

핵융합 배가스 중 CQ_4 와 Q_2O 처리공정 제안 및 HAZOP 분석

정우찬[†] · 정필갑 · 김정원 · 문흥만 · 장민호* · 윤세훈* · 우인성**

대성산업가스(주) 초저온연구소
15434 경기도 안산시 단원구 산단로 128
*국가핵융합연구소
34133 대전광역시 유성구 과학로 169-148
**인천대학교 안전공학과
22012 인천광역시 연수구 아카데미로 119
(2017년 8월 14일 접수, 2017년 11월 17일 수정본 접수, 2017년 11월 21일 채택)

Process Suggestion and HAZOP Analysis for CQ_4 and Q_2O in Nuclear Fusion Exhaust Gas

Woo-Chan Jung[†], Pil-Kap Jung, Joung-Won Kim, Hung-Man Moon, Min-Ho Chang*, Sei-Hun Yun* and In-Sung Woo**

Daesung 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

**Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea

(Received 14 August 2017; Received in revised form 17 November 2017; accepted 21 November 2017)

요 약

본 연구는 핵융합 배가스 중 삼중수소가 포함된 화합물인 메탄(CQ_4) 및 물(Q_2O)로부터 수소동위원소를 회수하기 위한 공정에 관한 것이다(Q는 수소, 중수소, 삼중수소). 수증기-메탄 개질반응과 수성가스 전환반응을 이용하여 CQ_4 와 Q_2O 를 Q_2 로 변환시키고, 후속하는 팔라듐 분리막으로 생성된 Q_2 를 회수한다. 본 연구에서는 CQ_4 및 Q_2O 중 하나의 물질인 CH_4 및 H_2O 로부터 수소 회수를 위해 촉매반응기, 팔라듐 분리막, 순환펌프로 구성된 순환루프를 적용하였다. 촉매반응온도 및 순환유량을 변화시켜가며 CH_4 및 H_2O 의 전환율을 측정하였다. CH_4 중 수소 회수는 촉매반응온도 650 °C, 순환유량 2.0 L/min 조건에서 99% 이상의 CH_4 전환율을 확인하였고, H_2O 중 수소 회수는 촉매반응온도 375 °C, 순환유량 1.8 L/min 조건에서 96% 이상의 H_2O 전환율을 확인하였다. 이와 더불어, 향후 핵융합 실증로(K-DEMO)에서의 CQ_4 발생량을 예측하고, 이에 대한 처리공정을 제안하였으며, HAZOP (Hazard and Operability) 분석을 실시하여 공정의 위험요소와 운전상의 문제점을 도출하고 해결방안을 제시하였다.

Abstract – This study deals with a process for the recovery of hydrogen isotopes from methane (CQ_4) and water (Q_2O) containing tritium in the nuclear fusion exhaust gas (Q is Hydrogen, Deuterium, Tritium). Steam Methane Reforming and Water Gas Shift reactions are used to convert CQ_4 and Q_2O to Q_2 and the produced Q_2 is recovered by the subsequent Pd membrane. In this study, one circulation loop consisting of catalytic reactor, Pd membrane, and circulation pump was applied to recover H components from CH_4 and H_2O , one of CQ_4 and Q_2O . The conversion of CH_4 and H_2O was measured by varying the catalytic reaction temperature and the circulating flow rate. CH_4 conversion was 99% or more at the catalytic reaction temperature of 650 °C and the circulating flow rate of 2.0 L/min. H_2O conversion was 96% or more at the catalytic reaction temperature of 375 °C and the circulating flow rate of 1.8 L/min. In addition, the amount of CQ_4 generated by Korean Demonstration Fusion Power Plant (K-DEMO) in the future was predicted. Then, the treatment process for the CQ_4 was proposed and HAZOP (hazard and operability) analysis was conducted to identify the risk factors and operation problems of the process.

Key words: Fusion, Hydrogen Isotopes, Steam Methane Reforming, Water Gas Shift, Pd membrane, K-DEMO, HAZOP

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: chan@gastopia.co.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

핵융합 발전은 중수소 및 삼중수소의 원자핵이 융합될 때 발생하는 막대한 에너지를 이용하여 전기를 생산한다. 중수소 및 삼중수소는 핵융합 반응의 연료로 공급되고, 반응 후 배가스 중 이들 성분들은 회수하여 재사용한다. 핵융합 배가스의 주성분은 T₂, D₂, H₂, DT, HT, HD 등의 수소동위원소(Q₂, 여기서 Q는 수소, 중수소, 삼중수소)이며, 메탄(CQ₄), 물(Q₂O), 암모니아(NQ₃)와 같은 삼중수소가 포함된 화합물과 CO, CO₂, O₂, N₂, Ar, He, Ne 등의 성분들이 포함되어 있다[1,2].

핵융합 배가스 중 수소동위원소가 주성분인 경우에는 팔라듐 분리막으로 회수하고, 삼중수소가 포함된 화합물인 CQ₄ 및 Q₂O가 주성분인 경우에는 수소동위원소 회수를 위해 촉매반응 및 팔라듐 분리막 결합공정이 이용된다[2]. 핵융합 배가스 중 CQ₄ 및 Q₂O 성분들은 별도로 발생되므로 개별적으로 처리된다. CQ₄가 주성분인 배가스의 경우 H₂O를 첨가하여 수증기-메탄 개질반응(식 (1)) 및 수성가스 전환반응(식 (2))을 유도하여 Q₂ 형태로 전환시키고, 생성된 Q₂는 후속하는 팔라듐 분리막으로 회수한다. Q₂O가 주성분인 배가스의 경우 CO 가스를 첨가하여 수성가스 전환반응으로 Q₂O를 Q₂로 전환시키고, 생성된 Q₂는 역시 팔라듐 분리막으로 회수된다.



일반적인 수소생산 공정에서는 상기 식 (1) 및 (2)으로 수소발생량에 중점을 두는 반면, 핵융합 공정에서는 수소동위원소의 회수율 극대화시켜 외부로 배출되는 양을 최소화시키는 차이가 있다. 그러므로 반응온도, 공급유량, 스템비율 등의 공정변수를 최적화하여 반응조건이 설정되어야 한다.

본 연구에 앞서 CH₄와 H₂O를 사용하여 H₂로 전환시키는 촉매반응 특성연구를 진행하였다[3]. CH₄ 및 H₂O의 H₂ 전환반응 적정 온도 및 유량조건에 대해 실험하였다. 본 연구에서는 촉매반응 후

발생된 H₂를 회수하기 위해 반응기 후단에 팔라듐 분리막을 설치하였고, 이와 더불어 CH₄ 및 H₂O 전환율을 증가시키기 위해 순환공정을 구성하여 반응온도, 순환유량 변화에 따른 전환율 변화를 관찰하고자 하였다.

현재 핵융합 발전의 기술적 실증을 위해 우리나라를 비롯한 선진 7개국 이 국제핵융합실험로(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor) 공동개발 사업에 참여하여 핵융합 발전소의 상용화를 목표로 연구를 진행하고 있다[1]. ITER 프로젝트 이후 한국형 핵융합 실험로(K-DEMO)가 건설될 예정이다. 이에 K-DEMO 배가스 중 CQ₄ 발생유량을 예측하고, 이에 대한 처리공정을 제안하였다. 이와 더불어, K-DEMO용 CQ₄ 처리공정의 HAZOP 분석을 실시하여 공정의 위험요소와 운전상의 문제점을 도출하고 이에 대한 개선안을 제시하였다.

2. 순환공정 실험장치 및 실험방법

2-1. 순환공정 실험장치

촉매반응 및 팔라듐 분리막 순환공정에 대한 특성을 확인하기 위해 Fig. 1과 같이 실험장치를 설계, 제작하였다. 실험에는 0.5% Pt/Alumina(용량 0.18 L) 촉매를 적용하였고, 원료가스와 초순수는 각각 질량유량조절기와 액체펌프로 유량이 제어되고, 예열히터에서 가열된 원료가스는 증발혼합기에서 생성된 수증기와 혼합되어 촉매반응기에 도입된다. 촉매반응으로 생성된 가스는 팔라듐 분리막으로 유입되어, 이 중 H₂만이 분리되며, H₂ 분리 회수율을 증가시키기 위해 팔라듐 분리막 후단에 진공펌프를 적용하였다. 팔라듐 분리막의 잔류가스는 순환펌프를 사용하여 반응기로 재투입되도록 하였고, 순환펌프 후단에 버퍼탱크를 설치하여 안정적인 흐름이 발생하도록 하였다. 순환가스 유량 중 실험장치로 유입되는 원료가스 유량만큼 순환공정으로부터 배출시킴으로서 연속적인 운전이 가능하도록 하였다. 배출가스를 분석기로 도입시켜 성분분석을 실시하여 공정에 유입되는 CH₄ 및 H₂O 제거효율을 측정하였다. 순환되

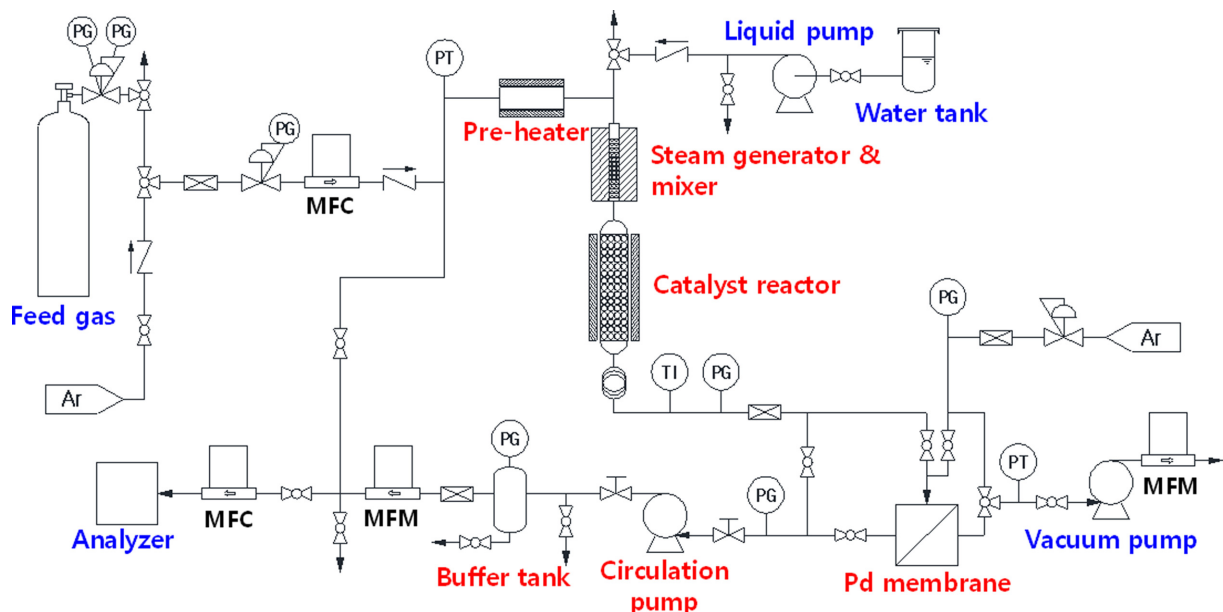


Fig. 1. Conceptual drawing of experimental device.

는 가스와 원료가스가 혼합되어 예열히터, 증발혼합기를 거쳐 반응기로 들어간다. 전체 순환공정 라인은 열선을 사용하여 부품 및 배관 내부에 수분이 응축되지 않도록 하였다.

2-2. 실험방법

핵융합 배가스 중 CQ₄ 및 Q₂O 성분들은 별도로 발생되므로 개별적으로 처리된다. 이에 실험을 크게 두 가지로 나누어 진행하였다. 먼저 CH₄의 수소 회수특성 확인을 위해, 핵융합 배가스와 유사한 조성인 6% CH₄, 6% CO, 88% Ar의 혼합가스를 적용하였다[2]. 원료가스의 공급유량은 100 mL/min, 반응압력은 0.2 MPa로 설정하였다. 반응온도는 500~650 °C 범위에서 실험하였고, CH₄ 및 CO가 최종적으로 CO₂로 전환되도록 스팀비율은 3(CH₄ 대비)으로 설정하였다. 순환유량은 500~2000 mL/min 범위에서 진행하였고, 이는 공급유량 대비 5~20배 수준이다. 팔라듐 분리막은 400 °C에서 사용하였고, 분리막 투과측은 10 torr 수준으로 유지하였다.

Q₂O 처리공정, 즉 H₂O를 H₂로 전환시켜 회수하는 공정의 특성을 확인하기 위해, 동일한 장치에 H₂O와 CO 가스를 공급하여 실험을 실시하였다. 반응압력은 0.2 MPa로 동일하고, 반응온도는 325~400 °C, H₂O 공급량은 80 mL/min(가스), 스팀비율은 CO가 과량인 0.8, CO 가스의 공급유량은 100 mL/min으로 설정하였다. 순환유량은 1000~1800 mL/min 범위로, 공급유량 대비 10~18배 수준에서 실험하였다. 팔라듐 분리막은 CH₄ 실험과 동일 조건으로 하였다.

순환공정의 효율을 확인하기 위해 공정배출가스의 조성분석을 실시하였다. 이를 위한 분석 장비로 Agilent 7890A GC-TCD (Gas Chromatography-Thermal Conductivity Detector)를 사용하였으며, 운반기체는 Ar 가스를 사용하였고, 유량은 25 mL/min로 설정하였다. 컬럼은 Carboxen-1000을 사용하였고, 길이는 2 m, 온도는 100~150 °C 조건에서 분석하였다. 교정은 매 실험마다 수행하였다.

3. 순환공정 실험결과 및 고찰

3-1. CH₄ 적용실험

Table 1과 같이 원료가스 조성 6% CH₄, 6% CO/Ar, 스팀비율 3.0 조건에서 반응온도, 순환유량을 변화시켜가며 실험을 실시하였다. Fig. 2는 촉매반응기 온도 600 °C 조건(Table 1의 실험 3)에서 순환루프로부터 배출되는 가스의 성분을 분석한 결과이다. 순환유량을 0.5~2.0 L/min 범위로 변화시켜가며 각각의 배출가스 성분을 측정하였다. 순환유량 0.5 L/min 조건에서 CO₂ 6.3%, CO 4.5%, H₂ 1.0%, CH₄ 0.5%로 나타났고, CH₄ 전환율은 91% 수준이었다. 순환유량을 증가시켜가며 실험한 결과, CO₂ 농도는 점차 증가하여 2.0 L/min 조건에서 7.8%까지 상승하였다. 반면, CH₄는 0.02%로 감소하여 99% 이상의 CH₄ 전환율을 얻었다. 순환유량이 증가함에 따라, 촉매반응기로 채투입되는 미반응 CH₄의 양이 증가되었고, 결

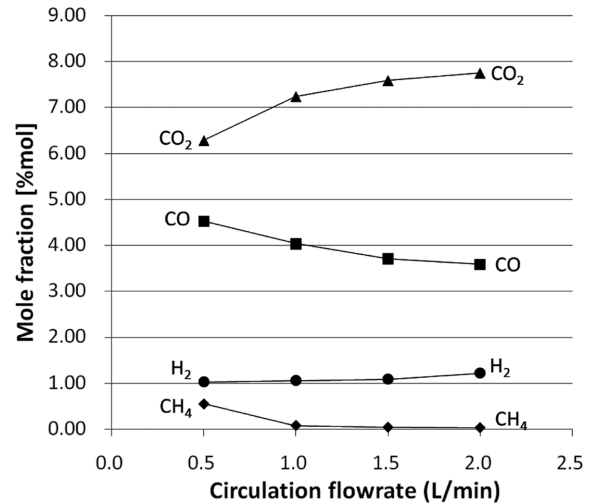


Fig. 2. Outlet gas composition for CH₄ test at 600 °C.

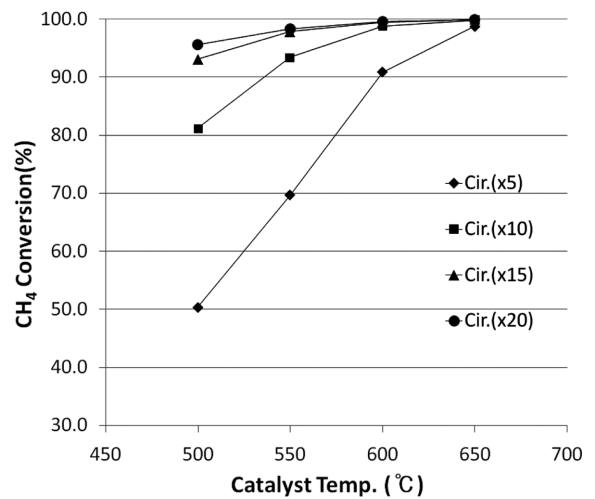


Fig. 3. CH₄ conversion rate for each circulation flowrate at 500~650 °C reaction temperature.

과적으로 CH₄ 전환율이 향상되었다. CO의 경우 순환유량이 증가함에 따라 농도가 감소하였는데, 이는 미반응 H₂O가 재순환하면서 수성가스 전환반응으로 없어진 것으로 판단된다. H₂ 농도는 1% 수준으로 거의 일정하게 나타났고, 순환유량 2.0 L/min 조건에서 약간 상승하였다. 이는 순환유량의 증가에 따라 팔라듐 분리막으로 유입되는 전체 가스유량이 증가하면서 팔라듐 분리막의 분리능이 약간 감소한 결과라고 판단된다.

Fig. 3은 촉매반응기 온도 500~650 °C 조건(Table 1의 실험 1~4)에서 각각의 순환유량별 CH₄ 전환율 결과를 나타낸 것이다. 500 °C에서 순환유량 0.5 L/min 경우 전환율이 약 50% 수준이었고, 순환유

Table 1. Test conditions for CH₄ test

No.	Feed gas			Catalyst reactor temp. (°C)	Circulation flow-rate (mL/min)	Pd membrane	
	Composition	Flow-rate (mL/min)	S/C ratio			Temp. (°C)	Permeate side pressure (torr)
Test 1		100	3.0	500	500~2000	400	10
Test 2	6% CH ₄ , 6% CO,	100	3.0	550	500~2000	400	10
Test 3	88% Ar	100	3.0	600	500~2000	400	10
Test 4		100	3.0	650	500~2000	400	10

Table 2. Test conditions for H₂O test

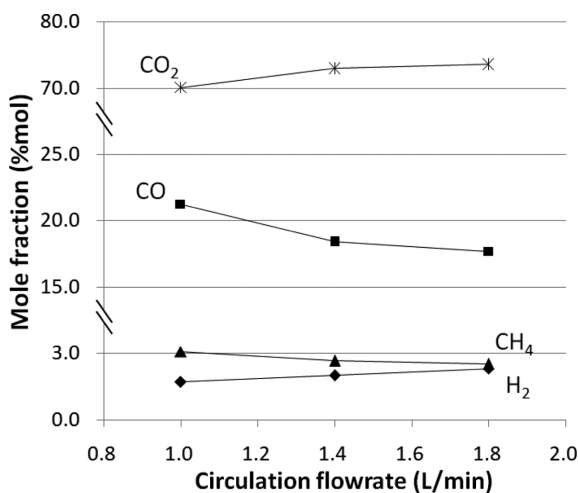
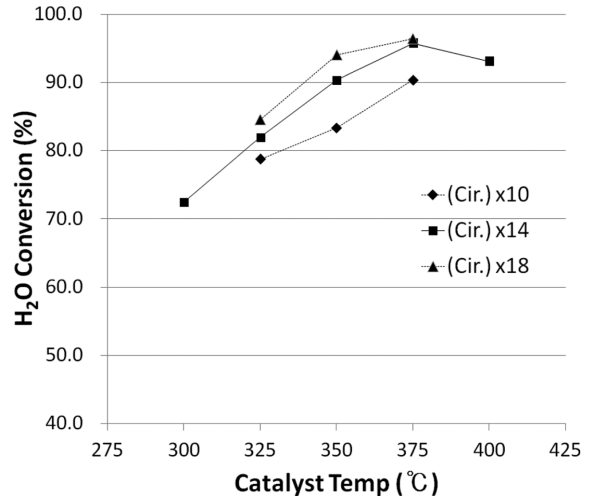
No.	Feed gas			Catalyst reactor temp. (°C)	Circulation flow-rate (mL/min)	Pd membrane	
	H ₂ O Flow-rate (mL/min)	CO Flow-rate (mL/min)	S/C ratio			Temp. (°C)	Permeate side pressure (torr)
Test 1	80 (as gas)	100	0.8	325	1000~1800	400	10
Test 2	80 (as gas)	100	0.8	350	1000~1800	400	10
Test 3	80 (as gas)	100	0.8	375	1000~1800	400	10
Test 4	80 (as gas)	100	0.8	400	1000~1800	400	10

량을 2.0 L/min으로 증가시키면 약 95%까지 CH₄ 전환율이 상승하였다. 650 °C 촉매반응기 온도조건에서는 수증기-메탄 개질반응이 매우 활발하여 모든 순환유량조건에서 99% 이상의 전환율을 나타냈다.

실험결과 모든 반응온도 조건에서 순환유량 증가에 따른 전환율 상승효과를 확인하였다. 반응기 온도가 낮으면(500 °C) 순환유량을 올려도 99% 이상의 전환율을 기대하기 어렵다. 적정 반응기 온도는 550~600 °C 수준으로 판단되며, 반응기 온도가 높으면 전환율 증가측면에서는 유리하나 반응기 벽면으로부터 외부로의 수소동위원소 투과율이 증가하는 단점이 있을 수 있다. 전체적인 수소 회수율 증가를 위해서는 팔라듐 분리막 후단의 진공도를 더 낮추는 방법이 있다. 이와 더불어 실제공정에서는 순환공정 이후에 최종처리공정을 배치하여 배출되는 미량의 CH₄를 완벽히 처리할 수 있다.

3-2. H₂O 적용 실험

Table 2와 같이 100% CO, 스팀비율 0.8 조건에서 반응온도, 순환유량을 변화시키며 실험을 실시하였다. Fig. 4는 촉매반응기 온도 375 °C 조건(Table 2의 실험 3)에서 순환루프로부터 배출되는 가스의 조성을 분석한 결과이다. 순환유량을 1.0~1.8 L/min 범위로 변화시키며 측정하였다. 순환유량 1.0 L/min 조건에서 배출가스의 조성은 CO₂ 70%, CO 21%, H₂ 1.7%, CH₄ 3.1% 이었으며, H₂O 전환율은 약 90%로 나타났다. 원료가스에는 존재하지 않았던 CH₄가 생성되었는데, 이는 수성가스 전환반응으로 생성된 H₂와 CO가 반응하여 생성된 것으로 판단된다. 순환유량을 증가시키며 실험한 결과, CH₄는 1.8 L/min 조건에서 2.5%로 감소하였고, CO₂ 농도는 74%까지 상승하였으며, H₂O 전환율이 96% 이상으로 증가하였다. 순환유량을 증가시키면 미반응된 CO 및 H₂O를 다시 촉매

**Fig. 4. Outlet gas composition for H₂O test at 375 °C.****Fig. 5. H₂O conversion rate for each circulation flowrate at 300~400 °C reaction temperature.**

반응기로 보내는 비율이 높아져서 결과적으로 전환율이 증가한다. H₂ 농도의 경우는 팔라듐 분리막으로 유입되는 가스유량이 증가하면서 팔라듐 분리막의 분리능이 감소하여 1.7%에서 2.3%로 약간 증가하였다.

Fig. 5는 300~400 °C 촉매반응기 온도(Table 2의 실험 1~4)에서 각각의 순환유량별 H₂O 전환율 변화를 나타낸 것이다. 300 °C에서 순환유량 1.4 L/min 경우 전환율이 약 70% 수준이었다. 375 °C 촉매반응기 온도조건에서는 촉매반응이 활발하여 순환유량 1.4 L/min 및 1.8 L/min 조건에서 약 96%의 H₂O 전환율을 나타냈다.

H₂O 적용실험 역시 반응기 온도가 낮으면 순환유량을 올려도 전환율 상승효과를 기대하기 어렵고, 400 °C 조건에서는 CH₄ 생성이 급격히 증가하여 전환율이 감소하는 특성을 보였다. 결과적으로 적정 반응온도는 350~400 °C 수준으로 판단된다.

4. 한국형 핵융합 실증로(K-DEMO)용 순환공정 및 HAZOP 분석

4-1. K-DEMO용 순환공정 구성

K-DEMO 핵융합 반응 후, CQ₄가 포함된 가스의 발생유량을 예측하고, 이에 대해 상기 실험결과 수준인 99% 이상을 처리하는 공정을 제안하고자 하였다. 배가스 발생유량 예측은 ITER 자료를 기반으로 K-DEMO size를 예측하여 산출하고자 하였다. 핵융합 반응 규모면에서, 먼저 열출력을 비교해 보면 ITER의 목표치인 500 MW[4] 대비 K-DEMO는 2200~3000 MW[5] 수준으로 약 4~6배 수준이다. 연료 주입량 대비 소모량 비율은 ITER의 경우 약 0.3%로 예측하고 있다. DEMO plant의 경우에는 삼중수소 재고량을 최

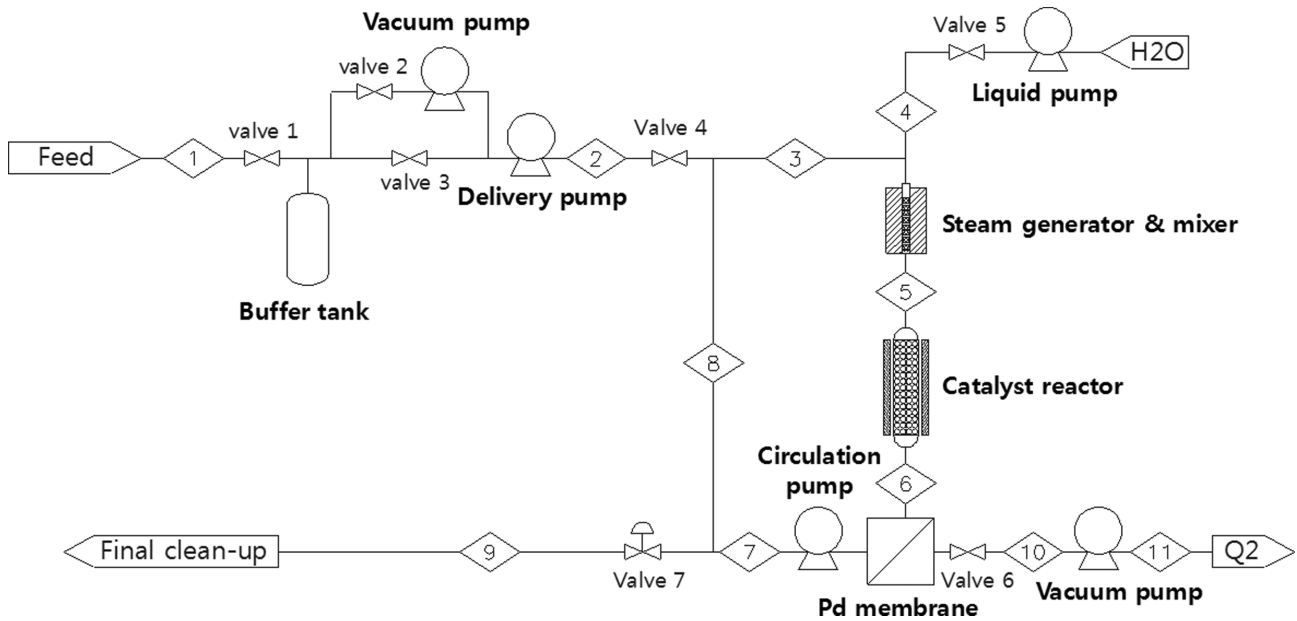


Fig. 6. CQ₄ treatment process suggested for K-DEMO.

소화하기 위해 배가스 처리시간을 감소시키고, 연료주입 효율 및 연료소비율을 증가시켜야 한다. 이에 연료 주입량 대비 소모량 비율을 약 3% 이상으로 기대하고 있다[6]. K-DEMO의 배가스 발생 유량 예측은 K-DEMO 설계가 구체화되어야만 정확한 값을 얻을 수 있지만, 대략적인 예측을 통해 값을 도출하여 CQ₄ 처리공정을 제시해 보고자 하였다. ITER 공정을 참고로, K-DEMO의 CQ₄ 포함 배가스 유량을 52 Pa·m³/s 수준으로 가정하였다. 이에 대한 처리를 위해 Fig. 6과 같은 순환공정을 제안한다.

CQ₄가 포함된 배가스가 유입되면 버퍼탱크를 거쳐 이송펌프를 통해 순환루프로 유입되고, H₂O를 액상펌프로 공급하여 원료가스와 함께 증발혼합기를 거쳐 촉매반응기로 들어간다. 촉매반응기 후단의 팔라듐 분리막은 촉매반응으로 생성된 Q₂를 회수하여 후속공정으로 보내고, 나머지 성분들은 순환펌프를 거쳐 다시 원료가스와 혼합되어 순환되며, 순환유량의 일부만 역압조절기(순환루프 압력 조절용)를 통해 순환루프로부터 배출되어 최종처리공정으로 이동한다. 팔라듐 분리막 후단의 진공펌프는 분리막 후단을 1 torr 수준으로 유지시켜 Q₂ 회수율을 증가시키기 위해 사용된다. Table 3에는 Fig. 6에 나타난 CQ₄ 처리공정의 가스유로별 공정조건을 나타내었다. 상기 언급하였듯이, 전체유량을 52 Pa·m³/s 수준으로 가정

하여 공정설계를 진행하였으며, 향후 K-DEMO의 구체적인 유량조건을 예측할 수 있을 경우 이를 반영하여 본 제안공정을 변경할 수 있을 것이다.

4-2. K-DEMO용 순환공정 HAZOP 분석

상기 제안한 K-DEMO용 CQ₄ 처리공정의 HAZOP 분석을 진행하여 공정의 위험요소와 운전상의 문제점을 도출하였다. 위험과 운전분석기법은 설계의도에서 벗어나는 이탈현상을 찾아내어 공정의 위험요소와 운전상의 문제점을 도출하는 방법으로 여러 분야의 경험을 가진 전문가로 팀을 구성하여 토론에 의해 잠재적인 이탈현상을 도출한다. 위험과 운전성 분석기법의 토론은 숙련된 팀리더가 토론을 갖기 위해 공정의 검토구간(Study Node)을 선정한 후에 가이드 워드(Guide Word)와 공정변수(Process Parameter)를 결합하여 위험요소와 운전상의 문제점을 도출하는 방법이다[7].

Fig. 6에서 제시된 공정의 위험성 평가를 위해 다음과 같이 구간별로 HAZOP 분석을 실시하였으며, 각 분석 노드별 이탈에 대해 원인, 결과 등을 파악한 후 이탈을 방지할 수 있는 안전조치를 강구하였다. 노드 #1과 노드#3에 대한 HAZOP 분석결과는 설명으로 대신하였다.

Table 3. Process condition for CQ₄ treatment

Stream Number	<1>	<2>	<3>	<4>	<5>	<6>	<7>	<8>	<9>	<10>	<11>
Name	Feed gas	Feed gas	Feed & Circ.	H ₂ O supply	Mix gas	Reform gas	Bleed gas	Circ. gas	Vent gas	Q ₂ gas	Q ₂ gas
Temp. (°C)	25	25	25	25	300	300	25	25	25	25	25
Press. (kPa)	180	210	205	205	200	190	205	205	200	0.1	200
Total	52	52	1022	8	1030	1036	1021	970	51	15	15
Q ₂	-	-	-	-	-	15	-	-	-	15	15
Flow rate (Pa·m ³ /s)	CQ ₄	3	3	-	3	-	-	-	<0.1	-	-
	CO	3	3	3	-	3	-	-	-	-	-
	CO ₂	-	-	113	-	113	118	113	6	-	-
	Q ₂ O	1	1	1	8	9	-	-	-	-	-
Ar	45	45	902	-	902	902	902	857	45	-	-

4-2-1. CQ₄ 포함 배가스 유입 공정, 흐름 1~2 (노드 #1)

원료 배가스가 들어오면 버퍼탱크를 거쳐 이송펌프를 통해 순환 루프로 공급된다. 이 공정에서의 주요 관점은 펌프를 통해 일정한 유량을 순환공정으로 공급하는 것이다. 공정유량이 없거나 낮아지는 원인들은 밸브 고장, 펌프 고장, 배관리크 발생 및 막힘현상이며, 이에 따른 결과는 공급유량 감소이다. 현재의 안전조치로는 유량 트랜스미터 및 리크 발생시 대비를 위한 삼중수소 검지기, 화염 검지기가 있다. 공정유량이 없거나 낮아지는 원인들에 대한 개선권고 사항으로는 밸브고장을 감지할 수 있는 밸브 포지셔너 및 밸브와 센서의 연동운동을 선정하였다.

4-2-2. 순환공정, 흐름 3~8 (노드 #2)

CQ₄를 Q₂ 형태로 변환하기 위해 H₂O를 액상펌프로 공급하여 원료가스와 함께 증발혼합기를 거쳐 촉매반응기로 들어간다. 촉매반응으로 생성된 Q₂는 후단의 팔라듐 분리막에서 분리/회수된다. 팔라듐 분리막의 잔류가스에는 미반응 CQ₄가 포함되어 있으므로, 이에 대한 전환율을 향상시키기 위해 순환펌프를 이용하여 다시 촉매반응기로 재투입한다. 순환유량 중 일부는 최종처리공정으로 배출된다. Table 4에는 노드 #2에서 선정된 공정변수 및 가이드 워드들을 바탕으로 HAZOP 분석을 실시한 결과를 나타내었다.

4-2-2-1. 공정유량 변동

공정유량이 없거나 낮아지는 원인들은 밸브 고장, 펌프 고장, 배관리크 발생 및 막힘현상이며, 이에 따른 결과는 촉매반응 생성물이 감소한다. 현재의 안전조치로는 유량 트랜스미터 및 리크 발생시 대비를 위한 삼중수소 검지기, 화염 검지기가 있다. 밸브 고장 원인에 대해서 빈도 1, 강도 2, 위험등급 2로 판단하였다. 배관리크의 경우 빈도는 낮게 예측하였으나 삼중수소가 포함된 가스가 누설될 경우 매우 위험하므로 위험등급을 최고 수준으로 부여하였다. 공정유량이 없거나 낮아지는 원인들에 대한 개선권고사항으로는 밸브고장을 감지할 수 있는 밸브 포지셔너 및 삼중수소 누설시 위험성으로 인해 전체장치를 글로브 박스에 설치하는 방안, 밸브와

센서의 연동운동을 선정하였다. 공정유량이 높은 원인들은 과도한 원료가스 유입, 역압조절기 잠김 및 펌프 제어가 안 될 경우이며, 결과로는 순환루프 내의 압력이 증가한다. 현재안전조치는 유량 트랜스미터이며, 안전밸브 설치를 개선권고사항으로 선정하였다.

4-2-2-2. 공정압력 변동

낮은 공정압력 원인들은 밸브고장, 펌프 고장, 배관리크 및 역압조절기 개방이며, 촉매반응 생성물이 감소하는 결과로 이어진다. 현재안전조치는 압력 트랜스미터 및 리크 발생시 대비를 위한 삼중수소 검지기, 화염 검지기가 있다. 개선권고사항은 낮은 공정유량의 경우와 동일한 방법들이 있다. 높은 공정압력 원인들은 과도한 원료가스 유입, 역압조절기 잠김 및 펌프 제어가 안 될 경우이며, 결과로는 순환루프 내의 압력이 증가한다. 현재안전조치는 버퍼탱크, 압력 트랜스미터 및 유량 트랜스미터이며, 안전밸브 설치를 개선권고사항으로 선정하였다.

4-2-2-3. 촉매반응온도 변동

낮은 반응온도 원인들은 반응기 히터 고장 및 과도한 원료가스 유입이며, 결과적으로 CQ₄ 전환율이 낮아진다. 현재안전조치로는 온도센서, 히터 제어 시스템, 버퍼탱크, 유량 트랜스미터이며, 개선권고사항은 순환루프 가스의 조성분석이다. 높은 반응온도의 원인은 히터 제어가 안 될 경우이며, 반응기 온도가 올라가면서 반응촉매의 변형손상이 발생할 수 있다. 현재안전조치는 온도센서 설치이며 시스템을 정지시키는 것이다.

4-2-3. Q₂ 회수공정, 흐름 10~11 (노드 #3)

팔라듐 분리막 후단의 진공펌프는 분리막 후단을 1 torr 수준으로 유지시켜 Q₂ 회수율을 증가시키기 위해 사용된다. 진공도가 낮을 경우 Q₂ 회수율이 낮아지게 되며, 낮은 진공도 원인들은 팔라듐 분리막 손상, 배관리크 및 펌프 고장이며, 이에 따른 결과로는 회수된 수소동위원소(Q₂) 오염 및 Q₂ 투과가 발생하지 않는다. 현재 안전조치로는 분리막 후단의 진공계이지 및 차단밸브 설치이며, 추가적

Table 4. HAZOP execution report for Node #2

No	Deviations	Causes	Consequences	Safeguard	Frequency	Severity	Risk Ranking	Recommendations
1	No flow / Low flow	1 Valve failure	Low production	FT	1	2	2	Valve positioner, Glove box, Valve interlocking with sensor
		2 Pump failure		FT	2	2	4	
		3 Pipe leakage		FT, T ₂ monitor, flame detector	1	4	5	
		4 Clogging		FT	2	2	2	
2	High flow	1 BPR failure (close)	Pressure build-up	FT, PT	1	2	2	Safety valve
		2 Pump control failure		FT, PT	1	2	4	
3	Low pressure	1 Valve failure	Low production	PT	1	2	2	Valve positioner, Glove box, Valve interlocking with sensor
		2 Pump failure		PT	2	2	4	
		3 Pipe leakage		PT, T ₂ monitor, flame detector	1	4	5	
		4 BPR failure (open)		PT	2	2	2	
4	High pressure	1 BPR failure (close)	Pressure build-up	PT	1	2	2	Safety valve
		2 Pump control failure		FT, PT	1	2	4	
5	Low temperature	1 Heater failure	Low conversion	Temp. sensor, Heater control system	1	2	2	Analysis of Circulation gas
6	High temperature	1 Heater control failure	Catalyst sintering	Temp. sensor, Shut-down system	1	3	3	

FT: Flow Transmitter, PT: Pressure Transmitter, BPR: Back Pressure Regulator

으로 생성된 Q_2 순도분석을 개선권고사항으로 선택하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 핵융합 반응 후의 배가스에 포함될 것으로 예상되는 CQ_4 및 Q_2O 성분 중 하나의 물질인 CH_4 및 H_2O 로부터 수소 회수를 위해 촉매반응기, 팔라듐 분리막, 순환펌프로 구성된 순환루프를 적용하여 실험하였다. 촉매반응온도 및 순환유량을 변화시켜가며 CH_4 및 H_2O 의 전환율을 측정하였으며, CH_4 중 수소 회수는 99% 이상의 CH_4 전환율을 확인하였고, H_2O 중 수소 회수는 96% 이상의 H_2O 전환율을 확인하였다. 또한, K-DEMO에서의 CQ_4 발생량을 예측하고, 이에 대한 처리공정을 제안하였으며, HAZOP 분석을 진행하여 공정의 위험요소와 운전상의 문제점 도출하고 해결방안을 제시하였다. 이 연구 결과가 향후 K-DEMO의 연료주기 설계에 있어서 기초설계 자료로 활용되기를 기대한다.

감 사

This work was supported by the 'ITER Technology R&D Program' through the National Fusion Research Institute (NFRI) of Korea funded by the Korean Government.

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), 28-33(2015).
2. Jung, W. C., Jung, P. K., Kim, J. W. and Moon, H. M., "Hydrogen Isotopes Recovery Technology from Nuclear Fusion Exhaust Gas," *News & Information for Chemical Engineers*, **33**(1), 43-49(2015).
3. Jung, W. C., Jung, P. K., Kim, J. W. and Moon, H. M., "Study on the Characteristics of Catalyst Reaction for Hydrogen Recovery from Nuclear Fusion Exhaust gas," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **26**(5), 402-408(2015).
4. <http://www.iterkorea.org/030101>.
5. Kim, K., Im, K., Kim, H. C. and Oh, S., "Design Concept of K-DEMO for Near-term Implementation," *Nucl. Fusion*, **55**(2015).
6. Scott Willms, "Tritium Technology for ITER," IAEA DEMO Workshop, Nov, Karlsruhe (2016).
7. Lee, N. W., Kim, J. H. and Baek, J. B., *Safety Assessment for Industrial Safety Technicians*, Dongwha Technology Publishing, Paju(2009).