

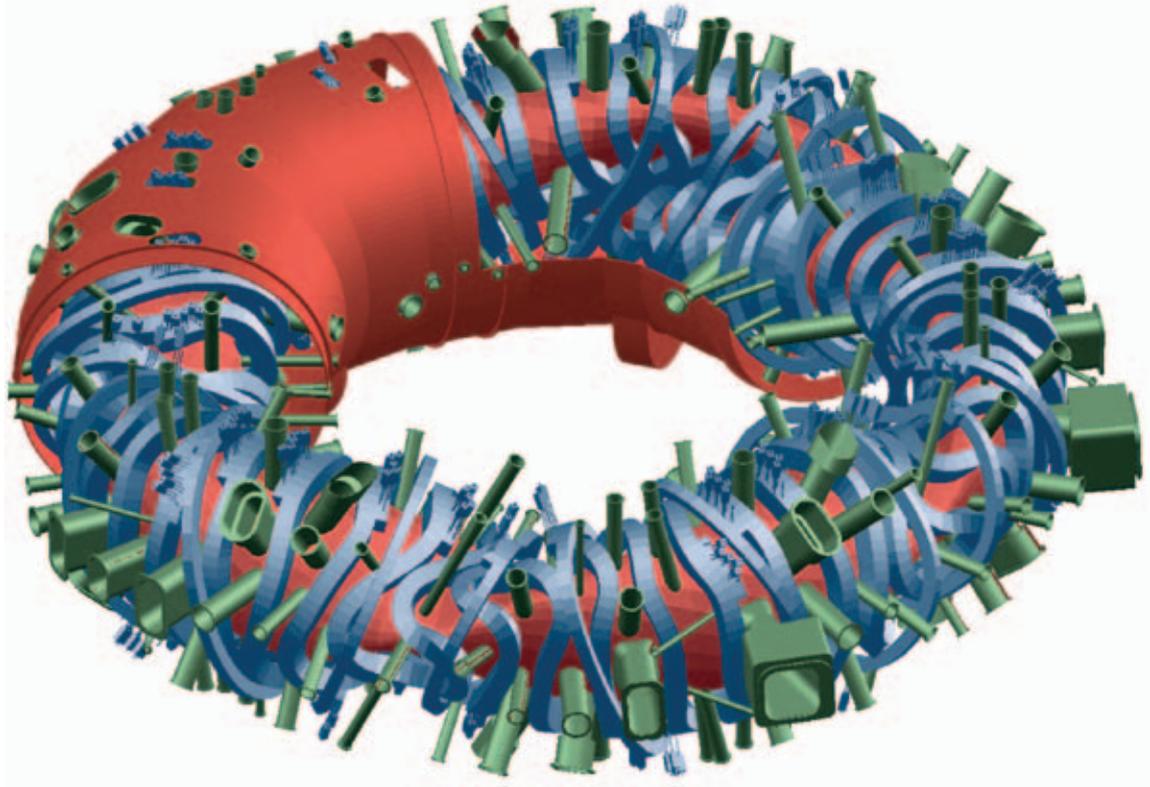
## 如太阳那样产生能量

### 真空为聚变提供必要条件

利用核聚变产生能量在寻求清洁替代能源来源中越来越重要。早在上世纪 50 年代，世界各地的科学家就一直试图将核聚变用于和平用途。毕竟这一过程在太阳中完美地进行着。然而，对于物理学家和工程师来说，模仿极端条件面临着一个很难破解的难题。主要问题是一次将两个氢同位素融合在一起，形成一个新的氦核。在这一过程中，不仅是形成氦和单个中子的问题，而且还会产生非常大的能量。释放的能量注定要用于产生电力：理论上，在发电厂里一克燃料可用于产生 90,000 千瓦小时的能量。这相当于 11 吨煤燃烧的热量。

聚变研究所带来的挑战是让原子核融合在一起。由于在地球上的发电厂中复制太阳自身条件是不可行，所以这就意味着聚变发生的高真空只能是 100,000,000 至 150,000,000 开尔文的高等离子体温度下且，而且粒子密度相对较低，为每立方米  $10^{20}$ 。加热过程之后，原子核与电子分开，形成等离子体。带电荷的原子核借助极强的磁场通过反应堆，远离反应堆壁。当两个原子核相互接近或碰撞时，它们会融合并释放大量的能量。能量的一部分转而确保等离子体保持在相同的温度下，并保持其状态而无需任何额外的能量输入。当然，如果目标是产生用于发电的能量，正能量平衡是必需的。只有在发电厂里的核聚变过程中产生剩余能量，才能产生电力。

目前，采用托卡马克和仿星器原理工作的装置已经在聚变研究中证明了自己。两个反应堆均限制了环形磁场中的等离子体。托卡马克反应堆具有对称的设计，并通过强电流流经等离子体形成一部分限制磁场。另一方面，仿星器使用完全由外部线圈产生的磁场限制等离子体。这导致复杂的不对称反应堆形式。



计算机图形：Wendelstein 7-X 聚变反应堆的低温恒温器、磁线圈和等离子体容器（图片：IPP）

由于聚变技术研究的成本越来越高，分散的各国项目日益被整合成联合的国际项目。目前在欧洲大陆，正在建设中的两个国际参与的大型研究项目是法国卡达拉舍的 ITER 托卡马克项目和德国格赖夫斯瓦尔德的 Wendelstein 7-X 仿星器项目。ITER 项目的目标是产生能量，而 Wendelstein 7-X 聚变实验旨在实现约 30 分钟的稳定燃烧期，而并不注重产生能量。Wendelstein 7-X 是一个关键的实验：其目的是探索仿星器发电厂的可行性：它是目前世界上基于仿星器的最大聚变实验装置。

### 聚变反应堆对真空技术的要求

Wendelstein 7-X 主要由两个交错的环形真空容器组成。外部低温室包含用于超导线圈的隔离真空和冷却设备，而超导线圈是产生磁场所必需的。内腔室或等离子体容器用于在高真空环境中产生实际的等离子体。

### 技术参数：

	Wendelstein 7-X
大等离子体半径	5.5 米
小等离子体半径	0.53 米
磁场	3 特斯拉(tesla)
放电时间	长达 30 分钟，微波加热连续运行
等离子体加热	20 兆瓦
等离子体体积	30 立方米
等离子体数量	5 - 30 毫克
等离子体组成	氢、氘、氦
等离子体温度	60,000,000 开尔文(kelvin)

操作聚变反应堆的一个重要因素是要有结实、强大可靠的真空系统。因此，所有真空元件必须通过马克斯·普朗克等离子物理研究所 (IPP) 的资格审查程序，以确保其用于聚变实验的适合性。

高达 3 特斯拉的强磁场限制了 Wendelstein 7-X 内部等离子体容器中带电的等离子体粒子。等离子体容器周围的磁场如此强烈，以致有必要在距离等离子体容器 4 到 9 米处的特殊装置上安装真空设备。即使在这个距离内，磁场仍然达到 7 毫特斯拉的强度，有时甚至达到 20 毫特斯拉。这些磁场强度几乎是地球自然磁场强度的 1,000 倍。

为使等离子体容器中的压力达到  $10^{-8}$  百帕，不仅有必要抽空 100 立方米的容器容量，而且有必要抽空从约 1,300 平方米的内表面上释放的气体负荷。而且，所使用的真空泵必须能够达到抽空聚变过程所涉及的氢、氘和氦轻型气体所需的高压缩比。另一个要求是涡轮分子泵和用于涂覆等离子体容器表面的材料之间的良好兼容性。

### 普发真空创造的解决方案

由于其真空系统可以满足极高的运行和质量要求，普发真空成功成为该项目合格的合作伙伴。所需的真空设备是与 Wendelstein 7-X 核聚变实验专家一起精心挑选的，而且经过了使用要求和条件的验证：

### 信息框

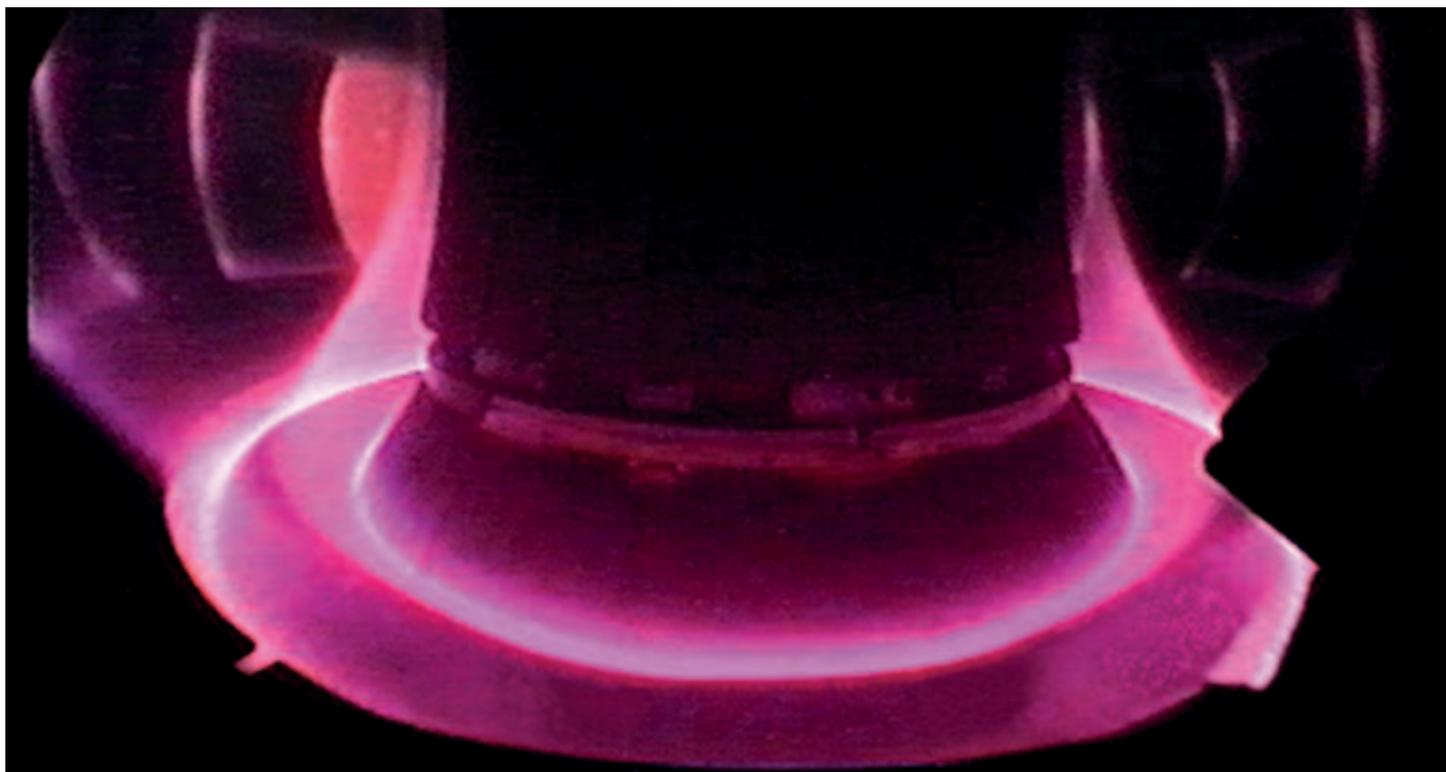
#### 等离子体

在物理学中，等离子体为气体状态，其中有自由电子和电离原子。该状态可在高温（热衰减）下获得，或者，也可通过强电场（如闪电、气体放电灯）获得。在高温（ $\approx 5,000$  开尔文）下，气体衰变，几乎完全形成等离子体。等离子体不是通过从一个阶段到另一个阶段的过渡产生的，如从水到冰，而是通过反应，导致中性原子衰变成离子和电子。在这一过程中，中性原子和带电离子之间实现平衡，这就是萨哈方程所描述的。

在更高的温度下，原子核可以完全剥离，这在核聚变中很重要。通常，等离子体像气体一样，具有作为最小粒子的电子和阳离子或原子核。该属性使得等离子体成为很好的电导体。

### 涡轮分子泵

两个真空室均使用普发真空 HiPace 涡轮分子泵，抽速为每秒 2,000 升，符合聚变实验特别严格的要求。单是在等离子体容器



聚变反应堆中等离子体放电的照片。（图片：IPP）

上，所有安装的涡轮分子泵提供的总抽速约为每秒 40,000 升。

由于实验周围存在的强磁场，快速旋转的涡轮分子泵转子上感应出很高的磁涡流，产生很高的热量并传递到泵上。HiPace 涡轮分子泵的特殊轴承原理和内部结构确保可以转移大量的热，而且一系列测试证明，这种泵在外部磁场中具有很高的热运行可靠性。普发真空的涡轮分子泵具有良好的磁场兼容性，这种优势使它们可以安装在等离子体容器附近。因此，由于所需的较短管道，在等离子体容器中可实现较高的有效抽速。

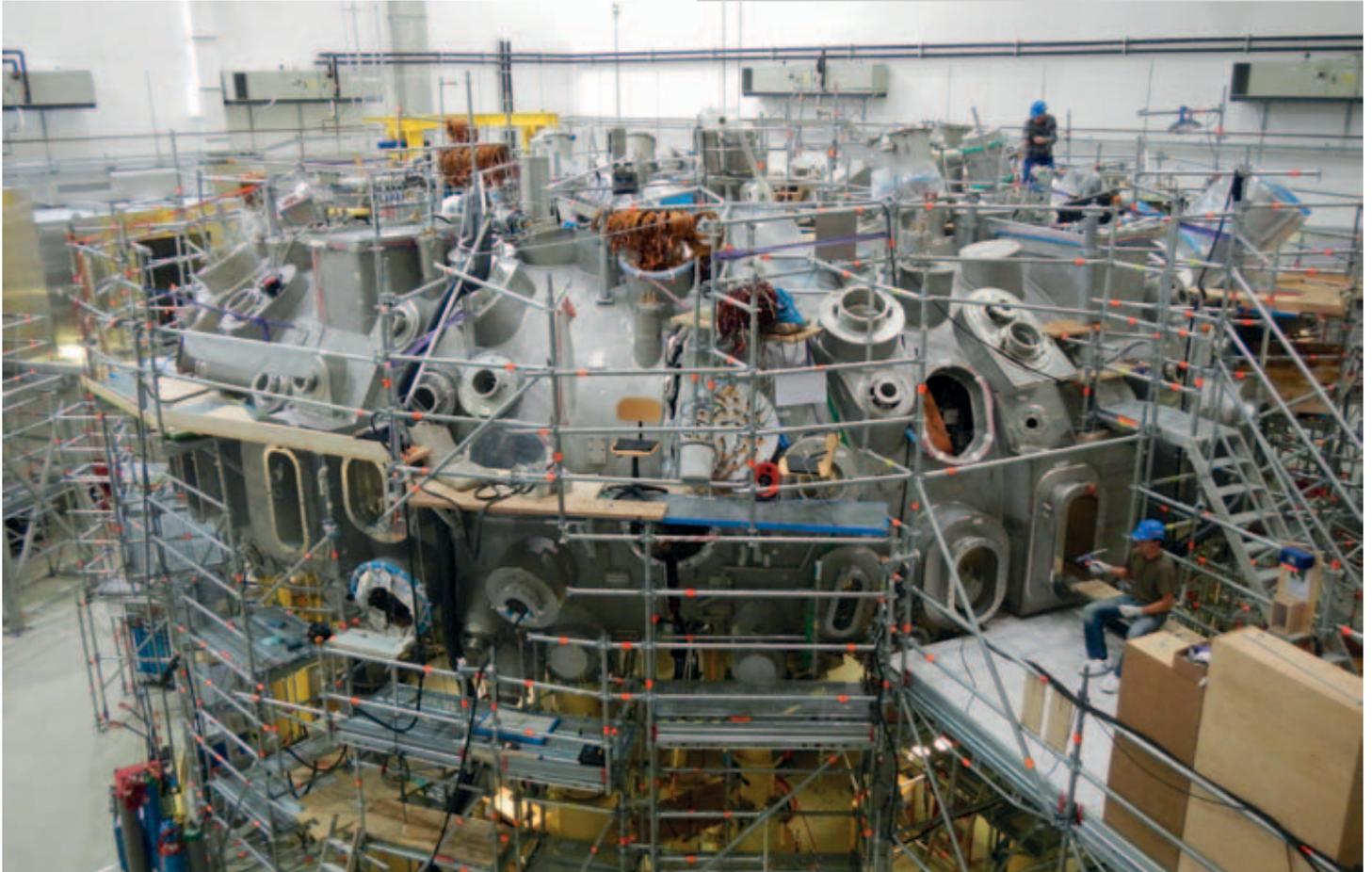
复合轴承涡轮分子泵专为最大限度提高机械运行可靠性而设计，扭矩极低，因此成为另一个优势。锚定泵时所允许的扭矩比使用其他类型结构低 3 至 4 倍。

### 测量技术

为恶劣条件下使用而研制的普发真空真空计用于真空室。马克斯·普朗克研究所事先成功地对强磁场下使用的测量设备的兼容性进行了评估。冷阴极真空计十分结实，被设计作为法兰上的被动式传感器，无需任何电子元件。电子分析装置位于几米外的安全区域，并通过长电缆连接至被动式传感器。此外还对传感器进行了屏蔽，以使其即使在发生高杂散磁场下也能可靠地显示压力。



HiPace 2300 涡轮分子泵 ( 图片展示示例 )



Wendelstein 7-X，于 2014 年 3 月，完成主要安装阶段前不久。( 图片：IPP, Beate Kemnitz )

## 真空部件

产生真空需要数百个特殊的真空兼容连接元件和管道部件，而且必须根据马克斯·普朗克等离子物理研究所的严格规范制造这些部件。高精度制造、选择具有最佳磁导率和低钴含量的合适材料、使用诸如激光焊接等先进制造技术以及必要的质量认证是真空系统可靠运行必不可少的重要因素，因此也是整个聚变实验必不可少的重要因素。

普发真空在 DN 400 至 DN 250 公称通径范围内为安装涡轮分子泵提供特殊部件，而且还为管道系统、法兰以及用于目视监测等离子体的浸入式管道提供部件。总之，普发真空总共向格赖夫斯瓦尔德供应了重量超过 12 吨的不锈钢真空部件用于进行聚变实验。

## 氦检漏

真空系统于 2014 年中期安装，目前正处于调试过程中。在各腔室被排空之前，必须逐一测试并确保 2,000 多个焊缝和其他法兰连接的氦泄漏密封性。

由于有些焊缝难以接近，于是在格赖夫斯瓦尔德，人们决定使用普发真空的 ASM 310 便携式检漏仪。这个决定的决定性因素是因为，即使在最低的氦泄漏率下，也具有出色的追踪可靠性。由于 ASM 310 的轻型结构和紧凑型尺寸，便于携带到需要检查的接头处，因此非常适合这种类型的使用。



ModulLine IKR 070



特殊管道部件



氦质谱检漏仪 ASM 310

## 我们提供一站式真空解决方案

普发真空代表着为客户在世界范围内提供创新的、定制化的真空解决方案，完美的技术，全方位的支持和可靠的服务。

## 完整的产品线

从一个配件到复杂的真空系统：  
我们是唯一能提供完整的产品线和技术服务的供应商。

## 理论与实践的完美结合

得益于我们的专业技术和完善的培训体系！  
我们提供给您完整的生产技术提升方案和全球统一的一流的现场服务。

您是否正在寻找  
完美的真空解决方案？  
请联系我们：

普发真空技术（上海）有限公司  
Pfeiffer Vacuum  
(Shanghai) Co., Ltd.  
T +86 (21) 3393 3940  
info@pfeiffer-vacuum.cn

Pfeiffer Vacuum GmbH  
德国总部  
T +49 6441 802-0  
info@pfeiffer-vacuum.de

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

All data subject to change without prior notice. P039-1PZH (July 2015/1)



**PFEIFFER**  **VACUUM**