

※ 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.

증식블랑켓 기술 설명자료

2024. 02.

목 차

I . 개요	1
II . 국내외 현황	3
III . 세부기술 현황	13
가. 설계·안전해석 체계구축	13
나. 제작·검증기술 개발	15
다. 계통기술 개발	18
라. 증식블랑켓 관련 연구시설	21

□ 기술정의

- 증식블랑켓은 핵융합 연료인 삼중수소를 생산하는 핵융합로 핵심내벽 부품으로서, 핵융합에너지(중성자 운동에너지)를 열에너지로 변환하고, 진공용기와 초전도 자석의 보호를 위해 중성자를 차폐하는 역할 수행

□ 필요성

- 실증로의 (준)연속 운전을 위한 연료 생산·추출을 담당하는 핵심분야로서, 핵융합 주요국들이 핵융합 시장선점을 위해 전략기술로 추진하는 등 국산화 필요
 - 증식블랑켓은 핵융합 연료자급 및 전기생산을 위한 핵심 품목으로, ITER 조달품목에서 의도적으로 제외되어 진행되고 있는 ITER TBM의 예에서 볼 수 있듯이 핵융합 선진국들이 타국과의 기술 협력에 폐쇄적인 입장
 - 실증로급 증식블랑켓은 ITER에서 검증이 불가능한 분야*로 EU, 일본, 중국 등은 독자적인 증식블랑켓 개발을 위한 로드맵 도출 및 인프라 구축에 착수
 - * ITER 경우, 중성자속 0.78 MW/m^2 , 열속 0.3 MW/m^2 , 3 dpa 재료손상이 예측됨, 실증로는 중성자속 $2.0\text{--}3.0 \text{ MW/m}^2$, 열속 $0.5\text{--}0.7 \text{ MW/m}^2$, 80~150 dpa 재료손상 예상
 - 핵융합 상용화의 핵심부가가치가 될 증식블랑켓 개발 과정에서 인프라 활용 등에 후발주자가 추격하지 못하도록 진입장벽을 설치할 것으로 예상
- 대량 열에너지 발생, 대규모 삼중수소 증식, 고강도 중성자 조사 재료 손상 등 실증로 환경에 적합한 증식블랑켓 개발

□ 파급성

- 증식블랑켓은 핵융합 연료 생산 및 열에너지 추출을 위한 품목으로 핵융합 주장치 방식(레이저, 소형/대형 토카막 등)에 공통 활용이 가능
- 증식블랑켓의 증식재료 리튬세라믹을 활용할 예정으로 리튬 동위원소 분리기술, 리튬 분말 합성기술, 리튬 증식재 재활용 기술 등이 이차전지 기술에 활용 가능
 - 특히 화학적 수명이 다해 폐기 처리할 이차전지의 리튬도 핵융합에서는 활용 가능해 서로 시너지 효과가 있을 것으로 기대
- 증식블랑켓 재료 선택에 따라 실증로 이후 고온의 증식블랑켓 운전이 가능할 경우 핵융합 BoP와 연계해 수전해 생산에 적용 가능할 것으로 예상

□ 세부기술

- 증식블랑켓 기술개발 및 제작을 위해 관련 코드를 개발^①하고, 개발된 코드를 활용한 설계 및 제작·검증 기술개발^② 및 단위공정 적용을 위한 계통기술 개발^③ 단계로 진행

< 세부기술 분류 >

① 설계/안전해석 체계 구축기술

- 실증로 핵심부품인 증식블랑켓 설계와 안전해석을 위한 코드개발 및 검증, 효율적인 코드 간 연계 및 종합관리를 위한 통합체계 구축
 - (설계코드 개발 및 통합체계 구축) 단일·복합하중 해석을 위한 설계코드 개발 및 인터페이스 관리를 위한 통합체계 구축
 - (계통·안전 해석 코드 개발) 실증로 안전을 증명할 수 있는 고유의 모델링 및 코드 개발·검증

② 설계 및 제작·검증 기술

- 실증로급 증식블랑켓 제작에서부터 성능평가, 교체·유지보수 등 제반 기술개발
 - (제작기술 개발) 산업기술 기분에 부합하는 블랑켓 제작공정 도출
 - (건전성·성능평가기술 개발) 소형·대형 목업 제작 및 건전성·성능 평가
 - (유지보수 기술 개발) 대형·대량의 블랑켓 모듈의 정밀·신속한 원격교체를 위한 조립·해체·원격제어 기술 개발

③ 계통기술

- 증식블랑켓에서 생산된 대량의 연료추출 시스템 및 관련 핵심기기, 고열을 냉각해 전기로 변환하기 위한 냉각시스템 및 관련 핵심기기 개발
 - (연료추출 기술개발) 블랑켓 연료추출 계통을 위한 공정관련 시스템 및 핵심기기 개발
 - (블랑켓 냉각기술 개발) 블랑켓에서 변환된 열에너지를 추출하여 동력변환 계통까지 전달하고, 내부 운전온도를 냉각하기 위한 기술개발
 - (계통운전기술 개발) 높은 가동률로 안전하기 운전하기 위한 기술개발
-

II

국내외 현황

가

기술 동향

- ▶ 해외 주요 국가는 ITER TBM 이후, 실증로 증식블랑켓 개발 및 국산화를 위해 다양한 연구개발을 추진 중이나, 한국은 ITER TBM 수준의 기술개발 추진 중

□ 국외

- (주요국) 핵융합 실증로 증식블랑켓 기술수준 향상 및 경험 축적 등 기술확보를 위해 단위공정 관련 다양한 연구개발 추진 중

< 국외 증식블랑켓 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
설계·안전 해석기술	<p>▶ 증식블랑켓의 다물리 특성을 반영한 설계코드 및 통합체계 구축 추진(US, EU)</p> <p>▶ 설계를 위한 CAD 기반 Super MC 코드 개발 및 사용자 확보를 위한 오픈소스 배포(CN)</p> <p>▶ MELCOR 개발을 통해 ITER 안전해석을 위한 품질보증(QA) 획득(US)</p> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 증식블랑켓의 국산화를 위한 자체 설계 코드 개발 추진 중</p>
설계 및 제작·검증 기술	<p>▶ 증식블랑켓 제작공정 확립 및 접합기술 등 다양한 제작기술 검토(EU)</p> <p>▶ TBM 건전성 평가를 위한 고열부하 시험, 열수력 구조안전성 평가, 중성자 증배재 반응성 시험, 냉각수 구조재 부식시험이 가능한 종합시험시설 구축 추진(JP)</p> <p>▶ 고열부하 및 전자기력을 동시에 모의·부하할 수 있는 장비 개발(UK)</p> <p>▶ 다양한 원격유지보수 장치 개발(UK) 및 기술개발을 위한 공동연구 추진(CN, EU)</p> <p>⇒ (주요이슈) 실증로 환경하 증식블랑켓의 종합적 평가를 위한 시험시설 구축 중</p>
계통 기술	<p>▶ 실증로 적용 가능한 단위 공정 다양한 연구개발을 추진 중이며, 실험실 규모 연료추출계통 기기 시제품 제작 및 삼중수소 활용 공정평가 진행(EU, JP)</p> <p>▶ 실증로 적용을 위한 냉각계통 루프 제시 및 성능 향상 기술 연구개발 추진 중(EU)</p> <p>▶ 신뢰도·가동률 평가를 위한 연구개발 추진 중이나 실증로 적용을 위한 데이터 베이스 구축 한계(EU)</p> <p>⇒ (주요이슈) 단위공정 기술개발이 진행 중이나, 실증로 증식블랑켓 계통기술(연료추출, 냉각, 계통운전 등) 확보를 위한 다양한 데이터 확보 요구</p>

- **(ITER)** ITER 플라즈마 특성에 따라 설계·안전해석 및 소재·계통기술 등 개발된 TBM 핵심기술을 핵융합 환경에서 실증
 - ITER TBM과 그 시스템에 대한 기존 코드로의 설계, 개량된 안전해석코드 사용과 검증이 진행되고 있으며, 개발·사용된 코드는 ITER 설계·인허가 문서에 사용에 따른 신뢰성 확보를 기반으로 국내 인허가 체계 개발·대응에 활용 가능
 - 프랑스 인허가 및 기술기준에 따른 제작법 개발과 제작 경험, 실제 ITER 환경에서의 운영 경험을 통한 건전성·성능 검증이 가능
 - ITER TBM에 필요한 수준의 냉각·정제·연료추출 공정 및 기기가 개발되어 ITER에서 운영·검증 예정
 - ITER 핵융합 환경에서 증식블랑켓 타당성 및 핵심기술 검증, 안전·인허가 기술 및 경험 확보 가능할 것으로 기대
- **(인프라 현황)** 증식블랑켓 종합 성능검증 관련 연구시설을 구축 중(일본, 영국)이나, 증식블랑켓의 계통기술(삼중수소 추출, 냉각, 계통운전 등) 확보를 위한 연구시설 부재

< 국외 인프라 구축 현황 >

세부시설	세부내용
중성자 생산시설	<ul style="list-style-type: none"> • EU는 약 1조원을 투자하여 스페인 그라나다에 IFMIF-DONES 구축 중('30년 운영목표) • 일본은 약 1조원을 투자하여 룩카쇼에 A-FNS 구축 중('31년 완공목표) • 중국은 '15년 HINEG-I을 개발완료하고, 현재 HINEG-II 공학설계 진행중이며,, 2031년까지 10억달러 투자하여 HINEG-III를 단계적으로 완공예정 • 미국 DOE에서는 핵융합 재료 연구를 위한 중성자선원에 대한 RFI 공고 ('23.5)
증식 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> • 미국 일본 등에서 시설구축 기획단계에 있으며, 구축 사례 부재
증식블랑켓 안전성 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 일본은 룩카쇼에 TBM 및 증식블랑켓의 안전실증을 위한 장치를 구축 중 • 영국은 증식블랑켓 및 디버터 고열부하 및 전자기설 성능평가 시험을 위해 CHIMERA 건설 중

□ 국내

- **(주요성과)** ITER TBM 사업을 통해 코드 개발·검증 및 성능평가 수행
 - ITER TBM 개발을 통해 연료이송해석 코드 THETA-FR 및 안전해석 코드 GAMMA-FR 개발·검증 진행
 - ITER TBM 서브모듈 규모의 제작기술 확보 및 성능평가 수행
 - ITER TBM 운전시나리오(펄스운전) 및 규모 계통 공정 개발 및 기기의 평가 진행

< 국내 증식블랑켓 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
설계·안전 해석기술	▶ 원자력 및 방사선 분야 코드 일부 활용 및 원자력(연) 고온가스로용 안전해석코드 (GAMMA+)의 핵융합용 코드(GAMMA-FR)로 개량 추진 ⇒ (주요이슈) 실증로 증식블랑켓 안전해석코드 기반은 확보되었지만, 다양하고 복잡한 현상을 반영한 핵융합 코드 부재 ⇒ (주요이슈) 개발된 실증로 증식블랑켓 코드 검증시설 부재
제작·검증 기술	▶ ITER TBM 세부모듈 단위 제작 및 원자력(연) 고열부하 시험시설 활용 준비 중 ⇒ (주요이슈) 실증로급 증식블랑켓 제작기술 개발 요구 ⇒ (주요이슈) 제작된 증식블랑켓의 종합적인 성능검증을 위한 연구시설 부재 ▶ 원격유지보수 관련 기술개발 전략 수립을 위한 기획연구 착수 ⇒ (주요이슈) 증식블랑켓 원격 유지보수 기술 개발 경험 부재
계통 기술	▶ ITER TBM 삼중수소추출시스템을 위한 단위 공정(펄스운전 수준)을 개발 중 ⇒ (주요이슈) 실증로 증식블랑켓 개발을 위한 (준)연속운전 및 연료 추출 연구개발 요구 ⇒ (주요이슈) 삼중수소 추출을 위한 삼중수소 생산시설 및 취급 경험 부재 ▶ ITER TBM 헬륨냉각시스템 개발 중 ⇒ (주요이슈) 실증로는 TBM 대비 열출력 100배 이상 제거를 위한 냉각시스템 소요 ▶ ITER TBM 요구 수준에서 계통운전기술 일부 연구개발 추진 중 ⇒ (주요이슈) 가동률 및 안전성 평가를 위한 기기/계통별 데이터베이스 요구

< 국내 증식블랑켓 연구개발 인력 현황 >

기관 분류		주요 연구내용(성과)	연구인력 ('23.7 기준)
연구 원	핵융합(연)	• ITER TBM 개발을 통해 연료이송해석 코드 THETA-FR 개발 및 검증 진행 • ITER TBM 개발을 통해 GAMMA-FR 검증 진행 • ITER TBM 개발을 통해 TBM 서브모듈 일차벽 제작기술 개발 • ITER TBM 개발을 통해 연료추출 및 냉각계통 공정개발·기기 평가 진행	13명
	원자력(연)	• 고온가스로용 안전해석 코드로 개발한 GAMMA+를 핵융합 환경에 사용할 수 있도록 GAMMA-FR 코드로 개량 및 검증 진행 • ITER TBM 개발을 통해 TBM 서브모듈 일차벽 제작기술 개발 • ITER TBM 개발을 통해 냉각계통 공정개발·기기 평가 진행	7명

○ (인프라 현황) ITER TBM 연구수행을 위한 중소형급 연구 및 시험장치 구축 운영

- ITER 일차벽 조달 및 ITER TBM 개발을 통해 중소형 목업의 성능·수명 평가를 위한 고열부하 시험장치(KoHLT-EB) 구축 및 운용
- ITER TBM 개발을 통해 계통공정 평가 및 중소형 기기 성능 평가를 위한 고온고압헬륨루프(HeSS), 연료추출계통 공정장치(PGLoop) 구축 및 운용
- 핵융합선도센터 사업을 통한 이온조사시험시설(KAHIF) 개량 및 시험기술 개발, DB 구축, 원자력사업과 연계한 중형급 중성자 발생장치 구축

< 국내 증식블랑켓 연구개발 관련 인프라 현황 >

세부시설	국내
중성자 생산시설	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력(연) 하나로 연구로 • 원자력(연) 정읍 첨단방사선연구소 30MeV 싸이클로트론 기반 중성자 발생 장치 (4개의 포트 중 1개를 중성자발생용으로 개발 중, 23.12 완료) • 경주양성자가속기(KOMAC) • 중성자가속기(RAON) • 원자력(연) 재료전용 이온조사시험시설 (KAHIF)
증식블랑켓 안전성 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 종합시험시설은 부재하나, 개별 고열부하시험시설(KoHLT-EB), 고온고압 헬륨시험장비(HeSS), 연료계통평가장비(PGLoop) 등 운영 중
핵반응/차폐 데이터 검증실험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 미래원자력기술장비구축사업을 통해 DD 선원(필요시 30MeV 가속기 기반 중성자원)을 활용한 차폐설계검증실험 기초 연구가 진행 중

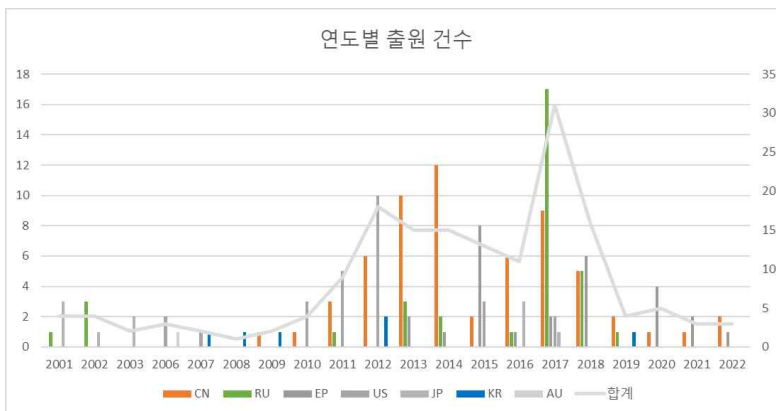
나

특허 · 논문 분석

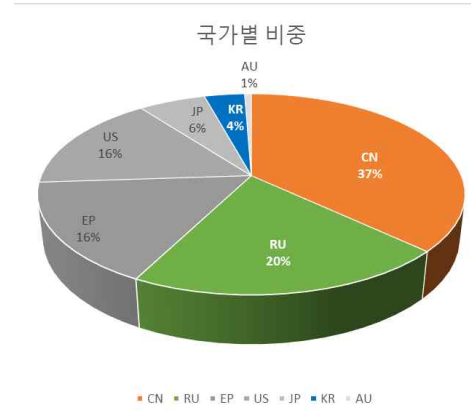
- ▶ (특허분석) ITER 조달품목 개발에 따라 중국, 러시아 중심 출원되고 있는 분야이나, 현재까지 타 핵심기술 분야 대비 특허 활동이 활발하지 않은 분야
- ▶ (논문분석) 중국, 독일을 중심으로 논문이 게재되고 있으며, 한국은 논문 피인용도와 게재건수가 모두 낮은 상황

□ 특허 출원 현황

- (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 165건의 특허가 출원되었으며, 2010년 이후 중국을 중심으로 특허출원량 증가
- (국가별 비중) 중국이 가장 많은 61건(37%)을 출원하였으며, 다음으로 러시아 34건(20%), 유럽 37건(16%), 미국 26건(16%) 순이며, 우리나라는 총 6건(4%) 출원



< 그림. 연도별 출원 건수 >



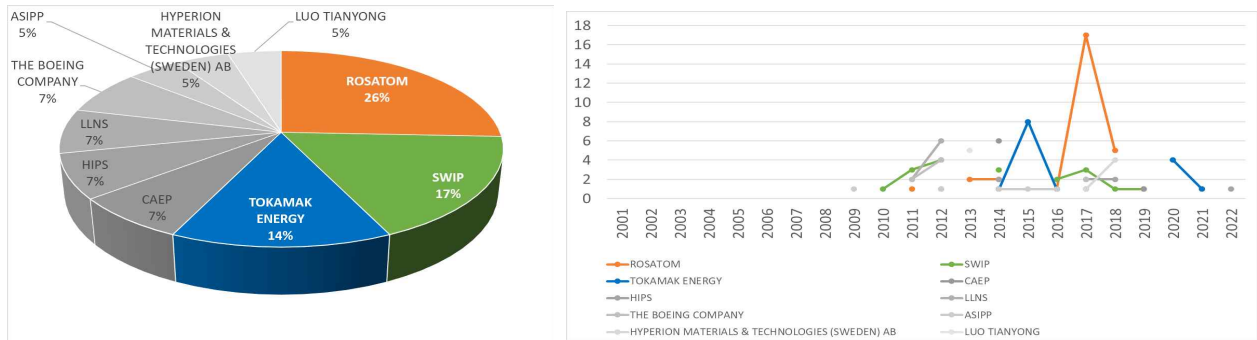
< 그림. 국가별 비중 >

- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 일본의 경우 자국 특허청 중심의 출원을 진행 중이며, 러시아, 유럽, 미국의 경우 세계 주요 국가 특허청에 동시 출원

< 표. 국가별-특허청별 출원 현황 >

구분	중국 특허청	러시아 특허청	유럽 특허청	미국 특허청	일본 특허청	한국 특허청	WIPO	기타	총합계
CN	98%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
RU	12%	35%	12%	15%	6%	12%	9%	0%	100%
EP	11%	7%	15%	11%	4%	11%	19%	22%	100%
US	4%	4%	19%	46%	12%	4%	8%	4%	100%
JP	0%	0%	0%	0%	90%	10%	0%	0%	100%
KR	0%	0%	0%	17%	0%	83%	0%	0%	100%
AU	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

- (주요 출원인 Top 10) ROSATOM(러)이 가장 많은 28건(26%)의 특허를 출원하였으며, 다음으로 SWIP(중) 19건(17%), TOKAMAK ENERGY(영) 15건(14%) 출원 진행
- ROSATOM(러), SWIP(중)의 경우, ITER 블랑켓 일차벽 등 조달품목 개발에 따라 2015~2017년 특허 출원건 수가 크게 증가한 것을 확인

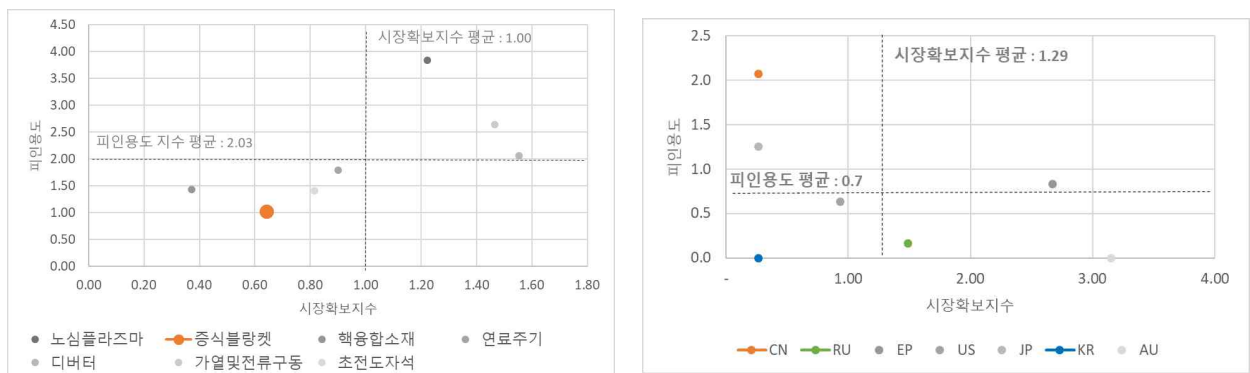


< 그림. 주요 출원인 Top 10 출원 비중 > < 그림. 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

- (특허경쟁력) 증식블랑켓 분야의 경우 핵심기술 분야 중 피인용도와 시장확보 지수가 낮은 분야로, 타 분야 대비 상대적으로 특허활동이 활발하지는 않은 분야

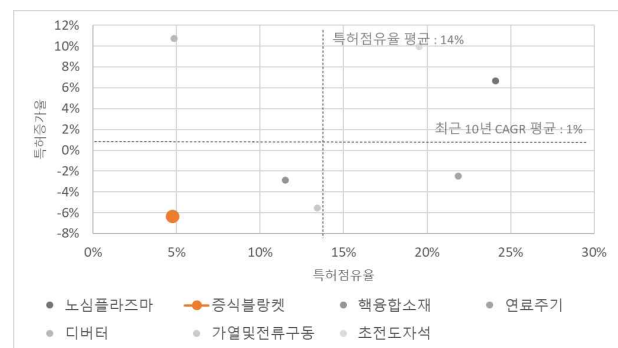
- 국가별로도 피인용도와 시장확보지수가 월등히 높은 국가(1사분면)는 없는 것으로 파악

※ 중국의 경우 자국 문헌의 인용을 통해 피인용도가 상대적으로 타 국가대비 높은 경향을 보임



< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) > < 그림. 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

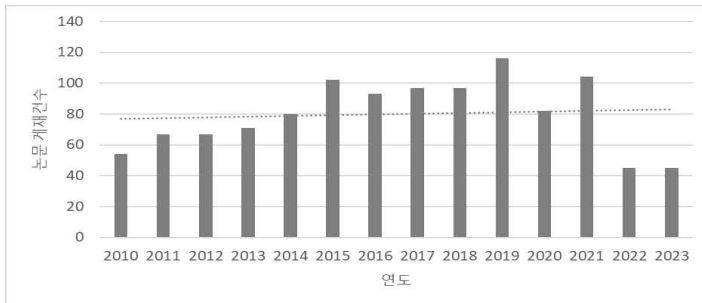
- (특허유망성) 증식블랑켓 분야는 특허 점유율(핵심기술중 7위)이 낮고, 최근 10년간 특허성장률이 낮은 분야(3사분면)에 위치하고 있으며, 타 기술분야 대비 특허활동이 활발하지 않은 분야로 판단



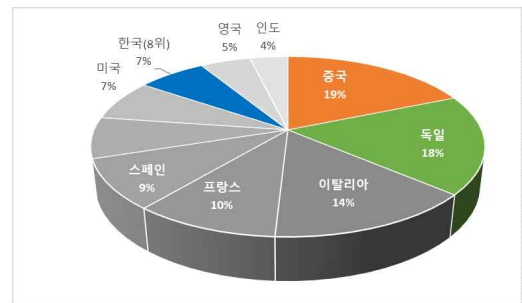
< 그림. 특허점유율 - 특허증가율 >

□ 논문게재 현황

- (연도별 게재 건수) 증식블랑켓 분야는 지난 14년간 총 1,120건의 논문이 게재되었으며, 과거부터 꾸준히 증가하다가 최근 감소추세(연평균 성장률 -2%)

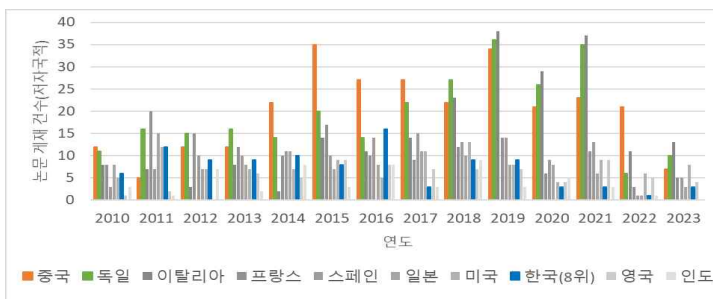


< 그림. 연도별 게재 건수 >

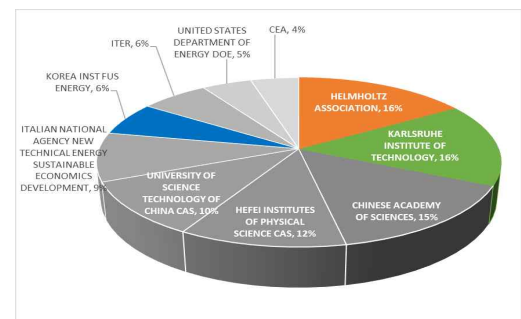


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 중국(280건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 중국에서 가장 많은 논문이 발표되었으나, 최근 2019년 이후 독일에서 많은 논문이 게재된 것을 확인. 한국은 게재 건수 8위(101건)

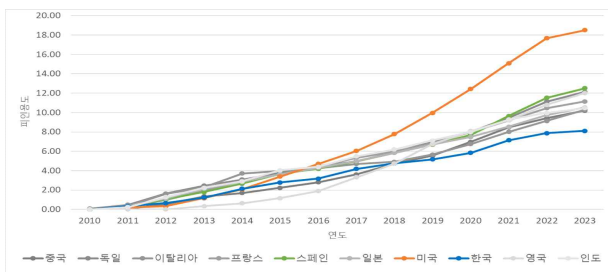


< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >

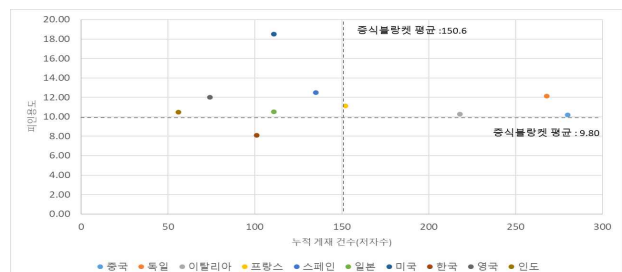


< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 HELMHOLTZ(독일)에서 가장 많은 212건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 KARLSRUHE(독일, 208건), CAS(중국, 196건) 비중이 높고, 한국의 KFE는 7위(84건)
- (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 미국이며 타 국가대비 피인용도가 크게 높고, 독일, 중국, 이탈리아, 프랑스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 낮은 3사분면에 위치(Top 10개국 중 피인용도 최하위)



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >



< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

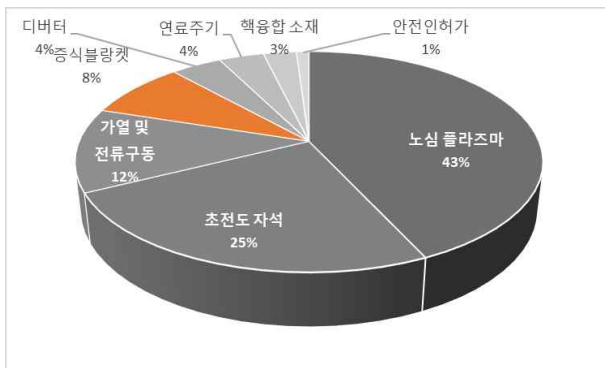
다

R&D 투자 현황

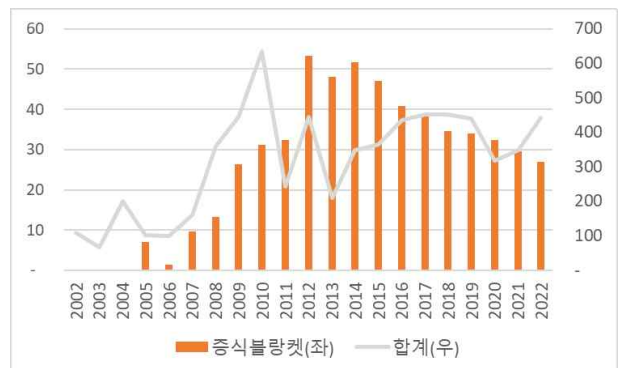
- ▶ 증식블랑켓 연구는 558억원이 투입(8대 핵심기술 전체금액 중 8%, 4위)되었으며, ITER TBM 설계 및 기술개발(ITER TBM 사업)을 중심으로 기술개발 진행 중

□ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 증식블랑켓은 558억원(8%, 8대 핵심기술 중 4위)이 투자된 것으로 파악
- (연도별 투자현황) ITER TBM 개발과 더불어 2010년대 중반까지 지속적으로 증가하였으나, 2014년 이후 점차 감소
- 국내 증식블랑켓 기술개발은 ITER TBM 사업을 중심으로, 일부 선도연구센터지원 및 기초연구사업으로 연구개발 추진 중이며, ITER TBM 사업비 감소로 인해 2010년대 중반 이후 감소

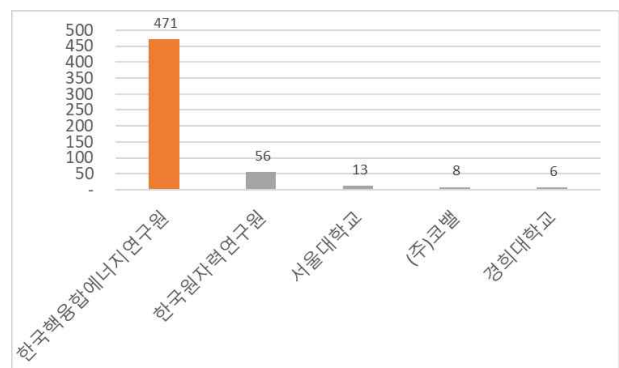


< 그림. 8대 핵심기술 비중 >



< 그림. 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) ITER TBM 사업을 주도하고 있는 핵융합(연)과 원자력(연)이 대부분의 연구비 사용(전체 94%)
- 이외 서울대, 경희대, 전북대에서 선도연구센터지원 사업을 통해 설계·안전해석기술 개발 중
- (주)코벨은 유일한 산업체 주관기관으로, 2019년부터 ITER TBM 헬륨냉각시스템 고온고압 벨브 개발(중소벤처기업부-중소기업 상용화 기술개발사업) 추진 중

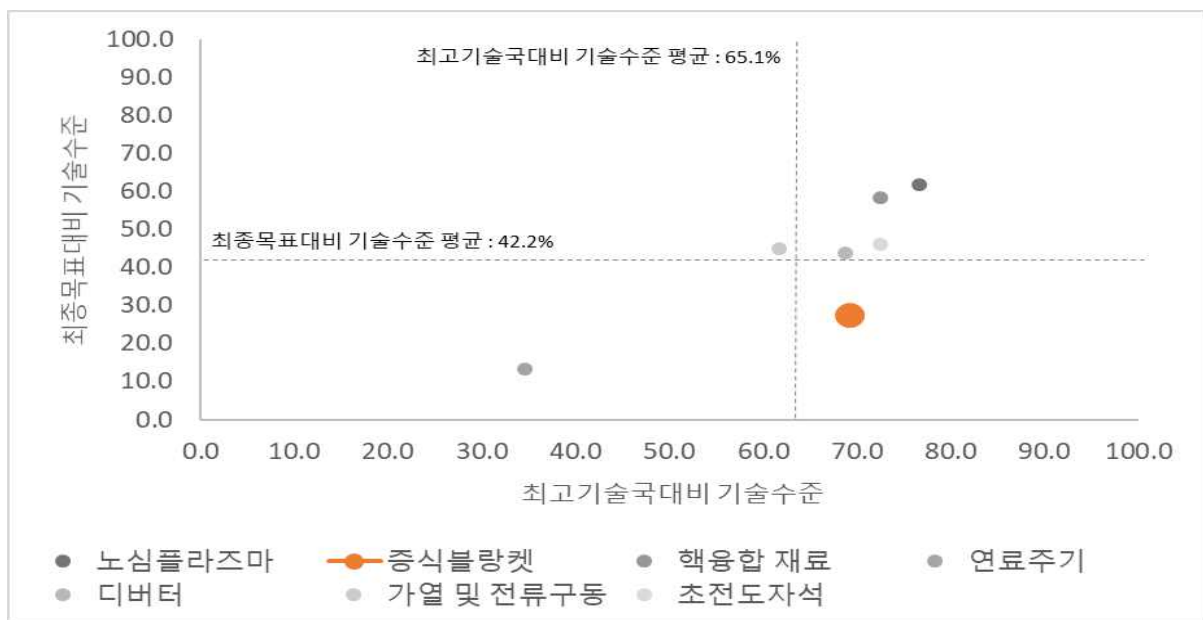


< 그림. 주요 연구기관 >

- ▶ 최종목표 대비 한국 기술수준(27.5%)은 낮으나, 최고기술국(EU) 역시 기술수준(39.6%)이 낮은 분야이며, 세부기술 중 계통 기술의 기술수준이 가장 낮은 상황

□ 실증로 대비 기술수준

- 최고기술국(EU) 대비 기술 수준은 높은 반면, 최종목표(실증로) 대비 기술수준은 낮은 상황
- 증식블랑켓 분야는 최종목표 대비 기술수준이 27.5%이나, 최고기술국(EU) 대비 기술수준은 69.2%
- 실증로 개발을 위해 기술수준 향상이 필요하며, 최고기술국 역시 실증로 대비 기술수준이 낮은 분야



< 그림. 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

□ 세부기술 기술수준

- 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면 설계·안전해석 기술 32.5%, 제작·검증 기술 30%, 계통기술 20% 수준
- 현재 ITER TBM을 중심으로 기술개발이 진행됨에 따라, 설계·안전해석 기술, 제작·검증 기술*을 추적하고 있으나, 계통기술은 다양한 후보공정 경험, 삼중수소 취급 경험이 타 국가 대비 상대적으로 취약한 분야

* ITER TBM 프로그램을 통해, TBM 개념설계 및 예비안전분석보고서 승인, TBM 목업 제작 등을 통해 최종목표대비, 최고기술국대비 격차를 줄여가고 있는 상황

< 표. 증식블랑켓 기술수준 분석결과 >

핵심기술	최고기술국	최종목표 대비 최고기술국 기술수준	최종목표 대비 한국 기술수준	최고기술국(100%) 대비 한국 기술수준
설계·안전해석 기술	EU	40.6	32.5	80.0
제작·검증기술	EU	46.2	30.0	65.0
계통 기술	EU	32.0	20.0	62.5
증식블랑켓	EU	39.6	27.5	69.2

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

□ ITER를 통한 확보 기술수준 및 한계점

- (ITER를 통한 기술확보) 펄스운전되는 ITER 환경(중성자속 0.78 MW/m², 열속 0.3MW/m², 1~3dpa 재료손상)에서의 소형 증식블랑켓 기술 실증, 관련 인허가 자료 확보
- (실증로 기술대비 한계점) 전기생산을 목표로 (준)연속으로 장기 운전이 되는 실증로 환경에서 연료자급 및 전기생산을 위한 열에너지 추출을 위한 공학적 방안 실증 및 검증 필요

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

세부기술	ITER 통해서 확보 가능한 기술	실증로 기술대비 한계점
설계·안전해석 체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> • ITER TBM과 그 시스템에 대한 기존 코드로의 설계, 개량된 안전해석코드 사용과 검증 • 개발 코드의 ITER 인허가 사용으로 신뢰성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 타분야(원자력, 방사선 등) 해석체계 및 코드는 복합적인 형상을 가진 핵융합 분야 적용시 한계가 존재하며, ITER TBM 계통·안전해석 코드는 ITER 운전조건 및 시설에 국한되어 개발됨에 따라, 실증로나 핵융합로 적용을 위한 기술 개발 필요
제작·검증기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 프랑스 인허가 및 기술기준에 따른 제작법 개발과 제작 경험 • 실제 ITER 환경에서의 운영 경험을 통한 건정성/성능 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • TBM 수준의 모듈형 제작기술 경험만 보유하고 있으며, 실증로급 제작기술로의 확장 필요
계통기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • ITER TBM에 필요한 수준의 냉각/정제 기술, 부품이 개발되어 ITER에서 운영/검증 예정 	<ul style="list-style-type: none"> • ITER TBM 단위공정 수준 및 규모의 연구개발을 진행 중인 상황으로서, (준)연속 및 대규모 공정의 실증로급 적용을 위한 연구개발 수행 필요

Ⅲ

세부기술 현황

가

설계·안전해석 체계구축

□ 정의

- 증식블랑켓 설계와 안전해석을 위한 코드를 개발하고, 설계 업무의 효율적·체계적 수행을 위해 개발·검증된 코드 간 연계 및 종합관리체계 구축

세세부기술	기술개요
설계코드 개발 및 통합체계 구축	• 증식블랑켓 설계를 위해서 모델링, 핵, 열수력, 구조, 전자기 등 단일·복합하중 해석을 위한 설계 코드 개발 및 검증 • 코드 관리, 코드 간 연계성 강화 및 입력/출력 인터페이스 확립 등 효율적이고 체계적인 설계 업무를 수행하기 위해 통합체계 구축
계통·안전 해석 코드개발	• 정상운전, 유지보수, 사고 시 다양한 안전/인허가 자료 생산을 위한 고유의 모델링 및 코드 개발·검증

□ 기술개발 필요성

- **(핵융합 전략기술)** 핵융합 주요국들이 핵심원천기술 확보를 위해 전략기술로 추진하는 시장성 높은 분야로서, 핵심기술 국산화를 통한 경제성 확보 필요
 - * 설계코드는 제작까지 연계되는 핵심 고부가가치 분야로서, 시장확보 및 기술경쟁력 향상을 위한 핵심 기반 기술
 - ex) 한국 조선업계가 최근 주력하고 있는 액화천연가스(LNG) 운반선의 경우 선박을 건조할 때마다 화물창 관련 원천 설계기술을 보유한 GTT(프랑스)에 막대한 로열티(23년 1분기 900억원) 지급
- **(타분야 코드적용 한계)** 타분야(원자력, 방사선 등) 해석체계 및 코드는 복잡한 형상을 가진 핵융합 분야 적용시 한계가 존재함에 따라, 추가적인 연구개발 필요
 - * 열수력·구조 등의 하중해석은 상업용 코드가 활용되고 있어 추가 개발없이 지속적인 활용 가능하지만, 일부 핵융합 하중 특성 및 고에너지(14MeV) 중성자 해석에 적합한 코드 개발 필요
- **(기존사업 한계)** ITER TBM을 통해 연구개발 중인 계통·안전해석 코드는 ITER 운전조건 및 시설에 국한되어 개발됨에 따라, 실증로나 핵융합로 적용을 위한 기술 개발 필요

□ 국내외 동향

① 설계 코드 개발 및 통합체계 구축

- (국외) 설계 코드 및 통합설계 체계 기술자립화를 위한 모델링 및 코드 개발 중
 - 미국 UCLA, 독일 KIT, 스페인 CIEMAT 등은 블랭킷 설계 시 다물리 특성이 반영된 통합설계체계 구축을 위한 모델링 및 코드 개발 진행 중
 - 중국은 CAD 기반의 SuperMC 코드를 개발하여 자국의 핵융합 연구뿐만 아니라, 타국 코드 사용자의 적극적 확보를 위해 오픈소스 배포 중
 - 모델링, 중성자수송해석, 방사화, 선량분포 평가 및 작업자 피폭선량 평가 상황모사까지 대부분의 핵해석 항목을 통합한 코드체계를 개발하여 사용 중
 - * 모델링틀(MCAM)은 ITER Standard model 생산에 공식적으로 사용 중
- (국내) 핵융합 분야 국내코드가 부재함에 따라, 원자력 분야 해석체계와 해석 틀(전산코드) 활용 중
 - 원자력 분야 해석 틀을 핵융합 분야 사용에 많은 제약사항이 존재함에 따라, 해외 코드를 제한적으로 사용 중
 - * 핵융합은 원자력 분야 대비 장치/시설의 넓은 영역까지 평가가 필요하고, 비대칭의 매우 복잡한 형상 보유
 - 열수력 · 구조 · 전자기 등의 하중해석은 상업용 코드 활용 중

② 계통 · 안전해석 코드 개발

- (국외) 미국 · EU · 중국은 ITER 기술 기반의 코드 개발 및 활용 중에 있으며, 일본은 원자력발전소용 코드의 ITER 활용 검증 진행 중
 - 미국에서 개발된 MELCOR는 유일하게 ITER 안전해석을 위한 품질보증(QA)을 획득하는 등 핵융합 분야에서 가장 신뢰도 있는 코드로 자리매김(EU, 중국이 활용 중)
 - * MELCOR는 ITER 예비안전분석보고서 및 사고해석보고서에 활용
 - 일본은 수냉방식의 블랭킷을 개발하고 있어 원자력발전소용 안전해석 코드인 TRAC-PF1를 사용하는 등 ITER 활용을 위한 검증 진행 중
 - EU는 EcosimPro 기반의 연료이송 코드를 개발하고 있으며, TBM 및 EuroFusion 프로그램을 통해 검증할 계획
- (국내) 원자력(연)에서 고온가스로용 안전해석 코드로 개발한 GAMMA+를 핵융합 환경에 사용할 수 있도록 GAMMA-FR 코드로 개량하여 활용 중
 - 삼중수소 이송 코드로는 최근 핵융합(연)에서 동적 연료이송해석이 가능한 THETA-FR 코드 개발에 착수

나

제작·검증기술 개발

□ 정의

- 실증로급 증식블랑켓 제작 기술개발 및 건전성·성능평가, 실증로 가동률 제고를 위한 로봇 기반의 교체·유지보수 등 제반 기술 개발

세세부기술	기술개요
블랑켓 제작기술 개발	• 대형 모듈 혹은 섹터 규모의 실증로 블랑켓 제작을 위한 기술개발 및 산업기술 기준에 부합하는 블랑켓 제작공정 도출
블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발	• 개발된 제작기술의 산업기술기준 부합여부 검증을 위한 소형·대형 목업 제작 및 건전성·성능 평가
블랑켓 유지보수 기술 개발	• 실증로 가동률을 높이기 위해 로봇을 이용하여 대형 블랑켓 세그먼트 또는 대량의 블랑켓 모듈을 정밀·신속하게 원격으로 교체하기 위한 조립·해체·원격제어 기술

□ 기술개발 필요성

- **(원가 절감)** 대형모듈을 생산하는 공정기술 및 산업기술기준 등 국내 산업체 기반 제작기술개발을 통해 블랑켓 제조 원가절감 및 해외시장 확보
 - * 우리나라 산업체는 해외 선진국 수준의 제조역량과 선진국 대비 가격경쟁력을 활용하여, ITER 타국 조달품목 제작 용역 수주 (~'23.5 누적기준, 177건 6,979억원)
- **(산업경쟁력 확보)** 실증로 관련 산업경쟁력 확보를 위해 KSTAR, ITER, 원자력 시설(원자로 및 대형가속기, 방사선발생장치) 등의 산업기술기준 벤치마킹을 통한 핵융합 산업기술기준 정립 필요
 - * 산업기술기준은 제작, 시험, 검사, 운전, 유지보수 등을 정립하는 것으로서, 기술자립과 국제경쟁력 확보에 필수
- **(경제성 제고)** 주기적인 교체가 필요한 블랑켓 유지보수 분야는 가동률과 직결되는 부분으로서, 실증로 경제성 제고를 위해 신속·정확한 원격유지보수 기술 필요
 - * 과도한 고에너지 중성자가 조사됨에 따라, 재료물성이 저하되기 이전에 실증로 블랑켓 교체 필요

□ 국내외 동향

① 블랑켓 제작기술 개발

- (국외) EU는 정밀 가공 공정을 확립하였으며, 독일은 다양한 방식의 제작 기술을 검토 중
 - EU는 블랑켓 일차벽 제작과 관련하여 국내와 동일한 방식(레이저 용접 + HIP 접합)의 제작 기술을 검토 중
 - 또한, 블랑켓 냉각관의 유로 가공을 위해 방전 가공을 활용한 정밀 가공 공정을 확립하였으며, 실증로 적용 검토 중
 - 독일 KIT는 실증로 블랑켓 제작을 위해 Metal Powder Application 및 Cold Spraying 방식과 Hot Isostatic Pressing 접합을 결합한 방식 등 다양한 방식의 제작기술 검토 중
- (국내) 핵융합(연)과 원자력(연)을 통해 제작 및 영향평가 관련 기초연구 수행 중
 - 핵융합(연)과 원자력(연)에서 ITER TBM Sub-module 규모의 블랑켓 일차벽 제작기술 개발 수행
 - 핵융합(연)에서는 프랑스 산업기술기준인 RCC-MRx에 부합하기 위해 레이저 용접과 HIP 접합을 적용해 Backing Strip을 제거할 수 있는 소형 일차벽 제작 기술을 개발 중
 - * 대형 블랑켓의 대량 생산을 위한 새로운 제작 기술과 연료 생산을 위한 증식유닛 제작기술 개발이 필요한 상황
 - 핵융합(연)에서 제작한 TBM 일차벽 소형 목업에 대해 원자력(연)의 고열부하 시험 장치(KoHLT-EB)를 이용한 고열부하 시험을 준비 중
 - * 이를 통해 용접부가 일차벽의 구조 건전성에 미치는 영향 평가 예정

② 블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발

- (국외) 일본과 영국에서 관련 시설 및 장비를 구축하여 운영 중
 - 일본의 QST는 TBM의 건전성 평가를 위해 고열부하 시험, 열수력 구조안전성 평가, 중성자 증배재 반응성 시험, 냉각수에 의한 구조재 부식 시험을 수행할 수 있는 종합시험시설 구축
 - 영국의 UKAEA는 고열부하와 전자기력을 동시에 모의·부하 가능한 장비 개발(CHIMERA)
 - * 시험 가능한 최대 컴포넌트 사이즈 : TBM ~1.7m x 0.6m x 1.0m 정도
 - * 고열부하 시험의 경우 0.5~1.0 MW/m², 정적 자기장 시험의 경우 4 Tesla (peak field)가 모의 가능하며 관련 평가 기술 개발 중

- (국내) ITER 일차벽 조달시 성능평가 경험을 보유하고 있으며, KSTAR 성능향상을 통해 성능 및 수명 평가 기술 보유 중
 - 원자력(연)의 고열부하 시험 장치(KoHLT-EB)를 이용해, ITER 일차벽 조달시의 부품 수명 및 성능평가 수행 경험 보유
 - 최근 KSTAR 디버터 업그레이드를 위해 산업체 제작 부품의 접합부위 건전성, 성능평가를 진행하는 등 대면부품으로서의 성능 및 수명 평가 기술 보유 중

③ 블랑켓 유지보수 기술 개발

- (국외) 영국은 다양한 원격 유지보수 장치를 개발중이며, 중국은 프랑스와 국제 공동과제를 통해 연구개발 중
 - 영국의 UKAEA RACE팀은 JET, ITER, DEMO 등을 위한 다양한 원격 유지보수 장치를 개발 중
 - * 특히 ITER 국제기구와 함께 ITER 내벽부품 교체 및 유지보수 관련 기술을 개발하고 있지만, 실증로를 위한 기술과는 큰 격차가 존재하는 것으로 평가
 - 중국은 프랑스 WEST 팀과 국제공동연구를 통해 자국의 실증로 블랑켓 유지보수 개념도출 연구를 진행중이며, EAST 토카막 원격진단을 위한 로봇 암 도입
- (국내) 핵융합(연)은 '22년부터 관련 기술개발 전략 수립을 위한 기획연구 진행 중
 - * 실증로 개념 연구를 통해 블랑켓 세그먼트를 수직으로 교체하는 개념을 제안하였지만 관련된 구체적인 기술 개발 미수행

□ 정의

- 증식블랑켓에서 생산된 대량의 연료 추출 시스템 및 관련 핵심기기, 고열을 냉각해 전기로 변환하기 위한 냉각시스템 및 관련 핵심기기 개발

세세부기술	기술개요
연료추출 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> • 블랑켓 연료추출 계통*을 위한 공정 관련 공정시스템 및 핵심기기 개발 * 증식재에서 생산된 연료를 추출하고, 삼중수소플랜트에서 요구하는 화학적 형태로 이송
블랑켓 냉각 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 블랑켓에서 변환된 열에너지를 추출하여 동력변환 계통까지 전달하고, 블랑켓 내부를 운전온도로 냉각하기 위한 공정 관련 공정시스템 및 핵심기기 개발
블랑켓 계통 운전기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 블랑켓 운전 시 발생가능한 비정상 상황에서의 안전성 확보, 블랑켓 본체 및 계통 보호 기술 개발

□ 기술개발 필요성

- ((준)연속운전 구현) 실증로의 (준)연속 운전을 위해 증식블랑켓에서 생산된 연료를 추출하여 재사용함으로써 안정적 연료 자급 실현
- (기존사업 한계) ITER TBM 단위공정 수준 및 규모의 연구개발을 진행 중인 상황으로서, 실증로급 적용을 위한 연구개발 수행 필요
 - * ITER 수준(1kg/s급) 대비 실증로에서는 약 300°C 의 고온 헬륨이 루프(약 10개) 당 100 kg/s으로 순환
 - * 실증로에서는 TBM 대비 루프 당 열출력 100배 이상 제거가 필요함에 따라, 실증로급 적용을 위한 냉각 공정관련 시스템 및 핵심기기 필요
- (경제성 및 가동률 제고) 핵심부품의 사용기간 및 블랑켓 가동률 제고를 통한 비용 절감 등을 위해 블랑켓의 안전운전과 관련된 블랑켓 및 계통 보호기술 확보 필요
 - * 유지보수가 발생 건수가 증가할수록 가동률이 낮아짐에 따라, 안전성 확보 및 내벽부품 내구연한 제고는 경제성 등과 밀접하게 연계

□ 국내외 동향

① 연료추출 기술개발

- (국외) 실증로 적용을 위한 단위공정을 개발 중이며, 연료추출계통 기기 시제품 제작 등 기술확보를 위한 연구개발 가속화 중
 - EU 및 일본을 중심으로 Zeolite 멤브레인 방식의 확산기, 전기화학적 수소 펌프 등 실험실 규모의 연료추출계통 기기 시제품을 제작해 성능을 평가하고 있으며, 최근 중국 역시 관련 연구를 착수하여 빠르게 기술개발을 수행 중
 - 미국, EU 및 일본의 연구소를 중심으로 '70년대부터 다양한 소재의 코팅기술 개발 및 이의 침투특성 평가를 수행한 바 있으며,
 - 특히 일본에서는 Tokyo 대학교, Kyoto 대학교, QST 등에서 Er_2O_3 , Y_2O_3 등의 코팅 개발 및 수소/삼중수소를 이용한 침투평가를 수행
- (국내) ITER TBM 단위공정 수준의 연구개발을 진행 중
 - 핵융합(연)에서 ITER 펄스 운전에 적합한 ITER TBM 삼중수소추출시스템 관련 단위공정 개발이 진행
 - 핵융합(연)에서 ITER TBM 적용 용량의 극저온분자체 제작 및 극저온흡착 성능 DB를 성공적으로 구축한 바 있으며, 현재는 소형 상온분자체 수분 흡탈착 실험 수행 중
 - 핵융합(연) 및 단국대에서 침투실험을 위한 장비구축하여 구조재 실험경험을 보유하고 있으며, 침투방지코팅을 위한 기술개발은 원자력(연), 홍익대 등에서 원형 디스크에 대한 Allumina 코팅 적용 등 기초적인 수준에서 수행

② 블랭킷 냉각 기술 개발

- (국외) EU와 일본을 중심으로 냉각 성능 향상을 위한 연구개발이 진행 중
 - EU는 최근 실증로를 위한 출력 6 MW 이하의 순환기를 적용한 냉각계통 루프를 제시하고 고압 헬륨루프를 이용한 냉각성능 향상기술 연구를 병행
 - 일본은 수냉각 방식의 블랭킷 개발을 목표로 연구개발을 진행함에 따라, 경수로 기술을 적용할 예정
 - EU의 Ateko사에서 소형, 중형급(10kg/s급, 15MW) 헬륨 순환기 개발에 성공

○ (국내) ITER TBM을 기반으로 헬륨냉각시스템 개발 중

- 핵융합(연) 및 원자력(연)이 ITER TBM 헬륨냉각시스템을 개발하고 있으며 TBM 규모의 냉각 공정에 대한 경험, 인프라 등 확보 중
- TBM 규모의 냉각제 정제를 위해 일부 단위 공정 기술 개발 착수
- 국내 산업체에서 1 kg/s 급 유량 순환이 가능한 상온 고압(8 MPa)용 헬륨 순환기 개발에 성공하여 ITER TBM에 적용 가능성을 평가 중
- 핵융합(연)에서 냉각제 정제를 위한 Q₂O 흡착베드 성능평가 수행 중

③ 블랭킷 계통 운전 기술 개발

○ (국외) 신뢰도·가동률 평가를 위한 연구개발을 수행하였지만, 실증로급에서의 적용을 위한 연구개발 추진에 한계 봉착

- EU 등은 신뢰도·가동률 평가를 위해 지난 30여년 간 노력해 왔으나, 신기술* 적용 및 적절한 평가를 위한 환경확보 등의 어려움으로 데이터베이스 구축에 한계 봉착
- * 고온등방가압(Hot Isostatic Pressing) 접합, 확산 접합, 이중용기 접합 등 다양한 신기술이 적용 필요
- EU는 TBM 규모의 헬륨 격리밸브 기술을 확보하고 있는 것으로 평가되며 현재 시제품을 이용 다양한 내환경 시험을 수행 중

* 실증로에서는 현재보다 대구경 배관에 대해 보다 고속으로 격리를 위한 밸브 개발 필요

○ (국내) ITER TBM에서 요구되는 수준에서 일부 분야에 대해서 연구개발 진행 중

- 가동률이나 안전성 평가를 위한 기기/계통별 데이터베이스가 필요하지만, ITER TBM에서 요구되는 수준의 가동률 및 안전성 평가가 수행 중
- ITER TBM 과제를 통해 ITER 시나리오에 따른 TBM 안전계통으로서 일부 격리 밸브에 대한 연구만 진행 중
- * 실증로 설계 시 다양한 비정상(사고) 상황에 대비한 시나리오를 개발하고, 이를 통해 사고를 완화/방지 할 수 있는 다양한 안전계통 및 핵심기기 개발이 필요
- 국내 산업체가 80DN급 헬륨 격리밸브 개발을 수행한 바 있으나 내방사성·내자기장·내진·삼중수소 환경 등 내환경 시험을 통한 기술 검증은 미수행

라

증식블랑켓 관련 연구시설

□ 정의

- 증식블랑켓 설계 및 제작기술 확보에 필요한 공학데이터를 확보하고, 제품의 검증 및 테스트를 위한 제반 시설

세부시설	시설 개요	필요성
중성자 생산시설	<ul style="list-style-type: none"> • 증식블랑켓 목업(조사면적~20x20 cm²)에 핵융합과 유사한 중성자 환경을 제공하는 시설 * 중성자속 10¹² n/cm²/s 이상, 에너지 10 MeV 이상을 24시간 이상 유지 	<ul style="list-style-type: none"> • 삼중수소의 생산, 추출, 회수 공정의 연료 시스템을 검증하고 증식유닛의 신뢰성 평가 및 공학데이터 확보에 활용
증식시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> • 중성자생산시설로부터 생산된 고에너지 중성자와 증식블랑켓 목업(증식유닛)을 이용하여 삼중수소 생산, 추출, 회수 및 인벤토리를 검증하고 (준)연속 장기운전에 대한 증식블랑켓 공학데이터를 확보하기 위한 시설 	<ul style="list-style-type: none"> • 증식블랑켓의 핵심기기인 증식유닛을 제작, 핵융합 유사 환경에서의 성능평가를 통해 연료자급이 가능한 증식블랑켓 시스템 구축에 필요한 요구사항 발굴 및 상세화
증식블랑켓 안전성시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> • 증식블랑켓 시스템의 기능(대용량 공정 등) 및 안전성(사고대응 등)을 검증하고, 내환경 건전성 평가를 통한 신뢰도 데이터 확보를 위한 시설 	<ul style="list-style-type: none"> • 소형 목업 뿐만 아니라 증식블랑켓 실사이즈로 제작된 대형 목업의 검증도 가능한 사양의 장비로서, 실증로 증식블랑켓 개발에 필요한 검증연구와 공장인수검사 장비로 활용

□ 국내외 시설구축 사례

- (해외) EU, 일본, 중국 등이 자국 증식블랑켓 연구개발을 목적으로 시설 구축 중
- 중성자 생산시설은 대부분 구축하고 있지만, 증식시험시설은 아직 미구축

세부시설	국외	활용가능 여부 및 사유
중성자 생산시설	<ul style="list-style-type: none"> • EU는 약 1조원을 투자하여 스페인 그라나다에 IFMIF-DONES 구축 중('30년 운영목표) 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 자국 소재에 대한 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상
	<ul style="list-style-type: none"> • 일본은 약 1조원을 투자하여 롯카쇼에 A-FNS 구축 중('31년 완공목표) 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 자국 소재에 대한 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상
	<ul style="list-style-type: none"> • 중국은 '15년 HINEG-I을 개발완료하고, 현재 HINEG-II 공학설계 진행중이며,, 2031년까지 10억달러 투자하여 HINEG-III를 단계적으로 완공예정 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) HINEG-I의 경우 핵자료 측정, 핵해석코드 검증, 동위원소 생산용으로 증식블랑켓 시험 불가능
	<ul style="list-style-type: none"> • 미국 DOE에서는 핵융합 재료 연구를 위한 중성자선원에 대한 RFI 공고 ('23.5) 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 개념 기획 단계로서, 현재시점에서 활용가능여부 판단 불가
증식 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> • 구축 사례 없음 * 미국,일본 등 시설구축 기획단계 	-
증식블랑켓 안전성 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 일본은 롯카쇼에 TBM 및 증식블랑켓의 안전실증을 위한 장치를 구축 중 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 자국 시험 우선 예상되며, 특히 일본은 수냉각 방식의 TBM/증식블랑켓 개발에 집중하고 있어 시험에 제약 예상

- (국내) ITER TBM 연구를 위해 원자력(연)의 하나로 시설을 활용하였지만, 빈번한 고장 및 시설의 낮은 사양으로 인해 추가 사용 한계
- 또한, 원자력(연)의 재료전용 이온조사시험시설과 구축 중인 중성자 발생장치는 일부 선행연구장치로서 활용이 가능하나, 중장기적 관점에서 활용 상 한계 존재

세부시설	국내	활용가능 여부 및 사유
중성자 생산시설	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력(연) 하나로 연구로 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) 증식블랑켓의 구조재료 조사 DB 구축에 일부 활용 가능 • (한계) 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설이 부재 * 고에너지중성자(14MeV)가 아닌 열중성자 영향과 잦은 정지로 인한 제약으로 추가 사용 제한
	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력(연) 정읍 첨단방사선연구소 30MeV 싸이클로트론 기반 중성자 발생 장치 (4개의 포트 중 1개를 중성자발생용으로 개발 중, 23.12 완료) 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) 중성자생산시설 개발 과정에 해당시설 구축 시의 표적, 차폐 시험 기술 적용 가능 • (한계) 표적 근처 유효 조사위치에서 $\sim 0.1 \text{ MW/m}^2$ NWL 수준으로 선행연구장비로는 사용가능하나, 대면적 조사가 불가능하여 실질적인 조사시험 불가 - 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설 부재
	<ul style="list-style-type: none"> • 경주양성자가속기(KOMAC) 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설이 부재 - 삼중수소/블랑켓 목업 설치·교체/조사후시험을 위한 시설 개선 불가능 * 연속운전 불가능에 따른 중성자 조사 시간 제약, 100 MeV 이상 양성자에 의해 생성되는 중성자 에너지 너무 높음
	<ul style="list-style-type: none"> • 중성자가속기(RAON) 	<ul style="list-style-type: none"> • (불가) 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설 부재 - 핵융합 유사환경 제공 불가(연속운전, 대면적 조사, 중성자속, 삼중수소 설비, 조사후시험시설 등)
	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력(연) 재료전용 이온조사시험 시설 (KAHIF) 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) He/Fe 이온 등을 이용해 핵융합 환경에서의 중성자 조사손상 모의가 가능해 증식블랑켓의 구조재 거동연구에 일부 활용 가능 • (한계) 이온조사시설은 재료의 조사손상 거동을 미시적으로 평가할 수 있는 시설로서 구조재료 DB 구축에 직접적 활용 불가 - 구축될 시설과 연계해 조사거동과 조사손상량 연구 병행 필요
증식시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 구축 사례 없음 	-
증식블랑켓 안전성 시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 종합시험시설은 부재하나, 개별 고열부하시험시설(KoHLT-EB), 고온 고압헬륨시험장비(HeSS) 등 운영 중 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) ITER TBM 및 소형 목업 시험 등 활용
핵반응/차폐 데이터 검증시험시설	<ul style="list-style-type: none"> • 미래원자력기술장비구축사업을 통해 DD 선원(필요시 30MeV 가속기 기반 중성자원)을 활용한 차폐설계검증시험 기초 연구가 진행 중 	<ul style="list-style-type: none"> • (일부가능) 26년 구축 완료 및 그 과정에서의 차폐설계검증 절차 활용 가능