KAERI/TR-2888/2004

수출전략형 연구로 계측제어계통 설계지침

Design Guide on Instrumentation and Control System
for an Advanced Research Reactor

KAERI

한 국 원 자 력 연 구 소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2004년도 “수출전략형 연구로 계통설계해석” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2004. 12.

주저자 : 김 영 기
공저자 : 정 환 성
최 영 산
류 정 수
박 철

요 약 문

수출연구로의 계측제어계통은 원자로 출력의 자동제어 기능을 수행하고 원자로의 안전성을 위협하는 사고 발생 시 원자로를 안전하게 정지시키기 위한 보호기능을 수행하는 중요한 계통이다. 비록, 수출연구로가 원자력발전소에 비하여 저온저압으로 유지되고 고유의 안전성을 가지고 있다고 하지만 보호 기능이 정상적으로 작동하지 않을 경우는 심각한 방사선 사고로 이어질 수도 있기 때문에 수출연구로의 원자로보호계통은 원자력발전소와 동일한 설계지침을 따라야 한다.

수출연구로의 계측제어계통은 안전등급과 비안전등급 계통으로 크게 나눌 수 있다. 제1정지계통과 제2정지계통으로 구성되는 원자로 보호계통은 안전등급으로 분류하였고 원자로 제어계통을 포함하는 나머지 계통들은 비안전등급으로 분류하였다. 계통등급의 분류는 기존 하나로에서 적용하였던 원칙에 바탕을 두었으나 최근 국제적인 관심사로 형성되고 있는 원자력 안전성 강화 움직임에 보조를 맞추고 또, 하나로 분류체계의 일부 미비점을 보완하기 위하여 안전등급 분류체계를 수정하여 수출연구로에 적용할 예정이다.

하나로의 설계 경험과 지난 10년간의 운전 경험을 바탕으로 새로운 디지털 계측제어개념을 적용하여 자동제어 및 신호처리기술의 성능을 향상하고 아울러 원자로 보호기능의 신뢰도를 높이는데 설계지침의 주안점을 두었다. 제1정지계통은 하나로와 동일 개념의 모터 구동 제어봉 형식을 사용하여 원자로 제어기능과 보호기능을 함께 가지도록 계통을 구성한다. 정상운전 시에는 모터 구동에 의하여 원자로 출력제어에 사용하고 정지 시에는 마그네틱 클러치 전원을 차단시켜 제어봉이 자유낙하하도록 한다. 제2정지계통은 중수를 신속하게 배수시켜 부반응도를 삽입하는 원리를 사용하여 제어봉과의 하드웨어 다양성을 적용하고 또, 제1정지계통 정지논리는 PLC와 같은 디지털 개념을 적용하여 구현하고 제2정지계통은 계전기 회로를 사용하도록 함으로써 보호기능의 신뢰도를 향상시킬 수 있도록 한다.

원자로 보호계통을 제외한 나머지 계측제어계통들은 비안전등급으로 분류하였으나 원자로 제어계통과 공학적 안전설비 제어계통들은 기능의 중요도를 감안하여 안전계통 설계요건들을 선별적으로 적용할 것이다. 원자로 제어계통의 출력제어를 수행하게 될 제어컴퓨터뿐만 아니라 공학적 안전설비 제어기들도 디지털 컴퓨터 개념을 도입하여 현장계측기의 수량을 최소화한다. 원자로 보호계통을 제외한 플랜트의 모든 제어컴퓨터들을 통신망으로 연결하고 상호 감시 및 보고 기능을 강화시켜 연구로 운영의 편이성을 향상시킨다.

Abstract

Instrumentation and control system is to regulate reactor power automatically and to perform protective functions to shut down the reactor safely in case of an accident threatening the reactor safety. If the protective action would not be properly activated, an abnormal situation might be connected to a significant radiation hazard, even though a research reactor is maintained at low pressure and low temperature condition. For this reason, the reactor protection system for the advanced research reactor will be designed as per the safety design requirements for nuclear power generating stations.

System classification are suggested based on the HANARO concept. Considering an international growing tendency toward nuclear safety enhancement and supplement of the existing one, a revised classification system will be applied to the components, structures and systems for the advanced research reactor. The reactor protection system is classified to the safety class and the others are non-safety grade.

Based on the HANARO experience, the design guide aims at the improvement of reliability of safety and achievement of automatic control and signal processing by digitalization. To satisfy functional diversity requirement, the first shutdown system adopts a concept of control rod with a stepping motor while the second shutdown system uses D_2O dump system. The first shutdown system will use a PLC-type digital logic processor but the second shutdown system will use a conventional relay logic for the concept of equipment diversity. The reactor protective function for the advanced research reactor has a higher reliability by using two different shutdown mechanism.

Although most of the instrumentation systems, except the reactor protection system are classified to non-safety grade, some systems like reactor regulation system or engineered safety feature actuation system selectively adopts the safety design requirements in order to ensure the safety-related function. All of the system control will be accomplished by a digital computer techniques and they are networked all together for comprehensive data display and management.

목 차

1.0 개론 ---------- 1

2.0 계측제어계통의 분류 ---------- 2
2.1 원자로 보호계통 ---------- 3
2.2 원자로 제어계통 ---------- 3
2.3 플랜트 컴퓨터계통 ---------- 4
2.4 공학적 안전설비 계통 ---------- 5
2.5 방사선 감시계통 ---------- 6

3.0 계측제어계통 설계기준 ---------- 6
3.1 안전성 설계요건 ---------- 6
3.2 적용규격 및 표준 ---------- 14
3.3 계통등급의 분류 ---------- 16

4.0 계통별 설계지침 ---------- 27
4.1 제1정지계통 ---------- 27
4.2 제2정지계통 ---------- 45
4.3 원자로 제어계통 ---------- 55
4.4 제어컴퓨터 계통 ---------- 59
4.5 공학적 안전설비 제어계통 ---------- 60

4.0 결론 ---------- 64

5.0 참고문헌 ---------- 65

그 림 목 차

그림 2-1 수출연구로 계측제어계통 구성도 ---------- 2
그림 3-1 수출연구로 보호계통의 설계기준과 적용규격 ---------- 16
그림 3-2 등급분류체계 및 상관관계 ---------- 21
그림 4-1 제어봉 구동장치의 설계 등급분류 ---------- 27
그림 4-2 동시성 정지논리 개념도 ---------- 36
그림 4-3 제1정지계통 채널 정지 논리회로 ---------- 38
그림 4-4 제1정지계통 2/3 Logic ---------- 39
그림 4-5 제1정지계통 응답시간 지연요소 ---------- 40
그림 4-6 제2정지계통 채널 정지 논리회로 ---------- 50
그림 4-7 제2정지계통 2/3 Logic ---------- 51
그림 4-8 제2정지계통 응답시간 지연요소 ---------- 52
그림 4-9 출력제어 알고리즘의 구성 ---------- 56
그림 4-10 원자로 출력제어 개념도 ---------- 58
그림 4-11 수출연구로의 컴퓨터 계통 구성도 ---------- 60
그림 4-12 비상환기계통 작동 논리도 ---------- 63

표 목 차

표 3-1 IEEE-279와 IEEE-603의 중요 설계요건 비교표 ---------- 7
표 3-2 수출연구로 원자로보호계통 설계에 적용될 규격 ---------- 15
표 3-3 수출연구로 계통, 구조물 및 기기의 등급 분류 ---------- 21
표 4-1 가상사고와 정지변수와의 관계 ---------- 34
표 4-2 제1정지계통 계측채널별 응답시간 요건 ---------- 41
표 4-3 제1정지계통 계측채널별 허용오차 요건 ---------- 42
표 4-4 제2정지계통 계측채널별 응답시간 요건 ---------- 52
표 4-5 제2정지계통 계측채널별 허용오차 요건 ---------- 53

1.0 개론

연구용 원자로는 활용 목적에 따라 노심의 형태와 시설계통의 규모면에서 크게 차이가 날 수 있지만, 타 계통과 달리 원자로의 제어와 보호를 목적으로 하는 계측제어계통은 비록 시설계통이 다르다 할지라도 설계개념은 대체적으로 비슷하다. 원자로의 출력제어 개념과 제어계통의 구현, 원자로 보호요건을 만족시키기 위한 안전성 설계방안 그리고 제어 및 보호계통 외에 종사자와 일반 대중의 안전을 최대한 보장하기 위한 연계계통 등 현재 추진 중인 수출전략형 연구로의 기본설계방향을 제시하였다. 그러나 아직 원자로뿐만 아니라 타 기계 공정계통들에 대한 설계개념이 확정되지 않은 상태이므로 향후 이들의 설계방향에 따라 일부 계측제어계통의 설계도 변경될 가능성은 있다고 보아야 하고 수출 대상국의 요구조건 또는 인허가 요건 등에 따라서도 수정되어야 할 가능성이 상존하기 때문에 계통설계 추진방향과 전략을 효과적으로 수립하여야 한다.

수출연구로의 계측제어계통은 하나로의 설계기술과 설계개선 노력을 통한 성능향상 그리고 지난 10년간 축적된 원자로 운전경험에 우리 연구소에서 활발하게 추진하고 있는 최신의 디지털 제어기술을 접목하여 원자로 안전성은 물론 최고의 신뢰성과 안정성을 보장할 수 있도록 설계한다.

기존 하나로 계측제어계통의 취약점을 우선적으로 살펴보고 이에 대한 설계변경과 개선내용을 수출연구로에 반영하는 것이 가장 효과적이다. 수출연구로 계측제어계통에서 가장 우선적으로 반영하여야 할 하나로와 다른 중요 설계개념은 수압실린더를 이용하는 정지봉 구동장치의 변경과 제2정지계통의 구현이다.

수압실린더와 피스톤 개념을 사용하는 하나로의 정지봉계통은 기능적인 결함보다도 유지보수의 불편함 때문에 많은 어려움을 겪고 있다. 정지봉을 수압실린더 개념으로 채택한 이유 중의 하나는 스텝핑모터를 이용하는 제어봉 구동방식과 다른 형태의 구동장치를 적용하기 위함이었다. 그러나 수출연구로에서는 하나로와 달리 제2정지계통을 채용할 예정이므로 제어봉과 정지봉을 따로 두지 않고 2개의 기능을 하나의 장치에 통합하는 개념으로 추진하는 것이 바람직하다. 즉, 마그네틱 클러치 등을 이용하여 제어봉의 상부와 하부를 연결하고, 정상운전 시에는 상하부가 결합된 상태에서 제어봉의 기능을 수행하고 원자로 비상정지 시에는 마그네틱 클러치 전원을 차단하여 제어봉 하부가 자유낙하하도록 구동장치를 구성하는 것이다. 즉 제1정지계통은 제어봉의 자유낙하를 이용하고 제2정지계통은 중수배수계통을 이용하는 것으로 설계하면 안전성 측면에서 현재의 하나로보다 더 향상된 설계개념이라 할 수 있을 것이다. IAEA의 안전계통 설계규격에서도 독립적인 제2정지계통의 필요성을 권고하고 있다.[1] 호주의 RRR 등, 신형연구로에서도 대부분 제2정지계통을 갖추는 것이 세계적인 추세이므로 우리의 수출연구로에서도 중수 배수를 이용하는 제2정지계통을 갖춘다고 가정하고 이를 바탕으로 계측제어계통의 설계방향을 제시하였다.

2.0 계측제어계통의 분류

수출연구로의 계측제어계통은 원자로 보호계통, 원자로 제어계통, 제어컴퓨터 계통, 중성자 계측계통, 공학적 안전설비 제어계통, 공정계측계통 및 방사선 감시계통 등으로 구성된다. 계측제어계통 역시 타 계통과 마찬가지로 원자로의 보호기능을 수행하는 안전등급 계통과 일반적인 계측제어기능을 담당하는 비안전 계통으로 구분된다. 원자로 보호계통은 비정상 상태 발생 시 원자로를 비상 정지시키기 위한 안전등급 계통으로 분류하고 나머지 계측제어계통들은 모두 비안전 계통으로 분류한다. 계측제어계통에는 속하지 않지만 직간접적으로 상호 연결 또는 연계되어 작동되는 제어봉 구동장치, 원자로 관련 구조물, 공정계통 그리고 제어실 등에 대해서도 간략하게 기술한다. 그림 2-1은 수출연구로 계측제어 계통 구성도를 보여주고 있다.

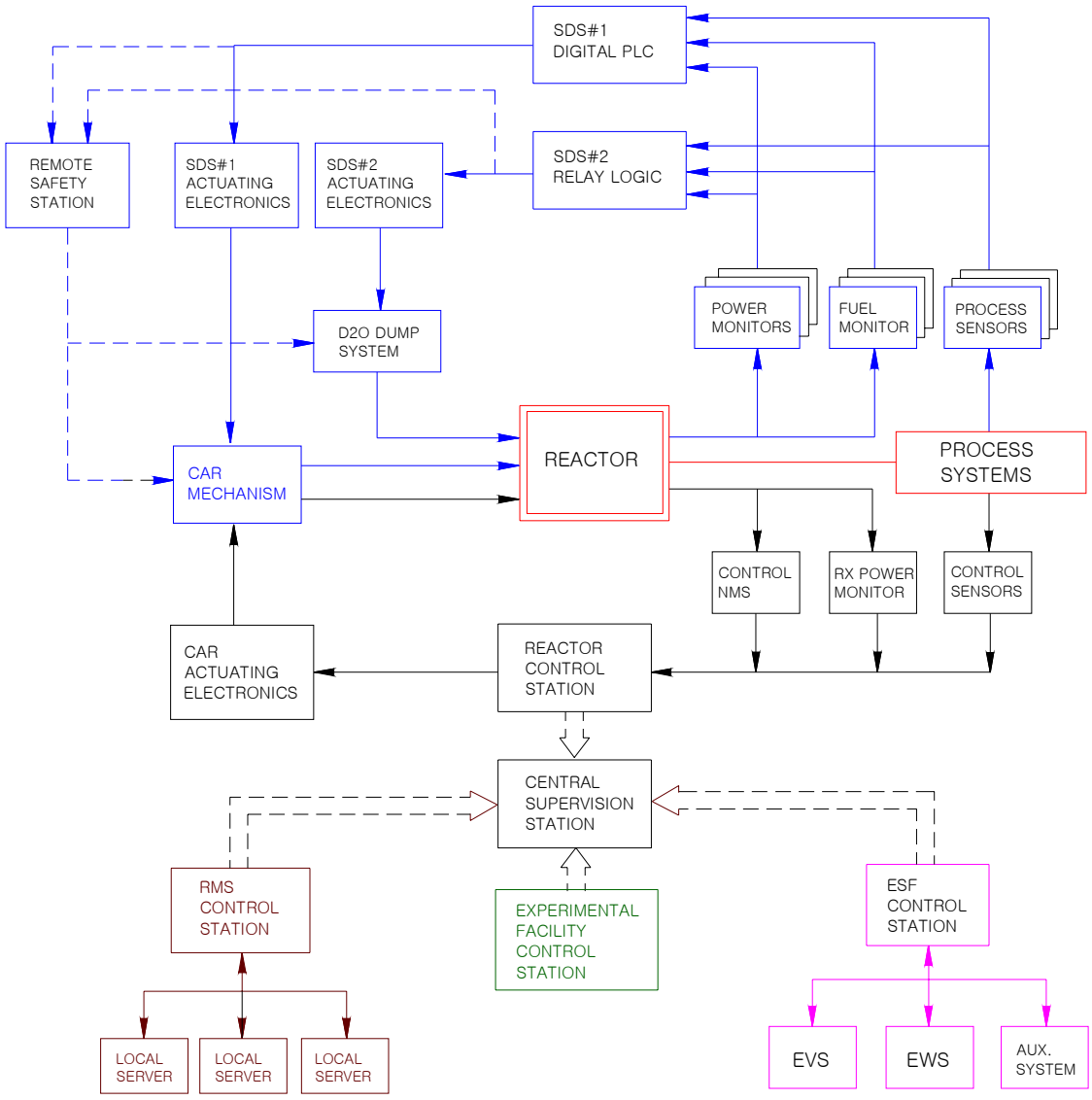


그림 2-1 수출연구로 계측제어계통 구성도

2.1 원자로 보호계통

원자로 보호계통은 계통 또는 기기의 오동작, 또는 외부 요인에 의하여 원자로가 안전운전 영역을 벗어나 사고상태로 발전하는 것을 사전에 방지하기 위하여 원자로를 비상 정지시키기 위한 안전등급 계통이다. 제어봉의 낙하에 의한 원자로 정지는 제1정지계통이 담당하고 중수배수에 의한 원자로 정지는 제2정지계통에 의하여 독립적으로 이루어진다. 현장에 설치되는 계측기기부터 최종 구동장치에 이르는 정지기능과 관련되는 모든 기기들은 안전등급, 내진등급 및 최고의 품질등급으로 설계, 설치, 운영하여 어떠한 설계기준사고 시에도 예정된 비상정지기능이 훼손되지 않도록 설계한다.

안전성 설계요건 중의 하나인 기능의 다양성을 만족시키기 위하여 원자로 보호계통 #1은 PLC를 이용하는 디지털 보호계통 개념을 적용하고 원자로 보호계통 #2는 보호 계전기 논리(Protective Relay Logic)를 이용하는 아날로그 개념을 적용하여 공통원인고장에 대비한다. 안전계통에 사용되는 Class-1E급 디지털 보호계통은 독일의 Siemens사가 일찍부터 개발에 성공하여 상용발전소 또는 연구용원자로 보호계통에 이미 사용 중에 있으나, 우리나라에서는 3년 전부터 안전등급 보호계통의 국산화에 착수하여 2004년 10월 현재 대부분의 기기검증 프로그램을 완료한 상태에 있다. 늦어도 2007년 까지는 상업로 또는 연구로의 안전계통에 적용이 가능할 전망이므로 수출연구로의 설계가 종료되는 시점에서는 국산 디지털 보호계통을 적용할 수 있을 것이다. 국내 기술의 세계화 및 국익 신장 차원에서 수출연구로에서는 국산 디지털 보호계통의 적용에 주안점을 두고 설계에 임하는 것이 바람직할 것이다.

원자로 보호계통은 압력, 온도, 유량, 원자로 출력 등 중요 변수를 감지하는 현장계측기기와 이들로부터의 신호를 받아들여 정지설정값과 비교하고 정지설정값 초과 시 정지논리 신호처리를 담당하는 보호논리처리부, 그리고 물리적으로 원자로를 비상 정지시키는 보호구동장치 제어부 등으로 나누어진다. 원자로 보호계통의 개념설계 내용은 4.1절에 기술하였다.

2.2 원자로 제어계통

원자로 제어계통은 원자로를 이용자의 실험 목적에 따라 요구되는 특정 출력으로 일정하게 유지하고 냉각계통의 변화 등과 같은 외란에 신속하고 안전하게 대응하여 1차적으로 원자로가 정상운전상태를 벗어나지 않도록 제어하기 위한 계통이다. 그러나 원자로 제어계통의 출력제어 기능이 상실되더라도 원자로 보호계통에 의한 안전정지가 보장되기 때문에 원자로 제어계통은 비안전계통으로 분류한다. 원자로 제어계통은 원자로의 출력을 측정하는 출력계측기기와 요구출력과 현재의 원자로 출력을 이용하여 원자로 출력제어 알고리즘을 수행하는 제어컴퓨터부 그리고 실제 원자로 출력을 조절하는 반응도제어장치 제어부 등으로 나누어진다. 비록 원자로 제어계통은 비안전계통으로 분류되지만 원자로 수조 속에 설치되는 제어봉구동장치는 안전계통 및 내진등급으로 분류하여 어떠한 설계기준사고가 발생되더라도 원자로 안전정지 기능의 수행에 장해가

되지 않도록 한다. 그리고 출력계측기기의 설계에 다중성, 다양성 및 독립성 등과 같은 안전성 설계요건을 적용시켜 원자로 출력제어 성능의 신뢰도를 최대한으로 향상시킬 수 있도록 한다.

원자로제어계통에 사용되는 제어컴퓨터는 비안전등급 기기이므로 컴퓨터산업의 발달로 한층 더 기능이 강화된 다양한 형태의 제어기 적용이 가능하다. 하나로를 설계할 당시만 하더라고 기능이 간단한 저급의 PLC만 국산이 가능하였으나 요즈음에는 PLC뿐만 아니라 DCS까지도 고성능 기종이 국내 제작사에 의하여 생산되고 있다. 그러나, 원자로의 출력제어라는 중요한 기능을 수행하여야 하므로 일반 산업체에 적용하는 기종과는 소프트웨어 및 하드웨어 성능을 차별화할 필요가 있다. 최근 연구소를 중심으로 몇몇 국내업체가 공동으로 원자력발전소에 적용하기 위한 DCS를 개발하고 있고 발전소의 급수계통제어와 같은 비안전 기능에 이미 적용되어 운전 중인 상황이다. 수출연구로에서도 수년 후 기능과 성능이 더욱 향상될 새로운 개념의 DCS 개발이 완료되면 이를 원자로제어계통에 적용할 수 있을 것이다.

2.3 플랜트 컴퓨터 계통

수출연구로에 사용되는 여러 가지의 제어컴퓨터들은 하나의 네트워크로 묶어 각 컴퓨터의 중요한 정보를 중앙 제어실과 같은 장소에서 통합 감시할 수 있도록 설계하여야 한다. 수출연구로의 컴퓨터 구성은 그림 2-1에서 보는 바와 같이, 원자로제어계통 컴퓨터, 공학적 안전설비 컴퓨터, 실험시설 제어컴퓨터 그리고 방사선감시계통 제어컴퓨터 등으로 구분된다. 각 계통의 기능은 서로 독립적으로 수행되어야 하고 공통원인고장 시 비정상의 범위를 최소화하기 위하여 제어기능을 직접 수행하는 제어컴퓨터는 상호 통신망 없이 전기적으로, 물리적으로 독립시키는 것이 바람직하다. 그러나, 각 컴퓨터들은 상위 네트워크를 통하여 정보를 공유할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 각 하위 제어컴퓨터의 기종에 관계없이 상호 통신망 구성이 가능하도록 범용의 통신 프로토콜을 적용하여 추후 기종이 변경되더라도 본래 기능의 상실이 없도록 하여야 한다.

제어컴퓨터 계통은 현장계측기기로부터 신호를 받아들여 소프트웨어로 구현되어 있는 출력제어 알고리즘을 수행하고 원자로 출력제어를 위한 적절한 형태의 신호를 현장으로 내보내는 것이 주목적이다. 각종 원자로 관련 공정계통의 상태를 표시하고 필요시 현장기기 제어신호를 발생시키며, 현장에 분산 설치되어 있는 단위 제어기 및 공학적 안전설비 전용 제어기들과의 실시간 통신을 통하여 원자로를 포함한 전체 플랜트가 안정한 상태로 유지되고 있는지 종합적으로 감시하는 중요한 역할을 수행한다. 제어컴퓨터 계통은 원자로 보호기능과 완전히 격리되어 있고 원자로 안전과는 직접적인 관련이 없으므로 비안전계통으로 분류한다.

2.4 공학적 안전설비 제어계통

원자력발전소와는 달리 연구용 원자로의 공학적 안전설비는 연구로의 고유 안전성을 고려하여 비안전등급으로 분류한다. 수출연구로에 적용되는 공학적 안전설비 계통에는 다음과 같은 설비 또는 계통이 포함된다.

1) 원자로 수조
2) 원자로 격납계통
3) 비상보충수 공급계통
4) 비상환기계통

원자로 수조는 구조적 건전성을 유지하는 것으로써 궁극적 열제거원으로서의 역할을 다하기 때문에 별도의 제어장치는 필요 없으나 나머지 계통은 다양한 능동기기를 포함하고 있어 입출력 신호처리를 위한 제어장치가 필요하다. 이들 계통은 원자로가 정상상태로 유지되고 있을 때는 필요하지 않고 냉각수 상실사고 또는 방사선 누출사고 등과 같은 비정상 사고가 발생되었을 경우 작동되어야 하는 안전관련 비상대응장치의 성격이므로 제어컴퓨터와는 기능이 독립된 별도의 제어기를 사용한다. 현장제어장치 및 제어기는 비록 비안전등급으로 분류되지만 그들의 기능 자체는 연구로의 안전과 종사자의 방사능 피폭 등 안전과 관련이 있으므로 배관과 밸브, 덕트와 격리댐퍼 등과 같은 기계장치들은 내진등급으로 분류하여 구조적 건전성은 언제나 유지될 수 있도록 한다.

2.5 방사선 감시계통

방사선 감시계통은 원자로 관련 계통에 포함되지는 않지만 방사선을 효과적으로 감시하는 것은 원자로 및 관련 계통 또는 플랜트 전역에서의 방사능 누출과 종사자의 피폭관리라는 측면에서 중요하게 인식되어야 한다. 방사성 감시계통은 원자로 운전과는 별개의 계통이므로 원자로 제어컴퓨터와는 물리적으로 전기적으로 분리시켜 별도의 디지털 제어방식으로 구성한다. 원자로의 안전과 직접적인 관련이 없기 때문에 안전등급으로 분류할 필요는 없다. 방사선 감시계통은 원자로 건물과 시설의 배치에 따라 다소 차이가 있을 수 있지만 원칙적으로는 원자로건물, 방사성 동위원소 및 조사재료 취급시설 그리고 중성자빔 이용시설 등과 같이 건물 별로 서버를 두는 독립적 개념의 감시계통으로 구성한다. 각 건물별 감시계통은 통신망을 이용하여 중앙 제어컴퓨터와 연결하도록 한다. 이와 같이 분산 제어방식을 채택함으로써 계통의 확장성, 유지보수의 편이성, 건물별 감시기능의 독립성 등과 같은 장점을 가질 수 있다.

3.0 계측제어계통 설계기준

3.1 안전성 설계요건

안전성 설계요건은 안전등급으로 분류한 원자로 보호계통의 설계에 적용한다. 설계 초기단계에서 안전성 설계요건을 결정하고 이를 엄격하게 적용함으로써, 어떠한 환경조건에서도 원자로 보호계통이 고유의 안전기능을 유지할 수 있도록 한다. 연구용 원자로는 목적과 운전환경이 발전용 원자로와 다르기 때문에 설계기준의 적용에서 큰 차이가 있지만 비정상 사고 발생 시 원자로 보호기능을 수행하는 안전계통이라는 관점에서는 크게 다르지 않다. 따라서 수출연구로의 원자로 보호계통은 원자력발전소에 적용되고 안전성 설계기준을 동일하게 적용하여야 한다.

1991년 IEEE-603, “IEEE Standard Criteria for Safety Systems for Nuclear Power Generating Stations” 이 새로이 발행될 때까지는 원자로보호계통의 설계요건은 IEEE 279, “Criteria for Protection Systems for Nuclear Generating Station”를 적용하였다. 물론 하나로의 원자로보호계통 역시 IEEE-279를 적용하여 설계하였다. 2개 규격의 요건들은 크게 다르지 않으나 일부 조항에 차이가 있다. 수출연구로는 최신의 기술로 설계되는 고성능 연구로인 만큼 설계에 적용하는 규격 역시 국제적으로 널리 통용되는 최신의 규격을 적용하는 것이 바람직하다. 현재까지 각국에 널리 알려져 있는 IEEE-279의 중요한 요건들이 새로운 규격인 IEEE-603에 모두 수용되어 있는지를 확인하는 것은 중요한 사안이다. 표 3-1은 2개 규격에 대한 중요 요건들의 비교표이다.

1993년 이후 IEEE-279 대신 원자로보호계통의 설계요건으로 새로이 적용되고 있는 IEEE-603은 기존 IEEE-279보다 독립성, 정보지시 등에서 한층 강화된 요건을 요구하고 있고 인간공학과 신뢰도 등과 같은 새로운 요건을 추가 기술하고 있다. 표 3-1에서 보는 바와 같이 IEEE-603은 IEEE-279에서 요구하였던 모든 설계요건들을 포함하고 있을 뿐만 아니라 더욱 강화된 요건을 추가 기술하고 있으므로 우리가 추진하고 있는 수출연구로는 당연히 새로운 규격인 IEEE-603의 요건에 따라 원자로보호계통의 설계를 추진하여야 할 것이다. IEEE-603에서 기술하고 있는 수많은 설계요건들은 원자로 보호계통의 하드웨어 설계에 관련된 것들이다. 그러나 수출연구로의 보호계통은 디지털 제어기 개념을 도입할 예정이므로 정지논리는 소프트웨어로 처리된다. 이와 같이 안전성에 필수적인 소프트웨어는 IEEE Std 7-4.3.2, “Criteria for Digital Computers in Safety Systems of Nuclear Power Generating Stations” 에서 요구하고 있는 기술요건들과 품질요건들을 모두 만족시킬 수 있도록 설계한다. 수출연구로의 디지털 계측제어계통은 제품 개발 과정에서 하드웨어 및 소프트웨어에 대한 확인과 검증이 성공적으로 완료되어 규제기관으로부터 기승인된 제품을 사용하도록 한다. 이하 절에서는 IEEE-603에서 요구하고 있는 각 설계요건들을 수출연구로 계측제어설계에 어떻게 작용할 것인지에 대하여 항목별로 설명하였다.

표 3-1. IEEE-279와 IEEE-603의 중요 설계요건 비교표

IEEE-279		IEEE-603	
4.1	General Functional Requirements - automatic initiation of protective action	6.1	Automatic Control
4.2	Single Failure Criterion - Any single failure shall not prevent system-level protective action.	5.1	Single Failure Criterion
4.3	Quality of Components and Modules - Minimum maintenance requirements and low failure rates	5.3	Quality
4.4	Equipment Qualification	5.4	Equipment Qualification
4.5	Channel Integrity - Channels shall be designed to maintain necessary functional capability under extremes of conditions.	5.5	System Integrity
4.6	Channel Independence - Electrical isolation and physical separation	5.6	Independence 5.6.1 Between redundant portions of a safety system 5.6.4 Detailed Criteria
4.7	Control and Protection System Interaction 4.7.1 Classification of Equipment 4.7.2 Isolation devices 4.7.3 Single random failure 4.7.4 Multiple failures resulting from a credible single event	5.6	Independence 5.6.2 Between safety systems and effects of DBE 5.6.3 Between safety systems and other systems 5.6.3.1 Interconnected equipment 5.6.3.2 Equipment in proximity 5.6.3.3 Effects of a single random failure

표 3-1. IEEE-279와 IEEE-603의 중요 설계요건 비교표 (계속)

IEEE-279		IEEE-603	
4.8	Derivation of System Inputs - Protection system inputs shall be direct measurement	6.4	Derivation of System Inputs
4.9	Capability for Sensor Checks - On-power checking of operational availability of sensors	6.5	Capability for Testing and Calibration 6.5.1 Checking the operational availability
4.10	Capability for Test and Calibration - Capability shall be provided for testing and calibrating channels and the devices used to derive final output signal	5.7	Capability for Testing and Calibration
4.11	Channel Bypass or Removal from Operation -Capability to remove any channel during operation	6.7 7.5	Maintenance Bypass Maintenance Bypass
4.12	Operating Bypass - The design shall be such that the bypass will be removed automatically whenever permissive conditions are not met.	6.6 7.4	Operating Bypasses Operating Bypasses
4.13	Indication of Bypass - Continuous indication of the bypass in the control room	5.8.3	Indication of Bypasses
4.14	Access to Means for Bypassing - Administrative control for bypassing channel or functions	5.9	Control of Access

표 3-1. IEEE-279와 IEEE-603의 중요 설계요건 비교표 (계속)

IEEE-279		IEEE-603	
4.15	Multiple Set Points -Changeability of set points for assuring safety	6.8	Setpoints
4.16	Completion of Protective Action Once It is Initiated	7.3	Completion of Protective Action
4.17	Manual Initiation	6.2	Manual Control
4.18	Access to Set Point Adjustment, Calibration and Test Points	6.8 5.9	Setpoints Control of Access
4.19	Identification of Protective Action	5.11	Identification
4.20	Information Read-Out	5.8	Information Display 5.8.1 Displays for manually controlled actions 5.8.2 System status indication 5.8.3 Indication of bypass 5.8.4 Location
4.21	System repair	5.10	Repair
4.22	Identification	5.11	Identification
		5.12	Auxiliary features
		5.13	Multi-unit station
		5.14	Human factors consideration
		5.15	Reliability
		5.16	Common cause failure criteria

(1) 단일고장기준(5.1 Single-failure criterion)

단일고장기준이라 함은 어떠한 고장이 다른 채널 또는 계통의 고장으로 확대되지 않고 자체의 고장으로 종결될 수 있도록 설계하는 것이다. 원자로 보호계통의 논리채널을 단 1개의 채널로 구성한다고 가정하였을 경우, 해당 채널 내 보호동작을 수행하는 어떤 기기가 고장났을 경우는 원자로 비상정지기능이 발휘되지 않을 수도 있다. 이와 같이 보호논리채널을 1개 채널로 설계하는 것은 단일고장기준을 위배하는 것이 된다. 단일 기기의 고장이 발생하더라도 계통의 보호기능이 상실되지 않도록 하기 위해서는 보호논리채널을 다중화시켜야 한다. 다중화하더라도 공통원인고장으로 인한 2개 이상 채널기기의 동시 고장 가능성이 있으므로 기기의 다양성, 기능의 다양성 등을 설계에 고려하여야 한다. 다중 채널에 공급하는 전력계통을 독립적으로 구성하는 것 역시 단일고장기준을 만족시키기 위한 중요한 설계 수단이라고 할 수 있다.

단일고장기준을 만족시키기 위한 대표적인 설계수단은 다중성(Redundancy), 다양성(Diversity), 독립성(Independence), 동시성(Coincidence) 등을 들 수가 있다. 이와 같은 설계수단은 안전등급 계측제어설계에 핵심적 설계요건으로써 전 세계 대부분의 상업용 발전로에서 적용하고 있고 우리의 수출연구로에서도 반드시 적용하여야 하는 절대적인 설계요건이다. 디지털 컴퓨터계통을 적용하는 경우에 소프트웨어의 공통원인고장을 방지하기 위한 설계요건을 적용하여야 하는데 이에 대해서는 IEEE-7-4.3.2에 상세하게 기술되어 있다. 수출연구로는 하드웨어뿐만 아니라 소프트웨어의 검증이 완결된 제품을 구입하여 적용할 예정이므로 소프트웨어 설계요건에 대해서는 상세하게 언급하지 않을 것이다. 단일고장기준에 대한 자세한 설계구현방법 등에 대해서는 IEEE-379에서 규정하고 있다.

(2) 보호동작의 완료(5.2 Completion of protective action)

어떤 원인에 의하여(비록 그것이 오동작에 의한 것이라고 하더라도) 수동 또는 자동으로 보호동작이 시작되었다면 반드시 그 작동은 종결될 때까지 진행되도록 설계하여야 한다. 그리고 다시 보호계통을 정상상태로 원상복구시키기 위해서는 운전원의 신중하고 절차에 따른 조치가 뒤따라야만 가능하도록 설계하여야 한다. 정지봉이 낙하하는 중간에 정지조건이 해제되었다고 하여 낙하동작이 중단되거나 원래의 정상상태로 되돌아간다면 큰 혼란이 야기될 것이고 안전성 관점에서도 바람직하지 않다.

수출연구로는 제어봉의 낙하를 이용하는 제1정지계통과 중수배수를 이용하는 제2정지계통이 있는데 정지논리에서 최종 정지신호가 발생되면 계전기가 소자(de-energized)되고 운전원이 정지리세트 스위치를 작동시키기 전까지는 계전기가 다시 여자(energized)되지 않도록 설계논리를 구성하여야 한다. 최종단 계전기가 여자되지 않는 한 즉, 운전원이 정지 리세트 스위치를 작동시키지 않는 한, 보호계통은 계속 정지상태를 유지하기 때문에 보호동작이 중단되거나 정상상태로 되돌아가는 일은 발생되지 않는다.

(3) 품질(5.3 Quality)

안전등급기기는 최소의 보수 및 낮은 고장률을 가져야 한다. 하나로 설계 당시부터 10 CFR 50 App.B 또는 ASME NQA-1 등의 국제표준규격을 적용한 품질보증체계를 유지하고 있기 때문에 수출연구로 역시 이와 동등한 풀질보증체계를 가져야 한다. 그러나 품질보증체계는 조직 또는 행정적인 요소가 많이 반영되고 있는데 나라별로 인식의 차이가 있을 수 있기 때문에 수출연구로에 적용하는 품질보증체계는 수출국이 결정되었을 경우 해당국과 협의를 통하여 결정하는 것이 바람직하다. 특히, 최근 IAEA에서는 ANSI/ANS-15.8, “Quality assurance program requirements for research reactor” 를 통하여 연구용원자로에 대한 품질보증 규격을 새로이 발표하였다. 전반적인 체계는 앞서 기술한 상업로와 크게 다르지 않으나 연구용원자로의 특성을 감안하였다는 것이 다르다. 수출연구로에서는 어떠한 품질보증체계를 따르겠다는 것을 미리 정하지 말고 2종류의 체계를 모두 적용할 수 있도록 준비만 하고 최종적으로 수출 대상국이 결정되면 상대국과 협의를 거쳐 최종 선택하는 것이 바람직한 방향이 될 것이다.

(4) 기기검증(5.4 Equipment qualification)

안전등급 계측제어기기들은 IEEE-323, IEEE-344, IEEE-627 및 IEEE-7-4.3.2 등에서 규정하고 있는 기기검증요건을 만족시켜야 한다. 일부 패널 등을 제외한 대부분의 계측기들은 제작사가 이미 기기검증을 완료한 제품을 기기검증보고서와 함께 제공하기 때문에 설계자들은 기기검증 사양을 확인하고 물건을 구입하기만 하면 된다. 그러나 여러 종류의 계측기기들이 장착되는 패널인 경우는 적절한 기기배치설계를 하여야 하고 실제 내진검증시험을 거쳐야 한다. 하나로의 경우에도 원자로보호계통 및 DC 배전계통 패널들을 90년대 초반에 국내에서 내진검증시험을 실시하여 현장에 설치하였기 때문에 국내에서 기기검증을 수행하는데 예상되는 문제점은 없다.

수출연구로의 제1정지계통 및 제2정지계통에 사용되는 모든 계측기들은 위에서 기술한 규격의 검증요건에 따라 내환경 및 내진검증을 실시하여야 하고 패널들은 내진검증을 실시하여야 한다. 패널의 내진시험은 내진시험용 모의패널을 제작하여 수행한다. 내진 또는 내환경시험에 사용된 계측기들은 재사용 하지 않도록 규정하고 있기 때문에 고가의 실제 계측기를 시험에 사용할 수가 없다. 따라서 시험패널은 실물과 동일한 조건으로 제작하되 그 속에 장착되는 계측기는 형태와 무게중심 등을 실물과 동일하게 제작한 모형(dummy)을 사용한다. OBE(Operating Basis Earthquake) 또는 SSE(Safe Shutdown Earthquake)에 해당하는 지진입력조건에서 각 모형이 설치되어 있는 지점에서의 가속도를 기록하고 실제 해당 기기의 내진검증보고서에 나타나 있는 최대 가속도 이하임을 비교 증명하는 방법으로 내진검증을 수행하면 된다. 계측제어패널들은 “mild zone”으로 구분되는 제어실 내에 설치되기 때문에 내환경검증은 수행할 필요가 없다.

(5) 계통 건전성(5.5 System integrity)

안전계통은 설계기준에 의하여 규정되는 모든 조건에서 안전기능을 수행할 수 있도록 설계하여야 한다. 검토되지 않은 안전성 문제가 발생되지 않도록 사고해석 분야와의 긴밀한 협조체제 하에서 원자로보호계통을 설계하고 구현하여야 한다.

(6) 독립성(5.6 Independence)

안전계통 설계에서 가장 중요한 설계요건 중의 하나이다. 독립성은 안전계통 채널간의 독립성과 비안전계통과의 독립성으로 크게 나눌 수 있다. 독립성을 구현하기 위한 방법은 전기적 독립성과 물리적 독립성이 있다. 전기적 독립성은 다중 채널에 필요한 전력을 별도의 전력설비를 통하여 공급하는 것이고 또, 비안전계통으로 전기신호를 내보낼 때 반드시 격리증폭기(Isolation amplifier)를 거치도록 하여 외부로부터의 비정상적 전기신호가 안전계통으로 전파되지 않도록 하는 것 등을 들 수 있다. 물리적 독립성은 인접한 계통 또는 기기들과 물리적으로 일정 거리 이상 이격시켜 독립성을 확보한다. 만약 설치 현장의 특성상 이격거리 확보가 곤란할 경우는 격벽(barrier)을 설치하여 물리적 독립성을 만족시키도록 한다.

수출연구로 계측제어에서의 독립성은 다음과 같은 방법으로 구현한다.

- 채널별 독립된 케이블 트레이를 사용하여 전선을 포설한다.
- 동일 채널이라 하더라도 전기신호의 특성에 따라, 즉, 아날로그신호, 접점신호 그리고 전력신호 등에 대하여 각각 독립된 케이블 트레이를 사용한다.
- 안전등급 계측기들은 인접한 계측기들과 최소 1.5미터 이상 이격시켜 설치한다.
- 다중 채널에 공급되는 전력은 채널별로 독립된 무정전 전원공급장치를 사용하여 공급한다.
- 외부로 아날로그 신호를 전송할 필요가 있는 계측기들은 기기 구매시방서에 격리증폭기 추가 요건을 기술하여 제작사가 물건과 함께 공급하도록 한다.

(7) 시험 및 교정(5.7 Capability for testing and calibration)

안전계통 계측기들은 원자로가 정지뿐만 아니라 운전 중일 때에도 계통의 안전기능의 손상없이 시험 및 교정이 가능하도록 설계하여야 한다. 수출연구로의 경우 3개의 다중 채널로 보호계통을 구성할 예정이므로 하나의 채널이 시험 중일 경우에는 1 out-of-2 논리에 의하여 보호동작이 수행되도록 설계하여야 한다. 즉, 한 개 채널이 시험 중일 때 해당 채널은 이미 정지되어 있는 상태로 인식되도록 보호논리를 설계하여야 한다. 따라서 나머지 2개 채널 중 또 다른 1개 채널이 동작되면 원자로는 정지되도록 설계하여야 한다는 의미이다.

(8) 정보 지시(5.8 Information displays)

플랜트의 안전운전을 위하여 정보의 지시는 매우 중요한 사항이다. 특히 안전계통의

경우는 제어실에서 항상 계통의 상태가 계속적으로 지시되고 파악되어야 한다. 수출연구로의 제어실에서는 다음과 같은 정보들이 지시되도록 설계하여야 한다.

- 정지변수의 현재 지시값
- 정지변수의 작동 상태
- 채널별 정지상태
- 계통 정지상태
- 채널 또는 기기의 우회상태
- 특정 정지변수의 우회상태

(9) Control of access

적절한 행정적인 절차에 따라 안전계통 기기에의 접근이 가능하도록 설계하여야 한다. 안전계통 정지변수 설정값의 변경 또는 보호논리의 설계변경 등과 같은 업무가 가능하도록 계통을 설계하여야 한다. 단, 이와 같은 계통에의 접근은 반드시 미리 정해진 절차에 따라 체계적으로 수행되도록 문서로 규정하여야 할 것이다.

(10) 수리(5.10 Repair)

안전계통은 고장상태를 적기에 파악하여 조정, 수리 또는 교체가 쉽게 이루어질 수 있도록 계통을 설계하여야 한다.

(11) 구분(5.11 Identification)

안전계통의 기기 및 전선 등은 플랜트 내 어느 곳에서라도 쉽게 구분이 가능하도록 표시되어야 한다. 안전계통 내 다중 채널간의 구분도 필요하고 비안전계통과의 구분 역시 명확하여야 한다. 앞서의 독립성 요건에 따라 비안전계통 기기들과의 물리적 격리가 되어 있지만 안전계통의 기기라는 표식이 단위 계측기별로 추가되어야 한다. 안전계통 내 다중 채널들 간의 표식은 전선 또는 케이블 트레이 등에 색깔로서 구분하도록 한다. 물론 각 계측기에는 별도의 표식판을 부착하여 비안전계통의 기기들과 구분이 가능하도록 한다.

(12) 보조계통(5.12 Auxiliary features)

보조계통에 대한 설계요건은 연구로와 상업로가 가장 크게 다른 점 중의 하나이다. 상업로인 경우 공학적 안전설비 등과 같은 보조계통은 대부분 안전등급으로 분류되어 안전계통의 요건을 대부분 따라야 하지만 연구로의 경우는 고유의 안전성 특성에 따라 발전로와 같은 공학적 안전설비가 요구되지 않는다. 비상환기계통 또는 비상보충수 계통 등과 같은 공학적 안전설비 설비가 연구로에도 적용되기는 하지만 발전로와 같은 등급을 적용할 필요는 없다. 따라서 연구로의 보조계통에 대한 설계요건 적용은 발전로와 다르게 적용하여야 한다. 안전계통에 필요한 전력설비들은 발전로와 같이 안전등급

으로 분류하여 IEEE-603에서 요구하고 있는 설계요건들을 적용하지만 그 외 나머지 보조계통에 대해서는 안전성 설계요건의 적용을 강제할 필요는 없다. 그러나 공학적 안전설비의 성격을 고려하여 일부 설계에 안전성 설계요건을 선별적으로 작용하여 기능의 신뢰도를 향상시키는 노력은 고려해 보아야 할 것이다.

(13) Muli-unit station

하나의 부지에 여러 호기의 상업로가 건설될 경우 안전계통 기능의 손상 또는 저해없이 동시에 수행할 수 있다면 건물, 계통 또는 기기들을 공유할 수 있도록 하는 요건으로써 발전용 원자로와는 다른 연구로의 특성을 고려할 때 연구로에는 적용되지 않는 요건이다.

(14) 인적요소의 고려(5.14 Human factors consideration)

하나로 설계 당시와 달라진 설계요건 중의 하나이다. 최근 인간공학에 대한 관심이 높아지면서 새롭게 원자력 발전소 설계에 도입된 설계요건 중의 하나이다. 운전원의 능력이 점차 중요한 요소가 되면서 제어실에서 운전원이 여러 가지 상황에 적절하게 대처할 수 있도록 인간공학적 설계가 강화되고 있는 추세이다. 연구로의 경우에도 제어실과 운전원의 기능은 근본적으로 발전로와 크게 다르다 할 수 없으므로 수출연구로의 계측제어설계에서도 인간공학설계를 충분히 고려하여야 할 것이다.

(15) 신뢰도(5.15 Reliability)

안전계통 계측제어계통의 신뢰도 목표값을 설계 초기에 결정하여야 한다. 결정된 신뢰도 목표값을 기준으로 하여 설계가 종료되기 전까지 신뢰도 분석을 수행하여 목표값을 만족시키고 있는지를 증명하여야 한다. 만약 신뢰도 목표값을 만족시키지 못할 경우에는 신뢰도를 향상시키기 위한 설계 변경을 실시하여야 한다. 계통 설계에 대한 신뢰도 분석 지침은 IEEE-352와 IEEE-577에 상세하게 기술되어 있고 디지털 컴퓨터의 소프트웨어에 대한 신뢰도 분석 지침은 IEEE-7-4.3.2에 나타나 있다.

(16) 공통원인고장 기준(5.16 Common cause failure criteria)

공통원인고장이 발생하더라도 안전기능의 상실 없이 플랜트 파라미터는 정상상태를 유지할 수 있도록 설계하여야 한다. 공통원인고장에 대한 설계 요건은 IEEE-379에 기술되어 있고 소프트웨어에 대한 공통원인고장 설계기준은 IEEE-7-4.3.2에 기술되어 있다.

3.2 적용규격 및 표준

연구용 원자로인 경우는 국내뿐만 아니라 세계적으로도 표준화된 기술기준이 존재하지 않아 국가별로 차이가 많고 또, 원자로의 목적과 용도에 따라 설계기준이 서로 다르다. 국제원자력기구(IAEA)와 ANSI/ANS 규격에서 연구로에 대한 일반적 기술지침을

발행하였으나 계측제어계통에 대한 전문적인 규격은 존재하지 않는다. 앞서 언급한 바와 같이 원자로 보호계통은 기능적인 측면에서 발전로와 큰 차이가 없으므로 수출연구로의 원자로 보호계통은 그림 3-1과 같이 발전로에 적용하고 있는 규격을 준용한다. 원자로 보호계통 및 계측제어계통에 적용되는 중요 규격은 표 3-2와 같이 요약할 수 있다(설계 착수 시점에서의 유연성을 위하여 규격의 발행연도는 별도 표기 않음).

표 3-2. 수출연구로 원자로보호계통 설계에 적용될 규격

연번	표준 및 규격	제목	비고
1	IEEE-603	Criteria for Safety Systems for Nuclear Power Generating Stations	발전로 하드웨어 설계
2	IEEE-7-4.3.2	Criteria for Digital Computers in Safety Systems of Nuclear Power Generating Stations	발전로 소프트웨어 설계
3	IAEA Safety Series No 35-S1	Code on the Safety of Nuclear Research Reactors : Design	연구로 안전계통 설계기준
4	ANSI/ANS-15,15	Criteria for the reactor safety systems of research reactors	연구로 안전계통 설계기준
5	IEEE-308	Class 1E Power System for Nuclear Power Generating Stations	발전로 안전등급 전력계통 설계
6	IEEE-323	Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations	발전로 안전등급 기기검증
7	IEEE-338	Periodic Testing Nuclear Power Generating Stations Safety System	발전로 안전계통 주기적 시험기준
8	IEEE-344	Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations	발전로 안전등급 기기 내진검증
9	IEEE-352	General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety Systems	발전로 안전계통 신뢰도 분석
10	IEEE-379	Application of the Single-Failure Criterion to Nuclear Power Generating Station	발전로 단일고장기준의 적용
11	IEEE-384	Independence of Class 1E Equipment and Circuits	발전로 안전등급기기 독립성
12	IEEE-420	Design and Qualification of Class 1E Control Boards, Panels and Racks Used in NPGS	발전로 안전등급 패널설계 및 검증
13	IEEE-497	Accident Monitoring Instrumentation for Nuclear Power Generating Stations	발전로 사고 후 감시기기 설계
14	IEEE-577	Requirements for Reliability Analysis in the Design and Operation of Safety Systems for NPGS	발전로 안전계통 신뢰도 분석
15	IEEE-627	Design Qualification of Safety Systems Equipment Used in Nuclear Power Generating Stations	발전로 안전등급기기 설계검증
16	IEEE-1050	Instrumentation and Control Equipment Grounding in Generating Stations	발전로 계측제어기기의 접지

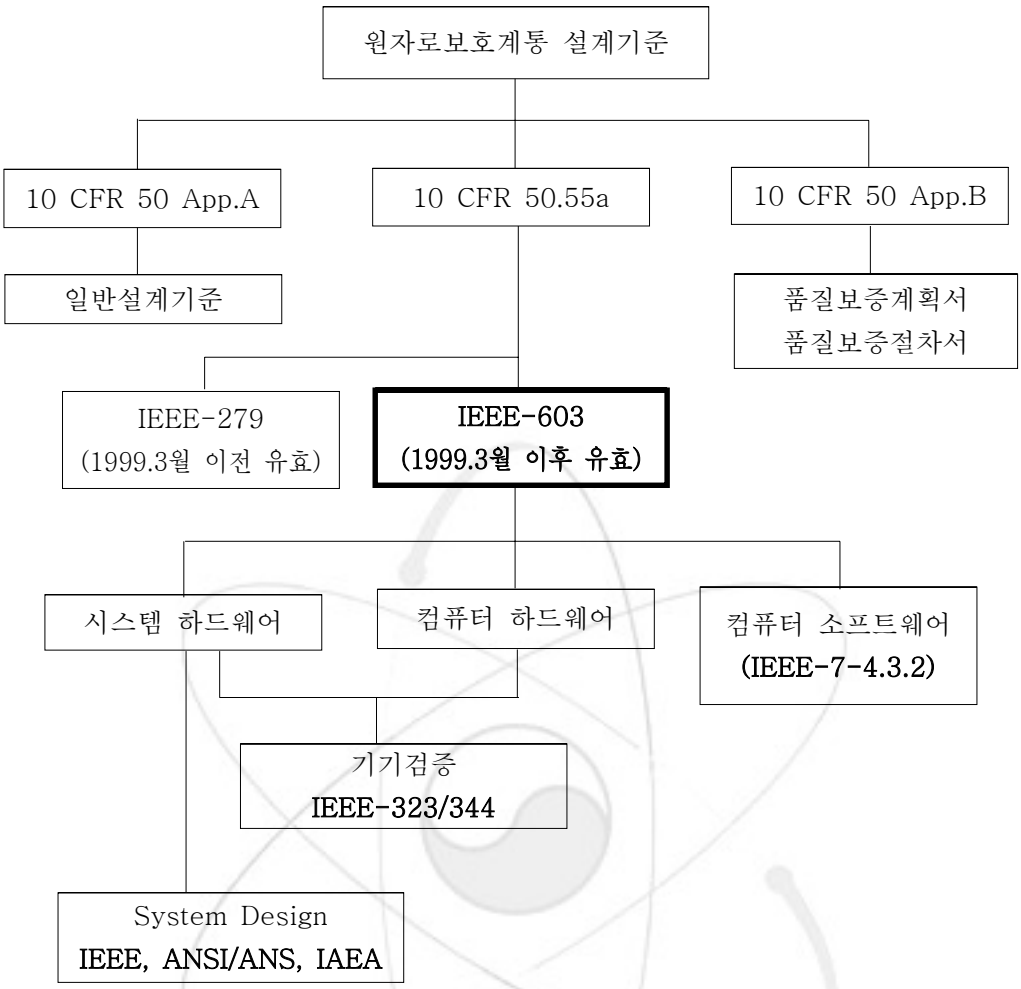


그림 3-1 수출연구로 보호계통의 설계기준과 적용규격

3.3 계통등급의 분류

계통의 등급은 안전성 관련 기능 및 중요도에 따라 안전등급, 내진등급 그리고 품질등급의 3종류의 등급 분류체계를 가진다. 안전등급 계통 및 기기의 기능을 성공적으로 완수하기 위해서는 내진검증과 엄격한 품질기준의 적용이 함께 요구된다. 하나로의 경우는 국제적인 표준규격의 지침과 국내 발전용 원자로의 법규를 적절하게 혼합하여 준용하였다고 할 수 있다.[2] 최근 국내법규도 개정되었고 국내외적으로 반핵단체들의 반핵운동이 조직화되고 있어 점차 원자력 관련 규제요건이 강화되는 추세로 가고 있다. 수출연구로의 설계가 동남아 등 외국으로의 플랜트 수출에 초점이 맞추어져 있다면 안전규제요건의 강화가 필요하다고 판단되며 이를 위해서는 기기, 구조물 또는 계통 등급분류도 하나로보다는 더 보수적이고 엄격하게 조정할 필요성이 있다. 비록, 본 보고서의 취지가 계측제어계통의 설계방침을 기술하는 것이지만 계통등급의 분류는 계측제어

계통뿐만 아니라 수출연구로의 전체 기기, 구조물 및 계통을 대상으로 함께 검토하여 보고자 한다.

3.3.1 안전등급

하나로 인허가 당시 적용하였던 국내 법규는 2002년 확정된 과기부 고시 2002-21, “원자로시설의 안전등급과 등급별 규격에 관한 규정”으로 개정되었다. 고시 2002-21은 ANSI/ANS-51.1-1983(R1988), “Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants”의 안전등급 분류 부분만을 그대로 번역하여 만든 법규로써 원자력발전소에 적용하기 위한 것이다. 원자력발전소와 연구용 원자로는 규모나 시설면에서 크게 차이가 있어 발전로에 적용하기 위한 안전등급 분류를 연구로에 그대로 적용하는 것은 무리가 있다. 수출연구로가 외국으로의 수출을 위한 것이라면 국내 발전로용 법규를 적용할 수는 없을 것이며 발전로용 국제 규격인 ANSI/ANS-51.1을 그대로 적용할 수도 없다. 따라서 국제 규격과 국내법규의 요건 그리고 하나로에 적용되고 있는 현실 등을 종합적으로 고려하여 수출연구로에 고유하게 적용할 수 있는 안전등급 분류체계를 제시하여 보았다.

(1) 안전등급 I (Safety Category I)

안전등급 I은 연구로의 안전성을 보장하기 위하여 1차적으로 필요한 기기, 구조물 및 계통에 적용하는 등급으로써, 발전로 규격인 ASME Sec.III.의 요건을 따라야 한다. 안전등급 I로 분류된 기기 또는 계통은 정상운전조건뿐만 아니라 설계기준사고 조건 하에서도 정상적으로 본래의 기능을 유지하여야 하며 안전성 규격요건을 만족시켜야 한다. 수출연구로의 경우 다음과 같은 기능을 수행하는 기기, 구조물 및 계통에 적용한다.

- 원자로 노심냉각을 위한 1차냉각계통의 압력경계를 구성하는 설비의 내압 부분 및 그 지지물
- 원자로 비상정지
- 원자로 격납건물의 내압부분 및 그 지지물
- 핵분열생성물의 유출을 방지하는 역할을 하거나 방사성 물질을 원자로 격납건물 내에 억류 또는 격리하는 기능
- 핵연료로부터 발생되는 핵분열 생성물의 누설을 억제하기 위한 격벽 기능
- 사고 후 원자로 감시 기능
- 주제어실의 접근이 불가능할 경우 원자로의 안전감시 기능을 수행하는 비상제어실과 관련된 기능

(2) 안전등급 II (Safety Category II)

안전등급 II는 안전등급 I에는 속하지 않으면서 안전등급 I의 기능을 보조하는 역할을 수행하거나 원자로의 안전과 관련된 역할을 수행하는 기기, 구조물 또는 계통에 적

용한다. 안전등급 II에 속하는 기기는 ASME Sec.III.의 요건을 강제적으로 따를 필요는 없으나 수행 기능의 중요도를 감안하여 안전성 설계요건을 선별적으로 적용하고 필요할 경우 국내외 산업규격을 적용할 수 있다. 수출연구로의 경우 다음과 같은 기능을 수행하는 기기, 구조물 및 계통에 적용한다.

- 비상시 노심에 직접 냉각재를 공급하여 노심냉각을 보장하는 기능
- 방사선사고 발생 시, 정해진 경로와 절차를 통하여 방사성 물질을 외부로 안전하게 배출하기 위한 기능
- 정상운전 동안 원자로의 중요 변수들을 안전한계 이하로 유지하기 위한 원자로 출력제어와 관련된 기능
- 신연료 또는 사용후 핵연료의 안전한 저장 및 취급과 관련된 기능
- 반사체 냉각계통의 압력경계를 구성하는 설비의 내압 부분 및 그 지지물
- 원자로 수평 조사공 등과 같은 이용설비의 방사선 차폐 기능
- 일정 기간 동안 원자로 내에서의 조사시험을 위한 캡슐 등과 같은 원자로 수조 내 조사시험설비 및 지지대
- 안전등급 I의 기기에 전력을 공급하는 전력설비
- 사용후 핵연료 저장조 냉각계통 압력경계를 구성하는 설비의 내압 부분 및 그 지지물
- 정상운전상태에서 원자로 수조 등의 방사선 누출을 최소화하기 위한 차폐 기능
- 방사성 물질을 내포하고 있어 경계 파손 사고 시 방사선이 주출될 수 있는 시설, 계통 또는 구조물

(3) 비안전등급 (Non-Nuclear Safety : NNS)

비안전등급은 안전등급 I 또는 II에 속하지 아니하는 나머지 기기, 구조물 또는 계통에 적용한다. 비안전등급은 일반 산업규격에 따라 설계할 수 있는 일반적 품목에 적용한다.

3.3.2 내진등급

원자로의 안전기능을 수행하는 안전등급의 기기, 구조물 또는 계통은 지진이 발생되었을 때에도 본래의 기능을 수행할 수 있도록 설계, 제작, 설치되어야 한다. 원자로가 설치되어 있는 해당 부지에서의 특성을 고려하여, 안전정지지진(SSE) 혹은 설계기준지진(DBE)이 발생하더라도 구조적인 건전성을 유지하고 안전기능을 상실하지 않도록 하기 위하여 내진등급을 분류한다. 내진등급의 분류는 발전로 또는 연구로가 크게 다를 이유가 없으므로, 현재 하나로에 적용하고 있는 내진등급 분류체계를 수출연구로에 그대로 적용하여도 문제가 없을 것으로 판단한다.

(1) 내진등급 I (Seismic Category I)

내진범주 I 급 구조물, 계통 및 부품은 다음 사항을 보장하는데 필요한 것으로 정의한다.

- 가동 중인 원자로를 정지시키고 안전한 정지상태로 유지시킬 수 있는 능력
- 기기 및 계통은 SSE 혹은 DBE, 운전기준지진(OBE), 부지설계지진(SDE) 등에서도 그 주어진 안전 기능이 손상되지 않고 견딜 수 있는 능력

내진등급 I 급 구조물, 계통 및 부품들은 언제 어느 때라도 그 건전성이 보장될 수 있도록 다른 구조물로부터 충분히 격리되고 보호되어야 한다. 내진등급 I은 지진이 진행되는 동안 또는 그 후에도 구조적 건전성뿐만 아니라 기능을 유지하여야 하고 내부 유체의 누설도 허용하지 않는다.

(2) 내진등급 II (Seismic Category II)

내진등급 I에 포함되지 않는 구조물, 계통 및 부품 중 안전관련 구조물, 계통 및 부품과 인접하여 이들의 손상으로 인하여 안전관련 구조물, 계통 및 부품들이 주어진 안전기능을 수행하는데 방해가 될 수 있는 것들은 SSE 시에도 구조적인 건전성이 유지되도록 설계하여야 하며 이들과 관련된 기자재를 내진등급 II로 분류한다. 구조적 건전성이라 함은 지진이 왔을 때 본래의 기능을 유지하지는 못하더라도 현재의 설치위치에서 크게 변형되거나 이탈하여 인접한 구조물에 충격을 가하지 않아야 함을 의미한다.

(3) 비내진등급 (Non_seismic)

내진등급 I, II 급으로 분류되지 않은 모든 구조물, 계통 및 부품들로서 내진설계 요구조건이 적용되지 않는다. 다만 일반 산업체에서 적용하고 있는 일반 건물에 대한 지진설계요건은 적용한다.

3.3.3 품질등급

안전에 중요한 모든 구조물, 계통 및 부품들을 그 중요성에 부합되는 기준에 따라 설계, 제작, 설치 및 시험을 수행하기 위하여 정한 개념으로서 안전등급 및 내진등급 분류기준과 밀접한 관계를 가지고 있다. 품질등급 체계는 현재 하나로에서 적용하고 있는 Q, T, S 등급체계를 그대로 적용한다. 각 품질등급에 대한 정의는 다음과 같다.

(1) 품질등급 Q

적용하는 규격이나 표준에 10 CFR 50 Appendix B 나 ASME/ANSI NQA-1 등이와 동등한 요건이 기술되어 있는 구조물, 계통 및 부품을 말한다. 수출연구로에서는 다음과 같은 구조물, 계통 또는 부품에 품질등급 Q를 적용한다.

- 상기 3.3.1 항의 안전등급 분류기준에 따라 안전등급 I 급으로 분류된 구조물, 계통 및 부품
- 상기 3.3.1 항의 안전등급 분류기준에 따라 안전등급 II 급으로 분류된 구조물, 계통 및 부품 중에서 다음 각 호에 해당되는 것에 적용한다.

  · 고장날 경우 원자로 정지를 유발하거나 원자로 이용에 심각한 문제점을 야기시킬 수 있는 부품 또는 계통
  · 여러 가지 부품들로 결합된 복잡한 구조나 형상을 가지고 있는 기기
  · 특수 목적을 위하여 새롭게 적용하거나 또는 기존 제품의 설계를 변경하여 최초 적용하는 부품 또는 기기

(2) 품질등급 T

품질등급 T 로 분류된 구조물, 계통 및 부품들은 다음과 같은 기능 및 특성에 해당되는 구조물, 계통 및 부품에 적용한다.

- 상기 3.3.1 항의 안전등급 분류기준에 따라 안전등급 II 급으로 분류된 구조물, 계통 및 부품
- 상기 3.3.1 항의 안전등급 분류기준에 따라 비안전등급으로 분류된 구조물, 계통 및 부품 중에서 다음 각 호에 해당되는 것에 적용한다.

  · 원자로 운전상 신뢰도에 원칙적으로 영향을 미치는 시설 또는 계통
  · 여러 가지 부품들로 결합된 복잡한 구조나 형상을 가지고 있는 기기
  · 특수 목적을 위하여 새롭게 적용하거나 또는 기존 제품의 설계를 변경하여 최초 적용하는 부품 또는 기기

(3) 품질등급 S

상기 3.3.1항의 안전등급 분류기준에 따라 비안전등급으로 분류되면서 Q 또는 T 등급으로 분류되지 않은 구조물, 계통 및 부품에 적용하며, 이에 적용되는 품질요건으로는 특별히 규정되어 있지는 않으나 제작자의 품질보증요건이나 산업규격을 선별적으로 적용한다.

그림 3-2는 안전등급, 품질등급 및 내진등급의 상관관계를 그림으로 표시한 것이다. 기본적으로, SC-I → QL-Q → Seismic-I, SC-II → QL-T →Seismic-II, NNS → QL-S → Non-Seismic 의 관계를 가지지만 앞서 기술한 분류체계에 따라 SC-II는 기기의 특성 및 형식에 따라 품질등급 Q 로 분류할 수 있으며 품질등급 T 로 분류된 기기이더라도 내진등급 I 또는 비내진등급으로 분류할 수 있다. 이와 같이 기본 분류체계를 따르지 않을 경우는 타당한 이유를 문서로서 기술하도록 하여야 할 것이다.

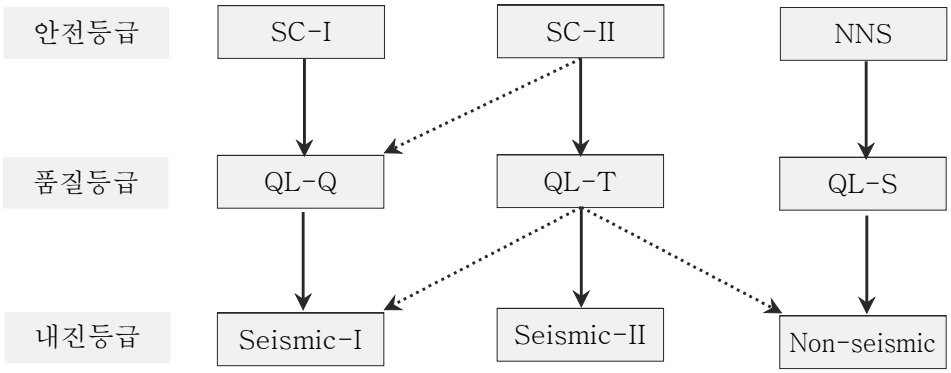


그림 3-2 등급분류체계 및 상관관계

표 3-3은 수출연구로의 계통, 구조물 및 기기의 계통등급을 요약한 것이다. 수출연구로의 설계가 완료되지 않은 상태이어서 상세한 기기 또는 부품 단위까지의 분류는 추후 기본설계가 본격적으로 시작되는 시점에 다시 검토하기로 한다.

표 3-3 수출연구로 계통, 구조물 및 기기의 등급 분류

계통, 구조물 및 기기	안전등급	내진등급	품질등급	비고
1. 원자로 관련 건물				
1) 원자로 격납건물	II	II	Q	
2) 원자로 굴뚝	II	II	T	
3) 수조 라이너	I	I	Q	1차냉각수 누설
4) 수조 격리문	II	II	T	
5) 원자로 콘크리트 집합체(RCI)	II	I	Q	방사선 누설
6) 냉각탑 및 2차냉각 펌프실	NNS	Non	S	
7) 원자로실 배수조 라이너	II	I	T	액체폐기물 누설
8) 기타 원자로 주변 건물	Non	II	T	
2. 원자로 구조물 집합체				
1) 원자로노심	I	I	Q	
2) 반사체탱크	I	I	Q	
3) 침니	I	I	Q	
4) 수평실험관(빔포트)	I	I	Q	
5) 중성자검출기 하우징	II	I	Q	
6) 핵연료집합체	I	I	Q	

표 3-3 수출연구로 계통, 구조물 및 기기의 등급 분류 (계속)

계통, 구조물 및 기기	안전등급	내진등급	품질등급	비고
3. 제어봉/정지봉 구동장치				
1) 제어봉/정지봉 구동장치	I	I	Q	
2) 제어봉 모터 제어회로	II	Non	T	원자로 제어기능
3) 클러치 작동회로	I	I	Q	원자로 보호기능
4. 1차냉각계통				
1) 배관 및 지지대	I	I	Q	
2) 냉각 펌프, 밸브 및 열교환기	I	I	Q	
3) 정화 펌프, 배관, 밸브 등	II	Non	T	
4) 계측제어 감지기 - 정지계통용 감지기 - 제어감시용 감지기*	 I II	 I Non	 Q T	* Thermowell은 배관과 동일 등급
5. 반사체냉각계통				
1) 주 배관 및 지지대	II	II	T	
2) 펌프, 밸브 및 열교환기 등	II	II	T	
3) 여과기, 팽창탱크 등	II	II	T	
4) 누설 배관 및 수집탱크	II	Non	T	
5) 계측제어 감지기	II	Non	T	
6. 사용후 핵연료 저장조 냉각계통				
1) 주 배관 및 지지대	II	Non	T	
2) 펌프, 밸브 및 열교환기 등	II	Non	T	
3) 여과기, 이온교환기 등	II	Non	T	
4) 계측제어 감지기	II	Non	T	
7. 비상보충수 공급계통				
1) 주 배관 및 지지대	II	II	T	
2) 주입밸브	II	I	Q	
3) 보충수 탱크 등	II	II	T	
4) 배수조 펌프, 밸브, 배관 등	II	Non	T	
5) 비상보충수 정화장치 등	II	Non	S	
6) 계측제어 감지기	II	Non	T	

표 3-3 수출연구로 계통, 구조물 및 기기의 등급 분류 (계속)

계통, 구조물 및 기기	안전등급	내진등급	품질등급	비고
8. 수조고온층계통				
1) 배관, 펌프, 밸브 등	II	II	T	
2) 이온교환기	II	Non	T	
3) 온수기	II	Non	T	
4) 계측제어 감지기	II	Non	T	
9. 2차냉각계통	NNS	Non	S	
1) 배관, 펌프, 밸브 등	NNS	Non	S	
2) 냉각팬	NNS	Non	S	
3) 화학약품 조절 배관, 펌프 등	NNS	Non	S	
4) 계측제어 감지기	NNS	Non	S	
10. 기계장치				
1) 핵연료 취급기구	II	Non	T	
2) 핵연료 저장랙	II	II	Q	
3) 맨브릿지	II	II	T	
4) 수조내벽 부착물 일체	II	II	T	
5) 수조덮개	II	II	T	
11. 수송조사장치				
1) 배관, 수송관, 조사관 등	II	II	T	
2) 펌프	II	Non	T	
3) 계측 및 제어기기	NNS	Non	S	
12. 기송조사장치				
1) 수조내 수송관, 조사관 등	II	II	T	
2) 수조외 수송관	NNS	Non	S	
3) 계측 및 제어기기	NNS	Non	S	
13. 조사캡슐장치				
1) 수조내 장전캡슐 및 지지대	II	II	T	
2) 계측제어 감지기	NNS	Non	S	
14. 반도체 생산장치				
1) 수조내기기(조사통 및 고정장치)	II	II	T	
2) 계측 및 제어기기	NNS	Non	S	

표 3-3 수출연구로 계통, 구조물 및 기기의 등급 분류 (계속)

계통, 구조물 및 기기	안전등급	내진등급	품질등급	비고
15. 전력계통				
1) 일반전기계통	NNS	Non	S	
2) 고압배전계통	II	Non	T	
3) 저압배전계통	II	Non	T	
4) 무정전 전원계통(UPS)	II	I	Q	120VAC
5) 축전지	II	I	Q	
6) 24V 분전반	II	I	Q	24VDC
7) 조명설비	NNS	Non	S	
8) 화재감시 및 경보	NNS	Non	S	
9) 전선관(원자로 보호계통)	II	II	T	
16. 원자로제어계통				
1) 제어봉 제어회로	II	Non	T	
2) 중성자 계측계통	II	Non	T	
3) 열출력 측정계통	II	Non	T	
4) 제어컴퓨터계통	II	Non	T	
5) 제어 패널	II	Non	T	
17. 제1정지계통				
1) 현장감지기 및 신호전송기 등	I	I	Q	
2) 논리제어기(PLC)	I	I	Q	
3) 패널 및 지시기	I	I	Q	
18. 제2정지계통				
1) 현장감지기 및 신호전송기 등	I	I	Q	
2) 계전기 정지논리 회로	I	I	Q	
3) 패널 및 지시기	I	I	Q	
4) 중수배수 배관, 밸브	I	I	Q	
5) 중수배수탱크	I	I	Q	
6) 중수회수펌프 및 보조설비	II	II	T	
19. 지진감시계통				
1) 현장감지기	II	I	T	
2) 지진감시패널	II	I	T	

표 3-3 수출연구로 계통, 구조물 및 기기의 등급 분류 (계속)

계통, 구조물 및 기기	안전등급	내진등급	품질등급	비고
20. 폐쇄회로 감시계통				
1) 현장 카메라 장치	NNS	Non	S	
2) 제어장치 및 모니터	NNS	Non	S	
21. 방사선감시계통				
1) 현장감시기(경보용)	NNS	Non	S	
2) 현장감시기(비상환기계통 작동)	II	Non	T	
3) 제어컴퓨터	NNS	Non	S	
22. RCI 환기계통				
1) 정상 RCI 환기계통 팬, 덕트 등	NNS	Non	S	
2) 비상 RCI 환기계통 팬, 덕트 등	II	II	T	
3) 정상 RCI 환기계통 계측기	NNS	Non	S	
4) 비상 RCI 환기계통 계측기	II	Non	T	
5) 격리댐퍼	II	I	T	
6) 격리댐퍼 액튜에이터	II	Non	T	
7) 일반댐퍼 및 액튜에이터	NNS	Non	S	
23. 원자로건물 환기계통				
1) 팬, 덕트, 댐퍼, 액튜에이터 등	NNS	Non	S	
2) 격리댐퍼	II	I	T	
3) 격리댐퍼 액튜에이터	II	Non	T	
4) 계측기	NNS	Non	S	
24. 소방계통				
1) 소화설비	NNS	Non	S	
2) 소방시설	NNS	Non	S	
25. 압축공기시설	NNS	Non	S	
26. 자재운송설비				
1) 천정 크레인	II	II	T	
2) 기타 운송설비	NNS	Non	S	
27. 액체폐기물 계통				
1) 방사성 액체폐기물 계통	II	II	T	
2) 비방사성 액체폐기물 계통	NNS	Non	S	

*** 안전등급 ***

SC-I : 안전등급 I 급
SC-II : 안전등급 II 급
NNS : 비안전등급

*** 내진등급 ***

I : 내진등급 I 급
II : 내진등급 II 급
Non : 비내진등급

*** 품질등급 ***

Q : 품질등급 Q
T : 품질등급 T
S : 품질등급 S

4.0 계통별 설계지침

4.1 제1정지계통

4.1.1 일반사항

제1정지계통은 스텝핑모터에 의하여 구동되는 4개의 제어봉을 자유 낙하시켜 충분한 부반응도를 노심에 삽입함으로써 원자로를 정지한다. 4개의 제어봉 중 3개만 삽입되더라도 원자로는 정지상태에 이를 수 있도록 설계한다. 제어봉 구동장치는 제1정지계통뿐만 아니라 원자로 제어계통의 출력제어기능도 동시에 수행하도록 설계한다. 즉, 정상운전상태에서는 스텝핑모터에 의하여 노심 속을 상하로 움직이면서 출력제어기능을 수행하고 사고 상태가 발생되면 마그네틱 클러치에 공급되는 전원을 차단하여 제어봉 하부가 노심 속으로 자유 낙하하여 원자로 정지기능을 수행하도록 한다. 2개의 서로 다른 기능 중에서 원자로 정지기능이 항상 우선되어야 하며 출력제어기능이 고장나더라도 정지기능은 언제나 건전한 상태를 유지하도록 설계한다. 원자로 제어기능은 안전등급 II, 비내진등급, 품질등급 T로 분류되지만 원자로 정지기능을 수행하여야하므로 제어봉 구동장치는 제1정지계통과 마찬가지로 안전등급 I, 내진등급 I, 품질등급 Q로 설계하여야 하고 3.1절에 기술되어 있는 안전성 설계요건을 모두 적용하여야 한다. 제어봉 구동장치에 대한 등급분류는 그림 4-1과 같다.

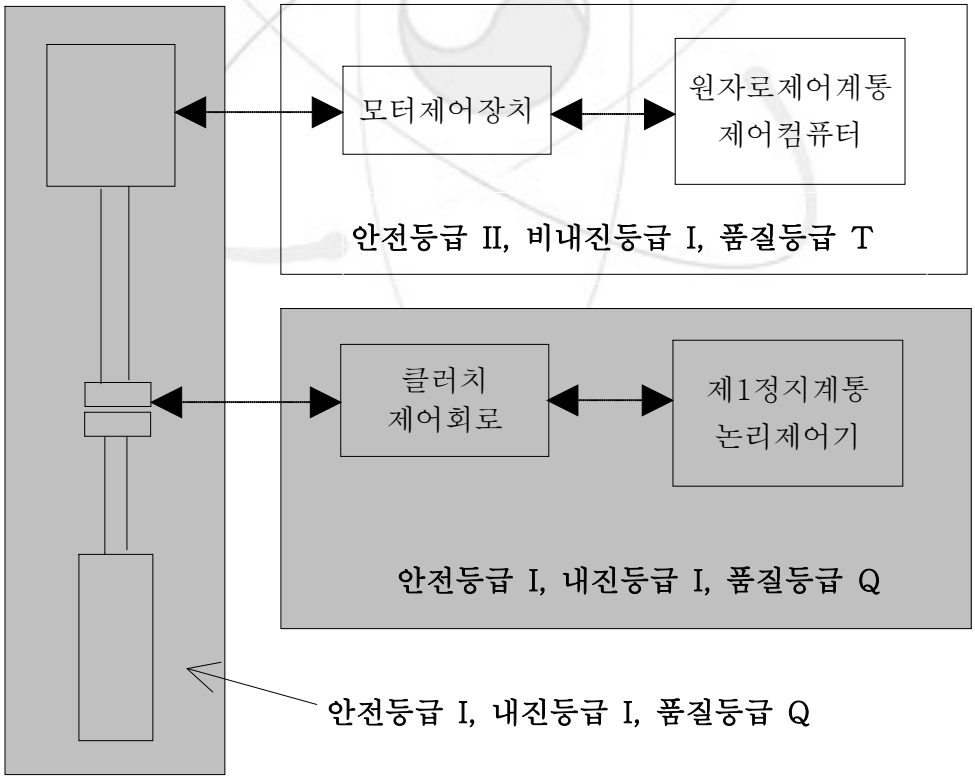


그림 4-1 제어봉 구동장치의 설계 등급분류

4.1.2 가상사고와 정지변수

제1정지계통은 모든 원자로 운전모드에서 발생 가능한 가상사고 발생 시 원자로를 비상 정지시키고 안전한 미임계 상태로 유지시키기 위한 원자로 보호계통이다. 제1정지계통의 계측제어기기들은 원자로가 안전한 상태로 유지되고 있는지를 항상 감시하고 정지설정값을 초과할 경우 신속하게 제어봉을 노심 속으로 삽입시켜 원자로를 정지시키는 기능을 수행하여야 한다. 또한 운전원에게 중요 공정변수들의 상태, 경보설정값 및 정지변수의 작동상태 그리고, 제어봉 구동장치의 작동상태 등을 항상 제공할 수 있어야 한다.

제1정지계통의 최종 목표는 설계기준사고 또는 비상사태 발생 시 신속하고 정확하게 원자로를 안전 정지시켜 핵연료의 손상을 방지하는 것이다. 이러한 계통의 목표를 달성하기 위해서는 가상사고의 종류와 사고해석을 근거로 한 적절한 정지변수와 정지설정값의 결정이 매우 중요하다. 가상사고가 발생되었을 경우, 원자로를 안전하게 정지시기 위한 정지변수가 적절하게 선정되어야 하고 원자로 안전의 보수성을 높이기 위하여 2개 이상의 정지변수가 동일 가상사고를 감지하여 원자로를 정지시킬 수 있도록 한다. 수출연구로의 설계에서는 다음과 같은 가상사고를 고려하여 정지변수를 선정한다.

- 반응도 주입사고
- 1차냉각계통 기능상실
- 2차냉각계통 기능상실
- 반사체 냉각계통 기능상실
- 수조내 중수 배관 파손사고
- 원자로 수조수 상실
- 핵연료 파손사고
- 외부전력 상실

(1) 반응도 주입사고

반응도 주입사고는 원자로 제어계통 등의 기능상실로 인하여 제어봉이 비정상적으로 노심에서 인출되는 경우에 발생된다. 반응도 주입사고는 비정상의 시작 시점이 어떤 출력준위이냐에 따라 이를 감지하는 정지변수가 달라진다. 원자로 제어계통의 고장이 아닌 조건에서의 반응도 주입사고가 발생될 수 있는 경우는 수조 내 반사체 탱크 또는 중수 배관이 파손되어 경수가 반사체 계통에 유입되는 경우인데 이는 추후 다시 다루기로 한다. 제어봉의 비정상적 인출에 의하여 원자로 출력이 상승할 경우 이를 감지하여 제1정지계통을 작동시키는 정지변수는 다음과 같다.

- 중성자 대수출력(광대역 핵분열 검출계통)
- 중성자 선형출력(광대역 핵분열 검출계통)

- 중성자 대수출력 증가율(광대역 핵분열 검출계통)
- 중성자 선형출력 증가율(광대역 핵분열 검출계통)

반응도 주입사고는 저출력, 중출력 및 고출력 등 3개의 구역에서 출력변화율 한계를 초과하는 빠른 속도로 진행되는 경우와 그러하지 아니하는 느린 속도를 진행되는 경우로 구분하여 해석을 수행한다. 빠른 속도로 진행되는 경우에는 대수출력 변화율과 선형출력 변화율 등으로 사고를 감지할 수 있지만 느린 속도로 진행되는 경우에는 1% 대수 중출력, 55% 선형 중출력 또는 선형출력 변화율 신호 등으로 사고를 감지하도록 한다. 느린 속도로 진행되지만 선형출력 변화율에 의해서는 감지될 수 있을 정도의 출력상승 사고라고 가정한다. 선형출력 변화율신호 설정값보다 느리게 진행되는 사고라면 노심 안전성에 연향을 미치지 않기 때문에 운전원이 수동 정지 등으로 대처할 수 있을 것이다. 따라서 선형출력 변화율 설정값은 이와 같은 기초에 근거하여 결정하여야 한다.

제1정지계통용 중성자 계측계통은 10 Decade를 처리할 수 있는 광대역 핵분열 전리함을 사용한다. 광대역 핵분열 전리함은 원자로 정지부터 전출력까지의 대수출력을 하나의 검출기로써 감시할 수 있고 또한 2 Decade의 선형출력신호도 함께 처리할 수 있다. 반응도 사고 시 원자로 출력의 상승속도를 나타내는 대수출력 출력변화율 신호 및 선형 출력변화율 신호도 함께 생산된다. 광대역 중성자 계측계통의 출력신호 및 측정범위는 다음과 같다.

- 대수출력 : 10^{-8} %FP ~ 200 %FP (10 Decade)
- 선형출력 : 0 %FP ~ 150 %FP (2 Decade)
- 대수출력 변화율 : -15 %PP/sec ~ 15 %PP/sec
- 선형출력 변화율 : -8 %FP/sec ~ 8 %FP/sec
- 대수 중 출력 정지신호
- 선형 중 출력 정지신호
- 대수출력 고 변화율 정지신호
- 선형출력 고 변화율 정지신호

(2) 1차냉각계통 기능상실

1차냉각계통의 기능상실 사고는 1차냉각수의 강제순환을 불가능하게 하는 1차펌프 또는 밸브의 고장, 1차배관의 파손에 따른 냉각수 상실사고 등에 의하여 발생한다. 1차냉각계통 기능상실을 감지하기 위한 정지변수는 다음과 같다.

- 1차냉각계통 유량
- 1차냉각계통 압력

1차냉각계통의 배관계장도가 확정되지 않은 상태에서 유량 또는 압력계측기를 어떻

게 설치할 것인지를 구체적으로 기술할 수는 없지만 1차냉각계통의 압력손실을 최소화하면서 제2정지계통용 감지기와의 다양성을 이룩할 수 있도록 설계하여야 한다. 2개의 변수 중에서 어느 것이 1차정지변수로 사용될 것인지는 추후 상세설계가 진행되면 확정될 것이다. 연구로의 안전성을 보장하는 가장 중요한 변수들이므로 이들은 제1정지계통뿐만 아니라 제2정지계통에서도 독립적으로 각각 설치되어야 한다.

유량 정지변수는 압력손실이 비교적 적은 유량 노즐(Flow Nozzle) 또는 벤츄리 형식의 유량감지기를 사용하는 것이 바람직하고 유량전송기는 차압전송기 형식을 사용한다. 압력 정지변수는 주배관으로부터 계기튜브를 연장하여 압력전송기에 연결하면 측정이 가능하므로 유량신호에 비하여 비교적 간단하다. 유량신호는 유량감지기를 배관에 설치하여야만 측정이 가능하므로 유량감지기의 설치는 계통의 압력 손실 등을 고려하여 신중하게 결정하여야 한다. 제2정지계통 유량감지기와의 독립성 또는 다양성 요건을 만족시키기 위해서는 독립적인 유량감지기를 설치하여야 하지만 일반적으로 유량감지기는 다중으로 설치하지 않는다. 제1정지계통용 유량감지기를 하나만 설치하고 대신 계기용 튜브를 추가로 설치하여 압력전송기부터 독립시킴으로써 독립성을 유지하는 것도 고려할 수 있다. 1차냉각계통의 배관계장도가 완성되면 제2정지계통의 유량신호를 어떻게 취득할 것인가를 결정할 수 있을 것이다. 굳이 유량감지기를 설치하지 않고 기존 배관 상에 설치되는 어떠한 밸브를 차압발생기처럼 이용하여 유량을 측정하는 것도 또 다른 방안이 될 수 있을 것이다.

(3) 2차냉각계통 기능상실

2차냉각계통의 기능상실은 2차냉각펌프 또는 밸브의 고장, 배관 파단 또는 냉각탑 기능상실 등과 같은 사고가 발생하였을 경우 원자로 노심에서 발생된 열을 충분하게 제거하지 못하게 되는 사고이다. 2차냉각계통의 기능이 상실되었을 경우 이를 감지하여 원자로를 정지시킬 수 있는 정지변수는 다음과 같다.

- 1차냉각계통 출구 온도
- 반사체냉각계통 출구 온도

2차냉각계통은 비안전등급 및 비내진등급으로 분류되기 때문에 2차냉각배관에 안전등급 유량 또는 압력감지기를 설치하는 것은 의미가 없다. 이를 위하여 2차냉각계통을 안전등급으로 분류할 수는 없기 때문에 안전등급 또는 내진등급으로 분류되는 1차냉각계통 온도신호 및 반사체냉각계통 온도신호를 이용하는 것이 타당하다. 제2정지계통을 위해서도 동일 목적의 온도계측기를 설치하여야 하므로 펌프 또는 열교환기의 전후단 등과 같이 설치위치를 서로 다르게 함으로써 독립성과 다양성을 만족시키도록 한다. 온도계측기는 내구성과 정확도가 뛰어나고 공정제어에 널리 사용되는 저항온도계측기를 사용하는 것이 바람직하다.

(4) 반사체 냉각계통 기능상실

반사체 냉각계통의 기능상실 사고는 중수의 강제순환을 불가능하게 하는 반사체 펌프 또는 밸브의 고장, 중수배관의 파손에 따른 중수 상실사고 등에 의하여 발생한다. 원자로 수조 내에서의 배관 또는 반사체 탱크 파손사고도 반사체 냉각계통 기능상실에 속하지만 이 사고는 원자로 출력 증강을 유발하는 반응도 주입사고에 해당되므로 따로 다루기로 한다. 반사체 냉각계통 기능상실을 감지하기 위한 정지변수는 다음과 같다.

- 반사체 유량신호
- 반사체 압력신호

유량 또는 압력계측기의 설치위치 또는 형식은 추후 상세설계가 진행되면서 확정될 것이다. 유량감지기의 설치는 계통의 특성을 감안하여 설계하여야 한다. 동일 계통에 2개 이상의 유량감지기를 설치하는 것은 바람직하지 않기 때문에 유량신호는 제1정지계통용으로만 사용하고 제2정지계통에서는 유량신호 대신 반사체 출구온도를 2차 정지변수로 사용할 수 있을 것이다. 즉, 반사체 냉각계통 기능상실 사고를 감지하기 위한 제1정지계통 변수로는 반사체 유량신호와 반사체 압력신호를 사용하고 제2정지계통 변수로서는 반사체 압력신호와 반사체 출구온도를 사용하는 방안이다. 물론 이에 대한 확정은 상세설계와 사고해석이 수행되어야만 가능할 것이다.

(5) 수조내 중수배관 파손 사고

중수탱크 출구배관이 파손되면 중수계통에 수조수(경수)가 유입되어 중수의 수질이 저하된다. 이로 인하여 부반응도가 노심에 삽입되고 중수탱크 외벽에 설치되어 있는 중성자 계측기는 실제 노심의 출력보다 낮아진다. 따라서 중성자 계측기의 출력신호를 받는 원자로 제어계통은 제어봉을 인출하여 낮아진 출력만큼 출력을 상승시켜 요구출력에 현재의 출력을 일치시키려 할 것이다. 결론적으로 원자로 제어계통은 현재출력을 요구출력에 일치시켜야 하는 본래의 기능을 다 하지만 실질적으로는 경수 유입으로 낮아진 중성자 계측기 출력만큼 노심의 열출력을 비정상적으로 상승시키는 결과를 가져오기 때문에 이는 곧 반응도 사고와 동일한 결과를 초래한다. 중수 배관 파손사고가 발생하더라도 중성자 계측기가 감지하는 중성자 출력은 정상상태를 유지하기 때문에 중성자 출력으로는 이 사고를 감지할 수가 없다. 수조내 중수배관 파손 사고의 특이성으로 인하여, 이 사고를 감지할 수 있는 변수는 중성자 출력이 아니면서 원자로 출력을 나타내는 다음과 같은 신호들이다.

- 1차냉각계통 감마출력신호
- 1차냉각계통 출구온도

1차냉각계통 감마출력신호는 감마이온챔버를 사용하여 1차 냉각수로부터 N-16에 의한 감마선을 측정한다. 감마이온챔버의 설치 위치는 원자로 노심에 가장 가까운 출구측

1차배관 상에 설치하여 응답시간을 최소화할 수 있도록 한다. 수조내 중수배관이 파손되면 중성자 출력은 외형적으로 정상으로 보이지만 실제 노심 출력은 상승한다. 1차 냉각수 N-16에 의한 감마선은 노심에서의 중성자속에 직접 비례하기 때문에 1차냉각계통의 감마출력은 상승하게 되므로 설정값 도달 시 원자로를 정지시킬 수 있다. 원자로 노심 출력이 상승하면 1차 냉각수 출구온도 역시 출력에 비례하여 상승하기 때문에 1차 냉각계통 출구온도를 2차 정지변수로 사용할 수 있다.

(6) 원자로 수조수 상실사고

하나로에서는 수조수를 이용하는 수력펌프 개념이었으므로 수조 수위가 펌프 흡입구 이하로 낮아지면 더 이상 수조수를 가압할 수 없게 되고 실린더 내부의 피스톤에 연결되어 있는 정지봉은 Fail-safe 개념에 의하여 저절로 자유낙하하기 때문에 수조 수위를 따로 정지변수로 지정할 필요성이 없었다. 그러나 수출연구로에서는 수력펌프 형식을 사용하지 않고 모터를 이용하는 제어봉을 사용할 예정이므로 수조 수위를 원자로 보호계통 정지변수로 지정하여야 한다.

제1정지계통 및 제2정지계통용 수위계측기를 독립적으로 설치하여야 하기 때문에 수조내 계측기의 설치 위치 및 계측 형식 등을 신중하게 검토하여야 한다. 제1정지계통용은 수위전송기를 사용하고 제2정지계통용은 수위스위치 형식을 사용함으로써 하드웨어의 다양성 요건을 만족시키는 것도 좋은 방안이 될 수 있다. 수조내 계측기의 수를 줄이기 위하여 제2정지계통용 수위스위치는 비상보충수 작동을 위한 기능을 동시에 수행할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

수조수 상실사고는 다른 가상사고에 비하여 사건의 진행이 느리고 노심냉각기능에 여유가 있으며 비상보충수 작동기능도 준비되어 있는 상태이므로 2차 정지변수로는 수조 표면 방사선을 제1정지계통과 제2정지계통에 공통으로 사용한다. 그러나 수위 측정계측기는 제1정지계통 및 제2정지계통에 독립적으로 설치하여 사고에 대비하여야 한다.

(7) 핵연료 파손사고

핵연료 파손사고의 감지는 핵연료와 원자로 특성에 따라 다를 수 있으나 하나로와 같이 1차 냉각수 내의 지발중성자를 On-line 형식으로 감시하는 것이 간편하고 효과적이다. 다른 방법으로는 1차 주배관으로부터 소형 튜브를 이끌어내어 N-16을 감쇄시킨 뒤 핵분열 생성물로부터의 감마선을 측정하는 Off-line 형식도 가능하다. 수출연구로의 1차배관 흐름도가 확정되면 구체적으로 검토하여 설계하여야 한다.

핵연료 파손사고는 공정변수와 달리 지발중성자 또는 감마선을 측정하는 방법 외에는 감지가 불가능하다. 따라서 제1정지계통 및 제2정지계통 모두에게 1차 정지변수와 2차정지변수를 각각 구현하기가 어렵다. 따라서 핵연료 파손사고의 경우는 예외적으로 1차 정지변수만 사용한다. 핵연료 파손사고는 방사선 누출과 직결되는 심각한 사고에 해

당되므로 제1정지계통 및 제2정지계통에 공통으로 1차정지변수로 사용한다. 이는 2개 정지계통의 독립성과 다양성 요건에 위배되지만 핵연료 파손 사고의 특성상 2차 정지변수를 따로 두기가 어렵고 연구용 원자로의 특성과 고유 안전성 등을 고려한 것이다.

1차냉각계통 감마출력 신호는 수조내 중수배관 파손사고의 1차정지변수 및 핵연료 파손사고의 정지변수로 중복 사용된다. 추후 설계가 진행되어야 확정되겠지만, 각각의 경우 정지설정값을 다르게 설정할 필요성이 있다. 감마출력신호의 주목적은 수조내 배관 파손사고를 감지하여 원자로를 조기에 정지시키는 것이므로 이때의 정지설정값은 고출력 설정값인 115 %FP 정도이지만 핵연료 파손사고는 파손의 정도를 평가하고 핵분열 생성물에 대한 계측기의 효율 등을 감안하여 결정하여야 할 것이다.

(8) 외부전력 상실사고

제1정지계통 및 제2정지계통은 모두 Fail-safe 설계원칙을 적용하여 설계한다. 외부전원이 상실되면 제어봉의 클러치 전원이 차단되어 제어봉은 중력에 의하여 노심 속으로 삽입되므로 정지변수로 지정할 필요가 없다.

표 4-1은 제1정지계통과 제2정지계통에 대한 가상사고와 정지변수를 비교하여 나타낸 것이다.

4.1.3 정지논리

새로운 연구로의 계측제어논리는 디지털 보호계통의 개념을 채택한다. 이미 외국에서는 오래 전부터 안전등급 PLC를 원자력발전소 보호계통용로 사용하고 있고 우리 나라에서도 2000년 초부터 안전등급 보호계통용 PLC의 개발에 착수하여 거의 마무리 단계에 있다. 따라서 제1정지계통의 보호논리 구현은 디지털 컴퓨터 개념의 안전등급 PLC를 적용한다. PLC에는 현장으로부터의 신호를 받아 정지설정값 초과 여부를 판단하는 비교기 기능을 포함할 것이며 또, 계측 채널의 건전성을 확인하기 위한 자기진단 및 시험기능까지 포함될 예정이므로 계통의 유지보수를 훨씬 더 효과적으로 수행할 수 있을 것이다.

(1) 동시성 논리

원자로 보호계통에 적용되는 정지논리는 국부 동시성 논리(Local Coincidence Logic)와 종합 동시성 논리(General Coincidence Logic) 등 2 종류가 있다. 그림 4-2는 동시성 논리의 개념을 보요주고 있다.

표 4-1 가상사고와 정지변수와의 관계

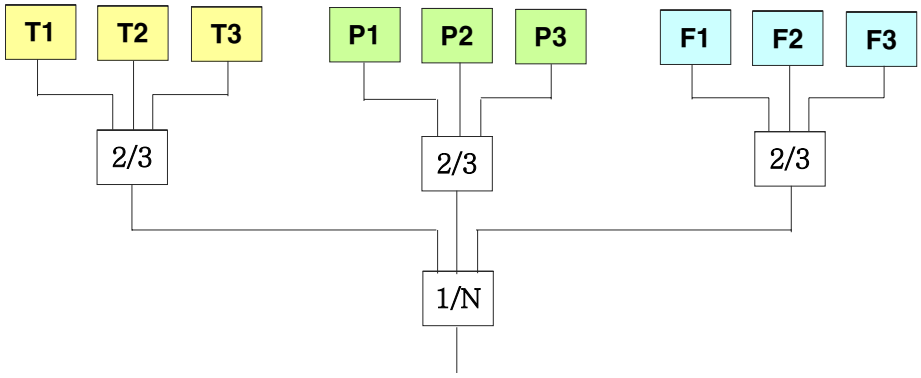
가상 사고	제1정지계통		제2정지계통	
	1차 정지변수	2차 정지변수	1차 정지변수	2차 정지변수
A. 반응도 주입사고				
A.1 Slow RIA at low power (P ≤ 1 %FP)	1% Log Level Trip	Manual Trip	Manual Trip	Manual Trip
A.2 Fast RIA at low power (P ≤ 1 %FP)	High Log Rate	1% Log Level Trip	High Log Rate	Manual Trip
A.3 Slow RIA at medium power (1< P ≤ 55 %FP)	High Linear Rate	55% Linear Level Trip	Manual Trip	Manual Trip
A.4 Fast RIA at medium power (1< P ≤ 55 %FP)	High Log Rate	High Linear Rate	High Log Rate	Manual Trip
A.5 Slow RIA at high power (55 < P ≤ 100 %FP)	High Linear Rate	High Linear Power	High CIC Power	High Gamma Power
A.6 Fast RIA at high power (55 < P ≤ 100 %FP)	High Log rate	High Linear Rate	High Log Rate	High CIC Power
B. Loss of Primary Cooling				
B.1 Primary Pump Failure	Low PCS Pressure	Low PCS Flow	Low PCS Pressure	Low PCS Flow
B.2 Primary Coolant Pipe Break	Low PCS Pressure	Low PCS Flow	Low PCS Pressure	Low PCS Flow
C. Loss of Secondary Cooling				
C.1 Secondary Pump Failure	High PCS Exit Temp.	High RCS Exit Temp.	High PCS Exit Temp.	High RCS Exit Temp.
C.2 Secondary Coolant Pipe Break	High PCS Exit Temp.	High RCS Exit Temp.	High PCS Exit Temp.	High RCS Exit Temp.
C.3 Cooling Tower Failure	High PCS Exit Temp.	High RCS Exit Temp.	High PCS Exit Temp.	High RCS Exit Temp.

표 4-1 가상사고와 정지변수와의 관계 (계속)

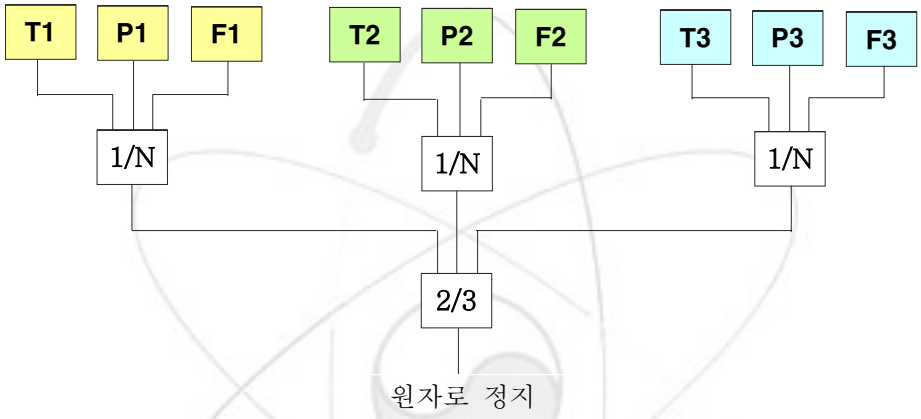
가상 사고	제1정지계통		제2정지계통	
	1차 정지변수	2차 정지변수	1차 정지변수	2차 정지변수
D. Loss of Reflector Cooling				
D.1 Reflector Pump Failure	Low RCS Pressure	Low RCS Flow	Low RCS Pressure	High RCS Exit Temp.
D.1 Reflector Coolant Pipe Break	Low RCS Pressure	Low RCS Flow	Low RCS Pressure	High RCS Exit Temp.
E. Reflector Pipe Break in the Reactor Pool				
E.1 Outlet side of Reflector Tank	High Gamma Power	High PCS Exit Temp.	High PCS Exit Temp.	High RCS Exit Temp.
E.2 Inlet side of Reflector Tank	High Pool Radiation	Manual Trip	High Pool Radiation	Manual Trip
F. Loss of Pool Inventory				
F.1 Beam Tube Failure	Low Pool Level	High Pool Radiation	Low Pool Level(switch)	High Pool Radiation
F.2 Pool Liner Leakage	Low Pool Level	High Pool Radiation	Low Pool Level(switch)	High Pool Radiation
G. Fuel Failure				
G.1 Fuel Channel Blockage	High FFDS Level	Manual Trip	High FFDS Level	Manual Trip
H. Loss of Electric Power				
H.1 Loss of Class IV Power	The lower part of CARs shall be safely dropped into the core by gravity force as a fail-safe		The reflector dump valves shall be automatically opened for emergency drain as a fail-safe.	

CIC : Compensated Ion Chamber, FFDS : Failed Fuel Detection System,

PCS : Primary Cooling System, SCS : Secondary Cooling System, RCS : Reflector Cooling System



(a) 국부 동시성(Local Coincidence) 논리 개념도



(b) 종합 동시성(General Coincidence) 논리 개념도

그림 4-2 동시성 정지논리 개념도

국부 동시성 논리는 독립성 및 기능시험 등의 측면에서는 종합 동시성 논리보다 유리한 측면이 있지만 3개 채널로부터의 신호가 하나의 패널 내에서 2/3 논리를 만들어야 하므로 전선설치에 큰 어려움이 있다. 종합 동시성 논리는 하나의 채널신호들을 모두 하나의 패널 내에서 1/N 논리 즉, OR 논리를 만들기 때문에 전선설치가 쉽다. 종합 동시성 논리의 경우 계측기의 고장으로 인한 불필요한 원자로 정지가 있을 수 있다. 다시 말하면, 채널 A의 온도신호, T1이 고장난 상태에서 채널 B의 압력신호, P2가 동시에 고장이면 실제 원자로는 정지조건이 아닌데도 불구하고 채널 A와 채널 B가 작동하여 원자로는 정지된다. 이론적으로는 국부 동시성 논리보다 계측기 고장으로 인한 불필요한 원자로 정지가 더 많이 발생할 수 있지만 실제 지난 10여 년간의 하나로 운전 동안 계측기 고장으로 인한 원자로 정지가 발생한 경우는 한번도 없었다. 세계적으로 대부분의 연구로도 종합 동시성 논리를 채택하고 있고, 설치나 유지보수 측면에서 더 유리한 종합 동시성 논리를 수출연구로 보호계통에 적용하는 것이 바람직하다.

(2) 논리회로

제1정지계통은 3개의 다중 채널로 구성된다. 채널 및 기기의 다중성은 현장의 감지기로부터 제어봉 낙하를 담당하는 최종단 구동회로까지 적용되며 각 채널은 전기적 독립성과 물리적 격리요건을 모두 만족시킨다. 이미 언급한 바와 같이 제1정지계통의 정지논리는 종합 동시성 논리를 적용하여 그림 4-3, 4-4와 같이 구현한다. 그림 4-3은 하나의 채널만 보여주고 있으나 나머지 2개 채널도 동일한 논리회로를 가진다. 그림 4-4는 3개의 채널 정지논리를 받아 최종 원자로 정지신호를 생성하는 2/3 논리회로를 보여주고 있다.

그림 4-3에서 보는 바와 같이 각 채널은 15개의 정지변수를 가지고 있다. 중성자 출력 관련 정지변수는 모두 5개인데 이중에서 1% Log, 55% Lin, 115% Lin 등과 같은 고출력 정지변수는 Level Trip Hand Switch(HS) 설정 위치와 연동되는 조건정지변수들이다. 원자로 기동 시 즉, 원자로 출력이 1%FP 이하일 때는 Level Trip HS를 “1% Trip” 위치에 설정하여야 한다. 이러한 조건에서 반응도 사고가 발생되면 원자로는 1% Log 정지변수에 의하여 정지된다. 이는 저출력에서 반응도 사고가 발생하였을 경우 좀 더 일찍 원자로를 정지하여 핵연료의 건전성을 보장하기 위함이다. 원자로 출력이 1%FP 이상이고 55%FP 이하일 때는 Level Trip HS를 “55% Trip” 위치로 설정한다. 원자로 출력이 1%FP 이상이고 55%FP 이하일 때 반응도 사고가 발생하면 원자로는 55% Lin 정지변수에 의하여 정지된다. 마찬가지로 Level Trip HS를 “115% Trip” 위치에 두고 55%FP 이상의 고출력 영역에서 반응도 사고가 발생하면 원자로는 115% Lin 정지변수에 의하여 정지된다. 이에 반해 Log rate 및 Lin rate는 출력영역에 관계없이 항상 작동하는 정지변수이다. Log rate는 저출력 영역에서 Lin rate는 고출력 영역에서의 빠르게 진행되는 반응도 사고를 감시하기 위한 정지변수이다.

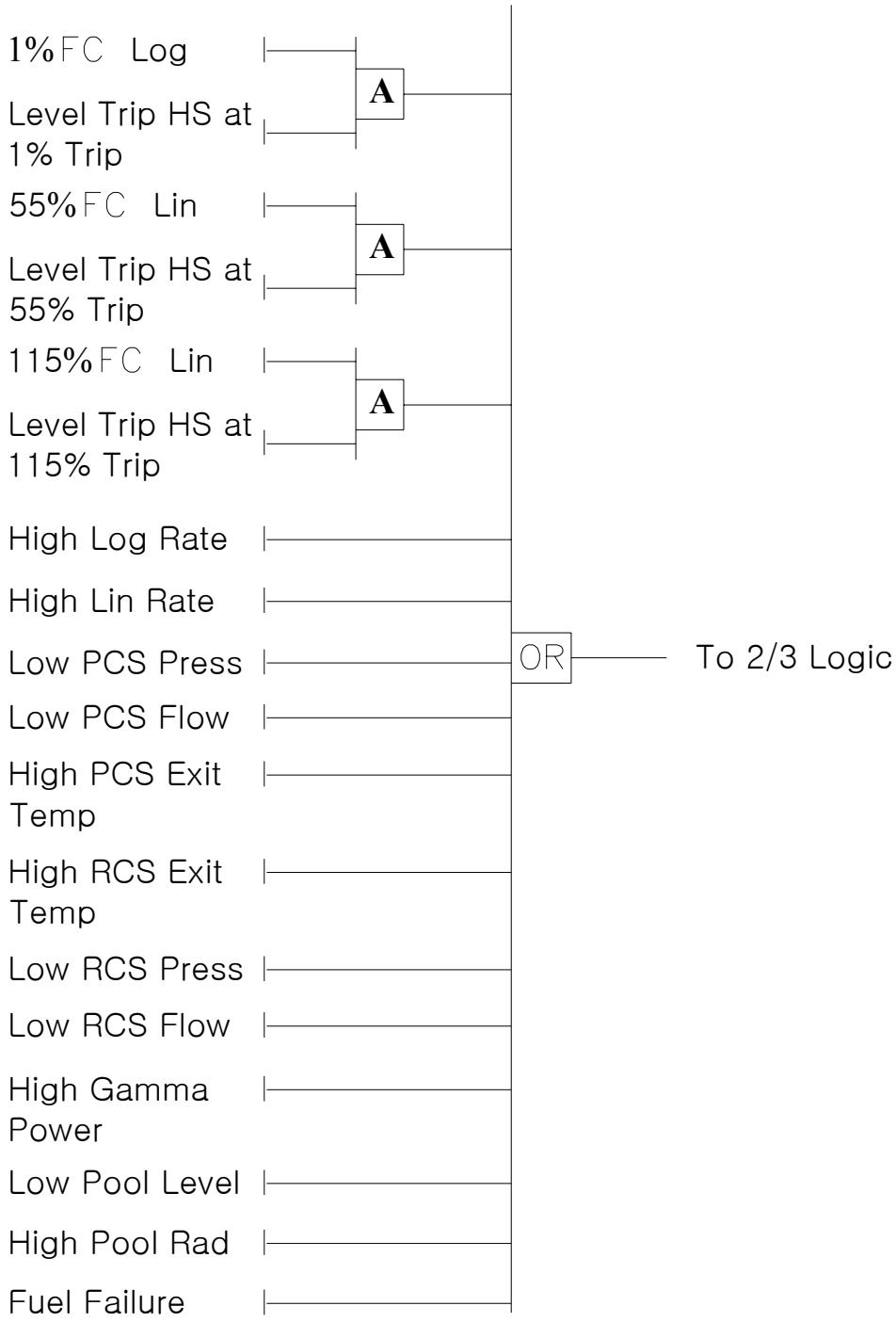


그림 4-3 제1정지계통 채널 정지 논리회로

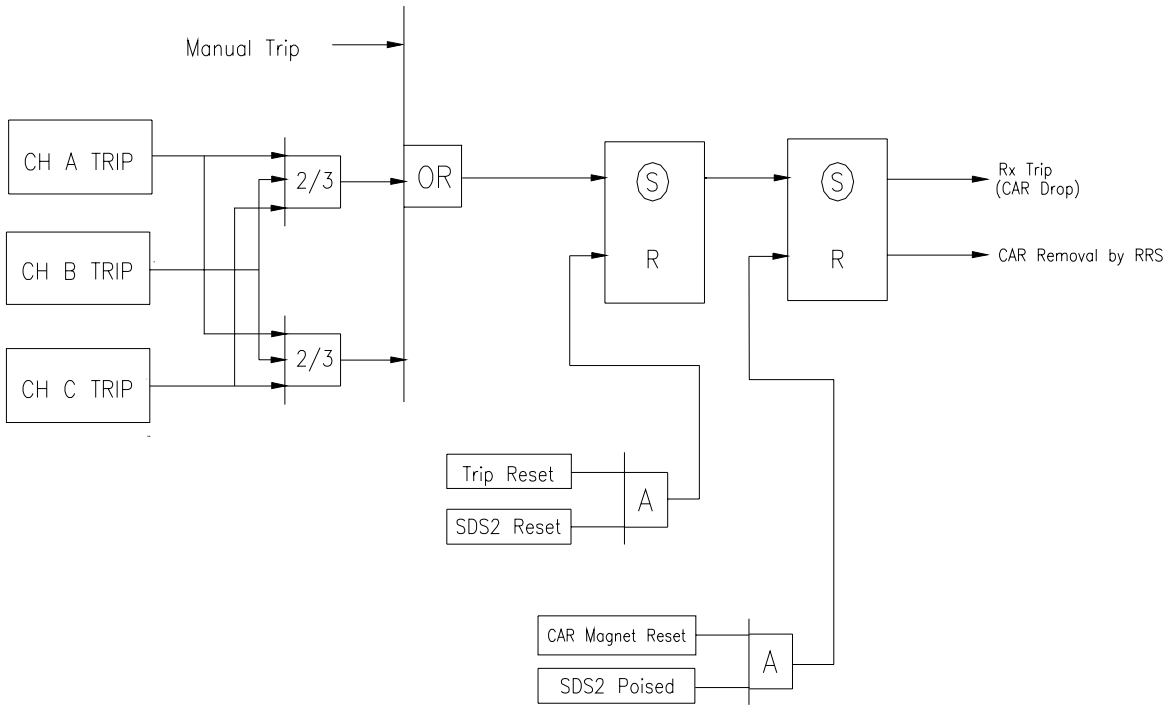


그림 4-4 제1정지계통 2/3 Logic

그림 4-4는 3개 채널의 정지신호를 처리하는 2/3 정지논리를 보여주고 있다. 3개의 채널 중에서 2개 이상이 작동되었을 때 비로써 원자로 정지신호가 생성된다. 원자로 정지 후 재기동하기 위해서는 그림에서 보는 바와 같이 제1정지계통과 제2정지계통의 리세트 논리가 함께 만족되어야 가능하다. 즉, 2개 정지계통 중 어느 하나의 계통에서 1개 이상의 정지변수가 정지조건에 있으면 원자로 재기동이 불가능하도록 논리를 구성하고 있다. 2개 정지계통의 리세트 논리가 만족되었다고 하더라도 또 하나의 논리를 거쳐야만 원자로 기동이 가능하도록 구성하였다. 즉, 2개 정지계통에서 정지조건이 더 이상 존재하지 않는 조건에서 제1정지계통의 제어봉 인출 논리가 만족되어야 하고 또, 제2정지계통이 정상운전조건으로 원상복구된 상태에서만 비로써 제어봉이 인출될 수 있도록 구성된다. 제2정지계통의 중수가 모두 반사체 탱크로 회수되어 반사체 탱크의 중수 수위가 정상으로 복구된 상태에서만 원자로 기동이 가능하도록 인터록 논리를 구현하여야 한다. 이상의 모든 정지논리는 PLC 형식의 컴퓨터 소프트웨어에 의하여 구현될 것이다.

4.1.4 성능요건

제1정지계통의 성능요건은 원자로 핵설계 및 기계공정계통의 설계가 진행되면서 각 계통의 특성과 설계요건을 근거로 하여 결정하여야 하지만 본 보고서에서는 기존 하나로 원자로 보호계통의 성능요건을 기준으로 하여 미리 정리하여 보았다.

(1) 응답시간

사고를 감지한 순간부터 제어봉이 노심의 완전삽입 위치까지 도달하는데 경과한 전체 시간을 의미한다. 총 응답시간은 계측기 채널의 응답지연시간과 제어봉 낙하시간를 합친 것이라고 할 수 있다. 제어봉 낙하시간은 공통적으로 적용되는 시간인 반면 계측기 지연시간은 각 계측채널의 특성과 계측기의 구성에 따라 크게 달라진다. 설계기준사고가 발생되었을 경우 해당 정지변수의 응답지연시간이 노심의 안전성 확보에 문제가 없는지를 중점적으로 검토하여야 한다. 그림 4-5는 응답시간을 결정하는 주요 지연시간 요소를 도식적으로 표현한 것이다.

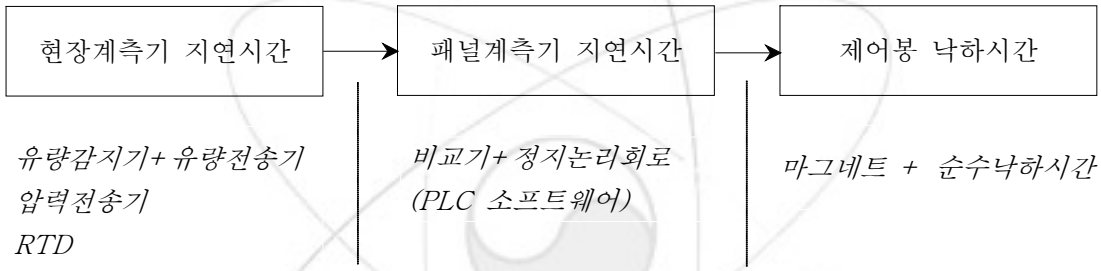


그림 4-5 제1정지계통 응답시간 지연요소

[제어봉 낙하시간]

제어봉 낙하시간은 모든 제1정지변수에 공통적으로 적용되는 지연요소이다. 제어봉 낙하시간 지연요소는 마그네트가 소자되는데 걸리는 시간과 제어봉의 순수 낙하시간으로 구성된다. 마그네트는 DC 전원으로 구동되므로 소자되는데 걸리는 시간은 제어봉의 순수 낙하시간에 비하면 무시할 수 있을 정도이다. 제어봉은 항상 노심 속의 어떤 지점에서 머물고 있는 상태에서 정지 시 노심 속으로 삽입되기 때문에 1초 이상 걸리지 않을 것으로 예상된다. 따라서 **제어봉 낙하시간 지연요소는 1초 이하로 규정**한다.

[계측기 응답시간]

계측기의 응답시간은 그림 4-5에서 보는 바와 같이 현장계측기 지연요소와 패널계측기 지연요소로 구분된다. 현장계측기 지연요소는 계측채널에 따라 크게 차이가 있기 때문에 일률적으로 규정할 수 없다. 하나로 윤전경험과 원자력발전소 등에서 비교적 범용으로 사용되고 있는 현장계측기를 중심으로 각 계측채널 종류별 응답시간 요건을 표 4-2에 정리하였다.

표 4-2 제1정지계통 계측채널별 응답시간 요건

계측 채널	1차감지기	신호전송기	비교기	정지논리회로	구동장치 초기지연	합계
유량	해당 없음	0.25 초	0.1 초	0.1 초	0.2 초	0.65 초
압력	해당 없음	0.25 초	0.1 초	0.1 초	0.2 초	0.65 초
온도	10 초	해당 없음	0.1 초	0.1 초	0.2 초	10.4 초
수위	해당 없음	0.25 초	0.1 초	0.1 초	0.2 초	0.65 초
중성자 대수출력	해당 없음	0.05 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	0.4 초
중성자 선형출력	해당 없음	0.05 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	0.4 초
중성자 대수 출력 변화율	해당 없음	3.5 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	3.85 초
중성자 선형 출력 변화율	해당 없음	2.5 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	2.85 초
감마 출력	해당 없음	0.25 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	0.4 초
FFDS	해당 없음	30 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	30.35 초
수조방사선	해당 없음	60 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	60.85 초

위 표에서 비교기와 정지논리회로의 응답시간 요건은 제1정지계통의 정지신호처리에 사용되는 PLC의 성능에 관계된다. PLC는 정지설정값의 초과를 판단하여 접점신호를 만들어 내는 비교기의 기능을 내장하고 있는 형식이므로 별도의 하드웨어를 의미하는 것은 아니다. 정지논리회로의 응답시간 요건 역시 하드웨어가 아니라 정지논리를 처리하는 소프트웨어 처리 지연시간이라고 생각하면 옳다.

구동장치 초기지연은 기계적인 장치가 관성력을 극복하고 최초 움직일 때까지 지연시간과 마그네트가 소자하여 흡인력을 상실할 때까지의 지연시간을 합친 것이다.

온도 계측채널에서 1차감지기의 응답시간은 RTD 측정시간을 의미하는 것으로써, RTD는 항상 Thermowell 속에 설치되기 때문에 냉각수의 온도가 RTD 감지부까지 전달되는데 걸리는 시간을 감안한 것이다.

FFDS와 수조방사선 계측채널은 펄스 계수회로 형식이므로 펄스 평균시간을 얼마로 결정하느냐에 따라 응답시간이 자동으로 산정되기 때문에 현 단계에서는 하나로에서 사용하고 있는 평균시간을 그대로 기술하였다.

(2) 허용오차

정지변수 계측채널의 허용오차는 사고해석을 수행하기 위하여 필요한 중요한 요소이다. 사고해석에서 좋은 결과를 얻기 위해서는 정확도가 높은 계측기를 사용하는 것이 최적이지만 기기의 구매 가능성, 비용 및 유지보수 등의 측면을 신중하게 고려하여 결정하여야 한다. 사고해석에서 수용 가능한 범위 내에서 쉽게 구입이 가능한 일반적인 제품 수준을 선정하는 것이 엔지니어링 관점에서 중요하다. 표 4-3은 시중에서 일반적으로 구입이 가능하고 원자력 발전소에서 일반적으로 사용하고 있는 제품을 기준으로 허용오차를 기술하였다. 상세 설계가 진행되면서 이들 값은 변동될 가능성이 많다.

표 4-3 제1정지계통 계측채널별 허용오차 요건

계측 채널	구성기기	채널 허용오차(불확도)
유량	유량노즐+ 신호전송기+ PLC	2.5 % FS
압력	신호전송기+ PLC	1.5 % FS
온도	RTD+ PLC	1.0 % FS
수위	1차감지기+ 신호전송기+ PLC	5.0 % FS
중성자 대수출력	핵분열검출기+ 신호증폭기+ 신호처리기	5.0 % FS
중성자 선형출력	핵분열검출기+ 신호증폭기+ 신호처리기	2.5 % FS
중성자 대수 출력 증가율	핵분열검출기+ 신호증폭기+ 신호처리기	2.0 % FS
중성자 선형 출력 증가율	핵분열검출기+ 신호증폭기+ 신호처리기	2.0 % FS
감마 출력	감마이온챔버+ 신호증폭기+ 신호처리기	2.5 % FS
수조방사선	이온챔버+ 신호증폭기+ 신호처리기	20 % FS
FFDS	1차감지기+ 신호증폭기+ 신호처리기	10 % FS

일반적으로 정지변수 계측채널의 불확실도는 사고해석에 따른 정지변수 선정과 함께 진행된다. 즉, 정지변수의 설정값을 결정할 때 각 정지변수 채널 계측기기의 불확실도를 평가하여 정지설정값과 허용 오차값 등을 결정한다. 하나로 설계업무가 진행되던 1992년 정지변수 계측채널에 대한 불확실도 평가를 실시하여 정지변수 채널별 허용 오차값을 계산하였고 이를 사고해석의 입력자료로 사용하였다. 당시의 불확실도 계산에서는 Westing House에서 제안하였던 확률론적 통계처리 방법을 사용하였다[3]. 불확실도 계산에 적용되는 데이터의 종류와 통계처리 방법에 약간의 차이가 있을 수 있고 일부 계측기의 데이터가 존재하지 않을 경우는 일반적 데이터를 준용하여 계산할 수도 있다.

그러나 계측기 구매시방서를 작성할 때 가능한 한 필요한 데이터를 제작사로부터 제공받을 수 있도록 구체적으로 요건을 명기하여야 한다. 수출연구로의 불확실도 분석에서는 계측기 정지설정값과 관련된 국제 규격 ANSI/ISA-S67.04-Part I, “Setpoints for Nuclear Safety-Related Instrumentation”의 요건을 따르는 것이 바람직하다.

4.1.5 연계계통

제1정지계통은 다음과 같은 계통 또는 기기들과 연계되어 작동된다.

- 제어봉 구동장치
- 중성자검출기 하우징
- 전원공급계통
- 제2정지계통
- 원자로 제어계통

(1) 제어봉 구동장치

제어봉 구동장치는 2개의 서로 다른 기능을 가진다. 제1정지계통과 연계하여 원자로 정지기능을 수행함과 동시에 원자로 제어계통의 출력제어 기능을 수행한다. 정지기능은 마그네트 전력제어에 의한 자유낙하기능이고 마그네트가 여자되어 제어봉 상부와 하부가 연결된 상태에서 스텝핑모터의 속도제어에 의한 제어봉의 상하 위치제어 기능이다. 2개의 기능 중에서 원자로 정지기능이 우선되어야 하고 어느 한 쪽의 문제점으로 인하여 다른 쪽 기능이 손상되지 않도록 설계하여야 한다.

(2) 중성자검출기 하우징

제1정지계통은 3채널의 핵분열검출기를 사용하고 제2정지계통은 3채널의 보상형 감마이온챔버를 각각 사용한다. 또한 원자로 제어계통 역시 2채널의 광대역 핵분열검출기를 사용하여야 한다. 이들 검출기들은 원자로 수조의 반사체 탱크 외벽에 설치되는데 원통형 바스켓이 장착된 중성자검출기 하우징에 설치된다. 각 검출기들은 노심의 중성자속을 가장 정확하게 볼 수 있는 위치에 설치되어야 한다. 3개 채널의 중성자검출기 신호값이 모두 일정하도록 대칭적으로 배열하여야 한다. 안전등급 기자재인 중성자검출기를 지지하는 하우징은 반드시 안전등급으로 분류하여 설계기준사고 시에도 구조적인 건전성을 유지할 수 있도록 하여야 한다. 중성자검출기 하우징은 검출기의 감도 저하에 따른 보정을 위하여 수평방향으로의 이동이 가능하도록 설계하여야 한다. 최대 수평이동 거리는 20cm를 넘지 않도록 한다.

(3) 전원공급계통

3개의 정지논리 채널은 24V DC 무정전 전원이 공급되어야 하고 현장 또는 패널계측기들은 120V AC 무정전 전원이 공급되어야 한다. 각각의 무정전 전원계통은 외부전력이 상실된 후에도 최소한 1시간 동안 축전지에 의하여 전원이 공급될 수 있도록

설계하여야 한다. 전원공급계통은 직접적인 안전기능을 수행하지는 않지만 안전등급 기기의 작동을 보조하는 역할을 수행하기 때문에 지진 시에도 그 기능이 유지될 수 있도록 내진등급 I급으로 설계, 제작하여야 한다.

(4) 제2정지계통

제1정지계통은 제2정지계통이 정상상태 즉, 반사체탱크의 중수 수위가 정상운전 수위를 유지하고 있는 상태에서만 제어봉 인출이 가능하도록 설계하여야 한다. 제2정지계통 역시 제어봉의 상태를 필요로 한다. 즉 4개의 제어봉이 모두 완전 삽입상태에 있을 때만 반사체탱크에 중수를 다시 채울 수 있도록 논리를 구성하여야 한다. 2개 계통 사이의 신호는 반드시 격리증폭기를 거치도록 하여 전기적인 독립성을 유지시켜야 한다.

(5) 원자로 제어계통

원자로 제어계통은 제어봉의 모터구동신호를 출력한다. 원자로 제어계통에서 어떠한 비정상이 발생되더라도 제1정지계통의 기능 즉, 제어봉의 자유낙하를 방해해서는 아니된다. 정지 후 제어컴퓨터에 의한 제어봉 인출은 반드시 제1정지계통 및 제2정지계통의 정지조건이 해제되어 마그네트가 정상적으로 결합된 상태에서만 가능하도록 논리를 구성하여야 한다. 제1정지계통과 원자로 제어계통은 전기적으로 완전히 독립된 구조이지만 제1정지계통의 많은 지시정보는 격리증폭기를 거쳐 제어컴퓨터로 입력된다.

4.2 제2정지계통

4.2.1 일반사항

제2정지계통은 반사체 탱크의 중수를 신속하게 배수탱크로 배수함으로써 부반응도를 노심에 주입하여 원자로를 정지시키는 안전 계통이다. 중력에 의하여 자유낙하하는 제어봉은 거의 1초 이내에 노심 속으로 완전 삽입되지만 중수 배수는 배관과 밸브를 통하여 중수가 흘러 배수탱크로 이동하여야 하기 때문에 단순 수두에 의한 배수는 시간이 걸린다. 사고 시 신속한 원자로 정지가 요구되기 때문에 중수배수 시간을 최소한으로 줄이기 위하여 정상상태에서 중수 탱크 상부를 헬륨가스 등을 이용하여 가압하고 있다가 정지 조건에서 배수밸브가 열리면 압력에 의하여 중수배수가 신속하게 이루어지도록 계통을 설계하여야 한다. 배수탱크의 설치위치, 중수배수 배관의 관경과 경로 그리고 배수밸브의 형식 및 수량 등을 신중하게 분석하여 결정하여야 한다. 배수밸브는 제2정지계통의 정지논리신호를 받아 작동되는 최종 구동장치 성격이므로 정지논리와 같이 반드시 다중성 요건을 만족시켜야 하므로, 배수밸브는 최소한 2개 이상 되어야 하고 작동신호도 3개의 정지 논리채널로부터 동시에 받을 수 있도록 설계하여야 한다.

제1정지계통과 함께, 제2정지계통은 안전등급 I, 내진등급 I, 품질등급 Q로 설계하여야 하고 3.1절에 기술되어 있는 안전성 설계요건을 모두 적용하여야 한다.

4.2.2 가상사고와 정지변수

제2정지계통은 제1정지계통과 마찬가지로 4.1.2절에서 기술한 가상사고 발생 시 원자로를 비상 정지시키고 안전한 미임계 상태로 유지시키기 위한 원자로 보호계통이다. 제2정지계통의 계측제어기기들은 원자로가 안전한 상태로 유지되고 있는지를 항상 감시하고 정지설정값을 초과할 경우 반사체 탱크의 중수를 배수하여 원자로를 정지시키는 기능을 수행하여야 한다. 운전원에게 중요 공정변수들의 상태, 경보설정값 및 정지변수의 작동상태 그리고, 중수배수 관련 밸브 및 배수탱크의 상태 등을 항상 제공할 수 있어야 한다.

가상사고가 발생되었을 경우, 원자로를 안전하게 정지시기 위한 정지변수가 적절하게 선정되어야 하고 원자로 안전의 보수성을 높이기 위하여 2개 이상의 정지변수가 동일 가상사고를 감지하여 원자로를 정지시킬 수 있도록 한다. 이와 같은 정지변수들은 가능한 범위 내에서 제1정지계통과 물리적, 전기적으로 독립되어야 한다. 제2정지계통도 제1정지계통과 마찬가지로 이미 정해진 가상사고에 대비하기 위한 정지변수는 다음과 같다.

(1) 반응도 주입사고

반응도 주입사고는 원자로 제어계통 등의 기능상실로 인하여 제어봉이 비정상적으

로 노심에서 인출되는 경우에 발생된다. 제어봉의 비정상적 인출에 의하여 원자로 출력이 비정상적으로 상승할 경우 이를 감지하여 제2정지계통을 작동시키는 정지변수는 다음과 같다.

- 중성자 출력(보상형 이온챔버 계측계통)
- 중성자 출력 증가율(보상형 이온챔버 계측계통)
- 1차냉각계통 감마출력

반응도 주입사고는 저출력, 중출력 및 고출력 등 3개의 구역에서, 출력변화율 한계를 초과하는 빠른 속도로 진행되는 경우와 그러하지 아니하는 느린 속도를 진행되는 경우로 구분하여 해석을 수행한다. 표 4-1에서와 같이, 빠른 속도로 진행되는 경우에는 출력 변화율 또는 고출력 등을 사용하여 원자로 정지신호가 발생되지만, 제1정지계통과 달리, 저출력 또는 중출력 영역에서 느린 속도로 진행되는 반응도 사고에 대한 제2정지계통의 정지변수는 따로 존재하지 않고 운전원에 의한 수동정지 개념을 사용한다. 저출력 또는 중출력 영역에서의 사고는 충분한 여유가 있고 진행속도 또한 느리기 때문에 제1정지계통에 의한 원자로 정지만으로도 충분할 것이라고 가정하였다. 추후 설계를 진행하면서 사고해석의 관점에서 문제가 없는지 여부는 다시 검토해 보아야 한다. 만약 사고해석 상의 문제가 있다면 제1정지계통과 마찬가지로 1% 또는 55% 중출력 정지변수를 채택하여야 할 것이다. 고출력 영역에서의 반응도 사고는 제1정지계통과 같이 1차 정지변수와 2차 정지변수를 모두 적용하여 원자로 정지의 신뢰도를 높였다. 원자로 출력에 비례하는 특성을 가지고 있는 1차냉각계통의 감마출력을 2차 정지변수로 사용하였다.

제2정지계통용 중성자 계측계통은 비교적 고출력에서의 선형성이 양호한 보상형 이온챔버 계측계통을 사용하여 제1정지계통과의 다양성 요건을 만족시킨다. 보상형 이온챔버 계측계통의 출력신호 및 측정범위는 다음과 같다.

- 출력 : 10^{-4} %FP ~ 200 %FP(6 Decade)
- 출력 변화율 : -15 %PP/sec ~ 15 %PP/sec
- 고 출력 정지신호
- 고 변화율 정지신호

(2) 1차냉각계통 기능상실

1차냉각계통의 기능상실 사고는 1차냉각수의 강제순환을 불가능하게 하는 1차펌프 또는 밸브의 고장, 1차배관의 파손에 따른 냉각수 상실사고 등에 의하여 발생한다. 1차냉각계통 기능상실을 감지하기 위한 제2정지계통의 정지변수는 다음과 같다.

- 1차냉각계통 유량

- 1차냉각계통 압력

제1정지계통에서 유량 노즐 또는 벤츄리 형식의 유량감지기를 사용할 예정인데 또 다른 유량감지기를 1차 배관에 따로 설치하는 것은 계통 압력손실 등 여러 가지 문제가 예상되기 때문에 신중하게 검토하여야 한다. 제2정지계통용 유량감지기로서 차압전송기가 아닌 초음파유량계 등을 사용할 수도 있으나 비용 및 기기검증 등의 문제가 예상된다. 하나의 선택사항으로써, 유량감지기는 제1정지계통의 유량감지기를 공통으로 사용하고 계기용 튜브 및 유량전송기부터 독립적으로 설치하는 방안을 생각해볼 수 있다. 유량감지기 부분은 독립성 요건을 만족시키지 못하고 있지만 일반적으로 유량감지기는 공통으로 사용할 수 있도록 허용하고 있으며 하나로의 경우도 하나의 유량감지기로부터 안전계통과 비안전계통 유량신호를 함께 공급받고 있다.

압력신호는 주배관으로부터 계기 튜브를 분기하여 압력전송기에다 연결하면 되므로 3개의 압력전송기를 제2정지계통용으로 설치하는 것은 문제가 없다. 다만, 제1정지계통과의 다양성 요건을 만족시키기 위하여 계기 튜브의 분기 위치를 제1정지계통과 다르게 하는 것이 바람직하다.

(3) 2차냉각계통 기능상실

2차냉각계통의 기능상실은 2차냉각펌프 또는 밸브의 고장, 배관 파단 또는 냉각탑 기능상실 등과 같은 사고가 발생하였을 경우 원자로 노심에서 발생된 열을 충분하게 제거하지 못하게 되는 사고이다. 2차냉각계통의 기능이 상실되었을 경우 이를 감지하여 원자로를 정지시킬 수 있는 제2정지계통의 정지변수는 다음과 같다.

- 1차냉각계통 출구 온도
- 반사체냉각계통 출구 온도

2차냉각계통은 비안전등급 및 비내진등급으로 분류되기 때문에 2차냉각배관에 안전등급 유량 또는 압력감지기를 설치하는 것은 의미가 없다. 이를 위하여 2차냉각계통을 안전등급으로 분류할 수는 없기 때문에 안전등급 또는 내진등급으로 분류되는 1차냉각계통 온도신호 및 반사체냉각계통 온도신호를 이용하는 것이 타당하다. 제1정지계통에도 동일 목적의 온도계측기가 설치될 예정이므로 제2정지계통용 온도계측기는 설치 위치를 서로 다르게 하여 독립성과 다양성을 이룩하여야 할 것이다. 온도계측기는 내구성과 정확도가 뛰어나고 공정제어에 널리 사용되는 저항온도계측기를 사용하는 것이 바람직하다.

(4) 반사체 냉각계통 기능상실

반사체 냉각계통의 기능상실 사고는 중수의 강제순환을 불가능하게 하는 반사체 펌프 또는 밸브의 고장, 중수배관의 파손에 따른 중수 상실사고 등에 의하여 발생한다.

원자로 수조 내에서의 배관 또는 반사체 탱크 파손사고도 반사체 냉각계통 기능상실에 속하지만 이 사고는 원자로 출력 증강을 유발하는 반응도 주입사고에 해당되므로 따로 다루기로 한다. 반사체 냉각계통 기능상실을 감지하기 위한 정지변수는 다음과 같다.

- 반사체 유량신호
- 반사체 압력신호

동일 계통에 2개 이상의 유량감지기를 설치하는 것은 바람직하지 않기 때문에 유량신호는 제1정지계통용으로만 사용하고 제2정지계통에서는 유량신호 대신 반사체 압력신호를 1차 정지변수로, 반사체 출구온도를 2차 정지변수로 사용한다. 즉, 반사체 냉각계통 기능상실 사고를 감지하기 위한 제1정지계통 변수로는 반사체 유량신호와 반사체 압력신호를 사용하고 제2정지계통 변수로서는 반사체 압력신호와 반사체 출구온도를 사용하는 방안이다. 물론 이에 대한 확정은 상세설계와 사고해석이 수행되어야만 가능할 것이다.

(5) 수조내 중수배관 파손 사고

중수탱크 출구배관이 파손되면 중수계통에 수조수(경수)가 유입되어 중수의 수질이 저하된다. 이로 인하여 부반응도가 노심에 삽입되고 중수탱크 외벽에 설치되어 있는 중성자 계측기는 실제 노심의 출력보다 낮아진다. 따라서 중성자 계측기의 출력신호를 받는 원자로 제어계통은 제어봉을 인출하여 낮아진 출력만큼 출력을 상승시켜 요구출력에 현재의 출력을 일치시키려 할 것이다. 결론적으로 원자로 제어계통은 현재출력을 요구출력에 일치시켜야 하는 본래의 기능을 다 하지만 실질적으로는 경수 유입으로 낮아진 중성자 계측기 출력만큼 노심의 열출력을 비정상적으로 상승시키는 결과를 가져오기 때문에 이는 곧 반응도 사고와 동일한 결과를 초래한다. 중수 배관 파손사고가 발생하더라도 중성자 계측기가 감지하는 중성자 출력은 정상상태를 유지하기 때문에 중성자 출력으로는 이 사고를 감지할 수가 없다. 수조내 중수배관 파손 사고의 특이성으로 인하여, 이 사고를 감지할 수 있는 제2정지계통의 정지변수는 다음과 같은 신호들이다.

- 1차냉각계통 출구온도
- 반사체냉각계통 출구온도

1차냉각계통 감마출력신호는 제1정지계통 정지변수로 사용하기 때문에 다양성 요건을 만족시키기 위하여 제2정지계통에서는 온도신호를 정지변수로 사용한다. 1차냉각계통 및 반사체 냉각계통에는 제2정지계통용 온도계측기가 설치되므로 이들을 이용하여 수조내 중수배관 파손 사고를 감지할 수 있다. 즉, 원자로 출력이 상승하기 때문에 이에 비례하여 냉각계통의 출구온도도 비정상적으로 상승하기 때문에 설정값을 초과할 경우 원자로를 정지할 수 있다.

(6) 원자로 수조수 상실사고

제1정지계통용은 수위전송기를 사용하고 제2정지계통용은 수위스위치 형식을 사용함으로써 하드웨어의 다양성 요건을 만족시키는 것도 좋은 방안이 될 수 있다. 수조내 계측기의 수를 줄이기 위하여 제2정지계통용 수위스위치는 비상보충수 작동을 위한 기능을 동시에 수행할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

수조수 상실사고는 다른 가상사고에 비하여 사건의 진행이 느리고 노심냉각기능에 여유가 있으며 비상보충수 작동기능도 준비되어 있는 상태이므로 2차 정지변수로는 수조 표면 방사선을 제1정지계통과 제2정지계통에 공통으로 사용한다. 그러나 수위 측정 계측기는 제1정지계통 및 제2정지계통에 독립적으로 설치하여 사고에 대비하여야 한다.

(7) 핵연료 파손사고

핵연료 파손사고는 공정변수와 달리 지발중성자 또는 감마선을 측정하는 방법 외에는 감지가 불가능하다. 따라서 제1정지계통 및 제2정지계통 모두에게 1차 정지변수와 2차정지변수를 각각 구현하기가 어렵다. 따라서 핵연료 파손사고의 경우는 예외적으로 1차 정지변수만 사용한다. 핵연료 파손사고는 방사선 누출과 직결되는 심각한 사고에 해당되므로 제1정지계통 및 제2정지계통에 공통으로 1차정지변수로 사용한다. 이는 2개 정지계통의 독립성과 다양성 요건에 위배되지만 핵연료 파손 사고의 특성상 2차 정지변수를 따로 두기가 어렵고 연구용 원자로의 특성과 고유 안전성 등을 고려한 것이다.

1차냉각계통 감마출력 신호는 수조내 중수배관 파손사고의 1차정지변수 및 핵연료 파손사고의 정지변수로 중복 사용된다. 추후 설계가 진행되어야 확정되겠지만, 각각의 경우 정지설정값을 다르게 설정할 필요성이 있다. 감마출력신호의 주목적은 수조내 배관 파손사고를 감지하여 원자로를 조기에 정지시키는 것이므로 이때의 정지설정값은 고출력 설정값인 115 %FP 정도이지만 핵연료 파손사고는 파손의 정도를 평가하고 핵분열 생성물에 대한 계측기의 효율 등을 감안하여 결정하여야 할 것이다.

(8) 외부전력 상실사고

제1정지계통 및 제2정지계통은 모두 Fail-safe 설계원칙을 적용하여 설계한다. 외부전원이 상실되면 제어봉의 클러치 전원이 차단되어 제어봉은 중력에 의하여 노심 속으로 삽입되므로 정지변수로 지정할 필요가 없다.

4.2.3 정지논리

제1정지계통의 정지논리는 디지털 컴퓨터 개념의 PLC를 사용하지만 제2정지계통은 다양성 요건을 최대한 만족시키기 위하여 아날로그 형식 하드웨어를 사용하여 구현하는 것이 바람직하다. 아날로그 형식으로는 현재 하나로 원자로 보호계통에 사용되고 있는 계전기를 사용할 수 도 있으나 접점의 기계적인 접촉 시 발생될 수 있는 고주파 노

이즈 제거 문제에 신경을 써야 한다. 기계적 계전기 이외에도 정지논리 구현에 적용할 수 있는 여러 가지 형태의 아날로그 형식의 제어기들이 많이 소개되고 있다.

제2정지계통 역시 제1정지계통과 같이 3개의 다중 채널로 구성되고 종합 동시성 논리를 사용하여 구현한다. 그림 4-2를 참조하면 이해가 가능하므로 동시성 논리에 대하여 별도 소개는 하지 않는다. 그림 4-6, 4-7은 제2정지계통에 대한 논리회로를 개념적으로 보여주고 있다. 그림 4-6에서 보는 바와 같이 제2정지계통은 모두 12개의 정지변수를 가지고 있다. 12개의 정지변수 중 1차냉각계통 감마출력, 파손핵연료 검출계통 그리고 수조방사선 정지변수 등은 제1정지계통과 함께 공통으로 사용된다. 제2정지계통에서는 제1정지계통과 같은 중출력 정지변수는 도입하지 않고 보상형 이온챔버로부터의 대수출력 변화율 신호와 고출력만을 반응도 사고에 대비하기 위한 정지변수로 사용하고 있다.

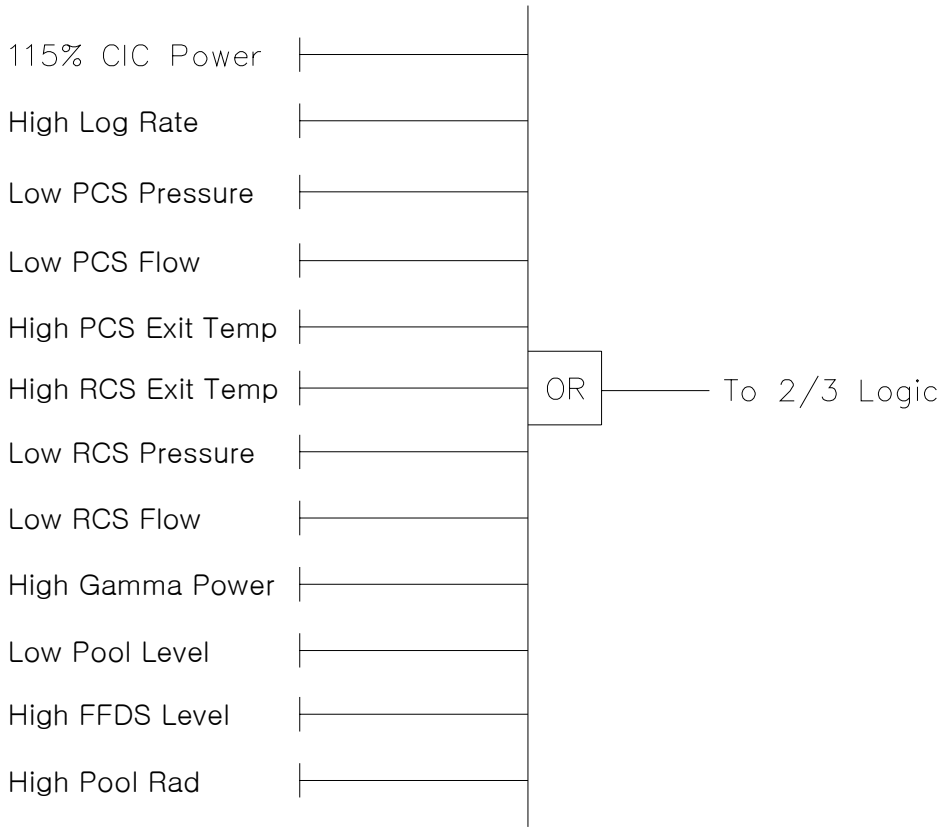


그림 4-6 제2정지계통 채널 정지 논리회로

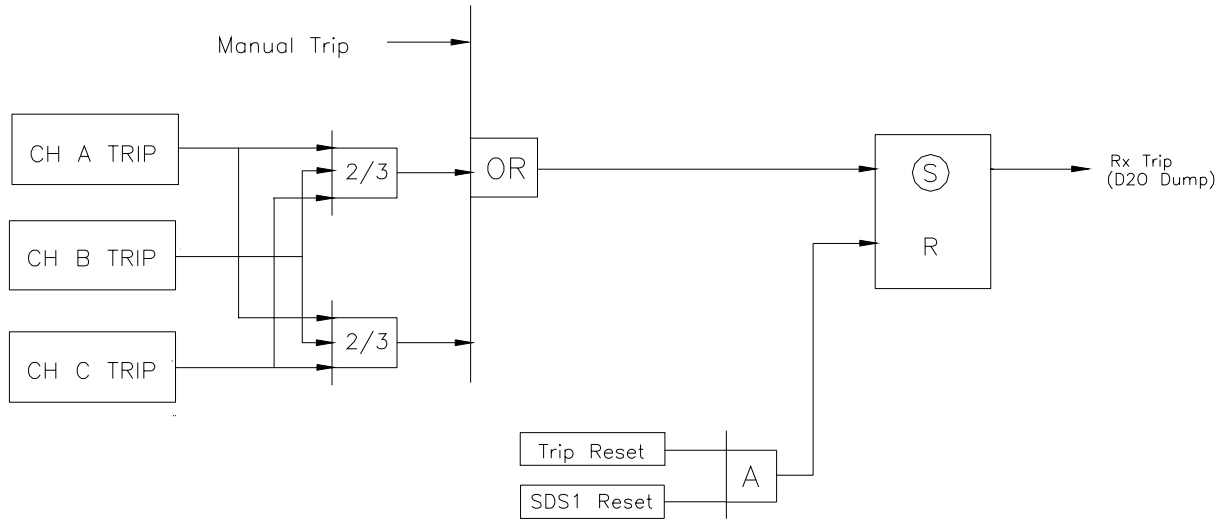


그림 4-7 제2정지계통 2/3 Logic

그림 4-7은 제2정지계통의 3개 채널의 정지신호를 처리하는 2/3 정지논리를 보여주고 있다. 정지논리의 기본은 제1정지계통과 크게 다르지 않다. 3개의 채널 중에서 2개 이상이 작동되었을 때 비로써 원자로 정지신호가 생성된다. 제2정지계통의 정지 리세트를 위해서는 제1정지계통이 정상상태 즉, 모든 정지조건이 해제되어 정지논리가 리세트되어 있어야 한다.

4.2.4 성능요건

제2정지계통의 성능요건은 제1정지계통과 대동소이하다. 원자로 핵설계 및 기계공정계통의 설계가 진행되면서 각 계통의 특성과 설계요건을 근거로 하여 최종 결정될 것이다.

(1) 응답시간

응답시간이란 사고를 감지한 순간부터 중수배수 밸브가 개방되어 반사체 탱크의 중수 수위가 낮아지고 충분한 부반응도가 노심에 인가될 때까지의 경과시간을 의미한다. 제1정지계통의 제어봉 낙하와는 달리 중수가 물리적으로 배수탱크까지 이동하여야 하므로 응답지연시간이 다소 길어진다. 중수탱크 상부를 고압의 헬륨으로 충진하여 배수시간을 어느 정도 줄일 수 있으나 한계가 있으며, 압력을 높일 경우 반사체 및 원자로 구조물의 건전성도 고려하여야 하므로 적정한 선에서 최적의 조건을 찾아야 할 것이다. 그림 4-8은 제2정지계통의 응답시간 지연요소를 보여주고 있다.

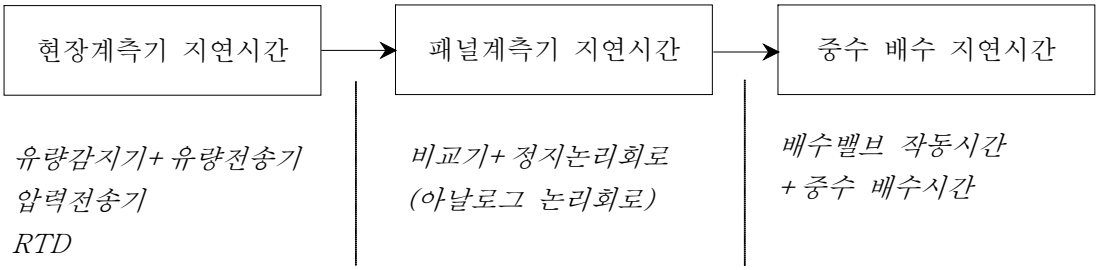


그림 4-8 제2정지계통 응답시간 지연요소

[중수배수 지연시간]

중수배수 지연시간은 모든 제2정지변수에 공통적으로 적용되는 지연요소이다. 중수배수 지연시간은 여러 개로 구성되는 중수배수밸브의 전원이 소자되어 밸브가 완전 열림상태로 진행되는데 걸린 시간과 중수탱크에 있던 중수가 배수탱크로 이동하는데 걸리는 시간을 의미한다. 반사체 탱크에 인가되는 헬륨 충진압력에 따라 달라지지만 개념적으로 **중수배수 지연시간은 5초 이하**로 정한다.

[계측기 응답시간]

계측기의 응답시간은 그림 4-8에서 보는 바와 같이 현장계측기 지연요소와 패널계측기 지연요소로 구분된다. 현장계측기 지연요소는 계측채널에 따라 크게 차이가 있기 때문에 일률적으로 규정할 수 없다. 하나로 윤전경험과 원자력발전소 등에서 비교적 범용으로 사용되고 있는 현장계측기를 중심으로 각 계측채널 종류별 응답시간 요건을 표 4-4에 정리하였다.

표 4-4 제2정지계통 계측채널별 응답시간 요건

계측 채널	1차감지기	신호전송기	비교기	정지논리회로	구동장치 초기지연	합계
유량	해당 없음	0.25 초	0.1 초	0.1 초	0.2 초	0.65 초
압력	해당 없음	0.25 초	0.1 초	0.1 초	0.2 초	0.65 초
온도	10 초	해당 없음	0.1 초	0.1 초	0.2 초	10.4 초
수위	해당 없음	해당 없음	0.1 초	0.1 초	0.2 초	0.4 초
중성자 출력 (CIC)	해당 없음	0.05 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	0.4 초
중성자 출력 변화율	해당 없음	3.5 초	0.05 초	0.1 초	0.2 초	3.85 초

(2) 허용오차

정지변수 계측채널의 허용오차는 사고해석을 수행하기 위하여 필요한 중요한 요소이다. 사고해석에서 좋은 결과를 얻기 위해서는 정확도가 높은 계측기를 사용하는 것이 최적이지만 기기의 구매 가능성, 비용 및 유지보수 등의 측면을 신중하게 고려하여 결정하여야 한다. 사고해석에서 수용 가능한 범위 내에서 쉽게 구입이 가능한 일반적인 제품 수준을 선정하는 것이 엔지니어링 관점에서 중요하다. 표 4-3은 시중에서 일반적으로 구입이 가능하고 원자력 발전소에서 일반적으로 사용하고 있는 제품을 기준으로 허용오차를 기술하였다. 상세 설계가 진행되면서 이들 값은 변동될 가능성이 많다.

표 4-5 제2정지계통 계측채널별 허용오차 요건

계측 채널	구성기기	채널 허용오차(불확도)
유량	유량노즐+ 신호전송기+ 논리신호	2.5 % FS
압력	신호전송기+ 논리신호	1.5 % FS
온도	RTD+ 논리신호	1.0 % FS
수위	1차감지기+ 스위치+ 논리회로	5.0 % FS
중성자 출력	CIC+ 신호증폭기+ 신호처리기	2.0 % FS
중성자 출력 증가율	핵분열검출기+ 신호증폭기+ 신호처리기	2.0 % FS

4.2.5 연계계통

제2정지계통은 다음과 같은 계통 또는 기기들과 연계되어 작동된다.

- 중성자검출기 하우징
- 전원공급계통
- 제1정지계통
- 원자로 제어계통
- 반사체 냉각계통

(1) 중성자검출기 하우징

제1정지계통은 3채널의 핵분열검출기를 사용하고 제2정지계통은 3채널의 보상형 감마이온챔버를 각각 사용한다. 또한 원자로 제어계통 역시 2채널의 광대역 핵분열검출기를 사용하여야 한다. 이들 검출기들은 원자로 수조의 반사체 탱크 외벽에 설치되는데 원통형 바스켓이 장착된 중성자검출기 하우징에 설치된다. 각 검출기들은 노심의 중성자속을 가장 정확하게 볼 수 있는 위치에 설치되어야 한다. 3개 채널의 중성자검출기 신호값이 모두 일정하도록 대칭적으로 배열하여야 한다. 안전등급 기자재인 중성자검출

기를 지지하는 하우징은 반드시 안전등급으로 분류하여 설계기준사고 시에도 구조적인 건전성을 유지할 수 있도록 하여야 한다. 중성자검출기 하우징은 검출기의 감도 저하에 따른 보정을 위하여 수평방향으로의 이동이 가능하도록 설계하여야 한다. 최대 수평이동 거리는 20cm를 넘지 않도록 한다.

(2) 전원공급계통

3개의 정지논리 채널은 24V DC 무정전 전원이 공급되어야 하고 현장 또는 패널계측기들은 120V AC 무정전 전원이 공급되어야 한다. 각각의 무정전 전원계통은 외부 전력이 상실된 후에도 최소한 1시간 동안 축전지에 의하여 전원이 공급될 수 있도록 설계하여야 한다. 전원공급계통은 직접적인 안전기능을 수행하지는 않지만 안전등급 기기의 작동을 보조하는 역할을 수행하기 때문에 지진 시에도 그 기능이 유지될 수 있도록 내진등급 I급으로 설계, 제작하여야 한다.

(3) 제1정지계통

제1정지계통은 제2정지계통이 정상상태 즉, 반사체탱크의 중수 수위가 정상운전 수위를 유지하고 있는 상태에서만 제어봉 인출이 가능하도록 설계하여야 한다. 제2정지계통 역시 제어봉의 상태를 필요로 한다. 즉 4개의 제어봉이 모두 완전 삽입상태에 있을 때만 반사체탱크에 중수를 다시 채울 수 있도록 논리를 구성하여야 한다. 2개 계통 사이의 신호는 반드시 격리증폭기를 거치도록 하여 전기적인 독립성을 유지시켜야 한다.

(4) 원자로 제어계통

원자로 제어계통은 제어봉의 모터구동신호를 출력한다. 원자로 제어계통에서 어떠한 비정상이 발생되더라도 제1정지계통의 기능 즉, 제어봉의 자유낙하를 방해해서는 아니된다. 정지 후 제어컴퓨터에 의한 제어봉 인출은 반드시 제1정지계통 및 제2정지계통의 정지조건이 해제되어 마그네트가 정상적으로 결합된 상태에서만 가능하도록 논리를 구성하여야 한다. 제1정지계통과 원자로 제어계통은 전기적으로 완전히 독립된 구조이지만 제1정지계통의 많은 지시정보는 격리증폭기를 거쳐 제어컴퓨터로 입력된다.

(5) 반사체 냉각계통

제2정지계통은 반사체 냉각계통에 속하는 중수배수밸브를 작동시키기 위한 신호를 출력한다. 제2정지계통은 반사체 탱크 수위, 중수 배수탱크 수위, 반사체 탱크 헬륨압력 그리고 중력배수밸브들의 상태 등을 받아들인다.

4.3 원자로 제어계통

4.3.1 설계요건

앞서 설명한 바와 같이 원자로 제어계통은 비안전등급으로 분류하였으므로 원자로 보호계통과 같이 안전성 설계요건을 강제 적용할 필요는 없다. 그러나 원자로 출력제어는 안전성 보장의 근간이 되는 기능이면서 제어 알고리즘의 정확도와 신뢰도는 원자로 이용 측면에서도 중요하다. 이와 같은 기능의 중요도를 고려하여, 원자로 제어계통은 비록 비안전계통이지만 다음과 같이 안전성 설계요건을 적용하여 설계, 제작한다.

- 중성자 계측계통의 다중성 적용
- 원자로 열출력(또는 기타 출력 대표신호)의 다양성, 다중성 적용
- 원자로 제어컴퓨터 하드웨어(입출력 장치, 중앙처리장치, 전원공급장치 등)의 다중성 적용
- 다중 채널간 전기적, 물리적 독립성
- 무정전 전원계통 사용
- 제어봉 구동장치 제어기의 독립성

원자로 제어컴퓨터는 내진등급으로 설계할 필요는 없지만 품질등급은 T 등급으로 분류하여 하드웨어 및 소프트웨어의 신뢰도를 높인다. 그리고 원자로 제어컴퓨터는 원자로 출력제어 알고리즘 관련 기능을 수행하고 공학적 안전설비 관련 기능은 별도의 제어기를 사용하여 역할을 분산시킴으로써 각 기능의 신뢰도는 높이고 공통원인고장에 의한 위험도는 줄인다. 그림 2-1에서 표시한 바와 같이 분산 제어 컴퓨터끼리는 통신망을 구축하여 중요 데이터의 교환이 가능하도록 한다.

4.3.2 출력제어 알고리즘

출력제어 알고리즘은 핵연료 및 원자로의 특성, 제어봉의 반응도가, 제어봉 구동장치의 특성 등 여러 가지 설계 특성에 따라 달라지지만 계측제어의 관점에서 수출연구로에 적용할 출력제어 알고리즘의 기본 요건을 간략히 기술한다. 그림 4-9는 출력제어 알고리즘을 몇 개의 중요한 부분으로 구분하여 표시하였다.

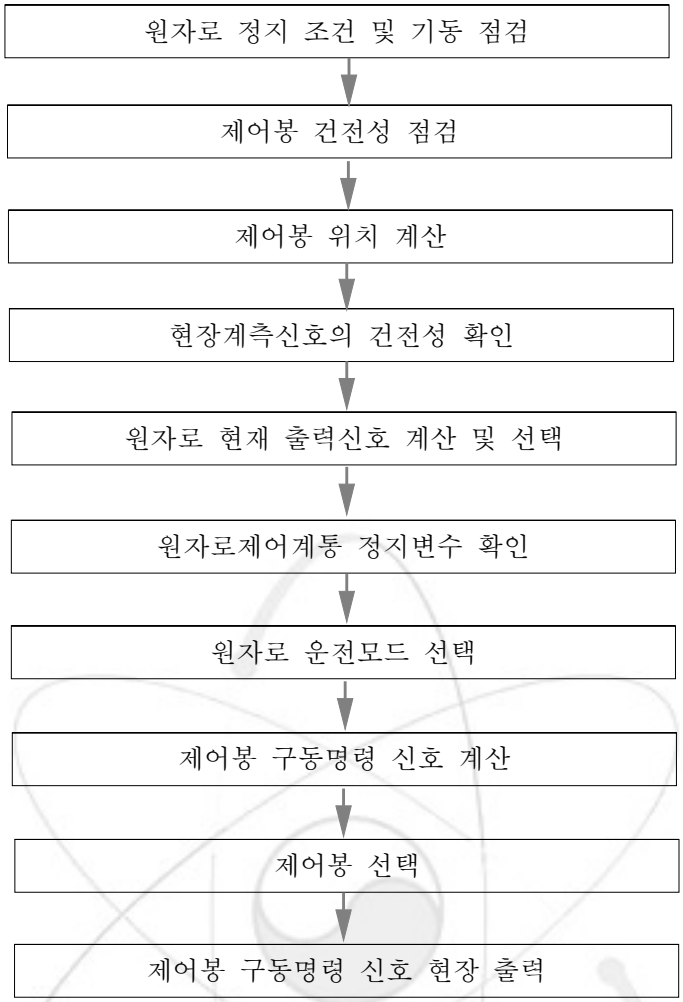


그림 4-9 출력제어 알고리즘의 구성

출력제어 알고리즘에서 원자로 출력 계측신호, 원자로 운전모드, 출력제어 원리, 원자로 제어계통 정지변수, 제어봉 제어장치 설계 등은 원자로 제어계통의 개념설계에서 가장 중요한 부분이다. 아직 설계가 본격적으로 진행되지 않은 상태에서 설계의 방향을 확정할 수는 없지만 최적의 방안을 제시할 필요는 있다.

(1) 원자로 출력신호

원자로 출력신호는 중성자 출력과 열출력 등으로 나눌 수 있다. 중성자 출력은 노심의 핵반응에 의하여 생성되는 중성자를 측정하여 현재의 원자로 출력으로 환산하는 상대적 개념의 출력이고 열출력은 1차 열교환기 입출구 온도와 유량을 이용하여 계산하는 실제적인 원자로 출력을 의미한다. 이들 2개의 출력신호는 각각의 특성이 다르기 때문에, 중성자 출력은 원자로 출력제어 입력신호 및 고출력 경보신호로 사용하고 열출력은 실제 원자로 출력을 나타내기 때문에 중성자 신호 교정에 사용하는 기준신호의 역할을 담당하도록 한다.

중성자 계측계통은 광대역 핵분열전리함을 사용한다. 원자로 수조내에 여러 가지 실험시설과 조사장치 등을 설치하여야 하는 연구로의 특성을 감안하면 중성자 검출기의 수를 최소화하는 설계가 요구되는데 광대역 핵분열전리함이 이러한 요건에 가장 잘 부합한다. 원자력 발전소의 경우는 기동영역, 중간영역 및 출력영역 등 각각의 범위에 서로 다른 중성자 검출기를 사용하고 안전계통과 비안전계통에 독립적으로 사용하기 때문에 감지기의 수가 많아질 수밖에 없다. 수출연구로의 경우는 하나의 중성자 검출기를 이용하여 기동영역과 중간영역뿐만 아니라 출력영역의 선형성까지도 보장할 수 있는 광대역 핵분열전리함 형식을 사용한다. 중성자 검출기는 노심 밖 원자로 집합체 3곳에 대칭적으로 설치되는 검출기 하우징에 설치한다.

열출력은 냉각수 온도와 유량신호를 이용하여 계산하는 실제 원자로 출력을 의미한다. 열출력 계산에는 노심 핵분열에 의한 출력과 노심을 둘러싸고 있는 반사체 계통의 열출력 그리고 냉각펌프, 기타 구조물의 발열에 의한 열출력 등 모든 변수들이 모두 포함되어야 한다. 일반적으로 90% 이상은 노심 핵분열에 의한 열출력이기 때문에 1차냉각계통에서 발생되는 열출력을 정확하게 측정, 계산하는 것이 무엇보다 중요하다. 연구로의 경우 전출력으로 운전하더라도 열교환기에서의 입출구 온도차는 크지 않기 때문에 온도신호의 측정오차를 최소한으로 줄일 수 있도록 하드웨어를 선정하여야 한다. 1차냉각계통의 열은 2차냉각계통에 의하여 회수되기 때문에 1차냉각계통에서 손실된 열은 2차냉각계통이 획득한 열과 동일하므로 2차냉각계통에서서 동일한 방법으로 열출력을 계산하여 1차냉각계통의 열출력과 비교 검토하는 논리를 만들어 열출력 계산의 정확도를 높일 수 있도록 한다.

열출력 계산에 사용되는 온도감지기는 저항온도계축기를 이용하는데 저항온도계측기는 약 10초 이상의 응답지연이 있기 때문에 출력과도상태에서는 신속하게 출력변화를 따라갈 수가 없다. 또한 2차냉각계통은 대기에 노출되어 있는 냉각탑을 사용하여 열을 제거하기 때문에 냉각계통의 온도신호는 외기의 영향을 많이 받을 수밖에 없다. 특히 외기 온도가 낮은 겨울철에는 냉각수의 온도 변화에 따라 실제 원자로 출력과 관계없이 열출력이 안정되는데 오랜 시간이 소요된다.

(2) 출력제어 원리

원자로 출력제어는 중성자 출력신호를 이용하여 원자로 출력을 운전원이 입력한 요구출력에 일치될 때까지 제어봉을 아래위로 구동시킴으로써 이루어진다. 현재출력이 요구출력에 안정되면 제어봉의 움직임은 최소한으로 유지될 것이고 운전원이 새로운 요구출력을 입력할 때까지는 안정상태로 유지된다. 새로운 요구출력으로 출력을 상승시킬 경우 출력 상승속도는 해석에 의하여 결정되는 설정값 이하로 유지되도록 제어 알고리즘을 설계한다. 출력 상승속도는 제어봉의 반응도가와 핵연료 특성 등에 의하여 결정된다. 그림 4-10은 원자로 출력제어 개념을 보여주고 있다.

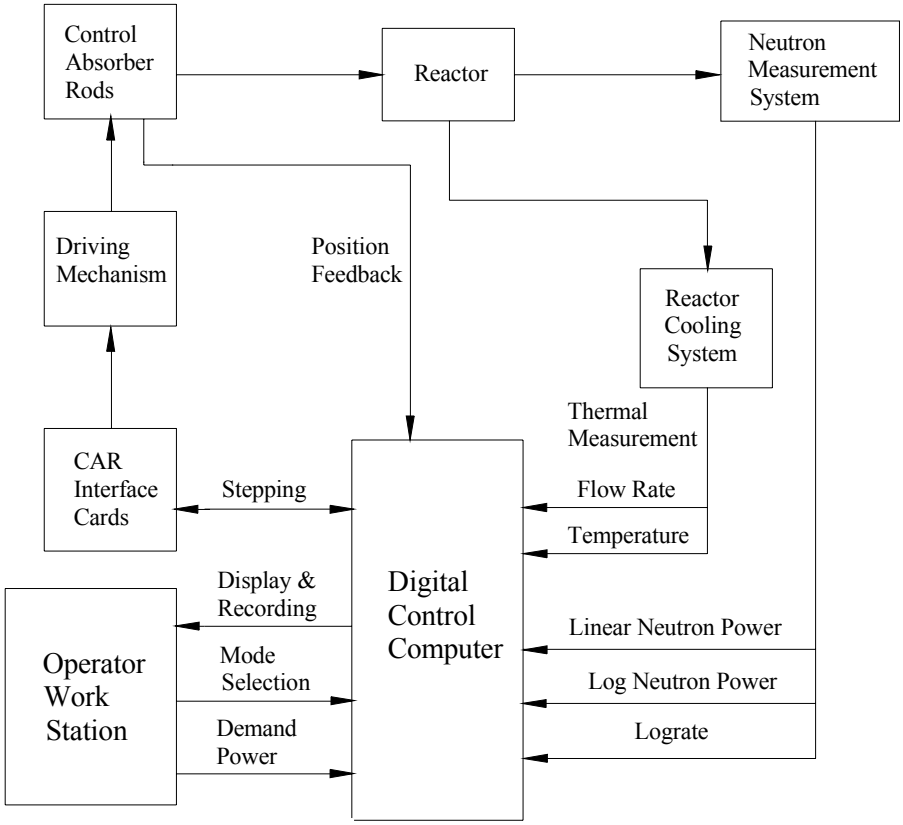


그림 4-10 원자로 출력제어 개념도

기본적으로 원자로의 출력제어는 제어컴퓨터에 의하여 자동으로 이루어지지만 중성자 출력신호가 미약한 10^{-5} %FP 이하의 저출력에서는 중성자 신호의 신뢰도가 낮기 때문에 자동운전을 수행하는 것은 오히려 문제가 될 수 있다. 따라서 중성자 출력이 충분한 신뢰도를 가지게 되는 일정 출력영역 이상으로 될 때까지는 수동으로만 운전할 수 있도록 하고 반대로 열출력이 나타나기 시작하는 1 %FP 이상의 비교적 높은 출력영역에서는 운전원의 실수에 의한 운전사고를 방지하기 위하여 자동운전모드만 가능하도록 논리를 구성한다.

4.4 제어컴퓨터 계통

제어컴퓨터의 주 기능은 원자로 출력제어 알고리즘을 수행하는 것이고 각종 공정계통의 신호 지시, 기록 및 경보기능 등을 담당한다. 제어컴퓨터는 제어 알고리즘을 수행하는 컴퓨터 본체부분과 각종 신호를 지시하고 제어신호를 입력할 수 있는 운전원 웍스테이션(Operator Work Station)으로 구분된다. 컴퓨터 본체 부분과 운전원 웍스테이션은 데이터 링크를 통하여 네트웍을 구성한다.

원자로의 제어를 전담하게 되는 제어컴퓨터뿐만 아니라 연구로 주변 이용연구시설의 제어컴퓨터도 설치되는데 이들 전체를 하나의 통신망으로 연결하여 통합 시스템 개념으로 구성하는 것이 바람직하다. 해당 시설 또는 장치를 직접 제어하기 위한 전용 컴퓨터는 별도로 설치하여 자동 제어할 수 있도록 하되, 제어실의 운전원 웍 스테이션은 통합 구성하여 운영할 수 있도록 설계한다.

제어컴퓨터 계통은 원자로 보호계통과 전기적, 물리적으로 분리되어 있고 제어컴퓨터의 고장으로 원자로 제어계통의 정지기능이 불가능하게 되더라도 원자로 보호계통의 정지변수에 의하여 원자로 안전이 보장되기 때문에 컴퓨터계통은 비안전등급 및 비내진등급으로 분류한다. 그러나 하드웨어의 품질을 보장하고 계통의 신뢰도를 향상시키기 위하여 하드웨어의 다중성과 독립성 등이 보장되어야 한다. 제어컴퓨터의 하드웨어는 완전 2중화 구조로 구성하여 주 제어기가 고장날 경우는 원자로 정지 없이 제어기능이 보조제어기로 전환될 수 있도록 자기진단기능을 보유하여야 한다. 제어컴퓨터 계통이 가져야하는 기본 성능요건은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 하드웨어의 2중화 구조
- 소프트웨어 프로그래밍 기법의 단순화
- 입출력 신호의 확장성
- 자기진단기능
- 실시간 데이터 처리 성능
- 외부기기와의 통신 기능
- 인간공학 설계개념을 구현한 그래픽 기능
- 하드웨어 및 소프트웨어 공급의 지속성

그림 4-11은 수출연구로에 적용할 수 있는 일반적인 개념의 컴퓨터계통 구조도이다. 계통의 구성은 설계가 진행되면서 확정될 것이다.

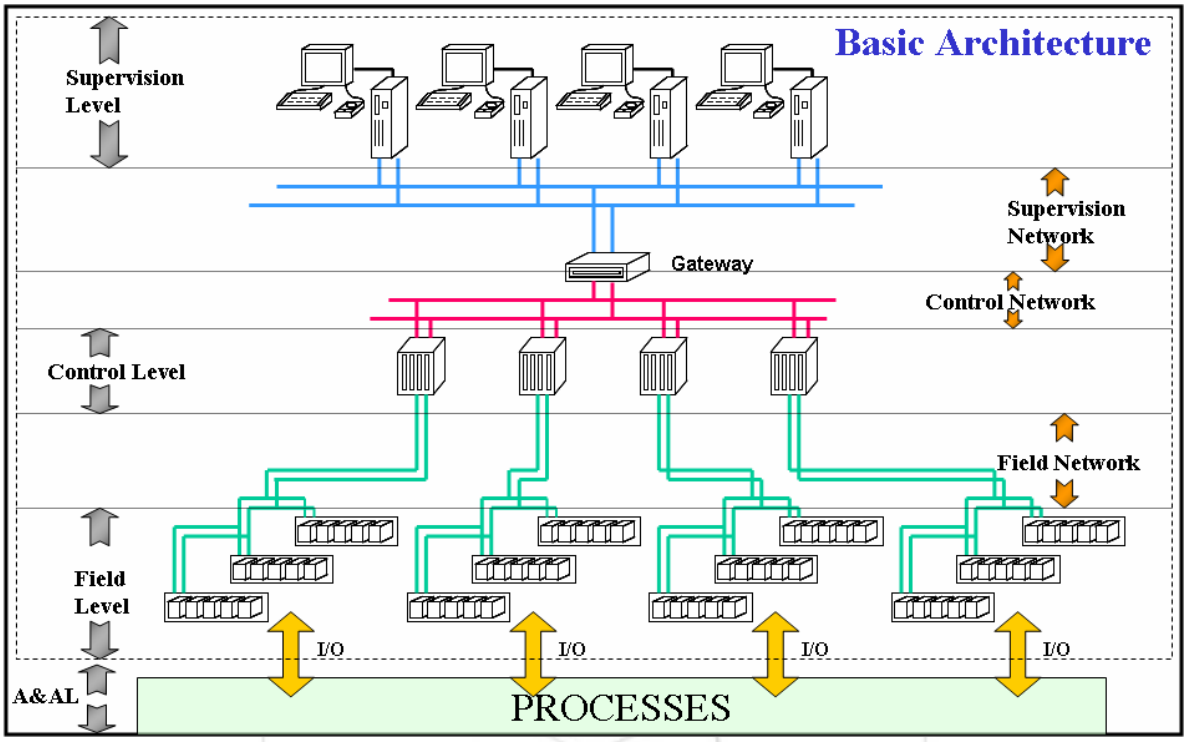


그림 4-11 수출연구로의 컴퓨터 계통 구성도

4.5 공학적 안전설비 제어계통

원자력발전소와는 달리 연구용 원자로의 공학적 안전설비는 연구로의 고유 안전성을 고려하여 비안전등급으로 분류한다. 그러나 기능의 중요도를 감안하여 품질등급 T 및 내진등급 II급을 선별 적용하여야 한다. 수출연구로에 적용되는 공학적 안전설비 계통에는 다음과 같은 설비 또는 계통이 포함된다.

- 원자로 수조
- 원자로 격납계통
- 비상보충수 공급계통
- 비상환기계통

(1) 원자로 수조

원자로 수조는 구조적 건전성을 유지하는 것으로써 궁극적 열제거원 및 방사선 차폐 역할을 다하기 때문에 별도의 제어장치는 필요 없다. 그러나 수조수는 사고 발생 시 노심냉각의 최후 수단이므로 어떠한 경우에도 누설되지 않도록 라이너를 제작하여야 한다. 수조 라이너는 지진과 같은 설계기준사고 시에도 수조수의 누수가 발생하지 않도록 내진등급 I급으로 설계, 제작하여야 한다. 수조수의 누설을 확인하기 위한 누수감지 계통을 고려하여야 한다.

수조 하부로부터 상승하는 방사선을 저감시키기 위하여 원자로 수조 상부에는 수조 고온층을 설치하여야 한다. 수조 고온층의 두께는 최소한 1.5 미터 이상이어야 하며 고온층의 온도는 50℃ 이상되어야 한다. 원자로 수조 수위는 항상 일정한 상태를 유지하도록 하여야 하고 필요 시 언제든지 자동, 원격 충수가 가능하도록 계통을 구성하여야 한다. 수조 고온층을 파괴하지 않도록 하기 위하여 충수 밸브의 종단부는 고온층 이하 위치까지 연장 설치하여야 한다.

다음과 같은 계측기기들이 원자로 수조에 설치되어야 한다.

- 수위 계측기(제1정지계통)
- 수위 계측기(수위 제어용)
- 수위 스위치(제2정지계통+비상보충수 공급계통용)
- 온도계측기(수조수 온도계측용)

(2) 원자로 격납계통

연구로는 저온, 저압조건에서 운전되며 사고 시에도 건물 내부에 고압이 걸리지 않으므로 원자력발전소의 격납(Containment) 개념과는 다른 준격납(Confinement) 개념을 채택한다. 준격납개념에는 원자로건물과 배기계통의 팬, 여과기, 덕트, 댐퍼 등으로 구성된다. 준격납개념은 정해진 경로를 통해 공기를 방출하여 건물 내부를 부압으로 유지함으로써 환경으로 방사성물질의 방출을 제어하는 기능을 가지며, 또한 원자로와 관련 계통 및 장비들을 자연재해로부터 보호하는 기능을 갖는다.

준격납계통의 설계기준은 핵연료 파손 시 유출되는 방사성 기체가 건물 경계를 통하여 자유로이 방출되지 않고 정해진 경로를 통해서만 배출되도록 하는 것이다. 설계기준지지 시에도 건물의 건전성을 유지하기 위하여 내진등급 I급으로 설계하여야 한다. 핵연료 파손사고가 발생되면 건물 내의 모든 기체는 반드시 활성탄 여과기를 통하여 굴뚝으로 방출되어야 한다. 그러나 활성탄 여과기를 거쳐 방출되고 있는데도 불구하고 굴뚝에서의 최종 방사선 준위가 환경방출기준을 초과할 경우에는 비상환기계통을 정지시키고 건물과 연결되는 모든 통로를 격리댐퍼를 이용하여 차단하여 원자로건물을 외부와 완전 격리시킨다. 이때부터 환경으로 방출되는 방사선 준위는 건물의 누설률에 의하여 지배된다. 이와 같은 Ground release 상황에서 적용되는 건물의 누설률 기준은 Source term 계산에 의하여 결정된다.

원자로건물을 외부와 격리시키는 격리댐퍼는 설계기준지진 시에도 기능을 다하여야 하므로 내진등급 I급으로 설계, 제작하여야 한다. 또한 격리댐퍼는, 누설률에 의하여 결정되지만, 차단되었을 때 공기의 누설이 최소가 되도록 설계, 제작하여야 한다. 격리댐

퍼는 전원상실과 같은 사고 시에는 자동으로 닫힐 수 있도록 고장시안전(Fail-safe) 설계개념을 적용하여야 한다. 주기적으로 건물의 누설률을 점검할 수 있도록 누설률 계측계통을 준비하여야 한다.

(3) 비상환기계통

비상환기계통은 핵연료 사고, 수조 고 방사선 또는 배기덕트 방사선감시기 등으로부터 고방사선이 감지될 때 외부로의 방사선 누출을 최소한으로 감소시키기 위하여 정해진 경로를 통해 외부로 공기를 방출하기 위한 계통이다. 비상환기계통은 다양한 능동기기를 포함하고 있어 입출력 신호처리를 위한 제어장치가 필요하다. 이들 계통은 원자로가 정상상태로 유지되고 있을 때는 필요하지 않고 비정상 사고가 발생되었을 경우 작동되어야 하는 안전관련 비상대응장치의 성격이므로 제어컴퓨터와는 기능이 독립된 별도의 제어기를 사용한다. 현장제어장치 및 제어기는 비록 비안전등급으로 분류되지만 그들의 기능 자체는 연구로의 안전과 종사자의 방사능 피폭 등 안전과 관련이 있으므로 배관과 밸브, 덕트와 격리댐퍼 등과 같은 기계장치들은 내진등급으로 분류하여 구조적 건전성은 언제나 유지될 수 있도록 한다.

비상환기계통의 설계요건은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 비상환기계통 작동 시 원자로건물의 내부압력은 외부보다 최소한 25 mmWG 낮게 유지되도록 계통을 설계하여야 한다. 건물의 부압이 지나치게 낮아지면 건물의 건전성에 악영향을 미칠 수 있으므로 과부압 방지용 릴리이프 댐퍼를 설치하여야 한다.
- 비상환기계통의 배기덕트에 HEPA 여과기와 히터가 내장된 활성탄여과기를 설치하여야 한다.
- 배기팬과 방사선 감시기 등은 기능의 신뢰도를 높이기 위하여 2중으로 설치하여야 하고 각 팬의 앞뒤에는 댐퍼를 설치하여 역류를 방지할 수 있도록 한다.
- 비상환기계통에는 비상전원이 공급되어야 한다.

비상환기계통은 핵연료 파손사고, 수조상부 고 방사능 또는 원자로 기기실로부터의 고 방사선이 검출되었을 때 자동으로 작동되도록 설계한다. 즉, 고 방사능 감지 시, 정상환기계통이 정지됨과 동시에 비상환기계통이 작동되도록 논리를 설계하여야 한다. 핵연료 파손사고 또는 수조상부 고방사능은 원자로 정지계통의 정지설정값에 의하여 작동되기 때문에 큰 문제는 없지만 원자로 기기실의 고 방사능은 정상상태 운전값에 비하여 어느 정도 준위에 설정값을 설정할 지 면밀한 검토가 필요하다. 설정값을 너무 낮게 설정할 경우에는 매우 짧은 시간 동안 방사선 준위가 상승하였다가 복귀되는 상황에서는 환경으로의 방출이 미미한데도 불구하고 비상환기계통이 작동되어 버리기 때문에 정상적인 원자로 운전에 불편함을 초래할 수 있다. 이를 방비하기 위하여 설정값을

지나치게 높게 설정할 경우는 실제 환경 방사선 누출이 문제가 될 수 있다. 따라서 기기실로부터의 고 방사능 설정값은 정상운전값의 3~5배 정도로 설정하고 대신 약 30분 정도의 이동평균 개념을 적용하면 효과적으로 방사선 사고에 대비할 수 있다. 그림 4-12는 비상환기계통 작동 논리도를 보여주고 있다.

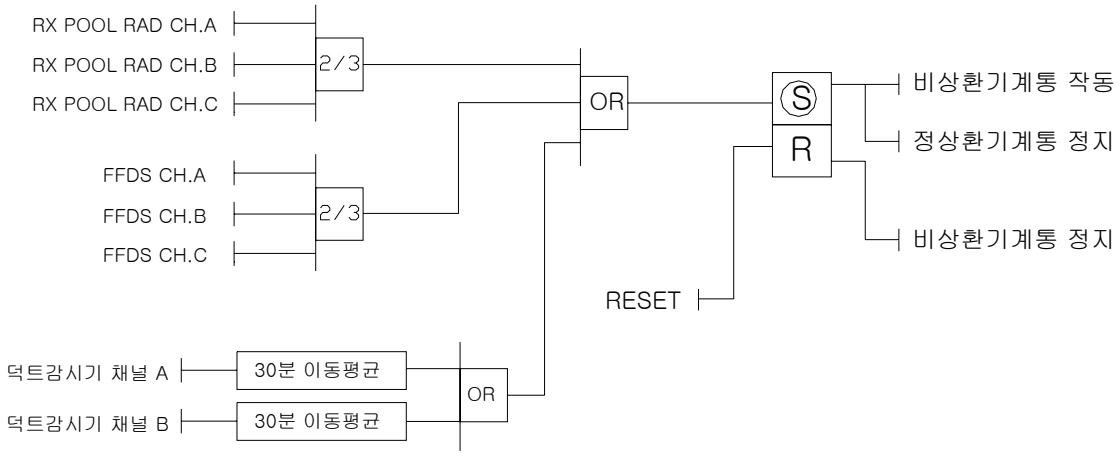


그림 4-12 비상환기계통 작동 논리도

(4) 비상보충수 공급계통

비상보충수 공급계통은 원자로 수조수가 상실될 경우 보충수를 공급하여 노심 내에 핵연료집합체가 냉각수에 잠겨있을 수 있도록 설계한다. 외부전원이 상실될 경우에도 작동할 수 있도록 비상전원이 항상 공급되어야 한다. 설계기준사고 시에도 비상보충수 공급기능이 항상 유지될 수 있도록 내진등급으로 설계, 제작하여야 한다.

비상보충수 공급계통은 보충수 탱크, 공급배관, 공급제어밸브, 유량계측기, 배수조 순환펌프 및 제어밸브 등으로 구성된다. 계통의 신뢰도를 향상시키기 위하여 공급밸브 및 배관 등은 2중으로 설치하여야 한다. 배수조에 모인 냉각수를 다시 계통으로 회수하여 수조내로 공급하기 위한 배수조 펌프는 2대로 구성하며 배수조 수위에 따라 선별 작동될 수 있도록 제어논리를 구성한다. 펌프와 공급밸브의 성능을 주기적으로 시험하기 위한 적절한 루프를 구성하여야 한다.

5.0 결론

하나로의 설계 경험과 지난 10년간의 운전 경험을 바탕으로 새로운 디지털 계측제어개념을 적용한 수출전략형 연구로의 계측제어계통 설계지침을 기술하였다. 수출 대상국이 정해지지 않은 상황에서 계통 설계 진행에 한계가 있지만 기본적인 중요 설계지침을 미리 수립해 놓을 필요가 있다. 설계지침애서 가장 중요하게 취급된 부분은 원자로 안전을 보장하기 위한 정지계통의 설계보강이었다. 하나로에서는 정지봉에 의한 원자로 보호개념에다 비안전계통으로 분류된 제어봉의 자유낙하를 보조 수단으로 하는 다소 미흡한 정지개념이었으나 수출연구로는 안전계통으로 분류한 제어봉의 낙하뿐만 아니라 기능의 다양성과 독립성을 최대한 적용한 중수배수계통을 제2정지계통으로 채택하여 원자로 안전성을 최대한 향상시킬 수 있도록 하였다. 제1정지계통 정지논리는 PLC와 같은 디지털 개념을 적용하여 구현하고 제2정지계통은 아날로그 개념을 사용하여 독립성과 다양성을 구현함으로써 보호기능의 신뢰도를 향상시킬 수 있도록 하였다.

원자로 보호계통을 제외한 나머지 계측제어계통들은 비안전등급으로 분류하였으나 원자로 제어계통과 공학적 안전설비 제어계통들은 기능의 중요도를 감안하여 안전계통 설계요건들을 선별적으로 적용할 것이다. 원자로 제어계통의 출력제어를 수행하게 될 제어컴퓨터뿐만 아니라 공학적 안전설비 제어기들도 디지털 컴퓨터 개념을 도입하여 현장계측기의 수량을 최소화한다. 원자로 보호계통을 제외한 플랜트의 모든 제어컴퓨터들을 통신망으로 연결하고 상호 감시 및 보고 기능을 강화시켜 연구로 운영의 편이성을 향상시킨다.

계통의 설계가 본격적으로 진행되지 않은 상황에서 기본적인 설계지침을 기술하였다. 향후 수출 대상국이 결정되어 구체적으로 계통설계가 진행되면 일부 내용의 수정이 필요하겠지만, 대체적으로 본 보고서의 설계지침이 유용한 계측제어계통의 설계 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

6.0 참고문헌

[1] IAEA Safety Series No.35-S1, "Code on the Safety of Nuclear Research Reactors : Design

[2] 한국원자력연구소, KAERI/TR-710/96, "하나로 안전성분석보고서"

[3] C. Park, "Calculation of error allowance to determine trip setpoints and initial conditions for safety analysis (rev.1)", SM-TH-023, Speedy Memo, KAERI, Dec. 20, 1992,

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-2888/2004			

제목/부제	수출전략형 연구로 계측제어계통 설계지침
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	김영기 / 하나로운영부
연구자 및 부서명	정환성, 최영산, 류정수, 박 철 / 하나로운영부

출 판 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2004. 12.
페 이 지	65 p.	도 표	있음(V), 없음( )	크기	29x21 cm
참고사항					

비밀여부	공개(V), 대외비( ), __ 급비밀	보고서종류	기술보고서
연구위탁기관		계약 번호	

초록 (15-20줄내외)

수출연구로의 계측제어계통은 원자로 출력의 자동제어 기능을 수행하고 원자로의 안전성을 위협하는 사고 발생 시 원자로를 안전하게 정지시키기 위한 보호기능을 수행하는 중요한 계통이다. 비록, 수출연구로가 원자력발전소에 비하여 저온저압으로 유지되고 고유의 안전성을 가지고 있다고 하지만 보호 기능이 정상적으로 작동하지 않을 경우는 심각한 방사선 사고로 이어질 수도 있기 때문에 수출연구로의 원자로보호계통은 원자력발전소와 동일한 설계지침을 따라야 한다.

수출연구로의 계측제어계통은 안전등급과 비안전등급 계통으로 크게 나눌 수 있다. 제1정지계통과 제2정지계통으로 구성되는 원자로 보호계통은 안전등급으로 분류하였고 원자로 제어계통을 포함하는 나머지 계통들은 비안전등급으로 분류하였다. 계통등급의 분류는 기존 하나로에서 적용하였던 원칙에 바탕을 두었으나 최근 국제적인 관심사로 형성되고 있는 원자력 안전성 강화 움직임에 보조를 맞추고 또, 하나로 분류체계의 일부 미비점을 보완하기 위하여 안전등급 분류체계를 수정하여 수출연구로에 적용할 예정이다.

주제명키워드 (10단어내외)	하나로, 제1정지계통, 제2정지계통, 원자로제어계통, 제어봉, 수출연구로, 공학적안전설비, 원자로정지변수, 안전등급

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/AR-2888/2004			

Title/ Subtitle	Design Guide on Instrumentation and Control System for an Advanced Research Reactor
Project Manager and Department (or Main author)	Young Ki, Kim / HANARO Management Div.
Researcher and Department	H. S Jung, Y. S. Choi, J. S Ryu, C. Park / HANARO Management Div.

Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2004.12.
Page	65 p.	Fig. & Tab.	Yes(V), No ( )	Size	29x21 cm.
Note					

Classified	Open(V), Restricted( ), ___ Class Document	Report Type	TR
Sponsoring Org.		Contract No.	

Abstract(15-20 Lines)

Instrumentation and control system is to regulate reactor power automatically and to perform protective functions to shut down the reactor safely in case of an accident threatening the reactor safety. If the protective action would not be properly activated, an abnormal situation might be connected to a significant radiation hazard, even though a research reactor is maintained at low pressure and low temperature condition. For this reason, the reactor protection system for the advanced research reactor will be designed as per the safety design requirements for nuclear power generating stations.

System classification are suggested based on the HANARO concept. Considering an international growing tendency toward nuclear safety enhancement and supplement of the existing one, a revised classification system will be applied to the components, structures and systems for the advanced research reactor. The reactor protection system is classified to the safety class and the others are non-safety grade.

Subject Keywords (About 10 words)	HANARO, First Shutdown System, Second Shutdown System, Reactor Regulation System, Control Absorber Rod, Advanced Research Reactor, Engineering Safety Feature, Reactor Trip Parameter, Safety Class