

핵융합 연구장치 개발현황과 핵융합 특수실험동 건설개요

이경수/기초과학지원연구소 핵융합연구개발사업단장·이화박사
윤창국/기초과학지원연구소 핵융합연구개발건설본부장

1. 머리말

지구상 모든 생명의 에너지 공급원인 태양은 매초 4조와트의 백조배(4×10^{26} 와트)에 이르는 에너지를 핵융합 반응에 의해 방출하고 있다. 이 에너지량은 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 하였고, 1950년대 초반에 이르러 미국의 핵물리학자인 텔러 박사, 소련의 핵물리학자 사하로프 박사의 주도하에 양국에서 비밀리에 핵융합 반응을 응용한 수소폭탄 개발 계획이 진행되었다. 이와 함께, 핵융합에 의해 발생하는 막대한 에너지 자원의 평화적인 이용 계획도 착수

되어 인공태양계획이라 불리는 제어 핵융합 에너지 개발도 같은 시기에 시작되었다. 이러한 핵융합 에너지개발은 화석에너지의 고갈문제 해결과 폐기물 등 환경문제를 유발치 않아 깨끗하고, 또 대형 방사능 유출사고가 없어 안전하면서도, 다른 대체 에너지원과는 달리 고밀도·대용량의 무한한 에너지 개발 가능성을 가지고 있다. 이와 같이 “꿈의 에너지”라고까지 불리는 인류 역사상 최대의 과학적 도전이 핵융합에너지 개발계획으로 시작되었다.

2. 핵융합 연구의 개요

인류의 출현과 함께 발명된 산화반응, 즉 화학 반응에 의한 불, 전기에 의한 불, 그리고 ‘제3의 불’이라 일컬어지는 핵분열(fission) 연쇄반응에 의한 원자력에 이어 ‘제4의 불’이라 불리는 핵융합(fusion)에너지는 태양을 위시한 모든 항성들이 방출하는 빛과 열의 근원을 이루는 에너지다.

원자력 발전의 기본원리가 되는 핵분열 반응과는 정반대 되는 물리적 현상이다. 핵분열 반응은 우라늄(^{235}U) 같은 무거운 방사성 동위원소들이 중성자들과 세슘(^{137}Cs) 등과 같이 가벼운 원소들의 핵과 중성자로 분리되는 현상을 말하며 이 반응 과정에서 질량결손이 생기게 되고, 이때 없어진 질량은 아인슈타인의 질량에너지 변환공식($E=mc^2$)에 따라 방출되는 입자들의 운동에너지로 분출된다. 이 핵분열 반응을 연쇄적으로 일으키는 것이 잘 알려진 원자폭탄이고, 폭발에 이르지 못하게 제어해서 발전에 응용하는 것이 바로 원자력 발전이다. 핵분열 반응과 상반되는 핵융합 반응은 수소와 같이 가벼운 원소들의 핵들이 서로 결합하여 헬륨(^4He)과 같은 좀더 무거운 원소의 핵을 형성하는 물리현상을 말한다. 이때에도 질량결손에 의해 생겨나는 에너지는 방출되는 입자들의 운동에너지로 나오게 된다. 이 핵반응 에너지를 이용한 수소폭탄 폭발의 큰 위력은 너무나 잘 알려져 있다. 그러나 이 에너지의 평화적 이용을 위한 제어된 상태의 핵융합 에너지 개발에는, 이때까지 현대과학이 만났던 그 어떤 문제보다도 어려운 기술적인 문제가 수반된다. 이 때문에 초기의 낙관적 예상과는 달리 반세기에 가까운 노력 끝에서야, 제어 핵융합 연구의 근본을 이루는 이론의 실험적 검증을 마칠 수 있었다. 제어 핵융합 에너지의 개발에 요구되는 기술적 어려움을 이해하기 위해서는 핵융합 반응시 일어나는 물리적 현상들과 필요한 조건들을 좀 더 자세히 알아야만 한다. 이를 위해 먼저 가능한 많은 핵융합 반응경로 중 가장 쉽게 일어날 수 있는 반응경로 두가지를 예로 들어보자. 그 첫 번째 경로는 D-T 반응으로 중수소(Deuterium)와 삼중수소(Tritium)의 핵자들이 충돌결합할 때 안정성이 높고 무해한 헬륨이온(^4He)과 중성자가 나오고, 그 때 방출되는 입

자들의 총 운동에너지는 17.5MeV(1MeV는 1백만 전자 볼트)가 나온다. 이 반응이 일어나기 위해서는 핵융합 연료인 수소동위원소 핵들로 이루어진 가스가 4천 5백만도 이상으로 가열되어야 한다. 이 경로가 다른 모든 핵융합 경로들보다 가장 쉽게 일어나는 반응경로다. 이를 제1세대 핵융합 반응이라 한다. 수소폭탄뿐 아니라 현재 진행되고 있는 제어 핵융합 실험들에 사용되는 핵융합 연료들은 이 반응경로에 의해 타오른 것이다. 두번째는 D- ^3He 로 불리는 반응경로로 D-T 반응에 이어 두번째로 쉽게 일어난다. 중수소(D)와 헬륨3(^3He) 핵자들이 충돌결합할 때 헬륨이온(^4He)과 양성자(p) 즉 수소의 핵자가 나오는 핵융합반응으로, 이 반응에서 방출되는 입자들의 총 운동에너지는 18.2MeV에 달한다. 하지만 이 반응이 일어나기 위해서는 연료를 D-T 반응을 위해 요구되는 온도보다 8배나 높은 3억 5천만도 이상으로 가열해야 한다. 이런 어려움에도 불구하고 이 반응에 쓰이는 핵융합 연료들(D- ^3He) 전부가 안정된 원소들이고, 주위의 물질이 방사성을 띠게 유도하는 반응, 중성자도 나오지 않기 때문에 가장 깨끗한 핵반응이라 불린다. 따라서 이는 핵융합 에너지 개발 연구의 최첨단 연료로 큰 기대를 모으고 있다. 이처럼 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 1백만배 이상의 초고압과 1천 5백만도 가량의 초고온 상태를 말하기 때문에 지구상에서 실험이 불가능한 것은 명백하다. 이러한 극한 상황이 필요한 것은 핵융합 에너지 개발의 초기부터 잘 알려져 있었다.

영국의 로슨경은 온도 밀도 밀폐시간 및 총부

피에 대한 점화조건을 계산한 바 있고 이러한 조건들은 보통의 물질로는 만족시킬 수 없고, 다만 플라즈마(Plasma)라 불리는 제4의 물질상태 즉, 고온하에서 이온화된 하전기체 상태만이 조건들을 만족시킬 수 있다.

저장방법에 있어서도 현재까지 알려진 최고온 내열재들은 4천도 이상이 되면 모두 타버리므로 관성밀폐방식(Inertial Confinement)과 자기밀폐방식(Magnetic Confinement) 등 두가지 방법 밖에는 없다는 결론이 내려져 있다. 이중에서도 지금까지 알려진 플라즈마 밀폐방식 중 핵융합 에너지의 실용화에 이용될 수 있는 최선의 방법은 자기밀폐 방식, 즉 전기를 띤 입자들은 자기장에 의해 운동의 구속을 받는다는 전자기학적 원리를 응용해서 진공용기 속에 초고온 상태의 플라즈마를 가두고, 초고주파 등을 이용해 플라즈마 속의 핵융합 반응 물질들을 더 높은 온도로 가열, 핵융합 반응이 일어나게 유도하는 방식이다. 이와 같이 전자기 원리를 이용하여 진공에 가까운 낮은 밀도(지구 대기밀도의 1천분의 1 이하)에서 핵융합 점화에 필요한 조건들을 만족시키기 위해서는 적어도 플라즈마를 태양 내부 온도보다 수십배 이상 뜨거운 3억도 가까이 가열하여 수초 이상 밀폐해야 한다. 이 목표를 달성하기 위해서 최첨단의 과학기술들이 총동원되어야 했으므로, 이 과정에서 극한상태하의 물질상태를 다루는 첨단 과학기술들을 연구하는 종합과학인 플라즈마과학이 탄생한 것이다. 이처럼 기술적으로 어려운 도전을 극복해 나가야 했음에도 불구하고 장기간 선진과학기술국들이 막대한 연구개발비를 투자해가며 핵융합 반응을 미래 에너지의 원천으로 개발하려고 노력을 경주하는데는 몇가지 중요한 이유들이 있다. 첫째는 지구상의 바닷물 속에는 분리 채취가 용이하고 방대한 양의 핵융합 반응물질인 중수소가 존재하고, 이 연

료로부터 얻을 수 있는 에너지의 양이 무한하다는 점이다. 핵융합 에너지의 기본연료가 되는 중수소는 바닷물 1당 약 30그램이 함유돼 있고, 이 중수소 1그램으로 얻을 수 있는 핵융합 에너지는 석유 50드럼이 가지는 에너지에 해당된다. 이 에너지 양은 전 인류가 1백억년 이상 사용하고도 남을 분량이기 때문에 무한의 에너지 자원이라고 해도 과언이 아니다. 석유, 석탄, 천연가스 등 화석연료 및 원자력 발전에 쓰이는 우라늄 등 세계 전체 에너지 부존자원 총량과 매년 급증하고 있는 에너지 수요를 감안해 보면 그 필요성은 더욱 극명해진다. 21세기 중반 이후에는 지구상의 이용가능한 연료가 고갈되어 인류는 심각한 에너지 문제에 봉착할 것이다. 두번째 이유로는 지구 환경보존 문제를 들 수 있다. 이는 화석연료를 태워서 얻는 에너지는 이산화탄소를 연간 35억 톤 이상 지구의 대기 속에 방출한다. 이 탄산가스는 온실효과를 초래해서 이상기후 현상을 일으킨다. 또한 산성비와 스모그를 일으키는 공해 물질을 배출해 지구촌 환경오염의 주된 원인이 되고 있다. 또한 우라늄 등을 핵연료로 사용하는 원자력 발전은 화석연료를 태울 때 나오는 공해 물질의 배출은 없지만 사용후 핵연료 속에는 수만년 이상의 긴 반감기를 가지는 고준위 방사성 폐기물이 만들어진다. 우리나라도 벌써 이 핵폐기물 처리 문제를 해결하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 이와는 달리 핵융합 반응에 의해 발생되는 물질은 해가 없는 헬륨기체 뿐이고, 방출되는 반응 중성자들에 의해 용기의 일부분이 저준위의 방사성을 띌 수 있지만 이것도 수십년의 짧은 반감기를 가지는 정도다. 이러한 간접적 방사능 문제도 핵융합 에너지 기술이 더 발전되어 앞에서 설명한 D-3He와 같은 깨끗한 반응경로를 이용할 수 있게 되면 근본적으로 해결될 수 있다. 세번째 이유로는 제어 핵융합로의 근본적인 안

정성을 들 수 있다. 여기서 근본적인 안정성이란 핵반응이 일어나는 핵융합로 속에는 소량의 연료만이 초고온의 플라즈마 상태로 존재하고 있기 때문에, 핵융합 발전에서는 수년전 옛소련의 체르노빌 원자력 발전소 사고와 같은 대형사고가 일어나기가 원천적으로 불가능하다는 의미다. 이와 같이 '미래의 에너지' 혹은 '꿈의 에너지'라 불릴 만큼 많은 장점을 가진 핵융합 에너지를 상용화하기 위해서는 막대한 연구투자가 장기간 지속해야 한다. 그러나 에너지문제와 환경문제가 더욱 심각해져 일반대중의 피부로 느껴질 때까지는 이 분야에 대한 충분한 연구투자가 어려울 것으로 전망되기 때문에 앞으로 30년 이상의 시간이 더 걸려야 경제성 있는 핵융합 에너지의 상용화가 가능하리라는 것이 전문가들의 일반적인 전망이다. 하지만 연구재원의 부족을 극복하고 실용화 시기를 앞당기기 위해 미국, 유럽연합, 일본, 러시아 등 선진 과학기술국들은 핵융합 연구의 초기부터 국제원자력기구(IAEA)를 통한 상호협조 체제를 구축하고 있으며, 제어핵융합 연구는 대형 연구개발 과제 중 가장 성공적인 국제협력 연구의 모델이 되고 있다.

3. 핵융합 연구의 성과와 전망

핵융합 연구는 초기의 예상과는 달리 磁氣場 속에 가둔 초고온의 플라즈마의 不安定性에 의해 많은 어려움을 겪었고 이를 극복하기 위해 요구되는 높은 기술수준으로 인해 지속적인 연구에 비해 발전의 속도가 느렸으나, 1968년 소련 과학자들에 의해 발표된 토카막 장치를 이용하여 천만도 고온의 안정된 플라즈마 밀폐 결과는 핵융합 연구 활성화에 크게 기여하였다. 이에 따라, '70년대에 들어와서는 토카막 장치에 의한 핵융합결과들은 괄목할 만큼 발전하기 시작하였고 '70년대 중반에 있었던 아랍권 국가들의 석유수

출금지 조치의 결과로 석유가격 인상 등이 전세계적으로 전파되면서, 이에 대응하는 세계적 노력의 한 방법으로 선진국들에 의해 본격적인 핵융합 에너지 개발이 시작되었다. 이에 따라 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 실험 시설이 건설되고 '80년대 초반에 실험이 시작되어 핵융합 연구의 획기적인 발전을 가져오게 되었다. 또, '70년대 후반부터 본격적으로 진행된 핵융합 연구의 괄목할만한 발전과 최근의 연구 성과들은 정량적 수치로 비교해 보면 빠른 성장을 보여주고 있으나, 세계3대 토카막 건설이후 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 알고 보면 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 가열 없이도 핵융합 반응이 지속되는 상태에 도달하는 것이다. 이러한 과학적 목표달성과 함께 상용료로써 필수조건인 플라즈마의 안정성과 정상상태하의 지속적인 핵융합반응 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 개

발이 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 『國際 熱核 融合 實驗 爐(International Thermonuclear Experimental Reactor : 약자로 ITER라 부름)』 장치의 건설을 국제 원자력기구(IAEA)의 지원하에 미국, 유럽연합, 일본, 러시아(구 소련)의 공동협력 과제로 1988년 概念設計를 시작으로 하여 1998년 7월 상세설계를 완성하고 2010년경에는 150만 kW 이상의 핵융합 에너지가 1,000초 이상 지속되는 핵융합 연구의 최종 실험장치의 건설을 추진하고 있다. 이제까지의 핵융합 연구의 주축을 이루어 온 토카막형 장치개발과는 별도로 유도기전력에 의한 플라즈마 전류구동이 필요하지 않아서 정상상태 운전이 용이한 밀폐형식인 헬리컬형 장치의 개발도 적극적으로 추진되고 있는데, 일본에서는 1989년 문부성 산하에 국립 핵융합 과학연구소를 설립하고 초전도 자석을 채택한 대형 헬리컬 장치인 Large Helical Device 개발에 착수하여 '98년 3월에 정상가동을 성공적으로 달성하였으며, 독일의 Max-Planck 플라즈마 물리연구소에서도 초전도 자석형의 스텔러레이터인 Wendelstein7-X 장치의 개발에 착수하여 구동동 지역인 Greifswald에 2005년 완공을 목표로 건설을 추진 중에 있다.

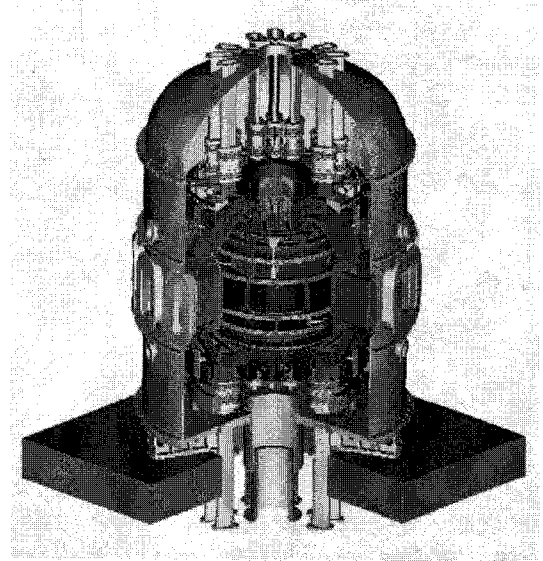


그림 [1.1] KSTAR 장치 개념설계도

융합 연구개발 기본계획』에 첫 단계로 선도기술 개발사업(G7사업)으로 착수된 『차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업』에서 시작되었다고 할 수 있다. 국가 핵융합 연구개발 사업은 『국가 핵융합 연구개발 기본계획』에 정의된 대로 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장치로 이름 지어진 차세대 초전도 토카막 장치의 개발·설치와 이 연구장치의 운영을 통한 핵융합 연구와 기술의 확보, 나아가 세계적인 핵융합로 개발에 동등한 자격으로의 참여 등을 중간목표로 하는 3단계 계획으로 수립되어 있으며, 핵융합 발전기술의 상용화 시기까지 이 분야의 기술선진국으로서의 위치를 확립하는 것을 최종 목표로 하고 있다. 이러한 중장기적인 목표의 달성을 위한 첫단계로 21세기 초까지 정상상태 운전이 가능한 세계 수준의 차세대 초전도 토카막 장치를 국제 공동협력을 적극적으로 활용하여 국내기술로 건설하는 국가적 사업으로 KSTAR 프로젝트가 수행되고 있다.

4. KSTAR 프로젝트 현황

(1) 연구개발 사업의 개요

우리나라의 본격적인 핵융합 연구개발 사업은 '95년말 『국가 핵융합 연구개발위원회』에서 성안되어 정부의 승인을 거쳐 확정·시행된 『국가 핵

이 KSTAR 장치 개발사업은 핵융합로 개발에 필요한 국내 연구개발 역량을 집중시킨 범 국가적 사업으로 추진되어 '96년초 총괄주관기관인 기초과학지원연구소에『핵융합 연구개발 사업단』을 개설하고 각 분야별 전문성과 연구개발 실적을 바탕으로 한국원자력연구소, 한국과학기술원, 포항공과대학교, 삼성종합기술원 등이 주관 연구기관으로 선정되었고, 한국 표준과학연구원, 한국 전기연구소 등 출연연구기관과 서울대학교, 연세대학교, 성균관대학교 등 대학, 삼성전자(주), 한국중공업(주), (주)포스콘 등 산업체를 포함하는 총 25개 기관 300여명의 연구기술 인력이 참여하는 사업으로 '98년 8월에 3개년간의 제1단계 사업이 성공적으로 완료되었다. 이러한 KSTAR 프로젝트의 단계별 추진일정은 2002년까지 핵융합 연구장치를 개발하고 미국, 일본, 유럽연합, 러시아의 주도로 2010년경 장치 건설을 목표로 추진중인『국제 열 핵융합 실험로(ITER)』장치의 본격 가동시까지 장치 운영을 통합 본격적인 핵융합 연구수행을 하는 것으로, 여기서 핵심이 되는 KSTAR 차세대 초전도 토카막 연구장치의 개발은 약 7년간('95. 12~2002. 9)에 걸쳐 총 1,500억원의 연구개발 투자가 계획되어 있으며 국가 핵융합 연구개발 위원회를 중심으로 하는 추진체에 의해 수행되고 있다. 제1단계 기간 중 수행된 연구개발 사업의 주요 실적은 KSTAR 장치의 주요 제원을 구체화하는 개념설계를 확립하였고, 이 설계기준에 따라 장치의 개념설계와 기본설계 작업을 수행하여 장치 설계의 주요 단계인 장치 개념설계 검증·평가와 KSTAR 주장치 기본설계 및 부대장치 기본설계 검증·평가를 각 분야별로 세계적인 전문가들이 참여한 국제 검증·평가위원회를 3차에 걸쳐 개최하여 목표한 설계 마일스톤 모두를 성공리에 완료하였다. 이러한 장치의 개념설계와 기본

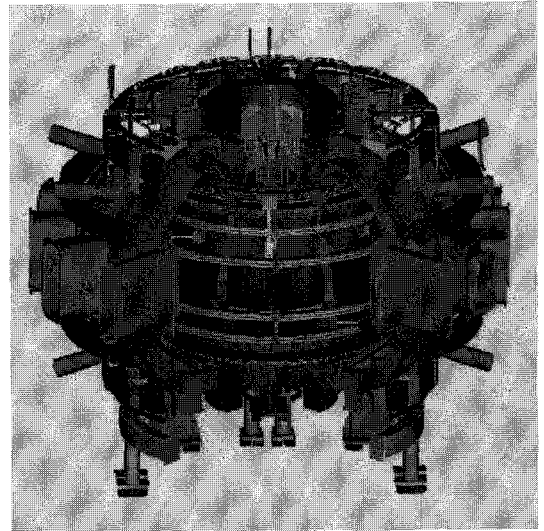


그림 [1.2] KSTAR 주장치 부분설계도

설계와 병행하여 제1단계 기간중에는 초전도 자석계통과 이들 초전도 자석들에 전원을 공급하는 전원제어 계통으로 구성되는 KSTAR 주장치 개발 R&D가 수행되었으며, 플라즈마 가열장치들과 진단장치들로 구성되는 KSTAR 부대장치개발 R&D도 수행되었다.

(2) KSTAR 주장치 개발 현황

KSTAR 토카막 주장치는 대형 초고진공 용기, Cryostat 극저온 용기, 초고온 플라즈마 대향장치와 진공배기계 및 연료주입계로 구성되는 진공계통, 대형의 D-형상을 가지는 DC형 초전도 자석인 Toroidal 자석과 AC형 초전도 자석인 Poloidal 자석 등으로 구성되는 초전도 자석계통과 이들 초전도 자석들에 전원을 공급하며 초전도 자석의 Quench로부터 자석을 보호하는 전원제어 계통으로 구성되어 개발·제작된다.

먼저 KSTAR 진공계통의 개발을 위해 진공용기와 Cryostat 등의 기본설계가 완료되었고, 이와 함께 상세한 응력 해석과 전자기적 해석이 수행되었고 장치제작 기술 확보와 검증을 위한 시

작품으로 진공용기의 90°Sector를 장치개발에 참여한 한국중공업에서 제작을 완료하여 시험에 착수하였다. KSTAR 토카막 장치 개발에 있어 가장 핵심이 되는 분야이며 이제까지 토카막에서 달성하지 못하였던 Steady-state 운전상태인 300초 이상의 펄스 지속을 위해 필수적인, 초전도 자석의 개발에는 ITER 개발계획을 위시해서 이제까지 세계 핵융합 장치 개발의 가장 중요한 연구개발 결과들을 반영하여 현재 최고 성능의 ITER High Performance 사양을 만족하는 Nb₃Sn 계열의 초전도 선재를 바탕으로 하며 Incoloy 908 사각관 형태의 초전도 관내 연선도체(CICC : Cable-in Conduit Cable)를 개발하였다. KSTAR 장치를 위해 개발된 Nb₃Sn 초전도 소선의 성능 특성은 ITER 장치개발에서 정의된 고전류 밀도를 가지는 DC용 초전도 선재 규격인 HP-1 사양과 저교류 손실 특성을 가지는 AC용 초전도 규격인 HP-2 사양을 동시에 만족시키는 선재의 개발과 특성 평가를 성공적으로 달성하였다. 또한, KSTAR 초전도 자석 시스템 중 장치제작에 있어 기술적으로 가장 난이도가 높은 부분인 AC형 초전도 자석인 Central Solenoid 자석의 제작기술 확보를 위하여 Nb₃Sn 선재에 기반을 둔 CIC 도체로 본 장치와 동일 반경을 가지는 모델 코일의 제작을 완료하여 현재 저온 테스트를 수행중이고, 대덕에 위치한 삼성중합기술원내에 건설된 세계수준의 초전도 중합 시험시설에서 곧 초전도 성능검증을 수행할 예정으로 있다. 이러한 초전도 자석 개발의 주요 R&D와 함께 초임계 헬륨(Supercritical Helium)을 이용한 CIC 도체의 강제 유동 방식의 냉각 연구와 초전도 접합부(Joint)와 단말부(Termination)의 시작품을 제작하여 실제 토카막 운전상황하에서의 손실특성에 대한 검증평가도 수행중에 있다. 이와 함께, 초전도 자석의 운

전특성에 맞춘 전원공급 장치의 제작도 KSTAR 주장치 개발과제의 중요분야인데, 이 분야의 개발은 포항 방사광가속기 전원공급장치 개발 경험을 바탕으로 하여 빠른 시간 응답 특성이 필요한 AC형 초전도 자석의 전원공급 시스템과 초전도 자석의 Quench 발생시 초전도 자석을 보호하기 위한 회로를 채택한 10 kA급의 모델 전원공급 장치가 포항공과대학교와 (주)포스콘의 공동연구로 개발·제작되어 Central Solenoid 모델코일의 테스트에 적용하여 운영되고 있다.

(3) KSTAR 부대장치 개발 현황

KSTAR 장치는 토카막 주장치 이외에도 플라즈마를 가열하기 위한 가열장치들과 핵융합 플라즈마의 온도, 밀도, 전류분포 등을 측정하고 플라즈마를 제어하기 위한 진단장치들로 구성되는 부대장치들이 개발·제작된다. 먼저 플라즈마 가열과 비유도성 전류 구동을 담당하게 될 시스템들은 중성입자빔 입사형 가열장치(Neutral Beam Injection), RF파를 이용하는 ICRH(Ion Cyclotron Resonance Heating)과 마이크로파를 이용하는 LHCD(Lower Hybrid Current Drive)로 구분할 수 있다. 이중에서 이온가열과 플라즈마 연료공급을 담당하여 토카막 플라즈마의 주가열원으로 활용될 중성입자빔 가열장치 개발을 위해 주관연구기관인 한국원자력연구소에서 설계와 이 장치의 주요부분인 120 kV, 65 A 급의 이온원 개발이 수행되고 있는데, 현재 3개의 빔라인으로 구성되는 8MW급 NBI 가열장치의 설계가 진행되었으며 이온원 시작품의 제작이 완료되어 시험에 착수하였다. 또, RF파 가열장치인 ICRH 시스템은 이온가열과 플라즈마 중심부 전류구동을 위해 2560 MHz 주파수 대역에서 6 MW급 가열장치가 설계되고 있으며, 이 장치의 주요부분인 안테나, 공명루프 및 정합회로 등의 개발이 수행되고 있다. 이와 함께 마이크로파 가

열장치인 LHCD 시스템은 플라즈마 외곽부 전류 구동을 위해 3.7 GHz 주파수 대역에서 1.5 MW급 가열장치가 설계 중에 있으며, 이 장치 제작을 위해 필요한 부품의 개발에 착수하였다. 이러한 가열장치와 함께 KSTAR 부대장치를 구성하는 주요 시스템으로 진단장치들이 있는데 여기에는 전자기, 진공, 분광, 레이저 산란, 입자 산란 등 다양한 물리학 분야와 첨단계측 기술들을 지원하는 다수의 장치를 개발·제작하여야 한다. 이러한 장치들은 KSTAR 토카막 장치의 운전과 제어등 가장 기본적인 임무의 수행뿐만 아니라 장치의 성능을 평가하고 최적화하며 초고온 핵융합 플라즈마에서 일어나는 중요한 물리적 현상의 자료를 연구자에게 제공하는 수단으로써, 장치 제작단계 이후 운영단계에서도 단계별 실험목표와 성능향상 계획에 따라 지속적으로 개발과 제작이 진행되어야만 할 시스템들이다. KSTAR 진단계통의 설계와 개발은 처음 운전에 착수할 때 필요한 기초 진단계, 본격적인 초고온 핵융합 플라즈마 실험에 사용될 기본 진단계와 정상상태 운전 및 플라즈마 형상제어에 필요한 고급 진단계로 분류하여 필요 우선 순위에 따라 설계가 단계적으로 진행되고 있으며, 이 장치 개발과 제작에 필요한 R&D도 병행하여 수행되고 있다.

(4) 핵융합 특수실험동 건설

선도기술개발사업으로 수행되고 있는 KSTAR 핵융합 연구장치 개발사업과 함께 KSTAR 장치가 설치되고 장치운영에 필요한 헬륨액화시설, 저진동 냉각수시설 및 대용량 전원 공급시설 등 특수설비를 건설하는 것을 목적으로 하는 핵융합 특수실험동 건설이 1997년도에 착수되어 2001년까지 5개년간 총 695억원이 투입될 계획으로 사업이 수행 중에 있다. 이 건설사업은 핵융합 연구개발 사업의 총괄주관기관인

기초과학지원연구소 부지내에 30미터 층고를 가지며 초고온 플라즈마 실험시 발생하는 고에너지 X-선등 방사선 차폐를 위한 1.5미터 두께의 콘크리트 외벽 구조를 가지는 핵융합 특수실험동, 4.5K에서 10kW급 냉각능력을 가지는 헬륨액화시설 및 대용량 수냉각 시설을 설치하게 될 특수설비동과 40MVA급 전력을 정류하여 KSTAR 주장치와 부대장치에 공급할 설비가 설치될 전원동 등 3개 동으로 구성되어 총 6,860평 규모로 설계되었으며 향후 KSTAR 장치 가동시 세계적인 핵융합 연구의 중심지이며 학계·연구계·산업계 연구 진들이 공동연구를 수행할 장소로 운영될 것으로 기대되고 있다. 이 핵융합 특수실험동의 설계는 삼성물산 주식회사와 머릿돌 에이스건축이 맡아 우리나라 전통 과학기술의 상징인 거북선을 현대 감각에 맞춘 형상화로 21세기 한국의 과학기술 능력을 상징하도록 설계되었다. 또, '98년 8월 완성된 상세설계를 기준으로 하여 국내 원자력 시설 건설의 경험이 있는 건설업체들의 경쟁 입찰을 통하여 삼성물산 주식회사와 원진건설이 시공사로 선정되어, '98년 12월 23일 과학기술부 차관과 과학기술계 인사 100여명이 참석한 가운데 기공식을 가지고 본격적인 건설에 착수하여 현재 토목공사가 진행중에 있다.

5. 맺는말

앞장에서 기술한 바와 같이 KSTAR 프로젝트는 3년여에 걸친 제1단계 사업을 통하여 '95년말 사업착수 당시 계획되었던 목표들인 KSTAR 개념설계, 주장치 기본설계와 부대장치 기본설계 등의 프로젝트 주요 마일스톤들을 핵융합 연구와 장치 개발의 세계적 전문가단으로 구성된 검증평가위원회를 개최하여 성공리에 달성하였으며, 장치 제작을 위해 필수적으로 확보해야만할 기술들의 확보를 위한 기반기술 R&D를 차질 없

이 수행하였다. 이 연구개발의 결과들을 바탕으로 하며 KSTAR 프로젝트는 실질적인 장치 제작과 최종 조립과 통합을 목표로 하는 제2단계 사업을 '98년 9월에 착수하였으며, 2002년 후반까지 지속될 사업기간중 KSTAR 장치의 국내 개발과 제작을 위한 연구개발 전략의 최적화와 국내 연구개발 투자와 역량을 총 집결하여 KSTAR 차세대 초전도 핵융합 연구장치를 우리의 손으로 성공리에 건설하고자 한다. 뿐만 아니라, KSTAR 장치의 성공적인 건설과 정상가동을 달성한 이후에도 당초 계획되고 설계된 장치 성능 목표를 달성하여 이 장치의 운영을 통하여 우리나라도 세계 수준의 핵융합 연구를 수행할 수 있는 능력을 확보하고 나아가 미국, 일본, 유럽연합, 러시아 등 세계 핵융합 선진국과 동등한 수준의 연구결과를 창출할 것으로 기대하고 있으며, 21세기 중반으로 예상되는 핵융합 발전의 상용화 시기가 도달하기 전에 우리나라 독자의 기술로 핵융합로 건설을 달성할 수 있는 기술을 확보할 수 있으리라 기대하고 있다. 이와 함께,

KSTAR 장치의 개발과 장치 건설의 초기부터 국내 산업체의 참여가 활성화되어 이 프로젝트를 통하여 대형 초전도 자석기술, 초고진공 기술, 초고온 특수소재 기술, 극저온 기술, 고전류 이온원기술, 대출력 고주파기술 등 21세기를 주도할 첨단극한 기술들을 국내 산업체에 체화하여 산업화 할 수 있는 기회가 마련될 것으로 기대하고 있으며, 이 프로젝트에 참여한 대학, 연구소와 산업체 연구개발 인력에 의해 우리나라 기초과학 연구의 발전에 필수적으로 요구되는 첨단 연구장치들의 국내 개발·제작의 기반을 만드는 데도 크게 기여할 것으로 기대하고 있다. 마지막으로 이 글을 통하여 국가 핵융합 연구개발 사업으로 추진되고 있는 KSTAR 장치개발 사업의 배경과 현황이 얼마간 전달되었기를 바라며, 이 프로젝트에 참여하여 최선의 노력을 기울이고 있는 프로젝트팀을 대신하여 KSTAR 프로젝트의 성공적인 목표달성을 위하여 성원과 관심을 가져주시기를 부탁드립니다.

하도급공사의 선급금기준에 대한 질의

Q 하도급법 제6조 제1항에 의하면 원사업자가 발주자로부터 선급금을 받은 때에는 원사업자가 받은 선급금의 내용과 비율에 따라 선급금을 수급사업자에게 지급하도록 규정하고 있는 바, 건설하도급공사에 있어 하도급공사금액이 도급공사금액을 초과한 경우(예컨대 도급공사금액 10억원, 선급금 비율 30%, 하도급공사금액 20억원) 초과한 부분에 대하여 수급사업자에게 선급금을 지급해야 하는지?

A ① 하도급법 제6조 제1항에서 규정하고 있는 “선급금의 내용과 비율”은 원사업자가 도급받은 공사시공과 관련하여 발주자

로부터 선급금을 지급받은 때에는 그가 받은 선급금의 정도에 따라 수급사업자에게 지급토록 한 규정이므로 일부 공종에 있어 하도급금액이 도급금액보다 초과한 경우도 원사업자가 발주자로부터 선급금을 수령한 정도 등을 감안하여 선급금을 지급하여야 할 것으로 사료된다.(선급금을 발주자로부터 공종별로 비율을 달리하여 지급받은 경우가 아니라 전체 계약금액을 기준으로 일정비율 지급받은 경우를 전제로 한다.)

② 즉, 일부 공종에 있어 하도급금액이 도급금액을 상회한 경우에도 하도급금액에 선급금수령비율을 곱한 금액을 수급사업자에게 선급금으로 지급하여야 한다.