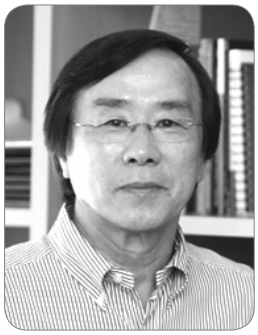
KSTAR 사업의 성과와 향후 전망

박현거
국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터장



· 미 남가주대 물리학 학사
· 미 캘리포니아주립대 전기공학 박사

· 미 프린스턴대 플라즈마 물리연구소 책임연구원('84~'07)
· 포항공과대 물리학과 교수('07~'13)

· 울산과학기술원 물리학과 교수('13~)
· 국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터장 겸임('15~)
· 미국물리학회 Fellow
· Plasma Physics & Controlled Fusion 편집위원

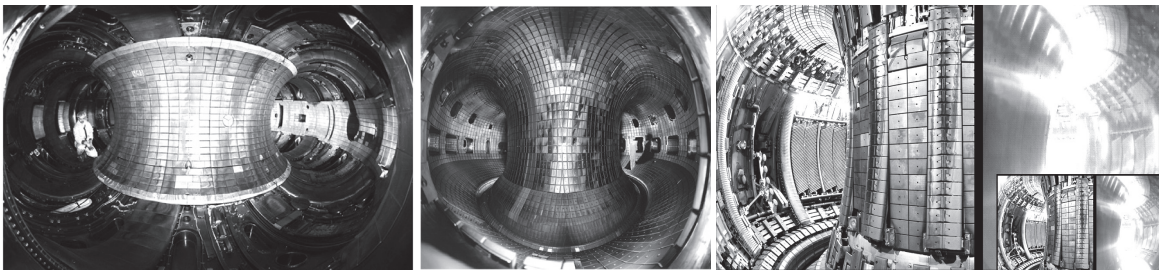
얼마 전 대전 핵융합연구소에서 국가핵융합연구소 개소 10주년을 기념하면서 제 자신의 대학 시절 플라즈마 물리에 관심을 가지면서 이 분야의 불모지였던 한국을 떠난 지가 벌써 40년이 되었고 다시 한국에서 핵융합 물리 연구를 하게 되었다는 것에 감회가 깊었습니다.

KSTAR의 첫 플라즈마 발생과 같은 시기(2008년)에 귀국하여 현 울산과기원으로 오기 전에 포항공과대학에서 한국 생활을 시작하면서 그 예전 한국에서 대학을 다닐 때까지 줄곧 마음에 여유가 없는 생활 때문이었는지(아마도 경제적 · 시간적 이유들) 한국을 돌아볼 기회가 없어 시간이 나면 그 옛날에 가보지 못한 곳을 둘러볼 겸 한국의 아기자기한 정경과 아울러진 깨끗한 하늘을 기억하면서 한국을 다시 배우는 기회를 가진 지가 벌써 8년이 되었네요.

물론 눈부신 경제 발전을 통해 산천이 한국의 생활의 기본이 되는 아파트촌으로 바뀌었고 해남의 끝도 초가집 대신 숙박집들로 변하여 한국의 경제 발전이 실감나지만 한 가지 아쉬운 것은 가을의 며칠을 빼고는 그전에 기억하던 푸른 높은 하늘을 보기가 어려워졌다는 것은 그 옛날을 기억하시는 분에게는 공통적으로 느끼는 점일 것입니다.

저 뿐만 아니라 중국을 다녀오신 많은 분들은 정말 그 근원지가 어디인지 실감하게 되지요. 하지만 신문지상을 통해 배운 바로는 중국도 중국이거니와 한국 내의 공해 문제도 중국 못지않게 어려운 상황이라는 것은 이미 다 알고 있으리라 생각합니다.

한국의 전경이 언제 어디를 가던 다시 깨끗해지려면 청정 에너지 문제는



TFTR 내부, PPPL, 미국　　JT60-U 내부, 나카, 일본　　JET내부, 옥스포드, 영국

〈그림 1〉 이중수소-삼중수소 실험(10.6MW의 핵융합에너지 출력)을 최초로 한 미국 프린스톤 플라즈마 물리연구소의 TFTR 장치(좌), 일본 원자력연구소의 일본 토카막 장치(이중수소-삼중수소 실험은 하지 않음)(중), 영국 옥스포드 근교에 있는 유럽공동 토카막 장치(이중수소-삼중수소 실험으로 16MW의 핵융합에너지 출력)(우)

어떤 방법이든지 해결되어야겠다는 것에는 이견이 없으리라 믿습니다. 어쩌면 80%를 탄소 연료에 의존하는 중국 옆에 있으면 우리의 의지와 관계없는, 우리만의 문제가 아닌 전 세계의 문제임을 실감합니다.

인류의 궁극적인 에너지원인 핵융합 에너지 연구

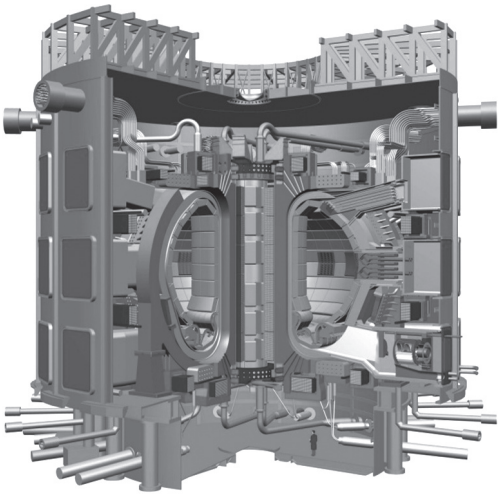
여러 형태의 청정 에너지원들이 개발되고 있지만 이들(풍력 발전, 태양열 발전, 배터리 등)에 필요한 생산 장비들을 만드는 일에도, 미래의 자동차 연료인 대용량 배터리, 수소 생산에도 대용량 전기 발전이 없이는 힘든 일입니다.

지속 가능한 안전한 에너지원 개발은 인류가 현재 상태의 생활 여건과 산업을 유지하는 데 필수의 조건입니다. 하여 우리가 할 수 있는 모든 형태의 에너지원(재생 에너지 및 원자력)의 효율 개선을 앞세워 안전하게 운영하면서 핵융합을 통한 발전의 현실화가 당겨질 수 있다면 얼마나 큰 도움이 될까 하면서 핵융합 에너지 연구의 역사와 더불어 KSTAR 가동 7년간을 돌아보면서 앞으로 우리는 무엇을 해야 하는지를 생각할 기회를 가지게 되었습니다.

핵융합 에너지 개발은 오랜 세월을 해왔기에 또 이에 대한 큰 기대 때문에 항상 논란의 대상이 되어 왔습니다. 이 때문에 주기적으로 신문지상에 나오는 깜짝 핵융합 새 기술 개발 성공 내지 상온 핵융합 성공이라는 기사에 가슴이 뛰게 되고 다시 실망하는 기회를 통해 마치 이 분야의 연구 종사자가 개발을 제대로 못하는 집단으로 매도되는 때도 가끔 있지요.

핵융합 에너지 연구는 반세기 전에 본격적으로 시작되어 이제는 출력이 입력을 뛰어넘는 장치 건설도 가능하게 되었지만, 이렇게 긴 세월이 걸린 이유는 연구에 지속적인 투자가 이루어지지 않고 어떤 계기(에너지 파동 등)가 있어 투자를 하게 되고 규모 큰 연구 장치 건설되는 시기가 지속적이지 못한 것이 큰 요인 중 하나라 여깁니다.

장치 건설에 적지 않은 시간이 걸리는 규모를 생각하면 70년대 '오일 파동' 때 시작되어 20여 년 전에 이미 '과학적인 breakeven'(발생 열과 입사 열이 같은 경우)에 가까이 가거나 달성한 미국(TFTR), 일본(JT60-U), 유럽(JET) 장치들(〈그림 1〉) 이후 '전기적인 breakeven'(500MW 출력)을 하기 위한 시도인 ITER(〈그림 2〉) 건



〈그림 2〉 프랑스 프로방스 근교에 지어질 ITER 장치

설은 오랫동안 표류하다 한국을 포함한 7개국의 투자로 최근에서야 시작하게 되었습니다. 인류 역사상 처음으로 시도하는 국제적인 대규모 공동 과학 사업이라 과학적 문제가 아닌 관리 문제로 지연이 되고 있지만 난관이 극복되면 성공리에 달성되리라 봅니다.

ITER 사업의 성공은 근본적인 핵융합 플라즈마 문제와 기본 기술은 해결되지만 전기 에너지로 전환하는 데는 좀 더 공학적인 연구 기간이 필요하다고 생각합니다. 인류의 궁극적인 에너지원인 핵융합 에너지 개발에 조급한 마음보다는 꾸준한 투자와 노력이 더 우선적이 되어야 할 것 같습니다.

KSTAR는 한국의 거대과학 발전의 모범

현재 한국의 핵융합 에너지 개발 계획은 세 단계로 되어 있습니다. 첫 번째로 플라즈마 연구용 장치인 KSTAR(〈그림 3〉)를 중심으로 핵융합 플라즈마 물리 및 기초 기술 연구를 수행하여 기존 선진국에서 반세기 동안 해온 핵융합 플라즈마 물리 연구를 빠른 시일에 답습하고 또 초월하는 연구 성과를 목표로 하고 있습니다.

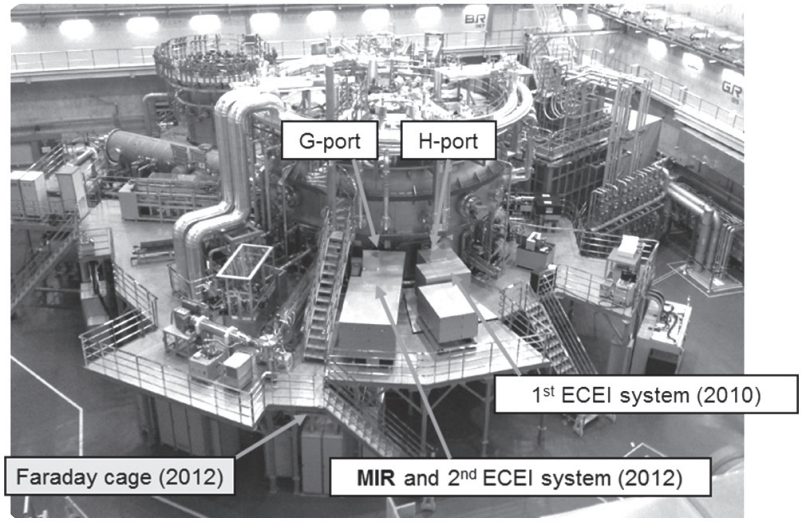
이를 통해 지속적으로 필요한 인력 양성 또한 중요한 과제입니다. 이를 위해 다양한 분야의 핵융합 연구를 위한 2009년에 시작한 국내 대학 거점 연구센터가 좋은 프로그램이라 하겠습니다.

두 번째로 세계 7개국(유럽연합, 일본, 미국, 러시아, 인도, 중국, 한국)의 공동 투자로 현재 프랑스 남부 프로방스 지역에 건설 중인 국제 공동 연구 장치인 ITER를 통한 차후 핵융합로 개발에 필요한 기술의 공동 소유권을 가지는 것입니다. 현재 계획으로는 2025년에 실험 시작으로 2031년에 본격적인 이중수소-삼중수소 실험이 시작될 예정입니다.

마지막으로 KSTAR에서의 연구 능력 및 인력 개발과 ITER를 통해 습득되는 기술력을 바탕으로 이룩하려는 한국형 핵융합로 개발 계획입니다. ITER의 이중수소-삼중수소 실험이 성공적으로 시작하는 시기가 바로 우리의 기술로 개발되는 핵융합로 설계 및 건설의 시작점이 되겠습니다.

이번에 한국의 유일한 핵융합 연구 장치인 KSTAR의 주기관인 국가핵융합연구소 개소 10주년 기념식을 하면서 때마침 올해부터 KSTAR 연구의 책임을 맡은 이로서, 한국이 핵융합 에너지 개발에 본격적으로 발을 들여놓은 지가 정말 짧은 시간이었지만 많은 발전이 있었고, 앞으로 핵융합 에너지 개발은 우리 손으로 반드시 해결하겠다는 젊은 연구자들의 의지를 피부로 느끼면서, 저의 재임 동안 이미 선진국에서 반세기 동안 해온 연구의 답습은 물론 KSTAR에서 값진 연구 결과가 나오도록 그 바탕을 마련해야겠다는 생각을 하게 되었습니다.

핵융합 연구의 불모지에서 시작해서 어려웠던 경제



〈그림 3〉 한국 대전에 건설된 KSTAR 장치

여건(IMF) 때문에 건설에 들어간 시간은 기대보다 더 길었고, 보잘 것 없었던 그 당시의 낙후된 기술력 때문에 한국이 건설하기에는 역부족이어서 아까운 연구비 낭비라던 많은 반대에도 불구하고 한국 내에서 기획되고 한국 기업이 건설하여 한국 기술의 결정체로서 지어진 KSTAR는 그 후 꾸준히 성장해와서 한국의 거대과학 발전의 모범이 되었고 세계 무대에서도 KSTAR 장치의 역량은 이미 높이 평가되어 있습니다.

뛰어난 우리의 기술력

KSTAR의 장치 운영 기술에 익숙해지면서 측정된 결과에 의하면, KSTAR 플라즈마 가장자리에서의 자장의 불균일성과 자석 설치에 의한 오차가 여태까지 지어졌던 어떤 장치보다 적은 것으로 판명이 됨으로써 장치 건설에 심혈을 기울인 우리 기술자들의 노력이 입증되었다고 할 수 있겠습니다.

KSTAR는 진정한 핵융합 플라즈마의 대칭성을 연구하기에 최적이고 이를 통해 자장 오차에 의한 플라즈마의 안정성 및 가둠 시간의 진정한 한계를 연구할 수 있는 유일한 장치로 부각되고 있습니다. 세계 무대에서 최적의 차세대 핵융합 플라즈마 연구 장치로 인정받는 것이 우연이 아니라는 점을 주지해야 합니다.

한국이 처음으로 시작한 거대과학은 포항가속기라 할 수 있겠습니다. 포항가속기를 완성하면서 과학 장치의 기술력을 터득한 우리 고급 기술진이 KSTAR 건설에 투입되었고 동시에 한국 기업의 기술력 또한 이미 선진국 기술 수준으로 가기 위한 준비가 된 상황이었기에 이들의 헌신적인 노력을 통해 한국이 자랑할 수 있는 KSTAR 장치의 건설이 가능했다고 봅니다.

특히 삼성이 참여했던 세계 최초의 Nb3Sn 초저온 고자장 자석의 개발 및 생산, 그리고 한국중공업이 개발한 수십억 도의 플라즈마와 상온을 분리하는 이중 진공용기 건설은 우리 기술력의 최상이라 할 수 있습니다.

이렇게 건설이 성공리에 끝나고 연구 장치로서 시작한 지가 벌써 7년이란 세월이 되었습니다. 놀라운 것은 그 사이에 이렇게 KSTAR를 완성시킨 기술진이 이미 ITER 건설에 대거 참여하고 있다는 사실입니다.

더 놀라운 사실은 ITER 건설에 참여한 우리 기업의 활약입니다. 만만치 않은 투자를 하고 있지만 우리 기업들이 외국 기관으로부터의 수주한 액수 또한 투자액 못지 않게 많다는 것입니다.

더욱더 기대되는 것은 KSTAR와 ITER 건설에 쌓은 경험과 우리 기업의 기술력이 다시 국내 거대과학에 투입할 수 있는 저력과 차후에 한국형 핵융합로 건설에 주저 없이 뛰어들 수 있는 기반을 마련했다는 큰 의미가 있습니다. 한나라의 거대과학 기술력의 발전이 이렇게 장시간에 걸쳐 가면서 세대를 이어간다는 것은 한국의 저력과 미래의 희망이라 하겠습니다.

더 나아가서 현재 KSTAR에서 연구를 통해 경험을 쌓는 지금의 젊은 세대가 ITER의 운전과 연구에 주도적인 역할을 하게 되어 핵융합 에너지 개발에서 KSTAR를 바탕으로 성장해온 우리 인력이 주도권을 장악할 수 있다는 것은 지나친 예상이 아님을 짐작할 수 있습니다.

새로운 운전 영역을 개척할 KSTAR

70년대 대학 초년에 핵융합 플라즈마 물리학을 접하게 되어 이를 연구하고자 했었지만 그 당시에는 교과서 하나 제대로 구하기 어려웠고 어느 대학에서도 이 분야의 강의는 찾아 볼 수 없었습니다. 플라즈마 물리 연구의 역사가 다른 물리학에 비하여 그렇게 성숙된 단계가 아니라는 것은 쉽게 짐작하시리라 여깁니다.

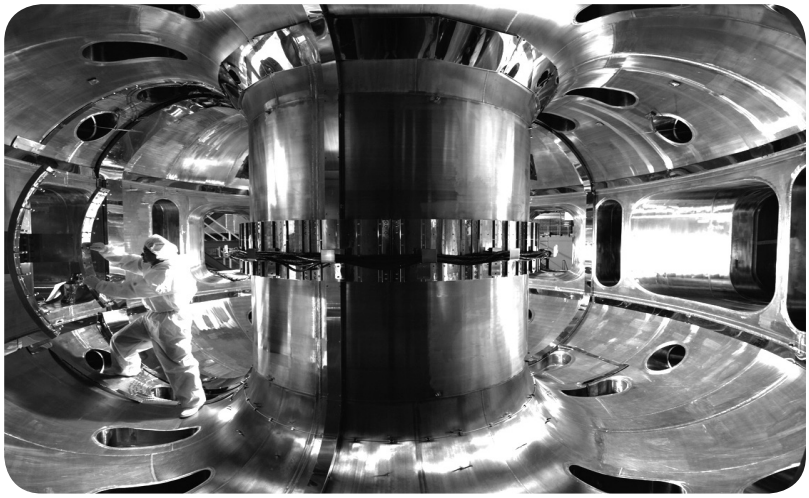
최근에 들어 이론의 발전과 전산모사의 결합으로 플라즈마 물리학은 많은 발전을 하게 되었어도 확고부동한 이론을 바탕으로 한 장치 건설은 좀 더 시간이 걸리리라 여깁니다. 반세기 동안 선진국의 독점물이었던 핵융합 물리 연구를 지난 7년 동안에는 어떻게 KSTAR를 제대로 운전하는가에 급급했지만 이제는 체계적인 계획하에 우리가 달성할 목표를 정하고 서서히 자신감을 가지고 앞으로 나갈 준비가 되었다고 여겨지는 시기입니다.

현재 우리의 이론 및 모델링 분야에서 경쟁력은 그리 높지 않지만 우수한 기술적 경쟁력을 가진 핵융합 연구 장치인 KSTAR를 보유한 우리로서는 후발 주자이지만 체계적으로 계획을 세워 모자라는 분야를 보완하고 KSTAR를 바탕으로 실험을 통해 이론을 정립하면서 우리의 길을 찾아 나가야 할 때입니다.

현재 건설 중인 ITER 장치는 성공률을 보장하기 위해 아주 보수적인 조건을 바탕으로 이론이 아닌 경험에 바탕을 두고 설계되어 건설된 핵융합 플라즈마 가둠 장치이고 입력 에너지의 10배 출력 에너지(500 MW) 목표를 달성하는 데에는 무리가 없겠지만, ITER 후에 효율적인 에너지 생산을 위해서는 좀 더 효율이 높고 안정적인 형태의 플라즈마 연구에 중점을 두어 실험을 통해 증명된 이론을 바탕으로 새로운 운전 영역을 개척하는 것이 KSTAR에서의 연구의 역할이라 여깁니다. 이를 바탕으로 차후에 세계 핵융합 플라즈마 물리 연구를 선도하고 한국형 실증로 건설의 기반을 마련하는 것입니다.

향후 과제와 전망

KSTAR를 통해서 새로운 핵융합 플라즈마 물리 연구의 새로운 패러다임을 만들고 이 분야 연구를 세계 무대에서 선도하기 위해서는 첫째로 자장의 대칭성이 확실한 잘 지어진 장치가 제일 중요하지요. 이미 앞에서 논의된 바와 같이 KSTAR의 자장 대칭성은 여태까지 지어진 장치들 중에서 가장 정확하다는 것이 지난 수 년 간의 실험을 통해서 여러 형태로 관찰되고 있습니다.



KSTAR 내부

하지만 실험 과학을 정량적인 증거를 통해서 선도할 수 있는 길은 남들이 가지지 않은 무기가 필요합니다. 우주 연구에는 허블 망원경처럼 강력한 망원경이 필수이고 생물학을 연구하는 데는 강력한 현미경을 가진 팀이 가지지 않은 팀보다 더 많은 연구 결과를 창출할 수 있겠지요.

그러면 핵융합 플라즈마 물리 연구에서 선도 연구를 하기에는 무엇이 필요할까요? KSTAR 플라즈마에서는 수십억에서 수백억 도에 달하는 전자와 이온들이 전자기장 속에서 각 입자의 운동에서부터 집합적인 운동까지 다양한 형태로 빠른 시간에 변화하고 있습니다.

간혹 플라즈마의 집단적 운동을 통해 일어나는 급작스러운 불안정성의 기작과 붕괴 현상들은 아직 완전한 정복이 되지 않았기에 가능하면 이런 현상이 일어나지 않는 낮은 압력의 플라즈마 운전에 국한되어 있지만, 이를 극복한 효율적이고 안정적인 운전을 위한 핵심적인 물리적 현상을 이해하기 위해서는 이런 현상들을 빠른 시간에 정확하게 측정하여 개발된 이론을 이차원적 boundary condition을 가지고 검증할 수 있는 특수 진단 장비의 개발이라 하겠습니다.

제가 한국에 돌아와 KSTAR에서 연구 생활을 시작한 이유도 이와 큰 연관이 있다 하겠습니다. 제가 오랜 연구 생활 동안 절실히 느낀 점은 플라즈마처럼 복잡계의 물리 현상은 기존의 일차원 진단 장치로는 이해의 한계성이 있다는 것이고, 이를 위해서는 초고속 및 최적의 해상도를 가진 전자 섭동 영상(ECEI: Electron Cyclotron Emission Imaging) 장치의 개발이었습니다.

결과로 KSTAR에 설치된 최첨단 2,3차원 전자 영상 장치(〈그림 3〉에서 보이는 ECEI I 과 ECEI II)로 다른 핵융합장치에서 보기 어려운 새로운 물리 현상을 촬영하는 데 성공하였고, 2008년 대전에서 열렸던 IAEA 총회에서 KSTAR의 성공적인 운전 결과와 더불어 발표되었습니다.

오랜 난제로 여겨졌던 고에너지 가둠 상태(H-mode)에서 일어나는 가장자리 불안정성을 KSTAR에서 세계 최초로 촬영함으로써 이제는 2,3차원 영상을 통해 지금까지 해온 플라즈마 물리 연구와는 차원이 다른 연구를 착수할 수 있게 되었습니다.

이는 시작에 불과하고 또 다른 첨단 진단 장치를 개발

ITER 건설 현장과 액상프로방스의 청명한 하늘

할 수 있는 우리 연구자들의 창조력과 끈기 있는 연구를 통해 다음 10년 후에는 반드시 우리의 핵융합연구소가 세계 핵융합 플라즈마 물리 연구를 선도하는 모습을 볼 수 있으리라 기대합니다.

결언

KSTAR 운전의 7년을 돌이켜 보면 핵융합 에너지 연구 분야에서는 후발 주자였지만 산 · 학 · 연이 공동으로 설계하여 선진국에서 한 번도 지어보지 않았던 초전도 토카막 장치를 완벽하게 건설하였으며 반세기 동안의 선진국 운전 경험을 지난 7년 동안 운전하면서 답습하게 되었습니다.

이런 KSTAR 사업은 우리 과학사에서 한국이 자랑할 수 있는 거대과학의 대표적 성공 사례라 할 수 있습니다. 하지만 진정한 성공은 이제부터는 완벽한 복습이 아닌 우리가 성취해야 할 핵융합 에너지 개발을 위한 미래를 스스로 개척해야 하는 사명에 있습니다.

핵융합 에너지 개발 계획의 기반이 되는 KSTAR를 통해 플라즈마 안정성 한계에서의 비선형 문제와 가둠 상태의 증가나 감소를 이론과 모델링을 통해서 정리하고, 예측 가능한 이론을 바탕으로 ITER의 플라즈마 운전 모드보다 더 효율적인 운전 모드를 찾는 일이 다음 10년 동안에 해야 할 일이라 생각합니다.

이를 성공리에 끌어갈 수 있다면 핵융합로 건설에 필요한 신기술들은 ITER 사업을 통해 공유하게 될 것이고, 마지막으로 해야 하는 한국형 핵융합로 기반 사업은 우리의 지식, 우리의 기술, 및 우리의 인력으로 충분히 할 수 있다고 믿습니다.

그런 면에서 KSTAR 운전 기간과 비슷한 핵융합연구소 10주년 기념식은 그 의미가 크다고 생각합니다. 지난주는 ITER 과학 및 기술 자문 회의에 참가하기 위해 프랑스 남부의 액상프로방스를 들려 ITER의 건설이 활발히 진행되는 현장을 둘러보았습니다.

중국과는 대조적으로 80%의 에너지가 원자력으로 돌아가는 프로방스 지역의 높고 푸른 가을 하늘을 바라보면서 이런 하늘이 제가 기억하는 하늘이 아니었나 하는 생각을 해 보았습니다.