

과제번호

2022R2A1099245

핵융합에너지 핵심기술 개발을 위한 기술분류체계 수립  
기획연구

A Study to establish a classification framework for the  
development of core technology of fusion energy.

연구기관 : 한국핵융합에너지연구원  
연구책임자 : 정 현 경

2023.08.14

과 학 기 술 정 보 통 신 부



## 안 내 문

본 연구보고서에 기재된 내용들은 연구책임자의  
개인적 견해이며 과학기술정보통신부의 공식견  
해가 아님을 알려드립니다.

과학기술정보통신부 장관 이 종 호



# 제 출 문

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀 하

본 보고서를 “ 핵융합 핵심기술 개발을 위한 기술분류체계 수립 기획연구 ”의  
최종보고서로 제출합니다.

2023 . 08 . 14 .

연구기관명 : 한국핵융합에너지연구원

연구책임자 : 정 현 경

연 구 원 : 최 원 재

연 구 원 : 이 은 상

연 구 원 : 도 현 수

연 구 원 : 조 아 라

연 구 원 : 권 순 원



# 요 약 문

|  |   |            |                                  |         |           |
|--|---|------------|----------------------------------|---------|-----------|
| 과제번호   | 2022R2A1099245  | 연구기간       | 2022년 11월 30일 ~<br>2023년 08월 29일 |         |           |
| 과제명  | (한글) 핵융합에너지 핵심기술 개발을 위한 기술분류체계 수립 기획연구<br>(영문) A Study to establish a classification framework for the development of core technology of fusion energy. |            |                                  |         |           |
| 연구책임자<br>(주관연구기관)  | 정 현 경<br>(한국핵융합에너지연구원)  | 참여<br>연구원수 | 총 6명                             | 연구비     | 105,000천원 |
| 요약   |   |            |                                  |         |           |
| <p>o (연구목표) 핵융합 전력생산 실증에 필요한 핵심기술의 체계적 연구개발 추진을 위한 기술분류체계 수립 및 국내 역량 분석</p> <p>o (연구내용) 핵융합 연구개발 현황·역량 분석 및 기술분류 체계 수립</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- (국내외 연구개발 동향) 핵융합에너지 개발 주요 국가는 2050년대 전력생산 실증을 위해 노력 중이며, 최근 해외 민간스타트업을 중심으로 핵융합에너지 전력생산 실증 시기를 단축시키려는 움직임 발생</li> <li>- (기술분류체계도) 핵융합 전력생산 실증로 장치 구성(PBS)를 기반으로 핵심기술 기술트리를 작성하고, 기술확보 수준 분석을 통해 8대 핵심기술*(대분류-중분류-소분류)의 재정의             <ul style="list-style-type: none"> <li>* 8대 핵심기술 : 노심플라즈마, 증식블랑켓, 핵융합 소재, 연료주기, 디버터, 가열 및 전류구동, 초전도 자석, 안전·인허가</li> </ul> </li> <li>- (핵심기술 국내외 기술동향) 핵융합에너지 개발 주요 국가는 핵심기술 확보를 위해, 다양한 개념의 요소기술을 연구 중이며, 개발 기술 검증을 위한 연구시설 장비 구축 추진*             <ul style="list-style-type: none"> <li>* 자국 플라즈마 실험장치를 기반으로 토카막 시스템(노심플라즈마, 가열 및 전류구동, 초전도자석 등) 기술개발의 끊임없는 노력을 추진 중이며, ITER 이후 연료시스템(증식블랑켓, 핵융합 소재, 연료주기, 디버터 등)의 실증로급 기술확보를 위해 중성자원 등 신규 연구시설 구축 추진 중</li> </ul> </li> <li>- (핵심기술별 R&amp;D 역량) 8대 핵심기술 중 노심플라즈마 기술수준이 선진국과 가장 근접한 것으로 분석되었으며, 노심플라즈마의 연구인력이 가장 많은 것으로 분석</li> <li>- (핵심기술별 주요 이슈 등 리스크 분석) 실증로급 핵융합 환경에 대한 기술경험 부족이 주된 리스크로 분석되었으며, 이와 더불어 장기적으로 인력수급, 산업체 육성 불확실성에 대한 리스크가 핵심기술별 도출</li> </ul> <p>o (기대효과) 본 기획연구는 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립의 기초자료로 활용될 것으로 기대되며, 장기적인 관점에서 핵융합에너지 핵심기술 확보를 통한 한국의 기술선도 기대</p> |   |            |                                  |         |           |
| 비공개 사유   | 해당사항 없음   |            | 비공개 기간                           | 해당사항 없음 |           |





# 목차

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 1. 개요 .....                    | 1   |
| (1) 추진 배경 .....                | 1   |
| (2) 연구 목표 .....                | 2   |
| (3) 추진 체계 .....                | 3   |
| (4) 추진 경과 .....                | 4   |
| 2. 국내외 동향 .....                | 5   |
| (1) 에너지·전력시장 전망 .....          | 5   |
| (2) 해외 핵융합 연구개발 동향 .....       | 9   |
| (3) 국내 핵융합 연구개발 동향 .....       | 44  |
| 3. 핵융합 기술분류체계 .....            | 59  |
| (1) 핵융합 실증로 장치구성 .....         | 59  |
| (2) 기술분류체계도 .....              | 67  |
| (3) 핵심기술별 국내외 기술동향 .....       | 80  |
| 4. 핵융합 실증로 핵심기술 개발기반 분석 .....  | 103 |
| (1) 핵심기술별 R&D 역량 .....         | 103 |
| (2) 핵심기술별 주요 이슈 등 리스크 분석 ..... | 150 |
| (3) 핵심기술별 종합진단 결과 .....        | 170 |
| 5. 결론 .....                    | 185 |
| (1) 기대효과 및 활용방안 .....          | 185 |
| (2) 한계점 및 후속연구 방향 .....        | 186 |



# 1. 개요

## (1) 추진 배경

- 최근 핵융합에너지는 탄소중립 및 기후변화 대응을 위한 신에너지원으로 평가 받으며 빠른 환경 변화가 나타나는 분야
  - ITER Research Plan('18.9월) 공개 및 진공용기섹터(#6) 조달을 통한 ITER 장치의 조립이 본격적으로 착수('20.7월)됨에 따라 각 국가는 ITER 이후 DEMO 개발을 위한 로드맵 수정 및 연구개발 추진 중
  - 최근 미국·영국의 민간 스타트업을 중심으로 미래 탄소중립, 기후변화 대응을 위해 소형 핵융합 장치 연구개발 투자유치가 활발히 진행 중
- 우리나라는 토카막 방식의 KSTAR·ITER 장치 중심으로 세계적인 연구성과 확보하고, 핵융합 전력생산 실증로 개발을 위한 준비에 본격 착수
  - KSTAR를 활용하여 이온온도 1억도의 초고온 플라즈마 달성('18) 및 유지 시간 지속 연장('21년 30초) 등 세계적 수준의 우수 연구성과 창출
  - ITER 장치·품목의 성공적 제작·조달 및 ITER 국제기구 한국인 근무자 지속 확대를 통해 핵융합 기술역량 강화 중
  - 「제4차 핵융합에너지 개발진흥 기본계획('22~'26)」을 통해 '50년대 전력생산 실증을 위한 장기 일정목표를 수립
    - ※ 실증로 기본개념 확립('22), 이를 바탕으로 장기 R&D 로드맵 수립 및 실증로 설계 착수('23), ITER 성공 확인 후 실증로 건설 여부 결정('38년)
- 최근 빠른 환경변화 속에서 중장기적인 관점에서 추진되는 핵융합에너지 연구개발의 효율적/체계적 대응을 통한 미래 경쟁력 확보 필요
  - 최근 환경 변화의 포괄적인 대응과 미래 핵융합 실증로 개발의 리스크를 저감 등 체계적인 추진, 중장기적 핵융합에너지의 효율적인 연구개발 투자 및 우선순위 설정 필요
  - 이를 위해서는 핵융합에너지 핵심기술 개발 로드맵 수립이 필요하며, 기술로드맵 수립 및 완성도 제고를 위해 핵융합 핵심기술 분류체계 및 역량 분석 필요
  - 국내 핵융합 산·학·연·정 전문가의 참여를 통해 기술분류체계 및 역량 분석의 객관성을 확보하고 향후 기술로드맵 수립의 기초자료로 활용 기대

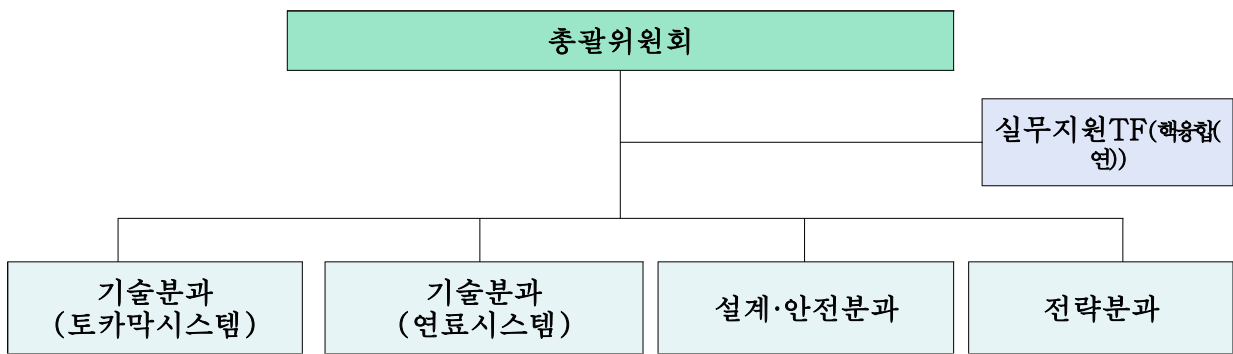
## (2) 연구 목표

- 핵융합 전력생산 실증에 필요한 핵심기술의 체계적 연구개발 추진을 위한 기술분류체계 수립 및 국내 역량 분석
  - 국내외 핵융합 연구개발 동향 및 핵심기술 기술분류 체계도 마련
  - 핵심기술개발 추진 전략수립을 위한 기반·역량 분석

| 연구 목표                            | 세부 연구목표  |
|----------------------------------|--|
| ① 핵융합에너지 국내외 환경 및 주요국 연구개발 동향 분석 | ① 국내외 에너지/전력 시장 환경 변화 등 최근 동향 분석<br>· 현재 에너지/전력 시장 현황 및 2050년대 전망 분석 등   |
|                                  | ② 주요국 핵융합 실증로 관련 연구개발 동향 분석<br>· 국가별 제시된 주요 핵심기술 및 연구시설, 마일스톤, 추진체계, 추진전략 등 분석<br>· 주요국 정책기조 및 R&D 추진현황, ITER 추진현황, 민간 방식 추진현황 및 전략 분석 |
|                                  | ③ 우리나라 핵융합 실증로 관련 연구현황 분석<br>· 주요 연구성과(스핀오프) 및 기술수준 현황 분석  |
| ② 핵융합 전력생산 실증 핵심기술 기술분류 체계도 마련   | ① 핵융합 실증로 장치 구성(PBS) 구체화<br>· 실증로 장치구성, 상세사양, 최종목표 대비 현재수준 분석 등  |
|                                  | ② 핵융합 실증로 개발을 위한 핵심기술 기술분류 체계도 마련<br>· 8대 핵심기술 및 추가 공백기술 식별  |
|                                  | ③ 핵융합 실증로 핵심기술별 국내외 기술동향 분석<br>· 핵심기술별 주요 기술개발 현황, 주요연구기관, 이슈 등  |
| ③ 핵융합 전력생산 실증 핵심기술 개발 기반 분석      | ① 핵심기술별 R&D 역량 분석  |
|                                  | ② 핵심기술별 주요 이슈 등 리스크 분석   |

### (3) 추진 체계

- 정부(과기정통부 거대공공연구정책관)·민간 공동위원장 下 총괄위원회(10인 내외) 및 기술·정책 분과위원회로 구성된 기획위원회 운영
  - (총괄위원회) 소관 국장 및 민간 전문가 1인을 공동 위원장으로 하고, 분과위원장 4인, 핵융합전문가를 포함하여 총 14명으로 구성
  - (전문가위원회) 토카막 및 연료시스템 기술분과 2개, 설계·안전분과, 전략분과로 구성(각 분과별 10명)



|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| 총괄위원회        |       | ▷ (위원장) 과기정통부 거대공공연구정책관, 민간 위원장(2명)<br>▷ (위원) 분과별 전문가위원회 위원장(4명), 핵융합 전문가(4명)<br>* 간사 : 핵융합연 정현경 정책전략부장(로드맵 기획과제 과제책임자)<br>▷ (역할) 기획연구 진행상황 점검, 분과간 조정 등 전체 총괄  |
| 전문가위원회       | 기술    | ▷ (구성) 토카막시스템, 연료시스템 분과로 구분, 분과별 산·학·연 전문가 각 10명 내외로 구성<br>▷ (역할) 8대 핵심기술 기술분류체계도 수립 및 핵심기술별 환경(연구동향, R&D 투자현황), 기반현황(기술수준, 특허, 논문, 연구인력, 인프라현황, 주요이슈 및 리스크) 분석 |
|              | 설계·안전 | ▷ (구성) 기술 및 설계전문가 총 10명 내외로 구성 (설계·인허가, 법제도 관련 전문가 구성)<br>▷ (역할) 실증로 설계·인허가 일정 검토, 8대 핵심기술 중 안전·인허가 환경(연구동향, R&D 투자현황), 기반현황(논문, 주요이슈 및 리스크) 분석                 |
|              | 전략    | ▷ (구성) 정책, 특허, 실증 관련 전문가 약 10명 내외로 구성<br>▷ (역할) 전략 수립을 위한 기반 및 역량 분석 항목수립, 작성내용 검토  |
| 실무지원TF(핵융합연) |       | ▷ (구성) 핵융합(연) 실무지원TF 구성<br>▷ (역할) 국내외 환경분석, 전문가 위원회 간사, 최종보고서 작성 등 실무 지원 총괄   |

#### (4) 추진 경과

- 제1차 총괄위원회 개최 '23.03.16
- 제1차 전략분과위원회 개최 '23.03.29
- 제1차 연료시스템 기술분과위원회 개최 '23.03.31
- 제1차 설계·안전분과위원회 개최 '23.04.03
- 제1차 토카막시스템 기술분과위원회 개최 '23.04.04
- 제2차 설계·안전분과위원회 개최 '23.04.10
- 제2차 전략분과위원회 개최 '23.04.12
- 제3차 설계·안전분과위원회 개최 '23.04.17
- 제2차 토카막시스템 기술분과위원회 개최 '23.04.19
- 제4차 설계·안전분과위원회 개최 '23.04.24
- 제2차 연료시스템 기술분과위원회 개최 '23.04.28
- 제3차 전략분과위원회 개최 '23.05.03
- 제5차 설계·안전분과위원회 개최 '23.05.08
- 제4차 전략분과위원회 개최 '23.05.18
- 제6차 설계·안전분과위원회 개최 '23.05.22
- 제7차 설계·안전분과위원회 개최 '23.06.12
- 제3차 연료시스템 기술분과위원회 개최 '23.06.15
- 제3차 토카막시스템 기술분과위원회 개최 '23.06.21
- 제5차 전략분과위원회 개최 '23.07.04
- 제4차 토카막시스템 기술분과위원회 개최 '23.07.20
- 제6차 전략분과위원회 개최 '23.08.07
- 제2차 총괄위원회 개최 '23.08.17

## 2. 국내외 동향

### (1) 에너지·전력시장 전망

#### □ 세계 전력 수급 전망

○ IEA World Energy Outlook 2022에서는 3가지 시나리오를 통해 세계 장기 에너지 수급을 전망

– (현정책 유지 시나리오, STEPS\*) 각 국가들이 설정한 정책을 미래에도 유지하는 것을 전망하지만 현재까지 세부 정보가 없는 정책들은 미달성함을 가정함

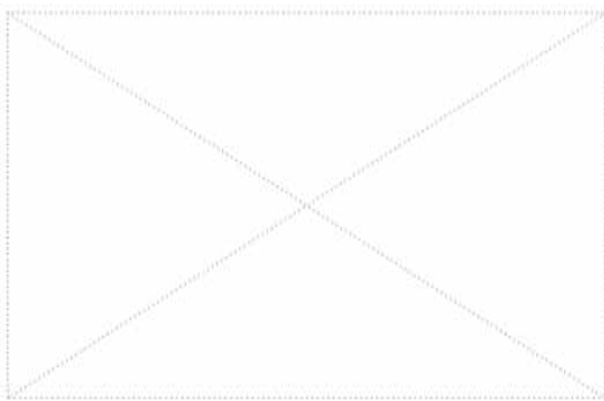
\* STEPS : Stated Policies Scenario

– (목표 선언 시나리오, APS\*) 개별 국가들의 선언한 탄소 중립 및 중장기 감축목표(NDC) 등을 공표한 대로 적절히 이행하는 것을 상정하여 전망함

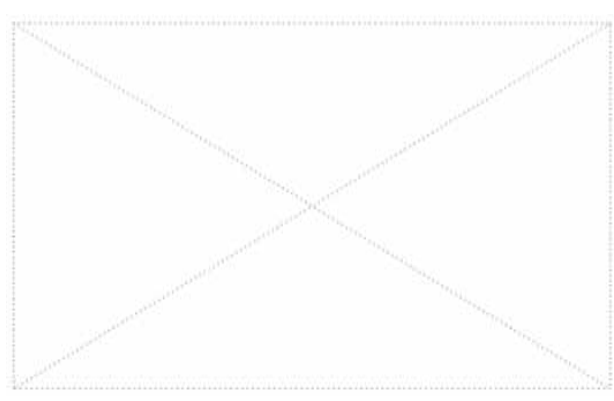
\* APS : Announced Pledges Scenario

– (탄소중립 시나리오, NZE\*) 2050년까지 전 세계 국가들이 넷제로(Net Zero) 경로를 달성하고 기온 상승 폭을 1.5°C로 유지하며 2030년까지 에너지 접근성 목표를 100% 달성한다고 간주함

\* NZE : Net Zero Emissions by 2050 Scenario



< 세계 전력수요 전망 >



< 세계 전력공급 전망 >

※ 세계원전시장 인사이트(2022.12), 에너지경제연구원

○ (전력 수요) 전세계 전력수요는 모든 시나리오에서 크게 증가하는 경향을 보이고 있으며, 건물과 산업 분야에서의 전력수요 증가 요인으로 분석

– 현 정책이 유지될 경우(STEPS) 세계 전력수요는 2021년 24,700TWh에서 2030년

30,621TWh (65% ↑), 2050년 43,672TWh(77% ↑) 증가할 것으로 전망

- 목표 선언 시나리오(APS)의 경우 세계 전력수요는 2030년 31,752TWh(71% ↑), 2050년 53,810TWh(118% ↑)로 증가할 것으로 예측되었으며, 건물부문의 전력수요가 가장 큰 비중을 차지
  - 탄소중립 시나리오(NZE)의 경우 세계 전력수요는 2030년 33,733TWh(82% ↑), 2050년 62,159TWh(152% ↑)로 증가할 것으로 전망되었으며, 산업부문의 전력수요가 증가의 주요 원인으로 분석되었으며, 또한 전기자동차 등의 확대에 의하여 수송 및 수소생산의 전력수요가 크게 증가
- (대륙별 전력수요) 전기차 보급, 기후 변화로 인한 냉방 수요 등으로 인하여 전세계 모든 국가의 전력수요가 급격하게 상승할 것으로 분석

| 구분       | 지역    | 상승요인  |
|----------|-------|---|
| 선진국      | 미국    | 현재 5% 미만을 기록하고 있는 전기차의 시장점유율은 IRA와 주 차원의 목표 등으로 2030년까지 30%으로 상승할 것으로 보임.(APS 시나리오에서는 50%로 증가 예상) |
|          | 유럽    | 건물과 산업에 히트펌프 활용 확대와 현재 전기차 보급 확대에 최종에너지에서 전력이 차지하는 비중이 현재 21%에서 2030년 25%(APS 시나리오: 29%)로 증가할 것임. |
| 신흥국, 개도국 | 중국    | 중국 경제가 서비스 및 첨단 기술 산업으로 전환됨에 따라 전력수요가 상승함   |
|          | 인도    | 경제성장에 따른 생활 수준 향상으로 전자제품의 보급이 확대됨.  |
|          | 인도네시아 | 현재 0.1대인 가구당 평균 에어컨 수가 2030년까지 0.4대로 증가함.   |
|          | 아프리카  | 전기 접근성의 확대에 최선의 전력 서비스를 이용할 수 있는 인구가 2030년까지 약 1.5억 명(APS 시나리오: 4.8억 명)으로 상승함.                    |

※ 세계원전시장 인사이트(2022.12), 에너지경제연구원



< 시나리오 지역별 글로벌 전력수요 >



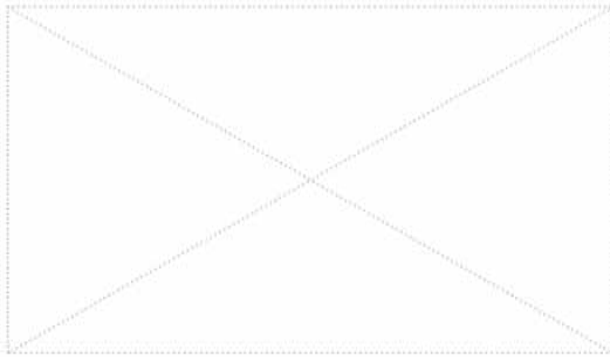
※ 세계원전시장 인사이트(2022.12), 에너지경제연구원

- (전력 공급) 전력수요에 맞추어 전력공급도 모든 시나리오에서 크게 증가하는 경향을 보이고 있으며, 태양광, 풍력 등 신재생에너지의 공급이 크게 증가할 것으로 전망
  - 현정책 유지 시나리오(STEPS)에서 전력 공급은 2030년 34,834TWh(62%↑), 2050년 49,845TWh(76%↑)로 증가할 것으로 전망되었으며, 전력 수요 충족을 위해 풍력, 태양광의 비중이 크게 늘어날 전망
  - 목표 선언 시나리오(APS)의 경우 전력 공급은 2030년 35,878TWh(67%↑), 2050년 61,268TWh(116%↑)로 증가할 것으로 예측되었으며, 풍력, 태양광이 가장 큰 폭으로 증가하고, 가장 큰 비중을 차지할 것으로 전망
  - 탄소중립 시나리오(NZE)의 경우 전력 공급은 2030년 37,723TWh(75%↑), 2050년 73,232TWh(158%↑)로 증가할 것으로 전망되었으며, 해당 시나리오 역시 풍력과 태양광이 가장 큰 폭으로 증가 하였으며, 가장 큰 비중을 차지할 것으로 전망
  - 모든 시나리오에서 증가하는 전력 수요를 충당하기 위해 석탄, 유류의 감소와 더불어, 원자력, 수력, 풍력, 태양광의 전력 공급이 증가하고 있는 경향

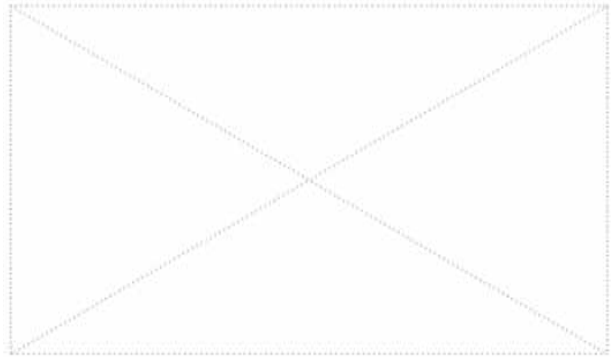
□ 국내 전력 수급 전망

- (전력 수요 추세 및 전망) '21년 전력소비량은 533.4TWh이며, 기온 및 경제상황, 코로나 19 영향 등에 따른 일시적인 전력소비 감소('19, '20년)를 제외하고 지난 10년간 전력소비량은 증가 추세로 2036년까지 꾸준한 증가 추세(연평균 1.7% 증가)가 이어질 전망
  - 용도별로 산업용 전력 수요의 비중이 가장 크며(50% 이상 유지), 상업용 비중은 보합세이나, 주택용 전력수요 비중이 지속적인 상승 중
  - 또한 전기차, 친환경차 보급 지속확대와 데이터 센터 등의 요인으로 인해 꾸준한 전력소비량은 증가 추세에 있는 것으로 확인

- 2036년의 전력수요는 703TWh로 꾸준한 증가추세(연평균 1.7% 증가)를 보일 것으로 전망



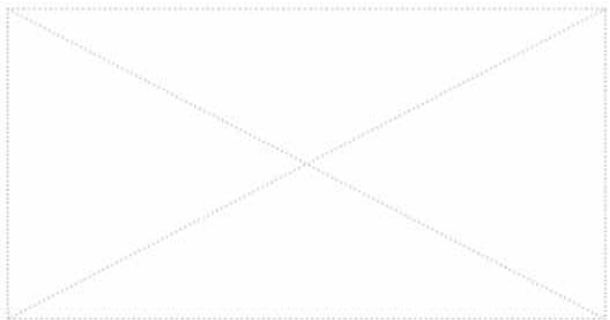
< 국내 전력 수요 추세 >



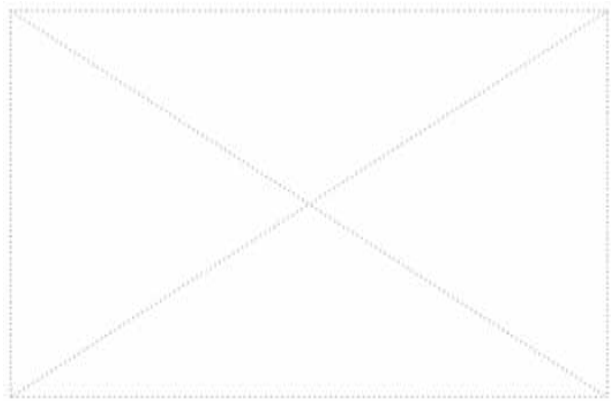
< 국내 전력 수요 전망 >

※ 제10차 전력수급기본계획(2022~2036)(2023.01), 산업통상자원부

- (전력 공급 추세 및 전망) 한국의 전력설비 규모는 '21년말 기준 총 134GW(정격용량 기준)이며, '13년말 기준 87GW 대비 54%가 증가한 수준이며, 2036년까지 꾸준한 증가추세 전망
- 발전원별로 LNG(31%), 석탄(28%), 신재생(19%), 원자력(17%)의 비중을 차지하고 있으며, 장기적으로 2036년 원자력(13.2%), 석탄(11.3%)의 비중이 줄어들고, 신재생(45.3%)의 공급이 크게 증가할 것으로 전망



< 국내 전력 공급 추세 >



< 국내 전력 공급 전망 >

## (2) 해외 핵융합 연구개발 동향

### 가. ITER 기구

- (7개 국 참여) 실증로(DEMO) 전 단계인 대형 연구로를 건설하는 세계 최대 규모의 국제 공동연구사업으로, 한국포함 7개국이 참여 중
  - (ITER 개요) 핵융합의 연료인 중수소와 삼중수소가 외부적 가열 없이 지속적으로 핵융합 반응을 일으키는 것을 목표로 하는 대규모 연구로(로)
  - (사업내용) 핵융합 에너지 개발을 위해 한국, EU(영국 포함), 미국, 중국, 인도, 러시아, 일본 7개국이 참여하고 있으며, 건설에만 15.2조 원을 투입
- (ITER 베이스라인) 대형연구로인 ITER는 2025년 완공예정으로, '35~'38년에 연료 직접 반응 실험인 D-T실험 시작할 예정
  - (건설) 2025년 완공예정으로, 현재 프랑스 남부 카다라쉬에 건설 중이며, 2022년 8월 77.3%의 공정률을 보이고 있으며, 2022년부터 토카막 모듈 설치 시작
  - (운영) 2025년에 첫 플라즈마 실험을 시행하며, 2035~2038년까지 핵융합 연료인 중수소와 삼중수소의 반응실험을 시작
  - (목표) 현재 최고 수준인 에너지 증폭률\* 1.25을 10까지 높여서 핵융합 에너지 실현 가능성을 입증하는 것이 목표
- \* 에너지 증폭률(Q)이란 에너지 1 투입 시 나오는 열로, 1998년 일본의 JT-60U에서 달성한 1.25가 현재까지 최고목표

[ ITER의 운영 계획 ]

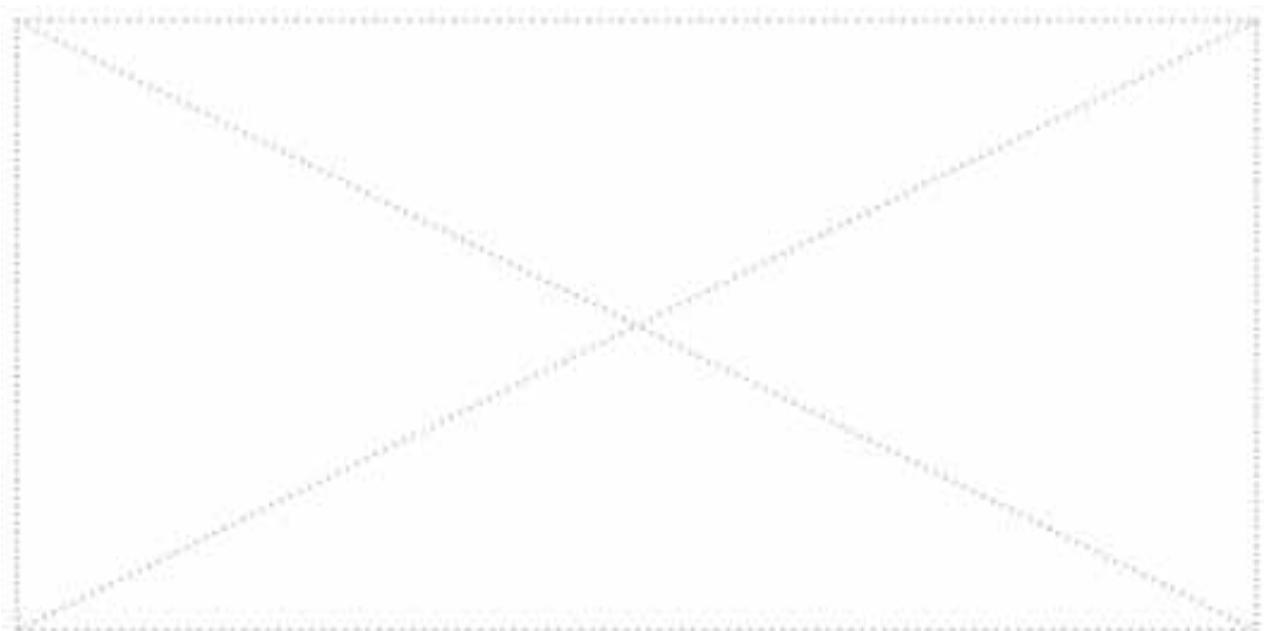


※ 출처: ITER Organization(2018)

[ ITER 단계별 연구계획 ]

| 단계        |                            | 기간            | 주요 활동  |
|-----------|----------------------------|---------------|--|
| Stage I   | FP & Engineering Operation | '25.12~'26.06 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ECRH를 활용해 100kA/100ms 마일스톤 달성</li> <li>• PFC align 전략 수립</li> <li>• Ohmic start-up 연구(at 1.8T)</li> </ul>             |
| Stage II  | PFPO-I                     | '28.12~'30.06 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• H/He 플라즈마 실험</li> <li>• 통합 진단 검증</li> <li>• 붕괴 연구</li> <li>• 디버터 RH 검증</li> </ul>                                     |
| Stage III | PFPO-II                    | '32.06~'34.03 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• H/He의 L모드, H모드 시나리오 개발</li> <li>• ELM 제어 및 붕괴 완화 검증</li> <li>• TBM 제작 검증 등</li> </ul>                                 |
| Stage IV  | FPO-I                      | '35.12~'37.01 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DT 반응 Q=5-10에서 50초 이하 운전 달성</li> <li>• ELM H모드 유도 시나리오 개발</li> </ul>  |
|           | FPO-II                     | '37.01~'38.05 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Q=10에서 300-500초 운전</li> <li>• Q&lt;2에서 1,000-3,000초 운전 달성</li> <li>• 유도 DT 플라즈마 시나리오 개발</li> <li>• TBM 테스트</li> </ul> |
|           | FPO-III                    | '38.05~'41.09 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DT 장시간 운전(Q≤5 최대 3,000초 운전 검증)</li> <li>• 핵융합 에너지 생산을 위한 최적화된 플라즈마 운전 시나리오 개발</li> <li>• TBM 테스트</li> </ul>           |

[ ITER 건설 현황 전경 ]



## 나. EU

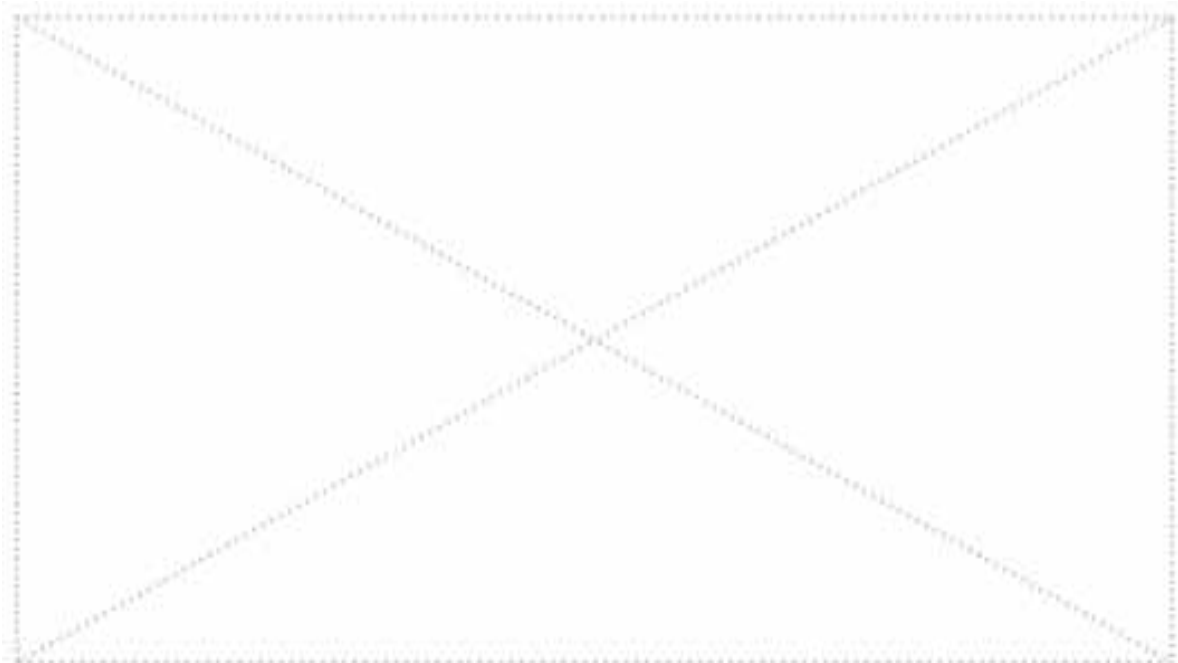
### □ 배경

- 글로벌 전력 수요 증가에 따른 지속 가능하고 예측 가능한 대규모 저탄소 전력 확보 기여를 위한 핵융합에너지 개발 추진

### □ 핵융합 로드맵

- '40년대 DEMO 건설 착수를 통한 '50년대 상용화 목표 달성을 위해 DEMO 로드맵 추진
  - \* 핵융합 상용화 R&D 로드맵 발표('18.9, EUROfusion)
    - (최종 목표) 토카막 방식 DEMO의 전력생산 실증
    - (세부 목표) △ 300~500MW 순전력 공급, 삼중수소 자가증식(TBR > 1), △ 일정기간 전출력 가동으로 DEMO 타당성 확보, △ 방사성 폐기물 최소화, 폐기물 단기 저장 타당성 입증, △ 핵융합 상용로 테스트 시설 역할 수행
    - (장기 일정) 개념설계('20년대)\* → 공학설계('30년대) → ITER 플라즈마 운전·기술 최적화 및 DEMO 건설('40년대)
    - \* DEMO 예비 개념설계 완료 및 개념설계 본격 착수('21년)
    - (부지) DEMO 공학설계 단계('29~'38년)에 부지 선정 추진 예정

### [ DEMO 중장기 전략 ]



※ 출처 : EUROfusion(2018.9)

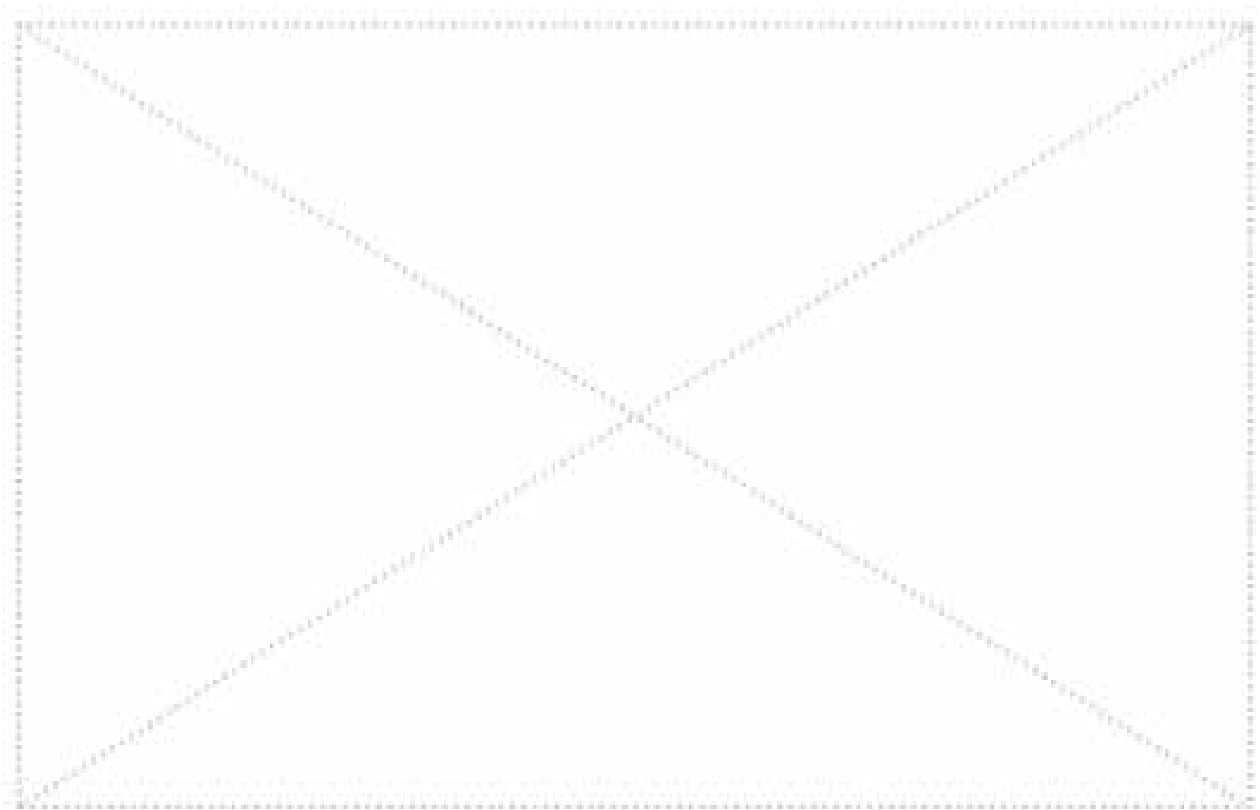
○ (8대 핵심과제) DEMO 로드맵을 통해 핵융합에너지 실현을 위한 8대 연구개발 핵심과제\* 선정 및 R&D 수행 중

\* ① 플라즈마 운전시나리오, ② 열배출 시스템, ③ 핵융합재료, ④ 삼중수소 자가증식, ⑤ 안전성, ⑥ DEMO 통합설계 및 시스템 개발, ⑦ 전력생산 비용 경쟁력, ⑧ 스텔러레이터

○ (요소기술 선정) 11개 DEMO 요소기술을 선정\*, 기술별 일정에 따라 연구개발 추진 중

\* TBM, 증식블랭킷, 동력계통(BoP), 진단 및 제어, 디버터, 가열 및 전류구동, 초전도자석, 핵융합재료, 원격유지보수, 안전성, 삼중수소(연료주기)

[ DEMO 요소기술 로드맵 ]



※ 출처 : Federici. G. & PPPT Team(2018).

□ 시뮬레이션 프로그램

○ (E-TASC 프로그램) 초고성능컴퓨팅을 기반으로 핵융합 모델링 및 코드 개발, DEMO 설계 지원을 위해 범유럽 차원의 핵융합 시뮬레이션 프로그램을 '21년부터 본격 착수

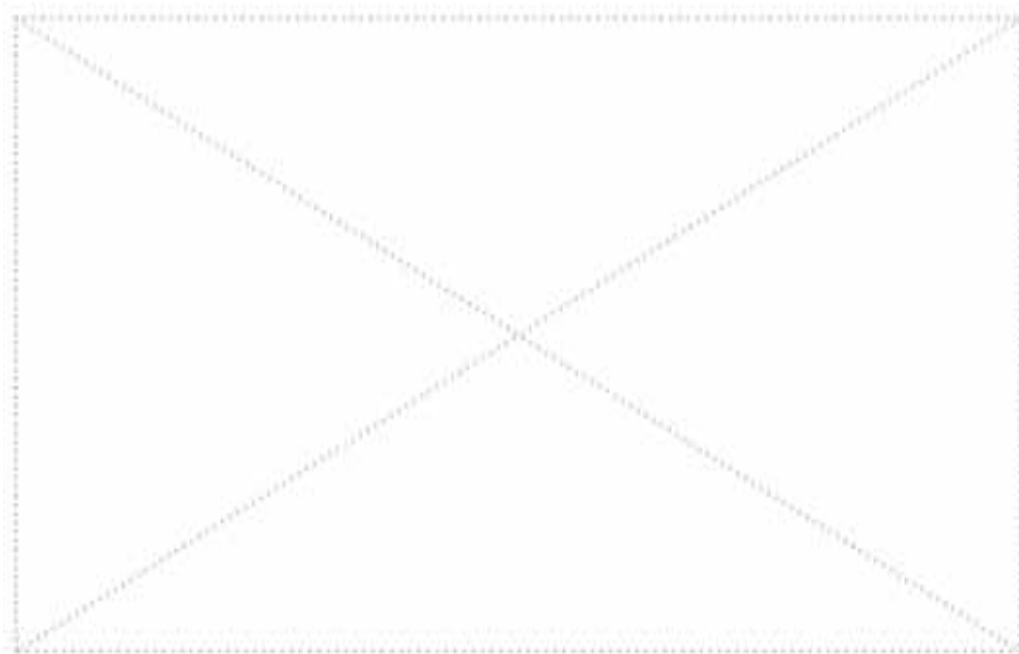
\* E-TASC : EUROfusion-theory and advanced simulation coordination

- 핵융합 실험장치 및 재료테스트 모델링, DEMO 모델 타당성 검증 및 공학설계를 위한 모델링 등을 수행

- 총 5개 연구주제(Thrust)에 총 14개 TSVV, 5개 ACH로 구성('21~'25년 총 예산 5,980만 유로(한화 약 795억원))

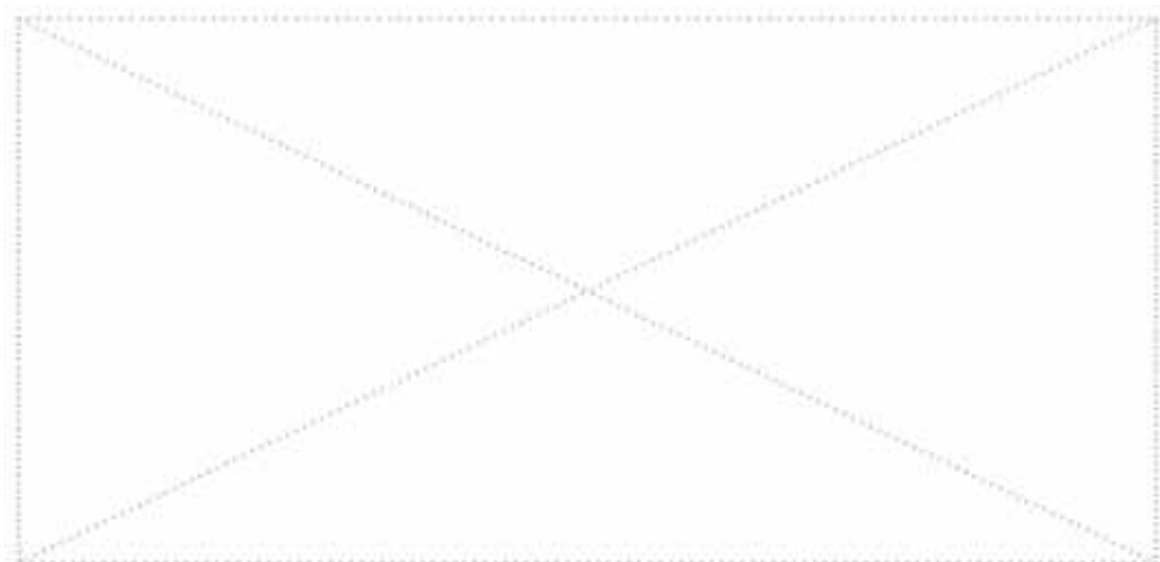
※ (분야 및 참여기관) ① 고성능 컴퓨팅 : CIEMAT(스페인), EPFL(스위스), MPG(독일), ② 통합 모델링 및 제어 : IPPLM(폴란드), ③ 데이터 관리 : VTT(핀란드)

[ E-TASC의 기본구조 ]



※ 출처: EUROfusion Ad-Hoc Group(2018). Theory and Advanced Simulation Coordination(E-TASC)

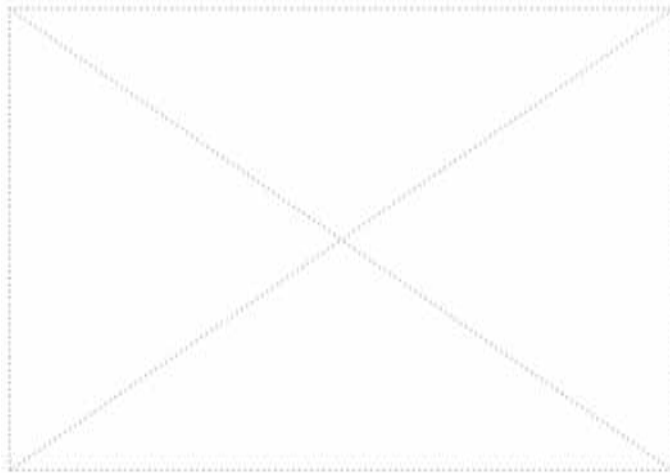
[ E-TASC 구성 및 주요활동 ]



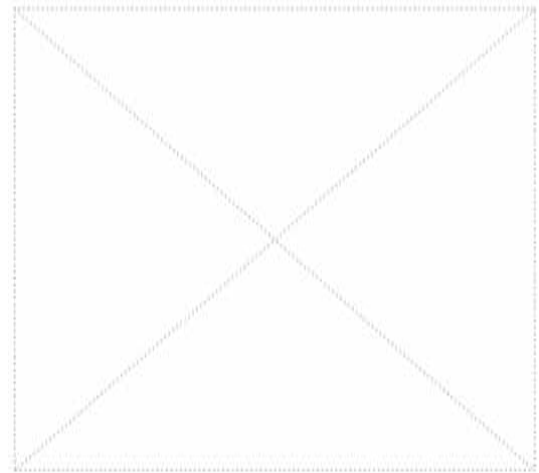
※ 출처 : X. Litaudon et al. (2022).

- (초고성능컴퓨팅 자원) EUROfusion을 중심으로 핵융합 시뮬레이션 및 모델링, 관련 기술 개발을 위한 초고성능컴퓨팅 자원을 지속적으로 확대·제공
  - HPC For Fusion은 범유럽 차원에서 ITER 및 자기가동 핵융합 플라즈마 연구를 목적으로 운영된 최초의 슈퍼 컴퓨터(독일 올리히 슈퍼 컴퓨터 센터 운영)
  - EU-일본 BA(Broader Approacher) 일환으로 HELIOS('12~'16) 구축(일본 QST 로카쇼 핵융합연구소 운영)
  - 이탈리아 CINECA의 Tier-0 슈퍼컴퓨터 MARCONI 활용 중(핵융합 분야에 총 12.5PF 할당, '16~)

[ EUROfusion 초고성능컴퓨팅 현황 ]



[ MARCONI 분야별 사용자 현황 ]



※ 출처 : F. Iannone et al. (2018).

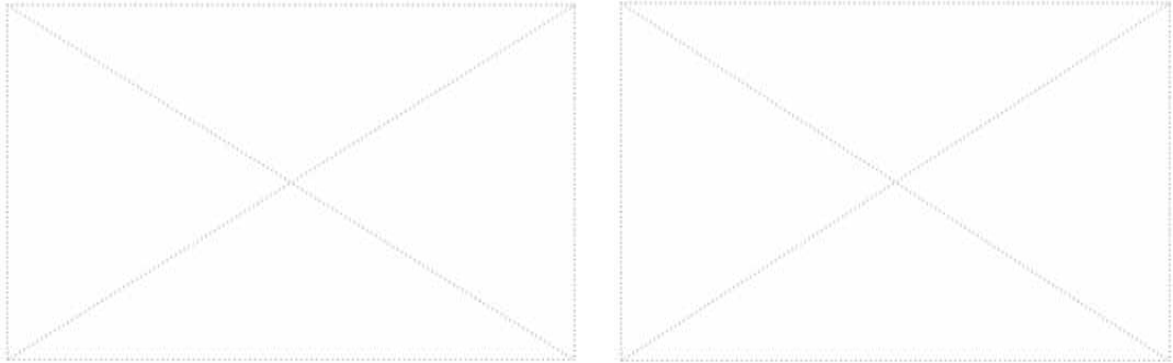
※ 출처 : CINECA (2021).

□ 주요 연구시설

- (ASDEX-U) 세계 최초로 디버터를 비롯해 모든 대면재를 텅스텐으로 업그레이드
  - 35MW 가열시스템과 40여 개 진단장치를 갖추고, 이를 기반으로 PWI 등을 비롯해 다양한 핵융합 실험 진행

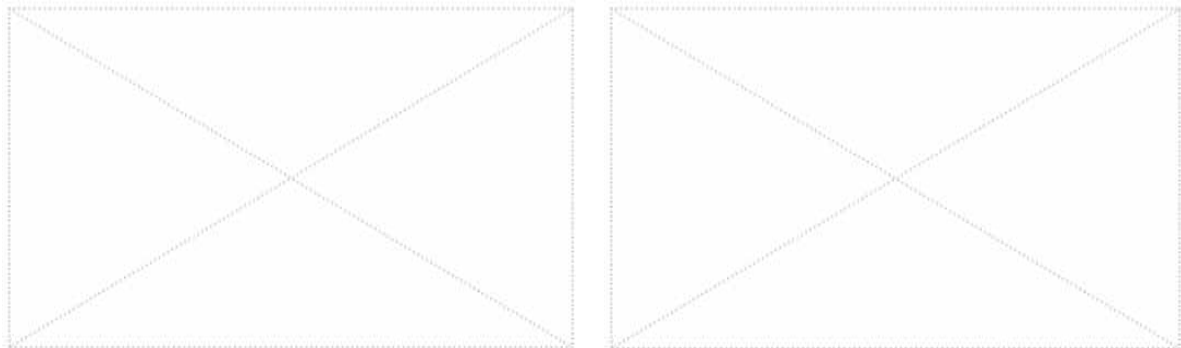


[ ASDEX 시설현황 ]



- (WEST) ITER의 텅스텐 디버터 설치·운영에서의 위험을 최소화하기 위해 초전도 토카막 Tora Supra를 능동냉각 텅스텐 디버터를 갖춘 토카막 장치로 업그레이드
  - ITER 텅스텐 디버터 테스트를 위해 IO와 CEA 간 joint team 구성('19.7)
  - 1단계('16~'19)를 통해 플라즈마 운전 36초를 달성('18.10)하였으며, 2단계('20~'27) lower 디버터에 능동냉각 텅스텐 디버터를 설치하고 장시간 운전 등 다양한 실험 추진 예정

[ WEST 시설현황 ]



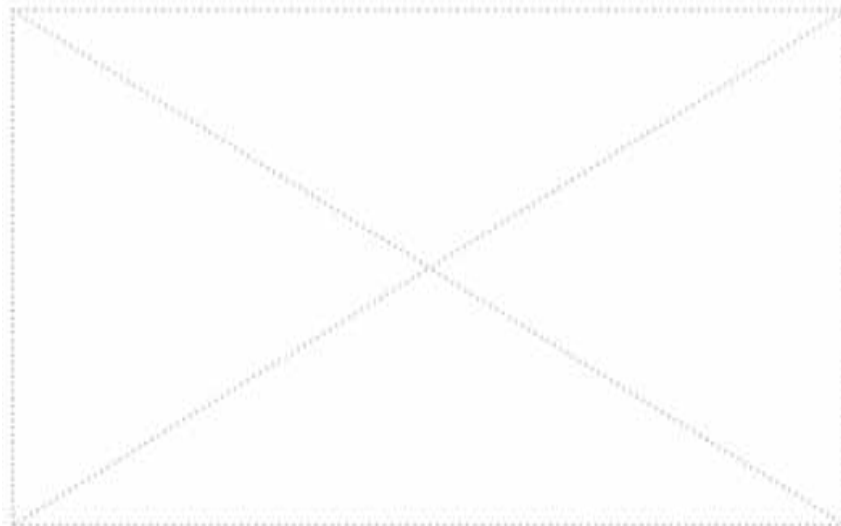
- (IFMIF-DONES\*) '32년 운전 착수를 목표로, 재료 테스트 및 검증 연구인프라 IFMIF-DONES 본격 착공('22)
  - \* IFMIF-DONES : International Fusion Materials Irradiation Facility-실증로 Oriented Neutron Source
  - ※ (IFMIF-DONES) 스페인 그라나다에 건설 중, 건설예산 총 약 € 884M 추정
    - '20년 건설 착공, '30년 운영을 목표로, 현재 세부 공학설계 진행 중('20~'22)
  - ※ (설계) '07~'15년(약 150백만 유로) → (사전준비) '15~'19년(약 40백만 유로) → (건설) '19~'29년(약 420백만 유로) → (운영) '29년~(연간 50백만 유로)

- IFMIF-DONES 건설을 위한 R&D 활동은 EUROfusion에서 추진하는 WP(Work Package) 중 하나인 WPENS(Work Package Early Neutron Source)을 통해 진행
- 또한 '20년 초에 환경 및 방사능 인허가 작업에 본격 착수하고, '33~'35년 첫 재료 데이터 확보 예상
- (DTT\*) 핵융합 플라즈마 부하제어가 가능한 다양한 디버터 시스템 연구를 위해 초전도 토카막 장치 건설(이탈리아) 추진('18.~'25, 5억유로)

\* DTT : Divertor Tokamak Test Facility

- 완공시, 최신 디버터 배치, 액체 금속 등의 다양한 디버터 대안을 테스트하고, 이를 기반으로 ITER 실험을 지원, 보완을 위해 붕괴의 회피/완화, 플라즈마대면장치, ELM pacing, 플라즈마 제어 등에 관한 R&D 추진 예정
- ※ (0단계, '25~'28) 완공 및 FP(First Plasma) → (1단계, '28~'32) 가열시스템 설치(25MW) → (2단계, '32~'36) 가열시스템 업그레이드(45MW) → (3, 4단계, '36~'40) 액체-금속 디버터 테스트 등

#### < DTT >



※ 출처: The new Divertor Tokamak Test facility, Albanese, R. et al., 2019

## 다. 일본

### □ 배경

- 글로벌 에너지 패권경쟁 및 기후변화 등의 글로벌 과제 및 국내 사회구조 개혁 대응을 위한 “과학기술혁신기본계획(‘21~‘25)\*, “에너지기본계획\*\*에 핵융합 연구개발, 실증, 국제협력 전략 수립·추진 계획 반영

\* 핵융합에 필요한 R&D, 실증, 국제협력 촉진 포함(제6차 과학기술혁신기본계획(‘21.3))

\*\* ITER 프로젝트 등 국제협력을 통한 핵융합 연구개발 추진(제6차 에너지기본계획(‘21.10))

- 글로벌 핵융합에너지 시장 선도를 목표로 핵융합 산업 육성 및 기술 개발 가속화를 위한 ‘국가 핵융합에너지혁신전략(안)’ 마련(‘23.04) 및 ‘통합혁신전략 2023’ 각의 결정(‘23.06)
- 기후변화 문제 해결을 위한 ‘청정에너지 전략’에 재생에너지, 수소와 더불어 핵융합 추진 계획 발표

### □ 핵융합 로드맵

- ‘50년경 운전을 목표로 DEMO 로드맵 추진 전략 및 실행계획 발표(‘17.12)
  - (최종 목표) DEMO를 통한 전력생산 실증 및 경제적 타당성 제고
  - (기본개념) △ 안정적인 전기생산 실증 구현, △ 상용화 가능성 검토 △ 삼중수소 증식 구현
  - (장기 일정) 예비개념설계(~‘20년경)\* → 개념설계(‘20년~‘25년) → 공학설계 및 full-scale 기술 개발(‘25~‘35년) → 제조 설계(‘35~‘40년) → 건설(‘40~‘50년) → 운전(‘50년~)

\* 예비개념설계 완료(‘21년) 및 1차 C&R 수행(‘22.01월 1차 C&R 보고서 공개)

[ 일본 DEMO 로드맵 ]

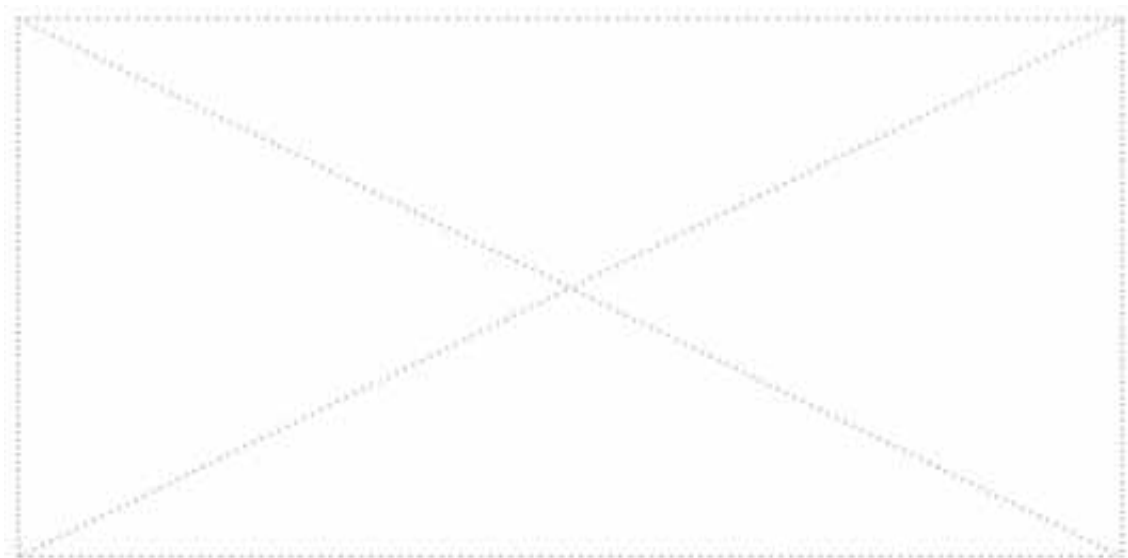


※ 출처 : Science and Technology Committee Fusion Energy, A Roadmap toward Fusion DEMO Reactor, 2018.07.24.

- (기본 전략) 일본 핵융합 실험장치 및 ITER 프로젝트, 일본-EU 간 BA(Broader Approach)\* 등을 토대로 DEMO 건설 기반 구축

\* (BA 활동) ITER 및 DEMO R&D 지원 활동으로 △ 위성 토카막 프로그램 (JT-60SA), △ IFMIF/EVEDA (IFMIF(핵융합중성자원) 공학설계 및 요소기술 공학 검증), △ IFERC (DEMO 설계 및 R&D, ITER 원격실험, 핵융합컴퓨터시뮬레이션 센터)로 구성(1단계 : '07.06~'20.03, 2단계 : '20.04~'25.03)

[ 일본 핵융합에너지 개발 전략 ]



※ 출처 : I. Goki, Japan Status Report on Fusion Research and Development, 18th KO-JA JCM, 2022.10.07

- (추진체계) 문부과학성 핵융합에너지기술위원회, JA-DEMO TF, DEMO 특별공동설립, 공동연구 워킹그룹 간 긴밀한 협력을 토대로 DEMO 설계 및 연구개발 추진

[ DEMO 추진 체계 ]



※ 출처 : I. Goki, Japan Status Report on Fusion Research and Development, 18th KO-JA JCM, 2022.10.07

- 글로벌 핵융합에너지 개발 경쟁 심화에 따른 핵융합에너지 개발 가속화를 위해 DEMO 건설 조기 착수('40년→ '35년) 방안 검토 논의 착수('22~)
- (조정(안)) '35년 DEMO 건설 착수, '45년경 완공 및 단계별 운전 착수

※ 내각부 통합혁신전략추진회의(統合イノベーション戦略推進会議) 산하 핵융합 전문가회의 구성 및 관련 논의 착수('22.09)

[ DEMO 로드맵 조정(안) ]



※ 출처 : 제26회 DEMO개발종합전략 TF, 2022.09.07.

[ 핵융합 사회적 활용을 위한 연구개발 및 산업육성 접근법 ]



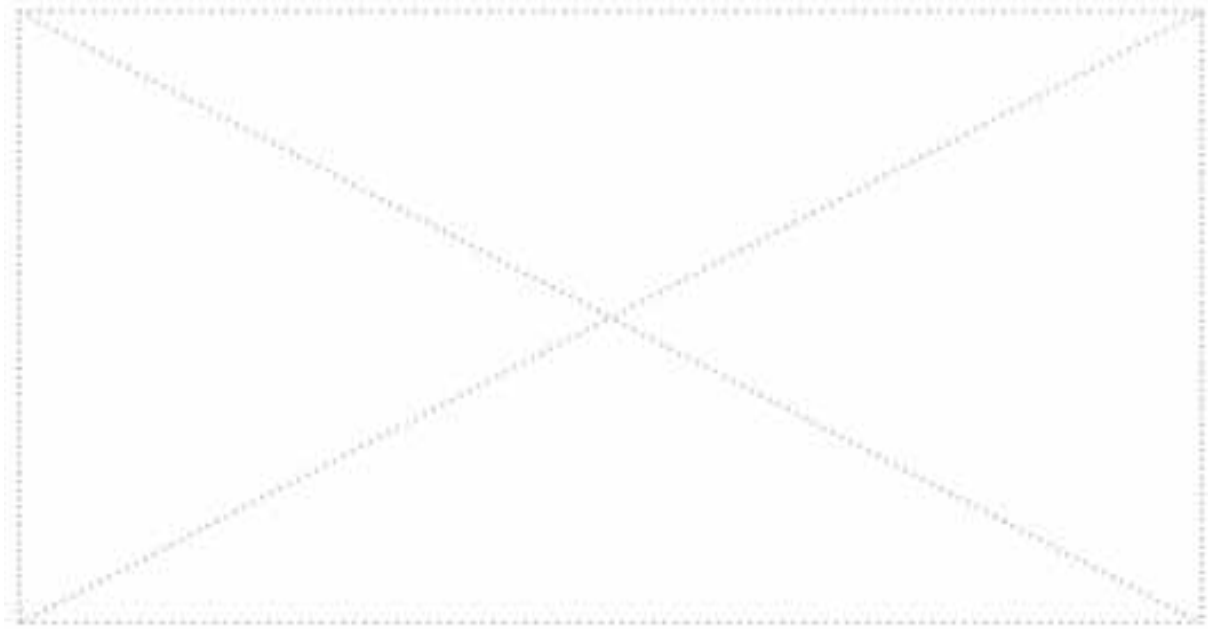
※ 출처 : 통합혁신전략추진회의 핵융합전략전문가회의, 국가핵융합에너지혁신전략(안), 2023.04.14.

- 글로벌 핵융합에너지 개발 경쟁 심화에 따른, 글로벌 핵융합에너지 시장 선도를 목표로 핵융합에너지 산업 육성 및 기술개발 가속화를 위한 범부처 차원의 “핵융합에너지혁신전략(안)” 마련('23.04)
  - 새로운 산업으로서의 핵융합에너지에 대한 인식을 토대로, 내각부 산하 통합혁신전략추진회의 핵융합전략전문가 회의를 중심으로 전략(안) 마련
  - 핵융합 산업 육성 및 핵융합 기술 개발, 핵융합에너지 혁신전략 추진체계 등에 관한 통합전략 제시
  - “핵융합에너지혁신전략(안)”이 포함된 “통합혁신전략 2023” 각의 결정('23.06)

□ 주요 연구시설

- (JT-60SA) ITER의 위성 토카막으로 역할 수행 및 DEMO 최적화 운전시나리오 개발을 목표로 초전도 자석 업그레이드 완료('20.3월)
  - ITER 최초 플라즈마 실험보다 5년 빠른 '20년에 운전을 시작하여, 충분한 성능을 갖춘 다양한 플라즈마 구동 장치를 기반으로 ITER 위성 토카막으로서 ITER에서 야기될 수 있는 주요 위험을 완화하는 역할 수행
  - ITER 및 JT-60SA, 모델링/시뮬레이션, 로공학 등을 통해 다양한 운전시나리오 개발 및 고성능 통합운전 실증, 통합 플라즈마 제어시스템 개발하고, 이를 토대로 DEMO 설계 파라미터 결정

< DEMO 건설에서 JT-60SA의 역할 >



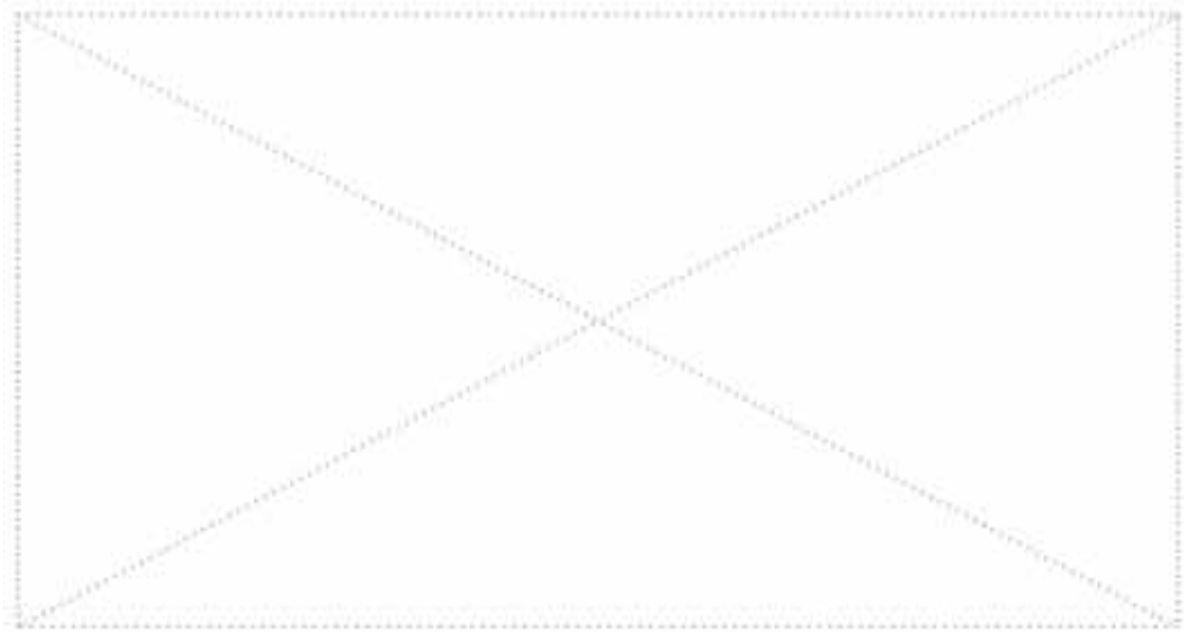
※ 출처 : JT-60SA Research Plan: Research Objectives and Strategy(v.4), JT-60SA Research Unit, 2018

○ (IFMIF/EVEDA\*) 중성자를 통한 핵융합 재료 테스트 및 데이터 확보를 위해 가속기 기반 중성자원 개발 및 건설 추진

\* IFMIF/EVEDA : International Fusion Materials Irradiation Facility/Engineering Validation and Engineering Design Activities

- 실증로의 엔지니어링 설계를 위한 데이터 제공 및 재료 성능 검증을 위한 가속기 기반 중성자원 개발 프로젝트로 가속기 프로토타입(LIPAc)과 리튬 테스트 루프(ELTL)로 구성
- (가속기 프로토타입, LIPAc) IFMIF 가속기 설계 검증을 위해 하나의 가속기를 시범적으로 설계 제작하여 실험·검증 수행

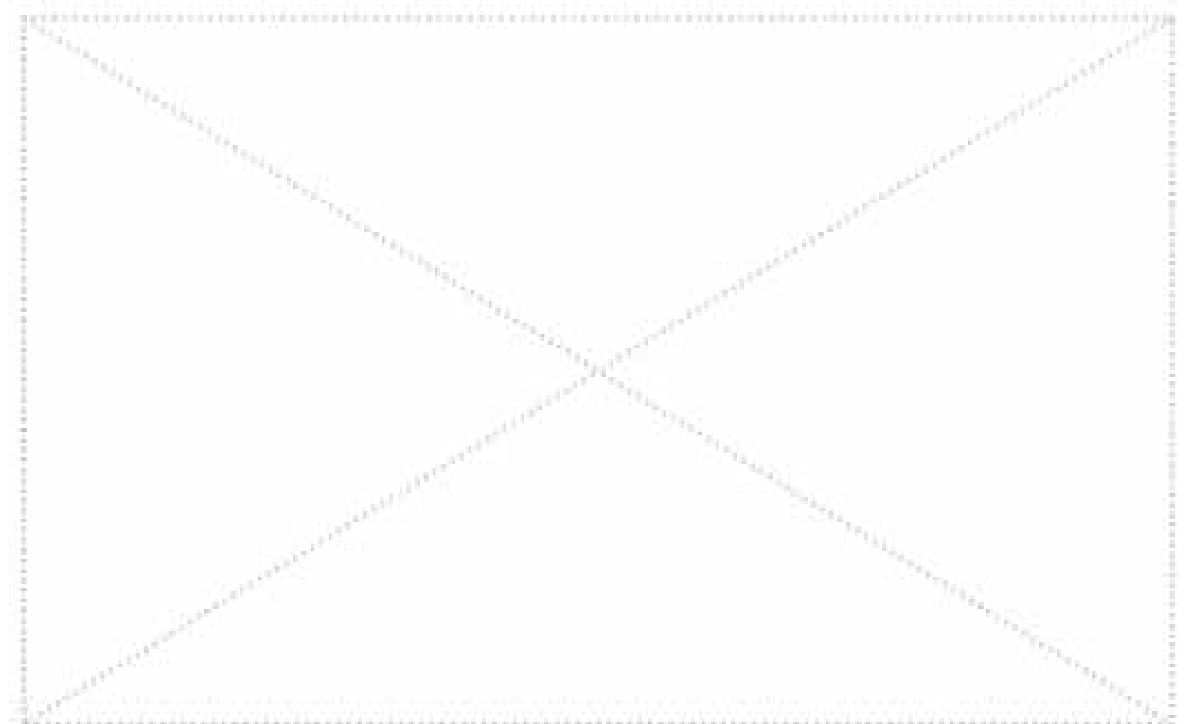
< IFMIF와 LIPAc 구조 비교 >



※ 출처 : IFMIF-LIPAc Diagnostics and its Challenges, Marroncle J. et al., 2012

- (리튬 테스트 루프, ELTL) 핵융합 중성자 발생을 위한 IFMIF의 리튬 타겟 시설의 모든 요소를 포함

< 리튬 테스트 루프(LIFUS6) 구조 >



※ 출처 : Assessment of erosion-corrosion phenomena induced by liquid Lithium on fusion

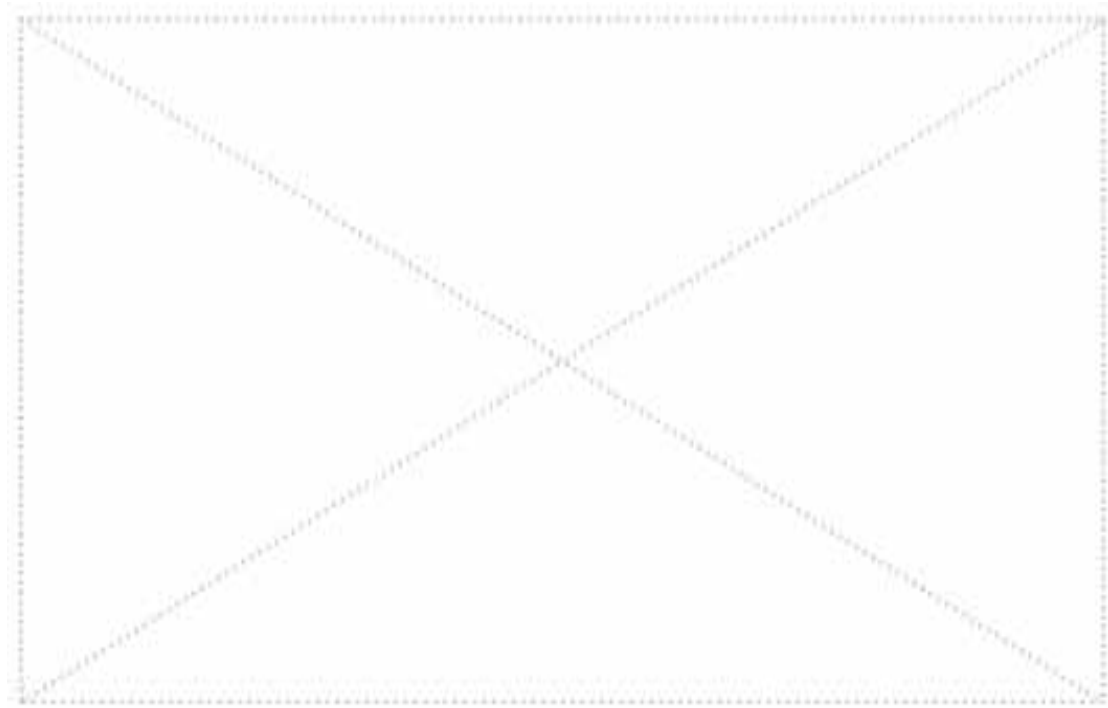


structural materials, Favuzza, P, 2018

- (IFERC\*) 핵융합 3재료, 삼중수소 등 실증로 R&D 및 시뮬레이션 연구를 위해 연구시설 (IFERC, 룩카쇼 지역) 구축

\* IFERC : International Fusion Energy Research Centre

< BA IFERC 조직 체계 >



※ 출처: [https://www.iferc.org/iferc\\_%20project.html](https://www.iferc.org/iferc_%20project.html)

- (DEMO 설계 및 R&D 코디네이션 센터) 핵융합로 및 디버터, 블랑켓 등에 대한 설계, 원격 유지·관리, 초전도 자석, 안전성 등 DEMO 사전개념설계 옵션 평가

※ 저방사화강(RAFM), SiCf/SiC 복합체 등 구조재 개발 및 중성자 증배재, 삼중수소 증식재 고도화, 기능소재 개발 등 공학기술 개발 추진 중

- (컴퓨터 시뮬레이션 센터) 대용량 핵융합 플라즈마 실험 데이터 분석, ITER 운전 시나리오 준비, DEMO 설계 활동 등에 필요한 시뮬레이션을 위한 슈퍼컴퓨터 지원 및 활용

- (ITER 원격실험 센터) ITER 원격 실험에 필요한 장치 및 S/W의 준비 및 검증

- (A-FNS\*) 실증로 로드맵 목표달성을 위해 핵융합 재료 기술 및 관련 데이터의 조기확보 검증을 위해 중성자원 구축 추진(~'31 완공, 룩카쇼)

\* A-FNS : Advanced Fusion Neutron Source

- 핵융합 구조재 헬륨 발생 및 변위로 인한 영향, 블랑켓의 삼중수소 발생 및 회수, 실증로

진단 및 제어장치 내구성 분석 등 R&D 추진

- (추진일정) 개념설계(CDA)(~'20) → 상세설계(EDA)(~'25) → 완공(~'31)

※ 완공 후 '33년까지 F82H 방사화데이터를 확보·분석하여 DEMO 건설여부 및 건설부지를 결정하는 데에 반영

< A-FNS 추진일정(안) >



※ 출처 : Design Progress of Advanced Fusion Neutron Source for JA/DEMO Fusion Reactor, Ochiai, K. et al., 2018

< A-FNS 설계(안) >



## 라. 중국

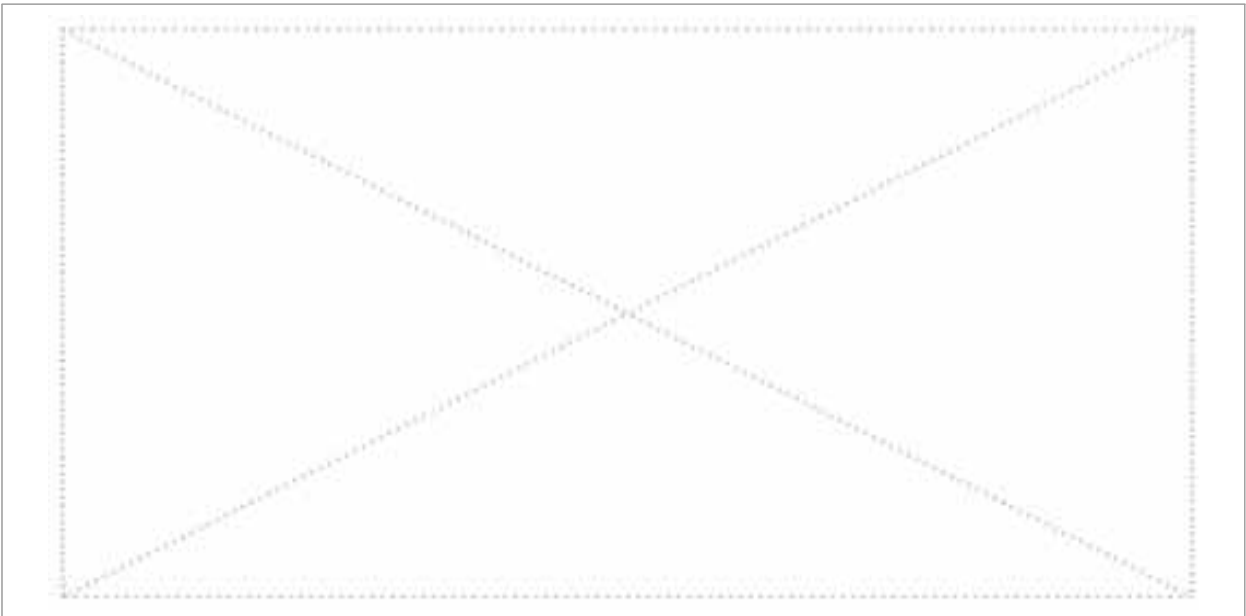
### □ 핵융합 로드맵 수립

- '30~'40년대 CFETR(중국 DEMO) 가동, 2050년대 프로토타입 발전소(PFPP) 완공이 목표로, EU·일본 대비 약 10년 빠른 로드맵을 수립

\* CFETR: Chinese Fusion Engineering Test Reactor, PFPP: Prototype of Fusion Power Plant

- (단계별 목표) 2020년대 CFETR(중국형 DEMO) 건설 착수, 2030년대 1단계 운전착수, 2040년대 2단계 전력생산 실증, 2050년대 프로토타입 발전소(PFPP) 완공이 목표
  - (1단계, '15~) EAST 등 자국 토카막 장치 활용 핵융합연구
  - (2단계, '25~) ITER 사업참여 및 실험결과 반영
  - (3단계, '30~'40년대) CFETR 완공 및 핵심요소기술 실험
  - (4단계, '50~) 핵융합 프로토타입 발전소(PFPP) 건설 추진

[ 중국 DEMO 로드맵 ]



※ 출처: G.Zhuang 외(2018). Progress of CFETR Design

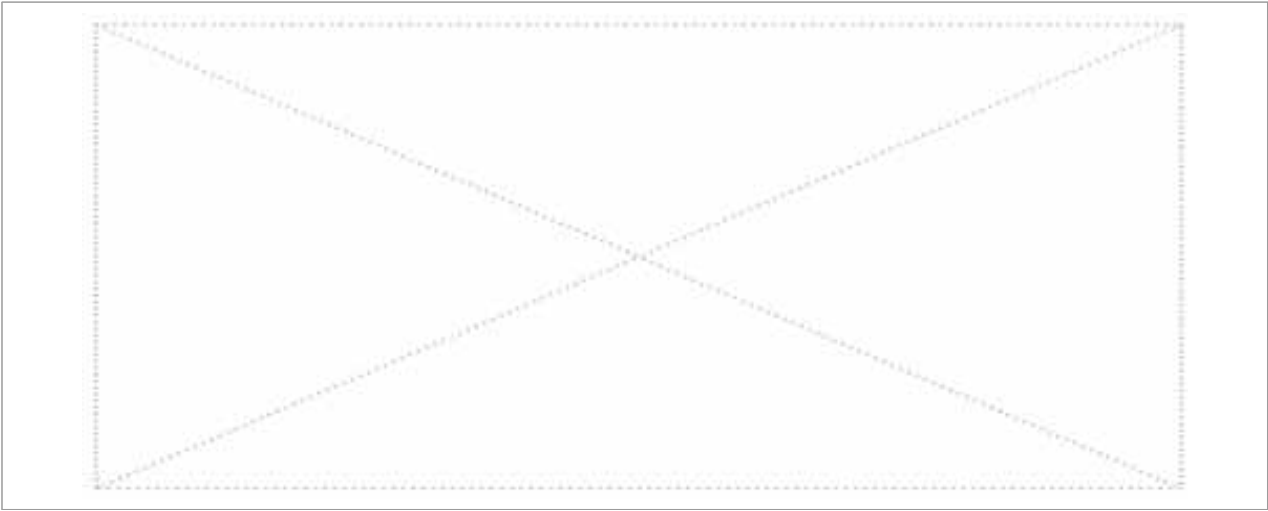
### □ CFETR 및 요소기술 개발

- (CFETR 5개년 계획) 2018년부터 2022년까지 추진 중으로, 5개년 계획에 따라 통합 공학 설계(118개 과제) 및 DEMO 건설 R&D에 총 600백만 달러를 투자 중

\* 물리 설계(14개 과제), Nuclear 설계(16개 과제), 토카막 상세 공학 설계(64개 과제), 추가 세부 기능 설계(18개 과제), 데이터베이스 IDM(6개 과제)

- (DEMO 요소기술) 통합 공학설계, 자석, 진공용기, 내부 장치, 원격 조정, 설계 표준, 가열 및 전류, 진단, 8개 CFETR 공학설계 주요이슈를 선정

[ CFETR 공학설계 주요이슈 ]



※ 출처: G.Zhuang 외(2018). Progress of CFETR Design

- (재료 로드맵) 3년에 걸쳐 수립했으며, 시뮬레이션, 모델링, 재료, 제작, 재료 검증, 재료 테스트 시설 등에 관한 재료 로드맵을 제안

[ CFETR 재료 로드맵 ]

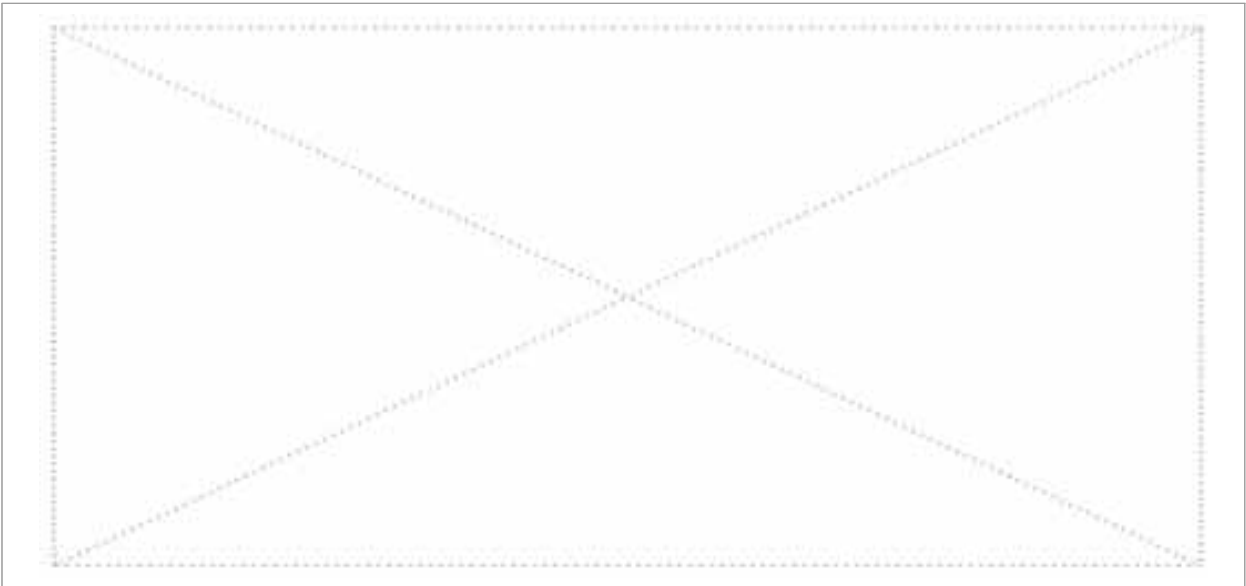
| 구분                       | 2020                   | 2030s            | 2040             |
|--------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| FW: W, Walloy            | 3-5dpa                 | 10dpa, CFETR     | 20dpa, CFETR     |
| Advanced W               | 1E25-1E28 PSI          | CFETR            | CFETR            |
| Divertor                 |                        |                  |                  |
| ODS-Du, Cu alloy         | 10dpa                  | 50dpa, CFETR     | 100dpa, CFETR    |
| Structure Material       |                        |                  |                  |
| Low active FS            | 5dpa, 1000T            | 50dpa, CFETR     | 100dpa, CFETR    |
| ODS-LFS                  | 100dpa, kg             | 50dpa, CFETR     | 100dpa, CFETR    |
| Breeding Material        |                        |                  |                  |
| Li4SiO4                  | specification, T level | fix, CFETR       | CFETR            |
| Li2TiO3                  | specification, T level | fix, CFETR       | CFETR            |
| Neutron multiplier       |                        |                  |                  |
| Be12Ti                   | Fission reactor        | fix, CFETR       | CFETR            |
| Resistance tritium layer |                        |                  |                  |
|                          | 500C, 1000             | 500C, 1E4, CFETR | 500C, 1E4, CFETR |

\* 출처: J.Li(2018). Chinese Fusion Energy Strategy

○ (삼중수소 R&D 투자) 블랭킷, 삼중수소 플랜트, 재료, 삼중수소 연소 비율 등에 관한 연구를 수행 중으로, 삼중수소 관련 R&D에 총 253.5백만 위안을 투자

\* TBR이 높은 블랭킷 설계, CFETR 고체 블랭킷 제작 및 핵심 기술 연구 등, CFETR 삼중수소 플랜트 시스템 설계, CFETR 플라즈마 배가스에서의 삼중수소 회수 및 재순환 기술, CFETR 증식 블랭킷 관련 삼중수소 추출 및 측정 공학기술 연구 등

[ 중국 삼중수소 연구사업 추진계획 ]



※ 출처 : Baojie Nie 외(2018) Insights into fuel start-up and self-sufficiency for fusion energy : The case of CFETR

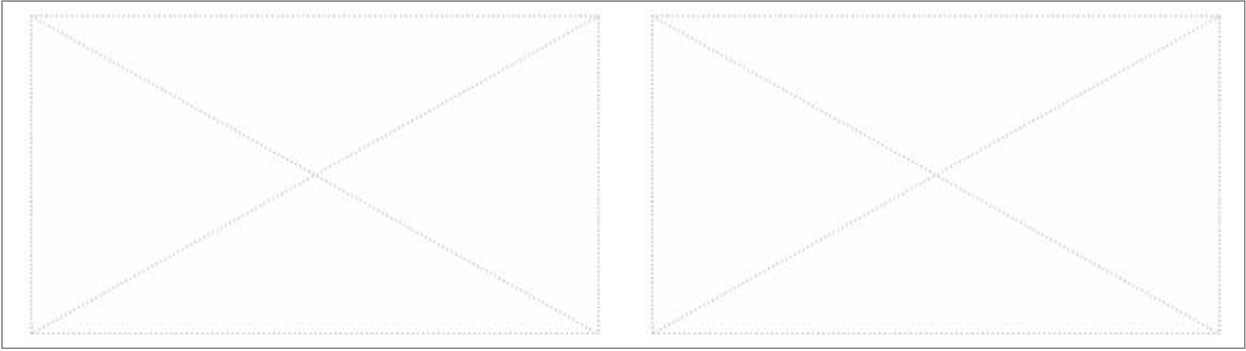
□ 주요 연구시설

○ (EAST) 중국의 핵융합 로드맵 상 대표적인 핵심 초전도 토카막장치로서, 고성능 플라즈마 장시간 운전을 중점적으로 연구

- 32MW의 H&CD 시스템 및 80여 종의 진단장치, 텅스텐 디버터 및 ELM 제어를 위한 RPM 코일 구축

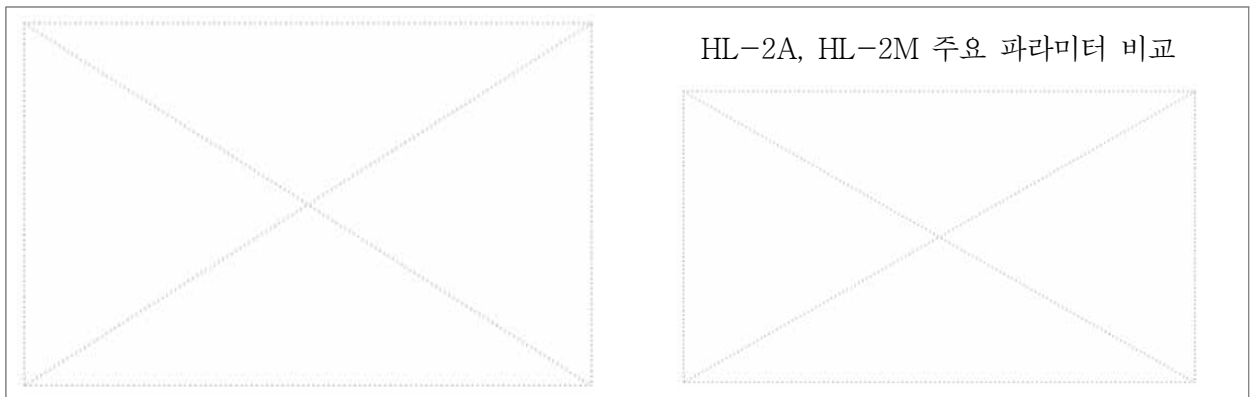
- 고성능 플라즈마(H-mode) 운전 403초 달성 성공('23) 및 전자온도 1억℃ 달성 성공

[ EAST 시설현황 ]



- (HL-2M) HL-2A의 디버터 성능 향상, 보조가열장치 10MW 추가(총 가열능력 25MW) 등을 통해 HL-2M으로 업그레이드 중이며, '20.12월 FP 달성. 플라즈마 전류 1MA 달성('22.11월)

[ HL-2M 시설현황 ]



- (CFETR\*) 중국형 핵융합공학실험로(CFETR) 건설('35 완공, 1천억 위안)을 통해 ITER와 실증로의 기술적 간극 해소 추진

\* CFETR : Chinese Fusion Engineering Test Reactor

- 실증로 주요기술의 조속한 확보 및 핵융합 상용로 기반 구축을 위해 CFETR 건설 추진 (연소플라즈마, 고성능 정상상태운전, 삼중수소 증식기술 확보 목표)

※ 단계별 목표 : (1단계) CFETR 안정적 운영 및 삼중수소 자가증식을 통해  $Q=1\sim 5$ , 200MW 달성, (2단계) 상용화 가능한 핵융합 발전을 위해  $Q>10$ , 1GW 이상 달성

- (CRAFT\*) 초전도자석, 디버터 기술연구 등 CFETR 건설 지원을 위한 통합연구시설 (CRAFT, 허페이) 구축('19~'25, 60억 위안)

\* CRAFT : Comprehensive Research Facility for Fusion Technology

- (초전도자석기술연구시스템) CFETR 초전도 재료, 초전도 도체, 거대 자석 연구를 위한 테스트 시설 구축
- (핵심 토카막 시스템) 가열, 원격유지보수, 디버터, 진단 연구 시스템 구축

- (HINEG\*) 가속기 기반 고밀도 D-T 핵융합 중성자 발생장치 개발(10억 달러)을 통해 중성자 조사 및 재료연구 추진

\* HINEG : High Intensity D-T fusion NEutron Source

- (HINEG-I, 개발완료) ITER TBM 구조재 후보인 CLAM 조사 테스트 진행(핵에너지안전기술연구소(INEST) 개발)
- (HINEG-II, 공학설계) 재료 조사 테스트를 위한 다양한 옵션 평가 및 사전 분석 수행

※ 이탈리아 ENEA와의 국제협력을 통해 설계 최적화 및 핵심기술 R&D 추진

- (HINEG-III, 개념설계) GDT(Gas Dynamic Trap)를 기반으로 핵융합 중성자원 개발을 목표로, INEST(중)-BINP(러) 국제협력을 통해 개발 착수

#### < HINEG 개발 로드맵 >



※ 출처 : Latest Fusion R&D Activities at INEST, Wu, Y., 2019

## 마. 미국

### □ 배경

- 2050 넷제로 달성, 에너지 안보 및 기술 주도권 확보를 위한 게임체인저기술로서의 핵융합 기여 가능성 주목
  - 특히 최근 핵융합 과학기술적 중요 성과 발표 및 민간 투자 확대 등에 따른 핵융합에너지 개발 가속화를 위한 지원 확대 필요성 제기
- 에너지 불평등 해소 등 에너지 정의 실현을 위한 에너지를 추진 중이며, '핵융합에너지 상용화를 위한 담대한 10년 비전(BDV)' 수립 계획 발표(22.03)를 통해 핵융합에너지 조기 상용화를 위한 핵심기술 개발 가속화 추진 착수

### □ 목표

- '40년대 핵융합에너지 상용화를 목표로, '35년 핵융합파일럿플랜트(FPP) 본격 운전을 위한 핵심기술 개발 가속화
  - (FPP 목표) 미래 에너지 믹스에서의 핵융합에너지 전력생산 기여 및 경쟁력 확보에 필요한 과학적, 기술적 이슈 해결

### □ 추진전략

- (공공-민간 파트너십) 마일스톤 기반 핵융합 개발 프로그램, INFUSE\* 등 다양한 공공-민간 협력 프로그램 운영을 기반으로 핵융합 기술 개발 가속화
  - ※ 공공-민간 공동참여, FPP 예비개념설계 및 기술 로드맵 마련을 위한 마일스톤 기반 핵융합 연구개발 프로그램 착수 (22. 12. 공모 마감)
  - \* (INFUSE : Innovation Network for Fusion Energy) 산업체가 공공 연구기관의 전문성을 활용하여 핵융합에너지 개발 난제 해결에 기여할 수 있도록 지원하는 사업으로, 연간 프로젝트별로 민간 20% 현금 분담, 정부 5만 달러~25만 달러 투자
- (전략적 투자) 미 에너지부 핵융합 크로스컷팀을 중심으로 핵융합 핵심기술 개발 및 기술 타당성 검증을 위한 최적의 투자 전략 모색
  - ※ FPP건설을 위한 과학기술 혁신과 연구 핵심과제(NASEM, 2021) 등을 고려
- (신규 연구시설 기획 및 건설) 중성자원 및 재료연구, 기반기술 개발, 관성핵융합 연구 지원 등을 위한 핵융합 신규 연구시설 추진 고려중
- (제도적 기반 구축) 안전 규제 프레임워크 등 FPP 건설 지원을 위한 제도적 기반 구축 추진
  - ※ 차세대 첨단 원자로 개발 가속화를 위해 제정된 원자력혁신 및 현대화법(NEIMA :



Nuclear Energy Innovation and Modernization Act '19)을 근거로, NRC(Nuclear Regulation Commission)에서 기술 포괄적(technology-inclusive) 핵융합 규제 프레임워크 개발 중(법적 수립기한 : '27.12월)

- (사회적 수용성) DEIA (다양성, 공평, 포괄적, 접근성)를 토대로, 핵융합에너지에너지 개발 사회적 인식 제고 및 정책 추진 동력 확보 노력
  - (국제협력) ITER 사업 지속적 참여를 통한 핵융합에너지 개발 역량 구축 및 기술 개발 지원, 핵융합 주요국과 공동실험, 협력연구 등 전략적 국제협력 추진
- 핵융합과일릿플랜트 추진 로드맵
- (추진 일정) 개념 및 예비설계('21~'28년) → 최종 설계 및 건설('28~'32년) → 운전 착수('32~'35년) → 1단계 운전('35~'40년) → 2단계 운전('40~'45년)

[ 핵융합과일릿플랜트 추진 로드맵 ]



※ 출처 : NASEM (2021).

- 미 에너지부 핵융합 에너지 개발 로드맵



※ 출처 : S. Hsu, Update on the Bold Decadal Vision (BDV) for Commercial Fusion Energy, Fusion Power Associates 43rd Annual Meeting and Symposium, 2022.12.07.

□ 연구개발 프로그램

- (연구프로그램 및 기반연구) FES(Fusion Energy Science)를 통해 핵융합 에너지 개발을 위한 연구프로그램 및 플라즈마 기반 과학연구 지원

[ 미국 주요 연구프로그램 ]

| 프로그램                           | 세부내용   |
|--------------------------------|--|
| 연소 플라즈마:<br>기반(foundation)     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (목표) 플라즈마 가둠, 다이내믹, 주변 물질과의 상호작용 등에 대한 이해</li> <li>• (분야) 연소 플라즈마 관련 과학(ITER 관련 프로젝트 등), 검증된 예측 모델링, 연구역량 증대</li> <li>• (추진방법) DIII-D, NSTX-U 등의 핵융합 실험장치 적극적 활용, 고성능 컴퓨터를 기반으로 한 모델링과 시뮬레이션, 국제협력, 실험 프로그램 및 지속적인 시설 개선</li> </ul>                   |
| 연소 플라즈마:<br>장시간 운전(long pulse) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (목표) 초전도 토카막의 장시간 플라즈마 운전연구 및 연소 플라즈마 환경에 적합한 새로운 재료 개발</li> <li>• (분야) 장시간 플라즈마 운전 유지, 중성자 조사 및 고열속/고입자속 부하가 핵융합에 미치는 영향</li> <li>• (추진방법) 국제협력을 기반으로 해외 장치의 적극적 활용, 재료연구를 위한 새로운 연구 플랫폼 구축 모색, 액체-금속 벽 재료연구 지원</li> </ul>                           |
| ITER 사업 지원                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (목표) 핵융합을 통한 고전력 에너지 생산의 과학적 타당성 실증</li> <li>• (분야) ITER 프로젝트 지원</li> <li>• (추진방법) ITER 프로젝트 성공에 따른 '20년대, '30년대 미국의 과학적 성과 확보를 위해 세계적 수준의 ITER 연구팀에 참여</li> </ul>  |
| 플라즈마 과학                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (목표) 플라즈마 특성의 다양한 활용을 위해 물질의 기본성질, 행동 등을 연구</li> <li>• (연구분야) 일반 플라즈마 과학, 고에너지밀도 실험실 플라즈마(High-Energy-Density Laboratory Plasma), 자화 플라즈마(Magnetized Plasma), 혁신적인 측정</li> <li>• (추진방법) 새로운 발견을 위한 플라즈마 연구, 핵융합과 관련성이 없는 분야에서의 플라즈마 응용을 지원</li> </ul> |

- (SciDAC 프로그램) Advanced Scientific Computing Research(ASCR)가 주관하는 SciDAC\* 프로그램에 산·학·연이 공동으로 참여하여 장치 통합 모델링 개발 가속화를 위한 다양한 핵융합 프로젝트 추진>(\* SciDAC : Scientific Discovery through Advanced Computing)

- SciDAC은 총 12개 핵융합 과제를 지원하며, 이들 과제들은 전영역 핵융합 시뮬레이션 모델링(WDM : Whole Device Modeling) 개발을 중심으로 운영('23~'27년간 약 1.12억 달러 투입)
- INCITE\*는 슈퍼 컴퓨팅 자원을 활용한 과학적 발견 및 기술 혁신 가속화 지원 프로그램으로, 총 4개 핵융합 과제 지원

\* INCITE : Innovative and Novel Computational Impact on Theory and Experiment

- ECP\*는 엑사스케일급 슈퍼컴퓨터 Frontier 생태계 구축 지원 프로그램으로, 핵융합시스템 예측력 향상을 위한 WDAMAPP, EXAALT 과제 지원

\* ECP : Exascale Computing Project

- Aurora ESP(Early Science Program)는 엑사스케일급 슈퍼컴퓨터 Aurora 생태계 구축 지원 프로그램으로, 딥러닝을 활용한 플라즈마 붕괴에 관한 핵융합 과제 지원

○ (초고성능컴퓨팅 자원) 미국의 최대 강점인 고성능 슈퍼컴퓨팅 자원을 토대로 핵융합에너지 개발 혁신 역량 강화 방안을 적극적으로 모색

- DOE 산하 연구기관의 고성능 슈퍼컴퓨터(Summit, Theta, CORI 등)를 활용한 핵융합 슈퍼컴퓨팅 기술 개발 추진

- 엑사스케일급 초고성능 슈퍼컴퓨터 구축시('23년 예정) 핵융합 슈퍼컴퓨팅 기술 개발은 더욱 가속화될 것으로 예상

[ 초고성능컴퓨팅 지원 현황 ]

| 슈퍼컴퓨터    | 운영 기관                       | 성능      | 기타  |
|----------|-----------------------------|---------|---|
| Summit   | ORNL-OLCF<br>(오크리지국립연구소)    | 200PF   | · ASCR-SciDAC, INCITE 프로그램 지원   |
| Frontier | ORNL-OLCF<br>(오크리지국립연구소)    | > 1.5EF | · ECP 연구 프로그램 연관<br>· '22년 구축   |
| Theta    | ANL-ALCF<br>(아르곤국립연구소)      | 11.7PF  | · INCITE 프로그램 지원  |
| Aurora   | ANL-ALCF<br>(아르곤국립연구소)      | ≥2 EF   | · Aurora ESP 연구 프로그램 연관<br>· '23년 구축 예정   |
| CORI     | LBNL-NERSC<br>(로렌스버클리국립연구소) | 30PF    | · DOE-FES(Fusion Energy Science) 프로그램 지원<br>※ NERSC 사용시간 기준, FES 활용 비율 총 13.2%('19) |

○ (슈퍼컴 지원) 엑사스케일급 슈퍼컴퓨터 Frontier 생태계 구축 지원 프로그램으로, 핵융합시스템 예측력 향상을 위한 WDAMAPP, EXAALT 과제 지원

[ 핵융합 관련 Exascale 활동 ]



※ 출처 : Van Dam, J. W.(2018).

- (MPEX 개발 착수) '18년에 PMI 연구의 실험역량 제고를 위해 ORNL의 Proto-MPEX Source Experiment에 기반한 MPEX 개발 착수
  - 시설 준비 및 장기 조달에 대한 기준선 검토를 완료('22.6)했으며, '23년 하반기에 장치조립 예정

[ MPEX 프로젝트 개념 ]



※ 출처 : Van Dam, J. W.(2018).

- (QIS 활용) Quantum Information Science(QIS) 활용 방안 모색
  - Fusion Energy Sciences Roundtable on Quantum Information Science에서 양자 컴퓨터, 양자 시뮬레이션, 양자 진단기술, 양자 신물질 등을 활용한 핵융합 연구에 관한 6개의 우선 연구과제 제안('18) 및 선정('19)
- 주요 연구시설
  - (소형 핵융합 추진) DEMO 대신, 가능한 적은 비용으로 핵융합 전력 생산을 검증할 수 있는 소형 파일럿 발전소(Compact Pilot Plant) 건설 프로젝트 및 핵융합 프로토타입 중성자 원시설(FPNS) 건설 제안
  - (DIII-D) GA에서 운영 중인 상전도 토카막 장치로 100개 이상 연구기관에서 약 650명의 연구자들이 연구 프로그램에 참여 중

- ECH 3.5MW, NBI 16MW의 가열장치 및 50개 이상의 진단장치를 갖추고 있으며, 고성능 AT(Advance Tokamak) 모드 운전 달성
- 지속적인 장치 업그레이드를 통해 새로운 과학적 연구과제 수행

[ DIII-D 주요 업그레이드 계획 및 새로운 연구과제('19~'24) ]



| New Scientific Exploration               | Enabled by                      |
|--|---------------------------------|
| Low torque, high beta                    | 2nd co-counter steerable NBI    |
| Electron heated regimes                  | 10 gyrotron system              |
| Reactor current drive schemes            | Top-launch EC, Helicon, LHCD    |
| 3d spectral flexibility (n=1-4)          | New 3d coils and power supplies |
| Divertor model validation & optimization | Divertor mods and diagnostics   |
| Reactor-relevant materials               | New PFCs and tests of materials |

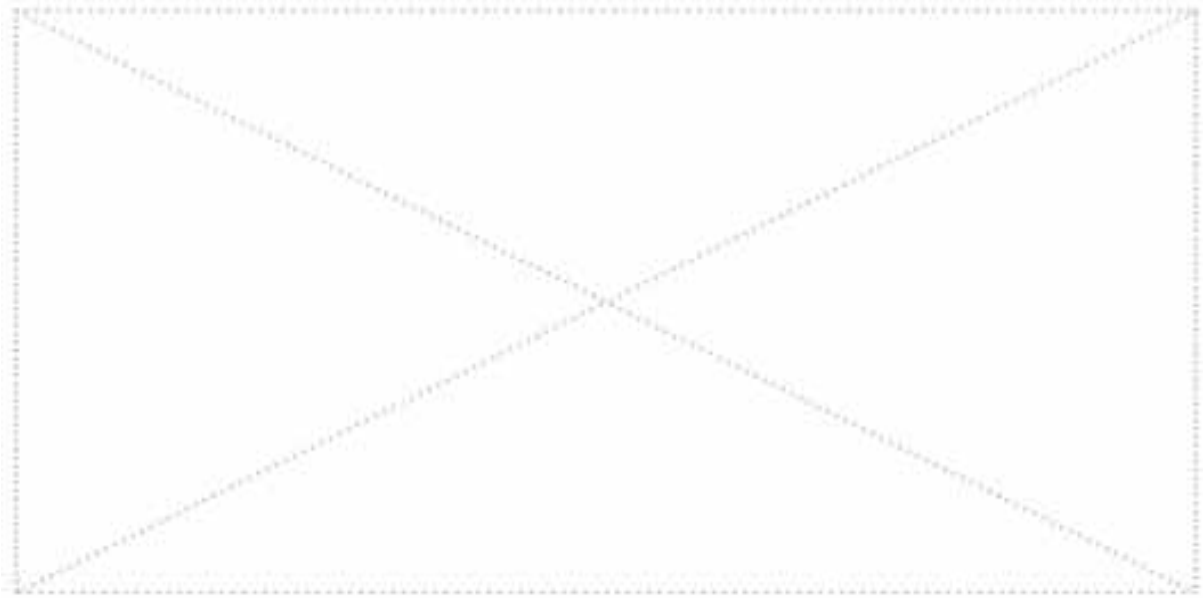
※ 출처 : GA(2018)

[ DIII-D 장치 현황 ]



- (NSTX-U) 기존 NSTX에 94M\$(약 1,120억원)를 투자하여 '15년도 업그레이드 완료
- '16년 운전 시작 10주 후 장치에 심각한 문제가 발생하여 운전을 중단하고 '17년부터 NSTX-U 보수·개선을 위한 Recovery 프로젝트 착수

[ NSTX-U 시설 현황]



## 바. 영국

### □ 배경

- 과감한 청정에너지 정책 추진\*에 따른 넷제로 달성 가속화 및 녹색 일자리 창출 기여 등을 위해 핵융합에너지 개발 가속화 추진

\* G7 국가 최초로 넷제로 달성을 위한 ‘탄소중립법’ 수립('19.6)

- 글로벌 핵융합에너지 상용화 기술 선도를 위해, 2040년 운전을 목표로 STEP 건설 추진 계획 발표('19.08)

※ ‘녹색 산업혁명을 위한 10대 계획’('20) 및 ‘에너지 백서’('20)에 STEP 건설 계획 포함

### □ STEP 개발 로드맵

- '40년 운전을 목표로, STEP(Spherical Tokamak for Energy Production) 로드맵 추진

- (최종 목표) 중소형급 구형 토카막 장치 운전을 통해 핵융합에너지 상용화 가능성 제시
- (세부 목표) △ 100MW 이상의 전력생산, △ 핵융합에너지의 다양한 활용을 위한 혁신, △ 삼중수소 자가증식 기술 확보, △ 핵융합 조건에 적합한 재료 및 장치 개발, △ 핵융합발전소 경제성 확보 가능성 제시\*

\* 핵융합발전소 전주기 비용 타당성 제시

- (장기 일정) 개념설계(~24.3월)\* → 상세설계 및 본공사 준비('24.4월~'32년) → 본공사('31년~'40년) → 시운전 및 운전('39년~)

\* 현재까지 STEP의 정확한 장치 크기 및 파라미터는 발표되지 않음

- (예산) 개념설계 단계에 총 2.2억 파운드 투자, 향후 20여년 간 엔지니어링 및 건설 조달 등에 총 200억 파운드 투자 예상

- (부지) 약 2년간의 부지 선정과정\*을 거쳐, 노팅햄셔 지역 웨스트버튼의 화력발전소 A 부지로 확정

\* 부지공모('20.12~'21.3) → 1차 후보지 5곳 선정('21.10) → 1차 후보지 평가('21.11~'22.9) → 최종 후보지 발표('22.10)

- (규제 체계) 보건안전청(HSE) 및 환경청(EA) 중심의 현행 핵융합 연구개발 시설에 관한 규제기관 체제 유지 및 규제 확실성 확보 추진\*

\* 에너지안보법(Energy Security Bill)(법안 의회 검토 중)을 통해, 원자력설비법(NIA 65)의 규제 인허가 요건에서 핵융합에너지시설 배제 예정

- (조달) STEP 조달 체계 구축 및 공급망 확보를 위해, UK Industrial Fusion Solution



Ltd.(UKIFS) 유한회사 설립('23.02) 및 STEP 통합조달팀(STEP Integrated Delivery Team) 구성 추진 중

[ STEP 로드맵 ]



※ 출처 : I. Chapman, An update on the UK fusion programme, The 43rd Annual Fusion Power Associates Symposium, 2022.12.08.

□ 주요 연구시설

- (FTF/MRF\*) STEP 목표 달성을 위해 핵융합 장치·재료 전주기 테스트를 위한 핵융합 재료연구시설 (FTF) 구축 및 기존 원자력 시설(MRF) 활용

\* FTF : Fusion Technology Facilities / MRF : Materials Research Facility

- (FTF) 국가핵융합플랫폼(NFTP)의 주요시설 중 하나로, 핵융합 조건 하에서 핵융합 장치 및 재료 전주기 테스트('21.6 개소/Culham Science Center에 소재)

※ (주요장비) 열-수력 테스트 스탠드, 전자기 테스트 리그, 재료 접합 검증용 테스트 리그, 신소재 합금 및 제조 물질 분석용 테스트 리그 등

- (MRF) 방사능 물질 분석을 위한 국가원자력사용자시설(NNUF: National Nuclear User Facility)로서 핵융합, 원자력 분야의 연구자들이 활용 가능(user-oriented facility)('16년 개소/예산: 연간 2M£)

※ (주요장비) 샘플 준비부터 미세구조분석, 기계적 테스트, 열물성 분석 등을 위한 다양한 장비 구축

- (H3AT\*) 핵융합에너지 연료주기와 관련한 삼중수소 관련 첨단 기술 개발을 위해 삼중수소 처리 및 저장 연구시설(H3AT) 구축

\* H3AT : Hydrogen-3 Advanced Technology

※ (주요시설 및 장비) 최첨단 삼중수소 연료주기 인프라, 다양한 삼중수소 관련 실험 지원이 가능한 인클로저 장비, 컴퓨터 시뮬레이션 및 모델 검증 시설, 교육훈련 시설, 탈삼중수소화 관련 시설 등

※ 삼중수소 100g 저장 가능. ITER의 1/20 수준의 삼중수소 연료주기 시스템 운영 예정

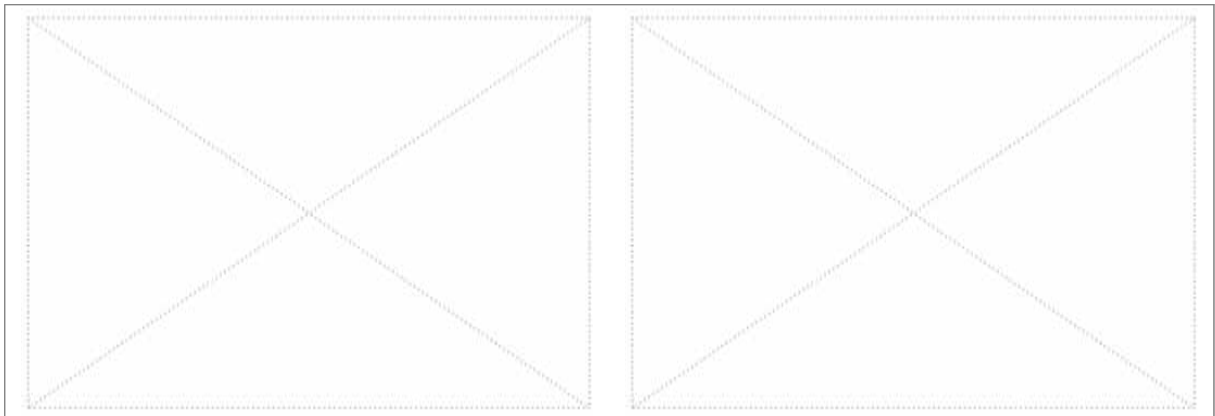
- (RACE\*) JET를 통해 축적된 로봇기술·원격제어 시스템 기술 고도화 및 타분야 적용을 위해 연구시설 활용

\* RACE : Remote Application in Challenging Environments

※ (특징) 약 160명의 엔지니어 근무, 약 40개 프로젝트 운영, 100여개의 산업체 및 13개 대학과 협력, 345M€ 로봇틱스 협력 R&D 수행

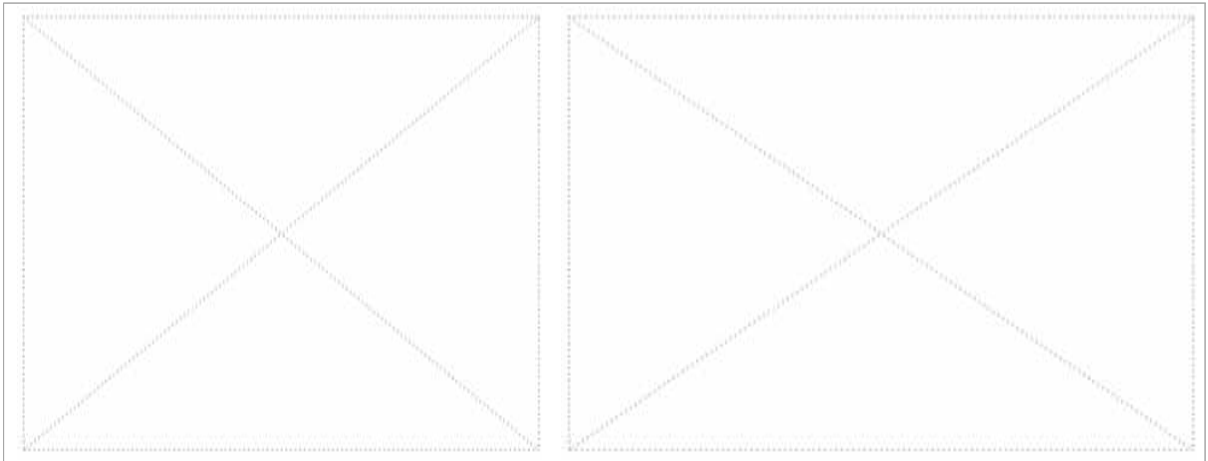
- (JET) 세계 최대의 핵융합 장치로서 전세계에서 유일하게 DT 실험 가능('23 운영 종료)
  - 세계 최초로 DT 실험에 성공('91)하였으며, 약 1초간 16MW 핵융합 전력 생산(Q=0.67)('97)
  - ITER와 동일한 베릴륨 내벽, 텅스텐으로 코팅된 CFC 디버터로 업그레이드('09~'11) 및 NBI(34MW)와 ICRH(22MW) 등 가열시스템 구축
  - DT 실험을 포함하여 ITER의 고성능 플라즈마 운전시나리오 개발 등을 수행 중이며, '22.1월 DT 실험 완료(5초간 총 59MJ Fusion power 달성)

[ JET 시설현황 ]



- (MAST-U) '13년부터 ITER 지원을 위한 과학연구 및 Super-X 디버터 활용 연구 등을 목표로 CCFE의 MAST를 MAST-U로 업그레이드 중
  - NBI 업그레이드, Super-X 디버터, 플라즈마 정상상태 유지를 위한 장치 파라미터 개선 등

[ MAST-U 시설현황 ]



## 사. 민간 동향

### □ 핵융합 산업 및 투자 현황 (‘22.말 기준)

○ (기업 현황) 약 33개의 핵융합 스타트업 활동 중, ‘16년 이후 급증

- (국가별 분포) 미국(21개)과 영국(3개), 캐나다(1개)가 민간 이니셔티브를 주도하며, 최근 독일, 프랑스, 이탈리아 등 유럽 스타트업 등장

- (핵융합 방식) 자기 가둠(15개), 관성 가둠(8개), 자기-관성 융합(7개) 등

- (투자 규모) ‘22.말 기준, 누적 48.6억 달러(6.5조원) 투자 유치(민간 47.4, 공공 1.2)

\* 마이크로소프트(MS)-헬리온에너지 간 전력공급(‘28~, 50MW) 계약 체결(‘23.5월)

#### [ 핵융합 주요 민간 스타트업 현황 ]

| 기업명(국가)                               | 방식/장치  | 성과 및 계획   | 투자 확보 규모   |
|---------------------------------------|--|---|--|
| Commonwealth Fusion System (CFS) (미국) | 자기 가둠<br>토카막<br>(고온초전도체)<br>SPARC, ARC       | [성과] 고온초전도체 20T 달성 (‘21.9)<br>[순에너지] SPARC 장치 건설 중 (‘21~‘25), Q>1 달성(‘25), Q>10 달성 (‘27)<br>[실증로] ARC 장치 200MW 전력생산 (‘30s초) | 2.6조원(발케이즈, 구글 등 총 36곳)  |
| Helion Energy (미국)                    | 자기-관성 핵융합<br>Polaris 등                       | [성과] Trenta 장치 1억도 달성 (‘21)<br>[순에너지] Polaris 장치 건설 중 (‘21~‘23)<br>[실증로] 소형 발전소 완공 및 MS社 50MW 전력 공급(‘28)                    | 7.6천억원 (Sam Altman(5천억원), Duston Moskovitz, Mithril 등 총 6곳)        |
| TAE Technologies (미국)                 | 자기 가둠<br>Copernicus, Da vinci 등              | [성과] Norman 장치 7.5천만도 달성 (‘22)<br>[순에너지] Copernicus 건설 중(‘22~‘25)<br>[실증로] Da vinci 전력생산 실증 (‘30s)                          | 1.7조원 (TIFF Investment Management, Chevron Technology, 구글 등 총 17곳) |
| Tokamak Energy (영국)                   | 자기 가둠<br>구형토카막<br>(고온초전도체)<br>ST-80, ST-E1 등 | [성과] ST-40 장치 1억도 달성 (‘22)<br>[순에너지] ST80-HTS 장치 완공(‘26)<br>[실증로] ST-E1 상용로 운전 (‘30s)                                       | 2천억원 (Hans-Peter Wild, UK 혁신&과학 Seed Fund 등 총 5곳)                  |
| General Fusion (캐나다)                  | 자기-관성 핵융합<br>FDP 등                           | [성과] 플라즈마 인젝터 플라즈마 가둠 시간 10ms, 3백만도 달성(‘22)<br>[순에너지] FDP 장치 건설 중(‘22~‘27년)   | 4.2천억원 (Business Development Bank of Canada, Jeff Bezos 등 32곳)     |

○ (특이 사항) 미국은 핵융합 전력생산 실증을 산업계가 주도하고 있으며, 산업계의 요구에 따라 핵융합 규제체계 개발도 진행되고 있음

- 원자력 발전소와 다른 방사선 발생시설로서 규제토록 잠정 결정(‘23.4)

※ 영국도 원자력 발전소와 별도 규제를 위해 원자력설치법에서 핵융합 분리 예정(KSTAR도

방사선 발생장치 적용대상으로 분류되어서 `07년도 사용허가 취득)

- 주요 기업은 5년내(~`28) 핵융합 순에너지 생산, 30년대 중반 전력생산 실증을 목표로 장치를 개발 중이며, 순에너지 생산은 일부 가능할 것으로 예상되나 전력생산 실증은 리스크가 높음

※ 공공분야 실증로는 ITER에 초점을 맞춰 ITER D-T 실험(`35년 이후) 결과에 따라 설계 마무리 후 50년대 완공 목표(中 CFETR, 英 STEP은 40년대 완공 목표)

□ (미국) Commonwealth Fusion System(CFS)

- (개요) 美 MIT Plasma Science and Fusion Center 스핀오프 기업으로, 스타트업 중 가장 빠르고 상대적으로 가능성 높은 프로젝트로 평가

\* (투자액) `21년 기준 약 20억 달러(한화 약 2.6조원), 핵융합 스타트업 최대 규모

- (방식) 고온초전도체 활용 자기 가둠 방식, 중수소-삼중수소 핵융합 방식

- (자기 가둠) 자기 가둠의 토카막 장치에 고온초전도체 적용, 저온초전도체 보다 높은 고자장·고밀도 플라즈마 핵융합 반응 유도

· 고온초전도체를 통해 ITER 등의 토카막에 적용되는 저온초전도체(-269℃, 최대 16T) 보다 높은 고온·고자기장(약 -253℃(CFS 자석), 최대 20T 이상) 구현 가능

· 고온초전도체 활용에 따른 자석 부피 감소 등으로 장치 소형화 및 건설비 절감 기대

· 자기장 증가와 성능 증가 간 상관관계 입증, 대형장치 대비 높은 D-T 중성자에 의한 구조재, 고속 이온에 의한 대면재 손상 문제 해결 필요

- (중수소-삼중수소 방식) 핵융합 발전의 가장 유력한 핵융합 연료 반응으로, 중수소-삼중수소 핵융합 반응으로 발생한 중성자의 운동에너지를 열에너지로 전환하여 터빈을 돌려 전기 생산

· 상용로의 경제성 확보를 위한 삼중중소 증식기술 개발 필수

- (장치 개발) SPARC 장치 개발 중

- (성과) 20T급 시험용 고온초전도 자석 제작 성공(`21.9)

- (SPARC 장치) 장치 건설(`21~`25), Q>1 달성(`25), Q>10 달성(`27)

- (ARC 장치) 건설 및 Q>10, 200MW 전력생산(`30년대 초)

\* MIT와 공동으로 ARC에 적용할 액체(용융염) 블랑켓 연구를 수행 중이나, 삼중수소 제어, 구조재 부식, 재료 안전성 및 블랑켓 유속 감소 가능성 등의 문제 해결 필요

□ (미국) Helion Energy

- (방식) 자기-관성 가둠 방식, 중수소-헬륨3 핵융합 방식
  - (자기-관성 가둠) 역자기장(FRC)\* 방식으로 플라즈마를 생성하고, 플라즈마를 가속·충돌시켜 1억도 고밀도 핵융합 조건을 형성
    - \* Field Reversed Configuration, 외부 자기장이 플라즈마 입자를 움직이게 하고, 플라즈마 입자의 움직임이 자기장을 형성하여 플라즈마 가둠이 발생
  - 플라즈마 가속·충돌을 통해 고밀도 플라즈마를 생성할 수 있어 비점화(Q<1) 수준에서도 전력생산 가능하나, 핵융합 펄스 반복률 제고(現 10분에 1번) 등 많은 기술적 난제가 존재
  - (중수소-헬륨3 방식) 중수소-헬륨3(D-3He) 연료를 사용하여 핵융합 반응에서 생성된 양성자를 이용하여 직접 전기생산
    - 중성자가 아닌 양성자가 발생하여 직접 전기생산이 가능하며, 중성자 방사화, 삼중수소 증식기술 개발 등의 문제 미발생
    - 3He 연료가 지구 상에 희귀하여 별도로 생산이 필요하며, 5억도 이하에서는 연료 내에서 D-D 반응을 일으켜 삼중수소와 중성자 발생
    - ※ 특허받은 고효율 폐쇄 연료 사이클을 활용하여 D-D 핵융합 반응으로 3He을 생산한다고 밝히고 있으나, 공개된 정보가 부족하여 판단이 어려움
- (장치 개발) 순전력 생산 실증을 위한 Polaris 장치를 개발 중이며, `28년까지 마이크로소프트社에 전력 공급(50MW)하는 계약 체결(`23.5)
  - (성과) 6번째 프로토타입인 Trenta 장치 플라즈마 1억도 달성(`21)
    - 10분마다 1번의 핵융합 펄스를 시행(다음 장치에서는 더 높은 반복률 목표)
  - (Polaris 장치) 장치 건설(`21~`23), 순전력 생산 실증(`24)
    - (Polaris 목표) ① 연속운전 중 핵융합 펄스 반복률 향상(초당 10번의 핵융합 펄스달성), ② 순전력(net electricity) 실증, ③ D-D 핵융합 반응을 통한 3He 생산 실증
  - (소형 실증로) `28년까지 소형 발전소 완공, MS社에 전력 공급
    - 소형 발전소는 Polaris 크기로 전기 그리드 접속기술과 하드웨어 포함 예정 (MS社에 공급할 전력생산 장치는 Polaris인지 소형발전소인지 불명확)

□ (미국) TAE Technologies

- (방식) 자기 가둠 방식, 양성자-붕소(p-B11) 핵융합 방식
  - (자기 가둠 방식) 역자기장(FRC) 방식으로 플라즈마를 생성, 충돌시킨 후, 중성입자빔을 통해 충돌한 역자기장 플라즈마를 장시간 안정화시켜 핵융합 반응 유도

- 중성입자빔은 불안정성이 높은 역자기장 플라즈마 제어에 용이
- 중성입자빔 주입의 정확성 및 안정성 제고, 빔-플라즈마 상호작용 제어 등의 기술 확보 필요
- (양성자-붕소 방식) 핵융합 반응시 중성자 대신 알파입자가 생성되어, 중성자 방사화 및 삼중수소 증식기술 개발 등의 어려움은 발생하지 않으나, 10억도 이상 핵융합 최적 반응온도 등 난제 존재
- (장치 개발) `25년 순에너지 생산을 목표로 Copernicus 장치 건설 중
  - (성과) Norman(C-2W) 장치에서 플라즈마 7.5천만도 달성('22)
  - 구글(Google)의 지원으로, AI 및 머신러닝을 활용한 데이터 처리를 통해 3~4초 내에 샷 데이터 처리 기술 확보
  - (Copernicus 장치) 장치 건설 중('22~'25), 중수소-삼중수소 1억도, 순에너지 생산 실증('25)
  - (건설예산) 약 2억달러(한화약 2.6천억원)
  - (Da vinci 실증로) 세계 최초 양성자-붕소 핵융합 발전소 건설, 350~440MW 전력 생산(30년대 초)
  - (전기생산 방식) 하전 입자 운동에너지를 활용한 직접에너지변환(direct energy conversion) 방식 채택 예상, 실험적으로 검증된 바 없는 방식

□ (영국) Tokamak Energy

- (방식) 자기 가둠 방식, 중수소-삼중수소 핵융합 방식
  - (자기 가둠 방식) 자기 가둠 방식의 구형 토카막(spherical tokamak) 장치에 고온초전도체를 적용하여 고자장·고밀도 플라즈마 핵융합 반응 유도
  - ITER 등의 전통 토카막(conventional tokamak) 대비 플라즈마 안정성 및 가둠 성능이 높은 구형 토카막에 고온초전도체를 적용하여, 소형 핵융합 장치에서 고자기장·고효율 핵융합 생성
  - 구형 토카막의 구조적 특징에 따른 장시간 고성능 플라즈마 구현 어려움 및 플라즈마 대면재의 내열성 확보 등의 문제 해결을 위해 장치의 공학적 복잡성\* 증가 예상
  - \* 전통 토카막 장치 대비 플라즈마 제어 기술 향상 및 높은 자기장·열부하를 제어할 수 있는 신기술 개발 등이 필요
  - 고온초전도체 활용 장치에 적용되는 자기장과 성능 간 상관관계 입증, 장치 소형화에 따른 높은 D-T 중성자에 의한 구조재 및 고속 이온에 의한 대면재의 손상 문제 해결 필요
  - (중수소-삼중수소 방식) 전통 토카막 방식과 동일하게, 중수소-삼중수소 핵융합 반응에서 발생한 중성자의 운동에너지를 열에너지로 전환, 터빈을 돌려 전기생산

· 상용로 경제성 확보를 위한 삼중수소 증식 기술 확보 필수

○ (장치 개발) 핵융합에너지 가능성 입증을 위한 장치 제작·업그레이드 중

- (성과) ST-40 장치 1억도 달성('22)

- (실험장치) 고온초전도체 실증장치 DEMO 4 장치 건설 중('21~'24), DEMO 4 20T 실증('24), ST80-HTS 장치\* 완공('26)

\* (목표) ST-40 대비 온도·밀도·가둠 기술 향상, 15분 장시간 운전(펄스 타입)

- (실증로) ST-E1 상용로 운전, 200MW 순전력 생산('30년대 초)

□ (캐나다) General Fusion

○ (방식) 자기-관성 가둠 방식, 중수소-삼중수소 핵융합 방식

- (자기-관성 가둠) 자기화된 타겟 플라즈마(magnetized target plasma)\*를 다수의 피스톤으로 빠른 속도로 대칭 압축하여 플라즈마 온도를 1억도로 상승, 핵융합 반응을 유도

\* (자기화된 타겟 플라즈마) 플라즈마 내에 고체 또는 액체 타겟이 포함되어, 외부 자기장으로부터 가둠, 압축되는 플라즈마

· 자기화된 타겟 플라즈마는 고밀도 플라즈마 형성 및 가둠 제고, 불안정성 제어 등이 용이

· 자기화된 플라즈마의 대칭 압축 및 액체 금속\* 등에 관한 기술적, 공학적 난제, 플라즈마 펄스를 향상 등의 문제 해결 필요

\* (액체 금속) 일차벽 및 증식 블랭킷, 시스템 냉각, 방사선 차폐 등의 역할 수행

- (중수소-삼중수소 방식) 중수소-삼중수소를 연료로 활용, 핵융합 반응으로 발생한 중성자의 운동에너지를 열에너지로 전환, 터빈을 돌려 전기생산

○ (장치 개발) FDP(Fusion Demonstration Plant) 건설 추진

- (성과) 플라즈마 20만 샷 달성\*, 약 150개 특허·특허출원(~'22)

\* 자기화된 타겟 플라즈마 투입 장치(injector) 활용 플라즈마 실험

- (실증로) FDP 장치 건설 중('21~'26), 1일 1 펄스, 중수소-중수소 1억도 이상 달성('27)

· (FDP) 상용로 파일럿 발전소의 약 70% 규모, 영국 원자력청(UKAEA) 컬럼 캠퍼스에 건설 중

- (상용로) 상용로 파일럿 발전소 완공('30년대 초)

· (운전 목표) 플라즈마 1초 1 펄스



### (3) 국내 핵융합 연구개발 동향

#### 가. 국내 연구개발 개요

- (KSTAR 운영) 국가핵융합연구개발기본계획을 통한 법적·제도적 기반 마련과 세계 최고 성능의 차세대초전도핵융합연구장치(KSTAR) 개발 및 운영
- (KSTAR 건설계획) 국가핵융합연구개발위원회 신설 및 국가핵융합연구개발기본계획 수립, KSTAR 건설계획 확정('95.12)
  - \* 타 국가대비 뒤늦은 핵융합연구 착수에 따라 중간진입전략을 발표하고, 세계최고성능의 장치건설 계획 수립
- (법체계 마련) “핵융합에너지개발진흥법”을 제정·공포(법률 제8079호)('06.12)하고, 5년 단위 “핵융합에너지개발진흥기본계획” 수립 추진('07.3)
  - 제1차 기본계획 수립('06)시 '30년대 핵융합발전소 건설능력 확보를 목표로 3단계 추진 전략을 제시('07~'36, 30년간)
  - 제2차 기본계획 추진 기간('12~'16)에는 핵융합 기반기술 연구를 목표로 KSTAR·ITER·기초연구 등을 지원 ('12~'16, 총 6,930억원, 연평균 약 1,400억원)
- (KSTAR 개발 성공) 단기간에 세계 수준의 핵융합에너지 기술 확보를 통해 차세대초전도 핵융합연구장치(KSTAR) 개발 성공('07.8)
- (시운전 성공) KSTAR는 세계 최초로 단번에 종합시운전을 성공('08)하였으며, 우리나라의 본격적 핵융합 연구기반을 마련

[ 우리나라 핵융합에너지개발 현황 ]



□ (ITER 가입) KSTAR 제작기술 등을 인정받아 ITER에 정식 가입('03.6)

- (국회 비준 통과) “ITER 공동이행협정”과 “특권 및 면제 협정” 체결('06.11)에 따라 ITER 사업 수행('07.4~)
- (조달현황) 우리나라 할당 9개 조달품목 중 1개 조달 완료(초전도 도체, '14.12), 8개 조달품목에 대한 조달약정 체결

[ 8개 조달품목별 약정체결 ]

|                   |               |         |         |         |         |          |
|-------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| [ 8개 조달품목별 약정체결 ] |               |         |         |         |         |          |
| ('08.5)           | ('08.11)      | ('09.8) | ('10.5) | ('11.3) | ('11.6) | ('13.11) |
| 초전도 도체            | 진공용기<br>분체·포트 | 조립장비류   | 열차폐체    | 전원공급장치  | 진단장치    | 블랑켓차폐블록  |

○ (계약·제작 현황) 현재 조달약정 체결품목 중 20개 세부패키지(8개 조달품목)에 대해 국내 산업체와 계약체결 및 제작 진행(초전도 도체 6개 세부패키지 완료)

\* 현대중공업, KAT, 포스코특수강, 다원시스 등 110여개 업체 본제품 제작 및 R&D 참여

□ (기초연구 수행) 핵융합 기초연구를 통한 지속적인 핵융합 기반확대 및 인력양성

○ (연구기반 확대) 미래 청정에너지인 핵융합에너지 개발에 필요한 다양한 핵융합 분야 연구기반을 확대하고 연구역량 향상을 위해 '09년부터 착수되었고, '20년도에 일몰

- '09년 50억원의 예산으로 사업이 시작되어 매년 60억원 내외 규모의 예산을 투입

○ (사업형태) 거점센터 지원사업, 공동연구 지원사업, 개인기초 지원사업으로 구분하여 수행

[ 핵융합 기초연구사업 세부사업 ]

| 구분        | 세부내용   |
|-----------|--|
| 거점센터 지원사업 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합 상용화를 위하여 전략적 추진이 필요한 핵심분야의 연구역량 강화 및 우수성과 달성을 위한 연구 거점으로 집단연구 지원</li> </ul> |
| 공동연구 지원사업 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 학문분야의 통합이 필요한 핵융합기술 개발을 위하여 산·학·연의 공동융합연구 활성화로 연구역량 제고 및 저변확대</li> </ul>    |
| 개인기초 지원사업 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 혁신도약형 R&amp;D 사업으로 도전적·창의적 연구과제 지원</li> </ul>                                   |

□ (선도기술개발사업) 핵융합 기초연구가 일몰되면서 핵융합 8대 핵심기술 분야의 우수 연구그룹 지원을 위해 '21년부터 핵융합 선도기술개발사업 착수

○ (전문인력 양성) 핵융합에너지 핵심기술 및 타 분야와의 융합기술 개발을 통해 핵융합 연구기반 확대, 글로벌 경쟁력 강화, 핵융합 전문인력 선제적 양성을 목적으로 추진

- '21년 8억원의 예산으로 사업이 시작되어 '26년까지 매년 12억원 내외 규모의 예산을 투입

○ (사업형태) 선도기술센터, 융합연구, Korea-ITER 박사후연구원 지원사업으로 구분하여 수행

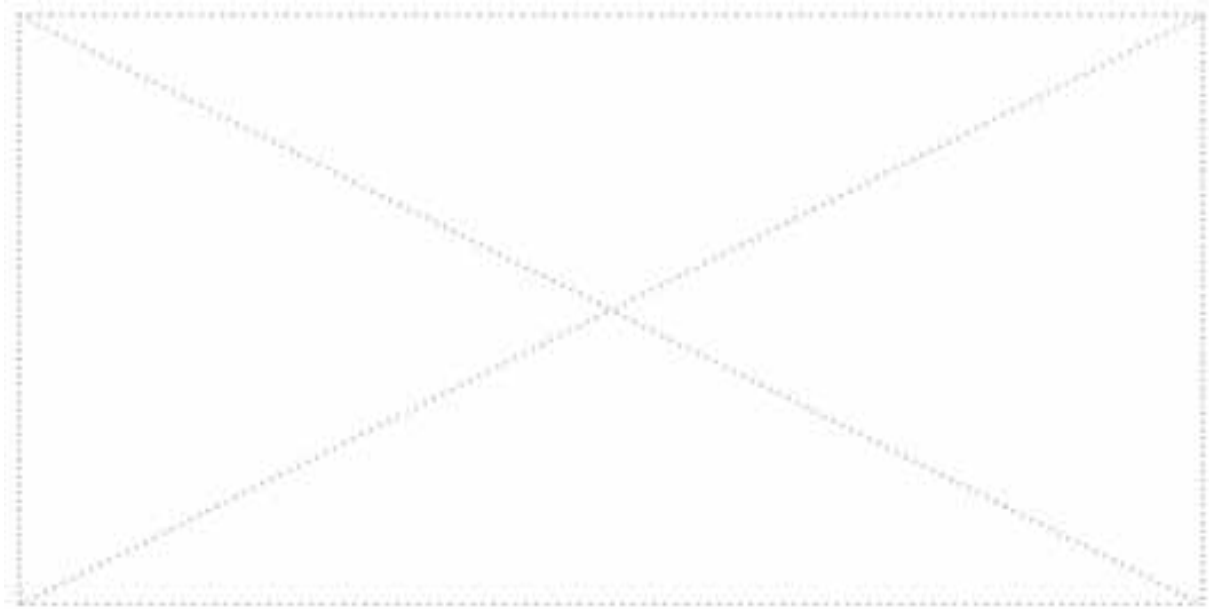
[ 핵융합선도기술개발사업 세부사업 ]

| 구분                   | 세부내용  |
|----------------------|---|
| 선도기술센터               | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 핵융합 8대 핵심기술 분야의 우수 연구그룹 지원</li> </ul>      |
| 융합연구                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 핵융합 기술과 기계, 소재 등 타 분야와의 융합연구 지원</li> </ul> |
| Korea-ITER 박사후연구원 지원 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 한국인 신진인력의 ITER 국제기구 근무 지원</li> </ul>       |

## 나. 정책 수립 현황

- (장기일정 수립) 제4차('22~'26) 핵융합에너지개발 진흥기본계획을 수립('21)을 통해 핵융합 핵심기술 확보 장기일정 수립
- (분야별 로드맵 정립) '50년대에 핵융합 전력 생산을 실증하기 위해 KSTAR, ITER 등 연구 분야별 장기일정 목표 수립

[ 핵융합 핵심기술 확보 장기 일정 ]



※ 출처 : 제4차 핵융합에너지 개발 진흥 기본계획(안), 제16차 국가핵융합위원회 안건

- (핵융합 정책 비전) 핵융합 핵심기술 확보 장기일정 목표 및 비전 달성을 위한 제4차 기본계획('22~'26)의 추진방향 설정

[ 제4차 핵융합에너지개발 진흥기본계획 추진 방향 ]



□ (핵융합 전력생산 실증로 개발) 제4차 기본계획 수립에 따른 후속조치로 핵융합 전력생산 실증로 개발을 위한 단계적 계획 수립 추진

○ (전력생산 실증로 기본개념(안)) 난제 극복을 통한 '50년대 전력생산 실증의 차질 없는 이행을 위해 장기적 관점에서 핵융합 전력생산 실증로 개발이라는 R&D 목표와 방향 설정을 위해 핵융합 실증로 기본개념(안) 확정('23.02월)

- (역할) 차세대 기저전력원으로서 핵융합 에너지를 활용한 전력생산이 기술적으로 실현 가능함을 실증하고(기술적 타당성), 핵융합 상용로의 경제성 향상(경제적 타당성), 안전 기술 개발 및 법·규제 정비(사회적 수용성) 등에 기여할 실용 규모의 실험로 역할 제공

▷ 핵융합 전력생산의 상용화 가능성을 입증하고 사회적 수용성 확보

- ①기술적 타당성 : 플랜트 전 주기에서 연료자급, 연속운전, 열·전기출력 등 정상운전 가능 실증
- ②경제적 타당성 : 핵융합 상용로의 건설·운영·폐로 등의 단가 절감, 효율향상 방안 등 연구
- ③사회적 수용성 : 핵융합에 특화된 안전·인허가기술 개발·검증, 법·규제 수립 기준 제공 등

- (최상위 목표) ① 최대 전기출력 500MWe 이상(열출력 : 1,500MW, 동력변환 효율 33%), ② 삼중수소 유효자급률 1 이상, ③ 핵융합 고유 안전성 검증, ④ 경제성 평가 가능 데이터 확보

- (주요 설계기준) ① 토카막 노형으로 주반경 7m 이내(\* 추후 연구를 통해 확정), ② 장치 가동률 60% 이상, ③ 설계수명 40년 이상, ④ 안전기준 지진 7.0

- (세부 기술사양) 최상위 목표 및 주요 설계기준의 핵심 요구조건을 충족시키는 설계사양

| 구분                         | 변수(기호)                                | 규격(단위)             | 비고  | 특기사항                            |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------------|---|---------------------------------|
| 주장치<br>(Reactor)<br>(핵융합로) | 주반경(R)                                | 6.8 m              | 7.0 m 이하  | - AT (Advanced Tokamak) 모드(도전적) |
|                            | 부반경(a)                                | 2.2 m              | Aspect Ratio (R/a) : ~3.1                           | - ITER와 유사                      |
|                            | 자기장(B <sub>T</sub> )                  | 6.5~7.0 T          | B <sub>max</sub> : 13~15 T                          | - 최대 16 T 이하(마진 고려)             |
|                            | 초전도 선재                                | Nb <sub>3</sub> Sn | 저온 초전도체   | - KSTAR/ITER에서 기술 검증            |
| 노심 연소<br>플라즈마              | 전류(I <sub>p</sub> )                   | 12~13 MA           |   |                                 |
|                            | 안전인자(q <sub>95</sub> )                | > 5.0              |   | - 높은 안전인자 확보                    |
|                            | Elongation(κ <sub>95</sub> )          | ~ 2.0              |   | - 고성능 형상 유지                     |
|                            | Triangularity(δ <sub>95</sub> )       | ~ 0.6              |   | - Single Null (Backup: Double)  |
|                            | 밀도(<n <sub>e</sub> >/n <sub>G</sub> ) | ~ 1.2              | Greenwald 밀도 ~0.85x10 <sup>20</sup> /m <sup>3</sup> | - 고성능 평균밀도                      |
|                            | 온도(<T>)                               | > 13 keV           |   | - 평균 온도                         |
|                            | β <sub>N</sub>                        | ~ 3.5              |   | - AT 모드 운전(도전적)                 |
|                            | 감금율(H)                                | ~ 1.3              |   | - 고성능 운전 모드                     |
| 열출력                        | 자발전류(f <sub>BS</sub> )                | ~ 0.6              |   | - 자발적 전류구동                      |
|                            | 열출력(P <sub>f</sub> )                  | > 1,500 MW         |   | - ITER 3배 열출력                   |
|                            | 가열/전류구동(P <sub>aux</sub> )            | 50~60 MW           | Q : 25~30   | - ITER 3배 고성능                   |

| 구분                          | 변수(기호)                 | 규격(단위)                                | 비고                 | 특기사항                              |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
|                             | 열부하( $I_N$ )           | ~ 1.5 MW/m <sup>2</sup>               |                    | - 구조재에 미치는 열부하                    |
|                             | 디버터 부하                 | ~ 20 MW/m <sup>2</sup>                | 텅스텐(W) 대면재         | - 대면재 순간 최대 열부하 (열부하 > 중성자부하)     |
|                             | 디버터 냉각                 | 수냉각                                   | W-armor            | - 설계 과정에서 변동 가능                   |
| 동력변환                        | 전기출력( $P_{e, gross}$ ) | > 500 MWe                             | 변환효율 > 33%         | - 열/전기 변환 효율                      |
|                             | 그리드전력( $P_{e, net}$ )  | > 300 MWe                             | In-house(~200 MWe) | - 시설 자체사용 전기 고려                   |
|                             | 동력변환                   | Rankine Cycle                         | 가압 증기              | - 설계 과정에서 변동 가능                   |
| 삼중수소<br>자급                  | 자급율(TBR)               | > 1.0                                 | 유효 자급율             | - 전체 증식 평균 Tritium Breeding Ratio |
|                             | 증식블랑켓                  | HCCP<br>(He-Cooled<br>Ceramic Pebble) | He-냉각 고체 증식재       | - R&D 결과에 따라 변동 가능                |
|                             | 구조재                    | RAFM 철강재                              |                    | - 구조재 연구개발 후,<br>결과에 따라 추후 확정     |
| 장치 운전                       | 가동률                    | > 60%                                 | 연간 가동시간/총시간        | - 상용료 ~80% 목표                     |
|                             | 설계수명                   | 40년                                   |                    | - 건설 후 40년 시설 유지                  |
| 원격<br>유지보수<br>(교체<br>주기/방법) | 블랑켓                    | ~ 10년(평균)<br>/포트                      | 총 3번 교체            | - 설계 과정에서 따라 교체<br>포트 및 방법 최적화    |
|                             | 디버터                    | ~ 5년(평균)<br>/하부 포트                    | 총 7번 교체            |                                   |
| 안전                          | 지진 규모                  | 7.0 (0.3 g)                           |                    | - 국내 최대 안전기준 적용                   |

○ (실증로 예비개념설계 착수) '35년 실증로 설계 완료를 목표로, 산·학·연 전문가가 참여하는 '핵융합 실증로 설계 TF' 구성 및 단계별 설계 본격 착수 추진('23.6월)

- (단계별 목표) 핵융합 핵심기술 확보 장기일정에 따른 설계 목표 달성

- (1단계 : '26년) 예비개념설계 완료 및 인허가 체계 수립
- (2단계 : '30년) 개념설계 완료 및 설계기준 확립
- (3단계 : '35년) 공학설계 완료 및 방사선 안전보고서 작성
- (36~38) 설계 최적화 및 방사선 안전보고서 최종승인

- (목표달성 이행점검) 이행점검단을 구성하여 설계 단계별 이행점검 및 다음 설계 단계 이행 여부 결정

- (구성·운영) 설계 TF에 총괄위원회\* 및 기술자문위원회, 시스템통합설계팀, 총 12개 워킹그룹(산·학·연) 구성

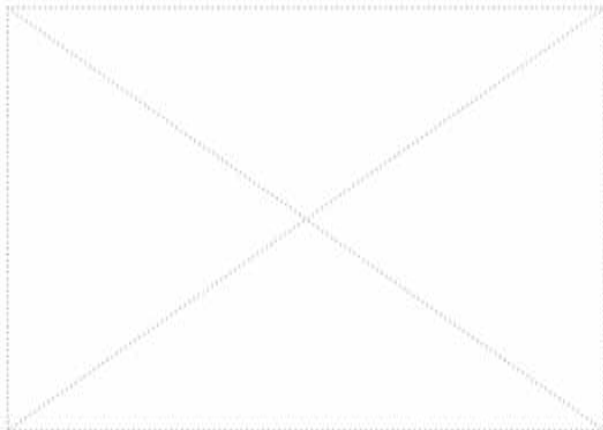
\* 총괄위원회는 총괄위원장 및 시스템통합설계팀장, 12개 워킹그룹 PM 및 코디네이터 참여(총 26명), 총괄위원장은 과기부 등과의 협의를 통해 선정

※ 예비개념설계 이후 본격 설계(개념 및 공학설계) 추진을 위해 설계 TF 조직 체계 변동 가능

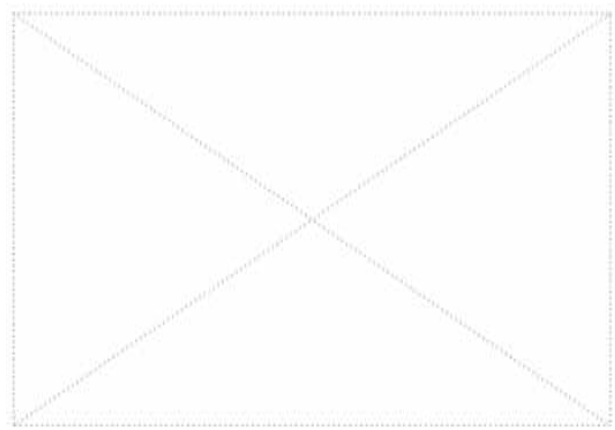


## 다. R&D 투자현황

- (R&D 투자 현황) 핵융합에너지 개발을 위해 지난 20년간 총 26,802억원이 투입되었으며, 세부 분야별로 장치제작(주장치, 부대장치, 부대시설 등)(52%)에 가장 많은 정부투자가 진행
  - 국가과학기술지식정보서비스(NTIS) “핵융합” 키워드, 과거 20년('02~'22) 검색
  - 핵융합에너지 개발을 위해 투입된 금액은 26,802억원이며, 이 중 가장 많은 금액이 KSTAR, ITER 장치 제작·조달에 활용(13,997억원, 52%)
- (8대 핵심기술 투자현황) 8대 핵심기술 기준 토카막 시스템(노심플라즈마, 가열 및 전류 구동, 초전도자석) 분야에 대부분 투입
  - 과거 20년('02~'22)간 8대 핵심기술 R&D에 6,672억원이 투입되었으며, 노심플라즈마 2,874억원(43%)으로 가장 많은 금액이 투입되었으며, 그 뒤로 초전도 자석 1,639억원(25%), 가열 및 전류구동 822억원(12%) 순으로 연구개발비 투입
  - 연료시스템분야는 증식블랑켓 558억원(8%), 디버터 278억원(4%), 연료주기 248억원(4%), 핵융합 소재 182억원(3%)의 연구개발비가 투입되었으며, 안전인허가 70억원(1%) 연구개발비 투입

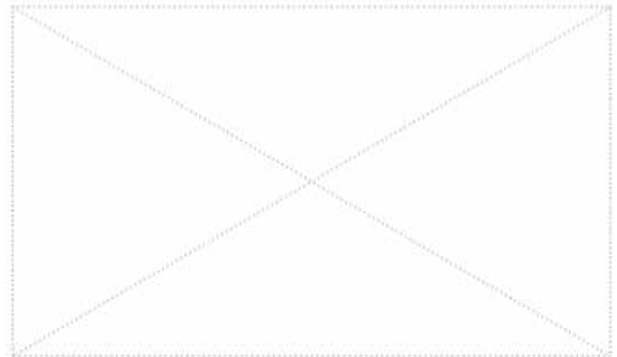


< 분야별 핵융합에너지 R&D투자 현황 >



< 8대 핵심기술별 R&D투자 현황 >

- (수행주체별 현황) 8대 핵심기술 분야 대부분이 연구기관 주도 R&D 추진 중이며, 노심플라즈마, 디버터, 핵융합 소재 분야의 경우 대학이 함께 참여. 산업체의 경우 R&D에 주도적 참여가 없는 상황



< 수행주체/핵심기술별 R&D투자 현황 >

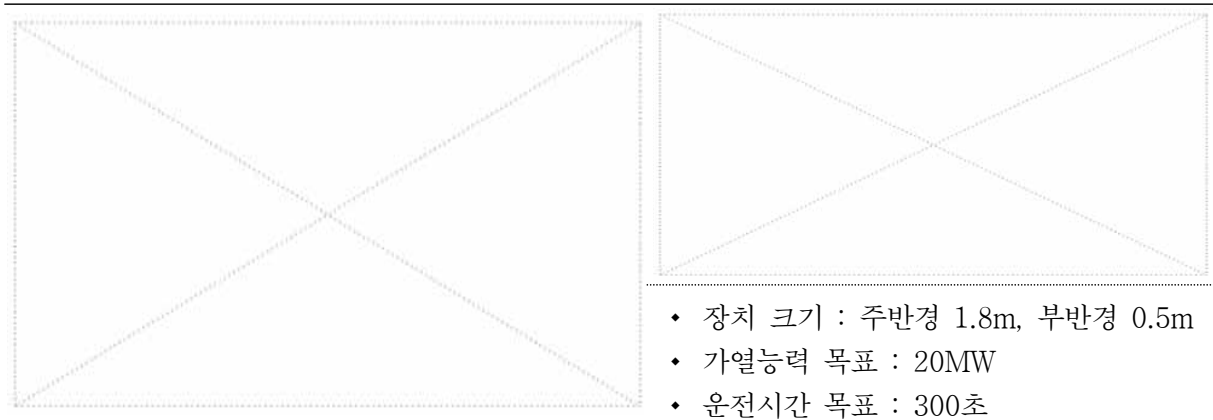


## 라. 주요 연구성과

### □ 초전도 핵융합연구장치(KSTAR) 개요

- 핵융합 기반기술(초전도 자석, 진공용기 등) 확보 및 고성능 플라즈마 운전 유지·실험을 통한 국내 핵융합 연구 역량 강화
- 초전도 토카막 운전기술, 고성능(1억도 이상) 장시간(300초) 플라즈마 제어기술, 실증로 선행 기술 시험 등 핵융합 핵심 기반기술 확보 목표

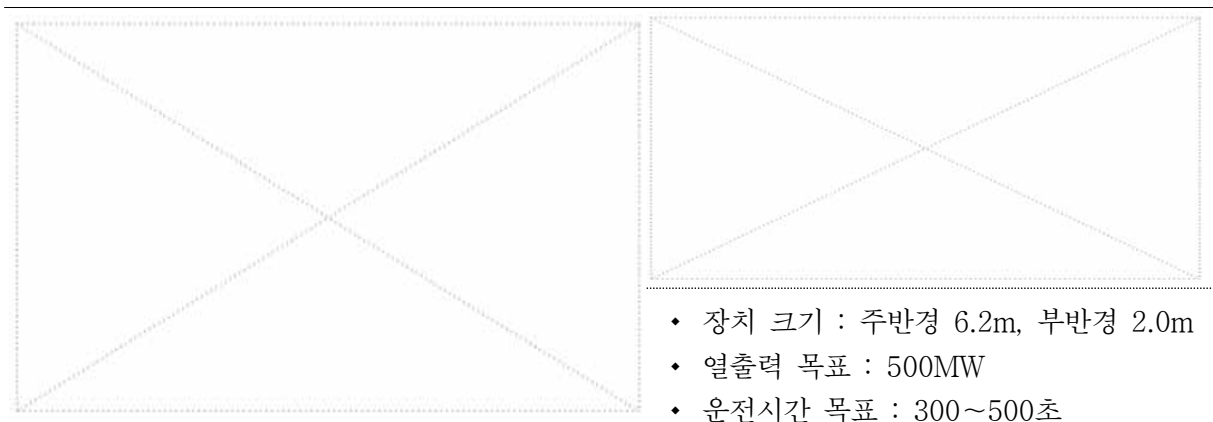
※ 1억도 1.5초 달성('18), 1억도 30초 이상('21), 1억도 300초 달성 목표('26)



### □ 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업 개요

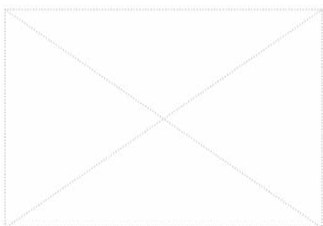

- ITER 공동개발사업은 핵융합에너지의 대량 생산 가능성을 실증하기 위해 주요 7개국(한국·미국·러시아·EU·일본·중국·인도)이 공동으로 대형 초전도 핵융합실험로를 건설·운영하는 프로젝트
- 7개 회원국은 ITER 건설을 위한 현물(장치 제작·조달)과 현금 동일 지분을 분담하며, EU가 45.46%, 나머지 6개국이 각 9.09% 비용 분담

※ '25년 최초 플라즈마 기준, 전체 건설 공정률 78.5% 달성('23.6기준)



□ KSTAR 및 ITER 사업 주요 내용






- (KSTAR) 고온·고밀도, 장시간 운전 플라즈마의 물리현상을 실험하기 위한 연구장치
  - KSTAR 건설·운영을 통해 초전도 자석 등 핵융합 장치 건설 분야에 세계 수준에 도달 및 핵융합 핵심 조건인 플라즈마 이온온도 1억도 이상의 지속시간을 매년 실험을 통해 향상 중
- (ITER) 핵융합에너지 대량생산 가능성(열출력 500MW, 에너지 증폭률 10배) 확인을 위한 실험장치
  - 한국은 선도국이 축적한 핵융합 기술을 추적·확보하기 위해 '03년부터 ITER 건설에 참여 중이며, ITER 조립·설치 일정 및 품질 요건에 따라 한국 할당 조달품목 제작·조달 등의 의무 이행 중





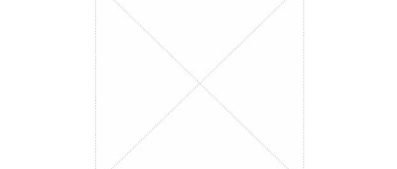




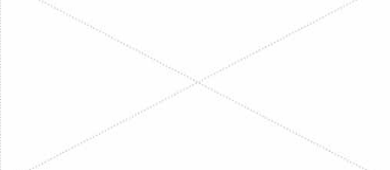
| 구분   | KSTAR   | ITER   |
|------|---|--|
| 장치역할 | • 핵융합 고성능 플라즈마 연구장치   | • 핵융합 연소 플라즈마 구현 실험장치  |
| 연구목표 | • 고성능(고온, 고밀도), 장시간 플라즈마 성능 평가 및 운전 기술 연구   | • 연소 플라즈마의 핵융합 반응으로 500MW 에너지를 발생시키고, 이런 조건에서 핵융합로의 과학적, 공학적 특성 연구   |
| 사용연료 | • 수소 또는 중수소   | • 중수소와 삼중수소(핵융합 반응률이 높음)   |
| 주요내용 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 초고온 고밀도 플라즈마의 장시간 운전제어 기술 확보</li> <li>• 가열·진단 등 핵심 부대장치의 성능 고도화 및 공학기술 확보</li> <li>• 핵융합 물리이론 검증, 경계면 불안정 현상 등 핵융합발전 난제 해결을 위한 연구 수행</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 한국은 ITER 기구 운영 등을 위한 현금분담금 납부 및 할당 9개* 주요장치를 제작·조달, 할당품목 이외의 핵융합 핵심기술 확보를 위한 연구개발 병행</li> </ul> <p>* ①초전도 도체(완료, '14), ②진공용기 본체/③조립장비류/④열차폐체(조달·운송완료, '21), ⑤진공용기 포트, ⑥블랭킷 차폐블록, ⑦전원공급장치, ⑧삼중수소 저장·공급 시스템, ⑨진단장치 등 R&amp;D/설계/제작/운송 진행</p>                    |
| 주요성과 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 기술로 세계 최고성능의 초전도 핵융합 장치 KSTAR 건설 완공('07.8월)</li> <li>• 세계 최초로 단 한 번의 시도로 First Plasma 발생 성공('08.7월)</li> <li>• 세계 최장 플라즈마 이온 온도 1억도 30초 운전('21.9월)*</li> </ul> <p>* ('18) 2초→('19) 5초→('20) 20초→('21) 30초</p> <p>※ KAT, 넥상스코리아, 현대중공업, 다원시스, SFA 등 80여개 업체 KSTAR 건설 및 운영 참여</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 한국할당 9개 조달품목 중 핵심품목인 진공용기 본체 등 4개 품목 제작·운송 완료</li> <li>• ITER 기구 건설총괄 부문장 등 한국인 총 65명이 ITER 기구 근무('23.6월)</li> <li>• ITER 기구 및 타 참여국의 조달품목 등에서 한국이 180건 총 7,288억원 규모 해외수주('23.6월)</li> </ul> <p>※ 현대중공업, KAT, 포스코특수강, 다원시스 등 140여개 업체 본제품 제작 및 R&amp;D 참여</p> |
| 장치규모 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 장치의 크기 1/3, 부피 1/30</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR 장치의 크기 3배, 부피 30배</li> </ul>    |

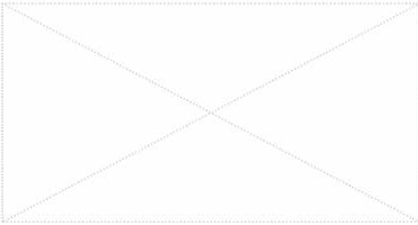
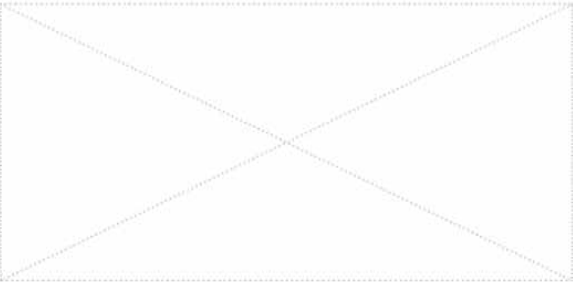

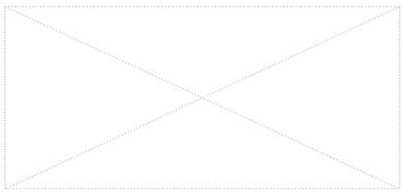
□ KSTAR 건설 10대 주요성과

| 핵심기술 분야   |                  | 기술성과   | 과급효과  | 비고 |
|-----------|------------------|--|---|----|
| 시스템 통합    | 진공기술 및 열차폐체 기술   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 세계 최초 3차원 곡면의 진공용기 제작기술 개발</li> <li>▶ 대형 은도금 기술이 적용된 단열차폐기술 개발</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 진공용기, 포트 및 열차폐체 전량을 국산품으로 공급</li> <li>▶ 3,900억원 규모의 국내기업 매출효과</li> </ul>  |    |
|           | 토카막 정밀조립         | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 세계 최초 회전공법을 적용한 TF 초전도자석 정밀 조립기술 개발</li> <li>▶ 세계 최초 분할형 솔레노이드 코일보호를 위한 전치하중 인가 기술 개발</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER의 조립기술 총괄 담당</li> <li>▶ ITER 조립 장비류 전체를 국산품으로 공급 및 390억원 추가 수주</li> <li>▶ KSTAR 운영의 세계 최저 자장 오차 입증</li> </ul>                        |    |
|           | 극저온 헬륨설비 설계 및 운영 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 극저온(4.5K) 9KW급의 국내 최대규모 헬륨냉동기 설계 및 설치</li> <li>▶ 열부하 안정화를 위한 열환층 시스템 적용</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 등의 핵융합장치와 가속기 등 첨단분야 응용가능</li> <li>▶ 중소기업 기술 이전(비츠로테크, 하늘 ENG)</li> </ul>   |    |
| 가열 및 진단장치 | 진단 및 장치 제어       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 플라즈마 거동측정용 자기진단 센서 등 개발</li> <li>▶ 초전도핵융합장치 운전 제어 통합기술 개발</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 플라즈마 진단 및 장치 정밀 제어기술 선도</li> <li>▶ 공동연구 및 원격운전 등을 통한 장치의 효율 증대 기대</li> <li>▶ ITER 제어 계통(CODAC 및 CS 등) 총 20억원 수주</li> </ul>               |    |
|           | 전원공급 장치 제작       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ IGBT 반도체 소자를 사용한 고효율 전원공급 장치 제작기술 개발</li> <li>▶ 2007년 산업기술 진흥협회 장영실상 수상</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 폐기물처리 및 방사선 이용 사업분야 응용</li> <li>▶ ITER 전원장치 38%를 국산품으로 공급(980억 규모)</li> <li>▶ KSTAR제어코일 전원장치 기술 선점</li> <li>▶ 지하철전원공급 1,100억원</li> </ul> |    |
|           | 초고온 플라즈마 가열      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 대용량 이온원 및 고주파 전송 안테나 제작기술 개발</li> <li>▶ 중성입자빔입사장치 국산화 성공</li> <li>▶ 100keV, 55A급의 대용량 이온원 제작 기술 확보</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 가열장치 운영기술 확보로 ITER 운전시 시험 기술력 선점 가능</li> <li>▶ 중소기업 기술 이전((주)에이스 안테나) 고출력, 광대역 하이브리드 분배기 개발</li> </ul>                                   |    |
| 초전도 자석    | 초전도 선재제작         | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 세계 최고성능의 초전도 선재 제작기술 개발</li> <li>▶ 선재 표면에 1<math>\mu</math>m의 크롬 박막 균일코팅기술 적용</li> <li>▶ ITER와 동급사양으로 전류밀도 성능 달성</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 초전도선재의 20%를 국산품으로 공급</li> <li>▶ 해외수주를 통한 3,100억원 규모의 국내기업 매출효과</li> <li>▶ CERN에서 ITER 참여업체인 KAT에 Nb3Sn 초전도 복합선재 납품요청</li> </ul>     |    |
|           | 초전도 전송시스템 설계·제작  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 세계 최초 34kA급 저손실형 Brass 전류인입 장치 제작기술 개발</li> <li>▶ 40kA 급의 대전류 송전용 초전도 버스장치 제작설치기술 개발</li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 제작기술의 국산화로 100억 규모의 수입대체효과 달성</li> </ul>   |    |
|           | 초전도자석 설계·제작      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 대형 초전도자석 제작 전체 공정기술 개발 뛰어난 운전 안정성 확보</li> <li>▶ 세계 최초로 전치하중 인가 조립기법 성공</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 초전도자석 쉘치 보호 계통 설계 수주</li> <li>▶ 자기장 측정 세계 최고 장치 대비 1/10 이하 Error field 확인('14)</li> </ul>   |    |
|           | 초전도자석 극저온 실험기술   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 초전도자석의 극저온 냉각 실험기술 개발</li> <li>▶ 대형 초전도자석의 극저온 냉각시험과 고자장 발생 시험 성공</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 극저온냉각 성능시험 기술의 선도적 위상 확보</li> <li>▶ KSTAR 안정적 운영기술 확보</li> </ul>   |    |

□ KSTAR 연도별 주요 연구성과

| 구분   | 주요 내용  |  | 성과 의미   |
|------|--|--|---|
| 2008 |    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 세계 최초로 한 번에 종합 시운전 완료</li> <li>■ 본격적인 핵융합 플라즈마 연구추진 기반 마련</li> </ul>   |
|      | KSTAR 최초 플라즈마 목표 달성  |  |   |
| 2009 |    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 중국 EAST : 최대전류 15kA 운전</li> <li>■ 프랑스 Tore Supra : 1.4kA 운전</li> </ul>                                       |
|      | '09년도 실험 목표 플라즈마 전류 320kA, 유지시간 3.6초 달성  |  |   |
| 2010 |    |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 초전도 핵융합장치에서의 H모드를 세계 최초로 달성</li> <li>■ 프랑스의 경우 20년간 H-모드 달성을 위해 노력하였으나 실패</li> </ul>                         |
|      | H-모드 플라즈마 현상   | KSTAR H 모드 발생 진단데이터  |   |
| 2011 |   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 핵융합 선도국에서 해결하지 못한 과학적 난제 해결</li> </ul> <p>* ELM : 플라즈마 경계의 급격한 압력 변화로 인해 밀폐상태를 방해하는 불안정 현상으로, 핵융합의 최대 난제</p> |
|      | H-모드 ELM 제어* 및 H-모드 플라즈마 연장·유지(5.2초)   |  |   |
| 2012 |   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 일본과 미국은 H모드에서 10초 수준</li> </ul>  |
|      | 실시간 플라즈마 형상 제어   | H-모드 플라즈마 17초 유지   |   |
| 2013 |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 불순물 제거기술은 장시간 운전이 요구되는 ITER장치 및 핵융합발전소 등에 반드시 필요한 기술</li> </ul>  |

| 구분   | 주요 내용   |  | 성과 의미  |
|------|---|--|--|
|      | KSTAR 플라즈마 내부불순물 제거 실험  | H-모드 플라즈마 20초 유지   |  |
| 2014 |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ KSTAR의 10,000번째 플라즈마 실험 달성은 성공적인 핵융합 플라즈마 실험이 수행되고 있음을 의미</li> </ul>                                      |
|      | KSTAR 10,000샷 달성  | H-모드 플라즈마 48초 유지   |  |
| 2015 |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 광복70주년 과학기술대표성과 70선 선정</li> <li>■ 초전도자석 전력소비 없이 외부 가열/전류구동장치를 이용한 100% 비유도성 전류구동 달성(핵융합로 핵심기술)</li> </ul> |
|      | 광복70주년 과학기술대표성과 70선 선정  | 100% 비유도성 전류구동(12초) 달성   |  |
| 2016 |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 고성능플라즈마(H-모드) 운전 세계최장 기록인 70초 운전 성공</li> <li>■ 차세대 운전모드인 ITB모드 운전을 초전도토크막 장치로 최초 성공</li> </ul>            |
|      | 고성능플라즈마 운전 세계 최장 기록(70초)  | 최초 ITB 모드 플라즈마 운전 성공   |  |
| 2017 |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 플라즈마 수직 불안정성 개선 및 ITER 기본운전 형상 구현 성공</li> </ul>   |
|      | 고성능 플라즈마 운전 73초 달성  | ITER 기본운전 형상구현 성공  |  |
| 2018 |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 초전도토크막 최초로 플라즈마 이온온도 1억도 1.5초 달성</li> </ul>   |
|      | 플라즈마 이온온도 1억도 달성  | H-모드 연속운전 88초 달성   |  |

| 구분                           | 주요 내용   |  | 성과 의미   |
|------------------------------|---|--|---|
| 2019<br>(‘20.2월<br>까지<br>실험) |    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 플라즈마 이온온도 1억도 8초간 달성으로 KSTAR에서 초고온 플라즈마 장시간 유지기술 확보</li> </ul>                                     |
|                              | 플라즈마 이온온도 1억도 8초간 장시간 유지 달성   |  |   |
| 2020                         |    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 내부수송장벽(ITB) 이용 장시간 초고온 플라즈마 유지, 세계 최장 유지 기록 달성</li> </ul>  |
|                              | 플라즈마 이온온도 1억도 20초간 장시간 유지 달성  |  |   |
| 2021                         |   |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ NBI-2 추가 도입 및 제어성능 향상 통한 1억도 초고온 플라즈마 운전 세계 최고 기록 경신</li> </ul>                                    |
|                              | 플라즈마 이온온도 1억도 30초간 장시간 유지 달성  |  |   |
| 2022                         |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ KSTAR 고성능 플라즈마 장시간, 안정적 운전기술 지속 확보 개선</li> <li>■ KSTAR 1억도 초고온 이온 플라즈마 FIRE모드 발견 네이저 게재</li> </ul> |
|                              | b <sub>N</sub> ~3 고성능 플라즈마 12초 운전 달성  | ELM제어 45초(2022년) 달성  |   |

□ ITER 주요 성과

- (내용) 한국 현금분담금 납부 및 할당 9개 주요장치 개발·제작·조달 등을 수행하며, 할당품목 외 핵융합 핵심기술 확보를 위한 연구개발 병행
- (기술확보) 한국 할당 9개 품목 중 4개 품목 제작 및 조달 완료 등 관련 핵심기술 확보

※ 정량적 성과('23.6월 말 기준): 논문게재(679건), 특허출원(61건), 특허등록(52건)

- (4개 품목 완료) 고성능 선재 등을 활용한 ①초전도 도체, ITER 핵심 품목인 ②진공용기 섹터(2개), 초대형 정밀 구조물인 ③조립장비류, ④열차폐체 등 조달 및·운송 완료
- (5개 품목 진행) 진공용기 주포트 등 제작, 블랑켓 차폐블록 개발·제작, 삼중수소 SDS 예비설계 진행, 전원공급장치 제작 및 현장설치, 진단장치 예비설계 및 최초 플라즈마 부품 제작 진행

| (4개 품목 제작·운송 및 조달 완료)   |   |   |  |  |
|---|---|---|--|--|
| ①초전도 도체   | ②진공용기 본체  | ③조립장비류  | ④열차폐체  |  |
| X   | X   | X   | X  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 조달 완료('14.12)</li> <li>• KAT, 넥상스코리아, 포스코 특수강, ICAS 등</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 조달 완료('21.11)</li> <li>• 현대중공업 등</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 조달 완료('21.12)</li> <li>• 에스에프에이, 일진기계, 유진엠에스 등</li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 운송 완료('21.12)</li> <li>• 에스에프에이, 삼흥기계 등</li> </ul>          |  |
| (5개 품목 설계·제작 및 운송, 현장 설치 등 진행 중)  |   |   |  |  |
| ⑤진공용기 포트  | ⑥블랑켓 차폐블록   | ⑦삼중수소 SDS   | ⑧전원공급장치  | ⑨진단장치  |
| X   | X   | X   | X  | X  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙부 및 하부포트 순차적 제작·운송 중</li> <li>• 현대중공업, 하늘엔지니어링 등</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 차폐블록 220개 중 36개 제작완료('21.12)</li> <li>• 이엠코리아, 비츠로테크, 알킨트 등</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 삼중수소 SDS 관련 R&amp;D 및 설계·검증 진행 중</li> <li>• 원자력(연), DIG 에너지가스 등</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 컨버터 / 변압기 (17/18대) 제작 운송완료</li> <li>• 다윈시스, 효성 등</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중성자방사화시스템 전선 1차 운송 완료('22.2)</li> <li>• 비츠로테크, 그린광학, 비츠로텍스 등</li> </ul> |

- (인력파견) ITER 기구 건설총괄 부문장, 진공용기 총괄 등이 ITER 건설 핵심을 담당하고 있으며, 총 65명이 ITER 기구 근무 중('23.6월말)
- (해외수주) ITER 한국사업단/국내기업은 ITER 기구 및 他 회원국으로부터 총 180건 수주 달성(약 7,288억\*, '07~'23.6월말)

\* ITER의 극한·첨단 장치 개발 경험을 바탕으로 ITER 조달·수주 이외에도 초전도 자석, 대형 전원장치 등 관련 국내외 수주 성과 창출



## 마. 기술수준 현황

### □ 최고기술국대비 기술수준

- 핵융합 분야 최고 기술국은 EU이며, 최고기술국(100%) 대비 한국의 기술수준은 64% 수준
- 노심플라즈마, 초전도자석 분야가 최고기술국 대비 가장 근접한 기술력을 보유, 연료주기 분야가 가장 큰 기술격차

### □ 최종목표대비 기술수준

- 핵융합 실증로 구현을 위한 최종 목표대비 기술수준은 40.8% 수준
- 최고 기술국은 노심 플라즈마, 핵융합 소재, 가열 및 전류구동 분야가 최종목표대비 근접, 증식블랑켓·연료주기 분야의 경우 아직 기술수준이 낮음
- 한국은 노심플라즈마 및 핵융합 소재 분야가 상대적으로 높은 분야이고, 연료주기 분야는 최종목표와의 기술격차가 가장 큰 분야
- 증식블랑켓, 연료주기 분야의 경우 우리나라의 기술수준이 낮은 반면, 최고기술국도 기술수준이 타 분야 대비 상대적으로 낮은 분야

< 핵융합에너지 전력생산 실증 핵심기술 기술수준 분석결과 >

| 핵심기술      | 최고기술국  | 최종목표 대비<br>최고기술국<br>기술수준 | 최종목표 대비<br>한국 기술수준 | 최고기술국 대비<br>한국 기술수준 |
|-----------|--------|--------------------------|--------------------|---------------------|
| 노심플라즈마    | 미국, EU | 80.4%                    | 61.7%              | 76.7%               |
| 증식블랑켓     | EU     | 39.8%                    | 27.5%              | 69.2%               |
| 핵융합 소재    | EU, 일본 | 80.5%                    | 58.3%              | 72.5%               |
| 연료주기      | EU     | 38.3%                    | 13.2%              | 34.5%               |
| 디버터       | EU     | 63.6%                    | 43.8%              | 68.8%               |
| 가열 및 전류구동 | EU     | 72.9%                    | 45%                | 61.8%               |
| 초전도자석     | EU, 미국 | 63.8%                    | 46.3%              | 72.5%               |
| 평균        | -      | 62.7%                    | 40.8%              | 64%                 |

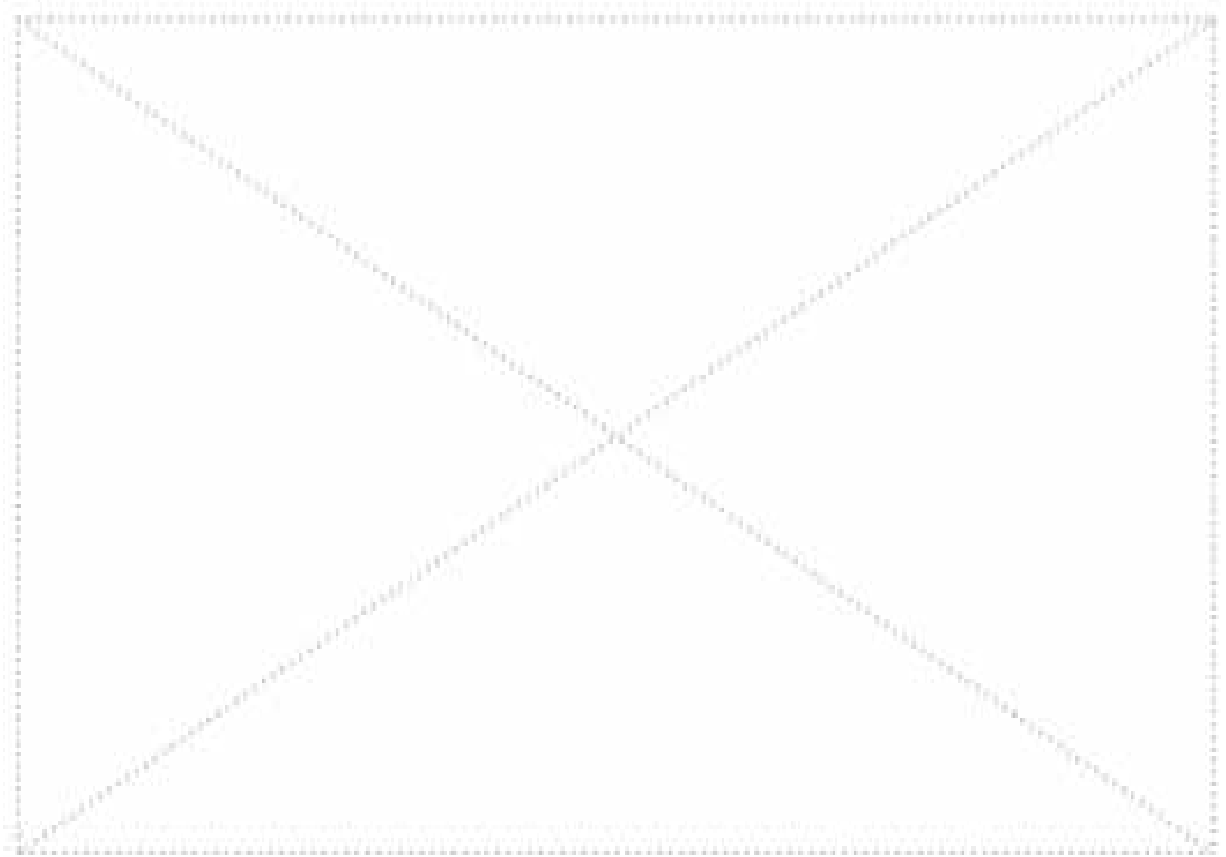
※ 2022년 핵융합에너지 핵심기술(안전·인허가제외) 기술수준평가 자료 활용(한국연구재단)

### 3. 핵융합 기술분류체계

#### (1) 핵융합 실증로 장치구성

- 핵융합 전력생산 실증로는 토카막 주장치, 부대장치, 부대시설, 내벽부품, BoP로 구분
  - 토카막 주장치는 초고온 플라즈마를 가두는 토카막으로 초전도자석, 진공용기, 열차폐체, 저온용기로 구분
  - 토카막 부대장치는 초고온 플라즈마를 제어하는 가열 및 전류구동장치, 진단장치, I&C 제어장치와 내벽부품을 유지보수 하는 원격조작장치, 거대 토카막의 조립을 보조하는 조립장치로 구분
  - 토카막 부대시설은 핵융합로 연료를 제어하는 연료주기 플랜트, 초전도 자석의 액체 헬륨을 공급하는 액화 냉동기 플랜트, 핵융합로 운영상 각종 가스 공급을 위한 가스 플랜트로 구분
  - 실증로 내벽부품은 핵융합 반응의 에너지를 전달받는 증식블랑켓과 플라즈마의 불순물을 배출하는 디버터로 구분
  - 실증로 BoP는 핵융합 반응으로 전달된 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 동력변환장치, 냉각수 플랜트, 전원 장치로 구성

< 핵융합 전력생산 실증로 장치구분 >



□ 핵융합 전력생산 실증로 구성 품목(PBS 및 상세 요건)

| PBS        | Level 1         | Level 2           | Level 3         | 규격 및 요건   | 특기사항  |
|------------|-----------------|-------------------|-----------------|---|---|
| <b>1</b>   | <b>토카막 주장치</b>  |                   |                 | - 초전도 토카막   |   |
| <b>1.1</b> |                 | <b>자석</b>         |                 | - 저온 초전도 자석<br>- 초전도선재 : Nb <sub>3</sub> Sn, NbTi                                   |   |
| 1.1.1      |                 |                   | TF              | - 18개 코일<br>- 고성능 High J <sub>c</sub> Nb <sub>3</sub> Sn 선재<br>- TFCS : 스텐 AISI 316 | - B <sub>max</sub> : 13~15 T<br>- J <sub>c</sub> : >1500 A/mm <sup>2</sup> (4.2K, 15T)<br>- Filament Dia. : < 10 μm |
| 1.1.2      |                 |                   | PF              | - 6개(상3/하3) 코일<br>- 고성능 NbTi 선재   |   |
| 1.1.3      |                 |                   | CS              | - 6개 원형 코일<br>- 고성능 Nb <sub>3</sub> Sn 선재   |   |
| 1.1.4      |                 |                   | Feeder          | - 저온초전도형 또는 고온초전도형  | - 시제품 시험 연구 및 설계 과정을 통하여 결정   |
| 1.1.5      |                 |                   | Correction Coil | - VS* 제어(수직 안정성)<br>- ELM** 제어(Edge Localize Mode)                                  | - *High Elongation 유지<br>- **설계 과정을 통하여 결정  |
| <b>1.2</b> |                 | <b>진공용기</b>       |                 | - 스텐 AISI 316   |   |
| 1.2.1      |                 |                   | 본체              | - 9개 섹터<br>- 스텐 AISI 316-LN   |   |
| 1.2.2      |                 |                   | 포트              | - 상부/중부/하부  | - 설계 과정에서 포트 수 결정   |
| <b>1.3</b> |                 | <b>열차폐체</b>       |                 | - 고성능 열차폐 기능<br>- 스텐 AISI 316   |   |
| 1.3.1      |                 |                   | 진공용기차폐          | - Emissivity : < 0.05<br>- 80K 가압 He 가스 냉각  | - 은도금 여부, LN <sub>2</sub> 냉각 여부 등은 추가 연구 후 결정   |
| 1.3.2      |                 |                   | 저온용기차폐          | - Emissivity : < 0.05<br>- 80K 가압 He 가스 냉각  |   |
| <b>1.4</b> |                 | <b>저온용기</b>       |                 | - 스텐 AISI 304<br>- 외경 : ~35 m   | - 외경은 저온용기 내부 진공 누설 탐침 필요 여부에 따라, 설계 과정에서 변동 가능   |
| 1.4.1      |                 |                   | 상부              | - 스텐 AISI 304   |   |
| 1.4.2      |                 |                   | 중부              | - 스텐 AISI 304   |   |
| 1.4.3      |                 |                   | 하부              | - 스텐 AISI 304   |   |
| 1.4.4      |                 |                   | VVPSS           | - 진공용기압력 감압 장치  | - 비상시 진공관련 안전시스템<br>* Vacuum Vessel Pressure Suppression System   |
| <b>2.</b>  | <b>토카막 부대장치</b> |                   |                 | - 가열/진단/제어 시스템  |   |
| <b>2.1</b> |                 | <b>가열/전류구동 장치</b> |                 | - > 80 MW 가열능력 확보   |   |
| 2.1.1      |                 |                   | ECH             | - 30 MW, > 200 GHz  | - 자이로트론   |
| 2.1.2      |                 |                   | LHCD            | - 10 MW, 고출력 론치   |   |
| 2.1.3      |                 |                   | ICRH            | - 10 MW, 고출력 안테나  |   |
| 2.1.4      |                 |                   | NBI             | - 30 MW (1 MeV)<br>- 15 MW 2대   | - 음이온원  |
| 2.1.5      |                 |                   | 가열장치 포트 카세트     | - 포트 카세트 원격 교체 가능 공학설계  |   |

|       |          |          |                  |   |                                      |
|-------|----------|----------|------------------|---|--------------------------------------|
| 2.2   |          | 진단장치     |                  | - 장치 보호 및 플라즈마 출력 변수 측정   |                                      |
| 2.2.1 |          |          | 자기장 진단계          | - 자기장 진단  |                                      |
| 2.2.2 |          |          | 중성자 진단계          | - 핵융합 출력 진단   |                                      |
| 2.2.3 |          |          | 블로메터 진단계         | - Radiation 진단  |                                      |
| 2.2.4 |          |          | 분광 진단계           | - 불순물 진단  |                                      |
| 2.2.5 |          |          | Active 광 진단계     | - 온도 진단   |                                      |
| 2.2.6 |          |          | 간섭 진단계           | - 밀도 진단   |                                      |
| 2.2.7 |          |          | 진단장치 포트 카세트      | - 포트 카세트 원격 교체 가능 공학설계  |                                      |
| 2.3   |          | I&C 제어장치 |                  | - AI 기술 기반 고속/실시간 자동제어 기술 적용                                      |                                      |
| 2.3.1 |          |          | CODAC            | - 안내서 준용  | - 설계 시 안내서(Handbook) 마련 예정           |
| 2.3.2 |          |          | Plant I&C        | - 안내서 준용  |                                      |
| 2.3.3 |          |          | Safety Interlock | - 안내서 준용  |                                      |
| 2.3.4 |          |          | Net work         | - 고속 Net work   |                                      |
| 2.3.5 |          |          | 자동 제어계           | - AI 기술 접목  |                                      |
| 2.4   |          | 원격조작 장치  |                  | - 유지보수를 위한 완전 원격 조작 장치 구현   |                                      |
| 2.4.1 |          |          | 블랑켓 교체용 로봇       | - 5톤 (원격)작업 가능  | - 원격 절단/용접 포함<br>- 블랑켓 모듈 교체 표준화 추진  |
| 2.4.2 |          |          | 디버터 교체용 로봇       | - 10톤 (원격)작업 가능   | - 원격 절단/용접 포함<br>- 디버터 카세트 교체 표준화 추진 |
| 2.4.3 |          |          | 이동 캐스크           | - 플러그카세트 이동<br>- 이동 레일 설치<br>- 10톤 (원격)작업 가능                      |                                      |
| 2.4.4 |          |          | 핫셀 로봇            | - 조사 후 분석실 로봇 조작 기능   |                                      |
| 2.4.5 |          |          | 검사/수리 로봇         | - 지능형 원격 검사/수리 가능   | - 저온용기 내부 검사/수리 가능 로봇                |
| 2.5   |          | 조립 장치    |                  | - 초전도 토카막 장치의 조립설치용 치구류   |                                      |
| 2.5.1 |          |          | 진공용기 조립 치구       | - SSAT 등  |                                      |
| 2.5.2 |          |          | 자석 조립 치구         | - SSAT 등  |                                      |
| 2.5.3 |          |          | 저온용기 조립 치구       | - 각종 조립 도구  |                                      |
| 2.5.4 |          |          | 내벽부품 조립 치구       | - 각종 조립 도구  |                                      |
| 2.5.5 |          |          | 토카막 조립 치구류       | - 중앙 기둥 등   |                                      |
| 3.    | 토카막 부대시설 |          |                  |   | -                                    |
| 3.1   |          | 연료주기 플랜트 |                  | - 삼중수소 연료 정제, 분리, 저장, 공급  |                                      |
| 3.1.1 |          |          | 연료 정제 시스템        | - 고농도 삼중수소 정제 : < ppm-O <sub>2</sub><br>- 저농도 삼중수소 정제 : < ppb-HT, |                                      |

|            |              |                   |                       |  |   |
|------------|--------------|-------------------|-----------------------|--|---|
|            |              |                   |                       | < 0.1 ppt-HTO  |   |
| 3.1.2      |              |                   | 연료 분리 시스템             | - 연료용 삼중수소 :<br>> 90%-T<br>- 연료용 중수소 : <<br>1%-T                     |   |
| 3.1.3      |              |                   | 연료 저장 시스템             | - Metal Hydride :<br>용기당 < 100 g-T                                   |   |
| 3.1.4      |              |                   | 연료 공급 시스템             | - 초저온 펠렛 주입기 :<br>평균 400 Pam <sup>3</sup> /s<br>- DM을 위한 MGI/SPI     | - ITER 대비 2배 연료 소비<br>효율 적용                                     |
| 3.1.5      |              |                   | 삼중수소 계량<br>시스템        | - 인벤토리 및 He <sup>3</sup> 측정<br>- 재고량 상시 모니터링<br>- 블랑켓 삼중수소 생산량 측정    | - 안전 요건   |
| 3.1.6      |              |                   | 진공배기 시스템              | - 극저온 펌프<br>- 고속 배기 : ~1 Pa 압력 유<br>지                                |   |
| 3.1.7      |              |                   | 진공 시스템                | - 각종 진공펌프 설치 가동<br>- 진공 배관 연결  |   |
| <b>3.2</b> |              | <b>액화 냉동기 플랜트</b> |                       | - 초전도 자석에 액체헬륨<br>공급 기능 확보   |   |
| 3.2.1      |              |                   | LHe 냉동 장치             | - 100 kW 급 He 액화기  |   |
| 3.2.2      |              |                   | LN <sub>2</sub> 냉동 장치 | - 100 kW 급 N <sub>2</sub> 액화기  |   |
| 3.2.3      |              |                   | LHe 분배 장치             | - 분배기<br>- 분배 라인   |   |
| 3.2.4      |              |                   | LN <sub>2</sub> 분배 장치 | - 분배기  |   |
| 3.2.5      |              |                   | He 회수 장치              | - He 가스 회수 시설  |   |
| <b>3.3</b> |              | <b>가스 플랜트</b>     |                       | - 핵융합로 운영에 필요한<br>각종 가스 공급   |   |
| 3.3.1      |              |                   | He 가스                 | - 블랑켓 냉각 He 공급<br>- He 퍼지가스 공급                                       |   |
| 3.3.2      |              |                   | N <sub>2</sub> 가스     | - N <sub>2</sub> 가스 공급   |   |
| 3.3.3      |              |                   | 기타 가스                 | - 기타 각종 가스 공급  |   |
| <b>4.</b>  | <b>내벽 부품</b> |                   |                       | - 교체 부품으로서 가능한<br>장시간 기능 유지  | - 연구개발을 통하여 지속 기술<br>개발   |
| <b>4.1</b> |              | <b>디버터</b>        |                       | - 열/불순물 배기 능력 확<br>보   |   |
| 4.1.1      |              |                   | 카세트 구조물               | - 디버터 모듈 지지구조물<br>- 냉각수 이동 및 분배                                      |   |
| 4.1.2      |              |                   | 내부 타겟                 | - 고인성 텅스텐 소재<br>- 열부하 20 MW/m <sup>2</sup><br>- Erosion Rate : < 기준* | - 텅스텐 대면재 연구개발을 통하<br>여 지속적 성능 향상 기술 확보<br>- *기준은 설계 과정을 통하여 결정 |
| 4.1.3      |              |                   | 외부 타겟                 | - 고인성 텅스텐 소재<br>- 열부하 20 MW/m <sup>2</sup><br>- Erosion Rate : < 기준* | - *기준은 설계 과정을 통하여 결정  |
| 4.1.4      |              |                   | 중앙 돔                  | - 열부하 10 MW/m <sup>2</sup>   |   |
| 4.1.5      |              |                   | 냉각관                   | - CuCrZr/RAFM  |   |
| <b>4.2</b> |              | <b>증식블랑켓</b>      |                       | - 삼중수소 생산, 중성자   |   |

|       |  |  |            |  |   |
|-------|--|--|------------|--|---|
|       |  |  |            | 차폐, 열 추출   |   |
| 4.2.1 |  |  | 블랑켓 모듈     | - 증식 모듈 집합체 (H 1m x W 1m x D* <1m)<br>- He 냉각<br>- 삼중수소 생산/회수 기능 확보  | - 진공용기 섹터당 다수의 모듈로 구성<br>- 모듈 형상 표준화 추진<br>* 설계 과정에서 최적화 예정 |
| 4.2.2 |  |  | 증식 유닛      | - 증식유닛 : 200 x 200 mm<br>- 증식/증배재 구성 최적화<br>- 평균 TBR/유닛 : > 1.15   |   |
| 4.2.3 |  |  | 블랑켓 일차벽    | - 텅스텐 소재<br>- Erosion Rate : < 기준*<br>- 냉각능력 : >0.5 MW/m <sup>2</sup>  | - *기준은 설계 과정을 통하여 결정  |
| 4.2.4 |  |  | 구조재        | - RAFM 철강재<br>- 중성자 : 14.1 MeV<br>- 중성자속 : 10 <sup>14</sup> n/cm <sup>2</sup><br>- 1차/2차 : 20/50 dpa 급<br>- 최종 : 100 dpa 급 | - 연구개발을 통하여 고성능 구조 재료 개발                                    |
| 4.2.5 |  |  | 증식재        | - Li 세라믹스<br>- 페블 : ~1 mm 균일   | - 연구개발을 통하여 리튬 동위원소 기술 확보                                   |
| 4.2.6 |  |  | 증배재        | - Be 화합물   | - 연구개발을 통하여 Be 화합물 기술 확보                                    |
| 4.2.7 |  |  | 블랑켓 냉각시스템  | - 냉각재 : He<br>- 냉각 성능 : > 6 kW/m <sup>2</sup> ·K   |   |
| 4.2.8 |  |  | 삼중수소 추출시스템 | - He 퍼지가스(H <sub>2</sub> ~0.1% 함유)   |   |

|            |                               |                |                   |  |                           |
|------------|-------------------------------|----------------|-------------------|--|---------------------------|
| <b>5.</b>  | <b>BoP (Balance of Plant)</b> |                |                   |  |                           |
| 5.1        |                               | 열에너지 변환        |                   | - 핵융합 열에너지 전기에너지 전환                                  |                           |
| 5.1.1      |                               |                | Rankine 사이클 시스템   | - 가압 증기 : 7~8 MPa, 230~290 °C<br>- 변환효율 > 33%        | - 연구개발을 통하여 규격 제시         |
| 5.1.2      |                               |                | 터빈 및 열교환 /열 저장 계통 | - 증기 터빈<br>- 고효율 열교환기(90%이상) 및 열에너지 저장 기기            |                           |
| 5.1.3      |                               |                | 송전/충전 계통          | - 충전 및 송전 시설<br>- > 500 MWe                          |                           |
| <b>5.2</b> |                               | <b>냉각수 플랜트</b> |                   | - 장치 보호 및 플라즈마 출력 변수 측정                              |                           |
| 5.2.1      |                               |                | 토카막 냉각            | - 냉각수<br>- LOCA 안전 설계                                | - 안전요건<br>- 고속 중성자 환경 냉각수 |
| 5.2.2      |                               |                | 디버터 냉각            | - 냉각수<br>- LOCA 안전 설계                                |                           |
| 5.2.3      |                               |                | 일반 냉각 시설          | - 가열장치, 전원장치, 진단장치, 기타 장치 등 일반 냉각수<br>- 동력변환 작동유체 공급 |                           |
| 5.2.4      |                               |                | 냉각탑               | - 규모 :   |                           |
| 5.2.5      |                               |                | 냉각 수조             | - 규모 :   |                           |
| <b>5.2</b> |                               | <b>전원장치</b>    |                   | - 전원공급 장치  |                           |
| 5.2.1      |                               |                | 초전도자석 전원 장치       | - AC/DC 컨버터<br>- 고전류 70 kA 급                         |                           |

|       |  |  |             |                      |  |
|-------|--|--|-------------|----------------------|--|
| 5.2.2 |  |  | 가열 전원 장치    | - 고전압(1 MeV) 전원장치    |  |
| 5.2.3 |  |  | 일반 계통 전원 장치 | - 계통 전원<br>- 비상전원 시설 |  |



□ 핵융합 전력생산 실증로 기술트리(Tech-Tree) 작성

- 핵융합 전력생산 실증로 PBS를 바탕으로, 구성 항목 개발을 위한 소요기술 식별, KSTAR, ITER를 통해 확보 가능한 기술을 분류하고, 로드맵 공백기술 식별 및 8대 핵심기술 매칭
- KSTAR, ITER 공동개발 사업을 통해 진공용기, 열차폐체, 저온용기, 진단장치, I&C 제어장치, 조립장치, 액화냉동기 플랜트, 냉각수 플랜트, 전원장치 제작기술 확보 가능
- 초전도 자석, 가열 및 전류구동장치, 원격조작 장치, 연료주기 플랜트, 디버터, 증식블랑켓, 동력변환, 노심플라즈마, 핵융합 소재, 안전·인허가는 KSTAR, ITER 공동개발 사업으로 실증로급 기술 확보 불가능

| L1       | L2        | 상세기술                                 | 기술 확보 수준* |      | 핵심기술 분류          |
|----------|-----------|--------------------------------------|-----------|------|------------------|
|          |           |                                      | KSTAR     | ITER |                  |
| 통합 관리    | 통합 설계     | 형상관리                                 | -         | -    | -                |
|          | 프로젝트 관리   | 비용관리, 일정관리, 범위관리, 위험관리, 품질관리         | -         | -    | -                |
| 토카막 주장치  | 초전도 자석    | 초전도 선재, 초전도 도체, 초전도 자석, 초전도 자석 기반시스템 | 00        | 00   | ⑦ 초전도 자석         |
|          | 진공용기      | 진공용기 설계, 진공용기 제작, 진공용기 평가·검증         | 00        | 000  | -                |
|          | 열차폐체      | 열차폐체 설계, 열차폐체 제작, 열차폐체 평가·검증         | 000       | 000  | -                |
|          | 저온용기      | 저온용기 설계, 저온용기 제작, 저온용기 평가·검증         | 000       | 000  | -                |
| 토카막 부대장치 | 가열 및 전류구동 | 가열 및 전류구동 장치 개발, 가열 및 전류구동 시스템 운영    | 00        | 00   | ⑥ 가열 및 전류구동      |
|          | 진단장치      | 진단장치 설계, 진단장치 제작, 진단장치 평가·검증         | 000       | 000  | ① 노심 플라즈마        |
|          | I&C 제어    | 제어장치 제작, 자동제어, 고속네트워크                | 00        | 000  | -                |
|          | 원격유지 보수   | 로봇 설계제작, 카메라 모니터링, 가상 및 증강 현실        | 0         | 00   | ② 증식블랑켓<br>⑤ 디버터 |
|          | 조립장치      | 조립장치 설계, 조립장                         | 0         | 000  | -                |

| L1   | L2        | 상세기술   | 기술 확보 수준* |      | 핵심기술 분류             |
|------|-----------|--|-----------|------|---------------------|
|      |           |  | KSTAR     | ITER |                     |
|      |           | 치 제작, 조립장치 평가·검증, 조립장치 해체                        |           |      |                     |
| 부대시설 | 연료주기 플랜트  | 삼중수소 안전, 삼중수소 정제·분리·저장, 연료공급, 진공배기               | -         | 0    | ④ 연료주기              |
|      | 액화냉동기 플랜트 | 액화냉동기 설계, 액화냉동기 제작, 액화냉동기 평가·검증, 액화냉동기 운전        | 00        | 000  | -                   |
|      | 가스 플랜트    | 가스플랜트 설계, 가스플랜트 제작, 가스플랜트 평가·검증, 가스플랜트 운전        | 00        | 000  | -                   |
| 내벽부품 | 디버터       | 디버터 설계, 디버터 제작 및 검증                              | 0         | 0    | ⑤ 디버터<br>③ 핵융합 소재   |
|      | 증식블랑켓     | 증식블랑켓 설계안전해석, 증식블랑켓 제작검증, 증식블랑켓 계통               | -         | 0    | ② 증식블랑켓<br>③ 핵융합 소재 |
| BoP  | 열에너지변환    | 열에너지변환 시스템 설계, 열에너지변환 시스템 제작, 열에너지변환 시스템 평가검증    | -         | -    | ② 증식블랑켓             |
|      | 냉각수 플랜트   | 냉각수 플랜트 설계, 냉각수 플랜트 제작, 냉각수 플랜트 평가검증, 냉각수 플랜트 운전 | 00        | 000  | -                   |
|      | 전원장치      | 전원장치 설계, 전원장치 제작, 전원장치 평가·검증, 전원장치 운전            | 00        | 000  | -                   |
| 기타   | 노심플라즈마    | 노심플라즈마 제어, 노심플라즈마 진단, 노심플라즈마 시뮬레이션               | 00        | 00   | ① 노심 플라즈마           |
|      | 핵융합 소재    | 구조재, 대면재, 기능소재                                   | 00        | 00   | ② 연료주기              |
|      | 안전 인허가    | 안전해석·평가  | 0         | 0    | ⑧ 안전 인허가            |

\* ○○○ 높음, ○○ 보통, ○ 낮음

□ 주요 국가별 핵심기술 분류체계

- (한국) 제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획 수립을 통해 핵융합 실증로 8대 핵심기술을 정의
- (EU) EU DEMO 로드맵 개정 당시 11대 요소기술을 설정하고, 개별 R&D 추진 중이며, 동력계통, 원격유지보수 기술을 별도 핵심기술로 설정
- (일본) JA-DEMO 설계 활동과 연계하여, 개념설계를 위한 15대 액션플랜 설정하고 개별 R&D 추진 중이며, 노심 플라즈마 운전·제어 분야를 상세하게 구분하고 있으며, 이외 사회연계활동 및 헬리컬, 레이저 등 대안기술을 고려한 기술분류 개정

[ 주요 국가 핵심기술 분류체계 비교 ]

| 핵융합 8대 핵심기술(한국) | EU DEMO 11대 요소기술(EU)         | JA-DEMO 14대 요소기술(일본)                   |
|-----------------|------------------------------|--|
| ① 노심 플라즈마       | ④ 진단 및 제어                    | ⑤ 이론 및 시뮬레이션<br>⑥ 노심 플라즈마<br>⑪ 계측 및 제어 |
| ② 증식블랑켓         | ① TBM<br>② 증식블랑켓<br>⑨ 원격유지보수 | ② 블랑켓<br>⑩ 가동률과 유지보수                   |
| ③ 핵융합 소재        | ⑧ 핵융합 재료                     | ⑧ 핵융합 재료 및 표준, 코드                      |
| ④ 연료주기          | ⑪ 삼중수소(연료주기)                 | ⑦ 연료시스템                                |
| ⑤ 디버터           | ⑤ 디버터<br>⑨ 원격유지보수            | ③ 디버터<br>⑩ 가동률과 유지보수                   |
| ⑥ 가열 및 전류구동     | ⑥ 가열 및 전류구동                  | ④ 가열 및 전류구동 시스템                        |
| ⑦ 초전도자석         | ⑦ 초전도자석                      | ① 초전도자석                                |
| ⑧ 안전·인허가        | ⑩ 안전성                        | ⑨ 안전성                                  |
| -               | ③ 동력계통(BoP)                  | -                                      |
| -               | -                            | ⑫ 사이트 정비(실증로 부지)                       |
| -               | -                            | ⑬ 사회연계활동                               |
| -               | -                            | ⑭ 헬리컬                                  |
| -               | -                            | ⑮ 레이저                                  |

※ 출처 : (한국) 제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획('22~'26), 국가핵융합위원회, 2022  
 (EU) EU DEMO Design and R&D Activities: Progress and Updates,, Federici. G. & PPPT Team, 2018  
 (일본) JA-DEMO 액션플랜 개정(안), 원형로 개발 종합전략 TF, 2022

## (2) 기술분류체계도

### □ 기술분류체계도 작성

- 8대 핵심기술을 중심으로 세부기술(중분류, 소분류)을 재정의
- 기술트리 상 상세기술에 정의된 세부기술을 중분류로 설정하고, 각 중분류기술 개발을 위한 하위기술 정의

### □ 노심플라즈마 중분류 및 소분류 정의

- 노심 플라즈마는 핵융합 에너지 생산에 적합한 높은 온도(1억도 이상)와 밀도를 갖는 노심 연소 플라즈마를 만들고, 이를 안정적으로 제어·유지하는 기술로 핵융합 반응 후 가열 에너지를 추가 투입하지 않고 연소상태를 지속시키는 기술
- 실증로 노심 연소 플라즈마 운전 시나리오 개발에 필요한 필수 조건을 고려하여, 고출력 연소 플라즈마의 구현과 제어, 진단, 시뮬레이션 기술 등 세 개의 중분류와 세부기술로 정의
  - (노심플라즈마 제어) 실증로 운전 표준 시나리오 수립을 위한 첫 번째 조건인 고출력 플라즈마 장시간 운전기술 개발
  - (노심플라즈마 진단) 연소 플라즈마의 극한 환경(고열속, 고자장, 고중성자속)에서 동작 가능한 진단 센서(자기장, 광량, 에너지, 출력 등), 재료, 설계 기술 개발
  - (노심플라즈마 시뮬레이션) 실증로의 운전 시나리오의 적용 가능성 등을 사전 검증할 수 있는 플라즈마 시뮬레이션 기술 개발

| 대분류     | 중분류       | 소분류                        | 정의  |
|---------|-----------|----------------------------|---|
| 노심 플라즈마 | 노심플라즈마 제어 | 차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR(D-D)를 활용 안정상태 <math>\beta_N &gt; 3.5</math>, 고효율 <math>H_{89} &gt; 3.0</math>, <math>G &gt; 0.4</math>, 전류구동 <math>f_{NI} \sim 1.0</math>, <math>f_{BS} &gt; 0.7</math>, 이온온도 <math>&gt; 10</math> keV(1억도) 성능조건을 만족시키는 고출력 운전 시나리오 개발 및 구현</li> </ul> |
|         |           | 정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER(D-T)를 활용 열효율 <math>Q = 2 \sim 10</math>, <math>\sim 3,000</math>초 정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어 기술, 안정화 기술 개발</li> </ul>   |
|         |           | 실증로 통합 제어                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 안정적인 D-T 핵융합 지속, 대면 물질 열부하 인가, 전기생산 효율 향상, 이상 상황 대처 등 실증로 운전의 주요 요건에 대응한 운전 기술 확립</li> </ul>   |
|         | 노심플라즈마 진단 | 연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 연소 플라즈마 환경(고열속, 고자장, 고중성자속)에서 동작 가능한 진단 센서(자기장, 광량, 입자속 등), 재료, 설계 기술 개발</li> <li>• 노심 핵융합 반응 및 안정성 제어에 필수적인 신호를 직간접적으로 제공할 수 있는 진단 센서 요구사항 정립 및 평가 기술 개발</li> </ul>   |

| 대분류          | 중분류 | 소분류                  | 정의   |
|--------------|-----|----------------------|--|
|              |     | 데이터 통합 분석            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 측정 데이터 통합을 통한 각종 물리변수의 상관관계를 종합적으로 분석하여, 진단 데이터의 불확실성의 정도(불확도)를 추산하는 기술 개발</li> <li>• 토카막 제어에 필요한 정보이나 직접 측정이 제한된 노심 플라즈마 물성 정보 추정 기술 개발</li> <li>• 실시간 시뮬레이션 기반 합성진단 신호와 측정신호 비교 분석을 통한 토카막 제어성능 제고 기술 개발</li> </ul> |
|              |     | 실증로 진단 계통 제작, 설치, 운영 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로 진단계 구조물 및 필수 부품 (차폐구조물, 케이블, 피드 스루 등) 설계, 제작, 설치 기술 개발</li> <li>• 진단 계통 in-situ 보정 기술 (자가 보정, 이중 진단간 보정 등) 개발</li> <li>• 연소 플라즈마 실시간 진단계 성능(신호품질, 신뢰도 등) 평가 기법 개발, 평가 환경 구축 및 성능 평가</li> </ul>                    |
| 노심플라즈마 시뮬레이션 |     | 토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 토카막 핵융합로 운전을 위한 플라즈마 동특성, 가열 및 전류 구동 통합 시뮬레이션</li> <li>• 설계 데이터를 활용한 토카막 장치 가상화 및 시뮬레이션 기능 통합 구현</li> <li>• 토카막 핵융합로 운전 시나리오 및 제어 시스템 개발에 필요한 플라즈마 성능 및 거동 예측</li> </ul>  |
|              |     | 플라즈마 감금 성능 시뮬레이션     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 토카막 핵융합로에 감금된 초고온 플라즈마의 미세 난류 및 수송 현상 시뮬레이션</li> <li>• 초고온 플라즈마의 감금 성능을 결정하는 열 및 입자 수송 계수 예측</li> <li>• 플라즈마를 둘러싼 토카막 핵융합로 1차 벽에 가해지는 열속 및 중성자속 예측</li> </ul>   |
|              |     | 플라즈마 안정성 시뮬레이션       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 토카막 핵융합로에 감금된 초고온 플라즈마의 자기유체역학적 안정성 시뮬레이션</li> <li>• 토카막 핵융합로 안전 운전을 위한 플라즈마 압력 및 전류 한계 예측</li> <li>• 초고온 플라즈마의 동적 특성 및 붕괴 예측과 이에 따라 토카막 핵융합로에 가해지는 전자기력 및 스트레스 예측</li> </ul>   |

□ 증식블랑켓 중분류 및 소분류 정의

- 증식블랑켓은 핵융합 연료인 삼중수소를 생산하고, 핵융합 에너지(중성자 운동에너지)를 열에너지로 변환하며, 아울러 진공용기와 초전도 자석의 보호를 위해 중성자를 차폐하는 핵융합로의 핵심 내벽 부품
- 증식블랑켓 기술개발 및 제작과 관련 개발단계 등을 고려하여 설계/안전 해석체계 구축, 제작/검증기술, 계통 기술 등 세 개의 중분류로 구성 및 소분류(세부기술) 정의
  - (설계/안전 해석 체계 구축) 실증로 핵심부품인 증식블랑켓 설계와 안전해석을 위한 코드개발 및 검증, 효율적인 코드 간 연계 및 종합관리를 위한 통합체계 구축
  - (제작/검증 기술) 실증로급 증식블랑켓 제작에서부터 성능평가, 교체·유지보수 등 제반기술 개발
  - (계통기술) 증식블랑켓에서 생산된 대량의 연료추출 시스템 및 관련 핵심기기, 고열을 냉각해 전기로 변환하기 위한 냉각시스템 및 관련 핵심기기 개발

| 대분류   | 중분류           | 소분류                   | 정의   |
|-------|---------------|-----------------------|--|
| 증식블랑켓 | 설계/안전 해석 체계구축 | 분야별 설계코드 개발 및 통합체계 구축 | <ul style="list-style-type: none"> <li>증식블랑켓 설계를 위해서 모델링, 핵, 열수력, 구조, 전자기 등 단일·복합하중 해석을 위한 설계 코드 개발 및 검증</li> <li>코드 관리, 코드 간 연계성 강화 및 입력/출력 인터페이스 확립 등 효율적이고 체계적인 설계 업무를 수행하기 위해 통합체계 구축</li> </ul> |
|       |               | 계통/안전해석코드 개발          | <ul style="list-style-type: none"> <li>정상운전, 유지보수, 사고 시 다양한 안전/인허가 자료 생산을 위한 고유의 모델링 및 코드 개발·검증</li> </ul>   |
|       | 제작/검증 기술      | 블랑켓 제작기술 개발           | <ul style="list-style-type: none"> <li>대형 모듈 혹은 섹터 규모의 실증로 블랑켓 제작을 위한 기술개발 및 산업기술 기준에 부합하는 블랑켓 제작공정 도출</li> </ul>  |
|       |               | 블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발  | <ul style="list-style-type: none"> <li>개발된 제작기술의 산업기술기준 부합여부 검증을 위한 소형·대형 목업 제작 및 건전성·성능 평가</li> </ul>   |
|       |               | 블랑켓 유지보수 기술 개발        | <ul style="list-style-type: none"> <li>실증로 가동률을 높이기 위해 로봇을 이용하여 대형 블랑켓 세그먼트 또는 대량의 블랑켓 모듈을 정밀·신속하게 원격으로 교체하기 위한 조립·해체·원격제어 기술</li> </ul>   |
|       | 계통 기술         | 블랑켓 연료추출 기술 개발        | <ul style="list-style-type: none"> <li>블랑켓 연료추출 계통*을 위한 공정 관련 공정시스템 및 핵심기기 개발</li> <li>* 증식재에서 생산된 연료를 추출하고, 삼중수소플랜트에서 요구하는 화학적 형태로 이송</li> </ul>  |
|       |               | 블랑켓 냉각기술 개발           | <ul style="list-style-type: none"> <li>블랑켓에서 변환된 열에너지를 추출하여 동력변환 계통까지 전달하고, 블랑켓 내부를 운전온도로 냉각하기 위한 공정 관련 공정시스템 및 핵심기기 개발</li> </ul>   |
|       |               | 블랑켓 계통 운전기술 개발        | <ul style="list-style-type: none"> <li>블랑켓 운전 시 발생가능한 비정상 상황에서의 안전성 확보, 블랑켓 본체 및 계통 보호 기술 개발</li> </ul>  |

□ 핵융합 소재 중분류 및 소분류 정의

- 핵융합로용 극한 소재 개발은 핵융합 발전소의 구조적 안전성과 에너지 생산의 효율성을 확보하는 핵심기술
- 핵융합 소재는 실증로의 주요부분 및 기능을 고려하여 구조재, 대면재, 기능소재 등 세 개의 중분류로 구성 및 소분류(세부기술) 정의
  - (구조재) 핵융합로용 내벽부품으로 사용되며 저방사화 철강재료의 대량 제조기술 개발, 용접/접합기술 개발 및 물성 DB 구축을 통한 표준화
  - (대면재) 핵융합 증식블랑켓 및 디버터용으로 사용되며, 세부기술개발로서 고인성 플라즈마 제조기술 개발 및 텅스텐 소재 DB 구축
  - (기능소재) 삼중수소 증식재로 사용되는 리튬 세라믹스와 중성자 증배재로 사용되는 베릴륨 화합물 개발 및 물성 DB 구축

| 대분류       | 중분류  | 소분류                     | 정의  |
|-----------|------|-------------------------|---|
| 핵융합<br>소재 | 구조재  | 저방사화 구조재 제조기술 개발        | • 핵융합로용 증식블랑켓 및 디버터 등의 내벽부품 구조재로 사용될 저방사화 철강재 대량 제조기술 개발                                      |
|           |      | 저방사화 구조재 용접 및 접합기술 개발   | • 저방사화 철강재를 이용하여 핵융합로 증식블랑켓 및 디버터 등과 같은 복잡한 형상의 부품 제작에 필요한 용접 및 접합기술 개발                       |
|           |      | 저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화 | • 핵융합로용 증식블랑켓 및 디버터 설계 파라미터로 사용하기 위해 한국형 저방사화 철강재 ARAA의 각종 물성 DB를 구축하고, 국내외 산업기술기준 등재를 통한 표준화 |
|           | 대면재  | 고인성 대면재 제조기술 개발         | • 핵융합로 증식블랑켓 및 디버터용 고인성 플라즈마 대면재 제조기술 개발  |
|           |      | 대면재 물성 DB 구축            | • 플라즈마 대면재로 사용되는 텅스텐 소재의 고열부하 및 고입자속 환경 노출에 따른 특성변화 및 중성자 조사된 텅스텐 소재의 물성 변화 관련 데이터베이스 구축      |
|           | 기능소재 | 기능소재 원료 확보 기술 개발        | • 핵융합 연료시스템의 기능소재(삼중수소 증식재 및 중성자 증배재 원료)로 사용될 리튬 화합물 및 베릴륨 화합물 등의 원료 합성 기술 개발                 |
|           |      | 기능소재 제조기술 개발            | • 삼중수소 증식재용 리튬 세라믹스 및 중성자 증배재용 베릴륨 화합물 제조 기술 개발   |
|           |      | 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증   | • 증식블랑켓의 설계 및 안전성 검증을 위한 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 평가  |



□ 연료주기 중분류 및 소분류 정의

- 연료주기는 삼중수소의 안전한 취급과 핵융합 연속 반응을 위해 연료를 공급·순환시키는 핵심기술
- 연료주기는 핵융합 연료인 삼중수소가 누출되지 않고, 실증로에서 배출되어 재공급되기까지의 단계를 고려하여, 삼중수소 안전, 삼중수소 정제·분리·저장, 핵융합 연료공급, 핵융합 진공배기 기술 등 네 개의 중분류 구성 및 소분류(세부기술) 정의
  - (삼중수소안전) 대량 삼중수소 취급시 누출가능한 미량 삼중수소 회수를 통해 작업자를 보호하고 환경 배출을 최소화하기 위한 기술
  - (삼중수소 정제·분리·저장) 핵융합 반응기 배기가스 연료 재사용을 위한 삼중수소·중수소 회수, 농축 및 저장기술
  - (핵융합 연료공급) 핵융합 반응에 의한 높은 에너지의 발산 및 안정적인 핵융합 반응을 지속하기 위해 초저온 고체 상태의 중수소, 삼중수소를 만들어 고속으로 토카막 내부에 공급
  - (핵융합 진공배기) 핵융합로 연속운전을 위한 내부 고진공 유지 및 미사용 삼중수소를 안정적으로 회수하기 위한 배기 시스템

| 대분류      | 중분류                | 소분류                                    | 정의   |
|----------|--------------------|--|--|
| 연료주<br>기 | 삼중수소<br>안전         | 대량 삼중수소 취급<br>안전기술 개발                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>대량 삼중수소를 취급함에 있어 환경 및 작업자의 안전 확보 등 법적 요건을 준수하기 위한 시스템 개발</li> <li>물상태로 미량 포함된 삼중수소를 수소동위원소 상태로 변환하여 삼중수소 재사용 강화 및 삼중수소 환경 방출을 최소화하기 위한 시스템 개발</li> </ul>                                |
|          |                    | 삼중수소 플랜트 공정가스<br>분석 및 환경시료 측정 기술<br>개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>삼중수소 플랜트 내 삼중수소를 포함한 공정가스 농도 측정을 위한 분석기술 개발 및 다양한 삼중수소 농도를 포함한 공정가스 분석기술 검증</li> <li>삼중수소 취급 시설 주변 액체 및 고체 상태로 존재하는 물체의 삼중수소 농도를 측정하여 대량 삼중수소 취급에 따른 환경 영향 평가 수행을 위한 측정기술 개발</li> </ul> |
|          | 삼중수소<br>정제분리<br>저장 | 수소동위원소 정제<br>시스템 개발                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>핵융합 반응기 배기가스 중 수소동위원소 재사용을 위한 정제</li> </ul>   |
|          |                    | 수소동위원소 분리<br>시스템 개발                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>삼중수소를 연료로 재사용하기 위한 수소동위원소 내 삼중수소 농축 및 분리 기술</li> </ul>  |
|          |                    | 삼중수소 저장·공급<br>시스템 개발                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>핵융합 연료공급을 위한 안전한 삼중수소 저장 및 취급 관련 공정기술 개발</li> </ul>   |
|          | 핵융합<br>연료공급        | 핵융합 연료 펠릿<br>주입 시스템 개발                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>핵융합 플라즈마 내부 연료를 안정적으로 공급하기 위한 다양한 크기 펠릿 생산 및 플라즈마 내 공급·리사이클 시스템 개발</li> </ul>   |
|          |                    | 핵융합 연료 가스<br>주입 시스템 개발                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>핵융합 반응기 내 다양한 공정 가스를 안정적으로 주입하기 위한 시스템 개발</li> </ul>  |
|          | 핵융합<br>진공배기        | 핵융합 연료 고진공<br>배기 기술 개발                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>핵융합로 대규모 연속운전의 고진공상태 유지하고 미사용 연료 회수를 위한 고진공 배기장치 개발</li> </ul>  |
|          |                    | 핵융합 연료 저진공<br>배기 기술 개발                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>고진공 배기를 지원하고 안정적으로 삼중수소 플랜트와 연계하기 위한 저진공 배기 시스템 개발</li> </ul>   |

□ 디버터 중분류 및 소분류 정의

- 디버터는 핵융합의 극한환경에 직접적으로 노출되어 불순물과 헬륨 제어를 통해 노심 플라즈마를 고성능으로 유지하게 하는 장치
- 디버터는 설계기술 개발, 제작, 검증 등 개발단계 등을 고려하여 디버터 설계기술 개발, 디버터 제작 및 검증 기술개발 등 두 개의 중분류 구성 및 소분류(세부기술) 정의
  - (디버터 설계) 핵융합 환경에서 고열속 장시간 운전이 가능한 고효율 디버터 장치개발을 위해 디버터 부근 물리현상분석 등의 결과를 활용한 공학설계
  - (디버터 제작 및 검증) 20 MW/m<sup>2</sup>급 초고열속 냉각성능을 갖춘 실증로급 규모의 디버터 제작 및 평가기술을 개발하고, 실증로 디버터의 유지보수 개념 도출

| 대분류 | 중분류         | 소분류                     | 정의   |
|-----|-------------|-------------------------|--|
| 디버터 | 디버터 설계      | 경계플라즈마 해석 및 영향 평가 기술 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 경계 플라즈마 물리해석을 통한 디버터 형상 및 열·입자속 계산과 최적화</li> <li>• 플라즈마와 일차벽 상호작용 해석 및 실험을 통한 대면재 연료 잔류 특성 및 수명 평가</li> </ul> |
|     |             | 디버터 공학설계 기술개발           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 공학설계의 건전성 확보 및 사고 예방을 위해 디버터 구조물에 발생하는 응력 평가, 냉각방식 도출, 사고 시나리오 정립, 핵반응 열 및 폐기물 기준 수립</li> </ul>               |
|     | 디버터 제작 및 검증 | 디버터 제작 기술 개발            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 MW/m<sup>2</sup>급 텅스텐 디버터 타겟 및 카세트 바디 제작기술 개발, 텅스텐-저방사화구조강 모노블록형 대면부품 제작기술 개발과 한계 열속 및 수명 평가</li> </ul>    |
|     |             | 디버터 평가 기술 개발            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합 실증로급 장치에 사용되는 디버터 대면 부품의 이종접합 계면의 평가기술 개발 및 기준 수립, 디버터 표면 열속 진단 기술</li> </ul>                             |
|     |             | 디버터 유지보수 기술 개발          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로급 디버터의 교체 시 방사화 및 자화 영향 평가를 기반으로 한 로봇을 이용하여 원격으로 유지보수를 할 수 있는 기술</li> </ul>                                |

□ 가열 및 전류구동 중분류 및 소분류 정의

- 가열 및 전류구동 장치는 가열장치를 이용한 토카막 플라즈마 온도상승, 전류구동 장치를 이용한 플라즈마 전류의 지속적 유지, 국지적인 전류 구동 수행으로 플라즈마의 발생부터 유지에 필요한 온도와 압력을 공급·제어하여 고성능 플라즈마를 안정적으로 발생·제어하는 역할 수행
- 실증로 가열 및 전류구동 설계 사양(50~60MW)을 고려한, 높은 효율과 넓은 운전 영역의 대용량 가열 및 전류구동 장치 개발과 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 최적화 기술 개발을 포함한 두 개의 중분류와 세부기술로 정의
  - (가열 및 전류구동 장치) 실증로급 플라즈마 가열 및 전류구동을 위한 장치 설계, 제작 및 시험 기술 개발
  - (가열 및 전류구동 플라즈마 통합) 고성능 핵융합 플라즈마 발생 및 제어를 위한 가열 및 전류구동 요구조건 개발과, 플라즈마 연속운전을 보장하기 위한 가열 및 전류구동 통합 운전 최적화 기술 개발

| 대분류       | 중분류               | 소분류                  | 정의  |
|-----------|-------------------|----------------------|---|
| 가열 및 전류구동 | 가열 및 전류구동 장치      | 고효율 고에너지 중성입자빔 주입장치  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합 플라즈마 정상상태(Steady-State) 도달과 온도 제어를 위한 MV급의 음이온원 기반 중성입자빔 주입 시스템 개발</li> <li>• 레이저 및 플라즈마 중성화기 등을 포함한 고효율 이온빔 중성화 기술 개발</li> <li>• 삼중수소 증식률 감소와 중성자 누설을 최소화하기 위한 빔 포트 형상과 빔 수송 방법 최적화 연구</li> </ul> |
|           |                   | 연속운전 고주파 전류구동장치      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고자기장 호환 주파수의 고효율/고출력 고주파 발생 장치 및 전송로 개발</li> <li>• 증식블라켓 호환 고출력밀도 고 전류구동효율의 고주파 입사장치 개발</li> </ul>   |
|           | 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 | 고효율 가열 및 전류구동        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고밀도 플라즈마에서 효과적인 전류구동 기술 개발</li> <li>• 가열 및 전류구동 운전 성능 예측 코드 개발, 이를 활용한 성능 최적화 기술 개발 및 운전 절차 개발</li> </ul>  |
|           |                   | 플라즈마 가열 및 전류구동 시뮬레이션 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 토카막 핵융합로에 감금된 플라즈마를 핵융합 반응이 가능한 초고온으로 가열하는 과정과 전류가 유도되는 과정 시뮬레이션</li> <li>• 토카막 핵융합로 정상 상태 유지를 위해 필요한 외부 가열 및 전류 구동 요구사항 예측</li> </ul>   |

□ 초전도 자석 중분류 및 소분류 정의

- 초전도 자석은 노심에 높은 중심 자기장을 발생시켜, 핵융합 플라즈마를 안정적으로 가두고 제어하는데 반드시 필요한 실증로 주장치의 핵심 부품
- 실증로 설계 사양(6.5-7.0T)을 충족하는 초전도 자석의 핵심 구성 부품을 기준으로, 선재, 도체 자석의 개발과 거대한 초전도 자석을 제작하고 운전하는 시스템 개발을 포함한 네 개의 중분류와 세부기술로 정의
  - (초전도 선재) 초전도 케이블의 핵심소재로 실증로급 초전도 자석용 고자장 고성능 초전도 선재 개발 및 제작 기술
  - (초전도 도체) 저온 및 고온초전도 도체 설계, 케이블링 조관 등 제작, 특성평가 기술
  - (초전도 자석) 실증로용 토로이달 필드 코일 등 초전도 자석 설계 및 제작 기술
  - (초전도 자석기반 시스템) 초전도 자석 냉각, 전원 등 기반 시스템 및 자석 켜치 보호, 운전 해석 기술

| 대분류    | 중분류    | 소분류                   | 정의   |
|--------|--------|-----------------------|--|
| 초전도 자석 | 초전도 선재 | 고성능 선재 개발 및 장선화       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 저온초전도 선재 내부의 수천가닥의 필라멘트의 크기를 더 작게 하거나 낱알 경계면 등의 핀닝 특성 등을 향상하는 방법으로 고자장 임계전류밀도를 향상시키면서 동시에 수 km 장선 제작이 가능하고 교류손실 등 그 외 필요한 성능을 만족시키는 고성능 선재개발 기술</li> </ul>  |
|        |        | 성능평가, QA/QC 기법, 사양 설정 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 실제와 유사한 고자장, 고변이 등의 상황에서 임계전류 밀도 저감 특성 등 분석기술</li> <li>• 자석 혹은 도체의 설계에 따라 교류손실 등 필요한 사양을 정의하고 이에 따른 선재 제작요건을 제시하는 기술 및 설계 수명을 견딜 수 있는 선재 QA/AC 프로세스 정립 기술</li> <li>• 장선화, 선재 형상 최적화, 선재 절연 및 표면처리, 균일 임계전류, 임계전류 조절, 중성자 내구성 등 실증로급 고온초전도 자석에 필요한 선재 사양 설정 및 제작 공정</li> </ul> |
|        | 초전도 도체 | 실증로 저온 초전도 도체 제작      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 케이블 패턴, 트위스트 피치 등에 따른 기계적 안정성, 공극률, 안정화동 비율 등에 따른 열적인 안정성, 켜치 안정성 등을 고려한 도체 설계기술 및 설계에 따른 단계별 케이블링 기법, 고자장 하에서 강한 기계적인 힘을 견딜 수 있는 두께의 조관 기술 등 도체 제작 기술</li> </ul>   |

| 대분류 | 중분류          | 소분류                     | 정의  |
|-----|--------------|-------------------------|---|
|     |              | 초전도 도체 특성평가<br>QA/QC 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>도체 시험시설 측정용 자석 혹은 시험용 코일의 자장 환경 하에서 도체의 임계전류, 혹은 외부 열원 인가에 따른 안정성 분석 등의 초전도 도체 특성 평가, 분석 기술 및 자석 권선을 위한 수 km 길이의 균일한 초전도 도체 제작을 위한 케이블링, 조관 품질 등 QA/QC 기법</li> </ul>   |
|     |              | 고온 초전도 도체 제작            | <ul style="list-style-type: none"> <li>고자장 임계전류 특성이 더 우수한 고온초전도 선재의 테이프 형태를 고려한 도체 형상, 교류손실 및 자기장 특성을 고려한 도체 개발, 비교적 큰 온도마진을 고려한 냉각 방법, 스크리닝 전류를 포함하는 기계적 힘에 대한 고려 등을 반영한 설계 및 시험 평가, 제작 기술</li> </ul>  |
|     | 초전도 자석       | 실증로 저온 초전도 자석 설계 및 제작   | <ul style="list-style-type: none"> <li>KSTAR 및 ITER의 저온 초전도 자석 설계를 기반으로, 기계적인 강도 한계에 근접하리라 예상되는 토로이달 필드(TF) 코일, 교류손실에 의한 심한 열적요동을 견디어야 하는 중앙 솔레노이드(CS) 코일 등의 40여년 운전기간 안정성을 고려한 설계 및 권선, 진공함침, 접합 등 자석 제작, 자석 전체를 지지하는 구조물 설계/제작 기술</li> </ul>            |
|     |              | 시험용 코일 특성평가 및 QA/QC 기법  | <ul style="list-style-type: none"> <li>K-Demo 용 초전도 자석 제작을 위한 저온 초전도체 기반의 초전도 자석의 열적 안정성 등에 대한 설계 검증 및 제작 기법 적절성 검증을 위한 시험용 토로이달 필드 (TF) 코일, 시험용 중앙 솔레노이드 (CS) 코일 제작, 성능 평가 및 일관된 권선 기법, 접합방법, 접합저항의 적절성, 특히 전류리드 부분의 내전압 특성 등 자석 전체의 QA/QC 기법</li> </ul> |
|     |              | 고온 초전도 시험용 코일 개발        | <ul style="list-style-type: none"> <li>실증로용 고온초전도 자석은 도체를 활용한 혹은 활용하지 않는 혹은 핵융합로 내부 부품 교체를 위한 분리 가능한 형태 등 다양한 기술이 가능하기에 이중 적절한 시험용 코일에 대해 정의하고 이에 대한 설계, 제작 기법 적절성 검증을 위한 시험용 코일 개발</li> </ul>  |
|     | 초전도 자석기반 시스템 | 초전도자석 기반 시스템            | <ul style="list-style-type: none"> <li>실증로급 초전도 자석의 열부하, 40여 년의 운전수명 등을 고려한 냉각, 전원 등 기반 시스템 사양 설정 및 급작스러운 초전도-상전도 전이에 대한 켄치 보호 기술, 자석 운전 시의 특성에 대한 운전 해석 기술 등 자석의 안정적인 운영에 필수적인 제반 기술개발</li> </ul>  |

□ 안전인허가 중분류 및 소분류 정의

- 안전인허가는 핵융합에너지 기술 연구 및 이용을 목표로 실증로 설계 및 건설에 필요한 안전성 평가기술을 개발하고 이를 실현하기 위한 인허가 체계 개발하는 기술
- 실증로의 안전성 확보 및 인허가 승인을 위해 관련 핵심기술 개발과 함께 이를 지원하는 체계 및 기반요소 등을 종합적으로 고려하여, 안전성평가기술과 인허가기술로 중분류를 구성하고 이에 따른 소분류(세분기술)를 정의
  - (안전성 평가기술) 실증로 안전기술 개발 및 확보를 목표로 주요 위험요소 규명 및 설계 안전성 평가를 위한 기반을 제공
  - (인허가 기술) 실증로 건설·운영에 관한 관련 법령 승인에 필요한 규제 및 인허가 절차, 체계 등을 개발·구축

| 대분류       | 중분류         | 소분류           | 정의  |
|-----------|-------------|---------------|---|
| 안전<br>인허가 | 안전성<br>평가기술 | 안전 요구조건 도출    | • 실증로 안전기본원칙을 수립하고 이를 토대로 안전 기술 정의 및 안전기준 제정, 실증로 건설 부지선 정 요건 및 안전 요구조건 도출, 검증을 통해 인허가 획득 |
|           |             | 안전성 규명        | • 실증로 안전성 평가 전략·방법론을 수립하고, 안전 규명기술 개발, 이를 활용한 사고해석/방사선환경 영향평가 등을 통해 안전성 규명                |
|           |             | 안전관리 체계 구축    | • 핵융합 안전관리 기본방향을 설정하고, 안전관리 전문인력 양성을 위한 기반 구축 및 안전관리 검증 관련 인프라 체계 마련                      |
|           | 인허가<br>기술   | 규제체계 확보       | • 안전규제요건 개발, 규제지침 및 심사지침 개발   |
|           |             | 규제검증<br>기술 개발 | • 설계 안전성 확인을 위한 안전성 검증기술 개발   |

□ 기술별(소분류) 현재 기술수준 및 목표수준(실증로 기본개념(안) 달성)을 TRL로 정의

| 대분류<br>(8개)             | 중분류<br>(23개) | 소분류<br>(58개)                     | 현재<br>기술수준                   | 목표<br>기술수준 |       |
|-------------------------|--------------|----------------------------------|------------------------------|------------|-------|
| 노심<br>플라즈<br>마          | 노심플라즈마 제어    | 차세대 고효율 플라즈마 운전 시나리오 개발          | TRL 4                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어             | TRL 3                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 실증로 통합 제어                        | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 실증로 운전 시나리오 개발                   | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         | 노심플라즈마 진단    | 연소플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술     | 연소플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술 | TRL 2      | TRL 6 |
|                         |              |                                  | 데이터 통합 분석 기술                 | TRL 3      | TRL 6 |
|                         |              |                                  | 실증로 진단 계통제작, 설치, 운영 기술       | TRL 1      | TRL 5 |
|                         | 노심플라즈마 시뮬레이션 | 토크막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술            | 토크막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술        | TRL 4      | TRL 6 |
|                         |              |                                  | 플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술          | TRL 4      | TRL 7 |
|                         |              |                                  | 플라즈마 안전성 시뮬레이션 기술            | TRL 4      | TRL 7 |
| 증식블<br>랑켓               | 설계/안전해석 체계구축 | 분야별 설계코드 개발 및 통합체계 구축            | TRL 4                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 계통/안전해석코드 개발                     | TRL 4                        | TRL 6      |       |
|                         | 제작/검증 기술     | 블랑켓 제작기술 개발                      | TRL 3                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발             | TRL 3                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 블랑켓 유지보수 기술 개발                   | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         | 계통 기술        | 블랑켓 연료추출 기술 개발                   | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 블랑켓 냉각기술 개발                      | TRL 3                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 블랑켓 계통 운전기술 개발                   | TRL 3                        | TRL 6      |       |
| 연료주<br>기                | 삼중수소 안전      | 대량 삼중수소 취급 안전기술 개발               | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정 기술 개발 | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         | 삼중수소 정제분리저장  | 수소동위원소 정제 시스템 개발                 | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 수소동위원소 분리 시스템 개발                 | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 삼중수소 저장·공급 시스템 개발                | TRL 3                        | TRL 6      |       |
|                         | 핵융합 연료공급     | 핵융합 연료 펠릿 주입 시스템 개발              | TRL 3                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 핵융합 연료 가스 주입 시스템 개발              | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         | 핵융합 진공배기     | 핵융합 연료 고진공 배기 기술 개발              | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         |              | 핵융합 연료 저진공 배기 기술 개발              | TRL 2                        | TRL 6      |       |
|                         | 핵융합<br>소재    | 구조재                              | 저방사화 구조재 제조기술 개발             | TRL 3      | TRL 6 |
| 저방사화 구조재 용접 및 접합기술 개발   |              |                                  | TRL 3                        | TRL 6      |       |
| 저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화 |              |                                  | TRL 3                        | TRL 6      |       |



| 대분류<br>(8개)      | 중분류<br>(23개)         | 소분류<br>(58개)             | 현재<br>기술수준 | 목표<br>기술수준 |
|------------------|----------------------|--------------------------|------------|------------|
|                  | 대면재                  | 고인성 대면재 제조기술 개발          | TRL 3      | TRL 6      |
|                  |                      | 대면재 물성 DB 구축             | TRL 3      | TRL 6      |
|                  | 기능소재                 | 기능소재 원료 확보 기술 개발         | TRL 3      | TRL 6      |
|                  |                      | 기능소재 제조기술 개발             | TRL 3      | TRL 6      |
|                  |                      | 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증    | TRL 3      | TRL 6      |
| 디버터              | 디버터 설계               | 경계플라즈마 해석 및 영향 평가 기술 개발  | TRL 3      | TRL 6      |
|                  |                      | 디버터 공학설계 기술개발            | TRL 6      | TRL 6      |
|                  | 디버터 제작 및<br>검증       | 디버터 제작 기술 개발             | TRL 3      | TRL 6      |
|                  |                      | 디버터 평가 기술 개발             | TRL 3      | TRL 6      |
|                  |                      | 디버터 유지보수 기술 개발           | TRL 2      | TRL 6      |
| 가열 및<br>전류구<br>동 | 가열 및 전류구동<br>장치      | 고효율 에너지 중성입자빔 주입장치       | TRL 3      | TRL 6      |
|                  |                      | 연속운전 고주파 전류구동장치          | TRL 3      | TRL 6      |
|                  | 가열 및 전류구동<br>플라즈마 통합 | 고효율 가열 및 전류구동 기술 개발      | TRL 3      | TRL 6      |
|                  |                      | 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술 | TRL 4      | TRL 7      |
| 초전도<br>자석        | 초전도 선재               | 고성능 선재개발 및 장선화 기술        | TRL 4      | TRL 6      |
|                  |                      | 성능평가 QA/QC 기법, 사양설정 기술   | TRL 4      | TRL 6      |
|                  | 초전도 도체               | 저온초전도 도체 설계 및 제작 기술      | TRL 4      | TRL 6      |
|                  |                      | 초전도 도체 특성평가 및 QA/QC 기법   | TRL 4      | TRL 6      |
|                  |                      | 실증로급 고온초전도 도체 기술         | TRL 4      | TRL 6      |
|                  | 초전도 자석               | 초전도 자석 설계 및 제작기술 확립      | TRL 4      | TRL 6      |
|                  |                      | 시험용 코일 특형평가 및 QA/QC 기법   | TRL 4      | TRL 6      |
|                  |                      | 고온초전도 시험용 코일 개발          | TRL 4      | TRL 6      |
|                  | 초전도 자석<br>기반시스템      | 초전도자석 기반기술               | TRL 4      | TRL 6      |
|                  | 안전·인<br>허가           | 안전성 평가                   | 안전 요구조건 도출 | TRL 2      |
| 안전성 규명           |                      |                          | TRL 2      | TRL 7      |
| 안전관리 체계 구축       |                      |                          | TRL 3      | TRL 7      |
| 인허가<br>(요건 도출)   |                      | 규제체계 확보                  | TRL 2      | TRL 7      |
|                  |                      | 규제검증 기술 개발               | TRL 2      | TRL 7      |

< TRL 단계 정의 >

| 구분       | 단계 | 정 의                          | 세부 설명  |
|----------|----|------------------------------|--|
| 기초 연구 단계 | 1  | 기초 이론/실험                     | 0 기초이론 정립 단계   |
|          | 2  | 실용 목적의 아이디어, 특허 등 개념 정립      | 0 기술개발 개념 정립 및 아이디어에 대한 특허 출원 단계   |
| 실험 단계    | 3  | 실험실 규모의 기본성능 검증              | 0 실험실 환경에서 실험 또는 전산 시뮬레이션을 통해 기본성능이 검증될 수 있는 단계<br>0 개발하려는 부품/시스템의 기본 설계도면을 확보하는 단계  |
|          | 4  | 실험실 규모의 소재/부품/시스템 핵심성능 평가    | 0 시험샘플을 제작하여 핵심성능에 대한 평가가 완료된 단계<br>0 3단계에서 도출된 다양한 결과 중에서 최적의 결과를 선택하려는 단계<br>0 컴퓨터 모사가 가능한 경우 최적화를 완료하는 단계<br>0 의약품 등 바이오 분야의 경우 목표 물질이 도출된 것을 의미  |
| 시작품 단계   | 5  | 확정된 소재/부품/시스템 시작품 제작 및 성능 평가 | 0 확정된 소재/부품/시스템의 실험실 시작품 제작 및 성능 평가가 완료된 단계<br>0 개발 대상의 생산을 고려하여 설계하나 실제 제작한 시작품 샘플은 1~수개 미만인 단계<br>0 경제성을 고려하지 않고 기술의 핵심성능으로만 볼 때, 실제로 판매가 될 수 있는 정도로 목표 성능을 달성한 단계<br>0 의약품은 GMP(Good Manufacturing Practice, 제조품질관리 기준) 파일럿 설비를 구축  |
|          | 6  | 파일럿 규모 시작품 제작 및 성능 평가        | 0 파일럿 규모(복수 개 ~ 양산규모의 1/10 정도)의 시작품 제작 및 평가가 완료된 단계<br>0 파일럿 규모 생산품에 대해 생산량, 생산용량, 수율, 불량률 등 제시<br>0 파일럿 생산을 위한 대규모 투자가 동반되는 단계<br>0 생산기업이 수요기업 적용환경에 유사하게 자체 현장테스트를 실시하여 목표 성능을 만족시킨 단계<br>0 성능 평가 결과에 대해 가능하면 공인인증 기관의 성적서를 확보<br>0 의약품의 경우 비임상 시험기준인 GLP(Good Laboratory Practice, 동물실험규범)기관에서 전임상시험을 완료하는 단계 |
| 제품화 단계   | 7  | 신뢰성평가 및 수요기업 평가              | 0 실제 환경에서 성능 검증이 이루어지는 단계<br>0 부품 및 소재개발의 경우 수요업체에서 직접 파일럿 시작품을 현장 평가(성능 뿐만 아니라 신뢰성에 대해서도 평가)<br>0 의약품의 경우 임상 2상 및 3상 시험 승인<br>0 가능하면 KOLAS 인증기관 등의 신뢰성 평가 결과 제출   |
|          | 8  | 시제품 인증 및 표준화                 | 0 표준화 및 인허가 취득 단계<br>0 조선 기자재의 경우 선급기관 인증, 의약품의 경우 식약청의 품목허가   |
| 사업화      | 9  | 사업화                          | 0 본격적인 양산 및 사업화 단계<br>0 6-시그마 등 품질관리가 중요한 단계   |

### (3) 핵심기술별 국내외 기술동향

#### 가. 노심 플라즈마

□ 연구개발 동향

- (국외) 고성능 플라즈마 제어, 진단, 시뮬레이션 기술 등 핵융합 플라즈마의 오랜 기간 연구 경험을 바탕으로 ITER 및 실증로 적용을 위한 기술개발 추진 중

< 국외 연구개발 동향 >

| 세부기술          | 주요내용  |
|---------------|---|
| 노심 플라즈마 제어    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 오랜 기술경험으로 <math>\beta_N \geq 3.5</math>급의 고성능 플라즈마 연구 성숙 단계이나, 장치(DIII-D, GA) 성능 한계로 장시가 운전연구 제약 존재(US)</li> <li>▶ 국가별 토카막 실험장치를 중심으로 ITER 연소 플라즈마에 적용 가능한 노심 플라즈마 제어 기술 개발 중(US, JP, EU)</li> <li>▶ 노심 플라즈마의 높은 선형예측성능을 갖는 통합운전시나리오 모델링 개발 중(US)</li> </ul>                                   |
| 노심 플라즈마 진단    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ DIII-D 중심 광범위한 진단기술(ITER 진단장치 등) 개발 선도 중, 최근 연소 플라즈마 적용 가능한 신개념 광섬유 볼로미터 개발(US)</li> <li>▶ 다양한 중성자 측정 기술 확보, 디버터 영역 진단 기술 개발 선도 중(JP)</li> <li>▶ ITER 진단장치 개발을 위한 국제협력을 주도하고 있으며, 다양한 진단 소자 및 재료에 대한 방사 환경 테스트(EU)</li> <li>▶ ITER 통합 분석시스템을 구축하여 진단 신호 통합 해석, 시뮬레이션 결과 검증 등 활용(EU)</li> </ul> |
| 노심 플라즈마 시뮬레이션 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 운전 시나리오 통합 모사에 필요한 시뮬레이션 모듈을 개발 및 통합 시뮬레이션 코드 개발 지속 추진 중(US, JP, EU)</li> <li>▶ 플라즈마 난류 및 수송을 동역학적 방법으로 모사할 수 있는 시뮬레이션 기술 개발 추진 중(US, JP, EU)</li> <li>▶ 노심 플라즈마 붕괴 현상 생성 과정 예측 등 플라즈마의 안전성 향상을 위한 시뮬레이션 기술 개발 추진 중(US, EU)</li> </ul>   |

- (국외 연구시설 현황) 노심 플라즈마 연구를 위한 자국 연구장치를 운영 중에 있으며, 핵융합 연소 플라즈마 기술 확보를 위한 ITER 장치 공동 개발 중

< 국외 연구시설 현황 >

| 국가    | 시설명      | 분야   | 목표 및 내용                                       | 비고                   |
|-------|----------|------|---|----------------------|
| 국제 공동 | ITER     | 플라즈마 | • Q=10, 열출력 500MW 달성을 통한 핵융합 플라즈마 운전시나리오 개발 등 | (기간) 2025년 완공(현재 기준) |
| 미국    | DIII-D   | 플라즈마 | • 고성능 플라즈마 모드(AT-mode) 운전 연구                  | (기간) 1986년 운전시작      |
| 일본    | JT60-S A | 플라즈마 | • 초전도 토카막 업그레이드를 통해 ITER 플라즈마 실험 및 DEMO 연구    | (기간) 2020년 운전시작      |
|       | IFERC    | 플라즈마 | • 시뮬레이션 기술개발을 위한 슈퍼컴퓨터 보유                     | BA 프로그램 운영 중         |
| 중국    | EAST     | 플라즈마 | • 고성능 플라즈마 장시간 운전 연구                          | (기간) 2006년 운전시작      |

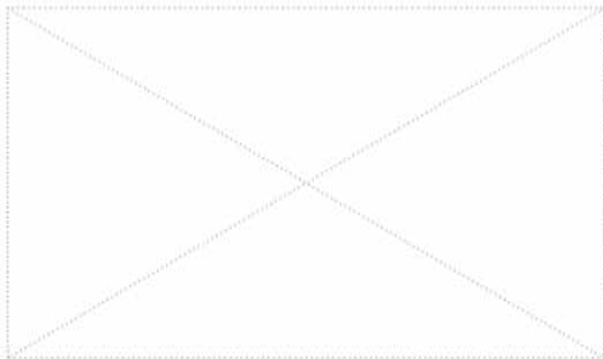
- (국내) KSTAR를 중심으로 노심 플라즈마 제어, 진단, 시뮬레이션 기술을 개발 중이나, 실증로 노심 플라즈마 기술 확보를 위한 향후 과제 존재

<표. 국내 연구개발 동향 >

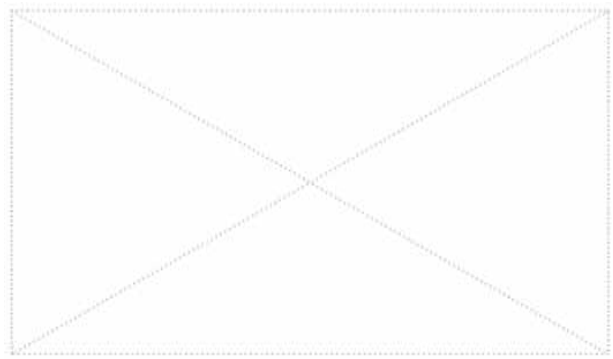
| 세부기술          | 주요내용   |
|---------------|--|
| 노심 플라즈마 제어    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR 초고온 플라즈마 장시간 유지(1억도 30초) 등 대학과 협력을 핵융합 플라즈마 성능 향상 연구 수행 중</li> <li>▶ KSTAR를 활용하여 플라즈마 안정성을 제고할 수 있는 운전방법을 개발 중이며, ITER 장치에 응용하고 실증로에 적용 계획</li> <li>▶ 계계학습 기법 등을 이용한 실증로 노심플라즈마 모델링 및 선행예측성능 고도화 기술 개발 추진 중</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 고성능 운전(<math>\beta_N \geq 3.5</math>, <math>f_M = 1</math>) 시나리오, 연소 플라즈마 제어 등 실증로 운전시나리오 개발을 위한 향후 과제 존재</p>  |
| 노심 플라즈마 진단    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 분광진단 시스템 개발 및 진단 장치 재료에 대한 고열 수증기 영향 평가 연구 중</li> <li>▶ 연소플라즈마 적용 가능 한 신개념 RF 측정 기술 개발 및 KSTAR, LHD(JP) 장치 시험적 적용</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 연소 플라즈마의 극한 환경에서 적용가능한 진단장치 개발 필요</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER와 협력을 통해 진단데이터 통합 분석을 위한 시스템(IMAS)을 KSTAR에 적합한 형태로 도입 중</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 실증로의 제한된 진단데이터로 기반 노심플라즈마 진단을 위한 분석기술 개발 소요</p>   |
| 노심 플라즈마 시뮬레이션 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 최근 통합시뮬레이션 프레임워크 및 시뮬레이션 모듈 개발 등 독자기술 개발을 위한 노력 병행, 디지털 트윈 기술 활용 V-KSTAR 개발 진행 중</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 시뮬레이션 고속 모듈화, 통합 시뮬레이션 기술개발 요구</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 동역학적 광역 난류 및 수송 시뮬레이션 코드를 개발하고 KSTAR 진단과 비교검증, 최근 토카막 장치 전역 난류 시뮬레이션 코드 개발 착수</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 실증로 개발을 위한 연소 플라즈마의 난류 및 수송 시뮬레이션 기술 요구</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 최근 V-KSTAR 개발에 착수하면서 노심 플라즈마의 안정성 향상을 위한 자기유체역학 시뮬레이션 코드 개발에 필요한 기반 기술 확보</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 실증로 개발을 위한 연소 플라즈마의 안정성 및 붕괴 시뮬레이션 기술 요구</p> |

□ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 노심플라즈마는 2,874억원(43%, 8대 핵심기술 중 1위)가 투자된 것으로 파악
- (연도별 투자현황) KSTAR 건설·운영을 통해 2000년대 중반이후 노심 플라즈마 연구비는 지속적으로 증가하는 추세
  - 한국의 노심 플라즈마 연구는 KSTAR를 중심으로 기술개발을 진행중이며, 2014년 KSTAR 연구사업(핵융합(연) 기본사업) 개편을 통해, KSTAR 공동실험 및 플라즈마 연구사업 연구비가 큰 폭으로 확대
- ※ KSTAR 연구사업 개편을 통해 노심 플라즈마 연구를 위한 일부 장비 구입(기열 및 전류구동 장치 등) 연구비 포함

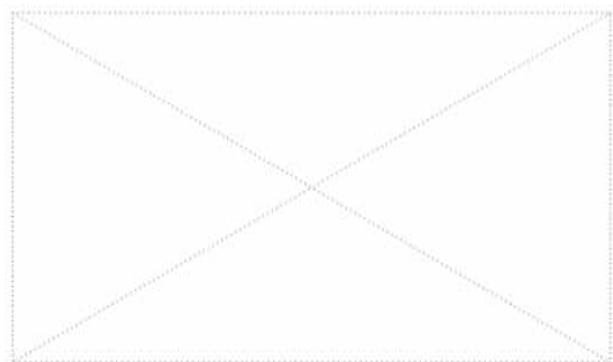


< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) KSTAR를 운영하고 있는 한국핵융합에너지연구원이 기본사업으로 노심플라즈마 연구주도(전체 82%)
- 한국과학기술원, 서울대학교, 울산과학기술원, 포항공과대학교에서 핵융합 기초연구사업(종료)을 통해 노심 플라즈마의 다양한 물리현상 규명을 위한 연구개발 수행



< 주요 연구기관 >

## 나. 증식블랑켓

### □ 연구개발 동향

- (국외) 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   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 증식블랑켓의 다물리 특성을 반영한 설계코드 및 통합체계 구축 추진(US, EU)</li> <li>▶ 설계를 위한 CAD 기반 Super MC 코드 개발 및 사용자 확보를 위한 오픈소스 배포(CN)</li> <li>▶ MELCOR 개발을 통해 ITER 안전해석을 위한 품질보증(QA) 획득(US)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 증식블랑켓의 국산화를 위한 자체 설계 코드 개발 추진 중</p>  |
| 설계 및 제작검증 기술 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 증식블랑켓 제작공정 확립 및 접합기술 등 다양한 제작기술 검토(EU)</li> <li>▶ TBM 건전성 평가를 위한 고열부하 시험, 열수력 구조안전성 평가, 중성자 증배재 반응성 시험, 냉각수 구조재 부식시험이 가능한 종합시험시설 구축 추진(JP)</li> <li>▶ 고열부하 및 전자기력을 동시에 모의·부하할 수 있는 장비 개발(UK)</li> <li>▶ 다양한 원격유지보수 장치 개발(UK) 및 기술개발을 위한 공동연구 추진(CN, EU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 실증로 환경하 증식블랑켓의 종합적 평가를 위한 시험시설 구축 중</p> |
| 계통 기술        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 실증로 적용 가능한 단위 공정 다양한 연구개발을 추진 중이며, 실험실 규모 연료추출계통 기기 시제품 제작 및 삼중수소 활용 공정평가 진행(EU, JP)</li> <li>▶ 실증로 적용을 위한 냉각계통 루프 제시 및 성능 향상 기술 연구개발 추진 중(EU)</li> <li>▶ 신뢰도·가동률 평가를 위한 연구개발 추진 중이나 실증로 적용을 위한 데이터베이스 구축 한계(EU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 단위공정 기술개발이 진행 중이나, 실증로 증식블랑켓 계통기술(연료추출, 냉각, 계통운전 등) 확보를 위한 다양한 데이터 확보 요구</p>   |

- (연구시설 현황) 증식블랑켓 종합 성능검증 관련 연구시설을 구축 추진 중(일본, 영국)이나, 증식블랑켓의 계통기술(삼중수소 추출, 냉각, 계통운전 등) 확보를 위한 연구시설 부재

< 증식블랑켓 연구시설 현황 >

| 국가 | 시설명               | 분야             | 목표 및 내용  | 비고   |
|----|-------------------|----------------|--|--|
| 일본 | QST<br>로카쇼<br>연구소 | 증식블랑켓          | <ul style="list-style-type: none"> <li>ITER TBM 건전성* 평가 시험</li> <li>* 고열부하, 열수력 구조 안전성, 중성자 증배재 반응성, 냉각수 구조재 부식시험 등</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>미쯔비시 중공업 테스트 장비 공급('22)</li> </ul>              |
| 영국 | CHIMER<br>A       | 증식블랑켓<br>, 디버터 | <ul style="list-style-type: none"> <li>증식블랑켓 및 디버터 고열부하 및 전자 기력 성능평가 시험</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>(기간) '19~건설 중</li> <li>(투자) 20백만 파운드</li> </ul> |

- (국내) ITER TBM 참여를 통해 기술을 추적하고 있으나, 해외 주요 국가 대비 다양한 연구개발 경험과 성능평가를 위한 연구시설 부족한 상황

< 국내 증식블랑켓 연구개발 동향 >

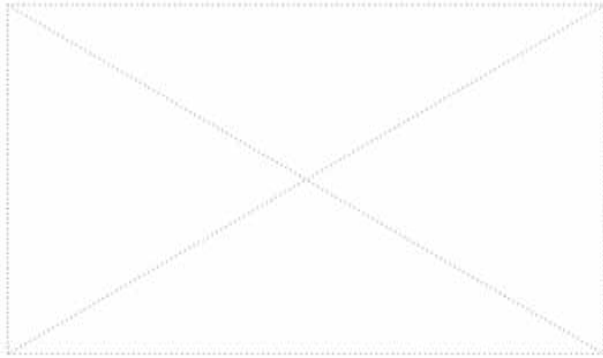
| 세부기술       | 주요내용   |
|------------|--|
| 설계·안전 해석기술 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 원자력 및 방사선 분야 코드 일부 활용 및 원자력(연) 고온가스로용 안전해석코드 (GAMMA+)의 핵융합용 코드(GAMMA-FR)로 개량 추진</li> <li>⇒ (주요이슈) 실증로 증식블랑켓 안전해석코드 기반은 확보되었지만, 다양하고 복잡한 현상을 반영한 핵융합 코드 부재</li> <li>⇒ (주요이슈) 개발된 실증로 증식블랑켓 코드 검증시설 부재</li> </ul>   |
| 제작검증 기술    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER TBM 세부모듈 단위 제작 및 원자력(연) 고열부하 시험시설 활용 준비 중</li> <li>⇒ (주요이슈) 실증로급 증식블랑켓 제작기술 개발 요구</li> <li>⇒ (주요이슈) 제작된 증식블랑켓의 종합적인 성능검증을 위한 연구시설 부재</li> <li>▶ 원격유지보수 관련 기술개발 전략 수립을 위한 기획연구 착수</li> <li>⇒ (주요이슈) 증식블랑켓 원격 유지보수 기술 개발 경험 부재</li> </ul>  |
| 계통 기술      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER TBM 삼중수소추출시스템을 위한 단위 공정(필스운전 수준)을 개발 중</li> <li>⇒ (주요이슈) 실증로 증식블랑켓 개발을 위한 (준)연속운전 및 연료 추출 연구개발 요구</li> <li>⇒ (주요이슈) 삼중수소 추출을 위한 삼중수소 생산시설 및 취급 경험 부재</li> <li>▶ ITER TBM 헬륨냉각시스템 개발 중</li> <li>⇒ (주요이슈) 실증로는 TBM 대비 열출력 100배 이상 제거를 위한 냉각시스템 소요</li> <li>▶ ITER TBM 요구 수준에서 계통운전기술 일부 연구개발 추진 중</li> <li>⇒ (주요이슈) 가동률 및 안전성 평가를 위한 기기/계통별 데이터베이스 요구</li> </ul> |

□ 연구개발 투자현황

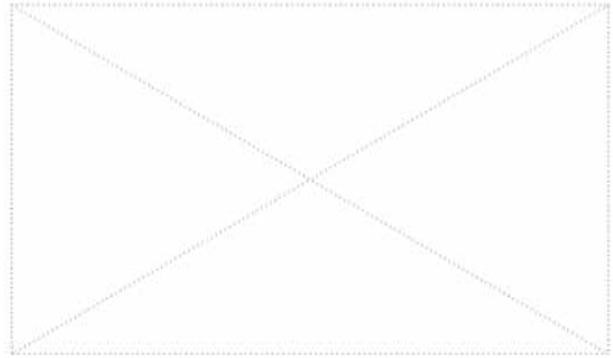
- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 증식블랑켓은 558억원(8%, 8대 핵심기술 중 4위)이 투자된 것으로 파악

○ (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



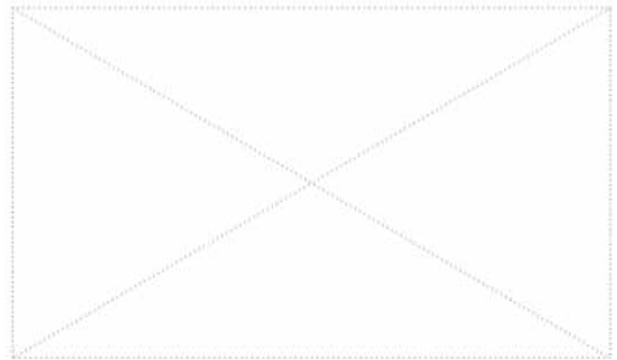
< 8대 핵심기술 비중 >



< 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



< 주요 연구기관 >



## 다. 핵융합 소재

### □ 연구개발 동향

- (국외) 핵융합 전력생산 실증로에서 활용 가능한 핵융합 소재 개발과 더불어, 개발된 소재의 물성평가·DB 구축을 위한 시설구축 추진 중

#### < 국외 핵융합 소재 연구개발 동향 >

| 세부기술 | 주요내용  |
|------|---|
| 구조재  | <p>▶ 국가별 저방사화 철강재를 개발하고 보유하고 있는 상황이나, 6톤급 이상 대량 제조기술이 대한 연구개발이 진행 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 실증로 적용을 위한 저방사화 철강재를 개발하고, 제조기술 개발 중</p> <p>▶ 국가별 자국 저방사화 철강재의 실증로 적용을 위해 장·단기 물성 DB 구축을 추진 중이며, 핵융합 중성자 조사 평가를 위한 중성자원 건설 착수(EU, JP)</p> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합의 고에너지 중성자 조사시험을 위한 중성자원 구축 중</p>  |
| 대면재  | <p>▶ ITER 디버터를 중심으로 텅스텐 판재 검증 및 실증로 적용을 위한 복합재료 연구개발을 진행중이며, 텅스텐-CuCrZr 접합 기술개발 완료(EU, JP, CN)</p> <p>▶ ITER 디버터 대형 목업에 대한 성능 검증을 위해 고열부하 및 고입자속 손상 평가 진행, 텅스텐 조사재 물성 데이터베이스 구축 중(EU)</p> <p>⇒ (주요이슈) ITER 디버터 개발을 통해 텅스텐 소재 개발 및 물성 DB 구축 중</p>  |
| 기능소재 | <p>▶ 국가별 독자적인 삼중수소 증식재 및 중성자 증배재 개발을 위한 베릴륨 취급 시설 구축(EU, JP, CN, IN)</p> <p>▶ 핵융합 원료 확보를 위한 리튬동위원소 분리기술 및 해수 리튬 추출 기술개발 진행 중 (JP)</p> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 핵융합 증식재 개발 및 원료 확보를 위한 요소기술 개발 추진 중</p> <p>▶ 독자적 기능소재의 화학적/열적 특성 평가를 위한 시스템을 구축하고 물성 DB 확보 중(EU, JP, CN, IN)</p> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 핵융합 기능소재 개발을 위한 시설구축 및 물성 DB 확보 노력</p> |

- (연구시설 현황) 핵융합 소재의 물성평가 및 DB 구축을 위해 핵융합 중성자원 중심 신규 연구시설 구축 추진 중

< 핵융합 소재 연구시설 현황 >

| 국가 | 시설명         | 분야     | 목표 및 내용                                  | 비고                             |
|----|-------------|--------|--|--------------------------------|
| EU | IFMIF-DONES | 중성자원   | • DEMO 재료의 방사화 데이터를 획득                   | (기간) 2030년 완공<br>(투자) 약 1조 원   |
| 일본 | A-FNS       | 중성자원   | • DEMO 재료의 방사화 데이터를 획득                   | (기간) 2031년 완공                  |
| 중국 | HINEG       | 중성자원   | • 중성자 조사와 재료연구 위해 고밀도 D-T 중성자 발생장치를 개발 중 | (기간) 2030년 개발완료 (투자) 10억 달러    |
| 미국 | FPNS        | 중성자원   | • 핵융합 중성자원 건설 논의 착수                      | -                              |
| 영국 | MRF         | 재료연구   | • 방사능 물질 분석을 위한 국가원자력 사용자 시설             | (기간) 2016년 완공<br>(예산) 연간 33억 원 |
|    | FTF         | 재료/블랑켓 | • 핵융합 조건하에서 핵융합 장치 및 재료 전주기 테스트          | (기간) 2023 완공<br>(투자) 651억 원    |

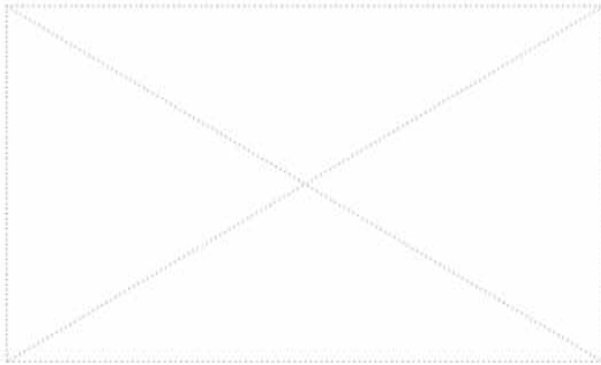
- (국내) ITER TBM 사업을 통해 재료 개발을 추진 중이나, 실증로 적용에는 한계가 존재하며, 물성평가 및 DB 구축을 위한 실험시설 부재

< 국내 핵융합 소재 연구개발 동향 >

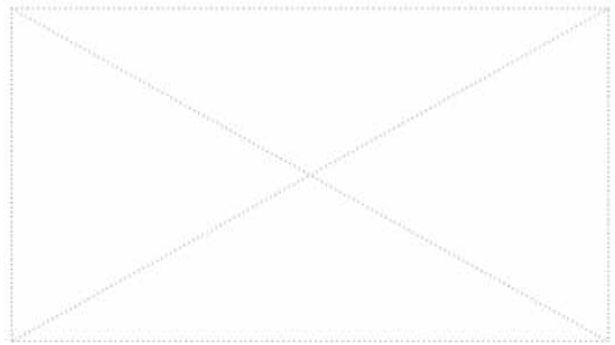
| 세부기술 | 주요내용  |
|------|---|
| 구조재  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 한국형 저방사화 철강재(ARAA)를 개발하고, 6톤급 대량 제조를 시도하였으나, 품질 균일성에 있어 해결해야할 연구주제 존재</li> <li>▶ ITER TBM 사업을 통해 ARAA의 장·단기 물성평가(연구용 원자로 활용)를 진행중이나, 실증로 적용을 위해서는 핵융합의 고에너지 중성자 조사시험 필요</li> <li>⇒ (주요이슈) 한국형 저방사화 철강재의 실증로 활용을 위한 핵융합 중성자 조사 시험을 통한 장·단기 물성평가 필요</li> </ul>   |
| 대면재  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 텅스텐 소재 개발 및 상용화 관련 연구가 진행되지 않은 상황, ITER 텅스텐 소재들에 대한 분석 수행 중, 텅스텐-CuCrZr 접합관련 기초연구 수행 중</li> <li>⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로급 텅스텐 소재 및 접합기술 개발 요구</li> <li>▶ KSTAR 텅스텐 디버터 업그레이드를 위해 원자력(연) 장비 활용 고열부하 시험 검증 진행 중</li> <li>⇒ (주요이슈) 실증로급 대면재 물성 DB 구축을 위한 시험시설 구축 필요</li> </ul>  |
| 기능소재 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 핵융합로용 삼중수소 증식재 원료로 사용하기 위한 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 분말 합성 및 펄블 제조 원천기술 개발</li> <li>⇒ (주요이슈) 핵융합 중성자 증배재 개발을 위한 베릴륨 연구 및 관련 시설 부재</li> <li>⇒ (주요이슈) 핵융합 원료 확보를 위한 리튬동위원소 분리, 해수 리튬 연구 요구</li> <li>▶ ITER TBM을 통해 기능소재의 화학적/열적 특성 평가를 위한 방법론 연구 진행 중</li> <li>⇒ (주요이슈) 펄블베드에 대한 기계적 물성 평가 및 중성자 조사 시험 요구</li> </ul> |

□ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 핵융합 소재 분야는 182억원(3%, 8대 핵심기술 중 7위)이 투자된 것으로 분석
- (연도별 투자현황) 핵융합 소재 분야는 과거부터 꾸준히 연구개발 투자비가 증가하고 있는 분야이나, 타 핵심기술 분야 대비 연구개발 규모가 작은 분야
  - 핵융합 선도기술개발사업(前 기초연구사업)을 중심으로 대학에서 핵융합 구조재, 기능소재에 대한 연구개발을 진행 중이며, ITER 비조달 과제를 통해 디버터 대면재 기술추적을 위해 연구개발 투자 진행 중

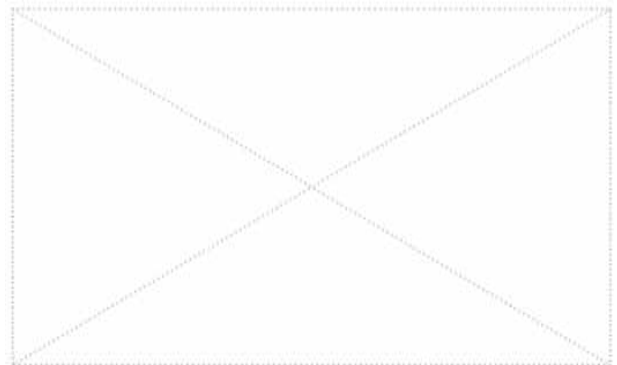


< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) 핵융합 소재 분야는 대학과 연구기관의 연구비규모가 유사하며 소규모 과제 위주의 연구개발 진행 중
  - 한국핵융합에너지연구원 ITER 비조달 사업을 중심으로 가장 많은 연구비가 투자되었으며, 서울대학교, 단국대학교, 기계(연) 산하 재료(연), 한양대학교는 선도기술개발사업을 통해 연구개발 추진 중



< 주요 연구기관 >

## 라. 연료주기

### □ 연구개발 동향

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

#### < 국외 연료주기 연구개발 동향 >

| 세부기술         | 주요내용  |
|--------------|---|
| 삼중수소 안전      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 핵융합 적용을 위한 ITER WDS 공정 개발이 진행되고 있으며(EU), 원자력 분야의 삼중수소 회수 기술을 개발하고 대량 중수 처리 중(CA)</li> <li>▶ 삼중수소 플랜트 공정 상 삼중수소 분석을 위한 다양한 분석 방법을 개발</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 삼중수소 분리, 분석을 위해 기술개발을 추진 중이다, 실증로급 삼중수소 취급경험 부재</p>                                     |
| 삼중수소 정제분리 저장 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 기준의 대량의 수소동위원소 정제 및 복합적 반응기 제작 등 ITER 장치 적용을 위한 기술개발 진행 중</li> <li>▶ 소규모 삼중수소 저장용기, 운반용기가 상용화 되어 판매 중</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) ITER 장치 적용을 위해 기술개발 진행 중이며, 실증로급 삼중수소 정제·분리·저장에 대한 기술개발 요구</p>   |
| 핵융합 연료공급     | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 핵융합 연료공급을 목적으로 다양한 가스의 펠릿 공급 시스템 연구 중</li> <li>▶ ITER 설치를 목적으로 다양한 공정가스 공급 시스템 제작 및 성능평가 진행</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) ITER 장치 적용을 위한 기술개발 및 성능평가 진행 중</p>   |
| 핵융합 진공배기     | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 대비 핵융합 에너지 생산 및 운영 시간의 증가에도 불구하고 취급 삼중수소량을 ITER 수준으로 설정하고 연구 (EU)</li> <li>▶ ITER는 새로운 저진공 펌프를 개발 중이며(IO), EU는 삼중수소 취급이 가능한 다양한 진공펌프 연구개발 중(EU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로에 적용할 연속운전이 가능하고 대량의 삼중수소를 포함한 수소 동위원소를 안정적으로 진공배기할 기기 및 시스템 필요</p> |

- (연구시설 현황) 각국이 운영하는 삼중수소 취급시설은 자국의 삼중수소 취급 경험 축적 및 기술 자립을 위해 요소기술을 개발 중

< 연료주기 연구시설 현황 >

| 국가   | 시설명  | 분야      | 목표 및 내용                          | 비고                       |
|------|------|---------|----------------------------------|--------------------------|
| 독일   | TLK  | 삼중수소 취급 | • EU 실증로 연료주기 파트 삼중수소 취급 요소기술 개발 | • g 삼중수소 활용              |
| 미국   | SRNL | 삼중수소 취급 | • 삼중수소 취급 요소기술 연구개발 수행           | • 실증로 연료주기 기술 개발 로드맵 개발  |
| 캐나다  | AECL | 삼중수소 취급 | • 저농도 삼중수소 취급기술 개발               | • 삼중수소 제거 설비 설계, 제작 및 운영 |
| 루마니아 | ICSI | 삼중수소 취급 | • 삼중수소 농축기술 기술개발                 | • 농축 시설 제작 운영            |

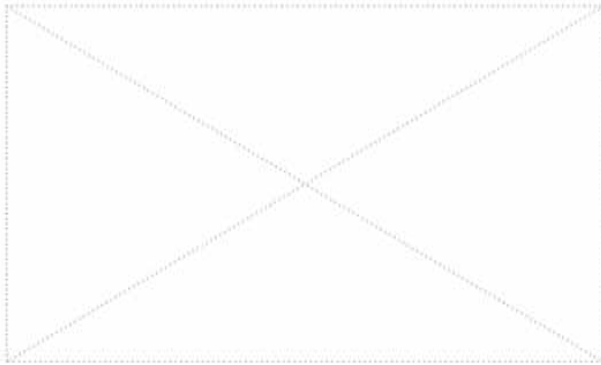
- (국내) 월성 TRF에 수g 급 삼중수소 취급을 위한 시설을 운영중이며, ITER 사업을 통해 기술을 개발중이나, 주요국 대비 삼중수소 취급관련 기술 및 경험 부족

< 국내 연료주기 연구개발 동향 >

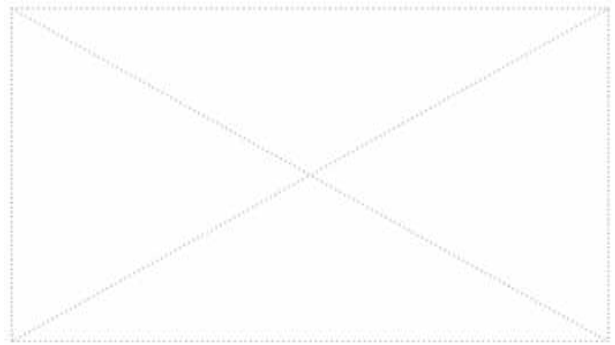
| 세부기술         | 주요내용  |
|--------------|---|
| 삼중수소 안전      | ▶ 월성 TRF에서 수g 급 삼중수소 분리기술 및 고농도 삼중수소 측정 설치운영 하고 있으나, 해당 시설에 국한<br>⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로 삼중수소 회수 및 분석을 위해서는 취급경험 요구   |
| 삼중수소 정제분리 저장 | ▶ ITER 조달 기준 수소동위원소 정제 시스템 기초실험 수행 중<br>▶ 수소동위원소 분리·농축 시스템이 월성 TRF 적용 중<br>▶ ITER 조달을 위한 삼중수소 저장용기, 연료공급 시스템, 재고측정기술 등 개발 중<br>⇒ (주요이슈) ITER 조달을 위해 기술개발 진행 중이나, 실증로급 기술개발 요구   |
| 핵융합 연료공급     | ▶ KSTAR에서 SPI를 통해 펠릿 제조 및 주입 실험을 진행 중<br>▶ KSTAR 장치에 독립된 밸브가 설치되어 있고, 공정 가스 공급<br>⇒ (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<br>▶ ITER 비조달 항목에 대한 기술추적을 수행하였으며, 그 일환으로 연료주기 내 삼중수소 재고량 분석을 위한 수치적 모델을 개발하여 평가<br>⇒ (주요이슈) 실증로는 ITER 대비 삼중수소 취급량이 증가가 예상됨에 따라, 재고량 감축 및 안전한 취급을 위한 진공배기 시스템 개발 필요 |

□ 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

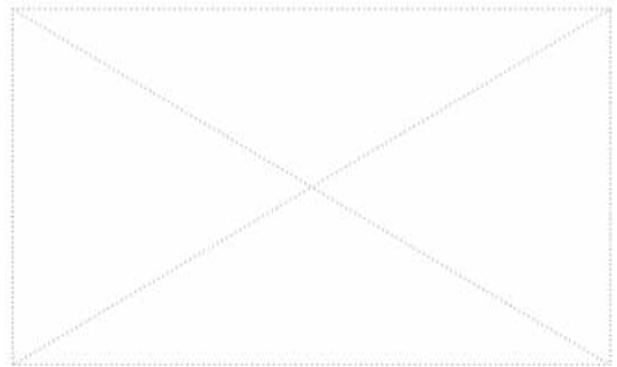


< 8대 핵심기술 비중 >



< 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 기반구축 및 헬륨-3 회수기술 개발 중



< 주요 연구기관 >



## 마. 디버터

### □ 연구개발 동향

- (국외) ITER 조달국을 중심으로 ITER급 기술개발을 진행 중이며, 실증로에 적용 가능한 다양한 디버터의 연구를 위해 신규시설 구축 등 인프라 확보 노력 지속

#### < 국외 디버터 연구개발 동향 >

| 세부기술    | 주요내용  |
|---------|---|
| 설계 기술   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 디버터 경계플라즈마 해석 및 영향평가 분야의 선도적인 입지 확보를 위해 자체 개발한 해석코드의 지속적 업데이트 및 인프라 구축 중(US, EU, JP)</li> <li>▶ 디버터 열부하 감소를 위한 다양한 디버터의 개념을 제시하고 연구개발 추진 중 (EU)</li> <li>▶ 디버터 경계플라즈마 해석이 가능한 코드를 자체개발하고, 이를 활용하여 디버터 영역에서의 입자 거동 해석 중(EU)</li> <li>▶ 디버터 공학설계를 위해 통합적인 공학해석 기술을 개발 중이며, 조달국간 높은 수준의 기술공유 진행 중(EU, JP, RU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) ITER급 기술의 조달국 간 공유로 기술개발을 추진 중</p> |
| 제작검증 기술 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 조달국을 중심으로 ITER급 디버터의 실제 제작단계를 진행 중이며, 열속 성능(20MW/m<sup>2</sup> 급)을 평가할 수 있는 시험시설을 보유(EU, JP, RU)</li> <li>▶ 자국 실험장치에 텅스텐 디버터 대면부품을 설치하고 시험평가관련 노하우 축적(EU, CN)</li> <li>▶ ITER 기술을 기반으로 원격유지보수 개념을 개발하고 원격제어장치, 로봇암 기술개발이 활발하게 진행 중(UK, EU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) ITER급 기술개발을 추진 중 이나, 향후 실증로급 디버터 기술개발을 위한 연구데이터 요구(이를 위한 장치 구축 진행 중)</p>                      |

- (연구시설 현황) ITER 디버터의 열속 성능 평가를 위한 시험시설(EU, 러시아)을 보유하고 있으며, 핵융합 다양한 디버터 개념의 연구를 위해 신규연구시설 구축 중(EU)

< 국외 디버터 연구시설 현황 >

| 국가       | 시설명     | 분야        | 목표 및 내용  | 비고                         |
|----------|---------|-----------|--|----------------------------|
| 국제<br>공동 | ITER    | 플라즈마      | • Q=10, 열출력 500MW 달성을 통한 핵융합 플라즈마 운전시나리오 개발 등  | (기간) 2025년 완공(현재 기준)       |
| EU       | ASDEX-U | 플라즈마, 디버터 | • 가열 및 진단, 텅스텐 디버터 업그레이드로 PWI 등 다양한 핵융합플라즈마 실험 | (기간) 1991년 운전시작            |
|          | WEST    | 플라즈마, 디버터 | • ITER 디버터 위험 최소화를 위한 능동냉각 텅스텐 디버터 업그레이드       | (기간) 2016년 운전시작            |
|          | DTT     | 디버터       | • 핵융합 플라즈마 부하제어가 가능한 디버터 시스템 연구                | (기간) 2025년 완공(투자) 6,000억 원 |
| 중국       | EAST    | 플라즈마      | • 고성능 플라즈마 장시간 운전 연구                           | (기간) 2006년 운전시작            |

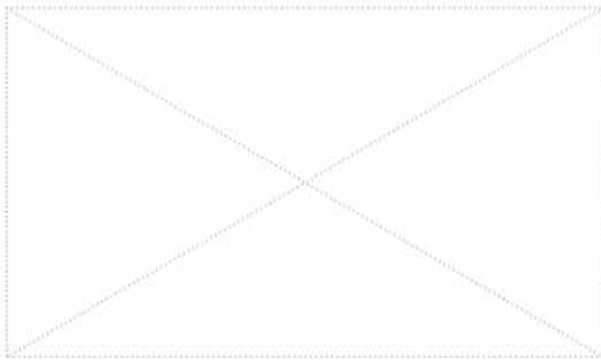
- (국내) KSTAR 텅스텐 디버터 업그레이드를 통해 기술개발을 진행 중이나, 열부하 시험, 실증로 유사 환경에서의 성능시험을 위한 연구시설 부재

< 국내 디버터 연구개발 동향 >

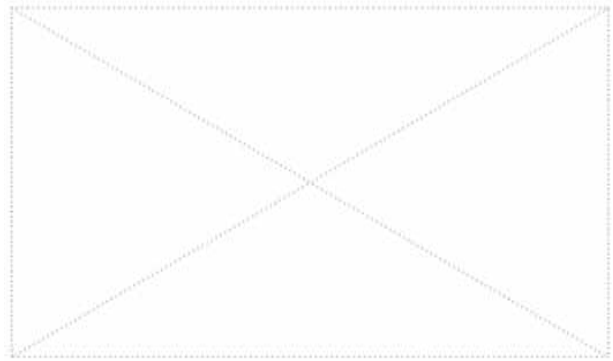
| 세부기술    | 주요내용  |
|---------|---|
| 설계 기술   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 디버터 경계 플라즈마는 기초연구사업 등을 통한 대학 연구실 단위 수준(기초 단계)의 해석 기술개발 진행 중</li> <li>⇒ (주요이슈) 디버터의 경계 플라즈마 해석 기술격차 및 자국 코드 부재</li> <li>▶ ITER 디버터 기술추적을 위해 공학적 해석기술을 개발 중이나, 열 및 구조해석의 기술수준은 높으나 전자기장 해석의 수준이 상대적으로 낮은 상황</li> <li>⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로급 환경(열속, 전자기력 등)에 대한 종합적인 해석 기술 요구</li> </ul> |
| 제작검증 기술 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR 텅스텐 디버터 개발을 통해 10MW/m<sup>2</sup> 수준 열속 시험 및 영향평가 예정</li> <li>⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로 환경에서의 성능을 검증할 수 있는 시험시설 요구</li> <li>▶ 한국의 산업용 로봇의 기술수준은 높으나, 디버터 원격유지보수를 위한 로봇시스템 개발은 기초연구 수준</li> <li>⇒ (주요이슈) 산업용 로봇 기술수준을 바탕으로 핵융합 환경을 고려한 원격유지보수 시스템 개발 필요</li> </ul>                   |

□ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 디버터 분야는 280억원(4%, 8대 핵심기술 중 5위)가 투자된 것으로 파악
- (연도별 투자현황) 디버터 분야는 과거부터 10억원 이하의 작은 수준에서 연구개발 투자가 진행되고 있었으나, 최근 2019년 이후 연구비가 성장하는 추세
  - 디버터는 한국의 ITER 비조달품목으로 과거 핵융합 기초연구사업을 중심으로 소규모 연구개발을 진행하였으나, 2019년 KSTAR의 플라즈마 성능 향상을 위해 텅스텐 디버터 교체 사업(KSTAR PFC 성능향상 사업)이 착수됨에 따라 연구개발비가 증가

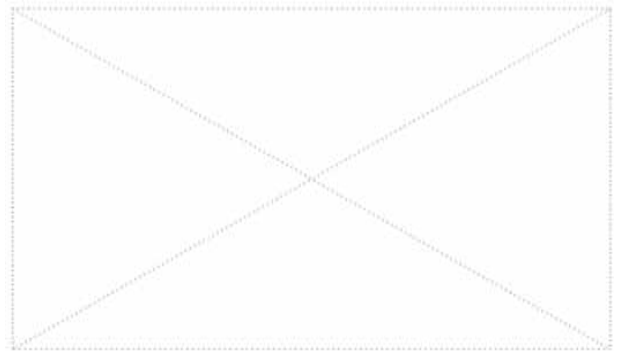


< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) KSTAR PFC 성능향상 사업(핵융합(연) 기본사업)을 주관하고 있는 한국핵융합에너지연구원이 연구개발을 주도(전체 69%)
  - 한국원자력연구원, 포항공과대학교, 한양대학교, 한국과학기술원에서 핵융합 기초 연구사업 등을 통해 디버터 설계·해석, 진단, 열속처리, 고열부하 시험 등 다양한 연구개발을 진행



< 주요 연구기관 >

## 바. 가열 및 전류구동

### □ 연구개발 동향

- (국외) 각 국가별 핵융합 장치 운영을 통해 가열 및 전류구동 분야의 기술력이 축적되어 있는 상황

#### < 국외 가열 및 전류구동 연구개발 동향 >

| 세부기술              | 주요내용  |
|-------------------|---|
| 가열 및 전류구동 장치      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ JET, ASDEX-U, W7-X 등 중대형 핵융합연구장치의 장기간 운영을 통해 각종 가열 및 전류구동 장치의 기술 축적(EU)</li> <li>▶ ITER 자이로트론 장치를 공급하고, 가장 먼저 공장시험 효율 통과(RU)</li> <li>▶ 8대의 ECH/CD용 자이로트론 장치를 개발하여 ITER에 납품 완료(JP)하였으며, ITER ECH 자이로트론을 시험하는 등 기술혁신에 꾸준한 투자 중(EU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 국가별 핵융합 장치를 운영하면서 가열 및 전류구동 분야의 기술력 축적</p>  |
| 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ DIII-D를 활용하여 고효율 가열 및 전류구동 방법을 진행 중이며, 가열 및 전류구동 장치 성능 예측을 위한 시뮬레이션 코드 개발 추진 중(US)</li> <li>▶ JT60-U, LHD를 중심으로 다양한 가열 및 전류구동장치 개발·운영 기술을 확보하였으나, 현재 대규모 연구는 중상업자빔 주입, ECH에 국한(JP)</li> <li>▶ ITER 가열장치 조달 및 기존 연구장치 운영을 통해 장치운영 기술에 가장 앞서 있는 국가로 평가, '27년까지 가열 및 전류구동 장치 옵션 결정계획(EU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 장기간의 가열 및 전류구동 장치 경험으로 기술력 축적</p> |

- (연구시설 현황) 각 국가별 가열 및 전류구동 장치 개발을 위해, 시험 평가 시설 보유

< 가열 및 전류구동 연구시설 현황 >

| 국가 | 시설명             | 분야        | 목표 및 내용   | 비고 |
|----|-----------------|-----------|---|----|
| EU | MTICA<br>(이탈리아) | 가열 및 전류구동 | <ul style="list-style-type: none"> <li>ITER NBI 개발 전용 시설</li> <li>1MV, 40A 중수소 음이온원 기반</li> </ul> | -  |
|    | FULGOR<br>(독일)  | 가열 및 전류구동 | <ul style="list-style-type: none"> <li>고주파 전류구동 장치 개발 및 테스트</li> </ul>                            | -  |
| 일본 | JT60-S<br>A     | 플라즈마      | <ul style="list-style-type: none"> <li>0.5MW, 22A 중수소 음이온원 기반 NBI 실험</li> </ul>                   | -  |

- (국내) KSTAR를 중심으로 가열 및 전류구동 기술을 개발 중이나, 자이로트론의 실증로 적용을 위해서는 기술경험 축적 필요

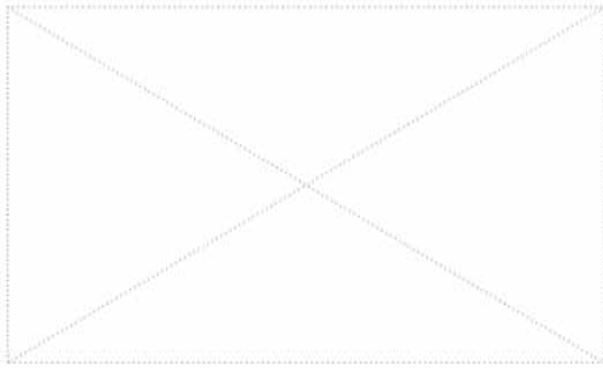
< 국내 가열 및 전류구동 연구개발 동향 >

| 세부기술              | 주요내용  |
|-------------------|---|
| 가열 및 전류구동 장치      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR를 중심으로 중성입자빔 주입장치의 고성능 연속운전 및 NBI 빔의 실시간 연속운전 제어기술 확보 추진 중</li> <li>▶ KSTARsms ECH(자이로트론 5기) 운영 중이며, NBI와 함께 KSTAR 장시간 고성능 플라즈마 운전에 기여 중</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) KSTAR를 통해 일부 기술(NBI 운전시간, 빔에너지)등 세계적 성능이나, 실증로 장시간 운전을 위한 장치개발 필요</p> |
| 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR 고성능 플라즈마 발생과 해석을 위한 가열 및 전류구동 시뮬레이션 코드를 운영 중이나 매우 부족한 상황</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) KSTAR-ITER 실험결과를 활용하여 실증로 가열 및 전류구동 운전 기술 개발 요구</p>  |

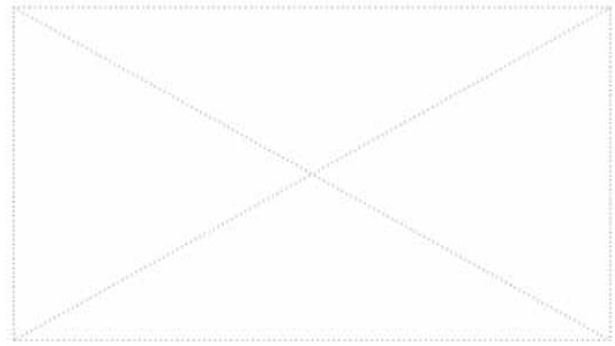
□ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 가열 및 전류구동 분야는 821억원(12%, 8대 핵심기술 중 3위)가 투자된 것으로 파악
- (연도별 투자현황) 가열 및 전류구동 분야는 2000년대 꾸준한 연구개발 투자가 진행되었으며, 2016년 연구비가 크게 증가
- 가열 및 전류구동 분야는 KSTAR 가열장치 개발 등을 중심으로 연구개발이 진행되었으며, 2016년 KSTAR 중성입자빔 가열장치(NBI-2) 개발이 착수됨에 따라 연구개발비 투자

가 크게 증가한 것으로 확인

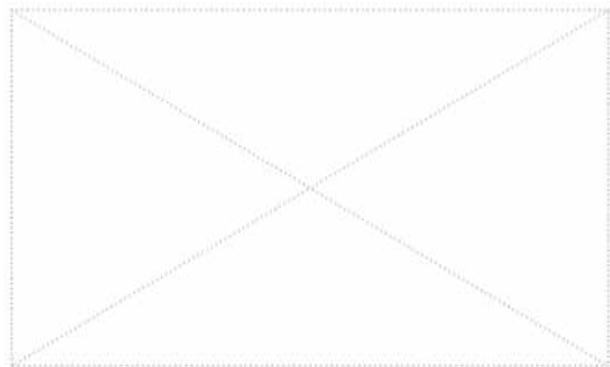


< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) KSTAR 중성입자빔 가열장치개발 사업(핵융합(연) 기본사업)을 주관하고 있는 한국핵융합에너지연구원이 가장 많은 연구개발비 활용(61%)
- 한국원자력연구원은 KSTAR 건설 당시 가열장치 개발을 주관하였으며, 최근 선도기술개발 사업을 통해 전류구동 기술개발 중
- 포항공과대학교, 서울대학교, 울산과학기술원은 대학기초연구사업을 통해 다양한 개념의 가열 및 전류구동 기술개발을 추진



< 주요 연구기관 >

## 사. 초전도 자석

### □ 연구개발 동향

- (국외) 실증로급 초전도자석 개발을 위해 지속적인 연구개발 및 시험평가 시설을 구축 하였으며, 최근 민간기업 중심 고온초전도체 개발도 병행 중

#### < 국외 초전도 자석 연구개발 동향 >

| 세부기술               | 주요내용  |
|--------------------|---|
| 초전도<br>선재          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 산업체를 중심으로 저온초전도체의 선재 제조 기법이 개발되었으며, 최근 성능이 개선된 고온초전도체 개발 추진 중(US, JP)</li> <li>▶ 선재과괴기술(US), 선재 성능분석(EU) 등 선도적인 초전도 선재 성능평가 기술 개발 중</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 저온초전도체의 제조 및 성능평가 기술의 선도적인 연구 수행 중</p>  |
| 초전도<br>도체          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 실증로급 저온초전도 자석 개념을 발전시키고 이에 필요한 도체 설계·제작기술을 경쟁적으로 연구 중(EU)</li> <li>▶ 저온 및 고온 초전도 도체의 평가가 가능한 시험시설(HFMVTF)를 구축하고 운영 착수(US, EU)</li> <li>▶ ITER 초전도 도체 시험시설을 보유하고 있으며, HFMVTF와 동일 사양의 시험시설(EDIPO2)을 추가적으로 건설 중(EU)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 실증로 초전도 도체 개발을 지속적으로 수행중이며, 고성능 선재의 실증로 운전에 따른 평가를 위해 연구시설을 구축 중</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 민간기업(CFS)가 고온초전도 도체기술을 선도 중(US)</li> </ul> |
| 초전도<br>자석          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 초전도 자석 설계·제작을 주도하고 있으며, DTT 초전도 자석 설계·제작으로 지속적인 연구 수행 중(EU)</li> <li>▶ ITER TF 시험용 코일 특성평가(EU), ITER CS 시험용 코일 특성평가(JP) 경험 보유</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 초전도 자석의 설계·제작·특성평가의 연구개발이 꾸준하게 지속</p>  |
| 초전도<br>자석<br>기반시스템 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 세계 최대 규모의 초전도자석 부대 시스템이 ITER를 통해 구축되고 있으며, 핵심기기(저온냉동기) 제작 가능한 산업체를 보유하는 등 산업계 역량도 세계 최고 수준(EU)</li> </ul>  |

- (연구시설 현황) 초전도 도체, 자석의 특성평가를 위한 시험시설을 구축

< 핵융합 소재 연구시설 현황 >

| 국가 | 시설명    | 분야    | 목표 및 내용                                    | 비고                        |
|----|--------|-------|--|---------------------------|
| EU | SULTAN | 초전도자석 | • 스위스 12T급 초전도도체 시험시설                      | • ITER 도체 평가수행            |
|    | EDIPO2 | 초전도자석 | • SULTAN에 설치된 16T 장비명                      | • 파손으로 사용불가               |
| 미국 | HFMVTF | 초전도자석 | • 미국에 설치된 15T급 도체시험시설                      | • 2022부터 운영시작             |
|    | CFS    | 초전도자석 | • 고온초전도자석 시험시설 구축하고 20T급 시험용 코일 제작 및 평가 성공 | • 고온초전도 핵융합 용 가능성을 최초로 시연 |

○ (국내) KSTAR, ITER 조달 이후 초전도자석 연구가 간헐적으로 수행되었으나, 최근 초전도 도체 시험시설 구축을 통해 기술력 향상 기대

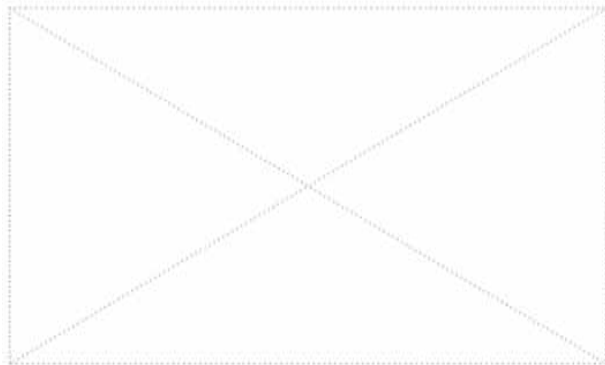
< 국내 핵융합 소재 연구개발 동향 >

| 세부기술         | 주요내용   |
|--------------|--|
| 초전도 선재       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ (주)KAT에서 ITER 사양을 능가하는 저온초전도 선재를 개발하고 DTT(이탈리아) 납품, CFETR(중국) 시험용 코일 선재 수주 성공</li> <li>▶ (주)서남, (주)삼동에서 고온초전도 선재를 세계시장에 공급하고 있으며, 성능개선 연구 및 양산, 표준화 연구도 진행 중</li> <li>▶ KSTAR, ITER를 통해 기초적인 선재 성능평가 기법은 확보하였으나, 고자장 고성능 초전도 선재 사양에 맞는 평가 기법 개발 필요</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 국내에서 고자장(16T) 저온초전도 선재 개발에 성공하였으나, 실증로급 운전에 따른 성능평가영향 연구 필요</p>   |
| 초전도 도체       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR, ITER를 기반으로 초전도 도체 기초설계 능력을 확보하였으나, ITER 조달 종료후 해당 산업체의 사업종료로 제작 업체 발굴 필요</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 실증로급 초전도 도체 제작을 위한 산업체 발굴 및 연구개발 참여 요구</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ HFVMTF 이상 규모의 초전도 도체 시험설비 구축에 착수('27년 완공)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 시험시설 구축을 통해 평가기술 분야의 기술수준 향상이 예상되나, 전반적인 경험을 보유한 선진국과의 협력 필요</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 최근 고온초전도 도체 개발을 위한 사업 착수</li> </ul> |
| 초전도 자석       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR 초전도자석 설계·제작 경험을 보유하고 있으나, 실증로급 초전도자석 설계는 간헐적으로 지속</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) KSTR 초전도 자석 제작 이후 대형 초전도 자석 제작 경험이 없고, 해당 경험을 보유한 인력의 은퇴로 기술공백 우려</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 최근 고온초전도 도체 연구가 착수되었으며, 고온초전도 자석은 시험용 코일 개념연구 수준</li> </ul>   |
| 초전도 자석 기반시스템 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ KSTAR 건설시 부대시설 구축 경험을 보유하고 있고, 이를 바탕으로 초전도 도체 시험설비 구축사업에 활용</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 실증로급 초전도자석 운전해석기술 및 쉘치보호 기술 등 개발 요구</p>  |

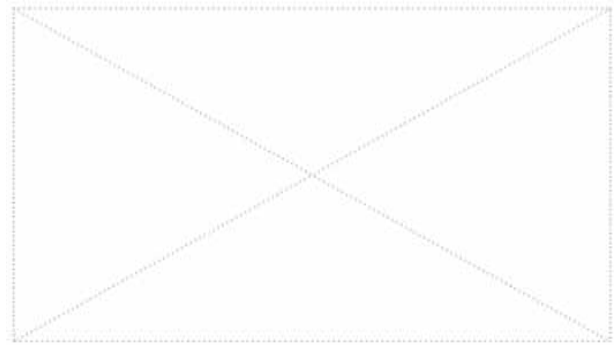
□ 연구개발 투자현황



- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 초전도 자석분야는 1,669억원(25%, 8대 핵심기술 중 2위)가 투자된 것으로 파악
- (연도별 투자현황) 2000년대를 중심으로 연구개발 투자가 진행되었으며, 2010년 ITER 초전도 도체 개발을 위해 크게 성장
  - 2000년대 초반 KSTAR 초전도 자석 개발에 연구개발비가 투입되었으며, ITER 조달 품목인 초전도 도체 개발을 위해 2008년부터 큰 규모의 연구개발비가 투입. ITER 초전도 도체 조달 이후 연구개발비가 크게 감소

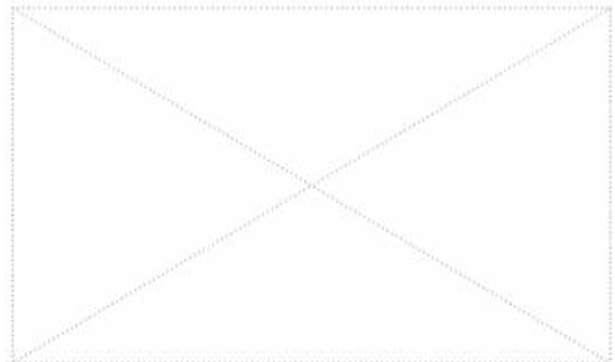


< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) ITER 초전도 도체 조달을 주관하였던 핵융합에너지연구원이 초전도자석 분야 연구개발을 주도(87%)
- 한국기초과학지원연구원이 2000년대 초반 KSTAR 초전도자석 개발을 주도하였으며, 한국에너지공과대학교는 최근 2022년 초전도 도체 시험설비 구축사업에 착수



< 주요 연구기관 >

## 아. 안전·인허가

### □ 연구개발 동향

- (국외) 핵융합에너지의 고유한 특성을 반영한 안전·인허가 체계 개발 및 안전성을 평가할 수 있는 사고해석 모드 등 요소기술 개발을 추진 중

#### < 국외 안전·인허가 연구개발 동향 >

| 세부기술           | 주요내용   |
|----------------|--|
| 안정성<br>평가      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ ITER 인허가 절차 및 경험을 통해 안전 인허가 안전규명 기술 및 기준 확립 (EU)</li> <li>▶ 핵융합 시설의 설계 안전 및 안전성 평가에 대한 국제기준 확립 추진 중 (IAEA)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 안전인허가에 대한 국제적 관심 제고와 함께 안전 요구조건 도출을 위한 IAEA 등의 국제기구 활동 및 주요국 간 국제협력이 더욱 확대될 것으로 예상</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ STEP 건설부지 선정기준(5개 평가기준, 23가지 세부사항)을 개발하고 이를 통한 건설부지 공모(UK)</li> <li>▶ 열유체 해석 코드를 활용한 사고해석, 머신러닝 활용 시스템 안전성 관독, 실증로 ALARA 기준 충족을 위한 방법론 개발(EU)</li> <li>▶ 교토퓨저니어링은 핵융합 사고해석을 위한 신규연구시설(UNITY) 구축 추진(JP)</li> </ul> |
| 인허가(요<br>건 도출) | <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 원자력규제위원회(NRC)에서 부산물인허가규칙(10 CFR 30)을 핵융합 규제 체계의 기본방향으로 결정하고 인허가 규칙 및 세부가이드라인 마련 본격 착수 (US)</li> <li>▶ 전세계 최초로 핵융합 규제체계 기본방향을 제시하고, 에너지안보법을 통해 원자력 시설 규제에서 핵융합 완전 분리 계획(UK)</li> <li>▶ 해외시장 진출기회 확보 및 핵융합 민간기업 참여 활성화 등을 위해 규제 기본방향 조기 검토, 국제협력을 통한 안전 규제 수립 및 표준화 추진(JP)</li> </ul> <p>⇒ (주요이슈) 핵융합 실증로 규제방향 마련(원자력 규제 제외)을 위한 노력 추진 중</p>  |

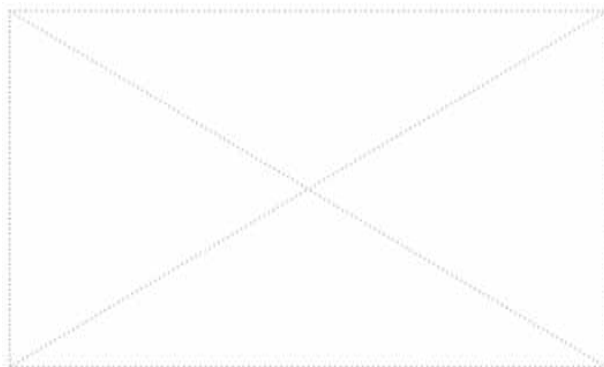
- (국내) 안전·인허가 체계 구축 및 평가기술 개발을 위한 초기 단계로, 핵융합 고유의 안전성을 반영한 규제체계 마련 착수

< 국내 안전·인허가 연구개발 동향 >

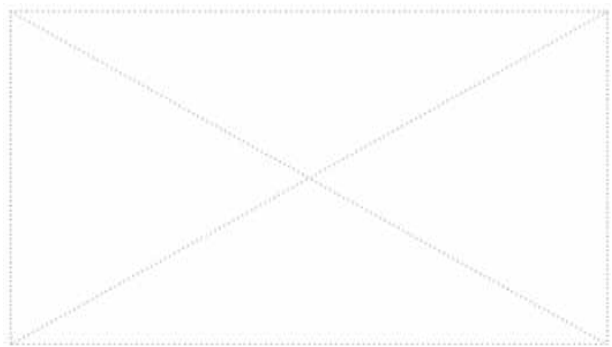
| 세부기술           | 주요내용  |
|----------------|---|
| 안정성<br>평가      | ▶ 핵융합(연) 실증로개념연구보고서(CSR Report)를 통해 국내외 주요 핵융합로 안전인허가 연구를 추적하고, 핵융합 안전목표 및 안전원칙 등을 분석<br>⇒ (주요이슈) 실증로 고유의 안전성 및 국제기준에 부합하는 안전규명 기준 확립 필요<br>▶ ITER 인허가에 활용한 MELCOR 이용 핵융합 사고해석 기술 보유, 핵융합 열유체 해석코드(GAMMA-FR), 삼중수소 투과모델 해석코드(THETA) 개발 중<br>⇒ (주요이슈) 실증로의 사고해석 및 방사선환경평가 기술 개발 요구 |
| 인허가(요<br>건 도출) | ▶ 제4차 핵융합에너지개발 진흥기본계획을 통해 핵융합 규제 체계 구축 추진의 근거를 마련<br>▶ 원자력안전기술원에서 원자력 안전법 시행령에 명시된 방사선발생장치의 정의에 핵융합 시설 등이 포함되도록 개정 추진 중<br>⇒ (주요이슈) 현행 원자력 안전법은 중수소-삼중수소를 활용하는 실증로 관련 규제체계 부재   |

□ 연구개발 투자현황

- (핵심기술 비중) 8대 핵심기술 분야 연구개발에 최근 20년간 6,672억원이 투자되었으며, 안전·인허가 분야는 70억원(1%, 8대 핵심기술 중 8위)이 투자된 것으로 파악
- (연도별 투자현황) 2004년을 제외하고 0.5억원 수준의 작은 규모과제로 연구개발 진행되었으며, 핵융합 안전·인허가에 관한 연구는 미미한 것으로 분석
  - 2004년 KSTAR의 방사선발생장치 인허가 연구를 위해 60억원이 투입되었으며, 이외에는 핵융합기초연구 등을 통해 방사선 폐기물 처리 등에 관한 연구가 대학을 중심으로 소규모 진행된 것으로 확인



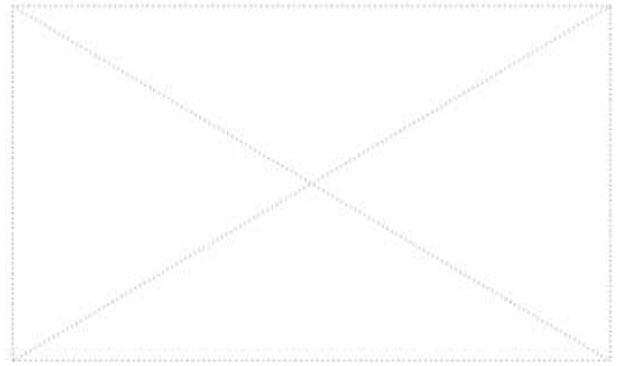
< 8대 핵심기술 비중 >



< 연도별 투자현황 >

- (주요 연구기관) KSTAR 방사선 발생장치 인허가 연구를 주관한 한국과학재단이 가장 큰 규모의 연구비를 활용
  - 전북대학교, 한양대학교, 서울대학교에서 핵융합 기초연구 등을 활용하여 방사성 폐기물 처리, 예측, 해석에 관한 기초연구를 진행

- 핵융합 안전·인허가의 연구는 타 핵심기술 분야 대비 미미한 것으로 분석



< 주요 연구기관 >

## 4. 핵융합 실증로 핵심기술 개발기반 분석

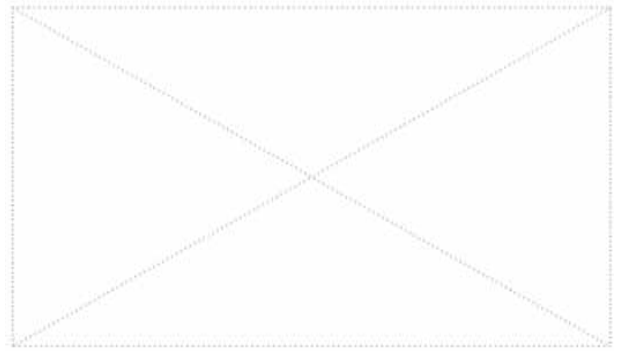
### (1) 핵심기술별 R&D 역량

#### 가. 노심 플라즈마

##### □ 기술수준 현황

○ (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 분야 중 최고기술국(US) 대비 기술수준과 최종 목표(실증로) 대비 기술수준이 가장 높은 분야

- 노심 플라즈마는 한국 핵융합 기술수준 향상에 가장 크게 기여한 분야로 최고기술국과의 격차가 가장 좁고, 현재 핵융합 기술개발을 견인하고 있는 분야



< 그림. 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

○ (세부기술 기술수준) 세부 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면 노심 플라즈마 진단 (57.5%) 분야의 기술수준이 가장 낮은 상황

- 노심 플라즈마 제어 중 초고온 플라즈마에 대한 구현, 해석 기술은 세계 최고 수준이나, 일부 플라즈마 제어 프로그램을 여전히 미국에 의존하고 있는 상황

- 노심 플라즈마 진단의 경우 일부 진단계 성능은 세계 최고수준이나, 향후 실증로의 가혹한 환경에 대응가능한 진단 장치의 개발이 진행되고 있지 못한 상황

- 노심 플라즈마 시뮬레이션은 다양한 모델링 연구와 최근 V-KSTAR 개발 등 기술수준을 향상시키고 있으나, 시뮬레이션 코드의 국산화 미진

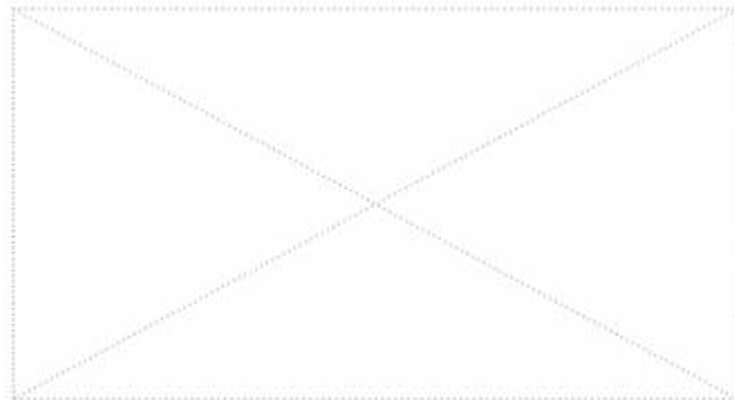
< 노심플라즈마 기술수준 분석결과 >

| 핵심기술          | 최고기술국 | 최종목표 대비 최고기술국 기술수준 | 최종목표 대비 한국 기술수준 | 최고기술국(100%) 대비 한국 기술수준 |
|---------------|-------|--------------------|-----------------|------------------------|
| 노심 플라즈마 제어    | 미국    | 79.4               | 67.5            | 85                     |
| 노심 플라즈마 진단    | 미국    | 82.1               | 57.5            | 70                     |
| 노심 플라즈마 시뮬레이션 | 미국    | 80.0               | 60              | 75                     |
| 노심 플라즈마       | 미국    | 80.5               | 61.7            | 76.7                   |

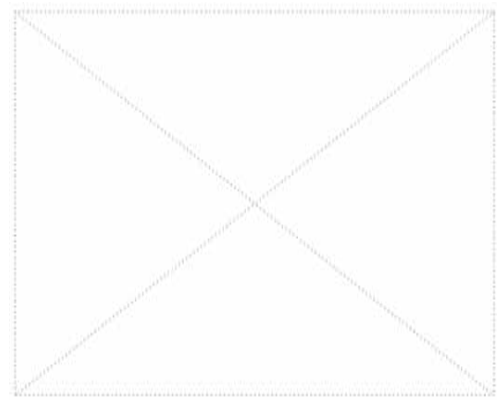
※ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 기술수준평가(한국연구재단, '22)

□ 특허 출원 현황

- (연도별 출원 건수) 최근 20년간 8대 핵심기술분야 중 가장 많은 837건의 특허가 출원되었으며, 2000년대 이후 최근까지 꾸준한 특허출원 증가 추세 경향
- (국가별 비중) 국가별로 미국이 가장 많은 319건(38%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 중국 243건(29%), 한국 86건(10%) 순으로 특허출원
  - 2000년대 초반 미국을 중심으로 특허출원이 진행되었다면, 2014년 이후 중국의 특허출원이 크게 증가하는 경향을 보이고 있는 분야



< 연도별 출원 건수 >



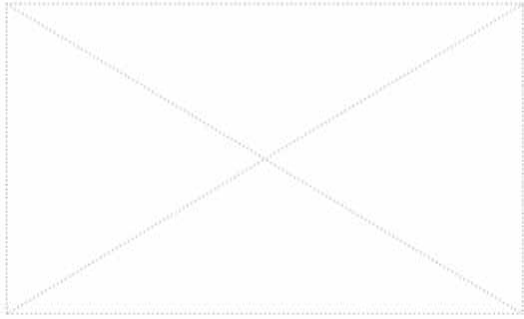
< 국가별 비중 >

- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국의 경우 자국 특허청 중심의 출원을 진행하고 있으며, 미국, 캐나다, 유럽, 일본 등의 경우 세계 주요 국가 특허청에 동시 출원

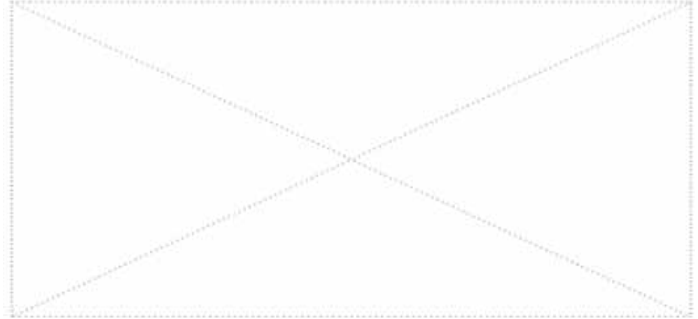
< 국가별-특허청별 출원 현황 >

| 구분 | 중국 특허청 | 유럽 특허청 | 일본 특허청 | 한국 특허청 | 러시아 특허청 | 미국 특허청 | WIPO | 기타  | 총합계  |
|----|--------|--------|--------|--------|---------|--------|------|-----|------|
| US | 9%     | 13%    | 10%    | 13%    | 0%      | 42%    | 8%   | 5%  | 100% |
| CN | 98%    | 0%     | 0%     | 0%     | 0%      | 0%     | 1%   | 0%  | 100% |
| KR | 1%     | 2%     | 1%     | 86%    | 0%      | 6%     | 3%   | 0%  | 100% |
| CA | 6%     | 11%    | 2%     | 11%    | 2%      | 34%    | 19%  | 16% | 100% |
| EP | 8%     | 14%    | 5%     | 6%     | 0%      | 38%    | 16%  | 13% | 100% |
| JP | 8%     | 8%     | 54%    | 8%     | 0%      | 15%    | 8%   | 0%  | 100% |
| RU | 4%     | 4%     | 13%    | 4%     | 63%     | 8%     | 4%   | 0%  | 100% |
| 기타 | 0%     | 8%     | 8%     | 17%    | 0%      | 8%     | 25%  | 33% | 100% |

- (주요 출원인 Top 10) Univ.of CALIFORNIA가 가장 많은 87건(20%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 KFE(핵융합(연)) 60건(13%), TAE Technology 60건(13%) 출원 진행
  - 2000년대 초반 Univ.of CALIFORNIA가 역자장 방식 플라즈마 제어 관련 특허로 출원을 주도하였으며, TAE Tehcnology는 2010년대 후반 동일 방식 특허 출원을 집중하는 경향
  - KFE는 2000년대 중후반 KSTAR 완공 및 실험에 따라 토카막 방식의 노심 플라즈마 진단 관련 특허 출원에 집중되어 있는 경향

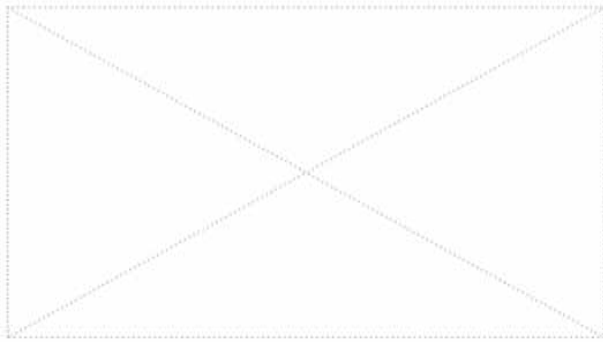


< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

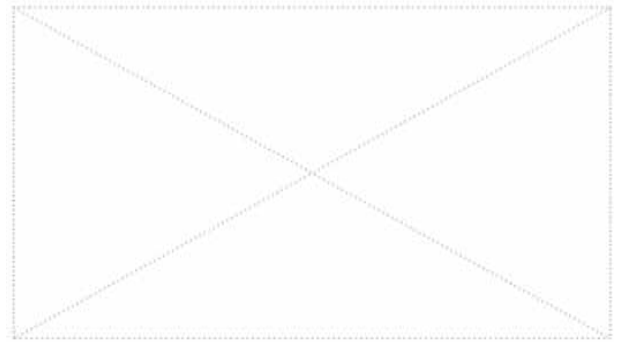


< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

- (특허경쟁력) 노심 플라즈마 분야는 핵심기술 분야 중 피인용도와 시장확보지수가 모두 높은 분야(1사분면)로 특허활동이 활발히 진행되고 있는 분야
- 국가별로 살펴보면 미국 출원특허가 우수한 경쟁력을 확보한 것으로 나타나며, 중국, 한국 특허의 경우 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 3사분면에 위치



< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

- (특허유망성) 노심 플라즈마 분야는 특허 점유율(핵심기술중 1위)과 특허 증가율(핵심기술중 2위)이 모두 높은 분야로 꾸준한 연구개발을 통해, 타 기술분야 대비 특허 활동이 이미 활발한 분야로 분석



< 특허점유율 - 특허증가율 >

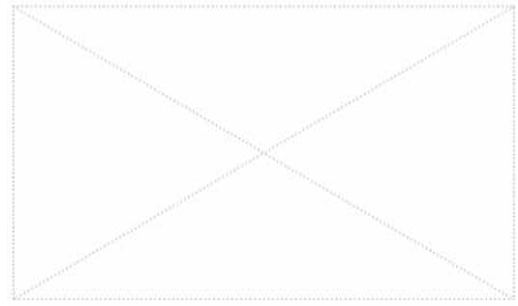
□ 논문게재 현황

- (연도별 게재 건수) 노심플라즈마 분야는 지난 14년간 총 11,398건의 논문이 게재되었으며, 꾸준히 관련 논문이 게재되고 있는 분야(연평균 성장률 2.6%)





< 그림. 연도별 게재 건수 >



< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 미국(4,239건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 미국에서 가장 많은 논문이 발표되었으나, 최근 중국(연평균 성장률 13.6%, 1위)에서 많은 논문이 발표되고 있는 형태. 한국은 게재 건수 11위(769건)



< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 DOE(미국)에서 가장 많은 2,289건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 막스플랑크(독일, 2,059건), CAS(중국, 1,744건) 비중이 높고, 한국의 KFE는 29위(566건)
- (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 영국이며, 미국, 독일, 프랑스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 낮은 3사분면에 위치



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >



< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 연구그룹 현황

| 기관 분류 | 주요 연구내용(성과)   | 실증로 기술 대비 한계점  |
|-------|---|--|
| 연구원   | <p>한국핵융합에너지연구원(62명)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• H-모드 플라즈마 90초 연속 운전 달성</li> <li>• 1억도 초고온 플라즈마 운전 30초 달성</li> <li>• <math>\beta_N=3.0</math> 고성능 플라즈마 12초 유지시간 달성</li> <li>• 노심 플라즈마 감금성능 시뮬레이션을 위한 섭동적 동역학 코드 개발('20)</li> <li>• 중성입자 가열 코드 개발('22)</li> <li>• KSTAR 토카막 가상화를 통한 초기버전 Virtual KSTAR 구현('22)</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR와 같은 중형 크기의 D-D 플라즈마 실험로에서 모든 고성능 지표를 동시에 만족시키는 실험을 수행하는 것은 한계가 있음</li> <li>• D-T 운전을 통한 높은 핵융합 이득률(Q) 달성을 목표로 하는 ITER 역시 실증로 수준의 경제성 확보를 위한 운전 영역 연구에는 한계가 있음</li> <li>• 현재 시뮬레이션 기술은 KSTAR 노심 플라즈마 상태 재현에 주력하고 있으며, 실증로에서 예상되는 연소 조건 플라즈마, 대형 장치 시뮬레이션 기술이 부족한 상황</li> </ul> |
| 대학    | <p>포항공과대학교(6명)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ECH 국소가열을 통해 노심의 MHD 불안정성 제거하고 열수송을 제어할 수 있음을 실험적으로 입증함.</li> <li>• 2차원 고속 영상측정 시스템 (ECEI) 개발 및 합성진단 코드 개발</li> <li>• 노심 MHD 불안정성의 발달 특성 규명</li> <li>• 경계면 MHD 불안정성 모드의 발달 특성, 난류와의 상호작용 및 MHD 모드의 붕괴 원인 규명</li> <li>• 고속 RF 스펙트럼 측정 시스템 개발</li> <li>• 고에너지 이온에 의한 파동 생성 기작 규명</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 연소플라즈마 수준의 고온 플라즈마 노심에 대해서는 실험적으로 검증된 바가 없음</li> <li>• ECEI 영상진단 시스템은 큰 포트를 필요로 하며 방사환경에 취약한 소자들을 사용하여 실증로에는 적합하지 않음. 방사환경 내구성이 큰 ECE radiometer 및 합성진단의 개발이 필요함.</li> <li>• 실증로 운전에서 필수적으로 여겨지는 알파입자 등 고에너지 이온 측정 기술로서 RF 진단의 가능성이 아직 검증되지 않음.</li> </ul>                          |
|       | <p>한국과학기술원(5명)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 플라즈마 붕괴시(disruption) 급속한 밀도 변화 측정이 가능한 single crystal</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 극한 환경 (고입자속, 고열속, 고중성자속 등)에서의 실험, 측정 및 데이터 해석 경험 부재로 인한 실증로</li> </ul>  |

| 기관 분류              | 주요 연구내용(성과)  | 실증로 기술 대비 한계점   |
|--------------------|--|---|
|                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>dispersion interferometer 개발</li> <li>텅스텐 디버터용 교체 가능한 랑뮈어 프로브 개발</li> <li>인공지능 기반 실시간 플라즈마 평형상태 추정 기술 개발</li> <li>플라즈마 난류 통계분석 알고리즘 개발</li> </ul> | 로의 적용 가능성 예측의 어려움   |
| 서울대학교(50명)         | <ul style="list-style-type: none"> <li>초고온 플라즈마 운전모드(FIRE 모드) 발견('22)</li> <li>통합 시뮬레이션을 위한 프레임워크 개발('20)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>ITER와 같은 연소 조건 플라즈마 실험 검증 및 실험 데이터를 활용한 시뮬레이션 기술 검증 및 신뢰성 확보 필요</li> </ul> |
| 울산과학기술대(UNIST)(3명) | <ul style="list-style-type: none"> <li>대규모 병렬 노심 시뮬레이션을 위한 격자 기술 개발('22)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>ITER와 같은 연소 조건 플라즈마 실험 데이터를 활용한 시뮬레이션 기술 검증 및 신뢰성 확보 필요</li> </ul>         |
| 한양대(4명)            | <ul style="list-style-type: none"> <li>2차원 플라즈마 수송 코드 개발('22)</li> </ul>   |   |

□ 인프라 현황

○ 국내 인프라 현황

| 세부시설          | 국내 보유 장치명   | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|---------------|---|--|
| 핵융합 플라즈마 연구시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>KSTAR(최종 운전목표) <ul style="list-style-type: none"> <li>운전시간 300초</li> <li>자기장 3.5T (테슬라)</li> <li>플라즈마 전류 2MA</li> <li>가열능력 20MW</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><b>(일부가능)</b> ITER와 유사한 구조의 초전도 토카막인 KSTAR는 ITER 초기 운전에 필요한 다양한 운전 선행 기술 연구를 수행할 수 있으며, ITER가 목표로 하고 있지 않은 실증로 단계에서 경제성과 직결되는 <math>\beta_N \geq 3.5</math> 운전 영역을 연구하는 등 ITER와 실증로 사이의 노심 성능 간극을 메우기 위한 실험으로서 역할을 충분히 할 것으로 기대</li> <li><b>(한계)</b> D-D 플라즈마 운전을 하는 중형 크기의 실험로로서, 그 한계를 넘어서는 실험은 ITER 국제공동연구를 통해 수행</li> </ul> |
| 포항방사광 가속기연구소  | <ul style="list-style-type: none"> <li>PLS-II <ul style="list-style-type: none"> <li>3 GeV/400 mA top-up/5.8 nm·rad</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li><b>(일부가능)</b> 방사선에 의한 재료 손상 평가</li> <li><b>(한계)</b> ITER 및 DEMO의 진단 장치에 영역에서 예상되는 방사 환경을 정확히 모사하는 것은 불가능하며, 빔타임 시간의 제약으로 장기간의 재료 손상을 테스트하는 것은 불가능함</li> </ul>   |

| 세부시설                 | 국내 보유 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|----------------------|--|--|
| 포항방사광 가속기연구소         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• XFEL <ul style="list-style-type: none"> <li>- 10 GeV/150pC</li> <li>- ~25 fs HXR; <math>1e11</math> photons per pulse</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 빔덤프를 활용하여 고방사환경을 부분적으로 구현할 수 있음</li> <li>• (한계) ITER 및 DEMO의 진단 장치에 영역에서 예상되는 방사 환경을 정확히 모사하는 것은 불가능함.</li> </ul>  |
| 선형 ECR 플라즈마 장치       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 라피드(RAPID) Research on Advanced Plasma Imaging and Dynamics <ul style="list-style-type: none"> <li>- 875G 최대 중심자기장</li> <li>- 2.45GHz, 1-6kW 마이크로파 전력</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 실증로의 난류 유동 및 파동-입자 상호 작용에 대한 기초 실험; mm-wave 기반의 진단기법 개발; 탈주전자(runaway electron) 모사 실험을 위한 전자빔 장치 추가 예정</li> <li>• (한계) 최대 구동 전력의 한계로 인하여 고온 플라즈마 생성 불가능</li> </ul>   |
| 디버터 주변 자기장 구조 모사 시설  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 맥시무스 (MAXIMUS) Magnetic X-point Simulator System <ul style="list-style-type: none"> <li>- 원통형(60cm Diameter, 200cm length) 기반 DC 플라즈마 소스</li> <li>- 전자온도 ~1-3eV</li> <li>- 이온온도 ~0.03eV</li> <li>- 자기 X-point 형성을 통한 디버터 근처 자기장 모사</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 극한환경(고입자속, 고열속, 고중성자속) 모사는 불가능하나, 디버터 주변 자기장 모사를 통한 입자 거동 실험 가능</li> <li>• (한계) 실증로의 디버터 환경 모사가 불가능하여, 플라즈마 물리 현상 분석은 가능하나, 실질적으로 중요한 재료 특성 분석을 위한 실험 불가</li> </ul>  |
| 디버터 입자속 부하 시험 시설     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KPBI (KAERI Plasma Beam Irradiation Facility)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 디버터 대면재(예-텅스텐)에 고이온속 이온빔을 조사하여 대면재의 성능(예-식각률, 표면 손상, 수소/중수소 보유)에 대한 시험 가능</li> <li>• (한계) ITER 및 DEMO 디버터 영역에 상응하는 <math>10^{24} m^{-2}s^{-1}</math> 입자속 모사는 불가능하나, <math>10^{23} m^{-2}s^{-1}</math> 입자속은 모사 가능함</li> </ul> |
| 냉각 채널 성능 평가 장치       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고열유속 부하 냉각 채널 성능 평가 장치 <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>15MW/m^2</math> 열속 부하 성능</li> <li>- Joule-Heating 방법</li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 현재 아머를 포함한 전체 플라즈마 대면체 형상에 대한 평가는 불가능하나, 냉각 채널 대한 열수력 성능 평가는 가능</li> <li>• (한계) 히터의 최대 허용 온도 문제로 인하여 열속 및 형상에 대한 한계 존재. 접촉 저항 감소 및 새로운 압착 방식을 통한 성능 개선 필요</li> </ul>   |
| 초고성능 컴퓨터             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KAIROS <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1.56 페타플롭스 계산 성능</li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (한계) 실증로 조건에서 연소 플라즈마 시뮬레이션을 위해 엑사플롭스 수준으로 계산 성능 확장 필요</li> </ul>   |
| 대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KAIROS 스토리지 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5.78 페타바이트 저장 용량</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (한계) 실증로 조건 시뮬레이션에서 산출되는 대규모 데이터를 저장, 분석하기 위해 10엑사바이트 이상 스토리지 자원 필요</li> </ul>  |
| 디지털 트윈 가상화           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V-KSTAR 서버</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (한계) 실증로를 구성하는 대형 토카막, 가열 장치, BOP 요소 가상화를 위해 자원 확장 필요</li> </ul>  |

| 세부시설<br>설비 | 국내 보유 장치명 | 활용가능 여부 및 불가 사유 |
|------------|-----------|-----------------|
|------------|-----------|-----------------|

○ 해외 인프라 현황

| 세부시설                | 국외 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유   |
|---------------------|---|---|
| 핵융합<br>플라즈마<br>연구시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DIII-D               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자기장 2.2 T</li> <li>- 가열능력 23 MW</li> <li>- 플라즈마 전류 (up to 2.0 MA)</li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (가능) KSTAR와 밀접한 연구 교류를 수행하고 있는 미국 GA의 DIII-D와 같은 해외 연구 장치의 선행연구 성과를 장시간 운전이 가능한 초전도 토카막인 KSTAR에서 구현하고 발전시키는 등 해외 연구 장치와 강화된 협력 연구를 추진</li> </ul> |
|                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER(국제 공동 연구장치)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 열출력 : 500MW (에너지증폭 10배)</li> <li>- 운전시간 : 300~500초</li> <li>- 자기장 5.3T</li> <li>- 플라즈마 전류 15MA</li> <li>- 가열능력 50MW</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (가능) KSTAR, DIII-D 등 현행 토카막들이 수행할 수 없는 초대형 D-T 운전 실험을 ITER 국제공동연구를 통해 수행하고 실증로 건설을 위한 핵심기술 성과를 확보</li> </ul>                                     |
| 선형<br>플라즈마<br>장치    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 규슈대학교 PANTA (Plasma Assembly for Nonlinear Turbulence Analysis)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 900G 중심자기장</li> <li>- 7MHz, 3kW RF 전력</li> </ul> </li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (가능) 규슈대학교와 POSTECH, 서울대 등 국내 대학 커뮤니티와의 활발한 교류 중이며, 이를 바탕으로 PANTA 장치의 활용 가능. 장치 활용 외에 장치 운영 기술 및 진단 기법 개발 등의 공동 연구도 가능</li> </ul>                |
| 소형 토카막<br>장치        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 규슈대학교 PLATO (Plasma Turbulence Observatory )               <ul style="list-style-type: none"> <li>- R=0.7m, a=0.2m</li> <li>- 0.3T</li> </ul> </li> </ul>   |   |
| 초고성능<br>컴퓨터         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국 Frontier 슈퍼컴퓨터(1.1exaFLOPS, 1,102PF)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 초고성능컴퓨터는 국제 공동 활용이 불가능한 자원</li> </ul>   |
|                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 Fugaku 슈퍼컴퓨터(442PF)</li> </ul>  |   |
|                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 유럽 Marconi 슈퍼컴퓨터(20PF)</li> </ul>  |   |

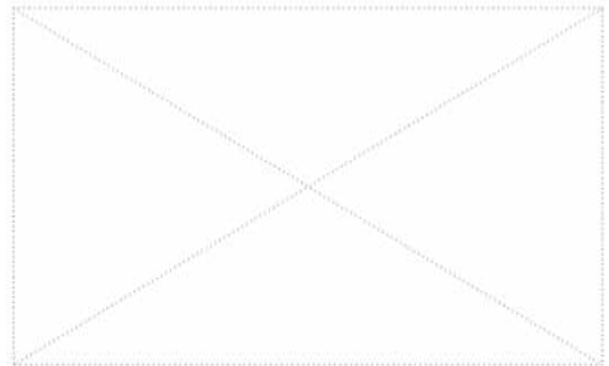
## 나. 증식블랑켓

### □ 기술수준 현황

- (핵심기술 기술수준 비교) 최고기술국 (EU) 대비 기술 수준은 높은 반면, 최종 목표(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



< 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

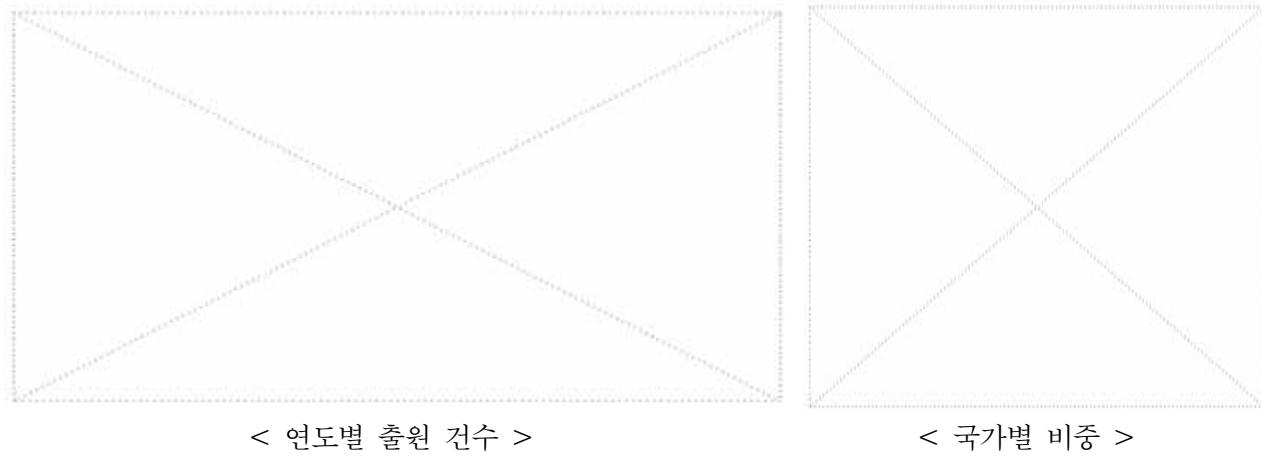
< 증식블랑켓 기술수준 분석결과 >

| 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)

□ 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

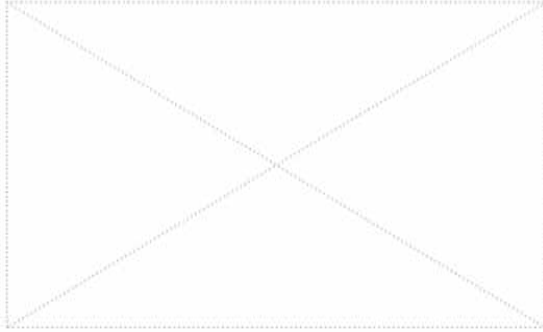


- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 일본의 경우 자국 특허청 중심의 출원을 진행 중이며, 러시아, 유럽, 미국의 경우 세계 주요 국가 특허청에 동시 출원

< 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



< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

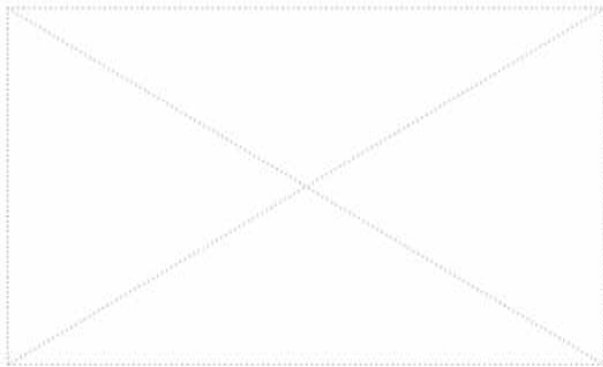


< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

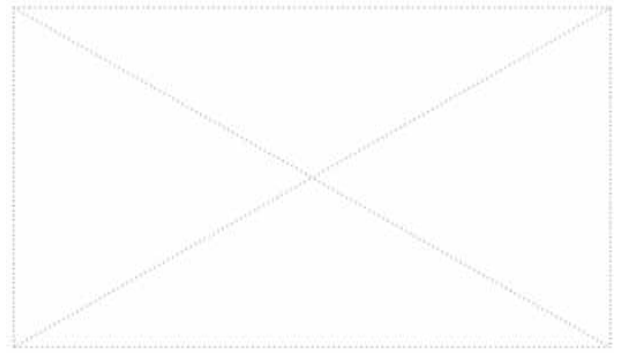
○ (특허경쟁력) 증식블라켓 분야의 경우 핵심기술 분야 중 피인용도와 시장확보 지수가 낮은 분야로, 타 분야 대비 상대적으로 특허활동이 활발하지는 않은 분야

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

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

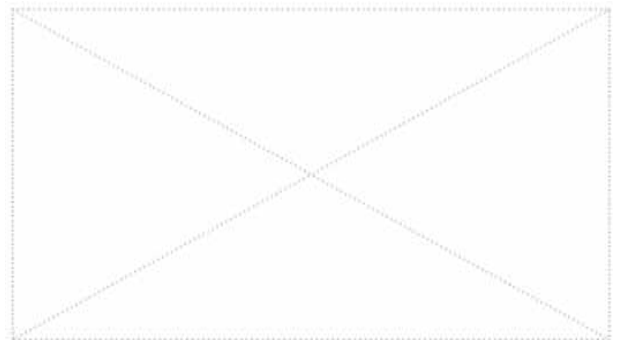


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

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



< 특허점유율 - 특허증가율 >

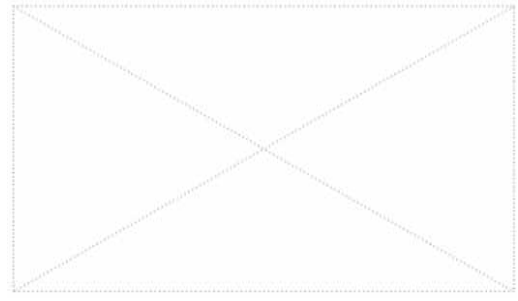
□ 논문게재 현황

○ (연도별 게재 건수) 증식블라켓 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 >

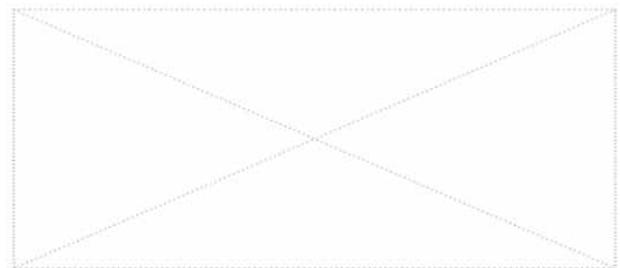


< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 HELMHOLZ(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 10 개국 중 피인용도 최하위)



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >



< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 연구그룹 현황

| 기관 분류 |                   | 주요 연구내용(성과)  | 실증로 기술 대비 한계점   |
|-------|-------------------|--|---|
| 연구원   | 한국핵융합 에너지연구원(13명) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER TBM 개발을 통해 연료이송해석 코드 THETA-FR 개발 및 검증 진행</li> <li>• ITER TBM 개발을 통해 GAMMA-FR 검증 진행</li> <li>• ITER TBM 개발을 통해 TBM 서브모듈 일차벽 제작기술 개발</li> <li>• ITER TBM 개발을 통해 연료추출 및 냉각계통 공정개발·기기 평가 진행</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER TBM 계통·안전해석 코드는 ITER 운전조건 및 시설에 국한되어 개발됨에 따라, 실증로나 핵융합로 적용을 위한 기술 개발 필요</li> <li>• 대형 블랑켓 제작을 위한 제작 기술 및 연료 생산을 위한 증식유닛 제작 기술 개발 필요</li> <li>• (준)연속 운전·대규모 연료추출 및 냉각을 위한 공정·핵심기기 개발과 핵융합(유사) 환경에서 검증 필요</li> </ul> |
|       | 한국원자력연구원(7명)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고온가스로용 안전해석 코드로 개발한 GAMMA+를 핵융합 환경에 사용할 수 있도록 GAMMA-FR 코드로 개량 및 검증 진행</li> <li>• ITER TBM 개발을 통해 TBM 서브모듈 일차벽 제작기술 개발</li> <li>• ITER TBM 개발을 통해 냉각계통 공정개발·기기 평가 진행</li> </ul>                          |   |

□ 인프라 현황

○ 국내 인프라 현황

| 세부시설     | 국내 보유 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유   |
|----------|--|---|
| 중성자 생산시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 원자력(연) 하나로 연구로                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 형태 : 원자로 형태개방수조형</li> <li>- 열출력 : 30메가와트(MW)</li> <li>- 최대 열중성자속 <math>5 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup>/sec</li> <li>- 핵연료봉형 집합체, 저농축 우라늄 실리사이드, 알루미늄 피복관</li> <li>- 냉각재/반사체경수(H<sub>2</sub>O), 중수(D<sub>2</sub>O)</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 증식블랑켓의 구조재료 조사 DB 구축에 일부 활용 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설이 부재</li> <li>* 고에너지중성자(14MeV)가 아닌 열중성자 영향과 잦은 정지로 인한 제약으로 추가 사용 제한</li> </ul> |
|          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 원자력(연) 정읍 첨단방사선연구소                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 인출 빔 에너지 : 15~30MeV</li> <li>- 이온원 인출 빔 전류 : 10mA</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 중성자생산시설 개발 과정에 해당 시설 구축 시의 표적, 차폐, 시험 기술 적용 가능</li> </ul>  |

| 세부시설           | 국내 보유 장치명   | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|----------------|---|--|
|                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최대빔 전류 : 300<math>\mu</math>A</li> <li>- 주파수 : 63.96MHz</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(한계)</b> 표적 근처 유효 조사위치에서 ~0.1 MW/m<sup>2</sup> NWL 수준으로 선행연구장비로는 사용가능하나, 대면적 조사가 불가능하여 실질적인 조사시험 불가</li> <li>- 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설 부재</li> </ul>                                |
|                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 경주양성자가속기(KOMAC) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 인출 빔 에너지 : 20~100MeV</li> <li>- 최대평균전류 : 4.8mA</li> <li>- 최대 빔 파워 : 160</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설이 부재</li> <li>- 삼중수소/블랑켓 목업 설치·교체/조사후시험을 위한 시설 개선 불가능</li> <li>* 연속운전 불가능에 따른 중성자 조사 시간 제약, 100 MeV 이상 양성자에 의해 생성되는 중성자 에너지 너무 높음</li> </ul>        |
|                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중이온가속기(RAON) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 인출 빔 에너지 : 200MeV</li> <li>- 대전류 : 400kW급</li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 생산된 중성자 특성이 핵융합 증식블랑켓 시험에 부적합하며, 삼중수소 취급/증식블랑켓 목업 설치·교체 등을 위한 시설 부재</li> <li>- 핵융합 유사환경 제공 불가(연속운전, 대면적 조사, 중성자속, 삼중수소 설비, 조사후시험시설 등)</li> </ul>  |
|                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 원자력(연) 재료전용 이온조사시험 시설 (KAHIF) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최대 인출 빔 에너지 : 1.06MeV</li> <li>- 빔사이즈 : 10 X 10mm<sup>2</sup></li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> He/Fe 이온 등을 이용해 핵융합 환경에서의 중성자 조사손상 모의가 가능해 증식블랑켓의 구조재 거동연구에 일부 활용 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> 이온조사시설은 재료의 조사손상 거동을 미시적으로 평가할 수 있는 시설로서 구조재료 DB 구축에 직접적 활용 불가</li> <li>- 구축될 시설과 연계해 조사거동과 조사손상량 연구 병행 필요</li> </ul> |
| 증식블랑켓 안전성 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고열부하시험시설(KoHLT-EB) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 가속전압 : 35~50kV</li> <li>- 빔출력 : 5~100kW</li> <li>- 열부하 : 2.5MW/m<sup>2</sup></li> </ul> </li> <li>• 고온고압헬륨시험장비(HeSS) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 파워 : 150kW</li> <li>- 압력 : 10/8 MPa</li> <li>- 온도 : 50/100<math>^{\circ}</math>C</li> </ul> </li> <li>• 연료계통평가장비(PGLoop) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 대용량 흡착성능 : ~50 mole</li> <li>- 압력 : 100~150 kPa</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 종합시설로서의 인프라가 아닌 개별 기능 수행이 가능한 인프라로서, ITER TBM 및 소형 목업 시험 등 활용</li> </ul>  |

| 세부시설              | 국내 보유 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|-------------------|--|--|
| 핵반응/차폐 데이터 검증실험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>미래원자력기술장비구축사업을 통해 DD 선원(필요시 30MeV 가속기 기반 중성자원)을 활용한 차폐설계검증실험 기초 연구가 진행 중</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>(일부가능) 26년 구축 완료 및 그 과정에서의 차폐설계검증 절차 활용 가능</li> </ul> |

○ 해외 인프라 현황

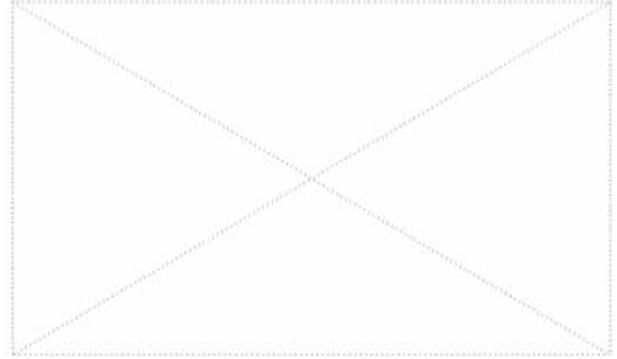
| 세부시설           | 국외 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|----------------|---|--|
| 중성자 생산시설       | <ul style="list-style-type: none"> <li>EU는 약 1조원을 투자하여 스페인 그라나다에 IFMIF-DONES 구축 중('30년 운영목표) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 빔에너지 : 40 MeV</li> <li>- 전류 : 125 mA</li> <li>- 빔파워: 5 MW</li> </ul> </li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>(불가) 자국 소재에 대한 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상</li> </ul>                            |
|                | <ul style="list-style-type: none"> <li>일본은 약 1조원을 투자하여 룩카쇼에 A-FNS 구축 중('31년 완공목표) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 빔에너지 : 40MeV</li> <li>- 빔전류 : 125mA</li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>(불가) 자국 소재에 대한 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상</li> </ul>                            |
|                | <ul style="list-style-type: none"> <li>중국은 '15년 HINEG-I을 개발완료 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중성자 수율 <math>10^{12}</math>n/s</li> </ul> </li> <li>현재 HINEG-II 공학설계 진행중, 2031년 까지 10억달러 투자하여 HINEG-III를 단계적으로 완공예정</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>(불가) HINEG-I의 경우 핵자료 측정, 핵 해석코드 검증, 동위원소 생산용으로 증식 블랑켓 시험 불가능</li> </ul>       |
|                | <ul style="list-style-type: none"> <li>미국 DOE에서는 핵융합 재료 연구를 위한 중성자선원에 대한 RFI 공고 ('23.5)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>(불가) 개념 기획 단계로서, 현재시점에서 활용가능여부 판단 불가</li> </ul>                               |
| 증식 시험 시설       | <ul style="list-style-type: none"> <li>구축 사례 없음</li> <li>* 미국·일본 등 시설구축 기획단계</li> </ul>   | -  |
| 증식블랑켓 안전성 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>일본은 룩카쇼에 TBM 및 증식블랑켓의 안전실증을 위한 장치를 구축 중</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>(불가) 자국 시험 우선 예상되며, 특히 일본은 수냉각 방식의 TBM/증식블랑켓 개발에 집중하고 있어 시험에 제약 예상</li> </ul> |

## 다. 핵융합 소재

### □ 기술수준 현황

- (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술분야 중 최고기술국(EU) 대비 기술수준과 최종 목표대비 기술수준이 평균 이상인 분야

- 핵심기술 중 노심 플라즈마 분야에 이어 최종목표 대비 한국의 기술수준이 가장 높은 분야(58.3%)이며, 최고기술국 대비 기술수준(72.5%)도 핵심기술 중 상위권



< 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

- (세부기술 기술수준) 최종 목표 대비 기술 수준을 살펴보면 구조재 분야가 가장 높은 기술수준을 보유하고 있으며, 대면재 분야가 낮은 것으로 분석

- 구조재는 ITER TBM 사업을 통해 한국형 저방사화 철강재(ARAA) 및 물성데이터 베이스를 구축하고, RCC-MRx 등재를 계획 중

- 대면재는 대학 실험실 규모의 연구개발을 통해 ITER 기술을 추적 중이며, 기능소재는 세계적 수준의 삼중수소 증식재 제조 원천기술을 확보하였으나, 리튬동위원소 분리, 중성자 증배재 연구가 미진한 것으로 파악

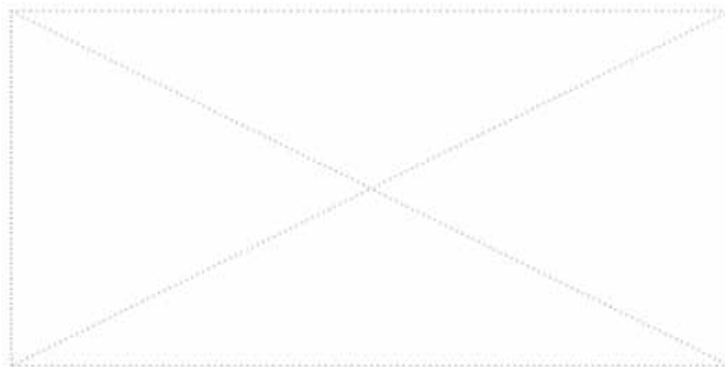
< 핵융합 소재 기술수준 분석결과 >

| 핵심기술   | 최고기술국 | 최종목표 대비 최고기술국 기술수준 | 최종목표 대비 한국 기술수준 | 최고기술국 대비 한국 기술수준 |
|--------|-------|--------------------|-----------------|------------------|
| 구조재    | EU    | 83.9               | 65.0            | 77.5             |
| 대면재    | EU    | 77.8               | 52.5            | 67.5             |
| 기능소재   | EU    | 79.3               | 57.5            | 72.5             |
| 핵융합 소재 | EU    | 80.3               | 58.3            | 72.5             |

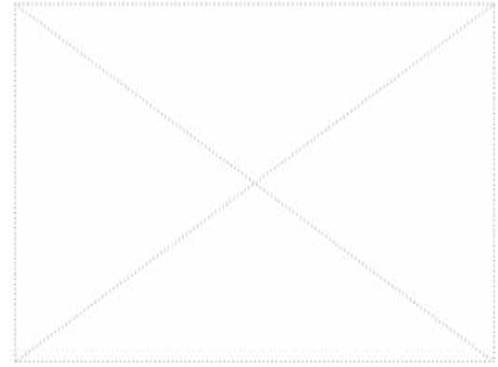
※ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 기술수준평가(한국연구재단, '22)

□ 특허 출원 현황

- (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 400건의 특허가 출원되었으며, 2010년 이후 중국을 중심으로 특허출원량이 크게 증가하는 경향을 보이나 최근 감소 추세
- (국가별 비중) 중국이 가장 많은 186건(46%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 유럽 53건(13%), 한국 51건(13%), 일본 42건(10%) 순으로 특허 출원 진행



< 연도별 출원 건수 >



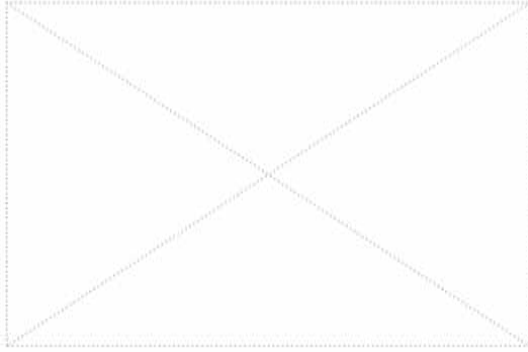
< 국가별 비중 >

- (국가별/특허청별 출원현황) 중국 한국, 러시아의 경우 거의 모든 특허를 자국 특허청에 출원하였으며, 유럽, 일본, 미국의 경우 세계 주요 국가 특허청에 동시 출원 진행 중

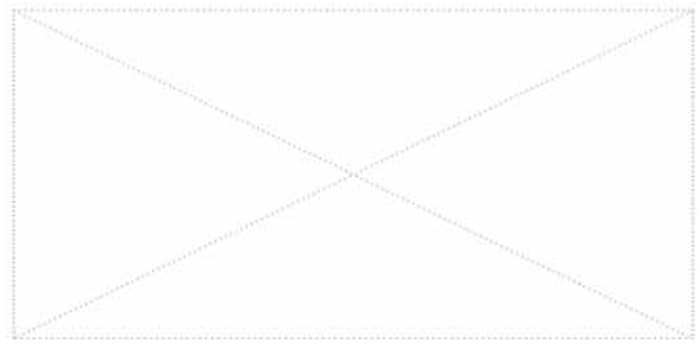
< 국가별-특허청별 출원 현황 >

| 구분 | 중국 특허청 | 유럽 특허청 | 일본 특허청 | 한국 특허청 | 러시아 특허청 | 미국 특허청 | WIPO | 기타  | 총합계  |
|----|--------|--------|--------|--------|---------|--------|------|-----|------|
| CN | 99%    | 0%     | 0%     | 0%     | 1%      | 0%     | 1%   | 0%  | 100% |
| EP | 8%     | 19%    | 4%     | 4%     | 4%      | 11%    | 23%  | 28% | 100% |
| KR | 0%     | 2%     | 0%     | 90%    | 0%      | 8%     | 0%   | 0%  | 100% |
| JP | 2%     | 12%    | 57%    | 5%     | 0%      | 14%    | 7%   | 2%  | 100% |
| US | 15%    | 18%    | 3%     | 9%     | 0%      | 41%    | 15%  | 0%  | 100% |
| AU | 18%    | 9%     | 9%     | 18%    | 0%      | 23%    | 5%   | 18% | 100% |
| RU | 0%     | 0%     | 0%     | 0%     | 100%    | 0%     | 0%   | 0%  | 100% |

- (주요 출원인 Top 10) 주요 출원인 중 SWIP, ASIPP, HIPS 등 중국의 연구기관이 특허 출원량이 많은 것으로 분석
- 2010년대 중반 이후 중국 연구기관의 특허출원량이 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있으며, 핵융합(연)(KFE)은 18건(12%)을 출원하며 2010년대 이후 출원 진행 중

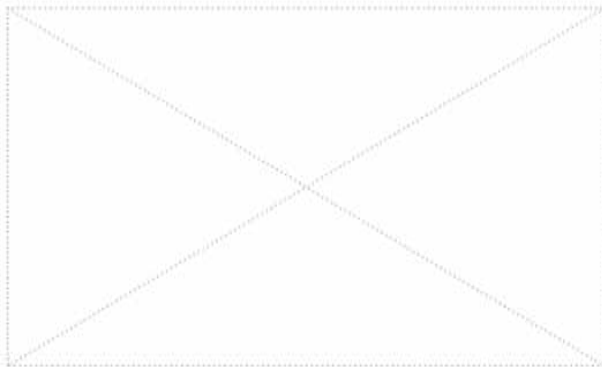


< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

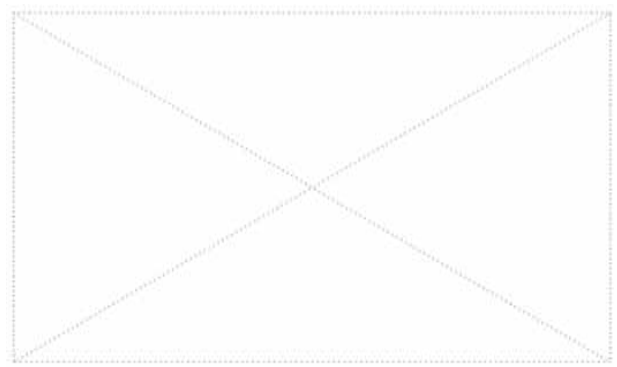


< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

- (특허경쟁력) 핵융합 소재 분야의 경우 핵심기술 중 피인용도와 시장확보지수가 낮은 분야로, 타 분야 대비 출원된 특허가 질적으로 낮은 수준으로 파악
  - 국가별로 살펴보면 미국이 유일하게 피인용도와 시장확보지수가 높은 1사분면 위치
- ※ 중국의 경우 자국 문헌의 인용을 통해 피인용도가 상대적으로 타 국가대비 높은 경향을 보임

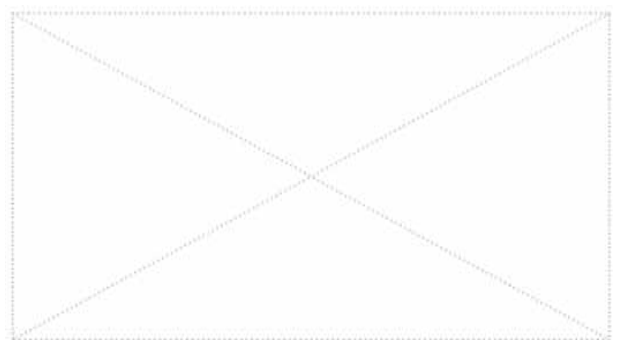


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

- (특허유망성) 핵융합 소재 분야는 특허 점유율이 낮고(핵심기술중 5위), 최근 10년간 특허성장률도 평균 이하로, 특허 활동이 활발하지는 않은 분야(3사분면 위치)



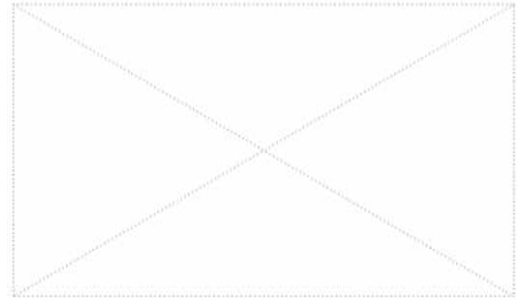
< 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

□ 논문게재 현황

- (연도별 게재 건수) 핵융합 소재 분야는 지난 14년간 총 3,050건의 논문이 게재되었으며, 최근 게재 건수가 감소한 분야(연평균 성장률 4.3%)



< 그림. 연도별 게재 건수 >

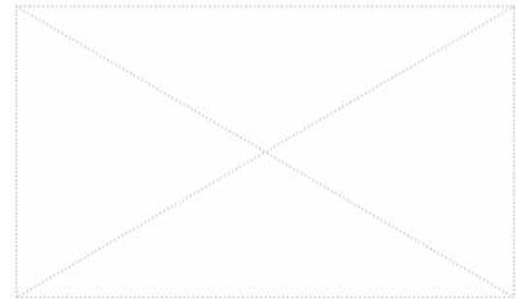


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 독일(752건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 2010년대 초 일본에서 많은 논문이 게재되었으나, 중반 이후 독일과 중국에서 많은 논문이 게재되고 있는 것으로 파악. 한국은 게재 건수 11위(153건)



< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 HELMHOLTZ(독일)에서 가장 많은 563건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 DOE(미국, 375건), KARLSRUHE(독일, 367건)의 비중이 높고, 한국의 KFE는 28위(101건)
- (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 영국이며 분석기간 동안 1위. 독일, 일본, 미국이 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 >



□ 연구그룹 현황

| 기관 분류 |                  | 주요 연구내용(성과)  | 실증로 기술 대비 한계점  |
|-------|------------------|--|--|
| 연구원   | 한국핵융합에너지 연구원(3명) | <ul style="list-style-type: none"> <li>한국형 저방사화 철강재 개발 및 기초 물성 DB 구축 진행 중('12~)</li> <li>삼중수소 증식재 페블 대량 제조 원천기술 개발('16)</li> <li>고성능 삼중수소 증식재 원천 기술 개발 진행 중('21~)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>실증로 건설을 위해서는 저방사화 철강재의 대량생산 기술이 확보되어야 하므로 국내 제강업체의 적극적인 협력이 필요한 상황이지만, 현재는 경제성 관점에서 산업체의 참여가 소극적</li> <li>실증로 환경에서의 핵융합재료에 대한 물성 평가 및 검증이 필요한 상황이나, 인프라 부족으로 인해 원활히 진행되지는 않고 있는 실정</li> <li>핵융합로용 삼중수소 증식재 및 중성자 증배재용 원료 확보를 위한 기초 연구 및 인프라 부족으로 인해 개발 착수 지연</li> </ul> |
|       | 한국원자력 연구원(1명)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>한국형 저방사화 철강재 공동 개발('12~)</li> </ul>   |  |
|       | 한국재료 연구원(1명)     | <ul style="list-style-type: none"> <li>저방사화 철강재 성능 향상을 위한 기초연구 진행 중</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>기초 연구 단계</li> </ul>   |
| 대학    | 가천대학교(1명)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>고성능 삼중수소 증식재 원천 기술 공동 개발 진행 중('21~)</li> </ul>  | -  |
|       | 창원대학교(1명)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>저방사화 철강재용 용접봉 개발 진행 중('22~)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>실증로 부품 제작을 위해서는 반드시 개발되어야 하는 기술이므로 지속적인 지원이 필요</li> </ul>   |

□ 인프라 현황

○ 국내 인프라 현황

| 세부시설                                 | 국내 보유 장치명   | 활용가능 여부 및 불가 사유   |
|--------------------------------------|---|---|
| 중성자<br>생산시설<br>및<br>조사후/조사<br>재 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 원자력(연) : 하나로 연구용 원자로               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 형태 : 원자로 형태개방수조형</li> <li>- 열출력 : 30메가와트(MW)</li> <li>- 최대 열중성자속 <math>5 \times 10^{14}</math> n/cm<sup>2</sup>/sec</li> <li>- 핵연료봉형 집합체, 저농축 우라늄 실리사이드, 알루미늄 피복관</li> <li>- 냉각재/반사체경수(H<sub>2</sub>O), 중수(D<sub>2</sub>O)</li> </ul> </li> <li>• 조사후/조사재 시험시설               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주요설비 : 조사시험 시료 인출입 장치, 비파괴시험장치, 시편 제작 장치, 금속조직관찰장치, 기계시험 장치, 정밀분석시험장치(SEM, TEM, EPMA) 등</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 실증로 구조재의 중성자 조사 DB 구축에 일부 활용 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> 생산된 중성자 특성이 핵융합 재료 시험에 부적합하며, 삼중수소가 발생하는 재료에 대한 시험이 불가능함</li> <li>* 고에너지중성자(14MeV)가 아닌 열중성자 영향과 맞은 정지로 인한 제약</li> </ul> |
|                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 원자력(연) : 재료 전용 이온조사시험시설 (KAHIF)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최대 인출 빔 에너지 : 1.06MeV</li> <li>- 빔사이즈 : 10 X 10mm<sup>2</sup></li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> He/Fe 이온 등을 이용해 핵융합 환경에서의 중성자 조사손상 모의가 가능해 구조재 거동연구에 일부 활용 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> 이온조사시설은 재료의 조사손상 거동을 미시적으로 평가할 수 있는 시설로서 구조재료 DB 구축에 직접적 활용 불가</li> </ul>                 |

○ 해외 인프라 현황

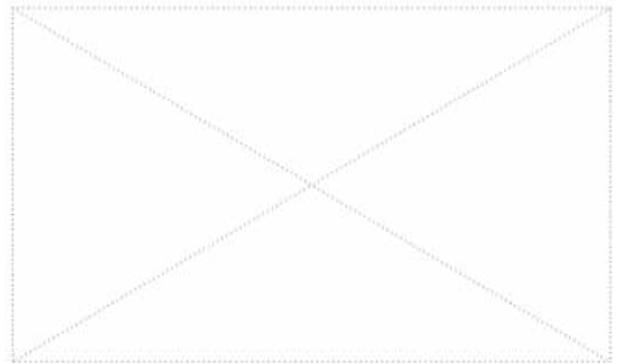
| 세부시설                                 | 국외 장치명   | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|--------------------------------------|--|--|
| 중성자<br>생산시설<br>및<br>조사후/조사<br>재 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• EU는 약 1조원을 투자하여 스페인 그라나다에 IFMIF-DONES 구축 중('30년 운영목표)</li> <li>- 빔에너지 : 40 MeV</li> <li>- 전류 : 125 mA</li> <li>- 빔파워: 5 MW</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 자국 핵융합 재료에 대한 고에너지 중성자 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상</li> </ul>                                     |
|                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본은 약 1조원을 투자하여 롯카쇼에 A-FNS 구축 중('31년 완공목표)</li> <li>- 빔에너지 : 40MeV</li> <li>- 빔전류 : 125mA</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 자국 핵융합 재료에 대한 고에너지 중성자 조사 물성 DB 구축을 위한 시험 우선 예상</li> </ul>                                     |
|                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중국은 '15년 HINEG-I을 개발완료</li> <li>- 중성자 수율 <math>10^{12}</math>n/s</li> <li>• 현재 HINEG-II 공학설계 진행중, 2031년까지 10억달러 투자하여 HINEG-III를 단계적으로 완공예정</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) HINEG-I의 경우 핵자료 측정, 핵해석코드 검증, 동위원소 생산용으로 핵융합 재료 시험 불가능</li> </ul>                              |
|                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국 DOE에서는 핵융합 재료 연구를 위한 중성자신원에 대한 RFI 공고 ('23.5)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 개념 기획 단계로서, 현재시점에서 활용가능여부 판단 불가</li> </ul>   |
| 베릴륨<br>취급시설                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국 : INL, Materion</li> <li>• 독일 : KBHF</li> <li>• 프랑스 : AREVA</li> <li>• 일본 : QST</li> <li>• 중국 : SWIP</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 베릴륨 및 베릴륨 화합물, 베릴륨 부품 등은 전략물자로 분류되어 수출입에 제한이 있으므로 한국형 중성자 증배재 개발을 위해서는 국내 인프라 구축 필요</li> </ul> |

## 라. 연료주기

### □ 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



< 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

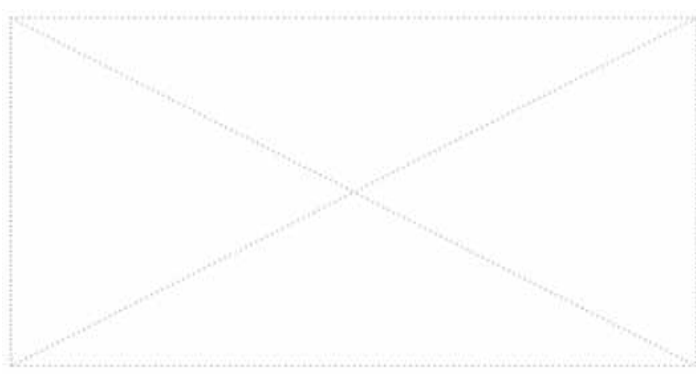
< 연료주기 기술수준 분석결과 >

| 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             |

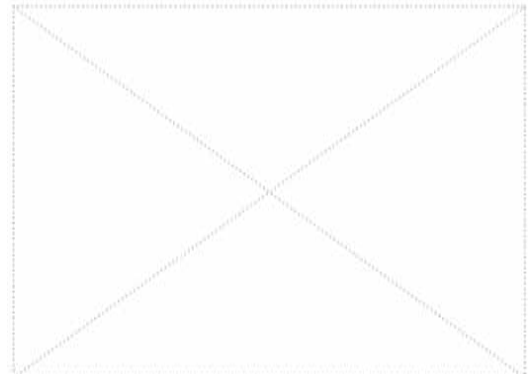
※ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 기술수준평가(한국연구재단, '22)

□ 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



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

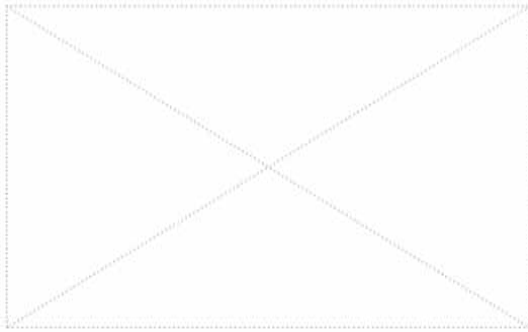
- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국의 경우 거의 모든 특허를 자국 특허청에 출원하는 경향을 보이고 있으며, 미국, 일본, 유럽, 러시아의 경우 세계 주요 특허청에 동시 출원 진행

< 국가별-특허청별 출원 현황 >

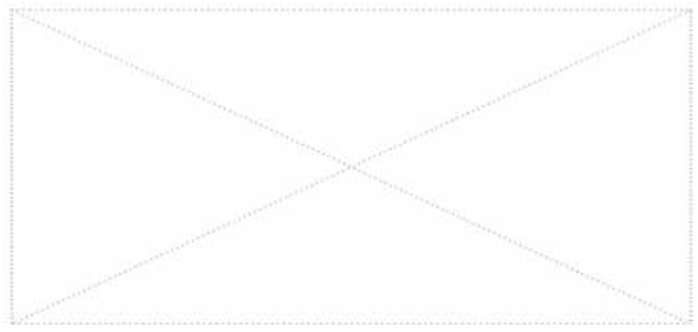
| 구분 | 중국 특허청 | 유럽 특허청 | 일본 특허청 | 한국 특허청 | 러시아 특허청 | 미국 특허청 | WIPO | 기타  | 총합계  |
|----|--------|--------|--------|--------|---------|--------|------|-----|------|
| US | 10%    | 14%    | 12%    | 8%     | 1%      | 41%    | 9%   | 5%  | 100% |
| CN | 95%    | 1%     | 0%     | 0%     | 1%      | 2%     | 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 출원하

면서 주요 출원인 중 상위권에 포함된 것으로 분석



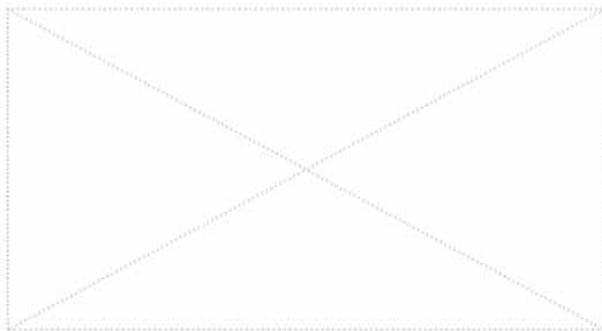
< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >



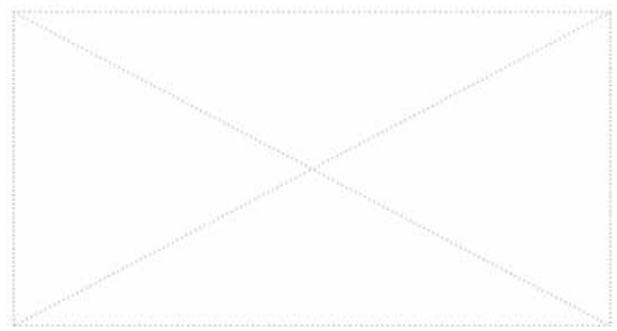
< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (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

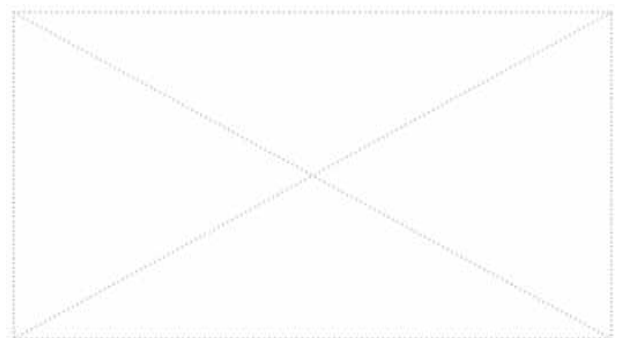


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 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



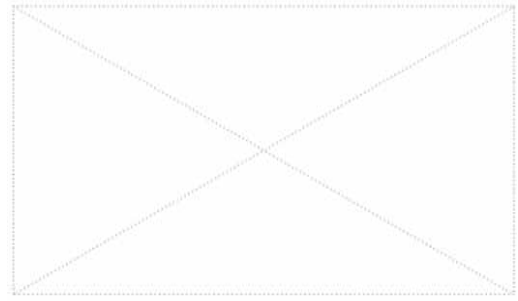
< 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

□ 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)

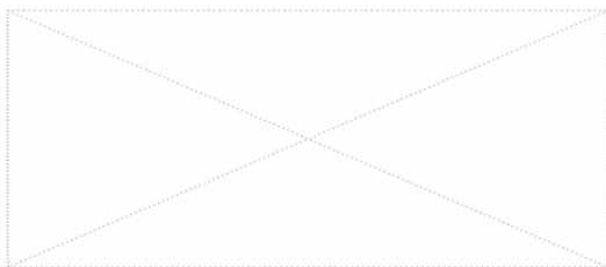


< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



< 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 >

□ 연구그룹 현황

|     | 기관 분류            | 주요 연구내용(성과)  | 실증로 기술 대비 한계점  |
|-----|------------------|--|--|
| 연구원 | 한국핵융합에너지연구원(10명) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 조달항목인 삼중수소 저장·공급 시스템(SDS) 관련 삼중수소 저장용기 개발 및 공정 설계 수행</li> <li>• 핵융합 실증로 연료주기 기술개발 착수</li> <li>• KSTAR Pellet Injection 구축 및 성능 검증</li> <li>• KSTAR Cryopump 부분 적용</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 조달을 중심으로 주요기기 검증 및 공정설계 수행</li> <li>• 실증로 삼중수소 플랜트 적용 가능한 기술 검색 착수</li> <li>• DT 핵융합 Pellet Injection을 통한 연료공급 예상됨. 실증로 적용 기술개발 필요</li> <li>• 소형 Cryopump 적용됨. 실증로 적용 기술개발 필요</li> </ul> |
|     | 한국원자력연구원(-)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 삼중수소 저장용기 요소기술 검증</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 업무 종료 및 과책 정년</li> </ul>  |
| 대학  | 서울대학교(4명)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 삼중수소 플랜트 ISS 및 WDS 기술추적</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 기술추적 및 공정모사 수행 실증로 적용 시스템 설계 및 실험적 검증 필요</li> </ul>   |
|     | 포항공과대학교(3명)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 삼중수소 플랜트 DS 기술추적</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 기술추적 및 공정모사 수행 실증로 적용 시스템 설계 및 실험적 검증 필요</li> </ul>   |
|     | 동국대학교            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 연료공급 및 진공배기 기술추적</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 업무 종료 및 과책 정년</li> </ul>  |
| 산업체 | 한수원 중앙연구원        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 삼중수소 Calorimeter 기술 검증</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 업무 종료</li> </ul>  |
|     | DIG 에어가스         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 삼중수소 플랜트 TEP 기술추적</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 업무 종료</li> </ul>  |



□ 인프라 현황

○ 국내 인프라 현황

| 세부시설              | 국내 보유 장치명   | 활용가능 여부 및 불가 사유   |
|-------------------|---|---|
| 삼중수소<br>취급시설      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합(연), ITER 삼중수소 저장·공급 시스템 단위공정 검증장치</li> <li>- 수소/중수소 적용</li> </ul>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 삼중수소 저장·공급 시스템 개발에 활용 가능함.</li> <li>• (한계) 실증로 삼중수소 플랜트 고농도 및 저농도 삼중수소 취급 전반의 기술개발이 필요함.</li> <li>삼중수소 저장·공급 시스템의 경우, 실증로 적용가능한 저장용기 개발 및 공정개발이 필요함.</li> </ul> |
|                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 한수원 중앙연구원, 삼중수소 계량 분배 장치</li> <li>- 삼중수소 적용 가능</li> <li>- 삼중수소 ~g 취급</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 삼중수소 분석 및 계량이 가능함.</li> <li>• (한계) 연구수행이 아닌 삼중수소 ~g 소분에 목적</li> </ul>   |
|                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 한수원 월성, 삼중수소 제거설비</li> <li>- 10 Ci/kg 삼중수소수 취급</li> <li>- 삼중수소 ~g 취급</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 발전소 특정 조건에서 삼중수소 제거 목적으로 사용 (~g 삼중수소 취급)</li> </ul>   |
| 핵융합<br>연료공급<br>시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합(연), KSTAR Pellet Injection</li> <li>- 수소/중수소 적용</li> <li>- 직경 2mm Pellet 200 ㎍ 20 Hz 공급</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) Pellet Injection을 통한 중수소 공급</li> <li>• (한계) 연료공급 보조 수단, 큰 크기 및 빠른 Pellet 공급 필요</li> </ul>   |
| 핵융합<br>진공배기<br>시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합(연), KSTAR Cryopump</li> <li>- 1 m<sup>2</sup></li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 액체 He을 활용한 Cyropump 적용</li> <li>• (한계) 진공배기 보조 수단, 보다 효율적인 연료 배기 성능 확보 필요</li> </ul>  |

○ 해외 인프라 현황

| 세부시설          | 국외 장치명   | 활용가능 여부 및 불가 사유   |
|---------------|--|---|
| 삼중수소<br>취급시설* | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 삼중수소 플랜트 설계 및 제작 진행 중('30대 중반 삼중수소 취급 시운전 및 운영 착수 예정)</li> <li>- ~kg 수준 삼중수소 취급</li> <li>- 100 Pam<sup>3</sup>/s 삼중수소 회수 및 연료 재사용</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) ~kg 수준 삼중수소 취급을 목표로 시스템 설계 및 제작 중</li> <li>• (한계) 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요</li> </ul>                                    |
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 독일 TLK 수십 g 삼중수소 활용가능 EU 실증로 연료주기 파트 삼중수소 취급 요소기술 개발 수행 중</li> <li>- 수십 g 삼중수소 취급</li> <li>- 핵융합 연료주기 적용 가능한 전반 삼중수소 취급기술 개발 중</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) EU 자체적으로 요소기술 개발을 선도하고 있음. 실증로 적용 가능성을 위한 기술평가가 필요함.</li> <li>• (한계) 삼중수소 취급 기술 자립을 함께 고려해야 하며, 도입하더라도 기술의 성숙도가 실증로 적용을 판단하기 이룸.</li> </ul> |

| 세부시설        | 국의 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유   |
|-------------|---|---|
|             | <ul style="list-style-type: none"> <li>미국 SRNL 수십 g 삼중수소 활용가능 US 실증로 연료주기 기술개발 로드맵을 개발하고 있음(10년 후 실증로 제작 착수) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 수십 g 삼중수소 취급</li> <li>- 특화된 수소동위원소 분리기술 개발</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 삼중수소 취급 요소기술의 연구개발을 수행하고 있음.</li> <li>• (한계) 삼중수소 취급 정보 수출통제에 따른 기술교류 한계</li> </ul>                             |
|             | <ul style="list-style-type: none"> <li>일본 TPL 수십 g 삼중수소 활용·삼중수소 취급 요소기술 검증 수행함. <ul style="list-style-type: none"> <li>- 수십 g 삼중수소 취급</li> <li>- 시설 해체 중</li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 시설 해체 착수</li> </ul>   |
|             | <ul style="list-style-type: none"> <li>캐나다 AECL 삼중수소 제거 설비 설계, 제작 및 운영 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 10 Ci/kg 삼중수소수 취급</li> <li>- 삼중수소 수십 g 취급</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 저농도 삼중수소 취급 기술 일부 적용 가능</li> <li>• (한계) 특정 운전 조건에서 운영되고 있으며, 다양한 삼중수소 취급 조건을 위한 기술개발이 필요함.</li> </ul>           |
|             | <ul style="list-style-type: none"> <li>루마니아 ICSI 삼중수소 취급 농축 시설 제작 및 운영 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 10 Ci/kg 삼중수소수 취급</li> <li>- 삼중수소 ~g 취급</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 삼중수소 농축 기술을 중심으로 기술개발 수행</li> <li>• (한계) 핵융합 연료주기 전반에 적용하기에 기술범위의 제한이 있음.</li> </ul>                            |
| 핵융합 연료공급 시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>ITER 연료공급 시스템 DT 기준 최대 200 Pam<sup>3</sup>/s 연료공급 예정 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 삼중수소 적용</li> <li>- 직경 5mm Pellet 300 ㎍ 공급</li> </ul> </li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) Pellet Injection 중심으로 실증로 적용 가능할 것으로 보임.</li> <li>• (한계) 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요</li> </ul> |
| 핵융합 진공배기 시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>ITER 진공배기 시스템 DT 기준 최대 200 Pam<sup>3</sup>/s 진공배기 예정 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 11.2 m<sup>3</sup></li> <li>- Charcoal 표면 코팅</li> </ul> </li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) DT 핵융합 실험 시작, 운영, 종료에 따른 토카막 내 적정 진공도 유지</li> <li>• (한계) 핵융합 연속운전 및 1500 MW 열에너지 생산에 적합한 Scale-up 필요</li> </ul> |

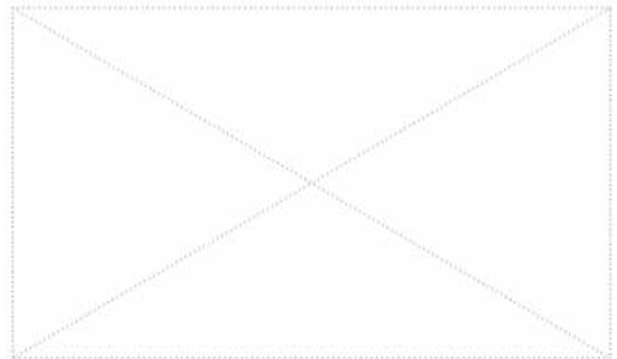
\* 삼중수소 자체뿐만 아니라 취급 기술 정보가 수출통제 대상임. 각국이 운영하는 삼중수소 취급시설은 자국의 삼중수소 취급 경험 축적 및 기술 자립을 위해 요소기술을 개발하고 있음. ITER 삼중수소 플랜트의 경우, 미국, EU, 일본, 한국만 조달의 참여가 제한되었음. 핵융합 실증로 개발을 착수함에 있어 삼중수소 취급 기술의 자립은 그 이후 핵융합 상용로 연료주기 기술 적용에도 타국의 종속을 피할 수 있는 적절한 시기로 판단됨.

## 마. 디버터

### □ 기술수준 현황

- (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 분야에서 최고기술국(EU) 대비 기술수준과 최종 목표(실증로) 대비 기술수준이 평균 이상

- 디버터는 ITER 비조달품목임에도 불구하고, 최고기술국 대비 기술수준과 최종목표 대비 기술수준이 상대적으로 높은 편에 속하는 분야



- (세부기술 기술수준) 세부기술별 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면, 디버터 설계 기술(40%), 디버터 제작·검증 기술(47.5%) 수준으로 분석

< 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

- 디버터 설계기술의 디버터의 공학적 관점에서 성능해석 및 설계 기술은 최고기술국에 근접한 역량을 보유하고 있으나, 디버터의 물리해석은 선진국의 기술을 추적(해외 설계코드를 활용한 기술추적 중)하고 있는 상황

- 디버터 제작·검증 기술은 KSTAR 텅스텐 디버터 개발을 통해 단기간에 크게 기술수준이 향상되었다고 볼 수 있으나, 기술수준 향상을 위해서는 디버터 성능을 실제 검증하기 위한 시설(고열부하시설 등)이 요구

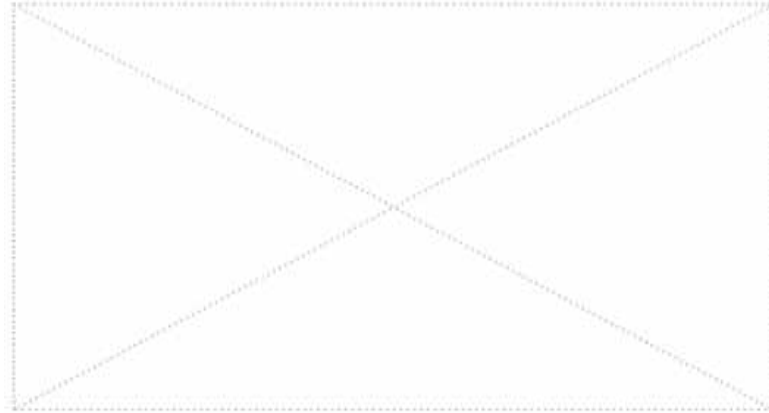
< 디버터 기술수준 분석결과 >

| 핵심기술     | 최고기술국 | 최종목표 대비 최고기술국 기술수준 | 최종목표 대비 한국 기술수준 | 최고기술국(100%) 대비 한국 기술수준 |
|----------|-------|--------------------|-----------------|------------------------|
| 설계 기술    | EU    | 64                 | 40              | 62.5                   |
| 제작·검증 기술 | EU    | 63.3               | 47.5            | 75                     |
| 디버터      | EU    | 63.7               | 43.8            | 68.8                   |

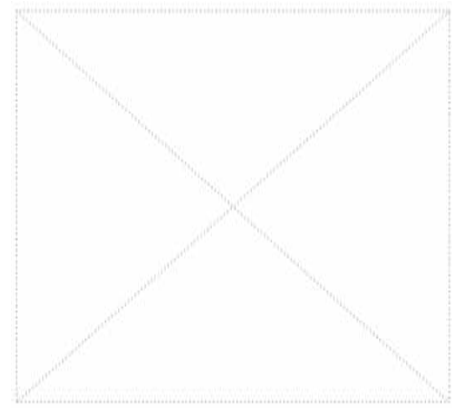
※ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 기술수준평가(한국연구재단, '22)

### □ 특허 출원 현황

- (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 168건의 특허가 출원되었으며, 2010년대 이후 중국이 주도적으로 특허 출원을 크게 늘리고 있는 것으로 파악
- (국가별 비중) 국가별로 중국이 가장 많은 68건(40%) 출원하였으며, 미국이 47건(28%)을 출원하였으며, 한국은 6건(4%) 출원 진행



< 연도별 출원 건수 >



< 국가별 비중 >

- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국의 경우 모든 특허를 자국에 출원하고 있으며, 미국, 오스트리아, 일본, 유럽의 경우 세계 주요 특허청에 출원을 진행하고 있는 상황

< 국가별-특허청별 출원 현황 >

| 구분 | 중국<br>특허청 | 유럽<br>특허청 | 일본<br>특허청 | 한국<br>특허청 | 러시아<br>특허청 | 미국<br>특허청 | WIPO | 기타  | 총합계  |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------|-----|------|
| CN | 100%      | 0%        | 0%        | 0%        | 0%         | 0%        | 0%   | 0%  | 100% |
| US | 13%       | 15%       | 13%       | 13%       | 0%         | 38%       | 6%   | 2%  | 100% |
| AU | 12%       | 12%       | 18%       | 12%       | 0%         | 12%       | 12%  | 18% | 94%  |
| JP | 6%        | 13%       | 69%       | 6%        | 0%         | 6%        | 0%   | 0%  | 100% |
| EP | 0%        | 27%       | 9%        | 9%        | 0%         | 27%       | 0%   | 27% | 100% |
| KR | 0%        | 0%        | 0%        | 100%      | 0%         | 0%        | 0%   | 0%  | 100% |
| 기타 | 0%        | 0%        | 0%        | 0%        | 67%        | 0%        | 0%   | 33% | 100% |

- (주요 출원인 Top 10) TAE TECHNOLOGY가 가장 많은 22건(19%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 HIPS 21건(18%), PLANSEE 17건(15%)을 출원
  - TAE TECHNOLOGY의 특허는 역자장 방식 핵융합 시스템 특허(디버터 포함)를 여러 국가에 출원함에 따라 디버터 분야 가장 높은 순위로 분석
  - PLANSEE는 디버터 모노블럭 냉각, 제작 등 특허를 2000년대 초반 출원하였으며, HIPS의 경우 디버터 구조, 교체방법, 데이터 처리 등 특허를 2010년대 후반 출원



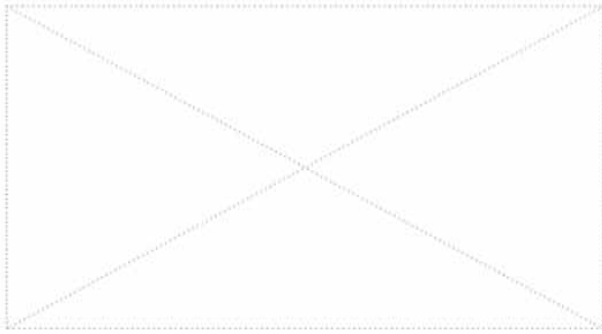
< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >



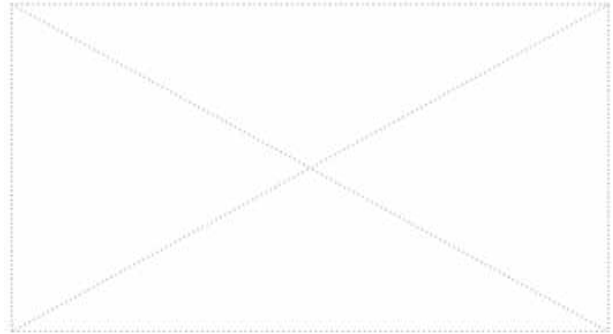
< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (특허경쟁력) 디버터 출원 특허는 피인용도와 시장확보지수가 모두 높은 분야(1사분면)으로 출원된 특허의 질적 수준과 시장성이 높은 것으로 확인

- 국가별로 살펴보면 미국이 가장 높은 피인용도와 시장확보지수를 보유하고 있으며, 기타 여러 국가의 특허의 질적수준 차이가 크지는 않은 상황

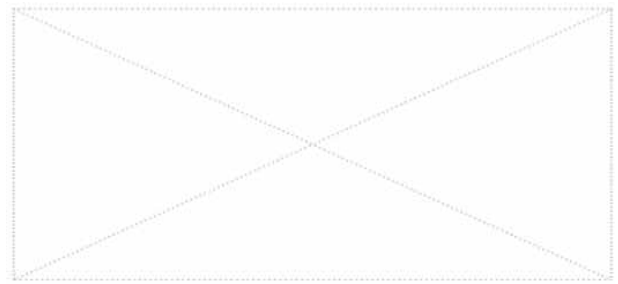


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 디버터 분야는 특허점유율이 낮은 분야(핵심기술 중 6위)이나, 특허증가율이 가장 높은 분야로, 최근에 가까워질수록 특허활동이 활발해지고 있는 유망 분야로 분류 가능



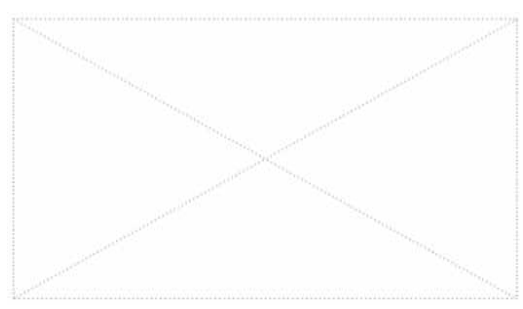
< 특허점유율 - 특허증가율 >

□ 논문게재 현황

○ (연도별 게재 건수) 디버터 분야는 지난 14년간 총 861건의 논문이 게재되었으며, 지속적으로 게재건수가 증가하고 있는 분야(연평균 성장률 9%)



< 그림. 연도별 게재 건수 >

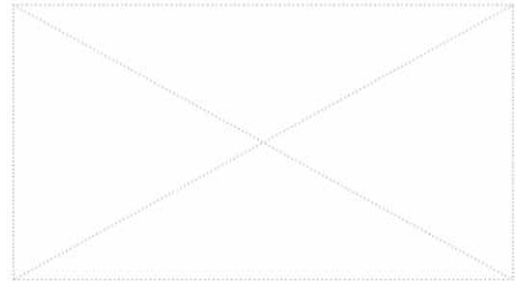


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

○ (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 독일(362건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 독일에서 가장 많은 논문이 발표되었으나, 최근 중국(연평균 성장률 16.8%, 1위)에서 많은 논문이 발표되고 있는 형태. 한국은 게재 건수 13위(54건)



< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 MAX PLANCK(독일)에서 가장 많은 270건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 DOE(미국, 177건), CEA(프랑스, 144건) 비중이 높고, 한국의 KFE는 33위(41건)
- (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 러시아이며, 독일, 미국, 프랑스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 낮은 3사분면에 위치



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >



< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 연구그룹 현황

| 기관 분류 |                  | 주요 연구내용(성과)   | 실증로 기술 대비 한계점   |
|-------|------------------|---|---|
| 연구원   | 한국핵융합에너지 연구원(5명) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR 디버터 설계, 해석 및 제작 기술 개발</li> <li>• 실증로급 디버터 초기 물리·공학해석을 통한 설계 프로세스 정립</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR는 소형 직선부에 대한 제작만 이루어졌고 실증로의 대형 곡면부에 대한 제작 기술 부재</li> <li>• 실증로 디버터 열하중을 전기생산에 활용할 수 있는 설계안 도출을 위한 지속적인 연구 필요</li> </ul> |
|       | 한국원자력 연구원(1명)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 소형 플라즈마 입자 발생시험장비(Applied-field magnet plasma dynamic thruster, AF-MPD) 구축을 통한 PSI 연구</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 입자속이 최대 <math>8 \times 10^{22}</math> 으로 매우 낮고 시편의 크기가 <math>40 \text{ mm}^2</math>로 제한적임. 샘플의 냉각 및 가열시스템 부재</li> </ul>      |
| 대학    | 한국과학기술원(5명)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 경계플라즈마 해석 코드(SOLPS-ITER)를 활용한 KSTAR 운전에 대한 디버터 물리 해석 연구</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 해석 대상이 KSTAR에 국한되어 있고 실증로에 대한 해석 방안 및 기술 부재</li> </ul>   |
|       | 포항공과대학(3명)       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 디버터 냉각 방식에 열수력 해석 및 시험과 계통 연구</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 소형 열수력 시험 장비의 한계와 실증로의 고온고압의 냉각수를 적용 불가</li> </ul>   |
| 산업체   | (주)비츠로테크(-)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR용 카세트 디버터 자체 제작 기술 개발</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 소형 직선부에 국한된 제작기술로 실증로의 대면적 곡선형 디버터에 대한 제작 및 검사기술 부재</li> </ul>   |

□ 인프라 현황

○ 국내 인프라 현황

| 세부시설            | 국내 보유 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유   |
|-----------------|--|---|
| 고열부하 시험시설       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Korea Heat Load Test Facility (KoHLT- EB), 원자력(연)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 가속전압 : 35~50kV</li> <li>- 빔출력 : 5~100kW</li> <li>- 열부하 : 2.5MW/m<sup>2</sup></li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 시설 보유 기관인 원자력(연)과 일정 협의 후 사용 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> 테스트 가능한 최대 열속이 10 MW/m<sup>2</sup>로 낮고(해외 장비의 경우 최대 ~40 MW/m<sup>2</sup> 가능), 시편의 크기도 7 cm x 3 cm 정도로 제한적임.</li> </ul>  |
| 플라즈마 입자 발생 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Applied-field magnet plasma dynamic thruster (AF-MPD), 원자력(연)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최대입자속 : <math>8 \times 10^{22} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}</math></li> <li>- 시편크기 : 40 mm<sup>2</sup></li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 시설 보유 기관인 원자력(연)과 일정 협의 후 사용 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> 입자속이 최대 <math>8 \times 10^{22} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}</math>으로 낮고(해외 기관 장비는 <math>10^{25}</math> 수준임.) 시편의 크기가 40 mm<sup>2</sup>로 제한적임. 샘플의 냉각 및 가열시스템 부재</li> </ul> |

○ 해외 인프라 현황

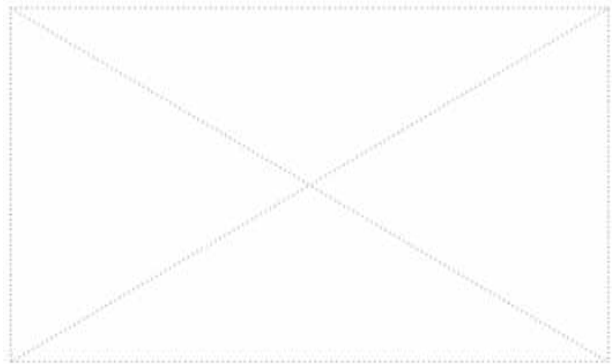
| 세부시설          | 국외 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유   |
|---------------|---|---|
| 고열부하 시험시설     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• GLADIS (독일)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 빔파워 : 2 x max. 1.1 MW</li> <li>- 열유속 : 1~45MW/m<sup>2</sup></li> <li>- 크기 : 직경 1.5m, 길이 4.5m</li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 자체 사용 외에 사용 시간에 대해 협의 후 사용 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가</li> </ul> |
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• IDTF(ITER Divertor Test Facility) (러시아)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 진공챔버 압력 : <math>3 \times 10^{-3} \text{ Pa}</math></li> <li>- 테스트 규격 : 직경 1.5m, 길이 2.5m</li> </ul> </li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> ITER Test 전용 시설로 사용</li> </ul>   |
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• JUDITH2 (독일)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 빔파워 : 200kW</li> <li>- 가속전압 : 30~60kV</li> <li>- 최대 스캐닝 영역 : 500 X 500 mm<sup>2</sup></li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요</li> <li>• <b>(한계)</b> 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가</li> </ul>          |
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• JEBIS (일본)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 출력 : 400kW</li> <li>- 가속전압 : 100kV</li> <li>- 최대 가열 영역 : 1,800 cm<sup>2</sup></li> </ul> </li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요</li> <li>• <b>(한계)</b> 테스트 샘플 사이즈가 실증로 디버터 타겟 전체에 적용 불가</li> </ul>          |
| 플라즈마입자 발생시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MAGNUM-PSI (네덜란드)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 입자유량 : <math>\sim 10^{23} - 10^{25} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}</math></li> <li>- 열 유속 : <math>&gt; 10 \text{ MW m}^2</math></li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요</li> <li>• <b>(한계)</b> 동시에 한 종류의 플라즈마 입자만 시험 가능</li> </ul>                  |
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PSI-2 (독일)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 플라즈마 컬럼 직경 : <math>\approx 6 \text{ cm}</math></li> <li>- 이온유량 : <math>\sim 10^{21} - 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}</math></li> </ul> </li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> 국제 공동연구 활용을 위한 협의 필요</li> <li>• <b>(한계)</b> 동시에 한 종류의 플라즈마 입자만 시험 가능</li> </ul>                  |



## 바. 가열 및 전류구동

### □ 기술수준 현황

- (핵심기술 기술수준 비교) 최고 기술국 (EU) 대비 기술수준은 핵심기술 평균 이하이나, 최종 목표(실증로) 대비 기술수준은 평균 이상인 분야
  - 최종 목표 대비 기술수준은 45%이며, 최고 기술국대비 기술수준은 61.8% 수준으로 분석
- (세부기술 기술수준) 세부기술별 최종목표 대비 기술수준은 가열 및 전류구동 장치, 플라즈마 통합 모두 45% 정도 수준
  - 가열 및 전류구동 장치는 KSTAR 장치 운전을 통해 중성입자빔 가열장치(NBI)의 장시간 운전기술 등에 강점을 가지고 있는 상황
  - 가열 및 전류구동 플라즈마 통합기술 역시 KSTAR 장치 운전을 통해 가열 및 전류구동 시나리오를 개발하고 있으나 실증로급 운전을 위해서는 전산 모델링, 제어기술 등 추가적인 연구활동이 필요한 것으로 분석



< 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

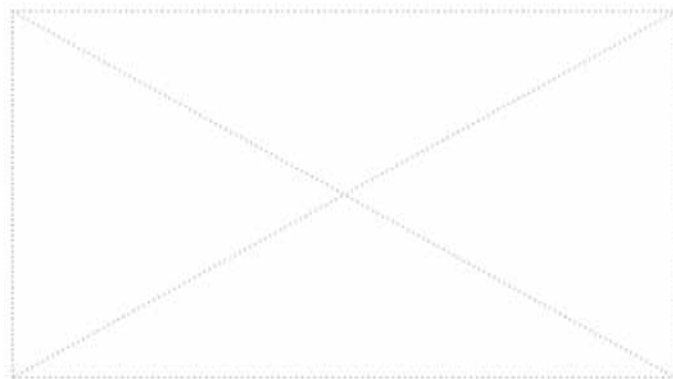
< 가열 및 전류구동 기술수준 분석결과 >

| 핵심기술                 | 최고기술국 | 최종목표 대비<br>최고기술국 기술수준 | 최종목표 대비<br>한국 기술수준 | 최고기술국 대비<br>한국 기술수준 |
|----------------------|-------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| 가열 및 전류구동<br>장치      | EU    | 68.2                  | 45.0               | 66.0                |
| 가열 및 전류구동<br>플라즈마 통합 | EU    | 78.3                  | 45.0               | 57.5                |
| 가열 및 전류구동            | EU    | 73.2                  | 45.0               | 61.8                |

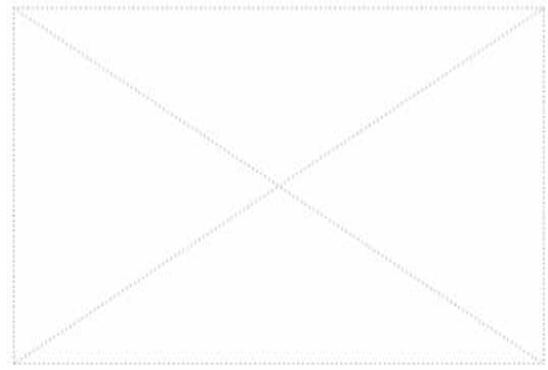
※ 핵융합 전력생산 실증로 핵심기술 기술수준평가(한국연구재단, '22)

□ 특허 출원 현황

- (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 466건의 특허가 출원되었으며, 2010년대 중반 크게 증가하였으나, 이후 점차 감소추세에 있는 것으로 확인
- (국가별 비중) 미국이 가장 많은 199건(43%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 중국 89건(19%), 유럽 62건(13%) 순이며, 한국은 35건(8%) 특허 출원 진행



< 연도별 출원 건수 >



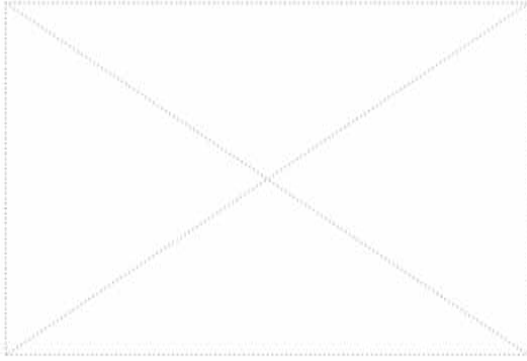
< 국가별 비중 >

- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 일본, 러시아는 자국 특허청 위주의 특허를 출원하고 있으며, 미국과 유럽은 세계 주요 특허청에 모두 출원을 진행 중

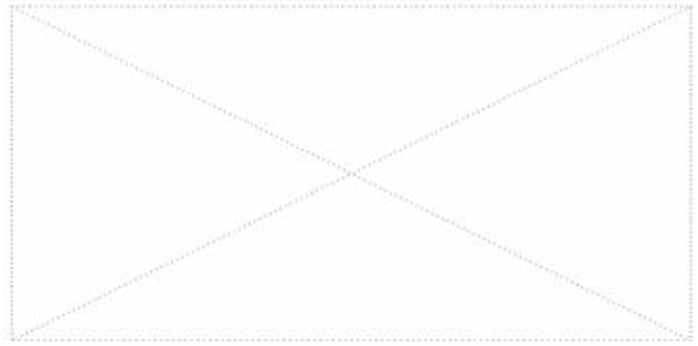
< 국가별-특허청별 출원 현황 >

| 구분 | 중국 특허청 | 유럽 특허청 | 일본 특허청 | 한국 특허청 | 러시아 특허청 | 미국 특허청 | WIPO | 기타  | 총합계  |
|----|--------|--------|--------|--------|---------|--------|------|-----|------|
| US | 6%     | 17%    | 12%    | 11%    | 1%      | 48%    | 5%   | 1%  | 100% |
| CN | 90%    | 1%     | 0%     | 0%     | 2%      | 4%     | 1%   | 1%  | 100% |
| EP | 10%    | 15%    | 10%    | 15%    | 3%      | 26%    | 11%  | 11% | 100% |
| JP | 2%     | 6%     | 73%    | 2%     | 2%      | 12%    | 4%   | 0%  | 100% |
| KR | 0%     | 3%     | 3%     | 74%    | 0%      | 9%     | 9%   | 3%  | 100% |
| CA | 15%    | 8%     | 0%     | 8%     | 8%      | 31%    | 15%  | 15% | 100% |
| RU | 0%     | 10%    | 0%     | 0%     | 80%     | 0%     | 10%  | 0%  | 100% |
| 기타 | 0%     | 17%    | 17%    | 17%    | 0%      | 33%    | 17%  | 0%  | 100% |

- (주요 출원인 Top 10) TAE Technologies(미), University of California(미), Lockheed Martin(미) 등 미국 산업체 및 대학이 주요 출원인 상위로 분석
- 2000년대 University of California(미)가 특허출원을 주도하였으며, 2010년대 TAE Technologies(미)가 특허출원을 주도, 핵융합(연)(KFE)는 16건(8%)의 특허를 출원

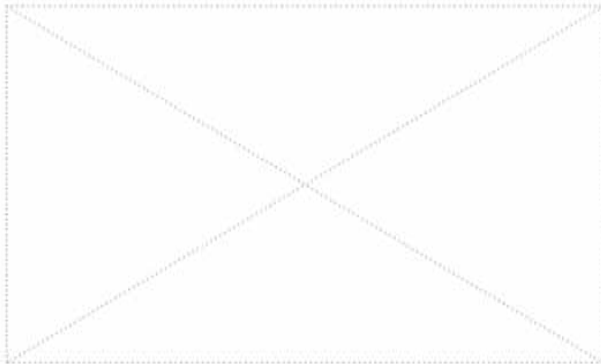


< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

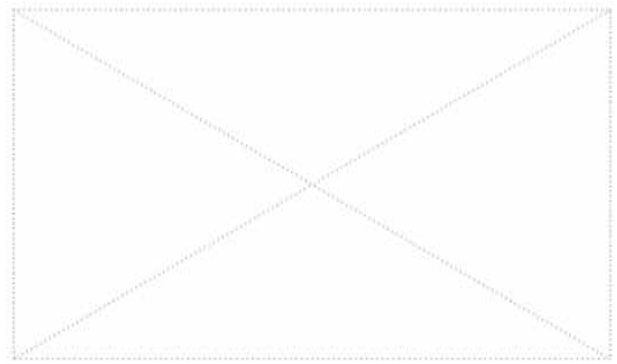


< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

- (특허경쟁력) 가열 및 전류구동 분야는 핵심기술 분야 중 피인용도와 시장확보지수가 모두 높은 분야(1사분면)으로 출원된 특허의 경쟁력이 상대적으로 높은 분야
  - 국가별로는 미국이 유일하게 피인용도와 시장확보지수가 높은 1사분면에 위치하고 있으며, 한국과 중국의 특허는 경쟁력이 낮은 것으로 분석

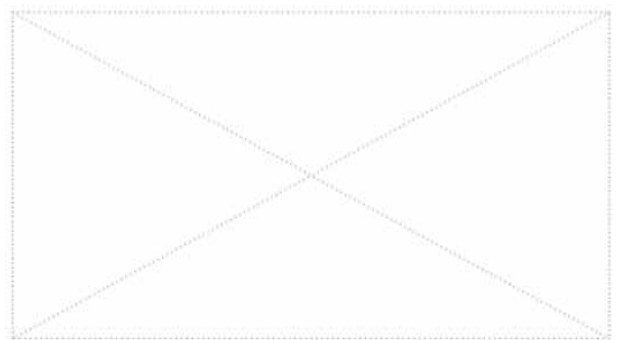


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

- (특허유망성) 가열 및 전류구동 분야는 특허점유율이 중간 수준(핵심기술 중 3위)이나, 최근 10년간 특허 증가율이 낮은 분야로, 과거에 특허활동이 집중되어 있었던 것으로 파악



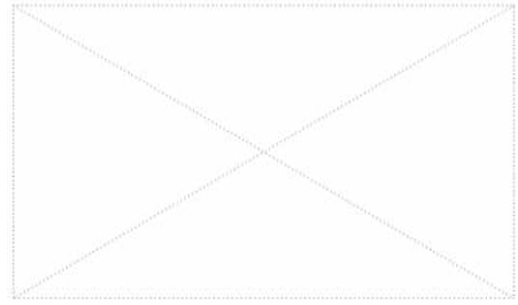
< 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

□ 논문게재 현황

- (연도별 게재 건수) 가열 및 전류구동 분야는 지난 14년간 총 1,445건의 논문이 게재되었으며, 꾸준하게 관련 논문이 게재되고 있는 분야(연평균 성장률 1.9%)



< 그림. 연도별 게재 건수 >

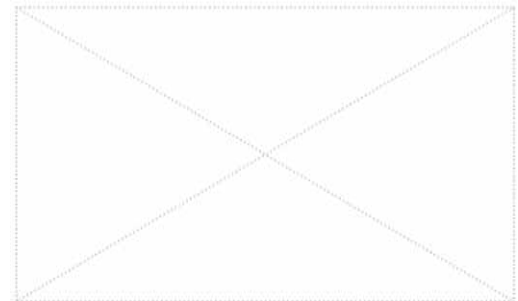


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 이탈리아(409건)가 가장 많은 논문을 발표하였으며, 연도별로 매년 이탈리아, 미국에서 가장 많은 논문이 발표되었으나, 최근 중국(연평균 성장률 21%, 1위)에서 많은 논문이 발표되고 있는 형태. 한국은 게재 건수 13위(84건)



< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 CAS, HEFEI INST(중국)에서 가장 많은 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 막스플랑크(독일, 234건), DOE(미국, 224건)가 비중이 높고, 한국의 KFE는 35위(57건)
- (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 영국이며, 이탈리아, 독일, 미국, 프랑스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도는 높으나 게재건수가 낮은 2사분면에 위치



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >



< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 연구그룹 현황

| 기관 분류                                  | 주요 연구내용(성과)  | 실증로 기술 대비 한계점   |
|--|--|---|
| <p style="text-align: center;">연구원</p> | <p style="text-align: center;">한국핵융합에너지<br/>연구원(9명)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR 가열장치 개발/운영을 통한 ~100초/~1억도 플라즈마 기여 (중성입자빔 12MW, 고주파 6MW 설치)</li> <li>• 헬리콘 전류구동 장치 1MW 급 개발 및 시험중 (300kW 전자가열 실증)</li> <li>• 200kV 중성입자빔을 위한 RF 30kW 세슘 기반 음이온원 개발 및 시험 진행중</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로의 플라즈마 크기와 높은 자기장으로 인해 KSTAR에 최적화된 가열 및 전류구동 장치의 직접 사용 불가능 - 가속전압 및 주파수 상향 필요</li> <li>• 헬리콘 등 신개념 전류구동은 실증로 적용 전 개념 실증연구 필요</li> <li>• 중성입자빔 가속전압 1MV 까지 상향 필요</li> <li>• 고효율 빔 중성화 기술(레이저 기반 기술 등) 개발 필요</li> <li>• 안테나 및 빔 최적화 디자인을 통해 삼중수소중식률 감소 최소화 필요</li> <li>• ITER 기술인 170GHz 자이로트론 장치를 그대로 도입하여 설계 및 제작 능력 확보 부족</li> </ul> |
|  | <p style="text-align: center;">한국원자력<br/>연구원(7명)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 대전력 이온원 운전 기술 (300초, 수 MW 급)</li> <li>• 음이온원 기초기술</li> <li>• 고주파 가열 전류구동 해석 및 안테나 설계 기술 (해석 예측 코드, 안테나 설계코드)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MV 가속 기술 미비</li> <li>• 음이온원 기술 보완 필요</li> <li>• 해석 및 설계 기술 검증 필요</li> </ul>  |
|  | <p style="text-align: center;">한국전기연구원(3명)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 의료·산업용 MW급 마그네트론 국산화에 성공 ('21)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 출력은 MW 급이나 주파수는 실증로 기술 대비 100배 가량 낮으며 연속운전 기능 확보 안됨</li> </ul>   |
| <p style="text-align: center;">대학</p>  | <p style="text-align: center;">울산과학기술원<br/>(UNIST)(4명)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수십 kW 급 ~100GHz 자이로트론 장치 개발 성공 ('16)</li> <li>• 자이로트론 핵심 설계 코드 개발 성공 ('18)</li> <li>• 실증로급 200GHz 이상 이중 주파수 자이로트론 장치 개념 설계 및 핵심 컴포넌트 개발 진행 ('23)</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 개발된 설계코드 충분한 실험적 검증이 확보되지 않은 한계</li> <li>• 대학 실험실 수준에서 프로토타입 중심의 개발로, 실증로급인 &gt;200 GHz, 연속운전용 장치 테스트를 위한 시설부재로 개발 한계 존재</li> </ul>  |
|  | <p style="text-align: center;">서울대학교(10명)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• VEST 토카막 활용 신개념 전류구동 LHFW 실증시험 진행</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 신개념 전류구동은 실증로 적용 전 개념 실증연구 필요</li> </ul>   |

□ 인프라 현황

○ 국내 인프라 현황

| 세부시설                                      | 국내 보유 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|---|--|--|
| 실증로<br>중성입자빔<br>시험 시설                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KFE 음이온원 개발 장치                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최대 빔에너지 : 200kV (계획)</li> <li>- 최대 빔전류 : &lt; 1A</li> <li>- 최대 빔 펄스 길이 : &lt; 1초</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 음이온원 요소기술 개발 장치로 활용 가능</li> <li>• (한계) 고주파 이온원의 고주파 출력과 가속 전압 한계 (최대 30kW, 200kV, 펄스 &lt;1초). 빔수송 장치 미비(중성화 장치, 칼로리미터 등). 음이온원 개발장치를 확대하여 실증로 중성입자빔 시험 시설로 전환할 수 있음</li> </ul>                   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KAERI NBI 시험 장치                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 수소 양이온원 기반</li> <li>- 수소이온빔에너지 및 전류 : 110kV/70A</li> <li>- 최대 중성빔 출력 : 3MW</li> </ul> </li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 대용량 진공 챔버, 가속 전원 일부 및 빔 진단장치 활용을 통한 빔수송 요소 기술 개발 활용</li> <li>• (한계) 고에너지 음이온 가속 전원 미비, 가스표적 중성화기 고정</li> </ul>   |
| 전류구동용<br>EC/RF 통합<br>장치 및<br>안테나 시험<br>시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR(최종 운전목표)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 운전시간 300초</li> <li>- 자기장 3.5T (테슬라)</li> <li>- 플라즈마 전류 2MA</li> <li>- 가열능력 20MW</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 헬리콘 전류구동을 포함한 신개념 전류구동 실증 시험 및 고밀도 플라즈마 전류구동 최적화 연구 실험 장치로 반드시 필요함</li> <li>• (한계) 자기장의 한계로 인하여 높은 주파수의 고주파원 및 안테나를 시험할 수 없음. 블랭킷이 없으므로 블랭킷 호환 안테나를 시험할 수 없음. 시험 시설로서의 KSTAR는 가용성이 낮음</li> </ul> |

\* 음이온원 진단장치 개발, 음이온 발생 최적화 연구, 전자 동반 인출 저감 연구 등

○ 해외 인프라 현황

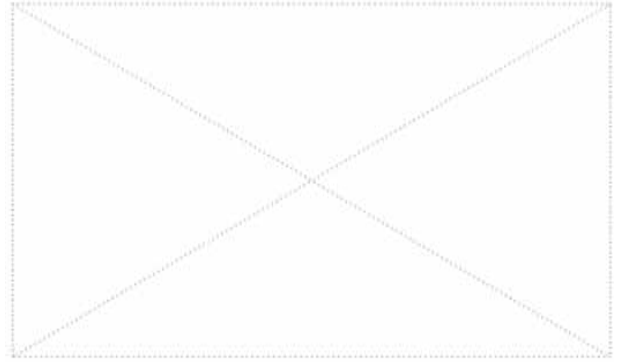
| 세부시설                  | 국외 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|-----------------------|---|--|
| 실증로<br>중성입자빔<br>시험 시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MITICA - ITER NBI 시험 시설 (이태리)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- ITER Prototype NBI</li> <li>- 빔에너지/전류: 1000kV/40A (계획)</li> <li>- 운전시간: 3600초 (계획)</li> <li>- 빔종: 수소 및 중수소</li> <li>- 중성빔 출력: 17MW</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 고전압 절연기술, 음이온원 공동 실험 등 부분적인 공동 이용 가능</li> <li>• (한계) ITER NBI 개발 전용 사양으로 빔 중성화 장치, 수송 장치가 실증로에 적용 가능성은 없음</li> </ul> |
|                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본 QST N-NBI 시험 시설                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 빔에너지/전류 : 500kV/22A</li> <li>- 운전시간 : 100초</li> <li>- 빔종 : 중수소</li> </ul> </li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 공동 연구를 수행하는 경우에도 자국의 시설 사용을 허용한 사례가 없음</li> </ul>  |

| 세부시설                                      | 국외 장치명  | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|---|---|--|
|   | - 중성빔 출력 : 10MW   |  |
| 전류구동용<br>EC/RF 통합<br>장치 및<br>안테나 시험<br>시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 러시아는 Gycom 회사에서 ITER 용 자이로트론 개발 진행 중</li> <li>- 기존 1MW 자이로트론 컨디셔닝 및 시험</li> <li>- 60kV/60A 고전압 시설, &gt; 300초</li> <li>- 자이로트론 출력: 1MW</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 자국 기업에서 생산된 자이로트론 테스트용 사이트는 외부 활용 불가</li> <li>• <b>(일부가능)</b> Gycom에서 실증로급 자이로트론 직접 구매</li> <li>• <b>(한계)</b> 자이로트론 직접 구매를 전적으로 해외 의존할 시, 향후 수리 및 가격 협상에 매우 불리함</li> </ul>  |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• EU는 FULGOR 시험시설을 완료하여 90kV/120A에서 10MW CW, 130kV/120A 5ms 미만 자이로트론 테스트 가능</li> <li>• EU는 Thales에서 ITER용 자이로트론 개발 진행중임</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 자국 기업에서 생산된 자이로트론 테스트용 사이트는 외부 활용 불가</li> <li>• <b>(일부가능)</b> Thales에서 실증로급 자이로트론 직접 구매</li> <li>• <b>(한계)</b> 자이로트론 직접 구매를 전적으로 해외 의존할 시, 향후 수리 및 가격 협상에 매우 불리함</li> </ul> |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 일본은 QST를 통하여 ITER 용 자이로트론 개발 진행하였음</li> <li>• 일본은 최근 그동안 ITER 용 자이로트론 개발에 참여하였던 자국 연구소, 대학 및 산업체 (QST, Univ. Tsukuba, Canon Electron Tubes&amp;Devices, Kyocera, JASTEC 등)과의 협력을 통하여 Kyoto Fusionering (KF) 기업 론칭하여, 향후 실증로급 자이로트론 개발을 계획하고 있음</li> <li>- QST 및 NIFS는 1MW 출력의 자이로트론 시험 가능</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 자국 기업에서 생산된 자이로트론 테스트용 사이트는 외부 활용 불가</li> <li>• <b>(일부가능)</b> KF에서 실증로급 자이로트로 직접 구매</li> <li>• <b>(한계)</b> 자이로트론 직접 구매를 전적으로 해외 의존할 시, 향후 수리 및 가격 협상에 매우 불리함</li> </ul>     |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 각 국 주요 토카막의 고주파 가열 및 전류구동 장치 시험 시설 (미국 DIII-D, 독일 ASDEX-U, 영국 JET, 중국 EAST, 일본 JT60-SA 등)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 현 시설은 해당 토카막 장치에 특화되어 있어 실증로급의 사양을 시험할 수 없음</li> <li>- 각 국은 해당국가의 실증로 사양에 맞는 시험 시설을 구축할 것으로 예측됨</li> </ul>  |

## 사. 초전도 자석

### □ 기술수준 현황

- (핵심기술 기술수준 비교) 핵심기술 중 최고기술국(EU), 대비 기술수준과 최종목표 (실증로) 대비 기술수준이 모두 높은 분야
  - 초전도 자석 분야는 최고 기술국 대비 기술수준이 72.5%이며, 최종 목표대비 기술수준은 46.3%로 분석



- (세부기술 기술수준) 세부기술별 최종목표 대비 기술수준을 살펴보면, 초전도 선재가 기술수준이 가장 높은 것으로 파악되었으며, 초전도 자석 분야의 기술수준이 낮은 상황
  - 초전도 선재는 해외 수출(DTT, 이탈리아) 등 세계 최고 수준의 특성에 근접하였으나, 초전도 도체의 경우 기존 산업체의 사업철수로 새로운 제작업체가 필요한 상황
  - 초전도 자석, 초전도 자석 기반시스템 분야의 경우 실증로급 초전도 자석 연구가 미진함에 따라 점차 격차가 발생하고 있는 것으로 파악

< 8대 핵심기술 기술수준 현황 >

< 초전도 자석 기술수준 분석결과 >

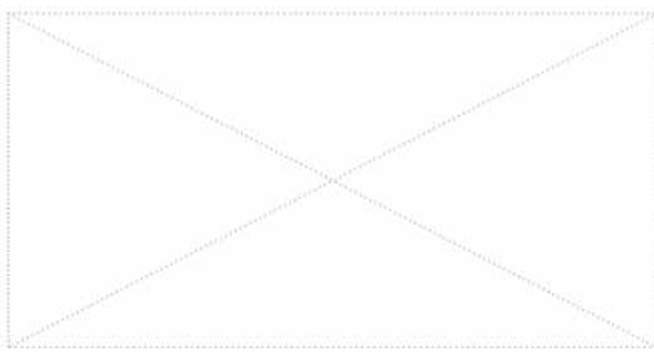
| 핵심기술         | 최고기술국 | 최종목표 대비 최고기술국 기술수준 | 최종목표 대비 한국 기술수준 | 최고기술국 대비 한국 기술수준 |
|--------------|-------|--------------------|-----------------|------------------|
| 초전도 선재       | EU    | 66.7               | 60.0            | 90.0             |
| 초전도 도체       | EU    | 71.4               | 50.0            | 70.0             |
| 초전도 자석       | EU    | 50.0               | 30.0            | 60.0             |
| 초전도 자석 기반시스템 | EU    | 64.3               | 45.0            | 70.0             |
| 초전도 자석       | EU    | 63.1               | 46.3            | 72.5             |

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

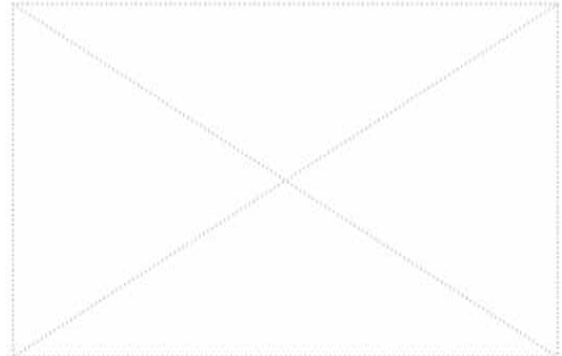


□ 특허 출원 현황

- (연도별 출원 건수) 최근 20년간 총 678건의 특허가 출원되었으며, 중국, 유럽을 중심으로 최근까지 특허 출원이 꾸준히 증가하고 있는 분야
- (국가별 비중) 중국이 가장 많은 236건(35%)의 특허를 출원하였으며, 유럽 201건(30%), 미국 118건(17%), 한국 51건(8%) 순으로 특허 출원 진행



< 연도별 출원 건수 >



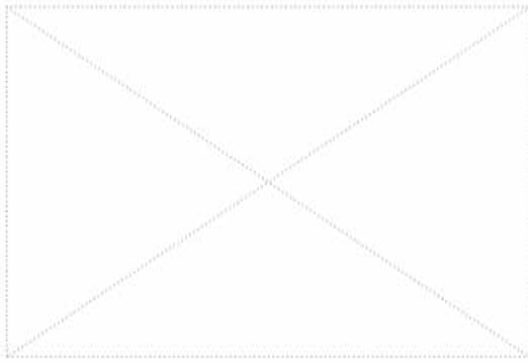
< 국가별 비중 >

- (국가별/특허청별 출원현황) 중국, 한국, 러시아의 경우 자국 특허청 위주의 특허출원을 진행 중이며, 유럽, 미국, 일본의 경우 세계 주요 특허청에 출원 진행 중

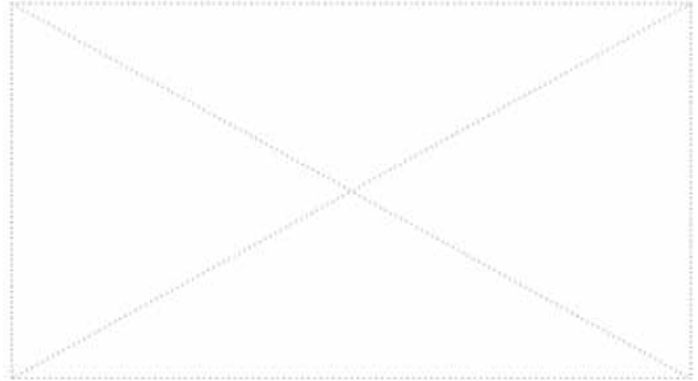
< 국가별-특허청별 출원 현황 >

| 구분 | 중국<br>특허청 | 유럽<br>특허청 | 일본<br>특허청 | 한국<br>특허청 | 러시아<br>특허청 | 미국<br>특허청 | WIPO | 기타  | 총합계  |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------|-----|------|
| CN | 92%       | 0%        | 0%        | 0%        | 1%         | 3%        | 3%   | 0%  | 100% |
| EP | 10%       | 16%       | 8%        | 10%       | 2%         | 18%       | 14%  | 21% | 100% |
| US | 7%        | 13%       | 8%        | 13%       | 1%         | 39%       | 16%  | 3%  | 100% |
| KR | 2%        | 0%        | 2%        | 86%       | 0%         | 4%        | 6%   | 0%  | 100% |
| JP | 10%       | 13%       | 29%       | 10%       | 0%         | 21%       | 15%  | 2%  | 100% |
| CA | 13%       | 13%       | 0%        | 13%       | 13%        | 19%       | 13%  | 19% | 100% |
| RU | 0%        | 0%        | 0%        | 0%        | 100%       | 0%        | 0%   | 0%  | 100% |
| 기타 | 0%        | 0%        | 0%        | 0%        | 50%        | 0%        | 0%   | 50% | 100% |

- (주요 출원인 Top 10) Tokamak Energy(영)이 가장 많은 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 HIPS(중), MIT(미) 순으로 특허를 출원하였으며, 공통적으로 최근 특허출원 집중
- Tokamak Energy(영)은 최근 고온 초전도 자석 관련 특허를 전 세계에 출원 중인 것으로 파악되고 있으며, HIPS(중)의 경우에도 최근 고온 초전도 자석 관련 특허 출원 진행 중



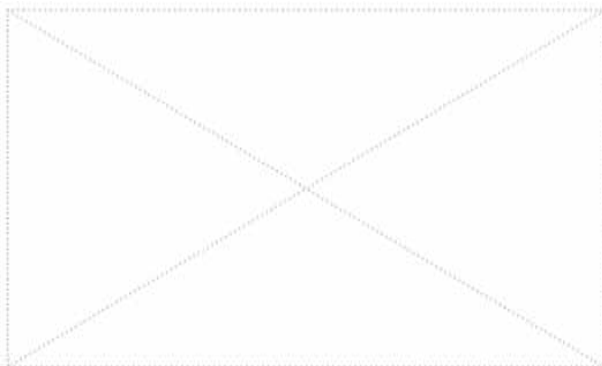
< 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >



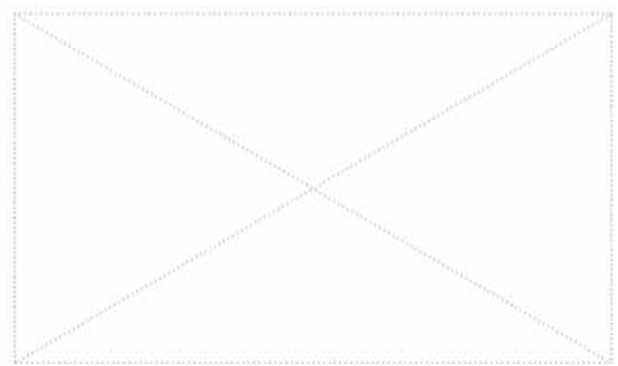
< 주요 출원인 Top 10 연도별 출원 건수 >

○ (특허경쟁력) 초전도 자석 분야는 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 분야(3사분면)이나, 최근 특허가 집중되고 있는 만큼 향후 피인용도 증가 가능성도 존재

- 국가별로 미국의 출원 특허가 경쟁력인 높은 1사분면에 위치하고 있으며, 한국은 핵심기술 중 유일하게 초전도자석 특허의 피인용도 주요국 평균 이상인 것으로 분석

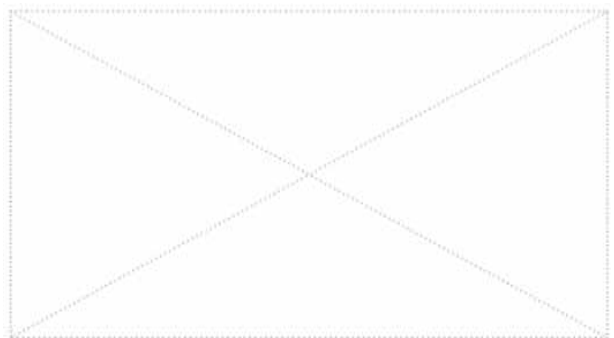


< 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

○ (특허유망성) 초전도 자석 분야는 특허점유율과 최근 10년간 특허 성장률이 높은 분야(핵심기술 중 1위)로 1사분면에 위치하고 있으며, 최근 활발한 특허활동이 진행되고 있는 분야로 파악



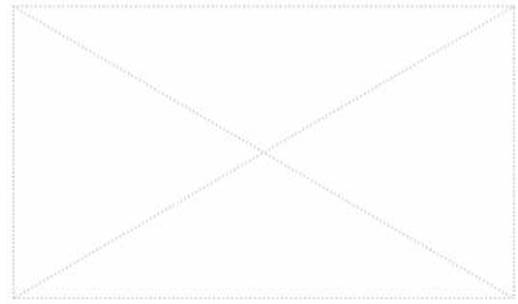
< 특허점유율 - 최근 10년 연평균 증가율 >

□ 논문게재 현황

○ (연도별 게재 건수) 초전도자석 분야는 지난 14년간 총 2,431건의 논문이 게재되었으며, 논문게재가 감소하다가 최근 다시 상승하고 있는 분야(연평균 성장률 -0.7%)



< 그림. 연도별 게재 건수 >

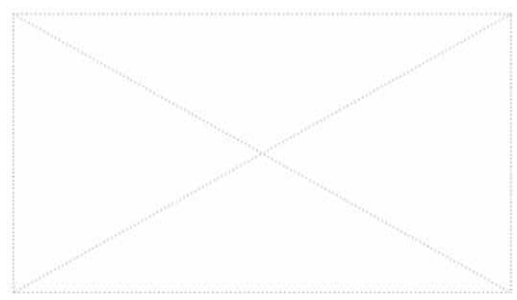


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (국가별 비중) 분석기간 동안 국가별로 미국(818건)이 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 연도별로 매년 미국이 가장 많은 논문이 발표되고 있으며, 한국은 게재 건수 6위(244건)



< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >



< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (게재 기관) 분석기간 동안 DOE(미국)에서 가장 많은 417건의 논문이 발표되었으며, 그 뒤로 CERN(스위스, 355건), CAS(중국, 268건)의 비중이 높고, 한국의 KFE는 29위(59건)
- (피인용도) 논문 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 네덜란드이며, 미국, 프랑스, 스위스가 논문의 질적수준과 게재건수가 모두 높은 1사분면에 위치하는 것으로 분석. 한국은 피인용도는 높으나 게재건수가 낮은 2사분면에 위치



< 그림. 국가별 연도별 피인용도 분석 >



< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

□ 연구그룹 현황

| 기관 분류 |                 | 주요 연구내용(성과)  | 실증로 기술 대비 한계점  |
|-------|-----------------|--|--|
| 연구원   | 한국핵융합에너지연구원(8명) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR 초전도 자석 제작('06), 운영 및 ITER 초전도 자석 조달 완료('14)</li> <li>• 핵융합(연)에서 K DEMO CSR 초전도 자석 설계('19) 및 KSTAR 초전도 자석 해석 코드 개발('21)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 저온 초전도체를 이용한 16 T급, DEMO 초전도 자석 개발은 기존 기술의 한계치에 있는 13 T급, ITER 초전도 자석 기술의 연장선에 있지 않기에 새로운 고자장용 저온 초전도 선재개발 및 이를 활용한 도체 연구 등 R&amp;D 필요</li> </ul> |
| 대학    | 서울대학교(11명)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 무절연 고온초전도 자석 활용 45.5 T 세계 최고 자기장 달성('19)</li> </ul>   |  |
|       | 한국에너지공과대학교(7명)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 초전도 도체 시험설비 구축 진행('22부터)</li> </ul>   |  |
| 기업    | KAT             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER급 초전도 선재 개발, 조달 완료('14)</li> </ul>  |  |
|       | 서남              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고온초전도 선재 활용 송전 케이블 상용화 성공('19)</li> </ul>   |  |

□ 인프라 현황

○ 국내 인프라 현황

| 세부시설        | 국내 보유 장치명   | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|-------------|---|--|
| 초전도 도체 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 한국에너지공과대학교-초전도 도체 시험시설</li> <li>- 최대자장 : 수직방향 15T</li> <li>- 최대인가전류 : 100kA</li> <li>- 측정가능온도 : 4.2 ~ 20K</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (가능) 구축이 완료되면 많은 도체 시험이 수행될 예정</li> </ul> |
| 초전도 자석 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR 건설 중에 일시적으로 운영되기도 했으나 현재는 없어진 상태임</li> <li>- 대형자석 권선기 : 4m 이상</li> <li>- 열처리로 : 800 °C 이상</li> <li>- 측정용 cryostat : 4m 이상</li> <li>- 측정용 전원 : 35kA 이상</li> </ul> | -  |

○ 해외 인프라 현황

| 세부시설        | 국외 장치명   | 활용가능 여부 및 불가 사유  |
|-------------|--|--|
| 초전도 도체 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• EU에서는 스위스 SPC의 SULTAN 시설 및 CERN의 FRESCA 등의 시설을 운영 중이며 특히 SULTAN 시설은 ITER 도체 시험 평가에 중요한 역할을 함</li> <li>• SULTAN               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최대자장 : 수직방향 12T</li> <li>- 최대인가전류 : 100kA</li> <li>- 측정가능온도 : 4.2 ~ 20K</li> </ul> </li> <li>• FRESCA               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최대자장 : 수평방향 12T</li> <li>- 최대인가전류 : 100kA</li> <li>- 측정가능온도 : 4.2 ~ 20K</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> FRESCA 시설은 핵융합로용 도체 시험에는 부적절하고 SULTAN 시설은 자장이 12 T 이하인 시험만 가능</li> <li>• <b>(한계)</b> SULTAN 시설은 자장의 한계 외에도 사용 시간 예약이 어려운 상황임</li> </ul> |
|             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 최근 페르미 랩 (FNAL) 및 로렌스 버클리 랩 (LBNL)에서는 EU와의 협력으로 고온초전도 도체 평가도 가능한 15T, 100kA급 시험 시설, HFVMTF (High Field Vertical Magnet Test Facility)을 공동으로 구축하고 운영 예정</li> <li>- 최대자장 : 수직방향 15T</li> <li>- 최대인가전류 : 100kA</li> <li>- 측정가능온도 : 4.2 ~ 20K</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(일부가능)</b> HFVMTF 시설은 핵융합로용 도체가 아닌 가속기용 도체로 제작되어 초기 운영 중</li> </ul>  |
| 초전도 자석 시험시설 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국 CFS (Commonwealth Fusion Systems)에서는 고온초전도 자석 시험시설을 구축하고 2021년 SPARC 사양의 20 T급 시험용 코일의 제작 및 평가에 성공</li> <li>- 측정용 cryostat : 2m 이상</li> <li>- 측정용 전원 : 50kA 이상</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>(불가)</b> 초전도 자석 시험시설은 자석 제작과 관련되어 여러 기밀 사항과 관련되어 있어 해당 기관에서 독점적으로 사용하기에 사용이 불가함</li> </ul>   |

## (2) 핵심기술별 주요 이슈 등 리스크 분석

### 가. 노심 플라즈마

#### □ 주요이슈사항

- 실증로 건설 단계에 진입하기 위해 필수적인 다양한 공학적 기술의 한계를 실험하고 확보하는 것을 목표
- ITER의 본격적인 D-T 운전을 통한 실증로의 구체적인 청사진 제시를 위해 KSTAR와 같은 장시간 운전이 가능한 초전도 토카막 장치의 중요성이 대두
- ITER 장치는 연소 플라즈마의 특징을 알아내기 위한 장치이나 실증로 사이의 노심 성능 간격을 메우기 위한 노심 운전 기술 확보 필요
- 실증로에서는 기존의 상용 발전로 수준으로 외부 개입이 최소화된 상태에서 안정적으로 고성능 노심 플라즈마를 유지해야 하는 운전기술 필요
- 연소플라즈마 환경을 고려한 진단 센서 요구사항 및 중성자 영향평가 설비 부재
- 실증용 센서들에 요구되는 불확도 수준이 명확하지 않으며, 노심 관련 간접 데이터만으로 토카막 운전이 가능한지 미검증
- 연소플라즈마 환경을 고려한 진단계 구조물 및 필수부품 요구사항 도출과, in-situ 진단계 통 보정방법론 확립 필요. 연소플라즈마 실시간 진단계 성능평가 기법 및 필요 환경(요구되는 환경)의 부재
- 현재 확보된 시뮬레이션 기술은 KSTAR, DIII-D, JET 규모의 중대형 토카막 실험 결과를 토대로 검증이 완료 혹은 진행 중인 상황으로, 핵융합 플라즈마가 연소 조건에 접근함에 (예를 들어 높은 고속이온 압력, 높은 전자와 이온 온도 비율 등) 다른 물성을 보이는 경향을 보임을 고려하여 시뮬레이션 기술을 수정, 확장할 필요
  - ITER 연소 실험을 통한 데이터 확보와 더불어, 궁극적으로 ITER와 핵융합 실증로 노심 플라즈마의 차이를 반영하여 실증로 성능을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술 확장 필요
- 핵융합 실증로 규모로 시뮬레이션의 시공간적 규모가 확대될 필요가 있으며, 이에 비례한 시뮬레이션 규모 증가를 극복하기 위해 극한 스케일 병렬 시뮬레이션 개발 필요
- 핵융합 실증로 설계를 위해서는 현재 독립된 형태로 개발 중인 여러 시뮬레이션 기술을 통합하여 활용할 필요. 특히 상세 공학 설계를 위한 노심의 물리 조건 도출에 활용할 수 있는 통합 설계 체계 확보 필요.

#### □ 기술 확보 리스크 및 해결방안

- MHD, ELM, 플라즈마 붕괴 등 아직 해결 과정에 있는 물리현상이 상당 부분 존재하며, 장시간  $\beta_N > 3$  성능 유지는 현재로서도 도전적인 연구 영역에 해당
- 고성능 플라즈마 열속 유지에 충분한 대면 소재와 제어 기술을 확보하기 위한 경험과 환경이 부족
- KSTAR-ITER의 상호보완적인 목표 성능을 실증로에서 통합 구현해야 하는 과정이 존재하며, 이를 설계 단계부터 반영하기 위한 기술 경험이 제한적
- 매우 복잡한 국제관계 등에 의해 전체적인 로드맵에 시간적 간극이 발생할 가능성이 상존
- 장기간 연구개발 로드맵상 숙련된 연구인력의 세대교체가 불가피하며, 고도로 훈련된 전문 연구 인력 수급에 차질이 발생할 가능성이 높음

| 세계부기술                                  | 기술확보 리스크  | 해결 방안   |
|--|---|---|
| 차세대<br>고출력<br>플라즈마<br>운전<br>시나리오<br>개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MHD, ELM, 붕괴 등 해결 과정에 있는 물리 현상이 상당 부분 존재</li> <li>• 장시간 고성능 정상상태 유지 기술을 주도하고 있으나 여전히 도전적인 연구 과제로 분류</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 금속 내벽에서의 다양한 고성능 장시간 시나리오 실험 연구 역량 확보</li> <li>• 다양한 예측 모델링과 실시간 ELM-free 제어, 플라즈마 입력성능 제어, 플라즈마 코어-엣지 통합성능 제어 등 고성능 플라즈마 운전 기술 구현</li> <li>• 인공지능, 머신러닝 등의 최신 IT 기법 응용 기술 확보</li> </ul> |
| 정상상태<br>연소<br>플라즈마<br>구현 및 제어          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Q~5 정상상태 운전에서도 <math>\beta_N</math> 운전성능은 2.6 정도로 제한될 것으로 보여 경제성 확보를 위한 기술 간극 확보 필요</li> <li>• ITER국제기구 내의 주도적 연구 역량 발휘와 선도기술 확보를 위한 경쟁</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR를 활용하여 <math>f_{NI}=1</math>에 기반한 <math>\beta_N \sim 3.5</math> 급 고성능 장시간 운전시나리오 확보</li> <li>• KSTAR에서의 강화된 국내외 연구협력과 선도적인 연구성과 창출을 통해 국제적 연구 역량을 지속적으로 확보</li> </ul>               |
| 실증로<br>통합 제어                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR, ITER 등에서 얻은 상호보완적인 성능 지표를 통합하기 위한 노력이 설계 단계부터 반영되기 위한 경험 부족</li> <li>• 국제관계 등 통제하기 어려운 불확실성에 기인한 선행기술 확보 지연</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고도의 예측 시뮬레이션 및 실험적 구현 기술의 경험치를 충분히 확보</li> <li>• KSTAR의 선도적 역량을 활용하여 장기간에 걸친 로드맵의 시간적 변수에 유연하게 대응</li> </ul>   |
| 실증로 운전<br>시나리오<br>개발                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 충분한 D-T 실험 경험과 결과 부족</li> <li>• 장기간의 연구개발 로드맵상 숙련된 연구인력의 세대교체와 고도로 훈련된 전문 연구 인력 수급</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 국제공동연구에서의 주도적 역할을 통한 충분한 경험과 데이터 획득</li> <li>• KSTAR 및 ITER에서의 체계적인 전문인력 양성 및 확보된 선도기술의 실용화</li> </ul>  |
| 연소<br>플라즈마                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 연소플라즈마 관련 실측 데이터 부재로 인한 센서 요구사항 등의 불확실성</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 센서 요구조건을 보수적으로 제시</li> <li>• 중성자원 설비 건설 및 기존 중성자원 활용</li> </ul>  |

| 세세부기술                    | 기술확보 리스크  | 해결 방안   |
|--------------------------|---|---|
| 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증용 센서 성능평가를 위한 중성자원 설비 부재</li> <li>• 전문 인력 부족 및 티분야로 유출</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 전문인력양성 프로그램 운영</li> </ul>  |
| 데이터 통합 분석 기술             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• IMAS와 데이터 통합 모델에 요구되는 큰 규모의 컴퓨팅 리소스</li> <li>• 노심 물성 관련 간접데이터 기반의 실증로 운전 성능의 제약</li> <li>• 전문 인력 부족 및 티분야로 유출</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KFE의 고성능 컴퓨터 활용</li> <li>• 인공지능 반도체 기술 활용</li> <li>• 간접데이터 기반 운전 성능(operation space 포함)의 한계를 확장하기 위하여 실증로에 활용될 수 있는 노심 물성 측정 진단계 고려</li> <li>• 전문인력양성 프로그램 운영</li> </ul> |
| 실증로 진단 계통 제작, 설치, 운영 기술  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 연소플라즈마 관련 실측 데이터 부재로 인한 진단계 구조물 및 필수부품 요구사항 등의 불확실성</li> <li>• In-situ 제약 조건으로 인한 진단계 보정 방법론 한정</li> <li>• 전문 인력 부족 및 티분야로 유출</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 진단계 구조물 및 필수부품 요구조건을 보수적으로 제시</li> <li>• In-situ 보정의 제한성을 극복하기 위한 유사한 물리값을 측정할 수 있는 이종진단계 적극 활용</li> <li>• 전문인력양성 프로그램 운영</li> </ul>                                     |
| 토크막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 통합 시뮬레이션에 적합한 속도, 효율성과 정확성을 동시에 갖춘 모듈 개발의 어려움</li> <li>• 고도로 복잡한 체계를 갖는 통합 시뮬레이션과 설계 데이터를 연계하는 기술적 어려움</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 전통적인 축약 모델 개발 활용에 병행하여 AI/ML 기술을 활용한 모듈 고속화 기술개발 및 적용 확대</li> <li>• 디지털 트윈 기술을 적용하여 설계 데이터의 가상화 및 시뮬레이션 활용 효율화와 체계화 고도화 추구</li> </ul>                                    |
| 플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 시뮬레이션 검증에 필요한 연소 조건 실험 데이터 확보의 어려움</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ITER 연소 실험 결과 확보 및 활용</li> <li>• 플라즈마 성능 및 안정성을 결정하는 핵심 물리현상 분석을 위해 최신 진단 개발과 KSTAR 적용, 관련 데이터 확보</li> </ul>   |
| 플라즈마 안정성 시뮬레이션 기술        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로 조건을 다루는데 필요한 극한 스케일 병렬 시뮬레이션 기술의 어려움</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• CPU/GPU 하이브리드 구조의 극한 병렬 컴퓨팅 자원 확보로 계산 규모 증가에 따른 자원 및 비용 증가 억제</li> </ul>   |
| 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 극한 스케일 병렬 시뮬레이션을 수행할 초고성능 컴퓨터 자원 확보의 어려움</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 정부가 추진하는 초고성능컴퓨팅 전문센터 정책과 연계하여 자원 및 인력 확보 추진</li> </ul>  |



## 나. 증식블랑켓

### □ 주요이슈사항

- 열수력·구조·전자기 등의 하중해석은 상업용 코드가 활용되고 있어 추가 개발없이 지속적인 활용 가능하지만 일부 핵융합 하중 특성 검증 필요
- 단일·복합하중 해석을 위해 다양한 부분의 설계코드를 개발하고, 코드 간 결과를 이용한 연계해석과 반복적 설계 최적화 진행이 필요함에 따라, 초기부터 연계성을 고려한 개발이 중요
  - \* 다양한 코드가 활용됨에 따라, 체계적인 코드개발/검증/DB구축 등 관리 필요
- 실증로 안전 인허가를 위해 정상상태뿐만 아니라 사고 시 다층적인 안전이 담보되었음을 증명하는 것이 필수적이며, 이를 위해 인허가 대응을 고려한 안전해석 코드의 개발과 적절한 검증 필요
- 핵융합 시설에 직접적 활용을 위해 핵융합 반응에 의한 고에너지(14 MeV) 중성자 해석에 적합한 코드 개발과 핵반응 단면적 등 라이브러리 관리 필요
- 계통안전해석 코드는 TBM 과제 내에서 ITER 운전조건이나 시설에 국한되어 개발되고 있어, 향후 실증로나 핵융합로 개발에는 구조재·기능소재·냉각재 간 반응모델, 분진 생산 및 이송, 각종 기기 모델 등 핵융합 고유의 해석 기능 추가 및 검증 필요
- ITER TBM 안전해석에 활용하기 위해 코드 검증이 수행 중이나, 코드 간 비교를 통한 검증에 그치고 있어, 실험 수행과 병행된 다양한 검증이 추가적으로 필요
- 블랑켓 성능 및 요건에 맞는 설계와 부품의 제작 가능성·절차는 지속적인 정보교류를 통해 반복적인 업데이트 필요
- 산업기술기준에 부합하는 실증로급 대형 증식블랑켓 제작 절차 및 방법 개발 필요하며, 이를 위해 목업 제작을 통한 제작법 검증, 건전성 및 성능 평가를 위한 장치 및 기술 확립 선행 필요
- 증식블랑켓은 방사화 환경에 노출됨에 따라, 대형·대량의 블랑켓 교체 및 계통 유지보수를 신속히 수행하기 위한 기술개발 필요
  - \* 과도한 고에너지 중성자가 조사됨에 따라, 심각한 열화가 발생하기 이전에 실증로 블랑켓 교체 필요
- 고체의 표면에서 해리, 흡착, 확산, 재결합 등의 과정을 거쳐 구조재 반대편으로 침투하는 수소동위원소의 특성으로 인해 고온으로 운전되는 블랑켓에서 생산된 삼중수소 등 수소동위원소는 냉각계통 및 계통 파이프에 침투 가능성 존재
- 실증로에서 블랑켓의 가동률 예측을 위해 계통 핵심기기의 고장률, 교체 및 수리시간 등

신뢰도 분석을 위한 데이터 구축 필요, 또한, 가동률을 향상시키기 위해 신뢰도 및 장기운전 노하우 확보 필요

□ 기술 확보 리스크 및 해결방안

- 핵융합 분야의 전략기술 중 하나로서, 국제협력 상의 한계가 존재하고 지나치게 해외의존 시 기술종속 우려
- 비교적 단기간에 개발이 가능하지만, 검증·인허가 및 활용을 통한 오류 확인과정이나 실험적 검증에 장기 투자가 필요하므로, 타 분야 대비 조기 개발 착수
- 개별 주체별로 코드를 개발할 경우, 코드 간 연계성이 부족해질 수 있으므로, 개발 초기부터 인터페이스를 고려한 개발 추진
- 핵융합 분야 전문인력이 부족함에 따라, 고온·고압·경수로 분야 연구사업, 핵융합 분야 실증로 기반사업 및 ITER TBM 사업에서 일부 개발·활용·검증 경험을 보유한 외부 전문그룹 인력 활용
- 기존 소형 블랑켓 단품 제작기술 경험을 활용하고, 대형 블랑켓 제작 기술을 보유한 주요 국과 공동연구 수행 등을 통해 노하우 축적 및 기술확보
- 개발기술의 성능평가 및 검증을 위한 인프라 부족에 따라, 인프라 구축을 위해 유관시설 및 국제협력 등을 추진

| 세세부기술             | 기술확보 리스크  | 해결 방안  |
|-------------------|---|--|
| 설계코드 개발 및 통합체계 구축 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵해석 분야 코드에 대한 외국 코드 도입은 가능할 수 있으나, 해외의존시 기술종속 우려에 따른 국제협력 한계 존재</li> <li>• 개발/검증/인허가 경험 등 장기간 소요</li> <li>• 전문인력 부족</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 산학연 협력을 통한 유관분야 코드 등을 활용하여 자체 개발 추진</li> <li>• 조기 개발과 검증을 위한 장치 구축</li> <li>• 유관분야 경험을 보유한 외부 전문그룹 인력 활용</li> </ul>                     |
| 계통·안전해석 코드 개발     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국외 의존시 고유 실증로 개발에 따른 문제 해결 제한 예상<br/>* 원자력 사례 참조</li> <li>• 개발/검증/인허가 경험 등 장기간 소요</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고유 설계 및 코드 개발, 장치 구축을 통한 검증 등 독자 개발의 조기 추진</li> </ul>   |
| 블랑켓 제작 및 검증기술 개발  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 대형 증식유닛 제작 기술 및 경험 부족</li> <li>• 기존 TBM 중소형목업 제작을 출연연 중심으로 진행함에 따라, 대형 블랑켓 제작 관련 산업기준 확립에 필</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 소형 블랑켓 단품 제작기술 경험을 활용한 국외 기술 벤치마킹 등을 통해 대형 블랑켓 제작기술 개발</li> <li>• 설계안 수립과 병행하되 TBM 등 기존 경험을 바탕으로 제작 후 보안을 선출하고, 산업계와의 협력을 통해</li> </ul> |

| 세세부기술                | 기술확보 리스크  | 해결 방안   |
|----------------------|---|---|
|                      | 요한 산업체 참여 경험 및 역량 부족                                      | 산업기준확립<br>• 기술 개발 및 목업 제작 시 국내 산업체와 적극 협력하여 추후 실증로 블랑켓 제작에 대비             |
| 블랑켓 건전성 및 성능 평가기술 개발 | • 대형 목업 시험 경험 부족  | • TBM 및 ITER 일차벽 개발 과정에서 확보한 소형목업 평가 기술을 기반으로 대형 장치 구축과 대형목업 시험을 연계해 기술개발 |
| 블랑켓 유지보수 기술 개발       | • 대형, 고정밀 및 내방사화 등 핵융합에 특화된 유지보수 기술 부족                    | • 산업용 로봇 기술 및 원자력 유지보수 개념 활용 가능성 검토와 이를 기반으로 개발                           |
|                      | • 개발된 유지보수 장치의 성능 검증 한계 존재                                | • 실증로급의 목업을 이용한 대형 유지보수 성능 검증   |
| 블랑켓 연료추출 기술개발        | • 통합공정 성능평가 및 안전성 검증을 위한 인프라 부재                           | • 특성평가 시스템 인프라 확보 및 이를 이용한 기술 개발  |
|                      | • 기존에는 수소를 이용한 공정평가에 국한되어 있어, 삼중수소에 대한 추가적인 검증 필요         | • 중성자원과 연계된 연료추출계통 확보 및 이를 이용한 기술 검증                                      |
|                      | • 확산기, 전기화학적 수소 펌프 등 새로운 기술의 저농도 수소동위원소 적용 가능성 평가 부족      | • 새로운 재료의 멤브레인 적용한 확산기 등 (준)연속 운전에 적합한 기기 개발                              |
|                      | • 개발된 핵심기기의 정상운전 및 사고시 안전성 평가 경험 부족                       | • 안전성 평가 인프라 확보 및 이를 이용한 기술개발   |
| 블랑켓 냉각기술 개발          | • 대량의 냉각재 정제 공정 연구 및 경험 미비                                | • TBM 냉각재 정제시스템에 제안된 공정 검토 및 공정 최적화, 새로운 공정 개발 및 검증                       |
|                      | • 주로 정상운전에 대한 공정평가를 수행하고 있으나, 사고를 비롯한 비정상 운전에 대한 공정 평가 부족 | • 블랑켓 및 냉각계통이 연계된 안정성 평가 시설 구축  |
|                      | • 개발된 핵심기기의 정상운전 및 사고시 안전성 평가                             | • 안전성 평가 인프라 확보 및 이를 이용한 기술 개발  |
| 블랑켓 계통 운전기술 개발       | • 가동률 평가를 위한 데이터베이스 미비                                    | • 데이터베이스 확보를 위한 노력 경주 및 선진기관과의 교류를 통한 데이터베이스 확보                           |
|                      | • 신 제작기술이 적용된 블랑켓 본체 및                                    | • 안전성 평가 인프라 및 평가시스템 구축   |

| 세세부기술 | 기술확보 리스크   | 해결 방안   |
|-------|--|---|
|       | 계통 기기의 가동률 평가를 위한 데이터베이스 부재  | 을 통한 데이터베이스 구축  |
|       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 신규 개발 안전/보호기기의 성능/신뢰도 검증할 인프라 부재</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 증식시험시설 및 안전성 평가 장치를 통해 안전·보호 기기 성능·신뢰도 검증</li> </ul> |

## 다. 핵융합 소재

### □ 주요이슈사항

- 토카막에서 내벽부품용 소재로 가장 많이 사용되는 저방사화 철강재의 대량제조기술 개발 및 제조 공정 확립 필요
  - 핵융합로에서 고준위 방사성 폐기물을 최소화 하기 위해서는 토카막에서 가장 많이 사용되는 철강재의 저방사화가 필수이며, 철강재에서 저방사화를 구현하기 위해 반감기가 긴 장주기 핵종 분출물의 엄격한 관리 필요
  - 실험실 및 소규모 제조 단계에서는 핵융합로용 철강재의 저방사화가 비교적 용이하게 달성되었으나 대량 제조 공정에서의 재현에 한계가 존재함에 따라, 저방사화 철강재의 대량 제조 기술 개발 및 제조 공정 확립 필요
- 저방사화 철강재의 판재 제조기술 외에 각종 부품 제작에 필요한 파이프, 볼트, 너트 등과 같은 다양한 형상 제조 기술 개발 수행 필요
  - 핵융합로의 증식블랑켓 및 디버터 등의 내벽부품을 저방사화 철강재로 제작하기 위해 판재 뿐만 아니라 파이프, 볼트, 너트 등과 같은 다양한 형상의 저방사화 철강재 필요
- 저방사화 철강재 판재를 이용하여 부품을 제작할 경우 용접은 필수 공정
  - 저방사화 철강재의 용접에 사용되는 용접봉 역시 저방사화 특성을 지녀야 하며, 모재에 따른 적절한 용접봉 개발 필요
  - 또한, 용접봉을 사용하지 않는 전자빔 또는 레이저 용접의 경우에도 용접재의 특성이 모재와 동등한 용접재가 될 수 있도록 용접 조건 설정 요구
- 복잡한 구조와 형상의 경우 용접 공정을 적용하기 어려운 부분은 접합을 통해 제작이 진행되어야 하므로 저방사화 철강재의 접합기술 개발필요
  - 핵융합로용 내벽부품인 증식블랑켓, 디버터 등은 매우 복잡한 구조와 형상으로 설계
- 생성된 삼중수소의 외부 누출을 방지하여 삼중수소를 확보하고 안전을 유지하기 위해 구조재에 삼중수소 투과 방지 코팅기술 필요
  - 증식블랑켓은 핵융합의 연료가 되는 삼중수소를 생산하는 역할 담당
  - 증식블랑켓 내부에서 생성된 삼중수소는 증식블랑켓의 구조재인 저방사화 철강재를 투과하여 냉각재 및 외부로 누출될 가능성 존재
- ARAA를 핵융합로용 각종 내벽부품으로 활용하기 위해 ARAA 설계에 필요한 장단기 물성 평가 필요
  - 핵융합로 내벽부품용 구조재로 한국형 저방사화 철강재인 ARAA가 개발되었지만, ARAA

- 를 이용한 각종 부품 설계를 위해 새롭게 제조되는 ARAA 물성이 필요
- 또한, 추가 개발할 ARAA에 대한 성능 및 품질 검증을 위해서는 ARAA의 기준 물성 필요
  - ARAA의 기본적인 물리적·화학적·열적·기계적 물성뿐만 아니라 시간에 따라 변하는 장기 기계적 물성을 포함한 전반적인 ARAA 물성 데이터베이스 구축 요구
  - 핵융합로 내벽부품의 안전성을 확보하기 위해서는 중성자 조사에 의한 ARAA 물성 변화를 정확하게 평가 필요
    - ARAA가 사용되는 핵융합로 내벽부품은 핵융합 플라즈마로부터 발생하는 중성자의 조사를 받는 환경
    - 따라서 핵융합로 내벽부품의 안전성을 확보하기 위해서는 중성자 조사에 의한 ARAA의 물성 변화의 정확한 평가 필요
  - ARAA의 조사손상의 정확한 평가를 위해서는 중성자원 활용 조사재 물성 평가 필요
    - 핵융합 플라즈마에서 발생하는 중성자는 약 14 MeV의 높은 에너지를 보유함에 따라, 구조재의 원자 배열을 흐트러뜨리는 것 외에도 구조재와의 핵반응에 의해 헬륨을 생성
    - 구조재 내부에 생성된 헬륨은 구조재의 물성을 변화시키게 되므로 핵융합로용 구조재인 ARAA의 조사손상을 정확히 평가하기 위해서는 고에너지 중성자에 조사된 조사재의 물성 평가 필요
  - 플라즈마 대면재의 기계적 특성 보안을 위해 제조공정개선 및 변화를 통해 높은 인성을 가진 텅스텐 제조기술 개발 필요
  - 텅스텐과 저방사화 철강재를 접합하기 위해 적절한 중간재의 선택 및 접합 조건의 최적화가 요구
  - 텅스텐은 반복적인 부하와 입자와의 충돌에 의해 피로균열 발생 및 침식 현상이 발생하게 되는데, 대면재인 텅스텐의 손상 정도에 따라서 증식블랑켓과 디버터의 사용 수명이 결정될 수 있는 중요한 요인
  - 텅스텐이 중성자에 의해 조사를 받게 되면 결함이 발생하게 되고 그로 인해 미세구조 변화 및 물성 변화를 초래하게 됨에 따라, 대면재 부품의 안전성을 평가하기 위한 정확한 물성 평가 필요
  - 증식재와 증배재는 우수한 삼중수소 증식 성능 및 중성자 증배 성능이 요구됨에 따라, 기능소재의 안정성을 위해 고결정성을 가진 리튬 화합물 및 베릴륨 화합물 합성기술 개발 필요
  - 핵융합 플라즈마에서 발생하는 중성자와 반응하여 삼중수소 증식성능 향상을 위해 리튬 동위원소 중 하나인 Li-6가 농축된 리튬 화합물 원료 필요

- 핵융합 실증로 증식블랑켓에는 수십톤 규모의 리튬 세라믹스 페블이 사용될 예정으로 페블 대량생산 기술 개발도 반드시 필요
- 증식블랑켓의 기능소재는 페블베드 형태로 사용되므로 페블 뿐만 아니라 페블베드 형태의 물성값 측정이 요구

□ 기술 확보 리스크 및 해결방안

| 세세부기술                   | 기술확보 리스크                                       | 해결 방안                                  |
|-------------------------|--|--|
| 저방사화 구조재 제조기술 개발        | • 대량제조를 위한 연구 부재                               | • 산업체의 협력을 위한 과제 발굴                    |
| 저방사화 구조재 용접 및 접합 기술개발   | • 저방사화 철강재에 적합한 TIG 용접기술개발 관련 인프라 부족           | • 관련 인프라 구축 등을 통한 대학 및 산업체와의 연계협력      |
| 저방사화 구조재 물성 DB 구축 및 표준화 | • 연구용 원자로 하나로의 불안정한 운영                         | • 최대한 하나로를 활용하되, 해외 사용 가능한 연구용 원자로와 협력 |
|                         | • 고에너지 중성자원 인프라 부재                             | • 고에너지 중성자원 인프라 구축                     |
| 고인성 대면재 제조기술 개발         | • 핵융합 환경을 모사하기 위한 고열부하 및 고입자속 시험시설의 부재 및 성능 미달 | • 국내 인프라 구축을 통한 연구개발 수행                |
| 대면재 물성 DB 구축            | • 특성평가 시험시설 부재에 따른 연구 수행 한계                    | • 특성평가 시험시설 인프라 확보                     |
| 기능소재 원료 확보 기술 개발        | • 베릴륨 취급시설 미확보                                 | • 국내 베릴륨 취급시설 구축                       |
|                         | • 리튬 동위원소 분리·농축 기술 정보 제한                       | • 독자적인 기술개발을 통한 원천기술 확보                |
| 기능소재 제조기술 개발            | • 베릴륨 관련 연구 경험부족 및 취급시설 부재                     | • 지속적인 정보수집 및 시험시설 확보                  |
| 기능소재 물성 DB 구축 및 성능 검증   | • 국내 기능소재 성능검증 시험시설 부재에 따른 추가기술확보의 한계 존재       | • 기능소재 성능검증 인프라 확보<br>• 해외 인프라 활용      |

## 라. 연료주기

### □ 주요이슈사항

- 핵융합 실증로에서 대량의 삼중수소를 사용할 예정임으로, 운전자와 환경의 절대적인 안전 확보를 위한 핵융합 연료주기 기술 필요
- 미량 삼중수소 회수는 환경 및 작업자를 보호하고 핵융합 연료로 삼중수소 사용이 지속 가능하도록 함.
- 핵융합 연료의 사용부터 환경방출 방지 확인을 위한 광범위한 삼중수소 분석이 필수적이며, 핵융합 발전의 연속운전이 가능하도록 분석 방법이 개발되어야 함.
- 핵융합 실증로에서 대량의 삼중수소를 사용할 예정임으로, 운전자와 환경의 절대적인 안전 확보를 위한 핵융합 연료주기 기술 필요
- 핵융합 연료로 사용되는 고농도 삼중수소를 취급하는 기술은 각국이 수출통제를 통해 기술의 상세한 사항을 파악하기에 어려움이 있음. 향후 안정적인 실증로 및 상용로 개발을 위해 삼중수소 취급 기술의 국산화가 반드시 필요함.
- 삼중수소 취급을 위해서는 환경 및 작업자의 안전 확보가 필수적이며, 이를 위해 소량 삼중수소 취급 경험 축적을 통해 대량 삼중수소 취급 시스템을 안전하게 운전할 수 있는 설계에 반영해야 함.
- 원활한 핵융합 반응을 위해 연료로 사용되는 중수소 및 삼중수소뿐만 아니라, 반응 제어에 사용되는 여러 물질은 기체 형태로 초기 공급
- 안정적인 핵융합 반응을 지속하기 위해 토카막 반응기의 경우 플라즈마 자기 가둠 기술을 활용하고, 자기 가둠 벽을 관통하여 연료를 공급하기 위해 초저온 고체 상태의 중수소, 삼중수소를 만들어 고속으로 반응 내로 공급
- 핵융합 실증로에 적용할 연속운전이 가능하고 대량의 삼중수소를 포함한 수소동위원소를 안정적으로 진공배기할 기기 및 시스템이 필요
- EU 실증로 연료주기는 개발 중인 Metal Foil Pump 등을 통해 DIR 개념을 실현할 계획임. 개념적으로 삼중수소 재고량 감축이 가능할 것으로 예상되지만, 기술의 안정성 및 성숙도가 아직 미진한 것으로 평가됨.

### □ 기술 확보 리스크 및 해결방안

| 세세부기술           | 기술확보 리스크   | 해결 방안   |
|-----------------|--|---|
| 대량 삼중수소 취급 안전기술 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 삼중수소 취급 시스템 개발 경험 부족</li> <li>• 삼중수소 취급 기술은 수출입 통제 대</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 월성 TRF 설계, 운전 경험 기반 자체 기술 개발</li> <li>• 선행 기술 추적 및 실험적 수치적 검</li> </ul> |



| 세세부기술                           | 기술확보 리스크                                      | 해결 방안  |
|---------------------------------|---|--|
| 개발                              | 상으로 도입 기술의 확대 응용 상 한계 존재                      | 증 수행   |
| 삼중수소 플랜트 공정가스 분석 및 환경시료 측정기술 개발 | • 삼중수소 취급 경험 부족                               | • 국내 월성 TRF 설계, 운전 경험 기반 자체 기술 개발                    |
|                                 | • 삼중수소 안전 취급 독자 기술 부족                         | • 원전 관련 안전기술 도입 및 대량 삼중수소 취급 안전 기술 자체 개발             |
|                                 | • 삼중수소 취급 기술은 수출입 통제 대상으로 도입 기술의 확대 응용상 한계 존재 | • 선행 기술 추적 및 실험적 수치적 검증 수행                           |
| 수소동위원소 정제 시스템 개발                | • 삼중수소 취급 기술은 수출입 통제 대상으로 도입 기술의 확대 응용 상 한계   | • 선행 기술 추적 및 실험적 수치적 검증 수행                           |
|                                 | • 삼중수소 취급 경험 부족                               | • 국제협력을 통한 삼중수소 취급 인력 양성                             |
|                                 | • 삼중수소 전용 기기 개발 경험 부족                         | • 소량 삼중수소 취급설비 구축 및 관련 R&D 수행                        |
| 수소동위원소 분리 시스템 개발                | • 삼중수소 취급 경험 부족                               | • 수소 및 진공기기 취급 산업체의 삼중수소 적용 가능한 기기 개발 응용 능력 배양       |
|                                 | • 삼중수소 초저온 증류 적용                              | • 국제협력을 통한 선진기술 도입                                   |
| 삼중수소 저장·공급 시스템 개발               | • 삼중수소 취급 경험 부족                               | • 소량 삼중수소 취급을 통한 경험 축적                               |
|                                 | • 삼중수소 저장을 위한 금속(감손우라늄) 취급 제한                 | • 액체 헬륨 취급 및 초저온 증류 기술 산업체 연계 기술개발                   |
|                                 | • 대형 운반용기 삼중수소 재고량 측정 경험 부족                   | • 국제협력을 통한 선진기술 도입                                   |
| 핵융합 연료 펠릿주입 시스템                 | • 펠릿제조 및 회수·재사용 시스템 경험 부족                     | • 소량 삼중수소 취급을 통한 경험 축적                               |
|                                 | • 삼중수소 취급 시스템 개발 경험 부족                        | • 국내 감손우라늄 취급 경험 축적                                  |
| 핵융합 연료 가스주입 시스템                 | • 삼중수소 취급 기기 개발 경험 부족                         | • 삼중수소 저장 후보 금속 검색 및 성능 평가                           |
|                                 | • 대량 연료의 연속 공급 경험 부족                          | • 소형 삼중수소 재고량 측정 기술을 활용한 자체 기술 개발                    |
| 핵융합 연료 고진공 배기 기술 개발             | • 삼중수소 취급 경험 부족                               | • 국제협력 강화를 통한 선진기술 도입 및 국내 자체기술 개발                   |
|                                 | • 장시간 연속 운전 경험 부족                             | • ITER 조달 참여를 통한 축적된 기술 적용                           |
|                                 |   | • ITER 조달 참여를 통한 축적된 기술 적용                           |
|                                 |   | • ITER 및 조달 국가와 기술협력                                 |
|                                 |   | • KSTAR 및 ITER에 적용한 기술을 기반으로 연속운전이 가능한 고진공 배기 시스템 개발 |
|                                 |   | • ITER 진공 배기 시스템 설계 및 운전 기술을 활용하여 한국형 실증로에 적합        |

| 세세부기술                           | 기술확보 리스크  | 해결 방안   |
|---------------------------------|---|---|
| 핵융합<br>연료<br>저진공<br>배기 기술<br>개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>삼중수소 취급 경험 부족</li> <li>Pumping 시스템 연계 경험 부족</li> </ul> | <p>한 시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>삼중수소 적용 가능한 Roughing Pumping 시스템 개발</li> <li>선행 기술 추적 및 고진공/저진공 배기 연계 제어 시스템 개발</li> </ul> |

## 마. 디버터

### □ 주요이슈사항

- 디버터 설계를 위해 경계 플라즈마의 해석을 통한 디버터의 형상 결정 및 열·입자속에 대한 계산 선행 필요
- 디버터 설계를 위해 응력을 평가하고 완화할 수 있는 공학적 해석과 발생 가능한 사고의 정의와 해석 과정 필요
- 실증로 디버터 설계를 위해 플라즈마의 평형 상태를 기반으로 경계 플라즈마의 물리적 계산을 통해 열 및 입자속을 최적화하는 디버터 형상 및 운전 방안 도출 필수
- “플라즈마 물리”-“핵융합 재료”-“열 및 구조 공학”의 연계를 통한 통합 설계 플랫폼 구축을 위한 연구 필요
- 디버터는 경계 플라즈마로부터 10~20 MW/m<sup>2</sup> 수준의 초고열속을 받는 장치로 이로 인한 재료와 냉각수의 열적 안정성 평가가 매우 중요
- 실증로급 디버터의 열 및 입자속의 영향을 모사할 수 있는 고열부하 및 플라즈마 입자 발생 시험시설 구축 필요
- ITER의 정상상태 10MW/m<sup>2</sup>의 열속보다 높은 20 MW/m<sup>2</sup> 수준의 높은 열속을 냉각할 수 있는 개선된 냉각 방식을 제안함으로써 실증로 디버터의 설계 영역을 넓히고 나아가 Cu 기반 냉각 방식을 저방사화강으로 대체하는 기회 발굴 필요
- 플라즈마로부터 탈출한 입자들이 재료에 주입되어 고체 내부 결함 등에 갇히거나 화학적으로 결합하여 남아있게 되는 연료 잔류는 입자 에너지, 표면 온도, 주입량 등과 관계가 있다고 알려져 있음
- KSTAR를 통해 디버터 설계 및 제작·설치 기술과 경험을 쌓았으나 ITER 디버터 조달에 참여하지 않아 곡면부를 포함하는 대형 디버터 설계·제작·평가 기술 및 노하우 부족
- 성공적인 디버터 타겟 개발을 위해 핵융합로 대면재 및 구조재 기반의 대면재와 구조재 접합을 통한 대면부품의 제작과 디버터 운전 환경에서의 성능 평가 필요
  - 정상상태(5~10 MW/m<sup>2</sup>)와 과도조건(>20 MW/m<sup>2</sup>)에서의 열부하 조건과 플라즈마 운전 중 발생하는 열 응력에 의한 접합 강도 감소 및 균열 형성 인자의 평가를 통해 열 및 입자속에 대한 디버터 타겟의 건전성 확보 필요
- 설계된 토카막 장치의 건설, 운영 및 수명평가를 위한 정량, 정성적 디버터 대면재의 접합 및 구조 건전성 평가 및 디버터 표면 열속 진단 방안 개발 필요
  - 토카막 핵융합로에서 디버터는 플라즈마의 열속이 가장 집중되는 장치로서, 디버터 허용 열속은 장치 운용한계를 정하는데 매우 중요한 파라미터

- 구조적으로는 디버터 대면재의 표면열을 냉각계통으로 전달하는 열전달력은 디버터 허용 열속 결정의 핵심인자 중의 하나이며, 또한 텅스텐 대면재의 반사특성은 인가되는 열속 측정의 정확도 저하의 원인
- 수명이 다하거나 교체를 요구하는 문제가 발생했을 때 유지보수를 위해서는 사람이 접근할 수 없고 로봇을 이용하여 외부에서 제어하는 원격유지보수가 필요
- DT 핵융합 반응을 계획하고 있는 장치인 ITER와 실증로급 장치들은 14.1 MeV의 중성자 조사에 의해서 진공용기 내부의 플라즈마 대면 장치들이 방사화되고 디버터도 중성자에 의해서 방사화
- ITER 디버터 54개 모듈 중 한 개의 무게는 약 9톤 가로x세로x깊이는 3.6m x 2.5m x 0.8 m 정도로서, 이를 이송하기 위한 장치와 주요 냉각 배관의 절단 및 용접을 위한 로봇의 개발 등 원격유지 기반기술 확보 필요

□ 기술 확보 리스크 및 해결방안

- 경계 플라즈마 해석을 위한 국내 자체 운용 인력이 부족하고 대학에서 배출된 인력이 연구원으로 이어질 수 있는 인력 연계 방안 필요.
- 플라즈마-일차벽 해석의 국내 인력 및 기술이 선진 기술 보유 국가 대비 매우 낮음. 선진 기술 보유 국가와 공동연구 및 인력 양성과 확보가 필요함.
- 플라즈마-일차벽 상호작용 실험 및 분석을 위한 국내 시험 설비가 절대적으로 부족한 상황임. 관련 시험 설비의 투자를 통한 기술 선진 국가와의 기술격차 해소 필요.

| 세세부기술                 | 기술확보 리스크                      | 해결 방안  |
|-----------------------|-------------------------------|--|
| 경계플라즈마 해석 및 영향평가기술 개발 | • 국내 경계 플라즈마 코드 자체 운용 능력 미흡   | • 유럽, 미국 등 경계플라즈마 해석 코드 보유 및 전문 운용 기관과 공동연구 진행           |
|                       | • 국내 입자거동 코드 자체 운용 능력 미흡      |  |
|                       | • 전문인력 부족                     | • 전문 인력 채용 및 공동연구 참여                                     |
|                       | • 실험 인프라 부족                   | • DTT와 연구분야 제안 및 공동연구 추진                                 |
|                       | • 실증로급 대면재 노출 시험시설 부족         | • 특성평가 시험시설 인프라 확보                                       |
|                       | • 실증로급 대면재 노출 시험시설 부족         | • 특성평가 시험시설 인프라 확보                                       |
|                       | • 금속 대면재 환경에서 광방출 분광분석시스템 미구축 | • 노심에서 텅스텐 측정 경험과 국제기술협력을 통해 디버터 경계 영역 조건에 부합하는 분석시스템 구축 |
|                       | • 국내 플라즈마 일차벽 코드 사용 경험 부재     | • 코드 개발기관 인력 파견 및 국제협력으로 코드 습득                           |

| 세세부기술                | 기술확보 리스크  | 해결 방안  |
|----------------------|---|--|
| 디버터<br>공학설계<br>기술 개발 | • 실증로 공학해석을 위한 코드 & 스탠다드 부재                       | • 실증로 인허가 및 코드 & 스탠다드 개발과 협업하여 연구 진행                     |
|                      | • 공학 관련 전문인력 부족                                   | • 인력채용 및 양성  |
|                      | • 신개념 냉각 개념 제작 시 소품종 다량 생산 한계                     | • 국내 대학 및 산업체와 연계하여 샘플 제작                                |
| 디버터<br>제작<br>기술개발    | • 20MW/m <sup>2</sup> 급 텅스텐 디버터 타겟 제작 기술 부족       | • 산업체 협력을 통해 1.5m급 디버터 타겟 제작이 가능한 HRP 공정기술 개발            |
|                      | • 대면부품 성능평가 시험시설 부재                               | • 고열속 성능평가 시험시설 구축 (시설, 장비 부분에 포함)                       |
|                      | • 모노블록형 텅스텐-RAFM 대면 부품 개발 경험 부재                   | • 디버터 공학설계와 연계하여 대면부품 기술요건 명확화<br>• 필요 기술 해외조사 및 국내개발 병행 |
| 디버터<br>평가기술<br>개발    | • 텅스텐 PFC 이중접합 계면의 결합과 고열부하 성능과의 비교 자료 부재         | • 여러가지 결합구조를 가진 PFC 시험편 제작과 시험을 통한 상관성 평가자료 축적           |
|                      | • 디버터 타겟 유닛 전체에 대한 비파괴 평가기술 부족                    | • 디버터 타겟 시험을 위한 비파괴 평가장비 제작                              |
|                      | • 디버터에 입사되는 순수한 광선의 양을 계산하기 위한 신뢰성있는 고도화된 진단장치 부족 | • 실물 측정결과를 바탕으로 광경로 모델링 및 광선수 증량                         |
| 디버터<br>유지보수<br>기술 개발 | • 핵융합에 특화된 원격유지보수 개념 개발 부재                        | • 산업용 로봇 기술 및 원자력 원격유지보수 개념 활용 가능성 검토                    |
|                      | • 디버터 방사화 및 자화 특성 평가 연구 미진                        | • 위탁연구를 통한 학계와 공동연구로 방사화 및 자화 특성 연구 진행                   |
|                      | • 원격 유지보수를 위한 설계 기준 미비                            | • 원격 유지보수가 가능한 선량 제한치 및 유지보수 시나리오/프로세스 수립                |
|                      | • 실증로급 원격유지보수를 위한 로봇 및 원격제어 기술 미진                 | • 해외선도기관과의 공동연구를 통한 기술 습득                                |

## 바. 가열 및 전류구동

### □ 주요이슈사항

- 중성입자빔 주입 장치의 고에너지 안정성 및 효율 제고 필요
- 중성입자빔 주입 장치 주요 부품의 중성자 피폭 최소화
- 삼중수소 증식 관점 증식 블랭킷과 가열 및 전류구동 장치의 상호 배타성 극복 필요
- 낮은 주파수 전류구동 안테나의 낮은 플라즈마-고주파 커플링
- 고자기장 호환 높은 주파수 > 200 GHz, > 1 MW, 연속운전 자이로트론 개발
- 고성능 플라즈마를 ( $\beta_N > 3.5$ ) 위한 전류구동 제공 방안
- 플라즈마 불안정성 (NTM 불안정성) 능동 제어를 위한 전류구동 기술
- ITER 가열 및 전류구동 기술 확보 방안 (운전 참여 인력 확보, 비조달 분야 기술 확보)
- 실증로 가열 전류구동 예측 코드 확보 (저작권 확보)

### □ 기술 확보 리스크 및 해결방안

| 세세부기술                               | 기술확보 리스크   | 해결 방안  |
|-------------------------------------|--|--|
| 고효율 고에너지 중성입자빔 주입장치                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>고효율 중성화 장치 개발</li> <li>삼중수소 증식률 감소</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>중성화 장치 개발 기술 다변화 (레이저 중성화 장치, 플라즈마 중성화 장치)</li> <li>중성빔 포트 위치, 형상 다변화 연구</li> </ul>   |
| 연속운전 고주파 전류구동 장치 개발                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>고효율 밀리미터파 (&gt;200GHz) 발생장치의 장펄스 성능 검증방법 확보</li> <li>블랭킷 호환 안테나 (진행과형, 도파관 슬릿형) 안정성 검증방법 확보</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>고효율 밀리미터파 발생장치 및 블랭킷 호환 안테나 시험시설 구축</li> </ul>  |
| KSTAR 및 ITER 활용 고효율 가열 및 전류구동 기술 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>마일스톤 내 차세대 전류구동 기술 확보 미흡</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>기존 기술 활용 방안 확보를 위한 연구 지속</li> </ul>   |
| 플라즈마 가열 및 전류 구동 시뮬레이션 기술            | <ul style="list-style-type: none"> <li>시뮬레이션 검증에 필요한 연소 조건 실험 데이터 확보의 어려움</li> <li>실증로 조건을 다루는데 필요한 극한 스케일 병렬 시뮬레이션 기술의 어려움</li> <li>극한 스케일 병렬 시뮬레이션을 수행할 초고성능 컴퓨터 자원 확보의 어려움</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>ITER 연소 실험 결과 확보 및 활용</li> <li>플라즈마 성능 및 안정성을 결정하는 핵심 물리현상 분석을 위해 최신 진단 개발과 KSTAR 적용, 관련 데이터 확보</li> <li>CPU/GPU 하이브리드 구조의 극한 병렬 컴퓨팅 자원 확보로 계산 규모 증가에 따른 자원 및 비용 증가 억제</li> <li>정부가 추진하는 초고성능컴퓨팅 전문센터 정책과 연계하여 자원 및 인력 확보 추진</li> </ul> |

## 사. 초전도 자석

### □ 주요이슈사항

- 국내에서 이미 16T급 Nb3Sn 선재개발에 성공하고, 현재 양산 체제를 위한 시험단계를 진행 중임에도 불구하고 여전히 선재개발 리스크가 크다고 할 수 있음. 특히 선재가 실증로급 초전도도체 내부에서 예상되는 강한 힘에 의한 변이 등에 대해 임계전류 밀도 특성 등이 유지되는지 등에 대한 우려가 있는 상황임. 그러나 기술분쟁 가능성은 국내 자체 기술로 개발되기에 낮다고 볼 수 있음
- 아직 고성능 선재를 활용한 도체 기술 개발은 세계적으로 활발하지 않은 상태로 ITER 초전도도체 개발 시와 유사하게 당시의 고성능 선재로 최대자장을 구현하고자 할 경우에 발생할 수 있는 예상하지 못한 문제점들 (unknown unknowns)에 대한 대비가 필요함. 기술분쟁 가능성은 작음

- 국내에서는 KSTAR 및 ITER 초전도도체 조달 때 케이블링에 참여한 기술력을 보유한 산업체에서 사정으로 인해 케이블링을 그만둔 상황으로 새로운 산업체와의 협력이 모색되고 있으며 또한 실증로급의 도체에 필요하리라 예상되는 3mm 두께 이상의 조판 기술에 관한 개발에 관한 논의가 이루어지고 있는 상황임
  - 2022년부터 시작된 ‘초전도도체 시험설비 구축사업’으로 도체 평가기술 부분에서 획기적인 발전이 기대되고 있으나 시편 준비, 특성 측정 기법 등의 평가 전반에 관해 많은 경험이 있는 EU 등과의 협력이 필요하리라 예상됨
  - 고온초전도 도체 개념은 아직은 세계적으로 태동기이지만 최근 급격한 기술적인 진보가 이루어지고 있는 상황으로 2022년부터 시작된 ‘고온초전도 마그넷기술 개발사업’ 과제 등을 활용하여 기술적 진보에 대해 원활한 대응 전략 수립이 필요함
  - 실증로급 거대 초전도 자석은 다음의 주요 세 가지 현안이 있는 상태임. 1. 자장의 세기로 인해 저온 구조물 탄성 한계치를 넘어서는 강한 힘이 예상되는 등 구조적 안정성 문제, 2. 내부 부품 교체를 위한 자석 간의 공간 확보 문제, 3. 비교적 긴 운전수명을 고려한 장기간 운전 안정성 문제. 기술분쟁 가능성은 낮음
  - 국내에서는 KSTAR 초전도 자석 제작 이후에 실제로 거대 핵융합로용 초전도 자석을 제작한 경험이 없고 또한 당시 제작에 참여한 인원의 은퇴로 인한 기술 공백에 대한 우려가 있는 상황임. 이는 일정 정도 2022년부터 시작된 ‘초전도도체 시험설비 구축사업’에 필요한 초전도 자석 제작을 통해 확보될 필요가 있음
  - 핵융합로용 고온초전도 자석은 사실상 미국의 벤처기업인 CFS가 주도하고 있는 상황으로 현재 시험용 코일 제작 및 평가에 성공하고 본 제품 제작에 들어가는 등 개발 현황을 주시하고 이에 따른 대응 전략 확보가 필요함. 2022년부터 시작된 ‘고온초전도 마그넷기술 개발사업’ 과제는 도체 개발에 관한 것으로 초전도 자석 개발에 관한 기술적 원활한 대응에는 한계가 있음
  - 초전도 자석 관련 타 기술에 비해 비교적 난이도가 낮은 편으로 주요 이슈 사항은 다음과 같음. 1. 비싼 도입비용 및 유지관리비용을 고려한 냉동기 국산화 가능성 여부, 2. 고온초전도 자석기술을 활용할 경우, 켈치보호 기술 개발은 매우 어려움. 그러나 켈치보호가 필요 없는 안정화 영역에서 운전가능성 또한 매우 높음. 3. 초전도 자석의 구조적 안정성을 고려하여 하이브리드 혹은 다단계 자석 구조를 채택할 경우, 전원 및 켈치보호 회로 구성 방법, 4. 초전도 자석의 안정적인 운전 및 설계 반영을 위한 초전도 자석 운전해석 기술 개발. 기술분쟁 가능성은 낮음
- 기술 확보 리스크 및 해결방안
- 고성능 선재개발 자체의 리스크가 매우 큼. 실증로급 초전도도체 내부에서 예상되는 강한 힘에 의한 변이 등에 대한 효과를 면밀하게 분석할 필요가 있음
  - 선재 평가/분석 방법 개발을 통해 선재개발 시에 발생하는 여러 사안에 대해 자세히 분석



하고 가능한 해결 방안을 도출하고자 함

- 특히 도체 시험 시설에서의 평가는 실제 실증로급 초전도도체 내부에서 상황과 유사하기에 이를 통해 기술 확보 리스크를 상당 부분 해소할 수 있으리라 기대됨
- 선재의 미흡한 특성 부분은 선재의 직경, 안정화 동 비율 등 사양 설정 기법을 활용한 유연한 설계로 운전 기간 내내 안정성 확보
- 고성능 선재로 최대자장을 구현하는 도체 개발 자체의 리스크가 매우 큼. 실증로급 초전도도체 내부에서 예상되는 강한 힘에 의한 변이 등에 대한 효과를 면밀하게 분석할 필요가 있음
- 도체 시험 시설에서의 평가는 실제 실증로급 초전도도체 내부에서 상황과 유사하기에 이를 통해 기술 확보 리스크를 상당 부분 해소할 수 있으리라 기대됨. 그러나 가능한 해외 특히 비슷한 개념의 실증로 개념을 연구하고 있는 EU와의 공동연구를 추진하여 리스크를 줄일 수 있는 방안 모색
- 고온초전도 도체 연구는 리스크가 많음과 동시에 기회이기도 함. 해외보다 조금 늦게 연구가 시작되었으나 해외도 아직은 기술적인 탐색기로 향후 연구에 따라 선도적인 기술 확보도 가능한 분야임. 이 분야는 리스크를 감수하고 도전적인 연구를 수행하는 것이 바람직해보임
- ITER TF 초전도 자석의 구조물에 인가되는 최대 하중이 스테인리스강의 저온 탄성한계에 근접한 값으로 실증로급 TF 초전도 자석의 가장 큰 리스크는 기계적 안정성이라고 할 수 있음. 이에 대해서는 탄성한계를 넘어서도 구조적 안정성이 유지되는지에 대한 시험 혹은 하이브리드 개념, CS 자석의 크기 조정을 통한 구조적 안정성 증대 등 다양한 방법에 대한 연구 수행 필요. 또한 이에 관한 해외공동연구를 통해 리스크 해소 방안 모색도 병행하여 추진
- 초전도 자석의 증장기적인 안정성에 관해서는 실증로급 초전도도체 내부에서 예상되는 강한 힘에 의한 변이 및 승온/냉각 과정에서의 변형 등 도체 시험 평가를 통해 리스크 상당 부분 해소할 수 있으리라 기대됨.
- 고온초전도 자석 연구는 리스크가 많음과 동시에 기회이기도 함. 해외보다 조금 늦게 연구가 시작되었으나 해외도 아직은 기술적인 탐색기로 향후 연구에 따라 선도적인 기술 확보도 가능한 분야임. 이 분야는 리스크를 감수하고 도전적인 연구를 수행하는 것이 바람직해보임
- 초전도자석 개발에 새로운 방식을 도입하게 될 경우, 부대 시스템 구성에도 리스크가 있을 수 있음. 이에 대한 피드백 과정을 거쳐 자석 및 부대 시스템 모두 안정적인 운영이 가능한 최종 시스템 구현 추진

| 세부기술                         | 기술확보 리스크  | 해결 방안  |
|------------------------------|---|--|
| 고성능<br>선재개발 및<br>장산화 기술      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 임계전류 밀도, 변이특성 등의 조건에 부합하는 고성능 선재개발 리스크</li> <li>• 장산화/대량생산 리스크</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 특성평가/분석 결과 피드백</li> <li>• 도체시험 시설 활용 실제 조건 시험</li> </ul>  |
| 성능평가,<br>QA/QC 기법,<br>시양설정   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고성능 선재 평가/분석 기법 개발</li> <li>• 선재 특성에 따른 최종 사양 설정</li> </ul>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 학연 협력</li> <li>• 선재 파괴 검사 등 필요시 해외기관과 협력 추진</li> </ul>  |
| 저온초전도<br>도체 설계 및<br>제작기술     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 고성능 선재 활용 초고자장 환경하 안정적인 도체 개발 리스크</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 도체시험 시설 활용 실제 조건 시험</li> <li>• 필요시 해외기관과의 공동연구 추진</li> </ul>  |
| 초전도 도체<br>특성평가 및<br>QA/QC 기법 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 초전도 도체 시험 자체 및 시험결과 해석의 어려움 관련한 문제</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 학연의 긴밀한 협력으로 해결 가능하리라 여겨짐</li> <li>• 필요시 해외기관과의 공동연구 추진</li> </ul>                                 |
| 실증로급<br>고온초전도<br>도체 기술       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 세계적으로 시작 단계로 시행착오 가능성이 매우 많은 상황임</li> <li>• 최근 연구개발 속도가 매우 빠름</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 도전적이고 선도적인 연구를 추진하되 해외 동향에 따른 유연한 연구방향 설정</li> </ul>  |
| 초전도 자석<br>설계 및<br>제작기술<br>확립 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 초고자장 환경하 기계적인 힘을 견디는 구조물 개발 리스크</li> <li>• 장시간의 운전기간 중의 초전도 자석 안정성 확보 리스크</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 하이브리드 개념을 포함한 다양한 구조설계안 연구 수행</li> <li>• 도체시험 시설 활용 실제 조건 시험</li> <li>• 필요시 해외기관과의 공동연구 추진</li> </ul> |
| 시험용 코일<br>특성평가 및<br>QA/QC 기법 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 초전도 자석 시험은 ITER TF, CS 시험용 코일 평가에서 보듯 시험 자체의 난이도가 있는 편임</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 학연의 긴밀한 협력으로 해결 가능하리라 여겨짐</li> <li>• 필요시 해외기관과의 공동연구 추진</li> </ul>                                 |
| 고온초전도<br>시험용 코일<br>개발        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 세계적으로 시작 단계로 시행착오 가능성이 매우 많은 상황임</li> <li>• 최근 연구개발 속도가 매우 빠름</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 도전적, 선도적인 연구를 추진하되 해외 동향에 따른 유연한 연구방향 설정</li> </ul>   |
| 초전도자석<br>기반기술                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 초전도자석 개발을 위한 기술 도입에 따른 부대설비 리스크 증대 가능성</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부대설비 리스크도 반영한 자석개발 (냉각 설비 자체개발도 가능하면 추진)</li> </ul>   |

## 아. 안전·인허가

### □ 주요 이슈사항

- 핵융합 안전기술 연구개발이 대체로 원자력과 유사한 방향으로 수행됨에 따라, 핵융합 특성에 맞는 독자적인 안전기술 확보가 절실히 요구
- 핵융합로의 안전성 평가를 위한 전용 기술 및 방사성 물질 관리 등에 관한 핵융합 안전기술 개발이 매우 부족
- 핵융합 안전기술 전문가 부족 문제 해결을 위한 체계적인 인력 육성 전략 필요
- (인허가 기술개발 동향) 미국, 영국, ITER 등 주요 국가 및 국제기구의 핵융합 인허가 기술개발 동향 파악 및 협력을 통한 기술 개발 중요
- (인허가 규제체계 확보) 삼중수소를 주 연료로 하는 핵융합로에 적용할 국내 인허가 규제체계 확보 및 검증기술 필요

### □ 기술 확보 리스크 및 해결방안

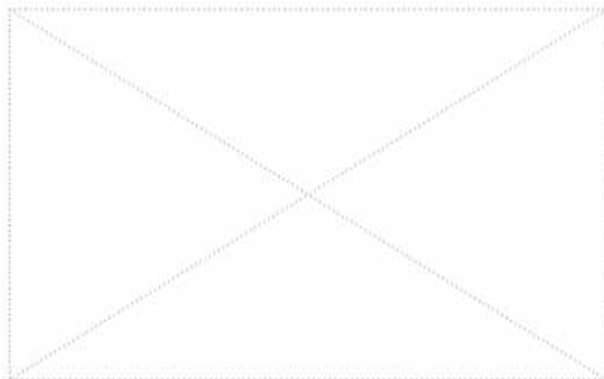
| 세계부기술              | 기술확보 리스크  | 해결 방안  |
|--------------------|---|--|
| 핵융합로<br>규제체계<br>확보 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 제한된 전문성</li> <li>• 규제 프레임워크 부재</li> <li>• 안전성 평가의 불확실성</li> <li>• 불충분한 연구 개발 자원</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 규제 시스템 개발 전문 연구조직 구축</li> <li>• 중장기 교육 프로그램 투자</li> <li>• 국제 협력 프로젝트 강화</li> <li>• 안전 평가 방법론 연구 및 개발 투자</li> <li>• 정부 자금 지원 확대 - 산업계, 국제 협력 등 자금 조달 기회 모색, 국가적 프로젝트로서의 집중적, 효율적 자원 집행의 필요성</li> </ul> |
|                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지식 격차</li> <li>• 규제 프레임워크 차이</li> <li>• 지적재산권, 기술이전</li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 공동 연구 프로젝트를 통한 파트너십, 이니셔티브 촉진</li> <li>• 타국의 규제 프레임워크 비교, 문화/제도적 차이의 이해 필요</li> <li>• 지적 재산권 보호 및 기술 이전에 대한 보장</li> </ul>   |
|                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 전문성 및 경험</li> <li>• 지식 이전, 공유, 승계</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 포괄적 교육, 인력 양성 프로그램 투자</li> <li>• 지식 관리 시스템 구현</li> </ul>  |
|                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지적재산권 보호</li> <li>• 조정 및 커뮤니케이션</li> <li>• 자원 할당 및 조달</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지적 재산권 보호, 기술 소유권 정의를 위한 명확한 계약/협약 명문화</li> <li>• 개방적 의사소통을 통한 공유 목표와 우선순위 정의</li> <li>• 필요 자원 확보를 위한 자원 공동개발, 파트너십 개발</li> </ul>   |
| 핵융합로               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 전문성 및 자원 부족</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지적재연구 개발을 위한 정부 자금 지원</li> </ul>  |

| 세세부기술         | 기술확보 리스크   | 해결 방안   |
|---------------|--|---|
| 안전해석<br>코드 개발 |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 적극적인 학-연 협력 프로그램</li> <li>• 핵융합 안전연구 교육 및 인력 양성</li> </ul>   |
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 데이터 보안 및 지적 재산보호</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지적 재산권 보호를 위한 명확한 합의</li> <li>• 국제 파트너 및 기관과 협력</li> <li>• 민감정보 접근 통제</li> </ul>   |
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 전문가 부족</li> <li>• 인력양성 프로그램 부족</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 대학과 협력을 통한 인력양성 프로그램 수립</li> <li>• 전문성 향상을 위한 지속적 교육 및 전문성 개발 기회 제공</li> </ul>   |
|               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 조정 및 커뮤니케이션</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 산학연 간 효과적 소통 채널 구축(정기 간담회 등)</li> <li>• 협력 당사자 간 역할, 책임, 기대치 정의</li> <li>• 지적재공동 연구 프로젝트 및 자원 공유를 위한 지식 교류, 협업 촉진</li> </ul> |

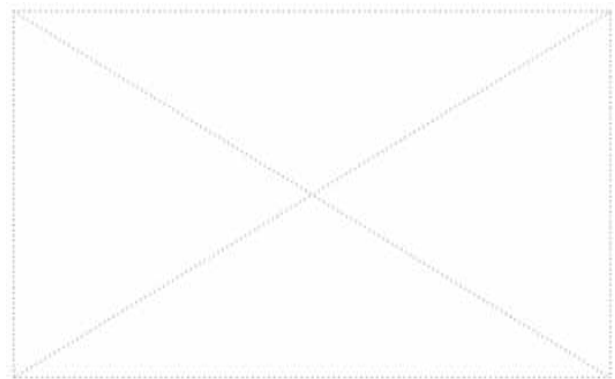
### (3) 핵심기술별 종합진단 결과

#### 가. 노심 플라즈마

- (기술개발 필요성) 실증로에서는 기존의 상용 발전로 수준으로 외부 개입이 최소화된 상태에서 안정적으로 고성능 노심 플라즈마를 유지해야 하는 운전기술 필요
- (동향 분석) 8대 핵심기술 중 가장 연구개발이 활발한 분야로, ITER 및 실증로 적용을 위한 세부 기술 개발을 추진 중
  - (연구개발 동향) 오랜 기간의 연구경험을 바탕으로 자국 실험장치 중심 ITER 및 실증로 적용을 위한 노심 플라즈마 기술 개발 추진 중, 한국은 유일한 자국 실험장치인 KSTAR를 통해 초고온 플라즈마 장시간 유지운전 분야 세계적 선도 중
  - (연구개발 투자) 8대 핵심기술 중 가장 많은 금액(2,874억원)이 투입되었으며, KSTAR 건설·운영 사업(핵융합(연))을 중심으로 기술개발이 추진 되고 있는 상황

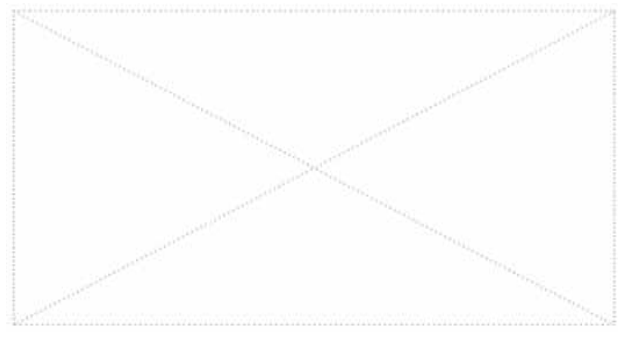
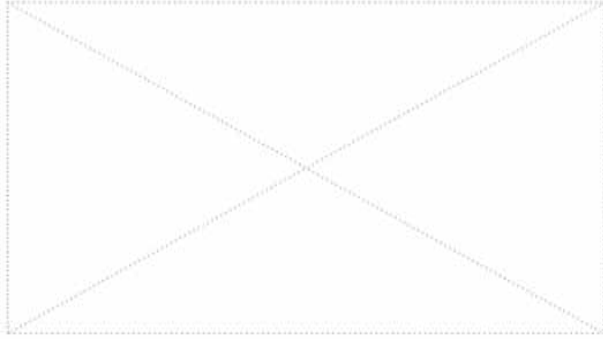


< 연구개발 투자(8대핵심기술 비중) >



< 기술수준 현황 >

- (기반역량 분석) 8대 핵심기술 중 한국의 연구개발을 견인하고 있는 분야이나, 연구결과의 양적인 수준과 질적인 수준이 주요 핵융합 개발 국가중 하위권으로 파악
  - (기술수준) 8대 핵심기술 중 기술수준이 최고 기술국과 가장 근접한 분야로 한국의 핵융합 기술을 견인하고 있는 분야 이나, 여전히 제어 프로그램을 미국에 의존하고 있는 상황
  - (특허분석) 8대 핵심기술 중 가장 많은 특허를 창출하고 있는 분야로 미국 출원 특허가 피인용도와 시장확보지수가 우수하였으며, 한국은 출원 특허의 피인용도와 시장확보지수가 평균 이하인 것으로 분석
  - (논문분석) 8대 핵심기술 중 가장 많은 논문이 게재되고 있는 분야로 미국 국적의 저자가 가장 많은 논문을 게재하고 있으며, 편당 피인용도가 가장 높은 국가는 영국이고, 한국은 편당 피인용도와 게재건수가 모두 낮은 상황



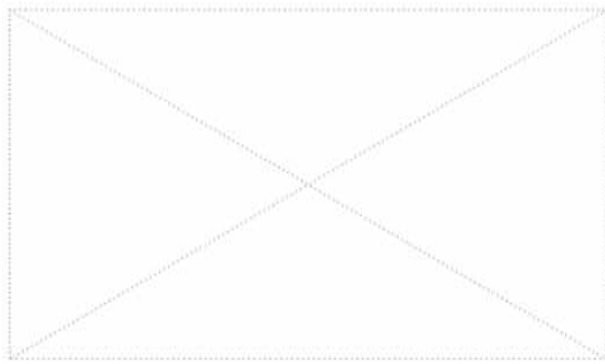
< (특허)피인용도/시장확보지수(국가별) >

< (논문)피인용도/논문 게재건수(국가별) >

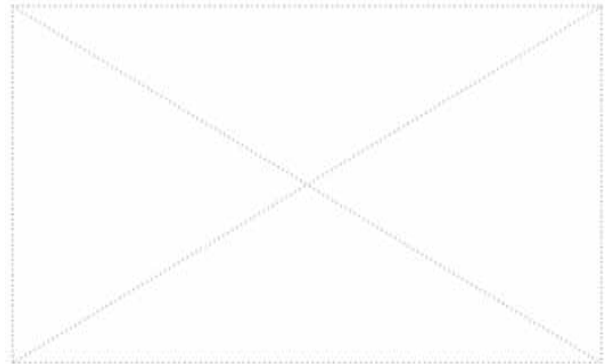
- (주요 이슈 및 리스크) 가장 오랜 기간동안 연구되고 있는 분야이고, KSTAR를 활용하여 초고온 플라즈마 유지 운전분야를 선도하고 있으나, 연소 플라즈마(D-T)(ITER 역할)에 대한 물리적 난제들과 확인되지 않은 현상, 이에 따른 기술적 한계들이 존재하고 있는 분야
- (추진 전략 방향) KSTAR를 활용한 고성능 시나리오 운전(ITER와 차별성)과 더불어, ITER 연소 플라즈마 데이터 확보, 이후 실증로 고성능 플라즈마 통합 제어를 위한 시뮬레이션 기술개발 집중
- (단기) KSTAR를 활용 미국 DIII-D(GA社)와 강화된 협력으로 고성능 운전( $\beta_N \geq 3.5$ ,  $f_{NI}=1$ ) 시나리오 개발에 집중하고, 고성능 플라즈마 통합 제어를 위한 시뮬레이션 요소기술 개발과 가상실험로(V-KSTAR) 개발 주력
- (중장기) ITER 실험의 주도적인 참여를 통한 연소 플라즈마 운전 데이터를 확보하고, 연소 플라즈마 운전시나리오 확보 집중. 실증로 성능을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술 확장이 필요한 만큼 이를 충족할 수 있는 사양의 슈퍼컴퓨팅 인프라 구축

## 나. 증식블랑켓

- (기술개발 필요성) 실증로의 (준)연속 운전을 위한 연료 생산·추출을 담당하는 핵심분야로서, 핵융합 주요국들이 핵융합 시장선점을 위해 전략기술로 추진하는 등 국산화 필요
- (동향 분석) 세계적으로 ITER TBM을 바탕으로 연구개발이 진행 중이며, 해외는 실증로급 기술 확보를 위한 연구개발, 시설투자가 확대되고 있는 분야
  - (연구개발 동향) ITER TBM을 중심으로 기술개발을 추진 중이나, 해외 국가들은 요소기술 확보를 위한 다양한 단위공정 연구개발 및 시설구축 추진 중
  - (연구개발 투자) 지난 20년간 증식블랑켓 분야는 558억원(8대 핵심기술 전체 8%)이 ITER TBM 사업을 중심으로 연구개발이 진행되었으며, 2014년 이후 지속적인 감소 추세

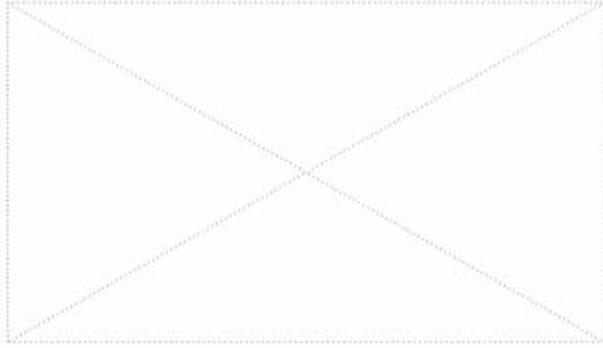


< 연구개발 투자(8대핵심기술 비중) >

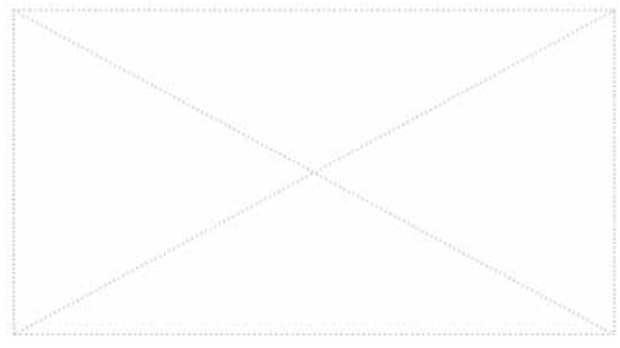


< 기술수준 현황 >

- (기반역량 분석) 8대 핵심기술 중 세계적으로 증식블랑켓에 대한 전체적인 기술수준이 낮은 상황
  - (기술수준) 최종목표 대비기술수준이 낮은 분야이나, 해외 주요 국가들의 기술수준도 낮은 상황으로, ITER TBM 사업을 통해 설계·안전해석, 제작·검증 기술을 일부 추적 중
  - (특허분석) 8대 핵심기술 중 특허활동이 활발하지는 않은 분야로, 타 국가의 경우에도 피인용도와 시장확보 지수가 높은 국가는 존재하지 않는 상황
  - (논문분석) 중국이 가장 많은 논문을 게재하고 있으나, 미국이 가장 높은 피인용도를 기록 중



< (특허)피인용도/시장확보지수(국가별) >



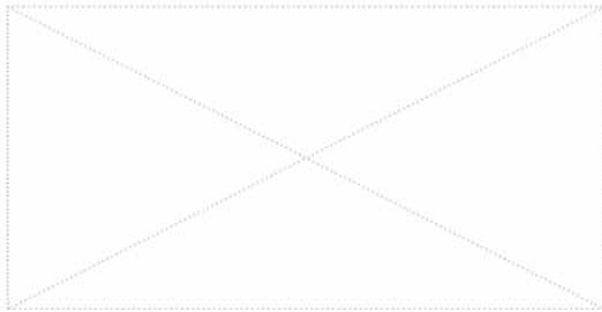
< (논문)피인용도/논문 게재건수(국가별) >

- (주요 이슈 및 리스크) 실증로급 기술 확보를 위해서는 ITER 장치로 만족하지 못하는, 실증로 환경에서의 증식블랑켓 검증이 필요한 상황이며, ITER TBM 이후 기술개발에 대해서 국제 협력의 한계가 명확히 존재하는 분야
  - ITER TBM을 통해 확보가능한 기술은 소형 증식블랑켓 기술 실증 및 관련 인허가 자료 수준으로서, 전기생산을 목표로 (준)연속으로 장기 운전이 되는 실증로 환경에서 연료자급 및 전기생산을 위한 열에너지 추출 관련 공학적 방안 실증 및 검증 필요
  - 연구개발 인프라 측면에서, 일본과 영국 등은 증식블랑켓 종합 성능검증 관련 대형 연구시설을 구축중이며, 이를 통해 증식블랑켓 기술수준 향상 및 경험축적 등 다양한 연구개발 추진 예정이나, 한국은 실증로급 연구개발을 위한 대형 인프라 구축 관련 세부계획 부재
- (추진 전략 방향) ITER TBM을 활용하여, 설계·안전해석, 제작·검증 기술을 개발하고, 핵융합 중성자원을 포함한 인프라 구축을 통해 실증로 환경에서의 실증로급 증식블랑켓 기술개발
  - (단기) ITER TBM을 활용하여 증식블랑켓의 설계·안전해석, 제작·검증 기반기술을 개발하고, 핵융합 중성자원을 포함한 연구 인프라 구축에 집중
    - ※ 한-EU TBM 공동개발 파트너십을 통해 설계·안전해석, 계통·인허가 등 핵심 DB를 확보
  - (중장기) 인프라 구축 이후 증식블랑켓 삼중수소 증식 시험 등 핵융합 실증로 유사 환경에서의 설계·안전해석, 제작성 검증 추진하고 ITER TBM 실험결과를 반영하여 실증로급 증식블랑켓 개발 주력
    - ※ 핵융합 중성자원을 포함한 증식블랑켓 연구 인프라 구축을 통해 증식블랑켓 설계 및 제작기술 확보에 필요한 공학 데이터 확보 및 제품 검증테스트 수행

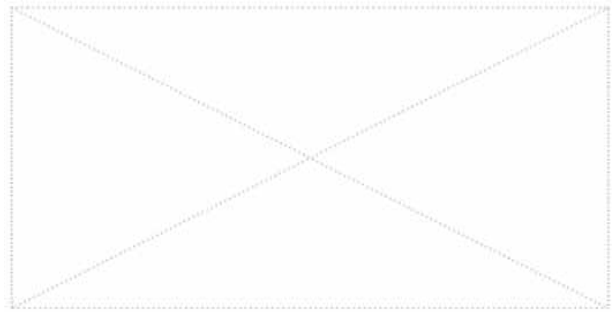


## 다. 핵융합 소재

- (기술개발 필요성) 핵융합 플라즈마에서 발생하는 고에너지 중성자에 대한 조사 저항성 및 고온 안정성을 유지하며, 장주기 방사성 폐기물을 저감시키기 위한 증식블랭킷 및 디버터 등 제작용 저방사화 재료 개발
- (동향 분석) ITER TBM 사업을 기반으로 저방사화 철강소재 개발 등 기술개발이 진행 중이나, 해외 국가는 자국 소재 개발·검증 DB 구축을 위한 시설 구축 추진 중
  - (연구개발 동향) 핵융합 전력생산 실증로에서 활용 가능한 핵융합 소재 개발과 더불어, 개발된 소재의 물성평가·DB 구축을 위한 시설구축(핵융합 중성자원) 추진 중
  - (연구개발 투자) 핵융합 소재 분야는 과거부터 꾸준히 연구개발 투자비가 증가하고 있는 분야이나, 타 핵심기술 분야 대비 연구개발 규모가 작은 분야

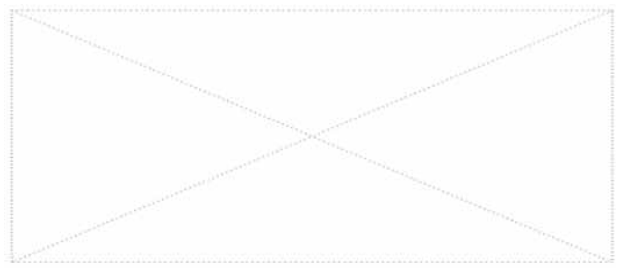
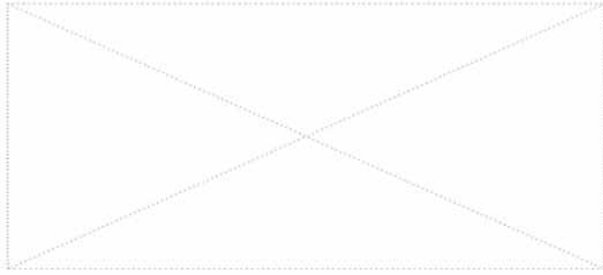


< 연구개발 투자(8대핵심기술 비중) >



< 기술수준 현황 >

- (기반역량 분석) 일부 요소기술의 경우 세계적인 수준이며, 타 국가 대비 특히, 논문의 지표가 상대적으로 미진하나, 실제 기술수준에서는 최고기술국과 격차가 크지 않은 분야
  - (기술수준) 핵심기술분야 중 기술수준이 평균 이상인 분야로, 한국형 저방사화 철강재 물성 데이터 베이스 구축을 추진 중이며, 세계적 수준의 삼중수소 증식재(기능소재) 제조 원천기술 확보
  - (특허분석) 핵심기술 중 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 분야로 미국이 유일하게 피인용도와 시장확보지수가 모두 평균 이상인 국가로 파악
  - (논문분석) 독일에서 가장 많은 논문이 게재되고 있으며, 영국의 논문 피인용도가 가장 높은 것으로 분석되었으며, 독일, 일본, 미국의 논문이 질적수준과 게재건수가 모두 높은 것으로 파악



< (특허)피인용도/시장확보지수(국가별) >

< (논문)피인용도/논문 게재건수(국가별) >

○ (주요 이슈 및 리스크) 개발된 핵융합 소재의 대량생산 기술과 더불어 실제 실증로 적용을 위한 물성평가 DB 구축이 필요하며, 이를 위한 핵융합 환경의 중성자원 구축 필요. 기능소재 개발을 위한 베릴륨 취급시설이 부재한 상황이며, 핵융합 재료에 필요한 핵심 원료는 전략물자로 분류하여 수출입을 통제함에 따라 기술 협력 및 자료 공유에 한계가 존재

- 핵융합 소재 분야의 경우 향후 핵융합 발전소의 경제성에 직결되며, 국가간 기술공유가 어려울 것으로 예상되는 분야로, 장기적인 관점에서 한국 고유소재 개발이 필수적인 분야

- 한국은 국내 유일의 연구용 원자로인 하나로 및 조사후 시험시설을 활용해 한국형 저방사화 철강재(ARAA)에 대한 중성자 조사 특성을 진행 중이지만, 실증로급 적용에는 한계 존재하며, 실증로 이후 상용로까지 고려할 때 인프라 구축을 통해 장기적으로 물성DB 구축이 필요

※ 실증로의 토카막 내벽부품이 받게 되는 핵융합 중성자 조사량은 20 dpa에서 많게는 100 dpa에 달할 것으로 예상됨에 따라, 실증로에 적용하기 위한 핵융합 재료를 시험 및 검증하기 위해서는 고에너지 중성자 조사시설 구축이 필요, ITER TBM이 받는 조사량은 1 ~ 3 dpa 수준에 그칠 것으로 예상

□ (추진 전략 방향) ITER TBM 사업을 통해 구조재 및 기능소재의 요소기술개발을 집중하고, 핵융합 중성자원으로 포함한 인프라 구축을 통해 실증로 및 상용로에 적용 가능한 고유소재 개발 추진

○ (단기) ITER TBM 사업을 통해 구조재 및 기능소재의 요소기술 개발에 집중하고, 하나로 등 기존 연구시설을 활용한 물성 DB 구축 지속. 핵융합 중성자원을 포함한 연구 인프라 구축에 집중

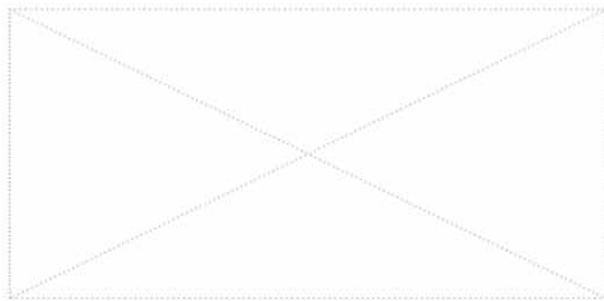
※ 또한, 유관분야(재료, 원자력 등)와 협력을 통해 소재개발 및 물성DB 구축, 대형 소재 제조기술개발 등 수행

○ (중장기) 핵융합 연구 인프라 구축 이후, 장기적인 관점에서 한국형 저방사화 철강재 등 물성 DB 구축을 통해 실증로 및 상용로에 적용가능한 한국형 고유소재 개발 추진

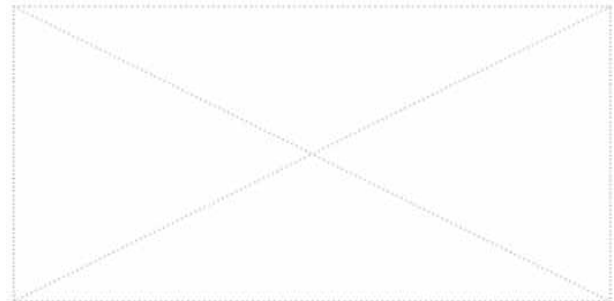
※ 핵융합 소재 분야의 경우 향후 핵융합 발전소의 경제성에 직결되며, 국가간 기술공유가 어려울 것으로 예상되는 분야로, 장기적인 관점에서 한국 고유소재 개발이 필수적인 분야

## 라. 연료주기

- (기술개발 필요성) 전략물자인 삼중수소를 직접 취급하는 공정의 특성으로 기술도입이 어렵고, 기술의 우위가 없을 경우 정보 교류 조차 제한되기 때문에 독자적 기술역량 보유 필요
- (동향 분석) 해외 주요 국가는 원자력 기반기술 역량을 기초로 ITER 적용, 이후 실증로 적용을 위한 연료주기 공정의 연구개발을 진행중이나, 한국은 ITER 조달품목(삼중수소 저장공급 시스템)에 집중
  - (연구개발 동향) 해외 주요국가는 단기적으로 ITER 연료주기 공정 적용을 위한 다양한 시스템 및 기기를 개발에 집중하고 있으며, 장기적으로 실증로급 대량의 삼중수소 취급을 위한 기술 개발 진행 중
  - (연구개발 투자) 한국은 ITER 조달 품목인 삼중수소 저장·공급 시스템 개발을 위해 국제 핵융합실험로(ITER) 공동개발사업을 연구개발을 추진하고 있으며, ITER 비조달 과제로 ITER 연료주기 기술추적을 진행

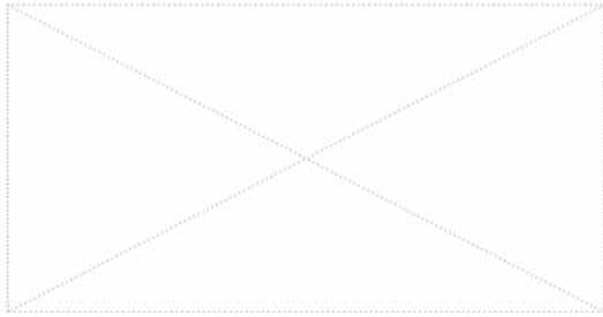


< 연구개발 투자(8대핵심기술 비중) >

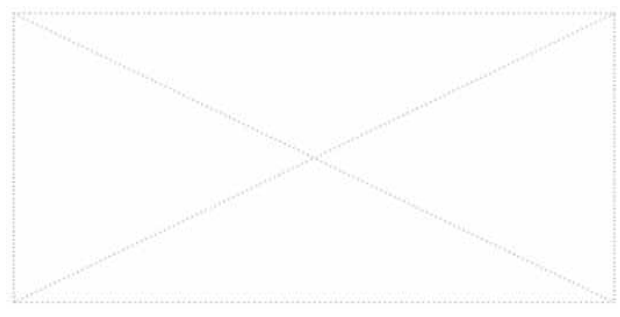


< 기술수준 현황 >

- (기반역량 분석) 연료주기 분야의 경우 일부 조달품목 중심의 연구개발로 연료주기 전체 공정 시스템의 경험이 부족한 것으로 분석
  - (기술수준) 핵심기술 중 최고기술국과의 격차, 최종목표와의 격차가 가장 큰 분야로 분석
  - (특허분석) 미국 출원 특허가 피인용도 및 시장확보지수가 가장 높은 우수한 특허를 창출 중이며, 한국은 피인용도와 시장확보지수가 모두 낮은 것으로 파악
  - (논문분석) 독일의 논문이 가장 높은 피인용도를 기록하고 있으며, 미국, 일본 역시 피인용도 및 게재건수가 모두 높은 것으로 분석. 한국은 피인용도가 높으나 게재건수 양이 작은 것으로 분석



< (특허)피인용도/시장확보지수(국가별) >



< (논문)피인용도/논문 게재건수(국가별) >

○ (주요 이슈 및 리스크) 삼중수소는 핵융합 반응의 연료로 안정적인 전력생산을 위해서는 연료주기 시스템 개발이 필수적이며, 삼중수소 취급 기술은 수출통제로 인하여 국제협력을 기대하기 어려운 대표적인 분야. 특히 한국은 삼중수소에 대한 취급경험이 부재하고, ITER 연료주기 시스템의 일부 하위 시스템만 조달하기 때문에 연구개발 격차가 심화되어 있는 상황

- ITER를 통해 핵융합 연료주기 전반에 걸친 기술을 설계, 제작, 운전에 대해 전주기적으로 관찰할 기회가 제공될 것으로 보이나, 이는 실제 국제협력이 제한적인 상황과 삼중수소 연구 측면에서 기술을 축적하는데는 한계가 있을 것으로 판단

※ 핵융합 실증로는 ITER 대비 3배의 열에너지 생산과 연속운전을 목표로 하고 있으며, 이는 취급할 삼중수소의 증가가 불가피하며, 안전을 보다 확보하기 위한 삼중수소 취급 기술 개발이 필요한 상황

□ (추진 전략 방향) 핵융합 연료주기 전체 공정을 개발을 위한 조달품목 외 요소기술 연구개발에 집중하고, 핵융합 인프라(중성자원) 구축과 더불어 증식블랑켓 연구와 연계하여 삼중수소 생산·추출·분리·정제·공급의 연료주기 전체 공정 구축 및 검증 추진

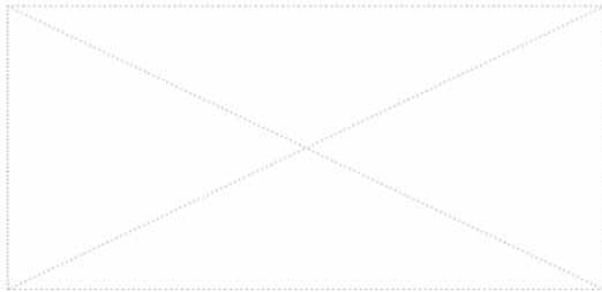
○ (단기) 핵융합 연료주기 전체 공정 개발을 위해 ITER 조달품목 및 조달품목외 요소기술 개발에 집중하고, 증식블랑켓 기술과 연계하여 삼중수소 회수 플랜트 구축에 집중

※ 핵융합 중성자원 구축 전까지는 ITER 조달품목 개발과 더불어 삼중수소 취급 경험을 보유한 원자력 등 유관분야 산·학·연 전문기관 등과 협력 기반의 조달품목외 요소기술 개발에 집중

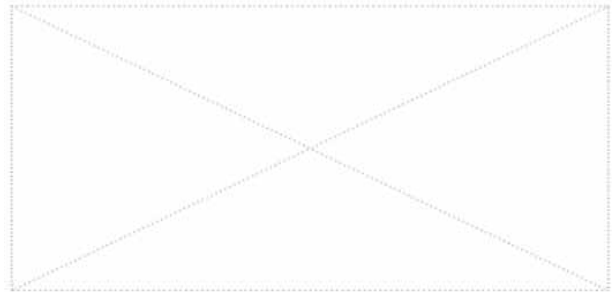
○ (중장기) 중성자원을 포함한 인프라 구축 이후, 개발된 요소기술을 기반으로 연료주기 공정 시험시설 구축 및 실증로 유사 연료주기 전체 공정 시험 운영. 또한, 구축된 연구 인프라를 기반으로 ITER 운전결과 흡수 및 실증로 적용 가능 기술 확보 추진

## 마. 디버터

- (기술개발 필요성) 핵융합 환경에서 고성능 노심플라즈마 유지를 위해 불순물과 헬륨 배출을 담당하는 핵심부품인 디버터는 실증로 내에 대량으로 설치되는 대형 부품으로서, 핵융합 전략기술로서 확보 필요
- (동향 분석) ITER 조달국을 중심으로 디버터 기술개발이 추진되고 있으며, 비조달국인 한국은 KSTAR 텅스텐 디버터 업그레이드를 통해 설계 및 제작 기술을 추적
  - (연구개발 동향) ITER 조달국을 중심으로 ITER급 디버터 기술개발에 집중하고 있으며, 향후 실증로 적용을 위한 다양한 개념의 디버터 연구를 위한 신규시설 구축 등 인프라 확보 추진 중
  - (연구개발 투자) 한국의 디버터 분야는 과거 소규모 연구개발 투자(10억원 이하)를 진행하였으나, 최근 2019년 이후 KSTAR 텅스텐 디버터 업그레이드를 통해 기술추적 진행 중

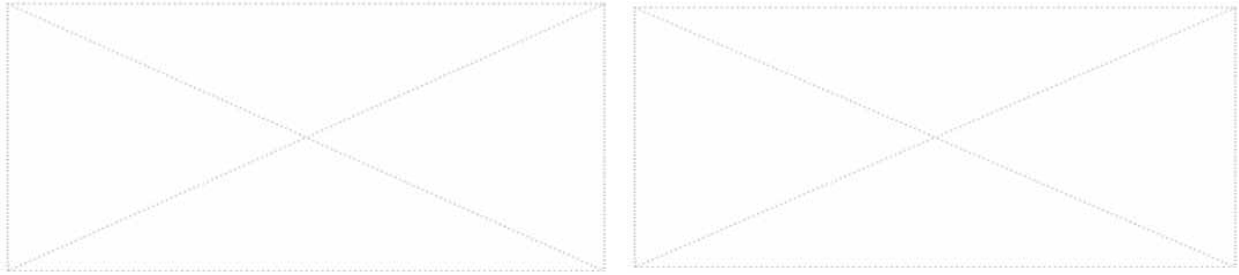


< 연구개발 투자(8대핵심기술 비중) >



< 기술수준 현황 >

- (기반역량 분석) KSTAR를 통해 단기간에 기술추적을 진행하였으나, 노심 플라즈마와 연계한 디버터 물리해석 역량이 부족한 것으로 파악
  - (기술수준) KSTAR 디버터 업그레이드를 통해 단기간에 기술경험을 축적하며 성능해석 및 설계, 제작 기술의 수준이 크게 향상되었으나, 디버터 물리해석의 경우 선진국대비 기술격차가 있는 것으로 파악
  - (특허분석) 디버터는 최근 특허출원이 증가하고 있는 분야로, 미국의 특허가 피인용도와 시장확보 지수가 높은 것으로 분석되었으나, 미국을 제외하고 기타 국가의 격차가 타 핵심기술분야 대비 크지는 않은 상황
  - (논문분석) 독일이 논문을 가장 많이 게재한 국가로 분석되었으며, 러시아는 논문의 피인용도가 가장 높은 것으로 분석. 한국은 피인용도와 게재건수가 모두 낮은 것으로 분석



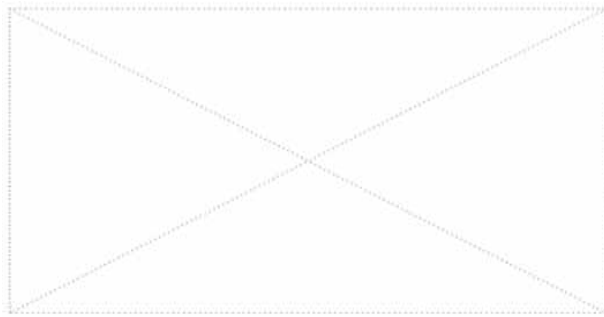
< (특허)피인용도/시장확보지수(국가별) >

< (논문)피인용도/논문 게재건수(국가별) >

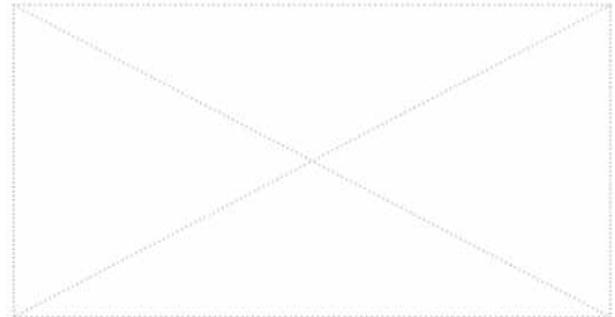
- (주요 이슈 및 리스크) 디버터 설계를 위한 물리해석 역량의 해외 주요국가와 격차가 있으며, 설계 코드 운영을 위한 인력이 부족한 상황. KSTAR 디버터와의 기술격차(곡면부 포함 대형 디버터 제작 등), ITER와 실증로의 디버터 기술격차(열속, 중성자속 조건하 성능 검증 등) 해소가 필요
  - ITER 디버터 조달국(EU, 일본, 러시아)를 중심으로 연구개발이 진행 중이며, 실증로 적용을 위한 다양한 디버터 개발을 제시하고 기술개발을 추진 중이지만, 한국은 비조달국으로서 설계, 제작 및 검사 기술 확보에 한계 존재
    - ※ 최근 KSTAR 디버터 업그레이드를 통해 기술격차를 해소하고 있으나, KSTAR - ITER - 실증로급 기술의 격차해소 필요
    - ※ ITER 디버터의 열속 성능 평가를 위한 시험시설(EU, 러시아)을 보유하고 있으며, 핵융합 다양한 디버터 개념의 연구를 위해 신규연구시설 구축 중(EU)
- (추진 전략 방향) 핵융합 실증로 디버터 설계를 위해 코드 운용 인력의 집중적인 양성과 더불어, 디버터 시험·검증 인프라 구축(증식블랑켓 시험시설과 공유)을 통해 ITER 기술을 흡수할 수 있는 기반을 마련하고, 더 나아가 실증로급 디버터 제작·검증
  - (단기) KSTAR 텅스텐 디버터 실험을 통한 운전기술 개발 및 검증과 더불어, 핵융합 실증로 디버터 설계를 위한 설계·해석 코드 운용 인력의 집중적인 양성
    - ※ 가장 우선적으로 실증로급 디버터의 설계와 ITER 운전결과 흡수를 위해서는 디버터 설계코드 운용인력의 양성이 선행될 필요성이 높은 상황이며, 설계코드를 직접 개발하기 보다 국제협력을 통한 빠른 운용역량 확보 필요
  - (중장기) 증식블랑켓 시험시설과 연계하여 실증로급 디버터 제작 및 검증 하고, ITER 텅스텐 디버터 운전결과를 반영하여, 실증로급 디버터 제작기술 확보

## 바. 가열 및 전류구동

- (기술개발 필요성) 전기생산이 가능한 실증로 운전 조건의 고성능 플라즈마 발생 및 연속 운전을 위해서는 기존장치의 낮은 효율과 좁은 운전영역을 극복한 차세대 대용량 가열 및 전류구동 장치 개발이 필수
- (동향 분석) 국가별 핵융합 실험장치 운영을 통해 가열 및 전류구동 장치 기술을 개발 중이며, 한국도 KSTAR 장치 운영을 통해 기술 개발 추진 중
  - (연구개발 동향) 국가별 핵융합 실험장치 운영을 통해 다양한 종류의 가열 및 전류구동 장치의 기술력이 축적되어 있으며, 한국은 KSTAR 운영을 통해 일부 종류(NBI 등) 가열 및 전류구동 기술 축적 중
  - (연구개발 투자) 8대 핵심기술 분야중 3번째로 많은 금액이 투입되었으며, 2016년 KSTAR 중성입자빔 가열장치(NBI-2) 개발이 착수됨에 따라 크게 증가한 것으로 분석

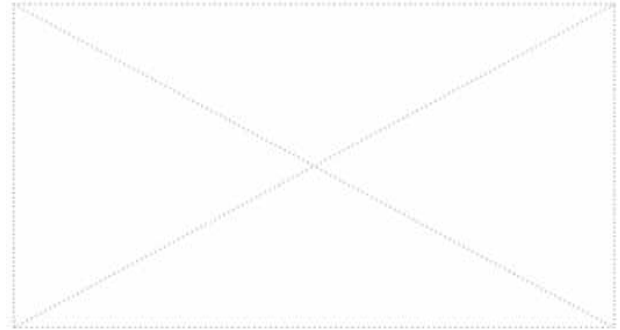
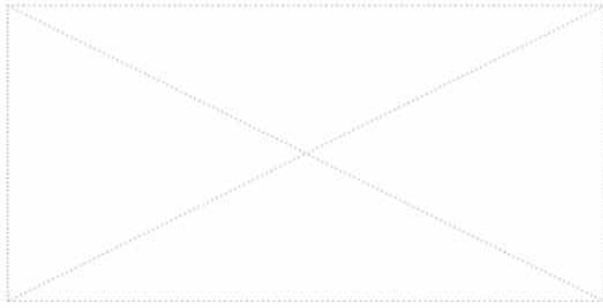


< 연구개발 투자(8대핵심기술 비중) >



< 기술수준 현황 >

- (기반역량 분석) KSTAR 장치 운전을 통해 일정 수준 이상의 가열 및 전류구동 장치 기술역량 확보
  - (기술수준) KSTAR 장치 운영을 통해 중성입자빔 가열 장치의 장시간 운전기술에 강점이 있으나, 실증로급 운전을 위한 전산 모델링, 제어기술 등 추가적인 기술개발 필요
  - (특허분석) 오랜 기간 동안 연구개발이 이루어진 분야로 출원된 특허의 경쟁력이 타 핵심기술 대비 상대적으로 높은 분야이며, 미국의 출원 특허가 피인용도와 시장확보지수가 가장 높은 것으로 분석
  - (논문분석) 이탈리아가 가장 많은 논문을 출원하고 있으며, 피인용도가 가장 높은 국가는 영국으로 분석. 한국은 피인용도가 높으나 게재 건수가 타국가 대비 작은 것으로 분석



< (특허)피인용도/시장확보지수(국가별) >

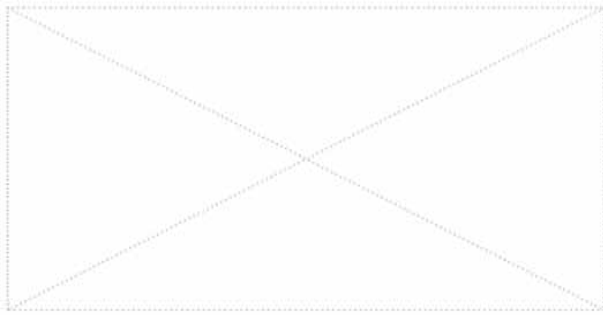
< (논문)피인용도/논문 게재건수(국가별) >

- (주요 이슈 및 리스크) 핵융합 실증로는 고성능의 플라즈마 운전이 요구되며, 이에 따라 현재 가열 및 전류구동 장치의 성능보다 상향된 요구조건을 만족시켜야 하는 상황. 또한, 현재 제시된 여러 종류의 장치 중 특정 시점에서 가장 효율적인 가열 및 전류구동 장치의 조합 결정이 필요
- (추진 전략 방향) 실증로에 적용 가능성이 가장 높은 가열 및 전류구동 장치(중성입자빔, ECH) 중심으로 요소기술 개발과 운전 성능 예측 등 시뮬레이션 기술개발에 집중. 현재 가열 및 전류구동 장치 기술의 성능 향상을 위한 인프라 구축 추진
- (단기) KSTAR를 활용하여 노심 플라즈마와 기술과 연계한 중성입자빔, ECH 자이로트론 등 운전 기술 개발과 성능예측을 위한 시뮬레이션 요소기술 개발에 집중하고, 학·연 연계를 통해 가열 및 전류구동 장치 기술 추적
  - ※ 실증로 적용 가능한 가열 및 전류구동 장치가 확정되지 않은 시점에서 가장 유력한 중성입자빔, ECH 자이로트론 장치를 KSTAR에 적용한 운전기술 개발과 더불어 다양한 개념의 기반기술을 추적하고 특정 시점에서 가장 효율적인 가열 및 전류구동 장치의 조합 결정
- (중장기) 가열 및 전류구동 장치의 성능 향상을 위한 시험시설 인프라 구축을 통해 실증로에 적용 가능한 장치 개발 및 시험성능 평가 추진. 구축된 연구 인프라를 활용하여 ITER 가열 및 전류구동 장치 기술, 운전 기술 결과 흡수

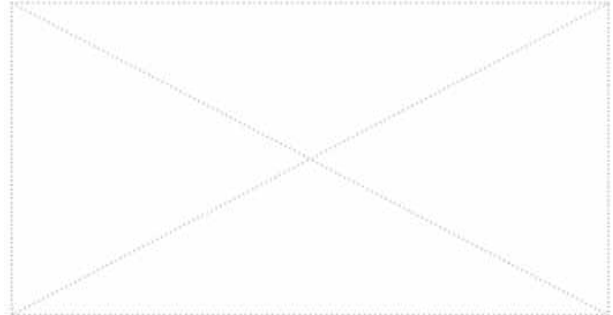


## 사. 초전도 자석

- (기술개발 필요성) 기존 기술의 한계치(13T급)를 극복하고, 실증로급(6.5-7.0T, 최대 16T이하)의 고자장용 저온 초전도 선재, 도체 및 자석 개발 필요
- (동향 분석) KSTAR, ITER 조달을 통해 ITER급 저온초전도체 기술을 확보하였으며, 최근 해외 스타트업을 중심으로 고온초전도체 기술개발이 진행 중
  - (연구개발 동향) ITER 이후 실증로급 초전도 자석 개발을 위한 지속적인 연구개발 및 시험평가 시설을 구축하였으며, 최근 민간기업을 중심으로 고온초전도체 개발 병행 중
  - (연구개발 투자) 한국은 KSTAR, ITER 건설·조달을 위해 8대 핵심기술중 2번째로 많은 연구개발비가 투입되었으며, 최근 초전도 도체 시험시설 구축사업에 착수

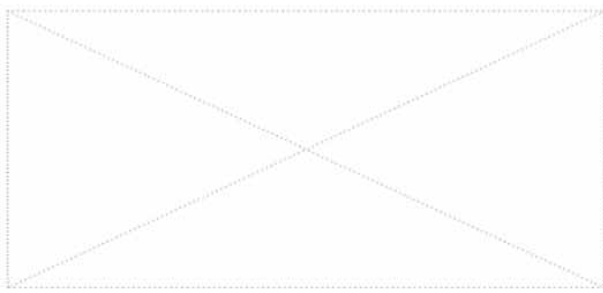


< 연구개발 투자(8대핵심기술 비중) >



< 기술수준 현황 >

- (기반역량 분석) KSTAR, ITER 저온초전도체 조달을 통해 기술역량이 일정 수준 이상 갖춰진 것으로 판단되나, 조달 이후 기술수준이 정체되어 있는 것으로 파악
  - (기술수준) KSTAR, ITER 등 조달경험을 바탕으로 핵심기술 중 선진국과의 격차가 작은 분야이나, 조달 종료 이후 기술수준 향상이 정체되어 있는 것으로 파악
  - (특허분석) 미국의 출원 특허가 가장 경쟁력이 높은 것으로 파악되고 있으며, 8대 핵심기술 분야 중 유일하게 초전도자석 분야의 특허의 피인용도가 타국가 대비 높은 수준
  - (논문분석) 미국이 가장 많은 논문을 게재하고 있으며 네덜란드가 가장 높은 피인용도를 기록하고 있는 상황. 한국은 특허와 마찬가지로 피인용도는 높으나 게재 건수가 낮은 상황



< (특허)피인용도/시장확보지수(국가별) >

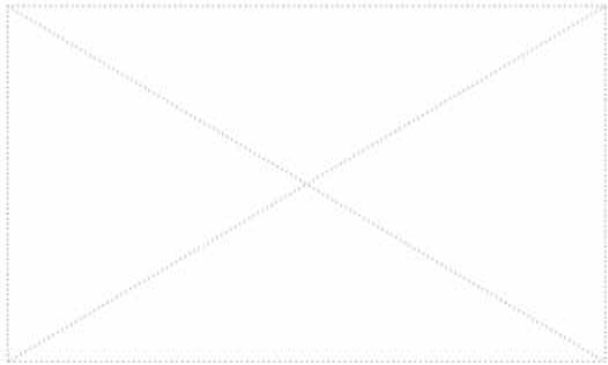


< (논문)피인용도/논문 게재건수(국가별) >

- (주요 이슈 및 리스크) 초전도자석 제작경험을 바탕으로 저온초전도체의 경우 일정 수준 이상의 기술력을 확보하고 있으나, 실증로급 기술개발을 위한 추가적인 연구가 필요하며, 최근 기술역량을 보유한 산업체의 이탈의 사례가 발생함에 따라 산업체의 기술력 유지 및 향상 필요
  - 저온초전도 선재는 국내에서 이미 16T급 Nb<sub>3</sub>Sn 선재개발에 성공하고, 양산 체제를 위한 시험단계를 진행 중임에도 불구하고 여전히 자체개발 리스크가 큰 기술로, 선재 평가/분석 방법 개발을 통해 선재개발 시에 발생하는 문제 해결을 위한 R&D에 집중 필요
- (추진 전략 방향) 초전도 도체 시험설비 구축사업을 통해 저온초전도 선재, 도체 개발과 시험·검증에 집중하고, 최근 주목 받고 있는 고온 초전도체 기술을 추적. 초전도 도체 시험설비 구축 이후, 초전도 자석 시험설비 구축을 통해 실증로급 초전도자석의 성능을 검증
  - (단기) 초전도 도체 시험시설 구축 사업을 활용하여 저온초전도자석 요소기술 개발 및 검증에 집중하고, 건설 및 개발 과정에서의 산업체의 참여를 통해 제작 기술력 유지. 또한, 고온초전도자석 기술의 경우 학·연협력을 통해 기술추적
  - (중장기) 초전도 도체 시험시설 구축 이후 초전도 자석 시험시설 구축(혹은 초전도 도체 시험시설 업그레이드)를 통해 실증로급 초전도 자석의 개발 및 검증 추진

## 아. 안전·인허가

- (기술개발 필요성) 안전한 핵융합에너지 이용 및 글로벌 핵융합기술 시장 진출 등을 위해 핵융합의 고유 안전성과 국제 핵융합 규제체계 개발 현황 등을 종합 반영한 실증로를 위한 안전·인허가 기술 개발 필요
  - 현재 IAEA를 중심으로 국제협력을 토대로 안전성 평가 관련 기술보고서 작성 진행 중
  - 영국 등 핵융합 인허가 규제체계 선도국을 중심으로 규제조화를 위한 국제협력 진행 중
- (동향 분석) 최근 세계적으로 핵융합 고유 안전성을 고려한 규제체계 마련에 착수
  - (연구개발 동향) 핵융합에너지의 고유한 특성을 반영한 안전·인허가 체계 개발 및 안전성을 평가할 수 있는 사고해석 코드 등 요소기술 개발 추진 중
  - (연구개발 투자) 8대 핵심기술 중 가장 적은 연구개발비가 투입된 것으로 분석되며, 한국의 핵융합 안전·인허가 연구는 미미한 것으로 분석
 



< 연구개발 투자(8대핵심기술 비중) >
  - (주요 이슈 및 리스크) ITER의 경우 원자력규제체계를 준수함에 따라 많은 문제점이 발생하였으며, 이를 해소하기 위해 전세계적으로 핵융합 고유 특성을 반영한 규제체계 개발이 착수. 과거 핵융합 안전·인허가 기술에 대한 투자가 미비함에 따라 미래 전략적인 계획 수립 필요
    - 타 핵심요소기술 대비 규모적으로 연구개발이 매우 부족하고 이를 지원할 기반 체계가 구축되어 있지 않은 분야로, 향후 기술개발을 위한 투자 확대와 함께 기술개발 가속화를 위한 인허가 체계의 조속한 마련이 필요
- (추진 전략 방향) 핵융합 고유 안전성을 고려한 인허가 규제체계 마련 및 핵융합 전력생산 실증로 건설 결정시점과 연계한 인허가 수검 및 인허가 획득
  - (단기) 해외 인허가 규제체계 추적 등 글로벌 수준에 부합하는 인허가 규제체계 수립 및 인허가 기관과의 사전 이슈 공유, 공감대 형성 추진. 핵융합기술 안전성 확보를 위해 실증로 설계 추진 및 부지선정, 사고해석 등의 안전성 사전평가에 필요한 핵융합 안전성 평가 기술 개발
  - (중장기) 핵융합 전력생산 실증로 설계와 연계하여 의사결정 시점('38년) 이후 건설 착수가 가능하도록, 핵융합 전력생산 실증로 인허가 획득 추진

## 5. 결론

### (1) 기대효과 및 활용방안

#### □ 핵융합 장기 연구개발 로드맵 수립 및 전략 목표 수립 활용

##### ○ 핵융합에너지의 핵심기술 확보를 위한 장기 연구개발 로드맵 수립의 기초자료로 활용

- 기술분류체계 수립에 따라, 핵심기술별 기술, 정책, 연구개발 투자, 연구개발 인력, 연구 시설장비 등 상세 동향 자료의 작성을 통해, 핵융합에너지 장기 연구개발 로드맵 수립의 기초자료로 활용

##### ○ 중장기 관점에서 체계적인 핵융합에너지 실증로 개발을 위해 기술별 목표설정 및 핵심기술 확보 전략 기반 마련

- 핵융합 전력생산 실증로 개발을 위한 핵심기술별 장기적 목표 설정으로 장기적으로 추진되는 핵융합에너지 연구개발의 효율성 제고 추진

- 기술별 주요 이슈사항, 리스크 및 해결방안 작성을 통해 핵융합 기술별 전략 수립을 위한 기초자료 활용

#### □ 제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획 전력목표 이행

##### ○ 핵융합 기술분류체계 수립 기획연구를 통해 제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획의 전략목표의 충실한 이행 기여

- (전략목표1) 과제1-1 「장기 연구개발 로드맵 구체화 및 체계적 이행」 “핵융합 전력생산 실증로 개념을 바탕으로 장기 연구개발 로드맵 구체화('23, 국가핵융합위 보고)” 달성 기여

#### □ 국내 핵융합 관련 전문가 의견수렴을 통한 정책 추진 효율성 제고

##### ○ 핵융합계 산·학·연 전문가 위원회 구성·운영을 통해 핵융합 실증로 개발을 위한 핵융합계 역량 결집 및 공감대 형성

- 전문가 위원회 구성·운영을 통해 기획연구 분석결과의 객관성을 제고하고, 핵융합에너지 개발의 공감대 형성을 통해 향후 정책 추진의 효율성 제고

#### □ 중장기적으로 핵융합에너지 핵심기술 확보를 통한 세계 선도

##### ○ 본 기획연구 결과활용으로 로드맵 수립을 통해 장기적으로 핵융합에너지 전력생산 실증로 핵심기술 확보와 더불어, 기술역량 확보를 통한 핵융합에너지 분야 세계적 선도 기여

## (2) 한계점 및 후속연구 방향

### □ 핵융합 핵심기술 개발의 체계적인 전략 수립

- 본 기획연구는 핵융합로드맵 수립을 위한 기초자료 확보를 위해 추진되었으며, 향후 장기 연구개발 로드맵 수립 기획연구를 통해 핵융합 실증로 핵심기술 개발의 전략 수립 필요
- 핵융합 실증로 핵심기술 로드맵 수립과 더불어 장기적 관점에서의 산업생태계 확장, 인력양성, 상용로 경제성·안전성 확보 등 기반 마련을 위한 추진전략 수립 필요
- 핵융합 전력생산 실증로 설계 로드맵 수립 및 확정과 핵심기술 개발과의 연계성 검토, 종합적인 조정을 통해 수립 전략의 타당성 제고 필요

### □ 핵융합 실증로 핵심기술 확보의 우선순위 설정

- 핵융합 핵심기술 상세 로드맵 개발과 함께 소요예산, 인력 도출을 통해 미래 요구되는 자원의 규모 산정과 함께, 자원 배분의 효율성 제고를 위한 우선순위 설정 필요
- 핵심기술별 기술개발 필요성, 실현 가능성, 시급성 등 기준 설정 및 우선순위 평가를 통해 대규모 예산이 소요되는 핵융합에너지 연구개발 투자의 효율성 제고 필요

### □ 전문가 공청회를 통한 사회적 공감대 형성 지속 노력 필요

- 핵융합 로드맵 수립의 전문가 혹은 대국민 공청회를 통해 핵융합에너지 개발의 사회적 수용성 제고와 함께, 국민적 공감대 형성으로 연구개발 추진의 타당성, 지속성 확보 필요

### □ 핵융합 에너지 환경변화의 유연한 대응체계 구축 필요

- 최근 민간 스타트업, 미국, 영국을 중심으로 빠르게 변화하는 기술개발과 환경변화의 대응이 가능한 로드맵 수립과 대응 및 관리체계 구축 필요
- 핵융합 전력생산 실증로 기본개념과 제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획에서는 내외부 환경변화에 따른 계획의 지속적인 수정·보완을 명시하고 있으며, 또한, 전력생산 실증로의 세부기술사양의 경우 설계 TF에서 구체화해감에 따라 반영 가능할 것으로 기대

## < 참고 문헌 >

- 과학기술정보통신부. (2022) 제4차 핵융합에너지개발진흥기본계획(2022~2026)
- 과학기술정보통신부. (2023) 핵융합에너지 실현을 위한 핵융합 전력생산 실증로 기본개념(안) - 핵융합 장기 R&D 목표와 방향
- 에너지경제연구원. (2022), 세계원전시장 인사이트
- 일본 통합혁신전략추진회의 핵융합전략전문가회의. (2023), 국가핵융합에너지혁신전략(안)
- 산업통상자원부. (2023), 제10차 전력수급기본계획(2022~2036)
- 한국연구재단. (2022), 핵융합에너지 핵심기술 연구를 위한 실험장치의 개념 및 요건 연구
- Albanese, R. et al. (2019), The new Divertor Tokamak Test facility
- Baojie Nie. et al. (2018) Insights into fuel start-up and self-sufficiency for fusion energy : The case of CFETR
- EUROfusion(2018), European Research Roadmap to the Realisation of Fusion, EUROfusion(2018.09).
- EUROfusion Ad-Hoc Group(2018), Theory and Advanced Simulation Coordination (E-TASC), EUROfusion.
- Federici, G. & PPPT Teams(2018), "EU DEMO Design and R&D Activities: Progress and Updates", Meeting NAS, Cadarache
- F. Iannone et al. (2018).MARCONI-FUSION: The new high performance computing facility for European nuclear fusion modelling
- Favuzza, P. (2018), Assessment of erosion-corrosion phenomena induced by liquid Lithium on fusion structural materials,
- General Atomic. (2018), The DIII-D National Fusion Program Five-Year Plan 2019-2024, General Atomics Report
- G.Zhuang et al. (2018), Progress of CFETR Design
- I. Chapman. (2022), An update on the UK fusion programme, The 43rd Annual Fusion Power Associates Symposium

I. Goki. (2022), Japan Status Report on Fusion Research and Development, 18th KO–JA JCM

ITER Organization(2018), ITER Research Plan within the Staged Approach(Level III – Provisional Version), ITER Technical Report( ITR–18–003)

J.Li. (2018), Chinese Fusion Energy Strategy

JT–60SA Research Unit. (2018), JT–60SA Research Plan: Research Objectives and Strategy(v.4)

Marroncle J. et al. (2012), IFMIF–LIPAc Diagnostics and its Challenges

NASEM. (2021), Bringing Fusion to the U.S. Grid

Ochiai, K. et al. (2018), Design Progress of Advanced Fusion Neutron Source for JA/DEMO Fusion Reactor

Science and Technology Committee Fusion Energ. (2018), A Roadmap toward Fusion DEMO Reactor

S. Hsu, (2022), Update on the Bold Decadal Vision (BDV) for Commercial Fusion Energy, Fusion Power Associates 43rd Annual Meeting and Symposium,

Van Dam, James, (2018), “Fusion Energy Science: Overview”, U.S. DOE.

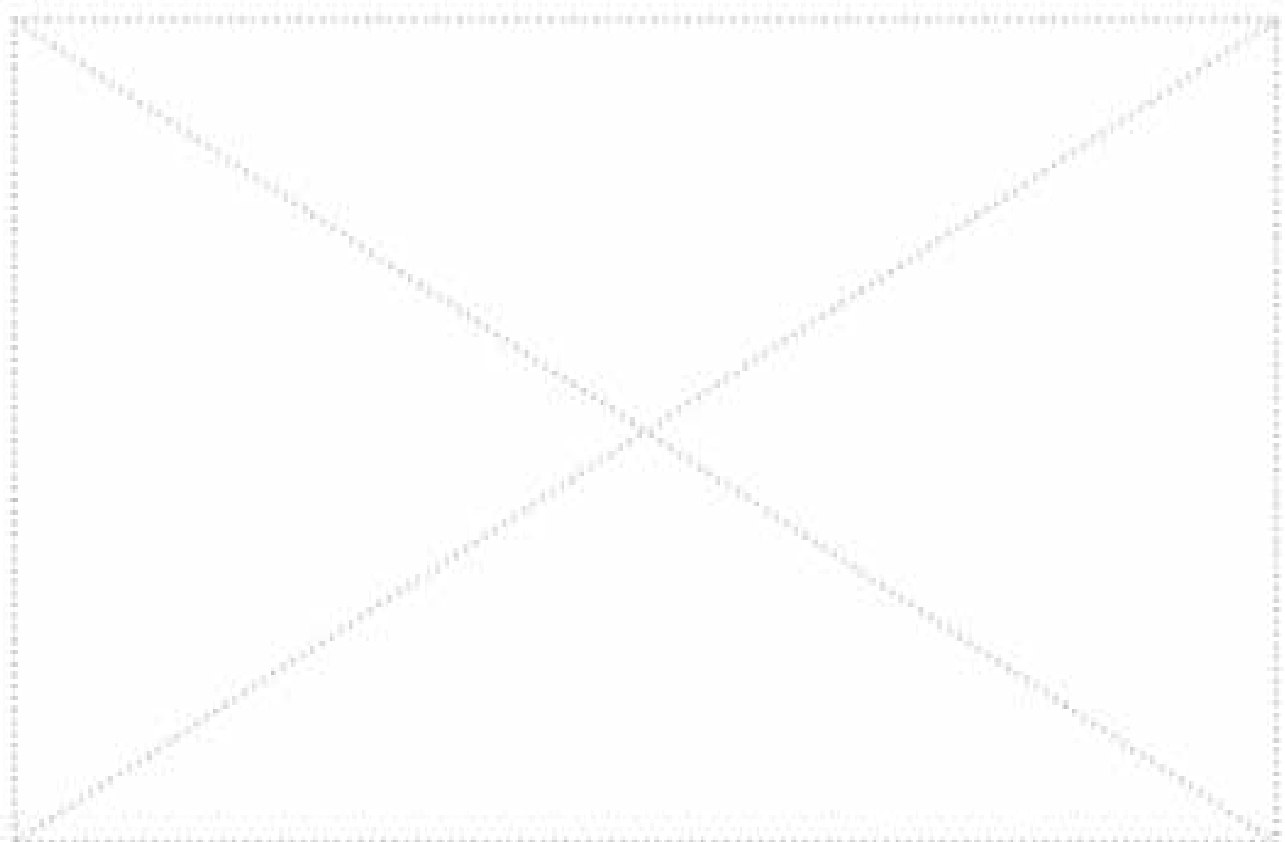
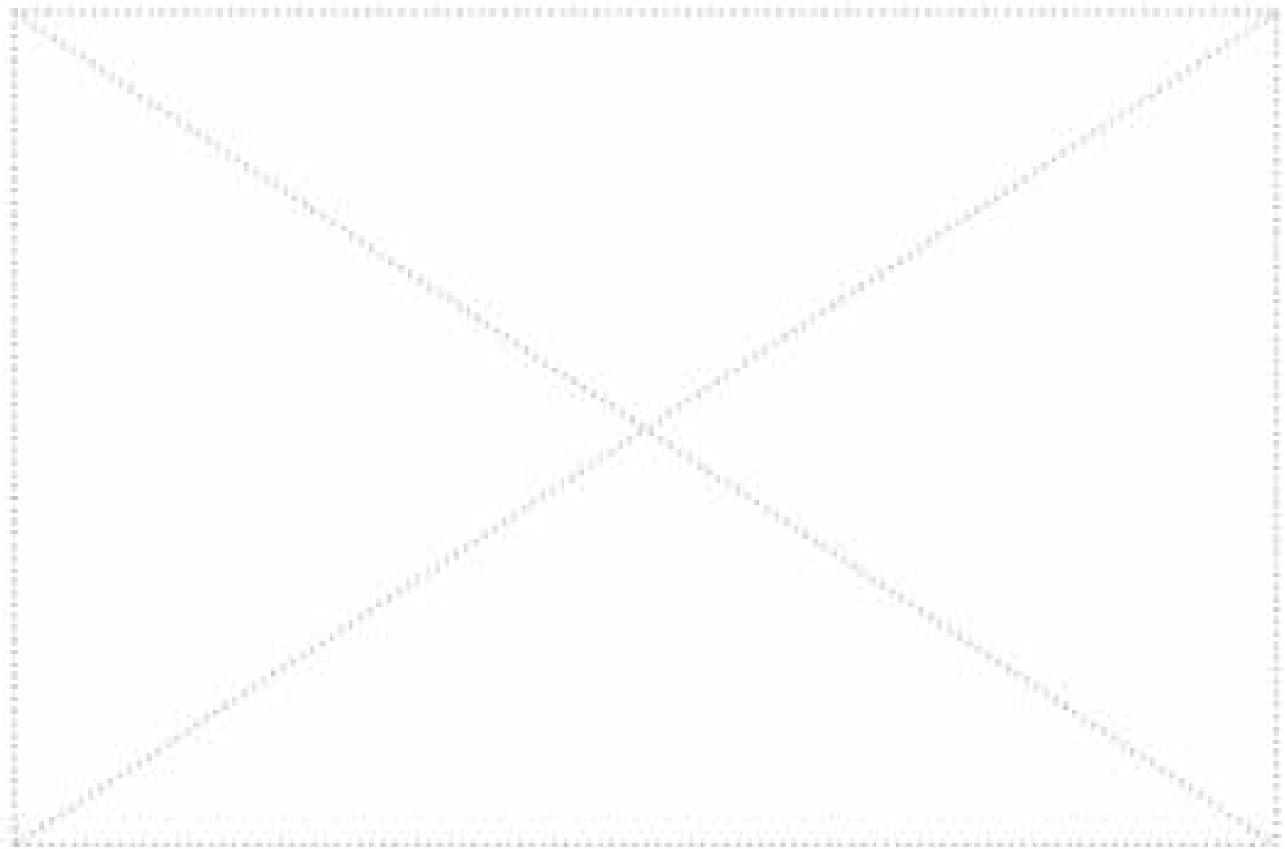
Wu, Y. (2019), Latest Fusion R&D Activities at INEST

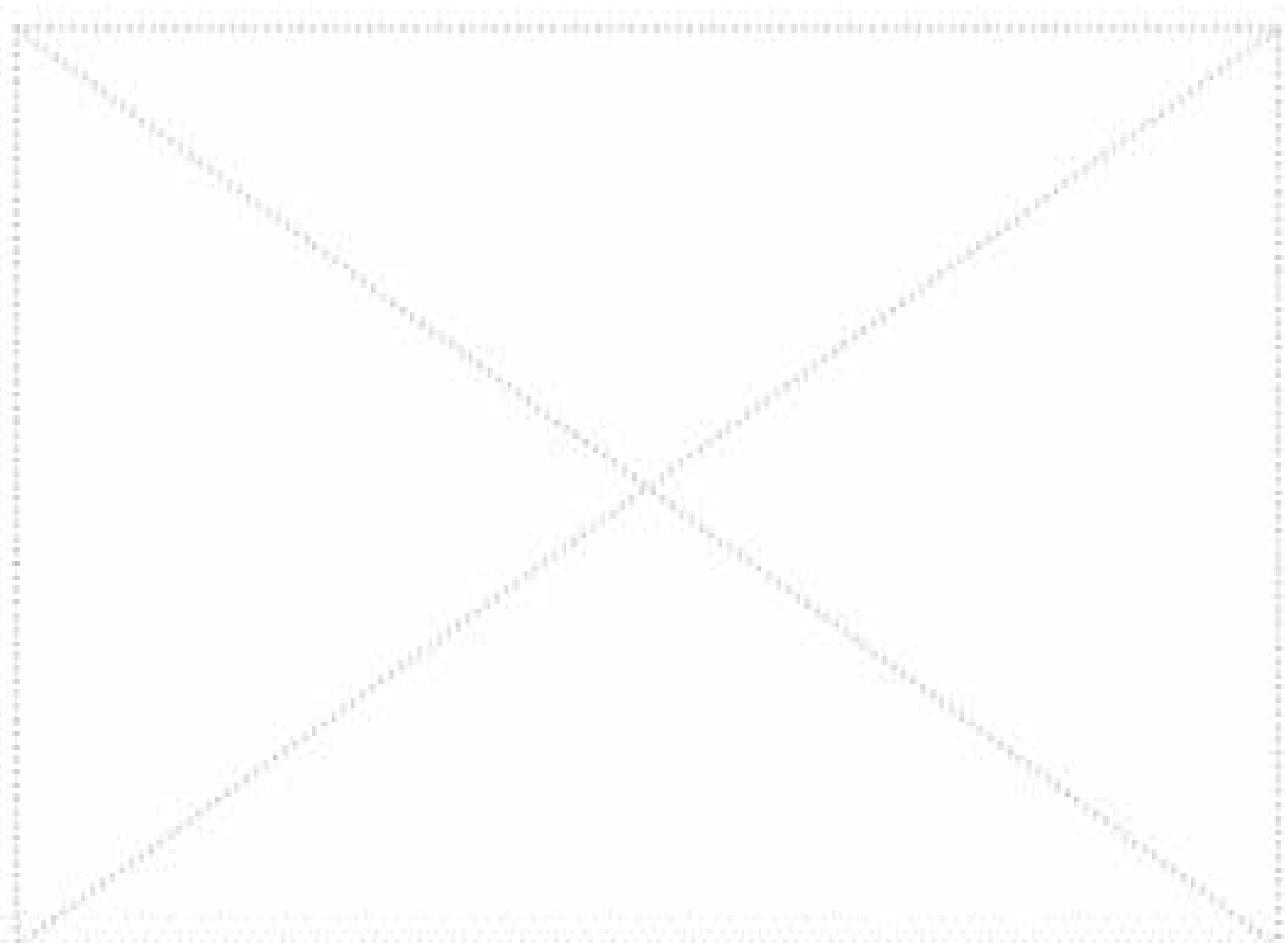
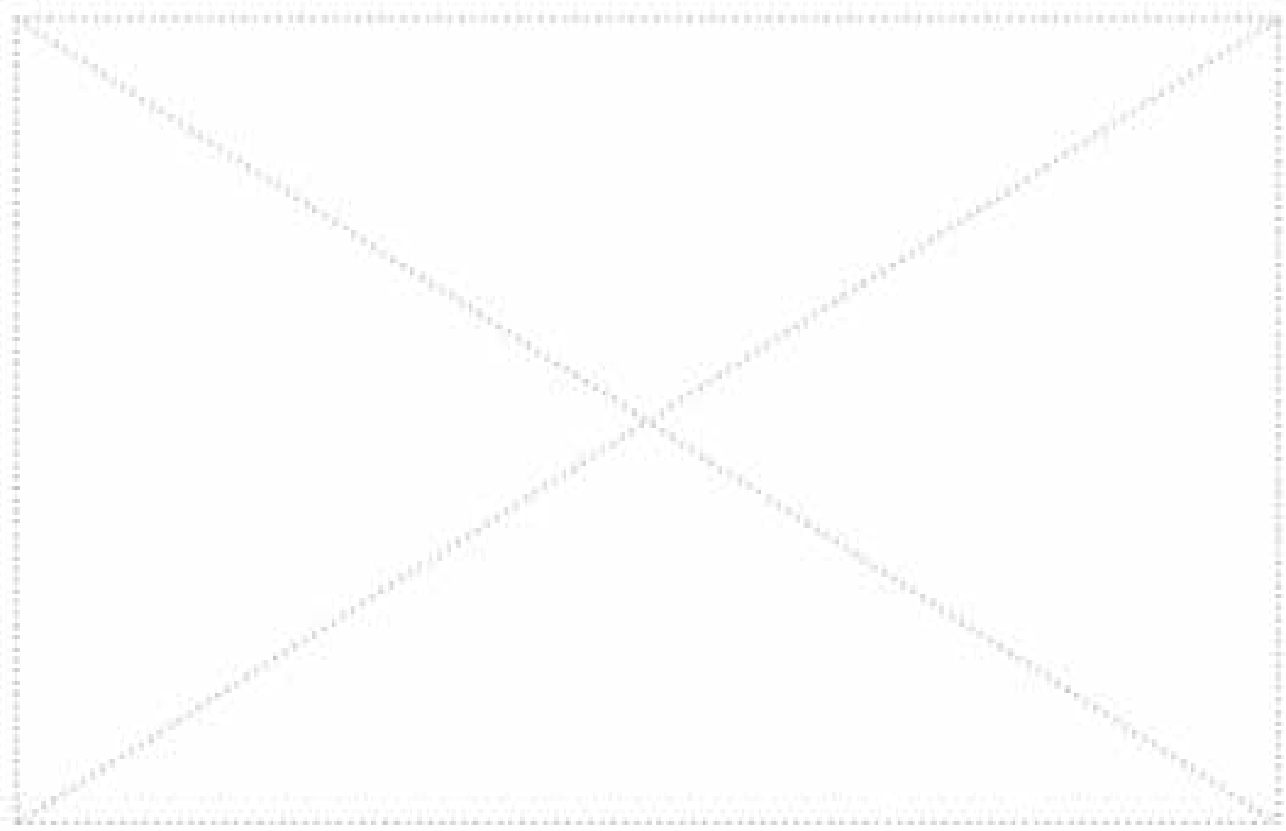
X. Litaudon et al. (2022), EUROfusion–theory and advanced simulation coordination (E–TASC): programme and the role of high performance computing

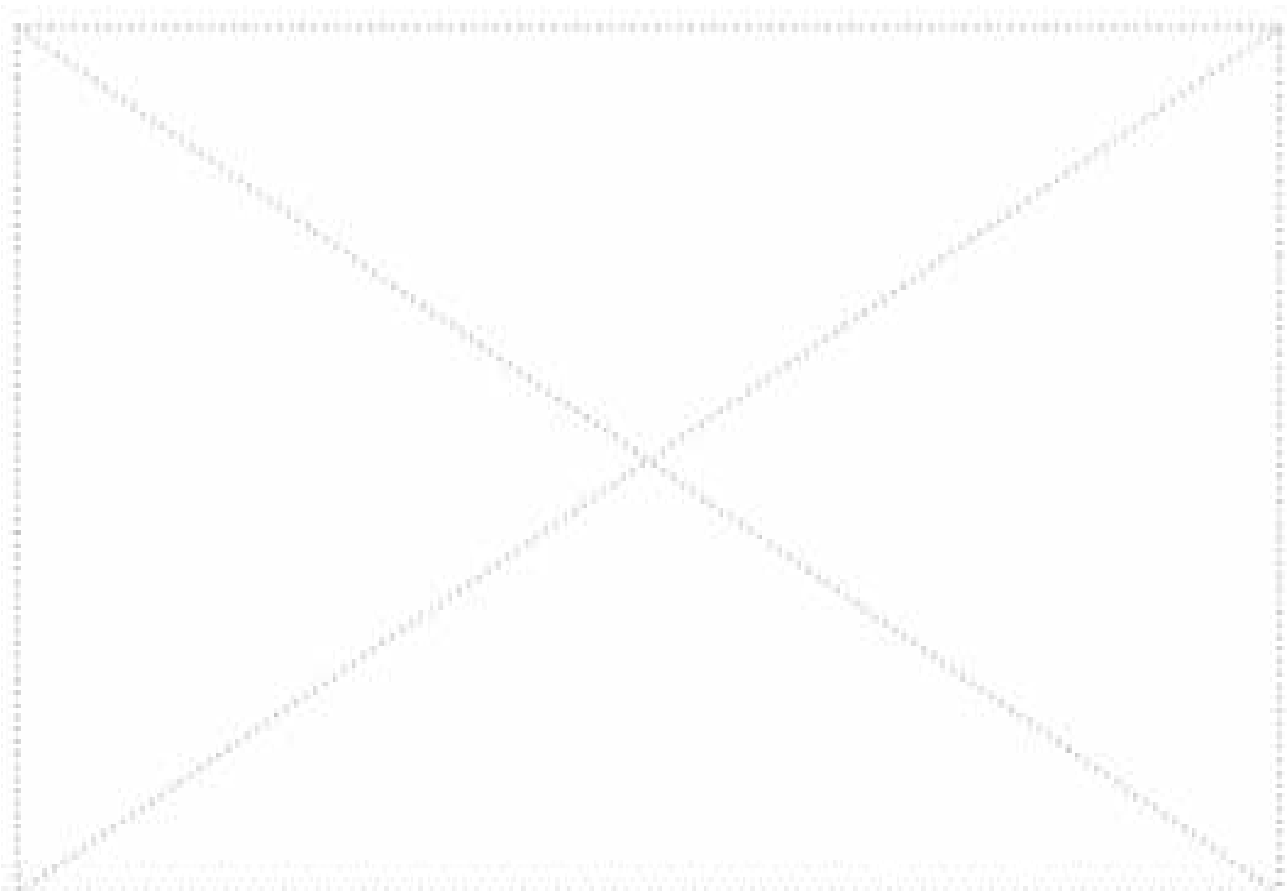
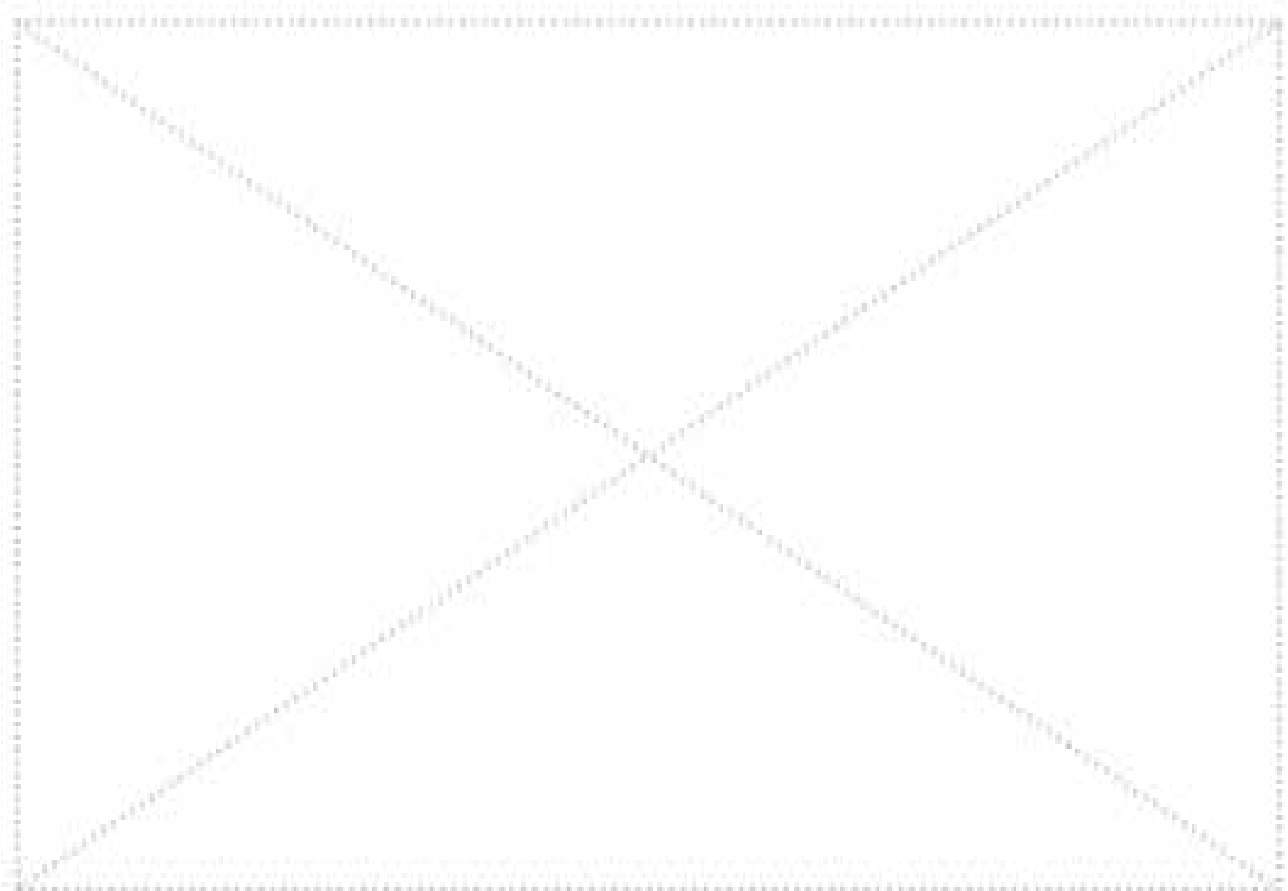
[https://www.iferc.org/iferc\\_%20project.html](https://www.iferc.org/iferc_%20project.html)

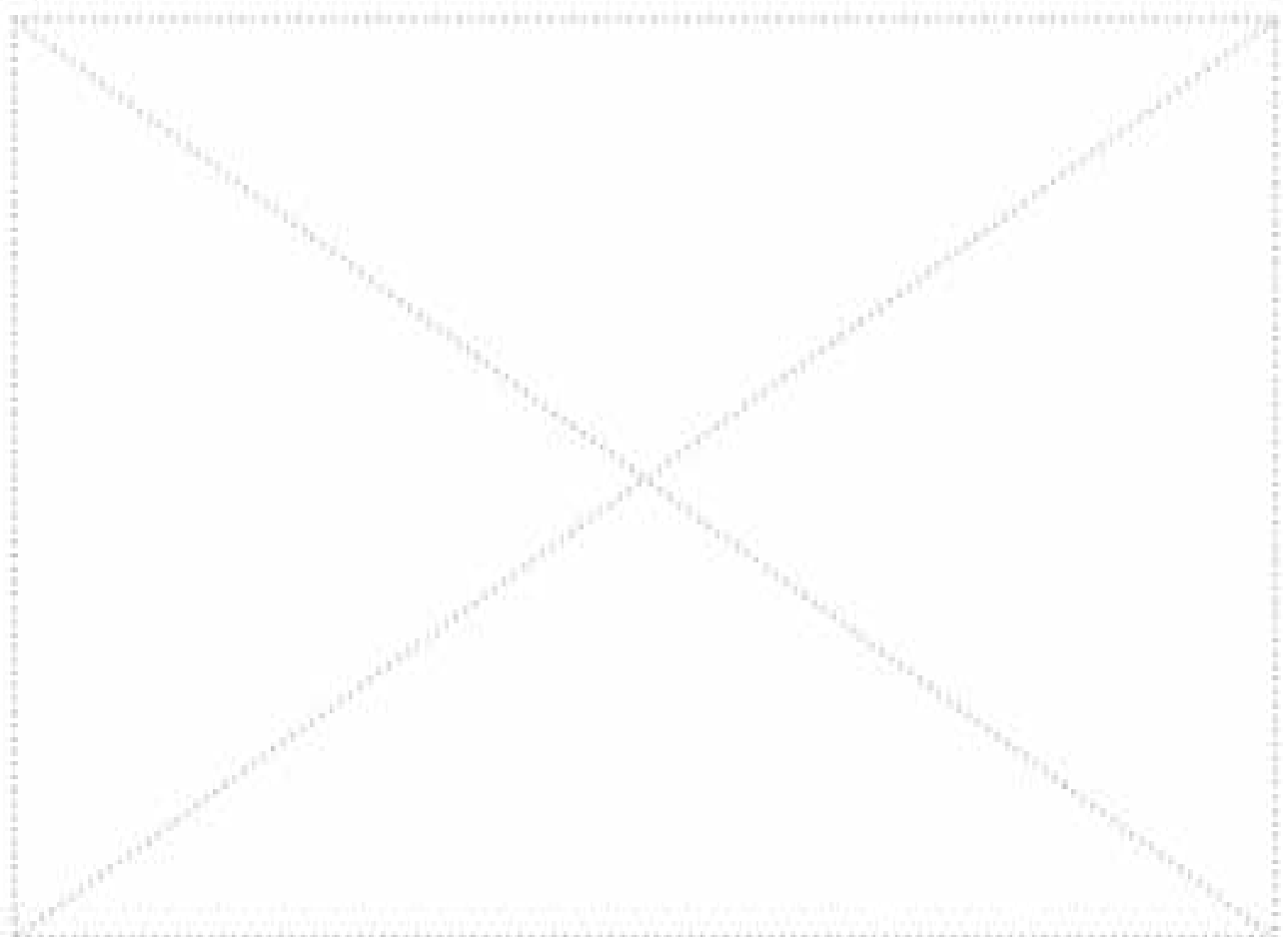
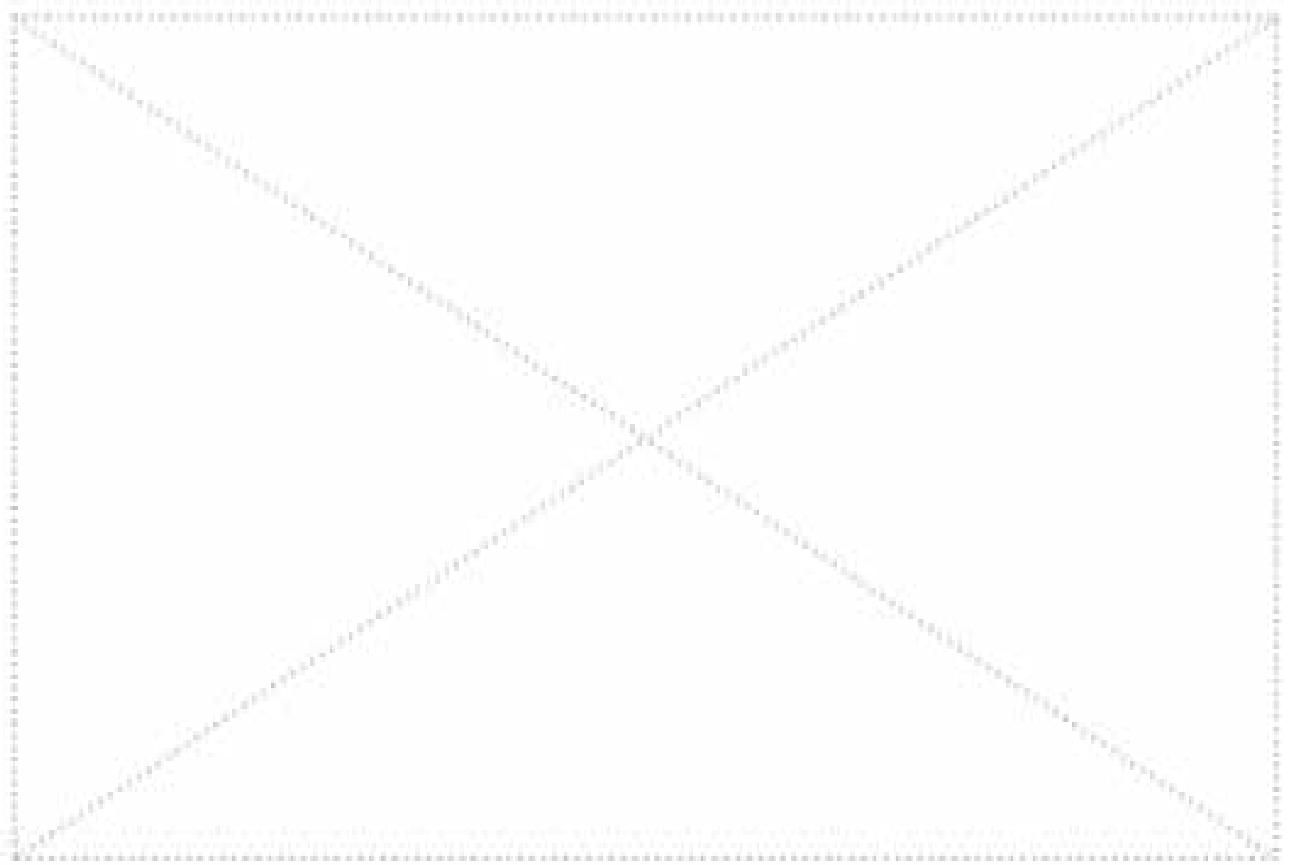
- 로 설계 : 로 개념 확립 및 건설 계획, 기기설계, 안전확보지침, 물리·공학·재료 DB 구축 등의 활동으로 구성
- 15개 요소기술
  - 초전도 코일 : SC 설계, 초전도 도체·코일 시험, 고강도 구조재·내방사선 절연재, 관련 BOP (냉각시스템 및 코일 전원) 설계, 코일 제조 등의 기술
  - 블랑켓 : 고체 증식·물 냉각 블랑켓, 텅스텐 모노블록 리미터 시스템, 리튬(6Li) 농축(일부는 연료주기에서), 베릴라이드 제조, 선진 블랑켓 등의 기술
  - 디버터 : 디버터 개발 목표 무결성 확인 및 로설계 적용, 플라즈마 운전 시나리오, 재료·기기 개발, 입자 제어, 디버터 제조 등의 기술
  - 가열·전류 구동 시스템 : 기술사양 결정, DEMO 시험용 설비 정비, 고출력·정상화, 고신뢰성, 고효율화, ECH 시스템 및 NBI 빔라인 정비 등의 기술
  - 이론 및 시뮬레이션 : 노심 플라즈마 제1원리계 시뮬레이션 코드(SMC : SiMulation Code) 군, 디버터 SMC, 노심 플라즈마 통합 SMC, 보호 리미터 평가 SMC, 핵융합로 재료 SMC, DEMO 시스템 통합 SMC, DEMO 시스템 통합 SMC, DEMO 제어 시뮬레이터 등의 기술
  - 노심 플라즈마 : DEMO 플라즈마 설계, ITER, JT-60SA 실험 연구, LHD 및 Heliotron J, 플라즈마-벽 상호작용 연구, 모델링/시뮬레이션 연구 등의 기술
  - 연료 시스템 : 연료주기 시스템 설계, 연료주기 시스템 기술 개발, 삼중수소 안전 취급·기기 개발, 삼중수소 대량 취급 시설, 리튬 확보, 초기 로딩(loading) 삼중수소 등의 기술
  - 핵융합로 재료, C&S : 저방사화 페라이트강, 선진 블랑켓 재료, 증식 기능재료(중성자 증배재 및 삼중수소 증식재), 디버터 재료, 계측·제어기기 재료, 기타(핵융합 중성자 핸드북 개발), 핵융합 중성자원, 로 구조 및 구조 규격(구조 설계, 공학 R&D, 구조 표준) 등의 기술
  - 안전성 : 안전성 법령 규제, 기기 고장 시나리오 확립, 안전성 해석 및 평가, 환경노출 삼중수소 거동 평가 등의 기술
  - 가동률 및 유지보수 : 보수 방식 잠정 결정, 백엔드 시나리오 검토, 보수 기술 개발 및 축적, 보수 기술 관련 신규시설 등의 기술
  - 계측 및 제어 : 이론 및 기존·해외 실험을 통한 예측, 실험 검증, 계측 개발, 운전 기준점 및 마진 평가, 오프라인 예측, 실시간 제어 시스템 등의 기술
  - 부지 정비 : 사전준비, 부지 설계·정비, 건설 설계·공사
  - 사회협력 : 사회연계 활동 본부 설치를 통한 활동 추진, 사회연계 인재육성, 사회연계 활동
  - 헬리컬 방식 : 헬리컬 플라즈마, 로공학·로설계, 수치 실험로 등의 기술
  - 레이저 방식 : 벽-플라즈마 상호작용 포괄적 이해, 액체금속벽 개발, 펄렛 제조·입사기술, 삼중수소 저장·제어 기술, 극한환경에서의 측정기술 등의 기술

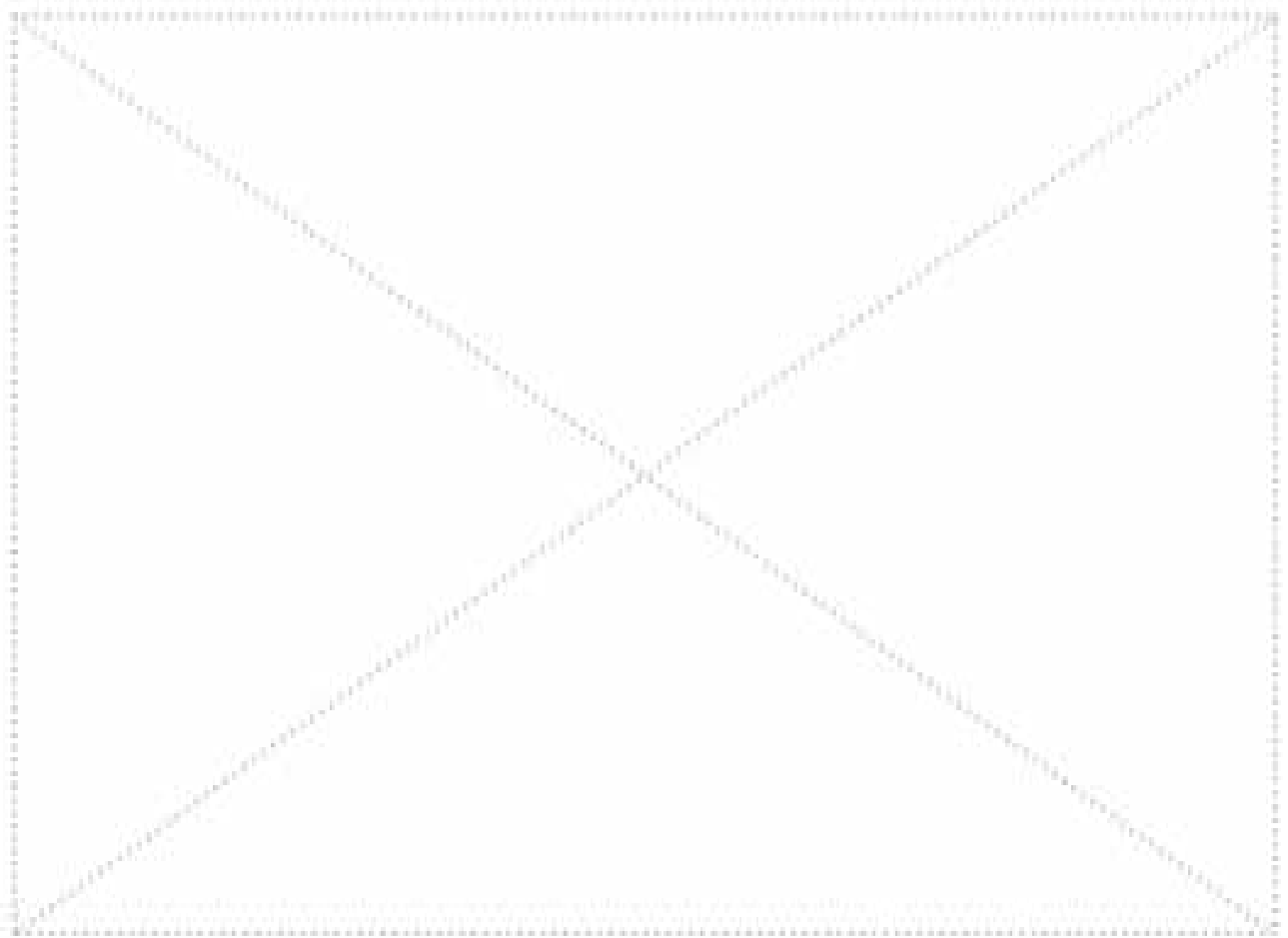


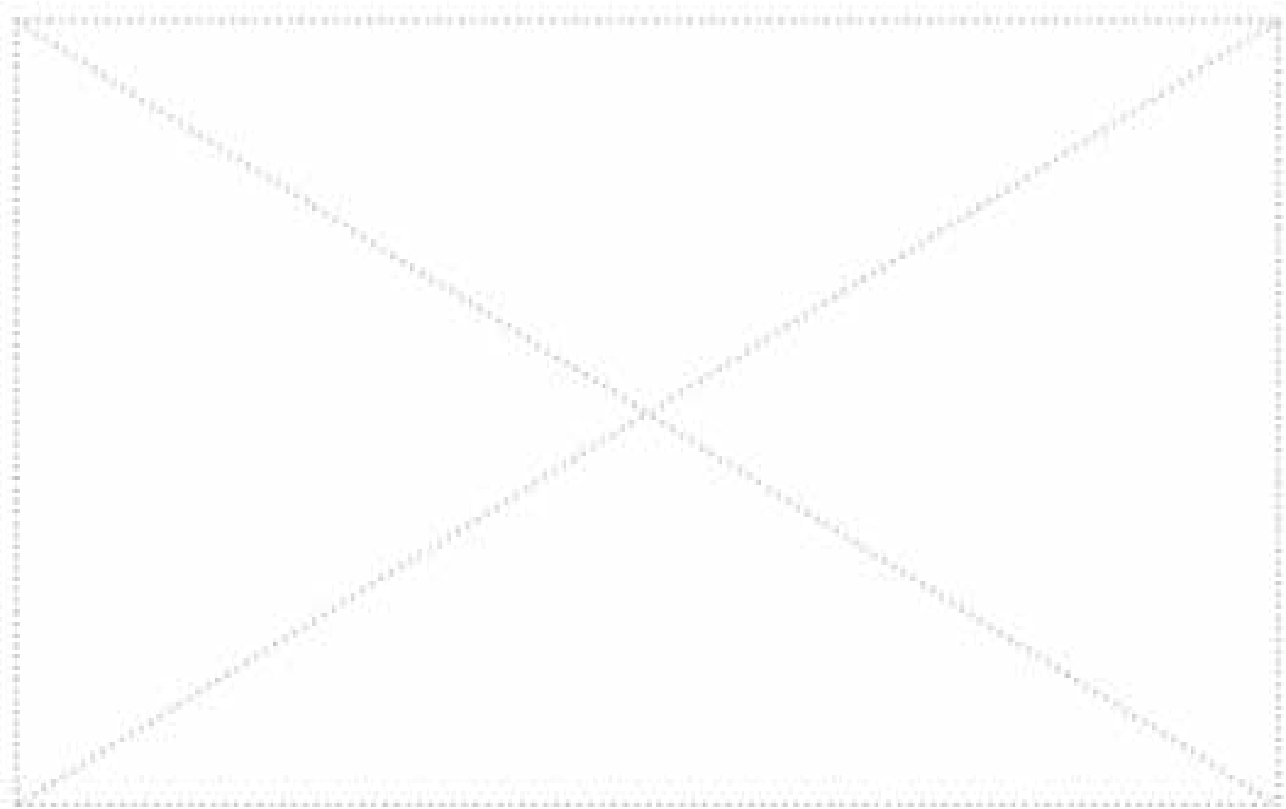
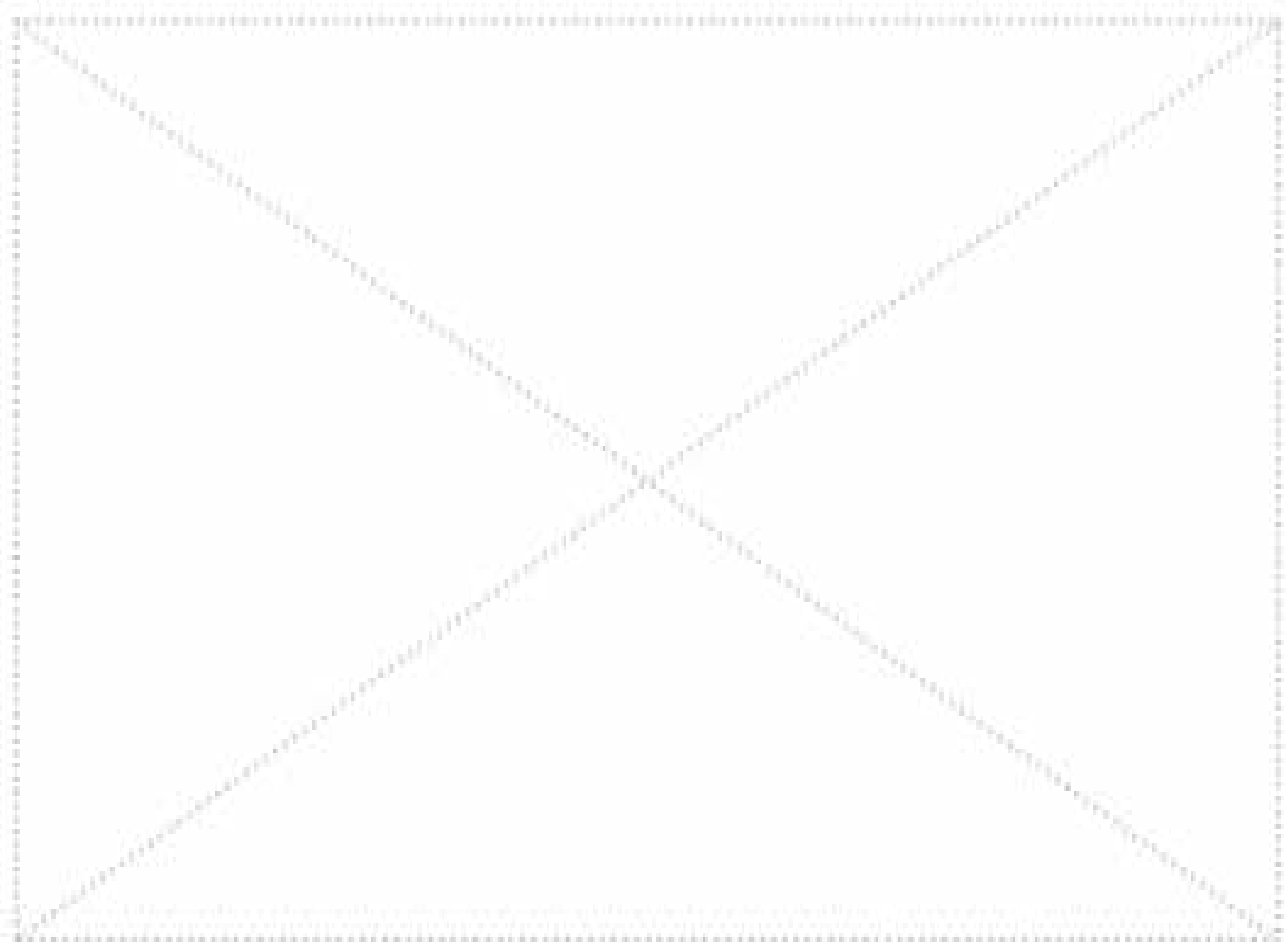


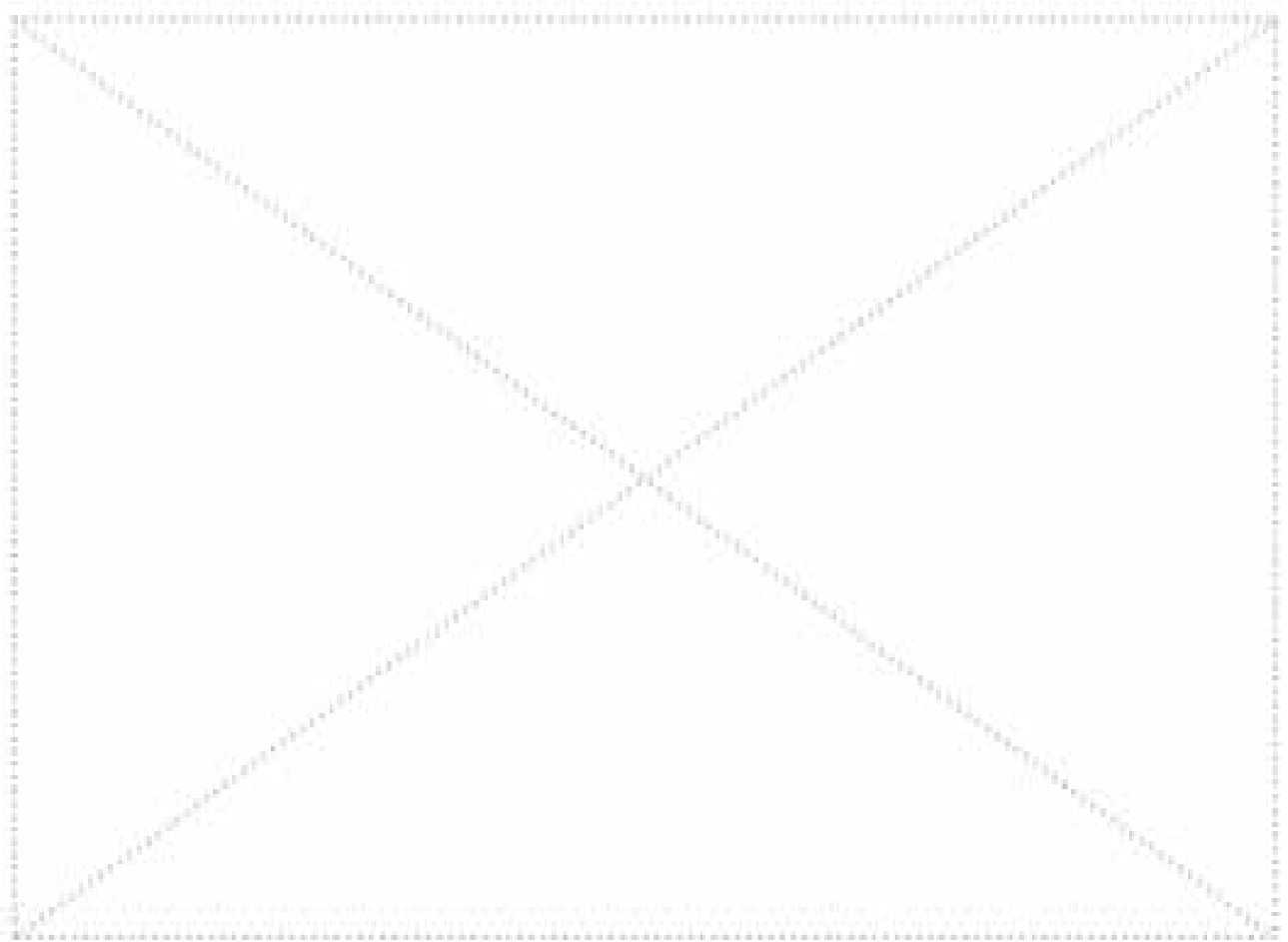
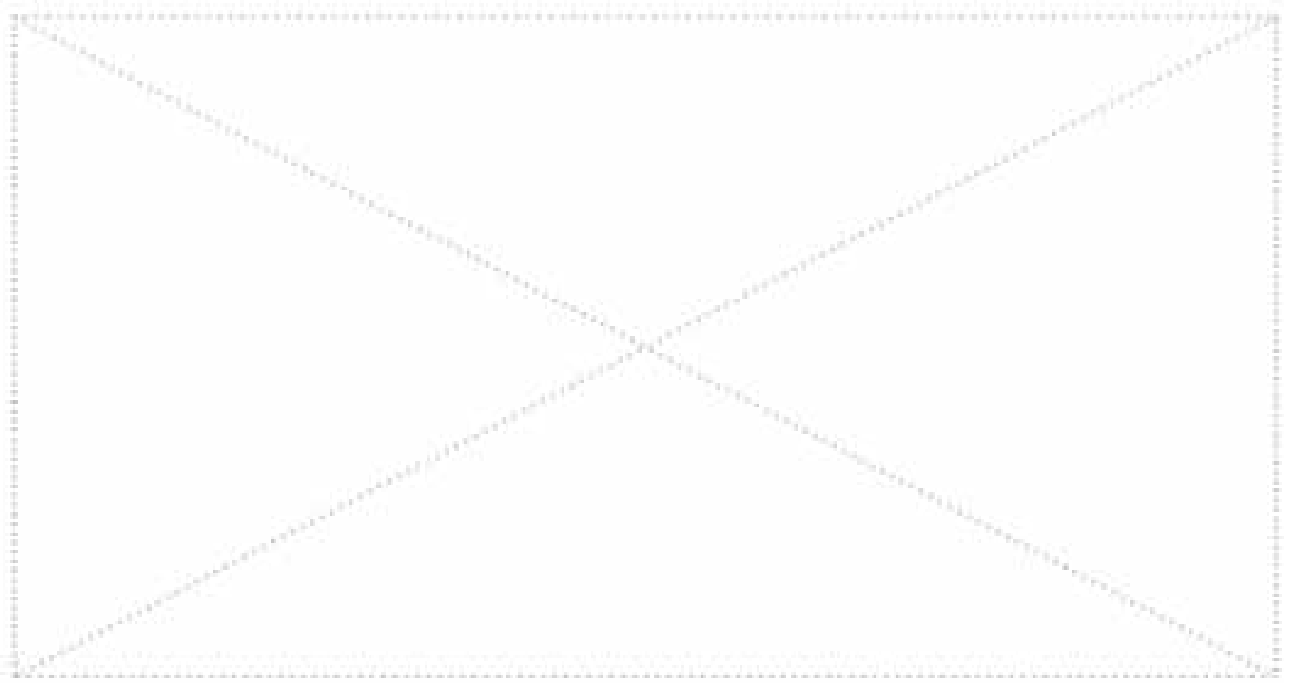


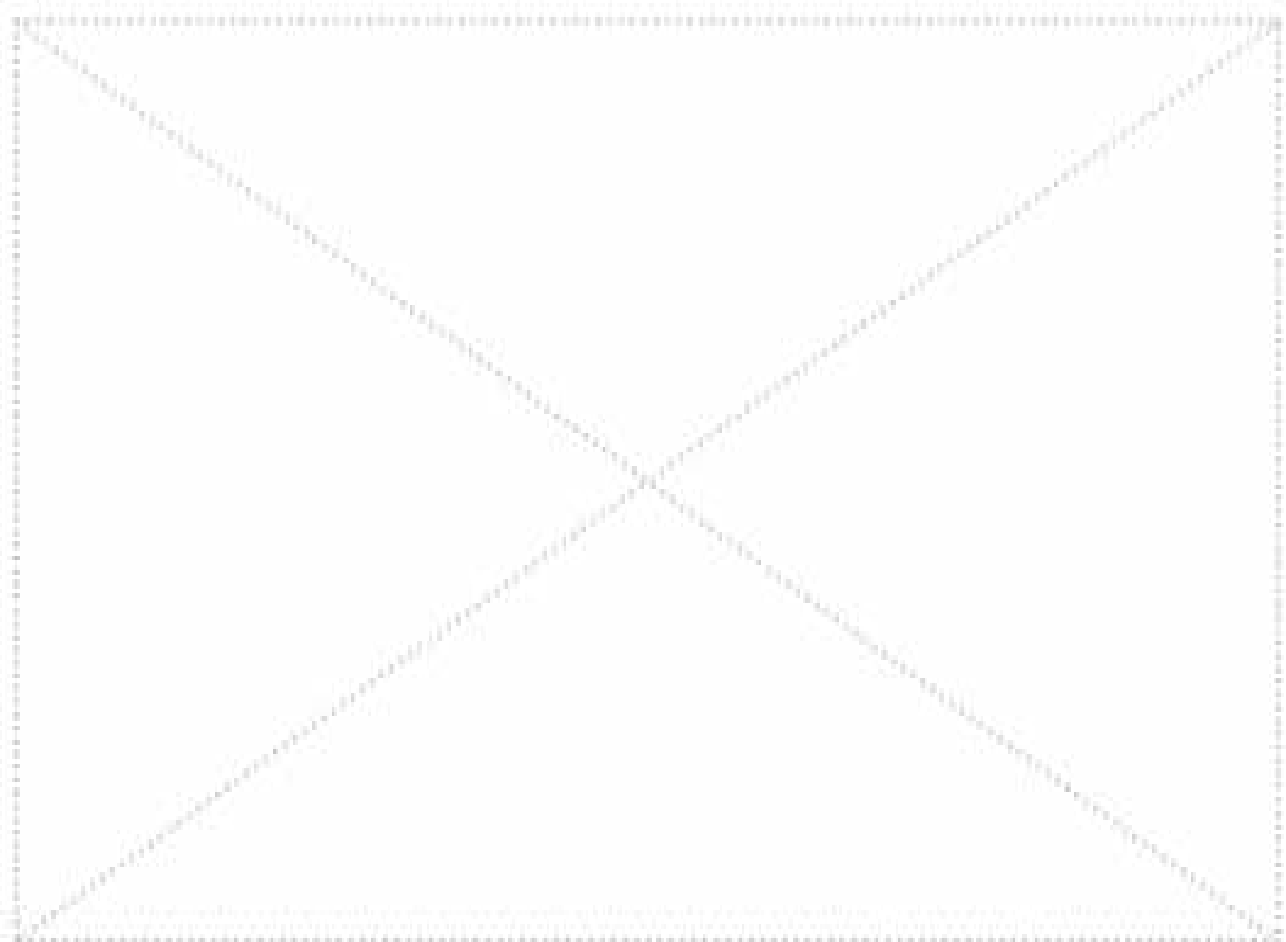
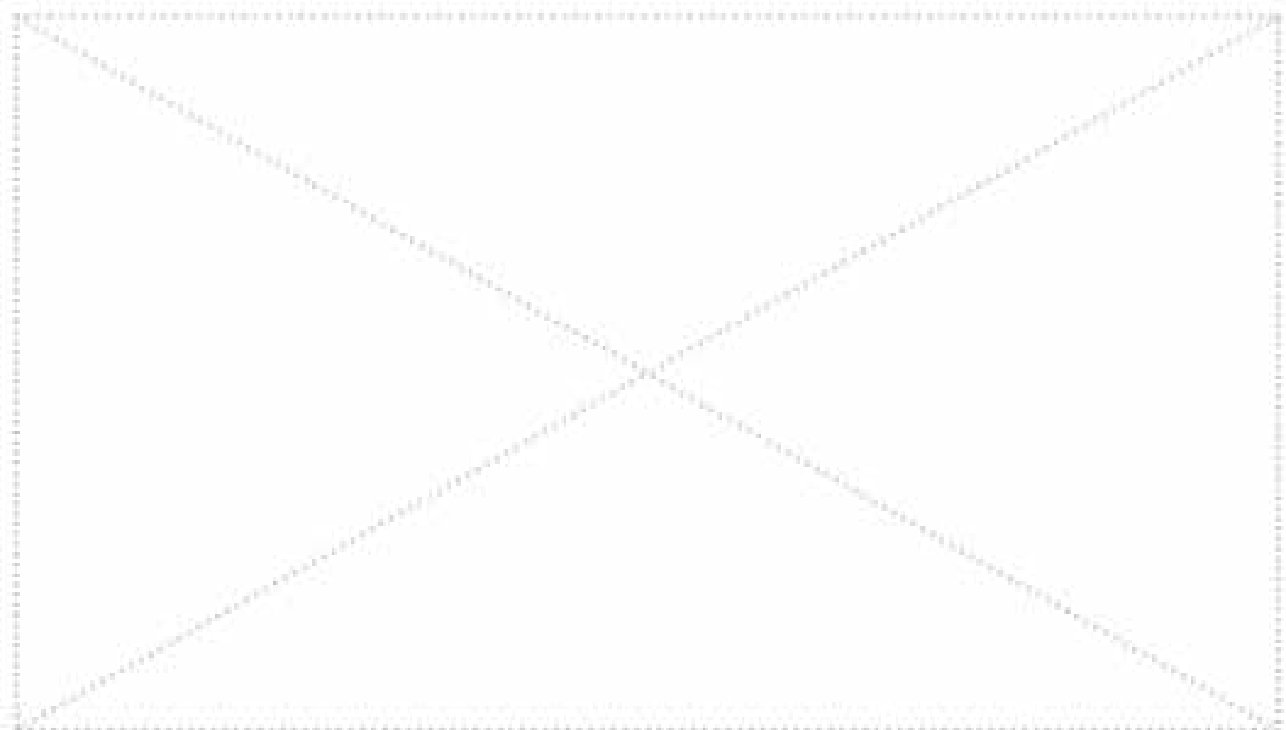




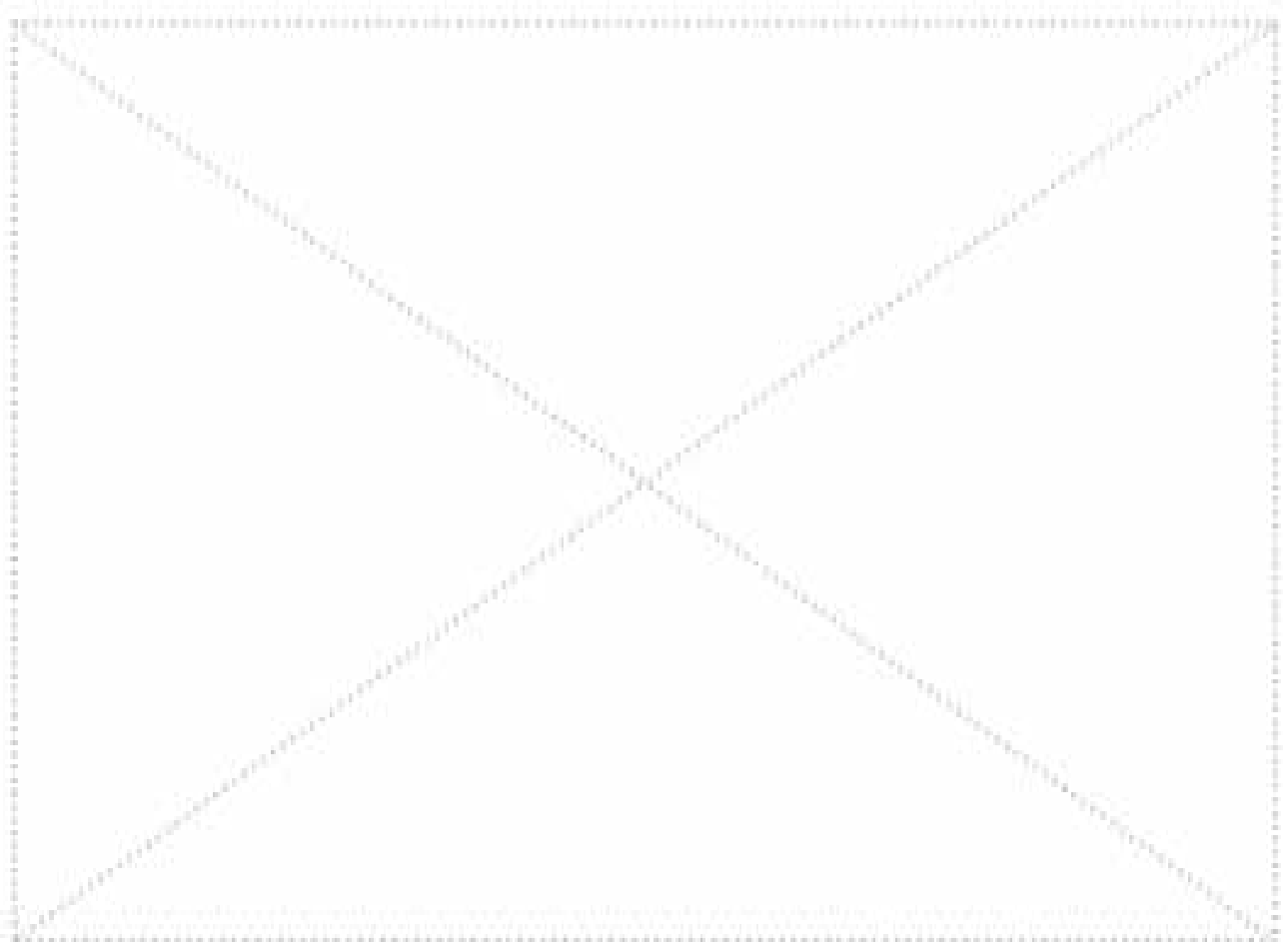
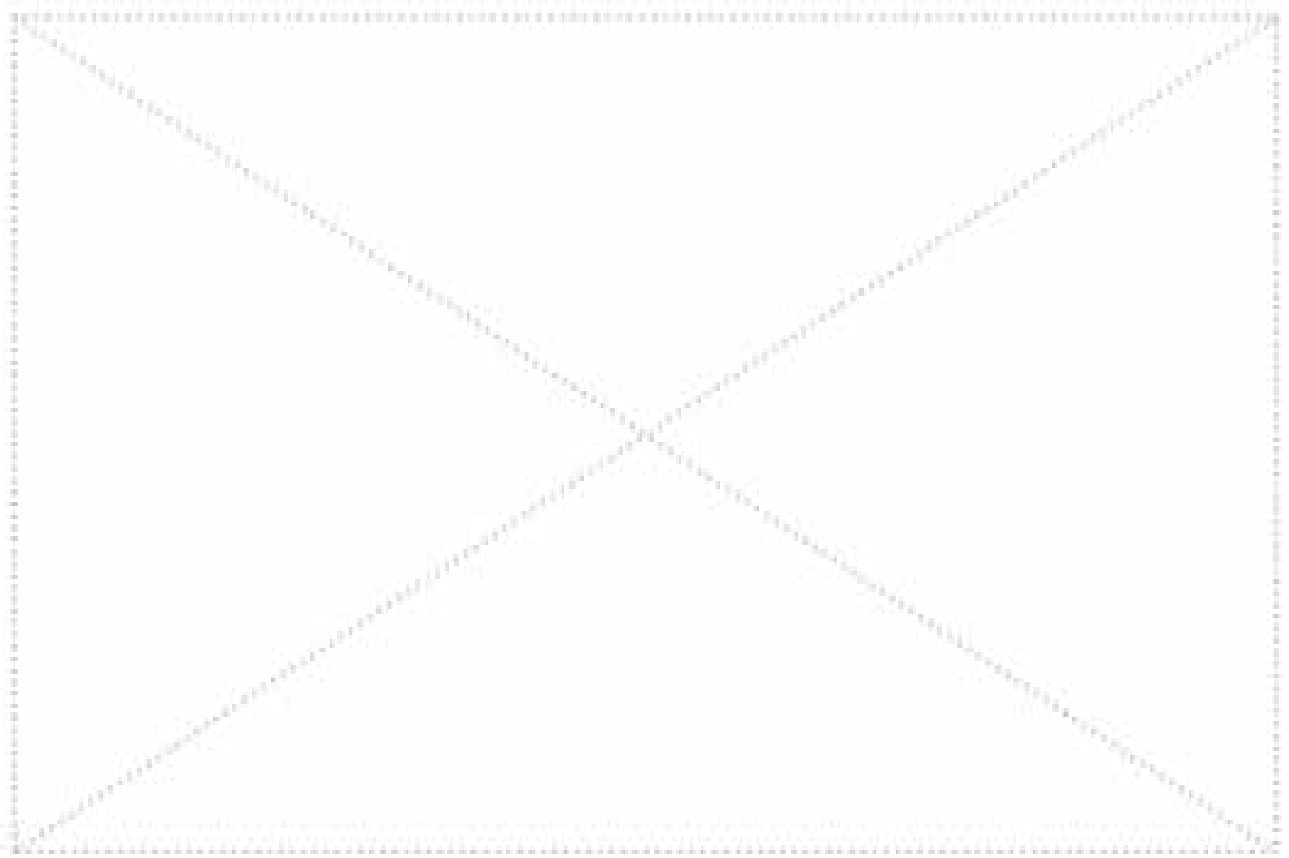


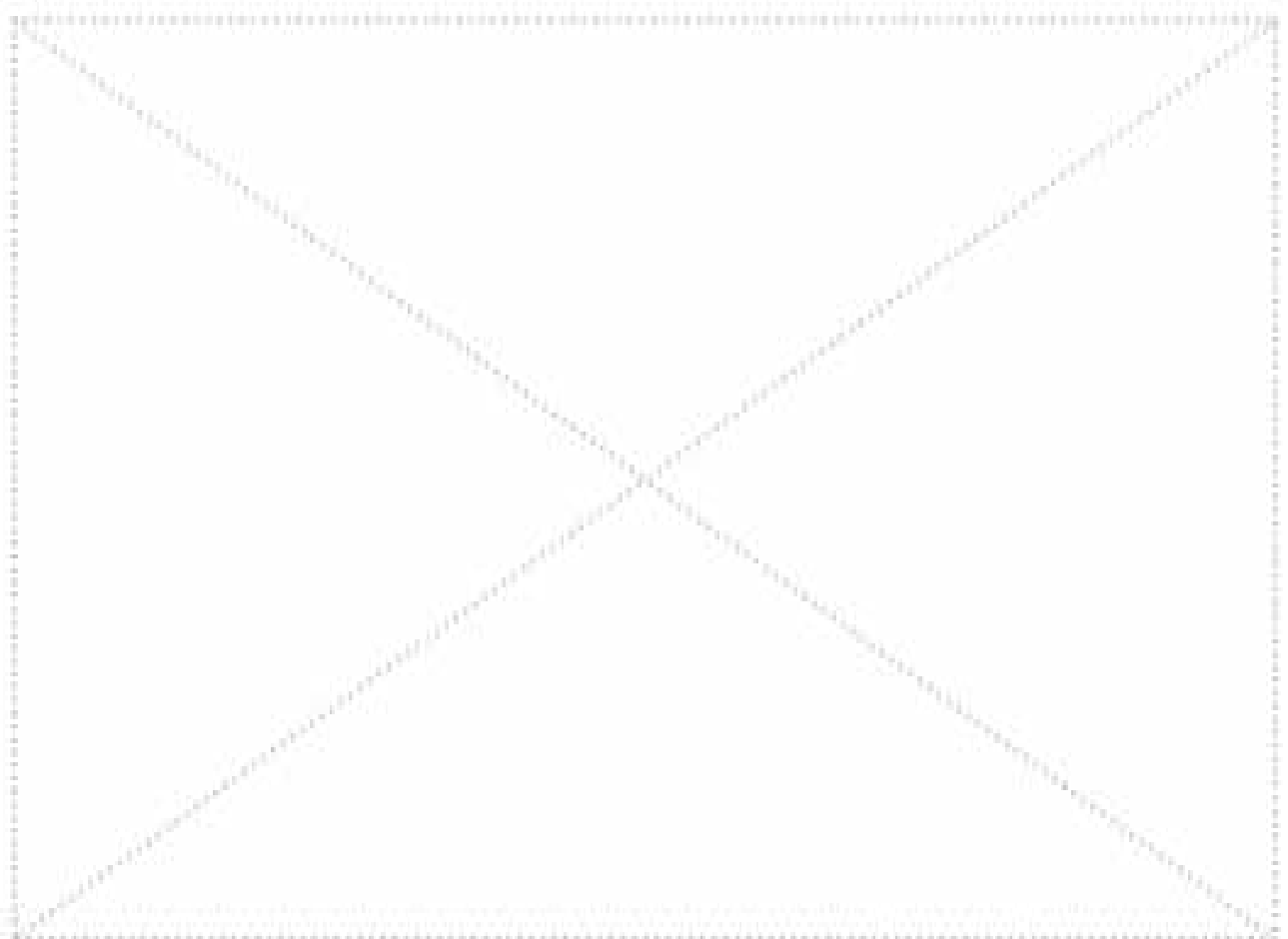
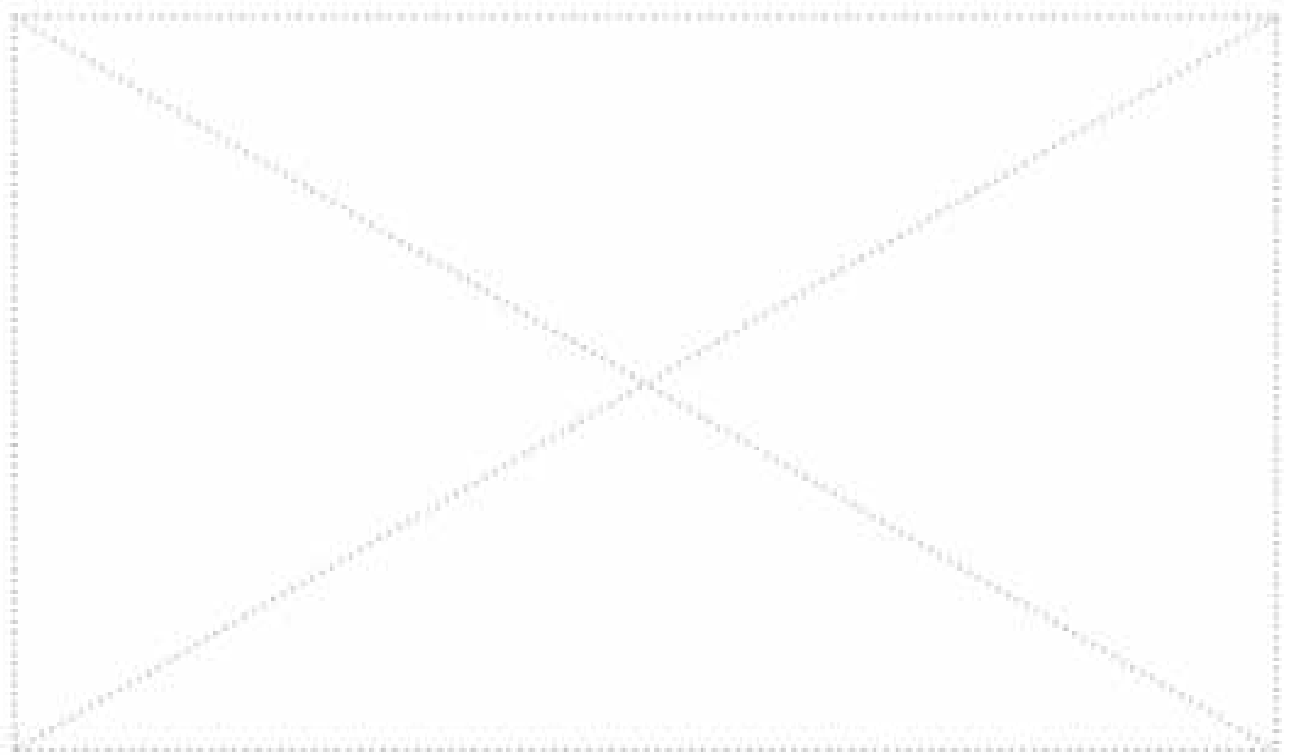


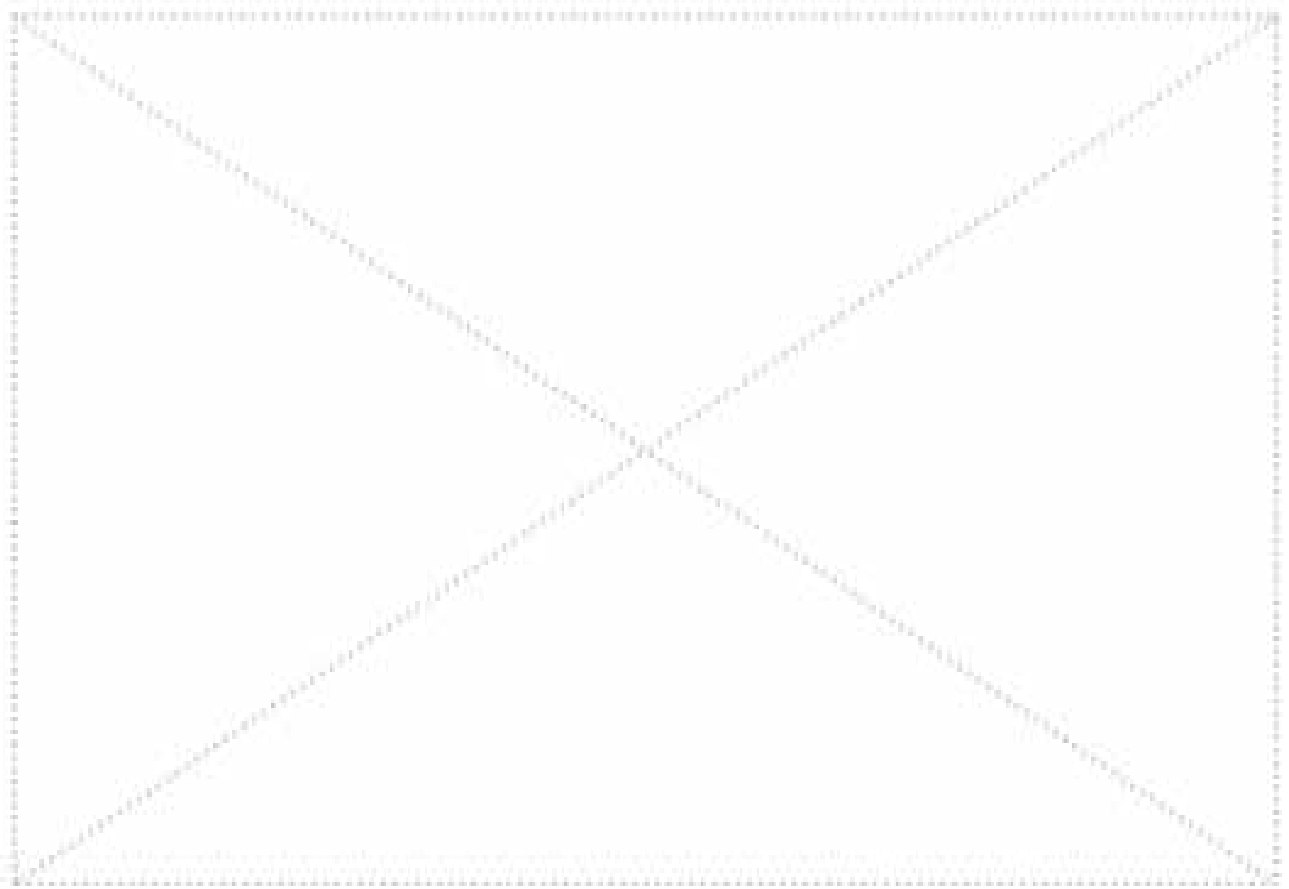
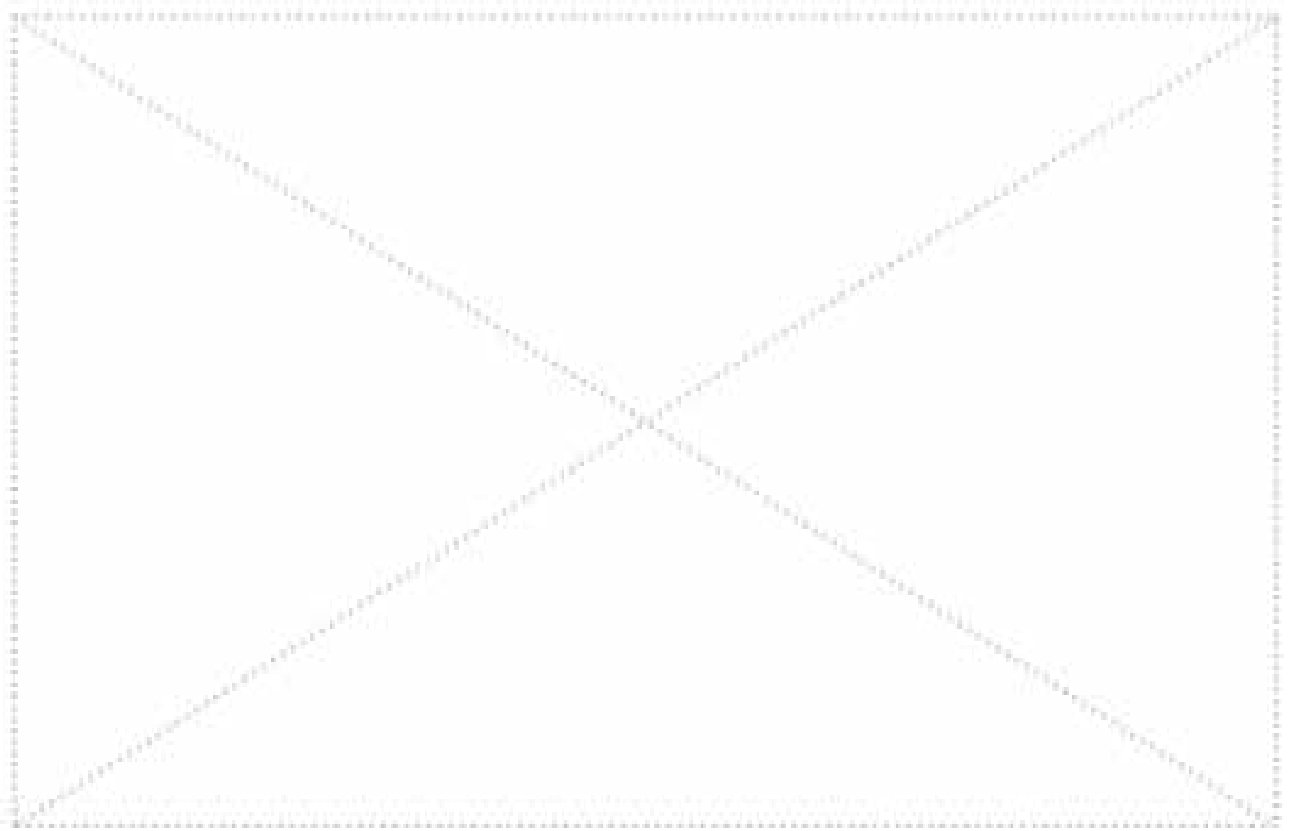


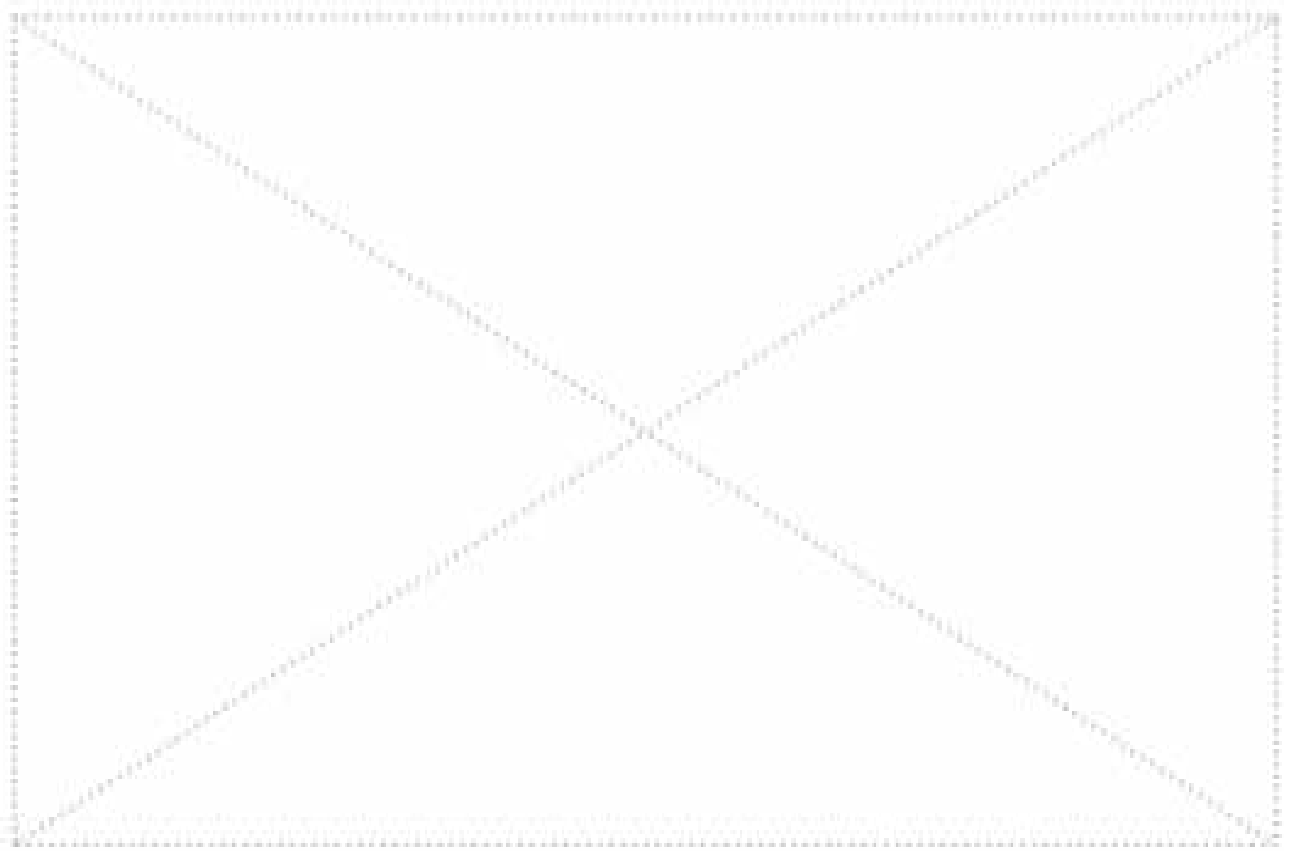












| 수정 및 보완의견  | 수정 및 보완의견 반영내용   | 해당 페이지  | 비고 |
|--|--|---|----|
| ○ 기술분류체계 : 기술분류(대-중-소) 정의 및 구체화 기준 적시(예: 디버터-기술개발 선후관계, 가열 및 전류 구동 - 채택가능한 후보기술 등)                                 | ○ 기술분류체계에 따라 핵심기술별 중분류, 소분류 기술정의<br>- 대분류, 중분류, 소분류 기술 정의 및 핵심기술 분류 사유 추가  | p.67~76   |    |
| ○ 해외 연구시설 현황 : 국내 공동활용 가능여부에 대한 판단이 가능하도록 상세 스펙 등 구체화  | ○ 국내외 연구시설의 공동활용 등 판단이 가능하도록 상세스펙을 추가하고, 활용가능 여부 및 불가사유 보완   | p.103~149                                       |    |
| ○ 핵심기술 개발 기반 분석 : 인프라, 인력, 산업체 현황 등 정량적인 조사결과는 있으나, 국내외 기술개발 동향 및 수준을 고려한 국내 연구개발 역량에 대한 종합적인 진단결과가 부재하므로 추가·보완 필요 | ○ 핵심기술별 기술동향, 개발기반을 종합하여 종합진단결과 추가<br>- 핵심기술별 기술동향 및 R&D 역량, 이슈 및 리스크 종합하여 기술하고<br>- 시사점을 종합하여 핵심기술별 단기, 중장기 추진 전략방향 기술                          | p.170~184                                       |    |
| ○ 핵심기술 분류체계를 정리하는데 있어서 현재 변화하고 있는 핵융합 연구 환경을 고려할 필요가 있음. 가령, 초전도체 기술을 저온 초전도체로 한정할 필요는 없을 것임                       | ○ 현재 분류되어 있는 기술분류체계의 경우 저온초전도 자석으로 한정되어 있지 않으며, 고온초전도자석 기술의 연구개발도 고려하고 있음  | p.98~100<br>p.144~149<br>p.165~167<br>p.182~183 |    |
| ○ 핵융합 전력생산 실증에 필요한 핵심기술 개발 연구 수행을 위한 국내 연구 기반을 파악하기 위해 정리한 인력 현황은 사실과 다른 것으로 보이며 이에 대한 수정이 필요해 보임                  | ○ 산업인력현황에 대하여 최종보고서 기재 내용외 별도 용역을 추진 중<br>- 최종보고서 기재 내용의 경우 핵심기술별 분과위원회 전문가 대상 자료를 취합한 내용<br>- 정확한 현황 파악을 위해 별도 용역을 추진 중이며, 후속 기획연구에 결과 반영토록 하겠음 | p.103~149                                       |    |
| ○ 특허 출원 현황이 기술 기반을 대변해 줄 수 있는지 의문임. 단순히 특허 개수가   | ○ 연구개발 동향, 기술수준, 특허, 논문, 연구개발 투자현황 등은 기반현황을 분석과 전략방향 수립을 위한  | p.80~102  |    |

| 수정 및 보완의견  | 수정 및 보완의견 반영내용  | 해당 페이지                   | 비고 |
|--|---|--------------------------|----|
| <p>중요한 것이 아니라 핵심 기술 개발 연구를 진행하는데 필요한 기술들 또는 milestone을 정리하고 국내 연구 그룹이 어떤 연구를 하고 있는지를 파악할 필요가 있음</p>  | <p>기초자료로 활용</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 핵심기술별 연구동향에 일부 내용 기술</li> <li>○ 후속 기획연구의 기술보고서 작성을 통해 기술별 상세연구현황, 마일스톤과, 상세 로드맵을 반영</li> </ul>   |                          |    |
| <p>○ 평가 의견에 대한 질의 답변 내용의 일부분은 (ITER 내벽 변경에 대한 대응, 증식 블랑켓 개발 역량 관련) 후속연구와 직접 관련될 수 있으므로 5.(2) ‘한계점 및 후속연구 방향’ 섹션에 요약하여 기재하는 것을 고려하기 바람</p>  | <p>○ 한계점 및 후속연구 방향 수정 반영</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 환경변화에 따른 유연한 대응체계 구축 필요성 추가 수정</li> </ul>   | p.186                    |    |
| <p>○ 주요국 핵심 기술 분류 체계도 비교 분석을 통하여 기술 분류 체계도를 보완하기 바람</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기술 분류 체계도에서 중분류 이하의 기술 내용은 핵융합로의 설계, 건설, 운전 단계에서 요구되는 실질적인 핵심 기술들을 커버할 수 있도록 보완하기 바람</li> <li>- 블랭킷 기술과 연계한 동력변환기술 부분의 추가 보완이 필요해 보임</li> <li>- 로드맵 전문가 위원회를 공유할 수는 있으나 활동 자체가 같을 수는 없을 것이므로 보고서에 기술된 활동 내용의 수정이 필요해 보임</li> <li>- 질의서에 포함된 질의내용에 따른 수정/보완 가능한 수준까지 반영</li> </ul> | <p>○ 해외 주요 국가(EU, 일본) 기술분류체계와의 비교 추가</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자료상 비교 가능한 EU, 일본의 기술분류체계와 한국의 기술분류체계 비교표 추가</li> <li>- 상세한 JA-DEMO 액션플랜(일본)의 상세자료를 참고자료로 추가</li> <li>○ 증식블랑켓의 하위 중분류 기술(계통기술)에서 일부 동력변환 기술의 범위를 포함하고 있으며, 상세 로드맵의 경우 후속 기획연구에서 보완</li> <li>○ 전문가 위원회별 활동내용 수정·보완</li> <li>- 전문가 위원회별 기획연구 역할 및 활동내용 수정·반영</li> </ul> | p.3<br>p.66<br>p.189~201 |    |