

## 중수로 표준 운전제한조건에 대한 최종점 연구

### A Study on the End States of the Standard LCO for CANDU

김기용, 성명숙, 성장경

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

본 연구에서는 중수로 표준 운전제한조건에 대한 불만족시 조치요구사항의 최종점을 평가하였다. 최종점 평가를 수행하기 위해, 중수로 원전에 적용되는 운전모드의 기술적 근거와 배경을 조사/분석하였다. 또한, 정지시 노심 붕괴열 제거 및 냉각재 계통의 잔열 제거 방안을 운전모드와 연계하여 분석하였다. 그리고 특정 운전제한조건을 선정하여 최종점 평가를 수행하였으며, 운전모드 4로 설정되어진 최종점을 운전모드 3으로 변경 가능함을 기술하였다.

#### Abstract

In this paper, end states of the standard LCO for CANDU were studied. Technical bases and backgrounds of standard operational mode for CANDU were surveyed to evaluate end states. Also, the relationship between heat (decay heat and stored energy in the HTS) removal paths and operational mode during plant shutdown was analyzed. Several LCO's were selected, and assessment was performed to the possibility of acceptable modification that can change Technical Specifications End States from Mode 4 to Mode 3.

#### I. 서 론

기술지침서(Technical Specifications)는 원자력발전소 운전시 안전성 확보를 위해 사업자가 지켜야할 안전제한치, 운전제한조건, 점검요구사항, 설계특성 등이 기술되어 있는 문서이다. 국내에서는 기술지침서 내에 원전의 운영에 필요한 사항을 추가로 기술한 운영기술지침서를 적용하고 있다. 운영기술지침서에는 안전해석을 기초로 한 가동중 원전의 안전제한치, 운전제한조건, 조치요구사항 및 점검요구사항 등이 규정되어 있으며, 원전 사업자는 이를 준수함으로써 안전성을 확

보할 수 있다. 운영기술지침서의 운전제한조건(Limiting Condition for Operation)은 적절한 운전 모드에서 해당 기기 및 계통들을 이용가능 하도록 설정되어 있다. 따라서 운전제한조건을 만족하고 있다는 것은 발전소가 설계기준에 맞게 운전되고 있음을 보증해 준다. 그러나 운전제한조건을 만족하지 못할 경우에는 운전제한조건이 만족될 때까지 운영기술지침서에서 허용하는 조치요구사항을 수행해야만 한다. 또한, 발전소가 제한시간 내에 원하는 상태로 복구될 수 없을 경우에는 조치요구사항에 기술된 더 낮은 운전모드로 변경하여야 한다. 현행 운영기술지침서는 결정론적 분석에 의존하여 발전되어 왔기 때문에 안전성에 대한 종합적인 영향 평가가 이루어지지 않았으며, 기술적 기반도 취약한 상황이다. 더욱이 최종적으로 진입해야하는 운전모드가 운전모드 4로 대부분 고정되어 있으며, 매우 보수적으로 설정되어 있다. 이로 인하여 불필요한 발전소 정지에 진입하는 경우도 생길 수 있다.

가압경수로 원전 보유국에서는 위험도 기반으로 기술지침서를 개선함에 있어 그 범위를 허용정지시간 뿐만 아니라 조치사항에서 매우 중요한 부분을 차지하는 안전정지 최종점까지 확장하고 있다. 이는 운전불가능한 설비에 의한 안전성 영향을 종합적으로 구체화하기 위한 것으로, 이미 CEOG에서는 기존 기술지침서의 최종점 평가를 통하여 일부 운전제한조건들의 최종점을 변경한 상태이다. 또한, 이를 통해 보수공정계획에서의 유연성과 자원 소비의 효율성을 확보할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그러나 가압중수로 원전 보유국 및 국내에서는 아직 최종점에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 현재 개발 중에 있는 가압중수로의 운영기술지침서에 제시되어져 있는 최종점이 적절하게 설정되어져 있는지를 평가하여 운전불가능한 계통에 의한 안전성 영향을 평가하고자 한다.

## II. 본론

### 1. 최종점 정의

기술지침서의 운전제한조건은 적절한 운전모드에서 해당 기기 및 계통들을 이용가능 하도록 설정되어 있으며, 발전소가 설계기준에 맞게 운전되고 있음을 보증해 준다. 기술지침서의 기본사항으로는 설계기준으로 다중성이 되어 있을 때, 기술지침서 상의 한 계열에 대한 기기가 제한시간 동안 운전불가능을 허용하도록 운전제한조건을 정의하고 있다. 이 제한시간 동안에는 그 계통의 다중 계열의 이용도를 발전소 설계기준에 맞는 것으로 본다. 만약, 발전소가 제한시간 이내에 원하는 상태로 복구될 수 없을 경우에는 운전불가능한 계통이 설계기준의 일부로 더 이상 필요하지 않는 운전모드로 변경하여 안전운전을 유지해야 하며, 이를 최종점이라고 한다. 또한, 최종점은 운전모드로 적용된다.

### 2. 중수로 운영기술지침서의 운전모드

#### 2.1 운영기술지침서의 심층방어전략

원전의 안전성 확보를 위한 원전 설계 기본원칙 중에서 가장 중요하게 다루는 것이 심층방

어전략이다. 이 전략은 원전 설계뿐만이 아니라, 원전의 운전 부분에서도 기본 배경이 되는 사항이다. 아래의 그림 1은 원전 운전의 핵심이 되는 문서인 운영기술지침서에서 사용되는 심층방어 전략을 나타낸 것으로 안전운전 체계를 나타낸 것이다. 이 체계도는 기기의 고장이나 운전원 실수가 발생하더라도 개인이나 공중에 큰 피해를 주지 않음은 물론, 안전한 운전을 하기 위해 적절한 조치가 중첩되어 수행되는 다단계 방호의 개념을 갖고 있다. 원전의 안전운전을 보수적으로 확보하기 위해 운전허용영역이 가장 작으며, 이 운전허용영역은 운전제한조건을 규정함으로써 설정된다. 운전제한조건 외에 안전계통제한설정치와 안전제한치가 있어 심층방어라는 안전 기본 원칙을 준수하고 있다. 그림 1에 표시된 안전제한치, 안전계통제한설정치 및 운전제한조건을 설명하면 다음과 같다.

- 안전제한치는 중요공정변수에 관한 제한치이다. 이 중요공정변수는 방사능 비제어 누출을 막기 위한 물리적 방벽의 건전성을 이상적으로 보호하는데 필요한 것이다. 만일 안전제한치를 위반한다면, 원자로를 정지시키고 규제기관에 통고해야한다. 그리고 규제기관의 운전재개 승인이 있을 후에 운전을 할 수 있다.
- 안전계통제한설정치는 중요 안전기능이 있는 공정 변수와 관련된 자동보호기기의 작동에 필요한 설정치 이다. 안전계통제한설정치가 설정되어 있기 때문에 안전제한치를 위반하기 전에 자동보호조치로 인해 비정상적 상황을 수정할 수 있다. 만일, 발전소 운전 중 요구시 필요한 자동 안전계통이 기능을 수행하지 못 하였다면, 원전사업자는 적절한 조치를 취한 후 규제기관에 통고하여야 한다.
- 운전제한조건은 발전소 안전 운전 필요 설비의 가장 낮은 수준의 기능적 성능 또는 가장 낮은 행위 수준에 해당하는 것이다. 운전제한조건을 만족하지 못했을 때, 원전 사업자는 기술지침서에 허용된 교정적인 조치(불만족시 조치)를 수행하고 규제기관에 통고하여야 한다.

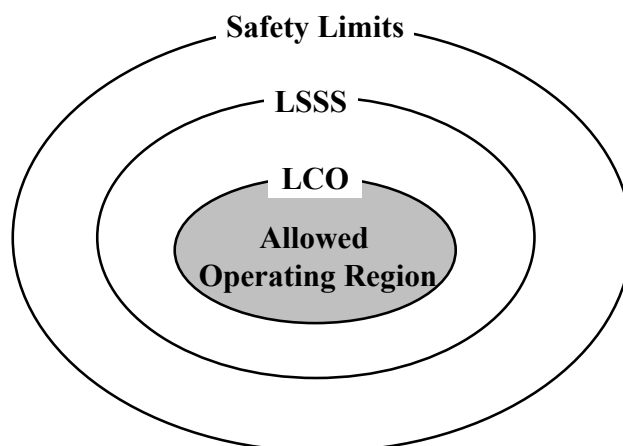


그림 1. 원자력 발전소 안전운전 체계 개념도

앞에서 설명한 바와 같이 운전제한조건은 운전측면에서 가장 낮은 수준의 안전 방벽이며, 동시에 원전의 이상 징후 발생을 처음 감지할 수 있는 도구이다. 따라서 이 운전제한조건이 잘 유지되고 준수되어야만 원전의 안전과 원활한 운전을 보장할 수 있다. 운전제한조건을 위반했을 경우, 아무런 조치를 취하지 않더라도 안전계통제한설정치와 안전제한치에 의해서 자동적으로 발전소가 정지하여 위험한 상태에 도달하는 것을 허용하지는 않는다. 그러나 안전계통제한설정치와 안전제한치에 도달하기 전에 적절한 조치를 취하여 다시 운전제한조건을 만족하도록 하는 것이 경제적 측면이나 안전성 측면에서 가장 바람직하다. 현재, 대부분의 발전소 운영기술지침서에서는 이러한 적절한 조치가 서술되어 시행되고 있다.

만일, 이 적절한 조치를 시행하더라도 재차 운전제한조건을 만족하지 못할 때는, 안전계통제한설정치에 도달하도록 기다리는 것이 아니라, 해당 운전제한조건이 적용되지 않는 상태, 즉 최종점에 진입한다. 이와 같은 행위는 해당 운전제한조건이 적용되어야 하는 상태를 벗어나기 위한 조치인데, 해당 운전제한조건의 준수 의무를 면함으로써 발전소 안전을 효과적으로 도모하고자 하는 의도이다. 이때 필요한 것으로, 해당 운전제한조건에 적용되는 발전소 운전상태를 설정하는 기본 배경이 되는 것이 바로 ‘운전모드’이다.

## 2.2 운전모드의 정의

운전모드란 발전소의 운전상태를 말하는 것으로, 발전소 상태를 표시할 수 있는 여러 인자들(열출력, 증배계수, 원자로냉각재 압력, 원자로냉각재온도 등등)을 타당하게 조합하여 정지에서 출력운전까지의 발전소 상태를 몇 단계로 나눈 것이다.

중수로 표준 운영기술지침서는 2개의 출력 모드와 3개의 정지모드로 모두 5개의 운전모드가 있다. 출력모드는 출력운전(운전모드1)과 저출력 대기(운전모드2)가 있으며, 정지모드는 원자로냉각재출구모관온도로 구분되어 고온정지(운전모드3), 상온정지(운전모드4), 그리고 보증정지(운전모드5)로 구성된다. 중수로형 표준 운전모드는 표 1과 같으며, 운전모드 설정의 기술적 근거 및 배경은 다음과 같다.

표 1. 중수로형 표준 운전모드

운전모드	반응도 조건 (Keff)	정격열출력 (%FP) <sup>(1)</sup>	원자로냉각재 출구모관온도(°C)
1. 출력운전	≥0.99	> 2	> 260
2. 저출력 대기	≥0.99	≤ 2	> 100
3. 고온정지	< 0.99	해당 없음	> 100
4. 상온정지	< 0.99	해당 없음	≤100
5. 보증정지 <sup>(2)</sup>	해당 없음	해당 없음	≤90

(1) 붕괴열은 제외한다.

(2) 어떠한 사고에서도 임계에 도달할 수 없음을 보장하는 원자로 미임계 상태를 말하는 것으로 감속재 정화 격리밸브를 격리하고 자물쇠로 잠근다.

### 2.2.1 운전모드 1

운전모드 1은 출력운전 상태로 원자력 발전소의 궁극적인 목적인 전력 생산을 위한 발전소 상태를 나타낸다.

노심반응도를 기준으로 볼 때, 임계 상태이면 핵분열에 의해 노심에서 지속적으로 에너지가 생성된다. 따라서, 1차 계통에서 발생하는 열을 2차 계통을 통해 계속적으로 제거해야만 노심 건전성을 유지할 수 있다. 반면에, 노심이 미임계로 유지될 경우에는 붕괴열이 발생되기는 하지만 지속적인 에너지 생성은 일어나지 않으며, 1차계통의 노심 및 냉각재에 저장된 열에너지만 제거하면 노심 건전성이 보장된다. 따라서, 노심반응도 0.99를 기준으로 운전모드 1, 2(Keff 0.99 이상)와 운전모드 3, 4(Keff 0.99 미만)를 구분하였다.

정격열출력 2%를 기준으로 하여 운전모드 1과 2를 구분한다. 2%라는 구체적 수치는 1개 이상의 공정변수가 비정상 상태로 확인될 때, 열출력을 자동제어 방식에 따라 출력을 감소하는 연속 출력감발(Set back)의 최종 목표값이며, 원자로 임계후 본격적으로 출력 운전에 돌입하기 위한 시작 시점이다. 운전모드 1(정격열출력의 2%초과)의 상태에서는 핵연료 다발이 가지고 있는 에너지의 양이 다른 운전모드에 비해 상대적으로 크므로 노심의 출력분포 제한치를 적용해야 한다. 따라서, 노심출력분포에 관한 운전제한조건들(핵연료 채널 출력, 핵연료 다발 출력 등)은 운전모드 1에서만 적용된다.

운전모드 1과 2를 구분하는 또 하나의 설정값으로 원자로냉각재출구모관(Reactor Outlet Header ; ROH) 온도가 있다. ROH 온도 260℃는 원자로 정지 후 냉각재 계통의 온도이며, 정상적인 방식으로 원자로를 냉각할 경우, 냉각재 온도 260℃에서부터 터빈 우회 밸브, 즉, 복수기 증기 방출 밸브를 통해 증기를 방출함으로써 원자로를 냉각할 수 있다. 이 방법을 사용하여 냉각함으로써 압력관 파단의 가능성을 제한할 뿐만이 아니라 수소 취화 균열의 위험을 조절할 수 있다.

### 2.2.2 운전모드 2

운전모드 2는 냉각재 계통이 고온 및 고압 상태이지만 출력이 2% 미만으로 저출력 대기 상태이며, 운전모드 1에서 준수해야할 운전제한조건을 위반했을 때 취해지는 발전소 보호조치로서 최종적으로 진입해야할 상태이다.

반응도 조건을 기준으로 볼 때, 운전모드 2는 운전모드 1과 동일하다. 연속출력감발(Set back)의 최종 목표값인 정격열출력 2%를 기준으로 운전모드 1과 운전모드 2를 구분하며, 열출력이 2% 이하 일 때 운전모드 2에 해당한다.

운전모드 2를 구분하는 또 하나의 인자로서 냉각재 출구모관 온도 100℃가 있다. 100℃는 상온과 고온을 구분하는 기준 온도이며, 발전소 냉각시 3차 감압 시점이다. 따라서 이 온도에서 비상노심냉각계통의 자동 작동 기능을 차단하지 않으면 자동 작동된다. 즉, 100℃이상에서는 비상노심냉각계통이 항상 운전가능한 상태를 유지해야하며, 100℃ 미만에서는 비상노심냉각계통이 차단되는 것을 허용한다.

운전모드 1과 2에서는 원자로 출구모관 온도가 100℃이상이면 원자로 임계를 허용한 상태로 운전모드 3에 비해 상당히 고압이다. 고압 상태에서 냉각재 상실사고가 발생하여 원자로냉각재계통의 압력이 저하되면, 건전한 회로의 원자로 냉각재가 파손된 회로로 이동하여 사고를 확대시킬 수 있다. 이를 방지하기 위하여 원자로냉각재 회로를 차단하는 가압기 격리 밸브, 압력 및 수위 제어계통의 중수 충수 밸브 등의 유로격리밸브에 관한 운전가능성 확보는 운전모드 1과 운전모드

2에서 요구된다.

### 2.2.3 운전모드 3

운전모드 3은 고온정지 상태로서 출구모관 온도가 100℃를 초과한 고온이며, Keff는 0.99미만으로 원자로 정지상태이다. 또한, 열출력이 발생하는 운전모드 1, 2에서 준수해야할 운전 제한조건을 위반했을 때 취해지는 발전소 보호조치로서 진입해야하는 발전소 상태가 운전모드 3에 해당된다.

운전모드 3과 4는 반응도 조건이 0.99 미만으로 명확한 미임계 상태로써, 원자로가 정지된 상태이다. Keff가 0.99 미만(원자로 정지)이므로, 붕괴열이 있을 수는 있어도, 원자로가 임계에 도달하여 발생하는 열은 존재하지 않는다. 그리고 운전모드 3, 4, 5에서는 원자로 정지 후 발생하는 붕괴열과, 노심 및 냉각재에 저장된 열을 제거한다면 발전소의 안전을 확보할 수 있다. 따라서 운전모드 3, 4, 5에서는 발생하는 열이 운전모드 1, 2에 비해 적기 때문에 전체 열제거 계통 중 일부 유로의 운전 정지가 허용된다. 그러나 대형과단 냉각재상실사고에 대한 비상노심냉각계통의 운전 가능성은 보수적인 관점에서, 운전모드 2와 냉각재 출구모관 온도가 동일한 운전모드 3에서도 확보되어야한다.

### 2.2.4 운전모드 4

운전모드 4는 상온정지 상태로서 출구모관 온도가 100℃ 이하로 상온이며, Keff는 0.99미만으로 원자로 정지상태이다. 또한, 원자로 정지 및 냉각 후 취해지는 발전소 보호조치로서 최종적으로 진입해야하는 발전소 상태이다.

운전모드 4는 운전모드 3과 동일하게 Keff가 0.99 미만이므로 원자로는 완전히 정지되어 임계 운전시 발생하는 열은 존재하지 않으며, 붕괴열과 냉각재에 저장된 열만 존재한다. 또한, 출구모관온도가 100℃ 이하로 운전모드 3의 상태보다 원자로 냉각재 온도가 훨씬 낮은 상태이다. 이로 인해 비상노심냉각계통의 운전가능성을 요구하지 않지만, 정지냉각계통을 사용하여 냉각을 하며, 비상노심냉각계통을 제외한 모든 특수 안전계통의 운전가능성을 요구한다.

### 2.2.5 운전모드 5

운전모드 5는 원자로가 완전히 정지되어 있는 상태로서 별도의 조치가 없는 한, 원자로를 지속적으로 미임계 상태로 유지할 수 있다. 출구모관온도는 90℃ 이하로 설정되어 있으며, 중수로에서 가장 안전한 상태에 해당한다. 보증정지상태에 진입하여 원자로가 완전히 그리고 지속적으로 정지되어 있다는 것을 확인한 후, 원전의 유지 보수를 위해 예방정비를 실시한다. 보증정지상태는 중수로 원전이 갖고 있는 주요 특성 중의 하나이다.

중수로 원전의 보증정지 상태에서는 독물질이 과다하게 주입되어 있고, 모든 정화계통이 차단되어 있으며, 외부전력수전상태에서 정지냉각계통을 이용해 냉각하고 있다. 다른 운전모드에 비해 안전한 상태이므로 2개의 정지계통 중 1개만 운전가능성을 확보하면 된다.

### 2.2.6 중수로 표준운전모드의 문제점

중수로 표준 운전모드는 이상과 같은 기술적 근거로 설정되었지만 중수로 발전소의 특성인 기동시 임계허용조건이 제대로 반영되어 있지 않다. 또한, 정지운전모드를 구분하는 중

요한 요소인 ROH 온도의 설정치가 중수로 발전소 기동 및 정지 절차와도 상이한 것으로 조사되었다. 따라서 중수로 표준 운전모드의 ROH 온도는 다소 문제점이 있는 것으로 판단된다. 관련사항은 본 연구의 범위를 벗어나는 것이므로 여기서는 논의 하지 않겠다.

### 2.3 중수로 운전제한조건 불만족시 조치 최종점 분류

중수로 운영기술지침서의 운전제한조건 불만족시 설정되어 있는 최종점을 표 2와 같이 분류하였다. 총 운전제한조건은 59개이며, 운전모드 4에 대부분의 최종점이 설정되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 가압경수로의 기술지침서에서 최종점이 통상적으로 저온정지상태(운전모드5)로 작성되는데, 저온정지상태의 원자로 냉각재 평균 온도가 93℃ 미만의 미임계 상태이기 때문에 원자로 냉각재상실사고 위험이 상대적으로 낮아 최소 발전소 계통으로 발전소를 유지할 수 있을 것이라는 공학적 판단에 기인하여 작성된 것과 동일하다. 그러나 중수로는 계통과 운전모드 구분 설정 요소의 설정치가 다르기 때문에 정지운전모드에 대한 최종점 평가를 수행할 필요성이 있다. 따라서 기존에 설정되어진 운전모드 4의 최종점에 대한 평가를 수행하였다. 여기서, N/A로 표시한 부분은 조치요구사항에 최종점이 기술되어 있지 않은 것으로 운전제한조건 3.0.3을 적용하는 내용이다.

표 2. 중수로 표준운전제한조건 조치요구사항 최종점 현황

	LCO	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5	N/A	기타	운전변수 위반
End states (LCO)	59	2	3	30(+1)	8	12(+2)	4	(13)
3.1 반응도 제어계통	4				4			(1)
3.2 출력분포제한	2						2	
3.3 계측설비	7			2	3		2	
3.4 원자로계통	20	2	3	10(+1)	1	4(+1)		(9)
3.5 비상노심냉각계통	3			3				
3.6 격납건물계통	8			7		1(+1)		(2)
3.7 발전소계통	6			5		1		(1)
3.8 전력계통	8			3		5		
3.9 핵연료취급운전	1					1		

### 3.1 중수로 운영기술지침서 항목별 적용 운전모드 분류 및 적용 계통, 기기 분류

정지운전시 발전소의 상태를 표지할 수 있는 기기, 계통을 운영기술지침서에 명시되어있는 계통 및 적용 운전모드로 분류하였다. 이를 통하여 정지운전시 운전모드 별로 이용가능한 기기/계통의 종류를 분류하여 다중계통의 이용가능성을 검토하였으며, 표 3에 나타내었다.

표 3. 운영기술지침서 필수안전기능 수행 기기/계통 분류표(일부)

운영기술지침서항목	3.4.7	3.4.7	3.4.8	3.4.9
계통	원자로계통	원자로계통	원자로계통	원자로계통
대상	HTS-유로 SDC 유로1 봉소 또는 가솔리늄 농도	감속재정화밸브 차단 감속재중수공급 원차단 SDC 1	원자로계통 정지냉각펌프 2	중수중수밸브 3331-MV13,22
운전모드1	X	X	O	O
운전모드2	X	X	O	O
운전모드3	X	X	O	X
운전모드4	X	X	X	X
운전모드5	O	O	X	X

### 3.3 최종점 진입 요건 확인

그림 2는 중수로 발전소 운전정지 경로에 대한 그림으로 3가지의 운전정지 경로가 있다. 경로 1은 필요시 정지냉각이 시작 될 수 있는 조건이며, 정지냉각이 상실되더라도 증기발생기를 이용한 냉각을 수행할 수 있는 상태일 가능성이 매우 높다. 경로 2는 정지냉각을 이용한 냉각이 이용될 수 있으나 증기발생기를 이용한 냉각은 불가능한 상태이다. 운전모드 3과 운전모드 4는 ROH 온도(100℃)로 구분되고 있어 운전모드 변경에 따른 계통 배열은 추가적으로 발생하지 않는다. 따라서 운전모드 변경 위험도는 발생하지 않으며, 발전소의 냉각율이 증가되는 상태가 된다. 경로 3은 보증정지상태로의 진입상태를 보여주고 있다.

최종점이 운전모드 4로 설정되어 있는 경우에, 불만족상태의 조치요구사항과 제한시간을 불만족할 때에는 [4]시간 이내에 운전모드3으로 진입해야하고, 다음 [6]시간 이내에 운전모드 4로 진입하도록 되어 있다. 현재의 운전모드 설정 상태로 보면 경로 1에 정지냉각계통 기동 과정이 있어 운전모드 3 상태에서 계통 배열이 생긴다.

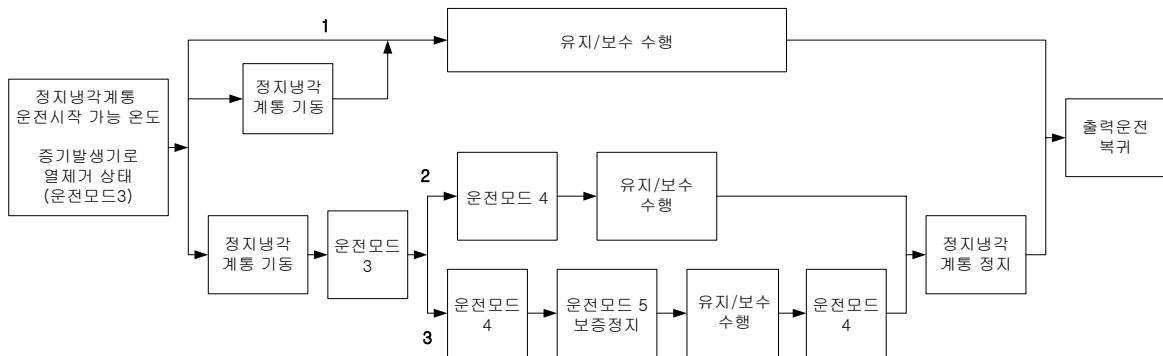


그림 2. 중수로 발전소 운전정지 경로

### 3.4 원자로 정지시 노심 붕괴열 제거 평가

정지운전에서는 원자로 정지 후 발생하는 붕괴열과, 노심 및 냉각재에 저장된 열을 제거한다면 발전소의 안전을 확보할 수 있다. 따라서 원자로 정지시 노심 붕괴열과 냉각재 잔열들을 제거할 수 있는 기기/계통들을 운전모드 설정 요소인 ROH 온도와 함께 분류하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3을 보면 ROH 온도가 149℃인 시점에서 여러 가지 계통 배열이 발생하는 것을 알 수



있으며, 표 4에 ROH 온도별 주요조치사항을 정리하였다. 또한, 이 온도는 원자로냉각재시스템의 루프가 정지냉각시스템의 루프와 연결 또는 격리 되는 온도로 중요한 계통 배열들이 많이 이루어지고 있다. 운전모드 3과 운전모드 4를 구분하고 있는 현재의 ROH 온도 100℃로 인하여 운전모드 3에 모두 포함되고 있다. 그러나 정지운전중의 운전모드 구분은 정지냉각시스템의 작동 온도인 149℃로 구분하는 것이 더 적절할 것으로 판단된다.

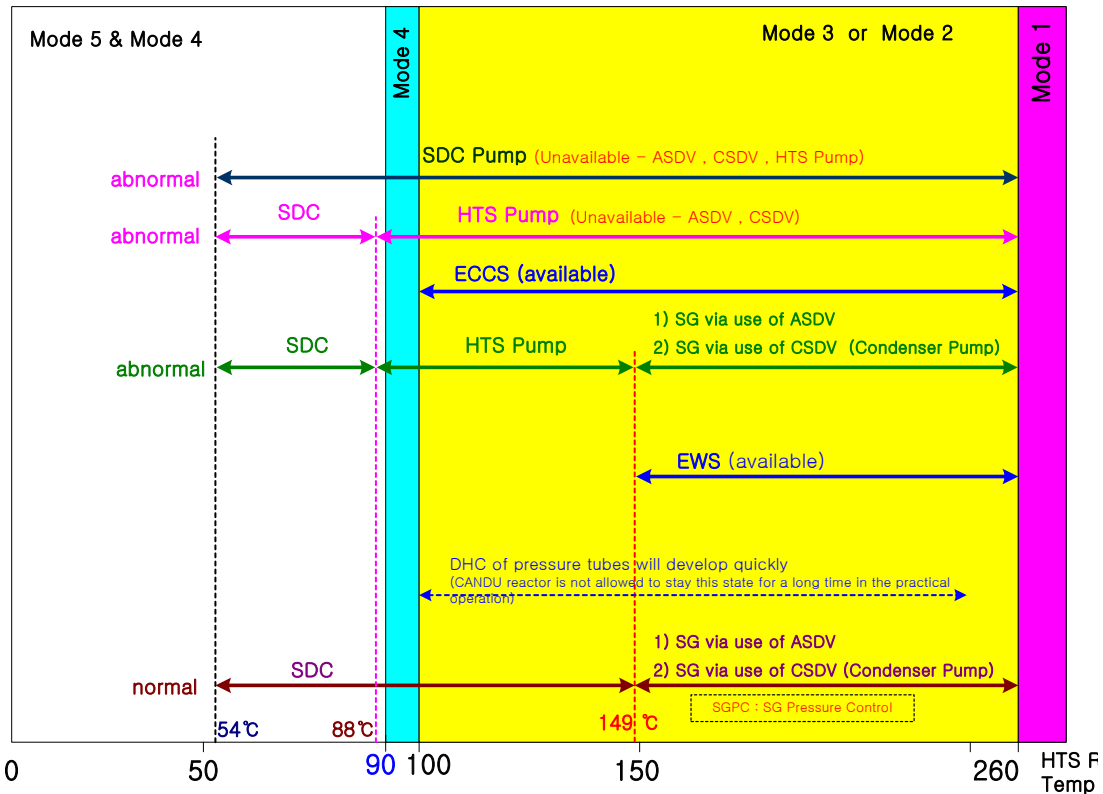


그림 3. 운전모드에 따른 노심 붕괴열 제거 가능 계통

운전모드 3 상태에서는 1차 감압(260℃, 9.89MPa → 8.0MPa) 및 냉각(8.0MPa, 260℃ → 149℃) 그리고 2차 감압(149℃, 8.0MPa → 7.0MPa) 및 냉각(7.0MPa, 149℃ → 100℃) 과정이 모두 수행된다(그림4 참조). 이 과정 중에 중요한 계통 배열을 보면, 증기발생기 압력제어를 통해 냉각을 수행한 후, 비상급수 계통 차단 후 정지 냉각시스템을 이용한 발전소 냉각 과정을 들 수 있다. 또한, 정지 냉각시스템 펌프 대신 원자로냉각재펌프를 이용한 냉각 과정을 수행할 수도 있다.

운전모드 4 상태에서는 3차 감압(100℃, 7.0MPa → 3.0MPa) 및 냉각(3.0MPa, 100℃ → 54℃) 과정이 수행된다.(그림4 참조) 본 과정 중에 중요한 계통 배열은 비상노심냉각시스템의 차단 정도로 볼 수 있다. 그림 3 및 그림4 에서 보면 정지냉각시스템의 계속 운전상태 외에 특별한 계통 배열은 수행되지 않는다.

원자로 정지시 노심붕괴열 제거 가능 계통에 대한 평가는 현재의 운전모드 조건 상태에서는 운전모드 4보다는 운전모드 3 상태에서 더 많은 계통과 기기들이 이용가능함을 알 수 있다.

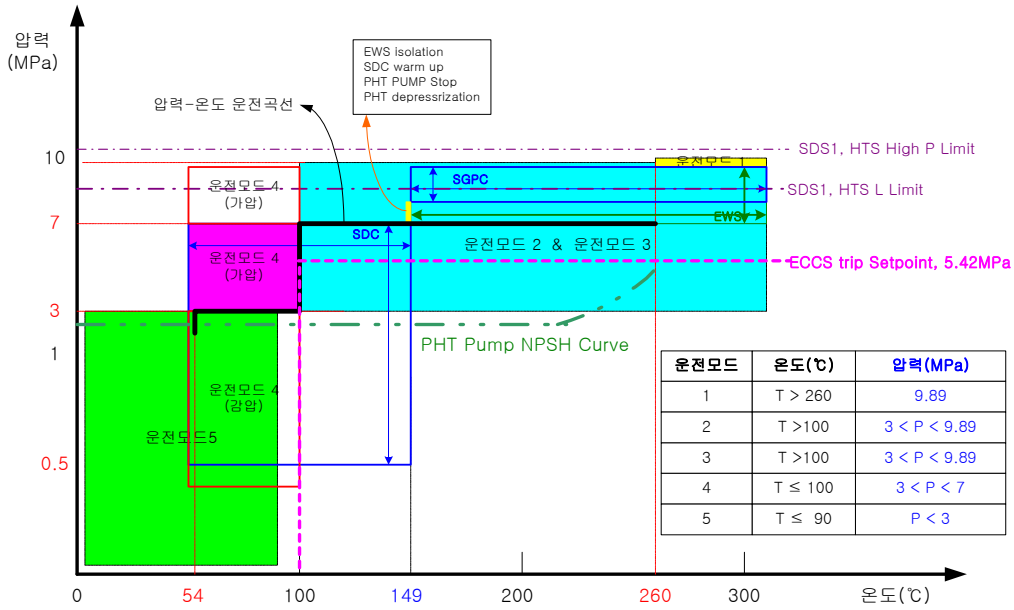


그림 4. 압력, 온도 조건에 따른 정지냉각계통 사용 영역

표 4. 냉각중 원자로 출구모관기준 온도별 주요 조치 사항

ROH 온도	주요 조치 사항	운전모드
260°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>SGPC를 이용한 발전소 냉각</li> <li>SDC 펌프 기동준비</li> </ul>	1
200°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>주증기 모관 배수전환</li> </ul>	2, 3
170°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>탈기기 Pegging steam 차단</li> <li>복수기 진공계통 정지 준비</li> </ul>	2, 3
149°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>EWS 계통 차단</li> <li>복수기 진공계통 정지 및 밀봉증기 격리</li> <li>SG ADP(auto depressurization) 차단</li> <li>SDC 계통을 이용한 발전소 냉각</li> </ul>	2, 3
100°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>ECC 계통 차단</li> <li>MRC(MOD.Rapid Cool Down)차단</li> <li>보일러 2nd Crash cool down 차단</li> <li>보일러 2차측 및 주증기관에 질소 가스 봉입</li> </ul>	4
54°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>냉각완료 및 온도 유지</li> </ul>	5

#### 4. 공학적 평가

##### 4.1 중수로 표준 운전제한조건 최종점 평가 대상 설정

중수로 표준 운전제한조건의 불만족시 조치로 인하여 진입한 최종점 중 다음과 같은 경우를 최종점 평가 대상으로 설정 하였다. 이는 심층방어 측면을 고려한 것이다.

- 한 계열의 기기가 운전불가능하여 진입한 불만족시 조치사항
- 발전소 운전 변수 위반으로 진입한 불만족시 조치사항

## 4.2 선정된 특정 운전제한조건에 대한 최종점 평가

### 4.2.1 운전제한조건

2대의 정지냉각펌프는 운전가능해야 한다.

### 4.2.2 적용

운전모드 1, 2, 3

### 4.2.3 운전제한조건 기술배경

이 운전제한조건의 목적은 정상 운전시 2개의 정지냉각펌프를 운전가능하도록 하여 최악의 단일고장을 동반한 사고시 정지냉각능력을 보장하는 것이다. 분리되고 독립적인 정지냉각계통에서 각각의 정지냉각펌프를 운전가능하도록 하여 어떠한 경우에도 2대의 정지냉각펌프가 운전가능함을 보장하는 것이다.

### 4.2.3 운전제한조건 불만족시 조치요구사항

만일 1대의 요구되는 정지냉각펌프가 운전불가능하면 72시간 내에 정지냉각펌프를 복구하여야 한다. 제한시간 내에 복구할 수 없다면, 운전모드 3의 상태 및 운전모드 4의 상태로 전환하여 출력준위를 낮추고 노심 열제거의 필요성을 낮춘다. 즉, 1대의 정지냉각펌프의 운전불가능으로 인한 최종점은 운전모드 4로 설정되어 있다.

### 4.2.4 최종점 평가 및 심층 방어 고려

운전모드 1과 2에서는 정지냉각펌프의 운전이 필요한 상태가 아니며, 원자로냉각재펌프와 증기발생기를 이용하여 열을 제거하고 있는 상태이다. 만일, 이 상태에서 최종점에 진입한다면 나머지 한 개의 정지냉각펌프를 이용하여 최종점(운전모드 4)에 도달하여야 한다. 먼저, 운전모드 3 상태로 전환하여 냉각재 계통을 격리하고, 건전한 나머지 한 개의 정지냉각계통을 이용하는 계통 배열로 진입하여야 한다. 이후 한 개의 정지냉각계통을 이용하여 최종점에 도달할 때까지 냉각하여야 한다. 이는 한 개의 정지냉각계통을 이용하여 온도를 낮추기 때문에 좀 더 많은 시간을 요구하며, 증기발생기를 이용한 열제거 상태에서 정지냉각계통을 이용한 열제거 모드로 변경을 요구한다. 이는 안전성에 별다른 이득이 없으며, 오히려 과도상태로의 진입을 유발하여 발전소의 안전성에 영향을 줄 수 있는 상황들의 가능성을 증가시킨다.

그림 3을 보면 정지냉각펌프 대신에 원자로냉각재펌프를 이용하여 온도를 낮출 수 있는 방법도 있다. 정지냉각펌프가 운전불가능할 경우 원자로냉각재펌프와 정지냉각열교환기를 이용하여 90℃까지 낮출 수 있다. 또한, 비상노심냉각계통도 작동 가능한 상태이다. 운전모드 3상태에서는 계통의 다중성 및 다양성이 모두 이용가능함을 알 수 있다. 추가적으로 정지냉각펌프 2대가 모두 운전불가능할 경우에도 열대류 운전을 수행할 수 있는 조건을 갖고 있다. 그러나 원자로냉각재펌프를 이용한 냉각과정으로 최종점(운전모드 4)에 도달하기 위해서는 많은 시간이 요구되어 진다. 원자로냉각재펌프 자체에서 발생하는 열로 인하여 4대 모두 가동시는 운전모드 4에 도달하는 것은 불가능하며, 원자로냉각재펌프 2대는 정지하고, 나머지 2대를 이용해야만 가능한 조건이다. 따라서 현재 설정되어져 있는 최종점은 그림 2의 경로 1과 같이 운전모드 4보다는 운전모드 3이 더

적절할 것으로 판단된다.

### III. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구는 중수로 원전 운영기술지침서의 불만족시 조치요구사항의 최종점을 평가하여 최적화하기 위해 수행되었다. 먼저, 최종점은 운전모드로 적용되므로 중수로 원전에 적용되는 운전모드의 기술적 근거와 배경을 조사 및 분석하였으며, 분석된 자료를 바탕으로 국내 중수로 표준운영기술지침서에 설정되어 있는 최종점을 검토하고, 운전모드별로 운전가능한 기기/계통을 분류하였다. 그리고 발전소 정지시 중요한 노심 붕괴열 제거 및 냉각재 계통의 잔열제거 방안을 운전모드와 연계하여 분석하였다. 마지막으로 중수로 원전 운영기술지침서의 운전제한조건 1개를 선정하여 최종점 평가를 수행하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 중수로 원전 운전모드의 기술적 근거와 배경을 조사/분석하였으며, 운전모드에 따른 노심 붕괴열 제거 가능 계통을 분류하였다. 이를 근거로 하여 운전모드 3과 운전모드 4의 구분은 정지냉각계통의 작동 온도인 149℃ 로 구분할 것을 제안한다.
- 중수로 표준 운영기술지침서에서 최종점 평가 대상의 설정 기준을 제시하였다. 그리고 특정 운전제한조건에 대한 불만족시 조치요구사항의 최종점을 평가하였으며, 기존에 설정되어진 운전모드 4의 최종점을 운전모드 3의 최종점으로 변경을 제안한다.

본 연구에서는 정지모드 임계안전기능 중 노심붕괴열 제거 측면에서 평가를 수행하였다. 향후, 격납건물 건전성 제어, 재고량 제어, 반응도 제어 및 전력의 이용도에 대한 평가를 추가적으로 수행하여 최종점 평가에 대한 연구를 계속할 계획이다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 지원하에 수행중인 정부중장기 과제인 “중수로 원전 표준운영기술지침서 기반 기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

### 참고문헌

1. EPRI NP-4498 Volume 1, "The Reactor Analysis Support Package", EPRI, 1986
2. NUREG-0452 Rev. 3, "Standard Technical Specifications for Westinghouse Pressurized Water Reactors", US NRC, 1980
3. ANS-58.4-1979, "American National Standard Criteria for Technical Specifications for Nuclear Power Stations", ANSI, 1979

4. 백원필, 장순홍 “원자력 안전” 청문각, 2001
5. EPRI NP-5475, “Identification and Clasification of Technical Specification Problems”, EPRI, 1987
6. 한전기술-0005, “WH형 표준운영기술지침서”, 한국전력공사, 2000
7. 한전기술-0005, “CE형 표준운영기술지침서”, 한국전력공사, 2000
8. NUREG-1431, “Standard Technical Specifications Westinghouse Plants”, US NRC, 1995
9. “월성원자력 2호기 운영기술지침서”, 한국전력공사
10. “운전 및 시험 분석 평가기술 개발(I) - 국내원전 기술지침서 표준화 연구” 과학기술부 1995
11. “월성 2호기 최종안전성분석보고서”, 한국전력공사
12. 류정동, 성창경 “중수로 표준 운전모드 설정 및 기술배경”, 추계원자력학술논문집, 2002
13. TSTF-422, CEOG-152, REV.0
14. CE NPSD-1186, CEOG