



Views & Comments

实现净零排放

Chris Greig

Gerhard R. Andlinger Visiting Fellow in Energy and the Environment, Princeton University, USA

深入了解可行的能源转变

在我们迈入新的十年之际，建立和维持经济福祉的同时，一系列持续性的挑战依然存在。四大社会经济趋势正在发挥作用：人口增长、国内生产总值(GDP)增长、城市化和互联性。总体而言，这些趋势将导致几乎所有商品（如能源、食品和材料）消费量的急剧增加，同时还会加剧气候变化，使生物多样性锐减以及食物和淡水的供应日益减少，这些情况给我们所在的星球增加了巨大的压力。在本文中，我们主要关注能源。将全球能源经济转变为净零排放是我们这一代所面临的最大的挑战之一。科学研究和工程研究显著提高了低碳能源技术和系统的经济性，尤其是在电力方面。这项研究有助于指导几种自上而下的综合评估和其他能源系统模型，以获得实现远大气候目标的各种成本最低的途径。然而，尽管做出了这些努力，全球温室气体排放量仍在持续增加。

将全球平均气温上升幅度限制在2 °C 以下的情景要求立即停止温室气体的排放增长，并且在本世纪中叶急剧减少至净零排放。以下五个系统级基础支撑着这些深度脱碳情景，并且应在研究组合和国家规划职能的议程中作为基础：

- (1) 提高能源生产率：少花钱多生产；
- (2) 使用脱碳化的电力供应；
- (3) 扩大终端用电；

(4) 燃料和其他载体的脱碳；

(5) 应用二氧化碳捕集和地质封存 (CCS) 技术以减少残留点源的排放，并有可能从大气中脱除二氧化碳。

对以上每个基础的技术解决方案及其在国家能源转型过程中的相互作用进行长远发展预测，有助于管理渐增的项目和基础设施需求。但是，为了评估过渡可行性，必须将这些预测分解为高水平的时空粒度。针对工厂和基础设施建设所需规模、发展速度提出的各种见解，可以突出各种潜在的瓶颈和冲突，这些瓶颈和冲突可能会限制计划的转变。其中包括能力限制、对自然环境和社会的影响、社会变革的期望、就业前景的差异、当代市场机制的限制、资本投资流动和现有资产价值的贬值。这种见解对于提出支持低碳能源转型所需持续性资本投资和公众支持的指导政策至关重要。因此，每个基础能做的贡献存在巨大的不确定性。

让我们了解一些系统转变的例子，这些转变对于深度脱碳的每个基础都是必要的。

基础 1：提高能源生产率

能源生产率（单位GDP最终消耗的能源比例）逐年提高。从历史上看，每年的改善率介于1.0%~2.5%之间。但是，大多数深度脱碳情景要求能源生产率在未来40年内每年持续提高2.5%~4.0%。这将需要广泛采用

最节能的工艺流程和设备，以及在人类活动和消费、城市规划、建筑标准和工业实践中进行重大转变。

基础 2：使用脱碳化的电力供应

电力部门脱碳的最重要资源包括风能、太阳能、生物质能、水能和核能，以及与CCS结合的化石燃料燃烧。尽管所有这些技术对于消除电力行业的排放可能都是必要的，但它们各自都面临着社会、经济和环境的挑战。技术、制造和供应链的创新降低了风力涡轮机（陆上和海上）和太阳能光伏（PV）模块的成本，从而使其在能源市场上具有竞争力。此外，在系统集成和储能技术方面的创新有助于减轻长期以来由于风能和太阳能多变性所带来的担忧。但是，这两种发电技术目前仅占全球发电量的10%，且都具有相对较低的设备利用率（约20%~40%）和较高的土地利用强度。具有可用土地的最佳资源场地通常远离主要的负载中心，因此需要大量新的输电基础设施，这可能会受到社会环境的抵制。核电需要的土地最少，但也必须克服由其产生的安全问题和废料问题。

基础 3：扩大终端用电

传统上依靠油/煤衍生的液体燃料和天然气的能源需求，包括轻型和中型客车、家庭供暖和工艺供热，预计将实现电气化。这将需要个人和公司在投资决策上做出重大改变，并且通常要有注销现有资产的意愿。目前越来越多的能源载体依赖电力，这给上述具有挑战性的电力系统转变带来了额外的压力。此外，如果电力供应的脱碳很大程度上依赖于仅在白天可获得的太阳能光伏，那么长期以来一直认为可随时按需获得电力的个人和公司可能需要更加注意自己的用电时间。

基础 4：燃料和其他载体的脱碳

即使终端的电气化水平得到了提高，所有脱碳途径仍依赖于数量不等的液体和气体燃料。如果我们要实现所定的远大气候目标，则必须将其脱碳。氢气作为合成液体和气体燃料的原料，或者作为独立的载体（如通过燃烧来发电和直接还原钢铁生产中的铁矿石），有望发挥核心作用。清洁氢气可以通过使用无碳电力进行电

解、结合CCS的天然气进行重整、结合CCS的煤气化或结合CCS的生物质气化来生产，每一种生产方法都会进一步使电力生产、生物量生产和二氧化碳封存需求变得复杂化。

基础 5：应用二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS）

即使基础1~4被广泛采用，在航空、农业和工业等领域，脱碳仍是困难的。所以说，上面提到的CCS技术对于电力和燃料的脱碳必不可少，也是对水泥、铁、钢和石化产品等材料工业生产过程进行大幅脱碳的一种选择。但是由于残留排放，CCS仅可能将点源的排放减少80%~95%。此外，全球范围内越来越多的人认为我们不可能很快地实现足够的减排，以避免气候变化带来的不可接受的后果，为此，我们需要从大气中提取二氧化碳，这是一种被称为CDR的方法。同时，通过重新造林、改进的农业做法或其他方法增加自然土地汇入量将发挥主要作用。大多数深度脱碳情景还依赖于生物能源结合碳捕集与封存（BECCS）——一种提供净负排放的能源供应技术。总的来说，在这些情景下，到本世纪中叶之前，每年要持续地质封存 $5 \times 10^{12} \sim 3 \times 10^{13}$ kg的二氧化碳。该规模约为当前CCS水平的1000倍，可与当前的全球石油和天然气开采率相媲美，或在某些情景下要远高于当前水平。对于BECCS，生物能源作物也是土地利用密集型的，并且它的最佳作用地点与对粮食供应至关重要的农作物之间存在竞争关系。

总而言之，为了向净零排放进行转变，全球经济将需要前所未有的设备和基础设施部署速度。尽管未来的技术成本和性能存在很大的不确定性，政府和私营部门仍必须大量且迅速地进行投资，现有资产将需要提前报废。电力部门必须与燃料和工业部门紧密结合，能源部门将以全新的和广泛的方式依赖陆地、海洋和深地，风能和太阳能、生物能源作物以及粮食作物之间的土地竞争将会加剧。在能源消耗和购买诸如汽车和家用电器之类物品方面，需要在全民范围内进行行为转变。社区将需要在其本地环境中接受大规模的“侵入式”基础设施，包括输电线路、管道和可再生能源农场。市场将需要进行重大改革，这种广泛的物理、环境、经济和社会变化的程度尚不确定，并且可能因地区而异。

研究的持续性是至关重要的。但要取得效果，我们

必须：①通过探索转变情景而不是规定途径来判断不确定性；②采用综合系统方法；③召集与重大挑战相关的跨学科团队（科学家、工程师、经济学家、商业学者、

社会行为科学家以及政策从业者）；④与私营部门和政府深入合作，以确保在实施挑战、研究重点和研究结果等方面信息的双向流动。