



清华大学

中国新能源发展与节能减排

清华大学深圳研究生院

康飞宇 教授

2011年1月8日

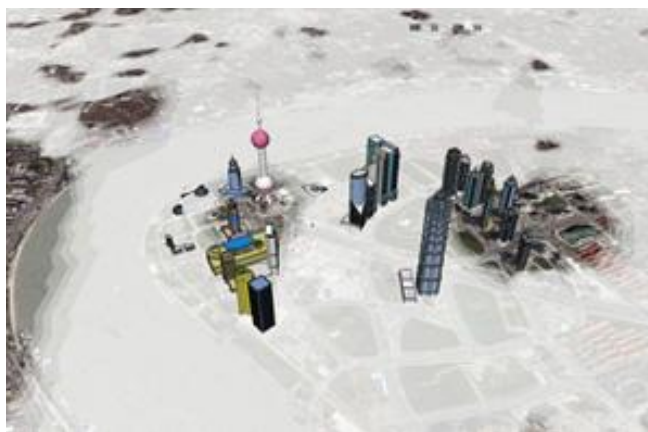
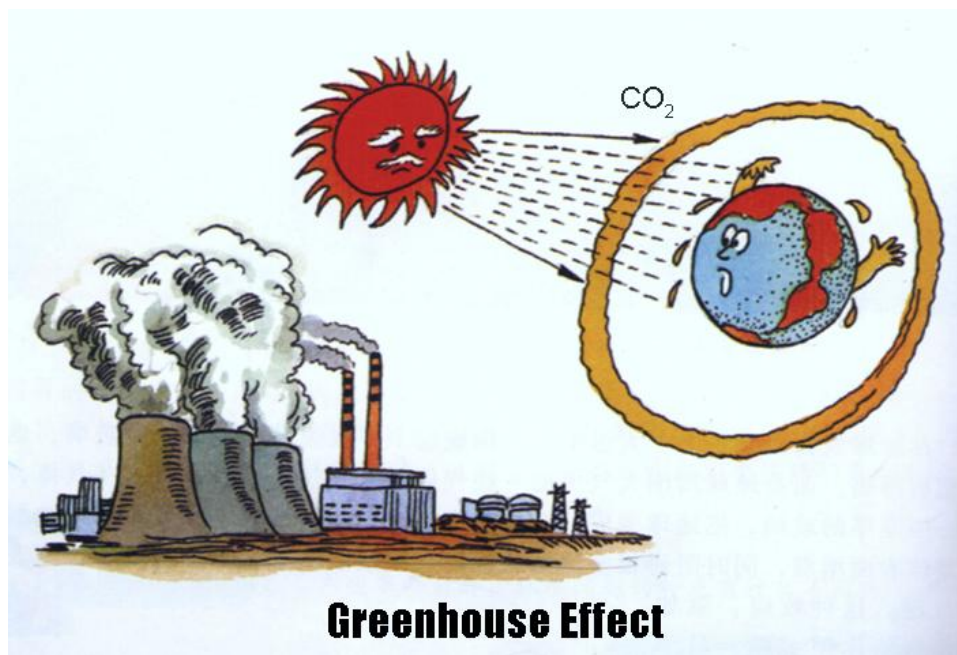
提纲

- 1.绪论
- 2.氢能与燃料电池
- 3.二次电池，超级电容器与电动车
- 4.太阳能利用
- 5.风能
- 6.核能
- 7.生物质能
- 8.总结

1. 绪论

- 京都议定书与清洁发展机制
- 中国能源问题
- 中国节能减排

温室气体排放导致全球气候变暖



IPCC2007年报告认为气候变暖归因于人类活动造成的温室气体排放。

《京都议定书》 Kyoto Protocol

- 《京都议定书》是1997年在日本京都举行的联合国有关会议上通过的一份国际协议，2005年生效。根据这份协议，从2008年到2012年期间，主要工业发达国家的温室气体排放量要在1990年的基础上平均减少5.2%。欧盟作为一个整体要将温室气体排放量削减8%，日本和加拿大各削减6%，美国削减7%。目前已有170多个国家批准了这份协议，但美国2001年退出了《京都议定书》。

温室气体GHG

- 温室气体是能将阳光带来的部分热量和地表释放的部分热量截留在地球大气中的气体。
- 《京都议定书》规定了六种主要的温室气体，它们分别是：二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、六氟化硫、氢氟碳化物和全氟化碳。

清洁发展机制

- 《京都议定书》中的“灵活机制（flexibility mechanism-FM）”：
 - 国际排放权交易（emissions trading-ET）
 - 联合履行（joint implementation-JI）
 - 清洁发展机制（clean development mechanism-CDM）
- CDM机制：发达国家提供**额外资金和先进技术设备**帮助发展中国家实现可持续发展；同时后者协助前者履行其定量化减排的义务。CDM机制是实现“双赢”的办法，涉及**6种**温室气体。

中国减排目标

- 2009年12月1日...在哥本哈根气候变化大会前夕，中国向世界做出了负责任的承诺：到2020年我国单位国民生产总值二氧化碳排放比2005年下降**40%~45%**。
- 2008年我国的GDP是3.0067万亿人民币，能耗是28.5亿吨标准煤，GDP能耗就是每万元人民币**9.47**吨标准煤；2005年的数字是每万元人民币**12.26**吨标准煤；2000年的数字是每万元人民币**13.96**吨标准煤；1990年的数字是每万元人民币**52.87**吨标准煤；1980年的数字每万元人民币**132.6**吨标准煤。

中国2005-2020年减排路线图

- 第一个是节能目标。从“十一五”规划算起，每一个五年规划期间单位GDP能耗减少**20%**，2005-2020年期间累计减少50%左右；
- 第二个是清洁能源目标。2005-2020可再生能源和核能比例从7.7%提高到**17.7%**；
- 第三个是清洁煤炭使用目标。2010-2020年清洁煤使用比例累计提高**15%**；
- 第四个是二氧化碳排放减缓排放目标。从“十二五”规划算起，每一个五年规划期间单位GDP二氧化碳排放量下降**20%**，在2010年-2020年期间累计下降**36%**，比2005年下降**40%-45%**；
- 第五个目标是主要污染物减排目标。从“十一五”规划算起，每一个五年规划期间主要污染物减少**10%**，2005-2020年期间累计减少**25%**以上；
- 第六个是提高森林碳汇能力目标。从2005-2020年森林覆盖率从**18.2%**提高到**22%**，森林蓄积量累计增加13亿-15亿立方米

中国2005-2020年减排路线图(续)

- 从长远来看，中国选择绿色现代化，分三步走：第一步就是实现上述目标，即使得我国在2020年前后二氧化碳排放达到峰值；第二步是在2020年之后二氧化碳排放开始下降，到2030年降至2005年的水平；第三步是到2050年使我国的二氧化碳排放降至1990年水平的一半，与世界减排同行。

中国能源发展的主要问题

1. 能源资源不足是中国能源发展面临的最大问题。
 2. 能源供应主要依赖于煤炭，环境污染问题严重。
 3. 能源利用效率比较低，能源资源浪费比较严重。
- 石油50%以上依赖进口；（2010年达55%）
 - GDP增速与能源增长同步；
 - 可再生能源所占比例小。（风能+太阳能1%，核能1%）

可再生能源

- 2005年4月30日，全国人大常委会通过；
- 2007年9月中国政府发布的《可再生能源中长期发展规划》。
- 发展目标：
 - 可再生能源利用总量翻两番：
 - 到2010年达到10%；
 - 到2020年达到16%左右。
 - （2008年已达到9%）

- 太阳能
- 风能
- 水电
- 核能
- 生物质能
- 氢能源
- 地热发电
- 潮汐发电
- ○ ○ ○ ○ ○ ○

水能资源和开发利用现状

Hydro Power

现状:

2004年总装机1亿千瓦, 占电力总装机24%
年发电量3280亿千瓦时, 占总发电量15%

发展目标:

2010年: 1.8亿千瓦

2020年: 3.0亿千瓦

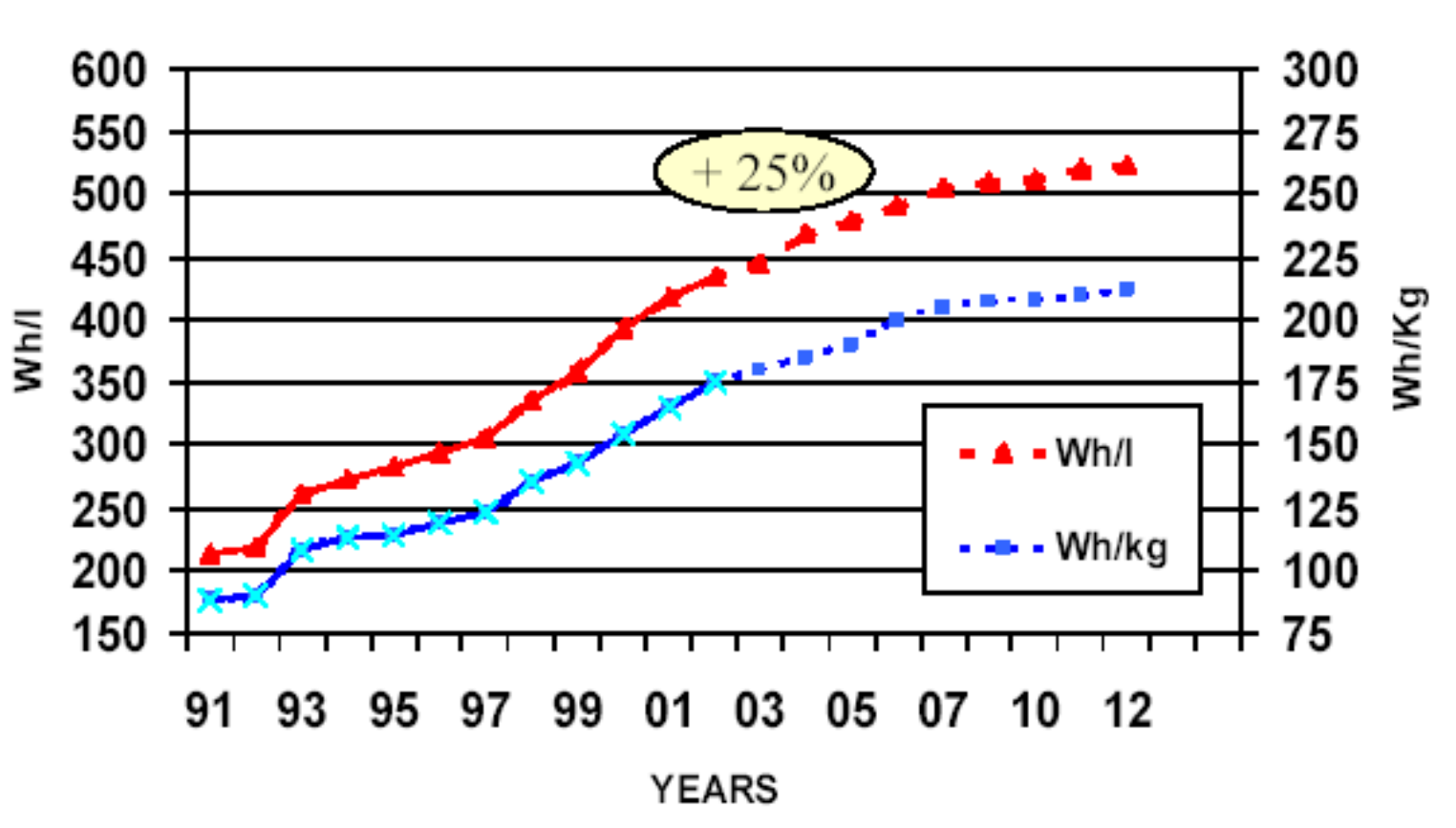


核能Nuclear Energy

- 现状(第二代压水堆):
 - 960万KW装机容量
 - 在建2000万KW
 - 即将开工600-700万KW
- 发展目标
 - 2020年核能装机容量4000万KW（占4%）调整为**7000万KW—1亿KW**（约占5%）
 - 以压水堆技术为主（AP1000+, 第三代）
 - 示范：高温气冷堆和快中子增殖堆

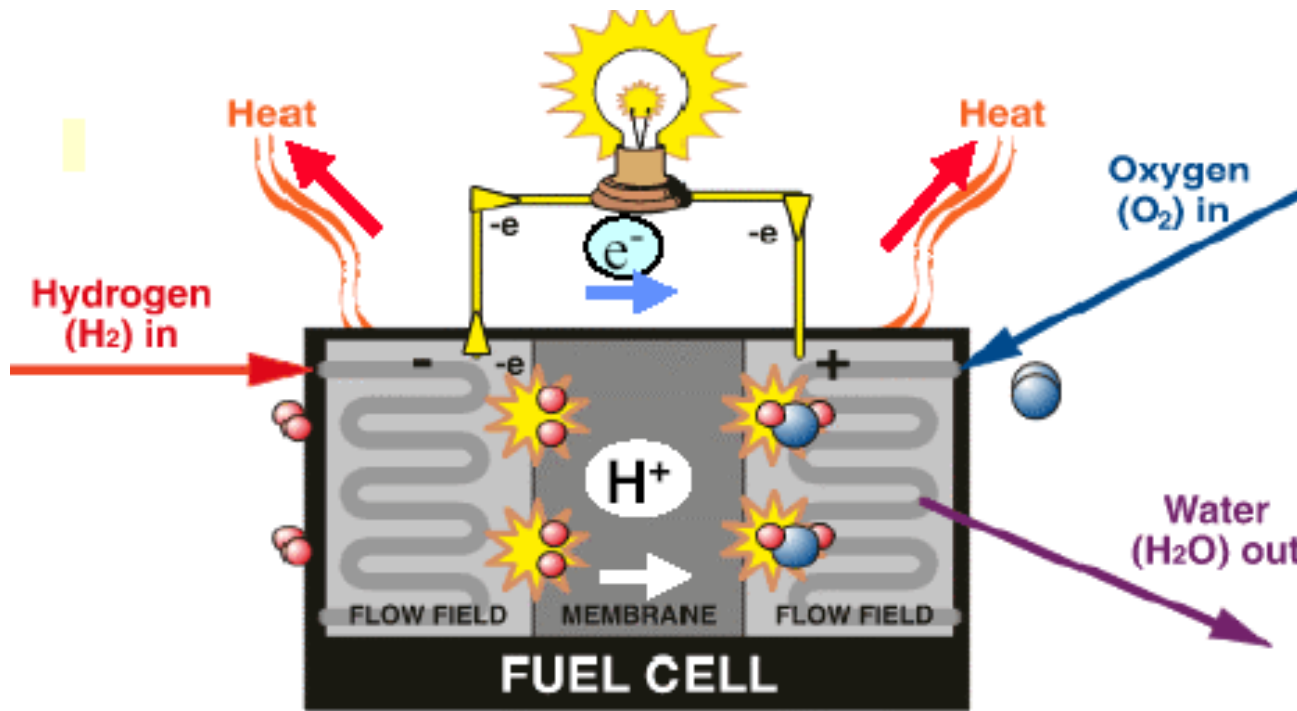


电池比能量能大于300Wh/Kg吗？



锂离子电池可望在这个10年中达到210Wh/Kg

燃料电池是下一个希望？



理论能量密度：
2.3KWh/Kg
安全性、储存
运输？

	g H ₂ / kg	g H ₂ / L	Total weight	Total volume	Wh/kg	Wh/ L
300 bars	30	12	92	243	316	120
700 bars	65	25	49	140	588	207
Met. Hydride	10	30	249	125	116	233
Primary Lithium (high power)			107	66	270	440

新型储能装置—电化学电容器

➤ 主要特点:

- 功率密度大
- 充放电快速

➤ 其它特性:

- 低温性能好 (-70°C)
- 使用寿命长 ($>10,0000$)
- 循环效率高
- 无污染

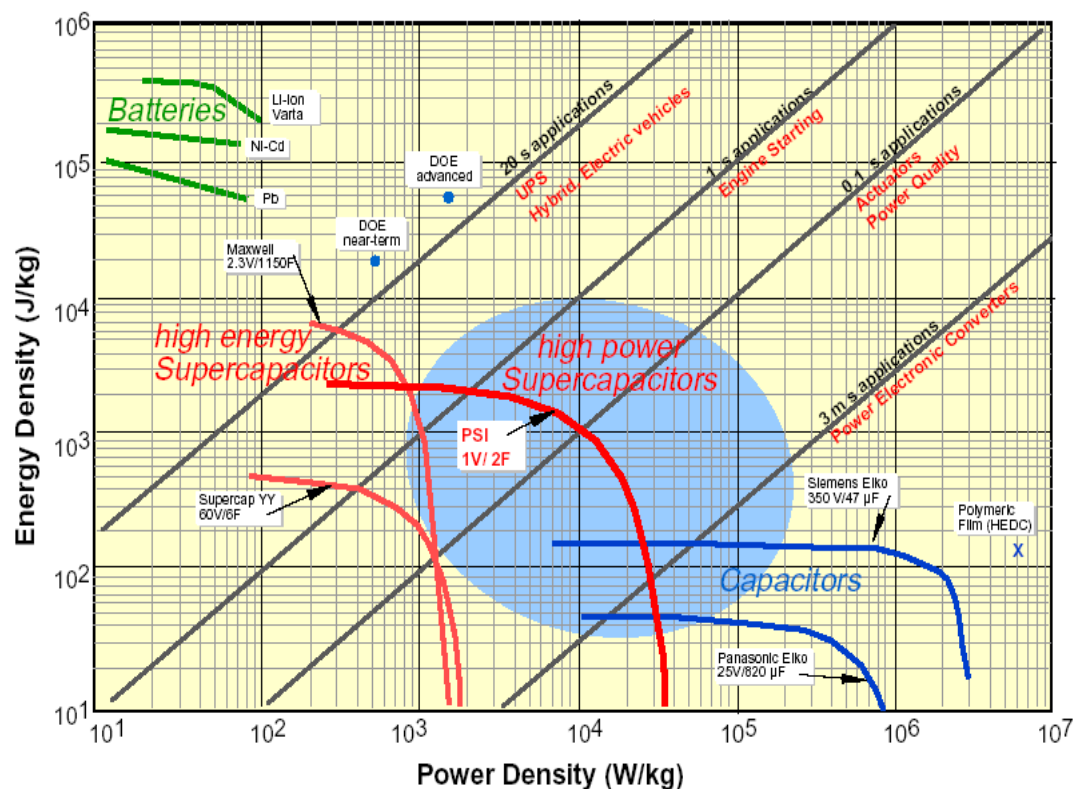


图1 储能体系功率—能量对比

可再生能源目标很难实现

- 原计划GDP从2000年到2020年翻2番，能源消耗翻1番，2020年达到30亿吨标准煤。
- 2010年和2020年可再生能源利用率分别达到2.7亿吨标准煤和5.3亿吨标准煤。
- 2008年3.43万亿度，28.5亿吨标煤；
- 2009年3.64万亿度，30.66亿吨标煤(占世界17%)；
- 2020年5万亿度
- 2020年能耗很可能是40-42亿吨标煤；
- 可再生能源占15%?

如果能源消费保持本世纪以来平均8.9%的增速，则2020年全国能源消耗将达近80亿吨标煤，占目前世界能源消费总量的一半以上

减排途径

- 清洁能源
- 节能才是最重要的！
- 能源结构中煤的比例
 - 中国：69%
 - 美日：24%
 - 印度：51%
 - 2020年，64%
- 钢铁和有色金属
- 建材
- 电力
- 。 。 。
- 先进技术
- 生活方式和观念

重点领域

- 电力
 - 建材（水泥与玻璃）
 - 钢铁与有色金属
 - 石油化工
 - 交通
- 2009年，我国生产粗钢**5.68**亿吨，水泥**16.5**亿吨，分别约占世界总产量的**43%**和**52%**。
- 从行业上看，中国电力、钢铁、石化、轻工、纺织、化工、有色金属等**8**个行业主要产品平均能耗比国际先进水平高**40%**；钢、水泥、纸和纸板的单位产品综合能耗比国际先进水平分别高**21%**、**45%**和**120%**；机动车油耗水平比欧洲高**25%**，比日本高**20%**。这些指标反映了目前中国能源使用浪费、能源利用效率低的事实。

5万亿新兴能源投资计划

- 2011-2020年中国能源产业规划：
- 直接投资累计5万亿元
- 包括可再生能源和对化石能源的清洁高效利用，**智能电网**，分布式能源等

促进新兴能源产业发展！

战略性新兴产业

- 2010年10月18日国务院发布《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，节能环保，新一代信息技术，生物，高端设备制造，新能源，新材料和新能源汽车七大产业。
- 其中，战略性新兴产业产值将占GDP，2015年8%，2020年15%。
- 新能源在国家能源构成中将占，2020年15%，2050年40%。

2010年1-10月， 新能源板块平均涨幅9.28%

其中：

- 锂离子电池板块涨幅**27.25%**
- 智能电网板块涨幅**25.63%**
- 节能照明板块涨幅**23.73%**
- 太阳能板块涨幅**14.81%**
- 核能板块涨幅**4.17%**
- 风能板块涨幅**3.62%**

中国低碳示范城市（5省8市示范计划）

- 低碳城市指的是城市为了在社会，文化，经济等方面的可持续发展，使得市民生活水平不断提高和持续减少温室气体排放所做的各种努力。
- **Demonstration initiatives:**
 - 5 provinces: **Guangdong**(广东), Hubei(湖北), Liaoning(辽宁), Shanxi(陕西), Yunnan(云南)
 - 8 cities: Tianjin(天津), Chongqing(重庆), Hangzhou(杭州), Xiamen(厦门), **Shenzhen**(深圳), Guiyang(贵阳), Nanchang(南昌), Baoding(保定).

低碳技术许许多多（节能减排高效再生）

- 清洁能源与可再生能源
- 电动车
- 智能电网
- 半导体照明（**LED**）
- 资源流动与重组（互联网/物流网）
- 清洁能源交通（电动车与轻质化汽车）与智能化交通管理
- 节能型建筑（绿色建材，轻质墙体材料，保温建材，利用太阳能和地热）
- 云计算（**Cloud computing**）
- 垃圾处理与焚烧技术
- 绿化与林业碳汇
- 绿色旅游
- 。 。 。

新能源学科建设

- 能源经济与管理
- 智能电网
- 储能材料与器件
- 核能核技术核材料
- 太阳能利用
- 生物质能源与资源化

低碳城市国际联盟

The World Alliance for Low Carbon Cities

- China
 - Hong Kong, Macao, Guangzhou, Shenzhen, Zhuhai, Dongguan
 - Shanghai
 - Baoding, Erdos
- Espoo, Capital Region of Finland
- Japan:
- EU:
- North America

Building a Collaborative City Network:

- Advisory board
- Demonstration projects
- Annual forum --- (cfr. Davos summit)
- Training talent
- Consultancy services
- Secretary offices (Finland and China)

Sino-Finnish Innovativeness Forum, Espoo, Finland 20.9.2010



二、氢能与燃料电池

1. 氢能源
2. 氢的制备与储运
3. 燃料电池

氢能

- 氢经济
- 氢社会
- 氢能源

- 氢在地球上不但有巨大蕴藏量，可以通过阳光、水能、风力、植物提取，而且作为汽车的新能源，排放污染为零。
- 氢气—储运—燃料电池（零排放）



氢能源及其燃料电池

世界首辆绿色跑车问世：耗氢气排水汽

英国“摩根”汽车公司2008年推出世界上第一款“绿色跑车”——“生命之车”。该车最高时速90英里，可以跑250英里。22千瓦的输出功率，当加速或者爬坡时，可以从一个超级电容器中获取更多能量。



全球第一架氢电池动力飞机试飞成功

波音公司在2008年2月和3月共进行了3次成功试飞。用于测试的小型双人座螺旋桨飞机重800公斤，机身长6.5米，翼展长16.3米。试飞时机上只有一名飞行员，依靠氢燃料电池提供动力，在1000米高度以时速100公里飞了约20分钟。



氢能源与氢经济

- 1970年，美国通用汽车公司的技术研究中心提出了“氢经济”的概念。
- 1976年美国斯坦福研究院就开展了氢经济的可行性研究。
- 20世纪90年代中期以来多种因素的汇合增加了氢能经济的吸引力。这些因素包括：
 - 持久的城市空气污染
 - 对较低或零废气排放的交通工具的需求
 - 减少对外国石油进口的需要
 - CO₂排放和全球气候变化
 - 储存可再生能源的需求等。
- 氢能作为一种清洁、高效、安全、可持续的新能源，被视为21世纪最具发展潜力的清洁能源，是人类的战略能源发展方向。
- 世界各国如冰岛、中国、德国、日本和美国等国家在氢能交通工具的商业化方面已经出现了激烈的竞争。氢能在小汽车、卡车、公共汽车、出租车、摩托车和商业船上的应用已经成为焦点。

氢能源

- 氢能是一种高效清洁的二次能源，具有许多独特的优点：
- 首先，氢能来源广泛，可以从化石能、核能、可再生能源中制取，有利于摆脱对石油的依赖；
- 其次，氢能作为燃料，能在传统的燃烧设备中进行能量转化，与现有能源系统易兼容；
- 第三，氢能通过燃料电池技术转化能量，比利用热机转化效率更高，而且没有环境污染；
- 第四，氢能能够储存，可以与电力并重而且互补。

氢能源利用的难点

- 氢能能否真正被广泛应用，**氢气的制取、储存和输送等**技术研发，显得尤为重要。目前，氢气制取消耗一次能源造成成本过高，而氢气的储存和输送还没有好的办法，利用金属氢化物储氢率太低，高压罐储氢耗能又太高。



制氢方法

- 天然氣、核能、[太陽能](#)、風力、生物燃料、煤礦、其他化石燃油、地熱
- 热方法:蒸汽重整;热化学水解;汽化;高温热解
- 电化学方法:电解,光电解法
- 生物方法:光生物;微生物发酵

传统储氢方法

- 高压存储气态氢
- 利用高压钢瓶（氢气瓶）来储存氢气，但钢瓶储存氢气的容积小，而且还有爆炸的危险（氢脆）；
- **复合材料：镍胆；碳纤维壳**
- 低温存储液态氢
- 储存液态氢，但液体储存箱非常庞大，需要极好的绝热装置来隔热。
- 固态储氢：金属氢化物

镁合金储氢未来可成为汽车新动力

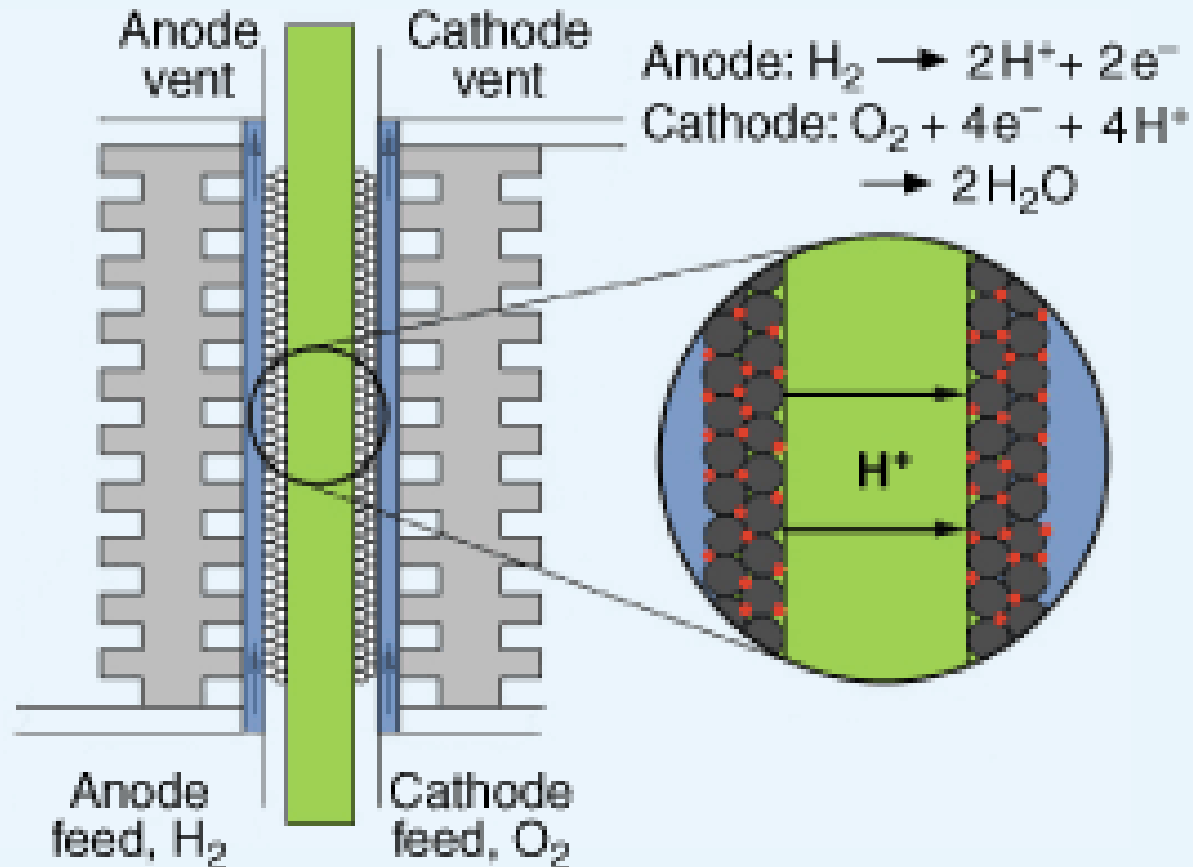
- 镁是具有发展潜力的轻量绿色结构材料和功能材料，也是储存氢的有效材料。镁的微观结构含有孔，而孔的大小恰好能让氢以原子的形式储存其中，氢的两个原子之间的距离以原子的形式存在要比以分子形式存在时小30%左右。因此，镁的储氢量比较高，达到6.7%，即10公斤镁中可以储存0.67公斤的氢。
- 把氢储存在镁合金中，可以控制释放的速度，保证利用的安全性。但是，从镁合金中释放氢需要加热，虽然目前研究人员已经把加热的温度从300摄氏度降低到了150摄氏度，但温度仍然较高。
- 用镁合金来储存氢的技术可以应用到交通领域。普通汽车的油箱储油量相当于5公斤—6公斤的氢产生的能量，需要80公斤—90公斤的镁合金容器，这与普通油箱的重量差不多，但体积较小。

几种主要燃料电池

- 磷酸燃料电池（**PAFC**）
- 熔融碳酸盐燃料电池（**MCFC**）
- 固态氧化物燃料电池（**SOFC**）
- 质子交换膜燃料电池（**PEMFC**）
- 直接甲醇燃料电池（**DMFC**）
- 微生物燃料电池(**MFC**)

质子交换膜燃料电池原理

**Conducting polymer lies
at heart of fuel cell**



质子交换膜燃料电池（PEMFC）

- 不受卡诺循环限制；
- 能量转化率高；
- 具有可室温快速启动，无电解液流失；
- 水易排出，寿命长；
- 比功率与比能量高等突出优点；
- 特别宜于用作可移动动力，是电动车的理想候选电源之一。

Fuel Cell City Bus

Tsinghua University and Shenli Science Technology Company



08奥运会上，清华大学项目组提供了**5**辆燃料电池大客车

Fuel Cell Vehicles

Tongji University & Shangqi

性能:

Power: 24KW

FCE Power: 30KW

Battery stack: 30AH

Peak Speed: 108.3 km/h

Gradient: $> 20^\circ$

Acceleration: 14.9s(0-80km)

Range: 209 km

Economy: $.394\text{kgH}_2/100\text{km}$

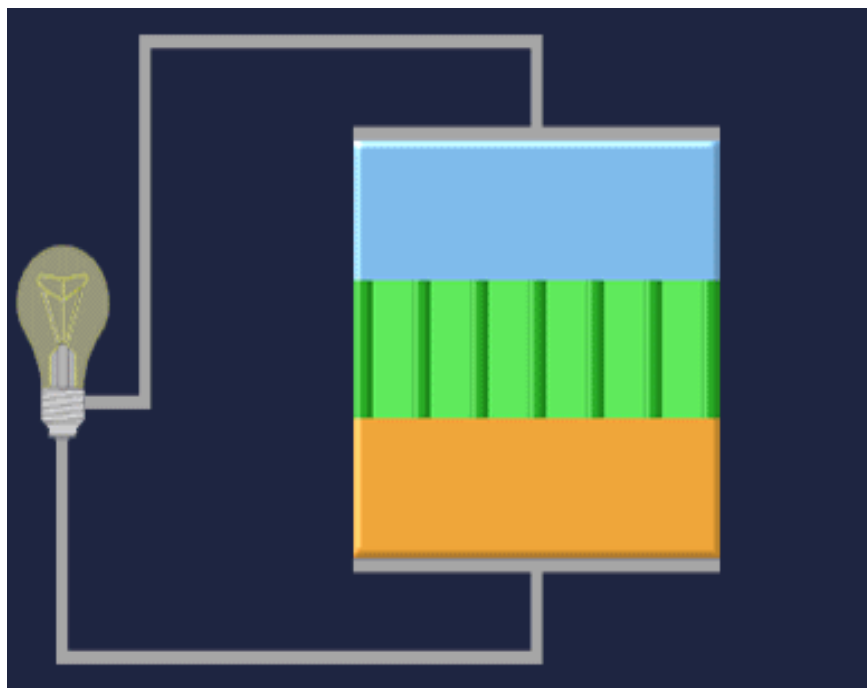


奥运会上，同济大学 and 上汽提供了20辆帕萨特燃料电池轿车

燃料电池应用难点

- 制氢：耗能
- 氢的储运
- 贵金属催化剂：**PtRu**
- 双极板
- 电解质隔膜 及**MEA**

直接甲醇燃料电池（DMFC）工作原理

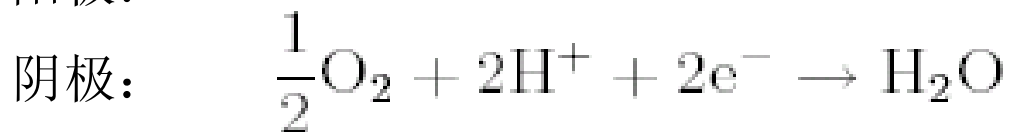
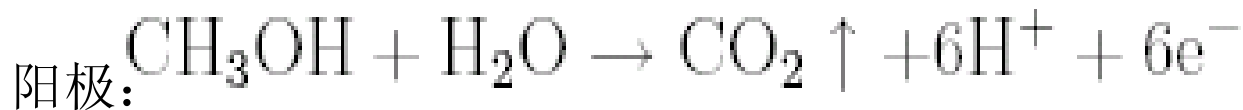


能量密度高

高效

清洁，环保

• 阳极的燃料为甲醇与水，而甲醇燃料透过催化剂（RuPt）作用产生质子、电子与二氧化碳



DMFC特点

- 以液态甲醇为燃料，体积能量密度约为液态氢的三至四倍
- 储存与运送远较氢气方便及安全
- 取得容易，成本低，因此更符合可携式电子产品的需求。
- 利用微型重整装置（**MicroReformer**）将甲醇转化产生氢气燃料，都是微小型燃料电池可能的发展方向。

直接甲醇燃料电池

Toshiba



Hitachi



Nokia



掌上电脑



直接乙醇燃料电池

- 甲醇→乙醇？
- 催化剂要求更高！CO中毒，贵金属。

直接碳燃料电池（DCFC）

- 煤
- 空气
- 不经过燃烧就能转化为电能

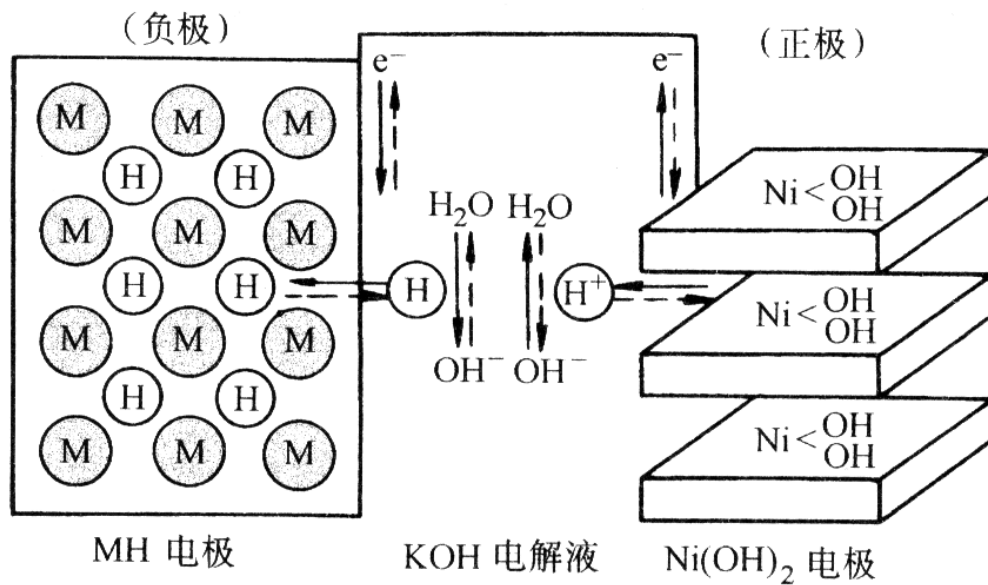
三、二次电池，超级电容器与 电动车

- 1.二次电池
- 2.锂离子电池
- 3.超级电容器
- 4.电动车

二次电池Secondary batteries

- 能反复充电的电池称为二次电池,又叫蓄电池。是一种可逆性的直流电源, 充电过程是将电能转变为化学能储存起来,放电过程是将化学能转变为电能。
- 铅酸蓄电池（**使用量占绝对优势**）
- 镍二次电池（**镍镉电池、镍氢电池**）
- 锂离子二次电池

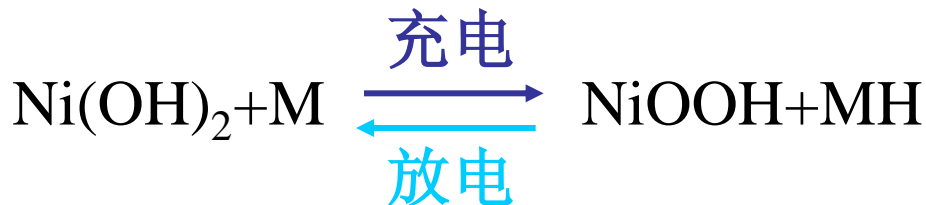
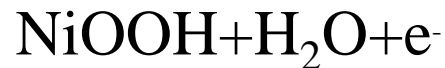
镍氢电池 (Ni/MH) 原理



充电 ↓ ↑ 放电



充电 ↓ ↑ 放电



电压: 1.2V

镍氢二次电池 Ni-H battery

- 阴极: **Ni**
- 高密度球形**Ni(OH)₂**
- 纳米**Ni(OH)₂**
- **α-Ni(OH)₂**
- 阳极: 储氢合金
- **AB₅: (LaNi₅)**
- **AB: (TiFe)**
- **AB₂: (ZrV₂)**
- **A₂B: (Mg₂Ni)**
- 纳米粒径控制?

镍镉电池 (Ni-Cd Rechargeable Battery)

- 具有良好的大电流放电特性、耐过充放电能力强、维护简单。
- 镍镉电池最致命的缺点是，在充放电过程中如果处理不当，会出现严重的“**记忆效应**”，使得服务寿命大大缩短。所谓“记忆效应”就是电池在充电前，电池的电量没有被完全放尽，久而久之将会引起电池容量的降低。此外，镉是有毒的，因而镍镉电池不利于生态环境的保护。
- 通常镍镉电池的充电次数为300~800次，在充放电达500次后电容量会下降至约80%。镍镉电池的记忆效应比镍氢电池严重。所以必须在完全没电时才可进行充电，以确保使用寿命。

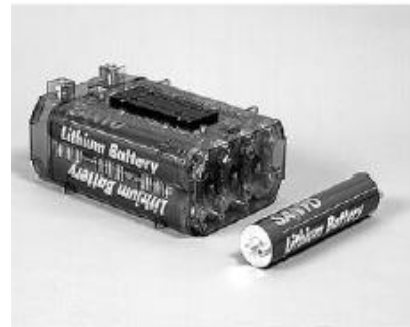
铅酸蓄电池特点

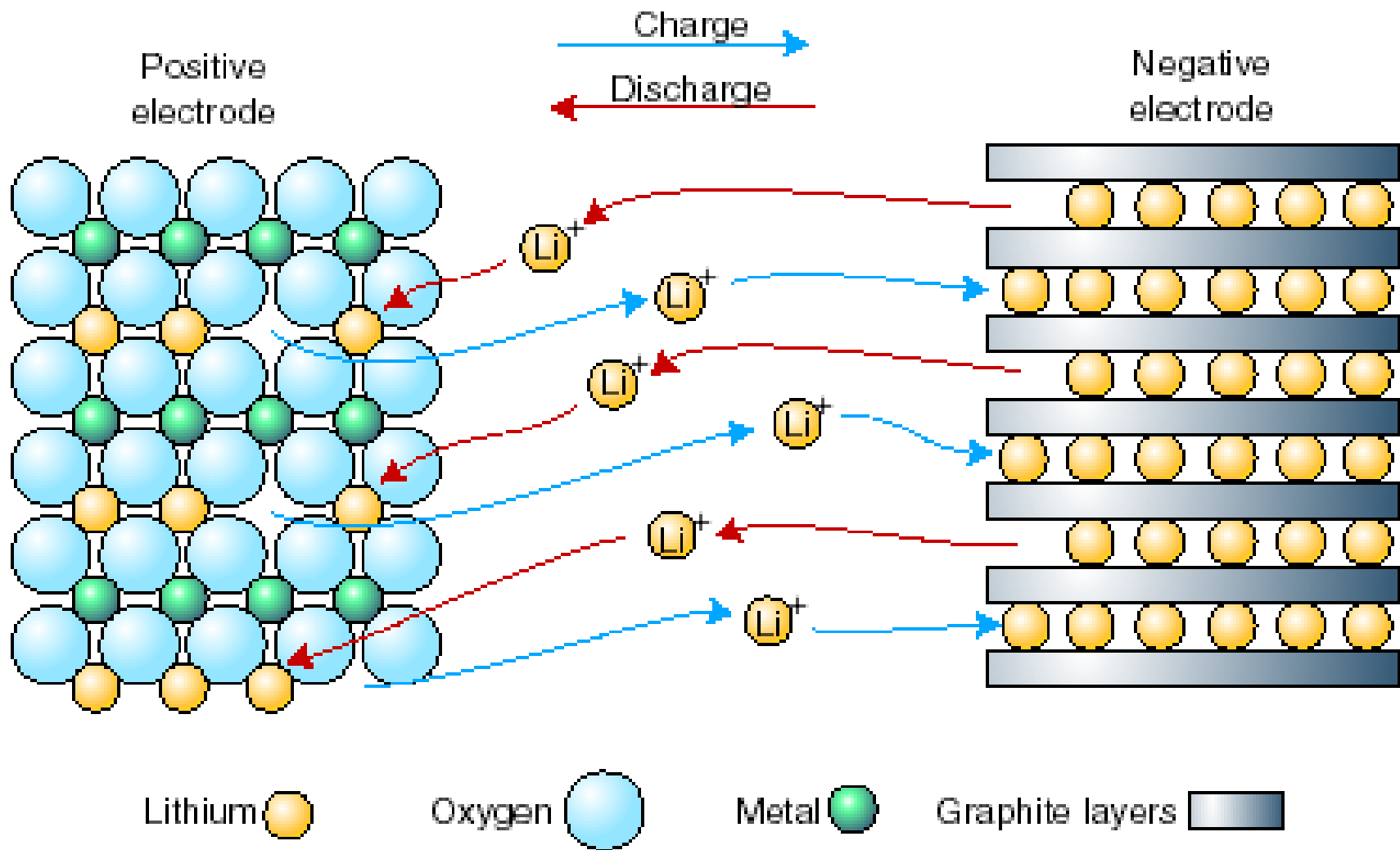
- 正极：二氧化铅（ PbO_2 ）
- 负极：铅（ Pb ）
- 电解液：稀硫酸 H_2SO_4
- 低能量密度
 - 污染

选题背景—锂离子电池简介

锂离子电池的优点：

- 工作电压高，约3.6V；
- 能量密度高，约150Wh/kg；
- 环境友好，不含铅或镉等有害物质；
- 自放电率低；
- 无记忆效应等

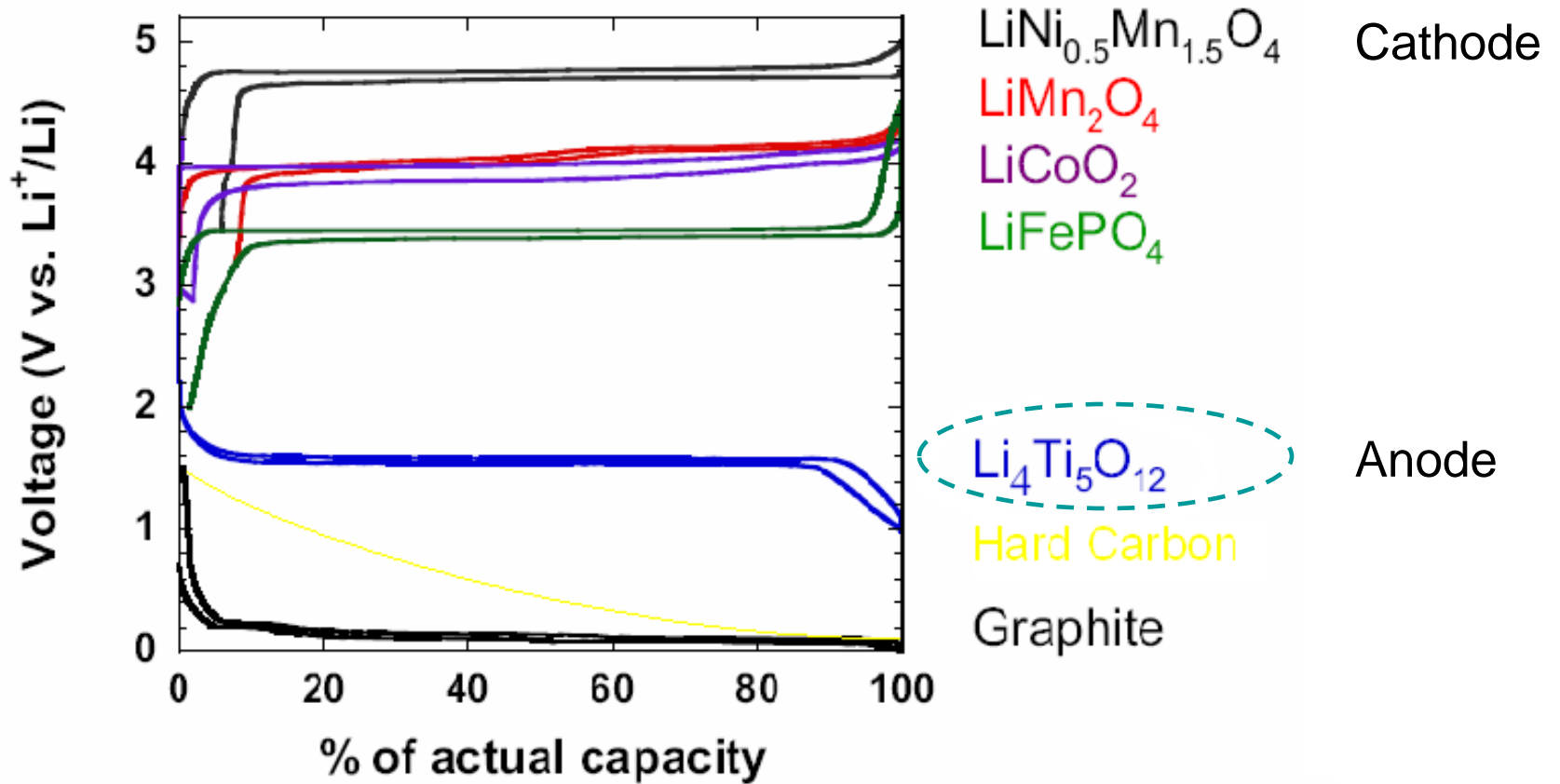




锂离子电池充放电原理图

The charge and discharge mechanism of lithium ion battery

Electrodes Materials of LIB

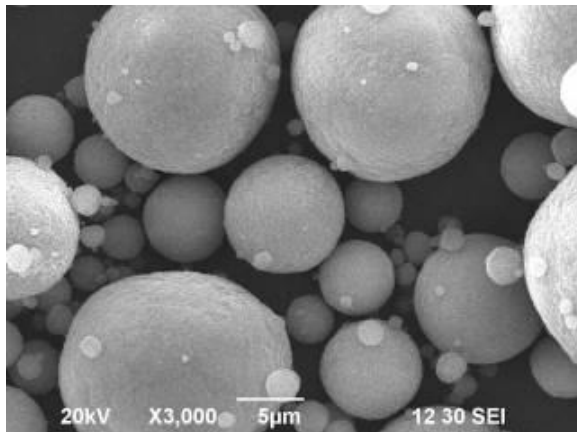


炭负极材料

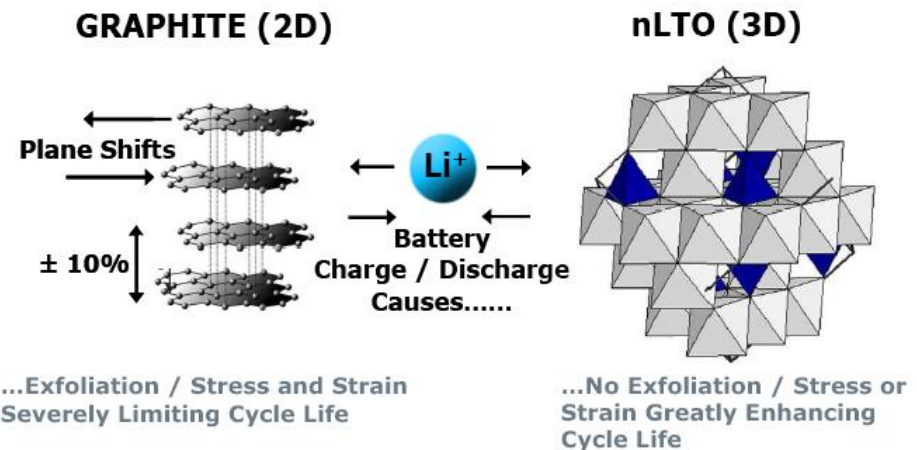
炭素材料	高规则	天然石墨	300—350mAh/g	改性 → 表面氧化 表面氟化 包覆 成膜
		人工石墨	主要为MCMB	
		300—330mAh/g		
	低规则	石油焦	200—230 mAh/g	
		针状焦	220—250 mAh/g	
		沥青焦	200—230 mAh/g	
	无规则 (无定形)	酚醛树脂	400—500 mAh/g	
		聚糠醇	400 mAh/g	
		聚合物热解炭	500—900 mAh/g	

用纳米钛酸锂 ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) 替代碳负极 可以使得电池寿命长和更安全

Advantage	Disadvantage
High safety (+)	Low energy density (-)
Long cycle life (+)	High potential plateau (-)
High rate capability (+)	
Good low temperature (+)	
Low cost in future (+)	



In typical lithium ion batteries, graphite undergoes life limiting stress.



LTO anode for longer cycle life and safety

电动车

欧洲电动卡车



巴士



美国



印度：轻型电动



Classification of EV 电动汽车分类

- 电动汽车是一种以电力替代燃油、以电动机替代内燃机的公路车辆。分为三大类：
- 纯电池（驱动）电动车（**purely battery-powered electric vehicles, EV**）；
- 混合型电动车（**hybrid electric vehicles, HEV and plug-in hybrid electric vehicles, PHEV**）；
- 燃料电池电动车（**Fuel cell electric vehicles, FCEV**）。

美国大力发展锂离子电池车

- 2009年1月7日，美国A123系统公司(A123 Systems)宣布，将“以先进的美国本土电池，帮助美国经济摆脱对石油的依赖”，计划在美国密歇根州东南部建设第一家锂离子电池工厂，其后还将在美国再建几个工厂，满足到2013年底500万辆混合动力车或50万辆充电式混合动力车（Plug-in Hybrids）的电池需求。
- A123系统公司将会在新工厂投资23亿美元，并向美国能源部管理的先进技术汽车制造激励项目（ATVMIP）250亿美元贷款中提出18.4亿美元的贷款申请。
- 此前，锂离子电池制造商EnerDel也向能源部提出4.8亿美元的低息贷款申请，其锂离子电池产能在2011年将达60万个电池包，2015年120万个电池包。

中海油总公司(China Offshore Oil Company)在本市滨海高新区投资注册新能源公司，将向力神电池有限公司投资**50**亿元，建设**20**条动力电池生产线



- 该项目总投资**16**亿元人民币，设备投资**9**亿元人民币，引进国际一流的锂离子电池生产线，年产能达**2**万辆纯电动汽车配套电池和**2**亿只电动工具及笔记本电脑电池，实现产值**40**亿元人民币。

北京普莱德新能源电池科技 有限公司

- 合资的总资金1亿人民币，出资和股权比例如下：
- 北京汽车工业控股有限责任公司，2400万元 24%
- 北汽福田汽车股份有限公司，1000万元 10%
- 北大先行科技产业投资有限公司，4100万元 41%
- 东莞新能德科技有限公司（ATL），2500万元 25%

充电站网络成电动汽车发展瓶颈



- 2007年，通过与国家电网公司合作，万向电动车公司在15个省市投入63台纯电动电力专用车，建立了26座充电站。
- 无锡去年建成了国内首个电动车充电网络。

普天海油(Putian-COOC)致力于
建立充电站网络

Advantages of BEV

纯电动汽车的优点

- 纯电动汽车由于具有效率高、能源不依赖燃料、在使用地点“零排放”等特点，成为最具竞争力的技术。
- 纯电动汽车的电池可以在夜间利用电网的廉价“谷电”进行充电，平抑电网的峰—谷差。2007年，我国电力装机容量已超过7亿千瓦，一天低谷电约9.2亿千瓦时，可为4000万辆锂电汽车充电。
- 陈立泉院士撰写的题为《发展锂电汽车是应对金融危机的战略选择》文章，指出发展锂离子电池电动汽车不仅以电代石油、减少温室气体排放，又能储存电网谷电，一举三得。

奥运会上的纯电动巴士

- 北理工主持研制
- 121路公共汽车
- 机械手换电池：10分钟

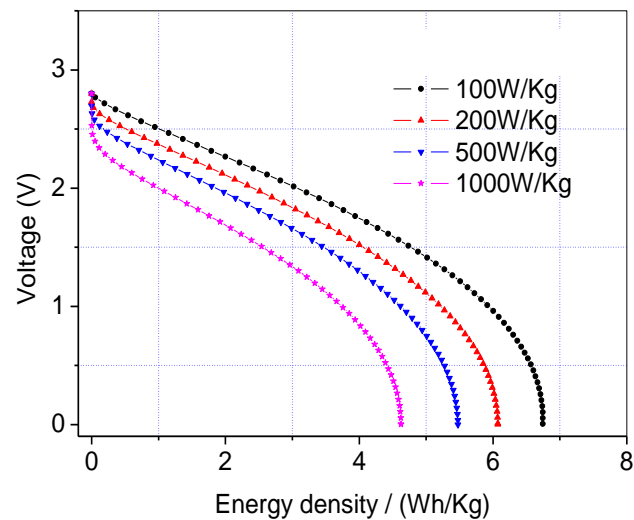
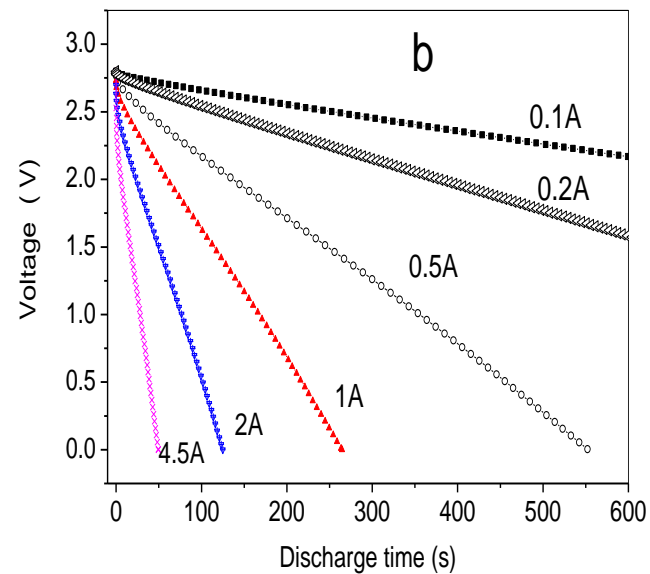


电动车发展瓶颈

Bottlenecks and Priority

- 电源，马达和控制系统是关键。
 - LIB, improve the energy and power densities, cycle life (**target: 2000 recently, 5000 in future**), reliability, and quick charge, low cost.
 - Driving motor, using permanent magnet, improve power, power density, efficiency, life and reliability, low cost.
 - Control system: balance charge, EDLC-LIB, battery pack-driving system
- 优先发展：
 - **公共汽车, 低速车和特种车**

超级电容器



超级电容器用途

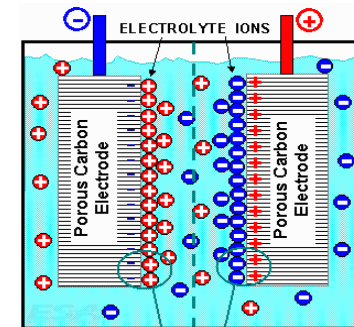
Nissan's capacitor for hybrid EV 2002



Japanese super capacitor hybrid buses 2002



Sizuki's 100 kW UPS



Double Layer Capacitors
(Adsorbed layers of ions and solvated ions)



Photo Courtesy of ESMA



Photo Courtesy of Maxwell Technologies

上海的超级电容器公共汽车（奥威）



锂离子动力电池发展瓶颈

- **价格太高** Expensive battery, 80,000 Yuan, which accounts for over half of the costs of the car
- **一次充电行驶里程** Limited driving distance per charge, less than 200 kilometers and thus battery capacity needs to be improved
- **充电时间太长** The quick charge power system, a few min to a hour.

小结：电源与电动车产业未来发展

- 锂离子电池
 - 新材料
 - 电池体系
 - 长寿命
 - 低成本
 - 快速充放电
- 超级电容器
 - 高能量密度
 - 与电池配合使用
- 电动车
 - 低速车→高速车
 - 特种车
 - 公共交通
- 控制系统
- 充电网络

四、太阳能利用

太阳能资源 Solar Energy

2004年底，太阳光伏发电装机为**6.5万千瓦**。主要用于解决偏远地区和特殊行业用电问题。



发展目标：

到2020年，装机总量**200万千瓦**。



太阳能资源 Solar Energy

太阳能热水器

累计**6500**万平方米，年
生产能力**1500**万平方米。
生产量和使用量均为世
界第一

发展目标：

到**2020**年太阳能热水器
3亿平方米，**4000**万吨标
煤



山东德州中国太阳谷

- 位于德州市，占地5000亩，涵盖了**太阳能热水器、太阳能光伏发电及照明、太阳能与建筑结合、太阳能高温热发电、温屏节能玻璃、太阳能空调、海水淡化**等可再生能源应用的众多门类。
- 皇明将把这里建设成为世界可再生能源的生产制造中心、研发检测中心、科普教育中心、观光旅游中心、会议交流中心，简称五大中心。
- 全球首创性地实现了**太阳能热水供应、采暖、制冷、光伏并网发电等技术**与建筑的完美结合，整体节能效率达**88%**，每年可节约标准煤2640吨、节电660万度，减少污染物排放8672吨。
- 日月坛集展示、科研、办公、会议、培训、酒店等功能于一身，全球首创性地实现了**太阳能热水供应、采暖、制冷、光伏发电等技术**与建筑的完美结合，建筑节能**70%**以上，加上60%采暖、制冷，节能效率**88%**，

太阳能电池 Solar Cell

- 太阳能电池是通过光电效应或者光化学效应直接把光能转化成电能的装置。
- 太阳能电池的原理
太阳光照在半导体p-n结上，形成新的空穴-电子对，在p-n结电场的作用下，空穴由n区流向p区，电子由p区流向n区，接通电路后就形成电流。这就是光电效应太阳能电池的工作原理。

太阳能发电方式

- 光—热—电转换方式
通过利用太阳辐射产生的热能发电，一般是由太阳能集热器将所吸收的热能转换成工质的蒸气，再驱动汽轮机发电。
- 光—电直接转换方式
该方式是利用光电效应，将太阳辐射能直接转换成电能，光—电转换的基本装置就是太阳能电池。

太阳能电池的特点

- 能源取之不尽
 - ~因为是利用太阳光发电，能源取之不尽，没有燃料费用
- 清洁能源
 - ~不产生废气等有害废弃物，无环境负荷，也没有噪音
- 能量充足
 - ~**0.13%**的地球表面覆盖**10%**转换效率的太阳能电池就能满足全球能源使用($4 \times 10^{20} \text{J} / 3 \times 10^{24} \text{J} = 0.13\% \times 10\%$)
- 可以直接在用电的地方发电
 - ~可以直接设置在需要用电的地方，如果在各家的屋顶上设置太阳电池，就可以直接满足家庭用电需要

太阳能电池分类

- 太阳能电池还可按照材料分为：硅太阳能电池（单晶，多晶，非晶）、多元化合物薄膜太阳能电池（半导体薄膜）、聚合物多层修饰电极型太阳能电池、纳米晶太阳能电池（燃料敏化）、有机太阳能电池，其中硅太阳能电池是目前发展最成熟的，在应用中居主导地位。

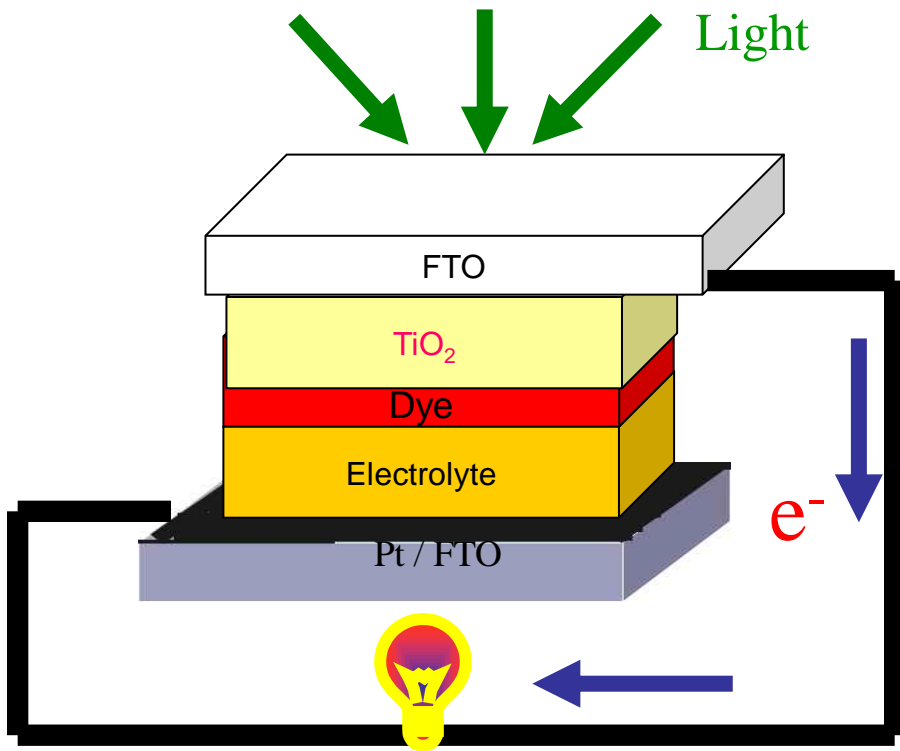
硅太阳能电池

- **单晶硅太阳能电池转换效率最高**，技术也最为成熟。在实验室里最高的转换效率为**24.7%**，规模生产时的效率为**15%**。在大规模应用和工业生产中仍占据主导地位，但单晶硅价格高，大幅度降低其成本很困难。（**河北晶澳太阳能公司，18.7%**）
- **多晶硅薄膜太阳能电池**与单晶硅比较，成本低廉，而效率高。于非晶硅薄膜电池，其实实验室最高转换效率为**20.3%(18%)**，工业规模生产的转换效率为**10%**。因此，多晶硅薄膜电池不久将会在太阳能电池市场上占据主导地位。
- **非晶硅薄膜太阳能电池**成本低重量轻，转换效率较高，便于大规模生产，有极大的潜力。但受制于其材料引发的光电效率衰退效应，稳定性不高，直接影响了它的实际应用。如果能进一步解决稳定性问题及提高转换率问题，那么，非晶硅太阳能电池无疑是太阳能电池的主要发展产品之一。

多元化合物薄膜太阳能电池

- **多元化合物薄膜太阳能电池**材料为无机盐，其主要包括砷化镓III-V族化合物、硫化镉、碲化镉及铜铟硒薄膜电池等。
- 硫化镉、碲化镉多晶薄膜电池的效率较非晶硅薄膜太阳能电池效率高，成本较单晶硅电池低，并且也易于大规模生产，但由于镉有剧毒，会对环境造成严重的污染，因此，并不是晶体硅太阳能电池最理想的替代产品。**13.4%**
- 砷化镓（GaAs）III-V化合物电池的转换效率可达**28%**，GaAs化合物材料具有十分理想的光学带隙以及较高的吸收效率，抗辐照能力强，对热不敏感，适合于制造高效单结电池。但是GaAs材料的价格不菲，因而在很大程度上限制了用GaAs电池的普及。**24%**
- 铜铟硒薄膜电池（简称CIS）适合光电转换，不存在光致衰退问题，转换效率和多晶硅一样。具有价格低廉、性能良好和工艺简单等优点，将成为今后发展太阳能电池的一个重要方向。唯一的问题是材料的来源，由于铟和硒都是比较稀有的元素，因此，这类电池的发展又必然受到限制。

燃料敏化太阳能电池（DSC）



- 纳米TiO₂晶体太阳能电池是新近发展的，优点在于它廉价的成本和简单的工艺及稳定的性能。其光电效率稳定在10%以上，制作成本仅为硅太阳能电池的1/5~1/10。寿命能达到20年以上。
11%

硅太阳能电池的生产流程



硅料



硅锭



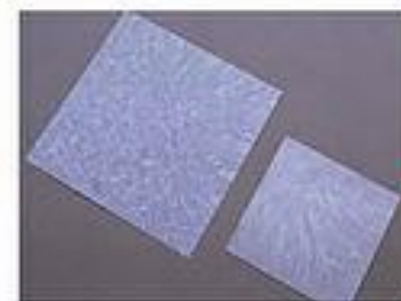
切割



太阳能电池板



多晶硅芯片



硅片

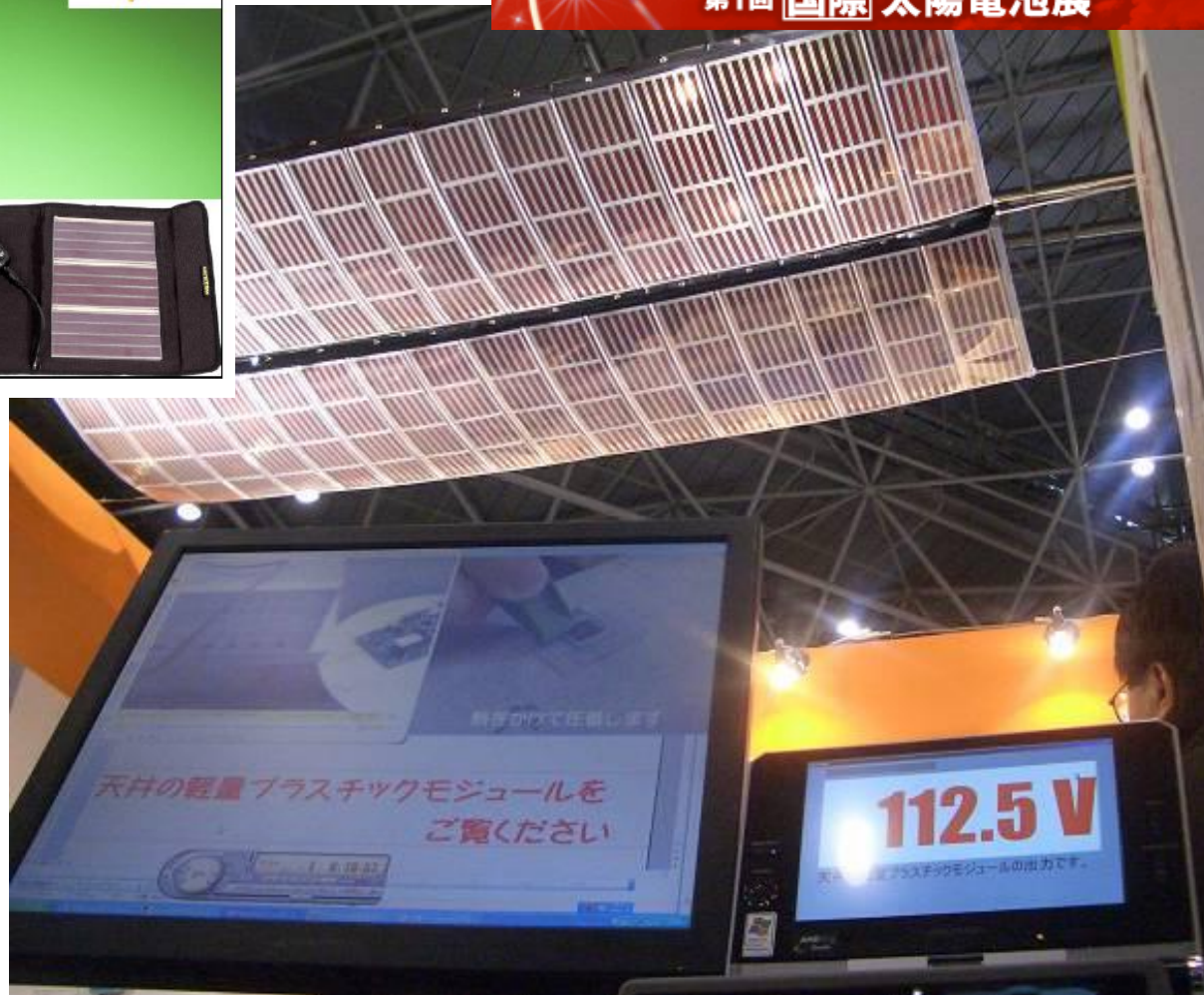
染料敏化太阳能电池优势

- 低成本（硅基电池的1/5）
- 易于制作
- 随温度升高转换效率有所提高
- 对光入射角不敏感
- 透明性
- 装饰性
- 柔性
- 理论转换效率高



世界最大柔性電池

The first G24 product is a light weight flexible power supply for mobile telephones



太阳能电池的主要问题

- 转化效率
- 成本
- 寿命

非硅基体；

提高转化效率。

五、风能

风能资源Wind Energy

全国风能资源量约为**10**亿千瓦。其中，陆地资源量约**2.5**亿千瓦，主要分布在“三边”地区及东部沿海地区。至**2008**年底，全国风电装机已超过**1000**万千瓦。我国风电装机总量已位居世界第五。

发展目标

2010：总装机500万千瓦

30个左右10万千瓦级大型风电项目

2020：总装机3000万千瓦

若干个200万千瓦以上的风电大省

6个百万千瓦级大型风电基地，50万千瓦

海上风电



风能Wind Energy

- 2007年9月中国政府发布的《可再生能源中长期发展规划》（以下简称“中长期发展规划”）中提出的目标是，到2020年，全国风电总装机容量达到**3000万千瓦**。
- **调整为**
- 在甘肃、内蒙古、河北、江苏等地形成几个上千万千瓦的风电基地，实现2020年供电装机规模**1亿千瓦**。

风力发电系统

- **风力发电系统**：风力发电机+充电器+数字逆变器。
- **发电机由机头、转体、尾翼、叶片组成**。各部分功能为：叶片用来接受风力并通过机头转为**电能**；尾翼使叶片始终对着来风的方向从而获得最大的风能；转体能使机头灵活地转动以实现尾翼调整方向的功能；机头的转子是永**磁**体，定子绕组切割磁力线产生电能。
- 风力发电机因风量不稳定，故其输出的是**13~25V**变化的交流电，须经充电器整流，再对蓄电池充电，使风力发电机产生的电能变成**化学**能。然后用有保护电路的逆变电源，把电瓶里的化学能转变成交流**220V**市电，才能保证稳定使用。

风能Wind Energy

难点：

风机整体制造技术— 中国大部分企业只能组装风机，还不能设计风机，特别是大型风机。另外，中国设计风机的标准仍是按欧洲的设计标准来设计。

叶片大型化—

材料

疲劳性能



2002/8/11 14:36

大型叶片 (blade)制造技术

- 叶片是风力发电机的核心部件，造价约占整个设备的1/4到1/3。实践证明，风力发电中叶片越大发电成本越低，所以目前人们倾向于叶片大型化。叶片的翼径达到40 m以上的话，需要用CFRP补强；而如果达到50 m以上的话，那么就必须要用CFRP来制造整个叶片了。
- 玻璃纤维叶片：
 - 德国：50.3米
 - 中国：中复连众复合材料公司
 - 2006年，1.5MW,37.5m
 - 2008年，2MW,45.3m
 - >5MW, 75m?
- 碳纤维增强塑料 (CFRP)

风机柱子（Main Shaft）材料

- 强度、刚度
- 耐疲劳
- 耐侯性
- 42CrMo4
- 34CrNiMo6

Onshore: 岸上

Offshore: 海上，耐腐蚀，价格约是路上的**2.5倍**

其他

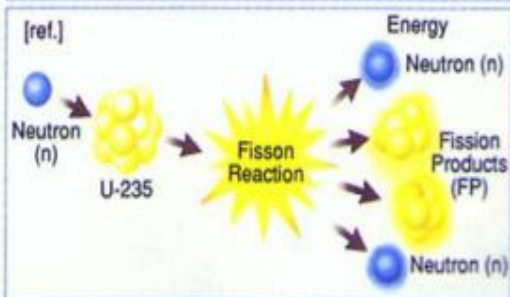
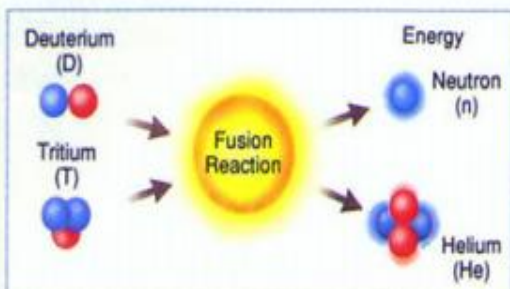
- 齿轮箱
- 轴承
- 偏航轴承
- 变桨轴承

六、核能

1. 反应堆种类
2. 核电站发展
3. 高温气冷堆

核能

核聚变和核裂变能



1997年

受控核聚变试验又创纪录

据新华社伦敦11月3日电 (记者姜岩)记者今天从联合欧洲环受控核聚变研究中心了解到,该中心10月31日夜创造了受控核聚变输出功率16.1兆瓦的新纪录,打破了该中心39天前创造的12.9兆瓦的原世界纪录。

联合欧洲环新闻官汤姆·埃尔斯沃西说,这一最高输出功率达到当时输入功率的65%,打破了39天前该中心创造的60%的世界纪录。

位于英国牛津郡的联合欧洲环始建于1978年,1983年投入使用,是世界最大的受控核聚变研究中心之一。1991年11月,该中心在人类历史上第一次实现受控核聚变,并创造了输出功率1.7兆瓦的世界纪录。1994年11月,设在英国普林斯顿大学的美国托克马克热核聚变实验反应堆创造了最高输出功率为10.7兆瓦,输出功率与输入功率之比为28%的世界纪录。

实现上述反应的条件:

温度 T 大于 一亿度;
 密度 n 大于 $5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

能量约束时间 τ 大于 1-2 秒

$$n T \tau > 1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ kev S}$$

一克铀²³⁵ (核裂变燃料) ~ 1.8 吨石油

一克氘-氚 (核聚变燃料) ~ 8 吨石油

核裂变（Fission Reaction）

- 核裂变是一个原子核分裂成几个原子核的变化。只有某些质量非常大的原子核像铀、钚等才能发生核裂变。这些原子核在吸收一个中子后会分裂成两个或更多个质量较小的原子核，同时放出二到三个中子和很大的能量，又能使别的原子核接着发生核裂变……，使过程持续进行下去，这种过程称作链式反应。
- 原子核在发生核裂变时，释放出巨大的能量称为原子核能，俗称原子能。1克铀-235完全发生核裂变后放出的能量相当于燃烧2.5吨煤所产生的能量。

核反应堆种类

- 輕水反應堆(Light Water Reactor, LWR)：
 - [沸水反應堆](#)(Boiling Water Reactor, BWR)
 - [壓水反應堆](#)(Pressurized Water Reactor, PWR)
- [重水反應堆](#)(Heavy Water Reactor, HWR)，如中國秦山III核電站。
- 高溫氣冷堆(High Temperature Gas-cooled Reactor)
- 石墨慢化壓管式沸水反應堆 (RBMK)，前蘇聯所發展的技術，由於設計缺陷易生意外，已較少使用。如[乌克兰切尔诺贝利](#)核電站。
- 快中子增殖反应堆(Fast Breeder Reactor)，如[日本茨城縣東海村](#)常陽和[福井縣敦賀市文殊](#)反應爐。

压水反应堆（**Pressurized Water Reactor**，缩写为**PWR**）

- 是美国Bettis Atomic Power Laboratory开发成功的一种轻水核反应堆。目前全世界核电站、核潜艇和核动力航空母舰等使用的反应堆中均以压水堆为主。中国目前已建成的秦山核电站和大亚湾核电站均采用压水反应堆。

沸水反应堆（Boiling Water Reactor，缩写为BWR）

- 是美国通用电气公司于1950年代中期研发成功的一种轻水核反应堆。
- 沸水反应堆以轻水（普通水）作为冷却剂和中子慢化剂。反应堆冷却系统内压强保持在70个大气压。在这里，来自汽轮机的给水进入压力容器后，在280°C左右沸腾。汽水混合物经过堆芯上方的汽水分离器和蒸汽干燥器过滤掉液态水后直接送到汽轮机。离开汽轮机的蒸汽经过冷凝器凝结为液态水（给水）后，回流至反应堆，完成一个循环。

增殖反应堆 Breeder Reactor

- 烧掉一个裂变原子，可产生一个以上的新裂变燃料原子的核反应堆。利用增殖堆可把不能直接作为裂变燃料用的铀-238和钚-232变成新的裂变燃料钚-239和铀-233。
- 通过增殖堆可利用天然铀的60%~70%，也可把储量丰富的钍资源利用起来，以补充天然铀的不足。
- 增殖堆分为热中子增殖堆和快中子增殖堆。
- 快中子增殖堆主要采用钠冷快堆，用钚-239作燃料，用铀-238作增殖材料。

快中子增殖堆（快堆）

- 在快中子增殖堆内，每个铀 235 核裂变所产生的快中子，可以使12至16个铀 238 变成钚 239 。尽管它一边在消耗核燃料钚 239 ，但一边又在产生核燃料钚 239 ，生产的比消耗的还要多，具有核燃料的增殖作用，所以这种反应堆也就被叫做快中子增殖堆。
- 钠导热性好而且不容易减慢中子速度，不会妨碍快堆中链式反应的进行，所以是理想的冷却液体。反应堆中使用吸收中子能力很强的控制棒，靠它插入堆芯的程度改变堆内中子数量，以调节反应堆的功率。为了使放射性的堆芯同发电部分隔离开，钠冷却系统也分一次回路和二次回路。一次回路直接同堆芯接触，通过热交换器把热传给二次回路。二次回路的钠用以使锅炉加热，产生 483°C 的蒸气，用以驱动汽轮机发电。

中国正在建设快堆

- 原子能院在建的中国首个实验快中子增殖反应堆已进入最后安装调试阶段，计划于2009年达到临界，2010年实现并网发电，2015年建成示范快堆并实现商用。
- 这个实验快堆建成后热功率为65兆瓦，净发电功率为20兆瓦。

核电站

- 核电站是利用核裂变(Nuclear Fission)或核聚变(Nuclear Fusion)反应所释放的能量产生电能的发电厂。目前商业运转中的核能发电厂都是利用核裂变反应而发电。
- 核电站一般分为两部分：利用原子核裂变生产蒸汽的核岛（包括反应堆装置和一回路系统）和利用蒸汽发电的常规岛（包括汽轮发电机系统）。核电站使用的燃料一般是放射性重金属：铀、钚。
- 现在使用最普遍的民用核电站大都是压水反应堆核电站，它的工作原理是：用铀制成的核燃料在反应堆内进行裂变并释放出大量热能；高压下的循环冷却水把热能带出，在蒸汽发生器内生成蒸汽，推动发电机旋转。

全世界核电发展迅速

- 2002年6月16日，国际原子能机构发表的一份报告说，截止2001年底，全世界正在运行的核电站共有438座，总发电量为353千兆瓦，占全世界发电量的16%，累计运行时间已超过1万堆年。
- 美国最多，达104座；法国59座，英国和俄罗斯也都在30座以上。
- 2001年核发电量在国内总发电量中所占比例超过20%的有19个国家。
- 其中，立陶宛比例最高，达到78%，比利时和斯洛伐克超过50%，乌克兰、瑞典和保加利亚3国则都在49%以上，韩国等8个国家也占到31%以上。

核电站优点

- 1.核能发电不像化石燃料发电那样排放巨量的污染物质到大气，因此核能发电不会造成空气污染。
- 2.核能发电不会产生加重地球温室效应的二氧化碳。
- 3.核能发电所使用的铀燃料，除了发电外，没有其他用途。
- 4.核燃料能量密度比起化石燃料高上几百万倍，故核能电厂所使用的燃料体积小，运输与储存都很方便，一座1000百万瓦的核能电厂一年只需30吨的铀燃料，一航次的飞机就可以完成运送。
- 5.核能发电的成本中，燃料费用所占的比例较低，核能发电的成本较不易受到国际经济情势影响，故发电成本较其他发电方法为稳定。

中国核电建设提速

- 调整核电中长期发展规划，力争2020年核电占电力总装机比例达到5%以上，即2020年我国核电运行装机容量应调整为7000万千瓦，在建3000万千瓦。
- 据国家电监会预测，到2020年我国电力装机容量将突破12亿千瓦。5%，即6000万千瓦。
- 据国家能源局的数据，2005年世界核电装机3.74亿千瓦，核电装机占总发电装机的比例全球为9.66%，法国56.21%、韩国26.86%、日本19.00%、德国17.07%、美国10.45%。

核电站缺点

- 1.核电厂会产生高低阶放射性废料，或者是使用过的核燃料，虽然所占体积不大，但因具有放射性，故必须慎重处理，且需面对相当大的政治困扰。
- 2.核能发电厂热效率较低，因而比一般化石燃料电厂排放更多废热到环境裏，故核能电厂的热污染较严重。
- 3.核能电厂投资成本太大，电力公司的财务风险较高。
- 4.核能电厂较不适宜做尖峰、离峰之随载运转。
- 5.兴建核电厂较易引发政治歧见纷争。
- 6.核电厂的反应器内有大量的放射性物质，如果在事故中释放到外界环境，会对生态及民众造成伤害。

美国三哩島核泄漏事故

- 通常簡稱「三哩島事件」，是1979年3月28日發生在美國賓夕法尼亞州薩斯奎哈納河三哩島（**Three-Miles Island**）核能發電廠的一次嚴重放射性物質泄漏事故。
- 檢查中才發現堆芯嚴重損壞，約20噸二氧化鈾堆積在壓力槽底部，大量放射性物質堆積在反應爐安全殼內，少部分放射性物質泄漏到周圍環境中。

苏联切尔诺贝利核事故

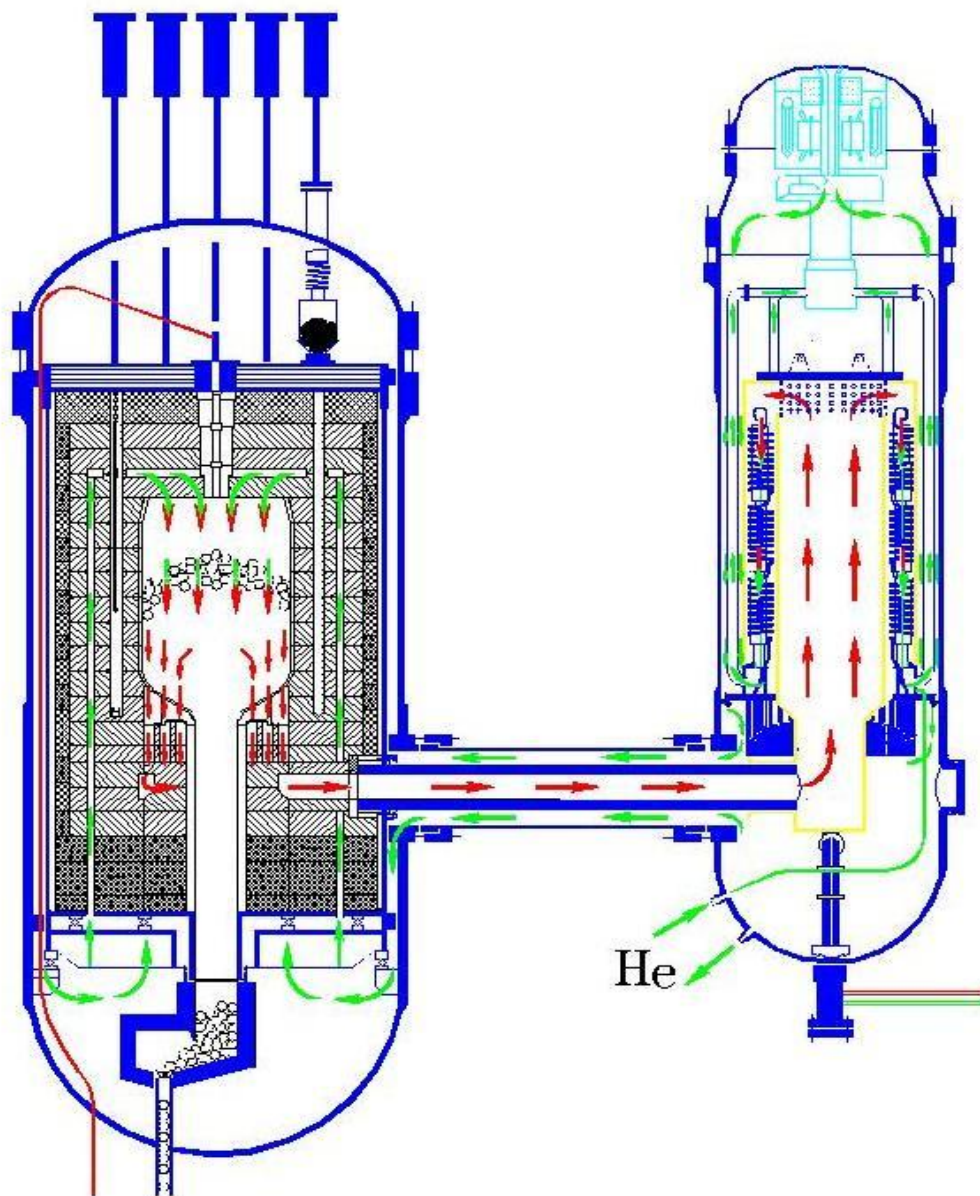
- 烏克蘭北部基輔州，位處白俄羅斯邊境。在1986年4月26日凌晨1點23分發生核事故。
- 蘇聯在1970年建造，是烏克蘭境內首個核電廠。
- 是歷史上最嚴重的核能發電廠意外事故。由於沒有保護掩體，導致受到核輻射塵污染的雲層飄往前蘇聯西部的部分地區、西歐、東歐、斯堪地那維亞半島、不列顛群島和北美東部部分地區。此外，在烏克蘭、白俄羅斯及俄羅斯境內遭受到嚴重的核污染，超過336,000名的居民被迫撤離。這次災難所釋放出的輻射線劑量是投在廣島的原子彈的400倍以上。
- 56人的死亡被歸咎於此事件（47名救災人員，9名罹患甲狀腺癌的兒童），並估計在車諾比地區660萬人口中，已經和將會死於輻射的人數可能高達4,000人。

中国将建成世界最先进 第三代核电站

- “AP1000技术是目前世界上最先进、最安全的第三代核电技术。”
- “中国在浙江三门新建的AP1000核电站机组，第一台在2013年就能并网运行。这将是世界上第一座第三代AP1000核电站，比美国提前了两年半。”
- 中国正在运行的11座核电机组，均属第二代核电技术(专家也称二代堆)。
- 中国购买美国4台先进的AP1000核电机组，美方同时转让AP1000设计技术、设备制造和成套技术、建造技术等先进的核电技术，中方将完全拥有在引进AP1000核电技术基础上改进和开发的、输出功率大于135万千瓦的、大型非能动核电站的知识产权。

高温气冷堆

- 以“全陶瓷”型包覆颗粒燃料球为燃料元件
- 以石墨为慢化剂和堆芯结构材料
- 以氦气作为冷却剂
- 具有良好固有安全特性。



模块式高温气冷堆的特点

安全性好，效率高和用途广泛

安全性好：用氦气作冷却剂，采用全陶瓷型的球型元件，杜绝堆芯熔化的可能，在出现严重事故时也不会对公众造成伤害。

效率高：反应堆氦气温度高达700~900℃，采用传统蒸汽循环发电效率可以达到38~40%，采用先进的氦气循环可以达到45%；同时采用不停堆装卸核燃料，提高了年运行时间。

用途广泛：除了高效发电，还可用于工艺热利用领域，如制氢，为未来氢能时代提供清洁能源，以及用于煤的气化液化等

小结：中国核电站的反应堆类型

- [大亚湾核电站](#) 压水型反应堆
- [秦山核电站](#) 压水型反应堆
- [秦山II核电站](#) 压水型反应堆
- [秦山III核电站](#) 重水型反应堆 ([PHZR](#))
- [岭澳核电站](#) 压水型反应堆
- [田湾核电站](#) 水-水动力反应堆 ([WWER](#))
- [岭澳II核电站](#) 压水型反应堆
- [红沿河核电站](#) ([辽宁](#)) 压水型反应堆 ([CPR1000](#))
- [宁德核电站](#) 压水型反应堆
- [三门核电站](#) 压水型反应堆 ([AP1000](#))
- [海阳核电站](#) 压水型反应堆 ([AP1000](#))
- [阳江核电站](#) 压水型反应堆
- [福清核电站](#) 压水型反应堆
- [方家山核电站](#) 压水型反应堆
- [台山核电站](#) 压水型反应堆 ([EPR](#))
- [荣成核电站](#) 高温气冷堆

- 问题：核燃料，核材料，核废料

七、生物质能

生物质能

- 生物质是指植物或动物生命体衍生得到的物质总称，主要为有机物。
- 可再生能源
- 清洁能源
- 来源广泛
- 成本低

生物质能资源和开发利用现状

Biomass Energy

资源量:

1. 农作物秸秆年产量约7亿吨
2. 林业及木材加工废弃物年产量约9亿吨
3. 畜禽养殖和工业有机废水年产沼气资源量约800亿立方米
4. 城市生活垃圾年产生量约1.2亿吨

生物质能 Biomass

生物质发电

2010年

2020年

总计

550

3000

农林生物质发电

200

2200

垃圾焚烧发电

50

200

垃圾填埋场沼气发电

20

100

大中型沼气工程发电

80

300

生物质能 Biomass



■ 生物质固体成型燃料

2010年: 示范点建设, 全国年消费100万吨

2020年: 年消费量达到5000万吨

■ 农村户用沼气

2010年: 110亿立方米/年

2020年: 180亿立方米/年



生物质能 Biomass

■ 生物质液体燃料

2020年：替代1000万吨成品油

✓ 燃料乙醇：

以甜高粱茎秆、甘蔗和木薯等为原料

2020年，年产1000万吨

✓ 生物柴油

以麻疯树、油桐、黄连木、油菜籽等为原料

餐饮等行业废油回收

2020年，年产100万吨

生物质利用

- 生物质气化
- 高温下转化为可燃性气体
- 干燥
- 热解
- 气化
- 生物质液化
- 直接液化
 - 裂解
- 间接液化

生物能源Bio-energy

- Biomass
- Biofuels
- Biological fuel cells
- 主要材料问题：
- 腐蚀：蒸发器，热交换器，汽轮机
- 采用新型合金或防腐蚀涂层

8.总结

- 中国能源以煤为主，石油进口依存度高；
- 清洁能源发展任重道远：2020-2030年国家装机12-15亿千瓦，其中水电3亿千瓦，核电1-2亿千瓦，风电1-2亿千瓦，火电8-9亿千瓦；
- 节能减排要依靠先进技术，还要改变生活方式和理念；
- 电动车发展是个机会：电源技术是关键。
- 新型能源产业方兴未艾，技术创新是重点。

谢谢大家!



Email: fykang@tsinghua.edu.cn

Tel: 18688994456