

※ 본 자료는 「(가칭)핵융합에너지 가속화 핵심기술 개발 및 인프라 구축사업」 기획연구
기술수요조사의 세부기술에 대한 이해도 제고를 위해 제공하는 과거 기획연구
참고자료로, 현재 기술 현황과 다소 차이가 있으며, 아래 작성된 사항은 확정된
내용이 아님을 양지 부탁드립니다.

연료주기 기술 설명자료

2024. 02.

목 차

I . 개요	1
II . 국내외 현황	3
III . 세부기술 현황	12
가. 삼중수소 안전	12
나. 삼중수소 정제 · 분리 · 저장 기술	15
다. 핵융합 연료공급	17
라. 핵융합 진공배기	19
마. 연료주기 관련 연구시설	21

□ 기술정의

- 삼중수소의 안전한 취급과 핵융합 연속 반응 유지를 위해 연료를 공급·순환시키는 기술

□ 필요성

- **(전략기술)** 전략물자인 삼중수소를 직접 취급하는 공정의 특성으로 기술도입이 어렵고, 기술의 우위가 없을 경우 정보 교류 조차 제한되기 때문에 독자적 기술역량 보유 필요
 - ITER를 비롯한 핵융합 실증로는 DT 핵융합을 기본으로 열에너지 생산을 목표로 하며, 이는 대량 고농도 삼중수소 취급이 필요
 - ITER 삼중수소 플랜트의 조달은 미국, 유럽, 일본, 한국에 국한되어 있으며 이는 대량 삼중수소 취급 기술에 대한 수출통제 문제에 따른 결과
 - 핵융합 실증로 연료주기 기술개발에 착수함에 있어, 주요 요소기술로 판단되는 기술의 국산화는 실증로 이후 상용로 개발에 있어 기술 자립의 출발점이 될 것으로 판단
 - ITER 연료주기 기술개발 상황은 삼중수소 취급 기술 측면에서 그 취급량과 프로세싱 속도에서 기존 삼중수소 취급 시설과 비교 불가능하게 높은 수준
- **(수용성 제고)** 핵융합 연료로 사용하는 삼중수소의 외부 누출 방지기술 확보를 통해 작업자 및 환경 보호 실현

* 핵융합 실증로는 전기 생산뿐만 아니라 연료로 사용하는 삼중수소 자체 생산을 위해 대량의 삼중수소 취급해야 하며, 이를 위해 안전을 담보할 수 있는 취급기술 확보 필요

□ 파급성

- **(기타 핵융합 유형 활용)** 핵융합 에너지 생산을 D-T 핵반응으로 제한할 경우, 삼중수소 취급 기술은 핵융합 연료주기의 필수적인 요소 기술
 - 핵융합 유형에 따라 연료 소모 효율에 차이를 보이지만, 대부분의 삼중수소가 미연소 상태로 회수되고 다시 재사용되기 때문에, 진공배기 및 삼중수소 플랜트는 요건에 따라 시스템 구성의 변화가 있더라도 필수적으로 필요
- **(타 분야 기술 활용)** 수소에너지 활용을 위한 요소기술은 수소동위원소로 삼중수소 취급 기술개발에 활용 가능하며, 다만 삼중수소의 방사성에 따른 취급에 안전을 확보하는 방향으로 기술의 선정 및 강화가 진행

- 삼중수소 안전한 저장과 안정적인 활용을 위한 금속수소화물 기술은 수소저장 기술의 하나로 개발되고 있으며, 삼중수소 누출을 최소화하기 위한 저장 금속 선정 및 시스템 구성 방식 제한적으로 활용 중
- 미량 삼중수소 회수를 위한 삼중수소수 생성 및 수전해를 통한 수소동위원소 생산은 환경으로 방출되는 삼중수소를 최소화 하고 회수 재사용하도록 활용되고 있는 상황

□ 세부기술

① 삼중수소 안전

- 대량 삼중수소 취급시 누출가능한 미량 삼중수소 회수를 통해 작업자를 보호하고 환경 배출을 최소화하기 위한 기술
 - (대량 삼중수소 취급 안전기술) 물상태로 미량 포함된 삼중수소를 수소동위원소 상태로 변환하여 삼중수소 재사용 강화 및 삼중수소 환경 방출을 최소화하기 위한 시스템 개발
 - (삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발) 삼중수소 플랜트 내 삼중수소를 포함한 공정가스 농도측정 분석기술 및 환경 영향평가를 위한 측정기술 개발

② 삼중수소 정제·분리·저장 기술

- 핵융합 반응기 배기가스 연료 재사용을 위한 삼중수소·중수소 회수, 농축 및 저장 기술
 - (수소동위원소 정제시스템 개발) 핵융합 반응기 배기가스 중 수소동위원소 재사용을 위한 정제
 - (수소동위원소 분리시스템 개발) 수소동위원소 내 삼중수소 농축 및 분리 기술 개발
 - (삼중수소 저장·공급 시스템 개발) 안전한 삼중수소 저장 및 취급 관련 공정기술 개발

③ 핵융합 연료 공급

- 핵융합 반응에 의한 높은 에너지의 발산 및 안정적인 핵융합 반응을 지속하기 위해 초저온 고체 상태의 중수소, 삼중수소를 만들어 고속으로 토카막 내부에 공급
 - (핵융합 연료 펠릿주입 시스템) 다양한 크기 펠릿 생산 및 플라즈마 내 공급·리사이클 시스템 개발
 - (핵융합 연료 가스주입 시스템) 다양한 공정 가스를 안정적으로 주입하기 위한 시스템 개발

④ 핵융합 진공배기

- 핵융합로 연속운전을 위한 내부 고진공 유지 및 미사용 삼중수소를 안정적으로 회수하기 위한 배기 시스템
 - (핵융합 연료 고진공 배기기술 개발) 핵융합로 대규모 연속운전의 고진공상태 유지하고 미사용 연료 회수를 위한 고진공 배기장치 개발
 - (핵융합 연료 저진공 배기기술 개발) 고진공 배기를 지원하고 안정적으로 삼중수소 플랜트와 연계하기 위한 저진공 배기 시스템 개발

II

국내외 현황

가

기술 동향

- ▶ 원자력기술을 보유한 주요국들은 소량의 삼중수소 취급기술은 보유하고 있지만, 실증로급의 대량 삼중수소 취급을 위한 기술 및 경험 부족

□ 국외

- (주요국) ITER 장치를 기반으로 연구를 수행 중이며, 실증로급 대량 삼중수소 취급을 위한 다양한 시스템 및 기기 개발 중

<표. 국외 연료주기 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
삼중수소 안전	<p>▶ 핵융합 적용을 위한 ITER WDS 공정 개발이 진행되고 있으며(EU), 원자력 분야의 삼중수소 회수 기술을 개발하고 대량 중수 처리 중(CA)</p> <p>▶ 삼중수소 플랜트 공정 상 삼중수소 분석을 위한 다양한 분석 방법을 개발</p> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 삼중수소 분리, 분석을 위해 기술개발을 추진 중이나, 실증로급 삼중수소 취급경험 부재</p>
삼중수소 정제·분리 저장	<p>▶ ITER 기준의 대량의 수소동위원소 정제 및 복합적 반응기 제작 등 ITER 장치 적용을 위한 기술개발 진행 중</p> <p>▶ 소규모 삼중수소 저장용기, 운반용기가 상용화 되어 판매 중</p> <p>⇒ (주요이슈) ITER 장치 적용을 위해 기술개발 진행 중이며, 실증로급 삼중수소 정제·분리·저장에 대한 기술개발 요구</p>
핵융합 연료공급	<p>▶ 핵융합 연료공급을 목적으로 다양한 가스의 펄스 공급 시스템 연구 중</p> <p>▶ ITER 설치를 목적으로 다양한 공정가스 공급 시스템 제작 및 성능평가 진행</p> <p>⇒ (주요이슈) ITER 장치 적용을 위한 기술개발 및 성능평가 진행 중</p>
핵융합 진공배기	<p>▶ ITER 대비 핵융합 에너지 생산 및 운영 시간의 증가에도 불구하고 취급 삼중수소량을 ITER 수준으로 설정하고 연구 (EU)</p> <p>▶ ITER는 새로운 저진공 펌프를 개발 중이며(IO), EU는 삼중수소 취급이 가능한 다양한 진공펌프 연구개발 중(EU)</p> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로에 적용할 연속운전이 가능하고 대량의 삼중수소를 포함한 수소 동위원소를 안정적으로 진공배기할 기기 및 시스템 필요</p>

- **(ITER)** ITER는 다양한 핵융합 실험을 계획하고 있으며 200 Pam³/s 연료공급을 통해 최대 열에너지 생산 기술을 확인할 예정
 - ITER는 DT 핵융합 실험 시작, 운영, 종료 및 플라즈마의 안정된 운전을 위해 수소 동위원소 뿐만 아니라 다양한 가스를 공급하여 성능을 검증할 예정
 - 토카막 내 적절한 진공도를 유지하며 미반응 가스를 회수하는 기술을 확인할 예정
- **(인프라 현황)** 각국이 운영하는 삼중수소 취급시설은 자국의 삼중수소 취급 경험 축적 및 기술 자립을 위해 요소기술을 개발 중

< 국외 인프라 구축 현황 >

세부시설	국외 장치명
삼중수소 취급시설*	• ITER 삼중수소 플랜트 설계 및 제작 진행 중(30대 중반 삼중수소 취급 시운전 및 운영 착수 예정)
	• 독일 TLK 수신품 삼중수소 활용가능 EU 실증로 연료주기 파트 삼중수소 취급 요소기술 개발 수행 중
	• 미국 SRNL 수신품 삼중수소 활용가능 US 실증로 연료주기 기술개발 로드맵을 개발하고 있음(10년 후 실증로 제작 착수)
	• 일본 TPL 수신품 삼중수소 활용·삼중수소 취급 요소기술 검증 수행함.
	• 캐나다 AECL 삼중수소 제거 설비 설계, 제작 및 운영
	• 루마니아 ICSI 삼중수소 취급 농축 시설 제작 및 운영
핵융합 연료공급 시설	• ITER 연료공급 시스템 DT 기준 최대 200 Pam ³ /s 연료공급 예정
핵융합 진공배기 시설	• ITER 진공배기 시스템 DT 기준 최대 200 Pam ³ /s 진공배기 예정

□ 국내

- **(주요성과)** ITER 삼중수소 저장·공급 시스템 조달을 위한 삼중수소 저장용기 개발 및 공정개발을 수행
 - ITER 연료주기 비조달 항목에 대한 기술개발 현황을 추적하였으며, KSTAR를 통한 Pellet Injection 연료공급 장치를 부분적으로 적용 및 Cryopump 진공배기를 부분적으로 적용

<표. 국내 연료주기 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
삼중수소 안전	▶ 월성 TRF에서 수g 급 삼중수소 분리기술 및 고농도 삼중수소 측정 설치운영하고 있으나, 해당 시설에 국한 ⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로 삼중수소 회수 및 분석을 위해서는 취급경험 요구
삼중수소 정제분리 저장	▶ ITER 조달 기준 수소동위원소 정제 시스템 기초실험 수행 중 ▶ 수소동위원소 분리·농축 시스템이 월성 TRF 적용 중 ▶ ITER 조달을 위한 삼중수소 저장용기, 연료공급 시스템, 재고측정기술 등 개발 중 ⇒ (주요이슈) ITER 조달을 위해 기술개발 진행 중이나, 실증로급 기술개발 요구
핵융합 연료공급	▶ KSTAR에서 SPI를 통해 펠릿 제조 및 주입 실험을 진행 중 ▶ KSTAR 장치에 독립된 밸브가 설치되어 있고, 공정 가스 공급 ⇒ (주요이슈) KSTAR 수준의 연료공급 시스템 연구를 진행하고 있으나, 삼중수소를 활용한 연구개발 요구
핵융합 진공배기	▶ KSTAR 진공용기 배기를 위해 상용 진공배기 장치를 조합하고 부분적으로 자체 제작 Cryopump를 적용하여 시스템 통합 운영 중 ▶ ITER 비조달 항목에 대한 기술추적을 수행하였으며, 그 일환으로 연료주기 내 삼중수소 재고량 분석을 위한 수치적 모델을 개발하여 평가 ⇒ (주요이슈) 실증로는 ITER 대비 삼중수소 취급량이 증가가 예상됨에 따라, 재고량 감축 및 안전한 취급을 위한 진공배기 시스템 개발 필요

< 국내 연료주기 연구개발 인력 현황 >

기관 분류		주요 연구내용(성과)	연구인력 ('23.7 기준)
연구원	핵융합(연)	• ITER 조달항목인 삼중수소 저장·공급 시스템(SDS) 관련 삼중수소 저장용기 개발 및 공정 설계 수행 • 핵융합 실증로 연료주기 기술개발 착수 • KSTAR Pellet Injection 구축 및 성능 검증 • KSTAR Cryopump 부분 적용	10명
	원자력(연)	• ITER 삼중수소 저장용기 요소기술 검증	-
대학	서울대	• ITER 삼중수소 플랜트 ISS 및 WDS 기술추적	4명
	포항공대	• ITER 삼중수소 플랜트 DS 기술추적	3명
	동국대	• ITER 연료공급 및 진공배기 기술추적	-
산업체	한수원 중앙연구원	• ITER 삼중수소 Calorimeter 기술 검증	-
	DIG 에어가스	• ITER 삼중수소 플랜트 TEP 기술추적	-

- (인프라 현황) ITER 조달 및 ITER 적용 가능한 기술을 부분적으로 개발 수행 중
- 삼중수소 저장·공급 시스템 삼중수소 저장용기 및 공정개발을 위한 성능평가 장치를 구축하였으며, KSTAR에 설치된 Pellet Injection 및 Cryopump 운전을 통한 성능 검증

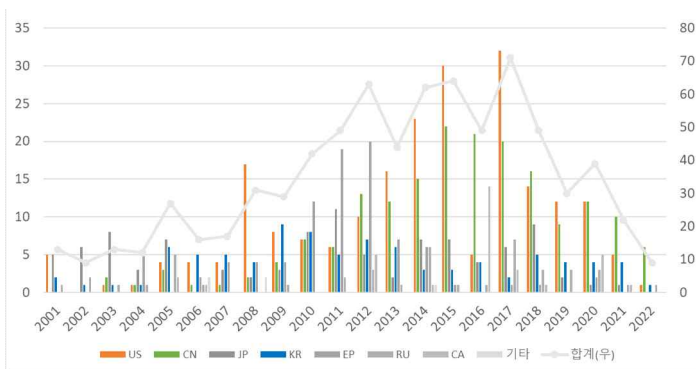
< 국내 연료주기 연구개발 관련 인프라 현황 >

세부시설	국내 보유 장치명
삼중수소 취급시설	• 핵융합(연), ITER 삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 검증장치
	• 한수원 중앙연구원, 삼중수소 계량 분배 장치
	• 한수원 월성, 삼중수소 제거설비
핵융합 연료공급 시설	• 핵융합(연), KSTAR Pellet Injection
핵융합 진공배기 시설	• 핵융합(연), KSTAR Cryopump

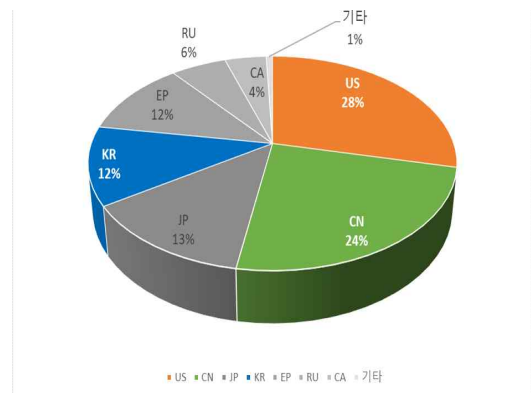
- ▶ (특허분석) 미국과 중국을 중심으로 특허 출원이 진행되고 있는 분야이나, 출원된 특허의 질적 수준이 타 기술분야 대비 상대적으로 낮은 분야
- ▶ (논문분석) 과거 일본을 중심으로, 최근 중국을 중심으로 논문이 게재되고 있으며, 한국의 논문은 피인용도가 평균이상이나, 게재건수가 낮은 상황

□ 특허 출원 현황

- (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 760건의 특허가 출원된 분야로 2010년대 중반까지 꾸준한 증가추세를 유지하고 있었으나, 최근 감소 추세로 확인
- (국가별 비중) 미국이 가장 많은 217건(28%)을 출원하였으며, 다음으로 중국 183건(24%), 일본 100건(13%) 순이며, 한국은 90건(12%) 특허 출원



< 그림. 연도별 출원 건수 >



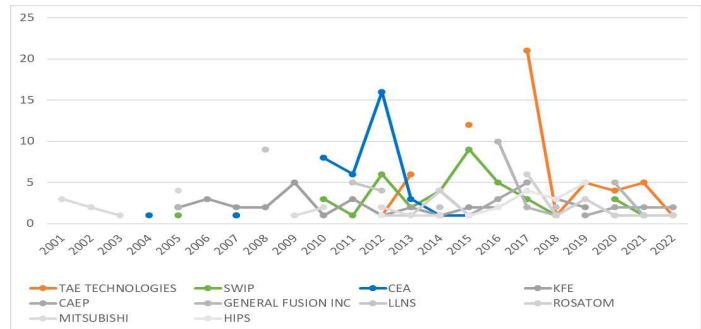
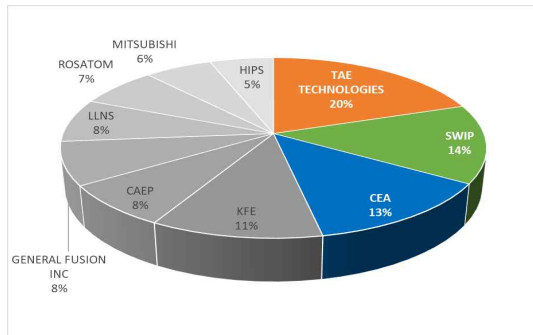
< 그림. 국가별 비중 >

- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국의 경우 거의 모든 특허를 자국 특허청에 출원하는 경향을 보이고 있으며, 미국, 일본, 유럽, 러시아의 경우 세계 주요 특허청에 동시 출원 진행

< 표. 국가별-특허청별 출원 현황 >

구분	중국 특허청	유럽 특허청	일본 특허청	한국 특허청	러시아 특허청	미국 특허청	WIPO	기타	총합계
US	10%	14%	12%	8%	1%	41%	9%	5%	100%
CN	95%	1%	0%	0%	1%	2%	2%	0%	100%
JP	7%	6%	62%	7%	1%	16%	1%	0%	100%
KR	0%	1%	1%	96%	0%	0%	1%	1%	100%
EP	3%	19%	3%	17%	3%	17%	11%	25%	100%
RU	5%	5%	11%	5%	68%	7%	0%	0%	100%
CA	15%	12%	0%	15%	0%	24%	18%	15%	100%
기타	20%	0%	0%	0%	0%	40%	20%	20%	100%

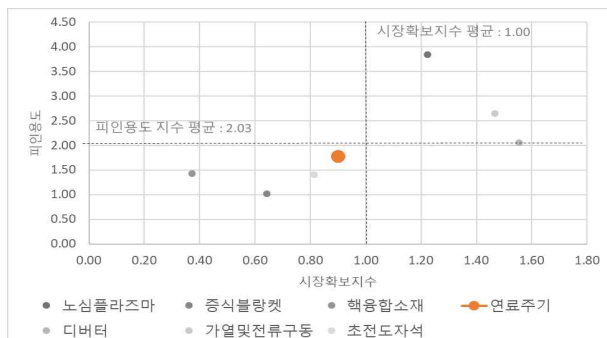
- (주요 출원인 Top 10) TAE Technologies(미)가 가장 많은 56건의 특허를 출원하였으며, 다음으로 SWIP(중) 40건(14%), CEA(프) 37건(13%) 출원 진행
- TAE Technology(미)의 경우 역자장 방식 핵융합 시스템 특허(연료공급 포함)를 여러 국가에 출원함에 따라 가장 높은 순위로 분석
- CEA(프), 핵융합(연)(KFE)의 경우 원자력 분야에서 삼중수소 취급 관련 특허를 출원하면서 주요 출원인 중 상위권에 포함된 것으로 분석



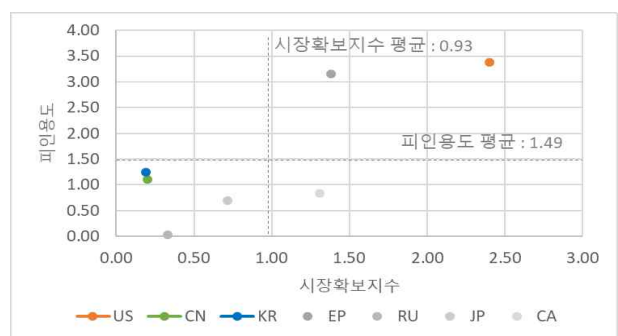
< 그림. 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

< 그림. 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

- (특허경쟁력) 연료주기 분야 특허는 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 분야로 출원된 특허의 질적 수준이 타 핵심기술대비 상대적으로 낮은 분야
- 국가별로 미국과 유럽이 피인용도와 시장확보지수가 모두 높은 1사분면 위치

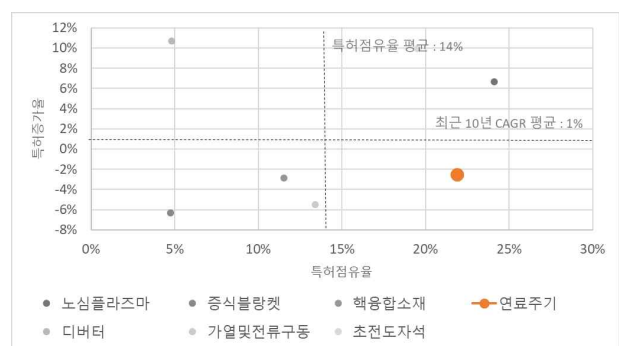


< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

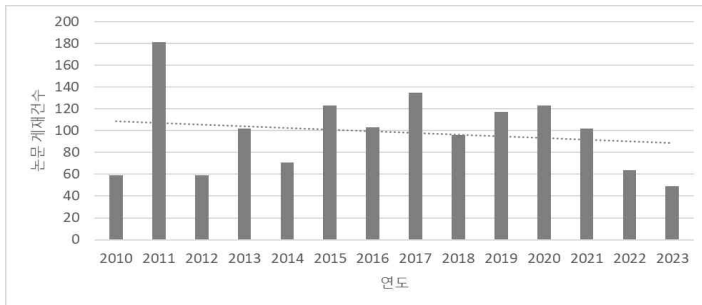
- (특허유망성) 연료주기 분야는 특허 점유율이 높은 반면, 최근 10년간 특허 증가율은 낮은 분야(4사분면 위치)로, 과거 원자력 분야의 삼중수소 취급 관련 특허를 보유하고 있으나, 최근 핵융합 관련 연구가 활발하지는 않은 분야로 파악



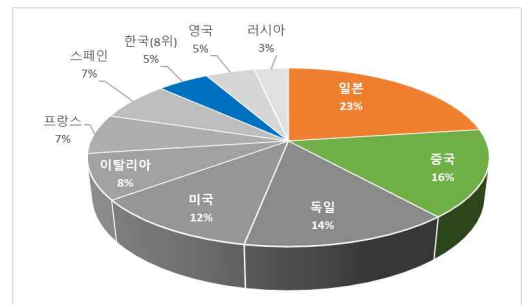
< 그림. 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

□ 논문게재 현황

- (연도별 게재 건수) 연료주기 분야는 지난 14년간 총 1,384건의 논문이 게재되었으며, 최근들어 게재 건수가 감소하고 있는 분야(연평균 성장률 0.7%)

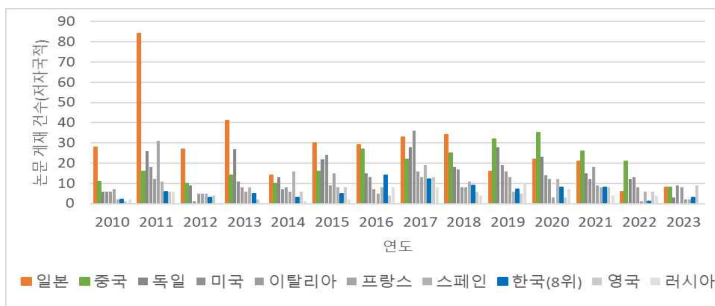


< 그림. 연도별 게재 건수 >

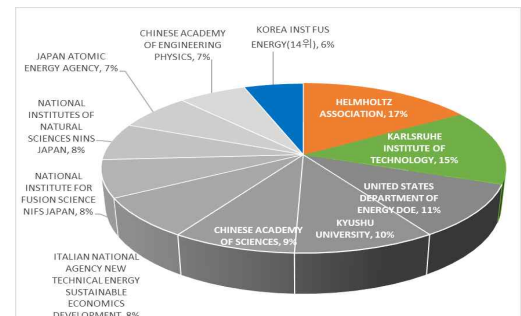


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 일본(393건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 2010년대 초반 일본을 주도로 논문이 게재되었으나, 최근 중국에서 가장 많은 논문이 게재되고 있는 상황. 한국은 게재 건수 8위(86건)

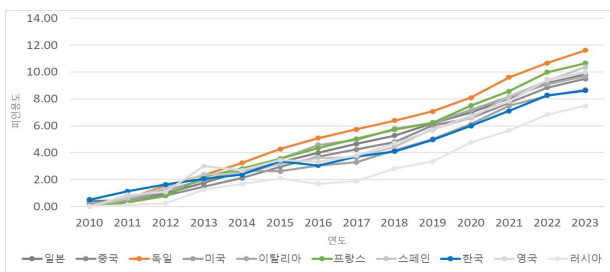


< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >

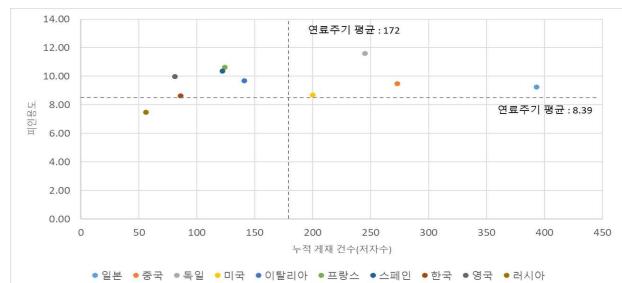


< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 HELMHOLTZ(독일)에서 가장 많은 204건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 KARLSRUHE(독일, 182건), DOE(미국, 129건)의 비중이 높고, 한국의 KFE는 15위(70건)
- (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 독일이며, 독일, 미국, 일본, 중국은 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용은 높으나 게재건수가 낮은 2사분면에 위치



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >

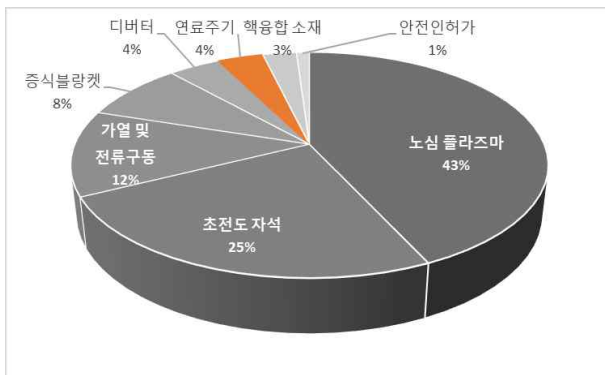


< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

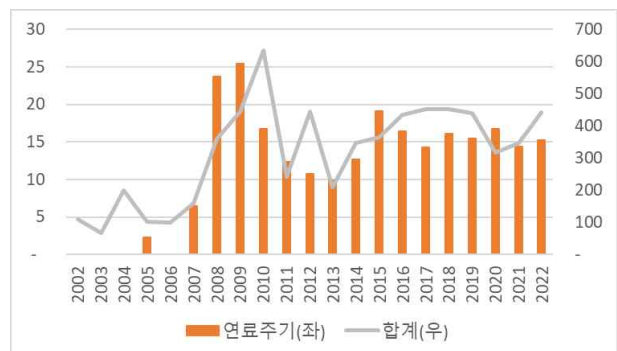
- ▶ 연료주기 연구는 248억원이 투입(8대 핵심기술 전체 금액 중 4%, 6위) 투입 되었으며, ITER 조달 품목인 삼중수소 저장·공급 시스템 개발이 가장 큰 비중

□ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 연료주기는 248억원(4%, 8대 핵심기술 중 6위)이 투자된 것으로 파악
- (연도별 투자현황) 연료주기분야는 ITER 삼중수소 저장·공급 시스템 개발을 중심으로 2008년부터 유사한 수준의 연구개발 투자가 진행되고 있는 상황
 - ITER 조달 품목인 삼중수소 저장·공급 시스템 개발을 위해 국제핵융합실험로 (ITER) 공동개발사업을 연구개발을 추진하고 있으며, ITER 비조달 과제로 ITER 연료주기 기술추적을 진행 중

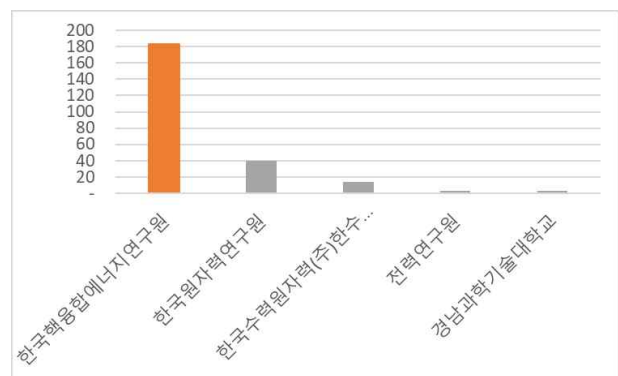


< 그림. 8대 핵심기술 비중 >



< 그림. 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) ITER 삼중수소 저장·공급 시스템 개발을 주관하고 있는 한국핵융합에너지연구원(74%)과 한국원자력연구원(16%), 한국수력원자력(주)(6%)가 연료주기 연구개발을 주도
 - 한국원자력연구원은 ITER 삼중수소 저장·공급 용기를 개발 중이며, 한국수력원자력(주)는 삼중수소 검증시험 기반 구축 및 헬륨-3 회수기술 개발 중

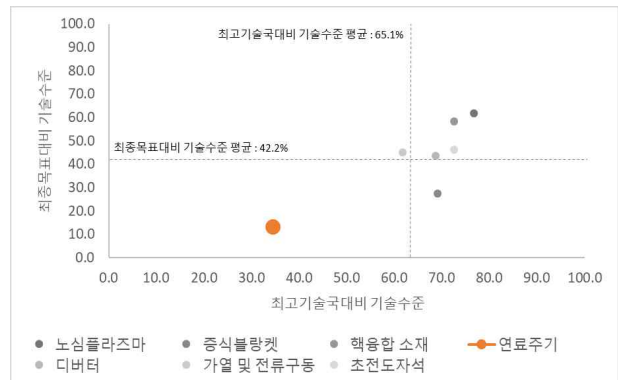


< 그림. 주요 연구기관 >

- ▶ 연료주기 분야는 핵융합 삼중수소를 취급한 경험이 부재함에 따라 기술수준이 가장 낮은 분야로 분석

□ 기술수준 현황

- (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 분야 중 최고기술국(EU) 대비 기술수준과 최종 목표(실증로) 대비 기술수준이 가장 낮은 분야
 - 연료주기는 핵심기술 중 가장 기술수준이 낮은 분야로 분석되었으며, 핵융합 삼중수소 취급경험이 부족한 한국의 경우 가장 취약한 분야로 파악



< 그림 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

- (세부기술 기술수준) 세부기술별 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면, 삼중수소 안전 기술의 기술수준이 가장 낮은 것을 확인
 - 핵융합 삼중수소의 취급 경험이 부재함에 따라 삼중수소 안전 기술수준이 가장 취약한 것으로 파악되었으며, 삼중수소 정제·분리·저장 기술의 경우 삼중수소 저장·공급 시스템 관련 기술은 높은 수준이나 정제·분리 기술 개발 시급
 - 핵융합 연료공급은 기술의 경우 ITER 적용 기술을 검증하고 있는 수준이며, 실증로 삼중수소 취급 경험 부재에 따라 진공배기 시스템 기술수준도 취약한 것으로 분석

< 표 연료주기 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국 대비 한국 기술수준
삼중수소 안전	EU	55.0	4.4	8.0
삼중수소 정제분리저장	EU	38.6	21.6	56.0
핵융합 연료공급	EU	30.0	18.0	60.0
핵융합 진공배기	EU	62.9	8.8	14.0
연료주기	EU	46.6	13.2	34.5

※ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 기술수준평가(한국연구재단, '22)

□ ITER를 통한 확보 기술수준 및 한계점

- (ITER를 통한 기술확보) ITER는 다양한 핵융합 실험을 계획하고 있으며 200 Pam³/s 연료공급을 통해 최대 열에너지 생산 기술을 확인할 예정이다.
 - ITER는 500 MW 열에너지 생산을 위해 ~kg 수준 삼중수소 취급을 해야하며, 이는 현재 전세계에 100 g 이하 삼중수소 취급 가능한 시설이 운영되고 있는 것을 고려하여 매우 진보한 것
 - ITER는 DT 핵융합 실험 시작, 운영, 종료 및 플라즈마의 안정된 운전을 위해 수소동위원소 뿐만 아니라 다양한 가스를 공급하여 성능을 검증할 예정이며, 이에 따른 토카막 내 적절한 진공도를 유지하며 미반응 가스를 회수하는 기술을 확인할 예정
- (실증로 기술대비 한계점) ITER를 통해 핵융합 연료주기 전반에 걸친 기술을 설계, 제작, 운전에 대해 전주기적으로 관찰할 기회가 제공될 것으로 보이나, 이는 실제 삼중수소를 취급하는 경험을 중시하는 삼중수소 연구 측면에서 기술을 축적하는데는 한계가 있을 것으로 판단
 - 핵융합 실증로는 ITER 대비 3배의 열에너지 생산과 연속운전을 목표로 하고 있음. 이는 취급할 삼중수소의 증가가 불가피하며, 안전을 보다 확보하기 위한 삼중수소 취급 기술 개발이 필요
 - 핵융합 실증로에 적합한 연료공급 방법의 선정 및 열에너지 생산이 가능한 연료공급량 조정 기술의 개발이 필요
 - 핵융합 실증로 연속운전에 따른 공급된 연료 및 불순가스의 안정적인 회수 및 연료가스 재사용을 위한 삼중수소 플랜트 연계시스템 개발이 필요

< 표. ITER 사업을 통해 확보되는 증식블랑켓 기술 및 한계점 >

ITER 통해서 확보 가능한 기술	실증로 기술대비 한계점
<ul style="list-style-type: none"> • ~kg 삼중수소 취급 삼중수소 플랜트 설계 및 제작 보고서 • 200 Pam³/s 연료공급 시스템 설계 및 제작 보고서 • 200 Pam³/s 진공배기 시스템 설계 및 제작 보고서 	<ul style="list-style-type: none"> • 실제 삼중수소 취급 경험 미비 • 열생산 증가에 따른 취급할 삼중수소 재고량 증가 • 핵융합 연속운전을 위한 삼중수소 취급, 연료공급 및 진공배기 시스템 설계

Ⅲ

세부기술 현황

가

삼중수소 안전

□ 정의

- 대량 삼중수소 취급시 누출가능한 미량 삼중수소 회수를 통해 작업자를 보호하고 환경 배출을 최소화하기 위한 기술

세세부기술	기술개요
대량 삼중수소 취급 안전기술 개발	<ul style="list-style-type: none">• 대량 삼중수소를 취급함에 있어 환경 및 작업자의 안전 확보 등 법적 요건을 준수하기 위한 시스템 개발• 물상태로 미량 포함된 삼중수소를 수소동위원소 상태로 변환하여 삼중수소 재사용 강화 및 삼중수소 환경 방출을 최소화하기 위한 시스템 개발
삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발	<ul style="list-style-type: none">• 삼중수소 플랜트 내 삼중수소를 포함한 공정가스 농도 측정을 위한 분석 기술 개발 및 다양한 삼중수소 농도를 포함한 공정가스 분석기술 검증• 삼중수소 취급 시설 주변 액체 및 고체 상태로 존재하는 물체의 삼중수소 농도를 측정하여 대량 삼중수소 취급에 따른 환경 영향 평가 수행을 위한 측정기술 개발

□ 기술개발 필요성

- (수용성 제고) 핵융합 연료로 사용하는 삼중수소의 외부 누출 방지기술 확보를 통해 작업자 및 환경 보호 실현
 - 삼중수소 취급 시설에서 대량 삼중수소를 취급함에 있어 환경 방출을 모니터링하고 환경에 대한 영향 평가
 - * 핵융합 실증로는 전기 생산뿐만 아니라 연료로 사용하는 삼중수소 자체 생산을 위해 대량의 삼중수소 취급해야 하며, 이를 위해 안전을 담보할 수 있는 취급기술 확보 필요
- (경제성 제고) 미량의 삼중수소 회수를 위해 ppm 수준의 물상태 삼중수소수가 발생하며, 이를 기체상태 삼중수소로 변환하여 재사용을 통한 활용 극대화
- (안정적 연료공급) 핵융합 실증로의 안정적인 운전을 위해 계통 내 삼중수소 재고량 파악 등 (준)연속 운전 실현을 위한 안정적 연료공급 실현

□ 국내외 동향

① 대량 삼중수소 취급 안전기술 개발

- (국외) 삼중수소의 안전한 취급을 위해 Enclosure 적용 중이며, ITER의 경우 수십 g 삼중수소를 한번에 취급하기 위한 공정 개발 중
 - 삼중수소 취급 안전을 확보하기 위해 Enclosure 적용하고, 시설별 제한된 삼중수소 재고량을 취급하도록 운영 중
 - 시설에서 삼중수소 취급 능력에 따라 적합한 시스템을 구축하여 활용 중이며, ITER 경우 수십 g 삼중수소를 한번에 취급하도록 공정 개발 중
 - * 핵융합 적용을 위한 ITER WDS 공정개발이 진행되고 있으며, 회수된 삼중수소의 재사용 및 안전한 폐가스 환경 배출 목표
 - 캐나다를 중심으로 중수로 원전에서 생성되는 삼중수소 회수를 위한 TRF를 개발하고 삼중수소를 포함한 대량 중수 처리 중
- (국내) 월성 TRF에 수 g 삼중수소 회수를 위한 시스템 설치 및 운영 중
 - 월성 TRF에 수 g 삼중수소 회수를 위해 캐나다 AECL에서 개발한 삼중수소 회수시스템 설치하였고, 한 번에 취급하는 삼중수소 양을 제한하여 삼중수소 누출의 최대양을 제한하여 운전
 - 월성 TRF 건설을 위한 반응추출탑 적용 국산 촉매 개발 수행

② 삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발

- (국외) 고농도 삼중수소 분석 방법은 개발되었지만, 저농도는 다양한 분석 방법 개발 중
 - 고농도 삼중수소 분석 관련, Off-line 삼중수소 분석은 여러 가지 기기를 활용하여 방법이 개발되어 있으나, On-line 분석 방법은 Raman Spectrometry를 부분적으로 시험 중
 - 저농도 삼중수소 분석 관련, 다양한 분석 방법이 개발되고 있으며, 공정가스 내 운전 조건 및 삼중수소 농도에 따른 적용 범위 검증 중
 - 원자력발전소 및 폐기물관리시설에 대한 삼중수소 생성, 배출, 환경시료 내 삼중수소, 인근 주민 피폭 측정 등을 통해 환경평가 데이터 구축

- (국내) 고농도 및 저농도 삼중수소 분석기술이 도입되었으며, 원자력시설에서 삼중수소 농도 측정결과 축적 중
 - 고농도 삼중수소 분석기술은 월성 TRF 생성된 삼중수소 농도 측정을 위한 GC가 설치·운영하고 있으나, 시설 운전에 국한하여 적용
 - 저농도 삼중수소 분석을 위해 Proportional Counter 및 Liquid Scintillation Counter 방법 등을 도입하여 시료 분석에 활용 중
 - 국내 원자력 시설에서 삼중수소 발생량 및 환경 시료 내 삼중수소 농도 측정결과 축적 중

나

삼중수소 정제·분리·저장 기술

□ 정의

- 핵융합 반응기 배기가스 연료 재사용을 위한 고농도 삼중수소 안전 취급 및 삼중수소·중수소 회수, 농축 및 저장 기술

세세부기술	기술개요
수소동위원소 정제 시스템 개발	• 핵융합 반응기 배기가스 중 수소동위원소 재사용을 위한 정제
수소동위원소 분리 시스템 개발	• 삼중수소를 연료로 재사용하기 위한 수소동위원소 내 삼중수소 농축 및 분리 기술
삼중수소 저장·공급 시스템 개발	• 핵융합 연료공급을 위한 안전한 삼중수소 저장 및 취급 관련 공정기술 개발

□ 기술개발 필요성

- (경제성 제고) 중수소·삼중수소 핵융합 반응 특성상 공급된 연료의 미량만이 반응하기 때문에 남은 연료를 회수하여 재사용을 통한 경제성 제고
- (안전성 제고) 삼중수소는 화학적·물리적으로 수소와 매우 흡사하게 작용하며, 안정적으로 가두어 저장하는 것은 삼중수소 안전 취급에 있어 매우 중요

□ 국내외 동향

① 수소동위원소 정제 시스템 개발

- (국외) 소량 삼중수소를 이용한 공정 적용 사례는 있지만, ITER 기준 대량 정제 목적의 공정은 없으며, 현재 ITER 적용을 목적으로 공학적 검증 수행 중
 - 타분야에서 소량 삼중수소를 이용한 공정이 적용된 바는 있으나, ITER 기준 대량 수소동위원소 정제를 목적으로 삼중수소가 활용되지는 않았으며, ITER 경우 수소를 이용한 Lab Scale 범위에서 수행
 - ITER 적용을 목적으로 Pt 촉매 및 Pd 분리막을 활용한 복합적인 반응기를 제작하여 수소를 이용한 공학적 검증 수행
- (국내) ITER 조달을 기준으로 적용되는 Pd 분리막 및 Pt 촉매를 적용한 실험실 조건의 수소를 이용한 기초실험 수행

② 수소동위원소 분리 시스템 개발

- (국외) H/D 초저온 증류가 중수소 생산을 위해 부분적으로 적용 중이며, 핵융합 연료주기 개발을 위해 평형반응기를 함께 적용 중
 - 수소동위원소 분리 중 H/D 초저온 증류는 중수소 생산을 위해 부분적으로 적용되고 있으며, 핵융합 연료주기 분야에서 대량의 삼중수소를 안정적으로 다루기 위해 적용
 - 핵융합 연료주기 개발을 위해 수소동위원소 분리 목적으로 초저온 증류와 함께 평형반응기 적용
- (국내) 초저온 증류가 월성 TRF에서 적용되어 사용 중
 - 수소동위원소 분리를 위한 초저온 증류가 월성 TRF에 적용
 - 삼중수소 농축을 위해 캐나다 AECL에서 설계한 월성 TRF에 적용되어 사용 중

③ 삼중수소 저장·공급 시스템 개발

- (국외) 그램 단위의 저장용기는 상용화되었지만, 대량의 삼중수소 공정가스 취급 관련 연구는 부재
 - 그램 단위의 삼중수소 저장용기의 경우 상업적으로 제작·판매되고 있으며, 미국 LANL에서는 200g 삼중수소 저장 가능한 용기의 평가를 수행
 - 소량의 공정가스 취급 공정 및 실제 삼중수소를 이용한 실험적 평가가 진행되었으나, 대량의 삼중수소 공정가스 취급 연구 부재
 - 삼중수소 운반용기 재고량 측정기기가 상용화되어 있으며, 각 시설에 요건에 적합 정도 확인이 필요한 상황
- (국내) ITER 조달 사업을 통해 70g 수준의 저장용기를 개발중이며, 공급시스템 공정 개발 중
 - ITER 조달을 위한 삼중수소 저장용기가 70g 저장 용량을 기준으로 개발 중
 - ITER 조달 사업을 통해 ITER 연료공급을 위한 시스템 공정개발 개발 중
 - ITER 적용 가능한 70g 삼중수소 용량의 공정 내 재고량 측정 기술 개발 중

다

핵융합 연료공급

□ 정의

- 핵융합 반응에 의한 높은 에너지의 발산 및 안정적인 핵융합 반응을 지속하기 위해 초저온 고체 상태의 중수소, 삼중수소를 만들어 고속으로 토카막 내부에 공급

세세부기술	기술개요
핵융합 연료 펠릿주입 시스템	• 핵융합 플라즈마 내부 연료를 안정적으로 공급하기 위한 다양한 크기 펠릿 생산 및 플라즈마 내 공급·리사이클 시스템 개발
핵융합 연료 가스주입 시스템	• 핵융합 반응기 내 다양한 공정 가스를 안정적으로 주입하기 위한 시스템 개발

□ 기술개발 필요성

- (안정적 연속운전) 핵융합 반응기 내 플라즈마 환경에서 소모·배출되는 연료의 안정적인 공급을 통한 DT 반응 속도의 안정적 유지 실현
 - * 원활한 핵융합 반응을 위해 연료로 사용되는 중수소 및 삼중수소뿐만 아니라, 반응 제어에 사용되는 여러 물질은 기체 형태로 초기 공급
- (DT 밀도 유지) 핵반응이 일어나는 플라즈마 내부 DT 밀도를 유지하기 위해 고체 상태의 펠릿을 고속으로 주입하여 D/T 이온 공급 및 에너지 전달

□ 국내외 동향

① 핵융합 연료 펠릿주입 시스템

- (국외) 실험실 수준에서 핵융합 연료공급을 목적으로 다양한 방식의 실험을 수행 중
 - 핵융합 연료공급을 목적으로 여러 종류의 가스를 다양한 크기 펠릿으로 제조하여 자기장 환경 플라즈마 내 공급하는 실험 수행 중
 - 삼중수소를 적용한 펠릿 제조가 실험실 수준에서 진행되고 있으며, ITER 적용을 위한 펠릿 공급 시스템 개발 중

- (국내) KSTAR 운전에 연료공급 펠릿을 활용중이지만, 삼중수소 기반의 플라즈마 시험 등의 추가적인 연구개발 필요
 - 핵융합(연) KSTAR에 소형 Extruder를 활용한 추가 연료공급 펠릿 및 SPI 펠릿을 제조하여 반응기 내에 주입하고 있으나, 플라즈마 실험을 위한 주요 연료공급을 위한 검증 필요
 - 중수소 펠릿을 제조 및 반응기 내 공급 라인은 구성되어 있으나, 손실 수소 동위원소 재사용 시스템의 삼중수소 취급 가능한 개발 필요

② 핵융합 연료 가스주입 시스템

- (국외) ITER 설치 목적의 시스템 설계 및 제작 중
 - ITER 설치를 목적으로 다양한 공정가스가 공급 가능하도록 MFC를 포함한 밸브 박스를 적용하고 있으며, 성능평가 수행 중
 - ITER에 공급하기 위해 삼중수소 취급 가능한 이중 파이프로 설계 및 제작 중
- (국내) KSTAR 장치 운전을 위한 밸브시스템 설치 및 공정가스 공급 중
 - 핵융합(연) KSTAR 장치에 독립된 밸브가 설치되며 이를 통해 공정가스 공급
 - 삼중수소 취급 가능한 Manifold가 없으며, 개발이 필요한 상황

□ 정의

- 핵융합로 연속운전을 위한 내부 고진공 유지 및 미사용 삼중수소를 안정적으로 회수하기 위한 배기 시스템

세세부기술	기술개요
핵융합 연료 고진공 배기 기술 개발	•핵융합로 대규모 연속운전의 고진공상태 유지하고 미사용 연료 회수를 위한 고진공 배기장치 개발
핵융합 연료 저진공 배기 기술 개발	•고진공 배기를 지원하고 안정적으로 삼중수소 플랜트와 연계하기 위한 저진공 배기 시스템 개발

□ 기술개발 필요성

- (장치 안전성 확보) 핵융합 실증로는 ITER 대비 삼중수소 취급량의 증가가 예상됨에 따라 전체 삼중수소 재고량 감축 및 안전한 취급 제고

□ 국내외 동향

① 핵융합 연료 고진공 배기 기술 개발

- (국외) ITER 장치 기준의 삼중수소량을 기준으로 EU 등은 연구개발 중
 - ITER는 여러 개의 Cryopump를 순차적으로 가동하여 진공, 승온, 배기, 냉각, 진공 순으로 순환하여 가동할 계획
 - EU 실증로 연료주기는 ITER 대비 핵융합 에너지 생산 및 운영 시간의 증가에도 불구하고 취급 삼중수소량을 ITER 수준으로 설정하고 연구
 - Direct Internal Recycling(DIR) 개념을 도입하고, DIR을 구현하기 위한 다양한 적용 가능한 요소기술 후보군의 도출 및 개발을 수행 중
- (국내) KSTAR 진공용기 배기를 위해 Commercial 진공배기 장치를 조합하고 부분적으로 자체 제작 Cryopump를 적용하여 시스템을 통합적으로 운영 중

② 핵융합 연료 저진공 배기 기술 개발

- (국외) ITER는 새로운 저진공 펌프를 개발 중이며, EU는 다양한 진공펌프 연구 중
 - 삼중수소 취급이 가능한 Roughing 진공의 부재에 따라, ITER는 새로운 저진공 펌프를 개발하여 삼중수소 플랜트와 공정을 연계할 예정
 - EU 실증로 연료주기는 삼중수소 취급이 가능한 다양한 진공펌프 연구개발을 수행하고 있으며, 이에 따른 연료주기 시스템의 조합을 다양하게 평가 중
- (국내) ITER 비조달 항목에 대한 기술추적을 수행하였으며, 그 일환으로 연료주기 내 삼중수소 재고량 분석을 위한 수치적 모델을 개발하여 평가

□ 정의

- 삼중수소의 안전한 취급과 핵융합 연속 반응 유지를 위한 연료 공급·순환 기술 개발을 위한 제반 시설

세부시설	시설 개요	필요성
삼중수소 회수플랜트	• 안전한 삼중수소 취급을 위한 삼중수소 누출 차단 방지막 설치 및 삼중수소 환경 배출을 최소화하기 위한 시스템	• 삼중수소 증식블랭킷 안정성 시험을 통해 생성되는 삼중수소를 안전하게 회수하기 위한 시스템
연료주기공정 시험시설	• 혼합물 형태의 배기가스 중 수소동위원소만을 선택적으로 정제하여 이 중 핵융합 반응물로 사용되는 삼중수소 및 중수소 재사용을 위한 시스템	• 핵융합 실증로 연료주기 공정설계를 위해 실증로 1/10규모의 연료주기 파일럿을 통한 연속운전 성능 검증

□ 국내외 시설구축 사례

- (해외) 원자력 기술을 보유한 주요국들은 삼중수소 취급관련 시설을 운영 중

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
삼중수소 취급시설	• ITER 삼중수소 플랜트 설계 및 제작 진행 중('30대 중반 삼중수소 취급 시운전 및 운영 착수 예정)	• (일부가능) ~kg 수준 삼중수소 취급을 목표로 시스템 설계 및 제작 중 • (한계) 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요
	• 독일 TLK 수십 g 삼중수소 활용가능 EU 실증로 연료주기 파트 삼중수소 취급 요소기술 개발 수행 중	• (일부가능) EU 자체적으로 요소기술 개발을 선도하고 있음. 실증로 적용 가능성을 위한 기술평가가 필요 • (한계) 삼중수소 취급 기술 자립을 함께 고려해야 하며, 도입하더라도 기술의 성숙도가 실증로 적용을 판단하기 이름.
	• 미국 SRNL 수십 g 삼중수소 활용가능 US 실증로 연료주기 기술개발 로드맵을 개발하고 있음(10년 후 실증로 제작 착수)	• (일부가능) 삼중수소 취급 요소기술의 연구개발을 수행하고 있음. • (한계) 삼중수소 취급 정보 수출통제에 따른 기술교류 한계
	• 일본 TPL 수십 g 삼중수소 활용·삼중수소 취급 요소기술 검증 수행함.	• (불가) 시설 해체 착수
	• 캐나다 AECL 삼중수소 제거 설비 설계, 제작 및 운영	• (일부가능) 저농도 삼중수소 취급 기술 일부 적용 가능 • (한계) 특정 운전 조건에서 운영되고 있으며, 다양한 삼중수소 취급 조건을 위한 기술개발이 필요함.
	• 루마니아 ICSI 삼중수소 취급 농축 시설 제작 및 운영	• (일부가능) 삼중수소 농축 기술을 중심으로 기술개발 수행 • (한계) 핵융합 연료주기 전반에 적용하기에 기술범위의 제한이 있음.

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
핵융합 연료공급 시설	<ul style="list-style-type: none"> ITER 연료공급 시스템 DT 기준 최대 200 Pam³/s 연료공급 예정 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) Pellet Injection 중심으로 실증로 적용 가능할 것으로 보임. • (한계) 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요
핵융합 진공배기 시설	<ul style="list-style-type: none"> ITER 진공배기 시스템 DT 기준 최대 200 Pam³/s 진공배기 예정 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) DT 핵융합 실험 시작, 운영, 종료에 따른 토카막 내 적정 진공도 유지 • (한계) 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요

○ (국내) 월성 TRF 등 원자력발전소에서 삼중수소 취급시설 운영 중

세부시설	장치명	활용가능 여부 및 사유
삼중수소 회수플랜트	<ul style="list-style-type: none"> • 한수원 중앙연구원, 삼중수소 계량분배 장치 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 연구수행이 아닌 삼중수소 ~g 소분 목적으로 사용
	<ul style="list-style-type: none"> • 한수원 월성, 삼중수소 제거 설비 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 발전소 특정 조건에서 삼중수소 제거 목적으로 사용
연료주기공정 시험시설	유사시설 없음	-