

위험도 정보를 이용한 중수로 제1정지계통 허용정지시간 설정

Risk-Informed Evaluation of Allowed Outage Times for PHWR Shutdown System No.1

서정관, 성창경
한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

최성수
(주)엑트
대전광역시 대덕구 신일동 1688-5

요 약

원자력발전소 운영기술지침서의 목적은 안전성 확보에 있으며, 이러한 관점에서 현행 제1정지계통과 관련한 운전제한조건은 변경이 필요하다. 현행 제1정지계통과 관련한 운전제한조건은 28개의 정지봉 중 3개 이상이 운전불가능할 경우 조치를 취하도록 하고 있으나, 표준운영기술지침서에서는 1개 또는 2개가 운전불가능할 경우 각각 31일 및 48시간의 허용정지시간을 갖도록 하는 조치가 제시되었다. 위험도 정보를 이용하여 새로 설정된 허용정지시간을 평가한 결과, USNRC Reg. Guide 1.174 및 1.177에서 제시한 허용기준, 그리고 특수안전계통에 대한 캐나다 신뢰도 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

Abstract

The purpose of technical specifications in nuclear power plant is to obtain plant safety. And in this respect, the necessity was raised to revise limiting condition for operation related to PHWR shutdown system No.1. In current technical specifications, actions are taken in cases only that three or more shutoff rods are inoperable, however in Improved Standard Technical Specifications, actions are suggested to be taken in cases that one or two shutoff rods are inoperable with the allowed outage times(AOT) of 31 days and 48 hours respectively. In the results of evaluation on the newly suggested AOTs using risk-informed regulation approaches, the AOTs show to meet the acceptable criteria in USNRC Regulatory Guide 1.174 & 1.177 and the reliability goals regarding special safety systems in Canadian regulatory document.

1. 서 론

원자력발전소 운영기술지침서의 표준화 방침에 따라 중수로 표준운영기술지침서가 개발되고 있

다. 운영기술지침서의 목적은 안전성 확보에 있으며, 이러한 관점에서 안전운전을 위한 심층방어 전략을 만족하도록 재구성된 운전제한조건이 있다. 현행 중수로 제1정지계통과 관련한 운전제한 조건은 28개의 정지봉 중 3개 이상이 운전불가능할 경우 조치를 취하도록 하고 있다. 그러나 안전 해석시 가정된 값을 운전제한조건으로 적용하는 것은 심층방어전략에 위배되므로, 표준운영기술지침서에서는 1개 또는 2개가 운전불가능할 경우 각각 31일 및 48시간의 허용정지시간을 갖도록 하는 조치가 제안되었다. 허용정지시간은 운전제한조건 불만족시 운전모드 변경 없이 계속 운전을 허용하는 시간으로서 복구를 위해 주어진 시간으로 정의된다. 기술지침서에 사용되는 용어인 제한시간은 허용정지시간과 운전모드 변경을 위해 주어진 시간이 포함된 개념이다.

본 연구에서는 위험도 정보를 이용하여 새로 설정된 제1정지계통 정지봉의 허용정지시간을 평가하였다. 평가를 위한 위험도 척도로서 USNRC Reg. Guide 1.174 및 1.177에서 제시한 노심손상빈도(CDF), 노심손상빈도증가(Δ CDF), 조건부노심손상확률증가(ICCDP), 대량조기방사능방출빈도증가(Δ LERF), 조건부대량조기방사능방출확률증가(ICLERP), 그리고 캐나다 규제기관에서 제시한 특수안전계통에 대한 이용불능도 목표치를 적용하였다. 분석방법은 WCAP-15622와 참고문헌 [4]에서 제시된 방법을 따랐다.

본 연구는 중수로 표준운영기술지침서에서 새롭게 설정된 제1정지계통 허용정지시간에 대한 평가 방법론을 제시하고, 최적화된 허용정지시간을 설정하여 중수로의 안전성 향상에 기여하는데 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 제1정지계통 허용정지시간에 대한 기술지침서 요건

제1정지계통은 일반 공중으로의 방사성물질 방출을 제한하기 위해 설치된 중수로형 원전의 4개 특수안전계통 중 하나이다. 제1정지계통은 냉각재상실사고(LOCA), 원자로제어상실사고(LOR) 등의 조건 하에서 발전소의 운전변수가 정해진 한계치를 초과했을 때 정지봉을 원자로의 수직방향으로 낙하시켜 다량의 부반응도를 노심에 가함으로써 원자로를 긴급 정지시키는 기능을 가지고 있다.

제1정지계통 관련 현행 운전제한조건은 그림 1에 나타난 바와 같이 28개의 정지봉 중 26개 이상이 운전가능하여야 하고, 3개 이상이 운전불가능할 경우 조치를 취하도록 하고 있다. 그러나 표준 운전제한조건은 그림 2에 나타난 바와 같이 28개의 정지봉이 모두 운전가능하여 하며, 1개 운전불가능시 31일의 허용정지시간이 주어졌고, 2개 운전불가능시 1개 복구를 위해 48시간의 허용정지시간이 주어졌다. 정지봉 1개 운전불가능시 허용정지시간을 31일로 설정한 것은 정지봉의 점검주기와 일치시킨 결과이며, 2개 운전불가능시 1개 복구를 위해 주어진 48시간의 허용정지시간은 정지봉의 평균수리시간을 고려하여 설정되었다.

2.2 발전소 안전성에 대한 영향 평가

상기한 제1정지계통 관련 허용정지시간이 발전소 안전성에 미치는 영향을 다음의 4가지 관점에서 평가하였다.

(가) 해당 계통/기기가 어떤 초기사건의 완화에 이용되는가?

제1정지계통은 전출력 운전 중 발생하는 모든 초기사건에 대해 원자로를 신속히 미임계 상태로 정지시키는 기능을 담당하는 계통으로서, 가압경수로 원전의 원자로보호계통(Reactor Protection System; RPS)과 같은 기능을 수행한다.

(나) 해당 계통/기기의 이용불능이 어떤 초기사건을 유발하는가?

제1정지계통의 이용불능으로 인해 특별히 유발되는 초기사건은 없다.

(다) 해당 계통/기기의 오작동이 어떤 초기사건을 유발하는가?

제1정지계통의 오작동은 원자로를 불시 정지시키는 결과를 초래하며, 이로 인해 특별히 유발되는 초기사건은 없다.

(라) 해당 계통/기기와 관련하여 어떤 backup 계통이 가용한가?

정지계통으로서 그룹 1 계통에 속하는 제1정지계통은 backup 정지계통으로서 그룹 2 계통에 속하는 제2정지계통을 가지고 있다.

2.3 확률론적안전성평가(PSA) 모델과 허용정지시간 관련 인자 수정

위험도 정보를 이용한 허용정지시간 평가를 위해 월성 2,3,4호기 PSA 모델을 사용하였으며, 본 허용정지시간 표준안과 관련하여 영향을 받는 고장수목은 다음과 같다.

- SDS1.KFT : 제1정지계통 고장수목
- SDS12.KFT : 운전원의 수동트립 논리가 포함되어 있는 정지계통 고장수목

제1정지계통 정지봉의 기계적 또는 전기적 고장원인에 의한 실패는 상기 고장수목의 정점사건 “TOP-SDS1”에 모델링되어 있으며, 28개의 정지봉 중 3개 이상이 요구 시 낙하하지 않으면 제1정지계통의 기능은 실패하는 것으로 되어 있다.

본 허용정지시간 표준안에 대한 위험도 평가를 위해 제1정지계통 정지봉은 기계적 고장, 시험, 정비 등의 3가지 원인에 의해 이용불가능한 것으로 가정하였다. 그리고 1개의 정지봉이 정비에 의해 이용불가능한 조건에서 추가 운전불가능한 정지봉이 최대 48시간 동안 존재하는 것으로 가정하였다. 다음과 같은 6가지 항목을 고려하여 PSA 모델과 허용정지시간 관련 인자를 수정하였다.

2.3.1 초기사건 빈도

제1정지계통 자체의 이용불능이나 오작동으로 인해 유발되는 초기사건은 없으므로 초기사건 빈도는 변경할 필요가 없다.

2.3.2 사건수목 모델

제1정지계통은 초기사건 발생 시 사고 완화를 위한 계통들 중 정지계통의 하나로서 사건수목에 모델링되어 있다. 본 허용정지시간 표준안으로 인해 성공기준이 변경되는 것이 아니므로 사건수목 모델을 수정할 필요는 없다.

2.3.3 계통 고장수목 모델

월성 2,3,4호기 PSA 모델에서 제1정지계통 정지봉은 “accessible failure”와 “inaccessible failure”가 구분되어 모델링되어 있다. “accessible failure”는 운전 중 복구가 가능한 고장이고, “inaccessible failure”는 정지 중 복구가 가능한 고장에 해당된다. 그러나 중수로 표준운영기술지침서에서는 이를 구분하지 않으므로 계통 고장수목 모델을 수정하였다.

운영기술지침서에서 시험 및 정비(PM)의 경우 2개 이상의 정지봉에 대하여 동시에 수행하지 않도록 되어 있으나, 고장정비(CM)의 경우에는 48시간 동안 동시 정비를 허용하고 있다. 따라서

그림 3과 같은 모델링에서 가능한 cutset은 다음과 같다.

- $a1*b1*a4$: 3개/28개 이상 Random Failure(RF)
- $a1*b3*a4 + b1*a3*a4$: (1개/28개 CM) * (2개/27개 이상 RF)
- $a2*b1*a4$: (1개/28개 PM) * (2개/27개 이상 RF)
- $a2*b3*a4$: (1개/28개 CM) * (1개/27개 PM) * (1개/26개 이상 RF)
- $a3*b3*a4$: (2개 CM) * (1개/26개 이상 RF)

2개가 동시에 고장정비인 경우는 1개가 31일의 허용정지시간으로 이용불가능한 기간에 48시간 동안 발생할 수 있으므로, 나머지 27개중 1개가 48시간 동안 고장정비인 이용불능도를 사용하였다.

정지봉 1개가 운전불가능할 때 조건부노심손상확률증가(ICCDP) 계산을 위한 고장수목은 그림 3에서 B의 이용불능도에 '1'을 할당한 경우에 해당되므로 가능한 cutset은 다음과 같게 된다.

- $a1*a4$: 2개/27개 이상 Random Failure
- $a2*a4$: (1개/27개 PM) * (1개/26개 이상 RF)
- $a3*a4$: (1개/27개 48시간 동안 CM) * (1/26 이상 RF)

정지봉 2개가 운전불가능할 때는 그림 3에서 A, B의 이용불능도에 '1'을 할당한 경우에 해당되므로 가능한 cutset은 다음과 같게 된다.

- $a4$: 1개/26개 이상 Random Failure

계통 고장수목 모델에서 수정된 기본사건의 의미와 계산된 이용불능도는 다음 '기기 신뢰도 데이터' 및 '시험 및 정비로 인한 이용불능도' 항목에 서술되어 있다.

2.3.4 기기 신뢰도 데이터

월성 2,3,4호기 PSA 모델에서 제1정지계통 개별 정지봉의 “accessible failure rate”는 $2.47E-2/yr$, “inaccessible failure rate”는 $1.26E-2/yr$ 가 사용되었다. 그러나 중수로 표준운영기술지침서에서는 이를 구분하지 않으므로 개별 정지봉의 고장률로서 다음과 같이 두 가지 고장률의 합을 사용하였다.

$$\text{accessible failure rate} + \text{inaccessible failure rate} = 3.73E-2/yr$$

이를 반영하여 수정된 기본사건의 이름과 설명을 표 1에 정리하였다.

표 1. 중수로 ISTS에 따라 수정된 기본사건

기본사건 명	설 명
8200SF->3_28---F	3 OR MORE SOR'S (28 SOR'S) FAILURE
8200SF->2_27---F	2 OR MORE SOR'S (27 SOR'S) FAILURE
8200SF->1_26---F	1 OR MORE SOR'S (26 SOR'S) FAILURE

표 1에 명시된 기본사건의 이용불능도 값을 표 2에 정리하였다. 표 2의 변경 후 이용불능도 값은 아래 식에 의하여 계산되었다.

- 개별 정지봉의 이용불능도 :

$$Q = \frac{1}{2} \lambda T = \frac{1}{2} (3.73E-2/yr)(1yr/365day)(28day) = 1.43E-3 \quad (1)$$

여기에서 T = 28일 (정지봉의 시험주기 28일을 적용함.)

- 28개의 정지봉 중 3개 이상이 운전불가능할 확률 :

$$1 - \{(1 - Q)^{28} + 28Q(1 - Q)^{27} + 378Q^2(1 - Q)^{26}\} = 9.34E-6 \quad (2)$$

- 27개의 정지봉 중 2개 이상이 운전불가능할 확률 :

$$1 - \{(1 - Q)^{27} + 27Q(1 - Q)^{26}\} = 7.02E-4 \quad (3)$$

- 26개의 정지봉 중 1개 이상이 운전불가능할 확률 :

$$1 - (1 - Q)^{26} = 3.65E-2 \quad (4)$$

표 2. 중수로 ISTS에 따라 수정된 기본사건 이용불능도

기본사건 명	변경 전 이용불능도 (accessible failure)	변경 후 이용불능도 (accessible + inaccessible failure)
8200SF->3_28---F	2.76E-06	9.34E-06
8200SF->2_27---F	3.12E-04	7.02E-04
8200SF->1_26---F	2.44E-02	3.65E-02

2.3.5 시험 및 정비로 인한 이용불능도

본 허용정지시간 표준안이 반영된 $\Delta CDF/\Delta LERF$ 계산을 위해, 계통 고장수목 모델 중 시험 및 정비 이용불능도 값에 대한 수정이 필요한 부분의 이름과 설명을 표 3에 정리하였다.

표 3. $\Delta CDF/\Delta LERF$ 계산을 위한 계통 고장수목 수정 필요 항목

기본사건 명	설 명
8200-SF-1_28---M	1/28 SOR UNAVAILABLE DUE TO MAINTENANCE
8200-SF-1_27---M	1/27 SOR UNAVAILABLE DUE TO MAINTENANCE (48 HRS)
8200SF2>1_26---F	1 OR MORE SOR'S (26 SOR'S) FAIL WITHIN 48 HRS

표 3에서 2개의 정지봉이 운전불가능한 경우는, 1개의 정지봉이 운전불가능으로 선언되고 주어 진 31일의 허용정지시간에 추가 운전불가능한 정지봉이 최대 48시간 동안 존재하는 것으로 모델 링하였다. 그리고 해당 48시간 이내에 나머지 26개의 정지봉 중 1개 이상이 "Random Failure"로 운전불가능한 것으로 모델링하였다. 각 기본사건의 이용불능도 값은 표 4에 정리되어 있으며, 아 래 식에 의하여 계산되었다.

- 개별 정지봉의 정비에 의한 이용불능도 :

$$Q = \lambda T = (3.73E-2/yr)(1yr/365day)(31day) = 3.17E-3 \quad (5)$$

여기에서 T = 31일 (정지봉의 허용정지시간 31일을 적용함.)

- 28개의 정지봉 중 1개가 정비에 의해 운전불가능할 확률 :

$$28Q(1-Q)^{27} = 8.14E-2 \quad (6)$$

- 개별 정지봉이 48시간 이내에 운전불가능할 확률 :

$$Q_c = \lambda T = (3.73E-2/yr)(1yr/365day)(2day) = 2.04E-4 \quad (7)$$

- 27개의 정지봉 중 1개가 48시간 동안 정비로 인해 운전불가능할 확률 :

$$27Q_c(1-Q_c)^{26} = 5.49E-3 \quad (8)$$

- 26개의 정지봉 중 1개 이상이 48시간 이내에 운전불가능할 확률 :

$$1 - (1 - Q_c)^{26} = 5.30E-3 \quad (9)$$

표 4. ΔCDF/ΔLERF 계산을 위한 계통 고장수목 수정 사항

기본사건 명	수정 사항
8200-SF-1_28---M	이용불능도 값으로 "8.14E-02"을 할당
8200-SF-1_27---M	이용불능도 값으로 "5.49E-03"을 할당
8200SF2>1_26---F	이용불능도 값으로 "5.30E-03"을 할당

또한, ICCDP/ICLERP 계산을 위해 계통 고장수목 모델에 대한 수정이 필요한 부분을 표 5 및 표 7에 정리하였다.

- 허용정지시간 31일 평가시

표 5. ICCDP/ICLERP 계산을 위한 계통 고장수목 수정 필요 항목

게이트 명/기본사건 명	설명
8200SF->3_28---F	3 OR MORE SOR'S (28 SOR'S) FAILURE
8200SF->2_27---F	2 OR MORE SOR'S (27 SOR'S) FAILURE
8200SF--1_28UDTST	1/28 SOR UNAVAILABLE DUE TO PARTIAL DROP TEST
8200SF-1_28DTTST	1/28 SOR FAILS TO WITHDRAW AFTER TEST
8200-SORF->2---F	>=2 SOR'S UNAVAILABLE / 1 UD TEST AND >=1 SOR'S UNAVAILABLE
8200-SF-1_28---M	1/28 SOR UNAVAILABLE DUE TO MAINTENANCE

표 5에서 ICCDP/ICLERP 계산은 1개의 정지봉이 운전불가능한 경우이므로, 나머지 27개의 정지봉 중 2개 이상이 운전불가능할 확률은 표 6에 정리된 바와 같이 상기 게이트/기본사건을 변경하여 정량화해야 한다.

표 6. ICCDP/ICLERP 계산을 위한 계통 고장수목 수정 사항

게이트 명/기본사건 명		수 정 사 항
변경 전	변경 후	
8200SF->3_28---F	8200SF->2_27---F	2/27개 이상 운전불가능할 확률로 변경
8200SF->2_27---F	8200SF->1_26---F	1/26개 이상 운전불가능할 확률로 변경
8200SF--1_28UDTST	8200SF--1_27UDTST	1/27개가 시험에 의해 운전불가능할 확률로 변경
8200SF-1_28DTTST	8200SF-1_27DTTST	1/27개가 시험 후 인출실패에 의해 운전불가능할 확률로 변경
8200-SORF->2---F	8200SF2>1_26---F	1/26개 이상이 48시간 동안 운전불가능할 확률로 변경
8200-SF-1_28---M	8200-SF-1_27---M	1/27개의 정지봉이 48시간 동안 운전불가능할 확률로 변경

- 허용정지시간 48시간 평가시

표 7. ICCDP/ICLERP 계산을 위한 계통 고장수목 수정 필요 항목

게이트 명	설 명
8200-SORF-M&E	3 OR MORE SOR'S (>2/28) FAIL TO DROP (MECHANIC. & ELECTRIC.)

표 7에서 ICCDP/ICLERP 계산은 2개의 정지봉이 운전불가능한 경우이므로, 나머지 26개의 정지봉 중 1개 이상이 48시간 동안 운전불가능할 확률은 위에서 구한 값과 같다. 표 7의 게이트에서 수정한 구체적 내용을 표 8에 정리하였다.

표 8. ICCDP/ICLERP 계산을 위한 계통 고장수목 수정 사항

게이트 명	수 정 사 항
8200-SORF-M&E	본 게이트의 하부 논리를 삭제하고 기본사건으로 변경한 후, 이용불능도 값으로 "5.30E-03"을 할당

그리고, 제1정지계통은 특수안전계통 중 하나이므로, 표준 허용정지시간이 반영된 제1정지계통의 이용불능도를 캐나다의 신뢰도 분석 방법론에 따라 계산해야 한다. 이를 수행하기 위해, 표 2 및 표 4의 변경된 이용불능도 값과 모든 공통원인고장 확률을 '0'으로 변경한 값이 필요하다.

2.4 PSA 모델을 이용한 위험도 평가

본 단계에서는, 다음과 같은 절차로 위험도 척도들에 대한 평가를 수행하여 본 허용정지시간 표준안에 대한 위험도 평가 결과가 허용기준을 충족시키는지 판단하는 업무를 수행하였다.

2.4.1 Baseline CDF

월성 2,3,4호기 PSA 모델을 이용하여 Baseline CDF를 정량화하면 2.508E-5/Ry으로서

1.0E-4/Ry 미만으로 분석되었다.

2.4.2 ΔCDF

CDF(허용정지시간 표준안 반영) 계산을 위해 계통 고장수목 모델에서 제1정지계통 정지봉의 기계적 또는 전기적 고장원인에 의한 낙하실패 부분을 수정하고, 표 2 및 표 4에 나와 있는 6개 기본사건의 이용불능도 값을 변경한 후 ΔCDF를 정량화한 결과는 다음과 같다:

$$\begin{aligned}\Delta\text{CDF} &= \text{CDF}(\text{허용정지시간 표준안 반영}) - \text{Baseline CDF} \\ &= 2.516\text{E-}5/\text{Ry} - 2.508\text{E-}5/\text{Ry} = 8.000\text{E-}8/\text{Ry}\end{aligned}\quad (10)$$

분석 결과, 상기와 같이 ΔCDF는 8.000E-8/Ry로 계산되어 1.0E-6/Ry 미만으로 분석되었다.

2.4.3 ΔLERF

LERF(허용정지시간 표준안 반영) 계산을 위해 계통 고장수목 모델에서 제1정지계통 정지봉의 기계적 또는 전기적 고장원인에 의한 낙하실패 부분을 수정하고, 표 2 및 표 4에 나와 있는 6개 기본사건의 이용불능도 값을 변경한 후 ΔLERF를 정량화한 결과는 다음과 같다:

$$\begin{aligned}\Delta\text{LERF} &= \text{LERF}(\text{허용정지시간 표준안 반영}) - \text{Baseline LERF} \\ &= 3.247\text{E-}7/\text{Ry} - 3.246\text{E-}7/\text{Ry} = 1.000\text{E-}10/\text{Ry}\end{aligned}\quad (11)$$

분석 결과, 상기와 같이 ΔLERF는 1.000E-10/Ry로 계산되어 1.0E-7/Ry 미만으로 분석되었다.

2.4.4 ICCDP

조건부 CDF(해당 기기가 이용불능인 상태에서의 조건부 CDF) 계산을 위해 계통 고장수목 모델을 표 6 및 표 8에 나와 있는 바와 같이 수정한 후 ICCDP를 정량화한 결과는 다음과 같다:

$$\begin{aligned}\text{ICCDP} &= (\text{해당 기기가 이용불능인 상태에서의 조건부 CDF} - \text{Nominal} \\ &\quad \text{Baseline CDF}) \times \text{단일 허용정지시간} \\ &= (2.525\text{E-}5/\text{Ry} - 2.516\text{E-}5/\text{Ry}) \times 31\text{day} = 7.643\text{E-}9 \text{ (AOT=31일)} \\ &= (5.275\text{E-}5/\text{Ry} - 2.516\text{E-}5/\text{Ry}) \times 2\text{day} = 1.511\text{E-}7 \text{ (AOT=48시간)}\end{aligned}\quad (12)$$

분석 결과, 상기와 같이 ICCDP는 5.0E-7 미만으로 분석되었다.

2.4.5 ICLERP

조건부 LERF(해당 기기가 이용불능인 상태에서의 조건부 LERF) 계산을 위해 계통 고장수목 모델을 표 6 및 표 8에 나와 있는 바와 같이 수정한 후 ICLERP를 정량화한 결과는 다음과 같다:

$$\begin{aligned}\text{ICLERP} &= (\text{해당 기기가 이용불능인 상태에서의 조건부 LERF} - \text{Nominal} \\ &\quad \text{Baseline LERF}) \times \text{단일 허용정지시간} \\ &= (3.250\text{E-}7/\text{Ry} - 3.247\text{E-}7/\text{Ry}) \times 31\text{day} = 2.547\text{E-}11 \text{ (AOT=31일)} \\ &= (4.397\text{E-}7/\text{Ry} - 3.247\text{E-}7/\text{Ry}) \times 2\text{day} = 6.301\text{E-}10 \text{ (AOT=48시간)}\end{aligned}\quad (13)$$

분석 결과, 상기와 같이 ICLERP는 5.0E-8 미만으로 분석되었다.

2.4.6 제1정지계통 이용불능도

제1정지계통의 고장수목은 편의상 크게 두 부분으로 나누어서 작성되었다. 한 부분은 정지붕 낙하논리 및 정지붕 부계통들과 관련되어 있고, 다른 한 부분은 트립신호 및 채널 논리와 관련되어 있다. 3개의 채널 D, E, F에 대해 고장수목 논리는 동일하다. 각 채널의 고장수목은 표 9에 나와 있는 바와 같이 트립변수의 특성에 따라 절대트립변수와 PDC-1 트립변수 및 PDC-2 트립변수 등 세 범주로 구분되며, 10개의 트립변수 논리는 고장수목에서는 해당 조건 사건과 AND 게이트를 통해 연결되어 있다. 본 분석에서는 각 트립변수 논리가 서로 배타적으로 작용하는 것으로 취급하였다.

(가) 기준(baseline) 이용불능도 분석

제1정지계통의 허용정지시간 표준안이 반영된 이용불능도 분석을 위해, 먼저 기준 이용불능도를 정량화하였다. 기준 이용불능도는 월성 2,3,4호기 PSA 모델에서 모든 공통원인고장 확률을 '0'으로 변경한 후 각 트립변수에 대하여 정량화한 것이다. 제1정지계통의 기준 이용불능도는 표 9에 나타나 있으며, "가압기 저수위 트립"에 대해 최대값을 가지는 것으로 분석되었다. 이때 이용불능도 값은 5.472E-4로서 이용불능도 목표치인 1.0E-3 미만임을 알 수 있다.

(나) 허용정지시간 표준안을 반영한 이용불능도 분석

계통 고장수목 모델에 표 2 및 표 4에 나와 있는 변경된 이용불능도 값을 적용하고, 공통원인고장 확률을 '0'으로 변경하여, 제1정지계통의 이용불능도(허용정지시간 표준안 반영)를 정량화한 결과는 표 9에 나타나 있다. 표 9에서 허용정지시간 표준안을 반영한 이용불능도는 "가압기 저수위 트립"에 대해 최대값을 가지는 것으로 분석되었다. 이때 이용불능도 값은 5.633E-4로서 이용불능도 목표치인 1.0E-3 미만임을 알 수 있다. 이 값은 기준 이용불능도(5.472E-4) 대비 2.9%가 증가된 값이다.

표 9. 제1정지계통의 이용불능도 분석 결과

구 분	트립변수 명	조 건	기준 이용불능도	AOT 표준안이 반영된 이용불능도
절대트립변수	중성자속 과출력 트립	CON1	9.850E-5	1.146E-4
	중성자속 고변화율 트립	CON2	1.394E-4	1.555E-4
	격납건물 고압 트립	CON3	2.597E-4	2.758E-4
PDC-1	가압기 저수위 트립	CON4	5.472E-4	5.633E-4
	증기발생기 저수위 트립	CON5	5.472E-4	5.633E-4
	열전달계통 저유량 트립	CON6	4.690E-4	4.851E-4
	감속재 고온 트립	CON7	9.441E-5	1.105E-4
PDC-2	열전달계통 고압 트립	CON8	7.709E-5	9.320E-5
	열전달계통 저압 트립	CON9	4.970E-4	5.131E-4
	증기발생기 급수관 저압 트립	CON10	1.514E-4	1.675E-4

3. 결 론

중수로 표준운영기술지침서에서는 제1정지계통 정지봉이 1개 또는 2개가 운전불가능할 경우, 각각 31일 및 48시간의 허용정지시간을 갖도록 하는 조치가 제시되었다. 위험도 정보를 이용하여 새로 설정된 허용정지시간을 평가한 결과, 표 10에 나타난 바와 같이 USNRC Reg. Guide 1.174 및 1.177에서 제시한 허용기준, 그리고 특수안전계통에 대한 캐나다 신뢰도 기준치를 만족하였다. 또한 본 허용정지시간 표준안으로 인해 심층방어 및 안전여유도는 향상되는 효과가 있으며, 발전소 배열이 변경되는 사항은 없다. 따라서 표준운영기술지침서에서 새로 설정된 제1정지계통 허용정지시간 표준안은 표준 허용정지시간으로서 채택될 수 있는 것으로 분석되었다.

표 10. 허용정지시간 표준안에 대한 위험도 평가 결과

위험도 척도	허용기준	정량화결과 (AOT=31일)	정량화결과 (AOT=48시간)
Baseline CDF	$< 1.0E-4/Ry$	$2.508E-5/Ry$	$2.508E-5/Ry$
ΔCDF	$< 1.0E-6/Ry$	$8.000E-8/Ry$	$8.000E-8/Ry$
$\Delta LERF$	$< 1.0E-7/Ry$	$1.000E-10/Ry$	$1.000E-10/Ry$
ICCDP	$< 5.0E-7$	$7.643E-9$	$1.511E-7$
ICLERP	$< 5.0E-8$	$2.547E-11$	$6.301E-10$
표준 AOT가 반영된 제1정지계통 이용불능도	$< 1.0E-3$	최대값 $5.633E-4$	최대값 $5.633E-4$

참고문헌

1. “월성 2호기 운영기술지침서”, 한국수력원자력주식회사, 2001.
2. 성장경 외, “중수로 운전제한조건 및 운전모드 설정”, TR.00NE21.C2002.168, 전력연구원, 2002.
3. “가압 중수로 원전 2단계 확률론적 안전성 평가”, TR.93NJ10.97.67-2, 전력연구원, 1997.
4. 임재원, 최성수, 김태운, 서정관, 성장경, “중수로 전출력 운전 시 운전제한조건 관련 계통의 STI/AOT에 대한 위험도 평가”, 한국원자력학회 2003 춘계학술발표회 논문집, 경주, 2003.
5. WCAP-15622, “Risk-Informed Evaluation of Extensions to AC Electrical Power System Completion Times”, Westinghouse Electric Co., 2001.
6. Regulatory Guide 1.174, “An Approach for Using PRA in Risk-Informed Decision on Plant Specific Changes to the Licensing Basis”, USNRC, 1998.
7. Regulatory Guide 1.177, “An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking Technical Specifications”, USNRC, 1998.
8. Proposed Regulatory Guide, “Reliability of Systems Important to Safety for Nuclear Reactor Facilities”, C-98, Rev. 1(E), AECB, 1998.

3/4.1.2 제 1 정지계통 (SDS 1) 정지봉

정지봉 위치

운전 제한 조건

3.1.2.1 28개의 제 1 정지계통 (SDS 1) 정지봉 중에서 최소한 26 개가 운전 가능 하여야 한다.

적 용 : 운전모드 1, 2, 3, 4

조 치 : 가. 3개의 정지봉이 운전불능인 경우에는, 원자로를 30분 이내에 정상적인 방법으로 정지시켜 고온정지 상태로 하고, 다음 6시간 이내에 상온정지 상태로 한다. 그 후 30시간 이내에 보증정지 상태로 한다.

나. 4개 이상의 정지봉이 운전불능인 경우에는, 원자로를 발견 즉시 정지시켜 고온정지 상태로 하고, 다음 6시간 이내에 보증정지 상태로 한다.

그림 1. 제1정지계통 관련 현행 운전제한조건

3.1 반응도 제어계통

3.1.1 제 1 정지계통 정지봉

운전제한조건 3.1.1 28개의 제 1 정지계통 (SDS 1) 정지봉은 모두 **운전가능** 하여야 한다.

적용 **운전모드 1, 2, 3, 4**
운전모드 5 - 제 2 정지계통 운전불가능 시

불만족시 조치

불만족상태	조치요구사항	제한시간
1. 1개의 정지봉이 운전불 가능할 때	1.1 정지봉을 운전가능 한 상태로 복구한다.	31일
2. 2개의 정지봉이 운전불 가능할 때	2.1 27개 이상의 정지봉을 운전가능 한 상태로 복구한다.	48시간
	그리고 2.2 모든 정지봉을 운전가능 한 상태로 복구한다.	31일

그림 2. 제1정지계통 관련 표준 운전제한조건

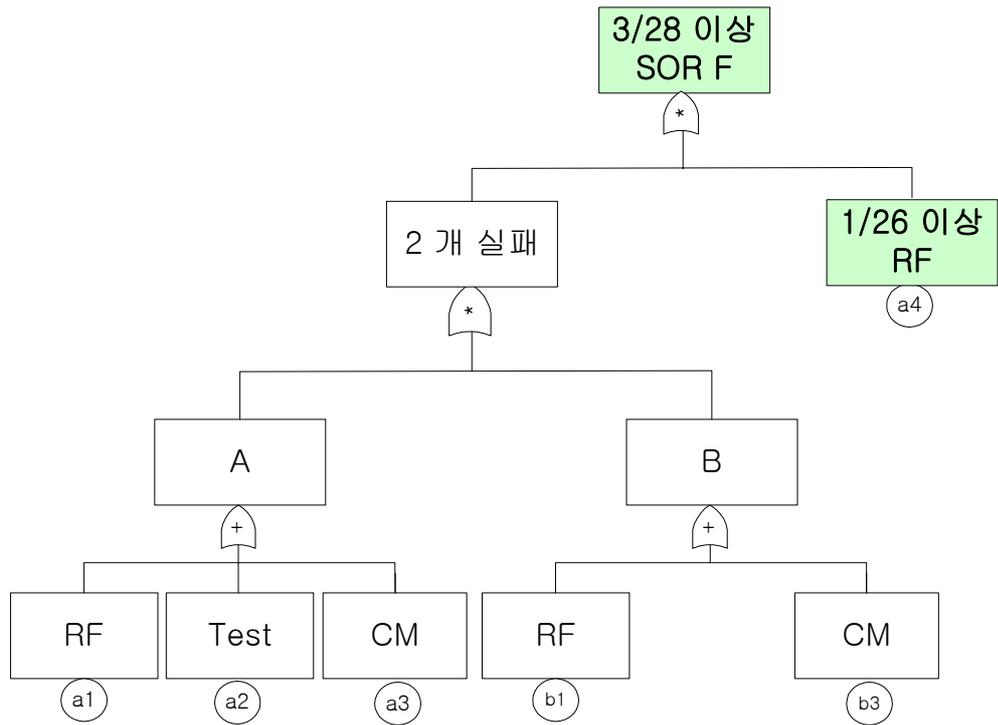


그림 3. 제1정지계통 정지봉 기능 실패 개념도