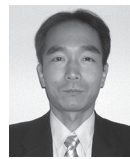


電力供給への 地球温暖化リスクに備える ——科学的知見と不確実性——

電力中央研究所「電気と環境のフォーラム」



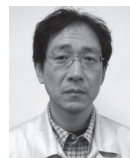
筒井 純一

電力中央研究所 環境科学研究所
上席研究員。地球温暖化の予測、
過去の気候データの分析、台風活
動に關係する大規模大気場の分
析などの研究に従事。



石井 孝

電力中央研究所 環境科学研究所
上席研究員 博士(工学)。森林炭
素固定量評価、オゾンの植物影響、
ダム堆砂關係の研究に従事。



小林 卓也

電力中央研究所 環境科学研究所
上席研究員 博士(農学)。森林の
CO₂吸収能力評価、生物・生態系
への環境影響の評価、淡水性付着
生物害などの研究に従事。

前回までの連載では、低炭素社
会の実現に向けて、①省エネルギー
②電化の推進、③低炭素排出
電源の利用の3つの観点から、関
連技術の将来見通しや課題につい
て述べてきた。今回は、二酸化炭
素(CO₂)濃度の増加に伴う気
候変化やその影響に関する科学的
知見を述べる。気候変化について
は、さまざまな不確実性が含まれ
ることを踏まえ、最新の予測情報
を統合的な視点から解説する。気
候変化の影響については、電力中
央研究所(以下、電中研)の研究
蓄積を活用して、電力供給設備と
その周辺の生態系を対象に、考慮

すべき温暖化のリスクを整理する。

1 地球温暖化の予測と その不確実性

1-1 地球規模の変化

まず、CO₂排出量と地球規模
の温暖化の度合いの關係を確認し
ておく。

IPCCの報告書によれば、人
間活動によって大気中に排出され
たCO₂は、約45%が大気中に残
留し、約30%が海洋に吸収され、
残りの約25%が陸上生態系に吸収
されたと見積もられる。大気中の
CO₂濃度が増加すると、大気か
ら地表面に向かう赤外線のエネル

ギーが増加する。その変化は、

CO₂濃度の対数にほぼ比例するこ
とが知られている。従って、平均
的な地表面気温の変化ΔTは、気
候感度S(濃度倍増による気温変
化)と呼ばれる比例定数を用いて

$$\Delta T = S \times \log_2(C/C_0) \quad (1)$$

と見積もることができる。ここで、
CはCO₂濃度、C₀は人間活動の
影響が生じる以前のCO₂濃度
(280ppm程度)を表す。

Sの値については、大きな不確
実性がある。現在のところ、2℃
から4・5℃までが可能性の高い

範囲、3℃が最良推定値とされる。

このような地球規模の炭素循環
や気候変化を簡易的に模擬する数
値モデルを用いて、将来想定され
るさまざまなCO₂排出経路を検
討することができる[1]。

図1-1に、大気中CO₂濃度が
21世紀末にかけて安定化する経路
の例を示す。安定化濃度レベルと
して450ppmと550ppm
の2種類を設定し、それぞれにつ
いて、単調に増加する場合(図で
STAと表記)と、一時的な超過
を許容する場合(オーバースチュ
ートと呼ぶ、図でOSと表記)を比
較している。ここでは、安定化レ

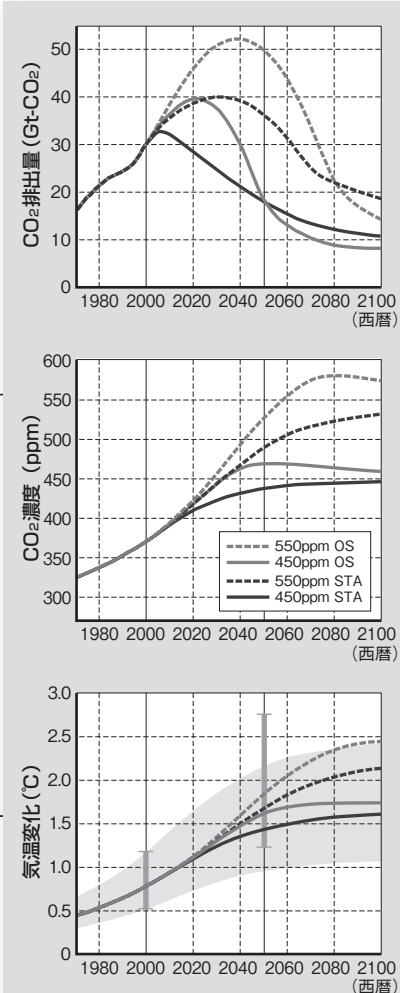


図1 450ppmおよび550ppm濃度安定化に至る経路の例

簡易的な気候変化予測手法を用いて、CO₂濃度が単調に増加する場合（STAと表記）と、一時的な安定化レベルの超過を許容する場合（OSと表記）を比較した結果。それぞれ450ppmと550ppmの2種類の安定化レベルを設定。気温変化は気候感度3℃を基準とし、450ppm STAおよび550ppm OSについて、気候感度の不確実性の幅（2.0～4.5℃）をそれぞれ陰影部とエラーバーで示す。図には示していないが、排出量と濃度の関係にも少なからず不確実性がある。

ベルの違いは排出削減が世界全体にゆきわたる度合い、単調増加とオーバーシュートの違いは排出削減の導入時期の違いと解釈する。450ppmや550ppmといった濃度レベルは、CO₂削減の長期目標の議論で、しばしば目安とされる数値である。日本は、2050年までに60～80%削減という目標を掲げている。各国の削減量の配分に不確実性があるが、日本の目標は、450ppm程度の安定化レベルを想定したものと推察される。

いずれの経路においても、長期的には現在の排出量から大幅に削減することになるが、21世紀前半の排出量にはシナリオ間で大きな開きがある。一方、気温はCO₂濃度に追従してゆっくりと変化する。50年ごろまではいずれのシナリオも最良推定値は2℃に満たず、シナリオの違いより不確実性の幅の方が目立っている。このように、長期的な温暖化の度合いは、削減技術の普及や気候応答の不確実性のため、ある程度の幅を持つて考慮する必要がある。一方、30年ごろまでの近未来については、シナリオによらず同程度の温暖化が進行する。地球全体で平均した気温変化は、10年当たり0.2℃である。

1-2 わが国の気候変化
温暖化によって予想される気候変化は、地域によって大きく異なる。気温上昇は、海上より陸上、低緯度より高緯度で大きく、特に、北半球高緯度域の冬季の昇温が著しい。この違いには、主に、海洋の熱容量が大きいことや、雪氷域の変化が気温変化を増幅することが関係する。気温が高くなると、大気中の水蒸気量が増えるので、豪雨や豪雪の危険性が増す。一方、地面からの蒸発も増えるので乾燥化が進み、渇水の危険性も増す。どちらの危険性が顕在化するかは、雨の降りやすさの状態に依存する

ため、地域によって異なり、同じ地域でも季節や年によって異なる。平均的な降水量は、一般に、赤道付近の熱帯や高緯度で増加し、亜熱帯や中緯度で減少する傾向である。ただし、わが国が位置する東アジア域は、モンスーン（季節風）による水蒸気輸送が増加することから、同じ緯度帯のほかの地域と異なり、夏季の降水量は増加する傾向である。

このような温暖化の空間パターンは、複雑な数値気候モデルをスーパーコンピュータで計算した結果から明らかになっている。最新のIPCC報告に使われた複雑モデルによる温暖化予測は、電中で20例以上ある。モデルによって予測結果はばらつくが、多くのモデルの平均を最良推定値とし、モデル間のばらつきを不確実性の尺度として評価できる。また、温暖化のシナリオや時期によらず、計算される気候変化の空間パターンは類似することが確認されている。複雑な気候モデルで得られる温

暖化の空間パターン（例えば、IPCC/WG1第4次評価報告書の11章）から、日本付近の平均的な気候変化を把握することができ、気温変化は地球全体の平均に近いが、北日本はやや大きな変化となる。また、季節による違いもあり、夏より冬の方が若干大きい。降水は気温に比べて予測モデル間のばらつきが大きい、全体的に増加傾向である。特に、夏季は、太平洋高気圧とオホーツク高気圧がともに強くなる傾向があり、その間に位置する日本では、梅雨が長引くことが示唆される。

1-3 極端現象の変化

電力供給を支える設備の健全性や環境適合性を考える場合、平均的な気候変化に加え、豪雨や台風などの極端現象（extreme event）の変化傾向が問題となる。豪雨と渇水がともに増加するなど、温暖化は極端現象の頻発をもたらすと予想される。しかしながら、もともとまれにしか起きない極端現象は、自然の変動要因に関する知見が不十分であり、大きな不確

実要素となっている。

図1-2に示すように、人為的な

温暖化と自然の気候変動との相対的な影響の度合いは、注目する気候要素によって異なる。図では、次のような3タイプの概念的な気候変数の時系列を示している。

1. 温暖化のトレンドが顕在化
2. 自然変動が相対的に大きい
3. 自然変動が温暖化に伴って変化

タイプ1には、地球全体の年平均気温といった大規模な平均量に関する要素が該当する。これに対し、ある地点の年降水量や台風の来襲頻度、エルニーニョの頻度や強度といった局所的・一時的な変動に関する要素は、大部分がタイプ2や3に該当する。温暖化対策の観点では、前者の扱いは比較的単純であるが、後者は人為的な温暖化と自然の気候変動が混在するため、対応が難しくなる。特に、タイプ3については、自然変動の理解に加え、温暖化がさまざまな自然変動にどのように影響するかを解明することが大きな課題である。自然変動が卓越する要素も、い

ろいろと工夫することによって、温暖化のシグナルを抽出することは可能である。例えば、個々の台風強度はさまざまな要因で変化するが、平均的な熱環境（海面水温と上空の気温）の変化に対して、理論的な発達強度限界の変化を評価することができ、電中研の研究では、地球規模の温暖化で海面水温が1℃上昇すると、日本に影響する台風の中心気圧が、平均的

に7±5hPa低下すると見込める[5]。極端現象については、ほかにも多くの研究がさまざまな手法で行われている。いずれも参考にすべき情報であるが、確度の高い知見として集約されるまでには至っていない。個別の断片的な情報を統合的に評価して、温暖化対策の議論の場に適切に反映することも重要な課題である。

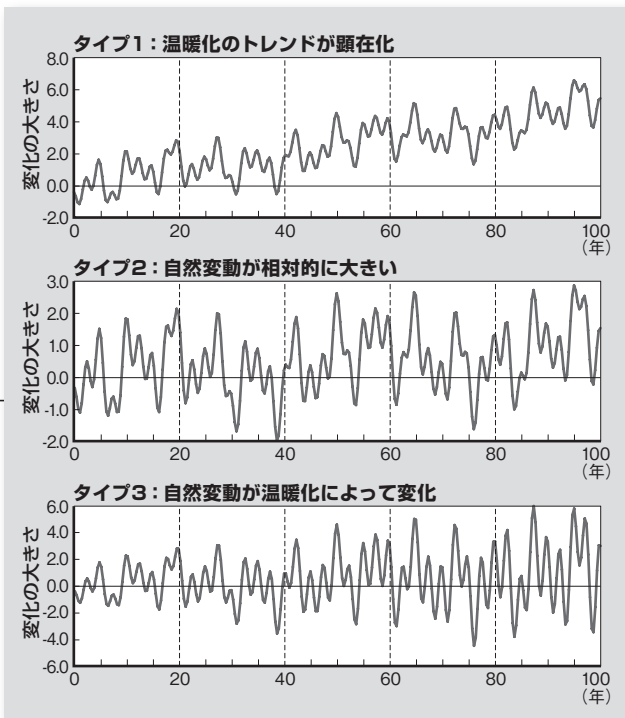


図2 人為的な温暖化トレンドと周期的な自然変動を含む概念的な気候変数の時系列

2 電力設備における温暖化のリスクと対応戦略

2-1 温暖化影響の主要なリスク

CO₂排出量の削減を進めていく上で考慮すべき電力設備への温暖化影響とはどのようなものであろうか。電中研では、地球温暖化による電気事業への影響評価研究を実施してきた[4]、[5]。そこで作成された温暖化影響のイベントツリーや専門家へのヒアリングを基に、自然エネルギーの拡大や電力設備の健全性の確保に及ぼす温暖化影響の主要なリスクを整理したものが図1-3である。ただし、懸念される事項を網羅的に抽出したもので、影響度合いを詳細に分析したものではない。温暖化影響の主要なリスクは「安定供給リスク」

であり、既存設備の健全性確保に関わるリスクと自然エネルギーの大量導入に伴うリスクに大別できる。2-2 既存設備の健全性確保にかかわるリスク

水力・火力・原子力発電・送配電設備に及ぼす温暖化影響は、気

温や海面水位の上昇といった緩やかな気候平均値の変化（前章のタイプ1）が電力施設に及ぼす影響と、大型台風、豪雨、異常高温、および雷の発生といった極端現象の増加（前章のタイプ2やタイプ3）が電力施設に及ぼす影響の2つに大別できる。

このうち、気温や海面水位の上昇といった緩やかな気候平均値の変化は、現在、電力施設への温暖化影響が顕在化しているものはないので、温暖化影響を早い段階で検知することが計画的に影響を軽減・回避するために重要であろう。また、電中研では、海水温（冷却水）の上昇による発電効率を評価できるツールを有しており、電力施設への温暖化影響の評価にも役立つものと期待される。

一方、大型台風、豪雨、異常高温、および雷の発生といった極端現象は、不確実性が高く信頼できる予測結果はないが、現在の自然変動の中でも起こっていることである。このうち、例えば、雷害については電中研は世界トップレベ

ルの知見と実績があり、塩害対策・雪害対策・地盤安定性の評価、出水解析などの技術も有している。これらは、電力施設への温暖化リスクの低減や実際の被害軽減に役立つものである。このため、入力条件となる近未来の高解像度温暖化予測に挑戦する計画である。

従って、現状の極端現象に伴う自然外力に対して電力設備をより強固にすることを基本に、将来想定される自然外力にも対応できる運用技術や監視・保守体制の強化に向けた取り組みが必要である。電中研では、送配電設備の災害に備えた復旧支援システムを開発中であり、想定できない極端現象に対する安定供給リスクを軽減する上でも役立つと期待される。

水力・火力・原子力発電・送配電設備に関する安定供給リスクへの対応策は、既存の運用で対応可能か、新規技術開発やモニタリングが必要か、設計変更や設備の補強・改造が必要となるかといった観点で整理できると考えられる。これらは、次回以降の本連載で、

電力設備の設計・保守の現状について述べるとともに、リスクを回避あるいは低減するための方策を紹介する。

2-3 自然エネルギーの大量導入リスク

自然エネルギーの大量導入リスクとしては、大量導入後に天候不順が長期化した場合に生じる太陽光や風力の稼働率低下による電源不足が最も懸念される。従って、自然エネルギー大量導入時の出力変動への対応策を早急に開発することが重要である。出力変動への対応策としては、現在鋭意開発が進められている蓄電池やインバーター以外に、局地気象予測に基づく出力変動対策が考えられる。予備電源の確保以外の対応策としては季節予報などの精度向上が重要となると考えられる。気温上昇に伴う太陽光発電効率の低下、気候変化による太陽光・風力の発電量やエネルギー密度分布の変化に対しては、気候変化の不確実性も考慮しながら長期的な対応を考える必要がある。

低炭素社会を実現するために自

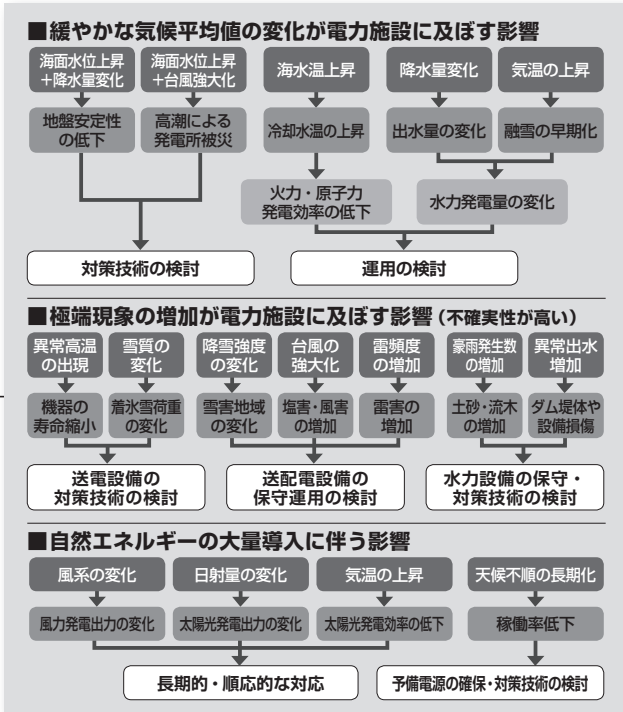


図3 電力安定供給への潜在的な温暖化影響リスク
(懸念される事項を抽出したもので、影響度合いが正確に予測されているものではない。)

3 地球温暖化の生態系への影響と電気事業の関わり

3-1 生態系への影響
IPCCの第4次評価報告書で

然エネルギーの大量導入が提起されているが、温暖化防止を実現させるためには、大量導入過程で想定されるリスクについても、着実にその対応戦略を検討することが重要であろう。

は気候変化に伴う生態系影響が既に顕在化しており、今後、生物種の分布範囲の変化や絶滅リスクの増加、陸域生態系からのCO₂放出の進行、食糧生産への影響などが生じる恐れがあることが報告されている。わが国でも、環境省が、主にIPCCの排出シナリオに基づく気候変化シナリオを用いて、20世紀末から50年間で気温が2℃以上上昇し、ブナなどの冷温を好

む樹種の分布適地の大幅な減少、松枯れ危険域の青森県平野部までの北進、農業生態系や海域生態系の攪乱による生物生産性の変化などを予測している[6]。

では、第1章で示した安定化シナリオを想定した場合、わが国の生態系は温暖化によりどのような影響を受けるのであろうか。これまでの生態系影響に関連した調査・解析では、生物間の相互作用、ほかの環境要因や人為影響との複合作用、生物の応答速度、生物自身の気温変動に対する適応能力などが考慮されていない。そのため、

現段階の生態系影響予測は気候変化以上に大きな不確実性を含んでいる。単純に比較はできないが、

図1-1の最も高排出となる経路で気候感度を不確実性幅の上限に設定した場合、気温変化が上記の環境省の推定値に相当するため、予測されているような生態系影響が顕在化する可能性がある。一方、排出削減が順調に進み、気候感度が現時点の最良推定値に近い場合には、21世紀中の変化が1・0℃

1・5℃程度で推移する可能性もある。この場合は、生態系影響の不確実性を考えると、近い将来顕在化する影響を予測するのは困難である。

以下では、長期的に生じうる生態系の変化と電気事業との関係について整理し、リスクへの対応に關する基本的な方向性を述べる。

3-2 電気事業への影響

温暖化環境下で自然環境との調和を図りながら電力供給を行っていく上で、無視できないリスクが生じる可能性がある。リスクは、「生態系への影響の視点によるリスク」と「電気事業への影響の視点によるリスク」に大別される(図1-4)。前者は、温暖化に伴う生態系の変化により、これまで電力設備が生態系に対して保っていた環境適合性が変化することで生じる生態系影響のリスクである。後者は、生態系の変化により、電気事業に対して生じる事業リスクである。生態系を対象としたこれらのリスクについては、生態系が(1)環境変化に対して画一的な反応を示さない

こと、(2) 反応の変動幅が大きいこと、(3) 外部に解放されていること、などを考慮する必要がある。従って、予測が外れる可能性が高いことを前提に管理システムを組み立て、常にモニタリングを行いながらその科学的な解析結果に合わせて対応を修正する「順応的」な取り組みが必須となる。

(1) 生態系への影響の視点によるリスク
電力設備に係る重要なリスクのひとつとして、電力設備による環境の分断に起因する生物の適応行動の阻害が挙げられる。例えば、陸水域においては温暖化に伴う水温上昇や猛暑や渇水などの極端現象発生時に、冷水を好む魚類の上流域（低温域）への移動をダムなどの河川構造物が阻害し分布域の縮小を引き起こす可能性が指摘されている。生物行動の阻害例としては、渡り鳥の渡り経路の変化に伴う風力発電施設への衝突の増加も示唆されている。ただし、現状では温暖化に伴うこれらの変化を予測するのは困難である。環

境の分断以外にもさまざまなリスクの可能性があるが、いずれも不確実性が高く、個々のリスクの絞り込みは困難である。基本的には、広い範囲のモニタリングに基づき運転を管理するなど、順応的な対応が求められる。また、近年「第3次生物多様性国家戦略」（07年）、「生物多様性基本法」（08年）、「生物多様性企業活動ガイドライン」（検討中）など、温暖化影響を考える上で、生物多様性の視点が重要になってきている点にも注意する必要がある。今後も、温暖化影響との関連の中で生態系の変化のモニタリングを基盤とした「予防的順応的管理」が強化される可能性が高く、対応できる体制を整えることが重要となってくる。

一方、電気事業の保有する自然資産の活用は、温暖化影響の緩和に向けた可能性を秘めている。例えば前出の魚類生息域の縮小について、事前の水温予測と生態系のモニタリングに基づき貯水池からの放水温を管理できれば、対策として冷水生物の避難場所・環境（レ

フュージア）を確保できる可能性もある。また、社有林や発電所緑地なども、積極的に介入して生態系機能を維持することで、周辺環境の悪化に対するレフュージアとして機能する可能性を有している。以上のように、電力設備の環境適合性の変化に伴う生態系リスクを低減するための対策も、柔軟な姿勢で臨むことが必要である。

と結びつくことが予想される。さらに、枯損木の増加が、倒木などによる送配電設備の破損事故の増加につながる可能性もある。対策は、温暖化に対して脆弱な森林の抽出と、モニタリングを含めた適切な管理の計画・実行であるが、管理の継続性や副次的な効果などを考えると地域と密接に協調した活動が必要となる。陸域に関しては、上記の生態系リスクと合わせて総合的な流域管理の視点で取り組む必要があるだろう。

(2) 電気事業への影響の視点によるリスク

電気事業に対して生じる事業リスクとしては、フジツボやイガイ類などの発電所汚損生物の水温上昇に伴う影響範囲の拡大が挙げられる。これらについては、設備の維持・管理に関連することから、次回以降の連載で説明する予定である。陸域については、植物の生育適地の変化や動物の食害などの増加による流域森林の健全性・機能低下による事業環境の悪化が挙げられる。例えば、これらの流域森林への影響は、極端現象である豪雨頻度・強度の増加により加速的に貯水池への土砂堆積の増加へ

電気事業の環境経営への影響も事業リスクとなる可能性がある。環境アセスメントは広い意味での環境経営における中心的活動であるが、温暖化に伴い種々の見直しが必要になる可能性がある。前述の通り、定量的な不確実性は残るが、温度反応性の高い生物種は温暖化により生息密度や分布域が変化する可能性が高い。その場合、調査結果から温暖化の影響を分離し事業の影響を評価することが必要になる。また、モニタリング地点の生物種構成に変化が生じた場

合には、対象種の変更を含めて順応的にモニタリング基準を管理することが必要になると考えられる。

環境アセスメントは、将来の低炭素社会を実現するための開発事業が必ず直面することになるが、温暖化を考慮した環境アセスメントについては、手法・政策的にはほとんど知見がなく、これからの取り組みが非常に重要となる。電中研では、効率的な環境アセスメント手法の構築に取り組んでおり[7]、これらの知見を温暖化時の環境アセスメントに生かすことが可能と考えている。特に生物多様性への温暖化影響が重要とされ、環境影響評価における生物多様性の重要性も一層増す可能性が高いことから、これらのモニタリングに利用可能なDNA解析技術は将来的にも有用と思われる[8]。

一方、自主的な陸・水域の環境修復などの保全活動では、管理コストの増大や手法の適合性の低下が生じる可能性があると同時に、活動自体の重要度が変化することが予想される。例えば、生態系に

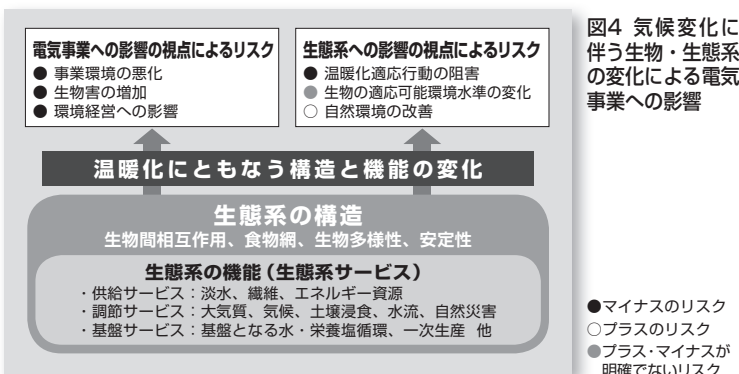
配慮したダム運用（維持流量やフラッシュ放流など）は、現在でも社会的に要望の高い取り組みであり、温暖化により河川生態系の脆弱化が生じる場合にはさらにその傾向が増すと予想される。ただし、これらの取り組みも、生態系の健全性維持効果が必ずしも科学的に裏付けされていないなど、今後の課題も多いと言える。

4 地球温暖化への適応に向けて

以上、温暖化の予測と、電力供給設備ならびにその周辺環境への温暖化影響を概観した。温暖化予測には不確実性が避けられないが、科学的知見も着実に向上している。ある程度の幅を持って将来を見通すことと、最新の情報に基づく意思決定を心掛けることが肝心である。重要な社会インフラを担う電力設備には、さまざまな温暖化リスクが想定されるが、大部分は、従来の自然外力に対する備えの延長線上にある。詳細については、次回以降の連載で取り上げる予定

である。一方、温暖化の生態系影響は、気候変化以上に不確実性を含んでいる。そのため、電力設備を取り巻く生態系の温暖化リスクについて、画一的な対策で臨むのは難しい。最善の適応策を適切な修正を加えながら確実に実行するのが基本であり、そのためのモニ

図4 気候変化に伴う生物・生態系の変化による電気事業への影響



タリングを中心とした柔軟な管理体制が必要である。

参考文献

- [1] 筒井 電力中央研究所 研究報告 V08022 2009.
- [2] 吉田ほか 電力中央研究所 研究報告 V07001 2007.
- [3] 筒井 電力中央研究所 研究報告 V08026 2009.
- [4] 加藤 化学技術誌 M O L 28-3 52-58 1990.
- [5] 電力中央研究所 電中研レビュー No.28 39-46 1992.
- [6] 国立環境研究所ほか 温暖化影響総合予測プロジェクト報告書 2008
- [7] 竹内ほか 電力中央研究所 研究報告 U03070 2003.
- [8] 松木ほか 電力中央研究所 研究報告 U03066 2003.