

IEEJ 展望 2018

— 面向2050年的展望与课题 —

概要

能源·环境·经济

(Translated by Lu Zheng)

The Institute of Energy Economics, Japan © 2017

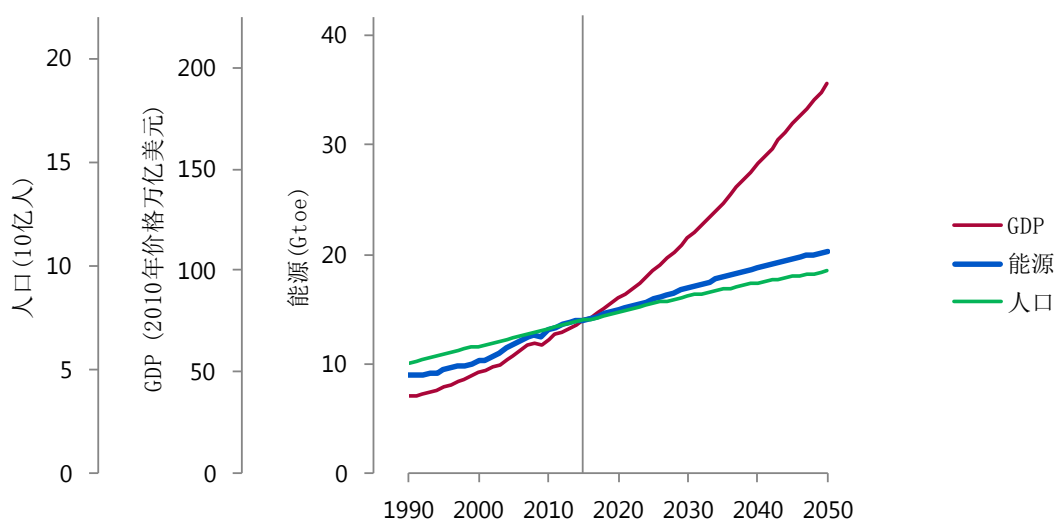
概要

世界能源供需展望

需求

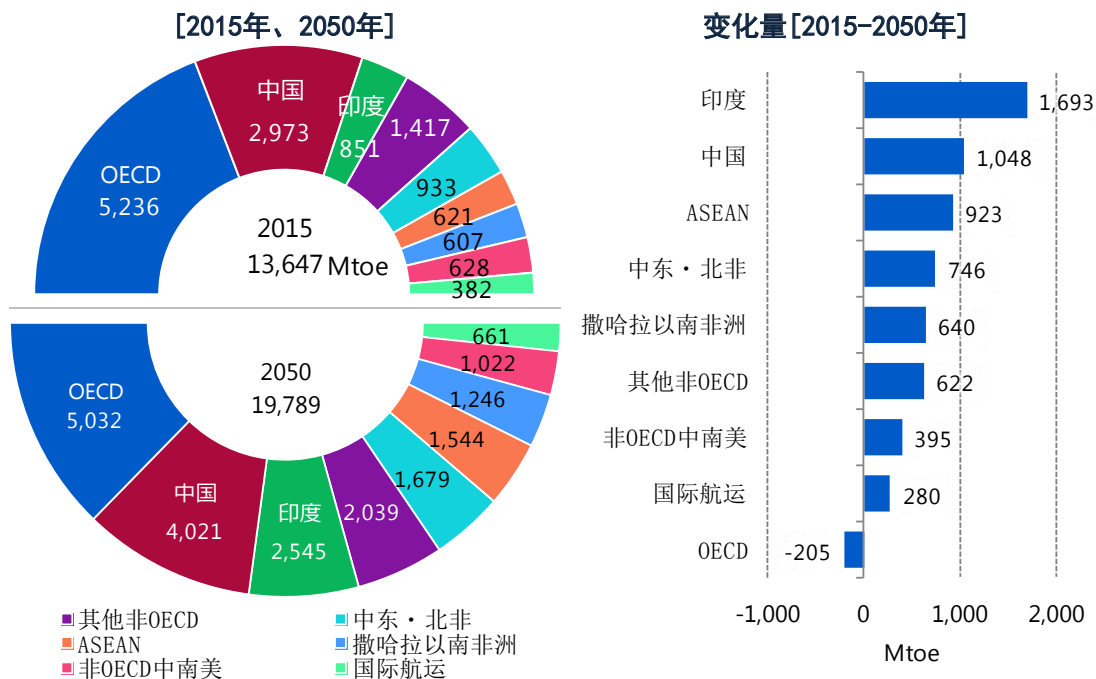
以当前的能源·环境政策等为背景，在延续至今为止的趋势的“基准情景”中，到2050年全球人口增加到1.3倍，经济增长到2.5倍，能源消费扩大为1.5倍（图1）。创造单位国内生产总值（GDP）所需的能源，通过推进节能实现年率降低1.6%，到2050年仅为现在的一半多一点（56%）。能源消费虽然会随着经济成长而保持增长，但两者的增速会出现显著的差异。即使如此，展望期间内的能源消费的增量—6,142百万吨石油当量（Mtoe）—仍然是个不小的数字，相当于每年增加一个英国的需求量。

图1 | 全球的人口、实质GDP、一次能源消费



经济成长和能源消费的关系在全球范围内因人而异。在经济成长的同时，经济合作与发展组织(OECD)成员国今后35年的能源消费反而会比现在有所减少（图2）。也就是说，在总体上今后能源消费的增加将全部来自OECD以外的国家和地区。非OECD国家中，亚洲—印度、中国、东盟(ASEAN)—的增加仍将最为显著，同时，以人口的快速增长和经济的成长为背景，中东·北非以及撒哈拉以南非洲的消费也将大幅增加。非OECD的能源消费总量，在2005年超过OECD国家，现在扩大到了全球总量的59%。这个比例在2050年将达到71%。换言之，如果以亚洲为首的非OECD国家的社会经济形势发生重大变化，能源消费的增速显著钝化的话，世界的能源供需的全景将会大不一样。

图2 | 一次能源消费、变化量(分地区)



非化石能源备受期待，但为了满足新增的庞大的需求，今后仍需主要依靠化石燃料（图3）。在展望期间内，非化石能源每增加1toe的同时，化石燃料会增加2.7toe。把所有非化石能源加到一起，仍将少于化石燃料中在2050年消费量最小的煤炭。非化石能源的份额将大于现今的19%，但即使是到本世纪中叶仍不过是21%左右。

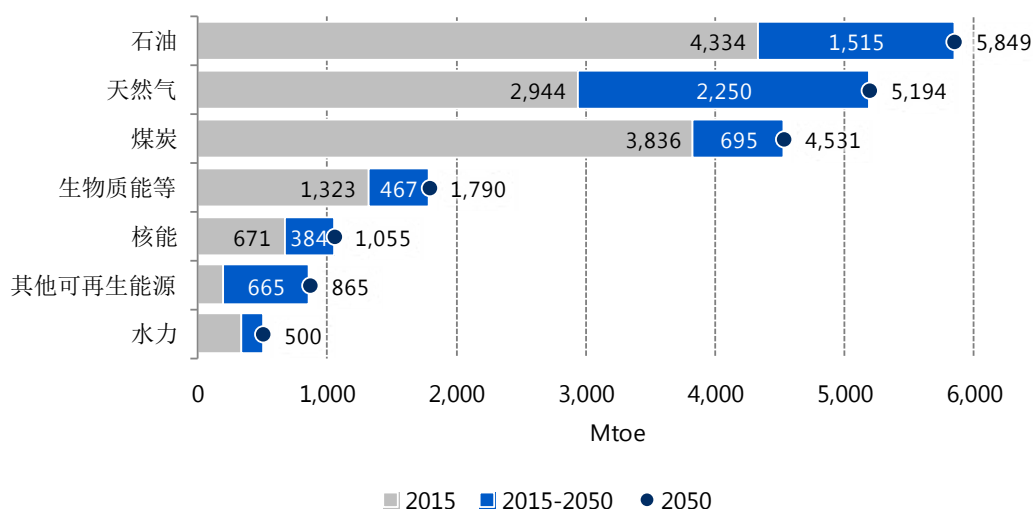
石油到2050年仍是消费量最多的能源，支撑全球能源需求的30%。OECD的石油消费在10年前已越过顶峰，今后也将以年0.7%的速度持续减少。全球石油消费将从现今的90万桶/天（Mb/d）上升到122Mb/d，其增加主要依靠非OECD国家和国际航运的旺盛消费。中国将在今后10年左右超过美国成为世界最大的石油消费国——不过，会在2040年代中期达到峰值，之后转为减少。印度将在2050年之前替代美国成为第2大消费国。作为将来拥有世界最多的人口国家，预计印度将在2050年代中期超过中国跃升为最大的消费国。

天然气消费量的增加大于其他任何能源，将在2040年前超过煤炭成为第2大能源。用于发电和其他用途的消费量都将贡献1,000Mtoe以上的增量。在IEEJ能源展望中划分的42个国家和地区中，只有日本、英国、意大利和德国这4国在2050年的消费量会低于现在的水平。美国在2030年左右，欧盟（EU）在2040年左右天然气将超过石油，到2050年，以天然气这个最新兴的化石能源为最大能源的国家和地区将从现在的10个（能源份额为13%）增加到21个，占总数的一半（能源份额为36%）。

煤炭在本世纪刚开始的10年里大幅增长，占同期世界能源消费增量的半壁江山。但是，最近其增长势头急速钝化，今后总体上也将保持这个趋势。不过各地区的差异会相当大。OECD国家将持续减少，中国的消费量从2000年到2015年扩大为3倍，到2040年前将保持微量增长，然后转为减少。相比之下，在印度、ASEAN，旺盛的能源需求的很大一

部分需要用煤炭来满足，到2050年对煤炭的依赖度将与现在持平或更高。煤炭是不可或缺的，需要在煤炭的高效·清洁利用技术的开发和普及上多下功夫。

图3 | 全球的一次能源消费(分能源种类)



终端用户实际消费的终端能源消费中，民生等、运输、工业、非能源消费的需求都将扩大，到2050年比现在高出46%、达到13,675Mtoe（图4）。和一次消费消费一样，其增量全部来自非OECD国家和国际航运。

不过，电力的终端消费今后仍将在处于不同发展阶段的各国·地区都保持增长（图5）。全球的终端消费中电力的比例将从现在的19%到2050年上升为24%。电力消费增长最显著的是非OECD中的高中收入国家。加上增加到4倍以上的低中·低收入国，非OECD的增量达15.7万亿kWh，远远超过OECD国家现在消费总量的9.3万亿kWh。

伴随着电力消费的增长，全球的电力供给（发电量）也急速增大。2000年时用于发电的能源占一次能源消费总量的34%，虽然发电效率会持续提高，但到2050年仍将有41%的能源用于发电。在电气化程度高的OECD国家这个比率达到44%。

图4 | 终端能源消费的变化量[2015-2050年]

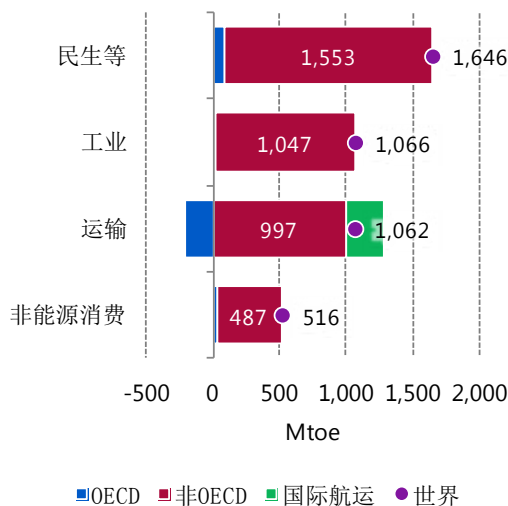
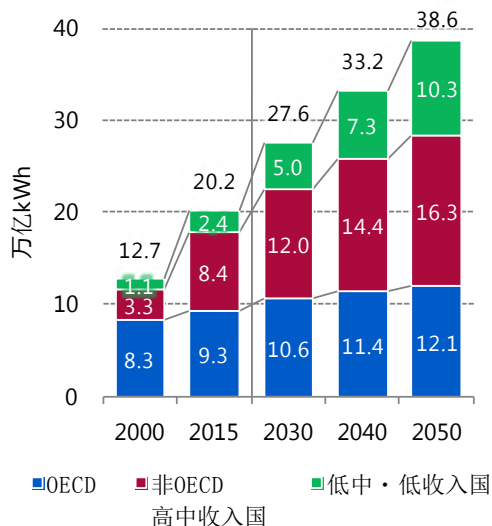


图5 | 电力终端消费



注：低中·低收入国是指2015年的人均名目GDP低于\$4,000的国家·地区

供给

随着石油需求的增加，OPEC、非OPEC都将增加其供给量（图6）。至2050年的全球原油生产的增量中，8成以上来自中东OPEC、北美及中南美。在北美，随着原油价格的缓慢回升—2030年\$95/bbl、2050年\$125/bbl（2016年实质价格）—，对勘探开发部门的投资也将回升，页岩油、油砂等非常规石油将引领增产。以巴西深海石油开发为代表，中南美的增产将是非OPEC供给量增加的中心。不过，受亚洲的减产和欧洲·中亚的产量也将在2030年左右达到峰值转而减少等因素的影响，非OPEC的生产份额将从2015年的58%逐渐降低，到2050年降到53%。

虽然石油的需求保持增长，但仅靠以当下的技术和经济性能够生产的资源—可采储量—就可以满足到本世纪中叶的需求（图7）。此外，考虑到技术的进步等能带来的埋藏量增加和未探明资源的发现等因素，从全球范围来看，资源枯竭导致供给困难的可能性很小。需要担心的是，以原油价格的震荡和环境制约等为背景，对风险的过度回避姿态可能会妨碍对石油供给的适当投资。

图6 | 主要地区的原油生产

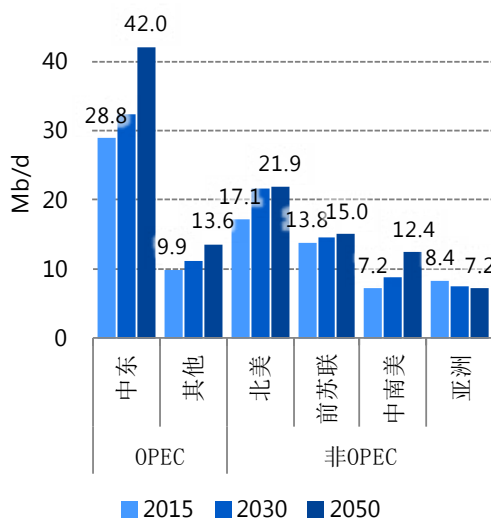
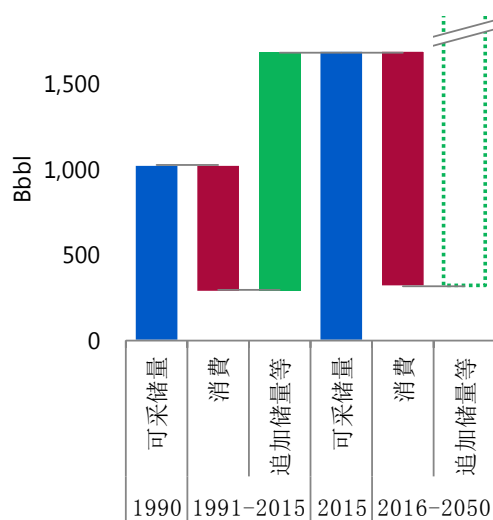
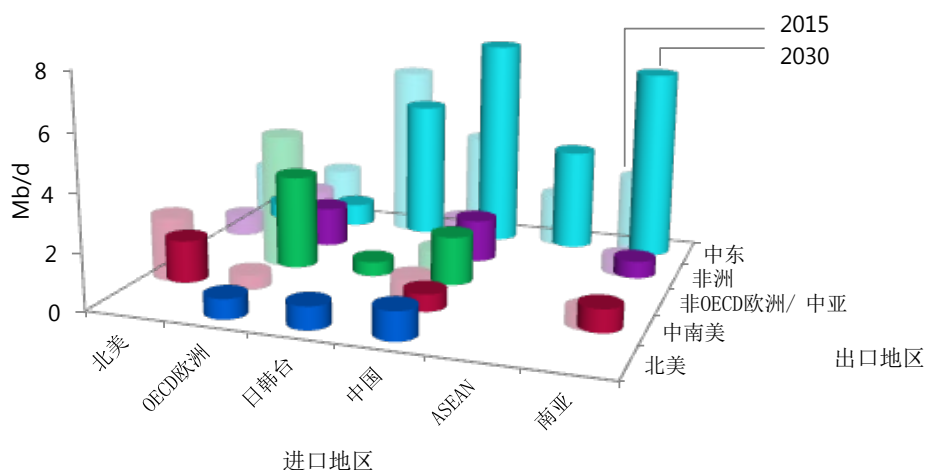


图7 | 全球的原油可采储量和累积产量



主要地区间的原油贸易到2030年将增加为43Mb/d(图8)。伴随着需求的减少和北美的增产，OECD国家的进口将减少，但亚洲新兴国家进口量的增加会推升全球的贸易总量。对亚洲来说，将在一定程度上推进供给源的多样化，但来自中东和非洲的供给量到2030年仍将占进口总量的八成。北美地区将继续从中南美和中东进口原油，但数量会大幅减少。欧洲的进口也将减少，非OECD欧洲/中亚、非洲、中东之间的竞争加剧。非OECD欧洲/中亚及中东将加强向需求不断扩大的亚洲市场的出口，特别是中东和亚洲在原油贸易上的相互依存关系会进一步加深。

图8 | 主要地区间的原油贸易 [2015年、2030年]



全球的天然气的生产量从2015年到2050年将增加80%(图9)。中东的产量增加最大，增幅将高到589十亿 m^3 (Bcm)。拥有世界最大储量的伊朗将在2030年以后，通过出口石化原料、管道天然气仍将保持最大生产国的地位。美国将进一步积累开发经验，随着从

墨西哥湾出口的液化天然气(LNG)的规模不断扩大,持续增产。前苏联国家紧随其次,特别是在俄罗斯,除了亚马尔半岛的开发项目之外,2030年以后东西伯利亚和萨哈林等地也会为增产作出贡献。在亚洲,中国和印度的需求不断扩大,其国内的资源开发也会取得进展。特别是在中国,为了进一步促进天然气的利用,对开发国内页岩气的投资会全面扩大。非洲国家中,莫桑比克和坦桑尼亚、塞内加尔等国的新的气田不断涌现,2030年以后将实现全面增产。

2016年世界主要地区间的天然气贸易量是544Bcm。其中大部分是管道贸易,特别是从俄罗斯向欧洲出口的管道气占了大半。今后,主要依靠亚洲的LNG进口和北美的出口,总贸易量在2030年增加到825Bcm。出口地区中,大洋洲和北美的增量最大,2020至2025年之间在有众多的LNG项目计划开始运营。一方面,进口最大是中国,特别是从俄罗斯·中亚的管道气和LNG加在一起,进口量会达到108Bcm。

随着天然气利用在数量和区域上的扩大,LNG的需求增速将快于天然气总体的增速。其供需平衡当前虽然较为缓和,但如果今后增加的供给能力仅限于已经完成最终投资决定(FID)和在建中的部分的话,2020年代中期将在400百万t (Mt)左右的水平上达到供需平衡(图10)。一方面,现在在计划中的项目合计约有370Mt,这些项目(一部分)付诸实施的话,就不会出现供给不足。重要的是要建设可以引入充足的投资的环境。

伴随着以亚洲为中心,以及中南美、非洲等地区的非OECD国家的需求增加,煤炭的生产量将从2015年的7,727Mt增加到2050年的9,283Mt。主要受发电用煤增加的推动,动力煤的生产量从2015年的5,835Mt增加到2050年的7,710Mt,扩大为1.32倍。另一方面,到2050年炼焦煤将从2015年的1,081Mt减少到1,004Mt,褐煤将从2015年的811Mt减少到570Mt。

图9 | 主要国家·地区的天然气生产

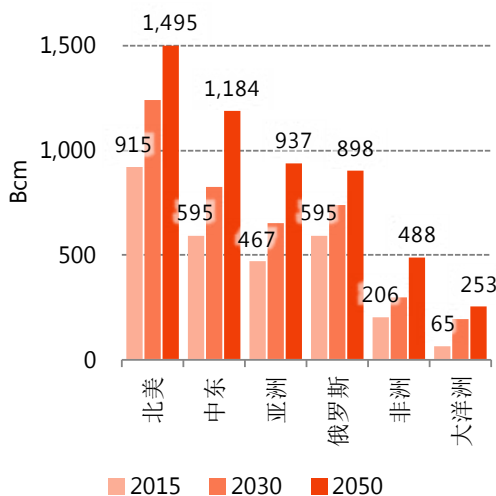
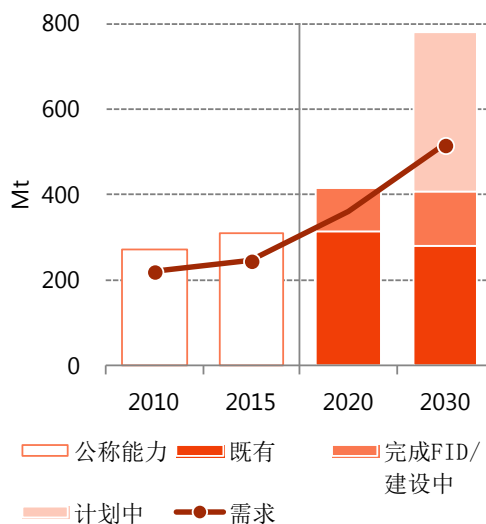
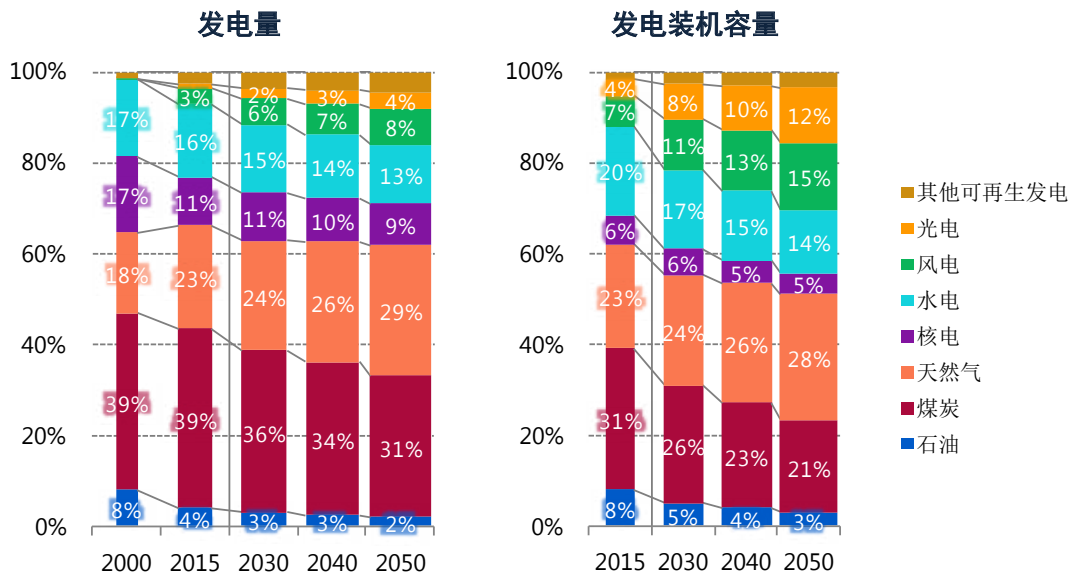


图10 | 全球的LNG供给能力和需求



在发电领域,可再生能源备受瞩目,但总体上火力发电仍将是电力结构的中心(图11)。不过,火电中只有天然气的发电量份额会扩大,这主要得益于其发电效率高、二氧化碳(CO₂)排放少以及调峰能力强等优势。煤炭虽然仍将维持最大电源的地位,但因为在欧美地区的减少,其发电量份额将降低到31%,减小8个百分点。

图11 | 全球的电力结构



注：柱形宽度与发电量成正比

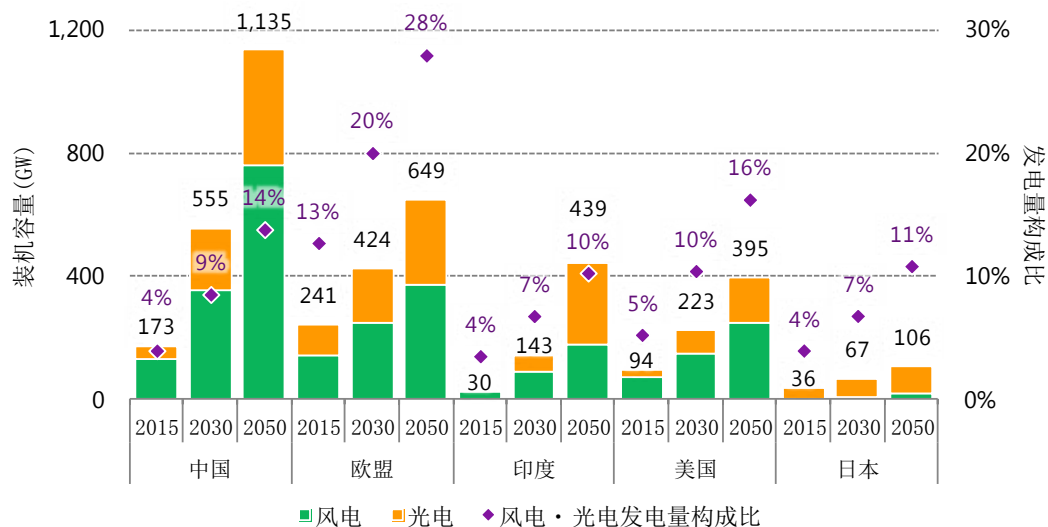
注：柱形宽度与总装机容量成正比

核电将从2015年的2,571TWh增长为2050年的4,047TWh。但因为其增速不及发电总量的快速增加，发电量份额将降低2个百分点。在计划2020年代全部停机的德国、以及日本等9个国家和地区，装机容量将减少。另一方面，将有12个国家成为新兴核电国家，20个国家会增建、扩建核电，因此全球的装机容量将从2016年的406GW扩大到2050年的577GW。

得益于政策鼓励和技术进步，风能·太阳能等的发电量到2030年将达到2,778TWh，相当于2015年(1,111TWh)的2.5倍，到2050年将进一步扩大2倍，达到5,637TWh。到2050年，占总发电量的比例达到13%。对应的所需装机容量是，风电增加到现状的4.5倍，达到1,865GW，光电增加到现状的6.8倍，达到1,519GW，两者合计占到总装机容量(12,547GW)的27%-发电量份额的2倍以上。

风电·光电现今主要集中于中国、欧洲和美国，今后印度也会加入这个行列。发电成本下降越显著的地区，建设规模扩张也将越大。成本降低的背后是系统价格和建设费用的降低、决定设备利用率的日照和风况、土地利用及环评等方面的阻碍较低等多种因素。在系统价格和建设费用较高的国家，需要采取措施解决这些问题。

图12 | 主要国家·地区的风电·光电的装机容量和发电量的构成比



石油需求顶峰情景

需求

石油消费在汽车用油的牵动下将持续增加到2050年(图13)。但近年来，以大气污染对策为背景，试图由传统的汽油·柴油车转向电动车的动向愈发活跃(表1)。同时也为了应对气候变化问题，有看法认为不是受资源有限的制约，而是受需求侧的影响，石油消费会在不久的将来迎来顶峰。

假设到2050年全世界销售的新车(载人·载货)全部是零排放车(ZEV)¹，这种情景下，未来的景象与基准情景将会大为不同。在所谓的“石油需求顶峰情景”下，石油消费将在2030年左右达到98Mb/d的顶点，然后转为减少(图14)。与基准情景相比，其减少量到2030年为7Mb/d，到2050年将扩大到33Mb/d。

¹ 在本展望中指插电式混合动力车、电动车、燃料电池车。

图13 | 全球的石油消费

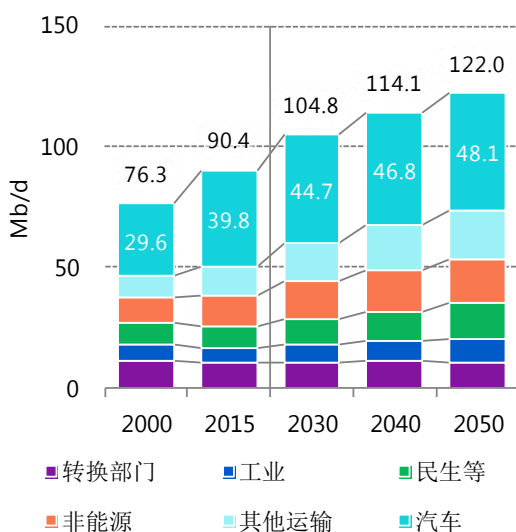


表1 | 汽车电动化的主要动向

德国	到2030年在EU内禁止销售传统汽车的议案在联邦参议院得以通过 (2016)
挪威	执政党、在野党都提案到2030年禁止销售传统汽车 (2016)
法国	政府公布到2040年禁止销售传统汽车的方针 (2017)
英国	政府公布到2040年禁止销售传统汽车的方针 (2017)
印度	内阁发表谈话，2030年以后所有销售的新车都须是电动车 (2017)
中国	副部长提及正在研讨禁止销售传统汽车的问题 (2017)

ZEV的普及将带来的电力需求的增加，其影响不可小觑(图15)。在2050年，汽车用电的消费量将比基准情景增加409Mtoe，带动电力需求增加12%。如果增加的发电量全部依赖火电，用于发电的天然气和煤炭的一次消费将分别增加572Mtoe、432Mtoe，天然气和煤炭将在2030年代末超过石油，之后，天然气将成为最大的能源。一方面，汽车用的生物质燃料将伴随着以内燃机为动力源的汽车的保有数量的缩小而减少。

到2050年，CO₂排放量比基准情景减少1.8Gt，减排量相当于2010年总排放量的5.9%。其中减排率最高的是新西兰、加拿大和拉丁美洲等拥有丰富的水力资源，单位电力CO₂排放量较低的地区。另一方面，伊拉克的CO₂排放量将反而增加7%。

图14 | 全球石油消费及变化要因

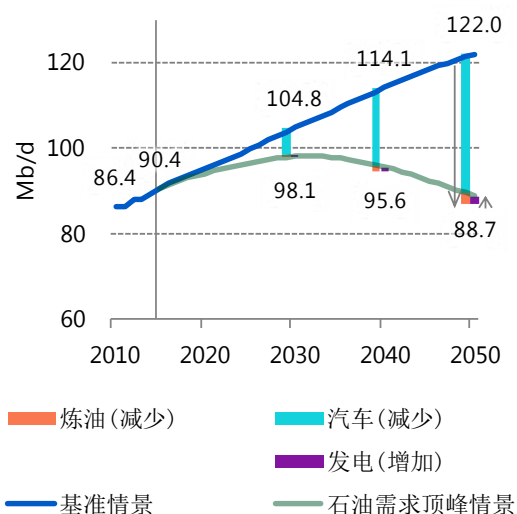
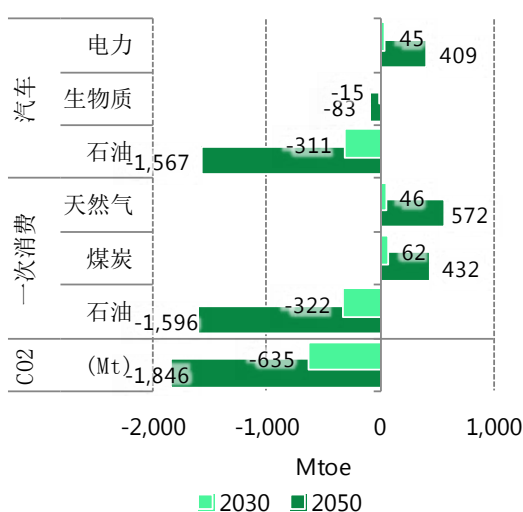


图15 | 全球能源消费的变化(与基准情景相比) [石油需求顶峰情景]

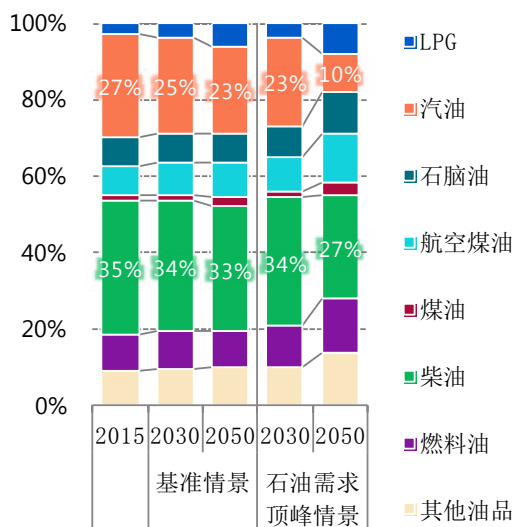


供给

这种变化将会波及到石油制品的供需(图16)。石油制品中汽油的比例到2050年将会降低到只有10%。柴油由于在工业部门的需求较大,其比例不会像汽油那样小,但也会比基准情景缩小6个百分点。面对这种情况,炼油产业的收率必须大幅变革。受此影响,将会产生由二次加工设备的不同所带来的竞争力的变化,以及重质原油和轻质原油的价格差的变化。

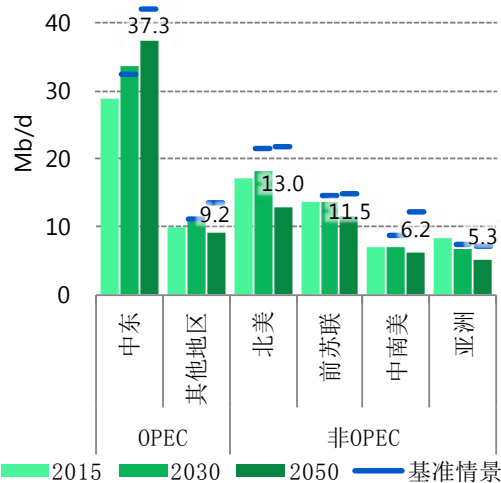
石油消费的缩小,会极大影响原油的生产(图17)。原来关于原油价格的设定前提是,建立在全球的石油需求持续增加,需要生产成本较高的石油才能满足需求,如果全球的石油需求达到顶峰,这将成为一种游戏规则的改变者,以供需的缓和及压力及市场的认识变化为背景,原油价格会大幅下降—相比基准情景中的2030年\$95/bbl、2050年\$125/bbl,降为2030年\$65/bbl、2050年\$50/bbl(2016年实质价格)。在价格如此大幅度降低的情况下,生产成本低廉的地区的优势会上升,只有中东的生产量会在2050年超过当今的规模。OPEC的生产份额将从2015年的42%增加2030年的46%,之后也会持续扩大。另一方面,北美的生产在2050年会比基准情景减少4成,降到13Mb/d。

图16 | 全球石油制品的消费结构



注: 不包括厂内消费

图17 | 主要地区的原油生产[石油需求顶峰情景]



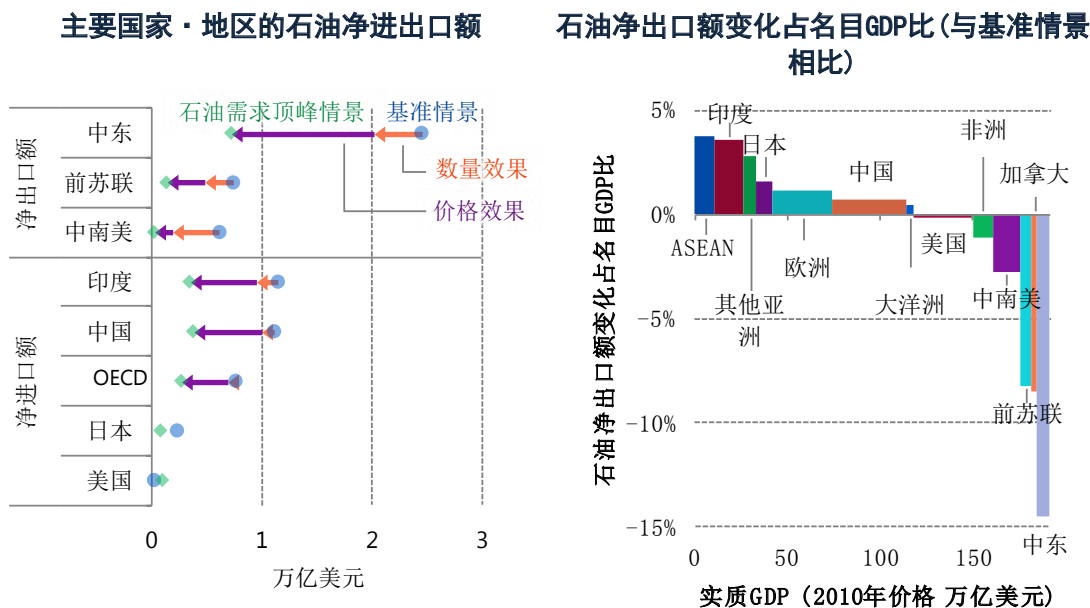
对经济·大气保护·能源安全保障的影响

但是,经济的下行压力不仅限于原油生产份额降低的国家和地区,中东的产油国也会受到影响(图18)。中东的石油净出口额在2050年将会减少1.6万亿美元,达到名目GDP的13%。产油国需要减少对石油的依赖推进经济的多元化,沙特阿拉伯的“Saudi Vision 2030”可以算是一个萌芽。相反,从石油净进口额的减少中获益最大的国家是作为世界第2大石油消费国而国内资源匮乏的印度,其次是将成为世界最大的汽车拥有国的中国。

发达国家普遍对汽车用汽油·柴油征收物品税,需求的降低会带来税收的减少,可能会影响到财政。OECD国家现在对汽柴油的税收总额据估算大约为3,700亿美元,如果税

率维持现状，在石油需求顶峰情景中，在2050年将大幅降低到800亿美元，仅为现在的5分之1。一方面，在现行制度下，基本无法区分用于电动车或其他用途的电力来分别征税。再加上在ZEV普及促进期的各种补助，财源可能会是很大的问题。

图18 | 石油净进出口额[石油需求顶峰情景 2050年]

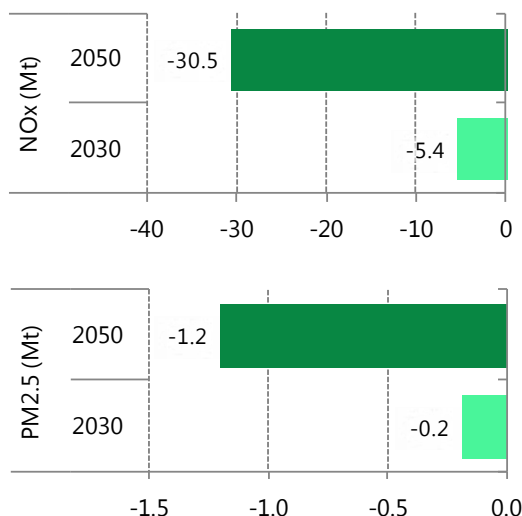


注：欧洲不包括前苏联

在ZEV的普及上，减少大气污染是很大的推动力。如果不考虑传统汽车提高减排性能的效果的话，与基准情景相比，氮氧化物(NO_x)的排放会减少30Mt，细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)将会减少1.2Mt（分别相当于2010年总排放量的27%和3%）(图19)²。预计会对都市区域的大气保护有一定贡献。

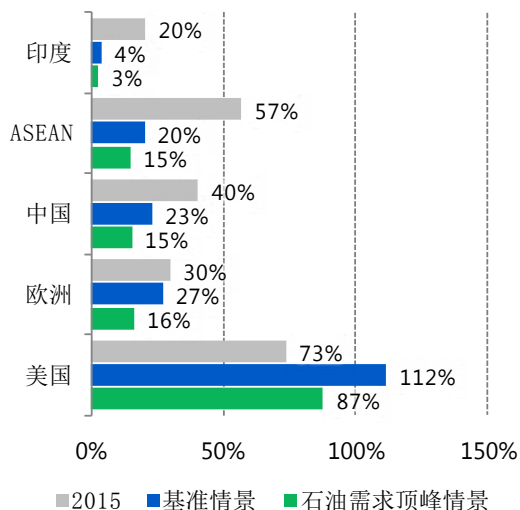
虽然消费将减少，但有些石油净进口国·地区的石油自给率与基准情景相比反而会恶化(图20)。其原因是，上述的原油价格的大幅降低会不利于这些成本较高的地区的原油生产。

² ZEV的电力需求可能会引起发电来源的大气污染物的增加。不过，发电厂的减排和汽车相比更容易。重要的是要通过适当的管理，来避免污染物排放的增加。

图19 | 全球来自汽车的NO_x、PM_{2.5}排放量的变化(与基准情景相比) [石油需求顶峰情景]

注：不包含传统汽车提高减排性能带来的效果

图20 | 石油自给率[2050年]



注：欧洲不包括前苏联

如何认识关于急速的脱化石燃料的判断

石油需求顶峰情景显示，在某些情况下，在不太远的将来石油消费会转为减少。不过，即使是与后面将要提到的“技术进步情景”（用从下至上的方法对先进技术得到最大限度应用时的情景的分析）相比，这个情景中的ZEV的普及程度都会遥遥领先，可以说其实现可能性是非常具有挑战性的。反而，这可以被解释为，暗示了石油消费很难减少的可能性。另外，石油需求顶峰情景中，不可忽视的是，即使在2050年，对石油的需求规模与现在的差距也不大。供给方担心需求顶峰问题是很自然的事，有必要对此有所准备。但是，如果因为出于对未来的过度悲观而忽视对供给方面的投资，这反而有可能会诱发真正的脱石化-由于对能源安全保障的威胁-的到来。

对中东原油的依赖度的提高，会使在安定供给方面的地政学的风险上升。沙特阿拉伯和伊朗的对立、和卡塔尔的断交、对“伊斯兰国”的攻势的进展可能带来的恐怖主义扩散等等，中东的形势是流动的，短期还看不到转为安定的迹象。对于中东产油国来说，本展望中所设想的低油价，会使财政平衡变得更难实现。为了削减财政赤字而压制公共投资或减少补助，这种措施有一定合理性，但会增大社会不安，不仅是产油国，整个中东的形势都有可能会进一步恶化。

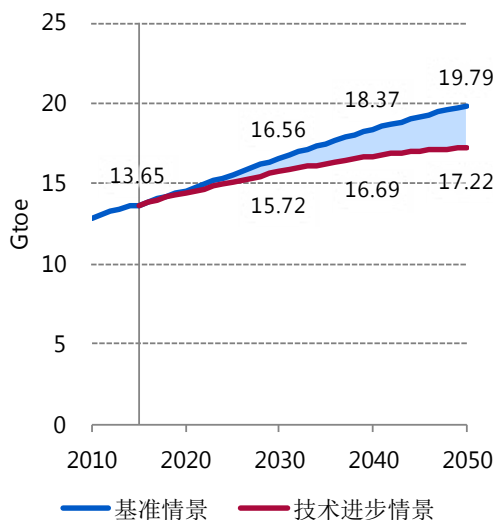
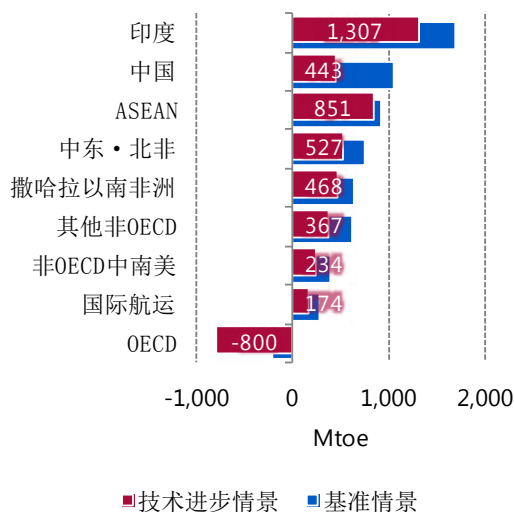
应对气候变化问题

技术进步情景

“技术进步情景”中，设想为了确保能源的安定供给和气候变化对策，在世界所有国家中，在现实社会中的应用可能性和被接受度的允许范围内，节能·低碳技术得到最大程度的应用和普及。在此情景中，2050年的能源消费量比基准情景降低2,570Mtoe，降幅为13%，今后的能源消费增量被压缩为基准情景的42% (图21)。

从基准情景转向技术进步情景，在2050年所需的节能量中，23%来自35个OECD国家，而中国和印度作为单个国家就分别贡献24%、15%(图22)。不仅是在发达国家，节能·低碳技术能否在应用潜力更大的发展中国家中取得广泛的普及，将大大影响世界的远景。

图21 | 全球的一次能源消费

图22 | 一次能源消费的变化量
[2015-2050年]

受电力消费的减少、发电效率的上升和其他能源的替代等影响，煤炭的变化最大，发电用煤将显著减少(图23)。石油在2040年左右达到顶点，到2050年时会比基准情景低1,193Mtoe。另一方面，天然气将不同于煤炭和石油，即使是在技术进步情景中今后35年也会持续增加。总体上，与基准情景相比，化石燃料会减少3,825Mtoe，而核能会增加699Mtoe，以风能和太阳能为中心，可再生能源会增加555Mtoe。结果上，化石燃料的比例会从2015年的81%降到2050年的68%。

全球与能源相关的CO₂排放量在2025年左右达到峰值，其后转入缓慢减少，到2050年比2010年减少1.6Gt(5%)，降为29.7Gt(图24)。2015年在埃尔毛召开的G7峰会上，提出“到2050年温室气体(GHG)排放量与2010年相比要减少40%至70%”，但技术进步情景的减排与此相距甚远。不过即使如此，与基准情景相比的14.4Gt的减排量相当于全球2010年排放量的46%，到2050年累积的减排量达到227Gt，相当于现在全球年排放量的7.2倍，这个效果决不能算小。从地域上来看，OECD到2050年会比2010年减少一半。相比之下，非OECD虽然会在2040年左右达到顶点转为减少，但与2010年相比仍将增加23%。

图23 | 全球的一次能源消费和发电量

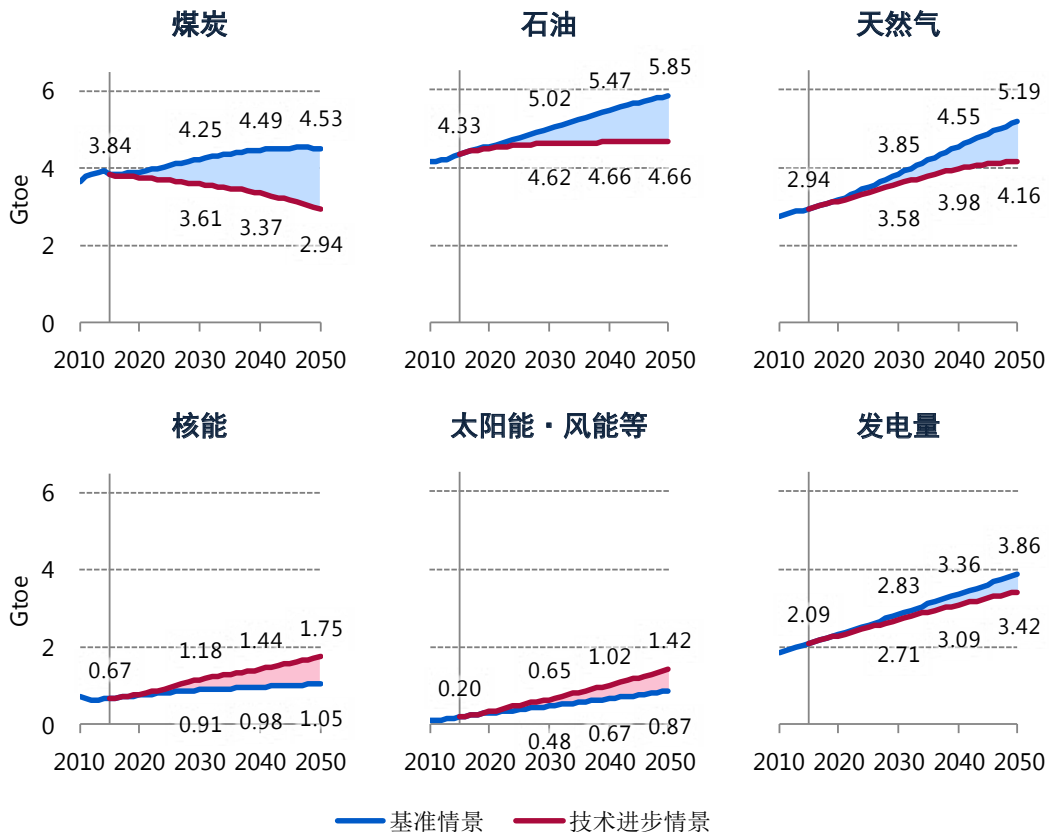
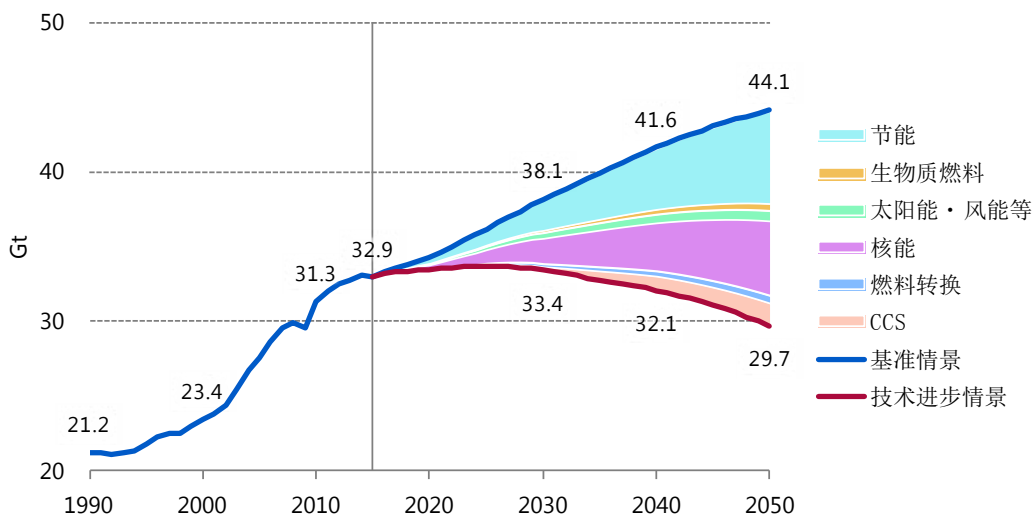


图24 | 全球与能源相关的CO₂排放量和减排贡献



巴黎协定的减排目标草案

根据各国在巴黎协定中提出的《国家自主贡献(INDC)》推算的话,全球的GHG排放量到2030年为45.2GtCO₂,与现在相比有所增加(图25)。虽然其增长势头得到了一定程度的抑制,但从近几年排放量的增长趋缓的情况来看,与基准情景相比,排放量的差别不大。相对于上述的到2050年减少40%至70%,或是巴黎协定的长期目标—让排放量尽早达到顶峰,到本世纪后半叶实质为零,这个远景相差很远。希望各国向技术进步情景方向进一步努力减排,为此推动低碳技术在发展中国家的普及是很重要的。

图25 | 全球的GHG排放

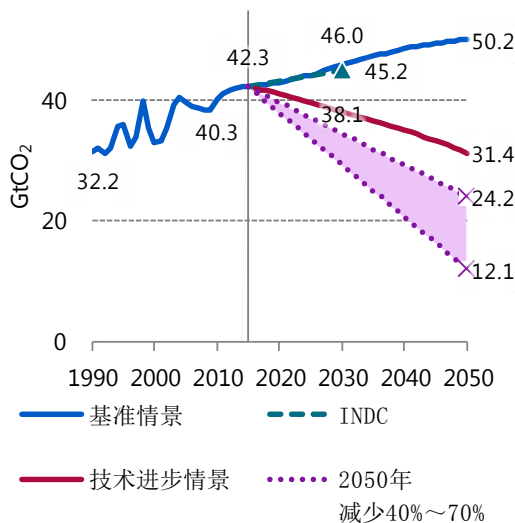


表2 | 巴黎协定的长期目标

Holding the increase in the global average temperature to well below 2° C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5° C above pre-industrial levels, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change. - Article 2

In order to achieve the long-term temperature goal set out in Article 2, Parties aim to reach global peaking of greenhouse gas emissions as soon as possible, recognizing that peaking will take longer for developing country Parties, and to undertake rapid reductions thereafter in accordance with best available science, so as to achieve a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases in the second half of this century, on the basis of equity, and in the context of sustainable development and efforts to eradicate poverty. - Article 4

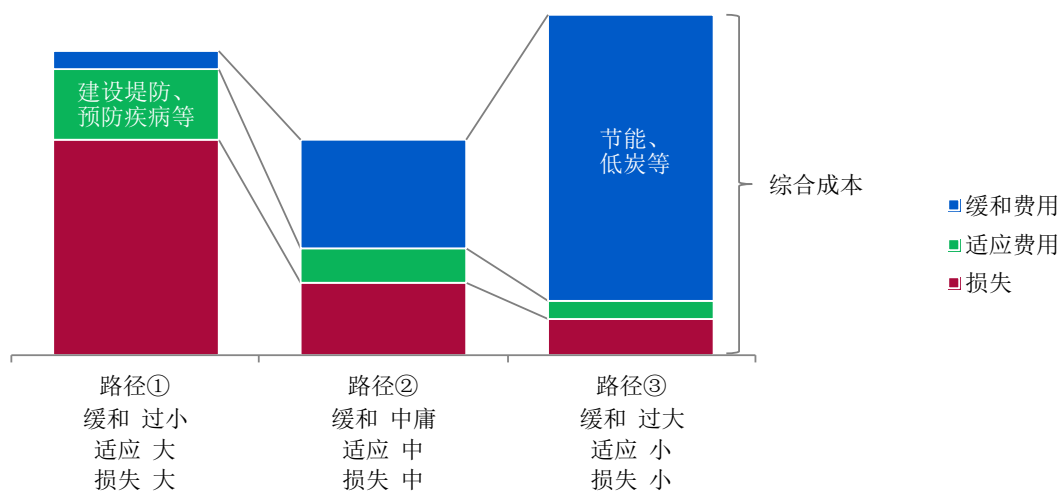
注: 根据G20的巴黎协定的INDC推算

出处: 联合国

超长期气候变化对策的路径

气候变化问题,影响范围广,是跨越几代人的长期课题。应该在何时、怎样、采取何种程度的措施,需要慎重的斟酌。依照可持续发展的视点,我们认为应该注重把消费所带来的效用最大化—也就是说,把包括缓和费用、适应费用、损失成本的综合成本最小化—的综合措施(图26中的路径②)。为了防止100美元的损害而投入1,000美元的费用来削减排放,构筑堤防—这种做法在长期上是难以为继的,不得不说失败的风险很大。

图26 | 包含缓和、适应、损失的综合成本的概念图



在使累积综合成本最小化的“最小费用路径”上，来自能源的CO₂的减排程度，到2050年与技术进步情景大体相当，但还不能达到比现在减半的程度(图27)。GHG排放量在2050年之后也会持续缓慢的减少，到2100年比现状减少52%。大气中的GHG浓度³，缓慢增加到2100年，然后转为减少，在2150年时降低到550ppm。与19世纪后期相比，气温到2100年上升2.4℃，到2150年上升2.6℃。也就是说，最小费用路径不同于要达成非常有雄心的巴黎协定的长期目标所需的路径。

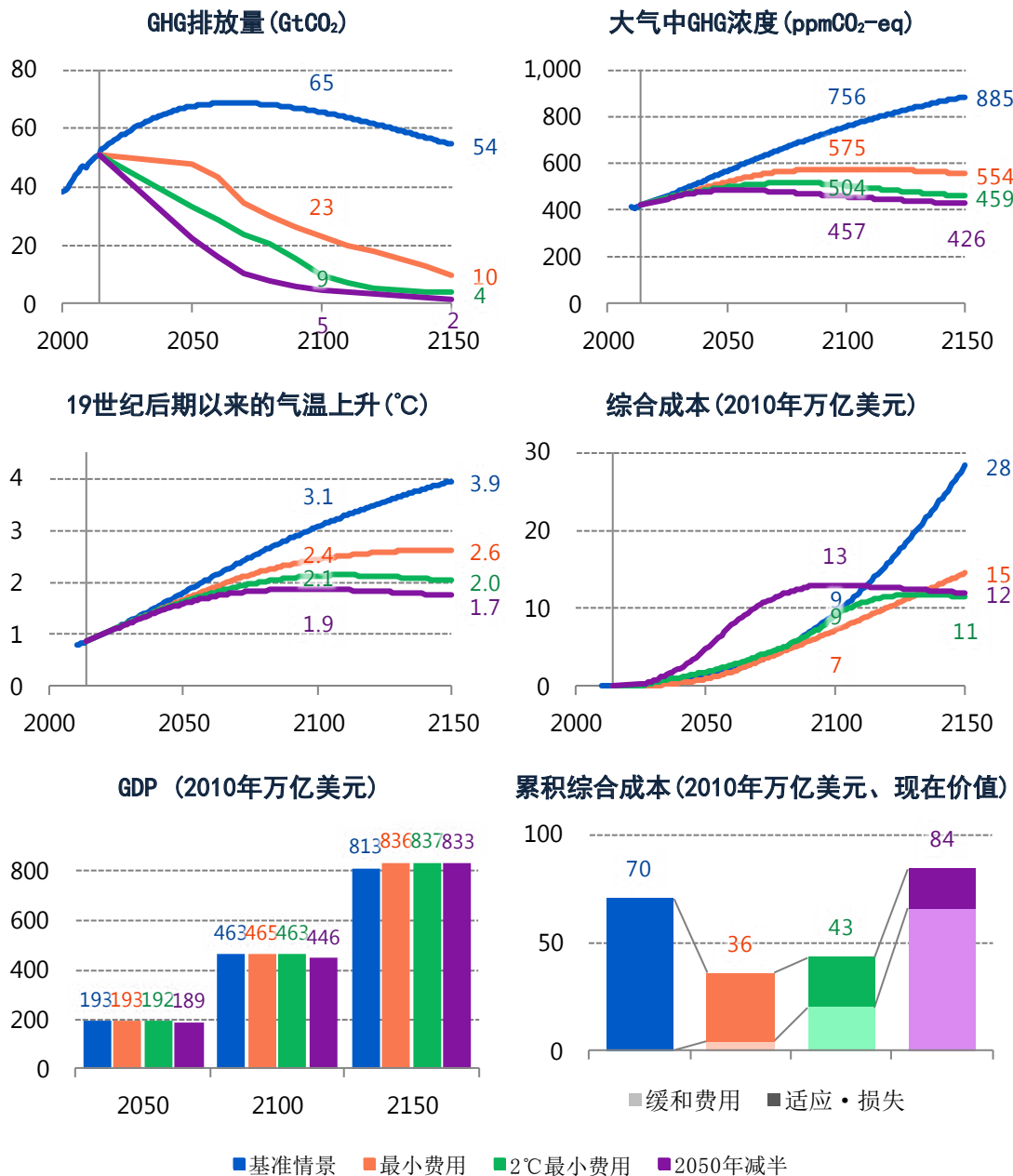
当然，这些数值会因前提条件的改变而变化。例如，如果气候感度⁴不是3℃而是1.9℃的话，最小费用路径中虽然缓和方面的措施会被推迟，但气温的上升幅度不过2℃左右。单纯计算的话，气候感度1℃的差异会使2200年气温有0.5℃左右不同。另外，如果到2300年为止的期间的平均折现率不是2.5%，而是设为1.1%的话⁵，对未来发生的费用的估值会更高，尽早实施缓和措施会被认为更合适。气温到2100年左右上升2℃，之后转为降低。单纯计算的话，折现率1个百分点的差异会使2200年气温相差0.5℃左右。

³ CO₂换算。包含烟雾质等。

⁴ 大气中的GHG的CO₂换算浓度增加1倍时，平均气温的上升幅度(℃)。

⁵ 期间中平均2.5%，相当于拉姆齐法则中的时间偏好率 $\delta = 0.5\%$ ，边际效用的消费弹性值 $\eta = 2$ 。期间中平均1.1%相当于 $\delta = 0.1\%$ 、 $\eta = 1$ 。

图27 | 超长期路径



注：大气中的GHG浓度包含烟霾质等。累积综合成本为2015年-2500年。

一方面，考虑到在国际政治·谈判中“2°C目标”广受尊重，探讨为了抑制气温上升，采取比上述的最小费用路径更有力的措施的路径，也是有益的。比如，在坚持使累积综合成本尽可能低的原则的同时，为了到2150年把气温上升幅度抑制在2°C，需要在最小费用路径的基础上追加减排措施。在这个“2°C最小费用路径”下的GHG排放量，与2010年相比，到2050年要减少31%，到2100年要减少80%。

为了实现2°C最小费用路径，革新性的技术开发·普及是必不可少的。从技术进步情景转向2°C最小费用路径，需要在2050年使来自能源的CO₂进一步减少11.1Gt，为了实现这个减排量所需的措施，比如靠实现氢气的广泛利用的话，全球的氢能发电机组需要达到3,000GW，同时燃料电池汽车要达到10亿辆(表3)。包括其他的选项，所有的革新性的技术，现在都在技术上或社会的接受度等方面有很多问题，为了克服这些问题，需要推进在个别技术上的开发，同时国际合作也是非常重要的。

表3 | 实现2°C最小费用路径所需的革新性技术应用量的事例

[1] 零排放技术：发电部门的CO₂排减(10.4Gt)所需要的应用量

2050年代替既有的未安装CCS火力发电约2,800GW

带CCS火力发电 (盐水层封存)	约2,800GW (假定CO ₂ 回收率为90%、最大减排量为9.4Gt) CO ₂ 封存潜力估计为7,000Gt以上	} 其中之一
氢气发电 (零CO ₂ 氢气)	约3,000GW ≈ 1GW汽轮机 × 约3,000机组 所需氢气体量: 650Mt/年 (相当于当前的LNG需求的3倍)	
太空光伏	约3,000GW ≈ 1.3GW设备 (方圆2km) × 约2,300套	
高温气冷炉	约2,400GW ≈ 0.275GW炉 × 约8,700机组	
可控核聚变	约2,200GW ≈ 0.5GW炉 (相当于ITER规模) × 约4,500机组	

[2] 零排放技术：发电部门的CO₂排减(约剩余0.7Gt)所需要的应用量

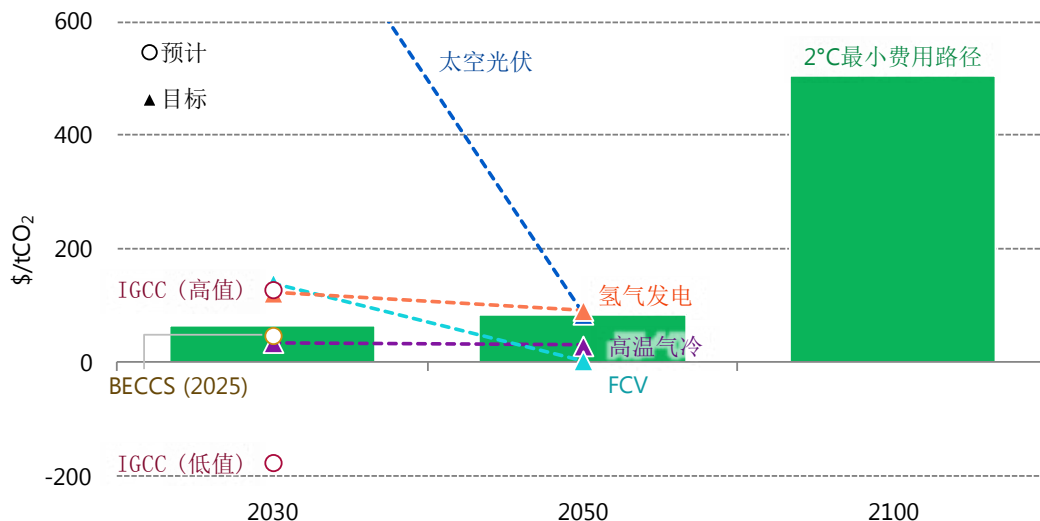
制造业CCS	钢铁、水泥、化工、造纸、炼油、GTL/CTL的制造设施·设备的16%中，设置CCS	} 其中之一
燃料电池汽车 (零CO ₂ 氢气)	约10亿辆 (2050年的总保有量为约26亿辆) 所需氢气体量: 150Mt/年 (相当于当前的LNG需求的6成)	

[3] 负排放技术：发电部门的CO₂排减(11.1Gt)所需要的应用量

带CCS的生物发电 (BECCS)	约1,400GW ≈ 0.5GW汽轮机 × 约2,800机组 所需生物质燃料量: 2,000Mtoe/年。实现这个规模的供给需要比阿根廷(278万km ²)还要广阔的285万km ² 土地
-------------------	--

注：2050年时的总拥有量、利用量。在技术进步情景基础上的追加量。[1]、[2]分别各选一个、或单选[3]来实现相当于11.1Gt的减排

还有，这些技术的成本必须足够低廉。2°C最小费用路径中，CO₂减排成本(2010年实质价格)的最高值是2050年\$85/tCO₂、2100年\$503/tCO₂(图28)。累积综合成本尽可能低的原则所规定的最小费用路径中，所需的技术的成本至少要低于这个CO₂减排成本，不然这个技术就不会得到应用。进一步说，如果不比其他竞争技术便宜的话，在竞争技术的应用没有达到潜力制约的上限之前，从经济合理性的角度，这个技术就不会被选中。革新性的技术需要革新性的成本降低。BECCS、氢能发电、FCV、高温气冷炉、太空光伏等革新性的技术的目标成本，基本上在上述的CO₂减排成本的大体范围内，如果能够广泛应用这些技术，实现2°C目标还是很有可能的。

图28 | CO₂减排成本

注：2°C最小费用路径中，各个时点所采用的技术中成本最高的技术的成本额（碳价）、2010年实质价格。各个技术的目标·预计成本的前提条件和野心程度不同。

计算的主要前提：

[高温气冷炉] 参考核能科学技术委员会《关于与高温气冷炉技术开发相关的今后的研究开发的实施方法（草案）》，设想30万kW发电机组的建设费用约为5亿美元。

[整体煤气化联合循环发电(IGCC)] 参考OECD/NEA “Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition”，设想建设费为\$1,200/kW - \$2,900/kW，发电效率为50%-52%。

[燃料电池汽车(FCV)] 参考氢能·燃料电池战略协议会《氢能·燃料电池战略路线图》，设想到2050年车辆费用为\$25,000（与传统汽车同等）、燃料费115km/kg（汽油换算油耗31km/L）、氢气零售价\$0.5/Nm³。

[氢能发电] 参考氢能·燃料电池战略协议会《氢能·燃料电池战略路线图》、IEA “Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells”，设想到2050年氢气的进厂价为\$0.15/Nm³、建设费\$1,200/kW、发电效率57%。

[太空光伏] 参考太空系统开发利用推进机构《发送电一体型太空光伏发电系统2006模型研究开发路线图2016年修订版》，选取2050年的发电价格目标的\$100/MWh。

[安装CCS的生物质发电(BECCS)] 参考IRENA “Renewable Power Generation Costs in 2014”，生物质发电的价格设为\$130/MWh，参考IPCC “Special Report on CCS”，CO₂捕集封存成本设为\$70/tCO₂，以此为基础进行估算。