

## 地球環境国際研究推進事業「脱地球温暖化と持続的発展可能な経済社会実現のための対応戦略の研究－ALPS プロジェクト (ALternative Pathways toward Sustainable development and climate stabilization)」

－ 多目的多様な世界を前提とした下での人類が選択し得る脱地球温暖化と持続的発展可能な経済社会実現に向けたシナリオの開発

### ■ 背景・目的

これまでも気候変動緩和のシナリオ策定は多く行われてきた。それらは温暖化対策、政策の立案に一定の貢献を行ってきた。しかしながら、シナリオ策定のためのモデル分析は、単純化されて世界全体で最も費用効果的な温暖化対策シナリオを示すようなものが多い。ところが、COP15をはじめとしたこれまでの地球温暖化対応のための国際交渉や各国国内での対応を見ても、各国は多様な目的を有し、また、国によって経済発展段階は異なり、また優先される政策課題も異なっている。多様な目的をバランスさせた中で温暖化対応をとらざるを得ないのが現実である。このような現実の世界を改めて見つめると、従来の温暖化対策モデル分析による温暖化対策シナリオ策定は、単純にすぎ、その他の多様性の部分を捨象してしまい、実態との乖離が大きく、時として、むしろ、世界の温暖化対策、政策立案を混乱させるものにもなっている。

本研究では、社会は多様で多目的であることを前提とし、それをシナリオとして定性的、そしてできる限り定量的に描き出すことによって、多様、多目的な社会の中で、温暖化対応ひいては持続可能な発展につながるより良い意思決定ができるよう、情報提供を行うことを目的としている。また、温暖化対策、持続可能な発展は、長期的かつ幅広い視点でとらえ、対応を考えることが不可欠である一方、短中期的な対応は、国別、セクター別、技術別に着実に対策を積み上げていくことになる。すなわち、マクロの視点とミクロの視点の両者を融合したシナリオ策定が、温暖化対策そしてより大きく持続可能な発展を目指すために求められている。

### ■ 叙事的シナリオの策定

現実の社会は多様で複雑である。モデル分析は、ある合理的なシナリオを導くことができ、意思決定サポートのツールとして大変有用であるが、一方で、現実社会の多くを捨象せざるを得ず、時として誤ったメッセージを発信してしまうこともある。本研究開発プロジェクトでは、モデルによる定量的な分析に先だて、より広く、より深く、現実社会の動向の把握に努めるとともに、それを基に叙事的なシナリオの策定を行ってきた。これを通して、モデル分析のみに頼ると落としてしまいがちな、社会状況全体を踏まえ、大きくかつ詳細なシナリオ策定を行っている。

叙事的シナリオは、1)社会経済状況に関するシナリオ、2)温暖化政策実施における背景に関するシナリオ、3)排出削減レベルに関するシナリオ（濃度安定化レベル）について策定している。これに加え、サブシナリオとして、温暖化対策技術の開発普及状況等について策定している。（図1）

社会経済状況に関するシナリオは、その主要なドライビングフォースは技術の進歩であるとし、その不確実性の範囲として2種類の見通しを策定した。技術進歩は不確実であり、将来の革新性の高い技術を予期することは不確実性が高いと考えたためである。本来、政策によっても技術の進歩は変わり得るが、それ以上に意図しない不確実性が大きいものと考えた。シナリオは、これまでの奇跡的とも言える高経済成長から先進国を中心に次第に緩やかなる経済成長へと変化していく「中位技術進展シナリオ」（シナリオ A）と、奇跡的とも言える技術革新が今後も継続し一人当たり GDP 成長も大きく成長する「高位技術進展シナリオ」（シナリオ B）の2種類である。

温暖化政策実施における背景状況に関するシナリオは次の3種類である。シナリオ I 「多目的多様な社会シナリオ」は、現在の社会行動に近いことを前提としたシナリオである。このシナリオでは、温暖化対策技術普及の様々な障壁が存在することが表現される。シナリオ II は「温暖化対策優先シナリオ」であり、このシナリオにおいては、様々な目的の中で温暖化対策の優先度が高く、温暖化対策を

コスト効果的に実施することが優先されるシナリオである。シナリオ III は「エネルギー安全保障優先シナリオ」であり、エネルギー安全保障の視点から国内資源の利用が優先されるようなシナリオである。

排出削減レベルに関するシナリオは、IPCC が第 5 次評価報告書に向けた新シナリオのために選定した 4 つの排出シナリオ (RCP: Representative Concentration Pathway) に沿って、ベースライン (RCP では 2100 年に放射強制力が 8.5 W/m<sup>2</sup>)、RCP6.0 (6.0 W/m<sup>2</sup>)、RCP4.5 (4.5 W/m<sup>2</sup>)、RCP3PD (3W/m<sup>2</sup> をピークに 2100 年に 2.6 W/m<sup>2</sup>) の排出推移、およびこれに加えて 3.7 W/m<sup>2</sup> シナリオの 5 シナリオについて検討を行うこととした。

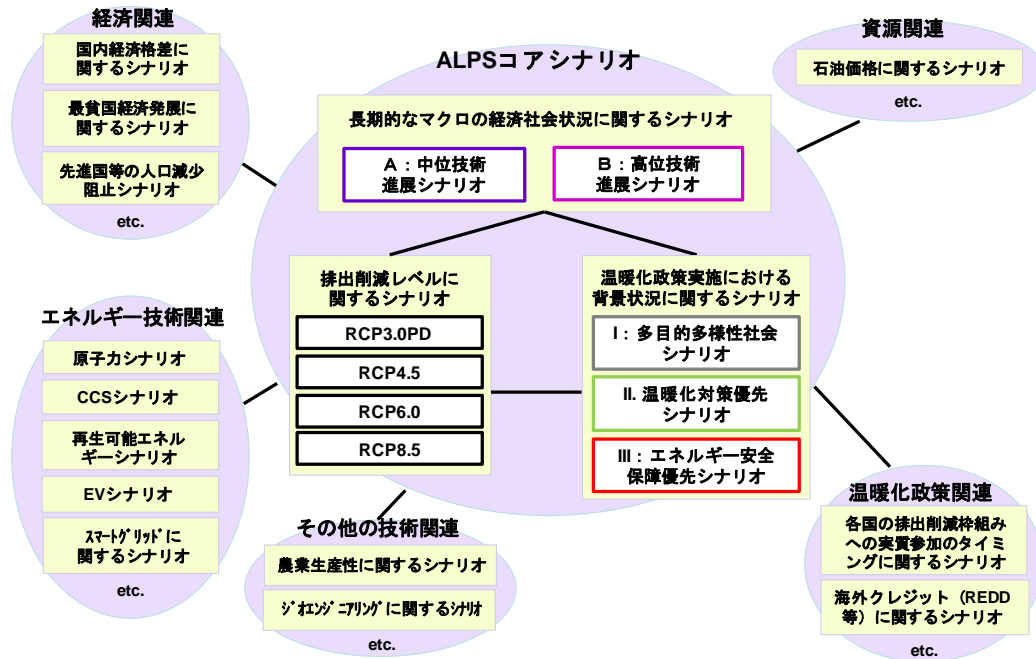


図 1 ALPS で策定予定のシナリオ

### ■ 各種モデルの開発

持続可能な発展の大きな文脈の中で、シナリオを策定するためには、温暖化に関連しつつも、より幅広い社会状況を評価できるモデルが必要である。本研究プロジェクトでは、RITE がこれまでに開発してきたモデルや、本研究プロジェクトにおいて新たに開発したモデルを総合的に利用して、シナリオ策定に取り組んでいる。

詳細な国別・セクター別・技術別のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出削減の分析が可能な DNE21+モデルや、食料需給・淡水資源・土地利用変化評価モデルなどのモデルによって、それぞれのシナリオを表現する各指標が、整合性を有するように定量的な分析を行うことができるようにしている。

また、国別・セクター別・技術別の対策の提示が重要である一方、温暖化対策、持続可能な発展は長期を考えた上での対応が不可欠である。そのため、短中期を扱う国別・セクター別・技術別評価が可能なモデル以外にも、気候変動、温暖化影響を考慮した評価が可能なより長期を対象に評価できるモデルも用いて、総合的なシナリオ策定に取り組んでいる。

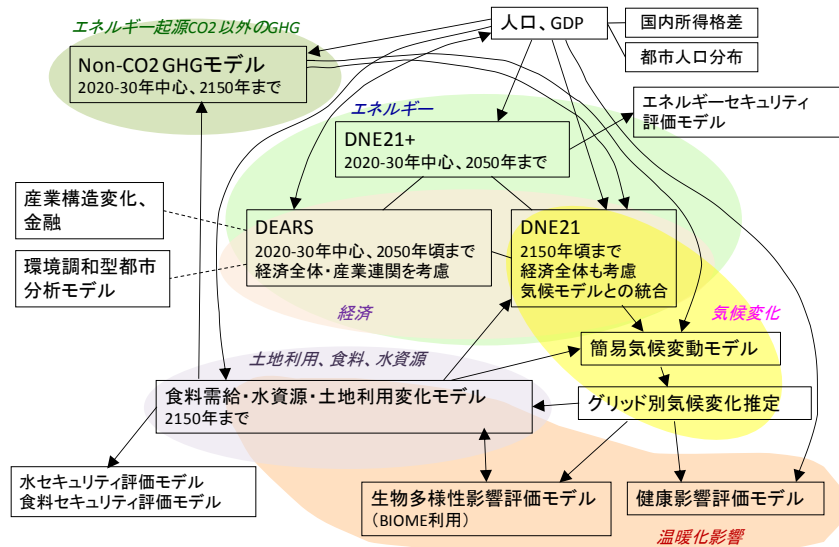


図2 ALPSの定量的シナリオ策定のためのモデル群

■ 現状の定量的な把握とそれに基づく将来見通し

温暖化問題は様々な社会経済状況と密接に関係しているため、より良い温暖化対応を考えるには、複雑な現状を正しく理解する必要がある。しかし、必ずしも簡単にはわからない指標も存在する。本研究では、マクロ、ミクロに様々な指標について、現状把握を行うとともに、将来の推定を行っている。

- 社会経済動向と将来シナリオ

叙事的シナリオにおいて規定した社会経済状況に関するシナリオの「A：中位技術進展シナリオ」、「B：高位技術進展シナリオ」に沿った定量的な社会経済シナリオは下図のように策定している。シナリオ A では、世界人口は中位成長であると想定し、国連 2008 中位推計を利用した。世界人口は、2050 年に 91 億人になり、それ以降は安定的に推移し 2100 年に 93 億人となる。一方、技術進展が進み経済成長が大きかったシナリオ B は、世界人口は低位に成長するものと想定し、国連推計(2008)の低位推計と中位推計の中間値に概ね相当するようなシナリオを想定した。シナリオ B の世界人口は、2000 年の 61 億人からゆっくりと成長し、2050 年頃に 86 億人でピークを迎え、2100 年にかけて 74 億人まで減少する。シナリオ A、B の 2000-2050 年の世界の年平均 GDP 成長率の見通しはそれぞれ 2.5%/年、2.8%/年、2000-2100 年はそれぞれ 2.0%/年、2.3%/年である。

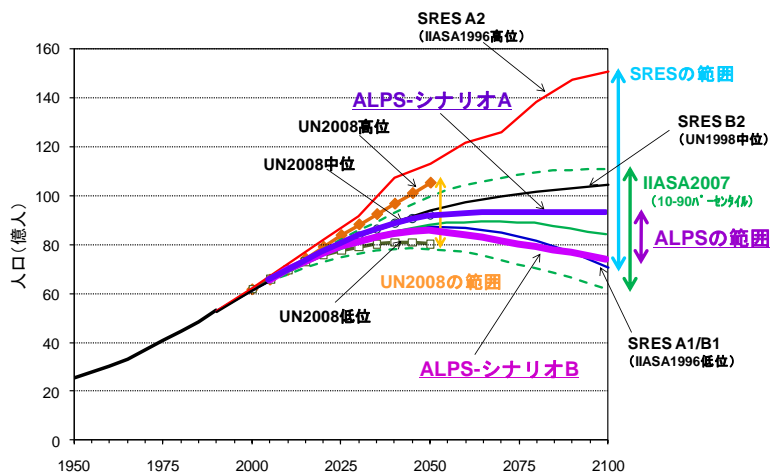


図3 世界の人口シナリオ

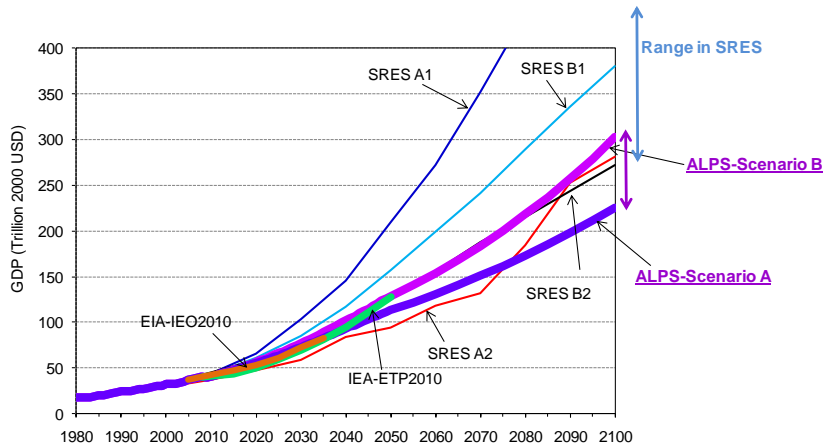


図4 世界のGDPシナリオ

注) 2008年までは統計値、2009年以降 RITE 見通し。SRES は IPCC 排出シナリオに関する特別報告書 (2000) におけるシナリオ。SRES シナリオは 1990 年価格のため、1990 年の 2000 年価格 GDP と一致するように補正して表示している。EIA-IEO2010 シナリオは 2005 年価格のため、2005 年の 2000 年価格 GDP と一致するように補正して表示している。IEA-ETP2010 シナリオは、PPP シナリオであるため、ALPS-シナリオ A の PPP/MER の比率(世界平均)を用いて世界 GDP(MER 換算)を推計した。

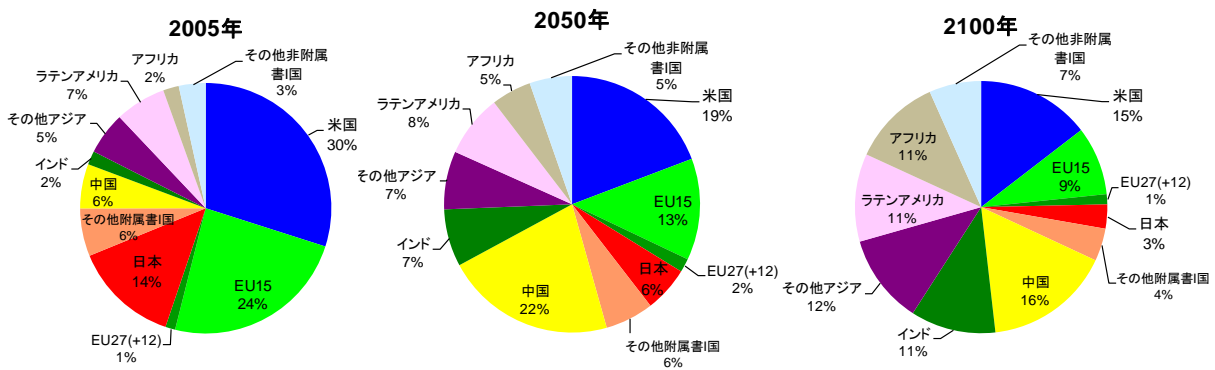


図5 シナリオ A における GDP の各国シェア

- 各国における現状のエネルギー効率

国別、セクター別に現状でどの程度のエネルギー効率を有する技術が導入されているのかを把握しておくことも、短中期の温暖化対策を検討するには重要である。マクロでの産業経済の状況把握に留まらず、セクター別、技術種類別のエネルギー効率の推定も調査、整理を行っている。

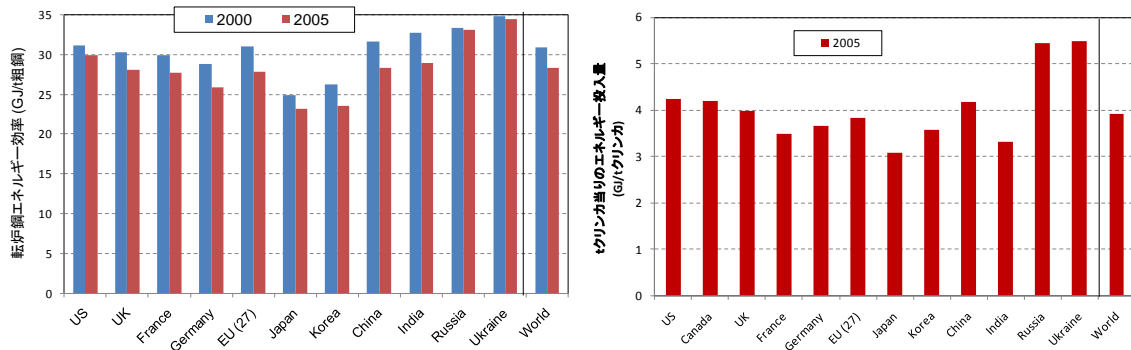


図6 鉄鋼、セメントにおける現状のエネルギー効率の推定 (RITE による推定。ただし、本推定は本研究開発プロジェクトにおける推定作業ではない。)

- 各種発電設備の発電コストと将来見通し

各種発電コスト等についても、最新の技術動向等を幅広く調査している。図7は時系列で見た発電コストであるが、原子力、石炭発電は現状では8~12円/kWh程度、天然ガスは10~14円/kWh程度、風力は16~18円/kWh程度、太陽光は55~63円/kWh程度である（送電費用込）。風力、太陽光は将来的にコスト低減が期待できるが、一方で、導入容量が大きくなるにしたがって、設置環境条件が悪くなったり、系統安定化のための追加費用が必要となったりするために、コストが増大する部分もある。導入量が小さい部分については、化石燃料発電や原子力発電のコストと比較的近くなると見込まれる部分もあるが、導入量を増やすと化石燃料発電や原子力発電よりも相当大きな発電コストを要すると見られる。

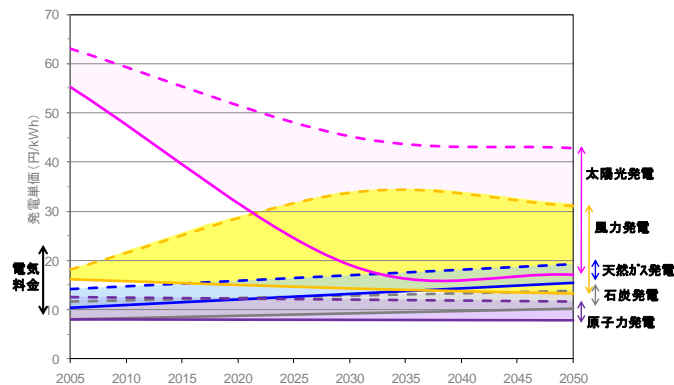


図7 日本における各種発電設備の発電単価および将来の見通し

- 粗鋼生産の見通し

粗鋼生産はエネルギー多消費であり、その動向はエネルギー消費量やCO<sub>2</sub>排出量に大きな影響を及ぼす。本研究開発においては、粗鋼生産量や鉄スクラップ利用可能量の見通しについても推定を行っている（図8、9）。世界の粗鋼生産量の見通しについては、中国は過去10年程度の間急激に粗鋼生産量が拡大してきたが、一人当たり見掛け粗鋼生産量などのデータを踏まえると、早晩、飽和傾向に移行すると見られる。一方、インドについては今後生産量の拡大が見込まれる。2050年の世界の粗鋼生産量は22億トン程度と推定した。銑鉄生産時に一定のエネルギー投入が不可欠であるため一般に銑鉄を主な鉄源とする転炉鋼とスクラップを主な鉄源とする電炉鋼ではエネルギー効率、CO<sub>2</sub>排出原単位が大きく異なる。そのため鉄鋼部門における将来のCO<sub>2</sub>排出量を分析する際に、電炉鋼すなわち鉄スクラップの利用可能量を推定しておくことも重要である。しかし、社会にどの程度、鉄が蓄積されているか、そのうちのどの程度が加工屑・老廃屑等として回収されているのかははっきりしていない。本研究では、様々なデータ、文献等を総合的に利用しつつ、2種類の推計方法で、世界の鉄スクラップ回収の将来推定も行っている。2050年には8~10億トン程度の鉄スクラップ（加工屑・老廃屑の合計の値）が回収可能と見込まれた。所内屑が1.5億トン程度と見込まれるため、所内屑、加工屑、老廃屑の合計では9.5~11.5億トン程度に相当と見られる。IEA(2009)の見通しは約12.5億トンと見積もられているが、本研究の2種類の推定方法によれば、それよりも3~1億トン程度小さいと見積もられる。



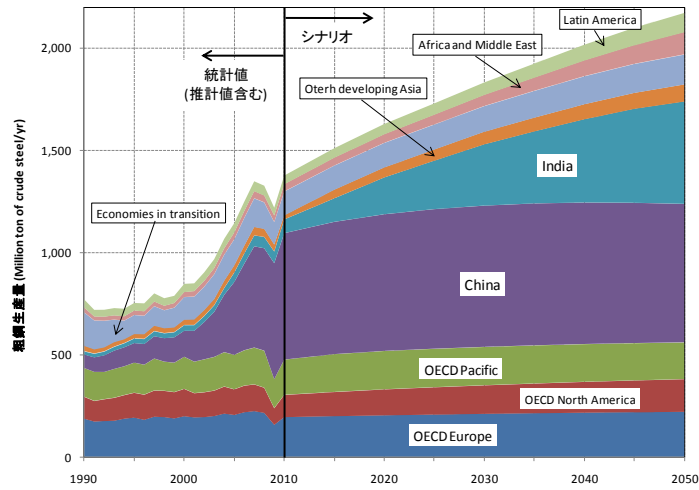


図8 地域別の粗鋼生産量実績と将来シナリオ

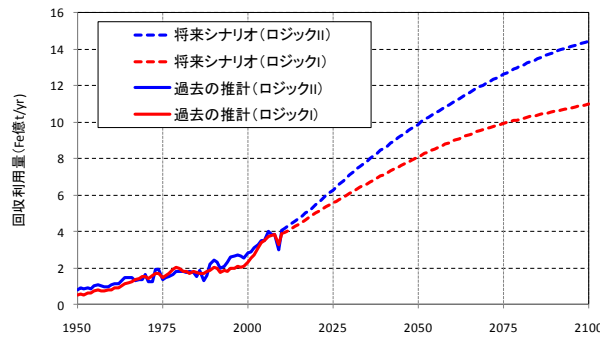


図9 世界の鉄スクラップ回収の実績と将来推定（加工屑および老廃屑の合計）

■ 温室効果ガス排出および削減の見通し

世界の温室効果ガス排出は、1990年では32 GtCO<sub>2</sub>eq.であったが、2005年には39 GtCO<sub>2</sub>eq.であり、特段の温室効果ガス排出削減を行わなければ、2020年には55 GtCO<sub>2</sub>、2050年には79 GtCO<sub>2</sub>程度となり、2050年には現在よりも2倍程度に増大すると見込まれる。特に途上国が経済成長に伴って大きく増大するとみられる。

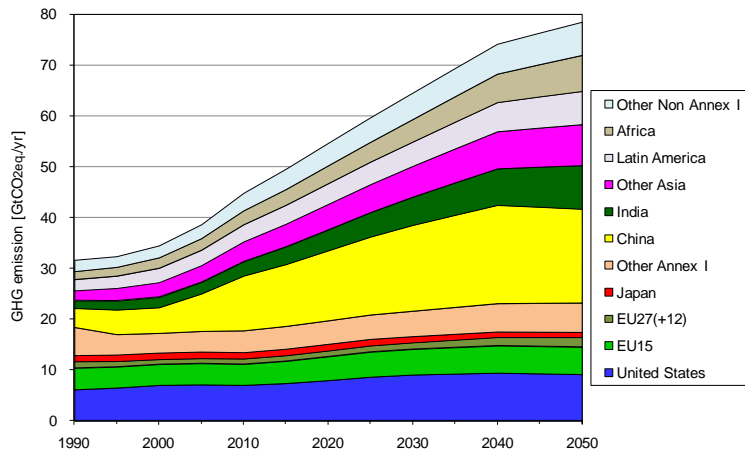


図10 世界のGHG排出量見通し

注) 2008年までは統計値、2009年以降はRITE DNE21+モデルによる分析。京都議定書が対象とする6種類の温室効果ガスを計上。ただし、土地利用変化CO<sub>2</sub>および国際海運・国際航空からのCO<sub>2</sub>排出は含まない。社会経済シナリオの想定はシナリオA「中位技術進展シナリオ」、また温暖化政策実施における背景状況に関するシナリオは、現在の社会行動に近いことを前提としたシナリオI「多目的多様性社会シナリオ」に基づく。

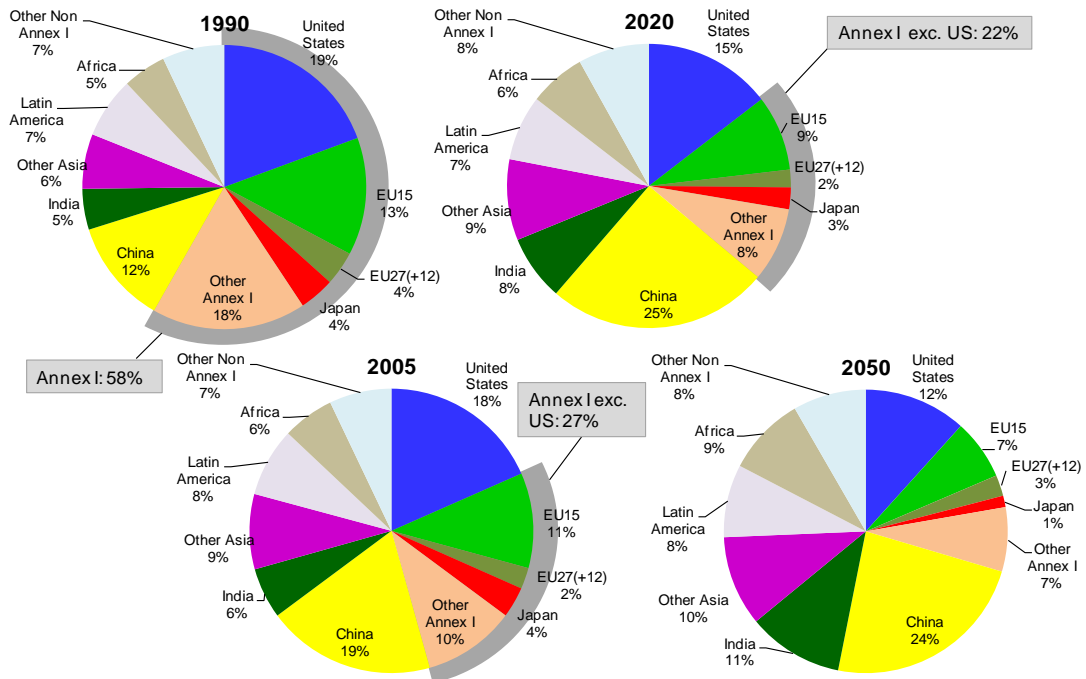


図 11 温室効果ガスの地域別のシェア

図 12、13 に、2050 年に世界排出量半減（世界のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量を 2005 年比で半減）のための技術別寄与度、地域別寄与度をそれぞれ示す。省エネによる削減効果が大きい。ただし、特に 2050 年では、原子力、再生可能エネルギー、二酸化炭素回収・貯留（CCS）の寄与大きい。地域別には途上国における削減が大きく、世界全体での取り組みが不可欠である。

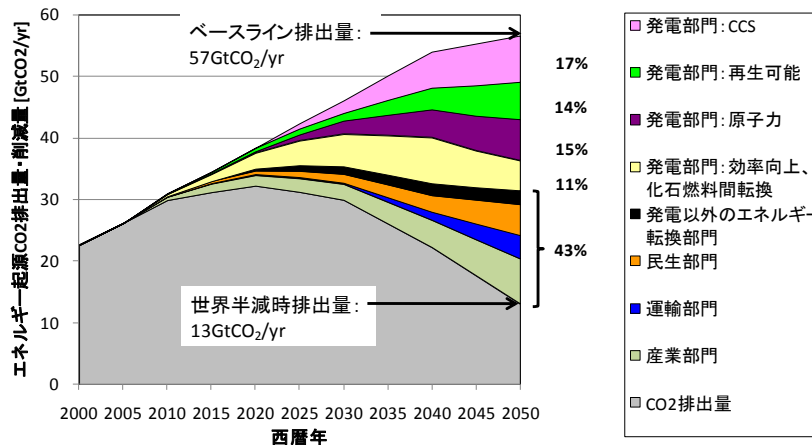


図 12 2050 年に世界排出量半減のための技術別寄与度（シナリオ A-I）

注) RITE DNE21+モデルによる分析。エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出のみ。ただし、国際海運・国際航空からの CO<sub>2</sub> 排出は含まない。

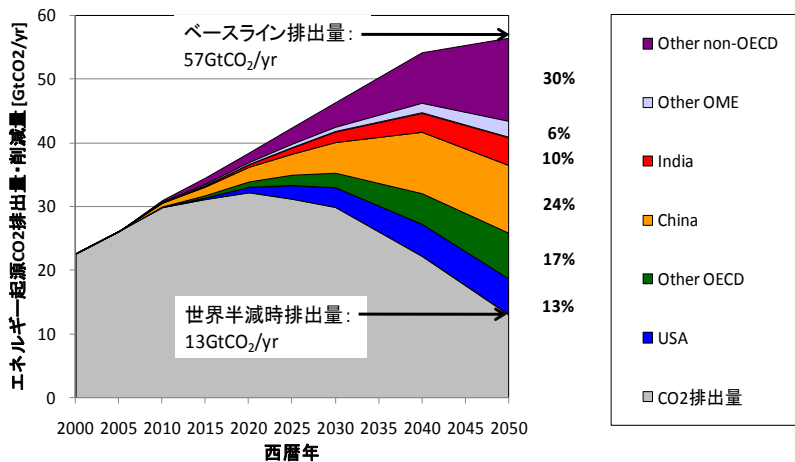


図 13 2050 年に世界排出量半減のための技術別寄与度 (シナリオ A-I)

■ 温暖化政策実施における背景状況に関するシナリオの分析

社会経済シナリオ A について、温暖化政策実施における背景状況に関するシナリオ (I、II、III) の差異に関して、DNE21+モデルによって 2050 年までの短中期のシナリオ策定、分析を実施した。現実社会における技術の選択では、様々な制約、要因によって、エネルギー効率が優れているからと言っても必ずしも技術選択がなされるわけではない。温暖化対策シナリオ I「多目的多様性シナリオ」では、現実社会の投資行動で観測されるような投資回収年数 (投資判断における主観的割引率) を想定した。シナリオ II「温暖化対策優先シナリオ」は投資判断における主観的割引率を現実社会で観測されるものよりも小さく想定した。図 14 は、シナリオ I と II の技術選択における違いのイメージである。また、シナリオ III「エネルギー安全保障シナリオ」は、石油、ガスの関税を他のシナリオよりも大きく想定することによってモデルで表現を行った。

図 15、16 には、シナリオ I、II、III のベースラインの世界の一次エネルギー供給量と発電電力構成を示す。シナリオ III では、原子力発電の比率がシナリオ I に比べて大きく、シナリオ II では、原子力発電の比率が大きいことに加え、初期設備費用は高いものの高効率な発電設備の導入量が多いシナリオとなっている。エネルギー需要部門においても省エネ機器の選択が進むシナリオ II では、総エネルギー消費量が他のシナリオよりも小さくなる。

図 17 は、世界排出量半減のときの限界削減費用のシナリオ I、II、III の比較だが、シナリオ I や III では現実社会における投資回収判断に依存するため、高い炭素価格をつけなければ半減が達成できないことがわかる。一方、シナリオ II では、シナリオ I、III に比べて限界削減費用を低減できる。これは炭素に明示的に価格付けを行っても実現できず、ボトムアップ的なきめ細かい方策によって、技術普及障壁を取り除くことで、このシナリオ II に近づくことができるものと考えられる。

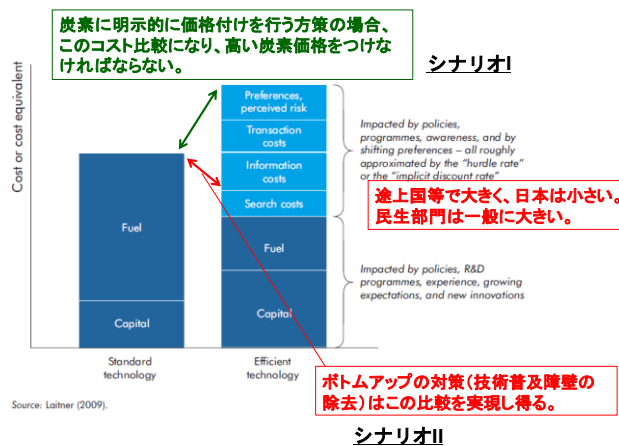


図 14 技術選択におけるコストのイメージ



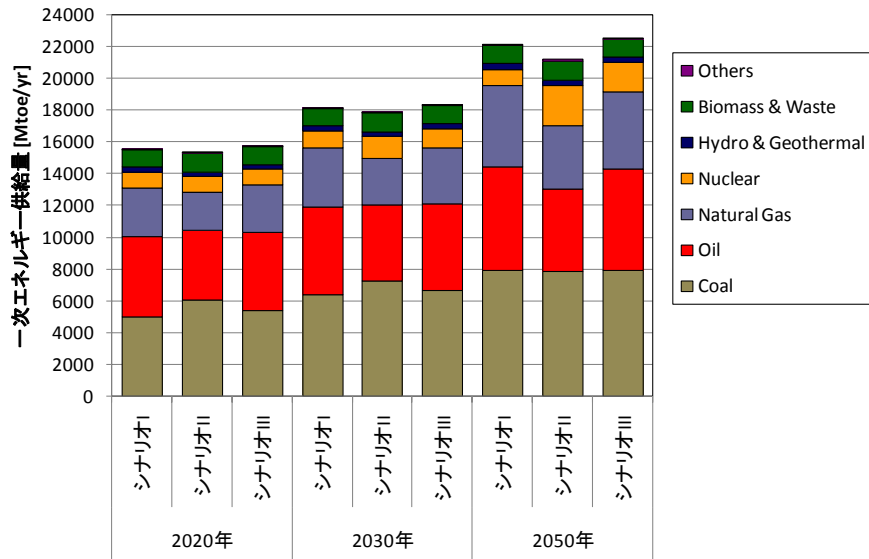


図 15 ベースラインにおける世界の一次エネルギー供給（シナリオ I、II、III の比較）

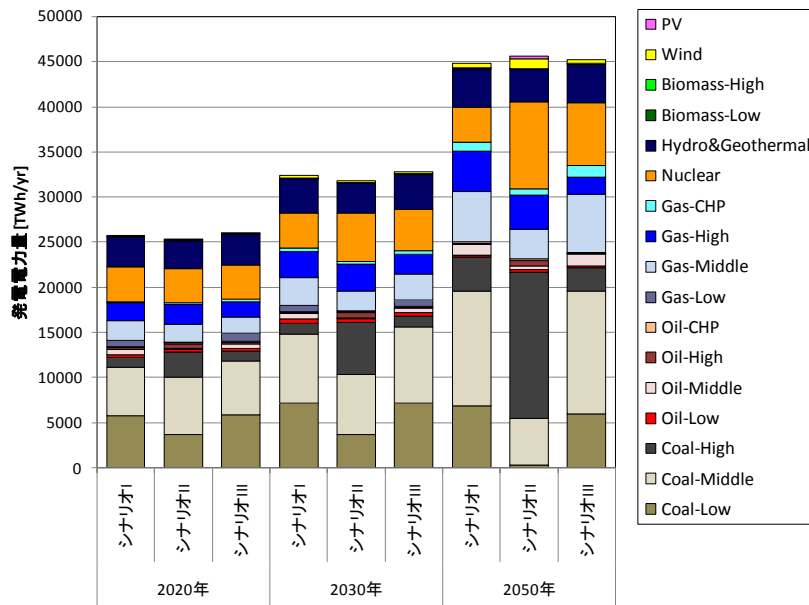


図 16 ベースラインにおける世界の発電電力構成（シナリオ I、II、III の比較）

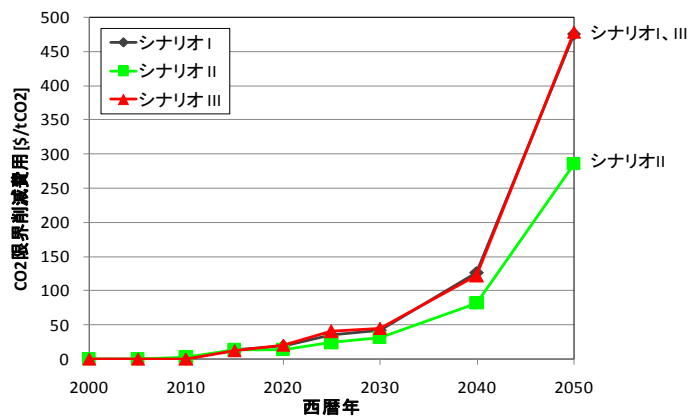


図 17 シナリオ I、II、III による CO<sub>2</sub> 限界削減費用の比較

■ 社会経済シナリオと排出削減レベルに関するシナリオの分析

温暖化政策実施における背景状況に関するシナリオ I について、社会経済シナリオ（シナリオ A、B）の差異および排出削減レベルに関するシナリオの差異（濃度安定化レベル、IPCC RCP）に関する分析を、統合評価モデル DNE21（DNE21+モデルよりも地域区分、具体的な温暖化対策技術の表現が簡略なモデル）を用いて、2100 年までの長期について実施した。図 18 に社会経済シナリオ A（中位）、B（高位）の違いによるベースラインと CO<sub>2</sub> 濃度安定化レベル別の世界のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量を示す。世界のベースライン排出量は、シナリオ A、B いずれにおいても、2050 年には現状の 2 倍程度、2100 年には現状の 3 倍前後の排出となることが見込まれる。なお、経済成長レベルの不確実性を考慮しても、ベースラインの世界排出量の不確実性の範囲はとりわけ 2050 年頃まではそれほど大きな幅が生じないと見ている。また、2100 年の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度は 700~770 ppm 程度に達すると見られる。濃度安定化レベル別の世界の GDP ロスを図 20 に示す。2050 年と 2100 年の GDP 比のロスはあまり差がなく、375 ppm-CO<sub>2</sub>（450 ppm-CO<sub>2</sub>eq.相当）では 4%強、450 ppm-CO<sub>2</sub>（550 ppm-CO<sub>2</sub>eq.相当）では 3%程度と見られる。なお、シナリオ A、B による差異もあまり大きくない。

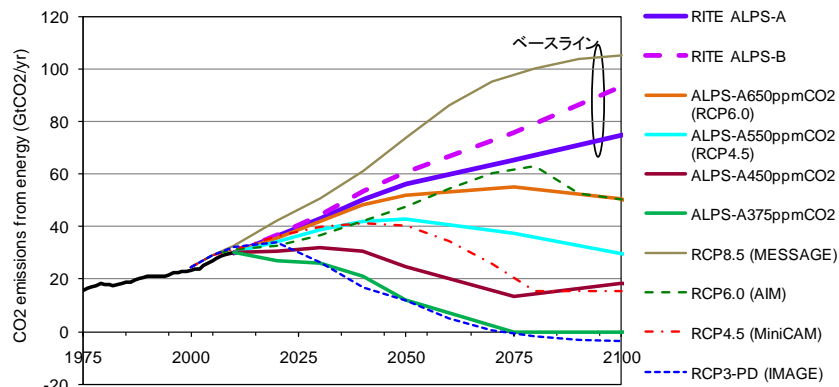


図 18 ベースラインにおける世界のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量シナリオ

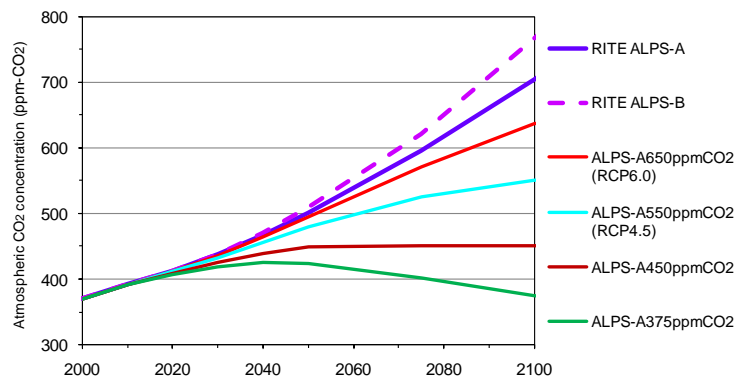


図 19 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度推移

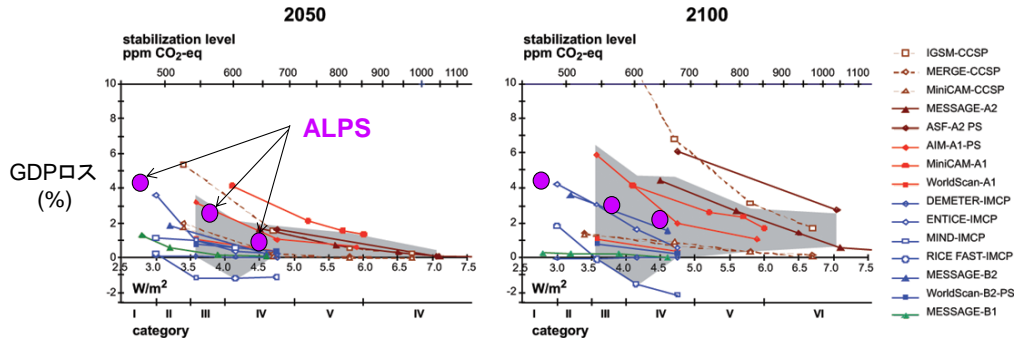


図 20 濃度安定化レベルによる世界の GDP 損失 (IPCC AR4 との比較)

■ 各種持続可能な発展指標に関する分析

社会は多目的多様性を有しているため、様々な目的に照らして高度にバランスした温暖化対策がとることができたときに社会の効用が高まり、そしてまた現実社会でその温暖化対策が持続的に実施可能となると考えられる。そのために、策定したシナリオについて、各種の持続可能な発展に関わる指標で評価も行ってきている。

例えば、図 21、22 は IEA が作成したエネルギーセキュリティ指標に準拠した指標を用いた評価例である。ベースラインでは、2050 年に向けてエネルギーセキュリティの脆弱性が高まると見込まれる。一方、世界排出量半減の場合でも、エネルギーセキュリティは一概に低減するわけではなく、むしろ高まる傾向さえ見られることは注目すべき点である。なお、シナリオ III のエネルギー安全保障シナリオでは、ここで採用したエネルギーセキュリティ指標によるとセキュリティが高まるシナリオとなっていることがわかる。また、図 23 に水ストレス人口を示す。これ以外にも様々な指標を用いてシナリオの評価を行っている。

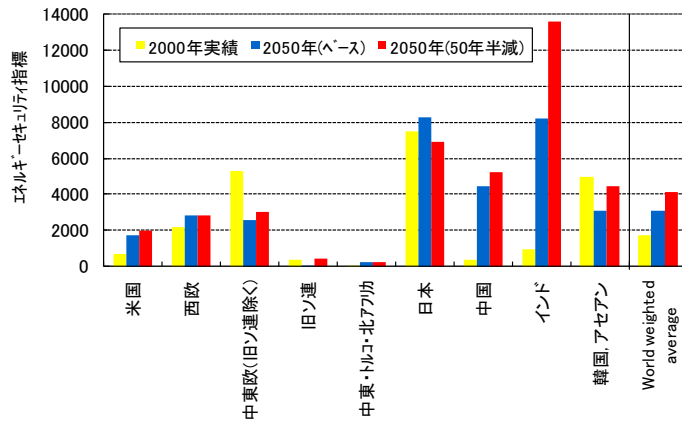


図 21 地域別のエネルギーセキュリティ指標 (シナリオ A-I)

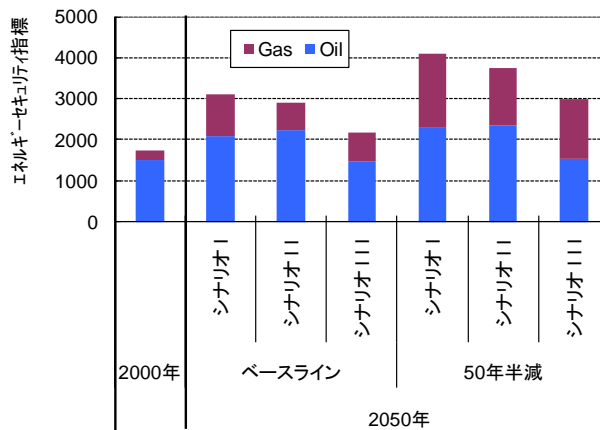


図 22 世界加重平均のエネルギーセキュリティ指標（シナリオ間比較）

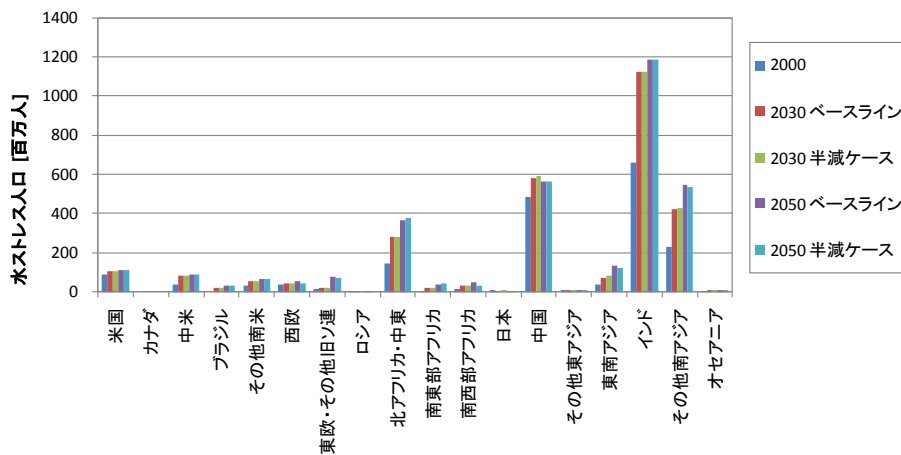


図 23 シナリオ別、時点別、地域別の水ストレス人口

■ 今後の予定と期待される成果

研究開発期間である 2012 年度末までに、引き続き、整合性のある脱温暖化と持続可能な発展に関する総合的、かつ、定量的なシナリオ作成を行う予定である。また、導出した定量的なシナリオについて、再度、解釈を行い、叙述的な解説をしっかりと付記して、全体としてのシナリオとする。

そして、作成したシナリオ、研究成果を、国内外に広く提供、情報発信し、IPCC 等の科学的知見の集積のみならず、国内外における温暖化対策の意思決定のための基礎的情報として役立てられるようにしていく予定である。

■ 研究開発期間

2007 年 4 月～2012 年 3 月予定

【問い合わせ先】

(財) 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ  
 グループリーダー 秋元 圭吾  
 〒619-0292 京都府木津川市木津川台 9-2  
 電話：0774-75-2304、FAX：0774-75-2317、E-mail：[aki@rite.or.jp](mailto:aki@rite.or.jp)

作成日：2011 年 4 月