

월성 TRF 공정실증용 파일럿 플랜트

Pilot Plant for Process Demonstration of Wolsong TRF

송규민, 손순환, 김광신, 이숙경

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

한국전력은 월성 원전에 삼중수소제거설비(WTRF : wolsong tritium removal facility)를 2005년까지 건설할 예정이다. 아울러 여기에 적용될 국산소수성 촉매를 사용한 액상촉매교환(LPCE : liquid phase catalytic exchange)공정의 복합공정실증을 위한 파일럿 플랜트를 2000년까지 준공할 것이다. 파일럿 플랜트는 실제설비의 10분의 1 크기로 설계되었다. 파일럿 플랜트는 액상촉매교환 반응계통, 기체순환계통, 초저온증류계통, 초저온 냉매공급계통 그리고 계측·제어계통의 5개 계통으로 이루어져 있다. 주요장치인 액상촉매교환계통의 촉매탑 직경은 7cm이며 단수는 5단으로 구성되어 있으며, 초저온증류계통의 증류탑은 직경 4cm 높이 1.5m로 이루어져 있다. 본 설비를 이용하여 수소와 중수소의 분리농축에 대한 실험을 통해 실제 설비의 설계지원, 운전절차보완 및 운전원 교육 등에 활용할 계획이다.

Abstract

KEPCO is planning to construct TRF(tritium removal facility) in wolsong nuclear power plant site by 2005. In advance of WTRF construction, the pilot plant also will be installed in KEPRI by 2000 in order to show process reliability of WTRF. The reactor column of LPCE as a front-end process of WTRF will be filled with the domestic hydrophobic catalysts. The pilot plant design is based on one of tenth of WTRF scale. It consists of LPCE(liquid phase catalytic exchange) system, gas circulation system, CD(cryogenic distillation) system, cryogenic refrigerant supply system and analysis & control system. The diameter of LPCE column, which is a major component of LPCE system, is 7 cm and the number of stages is 5. The diameter and height of CD column is 4 cm and 1.5 m respectively. The experience of the pilot plant will be practically used in WTRF design, operating procedure revision and fundamental education for the operators.

1. 서론

월성 원전에 2005년까지 건설될 삼중수소 제거설비(TRF : Tritium Removal Facility)는 중수계통내 삼중수소를 분리·제거하기 위한 설비이다. 월성 TRF는 삼중수소를 분리·제거하기 위하여 액상촉매교환공정과 초저온증류공정을 이용한다. 액상촉매교환공정은 소수성 촉매를 이용하여 중수내 삼중수소를 중수소와 치환하여 삼중수소를 기체로 분리해 내는 공정이다. 여기에 사용될 소

수성 촉매는 한전 전력연구원과 원자력연구소 공동연구로 이미 국산화에 성공한 바 있다. 액상촉매교환공정에서 기체상으로 분리된 삼중수소는 부피를 최소화하기 위해 초저온증류공정에서 농축하여 금속수소화물 형태로 저장을 하게 된다. 액상촉매교환공정은 상업설비 규모로는 세계 최초로 적용하는 것으로 초저온증류공정과 복합공정실증과 운전절차 보완을 위해 파일럿 플랜트를 설치하게 되었다. 파일럿 플랜트 운전은 액상촉매교환공정과 초저온증류공정을 합성하는 과정에서 단위공정설계시 간과되었던 설계변수를 찾아내고, 월성 TRF 설계 및 설치의 신뢰성 확보에 적절히 사용될 것이다. 또한 파일럿 플랜트 운전경험을 통해 내년부터 본격적으로 수행될 월성 TRF 설계의 적합성 분석·평가를 위한 전산프로그램 개발 및 검증에 활용할 계획이다.

2. 본론

월성 TRF 공정실증용 파일럿 플랜트는 액상촉매교환반응계통, 기체순환계통, 초저온증류계통, 초저온 냉매공급계통 그리고 계측·제어계통의 5개 계통으로 구성되어 있다. <그림 1>은 각 계통 간의 관계를 간략화하여 나타낸 것이다. 경수 속에 있는 중수소는 액상촉매교환계통에서 기체상태로 분리되며, 기체순환계통의 전처리를 거쳐 초저온증류계통으로 유입된다. 초저온증류계통에서 분리된 중수소는 저장되며, 수소는 액상촉매교환계통으로 순환된다. 각 계통의 구성요소와 기능은 다음과 같다.

2.1 액상촉매교환계통

본 계통은 촉매를 사용하여 경수에 섞여 있는 중수로부터 중수소를 분리하는 장치로서 주장치인 촉매탑을 비롯하여 계통 온도를 조절하기 위한 온도조절장치, 액체 및 기체 순환장치, 계측·제어 및 주변장치 등으로 구성된다.

1) 액상 촉매탑

액상 촉매탑은 <그림 2>에서 볼 수 있다. 촉매탑은 5개의 반응단과 촉매탑 하부에 포화장치로 구성되어 있다. 반응단은 일정온도 유지를 위하여 각 단마다 water jacket을 설치하였다. 반응단의 내부구조는 분리형 촉매탑으로 촉매와 일반 충전물이 물리적으로 분리된 구조를 갖고 있다. 반응단의 내부는 Sulzer-CY packing이 설치되며, 외부에 국산소수성 촉매가 충전되어 있다. 반응단 하부에 설치되는 포화장치는 반응단에 들어오는 기체를 수증기로 포화시키는 역할을 하며 기액접촉면적을 증가시키기 위해 내부에 금속 라석링이 충전된다. 포화장치상부에는 액체분산기를 설치하여 탑하부에서 재순환된 중수가 고르게 분산되게 한다.

2) 온도조절장치

온도조절장치는 촉매탑과 포화장치에 들어가는 액체를 가열하는 장치와 촉매탑의 water jacket 온도를 유지하는 장치, 촉매탑에서 나오는 기체중의 수분을 제거하기 위한 냉각장치 등으로 구성된다. 액체시료 및 water jacket의 물 온도는 상온에서 90℃까지 유지시킬 수 있다. 냉각장치는 냉동 항온조에 의해 0℃ 근처로 온도가 유지되는 냉각트랩으로 촉매탑 상부에서 기체에 섞인 수분이 제거하는 기능을 한다.

3) 액체순환장치

액체순환장치는 포화장치내 중수를 순환시키는 장치, 촉매탑에 중수를 공급 또는 순환시키는 장치로 구성되어 있다. 이중 중수가 순환되는 장치는 대기로부터 밀폐되어 있어 중수 속으로 공기 등의 기체가 용해되어 들어가는 것을 방지한다. 또한 공급탱크에 분리막을 이용한 탈기장치를 설치하여 중수내 산소 및 질소등의 기체를 제거하도록 하였다. 촉매탑에 공급되는 중수는 정밀주입펌프에 의해 유량을 조절한다. 이때 중수의 공급과 저장은 200ℓ의 중수탱크 두 개를 이용한다.<그림 3>

4) 기체순환장치

기체순환장치는 수소를 액상축매교환계통의 자체 순환과 초저온증류계통과의 연계순환이 가능하다. 초저온증류계통과 연결되는 부분에는 완충탱크를 설치하여 초저온증류 계통으로 수소가 원활히 공급될 수 있도록 한다. 계통내의 압력은 대기압 정도로 유지하며 압력제어컬럼에 의해 압력을 조절한다. 축매탑에서의 반응에 의한 수소기체내 중수소 농도변화를 보정하기 위해 중수소 spike system을 설치하였다. 장치 기동을 위한 준비 단계로 계통내의 공기를 제거하기 위하여 기체순환장치에 진공펌프를 연결하였다.

5) 기타 주변장치

기타 주변장치로 수소기체내 수증기 회수장치, 시료채취장치 등이 있다. 또한 안전장치로 계통내의 압력이 급격히 떨어지는 경우 또는 정전시와 같은 비상시에는 기체 및 액체 공급장치의 밸브가 닫혀 순환이 정지되도록 되어 있으며, 질소공급장치가 가동되어 계통내에 비활성기체인 질소가 공급되도록 하였다.

2.2 기체순환계통

1) 전처리

수소가 초저온증류탑으로 유입되기 전 수증기, 질소, 산소 등의 불순물을 제거하고, 온도를 떨어뜨리기 위해 혼합탱크, 평형장치, 흡습탑 및 액체질소 흡착탑으로 구성되어 있다. 평형장치는 반응을 통해 H_2/D_2 계를 H_2/HD 계로 변환시켜 주며, 흡습탑은 수소 기체내 수분을 제거한다. 혼합탱크는 수소와 중수소를 일정 비율로 정확하게 혼합할 수 있도록 정밀도가 높은 압력계가 장착되어 있다. 액체질소 흡착탑은 질소, 산소, 이산화탄소 등 불순물을 제거하기 위한 설비로 열교환 기능도 함께 한다. 이때 온도는 약 78K까지 낮아지며 cold box까지 온도를 유지하기 위해 이중관으로 이송된다.

2) 후처리

초저온증류탑에서 분리된 중수소를 저장하고 수소를 액상축매교환반응계통으로 순환시키거나 초저온증류탑으로 재순환시키는 기능을 한다. 수소가 초저온에서 상온으로 유출될 때 발생하는 압력증가를 완화시키기 위해 팽창탱크를 설치하고 열교환이 충분이 이루어질 수 있도록 증발기를 설치한다. 이때 유량조절은 2대의 metal bellows pump(<그림 4>)를 이용한다. 수소이송장치에 의한 압력변화를 방지하기 위해 완충탱크를 설치한다. 수소이송장치는 액상축매교환반응계통에서 유입된 수소/중수소 혼합기체를 가압하고 일정 유량으로 초저온증류탑으로 유입시키는 기능을 한다. 액상축매교환반응계통에서 유입된 수소/중수소 혼합기체의 가압은 방폭용 수소이송장치에 의해 이루어지며, 수소기체유량은 mass flow controller(MFC)에 의해 제어된다. 농축된 중수소는 저장탱크로 이송된다.

2.3 초저온증류계통

초저온 증류계통은 <그림 5>에서 볼 수 있다. 전체가 20K 이하의 초저온으로 유지되어야 하므로 진공시스템을 제외한 모든 설비가 cold box안에 들어가 있어 외부에서 볼 수는 없다. cold box 내부에는 초저온증류탑, 열교환기, 액체질소조, 각종 센서 및 계측기가 설치되며, 모두 cold box 상단에 매달린 상태로 있다고 보면 된다.

1) 초저온증류탑

초저온증류계통의 핵심부로 수소동위원소 분리가 일어나는 부분이며, 물질전달면적을 증가시키기 위해 내부에 Sulzer-CY packing을 충전하였다. 초저온증류탑은 전체적으로 세 부분으로 구성되는데, 상단의 응축기는 수소기체를 액체로 응축시켜 환류시키는 역할을 하며, 하단의 재비기는

상부에서 떨어진 액체수소를 기화시켜 환류시키는 역할을 한다. 가운데의 증류탑부는 기액접촉을 통해 실제 수소동위원소 분리가 일어나는 부분으로 상대 휘발도 차이에 의해 수소는 기상으로 증수소는 액상으로 농축시키는 역할을 한다. 초저온증류탑의 높이는 1.5m이며 직경은 4cm이다. silicone diode 방식의 6개의 온도센서를 설치하였고, 탑상부와 탑하부 그리고 재비기 하부의 압력차를 측정하기 위해 차압계를 설치하였다. 시료채취도 5개 곳에서 가능하다. 증류탑 응축기 상부는 팽창 탱크로 직접 연결된 배관이 있으며 초저온 유지 불가 혹은 열침입에 의한 초저온증류탑 가압시 폭발을 방지하도록 하였다.

2) Cold Box

초저온증류탑이 원활한 기능을 할 수 있도록 열침입을 방지하고, 진공을 유지하는 기능을 하며, 방폭 및 열교환 기능도 한다. 열침입 방지는 단열(알루미늄 코팅), shield chamber(20K 헬륨), 액체질소조(78K 액체질소), 고진공(10^{-5} Torr)의 다단계 단열로 구성되어 있다. cold box 중간부에는 ISO250 크기의 배관연결부가 있어 이를 통해 진공시스템과 연결된다. cold box 내부 상단과 내부 바깥면 쪽에는 액체질소조가 설치되어 있다. 또한 유입된 수소기체의 온도를 낮추기 위한 열교환기가 설치되어 있다. 1단계로 cold box 상단에 설치된 액체질소조가 열교환기 역할을 하며 이때 78K까지 온도가 내려간다. 2단계로 헬륨냉매와의 열교환을 하여 20K까지 온도가 내려간다.

3) 진공시스템

외부로부터 유입된 열이 대류에 의해 증류탑으로 전달되는 것을 차단하기 위해 cold box 내부 압력을 10^{-5} Torr 이하로 유지시키기 위한 설비이다. 1800 l/sec용량의 터보펌프와 2개의 보조진공펌프(로터리 방식)가 설치되어 있다. 보조진공펌프는 초기 cold box의 진공을 위해 가동되며 진공도가 10^{-3} Torr가 되면 터보펌프를 가동한다. 이때 이들이 원활하게 작동할 수 있도록 5개의 공압밸브와 압력계 및 펌프제어기가 주어진 로직에 의해 작동된다. <그림 6>에서 cold box와 연결된 터보펌프와 2대의 로터리방식의 보조진공펌프를 볼 수 있다.

2.4 초저온 냉매공급계통

초저온증류계통에서 사용되는 냉매를 원활하게 공급하여 각 계통의 초저온을 유지시키는 기능을 한다. 초저온냉매공급계통은 액체질소 공급장치과, 헬륨냉매 공급장치로 구분할 수 있다. 액체질소 공급계통은 액체질소 흡착탑, cold box의 상단 액체질소조 및 cold jacket의 액체질소가 일정 수위 이하로 낮아지면 액체 질소가 공급되도록 하였다. 액체질소공급은 외부에 설치된 5톤 용량의 액체질소 탱크로부터 이루어지며, 액체질소 수위 제어기와 solenoid 밸브에 의해 제어된다. 헬륨냉매 공급장치는 헬륨냉동기(<그림 7>), 헬륨냉동기용 압축기 및 냉각탑으로 구성되어 있다. 헬륨냉동기 용량은 15K 기준으로 360W이며 헬륨냉매의 열침입을 최소로 하기 위하여 cold box에 가깝게 설치하였다. 헬륨냉동기는 자체적으로 열교환기, 팽창엔진, 이중활성탄 흡착장치, 진공시스템 및 제어기기를 갖추고 있어 독립적으로 제어된다. 헬륨압축기는 열교환 및 압력손실이 발생한 헬륨을 고압으로 가압하여 헬륨냉동기로 이송하는 역할을 한다. 이때 발생하는 열을 제거하기 위하여 냉각 시스템과 연결되어 있다. 냉각시스템은 24 °C로 유지되는 냉각수를 30 psi 이상의 압력으로 유량 60 l/min 만큼 공급할 수 있다. 헬륨냉동기 제어를 위해 공압밸브가 사용되며 유량 9 l/min 이상, 압력 2.4 bar 이상의 압축공기가 사용된다. 헬륨냉동기에서 필요로 하는 헬륨은 초기 장전시 및 가동시 소모되는 헬륨은 헬륨가스통에서 공급되며, 재가동시나 정지시에는 자체 저장/공급기능을 이용한다.

2.5 계측·제어 계통

1) Control Panel

본 설비의 모든 계측·제어기기를 한 곳에 배치하여 신속한 자료수집과 감시 및 제어기능을 한다. MFC를 제어하며, 공압밸브, solenoid밸브의 조작을 할 수 있으며, 유량, 온도, 압력을 지시한다.

다. 또한 운전 모드에 따른 밸브의 on/off 상태를 표시한다. Control panel은 상단에 그래픽보드가 있으며 데스크에 각종 밸브 및 기기 작동용 버튼과 파워스위치가 있다. 그래픽보드는 모자익 방식으로 제작되었다. 데스크와 그래픽 보드 사이에 MFC, 터보펌프 컨트롤러 등의 각종 제어기가 설치되어 있다.

2) 기체시료 분석장치

기체시료는 on-line으로 분석하기 위해 질량분석기를 설치하였다. 기체시료의 on-line분석을 위해 시료채취가 필요한 곳에 1/8"의 시료채취라인을 연결하여 질량분석기까지 연결하였다. 시료채취라인은 총 8개이며 질량분석기 진공펌프에 의해 유입된다. 질량분석기는 magnetic sector 방식으로 시료채취가 가능한 시간간격은 5분이며 측정가능한 최소 농도는 5 ppb이다.

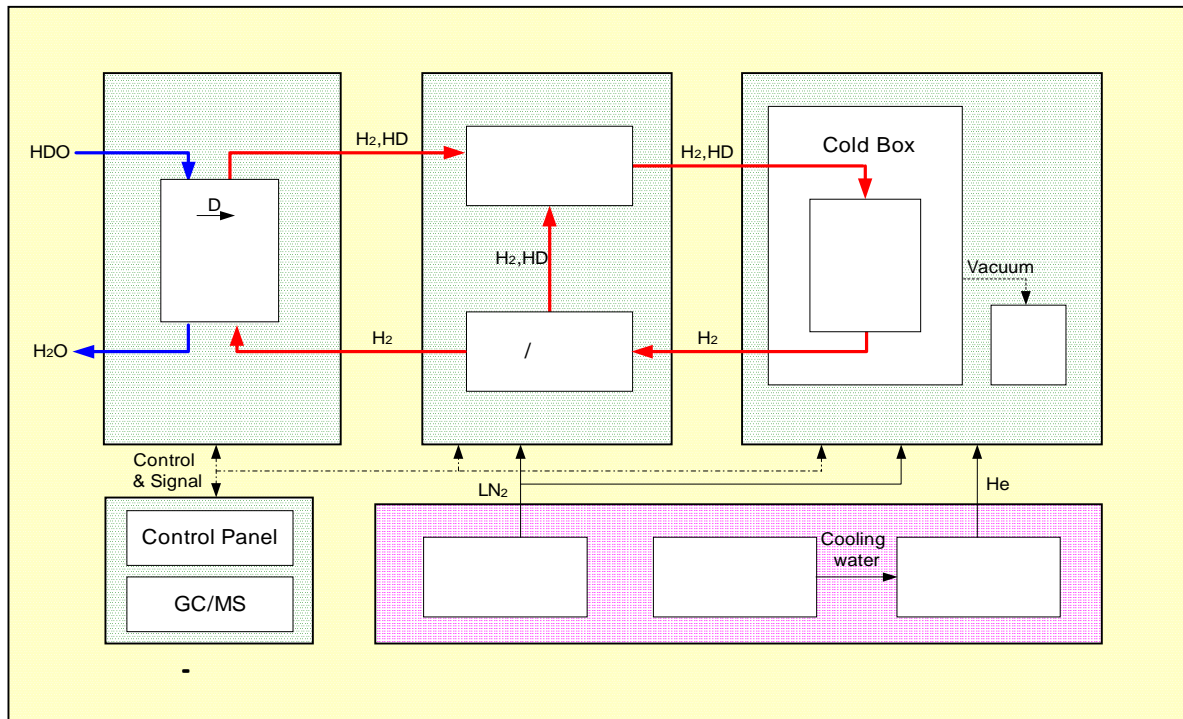
3. 결론

월성 TRF 공정실증용 파일럿 플랜트는 실제 설비의 처리용량 기준으로 100분의 1규모로 액상 촉매교환반응계통, 전처리계통, 초저온증류계통, 초저온 냉매공급계통 그리고 계측·제어계통으로 이루어져 있다. 주요장치인 액상촉매교환계통은 국산 소수성촉매를 적용하였으며, 본 설비를 이용하여 수소와 중수소의 분리농축에 대한 실험 통해 실제 설비의 설계지원, 운전절차보완 및 운전원 교육 등에 활용할 계획이다.

참고문헌

1. 손순환 등, "삼중수소 제거기술개발 (I) 제2단계(중간보고서)", 전력연구원, '00전력연-단056, TM-96NJ18.M2000.56 (2000).
2. 김광신 등, "수소동위원소 액상촉매교환반응에서 다중관형 촉매탑의 촉매층 최적화", 원자력공학회 추계학술회의, Oct. 29-30 (1999).
3. 송규민 등, "삼중수소 제거공정 실증용 파일럿플랜트 설계", 전력연구원, '99전력연-단484, TM-96NJ18.P1999.475 (1999).
4. 송규민 등, "삼중수소 제거공정 실증용 파일럿플랜트 초저온증류공정 열교환기 설계", 전력연구원, '99전력연-단389, TM-96NJ18.P1999.382 (1999).
5. 송규민 등, "월성 TRF LPCE 공정 Pilot Plant 설계서", 전력연구원, '99전력연-단681, TM-96NJ18.P1999.673 (1999).
6. 김광신 등, "수소동위원소 액상촉매교환공정 촉매탑 비교", 전력연구원, '99전력연-단487, TM-96NJ18.P1999.478 (1999).

그림



< 1 >

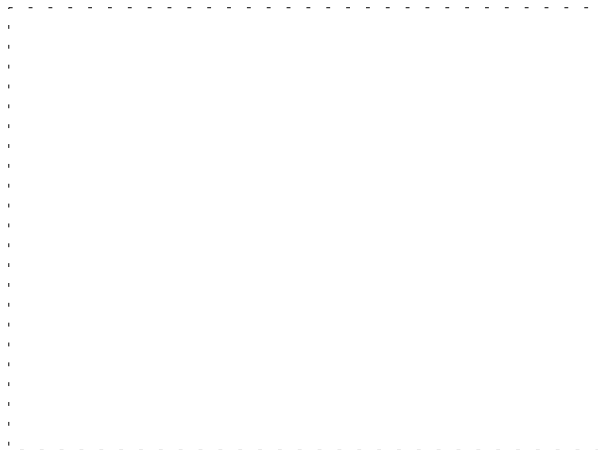
Pilot Plant



<그림 2> 액상축매탑(액상축매교환계통)



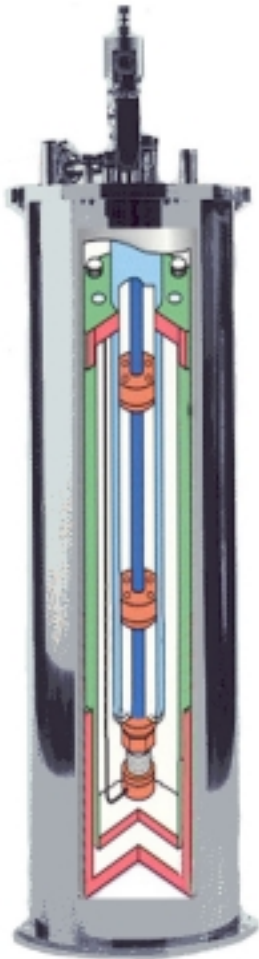
<그림 3> 액상축매교환계통 (좌측 : 중수저장조, 우측 : 수소/ 중수소 혼합탱크)



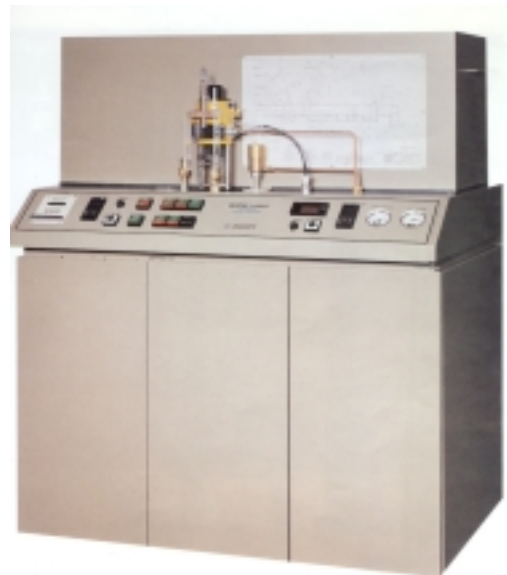
<그림 4> Metal bellows pump(기체순환계통)



<그림 6> Cold box와 진공시스템(초저온 증류계통)



<그림 5> 초저온증류계통 - cold box 및 초저온증류탑



<그림 7> 헬륨냉동기(초저온 냉매 공급계통)