

# 핵 융합로의 진공

토카막 및 스텔라레이터  
원자로 원리

사진 출처: ITER

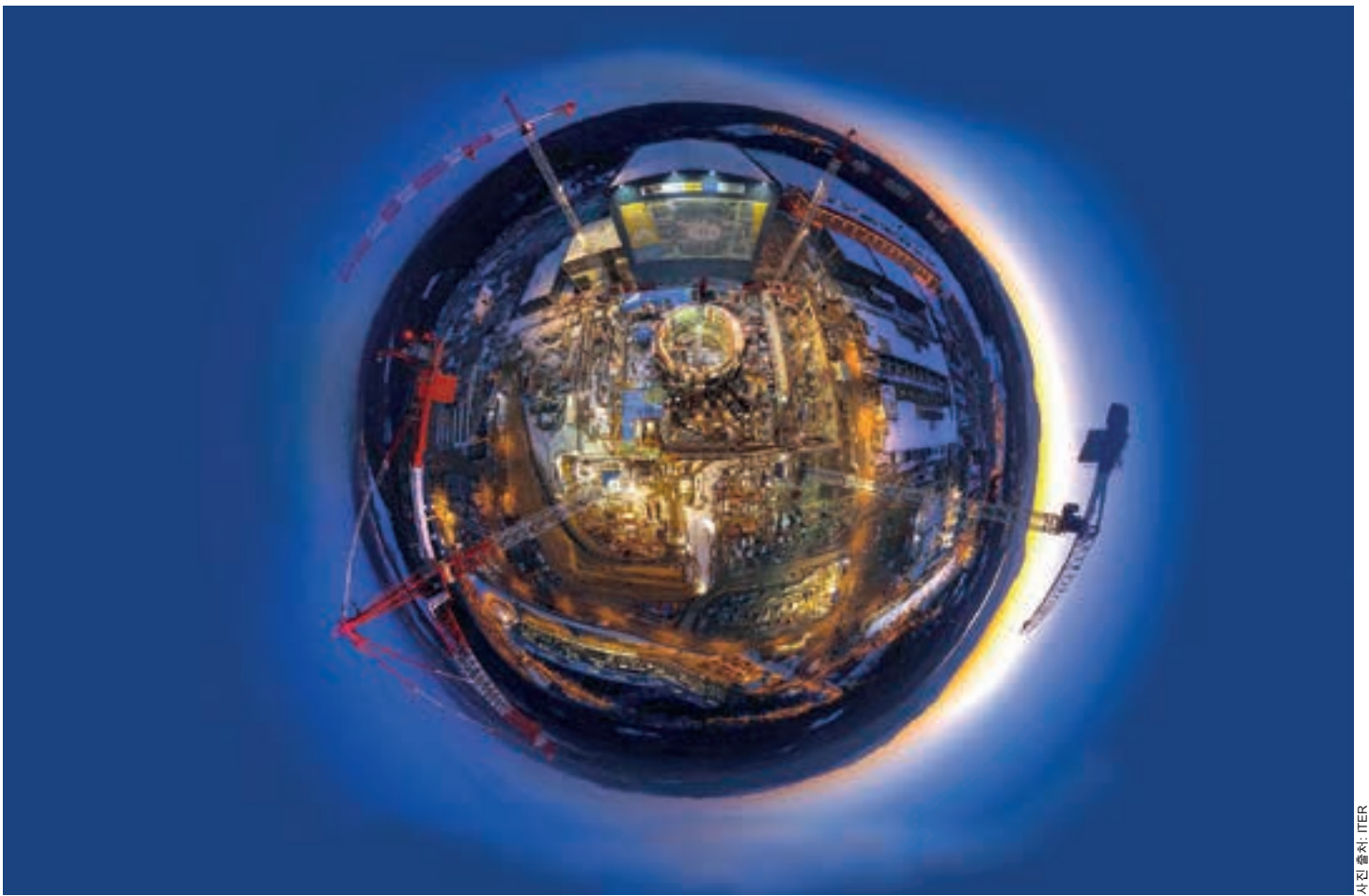


사진 출처: ITER

## 프로토타입으로서의 태양

지구 온난화와 기후 변화가 계속됨에 따라 대체 에너지 원으로서 청정 에너지에 대한 필요 및 수요가 증가하고 있습니다. 과학자들은 태양의 예를 따라 에너지를 생성하기 위해 지구에 태양을 복제하기 위해 수년 동안 노력해왔습니다. 여기에는 수소 핵이 융합되어 헬륨 핵을 형성하는 것이 포함되며 다시 말해 핵융합이 이루어져야 하는 것입니다. 가장 어려운 점은 태양의 조건이 지구와 완전히 다르기 때문에 태양계의 중심에 있는 별에 나타나는 극단적인 조건을 재현하는 일입니다.

### 핵융합의 원리

섭씨 약 6,000도의 표면 온도가 태양에서 도달하는 핵융합의 원리를 취하고, 에너지를 생성하기 위해 지구에서 이를 사용하려면 태양의 반응을 재현해야 합니다. 태양이 진공으로 둘러싸여 있기 때문에 재현 과정에서 진공 기술이 중요한 역할을 합니다.

핵 융합로로 알려진 대규모 실험 구조물은 지구에서 태양 조건을 재현하는 데 사용됩니다.

핵 융합로는 원자핵이 열핵 반응에서 제어된 방식으로 서로 융합되는 기술 플랜트입니다. 핵융합 과정의 목표는 원자핵이 서로 융합될 때 막대한 양의 에너지가 방출되기 때문에 전기를 생산하는 것입니다.

현재 널리 사용되는 두 유형의 원자로, 즉 토카막 및 스텔라레이터 원자로가 있습니다. 두 유형의 원자로는 모두 기본적으로 동일한 원리로 작동합니다. 차이점이 있다면 자기장을 생성하는 코

일의 모양과 배열이 다릅니다. 두 유형에는 모두 수소 또는 수소 동위 원소를 섭씨 1억 5,000만도까지 가열하는 과정이 포함됩니다. 다른 입자 또는 벽과 접촉하면 열이 빠져 나가기 때문에 이렇게 높은 열을 발생시키려면 플라즈마가 진공 상태에서 자유롭게 부동해야 합니다. 따라서 초전도 전자석의 도움으로 강도가 최대 10테슬라에 이르는 자기장이 생성되는 경우가 많습니다. 그런 다음 플라즈마는 전기 가열 또는 전자기파에 의해 가열되면서 최상의 경우에서 핵융합을 일으킵니다.

### 진공은 핵 융합로에서 어떤 일을 합니까?

융합로를 작동시키는 데 중요한 요구 사항 중 하나는 강하고 신뢰할 수 있으며 출력이 높은 진공 시스템입니다.

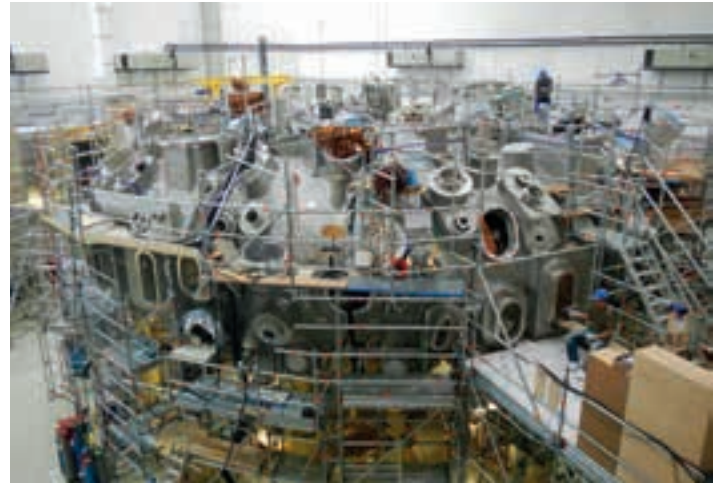
- 벽에서 자유 부동 플라즈마의 분리: 최대 1억 5,000만도의 고온 플라즈마와 챔버 벽 사이의 열 전달을 방지하는 것이 필수적입니다. 그러지 않을 경우 플라즈마가 즉시 냉각되면서 융합 반응이 중단됩니다.

- 헬륨과 불순물 제거: 벽 재료의 폐기물 헬륨과 핵은 공정에서 오염 물질로 작용하므로 자기 편향을 통해 플라즈마에서 이를 제거해야 합니다. 일단 플라즈마에서 제거되면 헬륨과 핵이 냉각되고 진공 펌프에 의해 제거됩니다.
- 저온 유지 장치의 단열: 많은 융합 실험에서 자기장을 생성하는데 초전도 코일을 사용합니다. 이 코일은 액체 헬륨으로 냉각됩니다. 이 경우 필요한 절연 진공을 생성하려면 진공 펌프가 필요합니다.

#### 진공 시스템의 요구 사항

낮은 최종 압력(플라즈마 용기의 경우  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa 미만, 저온 유지 장치의 경우  $1 \cdot 10^{-5}$  hPa 미만)

- 공정 기체가 유입되기 전에 용합로의 용기는  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa 미만의 기본 압력으로 배기되어야 합니다. 공정기체는 수소, 중수소 또는 삼중 수소입니다. 크라이오 펌프도 사용하도록 계획되어 있지만 작동 중에 발생하는 기체 부하는 종종 터보 펌프로 펌핑됩니다. 일반적인 원리로서, 사용되는 모든 펌프 기술은 가벼운 공정 기체에 대해 펌프 속도가 높아야 합니다.
- 다양한 센서가 총 진공 압력을 측정하는 데 사용됩니다. 열 전도성 진공 측정기(피라니) 외에 냉음극 게이지도 널리 사용됩니다. 냉음극 게이지는 용기의 고진공과 초고진공을 감지하는 데 사용됩니다.
- 많은 경우, 분석을 위해 고분해능의 4중극자 질량 분석기를 용합로에 설치합니다. 이 분석기는 헬륨과 중수소의 비율을 감지하는 데 사용됩니다.



2014년 3월 기본 설치 단계 완료 직전의 Wendelstein 7-X(사진: IPP, Beate Kemnitz)

## 전문가 팁

작동 중 터보 펌프는 외부 자기장에 매우 민감합니다. 이는 자기장에서 발생하는 와상 전류 때문입니다. 이로 인해 알루미늄 로터가 급격히 가열되는데 최악의 경우 로터가 파손될 수 있습니다. 이러한 현상은 특히 로터 축에 수평으로 흐르는 자기장이 원인입니다. 이러한 현상에도 불구하고 터보 펌프가 자기장 내에서 작동할 수 있도록 파이퍼 베콤은 다음 터보 펌프에서 자기 차폐 기능을 제공합니다.

- HiPace 80
- HiPace 300
- HiPace 700

HiPace 300 H와 HiPace 700 H는 가벼운 기체에 매우 높은 압축률을 제공합니다. 따라서 이 펌프들은 특히 융합 실험에 사용하기에 적합합니다. 자기 차폐의 재료 및 벽 두께는 개별적으로 결정됩니다. 또한 이 매개변수들은 터보 펌프가 노출되어도 괜찮은 자기장의 강도를 결정합니다.

## 삼중 수소와의 호환성

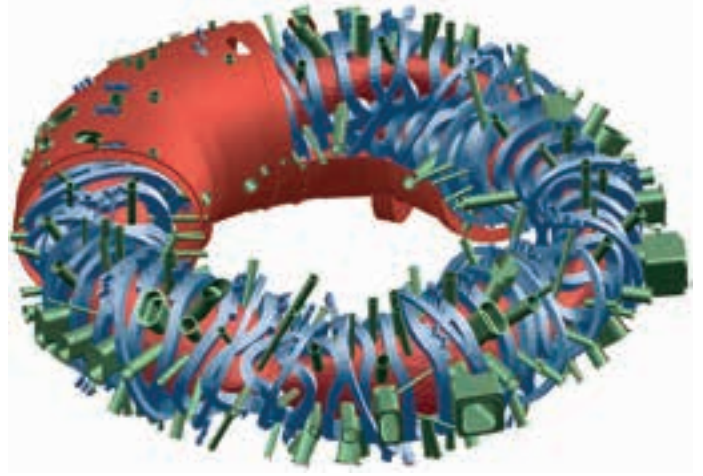
- 일부 용합 실험에서는 수소 외에 삼중 수소가 사용됩니다. 삼중 수소의 응용 분야는 저농도, 중간 농도 및 고농도에 따라 분류되지만 진공 구성품의 재료는 일반적으로 명확하게 지정됩니다. 예를 들어 엘라스토머는 사용할 수 없습니다. 배압 펌프의 경우 기밀성 문제 때문에 회주철 하우징을 사용할 수 없습니다.
- 삼중 수소의 경우 다음과 같이 진공 구성품의 견고성에 대한 요구 사항이 특히 높습니다.  $Q < 1 \cdot 10^{-10} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ . 그러나 수소가 사용되는 플랜트에서도 펌프와 측정 장치를 점검해야 할 뿐만 아니라 모든 플랜지와 연결 요소가 설치된 용기 전체에 대한 누출 여부를 점검해야 합니다.

## 방사능 환경에서 사용하기에 적합함

사용된 모든 진공 구성품에도 전자 장치는 실제 펌프 또는 측정 장치와 떨어진 곳에 설치해야 한다는 일반적인 원칙이 적용됩니다. 왜냐하면 최신 디지털 전자 장치는 방사능에 의해 손상되기 때문입니다. 사용 가능한 유일한 옵션은 긴 케이블을 사용하여 제어 장치와 액추에이터(펌프, 측정 장치 등)를 멀리 떨어지게 하는 것입니다. 무할로겐 재료로 만든 케이블 연결은 길이가 최대 100 m 이상으로 지정되는 경우가 많습니다.

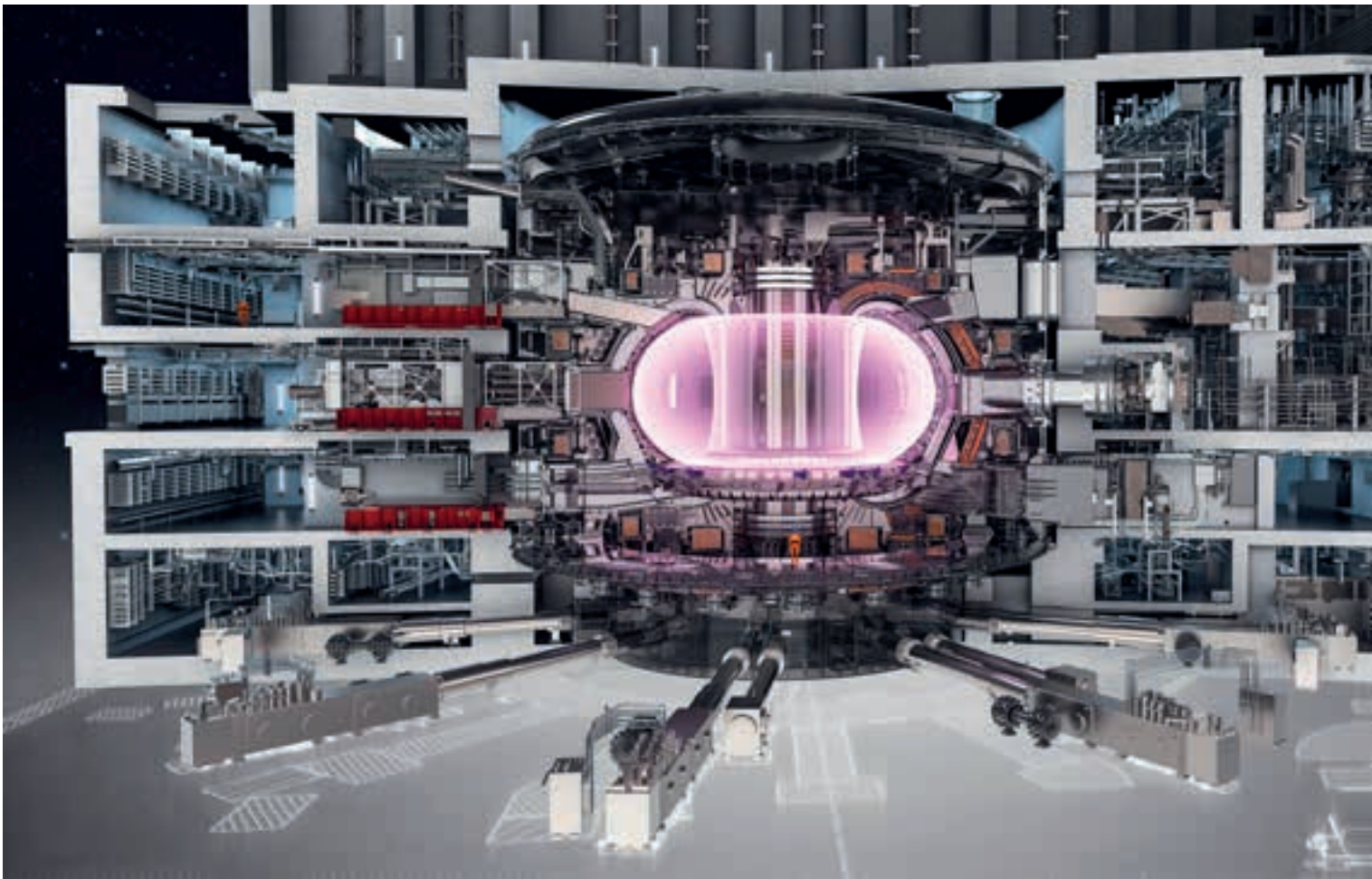
## 자기장 강도가 높은 영역에서의 작동

- 용합로를 작동 시키는 데 필요한 높은 자기장 강도(몇 테슬라)는 여전히 진공 구성품의 설치 위치에서  $H > 100 \text{ mT}$  수준에 도달할 수 있습니다. 따라서 모든 구성품은 자기를 차폐해야 합니다. 터보 펌프의 경우 와류의 결과로 로터가 가열되는 것을 방지하기 위해 차폐가 특히 중요합니다.



컴퓨터 그래픽: Wendelstein 7-X 용합로의 저온 유지 장치, 자기 코일 및 플라즈마 용기(사진: IPP)

- 진공 용기를 제조하는 데 사용되는 재료에는 이와 반대되는 특성이 적용됩니다. 여기서는 가능한 가장 높은 투자율이 필요합니다. 이는 외부에서 유도되는 자기장이 편향되어서는 안 되고 와상 전류에 의해 재료가 가열되어서는 안 된다는 것을 의미합니다.



## 참조

수년 동안 파이프 베콤은 융합 실험에 있어 전 세계적으로 체계가 잡힌 역량 있는 파트너로 활동해왔습니다. 파이프 베콤의 경우, 사용자와 긴밀히 협력하면서 솔루션을 개발하는 것이 특히 중요합니다. 프로세스에서 가장 중요한 부분은 가능한 한 각 응용 분야에 가장 적합한 제품 조합 또는 솔루션을 결정하는 일입니다. 다음에 고객 참조 프로젝트가 요약되어 있습니다.

### Wendelstein 7-X(스텔라레이터)

- 47 x HiPace 2300 C 터보 펌프
- HiCube Eco 펌핑 스테이션
- ModulLine 진공 측정기(원격 전자 장치 포함)
- ASM 310 리크 감지기
- HPA 220 질량 분석기

### ITER(토카막)

- 삼중 수소 호환 루츠 펌프, 특허를 취득하여 파이프 베콤에서만 독점적으로 사용 가능
- 이동식 잔류 기체 분석 시스템
- 이동식 리크 감지기



수소 압축률이 가장 높은 삼중 수소 호환 루츠 펌프 Okta 1500 GM



응용 분야가 매우 광범위한 특수 리크 감지기. 넓은 압력 범위에서 H<sub>2</sub>부터 제논에 이르기까지 모든 기체를 감지할 수 있습니다.



## 파이퍼 베큘 제품 및 장점에 대한 개요

### HiPace 터보 펌프

- 높은 펌프 속도
- 가벼운 기체에 대한 높은 압축률
- 높은 외부 자기장에 대한 다양한 버전
- 펌프로부터 최대 100 m 떨어진 외부 드라이브 전자 장치
- 현장 정비 가능



### ACP 다단계 루츠 펌프

- 외부 드라이브 전자 장치
- 마찰 없는 작동으로 인해 마모 없음
- 탄화수소의 역류 없음
- 매우 청정한 진공 생성
- 비접촉식 펌프 모듈
- 무입자 진공
- 무불소 버전 제공

### 루츠 펌프

- 스테인레스강 소재, 특허를 취득함
- 삼중 수소 호환 가능
- 펌프 속도: 250 ~ 25,000 m<sup>3</sup>/h
- 마그네틱 커플링 - 우수한 실링과 긴 사용 수명
- 가벼운 기체에 대한 높은 압축률



### 챔버 및 구성품

- 대형 치수
- 고객 맞춤형 가능
- 범용 구성품

### 진공 측정기

- 최대 70 mT까지 자기 차폐(모듈라인)
- 최대 케이블 길이 500 m
- Profibus 연결



### 질량 분석기

- 잔류 기체 분석 및 리크 테스트
- 고해상도의 헬륨 및 중수소용 질량 분석기
- 다양한 응용 분야용 버전

### 리크 감지기

- 최대  $1 \cdot 10^{-13}$  Pa m<sup>3</sup>/s까지의 매우 낮은 감지율
- 쉬운 조작법
- 최대 40 m<sup>3</sup>/h까지의 건식 배압 펌프 사용 가능



## 원스톱으로 제공되는 진공 솔루션

파이버 베큘은 전세계에 걸쳐 혁신적인 고객 맞춤형 진공 솔루션,  
기술적인 완벽성, 역량 있는 조언, 신뢰성 있는 서비스를 제공합니다.

## 완전한 제품군

간단한 구성품에서 복잡한 구성품까지:  
당사는 종합적인 제품 포트폴리오를 제공하는 유일한 진공 기술 공급업체입니다.

## 이론과 실재를 바탕으로 갖춰진 뛰어난 역량

당사의 노하우와 교육 기회의 포트폴리오에서 얻을 수 있는 이점!  
당사는 전세계에 걸쳐 플랜트 레이아웃을 지원하고 최고의 현장 서비스를 제공합니다.

완벽한 진공 솔루션을 찾고 계  
십니까 당사로 문의하십시오.

파이버베큘 GmbH  
본사 · 독일  
전화: +49 6441 802-0

[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)

**PFEIFFER**  **VACUUM**