

하나로 냉중성자원설비의 제어계통 개념 설계

Conceptual Design of Control System for Cold Neutron Source Facility of HANARO

김형규,정환성,김영기,우종섭
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

냉 중성자를 이용한 첨단 물성 연구를 지원하기 위하여 개발중인 하나로 연구용 원자로의 냉중성자원 설비를 위한 계측제어 계통의 개념 설계를 수행하였다. 보호 계통은 법규상의 안전 관련 계통은 아니지만 신뢰성, 이용성등을 고려하여 다중성, 독립성, 다양성등과 같은 안전성 설계요건을 반영하여 설계하였다. 감속재, 진공 계통, 그리고 블랭킷의 압력과 냉매의 온도를 보호계통의 정지변수로 선정하였다. 제어 계통은 안정성을 위하여 PLC를 기반으로하고, 편리성과 보수성등을 고려하여 PC를 이용한 운전원 인터페이스로 개발하였다. 모든 공정은 자동운전되며, 제어는 운전 모드에 따라 원자로 제어실, CNS 계측실, 그리고 부속기기실등 3 곳에서 할 수 있다.

Abstract

Control and instrumentation system for HANARO cold neutron source(CNS) facility was designed conceptually. Control and instrumentation system consists of protection and control system. Protection system is non-nuclear safety system. But this system was designed to meet the requirements of safety system. Pressures of hydrogen system, vacuum system, and blanket system are selected as trip parameters of protection system with the temperature of refrigerant He. Controllers will be a kind of programmable controller like PLC. HMI system is PC-based operator workstation using off-the-shelf commercial operating software. Operation is performed in three locations, HANARO control room, CNS Instrumentation Room and CNS auxiliary building (compressor room) to support flexible operation policies.

1. 서론

하나로 냉중성자원(Cold Neutron Source, CNS) 계측제어계통은 보호계통과 제어계통으로 크게 분류할 수 있다. 보호계통은 냉중자원 설비 운전 중 비정상 사고가 발생하였을 경우 원자로를 정지시키는 기능을 수행하고 제어계통은 냉중성자원 감속재의 열사이클 성능을 정상적으로 유지시키기 위하여 필요한 각종 공정계통의 자동 또는 수동 제어 기능을 수행한다. 원자로를 정지시키기 위해서는 하나로의 제어봉 또는 정지봉을 작동시켜야 하므로 보호계통은 하나로 계측제어계통과의 연계가 필요하다. 이에 반하여 제어계통은 원자로 제어와는 독립된 기능이므로 별도 계통으로 설계한다. 냉중성자원 설비는 원자로 수조내에 설치되는 In-Pile Assembly(IPA)내의 진공챔버의 물리적 건정성이 유지되면 원자로에 어떠한 위험도 초래하지 않도록 피동 안전 개념으로 설계되므로 보호계통과 제어계통은 비 안전계통으로 분류한다.[1] 본 논문에서는 하나로 냉중성자원의 제어계통과 보호계통의 개념설계에 대하여 기술한다.

2. 보호 계통

2.1 설계요건

CNS 보호계통을 비록 비안전등급으로 분류하였지만, 수조내기기 또는 냉중성자 시설 보호의 중요 기능을 수행한다는 점을 고려하여 다중성, 독립성, 다양성 등과 같은 안전성 설계요건을 최대한 적용한다. 냉중성자 보호계통의 기본 설계요건은 다음과 같다.[2]

- 1) CNS 정지변수 작동에 의한 원자로 정지는 하나로 원자로 제어계통의 제어봉 낙하를 이용한다. 단, 하나로 제어컴퓨터의 소프트웨어를 통한 정지가 아니라 제어컴퓨터를 거친 최종단 계전기 논리회로와 hard-wire적으로 연계시킨다.
- 2) CNS 보호기능 즉, 원자로 정지신호를 발생시키는 정지변수 채널은 3중화한다.
- 3) 정지논리의 구현은 상용 PLC 제품을 사용하고 다음과 같은 요건을 만족시켜야 한다.
 - PLC는 모든 하드웨어가 2중화 되어 있는 hot-standby 개념을 가져야 한다.
 - PLC로 입력되는 3중화된 입력신호는 물리적 독립을 위하여 각기 서로 다른 입력 카드에 할당한다.
 - PLC를 통하여 정지변수 채널의 주기적인 기능시험을 소프트웨어적으로 수행할 수 있도록 설계하여야 한다.
- 4) CNS가 정지되어 있는 상황에서 원자로를 가동하기 위해서는 CNS 보호논리기능을 우회(bypass)시킬 수 있도록 소프트웨어를 구성하여야 하고 CNS 보호기능의 우회상태 여부를 CNS 계측실과 하나로 제어실에서 확인할 수 있도록 경보로 지정한다.
- 5) CNS 계측실에 하나로 원자로 보호계통 수동정지 스위치를 설치하여 냉중성자 시설의 비상 상황 발생 시 현장에서 원자로를 비상정지시킬 수 있도록 한다.
- 6) CNS 보호기능과 관련된 계측기 및 논리회로 설계는 fail-safe 요건을 만족시켜야한

다. 즉, 계측기의 고장, 지진 발생, 또는 전원 상실 등과 같은 사고가 발생되었을 경우 모든 계통은 안전한 상태로 진행되도록 설계한다(원자로 정지변수인 경우 원자로 정지 신호를 발생시켜야 한다).

2.2 CNS 정지변수

열사이편 계통의 비정상과 관련되고 사고의 확산에 의하여 CNS 시설 또는 계통의 심각한 손상이 예상되는 경우 이러한 상황을 감시할 수 있는 공정변수를 CNS 정지변수로 채택한다. 감속재로서 액체수소를 사용하고 있기 때문에 CNS 시설계통에서 가장 심각한 사고는 수소계통에 외부로부터의 공기가 침투하여 진공챔버 내에서 수소-산소 결합에 의한 폭발반응이 발생하는 경우이므로 이를 설계기준사고로 정의하여야 할 것이다. 액체수소의 2상 유동이 일어나는 감속재용기와 콘덴서 그리고 연결배관 등 열사이편 계통은 진공챔버 속에 수용되어 있는데, 진공챔버는 설계기준사고 시에도 원자로 및 반사체용기의 비정상을 유발하지 않도록 기계적 건전성을 유지할 수 있도록 설계, 제작되어야 한다. CNS 정지변수는 설계기준사고로 이어질 수 있는 비정상 현상을 사전에 감지할 수 있는 공정변수로서 선정되어야 하며 다음과 같은 공정변수를 개념설계 단계에서 CNS 정지변수로 선정하였다.

(1) 수소계통 고 압력

열사이편 계통의 액체수소가 설계기준사고의 가능성을 가장 직접적으로 알려주는 정지변수이며 다음과 같은 원인에 의하여 발생할 수 있다.

- 수소계통으로의 공기 침투 → 수소-산소 결합반응 → 수소계통 압력 상승
- 정상운전상태에서 헬륨냉동기 비정상(냉각헬륨의 공급 중단) → 열사이편 루프 내 액체수소 기화 → 수소계통 압력 상승
- 헬륨냉동기 과냉각 → 콘덴서 내부에서 액체수소의 결빙, 고착 → 열사이편 루프 차단 → 감속재용기 내 액체수소 급속 기화 → 수소계통 압력 상승
- 수소버퍼탱크 설치지역(원자로실 또는 CNS 기기실)의 온도 비정상 상승 → 기체 팽창에 따른 수소계통 압력 상승
- 수소가스의 과다 충전(작업자 실수)

(2) 수소계통 저 압력

수소계통의 압력이 정상상태보다 떨어질 수 있는 조건은 수소경계계통의 누설을 의심할 수 있고 또, 과냉각 등 헬륨냉동계통의 제어기능 비정상에 의하여 감속재의 2상 유동에 문제가 발생하였다는 것을 뜻한다. 이와 같은 상황은 쉽게 판단하기 어려운 문제이므로 원자로를 정지하고 계통의 누설과 제어기능의 점검을 실시하는 것이 바람직하다.

(3) 냉각 헬륨 고 온도

정상운전 중 헬륨냉동계통의 고장으로 인하여 냉각헬륨의 온도가 비정상적으로 상승하게 되면 액체수소의 기화가 급속하게 진행되어 감속재용기의 손상을 초래할 수 있다. 그러나 대기상태 또는 CNS 정지상태에서는 냉동계통이 운전되지 않기 때문에 냉각헬륨 고 온도에 의한 원자로 정지는 오히려 발생되어서는 아니 된다. 따라서, 냉각헬륨 고 온도에 의한 원자로 정지는 반드시 CNS가 정상운전 중일 때만 작동되도록 논리를 설계하여야 한다.

(4) 진공계통 고 압력

진공계통의 주 목적은 극저온으로 유지되는 열사이편 계통의 단열이라고 할 수 있다. CNS 정상운전 중 진공이 파괴되더라도 심각한 사고 또는 기기의 손상과 직결되지는 않지만 열사이편 성능이 저하되기 때문에 계속 운전은 바람직하지 못하다. 심각한 문제는 아닌 만큼 비정상적 진행 상황을 감안하여 충분한 조치 시간을 가질 수 있도록 논리를 구성한다. 먼저 제어실에 경보를 발령하여 필요한 조치를 취하도록 한다. 필요한 조치를 취하였음에도 불구하고 정상상태로 복귀하지 않고 압력이 계속 상승하여 정지설정값에 이르게 되면 원자로를 정지한다.

(5) 가스 블랭킷 계통 압력 비정상

가스 블랭킷 계통은 수소가스가 존재하는 경계면의 외곽을 둘러싸고 있어 수소가 공기와 접촉하는 것을 방지해준다. 원자로의 안전 또는 열사이편 성능과 직접적인 관계는 없지만 수소가스가 누설되고 동시에 외부 공기가 유입될 경우는 수소-산소 결합반응에 의한 폭발사고가 발생할 수 있다. 가스 블랭킷 계통의 경계면 손상 또는 수소경계 계통의 누설이 발생되었다면 이는 반드시 보수하여야 하고 실질적으로 이러한 보수행위는 원자로가 정지되어야만 가능하기 때문에 가스 블랭킷 계통의 압력 비정상이 발생하면 원자로를 정지한다.

2.3 CNS 보호논리

하나로는 원자로 제어계통(Reactor Regulation System : RRS)의 제어봉과 원자로 보호계통(Reactor Protection System : RPS)의 정지봉에 의한 원자로 정지가 있는데 제어봉은 비안전등급이고 정지봉은 안전등급으로 분류되어 있다. CNS 보호논리는 원자로 안전성과는 관련이 없으므로 비안전등급으로 분류된 RRS의 제어봉 낙하를 이용하여 원자로를 정지한다. PLC 내부의 소프트웨어에 의하여 2-out-of-3 논리를 구성하고 3개의 정지변수 중 2개 이상이 작동하면 원자로 정지신호를 발생시킨다.

수소계통 고 압력에 의한 원자로 정지가 발생되면 감속재용기에서의 온도 상승이 충분히 예측되므로 감속재용기 등으로부터 발생한 열을 외부로 신속하게 내보내기 위해서는 고 진공으로 유지되고 있는 진공챔버 속을 헬륨으로 채우는 것이 바람직하다(비상 헬륨냉각기능). 비상 헬륨냉각기능은 진동계통에 속하며 요구 시 신속하게 작동하기 위해서는 일정한 압력으로 항상 대기 상태에 있어야 한다. 별도의 펌프 등과 같은 기기 없이

밸브만 개방하면 압력에 의하여 진공챔버 속으로 밀려 들어갈 수 있도록 설계한다. CNS 보호논리에 의하여 원자로 정지신호가 발생되면 감속재용기의 열을 가능한 한 빠른 시간 내 외부로 발산시키기 위하여 비상 헬륨냉각기능이 작동되도록 보호논리를 구성하여야 한다.

진공계통의 비정상은 대부분이 진공펌프 등과 같은 진공계통의 기기 고장으로 인한 것이지만 외부로부터 공기의 침투 가능성과 열사이펀 계통의 누설 등도 의심해볼 수 있는 상황이다. 이와 같은 비정상 상황 하에서 열사이펀 계통에 액체수소가 존재한다는 것은 안전성 측면에서 바람직하지 않으므로 가능한 한 빠른 시간 내 수소버퍼탱크로 보내야 한다. 진공계통 고 압력뿐만 아니라 CNS 보호논리에 의한 원자로 정지가 발생하면 원자로 정지와 동시에 헬륨냉동기 정지 신호도 함께 출력되도록 논리를 구성한다. 개념 설계된 CNS 보호논리는 그림1과 같다.

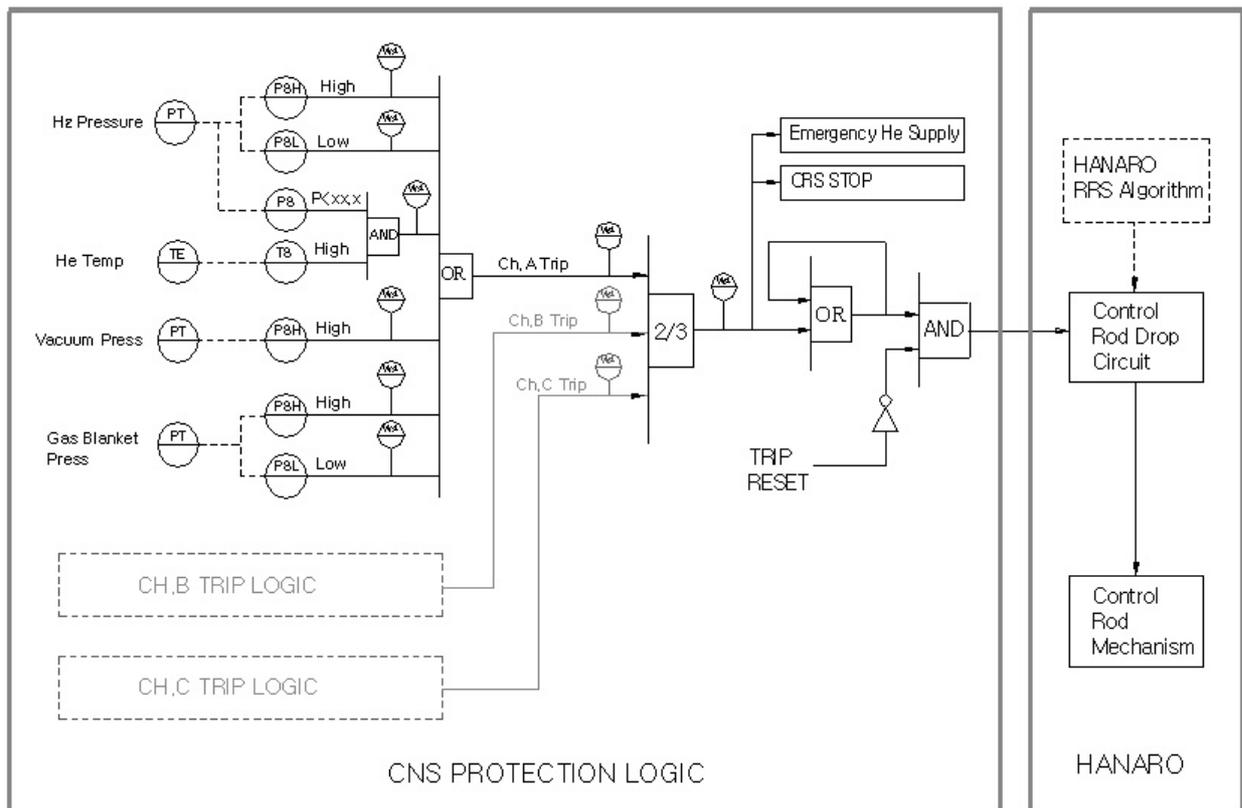


그림 1 CNS 보호논리

3. 제어 계통

3.1 설계요건

제어계통은 냉중자원 설비를 제어하는 기능 수행한다. 제어계통은 수소 감속재의 온도를 약 14 ~ 20K 사이가 되도록 제어하여 양질의 냉중정자속을 유지할 수 있도록 플랜트를 자동으로 운전한다. 제어계통 요건은 다음과 같다.[3]

- 냉매(헬륨)가스의 온도 및 압력을 감시 및 제어한다.
- 감속재 압력(온도)을 감시 및 제어한다.
- 진공 계통을 감시 및 제어한다.
- 블랭킷(blanket) 계통을 감시 및 제어한다.
- 2차 냉각수 계통 등 하나로 연계계통의 상태를 감시 및 제어한다.
- 계통 내 기기간의 연계를 제공한다.
- 원자로 운전과의 연계를 제공한다.
- 방사선 감시기의 상태를 감시한다.
- 전원계통등 보조계통의 상태 감시 및 제어를 한다.
- 제작사가 제공하는 헬륨 냉동기 제어컴퓨터와의 상호연계를 제공한다.

3.2 제어 계통 구성

제어계통의 제어기는 PLC를 기본으로 하고 운전반은 MS 윈도우를 사용하는 PC 형태를 이용한다. 사용자 인터페이스 구현 소프트웨어는 상용(범용) 제품을 사용한다. 운전반에서는 제어는 물론 제어기의 프로그램 작성 및 수정이 가능하고, 미믹, 트렌드 등의 사용자 인터 페이스를 제공하고 데이터 저장 저장, 검색이 가능하다. 운전반은 하나로 제어실, CNS 계측실, 그리고 부속기기실 등에 각각 설치하여 필요 시 서로 다른 위치에서 냉중성자 계통의 상태를 항상 감시하고 제어할 수 있도록 한다. 초기기동과 정지는 CNS 계측실에서 수행하고, 일상 운전은 원자로 제어실에서 수행한다. 보수, 비상대피시에는 부속기기실에서도 계통을 제어 할 수 있다. 단 제어신호의 우선권은 지정된 권한을 가진 제어반에서만 가지도록 하드웨어 또는 소프트웨어적으로 통제 기능을 둔다. 원자로 운전 상황도 CNS 계측실과 부속기기실의 운전반에서 감시가 가능하도록 한다. 제어 계통의 기능은 다음과 같다.

- CNS의 모든 기기들을 제어한다.
- 가이드 홀의 상태(방사선, 부압 등)를 감시한다.
- 원자로의 운전상태를 감시한다.
- 수동 및 자동으로 원자로 정지 신호를 발생 시킬 수 있다.
- 원자로실, 부속기기실, 가이드홀과 통신이 가능하다.
- 부속기기실, 가이드홀 및 수조의 상태를 CCTV로 감시할 수 있다.

극저온을 생성하기 위한 제반 냉동 설비는 자체의 제어 시스템을 가지고 수소 감속재가 요구하는 온도로 자동운전 된다. 냉동 설비를 제외한 보호계통 및 기타 계통은 별도의 PLC로 제어된다. CNS 계통의 이들 제어기들은 자동 및 원격으로 제어할 수 있고, 운전반과 함께 이중 통신망으로 연결한다. 전체적인 제어계통의 구성은 그림 2와 같다.

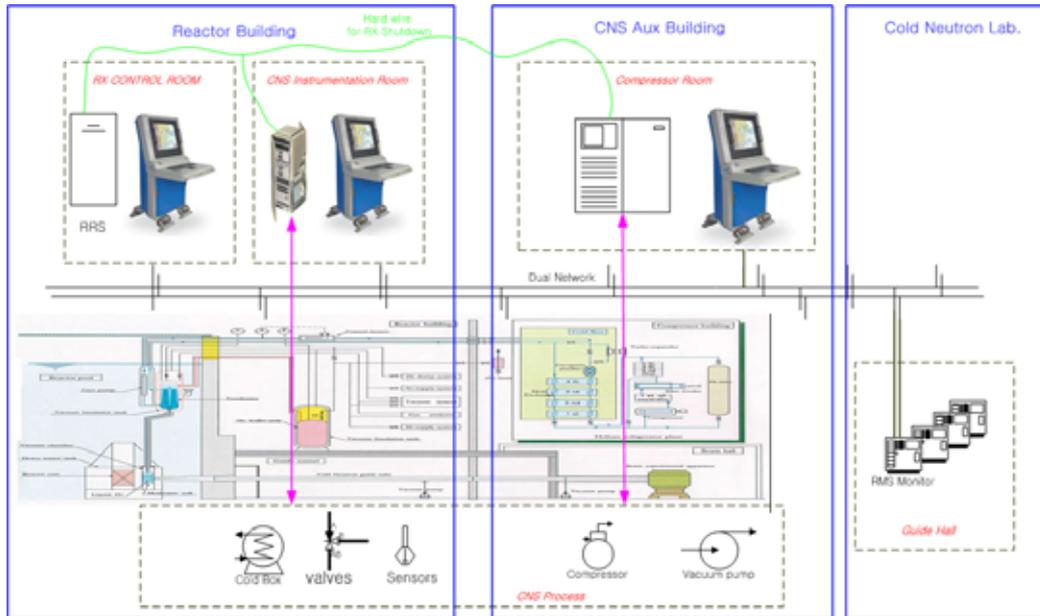


그림 2 CNS 제어 계통 구성

4. 결론

냉중성자를 이용한 기초물성자료 연구, 신소재 특성확립, 생체 합성 분석 등을 통하여 광범위한 분야에서 첨단연구 촉진 및 신기술 개발을 위하여 하나로 연구용 원자로에 냉 중성자원을 설치하는 연구를 진행하고 있다. 이 연구의 일환으로 냉중성자원 설비의 계측제어를 위한 개념 설계를 수행하였다. 보호 계통은 법규상의 안전 관련 계통은 아니지만 신뢰성, 이용성등을 고려하여 다중성, 독립성, 다양성 등과 같은 안전성 설계요건을 반영하여 설계하였다. 감속재, 진공 계통, 그리고 블랭킷의 압력과 냉매의 온도를 보호계통의 정지변수로 선정하였다. 제어 계통은 안정성을 위하여 PLC를 기반으로하고, 편리성과 보수성등을 고려하여 PC를 이용한 운전원 인터페이스로 개발하였다. 모든 공정은 자동운전되며, 운전 제어는 모드에 따라 원자로 제어실, CNS 계측실, 그리고 부속기기실등 3 곳에서 할 수 있다.

5. 참고 문헌

- [1] Young Ki KIM, "Safety Design Criteria for HANARO Cold Neutron Source", HAN-CS-DD-DR-070-04-001, KAERI, 2004. 1. 19
- [2] 김영기, "냉중성자 계측제어계통 보호논리 및 설계요건", HAN-CS-CR-075-04-009, 내부통신문 2004. 2. 28.
- [3] 정환성, "CNS 제어(컴퓨터) 계통 구성 (안)", HAN-CS-CR-600-04-008, 내부통신문 2004. 2. 24