

## 중수로 원전 계측설비 신뢰도 분석 방법론 수립 및 적용 결과

# Establishment of Reliability Analysis Application for Instrumentation Equipment and the Result of Application in PHWR Type Nuclear Power Plants

임재원, 최성수, 김태운

(주)엑트

대전광역시 대덕구 신일동 1688-5

서정관, 성창경

한국전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

중수로 원전의 경우에는 월성 2,3,4호기 인허가 요건으로서 운영기술지침서가 도입되어 발전소 운영에 이용되고 있지만, 신뢰도 분석 결과 적용 등의 측면에서 미결 사항이 있는 상태이다. 이러한 중수로 원전에서는 전통적으로 계통 수준의 이용불능도 목표치를 설정하여 이를 초과하지 않는 범위 내에서 STI/AOT를 설정하여 사용하여 왔다. 하지만 캐나다 규제 문서인 R-문서 및 C-문서에서는 정의 등이 분명하지 않고 상세하게 기술배경이 기술되어 있지 않아 운영기술지침서의 변경 등에 어려움이 있다. 이러한 배경 하에 본 연구에서는 중수로 STI/AOT에 대한 위험도 정보 활용을 위해 구체적이고 명확한 평가 방법론을 설정하였으며, 이를 기반으로 중수로 진출력 운전 시 운전제한조건 관련 계측설비의 STI/AOT에 대한 신뢰도 평가를 수행하여 최적화된 표준 STI/AOT를 개발하였다.

### Abstract

In case of CANDU plants, a technical specification has been introduced in plant operation as a licensing basis of Wolsong 2,3,4 Units. However there are some pending issues related to reliability application. Traditionally, system unavailability has been utilized in deciding STI/AOT for CANDU plants. However, because definition is not clear and technical bases are not detail in Canadian regulatory document such as R-documents and C-document, there is some difficulty in modifying STI/AOT. Upon the above background, the establishment of applicable reliability assessment methodology of STI/AOT, and its application to develop optimal STI/AOT for the improved standard technical specification of CANDU plants are

performed in this study

## I. 서론

국내 중수로 원전의 경우, NUREG-1431/1432를 근간으로 한 웨스팅하우스형 및 CE형 표준운영 기술지침서(Improved Standard Technical Specification; ISTS)의 개발이 완료됨에 따라 이를 근거로 하여 기존 운영기술지침서를 개선 운영기술지침서로 전환하는 작업이 각 발전소별로 진행 중에 있다. 이러한 표준운영기술지침서에서는 정기점검주기(Surveillance Test Interval; STI) 및 허용정지시간(Allowed Outage Time; AOT)의 기술배경 강화를 통해 위험도가 저해되지 않는 범위 내에서 이들을 합리적으로 설정함으로써 경제적 측면의 이득도 꾀하고 있다.

즉, STI 측면에서는 정기점검을 자주 수행함으로써 기기의 고장 혹은 성능 저하 상태를 빨리 탐지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 잦은 시험에 따른 이용불능도 증가 및 시험 후 원 위치 실패 가능성 증가, 기기 마모 및 성능 저하로 인한 기기 신뢰도 저하, 시험 중 원자로 불시정지 가능성 증가 등의 역영향(adverse effect)도 있다. 한편, AOT 측면에서는 짧은 AOT는 시험 및 정비로 인한 이용불능도를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 불충분한 AOT에 따른 불충실한 시험 및 정비로 인한 기기 신뢰도 저하, AOT 이후의 원자로 불시 정지 빈도 증가, 운전원 스트레스에 의한 인간오류 가능성 증가 등의 역영향도 있다. 이러한 이유로 STI/AOT에 대한 신뢰도 평가를 통해 안전성을 확보하면서 경제성도 추구하는 최적화된 STI/AOT 설정이 요구되고 있다.

중수로 원전의 경우에는 월성 2,3,4호기 인허가 요건으로서 운영기술지침서가 도입되어 발전소 운영에 이용되고 있지만, 신뢰도 분석 결과 적용 등의 측면에서 미결 사항이 있는 상태이다. 이러한 중수로 원전에서는 전통적으로 계통 수준의 이용불능도 목표치를 설정하여 이를 초과하지 않는 범위 내에서 STI/AOT를 설정하여 사용하여 왔다. 하지만 캐나다 규제문서인 R-문서 및 C-문서에서는 정의 등이 분명하지 않고 상세하게 기술배경이 기술되어 있지 않아 기술지침서의 점검 요건 변경 등에 큰 어려움이 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 중수로 원전 계측설비에 대한 STI/AOT에 대한 구체적이고 명확한 평가방법론을 설정하여 중수로 원전의 표준 기술지침서 개발에 기여하는데 그 기술적 의미가 있다.

## II. 중수로 원전 계측설비 신뢰도 분석 방법론 수립

중수로 원전 계측설비 STI/AOT에 대한 신뢰도 분석 방법론을 수립하기 위해 국내·외의 평가 방법론들에 대한 검토가 수행되었다. 이 과정에서는 기술지침서에서의 위험도 정보 활용 관련한 미국 NRC의 접근방법과 기술지침서에서의 STI/AOT 결정 관련한 캐나다 CNSC의 접근방법 및 국내·외의 연구기관 및 사업자 등이 수행한 STI/AOT 변경 관련 신뢰도 평가 방법론들에 대한 검토가 이루어졌다. 그런 후 검토 결과를 바탕으로 위험도 평가 절차서를 작성하여 관련 전문가들의 검토자문을 거쳐 신뢰도 평가에 활용하였다.

### 1. 위험도 평가 절차서 작성

위험도 평가 절차서는, 중수로 표준운영기술지침서에 나와 있는 계측설비 STI/AOT 항목들 중에서 신뢰도 평가를 통해 기술배경을 제시할 수 있는 항목들에 대한 표준 STI/AOT 개발을 위해서, 적합한 PSA 방법론에 따라 신뢰도 평가를 수행할 수 있도록 해당 절차 및 방법을 제공하기 위한 목적으로 작성되었다. 본 절차서는 중수로 표준운영기술지침서에 사용될 계측설비에 대한 표준

STI/AOT 개발을 위해 작성되었으므로 STI/AOT의 완화/유지/강화 안에 대해서 PSA 방법론을 이용해 실제적으로 신뢰도 평가를 수행할 수 있도록 하는 범위 내에서 기술되어 있다.

#### 가. STI/AOT 관련 표준안 정의

본 단계에서는 다음과 같은 사항들을 고려하여 중수로 원전 계측설비 ISTS의 STI/AOT와 관련된 표준안을 정의하는 업무가 수행된다.

- 현행 STI/AOT가 발전소 현장의 점검방법/정비방법 등을 고려할 때 시간적인 측면에서 합리적으로 설정되어 있는가?
- 현행 STI/AOT가 비용편익적인 안전성향상 또는 불필요한 운전 부담 감소 등의 측면들을 고려할 때 완화/유지/강화 대상 중 어디에 해당하는가?

#### 나. 발전소 안전성에 대한 영향 평가

본 단계에서는 "II.1.가"에서 정의된 STI/AOT 표준안이 발전소 안전성에 미치는 영향을 평가하는 업무가 수행된다. 이러한 영향 평가는 크게 위험도 관점 및 결정론적 관점에서 수행되어야 한다.

위험도 관점에서는 다음과 같은 4가지 질문들에 대한 답변이 이루어져야 한다.

- 해당 계통/기기가 어떤 초기사건의 완화에 이용되는가?
- 해당 계통/기기의 이용불능이 어떤 초기사건을 유발하는가?
- 해당 계통/기기의 오작동이 어떤 초기사건을 유발하는가?
- 해당 계통/기기 관련해 어떤 백업 계통(안전 등급 또는 비안전 등급)이 가용한가?

결정론적 관점에서는 STI/AOT 표준안이 해당 계통의 설계기준에 미치는 영향이 평가되어야 한다. 또한 Reg. Guide 1.174[1]에 제시된 지침과 부합되도록 심층방어 측면에서 백업 계통의 가용여부가 고려되어야 하고, 발전소 안전여유도 측면도 고려되어야 한다.

#### 다. PSA 모델에의 영향 파악

본 단계에서는 중수로 계측기기 STI/AOT 표준안에 따라 영향을 받는 모든 인자들을 파악하기 위해 중수로 PSA 모델을 검토하는 업무가 수행된다. 이 과정에서 PSA 모델이 발전소 운전 및 사고 완화의 관점에서 관련 계통을 올바르게 모델링하고 있는지, 적합한 성공기준이 적용되었는지 등이 또한 검토되어야 한다. AOT 표준안에 대한 신뢰도 평가의 경우에는 관련된 시험 및 정비로 인한 이용불능도가 반영될 수 있도록 모델링되어야 하고, STI 표준안에 대한 신뢰도 평가의 경우에는 해당 시험주기에 따른 기기 이용불능도가 반영될 수 있도록 기기 고장 기본사건이 모델링되어야 한다. PSA 모델과 관련해 검토되어야 하는 세부 요소들은 다음과 같다.

##### (1) 초기사건 빈도

STI/AOT 표준안이 보조계통(전원, 계기용 공기, 용수 관련 계통)과 관련되어 있으면 해당 보조계통 상실의 초기사건으로 고려되어 있는지, 혹은 STI 표준안과 관련해 시험으로 인한 불시정지 발생 위험도 변화의 정량적 평가가 가능한지를 검토한다.

(2) 사건수목 모델

성공기준의 변경이 필요한지 검토한다.

(3) 계통 고장수목 모델

계통 고장수목 모델에 대하여 다음과 같은 내용을 검토한다.

- 기기 Random 고장모드 : STI/AOT 표준안에서 고려하는 고장모드가 기기의 Random 고장모드로서 모델링되어 있는지 검토한다.
- 공통원인고장 : STI/AOT 표준안과 관련된 기기에 대하여 공통원인고장이 모델링되어 있는지 검토한다.
- 인간오류 : STI 변경에 따라 시험 후 원위치 실패로 인한 위험도 변화의 정량적 평가가 필요한지 검토한다.
- 시험주기 : STI 표준안과 관련된 기기에 대하여 standby time-related 고장모드 형태로 모델링되어 있는지 검토한다.
- 시험 및 정비로 인한 이용불능 : AOT 표준안과 관련된 기기에 대하여 시험 및 정비로 인한 이용불능이 모델링되어 있는지 검토한다.

라. PSA 모델과 STI/AOT 관련 인자 수정

본 단계에서는, "II.1.다"에서 파악된 내용을 기반으로, STI/AOT 표준안이 위험도에 미치는 영향을 올바르게 평가하기 위해 PSA 모델을 실제로 수정하는 업무가 수행된다. 이러한 수정 대상에는 다음과 같이 6가지 항목이 포함된다.

- 초기사건 빈도
- 사건수목 모델
- 계통 고장수목 모델
- 기기 신뢰도 데이터
- 시험주기
- 시험 및 정비로 인한 이용불능도

초기사건 빈도의 경우, 보조계통 이용불능과 관련된 초기사건 빈도는 고장수목을 작성하여 구하는 것이 일반적이므로, 해당 기기와 관련된 초기사건 빈도가 고장수목 작성을 통해 구해졌다면 STI/AOT 표준안에 따라 초기사건 빈도가 올바르게 정량화될 수 있도록 주의를 기울여야 한다. 또한 STI 표준안과 관련해 시험으로 인한 불시정지 발생 위험도 변화의 정량적 평가가 가능한 경우에는 이를 고려하여야 한다.

일반적으로 사건수목 및 계통 고장수목 모델의 경우에는, 성공기준의 변경이 필요하지 않는 한 수정할 필요성은 발생하지 않는다. 다만, "II.1.다"에서 계통 고장수목 모델이 STI/AOT 표준안에 대한 영향을 평가할 수 있도록 모델링되어 있지 않는 것으로 파악된 경우에는, 관련 영향 평가가 가능하도록 적합하게 수정되어야 한다.

STI/AOT 표준안이 기기 신뢰도 데이터에 미치는 정량적인 영향 평가는 실제적으로 매우 어려우므로 별도로 고려하지 않거나, 정성적인 영향만을 기술하도록 한다. "II.1.마"에서 평가될 위험도 척도 중 조건부(conditional) CDF의 경우에는, 초기사건 빈도 및 공통원인고장으로 인한 이용불능도가 올바르게 변경되어 적용될 수 있도록 주의를 기울여야 한다. 또한 STI 변경에 따라 시험 후

원위치 실패로 인한 위험도 변화의 정량적 평가가 필요한 경우(고장률에 이미 포함되어 있는 경우에는 고려할 필요 없음)에는 이를 고려하여야 한다.

계통 고장수목의 시험주기 항목 또는 시험 및 정비로 인한 이용불능도의 경우에는 STI/AOT 표준안을 반영할 수 있도록 명시적으로 수정되어야 한다. 시험주기 항목의 경우 해당 기기 관련 기본사건을 standby time-related 고장모드 형태로 모델링한 후에 STI 표준안을 반영하도록 한다. 시험 및 정비로 인한 이용불능도의 경우 AOT 관련 기기 고장 논리의 하부에 있는 standby time-related 고장모드를 갖는 각 기본사건들에 대해 평균수리시간(Mean Time To Repair; MTTR) 대신 AOT를 개별 적용하는 방식을 적용하여 AOT 표준안을 반영하도록 한다.

특수안전계통(제1정지계통, 제2정지계통, 비상노심냉각계통, 격납건물계통)의 경우에는 캐나다의 신뢰도 분석 방법론에 따라 계통 이용불능도를 정량화해야 한다. 이 때 특수안전계통 설계와 관련해 규제요건으로 명시되어 있는 계통 이용불능도 개념에는 공통원인고장으로 인한 이용불능은 고려하지 않고 있으므로, 공통원인고장은 계통 이용불능에 기여하지 않도록 계통 고장수목 모델을 수정해야 한다.

#### 마. PSA 모델을 이용한 위험도 평가

본 단계에서는, 다음과 같은 절차로 위험도 척도들에 대한 평가를 수행하여 허용기준을 충족시키는지 판단하는 업무를 수행한다.

- Baseline CDF

중수로 원전 PSA 모델을 이용하여 Baseline CDF가 1.0E-4/년 미만임을 확인한다.

- ΔCDF

중수로 원전 PSA 모델을 이용하여 ΔCDF가 1.0E-6/년 미만임을 확인한다. ΔCDF는 다음과 같이 정의된다:

$$\Delta CDF = CDF(STI/AOT \text{ 표준안 반영}) - \text{Baseline CDF} \quad (1)$$

- ΔLERF

중수로 원전 PSA 모델을 이용하여 ΔLERF가 1.0E-7/년 미만임을 확인한다. ΔLERF는 다음과 같이 정의된다:

$$\Delta LERF = LERF(STI/AOT \text{ 표준안 반영}) - \text{Baseline LERF} \quad (2)$$

- ICCDP

AOT 표준안의 경우에는 ICCDP가 5.0E-7 미만임을 확인한다. ICCDP는 다음과 같이 정의된다:

$$ICCDP = [\text{해당 기기가 이용불능인 상태에서의 조건부 CDF} - \text{Nominal Baseline CDF(AOT 표준안 반영)}] * \text{단일 AOT} \quad (3)$$

- ICLERP

AOT 표준안의 경우에는 ICLERP가 5.0E-8 미만임을 확인한다. ICLERP는 다음과 같이 정의된다:

$$ICLERP = [\text{해당 기기가 이용불능인 상태에서의 조건부 LERF} - \text{Nominal Baseline LERF(AOT 표준안 반영)}] * \text{단일 AOT} \quad (4)$$

- 특수안전계통 이용불능도

특수안전계통 관련 STI/AOT 변경안의 경우에는 계통 이용불능도가 1.0E-3 미만임을 확인한다.

상기의 위험도 척도에서 대량조기방출빈도(Large Early Release Frequency; LERF)의 정량화 시 고려해야할 요소는 다음과 같다[2] : 중수로의 경우, 격납건물 1차 손상은 칼란드리아 탱크 손상

이전 시점에 발생하는 손상으로서 사고 발생 후 약 1일(경수로의 1차 손상은 약 4시간)이 경과한 후에 발생하는 것으로 분석되었다. 그리고 격납건물 2차 손상은 칼란드리아 탱크 손상 시점 혹은 손상 이후 시점에 발생하는 손상으로서 사고 발생 후 약 1.5일 이후에 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 중수로 원전에서 대량조기방출빈도를 정량화할 때는 격납건물 격리 실패와 격납건물 우회사고 등 2가지 경우에 대해 정량화를 수행하면 된다.

캐나다의 전통적인 신뢰도 분석 방법론에서 요구하는 계통 이용불능도는 AECB-1059[3]에 바탕을 두고 있는 특수안전계통 이용불능도 목표치( $< 1.0E-3$ ) [4-6]에 근간을 두고 위험도 척도 중의 하나로서 선정하였다.

이러한 신뢰도 평가 과정에서 경우에 따라서는 출력 운전 중에 있는 것보다, 정지 운전으로 인한 전이위험도 및 정지상태의 위험도가 더 크다는 것을 입증함으로써 출력 운전 중의 STI/AOT 표준안에 따른 위험도 증가분에 대해 정당성을 간접적으로 제시할 수도 있다.

본 단계에서의 신뢰도 평가 결과 주어진 허용기준을 만족시키지 못하는 것으로 판명되면 STI/AOT 표준안이 수정되거나 보상조치가 고려되어 재평가되어야 한다. 여기서 보상조치란 사고 완화과정에서 해당 기기와 유사한 기능을 수행할 수 있는 백업 기기의 가용성 또는 사고 완화를 위해 해당 계통을 필요로 하는 초기사건 발생 확률을 낮추는 방법 등을 고려하는 조치이다.

#### 바. 표준 STI/AOT 개발

본 단계에서는, 표준 STI/AOT 개발과 관련한 과정으로서 다음과 같은 정보들을 문서화하는 업무가 수행된다.

##### (1) 계통/기기 설명

STI/AOT 표준안과 관련된 계통/기기가 안전성 측면에서 수행하는 기능을 설명한다.

##### (2) 사고 완화를 위해 해당 계통을 필요로 하는 초기사건 목록

초기사건 목록을 기술하고 초기사건 완화를 위해 수행하는 기능을 설명한다.

##### (3) (2)의 각 초기사건별 계통의 성공기준

중수로 원전 PSA 모델에서 구성된 해당 계통/기기의 성공기준을 기술한다.

##### (4) STI/AOT와 관련된 모델링 내용을 파악할 수 있는 수준에서의 계통 고장수목 모델

STI/AOT 표준안과 관련된 모델 변경 방식을 다음과 같이 설명한다.

- $\Delta CDF/\Delta LERF$  정량화를 위해 변경된 초기사건 고장수목 및 계통 고장수목 내용을 설명한다.
- $\Delta CDF/\Delta LERF$  정량화를 위해 변경된 이용불능도 값을 통합 데이터베이스 파일에 정의하여 이용한 내용을 제시한다.
- ICCDP/ICLERP 정량화를 위해 변경된 초기사건 고장수목 및 계통 고장수목 내용을 설명한다.
- ICCDP/ICLERP 정량화를 위해 변경된 이용불능도 값을 통합 데이터베이스 파일에 정의하여 이용한 내용을 제시한다.
- 특수안전계통의 경우, 이용불능도를 계산하기 위해 변경된 계통 고장수목 내용을 설명한다.

##### (5) PSA 모델 정량화 결과

STI/AOT 표준안에 대한 다음과 같은 PSA 모델 정량화결과를 기술한다.

- Baseline CDF
- $\Delta$ CDF
- $\Delta$ LERF
- ICCDP (AOT 표준안의 경우)
- ICLERP (AOT 표준안의 경우)
- 계통 이용불능도 (특수안전계통 관련 STI/AOT 표준안의 경우)
- 정지상태의 위험도 대비 결과 (해당 시)
- 민감도 분석 결과

## 2. 세부 신뢰도 평가 방법론 수립

계측설비 STI/AOT에 대한 실제 신뢰도 평가를 위해 세부 신뢰도 평가 방법론을 수립한 후, 이를 바탕으로 계통 고장수목 등의 PSA 모델을 일관성 있게 변경하여 분석하는 업무를 수행하였다.

### 가. AOT에 대한 신뢰도 평가 방법론

계측설비 AOT에 대한 신뢰도 평가 방법은 3개의 채널 중 1개 채널 고장 시와 3개 채널중 2개 채널 고장 시에 따라 차이가 있으며, 신뢰도 평가 방법론은 다음과 같다.

#### (1) 계측설비 3개의 채널 중 1개 채널 고장 시

계측 설비 관련 LCO인 "3.3.1 제1정지계통 계측설비"와 관련된 그림 1에 관한 AOT 신뢰도 평가 방법은 아래와 같다.

- $\Delta$ CDF/ $\Delta$ LERF
  - 고장난 채널의 기본사건에 복구 AOT(7일) 대신에 트립 AOT(1시간)적용하여 이용불능도 값을 변경한 후  $\Delta$ CDF의 정량화 결과를 구한다.
- ICCDP/ICLERP
  - 고장난 채널의 신호 게이트의 하부 논리를 삭제한 후 기본사건으로 만든다.
  - 복구 AOT(7일) 대신에 트립 AOT(1시간)을 적용하여 ICCDP/ICLERP를 구한다.
- 계통이용불능도
  - 모든 공통원인고장 관련 기본사건의 이용불능도 값을 '0'으로 설정한다.
  - 고장난 채널의 기본사건에 복구 AOT(7일) 대신에 트립 AOT(1시간)적용하여 계통 이용불능도 값을 구한다.

#### (2) 계측설비 3개의 채널 중 2개 채널 고장 시

계측 설비 관련 LCO인 "3.3.1 제1정지계통 계측설비"와 관련된 그림 2에 관한 AOT 신뢰도 평가 방법은 아래와 같다

- $\Delta$ CDF/ $\Delta$ LERF
  - 고장난 채널의 기본사건에 트립 AOT(1시간)를 적용하여 이용불능도 값을 변경한다.
  - 다른 고장난 채널의 기본사건에 복구 AOT(8시간)를 적용하여 이용불능도 값을 변경한 후  $\Delta$ CDF/ $\Delta$ LERF의 정량화 결과를 구한다.
- ICCDP/ICLERP
  - 고장난 채널의 신호 게이트의 하부 논리를 삭제한 후 기본사건으로 만든다.
  - 트립되기 전(1시간)까지 2개 채널에 ICCDP/ICLERP 값을 적용한다.

- 트립된 후(7시간)에는 1개 채널에 ICCDP/ICLERP 값을 적용하다.
- 두 값을 합산하여 최종 ICCDP/ICLERP를 구한다.
- 계통이용불능도
  - 모든 공통원인고장 관련 기본사건의 이용불능도 값을 '0'으로 설정한다.
  - 고장난 채널의 기본사건에 트립 AOT(1시간)를 적용한다.
  - 다른 고장난 채널의 기본사건에 복구 AOT(8시간)를 적용하여 계통 이용불능도 값을 구한다.

#### 나. STI에 대한 신뢰도 평가 방법론

STI에 대한 신뢰도 평가 방법은 ,그림3 에 나와 있는 예제에 대한 평가 방법은 다음과 같다.  
(STI : 기기 A, B 운전가능성 확인)

- STI 관련 위험도 척도 평가 시, 고장수목 변경 내용은 다음과 같다.
  - A에서 a1의 "STI" → "STI 표준안"으로 변경
  - B에서 b1의 "STI" → "STI 표준안"으로 변경

### III. 중수로 원전 계측설비 신뢰도 분석 결과

"II"에 기술되어 있는 신뢰도 평가 절차서 및 세부 신뢰도 평가 방법에 의하여 중수로 전출력 운전 시 운전제한조건 관련 계측설비에 대한 STI/AOT 신뢰도 평가를 다음과 같이 수행하였으며 평가 결과는 표 1, 2와 같다.

#### 1. 제1정지계통 신뢰도 평가 방법

3개의 채널 중 1개가 운전불가능 한 경우를 고장수목에 반영하기 위해 고장난 채널 D의 하부논리의 기본사건들과 관련된 MTTR+Shift 값을 트립 AOT(1시간)으로 대체해  $\Delta CDF/\Delta LERF$ 를 정량화하여 결과를 얻었으며, 채널 D 게이트의 하부 논리를 삭제 후 기본사건으로 만들고 트립 AOT를 적용하여 ICCDP/ICLERP 값을 구하였다. 계통 이용불능도의 경우 기본사건에 트립 AOT를 적용하고 공통원인고장 관련 기본사건을 "0"으로 설정한 후 계통 이용불능도를 구하였다.

3개의 채널 중 2개가 운전불가능 한 경우를 고장수목에 반영하기 위해 고장난 채널 D의 하부논리의 기본사건들과 관련된 MTTR+Shift 값을 트립 AOT(1시간)으로 대체하고 채널 F의 하부논리 이 기본사건들과 관련된 MTTR+Shift 값을 복구AOT(8시간)으로 대체하여  $\Delta CDF/\Delta LERF$ 를 정량화하여 결과를 얻었으며, 채널 D, F 게이트의 하부 논리를 삭제 후 기본사건으로 만들고 트립 AOT가 적용되기 전(1시간)까지는 2개의 채널에 대한 ICCDP/ICLERP 값을 구했으며, 트립 후부터 복구 AOT까지의 시간(7시간)에는 1개 채널에 대한 ICCDP/ICLERP 값을 구한 후 두개의 값을 합하여 ICCDP/ICLERP를 정량화 하였다.

#### 2. 제2정지계통 신뢰도 평가 방법

3개의 채널 중 1개가 운전불가능 한 경우를 고장수목에 반영하기 위해 고장난 채널 G의 하부논리의 기본사건들과 관련된 MTTR+Shift 값을 트립 AOT(1시간)으로 대체해  $\Delta CDF/\Delta LERF$ 를 정량화하여 결과를 얻었으며, 채널 G 게이트의 하부 논리를 삭제 후 기본사건으로 만들고 트립



AOT를 적용하여 ICCDP/ICLERP 값을 구하였다. 계통 이용불능도의 경우 기본사건에 트립 AOT를 적용하고 공통원인고장 관련 기본사건을 “0”으로 설정한 후 계통 이용불능도를 구하였다.

3개의 채널 중 2개가 운전불가능 한 경우를 고장수목에 반영하기 위해 고장난 채널 G의 하부논리의 기본사건들과 관련된 MTTR+Shift 값을 트립 AOT(1시간)으로 대체하고 채널 H의 하부논리가 기본사건들과 관련된 MTTR+Shift 값을 복구AOT(8시간)으로 대체하여  $\Delta CDF/\Delta LERF$ 를 정량화하여 결과를 얻었으며, 채널 G, H 게이트의 하부 논리를 삭제 후 기본사건으로 만들고 트립 AOT가 적용되기 전(1시간)까지는 2개의 채널에 대한 ICCDP/ICLERP 값을 구했으며, 트립 후부터 복구 AOT까지의 시간(7시간)에는 1개 채널에 대한 ICCDP/ICLERP 값을 구한 후 두개의 값을 합하여 ICCDP/ICLERP을 정량화 하였다.

### 3. 비상노심냉각계통 신뢰도 평가 방법

제1정지계통 및 제2정지계통의 신뢰도 평가 방법과 동일하며, 계통 이용불능도 정량화 시 원자로 냉각재계통 냉각수 주입 정점사건(ECC-D), 증기발생기 급속 냉각 정점사건(CC), 원자로 냉각재 유로 정점사건(LI)를 각각 정량화 한 후 값을 합산하였다.

### 4. 격납건물계통 신뢰도 평가 방법

제1정지계통 및 제2정지계통의 신뢰도 평가 방법과 동일하며,  $\Delta LERF$  및 ICLERP에 대해서만 정량화 작업을 수행하였다. 계통 이용불능도 정량화 시 격납건물 살수계통(CDTS), 수소점화기계통(CHIS), 지역공기냉각기계통(CLAC), 출입문계통(CAL), 격리계통(CIS) 정점사건을 각각 정량화 한 후 값을 합산하였다.

## V. 결론

본 연구는 중수로 원전의 계측설비 신뢰도 분석 방법론을 설정하고, 이를 기반으로 중수로 전출력 운전 시 운전제한조건 계측설비의 STI/AOT에 대한 신뢰도 평가를 수행하여 최적화된 표준 STI/AOT를 개발함으로써 중수로 원전의 표준운영기술지침서 개발에 기여하는데 그 목적이 있다.

첫째로 STI/AOT에 대한 신뢰도 평가를 위해 국내·외의 평가 방법론들에 대한 검토가 수행되었다. 이 과정에서는 기술지침서에서의 위험도 정보 활용 관련한 미국 NRC의 접근방법과 기술지침서에서의 STI/AOT 결정 관련한 캐나다 CNSC의 접근방법 및 국내·외의 연구기관 및 사업자 등이 수행한 STI/AOT 변경 관련 신뢰도 평가 방법론들에 대한 검토가 이루어졌다. 그런 후 STI/AOT 항목들에 대해 적합한 PSA 방법론에 따라 체계적이고 일관성 있는 위험도 평가를 수행할 수 있도록 해당 절차 및 방법 제공 목적으로 위험도 평가 절차를 작성한 후, 관련 전문가들의 검토자문을 거쳐 완성하여 위험도 평가에 활용하였다.

둘째로 STI/AOT에 대한 실제 신뢰도 평가를 위해 세부 신뢰도 평가 방법론을 수립한 후, 이를 바탕으로 계통 고장수목 등의 PSA 모델을 변경하는 업무를 수행하였다. 그런 후, 특수안전계통과 관련된 STI/AOT 항목들의 경우에는 중수로 규제요건인 특수안전계통 신뢰도 목표치와의 비교 분석 목적으로 계통 이용불능도 분석을 수행하였다. 또한 사고경위 정량화를 통한 노심손상빈도 및 대량조기방출빈도 분석을 수행하여 위험도 척도별 평가 및 허용기준과의 비교 분석을 수행하였다.

## VI. 참고문헌

- [1] "An Approach for Using PRA in Risk-Informed Decision on Plant Specific Changes to the Licensing Basis", Reg. Guide 1.174, NRC, 1998.
- [2] "가압 중수로 원전 2단계 확률론적 안전성 평가", TR.93NJ10.97.67-2, 전력연구원, 1997.
- [3] D.G. Hurst and F.C. Boyd, "Reactor Licensing and Safety Requirements", AECSB-1059, AECSB, 1972.
- [4] "Requirements for Containment Systems for CANDU Nuclear Power Plants", R-7, AECSB, 1991.
- [5] "Requirements for Shutdown Systems for CANDU Nuclear Power Plants", R-8, AECSB, 1991.
- [6] "Requirements for Emergency Core Cooling Systems for CANDU Nuclear Power Plants", R-9, AECSB. 1991.

표 1. 중수로 원전 계측설비 신뢰도 분석 결과 (AOT)

ISTS LCO/SR 번호	불만족시 조치/점검내용	AOT (표준안)	Baseline CDF (< 1.0E-4)	ΔCDF (< 1.0E-6)	ΔLERF (< 1.0E-7)	ICCDP (< 5.0E-7)	ICLERP (< 5.0E-8)	계통 이용불능도 (< 1.0E-3)
3.3.1-1	제1정지계통 1개/3개 채널 고장	1시간	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	7.050E-08	4.261E-10	5.491E-04
3.3.1-2	제1정지계통 2개/3개 채널 고장	8시간	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	5.640E-07	3.409E-09	5.644E-04
3.3.2-1	제2정지계통 1개/3개 채널 고장	1시간	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	4.191E-08	4.230E-10	5.367E-04
3.3.2-2	제2정지계통 2개/3개 채널 고장	8시간	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	3.353E-07	3.384E-09	5.507E-04
3.3.3-1	비상노심냉각계통 1개/3개 채널 고장	1시간	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	8.629E-08	2.389E-10	8.442E-04
3.3.3-1	비상노심냉각계통 2개/3개 채널 고장	8시간	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	9.052E-07	2.950E-09	8.442E-04
3.3.4-1	격납건물계통 1개/3개 채널 고장	1시간	-	-	0.000/R	-	1.161E-10	1.684E-03
3.3.4-2	격납건물계통 1개/3개 채널 고장	8시간	-	-	0.000/R	-	1.430E-08	1.684E-03

표 2. 중수로 원전 계측설비 신뢰도 분석 결과 (STI)

ISTS LCO/SR 번호	불만족시 조치/점검내용	STI (표준안)	Baseline CDF (< 1.0E-4)	ΔCDF (< 1.0E-6)	ΔLERF (< 1.0E-7)	계통 이용불능도 (< 1.0E-3)
3.3.1.4	제1정지계통 중성자속 변수, PDC Watchdog 기능시험	7일	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	5.472E-04
3.3.1.5	제1정지계통 공정변수 기능시험	28일	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	5.472E-04
3.3.2.4	제2정지계통 중성자속 변수, PDC Watchdog 기능시험	7일	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	5.349E-04
3.3.2.5	제2정지계통 공정변수 기능시험	28일	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	5.349E-04
3.3.3.3	비상노심냉각계통 급냉동작을 제외한 기능 시험	28일	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	8.442E-04
3.3.3.4	비상노심냉각계통 급냉동작 기능 시험	92일	2.508E-5/R	0.000/R	0.000/R	8.442E-04
3.3.4.3	격납건물계통 채널 기능시험	7일	-	-	0.000/R	1.685E-03
3.3.4.7	격납건물계통 최종구동기 시험	31일	-	-	0.000/R	1.685E-03

그림 1. LCO 3.3.1 제1정지계통 계측설비 3개의 채널 중 1개 고장시

불만족상태	조치요구사항	제한시간
1. 3개의 채널 중 1개가 운전불가능할 때	-----주----- 운전불가능한 채널은 운전가능한 다른 2개의 채널을 시험하는 동안 우회할 수 있다. -----	
	1.1 채널을 트립상태로 둔다.	1시간
	그리고 1.2 채널을 운전가능한 상태로 복구한다.	7일

그림 2. LCO 3.3.1 제1정지계통 계측설비 3개의 채널 중 2개 고장 시

불만족상태	조치요구사항	제한시간
2. 조치요구사항 1.2와 관련 제한시간을 불만족할 때	2.1 운전모드 3으로 간다.	4시간
3. 3개의 채널 중 2개가 운전불가능할 때	3.1 운전불가능한 채널 2개 중 1개를 트립상태로 둔다.	1시간
	그리고 3.2 나머지 운전불가능한 채널을 운전가능한 상태로 복구한다.	8시간
4. 조치요구사항 3.2와 관련 제한시간을 불만족할 때	4.1 운전모드 3으로 가는 조치를 시작한다.	즉시
	그리고 4.2 운전모드 5로 간다.	8시간

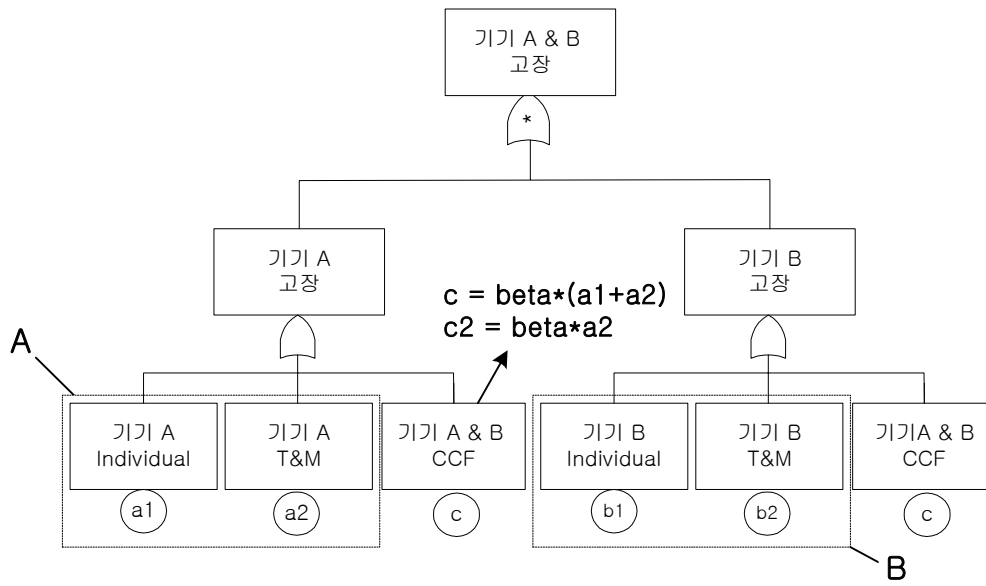


그림 3. 2개의 트레인으로 구성된 기기의 변경 전 고장수목