

핵융합기술의 현주소

핵융합, 과연 미래 에너지인가?

강정민 박사
전 원자력안전위원회 위원장



핵융합 기술의 현주소: 핵융합, 과연 미래에너지인가?

2021. 7. 5

전 원자력안전위원회 위원장
강정민 박사

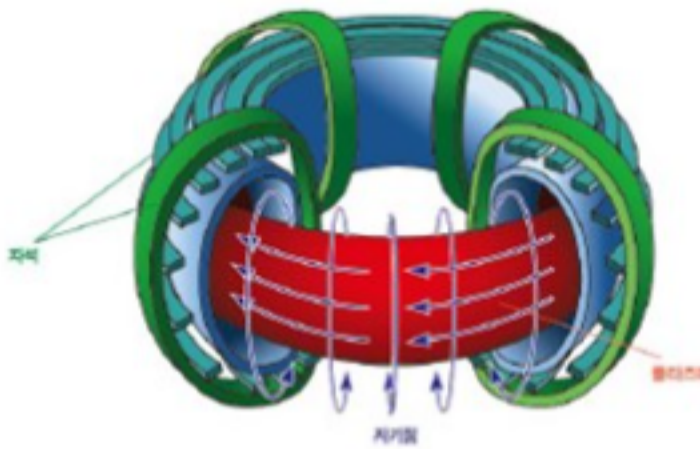
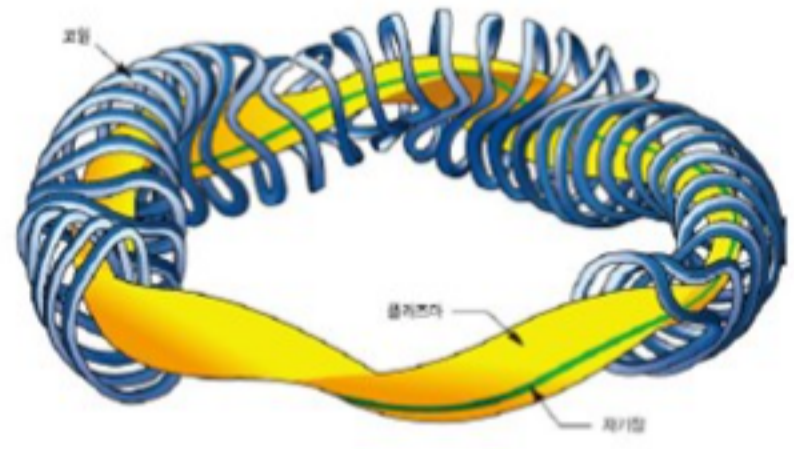
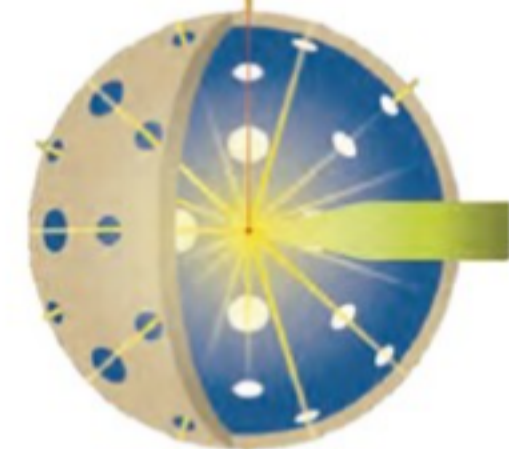
1

2050 탄소중립과 핵융합

- 기후위기로 인해 '2050 탄소중립'은 시대적 화두
 - 지구온도 상승을 1.5°C 이내로 억제하기 위해 2050년까지 탄소 순배출량이 0(zero)이 되는 탄소중립 사회로의 전환을 위해 세계적인 노력이 필요한 시기.
- 이러한 시대적 조류에 편승해 국내 핵융합계 인사들은 2050 탄소중립 실현을 위한 안정적인 대안으로 핵융합발전을 내세우고 있음
 - 이들은 핵융합발전은 이산화탄소 발생이 거의 없는 무궁무진한 친환경 에너지원이며 방사성 물질도 중저준위로 소량밖에 나오지 않는다고 주장.
- 그러나 핵융합발전은 2050 탄소중립에 기여할 수 없음
 - 왜냐하면, 국내 핵융합계조차 핵융합발전의 상용화를 2050년대로 기대하고 있기 때문.
 - 그럼에도 불구하고 그들은 신문지상을 통해 핵융합발전이 2050 탄소중립의 궁극적 대안이라는 주장을 계속해서 하고 있음.

핵융합 발전 개요

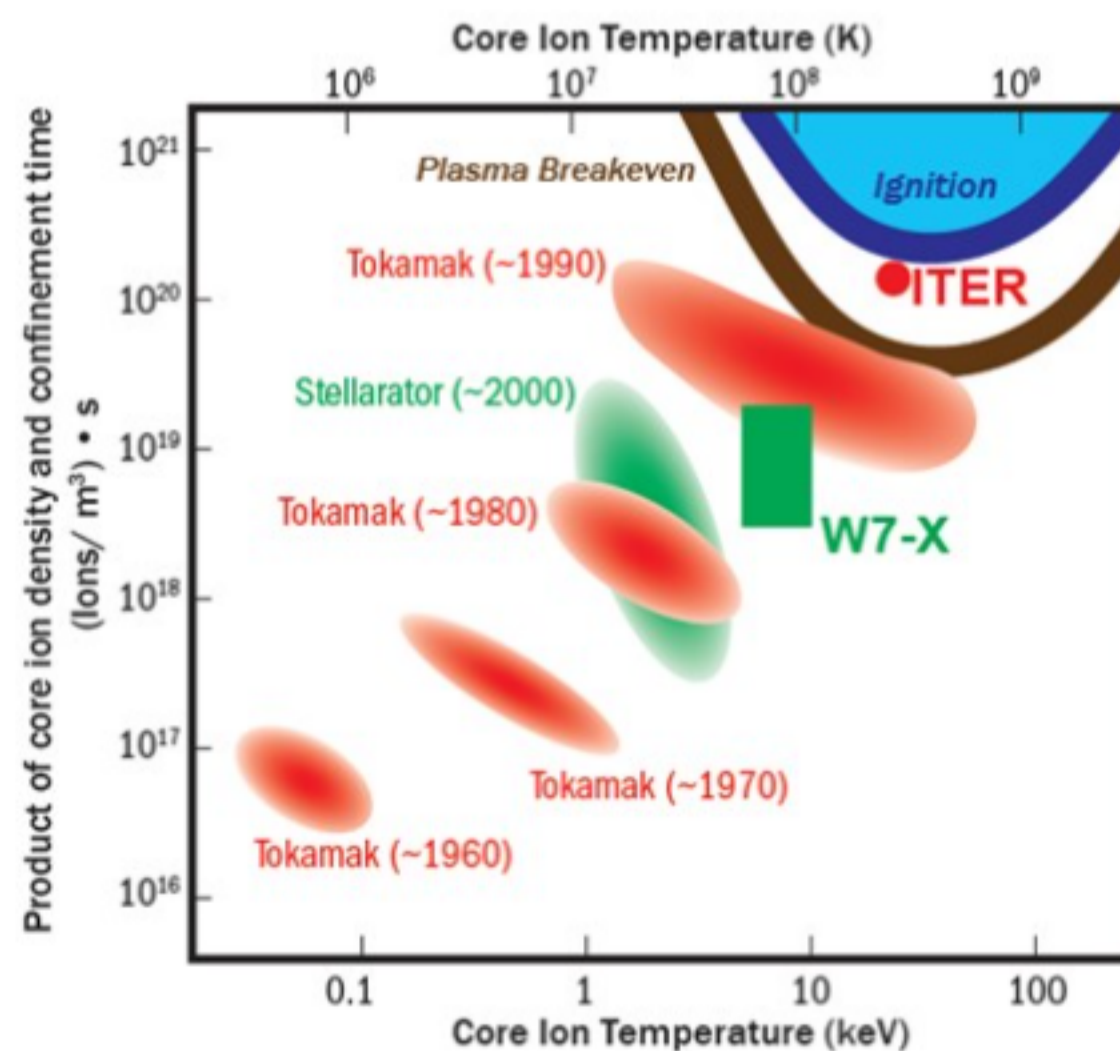
핵융합 반응 유도 방식 비교

자기 가둠 방식		관성 가둠 방식
토카막(Tokamak)	스텔러레이터(Stellarator)	레이저
		
<ul style="list-style-type: none"> • (원리) 토로이달(수평) 방향 플라즈마 전류를 통해 간접적으로 추가 자기장 생성 • (특징) 구조가 단순하여 건설이 용이하나, 플라즈마를 안정적으로 장시간 제어하기가 어려움 • (대표장치) ITER, KSTAR 등 	<ul style="list-style-type: none"> • (원리) 나선형 외부 도체(헬리컬 코일)를 통해 직접적으로 추가 자기장 생성 • (특징) 플라즈마 장시간 유지에 용이하나, 구조가 복잡하여 건설이 어려움 • (대표장치) W7-X, LHD 등 	<ul style="list-style-type: none"> • (원리) 중수소와 삼중수소로 이뤄진 작은 펄릿에 강력한 레이저 조사하여 폭발을 유도 • (특징) 에너지 생산뿐 아니라 무기 관련 연구도 진행 중. 투입 대비 발생 에너지는 상당히 낮은 편 • (대표장치) NIF, LMJ 등

(참고문헌: 여준석·정예슬, "핵융합 에너지," KISTEP 기술동향브리프, 2020-11호.)

핵융합 발전 개요

토카막과 스텔러레이터의 성능



(참고문헌: Cleo B. Chou et al., "Fusion Energy via Magnetic Confinement," ACEE, 2016)

(플라즈마 가둠시간 ITER 목표: 400초, 500 MW 출력)

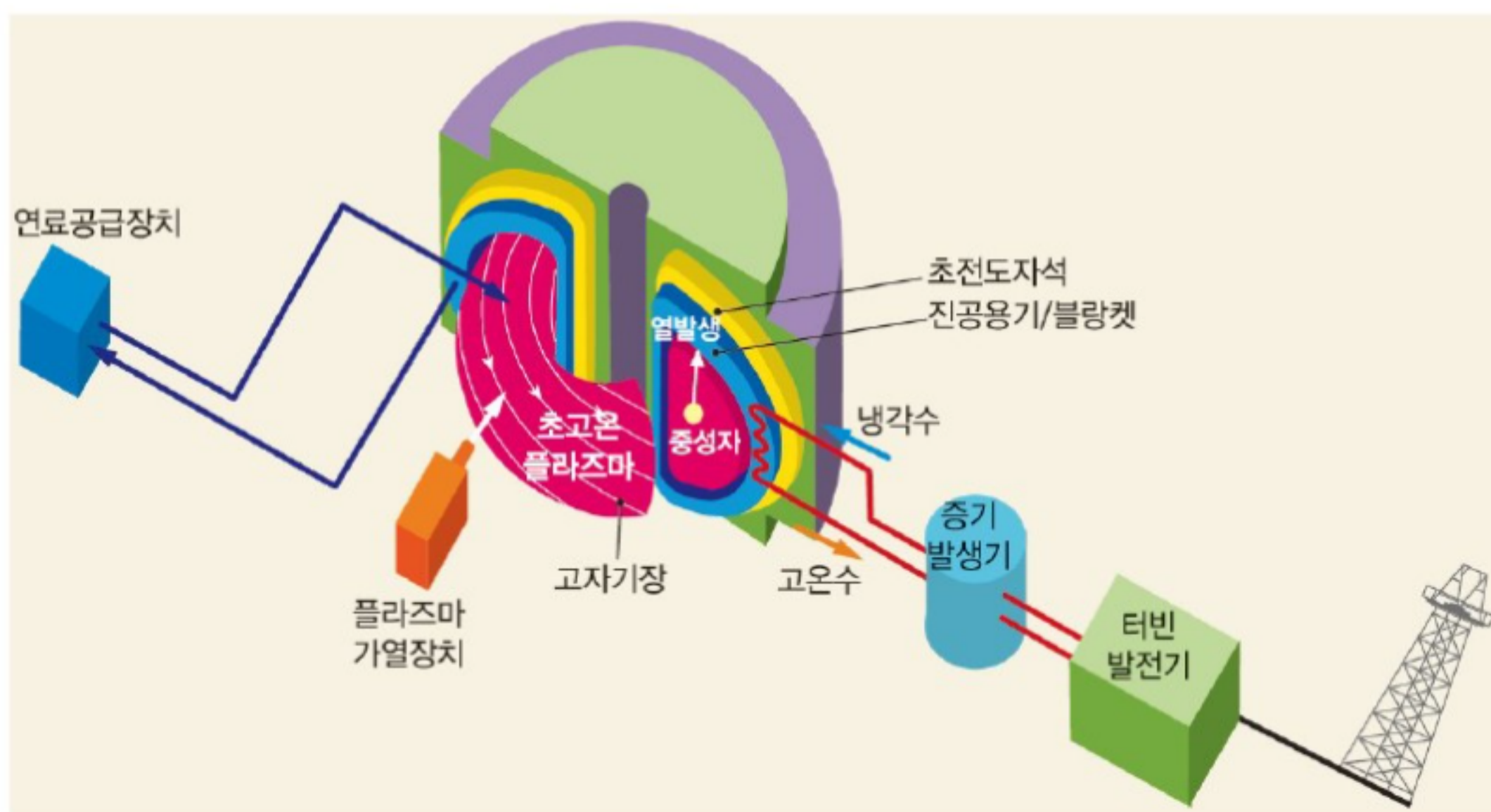
핵융합 발전 개요

핵융합 에너지와 핵반응

- ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow \text{n} + {}^4\text{He} + 17.6\text{MeV}$ (반응식 1)
- $\text{n} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^4\text{He} + 4.8\text{MeV}$ (반응식 2)
- 1,000 MW 핵융합로 경우, 매년 반응식 1은 약 80kg 중수소와 120kg 삼중수소 소비하고, 160kg 헬륨-4와 40kg 중성자를 생산.
 - 반응식 2는 40kg 중성자로부터 120kg 삼중수소를 재생산하는 한편 240kg 리튬-6을 소비하고 160kg 헬륨-4를 추가로 생산.
- CANDU 중수로는 연간 약 100g의 삼중수소를 생산할 것으로 예상.
 - 2011년 캐나다 CANDU 원자로의 삼중수소 재고는 20kg.
 - 1,000 MW D-T 핵융합로는 연간 120kg의 삼중수소 연료를 필요로 한다는 점을 상기하면, 초기 연료로 사용할 삼중수소 확보 방안이 과제임을 알 수 있음.
- 그러므로 삼중수소를 바닷물에서 거의 무한하게 얻을 수 있음을 보이려면 핵융합로 내 자금을 위해 삼중수소를 생산, 회수, 저장, 공급하는 연료주기 기술 개발을 ITER 사업을 통해 증명해야 함.

핵융합 발전 개요

핵융합 발전 모식도



(참고문헌: 여준석·정예슬, "핵융합 에너지," KISTEP 기술동향브리프, 2020-11호.)

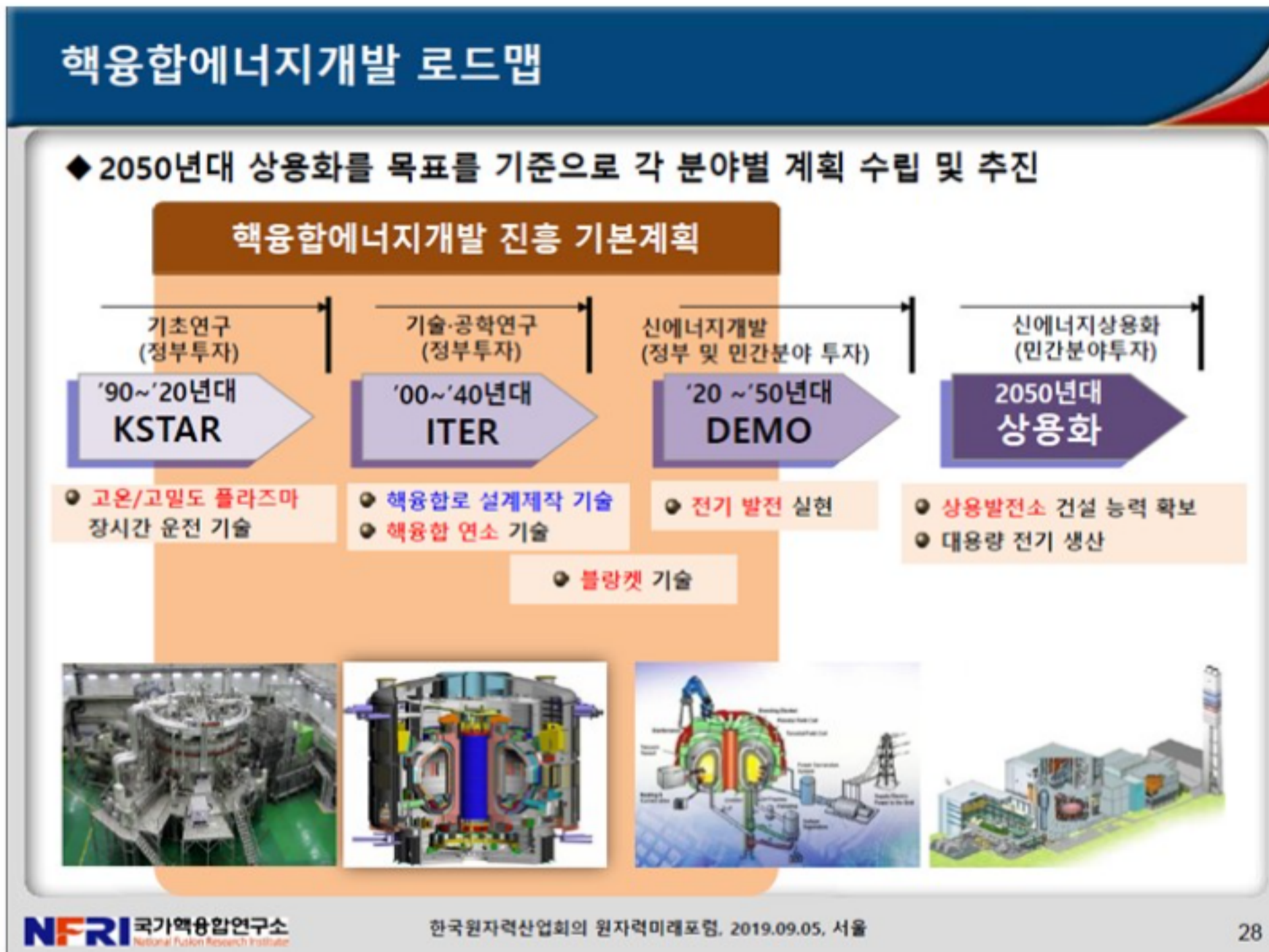
연소 플라즈마 거동은 미개척 과학

- 핵융합반응을 일으키는 태양 중심의 온도가 섭씨 1500만 $^{\circ}\text{C}$ 에 비해 태양 중심처럼 엄청난 중력이 작용하지 않는 지상에서 핵융합반응을 이루려면 연료 온도를 섭씨 2억 $^{\circ}\text{C}$ 까지 올려야 함.
 - 이러한 초고온에서 연료는 완전히 이온화돼 ‘플라즈마’ 상태가 됨.
 - 핵융합로는 강력한 자기장을 사용해 플라즈마 열을 유지하고 플라즈마 거동을 제어하며, 핵융합반응에 의해 플라즈마 내에서 에너지가 생산됨.
- 핵융합 초기 연구는 불규칙하게 거동하는 플라즈마 제어에 초점을 맞추고, 제어문제를 줄이기 위해 핵융합 반응을 제한
 - 현재 핵융합 첨단연구는 외부 가열없이 플라즈마의 고온을 유지하기 위해 충분한 핵융합 반응이 발생하는 ‘연소 플라즈마’ 연구에 중점을 두고 있음.
- 그런데 불안정한 연소 플라즈마의 거동 해석과 통제는 새로운 과학의 영역이고 여전히 난제.
 - 2025년 완공 목표로 20조원 이상 사업비가 드는 국제핵융합실험로(ITER)에서 약 20년간 핵융합 실험을 통해 연소 플라즈마의 역학이 밝혀질 것으로 예상됨.
 - 즉 ITER를 통해 연소 플라즈마의 불안정한 거동의 통제에 성공할 때, 비로소 ITER 핵융합발전의 가능성이 증명되는 것임.

국내 핵융합 동향

- 우리나라의 본격적 핵융합연구는 1995년 ‘국가 핵융합 연구개발 기본계획’ 이 시작
 - 2006년 ‘핵융합에너지 개발진흥법’ 제정
 - 2007년 ‘제1차 핵융합에너지 개발진흥 기본계획’ 을 시작으로 5년 단위 ‘핵융합에너지개발 진흥기본계획에 따라 핵융합 R&D를 추진
 - 정부의 핵융합 R&D 투자는 2007년 573억 원에서 2019년 1,568억 원으로 크게 증가
 - 제1차 핵융합에너지개발진흥기본계획은 2030년대 핵융합발전소 건설능력 확보를 목표
 - 제3차 핵융합에너지개발진흥기본계획에서는 2040년대로 연기
 - 국가핵융합연구소는 ITER 이후 국내에서 K-DEMO 실증로 건설 계획에 근거하여 2050년대 국내 핵융합 발전 상용화 예상

국내 핵융합에너지 개발 로드맵



(Source: 이현곤, "핵융합에너지개발의 현재와 미래," 2019. 09. 05, 한국원자력산업회의 원자력미래포럼)

핵융합 상용화 여전히 먼 미래

- 핵융합 성공을 위한 여러 다른 기술적 과제들은 차치하고, ITER 사업을 통해 불안정한 연소 플라즈마의 통제와 삼중수소 자급자족에 성공했다 하더라도, 전력생산은 또 다른 과제.
 - ITER는 전력생산을 할 수 없음.
- ITER 실험로 운영 성과에 기반해 연간 몇시간 만이라도 전력생산을 시도해볼 핵융합 실증로(DEMO)의 운전 개시를 핵융합 연구의 선두주자라 할 수 있는 유럽연합은 빨라야 2050년대로 예상.
- 통상 거대 연구프로젝트의 연구개발 기간 20~30년을 고려한다면, 아직 건설되지도 않은 데모(DEMO) 실증로가 성공한다는 가정 아래, 그에 기반할 실제 핵융합발전 상용로 1호기는 2070~2080년대 중에도 실현되기 쉽지 않을 것으로 예상됨.

핵융합 발전의 비경제성

- 핵융합 상용화가 여전히 먼 미래이기 때문에 핵융합발전의 경제성을 정확히 파악하는 것은 어렵지만, 핵융합 발전비용이 주로 자본 비용과 매년 발전소 가동 시간에 의해 결정되므로 다른 발전원과의 비교분석은 가능.
- 2018년 핵융합 지지입장의 한 연구논문은 전기출력 1.6GW 전력생산 핵융합로의 건설비용으로 약 9조원, 균등화 발전비용은 kWh당 약 180원으로 추정.
 - 그런데 이 수치는 건설비용과 균등화 발전비용 측면에서 기존의 어떠한 발전원들, 즉 석탄, 가스, 원자력, 재생에너지보다 이미 비쌌.
 - 미래의 핵융합발전이 기존의 타 발전원에 비해 가격 경쟁력이 없을 가능성이 높다는 사실을 입증.

핵융합 발전의 비효율성

- 핵융합 발전소의 가동률에 영향을 미치는 구성 부품 교체 관점에서 가장 중요한 영역은 핵융합 플라즈마 자체에 근접한 블랭킷 및 다이버터.
 - 블랭킷 및 다이버터 등 핵융합로 주요 부품들 교체로 인해 1~2년 운전 후 최소 반년 이상의 유지보수 기간이 필요
 - 그 기간에는 극저온 유지 등 시설 유지 및 보수를 위해 상당량의 전력이 외부로부터 거꾸로 공급돼야 함.
- 발전 경제성 때문에 대규모의 발전용량을 추구할 수밖에 없는 ITER형 핵융합발전은 미래의 국내 전력망의 계통 안정성 차원에서 수용하기 어려울 것으로 전망됨
 - 또한 전력 수요와 공급의 변화에 맞추기 위해 잦은 출력 감발(출력을 낮춤) 운전이 필요한데, 핵융합발전은 이에 적합하지 않을 것으로 예상됨.

핵융합 발전과 방사성폐기물

- 방사성폐기물 관리 관점에서 원자력 발전에 비해 고준위 방사성폐기물을 발생시키지 않는 핵융합발전의 이점은 연료로 사용하는 다량의 삼중수소 자체가 인체에 치명적인 방사성물질이라는 사실과 핵융합 반응에서 발생하는 엄청난 양의 중성자에 의해 방사화되는 구조재료 등 저준위 방사성폐기물의 대량 발생으로 인해 상쇄될 수 있음.
 - 유럽연합의 핵융합발전 개념연구는 전기출력 1.5GW 발전소의 25년 수명기간 동안 7만t 이상의 저준위 방사성폐기물이 생성될 것으로 추산하고, 해체 시 5만t이 추가로 발생한다고 추정.
 - 이들 저준위 방사성폐기물은 약 100년간 저장해야 할 것임.
- 그리고 철강재 속에 포함된 니오븀과 몰리브덴이 중성자 피폭으로 장수명 고준위 방사성폐기물로 전환.
 - 초전도 자석의 구성물질 중 하나이기도 한 니오븀은 중성자 피폭으로 약 2만300년 반감기를 가진 방사성물질인 니오븀-94(Nb-94)로 전환됨.
 - 그리고 몰리브덴은 중성자 피폭으로 반감기가 3500년인 몰리브덴-93(Mo-93) 방사성물질로 전환됨.

결론

- 상기의 지적사항들을 감안할 때, 기술적 난제를 다 극복하고 미래에 핵융합발전이 성공한다 할지라도 핵융합발전은 경쟁력 있는 에너지원이 되기 쉽지 않음.
- 그런데 이러한 기술적·경제적 불확실성에 싸인 핵융합발전의 상용화를 위해 향후 50~60년에 걸쳐 매년 1500억원 이상의 연구개발비를 지속적으로 지출한다는 것은 합리적이지 않음.
- 핵융합 관련 지원정책과 연구예산의 재검토가 필요함.