배포용

제4차 핵융합에너지 개발 진흥 기본계획 (2022~2026) (안)

2021. 12

과학기술정보통신부

순 서

Ⅰ. 기본계획 수립배경과 추진 현황 ····· 1

Ⅱ. 글로벌 동향과 정책 추진 여건 ····· 5

Ⅲ. 장기일정 수립 및 기본계획 추진방향 ···· 7

1) 핵융합 핵심기술 확보 장기일정 수립 ····· 7

2) 제4차 기본계획 추진 방향 ····· 10

Ⅳ. 제4차 기본계획 추진 전략과 과제 ····· 11

Ⅰ. 기본계획 수립 배경과 추진 현황

1 기본계획 수립 배경

○ **(배경)** 핵융합에너지개발진흥법(제 4조)에 따라 핵융합 연구개발 촉진을 위한 "핵융합에너지 개발 진흥 기본계획"을 매 5년마다 수립

※ 정책 목표와 기본방향, 연구개발 추진체계와 전략, 추진계획 등

< 추진 경과와 정책 목표 >

('07~'11) 제1차 기본계획	('12~'16) 제2차 기본계획	('17~'21) 제3차 기본계획
· 핵융합에너지개발 추진기반 확립	▶ · KSTAR와 ITER를 활용한 핵융합 기반기술 연구·개발	▶ · 전력생산 실증을 위한 핵융합로공학 기술 개발 추진기반 확립

○ **(경과)** 기획연구('20.12~)를 바탕으로 계획(안) 마련(~'21.9)
→ 핵융합실무위원회 검토('21.10) → 공청회 개최 및 의견 수렴('21.11)
→ 전문위원회(과기자문회의 산하) 사전 검토('21.11~12)

2 핵융합에너지 개발 개요

○ 핵융합에너지(fusion energy)*는 **低 탄소** 발생, **높은 안전성**(고준위 방폐물/폭발위험 없음)의 잠재력을 가진 **미래 에너지**

* 가벼운 원자핵(중수소, 삼중수소)들이 융합 → 무거운 원자핵(헬륨)으로 변환하며 발생

- 핵융합에너지 실현의 과학기술적 난제 극복을 위해 **2050년대를 바라보는 장기·도전적 연구개발** 추진 중

< 핵융합에너지 개발 주요 일정 >



3 제3차 기본계획 기간('17-'21) 성과와 한계 진단

1 KSTAR 연구를 통한 고성능 플라즈마 운전 기술 지속 향상

○ **(주요 성과)** 초전도 핵융합 연구장치 KSTAR 실험을 통해 **초고온·고성능 플라즈마 운전** 등 **핵심 기술 확보**

- 이온온도 **1억도의 초고온 플라즈마 달성**('18) 및 유지 시간 지속 연장('21년 30초) 등 **세계적 수준의 우수 연구성과** 창출

※ '플라즈마 경계면 불안전성 억제 예측모델 개발' 네이처 피직스 게재('18.4) 등 핵융합(연) KSTAR 연구 관련 국내·외 SCI 151건 게재('17~'21)

- **국제협력 연구**(ITER 기구-한국-EU-미국)를 통해 ITER 난제 해결을 위한 '플라즈마 붕괴 완화' 기술 검증 수행('19)

○ **(한계)** 종합적인 핵융합 **기술수준**은 선진국 대비 **격차***가 지속 존재

* 세계 최고 기술보유국 대비 국내 기술수준은 75.0%, 기술격차는 6년 (Kistep, '20)

2 국제핵융합실험로(ITER)를 통한 핵심 기술 확보

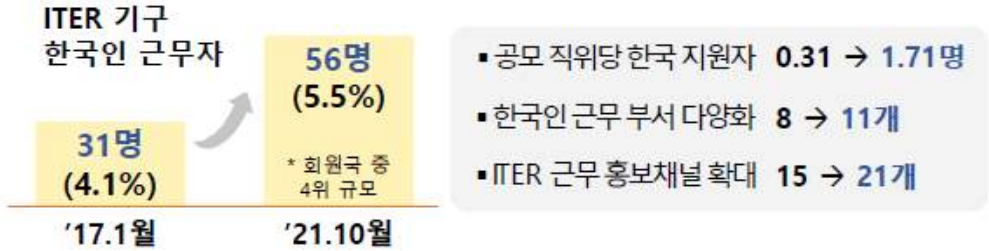
○ **(주요 성과) ITER 장치·품목의 성공적 제작·조달** 및 ITER 국제기구 **한국인 근무자 지속 확대**를 통해 핵심기술 확보

- 엄격한 기술·품질·안전 요건에 따른 제작 과정에서 **초대형·초정밀 기술 다수 확보***, **ITER 고난이도 핵심품목 조달 성공****

* 논문 657건, 특허출원 61건, 특허등록 50건 등

** 특히 기술적 난제를 극복하고 **ITER 진공용기 최초 섹터 제작·조달에 성공**('20.8)하여 **ITER 조립 단계 착수**에 **결정적 역할**

- **'ITER 기구 근무자 확대방안**('18.3)' 수립 등 정책적 지원노력 강화, ITER 장치 건설 총괄 **고위직 진출** 및 **한국인 근무자** 대폭 **확대**



○ **(한계)** 기술적 난제와 외부적 요인으로 각국의 **장치 제작 일정에 지연 발생**, ITER에 근무 가능한 **국내 전문가 풀 부족** 문제 지속

3 미래 핵융합 전력생산 실증을 위한 연구 기반 준비

○ **(주요 성과)** 핵융합 전력생산 실증에 필요한 **핵심기술 분야를 도출**하고 **시뮬레이션 연구 인프라** 구축

- 전문가 논의를 통해 2050년대 전력생산 실증을 위해 확보 필요한 **8대 핵심기술 분야** 도출(~'20)

※ ① 노심 플라즈마, ② 증식블랑켓, ③ 핵융합 소재, ④ 연료주기, ⑤ 디버터, ⑥ 가열 및 전류구동, ⑦ 초전도 자석, ⑧ 안전·인허가

- KSTAR·ITER 모사, 실증로 연구 등에 활용할 수 있는 **1.5PF급** (초당 1,500조회 연산) **슈퍼컴퓨터**(핵융합(연), "KAIROS") 구축('18~'20)

○ **(한계)** 체계적인 연구개발 추진을 위해서는 '**핵융합 전력생산 실증로**'의 **명확한 개념**을 바탕으로한 **장기 로드맵**이 필요

4 핵융합 연구 역량 성장과 신진인력 양성

○ **(주요 성과)** **핵융합기초연구사업**('09~'21)을 통해 국내 연구기반을 꾸준히 강화*하고 **핵융합 신진인력 양성****

* 주요 4대 저널(Physical Review Letter, Applied Physics Letters, Nuclear Fusion, Physics of Plasmas) 85편을 포함한 SCI 논문 313건 등('17～'20)

** '17～'20년 국내 대학 거점센터 6개 지원, 석·박사 인력 148명 배출

- 보다 전략성·원천성을 강화한 '**핵융합선도기술개발사업***' 착수('21)

* 핵심 기술 연구 거점인 선도기술센터, 타 분야와 핵융합 기술의 융합연구 등 지원

○ **(한계)** ITER **운영·실험 참여 효과를 극대화**하고 미래 **실증 연구를 선도**하기 위해서는 **국내 인력양성 강화**가 **시급**

< 국내 핵융합 인력 현황('18) >

(단위 : 명)

구분	산업체	연구기관	대학	합계
박사 (교수 포함)	28	150	184	**382**
석사	119	27	89	**235**
학사 이하	496	-	-	**496**
합계	**643**	**177**	**273**	**1,093**

(한국연구재단('20), 핵융합 및 가속기 산업분야 국내 생태계 종합 실태조사)

5 핵융합 산업 생태계 활성화 지원

○ **(주요 성과)** ITER 건설 등 관련 **국내 산업체의 해외 수주 지속 증가***, **핵융합 및 파생기술 분야 산업체 협력** 및 관련 기술이전 확대**

* 정보 제공 및 ITER Business Forum('17, '19, '21) 등 네트워킹 지원 노력 / 국내 산업체는 ITER 기구·타 회원국으로부터 159건(6,747억원)의 용역 및 제작 수주('07~'21.10 누적)

** '핵융합·가속기 산업체 상생한마당' 매년 개최, 평균 약 40개 업체 참여 / 핵융합(연) 기술이전 증가(('17) 7건, 4.03억원 → ('20) 10건, 9.57억원))

○ **(한계)** ITER 관련 수주 이외에는 **민간 부문에서 핵융합 기술에 대한 인식 및 활동이 저조**한 편

< 국내 핵융합 분야 기업 구성('18) >



(한국연구재단('20), 핵융합 및 가속기 산업분야 국내 생태계 종합 실태조사)

6 ITER 국제기구 및 주요 핵융합에너지 개발국과의 기술협력 확대

○ **(주요 성과)** 주요국과의 기술협력을 꾸준히 강화하고 **ITER 난제 및 실증 핵심 기술 분야**에서 **신규 협력 착수**

※ (**한-일/한-중**) 장치 실험과 ITER 조달 등 관련 각 19개, 8개 의제 중심 협력

(**한-EU**) 한-EU '기술관리계획' 체결('19.11), 양자간 ITER TBM 공동개발 추진 등 실증 핵심기술 분야 협력 강화

○ **(한계) 실질적인 공동 연구** 등으로 **협력을 지속 고도화**하여 첨단 기술의 **전략적 확보** 및 **리스크 감소** 필요

7 핵융합 연구개발 추진 기반 확충

○ **(주요 성과)** **'한국핵융합에너지연구원' 출범***('20.11), 우수 연구성과 공유** 등을 통해 일반의 핵융합 **이해도 제고**

* 기초과학지원연 부설기관('국가핵융합연구소')에서 독립 법인으로 출범

** 핵융합 기술혁신 국민보고대회('17.12), KSTAR 1억도 최초 달성 및 10주년 기념식('19.2), 국제핵융합실험로 장치조립 착수('20.7) 등

※ 국내 주요 에너지 기업, 대기업 등의 핵융합에너지에 대한 관심도 점차 증대

○ **(한계)** 기술 개발 이외에 규제, 제도, 산업 경쟁력 등의 다양한 측면에서 **종합적인 기반 조성·강화**가 필요

Ⅱ. 글로벌 동향과 정책 추진 여건

1 탄소중립 정책과 연계하여 핵융합에너지 개발 추진동력 강화

○ **파리 기후협정**('16년 발효), **UN 기후정상회의**('19.9) 이후 각국의 **탄소중립**(carbon neutrality) **노력** 가속화

- **EU, 영국, 일본** 등은 기후변화 대응, 녹색 산업혁명, 탄소중립을 위한 **정책적 노력** 일환으로 **핵융합에너지 개발에 투자·지원**

※ (예) 영국「녹색 산업혁명을 위한 10대 중점계획」('20.11), 일본「2050년 탄소중립을 위한 녹색성장 전략」('20.12)에 핵융합 에너지 개발이 포함

○ 한국은 **'2050 탄소중립 추진전략**('20.12)'에 따라 ①경제구조 저탄소화 ②신유망 저탄소 산업 생태계 조성 ③공정전환 등 추진

※ 핵융합에너지는 개발 일정상 2050년 이전에 전력 수급을 담당하기는 어려우나, 장기 관점에서 '2050 탄소중립 연구개발 투자전략('21.3)'의 10대 핵심 투자분야에 포함

2 국제핵융합실험로(ITER) 조립 시작, 코로나로 일정 영향 예상

○ 각 회원국이 제작한 핵심 장치의 현장 조달*이 시작됨에 따라 프랑스 **ITER 현장**에서 **주장치 조립 공정이 본격 착수**('20.7)

※ 최초플라즈마 실험(現 사업계획상 '25.12 목표) 기준 건설공정률 75.3% ('21.11)

* **TF 코일** #12(일본, '20.4), **조립동** 완공(EU, '20.4), **PF 코일** #6(EU, '20.6), **진공용기 섹터** #6(한국, '20.8) 등

- ITER **회원국 정상** 등 고위직이 참여한 **'장치 조립 착수 기념행사'**를 통해 **사업에 대한 각국의 지속적인 지지** 의사 확인

○ 그러나 **코로나**로 인한 각국 **산업체 직접적 영향, 기술적 난제** 등으로 **ITER 완공**(당초 '25년말 예정)**은 1년 이상 연기 가능성**이 높은 상황

※ 일정 영향을 지속 업데이트 중이며 가속화 조치 모색 중

3 주요국의 핵융합 기술개발 및 투자 적극 추진

○ 세계 주요국은 **첨단 핵융합 연구장치** 및 관련 **연구시설 신규 확충** 등 **핵융합 핵심기술 확보**에 적극적·지속적 노력

< 주요국 핵융합 연구 장치 현황 >



○ 주요국은 대체로 **'50년대 전력생산 실증을 목표로 기술 개발에 박차**

※ '35년경 이후 ITER 중수소-삼중수소 연소실험 결과 확인 후 실증로 건설 추진 여부 결정

< ITER 및 주요국의 핵융합 추진 일정 요약 >



4 해외 핵융합 혁신기술 스타트업 부상 및 투자 활성화

○ ITER 대비 **소규모**로 **혁신 기술**에 도전하는 **핵융합 스타트업**들이 출현하여 **공공·민간의 투자 유치, 장치 설계·제작 등을 활발히 진행**

< 주요 핵융합 스타트업 현황 >

스타트업	국가	주요 사업 내용
Commonwealth Fusion Systems	미국	· **고온초전도체** 활용 **토카막 장치** "SPARC" 제작(~'25) · 핵융합 **에너지 순증**(Q>1) **최초 검증** 목표 * MIT 대학에서 스핀오프하여 설립
Tokamak Energy	영국	· **고온초전도체 기술** 및 "**구형**(Spherical) **토카막**" 기술 확보를 통한 연구장치 제작·업그레이드 추진
General Fusion	캐나다	· **자화표적핵융합 방식***의 연구장치 개발 추진 * 토카막과 달리 '가둠 용기' 없이 강한 자기장 내에 플라즈마 생성
TAE Technologies	미국	· **역자장 방식***을 활용한 빔 형태 연구장치 개발 추진 * 플라즈마 입자의 소용돌이 운동으로 자기장 생성

Ⅲ. 장기 일정 수립 및 기본계획 추진 방향

◆ 핵융합에너지 개발의 핵심 활동별로 **현행화된 장기 일정과 주요 목표를 제시**하고, 이를 기반으로 **향후 5년의 정책 추진 방향과 전략**을 수립

1 핵융합 핵심기술 확보 장기 일정 수립

□ 주요 내용

○ 국내 **기술 역량**과 **ITER 건설·운영 일정** 등을 고려하여, **2050년대**에 **핵융합 전력 생산을 실증***하기 위한 **장기 일정 목표** 수립

* 통상 '**실증**(Demonstration)'은 기술적으로 수백 MW의 전기출력 실현, '**상용화**(Commercialization)'는 실증단계 이후 경제성이 확보된 가운데에서 전기 공급을 의미하나, 한국 '핵융합 전력생산 실증로'의 보다 상세한 개념은 추후 구체화 필요

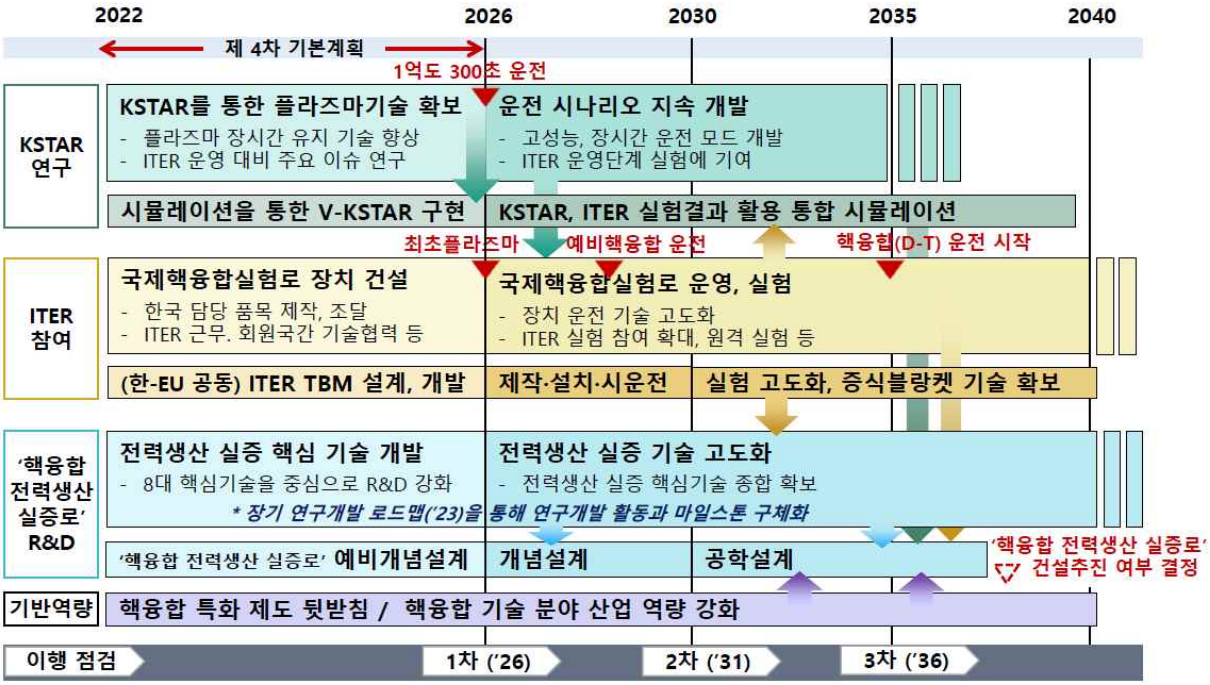
○ 2035년경 이후 **ITER 실험의 목표 달성**(에너지 증폭률 10배) **성공 여부를 확인한 후 한국의 '핵융합 전력생산 실증로' 건설 추진 여부***를 결정

* (필수 고려사항) ① ITER 성공 ② 8대 핵심기술 확보 ③ 핵심부품 국내 조달 ④ 핵융합 발전의 경제성 확보 가능성

○ 기존 **핵융합 R&D 활동의 유기적 추진**을 기반으로 **전력생산 실증에 이르기 위해 필요한 연구 분야와 일정**을 큰 틀에서 함께 제시

※ 5년 주기 기본계획 수립 시 장기 일정을 업데이트 제시 (Rolling Plan)

< 핵융합 핵심기술 확보 장기 일정 >



붙임1 미래 핵융합 전력생산 실증에 필요한 8대 핵심기술

□ 8대 핵심기술의 범위

○ **(주요 전제)** ① 향후 한국의 '핵융합 전력생산 실증로'가 KSTAR와 ITER를 확장·발전한 **토카막*** **방식**을 채택 ② 핵융합 전문가들에 의한 **현 시점에서의 최선의 과학기술적 판단**에 근거

* 자기장으로 플라즈마를 가두는 도넛모양 장치

※ i)타 기술 분야(예: 원자력 등)에서 이미 성숙된 기술이 확보되어 있고 핵융합에 적용이 비교적 쉬운 기술이거나, ii)전세계적으로 기초단계에 있어 현 시점에서 '핵융합 전력생산 실증로'의 기술적 기반으로 채택 검토가 어려운 기술은 범위에서 제외

○ **(범위)** 2050년대 핵융합 전력생산 실증에 필수적인 기술로서,

- 현재 진행 중인 연구개발 활동의 심화 또는 추가적·도전적 연구 수행을 통해 과학기술적·공학적 난제를 극복함으로써 확보 가능한 기술

→ ① 노심 플라즈마, ② 증식블랑켓, ③ 핵융합 소재, ④ 연료주기, ⑤ 디버터, ⑥ 가열 및 전류구동, ⑦ 초전도자석 기술

- 이에 더하여, '핵융합 전력생산 실증로' 등 미래 핵융합 장치 등에 적용할 안전·인허가 체계를 확립하기 위해 필요한 기술 → ⑧ 안전·인허가

< 핵융합 전력생산 실증을 위한 8대 핵심기술 범위 >



□ 8대 핵심기술 주요 내용

토카막 / 로공학 / 안전 · 인허가

1 초고온·장시간·고밀도 노심 플라즈마 기술

- 핵융합 반응을 위해 **높은 온도**(1억도 이상)와 **밀도**를 갖는 **노심 플라즈마**를 만들고, 제어·유지하는 **운전 시나리오** 개발
  * ① 제어기술, ② 진단기술, ③ 시뮬레이션

2 삼중수소 증식 및 전력생산을 위한 증식블랑켓 기술

- **열에너지 변환** 및 **삼중수소 증식을** 위한 내벽 부품인 **'증식블랑켓'** 기술 개발 및 **실증로 환경** 검증
  * ① 설계/안전해석 체계 구축, ② 제작/검증 기술, ③ 계통 기술

3 극한 열부하와 高중성자속을 견디는 고유 소재 기술

- 핵융합로의 **구조적 안정성**과 **에너지 생산의 효율성을 확보할 수 있는 소재 개발** 및 물성평가 데이터베이스 구축
  * ① 구조재, ② 대면재, ③ 기능소재

4 핵융합 연속 반응 유지를 위한 연료주기 기술

- **삼중수소의 안전한 취급**과 핵융합 **연속 반응 유지**를 위해 **연료를 공급·순환**시키는 기술
  * ① 삼중수소 안전, ② 삼중수소 정제·분리·저장 기술,
    ③ 연료공급 기술, ④ 진공배기 기술

5 플라즈마 고성능 유지를 위한 디버터 기술

- 핵융합 환경에 **직접 노출**되어 **불순물과 헬륨을 제어**하는 장치인 '**디버터**'의 정밀한 설계·제어
  * ① 디버터 설계 기술, ② 디버터 제작 및 검증 기술

6 플라즈마 가열 및 전류구동 장치 기술

- 플라즈마 **성능 향상** 및 **안정적 유지**를 위한 가열 및 전류구동 장치 기술 개발
  * ① 가열 및 전류구동 장치 기술, ② 가열 및 전류구동 플라즈마 통합 기술

7 플라즈마 안정적 가둠을 위한 고자장 초전도 자석 기술

- 초고온 **핵융합 플라즈마의 가둠·제어, 핵융합로 운전 및 경제성 향상**을 위해 **높은 자기장의 초전도 자석** 개발
  * ① 초전도 선재, ② 초전도 도체, ③ 초전도 자석, ④ 기반 시스템

8 기술 혁신 및 수용성 확보를 위한 안전·인허가 관련 기술

- 핵융합로 **운전방식**, **고유 안전성**을 고려한 **특수한 안전·인허가 체계 확립**과 이를 위한 **평가·검증 기술**
  * ① 안전성 평가 기술, ② 인허가 기술(요건 도출)

2 제 4차 기본계획('22-'26) 추진 방향

- 비 전 -

핵융합에너지 실현으로 지속가능한 국가 新 에너지 확보

- 제4차 기본계획 목표 -

"핵심기술 개발 가속화 · 전략적 기반 조성으로
핵융합에너지 실현을 위한 국내외 노력 선도"

- ◆ KSTAR 장치 실험 목표 달성
- ◆ ITER 건설 마무리 단계 진입
- ◆ 장기 연구개발 로드맵 구체화
- ◆ 핵융합 규제 체계 기본방향 마련

- 추진 전략과 과제 -

[전략 1] 핵융합 특화 전략 · 제도 확충	❶ 장기 연구개발 로드맵 구체화 및 체계적 이행 ❷ 핵융합 특화 제도·체계 등 종합 기반 확충
[전략 2] 핵융합 핵심기술 개발 촉진 및 기반 강화	❶ KSTAR를 활용한 고성능 플라즈마 기술 연구 ❷ 전력생산 실증 핵심기술 개발 강화 ❸ 핵융합 인재 양성 및 산업 생태계 활성화 지원
[전략 3] 국제협력을 통한 첨단기술 확보 가속화	❶ ITER 사업을 통한 핵심기술 확보 극대화 ❷ 주요 핵융합에너지 개발국과의 전략적 기술협력 강화

Ⅳ. 제4차 기본계획 추진 전략과 과제

전략 1. 핵융합 특화 전략·제도 확충

과제 1-1. 장기 연구개발 로드맵 구체화 및 체계적 이행

◆ **장기·도전적** 연구개발 및 **대규모 투자**에 따른 리스크 관리를 위해 신뢰성 있는 **장기 연구개발 로드맵을 확립**하고 **철저한 이행 체계**를 마련

□ **미래 '핵융합 전력생산 실증로'에 대한 기본개념 확립을 바탕으로 장기 연구개발 로드맵 구체화**

○ 한국 '핵융합 전력생산 실증로'의 **정의**와 **역할**, 주요 **추진 단계** 및 **개발·활용 일정** 등에 관한 **기본 개념 확립**(~'22)

※ ('~22.上) '핵융합 전력생산 실증로'의 목표, 기능, 실증 및 연구 범위, 상용화 근접도 등에 핵융합 전문가 컨센서스 도출 → ('~22.下) 에너지 분야 등 폭넓은 전문가 검토를 거쳐 기본개념 확립

○ **명확한 '핵융합 전력생산 실증로' 개념**을 바탕으로 **장기 연구개발 로드맵*** **구체화**(~'23, 국가핵융합위 보고)

* ITER에서 '핵융합 전력생산 실증로'로 이행하는 **중간 단계에 필요한 주요활동 식별, 마일스톤 정의·구체화 등**

□ **5년 주기의 이행 점검을 통해 체계적인 추진 확보**

○ 5년 주기 기본계획 수립 일정과 연계하여 기술 확보 상황에 대한 **'이행 점검'**을 실시, **향후 단계 이행 여부·방향**을 결정

※ 핵심기술 확보 일정 및 로드맵에 따른 주요 마일스톤 달성 여부, 설계 연구 완료 여부, 기술개발 추진 상황, 향후 단계 이행 가능성 등 점검

○ 산·학·연 전문가로 구성된 **이행점검단**을 운영, **점검 결과**와 **향후 추진 방향**에 대해 국가핵융합위 보고

< 1차 이행점검('26) 추진 내용(안) >

이행 점검 내용		추진 방향 검토
· KSTAR, ITER 등 주요 활동의 추진 현황 · 8대 핵심기술 개발·확보 상황 · '핵융합 전력생산 실증로' 예비개념설계 결과물 등	☞	· 일정·로드맵에 따른 향후 단계 이행 여부 등

과제 1-2. 핵융합 특화 제도·체계 등 종합 기반 확충

◆ **핵융합의 특수성**을 고려하고 **혁신을 촉진**할 수 있도록 관련 **법제, 규제 체계, 특허전략** 등 종합적인 경쟁력 강화를 위한 **기반 준비에 박차**

□ 핵융합 관련 법·제도 정비 및 종합 전략 지원 체계 확충

○ **대내외 여건 및 연구개발 일정 반영**, 핵융합 연구개발 촉진을 위한 **법제 보완·발전 방안 검토**(핵융합에너지 개발진흥기본법 등)

○ 핵융합 기술 **투자, 안전 규제, 산업 경쟁력** 등을 아우를 수 있는 **종합적인 전략 지원 체계**를 신속히 마련(~'22)

※ (예) (가칭) '핵융합 전략지원센터' 지정·운영 추진('23~)

□ 안전 기술 연구 추진 및 핵융합을 위한 규제 체계 준비

○ 핵융합 **안전** 및 **평가** 관련 **기반 연구** 지속 추진

* 핵융합로 부품 설계/제작 기술표준 정립 연구('22~), 안전평가 방법론 연구('23~), 고유안전성 및 리스크 인자 평가기술 개발('24~) 등

○ 미래 핵융합로 및 관련 실험시설의 안전 이슈 대응을 위해 필요한 **'핵융합 규제 체계 기본방향'**을 마련(~'24)하고 **관계기관 등 소통**('24~)

※ **핵융합 특수성과 고유 안전 이슈**에 **균형있게 대응**하는 **규제 체계**의 선제적 검토·준비를 통해 기술 혁신 촉진 및 투자 불확실성 감소

< 미래 핵융합 분야 주요 안전 이슈 >

안전 이슈	※원자력(핵분열)과 비교
■ (**삼중수소**) 삼중수소의 취급, 저장, 폐기물 관리 필요 ■ (**중저준위 방폐물**) 중성자에 의해 방사화된 내벽재료 등 폐기물 발생	:**고준위 방폐물 미발생,** 노심 용융/폭발위험 없음

□ 미래 기술·시장 선점을 위한 특허 전략 마련

○ 증식블랑켓, 재료 등 주요 기술의 미래 시장 경쟁력 확보를 위한 **핵융합 핵심기술 특허전략** 마련(~'22, 국가핵융합위 보고)

< 핵융합 분야 한국의 특허 현황('08~'17, 출원기준) (Kistep, '20) **>**

국가	미국	중국	일본	EU	**한국**	계
건수 (점유율)	116 (27.5%)	114 (27.0%)	96 (22.7%)	66 (15.6%)	**30** **(7.1%)**	422 (100%)

전략 2. 핵융합 핵심기술 개발 촉진 및 기반 강화

과제 2-1. KSTAR를 활용한 고성능 플라즈마 기술 연구

◆ **고성능·장시간 플라즈마 실험 목표 달성** 및 **ITER 선행연구** 등 중요 주제의 연구를 수행하고, **KSTAR 향후 연구 방향**을 마련

□ 고성능 플라즈마 장시간 운전 기술 향상을 통한 실험목표 달성

○ 초고온 플라즈마 장시간 유지기술 향상 및 지속 **운전 목표 달성***(~'26)

* 초고온 플라즈마(1억도) 조건 지속시간 연장 : 50초('22) → 100초('24) → 300초('26)

○ **내벽 업그레이드**(탄소→텅스텐)('22)를 통한 **고성능 플라즈마 기술 지속 확보***

* 고성능 플라즈마(β_N~3) 조건 지속시간 : 15초('22) → 30초('24) → 100초('26)

※ β_N : 플라즈마를 가두는 자기장 압력에 비해 바깥으로 팽창하려는 플라즈마의 압력 비율로, 값이 커질수록 핵융합로 효율성이 높아지지만 불안정성 발생 가능성도 증가

□ ITER 선행연구 및 시뮬레이션 기반 가상 핵융합로 연구 추진

○ ITER **초기운전 단계 필수 요소기술*** 검증 등 ITER의 향후 연구계획('18, ITER Research Plan)을 고려한 선행연구 추진

* 초전도 토카막 장치운영 불확실성·리스크 최소화를 위한 텅스텐 디버터 환경 운전기술, 산탄입자주입을 통한 플라즈마 붕괴완화 기술 등

○ KSTAR 설계·실험 데이터로 **'Virtual KSTAR' 구현**

※ KSTAR 주장치 및 부대장치 가상화 구현(~'22) → 플라즈마, 가열 및 전류구동 시뮬레이션 기능 통합('25) → 통합 시뮬레이션 가능한 Virtual-KSTAR 구현(~'26)

□ KSTAR 활용·운영 활성화 및 향후 연구방향 마련

○ 국내 **대학, 연구기관**의 KSTAR **실험 참여** 확대, **국제 공동연구과제 지속 확충**을 통해 **다양한 주제의 연구 수행**

※ '20년 기준 KSTAR 실험에 해외 연구자 약 60명 참여, 실험 제안 주제 25% 차지

○ '26년 이후 KSTAR의 **연구 방향** 검토·마련(~'23, 국가핵융합위 보고)

※ 대외 환경변화(ITER 건설, 각국 핵융합 장치 연구계획 등) 및 미래 전력생산 실증연구 관련 필요를 고려

과제 2-2. 전력생산 실증 핵심기술 개발 강화

◆ **8대 핵심기술을 중심**으로 **전력생산 실증 핵심기술 개발 노력**을 강화하고 산·학·연 전문가가 참여하여 '핵융합 전력생산 실증로' **예비개념설계 추진**

□ 핵융합 경쟁력 선도를 위한 핵심기술 개발 추진

○ 8대 핵심기술 분야를 중심으로 연구개발 추진을 강화하고, 장기 연구개발 로드맵에 따라 공백기술 확보를 위한 신규 R&D 사업 기획

< 주요 사업과 핵심기술 분야 연계 현황 >

	노심 플라즈마	블랑켓	소재	연료주기	디버터	가열·전류구동	초전도 자석	안전·인허가
KSTAR 연구	✔					✔		
ITER 참여	✔	✔	✔	✔				
핵융합 선도기술개발	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔
초전도자석 분야 R&D 사업							✔	
(기타)핵융합연 주요사업 등					✔			✔

○ **'선도기술센터*' 지원 확대** 및 **초전도자석 분야 기술개발** 착수('22) 등 **도전적 분야**의 핵심기술 확보 추진

* 우수 연구그룹으로 핵심기술 개발 및 인력양성의 거점 (센터당 年 약 12억원, 5년)

○ 핵융합의 다양한 난제 해결을 위한 **타 분야와의 융합연구*** 확대

* 핵융합 기술 + 기계, 재료, IT, 원자력 등 타 분야 기술의 융합연구

□ '핵융합 전력생산 실증로' 예비개념설계 착수

○ 핵융합(연)을 중심으로 산·학·연 전문가가 참여하는 **'핵융합 전력생산 실증로' 설계 TF** 구성·운영('22~)

※ 전문가 TF의 예비개념설계(안) 후보 도출 → 1차 이행점검('26)을 통해 검토

○ '핵융합 전력생산 실증로' **핵심 파라미터 검토** 등 **예비개념설계 추진**('23~)

※ 핵심 파라미터(전력생산량, 크기, 경제성 등) 검토 및 필수 요소기술을 통합하여 실증로가 기능할 수 있는 예비개념설계 도출

과제 2-3. 핵융합 인재 양성 및 산업 생태계 활성화 지원

◆ ITER 운영 및 실증로 연구를 선도할 **핵융합 인재 양성을 적극 지원**하고, 핵융합 **산업 생태계**의 **경쟁력 강화**와 **혁신**을 위한 기반을 조성

□ 글로벌 핵융합 연구를 선도할 고급 인재 양성 확대 지원 강화

○ **대학**의 **핵융합 교육과정 확충** 등 **인재양성 촉진을 위한 적극적인 지원을 모색***하고 **교과목 개발 등 자발적 혁신 노력** 강화

* 단계적 진로, 중장기 수급·선순환을 고려한 인력 양성 신규사업 기획 등

※ **국내 대학 현황**('21) : 핵융합 관련 대학원 **전공과정 운영**(2개 대학), 관련 **과목 개설**(10개 대학), 핵융합 분야의 **전임교원 근무**(11개 대학)

○ **한국인 신진인력**을 대상으로 **ITER 국제기구**에서 **박사후 연구원 근무를 지원**(Korea-ITER Post-doc.)하는 **특화 프로그램*** 추진 ('22~)

* ITER 국제기구 內 공학·과학·운전 등 부서에서 2년간 근무를 통해 첨단 경험 축적

○ **핵융합(연)-대학 연계 협력*** 및 **미래세대 교육** 프로그램 확대

* 예) '핵융합 여름/겨울 학교', 신진 교수 및 박사후연구원 대상 연구(연수) 프로그램 등

□ 국내 핵융합 기술 산업체의 역량 강화 및 생태계 활성화 지원

○ 핵융합에 대한 **민간의 관심과 투자 촉진**, 기술 **산업 생태계 확대·활성화**를 위한 **협의회**(가칭 '핵융합기술산업협의회') 구성·운영 추진

※ (**참여**) 핵융합 사업 참여 및 연구 협력 기업, 에너지·IT 등 분야의 국내 대기업 및 중소기업, 핵융합 및 유관분야의 공공·민간 연구기관 등

(**활동**) 산업 실태조사, 정보 교류, 정책 소통, 산업계 전문인력 양성 등

○ 핵융합 **R&D 활동** 추진에 **산업체와의 협력**을 확대*하고, **핵융합 요소기술·파생기술 산업 분야**로의 **성과 파급**도 **지속 촉진****

* 예) 핵융합선도기술개발사업 內 융합연구, 핵융합(연)을 중심으로 산학연 공동 연구 등

** 산업생태계 활성화를 위한 '핵융합 산업체 상생한마당' 매년 개최, 핵융합(연) 기술사업화 노력 확대 등

○ 국내외 **핵융합 프로젝트**에 **국내 산업체의 참여·수주 노력** 지원*

* ITER Business Forum 참여 등 네트워킹 지원, 국내외 사업 정보 제공, ITER 유지 보수, 최초플라즈마 이후 잔여 건설 및 운영 관련 참여 지속 확대 모색

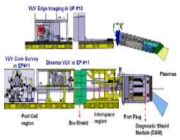
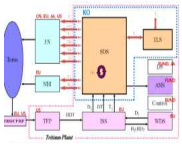
전략 3. 국제협력을 통한 첨단기술 확보 가속화

과제 3-1. ITER 사업을 통한 핵심기술 확보 극대화

◆ 한국 담당 장치의 제작·조달 등 **ITER의 성공적 건설에 노력**하고 한국인 **ITER 근무자 지속 확대** 등 사업 참여 효과 극대화

□ 핵심 품목 제작·조달 및 ITER 건설 일정 리스크 관리 강화

○ ITER 건설 일정 및 품질 요건에 따라, **한국이 담당하는 장치 개발·제작 및 조달 이행**

장치 건설 단계에 조달			최초 플라즈마 이후 조달	
전원공급장치	**블랑켓 차폐블록**	**진공용기 포트**	**진단장치**	**삼중수소 시스템**
				
- 제작·조달(~'22)	- 제작·조달(~'25)	- 제작·조달(~'25)	- 설계(~'23) →제작·조달(~'27)	- 설계(~'24) →제작·조달(~'28)

※ 초전도자석('14), 조립장비('20), 열차폐체('21), 진공용기 본체('21)는 조달 완료

○ **코로나 영향** 등으로 인한 **ITER 건설 일정 지연 최소화** 및 **가속화 조치 확대**를 위해 회원국들과 공동 노력

※ 코로나 등 영향으로 인한 **사업 지연 현황 반영**을 위해 **ITER 차원의 사업계획**(일정, 총사업비) **갱신이 예정('22년 하반기)** (→ 사업계획 갱신 시 국가핵융합(실무)위 보고)

□ ITER 근무자 확대 및 핵심 기술 개발 등 전략적 역량 확보 극대화

○ 국내 핵융합 역량 강화를 위한 **필요 기술 분야를 고려**하여 ITER 국제기구에 업무 분야별 **전문가 진출 확대 노력**

※ ITER 운영단계 대비 과학·실험 및 운전(제어, 가열, 진단), 플랜트엔지니어링(연료주기) 등 분야에 점진적 확대 노력

○ ITER **조달 품목 이외**의 주요 **핵심기술**('非조달 기술')* 확보 촉진

* 한국 할당 조달품목 이외 기타 핵심 기술(노심 연소플라즈마 물리, 가열/전류구동, 연료주기, 디버터 대면재 기술 등) 등 개발('11~'25)

○ ITER 사업 참여 全 과정에서 ITER 국제기구와 긴밀히 협력·소통

과제 3-2. 주요 핵융합에너지 개발국과의 전략적 기술협력 강화

◆ 핵융합에너지 개발은 모든 국가가 최초로 도전하는 기술인만큼 **주요 기술 선도국과 적극적인 협력**을 통해 **핵심기술을 효과적으로 확보**

□ 주요 핵융합 기술 선도국과 양자 연구협력 강화

○ 각국과 중점 협력 분야 및 실증 핵심기술 분야를 중심으로 **정책 교류, 기술협력 및 공동연구 프로그램 발굴·강화**

< 주요국과의 핵융합 국제협력 현황 >

국가	주요 협정	협력 주요 현황
일본	핵융합협력 약정('04)	·KSTAR 플라즈마 가열, 부대 장치 공동개발, 장비 무상 도입 ·KSTAR-LHD 장치 간 실험 협력 및 인력 교류 ·ITER 기술 협력(일차벽 및 블랑켓, 삼중수소 시설, 진단분야)
EU	핵융합협력 협정('06)	·한-EU 기술관리계획('19)에 따른 실증 주요 기술 분야 협력 ·한-EU ITER TBM 공동 개발 협력 추진 협의 중 ·ITER 플라즈마붕괴완화시스템 관련 연구 장치 실험 협력
미국	핵융합 연구협력 시행약정('10)	·KSTAR 장비 무상 도입 ·한-미 간 장시간 플라즈마 연구, 실시간 제어시스템 구축 협력 ·ITER SPI 플라즈마붕괴완화시스템 관련 연구 장치 실험 협력
중국	핵융합협력 약정('11)	·KSTAR-EAST 연구장치 협력 ·ITER 조달 관련 기술협력(블랑켓 차폐블록, 전원장치 등)
영국	-	·신규 협력 논의 중 → 협력 분야 도출 및 협력체계 마련 추진('22)

□ 한-EU ITER 테스트블랑켓모듈 공동개발을 통해 블랑켓 핵심기술 확보

○ ITER의 **핵융합 환경**에서 **열추출·연료주기 등 실증기술을 검증**하기 위해 한국이 참여('12~)해오고 있는 **"TBM 프로그램"**을 **EU와의 양자 공동개발 협력으로 전환 추진**하여 **기술 확보 극대화**

※ (개요) 증식블랑켓: 핵융합로 노심을 둘러싸고 ①삼중수소 증식, ②에너지 변환·추출, ③방사선 차폐의 3대 기능 수행

→ TBM은 ITER에 설치하여 성능·타당성을 검증 하는 '증식블랑켓 시험모듈'