

현대문명의 빛과 그늘 「원자력」

VI. 꿈의 핵융합로

한국원자력문화재단 제공

한국 표준형원전의 효시이며 단위기 용량으로는 국내 최대인 100만kW급 영광원전 3,4호기의 성공적인 완성으로 우리나라는 모두 11기의 원자력발전소를 보유하게 되었고 지난 해는 3752만kW의 총발전설비 용량 중 27%를 원전 설비가 점유하기에 이르렀다.

이제 원자력은 분명히 우리곁에 와 있고 우리는 그 혜택을 누리면서 문명을 구가하고 있다. 그러나 원자력에 대한 국민적 합의는 여전히 어려운 가운데 사회적인 낭비가 계속되고 있다.

지난해말 한국원자력문화재단에서는 “현대문명의 빛과 그늘 「원자력」 (동아일보 편집위원 이용수 박사 지음)”이라는 제호의 책자를 발간한 바, 원자력에너지의 이용에서부터 안전성 및 방사성폐기물 처리문제, 그리고 원자력이 국제적인 위상에서 차지하는 비중과 원자력에 대한 국민이해에 대한 내용까지 원자력시대에 살고 있는 우리에게 ‘에너지로서의 원자력’ 관한 모든 것을 이야기해 주고 있어 내용을 연재로 게재한다.

〈편집자 주〉

1. 지구에 태양을

- I 물질과 에너지
- II 원자력시대에 산다
- III 방사선과 인간생활
- IV 방사선 이용
- V 원자력 사고
- VI 꿈의 핵융합로**
- VII 원자력과 국제정치
- VIII 아쉬운 정책지원
- IX 원자력과 국민이해

인류는 문명의 젖줄인 에너지 걱정에서 영원히 해방될 수 없는가. 현재 사용되고 있는 석탄, 석유, 천연가스, 우라늄 등 에너지자원들은 언젠가 동이 날 것이 뻔하다. 그런데도 오늘날 인류의 에너지 사용량은 거의 매년 30%씩 증가하고 있다. 경제발전과 문화생활의 원천이 에너지이고 보면 에너지문제는 인류가 존재하는 한 해결하지 않으면 안되는 필수불가결의 요소다. 이러한 문제에 완전한 해답을 줄 수 있는 것이 바로 핵융합기술이라고 과학자들은 한결같이 입을 모은다.

인류의 발명품 가운데 가장 위대한 것은 불. 인류가 초기에 터득한 불을 얻는 방법은 산화반응, 즉 물질을 태워서 얻는 것이었다. 그 다음은 전기의 형태로 에너지를 바꾸어 이용하여 인류의 문명을 크게 발전시켰다. 그리고 제3의 불이라는 핵분열반응에 의한 원자력에너지가 등장했다. 이제 다시 인류는 제4의 불이라는 핵융합에 기대를 걸고 있다.

그리고 이 새로운 불, 즉 태양을 지구에 재현하고자 하는 꿈이 바야흐로 눈앞에 다가오고 있다.

핵융합에너지는 핵융합반응에서 얻어지며 태양을 비롯한 우주의 모든 항성들이 방출하는 빛과 열의 근원이다. 그것은 바로 궁극적인 에너지라고 할 수 있다. 핵융합반응은 원자력발전의 기본원리가 되는 핵이 분열하는 반응과는 정반대가 되는 물리현상이다.

핵분열반응은 우라늄235와 같은 무거운 방사성동위원소들이 중성자를 받아 세슘137과 같은 가벼운 원소들의 핵과 중성자로 분리되는 현상을 말한다. 이 과정에서 반응물질들의 질량결손이 생기고 이 때 없어진 질량은 아인슈타인의 질량에너지변환법칙에 의해 방출되는 입자들의 운동에너지로 나온다. 이 핵분열반응이 연쇄적으로 일어나는 것이 잘 알려진 원자폭탄이고 폭발을 잘 제어해서 인간이 원하는 에너지로 이용하는 것이 바로 원자력발전이다.

그러나 핵융합반응은 수소와 같이 가벼운 원소들이 서로 결합하여 헬륨과 같이 좀 더 무거운 원소의 핵을 형성하는 현상이다. 이 때에도 질량결손이 일어나고 질량결손에 의해 생겨나는 에너지는 방출되는 입자들의 운동에너지로 나타나게 된다.

핵융합반응에서 나오는 에너지를 이용한 것이 수소폭탄이다. 이 폭탄의 폭발위력은 잘 알려져 있다. 그러나 이 에너지는 인간이 원하는 만큼 에너지가 나오도록 제어할 수 없는 것이다. 평화적으로 이 에너지를 이용하기 위해서는 핵융합을 제어할 수 있어야 한다. 엔리코 페르미가 핵분열반응을 조절하기 위한 원자료를 만들었듯이 이 핵융합반응도 조절할 수 있는 원자료가 필요한 것이다.

그러나 이 제어기술은 지금까지 인류가 당면한 여러 가지 과학기술적인 문제 가운데 가장 어렵고 복잡한 것이다. 그래서 그만큼 개발이 늦어지고 있는 것이다.

태양은 반영구적인 핵융합로다. 태양은 매초 4×10^{20} MW의 열을 쏟아내고 있다. 이 열은 태양의 중심부를 이루는 99%의 수소와 약간의 헬륨이 핵융합을 일으

키면서 나오는 것이다.

인류의 핵융합로계획은 지구위에 태양과 같은 영원히 꺼지지 않는 인공태양을 건설하자는 것이다. 1950년 초부터 연구되기 시작한 핵융합연구는 이제 서서히 그 돌파구를 마련해 가고 있다. 유럽연합에서 개발한 JET(Joint European Torus)란 핵융합로나 프린스턴 플라즈마물리연구소(PPPL)에서 개발한 TFTR이란 핵융합로가 인류의 꿈을 실현하고 있다.

태양에서는 지구보다 34배나 무거운 중력(압력)이 작용한다. 그곳에 있는 플라즈마상태의 수소입자들이 태양내부의 고온에 의해 핵융합을 일으키고 있다. 지구상에도 이같은 조건 즉 고온과 고압, 핵융합물질의 반응시간을 조절하여 지속적인 핵융합반응이 일어나게 할 수 있다면 그것이 바로 인공태양이 아닌가.

인공태양인 핵융합로의 건설은 바로 이 플라즈마를 태양의 내부와 같은 초고온 초고압의 극한 상태로 가둘 수 있어야 한다. 그러나 태양의 내부상태란 지구 대기밀도의 100만배 이상의 초고압과 1500만도 가량의 초고온상태를 말하기 때문에 이런 조건을 지구상에 재현한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 이런 목표를 달성하기 위해 현대의 과학이 총동원되고 있다.

핵융합이 일어나도록 하기 위해서는 1억도 이상의 고온과 반응이 지속적으로 일어날 수 있도록 이들 입자들을 한 곳에 가두어 두어야 한다. 이것이 핵융합의 절대조건이다.

1957년 영국의 로손 경(卿)은 핵융합의 임계조건을 중수소와 삼중수소의 경우 온도는 1억도 이상, 1cm^2 에 100조개 이상의 입자 그리고 1초 이상 이들 입자들을 가두어 두어야 한다는 조건을 이론적으로 밝혔다. 이 연구결과에 의하면 고체, 액체, 기체 등과 같은 인간에게 친숙한 물질상태로는 이러한 조건들을 도저히 만족시킬 수 없다는 것이다. 다만 플라즈마라고 불리우는 제4의 물질상태 즉 고온에서 이온화된 하전기체상태에서만 이 조건들을 만족시킬 수 있는 것으로 알려졌다.

따라서 핵융합을 이해하기 위해서는 먼저 플라즈마

가 무엇인지를 아는 것이 중요하다. 플라즈마는 고온 상태에서 양이온과 전자로 이온화된 입자상태로 있으면서 각각 전기를 띠고 있으나 전체로는 전기적으로 중성인 물질상태다.

우리가 일상생활에서 보는 물질에는 세 가지 형태가 있다. 두 개의 수소원자와 한 개의 산소원자로 이루어진 물이 좋은 예가 된다. 즉 가장 낮은 에너지를 가지고 있는 것이 고체(얼음)로 이것을 제1의 물질상태라고 한다. 그리고 외부에서 이 고체에 에너지를 가하면 제2의 상태인 액체(물)로 변하고 다시 여기에 에너지를 가하면 제3의 상태인 기체(수증기)로 변한다.

그런데 다시 기체에 에너지를 가하면 기체를 구성하고 있던 분자는 원자로 갈라진다. 이 때 가해지는 에너지가 더 많으면 그 원자는 다시 원자핵과 전자로 분해되고 만다. 이 원자핵과 전자가 분리되는 현상을 전리현상이라고 한다. 전리된 원자핵과 전자를 합쳐 제4의 물질인 플라즈마라고 한다. 즉 수소원자는 하나의 원자핵과 하나의 전자로 이루어져 있다. 여기에 고온을 가하면 전자는 원자핵에서 떨어져 나와 원자핵과 전자는 별개로 존재하게 된다. 이처럼 원자핵과 전자가 떨어져 있는 물질의 덩어리가 바로 플라즈마이다.

이처럼 플라즈마는 한 개의 양전하를 띤 원자핵과 한 개의 전자가 어떤 공간에 존재할 때와 같은 개개의 입자를 말하는 것은 아니다. 물질상태가 플라즈마로 불리우기 위해서는 많은 입자가 서로 영향을 끼치면서 집단을 이루고 있어야 한다. 이 때 플라즈마는 파동성, 비선형성, 불안전성, 자기유지성 등 각각 개개의 입자에서 볼 수 없는 다양한 특성을 보인다.

플라즈마는 떠오르는 태양, 밤하늘의 무수한 별들의 근본상태일뿐만 아니라 번갯불, 형광등, 네온사인 등과 같이 우리 주변에서도 흔히 볼 수 있는 것이다. 또 북극 하늘을 아름답게 수놓는 오로라, 태양에서 불어오는 태양풍, 지구에서 전자통신을 가능하게 해 주는 반알렌대와 같은 전리층들도 모두 플라즈마가 만들어 내는 자연계의 오묘한 현상들이다.

물질상태로서 플라즈마는 우주가 다 만들어지기 시작한 바로 그 시점부터 우주에 존재하기 시작했다. 우주만물의 99.9%가 플라즈마로 되어 있다. 오히려 지구상에 있는 세 가지의 물질상태 즉 고체, 액체, 기체는 우주적인 입장에서 보면 오히려 매우 특수한 예외의 물질상태라고 할 수 있다.

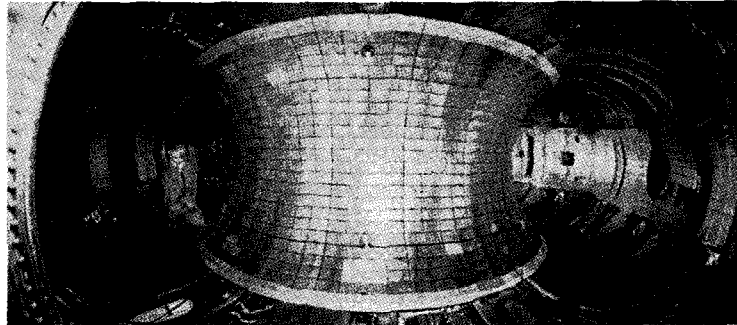
과학자들에 의해 플라즈마란 이름이 물질상태를 지칭하는 단어로 사용된 것은 그리 오래 되지 않는다. 19세기 말 영국의 물리학자인 쿠크크는 우주를 떠돌아 다니는 에너지를 가진 원자핵과 전자를 제4의 물질상태라고 표현했으며 그 후 1920년에 전자기물리학자인 랑뮤어가 이 물질을 플라즈마로 이름지어 오늘에 이르고 있다.

2. 프린스턴의 개가

미국의 유서깊은 도시 프린스턴. 이곳은 미국의회가 처음 자리한 곳일 뿐만 아니라 프린스턴 대학을 비롯하여 아인슈타인 박사 등이 학문적인 꽃을 피운 세계적인 민간연구기관인 고등연구원이 있어 더욱 유명하다. 더욱 최근에는 미래 에너지로 각광을 받고 있는 핵융합에너지의 본산인 프린스턴 대학 부설 플라즈마 물리연구소(PPPL)가 핵융합을 성공시켜 대규모의 에너지를 얻는데 성공함으로써 세계적인 핵융합연구자들이 줄을 잇고 있다.

오직 핵융합만을 연구하기 위해 지난 1951년 문을 연 이 연구소는 지난 '93년 크리스마스를 전후하여 인류역사상 처음으로 완전한 핵융합장치에서 3300만 와트의 에너지를 얻는데 성공했다. 로널드 C 데이비스 소장은 "이제 모든 인류가 그렇게 소망해 오던 지구상에 영원히 꺼지지 않는 불꽃을 지피는 이정표를 세웠다. 앞으로 공학적인 실증실험을 거쳐 상업적 이용을 위한 과정만 남겨 놓았다"고 핵융합성공의 의미를 설명했다.

이 연구소의 핵융합로는 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor)로 이름 지어진 토카막. 토카막은 '도넛



미국 프린스턴 대학이 지난 1993년 말 3300만 와트의 에너지를 발생시킨 TFTR 핵융합로 내부

모양의 자기그릇이란 러시아말로 사하로프 박사가 처음으로 고안했다. 이 핵융합로는 현재까지 가장 이상적인 핵융합로로 알려져 세계 각국이 이 융합로로 연구를 하고 있다.

프린스턴팀이 만든 융합로의 반지름은 2.6m, 플라즈마가 갇히는 자기장 원통의 반경은 0.9m였다. 전자석에 300만암페어의 전류를 보내 5.2테슬라(자기장 세기의 단위, 1테슬라는 1만가우스, 1가우스는 5암페어의 전류가 흐르는 전선에서 1cm 떨어진 곳에서 발생하는 자장의 세기)의 자장을 만들고, 1cm³당 500조개의 플라즈마(수소입자)에 0.55초 동안 1억 7백만와트의 에너지를 쬐었다. 그 결과 곧 핵융합반응은 일어났고, 이때 나온 에너지는 3300만와트였다는 것이다.

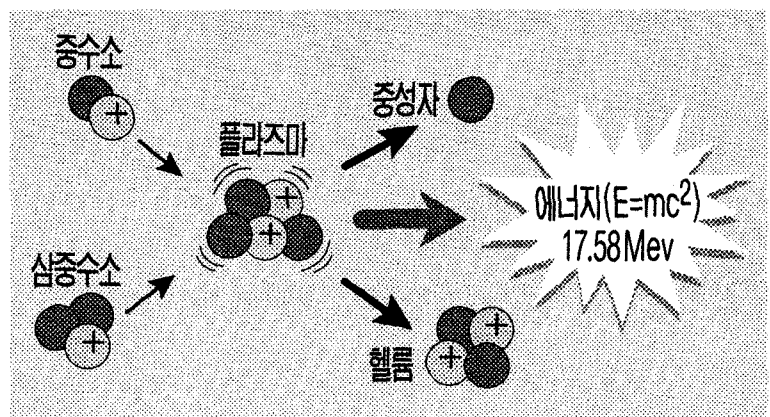
이 실험에서 새로 생긴 에너지의 양은 들어간 에너지의 약 3분의 1에 불과한 것이었다. 그러나 앞으로 플라즈마의 밀도를 좀 더 높이고 플라즈마의 갇힘시간을 늘리면 인류가 바라는 지속적인 핵융합을 일으킬 수 있다는 것이다. 실제로 이런 조건들의 변화가 이제 가능해지고 있다. 이 연구소는 플라즈마의 갇힘시간을 5초로 늘리고 플라즈마의 온도를 1억도까지 올리는데 성공하고 있다.

핵융합반응을 일으키는 방법에는 두 가지가 있다. 즉 중수소(Deuterium: 2H)와

삼중수소(Tritium: 3H)융합반응(D-T 반응)과 중수소와 헬륨(³He반응)의 융합반응(D-3He반응)이 그것이다. 이중 D-T의 반응식은 $D+T \rightarrow ^4\text{He}+n$ 로 이 때 중수소와 삼중수소의 핵입자들은 충돌, 결합하여 안정성이 높고 무해한 헬륨이온(⁴He)과 중성자(n)가 나오고, 이 때 방출되는 입자들의 총 운동에너지는 17.5MeV(1MeV는 100만전자볼트)에 이른다. 보통 수소는 원자핵에 하나의 양성자가 있으나 중수소에는 양성자 1개 외에 중성자가 1개 더 있다. 그리고 삼중수소는 중성자가 2개 있다. 그래서 이들 이중수소나 삼중수소는 보통의 수소보다 무겁다.

D-T반응이 일어나기 위해서는 핵융합연료인 수소동위원소핵들로 이루어진 플라즈마가 4500만도 이상으로 가열되어야 한다. 이 반응이 다른 모든 핵융합보다

핵융합 반응 원리



가장 쉽게 일어나는 반응이다. 프린스턴 연구팀이 성공한 방법도 이 방법이다. 이를 제1세대 핵융합반응이라 한다. 현재 세계 각국에서 실험하고 있는 반응은 모두 이 반응을 이용한 것이다.

그러나 이 반응에서 나오는 중성자는 주위의 물질에 부딪쳐 이들 물질을 방사성물질로 만들 수 있어 약간의 부작용이 있을 수 있다. 그러나 이 중성자에 의해 생긴 방사성물질은 반감기가 수십 년에 불과하기 때문에 거의 문제되지 않는다.

$D-^3\text{He}$ 반응식은 $D+^3\text{He}\rightarrow^4\text{He}+p$ 로 중수소(D)와 헬륨(^3He)을 융합시키는 것이다. 이 반응에서 생기는 것은 헬륨이온(^4He)과 양성자(p)이다. 즉 수소핵자가 나오는 핵융합반응으로 이 반응에서 나오는 입자들의 총운동에너지는 18.2MeV에 이른다. 에너지효율도 D-T반응에서보다 높다. 하지만 이 반응이 일어나기 위해서는 D-T반응에서 필요한 온도보다 무려 8배나 높은 3억 5천만도 이상으로 가열해야 한다. 이런 어려움에도 불구하고 이 반응에 쓰이는 원소들은 물론 생성되는 물질도 주위에 방사성을 띠게 하는 것은 아무 것도 없기 때문에 가장 깨끗한 반응이다. 따라서 이 핵융합반응은 궁극적으로 인류가 이룩해야 할 목표가 되고 있다.

핵융합이 일어나는 조건은 고온과 원료의 고밀도, 원료를 가두어 두는 일정한 시간이다. 이런 조건들은 이 지구상에 없는 극한 상황이기 때문에 지금까지 과학자들은 이 조건을 만족시킬 수 있는 방법을 연구해 왔다. 핵융합에의 성공은 이런 조건들이 현대과학에 의해 서서히 달성되고 있음을 의미하는 것이다.

사용되는 원료물질로 플라즈마를 개발한 인류는 이를 보관하는 용기로 자장용기까지 개발했고 중성자빔이나 초고주파로 수억도의 온도를 얻는데도 성공하여 결국 핵융합을 성공시키고 있는 것이다.

핵융합을 위해서는 먼저 플라즈마를 잘 가두어 놓는 방법이 문제였다. 핵융합에 필요한 수억도나 되는 고온에 견디어 낼 수 있는 재질이 없기 때문이다. 따라

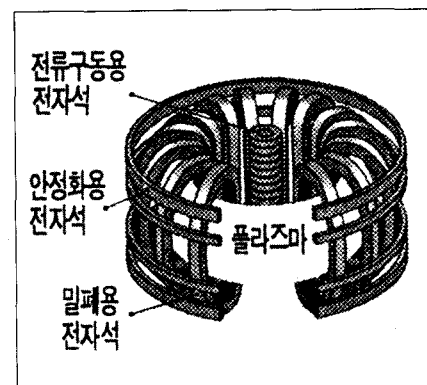
서 우선 이를 가두어 두는 방법이 가장 중요한 연구과제가 되어 왔다. 오늘날 이 플라즈마를 한 곳에 가두어 두는 방법에는 두 가지가 실험되고 있다. 관성(慣性)밀폐방법과 자장(磁場)밀폐방법이 그것이다.

관성밀폐는 연료물질을 고체 알갱이로 만들고 여기에 초고주파나 중성자빔을 집중적으로 쬐어 연료물질을 고체의 1,000배까지 관성으로 압축하면서 이 때 온도가 상승하여 순간적으로 핵융합이 일어나게 하는 것이다. 이 방식은 핵융합반응상태를 지속적으로 유지시키면서 원하는 만큼의 에너지를 이용할 수 없기 때문에 상용화할 수 있는 방법은 될 수 없다. 그러나 이 방법은 수소폭탄의 폭발구조와 흡사해서 수소폭탄의 개량을 위한 방법 등 군사적으로 많이 이용되고 있다.

자장밀폐는 플라즈마가 전기를 띤 입자들로 구성되어 있기 때문에 자력선으로 가두어 두려는 방법이다. 즉 적절한 모양의 자장용기를 만들고 여기에 플라즈마를 가두어 두려는 것이다. 그것은 바로 전기를 띤 입자들은 자기장에 의해 그 운동을 구속받는다든 전자기학적 원리를 응용한 것이다. 그래서 진공의 자장용기 속에 플라즈마를 가두고 여기에 초고주파 등을 쬐어 높은 온도로 가열하여 핵융합이 일어나게 하는 것이다.

이 방법은 핵융합에너지의 실용화를 위한 최선의 방법으로 알려져 세계 여러 나라에서 이용하고 있다. 이 방법을 이용한 실험장치 중에는 미국에서 개발된 스텔러레이터(Stellarator), 자기거울(Magnetic Mirror)

토카막 핵융합로의 구조



과 영국에서 개발된 핀치(Pinch) 등이 있다. 또 옛소련에서 사하로프와 팀에 의해 발명된 토카막(Tokamak)은 현재 가장 진보된 핵융합장치로 세계 과학자들의들의 사랑을 받으면서 애용되고 있다.

현재 핵융합 임계조건에 도달한 유럽연합의 JET나 미국 프린스턴 대학 플라즈마물리연구소의 TFTR 및 일본의 JT-60U 등은 모두 토카막핵융합실험장치들이다. 이를 위해 최근 크게 발전한 초전도 자석이 중요한 기능을 하고 있다.

핵융합연구가 시작된 것은 세계 2차대전이 끝난 후였다.

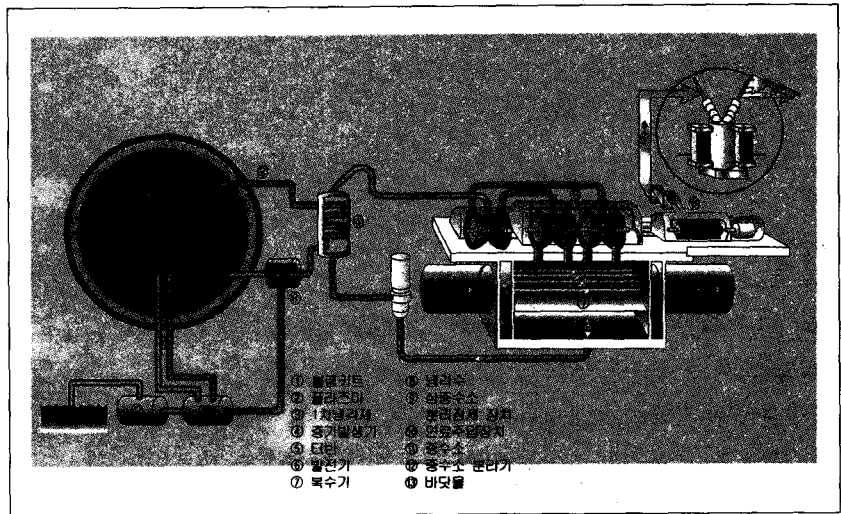
1951년 5월, 1952년 8월 조지와 마이크란 이름의 수소폭탄 실험이 미국에서 성공함으로써 핵융합에너지의 이용이 시작된 것이다. 1942년 핵분열원자로의 개발에 몰두하던 페르미의 권유

를 받은 에드워드 텔러가 수소폭탄의 계획서를 작성하여 실험에 성공했던 것이다. 같은 질량에서 얻는 에너지의 양은 핵융합반응에서 얻는 것이 핵분열반응에서 얻는 것보다 7배나 많다. 수소폭탄이 원자폭탄보다 더 무섭다는 것도 바로 이 때문이다.

한꺼번에 폭발하는 원자폭탄의 핵분열을 제어하여 이를 평화적으로 이용할 수 있는 길을 연 미국의 과학자 페르미는 수소폭탄의 핵융합도 제어할 수 있을 것으로 낙관했다. 그래서 핵융합에 관한 자료를 비밀로 하여 1950년대 초부터 수년 간 핵융합로 연구에 매달렸다. 그러나 신통한 결과가 나오지 않았다. 매터혼(Matterhorn)이란 비밀프로젝트 이름으로 핵융합로 개발에 몰두한 미국은 이 연구가 상상외로 어렵다는 것을 알자 1958년 제네바회의에서 평화적인 이용을 위해 핵융합연구를 국제화하자는 제안을 하면서 이 연구를 세계의 프로젝트로 내걸었다.

핵융합로의 노심의 형태와 특성은 핵융합의 원료가 되는 플라즈마의 밀폐방식에 따라 다르지만 발생한 핵융합 에너지를 열에너지로 변화시키고 이를 전기적인 에너지로 다시 바꾸는 부대시설은 기존의 발전시설과 같다.

핵융합로의 기본 모형



인류가 핵융합에 목줄을 매고 있는 중요한 이유들이 있다. 그것은 원료가 거의 무한하다는 점과 안전하며 현재 문제가 되고 있는 지구환경 오염을 해결할 수 있다는 점 때문이다.

지구상의 바닷물 속에는 분리 채취가 쉽고 방대한 양의 핵융합반응물질인 중수소가 존재하고 이 연료로부터 얻을 수 있는 에너지의 양이 거의 무한하다. 현재 세계 과학자들이 추산하고 있는 바닷물의 양은 1조리터의 150만 배에 이르며 이 가운데 0.015%가 중수소이기 때문에 현재의 에너지 소비 추세로 바닷물 속에 들어 있는 중수소를 다 쓰려면 4억년이 걸린다.

바닷물 1t 속에 들어 있는 중수소를 이용해 핵융합을 일으켜 얻을 수 있는 에너지는 석탄 270t을 태워 얻을 수 있는 양과 맞먹는다. 중수소는 바닷물 1m³당 약 30g 정도 들어 있고, 이 중수소 1g으로 얻을 수 있는 핵융합에너지는 석유 50드럼이 가지는 에너지의 양과 같다.

석유, 석탄, 천연가스 등 화석연료 및 원자력발전에 쓰이는 우라늄 등 세계 전체 에너지 부존자원의 총량과 매년 급증하고 있는 에너지 수요를 감안해 보면 핵융합의 필요성은 더욱 극명해진다.

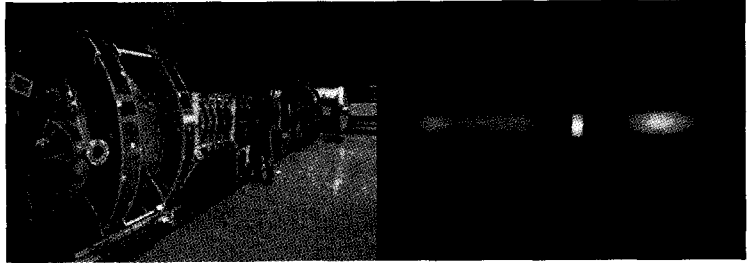
지구환경문제를 해결하는데도 핵융합에너지는 결정적인 기여를 할 것으로 보인다. 오늘날 지구환경문제는 화석연료를 태우는 데서 비롯된다. 화석연료를 태워서 얻는 에너지 때문에 매년 많은 이산화탄소가 지구대기 속에 방출된다. 또 우라늄을 핵연료로 사용하는 원자력발전은 화석연료를 태울 때 생기는 이산화탄소는 없지만 사용후 핵연료 속에는 수만 년 이상의 긴 반감기를 가지는 고준위방사성 폐기물처리가 문제로 남는다.

이와는 달리 핵융합반응에 의해 발생하는 물질은 해가 없는 헬륨기체뿐이고 방출되는 중성자들에 의해 용기의 일부분이 저준위 방사능을 띌 수 있지만 이것도 수십 년의 짧은 반감기뿐이다. 그러나 이 저준위 방사성폐기물도 핵융합기술이 더욱 발전하여 중수소와 헬륨으로 핵융합을 일으키게 되면 그런 걱정조차 필요 없다. 핵융합에너지가 지구환경에 기여하는 것은 바로 이 때문이다.

그러나 무엇보다도 핵융합에너지는 안전하다는 장점을 가지고 있다. 그 원료물질이 천연 인체나 자연에 해를 주지 않는 안전한 물질일 뿐만 아니라 반응 후에 발생하는 물질도 안전하다. 핵융합의 근본적인 안전성이란 핵융합반응이 일어나는 핵융합로 속에는 소량의 연료만이 초고온의 플라즈마상태로 존재하기 때문이다.

이제 핵융합은 상상외로 빨리 우리 곁에 다가 오고 있다.

지난 1991년 11월 유럽연합 핵융합연구소의 JET라고 명명된 토카막핵융합실험장치에서 인류 최초로 2천kW 규모의 핵융합에너지를 발생시킨 인류는 다음 '93년 12월 미국 프린스턴 대학 플라즈마 물리연구소에 설치된 TFTR이란 장치에서 3300만kW의 실험초기단계로서는 큰 에너지를 발생시킴으로써 지구에 인



기초과학연구원연구소의 한빛장치(왼쪽)와 한빛장치가 생성시킨 플라즈마

공태양을 가지려는 꿈을 실현시키고 있는 것이다. 이것은 거의 반 세기 동안 땀을 흘리며 노력해 온 수많은 과학자들의 노고의 결정이며 지구상에 영원히 꺼지지 않은 불꽃을 만들기 위한 이정표가 세워졌음을 의미한다.

3. K-Star 계획

세계는 어느 정도 핵융합로의 개발에 열을 올리고 있는가.

너무나 많은 연구비가 든다는 이유로 미 의회에서 매년 예산이 깎이고 있는 핵융합로 연구는 미국만 해도 그리 급한 문제가 아니다. 짠 에너지자원을 가지고 있는 미국으로서는 굳이 초기에 많은 연구비를 들일 필요를 느끼지 않을는지 모른다. 이에 비해 에너지자원이 없는 프랑스나 일본은 인류구원의 에너지인 핵융합연구에 상대적으로 많은 관심을 쏟고 있다.

현재 실험적인 규모로 핵융합에 성공한 나라는 유럽연합과 일본이다. 이들은 미국, 러시아와 함께 공동으로 국제열핵융합실험로 연구를 끝내고 실용화를 위한 핵융합로 설계를 하고 있는 것이다.

세계 각국의 핵융합연구 현황을 보면 미국에서는 프린스턴 대학 플라즈마 물리연구소가 운영하는 TFTR 원자로와 제너럴 아토믹사가 운영하는 D3-D이란 원자로 및 MIT의 Alcator-CMOD가 있다.

일본은 일본원자력연구소의 JT-60U, 문부성 핵융합

과학연구소의 LHD란 핵융합로가 있고, 교토 대학, 큐슈 대학, 츠쿠바 대학에 소규모 핵융합로 연구장치가 있다.

러시아는 T-3토크막장치가 있으며 중국에는 HT-7 및 HT-7U장치가 있다. 유럽에서는 프랑스, 독일, 영국, 스페인, 이태리 등이 유럽연합(EU)을 구성하여 만든 JET란 핵융합로에서 인류 최초로 2,000kW의 에너지를 얻었고, 오는 2010년에 가동을 목표로 한 ITER이란 핵융합로를 설계중에 있다. 그외 각 나라들은 별도로 핵융합로를 가지고 있다. 독일은 ASDEX-U, 프랑스는 Tore-Supra, 이태리는 Frascati Tokamak-U가 있다. 영국은 유럽연합의 JET를 운영하면서 국립연구소인 Culham연구소내에 중형급 장치를 가지고 있다.

현재 세계에서 운전되고 있는 TFTR, JET, JT-60U, D3-D 등은 1980년대 중반에 개발된 것으로 전자석을 이용한 세계 4대 토크막이다. 이 장치들은 21세기 초에 그 수명이 끝날 전망이다. ITER이 실용화되는 2008~2010년 이전까지의 공백기간에는 LHD(Large Helical Device), JT-60SU, 독일의 Wendelstein-7X와 중국의 HT-7U 등만이 세계 핵융합로 자리를 차지할 것이란 것이 국내 핵융합전문가들의 분석이다.

이들 장치들은 초전도 자석형이 아닌 기존의 기술로 개발되고 있기 때문에 최근 새롭게 부상하고 있는 초전도적 자석을 이용한 새로운 형의 소규모 핵융합로는 세계적인 관심의 대상이 되는 장치란 것이 학자들의 분석이다. 특히 원자로 안에 플라즈마를 머물게 하는 새로운 기법이 발표되고 있기 때문에 이러한 새기술을 활용한 신행로는 기술적인 타당성이 있다고 보는 것이다.

또한 ITER계획에서 보듯이 선진국 주도로 개발된 핵융합기술이 소속회원국가들 간에만 소유되면 이에 따른 비회원국가들과의 관계는 OECD의 배타적인 조직보다 더욱 강해질 가능성이 있다는 시각도 있다. 이런 결과는 핵융합기술에서 세계에 기여하지 않은 국가는 결국 핵융합에너지기술에서 기술중속국으로 전락하는 결과를 가져올 가능성이 있는 것이다.

이런 국제적인 기술환경 변화는 국내 학자들로 하여금 핵융합기술연구 프로그램을 개발할 당위성을 부여하고 있으며 그 결과로 나타난 것이 바로 한국형 핵융합로 개발 프로그램인 K-Star계획이다. 이것은 세계적인 핵융합연구 조류에 부응하면서 기술자립을 위한 전략으로 초전도 전자석으로 운용되는 최신의 핵융합연구로를 개발하자는 것이다.

핵융합연구에 세계의 강대국들이 관심을 가지는 것은 단순히 에너지문제만을 해결한다기보다 그 나라의 첨단과학과 기초연구의 수준을 높이는 계기를 만들 수 있다는 점도 간과할 수 없다. 연구과정에서 얻을 수 있는 초전도 자석 기술, 초진공 기술, 고온에 견디는 특수 소재 기술, 대출력 고주파가열 기술 등 첨단기술을 산업화시킬 수 있는 기회로 활용할 수 있기 때문이다.

또한 반도체 제조, 다이아몬드 표면 코팅 처리, 독성방사성폐기물 처리, 엑시머레이저 제조 등 산업현장의 첨단기술개발 연구에도 획기적인 도약의 계기를 맞게 될 것으로 전망된다.

그동안 국내에서 핵융합의 연구는 단순히 학문적인 관심에서 각 대학 및 연구소에서 추진되어 왔었다.

1980년 초 서울대학의 SNUT-79토크막, 1980년대 중반 한국원자력연구소의 KT-1토크막, 1990년대 초 한국과학기술연구원의 KAIST토크막 등 소형 토크막이 있다.

1993~1995년도에 걸쳐 이루어진 기초과학지원연구소의 '한빛' 대형플라즈마연구장치 건설, 운용 등은 핵융합기초연구와 인력양성에 크게 기여하고 있다. 또한 우리나라 기초과학연구 프로젝트로는 최대인 포항방사광가속기 건설은 핵융합연구장치 개발에 필요한 첨단기술 등을 경험하는 좋은 계기가 됐다.

특히 한빛장치는 핵융합연구의 결정적인 계기를 제공하게 됐다. 1996년 1월 25일 대덕 기초과학지원연구소에 설치된 초고온 플라즈마 실험장치인 한빛에서 질소가스를 수만도로 가열시켜 1차 플라즈마를 얻는

데 성공한 것이다. 한빛의 최대 지름은 3m, 전체길이 15m, 총 진공체적은 25m³다. 한빛의 내부는 대기압의 10억분의 1에도 미치지 못하는 초고진공이며 지자기자의 1백만배 크기인 5만가우스가 걸려 플라즈마를 밀폐시킬 수 있다.

플라즈마연구시설로서 국내 최대의 장치이기도 한 이 한빛은 원래 미국 MIT가 1985년에 개발하여 '95년까지 사용하던 5000만달러 상당의 대형 플라즈마연구시설인 타라(TARA, 빛의 신이란 뜻)를 한·미 양국간 연구시설에 관한 협정에 따라 영구임대형식으로 이양받은 사실상 국내 최초의 플라즈마연구시설이다. 2년여 동안 국내 기술로 전면 재조립하여 '96년 6월21일에 불을 당김으로써 국내에 제4의 불을 점화시킨 것이다.

현재 세계적으로 플라즈마발생장치는 70여 개 정도가 설치되어 있는데, 한빛 규모와 비슷한 것으로는 일본 츠쿠바 대학의 감마 10과 러시아 노보시프비르크에 있는 핵물리연구소의 암발-M 등이 있다. 그러나 한빛장치는 이들이 추구하는 자기거울형 핵융합연구를 목표로 하지 않고 초고온 플라즈마 가열과 이를 위해 필요한 여러 가지 진단과 계측연구와 같은 핵융합기초 연구를 통해 추후 토카막핵융합연구의 기반조성을 목표로 하고 있다.

이에 따라 국내에서는 핵융합소위원회가 열려 대략적인 연구방향을 모색했다. 이 계획에 의하면 오는 2001년까지 1200억원을 들여 차세대 콤팩트형 초전도 토카막 핵융합연구장치인 Star-X를 세운다는 것이다. 이 장치는 주변반경 2m, 부반경 1m, 자장감도 5테슬러, 플라즈마 전류 2,500암페어급으로 2001년에 가동될 예정이다.

이 계획에는 산업계의 참여도 불가피하다. 한국중공업을 비롯 삼성, 대우, 현대중공업 등이 참여를 희망하고 있다. 이 사업은 1996년부터 '97년까지 1단계로 장치설계 및 기반기술에 대한 연구개발투자가 이루어지고 2001년까지 2단계에는 연구장치를 건설한다는 것이다.

이에 필요한 기술은 미국의 프린스턴 플라즈마물리

연구소, MIT, 오크리지 국립연구소, 일본 국립핵융합연구소(NIFS), 유럽연합(EU)의 JET연구소, ITER 중앙연구소 등으로부터 확보한다. 이 과정에서 획득할 수 있는 중요한 기술은 초전도자석기술, 고진공기술 및 초진공기술, 고주파발전기술 및 초고온 특수소재기술 등이다.

초전도자석기술은 자기부상열차, 초전도에너지 저장장치, 초전도 발전기, 초전도선박 등에 응용된다. 초진공기술은 반도체 제조장비 및 초고온 극한재료 생산에 사용될 수 있다. 고주파발전기술은 방송통신기술, 고주파응용가열·건조기술, 레이더 등 방위산업에 응용이 가능하다.

이런 구상은 1995년 7월 김영삼 대통령이 미국을 방문하는 가운데 샌프란시스코에서 가진 재미한국인과학자들과의 모임에서 "기초과학을 획기적으로 진흥시키기 위해 꿈의 에너지로 불리는 핵융합기술개발에 착수하는 한편 오는 2015년까지 20기의 인공위성을 발사하는 등 본격적인 우주항공산업에 나서기로 했다"고 밝힘으로써 구체화되었다.

이런 계획이 발표되자 한때 국내의 많은 과학자들은 너무나 꿈같은 얘기로 치부했었다. 그러나 세계는 분명 핵융합에 바짝 다가가고 있다. 오직 정부가 연구비를 어떻게 델 것인가가 문제로 남는다.

핵융합이 세계적인 관심이 되고 있는 가운데 미국 유타 대학의 스탠리 폰스 교수와 영국 사우드 햄턴 대학의 플라이 슈맨 교수는 1989년 '상온에서도 핵융합을 일으킬 수 있다'는 실험결과를 발표하여 과학계의 관심을 끌었다. 그러나 그후 세계 각국의 실험에서는 그 결과가 신통치 않게 나와 이들의 실험결과에 회의론을 가지게 됐다. 이러한 사실은 결국 핵융합이 얼마나 세계인의 관심거리인가를 보여주는 것이다.

현재로서는 상온핵융합에 거의 기대를 걸지 못하고 있으나 앞으로 고온에 의한 핵융합의 어려움을 없앨 상온에서의 핵융합도 인간의 노력에 의해 극복될 날이 있을지도 모를 일이다. ■