

토카막 핵융합 시설 JET의 사업 추진 현황

새로운 실험 시작, 연내 평형점 도달

영

국의 Culham에 위치한 JET(Joint European Torus)는 현재까지 가장 큰 토카막 핵융합 시설이다.

JET은 97년초에 중수소와 삼중수소(D-T Deutrium-Tritium) 플라즈마를 이용한 일련의 새로운 실험을 시작할 예정이며, 핵융합로의 첫번째 목표를 실현할 수 있는 지점인 평형점(Breakeven)에 도달할 것으로 기대되고 있다.

평형점은 D-T 핵융합에서 발생한 전력의 양이 수십MWe에 달하여, 이 전력이 플라즈마의 온도와 압력을 유지하도록 되돌려지는 단계이다.

핵융합 전력의 펄스는 약 2초간 지속되는데, 이 시간은 비록 짧지만 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)의 최종 설계를 확정하는 데 필요한 자료를 제공하기에 충분한 시간이다.

ITER은 유럽·일본·러시아 및 미국이 참여하는 국제적인 프로젝트로서 그 규모는 JET의 약 3배이며, 지속적인 플라즈마 내부에서 발생하는 1,500MWe의 전력을 생산하게 된다.

JET은 지난 91년 2월에 최초로 핵융합 전력을 발생시킨 바 있다.

이때 최초로 약 0.1g의 삼중수소가 여러해 동안 중수소 플라즈마로만 운전되던 ITER에 첨가되었다.

첨가된 삼중수소의 양은 중수소의 양에 비해 몇% 정도에 지나지 않았으며, 핵융합로의 최적 혼합 비율인 50 : 50에 훨씬 못미치는 양이었다.

그럼에도 불구하고 이때 약 1초간 발생한 2MWe의 핵융합 전력은 D-D(Deutrium-Deutrium) 운전 방식에서 D-T 운전 방식으로 전환하는 데서 얻을 수 있는 예측된 개선 효과를 확인하는 데 충분하였다.

JET가 최초로 가동되던 83년 당시의 향후 일정에 따르면, 97년에는 이미 50 : 50의 D-T 플라즈마에 관련된 일련의 최종 시험을 수행하고 있어야 한다.

그러나 ITER 및 미래의 전력 생산용 핵융합로에 필수적인 설비인 Pumped Diverter System의 개발 및 시험 때문에 그 기간은 연장되었다.

그러나 JET은 규모가 크고 원환(Torus)의 단면이 D자형이기 때문에

원환의 바다 근처에 Pumped Diverter를 수용할 수 있다.

이 Pumped Diverter는 플라즈마의 외부 영역을 효과적으로 끌어들이고 플라즈마의 온도를 높이는 데 지장을 줄 수 있는 불순물을 제거할 수 있는 자기 배열(Magnetic Configuration)을 이용하고 있다.

94년에 JET의 원환 내부에 Mk I Diverter System을 설치함으로써 플라즈마의 체적이 20% 감소될 수 있었다.

또한 최근에 개발된 D-D Shot은 기존의 대형 플라즈마에서 사용되던 것과 같은 성능을 발휘하고 있다.

JET은 비록 규모가 작기는 하지만 핵융합로의 소기의 목적을 달성하기 위한 지속적인 발전을 해나가고 있으며, 전세계의 많은 토카막에 선행 운전 경험을 전수하고 있다.

특히 프린스턴대학의 TFTR은 50 : 50 D-T 플라즈마에서 약 1초간 10MW 이상의 핵융합 전력을 생산한 바 있다.

또한 일본의 JT-60U는 핵융합 조건에의 접근도를 측정하는 기준이 되는 3가지 생산물(이온 밀도, 이온 온

도 및 Energy Confinement Time) 분야에서 현재 최고의 기록을 보유하고 있다.

이들 설비들은 기타 국가의 대형 토카막과 함께 ITER의 설계를 지원하는 데이터 베이스에 많은 실험 결과를 입력하고 있다.

그러나 JET의 다음 실험의 결과들은 ITER의 설계에 많은 도움을 줄 것으로 기대되는데, 그 이유는 JET의 규모와 배열이 ITER과 특별히 연관성이 있기 때문이다.

3개년 계획

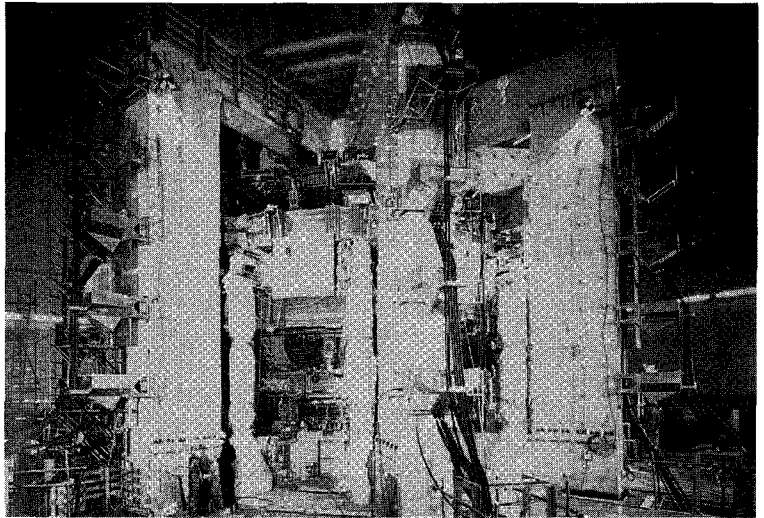
95년 유럽연합(EU) 장관평의회는 JET의 운영을 위해 99년말까지 매년 1억달러씩을 지원할 것을 결정하였다.

이 예산은 과거의 예산에 비해 다소 적은 금액이기는 하지만 추가 설비 투자가 이미 끝난 상태이기 때문에 나머지 실험 계획을 수행하는 데는 모자람이 없다.

3개년 계획은 3~4개월간의 D-T 운전으로부터 시작될 예정이다.

생산되는 핵융합 중성자속은 원환 구조물의 과도한 방사화를 방지하기 위하여 2×10^{20} neutrons로 제한될 것이다.

이것은 약 350 D-T Shots를 허용할 것인데, 이 값에는 평형점 근처 혹은 그 이상의 고핵융합 전력을 나타내 보이기 위한 Shots가 포함된다.



JET의 외부 모습

이러한 고핵융합 전력에서의 Energy Confinement Time은 핵융합 반응 생성물인 알파 입자에 의해서 플라즈마 내부에서 생산된 증가된 가열을 연구할 수 있는 충분한 시간이다.

이러한 효과는 핵융합로에서 궁극적인 목표인 점화를 달성하는 데 특히 중요하다.

점화는 알파 입자 가열이 외부의 가열 없이도 플라즈마의 온도를 유지할 수 있어야 할 것을 요구한다.

다른 D-T Shots는 몇 가지의 향상된 운전 모드에서 Diverter에 연관된 물리 현상을 조사하는 데 이용될 것이다.

JET의 전력 주입 계통의 설비에 최근 추가된 중요한 설비는, 무선 주파수 전력을 3.7GHz 범위로 플라즈

마 내부로 유도하는 LHCD(Lower Hybrid Current Drive) 계통이다.

이 계통은 16MW의 전력을 플라즈마 내의 전자에 결합시키며, 플라즈마 내부의 전류 형태를 미세하게 변화시켜 계통 주위에 잉여 전류를 유도하는 데 이용된다.

또다른 중요한 노력은 입자의 흐름으로부터 전자기 방사선에 유입되는 에너지 흐름의 변화를 나타내 보이는 것이다.

이것은 ITER의 연속 운전 기간중에 염려가 되는 Diverter의 흡수 타일에 가해지는 열부하를 경감시킨다.

ITER과 향후의 핵융합로를 위하여 삼중수소 관리 기술을 시연해 보는 것도 매우 중요하다.

JET의 새로운 삼중수소 처리 공장은 D-T Shots 프로그램 기간중

Diverter 및 원환 주위의 여러 곳에서 발생하는 가스를 제거하는 데 이용될 것이다.

이 공장은 중수소 및 삼중수소를 분리하여 플라즈마 내부로 재활용하게 된다.

원격 취급은 D-T 운전으로부터의 격렬한 중성자 폭발에 의해 원환 구조물이 일단 방사화된 후에 활용될 매우 중요한 기술이다.

이 기술은 96년초에 현재의 Mk II A Pumped Diverter 2개 모듈의 원격 설치시 활용된 바 있다.

그러나 원격 취급 설비는 원환 구조물의 방사선 준위가 상승하는 첫 번째 D-T Shots 프로그램 직후에 실제

로 시험될 예정이다.

현재로서는 Mk II A Diverter Tile과 Tile Support Module을 ITER에 활용된 설계와 유사한 '기체 상자' 급 Diverter(Mk II GB)로 교체하는 데 원격 기술을 활용할 수 있기를 희망하고 있다.

97년과 98년의 2년 동안, JET는 ITER-Type Diverter의 특성화를 위하여 D-D 운전 형태로 전환할 예정이다.

이 기간이 끝나면, 원환의 조정과 설계 변경을 위하여 원환 내부로의 접근이 가능해져야 한다.

99년말로 예정된 마지막 D-T 프로그램의 준비를 위해서 고프라즈마

성능을 위한 최적 배열을 제공할 수 있는 Mk II A Diverter를 재설치하는 데 따르는 결정이 이루어져야 한다.

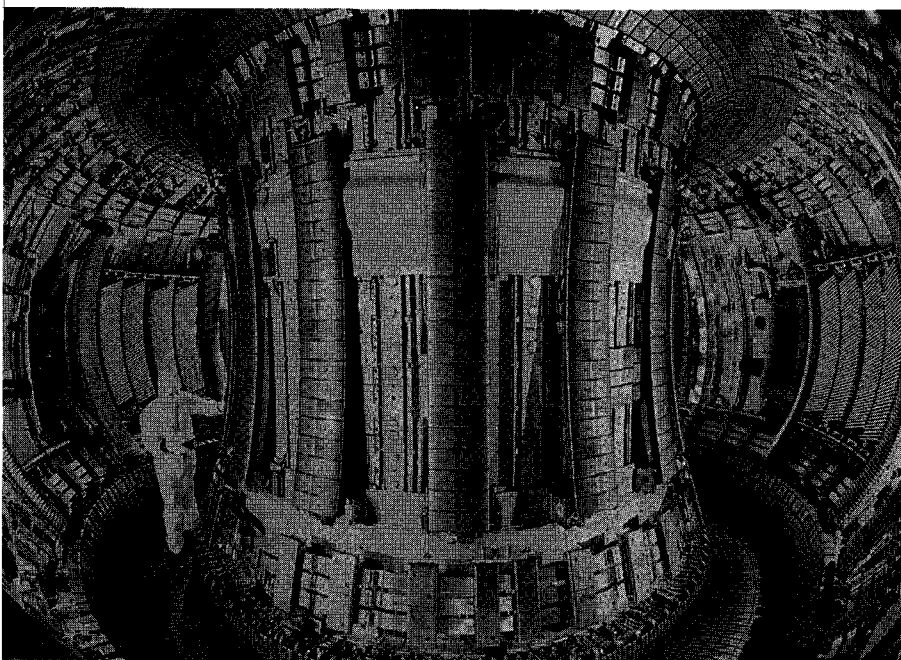
이것은 약 8개월간 지속될 것으로 예상되며 5×10^{21} neutrons를 생산하도록 허용될 예정이다.

원격 취급 기술

JET 사업의 시작 단계부터 일련의 최종적인 D-T 시험 후에 설비를 다루고 향후의 핵융합로의 정비에 관한 노하우를 축적하기 위하여, 원격 취급 기술은 JET 기술 프로그램의 필수적인 부분으로 인식되어 왔다.

그리고 지난 3년간 원격 취급 기술 개발은 JET에서의 D-T 운전 기간이 끝난 후에 Diverter의 원격 정비와 변경에 관한 특정한 요구 때문에 강화되어 왔다.

14톤의 무게가 나가는 인공적인 Boom(기중기의 물건을 들어올리는 부분)이 원환의 사각형 포트 중의 하나로 진입하여 원환 내부의 어느 위



JET의 내부 모습

치에든지 약 5mm 이내의 오차로도 달할 수 있다.

Boom의 끝에는 필요한 도구·카메라·조명 및 원환 내부에서의 모든 종류의 정비 및 검사를 수행할 수 있는 기기가 장치된 2개의 팔이 달린 조작 기기가 장치되어 있다.

각각의 팔은 35kg의 무게를 들어 올릴 수 있으며, 조작 기구는 Diverter의 Tile-Carrying 모듈을 설치하거나 제거할 수 있다.

원격 취급 제어실은 개인용 컴퓨터를 활용한 제어반을 갖추고 있다.

또 하나의 추가적인 설비는 Silicon Graphics 워크스테이션상의 실시간 가상 현실 전시(Display)이다.

이 설비는 원환 내부의 인공 Boom을 어떤 각도에서도 볼 수 있게 해준다.

광범위한 여러 가지의 정비 및 검사 업무를 지원하기 위해 수동 조작 Slave Manipulator를 갖추도록 하는 조치가 취해졌다.

이러한 기술을 ITER에 적용할 것인지 여부에 대해서는 약간의 논란이 있다.

일본에서 개발되고 있는 다른 방식은 원환 내부를 이동할 수 있는 Gantry Crane에 부착된 로봇 시스템이다.

원격 취급 계통은 실제 규모 크기의 원환 모형에서 여러 가지의 시험을 수행하고 있다.

원환의 내부는 매우 복잡하여 물체

를 이동할 때 낙하할 가능성도 있다.

이러한 이유로 여분의 쇠사슬이 사용된다.

원격 취급 기술 개발 프로그램은 여러 가지의 복잡한 작업을 수행하는데 요구되는 시간의 절약에 많은 비중을 두고 있다.

컴퓨터 제어 계통이 인공적인 Boom을 5분 이내에 원하는 위치에 정확하게 위치시킬 수 있도록 여러 가지의 조작 교범이 파일화되어 입력되어 있다.

원격 취급 기술의 신뢰도를 확인하기 위하여 1,000여 시간의 시험이 수행되었고, Boom과 조작 기구의 이용 가능성이 연속적으로 감시되고 있다.

어떠한 형태의 실패도 공식적인 문서로서 보고되고 기록되고 있다.

원환 내부에서 발생할 수 있는 최악의 사고에 대한 연구도 수행된 바 있다.

삼중수소 취급

JET의 새로운 활성 가스 취급 계통(AGHS)은 일반 산업용 규모의 설비이다.

JET의 향후 프로그램에서 JET가 취급할 AGHS의 양은 10g을 넘지 않을 것으로 예상되지만, 100g의 삼중수소를 취급할 수 있도록 허가를 받은 상태이다.

현재 이 설비는 캐나다로부터 3g의 삼중수소를 공급받아 마지막 단계의

시운전을 수행하고 있다.

이 설비는 JET의 주건물에서 분리된 별도의 건물에 탑재되어 있으며, Gantry Crane으로 연결될 수 있다.

원환에 연결된 다양한 계통으로부터 수집된 가스들은 정화 및 동위 원소 분리를 위해 AGHS로 이송된다.

순수한 중수소와 삼중수소는 필요시 원환 내로 주입된다.

중수소와 삼중수소는 저장을 위해서 우라늄 Bed에 흡수된다.

Bed의 온도에 따라서 가스가 흡수되기도 하고 방출되기도 한다.

Tritiated Gas의 정화는 주로 산소와 결합시킴으로써 물로 만드는 과정에서 달성된다.

이때 생성된 물은 Cold Trap에서 동결된다.

탄화수소·산소 및 질소 등과 같은 불순물은 Detritiation System을 통해서 최종 처리된다.

동위 원소의 분리는 Cryogenic Distillation Column이나 Gas Chromatography Unit를 통해서 수행된다.

이러한 미세한 공정의 대부분은 분산 제어 시스템을 통하여 이루어진다.

설비의 여러 장소에서 채집된 가스는 대형 Glovebox Facility에서 정밀하게 분석된다.