'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비상운전시 특정 운전모드 결정을 위한 기술평가지침

Technical Evaluation Guidelines to Determine the Specific Operational Mode during an Emergency Operation

김현장, 권갑주

한국전력공사
울산광역시 울주군 서생면 신암리 991

요 약

비상운전절차서는 발전소 운전변수가 원자로 보호계통이나 공학적 안전설비 동작 설정치를 초과하는 과도상태 또는 사고 발생시, 이의 결과를 완화하고 필수안전기능을 회복하기 위해 작동이 요구되는 기기 및 계통과 운전원의 조치사항을 기술한 절차서로서 발전소 안전에 있어 핵심적인 절차서이다. 비상운전 수행 중 운전원은 여러 단계에서 절차서에 명시된 운전조치 이외에 발전소 비상조직인 기술지원실의 전문가로부터 기술평가를 받아 특정 계통 및 기기에 대한 운전모드를 결정하도록 되어있다. 이러한 운전모드는 발전소상태, 사고의 전개과정, 기기의 이용가능성 및 방사선 안전측면 등을 종합적으로 판단하여 이루어져야 한다. 본 연구는 비상운전시 기술지원실 전문가의 기술평가를 받아 결정해야 하는 운전단계를 체계적으로 분류·정리하였으며, 각 단계별로 운전모드 결정에 고려해야 할 필수 기술평가 지침을 제시하므로서 기술지원실 전문가의 교육훈련은 물론 향후 종합적인 기술평가지침서 개발에 대한 방향을 제시하였다.

Abstracts

Emergency operation procedures are documents that identify the equipment or systems to be operated and list the steps necessary to mitigate the consequences of transient and accidents that have caused plant parameters to exceed reactor protection system set points or engineered safety feature set points, or other established limits and to restore safety functions. Operational modes of specific systems or components are not provided in the emergency operation procedures. These operational modes should be determined with consultations on technical evaluation by technical support center which is one of the plant emergency organizations during the emergency operation. To determine the operational modes, plant status, accident evolution, equipment availability and radiological effects to environment should be considered. This study summarizes the emergency operation steps requiring technical evaluation in determining the operational modes and proposes the essential technical evaluation guidelines to determine the mode. The results can be profitably utilized in training experts of technical support center and developing the plant specific technical evaluation guidelines.

1. 서 론

원전의 안전성은 심층방어개념에 입각한 발전소 설계 뿐 아니라 체계화된 절차서에 의해 발전소를 안전하게 운영함으로써 확보될 수 있다. 비상운전절차서(Emergency Operation Procedure, 이하 EOP라 함)는 발전소 운전변수가 원자로 보호계통이나 공학적 안전설비 동작설정치를 초과하는 과도상태 또는 사고 발생시, 이의 결과를 완화하고 방사성물질의 환경누출 방지를 위한 필수 안전기능 회복을 위해 작동이 요구되는 기기 및 계통과 운전원 조치사항을 기술하고 있다. 각 발전소 EOP는 참조발전소의 과도 및 사고분석을 통해 얻어진 공학적 데이터를 근거로 노형별 사용자그룹(WH형의 경우 WOG[1])에 의해 개발되어 검증과정을 거친 비상대응지침서(이하 ERG[2]라 함)를 근거로 발전소 설계 및 설비특성에 맞게 작성된다. 운전원들은 이 절차서에 대한 주기적 반복교육과 시뮬레이터 실습을 통해 사고상황시 발전소를 안전하게 정지하고 방사성물질의 환경누출을 최소화하기 위한 운전능력을 배양하게 된다.

비상운전 수행 중 운전원은 여러 단계에서 절차서에 명시된 운전조치 이외에 발전소 비상대응조직인 기술지원실의 전문가로부터 기술평가를 받아 특정 계통 및 기기에 대한 운전모드를 결정하도록 되어있다. 이러한 운전모드는 발전소상태, 사고의 전개과정, 기기의 이용가능성 및 방사선 안전측면 등을 종합적으로 판단하여 이루어져야 한다. 기술평가가 효과적으로 이루어지기 위해서 기술지원실 구성원은 EOP는 물론 과도 및 사고의 진행과정과 이때 나타나는 발전소 현상에 대해 정통해야 한다. 그러나 이제까지 기술지원실 전문가의 기술평가를 받아 운전모드를 결정해야 하는 특정 운전단계에 대한 체계적 정리가 이루어지지 않았으며, 기술지원실 전문가가 기술평가에 이용할 수 있는 기술지침서가 마련되어 있지 않아 관련 당사자에 대한 교육훈련은 물론 실제 상황 발생시 효과적인 비상운전 수행에 어려움이 예상되고 있다.[1] 본 연구에서는 고리 3/4호기 및 영광 1/2호기 비상운전절차서를 대상으로 비상운전 수행시 기술지원실 전문가의 기술평가를 근거로 운전모드를 결정해야 하는 특정 운전단계를 체계적으로 분류·정리하고 단계별로 평가에 요구되는 필수 기술지침과 참고해야 할 기술적 배경이 포함된 참조 자료명을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 EOP 수행시 기술평가가 요구되는 운전단계

현재 사용중인 고리 3/4호기, 영광 1/2호기 EOP의 기술배경서인 WOG ERG 개정-1C를 기준으로 기술지원실 전문가의 기술평가를 근거로 운전모드를 결정해야 하는 특정 운전단계는 다음 17개 항목이다; 1) 잔열제거계통 흡입측 밸브배열, 2) 고온관재순환으로 전환, 3) 원자로냉각재계통 추출유로, 4) 원자로용기헤드의 배기여부 평가, 5) 격납용기 재순환배수조 pH 평가, 6) 격납용기 배수조 수위와 방사능농도 평가, 7) 격납용기 방사선준위 평가, 8) 의도적인 방사능물질 방출전 소외선량 평가, 9) 증기발생기 과충수 평가, 10) 증기발생기 관파열사고시 후속냉각방법 평가, 11) 고장 증기발생기와 관파열 증기발생기 평가, 12) 원자로냉각재 상실사고를 동반한 증기발생기 관파열사고시 과냉상태 복구와 포화상태 복구 평가, 13) 고갈 증기발생기에 대한 급수공급 평가, 14) 가압기 압력제어기능 평가, 15) 원자로냉각재 펌프 상태판정, 16) 격납용기 수소와 수소 재결합기 평가, 17) 장기적 발전소상태 평가.[2][3]

---

1) Westinghouse Owners Group
2) Emergency Response Guidelines

각각의 특정 운전단계가 적용되는 비상운전절차를 정리하면 [붙임-1]과 같다.

2.2 주요 운전단계별 기술평가지침

상기 17개 항의 특정 운전단계 중 운전원 측면에서 중요하다고 판단되는 잔열제거계통 흡입측 밸브배열 및 원자로용기헤드의 배기여부 평가에 대해서 평가목적, 적용 비상운전 절차서, 발전소 상태 및 기술평가지침을 정리하면 다음과 같다.[4][5][6]

2.2.1 잔열제거계통 흡입측 밸브배열

평가 목적

현재 및 예상되는 발전소상태를 근거로 1) 각 잔열제거계통 계열의 흡입측에 요구되는 최적 밸브배열이 다음 중 어느 것인지를 결정하기 위함이다. ; 핵연료재장전수탱크, 원자로냉각재계통 고온관, 격납용기 재순환 배수조, 2) 격납용기 배수조를 통한 비상재순환능력이 상실된 후 잔열제거계통이 이용 가능한지와 이것을 정지냉각모드로 전환(원자로냉각재계통 고온관으로 배열)할 것인지를 결정하기 위함이다.

적용 비상운전 절차서

- 평가목적 1)항이 적용되는 비상운전 단계는
  1) LOCA[3]후 냉각 및 감압(ES-1.2) 단계-30.b
  2) LOCA를 동반한 SGTR[4]-과냉상태 복구(ECA-3.1) 단계-37.b
  3) LOCA를 동반한 SGTR-포화상태 복구(ECA-3.2) 단계-31.b 이며
- 평가목적 2)항이 적용되는 비상운전 단계는
  1) 비상재순환 상실(ECA-1.1) 단계-23.b, 35.b, 38 이다.

발전소 상태

1) 운전원은 발전소 상태에 따라 다음 EOP를 수행하고 있을 것이다. ; ① SGTR가 동시에 발생하지 않은 조건에서 만일 파단부위가 잔열제거펌프 차단수두 이하로 원자로냉각재계통을 감압하는데 충분하지 않다면 LOCA후 냉각 및 감압절차(ES-1.2), ② 핵연료재장전수탱크 수위가 40% 이하로 감소했으나 운전원이 저온관재순환으로 전환할 수 없었을 경우, 40% 이하로 감소하기 전에 운전원이 저온관재순환 능력이 이미 상실되었음을 확인했을 경우, 격리 불가능한 격납용기 외부 LOCA로 격납용기 재순환배수조에 누출수가 집수되지 않을 경우 비상재순환 상실절차(ECA-1.1), LOCA와 SGTR 동시발생시 LOCA를 동반한 SGTR절차(ECA-3.1 또는 ECA-3.2).

2) 원자로재장전수 탱크 수위는 40% 이하로 감소되지 않았고 잔열제거펌프 흡입측은 여전히 원자로재장전수 탱크로 배열되어 있다.

3) 원자로냉각재펌프 기동조건이 만족된 상태에서 운전원이 원자로냉각재계통 과냉상태와 가압기 수위를 유지할 수 있다면 한 대의 원자로냉각재펌프가 운전중일 것이다.

기술평가지침

1) 소형 LOCA의 경우 1대를 제외한 모든 안전주입펌프는 정지될 것이며 핵연료재장전수 탱크의 재고량 대부분은 잔열제거계통이 운전가능한 시점까지 유지될 것이다. 이런 경우에 잔열제거계

---

3) Loss of Coolant Accident
4) Steam Generator Tube Rupture

통은 정상적인 배열(흡입을 원자로냉각재계통 고온관에서 취함)로 운전될 수 있다. 정지중인 나머지 충전/고압안전주입 펌프는 핵연료재장전수 탱크에서 흡입을 취하는 저온관 주입모드로 유지된다. 만일 정상충전이 형성될 수 있으면, 주입원은 핵연료재장전수 탱크가 될 것이다.

2) 만일 원자로냉각재계통 고온관이 완전 충수되지 않은 상태(원자로냉각재계통에 많은 기포가 생성되는 상태)이면, 잔열제거계통은 정지냉각상태로 배열해서는 안된다. 원자로냉각재계통에 많은 기포가 생성되는 상태에서 잔열제거계통 흡입을 고온관으로 배열하면 펌핑되는 유체의 기포, 캐비테이션, 와류, 펌프의 공통모드 고장을 야기할 수 있다. 원자로냉각재계통에 많은 기포가 생성되는 상태는 다음의 증상에 의해 확인할 수 있다. ; ① 원자로용기 수위지시계통(RVLIS) 지시치가 고온관 이하(RVLIS가 설치된 경우), ② 원자로냉각재계통 과냉각도 상실, ③ 가압기 수위 유지 불가

3) 대형 LOCA의 경우 핵연료재장전수 탱크 수위는 결국 40%(재순환전환 설정치)까지 감소할 것이며 적어도 한 대의 잔열제거펌프는 저온관 재순환에 이용되어야만 한다. 만일 잔열제거계통이 정지냉각모드로 운전중이지 않다면 안전관련 계통들은 잔열제거 열교환기를 통해 노심의 붕괴열을 제거하는 장기적 재순환모드로 유지할 수 있다.

4) 만일 발전소 설계가 허용하면 한 대의 잔열제거펌프는 정상 정지냉각모드로 배열(원자로냉각재계통 고온관에서 흡입을 취함)하고, 다른 한 대는 재순환모드로 배열될 수 있다. 만일 충전/고압안전주입 펌프 정지 또는 정상 충전유량을 형성하기 위한 원자로냉각재계통 과냉각도 기준이 만족되지 않으면 하나의 잔열제거펌프는 충전/고압안전주입 펌프를 정지한 후 주입유량을 공급하기 위해 또는 정상 충전유량을 형성하고 붕소주입탱크를 격리할 수 있도록 기동될 것이다. 이런 상태에서 잔열제거펌프는 폐루프 상태의 정지냉각모드로 운전할 수 없게 된다. 따라서, 발전소 설계특성 및 현재 그리고 예상되는 발전소상태에 따라 잔열제거 계열의 흡입은 다음 중 하나의 방법으로 배열될 수 있다. ; ① 양 계열 모두 정지냉각모드로 흡입을 원자로냉각재계통 고온관으로 배열, ② 한 계열은 정지냉각모드로 흡입을 원자로냉각재계통 고온관으로 배열하고 다른 한 계열은 격납용기 재순환배수조에서 흡입을 취하는 재순환모드로 배열, ③ 한 계열은 핵연료재장전수 탱크에서 흡입을 취하는 주입모드로 배열하고, 다른 한 계열은 원자로냉각재계통 고온관에서 흡입을 취하는 정지냉각모드로 배열.

5) 비상 노심재순환 능력이 상실되고 핵연료재장전수 탱크 재고량이 고갈되고 있는 경우에, 원자로냉각재계통 냉각은 잔열제거계통을 정지냉각모드로 운전하거나 증기를 덤프하여 유지해야 한다. 비상 노심재순환 상실절차(ECA-1.1) 수행 중 운전원은 발전소상태가 잔열제거계통을 정지냉각모드로 운전하는데 적합한지 결정해야 하며 적합하다면 기술지원실은 다음가 같이 잔열제거계통의 운전가능성 여부를 결정해야 한다. ; ① 만일 비상 노심재순환능력의 상실이 펌프 2대 모두의 상실에 기인한 것이면 잔열제거 정지냉각은 가능하지 않을 것이다. ② 잔열제거계통의 이용가능성은 계통운전에 필요한 기기(흡입측 밸브, 펌프, 기기냉각수 등)의 확인과 펌프 흡입측으로 증기가 유입되는 것을 배제하기에 충분한 원자로냉각재 재고량의 확인을 포함한다. 만일 잔열제거계통이 이용가능하며 운전조건이 만족되면 잔열제거계통은 흡입을 원자로냉각재계통 고온관에서 취하여 정지냉각모드로 배열될 수 있다.

6) 계기용 압축공기의 상태는 잔열제거계통이 정지냉각모드로 운전될 수 있는지를 결정하는데 매우 중요하다.

2.2.2 원자로용기헤드의 배기 평가

평가 목적

주로 수소인 비응축성가스의 노심냉각유량 방해 가능성 때문에 이것을 원자로용기 헤드로부터 배기시켜야만 하는지와 현재 발전소 상황에서 원자로용기 기포존재시 대응절차(FR-I.3)의 어떤 고려사항을 적용할 수 있는지를 평가하기 위함이다.

적용 비상운전 절차서

1) LOCA 절차(E-1) 단계-16.a

2) LOCA후 냉각 및 감압 절차(ES-1.2) 단계-33.b

발전소 상태

1) LOCA가 발생했으며 원자로용기 상부에 기포가 존재할 수 있다. 만일 기포가 존재한다면 그것은 포화증기나 과열증기 또는 수소나 질소인 비응축성가스일 것이다.

2) 운전원은 다음 중 하나의 절차를 수행하였을 것이다. ; ① 원자로냉각재계통 압력이 잔열제거펌프의 차단수두 이하로 감압되기에 충분한 대형 LOCA의 경우 LOCA 절차(E-1), 원자로냉각재계통 압력이 잔열제거펌프의 차단수두 이하로 감압되기에 충분하지 않은 소형 LOCA의 경우 LOCA후 냉각 및 감압절차(ES-1.2)

기술평가지침

1) 만일 주제어실 운전원들이 LOCA후 냉각 및 감압절차(ES-1.2)를 수행했고 안전주입을 종료할 수 있었다면, 원자로용기 기포 존재시 조치절차(FR-I.3)를 적용할 수 있으며, 이 평가를 수행하고 원자로용기헤드로부터 수소를 포함한 비응축성 기체를 배기시키기 위한 지침으로 사용되어야 한다. 만일 FR-I.3이 적용 가능하고 사용된다면 원자로용기 상부 배기를 평가하기 위해 본 지침을 사용할 필요가 없다.

2) 만일 원자로냉각재펌프가 운전되고 있다면 원자로냉각재는 과냉상태이고 냉각재 회로를 순환하는 기포들은 수소, 질소를 포함한 비응축성 기체들이다. 이들 기체들은 결국 가압기로 들어가게 되며, 발전소 운전 절차서에 따라 가압기 방출탱크로 배기될 수 있다.

3) 원자로용기 상부에 기포가 있는지를 판단하는 기준은 다음과 같다. ; ① 원자로용기 수위지시계통의 지시가 상부범위 이하이다. ② 원자로냉각재계통 압력변동에 대한 가압기 수위거동이 비정상적이다. 즉, 압력변동시 가압기 수위변동이 심하다. ③ 원자로용기 상부헤드 온도가 현재 원자로냉각재계통 압력에 대한 포화온도보다 높다.

4) 기포가 응축성이라면 배기를 하지 않고도 제거할 수 있다. 만약 부분적으로만 응축이 가능하다면, 먼저 응축가능한 부분을 응축시킨 다음 비응축성 기체들을 배기하므로서 기포 제거를 위해 필요한 배기량을 줄일 수 있다. 포화상태의 증기 기포들은 상부 헤드의 온도를 낮추거나 원자로냉각재계통 압력을 높여서, 또는 두 가지 방법 모두를 사용해서 응축시킬 수 있다. 과열된 증기 기포는 원자로용기 상부 헤드 온도를 낮춤으로써만 응축시킬 수 있다. 원자로용기 상부 온도를 낮추는 방법은 다음과 같다. ; ① 가장 효과적인 방법은 원자로냉각재펌프를 기동하는 것이다. 그러나, 만일 주제어실 운전원들이 LOCA 절차(E-1)로부터 본 평가의 수행을 요청했다면 원자로냉각재펌프의 운전을 위한 조건들이 만족되지 않은 상태이다. 만일 LOCA후 냉각 및 감압절차(ES-1.2)로부터 평가수행을 요청했다면, 펌프 운전조건이 만족될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. ② 제어봉구동장치(CRDM) 팬을 작동시켜 상부의 금속구조물을 냉각한다. ③ 열전도에 의해 상부헤드가 자연냉각 되도록 기다린다. 이 방법을 통해 저온정지상태(93℃)까지 냉각하기 위해서 필요한 시간

은 대략 역 모자 형태의 상부지지판(Inverted-Top-Hat Upper Support Plate : USP)을 가진 고리 2, 3, 4호기, 영광1, 2호기의 경우 88시간, 모자 형태의 USP(Top-Hat USP)를 가진 발전소의 경우 27시간, 평평한 USP(Flat USP)를 가진 고리1호기의 경우 29시간이다.[7] ④ 원자로용기 상부의 증기를 응축시키기 위해 원자로냉각재펌프를 기동시킬 수 있다면 반드시 한 대만 기동해야 한다. 그럼으로써 원자로용기 상부의 비응축성 기체가 냉각수 유동에 휩쓸려 증기발생기 세관과 같은 원자로냉각재계통의 다른 부분으로 확산되는 것을 최소화할 수 있다. 이러한 제한 조건은 기포중 일부가 비응축성 기체이고, 동시에 이후의 발전소 상태 변화로 인해 강제순환이 모든 비응축성 기체를 가압기의 증기 공간에 포집하기 위해 충분한 시간동안 지속되기 이전에 모든 RCP를 정지시켜야 할 경우에 필요하다. ⑤ 노심 노출이나 축압기 주입 등으로 인해 원자로용기 상부의 기체 대부분이 비응축성 기체일 것으로 추정될 경우에는 원자로냉각재펌프를 기동해서는 안된다.

5) 원자로용기 상부의 기체가 비응축성이라고 추정될 경우 비응축성 기포(수소 또는 질소)가 노심 냉각을 방해하기 위해서는 파단부위를 통해 빠져나가는 안전주입 유량이 작아 노심 붕괴열을 제거하기에 충분하지 못하여 일부 붕괴열은 자연순환으로 증기발생기 튜브를 통해 제거되어야 할 경우 (이러한 상황은 소형 LOCA시 발생), 그리고, 기체 영역이 고온관 상부 또는 더 아래까지 확장되어, 비응축성 기체들이 증기발생기 세관의 윗 부분에 모여 자연순환 유동을 방해할 가능성이 있을 경우이다. 만일 원자로용기 상부의 비응축성 기체 기포가 하부로 확대되어 고온관 노즐이 노출될 가능성이 있고, 그리고 노심 냉각을 위해 자연순환 유동이 필요한 상황이라면 원자로용기 상부 배기를 수행해야만 한다. 기포가 질소로만 이루어졌다는 확신이 있고(즉, 축압기 주입이 끝난 뒤 축압기를 격리할 수 없었으며 부적절한 노심 냉각 상태는 방생하지 않았던 경우), 그리고 질소 기포가 노심 냉각을 방해할 우려가 없을 경우에는 원자로용기 상부 배기를 수행할 필요가 없다. 만일 기포 내에 수소가 포함되어있다는 확신이 있는 경우(즉, 부적절한 노심 냉각 상태가 일정기간 있었던 경우), 수소 기포가 노심 냉각을 방해할 우려가 있다면 반드시 원자로용기 상부 배기를 해야 하며, 수소 재결합기에 의해 수소가 제거될 수 있는 격납용기로 수소를 이동시킨다는 의미에서 원자로용기 상부 배기를 수행할 수 있다.

6) 원자로용기 기포존재시 대응절차(FR-I.3)는 안전주입이 종료되었다는 가정에 근거하고 있다. 또한, 이 절차의 일부 조치, 즉 원자로냉각재펌프 기동 또는 원자로냉각재계통 압력 상승 조치 등은 현재의 발전소 상황에 적절하지 않을 수 있다. 그러나, 상부 배기를 위한 고려사항 중 일부(즉, 격납용기 내 수소농도)는 현재 상황에 적절할 수 있다. 원자로용기 기포존재시 대응절차의 다음 단계들을 참조하여야 한다. ; ① 원자로용기 배기에 적당한 격납용기 조건 조성, ② 최대 허용 배기 시간 결정, ③ 원자로용기 배기 종료 기준 검토, ④ 원자로용기 배기, ⑤ 원자로용기 수위지시계통 수위점검.

기술지원실 전문가의 기술평가를 근거로 운전모드를 결정해야 하는 특정 운전단계 17개 항목 중 위에서 언급한 2항목을 제외한 나머지 특정 운전단계의 기술평가 내용, 적용 비상운전절차서 단계, 기술평가시 참조해야 할 참고 자료명은 [붙임-2]에 제시하였다.

3. 결 론

비상운전 수행 중 운전원은 여러 단계에서 절차서에 명시된 운전조치 이외에 발전소 비상조직인 기술지원실의 전문가로부터 기술평가를 받아 특정 계통 및 기기에 대한 운전모드를 결정하도

록 되어있다. 이러한 운전모드는 발전소상태, 사고의 전개과정, 기기의 이용가능성 및 방사선 안전 측면 등을 종합적으로 판단하여 이루어져야 한다. 그러나 이제까지 기술지원실 전문가의 기술평가를 받아 운전모드를 결정해야 하는 특정 운전단계에 대한 체계적 정리가 이루어지지 않았으며, 기술지원실 전문가가 기술평가에 이용할 수 있는 기술지침서가 마련되어 있지 않아 관련 당사자에 대한 교육훈련은 물론 실제 상황 발생시 효과적인 비상운전 수행에 어려움이 예상되고 있다.

본 연구는 현행 고리 3/4호기 및 영광 1/2호기 비상운전 절차서를 대상으로 관련 자료를 검토하여 비상운전 수행시 기술지원실 전문가의 기술평가를 근거로 운전모드를 결정해야 하는 특정 운전단계를 17개항으로 분류·정리 하였으며, 운전원 측면에서 중요하다고 판단되는 잔열제거계통 흡입측 밸브배열 및 원자로용기헤드의 배기여부 평가에 대해서는 각 항목별로 평가목적, 적용 비상운전절차서 단계, 평가가 요구되는 시점의 발전소상태 및 기술평가지침을 제시하였다. 나머지 15개 항에 대해서도 같은 방법으로 기술평가지침을 개발할 수 있도록 항목별 평가내용, 적용 비상운전절차서 단계, 참고해야 할 자료명을 제시하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결과는 지금까지 취약점으로 여겨졌던 비상운전시 기술지원실 전문가의 기술평가 업무내용을 명확히 하였으며, 제시된 기술평가지침서 활용을 통해 효과적이고 정확한 기술지원이 가능하도록 하였다. 또한 본 연구의 결과물을 기술지원실 해당 요원의 교육훈련에 활용함으로써 사고시 발전소의 비상대응 능력을 한층 제고하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

[참고자료]

[1] 고리원자력본부 방사선 비상계획서, 한국전력공사, 고리원자력본부

[2] Westinghouse Owners Group(WOG) Emergency Response Guidelines, Rev. 1C, Sept. 30. 1999

[3] WOG Emergency Response Guidelines Direct Work Items DW-97-002 Response, Mar. 23. 1999

[4] WOG Emergency Response Guidelines Background Documents, Rev. 1C, Sept. 30. 1999

[5] 고리 3/4호기 비상운전절차서, 한국전력공사, 고리원자력본부

[6] 영광 1/2호기 비상운전절차서, 한국전력공사, 영광원자력본부

[7] WOG ERG Background Documents, ES-0.2 BD, Step Description Step-20, Rev. 1C, p.57, Sept. 30. 1999

[표-1] 특정 운전단계별 적용 비상운전절차서

특정 운전단계	적용 비상운전절차서 번호												
	ES-0.2	ES-0.3	ES-0.4	E-1	ES-1.1	ES-1.2	ES-1.3	ECA-1.1	ECA-2.1	E-3	ES-3.1	ES-3.2	ES-3.3
RHR흡입측 밸브배열						○		○					
고온관재순환으로 전환						○							
RCS 추출유로					○	○	○		○	○			
Rx Head 배기여부평가				○		○							
CV배수조 pH 평가				○		○		○					
CV배수조 수위와 방사능농도 평가,													
CV 방사선준위 평가													
의도적인 방사능물질 방출전 소외선량 평가				○									○
SG 과충수 평가										○			○
SGTR후속냉각방법 평가										○		○	
고장SG와 관파열SG평가										○	○	○	○
LOCA+SGTR시 과냉/포화상태 복구평가													
고갈SG 급수공급 평가													
PZR압력제어기능 평가													
RCP 상태판정	○	○	○		○	○		○	○	○			
CV 수소와 수소 재결합기 평가				○		○		○					
장기적 발전소상태 평가.	○	○	○	○		○		○	○		○	○	○

특정 운전단계	적용 비상운전절차서 번호												
	ECA-3.1	ECA-3.2	ECA-3.3	ECA-0.1	FR-C.1	FR-H.3	FR-H.5	FR-P.1	FR-Z.2	FR-Z.3	FR-I.1	FR-I.3	
RHR흡입측 밸브배열	○	○											
고온관재순환으로 전환	○	○											
RCS 추출유로	○	○	○	○				○			○	○	
Rx Head 배기여부평가													
CV배수조 pH 평가	○	○							○				
CV배수조 수위와 방사능농도 평가,										○			
CV 방사선준위 평가													
의도적인 방사능물질 방출전 소외선량 평가			○										
SG 과충수 평가			○			○							
SGTR후속냉각방법 평가													
고장SG와 관파열SG평가	○	○											
LOCA+SGTR시 과냉/포화상태 복구평가	○												
고갈SG 급수공급 평가							○						
PZR압력제어기능 평가			○										
RCP 상태판정	○	○										○	
CV 수소와 수소 재결합기 평가	○	○			○							○	
장기적 발전소상태 평가.	○	○	○										

주) E : 비상절차서, ES : 보조절차서, ECA : 비상부수절차서, FR : 기능회복절차서

[표-2] 특정 운전단계별 기술평가내용, 적용 EOP단계 및 참고자료 종합

특정 운전단계	기술평가내용	적용 EOP단계	참고자료
RHR 흡입측 밸브배열	비상재순환능력 상실후 RHR 계통이 이용가능한지와 정지 냉각모드(흡입을 고온관)로 운전해야만 하는지를 평가		ECA-1.1 BD, Sect-1 개요 p1
			ECA-1.1 BD, Sect-3.1 HLAS, p7
			ECA-1.1 BD, Sect-3.2 KUDP, p7
		ECA-1.1, 단계 23.b	ECA-1.1 BD, SD 단계-23 p57-58
		ECA-1.1, 단계 35.b	ECA-1.1 BD, SD 단계-35 p77-78
		ECA-1.1, 단계 38	ECA-1.1 BD, SD 단계-38 p83
	현재 발전소상태에서 각 RHR 계열 흡입측의 최적 배열이 무엇 인지 평가 (RCS고온관, CV 재순환 배수조 또는 RWST)		ECA-3.1 BD, Sect-3.1 HLAS, p34
		ECA-3.1, 단계-37.b	ECA-3.1 BD, SD 단계-37 p136-137
			ECA-3.2 BD, Sect-3.2 HLAS, p34
		ECA-3.1, 단계-31.b	ECA-3.2 BD, SD 단계-31 p130-131
			ES-1.2 BD, Sect-3.1 HLAS, p59
			ES-1.2 BD, Sect-3.2 KUDP,p59-60
		ES-1.2, 단계-30.b	ES-1.2 BD, SD 단계-30 p131-132
			ES-1.2 BD, Sect-5 FAQ, p142
고온관재순환으로 전환	노심의 보론석출을 방지하기 위해 SI계통을 고온관재순환으로 배열해야 하는지를 평가. 연료표면에 보론석출시 연료에서 냉각재로 열전달 능력 감소		ES-1.2 BD, Sect-3.2 KUDP, p60
		ES-1.2, 단계-33.b	ES-1.2 BD, SD 단계-33 p136-137
			ES-1.2 BD, Sect-5 FAQ, p144
			ES-1.4 BD, Sect-1 개요 p1
			ES-1.4 BD, Sect-2 설명 p2-6
			DW-92-052 ; ES-1.4 H/L Recirculation Switchover Time
		ECA-3.1, 단계-40.b	ES-1.4 BD, Sect-1 개요 p1
		ECA-3.1, 단계-34.b	ES-1.4 BD, SD 단계-4 p13
RCS 유출유로 형성	노심손상 사고후 격납용기 외부로의 RCS 유출유로 형성은 보조건물내 배관계통을 통한 고방사성유체의 순환을 가져오게 됨	ES-1.1, 단계-13&21	ES -1.1 BD, SD 단계-13 지식, p28; SD 단계-21 지식, p39
		ES-1.2, 단계-26	ES-1.2 BD, SD 단계-26 지식, p127
		E-3, 단계-28&35	E-3 BD, SD 단계-28 지식, p133: SD 단계-35 지식, p147
		ECA-0.1, 단계-10	ECA-0.1 BD, SD 단계-10 지식, p35
		ECA-2.1,단계-25&30	ECA-2.1 BD, SD 단계-25 지식, p66; SD 단계-30 지식, p73
		ECA-3.1, 단계-32	ECA-3.1 BD, SD단계-32 지식, p128
		ECA-3.2, 단계-26	ECA-3.2 BD, SD단계-26 지식, p123
		ECA-3.3,단계-13&19	ECA-3.3 BD, SD 단계-13 지식, p60: SD 단계-19 지식, p70
		FR-P.1, 단계-19	FR-P.1 BD., SD 단계-19 지식, p56
		FR-I.1, 단계-3&4	FR-I.1 BD, SD 단계-3 지식, p13: SD 단계-4 지식, p14
		FR-I.3, 단계-3	FR-I.3 BD, SD 단계-3 지식, p13
		ES-13, 단계-1, 주의3	ES-I.3 BD, SD단계-1 주의3배경,p12 DW-93-018, SAMGs-Applicability of Establishing Letdown Paths following a severe Accident

주) WOG ERG의 SD : Step Description, BD : Background Document, HLAS : High Level Action Summary, KUDP : Key Utility Decision Point, DW : WOG ERG Maintenance Direct Work Items

특정 운전단계	기술평가내용	적용 EOP단계	참고자료
원자로용기 헤드 배기 필요성 및 조치	주로 수소인 비응축성 가스는 원자로 용기헤드로부터 배기해야 함	E-1, 단계-16.a	E-1 BD, sect-3.2 KUDP, p45 E-1 BD, SD 단계-16, p79
		ES-1.2, 단계-33.b	ES-1.2 BD, sect-3.2 KUDP, p60
	현재의 상태에서 FR-I.3의 어떤 조치사항이 적용될 수 있나?		FR-I.3 BD ES-0.2 BD Generic Issues RCS Voiding
격납용기배수조 pH	재순환배관 및 기타 격납용기 물질의 Chloride-induced 응력부식	E-1, 단계 -20.a	E- BD, SD 단계-20, p86
		ECA-1.1, 단계-38	ECA-1.1 BD, SD 단계-38, p83
		ECA-3.1, 단계-40.b	ECA-3.1 BD, SD 단계-40, p141
		ECA-3.2, 단계-34.b	ECA-3.2 BD, SD 단계-34, p-135
		ES-1.2, 단계-33.b	ES-1.2 BD, SD 단계-33, p136
	방사성옥소의 배수조 물속 유지		NSAL-93-16, Rev1(10/04/1993), Containment Spray System Issues WOG Standard T/S, B.3.6.7, Spray Additive System WH Standard Information Package NUREG-800, SRP (1988)
격납용기 배수조 수위 및 방사능	격납용기 침수에 대비하여 오염수가 격납용기 외부탱크로 이송되어야만 하는가?		FR-Z.2 BD, Sect-2 개요, p2
			FR-Z.2 BD, Sect-3.1 HLAS, p3
			FR-Z.2 BD, Sect-3.2 KUNP, p5
			FR-Z.2 BD, SD 단계-1, p7
			FR-Z.2 BD, SD 단계-2, p8
		FR-Z.2, 단계-3	FR-Z.2 BD, SD 단계-3, p9-10
			WOG generic SAMG, Computational Aid CA-5 Containment Water Level & Volume, and associated BD
격납용기 방사선준위	FR-Z.3의 조치외에 격납용기 고방사 선에 대처하기 위해 어떤 조치가 요구되는가?		FR-Z.3 BD, Sect-2 개요, p2
			FR-Z.3 BD, Sect-3.1 HLAS, p3
			FR-Z.3 BD, Sect-3.2 KUNP, p5
			FR-Z.3 BD, SD 단계-2, p8
		FR-Z.3, 단계-3	FR-Z.3 BD, SD 단계-3, p10
			NSAL-93-16, Rev.1(10/04/1993), Containment Spray System Issues NUREG-800, SRP (1988) WOG Generic SAMG Training Materials
	격납용기내 계측기에 대한 집적 선량이 10^6 (Rad)에 접근하고 있는가?	CV비정상; CV방사선〉 105 R/hr	ERG ExVo1, Generic Issues, Instrumentation, p21
의도적인 방출전 소외선량평가	소외피폭을 최소화하고 가능하다면 10CFR20 제한치 만족을 확인	E-1, 단계-15.c	E-1 BD , SD 단계-15, p77-88
		ECA-3.3, 단계-30.a	ECA-3.3 BD, SD 단계-30 지식, p94
			ES-3.2 BD sect-3.1 HLAS, p15
			ES-3.2 BD sect-3.2 KUDP, p16
			ES-3.3 BD sect-3.1 HLAS, p14-15
			ES-3.3 BD sect-3.2 KUDP, p16
		ES-3.3, 단계-1주의2	ES-3.3 BD, SD 단계-1 주의2, p19
			ES-3.3 BD, SD단계-9 참조, p44-45
			ES-3.3 BD, SD 단계-9, p46-47

주) WOG ERG의 SD : Step Description, BD : Background Document, HLAS : High Level Action Summary, KUDP : Key Utility Decision Point, DW : WOG ERG Maintenance Direct Work Items

특정 운전단계	기술평가내용	적용 EOP단계	참고자료
SG 과충수	SG수위가 상부탭에 도달하여 해당 주증기관에 물이 유입되었는가? 기기 및 구성품의 손상은 없는가? 해당 SG로부터 증기를 방출하기 전에 어떤 조치를 취해야만 하는가?		NRC Generic Letter 81-28, Steam Generator Overfill
		E-3, 단계-39	E-3 BD, SD 단계-39, p159
			E-3 BD, Sect-5, p176
		ES-3.3, 단계-1,주의1	ES-3.3 BD, SD 단계-1 주의 1, p18
		ES-3.3, 단계-9	ES-3.3 BD, SD 단계-9 지식, p47
		ECA-3.3단계30주의1	ECA-3.3 BD, SD단계-30 주의1, p91
			FR-H.3 BD sect-1 개요, p1
			FR-H.3 BD, sect-3.2 KUDP, p6
		FR-H.3, 단계-1,주의	FR-H.3 BD, SD 단계-1 주의 p8
관파열 SG 후속 냉각방법	관파열SG는 제2의 가압기와 같이 작용하며 RCS 감압을 방해한다. 현재의 발전소 상태에 적합한 관파열 SG 후속냉각방법을 선택한다.	E-3, 단계-39	E-3 BD, sect-3.2 KUDP, p44-45
			E-3 BD, SD 단계-39, p159-160
			ES-3.1 BD, sect-5 FAQ, p49
		ES-3.2,단계-9, RNO	ES-3.2 BD, SD 단계-9, p43
고장SG 냉각과 관파열SG 냉각	하나 또는 2개의 SG에서 관파열이 발생했고 관파열되지 않은 나머지 하나의 SG는 고장상태이다. 고장SG 급수에 따른 부정적영향은 관파열 SG로부터 증기방출시의 부정적영향과 비교되어야 한다.	E-3, 단계-14	E-3 BD, sect-3.2 KUDP, p46-47
		ES-3.1,단계-5.c,RNO	ECA-3.1BD, sect-3.2KUDP, p36-38
		ES-3.2,단계-5.b,RNO	ECA-3.2BD, sect-3.2KUDP, p36-37
		ES-3.2,단계14.c,RNO	
		ES-3.3,단계-5.b,RNO	DW-94-14, ECA-3.1 Controlling RCS C/D to Maintain SG Tubes Covered DW-91-012, Multiple Casualties Affecting Both SGs in a 2-Loop Plant DW-95-040, Incorporation of Guidance for Feeding a Hot Dry SG DW-95-045, General Guidance for Feeding a Hot, Dry SG
		ES-3.3,단계14.c,RNO	
		ECA-3.1, 단계-11	
		ECA-3.2, 단계-6	
SGTR+LOCA시 과냉상태 복구와 포화상태복구	관파열SG수위가 포화상태 복구지침서 로 전환을 요구하게끔 과충수 위협에 직면해 있는가? 과충수는 추가적인 방사물 방출결과를 초래하게 된다.	ECA-3.1,단계12.b RNO	ECA-3.1 BD, SD 단계-12, p70-74
고갈SG에 대한 급수재개	고갈SG에 급수재개시 열응력 및 그에 따른 손상	FR-H.5,단계-4 RNO	DW-95-045, General Guidance for Feeding a Hot, Dry SG DW-95-040, Incorporation of Guidance for Feeding a Hot Dry SG WCAP-15104, Evaluation of EDF SG Internals Degradation-Impact of Causal Factors on the WH Models..., Sep. 1998
			NRC GL 97-06, Degradation of SG Internals, December 1997 WOG-97-186, NEI-Sponsored SG Internals Degradation Interim Inspection Guidelines, September 1997
가압기 압력제어기능의 복구	ECA-3.3 절차에 따라 저온정지까지 RCS냉각을 개시할 것인지, 또는 가압기 압력제어기능 복구시까지 기다릴 것인지.	ECA-3.3,단계-22, 참고	ECA-3.3 BD, SD 단계-22 참고, p74-75

주) WOG ERG의 SD : Step Description, BD : Background Document, HLAS : High Level Action Summary, KUDP : Key Utility Decision Point, DW : WOG ERG Maintenance Direct Work Items

특정 운전단계	기술평가내용	적용 EOP단계	참고자료
RCP 상태	밀봉냉각 상실 및 복구후에 RCP 재기동에 따른 손상 가능성	E-3, 단계-36 주의 1	E-3 BD, SD 단계-36, p149-151
			ECA-0.1 BD, sect-2.1 RCP 개요, p9
		ECA-1.1,단계14주의1	ECA-1.1BD,SD단계-14주의1, p35-36
		ECA-2.1,단계32주의1	ECA-2.1BD,SD단계-32주의1, p76-77
		ECA-3.1,단계17주의1	ECA-3.1BD,SD단계-17주의1, p84-85
		ECA-3.1,단계24주의1	ECA-3.1BD,SD단계-24주의1, p106-107
		ECA-3.2,단계11주의1	ECA-3.2BD,SD단계-11주의1, p73-74
		ECA-3.2,단계18주의1	ECA-3.2BD,SD단계-18주의1, p98-99
		ES-0.2,단계1 주의2	ES-0.2BD,SD단계-1주의2, p19-20
		ES-0.3,단계-1주의3	ES-0.3BD,SD단계-1주의3, p11-12
		ES-0.4,단계-1주의3	ES-0.4BD,SD단계-1주의3, p11-12
		ES-1.1,단계-23주의1	ES-1.1BD,SD단계-23주의1, p42-43
		ES-1.2,단계-12주의1	ES-1.2BD,SD단계-12주의1, p87-88
		ES-1.2,단계-19주의1	ES-1.2BD,SD단계-19주의1,p108-109
		FR-I.3,단계-9주의	FR-I.3 BD, SD 단계-9 주의, p24-25
			DW-94-011 : Generic Guidance for Restoration of RCP seal Cooling DW-89-072 : Restarting an RCP after Restoration of Seal Cooling DW-86-030 : RCP Seal Cooling Restoration WCAP-10541, Rev.2, WOG Report, RCP Seal Performance Following Loss of All AC Power, Nov. 1986
수소가연성 및 수소 재결합기 운전 가능성	수소재결합기의 점화원 가능성 높은 수소농도에서 수소재결합기의 운전가능성 CV외부에 설치된 수소재결합기의 누설 가능성	E-1 단계-17.b RNO	E-1 BD, SD 단계-17, p81-81
		ECA1.1,단계37.bRNO	ECA-1.1 BD, SD 단계-37, p81-82
		ECA3.1,단계38.bRNO	ECA-3.1 BD, SD 단계-38, p138-139
		ECA3.2,단계32.bRNO	ECA-3.2 BD, SD 단계-32, p132-133
		ES-1.2,단계31.bRNO	ES-1.2 BD, SD 단계-21, p133-134
		FR-C.1,단계8.bRNO	FR-C.1 BD sect-3.2 KUDP, p8
		FR-I.3,단계17.aRNO	FR-C.1 BD, SD 단계-8, p24-25
장기적 발전소상태	지금 발전소는 장기적 안정 상태에 있다. 초기 사건이나 후속 사건에 근거하여 수리나 장기적운전을 위해 해결해야 할 문제점을 확인하고 평가	E-1, 단계-20.a	E-1 BD, SD 단계-20, p85
		ECA-1.1, 단계-38	ECA-1.1 BD, SD 단계-38, p83
		ECA-2.1, 단계-46.b	ECA-2.1 BD, SD 단계-46, p101
			ECA-3.1 BD, SD 단계-8, p57
		ECA-3.1, 단계-40.b	ECA-3.1 BD, SD 단계-40, p141
		ECA-3.2, 단계-34.b	ECA-3.2 BD, SD 단계-34, p135
		ECA-3.3, 단계-37.b	ECA-3.3 BD, SD 단계-37, p105
		ES-0.2, 단계-21.b	ES-0.2 BD, sect-3.2 KUDP, p16
		ES-0.3, 단계-12.b	ES-0.3 BD, sect-3.2 KUDP, p6
		ES-0.4, 단계-22.b	ES-0.4 BD, sect-3.2 KUDP, p7
			ES-1.2 BD, Sect-1 개요, p2
		ES-1.2, 단계-33.b	ES-1.2 BD, SD 단계-33, p136-137
		ES-3.1, 단계-12.b	ES-3.1 BD, SD 단계-12, p45
		ES-3.2, 단계-16.b	ES-3.2 BD, SD 단계-16, p55
		ES-3.3, 단계-16.b	ES-3.3 BD, SD 단계-16, p59

주) WOG ERG의 SD : Step Description, BD : Background Document, HLAS : High Level Action Summary, KUDP : Key Utility Decision Point, DW : WOG ERG Maintenance Direct Work Items