

하나로 냉중성자원 시설계통 개념 설계

A Concept Design of Facility Systems for Cold Neutron Source in HANARO

우 상익, 김 영기, 정 환성, 김 영진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로에서는 국내외의 냉중성자원 연구시설에 대한 이용 수요 증가에 대비하기 위하여 2008년까지 냉중성자 연구 시설의 구축과 시운전을 완료할 계획을 갖고 있다. 냉중성자 연구 시설은 연구용 원자로인 하나로에 연계되는 시설로서 원자로의 안정성을 최우선으로 고려하여야 하며, 냉중성자 이용 연구 그룹의 요건을 충분히 반영하여 설계 개념을 수립하여야 한다. 본 논문에서는 선행연구 결과와 계통 설계를 위해 수행된 개념 설계 과정을 소개하고, 이를 통해 하나로 냉중성자 시설 및 계통 설계에 적용할 수 있는 수소계통과 진공계통 및 헬륨냉동계통의 설계 요건과 개념을 제안하였다. 또한, 제안된 수소계통과 진공계통의 안전을 확보하기 위한 수단으로 채택한 블랑킷 계통에 대하여 블랑킷 박스내의 발열기기를 위한 별도의 냉각설비 설치 여부를 검토하였다. 제안된 설계 개념은 세계적으로 가장 효율적인 냉중성자 연구시설을 구축하는데 기여할 것이다.

Abstract

In HANARO, there is a plan to accomplish the construction and the operation test for the cold neutron research facilities (CNRF) until the end of 2008. It intends to accept the domestic or overseas needs to use the CNRF. More than anything else the CNRF, directly installed to HANARO, is required to consider the stability of the reactor. And, the requirements of the user group shall be reflected enough to its concept design. In this paper, it intends to introduce the previous research results and to describe the design concepts performed for the process systems of the CNRF. And, the design requirements and concepts of the hydrogen process, the vacuum process, and helium refrigeration process to be applied to the CNRF in HANARO are proposed by considering the previous and recent researches. Also, the blanket parts were adopted to ensure that the hydrogen process and the vacuum process are safe in their operation mode, and it was considered to whether it needs the extra cooling system in the blanket box of each proposed system. The proposed design concepts would be helpful to realize the most efficient CNRF in the world.

1. 서론

첨단산업의 발전과 병행하여 냉중성자원에 대한 이용 수요가 점차 증가함에 따라, 전세계적으로 2010년경부터 냉중성자 연구시설의 공급 부족 현상이 나타날 것으로 전망하고 있다. 이에 따라, 하나로에서는 냉중성자원을 이용한 국내외의 연구 수요에 대비하기 위해 2008년까지 냉중성자 연구 시설의 설계, 시공, 시운전 및 종합성능시험을 완료할 계획을 갖고 있다.

냉중성자 연구 시설은 연구용 원자로인 하나로에 직접 연계되는 시설로서 원자로의 안정성을 최우선으로 고려하여야 하며, 냉중성자 이용 연구 그룹의 요건을 충분히 반영하여 설계개념을 수립하여야 한다. 본 논문에서는 하나로 냉중성자 시설 및 계통의 설계를 위해 수행되고 있는 개념설계 과정을 소개하고, 시설의 설계 요건과 국내외의 기술 동향을 반영하여 하나로에 적용될 수 있는 설계 개념을 제시하고자 한다.

하나로에 냉중성자원 시설이 설치되면, 이를 이용한 냉중성자 관련 첨단 연구들이 이루어질 것이고, 기술 고도화와 국가 연구기반 강화 및 국제 경쟁력 향상을 이룩하여 국제적 중성자 공동연구의 중심체로서 하나의 위상을 드높일 수 있을 것이다. 또한, 냉중성자 시설은 연구로의 중요한 부대시설로서 가까운 장래에 실현될 고성능 연구로의 기술 수출에 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

2. 선행 연구

하나로에서는 1996년 12월부터 1997년 초까지 러시아의 PNPI와 하나로 냉중성자 시설에 대한 개념설계 공동 연구를 통해, 하나로 냉중성자 조사공의 환경을 토대로 감속재 선정에 위한 기본 계산과 PNPI의 풍부한 경험에 따른 감속재 재료의 장단점을 파악하였고 감속재 용기 형태를 선정하였다. 그리고 감속재로서의 액체수소 취급과 헬륨냉동계통에 대한 개념을 제시하였으며, 그 외 보조계통의 설계 개념과 안전성 보장을 위한 기본설계요건도 함께 제시하였다.

제안된 시설계통의 수소계통은 원자로 수조내에 극저온 조립체를 설치하고, 원자로 외부에 기화된 수소를 저장하기 위한 수소 완충탱크와 압력제어장치를 설치하며, 별도의 실험동에는 각종 가스 공급 장치 및 제어계통이 설치되는 것으로 구성되어 있다.

진공계통은 감속재 용기, 진공박스, 펌프 등으로 구성되는데, 진공박스는 감속재 용기의 진공상태를 제어하고 감시하기 위한 게이지, 밸브, 그리고 이온펌프로 구성되어 있다. 냉중성자 정상 운전중에는 이온펌프가 가동되면서 감속재 용기의 진공상태를 조절한다. 진공 펌프는 정상운전 시작전에 감속재 용기의 진공을 형성하기 위하여 기동되는데 1×10^{-3} Pa에 도달하면 진공펌프가 정지하고 이온펌프가 진공유지 역할을 담당하도록 설계되었다. 한편, 헬륨 냉동계통은 Cold box, 응축기, 압력제어장치, 압축기 그리고 진공단열배관 등으로 구성된다. Cold box에서 20K 이하로 떨어진 헬륨가스는 이중으로 특수제작되는 진공단열배관을 통하여 응축기를 통과하면서

다시 액화되어 저온 유로관을 통하여 감속재 용기로 보내진다. 응축기 기준으로 입구 헬륨 온도는 약 15K이고 출구 헬륨 온도는 약 20K로 유지되어야 하며, 과냉각을 방지하고 감속재의 순환을 일정하게 유지하기 위하여 헬륨가스의 압력과 온도를 정확하게 제어할 수 있어야 한다.

PNPI와 개념설계를 위한 공동연구 후, 냉중성자 시설 설계 및 운영 경험이 풍부한 프랑스 Technicatome사와 개념설계의 타당성 확인을 위한 기술검토 공동연구를 수행하였다. 기술검토 총괄은 Technicatome사가 담당하고 운영경험에 따른 검토는 CEA, 제작 측면에서의 검토는 AirLiquide사가 담당하였다. PNPI와 수행하였던 개념설계에 대해서는 큰 이의가 없었으나 다음과 같은 의견이 제시되었다.

첫째, 헬륨냉동가스의 응축기 입출구 온도차가 약 5K 정도밖에 되지 않아 온도제어의 정확성에 신중을 기하여야 한다. 둘째, 수소가스의 누출을 감지하기 위하여 수소압력은 1.3 bar, 헬륨 블랭킷 압력은 1.2 bar, 외부는 1.0 bar 등으로 서로 다르게 유지하여 헬륨 블랭킷의 압력을 감시하는 개념이다. 0.1 bar 분해능을 가지는 정밀 압력센서를 필요로 하며, 예상되는 다양한 운전 모드에 따라 이들의 압력을 언제나 일정하게 유지시킬 수 있는지 신중한 검토가 필요하다. 셋째, 감속재 용기 내부의 열악한 환경에 설치되어야 하는 극저온 온도감지기 및 압력감지기의 수명에 대한 검토가 필요하고 감지기를 신중하게 선정해야 할 것이다. 넷째, 수소완충탱크를 원자로실 내부에 두어야 할 지 아니면 원자로실 외부 실험동에 두어야 할 지 검토가 필요하다.

3. 계통 설계 개념

3.1 설계 요건

하나로 냉중성자 연구시설 구축에 대한 선행연구를 통해 결정된 헬륨 냉동기의 설계 냉각용량은 2kW이며, 헬륨 냉동기의 입출구 헬륨가스 제어온도는 각각 15K/20K이다. 이와 더불어 진공계통의 진공도는 1×10^{-3} Pa 이하로 유지되어야 하며, 원자로 건물의 누설률을 $570 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이하로 유지하는 것을 기본 설계 요건으로 규정하였다. 이러한 설계 목적을 달성하기 위해 안정성 적용 규격 확정과 주요 공정계통별 성능요건 확정을 통해 설계 개념을 수립해야 한다.

냉중자원 시설계통은 여러 곳에서 하나로와 간섭되고 있으므로 설계기준은 원자로의 안전성을 최우선적으로 고려해야 한다. 냉중성자원 시설계통이 하나로의 부속설비이며, 하나로 자체가 이미 운영허가를 취득하여 가동중인 설비이므로 하나의 설계기준 또는 품질요건을 따르는 것이 타당하다. 설계기준 수립 업무에서 시설계통의 기능과 특성에 따라, 안전등급, 내진등급 그리고 품질등급을 결정하여야 한다. 원자로 수소내 감속기 부분과 수소 취급계통, 그리고 헬륨냉동계통 등이 원자로의 안전 또는 종사자의 안전에 직간접적으로 영향을 미치기 때문에 설계기준 수립시 신중을 기하여야 한다.

시설 계통의 안전성 설계에 적용될 수 있는 설계규격을 확정해야하는데, 대부분의 시설계통은

원자로 설계에 적용하는 ASME, IEEE, IAEA 등의 규격을 적용할 수 있으나, 수소계통의 경우는 일반적으로 적용할 수 있는 규격이 아직까지는 완벽하게 정리되어 있지 않으므로 미국이나 프랑스 등 선진국에서 적용하고 있는 실례를 최대한 활용하여야 할 것이다. 개념설계 단계에서 수립된 설계기준에 부합되는 적절한 표준과 규격을 정립하여 기본설계에 대비할 것이다. 또한, 계통 설계의 기초가 되는 헬륨냉동방식과 압축기 용량, 제어컴퓨터 계통 하드웨어 및 소프트웨어 구현체계, 그리고 전력계통 설비 구성방식 및 전선로 기본경로 설정 등의 기기와 설비에 대한 성능요건을 확정하여야 한다.

3.2 수소 계통

수소계통의 운전압력은 정상 운전상태 (원자로 및 CNS가 정상 가동되는 상태)에서 130 kPa(a)이며, 대기 운전상태 (원자로는 정상 운전되나 CNS의 헬륨 냉동설비가 정지된 상태)에서는 350 kPa(a)이다. 감속재로 사용되는 수소는 2 Phase 상태로 간주하고, 공급되는 수소의 순도는 99.99999% 이상이어야 하며, 열사이펀 구동방식을 채택하였다. 일반적으로 감속재는 중성자에 대한 감속능력이 큰 수소나 중수소가 사용되나, 하나로에 설치될 냉중성자원 시설은 현재 설치된 원자로를 개조하지 않고 CNS를 설치하기 위하여 중수소에 비해 부피가 작은 수소를 감속재로 사용하는 것으로 규정하고 관련 수소계통을 설계하였다.

수소계통은 감속재 용기, 열교환기, 연결배관으로 구성되는 열사이펀 루프와 Valve Manifold를 포함하는 수소박스 및 배관, 대기 운전상태에서 기화된 수소를 저장할 수 있는 충분한 용량의 수소 완충탱크로 구성되며, 수소의 Sampling 및 Loading/Unloading을 위한 부속설비를 포함하는 것으로 규정하였다. 또한, 수소계통은 외부공기와의 접촉을 차단하기 위하여 In-Pile Assembly(IPA)와 수소 박스간 연결배관을 격리하기 위한 헬륨 Blanket Part와 수소박스, 수소 완충탱크 및 수소박스와 수소완충 탱크간 연결배관을 격리하기 위한 질소 Blanket Part 의하여 안전을 확보하는 것으로 하였다.

부속설비로 수소의 Sampling 및 Loading/Unloading을 위한 연결배관을 반영하여 가스분석기, 수소공급시설 연결장치 및 수소저장용 Metal Hydride Unit를 설치하며, 수소박스는 수소 Purge를 위한 진공펌프와 각종 밸브, 감속기내부의 온도 및 압력을 감시, 기록 및 제어를 위한 계기류로 구성되고, 외부로부터 공기의 유입을 방지할 수 있는 구조로 제작한다. 개념설계 방안으로 제안된 수소계통은 그림 1과 같다.

수소 계통내 수소 Purge시에는 압력조절기가 장착된 질소공급시설로부터 혼합가스중 수소의 농도가 4% 이하가 되도록 충분한 양의 질소를 공급받아 별도의 배기계통을 통하여 대기중에 배출될 수 있도록 한다. 계통내 수소의 Loading/Unloading 절차는 Program Controller에 의하여 자동으로 조작되도록 하여 계내로의 공기의 유입, 수소가스의 계외로의 이상유출, 계내 수소가스의 과잉충진을 방지한다. 계통을 구성하는 설비중 수소박스과 수소완충탱크는 원자로실내 CNS 기기실내 에 배치하여 운전시 응답성을 높이고, 운전자의 접근성을 감안하여 가스분석기도

원자로실내 CNS 기기실내에 배치한다. 수소계통은 유사시 외부로부터 차폐가 요구되는 시설이므로 수소 공급설비 및 저장설비(Metal Hydride Unit) 또한 원자로실내 CNS 기기실내에 배치하는 것으로 하였다.

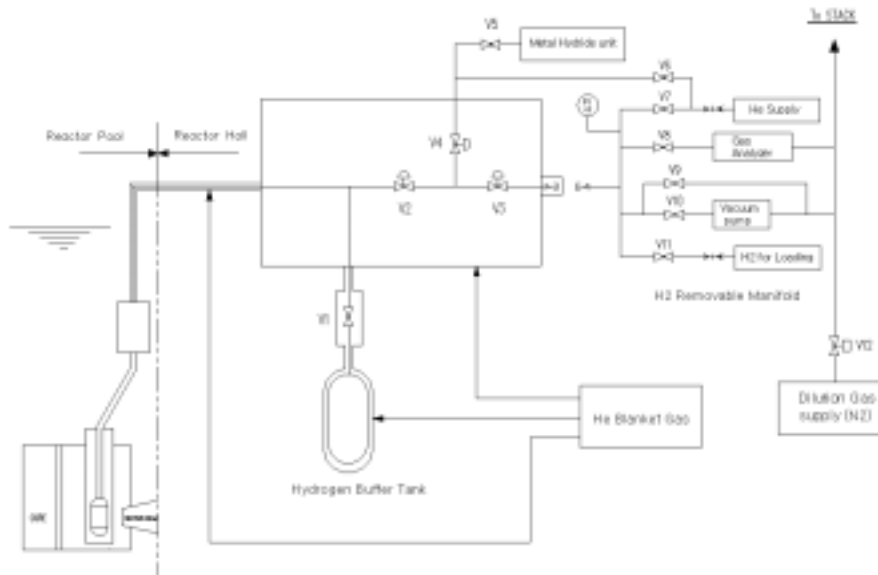


그림 1. 하나로 냉중성자 시설의 수소계통 설계 개념도

3.3 진공 계통

진공 계통의 운전조건을 위한 요구 진공도는 공정 진공도 (Process)가 10^{-5} Torr이며, 도달 진공도 (Ultimate)가 10^{-8} Torr이다. 계통의 주요 설비는 Train 방식으로 구성되는데, 운전과 대기 상태 각각 하나씩 설치하며, 일차펌프는 운용유가 필요 없는 스크롤 타입의 진공 펌프 (Scroll type vacuum pump) 를 사용하며, 고진공 펌프는 터보펌프 (Turbo-molecular Pump)를 사용한다. 진공계통은 감속재인 액체수소 열사이펀, 감속재용기 등 냉중성자원 극저온 부품들의 단열을 목적으로 진공 압력 용기내에 진공상태를 유지하기 위한 설비로서 진공박스, 펌프 스테이션, 연결배관 등으로 구성된다. 개념설계 방안으로 제안된 진공계통은 그림 2와 같다.

진공박스는 계통이 공정 진공도를 확보한 후 진공압력용기의 연결배관을 차단하기 위한 고진공용 주밸브와 정상 가동상태에서 공정 진공도 유지를 위한 이온펌프 (그림 2의 P005, P006) 및 차단밸브로 구성되며, 진공압력용기의 진공도를 감시, 기록 및 제어를 위한 계측기를 설치하는 것으로 하였다. 이온펌프의 특성상 공정진공도 확보 후 가동시에는 펌프운전에 따른 열발생량이 진공박스내부 온도 상승에 미치는 영향이 무시할 수 있을 정도이나, 계통내 요구진공도의 설정에 따라 별도의 냉각장치 설치에 대한 필요성이 검토되어야 한다.

진공계통의 주배관경은 고진공펌프의 흡입노즐 크기 이상으로 유지하는 것이 좋으나 진공용기의 크기 및 설치여건상 배관의 길이가 길어짐을 고려하여 최적의 크기를 결정하여야 하며, 만

일의 경우 외부공기의 계통내로의 유입을 차단하기 위하여 헬륨에 의한 Blanket Part와 질소에 의한 Blanket Part에 의해 격리한다. 질소로 Blanket되는 펌프 스테이션에는 계통내의 초기 진공확보를 위한 진공펌프 조합과 각종 밸브 및 진공압력 감시와 진공펌프의 운전제어를 위한 각종 계기류가 설치되며, 내부 온도제어를 위한 냉각장치가 반영되어야 하며, 진공박스과 펌프스 테이션은 외부로부터 공기의 유입을 방지할 수 있는 구조로 제작되어야 한다.

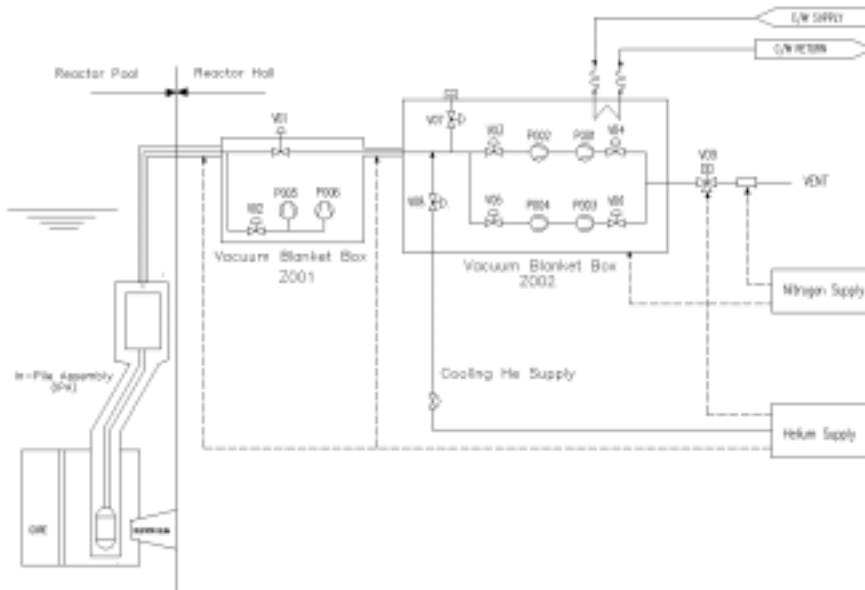


그림 2. 하나로 냉중성자 시설의 진공계통 설계 개념도

진공계통과 배기계통 연결배관상에는 만일의 경우 외부공기의 역류를 방지하기 위한 역류방지밸브를 설치한다. 배기가스는 별도의 수소검출장치에 의하여 감시되어야 하며, 수소가스 검출 시에는 압력조절기가 장착된 질소공급시설로부터 혼합가스중 수소의 농도가 4% 이하가 되도록 충분한 양의 질소를 공급받아 배기계통을 통하여 대기중에 배출될 수 있도록 한다. 진공계통의 배치계획으로 진공용기 및 연결배관의 용적과 요구진공도 도달시간에 따라 진공펌프의 용량이 결정되기 때문에 연결배관의 길이를 단축시킬 수 있도록 하여야 하며 CNS 운영시 진공 압력용 기내 진공의 중요도를 고려하여 진공박스 및 펌프 스테이션은 원자로실의 CNS 기기실내에 배치하는 것으로 하였다.

3.3 극저온 헬륨 냉동계통

헬륨 냉동설비는 30MW 원자로의 정상가동시 CNS내 열사이편과 수소액화에 필요한 열량을 공급할 수 있는 충분한 용량으로 설계되어야 하며, 저온배관에서의 열손실을 고려해야 하므로 헬륨 냉동계통의 설계용량을 1500W로 설정하였으며, 운전온도 및 압력은 공급시에 15K, 1.5

bar, 회수시에 20K, 1.3 bar로 설정하였다.

헬륨 냉동계통은 주로 열교환기와 팽창터빈 및 극저온계통의 계측기기를 내장한 Cold Box로 구성되며, 수소계통의 수소내 기기 집합체(IPA)의 열교환기로부터 저온박스까지의 거리가 멀어지면 이에 비례하여 저온배관에서의 열손실이 발생하므로 저온박스는 원자로실의 CNS기기실 내부에 설치하여야 하며, 가능한 열교환기와의 연결배관 길이를 단축시켜야 한다.

헬륨 냉동설비는 열사이펀내 수소의 결빙과 기화를 방지할 수 있는 범위의 극저온헬륨을 공급하도록 최적의 상태로 운전되어야 하며, 열교환기에 공급되는 극저온헬륨의 온도에 따라 CNS 성능이 결정되므로 CNS 본체의 부하변동에 따른 극저온헬륨의 온도를 조절할 수 있는 장치를 고려해야 한다. 압축기 및 팽창터빈 등 계통내 주요설비는 고장에 대비한 Stand-by 설비를 두고 자동 절환운전이 가능하도록 하여 CNS의 연속적인 운전에 영향이 없도록 하여야 한다. 또한, 헬륨완충탱크는 국내 고압가스관련 법규에 따라 제작하여 설치하여야 하며, 계통에 필요한 냉각수 순환설비는 충분한 용량을 확보하여야 한다.

헬륨 계통의 배치는 열교환기와의 연결되는 저온배관의 길이를 최대한 단축시키기 위하여 저온박스는 원자로실의 CNS 기기실내에 배치하며, 진동 및 소음발생이 우려되는 압축기설비 및 계통내 헬륨압력 조절에 필요한 헬륨 완충탱크는 냉중성자 실험동과 분리하여 설치되는 유틸리티 공급 시설동에 설치하는 것으로 하였다.

4. 블랭킷 박스내의 냉각장치 필요성 검토

냉중성자원 시설계통중 수소계통과 진공계통은 계통의 안전을 확보하기 위한 수단으로 블랭킷을 이용한 격리 시스템을 채택하였는데, 블랭킷 박스내에는 전동기 등의 발열기기가 포함되어 있으므로 별도 냉각설비의 설치 여부에 대한 필요성을 검토하여야 한다.

4.1 냉각장치 필요성 검토

수소계통의 수소 박스내에는 수소 배출을 위한 Scroll type의 진공펌프와 각종 밸브류 및 감속기 내부의 온도와 압력을 감시, 기록과 제어를 위한 각종 계기가 설치되어 있다. 수소 박스내 설비중 냉중성자원의 통상 운전중 별도의 냉각이 필요한 발열설비는 없으나, 계통내 수소 배출시 일정시간 진공펌프가 가동되므로 펌프 전동기로부터 발생하는 발열량에 따라 별도의 냉각장치가 필요한 것으로 판단된다.

반면, 진공박스는 진공계통이 공정 진공도를 확보한 후, 진공 압력용기의 연결배관을 차단하기 위한 고진공용 차단밸브와 정상 가동상태에서 공정진공도 유지를 위한 이온펌프 및 차단밸브로 구성되며, 진공 압력용기내 진공도의 감시, 기록 및 제어를 위한 계측기가 설치되는데, 이온펌프 특성상 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Torr 범위에서 대량의 배출이 일어나 전력소모가 크게 되고, 이후 진

공도가 높아지면 소요 전력량이 급격하게 줄어들게 된다. 제안된 진공계통내 이온펌프는 공정진공도(10^{-5} Torr) 확보 후 가동되기 때문에 펌프운전에 필요한 전력 소요량이 적어 진공박스 내부의 온도상승에 미치는 영향이 무시할 수 있을 정도이므로 별도의 냉각장치의 설치는 필요치 않은 것으로 판단된다.

한편, 진공계통 펌프 스테이션에는 진공 압력용기내 공정진공도 확보를 위한 저진공 및 고진공 펌프와 각종 밸브류, 진공압력 감시와 진공펌프의 운전제어를 위한 각종 계기류가 설치되는데, 진공압력용기 내부의 공정진공도 확보를 위해서는 장시간에 걸쳐 저진공 펌프 또는 고진공 펌프를 가동하여야 하고, 전동기에 의한 발열이 펌프 스테이션내에 누적될 수 있기 때문에 별도 냉각장치의 설치가 필요한 것으로 판단된다.

4.2 냉각 장치 검토

별도의 냉각장치 설치가 필요한 것으로 검토된 수소박스 및 펌프 스테이션내에 설치되는 주요 발열기기 및 기기별 소비전력은 표 1과 같이 예상되나, 각 계통내 구성설비의 설치 위치 및 박스내 설치기기 구성이 확정되지 않은 상태에서 조사된 결과이므로 냉중성자원 시설계통에 대한 기본 설계시 상기 사항이 확정된 후 대상기기 및 예상 발열량에 대하여 재검토 되어야 한다.

블랑킷 내부의 냉각방식으로는 수소박스과 펌프 스테이션내에 설치된 발열기기로부터 발생하는 열부하 제거를 위한 냉각장치는 구조가 단순하고 열제거 효과가 큰 수냉식 열교환기 방식이 바람직한 것으로 생각된다. 열교환기는 박스내부 블랑킷 가스(질소)의 순환을 위하여 박스 상부에 설치가 요구되나, 열교환기 설치위치의 변경이 필요한 경우와 강제적인 내부공기의 순환이 필요한 경우, 별도 순환용 냉각Fan이 설치되어야 할 것이며, 열교환에 필요한 냉각수는 시설계통의 2차 냉각수 계통 설계시 반영하여야 할 것으로 판단된다.

표 1. 블랑킷 박스내 주요 발열기기 및 예상 소비 전력

| 구 분 | 블랑킷 박스 | 주요 발열기기 | 예상 소비전력 |
|------|--------|--------------|-------------|
| 수소계통 | 수소박스 | 진공펌프 1 Set | 0.60 kW/Set |
| 진공계통 | 펌프스테이션 | 저진공펌프 2 Sets | 0.60 kW/Set |
| | | 고진공펌프 2 Sets | 0.20 kW/Set |

5. 결론

하나로에서는 국내외의 냉중성자원 연구시설에 대한 이용 수요 증가에 대비하기 위하여 2008년까지 냉중성자 연구 시설의 설계, 시공 및 시운전을 완료할 계획을 갖고 있다.

냉중성자 연구 시설은 연구용 원자로인 하나로에 연계되는 시설로서 원자로의 안정성을 최우선으로 고려하여야 하며, 냉중성자 이용 연구 그룹의 요건을 충분히 반영하여 설계 개념을 수립하여야 한다.

본 논문에서는 선행연구 결과와 계통 설계를 위해 수행된 개념 설계 과정을 소개하고, 이를 통해 하나로 냉중성자 시설 및 계통 설계에 적용할 수 있는 수소계통과 진공계통 및 헬륨냉동계통의 설계 요건과 개념을 제안하였다. 또한, 제안된 수소계통과 진공계통의 안전을 확보하기 위한 수단으로 채택한 블랑킷 계통에 대하여 블랑킷 박스내의 발열기기를 위한 별도의 냉각설비 설치 여부를 검토하였다.

이러한 기본 자료를 토대로 시설 계통의 상세 설계가 이루어 질 것이며, 중국적으로는 세계적인 경쟁력을 갖춘 냉중성자원 연구 시설을 구축하는데 도움이 될 것이다. 또한, 냉중성자 시설은 연구로의 중요한 부대시설이므로 가까운 장래에 실현될 고성능 연구로의 기술 수출에도 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. Takeshi Kawai, Sungjoong Kim, Osvaldo Lovotti, "냉중성자 해외전문가 활용 결과보고서", 냉중성자 연구기반 구축 및 이용기술 개발, 한국원자력연구소, 2003.
2. HCNS-CD 55064 00.000.DR, "Conceptual Design Report HANARO Cold Neutron Source", KAERI and PNPI, 1997.
3. "Cold Neutron Source at 20MW-NBSR", National Institute of Standards and Technology, 2003.
4. KAERI, TR-2234/2002, "Conceptual Design of HANARO Cold Neutron Source", 2002.
5. "Safety Class and the Applicable Standards to Nuclear Reactor Facilities", MOST, 2002-21.
6. "Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants", ANSI N51.1-1983 (R1988).
7. KAERI, TR-710, "HANARO Safety Analysis Report"
8. 조만순, 박선희, 박국남, "하나로 CNS 설계를 위한 JRR-3M의 설계 및 활용분야 조사", KAERI/OT-214/95, 1995. 9.
9. S. I. Wu, Y. K. Kim, H. S. Jung, and Y. J. Kim, "Safety Design Criteria for Facilities of Cold Neutron Source in HANARO", HANARO WORKSHP 2004, 2004. 4.