

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

# 노심 플라즈마 기술 설명자료

2024. 02.

# 목 차

I . 개요 .....	1
II . 국내외 현황 .....	3
III . 세부기술 현황 .....	14
가. 노심 플라즈마 제어 .....	14
나. 노심 플라즈마 진단 .....	18
다. 노심 플라즈마 시뮬레이션 .....	21
라. 노심 플라즈마 관련 연구시설 .....	25

## □ 기술 정의

- 핵융합 에너지 생산에 적합한 높은 온도(1억도 이상)와 밀도를 갖는 노심 연소 플라즈마\*를 만들고, 이를 안정적으로 제어·유지하는 운전 시나리오를 정의 및 개발
- \* 핵융합 과정에서 스스로 가열이 일어나는 플라즈마 상태. 핵융합 반응이 지속 가능한 조건으로 노심의 연소 플라즈마를 발생·유지하는 기술

## □ 필요성

- 노심 플라즈마 기술은 핵융합 반응 후 가열 에너지를 추가 투입하지 않고 연소상태를 지속시키는 기술로 핵융합 발전의 경제성 확보를 위해 반드시 필요한 조건임
- ITER 이후의 노심 운전 기술 확보는 핵융합에너지 기술이 본격적인 상업 기술 단계로 올라서기 위한 마지막 관문으로, 이를 선점하기 위한 주요 핵융합 선진국들의 기술 보안 강화와 내재화 경쟁이 치열해질 것으로 예상
- 운전 시나리오\*는 연소 플라즈마를 24시간 유지하기 위하여 플라즈마를 안정적으로 제어하는데 필수적인 요소로, 핵융합 실증로의 작동 절차와 운전 조건을 설계에 반영하여 실증로의 성공적인 건설 및 운전에 반드시 필요
- \* 핵융합 반응이 지속 가능한 조건 하에 연소 플라즈마를 발생 유지하고, 전원 가동부터 플라즈마의 생성, 가둠, 유지, 소멸에 이르는 모든 실험 절차와 운전 조건을 명시
- 낮은 TRL의 연구 개발 단계에서는 국제 공동 연구가 활발히 진행될 수 있지만, 상용화 단계에 돌입 시 개발국의 기술 보호 및 지재권 확보가 두드러져 본격적인 실증로 연구 단계에서의 국제협력은 제한적일 것으로 예상

## □ 파급성

- 산업 인공지능 분야, 특히 극한 환경에서의 차세대 원자력, 우주항공 등에 초정밀 실시간 제어기술 활용 가능
- 실증로의 극한환경에서 운용 가능한 진단장치(소재) 개발기술은 심우주탐사에, 대용량 데이터 분석에 활용되는 인공지능 기술은 여러 산업에 범용 가능
- 시뮬레이션 기술은 일부 기술 변형 및 확장을 통해 토카막 방식의 다양한 핵융합 연구 분야(예: 구형 토카막, 자기 거울, 핀치 방식)와 타분야 기술로 확장 가능
- 토카막 가상화 기술의 경우 첨단 제조 분야에 활용되는 Virtual Engineering 기술과 연관성이 있으며, 특히 인공지능 기술을 접목한 디지털 트윈 기술 개발과 밀접하게 연결

- 최첨단 연구설비와 연결되어 구축된 초고성능컴퓨팅 자원과 디지털 트윈 설비는 인공지능 연구를 위한 설비 고도화, 산업 활용 및 혁신을 위한 AI 기술, 가상제조 등의 연구에 활용 가능

## □ 세부기술

- 실증로의 운전 시나리오 개발은 KSTAR, ITER, 슈퍼컴퓨팅 시뮬레이션 등을 통해 현존하는 물리학적 난제들\*을 최종적으로 극복하고 검증

\* 전력생산이 가능한 수준의 연소 플라즈마 발생과 소멸에 대한 통제 능력 기술 완성

### ① 노심 플라즈마 제어기술

- 실증로 운전 표준 시나리오 수립을 위한 첫 번째 조건(고출력 플라즈마, 장시간 운전)을 구현하는 기술
  - **(고출력 플라즈마)** KSTAR(D-D)를 활용 안정상태  $\beta_N > 3.5$ , 고효율  $H_{99} > 3.0$ ,  $G > 0.4$ , 전류구동  $f_{NI} \sim 1.0$ ,  $f_{BS} > 0.7$ , 이온온도  $> 10$  keV(1억도) 성능조건을 만족시키는 **고출력 운전 시나리오** 개발 및 구현
  - **(연소 플라즈마)** ITER(D-T)를 활용 열효율  $Q = 2 \sim 10$ ,  $\sim 3,000$ 초 **정상상태 연소 플라즈마** 구현 및 제어 기술, 안정화 기술 개발
  - **(실증로 통합제어)** 실증로 노심 플라즈마의 위치 및 모양 제어, ELM, NTM, 수송 및 난류 등 플라즈마 운전을 통합적으로 제어하는 기술

### ② 노심 플라즈마 진단기술

- 연소 플라즈마의 극한 환경(고열속, 고자장, 고중성자속)에서 동작 가능한 **진단 센서**(자기장, 광량, 에너지, 출력 등), **재료, 설계 기술**
  - **(측정 데이터 통합 분석)** 각종 물리변수의 상관관계를 종합적으로 분석하여, 플라즈마 실시간 제어에 활용할 수 있는 **진단 측정 데이터 통합 분석 기술 개발**
  - **(센서/계통 제작)** 실증로 진단 센서/구조물 설계 제작 기술 및 **진단계통**(차폐구조물, 케이블, 피드스루 등)에 필수적인 특수부품 **제작 설치 기술 개발**
  - **(실시간 분석시스템 개발)** 연소 플라즈마 실시간 진단-제어 분석시스템 구축 및 작동 테스트

### ③ 노심 플라즈마 시뮬레이션

- 실증로의 운전 시나리오의 적용 가능성 등을 사전 검증할 수 있는 플라즈마 시뮬레이션 기술
  - **(정밀 시뮬레이션)** 슈퍼컴퓨팅 기술활용 **노심 플라즈마 정밀 시뮬레이션 기술 개발**
  - **(대용량 데이터 처리/통합 분석)** 빅데이터 기술을 접목한 **대용량 데이터 효율적 처리 및 통합 분석 소프트웨어 개발**을 통한 시뮬레이션-실험 결과 비교 검증
  - **(고속 시뮬레이션 모듈화)** 기계학습으로 노심 플라즈마의 **고속 시뮬레이션 모듈화 기술 개발**
  - **(통합 시뮬레이션 코드 개발)** 다양한 운전 시나리오에 대응 가능한 **핵융합로 통합 시뮬레이션 코드 개발**을 통한 발전소 통합 설계 및 노심 성능 예측 기술 확보

## II

## 국내외 현황

### 가

### 기술 동향

- ▶ 핵융합 노심 플라즈마의 안정적인 운전과 제어를 위해서 국가별 자국 장치를 중심으로 ITER, 실증로에 적용 가능한 기술을 개발 중

#### □ 국외

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

<표. 국외 노심 플라즈마 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 장치가 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 선행예측성능을 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>

- **(ITER)** 비유도 정상상태 및 D-T 장시간 연소 플라즈마 운전 기술 개발/검증
  - ITER를 통해 비유도 정상상태  $Q \leq 5$ , 3,000초 장시간 운전 기술 개발/검증 및 D-T 연소플라즈마  $Q=10$ , 400초 운전 달성 기술 확보
  - ITER에서 계획 중인 연소 조건 플라즈마 데이터를 토대로 시뮬레이션 기술개발 및 검증 가능
- **(인프라 현황)** 노심 플라즈마 연구를 위한 자국 연구장치를 운영 중에 있으며, 핵융합 연소 플라즈마 기술 확보를 위한 ITER 장치 공동 개발 중

<표. 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-SA	플라즈마	• 초전도 토카막 업그레이드를 통해 ITER 플라즈마 실험 및 DEMO 연구	(기간) 2020년 완공
	IFERC	플라즈마	• 시뮬레이션 기술개발을 위한 슈퍼컴퓨터 보유	BA 프로그램 운영 중
중국	EAST	플라즈마	• 고성능 플라즈마 장시간 운전 연구	(기간) 2006년 운전시작

세부시설	국외 장치명	활용가능 여부 및 사유
핵융합 플라즈마 연구시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DIII-D 등 해외 협력 연구장치</li> <li>• ITER 국제 공동 연구장치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (가능)</li> <li>• 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> <li>• 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>
초고성능 컴퓨터	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국 Frontier 슈퍼컴퓨터</li> <li>• 일본 Fukaku 슈퍼컴퓨터</li> <li>• 유럽 Marconi 슈퍼컴퓨터</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (불가) 초고성능컴퓨터는 국제 공동 활용이 불가능한 자원</li> </ul>

## □ 국내

- (주요성과) KSTAR를 중심으로 노심 플라즈마 제어, 진단, 시뮬레이션 기술을 개발 중이나, 실증로 노심 플라즈마 기술 확보를 위한 향후 과제 존재
  - H-모드 플라즈마 90초 연속운전, 1억도 초고온 플라즈마 운전 30초 달성
  - $\beta_N=3.0$  고성능 플라즈마 12초 유지시간 달성
  - 노심 플라즈마 감금 성능 시뮬레이션을 위한 섭동적 동력학 코드 개발
  - 중성입자 가열 코드 및 KSTAR 토카막 가상화를 위한 초기 버전 Virtual KSTAR 개발
  - 대규모 노심 플라즈마 시뮬레이션을 위한 격자 기술 개발(UNIST), 2차원 플라즈마 수송 코드 Total-PI 개발(한양대), 통합 시뮬레이션 프레임워크 TRIASSIC 개발(서울대)

<표. 국내 노심플라즈마 연구개발 동향 >

세부기술	주요내용
노심 플라즈마 제어	<p>▶ KSTAR 초고온 플라즈마 장시간 유지(1억도 30초) 등 대학과 협력을 핵융합 플라즈마 성능 향상 연구 수행 중</p> <p>▶ KSTAR를 활용하여 플라즈마 안정성을 제고할 수 있는 운전방법을 개발 중이며, ITER 장치에 응용하고 실증로에 적용 계획</p> <p>▶ 계계학습 기법 등을 이용한 실증로 노심플라즈마 모델링 및 선행예측성능 고도화 기술 개발 추진 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 고성능 운전(<math>\beta_N \geq 3.5</math>, <math>f_{N=1}</math>) 시나리오, 연소 플라즈마 제어 등 실증로 운전시나리오 개발을 위한 향후 과제 존재</p>
노심 플라즈마 진단	<p>▶ ITER 분광진단 시스템 개발 및 진단 장치 재료에 대한 고열 수증기 영향 평가 연구 중</p> <p>▶ 연소플라즈마 적용 가능 한 신개념 RF 측정 기술 개발 및 KSTAR, LHD(JP) 장치 시험적 적용</p> <p>⇒ (주요이슈) 연소 플라즈마의 극한 환경에서 적용가능한 진단장치 개발 필요</p> <p>▶ ITER와 협력을 통해 진단데이터 통합 분석을 위한 시스템(IMAS)을 KSTAR에 적합한 형태로 도입 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 실증로의 제한된 진단데이터를 기반으로 노심플라즈마 진단을 위한 분석기술 개발 소요</p>
노심 플라즈마 시뮬레이션	<p>▶ 최근 통합시뮬레이션 프레임워크 및 시뮬레이션 모듈 개발 등 독자기술 개발을 위한 노력 병행, 디지털 트윈 기술 활용 V-KSTAR 개발 진행 중</p> <p>⇒ (주요이슈) 시뮬레이션 고속 모듈화, 통합 시뮬레이션 기술개발 요구</p> <p>▶ 동역학적 광역 난류 및 수송 시뮬레이션 코드를 개발하고 KSTAR 진단과 비교검증, 최근 토카막 장치 전역역 난류 시뮬레이션 코드 개발 착수</p> <p>⇒ (주요이슈) 실증로 개발을 위한 연소 플라즈마의 난류 및 수송 시뮬레이션 기술 요구</p> <p>▶ 최근 V-KSTAR 개발에 착수하면서 노심 플라즈마의 안정성 향상을 위한 자기유체 역학 시뮬레이션 코드 개발에 필요한 기반 기술 확보</p> <p>⇒ (주요이슈) 실증로 개발을 위한 연소 플라즈마의 안정성 및 붕괴 시뮬레이션 기술 요구</p>

기관 분류		주요 연구내용(성과)	연구인력 ('23.7 기준)
연구 기관	핵융합(연)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• H-모드 플라즈마 90초 연속운전, 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</li> <li>• 중성입자 가열 코드 개발</li> <li>• KSTAR 토카막 가상화를 통한 초기버전 Virtual KSTAR 구현</li> </ul>	62명
대 학	UNIST	• 대규모 병렬 노심 시뮬레이션을 위한 격자 기술 개발	3명
	한양대	• 2차원 플라즈마 수송 코드 개발	4명
	서울대	• 통합 시뮬레이션을 위한 프레임워크 개발	4명
	포항공대	<ul style="list-style-type: none"> <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> <li>• ECH 국소가열을 통해 노심의 MHD 불안정성 제거하고 열 수송을 제어할 수 있음을 실험적으로 입증함.</li> </ul>	6명
	KAIST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 플라즈마 붕괴시(disruption) 급속한 밀도 변화 측정이 가능한 single crystal 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>	5명

○ (인프라 현황) KSTAR 및 V-KSTAR 활용 노심 플라즈마 제어,진단 연구수행

- ITER 초기 운전에는 필요한 다양한 운전 선행 기술 연구와 실증로 사양의  $\beta_N \geq 3.5$  운전 영역 등의 연구를 위해 KSTAR 운용 중
- 진단장치의 고방사환경을 구현하여 방사선에 의한 재료 손상 평가가 일부 가능한 포항방사광가속기 운용 중
- 노심 플라즈마 난류, 수송 등 시뮬레이션이 가능한 초고성능컴퓨팅 운영 중

세부시설	국내 보유 장치명	활용가능 여부 및 사유
핵융합 플라즈마 연구시설	• KSTAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) ITER와 유사한 구조의 KSTAR(초전도 토카막)는 ITER 초기 운전에는 필요한 다양한 운전 선행 기술 연구와, ITER가 목표로 하고 있지 않은 실증로 단계에서 경제성과 직결 되는 <math>\beta_N \geq 3.5</math> 운전 영역을 연구하는 등 ITER와 실증로 사이의 노심 성능 간극을 메우기 위한 실험로로서의 역할은 가능</li> <li>• (한계) D-D 플라즈마 운전을 하는 중형 크기의 실험로로, 한계를 넘어서는 실험은 ITER 국제공동 연구를 통해 수행</li> </ul>



세부시설	국내 보유 장치명	활용가능 여부 및 사유
방사광 가속기	• PLS-II	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 방사선에 의한 재료 손상 평가 가능</li> <li>• (한계) ITER 및 DEMO의 진단 장치에 영역에서 예상되는 방사 환경을 정확히 모사하는 것은 불가능하며, 빔타임 시간의 제약으로 장기간의 재료 손상을 테스트하는 것은 불가능</li> </ul>
방사광 가속기	• XFEL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 빔덤프를 활용하여 고방사환경을 부분적으로 구현 가능</li> <li>• (한계) ITER 및 DEMO의 진단 장치에 영역에서 예상되는 방사 환경을 정확히 모사하는 것은 불가능</li> </ul>
디버터 주변 자기장 구조 모사 시설	• 맥시무스(MAXIMUS) (Magnetic X-point Simulator System)	<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, 플라스마 물리 현상 분석은 가능하나, 실질적으로 중요한 재료 특성 분석을 위한 실험 불가</li> </ul>
초고성능 컴퓨터	• KAIROS (1.56 페타플롭스 계산 성능)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 중형급 토카막 방식의 연구장치 플라스마를 모사하는 수준만 가능</li> <li>• (한계) 실증로 조건에서 연소 플라스마 시뮬레이션을 위해 엑사플롭스 수준으로 계산 성능 확장 필요</li> </ul>
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	• KAIROS 스토리지 (5.78 페타바이트 저장 용량)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 중형급 토카막 방식의 연구장치 플라스마 데이터를 저장,분석만 가능한 수준</li> <li>• (한계) 실증로 조건 시뮬레이션에서 산출되는 대규모 데이터를 저장, 분석하기 위해 10엑사바이트 이상 스토리지 자원 필요</li> </ul>
디지털 트윈 가상화 설비	• V-KSTAR 서버	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (일부가능) 중형급 토카막 가상화는 가능하나, 실증로 사양의 시뮬레이션 영역과 에너지 범위가 한계</li> <li>• (한계) 실증로를 구성하는 대형 토카막, 가열 장치, BOP 요소 가상화를 위해 자원 확장 필요</li> </ul>

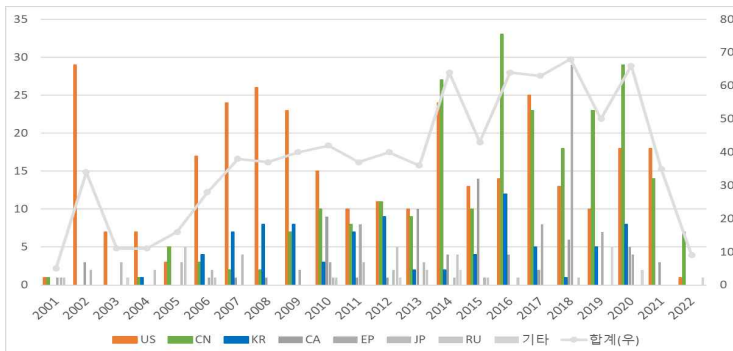
## 나

## 특허 · 논문 분석

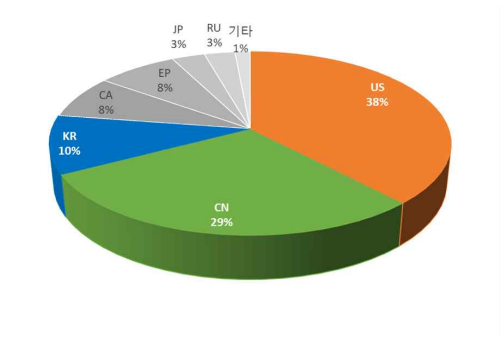
- ▶ (특허분석) 노심플라즈마는 8대 핵심기술 분야 중 특허활동이 가장 활발한 분야로 2000년대 초반 미국을 중심으로, 2010년대 중후반 중국을 중심으로 특허 출원 진행 중
- ▶ (논문분석) 미국을 중심으로 논문이 게재되고 있으며, 한국은 논문의 피인용도와 게재건수가 낮은 상황

### □ 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



< 그림. 연도별 출원 건수 >



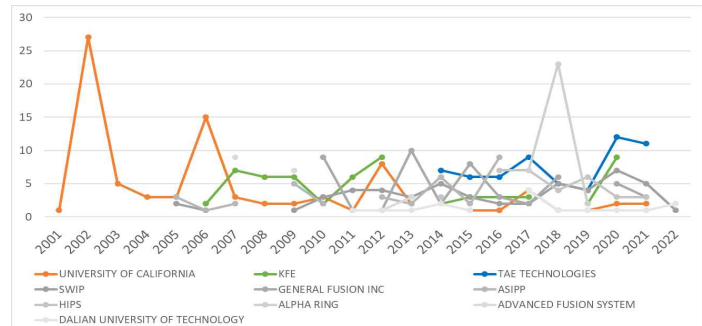
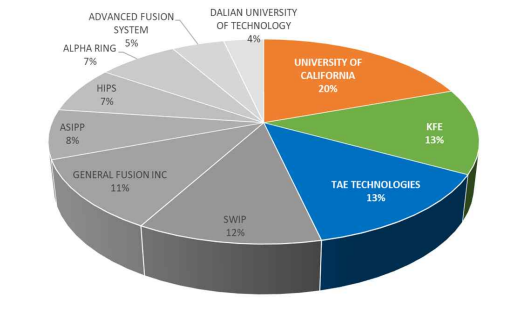
< 그림. 국가별 비중 >

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

< 표. 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%

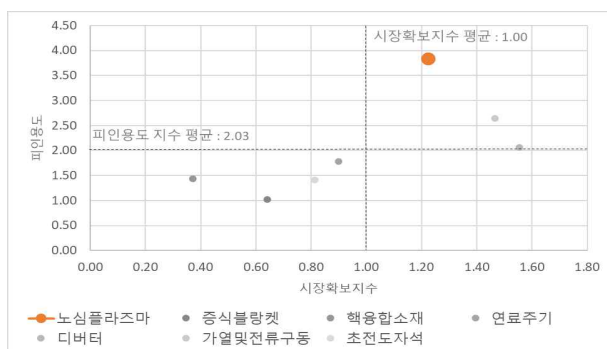
- (주요 출원인 Top 10) Univ.of CALIFORNIA가 가장 많은 87건(20%)의 특허를 출원하였으며, 그 뒤로 KFE(핵융합(연)) 60건(13%), TAE Technology 60건(13%) 출원 진행
- 2000년대 초반 Univ.of CALIFORNIA가 역자장 방식 플라즈마 제어 관련 특허로 출원을 주도하였으며, TAE Tehcnology는 2010년대 후반 동일 방식 특허 출원을 집중하는 경향
- KFE는 2000년대 중후반 KSTAR 완공 및 실험에 따라 토카막 방식의 노심 플라즈마 진단 관련 특허 출원에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



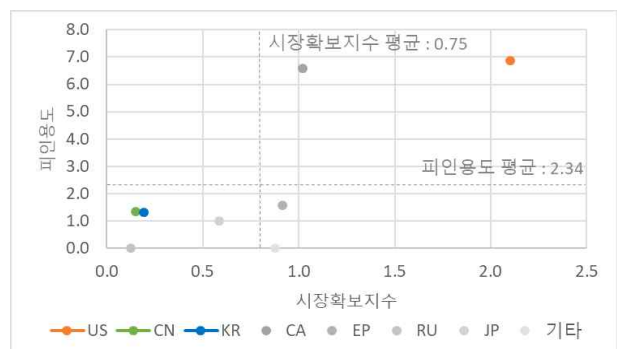
< 그림. 주요 출원인 Top 10 출원 비중 >

< 그림. 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

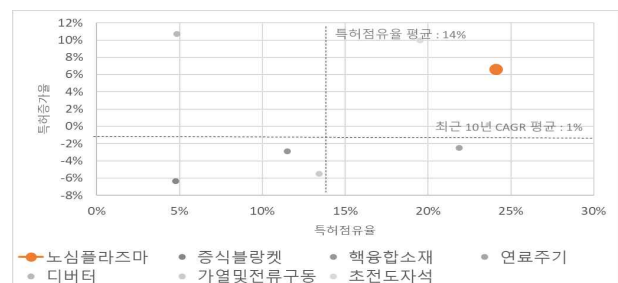


< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(핵심기술) >



< 그림. 피인용도 - 시장확보지수(국가별) >

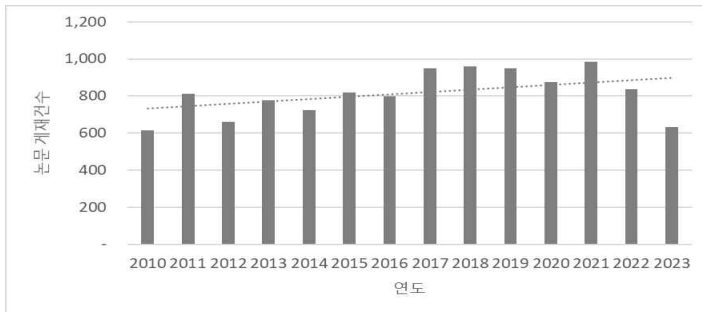
- (특허유망성) 노심 플라즈마 분야는 특허 점유율(핵심기술중 1위)과 특허 증가율(핵심기술중 2위)이 모두 높은 분야로 꾸준한 연구개발을 통해, 타 기술분야 대비 특허 활동이 이미 활발한 분야로 분석



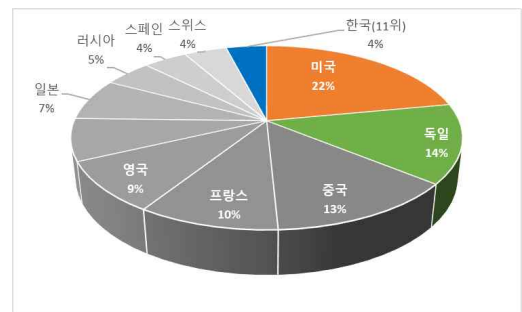
< 그림. 특허점유율 - 특허증가율 >

## □ 논문게재 현황

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

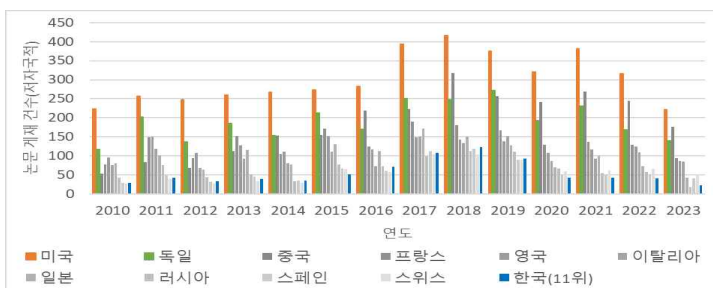


< 그림. 연도별 게재 건수 >

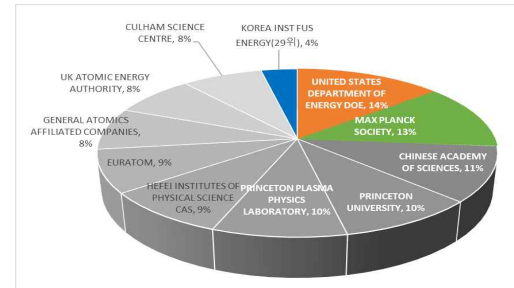


< 그림. 국가별 Top 10 게재 비중 >

- (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)

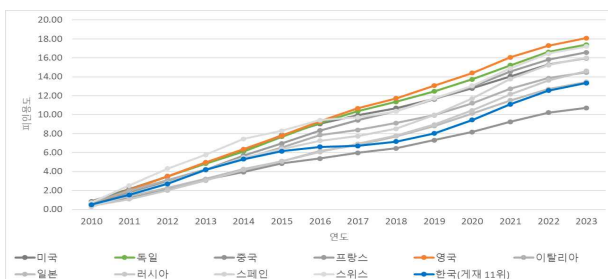


< 그림. 연도별/국가별 Top 10 게재 건수 >

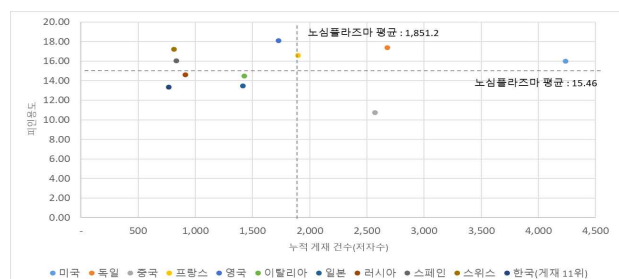


< 그림. 기관별 Top 10 게재 비중 >

- (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 >



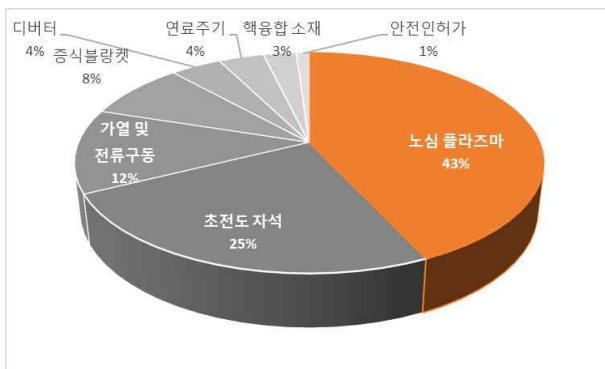
< 그림. 게재 건수/피인용도 분석 >

- ▶ KSTAR를 중심으로 추진되고 있는 노심 플라즈마 연구는 핵심기술 분야 중 가장 많은 연구개발비가 투자(2,874억원, 핵심기술 연구개발비 전체 43%)

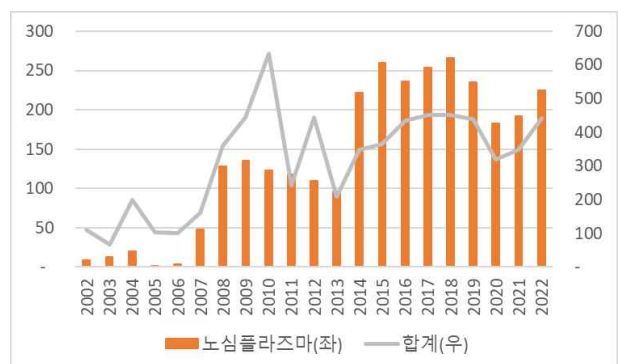
## □ 연구개발 투자현황

- (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(가열 및 전류구동 장치 등) 연구비 포함

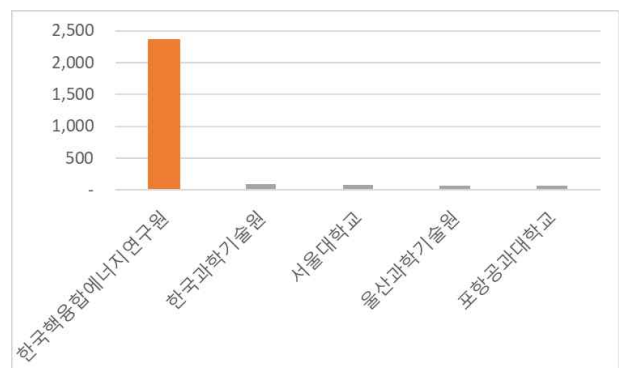


< 그림. 8대 핵심기술 비중 >



< 그림. 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

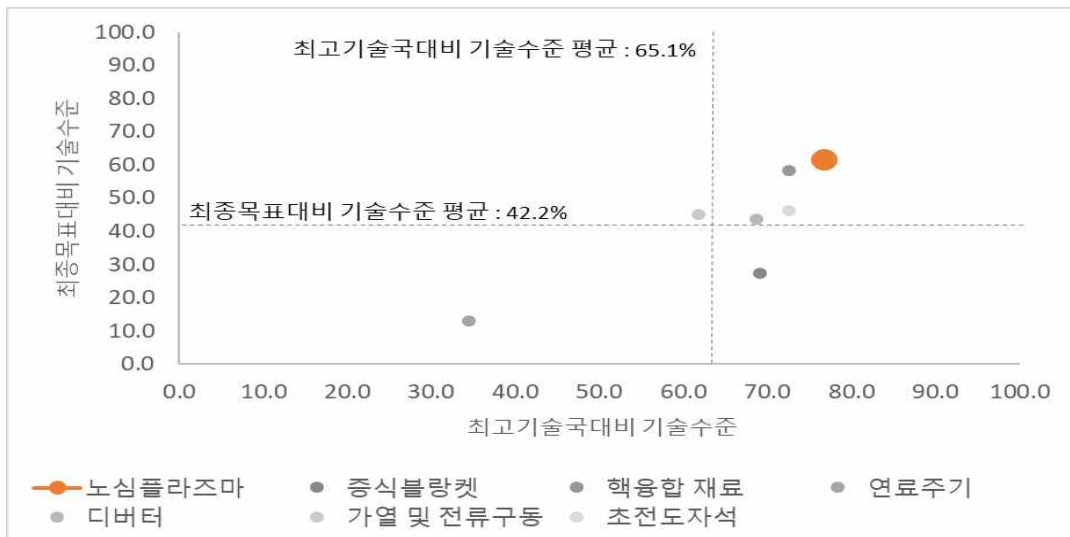


< 그림. 주요 연구기관 >

- ▶ 노심 플라즈마는 한국의 핵융합 기술을 견인하고 있는 분야로, 핵심기술 분야 중 최고기술국과 가장 격차가 적은 분야(최고기술국 대비 76.7%)

## □ 실증로 대비 기술수준

- 핵심기술 분야 중 최고기술국(US) 대비 기술수준과 최종목표(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

- 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 최고 수준이나, 향후 실증로의 가혹한 환경에 대응 가능한 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

< 표. 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)

## □ ITER를 통한 확보 기술수준 및 한계점

- (ITER를 통한 기술확보) 비유도 정상상태 장시간 운전 기술 개발/검증 및 D-T 연소플라즈마 기술 확보, 연소 플라즈마 시뮬레이션 기술 개발 및 검증 등
- (실증로 기술대비 한계점) 핵융합 이득률, 노심 환경 등 실증로 수준의 사양에 비해 불충분한 실험로 연구 영역 및 환경으로 인한 실증로 환경의 추가 연구 불가피

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

세부기술	ITER 통해서 확보 가능한 기술	실증로 기술대비 한계점
노심 플라즈마 제어	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비유도 정상상태 <math>Q \leq 5</math>, 3,000초 장시간 운전 기술 개발/검증</li> <li>• D-T 연소플라즈마 <math>Q=10</math>, 400초 운전 달성 기술 확보</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로 이후의 개념에서 10배 이상의 핵융합 이득률(<math>Q&gt;10</math>)로 정상상태 운전을 하기 위한 연구 영역 필요</li> <li>• ITER가 비유도 정상상태에서 <math>Q \sim 5</math> 구현하고 <math>2.6 \geq</math> 영역에서 운전 예정이나, 실증로 단계에서는 경제성과 직결되는 <math>\geq 3.5</math> 연속운전 영역에서의 제어기술 확보가 반드시 필요한 상황</li> </ul>
노심 플라즈마 진단	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이론 및 전산모사 결과에 대한 통합적인 분석을 통해 플라즈마 물성을 정확히 예측하기 위한 통합 모델링 및 분석 체계 (IMAS) 확보 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 극한 환경 (고입자속, 고열속, 고중성자속 등)에서의 실험, 측정 및 데이터 해석 경험 부재로 인한 실증로로의 적용 가능성 예측 어려움</li> </ul>
노심 플라즈마 시뮬레이션	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연소 조건 플라즈마 데이터를 토대로 시뮬레이션 기술개발 및 검증 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로 노심의 조건이 ITER와 비교하여 50%이상 증가한 성능 지수를 요구하는 만큼 (감금성능 지수 및 에너지 밀도 50%이상 증가 필요), ITER 실험 데이터를 토대로 검증한 시뮬레이션 기술의 예측 능력에 제한</li> </ul>

### Ⅲ

## 세부기술 현황

### 가

## 노심 플라즈마 제어

### □ 정의

- 실증로에 활용 가능한 노심 플라즈마 운전 성능을 효율적으로 달성하고 안정적으로 유지하는 기술

세세부기술	기술개요
차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로 주요 성능 지표에 기반한 <math>\beta_N \sim 3.5</math>급 고성능 장시간 운전 시나리오 확보</li> <li>* 고효율(<math>H_{99} &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))</li> </ul>
정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵융합 반응 중 가장 많은 에너지를 얻을 수 있는 D-T 연소 플라즈마 구현 및 장시간 운전기술 개발/검증</li> <li>* 에너지 증폭률 10배(<math>Q=10</math>), 400초 운전 달성 기술 확보 및 비유도 전류구동으로 정상 상태 <math>Q \leq 5</math>, 3,000초 장시간 운전 기술 개발/검증</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>

### □ 기술개발 필요성

- (공학적 기술 한계 극복) 실증로 건설 단계에 진입하기 위해서는 다양한 노심 플라즈마 관련 공학적 기술의 한계를 해결하기 위한 연구가 반드시 필요
  - 실증단계에서는 기존과 달리 고출력의 플라즈마가 필요하며, 이를 생성하고 불안정한 플라즈마를 제어하는 여러 기술적 난제 해결이 실증로 건설·운영 성공의 첫 관문
  - 높은 열속을 견디며 삼중수소를 스스로 공급할 수 있는 D-T 연소 플라즈마 실험은 현존하는 토카막 연구장치들은 시도할 수 없었던 분야로 기술개발이 반드시 필요
- (실증로 운전 기술 확보) 실증로는 상용로와 동일한 수준의 최소화된 외부개입 만으로도 고성능 노심 플라즈마를 안정적으로 유지해야 하는 정밀한 운전기술이 필요
  - ITER와 실증로 사이의 노심 성능 간극을 메우기 위한 노심 운전 기술 확보\*는 핵융합에너지 기술이 본격적인 상업 기술 단계로 올라서기 위한 마지막 관문
  - \* 핵융합 실증로는 기존 토카막과 달리 플라즈마 압력비( $\beta_N$ )와 가둠성능을 정상상태로 유지하면서 플라즈마 내벽에 인가되는 열속 및 입자속을 적절히 통제할 수 있는 진보된 운전 시나리오가 필요



## □ 국내외 동향

### ① 차세대 고출력 플라즈마 운전 시나리오 개발

- (미국) 오랜 경험과 기술이 축적되었으나 상전도 토카막 기반으로 인하여, 플라즈마를 고성능 상태로 유지하는데 발생하는 문제를 연구하는 장시간 운전연구 분야에서는 제약이 있음
  - 미국 GA의 DIII-D에서는  $\beta_N \geq 3.5$ 급의 고성능 플라즈마 연구가 성숙 단계 진입
- (일본) DEMO 운전을 위한 high- $\beta$  플라즈마 유지운전 기술 수립을 핵심 이슈 중 하나로 선정
  - JT-60SA를 활용한 시나리오 연구를 준비 중에 있으며, ITER의 DT 플라즈마 실험을 통한 시나리오 검증을 계획하고 있음.
- (EU) 실증로 기술 연구를 위해 다수의 연구장치를 운영 및 건설 중
  - 세계적으로 가장 앞선 연구성과를 창출하고 있는 장치로 평가받는 세계 최대 규모인 유럽연합의 JET(Joint European Torus)에서는 '22년 핵융합 반응을 통해 59MJ 정도의 에너지를 얻는 실험을 성공적으로 수행
- (국내) 세계적 수준의 초전도 토카막 연구 장치인 KSTAR를 중심으로 서울대, 포항공대, KAIST, UNIST 등 거점 대학과 연계하여 핵융합 플라즈마 성능 향상 연구 수행
  - 국내 거점 대학들의 교수진과 학생들은 KSTAR의 다양한 실험 워킹그룹 참여를 통해 매년 우수한 실험 제안과 분석 연구 등 수행
  - KSTAR 연구진들과 함께 국내 핵융합 연구의 현재와 미래 구성원으로 활발한 연구 활동을 수행
  - 최근 급격히 주목받고 있는 인공지능, 빅데이터, 머신러닝 등 최신 컴퓨팅 및 IT 기술의 접목을 산학연 공동연구로 추진 예정

### ② 정상상태 연소 플라즈마 구현 및 제어

- (미국) ITER의 연소 플라즈마에 활용할 제어 기술을 개발 중이며, 실제 실험 결과를 토대로 다양한 제어 요소를 사전 학습하여 DEMO 장치에 구현을 계획 중임
  - 미국 General Atomics 社 DIII-D 장치의 TokSys 전산모사 시스템을 사용해 운전 시나리오에 대한 사전 검증 및 반응성 테스트 진행
  - 미국 Columbia University에서 개발하고 있는 DECAF 시스템은 다양한 실시간 진단 신호를 바탕으로 운전 경계 계산 및 감지를 수행
  - DIII-D는 이미 NBI 가열장치와 연동된 값 자동 제어를 통해 고성능 운전 경계를 따라 안정적인 운전에 대한 실증 실험을 수행

- (일본) ITER 연구계획 일정을 반영하여 “JP 실증로 로드맵”을 개정(18)하고, EU와의 공동연구 프로그램을 통하여 진단 및 제어 등의 요소기술 연구 추진
  - JT-60SA와 ITER의 플라즈마 제어 관련 데이터베이스 구축 계획
  - 안정적인 플라즈마 장시간 운전 연구 결과에 기반한 DEMO 운전 시스템 조기 설계
- (EU) 11대 요소기술 중 하나로 ‘진단 및 제어 분야를 선정하였으며, 로드맵 및 세부 일정 수립
  - ITER의 설계 요소 및 연구계획 일정을 로드맵에 반영
- (국내) KSTAR를 대상으로 플라즈마 안정성을 강화할 수 있는 운전 방법을 연구 중이며, 이를 ITER장치에 응용하고 이에 대한 결과를 DEMO 장치에 도입하는 전략을 수립
  - 현재 KSTAR를 대상으로 digital twin을 구현하는 작업이 진행 중이며, 이를 바탕으로 K-DEMO에 적용할 수 있도록 플랜트 시스템 전반을 아우르는 digital twin으로 확장하는 연구를 ‘25~’35년 사이 중장기 관점에서 진행 예정
  - KSTAR의 IVC coil을 통해 관찰하고자 하는 불안정성과 일치하는 외부 자기장 섭동을 가할 수 있으며, 주파수 변조 등의 방법을 통하여 실시간 플라즈마 반응을 자기장 진단 도구(saddle loop, MD)를 통해 수집하는 연구 진행 (실시간 MHD spectroscopy)
  - 현재 KSTAR에서 플라즈마 안정성에 대한 간접적 척도인  $\beta$ 값을 실시간으로 계산해 일정 수준 이상이 되는 경우 자동으로 가열 파워를 조절하는 연구 진행
  - 운전 상황에 따라 플라즈마가 안정성 경계를 넘어 회복할 수 없다고 판단되는 경우 플라즈마 자체를 꺼버리는 forced landing 기법을 KSTAR에 적용해 특정 불안정성으로부터 KSTAR 장치 보호

### ③ 실증로 통합 제어

- (미국) 전통적인 후행해석\* 방식의 시나리오 연구를 꾸준히 수행하였고, ITER 및 실증로에 적용 가능한 수준의 실험 검증 추진 중
  - \* 가정에 의해 시나리오를 설정하고 실험을 수행한 후 이 실험 데이터를 바탕으로 같은 결과가 나오도록 해석 코드로 분석하여 직접 측정하지 못하는 플라즈마 주요 변수들을 정량적으로 유추하는 방식
  - 최근 높은 선행 예측성능을 갖는 통합운전시나리오 모델링에 많은 노력 중이며, 대표적으로 CESOL 패키지\*가 최근 활발히 개발·개선 중
    - \* CESOL : 통합운전 시나리오의 일종으로 Core-Edge Pedestal-Scrape off layer의 약어. 노심플라즈마의 중심, 언저리 및 내벽 근처의 플라즈마 전체 영역을 한번에 통합하여 시뮬레이션하는 방식.
  - KSTAR와 같은 국외 연구기관과 긴밀한 공조와 연구협력을 통해 플라즈마 발생 및 실시간 피드백 제어 시스템 개발을 지속해서 노력

- **(일본)** JA MODEL 2018 설계(안)을 도출하고, 과거 제안된 다양한 설계(안)을 비교 분석하여 주어진 시간/조건 내에 최종 개념설계(안) 도출 예정
  - ITER 및 JT-60SA에 기반한 통합 플라즈마 제어시스템 개발하고, 이를 토대로 DEMO 설계 파라미터 결정
  - ITER 및 JT-60SA, 모델링/시뮬레이션, 로공학 등을 통해 다양한 운전시나리오 개발 및 고성능 통합운전 실증을 계획
- **(EU)** DEMO 상황에 맞는 플라즈마 운전 시나리오의 기준을 정하였으며, 이에 관한 운전 시나리오 제시 및 검토 착수
  - 플라즈마의 정상 상태 유지 및 이상 상태 회피를 위한 제어 장치의 필요 성능 연구등을 수행하고 제어 시스템의 개발을 계획 중
  - 유럽 DEMO 설계를 위한 EUROfusion PPP&T 내부의 주요 업무
- **(국내)** DEMO 선행기술 개발 중 하나로 통합 제어 시스템 개발 추진
  - 실증적 플라즈마 운전시나리오 모델링 기술개발 및 선행예측 성능 고도화 추진
  - 국내에는 중형 규모의 KSTAR 장치의 플라즈마 제어 기술이 미국과의 협력을 통하여 구축되어 있음. 대학의 경우는 소규모 토카막 장치를 이용해 이론 및 기초 연구 진행
  - 국내 핵융합연구 거점 대학 중 하나인 서울대에서는 플라즈마 운전시나리오 개발 및 모델링과 관련하여 가장 활발한 연구를 수행하며 플라즈마 평형, 안정성, 수송, 가열 및 전류구동 현상 등에 대해 기존의 이론과 기계학습 기법 등을 이용한 모델을 구축해 TRIASSIC 통합시뮬레이터 개발
  - 기계학습 기법을 활용해 선행예측 성능을 향상시켜 최적 운전시나리오를 도출 하고 실증하는 연구 수행

장치	R/a	$\beta_N$	$B_T$	$f_{GW}$	$I_P$	$f_{BS}$	$H_{98}$	Q, $P_{Aux}$
ITER-SS(2011)	6.2/2.0m	2.75	5.4T	0.85	8 MA	62.5%	1.5	3.36, 73MW
EU-DEMO(2018)	9.0/2.9m	2.5	5.9T	1.2	18 MA	35%	1.1	40, 50MW
ARIES-ACT(2014)	6.25/1.56m	4.75	6.0T	1.0	10.9 MA	91%	1.65	42, 42.5MW
CFETR-A4(2019)	7.2/22m	3.0	6.5T	0.96	13.78 MA	75%	1.42	28, 78MW
J-DEMO(2014)	8.5/2.42m	3.4	5.94T	1.2	12.3MA	61%	1.3	17.5, 83.7MW
K-DEMO(2023)	6.8/2.2m	3.5	6.5~7.0T	1.0	12~13MA	60%	1.5	25~30, 50~60MW

[ 주요국 DEMO Design Parameters ]

## 나 노심 플라즈마 진단

### □ 정의

- 실증로의 극한 환경에서 동작 가능하며 평형 상태 플라즈마의 주요 물성 분포에 대한 정보를 실시간으로 제공하여, 장치 제어변수와 함께 노심의 핵융합 반응 및 안정성 제어를 가능하게 하는 기술

세세부기술	기술개요
연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술	<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>
데이터 통합 분석 기술	<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 제어 성능 제고 기술 개발</li> </ul>
실증로 진단 계통 제작, 설치, 운영 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실증로 진단계 구조물 및 필수 부품 (차폐구조물, 케이블, 피드스루 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>

### □ 기술개발 필요성

- (데이터 신뢰성 확보) 실증로 고성능 플라즈마의 가혹한 작동환경에서의 데이터 확보를 위해서는, 진단장치의 내구성 및 동작 안정성 확보가 필수
  - 실증로 노심의 진단장치는 중성자 및 고열에 의한 물성 변화 및 오동작 등 진단신호 품질 및 진단장치 자체의 건전성에 악영향을 주는 위험 상황 대응기술이 필수
  - 실증로는 연소상태가 연속적으로 유지되므로 노심 플라즈마에 대한 실시간 진단과 데이터를 통합 분석하는 기술이 필요
- (효율성 제고) 실증로는 연구장치 대비 최소화된 진단장비로 핵융합 반응을 관련 노심 물성 제어에 필요한 정보를 통합적으로 제공할 수 있는 효율성이 중요
  - 대부분의 핵융합 연구장치는 뷰포트(viewport)\*를 필요로 하는 다양한 진단 장치를

운영 중이나, 이는 진공용기, 열차폐체, 저온 유지 장치(cryostat), 초전도체 등의 설계의 용이성 저하 및 제작·운용 비용 상승의 원인으로 작용

\* 플라즈마의 물성 프로파일, 거시적 상태 및 가둠 성능의 정량적 측정에 사용

- 실증로급의 극한 환경에서는 진단 계통 구성품의 물성 및 성능 변화를 완벽히 방지하기 어려워, 진단 시스템에 대한 현장 (in-situ) 보정 기술이 필수적으로 요구

\* ITER는 이론 및 전산모사 결과에 대한 통합적인 분석을 통해 플라즈마 물성을 정확히 예측하기 위한 통합 모델링 및 분석 체계(IMAS)를 구축 중

## □ 국내외 동향

### ① 연소 플라즈마 극한환경 진단 센서 설계 및 제작 기술

- (미국) DIII-D를 중심으로 광범위한 진단기술 개발을 선도하고 있으며, 이를 기반으로 ITER를 위한 mm-wave 기반의 진단장치 (ECE, 간섭편광계, fast wave 반사계), 노심 X-ray 분광기, 전류 프로파일 측정장치 등을 개발 중. 최근에는 연소 플라즈마 환경에도 적용 가능한 신개념(Fabry-Perot 간섭계 원리) 광섬유 볼로미터를 성공적으로 개발
- (일본) 다양한 중성자 측정 기술을 확보하고 있으며, 디버터 영역 진단 기술 개발을 선도. 일본에서 개발하고 검증한 냉각수 활성화를 이용한 중성자속 측정 방식은 ITER에서 가장 신뢰도 높은 핵융합 파워 측정기술로 채택
- (EU) ITER 진단 장치들의 내구성, 보정 방법, 신호 품질을 개선하기 위한 국제적인 협력을 주도하고 있으며, 원자로, Spallation source, 입자빔 기반 중성자원 등 다양한 시설을 이용하여 다양한 소자 및 재료에 대해 방사 환경 테스트를 진행 중
  - 광섬유 소재 물성 변화, Single Event Effect 등 방사선 영향에 대한 시험 데이터 축적 중
  - 실시간 핵융합 파워 측정을 위해 D-T 부반응인  $d(t,\gamma)^3\text{He}$  에서 방출되는 17 MeV 감마선 측정 방법 개발 중
  - 고성능 플라즈마 중심부에 존재하는 고에너지 이온에 대한 간접적인 측정 방법으로 Collective Thomson Scattering 진단기술을 확보. 이외에도 High Resolution Neutron Spectroscopy (HRNS), Gamma Ray Spectroscopy (GRS)을 활용한 고속 alpha 입자 분포 측정 방법 연구 중
- (중국) 최근에 시작한 BEST 토카막 프로젝트를 통해 ITER와 거의 유사한 구성의 진단 시스템을 개발 중이며, 극한 환경에서 동작하는 electrical probe 기술 개발을 선도
- (국내) ITER의 분광 진단 시스템을 개발하고 있으며, First mirror 재료에 대한 고열

수증기 영향 평가 연구를 수행 중임. 연소 플라즈마 적용 가능한 신개념의 RF 측정 기술을 개발 중이며, KSTAR 및 일본 LHD 장치에 시험적으로 적용 중

## ② 데이터 통합 분석 기술

- (미국) 플라즈마 시뮬레이션 기술을 선도 중이며, 유체, Gyrokinetic, Particle-In-Cell 및 Electromagnetic 시뮬레이션 등 플라즈마 물리의 전 스케일에서 (MHD, 난류, 입자, 파동의 스케일) 다양한 시뮬레이션 연구를 주도
- (일본) 데이터 통합 분석에 활용될 수 있는 다양한 종류의 플라즈마 시뮬레이션 코드들 자체적으로 확보
- (EU) ITER 및 독일의 AUG를 중심으로 데이터 통합 분석 기술을 선도.
  - ITER는 Integrated Modelling and Analysis Suite (IMAS) 시스템을 구축하여 운전 시나리오 개발 및 사전 검증, 진단 신호 통합 해석, 플라즈마 시뮬레이션 결과 검증 등에 활용
  - ITER는 주요 진단 시스템에 대하여 합성(가상) 진단 코드를 개발하고 있으며, 이를 진단 시스템 설계 및 성능 개선, 플라즈마 제어 기술 개발 등에 활용 중
- (국내) ITER와의 협력을 통해 IMAS 시스템을 KSTAR 장치에 적합한 형태로 도입 중

## ③ 실증로 진단 계통 제작, 설치, 운영 기술

- 국내를 비롯한 해외는 플라즈마 난류 및 진단 해석 기술에 집중하고 있으며, 실증로 진단 계통 개발(계통 제작, 설치, 운영)은 추진 사례 없음

## 다 노심 플라즈마 시뮬레이션

### □ 정의

- 토카막 핵융합로에 감금된 초고온 플라즈마의 감금 성능, 안정성, 전류 구동 및 가열 효율 등을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 예측하는 기술
- 이를 바탕으로 실증로 운전 시나리오를 신뢰성 있게 예측하고 최적화하며, 더불어 상세 공학 설계에 필요한 열속, 중성자속, 전자기력 부하 등을 도출

세세부기술	기술개요
토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술	<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 기술	<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 기술	<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>

### □ 기술개발 필요성

- (신뢰성 제고) ITER 연소 플라즈마 데이터 확보와 더불어, 궁극적으로 ITER와 실증로 노심 플라즈마의 차이를 반영하여 실증로 성능을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술 확장 필요
  - ※ 현재 확보된 시뮬레이션 기술은 KSTAR, DIII-D, JET 규모의 중대형 토카막 실험 결과를 토대로 검증이 완료 혹은 진행 중인 상황으로, 실증로급의 기존과 다른 물성에 따른 추가 연구 필요
- (기술적 한계 극복) 실증로급의 시뮬레이션 시공간적 규모 확대에 따라 발생할 수 있는 기술적 한계를 극복하기 위한 스케일 병렬 시뮬레이션 개발 필요
  - 실증로 설계를 위해서는 독립된 형태로 개발 중인 여러 시뮬레이션 기술을 통합하여 활용해야 하며, 특히 상세 공학 설계를 위한 노심의 물리 조건 도출에 활용할 수 있는 통합 설계 체계 확보 필요

## □ 국내외 동향

### ① 토카막 가상화 및 통합 시뮬레이션 기술

- (미국) PPPL, GA 등의 기관을 중심으로 운전 시나리오 통합 모사에 필요한 플라즈마 수송, 안정성, 가열 시뮬레이션 모듈을 꾸준히 개발해오고 있으며, 최근에는 AI/ML 기술을 접목한 고속 시뮬레이션 모듈 개발을 추진 중
  - 이들 시뮬레이션 모듈을 통합한 PTRANSP, FASTTRAN 등의 통합 시뮬레이션 코드 개발을 지속 추진 중
  - DIII-D, KSTAR 등 다양한 핵융합 실험 장치 적용을 통해 시뮬레이션 정확성 및 유효성 검증을 추진하고 기술 신뢰도를 높여가는 중
  - 최근 디지털 트윈 기술을 기반으로 장치 설계 데이터를 반영한 토카막 가상화, 시뮬레이션 통합을 위한 기술개발에 착수
- (일본) QST, NIFS 양 기관을 중심으로 TASK 통합 시뮬레이션 프레임워크 개발, 수송 및 안정성, 가열 모듈 개발을 추진 중
  - 통합 시뮬레이션을 구성하는 일부 모듈을 AI/ML 기술을 적용하고 고속, 효율화 하는 연구를 함께 추진 중
- (EU) 독일, 프랑스, 영국 등 각국이 진행하던 통합 시뮬레이션 기술개발을 E-TASC 출범을 통해 조율 및 통합하는 작업에 착수
  - ITER 운전 단계에 대비하여 ITER-IMAS 데이터 표준 기술을 개발하고 통합 시뮬레이션 및 해석 도구에 적용 노력 중
- (국내) 우리나라는 과거 미국, 유럽 등에서 도입한 통합 시뮬레이션 기술을 KSTAR 연구에 적용해왔으나, 최근 TRIASSIC 통합 시뮬레이션 프레임워크 개발과 Total-PI와 같은 2차원 수송 모듈 개발에 착수하는 등 독자적 기술개발 노력을 병행 중
  - 디지털 트윈 기술을 활용하여 설계 데이터 기반의 KSTAR 주장치 가상화를 완료 하고 다양한 핵융합 시뮬레이션 기능을 통합한 Virtual KSTAR 개발을 진행 중

### ② 플라즈마 감금 성능 시뮬레이션 기술

- (미국) 미국 정부가 주관하는 SciDAC 프로젝트를 통해 GA, PPPL 기관 및 학교를 중심으로 플라즈마 난류를 유체 혹은 동역학 방식으로 모사하는 시뮬레이션 기술 개발 중



- 플라즈마 난류 및 수송 현상이 갖는 광범위한 시공간적 동역학 특성을 포괄하기 위해 초병렬 슈퍼컴퓨터를 활용한 대규모 시뮬레이션 기술개발 추진 중
- GA를 중심으로 시뮬레이션의 기술 신뢰성 확보를 위해 난류 및 수송의 특징을 실험과 비교하는 검증 연구도 함께 추진 중
- (일본) QST 및 교토대학을 중심으로 플라즈마 난류 및 수송을 동역학적 방법으로 모사하는 시뮬레이션 기술개발 추진 중
  - QST, NIFS 및 RIKEN에 구축한 슈퍼컴퓨터 자원을 활용하여 동역학적 방식의 대규모 병렬 시뮬레이션 기술개발에 주력
- (EU) 독일 막스 플랑크 연구소, 프랑스 CEA를 중심으로 동역학적 방식의 플라즈마 난류 시뮬레이션 기술개발 중
  - 최근에는 토카막 1차벽을 경계로 장치 전영역 난류 및 수송 모사를 위해 시뮬레이션 기술 확장 중
- (국내) 우리나라는 과거 10여 년 기간에 걸쳐 동역학적 광역 난류 및 수송 시뮬레이션 코드를 개발하고 KSTAR 영상 난류 진단과 비교 검증하는 연구를 통해 개발 경험을 축적
  - 최근 토카막 장치 전영역 난류 시뮬레이션 코드 개발에 착수하고 노심과 언저리를 포괄하는 신고전 수송 시뮬레이션 기능 완성하고 비 축대칭 난류 모사를 위한 기술 확장 추진 중

### ③ 플라즈마 안정성 시뮬레이션 기술

- (미국) 미국 정부가 주관하는 SciDAC 프로젝트를 통해 PPPL, Wisconsin 대학을 중심으로 자기 유체 방식의 플라즈마 안정성 및 동적 거동 시뮬레이션 기술개발 중
  - 감금 성능 시뮬레이션 기술개발과 유사하게 다중 스케일을 포함한 모델 시뮬레이션을 위해 병렬 슈퍼컴퓨터를 활용한 대규모 코드 개발 추진 중
  - 최근 플라즈마 붕괴 현상 및 폭주전자(runaway electron) 생성 과정 예측을 위해 고속입자를 포함한 유체 및 동역학 하이브리드 방식의 시뮬레이션 기술로 확장 추진 중
- (EU) 프랑스를 중심으로 자기유체 방식의 시뮬레이션 코드 JOEREK를 꾸준히 개발 중이며, 특히 영국, 독일, 미국, 한국 등 여러 나라 개발자가 참여하는 유체 시뮬레이션 프레임워크 방식의 개발 모델을 채택

- 최근 CAD 데이터를 바탕으로 토카막 장치 구조에 유도되는 와류전류, 후광 전류를 정교하게 모사할 수 있는 시뮬레이션 기술 확장 추진 중
- (국내) 우리나라는 그동안 해외에서 도입한 M3D-C1, JOEKE, BOUT++ 코드 활용에 주력하고 자체 개발 노력은 미비
- 그러나 최근 Virtual KSTAR 기술개발에 착수하면서 비구조 격자, 와류전류 모사를 위한 유한요소 풀이모듈 등을 개발 완료하고, 본격적인 자기유체 역학 시뮬레이션 코드 개발에 필요한 기반 기술을 확보한 상황

## 라

## 노심 플라즈마 관련 연구시설

### □ 정의

- 실증로 사양의 노심 플라즈마 제어, 가열 및 전류구동 시뮬레이션 프로그램 개발과 성능을 검증하기 위한 초고성능 컴퓨터 등의 제반 시설

세부 시설	시설 개요	필요성
초고성능 컴퓨터	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고성능 CPU/GPU를 탑재한 고성능 컴퓨팅 노드 다수 탑재</li> <li>• 계산 노드를 초고속 네트워크 기술로 연결하여 수십~수백 페타플롭스 이상 병렬 계산 용량 제공</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR, ITER, 실증로 노심 시뮬레이션 기술개발과 코드 활용을 위해 초고성능 컴퓨터 자원 필요</li> <li>• 시뮬레이션 기술을 KSTAR, ITER, 블랑켓 설비에서 산출되는 데이터와 연계하여 실증로 설계에 활용하기 위해 대용량 스토리지 시스템 및 디지털 트윈 설비와 통합 활용 체계 구축 필요</li> </ul>
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수백 페타바이트에 이르는 시뮬레이션 및 실험 데이터를 저장할 수 있는 SDD/HDD 형태의 스토리지 시스템</li> <li>• 고속 파일 입출력이 가능하도록 병렬 파일 시스템을 탑재하여 구동</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KSTAR, ITER, 블랑켓 설비에서 산출되는 데이터를 백업을 포함하여 안전하게 저장하고, 시뮬레이션, 설계 등의 연구에 활용하기 위해 대용량 스토리지 시스템 구축 필요</li> <li>• 대규모 시뮬레이션에서 산출되는 데이터를 효율적으로 저장, 서비스하기 위해 대용량 스토리지 시스템 구축 필요. 특히 다양한 데이터 저장, 접근 방식에 효율적으로 대응하기 위해 병렬 파일시스템 도입 필요</li> </ul>
디지털 트윈 가상화 설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 디지털 트윈 소프트웨어 구동을 위해 고성능 GPU를 탑재한 서버 계산 자원</li> <li>• 대용량 스토리지 및 초고성능 컴퓨터와 자원을 공유하며 유기적으로 연결하는 100G 이상의 초고속 네트워크 설비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 디지털 트윈 기술로 표현된 KSTAR, ITER, 즉 Virtual KSTAR, Virtual ITER를 구동하고 원격 연구자에게 가상화된 환경에서 실험 모니터링, 시뮬레이션 분석, 예측 등의 서비스를 제공하기 위한 설비 필요</li> <li>• 핵융합 실증로 설계 데이터를 활용하여 디지털 트윈 기술을 적용한 Virtual DEMO를 구현하고 실증로 설계 정합성 분석, 최적화 연구를 수행하기 위해 관련 설비 필요</li> </ul>

## □ 국내외 시설 구축 사례

- (해외) 미국, 일본, EU 등은 자국의 초고성능 컴퓨터를 보유하고 있으며, 컴퓨터와 연계한 0.5 EB 이상 규모의 대용량 스토리지 시스템을 구축 및 활용 중
  - 디지털 트윈 기술의 핵융합 적용은 도전적인 시도로 해외 구축 사례가 없음

세부시설	국외	사양
초고성능 컴퓨터	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국, 일본, EU 등에서 핵융합 시뮬레이션 기술개발과 코드 활용을 위해 다양한 초고성능 컴퓨터 구축 및 활용 중</li> <li>• 평균 5년 가량의 수명 주기를 갖고 보다 대용량을 갖는 시스템 구축 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국은 2.0 엑사스케일 초고성능컴퓨팅 자원 구축 및 활용 중</li> <li>• 일본은 초고성능컴퓨팅 자원 구축 로드맵을 수립하고 계획에 따라 자원 확장 추진 중</li> <li>• EU는 E-TASK를 지원하기 위한 범 유럽 초고성능컴퓨팅 자원 구축 및 확대 추진 중</li> </ul>
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국, 일본, EU 등에서 초고성능컴퓨터 자원과 연계하여 산출 데이터 저장, 서비스를 위해 대용량 스토리지 시스템 구축 및 활용 중</li> <li>• ITER 설계, 실험 데이터 저장과 서비스를 위해 관련 자원 확대 추진 중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국, 일본, EU는 초고성능컴퓨팅 자원과 연계하여 0.5 EB 이상 규모의 스토리지 자원 구축 및 활용 중</li> </ul>
디지털 트윈 가상화 설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 디지털 트윈 기술의 핵융합 적용은 현재 매우 실험적이고 도전적 시도로 아직 해외 구축 사례 없음</li> </ul>	

- (국내) 핵융합(연)에 KAIROS 초고성능컴퓨터를 구축하여 보유하고 있으며, 컴퓨터와 연계한 대용량 스토리지 시스템도 운영 중

세부시설	국내	사양
초고성능 컴퓨터	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KAIROS 초고성능컴퓨터</li> <li>• LOTAN 병렬클러스터 컴퓨터</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.56 페타플롭스 계산 성능</li> <li>• 28 테라플롭스 계산 성능</li> </ul>
대용량 스토리지 및 병렬 파일 시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KAIROS 대용량 스토리지 시스템</li> <li>• Islon 대용량 스토리지 시스템</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luster 병렬 파일 시스템 기반 5.78 페타바이트 저장 용량</li> <li>• GPFS 병렬 파일시스템 기반 6.7 페타바이트 저장 용량</li> </ul>

### ○ 구축 필요성

- (연구 효율 증대) KSTAR, ITER, 블랑켓 실험 설비로 이어지는 실험 설비 가동 일정에 맞추어 산출 데이터 규모에 대응할 수 있는 적절한 규모의 장비 규모 확대 필요
- (서비스 안정성 강화) KSTAR, ITER 등 실험 설비와 보안 연결이 가능하고 동시에 핵융합 연구자들에게 컴퓨터, 스토리지, 가상화 통합 서비스를 일원화된 방식으로 제공하기 위해 핵융합 전용 자원 구축 및 자원 규모의 지속 확대 필요