

可完成的使命

截至本世纪中叶难减排领域实现CO₂零排放



案摘要报告



完成的使命

截至本世纪中叶难减排领域实现
CO₂零排放

案摘要报告

能源转型委员会

能源转型委员会 (ETC) 汇集了能源领域中各团体的领导者，其中包括来自发达国家和发展中国家的能源生产商、能源用户、设备供应商、投资者、非营利组织和学术机构。我们旨在加快向低碳能源体系转型，实现经济稳健发展，将全球气温上升限制在 2°C 以内，尽可能趋近 1.5°C。

能源转型委员会由 Lord Adair Turner 和 Ajay Mathur 博士共同担任主席。我们的委员名单在下一页中。

本《可完成的使命》报告由委员们在能源转型委员会秘书处的支持下编制而成，并由 SYSTEMIQ 提供。报告采用了由材料经济咨询公司、麦肯锡咨询公司、University Maritime Advisory Services 和 SYSTEMIQ 为 ETC 以及与 ETC 合作完成的一系列分析，另包含更广泛的文献综述。

我们花了六个月时间就新成果向社会各界征询意见，期间收到了来自公司、行业项目、国际组织、非政府组织和学术界近 200 名专家的反馈。对于他们的贡献，我们表示由衷的感谢。本报告代表了能源转型委员会的集体观点。能源转型委员会成员认可本报告中所作论点的大体主旨，但不应被视为同意其所有结论或建议。未要求委员所属的机构正式认可本报告。能源转型委员会委员不仅肯定了到本世纪中叶能源和工业系统实现碳净零排放的重要性，而且分享了如何实现转型的广泛见解。本协议在对能源系统存在不同观点和利益的公司和组织的领导者之间得以达成，并能赋予全球决策者们信心，在保持全球经济快速增长的同时，又能将全球气温升高限制到远低于 2°C，而且实现这些目标的诸多关键措施都非常明确，可以立即付诸实施。

有关详情，请访问：

www.energy-transitions.org

www.facebook.com/EnergyTransitionsCommission

www.linkedin.com/company/energy-transitions-commission

www.twitter.com/ETC_energy

我们的委员

Laurent Auguste

Veolia创新与市场部高级执行副总裁

Pierre-André de Chalendar

Saint-Gobain首席执行官

Dominic Emery

BP集团战略规划部副总裁

Will Gardiner

DRAX首席执行官

Didier Holleaux

ENGIE执行副总裁

Chad Holliday

Royal Dutch Shell董事长

Gopi Katragadda

Tata Sons首席技术官兼创新主管

Zoe Knight

HSBC可持续金融中心执行董事兼集团主管

Jules Kortenhorst

Rocky Mountain Institute首席执行官

Rachel Kyte

联合国秘书长特别代表兼Sustainable Energy For All首席执行官

Mark Laabs

Modern Energy执行董事

Richard Lancaster

中电首席执行官

Alex Laskey

OPower前总裁兼创始人

Auke Lont

Statnett总裁兼首席执行官

Ajay Mathur

能源和资源学会总理事兼能源转型委员会联合主席

Arvid Moss

Hydro能源与公司业务开发部执行副总裁

Philip New

Catapult Energy Systems首席执行官

Nandita Parshad

欧洲重建和发展银行能源与自然资源部执行董事

Andreas Regnell

Senior Vice President, Strategic Development, Vattenfall

Mahendra Singhi

Dalmia Bharat集团首席执行官

Andrew Steer

世界资源研究所总裁兼首席执行官

Nicholas Stern

伦敦经济学院教授

Nigel Topping

We Mean Business首席执行官

Robert Trezona

IP Group清洁科技合伙人兼主管

Jean-Pascal Tricoire

施耐德电气董事长兼首席执行官

Laurence Tubiana

欧洲气候基金会首席执行官

Adair Turner

能源转型委员会主席

Timothy Wirth

联合国基金会副主席

Lei Zhang

远景集团首席执行官

Changwen Zhao

中国国务院发展研究中心产业经济研究部长

Cathy Zoi

EVgo首席执行官

远低于 2°C

要使全球变暖远低于2°C且尽可能接近1.5°C，全球在本世纪中叶必须实现净零二氧化碳排放。

本世纪中叶 净零二氧化碳排放

履行巴黎协定的最大挑战在于主要的减排行业

重工业



水泥



钢材



塑料

重型运输



重型陆运运输



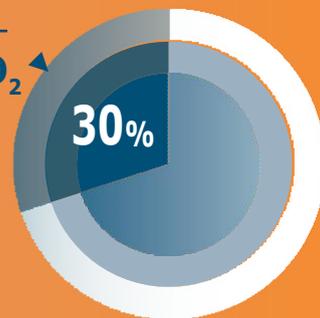
海运



空运

10GtCO₂

年度碳排放总量来自能源和工业

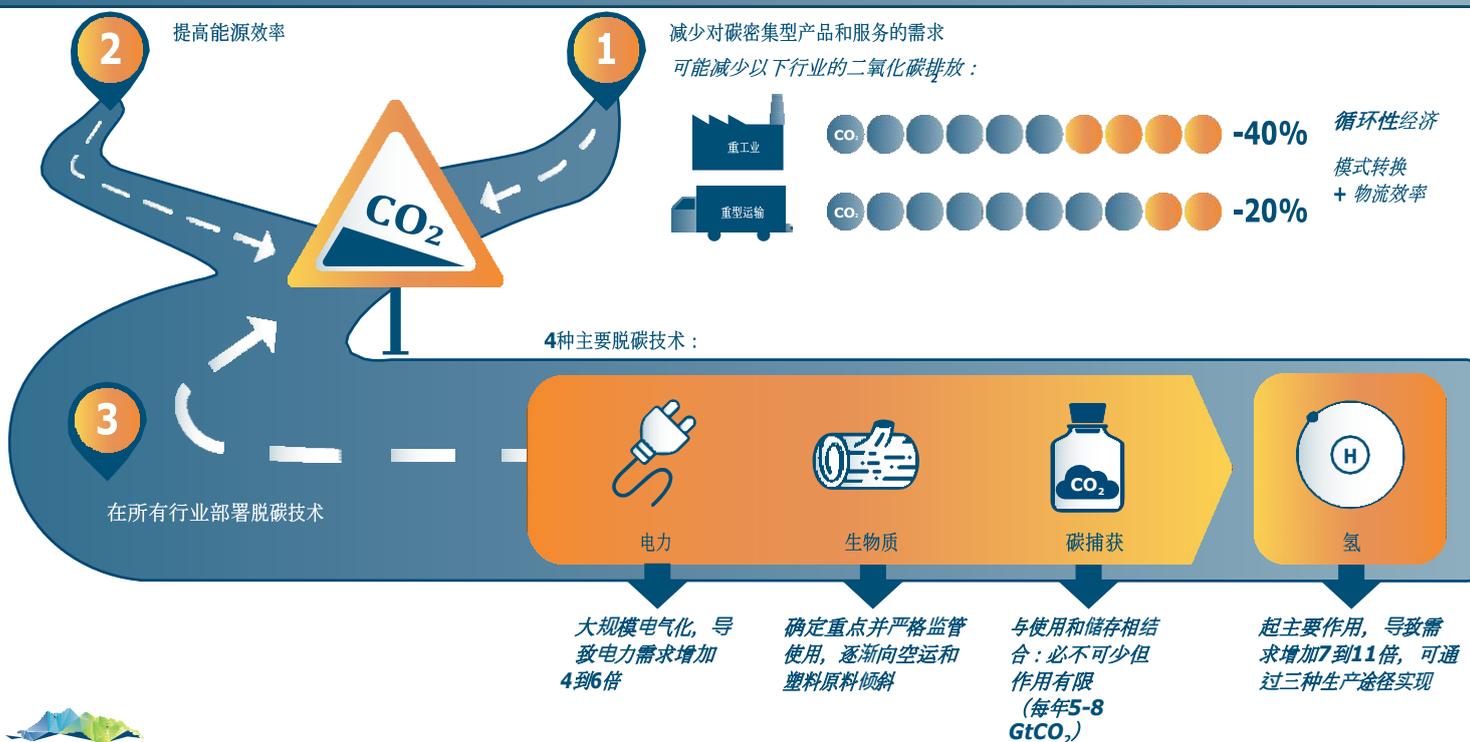


.....而且随着电力、建筑和轻型运输等其他部门的脱碳，其剩余排放量的份额将会增加。

难减排行业在本世纪中叶实现净零二氧化碳排放是可能的



有三种主要的脱碳途径



最终草案摘要报告

巴黎气候协定向世界承诺，将全球平均气温较工业化前水平的升高幅度控制在远低于 2°C，尽可能控制在 1.5°C 以内。最新 IPCC 报告¹警示人们全球气温升高 1.5°C 对整个地球和人类会产生严重负面影响，若全球气温升高 2°C 则后果会更加严重。因此，这促使全球以 1.5°C 为目标，建议到 2050 年全球实现 CO₂ 净零排放。

能源转型委员会 (ETC) 是一个由来自能源生产和消耗行业的商业、金融和民间社会领导者组成的联盟，支持将全球气温升高幅度限制为 1.5°C 的理想目标，或者至少远低于 2°C。

为达到 2°C 的目标，并有机会实现 1.5°C 这一目标限制，能源和工业系统自身实现 CO₂ 净零排放至关重要 – 即无需永远依靠从土地使用部门购买碳补偿额度。ETC 坚信到 2050 年在发达经济体可实现该目标，到 2060 年发展中经济体可以实现该目标²。

这是当务之急，但也是一个重大机遇。正如新气候经济所示，避免有害气候变化所需的新经济模型还将推动快速技术创新，提高资源生产率，创造新行业工作机会以及带来能够提升生活质量的本土环境效益。

未来十年的行动对于限制大气中日益增加的 CO₂ 存量所需的早期减排，以及计划在截至本世纪中叶能源和工业系统实现零排放，都至关重要。

能源和工业系统实现 CO₂ 零排放需将快速提高能源效率、电力的快速脱碳和尽可能将多的经济逐步电气化相结合，以轻型陆运、制造业为主，家庭烹饪、供暖和制冷也占相当大的比例。在能源转型委员会于 2017 年 4 月发布的首份报告《更好的能源、更美的前景》中，我们重点关注了这些挑战。尤其是，我们证实可再生发电和能源储存方案成本的大幅降低可实现对具有成本竞争力的电力系统的规划，而这几乎完全依靠风能和太阳能（例如 85-90%）。³

然而，为了实现全脱碳经济，我们还必须降低并最终消除那些在重工业里被我们定义为的“难减”领域（尤其是水泥、钢铁和化工）和在重型运输内的“难减”领域（重型公路运输、海运和航空）的排放。目前，这些领域占全球 CO₂ 排放的 10 Gt (30%)，但是按当前趋势，到 2050 年它们的排放可能占 16 Gt，随着经济其他部分的脱碳，它们占据剩余排放量的份额越来越大⁴。到目前为止，许多按照巴黎协定的国家自定贡献 (NDC) 制定的国家策略很少关注这些领域。

因此，在过去的一年里，ETC 侧重于寻找难减领域实现 CO₂ 零排放的途径。好消息是截至本世纪中叶这在技术上可行，对经济的影响低于全球 GDP 的 0.5%，对消费者生活标准影响微小。实现该脱碳的技术已经存在：部分仍需要实现商业可行性；但是我们相信零增长的可实现性，且不需要假设基本的和目前未知的研究突破。而且，通过更加充分地利用碳密集型材料（通过更高的材料效率和回收）以及限制碳密集型运输的需求增长（通过更高的物流效率和模式转型），脱碳成本可以大幅降低。

然而，对于这一重要且技术性可行的转型，决策者、投资者和企业立即共同采取强有力的行动不可或缺。

因此，该报告依次介绍以下方面：

- A. 为什么难减领域实现 CO₂ 零排放在技术上和经济上可行（第 6 页）；
- B. 如何在重工业和重型运输业管理 CO₂ 零排放的转型（第 18 页）；
- C. 政策制定者、投资者、企业和消费者必须如何做才能加快变革（第 22 页）。

¹ IPCC (2018), 全球变暖 1.5°C

² 如果到本世纪中叶，全球的 CO₂ 净排放量为零，则在过渡期间将需要土地使用行业的负排放来抵消 21 世纪 50 年代能源和工业系统的剩余排放量。

³ 能源转型委员会（2017 年），更好的能源，更美的前景

⁴ IEA（2017 年），能源技术展望

A. 任务可行：难减领域实现 CO₂ 零排放在技术上和经济上可行

截至本世纪中叶所有难减领域实现脱碳在技术上可行，总成本低于全球 GDP 的 0.5%。需要采取三套互补措施：

- **限制需求增长** – 这可以大大降低工业脱碳的成本，其次降低重型运输脱碳的成本；
- **提高能源效率** – 这可以使减排尽快取得进展，降低最终脱碳成本；
- **应用脱碳技术⁵** – 这对于能源和工业系统最终实现 CO₂ 零排放至关重要。

重工业实现 CO₂ 零排放

通过材料效率和循环进行需求管理

截至 2050 年，更加循环的经济可以将四个主要工业领域（塑料、钢材、铝业和水泥）的 CO₂ 排放在全球范围内降低 40%，在欧洲等发达经济体降低 56%⁶ [例 1]。这主要涉及两个方面的发展：(i) 通过更广泛、更好的回收和再利用来更充分地使用现有的材料库存，以及 (ii) 通过改进产品设计、延长产品寿命以及新的共享业务模型（例如共享汽车），降低关键价值链（例如运输、建筑、消费品等）的材料要求。

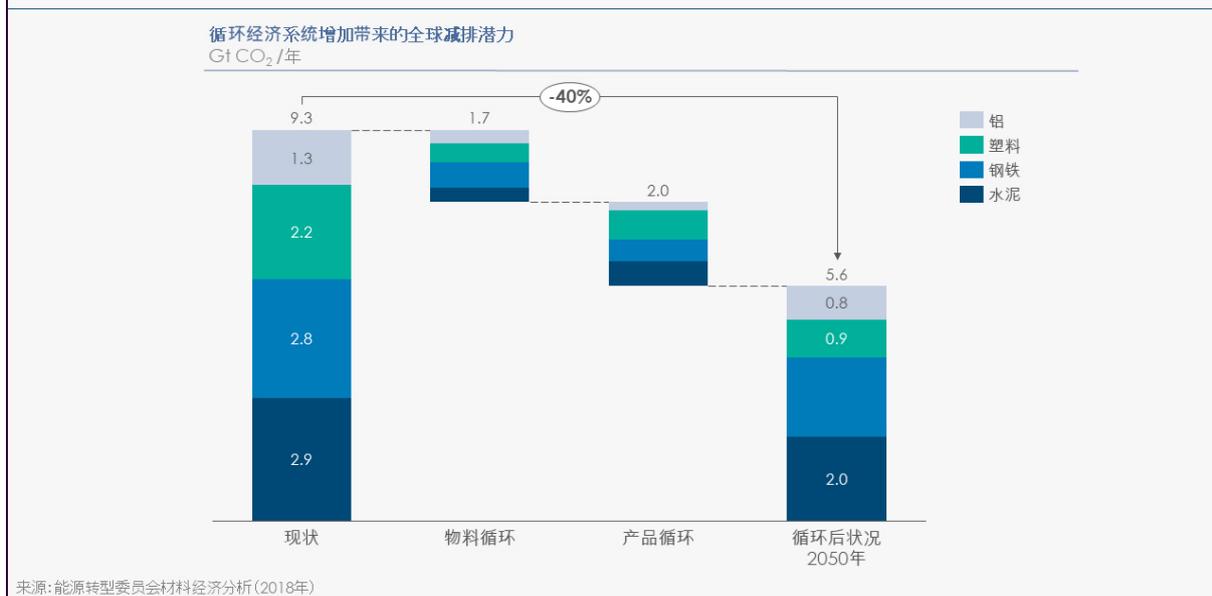
- 通过更广泛的机械和化学回收以及减少塑料在关键价值链中的使用，初级塑料生产可以较通常降低 56%。
- 通过降低价值链上的损耗，减少回收过程中的降级，提高钢制品再利用以及转向新的汽车和租赁体系，与正常相比，原钢生产可以降低 37%。
- 通过采取与钢材一样的措施，原铝生产可以降低 40%。
- 关于水泥，回收机会有限，但是通过改进建筑设计可以将总需求降低 34%。

把握这些机会需要对产品设计以及价值链上不同环节公司之间的关系进行重大变革，还需要强硬的政策为这些变革提供激励。

⁵见术语表中“脱碳技术”的定义。[我们使用术语“脱碳技术”来描述通过燃料/原料切换、工艺变更或碳捕获，并以产品或服务为单位而减少人为碳排放的技术。这并不意味着完全消除 CO₂ 的使用。首先，使用生物质或合成燃料可导致之前通过生物质生长或直接从空气中捕获从而隔离出的 CO₂ 释放回大气中。第二，CO₂ 可能仍存在于材料中（例如：塑料中）。我们将能效技术排除在“脱碳技术”的范围之外，因为两者是分开考虑的。]

⁶能源转型委员会材料经济分析（2018 年）

截至2050年，循环性更高的经济系统可以将工业难减领域的排放降低40%



例1

能源效率

在工业领域，现有流程范围内提高能源效率(通过先进的生产技术或者数字技术的应用)有机会推动短期减排。这不太可能超过能源消耗的15-20%，但对降低现有的长期工业资产的排放十分关键，尤其对发展中国家而言。

脱碳技术

在每个工业领域，生产脱碳有四个主要途径：

- 在钢铁和化学生产中将**氢气作为热源或者作为还原剂**，使用从电解中获取的零碳氢气（有可能是长期的主要途径）或从蒸汽甲烷重整（SMR）加碳捕获来获取的接近零碳的氢气⁷；
- **工业流程直接电气化**，尤其在产生高温热量过程中；
- **使用生物质作为制热的能源**，作为钢铁生产的还原剂，或者作为原料，尤其是用于塑料生产；
- **碳捕获**，与使用或地下储存相结合。

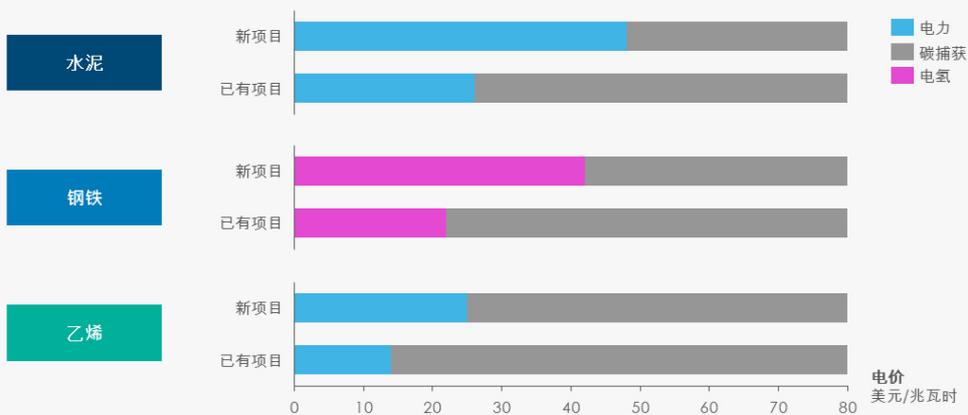
在每个工业领域，最经济的脱碳途径可能**根据具体地点及当地的资源有所不同**。尤其是，选择电气化途径还是选择生物质或碳捕获方案，主要取决于当地零碳电的价格[例2]。

无论哪种途径，依照我们的分析将能够以较低的成本为难减工业领域脱碳，即钢铁每吨 CO₂ 的成本节省至少 60 美元、水泥节省至少 130 美元和塑料（乙烯生产）节省至少 300 美元。

⁷ 理论上，生物甲烷重整也可产生零碳氢，但是考虑到可持续生物质供应的限制，这一途径不太可能发挥明显作用

具体取决于行业以及当地电价，电脱碳途径能比碳捕获途径更加经济

供应方脱碳途径的减排成本取决于电价
美元/吨 CO₂



注：虽然生物质在某些地区可能成本较低，但是由于可用性有限，所以不被认为是首选
来源：麦肯锡咨询公司(2018年)，工业领域脱碳：下一个前沿领域

例2

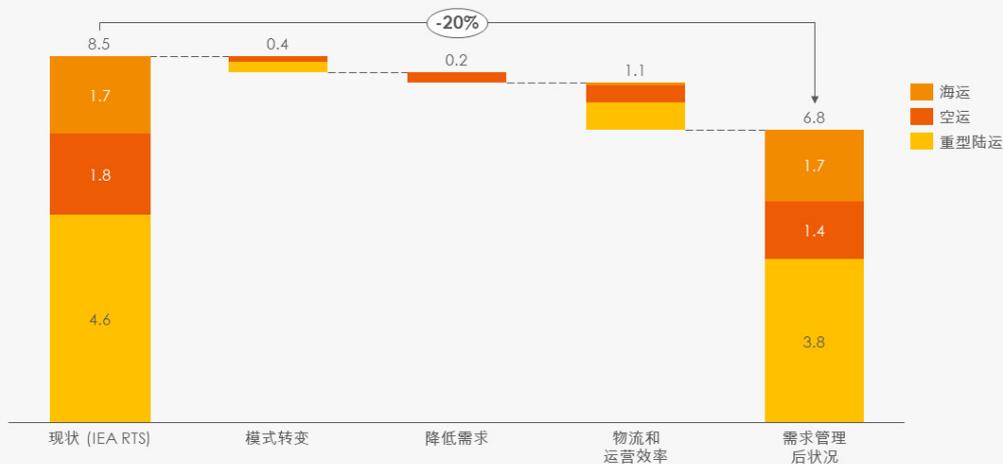
重型运输实现 CO₂ 零排放

通过物流效率和模式转型进行需求管理

与工业领域相比，运输领域降低需求增长的机会更为有限，因为货运受全球经济增长的影响，且客运受新兴经济体高流动性需求的影响。然而，**提高物流效率与模式转型相结合** – 从卡车运输到铁路运输和海运，从短途空运转向高铁 – 仍可能将 CO₂ 排放降低 20%^[例 3]。

截至2050年，需求管理可以将运输业难减领域的排放降低20%

需求管理带来的全球减排潜力
Gt CO₂/年 (2050年)



来源：能源转型委员会SYSTEMIQ分析(2018年)

例3

能源效率

在运输领域，无需技术发生重大变革也有很大的机会将能源效率提高 35-40%。该潜力对于海运和空运尤其重要，因为飞机和轮船的使用寿命长：发动机和轮船/机身设计的潜在能源效率提高可以大大降低换成新燃料的成本。

脱碳技术

关于全脱碳的主要途径以及产生成本，在重型陆运与海运/空运中可能会大不相同[例 4]。



例 4

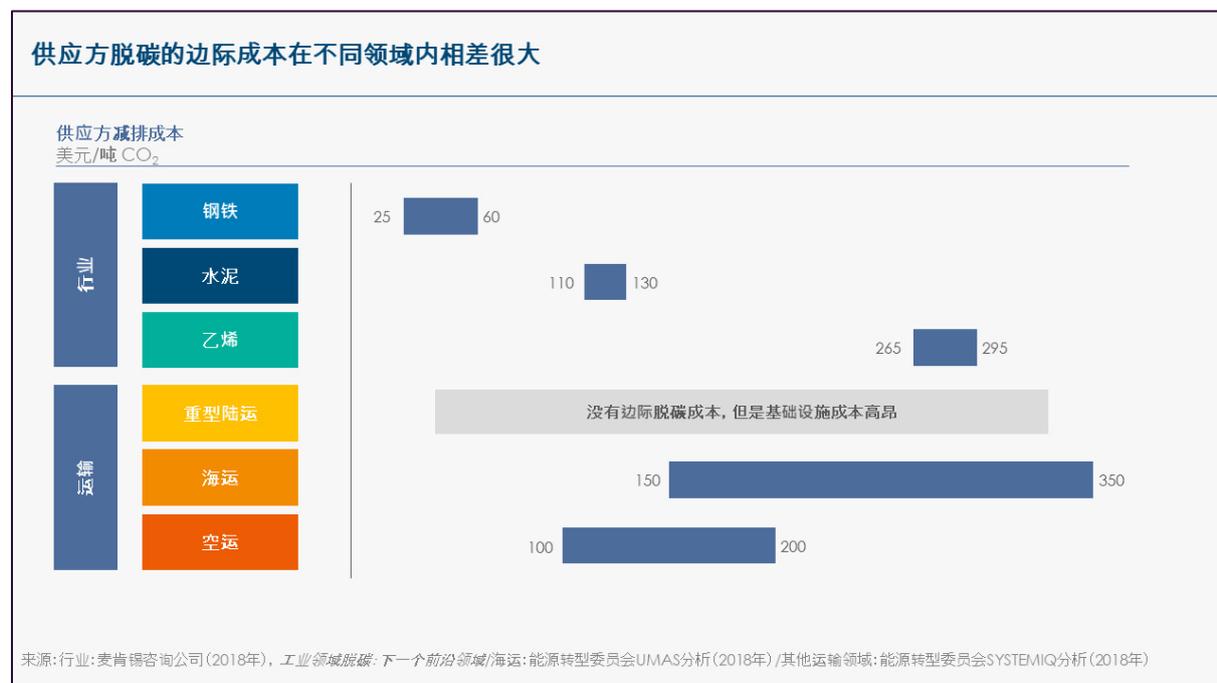
- 对于重型陆运，几乎可以肯定电动传动系统最终将占据主导地位，因为它们的效率优于内燃机，能量储存为电池或氢气形式。21 世纪 20 年代，与柴油或汽油汽车相比，电动卡车将更具成本优势。因此，生物燃料和天然气应该仅扮演过渡角色。
- 在海运和空运方面，使用电池或氢储能电发动机的电发动机可能会用于短途运输。但是，除非电池密度有了重大突破，长途空运可能会依赖生物航空燃料或合成航空燃料，而长途海运可能会在现有发动机中使用氨水或（在较低程度上）使用生物柴油⁸。因为这些燃料可能比现有的化石燃料更加昂贵，空运脱碳成本可能为 115-230 美元/吨，海运则为 150-350 美元/吨，尽管技术进步和规模经济随着时间推移能够降低这些成本。

⁸ 鉴于可持续生物质供应的限制，生物能源的使用实际上应仅限于存在替代性的低碳燃料的行业中。

为经济和消费者造成的成本最低

为全球经济产生的成本

基于已经实践证实的脱碳技术，预估减排的边际成本在不同领域相差很大；但是在大部分难减领域，它们都比较高[例 5]。



例 5

然而，即使有这些成本且需求增长与常规预测一致，截至本世纪中叶重工业和重型运输脱碳的最高额外成本将仅占全球 GDP 的 **0.5%**[例 6]。维持 CO₂ 零排放的经济运营成本将远低于 GDP 的 1%。

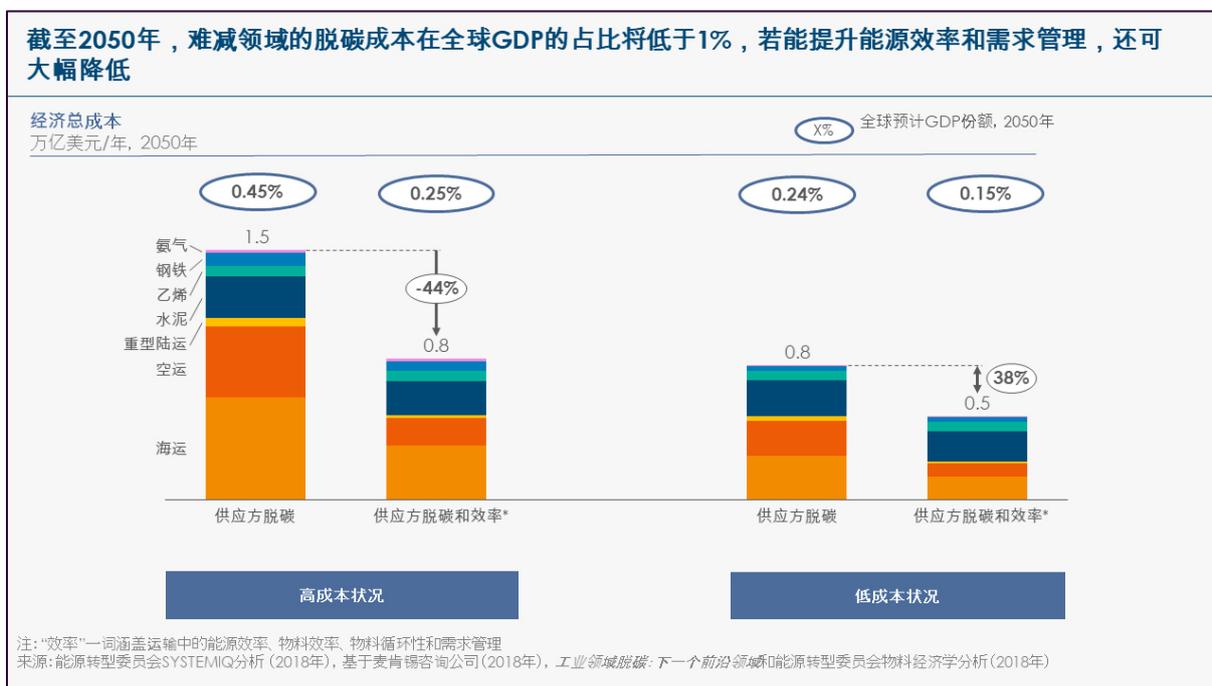
这些成本主要来自四个领域。工业内，由于制程排放所以**水泥**脱碳成本相对较高，**塑料**同样如此，因为它需要消除生产过程中和报废后的排放。运输业内，**空运和海运**的脱碳成本相对较高，而考虑到电动发动机固有的能效优势，转用电池电动或氢燃料电池卡车可能所需成本最低⁹。

通过以下三个方面可以大大降低这些脱碳成本：

- **较低的可再生能源成本**：如果全球零碳电可以实现 20 美元/兆瓦时（而不是 40 美元/兆瓦时），那么重工业脱碳成本将降低 25%。同样，如果生物燃料或合成燃料的额外成本能够降低至 0.30 美元/升（而不是 0.60 美元/升），则海运和空运脱碳成本将降低 55%。总体上，较低的可再生能源价格可能将总成本占全球经济的比例从全球 GDP 的 0.45% 降至 0.24%。
- **需求管理**：在更加循环的经济中提高材料回收和再利用率，结合物流效率提升和运输领域的模式转型，可以将难减领域的脱碳成本降低 40-45%，使之降至全球 GDP 的 0.15-0.25%。

⁹ 但是，BEV 和 FCEV 将要求本报告后面解决基础设施投资问题。

- **未来技术发展**：历史告诉我们学习曲线和规模经济效应往往会使技术成本降低超过预期，新技术会出现且无法提前预测出现了的新技术。如果未来发生了这种情况，则将大大减少甚至消除脱碳成本。例如，如果学习曲线和规模降低了碳捕获的成本，那么水泥脱碳的成本会大大降低；如果电池密度大幅提高足以实现电气化，那么空运和海运脱碳的成本将会大大降低。



例6

对总资本投资的分析需要进一步确认能够以可承受的成本实现脱碳。

- 在工业领域，2015年至2050年总增量资本投资可达5.5-8.4万亿美元¹⁰，占该时期总GDP的0.1%左右，低于可能的全球储蓄和投资的0.5%。
- 在货车运输领域，欧盟委员会的估计表明充电或加氢基础设施所需的投资将低于运输基础设施正常业务投资的5%¹¹。
- 在空运和海运领域，如果主要通过现有设计发动机中使用零碳燃料来实现脱碳，那么可能不需要较大的增量资本投资。

因此，与全球储蓄和投资相比，对重工业和重型运输转向CO₂零排放所需的基础设施和工业资产的投资不是很大，如果采用适应性的融资机制，则资金短缺不会影响CO₂净零排放的实现。

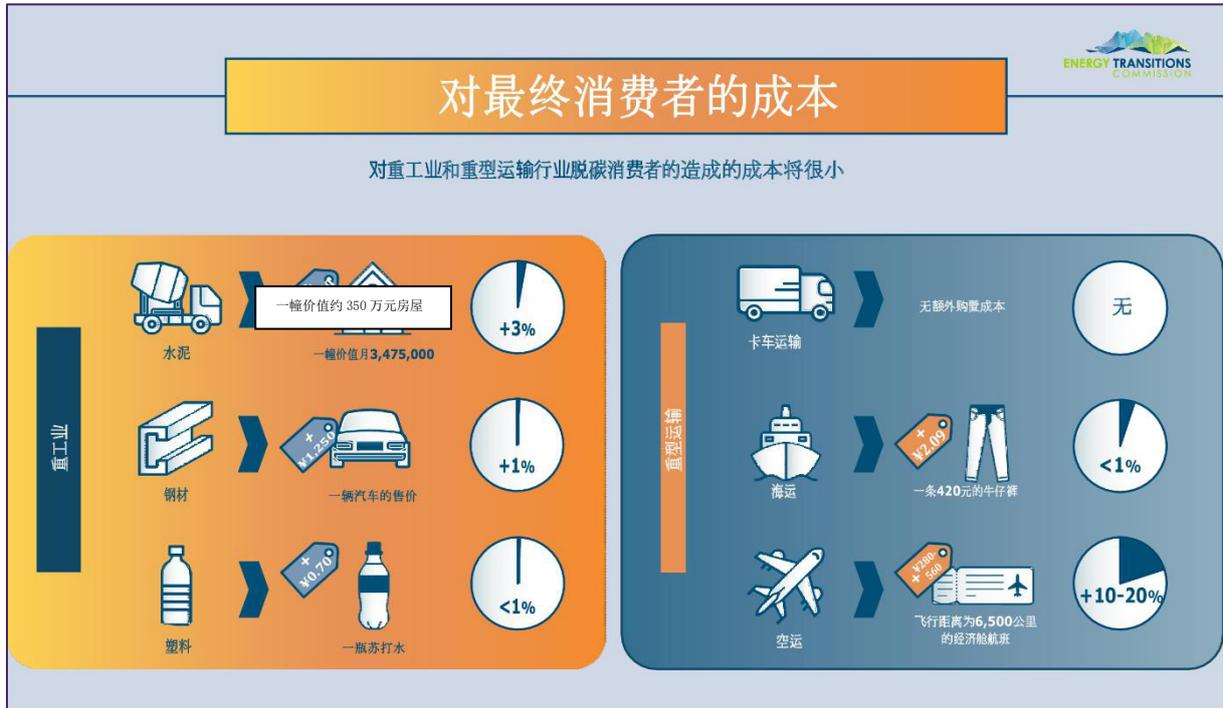
终端消费者的成本

脱碳对终端消费者面临的价格的影响因行业而异，但总体上会很小[例7]。脱碳钢不可能会让汽车的价格上涨超过180美元，而使用零排放塑料会让一升软饮料的价格上涨不超过0.01美元。为最终消费者带来的最大成本是航空业：如果生物燃料或合成燃料总是比普通航空燃料贵

¹⁰麦肯锡咨询公司（2018年），*工业行业脱碳：下一个前沿领域*

¹¹欧洲环境局（2018年）

很多，那么零碳国际航班的票价可能会上涨 10-20%。然而，因为国际航班的开支占全球家庭消费不到 3%，所以这一点对生活标准的总体影响仍比较小。



例 7

中间产品成本

虽然对最终产品价格影响不大，但是对中间产品的价格影响可能会很大。例如，生产零碳钢铁每吨的成本可能比传统钢铁高 20%。一些公司可能会发现难以为低碳技术前期投资提供资金，特别是如果这需要在使用寿命结束前注销现有资产。此外，如果中间产品采用国际贸易，单方面强加国内碳价格或法规可能会产生有害的竞争效应，因此理想做法是采用国际碳价或法规 [例 8]。



例 8

对政策制定者的主要意义：

- 碳价格需可由消费者承担，且应该谨慎设定，以避免影响国际竞争力。
- 难减领域应该能从公众对创新的支持和投资中收益。
- 提高能源效率、材料效率和循环性、运输需求管理以及脱碳技术对于降低整体经济成本至关重要。

脱碳技术组合

不可能且没必要提前确定难减领域实现 CO₂ 净零排放所需的供给侧脱碳的四个主要途径（电能、生物能、碳捕获和氢能）之间的准确平衡关系。最佳平衡根据各地拥有的不同自然资源情况（太阳能、风能和水力资源；可持续生物质资源；地下碳存储的可用性）有所不同，并随着不确定的技术和成本趋势随时间演变。

因此，公共政策应该主要侧重于制定强有力的脱碳激励措施，同时留给市场来决定每个领域最经济划算的途径。但是，可以确定一些实现 CO₂ 净零排放的几乎肯定的特征，这对公共政策和私人投资的优先事项具有影响。

氢能的主要角色

氢能很有可能在几个难减领域的脱碳中发挥重要的低成本作用，而且在住宅供热和电力系统灵活性方面也非常重要。因此，实现 CO₂ 零排放经济将需要将全球氢气生产从如今的 60 公吨/年增加到本世纪中叶的 425-650 公吨/年，即使氢燃料电池汽车在轻型运输领域中所占的比例很小。

因此，通过以下三种途径之一促进较低成本大规模生产零碳氢非常重要：

- **通过零碳电电解**：随着可再生能源价格和电解设备成本的降低，这将越来越经济划算。如果未来氢能需求有 50% 通过电解来满足，那么电解生产总量将比现在增加 100 倍，为通过规模经济和学习曲线效应实现成本降低创造了巨大的潜力。
- **采用碳捕获进行蒸气甲烷重整，以及随后储存或使用收集的 CO₂**：如果流程能源输入实现电气化，那么这可能是更经济划算的碳捕获方式之一，因为化学反应产生的 CO₂ 纯度高。不过，要使从 SMR 加 CCS 获取的氢气真正接近零碳，捕获过程中的碳泄漏以及整个价值链上的甲烷排放都必须降至最低值。如果未来 50% 的氢能需求能在使用 SMR 加上化学反应中收集碳来满足，那么相关的碳封存需求将达到 2-3Gt。
- **生物甲烷重整**：如果使用沼气取代天然气，那么 SMR 也可以制成零碳，但是鉴于有限的可持续生物质资源有其他更为优先级的需求，SMR 不太可能发挥重要作用。

对决策者的主要意义：

- 降低电解成本是创新的重点，目标是资本成本实现 250 美元/千瓦。
- 需要发展 CSS 基础设施以实现从 SMR 加 CSS 获取接近零碳的氢气的生产。
- 进一步降低燃料电池和氢气罐成本也是重点。
- 氢或氨的国际贸易可能扮演重要角色，需要大量潜在的基础设施投资。

至关重要的大规模电气化

在实现零碳经济的任何可行途径中，截至 2060 年电能最终在总能源需求中的份额将从如今的 20% 上升 60% 以上。因此，到本世纪中叶，全球发电总量必须从如今的 20,000 太瓦时左右增加到 85,000-115,000 太瓦时，同时从高碳电力转变为零碳电力。

实施提高能源效率，增加材料效率和循环性以及管理重型运输需求的强有力的政策，可以将该要求有效降低 25%，在发达经济体中降低幅度会更大。考虑到投资挑战的规模，最大化这些机会至关重要。

但是，快速推广零碳电仍是当务之急。我们的分析表明，该扩张虽具挑战性，但是在技术上和经济上具有可行性：

- 与化石燃料电力相比，可再生能源的成本优势越来越明显。15 年内，将有望通过风能和太阳能来满足电能系统中 85-90% 的电力需求，结合电池用于短期备用，剩余 10-15% 由调峰发电能力（例如可调度水能、生物质或化石燃料加碳捕获）来满足。到 2035 年，可再生能源和电池成本大幅降低可使得该电力系统在大部分地域的总成本实现 55 美元/兆瓦时，在最有利地区低于 35 美元/兆瓦时¹²，特别是相应的市场设计已经到位时 [例 9]。这低于当前的传统电力成本。
- 从全球总体层面上看，有足够的土地支持按所需规模进行可再生发电，但是地区之间差异很大。例如在中国西北地区、美国中西部地区以及中东等条件有利地区，能够以

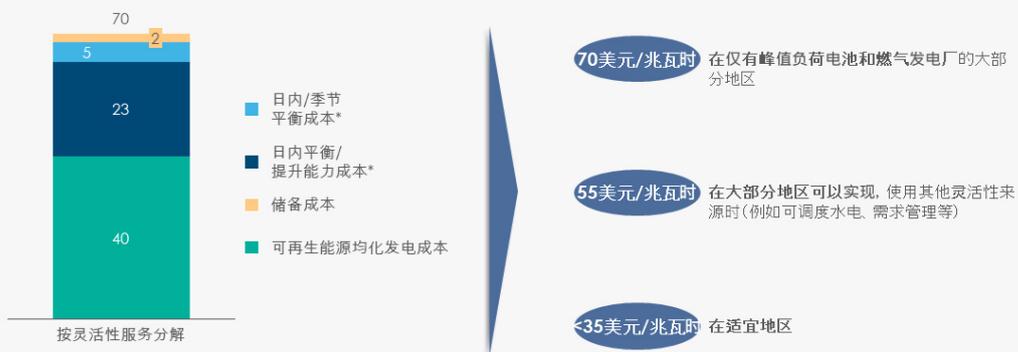
¹²能源转型委员会 SYSTEMIQ 分析（2018 年），基于能源转型委员会气候政策倡议（2017 年），低成本、低碳电力系统

低成本进行超出当地需求的可再生发电。但是，在条件不太便利的地区，人口密度大或者可再生资源少，可能需要将重点放在不太占用土地且具有较高容量因数的零碳电力来源（例如核能或碳捕获的化石燃料）或者进口电力（通过远距离传输线路或以氢或氨的形式）上。

- **我们需要加快可再生能源的部署速度。**为了在 2050 年以 90%可再生电力满足 100,000 太瓦时需求，太阳能和风能的部署速度将需要每年增加 10%以上（即每 7 年翻一番）。同时也需要加强电网。

**低成本、低碳电力很可能在大部分地区都可获得，
在大部分最适宜的地区发电成本低于35美元/兆瓦时**

截至2035年，几乎全部使用多种可再生能源电力系统发电最大总成本
美元/兆瓦时



注：根据德国的资源和负载分布 / *仅考虑两种灵活性技术：CCGT和锂离子电池/均化可再生能源发电成本包括潜在产生的所有能源，包括缩减或储存/转变的量。
来源：选自能源转型委员会气候政策倡议（2017年），*低成本、低碳电力系统*

例9

如果在电力完全脱碳之前实现电气化，电能仍主要来自化石燃料，那么 CO₂ 排在短期内可能会增加。我们的分析表明，在电能的碳强度低于 750 克 CO₂/千瓦时的发达经济体中，该危险在水陆运输和大部分工业应用中都非常有限，但是在换成氢气、氨水和合成燃料，或者电采暖之前，需要更低的碳强度，这有助于减少排放。相比之下，在一些以煤为主的发展中经济体中（例如在印度，电能的碳强度超过 1000 克 CO₂/千瓦时）直接电气化，则可能导致大量碳排放。因此，快速推进电力脱碳非常重要，需要仔细协调电力脱碳和电气化的节奏。

对政策制定者的主要意义：

- 电力脱碳政策应该为电力需求大幅增加做好规划，加快可再生电力的部署。
- 如 NDC 所述的国家脱碳计划应制定电力脱碳和电气化的综合愿景，确保零碳电力满足增加的电力需求。

生物质的优先和严格管制使用

无论是作为热能生产的能源、钢铁生产中的还原剂还是化学生产的原料，原则上生物质在每个难减领域脱碳中都扮演着重要角色。当它用于电力、热源或工业时，可以结合碳捕获，并可能产生负排放。木材还可以提供替代的低碳建筑材料。

不过，鉴于土地使用竞争激烈，生物质的使用必然会受到真正可持续生物质总供应量有限的限制。这要求生物质来源或土地不会占用提供食品或碳存储的来源或土地，并且其使用符合生物多样性以及生态系统保护原则，特别是要避免滥伐森林。而且，生物能源通常产生的能源不到太阳能每公顷产生的能源的 1%，使得基于电力的解决方案在可用和技术可行的情况下更有效。

可持续生物质供给的估计差别很大，但是保守假设显示截至本世纪中叶每年至少有 70EJ 的可持续生物质可用于能源和原料，城市废物占 10-15EJ，农业城市废物和加工废物占 46-95EJ 以及木材收获残留占 15-30EJ¹³。该估算不包括来自专用能源作物的任何生物质产量，无论是以油料植物（例如大豆）的形式还是以林业作物（例如速生柳树或杨树）的形式。

主要的不确定性涉及木质纤维素材料的供给，这些木质纤维素材料可以从森林作物中可持续地收获（通过大规模的重新造林计划，重点是热带国家的退化土地），同时也与冬季覆盖作物和藻类产品的可用性有关。有几个因素可能会减少可持续生物量，尤其是气候变化引起作物减产。

70 EJ（或者甚至 100EJ）的可持续供应不足以满足能源、工业和运输领域对生物质的潜在需要。因此，它必须主要用于替代脱碳途径最少的领域：

- 排在第一位的领域似乎是航空，其中等量航空燃料的零碳对于长途飞行脱碳至关重要。完全脱碳最多需要 42EJ 生物质。如果使用合成燃料以及通过能源效率和需求管理，则可能稍有降低。
- 其次可能是塑料领域，其中生物原料对于补偿报废后的排放非常重要，除非报废后的塑料被回收或安全填埋。生物原料无法完全取代化石燃料：28EJ 生物质供给仅覆盖 30% 的原料需求。因此，塑料脱碳战略必须尽可能完整地结合循环模式转型，实现碳固存（以固体塑料的形式，放在永久安全防漏的储存设施中），以及尽可能限制使用生物原料以弥补价值链上不可避免的损失。

¹³ IEA（2017 年），技术路线图：提供可持续生物能源

- 不过，如果不是受严格的可持续性条件的限制，**生物质的最大需求**反而不会出现在本报告中考虑的难减行业，**而是出现在住宅供暖和发电行业**（如果结合碳捕获和固存，可能产生负排放）¹⁴。因此，关键是推动能源储存技术和智能需求管理，以取得长足进展，进而将该需求最小化。
- 相比之下，**生物燃料/生物质对于推动重型陆运、海运和其他工业领域脱碳并不关键**，因为有其他脱碳途径可用。

在使用中，**生物质、沼气和生物燃料很有可能比化石燃料价格高**。因此，碳价和法规将十分必要并且要适当以使这些能源使用具有经济性。基于生物质的解决方案也可能比替代脱碳途径成本高，例如一些应用中的电气化或氢能，如此一来它们自然会被市场淘汰。

对决策者的主要意义：

- 针对生物质可持续性颁布严格法规至关重要。这可能排除经常与农业和生态系统服务竞争的能源作物，以及一些当地的例外情况，例如温带气候下的冬季覆盖作物
- 支持创新的首要任务是，开发真正可持续生物航空燃料和用于生产塑料的生物原料并降低其成本。
- 对生物质开发的公共支持应从非有限领域过渡到高优先领域，除非本地条件可对更广泛的应用组合提供明确的可持续供应。
- 为电力和住宅供暖开发非基于生物质的峰值发电能力和能源储存方案势在必行。
- 在一定的主供给水平上，生物炼制工艺的效率提高，对于提高生物能量和生物原料使用量非常关键。

碳捕获不可或缺但作用有限

过去 10 年可再生资源的成本大幅降低，意味着碳捕获在**潜在提供可调度低碳电力以补充可变可再生能源的电力领域起到的作用可能比之前所认为的更小**。但是，如果没有碳捕获和封存的作用，难减工业领域实现零 CO₂ 排放可能无法实现，而且成本必然会更高：它可能是实现水泥生产总脱碳的**唯一途径**（除非水泥化学取得突破，消除工艺排放），在一些地区，可能是钢铁、化工和氢气生产脱碳成本最低的途径。

但是，**目前对于碳捕获的必要规模尚无共识**。实现巴黎协定目标的几种情况中假设，到 2100 年，碳捕获和封存将占 18Gt/年减排（或更多），其应用到生物质工艺会产生大量负排放。有担心认为这些大规模的假设，是为继续大规模使用化石燃料生产辩解。另外，不时有地下碳储存不安全或者并非永久有效的担忧。

因此，就碳捕获的切实性和必要作用，以及碳储存和碳使用在 CO₂ 产品中的分别的作用，达成一些共识至关重要。能源转型委员会的判断是：

- 净零碳经济可以实现，无需一些模型中假设的大量碳捕获（例如每年 18Gt），但是**作为整体脱碳战略的一部分，更适度的碳捕获规模（例如每年大约 5-8Gt）**，很可能是必须而且经济有效的。
- **每年捕获的大约 1-2Gt CO₂ 可能用于 CO₂ 产品，实现长期储存**，绝大多数情况下会用于混凝土、集料和碳纤维。这意味着水泥厂碳捕获与混凝土生产使用之间可以实现潜在协同。

¹⁴ 如果沼气在住宅供热方面发挥重要作用，ETC 图解途径显示高达 28EJ 生物质输入，如果基于生物质的发电厂仅提供全球 4% 的电力供应以帮助满足高峰期发电需求，则多达 34EJ

- 然而，可能需要一定量的存储（每年储存 3-7Gt CO₂），包括来自 IPCC 的最佳专家建议认为碳储存可以既安全又有保障，前提是得到有效规范¹⁵。
- 在本世纪中叶前达到这些碳捕获量，将需要加快部署速度，政府需要在以下方面发挥积极作用，否则无法实现：(1) 使用独立的科学依据来证明碳运输和储存安全，以获得社会认可；(2) 通过碳定价让碳捕获和储存在经济上可行；以及 (3) 计划和规范部署碳运输和储存基础设施。如今，这些条件尚未得到满足。政策制定者和行业需要立即采取强有力的集体行动，从而在未来 10 年满足这些要求。

对政策制定者的主要意义：

- 商业规模的碳捕获和碳使用技术，尤其是在水泥混凝土价值链中，应该是一个关键的创新点。
- 对于任何形式的碳捕获和封存，碳的价格是关键支持。
- 要使地下碳储存成为解决方案组合的一部分，政府需要：
 - 全面且严格规范碳运输和储存，以获得社会认可；
 - 计划和支持部署碳运输和储存基础设施。
- 如果未发展地下碳储存，则政府将需要：
 - 计划加快部署可再生资源 and 基于电力的工业解决方案；
 - 在市场上推出低碳材料以替代水泥；
 - 在市场上推出二氧化碳破坏技术以处理剩余碳排放。

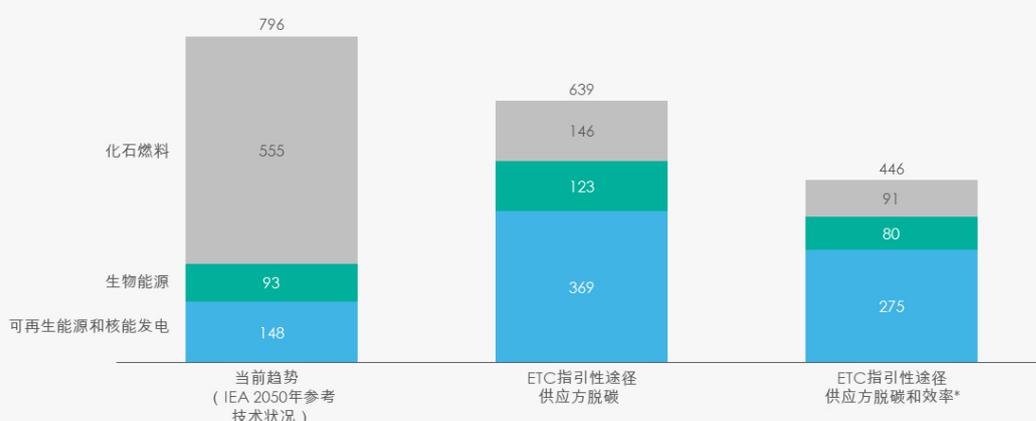
实现零碳经济的最佳途径

实现零碳经济的最佳途径将需要使用所有脱碳工具。在总体平衡内，**电气化将发挥最大作用，截至本世纪中叶占最终能源需求的 65% 左右，电力也用于产生大量氢气。**大约 85-90% 的电力将来自可再生能源或其他零碳来源，不超过 10-15% 来自采用碳捕获的生物质或化石燃料。如果抓住机会提高能源效率、材料效率/循环次数和运输需求管理，则初级能源需求将大大降低。[例 10]

¹⁵ IPCC（2005年），二氧化碳捕获和储存；IPCC（2014年），减缓气候变化

可再生能源和核能发电可能占主要能源需求的~60%

全球主要能源需求, CO₂净零排放经济
EJ/年, 世纪中叶



注：“效率”一词涵盖运输中的能源效率、物料效率、物料循环性和需求管理
来源：能源转型委员会SYSTEMIQ分析(2018年)；IEA(2017年)，*能源技术展望*

例10

然而，由于相关自然资源分布差异较大，所以最佳平衡因地区而异：

- **太阳能和风能资源的巨大差异**意味着，虽然一些国家可以实现当地生产的廉价可再生能源满足 65% 以上的最终能源需求，但其他国家则需要依赖其他零碳电力来源或电力进口。可再生能源发电的成本也会有很大差异。
- **人均生物质资源和成本也因地区而异**，这很可能导致空运和塑料生物精炼产品发生国际贸易，以及经济的其他领域，例如热量和电力，不同地区的生物质使用程度差异很大。
- **就地下碳储存而言**，已知可用储存容量规模的巨大区域差异部分，反映出各地区（特别是非洲）对当前知识的局限性。但是，一旦全面调查完成，则各地区之间的可用存储容量将有很大差异。

B. 零排之路：工业和运输业管理零排放转型

我们的分析表明，到本世纪中叶，所有难减领域都可以实现 CO₂ 零排放，对全球经济和最终消费者来说成本很低。但是，零排之路与结果一样重要。因此，以下几点非常重要：

- 认识到决定可行的转型速度的复杂性；
- 通过提高能效和需求管理，降低脱碳挑战难度；
- 确定转型解决方案的适当作用，特别是储量巨大的天然气作为转型燃料，抵消购买作为转型减排战略。

各个领域面临的技术、经济和制度挑战

三类转型挑战非常重要：技术挑战、经济挑战和体制挑战。

技术挑战：

- 许多相关技术尚未商业化。虽然到 2030 年电动卡车可能具有成本竞争力，但水泥窑电气化可能要到十年之后才能商业化。基于氢的工业流程也需要重大发展。因此，加速关键技术的开发和规模部署至关重要。
- 塑料达到生命周期零排放是一项重大挑战，因为需要消除其报废后和生产过程中的排放。可持续生物原料供应有限，使得生物原料无法完全替代化石燃料。因此，必须通过机械和化学回收，以及固体塑料安全报废储存来管理现有和未来的基于化石燃料的塑料原料。
- 大多数情况下，碳捕获技术将捕获大约 80-90% 的 CO₂ 流，剩下 10-20% 仍会进入大气中。应优先发展具有高捕获率的捕获技术，但需要一定程度的土地使用或 BECCS 负排放来补偿这些残余排放。

经济挑战：

- 由于大多数脱碳途径需要净成本，单靠市场力量不会取得进展；必须制定强有力的政策结合法规和支持，为快速脱碳建立激励机制。
- 如今，最大的困难在于创造足够强大的财务激励措施，以促使人们寻找最佳脱碳途径，且不会给目前尚无全面脱碳技术的行业造成不合适的负担。
- 关于重工业，超长的资产寿命影响新技术的部署，除非有强有力的政策鼓励提前核销资产。关于钢铁，例如从高炉还原转换到氢气直接还原，可能需要在现有设备使用寿命结束之前废弃。
- 即使碳价在理论经济上转向零碳技术，高前期投资成本也可能成为向前推进的障碍，特别是利润率较低的行业或公司。因此，可能需要直接的公共投资支持（例如通过贷款担保或偿还预付款）。
- 虽然在总体上有益，但在向零碳经济的过渡过程中将不可避免地出现赢家和输家，影响一些地区的地方经济发展和就业。而且对终端消费者价格的影响（虽然有限）可能对低收入家庭，特别是发展中国家的低收入家庭，产生较大的影响。政策应该通过转型战略来预测和补偿这些分配影响。

制度挑战：

- 目前的创新体系联系不紧密，公共和私人研发之间几乎没有协调，缺乏国际论坛来开展关注难减领域的创新议程。
- 在面临国际竞争的领域，国内碳价或法规可能对竞争和生产地点的流动产生不利影响。这意味着需要进行国际政策协调，或者使用下游税收和/或边境税调整，或排放量交易计划或补偿计划内的自由分配（结合日益远大的基准技术标准）。
- 海运或建筑等一些行业非常分散，所以激励机制也是四分五裂。即使是具有成本效益的效率技术和可循环实践也不容易部署。创新政策应加强激励措施，例如在港口层面实施的法规或材料回收的义务。

对工业和重型运输的影响

考虑到这些技术、经济和体制障碍，转型途径将因领域不同相差很大：

- 在工业领域，完全脱碳必然需要几十年。因此，公共政策必须超前通过碳定价、法规或财政为长期变革提供强有力的激励。未来十年来各行业的积极行动将降低后续脱碳工作的成本。
- 在运输领域，转型途径不那么复杂：
 - 在重型陆运中，一旦替代车辆（无论是电池电还是氢燃料电池）在新购买时变得具有成本竞争力，相当短的资产寿命可以允许快速脱碳（例如，超过 15 年而不是 30 年）。
 - 在长途海运和空运业中，完全脱碳的可能途径需要在现有发动机内使用零碳燃料，这意味着海运和空运发动机的使用寿命不会对转换速度产生影响，而是由零碳与传统燃料的相对成本决定¹⁶。

通过提高能效和需求管理，降低脱碳挑战难度

考虑到实现供应方脱碳所需的时间，特别是在工业中，提高效率和减少需求不仅对于实现短期减排，而且对于降低长期脱碳成本也至关重要，通过减少初级工业产量，或在移动服务采用供应方脱碳技术[例 11]。

提高能源效率在海运和空运业中尤为重要，因为每公里较低的燃料消耗可以降低使用零碳燃料的亏损，并减少对有限的可持续生物燃料供应的需求。

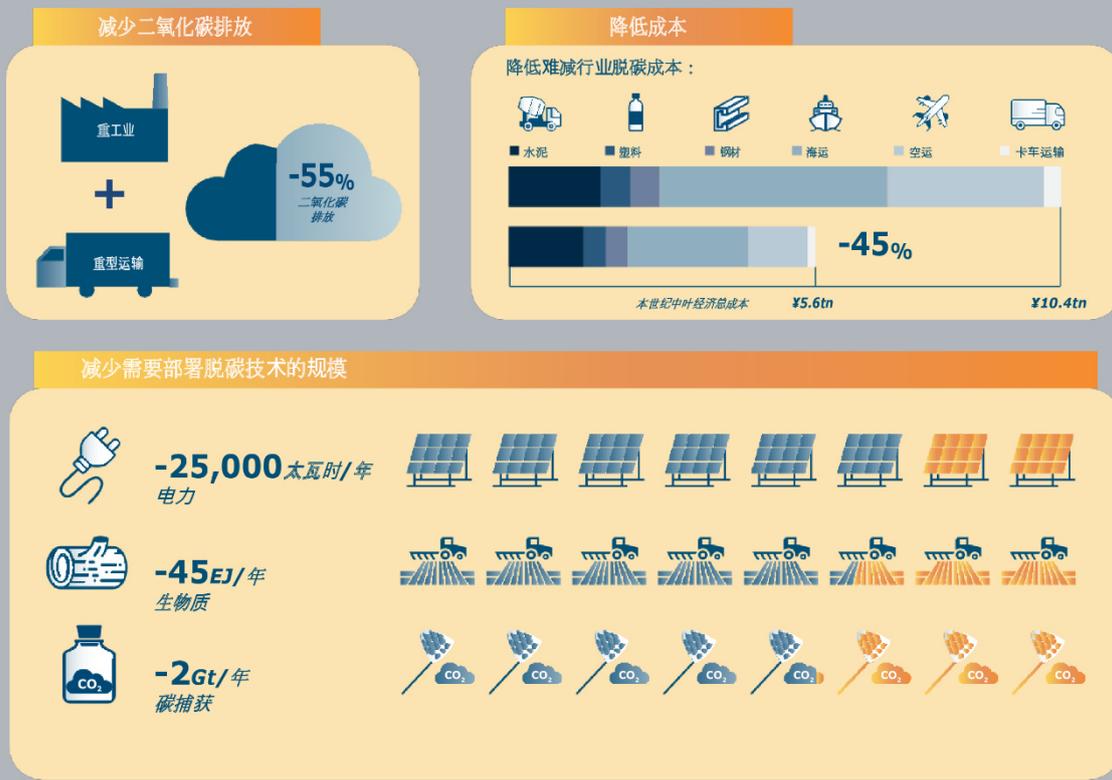
运输和工业领域之间的需求管理潜力不同：

- 在运输领域，最大的潜力在于货运方式从公路到铁路的模式转换以及短途客运的飞机到高铁，但总可能潜力不太可能超过 20%。
- 然而，在工业中，到 2050 年，更高的材料效率和循环性可以使全球 CO₂ 排放减少 40% - 发达经济体排放减少 55% 以上，塑料和金属供应链中的机会最多。

¹⁶ 虽然海运行业需要进行一些改造，以使燃料输送和存储设备适合使用氨气和氢气。

为什么能源效率和需求管理很重要

在难减排行业，提高能源效率和进行需求管理可以：



例 11

实现这种需求方减少潜力所需的大多数技术已经可用。它们的规模部署可能会降低成本，例如在回收行业。但是，如果想要抓住机遇，那么产品设计、行业实践和监管方面的重大变化至关重要。

- 如果制造、汽车和建筑价值链上的不同公司之间没有加强协调，则不可能改进材料循环性。高质量的回收确实需要新的产品设计方法以及报废拆解和材料分离，除非法规要求，特别是通过扩大生产者的责任，否则不会发生。
- 在大数据计算的推动下，提高物流效率还将依赖于公司之间的更多协调，而推动模式转变需要改善公共交通基础设施，特别是铁路，并为客运和货运创造财务激励措施。

利用转型解决方案：天然气和补偿

正确应用这些解决方案因行业而异，具体取决于最终解决方案商业化时间。

因此，过渡解决方案特别适用于重工业，其中许多零碳解决方案尚未上市；鉴于相对容易过渡到电动汽车（卡车运输）或生物燃料和合成燃料（海运和空运），它们可能在运输中发挥较小的作用。

天然气作为转型燃料

由于天然气通常比煤燃烧产生的排放量少约 50%（当且仅当甲烷排放量受严格控制）因此在原本基本不变的生产过程/设备中从煤转换为燃气原则上可以实现显著的短期减排。从石油转向天然气带来的减排更加有限 (5-20%)。然而，如果天然气价值链中的甲烷泄漏超过 1-3%（取决于应用），气候效益可能会显著下降甚至消失。

- 在工业领域中，在仍以煤炭为热源的工业（例如水泥）中以及在仍以煤炭为化学品生产的原料的国家（例如中国）中，可能存在从煤转向天然气的巨大潜力。然而，这种潜力可能受限于有限的国内天然气供应，特别是在中国和印度。
- 在运输业中，天然气的最佳作用更加有限。如果现在可以用这些技术在现有车辆上进行改装，并且在未来 10-15 年内分别由电动车辆和零碳燃料取代，而相关基础设施改做其他用途和撤除，¹⁷那么陆运中的 CNG 和海运中的 LNG 可能会发挥有限的过渡作用。

到 2040 年，零 CO₂ 排放的最佳途径可能导致天然气的产量大致持平或略微上涨，前提是：

- 强有力的政策以确保在整个生产和使用链中，在任何气体使用前，甲烷泄漏要达到足够低的水平（上游泄漏量为 0.2%，综合考虑上游、中游和下游排放量时低于 1%）。
- 预先宣布的战略，以确保最终天然气使用行业：
 - 转型至沼气 – 同时考虑可持续生物质可用性的限制，而这将对价格产生压力；
 - 将碳捕获和封存应用于现有的燃气生产过程中；
 - 从天然气转向电力、氢气或生物能源，这意味着需要提前计划在使用寿命结束前核销天然气基础设施和设备，或者将其重新用于氢气。

实际上，到 2040 年之后，储量巨大燃气消耗将会快速下降以实现巴黎目标。

抵消的适当作用

由于脱碳的边际成本在难减行业和整个经济体之间差别很大，因此按行业达到净零路径的早期阶段，可以允许从其他经济行业或从土地使用行业进行购买以实现抵消¹⁸。这些设计（有时被称为“基于市场的措施”）也将通过碳边际价格，为一些行业寻求长期脱碳解决方案创造动力。

此外，土地使用行业购买抵消款项可以提供宝贵的资金来源，以加大对更可持续的土地使用的投资，例如防止砍伐森林和促进重新造林。

但是，对于任何依靠购买抵消款项的措施，都必须进行严格控制并且明确时间限制：

- 对于从其他能源使用行业购买实现抵消，必须限制在排放量交易设计的框架内，须严格限制设计的总量，并且按巴黎协定的目标逐步降低。这意味着到本世纪中叶，这些购买将不再起到作用。
- 考虑到天然碳封存总体潜在能力的限制，土地使用补偿仅应起到过渡作用。土地使用必须受到极其严格的监管，以确保购买抵消款项确实能够减少碳排放量，并避免对生物多样性产生不利影响。但我们的分析表明，虽然到 2060 年能源和工业系统贴近净

¹⁷ 此外，天然气在住宅供暖以及加速电气化方面发挥着过渡作用，并且以后可能被沼气或氢气取代。不过，ETC 尚未详细分析这一问题。

¹⁸ 本报告未涉及在受管制的排放交易计划之外，如何计算碳减排抵消额度的国际交易相关的法律纠纷。



零，但仍有少量残留排放（每年约 2Gt），其消除成本非常高。因此，可能会需要少量的土地使用或 BECCS 负排放，来发挥长期作用。

不过，我们的分析表明，虽然到 2060 年能源和工业系统贴近净零，但仍有少量残留排放（每年约 2Gt），其消除成本非常高。因此，可能会需要少量的土地使用或 BECCS 负排放，来发挥长期作用。

但是，鉴于长期负排放受限制，行业战略目标需要设定为到本世纪中叶实现 CO₂ 净零排放，才符合巴黎协定协议。

C. 行动：决策者、投资者、企业和消费者可以（而且应该）做些什么

通过创新推动进步

使用已有技术应该可以实现所有难减行业的完全脱碳。但部分行业仍然没有市场准备，也没有在商业规模上部署。此外，**未来技术突破毋庸置疑**，在将来几十年内，会出现不同的成本更低的脱碳途径。需要私人投资和公共政策支持来推动渐进式创新，将根本性突破最大化。

实现运输和工业的电气化

在运输行业，主要挑战是进一步降低成本和提高电池性能：

- 由于现在大规模私人投资的流入，目前占主流的锂离子技术很可能使**电池价格下降**，这符合 **BNEF** 做出的到 **2025 年 100 美元/千瓦时**（电池加电池组）的预测，甚至早于其预测节点。
- 与进一步降低成本相比，**能量密度、充电速度和电池寿命的改善将变得更加重要**。如果电池密度提高 2-3 倍，电池电动汽车在长距离陆运将具凸显优势，对于长途海运和空运而言，则需提高 5-10 倍。这些将需要电池化学发生根本性改变。

在工业行业，主要挑战是**开发电动水泥窑和高炉**。除此之外，在钢铁和化工行业，应积极探索基础研究中**电化学的彻底突破**。

降低氢气生产和使用的成本

鉴于我们几乎可以肯定氢气会发挥重要作用，降低氢气生产和使用的成本至关重要，特别是针对：

- 从根本上**降低电解设备的成本**，实现从如今为 1000 美元/千瓦，到 21 世纪 20 年代中期达到 250 美元/千瓦；
- **降低蒸汽甲烷重整和碳捕获的成本**；
- **将燃料电池的成本**从目前的 100 美元/千瓦降低到 2025 年不足 80 美元/千瓦，中型车和氢气罐从现在的 15 美元/千瓦降低到 2025 年不足 9 美元/千瓦。

降低碳捕获和碳使用技术的成本

碳捕获和使用的关键挑战不是基本技术，而是如何实现大规模部署以推动规模经济和学习曲线效应。

通过生物化学和合成化学革新化学工业

虽然可以通过电气化、生物质燃烧或碳捕获和固存来消除工业过程的排放，但**更难以解决的技术挑战是解决产品寿命末期在多个分散位置产生的排放**，特别是由于**剩余碳氢燃料**（空运和海运）、**塑料和化肥**（同时产生 CO₂ 和 N₂O 排放）。

因此以下四个方面的创新至关重要：

- **生物化学**，其关键挑战是开发用于塑料生产的液体燃料或原料，同时通过以下方式最大限度地减少与粮食生产竞争和威胁生物多样性的生物质来源的使用：

- 能够发现木质纤维素来源的生化技术，
- 可以在旱地或海水中生长的作物的基因工程，包括藻类，
- 提高生物炼制工艺的效率；
- **合成化学**，有创新方面面临两大挑战：
 - 降低直接空气捕获 CO₂ (DAC) 的成本，
 - 寻找生产塑料的芳烃的有效方法；
- **混合化学途径** - 即：结合生物和合成化学；
- **化学回收塑料**，以限制对新的生物和合成原料的需求。

实现更高效率和循环能力

实现能源效率以及材料效率和管理潜力，需要在以下三个主要方面进行创新：

- **产品设计**以实现：
 - 提高能源效率 - 例如：改进飞机和船舶的设计；
 - 使用新的低碳燃料 - 例如：重新设计飞机，以便使用氢气；
 - 提高材料效率和循环能力 - 例如在建筑物、汽车或包装设计中减少余量，并促进材料的废弃物拆解、分类和回收；
- **改进材料加工系统**，特别是：
 - 新制造或建筑技术，减少生产浪费；
 - 新型高强度材料，可减少所需的材料投入；
 - 材料可追溯系统，由数字技术支持；
 - 自动分拣系统，实现材料的高级分离；
 - 分离复合材料成分（如纺织品）的方法；
 - 改进冶金技术，去除废金属中的杂质，并从混合废料中生产出高质量的金属；
- 新的商业模式依赖于更长的产品生命周期（通过设计、维护、更高质量的材料、再制造和再利用），以及更密集的使用（通过共享或增加占用水平）。

开发新材料

将碳强度较低的材料替换为碳密集型材料具有巨大潜力，例如：

- 在建筑行业，使用木材或火山灰基混凝土代替波特兰水泥；
- 在包装、纺织和制造行业，使用纤维素纤维代替塑料（和生物基塑料，这与直接使用纤维相比，需要更多的生物质）。

通过政策推动进步

由于有很多途径可以解决难减行业的脱碳问题，因此政策应该支持市场驱动，来寻找最佳解决方案，同时针对性地支持一些必须的过渡措施。需要四组互补的政策来推动进步。

有效和务实的碳定价方法

必须有合理的碳价来发挥核心作用，同时鼓励提高能源效率，供应方脱碳和减少需求。

EU-ETS 等现有碳定价计划已经开始在降低碳排放方面发挥作用，但三大挑战制约了其目前的效率：

- 如果无法达成国际协议，某个国家征收碳税可能会导致**国际贸易商品和服务**（例如钢和铝）的生产地点发生变化，这往往导致 EU-ETS 等碳定价计划内出现例外情况；
- **各行业的边际减排成本差异很大，再加上高排放上限**，这意味着价格可能过低，从而无法促使成本较高的行业（例如空运）发生变化。
- 排放交易系统中长期价格的不确定性，该定价系统没有提供足够强大的长期价格信号来促进技术发展。

克服这些挑战至关重要。涵盖各行各业国际协议仍是理想，达成这些协议至关重要。但是，决策者还应该认识到，如果理想不可能实现，仍然有机会通过加强现有排放交易计划和发展不完善但有用的补充计划取得进展，可能可行的方案有[例 13]：

- **提前规定**，在某些情况下，采用特定税收来确定，进而通过波动价格实现更强大的激励。
- **按行业划分**以反映不同边际减排成本和技术准备情况，例如：海运和空运的碳价远高于材料生产工业行业；
- **国内/地区**，例如：在水泥行业（竞争主要在国内）采用高碳价，但是在钢铁行业不采用同等水平的碳价；通过排放交易计划或补偿计划内的自由分配来避免碳泄漏危险（结合日益远大的基准技术标准进行分配/补偿，从而激励创新和投资）；
- **下游**，即实施在消费品而非生产过程中的生命周期碳排放，如汽油和柴油的消费税，无论原油生产和炼油的位置如何，都可以有效地征收碳税；

需要设计这类碳定价方法来限制行业之间和地区之间的碳泄漏风险，并可能需要新的系统以确保生命周期碳排放的可追溯性。最好可以建立起全球统一的碳定价框架。

六个创新领域

在经济体的难减排行业实现完全脱碳

- 渐进式创新
- 突破性创新

电气化



- 更便宜、更高效的电池
- 适于处理水泥和化学品的电炉
- 用于钢铁生产的铁的电化学还原

材料效率和循环能力



- 新的消费品设计
- 材料可追溯性、收集、分类和回收技术
- 新业务模式：产品即服务、共享...

氢



- 更便宜的电解 (目标1740元/千瓦)
- 更便宜的氢燃料电池和氢气罐
- 氢的远距离运输

新材料



- 低碳水泥和混凝土化学品
- 建筑用生物材料
- 纤维素基纤维作为塑料的替代品

生物化学和合成化学



- 提高生物质转化效率
- 来自木质纤维素来源和藻类的生物能源和生物原料
- 合成化学，包括直接捕获空气中的二氧化碳

碳捕获和碳使用



- 提高碳捕获效率，特别是对于水泥
- 将碳用于混凝土、聚合物和碳纤维

例 12

对碳定价

适当对碳定价必须在推动难减排行业脱碳过程中发挥核心作用

涵盖各行各业的国际协议是理想，应努力达到。



政府可以通过有效和务实的碳定价方法不断推进工作。

有效和务实的碳定价方法

提

前确定

建立长期机制
通过税收和底价推动投资决策，而不是交易计划中的价格波动。

区

别对待

按行业区分，
因为需要更高的价格来发起
海运业变革，而不是钢材变革。

国

内

关乎非
国际贸易商品（如水泥），而
不是国际贸易商品（如钢铁）。

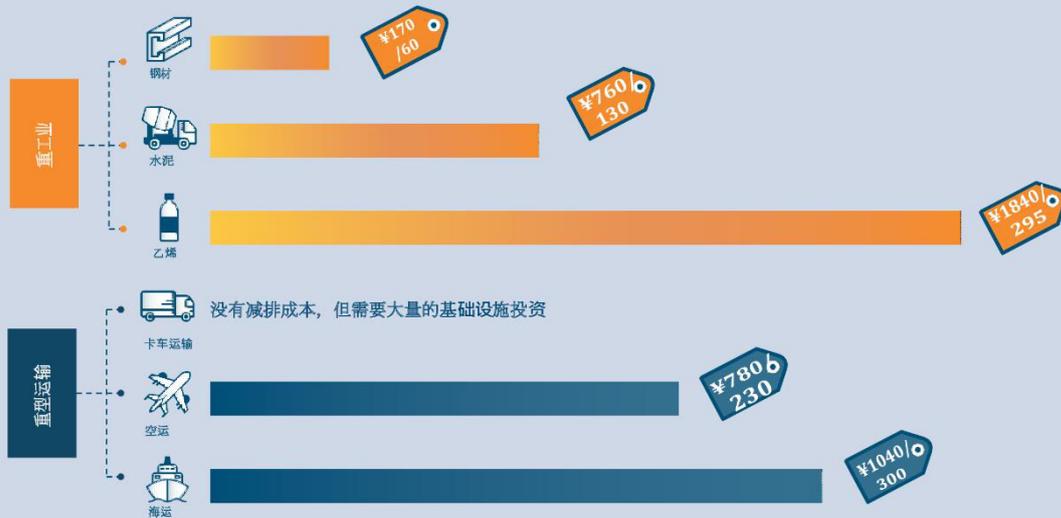
下

游

关乎消费品
生命周期中的碳排放，而非生产
过程（如对包装的碳含量征税）。

指示性供给侧减排成本（元/吨二氧化碳）

0 25 50 75 100 125 150 175 200 225 250 275 300



例 13

监管要求和规定

除碳定价外，具体的监管要求可以而且应该包括：

- **能效监管**一直是提高汽车和设备效率的关键驱动因素，IMO 已经采用该措施来推动提高新型船只的能效；
- 基于可靠的生命周期碳核算和其他环境影响的评估，针对低碳燃料（包括生物能源和氢能）**严格定义的可持续性标准**；
- **绿色燃料监管**可能要求空运和海运公司持续增加零碳燃料的比例（与严格规定的可持续性标准相结合）；
- **规定特定日期起，禁止销售柴油或汽油 ICE 卡车**，和/或禁止在主要城市使用；
- **含碳的产品标签以及规定**，确保消费品（例如汽车或电器）中使用的材料的来源、碳强度和再循环含量的可追溯性；
- **材料效率标准**，特别是基础设施、建筑和关键消费品；
- **推动循环经济的法规**，特别是执行报废产品回收责任制，并要求产品设计有回收潜力。

公共支持基础设施的发展

建立零碳经济所需的大部分投资将由私营部门完成。但在以下方面可能需要公共政策来积极协调或直接给予投资支持：

- **远距离输电**，支持间歇性可再生能源的高渗透率；
- **交通网络沿线、港口甚至机场（如果使用氢气和氨气）的基础设施**，用于车辆充电和加油；
- **铁路基础设施**，特别是连接各区域的高铁，以实现更大的模式转变；
- **港口和管道基础设施**，以推动氢和氨等新燃料的国内和国际贸易的发展；
- **碳交通和储存网络**，政府在实施严格的监管标准以及规划和批准管道路线方面发挥关键作用。

公众支持研究、开发和部署新技术

根据不同技术的市场准备程度，公共政策的角色将有所不同：

- **以商业规模部署成熟技术**：这里的大部分投资必须来自私营行业，但政府可以通过促进融资（例如通过贷款担保或可偿还预付款）和利用公共采购来创造对低碳产品和服务的需求来加速进展。
- **促进正在开发的技术转化为商业应用**：需要结合公共和私人创新资金来加速将技术推向市场的过程，特别是为试点项目提供资金。
- **促进激进技术改变游戏规则**：公共资金应该为特定的研究行业提供直接支持，特别是通过目标驱动的项目：在未来 10-15 年定义具体的量化目标，并愿意支持可以实现目标的多项研发工作。

通过私营部门行动推动进步

私营部门的行动对于实现难减行业完全脱碳也至关重要。

难减行业的行业协会

主要工业和重型运输（尤其是海运和空运）的许多行业协会已经打算在本世纪中叶实现大幅减碳。为达到效果，需在以下方面进一步加强：

- 制定到本世纪中叶零碳排放的路线图，包括明确规定，将随着时间的推移逐步淘汰过渡性解决方案（如抵消款项或使用天然气）；
- 制定跨行业举措，以发展对低碳/零碳产品的需求（例如：空运公司、机场和旅行社之间的伙伴关系，提供零碳飞行方案）并支持材料循环（例如：钢铁生产商和制造商之间的伙伴关系，提高废钢的收集速度和质量）；
- 利用他们的游说能力，来倡导强有力的碳定价国际协议。

难减领域的公司

同时，领先的行业公司已经开始准备低碳转型，一些公司致力于以科学为基础的目标，另外一些公司则大胆承诺零碳排放。我们希望越来越多的公司继续：

- 投入研发项目，尤其是试验工场，专注上述关键创新重点；
- 开展合作，提高材料效率和循环性；
- 发展工业集群地区合作伙伴关系，以支持基础设施发展和工业共生；
- 基于其长期商业战略和关于强化科学目标的股东报告，旨在在本世纪中叶前实现零碳排放。

材料和流动服务的主要买家

主要买家（特别是企业和公共采购服务）可以通过创造对“绿色”材料和流动服务的需求，来加速难减行业的变化，起初价格会高。这些举措包括：

- 将企业和城市的 EV100 承诺（承诺 100% 电动汽车）扩大到电动卡车和公共汽车（BEV 或 FCEV）；
- 承诺在商业和工业建筑使用低生命周期的碳排放材料，完成现有的运营能效目标；
- 承诺购买绿色航班替代商务航班所花费抵消款项。

消费者

除了空运，以及海运和重型陆运的下属行业外（即：公共汽车），难减行业不会直接面临消费者的压力。但是，对于关键终端消费品的运送，材料和货运至关重要。对商品（例如汽车、电器）及服务（例如：航班）的生命周期和含碳强度进行合理标记，可以形成可追溯性并加强消费者意识。考虑到脱碳对终端消费者的成本影响相对较小，可以创造“绿色报价”这一高价位概念。

公共和私有投资者

更多新的投资机遇，将出现在低碳基础设施以及利用低碳创新材料、产品和商业模式的公司中。投资者可以通过以下方式促进脱碳：

- 更好地评估与气候相关的风险和机遇，不仅关注能源，还应关注工业和运输行业；
- 制定明确的计划，按不同时间进行投资组合，增加对低碳基础设施、技术和公司的投资，并减少对潜在搁浅资产的投资；

- 在发展银行的支持下，发展一系列具有不同风险回报的“绿色投资”产品，以促进发展中国家的可持续基础设施投资（通过政策制定、公共投资以及经混合金融的私人资本调动）。

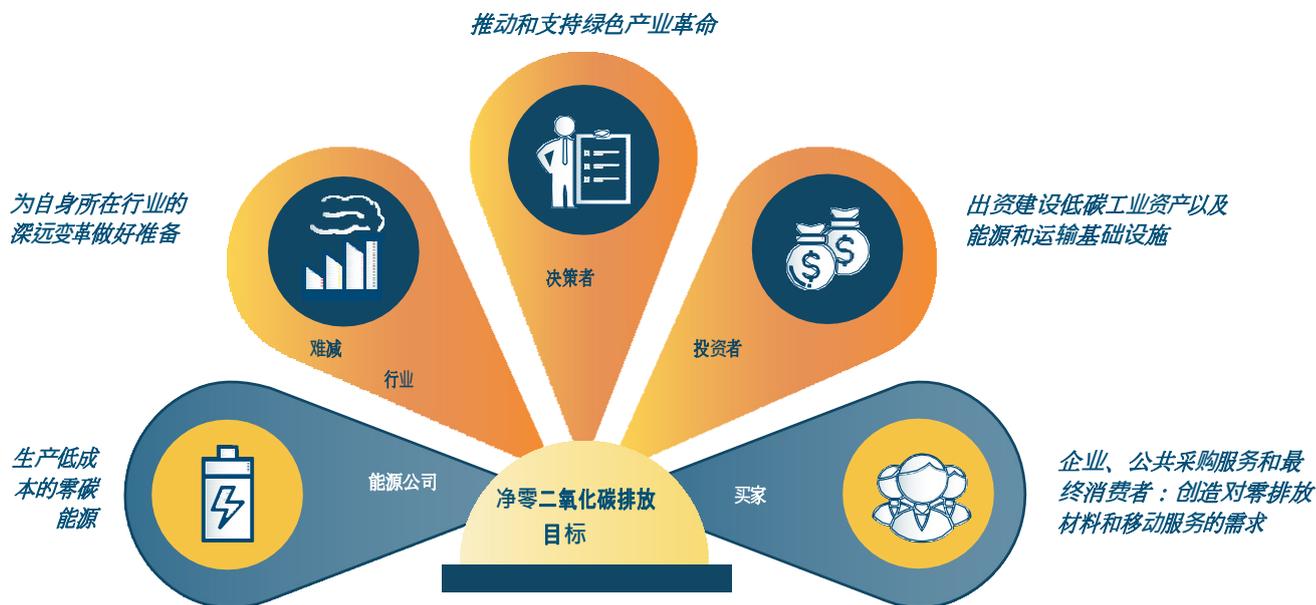
赢得气候大战

能源转型委员会认为，到本世纪中叶，有可能实现经济中难减行业近乎完全脱碳，从而大大增加了将全球变暖限制在 1.5°C 的可能性。在这历史性努力中取得成功不仅会限制气候变化的有害影响；还将通过快速的技术创新和新兴产业的就业机会推动繁荣，并带来重要的局部环境效益。因此，国家和地方政府、企业、投资者和消费者应采取必要行动来实现这一目标。

赢得气候大战

如果各界能够立即采取一致行动，在经济体的难减行业（即重工业和重型运输行业）实现零二氧化碳排放，在技术和经济上是可行的。

各自的责任



变革推动因素 谁 什么

- 1** 设定远大的碳密度目标

 对工业流程、重型运输和消费品碳含量提出严格的碳密度要求。
- 2** 对碳定价

 设定按行业区分的价格、国内价格、下游价格以及提前确定的价格，同时寻求达成国际共识。
- 3** 由线性经济体转向循环性经济体

 在整个价值链加强协作，提高材料效率和回收再利用的能力，同时严格监管。
- 4** 投资绿色产业

 投资和支持研发项目，促进适用于难减行业的脱碳技术的商业化部署。
- 5** 创造对绿色产品和服务的需求

 自愿承诺采购绿色卡车、班机、工业部件、建筑材料。
- 6** 降低可再生能源的成本

 增加零碳电力、零碳氢和真正可持续生物能源的产量并降低相关成本。





