

## 핵융합 수소동위원소의 회수공정과 위험관리에 관한 연구

†정우찬·문흥만·장민호\*·이현곤\*·황명환\*\*·우인성\*\*

대성산업가스(주) 초저온연구소·\*국가핵융합연구소·\*\*인천대학교 안전공학과  
(2019년 8월 19일 접수, 2019년 11월 1일 수정, 2019년 11월 30일 채택)

## Study on the Recovery Process and Risk Management for Fusion Hydrogen Isotopes

†Woo-Chan Jung · Hung-Man Moon · Min-Ho Chang\* ·

Hyeon-Gon Lee\* · Myung-Whan Hwang\*\* · In-Sung Woo\*\*

*Cryogenic Research Institute, Daesung Industrial Gases Co., Ltd.,  
128, Sandan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15434, Korea*

*\*National Fusion Research Institute,*

*169-148, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34133, Korea*

*\*\*Dept. of Safety Engineering, Incheon National University,*

*119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea*

*(Received August 19, 2019; Revised November 1, 2019; Accepted November 30, 2019)*

### 요 약

본 연구는 핵융합 배기가스에서 수소동위원소를 회수하기 위한 공정에 관한 것이다. 이 공정은 불순물을 제거하고 수소동위원소만을 최대한 회수하는 것이 목표이다. 수소와 중수소를 이용한 실험을 통해 수소동위원소의 회수 가능성을 확인하고자 하였다. 수소가 포함된 배기가스는 주로 분리막 공정에서 불순물을 제거하여 순수한 수소만을 회수하고, 헬륨-글로우 방전 세척 공정의 배기가스는 초저온 흡착 공정을 이용해서 수소를 회수하였다. 또한 정성적 위험성 평가를 위해 HAZOP 분석을 실시하였다. 시나리오 분석을 위해서 피해 예측 ALOHA 프로그램을 사용하여 영향 범위를 산출하고, 안전성 방안을 모색하였다.

**Abstract** - This study deals with a process for recovering hydrogen isotopes from fusion exhaust gas. The goal of this process is to remove impurities, maximally recover only pure hydrogen isotopes. Experiments using hydrogen and deuterium were conducted to confirm the possibility of the recovery of hydrogen isotopes. In the exhaust gas containing H<sub>2</sub>, impurities was removed in the membrane process, and only pure H<sub>2</sub> was recovered. And the H<sub>2</sub> in the exhaust gas of the He-GDC(Glow Discharge Cleaning) process was recovered using a cryogenic adsorption process. In addition, HAZOP analysis was performed for qualitative risk assessment. For scenario analysis, the damage prediction ALOHA program was used to calculate the range of influence. Finally measures were sought to improve safety.

**Key words** : fusion, hydrogen isotopes, recovery process, risk assessment, HAZOP, ALOHA

†Corresponding author:chan@gastopia.co.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

핵융합 에너지는 미래 인류의 에너지 문제 해결을 위한 중요한 에너지원이라고 한다. 국제적으로 이러한 핵융합을 이용한 상용화 가능성에 대해 활발한 연구가 진행되고 있고, 국내에서도 초전도핵융합연구장치(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, KSTAR) 연구와 국제핵융합실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 프로젝트에 정식 회원국으로 참여하여 연구를 수행하고 있다. 국제핵융합실험로 프로젝트는 한국, 유럽연합, 미국, 러시아, 중국, 일본, 인도의 7 개 회원국이 참여하는 사상 최대의 국제 협력 사업이며, 프랑스 카다라쉬 지역에 건설[1]되고 있다. 이러한 핵융합 관련 연구를 통해서 향후 국내에 건설될 DEMO plant를 위한 기술을 확보해야 한다.

국제핵융합실험로 프로젝트의 핵융합 원료는 중수소와 삼중수소이며, 플라즈마 상태에서 핵융합 반응을 일으키고, 온도가 1억 $^{\circ}\text{C}$  이상이 되어야 한다. 이러한 조건에서도 반응로 내에서 투입된 수소동위원소의 0.3% 미만만 반응에 참여하고 대부분은 그대로 배출된다. 특히 삼중수소의 경우 그 가격이 매우 고가이고, 외부 공급이 어려운 물질이므로, 반드시 회수되어 재사용되어야 한다. 이러한 수소동위원소( $Q_2$ ,  $Q$ 는 수소, 중수소, 삼중수소)를 포함하는 배기가스가 회수, 정제, 동위원소 분리, 저장, 공급 등의 단계가 순환되는 공정을 삼중수소 연료주기[2-4]라고 한다.

삼중수소 연료주기 중에서 배기가스의 회수와 정제 공정은 수소동위원소만을 추출하여 회수하는 공정으로 삼중수소를 포함한 수소동위원소의 엄격한 관리의 기초가 되는 공정이다. 이 공정에서 삼중수소를 포함한 수소동위원소를 회수하지 못한다면 대기 중으로 배출 될 수 있는 가능성이 존재할 수 있다. 배기가스의 조성을 살펴보면 연료로 사용되는 중수소와 삼중수소가 있고, 불순물로는 헬륨, 네온, 삼중수소화 메탄, 삼중수소화 물, 일산화탄소, 이산화탄소, 아르곤 등이 존재한다.

삼중수소는 방사능을 지니며, 반감기는 12.3년이다. 삼중수소와 삼중수소를 포함하는 화학 물질에 대한 배출 허용기준은 원자력안전위원회 고시 별표3의 방사성 물질의 연간섭취한도, 유도공기중 농도 및 배출관리기준[5]에 있으며, 방사성 물질인 삼중수소를 최대한 회수해서 대기 중으로 배출되지 않도록 해야 한다.

이 논문에서는 수소와 중수소를 이용한 실험을 통해 핵융합 배기가스 중 수소동위원소의 회수, 정

제 가능성을 확인하고자 하였다. 수소동위원소가 포함된 배기가스는 주로 분리막 공정에서 불순물을 제거하여 순수한 수소동위원소만을 회수하고, 핵융합실험로인 토카막(Tokamak)을 세척하는 공정인 헬륨-글로우 방전 세척(He-Glow Discharge Cleaning) 공정에서도 적지 않은 수소동위원소가 포함되어 나오는데, 이러한 배기가스는 초저온 흡착 공정을 이용해서 수소동위원소를 회수하고자 하였다.

수소동위원소 회수 공정에 대해 누출 등 위험 요소에 대해 안전한 시스템을 확보할 수 있도록 위험성 평가를 통해 위험 요소를 파악하고자 정성적 위험성 평가와 시나리오 분석을 실시하였다.

정성적 위험성 평가를 위해 공정에 대한 위험을 검토하여 설계 의도에서 벗어나는 이탈 현상을 찾아내어 공정의 위험 요소와 운전상의 문제점을 도출하는 방법인 HAZOP 분석을 실시하였다. 시나리오 분석을 위해서는 화학 사고의 위험성 평가에 대한 장외영향평가를 실시하고, 수행 방법으로 피해 예측 상용 프로그램인 ALOHA를 사용하여 영향 범위를 산출하고, 안전성 확보 방안을 모색하였다.

## II. 수소동위원소 회수 실험

수소, 중수소를 사용하여 분리막 공정과 초저온 흡착 공정 실험을 통해 수소동위원소의 회수에 대한 기술을 확보하고자 하였다.

### 2-1. 분리막 공정

이 실험의 목적은 분리막 투과 실험을 통해 분리막의 성능을 확인하고, 핵융합 공정에 적용 가능한 기술과 데이터를 확보하는 것이다. 이를 위해 분리막의 수소동위원소 투과 성능과 온도, 압력의 공정 변수 변화에 대한 실험을 위해 그림 1과 같이 실험 장치를 구성하였다.

실험은 2가지의 경우로 나누어 진행하였다. 첫 번째는 원료가스(feed gas)로 수소와 중수소를 사용하여 수소동위원소간의 투과율의 차이를 확인하였으며, 두 번째는 45% 수소, 45% 중수소, 5% 헬륨, 5% 네온의 혼합가스를 이용하여 핵융합 배기가스 유사 조성을 만들어 실험하였다. 공정 압력은 0.2MPa 정도로 분리막에 유입된다.

분리막은 Pd-Ag 합금이고, 팔라듐이 수소동위원소만을 투과시키는 분리막의 성질을 이용하였다. 본 실험에 적용된 분리막은 2가지 제품을 사용하였고, K사의 분리막과, S사의 분리막을 사용하였다. 분리막의 수소동위원소 회수율을 극대화시키기 위

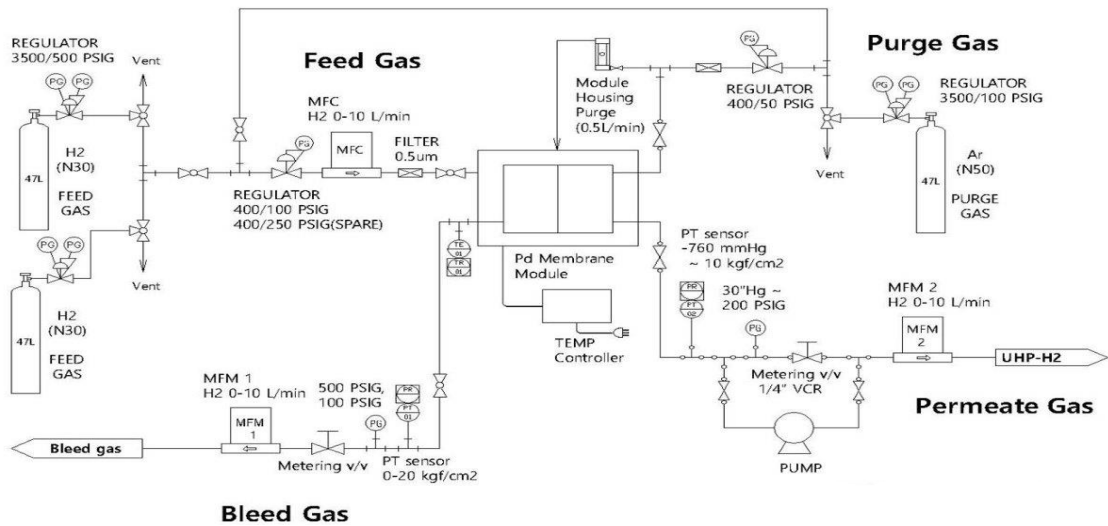


Fig. 1. Design of the Pd membrane permeation experiment device.

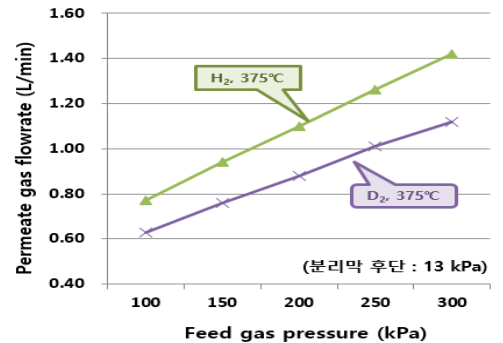
해서 분리막 후단의 투과 측에 고진공 펌프 시스템을 배치하여 진공도를 높여서 실험하였다.

그림 1의 좌측 상단에 원료가스(feed gas)의 공급 부가 있으며, 압력 조절기(pressure regulator)와 질량 유량 조절기(mass flow controller)를 통해 일정한 압력과 유량으로 분리막에 공급된다. 투과 가스(permeate gas)와 비투과 가스(bleed gas)는 유량 측정기를 이용하여 각각의 유량이 측정되고, 투과된 가스는 분석시스템으로 도입되어 순도분석을 수행하였다. 우측 상단의 퍼지 가스(purge gas)는 분리막 손상을 줄이기 위해 분리막 전단·후단을 모두 퍼지할 수 있도록 설계하였다. 그림의 우측 하부는 정제된 수소동위원소가 분리막으로 부터 배출되며, 대기압 배출 및 진공 펌프를 겸용으로 사용할 수 있도록 구성하였다.

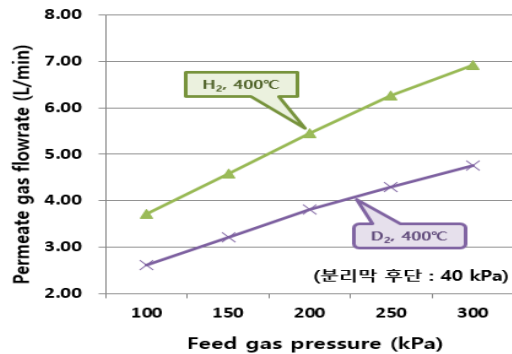
그림 2는 분리막의 수소와 중수소의 투과 성능을 비교한 결과로, 중수소의 투과 유량은 수소 대비 약 80% 수준으로 투과됨을 확인할 수 있었다. 이 실험 결과로 삼중수소는 수소와 중수소보다 적은 양이 투과될 것으로 예상할 수 있다.

분리막의 투과성능은 온도와 압력에 영향을 받으므로, 온도와 압력을 주요 공정 변수로 설정하고 조건 변화에 따른 투과 유량을 측정하였다. 공급 압력의 증가에 따른 투과 유량의 증가 추이를 확인하였고, 중수소의 투과 유량 상승의 기울기는 수소 대비 낮은 것으로 알 수 있었다.

다음으로 비투과 가스(bleed gas) 유량을 점차 줄여가며 투과되는 유량과 회수율에 대해 결과 값을

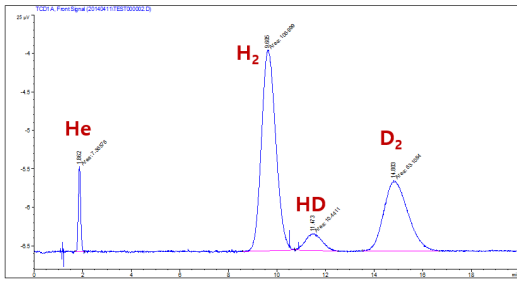


(a) Performance of K membrane

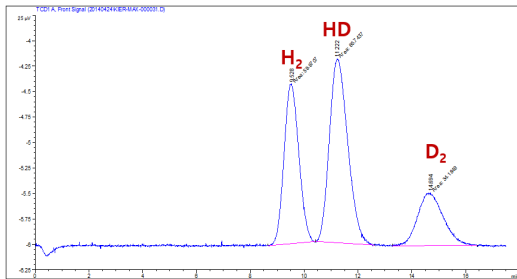


(b) Performance of S membrane

Fig. 2. Comparison of permeation performance between H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub>.



(a) Gas Chromatogram of feed gas



(b) Gas Chromatogram of permeate gas

Fig. 3. Results of gas chromatography analysis.

얼었다. 유입가스의 공급 압력은 0.25MPa, 분리막 후단 압력은 13~20kPa로 유지하면서 분리막을 통과한 수소의 유량을 측정하였다. 유입가스의 10%를 차지하는 헬륨과 네온은 팔라듐 분리막 표면에서 수소의 분압(partial pressure)을 감소시키고 투과 흐름을 방해하는 요소로 작용하는데, 비투과 가스 유량을 감소시키면 분리막 표면에 헬륨, 네온이 농축되어 투과 흐름을 방해하여 투과 유량은 감소하지만 외부로 배출되는 양도 감소하여 회수율은 증가된다. 최대 회수율은 86.8%이었고, 이때의 투과 유량은 0.89 l/min으로 측정되었다. 이 실험 결과를 바탕으로 분리막의 처리 용량을 예측할 수 있으며, 분리막을 여러 단계를 거쳐 회수율을 높일 수 있고, 후단에 고진공 펌프를 사용하여 수소 회수율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

그림 3은 45% 수소, 45% 중수소, 5% 헬륨, 5% 네온의 혼합가스를 이용하여 분리막을 통과시켜 실험한 분석 결과이며, 분리막 후단에서 헬륨이 검출되지 않았고, 팔라듐 분리막을 통과한 수소와 중수소는 각각 해리되고 재결합하는 과정에서 HD가 50% 정도 생성됨을 확인할 수 있었다.

## 2-2. 초저온 흡착 공정

이 공정은 핵융합 반응로인 토카막(Tokamak) 내

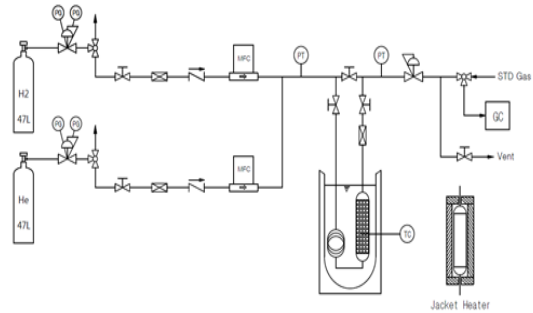


Fig. 4. System of cryogenic adsorption experiment.

부에 존재하는 삼중수소를 비롯한 불순물 세척을 하는 공정인 헬륨을 이용한 글로우 방전 세척 공정에서 발생하는 배기가스의 처리 공정으로 주성분은 헬륨이고, 소량의 수소동위원소가 포함되어 있다.

헬륨-글로우 방전 세척 배기가스(He-Glow Discharge Cleaning) 처리 공정에 사용되는 초저온 흡착 기술은 액체질소 온도인 -196℃에서 분자체(molecular sieve)와 같은 흡착제를 이용하여 헬륨을 제외한 나머지 성분들을 흡착하는데, 비점이 낮은 헬륨은 통과하고 나머지 성분들은 흡착된다. 초저온 흡착탑에 흡착된 성분들은 온도를 올려 탈착시켜 수소동위원소 회수 공정으로 보내어 회수한다.

초저온 흡착 실험 방법은 동적 방법(dynamic method)을 적용하였고, 그림 4와 같이 실험 장치를 설계하였다. 초저온 흡착 실험은 -196℃의 온도에서 흡착제의 수소 흡착성능 및 흡착특성을 확인한다. 이를 위해 흡착제로 공급되는 수소량 및 흡착제를 통과하여 배출되는 수소량을 정확히 파악해야 한다. 이를 위해 흡착제를 통과하여 배출되는 가스 중 수소 농도 분석을 위해 AGC社의 가스크로마토그래피(gas chromatography) 분석기를 이용하였으며, 이 분석기의 검출기는 방전 이온화 검출기(Discharge Ionization Detector)이었다. 분석 조건은 운반가스(carrier gas)로 헬륨을 사용하였고, 분석 컬럼은 분자체(Molecular Sieve-5A), 오븐 온도는 100℃로 설정하였다. 0.1~5% 수소의 표준가스를 통해 분석시스템의 교정에 사용하였다.

원료가스 공급부에는 수소, 헬륨 및 기타 가스 공급을 위해 47l 실린더, 압력 조절기, 질량 유량 조절기를 설치하여 각 가스의 유량을 조절하여 원하는 수소동위원소 농도를 만들어 공급하였다. 흡착탑의 압력 조절을 위해 흡착탑 후단부에 역압 조절기(back pressure regulator)를 적용하고, 흡착탑 전단·후단에 압력 센서를 설치하여 압력 조절 및 모니터링 하였다. 배출 가스는 가스크로마토그래피

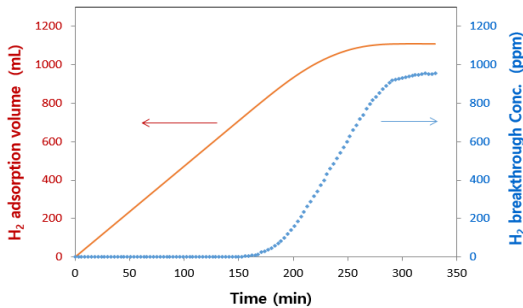


Fig. 5. H<sub>2</sub> breakthrough curve and cumulative adsorption volume.

분석기로 도입시켜 흡착탑 후단에서 수소 파과 시점 및 농도 확인용으로 사용하였다.

초저온 흡착 실험에는 분자체(Molecular Sieve-5A) 112g을 사용하였다. 흡착제는 구형으로 크기는 1.6~2.6mm, 부피 밀도(bulk density)는 770kg/m<sup>3</sup>이다. 흡착탑을 액체질소 온도로 낮추고, 원료가스가 흡착탑에 도입되기 전에 충분히 냉각 될 수 있도록 배관을 구성하였다. 흡착탑 내부의 온도를 측정하기 위해서 온도 센서를 설치하고, 흡착탑의 가열, 재생을 위해 히터를 설치하였다.

흡착탑 온도 -196℃, 공정 압력 150kPa, 원료가스 0.09% 수소, 5 l/min 조건에서 실험을 실시하였고, 흡착탑 후단 농도분석을 통해 수소 파과시점 및 농도변화추이를 그림 5와 같이 확인하였다. 실험 초기에는 흡착탑으로 공급된 모든 수소가 흡착제에 흡착되어 배출되지 않으므로 흡착탑 후단에서는 수소가 검출되지 않는다. 수소 주입시작 후 어느 정도 시간이 지나면서 흡착제의 흡착능력이 포화되기 시작하면 소량의 수소가 흡착탑 밖으로 배출된다. 결과적으로 그림 5의 파과곡선에서 보면 150분 정도가 지나면 가스크로마토그래피에 수소 피크가 나타나기 시작한다. 시간이 지남에 따라 후단 농도가 점점 증가하고, 어느 시점이 지나면 점점 파과농도가 흡착제 주입농도와 동일해진다. 이 시점이 흡착완료 시점이다. 이와 같은 파과농도 곡선은 S자 형태로 나타난다. 실험 조건에서 실험한 결과 수소 흡착능은 4.3x10<sup>-4</sup> mol/g으로 계산되었다.

다음으로 공정 압력 조건은 250kPa, 유량은 2 l/min, 수소 농도 0.5~5% 범위(분압 1.3~12kPa)로 설정하고 실험을 계속 진행하였다. 실험 결과를 하기 표 1에 나타내었다. 수소 흡착능은 수소 분압 1.3~12kPa 범위에서 1.32x10<sup>-3</sup>~2.97x10<sup>-3</sup> mol/g으로 나타났다.

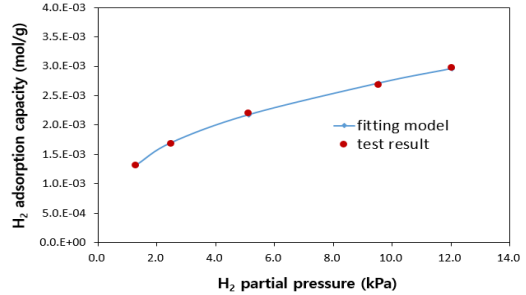


Fig. 6. Experimental results of H<sub>2</sub> adsorption capacity.

Table 1. Results of cryogenic adsorption test

H <sub>2</sub> 농도 (%)	H <sub>2</sub> 분압 (kPa)	H <sub>2</sub> 흡착능 (mol/g)
0.5	1.3	1.32x10 <sup>-3</sup>
1.0	2.5	1.68x10 <sup>-3</sup>
2.0	5.0	2.20x10 <sup>-3</sup>
3.8	9.5	2.69x10 <sup>-3</sup>
4.8	12.0	2.97x10 <sup>-3</sup>

표 1의 실험 결과 값을 랭뮤어(Langmuir)식에 적용하여 계수 값 a, b를 산출한 결과 아래의 식 (1)을 얻었다. 이때 랭뮤어 계수인 a1과 b1은 각각 2.52x10<sup>-3</sup>, 1.41와 a2와 b2는 각각 1.28x10<sup>-4</sup>, 1.79x10<sup>-2</sup>으로 계산되었다.

$$Q = \frac{2.52 \times 10^{-3} \times P}{1 + 1.41 \times P} + \frac{1.28 \times 10^{-4} \times P}{1 + 1.79 \times 10^{-2} \times P} \quad (1)$$

표 1의 실험 결과 값 및 상기 식 (1)의 랭뮤어 모델식의 피팅 값을 그림 6에 나타내었다.

수소와 중수소의 흡착능 차이를 확인하기 위하여 동일한 조건인 공정 압력 250kPa, 중수소 농도 0.5~5%, 유량 2 l/min 조건에서 중수소 흡착 실험을 진행하여 얻은 결과를 그림 7에 나타내었다. 실험 결과 수소 흡착능 대비 중수소 흡착능은 약 12%~22% 높게 나타났으며, 이는 동위원소 효과에 의한 것으로 판단된다. 이 실험 결과로 삼중수소는 수소와 중수소 보다 더 많은 양이 흡착될 수 있을 것으로 예상된다.

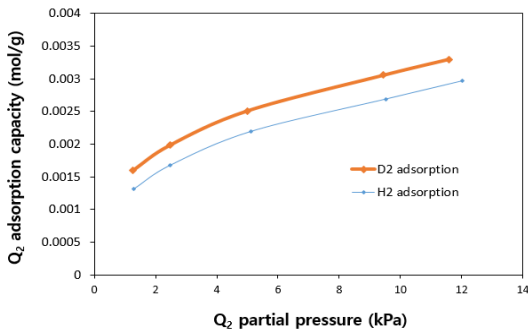


Fig. 7. Comparison of adsorption capacity between H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub>.

### III. 정성적 위험성 평가와 시나리오 분석

수소동위원소 회수 공정에 대한 공정 위험을 파악하고 위험성 평가 방법을 통해 위험의 수준 및 억제 방안을 모색하고자 하였다. 이러한 시스템은 신뢰할 수 있는 연속 공정으로 이루어져야 하며, 특히 삼중수소는 방사능 물질로 이에 대한 취급에 있어서 반드시 안전이 고려되어야 한다.

위험과 운전분석기법(Hazard and Operability, HAZOP)은 설계 의도에서 벗어나는 이탈 현상을 찾아내어 공정의 위험 요소와 운전상의 문제점을 도출하는 방법으로 여러 분야의 경험을 가진 전문가로 팀을 구성하여 토론에 의해 잠재적인 이탈 현상을 도출한다. 위험과 운전성 분석기법의 토론은 숙련된 팀 리더가 토론을 갖기 위해 공정의 검토 구간(Study Node)을 선정한 후에 가이드 워드(Guide Word)와 공정 변수(Process Parameter)를 결합하여 위험 요소와 운전상의 문제점을 도출하는 방법[6]이다.

그림 1에서 제시된 공정의 위험성 평가를 위해 우선 가이드 워드와 공정 변수를 확인하고 구간별로 HAZOP 분석을 실시하였으며, 각 분석 노드별 이탈에 대해 원인, 결과 등을 파악한 후 이탈을 방지할 수 있는 안전 조치를 강구하였다.

흐름은 가이드 워드의 No / Low / High와 관련이 있다. 압력은 Low / High, 온도는 저온과 관련이 있다. 그리고 노드는 수소동위원소 유입(feed gas) 공정을 흐름 1(노드 #1), 비투과 가스(bleed gas) 공정을 흐름 2(노드 #2), 투과 가스(permeate gas) 공정을 흐름 3(노드 #3), 퍼지 가스 공정을 흐름 4(노드 #4)로 선정하였으며, 전체 공정에 대한 HAZOP 분석을 수행하였지만, 이 논문에서는 지면 관계상 흐름 3(노드 #3)에 대한 분석 결과만을 나타내었다.

투과 가스가 분리막 후단을 통해 나오는 흐름으로 이 공정에서의 주요 관점은 일정한 압력과 유량으로 비투과 가스가 분리막에서 나오는 것이다. 다음과 같이 공정 유량, 압력, 온도에 대한 위험성 평가를 수행하였다.

#### (1) 공정 유량 변동

공정 유량이 없거나 낮아지는 원인들은 밸브 고장, 펌프 고장, 배관 누출 발생 및 막힘 현상이며, 이에 따른 결과는 분리막 투과 생성물이 감소한다. 현재의 안전 조치로는 유량 트랜스미터 및 누출 발생 시 대비를 위한 삼중수소 검지기, 화염 검지기가 있다. 밸브 고장 원인에 대해서 빈도 1, 강도 2, 위험등급 2로 판단하였다. 배관 누출의 경우 빈도는 낮게 예측하였으나 삼중수소가 포함된 가스가 누설될 경우 매우 위험하므로 위험 등급을 최고 수준으로 부여하였다. 이에 대한 개선권고사항으로는 밸브 고장을 감지할 수 있는 밸브 포지셔너 및 삼중수소 누설 시 위험성으로 인해 전체 장치를 글러브 박스에 설치하는 방안, 밸브와 센서의 연동 운영을 선정하였다. 공정유량이 높은 원인들은 과도한 원료가스 유입, 분리막 손상에 의한 투과 유량 증가이다. 현재 안전 조치는 유량 트랜스미터이며, 안전밸브 설치를 개선권고사항으로 선정하였다.

#### (2) 공정 압력 변동

낮은 공정 압력 원인들은 밸브 고장, 펌프 고장, 배관 누출 및 역압 조절기 개방이며, 반응 생성물이 감소하는 결과로 이어진다. 현재 안전 조치는 압력 트랜스미터 및 누출 발생 시 대비를 위한 삼중수소 검지기, 화염 검지기가 있다. 개선권고사항은 낮은 공정유량의 경우와 동일한 방법들이 있다. 높은 공정 압력 원인들은 과도한 원료가스의 유입, 역압 조절기 잠김 및 펌프 제어가 안 될 경우이며, 현재 안전 조치는 압력 트랜스미터 및 유량 트랜스미터이며, 안전밸브 설치를 개선권고사항으로 선정하였다.

#### (3) 분리막 반응 온도 변동

낮은 반응 온도 원인들은 분리막 히터 고장이며, 결과적으로 수소동위원소 투과율이 낮아진다. 현재 안전 조치로는 온도 센서, 히터 제어 시스템, 유량 트랜스미터이며, 개선권고사항은 온도 제어이다. 높은 반응 온도의 원인은 히터 제어가 안 될 경우이며, 반응기 온도가 올라가면서 반응 촉매의 변형 손상이 발생할 수 있다. 현재 안전 조치는 온도 센서 설치이며 시스템을 정지시키는 것이다.

**Table 2.** HAZOP execution results for Node #3

No.	Deviations	Causes	Consequences	Safeguard	F	S	R	Recommendations	
1	No flow / Low flow	1	Valve failure	Low production	FT	2	1	2	Valve positioner, Glove box, Valve interlocking with sensor
		2	Pipe leakage		FT, T2 monitor, flame detector	1	4	4	
		3	Clogging		FT	1	2	2	
2	High flow	1	Excessive feed supply	Pressure build-up	FT	1	2	2	Safety valve
		2	Membrane failure		LN2 LT	1	2	2	
3	Low pressure	1	Valve failure	Low production	PT	2	1	2	Valve positioner, Glove box, Valve interlocking with sensor
		2	Pipe leakage		PT, T2 monitor, flame detector	1	4	4	
4	High pressure	1	Excessive feed supply	Pressure build-up	PT	1	2	2	Safety valve
		2	Membrane failure		LN2 LT	1	2	2	
		3	Clogging		PT	1	2	2	
5	Low temperature	1	Heater failure	Low production	TT, FT	1	3	3	Dual control Dual heater setting

FT : Flow Transmitter, PT : Pressure Transmitter, TT : Temperature Transmitter, LT : Level Transmitter  
F : Frequency, S : Severity, R : Risk Ranking

**Table 3.** Effect zone for alternative scenario

Level of concern	H <sub>2</sub> 영향범위	D <sub>2</sub> 영향범위
0.1 ppm = Default LOC-3	0.38 km	0.15 km
0.01 ppm = Default LOC-2	1.3 km	0.5 km
0.001 ppm = Default LOC-1	4.7 km	1.7 km

표 2에서 빈도(Frequency), 강도(Severity), 위험 등급(Risk Ranking)은 위험 매트릭스 문헌을 참고하여 작성하였다[7]. 빈도는 특정 기간의 발생 횟수를 나타내며 1 (거의 발생하지 않음), 2 (발생할 수 있음), 3 (자주 발생하지만 빈번하지 않음), 4 (자주 발생) 으로 정하였다. 그리고, 분리막 시스템의 사용 기간은 10년으로 설정하고, 발생 빈도는 경험을 통해 하였다. 또한 강도는 1 (사소한), 2 (경미한), 3 (보통) 및 4 (심각한) 단계로 분류하였다. 강도의 단계는 이탈의 결과로 나타나는 현상의 심각성을 기준으로 산정하였다. 위험 등급(Risk Ranking)은 분리막의 위험 요소를 정량화하며 빈도와 강도를 곱

하여 계산하였다.

위험 순위 결과를 바탕으로 가장 위험한 상황에서 위험을 완화하기 위해 안전 조치를 취해야한다. 분리막 공정에서 가장 위험한 조건은 삼중수소 누출이다. 이러한 위험을 줄이기 위해 글러브 박스에 장비를 설치하고 감지기를 설치하고 환기 장치를 작동시켜 삼중 수소가 누출되면 안전하게 장치 밖으로 보내는 방법이 있다. 또한 계측 시스템의 보강 및 모니터링 (예 : 유량, 프로세스의 온도 및 압력 측정, 상한 및 하한 설정, 센서 및 밸브와의 연동)으로 2차 안전이 보장된다. 이러한 계측 시스템을 강화하면 위험이 감소하고 보다 안전한 프로세스가 될 수 있다.

다음으로 핵융합 수소동위원소 회수 공정에 대한 장의 영향 평가를 위해 시나리오 분석을 수행하였다. 이를 위해 피해 예측 프로그램인 ALOHA 프로그램을 사용하여, 수소와 중수소에 대한 영향 범위를 파악하여 삼중수소의 영향 범위를 예상해 보고자 하였다.

핵융합 수소동위원소 회수 공정에서 수소동위원소가 저장되는 용기 최대 허용량 70g이 누출이 발

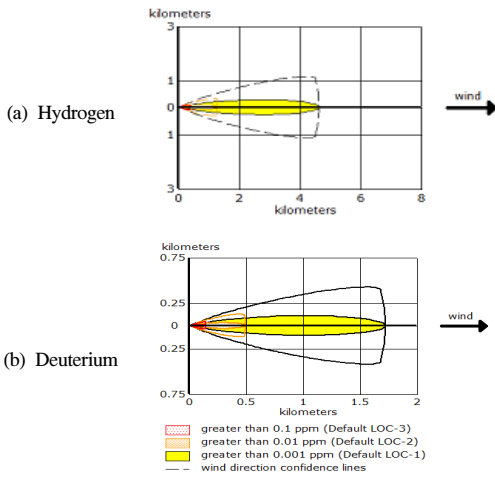


Fig. 8. Alternative scenario.

생활 경우를 누출 시나리오로 선정하였다. 수소, 중수소의 농도에 따른 영향을 확인하기 위하여 관심농도(Default Level of Concern) 값 0.1ppm, 0.01ppm, 0.001ppm을 각각 입력하였다.

시나리오는 현실적으로 발생 가능성이 높고, 사람이나 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까지 미치는 경우의 시나리오 중에서 영향 범위가 최대인 경우의 시나리오를 가정하였다. 누출률은 검출 및 차단시스템에 기반하여 시간을 30분으로 적용하였다. 대안의 시나리오의 조건은 다음과 같다. 설비 내 물질이 모두 누출되는 누출률은 30분 이내, 대기 온도 25℃, 풍속 3m/sec, 대기 안정도 D, 대기 습도 50%이다. 결과는 표 3과 같다.

#### IV. 안전성 확보 방안

중수소와 삼중수소를 다루는 핵융합 배기가스 회수 공정은 안전한 설계를 바탕으로 방사성 물질인 삼중수소의 배출을 엄격히 관리해야 하며, 수소동위원소의 누출에 대한 위험성을 저감하기 위한 방안을 다음과 같이 제시하였다.

분리막 반응기의 경우 압력은 0.2Mpa, 운전 온도는 300~400℃이다. 수소동위원소의 경우 스테인레스 재질에 미량이 투과되는 성질이 있고, 온도가 높을수록 투과능이 높다. 따라서 반응기는 이중 용기로 제작하고, 이중 용기의 바깥쪽 용기는 누출된 삼중수소를 빼내어 처리할 수 있는 배관을 연결해야 한다. 이 배관에는 삼중수소를 검지할 수 있는 압력계 또는 검지기를 설치하여 만약 삼중수소가

누출된다면 후처리 공정으로 보내어 처리한다.

초저온 흡착탑의 경우 기능적 측면을 고려하면 반응기처럼 이중 용기로 설계하는 것이 어려울 수도 있다. 이런 경우에는 액체질소 배출가스의 출구에 수소동위원소 검지기를 설치하여 계장 시스템의 보강으로 시스템의 안전을 확보할 수 있을 것이다.

또한 시스템 이상으로 공기나 산소의 유입이 발생하는 경우 가연성인 수소동위원소와 폭발적 반응을 할 수 있으므로, 공정가스 중의 산소농도를 모니터링하기 위해 배관에는 산소 센서를 설치하여 산소 수치를 감시할 필요가 있다.

수소동위원소의 누출과 관련해서는 위험성 평가에서 도출된 안전성 확보 방안으로 회수 설비는 글러브 박스에 둔다. 누출의 위험성을 차단하기 위한 이중의 격리시설로 공정 격리시설(First Confinement), 즉 글러브 박스 시스템 내에 질소 또는 아르곤 가스 분위기에서 시스템을 운영하는 것이다.

각종 설비와 밸브, 계측기, 배관 등의 수많은 부품이 존재하는 시스템에서는 설비, 밸브 등의 고장, 배관 이음새의 누출 등이 발생할 수 있다. 이런 경우를 대비해서 밸브 포지셔너, 검지기 등의 부품을 설치하여 안전을 강화할 수 있다. 또한 밸브 조절 인터락 등 자동화 부품을 설치하여 가급적 빠른 시간에 위험을 방지할 수 있는 시스템을 구축하고, 능동적 완화장치의 긴급차단밸브, 공정자동화 시설로 시스템을 구축한다면 더욱 안전성이 향상된다. 또한 전체 시스템을 CCTV로 관리하여 비상 상황에 대비한다.

마지막으로 관리적 대책을 마련한다. 설치되어 있는 설비가 제 기능을 유지할 수 있도록 안전하게 관리함으로써 위험도를 낮출 수 있는 방안으로 설비·장치의 유지보수 계획과 자체 점검 계획을 수립한다. 매뉴얼을 갖추고 시스템을 유지하기 위한 계획을 수립하고 이행한다면 설비의 노후화를 지연시키고, 누출 등의 위험을 완화시킬 수 있다.

화학 사고의 발생 시 영향 범위 및 사고 발생 빈도를 줄이기 위하여 주요 위험설비에 대하여 사고가 발생할 수 있는 원인과 현재의 안전 조치의 한계점을 분석하고 개선권고사항을 도출하기 위한 위험성 검토를 주기적으로 실시한다. 그리고 비상 상황에 대한 주기적인 교육도 실시하여 담당자의 대응 능력을 향상시킨다. 이러한 일련의 안전 활동이 전체 시스템의 안전성 향상에 기여할 수 있을 것이다.



## V. 결론

본 연구에서는 핵융합 수소동위원소 회수 공정에 대한 실험과 위험성 평가를 수행하였고, 이 공정에 대한 위험관리를 다음과 같이 정리하였다.

첫 번째로 시스템의 수소동위원소 최대 회수를 위한 공정을 구성하였다. 핵융합 배기가스의 조성을 파악하고 공정 조건에 맞는 회수 공정을 구성한다면 수소동위원소의 최대 회수율을 얻을 수 있고, 배기가스 중 수소동위원소는 분리막 공정과 초저온 흡착 공정을 이용하여 회수 할 수 있었다.

분리막 공정을 통해 수소와 중수소의 회수율을 86.8% 이상 얻을 수 있었고, 추후 후단에 고진공 펌프를 적용하여 수소 회수율을 더 높일 수 있을 것으로 생각한다. 또한 초저온 흡착 공정을 통해 분자체를 사용한 실험으로 수소의 흡착능은 수소분압 1.3~12kPa 범위에서  $1.32 \times 10^{-3} \sim 2.97 \times 10^{-3}$  mol/g을 얻었고, 중수소는 수소보다 12~22% 높게 나타났다.

두 번째로 정성적 위험성 분석을 통해 위험 요소를 인지하고, 이에 대한 대책을 마련하였다. 설계 단계에서 HAZOP 분석을 실시하였고, 선정된 공정 변수와 가이드 워드를 가지고 공정의 위험 요소를 파악하여 안전성 향상 방안을 모색하였다.

세 번째로 시나리오 분석을 통해 영향 범위를 확인하였다. 분석을 위해 ALOHA 프로그램을 이용하여 수소와 중수소의 영향범위를 파악하였고, 0.001ppm의 영향범위는 수소가 4.7km, 중수소가 1.7km로 계산되었다.

네 번째로 안전을 확보 할 수 있는 방안을 제시하였다. 반응기는 이중 용기로 제작하고, 삼중수소 검지기와 산소 센서 등을 설치하여 위험을 감지하게 한다. 그리고 모든 설비는 글러브 박스 시스템으로 운영하고, 인터락 제어를 통해 공정자동화 시설로 운영한다. 마지막으로 관리적 대책을 마련하여 관리함으로써 위험을 완화시킬 수 있다.

이상으로 핵융합 수소동위원소 회수 공정의 위험관리에 대해 알아보았고, 이 논문을 포함하여 국제핵융합실험로 프로젝트를 모니터링하고, 관련 연구를 지속적으로 수행한다면 향후 건설될 DEMO plant에 안전한 공정을 구축할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부) 출연 재원으로 국가핵융합연구소 ITER 연료주기 기술개발의 지원을 받아 수행된 연구임. (1711080215)

## REFERENCES

- [1] Yun, S. H., Cho, S. Y., Lee, H. G. and Jung, K. J., "ITER project -introduction of tritium fuel cycle technology", *News&Information for Chemical Engineers*, **33**(1), 2-7, (2015)
- [2] Glugla, M., et al., "Review of the ITER D-T Fuel Cycle Systems and Recent Progress", *Tritium 2010*, Nara, Japan, (2010)
- [3] Song, K. M., et al., , "Tritium Fuel Cycle of the International Thermonuclear Experimental Reactor", *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**(4), 595-603, (2012)
- [4] Jung, K. J., et al., "Tritium reearch activities in Korea", *Fusion Engineering and Design*, **113**, 236-249, (2016)
- [5] Notice 2017-36, [Asterisk 3] *The annual intake limit of radioactive materials, the concentration in the induction air and emission control standard*, Nuclear Safety and Security Commission, (2017)
- [6] Frank Crawley, et al., HAZOP: Guide to Best Practice, 3rd edition, ELSEVIER, (2015)
- [7] Nijs Jan Duijm, "Recommendations on the use and design of risk matrices", *Safety Science*, **76**, 21-31, (2015)