

# 净零碳排放政策的迅速、 “少遗憾”决策

## 执行概要

英国政府设定了雄心勃勃的碳减排目标：**到2035年至少减排78%**（相较1990年）。<sup>1</sup>为了实现这一目标，**英国承诺，以快于全球其他主要经济体的速度进行减排**，这一最新承诺旨在促进到2050年实现净零碳排放（相较1990年）目标。<sup>2</sup>

### 实现净零碳排放目标是一项前所未有的挑战<sup>3</sup>

—在政策变革规模和速度以及所需行动方面。没有全面的能源效率措施、从依赖化石燃料向英国经济所有行业实现净零碳排放的新体系转型的结构化计划，就不可能实现这一目标。正在取得进展。据估算，英国2019年的二氧化碳当量（MtCO<sub>2</sub>e）净排放量为4.548亿吨，相较1990年减少了44%。<sup>4</sup>然而，尽管取得了上述进展，如果英国实现2050年净零碳排放的承诺，就必须迅速加快英国经济所有行业的脱碳过程。

英国以足够快的速度、足够大的规模脱碳的能力取决于政府当前及未来数年做出的关键决定。距离英国最终实现净零碳排放目标还有不到30年的时间，因此，即使存在不确定性，决策者也应能够做出有信心的决定，确定当前可以采取的优先行动，助力英国到2050年实现净零碳排放目标。需要跨政策领域做出上述决定，相关政策领域应作为整体系统，共同努力，通过最有效的方式，实现净零碳排放目标。<sup>5</sup>鉴于剩余时间较短，需要在彻底解决不确定性之前做出决定。

意识到采取紧急行动的必要性，本《报告》中提出的少遗憾框架旨在帮助决策者确立、建立对当前可执行的、助力英国经济脱碳之决策的信心。“少遗憾的决定”（定义参见框1）是净零碳排放政策的重要组成部分，迫切需要该等决定，以期到2050年实现净零碳排放目标。少遗憾的决定应构成早期行动的第一步，配合更全面的、影响深远的、适应性强的、超出少遗憾的决定框架范围的、包含更强硬、风险更高的中长期决定的过渡计划。

少遗憾的决定，包括本《报告》中所述的示例，是当前可以采取的、助力英国迎接实现净零碳排放挑战的行动。当前可采取的、重要的少遗憾的决定示例包括：

- 降低能源需求，例如提供激励措施，促进消费者行为改变。

## 执行概要

- 提高国内、交通和建成环境（包括改造）的资源 and 能源使用效率（参见**案例研究1**）。
- 扩展成熟技术的部署，例如扩展电池电动汽车（BEV）充电网络（参见**案例研究2**）。
- 证明未经验证、但至关重要的技术的有效性，包括氢和碳捕获和储存技术（参见**案例研究3**）。

通过一系列案例研究，介绍了不同行业涉及的各类少遗憾的决定，案例研究源自英国国家工程政策中心（NEPC）净零工作组提供的证据和见解。

### 框1： 少遗憾的决定定义

英国政府的净零碳排放战略引入少遗憾的决定，该等决定系指“成本低、收效高、未来裨益能被持续证明的当前行动”。本《报告》以此为基础编写，更加详尽地阐述了为确保对某决定少留遗憾而必须要考虑的因素。照此，我们将少遗憾的决定定义为当前必须做出且能够做出的、对脱碳目标有重大影响的紧急决定。少遗憾的决定通常能解锁实现净零碳排放目标的途径，提供选项和灵活性，而非锁定选项。这些决定能创造灵活空间，降低未来成本，产生社会、经济和环境共同效益，并充分利用有限资源。本《报告》将少遗憾的决定的特性程序化为是一套标准（参见《表1》）。

# 目录

执行摘要	1
介绍	4
少遗憾的决定的性质：定义和系统思考	6
做出少遗憾的决定：框架和示例	7
案例研究	14
案例研究1：建筑物改造	14
案例研究2：电池电动汽车充电网络	16
案例研究3：部署氢和碳捕获等关键技术	18
结论	21
鸣谢	22
参考文献	23

# 介绍

## 框2 目的

本《报告》旨在介绍一种定性工具，用于在面临不确定性时确定少遗憾的决定（定义参见框1）。本《报告》提出了一个指导决策过程、确定当前可采取的政策决定、以助力英国经济脱碳的框架。应制定影响深远的、全面的、适应性强的、超出上述框架范围的过渡计划。本《报告》侧重于提供框架，指导自信确定“少遗憾的决定”，政府可以根据该等决定，立即采取行动，同时制定全面的、适应性强的过渡计划。

本《报告》由英国国家工程政策中心净零工作组编制，工作组成员包括学术界和工业界的工程、系统学和社会学专家。

实现净零碳排放目标的紧迫性是一项跨行业的重大挑战。英国实现净零碳排放目标的途径、以足够快的速度、足够大的规模脱碳的能力取决于政府当前及未来数年做出的关键决定。需要跨政策领域做出上述决定，相关政策领域应作为整体系统，共同努力，通过最有效的方式，实现净零碳排放目标。上述措施应不仅促进英国经济快速脱碳，而且利于创造就业机会、提高和竞争力、确保其他环境利益（如当地空气污染和居民健康）、避免不利的环境和社会影响（例如，确保低收入和弱势家庭免受不相称的负面影响）。

实现净零碳排放涉及诸多选择和方案，导致实现目标的方式存在不确定性。随着工业、能源和交通系统相继开始脱碳，哪些技术会占据主导地位也存在不确定性，而且，这三大系统采用的技术应用于全国和地方时应进行何种改变尚不明确。鉴于所需变革的规模和速度、较短的交付时限，需要在彻底解决不确定性之前做出重要决定。然而，应谨慎行事，避免锁定于高碳排放量的、限制未来实现净零碳排放的能力的途径。

尽管如此，政策制定者仍面临巨大挑战，如果以到2050年实现净零碳排放目标的速度前行，就必须做出紧急决定，确定优先行动。能够实现“速赢”的、有助于实现中长期目标的、有益于进一步决策的、少遗憾的短期决定的财务和政治可行性都将大幅提升。<sup>7,8</sup>少遗憾的决定概念可以为做出上述紧急决定提供依据，还可以与其他方法（如情景规划）结合使用。<sup>9</sup>但重要的一点是，应清晰认识到，仅凭少遗憾的决定不足以实现净零碳排放目标，英国要想实现这一目标，就需要决策者做出更大的、风险更高的决定，这意味着许多必要决定将超出本《报告》所述少遗憾的决定框架的范围。

政府近期发布的公告（包括《绿色工业革命十点计划》<sup>10</sup>和《能源白皮书》<sup>11</sup>）中包含的政策干预可视为少遗憾的、英国实现净零碳排放目标所需的重要后续措施。随着政府制定更多

净零碳排放战略，决策者应明确重大决定的排序，考虑不同政策干预之间的相互依赖性—从空间规划到碳定价和消费者监管，共同努力，实现净零碳排放目标，侧重更广泛的成果和政策的实际执行。

本《报告》中介绍：



**少遗憾的决定的性质：定义和系统思考。**



**做出少遗憾的决定：框架和示例。**



**案例研究。**

案例研究由英国国家工程政策中心净零工作组成员编写，介绍了不同行业涉及的各类少遗憾的决定，强调了挑战的规模以及需要少遗憾的决定的理由。

## 少遗憾的决定的性质：定义和系统思考



### 框3 受众

本《报告》的受众是在制定脱碳和实现净零碳排放政策方面发挥核心作用的决策者：包括中央政府、权力下放政府和地方政府，以及针对净零碳排放挑战而研究、开发、实施和扩展解决方案的社区和工程师。本《报告》中的论述和案例研究基于英国视角，但标准框架可以应用于其他国家。

- 能够逐步扩大规模，以便未来降低成本
- 充分利用有限资源
- 实现涉及其他政策目标的共同利益或协同效应

作为参与系统设计的工程师，我们可以凭借系统思维，应对脱碳等复杂挑战。我们将技术、财务、监管、法律、道德、劳动力和面向公众的要素整合至实际解决方案，这种经验可用于决策和脱碳过程。政府决策者可以采用系统方法，做出净零碳排放决定，更好地评估决定的有效性，监测不可预见的后果，提供反馈，实现未来性能改进。

需要基于系统方法的要素，评估一组选项是否构成少遗憾的决定，包括：

- **净零碳排放系统不同要素之间的相互依赖性：**为各行业制定少遗憾的决定时，需要详细评估不同选项间存在的、跨行业的相互依赖性，这是评估高碳排放量技术锁定可能性、确定共同利益的关键。
- **时间表和时间依赖性：**评估选项时需要考虑实施时间表，即当前、未来不同时间节点分别需要何种决定该等评估对于理解所需的扩展速度和预期获益时间至关重要。

应灵活、持续评估上述相互依赖性、时间表和时间依赖性；随着新证据的出现、干预措施的实施，还需要进行维护、审核、更新。

### 框4 为何框架有助于决策者做出决定

距离英国最终合法实现净零碳排放目标还有不到30年的时间，英国须确定可以有效扩展的、助力减少温室气体排放的技术和干预措施。许多上述技术和干预措施已经存在，且通过明智的政策干预，可以被迅速实施和扩展，加速英国经济脱碳。利用本《报告》中提出的框架，可以建立信心，坚决执行少遗憾的决定。但重要的一点是，应清晰认识到，仅凭少遗憾的决定不足以实现净零碳排放目标，英国要想实现这一目标，就需要决策者做出更大的、风险更高的决定，但成功实施少遗憾的决定可以为执行高风险决定积累经验和信心。

少遗憾的决定定义参见框1。<sup>12</sup>少遗憾的决定并不意味着在净零碳排放未来，有关不同于化石燃料时代的方式，不存在遗憾；相反，此类决定意味着有可以立即采取的行动、当前可以实施的技术解决方案，以便决策者助力英国净零碳排放挑战。明智选择的少遗憾的决定：

- 在英国碳减排中发挥重要作用
- 避免锁定于高碳排放量技术，应解锁低碳途径，为未来进一步低碳干预提供灵活性

## 做出少遗憾的决定：框架和示例



本部分介绍了划分为少遗憾的决定所需符合的标准的框架。

制定非常有用。

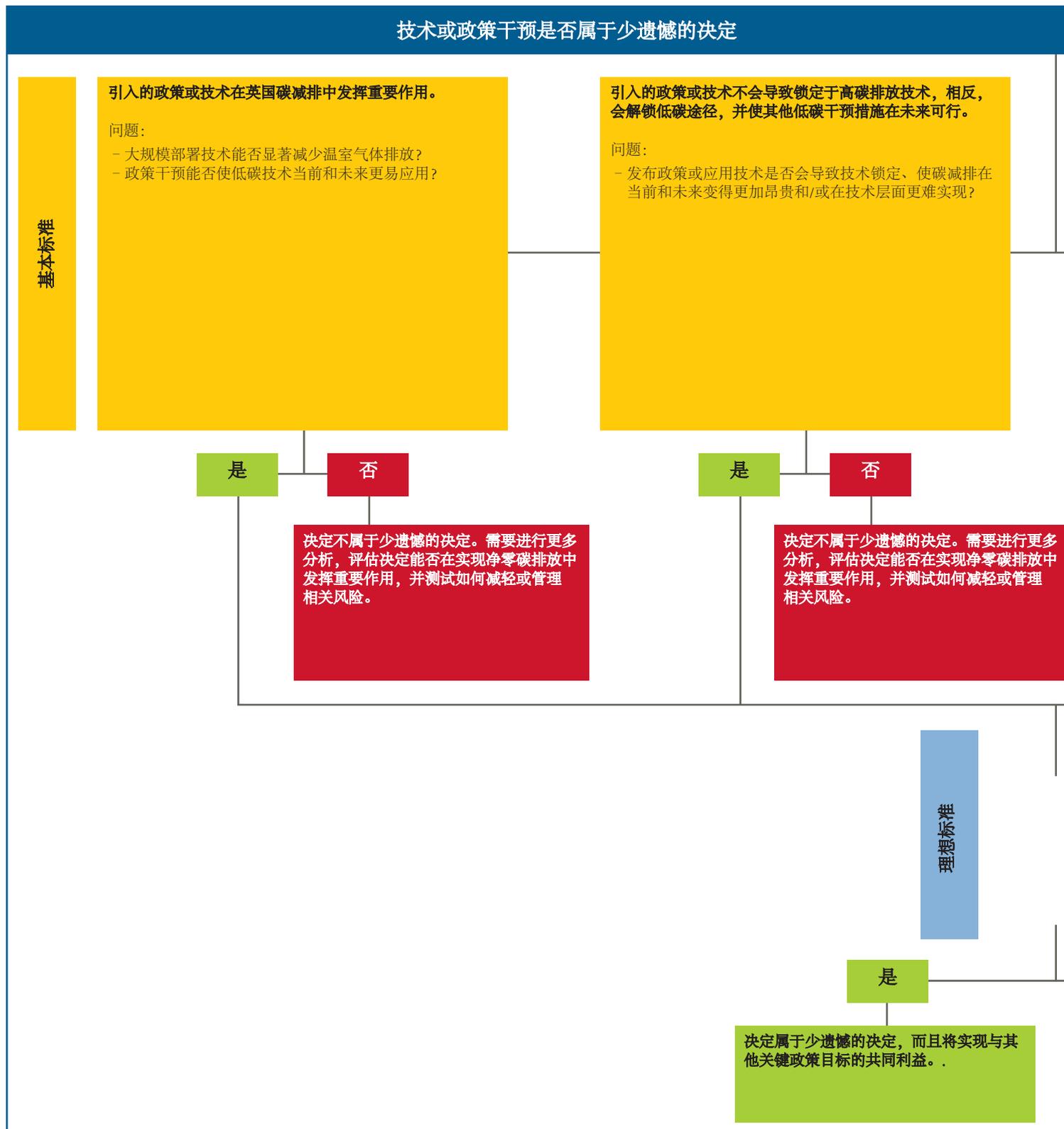
**表1**通过举例提取了每项标准的框架和基本原理。经过慎重考虑做出的少遗憾的决定应证明符合本框架中所载的标准。某些情况下，这一证明显而易见，但其他情况下，则需要更加细致入微的证明。为确保决定和技术不会脱离其所处的条件，还会加入其他突出的社会、经济和政策因素考虑。满足本框架中所述标准应视为必要条件，但不足以确保该决定属于少遗憾的决定。然而，本框架规定了某些关键必要标准，应作为某决定构成少遗憾的决定的首要充分指标，据此，该框架应该会对决策

**表1:** 少遗憾的决定选项框架

标准	示例
<b>基本标准</b>	
引入的政策或技术在英国碳减排中发挥重要作用。	不存在无需智能电网即可在英国实现净零碳排放目标的途径。 <sup>13</sup> 因此，支持开发智能电网的决定符合本标准。实现净零碳排放目标的可靠途径中包含的降低能源需求和提高能源效率也符合本标准。
引入的政策或技术不会导致锁定于高碳排放技术，相反，会解锁低碳途径，并使其他低碳干预措施在未来可行。	有关住宅区开选址的决定可能会导致未来几十年对私家车的依赖。 <sup>14</sup> 因此，在配备多种交通出行方式的地点建设住宅区符合本标准。
政策或技术虽然目前产生成本，但会在未来降低成本。	模块化基础设施在短期内可能更昂贵，但从长期角度看，更易改造、改装或拆除（包括组成部分和组件再利用），可以在其整个生命周期内降低碳排放量和成本，额外的前期费用更低。有关建设此类基础设施、并因此可在较长时期降低碳排放量 and 经济成本的决定符合本标准。
注：重要的一点是，应考虑与脱碳失败相关的成本，以及任何可确定的、积极的共同利益。	众所周知，氢气的应用很广泛。然而，在其某些应用中，如工业过程，氢气的低碳替代品较少。确保氢气（中短期内可能供应有限）可用于缺乏低碳替代品的地区的政策可归类为少遗憾。
如果政策或决定涉及使用或消耗有限资源，则政策或决定促使或促进充分利用有限资源。例如，在没有其他可行低碳方案的情况下优先使用。	尽快从化石燃料城市交通转型可以在空气质量和健康方面实现很高的共同利益。 <sup>15</sup> 因此，支持向低碳交通转型、并因此减少空气污染的决定符合本标准。
政策或技术与其他政策目标具有明确的共同利益或协同效应，例如，创造就业机会、减少污染、对保护生物多样性的影响。	
<b>理想标准</b>	

## 做出少遗憾的决定：框架和示例

## 框5：如何使用少遗憾的决定框架



## 做出少遗憾的决定：框架和示例

## 技术或政策干预是否属于少遗憾的决定？

政策或技术虽然目前产生成本，但会在未来降低成本。

问题：

- 应用技术能否降低未来投资成本？

是

否

决定不属于少遗憾的决定。需要进行更多分析，评估决定能否在实现净零碳排放中发挥重要作用，并测试如何减轻或管理相关风险。

如果政策或决定涉及使用或消耗有限资源，则政策或决定促使或促进充分利用有限资源。例如，在没有其他可行低碳方案的情况下优先使用。

问题：

- 发布政策是否涉使用或消耗有限资源？
- 是否需要优先考虑有限资源的特定用途（例如，因缺乏低碳替代选择而使用）？
- 如何引入保障措施，以确保适当、优选使用有限资源？
- 考虑上述情况，政策决定或技术能否确保优先使用有限资源？

是

否

决定不属于少遗憾的决定。需要进行更多分析，评估决定能否在实现净零碳排放中发挥重要作用，并测试如何减轻或管理相关风险。

政策或技术与其他政策目标具有明确  
的共同利益或协同效应，例如，创造  
就业机会、减少污染、对保护生物  
多样性的影响。

问题：

发布政策或扩展技术能否与其他关  
键政策目标具有明确的共同利益，如  
创造就业机会？

否

决定虽然属于少遗憾的决定，但需要更多  
分析，探索如何实现共同利益。

## 做出少遗憾的决定：框架和示例

如前一部分所述，如框5所示，归类为少遗憾的任何技术或政策干预应有助于减少碳排放、避免高碳排放技术锁定、未来降低成本、将任何有限资源优先用于最需要的地点。干预措施也可以、但非必须与其他政策目标具有明确的共同利益或协同效应。如果一项决定不符合标准，并不意味着应否决该决定，相反，应进一步分析，确定该决定对实现净零碳排放目标的重要性，并测试如何减轻或管理相关风险。以下案例研究1~3呈现了英国国家工程政策中心净零工作组成员提出和开发的框架的应用示例。

表2：对比标准的少遗憾的决定选项示例（“X”表示满足标准的选项）

选项	基本标准				理想标准
	在英国碳减排中发挥重要作用	不会导致锁定于高碳排放技术，相反，会解锁低碳途径，并使其他低碳干预措施在未来可行：	虽然目前产生成本，但可以逐渐扩展，因而会在未来降低成本	在没有其他可行选项的情况下，促使或促进优先使用有限资源	与其他关键政策目标具有明确的共同利益或协同效应
尽快扩展经验证技术的部署					
升级电网，以应对更大的电气化和可再生能源挑战	X	X	X	X	
提高储能能力	X	X	X	X	
扩展配电网络/电动汽车充电基础设施，应对电动汽车增长（案例研究2）	X	X	X		X
确保电解制氢地点有多余的可再生能源	X	X	X	X	

## 做出少遗憾的决定：框架和示例

选项	基本标准				理想标准
	引入的政策或技术在英国碳减排中发挥重要作用。	不会导致锁定于高碳排放技术，相反，会解锁低碳途径，并使其他低碳干预措施在未来可行：	虽然目前产生成本，但可以逐渐扩展，因而会在未来降低成本	在没有其他可行选项的情况下，促使或促进优先使用有限资源	与其他关键政策目标具有明确共同利益或协同效应
证明低碳技术，以便在未来应用					
投资低碳技术研究、示范和测试，如碳和氢捕获和储存技术	X	X	X		X
开发氢气的生态位 例如，交通站点使用的绿氢和产业集群使用的蓝氢	X		X	X	
提高国内、商业、交通和工业应用的资源和能源使用效率					
通过新建筑物标准促进脱碳	X	X	X		X
改造已有建筑物 (案例研究1)	X	X	X		X
强制要求备氢装置 (案例研究3)	X		X	X	
降低需求					
推广智能电表	X	X			X
公众参与降低需求	X	X			X

## 做出少遗憾的决定：框架和示例

本《报告》中提出的少遗憾的决定框架可以指导决策过程，确定当前可采取的政策决定，助力英国经济脱碳。然而，仅凭少遗憾的决定不足以实现净零碳排放目标。要实现净零碳排放所需的社会、技术转型，决策者应做出更大的、风险更高的、超出少遗憾的决定框架范围的决定。

上述风险更高的决定指在长期内对英国不同行业脱碳起关键作用、但不符合上述框架中规定的标准的决定。例如，某些关键、必要的决定可能：

- 会产生重大影响，包括短期内碳排放量增加
- 依赖于某些尚无明确低碳选项或脱碳途径的技术或工艺
- 涉及虽然不随时间推移而降低、但相较无法脱碳的成本而言相对合理的高成本
- 与其他关键政策目标没有共同利益
- 利用有限的资源

为了到2050年实现净零碳排放目标而必须做出的决定示例之一：新建核电厂，详见框6。如示例所述，不符合本《报告》中规定的、少遗憾的决定标准的决定并不一定要否决，但也不能自动视为少遗憾的决定；如果决定不符合该等标准，则表明对决定进行的基础分析会超出框架中所列的问题范围；不满足该等标准的选项不应排除在长期考虑之外；如果决定满足该等标准，则强烈表明，应优先纳入短期行动考虑。

### 框6

#### 选择而非排除工具：新建核电厂案例

根据一些研究，核电可以替代化石燃料的低碳能源，可以在约60年的核反应堆运行寿命内，产生大量低碳电力。<sup>16</sup>核电还可以在确保电力供应安全方面发挥关键作用。一些研究表明，核电可以在经济脱碳和到2050年实现净零碳排放方面发挥关键作用。<sup>17,18</sup>

然而，核反应堆的建造、铀的开采和提炼、核反应堆燃料的制造都属于碳密集型过程。<sup>19</sup>因此，为了在未来生产低碳电力，建设阶段内，温室气体排放量会短期增高，并锁定长期运营影响。在另一些可实现的未来情景中，核能发电成本相对较高，尤其考虑退役成本。<sup>20</sup>鉴于上述原因，新建核反应堆不符合本《报告》中规定的少遗憾的选项标准。

与其他助力实现净零碳排放的决定一样，仅因为新建核电厂不符合本《报告》中规定的少遗憾的决定标准，并不意味着应被排除。如上所述，低碳能源和确保电力供应安全是新建核电厂的强有力理由。不符合上述标准仅意味着相关决定不能自动视为少遗憾的决定，且其基础分析会超出框架中所列的问题范围。



## 案例研究



本部分介绍案例研究，旨在说明本《报告》中所述框架在英国决策过程中的应用。<sup>21</sup>在案例研究中，将标准应用于可在减少碳排放方面发挥关键作用的政策和技术干预示例，定性讨论了干预措施符合标准的程度，例如，解锁净零碳排放途径，实现与其他关键政策目标的共同利益，扩展干预措施，以降低未来成本。至关重要的是，在不确定是否符合标准的情况下，尝试概述待解决问题。

案例研究由英国国家工程政策中心净零工作组的个别成员编写，并表达了他们对各主题的个人看法。英国国家工程政策中

心特此感谢上述成员。

### 案例研究1 建筑物改造

**作者：**Julie Godefroy博士，英国皇家注册设备工程师协会（CIBSE）可持续发展负责人

#### 建筑物改造为什么是少遗憾的选项？

向净零碳排放过渡需要降低建筑物的能源和水消耗量，改用零碳排放供热系统（或随着更多低碳发电纳入电网，成为零碳排放供热系统）。建筑物改造是很好的政策示例，将在减少建成环境碳排放方面发挥重要作用，而且切实可行，助力实现净零碳排放目标。改造包括对建筑物结构、服务和设备的干预，旨在利用低碳技术，降低需求，同时满足剩余需求，或促进未来采用低碳技术。改造已有基础设施符合表1所列少遗憾的决定框架中的所有关键标准。

#### 在英国碳减排中发挥重要作用：

在实现净零碳排放目标的所有情景中，建筑物脱碳供热是重要步骤。鉴于到2050年仍在使用的绝大多数建筑物已经建成，且未达到净零碳排放所需的碳排放量要求，建筑物改造须在减少碳排放方面发挥重要作用。英国气候变化委员会（CCC）在《第六次碳预算报告》中强调，在未来10~15年内，改造和升级所有建筑物是优先事项，该预算保守假设，能源效率提高会使热量需求降低12%。<sup>22</sup>

#### 不会导致锁定于高碳排放技术，相反，会解锁低碳途径，并使其他低碳干预措施在未来可行：

改造（定义见上文）是所有脱碳情景都需要的步骤，也是能源、建筑物和交易系统电气化的促成因素。<sup>23</sup>建筑物的热效率对氢气锅炉和热泵而言同样重要。<sup>24</sup>考虑到所需的基础设施、投资和对消费者的财务影响，如果不降低需求，则不可能到2050年实现向低碳供热转型（无论通过电气化、氢气或混合方式）。在系统层面，建筑物改造可以降低对发电、存储和配电基础设施的需求，提高弹性。在建筑物层面，改造可以减小供暖系统的规模，降低供暖系统和能源成本，在建筑物内系统层面，改造可以提高热泵等技术的效率。

**虽然目前产生成本，但可能逐渐扩展，因而会在未来降低成本：**

建筑物改造可以扩展。解决所有建筑物问题必然要逐步进行，这为开发新供应链、吸取经验教训、不断改进交付和成果（包括成本效益）提供了机遇。<sup>25</sup>“难以处理”的建筑物可以受益于上述改进，在后期处理。

创新解决方案（如英国能源跳跃<sup>26,27</sup>）每次解决一组住宅物（如街边排屋），采用并非适用于所有地点（如保护区）、但在成本、速度和干预方面具有显著优势的标准化方法，该方法最好作为区域战略的组成部分、与更多定制的独立建筑物解决方案一同实施。<sup>28</sup>

#### 与其他关键政策目标具有明确的共同利益：

**在建筑物和系统层面，改造可以实现明确的共同利益：**

- 居民的利益：
  - 降低能源成本，有助于缓解脱碳导致的能源价格上涨。<sup>29</sup>
  - 提升舒适度和健康度，尤其燃料用量少的家庭。
  - 作为更广泛工作的一部分，改造有助于提高建筑物的价值和使用寿命。
- 减少能源使用造成的、会污染空气的排放：
  - 降低化石燃料消耗可以减少会污染空气的排放和碳排放，全电气化情景没有此类排放，但如果使用氢气，燃烧过程会释放氮氧化物（NO<sub>x</sub>）。
- 保持和创造就业机会：
  - 据估计，将在整个英国创造约50万个专业和商业岗位，这是新冠疫情暴发后经济复苏计划的重要机遇。<sup>30</sup>

请注意，成果取决于改造的良好实施，从方案评估到设计和交付。这是政策需要解决的关键问题，以避免不利的、非预期的后果。<sup>31</sup>

#### 在没有其他可行选项的情况下，促使或促进优先、充分使用有限资源：

目前，大量建筑物在能源效率技术可行水平以下运行良好，可以通过改造降低原本能源需求，实现大部分能源效率目标。因此，能源效率措施（以及任何其他降低能源需求的措施）可以从根本上降低对输入能源的需求。

## 案例研究



然而，改造建筑物，改用低碳供热系统，实现供热脱碳，这需要持续、彻底的审查，以确保符合标准。建筑物供暖技术方案不止一种，而且每种方案的主要考虑因素不尽相同。例如，通过热泵实现供热电气化将增加对低碳电力的需求，主要需要考虑管理和满足电力峰值需求；氢气供热需要开展试点项目，以便更好地确定体积规模的低碳氢气生产和使用在技术和经济上可行，从而能更好地了解其在建筑物供热中的作用（参见**案例研究3**）；家庭供热脱碳的最有效技术（如电气化或热网）在不同地区可能有所不同。

## 案例研究

**案例研究2 电池电动汽车（BEV）充电网络**

作者：Roger Kemp MBE FEng教授，兰卡斯特大学

**电池电动汽车为什么是少遗憾的选项？**

开发电池电动汽车充电网络是实现净零碳排放目标的很好政策示例，在减少建成环境碳排放方面起着重要作用，符合表1所列少遗憾的决定框架中的三个关键标准，不符合其他标准的方面需要决策者格外注意：

**在英国碳减排中发挥重要作用：**

开发电池电动汽车充电网络在减少交通行业碳排放方面发挥关键作用。目前，交通行业的二氧化碳排放量占二氧化碳排放总量的三分之一，其中大部分源自道路交通。<sup>32</sup>因此，任何有助于取代大多数汽油/柴油车和货车的电池电动汽车充电网络政策或技术干预均符合该标准。

**不会导致锁定于高碳排放技术，相反，会解锁低碳途径，并使其其他低碳干预措施在未来可行：**

开发电池电动汽车充电网络将为摆脱化石燃料提供最佳中短期机遇。研究表明，用可持续生物燃料替代化石燃料的规模有限，<sup>33,34</sup>而在全国范围内发展低碳氢气基础设施尚需时日（参见**案例研究3**）。<sup>35</sup>对于某些道路交通应用而言，电动汽车是可行的中期（即未来20年）解决方案（未来可能需要氢气等其他解决方案）。然而，在可预见的未来，电力可能会是主要的道路车辆能源，因此扩展电池电动汽车充电网络是少遗憾的决定，可以助力摆脱化石燃料驱动的交通，为未来提供灵活性。

电池电动汽车也代表了一个大而灵活的国内负荷。对于许多用户来说，几乎可以在白天或晚上的任何时候充电，无论是在家里、工作中还是在停车场。再加上灵活的电价和有效的智能电网，这将允许电力系统运营商（ESO）实时调度充电负荷。这为ESO提供了降低电网需求高峰和“填补低谷”的能力，从而提高低碳发电的负荷系数，改善系统的经济性能。

**与其他关键政策目标具有明确的共同利益：**

开发电池电动汽车充电网络还将实现明确的共同利益。作为向净零碳排放过渡的一部分，减少道路交通量至关重要。有效的电池电动汽车充电网络将激励公众更多地选择电动汽车，道路上汽油/柴油车辆的数量会减少，从而将降低道路车辆造成的空气污染对空气质量和健康的影响。

**虽然目前产生成本，但可能逐渐扩展，因而会在未来降低成本：**

开发电池电动汽车充电网络可以逐步扩大规模，以降低未来成本。首先，扩展英国电池电动汽车充电网络会增加消费者对电池电动汽车的信心，电池电动汽车的使用率和拥有率将会提高，收费需求将会增加，从而产生潜在的规模经济。其次，大规模采购充电基础设施将提升供电能力，从而降低未来成本。但必须认识到，维护充电网络的成本会持续到未来。

## 案例研究

**在没有其他可行选项的情况下，促使或促进优先、充分使用有限资源：**

需要持续审查电池电动汽车充电网络的扩展，以确保满足标准。交通电气化规模的扩大将增高对低碳电力的需求，主要需要考虑电力峰值需求管理，这取决于通过结合灵活电价和有效智能电网技术、引入灵活需求管理的数量。控制和限制电力峰值需求的能力是实现电池电动汽车与其他用电设施（如供热电气化）同时充电的关键因素，同时还可以避免在关键时刻出现导致电网利用率下降、价格上涨的严重峰值需求。

电池电动汽车与更广泛的电池电动汽车充电和使用系统连接，包括电池制造。由于某些材料的供应链面临潜在障碍，包括与材料提取和加工相关的高成本和环境影响问题，因此，应持续评估增高的电池电动汽车制造需求。<sup>36</sup>研究表明，由于采矿和制造业的限制，电池所用的钴<sup>37</sup>、锂和某些其他关键部件的未来供应将无法满足不同需求。为了解决供应问题，英国皇家化学学会倡导“减少、再利用、回收”的方法。<sup>38</sup>不同的电池选项各有其灵活性，但重要的是，应持续分析材料供应链中的潜在限制、成本和对环

境的影响。



## 案例研究

**案例研究3 部署氢和碳捕获等关键技术**

**作者：**Ian McCluskey，煤气工程师和管理人学会技术和政策主任

**部署氢和碳捕获等关键技术为什么是少遗憾的选项？**

要到2050年实现净零碳排放，需要部署由协调方案和新政策支持的诸多关键技术和解决方案，氢气技术（即所谓的绿氢和蓝氢，以及碳捕获和储存（CCS））是此类关键技术的很好示例。以试点规模部署氢技术符合表1所列少遗憾的决定框架中的四个关键标准，不符合其他标准的方面需要在更大规模部署前解决。在这种情况下，以试点规模部署氢气技术可以解决与技术可行性相关的其余不确定性；氢气技术可以在实现净零碳排放目标中发挥关键作用，并实现潜在的共同利益，因此，以试点规模部署氢气技术是少遗憾的决定。

**在英国碳减排中发挥重要作用：**

在各种净零碳排放途径中，氢和碳捕获和储存技术都发挥重要作用。英国国家电网在其2020年《未来能源情景》报告39指出，“为实现净零碳排放目标，必须应用氢和碳捕获和储存技术，而且，应在十年内运行工业规模的示范项目。”碳信托在其《英国的灵活性》报告40中，通过先进的综合整体能源系统（IWES）模型，分析了灵活性在直至2050年各种能源情景中的作用和价值，其中一项关键结论认为，如果有效协调系统，“在整体能源系统中使用氢气可以实现碳效益和成本效益，但需要一系列生产方法和碳捕获和储存基础设施”。此外，英国国家基础设施委员会（NIC）近期在一份报告中指出，涉及碳捕获和储存的温室气体清除和储存工程应成为英国新的主要基础设施领域，以助力实现碳减排目标，同时建议政府承诺在2030年前大规模应用这些技术。<sup>41</sup>

**不会导致锁定于高碳排放技术，相反，会解锁低碳途径，并使其他低碳干预措施在未来可行：**

全球每个净零碳排放社会都需要至少四个比例与当地情况和能力相当的净零碳排放能源储存和传输载体：电、氢气、合成燃料和生物燃料。随着时间推移，主要问题将是最适合各载体的相对比例和作用。上述比例可能随技术机遇、客户的适应和接受程度改变而变化，因此，需要跨载体、敏锐、快速响应的能力。

根据英国气候变化委员会在《第六次碳预算》中提出的净零碳排放途径展望，到2050年，生产的氢气将有四分之三以上是蓝氢和绿氢，<sup>42</sup>这表明，需要平衡的氢气战略，包括扩展蓝氢和绿氢使用。从化石燃料—即天然气（蓝氢）—生产氢气取决于碳捕获和储存技术的成功扩展。因此，鼓励和促进开发碳捕获和储存技术，不仅可以扩大英国国家基础设施委员会概述的温室气体工程清除范围，<sup>43</sup>而且可以提升氢气生产和使用能力，在使用此类设施的工

业部门间实现局部协同效应，这属于少遗憾的决定，可以缓解对中短期供应短缺的担忧。

开发能够以所需规模和弹性生产绿氢的技术是所有净零碳排放社会的首要侧重点。存在诸多处于不同成熟阶段的技术，部分技术依赖于可再生电力的大幅增加。在整个能源系统而非单一能源载体层面，应鼓励开发此类技术，助力英国加速实现净零碳排放目标，在此过程中，应建立英国的能力、知识和技能，详见共同利益标准。

**虽然目前产生成本，但可能逐渐扩展，因而会在未来降低成本：**

氢气的大规模使用需要部署新的、尚待尝试和测试的关键技术。尽管在进行研究和创新的同时，示范和扩展需要投资，需要更多思考，以确定是否以及如何优先考虑某些难以实现脱碳的最终使用，但早期部署可以降低未来成本。应开展有针对性的科学和工程研究，“边做边学”，确保评估不确定性，将风险降至最低。<sup>44</sup>这将降低未来部署的成本，为供应链和技术提供商提供确定性，最大限度地降低对消费者的影响，加快应用。

英国无需一定成为氢气技术的“先驱”，也可以静候其他国家开发、示范和部署氢气技术。虽然这可能为英国降低短期风险和成本，但正如风电技术开发所证明的情况，英国可能错失早期开发知识产权、英国制造和新行业所需技能可以带来的重大共同利益以及推进低碳氢气技术执行标准的机遇。

**与其他关键政策目标具有明确的共同利益：**

作为工业脱碳的可行、可负担、安全的能源载体，氢气可以发挥重要作用，例如，在矿物燃料替代品有限的高热量工业，氢气可以在供热方面替代矿物燃料。<sup>45</sup>

但是，需要通过中型和大型示范项目，进一步测试氢气的作用；在部署蓝氢的情况下，需要建立所需规模的碳捕获和储存技术示范和适当规模的氢储存系统，以平衡生产和需求。如果能够以低碳方式实现氢气生产和供应，扩展氢和碳捕获和储存技术将为潜在经济增长领域提供新市场、出口、供应链、服务和就业机会等共同利益和机遇。示范项目有助于测试和了解扩大氢和碳捕获和储存技术的作用所需的技能、能力、市场、法规、供应链和服务。英国有机会成为新技术的领先创新者、开发者和首个采用者，以及大量低碳解决方案的主要采用者，从而增强国内制造和产品开发能力，创造新的就业机会和技能，增强在技能、能力和商品方面的出口潜力。

近期，英国首相在《绿色工业革命十点计划》中做出的承诺为测试计划设立了关键里程碑，承诺包括：支持工业在2023年前开始氢气社区测试，在2025年前开始大型氢气村测试，政府将如何协助在2030年前建成英国首个“氢气城镇”。<sup>46</sup>

## 案例研究

**在没有其他可行选项的情况下，促使或促进优先、充分使用有限资源：**

如英国气候变化委员会在《第六次碳预算》中所述，在实现净零碳排放的所有途径中，氢气必不可少。<sup>47</sup>然而，重要的是，在扩展氢气生产、储存和使用的过程中，没有氢气则最难脱碳的行业应准备好向氢气过渡，制定必要政策和激励措施，加快采用，投资研发和技能，以获得脱碳所需的氢气供应。

这意味着，应将上述行业纳入旨在扩展氢气生产、储存和最终使用的试点项目，同时增加所需的产品、市场、技能和知识基础。试点项目和任何进一步扩展氢气技术都应基于公众参与，使大众了解氢气这一新能源载体以及其在不同行业中的使用。随着氢气供应量的增加，原本难以脱

碳的行业可以快速实现减排，为向净零碳排放过渡贡献力量。



在澳大利亚维多利亚州的Hastings进行氢气供热试制项目。

## 结论

鉴于实现净零碳排放目标的剩余时间有限，决策者应能够迅速确定少遗憾的决定，从而减少碳排放，避免高碳排放技术锁定，扩大规模，以满足需求，实现与其他关键政策目标的明确共同利益，并在资源有限的情况下充分利用资源。

本《报告》中概述的少遗憾的决定框架（表1）、少遗憾的决定示例（表2）和案例研究可以帮助决策者确定少遗憾的决定，包括确定当前可用的、可以有效扩展的、可以助力英国脱碳、到2050年实现净零碳排放目标的技术。但是，仅凭少遗憾的决定不足以实现净零碳排放目标，英国要想实现这一目标，就需要决策者做出更大的、风险更高的决定，这将超出该框架的范围。

许多必要决定可能不符合少遗憾的决定框架中规定的标准，可能短期内会导致碳排放量增加，高成本可能不会随着时间推移而降低，或者可能与其他关键政策目标没有共同利益。选项满足越多标准，就越可能是少遗憾的决定，因此，该框架有助于快速确定。不应排除不满足标准的选项，而应引导决策者解决待解决问题或不确定性。

确定少遗憾的决定的同时，应采用系统方法，关联不同选项。实现净零碳排放是独特的政策目标，不仅取决于有限时间内的雄心规模，也取决于政策领域的宽度，利益相关者应团结合作，实现这一共同的、不确定的目标。如果方法正确，这一宏大目标即可实现。采用系统方法可以提高政策制定者评估不同行业间的相互联系性、确定相互依赖性的能力，突出与决定相

关的未知和不确定性，并监测不可预见的后果。

## 鸣谢

英国国家工程政策中心特此感谢：

### 审核人员：

Jillian Anable教授，  
英国利兹大学交通研究院交通和能源教授

Paul Ekins OBE教授，  
英国伦敦大学学院巴特莱特环境能源资源学院资源和环境政策教授

### 编写人员：

Roger Kemp MBE FREng教授，  
英国兰卡斯特大学

Julie Godefroy博士，  
英国皇家注册设备工程师协会（CIBSE）可持续发展负责人

Ian McCluskey，  
煤气工程师和管理人学会技术和政策主任

Ian Gardner，  
奥雅纳全球能源主任

Simon Harrison博士，  
工程技术学院，英国莫特麦克唐纳咨询集团战略负责人

### 英国国家工程政策中心净零碳排放工作组成员：

Dervilla Mitchell CBE FREng，  
主席

Nilay Shah OBE FREng教授，  
副主席

Mark Apsey MBE，  
IChemE能源实践社区研究所主席

Jenifer Baxter博士，  
机械工程师学会总工程师

Harriet Bulkeley FBA教授，  
英国杜伦大学

Mike Cook FREng博士，  
Buro Happold公司董事，英国帝国理工学院兼职教授，气候紧急任务组英国结构工程师学会主任

Ian Gardner，  
奥雅纳全球能源主任

Julie Godefroy博士，  
英国皇家注册设备工程师协会（CIBSE）可持续发展负责人

Jim Hall FREng教授，  
英国牛津大学，土木工程师学会副会长

Steve Holliday FREng，  
能源研究所所长

Roger Kemp MBE FREng教授，  
英国兰卡斯特大学

Ian McCluskey，  
煤气工程师和管理人学会技术和政策主任

Susan Owens OBE FBA教授，  
英国剑桥大学名誉教授

Sophie Parsons博士，  
国家复合材料中心材料、矿物和采矿研究所战略顾问

Nick Winser CBE FREng，  
能源系统Catapult主席

## 参考文献

- 1 《英国政府设定新的减排目标：到2035年减排78%》，英国政府，2021年
- 2 《2008年气候变化法案(2050年目标修正案)》2019年法令，英国政府，2019年
- 3 《净零碳排放解读》，英国皇家工程院，2021年
- 4 《2019年英国温室气体排放最终数据》，英国商业、能源和产业战略部，2021年
- 5 《零净碳排放：气候挑战的系统视角》，英国皇家工程院，2020年
- 6 《净零战略：绿色重建》，英国政府，2021年
- 7 《超越新冠：为恢复净零碳排放工作奠定基础》，英国国家工程政策中心，2020年
- 8 例如，在全面推广前应开展试点或概念验证活动。
- 9 例如，气候变化委员会在《第六次碳预算报告》中规定了代表一系列途径的不同情景，指导在不确定性存在情况下进行判断。
- 10 《绿色工业革命十点计划》，英国政府，2020年
- 11 《能源白皮书：为零碳未来提供动力》，英国商业、能源和产业战略部，2020年
- 12 《超越新冠：为恢复净零碳排放工作奠定基础》，英国国家工程政策中心，2020年
- 13 《能源白皮书：为零碳未来提供动力》，英国商业、能源和产业战略部，2020年
- 14 《交通系统的未来》，英国政府科学办公室，2019年
- 15 《清洁空气战略》，英国环境、食品和乡村事务部，2019年
- 16 《全球能源评论2020》，国际能源署，2020年
- 17 《核能前景》，Ahearne，2011年
- 18 《未来核能》，Hill，2008年
- 19 《核能的温室气体排放—欧洲加压反应堆生命周期评估》，Pomponi和Hart，2021年
- 20 《高度可再生电力系统的可操作性》，英国国家基础设施委员会，2021年
- 21 在不同国家，平衡考虑不尽相同。
- 22 《第六次碳预算报告：英国的净零碳排放之路》，气候变化委员会，2020年
- 23 《未来能源情景》，英国国家电网，2020年
- 24 《未来能源情景》，英国国家电网，2021年
- 25 例如，《CLC国家改造战略》草案提出了4个阶段：到2025年能力就绪、到2030年实现产量、到2035年达到最高速度、到2040年完成最终推进。
- 26 《英国能源跳跃》，2021年
- 27 《英国能源跳》采用整栋房屋翻新和新建标准，结合合同绩效和资金方法，建造能够产生供暖、热水和电器所需能源的房屋。
- 28 《可持续建筑物规划》，威尔士政府，2014年
- 29 《第六次碳预算报告：英国的净零碳排放之路》，气候变化委员会，2020年
- 30 《2019年新冠疫情暴发后经济复苏计划会加速抑或延缓应对气候变化进程？》，牛津大学史密斯企业与经济学院，2020年
- 31 有很多相关报告，包括创建公共可用规范（PAS）框架的《每个家庭都很重要2016》等
- 32 《2019年英国温室气体排放最终数据》，英国商业、能源和产业战略部，2019年
- 33 《朝向资源可持续生产和使用：生物燃料评估》，联合国环境规划署，2008年
- 34 《可持续食品：食品安全和环境保护方法》，欧盟委员会，2013年
- 35 《氢的未来》，国际能源署，2019年
- 36 《稀土金属》，英国国会科学技术办公室，2011年
- 37 《钴需求：过去、现在和未来》，麻省理工学院，2018年
- 38 《处于危险中的元素》，英国皇家化学会，2021
- 39 《未来能源情景》，英国国家电网，2020年
- 40 《英国的灵活性》，碳信托，2020年
- 41 《温室气体清除工程》，英国国家基础设施委员会，2021年
- 42 《第六次碳预算》，英国气候变化委员会，2020年
- 43 《温室气体清除工程》，英国国家基础设施委员会，2021年
- 44 《向氢能过渡》，英国工程技术学会（IET），2019年
- 45 《英国的灵活性》，碳信托，2020年
- 46 《绿色工业革命十点计划》，英国政府，2020年
- 47 《第六次碳预算》，英国气候变化委员会，2020年

**英国皇家工程院**正在利用工程力量，建设可持续发展的社会和惠及所有人的包容性经济。

我们与研究人员、合作伙伴开展合作，为未来培养人才和技能，推动创新，促进建立全球合作伙伴关系，协助制定政策，实现公众参与。

共同应对我们这个时代最大的挑战。

## 我们的行动

### 人才和多样性

**我们培训、支持、指导和资助**工程专业领域最才华横溢、有创造力的研究人员、创新者和领导者，为未来培养人才。我们识别不断变化的世界所面临的挑战，开发所需技能和方法，为未来培养技能，以期建立有弹性、多样化的工程专业领域。

### 创新

**我们投资**英国最具创造性、最令人兴奋的工程理念和业务，推动创新。我们建立全球合作伙伴关系，汇聚工业、企业和学术界的世界顶级工程师，共同创造，协作创新，应对我们这个时代最大的全球挑战。

### 政策和参与

**我们通过英国国家工程政策中心**协助制定政策—在重要问题上为决策者提供独立专家支持。  
**我们让公众**了解工程奇迹，激励年轻人成为下一代工程师，实现公众参与。

### 英国国家工程政策中心

我们代表43个专业工程组织、45万名工程师统一发声，中心由英国皇家工程院领导。我们为决策者提供涵盖整个工程专业领域的建议途径。我们向社会通报国家层面的重要政策问题，并响应政策。