

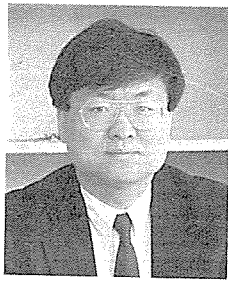
# 빠르면 2020년 상업로 실현 기대 연구 50년 ... 과학적 실증단계 올라

### 태양은 거대한 핵융합로

지구상 모든 생명의 에너지 공급원인 태양은 매초 4조와트의 백조배(4 x 10<sup>26</sup>와트)에 이르는 에너지를 핵융합 반응에 의해 방출하고 있다. 이 에너지양은 현재 지구상에서 생산되고 있는 총 전력량의 일조배 이상이나 되는 막대한 양의 에너지이다. 이와 같이 모든 우주 만물의 에너지원인 항성들 내부에서는 가벼운 원소들의 핵융합 반응에 의해 막대한 에너지가 발생되고 있다는 과학적 사실은 1930년대에 이르러 알려지기 시작했다.

이러한 과학적 사실에 대한 이해는 과학자들로 하여금 인공적인 핵융합 반응의 실현을 추구하게 하여 1950년대 초반에 이르러 미국의 핵물리학자인 텔러박사, 소련의 핵물리학자인 사하로프박사의 주도하에 양국에서는 비밀리에 핵융합 반응을 응용한 수소폭탄 개발 계획이 진행되었다.

이와 함께 핵융합에 의해 발생하는 막대한 에너지 자원의 평화적인 이용 계획도 진행되어 인공태양계획이라 불리는 제어 핵융합 에너지 개발도 같은 시기에 시작되었다. 이러한 핵융합 에너지개발은 화석에너지의 고갈문제 해



李京洙

(기초과학지원연구소 대형기공동연구부장)

결과 폐기물 등 환경문제를 유발치 않는 깨끗하고, 또 대형 방사능 유출사고가 없는 안전하면서도, 다른 대체 에너지원과는 달리 고밀도·대용량의 무한한 에너지 개발 가능성을 가지고 있어, '꿈의 에너지'라고 까지 불리는 인류 역사상 최대의 과학적 도전이 시작되었다.

또한, 이즈음 국제연합을 통해 '원자력 에너지의 평화적 이용'에 관한 국제적 합의가 도출되고 1958년에 이르러서는 국제 원자력기구의 지원하에 핵융합 에너지의 평화적 이용을 위한 국제 공동노력이 시작되어, 지금은 상호 호혜주의원칙에 입각한 가장 성공적인 국제공동 협력연구의 표본으로 인정되고 있다.

현재 우리나라 전력수요의 많은 부

분을 담당하는 원자력발전은 우라늄(<sup>235</sup>U)과 같은 무거운 방사성 동위원소들이 핵분열 반응에 의해 가벼운 원소들의 핵과 중성자로 분리되는 현상을 이용하는데, 이 핵분열 과정에서 발생하는 질량 결손은 아인슈타인에 의해 잘 알려진 질량의 에너지 변환 공식(E=mc<sup>2</sup>)에 따라 방출되는 입자들의 운동에너지로 나오게 되고, 이 연쇄적인 핵분열 반응을 제어된 방법에 의해 에너지화 하는 것이다.

핵융합 반응은 핵분열 반응과 상반되는 물리현상으로 수소의 동위원소들과 같은 가벼운 원소들의 핵이 초고온 상태에서 서로 결합하여 헬륨과 같은 좀 더 무거운 원소의 핵을 형성하는 반응을 말하며, 이때에도 질량 결손에 의해 생겨나는 에너지는 방출되는 입자들의 운동에너지로 나타나게 되는데 이를 제어된 방법에 의해 에너지화 하려는 것이 핵융합 에너지개발의 목표이다.

핵융합에 의한 에너지 발생은 수소폭탄의 폭발위력에 의해 너무나 잘 알려져 있지만, 이 에너지의 평화적 이용을 위한 제어된 상태의 핵융합 에너지개발에는 초기의 예상과는 달리, 이 때까지 현대 과학이 만났던 그 어떤

문제보다도 어려운 기술적인 문제를 해결해야만 되어서 반세기에 가까운 노력끝에서야 이제 제어 핵융합 연구의 과학적 실증단계에 도달하였다.

제어 핵융합 에너지의 개발에 요구되는 기술적 어려움을 이해하기 위해서는 핵융합 반응시 일어나는 물리적 현상들과 필요한 조건들을 좀 더 자세히 알아야만 한다. 이를 위해 먼저 많은 핵융합 가능 반응경로중 가장 쉽게 일어날 수 있는 반응경로 두가지를 예로 들어 보면, 그 첫번째는 D-T 반응으로 불리는 반응경로로 반응식은  $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ 이고 이 반응에서는 중수소(Deuterium)와 삼중수소(Tritium)의 핵자들이 충돌 결합할 때 안정성이 높고 무해한 헬륨이온( ${}^4\text{He}$ )과 중성자(n)가 나오고 그 때 방출되는 입자들의 총 운동에너지는 17.6MeV (MeV = 백만 전자볼트)가 나온다.

이 반응이 일어나기 위해서는 핵융합 연료인 수소 동위원소들의 핵들로 이루어진 가스들이 4천5백만도 이상으로 가열되어야 한다. 일반인들에게는 불가능하게 느껴지는 숫자들이지만 이 반응경로가 다른 모든 핵융합 반응경로들 보다 가장 쉽게 일어나는 반응경로여서, 제 1세대 핵융합 반응이라 불리고 수소폭탄뿐만 아니라 초기 핵융합로에서 사용될 연료들은 이 반응경로에 의해 타오르게 된다.

두번째는 D -  ${}^3\text{He}$ 로 불리는 반응경로의 반응식은  $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ 이고 이 반응경로는 D - T 반응에 이어 두번째로 쉽게 일어나는 반응경로이다. 이 반응에서는 중수소(D)와 헬륨-3( ${}^3\text{He}$ ) 핵자들이 충돌결합할 때 헬륨이온( ${}^4\text{He}$ )과 양성자(p) 즉 수소의 핵자가 나오는 핵융합 반응으로, 이

반응에서 방출되는 입자들의 총 운동에너지는 18.2MeV에 달한다. 하지만 이 반응이 일어나기 위해서는 연료를 D-T 반응을 위해 요구되는 온도보다 8배 가량이나 높은 3억5천만도 이상으로 가열하여야 한다.

이런 어려움에도 불구하고 이 반응에 쓰이는 핵융합 연료들(D- ${}^3\text{He}$ ) 전부가 안정된 원소들이고, 주위의 물질이 방사성을 띠게 유도하는 반응 중성자도 나오지 않기 때문에 D- ${}^3\text{He}$  반응은 가장 깨끗한 핵반응이라 불리면서, 핵융합 에너지 개발연구의 첨단 연료로 큰 기대를 모으고 있다.

이와 같이 상대적으로 쉽게 일어나는 핵융합 반응경로들도 이 반응으로부터 에너지를 얻기 위해서는 연료 즉 핵융합 물질들을 태양의 내부와 같은 초고온, 초고압의 극한상태로 가둘 수 있어야만 한다. 하지만 태양의 내부상태란 지구 대기밀도의 백만배 이상의 초고압과 1천5백만도 가량의 초고온 상태를 말하기 때문에 지구상에서의 실현이 불가능한 것은 명백하다 하겠다.

핵융합 반응에는 이와 유사한 극한상황이 필요하다는 점은 핵융합 에너지 개발의 초기부터 잘 알려져서 영국의 로오슨경에 의해 온도, 밀도, 밀폐시간 및 총 부피에 대한 점화조건이 계산되어 알려졌고, 이러한 상수들간의 상관관계도 알려져 있었다. 이 연구결과에 의하면 고체, 액체, 기체 등과 같이 우리에게 친밀한 물질상태로는 이러한 조건들을 만족시킬 수 없고, 다만 플라스마(Plasma)라 불리는 제 4의 물질상태 즉, 고온의 이온화된 하전기체 상태만이 조건들을 만족시킬 수 있고, 저장방법에 있어서도 현재까지 알려진 최고온

내열체들은 수천도 이상이 되면 모두 타버리므로 관성밀폐방식(Inertial Confinement)과 자기밀폐방식(Magnetic Confinement) 등 두가지 방법 이외에는 다른 방법이 없다는 결론에 이르게 되었다.

여기에서 관성밀폐방식이란 조그마한 구슬형태의 핵융합 연료를 레이저와 같이 강력한 빛으로 쬐으면 그 압력에 의해 내부밀도가 보통 액체 상태의 밀도보다 수천배 더 높은 상태로 압축되게 되고, 이 수축시 발생하는 충격파에 의해 연료가 가열되어 핵융합 반응이 일어나게 하는 것을 말하는데, 이 방식은 핵융합 반응상태를 지속적으로 유지시킬 수 없기 때문에 상용화 될 수 있는 에너지 원으로는 부적합하게 보이지만, 기술적으로는 수소폭탄의 폭발구조와 흡사해서 수소탄 개발을 위한 시뮬레이션 등 군사적 목적을 가진 연구로 계속 진행되고 있다.

지금까지 알려진 플라스마 밀폐방식중 핵융합 에너지의 실용화에 이용될 수 있는 최선의 방법인 자기밀폐방식은 전기를 띤 입자들은 자기장에 의해 운동의 구속을 받는다는 전자기학적 원리를 응용해서 진공용기 속에 초고온 상태의 플라스마를 가두고, 초고주파 등을 이용해 플라스마 속의 핵융합 반응 물질들을 더 높은 온도로 가열해서 핵융합 반응이 일어나게 유도하는 방식이다.

이 방식을 이용한 실험장치 중에는 미국에서 개발된 스텔러레이터(Stellarator), 자기거울(Magnetic Mirror), 영국에서 개발된 핀치(Pinch), 1968년 소련에서 사하로프와 팀에 의해 발명되어 현재 가장 진보된 방식인 토카막(Tokamak:도우

넷형의 자기용기라는 뜻을 가진 러시아어 약자) 등 여러가지가 있는데 현재 핵융합 임계조건에 도달한 장치는 모두 토카막형 핵융합 실험로이다.

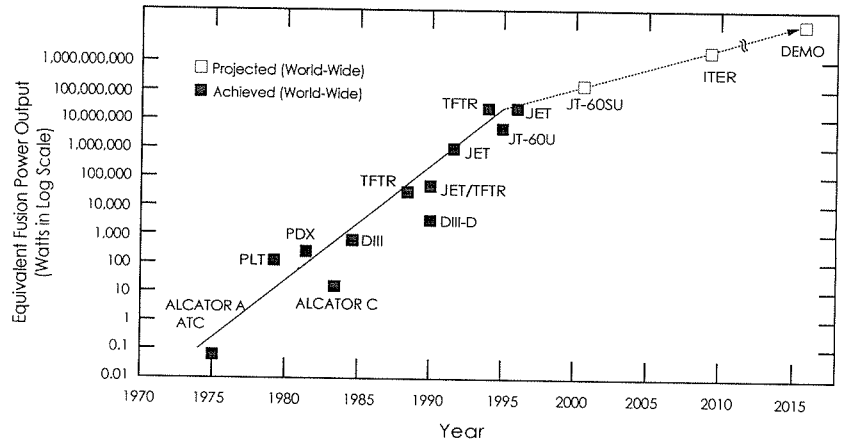
이와 같이 전자기 원리를 이용하여 진공에 가까운 낮은 밀도(지구 대기밀도의 1천분의 1 이하) 하에서 핵융합 점화에 필요한 조건들을 만족시키기 위해서는 적어도 플라스마를 태양 내부온도보다 수십배 이상 뜨거운 3억도 가까이 가열하여 수초 이상 밀폐하여야 하는데 이 목표를 달성하기 위해서는 모든 최첨단의 과학기술들이 총동원되게 되었고, 이 과정에서 극한상태하의 물질상태를 다루는 첨단 과학기술들을 연구하는 종합과학인 플라스마 과학이 새로 생겨나기까지 하였다.

### 토카막 개발로 연구활성화

앞에서 설명한 바와 같이 핵융합 연구는 초기의 예상과는 달리 자기장 속에 가둔 초고온의 플라스마의 불안정성에 의해 많은 어려움을 겪었고 이를 극복하기 위해 요구되는 높은 기술수준으로 인해 지속적인 연구에 비해 발전의 속도가 느렸으나, 1968년 소련 과학자들에 의해 발표된 토카막장치를 이용하여 천만도 고온의 안정된 플라스마 밀폐 결과는 핵융합 연구 활성화에 크게 기여하였다.

이에 따라 70년대에 들어와서는 토카막장치에 의한 핵융합 결과들은 괄목할 만큼 발전하기 시작하였고 70년대 중반에 있었던 아랍권 국가들의 석유수출금지 조치의 결과로 석유가격인상 등이 전세계적으로 전파되면서, 이에 대응하는 세계적 노력의 한방법으로 선진국들에 의해 본격적인 핵융합 에너지 개발이 시작되었다. 이에따

〈그림1〉 핵융합 기술발전 도표



라 현재 세계 3대 핵융합 실험장치로 불리는 미국의 '토카막 핵융합 실험로(TFTR)', 유럽연합의 '유럽 공동연구 토러스(JET)'와 일본의 'JT-60토카막' 장치 등과 같은 대형 토카막형 핵융합 실험시설이 건설되고 80년대 초반에 실험이 시작되어 핵융합 연구의 획기적인 발전을 가져오게 되었다.

핵융합 연구의 발전을 좀 더 정량적으로 살펴보면 1975년부터 1995년까지 20년간 연구의 결과 플라스마의 온도는 1백배 이상, 핵융합 에너지 발생은 일억배 이상의 진척을 보이고 있으며, 1991년 말에는 유럽연합의 JET장치가 D-T연료를 최초로 사용하여 2천kw의 핵융합 에너지를 얻는데 성공하였고, 그 2년 후에는 미국의 TFTR장치에서 3억도의 초고온하에 1만kw의 핵융합에너지 창출에 성공하였다.

또한, 세계 3대장치 모두는 핵융합 연구의 과학적 측면에서 중요한 의미를 가지는 임계조건(Break-even)에 거의 도달하여 있는데, 이는 핵융합 반응을 지속시켜 이때 방출되는 에너지가 이 반응을 일어날 수 있게 하기 위해 소모된 에너지양과 같아지는 상태에 도달하였다는 것을 의미한다.

### 석유값 안정이 연구지연 초래

70년대 후반부터 본격적으로 진행된 핵융합 연구의 괄목할만한 발전과 최근의 연구성과들은 정량적 수치로 비교해 보면, 어떤 다른 분야의 연구성과의 발전보다 빠른 성장을 보여주고 있으나, 세계 3대 토카막건설 이후 세계적인 석유가격의 안정과 선진국의 연구 재정 형편으로 근 20년간 다음단계의 핵융합 장치 개발에 대한 투자가 이루어지지 못하여, 당초 핵융합 에너지 개발 목표 달성이 지연되었고 이로 인해 핵융합 연구의 발전이 느리다는 비판이 있어 왔으나, 이는 연구결과들을 자세히 알고보면 사실이 아님을 알 수 있다.

그러나 핵융합 에너지의 상용화를 위해서는 지금까지의 연구결과를 바탕으로 하여 넘어야만 할 과제들이 아직도 남아있는데, 그중에서도 가장 중요한 것은 핵융합 에너지 개발의 과학적 최종목표인 점화상태(Ignition)의 달성으로 이 상태에서는 핵융합 반응으로 방출되는 에너지가 충분하여 외부에서 추가되는 가열없이도 핵융합 반응이 지속되는 상태에 도달하는 것이다.

이러한 과학적 목표달성과 함께 상용으로써 필수조건인 플라즈마의 안정성과 정상상태하의 지속적인 핵융합 반응 목표의 달성과 지금보다 출력 밀도를 높여 핵융합로의 경제성을 확보하는 것이 앞으로 풀어야 할 과제들이다. 이를 위해서는 대형 초전도 자석의 개발과 무유도 방식에 의한 전류구동 기술의 개발이 필요하고, 발생하는 높은 고열을 견디기 위한 초고온 재료와 발생하는 중성자들에 의한 방사화를 최소화하기 위한 금속재료의 개발이 요구되고 있어, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

지금까지의 핵융합 연구결과와 다양한 관련 기술개발을 바탕으로 하여, 핵융합 기술의 종합적인 실증을 목표로 한 '국제 열 핵융합 실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor : 약자로 ITER라 부름)' 장치의 건설을 국제 원자력기구(IAEA)의 지원하에 미국, 유럽연합, 일본, 러시아(구 소련)의 공동협력 과


제로 1988년 개념설계를 시작으로 하여 1998년까지 모든 설계를 완성하고 2010년경에는 1백만kw 이상의 핵융합 에너지가 1천초 이상 지속되는 핵융합 연구의 최종 실험장치로 추진하고 있다. 이 계획은 당초 계획대로 순조로이 진행되어 1990년 말에는 개념설계가 완료되었고, 금년 말에는 공학설계의 중간보고서가 발표될 예정이며, 최종 설계 완료와 건설부지 선정 등도 1998년 내에 완료하기 위해 꾸준한 연구가 진행되고 있다.

ITER장치와 같은 핵융합 연구의 다음단계 목표를 달성하기 위한 종합적 실험로 건설과 병행하여 핵융합 에너지의 상용화를 위해 필수적인 장치의 소형화와 에너지 출력밀도의 증가 등의 핵융합 발전의 경제성 확보를 위한 새로운 실험들도 제안되고 있어, D-T 연료를 이용하여 점화된 지속적인 자기 핵융합의 실현이 눈앞의 현실로 다가오고 있으며 이들 장치로부터 나오는 연구결과와 초고온 재료, 저방사

화 재료 등의 개발 결과를 활용하면 2020~2030년경에는 DEMO (Demonstration Power Plant)라 불리는 상업적 핵융합발전소 모델의 개발·운영이 가능할 것으로 기대된다.

토카막장치에 의한 자기 핵융합 연구는 이제 과학적 실증의 최종단계에 도달하였고, 현재 운영중인 세계 3대 장치의 연구결과를 바탕으로 한 종합적 핵융합 실증로인 ITER장치의 건설과 추후 핵융합 발전로의 경제성 확보를 위한 차세대 개념의 초전도 토카막 핵융합장치의 개발과 운영에 따른 연구결과를 토대로 하여 21세기 중반경에는 경제적인 핵융합 발전소의 건설을 가능하게 할 충분한 잠재력을 보유했다.

이는 핵융합 연구의 가장 큰 장점인 긴밀한 국제협력에 힘입은 바가 크고, 지금까지의 활발한 연구개발 프로그램이 지속적으로 유지 발전되어 ITER 장치에 이어 DEMO장치의 개발에 이르게 되면 D-T 연료를 이용하는 제1세대의 핵융합발전소는 실용화가 달성될 것이고, 그 후에도 방사성 동위원소나 반응 중성자가 없는 D - D 연료나 D -  $^3\text{He}$  연료를 사용하는 제 2세대 핵융합 발전소 개발이 완료되면 원래 핵융합 연구 목표인 깨끗한 '꿈의 에너지' 달성이 완성될 것으로 기대된다.

우리나라도 이러한 세계적 핵융합 연구개발 여건을 잘 활용하여, 활발히 진행중인 국제 협력을 통해 2010년 ITER장치의 가동시까지 국내 핵융합 연구수준을 세계화하여, 세계적인 핵융합 에너지 개발에 동등한 자격으로 동참할수 있도록 학계와 산업체의 노력을 결집한 범 국가적 핵융합 연구개발 계획의 추진을 기대해 본다. 

〈그림2〉 「국제열핵융합실험로(ITER)장치」 개념도

