

Climate change threatens the basic elements of life for people around the world - access to water, food production, health, and use of land and the environment.

Estimating the economic costs of climate change is challenging, but there is a range of methods or approaches that enable us to assess the likely magnitude of the risks and compare them with the costs. This Review considers three of these approaches.

This Review has first considered in detail the physical impacts on economic activity, on human life and on the environment.

On current trends, average global temperatures will rise by 2 - 3°C within the next fifty years or so.⁵ The Earth will be committed to several degrees more warming if emissions continue to grow.

Warming will have many severe impacts, often mediated through water:

- Melting glaciers will initially increase flood risk and then strongly reduce water supplies, eventually threatening one-sixth of the world's population, predominantly in the Indian sub-continent, parts of China, and the Andes in South America.
- Declining crop yields, especially in Africa, could leave hundreds of millions without the ability to produce or purchase sufficient food. At mid to high latitudes, crop yields may increase for moderate temperature rises (2 - 3°C), but then decline with greater amounts of warming. At 4°C and above, global food production is likely to be seriously affected.
- In higher latitudes, cold-related deaths will decrease. But climate change will increase worldwide deaths from malnutrition and heat stress. Vector-borne diseases such as malaria and dengue fever could become more widespread if effective control measures are not in place.
- Rising sea levels will result in tens to hundreds of millions more people flooded each year with warming of 3 or 4°C. There will be serious risks and increasing pressures for coastal protection in South East Asia (Bangladesh and Vietnam), small islands in the Caribbean and the Pacific, and large coastal cities, such as Tokyo, New York, Cairo and London. According to one estimate, by the middle of the century, 200 million people may become permanently displaced due to rising sea levels, heavier floods, and more intense droughts.
- Ecosystems will be particularly vulnerable to climate change, with around 15 - 40% of species potentially facing extinction after only 2°C of warming. And ocean acidification, a direct result of rising carbon dioxide levels, will have major effects on marine ecosystems, with possible adverse consequences on fish stocks.

⁵ All changes in global mean temperature are expressed relative to pre-industrial levels (1750 - 1850).

気候変動は、水へのアクセス、食糧生産、健康、土地と自然環境の利用といった、世界中の人々の生活基盤を脅かすものである

気候変動の経済的コストを推計することは難題である。しかし、リスクの規模を見積もり、対策費用と比較できるような方法やアプローチはある。本レビューでは、その中から3つのアプローチを用いて検討する。

まず気候変動が経済活動、人間の生活、環境に及ぼす物理的影響について詳しく検討する。

現在の状況が今後も継続するならば、全球平均気温は今後50年以内に2~3 上昇する⁵⁾。温室効果ガス排出量が増加し続けるのであれば、さらに数 度の温暖化は避けられない。

温暖化によって、多くの深刻な影響が現れる。影響には、水が介在していることが多い。

- 氷河の溶解は、まず洪水のリスクを増大させる。その後、水供給量の大幅な減少につながる。これらの影響範囲は、最終的には世界人口の六分の一にまで拡大する。この範囲には、インド全域、中国の一部、南アメリカのアンデスが含まれる
- とくにアフリカにおける穀物収量の減少は、数億人が必要最低限の食物を生産できない、あるいは購入できなくなる事態をまねく。中高緯度地域では、中程度の温度上昇（2~3 ）により穀物収量は増加するだろう。しかし、温度が3 以上に上昇すると、収量は減少し始める。平均気温が4 以上上昇する場合には、地球全体の食料生産は深刻な影響を受けることになる
- 高緯度地域では、低温が原因となる死者数は減少する。しかし世界全体では、気候変動により栄養失調や熱ストレスによる死者数は増加する。適切な抑制策なしには、マラリアやデング熱のような動物を媒介とする病気の蔓延を止めることはできない
- 全球平均気温が3~4 上昇すると、海水面の上昇によって毎年数千万人から数億人単位の人々が洪水の危機にさらされることになる。東南アジア地域（バングラデシュとベトナム）、カリブ海および太平洋の小諸島、そして東京、ニューヨーク、カイロ、ロンドンなどの海岸沿いの大都市では、深刻な洪水のリスクと、沿岸を防護する必要性が生じる。ある予測によると、今世紀の半ばまでに、海水面の上昇、より大規模な洪水、そして厳しい干ばつによって、2億人が本格的な移住を余儀なくされると見積もられている
- 生態系は、気候変動に対してとりわけ脆弱である。平均気温がわずか2 上昇しても、15~40%の種が絶滅の危機にさらされる可能性がある。海水の酸性度は、二酸化炭素の大気中濃度の影響を直接受けており、海水が酸性化することにより海洋の生態系に大きな影響を与え、漁獲量が減少する可能性がある

⁵⁾ 全球平均気温は、産業革命以前（1750~1850年）の平均値を基準値としている。

The damages from climate change will accelerate as the world gets warmer.

Higher temperatures will increase the chance of triggering abrupt and large-scale changes.

- Warming may induce sudden shifts in regional weather patterns such as the monsoon rains in South Asia or the El Niño phenomenon - changes that would have severe consequences for water availability and flooding in tropical regions and threaten the livelihoods of millions of people.
- A number of studies suggest that the Amazon rainforest could be vulnerable to climate change, with models projecting significant drying in this region. One model, for example, finds that the Amazon rainforest could be significantly, and possibly irrevocably, damaged by a warming of 2 - 3°C.
- The melting or collapse of ice sheets would eventually threaten land which today is home to 1 in every 20 people.

While there is much to learn about these risks, the temperatures that may result from unabated climate change will take the world outside the range of human experience. This points to the possibility of very damaging consequences.

The impacts of climate change are not evenly distributed - the poorest countries and people will suffer earliest and most. And if and when the damages appear it will be too late to reverse the process. Thus we are forced to look a long way ahead.

Climate change is a grave threat to the developing world and a major obstacle to continued poverty reduction across its many dimensions. First, developing regions are at a geographic disadvantage: they are already warmer, on average, than developed regions, and they also suffer from high rainfall variability. As a result, further warming will bring poor countries high costs and few benefits. Second, developing countries - in particular the poorest - are heavily dependent on agriculture, the most climate-sensitive of all economic sectors, and suffer from inadequate health provision and low-quality public services. Third, their low incomes and vulnerabilities make adaptation to climate change particularly difficult.

Because of these vulnerabilities, climate change is likely to reduce further already low incomes and increase illness and death rates in developing countries. Falling farm incomes will increase poverty and reduce the ability of households to invest in a better future, forcing them to use up meagre savings just to survive. At a national level, climate change will cut revenues and raise spending needs, worsening public finances.

Many developing countries are already struggling to cope with their current climate. Climatic shocks cause setbacks to economic and social development in developing countries today even with temperature increases of less than 1°C. The impacts of unabated climate change, - that is, increases of 3 or 4°C and upwards - will be to increase the risks and costs of these events very powerfully.

Impacts on this scale could spill over national borders, exacerbating the damage further. Rising sea levels and other climate-driven changes could drive millions of people to migrate: more than a fifth of Bangladesh could be under water with a 1m rise in sea levels, which is a possibility by the end of the century. Climate-related

気候変動による被害は温暖化が進むにつれ急激に増加する

気温の上昇に伴って、急激かつ大規模な変化が起こる可能性が増加する。

- 温暖化は、南アジアのモンスーンやエルニーニョ現象のような、地域の天候パターンに急激な変化をもたらす可能性がある。さらに、天候の変化は、水供給量や熱帯地方の洪水などに深刻な影響を及ぼし、何百万人も生活を脅かす可能性がある
- 多くの研究が、アマゾンの熱帯雨林が気候変動に対して脆弱であると指摘しており、モデルの多くがアマゾン地域の乾燥化が深刻化すると予測している。例えばあるモデルでは、アマゾンの熱帯雨林は、気温が 2~3 上昇するだけで深刻かつ恐らく取り返しのつかない被害を受けるだろうと予測している
- 氷床の溶解や崩壊は、最終的には世界人口の 20 分の 1 が住む土地への脅威となる

これらのリスクについては、まだまだ学ぶべきことが多い。一方、止まることなく続く気候変動の結果としての気温変化により、世界は人類が未だかつて経験したことのない領域へ踏み出すことになる。このことは、非常に壊滅的な結果をもたらされる可能性があるということを示すものである。

気候変動の影響は均一に起こるものではなく、最貧国とその国に暮らす人々が、いち早くまたより大きな影響を受ける。そして、被害が顕在化してしまった時には、すでにそのプロセスを止めるには遅すぎるのである。したがって、我々はかなり先を見据えて対策を実施しなければならない

気候変動は、発展途上地域にとって憂慮すべき脅威であり、様々な面において貧困解消への大きな障害となっている。第一に、発展途上地域は先進国と比較して温暖な場合が多く、降雨パターンの大きな変化によって被害を受けやすい。したがって、温暖化の進行に伴いコスト負担は高額となるが、便益は少ない。第二に、発展途上国は、農業に依存していることが多い。これは、貧しい国々では特に顕著である。農業は、経済部門の中でもっとも気候変動の影響を受けやすい。また、このような国々では健康への対策が不十分であり、公共サービスの質も悪い。第三に、これらの国々は低所得かつ所得構造が脆弱なために、気候変動への適応策実施が難しいものとなっている。

このような脆弱性により、発展途上国では気候変動は既に低水準にある所得をさらに引き下げ、罹患率や死亡率を上昇することになるだろう。農業収入の減少は貧困を増大させ、わずかな蓄えは生き延びるために使わざるを得ず、一般家庭のより良い将来に対する投資能力を低下させる。国家レベルでは、気候変動によって歳入は減少し、必要経費が増大して国家財政の悪化につながる。

発展途上国の多くでは、現在でも気候による不利益を克服するための困難に直面している。気温上昇がたとえ 1 未満であっても、それによって生じる気候的な打撃は、発展途上国が現在取り組んでいる経済的、社会的な発展の妨げとなる。気温上昇が 3 や 4 以上まで続くようであれば、その影響はリスクとコストを激しく押し上げることになる。

大規模な気候変動の影響は、国内の被害増加のみならず、国境を越えた波及効果を持つ。海水面の上昇や他の気候変動に伴う変化は、何百万人規模の人口移動の原因となる。今世紀末までに海水面は 1m 上昇すると予測されているが、バングラデシュでは国土面積の 5 分の 1 が水没する可能性があるということである。

shocks have sparked violent conflict in the past, and conflict is a serious risk in areas such as West Africa, the Nile Basin and Central Asia.

Climate change may initially have small positive effects for a few developed countries, but is likely to be very damaging for the much higher temperature increases expected by mid- to late-century under BAU scenarios.

In higher latitude regions, such as Canada, Russia and Scandinavia, climate change may lead to net benefits for temperature increases of 2 or 3°C, through higher agricultural yields, lower winter mortality, lower heating requirements, and a possible boost to tourism. But these regions will also experience the most rapid rates of warming, damaging infrastructure, human health, local livelihoods and biodiversity.

Developed countries in lower latitudes will be more vulnerable - for example, water availability and crop yields in southern Europe are expected to decline by 20% with a 2°C increase in global temperatures. Regions where water is already scarce will face serious difficulties and growing costs.

The increased costs of damage from extreme weather (storms, hurricanes, typhoons, floods, droughts, and heat waves) counteract some early benefits of climate change and will increase rapidly at higher temperatures. Based on simple extrapolations, costs of extreme weather alone could reach 0.5 - 1% of world GDP per annum by the middle of the century, and will keep rising if the world continues to warm.

- A 5 or 10% increase in hurricane wind speed, linked to rising sea temperatures, is predicted approximately to double annual damage costs, in the USA.
- In the UK, annual flood losses alone could increase from 0.1% of GDP today to 0.2 - 0.4% of GDP once the increase in global average temperatures reaches 3 or 4°C.
- Heat waves like that experienced in 2003 in Europe, when 35,000 people died and agricultural losses reached \$15 billion, will be commonplace by the middle of the century.

At higher temperatures, developed economies face a growing risk of large-scale shocks - for example, the rising costs of extreme weather events could affect global financial markets through higher and more volatile costs of insurance.

Integrated assessment models provide a tool for estimating the total impact on the economy; our estimates suggest that this is likely to be higher than previously suggested.

The second approach to examining the risks and costs of climate change adopted in the Review is to use integrated assessment models to provide aggregate monetary estimates.

Formal modelling of the overall impact of climate change in monetary terms is a formidable challenge, and the limitations to modelling the world over two centuries or more demand great caution in interpreting results. However, as we have explained, the lags from action to effect are very long and the quantitative analysis needed to inform action will depend on such long-range modelling exercises. The monetary impacts of climate change are now expected to be more serious than many earlier studies suggested, not least because those studies tended to exclude some of the

気候変動に伴う深刻な影響は、過去にも暴力的な国家間紛争の引き金となってきた。このような紛争は、西アフリカ、ナイル盆地、中央アジアでは深刻なリスクとなっている。

気候変動の初期段階では、先進国のいくつかには良い影響をもたらす。しかし、BAU シナリオのもとでは、今世紀の中後半にかけてのより高い温度上昇の場合には、被害はきわめて大きなものとなると予測されている

カナダ、ロシア、スカンジナビア諸国など高緯度の国々では、気候変動による 2~3 の気温上昇は、農業生産の増大や、冬季の死亡率の低下、観光産業振興の可能性などといった便益をもたらす。しかし、これらの地域も急速な温暖化によって、インフラストラクチャー、健康、地域の生活、生物多様性への被害を避けることはできない。

より低緯度の先進国は、温暖化に対してさらに脆弱である。たとえば、南ヨーロッパでは全球平均気温が 2 上昇することによって、水供給と食糧生産が 20%減少すると予測されている。すでに水資源が乏しい地域では、水の確保が一層困難となり、供給量確保に係るコストも上昇する。

嵐、ハリケーン、台風、洪水、干ばつ、熱波などの異常気象に伴う損害のコストが上昇すると、当初は確保できていた気候変動による便益を相殺するのみならず、平均気温が上昇するにつれて正味のコストは急激に上昇する。単純に外挿すると、今世紀の中ごろまでに異常気象によるコストだけでも世界の年間 GDP の 0.5~1%に達し、温暖化が進むにつれてコストはさらに増加する。

- 海水温の上昇によってハリケーンの風速が 5~10%上昇すると、米国では年間被害額が現在の 2 倍になると予測されている
- 英国の洪水被害額は、現在は年間 GDP の 0.1%であるが、全球平均気温が 3~4 上昇すると GDP の 0.2~0.4%に増加する可能性がある
- 欧州では、2003 年の熱波によって 35,000 人が死亡し、農業部門では 150 億ドルもの損害が生じた。今世紀半ばまでには、このような状況は日常茶飯事となるだろう

大気温度がいっそう上昇すると、先進国では気候変動に伴い壊滅的な影響を受けるようなリスクが増大することになる。たとえば、異常気象のコストが上昇すると、保険金額がより高額かつ変動しやすくなり、世界の金融市場に影響を与える。

統合評価モデルは、経済への総合的な影響を予測するためのツールである。この手法を用いた我々の推計によると、気候変動の影響は、従来の研究が示唆しているよりも大きいものである

本レビューで採用した気候変動のリスクと被害額を評価する 2 番目のアプローチとして、被害額の総計を貨幣単位にて評価することを目的として、統合評価モデルを用いた。

気候変動の全体的な影響を、金銭的な観点から本格的にモデル化することはきわめて難しい。また、2 世紀あるいはそれ以上先の世界をモデル化することには限界があり、結果の解釈には慎重にならなければならない。しかし前述したように、気候変動抑制対策が効果を発揮するまでには非常に長い時間がかかるために、定量評価は対策実施に関する情報を提供することが目的であり、数世紀にもわたる長期間を対象としたモデルに依らなくてはならない。今日、気候変動による金銭的影響は、過去の多くの研究が予測したよりも大きな額になると予測されている。これは、過去の研究では不確実性がきわめて高いものの、壊滅的な影響を与える要素を除外していたためである。現在は、不確実性に関する研究が進んだこともあり、このようなリスクを確率により評価することができるようになっている。

most uncertain but potentially most damaging impacts. Thanks to recent advances in the science, it is now possible to examine these risks more directly, using probabilities.

Most formal modelling in the past has used as a starting point a scenario of 2-3°C warming. In this temperature range, the cost of climate change could be equivalent to a permanent loss of around 0-3% in global world output compared with what could have been achieved in a world without climate change. Developing countries will suffer even higher costs.

However, those earlier models were too optimistic about warming: more recent evidence indicates that temperature changes resulting from BAU trends in emissions may exceed 2-3°C by the end of this century. This increases the likelihood of a wider range of impacts than previously considered. Many of these impacts, such as abrupt and large-scale climate change, are more difficult to quantify. With 5-6°C warming - which is a real possibility for the next century - existing models that include the risk of abrupt and large-scale climate change estimate an average 5-10% loss in global GDP, with poor countries suffering costs in excess of 10% of GDP. Further, there is some evidence of small but significant risks of temperature rises even above this range. Such temperature increases would take us into territory unknown to human experience and involve radical changes in the world around us.

With such possibilities on the horizon, it was clear that the modelling framework used by this Review had to be built around the economics of risk. Averaging across possibilities conceals risks. The risks of outcomes much worse than expected are very real and they could be catastrophic. Policy on climate change is in large measure about reducing these risks. They cannot be fully eliminated, but they can be substantially reduced. Such a modelling framework has to take into account ethical judgements on the distribution of income and on how to treat future generations.

The analysis should not focus only on narrow measures of income like GDP. The consequences of climate change for health and for the environment are likely to be severe. Overall comparison of different strategies will include evaluation of these consequences too. Again, difficult conceptual, ethical and measurement issues are involved, and the results have to be treated with due circumspection.

The Review uses the results from one particular model, PAGE2002, to illustrate how the estimates derived from these integrated assessment models change in response to updated scientific evidence on the probabilities attached to degrees of temperature rise. The choice of model was guided by our desire to analyse risks explicitly - this is one of the very few models that would allow that exercise. Further, its underlying assumptions span the range of previous studies. We have used this model with one set of data consistent with the climate predictions of the 2001 report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, and with one set that includes a small increase in the amplifying feedbacks in the climate system. This increase illustrates one area of the increased risks of climate change that have appeared in the peer-reviewed scientific literature published since 2001.

We have also considered how the application of appropriate discount rates, assumptions about the equity weighting attached to the valuation of impacts in poor countries, and estimates of the impacts on mortality and the environment would increase the estimated economic costs of climate change.

従来のモデルでは、将来の温度上昇が 2~3 となるシナリオを解析の出発点として用いていた。このようなシナリオでは、気候変動によるコストは、気候変動が起こらないと仮定したケースにおける全世界生産額**の 0~3%に相当する。発展途上国では、さらに高額の損害を受けるだろう。

しかしながら、初期のモデルにて示された結果は、あまりにも温暖化を楽観的に捉えているといえるだろう。最近提出された知見に基づく、排出量が BAU シナリオに沿って推移した場合には、今世紀末までに 2~3 を超える温度上昇を伴う気候変動が起こると予測される。これは、従来示されてきた以上に、より広範囲の影響が起こる確率が高いことを示している。急激かつ大規模な気候の変化など、このような影響の多くは、数量化することが難しい。来世紀にも十分起こりうるような 5~6 の温暖化の場合には、急激かつ大規模な気候変動を含めた現行のモデルでは、世界の GDP 損失は平均 5~10%であり、貧しい国々では GDP の 10%を超える額の損失が生じると予測される。さらには、いくつかの知見では、これ以上の気温上昇のある危険性が、小さいながらも統計的に有意な確率であることを示している。このような高い気温上昇は、我々人類がいまだかつて経験したことのないところであり、我々の周りの世界に急激な変化を与えうるものである。

そのような可能性を視野にいれるならば、本レビューで用いられたモデル化の枠組みが、リスクの経済学を中心として構築されるべきなのは明らかである。様々な可能性を平均化することにより、リスクは隠蔽されてしまう。予想以上に悪い結果となるリスクは、十分にありえる話であり、その結果は破壊的なものとなる可能性もある。このようなリスクを低減するための政策のひとつが、気候変動に関する政策である。リスクを完全になくすことは不可能だが、十分に軽減することはできる。そのようなモデル化の枠組みは、所得の分配と、いかに将来の世代へ配慮するかについての倫理的な判断を行う必要がある。

分析では、GDP のような狭義の経済便益にのみ焦点を当てるべきではない。気候変動がもたらす健康や環境への影響は、深刻なものであることが予想される。異なった方策を比較検討する場合には、このような影響の評価も不可欠である。繰り返すが、分析には難しい概念的、倫理的、そして計量的な課題が関係しており、分析結果には慎重な取り扱いが求められる。

本レビューでは、気温上昇についての確率の変化に関する最新の科学的知見に基づいて、これらの統合評価モデルから導かれる予測値がどのように変化するかを示すために、PAGE2002 という名前のモデルによる結果を取り上げる。このモデルを用いた理由は、リスクの分析を明示的に行いたいという我々の欲求からである。このモデルは、リスクを分析できる数少ないモデルのひとつである。さらには、このモデルの仮定条件は、これまでの研究にて対象としてきた範囲をカバーするものであるからである。我々は、このモデルに IPCC の 2001 年報告書（第 3 次評価報告書）にて示された気候予測にあわせたデータセットと、気候システムの増幅フィードバックを若干追加したデータセットを用いた。この追加は、2001 年以降に、査読つき論文として発表された、ある分野における気候変動のリスクの増大を例証するものである。

さらに、適切な割引率^{††}、貧しい国々における影響評価に伴う衡平性^{††}の重み付けに関する仮定、および死亡率と自然環境への気候変動の影響の評価を、どのようにモデルへ適用するかについても検討した。

** [訳注] 各国 GDP の世界総和。

†† [訳注] 将来の価値を現在の価値に割り戻す(換算する)率。「割引」することは、現在の価値を将来の価値よりも高く評価することを意味する。

†† [訳注] 様々な考え方があるが、「関係者間で釣り合いのとれた資源の配分あるいは再配分」と定義できる。

Using this model, and including those elements of the analysis that can be incorporated at the moment, we estimate the total cost over the next two centuries of climate change associated under BAU emissions involves impacts and risks that are equivalent to an average reduction in global per-capita consumption of at least 5%, now and forever. While this cost estimate is already strikingly high, it also leaves out much that is important.

The cost of BAU would increase still further, were the model systematically to take account of three important factors:

- First, including direct impacts on the environment and human health (sometimes called 'non-market' impacts) increases our estimate of the total cost of climate change on this path from 5% to 11% of global per-capita consumption. There are difficult analytical and ethical issues of measurement here. The methods used in this model are fairly conservative in the value they assign to these impacts.
- Second, some recent scientific evidence indicates that the climate system may be more responsive to greenhouse-gas emissions than previously thought, for example because of the existence of amplifying feedbacks such as the release of methane and weakening of carbon sinks. Our estimates, based on modelling a limited increase in this responsiveness, indicate that the potential scale of the climate response could increase the cost of climate change on the BAU path from 5% to 7% of global consumption, or from 11% to 14% if the non-market impacts described above are included.
- Third, a disproportionate share of the climate-change burden falls on poor regions of the world. If we weight this unequal burden appropriately, the estimated global cost of climate change at 5-6°C warming could be more than one-quarter higher than without such weights.

Putting these additional factors together would increase the total cost of BAU climate change to the equivalent of around a 20% reduction in consumption per head, now and into the future.

In summary, analyses that take into account the full ranges of both impacts and possible outcomes - that is, that employ the basic economics of risk - suggest that BAU climate change will reduce welfare by an amount equivalent to a reduction in consumption per head of between 5 and 20%. Taking account of the increasing scientific evidence of greater risks, of aversion to the possibilities of catastrophe, and of a broader approach to the consequences than implied by narrow output measures, the appropriate estimate is likely to be in the upper part of this range.

Economic forecasting over just a few years is a difficult and imprecise task. The analysis of climate change requires, by its nature, that we look out over 50, 100, 200 years and more. Any such modelling requires caution and humility, and the results are specific to the model and its assumptions. They should not be endowed with a precision and certainty that is simply impossible to achieve. Further, some of the big uncertainties in the science and the economics concern the areas we know least about (for example, the impacts of very high temperatures), and for good reason - this is unknown territory. The main message from these models is that when we try to take due account of the upside risks and uncertainties, the probability-weighted costs look very large. Much (but not all) of the risk can be reduced through a strong mitigation policy, and we argue that this can be achieved at a far lower cost than

このモデルを使い、現時点で組み込むことのできる上述の分析要素を含めることによって、今後2世紀にわたるBAUでの排出条件下における、気候変動による影響とリスクに関わる総コストは、世界の一人あたり消費額の平均を少なくとも5%減少させる額に相当すると、我々は予測した。この予測値は、既に驚くほど高い値と思われるが、まだまだ重要な事柄を無視している。

BAUでのコストはもっと増大する可能性がある。モデルは以下の3つの重要な要因を考慮に入れるべきである。

- 第一に、BAUの道筋における気候変動の総被害額は、世界の一人あたり消費額の5%と見積もられているが、環境と人間の健康に関する直接的な影響（しばしば「非市場的」影響と呼ばれる）を含めることによって11%へ増加する。この計測には、難しい分析上のまた倫理上の課題がある。このモデルにて、これらの影響コストを直接的に算定する手法は、かなり保守的なものである
- 第二に、最近のいくつかの科学的知見は、気候システムは以前考えられていた以上に温室効果ガスの排出に敏感に反応することを示している。例えば、温度上昇によりメタンの放出が増加したり、炭素吸収量が減少するような、増幅フィードバックの存在などである。我々の予測は、このような反応による増大を限定的に扱っており、被害額は世界の一人あたり消費額の5%と見積もっているが、潜在的な気候の反応を考慮することにより7%へ増加する。また、上述の非市場の影響を考慮に入れるならば11%から14%に増加することを示している
- 第三に、気候変動の負荷は世界の貧しい地域に集中する。この不均衡な負荷を加重付けしてより適切に評価することにより、気温上昇が5~6の場合における、気候変動による被害額の予測値は、重み付けなしの場合よりも25%増加する

このような要因を追加するならば、BAU時の気候変動による総被害額は、現在そして将来にわたって、一人あたり消費を20%削減する額に相当する。

以上より、リスクの経済学を適用し、影響とその結果をすべて考慮して解析すると、BAU時の気候変動は、1人あたり消費額の5~20%に相当するだけの、社会厚生^{SS}の減少が示唆されるのである。より大きなリスクを示す科学的知見が増えていること、大災害の可能性を回避すること、気候変動の結果に対し狭義の生産高による評価以上の幅広いアプローチを行うことを考慮に入れるならば、温暖化影響による被害額は、この数字の上限に近いものとなる公算が大きい。

経済学的な予測は、数年先のことであっても難しく、不正確さを伴う。気候変動の分析では、その性質から、50年、100年、200年あるいはそれ以上先を見据えることが要求される。そのようなモデリングには慎重さと謙虚さが求められ、その結果はモデルと前提条件により左右される。始めからそれらには正確さや確実性が備わっているわけではなく、また、単純に達成できるものではない。さらに、科学や経済学における大きな不確実性のいくつか（例えば、きわめて高い気温における影響など）は、我々のほとんど知らない領域に存在していて、当然のことだが我々にとって未知の領域である。これらのモデルから得られる主なメッセージは、我々がリスクと不確実性の高い方を考慮に入れると、確率によって重みづけられたコストは非常に大きなものになりうるということである。ほとんどの（すべてではなく）リスクは、強固な緩和策によって低減させることができる。そして、我々が主張しているのは、緩和策は、気候変動の影響として計算された損失に比べ、はるかに安いコストで達成可能な

^{SS} [訳注] 「(生産者の利益+消費者の利益)-環境汚染の被害」にて表され、政策シナリオの"社会的な望ましさ"を示し、政策シナリオを比較する際に評価指標として使うことができる。

those calculated for the impacts. In this sense, mitigation is a highly productive investment.

Emissions have been, and continue to be, driven by economic growth; yet stabilisation of greenhouse-gas concentrations in the atmosphere is feasible and consistent with continued growth.

CO₂ emissions per head have been strongly correlated with GDP per head. As a result, since 1850, North America and Europe have produced around 70% of all the CO₂ emissions due to energy production, while developing countries have accounted for less than one quarter. Most future emissions growth will come from today's developing countries, because of their more rapid population and GDP growth and their increasing share of energy-intensive industries.

Yet despite the historical pattern and the BAU projections, the world does not need to choose between averting climate change and promoting growth and development. Changes in energy technologies and the structure of economies have reduced the responsiveness of emissions to income growth, particularly in some of the richest countries. With strong, deliberate policy choices, it is possible to 'decarbonise' both developed and developing economies on the scale required for climate stabilisation, while maintaining economic growth in both.

Stabilisation - at whatever level - requires that annual emissions be brought down to the level that balances the Earth's natural capacity to remove greenhouse gases from the atmosphere. The longer emissions remain above this level, the higher the final stabilisation level. In the long term, annual global emissions will need to be reduced to below 5 GtCO₂e, the level that the earth can absorb without adding to the concentration of GHGs in the atmosphere. This is more than 80% below the absolute level of current annual emissions.

This Review has focused on the feasibility and costs of stabilisation of greenhouse gas concentrations in the atmosphere in the range of 450-550ppm CO₂e.

Stabilising at or below 550ppm CO₂e would require global emissions to peak in the next 10 - 20 years, and then fall at a rate of at least 1 - 3% per year. The range of paths is illustrated in Figure 3. By 2050, global emissions would need to be around 25% below current levels. These cuts will have to be made in the context of a world economy in 2050 that may be 3 - 4 times larger than today - so emissions per unit of GDP would need to be just one quarter of current levels by 2050.

To stabilise at 450ppm CO₂e, without overshooting, global emissions would need to peak in the next 10 years and then fall at more than 5% per year, reaching 70% below current levels by 2050.

Theoretically it might be possible to "overshoot" by allowing the atmospheric GHG concentration to peak above the stabilisation level and then fall, but this would be both practically very difficult and very unwise. Overshooting paths involve greater risks, as temperatures will also rise rapidly and peak at a higher level for many decades before falling back down. Also, overshooting requires that emissions subsequently be reduced to extremely low levels, below the level of natural carbon absorption, which may not be feasible. Furthermore, if the high temperatures were to weaken the capacity of the Earth to absorb carbon - as becomes more likely with overshooting - future emissions would need to be cut even more rapidly to hit any given stabilisation target for atmospheric concentration.

ことだ。そういう意味で緩和策は、きわめて生産的な投資であると言える。

温室効果ガスの排出は今までも、そして今も経済の成長によって進むが、大気中の温室効果ガス濃度の安定化は実現可能であり、経済成長の継続と矛盾しない

1人あたりのCO₂排出量は、1人あたりGDPと強い相関がある。結果として、1850年以来、北米とヨーロッパが、全てのCO₂排出量の70%をエネルギー生産に伴って排出してきた。一方、発展途上国は全体の4分の1以下を占めているにすぎない。将来の排出の増加分のほとんどは、今日の発展途上国からもたらされる。なぜなら、これらの国々では急速な人口と、GDPの増加、またエネルギー集約型の産業の割合が増加するからである。

しかしながら、この歴史的なパターンとBAUの予測にも関わらず、世界が気候変動の回避と成長や発展の促進との二者択一をする必要はない。エネルギー関連技術と経済構造の変化によって、特に最も豊かな国々の中には、所得が増加してもエネルギー消費がそれほど増加しないようになった。強固かつ意図的な政策の選択がなされるなら、先進国、発展途上国の経済のいずれにおいても、それぞれの経済成長を維持したまま、気候の安定化に必要な規模に「脱炭素化」をすることは可能である。

どんなレベルにせよ温室効果ガス濃度を安定化させるためには、年間の排出量を、温室効果ガスを大気中から取り除く地球の自然の能力とバランスがとれるレベルにまで下げることが必要である。このバランスがとれるレベルよりも排出量が多い状態が長く続けば続くほど、最終的な安定化レベルは高くなる。長期的にみれば、世界の年間排出量はCO₂換算50億トン以下にまで下げることが必要である。これは、地球が大気中の温室効果ガスの濃度を上げることなく吸収できるレベルであり、現在の年間排出量の絶対値の80%以下に相当する。

本レビューでは、大気中の温室効果ガス濃度をCO₂換算にして450~550ppmの幅において、安定化の実現可能性とコストについて焦点をあわせる。

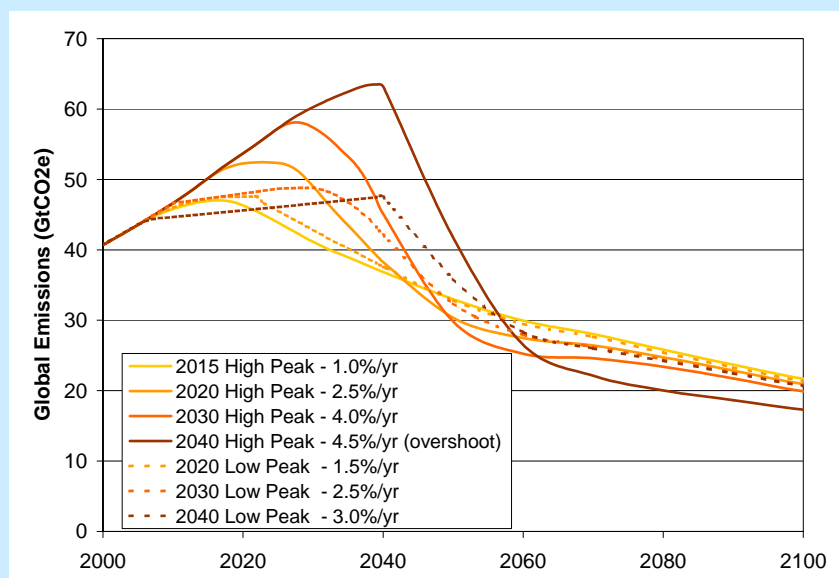
CO₂換算550ppmあるいはそれ以下に安定化させるためには、今後10年から20年の間に排出量のピークが来て、それ以降は少なくとも年率1~3%の割合にて減少することが必要となる。CO₂換算550ppmに安定化させるために十分な、CO₂排出量の経路の範囲を図3に示した。2050年までに、世界の排出量が現在のレベルより25%下がる必要がある。この削減は、2050年の世界経済が現在の3~4倍に拡大するとともに実施されることを考える必要がある。そのため、GDP単位あたりの排出量は2050年までに現在のレベルの4分の1になることが必要である。

行き過ぎる（濃度が上がりすぎる）ことなく、CO₂換算450ppmで安定化させるためには、今後10年間のうちにピークが来て、それ以降は毎年5%以上減少し、2050年までに現在のレベルの70%以下に達することが必要である。

理論的には、大気中の温室効果ガス濃度をいったん安定化レベルより高いところまでピークを持っていき、それから下げるという「行き過ぎる」方法も可能ではあるが、これは現実的に難しく、また、あまり賢明でない方法と言える。行き過ぎる道筋を取った場合には、気温は急激に上昇して、高いレベルでのピークが何十年も続き、その後低下するため、大きなリスクがある。また、行き過ぎでは、排出を自然の炭素吸収能力の許すレベル以下というきわめて低いレベルに一定化する必要があり、これは実現可能性があまりない。さらには、これは行き過ぎにともなって起こり得ることなのだが、もし高い気温が地球の炭素吸収能力を弱めるとしたら、大気中の濃度の安定化目標を達成するために、さらに急速な温暖化ガス排出の削減が必要となるからである。

Figure 3 Illustrative emissions paths to stabilise at 550ppm CO₂e.

The figure below shows six illustrative paths to stabilisation at 550ppm CO₂e. The rates of emissions cuts given in the legend are the *maximum* 10-year average rate of decline of global emissions. The figure shows that delaying emissions cuts (shifting the peak to the right) means that emissions must be reduced more rapidly to achieve the same stabilisation goal. The rate of emissions cuts is also very sensitive to the height of the peak. For example, if emissions peak at 48 GtCO₂ rather than 52 GtCO₂ in 2020, the rate of cuts is reduced from 2.5%/yr to 1.5%/yr.



Source: Reproduced by the Stern Review based on Meinshausen, M. (2006): 'What does a 2°C target mean for greenhouse gas concentrations? A brief analysis based on multi-gas emission pathways and several climate sensitivity uncertainty estimates', *Avoiding dangerous climate change*, in H.J. Schellnhuber et al. (eds.), Cambridge: Cambridge University Press, pp.265 - 280.

Achieving these deep cuts in emissions will have a cost. The Review estimates the annual costs of stabilisation at 500-550ppm CO₂e to be around 1% of GDP by 2050 - a level that is significant but manageable.

Reversing the historical trend in emissions growth, and achieving cuts of 25% or more against today's levels is a major challenge. Costs will be incurred as the world shifts from a high-carbon to a low-carbon trajectory. But there will also be business opportunities as the markets for low-carbon, high-efficiency goods and services expand.

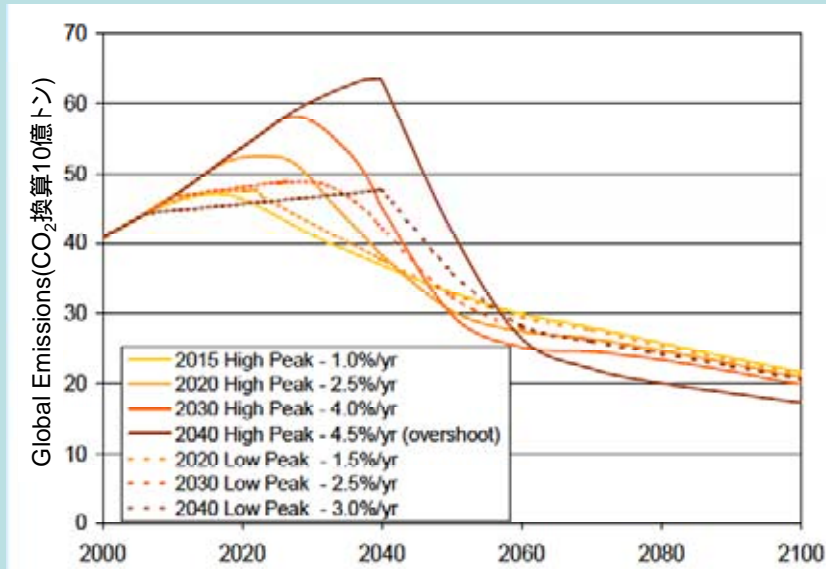
Greenhouse-gas emissions can be cut in four ways. Costs will differ considerably depending on which combination of these methods is used, and in which sector:

- Reducing demand for emissions-intensive goods and services
- Increased efficiency, which can save both money and emissions
- Action on non-energy emissions, such as avoiding deforestation
- Switching to lower-carbon technologies for power, heat and transport

Estimating the costs of these changes can be done in two ways. One is to look at the resource costs of measures, including the introduction of low-carbon technologies and changes in land use, compared with the costs of the BAU alternative. This

図3 CO₂換算550ppmに安定化させる場合の排出量経路図

下図は、CO₂換算550ppmに安定化させるための排出経路を7通り示したものである。凡例に示された排出削減割合は、世界全体の排出削減割合を10年平均したものの最大値を示す。排出削減のタイミングを遅らせる（ピークが右に移動する）と、同じ安定化目標であっても、より迅速に排出削減を実施しなくてはならないことを示している。また、排出削減速度は、排出量のピーク値に大きく影響される。例えば、2020年のピーク値がCO₂換算520億トンではなく480億トンに低減できると、削減速度は年率2.5%から1.5%に減少する。



出典： Meinshausen, M. (2006)をもとにして、本レビュー用に作成。
 Meinshausen, M. (2006): 'What does a 2 ° C target mean for greenhouse gas concentrations? A brief analysis based on multi-gas emission pathways and several climate sensitivity uncertainty estimates', Avoiding dangerous climate change, in H.J. Schellnhuber et al. (eds.), Cambridge: Cambridge University Press, pp.265 - 280.

排出量を大幅に削減するためには、コストがかかる。本レビューでは、CO₂換算 500～550 ppm での安定化に伴う年間コストを、2050 年まで、GDP のおよそ 1%と予測している。これはきわめて高額であるものの、実現可能な水準である

これまで続いてきた排出量増加の流れを反転させ、現在水準と比較して 25%以上の削減を達成することは、きわめて大きな挑戦である。高炭素世界から低炭素世界にシフトするには、コストを負担することになるであろう。しかし、世界構造のシフトに伴って、低炭素、高性能な機器やサービスを扱う市場の拡大など、ビジネスの好機もあろう。

温室効果ガス排出量を削減するためには、4 つの方策がある。削減コストは、手法の組み合わせと、対象とする部門の選択如何によって、大きく変化する。

- 温室効果ガス排出量の大きな機器や、サービスの需要を抑制する
- エネルギー効率を高め、エネルギーコスト抑制と排出量削減の両立を目指す
- 森林減少の防止など非エネルギー起源の排出対策の推進
- 電力部門、熱供給部門、交通部門における低炭素技術への転換

上述のような方策実施に伴うコストは、2 種類の手法を用いて予測することが可能である。ひとつは、低炭素技術の導入と土地利用の変化を含む、それぞれの方法における資源コストを、BAU 選択時のコストと比較して考察する方法である。この方法によってコストの上限値を得られる。

provides an upper bound on costs, as it does not take account of opportunities to respond involving reductions in demand for high-carbon goods and services.

The second is to use macroeconomic models to explore the system-wide effects of the transition to a low-carbon energy economy. These can be useful in tracking the dynamic interactions of different factors over time, including the response of economies to changes in prices. But they can be complex, with their results affected by a whole range of assumptions.

On the basis of these two methods, central estimate is that stabilisation of greenhouse gases at levels of 500-550ppm CO₂e will cost, on average, around 1% of annual global GDP by 2050. This is significant, but is fully consistent with continued growth and development, in contrast with unabated climate change, which will eventually pose significant threats to growth.

Resource cost estimates suggest that an upper bound for the expected annual cost of emissions reductions consistent with a trajectory leading to stabilisation at 550ppm CO₂e is likely to be around 1% of GDP by 2050.

This Review has considered in detail the potential for, and costs of, technologies and measures to cut emissions across different sectors. As with the impacts of climate change, this is subject to important uncertainties. These include the difficulties of estimating the costs of technologies several decades into the future, as well as the way in which fossil-fuel prices evolve in the future. It is also hard to know how people will respond to price changes.

The precise evolution of the mitigation effort, and the composition across sectors of emissions reductions, will therefore depend on all these factors. But it is possible to make a central projection of costs across a portfolio of likely options, subject to a range.

The technical potential for efficiency improvements to reduce emissions and costs is substantial. Over the past century, efficiency in energy supply improved ten-fold or more in developed countries, and the possibilities for further gains are far from being exhausted. Studies by the International Energy Agency show that, by 2050, energy efficiency has the potential to be the biggest single source of emissions savings in the energy sector. This would have both environmental and economic benefits: energy-efficiency measures cut waste and often save money.

Non-energy emissions make up one-third of total greenhouse-gas emissions; action here will make an important contribution. A substantial body of evidence suggests that action to prevent further deforestation would be relatively cheap compared with other types of mitigation, if the right policies and institutional structures are put in place.

Large-scale uptake of a range of clean power, heat, and transport technologies is required for radical emission cuts in the medium to long term. The power sector around the world will have to be least 60%, and perhaps as much as 75%, decarbonised by 2050 to stabilise at or below 550ppm CO₂e. Deep cuts in the transport sector are likely to be more difficult in the shorter term, but will ultimately be needed. While many of the technologies to achieve this already exist, the priority is to bring down their costs so that they are competitive with fossil-fuel alternatives under a carbon-pricing policy regime.

なぜならば、この方法では高炭素機器や高炭素サービスの需要を下げることなどによって起こる新しいビジネスの好機については配慮しないからである。

二つ目は、低炭素エネルギー経済への転換による効果を、経済システム全体で見るために、マクロ経済モデルを使う方法である。これは、価格の変化に対する経済の反応など、異なった要因の長期間に及ぶ動的な相互作用を追うには有効な方法である。しかし、この方法は大変複雑で、一連の仮定の範囲によって結果が左右されるということがある。

この二つの方法に基づいた代表的な予測によると、温室効果ガスを CO₂ 換算 500 ~ 550 ppm に安定化させるためには、2050 年までに平均しておよそ年間 GDP の 1% のコストが必要とされている。これは、かなり高い値ではある。しかし、最終的には成長に対して非常に大きな脅威となる衰えない気候変動とは対照的に、成長と発展の継続と矛盾しないものである。

資源コストの予測値は、CO₂ 換算 550 ppm での安定化に向かう排出削減にかかる 2050 年までの年間のコストの上限値が、GDP の 1% であろうと示唆している

本レビューでは、異なる部門を通じて排出削減のための技術と方策の可能性とそのコストが、詳細に検討された。その可能性とコストは、気候変動の影響とともに、重大な不確実性に左右される。この不確実性には、この先数十年にわたる技術のコストを予測することの困難さと、化石燃料の価格の将来的な展開の道筋を含む。また、化石燃料の価格の変化に対し、人々がどのように反応するかも、また知ることは難しい。

排出削減の努力を的確に展開することと、排出削減の部門を超えた取り組みは、これらの要因に依存している。しかし、ある範囲に対して、起こりうるオプションのポートフォリオ^{***}間のコストの代表的な予測を行うことは可能である。

技術による排出量削減とコスト低減のための効率性のポテンシャルは非常に大きい。過去 1 世紀では、エネルギー供給の効率性は、先進国では 10 倍あるいはそれ以上に改善され、さらなる改善の可能性は、改善策が出尽くす可能性よりもはるかに大きい。国際エネルギー機関の研究によると、2050 年までは、エネルギー効率の改善が、エネルギー部門における排出削減の最も大きい単独の要因として可能性があると考えられている。このエネルギー効率の改善は環境と経済の両方に便益をもたらす。エネルギー効率を改善させると、無駄が省けるのみならず、しばしば費用の節約になるからである。

温室効果ガスの全排出量の 3 分の 1 は、非エネルギーによるものである。それゆえ、ここでの対策は大きな効果がある。知見のかなりの部分が、もし適切な政策と制度的な仕組みが整備されるならば、これ以上の森林減少を抑制するという対策は、他の緩和策に比べて比較的安価に行えることを示唆している。

クリーンな電力、暖房、交通の技術を大規模に取り入れることが、中長期にわたる大幅な排出削減を行う上で必要である。CO₂ 換算 550 ppm あるいはそれ以下で安定化させるためには、世界中の電力部門が、2050 年までに少なくとも 60%、あるいは 75% の脱炭素化（排出量削減）を図る必要がある。運輸部門における大幅な削減は、短期的には難しいかもしれないが、長期的には必要である。これらの削減を達成するような多くの技術は既に存在しているが、まずやらなくてはならないのは、これらの技術のコストを下げ、それが炭素の価格付け政策の下で、化石燃料の代替として競争力のあるものにするということである。

^{***} [訳注] もとは金融用語で、機関投資家の資産運用に際し、最も有利な分散投資を選択すること。ここでは、安全性や費用対効果などを考慮した、より良い対策技術の組み合わせを意味する。

A portfolio of technologies will be required to stabilise emissions. It is highly unlikely that any single technology will deliver all the necessary emission savings, because all technologies are subject to constraints of some kind, and because of the wide range of activities and sectors that generate greenhouse-gas emissions. It is also uncertain which technologies will turn out to be cheapest. Hence a portfolio will be required for low-cost abatement.

The shift to a low-carbon global economy will take place against the background of an abundant supply of fossil fuels. That is to say, the stocks of hydrocarbons that are profitable to extract (under current policies) are more than enough to take the world to levels of greenhouse-gas concentrations well beyond 750ppm CO₂e, with very dangerous consequences. Indeed, under BAU, energy users are likely to switch towards more carbon-intensive coal and oil shales, increasing rates of emissions growth.

Even with very strong expansion of the use of renewable energy and other low-carbon energy sources, hydrocarbons may still make over half of global energy supply in 2050. Extensive carbon capture and storage would allow this continued use of fossil fuels without damage to the atmosphere, and also guard against the danger of strong climate-change policy being undermined at some stage by falls in fossil-fuel prices.

Estimates based on the likely costs of these methods of emissions reduction show that the annual costs of stabilising at around 550ppm CO₂e are likely to be around 1% of global GDP by 2050, with a range from -1% (net gains) to +3.5% of GDP.

Looking at broader macroeconomic models confirms these estimates.

The second approach adopted by the Review was based comparisons of a broad range of macro-economic model estimates (such as that presented in Figure 4 below). This comparison found that the costs for stabilisation at 500-550ppm CO₂e were centred on 1% of GDP by 2050, with a range of -2% to +5% of GDP. The range reflects a number of factors, including the pace of technological innovation and the efficiency with which policy is applied across the globe: the faster the innovation and the greater the efficiency, the lower the cost. These factors can be influenced by policy.

The average expected cost is likely to remain around 1% of GDP from mid-century, but the range of estimates around the 1% diverges strongly thereafter, with some falling and others rising sharply by 2100, reflecting the greater uncertainty about the costs of seeking out ever more innovative methods of mitigation.

排出を安定化させるためには技術のポートフォリオが必要である。いかなる技術でも、単独では必要な排出抑制を達成することは出来ない。なぜならば、全ての技術は何かしらの制約を持つが、温室効果ガスは様々な種類の活動や部門から排出されるからである。また、どの技術が結果的に最も安価となるかもわからない。したがって、低コストで排出削減を実施するためには、技術のポートフォリオが必要となる。

世界的な低炭素経済への転換は、化石燃料の十分な供給がある状況とは反対の場面で起こる。つまり、現在の政策の下で収益性のある炭化水素の貯蔵量は、世界の温室効果ガス濃度をCO₂換算 750 ppm を超えるのに十分な量であり、これは、極めて危険な結果を生み出す水準である。実際、BAU においては、排出量の増加により、炭素集約度の高い石炭やオイルシェールに移行することが予想されている。

たとえ再生可能エネルギーや他の低炭素型のエネルギー源の使用の拡大が優勢になったとしても、2050年の時点では、炭化水素は世界のエネルギー供給の半分以上を支え続けるであろう。炭素隔離貯留技術の拡大は、大気へ被害を与えることなく化石燃料の使用の継続を可能にするものである。またこの技術は、化石燃料価格の下落によって弱体化する気候変動政策の危機から守ってくれる。

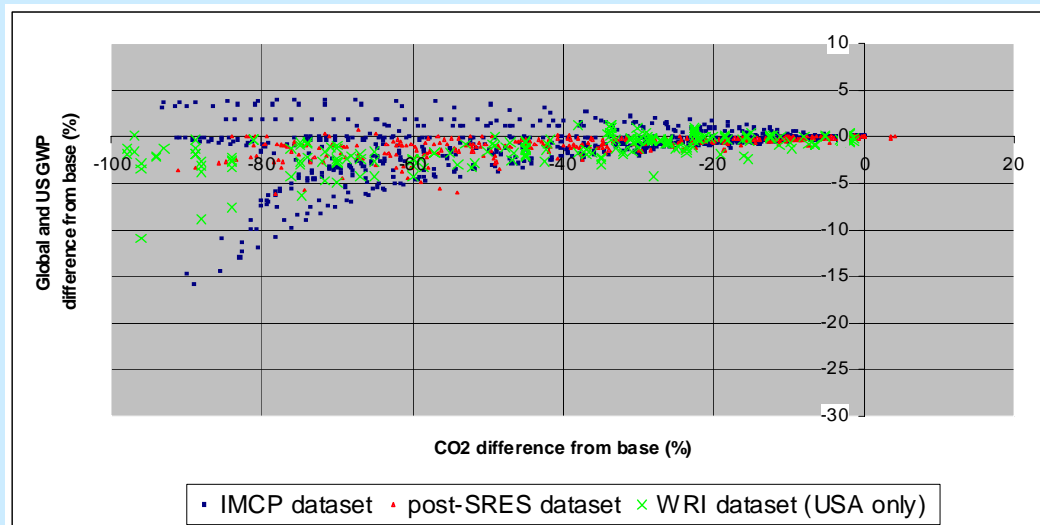
それぞれの予測される排出削減技術のコストを元にした計算によると、CO₂換算 550 ppm に安定化させるために2050年までに必要となる年間のコストは、世界のGDPのおよそ1%であり、GDPの-1%（純益）から+3.5%までの幅があると予測される。

より一般的なマクロ経済モデルも、上述の予測を支持している

本レビューでコストの予測のために採用された第二の方法は、下記の図4に示したような、様々な一般的なマクロ経済モデルによる予測の比較を元にするものである。この比較によって、CO₂換算 500~550 ppmでの安定化させるためのコストは、2050年までの世界のGDPの1%を中心として、-2%から+5%までの幅になることがわかった。この数字の幅は、技術革新のスピードや世界中で実行される施策の効率性など、多くの要因を反映している。技術革新が早ければ早いほど、効率性が高ければ高いほど、コストは低くなる。これらの要素は政策に左右される。

予測されるコストの平均値は、今世紀中ごろまではGDPの1%あたりにとどまる。それ以降は、予測値のばらつきは大きくなっていき、下がるものもあれば、2100年までに大きく増加するものもある。このばらつきは、より革新的な緩和策を見つけるためのコストに関する不確実性の大きさに起因するものである。

Figure 4 Model cost projections scatter plot
Costs of CO₂ reductions as a fraction of world GDP against level of reduction



Source: Barker, T., M.S. Qureshi and J. Köhler (2006): 'The costs of greenhouse-gas mitigation with induced technological change: A Meta-Analysis of estimates in the literature', 4CMR, Cambridge Centre for Climate Change Mitigation Research, Cambridge: University of Cambridge.

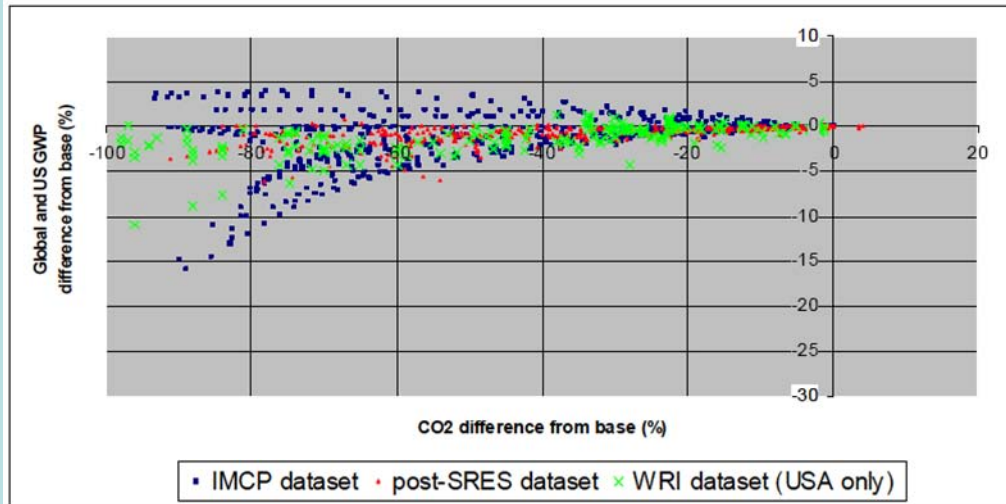
A broad range of modelling studies, which include exercises undertaken by the IMCP, EMF and USCCSP as well as work commissioned by the IPCC, show that costs for 2050 consistent with an emissions trajectory leading to stabilisation at around 500-550ppm CO₂e are clustered in the range of -2% to 5% of GDP, with an average around 1% of GDP. The range reflects uncertainties over the scale of mitigation required, the pace of technological innovation and the degree of policy flexibility.

The figure above uses Barker's combined three-model dataset to show the reduction in annual CO₂ emissions from the baseline and the associated changes in world GDP. The wide range of model results reflects the design of the models and the choice of assumptions included within them, which itself reflects uncertainties and differing approaches inherent in projecting the future. This shows that the full range of estimates drawn from a variety of stabilisation paths and years extends from -4% of GDP (that is, net gains) to +15% of GDP costs, but this mainly reflects outlying studies; most estimates are still centred around 1% of GDP. In particular, the models arriving at higher cost estimates make assumptions about technological progress that are very pessimistic by historical standards.

Stabilisation at 450ppm CO₂e is already almost out of reach, given that we are likely to reach this level within ten years and that there are real difficulties of making the sharp reductions required with current and foreseeable technologies. Costs rise significantly as mitigation efforts become more ambitious or sudden. Efforts to reduce emissions rapidly are likely to be very costly.

An important corollary is that there is a high price to delay. Delay in taking action on climate change would make it necessary to accept both more climate change and, eventually, higher mitigation costs. Weak action in the next 10-20 years would put stabilisation even at 550ppm CO₂e beyond reach – and this level is already associated with significant risks.

図4 各種モデルによる対策費用予測値のプロット図
CO₂削減率と世界GDPに占める削減費用の割合の比較



出典: Barker, T., M.S. Qureshi and J. Köhler (2006): 'The costs of greenhouse-gas mitigation with induced technological change: A Meta-Analysis of estimates in the literature', 4CMR, Cambridge Centre for Climate Change Mitigation Research, Cambridge: University of Cambridge.

IPCCより委託された研究に加え、IMCP、EMF、USCCSPによるモデル比較研究から得られた分析結果によると、CO₂換算500～550ppmに安定化するためには、2050年における必要な対策コストはGDP比-2%～5%の範囲にあり、平均では1%になることがわかった。幅があるのは、対策の必要度合い、技術革新のスピード、政策の柔軟性等において不確実性があるためである。

上図は、Barker博士によって示された3つのモデルデータセットを組み合わせたものであり、ベースラインからの年間排出量の変化とそれに伴うGDPの変化を示したものである。モデルから得られた結果の幅は、モデル構造と仮定条件の違いを表しており、不確実性と未来の推測に用いたアプローチの違いが反映されている。さまざまな安定化経路と目標年があるものの、全体的に見るとGDPの変化は、-4%(すなわち、純便益をもたらす)～+15%の範囲に見積もられている。解析結果の多くが、GDP変化率1%付近に集中している。費用を高額に見積もっているモデルには、技術進歩を悲観的に想定しているという特徴がある。

CO₂換算値 450 ppm での安定化は、既に手の届かないものになっている。というのは、今後10年以内にこのレベルに達する公算が高く、現在のそして今見通しの立つ技術を用いたとしても、急激な削減はきわめて難しいからである。緩和策をより大規模かつ早急に実施する努力が必要になるが、コストは大きく増大してしまう。排出量を急激に下げる努力は、きわめて高くつく。

重要な帰結の一つは、対応の遅れは高くつくということである。気候変動対策への対応の遅れは、より多くの気候変動と、結果的にはより高額な緩和策へのコストの両方を受け入れることが必須である。今後10年から20年間に実施される対策が弱いものであるなら、CO₂換算550 ppmの安定化ですら、手の届かないものになってしまう、しかもこのレベルでさえ深刻なリスクがあるかもしれない。

The transition to a low-carbon economy will bring challenges for competitiveness but also opportunities for growth.

Costs of mitigation of around 1% of GDP are small relative to the costs and risks of climate change that will be avoided. However, for some countries and some sectors, the costs will be higher. There may be some impacts on the competitiveness of a small number of internationally traded products and processes. These should not be overestimated, and can be reduced or eliminated if countries or sectors act together; nevertheless, there will be a transition to be managed. For the economy as a whole, there will be benefits from innovation that will offset some of these costs. All economies undergo continuous structural change; the most successful economies are those that have the flexibility and dynamism to embrace the change.

There are also significant new opportunities across a wide range of industries and services. Markets for low-carbon energy products are likely to be worth at least \$500bn per year by 2050, and perhaps much more. Individual companies and countries should position themselves to take advantage of these opportunities.

Climate-change policy can help to root out existing inefficiencies. At the company level, implementing climate policies may draw attention to money-saving opportunities. At the economy-wide level, climate-change policy may be a lever for reforming inefficient energy systems and removing distorting energy subsidies, on which governments around the world currently spend around \$250bn a year.

Policies on climate change can also help to achieve other objectives. These co-benefits can significantly reduce the overall cost to the economy of reducing greenhouse-gas emissions. If climate policy is designed well, it can, for example, contribute to reducing ill-health and mortality from air pollution, and to preserving forests that contain a significant proportion of the world's biodiversity.

National objectives for energy security can also be pursued alongside climate change objectives. Energy efficiency and diversification of energy sources and supplies support energy security, as do clear long-term policy frameworks for investors in power generation. Carbon capture and storage is essential to maintain the role of coal in providing secure and reliable energy for many economies.

Reducing the expected adverse impacts of climate change is therefore both highly desirable and feasible.

This conclusion follows from a comparison of the above estimates of the costs of mitigation with the high costs of inaction described from our first two methods (the aggregated and the disaggregated) of assessing the risks and costs of climate change impacts.

The third approach to analysing the costs and benefits of action on climate change adopted by this Review compares the marginal costs of abatement with the social cost of carbon. This approach compares estimates of the changes in the expected benefits and costs over time from a little extra reduction in emissions, and avoids large-scale formal economic models.

Preliminary calculations adopting the approach to valuation taken in this Review suggest that the social cost of carbon today, if we remain on a BAU trajectory, is of the order of \$85 per tonne of CO₂ - higher than typical numbers in the literature, largely because we treat risk explicitly and incorporate recent evidence on the risks,

低炭素経済への転換は競争力という点からは大きな挑戦であるが、一方、経済成長への好機でもある

緩和策に要するコストは、GDPの1%であるが、それによって避けうる気候変動に伴う被害額とリスクに比べると小さいものである。しかしながら、いくつかの国やセクターにとっては、コストはより高額となる。国際的に取引される製品や国際取引行為において、その競争力になんらかの影響が出ることも中にはあるかもしれない。この影響は過大評価されるべきものではなく、また関係各国やセクターが協調行動をとることによって影響を低減あるいは解消することができる。いずれにせよ、低炭素経済への転換は可能である。経済全体としてみれば、これらのコストを相殺できるような、技術革新による便益がある。すべての経済は常に構造の変化にさらされており、最もうまくいっている経済というのは、そのような変化を受け入れるだけの柔軟性とダイナミズム^{†††}を持つものである。

また、様々な産業、サービスにわたって、かなりの新ビジネスの好機がある。低炭素エネルギー製品の市場は2050年までに、少なくとも5千億ドルあるいはそれ以上に上ることが見込める。それぞれの会社や国は、このビジネスの好機を生かすように自らを位置づけるべきである。

気候変動への対策は、現存する非効率性を根絶する一助となる可能性がある。企業レベルでは、気候対策の導入は、経費を節約するチャンスに目を向ける機会になるかもしれない。経済全体のレベルでは、気候変動対策は、非効率なエネルギーシステムを改善するよい機会である。また、世界全体では現在年間2千5百億ドルがエネルギーへの補助金として支出されているが、このような偏った政府補助金を修正する機会になるかもしれない。

気候変動対策は、それ以外の目的を達することへの助けになり得る。そのような副次的便益は、温室効果ガス排出削減に伴う全体的な経済的コストを大きく下げる可能性がある。もし気候対策がよく練られたものであるなら、例えば大気汚染による健康被害や死亡が減ったり、世界の生物多様性の大きな割合を占めている森林が保全されたりすることに貢献する。

エネルギー安全保障のための国家目標は、気候変動に関する目標と同時に達成でき得る。エネルギー効率の向上とエネルギー源および供給の分散化は、エネルギー安全保障に役立ち、発電設備に投資する人に対して長期的な政策枠組みを明らかにすることにも役立つ。炭素隔離貯留技術は、安全で信頼性の高いエネルギーである石炭を、多くの経済活動に供給するためにはきわめて重要である。

予期される気候変動の悪影響の低減は、きわめて価値があり、しかも実現可能である

この結論は、上述の緩和策にかかるコストの推定額と、最初に説明した何も対策をとらなかった場合の、気候変動のリスクとコストを推計する統合的手法と非統合的手法という二つの方法による、きわめて高いコストの推定額との比較から導かれるものである。

本レビューで採用された、気候変動への対策費用と便益を分析するための第三の方法は、炭素削減にかかる限界費用と炭素の社会的費用を比較するものである。この方法は、追加的な1単位の排出削減時の長期的な費用と便益の期待値の変化の見積もりを比較するもので、大規模な経済モデルを使わないものである。

本レビューで、この方法を採用するにあたり、予備的に行われた計算によると、炭素の今日の社会的費用は、もし我々がBAUの軌道をたどりつづけると仮定すると、CO₂ 1トンあたり、ほぼ85ドル程度になると推定される。これは文献等で一般に言われているよりも高い価格になるが、その理由の大きなものとしては、我々がリスクをきちんと取り扱い、リスクに関する最新の知見を取り込んだことがあげられる。しかし、この価格帯は、今まで発表された予測価格帯の範囲にはいるものである。そして、この数字は、多くの部門で、限界削減費用に

^{†††} [訳注] あらゆる現象を要素間の力関係でもって説明しようとする考え方。経済では、様々な主体（企業、政府、個人）が有機的に連係し、共同して利益を追求すること。

but nevertheless well within the range of published estimates. This number is well above marginal abatement costs in many sectors. Comparing the social costs of carbon on a BAU trajectory and on a path towards stabilisation at 550ppm CO₂e, we estimate the excess of benefits over costs, in net present value terms, from implementing strong mitigation policies this year, shifting the world onto the better path: the net benefits would be of the order of \$2.5 trillion. This figure will increase over time. This is not an estimate of net benefits occurring in this year, but a measure of the benefits that could flow from actions taken this year; many of the costs and benefits would be in the medium to long term.

Even if we have sensible policies in place, the social cost of carbon will also rise steadily over time, making more and more technological options for mitigation cost-effective. This does not mean that consumers will always face rising prices for the goods and services that they currently enjoy, as innovation driven by strong policy will ultimately reduce the carbon intensity of our economies, and consumers will then see reductions in the prices that they pay as low-carbon technologies mature.

The three approaches to the analysis of the costs of climate change used in the Review all point to the desirability of strong action, given estimates of the costs of action on mitigation. But how much action? The Review goes on to examine the economics of this question.

The current evidence suggests aiming for stabilisation somewhere within the range 450 - 550ppm CO₂e. Anything higher would substantially increase the risks of very harmful impacts while reducing the expected costs of mitigation by comparatively little. Aiming for the lower end of this range would mean that the costs of mitigation would be likely to rise rapidly. Anything lower would certainly impose very high adjustment costs in the near term for small gains and might not even be feasible, not least because of past delays in taking strong action.

Uncertainty is an argument for a more, not less, demanding goal, because of the size of the adverse climate-change impacts in the worst-case scenarios.

The ultimate concentration of greenhouse gases determines the trajectory for estimates of the social cost of carbon; these also reflect the particular ethical judgements and approach to the treatment of uncertainty embodied in the modelling. Preliminary work for this Review suggests that, if the target were between 450-550ppm CO₂e, then the social cost of carbon would start in the region of \$25-30 per tonne of CO₂ – around one third of the level if the world stays with BAU.

The social cost of carbon is likely to increase steadily over time because marginal damages increase with the stock of GHGs in the atmosphere, and that stock rises over time. Policy should therefore ensure that abatement efforts at the margin also intensify over time. But it should also foster the development of technology that can drive down the average costs of abatement; although pricing carbon, by itself, will not be sufficient to bring forth all the necessary innovation, particularly in the early years.

The first half of the Review therefore demonstrates that strong action on climate change, including both mitigation and adaptation, is worthwhile, and suggests appropriate goals for climate-change policy.

The second half of the Review examines the appropriate form of such policy, and how it can be placed within a framework of international collective action.

リスクに関する最新の知見を取り込んだことがあげられる。しかし、この価格帯は、今まで発表された予測価格帯の範囲にはいるものである。そしてこの数字は、多くの部門で限界削減費用をはるかに上回るものである。BAUの道筋とCO₂換算 550 ppmでの安定化に向かう道筋との、両方の道筋における炭素の社会的費用を現在価値にて比較すると、強固な緩和策を今年中に実施し、世界をよりよい道筋に移行させることによって、便益がコストを上回ると予測され、その純便益は約 2 兆 5 千億ドル程度にのぼる。この数字は、時間が経つにつれて今後増加する可能性がある。この数字は、今年単年で発生する純便益ではなく、今年中にとられる対策から得られるであろう便益の評価額である。対策費用、便益とも中・長期にわたり生じるものである。

たとえ、我々が賢明な対策をとったとしても、長期的には炭素の社会的費用は徐々に上がり続ける。したがって、緩和策に関する技術の選択肢をより多く増やすことが、費用対効果を持つことになる。このことは、決して、一般消費者が、現在享受している商品やサービスの絶え間ない価格の上昇に直面しなければならないということではない。強力な政策によるイノベーションによって、結果的には我々の社会の炭素排出原単位を下げ、低炭素技術が成熟するにつれて、消費者は彼らが支払う費用を低減できることになるからである。

気候変動に関する対策費用の分析のために、本レビューで使われた 3 つの手法のいずれもが、緩和策にかかる費用の予測から見て、強固な行動をとることが望ましいということを示している。しかし、どの程度の対策が必要なのか、本レビューは、この問題について経済学的な考察を続けるものである。

現在、我々の持っている知見は、CO₂換算 450~550 ppmの範囲のどこかで、安定化を目指すべきことを示唆している。これより高い値では、緩和策に必要な費用を下げることはできるが、きわめて危険な影響の起こるリスクが実質的に増大する。また、この範囲の下限値を目指すとなると、緩和策にかかる費用が急激に増大すると予測される。下限値以下では、短期間で適応策にかかる費用が極めて大きくなり、その見返りも少ない。さらに言うと、すでに強固な対策をとることについて遅れをとっているために、その達成は実現可能ではないかもしれない。

最悪のケースを想定したシナリオの中で描かれる、気候変動の悪影響の大きさに鑑みると、不確実性は、より厳しい要求をする目標の設定についての議論となる。

最終的に達成すべき温室効果ガスの濃度が、炭素の社会的費用の見積もりの道筋を決定づける。予測の道筋は、ある種の倫理的判断やモデルに内在する不確実性をどのように扱うかにも反映する。本レビューに先立つ予備的な研究では、もし達成目標がCO₂換算 450~550 ppmに設定されるならば、炭素の社会的費用はCO₂ 1 トンあたり 25~30 ドルの範囲の値から始まると予測される。この値は、もし世界がBAUの道筋にとどまると仮定した場合の約 3 分の 1 である。

大気中の温室効果ガスの蓄積量が増えるにつれ、限界損失^{***}が増えることになる。また、蓄積量そのものも時間が経つにつれて増加する。その結果、炭素の社会的費用は徐々に上がり続ける。したがって、対策も、限界点での軽減の努力が時間とともに強化されるようにしなければならない。しかし、特に初期段階においては、必要となるイノベーションのすべてに結びつくような十分な炭素価格ではないにしても、その対策は、温室効果ガス削減の平均費用を下げうるような技術開発を促進するものでなければならない。

本レビューの前半では、緩和策と適応策の両者を含む、気候変動に対する強固な対策は、実施する値打ちがあるものであるということを明らかにし、また、気候変動対策における適切な目標についての提言を行った。

本レビューの後半では、そのような気候変動対策がどのような形式をとるのか、また、国際的な共同作業の枠組みの中で、その対策がどのように位置づけられるかを検討する。

^{***} [訳注] ある財（ここでは温室効果ガス）を 1 単位だけ増加させることに伴う総費用の減少(損失)分。