



# 第一章 引言



# 主要内容

- 1.1 能源与环境
- 1.2 聚变能的作用
- 1.3 聚变与国家安全

# 主要内容

- 1.1 能源与环境
- 1.2 聚变能的作用
- 1.3 聚变与国家安全

# 1.1 能源与环境

- 能源的供需如何？环境？
- 能源供应遇到的主要问题是什么？
- 解决能源的主要方案是什么？
- 核能利用的限制条件和困难在哪里？有解决办法吗？



# 1.1 能源与环境

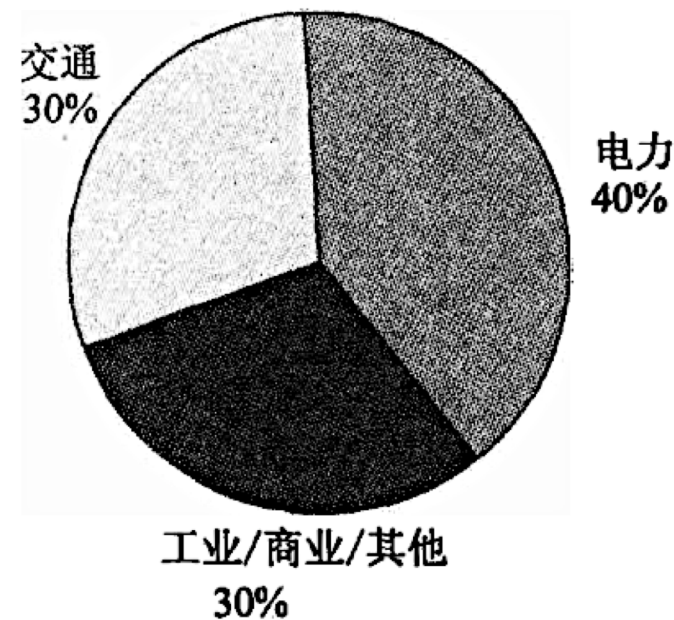
- 众所周知，多年来，生活质量标准直接与能量消耗成正比。能源在食品生产、家庭取暖与照明、工业设备运行、提供公共与私人交通以及通信保障等方面必不可少。一般来讲，高质量的生活需要由价格合理的充足的能量消耗来保证。
- 尽管人们已经认识到这些，但现今世界大部分地区的能源状况却不容乐观，并且情况不是在好转而是变得越来越糟。简单地说，就是对新的产能持续增长的需求超过了现有资源配置条件下具有经济可行性和环境友好型方法所能取得的供给。这些需求中，有些来自如北美、西欧和日本等世界工业化区域对能源使用的持续增长，还有很大一部分则来自于正处于快速工业化过程中的国家，如中国和印度。几乎所有关于未来能量消耗的预测都指出，到2100年，世界能源需求量将至少是目前能源消耗量的两倍。
- 加剧能源供给矛盾的一个重要问题是环境的恶化。特别是有越来越多的证据表明，温室气体排放已开始对环境产生明显的副作用。如果不存在温室气体排放的问题，那么通过增加煤的使用就可以大大缓解能源供给短缺的问题。地球上煤的储量十分充足，然而，如果要减少未来温室气体的排放，那么对主要化石燃料（煤、天然气、石油）的产能就需要设定一个限制。测算表明，现已探明的天然气和石油储量将在未来几十年内消耗殆尽，这将使问题变得更加复杂，而温室气体对环境的影响是我们必须正视的一个问题。因此在下面的讨论中，我们将把能源生产过程中减少温室气体的排放作为一个重要的考虑因素。

# 1.1 能源与环境

- 目标是要增加能源供给同时减少排放。
- 未来能源供给也不必存在单一解决方案，新能源供给途径必须进行评估。
- 几种主要能源供给方式，从初级自然资源来分：化石燃料、核燃料和太阳能，既直接利用，也可以转换成电力间接使用，任何方式都存在优缺点。其中太阳能是大多数可再生能源的来源。直接用途包括家庭、商业建筑和工业设施等加热取暖、交通燃料等；电力则用于制造业和建设，以及家庭、商业和工业照明与制冷等。
- 聚变能和现有能源供给方式进行对比：
  - 聚变能的发展潜力十分突出，安全性、燃料储量以及最小的环境破坏性等占优。
  - 不利：存在的复杂的科学和工程难题，必须能够提供不间断的可靠的大规模电力，才能成为世界能源供给的主力军。目前进入到寻找解决这些难题的方案阶段。

# 1.1 能源与环境

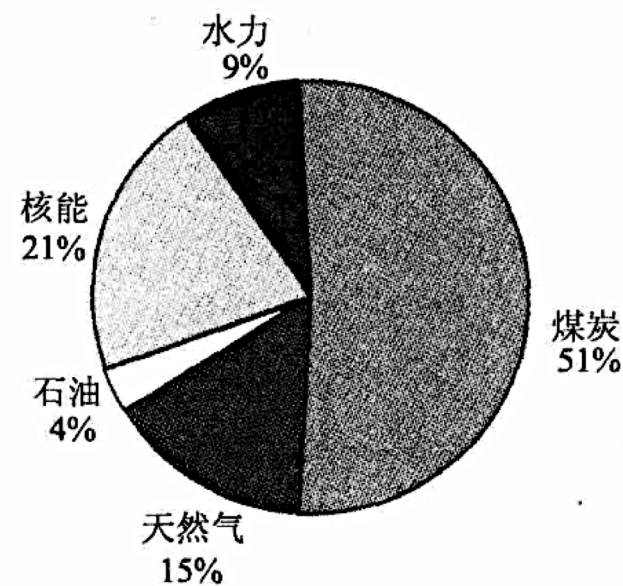
- 所有形式的能源都有一个共同的问题需要考虑，就是利用率。它直接影响到能源的储备和/或成本。人们希望得到明显高的利用率，实际上这已经影响到资源的保护方法。
- 应最大可能地对资源进行保护，以应对能源问题。
- 对当前能源的最终消费状况的简单综述，在2001年，像美国这样的工业发达国家，其能源的直接利用占到60%，其余40%用来发电，如右图所示。



2001年美国的能源分配 (Annual Energy Review, 2001 Energy Information Administration, US Department of Energy) <sup>7</sup>

# 1.1 能源与环境

- 考察电力的主要来源领域，就可以看出，聚变能是可以有所作为的主要领域。
- 美国在2001年用来发电的能源相对消耗的详细分类。化石燃料发电占了较大部分，提供了大约70%的电力，其中煤的贡献占51%。核能、天然气和水力发电也占有很大比例，而风能、太阳能和其他可再生能源发电所占比例很小（仅0.4%）。



2001年美国用于发电的燃料消耗分类 (Annual Energy Review, 2001 Energy Information Administration, US Department of Energy)<sup>8</sup>

# 1.1 能源与环境

- 一些结论：
  - 第一，世界上大部分能源，包括电力，都是从化石燃料中得到的；
  - 第二，所有的化石燃料都会产生温室气体；
  - 第三，要减少未来温室气体的排放，同时应对能源需求的持续增长，就必须将核能、水电、可再生能源（如风能、太阳能、地热等）与环境保护结合并满足能源供给；
  - 第四，主要能源直接利用方式用电力替代，但会因较低能量利用率而使成本有所增加；
  - 第五，机动车燃料的需求将使交通问题变得突出。通过合成燃料、乙醇或者氢燃料的生产，电力将有助于改善目前的能源状况，这些燃料最终会取代汽油和柴油。
- 总之，运用经济的、环境友好的手段来增加电力供应，是应对世界能源问题的重要措施。聚变是能够完成这种使命的新的能源方式，但需要一个长期的解决过程。（可能要30~100年）。在这一期间，化石燃料仍然是世界电力生产的主要来源。

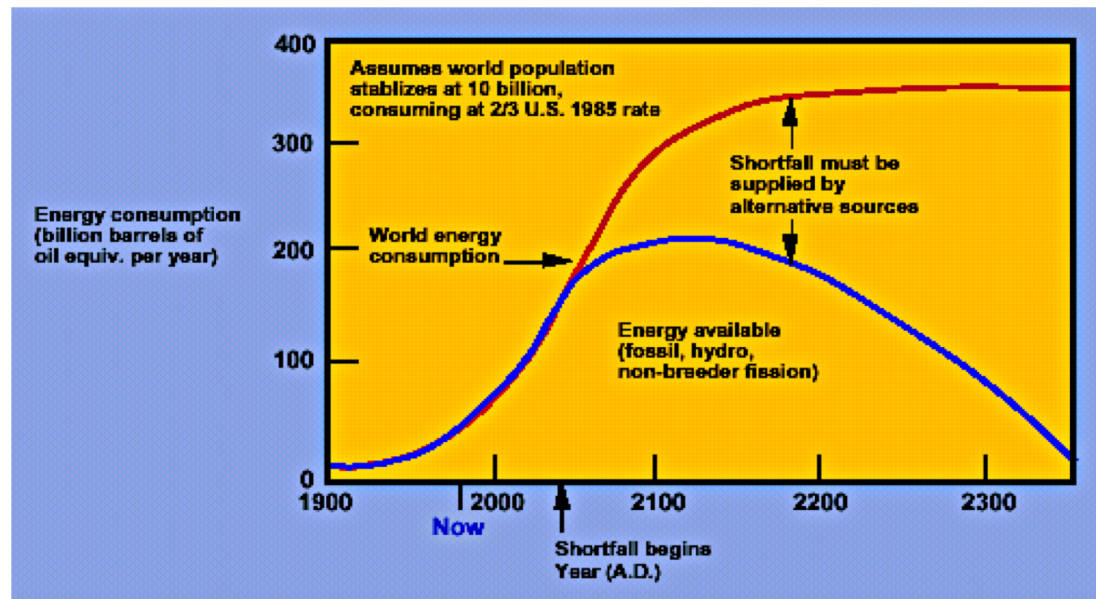


# 1.1 能源与环境

能源危机！

## 能源趋势预测：

- 化石能源时代已经走到了尽头；世界人口将在2150年左右达到100亿饱和点；
- 化石能源、水电、裂变堆在2050—2150年期间将出现拐点，届时只能提供2千亿桶石油，之后持续下降，在2400年左右枯竭；
- 能源资源缺口从2050年左右开始出现，之后逐年加大。必须寻找新的替代能源！！



# I.I 能源与环境

## 各种初级燃料的蕴藏量估计

能源	蕴藏量/ 夸德	总耗年限/ 年	单耗年限/ 年
煤炭	$10^5$	200	900
石油	$10^4$	20	60
天然气	$10^4$	20	100
$^{235}\text{U}$ (标准)	$10^4$	20	300
$^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ (增殖)	$10^7$	20 000	
聚变 (氘-氘)	$10^7$	20 000	
聚变 (氘-氚)	$10^{12}$	$2 \times 10^9$	

# 1.1 能源与环境

世界能源署 2020 年的年度报告能源储量预计

能源	储量/ ( $10^9 J$ )	可用时间 (目前的耗能水平) / 年
石油	$1.2 \times 10^{13}$	40
天然气	$1.4 \times 10^{13}$	50
煤	$1.0 \times 10^{14}$	300
铀 235 (裂变堆)	$1.0 \times 10^{13}$	30
铀 238、钍 232 (增殖堆)	$1.0 \times 10^{16}$	$3 \times 10^4$
锂 (用于 DT 聚变堆)	$1.0 \times 10^{19}$	$3 \times 10^7$



# 1.1 能源与环境

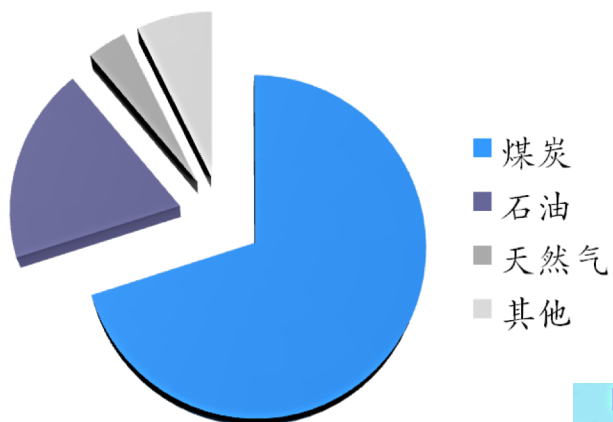
资源种类	探明储量	开采年限
煤炭	$1.0 \times 10^{14}$ GJ	300年
石油	$1.2 \times 10^{13}$ GJ	40年
天然气	$1.4 \times 10^{13}$ GJ	50年
铀235(裂变堆)	$\sim 10^{13}$ GJ	30年
铀238(增殖堆)	$\sim 10^{16}$ GJ	3万年
目前世界每年消耗的初级能量 $3 \times 10^{11}$ GJ ( $\text{GJ} = 10^9 \text{ J}$ )		

- 化石能源的开采年限已经非常有限了；而且其造成的环境问题也是有目共睹的；
- 核裂变能（乏燃料增殖堆可以维持上万年时间？）：公众对其安全性和放射性核废料的担心与日俱增，特别是日本福岛事件增加了这种担心。

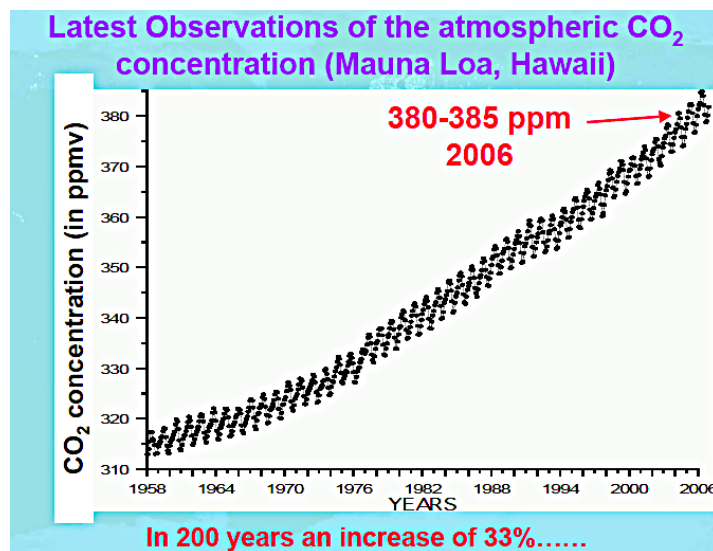
# 1.1 能源与环境

- 到 2040 年，人口将继续增长12 亿，全球总人口将从2019年的77 亿增加到2040 年的90亿，新兴经济体的能源需求快速增加。
- 世界能源需求预计增长50%，天然气需求增长29%，总石油需求也将不断增加，尽管运输用油近年来将达到顶峰，但同时石化产品还在持续不断的增长，这意味着未来将需要更多的石油。
- 在2020年，没用电的人数增长了2%左右，而且新冠大流行的影响正在逆转最近获得电力的进展。自2013年以来，在2020年，无法获得电力的人口首次增加，全球能源需求将在2023年初反弹至危机前的水平。许多国家和地区都在寻求更经济实惠的能源，用以提供负担得起的，可靠的发电方式，且产生比煤炭更低的排放量。

# 1.1 能源与环境



- 2015年5月,  
**400 ppm**
- 2019年5月,  
**415 ppm**



DAILY FUEL CONSUMPTION DAILY WASTE PRODUCTION 1,000 MEGAWATTS		
	COAL PLANT	D-T FUSION PLANT
FUEL	9,000 T. COAL	1.0 LB D <sub>2</sub> 3.0 LB Li <sup>6</sup> (1.5 LB T <sub>2</sub> )
WASTE	30,000 T. CO <sub>2</sub> 600 T. SO <sub>2</sub> 80 T. NO <sub>2</sub>	4.0 LB He <sup>4</sup>

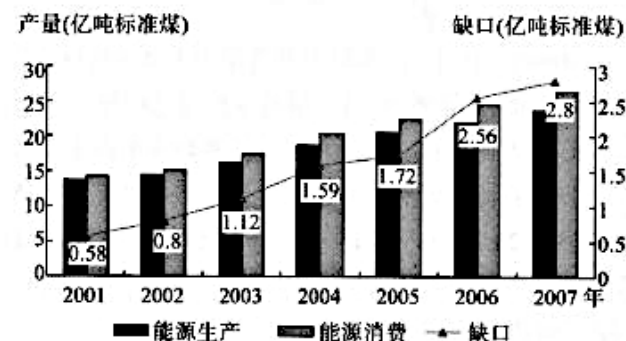


图1 2001~2007年中国一次能源生产和消费  
(数据来源:中国统计年鉴2007)

# 1.1 能源与环境

资源种类	煤炭	石油	天然气	水电装机容量
探明储量	1145 (亿吨)	33 (亿吨)	11704 (亿立方米)	3.53 (亿千瓦)
开采年限	54~81	15~20	28~58	38~104
可开采到	~2085	~2025	~2065	~2110

**中国的铀资源仅能支持4-5×100万kW核电站。**

- 风能、太阳能等新能源的研发减缓了这种短缺危机，但据测算，它们将无法弥补能源资源的缺口。这一趋势是无法逆转的，核聚变能研发变得极为迫切！
- 在未来50—100年内，必须找到替代能源！！！！

# 1.1 能源与环境

- 世界面临的能源方面的困难在未来可能会继续恶化。目前还没有明显的、一劳永逸的解决办法。现有的每一种能源选择都面临着一大堆困难，包括资源有限、 $\text{CO}_2$ 排放、有毒废气、废物处理、过多的土地占用以及高成本等。能源供应最终将走组合选择的道路，这种选择是通过理性而不是通过危机来进行的。这种组合选择现在新增了一种可能性，而且具有潜在的巨大影响，这就是聚变能，这是我们所要学习的课程。

# 主要内容

- 1.1 能源与环境
- 1.2 聚变能的作用
- 1.3 聚变与国家安全

# 1.2 聚变能的作用

## ■ 1. 聚变能

- 聚变能是一种核能形式。它的主要应用方式是通过大型基本负荷发电站进行电力供应。如果从单位质量结合能角度来看，聚变反应的基本核过程发生在质量谱上与比裂变相对的另一端。具体来说，就是裂变涉及像 $^{235}\text{U}$ 这样的重原子核的分裂，而聚变则涉及轻元素，主要是氢（H）及其同位素氘（D）和氚（T）等的融合（即聚合）。氢核聚变是太阳维持其存在的主要反应形式。
- 聚变能主要有三大优势：燃料蕴藏量、环境影响和安全性。我们首先考虑燃料蕴藏量问题。从电力产生上说，反应速率足够快的聚变反应主要有两种，它们都要用到纯净的氘，以及氘和氚的等量组合。天然的氘存在于海水中，平均每6700个氢原子就有1个是氘原子。氘的提取也很容易，成本非常低。如果海洋中所有的氘都用于聚变反应堆，并利用标准的蒸汽循环进行电力生产，那么按当今世界总的能源消耗速度计算，产生的动力将足够地球维持约20亿年！换句话说，由于聚变是一种核过程，因此，大约只需要一小卡车的含氘海水（ $\text{HDO}$ ，而不是 $\text{H}_2\text{O}$ ）就足以为波士顿市提供一年的电力。



## 1.2 聚变能的作用

- 氘氚（DT）反应生产的能量超过纯氘（DD）反应，而且DT反应还有一个主要优点是反应发生的速度更快，从而更容易建立这种类型的反应堆。因此，所有第一代核聚变反应堆都将采用DT反应的形式。从燃料储备方面说，用于DT反应堆以及DD反应堆的氘可以用上几十亿年，但氚则不然。氚是一种半衰期约为12年的放射性同位素，而且地球上没有天然的氚存在，但氚可以通过锂同位素 $^6\text{Li}$ 的反应来增殖获得。 $^6\text{Li}$ 是聚变堆包层的一个组成部分。这样，DT聚变的总体燃料储备由此转化为 $^6\text{Li}$ 的储备限制。地质估计表明，地球上可获得的廉价 $^6\text{Li}$ 可以用上2万年（假设世界能源总消费量按目前速度进行）。据推测，早在 $^6\text{Li}$ 耗尽之前，科学技术就已经发展到将聚变反应途径转换到DD反应堆上了。
- 聚变能的第二个优势是对环境的影响小。聚变反应不产生 $\text{CO}_2$ 或其他温室气体排放，也不会向大气排放任何其他有害化学物质。聚变反应的主要代谢物是无害的惰性气体氦气。聚变引起的最大的环境问题是，不论是DD反应还是DT反应，都会释放出高能中子。这些中子在聚变包层里被捕获，因此不会对公众构成威胁。然而，当它们经过包层的结构材料时，中子会造成材料结构改性，使材料变得也具有放射性。但即便如此，这种放射性结构材料的半衰期很短，因此，更换下来需要存储的时间也短，在100年量级。总的来说，从整体环境上考虑，聚变能是一种<sup>20</sup>比化石燃料、核能和其他可再生能源更具吸引力的选择。



## 1.2 聚变能的作用

- 聚变能的最后一个主要优势是安全性。由于聚变是一种核过程，因此，人们非常在意发生如三哩岛事故那样的放射性灾难的可能性。支配核聚变反应的物理学的基本规律可以保证这种事情不可能发生。具体来说，在裂变反应堆里，相当于电力生产几年的整个能量被即时地存储在反应堆的堆芯。正是这种巨大的能量使得裂变堆有可能崩溃。而聚变反应堆的工作并不取决于大量燃料的链式反应。相反，燃料必须源源不断地送入反应堆才能维持所需的消耗。最终的结果是，在任何时刻，聚变反应堆内的燃料质量都非常少，也许仅相当于几面邮票的重量。正是这种任何瞬间都极少的燃料质量使得聚变堆不可能发生崩溃。
- 上述讨论表明，从燃料蕴藏量、对环境的影响和安全性等角度来看，<sup>21</sup> 聚变能的潜在优势的确给人留下了深刻印象。

## 1.2 聚变能的作用

- 如人们所预料的那样，聚变也有些不足的地方必须考虑到。这些不足之处包括科学上、技术上的挑战，也有经济上的不利因素。关键性问题有如下几个方面：
- 首先，聚变科学相当复杂。具体来说，DT燃烧需要将燃料加热到 $150 \times 10^6$  K 这样的极端温度，比太阳中心温度还要高。在这样的温度下，燃料完全电离成了等离子体。由在这种高温下自由运动的电子和离子构成的集体主要受电磁力支配。一旦变热后就需要采取某种方法将等离子体约束在一起。人们能想到的主要办法就是通过巧妙的磁场位形来箍缩，这个概念对那些不熟悉等离子体物理科学的人来说是非常模糊的。但没有其他选择的余地。过于简单的磁场位形只能使等离子体迅速损失掉，这样，聚变反应在还没能产生足够多的能量之前就中断了。即使是采用精巧的磁场位形，对等离子体仍有压强上的限定，这样才能确保等离子体在磁场中被约束住，不会快速损失掉。

## 1.2 聚变能的作用

- 为了实现将密度足够高的等离子体在足够高的温度下约束足够长的时间，世界各国聚变研究计划已经对此进行了70年的研究。净功率输出的聚变反应堆之所以要这么久才能实现，首要原因是科学上遇到了意想不到的困难。
- 此外，还有工程上的挑战。许多人认为它们和科学挑战一样困难。首先，必须开发出能够承受聚变等离子体产生的中子和热负荷的先进的低活性材料；其次，必须开发出大型的、能够产生强磁场的大电流超导磁体，以便约束等离子体，聚变规模所需的超导磁体至今还未制造出来；第三，必须开发出能够将等离子体温度提高到极高水平的加热新技术，这涉及非常宽的技术领域，从大功率中性束到兆瓦级毫米波微波源，不一而足。显然，要使聚变成为现实，就需要有大量的研究和开发项目。

## 1.2 聚变能的作用

- 最后还有经济学上的不利因素。聚变反应堆本身就是一整套复杂的设施。它包括燃烧室、包层以及一系列复杂的超导磁体。此外，由于结构材料变得具有放射性，因此还需要有远程处理系统，以便进行安装、拆卸和定期维护。氚的使用加上结构材料活化意味着还必须要有辐射防护。这些基本的技术要求意味着一个聚变反应堆的建设成本将大于化石燃料电厂的建设成本，并且很可能高于裂变电站的建设成本。这些显然都会提高消费者的用电成本。但与此相平衡的是聚变能的燃料成本低，保护环境所需的成本也低，这两方面都可能会使消费者的用电成本降低。
- 显然，很难预料未来30~50年后聚变能成本与其他能源成本进行比较的结果。问题复杂的主要原因是，将燃料储备和环境治理成本综合起来考虑，其他能源选择的成本有可能大大增加，因此这种比较同时涉及多个变动的方面。未来聚变能的成本估计不会偏离其它能源选择太远，但由于不确定性很大，故应谨慎对待。这些估计的主要价值在于证明了继续进行聚变研究是有意义的。聚变不应因其内在非常高的用电成本而被忽略，也不会像人们过去所希望的那样“过于便宜”。

## 1.2 聚变能的作用

- 聚变发电的实现将是很多年以后的事。尽管如此，它还是值得的，因为它具有大量的燃料资源储备、较低的环境影响以及内在的安全性等基本优势。最重要的是，聚变能够产生大量的基础负荷电力，因此，有可能对能源消费产生重大影响。
- 聚变能的两个主要不利因素是在科学和技术问题上遇到了意想不到的困难。在解决科学问题方面，目前已取得重大进展；面对技术方面的挑战，目前研究人员正投入巨大的努力，但其结果仍不能确定。许多关键性问题还有待于通过新的实验，即所谓“国际热核聚变实验堆（ITER）”予以解决。这项由多国资助的项目已于2006年开始建设。
- 如果成功的话，聚变能在用电成本上应该具有与其他能源选择一较高下的竞争力，虽然作出这种预测存在很大程度上的不确定性，但预料中的成本仍具有足够的合理性，它不会对完成必要的电力来源的技术可行性评估研究构成威胁。



## 1.2 聚变能的作用

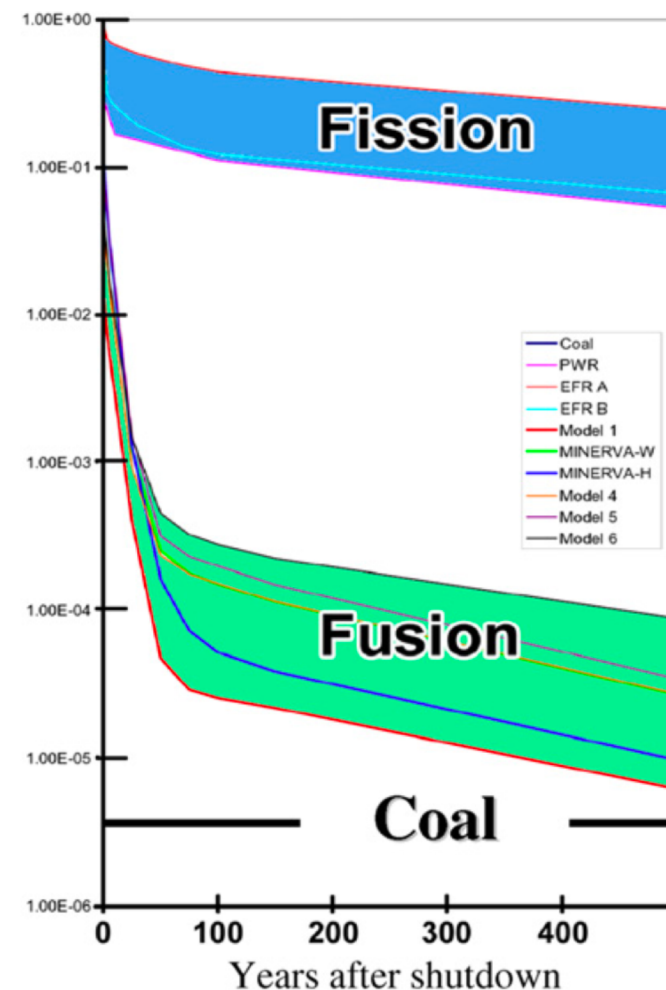
- 除燃料储备充分之外，核聚变作为能源生产反应还有很多其它的优点。对环境的影响方面，同化石能源比较，从理论上不排放任何尾气污染。和裂变能源比较，放射性污染要低几个量级，而且，聚变装置由于固有内在安全性，发生大规模泄露等危险事件的可能性极低（如切尔诺贝利、福岛），可以直接部署在人口稠密地区。 $10^9\text{W}$ 功率（典型燃煤电厂规模）的聚变能电站和燃煤电站一天所耗费的燃料和产生的废料比如下所示，从表中可以看出聚变能源的优越性，表中  ${}^6\text{Li}$  用于产生  $\text{T}_2$ 。

	煤	氘氚聚变电厂
燃料	9000 吨煤	0.5 千克 $\text{D}_2$ , 1.5 千克 ${}^6\text{Li}$ (0.7 千克 $\text{T}_2$ )
废料	3000 吨 $\text{CO}_2$ , 600 吨 $\text{SO}_2$ , 90 吨 $\text{NO}_2$	2 千克 ${}^4\text{He}$

煤和典型的氘氚聚变电厂一天所耗费燃料和产生废料的对比

## 1.2 聚变能的作用

- 对环境的影响的长期评估，如右图所示，聚变堆关闭后放射性远远低于核裂变堆。从以上对比可以看出核聚变是未来的理想能源，聚变事业对能源安全和生态环境建设均至关重要。
- 右图给出了裂变和聚变堆关闭后放射性逐年变化情况。不同的条带对应于不同的裂变材料循环和聚变结构材料的选择，最下面的黑线是煤的放射性



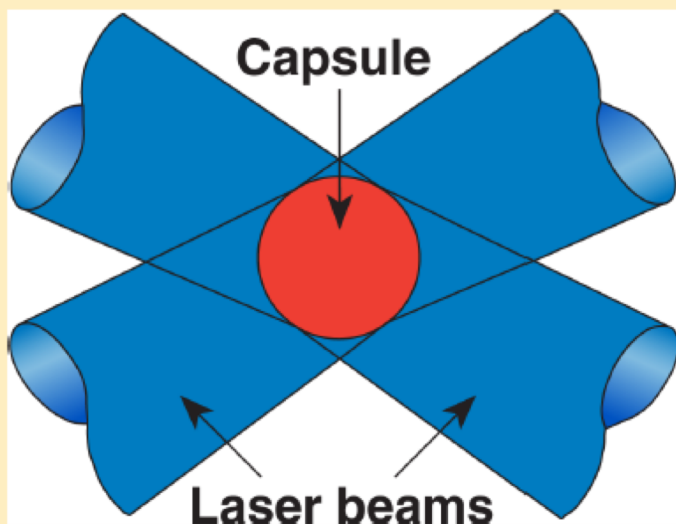
# 主要内容

- 1.1 能源与环境
- 1.2 聚变能的作用
- 1.3 聚变与国家安全

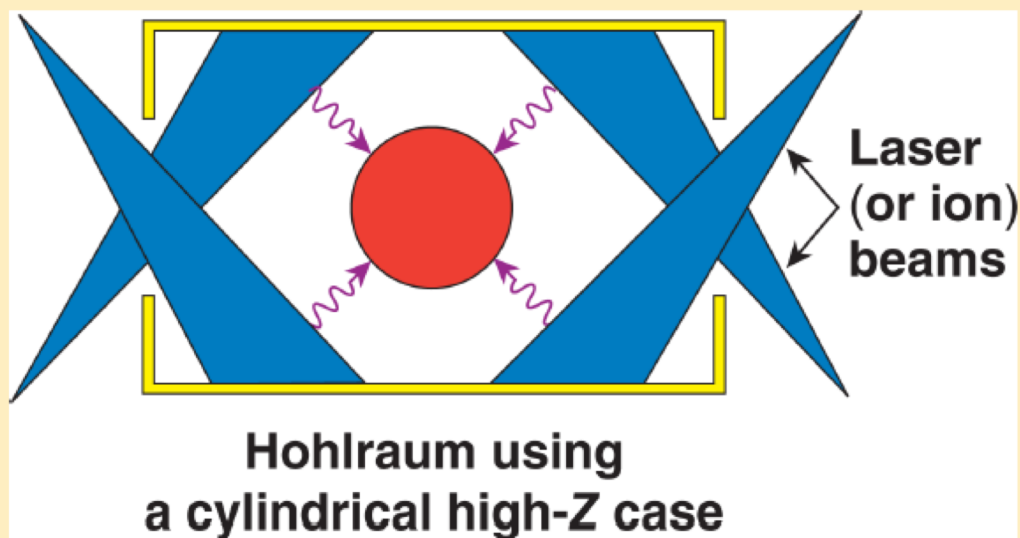


# 1.3 聚变与国家安全

直接驱动



间接驱动

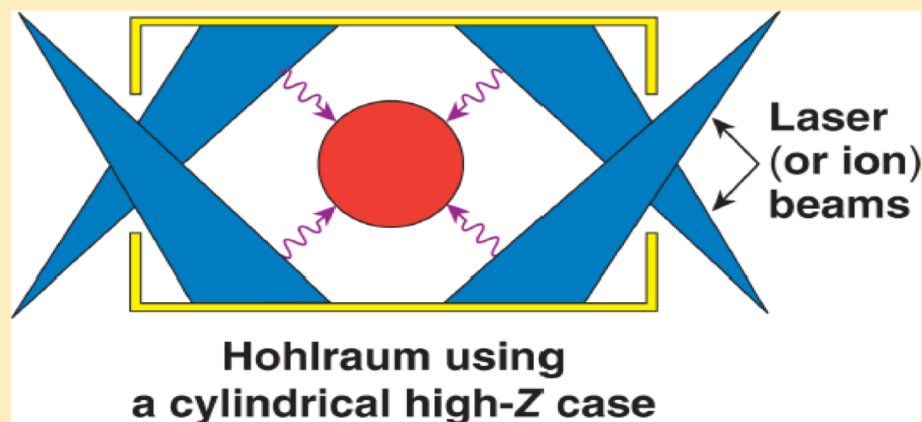


## 激光聚变

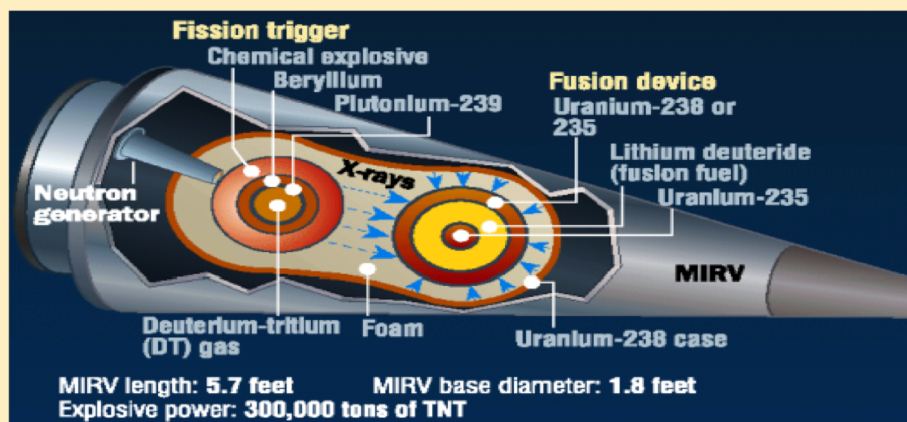
激光聚变有两种驱动方式，两种驱动方式各有千秋，但目前的研究以间接驱动为主：间接驱动与热核武器有密切联系。

# 1.3 聚变与国家安全

间接驱动



氢弹



间接驱动与热核武器之间的关系：性质相同，量上接近 (于敏先生语)

- 热核武器的初级使用 DT 燃料助爆<sup>a</sup>，以提高裂变燃料的燃烧效率：DT 燃料发生聚变类似中心点火；
- 热核武器的初级和次级之间通过辐射场耦合<sup>b</sup>，类似间接驱动；
- 热核武器的次级需要形成热核燃烧波才能大量释放能量，类似惯性约束聚变产生能量增益。

<sup>a</sup>助爆，英文 boost。DT 聚变产生的 14.1 MeV 的中子比裂变中子更容易引发裂变反应，可有效提高燃料的燃耗，减少燃料装量，是武器小型化的关键之一。有资料说，在美国设计的各型核弹头中，曾经有 15 种出现过严重问题，都与助爆型初级有关

<sup>b</sup>大约 80% 的裂变能转换为辐射能

# 1.3 聚变与国家安全

惯性约束聚变涉及众多研究领域：

- 高温等离子体物理；
- 高温稠密等离子体中的原子过程；
- 超高压物理；
- 非平衡统计物理；
- 三维非定常流体力学；
- 核燃烧及其传播；
- .....

上述内容构成了高能量密度物理的主要部分，发展成为独立的学科。



谢谢！