

能 源 与 安 全

能源与环境研究所出版 · 美国华盛顿 · 一九九八年总第五期

核电：绝非解决全球气候改变问题的良方

阿琼·麦克贾尼

在最近有关全球气候变化的争论中，人们广为重复这样一个论点，核电必须在任何为减少温室气体排放而提出的战略中占据重要位置。支持者们提出，核电作为一种无炭技术，是少数几种既能大幅度减少二氧化碳排放，又能同时满足持续增长的能源需要的方法。这种主张无论在技术方面还是在经济方面都经不起推敲，核电和大量使用矿物燃料都会产生多种问题。本文将探讨与核电有关的各种问题，其他几篇有关全球变暖(第 8 页)和建立可持续能源供应(第 13 页)的文章则着重讨论一些与矿物燃料有关的问题。

反应堆的安全

现在还没有合理或切实有效的途径来消除由商用核电引起的安全和核扩散威胁。现已开发或设计的所有类型的反应堆

风动力系统——可持续能源未来的一部分

都存在发生切尔诺贝利核电站那种规模的灾难性事故的危险，尽管事故的成因和发生可能性取决于反应堆的类型。¹这其中部分原因是商用核电开发是作为核武竞赛的附属品和冷战宣传的工具。²在争相建造新反应堆之时，工业界从一开始就将大众安全、健康、环保甚至经济因素置于武器开发和宣传之后。

早在反应堆开发早期，原子能委员会就已经意识到发生灾难性事故的可能性。1957年，布鲁克海文国家研究所发布了一份名为 WASH-740 的评估报告。该报告概括了重大反应堆事故对健康和财产所可能造成的潜在损害。该报告发布后几个

在本期内

- 全球变暖和温室效应..... 8
- 建立可持续的能源供应...13
- 《京都议定书》.....18

月，国会通过了普莱斯-安德森法案，将核设施的赔偿责任限制为5亿美元——这只是WASH-740报告中提出的财产损失预测数字的 $1/10^3$ 。1988年国会又将该限制提高至70亿美元，但还是大大低于此类事故可能造成的损失。

尽管1986年4月发生的切尔诺贝利灾难提供了明证，但核工业界还是继续低估反应堆发生灾难性事故的可能。切尔诺贝利的爆炸和大火将放射性尘埃散落到北半球的每个国家，并迫使10多万人从核工厂周围方圆30公里内搬离，使人们被迫放弃了25-37.5万公顷农业用地。但是核工业界和国际原子能机构都引用了苏联官方提出的具有误导性的数据，忽略了其中缺乏有关健康影响的准确数据这一事实，力图将该事故造成的影响大事化小。苏联官方在事故发生后10天内对辐射放射总量估计为8,000万居里。但苏联科学家佐雷斯·梅德费多夫在一项独立评估中则估计放射性碘和放射性铯的放射总量约是官方公布数据的3倍以上。⁴ 切尔诺贝利事故造成的损失总值虽然难以计算，但即使是官方估算的100-150亿美元的损失也远远超出了普莱斯·安德森法案中规定的70亿美元的赔偿上限。

切尔诺贝利事故为我们留下的最重要也是最惨痛的教训是，事实上发生最严重的核电事故是可能的。而且，因此类严重事故造成的问题可能会在未来许多代人的时间范围内持续存在。尽管人们提出主张建造新一代“内在安全的反应堆”，但却夸大并严重误导了其安全性。⁵ 虽然人们希望建造一种经济实用且不会发生重大灾难性事故

的反应堆，但这需要花费几十年时间去试验各种设计方案，才能确定能否造出这种反应堆。⁶ 由此我们可以得出结论，核电并不能在安全的前提下帮助我们人类减少二氧化碳排放，而这恰恰是我们必须在今后几年间制定政策加以解决的紧迫问题。

经济性

如第15页表格所示，就发电方式而言，建设核电站与高效联合循环天然气发电厂相比，其成本要高得多，风险也更大。即使在高度依靠核电的法国，官方也承认利用天然气的联合循环发电厂要比核电厂更具经济性。⁷ 预计每个核电厂都要耗费十亿至几十亿美元（超期运行时）。⁸ 如需从根本上减少二氧化碳排放量，则核电厂不仅必须提供大部分世界电力的增长，还必须在许多煤炭发电厂退役后将其取代。这就必须在今后几十年间建造数量级为2,000座的核电厂（每座发电容量为1,000兆瓦）。人类为使用核能而必须付出的代价将达到几万亿美元。这种巨额资金将来只能从政府补贴和/或提高电价来获得。这些资金显然可更有效地用于提高能源效率、热电联合、再生能源、综合循环的电厂或燃料电池等领域，会取得更加经济和高效的结果。

因此，对核电投资必然会影响到人类为减少二氧化碳排放而作出的努力，使后者无法得到合适的投资。

核不扩散与裁军⁹

对核不扩散与裁军事务的挑战

甚至要比经济和安全事务更加令人感到恐怖不安，因为它们不再仅仅局限于技术范围，而是有关军事、政治和制度等事务。

所有商用反应堆都生产钚。¹⁰一旦通过再处理实现分离，乏燃料中的钚就可以用来制造核武器。自80年代初期以来，已分离商用钚的储存量一直在迅速增加，并将在今后几年中超过军用钚的储存量。法国、俄罗斯、英国、日本和印度等五国已经制定了商用再处理政策。另外德国、荷兰、比利时、瑞士、意大利和美国也拥有商业分离钚（来自一个1966年至1972年间运行的商用再处理工厂）。¹¹

如果将核电作为减少温室气体排放的一种途径，钚的存储量势必大幅增加。如果在今后几十年间新建2,000座核电厂（在替换现有的350,000兆瓦核电发电能力以外），到下个世纪中叶全球商用钚的存储量将高达20,000公吨，远远高出现有储量。如此巨大的存储量、对铀资源需求的压力和公众对核废料贮存的反对必将大大加剧商用钚分离的压力以及钚在核反应堆中的使用，也必将激化与核电有关的经济、环境和核不扩散问题。

几十年来，核技术一直被套以“高技术”的光环，将其促进推广也是《不扩散核武器条约》的一部分。¹²西方媒体对其的宣传至少可以回溯至艾森豪威尔总统于1953年12月发表的“原子为和平”讲话。在这篇讲话中，他将放弃核武器与推广核能联系在一起。这些冷战政策的结果是在钚经济中享有既得利益的各主要国家纷纷在政府和私人机构的补贴下建立起了巨大的核设施。尽管其在增殖反应堆和再处理

《能源与安全》

《能源与安全》是一份报导核不扩散、裁军和能源可持续性的时事通讯刊物，由能源与环境研究所(IEER)一年发行4次。

IEER地址: 6935 Laurel Avenue, Takoma Park, MD 20912, USA

电话: (301) 270-5500

传真: (301) 270-3029

INTERNET: ieer@ieer.org

万维网地址: <http://www.ieer.org>

能源与环境研究所就广泛的问题向公众和决策者提供有见地的、明确的和稳妥的科学和技术研究报告。该研究所旨在向公共政策事务提出科学的意见，以促进科学的民主化和更健康的环境。

能源与环境研究所成员:

所长: 阿琼·麦克贾尼

执行主任: 伯恩德·弗兰克

助理对外协调员: 罗伯特·布鲁克斯

图书馆员: 洛伊丝·查墨斯

工程师: 马克·菲奥兰凡特

簿记员: 戴安娜·科恩

项目科学家: 安妮·麦克贾尼

对外协调员: 帕特·奥特梅尔

全球对外协调员: 阿妮塔·塞斯

行政助理: 贝特西·瑟洛-希尔兹

感谢我们的支持者

我们衷心感谢我们的资助者，是他们的慷慨资助使我们能够进行自己的“核材料危险”全球计划。我们的资助者是 W. Alton Jones Foundation, John D. And Catherine T. MacArthur Foundation, C. S. Fund 和 H K H Foundation.

我们还要感谢能源与安全研究所的其他资助者，因为我们的全球计划使用了由他们资助的项目中所产生的物资。这些资助者是 Public Welfare Foundation, John Merck Fund, Ploughshares Fund, Unitarian Universalist Veatch Program at Shelter Rock, Rockefeller Financial Service, Stewart R. Mott Charitable Trust, Town Creek Foundation, Beldon II Fund 和 DJB Foundation. 本期刊物英文版的设计由华盛顿特区的 Cutting Edge 图象公司承担。照片由 Atomic Photographers Guild 的罗伯特·德尔·特里迪塞提供。

主管编辑: 阿妮塔·塞斯

本期英文版于1998年3月出版。

等关键技术上都遇到了环境、不扩散和经济方面的挫折，但是这些官僚机构一直在政治和财政上享有很大的权利。¹³

核技术的适用性

核电与世界上绝大多数国家人民的需要无关，因为核电厂太大太贵以致无法进入这些国家的电网。在印度和中国等可能利用核电的国家，其现在的经济和技术基础都更适于利用其它技术，比如联合循环天然气火力发电厂，也更适于大幅提高其电网效率和煤炭火力发电厂的效率。在这些技术上进行投资会比将资金投入核电厂产生更多电力。在经历了40年的开发后，印度迄今只有3%的电力来自核电。

现在只有少数几个国家从根本上依赖核电厂，且多为高度发达的工业化国家。这些国家就象其它国家一样，有提高能源利用有效性的巨大潜力。这对具有最多的依据执照运行的核发电厂的美国来将，尤其如此(最新统计有106家)。而且，这些国家中的一部分在减少而不是增加对核电的依赖。即使在法国和日本，对核电的严重依赖也正越来越受到政府和公众的审视。

放射性废料

如上所述，如果我们想利用核电来显著减少温室气体，则势必需要建造几千座新的核电厂。这又必将在现有核废料的基础上，产生几十万公吨乏燃料。现在各国还没有就乏燃料的管理制定任何可行的政策。核电倡导者提出一种解决方案，即至少建造一座地质储藏库，作为核电在美国再获生机的基本办

法。这一主张激起一片反对之声，除非核废料的长期管理问题可以与核电的推广区分开来。而建议通过原子核嬗变来改变废料属性(将长期存在放射性的元素改变为短期存在的元素)的方法由于各种原因也事实上不可行，因为这种转变过程不仅需要这样或那样的核反应堆，也需要利用再处理技术，而这一技术稍加改动就可用于生产武器用材料。原子核嬗变和再处理技术也会产生大量新的放射性废料，从而造成其自身的核废料管理问题。因此，对扩散和废料管理首先可能作出的技术回答就可能是没有真正解决废料管理问题的情况下反而使扩散问题恶化。除了无法消除对储藏库或其它处理方略的需要之外，这些技术也非常昂贵，并将大幅度提高核能利用的成本，而核能本来就没有什么竞争力。¹⁴

逐渐淘汰核能

除了上述安全、扩散和经济缺点之外，另有许多理由可以证明逐步淘汰核能对于一个可持续、和平和有利于健康的能源未来是必要的。这些理由包括：

- 现存大量分离钚和乏燃料中的钚使在危机或战争时期回复到核武装状态更加可能。
- 在许多国家，包括现有的核武国家，最热衷于推广核能的官僚机构也往往力图发展核武器。尽管核电在技术、环境和经济等方面存在着诸多失败，但这些机构仍然对钚经济寄予希望。这将继续是扩散和公开宣布(拥有核武器)政策的诱因。

- 核电厂在常规战争中可能成为攻击目标，从而大大恶化其对环境和健康的破坏。
- 推广核能加剧了中亚和西亚地区(包括波斯湾地区)的冲突、不稳定和不确定因素。美国、欧共体、俄罗斯、马来西亚和伊朗等国在法国-Gazprom-马来西亚等投资伊朗油气问题上发生冲突就是重要一例。

除非首先倡导使用核能的西方国家宣布放弃并开始逐步淘汰核能，其它国家才可能放弃发展核能，并且西方国家才会有拒绝向其它国家提供核技术的基础。例如，尽管伊朗服从国际原子能机构的检查和监督，美国还是非常关注伊朗购买俄罗斯反应堆可能造成的核技术扩散的后果，因为美国政府怀疑伊朗有一个秘密的核武器计划。这一点既富讽刺意味也具教育意义，因为正是美国在70年代首先鼓励伊朗发展核计划，那时尚未发生1979年的革命。尽管西方国家逐步停止利用核电并不足以保证在其它问题上取得进展，或使其它国家也采取同样的步骤，但满足这个基本条件却可以使得那些与石油、天然气和温室气体增加相关的问题更易管理。如上所述，如果不逐步淘汰核能，就不可能理想地解决乏燃料的长期管理问题。

各国不可能立即或在没有周密计划的情况下淘汰核电。事实上，在一些国家，如果马上关闭所有核电厂，势必造成整个或部分电网严重混乱，甚至使之瘫痪。法国、德国、日本、前苏联部分地区和东欧、美国部分地区的情况就是如此。因此，在倡导逐步停止使用核电的同时，还应该提出并实施一套可以解

决温室气体排放和满足世界绝大多数人口能源需要的明确的能源政策。目前，人们已经提出了许多可行的政策、技术和建议。(详细例证见第13页上的文章)。

¹ 见能源与环境研究所1996年报告中有关反应堆事故的表格，《核能骗局》，阿琼·麦克贾尼和斯考特·塞尔斯加，第121页。也可通过能源与环境研究所的网址：www.ieer.org/reports/accident.html查找。

² 在《核能骗局》中详加探讨。这一报告的主要部分可通过网址：www.ieer.org/reports/npd.html获得。

³ 原子能委员会，“大型核电站主要事故的理论可能性和后果：如果假设中的某些理论上可能出现但实践上很不可能出现的事故在大型核电厂发生了的可能后果研究”，WASH-740，美国原子能委员会，华盛顿特区，1957年3月。

⁴ 佐雷斯·A·梅德费多夫，《切尔诺贝利的悲剧》(纽约：W·W·诺顿出版社，1990年)，第78页。(梅德费多夫博士也是苏联第一位公开报告1957年车里雅宾斯克-65高放射性废料存贮池爆炸的科学家)。重要的是要强调，(苏联)官方对切尔诺贝利事故宣布是对事故后10天经过衰变修正的数据，这正是低估的一部分。

⁵ 《核能骗局》，第118-120页。

⁶ 《核能骗局》，第3-4章。

⁷ 埃杜瓦·朗内，“当相对成本上升时核电的前景出现困难”，《巴黎解放报》，1997年4月17日。

⁸ 这一成本未打任何折扣。也就是说，如果建立核电厂代替联合循环厂，这是未来电力生产所带来的额外成本在今天的价值。它考虑的联合循环厂的燃料成本较高，而且在联合循环厂的整个生命周期中都考虑这些燃料的成本。未来成本或收益在今日的价值应在折扣后获得，因为未来的钱没有手中的现金值钱。

⁹ 关于核动力造成的核扩散后果的更多信息请参见《能源与安全》(能源与环境研究所在国际上发行的时事通讯)第1-3期。可以向能源与环境研究所索要刊物，也可通过网址：www.ieer.org/ensec/index.html查询。

¹⁰ 海军的许多核反应堆不产生大量钚，因为

它们使用高浓铀为燃料，但是在这种情况下，高浓铀本身可用来制造核武器。有人建议使用以铀-233为燃料并因此将不产生钚的反应堆。自然界中不存在铀-233，必须由钍-232制造。此种类型的反应堆尚未商业化。已有人建议将铀-235和钍-232结合起来使用，以增殖产生铀-233，以在现有轻水堆中使用。（见：阿列克斯·加尔伯林、保罗·赖克特、阿尔文·瑞得考斯基，“轻水堆中的钍燃料——降低核电燃料循环的扩散风险，”《科学与全球安全》第六卷（1996年），第267-292页）。然而，这一广为宣传的论断，即这种燃料可以几乎消除扩散顾虑，经不起仔细的检验，因为铀-233象钚-239一样，也可以用于核武器。

¹¹ 有关商用分离钚储量的数据请查阅戴维·奥尔布莱特，弗朗斯·伯克豪特和威廉·沃

尔克：《钚和高浓铀1996：世界的库存、能力和政策》（牛津：牛津大学出版社，1997年），第230页。世界范围的储存量以每年约20公吨的速度递增。参见《能源与安全》第1期。

¹² 《不扩散核武器条约》第四条指出：“……所有缔约国承诺促进并有权参加在最大可能范围内为和平利用核能而交换设备、材料和科学技术情报。除此以外，各缔约国还应……在进一步发展为和平目的而应用核能方面……进行合作以作出贡献。”

¹³ 自1992年以来，法国能源部一直认为钚的价值为零。然而，法国商用钚的价值事实上一直为负数，因为从乏燃料中将之萃取的成本差不多是每千克（钚）10万美元。

¹⁴ 国家研究理事会：《核废料：分离和嬗变技术》（华盛顿特区：国家科学院出版社，1996年）。

能源与安全的联系

阿琼·麦克贾尼

许多可能影响今后几个世纪人类生存和幸福的安全、经济和环境问题现在都集中在一个问题上——能源。由于温室气体可能会彻底改变地球的气候，人们是否会在21世纪重新采用核能来对付温室气体增加的威胁？钚资源是否会作为一种电力来源大规模进入商业市场，从而造成更多的核扩散威胁？来自波斯湾（西方国家的“生命线”）的石油输出管道是否会因由核武器或大规模杀伤性武器相关问题引起的冲突而中断

这些问题绝不是什麼新问题。比如，在冷战时期，五角大楼制定的一些核战争方案就是首先从波斯湾-西亚地区的危机开始，然后再向欧洲地区蔓延。在第二次世界大

战期间，很多战略都是围绕着对石油资源的控制而制定的，因为这是所有参战各方战争机器的生命线。事实上，美日危机就是围绕着当时由荷兰殖民统治的印尼的石油资源而展开的，冲突激化的结果是日本轰炸珍珠港。¹ 二次大战期间同盟国战略的一个重要组成部分就是防止德国获得当时由比利时殖民统治的刚果的丰富的铀资源。²

环境联系在过去也已显现出来。在城市地区到处燃烧煤炭已经对空气造成了可怕的污染，比如在伦敦（同样也有现在的一些中国城市）。严重的核电厂事故引起的碘-131和铯-137等裂变产物的扩散所造成的破坏性后果，一直是人们对核电主要关注的内容之一。对煤和铀的采掘已经在世界许多地区造成污染。核电厂中大量产生的钚-239也是人们关注核电的主要原因，这

不仅是因为它可用于制造武器，也是因为它具有较长的半衰期(24,000 年)和较高的放射毒性。

这一切现已造成了一种前所未有的政治、军事和环境因素共同作用的局面。以下是它的几项特征：

- 温室气体(主要是二氧化碳、甲烷、氧化亚氮和碳化卤素)的积累已经到了可能影响地球气候的地步。扩大利用核电以防止破坏性的气候改变这一主张不仅受到核工业界的支持，而且受到某些国家政府的支持，这其中不乏一些最富有、最强大的国家。
- 苏联解体和该地区后来发生的经济危机更使人们感到害怕，因为核弹头或那些来自无论是军方或商业公司的可用于核武器的材料可能会在国际黑市上出现。
- 美国、俄罗斯和其它核国家现在主张将军事计划中多余的钚资源作为燃料用于商业反应堆。而且，尽管钚在经济、环境和扩散等方面存在诸多问题，一些国家中势力强大的官僚机构还是支持继续经营再处理厂(法国、英国、俄罗斯、日本和印度)。同时，美国政治和经济上的有势力者对从商业乏燃料中分离钚重新抱有兴趣。
- 自 1979 年伊朗革命之后，波斯湾地区一直处于长期的紧张的军事危机之中，其中包括 80 年代的两伊战争、1990 年伊拉克入侵科威特、1991 年海湾战争、伊拉克计划发展大规模杀伤性武器和联合国对伊拉克实

施制裁。

- 天然气可以用于缓解温室气体危机，但世界上这种资源的绝大部分都集中在中亚和波斯湾地区，和那些属于阿塞拜疆、哈萨克斯坦、伊朗、沙特、伊拉克和卡塔尔的陆地或沿海地区。这些国家同时也拥有世界上最大的石油储备。因此，天然气运输的安全问题——这一对能源供应和减少温室气体排放至关重要的问题——又成了该地区各种安全危机中的新问题。

这些问题相互缠绕，也相当复杂，以至于任何地区的大国政府和大公司所作出的重大决定都可能对所有这些地区产生长久而深远的影响。对全球形势的考察使我们得出结论，我们不可能就核开发所可能造成的安全、健康和环境后果提供准确、全面的信息，除非将对广泛的能源问题的考虑与这些因素结合起来。

能源与环境研究所的研究人员在能源和气候变化问题(包括臭氧层保护问题)方面具有丰富的经验，尽管许多人更了解我们与核武器有关的工作。我在 70 年代从事的绝大多数工作以及在 80 年代和 90 年代所从事的大量工作都与这些问题有关。能源与环境研究所已就臭氧层保护问题发表了许多报告，这其中有最初的《拯救我们的“皮肤”》。该报告写于 1987 年，就臭氧耗竭的化学性质作了基础分析。还有麻省理工学院出版社于 1995 年出版的《修补臭氧洞》一书。《科学为了民主行动》杂志以往所主要关注的是与核武器相关的环境和安全问题，能源与环境研究所将在明

年更多地将两者结合起来开展研究。

¹ 丹尼尔·耶金：《大奖》，纽约：西蒙和舒

斯特出版社，1991年，第314-316页。

² 莱斯利·R·格罗夫：《现在可以说了：曼哈顿计划内幕》（纽约：哈泼兄弟出版社，1962年），第33-35页和第218-220页。

全球变暖和温室效应

凯文·格尼

作为地球大气的组成部分、能源从中通过或被吸收的各种气体，在调节地球温度方面发挥着至关重要的作用。大气的主要组成部分是分子氮(78%)和氧气(21%)，另外还含有少量的放射性活性气体。放射性活性气体主要有水蒸气和二氧化碳，两者的存在数量都相当稀少。这些气体允许主要为可见光辐射的大多数阳光通过大气射至地球表面，70%的能源在此被吸收，从而提高地球温度。然后地球向太空发出热(红外)辐射，从而保持能源平衡：进入地球/大气系统的能源数量与离开的能源数量持平。

在这些热辐射离开大气的过程中，被遭到放射性活性微量气体的截留。后者吸收向外发射的辐射，并在此过程中提高了温度。热辐射发射和大气吸收之间的相互作用提高了地球和大气系统的温度。事实上，如果大气中没有发射性活性气体存在，地球温度将只有华氏 1.4 度(摄氏-17 度)。由于大气将能量吸收，地球平均温度现在是令人舒适的华氏 59 度(摄氏 15 度)。我们现在把这种隔温能力称作“温室效应”，因为这种过程与温室很相似。

在温室中可见光通过顶棚上的窗格玻璃，然后通过玻璃吸收红外辐射将热量滞留其中。

不幸的是，燃烧化石燃料、大规模使用化肥、畜牧生产和砍伐森林等人类活动已经直接将大气中的“温室气体”数量增加到高于自然的水平。温室气体浓度的增加预计会将地球平均温度提高到可能破坏大气、海洋和生态的程度，并最终破坏人类系统和幸福。自然温室效应的增强现象现在被称作“全球变暖”。

按照其对全球变暖所估计造成的影响，主要的温室气体包括二氧化碳、甲烷、碳化卤素和氧化亚氮。从地球周围远距离所作的测量显示，此类气体在大气中浓度的增加是千真万确、毫无疑问的。有些气体，比如二氧化碳，既有自然气体，也有人类造成的，而碳化卤素等其它气体则纯粹是人类自己产生的。

主要温室气体

二氧化碳(CO₂)：二氧化碳是迄今为止对气候变化造成影响最大的气体，对全球变暖约负 64% 的责任。向大气中排放二氧化碳的主要来源是化石燃料的生产、运输、加工和消耗(86%)、热带森林砍伐和其它

生物量的焚烧(12%)，以及其它来源(2%)，比如水泥生产和一氧化碳的氧化等。一旦释放，二氧化碳的一种特别分子在最终通过海洋过程或地球生命储存的长期增长而去除(比如被植物所吸收)前，在大气和生物群之间进行循环。某种气体经排放后，其中63%从大气中被去除所需的时间称为有效驻留时间。尽管这一重要的参数对计算某种温室

气体对气候造成的影响非常重要，但它往往存在相当的不确定性。如果温室气体的排放速度高于其去除速度，则其在大气中的浓度就会增加。就二氧化碳而言，在过去的一个多世纪中就出现了这种情况。估计二氧化碳的有效驻留时间在50—200年之间。

甲烷(CH₄)：甲烷也同样有天然

表1. 主要温室气体的特性

温室气体	主要来源	目前大气中的浓度(ppmv)	年增长率(%)	大气的增加*	大气中有效的驻留时间	洗涤与贮存*
二氧化碳	商业能源生产；砍伐森林；其它生物量燃烧	360	0.4	~71 亿公吨/年 ¹	50-200年	大气贮存；海洋吸收；北半球森林增长而吸收(几年后才开始)。在土壤和深海中转化(以世纪为时间单位)
甲烷	天然气生产和传送；肠发酵(例如：牲畜)，粮食耕种；垃圾填埋场气体排放，森林砍伐	1.7	0.5	3700 万公吨/年	12.5年	主要去除过程：对流层羟基根 ² ；再有：平流层；土壤中。
碳化卤素最丰富的是CFC-11和CFC-12	完全由于人类原因：在工业过程中使用，以及空调和冰箱(作为冷却剂和绝热材料)的最终产物	CFC-11=27 CFC-12=500	由于禁止使用而下降。 替代品(HCFCs)以及(HFCs)看上去正在增加	CFCs：目前~0由于蒙特利尔议定书，应该逐渐降低；HCFCs和HFCs最近表明正在上升	范围从几年至几千年不等	大气贮存；主要通过平流层阳光的分解(光解作用)去除。
氧化亚氮	主要来自化肥的使用和矿物燃料的燃烧	3.15	0.25	3-8 百万公吨/年	120年	重要通过平流层阳光的分解(光解作用)去除。

* “大气增加”和“洗涤与贮存”两栏中的数据来自气候变化国际专家小组，《气候变化1995》(剑桥大学出版社，1996年)第15-19页。

和人为之分。人为产生的甲烷主要源于燃料生产、肠发酵(比如牲畜)、粮食耕种、垃圾填埋场气体排放和森林砍伐(主要是生物量焚烧和过量有机物质的腐败)。甲烷排放是温室气体的重要来源,因为它的影响程度在当前全球变暖中达到约 20%。就一个分子对一个分子来看,甲烷作为一种温室气体的有效性是二氧化碳的 21 倍。从大气中去除甲烷的主要途径是它与氢氧基(OH)发生反应。³ 因为许多碳氢化合物和碳化卤素(包括许多消耗臭氧的化合物)也是通过与氢氧基发生反应才能从大气中去除,较高的甲烷浓度可能严重影响大气去除温室气体的总体能力。有些数据显示甲烷和其它污染物已经造成氢氧基浓度的降低。甲烷在大气中的浓度已经有所提高,其中有约 30%是因为大气吸收甲烷能力的降低而造成的。

碳化卤素: 碳化卤素是一类化学合成物,既有人为的也有天然的,其包含碳和一个或多个卤族原子,比如氟和氯。⁴ 就其对全球变暖造成的影响而言,数量最多的碳化卤素是含氯氟烃(CFCs,其商用名为氟利昂),特别是 CFC-11 和 CFC-12。尽管其在大气中的存量非常微小,除了人们熟知的消耗臭氧能力之外,这些化学合成物还向人们展示了强大的放射性捕获能力。碳化卤素对当前全球变暖的影响程度约达 10%,由于国际上禁止它们的生产和消耗,这些化合物在大气中的浓度已经开始下降。HCFCs 和 HFCs 可以用于替代氟利昂,对这些类似的化学品的测试显示其大气浓度正在增加。如果其浓度继续增加,这

些替代化学品将对未来的全球变暖产生重大影响。

氧化亚氮(N₂O): 与二氧化碳相似,氧化亚氮天然存在于大气中。但是,大量使用人造氮肥和燃烧化石燃料则会因为人为原因造成氧化亚氮的大量排放。氧化亚氮对当前全球变暖的影响程度约为 6%。

全球变暖的测量和模型建立

过去 100 年间收集的温度资料显示,自 19 世纪末以来,全球平均温度已经显著上升约 0.3-0.6 摄氏度。尽管在气温升高是由温室气体增加而造成的这一点上还存在不确定性,但气温升高的记录到目前为止与全球变暖理论相吻合。这一证据以及不断出现的极端气候事件,促使政府间气候变化专家小组作出结论,“事实明证的平衡表明人类对全球气候造成了明显的影响”。⁵

为了估计温室气体增加究竟会对未来气候造成什么影响,人们开发了一种称作大气环流模型的气候模型,并对实际气候的工作方式作出各种假设。尽管就该推测而言还存在不确定因素(主要是因为尚难确定蒸发的增加和云的形成究竟会在辐射和热能的再分配中发挥什么作用),但人们近乎一致地估计,如果二氧化碳等价物达到工业文明前水平的 2 倍,则地球平均温度将上升 1.0-3.5 摄氏度。就目前趋势而言,这种情况可能在 2100 年左右发生。就地区而言,极区的温度可能上升高达 10 摄氏度,而赤道地区的温度可能根本就没有变化。

京都议定书管制的主要温室气体的生命周期, 浓度和对全球变暖的潜力¹

温室气体	化学式*	大气中的 生命周期 (年)	工业化前的 浓度	1994年的 浓度	浓度 变化率 ²	对全球变暖的潜力 ³ (时间尺度)		
						20年	100年	500年
二氧化碳	CO ₂	50-200 ⁴	~280ppmv	358ppmv	1.5ppmv/yr (0.4%/年)	1	1	1
甲烷 ⁵	CH ₄	12 ± 3 ⁶	~700ppbv	1720ppbv	10ppbv/yr (0.6%/年)	56	21	6.5
氧化亚氮	N ₂ O	120	~275ppbv	312ppbv ⁷	0.8ppbv/yr (0.25%/年)	280	310	170
六氟化硫	SF ₆	3,200	0	3.2pptv	0.2pptv/yr (6.3%/年)	16,300	23,900	34,900
HFC-32	CH ₂ F ₂	5.6	0	0(1989 年估计)	0	2,100	650	200
HFC-125	C ₂ HF ₅	32.6	0	0(1989 年估计)	0	4,600	2,800	920
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14.6	0	0(1989 年估计)	0	3,400	1,300	420
HFC-143a	C ₂ H ₃ F ₃	48.3	0	0(1989 年估计)	0	5,000	3,800	1,400
HFC-152a	C ₂ H ₄ F ₂	1.5	0	0(1989 年估计)	0	460	140	42

资料来源: 气候变化国际专家小组: 《气候变化 1995》, (剑桥大学出版社, 1996年), 第15, 22页; A·麦克贾尼和K·格尼: 《修补臭氧洞》(剑桥, 麻省理工学院出版社, 1995年), 第96, 103页; M·麦茨等: “六氟化硫——一种强有力的新型大气示踪物”, 《大气环境》, 第36卷第10/11期, 1996年, 第1621-1629页。

*化学式和对大气生命周期的估计也许不同。它们来自气候变化国际专家小组, 1996年。

pptv=容量的兆兆分率

CFC=氟利昂

ppbv=容量的10亿分率

ppmv=容量的兆分率

1. 蒙特利尔议定书规定的氟利昂, HFC和其它碳化卤素并未包括在该表格中。
2. 二氧化碳, 甲烷和氧化亚氮的增长率取自1984年以来十年间的平均数。
3. 全球变暖潜力取决于与碳循环和二氧化碳浓度有关的许多假设。这里列举的数字根据伯尼碳循环模型和目前的二氧化碳浓度计算得出。
4. 二氧化碳无法定义单独的生命周期, 因为不同洗涤过程的吸收率不同。
5. 甲烷对全球变暖的潜力包括对流层臭氧生成的间接影响以及平流层水蒸气的生成。
6. 此项被定义为调节时间, 它考虑甲烷对其自身生命周期中的间接影响。换句话说, 甲烷可以影响大气净化包括甲烷在内的污染物的能力。见《修补臭氧洞》, 第262-263页; 以及气候变化国际专家小组, 1995年第18-19页。
7. 根据1992-1993年数据估计。

如果温室气体浓度进一步增加, 全球变暖的程度可能超过此项预计。许多研究者也提出甲烷和/

或二氧化碳可能发生灾难性的突然增加。温度升高可能导致极区的永冻土层和冰冻土层显著融化, 从而

释放出其中包含的大量甲烷和二氧化碳。排放的温室气体数量可能相当巨大，其对大气化学和大气组成的影响也是无法预测的，现在几乎没有什么模型可以使人们充满自信地对此作出预测。我们甚至不完全了解如何计算这种灾难性事件发生与否的可能性。我们只知道这可能发生，而且其造成的破坏性结果可能远远超出任何现有的全球变暖模型所能作出的预测。

除了在全球平均温度方面可能造成改变之外，由于对发射出去的辐射吸收的增加和由此造成的温度升高，其它气候变量也会发生改变。尽管具体而言还存在相当的不确定性，但可能出现的最重要改变是：

- 地球降水将会增加，特别是在冬天的中高纬度地区；
- 中纬度以上地区在夏天的土壤湿度会降低；
- 全球的海冰和积雪将会减少；
- 热带暴雨强度将会提高；
- 2100年之前地球海平面将会抬高50厘米(略高于1.5英尺)。

由于气候和水文系统受到破坏，生态、生物化学、人类和动物系统会相应发生一系列变化。它们可能是气候变化的绝对数量造成的，也/或可能是预测变化的快速性造成的。事实上，有些研究人员认为温度变化和其它变化的速度可能是造成生态和经济破坏的主要原因，因为无论是生态系统还是人类都没有足够的时间进行调整。⁶

解决方案

随着科学的进步，不确定因素

的进一步减少，现在已经出现了许多缓解全球变暖的解决方案。既然从化石燃料使用中排放的二氧化碳是温室气体的最大来源，人们现在正在认真探讨如何改变现有的能源生产和消耗状况。由于就每单位能量而言，煤产生的二氧化碳要比天然气产生的来得多，人们就此提出了许多建议，其中包括在发电过程中转向使用天然气等。能源更有效的措施，如：改进点火、提高工业加工的有效性、电热共生(见“亲爱的阿琼”，第21页)、更好的建筑物隔热、使用更多的高效汽车和卡车等，都可以进一步减少二氧化碳的排放量。人们也提出提高对核电的依赖程度，但无论就经济还是环境而言这都不是一种好的选择方案(见首页文章)。

鉴于当前在全球许多地区的能源趋势和电力扩大使用的消耗，逐渐放弃利用化石能源就长期而言是必需的，只有这样才可能将预测的二氧化碳增多缓解到必要的程度。为了达到这一目的，人们正在考虑使用太阳能电池、生物量和风能等再生资源。在转而使用这些资源的过程中，天然气不啻为一种良好的燃料来源。但应当强调的是，天然气的生产、运输和使用也会引起少量甲烷排放，其产生的温室效应将会很大，因为甲烷是比二氧化碳更为强大的温室气体。在增加使用天然气的同时，必须采取措施减少人为甲烷的排放。这可以通过多种渠道来实现，比如收集和使用从垃圾填埋场中排放的甲烷(废弃食物等有机物因厌氧分解而发生的排放)、减少运输损耗、通过厌氧消化将牲畜粪转化成可利用的甲烷。

当然，通过植物和树木的净增

加也可能将二氧化碳直接从大气中去除，这种缓解方案称作**碳查封**。通过在一些已经转向农业的地区（比如新英格兰）植树造林，可以将空气中增加的二氧化碳永久性存放在土壤或活生物的组织中。人们也提出了其它一些储气方案，比如将二氧化碳泵入地下或海底气层中。

限制碳化卤素、氧化亚氮和甲烷等其它温室气体的排放，也可以帮助缓解全球变暖。如上所述，制定法规限制使用氟利昂已经收到了很好的效果，但对HFCs和HCFCs等合成物要么还没有得到有效的管制，要么得等到几十年后才会被逐步淘汰。

近100年因人类活动而造成的温室气体增加现象是一个无可争辩的既成事实。人们也知道这些气体一般都具有放射特性。本研究领域的众多科学家将这些事实与许多实验室试验、对地球温度的观察和生物化学的特性结合起来，普遍认为温室气体增加已经影响了地球的气候，如果我们不采取措施加以遏制，则可能造成更大的破坏。人们知道遏制的方法——目前最大的不确定因素不是技术事实，而是费用问题。

减少温室气体，建立可持续能源供应

阿琼·麦克贾尼

由于大规模利用化石燃料和核电，地球能源系统对人类的幸福构成了严重威胁，虽然其威胁方式各有不同。人类对造成温室气体的化石燃料

¹ 为比较起见，1994年的排放量为6.1亿公吨/年。

² 大气层中甲烷的大量增加减少了羟基根的长度，从而进一步减少甲烷的减少速度。

³ 大气中主要有四种去除机制或“洗涤槽”，它们帮助去除消耗臭氧的化合物：与其它化合物进行反应发生化学变化；通过与太阳辐射的相互变化发生化学变化；在雨水或海水中分解；以及表面吸收。通过羟基反应，许多消耗臭氧的化合物被去除。这种情况主要在羟基丰富的对流层出现。欲了解有关大气化学中羟基作用的更详尽介绍，请参见《修补臭氧洞》第257-264页。

⁴ 碳化卤素来自一种称作碳氢化合物的较大类化学物质。这种化学物质由碳和氢构成。碳氢化合物中一个或多个氢原子由一个或多个卤素原子代替，构成碳化卤素。

⁵ 摘自世界气象组织/联合国环境项目，《气候变化1995：气候变化科学》（英国剑桥：剑桥大学出版社1996年），第5页。气候变化国际专家小组于1988年由世界气象组织和联合国环境项目联合建立。

⁶ 世界气象组织/联合国环境项目，《气候变化1995：气候变化的冲击、适应与缓解》（英国剑桥：剑桥大学出版社，1996年），第3-12页。

和其它资源的依赖可能导致地球气候发生灾难性变化。当前，生物圈吸收二氧化碳的能力大大低于现有的排放水平。¹ 这导致了大气中的二氧化碳浓度增加。由于二氧化碳是主要的温室气体（见第8页上文章），在任何接近现有排放水平之处并采用当前技术

使用化石燃料都会对地球气候变化构成巨大风险。

核电支持者建议通过核电来解决温室气体问题，因为核反应堆不会向空气中排放二氧化碳。但是，由于巨额费用和伴随的许多风险，核电所可能产生的问题并不会比大规模利用化石燃料来得少(见第1页上的文章)。

由于各国政府和公司都将几乎所有资源和开发工作集中在化石燃料和核电上，将全球经济转向健康、安全和可持续的能源系统不会是件易事。本文将从能源供应——特别是发电燃料方面——就减少温室气体排放的几种选择方案进行技术分析，并提出建立可持续能源系统的几项基本判据。

有关可持续能源系统的标准

为了确保可行性和可持续性，全球能源系统必须同时满足下述基本判据：

1. 该系统必须是可靠的。
2. 其成本必须是合理的。
3. 它不应造成日常性的严重污染。
4. 将能源系统的环境和安全费用几乎完全限制在受益的各代人应成为可能。换言之，该系统应实现费用内部消化。
5. 它应该能够维持向 80—100 亿人提供能源服务的合理水平(下世纪全球预计人口数)。²
6. 其核心功能是，对供应、运输、传输和经济冲击应具有弹性。

使用核电不能满足上述判据的主要理由是：1) 切尔诺贝利规模事故的长期和大规模破坏的风险；2) 生产大

量核武器用材料的内在风险。以现有方式和规模利用化石燃料也不可能满足这些判据，主要是因为存在发生全球气候灾难性变化的风险。而且也存在其它问题。

一项良好的战略应可以在今后几十年中大幅度提高效率，并在利用再生能源资源的同时使用一定量化石燃料。我们不必为了缓解全球变暖而完全停止使用化石燃料，因为自然界具有吸收人为二氧化碳的能力(除了在大气、水、土壤和生物群之间循环的二氧化碳之外)。长期目标应是将碳

授权使用《再生能源：燃料和电力的来源》，托马斯B约翰松，亨利凯利，阿
 尔夫王E兰迪，以及罗伯特H威廉姆斯编，1993年Island出版社版权，华盛顿
 特区和加州Island出版社出版。需要更多信息请直接联系Island出版社，电
 话：1-800-828-1302，电子信件：info@islandpress.org，或网址：
 www.islandpress.org。

排放保持在自然吸收水平之下，即 30 亿公吨人为碳排放。但应当指出的

是，将这些排放出的碳被海洋、生物群和土壤吸入的方式目前仍不十分清楚。

如果能够找到防止向大气排放二氧化碳的方法，也可能在高于大气自

然吸收能力的碳排放水平上使用化石燃料。一般术语中所称的“查封”，即封存二氧化碳的方法各有不同，也包括将二氧化碳存放在地下气层中或将之泵压至海底。就这些建议而言，

表1 预计成本：联合循环厂与核电厂对比

电力系统	资金成本 美元/千瓦	收益+损耗 美分/千瓦·小时 ¹	天然气 价格 美元/百万 Btu ²	燃料成本 美分/千瓦·小时	非燃料O&M 美分/千瓦·小时 ³	总成本 美分/千瓦·小时	30年后 二氧化碳 降低总量 千克碳 ⁴	碳降低率 天然气/核电
联合循环⁵								
案例1	500	0.76	150	1.02	0.48	2.26	9.97×10^{10}	1.37(案例1)
案例2	500	0.76	250	1.71	0.48	2.95	1.02×10^{11}	1.40(案例2)
案例3	500	0.76	400	2.73	0.48	3.97	1.09×10^{11}	1.50(案例3)
核⁶								
案例1	1500	2.28		0.6	1.7	4.58	7.29×10^{10}	
案例2	2500	3.81		0.6	1.7	6.11	7.29×10^{10}	
案例3 ⁷	4000	6.09		0.7	2.0	8.79	7.29×10^{10}	

基于以下来源：对核电站成本(案例2与3)，见斯蒂芬·M·科恩，《廉价得无法计量：核梦想的经济和哲学分析》，纽约州立大学出版社，阿尔伯尼，1997年，第106和155页；美国核管制委员会，《信息文摘1997年》，华盛顿特区，1997年，表6和7。对天然气成本：美国能源信息署网页：www.eia.doc.gov/oiaf/ieo97/gas.html。对联合循环电厂成本：D·M·陶德和H·斯托尔，《整体的气体联合循环——各种提议中受青睐的电力技术》，通用电力公司电力系统，1997年6月在马德里电力生产欧洲97年大会上发表的论文；C·科曼诺夫，R·布雷罗夫和J·沃勒克：《坏钱后的好钱：塞勒姆核电站提早退休的经济分析》，佩斯大学法学院环境法律研究中心，纽约州怀特普莱恩斯，1997年9月，第39页。

注释：

1. 在所有案例中收益和损耗假设为10%。所有案例中资金因素假设为75%。
2. Btu代表英制热能单位。1Btu=约1055焦耳。1千瓦·小时电力=360万焦耳=3413Btu。
3. 非燃料核成本包括每发一千瓦·小时电力需在废物处置上花0.2美分，最糟的情况(案例3)是个例外，那时每发一千瓦·小时电力需为此花0.5美分。见科恩之书第155页。
4. 所避免的二氧化碳排放是基于以下假设计算而成的，即两种电站都将替代每发一千瓦·小时电力就要释放0.37千克(碳基)的现有燃煤电厂。由此初始估计，核电站因此而避免的(二氧化碳)释放为0.37千克。对50%效率的联合循环电厂来说，这一数字是约每发一千瓦·小时电力就可少释放0.25千克(燃煤电厂中释放的二氧化碳减去联合循环厂的)。联合循环电厂避免二氧化碳释放的数字对今后几年建立的电站来说可能会上升，因为那些电厂的有效性会提高。
5. 联合循环电厂的效率假设为50%。今后几年内有望获得较高的效率——接近60%。我们假设在这些计算中每立方英尺天然气的价值是1000Btu。(核电厂的热效率约33%。由于燃料成本只占总成本的很小一部分，确切数字对电力成本没有实质影响。)
6. 核成本未包括再处理和铀管理的任何费用。
7. 最糟的情形中，核成本(案例3)通常如1983年后美国建立的核电站的费用，但是其容量因子比美国80年代的典型情况高得多。最佳情况的核资本费用(案例1)是媒体报道的俄罗斯卖给中国的VVER-1000反应堆。

且不论高成本还存在相当大的环境不确定性。鉴于在今后几十年中必须采取一种与增加的能源供应相匹配的方式来大幅减少二氧化碳排放,对能效进行投资,可以同时满足上述两项目标,且更加经济,显然比查封战略更加理想。因此本文中讨论的政策将不依赖于实行查封战略作为减少二氧化碳排放的措施。

减少温室气体的一些可持续选择方案

一些现有技术可以帮助实现实质性地减少全球温室气体排放,并同时提高经济效益。风能、热电联合、燃料电池、天然气辅助的太阳热电厂、利用再生和/或天然气厂取代非高效煤厂等,都是一些在减少温室气体排放的同时保持发电能力增长的技术解决方案。综合利用这些技术并予以投资将显著减少二氧化碳排放,而非仅仅防止二氧化碳排放,而建立新的核电厂就只能发挥防止的目的。事实上,发展核电的开支实际上会占用对其它技术的投资,而开发这些技术将更好地实现减少二氧化碳排放的目标。

表1显示,在所有情形下,天然气联合循环厂的经济效益都比核电厂高。联合循环厂在一种两步式发电系统中利用天然气为燃料。首先,天然气驱动燃气轮机和发电机,然后将来自燃气轮机的热废气用于生成水蒸汽,再驱动蒸汽涡轮(见第14页右下图)。就商用价值而言,现在这种系统的效率约为50%。

请注意,中国作为新核电厂的主要预期客户,不太可能支付联合循环的最高费用,因为它将使用管道气体(来自其近海或沿海的气田以及中亚地区),而不是液体天然气。这一比

较未包括核电厂成本的悲观方案,而该项费用将大大高于表中列出的最高核成本。³

1千瓦·小时电力在成本上每美分的差别会导致(1000兆瓦规模)核电站每年附加电力成本约6600万美元。就当前价值计算,30年中这将累计达11.5亿美元(以每年折扣率为4%计)。(未来的成本需打折扣,因为未来所省的1美元比今日手中的1美元所值要小)。使用这些数字,人们可以将使用核电站战略与以联合循环电厂代替现存燃煤电厂战略进行比较。我们已就联合循环相对于核电的不同情况进行了比较:低成本对低成本,中成本对中成本,高成本对高成本。典型的情况是,建立联合循环厂所能带来的二氧化碳的降低将比核电所能达到的多40%(将案例2联合循环厂与相应的核电厂进行比较)。这一收益可望进一步增加,因为联合循环厂的效率在提高。

在建造联合循环厂而非开发核电的同时,人们还可以利用节省的资本去开发和推广太阳能和风能技术以提高能效。在这类情形下能少排放多少二氧化碳将取决于电厂的位置或所选择的提高能效的特定技术。如果联合循环厂可促使停止使用全球一半的煤炭发电厂,则可以实现全球年平均二氧化碳排放减少15%的目标。

在70年代,人们担心天然气是一种非常稀有的资源,但其论据不足。天然气分布广泛,而且不具核电的扩散风险。我们的方法并不在无限的未来仍使用天然气为前提,而是建立在今后几十年中将其高效率使用之上的。天然气作为一种过渡燃料使用不失为一种既经济又有利环境的战略。在我们预期的那段时间里,只要政府、公司和用户各方面都采取适当

的行动,那么再生能源资源将取代大多数现有的能源供应,极大地促进经济效率的提高。

全球天然气储备量一直在稳步增加,以1995年的水平而言(对应于约 5.2×10^{21} 焦耳的储备量以及每年使用 7×10^{19} 焦耳),可供人类使用75年。全球天然气储备量一直在稳步增加,尽管消耗量也在增加。⁴

在全球许多地区都建有煤炭火力发电站,其中包括西欧、美国、前苏联、中国、印度和东欧。尽管从经济角度而言,用联合循环电厂立即全部取代煤炭火力发电厂并不可行,但可以逐渐淘汰使用煤炭的发电厂,并在一段时间后将其取代。在一些地区,风能发电也可以针对二氧化碳排放提供经济而有效的补偿。

增加使用天然气的缺点是天然气管道可能会增加甲烷排放,因为管道可能出现小泄露。就电厂而言,对其泄露量的一种估计约为0.8%。由于甲烷比二氧化碳的温室气体作用强大得多,有必要抵消这些排放,以便我们能够利用天然气将温室气体排放降到最低水平。人们可以通过一些相当简单的措施来抵消这种排放,比如在饲养厂建立沼气发电厂,及将垃圾填埋场(在许多地区现在是重大污染源)中排放的甲烷重新用作燃料。现在许多地方都在有限利用垃圾填埋场气体发电或用作供热燃料。比如,来自弗莱西·基尔斯垃圾填埋场(此处倾倒来自纽约的城市垃圾)的垃圾填埋气体就可为14,000户提供供热燃料。⁵

能效和再生能源资源

未来的能源系统既要满足能源需要,又要具有可持续发展的能力和经

济效益,那么通过何种方式才能向这种能源系统转化呢?做出这样的假定并不困难,即在某个遥远的将来再生能源资源可以在经济上足以满足基本能源需求。但是,如果经过几十年的开发之后,太阳能和风能并没有对全球能源供应作出实质性的贡献,而且能效提高的工作陷于停顿,或大大落后于潜力时,我们该怎么办才能达到那样的未来呢?

首先需要指出,无论是能效还是再生能源资源,其研究、开发和投资水平都远不如化石燃料和核能。仅仅是失败的钷增殖反应堆一项,人类对其投入的资源就远远超过了对风能和太阳能的投入的总和。

其次,决策者们目前甚至还没有认识到能效中的关键性问题,其对实质性研究和开发目标的认识就更少。例如,针对低温热源开发热交换技术是一种高效、密集而经济的手段,它可以在能效领域开拓巨大的新的可能性。但是用于所需基础研究的政府资金显然不足,而私营部门的研究一般又集中在那些能够在短期看到回报的技术上。

第三,有关能源的数据资料严重缺乏。例如,大宗能源资源,特别是在全球大部分地区为农业提供动力的役畜的生物量,显然没有包括在现在收集的能源资料中。没有包括在现有能源数据中的还有大量的天然气,人们将其作为石油开采中的一种无用副产品,任其燃烧或排放。例如,壳牌石油公司在尼日利亚就将产油同时获得的天然气一烧而光。⁶

转变全球的能源系统将是一项巨大而困难的任務。主要问题是大公司的主要目的是赢利,而它们已经在矿物燃料和核能方面投入巨资,且控制了大多数能源生产、转换和批销渠

道。如同《蒙特利尔议定书》规定保护臭氧层一样，各种政府现在必须利用《京都议定书》，创建一种管制结构及财政奖惩措施，以取得在市场上减少温室气体排放的满意效果。在地方、国家、地区和全球层次上分别采取强硬行动是必要而紧迫的，只有这样才能将现在充满危险的能源系统转向有利于环境上可持续发展的能源系统。

¹ 大多数估计认为，当碳释放在每年70-80亿吨的水平时，生物圈能够吸收的过量碳为每年约33亿吨。化石燃料燃烧每年释放的碳约55亿吨。所有数字以二氧化碳中的碳重量来体现。资料来源：气候变化国际专家小组：《气候变化1995》（英国剑桥：剑桥大学出版社，1996年），

第17页。

² 我们使用“能源服务”（energy service）概念，而不是能源使用或能源供应概念，因为人们所需要的并不是那些燃料，而是能源使用所提供的服务，如：光照取暖装置和运输等。正如本期第21页有关热力学第二定律的讨论所指出的，某一特定水平的能源服务所需要的能源供应可以有很大的不同。

³ 见斯蒂夫·M·科恩：《廉价得无法测量：核梦想的经济学和哲学分析》，纽约州立大学出版社，阿尔伯尼，1997年，第155页，“悲观的方案”。

⁴ 美国能源信息局的网址是：
www.eia.doe.gov/oiaf/ieo1997/gas.html

⁵ 维维安·托安，“封闭垃圾山：关闭斯塔藤岛的弗莱西·基尔垃圾山是缓解复杂性的一种方法。”《纽约时报》，1997年12月21日。

⁶ 燃烧天然气到这种做法将到2008年时才停止。对壳牌石油公司纽约办公室对外事务/投资者关系部总经理唐·坎农的电话采访，1998年2月19日。

《京都议定书》

1997年12月1-11日，《联合国气候变化框架公约》缔约国第三次大会在日本京都举行，来自各国政府、政府间组织、非政府组织和新闻界的10,000多名代表到会。171个国家在会上通过了《京都议定书》，该议定书规定了构架以减少六种温室气体：二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、HFCs、PFCs和六氟化硫。该议定书必须获得签约国立法机构的批准。以下简述《京都议定书》的主要条款：

1. 温室气体排放较1990年的水平减少5%：该议定书第3条表示，各缔约国承诺在2008-2012年间将温室气体的总体排放量较1990年水平减少5%。5%的目标并不是全球性目标，但可作为总体目标适用于协议书附录B中列出的国家。有些国家，

包括美国、加拿大、欧盟国家和日本，必须将排放量减少8%以上。该清单上的有些国家，包括澳大利亚和冰岛可以允许增加最多10%的排放量。就中国、印度、巴西、墨西哥、印尼、尼日利亚等发展中国家而言，因其人均化石燃料消耗量尚低，因此对排放未作限制。

2. 排放贸易：第16条第2款规定，“附录B中所列各方可以出于完成其在协议书第3条中所作承诺的目的而进行排放贸易。任何此类贸易应是其为满足本条款规定的排放数量限制和承诺减少排放而开展的国内行动的补充。”第16条第2款是后来加入《京都议定书》的，也是各方争论的主题。它在原则上允许排放交易，但特别规定尚待1998年11月2-13日在阿根廷布宜诺斯艾利斯举

行的缔约方第4次大会上确定。

3. “清洁的发展机制”：第12条规定了清洁的发展机制，其目的是为了协助发展中国家实现“可持续发展”的目标。附录I中所列国家可以针对其各自目标计算其减少温室气体排放的数量。

4. 联合实施：第6条规定，“为了实现第3条中的承诺，附录I中所列各方可以向其它各方转移或购买排放减少指标，减少排放量可以通过减少人为排放来源来实现，也可以在任何经济部门中沉积温室气体来加强人为排除”。与“清洁的发展机制”类似，联合实施表示在附录I各成员国间(一般为工业化国家)关于排放减少指标的交易，而清洁的发展机制则允许附录I各方从非附录I国家的公司所实施的排放减少计划中获益(即获得排放减少指标)。

注：“附录I成员”是指1992年5月9日在纽约正式通过的《联合国大气变化框架公约》附录I中所包括的国家。“附录B成员”指《京都议定书》附录B中所包括的国家。见表格。

联合实施：并非灵丹妙药

阿琼·麦克贾尼

联合实施作为《京都议定书》各条款的主要组成部分，涉及协议中某两方的排放交易。其意思是，如果一方减少排放的成本比另一方低，或者已低于允许值，则减少排放所需成本较高的一方可以简单地购买成本较低一方的排放减少。这就可以在所有污

附录I和附录B成员国
(除非另有说明，以下国家同时是
附录I和附录B成员国)

《京都议定书》的释放限制
作为基准年(1990)的100%

澳大利亚	108
奥地利	92
白俄罗斯(仅在附录I)	-
比利时	92
保加利亚	92
加拿大	94
克罗地亚(仅在附录B)	95
捷克共和国	92
丹麦	92
爱沙尼亚	92
欧洲共同体	92
芬兰	92
法国	92
德国	92
希腊	92
匈牙利	94
冰岛	110
爱尔兰	92
意大利	92
日本	94
拉托维亚	92
列支敦士登	92
立陶宛	92
卢森堡	92
摩纳哥(仅在附录B)	92
荷兰	92
新西兰	100
挪威	101
波兰	94
葡萄牙	92
罗马尼亚	92
俄罗斯联邦	100
斯洛伐克	92
斯洛文尼亚(仅在附录B)	92
西班牙	92
瑞士	92
瑞典	92
土耳其(仅在附录I)	-
乌克兰	100
英国	92
美国	93

染者必须减少各自排放的时候，避免涉及额外开支。因此理论上讲，通过所谓“市场原则”，整个社会可以在最低成本条件下达到减少排放的目标。

美国在减少工业来源二氧化硫排放的实践中已经较成功地运用了该理论。这些来源，比如许多燃煤发电厂，都是二氧化硫的庞大排放源，它们排放二氧化硫也广为人知。它可以延长工业界达标所需的时间，期间无须面临停产的危险。

为了保证排放交易取得成功，需要下述条件：

- 一个衡量单位的污染量所内含的代价应高至足以促使所有污染者减少其排放量；
- 必须制定渐近的目标以达到理想水平，这样才能在合理的时间将排放降低到理想水平。
- 排放源应合理定性，这样排放减少的进程才能有把握地进行测算。这是一项关键要求，否则将无法具体实施，而且会出现各种有问题的方案。
- 价格谈判应在可比经济体各方之间进行，这样才能保证交易是公正合理的。

美国所进行的二氧化硫交易实验都符合这些条件，而各国国内大型工业公司的排放也遵从这些条件。当不同国家大型工业体在跨国界谈判时也许也应大致遵从这些条件，尽管应该考虑一些差异因素，比如货币可转换性和不合理的交换利率等。

就《京都议定书》规定的二氧化碳排放而言，帐户单位是各个国家，因此国内交易不在此列。（每个国家当然可以选择在其领土内允许二氧化碳交易以达到《京都议定书》的目标，

但这限于该国的各个省份之间，而非本协议规定的范畴）。如果确定了定价方案，那么附录 I（或附录 B）中所列的大多数国家中的电厂等大型工业体之间可以相互进行排放交易。但是由于附录 I 清单中所列的有些国家（比如前苏联和东欧国家），经济情况较差，且货币疲软，交易可能会变得不公正合理。而且在许多情况下，前苏联和东欧国家的大型工业体在 1990 年以前的排放记录往往做得很差或很不完整。最后，由于 1990 年以来发生的巨大变化，这些记录与今后十年有什么关系也很值得怀疑。

如果附录 I 所列国家出于联合实施目的而开展交易似乎还有问题的话，那么附录 I 所列国家和发展中国家之间开展交易就更是如此。除了测算和实施问题之外，公平问题在此显得尤为突出。二氧化碳问题主要来自工业化国家的排放造成。但是排放权力却是根据 1990 年的水平分配确定的，这给了那些产生出这个问题的国家以最大的可用于交易的排放指标。尽管对排放问题造成的影响最小，消费化石燃料水平最低的国家获得的排放指标却最低，因此它们从中获益也最少。这也是为什么这些国家不同意《京都议定书》中对其规定的排放限制的主要理由。对于发展中国家享有多少排放交易权的问题，将留待以后解决（可能是在 1998 年 11 月的阿根廷会议上）。

如果按照发展中国家许多人士的要求，以人均标准为基础来确定排放权，则将大大扩展联合实施的可行性，因为它们可以从中获得经济利益。

关于联合实施的建议在涉及到工业以外的产业时，又有其它问题：比如在发展中国家植树造林，在电厂中

使用农业残渣来抵消工业化国家中的二氧化碳排放。这些建议都不适用于联合实施，因为它们不满足上述几项条件。首先，此类方案中谈判各方的不平等性显而易见，而且不平等现象还会恶化，因为在一个阶级高度区分的社会中，上层社会不可能在谈判时代表农民和穷人的利益。

技术性事务也同样令人惧怕。最简单的例子是，树木只可能在成长时期才有助于减少二氧化碳。这以后则会根据具体情况，出现二氧化碳的净增加或净减少。而且，还有必要考虑氧化亚氮和甲烷等其它温室气体的排放。是否需要重新植树呢？又该如何解释森林地区在一段时期后的自然改变呢？目前尚不清楚在温室气体的数量计算中如何考虑这些复杂的过程。

就土地而言，也存在着问题。大多数发展中国家都没有多少闲置的可耕地。穷人经常将公地或部分森林用地用于放牧，而这些森林也正是木材燃料和建筑木料的来源，并可作其它用途。通过这些土地列入联合实施计划而将其货币化，显然将剥夺数以百万计穷人获得基本资源的权力，尽

管它们并没有产生如今的温室气体问题。

一些表面上具有吸引力的计划实际上却经不起推敲。例如，某项计划准备在印度利用甘蔗渣发电，但这却会给大量人口带来破坏性后果。甘蔗渣是甘蔗榨出糖份后留下的有机物，它已经具有多种用途，其中包括发电。在将更多的甘蔗渣用于发电的压力驱动下，人们会大量增加甘蔗栽培，而放弃种植粮食作物。而且，印度许多地方都在传统炉子中使用甘蔗渣，用来制作美味的被称作“gurdh”的褐色粗糖。联合实施可能会彻底关闭这些雇工众多的传统产业，在本已贫困的农村地区产生更多的失业问题。

总而言之，联合实施计划的前景有限。人们可能会因为它给全球社会带来某些经济利益而追求实施该计划。但是，我们必须以一种未曾尝试的方式来仔细考虑这一问题，以确保它是平等的，其结果是可测算的，且不会对世界上最贫困的人口造成不利影响。

疑

问

解

答

亲爱的阿琼：

什么是热力学第二定律，为什么它很重要？

——霍特问于哈瓦苏

亲爱的霍特：

1215年6月15日，约翰国王

签署《大宪章》的这一天，天气又热又闷。为了对将王家特权丧失给肆无忌惮的税收贵族之事聊以自慰，国王颁布了热力学第二定律。它宣称，你可以不做功而将热从较热处移到较凉处，但将热从较凉处移到较热处时你必须做功。¹ 约翰国王认为，有第二定律起作用，他不必担心从北方维金斯带来任何热，因为北方较冷。

令人惊奇的是，热力学第二定律经受了时间的考验和科学的验证，与《大宪章》不同，英国议会至今不能废除它。热力学第二定律的运用帮助解释了如汽车的汽油引擎或蒸汽涡轮等将热转变为机械功的不同方法。

基于热力学第二定律之上的效率措施考虑能量的质量——不象基于热力学第一定律之上的效率仅考虑能量的数量。热力学第一定律指出，即便形式变化时，如机械能变为热能，能量也守恒。相反，热力学第二定律使我们知道一种能源系统就能源质量而言能运作得多好。1824年，法国物理学家尼古拉·里奥纳多·萨迪·卡诺描述出将热能转化为机械能最有效（理想）的引擎。这一最大的理论效率（称作卡诺效率）使我们知道，与最大理论效率相比，真实世界中的能源使用系统可以表现得有多好。

在多高温度上获得能源是衡量其质量的良好尺度——能源的温度越高，理论上我们能从中得到的机械功就越多。这样，在其它条件（如压力）相同的情况下，1千克摄氏1,000度的蒸汽比摄氏500度的蒸汽能产生更多的机械能。20摄氏度的能量能提供一个惬意的生活环境，但是日常情势基本上无法产生机械功。

让我们考虑一下提供暖气为大楼供热的天然气加热系统（这一例子也能适用于提供热水取暖的系统）。典型的天然气取暖系统将天然气的热量从可能超过摄氏1,000度降到约摄氏50度。这样，当天然气中大量能量被转化为用于大楼供热的气体时，天然气做功的功能差不多完全浪费了。因此，典型的

天然气家庭取暖炉有很高的第一定律效率，经常在大约85%或90%，但是其第二定律效率很低，只有百分之几（取决于外界温度）。用热力学第二定律衡量这一系统使我们发现，如果其热量没被浪费，最初的天然气输入可能被更有效的使用，获得更大的收益。

例如，人们可以将天然气作为燃料电池的氢来源来使用，以60%的效率产生电力（第二定律）。然后，电力可以用来从外界将冷空气中的热量“泵”到希望的室温。（热泵使用电能将外界空气或土壤中的能量泵至室温并将之传入大楼中。）²⁾描述这种过程的另一方法是空调机的反向操作，将暖气吹入而不是吹出大楼。在温和天气，这可以提高4倍或更多倍地提高天然气使用的效率。在较冷的天气，来自地面的热气比空气温暖，可被泵至希望的室温，达到相似的效率改善。

使用天然气引擎以产生电力并将热量来加热或冷却（称为共发电系统）能带来相似的效率提升。使用比目前能获得的热交换器更有效的热交换器中（这种装置从较热的介质中获取能量来加热较凉的介质，比如将能量从热气传入冷水中的锅炉）也能达到更高的效率。理论上，在空间取暖应用中燃料使用的效率，比起美国目前的典型系统而言，可以提高10—15倍。

当然，使用共发电系统也有实际问题，以至于它们并非总是经济的。例如，实际的运用取决于这样一些因素，诸如热量、热水、空调和所需电力，电力生产系统能否与输电线相连接，以及小型发电机的费用。然而，在过去的20年里，新技术的演进已经使共发电装置能

够在比该系统目前使用水平还要更大的范围内经济地进行。

提高能源使用的说法——意味着使用初始燃料——是提高能源所提供服务的唯一方法。即使在所谓的“先进”工业化国家，能源所提供的服务也并不基于提高能源效率的巨大潜力这种仔细考虑。以热力学第二定律这一标准判断，世界能源系统非常没有效率。因此，即使当能源的最终使用保持不变或甚至降低时，大幅度提高能源提供的服务，诸如加热、冷却或发光，都是

可能的。

¹ 热力学第二定律也可以用熵来表述。熵是系统无序的度量。既然在封闭系统内部提高有序性需要做功，有序性的提升就对应于熵的下降。因此，系统中熵的下降要求向该系统输入功。

² 实践中，所有材料包含一定量的热能。即使是在冷空气或冰块中，也有相当量的热能。零热能——原子或分子没有随机运动——只有在被称为绝对零度的温度时才能达到。绝对零度等于约 - 273 摄氏度 (约 - 460 华氏度)。事实上绝对零度不可能通过任何实际装置达到。