

核科学与人类社会¹⁾

有马朗人²⁾

(日本科学技术振兴财团)

1 科学篇

每个人都有好奇心,人类对于大自然的结构及其机制的运转过程尤为好奇.而从古至今自然科学发展的源泉正是这种好奇心.因此我们科学家将发现自然的奥秘视为己任.对我们而言,推动科学的发展和人类的进步是一种巨大的满足.同时,我们科学家也有义务去满足公众的好奇心,向他们解释最近取得的研究进展.

科学与技术是相辅相成的.新技术的产生源自基础研究,一个很好的例子就是电磁学.电磁学是由奥斯特、安培和法拉第等伟大的物理学家构建起来的.麦克斯韦创建了麦克斯韦方程,将电场和磁场统一起来,预言了电磁波的存在,并最终被赫兹所证实.而在赫兹发现电磁波后不久,马可尼就利用它发明了无线电报,从此开启了人类步入信息化社会的大门.反过来说,技术的发展又推动了基础研究的新发现.一个很好的例子就是加速器的发展.例如范德格拉夫起电机、直线加速器、回旋加速器和同步加速器.这些加速器促进了核科学的发展,使我们更加清晰地了解自然界结构的层次,从分子、原子、原子核、核子一直到夸克.

核科学为我们揭示了自然的结构,在很大程度上满足了人类的好奇心.这仅仅是核物理为人类社会做出的巨大贡献之一.

美国国家科学院编制了物理学中的 11 个未解决的重大问题(“The 11 Greatest Unanswered Questions of Physics”).这些问题列成表格刊登在 2002 年 2 月出版的 *Discover* 杂志上.在这个表中有三个与核物理相关的问题:

问题 3:从铁元素到铀元素的重元素是如何形成的?

问题 4:中微子有质量吗?

问题 7:在极高温密度条件下是否存在新物态?

我由衷地希望年轻人在核物理的前沿领域展开研究,并将核科学的基础研究成果应用到天体物理等领域,要充分利用放射性核束工厂所提供的机会,研究更多不稳定核的结构及其反应,特别是那些处在极端条件下的原子核,例如那些核素图中远离稳定线的丰中子核,以期获得从铁到铀的重元素的合成机制,这将有助于我们回答第 3 个问题.而双 β 衰变对于回答第 4 个问题是十分重要的.日本理化学研究所(RIKEN)的 Morita 等人最近发现了 $Z=113$ 号元素,对更重元素的探索和发现同样是十分激动人心的.

在核科学对人类的诸多贡献中,核能的贡献无疑是最大的.在许多国家中,核电站都为人们提供了大量的电力.除了核裂变,核聚变也正伴随着国际热核聚变实验反应堆(ITER)计划中的国际交流与合作而得到广泛的研究.虽然我希望聚变反应堆能够很快建成,但是看起来核聚变反应堆的商业化要在 30 到 50 年以后.随着能源危机和全球变暖等问题的出现,核能将成为不可或缺的.在下一节——能源篇中,我将深入地讨论这一问题.

2 能源篇

2.1 人类社会危机

首先让我们从人口问题开始.直到 1800 年,只有不到 10 亿人生活在地球上.大约从 18 世纪 60 年代的工业革命开始,地球上的人口开始迅速增长.2005 年,地球人口达到 64 亿.2030 年,世界人口预计将达到 82 亿.在亚洲,2005 年人口达到 35 亿,到

2011-08-18 收到

1) 此文是由北京大学物理学院张双全、余灵妃根据有马朗人先生 2009 年 8 月 26 日在第五届北京国际亚原子物理暑期学校的演讲录音整理而成,后又经过孟杰校对——编者注

2) 有马朗人先生是日本著名科学家、国际原子核物理领域大师、诗人、教育家和社会活动家、日本科学技术振兴财团会长、科学技术馆馆长、日本俳句学会会长,曾任东京大学校长、理化学研究所所长、日本文部大臣、科技大臣、参议员等职。——译校者注

2030年预计达到44亿,其中,中国的人口预计将从13亿增长到14.5亿,印度的人口预计将从10亿增长到14.9亿。

各国人均年消费能源可参见图1,以石油作为当量,加拿大和美国人均年消费能源约8吨,欧盟国家和日本约4.2吨,中国1.4吨,印度0.5吨。加拿大、美国、欧盟、日本等国必须付出更大的努力,以削减能源消费总量。另一方面,中国、印度和其他新兴国家在未来不可避免地会增加能源消费总量。

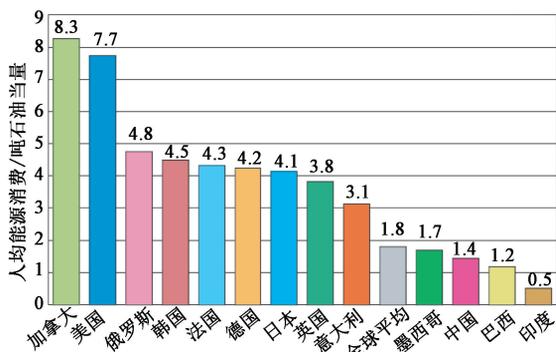


图1 2006年各国的人均能源消费

全球的基本能源需求在2005年为103亿吨石油当量,预计在2030年达到165亿吨。在亚洲,这一数字在2005年是32亿吨,预计到2030年将翻一番达到65亿吨。除非全世界联合起来大刀阔斧地实施能源紧缩计划,否则能源消费的增长将不可避免。特别是中国、印度和其他新兴国家的经济和工业在强劲发展,难以遏制随之而来的能源需求增长。

在这种情形下,人类必须面对化石燃料急剧损耗带来的问题,表1给出了世界一次能源资源可使用年限。按照目前的开采速度,全球原油储量还可开采约41年,天然气储量还可开采约61年,煤还可开采约133年。由于近年原煤消耗的增加,尤其是来自美国和中国的消耗,原煤的可开采年限已大大缩短。同样,铀资源的储备也仅剩约81年。这些事实促使

表1 世界一次能源资源可使用年限

	原油	天然气	煤	铀
探明储量 R	1.238 万亿桶 (至2007年底)	177 万亿立方米 (至2007年底)	8475 亿吨 (至2007年底)	547 万吨 (至2007年1月)
年开采量 P	298 亿桶 (2007年)	2.94 万亿立方米 (2007年)	64 亿吨 (2007年)	消费4万吨(2006年) 需求6.65万吨(2006年)
可使用年限 R/P	41.6年	60.3年	133年	81.6年*
数据来源	BP世界能源统计(2008年6月)			2007年世界铀资源红皮书/ 《2007年铀:资源、产量和需求》 (OECD/NEA/IAEA)

* 数据由2006年年末铀储备量除以年需求量得到

我们考虑核燃料的循环利用,从核废料中提取钚,再与铀混合,作为核燃料。通过这种方法,铀的使用期限可延长约150倍,即99.3(^{238}U 的同位素丰度)除以0.7(^{235}U 的同位素丰度)。为能够延长铀资源的使用期限,需要加强循环利用核燃料领域的研发。

人类还面临着全球变暖的危机。 CO_2 排放量的增加被认为是诱导全球变暖的主要因素。工业革命以前,大气中 CO_2 浓度在280ppm($1\text{ppm}=10^{-6}$)的水平,而人类的活动将这个数增加了80ppm而达到现在的360ppm。如何看待这80ppm的增加,科学家们大致有两个截然不同的立场。一种看法是,这80ppm与以前280ppm的水平相比是相当大的增加,因此认为这是导致全球变暖的一个主要因素;另一种观点是,这80ppm的增长量不超过总量的30%,因此不是全球变暖的主要因素。

我曾向东京大学的Akimasa Sumi教授请教过这一问题,Sumi教授和我一起分享了他通过地球模拟程序(Earth Simulator)得出的计算结果,如图2所示。图2中红线表示实际的大气温度,黑线表示计算结果。图2显示地球温度在1970年前后有轻微降低。其原因被认为是弱的太阳黑子活动周期以及火山活动的增强。然而,在这之后地球温度的升高被认为是人类活动带来的 CO_2 增多而引发的。这些计算值可以很好地解释实际观察值。基于这些计算,Sumi教授认为当前全球变暖是人为的 CO_2 增多的后果。而根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的意见,如果 CO_2 增多的这种人为因素不被遏制,到2100年全球温度将提升 4°C 。

尽管目前人们对化石燃料消耗速度到底有多快还有不同意见,但是化石燃料无疑会消耗殆尽。而且,燃烧化石燃料释放的 CO_2 ,会使全球变暖不可避免。那么,我们该怎么做呢?

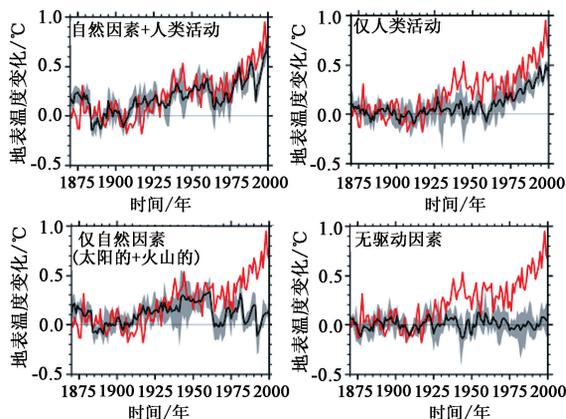


图2 对19世纪中晚期以来全球平均表面大气温度的计算模拟(红线表示实际的大气温度,黑线表示计算结果,见《物理》网刊彩图)

2.2 新能源难堪大任

有人可能立即会说“太阳能和风能怎么样?”,还有生物质能.换句话说,我们有新型能源.实际上,世界上很多人在努力发展新能源.除了上面提到的三种能源外,还有水力资源,同时新的可再生能源也聚焦了人类的目光.我同样相信,为了人类的未来,我们必须发展新能源.但是,到2030或2050年时,我们真的可以发展足够多的新能源吗?

表2给出了2006年美国、欧盟和日本新能源所占国家电力装机总量的百分比.若不统计水电,即使在新能源大力发展的欧盟国家,这一百分比也不超过5.5%.如果将水电统计在内,这一百分比大约就在10%到15%之间.在欧盟国家中,即使是在此领域十分活跃的德国,新能源的百分比也仅是总量的8%.由于德国的持续努力,2009年的数字估计会达到10%.

表2 2006年美国、欧盟和日本新能源所占国家电力装机总量比例

	美国	欧盟	日本
总发电量/TWh	4272	3316	1091
新能源/TWh (包括生物质能、风能、地热、太阳能和潮汐能,未统计水电)	117	184	27
百分比	2.7%	5.5%	2.5%
新能源/TWh (包括水电、生物质能、风能、地热、太阳能和潮汐能)	409	492	113
百分比	9.6%	14.8%	10.4%
数据来源	经济合作与发展组织(OECD) /国际能源署(IEA): 《2008年世界能源展望》一文		

投入新能源所存在的另一个问题是它需要相当长的时间来增加发电总量.以日本为例,2000年新能源相比一次能源的使用量仅为1.2%,到2006年增加到2.0%,即6年增加了0.8%.按照目前的增长速度,到2020年仅能达到2.7%,如果大力投入的话,也许能达到4.3%.而如果加大太阳能光伏发电系统的投入,增长速度可以提高近20倍,但在那之后,不可能继续保持这样的增速.而且,就像太阳能和风能一样,新能源发电量的供应是不稳定的.必须投入相当规模的蓄电池作为备用.另一种选择是准备额外的电力来保障稳定的电力供应.但结果是造成热电站数目的增加,其意义不大.同时,太阳能和风能的能量密度很低,占用的区域面积大,这也是它们的缺点.

从某种意义上讲,每个国家当然应该竭力发展新能源.然而到2050年,要实现CO₂排放量削减50%或更多的目标,我不认为新能源到那时有能力填补(哪怕是接近)相应的能源空缺,也不可能在化石燃料耗尽前及时填补这一空缺.即使梦想新的聚变能源得以实现,国际热核聚变实验堆(ITER)计划的实施也至少需要30年,而此后商业化发电装置的问世可能又需要几十年.

2.3 核能——我们别无选择

那么我们该怎么做?我相信除了投入核电,我们别无选择.我相信我们必须同时发展核能和新能源以获得足以维系的能源支持.

关于核能,国际原子能机构的Yury Sokolov先生曾经指出下面几个值得关注的方向:

(1) 铀资源的稳定供应;(2) 安全性;(3) 废料处理;(4) 公众的接受度;(5) 装置老化和劳动力;(6) 新兴核能国家(如越南和印度尼西亚)步入核电之路;(7) 技术保障/核材料和核不扩散.

为完成这些目标,国际原子能机构将在其中扮演关键的角色.

我们必须避免类似1986年发生在切尔诺贝利(Chernobyl)的严重核事故.我们正通过汲取长期以来的核电运转经验来加强核安全,但公众的接受度是最重要的因素之一.

民意调查(见表3,4)所显示的结果是很有意思的.表4显示,即使在日本,公众对核电的接受度已经大大增加了.已有超过50%的民众支持利用核能来发电,低于25%的民众认为核能是危险的.民意的这一转变,反映出全世界正向建设更多的核电站迈进.

表3 欧美国家支持发展核电的公众比例变化(2005—2008年)*

	2005年	2008年	增长
英国	44%	50%	6%
芬兰	58%	61%	3%
意大利	30%	43%	13%
德国	38%	46%	8%
美国	54%	59% (2009)	5%

* 数据来源:欧盟委员会

表4 日本政府关于核电的民意调查报告(2005年12月)

	1999年	2005年
核电站应该增加	43%	55.0%
核电应该维持现有水平	27%	20.2%
核电站应该关闭	22%	17.0%
核电安全难以保证	25.4%	24.8%
核电是安全的	68.2%	65.9%

表5 2009年世界上核电发展趋势简表

欧美国家	意大利决定重新启动核电开发计划(2008年5月); 英国决定恢复核电站计划; 土耳其计划到2012年建造3座总装机容量为5GW的核电站(2006年); 波兰计划到2020年运行2座核电站(2009年1月); 瑞典废止其取消核能的政策,将建造10座新的核电站(2009年2月); 美国计划到2016年运行4—8座新的核电站.
非洲国家	埃及决定2018年前建造核电站(2008年); 南非正运行2座压水堆,到2030年将建造12座压水堆和24座高温气冷堆.
亚洲国家	海湾国家对核电发展有浓厚兴趣; 阿联酋计划2017年运行第一座核电站(与美国、法国、英国、日本签署合作协议); 约旦科研大臣表示2015年前完成第一座核电站(2007年); 哈萨克斯坦已经启动核电站可行性研究(2007年); 孟加拉国初步落实卢普尔(Rooppur)核电站; 中国正运行11座核电站(9GW)、正在建造8座,预计2020年核电装机总量达到40GW(占全国发电总量的4%); 印度正运行15座核电站(3.4GW),到2020年增加25—30GW,包括到2010年增加0.5GW的增殖反应堆; 印度尼西亚正运行2座核电站(每座1GW),关于核电站建设的最终决议在2009年总统大选之后给出; 韩国正运行20座核电站,正在建造6座,计划建造2座; 菲律宾巴达安核电站自从1987年停止运行,正寻求重启可能性(2009年); 泰国计划2020年核电总量达到2GW; 越南计划2020年核电总量达到4GW,详尽的可行性研究将在2009年启动; 马来西亚进行核电站可行性研究.

表5列出了一些国家的核电发展计划.瑞典的核电发展出现了分水岭:他们原决定2010年前关闭所有核电站,现在他们已撤消这一决定,而计划建设10座新的核电站(2009年2月).

今天,长期以来因为切尔诺贝利的严重核事故而停滞不前的核电,又一次受到广泛的关注.的确有些事情应该由我们核物理学家贡献给社会,其中之一是对核废料处理的改进,比如发展核嬗变技术.核嬗变技术的目的在于减少长寿命同位素在核废料中的比例.的确,我们有一些可能的途径来处理放射性核废料.为此目的,日本强流质子加速器工厂(J-PARC)计划建造加速器驱动核嬗变实验装置.我希望不久的将来在这一项目上有更多的国际合作.

相关核能的另一重要议题是建造增殖反应堆,研究发展诸如钍基反应堆等新型反应堆的可能性.

3 结束语

最后,作为一个日本公民,我的国家已经经受了两次由原子弹带来的毁灭,我恳求全世界避免再次以武力的方式使用核能.

我欣喜地看到长久以来的废止核装备的理念在全球发展.2009年4月,美国总统贝拉克·奥巴马(Barack Obama)强调美国将承担寻求不动用核武器的世界和平和世界安全的义务.我相信和平运用核能对于人类解决由化石燃料损耗带来的两大最紧迫的危机——能源危机和全球气候变暖,是不可或缺的.这将成为核物理学家对人类社会做出的一项伟大贡献.我希望在我们核物理学家群体之中,能够涌现出一批肩负核能技术发展所亟需的基础研究人才.