 (likelihood) 입력으로도 적용할 수 있는 EDG Fail to Run 발전소 고장율은 4.4e-3으로서 여기서 계산된 GDB와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

5.3. 리스크 영향에 대한 민감도분석

당 사례분석 결과로 발전소 리스크에 미치는 영향을 평가하기 위하여 국내 표준원전을 대상으로 노심손상빈도를 계산하고 자료 데이터 변경 적용에 따른 변화치(ΔCDF)를 조사하였다. 이를 위해 ALWR URD Data Source를 사용한 경우를 기본 경우 (Base case)로 두고 MOV fail to operate 모드에 대한 고장 확률을 변경한 사례에 대한 계산과 EDG fail to run

모드에 대한 고장 확률을 변경한 사례에 대하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용한 모델은 울진 3,4호기 RM PSA (ver.4) 모델이며, 계산 절삭치로는 1.0E-11의 값이 사용되었다.

분석 결과는 표 5에 제시되어 있으며, MOV의 일반 신뢰도자료 데이터 변경 적용으로 인해서 리스크 수치는 4% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 EDG FTR의 일반 신뢰도자료 데이터 변경 적용으로 인해서 리스크 수치는 3% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

6. 결론 및 고찰

국외에서 생산된 과거 어느 시점의 일반 신뢰도 자료원 (GDB)들을 채택하거나 배제하는 판단과정에서는 사실상 분석자의 주관적인 판단이 많이 개입될 소지가 있다. 따라서 GDB 대표값을 선정할 때는 각 GDB의 최신성, 신뢰성 및 기존의 국내 자료 등을 종합적으로 비교검토하여야 적절할 것이다.

본 연구에서는 자료원 상관관계분석과 선별처리 등을 통해 분석자의 주관적인 판단을 가능한 줄이고 동일 신뢰수준의 GDB를 적절히 처리할 수 있는 일련의 방법을 제시하였다. GDB의 적절한 선택과 취급을 위해 기존의 조사 분류연구를 바탕으로 각 고장 범주별 선별지침을 개발하고 자료 선정에 따른 민감도분석을 수행하였다. 평가결과, 경우에 따라서는 현재 우리나라에서 사용하고 있는 기기의 일반 고장률/확률에 비해 훨씬 크거나 또는 작은 값들을 적용할 수도 있는 것으로 밝혀졌다. 이와 같은 원인의 하나는 무조건적인 특정 GDB의 적용 또는 다수 GDB에 대한 적절한 선별기준 부재에 기인하는 것이다. 본 연구에서 제시된 방법은 PSA 입력의 불확실성을 저감시켜 그 결과의 신빙성을 제고하는데 기여할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발 중장기연구 과제에서 수행한 것이며, 특히 KINS-KAERI 연구협력협정에 따른 공동연구 결과입니다.

참고 문헌

[1] “Standard for Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plants Applications,” ASME RA-S-2002, ASME, 2002.

[2] “Probabilistic Risk Assessment Peer Review Process Guidance,” Nuclear Energy Institute Risk-based Applications Task Force, Draft Rev.A3, July 18, 2001.

[3] 황미정 외, 기기 신뢰도자료 실태 조사 및 기본 데이터베이스 구축, KAERI/TR-997/98, 한국원자력연구소, 1998. 3.

[4] Jeffrey L. LaChance, et al., Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment, Draft NUREG/CR-xxxx, US NRC, November 27, 2002.

[5] J. R. Houghton, Component Performance Study – Motor Operated Valves, 1987-1998, NUREG-1715, Vol.4, September 2001.

표 1. 현재 적용 가능한 GDB (NRC: Ref. [4])

GDB	참조 자료원	자료 제공 형태	사용상 약점
NUREG-1150	WASH-1400 IREP data 원전 및 RSSMAP PSA LER SBO 사고분석	고장률/확률 및 초기사건빈도에 대한 대수정규분포의 평균 및 오차계수	실제 운전경험자료가 드믐. 옛날 자료 적용으로 인한 한계점 내포
NUREG/CR-5500	다양한 계통들의 LER에 근거한 신뢰도 분석결과	비신뢰도 추정치 (평균 및 분포)	실제 현재 운전경험 반영한 대표적 결과가 안될 가능성 내포
NUREG/CR-1715	LER 및 NPRDS에 근거한 TDP, MDP, AOV 및 MOV기기 성능분석	상 동	상 동
EPRI ALWR URD	Oconee PRA Seabrook PRA NUREG/CR-1205, 1362 및 1363 (LER)	고장률/확률 및 초기사건빈도에 대한 best estimate	best estimate 설정에 대한 근거 미약, 불확실성 범위 미제공

표 2. ALWR URD Data Source (MOV fail to operate on demand)

Sources	Failure Rate (/d)	비 고
NUREG/CR-4550	3.0E-3	
NUREG/CR-1363	4.2E-3	
Oconee PRA	4.0E-3	
Seabrook PSS	4.3E-3	
5 Plant-specific Evidence	4.6E-3	Oconee, Zion, Indian Point, Millstone, PWR X
Value Selected	4.0E-3	산술 및 기하평균

표 3. 일반 신뢰도자료 선별평가 결과 (MOV fail to operate on demand)

	자료원 개수	산술평균	표준편차	비 고
Case 1	11	3.31E-3	1.83E-3	Historical GDB 제외
Case 2	16	3.10E-3	1.63E-3	Historical GDB 포함
Case 3	5	4.0E-3	6.1E-4	ALWR URD only

표 4. EDG Fail to Run 발전소 고장 경험자료 (ALWR URD 등에서 발췌)

발전소	작동시간 (hrs)	고장 횟수	고장율 (1/hr)
Zion	1340	6	4.5e-3
Indian Point	408	0	1.2e-3
Millstone	1018	1	9.8e-4
PWR X	846	7	8.3e-3
Swedish	1440	8	5.6e-3
German	3740	17	4.5e-3
Total	8792	39	4.4e-3

표 5. 신뢰도자료 변경에 의한 리스크 변화 계산결과

Cases	MOV FTO/FTC 고장 확률 (/d)	EDG FTR 고장율 (/hr)	CDF before recovery	CDF after recovery	ΔCDF (%) based on 'CDF after recovery'
Base Case	4.0E-3	2.40E-3	9.51E-06	6.17E-06	-
Case 1	3.3E-3	2.40E-3	8.86E-06	5.92E-06	∇ 4.0
Case 2	4.0E-3	5.02E-3	1.12E-05	6.35E-06	3.0

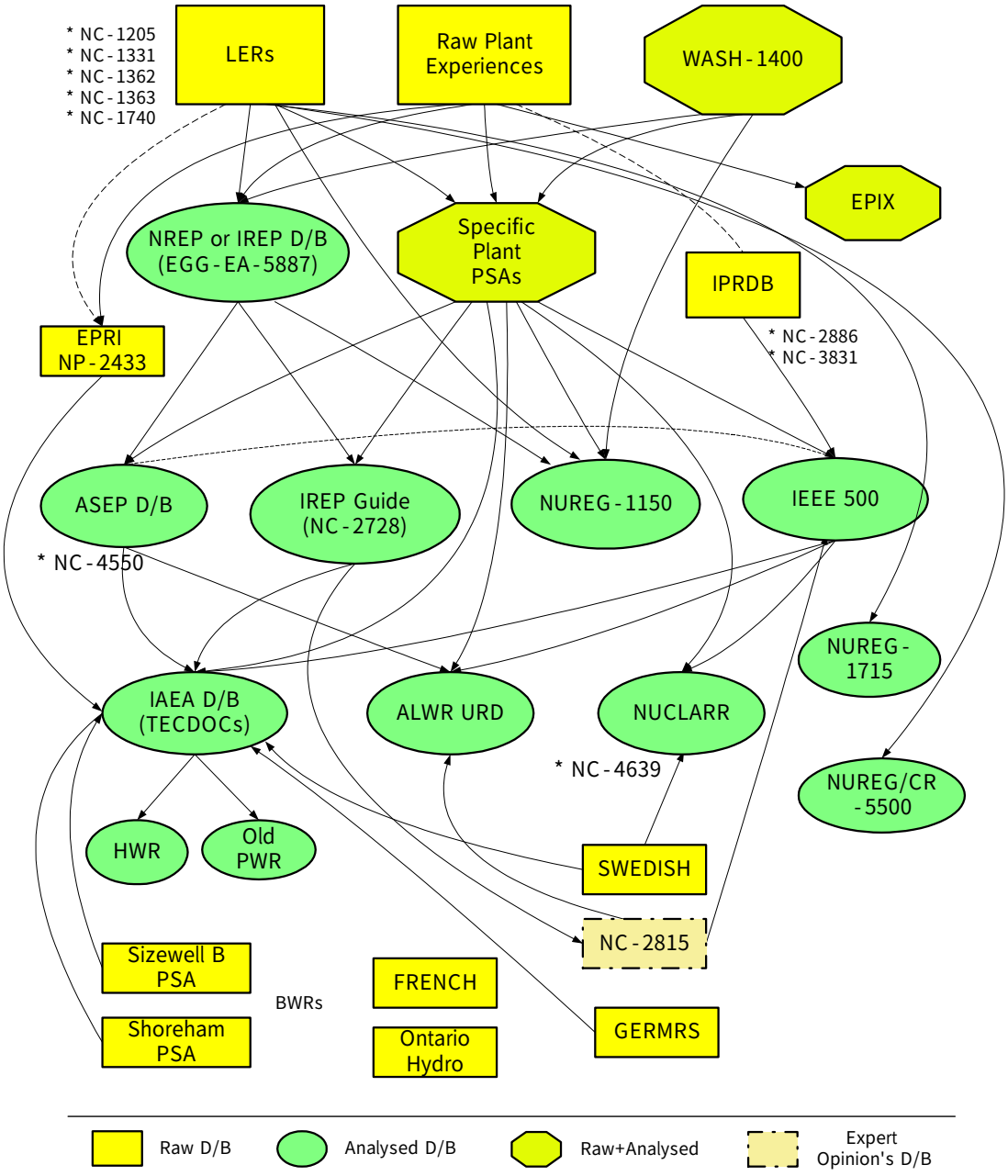

그림 1. GDB 전체 자료원간 상관성 연계도

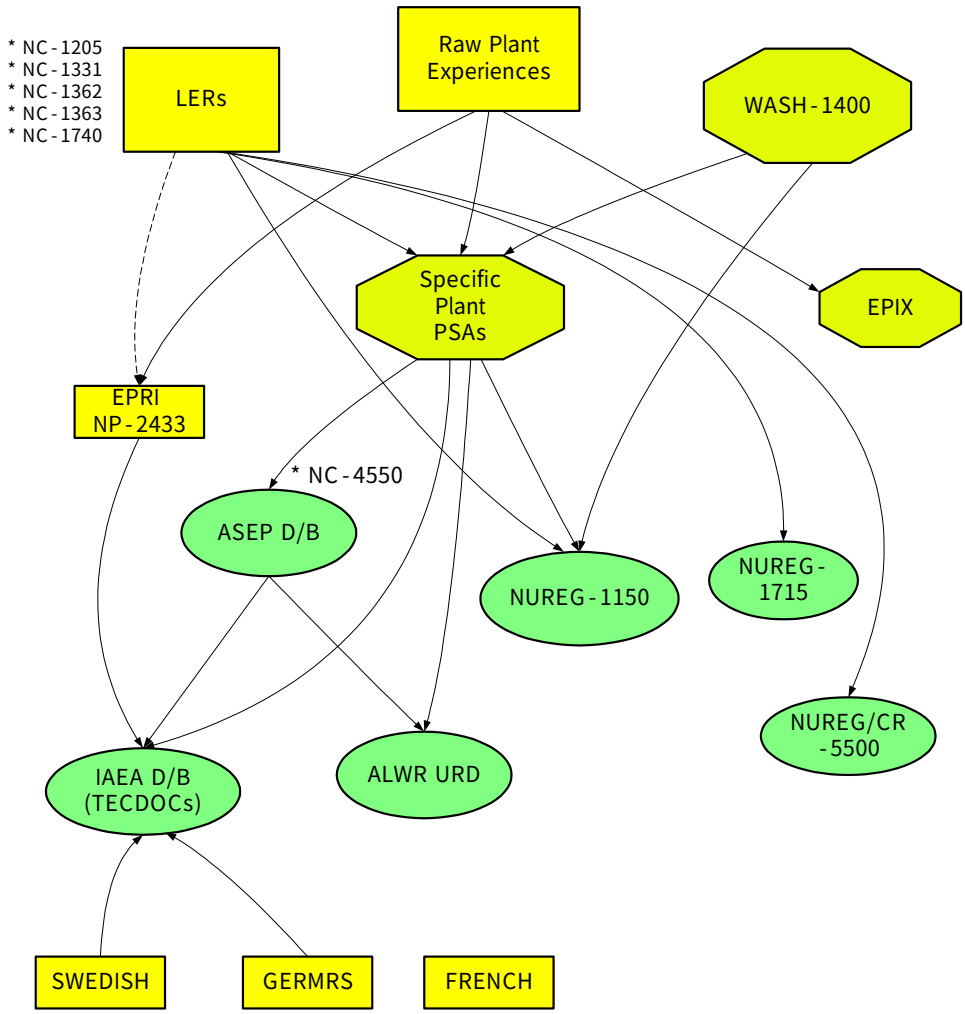

그림 2. 간략화된 가용한 GDB Source간 상관성 연계도