

電中研レビュー

DENCHUKEN REVIEW

地球温暖化の科学的知見と対策技術



はじめに 理事 水鳥 雅文	2	3-2-1 先進高効率発電技術	53
第1章 地球温暖化問題の変遷と 電力中央研究所の取り組み	3	3-2-2 石炭ガス化複合発電	56
1-1 国際・国内動向	4	3-2-3 低炭素燃料の利用	60
1-1-1 京都議定書に至る道筋	4	◎コラム7: EnergyWin	66
1-1-2 気候変動枠組み条約および京都議定書への 日本の対応	5	3-3 発電所におけるCO ₂ 回収・貯留技術(CCS)	67
1-1-3 パリ会議(COP21)に向けての 日本の取り組み	5	3-3-1 CCSの国内外動向	67
1-2 当研究所の取り組み・スタンス	6	3-3-2 CO ₂ 回収技術	71
第2章 地球温暖化の科学的知見と 電気事業への影響	9	3-3-3 CO ₂ 貯留技術	71
2-1 科学的知見	10	3-3-4 CCS導入に係る諸リスク	75
2-1-1 GHG排出量と気温上昇の関係	10	3-4 再生可能エネルギー利用技術	78
2-1-2 長期目標の科学的根拠	17	3-4-1 太陽光発電大量導入に対応する 電力系統運用技術	78
◎コラム1: 地球システムモデル	28	◎コラム8: 太陽光発電量予測技術	84
◎コラム2: 海洋生態系モデル	29	3-4-2 風力発電 -出力予測と有効利用に向けた課題-	85
◎コラム3: 海洋酸性化	30	3-4-3 地熱発電	91
2-2 電気事業への影響	31	3-5 省エネルギー技術	97
2-2-1 概説	31	3-5-1 ヒートポンプ活用による地球温暖化抑制	98
2-2-2 影響評価のための詳細な気候予測情報	32	3-5-2 エネルギー消費解析による 省エネ検討支援	100
2-2-3 電力設備への影響と対策	40	3-5-3 エアコン選定ツール (エアコンの選定による省エネ)	102
◎コラム4: 日本の過去の気象場の再現	45	◎コラム9: 住宅用室内温熱環境設計ツールCADIEE	105
◎コラム5: 地球温暖化と生物多様性条約	46	3-5-4 電気自動車(環境にやさしい電気自動車)	106
◎コラム6: 付着生物	47	3-6 温暖化抑制のための政策の研究	108
第3章 地球温暖化の対策技術	49	3-6-1 IPCCのシナリオと政策評価	108
3-1 各発電技術のライフサイクルCO ₂ 排出量	50	3-6-2 自主的取り組みの研究	110
3-1-1 はじめに	50	3-6-3 原子力政策の研究	111
3-1-2 ライフサイクルアプローチによる発電技術の CO ₂ 排出量の評価方法	50	3-6-4 省エネ・節電政策の研究	113
3-1-3 評価対象発電技術	50	3-6-5 再生可能エネルギー政策の現状と課題	115
3-1-4 発電技術のライフサイクルCO ₂ 排出量	51	3-6-6 国際枠組みの研究	116
3-2 火力発電の高効率化・低炭素燃料利用技術	53	参考文献・資料等	119
		執筆分担	130

はじめに

理事 水鳥 雅文



2015年11月末からパリでCOP21が開催される。今回は2020年以降の地球温暖化対策の枠組みについて合意することが目標となっており、大変注目されている。この国際交渉の行方は、先進国と途上国との対立、各

国のエネルギー・経済事情の相違などもあり、現時点では見通しがたっていない。しかし、これは単なる通過点に過ぎない。地球温暖化問題は、社会全体がこれからも長きにわたり向き合っていかなければならない環境問題であり、電気事業は、特に関わりの深い事業分野であることは言うまでもない。

我が国の電気事業は、1996年に「電気事業における環境行動計画」を策定し、以来継続的にCO₂の排出抑制対策を最重要課題の一つと位置付け、自主的かつ積極的に取り組んできた。しかし、一方で電気事業は今、広域系統運用の拡大、電力小売り完全自由化、発送電分離の3つを柱とする電力システム改革という大変革時代を迎えている。この変革の時代において、「電力の安定供給・コスト抑制と地球温暖化の防止の両立」という命題に電気事業全体がどう向き合い、対応していくか。現在、電気事業が突き付けられている大きな課題の一つであろう。

2015年7月、新電力（有志23社）を含む主たる電気事業者は、政府が示す長期エネルギー需給見通しに基づき、2030年度の国全体の排出係数を0.37kg-CO₂/kWh程度とする目標を示した。また、火力発電所の新設などに当たり、BAT（利用可能な最良の技術）を活用することによって最大削減ポテンシャルとして約1,100万t-CO₂の削減を見込んだ。これに対して国・社会からは、電力システム改革という状況の中で、こうした目標の達成に向けた仕組みやルールの構築といった実効性の明確化が問われている。また、東日本大震災後、電力の安定供給とコスト抑制の観点からは必要不可欠な存在となった石炭火力発電は、CO₂排出

原単位が他の発電技術に比べ大きいことなど環境面での課題が多いことから、その新增設については厳しい意見が多々あることも事実である。そのため、石炭火力発電の高効率化やCO₂排出抑制対策などに関する技術開発への期待も大きい。その他、再生可能エネルギーの導入拡大と大量導入後の電力系統への影響の問題、エネルギー使用の合理化つまり省エネルギーの推進といった課題もある。一方、温暖化抑制策の進展には現状では不透明な点が多く、最近では気温上昇や台風・集中豪雨など極端現象の増加といった温暖化影響リスクに対する適応策の必要性の認識が一段と高まってきた。電気事業においても、電力の安定供給に影響する潜在的なリスクは、発電、送配電、販売などあらゆる部門で想定される。今から、こうした適応策を検討しておくことは、電力の安定供給に資するだけでなく、リスクを回避することが結果として電気事業の将来の便益にも繋がるものだと考える。

以上のような電気事業の直面する地球温暖化の諸課題に対して、電気事業共同の学術研究機関としての当研究所の役割は、主に次のようなものと思慮する。第1は、地球温暖化に関する最新の科学的知見や社会動向に関する情報を客観的かつ分かり易く整理・分析し、発信すること。そして第2は、「電力の安定供給・コスト抑制と地球温暖化の防止の両立」に貢献するCO₂削減技術や制度などのオプションを多様化すること、である。この2つの役割を着実に果たして行くことが、温暖化対策のための科学や技術の発展に寄与するとともに、持続的な電気事業経営に資するものとなると確信する。

本電中研レビューは、地球温暖化をテーマとした3回目のレビューとなる。今回は、主に地球温暖化に関する科学的知見と電気事業への影響、および温暖化対策技術に関して、環境分野に止まらず社会経済分野、電力流通・発電分野、電気利用分野まで極めて広範に取り組んできた最新の研究成果を取りまとめた。本電中研レビューが、今後の電気事業の地球温暖化問題への対応にわずかでもお役に立てれば幸いである。

第1章

地球温暖化問題の変遷と 電力中央研究所の取り組み

1-1 国際・国内の動向

- 1-1-1 京都議定書に至る道筋 4
- 1-1-2 気候変動枠組み条約および京都議定書への日本の対応 5
- 1-1-3 パリ会議（COP21）に向けての日本の取り組み 5

1-2 当研究所の取り組み・スタンス 6



1-1 国際・国内の動向

1-1-1 京都議定書に至る道筋

地球温暖化問題は日本一国だけで解決できるものではなく、グローバルな協調の下に進めていく必要がある。そのため、1990年代から25年近くにわたって国際交渉が行われ、国際枠組みが定められてきた。

地球温暖化問題が国際政治課題として浮上したのは、科学的知見の整理、評価を行うために1985年にオーストリアのフィラハで開かれた地球温暖化に関する科学者による初めての世界会議が切っ掛けになっている。

その後、フィラハ会議で整理された科学的知見を基に、1987年にイタリアのベラジオで地球温暖化防止策について初めての行政レベルの会議が持たれた。1988年にカナダのトロントで開かれた会合では、科学者と政府関係者とが一堂に会し、「2005年までにCO₂排出量を20%削減する」という具体的な数値目標が提案された。また1988年には、世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)が、世界の科学者で構成する「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)を設立した。

IPCCは、発表された気候変動に関する科学的知見の収集と整理を行い、評価報告書として取りまとめてきた。これまで、1990年に第一次(FAR)、1995年に第二次(SAR)、2001年には第三次(TAR)、2007年に第四次(AR4)、2013年～14年にかけて第五次(AR5)の各評価が発表された。各評価は、気候変動予測を扱う第1作業部会報告書、温暖化の影響・適応を扱う第2作業部会報告書、温暖化への対策・政治経済的側面の評価を扱う第3作業部会報告書、および統合報告書の4部構成である。IPCCは、地球温暖化が既に起きていること、その主な要因が人間活動によるCO₂排出など温室効果ガスの排出によって引き起こされていること等を指摘してきた。また一方でIPCCは、一定の温室効果ガス排出に対してどの程度の温暖化が起きるか、それによる悪影響はどうかといった点については、リスクが懸念されるものの、科学的不確実性も大きいことも合わせて指摘してきた。

国際政治の場での地球温暖化問題への取り組みは、IPCCによる科学的評価がベースになって進展すること

になる。1989年にオランダのノルドヴェイクで開かれた「大気汚染と気候変動に関する環境閣僚会議」では、温室効果ガスの排出量を「安定化」させる必要性についての認識を促すためノルドヴェイク宣言が採択された。1990年の第二回世界気象会議では、今後の国際的取り組みを方向付けた、各国が協力して地球温暖化防止に取り組むべきことに合意する閣僚宣言が出され、同年、国連内に「気候変動に関する枠組み条約交渉会議」が設置された。1992年5月、第5回気候変動に関する政府間交渉において温暖化防止のための「国連気候変動枠組み条約」(UNFCCC)が採択され、6月のリオの地球サミットで各国の署名が始まり、1994年3月にECを含む154ヶ国が署名して発効した。枠組み条約の究極の目標は、「温室効果ガスの濃度を『生態系が気候変化に自然に適応し、食糧の生産が脅かされず、かつ経済活動が持続可能な状態で進行することができるような期間内に』安定化させること(第2条)」とされた。

参加各国は、2000年までに温室効果ガスの排出量を自主的に1990年レベルに安定化させること等の温暖化対策の実施を申し合わせた。更に、この取り組みを具体化するため、各締約国、特に先進国の排出削減計画や実施状況の検証、新たな仕組みなど、気候変動枠組み条約の具体的方策を話し合うための意思決定機関として「締約国会議」(COP: the Conference of the Parties)が設置された。

1995年のCOP1(第1回会合)で2000年以降の取り組みの検討課題や手順を定めた「ベルリン・マンデート」が、1997年のCOP3で「京都議定書」がそれぞれ採択された。京都議定書には、温暖化防止のための法的拘束力を持つ数値目標が定められた。日本は基準年(概ね1990年)比で2008～2012年(第一約束期間)の平均で▲6%、米国は▲7%、EUは▲8%という目標が定められた。中国、インドなどの開発途上国には数値目標は課されなかった。また、自国内のみで目標達成が困難な場合に国々が排出量を国際的に取引してもよいとする「京都メカニズム」も定められた。それには、共同実施(JI)、クリーン開発メカニズム(CDM)、国際排出量取引(IET)があった。

1-1-2 気候変動枠組み条約および京都議定書への日本の対応

わが国は地球規模の環境問題の進行を受けて、1989年に「地球環境保全に関する関係閣僚会議」を設置した。翌1990年、地球温暖化問題に対応するために「地球温暖化防止行動計画」を策定し、1992年の地球サミットにおいて、この計画の達成を国際的に宣言した。行動計画においては、CO₂の排出抑制目標として、一人当たりの排出量を2000年以降概ね1990年レベルで安定化させるとともに、さらに革新的技術開発などが早期に大幅に進展することにより、排出総量が2000年以降概ね1990年レベルで安定化するよう努める、とした。以後、これに沿ってわが国の温暖化対策が進められたが、CO₂の排出を抑制することはできず、2000年時点の目標達成は困難な状況になった。

一方、1992年の地球サミットで気候変動枠組み条約に署名し、1993年に批准した。同年に「環境基本法」を公布・施行し、これを具体的行動に移すための「環境基本計画」を閣議決定した。

京都議定書が採択された1997年のCOP3の直後、内閣総理大臣を本部長とする「地球温暖化対策推進本部」を設置し、1998年に「地球温暖化対策推進大綱」を決定した。京都議定書の第一約束期間（2008年から2012年の5年間）に向けて、わが国の温暖化政策はこの大綱の枠組みで進められることになった。

経済団体連合会は、1991年に地球サミットに先駆けて「経団連地球環境憲章」を策定し、「環境問題への取り組みが企業の存在と活動に必須の要件である」との認識を基本理念として掲げ、環境保全に向けて自主的かつ積極的に取り組みを進めていくことを宣言した。1996年には、地球環境憲章の理念を具体的な行動に結びつけるため、「経団連環境アピール」を発表し、温暖化対策については、産業界として実効ある取り組みを進めるべく、自主行動計画を策定することを宣言した。これを受けて、翌1997年に「経団連環境自主行動計画」を策定し、温暖化対策については「2010年度に産業部門及びエネルギー転換部門からのCO₂排出量を1990年度レベル以下に抑制するよう努力する」という統一目標を掲げ、産業部門及びエネルギー転換部門34業種（2001年度からは36業種）が目標達成に向けて取り組みを進めた。

電気事業連合会は、環境問題への取り組みを経営の最重要課題のひとつとして位置付け、1996年11月に「電気事業における環境行動計画」を策定し、以降、政府の産業構造審議会においてフォローアップ（レビュー）を行い、毎年結果を公表してきた。

1-1-3 パリ会議（COP21）に向けての日本の取り組み

京都議定書は米国が離脱し、また中国、インドなどの主要な開発途上国が数値目標を持たず、その一方でロシアなどには過剰な排出枠が与えられるといった問題が、採択直後から指摘されてきた。カナダも、2011年のCOP17閉会直後に、京都議定書からの離脱を宣言した。

日本は結局▲6%の数値目標を達成できたが、京都議定書の2013年以降の継続については疑問視する意見が多数を占めた。2011年に南アフリカのダーバンで開催されたCOP17及び第7回京都議定書締約国会合（CMP7）において、EU等は2013年1月1日から京都議定書の第2約束期間を開始することに合意したが、日本、ロシア、カナダは第2約束期間には参加しないことが決定された。

これを受け、翌年のCOP18（2012年）の合意によって、2020年までの枠組みが決まった。欧州連合（EU）等は、京都議定書の下で、2013年から2020年までを第2約束期間として、引き続き、削減義務を負うこととなった。一方、ボトムアップ型の枠組み（カンクン合意という）の下で、米国を含むすべての先進国が自主的な総量目標を、中国とインドを含む途上国が自主取組（GDP原単位目標など）を掲げ、その実施状況に対して国際的なレビューを行うことになった。

さらに、京都議定書の反省を踏まえて、「全ての国が参加する新たな法的枠組み交渉」が開始された。

これに先立つ2008年の洞爺湖サミットの前後から、温暖化問題は一層政治的な注目を浴びようになり、G8や気候変動枠組み条約の場では、「産業革命前に比べて2度以下」という温暖化防止の目標が概ね共有されるようになった。またこれを受けて先進国は2050年に80%程度の温室効果ガス削減という目標を掲げるようになった（日本でも、2012年に策定された第四次環境基本計画に80%削減を目指すという文言が掲げられた）。さらに、2009年には鳩山政権が「2020年までに1990年比で25%の排出削減をする」と宣言した。このような

大規模なCO₂削減を実現するための主力は原子力発電であり、その発電量増大が必要であるとされていた。

しかし、2011年の東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故の後、原子力発電所がすべて停止することになり、温室効果ガス排出量が大幅に増大した。そのため、日本の長期エネルギー需給見通しのあり方があらためて政府において検討された。2020年の数値目標は撤回されて2005年比で3.8%の削減となった。さらに、2030年の長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）についての検討が行われ、その結果をもとに地球温暖化対策推進本部は2015年7月17日、「日本の約束草案」を決定して、COP21に向けた国際交渉の事務局を務める気候変動枠組み条約事務局に提出した。

この約束草案は、政府の説明によれば、「我が国の約束草案、すなわち2020年以降の削減目標は、2030年度に2013年度比で26%減、2005年度比で25.4%減とする。これは、エネルギーミックスと整合的なものとなるよう、技術的制約、コスト面の課題などを十分に考慮した裏付けのある対策・施策や技術の積み上げによる実現可能な削減目標である。削減率やGDP当たり・1人当たり排出量等を総合的に勘案すると、国際的にも遜色のない野心的なものと考えている。」⁽¹⁾としている。

これに呼応する形で、電気事業者は新たな自主的取り組みを策定し、2015年7月17日に（「電気事業における低炭素社会実行計画」の策定について）のプレスリリースを行った（図1-1-1）⁽²⁾。

1-2 当研究所の取り組み・スタンス

- 当研究所の温暖化研究のスタンスは、次の通りである。
- ・温暖化問題に対する電気事業経営における的確な意思決定に資するために、国内外の政策の実効性を分析し、また最新の科学的知見・情報を提供すること
 - ・地球温暖化に関する短期的課題と長期的課題に並行して取り組み、電気事業の温暖化問題への柔軟な対応に資すること
 - ・電源のベストミックス、電力設備の効率向上、省エネルギー、エネルギー資源の低炭素化・非化石化等による温暖化抑制効果を明らかにすると共に、これらの対策技術の導入促進に寄与すること
 - ・温暖化防止・抑制技術の選択肢を拡大するためのメニュー

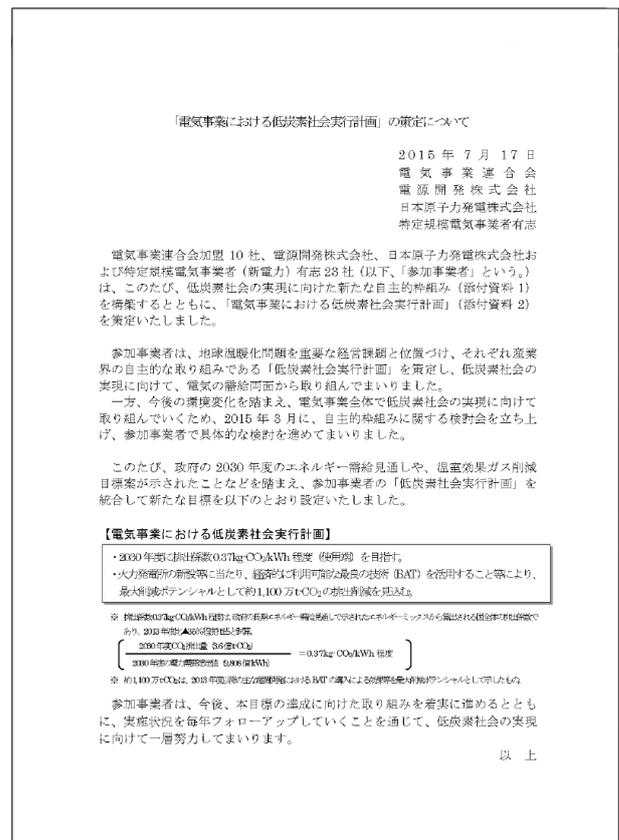


図1-1-1 電気事業者のプレスリリース資料⁽²⁾
(添付資料1、添付資料2は省略)

- (CO₂削減技術や制度等)を整備・増強すること
- ・温暖化問題は広範・多岐に亘り、一個人、一機関での対応は不可能なため、国際協力・協力を念頭に、国内外の研究ネットワークを確立し、有効に活用すること
 - ・学術研究機関として、国や民間の研究機関では対応が困難な課題に取り組み、科学や技術の発展に寄与するとともに、研究成果を社会に還元すること

以下、第2章では、地球温暖化の科学的知見と電気事業への影響について、第3章では地球温暖化の抑制対策について、これまでの研究成果を取りまとめた。

第2章2-1節では科学的知見について述べている。IPCC報告によれば、世界の温室効果ガス排出量が今後とも増えると地球温暖化が起きることはほぼ間違いはない。ただし、どの程度の温暖化が起きるといった点については科学的不確実性がある(2-1-1)。更に、悪影響の程度がどの程度なのか、人間社会の対応のあり方にはどのようなものがあるかといった点については、一層のこと多様な見方がある、それを理解するために様々な角度

から検討がなされている (2-1-2)。

次いで2-2では、地球温暖化による環境影響が、電気事業に対してどのような悪影響を与えうるのか、検討した例を紹介する。一般的に言って、電気事業の設備は自然災害等に対して一定の余裕を持って建設されるために、地球温暖化が起きたからといって、すぐに大幅な悪影響が顕在化するという訳ではない。IPCCにおいても、温暖化の悪影響が最も心配されるのは自然生態系などであって、インフラや近代的な経済活動は温暖化の悪影響に対しては比較的頑強である、とまとめられている。ただし、温暖化に限らず、自然災害に対する備えは安定供給のために何れ必須であるので、当研究所では、温暖化問題を周縁部に捉えつつ、自然災害に対する防災全般についての研究を鋭意進めている。本項で紹介するのは、そのような研究活動についての、温暖化問題を切り口とした一端である。

第3章では、CO₂削減のための対策の研究を紹介する。まず3-1で原子力や火力発電など、様々な発電方式の違いによるCO₂排出量の比較研究(LCA研究)を紹介する。次いで、個別具体的な技術を4つに分けて紹介する。

すなわち、火力発電の高効率化(3-2)、CO₂を発電所から回収して地中に埋めるという回収貯留技術(3-3)、再生可能エネルギー技術(3-4)、省エネルギー技術(3-5)である。最後に、これらの技術を推進するための政策のあり方についての研究を紹介する(3-6)。

執筆現在、G7や気候変動枠組み条約などの国際的な場においては産業革命前に比べて2度以下という地球温暖化の抑制目標に世界の指導者達が概ね合意している。しかし、それを技術的にどのように具体的に達成するかという道筋は、よく示されているとは言いがたい。この原因は、今知られている技術だけでは、大規模なCO₂削減をしようとする、極めてコストが高くなってしまい、非現実的になることである。(なお原子力は例外であるが、原子力開発はいま固有の困難に直面している。)さらなる技術開発を通じて、経済活動と両立する形でCO₂削減を実現していくことの重要性については、立場や見解の違いを超えて、幅広い意見の一致がある。当研究所の技術開発も、そのような形で温暖化の解決に寄与することを目指している。

第2章

地球温暖化の科学的知見と 電気事業への影響

2-1 科学的知見

2-1-1 GHG排出量と気温上昇の関係	10
2-1-2 長期目標の科学的根拠	17
コラム1：地球システムモデル	28
コラム2：海洋生態系モデル	29
コラム3：海洋酸性化	30

2-2 電気事業への影響

2-2-1 概説	31
2-2-2 影響評価のための詳細な気候予測情報	32
2-2-3 電力設備への影響と対策	40
コラム4：日本の過去の気象場の再現	45
コラム5：地球温暖化と生物多様性条約	46
コラム6：付着生物	47



2-1 科学的知見

地球温暖化の対策は、CO₂等の温室効果ガス（greenhouse gas: GHG）の排出を減らす施策と、変化しつつある気候に適応するための施策がある。前者は緩和策と呼ばれ、21世紀中およびそれ以降も見通して、長期的に取り組むべき課題である。後者は適応策と呼ばれ、近未来に予想される不可避の気候変化への対策として言及されることが多い。

どのような緩和策をいつ頃から実施するかは、関連する技術開発の動向を考慮しつつ、費用対効果の点から検討されるべき課題である。その際、気候変化が大きくなると、有効な適応策が限られ、そのための費用も増すこと、および気候変化の影響の度合いとその変化に適応する能力が、地域によって大きく異なることに留意する必要がある。したがって、緩和策と適応策は総合的に検討すべき課題である。

本章では、緩和策の前提となる将来の気候変化とその影響への適応に関する科学知見を述べる。

緩和策は、国連の気候変動枠組み条約（United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC）の下、人為的な気候変化の危険な影響が生じないように、大気中の温室効果ガス（greenhouse gas: GHG）濃度を安定化することが目標とされる。この安定化目標の目安としてしばしば言及されるのが、工業化前（1750年頃）を基準とする気温上昇を世界全体の平均で2℃以下に抑える目標である。ただし、地球温暖化の科学には様々な不確実性があり、2℃目標の根拠は必ずしも明確ではない。したがって、適応策も含めた地球温暖化対策の議論では、常に不確実な情報に基づく意思決定が求められる。ただし、科学知見も年を追う毎に充実しており、地球温暖化対策の意思決定に最新の知見を柔軟に反映させる必要がある。

このような観点から、当研究所では、適切な緩和目標の立案に資するために、独自のモデル研究を実施する傍ら、IPCCの評価報告書を始めとする多岐にわたる科学知見を総合的に俯瞰して、最新の情報を整理・分析している^{(1),(2)}。ここでは、これまでの当研究所のモデル研究と情報分析を踏まえて、緩和目標の観点で鍵となる科学知見を解説する。以下、IPCCの評価報告書（Assessment Report）は、慣例にしたがって略称（第1次 - 第5次:

FAR, SAR, TAR, AR4, AR5）で表記する。IPCCには三つの作業部会（WG1, WG2, WG3）があり、それぞれ気候科学、影響・適応、緩和の分野を扱っている。

なお、UNFCCCやIPCCの名称に含まれる「climate change」は「気候変動」と訳されるが、その意味するところは気候の平均状態や変動特性の変化である。ここでは、その原意を踏まえ、「climate variability」（気候の平均状態や各種統計量の変動）と区別するために、「気候変化」を「climate change」の意味で用いる。

2-1-1 GHG 排出量と気温上昇の関係

(1) 気候予測の不確実性

気候安定化の目標となるGHG濃度レベルや気温上昇の上限については大きな不確実性がある。ここでは、CO₂排出量と気温上昇の関係を定量化する指標に注目して、目標を大きく左右する不確実性の問題を述べる。

GHGやその他の気候変化要因は、放射強制力と呼ばれる指標で定量化される。放射強制力は、注目する要因で生じる放射的な外力のことであり、地球のエネルギー平衡における正味の変化をW/m²の単位で表す。

大気中のCO₂濃度の変化については、その放射強制力（ F_{CO_2} ）が濃度の対数にほぼ比例することが知られており、次の近似式⁽³⁾が標準的に使われる。

$$F_{CO_2} = 5.35 \ln(C/C_0) \quad (2-1-1)$$

ここで、 C はCO₂濃度、 C_0 は基準となる工業化前の濃度（約280 ppm、AR5では278 ppm）である。この式を使うと、CO₂とそれ以外の放射強制力の合計に対応する等価CO₂濃度（ C_{eq} ）が次式で表される。

$$C_{eq} = C_{exp}(F_{other}/5.35) \quad (2-1-2)$$

ここで、 C_{other} はCO₂以外の放射強制力である。通常、GHG濃度と呼ばれるのは、この式に基づく等価CO₂濃度であり、単位はppm CO₂eq、あるいはppm eqのように表記される。

放射強制力が濃度の対数に比例することから、気温上昇も濃度の対数に比例すると考えられる。この関係を図2-1-1に示す。濃度の単位ppmは体積比（モル混合比）で百万分の一を表し、1 ppmのCO₂濃度の増加は大気中の炭素の質量が2.12 GtC増加することに相当す

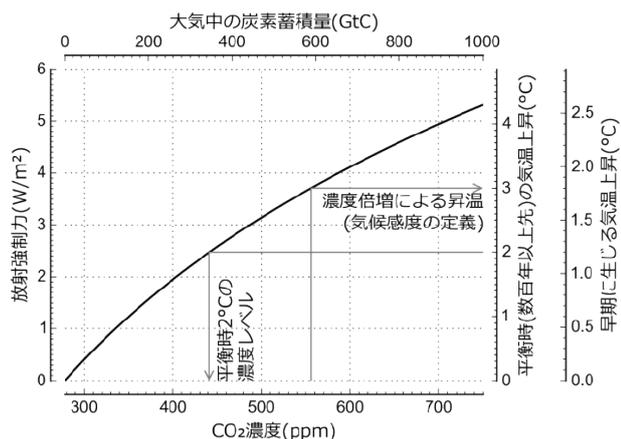


図2-1-1 CO₂濃度と気温上昇の関係

る。ここで、GtCはCO₂のC（炭素）のみの質量で10億トンを表し、CO₂全体の質量はその3.67倍（分子量の比44/12）である。図2-1-1の上側の横軸には、濃度の増加に対応する大気中の炭素の増分を示している。排出されたCO₂のうち大気に残る割合がわかれば、排出量と濃度の増分が対応づけられる。WG1 AR5⁽⁴⁾によると、この大気残留率は現在のところ40%強と推定されている。最近の世界全体のCO₂排出量は年間10 GtC程度であり⁽⁵⁾、1年当たり2 ppm程度の増加率に対応する。2013年の年平均CO₂濃度は396.0 ppmであり⁽⁶⁾、2015年頃には400 ppmに達すると予想される。ただし、大気残留率は様々な要因で変化し、不確実性も大きい。なお、CO₂以外のGHGの排出量を地球温暖化係数（global warming potential: GWP）でCO₂相当量に換算したものは、ここで述べた濃度・質量換算や大気残留率の考え方には合致しない。

気温上昇と放射強制力の比は気候感度パラメータと呼ばれ、特に、濃度倍増の放射強制力（3.7 W/m²程度）に対する気温上昇は気候感度と呼ばれる。放射強制力に対する気温の応答は、熱容量の大きい海洋のはたらきによって遅れが生じる。このため、気候感度は、気温上昇が一定となる平衡状態と、変化が続いている過渡状態で区別され、それぞれ平衡気候感度（equilibrium climate sensitivity: ECS）、および過渡的気候応答（transient climate response: TCR）と呼ばれる。TCRは、大気CO₂濃度が年率1%で増加して2倍に達する70年目の気温上昇と定義されている。

図2-1-1の右側の縦軸には、ECSとTCRが3.0℃と1.8℃として、それぞれに対応する気温上昇を示してい

る。この場合、平衡時の気温上昇が2℃となる濃度レベルは440 ppmとなる。WG1 AR4⁽⁷⁾では、ECSの最良推定値が約3℃と評価され、450 ppm程度が2℃目標に対応する濃度レベルとして注目された。ところが、気候感度の不確実性は非常に大きく、可能性が高い（66%超の確率）と評価された範囲は、表2-1-1に示すように、AR4では2℃から4.5℃、AR5では1.5℃から4.5℃におよぶ。すなわち、図2-1-1の温度の目盛は、不確実性の幅が1/3ないし1/2から1.5倍におよぶことになる。

この不確実性の幅は、実際のところ、過去30年以上の間ほとんど変わっていない。気候感度に関係するのは、雲などの変化が気温変化を増幅あるいは減衰するフィードバックと呼ばれるはたらきである⁽⁸⁾。個々のフィードバック過程の理解は着実に進んでおり、AR5では、不確実性の大部分が低層の雲のはたらきによることが特定されているが、気候感度の幅を狭めるのは依然として難しいようである。過渡応答の大きさについては、気候のフィードバックの他に、海洋の熱吸収が関係する。ECSに対するTCRの比率は、次項で述べる気候モデル計算から0.6程度と見込まれるが、この値もモデルによってばらつきがある。図2-1-1で仮定した1.8℃は多数のモデルの平均である。

AR5の気候感度の評価では、ECSの最良推定値が示されなかったことと、不確実性の幅が低い方に若干広がったことが注目される。気候感度の値は、基本的には気候モデルで評価されるが、様々な観測情報から推定する方法もある。AR5で改訂されたところは、観測情報に基づく推定で低めの値が報告された⁽⁹⁾ことが関係する。この推定は、気温変化とその変化の原因となる放射強制力の比率を観測情報から求めるものである。ただし、この推定には少なからず誤差があり、僅かな見積りの違いで結果が大きく変わる。特に、化石燃料の燃焼などに伴って大気中に放出されるエアロゾル（微小粒子）の放射強制力が大きな不確実要因である。

様々な気候変化要因について、AR5で評価された2011年時点の放射強制力（1750年基準）を図2-1-2に示す。CO₂濃度の変化による放射強制力は1.82 [1.46–2.18] W/m²（[]内は90%信頼区間）、CH₄、N₂O、ハロカーボン類を加えた長寿命GHG全体では2.83 [2.26–3.40] W/m²である。このGHG全体の等価CO₂濃度は470 ppm eq程度であり、TCRが1.8℃の場合の気温上

表 2-1-1 AR5 と AR4 による気候感度の評価

	AR5	AR4
平衡気候感度 (ECS)		
可能性の高い範囲	1.5°Cから4.5°C	2°Cから4.5°C
最良推定値	非提示	約3°C
低い値の限定	1°C未満: <5%	1.5°C未満: <10%
高い値の限定	6°C超: <10%	6°C超: 排除不可
気候モデル	3.2±1.3°C	3.2±1.1°C
過渡気候応答 (TCR)		
可能性の高い範囲	1.0°Cから2.5°C	非提示
低い値の限定	非提示	1°C超: >90%
高い値の限定	3°C超: <5%	3°C超: <10%
気候モデル	1.8±0.6°C	1.8±0.5°C

昇は 1.4°C 程度となる。一方、観測された気温上昇は、AR5 で評価された 1850-1900 年から 2003-2012 年にかけての変化が 0.78 [0.72-0.85] °C である。この違いは、TCR の不確実性も関係するが、GHG 以外の気候変化要因である程度説明される。中でも、エアロゾルの影響が大きく、日射を遮る効果や雲の変化を介した間接的な効果により、全体として寒冷化に寄与する。ただし、エアロゾルの放射強制力は最大の不確実要因でもある。

AR5 では、人為起源の放射強制力の合計を 2.3 [1.1-3.3] W/m² と評価している。これは、AR4 で評価された 2005 年時点の放射強制力 1.6 [0.6-2.4] W/m² と比べて 44% の増加である。この違いは、評価時点の差 (2005 年から 2011 年にかけての GHG 濃度の増加) に加え、エアロゾルの冷却効果が下方修正されたことも関係する。

このように、不確実性はあるものの、放射強制力は着実に増加している。ところが、実際の気温上昇は、1998 年頃から停滞したような状態が続いており、近年注目を集めてきた。特に、多数の気候モデルによる近未来の予測は、ほとんどが停滞することなく上昇する傾向を示したことから、その原因が精力的に調査されてきた。この問題は、気温上昇の停滞が「hiatus」(中断や休止の意味) と表現されたことから、「ハイエイタス問題」と呼ばれている⁽¹⁰⁾。

AR5 による人為起源の放射強制力 2.3 W/m² に対して、TCR を 1.8°C として見積られる気温上昇は 1.1°C であり、気候モデルの予測値も平均的にはこの値に近い。一方、観測値は上述のように 0.8°C 程度である。両者の違いには、放射強制力、気候感度、観測情報の不確実性に加え、自然変動も関係する。気候は、大気、海洋、陸面、雪氷域、生態系などから構成されるシステムと捉えられる。放射

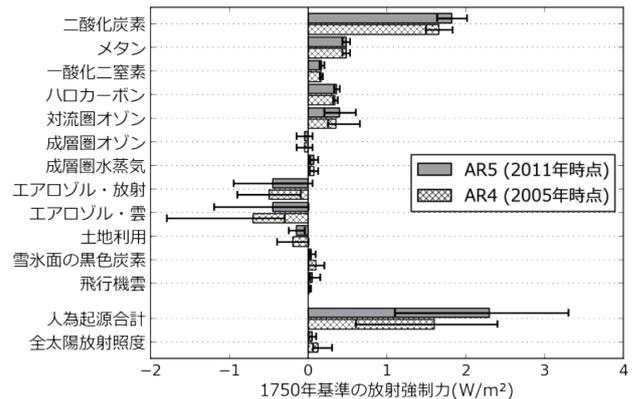


図2-1-2 AR5とAR4による放射強制力の評価

強制力は、気候システムの外部から与えられる加熱・冷却効果である。これに対して、自然変動は気候システムの内部で生じる変動である。

ハイエイタスの原因について、AR5 では放射強制力と自然変動の観点から説明されている。放射強制力については、当該期間の小規模な火山噴火や 11 年周期の太陽活動サイクルにより、GHG 濃度の増加による効果がいくらか相殺されたと考えられている。自然変動については、気候システムに蓄積される熱の配分の観点から説明されている。すなわち、当該期間は深海への貯熱が活発な時期に当たり、海洋表層の温度上昇が相対的に小さくなるという解釈である。この他、一部の気候モデルは気候感度が高過ぎる可能性にも触れている。

このうち、AR5 以降の研究では、熱帯太平洋の大気・海洋相互作用に関係する、10 年以上の自然変動を主因とする見方が主流となっている⁽¹¹⁾。ハイエイタスが熱の配分に関する自然変動の一端であるとする、地球全体の貯熱量は停滞なく増加していると考えられる。実際、海洋の貯熱量は、最近の海洋観測で得られる深海まで含めた水温データから、停滞することなく増加していることが確認されている。さらに、海水の熱膨張による海面上昇も停滞していないという裏づけ情報もある。

問題の 10 年以上の自然変動は、東部熱帯太平洋の水温変動として知られるエルニーニョ (昇温期)・ラニーニャ (降温期) の頻度と関係している。この水温変動は世界平均気温とも連動しており、ハイエイタス期間はラニーニャの傾向であった。本稿執筆時点 (2015 年 8 月) では、前年に 5 年振りに発生したエルニーニョが続いている⁽¹²⁾。このエルニーニョは、2014 年に観測史上最高の世界平均気温をもたらし、それ以前の 1998 年の記録

が更新された⁽¹³⁾。現時点では、ハイエイタスが収束するかどうかわかっていないが、いずれにしろ、ハイエイタスを契機に気候システムの理解が進んだと言える⁽¹⁴⁾。排出削減目標を左右する気候感度などの不確実性についても、今後さらに理解が深まることが期待される。

なお、太陽活動の長期的な変化による自然の放射強制力はAR5では 0.05 W/m^2 と評価されており、人為起源の放射強制力と比べて非常に小さい。また、AR4の評価は 0.1 W/m^2 であり、AR5では下方修正されている。この違いには、11年周期の太陽活動において、最も新しい極小期の活動が、それ以前と比べて弱くなっていることが反映されている。この傾向が将来どうなるかは不明であるが、いずれにしろ太陽活動の長期的な変化は、GHG濃度の増加と比べて小さいことに変わりはない。太陽活動については、雲凝結核に関わる銀河宇宙線との関係に気候変化の原因を見出す主張がある。しかしながら、AR5の評価では、宇宙線と雲量に関連づける確固たる証拠はなく、関連性があったとしても、雲凝結核を介した変化である可能性は非常に低いとされている。

(2) 気候モデル研究

地球温暖化の予測には気候モデルが使われる。気候モデルとは、大気、海洋、陸面、植生、海氷などの現象に既知の法則を当てはめて数式で表現し、地球の気候を計算機でシミュレートするものである。気候モデルには簡便なものから複雑なものまであり、目的に応じて使い分けられる。最も複雑なモデルは、空間3次元にわたって気温、風、水温、海流などの変化を計算するもので、大循環モデル (general circulation model: GCM) と呼ばれる。地球温暖化の科学知見は、GCMとその計算に用いるスーパーコンピュータの発展とともに向上してきた。これまでのIPCC WG1の評価報告書は、その時点で最新のGCMによる予測結果が基盤となっている。

地球温暖化の予測では熱容量の大きい海洋のはたらきが重要である。初期のGCMは大気のGCMに簡略化された海洋モデルを結合したものであったが、1996年のSARから、大気と海洋のGCMを結合したモデル (atmosphere-ocean general circulation model: AOGCM) が利用されるようになった。AOGCMによる長期の気候計算では、基準となる工業化前の条件で、世界平均気温などの値が一定の範囲に保たれる必要がある。初期

のAOGCMでは、気温のずれを抑えるために大気・海洋間の物理量の交換に人為的な調節が施されることがあったが、計算精度が年を追うごとに向上し、2001年のTARの頃から人為調節を不要とするモデルが主流となった。

AOGCMの発展には二つの方向性がある。一つは、空間解像度や個別の物理過程をより精緻にする方向である。物理過程は、雲や放射などの計算格子間隔より小さい規模の現象を指す。個々の物理過程の表現方式の違いは、モデルの精度 (気候の再現性) を大きく左右する。もう一つは、地球の気候形成に関わる要素をより多く取り入れる方向である。AOGCMに統合される要素には、陸面、植生、海氷、大気化学、海洋生態系、炭素循環などがある。このうち、炭素循環は、大気・海洋間、および大気・陸域間の CO_2 交換を詳細に定式化したものである。AOGCMをベースに炭素循環を実装したものは地球システムモデル (Earth system model: ESM) と呼ばれる (コラム1)。ESMは、2007年のAR4に初期の成果が引用され、2013年のAR5で本格的に扱われるようになった。AOGCMとESMでは、気候モデルの外力となる CO_2 の扱いが大きく異なる。AOGCMでは与えられた大気 CO_2 濃度に対して気候の応答が計算されるのに対し、ESMでは排出量と濃度の関係が気候応答と相互に影響する形で計算される。

このように、気候モデルは二つの面で複雑化しており、より詳細な予測情報が得られるようになる一方で、不確実要因も増える傾向にあることに注意が必要である。将来予測の妥当性の判断記述となる過去や現状の気候の再現性は、新しい世代のモデルで着実に向上しているが、モデル間の相違が大きく、将来予測の不確実性は必ずしも縮まっていない。

最近の気候モデル研究は、6-7年毎のIPCC評価報告書のサイクルと連動する形で、国際的なモデル間相互比較研究の枠組みで実施されている。相互比較の対象となる観点やモデル種別には様々なものがあるが、地球温暖化研究の観点では、AOGCMを対象とする結合モデル相互比較 (Coupled Model Intercomparison Project: CMIP) が中核となっている^{(15)~(17)}。

当研究所は、CMIPで主導的な役割を担っている米国大気研究センター (National Center for Atmospheric Research: NCAR) との共同研究を通じて、1990年代か

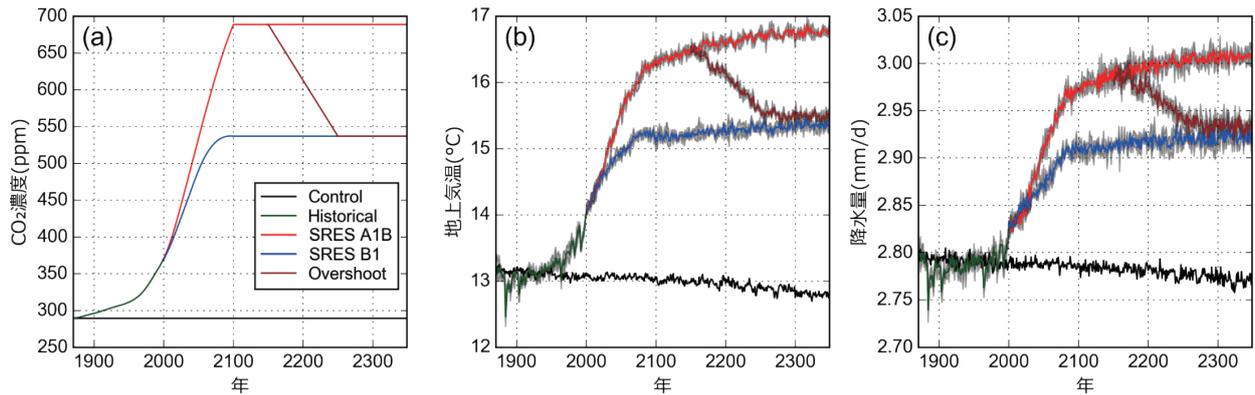


図2-1-3 SRESシナリオの気候計算: (a)大気CO₂濃度の設定、(b)全球年平均地上気温、(c)全球年平均降水強度

CO₂濃度等を18世紀半ばの状態に保つ計算（Control）から、自然変動の状態が異なる3時点を選び、それぞれを初期条件とする3メンバーのアンサンブル気候計算を実施。20世紀再現（Historical）を経て、A1BとB1のSRESシナリオを2350年まで延長して計算。灰色部分は3メンバーアンサンブルの最大・最小の範囲。

ら気候モデル研究に取り組み、2001年のTAR、および2007年のAR4に向けて、主要な成果を創出してきた。当研究所の初期の気候モデル研究については、2001年発行の電中研レビューNo.45にまとめられている。AR4に向けた研究は、「人・自然・地球共生プロジェクト」と呼ばれる文科省の研究プログラムの枠組みで2002-06年度に実施された。これは、国内の気候モデル研究を結集して、2002年に運用が開始された世界最速（2004年11月まで）のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を活用して温暖化予測を実施するという、画期的な研究プログラムであった。

共生プロジェクトと地球シミュレータは、国内の気候モデル研究のレベルを飛躍的に高め、AR4には日本の研究成果が多数引用された。この中で当研究所はオーバーシュートシナリオの気候計算を実施した⁽¹⁸⁾。オーバーシュートとは、気候安定化の目標となる大気CO₂濃度レベルを一時的に超過するという意味である。オーバーシュートは、温度についても目標レベルを一時的に超過する意味で使われるが、ここでは濃度のオーバーシュートに限定する。例えば、2°C目標の目安となる450 ppm eqの場合（ECSが3°Cの想定、図2-1-1）、この濃度レベルで早期に生じる気温上昇は1.2°C程度で（TCRが1.8°Cの想定）、2°Cに達するのは数百年以上先である。このため、450 ppm eqを超過しても、長期的にそのレベルに下がってくれば、2°Cを越えないことは十分あり得る。

AR4に引用された当研究所の成果を図2-1-3に示す。この研究では、AR4の長期予測で使われたシナリオの

うち、A1BとB1を対象に、NCARのAOGCMであるCCSM3を用いて1870年から2350年までの長期計算を実施した。シナリオについての詳細は後述する。CO₂濃度などの各種の気候変化要因は、2000年までは過去の気候を再現するための実測値、2000年以降は各シナリオにしたがった値である。A1BとB1はいずれも排出削減の政策を含まないが、社会経済的な発展の違いによって排出量が異なる。図2-1-3(a)に示すように、CO₂濃度は2100年にA1Bが約690 ppm、B1が約540 ppmに達する。シナリオで与えられるのは2100年までで、その後は2100年時点の値に固定して計算を延長している。この延長計算は、熱容量の大きい海洋のはたらきによる気候の慣性を定量的に評価する目的で、AR4に向けたCMIP3（第3期のCMIP）⁽¹⁵⁾の中で共通に実施されたものである。当研究所は、CMIP3の計算を分担するとともに、CO₂濃度などをA1BからB1のレベルに直線的に下げる計算を追加し、オーバーシュートシナリオで気候変化が回復するかどうかを調査した。

地上気温は、図2-1-3(b)に示されるように、2100年までそれぞれのシナリオに対応して上昇した後、濃度が一定の状態できつりした上昇が続く。A1BレベルからB1レベルに下げる計算は、A1Bを延長した2150年から分岐し、100年後の2250年でB1レベルの条件に一致させ、さらにその状態で100年間続けている。このオーバーシュートの結果は、B1の延長計算と比べると、濃度レベルが等しくなる2250年の時点では若干高いが、その差は徐々に縮まって、100年後には自然変動の幅と同程度になる。降水量の経年変化（図2-1-3(c)）は、

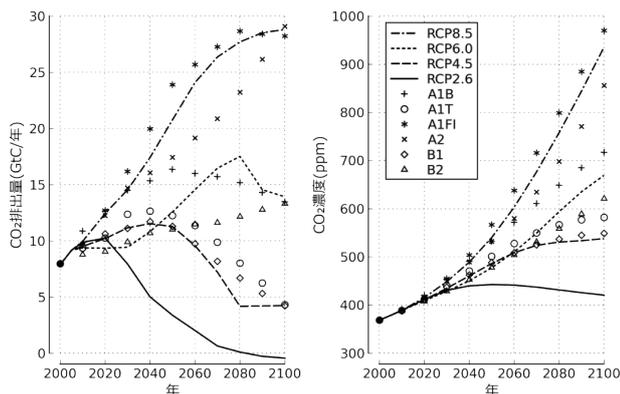


図2-1-4 SRESとRCPのCO₂排出量と大気CO₂濃度

自然変動が相対的に大きい、シナリオ間の違いやオーバーシュートを経た結果との差は、地上気温と同様である。このように、大気や地表面の気候要素については、濃度のオーバーシュートで生じた変化が、100年程度で回復することが確認された。また、海洋の深層の応答が関係する海面上昇などは、100年程度では大きな履歴効果が残るが、濃度の低下によって変化が軽減される効果が長期間続くことも確認された。

一連の計算で与えた2100年以降のCO₂濃度は、気候システムの振舞いを調べるための理想化された計算条件である。現実的な排出量の経年変化では、不連続的な濃度の変化は生じない。また、濃度が一定となるのは、排出量と自然の吸収量がバランスした状態であり、その状態が長期間続くのも不自然な条件である。AR4では、濃度一定の下でゆっくりと気温上昇が続くことが、気候変化のコミットメント、あるいはコミットされた気候変化と言及された。これは遅れて生じる不可避の気温上昇を意味するが、濃度一定の条件が不可避というわけではなく、それ自体不自然な条件であることに注意が必要である。2-1-2節では、より現実的な観点から検討したオーバーシュートシナリオについて述べる。

この研究で用いたCCSM3は、代表的なAOGCMであるが、数あるAOGCMのうちの一つに過ぎない。同一の条件で計算しても結果はモデルによってばらつき、他と比べて決定的に優れるモデルは存在しないため、定量的な気候予測情報は、基本的に、CMIPの枠組みで実施される多数のAOGCMの結果から評価される。文科省の研究プログラムは、「21世紀気候変動予測革新プログラム」(2007-11年度)、「気候変動リスク情報創生プログラム」(2012-16年度)と続き、この間、地球シミュ

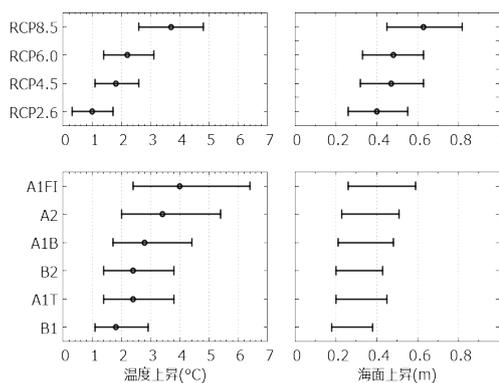


図2-1-5 AR5(上段)とAR4(下段)で評価された20世紀末から21世紀末にかけての気温上昇と海面上昇の予測

レータも2回にわたって更新されている。これらのプログラムでも、AR5に向けて実施されたCMIP5⁽¹⁶⁾や、その後のCMIP6⁽¹⁷⁾に向けた準備が重要な役割となっている。なお、CMIPは第3期の後にIPCCの評価報告書の番号と一致させることになり、第4期は欠番となっている。

(3) 21世紀の気候予測

気候予測の前提となるCO₂等の気候変化要因のシナリオは、AR4まで使われた1999年公開のSRESシナリオ⁽¹⁹⁾から、AR5では2009年公開の代表濃度パス(Representative Concentration Pathway: RCP)⁽²⁰⁾に変更された。SRESは多数のシナリオで構成されるが、AR4の気候予測ではA1B、A1FI、A1T、A2、B1、B2の6本が使われた。RCPはRCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5の4本で構成される。図2-1-4に両シナリオのCO₂の排出量と大気中濃度の推移を比較する。

現状から21世紀末にかけての気温上昇と海面上昇について、AR4とAR5の予測情報を図2-1-5に示す。予測情報は、多数の気候モデルの結果を集約した代表値と不確実性の幅で示されている。予測に使われた気候モデルは、AR4時点のCMIP3からAR5時点のCMIP5にかけて精度が向上しているが、気温上昇の大きさを左右する気候感度については、モデルの平均、ばらつきとも、大きな違いはない(表2-1-1)。したがって、気温上昇のAR4とAR5の違いは、基本的にシナリオの違いによる。不確実性の幅は、AR4と比べてAR5の方が小さくなっているが、これは評価方法の違いに起因するもので、不確実性の大きさも両者は同等と言える。

図2-1-5に示した気温上昇は現状(AR4とAR5で期

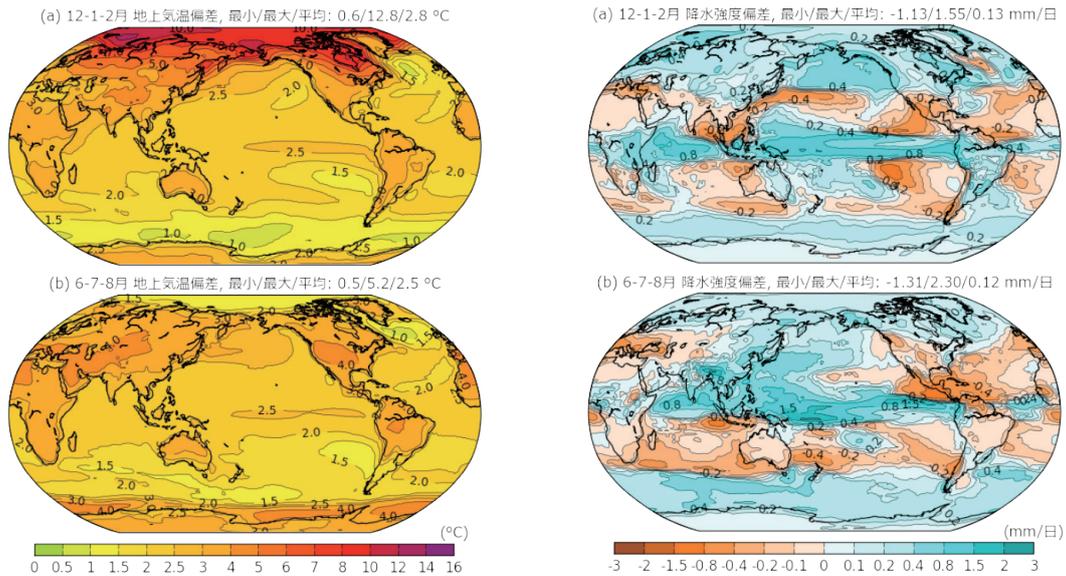


図2-1-6 12-2月(上段)と6-8月(下段)の20世紀末からA1Bシナリオの21世紀末にかけての地上気温(左)と降水量(右)の変化

間が異なる)が基準となっている。工業化前を基準とする気温上昇に換算するには、AR5の結果には0.6°Cを、AR4の結果には0.5°Cを加算する。この換算から、21世紀末の気温上昇が、不確実範囲の大半も含めて2°C以下に収まるのは、RCP2.6のみであることがわかる。AR5では、RCP2.6の気温上昇について、確信度を中程度(5段階の3番目)とした上で、2°Cを超える可能性が低い(33%未満)と評価している。また、2番目に放射強制力の小さいRCP4.5については、同じく中程度の確信度で、どちらかと言えば2°Cを上回る(50%超)と評価している。IPCCの確信度は、証拠の種類、量、質、および整合性と、見解の一致度から評価される。確信度が中程度に留められたのは、気候モデルのばらつきが大きいことに加え、気候モデルと観測情報の整合性も十分とは言えないことが背景にあると推測される。

海面上昇は、AR4以降、観測情報の精度が向上し、AR5ではより詳細に評価されるようになった。AR4では不確実性の幅のみが示されただけであったが、AR5では代表値も示された。AR5の予測値は、AR4に比べて全体的に大きくなっている。海面上昇は、海水の熱膨張、山岳氷河の変化、および氷床(グリーンランドと南極)の変化による寄与があり、氷床の寄与は、表面の質量収支(積雪と融解)と流動による変化に分けられる。このうち、氷床の流動は評価が難しく、AR4では予測値に含まれなかった。AR5の予測値が大きくなったのは、

主に氷床流動の効果が追加されたことによる。要因毎の内訳では、熱膨張が最大の寄与で(30-55%)、山岳氷河がそれに次ぐ。この点についてはAR4も同様である。

地球温暖化は文字通り地球規模の変化であるが、変化の度合いは地域によって大きく異なる。図2-1-6に、現状から21世紀末にかけての気温と降水量の変化の空間分布を示す。この分布は、AR4で使われた多数の気候モデルによるA1Bシナリオの予測結果を平均したものである。分布の特徴はAR5で使われた新しいモデルでも同様であり、シナリオや評価期間が異なる場合でも傾向は類似する。

気温上昇は、海洋より大陸、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。この違いは、主に、海洋の熱容量が大きいことと、雪氷域の変化が気温変化を増幅する効果による。降水量の変化は、地域によって大きく異なり、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。なお、地球全体の年間降水量は増加傾向であり、その変化率は地球全体の熱収支に規定され、気温上昇1°Cにつき1-2%となる。

日本付近の気温変化は、地球全体の平均に近く、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、夏より冬の昇温が若干大きい。日本付近の降水量は、同じ緯度帯の他の地域と異なり、夏季に増加傾向となる。これは、日本が位置する東アジア域で、モンスーン(季

節風)による水蒸気輸送が増加するためである。水蒸気輸送の増加は、気温上昇とともに大気中の水蒸気量が増加することが関係する。

(4) 累積 CO₂ 排出量と気温上昇の関係

気候安定化に向けた排出削減目標の検討では、(1)で述べたように、放射強制力と気温上昇の関係(気候感度、海洋の熱吸収の度合い)、CO₂濃度と放射強制力の関係、CO₂の排出量と濃度の関係(自然のCO₂吸収、コラム2)、およびCO₂以外のGHGやエアロゾルの排出が関係する。個々のプロセスは複雑であるが、大まかに見ると、主な気候変化要因がCO₂で、その大気中濃度が累積排出量で規定されることから、所定の気温目標に累積CO₂排出量の上限が対応することになる。排出量は、年々の変化ではなく、工業化前から現在および将来に至るまでの累積量が効く点が重要である。

AR5では、気温上昇と累積CO₂排出量が近似的に比例関係にあることが初めて明記された。両者の間には様々な非線形的な要因が介在するが、それらが相殺されて直線的な関係になると理解される。実際、多くの気候モデルでこのような直線関係が確認されている。ただし、その比例定数は気候モデルによって大きく異なり、1000 GtCの排出につき0.8℃から2.5℃までが可能性の高い(66%超)範囲と評価された。この1000 GtC当たりの気温上昇は、「累積炭素排出量に対する過渡的気候応答」(transient climate response to cumulative carbon emissions: TCRE)と呼ばれる指標である。現状では不確実性の幅が広いが、TCREは気温目標を累積CO₂排出量の上限と結びつけることから、関心が高まっている^{(21),(22)}。TCREの評価値の幅には、気候感度の他に、海洋と陸域生態系によるCO₂吸収の不確実性が反映されている。

TCREは過渡状態の気温上昇を表すが、上昇した気温の不可逆的な性質により、TCREは所定の累積排出量で長期間維持される気温上昇とも見なせる。上昇した気温が不可逆的というのは、排出をゼロにしてもほぼ一定の気温上昇が数百年間続くということである。当研究所の研究でも、2種類の代表的な地球システムモデルを用いた数値実験で確認されている⁽²³⁾。

TCREを用いると、所定の気温目標と目標達成の確率に対して、累積CO₂排出量の上限が決められる。AR5では、特に2℃レベルについて、図2-1-7に示すやり方で、

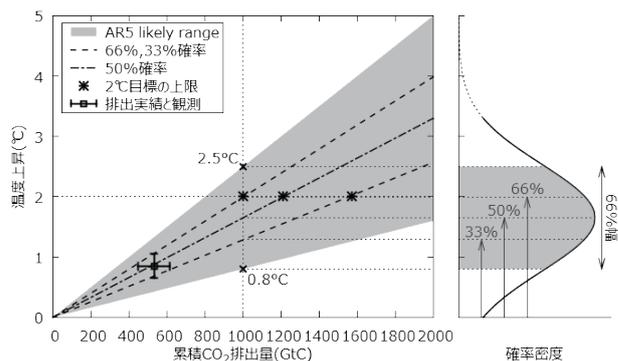


図2-1-7 TCREに基づく気温上昇と累積CO₂排出量の関係

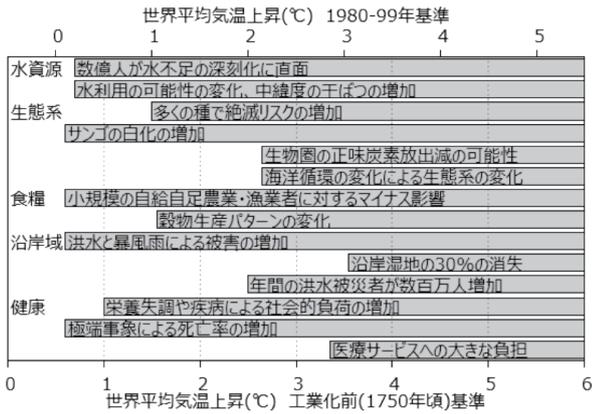
非超過確率が66%、50%、33%の場合で、累積CO₂排出量の上限を1000、1210、1570 GtCと評価している。累積の起点は1870年であり、2011年までの既排出量が515 GtC程度であることも付記されている。TCREに基づく評価はCO₂のみによる気温上昇の場合であり、CO₂以外の要因を考慮すると上記の数値は減少する。ただし、気温上昇と累積排出量の比例関係は、あくまでもCO₂の諸特性の場合に近似的に成立する関係であり、一般的なGHG排出に対応する指標はない。AR5では、CO₂以外の要因を含む複数の気候モデルによるRCPシナリオの計算結果に基づき、2℃レベルに非超過確率66%、50%、33%で適合する累積CO₂排出量の上限值を790、820、900 GtCと評価している。

上記のCO₂以外の要因を考慮した場合の評価結果は、TCREに基づく方法と比べて確率の違いによる幅が狭くなっている。AR5の説明によると、この理由は、一つのシナリオのみで、限られたモデルサンプルから評価されたこととされる。そのシナリオ(RCP8.5)では、CO₂以外の放射強制力が比較的大きく設定されているため、安全側の(より多くの排出削減を必要とする)評価となる。ただし、永久凍土層からのメタン排出といった、上記の評価で考慮されていない懸念事項もある。

2-1-2 長期目標の科学的根拠

(1) WG2 AR5⁽²⁴⁾の気候影響の評価

工業化前を基準とする世界平均の気温上昇を2℃以下に抑える(理念的な)目標は、現在のところ、事実上の国際合意である。この2℃目標は、1980年代頃から繰り返し言及され、UNFCCCの第16回締約国会議(COP16、2010年)では合意文書(カンクン合意)に盛り込まれた。



図の横棒は、左端に対応する気温で影響が顕在化し、気温上昇とともに影響が拡大することを示す。表の「温度」はティッピング・ポイントに対応する1980-99年基準の世界平均昇温、「期間」は質的变化に至るまでの遷移期間。

図2-1-8 AR4でまとめられた気温上昇と主な影響の関係

表 2-1-2 主なティッピング・エレメント

ティッピング・エレメント	限界(°C)	期間(年)	影響
北極海の海水減少	0.5-2	10	温暖化増幅、生態系変化
グリーンランド氷床消失	1-2	>300	海面上昇 2-7 m
西南極氷床の消失	3-5	>300	海面上昇 5 m
大西洋熱塩循環の弱化	3-5	100	局所的な寒冷化など
エルニーニョの振幅増大	3-6	100	東南アジアの乾燥など
西アフリカ植生の増加	3-5	10	環境収容力の増加(良い影響)
アマゾン熱帯林の減少	3-4	50	生物多様性消失、降水減少
北方林の減少	3-5	50	生物群系の遷移

ただし、2℃の根拠は必ずしも明確ではなく、目標設定には、科学的根拠の他に、価値判断も大きく関係する。

2℃目標を示唆する科学情報としては、WG2 AR4⁽²⁵⁾でまとめられた、分野・地域別の影響の度合いと気温上昇の関係が挙げられる。これは、地球温暖化の影響や脆弱性について、多くの既往研究の成果に基づき、水資源、生態系、食糧、沿岸域、健康、特異事象といった分野で整理したものである。図2-1-8にその主な内容を示す。地球温暖化の影響は、必ずしも悪い面ばかりではないが、現状(1980-99年平均)から温度が2-3℃上昇すると(工業化前の基準では「2.5-3.5℃に相当」)、全ての地域で良い面が減少するか悪い面が増加する可能性が非常に高いと評価されている。

AR5⁽²⁴⁾では、さらに多くの知見に基づいて、気候以外のリスクも考慮した分野・地域別の影響をまとめている。影響評価は、気温上昇が2℃の場合と4℃の場合(RCP2.6とRCP8.5に対応)で整理され、排出増加と

もにリスクが増大し、厳しい影響が拡大すると指摘している。

安定化目標の根拠となる情報には、ティッピング・エレメントと呼ばれる事象も含まれる。ティッピング・エレメントは、限界(ティッピング・ポイント)を超える気温上昇によって、ある有限時間が経過した後に質的な変化を引き起こす事象と定義され、多くの事象について限界温度と質的变化に至るまでの遷移期間が評価されている。表2-1-2に代表的な研究⁽²⁶⁾で挙げられた主な事象を示す。質的な変化は、元の状態と大きく異なる状態であり、多くの場合、人間社会や生態系にとって悪い影響が生じる。ティッピング・ポイントと遷移期間は事象によって様々であり、不確実性の度合いも異なる。この研究では、グリーンランド氷床の融解と北極海の海氷減少が最も大きな脅威であり、不確実性も小さいと結論づけている。

氷床融解に伴う海面上昇は、小島嶼国にとっては国土消失につながる重大な問題である。カンクン合意では、小島嶼国の主張を踏まえ、目標を1.5℃とすることにも言及されている。グリーンランド氷床(7m分の海面上昇)のティッピング・ポイントは、表2-1-2では現状から1-2℃とされている。この幅は、工業化前の基準では1.5-2.5℃に相当し、下限値は小島嶼国の主張と一致する。その後の研究も考慮されたAR5では、1-4℃の幅を示している。また、南極については、氷床の海底接地部の不安定性が懸念されるが、AR5では定量的評価は困難という見解である。

このような個別の分野や事象に注目した評価の他に、IPCC WG2では、分野・地域横断的な観点での気候変化リスクの評価も行っている。この観点はReasons For Concern(RFC)と呼ばれ、表2-1-3に示す5種類が選定されている。AR5では、リスクの概念がより体系的に整理されるとともに、RFCについての最新の評価結果が図2-1-9のように示された。評価結果を示す図は、その色合いと形からアンバーダイアグラムと呼ばれる。アンバーは燃えさし(ember)の意味で、色合いは4段階に分かれるリスクレベルに対応する。

気候変化のリスクは、物理的なハザードと社会経済的な要因が重なり、相互に影響することで生じるとされる。AR5の評価では、AR4時点の評価⁽²⁷⁾と比べて、一部を除き、気温上昇が比較的大きいところでリスクレベルが

表 2-1-3 IPCC WG2 で選定された分野・地域横断的リスクの種別 (Reasons For Concern: RFC)

RFC種別	リスクの視点(対象、ハザード、特性)
1 消滅危惧のある固有系	比較的狭い地理的範囲に限定され、将来の気候変化によって消滅する恐れのある系：海水、氷河、珊瑚礁、様々な土地固有の民族や生態系など
2 極端気象	熱波、豪雨、干ばつ、熱帯低気圧（台風）などの極端な天気事象
3 影響の偏在性	食糧や水資源の確保などで、リスクが他と比べて大きい地域や住民が存在すること
4 世界統計の影響	世界全体の影響を包括的に表す経済損失、人的影響、消滅する生物種や生態系などの数量
5 大規模な特異事象	連続的な変化の過程で生じる急激かつ重大な変化：北極の海水消失、氷床融解とそれに伴う海面上昇、生態系レジームシフトなど

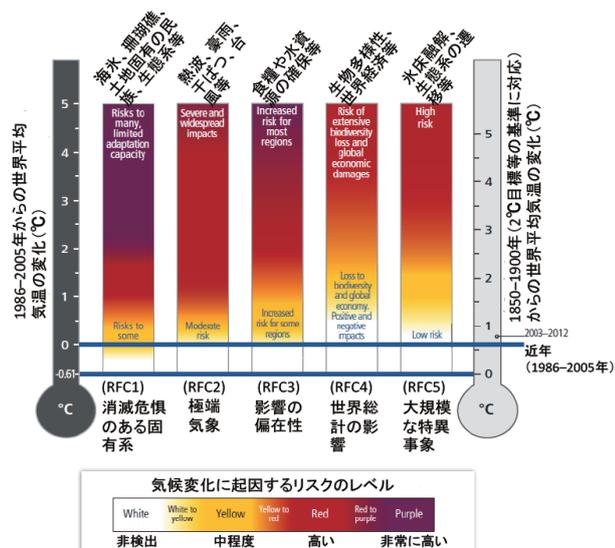


図2-1-9 AR5のアンバーダイアグラム(WG2 AR5 Figure 19.4に和文表記を記載)

高くなり、根拠となる知見の確信度も増している。リスクレベルや確信度が上がった背景には、観測や将来予測の新しい情報の獲得に加え、リスクの対象や関連する社会経済的な要因をより広範囲に扱う傾向のあることも関係している。新しい情報の中には、海洋酸性化(コラム3)のように、最近になって認識されてきた現象も含まれる。

社会経済的な要因には、気候変化の影響下に置かれているかどうか(曝露性)と、その影響を受けやすい状況かどうか(脆弱性)がある。いずれも今後の世界の発展の仕方によって大きく異なり、それによって同じ気温上昇であってもリスクレベルは異なる。ただし、このような将来の発展経路の違いは、AR5の段階の評価では明示的に扱われていない。

(2) WG3 AR5⁽²⁸⁾の排出削減シナリオの評価

地球温暖化の進行は、今後のGHG排出量に大きく左右される。排出量はエネルギー利用や土地利用の形態に依存し、さらに、これらは人間社会の発展の方向性に関

係する。このため、将来の気候変化の見通しを得て対策を検討する際には、複数の排出・濃度シナリオが使われる。シナリオとは、一貫性のある仮定に基づいて妥当性のある将来の発展を記述したものである。シナリオとして扱われる要素には、排出量や濃度の他、その前提となる社会経済の諸条件や、その結果となる気候の変化・影響も含まれる。それぞれの要素について、一定期間にわたる変化を経て到達したレベル(GHG濃度など)とそのレベルに至るまでの道筋は、pathway(以下、パス)と呼ばれる。

地球温暖化問題の検討では、このような様々なシナリオが基盤的な情報となる。特に、排出シナリオに関係する電源構成などを含む社会経済の要素は、効果的な対策を進める上で重要な示唆を与える。そこでは、気候政策を含まないベースラインシナリオと、気候政策を含む緩和シナリオ(気候変化の緩和の意味)が区別され、対策コストなどの評価が両者の差として議論される。

以下では、AR4とAR5の気候予測で使われたSRESとRCPの位置づけを説明し、IPCC WG3の緩和シナリオを気候科学の観点から分析した結果を述べる。

SRESは、気候政策を含まないベースラインの排出シナリオであり、これに関するIPCCの特別報告書「Special Report on Emissions Scenarios」⁽¹⁹⁾がシナリオの名称となっている。SRESは多くのシナリオから構成され、これらは、社会、経済、技術、環境の特徴を記述した4種類のシナリオ群に属する。この4種類は、図2-1-10に示すように、世の中の発展の方向性として、経済発展(A)と環境保全(B)の優先度と、グローバル指向(1)と地域指向(2)の優先度の違いで理解される。二つの評価軸(A-B、1-2)のそれぞれに二つの方向性があり、それらの組み合わせが4種類のシナリオ群となる。各シナリオ群は、単に「A1」、「A2」といった記号で呼ばれる。A1については、エネルギー技術の違いによる、A1FI、

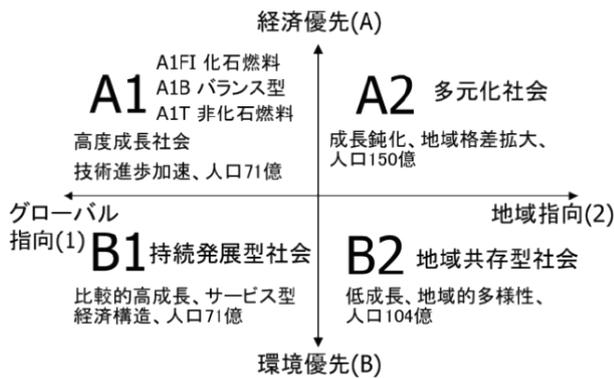


図2-1-10 SRESシナリオの概念

A1T、および A1B の区分があり、それぞれ、化石燃料、非化石燃料、および両者のバランスが重視されるシナリオである。

これら6個のシナリオ群の中では、それぞれの特徴を良く表すものとして例示シナリオが選ばれている。通常 SRES シナリオと言う場合は例示シナリオを指す。図 2-1-4 に見られるように、特段の排出削減政策をとらなくても、将来の排出量は社会経済の発展の方向性によって大きく異なることがわかる。A-B の違いは期間全体の排出量を左右し、1-2 の違いは経年変化の傾向を左右する。当研究所のオーバーシュートシナリオの計算で用いた A1B と B1 は、SRES の中では中位と低位に位置する。排出量に対応する濃度は、簡易モデル計算で推計したものが参照用に使われている。この推計値は複数あり、図 2-1-4 と当研究所の計算で用いた図 2-1-3 に示したデータでは若干の違いがある。

一方の RCP は、2009 年に公開された Representative Concentration Pathway（代表濃度パス）⁽²⁰⁾ の略称で、放射強制力のパスを濃度ベースで与えたものである。放射強制力の範囲は、SRES を含む既往シナリオの大半をカバーするように決められ、上限と下限に相当する2本のパスと、その間に設定された2本のパスで構成される。それぞれのパスは RCP を冠した数値で参照され、その数値は 2100 年以降の概ね安定化する頃の放射強制力（CO₂ 以外の要因も含む合計、単位 W/m²）を表す。RCP の排出量の範囲は、SRES の範囲に対して、極端に低排出となる RCP2.6 を加えた形である。2-1-1 節の第(3)項で述べたように、RCP2.6 は 2℃ 目標達成の可能性が高いシナリオと目されている。

SRES や RCP の作成には、IPCC WG3 の分野で扱わ

れるエネルギー・経済・気候の相互依存を統合的に評価するモデルが使われる。統合評価モデルについては、当研究所で開発しているものも含めて、第(4)項で述べる。統合評価モデルと気候予測に使われる AOGCM とは、シナリオ情報の受渡しを通じたつながりがある。この情報の流れは必ずしも一方向ではなく、AOGCM の計算結果を統合評価モデルに反映する方向もある。気候感度に代表される気候応答のパラメータはその代表例であり、統合評価モデルに含まれる簡易的な気候計算のパラメータは、多数の AOGCM の傾向に基づいて調整される。両モデルで扱われる土地利用のモデルも、情報の流れが双方向になり得る要素である。

こうしたシナリオ情報の相互依存性は、AR4 以降、強く意識されるようになってきている。SRES は IPCC が主導して作成されたものであるが、その後のシナリオ作りでは、IPCC は触発者（catalyst）の役割になり、作成主体は研究コミュニティになった。そこでは、シナリオ情報の重要性和ニーズが時間をかけて議論され、全体として整合性のあるシナリオ作りが指向されている⁽²⁹⁾。

実は、RCP は一連のシナリオ研究の出発点に位置している。4本のパスはいずれも統合評価モデルで作成されているが、付随する社会経済シナリオは表に出ていない。これは、AR5 に向けて、時間のかかる気候計算を最初に実行する必要がある、その気候計算の入力条件として RCP が用意されたためである。社会経済シナリオの検討は気候計算と並行して進められ、ベースラインシナリオと緩和シナリオの作成と分析が進められた。この作業は、統合評価モデルを手がける世界中の研究機関で行われ、AR5 のシナリオとしてデータベース化されたものは 1200 本に上る。そして、AR5 の取りまとめの段階で、CMIP5 の知見を反映した簡易気候モデル⁽³⁰⁾によって、各シナリオの気候計算が実施された。

この社会経済シナリオの評価で最も注目されるのは、多数のシナリオを GHG 濃度レベルで分類した表である。この表は、WG3 AR4⁽³¹⁾ に掲載された同様のシナリオ分類表の改訂版にあたる。ここでは両者を引用して図 2-1-11 で比較する。いずれの表も、排出量や気温上昇の定量的な特徴が濃度レベルと対応づけられ、排出削減の長期目標に直結する重要な政策的示唆を与える。特に、2℃ 目標に対応する濃度レベルの数値は、報道や政策目標でしばしば取り上げられてきた。

カテゴリ	放射強制力 (W/m ²)	二酸化炭素濃度 ⁽¹⁾ (ppm)	温室効果ガス濃度 (二酸化炭素換算) ⁽²⁾ (ppm)	気候感度の“最良の推定値”を用いた平衡時の世界平均気温の上昇 ⁽³⁾ (°C)	二酸化炭素排出がピークを迎える年 ⁽⁴⁾	2050年における二酸化炭素排出量の変化 (2000年比) ⁽⁵⁾ (%)	評価されたシナリオの数
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000-2015	-85 ~ -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000-2020	-60 ~ -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010-2030	-30 ~ +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020-2060	+10 ~ +60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050-2080	+25 ~ +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060-2090	+90 ~ +140	5

(a)AR4 時点
WG3 AR4 Table SPM.5 「ポスト TAR の安定化シナリオの特徴」(経産省訳)
排出量の変化は、シナリオ分布の 15-85 パーセンタイルの範囲。

2100年 CO ₂ 換算濃度 ⁽¹⁾ 区分ラベル (濃度幅)	細区分	RCP シナリオの相対的位置 ⁽²⁾	2010年比の CO ₂ 換算排出量変化 (%) ⁽³⁾		21世紀にわたり(1850 ~ 1900年と比べて)特定の気温水準未満にとどまる可能性 ⁽⁴⁾			
			2000年	2100年	1.5°C	2°C	3°C	4°C
< 430	430ppmCO ₂ 換算未満の水準について調査した個別のモデル研究は数が限られている ⁽⁵⁾ 。							
450 (430 ~ 480)	全体幅 ⁽⁷⁾	RCP2.6	-72 ~ -41	-118 ~ -78	どちらかといえば可能性が高い	可能性が高い		
500 (480 ~ 530)	530ppmCO ₂ 換算のオーバーシュート無		-57 ~ -42	-107 ~ -73	可能性が高い	どちらかといえば可能性が高い	可能性が高い	
	530ppmCO ₂ 換算のオーバーシュート		-55 ~ -25	-114 ~ -90		どちらかといえば可能性が高い		
550 (530 ~ 580)	580ppmCO ₂ 換算のオーバーシュート無		-47 ~ -19	-81 ~ -59	可能性が高い	どちらかといえば可能性が高い	可能性が高い	
	580ppmCO ₂ 換算のオーバーシュート		-16 ~ -7	-183 ~ -86		どちらかといえば可能性が高い		
(580 ~ 650)	全体幅	RCP4.5	-38 ~ -24	-134 ~ -50	可能性が高い	どちらかといえば可能性が高い	可能性が高い	
(650 ~ 720)	全体幅		-11 ~ -17	-54 ~ -21		どちらかといえば可能性が高い		
(720 ~ 1000) ⁽⁸⁾	全体幅	RCP6.0	18 ~ 54	-7 ~ 72	可能性が高い	どちらかといえば可能性が高い	可能性が高い	
>1000 ⁽⁹⁾	全体幅	RCP8.5	52 ~ 95	74 ~ 178	可能性が高い	可能性が高い	どちらかといえば可能性が高い	

(b)AR5 時点
AR5 統合報告書 Table SPM.1 「第3作業部会第5次評価報告書で集められ、評価されたシナリオ区分の主要な特徴。全てのパラメータについて、各シナリオの 10 ~ 90 パーセンタイルで示されている。」(経産省訳)

図2-1-11 統合評価モデルで作成・分析されたシナリオの分類(上:(a)AR4時点、下:(b)AR5時点)

AR4の表では、2°C(平衡時の気温上昇)を含むカテゴリIで、2050年のCO₂排出量が2000年比で85%から50%減となっている。この数値は、AR5以降の長期目標の議論で、2050年に少なくとも半減という認識が定着したことに寄与したと考えられる。ただし、その基になったシナリオは僅か6本であり、しかも特定の研究グループによる偏った情報と見られている⁽³²⁾。

AR5のシナリオは、総数が大幅に増加した他、気温上昇の確率論的評価が導入されたことも大きな変化である。この中では、19世紀後半から2100年までの気温上昇が2°C未満に留まる可能性が高いと唯一評価されたのが450 ppm eq(2100年時点のGHG濃度)の種別であり、そのGHG排出量(GWPによるCO₂換算値)が2050年時点で2010年比41%から72%減とされた。2015年6月のG7サミット(主要国首脳会議)では、40%から70%の範囲の上端を世界全体の2050年目標とすることが首脳宣言に盛り込まれた。そこでは、IPCCの推奨という誤った表現が使われているが、450 ppm eqのシナリオ分類種別の情報が基になっているのは明らかである。なお、このシナリオについては政策面の論点を3-6-1節で議論する。

このようにAR4とAR5のシナリオ分類表が現行の長期目標に少なからず影響していることから、両者の違いに関心が持たれる。AR4とAR5のシナリオ分類を比較する場合、基準とする濃度レベルの前提条件の違いを考

慮する必要がある。

AR4のシナリオは、平衡状態の濃度で分類され、気温上昇も平衡状態の数値が記載されている。この場合、濃度と気温上昇がECSのみで関係づけられる。実際、表に示されている数値は、式(2-1-1)、および気温上昇と放射強制力の比例関係から得られる

$$\Delta T = ECS \times \ln(C/C_0) / \ln(2) \quad (2-1-3)$$

において、ECSを3°Cとして得られる値である。

一方、AR5の表に含まれる濃度や気温上昇は、平衡時ではなく、2100年時点の変化が続いている状態の値である。2100年以降の濃度の推移は、その後の排出に依存する。大気CO₂濃度の変化は、人間活動の排出率と自然の吸収率の差で決まる。ここで、率は単位時間(例えば1年間)の排出量や吸収量を意味する。一時的に両者がバランスして濃度が一定になったとしても、自然の吸収率が徐々に減少するため、そのまま排出が続けば長期的に濃度は増加する。また、排出率を自然の吸収率以下とし、その状態を続ければ濃度は低下する。AR5のシナリオには、2100年時点で排出率が負に達するものも含まれる。その状態が長期間続くと仮定すれば、AR4のカテゴリIに相当するシナリオは、AR5の濃度区分の相当広い範囲におよび、カテゴリIの濃度レベルを下回るシナリオも多数存在することになる。しかしながら、AR5のシナリオデータは基本的に2100年までであり、

平衡時の濃度レベルを特定することはできない。

AR5のシナリオの気温上昇については、気温上昇の確率論的評価⁽³³⁾の基になった多数のアンサンブル計算の結果も示されている(WG3 AR5 Table SPM.1等)。そこには、2100年時点(1850-1900年基準)の気温上昇が、濃度区分毎に、気温応答の中央値に対応する範囲と、不確実性の幅を考慮した範囲が示されている。450 ppm eqの区分では、それぞれ1.5-1.7℃、1.0-2.8℃となり、2℃未満となる可能性が高いという評価の根拠となっている。

ECSを3℃としたAR4の気温の評価は、気温応答の不確実範囲の代表値(AR4時点の最良推定値)をとったものである。AR5のシナリオに対する気温上昇の計算では、TCRの中央値が1.8℃、90%幅が1.2-2.6℃に調整されている⁽²⁸⁾。TCRとECSの比率が経験的に0.6程度であることから、TCRの代表値(1.8℃)はECSでは3℃に相当する。すなわち、平均的な気温応答は、AR4とAR5で概ね同等の扱いと言える。ただし、AR5でECSの最良推定値が決められなかったことから、評価結果の妥当性については根拠が弱まっている。

2100年以降の気温の推移は、濃度の場合と同様、その後の排出量に依存する。気温上昇と累積CO₂排出量が近似的に比例する(2-1-1節の第(4)項)ことから、2100年以降のCO₂排出がゼロであれば、CO₂以外の要因を無視して、2100年時点の気温上昇を平衡時の気温上昇と見なせる。450 ppm eqの区分は、平均的な気温上昇が1.6℃であることから、2100年以降ゼロ排出の場合はカテゴリIより相当低い気温レベルとなる。逆に、2100年以降、僅かずつでも排出が続けば、気温上昇が続き、いずれは2℃を越えることになる。

以上のように、AR4とAR5のシナリオ評価は単純に比較できないが、既に政策目標として言及された2050年の排出削減量について、基準年とパーセンタイルを揃えて比較することは参考になる。世界全体のGHG排出量は、SARの積算期間100年のGWPによるCO₂相当量では、2000年の40 GtCO₂ eqから2010年の49 GtCO₂ eqに増加している⁽²⁸⁾。したがって、AR5の2010年比41-72%減は、2000年比で28-66%減に当たる。さらに、正規分布を仮定して、AR5の10-90パーセンタイルの範囲をAR4の15-85パーセンタイルの範囲に換算すると、AR5の評価は31-62%減となる。AR4はCO₂排出

量について50-85%減とされたが、GHG排出量も同様の削減率と見なすと、AR5の評価はAR4と比べて20ポイント程度緩やかになったと言える。

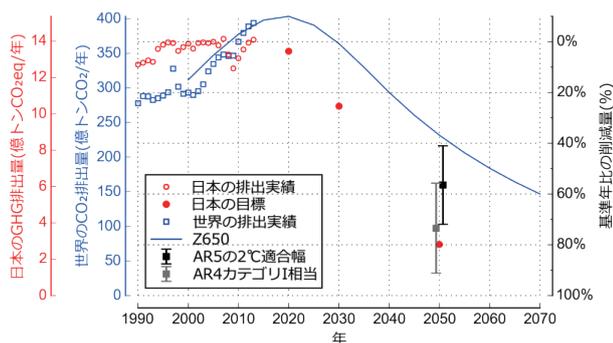
所定の濃度や気温のレベルに至る排出パスは、2050年といった特定の時点の排出量ではなく、一定期間にわたる累積排出量に制約される。多数の社会経済シナリオの気温上昇と累積CO₂排出量の関係も、基本的に、CMIP5モデル等で見出された両者の比例関係と整合することが確認されている⁽³⁴⁾。この比例関係は、温度目標の高低によらず累積CO₂排出量に上限があり、最終的にCO₂排出量をゼロにする必要性を意味する。累積値の制約は厳しい排出削減を示唆するが、所定の累積値に至る排出経路に任意性があることから、2050年といった特定の時点の排出量に柔軟性があることの根拠でもある。

早期に削減を開始して緩やかに減らすか、削減開始を遅らせて急激に減らすかは、シナリオの作成に使われる統合評価モデルで前提となる技術やコストなどの条件に依存する。AR4と比べて大幅に増加したAR5の低排出シナリオでは、オーバーシュート的な排出パスを可能にする前提がより強化されたと推測される。さらに、AR4からAR5にかけて時間が経過し、通常用いられる10年間隔の計算時点で、シナリオの開始時点が2000年から2010年になってきていることも、オーバーシュート指向の一因となる。

(3) 気候安定化の考え方

1992年に作成・採択されたUNFCCCは、その究極の目標をGHG濃度の安定化としている。従来のAOGCMによる気候計算や統合評価モデルによる社会経済シナリオの分析は、濃度安定化をベースとするものであったと考えられる。しかしながら、AR5では、累積CO₂排出量の制約やオーバーシュート型の排出パスが主流となり、濃度安定化の概念が薄れつつある。当研究所は早くからオーバーシュートの考え方に注目するとともに(2-1-1節の第(2)項)、独自の簡易気候モデルを開発して⁽³⁵⁾、長期の排出パスの検討を行ってきた。以下では、海洋研究開発機構の松野太郎博士と共同で研究した、実現可能性の高い合理的な排出パスとその基盤となる気候安定化^{(36)~(38)}について説明する。

濃度安定化のシナリオを作成する場合、2100年以降



世界のCO₂排出量と日本のGHG排出量は、それぞれ2010年と2005年を基準とする相対量でスケールアップ。世界の実績値は化石燃料起源と土地利用起源のCO₂排出の合計。AR4カテゴリは基準年等を換算。日本の実績値は温室効果ガスインベントリオフィスによる2013年までのデータ(CO₂とその他6種ガスの合計)、目標値は2015年7月時点の公表情報に基づく(2020年目標は暫定、2050年目標の基準年は未定)。

図2-1-12 Z650と世界および日本の排出実績・目標との比較

のそう遠くない時期に所定の濃度レベルに達するような前提が置かれる。しかしながら、その濃度レベルで気温が平衡状態に達するのは千年以上先となる。その間は、自然の吸収率とバランスするよう人間活動による排出が続くことになる。この排出は現在の1/10程度である。松野博士は、長期間にわたる濃度一定の前提が不自然であること、および安定化の目標には千年規模の海面上昇も関係することから、より合理的なゼロエミッション安定化という新しい概念を提案した。さらに、この概念に基づいて2℃目標を柔軟に考え、AR4で言及された2050年時点の排出削減を緩和する、Z650と称する世界全体のCO₂排出パスを提案した。

Z650の排出パスは、2020年に11 GtCでピークアウトして2040年に8 GtCとなり、そこから30年で半減するペース(年率2.3%減)で21世紀末に2 GtCまで減少し、2160年にゼロに達する。累積排出量は、21世紀中に約650 GtC、工業化前からゼロ排出に至るまでの累計で1100 GtC程度である。Z650の名称は、ゼロを意味する「Z」と21世紀中のGtC単位の累積値に由来する。650 GtCは、450 ppmで安定化する従来の排出パスから見積もられる550 GtC程度に、オーバーシュートによる上乗せを100 GtC程度見込んだことに相当する。

参考として、図2-1-12に、Z650の排出パスを世界と日本の排出実績^{(39)~(41)}ならびに目標値と比較する。直近の世界の排出実績は、Z650の排出パスに近いところで推移している。2050年の排出量は、AR5の2℃目標に適合するとされる450 ppm eqのシナリオ区分の幅より

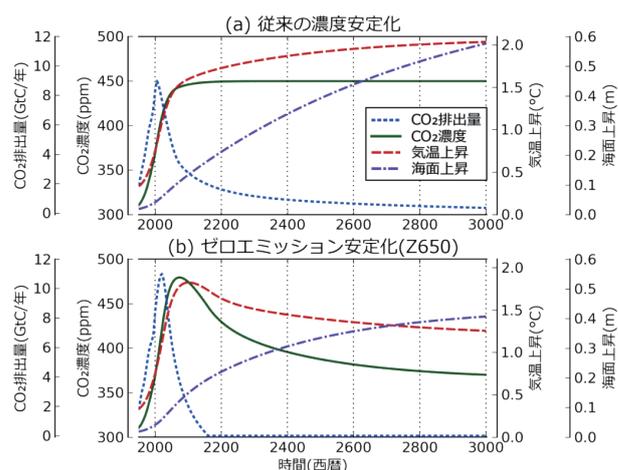


図2-1-13 従来濃度安定化(450 ppmレベル)とゼロエミッション安定化(Z650)

Matsuno et al (2012) Figure 3⁽³⁶⁾に基づいて作成。

上側に位置する。仮に、この幅の中央とZ650の差に相当する削減緩和を日本の長期目標に適用すると、2050年の80%減の目標は60%減程度に緩和される。

ゼロエミッション安定化で鍵となるのは海洋の働きである。これまでの人間活動で排出されたCO₂は、半分強が海洋と陸域生態系に吸収されている⁽⁴⁾。ただし、この割合は一定ではなく、特に海洋は長期的により高い吸収率になると期待できる。海洋は気温上昇を遅らせる働きもあり、2℃レベルに対応する濃度に達しても、気温上昇が2℃になるのは遠い先となる。ゼロエミッション安定化では、自然の吸収率より十分に低い排出率を実質的に「ゼロ」とし、その状態で気候システムがゆっくりと(千年以上かけて)平衡に向かう過程を考える。

図2-1-13に、当研究所の簡易気候モデルを用いた千年規模の気候計算から、CO₂のみの気候変化要因の条件で、従来の濃度安定化(450 ppmレベル)とZ650を比較した結果を示す。上昇した濃度が一定に保たれる濃度安定化の場合、気温は緩やかな上昇が続き、平衡時の値(この計算では2.1℃)に近づいていく。図には、海水の熱膨張による海面上昇も示している。海洋の深部に熱が伝わるのに時間がかかるため、熱膨張は数千年規模で続く。実際の海面上昇には、山岳氷河と極域氷床の融解の寄与が加わる。特に、氷床の寄与は非常に大きく(表2-1-2)、熱膨張と同様の時間規模で進行するため、気温上昇が長期間続く場合は深刻な影響が懸念される。

一方、Z650のゼロエミッション安定化では、排出ゼロの下で濃度が徐々に低下し、やがて気温も低下してく

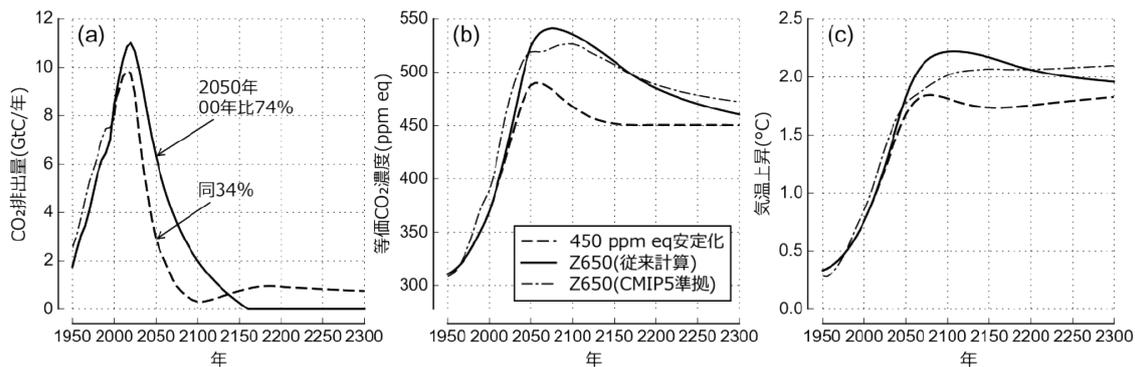


図2-1-14 非CO₂要因を含む簡易気候計算による450 ppm eq安定化とZ650の比較

450 ppm eq安定化と従来計算のZ650は、Matsuno et al (2012)⁽³⁷⁾のFigure 4, 6に基づく。CMIP5準拠のZ650では、Z650のCO₂排出パス(2005年以降)以外をCMIP5のRCP2.6の条件とし、炭素循環はCMIP5モデルのESMの平均的な傾向に、気温応答はCMIP5モデルの平均(ECS=3.1°C、TCR=1.8°C)に調整して計算。

る。海面上昇(熱膨張)は止まらないが、濃度安定化の場合より軽減される。また、長期的に気温が下がっていくため、氷床融解が起きる可能性は低くなる。この傾向は、Z650に限らずゼロ排出の下で共通に見られる特徴である。ただし、気温が低下するかどうかは複雑な要因が関係する。図に示した計算ではシンプルな仮定が置かれているが、AR5の知見によれば、気温はほぼ一定の状態でも長期間続くと見られる。

このように、従来の濃度安定化とゼロエミッション安定化では、長期的な気候の推移に本質的な違いがある。濃度安定化では、暗黙のうちに、自然の吸収とバランスする排出を何世紀も続ける状態が想定され、その結果として最終的に平衡に達した時の気温上昇が目標とされる。今世紀中は目標温度まで相当に余裕があるので、今世紀に限れば排出削減をもっと緩和できるはずである。また、来世紀以降、自然の吸収に合わせて同量の排出を続ける必然性もない。これらの点に注目して、濃度一定の前提をなくし、今世紀の排出に余裕を持たせるのがゼロエミッション安定化のねらいである。

濃度が下がる前提であれば、目標とする濃度レベルを一時的に越えた(オーバーシュートした)としても、長期(来世紀以降)の深刻な気候影響を軽減できる。特に、グリーンランド氷床融解は千年規模の現象であるので、この考え方に合致する。排出削減の長期目標は2050年時点で議論されるが、気候科学の観点では2050年は通過点に過ぎない。ゼロエミッション安定化の意義は、時間の尺度を大きく延ばして、排出パスの柔軟性を見出す点にある。AR5で検討された多数のオーバーシュート型のシナリオは、排出パスの柔軟性という点でゼロエ

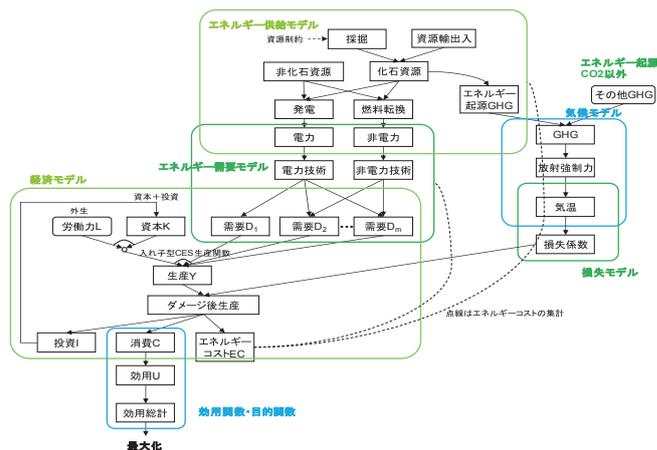
ミッション安定化と共通するが、2100年以降が無視される点が根本的に異なる。また、AR5の低排出シナリオに見られるような負の排出は、ゼロエミッション安定化では考慮されない。

CO₂以外の気候変化要因も考慮して、Z650と2°C目標に適合する濃度安定化を比較した結果を図2-1-14に示す。この図には、論文で示された結果⁽³⁷⁾と、CMIP5モデルの平均に準拠する新しい設定でZ650を計算した結果を示している。ここでは、前者を従来設定として区別する。2050年のCO₂排出量は、濃度安定化では2000年比34%、Z650では同74%で大きく異なる。この違いは21世紀末にかけて気温上昇の差をもたらすが(従来設定の計算でピーク値はそれぞれ1.8°Cと2.2°C)、その差は徐々に縮まり2300年以降に逆転する(最終的な平衡状態でそれぞれ2.1°Cと1.7°C)。非CO₂要因が加わる等価CO₂濃度は、濃度安定化の場合もピーク後減少する経路となる。Z650の濃度はさらに大きく減少するが、2100年時点の濃度に基づくAR5のシナリオ区分(図2-1-11)では、550 ppm eq(480-530 ppm eqの範囲)の区分に位置する。AR5では、21世紀中のピークと2100年時点の差が30 ppm以上の場合にオーバーシュートとしている。Z650は負の排出に至るような極端な削減を想定しないため、AR5の基準ではオーバーシュートに該当しない。

新しい設定の計算では、Z650の気温上昇は明瞭なピークがなく、長期的にほぼ一定(2.1°C程度)で推移する。この計算では、CMIP5モデルの平均を模擬するように、海洋と陸域生態系のCO₂吸収に温度依存性を導入し、さらに気温応答の特性も調整している。また、

非CO₂要因はRCP2.6のシナリオ（過去の期間含む）を用いている。上昇した気温がほぼ一定で長期間続く傾向はAR5の知見と整合するが、気温上昇の大きさや長期的な変化傾向は様々な設定条件に依存する。

様々な不確実性があるものの、Z650は、来世紀以降も含めた長期にわたり、50%程度の確率で2℃目標を達成できる排出パスと位置づけられる。当初意図したゼロエミッションの下での気候復元には相当の時間がかかると見込まれるが、従来の濃度一定の前提と比べて長期の気候影響が軽減されることに変わりはない。いずれにしても、気候感度等の不確実性は依然として大きく、Z650に限らず、気候科学の進展とともに、排出削減目標や気候リスクへの対応を柔軟に見直す必要がある。



生産を各期の消費と投資に適切に配分し、効用の割引・地域別加重後の総計を最大化。気候影響は生産の損失に含まれる。

図2-1-15 BETモデルの構成

(4) 統合評価モデルの役割

Z650は気候科学の観点から考案されたCO₂の排出パスである。排出パスに対応するエネルギー技術や電源構成等の情報は、統合評価モデルから得られる。モデルは現実の世界を極度に単純化したものであるが、その前提条件の範囲で首尾一貫した結果を出力する。その結果から、将来のエネルギー需給見通しなどの情報も含めて、政策的含意を得ることができる。Z650の検討は、これまでキャノングローバル戦略研究所の地球温暖化研究で実施されており、そこでは、エネルギー総合工学研究所の統合評価モデル（GRAPE）のエネルギーモジュールが使われた⁽⁴²⁾。その結果によると、Z650の排出パスを実現するには、特に今世紀後半から、全ての部門であらゆる技術を駆使した排出削減を世界全体で強力に推進する必要があることが示される。

一般に、統合評価モデルは、所定の前提（人口、経済、資源、エネルギー技術等の諸元）で、与えられた制約（例えばZ650の排出パス）に対する最適解を計算するツールである。モデルによって構成や最適解を得る仕組みが大きく異なり、計算結果に大きな差異が生じることも多い。このため、計算結果の理解を深め、適切な政策的含意を得るために、国際的なモデル比較研究のプログラムが多数実施されている⁽⁴³⁾。AR5の社会経済シナリオのデータベースは、このような研究プログラムの成果が集約されたものである。最近では、IPCCの要請を受ける形で、2007年に統合評価モデルコンソーシアム（Integrated Assessment Modeling Consortium: IAMC）

が結成され、統合評価モデルに関連する情報共有と意見交換の場となっている。

当研究所は、この分野では後発となるが、BETと称する独自の統合評価モデルを開発し⁽⁴⁴⁾、国際モデル比較プログラムへの参加を通じて、AR5のシナリオデータベースにも貢献した。BETは、Basic Energy systems, Economy, Environment, and End-use Technology Modelの略称である。

統合評価モデルには、対象地域、経済諸変数の均衡、時系列と最適化、経済部門やエネルギー部門の扱いなどの違いにより、いくつかの類型がある。BETは、世界13地域の経済一部門で多時点の動学的最適化を行う一般均衡モデルで、エネルギー供給部門を詳細に扱える特徴がある。さらに、他の同種のモデルにない特徴として、エンドユース技術（需要側のエネルギー利用技術）を明示的に扱う仕組みを導入している。図2-1-15および表2-1-4に、BETの構造およびエンドユースの需要区分と技術を示す。

緩和策の評価では、CO₂等の制約に対するエネルギー利用の変化やその経済影響が主な関心事である。BETモデルでは、電源構成に代表される供給側の技術だけでなく、需要側の技術も分析対象となる。計算結果の一例として、図2-1-16に、世界全体のGDPと2050年時点のエネルギーサービス需要に対するGHG濃度制約の影響を示す。この計算では、ヒートポンプ、電気自動車、ハイブリッド貨物車などを革新的エンドユース技術とし、それを含めるかどうかの違いを比較している。

表 2-1-4 BET モデルで扱われるエンドユース技術

エネルギーサービス需要	エネルギー	電力	非電力		
			固体燃料	液体燃料	気体燃料
産業	高温加熱	電熱加熱、産業用IH	石炭ボイラ	石油ボイラ	ガスボイラ
	低温加熱	電熱加熱、産業用HP	石炭ボイラ	石油ボイラ	ガスボイラ
	その他電力 ^{※1}	電力	—	—	—
	その他固体 ^{※1}	—	石炭	—	—
	その他液体 ^{※1}	—	—	石油	—
	その他気体 ^{※1}	—	—	—	ガス
業務	機器	電気機器	—	石油ランプ ^{※2}	—
	冷房	エアコン	—	—	—
	調理 ^{※3}	電気	石炭	石油	ガス
	給湯	HP給湯器	—	石油給湯器	ガス給湯器
	暖房	エアコン	石炭ストーブ	石油ストーブ	ガスストーブ
家庭	機器	電気機器	—	石油ランプ ^{※1}	—
	冷房	エアコン	—	—	—
	調理 ^{※3}	電気	石炭	石油	ガス
	給湯	HP給湯器	石炭給湯器	石油給湯器	ガス給湯器
	暖房	エアコン	石炭ストーブ	石油ストーブ	ガスストーブ
	運輸	道路貨物輸送	電気自動車	—	従来自動車
道路旅客輸送		—	—	従来自動車、ハイブリッド車	—
鉄道 ^{※3}		電力	—	石油	—
航空船舶 ^{※2}		—	—	石油	—

※1 加熱以外の需要は代替不能と考える。例えば、電気化学、モーター、原材料等。
 ※2 初期時点の実績との整合のみに採用されることを目的とした技術である。
 ※3 現状モデルでは、将来のシェアは現状レベルで固定と仮定した。

GHG 濃度制約が厳しくなるほど GDP ロスが大きくなるが、その度合いは革新的エンドユース技術によって軽減される。エネルギーサービス需要も GHG 濃度制約とともに減少するが、電力利用のサービスは増加する。この結果は、電気の利用拡大が排出削減に効果的であることを意味する。

このような排出削減におけるエネルギー技術の効果は、モデル間比較のプログラムでも多数検討されている。代表的なモデル比較の一つに、米国 Stanford 大学が主催する Energy Modeling Forum (EMF) が挙げられる。EMF では様々なテーマで多数のプログラムが実施されており、各プログラムは実施順に EMF を冠した番号がつけられている。このうち、当研究所の BET モデルも参加した EMF27 の成果⁽⁴⁵⁾ は、AR5 の緩和シナリオの評価で多数引用された。

EMF27 では、18 個の統合評価モデルが参加して、技術と気候政策の異なる条件を組み合わせた 30 程度のシナリオ計算が実施された。技術条件には、エネルギー強

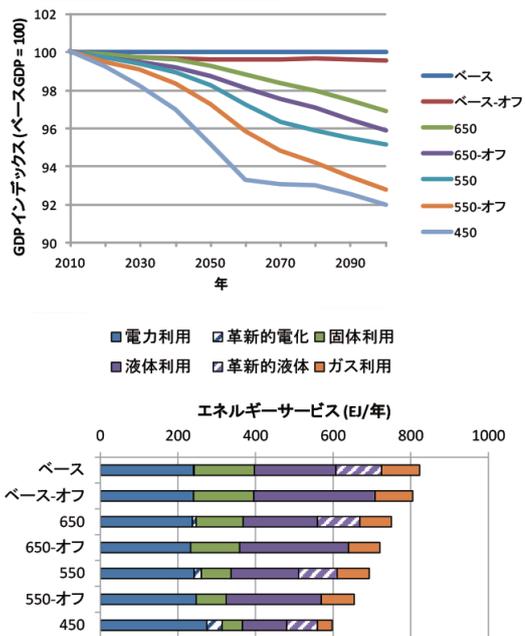


図2-1-16 GHG濃度制約に対するBETモデルの試算

GHG濃度は、「ベース」が制約なし、650、550、450が2100年時点にそれぞれのレベル(等価CO₂濃度、単位ppm eq)に達する制約を課す場合。固体、液体、ガスは2次エネルギーとして使用される燃料の形態を表す。

度の改善、CO₂ 回収・貯留 (carbon capture and storage: CCS)、原子力、太陽・風力、バイオエネルギーが含まれる。エネルギー強度は、単位経済量当たりのエネルギーで、値が小さいほど改善される (エネルギー利用効率が低い) ことを意味する。気候政策は、特段の排出削減を行わないベースラインの他、等価 CO₂ 濃度を 2100 年までに 450 ppm eq ないし 550 ppm eq に抑える条件などが設定された。分析結果は次のように集約される。

- ・世界のエネルギーシステムの脱炭素化では、エネルギー強度の改善と、電力部門の脱炭素化およびエンドユースの電化が確固たる変革となる。
- ・鍵となる技術の中では、負の排出をもたらす CCS とバイオエネルギーの組み合わせといった、効果が多方面におよぶ技術が最も重要。
- ・変革規模が大きくなる 450 ppm eq の条件では、利用可能な技術の違いによって、実現可能性 (解が得られない場合あり) やコストが大きく異なる。

AR5 の緩和シナリオの評価においても、需要側の観点から、既存のエネルギー源の低炭素化とともに、電気利用の増加などを通じた低炭素燃料の利用拡大に言及しており、そこでは当研究所の成果も根拠の一つとなっている^{(46), (47)}。当研究所では、エネルギー強度の改善にも注

目しており、EMF27の多数のモデルについて次の傾向があることを分析している⁽⁴⁸⁾。

- ・ 450 ppm eq の条件では、エネルギー強度の改善率が2010-30年の期間に1年当たり2.3%（モデルの範囲は全体で1.3-2.9%、地域別・部門別では拡大）となり、過去の実績（年率1.3%）と比べて非常に大きい。
- ・ この改善率は、CCSが利用できないといった技術的な制約があるとさらに大きくなり、省エネに過度に期待することになる。
- ・ モデル間の違いの中で、例えば、輸送部門においては、所定のエネルギー効率を達成するために、一般均衡型のモデルはサービス需要を減らす傾向があり、部分均衡型のモデルは技術の代替を指向する傾向がある。

実際のエネルギー強度の改善では、技術の普及を妨げる様々な障壁やエネルギーサービス価格の低下に伴う需要の増大（リバウンド効果）が生じる。EMF27のモデルでは、これらの効果がある程度現実的に扱われている。

450 ppm eq のような2100年時点の濃度レベルは、基本的には、その時点までの累積CO₂排出量に依存する。したがって、途中の時点（例えば2050年）の排出量の多寡によらず、2100年時点で累積排出量が同じであれば同程度の濃度レベルとなる。EMF27の異なる技術と気候政策（2100年時点の濃度レベル）を組み合わせる設定は、与えられた技術オプションで、気候政策で制約される累積CO₂排出量を満たす経済最適な排出パスを見出す問題と捉えられる。当研究所のBETモデルでは、CCSが利用できない条件では、450 ppm eq に対する最適解は得られなかった。この結果は、450 ppm eq の達成が相当困難であることに加え、技術の利用可能性によって排出パスの選択に柔軟性があることを示唆する。

CCSはバイオエネルギーと組み合わせることで原理的には負の排出を実現できる⁽⁴⁹⁾。この可能性をどの程度想定できるかによって、2050年といった途中の時点の削減量は大きく左右される。負の排出は、大気中からCO₂を除去することを意味し、その手段はcarbon dioxide removal (CDR) と総称される。その代表例がCCS付きバイオマス発電でBECCSと呼ばれる（BEはbioenergyの略）⁽⁴⁹⁾。他のCDRには大規模植林や、空気中のCO₂を直接回収・処分する技術などがある。CDRの手法は、規模によっては、従来の緩和策と区別して、気候工学（ジオエンジニアリング）^{(50),(51)}と分類されるこ

ともある。

BECCSは統合評価モデルで最も検討が進んでいるCDR手法である。当研究所のBETモデルでは、図2-1-17に示すように、バイオマス資源量の仮定の違いによって、経済最適な排出パスが大きく変わる結果が得られた⁽⁵²⁾。資源量の制約が最も厳しい場合、2050年のCO₂排出量は2000年比50%の水準を下回り、CO₂価格（排出削減の限界費用）は2100年までに1 tCO₂当たり3000ドルを越える。これに対し、土地利用競合等に楽観的な仮定をおく場合、2050年の排出量は2000年の水準を若干下回る程度となり、2080年以降の排出量が負になることで相殺される形となる。この場合、2100年時点のCO₂価格は1 tCO₂当たり1000ドルに抑えられる。

BECCS等のCDR手法は、所定の累積排出量を達成する排出パスの選択に柔軟性をもたらすが、その導入は確証されてはいない。BECCSも要素技術の開発は進められているがシステムとしては未完成である。バイオマスの大規模利用には生産性の向上や土地利用の競合などの課題もある⁽⁵³⁾。

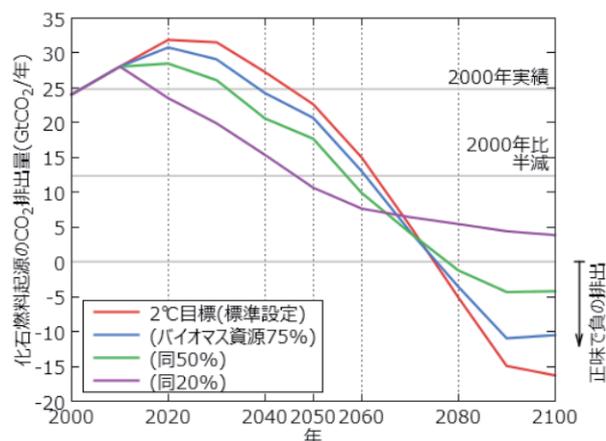


図2-1-17 所定のバイオマス資源量で450 ppm eqのGHG濃度の制約に適合するCO₂排出パス

2100年時点のバイオマス利用可能量は、標準設定では年間約460 EJ(土地利用競合等に楽観的な仮定をおく場合)、下限の20%の設定では年間100 EJ(廃棄物系バイオマスの利用に限定する場合)。

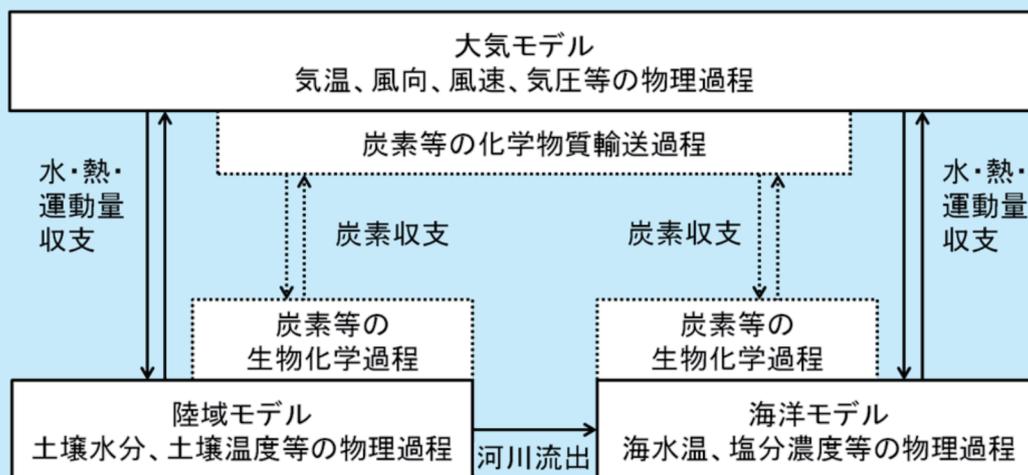
人間活動によって排出されたCO₂が海洋や陸域生態系に吸収される割合は、気温が高くなるにつれて減少する。このため、CO₂排出に起因する気温上昇は、大気に残るCO₂の割合が増加することで、さらに大きくなる。この効果は気候炭素循環フィードバックと呼ばれる⁽¹⁾。

このような気候変化と炭素循環の間の相互作用を評価するために、従来の気候予測に利用されている大気海洋結合モデルに、地球規模の炭素の循環を表す生物地球化学過程を結合した地球システムモデル(図1)の開発が進んでいる。この生物地球化学過程には、植生による生産活動、微生物による有機物の分解、海洋によるCO₂の吸収や放出、海洋生態系による有機炭素の沈降分解など、様々な過程が含まれる。地球システムモデルによって、炭素循環過程を含めた気候変化やその不確実性の要因などに対する科学的理解の向上が期待される。また、CO₂排出量から大気CO₂濃度や気候の変化を詳細に評価できるようになり、温暖化緩和策の検討で基盤となる科学情報がさらに充実してきた。

2013年に発表されたIPCC WG1 AR5⁽²⁾では、地球システムモデルを用いた一連の研究から、累積CO₂排出量と気温変化がほぼ比例関係にあることを報告している。ただし、その比例定数の不確実性は

大きく、可能性の高い(66%超)範囲が1000 GtC当たりの温度上昇で0.8℃から2.5℃の範囲と評価されている。また、気候炭素循環フィードバックの符号が正、すなわち気温上昇によって自然のCO₂吸収率が減少し、排出されたCO₂がより多く大気中に留まることが、高い確信度で評価された。

このように気候と炭素循環に関する科学的理解は深まっているが、炭素循環は温暖化予測の新たな不確定要因と認識されるようになった。当研究所では、地球システムモデルを用いて、長期の気候安定化について、特にCO₂排出がゼロになった後の気候の復元に着目して、検討してきた⁽³⁾。ゼロ排出すなわち累積排出量が一定の状態では、大気CO₂濃度は長期的に低下するが、気温は大気CO₂濃度の変化から期待されるほどには低下しない。これはCO₂濃度による放射強制力の低下と海洋の熱吸収による気候の慣性が相殺するためと理解され、その度合いは地球システムモデルの特性によって異なる⁽⁴⁾。また、長期的な気温変化の傾向は、累積CO₂排出量を一定とした場合の排出経路にほとんど依存しないことも確認している⁽⁵⁾。これらの結果は、累積CO₂排出量が長期的な気候安定化を特徴づける重要な指標であることを示唆している。



枠と矢印は要素モデルと要素モデル間の物理量の交換を表す。実線は大気海洋結合モデルの要素で、点線は地球システムモデルに組み込まれる生物地球化学過程の要素を示す。

図1 地球システムモデルの概念

コラム 2: 海洋生態系モデル

産業革命以降に大気中に放出された二酸化炭素(CO₂)の約1/3は海洋が吸収してきたと考えられている⁽¹⁾。そのため、今後、海洋が大気中のCO₂をどの程度吸収するか明らかにすることは、温暖化を予測する上で重要である。当研究所では米国大気研究センターと協力して、海洋の生物活動や化学物質の循環を計算できる数値モデル(海洋生態系モデル)を開発し、海洋のCO₂吸収量変化の予測を行っている。

海洋の表層では、光合成により植物プランクトンが海水中のCO₂を固定し(一次生産)、その死骸が有機炭素として沈降することで、海洋の深層へ炭素を輸送している。海洋の深層へ輸送された有機炭素の大部分は分解されて無機態に戻るが、深層水が表層に戻るまでには百~千年の時間を要することから、長期に渡って大気からCO₂を隔離する。この炭素の輸送過程は駆動力が一次生産であることから生物ポンプと呼ばれている。海洋のCO₂吸収量変化を予測するには、駆動力である一次生産の変化を予測することが大切になる。

海洋の一次生産量は、主に水温や光、溶存栄養物質の濃度により決まる。温暖化すると、水温の上昇や海水の融解により海面に届く光量が増え、水温や光の条件は改善すると予想される。一方、表層水温の上昇や海水融解による表層水の低塩分化は、鉛直の密度差を増加させ(成層化)、深層水との混合を減少させる。栄養物質は深層水に豊富に含まれることから、栄養物質の条件は悪化すると予想される。

将来の環境変化は、正味の影響として一次生産をどちらの方向に変化させるのであろうか? 複合的な要因を定量的に評価するため、海洋生態系モデルを用いた温暖化実験を行った^{(2),(3)}。産業革命前の状態からモデルを駆動し、高排出シナリオ(RCP8.5)の条件で2100年までの計算を行った(図1)。その結果、一次生産は低緯度域で成層化により減少、高緯度域では水温・光環境の改善により増加した。正味の影響として2090年代の一次生産量は1990年代と比べ6%減少すると予想された。このような結果は世界各国のモデルの結果からも得られており、一次生産の減少量は1-10%程度と予想されている⁽⁴⁾。温暖化に伴う環境の変化は生物ポンプの働きを弱め、他の条件が同じであれば、温暖化を加速させる可能性が高い。

海洋の一次生産量変化の予測には、多くの不確実性が残されており、さらなる研究が必要である。例えば、我々の結果では東部赤道太平洋域で一次生産が増加していたが、他のグループの結果では減少していた。この違いを調べたところ、我々の結果では、温暖化に伴う海流の変化が栄養物質の一つである鉄の供給を増加させているためであることが分かった⁽²⁾。モデル間の結果の比較による不確実要素の洗い出しと、観測データとの比較によるモデルの妥当性の検証により、海洋のCO₂吸収量の予測を精緻化することが、温暖化予測の不確実性の低減に不可欠である。

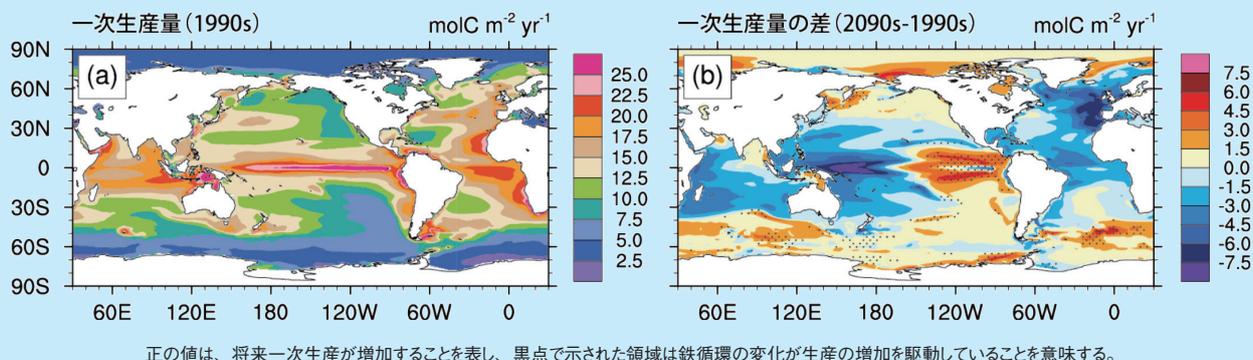


図1 海洋生態系モデルで再現された、1990年代の一次生産量の分布(a)と、高排出シナリオ(RCP8.5)における2090年代と1990年代の一次生産量の変化(b)⁽²⁾

海洋酸性化は大気 CO₂ 濃度の増加により引き起こされる新たな環境問題として認識されつつある。人為活動により大気 CO₂ 濃度が増加すると、大気と接している表層海水への CO₂ 溶解量が増加する。CO₂ は弱酸性を示す気体であるため、CO₂ 溶解量の増加は海水の pH を低下させる。外洋海域での定点観測結果から、表層海水の CO₂ 分圧は大気 CO₂ 濃度と同程度の速さで増加していることが明らかとなっている（図 1）。将来の大気 CO₂ 濃度の増加はさらなる pH の低下をもたらすことになり、CO₂ 排出シナリオによっては 2100 年時点で海水 pH が 7.7 まで低下する可能性もある（表 1）。pH とは、水中の水素イオンのモル濃度を逆数の常用対数で示したものであり、pH が現在の 8.0 から将来 7.7 まで低下したとすると、水素イオン濃度は約 2 倍に増加することを意味する。現在観測されている pH 低下速度は、過去の地球環境の変遷のなかでも極めて大きなものであり、海洋生物に種々の影響をもたらすことが懸念されている。

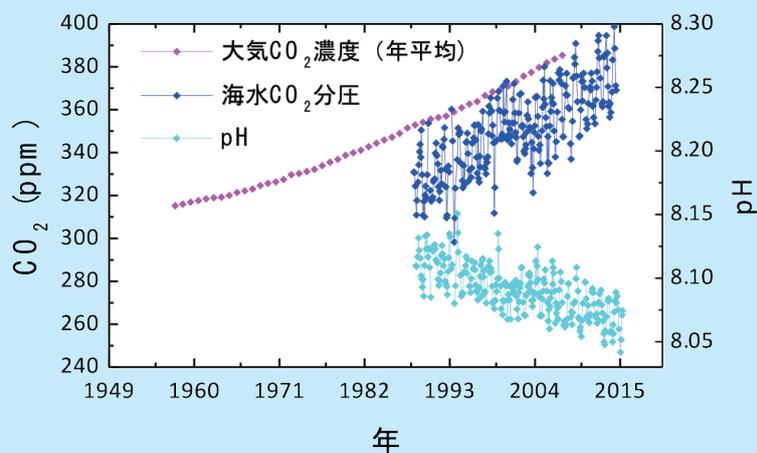
海洋酸性化の現状とその生物影響を解明するための研究は世界中で活発に進められている。例えば、最新の研究成果は 4 年毎に開催される国際シンポジウム「The Ocean in a High-CO₂ World」において発表されてきた。会議での研究発表件数は回を追うごとに飛躍的に増加しており、この分野が近年の海洋研究のトピックの一つであることを示している。

当研究所では、海洋における食物網の起点であり物質循環の駆動力となっている植物プランクトンへの海洋酸性化の影響を室内や現場での培養実験により評価し^{(1),(2)}、その成果を発表してきた。現在は、海洋酸性化と同時に進行すると考えられる水温上昇や溶存酸素濃度の減少をも加味した影響評価研究が実施されつつあり、当所でも海洋酸性化と水温上昇の複合影響評価に取り組んできた。2016 年 5 月にオーストラリアで開催される次回会議では、これらの複合影響に関する新たな知見が数多く報告されることが期待されている。

IPCC WG2 AR5⁽³⁾ では海洋酸性化の生物影響に関する最新の知見が取り纏められ、当所の成果の一部も引用され貢献したが、海洋生物への影響を総合的に理解する上では知見がまだまだ十分ではないことが示された。今後は生物や物質循環への影響の知見を充実させるだけでなく、モデルなどを活用した海洋生態系への影響評価が求められている。

表 1 水温 20℃、塩分 35、全アルカリ度 2350 μmol/kg を仮定した海水が大気成分と平衡状態にある場合の、大気 CO₂ 濃度と海水 pH の関係

大気 CO ₂ (ppm)	海水 pH (total scale)	年代
280	8.17	産業革命前
400	8.04	現在
550	7.93	2100年(RCP4.5)
650	7.86	2100年(RCP6.0)
900	7.74	2100年(RCP8.5)



米国 The Carbon Dioxide Information Analysis Center (<http://cdiac.ornl.gov/>) の公開データを使用。

図 1 ハワイ沖の観測地点における大気 CO₂ 濃度、海水 CO₂ 分圧、および海水 pH の時系列変化

2-2 電気事業への影響

2-2-1 概説

(1) 温暖化の適応策の役割

気候安定化に向けたCO₂排出削減が実現できたとしても、その効果が現れるまでには時間がかかる。したがって、今後の排出シナリオによらず、今世紀半ば頃までは同程度の温暖化が進行する。このような不可避の気候変化に対処するため、各種の適応施策が必要となる。CO₂排出削減が計画通りに進まない場合や、オーバーシュートシナリオの考え方で排出削減が遅れる場合は、適応策の役割がさらに重要になる。

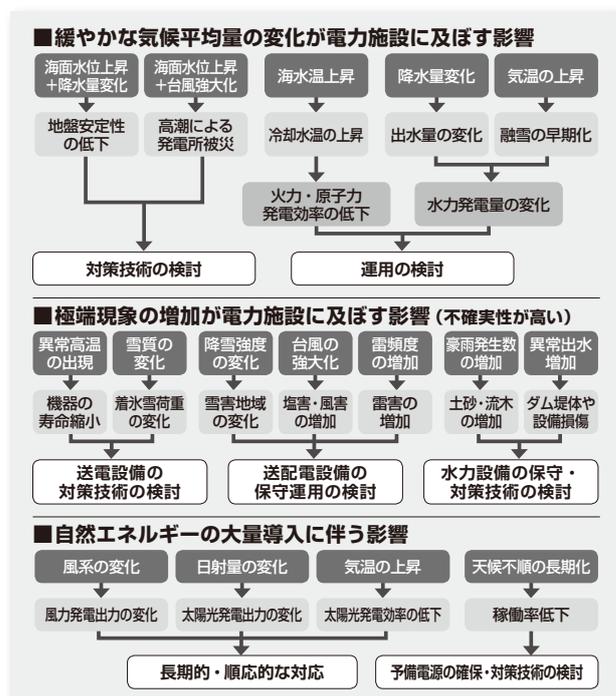
予想される気温上昇には、気候感度などの不確実性が含まれる。気候感度は長年にわたる重要な研究課題の一つであるが、現状では、気候感度が想定以上に高い場合に備えるリスク管理も求められる。

現実の気温変化には、自然起源の外的要因や、気候システム内部の変動も加わる。数十年規模の変動によって、ある時期に急激な気温上昇が生じる状況や、逆に気温上昇が抑えられる状況もあり得る。いずれにしろ、長期にわたる人為的な気候変化と自然の気候変化・変動を合わせて、気温上昇とその不確実性を定量化する必要がある。適応策は、地球温暖化のためだけの施策ではなく、既存の防災や水資源管理などの施策に統合化されるべき性質のものである。したがって、人為起源、自然起源の区別によらず、気候変化・変動に対処し適応するための施策は、同一の枠組で検討されるべきである。これは、地球温暖化対策の主流化、すなわち様々な施策の中で地球温暖化対策を一定程度位置づける考え方に通じる。

適応策の検討には、地域毎の詳細な気候予測が必要となる。また、気温や降水量などの気象要素の平均的な変化に加え、それらの変動の大きさや、極端な変動を引き起こす事象の頻度や大きさが問題となる。このような局所的な変動や極端現象に関する気候予測は、自然変動の影響が大きく、気候モデルによって定性的、かつ定量的にも異なることがあり、不確実性が大きい。地域規模の気候予測は、今後の研究の進展が期待される分野である。当研究所の取り組みについては2-2-2節で述べる。

(2) 安定供給における電力設備への影響

電気事業においては、CO₂等の排出削減を進めていく中で、地球温暖化の影響にも適切に対処することが求められる。当研究所ではこの問題に早くから注目し、地球温暖化がわが国の電気事業におよぼす影響を分析し、適応策の考え方を示してきた^{(1),(2)}。さらに、影響項目の中から電力供給設備に注目して、具体的な対応策を議論してきた⁽³⁾。以下では、文献⁽³⁾に基づいて、電力供給設備における温暖化リスクと対応戦略を概観する。



※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。

図 2-2-1 電力安定供給への潜在的な温暖化影響リスク (出典「電気の子カラ」エネルギーフォーラム 2010年4月:図Ⅱ-29より転載)

安定供給の観点では、図 2-2-1 に示すような潜在的なリスクがある。これは、気候影響に関する既往のイベントツリーや専門家へのヒアリングを基に、再生可能エネルギーの利用拡大も考慮して、電力設備の健全性に関わる主要なリスクを整理した結果である。個別の事案についての影響の度合いはそれぞれ異なるが、対策は既存の安定供給を確保するための施策の延長線上にあり、必ずしも特別な対応が必要となるわけではない。前述のように、既存の様々な施策の中に、地球温暖化対策の観点を取り入れる主流化の考え方が基本となる。

個々の設備に影響をおよぼす気候の要因は、気温や海

面水位などの平均値の変化と、台風、豪雨、異常高温、および雷の発生頻度といった極端現象の変化に分けられる。前者は緩やかに進行する変化であり、その影響を早い段階で検出して、計画的に影響を軽減・回避することが重要である。その際、例えば、海水温（冷却水）の上昇によって発電効率が低下する懸念については、当研究所の評価ツール⁽⁴⁾を活用できる。

一方、極端現象については、不確実性が大きく信頼できる予測結果を得ることが難しいが、自然変動の振れ幅の拡大が懸念されている。このため、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。これは温暖化対策の主流化の考え方に合致するもので、その際、当研究所の保有する様々な技術（塩雪害・雷害対策、地盤安定性評価、出水解析など）が、温暖化リスクの低減や実際の被害軽減に役立つ。2-2-3節では、気候の外力が支配的となる送配電設備と水力設備、およびその周囲の生態系における影響と対策について述べる。

2-2-2 影響評価のための詳細な気候予測情報

地球温暖化の影響や適応策を検討するには、平均的な気候よりも、むしろ熱波・豪雨・強風などの極端な現象の強度や頻度の変化の予測が重要である。極端な現象には、時間的に数時間以下、空間的には数十 km 以下のスケールのものが含まれる。ところで、気候変化予測には、通常2-1節で述べたような全球気候モデルが用いられるが、その出力データの空間解像度は100 km程度、また時間的にも1日に1回程度、高頻度でも6時間毎までとなっており、そのままでは、前述のような極端現象の情報抽出は難しい。そのため、全球気候モデルの出力から時間・空間的に細かい現象に関する情報を抽出するために、様々な手法が提案されており、それらは一般に「ダウンスケーリング」と呼ばれる。

ダウンスケーリングで最もオーソドックスなのは、力学的ダウンスケーリング(力学的DS)と呼ばれるもので、全球モデルの出力を境界条件として、数十 km 以下の格子の気象モデルを用いて高解像度の気象場を推定する方法である^{(5),(6)}。当研究所では、この方法を用いて日本付

近の過去の気象場を、5 km、1時間間隔の高解像度で再現しており（コラム4参照）、さらに、気候予測モデルの出力の力学的DSを計画している。力学的DSは、現在の気象予測でも行われている手法であり、気象モデルの進歩とともに精度の向上も期待できる反面、莫大な計算量を必要とする。特に、稀にしか起こらない極端現象の頻度を精度よく推定するために見掛けのデータ期間を増やすアンサンブル手法を用いるような場合には、その計算量はさらに大きな問題となる。

力学的DSに対して、過去のデータの統計的關係に基づき、全球モデルで表現される広域場から地域的気象場を推定する手法は統計的ダウンスケーリング(統計的DS)と呼ばれる^{(7),(8)}。統計的DSでは、力学的DSに比べて極めて少ない計算量で推定結果が得られる反面、極端な値の再現は難しく、文献^{(7),(8)}でも平均的な気候の議論にとどまる。そのため、極端現象の強度や頻度の温暖化影響を予測するためには、単純な統計的手法にとどまらない経験的手法や、気象要素の物理的關係性に着目した手法が提案されている。

本小節では、そのような手法のなかから、当研究所で開発した手法やその適用結果を紹介する。

(1) 統計的DS手法による確率予測

通常の統計的DSでは、広域場(説明変量)と局所的な値(目的変量)の關係は、重回帰やその派生的な形で定式化されるが、そのほとんどは標準誤差が一定であることを暗黙のうちに仮定したものになっている。しかし、実際には標準誤差は気象場の状態に大きく依存することが経験上示唆される。当研究所では、この標準誤差の変化に着目して、推定対象(目的変量)の確率密度関数(Probability Density Function: PDF)を推定する手法を開発した⁽⁹⁾。本手法は、九州の気象官署における日降水量や同じく九州の河川の流域平均日降水量を対象として、過去のデータに基づく検証により、観測値の分布と矛盾ない気候的PDFが得られるという優れた特性を有することが示されている⁽¹⁰⁾。本項目では、本手法の概要と、これを過去の気候的PDFの推定や、気候モデルに基づく将来の豪雨強度の変化推定を行った結果を示す。

a. 確率密度関数推定手法

一般的には、統計的ダウンスケーリングは、① 大域の状態を表す説明変量と局所的な状態を表す目的変量の関係を過去のデータの組から統計的に導出する部分と、② 新たな説明変量の値に対して目的変量の値を推定する部分より構成される（図 2-2-2）。但し、ここで用いた手法では、推定対象が目的変量そのものではなく、目的変量の PDF を決定するパラメータという形になる⁽⁹⁾。例えば、目的変量 y の PDF モデルとして正規分布を用い、そのパラメータである期待値 μ と標準偏差 σ を説明変量 x の一次関数で表す形をとる。

$$P(y;x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2-2-1)$$

$$\mu = a_{10} + \sum_j a_{1j} x_j \quad (2-2-2)$$

$$\sigma = a_{20} + \sum_j a_{2j} x_j \quad (2-2-3)$$

ここで、 a_{1j} 、 a_{2j} は、超パラメータで、推定式構築の処理での推定対象である。推定は最尤推定法 (Maximum Likelihood Estimation: MLE) の原理に基づく。すなわち、全サンプルにわたる平均対数尤度

$$L = \sum_i \log [P(y_i; x_i)] \quad (2-2-4)$$

を最大化するように、係数 a_{1j} 、 a_{2j} (超パラメータ) を決定する。式 (2-2-4) より明らかなように、この最大化問題は、非線型の逆問題 ($\partial L/\partial a_{1j}, \partial L/\partial a_{2j}=0$) であるため、ニュートン法に基づく繰り返し計算を用いて解く。得られた係数 a_{1j} 、 a_{2j} と式 (2-2-1-2)、(2-2-1-3) に基づき、説明変量の値に対応する μ 、 σ の値が得られ、PDF は式 (2-2-1) の形で推定される。このようにサンプル毎に推定される PDF を対象期間平均することで、その期間の気候的 PDF が推定される。

b. 流域平均日降水量の PDF 推定

統計的ダウンスケーリングでは一般に、説明変量として過去のデータと対応のつく低解像度データを用いて推定式を構築する。ここでは、気象庁と当研究所の共同研究として実施された JRA-25 長期再解析 (JRA-25) の結果を用いた。JRA-25 での解析方法や結果の特性については文献^{(11)~(13)}に詳しい。目的変量が日降水量であることに対応して、説明変量は JRA-25 の出力のうち 1 日サンプル (1 日平均値または 1 日積算値) のものに限定した。

流域日降水量はレーダーアメダスのデータから推定し、更に AMeDAS データに基づき対象期間 1988-2008 年までの 21 年間で均質になるよう補正を行なった。

まず、説明変量 (JRA-25 データ) と流域平均日降水

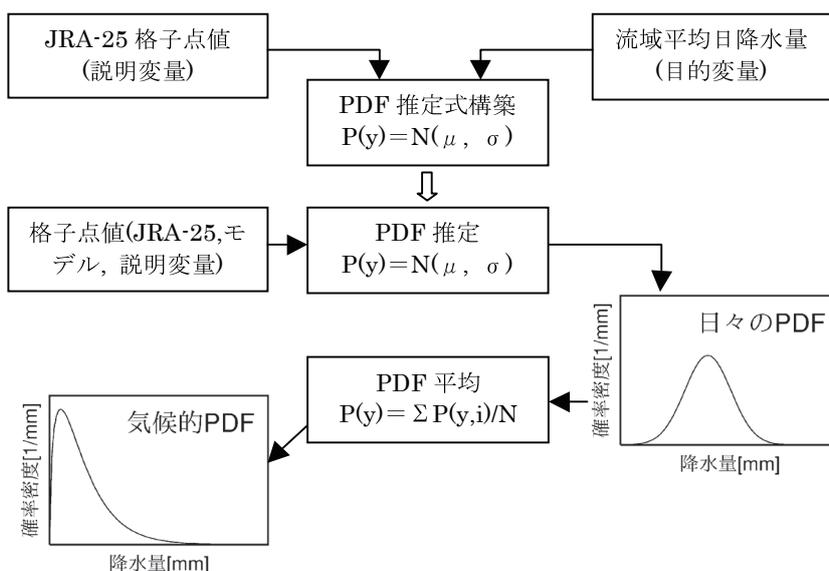


図 2-2-2 PDF 推定モデルの概念

過去のデータに基づき PDF 推定式を構築する。構築した式に、説明変量を当てはめて、日々の PDF を推定する。更にこれを平均することで気候的 PDF を得る。

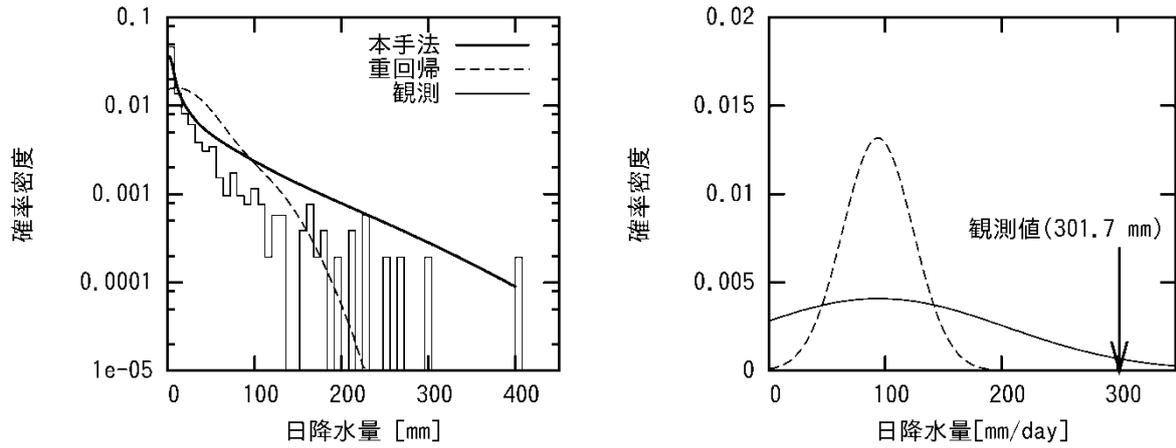


図 2-2-3 流域平均日降水量の PDF の推定例（流域 A、7 月）

左は対象期間を通じての気候的 PDF、右は観測値が 301.7 mm となった 1993 年 7 月 17 日の PDF。
 横軸は日降水量、縦軸は確率密度。実線、破線はそれぞれ本手法及び、重回帰による推定。ヒストグラムは観測の頻度を表す。

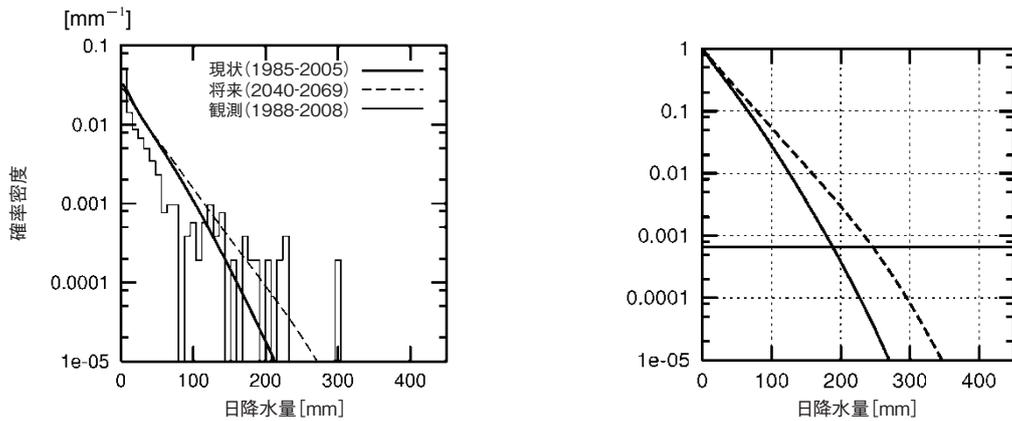


図 2-2-4 気候モデルの出力より推定した流域平均日降水量の気候的確率

流域 B (737 km²) 7 月の気候的 PDF (左) の推定結果とこれを積分することで得られる超過確率 (右) を示す。実線、破線はそれぞれ現状再現 (1985-2005 年) 及び、将来予測 (RCP4.5 シナリオによる 2040-2069 年) に対する推定、ヒストグラムは観測の頻度 (PDF のみ) を表す。超過確率について、50 年 (7 月のみ) に 1 回の頻度に相当する確率を水平線で示す。この頻度に対応する降水量の将来の増加率は、解析した 20 の流域の平均で 20% と推定された。

量の関係式を構築し、次に、その関係式に JRA-25 のデータを適用して日々の PDF 推定を行ない、更に対象期間平均により気候的 PDF を推定した。得られた PDF の例を図 2-2-3 に示す。同図右は、大きな流域平均日降水量 (301.7 mm) を記録した 1993 年 7 月 17 日の例である。本手法と重回帰手法では、期待値の推定はほぼ同じになっているが、標準偏差について、本手法では重回帰に比べ大きな値を推定しているため、観測値に対応する PDF の値、すなわち尤度が大きくなっている。これは本手法の優位性を示すものである。同図左は、個別の日の PDF を期間平均した気候的 PDF であるが、本手法では大きな降水でも PDF が極端に小さくなることはなく、

低頻度の豪雨の領域での表現に優れることがわかる。

c. 温暖化による極端降水の変化予測

気象研究所の気候モデル MRI-CGCM3⁽¹⁴⁾ による温暖化予測結果 (空間解像度約 120 km) を用いて、九州の主要河川 5 水系 20 流域における日降水量の、現状再現時と将来予測時 (全球平均気温上昇 1.1 °C) の PDF を推定した。図 2-2-4 にその例を示す⁽¹⁵⁾。左は面積 737 km² の流域の現状再現と将来予測の推定 PDF を、右はこれを積分することで得られる超過確率を示す。後者においては 50 年に一度の頻度に相当する確率を横線で示したが、これに対応する降水量 (再現期間 50 年の

確率降水量)は現状での約190 mmに対し、将来予測では約240 mmに増加することが示されている。また、推定した九州の20の流域のいずれにおいても、将来の極端降水の頻度が増加する結果が得られている。当研究所では、今後、複数の気候モデル出力について同様の解析を行い、将来変化の予測の信頼性を評価するとともに、対象を日本全国の流域に広げて、豪雨増加率のマップ化を計画している。

(2) 極端気象のパターン抽出

豪雨の長期的な変動と将来的な変化に関する情報は防災・インフラ設備の被害軽減や維持管理に有用である。特に、梅雨前線の強化等に伴って生じる豪雨・洪水は、河川周辺・ダム設備の防災・運用・保守管理などに多大な影響を与えている。設備に大きな影響を与える洪水の発生には、数日程度の広域スケールの気象場と関係していることが多い。当研究所では、自己組織化マップ(Self-Organizing Map: SOM)と呼ばれるニューラルネットワークの手法を用いて、梅雨期における広域気象場の変動パターンの分類を行い、広域気象場と降水との関連性を地域的な差異や長期的な変化傾向の観点から調査した^{(16),(17)}。

解析には全球再解析データと高解像度の日本域降水

グリッドデータを使用した。再解析データには、JRA-25の改訂拡張版として気象庁で作成されたJRA-55長期再解析⁽¹⁸⁾の日平均データを用い、降水量には雨量計観測から得た日降水量データをもとに作成されたAPHRODITE's Water Resources プロジェクトによる解像度0.25度の高空間分解能日降水量グリッドデータ⁽¹⁹⁾を使用した。気象場としてJRA-55の850-hPa東西風、南北風、相当温位、200-hPa気圧面高度場の4要素を入力ベクトルとし、日平均の気候値からの偏差(1958-2011年の気候値からの差)にノード数12×12のSOMを適用し、さらにその結果をクラスター解析により分類した。相当温位とは、水蒸気を含む空気塊の断熱過程で一定値となるように定義された温度で、大気の状態の不安定性を捉えるのに適している。また、上空の気圧面高度場は偏西風の蛇行などの影響を捉え、下層の水平風は気圧配置の代替になるとともに、熱帯からの影響を捉えるのに適していると考えられる。

SOMによる解析の結果、マップ上において、強い降水(日降水量150 mm)が頻繁に発生する気象場が見られた。これら豪雨イベントと比較的関連性が深いと考えられる、7個のクラスターを豪雨に関連した気象パターン(Clst1-7)として抽出した(図2-2-5)。各豪雨パター

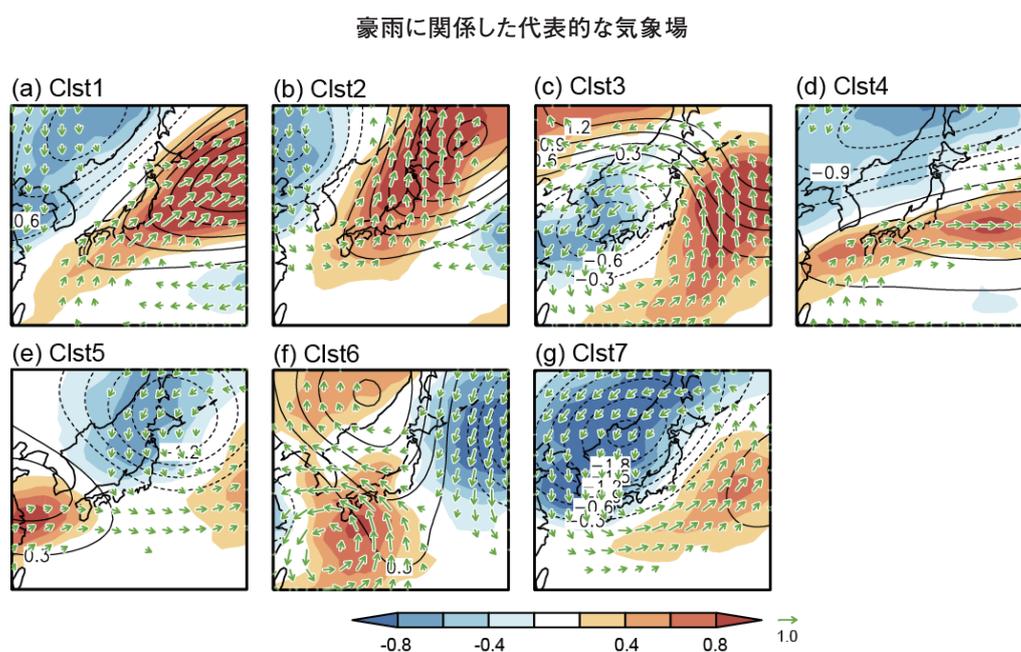
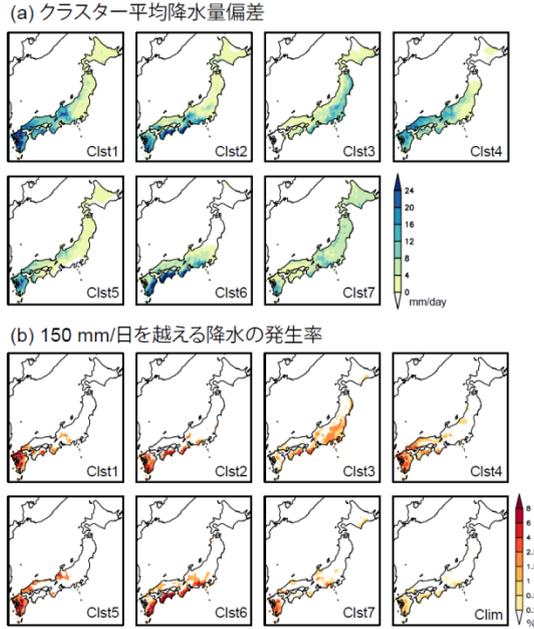


図 2-2-5 豪雨(150 mm/day)の発生と関連が深い SOM 上の気象パターンの分類

気象パターンの分類は、規格化された日平均の850-hPa相当温位(陰影)、200-hPa気圧面高度場(等値線)、および850-hPa風速(矢)の偏差による。文献⁽¹⁶⁾ Fig. 2から引用。



(文献⁽¹⁶⁾ Fig. 4 から引用。)

図 2-2-6 パターン別の平均降水量偏差 (a) と日降水量 150 mm の豪雨イベントの発生率 (b)

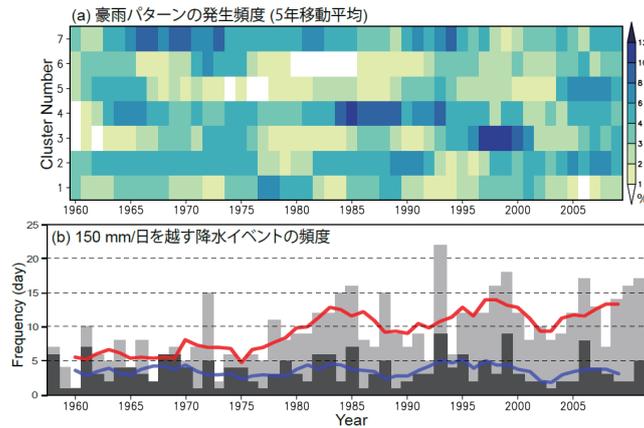


図 2-2-7 豪雨パターンの発生頻度 (a) と豪雨イベントの発生頻度 (b) の時間変化

豪雨パターンの発生頻度は、分類種別毎の 5 年移動平均、豪雨イベント (日降水量 150 mm) の発生頻度は、全データの集計と 60 地点のデータの集計から、5 年移動平均 (赤色と青色の線) および年別値 (灰色と黒色の棒) を示す。文献⁽¹⁶⁾ Fig. 8 から引用。

ンは主に湿潤空気の流入方向によって特徴付けられる。
 例えば、日本の東側下層に高気圧偏差が張り出す C1st1 では、その南西部から湿潤空気が流入して、九州から四国・中国地方で豪雨の発生頻度が高くなる (図 2-2-6a)。
 本豪雨パターンの長期的な変化傾向を把握するために、過去 54 年間の各パターンの発生頻度を豪雨イベントの頻度と比較する (図 2-2-7)。1970 年代後半までは C1st7 が比較的卓越していたものの、それ以後 C1st3

と C1st4 がより卓越する期間が現れている。図 2-2-7 では、豪雨イベントの増加が 10 年程度の期間に起きており、その期間に特定の気象パターンが支配的となる傾向が見られる。1980 年代の豪雨増加期は C1st2、4 が支配的である。その後の 1995-2000 年あたりは C1st3、4 が、2000 年代後半は C1st2、5 が目立っている。このような梅雨期に豪雨をもたらす場の顕著な変化は、熱帯太平洋・インド洋における海面水温変動のレジームシフトなどに関係すると考えられる。

以上のように、日-週規模の気象場の変動の中で生じる豪雨イベントの背景場として、10年規模で変動する複数の豪雨パターンが見出された。このような豪雨パターンの長期変動は、将来の豪雨イベントの頻度を予測するための重要な手掛かりとなる。

(3) 台風に伴う強風と豪雨の評価

電力設備の構造設計等で台風に伴う強風や豪雨が基準となる場合、その地球温暖化による変化を耐用年数に応じて考慮する必要がある。設計の基準となるような過去最強クラスの台風は、局所的で非常に稀な事象であり、自然の変動が大きい。このため、地球温暖化による将来の台風の変化は、ダウンスケーリング等の通常的手法で評価するのが難しい。この問題に対し、当研究所では、最大潜在強度 (Maximum Potential Intensity: MPI) と呼ばれる台風の発達限界を定量化する理論を基にして、地球温暖化による強風や豪雨の変化を評価する手法を開発してきた^{(20),(21)}。

MPI は、与えられた熱環境 (海面水温や上空の気温分布) に対し、最大風速や最低中心気圧で表される発達限界を定式化したものである。その理論的枠組みは、地球温暖化の問題が注目され始めた1980-90年代に、Emanuel^{(22),(23)}とHolland⁽²⁴⁾によって、それぞれ異なる方式が提唱された。当研究所の評価手法では、Holland

の方式を用いている。

図2-2-8に、日本近海を含む緯度帯別に、現状気候の熱環境で計算したMPIと実際の台風の最低中心気圧の年変化を比較する。ここで、現状気候の熱環境はJRA-25長期再解析の月別気候値 (1979-2004年平均)、実際の台風は気象庁の1951-2010年のベストトラックデータ (事後解析を経て最終的に確定した中心気圧等のデータ) である。実際の台風は必ずしもMPIの強度まで発達するわけではないが、その中心気圧の下限値はMPIで概ね包絡される。ただし、6-7月の台風シーズンの早い時期は、低緯度でMPIの強度に達する台風がほとんど観測されていない。この時期の熱環境は台風の発達に適しているが、他の力学的な条件 (大規模の風系) が発達を妨げていると考えられる。また、9月以降の台風シーズンの後半には、実際の台風の中心気圧がMPIの値を下回るものが見られる。これは、MPIの精度の問題の他に、台風が発達しながら北上する場合に、図に示す比較では南方の高水温域での発達が反映されず、見かけ上MPIが過小評価されることが関係する。なお、MPIでは力学的な条件が考慮されないが、気候モデル計算等のMPI以外の手法でも、その効果を地球温暖化の観点で評価するのは難しいのが現状である⁽²⁵⁾。

HollandのMPIは、与えられた海面水温と上空の環境気温に対し、台風の発達に関わる熱力学的な過程に基づ

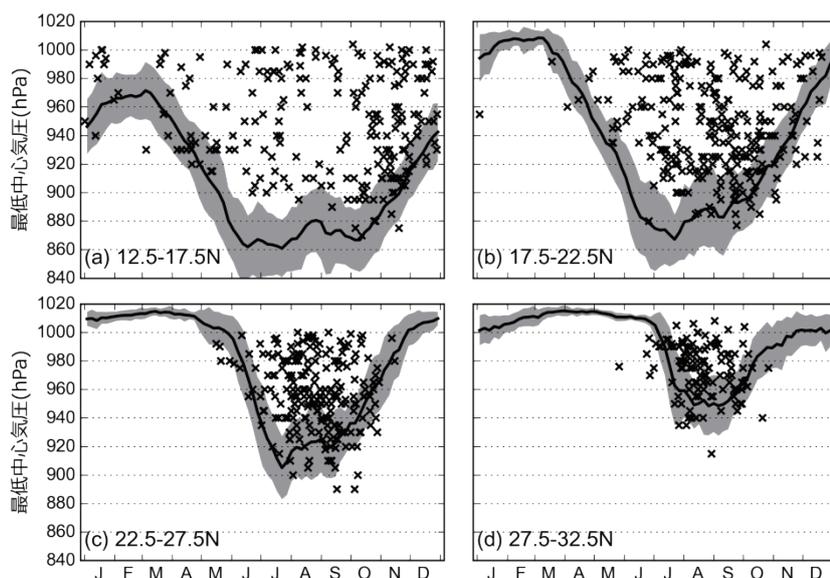


図 2-2-8 西部北太平洋の日本近海を含む緯度帯別 MPI 気候値の年サイクルと観測された台風の最低中心気圧の比較

陰影部は年々変動の標準偏差の幅 (±1 倍)。観測は気象庁の1951-2010年のベストトラックデータで、各台風の生涯最低中心気圧をそれが記録された地点の緯度帯の図にマーカーで表示している。文献⁽²⁰⁾ Fig. A1 に基づく。

いて、中心気圧の下限値を定式化したものである。海面水温が高いほど、また上空の環境気温が低いほど、MPIの指標となる中心気圧は低くなる。地球温暖化による気温上昇は、水蒸気を含む大気の大熱力学的な性質により、熱帯の対流圏では上空に向かって増加する。このため、海面水温の上昇による台風の強大化は、上空のより大きな昇温によってある程度抑制されることになる。

台風は、海面水温が26℃以上の海域で発生し、海面水温が高いほど強度が増すことが経験的に知られているが、この経験則は温暖化した環境にそのまま当てはまるわけではない。これは、上述のように、MPIが上空の環境気温に依存すること、および熱帯対流圏の昇温の特徴から理解され、**図 2-2-9**に示すMPIの計算結果から確認される。この図では、12.5-32.5N、122.5-145Eの南北2.5度間隔の東西平均場に対する月別のMPIから、現状と温暖化した気候で中心気圧と海面水温の関係を比較している。ここで、温暖化した気候は海面水温が一律1℃上昇する設定とし、対応する上空の昇温は、多数の気候モデル⁽²⁶⁾による気候予測の平均的な傾向を反映して設定している。図に示されるように、温暖化した気候での中心気圧と海面水温の関係は、現状に対して高温側に平行移動して、気圧が低い方に若干ずれることがわかる。この気圧低下が温暖化による強度の増分であり、その大きさは海面水温の上昇量とそれに相対的な上空気温の昇温量に左右される。

以下では、日本の本土に上陸する最強クラスの台風を想定して、緯度30Nに沿った領域の8-9月平均の熱環境を対象に、地球温暖化に伴うMPIの変化を評価する。現状気候のMPIは、JRA-25気候値の熱環境に対して944 hPaとなる。地球温暖化によるMPIの変化は、台風周辺の気圧と中心気圧の差を気圧深度(δp_c)として、その変化率で表す。この例では、基準となる現状気候の δp_c は65 hPaである(周辺気圧1009 hPa)。

δp_c の変化率は、現状気候の δp_c にほとんど依存しない。したがって、例えば、伊勢湾台風(1959年)や室戸台風(1934年)の事例(δp_c は80-100 hPa程度)を基準にして、より低頻度の極値の評価に適用することもできる。

δp_c は、台風域内の風速分布の特徴から、中心付近の最大風速と対応づけられ、最大風速の変化率が δp_c の変化率の0.5倍強と見積もられる。より広い範囲については、同心円状の気圧分布を与える経験式と台風の移動に

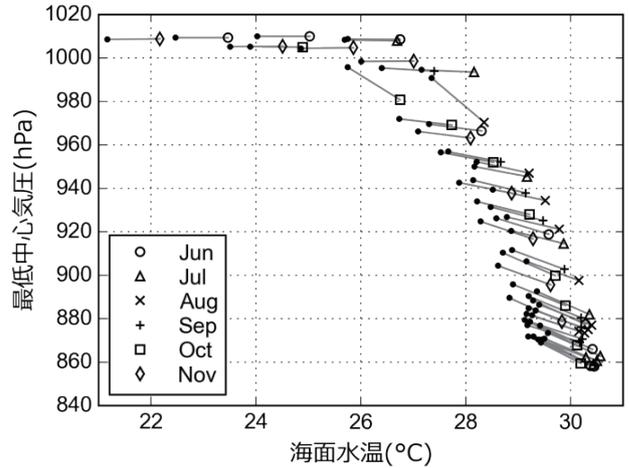


図 2-2-9 MPI (最低中心気圧)と海面水温の関係

12.5-32.5N、122.5-145Eの月別南北2.5度間隔の東西平均場で、現状と温暖化した気候のMPIを計算した結果。それぞれ黒点と月別のマークで表し、個別に線で結んでいる。温暖化した気候は、海面水温が一律1℃上昇する設定。文献⁽²⁰⁾ Fig. 5に基づく。

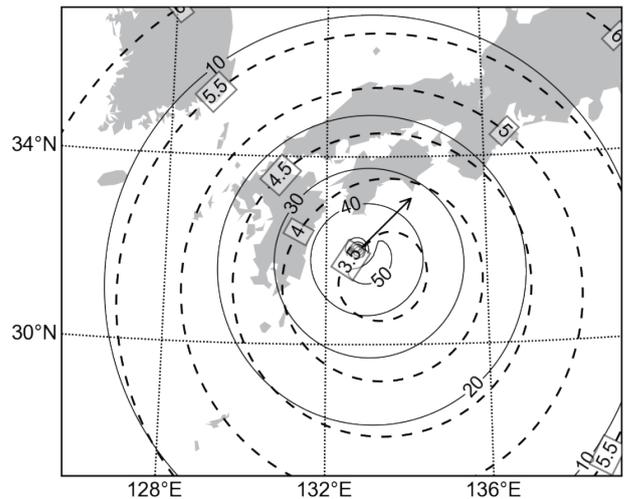


図 2-2-10 台風域内の地上風分布の例

実線コンターは風速(単位 m/s)、破線コンターは気圧深度の変化率が6.5%(全球平均で1℃の昇温に相当)の場合の風速の変化率(単位%)。

伴う風を考慮して、**図 2-2-10**に示すような風速分布が得られる。この風速分布は送電鉄塔などの設計外力の基礎となるもので、各地点の風速の変化率も δp_c の変化率と対応づけられる。さらに、降水強度を評価する理論スキーム⁽²⁷⁾を導入すると、台風中心付近の降水強度の変化率も評価できる。地球温暖化による降水強度の変化は、大気中の水蒸気量が増加することによる熱力学的効果と、上昇気流が変化することによる力学的効果に分けられる。 δp_c の変化は後者に反映される。このように δp_c の変化率は、地球温暖化による台風強度を定量化する指

標として汎用性がある。

図 2-2-11 に、 δp_c と降水強度の変化率を全球平均の地表温度偏差 (ΔT_s) の関数として評価した結果を示す。温度偏差の基準は現状気候 (20 世紀末) としている。 ΔT_s に相対的な海面水温や上空気温の変化は、将来予測のシナリオや時点にあまり依存しないことが知られている。したがって、図の評価では、日本付近の海面水温や上空気温の偏差が、 ΔT_s に比例すると仮定している (海面水温偏差は ΔT_s の 0.86 倍)。ただし、上空気温の偏差は気候予測に使われる AOGCM によってばらつきがあり、 δp_c を大きく左右する。このため、多数の AOGCM の平均を最良推定値として、昇順に並べて 25-75% に相当する範囲を不確実性の幅としている。

δp_c は ΔT_s が大きくなるにつれてやや非線形的に増加する。ただし、上空の気温偏差に関する不確実性は非常に大きく、温暖化で強度が若干弱まることを示すマイナスの値から、最良推定値の 2 倍程度の範囲におよぶ。降水強度の変化率も同様の傾向であるが、 δp_c と比べて変化率が大きくなり、不確実性の幅は相対的に小さい。これは、降水強度の変化に台風強度と関係しない熱力学的效果 (図中の一点鎖線) が含まれることによる。図には、代表的な値として ΔT_s が 1°C と 2°C の場合の変化率を明示している。最良推定値はそれぞれ δp_c が 6.5% と 14.2%、降水強度が 9.3% と 19.7% である。

ΔT_s は、地球温暖化の予測情報の中で最も基本となる変数である。様々なシナリオの任意時点における台風強度の変化は、それぞれの ΔT_s を基に定量化でき、ダウンスケーリング等の他の手法による評価結果とも、 ΔT_s を介して相互に比較できるようになる。これまでの国内の気候変化影響では、21 世紀末の ΔT_s が 2.6°C 程度の気候予測 (AIB シナリオの CMIP3 モデル平均) が基になっていることが多い。この場合、図 2-2-11 より、日本付近の豪雨強度は 27% 程度の変化率で、上昇気流の変化を考慮しない熱力学的效果のみでは 15% 程度である。この変化率は、全国 1 級水系における年最大流域平均雨量の増加率とされる約 1.1-1.3 倍⁽²⁸⁾ と概ね整合する。

なお、第 (1) 項で述べた統計的 DS では、 ΔT_s が 1.1°C の場合、50 年確率降水が平均的に 20% 程度増加する結果が得られている。この手法では台風が考慮されていないため、熱力学的效果のみの変化としてはやや大きい。統計的 DS は変化の仕組みまで踏み込んだ分析が難しい

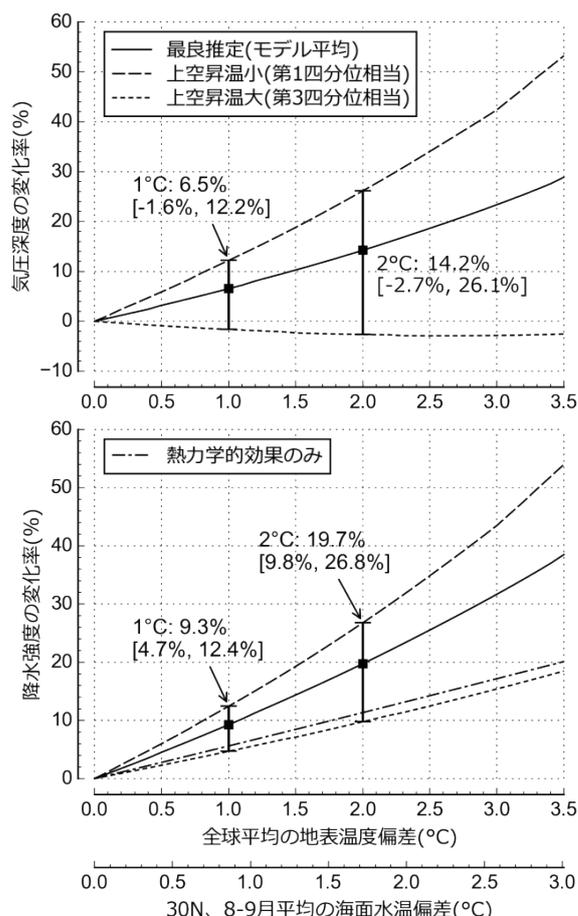


図 2-2-11 気圧深度および降水強度の変化率と全球平均の地表温度偏差の関係

評価対象は 29-31N、127-139E の 8-9 月平均の熱環境で、その海面水温偏差 (追加の横軸) は全球平均の地表温度偏差の 0.86 倍に設定。

が、ここでの理論的な手法との比較から、先の事例では豪雨の頻度が変化していることが示唆される。

MPI は熱環境のみに注目して現実の台風の発達の仕事みを単純化したものであるが、地球温暖化に対する適応策を具体的に検討するための有用な手法である。特に、注目する地域の δp_c や降水強度の変化率を ΔT_s の関数として定式化することで、様々な応用が考えられる。例えば、気候感度等の不確実性を考慮した任意のシナリオに対する ΔT_s の確率論的評価から、台風強度についても同様の評価が導出される。MPI の手法は、ダウンスケーリング等の詳細な手法と相補的な関係にある。MPI の定式化は、詳細な手法から得られる知見を基に改良されるべきものであり、詳細な手法による結果は、MPI の結果と比較することで定量的な解釈と不確実情報が補完される。

2-2-3 電力設備への影響と対策

(1) 送配電設備

常に自然環境にさらされている送配電設備は、不確定性の高い自然外力（強風、着氷雪など）、特に極端現象が安全性に大きな影響を与える。また外力に対する抵抗力（耐荷力）についても、腐食など環境の影響を強く受ける。設備固有の視点からは、外力に対する応答特性の異なる支持物と電線により構成される線状構造物であり、特に電線は揺れやすいことから、様々な振動による設備の疲労の問題が生じる。加えて、機能維持のためには絶縁性能の確保も必要であり、数が膨大であるため事故時の復旧対応も重要な課題となる。これらの特徴から、以下の3視点で地球温暖化のリスクをとらえることができる。

- ① 設計・維持管理：考慮すべき自然作用（強風、着氷雪など）の強さ・頻度の変化、構造部材・材料強度の劣化速度の変化、これら両者の関係で決まる安全性の変化
- ② 電線に関するギャロッピングなどの振動対策や着雪量の低減対策など各種対策法：風況特性や雪質の変化による各種対策法の効果の消失、対策地域の変化
- ③ 復旧対応への課題：被害規模の拡大、被害発生頻度の増加、被害発生地域の変化

上記を踏まえ、送配電設備それぞれの影響と対策について述べる。

送電設備の設計に用いられる JEC127(電気学会)では、設計風速や設計着雪量として、地域別の再現期間 50 年に対する値（以下、設計外力）を用いており、この設計外力による応答値が部材の強度を超えないように設計することで安全性のレベルを規定している。地球温暖化の対策では、これまでと同等の安全性を将来にわたって確保することが目的となる。

地球温暖化によって設計外力が大きくなるとすれば、補強や建替などの直接的な対策が求められる。対策の必要性、およびその程度や方法を定めるためには、地球温暖化のシナリオの下で再現期間 50 年の設計風速や設計着雪量を定量化する必要がある。極端現象の将来予測は、特に発現頻度の変化についての評価が難しいが、2-2-2 節で述べたように、定量的な評価のための手法はある程度整ってきている。当面の課題は、気候予測の情報を実

務的な判断材料になり得る具体的な荷重に翻訳することである。当研究所では、送電用鉄塔の耐風設計研究を実施してきている。この研究で用いた台風モデルによる設計風速評価法⁽²⁹⁾を拡張し、種々の温暖化シナリオに対する設計風速の変化の定量化検討を進める予定である。

現場での維持管理・保守のなかで、シナリオに基づく定量値（例えば、台風強度が所定の割合で増加したときの設計風速の変化量など）を参考にして補強の程度を変えるなど、少しずつ適応することが、現実的な対策と考えている。

次に、架空配電設備について述べる。わが国における架空配電設備は、電柱が約 2091 万本（2005 年現在）と報告されており、送電用鉄塔（約 25 万基）に対して圧倒的に数が多い。また、設計方法は単純化されていることから、安全性のばらつきも大きい。このため、配電設備の地球温暖化への対応として、上記送電線で述べたような設計、維持管理面でのハードな対応に加え、供給支障が発生したとき早期復旧への対応がより重要となる。

温暖化を踏まえた早期復旧を考える場合には、これまでに例のない強大な台風が襲来した場合でも、確実に早期復旧を実現できる技術が必要であり、台風接近時の被害数の事前予測、被害発生時の被害箇所の検知技術が重要となる。このためには、台風の進路や強度、降雨の予報技術、被害数の予測技術、被害箇所の検知技術などを、現在よりも高度化することが一つの対策となる。一方、台風の強度や襲来頻度が変化した場合の年間の復旧費用、資材確保といった経営的な問題や復旧戦略への対応も重要である。この場合は、送電線と同様に、事前に様々なシナリオ台風で相対的な被害規模の予測ができれば、対策の検討が可能となる。

当研究所では、図 2-2-12 に示すような配電設備の台風被害予測システム RAMPT を開発している⁽³⁰⁾。本システムは、台風進路や中心気圧の予報値を入力として、台風接近時の地上の風速や配電設備被害数を予測するものである。本システムの予測精度向上が対策の一つとなりうる。また、予報値をシナリオ台風に置き換えれば、復旧戦略の策定に寄与できると考えている。

以上、送配電設備について、設計・維持管理の視点、災害早期復旧の視点から、影響と温暖化対策について述べた。特に地球温暖化対策としては、現状の技術開発を着実に進めるとともに、意志決定の判断に必要な情報の



図 2-2-12 RAMPT における台風通過時の最大風速の推定値

整理、「設計風速」のような実務で使用される数値での定量化が重要であることを強調した。

(2) 水力設備

水力発電は再生可能な純国産エネルギーとして、供給安定性や経済性に優れるとともに、発電時に CO₂ を排出しないことから地球温暖化防止の面からも重要な電源と認識されている。電気の低炭素化の取り組みの一つとして、全国各地で既存のダムからの河川維持流量を利用した発電所が建設されており、2015 年度運用開始予定の出力 540 kW の発電所では、年間約 800 トンの CO₂ 排出量が削減される⁽³¹⁾。一方で、温暖化による降水量の増減は、水力発電に大きな影響を与えるものと懸念されているが、その変化の時間スケールによって、受ける影響の性質が大きく異なってくる。比較的長い時間(月、季節単位)の降水量が減少し、少雨や少雪となると発電電力量は減少する。短い時間の極端な豪雨(例えば台風や前線に伴う数日間の雨)の量やその頻度の増加は、施設の構造的安全性を脅かす。このため、洪水時のゲート操作といったダム運用の見直しを行うとともに、施設の改造などの検討も必要となってくる。上記のように、水力発電が受ける温暖化の影響としては、発電電力量への影響と施設の構造的安全性が懸念され、後者についてはその対策も議論されている。

水力発電は年間の「発電電力量」の確保が重要であ

る。電気事業連合会の電力統計情報によると、北海道から九州までの電力 9 社の水力発電による発電電力量は 1 年間に 651 億 kWh であり、その約 78% にあたる 505 億 kWh が、自流式設備によって発電されている。自流式発電はダムによる貯水を行わないため、ある一定量以上に河川水が増えても発電電力量が多くなるわけではないが、一般的には、河川水量が多くなるほど発電電力量も多くなる。毎月あるいは年度の平均流量を、過去 40 年の平均流量と比較したものを出水率という。自流式水力発電による 1 年間の発電電力量とその年の出水率の関係について、回帰式を求めたところ、出水率が 1% 増えると 1 年間に 5,000 万 kWh の電力量が増える。このように降水量が増えると出水率も増えるため発電電力量も増えることが期待されるが、台風や梅雨に伴う豪雨時の雨量が増えても、発電に利用されない無効放流が増えれば発電電力量の増加とはならないことも懸念されている。気温が上昇することにより降雪量が減少する可能性も大きいですが、雪から雨に変化したものも含めての降水量の増減を正しく予測することは難しいものの、融雪時期の早期化による自流式発電は大きく影響を受けることは事実であると言われている⁽³²⁾。

極端な豪雨でなくても洪水量やその頻度が増加すると、洪水を適切に処理するために今以上の高度なダムゲートの操作が求められる。また、無駄な放流を少なくし、洪水後にできるだけ多くの貯水量を確保するために、電力会社では高精度な降雨・出水予測手法を開発し実用化する検討がなされている。ダムへの水の流入量を予測する技術には、数日先の降水量を数キロメートルの高分解能で予測する気象予測モデル、ダム上流域の地質や土地利用情報を参照し、ダムに流入する洪水を精度良く予測する分布型流出モデルが開発されている。降水・出水予測が精度の高いものになれば、洪水時の無効放流を減らすことも可能になり、水資源の確保に大いに役立つこととなる。一方で、水力発電設備は常に自然環境にさらされているだけに、構造物の安全性に関わるような極端な降水量や河川流量の増大が最も懸念される事項である。また、豪雨の増加は山地の斜面崩壊を引き起こし、導水路や水圧鉄管などの発電施設の崩壊リスクを高めることになる。2011 年の台風 12 号 (Talas) が紀伊半島を通過した際には、水力発電所の下流約 1 km で斜面崩壊が生じて天然ダムが形成された。天然ダムは、河道を

閉塞させ、上流からの洪水流が反射して上流側に段波として遡上し、発電所建屋、放水路、屋外開閉設備が全損した。また、豪雨による斜面崩壊は、経年的なダムの堆砂を加速させ、貯水容量の減少や取水障害、上下流の河床変動などの問題を引き起こす。土砂により河床が高くなると、同じ流量が流れていても水位も同時高くなることから、洪水時の危険性も増し、地域の洪水リスクを高める原因となってしまう。ダムの経年堆砂の対策としては、水の力を利用して湖内を移動させる方法、堆砂を浚渫して建設材料に転用する方法、残土を埋め立てて処分する方法がとられている。しかし、浚渫土の有効利用や残土の埋め立て地には限りがあり、その輸送や埋め立てにより環境破壊を伴う。また、下流河川や海岸への土砂供給を行うべきだとの市民の声があがっている地域もあり、近年では、下流への通砂や排砂を促進させる様々な手法が検討され、実行されている。さらに、山林の荒廃も土砂発生要因の一つであると考えられ、林業の伐採放棄などによる山林の荒廃は、土砂の発生を増加させるほか、濁水の長期化や流木の原因にもなっている。このような山林荒廃は、対象とする範囲が非常に広く、電気事業者だけでは到底解決できるものではない。地元地域の方々とともに土砂流入の実態やその発生要因を明らかにしながら、森林・山地の保全に関する政策提言を行い、自然循環型エネルギーである水力発電を有効に使える体制を整えていく必要がある。森林・山地の保全は、豪雨のみならず地震による斜面崩壊リスクの低減にもつながり、土砂流出の抑制や下流への洪水の緩和、水源涵養機能の向上によって異常渇水による出水率の極端な低下にも貢献するはずである。渇水時の水資源の安定供給では、既に発電ダムが水補給に貢献している事例もある。複雑に絡み合う諸課題を、関係機関が連携して解決を図りながら、河川の最適な水利用を考えていくべきである。

(3) 生態系の反応と機能変化による影響

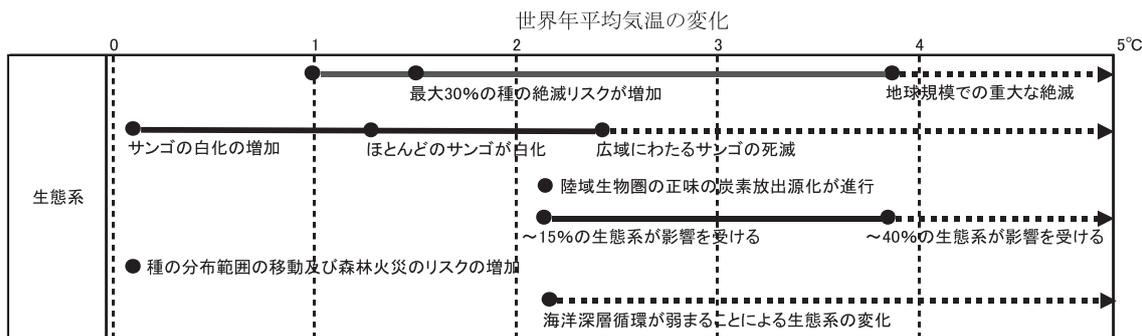
IPCCの第4次評価報告書(AR4)⁽³³⁾において、気候変化が生態系におよぼす影響が既に顕在化しており、今後、生物種の分布範囲の変化や絶滅リスクの増加、陸域生態系からのCO₂放出の進行、食糧生産への影響等が生じる恐れがあることが報告された(図2-2-13)。また、第5次評価報告書(AR5)⁽³⁴⁾においても、「陸域、淡水域及び海洋の多くの生物種は、進行中の気候変動に対応

し、その生息域、季節的活動、移動パターン、生息数及び生物種の相互作用を変異させている」とされ、既に暖かい海のサンゴ礁や北極生態系が不可逆的な構造転換(レジームシフト)を経験していることが示された。想定するCO₂排出量シナリオにより予測結果は異なるが、これまでの調査・解析結果によると、生態系影響の拡大は避けられない状況にある。ただし、生物間の相互作用、他の環境要因や人為影響との複合作用、生物の応答速度等が十分に考慮できていないこと、生物自身が気温の変化に適応する能力を有すること等から、1℃前後の気温上昇に伴う生態系の姿を予測するのは容易ではない。一方、2℃を越えるような気温上昇については様々な生態系において影響が顕在化することが指摘されている。

わが国に関しては、ブナ林等の冷温気候を好む樹種の分布適地の大幅な減少、松枯れ危険域の北進、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等が2031-2050年の近い未来に生じると予測されている⁽³⁵⁾。さらに、2081-2100年には、ハイマツやシラビソの絶滅リスクの増大、本州におけるブナの脆弱化、アカガシの分布拡大の可能性が生じることが予測されている^{(36),(37)}。

生態系影響については気候要素の変化予測以上に不確実性が高く、経時的な変化過程を考慮した影響予測は難しい。そのため、生態系の変化と電気事業との関係を考える場合には、長期的に生じうる変化を想定することになるが、気候の変化が生態系におよぼす影響は、電気事業にとって無視できないリスクを生じる可能性がある(図2-2-14)⁽³⁸⁾。リスクは、温暖化に伴う電力設備の環境適合性の変化によって新たに生じる「生態系リスク」、温暖化の生態系影響によって引き起こされる「事業リスク」に大別できる。生態系を対象としたこれらのリスクに対応するには、生態系が①環境変化に対する反応についての基本情報が曖昧な不確実な系であるとともに、②変動性の高い非定常な系であり、③明確な境界を持たない解放場の系であることから、予測がはずれる可能性がある(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結果に合わせて対応を変える「順応的」な取り組みが必須となる。

電力設備に関連する重要な生態系リスクの一つとして、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。一例として、ダム等の河川構造物が水温上昇や猛暑や渇水などの極端現象発生時に、冷



1990年レベル（1980～1999年）の世界年平均気温に対する温度変化に対して、発現する確度が高いと考えられる影響について示されている。
●は影響やその水準の始まりを、実線は影響の増加を、点線は影響の継続を示す。IPCC（2007）⁽¹⁾ から抜粋、作成。

図 2-2-13 世界平均気温の変化に伴う生態系への影響の事例（文献⁽³³⁾ から抜粋して作成）

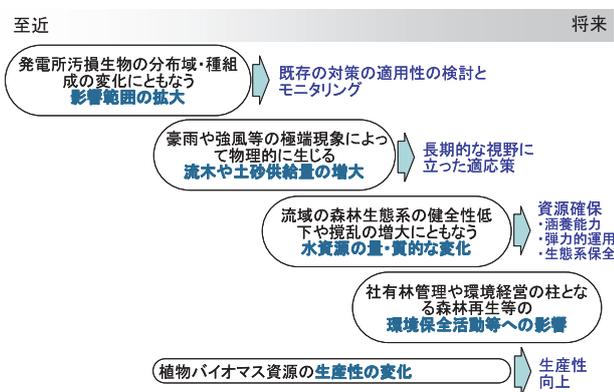


図 2-2-14 電気事業への影響が考えられる温暖化の影響（文献⁽³⁸⁾ から引用）

水を好む魚類の河川上流域（低温域）への移動を阻害し、その結果、分布域の縮小や個体数の減少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、気候の変化で渡り鳥の渡り経路が変わり、建設時には衝突の危険性を回避できる場所に設置された風力発電施設において衝突が増加する危険性も示唆されているが、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。このようなリスクについては、環境の分断以外にも大小様々な可能性が考えられるが、いずれも不確実性が高いことから、個々のリスクの絞込みは困難であり、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を取る必要がある。特に、近年、生態系影響に関する生物多様性（コラム5参照）の視点の重要性が指摘されており、「第三次生物多様性国家戦略」（2007）、「生物多様性基本法」（2008年）、「生物多様性企業活動ガイドライン」等）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」によ

り柔軟に対応できる体制を整えることが重要と考えられる。

上記のリスクが想定される反面、電気事業の保有する自然資産の活用は、気候影響の緩和に向けた可能性を秘めていると考えられる。例えば、前出の魚類生息域の縮小について、貯水池の湖底付近に貯留される冷水が資源として注目され始めている。このような冷水資源を利用して、事前の水温予測と生態系のモニタリングに基づき放水温を順応的に管理することで、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、発電所緑地や社有林に関しても、かつてはCO₂吸収源としての機能が注目されることが多かったが、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。このように、生態系リスクを低減するための適応についても、順応的な視点で臨むことが重要である。

一方、気候の生態系影響によって引き起こされる事業リスクとしては、温度環境の変化に伴って生じる発電所汚損生物や生物害の影響範囲の拡大が上げられる。特に、フジツボやイガイ類といった海域における汚損生物種は発電施設の維持管理に関連する（コラム6参照）。陸域においても、水力発電所の汚損生物として外来付着生物であるカワヒバリガイの生息可能域が拡大することが危惧される⁽³⁹⁾。また、蔓植物や外来植物など設備を維持する上で除去や成長抑制などを必要とする植物の生息地域の拡大、線下樹木の生長変化等、植物に関連した管理の見直しなどが必要になる可能性がある。

さらに、陸域については、温暖化に伴う植物の生育適地の変化や動物の食害等の増加による流域森林の健全

性・機能低下の影響が挙げられる。流域森林の劣化は、土砂災害防止／土壌保全機能の低下を引き起こし、極端現象である豪雨頻度・強度の増加に伴う加速的な貯水池への土砂堆積の増加を引き起こすことが予想される。加えて、洪水緩和、水資源貯留、水量調節、水質浄化等の水源涵養機能の低下にも繋がる。水資源に関しては、融雪時期の早期化による農業との共存の問題が指摘されているが、森林植生の変化が吸水・蒸散等の水収支の変化を生じさせ、森林からの流出特性を変化させる可能性にも注意する必要がある。

また、枯損木の増加は配電設備を中心とした破損事故の増加に繋がる可能性があると同時に、森林内への枯損木の貯留は、豪雨時の多量の流木の発生につながる可能性がある。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等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あ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。当研究所では、動物の挙動⁽⁴⁰⁾や樹木の反応の変化⁽⁴¹⁾、森林の土壌保全機能の評価^{(42)~(44)}等の流域管理に必要な技術の開発に取り組んできている。

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な活動であるが、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においては温暖化により生息密度や分布域に変化が生じる可能性が高い。その場合、発現した変化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。通常は、過去の調査結果の蓄積に基づく生物種のデータベースが基盤情報として利用されるが、対象地点の生物種構成の変化が生じた場合には、データベースの妥当性を見直しや補強が必要になる可能性もある。また、事後のモニタリングが必要とされる場合には、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。これらの環境アセスメントにかかわる事項に関しては、手法的にも政策的にもほとんど知見がなく、今後の取り組みが重要となる。

一方、自主的に実施されている陸・水域の環境修復等の保全活動においては、管理コストの増大や管理手法の見直しの必要性が生じる場合があると同時に、個々の活

動の重要度が増すなどの変化が生じると予想される。例えば、生態系に配慮したダム運用は社会的に要望の高い取り組みであり、温暖化による河川生態系の脆弱化が生じる地域・地点においては、その重要性が増すと予想される。ただし、維持流量やフラッシュ放流等についても、生態系の健全性維持への効果の科学的かつ定量的な裏づけが取れていない部分が多分にあることに十分注意することが必要である。

気候の変化が生態系におよぼす影響に関しては、未だ、一部の生物種に関して地域スケールで定常的な環境に対する定量的な反応予測の成果がみられるようになってきた段階にある。さらに、気候の予測以上に、生物・生態系への影響予測の結果は不確実性を含んでいる。このように、電気事業に対する生態系機能の変化の影響を定量的に予測し対策をとることが難しいことから、順応的な視点に立って最善の適応策を選択・実行できるような体制を構築することが重要と考える。

コラム 4: 日本の過去の気象場の再現

送配電設備の耐風設計や耐氷雪設計、あるいは水力ダムの設計洪水流量の算定を行う場合、過去の観測データを極値統計解析し、数十年から百年程度の再現期待値を求める。また最近では、建設後数十年を経過した電力設備の維持管理のために、設備が今までに受けた風雨や気温等の気象要因による疲労や腐食を改めて評価することも重要となっている。気象データを解析する場合、気象官署やアメダス観測所におけるデータを用いるが、観測要素や観測時間間隔は観測所や年代により異なることがある。山間部を通る送配電設備では、付近に観測所が無い場合も多い。

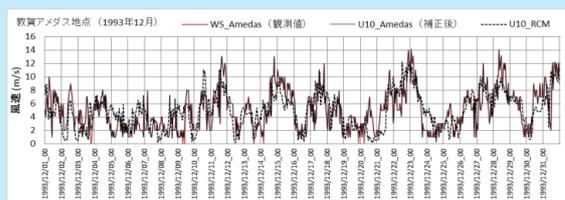
そこで当研究所では、日本の過去の気象を再現するために、領域気候モデル NuWFAS-RCM⁽¹⁾ を開発した。このモデルは、数日先の気象を予測する気象モデル NuWFAS⁽²⁾ をベースに、土壌の温度や水分量、地表の積雪量や積雪深、湖沼の水面温度⁽³⁾ などの季節・年変化も計算できるよう改良されている。

このモデルでは、過去の全球気象場（再解析値）を初期値・境界値として与え、日本周辺の気象場を水平解像度5kmで再現する⁽⁴⁾。ここに再解析値とは、最新の気象モデルやデータ解析技術を用いて、過去の全球気象場を再評価した全球格子点データ（水平解像度は約120km、時間解像度は6時間）である。

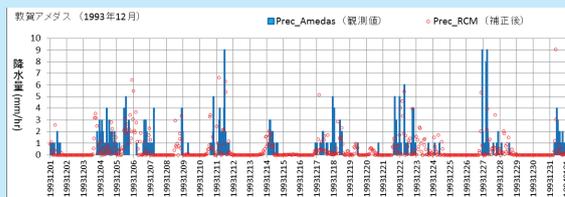
1957年9月から2013年までの気象再現結果を、長期気象・気候データベース（以下、気象・気候DB）として保存した。このDBには、風、温度、湿度、気圧、降水量など多くの気象要素が、地上から上空約20kmまでの格子点データとして1時間間隔に保存されている。

図1は、気象官署での1ヶ月間の観測値をその地点に最も近い気象・気候DBの格子点データと比較した一例である。両者は比較的良く一致していることが確認できる。

図2は、気象・気候DBの風速・風向、降水量、気温、日射量データを基に、着雪による送電線ギャロッピングが発生する可能性のある年間の時間を試算した一例である。このDBを用いる事で、観測データだけでは解析不可能な現象の評価を面的に行う事が可能となる。

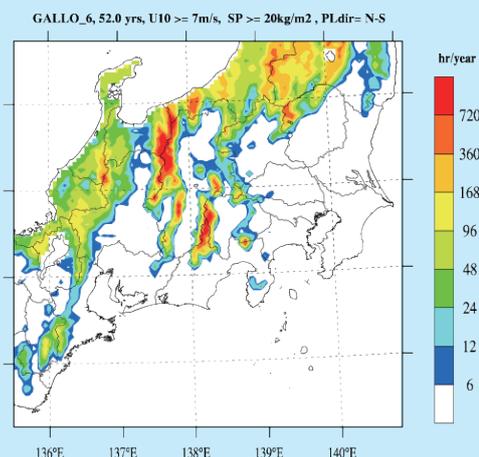


(a) 風速

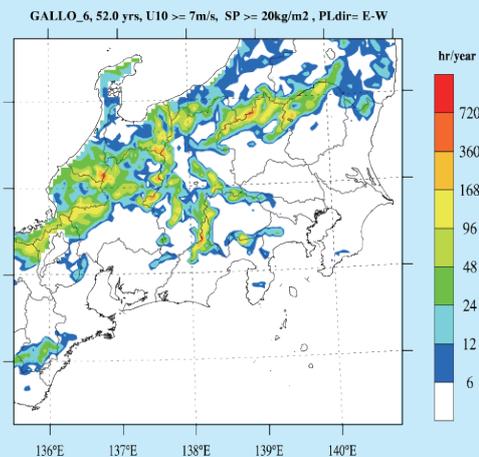


(b) 降水量

図1 長期気象・気候DBと観測値の比較



(a) 送電線走向が南北方向



(b) 送電線走向が東西方向

図2 ギャロッピング発生可能時間の試算例

地球温暖化は生物多様性に様々な影響をおよぼす。1992年に気候変動枠組み条約（UNFCCC）とともに採択された生物多様性条約（Convention on Biological Diversity: CBD）の締約国会議（COP）では、2004年のCOP7以降、UNFCCC事務局との意見交換や関連会合での広報活動等、地球温暖化対策と生物多様性保全の相乗効果を図る試みを継続的に行ってきた（図1）。2010年に名古屋で開催されたCOP10では、採択された20の国際目標（愛知目標）のうち、2つ（目標10,15）が地球温暖化に関連したものであった⁽¹⁾。

CBDの活動では、地球温暖化の個別の施策に対して、生物多様性を保全する観点から懸念が表明されることもある。そのうちのひとつが、途上国における森林減少・劣化の防止による排出量削減（REDD+）において、生物多様性への配慮を求める取り組みである。森林保全を通じた生物多様性の保全が期待される一方で、COP9（2008年）では、REDD+の活動によって生物多様性やそれによって地域住民が受ける恩恵が損なわれるという懸念の声が参加者の一部からあがった⁽²⁾。これを受けてREDD+における配慮事項をまとめた「生物多様性セーフガード」をCBDの事務局がとりまとめることとなった^{(3),(4)}。UNFCCCへの積極的な働きかけを含む規制化に向けた動きはなかったが、代わりにCOP12（2014年）では、UNFCCCで合意されたREDD+実施に関するワルシャワフレームワーク（2013年）に沿う形で、各国が生物多様性への配慮を行うことが決議された⁽⁵⁾。ちなみに、ワルシャワフレームワークに先立つUNFCCCのカンクン合意（2010年）に定められたセーフガードに、生物多様性に配慮する具体的な記

載はない⁽⁶⁾。

また、温暖化緩和策の気候工学（ジオエンジニアリング）の中でも、鉄・栄養塩の投入によって植物プランクトンによる炭素固定を促進する「海洋施肥」等、生態系への影響が懸念される手法に対して、CBDは、「懸念が科学的に払拭されない限り、（小規模な科学的実験を除き）気候工学による緩和策の実施を自粛するように要求」する決議をCOP9とCOP10で採択した^{(3),(7)}。なお、これらの決議にはいずれも法的拘束力はなく、海洋施肥については、その後、海洋汚染防止に関するロンドン条約・同議定書によって規制された⁽⁸⁾。

上記のように、CBDにおける議論が気候変動に関する国際交渉や地球温暖化対策に関する個別施策に大きな影響を与えることはなかった。これは国際条約としては後発の部類に入るCBDの影響力が大きくないことに加えて、UNFCCCの京都議定書以降の交渉が長期化する中で、CBD側からの十分な働きかけが出来なかったことも一因であったと考えられる。今後、2015年末にパリで開催されるUNFCCC COP21において2020年以降の国際枠組みが合意に至れば、具体的な地球温暖化対策に関する交渉が進み、その中で生物多様性に配慮する取り組みが加速する可能性もある。

2014年に開催されたCBD COP12では、生態系を活用した地球温暖化への適応策ならびに生態系の保全・再生を通じた防災・減災の取り組みを推進していくことが新たに強調される形で確認された⁽⁵⁾。生物多様性保全と地球温暖化対策の相乗効果を狙った新たなアプローチとして、今後の動向が注目される。

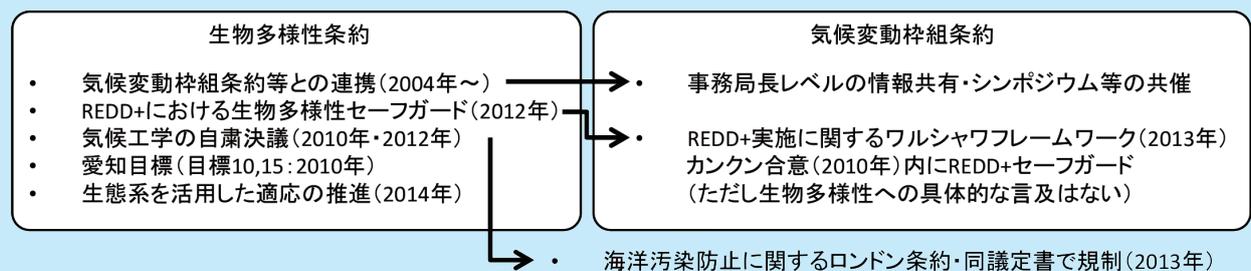


図1 生物多様性条約における気候変動関連決議と他条約の動向

第3章

地球温暖化の対策技術

3-1 各発電技術のライフサイクルCO₂排出量

3-1-1	はじめに	50
3-1-2	ライフサイクルアプローチによる 発電技術のCO ₂ 排出量の評価方法	50
3-1-3	評価対象発電技術	50
3-1-4	発電技術のライフサイクルCO ₂ 排出量	51

3-2 火力発電の高効率化・低炭素燃料利用技術

3-2-1	先進高効率発電技術	53
3-2-2	石炭ガス化複合発電	56
3-2-3	低炭素燃料の利用	60
	コラム7：EnergyWin	66

3-3 発電所におけるCO₂回収・貯留技術（CCS）

3-3-1	CCSの国内外動向	67
3-3-2	CO ₂ 回収技術	71
3-3-3	CO ₂ 貯留技術	71
3-3-4	CCS導入に係る諸リスク	75

3-4 再生可能エネルギー利用技術

3-4-1	太陽光発電大量導入に対応する電力系統運用技術	78
	コラム8：太陽光発電量予測技術	84
3-4-2	風力発電－出力予測と有効利用に向けた課題－	85
3-4-3	地熱発電	91

3-5 省エネルギー技術

3-5-1	ヒートポンプ活用による地球温暖化抑制	98
3-5-2	エネルギー消費解析による省エネ検討支援	100
3-5-3	エアコン選定ツール（エアコンの選定による省エネ）	102
	コラム9：住宅用室内温熱環境設計ツールCADIEE	105
3-5-4	電気自動車（環境にやさしい電気自動車）	106

3-6 温暖化抑制のための政策の研究

3-6-1	IPCCのシナリオと政策評価	108
3-6-2	自主的取り組みの研究	110
3-6-3	原子力政策の研究	111
3-6-4	省エネ・節電政策の研究	113
3-6-5	再生可能エネルギー政策の現状と課題	115
3-6-6	国際枠組みの研究	116

3-1 各発電技術のライフサイクルCO₂排出量

3-1-1 はじめに

地球温暖化問題を考える時、電力の生産（発電）に際し消費した燃料（石炭、天然ガス、石油）から排出される二酸化炭素（CO₂）に着目しがちである。

しかしながら、どのような発電技術であっても、“エネルギー・資源”を一切、利用せずに、設備を作ることには不可能である。発電時にCO₂を排出しない原子力発電や、太陽光発電・風力発電といった再生可能エネルギーであっても、ウラン燃料の製造や太陽電池製造時等にエネルギーを消費することでCO₂が排出される。したがって、発電用燃料消費に伴い排出されるCO₂だけでなく、設備の建設や運用時に排出されるCO₂についても考えることは、地球温暖化問題を考える上で重要である。

当研究所では、ライフサイクルアプローチ（LCA）による発電技術のCO₂排出量の評価を行ってきた^{(1)~(3)}。ライフサイクルアプローチによるCO₂排出量評価は、資源の採取・輸送から、設備の製造・使用、廃棄に至るすべてのプロセスにおいて排出される温暖化影響物質を網羅しつつ、環境負荷を評価する方法である。

3-1-2 ライフサイクルアプローチによる発電技術のCO₂排出量の評価方法

(1) 評価の範囲

ライフサイクルアプローチによる各種発電技術の評価を行う際には、評価対象技術の評価範囲をそろえて実施することが重要である。

具体的には、資源の採取・輸送から、設備の製造・運用、廃棄に至るプロセスすべてのCO₂排出を考慮する（図3-1-1）。特に、資源の採取から廃棄に至るプロセスの各段階におけるエネルギーや消耗資材などの消費に伴うCO₂排出量を実態に即して考慮する必要がある。また、各段階における設備の製造に伴うCO₂排出も含めることも重要である。ただし、設備の解体については、原子力発電及び石炭火力以外については、解体後の廃材に長期間保管を有する物質又は処分に際して管理が必要な廃棄物（石炭灰）が含まれていないため、考慮していない。



図 3-1-1 発電技術のライフサイクル評価対象範囲

(2) 評価指標

発電技術のライフサイクルCO₂排出量（LC-CO₂排出量）指標としては、発電設備が耐用年間に排出した直接分及び間接分の総CO₂排出量を、その設備が生涯に発電した電力量で除した、1kWh（送電端）あたりのライフサイクルCO₂排出量の式（3-1-1）が有用である。また、CO₂以外の温室効果ガスは、GWP（地球温暖化ポテンシャル）を用いてCO₂量に換算し、加味することで、指標としての有用性は高まる。特に、火力発電のLC-CO₂排出量評価においては、燃料採取時のメタン漏洩による温室効果ガス放出を無視できないため、メタンの温室効果をCO₂の21倍（積算年数100年）としてメタンをCO₂に換算し、加味する。

ライフサイクルにわたり排出される温室効果ガスは、発電燃料の燃焼による直接排出、設備建設、設備運用、設備解体に伴う間接排出の4つに大きく分けられる。

$$\text{LC-CO}_2\text{排出量}[\text{g-CO}_2/\text{kWh}(\text{送電端})] = \frac{(\text{発電燃料} + \text{設備建設} + \text{設備運用} + \text{設備解体})[\text{g-CO}_2]}{\text{耐用年間の発電電力量}(\text{送電端})[\text{kWh}]}$$

(3-1-1)

一般に、ライフサイクルからの排出量を推計するためには、そのライフサイクルに含まれるプロセスをひとつずつ検討する手法（積み上げ法）が採用される。しかし、発電システムのように多種多様な製品で構成されている設備の製造および建設のプロセスをひとつずつ把握するのは極めて困難である。そこで、設備の製造および建設に伴うCO₂排出量については、産業連関表を用いて推計する手法（産業連関法）が有効である。本評価では、積み上げ法と産業連関法の長所を生かした融合手法を利用して、ライフサイクルにわたるCO₂排出量（LC-CO₂排出量）を推計している。

3-1-3 評価対象発電技術

LC-CO₂排出量評価を行った発電技術の一覧と、それぞれの発電技術の主な技術特性を表3-1-1に示す。現在、

表 3-1-1 評価対象とした発電技術

	発電端出力 [MW]	設備利用率	発電端熱効率 (HHV)	所内率 (HHV)	耐用年数	
石炭火力	(従来)	1000	70.0%	39.6%	6.9%	40年
	(USC)	1000	70.0%	42.4%	5.1%	40年
石油火力		1000	70.0%	38.3%	5.1%	40年
LNG火力	(汽力)	1000	70.0%	38.9%	4.3%	40年
	(従来)	1000	70.0%	44.6%	2.1%	40年
	(複合 1300℃)	1000	70.0%	50.0%	2.1%	40年
	(複合 1500℃)	1000	70.0%	53.0%	2.1%	40年
原子力	(BWR)	1000	70.0%	33.7%	4.3%	40年
	(PWR)	1000	70.0%	33.7%	4.3%	40年
水力	(中規模ダム水路式)	10	45.0%		0.7%	40年
地熱		55	60.0%		7.0%	30年
太陽光	(住宅用)	0.00384	15.0%		0.0%	30年
	(事業用)	10	15.0%		0.0%	30年
風力	(300kW 級)	0.3	20.0%		10.0%	30年
	(600kW 級)	0.6	20.0%		10.0%	30年
	(1000kW 級)	1	20.0%		10.0%	30年
	(1750kW 級)	1.75	20.0%		10.0%	30年
	(2000kW 級)	2	20.0%		10.0%	30年
	(2500kW 級)	2.5	20.0%		10.0%	30年
ウインドファーム	(陸上/2MW×20)	40	20.0%		10.0%	30年
	(洋上設置着床式/2MW×20)	40	30.0%		10.0%	30年
	(洋上設置浮体式/2MW×20)	40	30.0%		10.0%	30年

[注] HHV: 高位発熱量

国内で運用されているか、実証段階の発電技術を評価の対象とした。各発電技術の発電端熱効率や設備利用率などの技術条件は、我が国の実績値を基に想定した。ただし、着床式洋上ウインドファーム、浮体式洋上ウインドファームの設備利用率については、政府が事業者団体に行った調査結果を基に想定した。

また、発電燃料の生産や輸送などのプロセスについても我が国の輸入実績を基に評価を行っている。例えば、輸入に大きく依存している化石燃料やウラン燃料の生産については、海外での生産活動やエネルギーの排出係数の実績値を基に評価を行っている。

3-1-4 発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量

次ページの図 3-1-2 に LC-CO₂ 排出量評価結果を示す。以下、各発電技術毎の LC-CO₂ 排出量の技術的な特徴及びライフサイクル分析の視点から地球温暖化対策への示唆を考える。

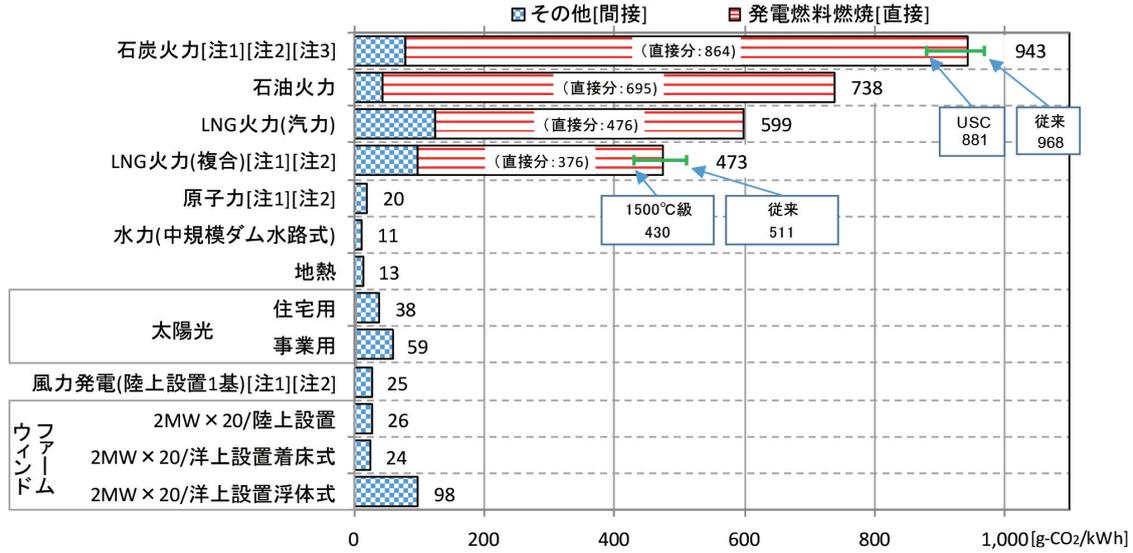
(1) 火力発電

発電用燃料からの直接分が多くを占めている火力発電技術（石炭火力（輸入炭、国内炭）、石油火力、LNG 汽力、LNG 複合火力）の LC-CO₂ 排出量は 473～943 [g-CO₂/kWh] と発電技術によって大きく異なる。発電用燃料燃焼に伴う直接 LC-CO₂ 排出量も、炭素分の多い燃料を利用する発電技術の CO₂ 排出量が多くなるため、376～864 [g-CO₂/kWh] と発電技術によって大きく異なる。ただし、LNG は炭素分が石炭に比べて大幅に少ないが、天然ガスの液化に際して消費されるエネルギーが大きいいため、間接分 LC-CO₂ 排出量は石炭火力よりも多くなる傾向がある。

また、火力発電の LC-CO₂ 排出量は、他の発電システムのそれと比べて 10 倍以上である。石炭火力と石油火力は、発電燃料の燃焼に伴う直接排出量が全体の 9 割以上を占めている。間接排出量の占める割合は小さいが、発電燃料の輸入国の違いによっても幅をもつ。これは、主に資源産出国からの輸送距離そして燃料採掘時のメタン漏洩量が異なるためである。

石炭火力では、従来型石炭火力の総 LC-CO₂ 排出量が 968 [g-CO₂/kWh] であるのに対して、技術進歩による熱効率の向上により、超々臨界圧（USC）石炭火力の総 LC-CO₂ 排出量は 881 [g-CO₂/kWh] と、石炭火力（従来）に比べて 9% 低い。現在、開発が急がれている石炭ガス化複合発電（IGCC）や先進超々臨界圧（A-USC）石炭火力等の次世代石炭火力発電技術では、さらなる熱効率の向上が見込まれており、これら技術の商用化と国内外での USC の活用が進んだ場合、豊富な資源量と価格安定性を持つ石炭を有効に利用しつつ、石炭火力からの CO₂ 排出量低減を図れる可能性がある。

LNG 複合火力については、1300℃ 級、1500℃ 級とガスタービン入口温度の高温化技術開発が図られてきた。この結果、発電端熱効率も初期の LNG 複合火力の 44.6% から 1500℃ 級で 53% と大幅な熱効率向上が図られている。この結果、初期の LNG 複合火力（従来）の 511 [g-CO₂/kWh] から 1500℃ 級で 430 [g-CO₂/kWh] と総 LC-CO₂ 排出量は 16% 低下している。LNG 複合火力についてもガスタービン入口温度のさらなる高温化技術開発が進んでおり、温度条件が 1600℃ 以上になった場合、さらに熱効率の向上が見込まれる。火力発電技術の中でも、総 LC-CO₂ 排出量が最も少ない、LNG 複合



[注 1] 発電技術種別毎に算出した生涯発電電力量あたりの LC-CO₂ 排出量を、各発電技術に属するプラントの 2008 年度末の設備容量で加重平均した「電源別平均 LC-CO₂ 排出量」。

[注 2] グラフ中の範囲棒は、発電技術種別が属する発電技術の内、LC-CO₂ 排出量が最大と最小の発電技術種別の範囲である。原子力発電は 19～21g-CO₂/kWh、風力発電については、23～29 g-CO₂/kWh であるため、範囲棒は割愛する。

[注 3] USC：超々臨界圧

[注 4] 出典 (1) (2) (3)

図 3-1-2 発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量

火力の高温化技術開発が進展することは、我が国の CO₂ 排出量低減をさらに図ることが出来る可能性がある。

(2) 原子力発電

原子力発電の LC-CO₂ 排出量は、20 [g-CO₂/kWh] であり、化石燃料を消費しない他の発電技術と同一水準である。このため、安定的に発電できる原子力発電は、ライフサイクル評価の視点からは地球温暖化対策としての有用性は高いといえる。

(3) 太陽光発電

住宅用太陽光発電の LC-CO₂ 排出量は 38 [g-CO₂/kWh] であるが、事業用太陽光発電の LC-CO₂ 排出量は 59g-CO₂/kWh であり、住宅用よりも LC-CO₂ 排出量は 55% 多い。事業用太陽光発電では、住宅用と異なり、架台・架台基礎用資材必要量が増加することに加え、連系電圧が家庭用と異なることによる系統連系の機器類が必要となる。このため、必要な機器類等の増加と輸送量増により、事業用太陽光発電の LC-CO₂ 排出量は、住宅用よりも多くなる。

(4) 風力発電

風力発電を陸上に 1 基設置した場合の LC-CO₂ 排出量

は 25 [g-CO₂/kWh] であるが、陸上設置ウインドファーム (2MW × 20 基) は、連系電圧が高いことと風車間接続ケーブルが必要なため、電気設備及び設備補修物量が増加し、LC-CO₂ 排出量は約 3% 増の 26 [g-CO₂/kWh] となる。

着床式洋上ウインドファームは、海底ケーブル・設備補修及び水中基礎等の物量が大幅に増加するが、陸上に設置した場合よりも高い設備利用率が期待できるため、LC-CO₂ 排出量は、陸上に 1 基設置した場合に比べて 2% 減の 24 [g-CO₂/kWh] になる。

一方、浮体式洋上ウインドファームは、浮体重量が風車本体のその約 10 倍であるため、設備建設に伴い投入される資材量が大幅に増加する。高い設備利用率により生涯発電電力量は増加するものの、投入物量増加による総 CO₂ 排出量増加を相殺することはできない。このため、浮体式洋上ウインドファームの LC-CO₂ 排出量は、陸上設置及び着床式洋上ウインドファームの約 4 倍の 98 [g-CO₂/kWh] となる。しかしながら、発電に際して化石燃料を消費しないため、火力発電技術の 10% 程度である。

ただし、本評価では、変動性電源である風力発電と太陽光発電の出力安定化等に対する対策技術は含まれていない。この点では、さらなる検討が必要といえる。

3-2 火力発電の高効率化・低炭素燃料利用技術

3-2-1 先進高効率発電技術

(1) 先進超々臨界圧 (A-USC) 火力発電技術

先進超々臨界圧 (A-USC : Advanced ultra super critical steam condition) 火力発電技術は日本をはじめとして、世界各国で研究・開発が積極的に進められている。以下では、A-USC 火力発電技術の概要、日本で進められているプロジェクトの全体計画と現状の進捗状況、および、当研究所の取り組みについて述べる。

A-USC 火力発電とは石炭火力の一種であり、二酸化炭素排出の削減を目指して、現在の USC 石炭火力よりも高い蒸気条件で稼働するものである。具体的には、現在の最新鋭の USC 石炭火力の主蒸気は温度 600℃、圧力 25MPa であるのに対して、A-USC の主蒸気は温度 700℃、圧力 35MPa である。この結果、熱効率は HHV 基準で USC が約 42% であるのに対して A-USC は約 46% であり、USC と比べて二酸化炭素排出量が約 100 (g-CO₂/kWh) 削減となる⁽¹⁾。A-USC は発電システムとしては現在の USC と基本的に同じであるため、技術的課題としては、蒸気条件の上昇に伴う構造材料の高温

化が主たるものである。国が設置した「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」が 2015 年 7 月に発表した資料⁽²⁾ においても、図 3-2-1-1 に示すように、次世代火力発電の中で最も実用化が早い第 1 世代技術の中に A-USC は位置づけられている。

A-USC に関する研究・開発は、1990 年代後半に欧州が世界に先駆けてプロジェクトとして取り組み、それを追う形で米国および日本がそれぞれプロジェクトを開始した。現在は日欧米に加えて中国およびインドも研究・開発を進めており、国や地域を単位としてプロジェクトが進められている。なお、欧州においては、近年、再生可能エネルギーの大量導入を受けて火力発電の位置づけが変化してきており、A-USC に関する研究・開発は縮小の方向である。一方、日本は 2011 年の東日本大震災以降、火力発電が従来に増して大きな役割を担っており、A-USC に関する研究・開発は着実に進められている。そのため、現時点においては、A-USC に関する技術は世界の中で日本が最も進んでいる。

日本における A-USC 研究の中核は、経済産業省からの補助事業として 2008 年から実施している「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」プロジェクトである。本プロジェクトのロードマップ⁽³⁾ を次ページの図 3-2-1-2 に示す。前述したように、A-USC における検討

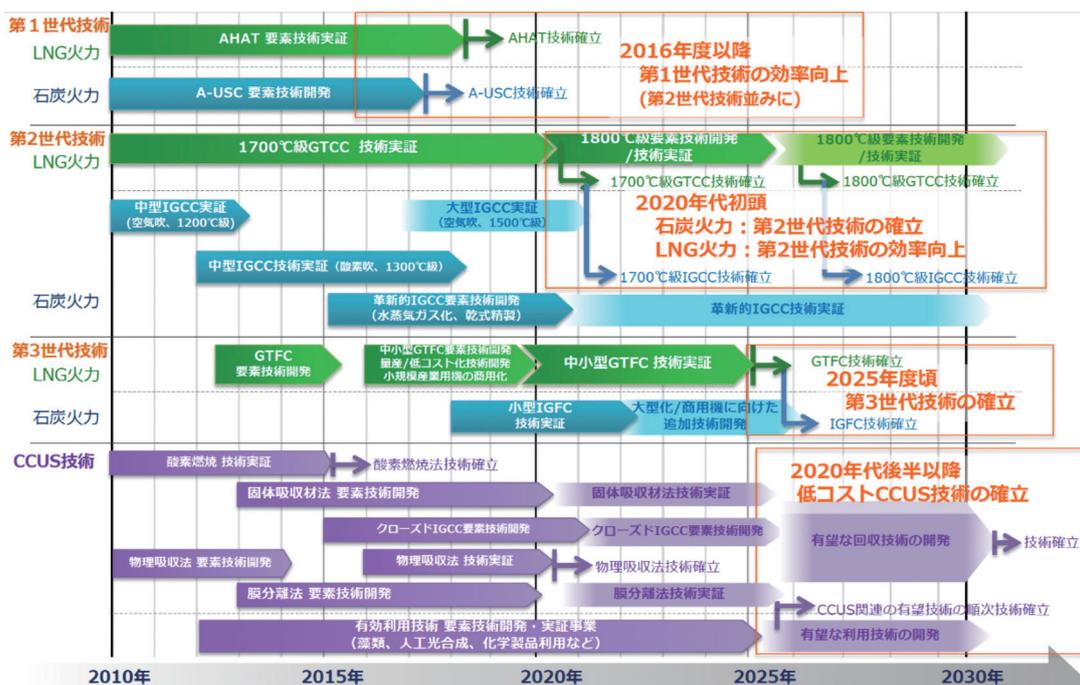


図 3-2-1-1 次世代火力発電技術の開発工程表⁽²⁾

項目	年度											
	2008 (H20)	2009 (H21)	2010 (H22)	2011 (H23)	2012 (H24)	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)			
システム設計, 設計技術開発	基本設計, 配置最適化, 経済性試算											
要素開発	ボイラ	材料開発	大径管, 伝熱管用新材料開発, 材料改良									
		材料製造性検証	高温長期材料試験 (3~7万時間)									
	タービン	材料製造性検証	溶接技術開発・試験, 曲げ試験									
		材料開発	材料改良仕様策定等, 実サイズ部材試作									
高温昇	構造・要素・材料開発	材料開発	ロータ, ケーシング等の大型溶接技術, 試作									
		材料開発	高温長期材料試験 (3~7万時間)									
実缶試験・回転試験 (高温昇含む)	設備計画, 設備設計, 設備製造, 据付, 試験, 評価											

図 3-2-1-2 A-USC プロジェクトのロードマップ

課題は蒸気条件の上昇に伴う構造材料の高温化であり、具体的には 700℃での使用に耐えうる Ni 基合金の開発・検証がポイントとなる。Ni 基合金はガスタービン翼やディスクなどには既に適用されているが、ボイラ大径管やタービンロータなど大型部材はこれまでに製造・適用実績がないため、A-USC での使用が初めての試みとなる。これまでの研究により、各機器・部位で想定した機械的強度を満足する材料の開発、および、同材料の大型部材の製造・成形加工の確認が完了している⁽³⁾。図 3-2-1-3 に示すように、A-USC 用 Ni 基合金を用いて、ボイラ再熱器管寄せ、および、タービンロータが製作されている。現在は、A-USC 候補材料に関する 7 万時間程度を目指した長時間クリープ試験を継続実施するとともに、ボイラ配管に 700℃の蒸気を供する実缶試験やタービンロータを 700℃下で回転させる試験が行われている。

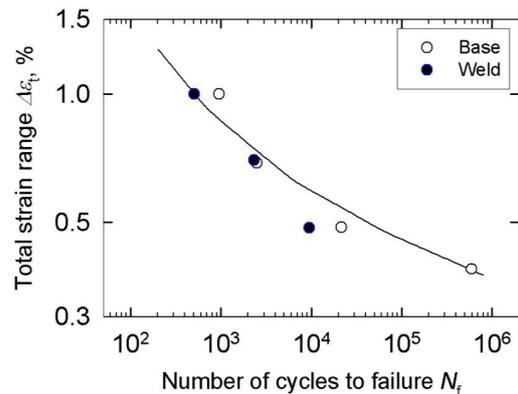


(1) ボイラ再熱器管寄せ (2) タービンロータ

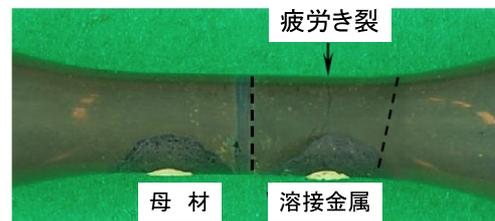
図 3-2-1-3 Ni 基合金による大型部材の製作⁽³⁾

上記のように、国のプロジェクトにおいて A-USC の要素技術開発研究が順調に進められている。当研究所では、A-USC は将来の火力発電における有望な選択肢の一つであると考え、ユーザサイドの観点から A-USC 用材料の研究に取り組んでいる。具体的には、①実構造物において損傷の進行が相対的に速い形状不連続部は応力

多軸性が高くなっていることから、応力多軸性がクリープ損傷に及ぼす影響の評価法の開発、②火力発電所の運用形態が現在想定しているベース運転に加えて、負荷変動運転も強いられる場合を想定して、熱疲労に対する寿命評価法の開発に取り組んでいる。例として、A-USC 用 Ni 基合金の一つである Alloy617 の母材および溶接継手を用いて 700℃で実施したひずみ制御型の疲労試験の結果⁽⁴⁾を図 3-2-1-4 に示す。全ひずみ範囲で本試験結果を整理した場合、溶接継手の疲労寿命は母材よりも短いこと、および、疲労き裂は母材ではなく溶接金属に発生すること、が分かった。なお、高温下ではクリープの影響により疲労寿命が低下することが知られているため、クリープ疲労相互作用も考慮した上で寿命評価法の開発を進めている。また、機器の保守・管理においては、非破壊検査技術の確立も重要な項目である。この点についても、当所では A-USC 用 Ni 基合金の内部損傷を対象とした検査技術の検証を進めている。



(a) 全ひずみ範囲と疲労寿命の関係



(b) 試験終了後の溶接継手試験片

図 3-2-1-4 Alloy 617 の高温疲労試験結果 (700℃)⁽⁴⁾

(2) 高温分空利用ガスタービン (AHAT) 技術

地球環境問題の観点から、火力発電システムの高効率化は今後も重要な取り組みである。また、出力変動の大きい太陽光発電や風力発電等の大量導入に対応するため、火力発電には負荷・周波数調整力などの運用性のさ

らなる向上も必要と考えられる。さらに、ピークあるいは中間負荷帯を担っている運用性の高い中容量の火力発電プラントの高経年化が進行しており、高効率で負荷調整力の高い中容量の火力発電システムの開発は重要な課題であると考えられる。

これらへの対応が期待できる次世代の発電システムとして、アドバンスド高湿分空気利用ガスタービン (Advanced Humid Air Gas Turbine、以下、AHAT) システムがある⁽⁵⁾。AHAT システムは、空気への加湿と排熱回収の相乗効果により、蒸気タービン (以下、ST) なしでも高出力・高効率を達成する新しいガスタービン (以下、GT) 発電システムである。

図 3-2-1-5 に AHAT システムの構成図を示す⁽⁵⁾。加湿の多くは、圧縮機で加圧された空気に対して増湿塔での温水によりなされる。ここで加湿された空気は、再生熱交換器を通過して排気ガスの熱を回収することで加湿され、燃焼器に供給される。圧縮機吐出空気に ST の蒸気量に匹敵する湿分を加えることで GT 動力を増加させると共に、加湿の際の空気温度低下と比熱増加により再生熱交換器での GT 排熱の回収量を増やすことが特徴である。また、高湿分空気による燃焼は、NO_x 排出量低減に大きな効果がある。圧縮機入口に吸気噴霧システムを設置することで、吸気冷却の効果と圧縮機内部での蒸発による中間冷却の効果で圧縮機動力が低減できる。GT 排気ガスには大量の湿分が含まれるが、排気ガスと冷却水の直接接触型の水回収装置により排気ガスを冷却することで湿分を回収し、増湿塔に供給して再利用できる。

このシステムの概念は 1980 年代に提案された HAT サイクルが原型となっている。しかし、HAT サイクルではそのサイクル性能を十分発揮させるために圧縮機を分割し中間冷却器を設けた新型の GT が必要であり、また、大量の補給水を必要としたため、系統的に優れていることは認められながらも実用化に至らなかった。

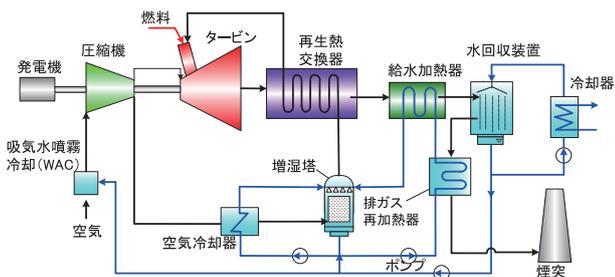


図 3-2-1-5 AHAT システムの構成図⁽⁵⁾

表 3-2-1-1 AHAT システムの特徴と GTCC に比べた優位性⁽⁷⁾

項目		優位性 / 特徴
運用性	起動時間	◎ ST 系が無く起動時間短い
	負荷即応性	◎ GT 単独システムと同等
	最低負荷	◎ 高湿分燃焼により低負荷で運転可能
	大気温度特性	○ 吸気噴霧冷却で高気温時の出力低下が少ない
	制御容易さ	○ GT 単独システムと同等でシンプル
環境性	NO _x 対策	○ 高湿分空気燃焼により低 NO _x 、必要に応じて脱硝装置を設置
	立地制約	◎ 水回収水温 60°C 程度で、冷却塔冷却や空冷により内陸部への立地可能
経済性	機器構成、工期	◎ ST 系なく、機器構成シンプルで工期短い
	配管	— GT 圧縮機吐出圧力低く、薄肉。ただし、再生サイクル配管径大
	水質管理	— 水処理装置 (イオン交換樹脂等) 設置
	ユーティリティ消費	— 純水 (圧縮機吸気噴霧冷却用)、アンモニア (脱硝用)、冷却水 (冷却塔補給用)
	メンテナンス費用	○ 構成機器少ない (排熱回収系、水回収系)

◎ : 特に優位 ○ : 優位 — : 同等

AHAT システムは、それら課題を低減し、実用化に近づけたシステムと言える。

AHAT システムは、概ね 200MW 以下の中小容量で他の方式よりも発電端効率で優位となる可能性を有しており、商用機 (～200MW 級) の開発目標として、発電端熱効率 57% (LHV) を掲げている⁽⁶⁾。その特徴と GTCC と比べた優位性を表 3-2-1-1 に示す⁽⁷⁾。AHAT システムは、ST、排熱回収ボイラならびに復水器からなる ST 系を必要としないことから構成が簡素であるため、起動時間や負荷応答性などの運用性に優れ、また、冷却用の海水を必ずしも必要としないため、立地条件の制約が緩和されると考えられる。

AHAT システムの研究開発は、経済産業省資源エネルギー庁からの補助金事業で、三菱日立パワーシステムズ (株) を中心に、住友精密工業 (株)、当研究所の三者で進めている。

これまでの開発状況として、小型 GT で構成される 3MW 級検証機を製作して運転試験を行い、AHAT システムが発電システムとして成立することを実証した⁽⁸⁾。また、年間を通じた運転試験を行い、起動・部分負荷特性、大気温度変化に対する各種特性、信頼性等を確認している⁽⁹⁾。

さらに、商用機開発に向けて、事業用発電に用いられる大型の重構造 GT を適用した、次ページの図 3-2-1-6、7 に示す 40MW 級総合試験装置により、重構造



図 3-2-1-6 40MW 級総合試験装置全景⁽⁷⁾

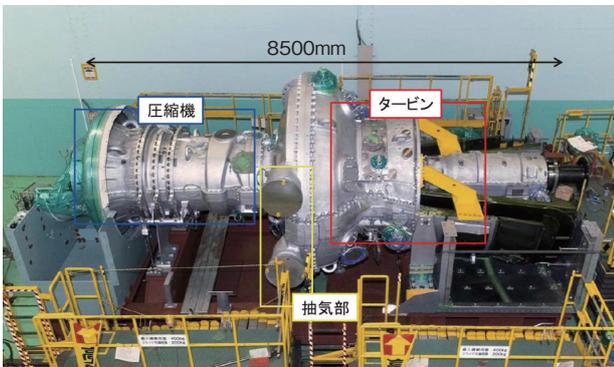


図 3-2-1-7 40MW 級総合試験 GT 外観写真⁽⁷⁾

GT で AHAT システムが成立することを世界で初めて示すことができた^{(7),(10)}。

総合試験装置では、コールド起動で約 60 分で定格負荷の 40MW に達することを確認でき、GTCC のコールド起動の約 1/3 に相当する短時間で起動できることを示せた⁽¹¹⁾。また、熱効率について、AHAT 運転時とシンプルサイクル（以下、SC）試験時の結果を比較したところ、図 3-2-1-8 が示すように、同じ圧力比において AHAT 運転の方が低い燃焼温度であるにも拘わらず 10% 程度高い熱効率を示し、加湿や排熱回収を行うことにより熱効率向上が図れることを実データから検証できた。さらに、水回収装置による水回収率について、GT への加湿量に対して 100% 以上の湿分が回収でき、外部からの補給水を大幅に低減できる見通しを得ている⁽¹¹⁾。

引き続き、40MW 総合試験装置を用いて長期信頼性の実証を行うと共に、商用機 の概念設計ならびに運用性評価を行うことを予定している。高効率で運用性の高い火力プラントの研究開発に、今後も努力して行きたいと考えている。

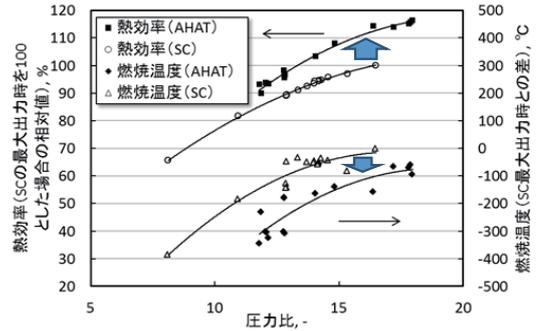


図 3-2-1-8 AHAT 運転と SC 運転の熱効率の比較

3-2-2 石炭ガス化複合発電

(1) 石炭ガス化複合発電技術

石炭ガス化複合発電 (IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle) は、高効率火力発電として普及しているガスタービン複合発電 (GTCC) の燃料に石炭ガスを適用するもので、新型の石炭火力である。環境適合性の高いクリーンコールテクノロジーの一つとして、我が国を始め各国で開発が進められている。

a. IGCC の特徴

IGCC の基本的なシステムは、石炭を気体燃料に転換する石炭ガス化設備、石炭ガス中に含まれる不純物を除去するガス精製設備、精製後の石炭ガスをガスタービン燃料として発電を行う複合発電設備で構成される (図 3-2-2-1)。ガス化技術は化学合成の分野で歴史があり、様々な形式のガス化炉が IGCC に用いられている。

IGCC の特徴として、高い発電効率、優れた環境性、低品位炭の利用拡大などが挙げられる。我が国の最新鋭微粉炭火力の発電効率は既に世界的に最高水準にあり、

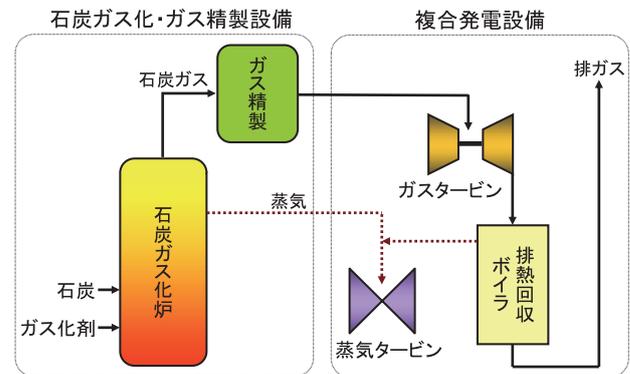


図 3-2-2-1 石炭ガス化複合発電の基本システム構成

USC ボイラの送電端効率は 40～41% (HHV) に達している。これに対し、我が国で開発されている IGCC では、1,500℃級ガスタービンを用いると 46～48%となる見通しである。効率向上により、発電電力量当りの CO₂ 排出量を削減することが可能である。

b. 海外における IGCC 開発

欧米では、1990 年代に本格的な IGCC 実証計画が進められ、四大プロジェクトと呼ばれる Buggenum (オランダ)、Wabash River (米国)、Tampa (米国)、Puertollano (スペイン) の 300MW 級実証機が知られている。ガス化炉は、それぞれ Shell 炉、E-Gas 炉、GE 炉、Prenflo 炉が採用されている。いずれも酸素吹きで、乾式給炭もしくは湿式(石炭-水スラリー)給炭方式の噴流床である。プナム(2013年に商用運転終了)を除き、現在も商用運転が続けられている。

四大プロジェクトに続く商用機として、Edwardsport (米国) で 618MW の IGCC (GE 炉×2基) が 2013 年 6 月に営業運転を開始した。また、Kemper County (米国) において、新型の移動床ガス化炉を用いる 582MW の IGCC (TRIG™ 炉×2基) の建設工事と試運転が進んでいる。これは CO₂ を回収する初の商用 IGCC で (回収率 60%)、EOR 用に販売することが計画されている。

中国では、近年、アンモニア、メタノール、オレフィンなどの原料製造のための産業用大容量ガス化炉が急速に普及している。独自の IGCC 開発も行っており、GreenGen プロジェクトの Stage I として、HCERI 炉を用いる 250MW 規模の IGCC が天津に設置され、2012 年 4 月より運転が開始されている。韓国では、Shell 炉を用いた 300MW 級の Taean IGCC の建設工事が進んでいる。

c. 我が国における IGCC 開発

我が国では、空気吹き IGCC の実証機計画が完了したところであり、また、酸素吹き IGCC 実証機の開発が進んでいる。

① 空気吹き IGCC 実証機プロジェクト

国と電気事業において、1980 年より噴流床石炭ガス化複合発電技術の検討が進められた。電力中央研究所と三菱重工業株式会社により 2 トン/日石炭ガス化基礎実験装置で開発された空気吹き二段噴流床方式 (図 3-2-2-

2) が、NEDO 事業である 200 トン/日パイロットプラント計画に採用された。1990～1995 年度に実施されたパイロットプラントの研究運転において、約 1 ヶ月間 (789 時間) の連続運転に成功した。その後、FS 及び要素研究を経て、1999 年度に経済産業省の補助事業として IGCC 実証機計画が開始された。

実証機計画では、電力 9 社と電源開発が出資した株式会社クリーンコールパワー研究所により、250MW 実証機が建設され、2007 年 9 月から 5 年半の運転試験が行われた。運転試験開始から 1 年後には 2,000 時間の長期連続運転試験を完了し、海外の先行例と比較して高い完成度が示された。さらに、5,000 時間の耐久性確認試験により IGCC の信頼性が検証されるとともに、熱効率や環境など全ての目標を達成し、商用機の設計に不可欠な実証データが取得された⁽¹⁾。

実証機計画は 2012 年度末に終了し、2013 年度より実証機は常磐共同火力株式会社勿来発電所 10 号機として商用運転されており、最長連続運転記録は 3,912 時間 (2013 年) に更新された。さらに、福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画として、500MW 級 IGCC (2 基) の開発が東京電力株式会社より発表されている。

電力中央研究所では、各種基礎実験装置や数値シミュ

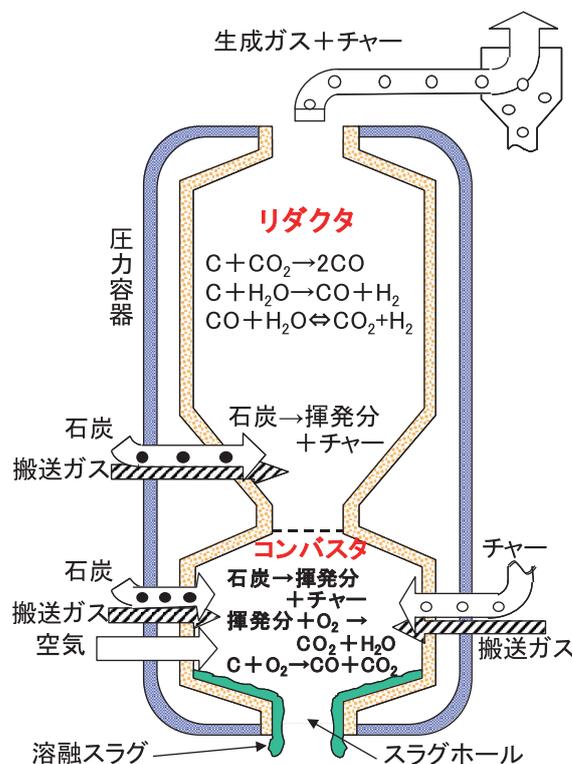


図 3-2-2-2 空気吹き二段噴流床石炭ガス化炉の概略

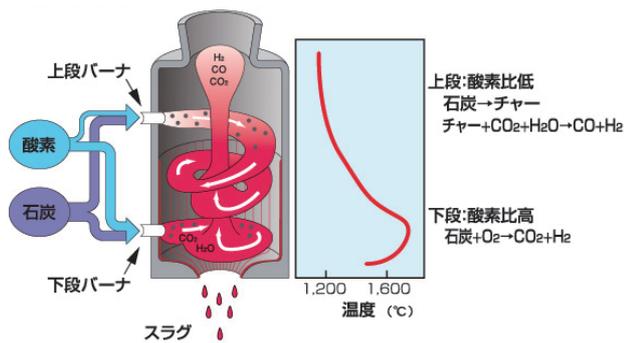


図 3-2-2-3 EAGLE 石炭ガス化炉の概念図⁽³⁾

レーション、石炭ガス化研究炉（3トン／日炉）等を用いて実証機計画を支援してきた。計画段階では、数値解析技術を用いた実証機の設計評価を行った。運転段階では、供試炭に対して反応性基礎実験および数値解析によるガス化性能の事前評価を行い、その成果が実証機の運転条件や監視項目の設定に反映されるなど、プロジェクトの目標達成に貢献した。これらの支援研究から、商用規模ガス化炉の設計や運用を評価可能な炭種適合性評価手法を構築した。

② 大崎クールジェンプロジェクト

NEDO 事業として実施された石炭利用水素製造技術開発（HYCOL）において、株式会社日立製作所が開発した酸素吹き一室二段旋回型方式（図 3-2-2-3）が採用され、1991～1994 年度に行われた 50トン／日パイロットプラントの研究運転では 1,149 時間の連続運転を達成した。ここでの成果は、電源開発株式会社が NEDO との共同研究として実施した多目的石炭ガス製造技術開発（EAGLE プロジェクト；Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity）に引き継がれた。EAGLE プロジェクトでは、150トン／日パイロットプラントが建設され、2002 年度に試験運転が始まった。化学吸収法および物理吸収法による CO₂ 分離回収試験も行われ、2013 年度に試験運転を終了した。

EAGLE プロジェクトの成果に基づき、中国電力株式会社と電源開発株式会社が共同出資する大崎クールジェン株式会社により、石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC：Integrated coal Gasification Fuel Cell combined cycle）を実証する大崎クールジェン（OCG）プロジェクトが進められている。中国電力株式会社大崎発電所構内に 166MW の実証機を建設中で、第 1 段階である酸素吹 IGCC 実証試験の開始が 2017 年 3 月に予定されている。

第 2 段階では、石炭ガス化ガスの最大 30% を導入する CO₂ 分離回収装置（回収率 90%）を追設し、CO₂ 分離回収型 IGCC の実証試験が計画されている。さらに第 3 段階として、最終目標である CO₂ 分離回収型 IGFC 実証試験が計画されている⁽²⁾。

(2) CO₂ 回収型高効率 IGCC（High Efficiency Oxy-fuel IGCC）

a. 背景

石炭は、安価な上、埋蔵量が豊富で地域的な偏在も少ない資源であり、エネルギー基本計画（2014 年閣議決定）でも「重要なベースロード電源の燃料」と位置づけられているが、地球温暖化対策の観点からは石炭火力からの CO₂ 削減が求められており、電気事業は発電効率向上やバイオマス混焼などの対策を進めてきた。一方、近年では欧米を中心に CCS 技術開発が進んでおり、国内でも 2012 年に苫小牧で大規模実証プロジェクトが始まった。

しかし、既存の CO₂ 回収技術では発電効率が低下し発電コストが上昇することが課題となっている。そこで、電力中央研究所と九州大学は、NEDO 受託研究として CO₂ 回収後も 42%_{HHV} の高い発電効率を維持できる CO₂ 回収型高効率 IGCC（High Efficiency Oxy-fuel IGCC、Oxy-fuel IGCC）の基盤技術を開発した（2008～2014）。

b. Oxy-fuel IGCC の概要

従来、CO₂ 回収型火力発電システムとして、燃焼後回収システム（図 3-2-2-4 (a)）、酸素燃焼システム（図 3-2-2-4 (b)）、燃焼前回収システム（図 3-2-2-4 (c)）の 3 方式が検討されてきた。

燃焼後回収システムは、微粉炭火力発電所の排煙処理装置の後流に設置した回収装置で CO₂ を回収する方式で、化学吸収法による CO₂ 回収設備が実用段階にある。

酸素燃焼システムは、微粉炭火力発電所の排ガスを循環させ、純酸素と混合して燃焼用空気に代える方式で、空気中の N₂ が混入しないため排ガスの主成分が CO₂ となり、CO₂ 回収装置が不要となるメリットがあり、豪州などで実証試験を終えている。

燃焼前回収システムは、IGCC からの CO₂ 回収を想定したもので、脱硫後の精製ガスをシフト反応により CO₂ と H₂ に改質した後に、CO₂ を分離して回収し、残った高 H₂ 濃度の生成ガスをガスタービン（GT）の燃料と

する方式である。吸収法、吸着法、膜分離法などのCO₂回収法が開発され、IGCCプラントでの抽気ガスによるパイロット試験も進んでいる。

これらのCO₂分離・回収技術を石炭火力に導入すれば、CO₂排出量の大幅削減が可能となるが、CO₂回収にエネルギーを要するため、発電効率が2割低下し、発電コストも1.5倍に上昇するとされている⁽⁴⁾。

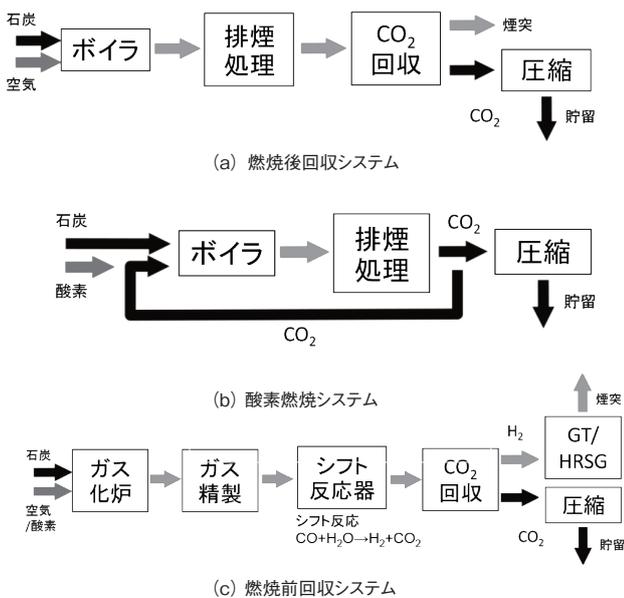


図 3-2-2 従来のCO₂回収型火力発電システム

IGCCからのCO₂回収を考える場合、本来IGCCの最大のメリットは高効率発電(>40%)であるが、燃焼前回収システムを適用すると、シフト反応器やCO₂回収設備が必要とする大量の蒸気を蒸気タービンから抽気するため、発電に用いる蒸気量が減少して発電端出力が低下し、送電端効率が30%程度まで下がるとみられており、微粉炭火力を軸とする燃焼後回収システムと比べ、IGCCを採用するメリットが薄れてしまう。

また、乾式ガス精製システムの採用はIGCCのいっそうの効率向上の鍵とされているが、燃焼前回収システムの多くは湿式方式のCO₂回収設備を用いるため、乾式ガス精製システムを導入しても効率向上の効果は小さいと懸念されている。

これに対し、Oxy-fuel IGCCは、CO₂を主成分とする循環排ガスを効果的に利用するO₂/CO₂吹き石炭ガス化炉と循環排ガスに純酸素を混合して燃焼させるセミクロードGTを組合せたシステム⁽⁵⁾であり、酸素燃焼システムと同じく、空気中のN₂が系内に混入しないた

め排ガスの主成分がCO₂となり、シフト反応器やCO₂回収装置が不要となる上、乾式ガス精製を採用すれば効率向上効果も享受できるため、CO₂回収後も高い発電効率が期待される。これに加え、排ガス循環によるガス化剤中CO₂濃度の増加によりガス化反応が促進される可能性もある⁽⁶⁾(図3-2-2-5)。

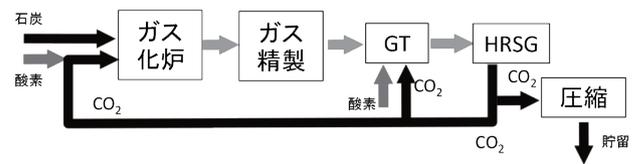


図 3-2-2-5 CO₂回収型高効率IGCC (High Efficiency Oxy-fuel IGCC)

c. Oxy-fuel IGCCの基盤技術開発

① O₂/CO₂ガス化技術の検討

電力中央研究所の石炭ガス化研究炉(加圧二段噴流床炉、石炭処理量3トン/日)にCO₂供給設備を追設し、CO₂富化条件におけるガス化特性を評価した。その結果、5炭種についてCO₂濃度の増加に伴い、ガス化反応が促進されることが検証された。その一方、N₂よりモル比熱の大きいCO₂の炉内投入により炉内温度が低下するなどの課題も明らかとなり、O₂/CO₂吹きガス化炉技術を開発する上で有用な知見が得られた。

前述の石炭ガス化研究炉で実施できる条件はCO₂富化ガス化試験までであり、O₂/CO₂ガス化条件を設定できないため、電力中央研究所が所有する3次元ガス化炉内数値解析コードをベースとしてO₂/CO₂ガス化条件に適用可能なコードに改良し、実機規模O₂/CO₂ガス化炉(石炭処理量70トン/時)を対象として炉内温度分布やガス化反応の状況、運転条件がそれらに及ぼす影響などを明らかとした。これにより、循環CO₂ガス量を適切に設定すれば、ガス化炉内の温度低下を回避できることが確認された。これに加え、電力中央研究所では実験実績のない高いO₂濃度条件(ガス化剤O₂濃度80%)における各種運転条件の影響などを予測することが出来た。

数値解析コードの改良にあたっては、まず、加圧型Drop Tube Furnaceなどを用いた基礎実験を行いO₂/CO₂ガス化場における反応モデルを構築し、これを組み込むことで数値解析コードの適用範囲をO₂/CO₂ガス化条件まで拡張した上で石炭ガス化研究炉を解析し、その

結果を実験データで検証した。

② 炭素析出対策の開発

Oxy-fuel IGCC では CO₂ をガス化炉に循環させるため、生成ガス中の CO 濃度が高くなり、乾式ガス精製設備などの系内低温部で炭素微粒子が析出するのではないかと懸念された。乾式ガス精製設備で炭素が析出すると、脱硫特性が損なわれるため、炭素析出の抑制策を検討した。種々の基礎試験の結果、CO₂ や水蒸気を乾式脱硫プロセスの上流に添加すれば炭素析出が抑制できることが明らかとなった。さらに、水蒸気はガス精製設備の脱硫特性を低下させること、回収 CO₂ は温度が低いため添加前に加熱が必要となることなどを考慮し、高温、高圧の循環排ガス (CO₂ と水蒸気の混合ガス) を添加する方法を選択した。システム効率計算により、循環排ガス添加法を採用すれば送電端効率もほとんど低下しないことが確認されている。

③ 全体システムの検討

従来の IGCC もガス化炉、ガス精製、GT などが連携した複雑なシステムではあるが、本システムはこれに再生熱交換器やセミクローズド GT などを加えたより複雑なシステムとなるため、再生熱交換器などの試設計や、起動・停止シーケンスの検討などを通じ、当初提案したシステムが内在していた課題を抽出し、その対策を施すことにより、実現性の高いシステムを構築した。また、空気分離装置についても、本システムにカスタマイズした試設計を行った。

実現性の高いシステムを指向することで送電端効率が若干低下することとなったが、それでも最終的なシステム効率計算において、インドネシア炭、中国炭、豪州炭の3炭種を供試した条件で、いずれも 43%_{HHV} 以上の送電端効率を期待できることが示された。

④ 実用化に向けた検討

これに加えて、本システムの実用化に向けた開発ステップを検討し、2035 年頃の商用化に向けたロードマップを作成し、各フェイズの開発課題を整理し、次フェイズの開発課題を明確化した。また、2035 年頃の競合技術を想定し、発電コストの比較により、本システムの優位性を示した。

これらの予備検討結果をベースに、本システムの実用化に向け、検討を進めることが望まれる。

3-2-3 低炭素燃料の利用

(1) バイオマス燃料

a. バイオマス燃料の種類

バイオマス燃料とは、動植物に由来する有機資源を加工して作り出される燃料の総称である。化石燃料と同様に、バイオマス燃料を燃焼させてエネルギーを取り出す際に CO₂ は排出される。しかし、カーボンニュートラルの考え方に基づいて、排出された CO₂ は同じ植物の生長や再生により回収されて、トータルの CO₂ は増加しないとされる。バイオマス燃料の種類は、見た目の形状から大きく3種類に分けることができる⁽¹⁾。

一つ目は、固体のバイオマス燃料である。木くずや廃材等の木質バイオマス、稲わらや籾殻等の農作物の残渣由来のバイオマス、さらにバイオマス燃料の原料を目的として栽培されるエネルギー（資源）作物由来のバイオマスが主な原料となる。さらに固体バイオマス燃料は、原料をそのまま、あるいは粉砕する等の加工により利用するタイプ及び、かさ比重を小さくして取り扱いを容易にするために、ペレットやブリケットのように固く加工するタイプに分けられる。これらは既に石炭火力での混焼で活用されている。

二つ目は、液体のバイオマス燃料であり、家庭や飲食店から廃棄される天ぷら油等の廃油及び油糧植物から直接搾った油、トウモロコシやサトウキビの搾りかす等を発酵させて作り出される。前者の油からはバイオディーゼル燃料 (BDF) が作られ、軽油の代替として活用されている。後者のトウモロコシ等からはバイオエタノールが作られ、ガソリンの代替として活用されている。これら液体燃料は、技術的に油火力や LNG 火力の混焼用として活用することは可能である。

三つ目は、気体のバイオマス燃料である。有機物が多く含まれる下水汚泥や家畜糞尿を発酵させてメタンガスを回収する方法が実用化されている。施設の大規模化が難しいこと、ガス輸送にコストがかかること等から、現在は製造場所での利用が中心となっている。

b. 原料の種類と賦存量

バイオマス燃料の原料となるバイオマスの種類は大きく3種類に分けることができる。廃棄物系バイオマス、未利用系バイオマス、そしてエネルギー（資源）

作物である。

廃棄物系バイオマスは、ゴミとして処理されていた有機物をバイオマスとして有効利用する方法である。製材廃材や公園剪定枝等の木質系バイオマス、乳用牛や豚等の家畜糞尿、下水処理場で発生する汚泥、食品工場からの廃棄物や家庭ゴミ等の食品系バイオマスが含まれる。

未利用系バイオマスは、森林の間伐による残材や果樹剪定枝等の木質系バイオマス、稲わら・もみ殻等の農業残渣、ササ、ススキ等の草本系バイオマスが含まれる。

我が国における廃棄物系と未利用系のバイオマスの賦存量推計結果（年）によると、両者の合計は熱量換算で672ペタジュール（PJ）となる⁽²⁾。2013年度の我が国の最終エネルギー消費量は13,980ペタジュール（PJ）である⁽³⁾。バイオマス燃料の賦存量が全て利用できると仮定すると、最終エネルギー消費の4.8%を代替できる量に相当する。

図3-2-3-1に我が国の廃棄物系と未利用系のバイオマスの種類別の割合を示した。廃棄物系（赤枠）と未利用系（青枠）はほぼ半分ずつとなり、未利用系バイオマスの切捨間伐材と稲わらが多いことがわかる。この切捨間伐材と林地残材は、森林の間伐実施により発生するバイオマスである。しかし、現状では間伐をすべき森林の多くが放置されており、間伐が適正に実施されれば、この推計値より多くなると予想される。廃棄物系バイオマスでは国産材の製材廃材が最も多く、食品系バイオマスでは家庭系厨芥類（生ゴミ）が多い。

エネルギー作物に関しては、我が国では実用的な栽培は実施されていない。日射量の多い東南アジアを中心に、

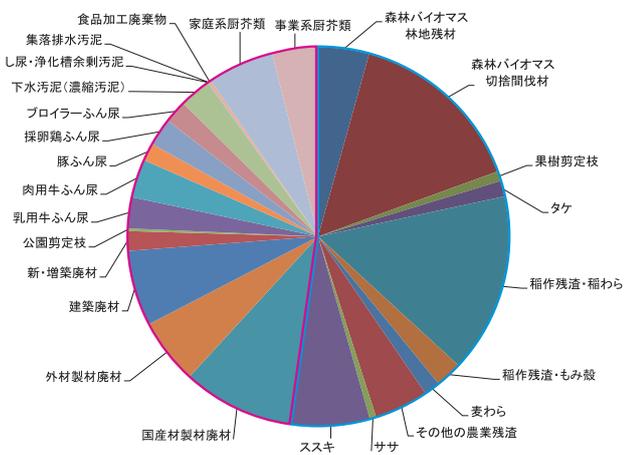


図 3-2-3-1 バイオマス種類別の賦存量の割合⁽²⁾

未利用あるいは荒地の土地にエネルギー生産を目的とした作物を植えて、エネルギーとして利用する方法も考えられている。種類としては、基本的に成長量が高い草本（ネピアグラス、スイッチグラス等）や樹木（ユーカリ、ポプラ等）が候補となる。また、培養槽等の施設が必要となるが微細藻類も含まれる。

c. 我が国でのバイオマス燃料製造の現状

固体バイオマス燃料と気体バイオマス燃料の実用化は図られているが、液体バイオマス燃料については、国や自治体等が実施する実証段階もしくは小規模な取り組みが多い。

固体バイオマス燃料でもっとも生産量が多いのが、木質系バイオマスのチップとペレットである。2012年の国産チップの生産量は586万トンである。用途は、紙・パルプ製造用が80%を占め、発電用が5%、乾燥施設熱源用が2%で、バイオマス燃料としての利用は10%程度である⁽⁴⁾。未利用間伐材等の一層の活用が、バイオマス燃料としての原料を増やすための課題といえる。一方、ペレットの国内生産量は2013年には約11万トンとなり、増加傾向が続いている⁽⁵⁾。ペレットのほとんどは、ボイラーや家庭用ストーブでのエネルギー利用である。

気体バイオマスについては、下水汚泥及び家畜糞尿のメタン発酵が多くを占める。下水汚泥のメタン発酵によるバイオガス化によるエネルギー利用は、2012年度における下水汚泥中の全有機物量の約12%となっている。バイオマスとして未利用（埋立、建設資材化の過程で焼却等）が76.1%を占めていることから、それらのバイオガス化や固形燃料化が課題となる⁽⁶⁾。一方、家畜糞尿に有機廃棄物を混合し、発酵させてバイオガスのメタンガスを製造する方法については実用化されており、北海道を中心に事例も多い。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が公表している資料によると、全国に68事例が存在し、製造したメタンガスを燃焼させた熱利用や、コージェネレーション（熱電併給）により発電利用されている⁽⁷⁾。

(2) バイオマス燃焼

国内の石炭火力発電所における木質バイオマスの混焼は、電気事業者に対して、一定量以上の新エネルギー等を利用して得られる電気の利用を義務付けた「電気事

業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS法）」（2002年6月公布）の施行がきっかけとなり開始された。風力発電や太陽光発電に比べ、石炭火力でのバイオマス混焼は、既存設備を利用するため、新たな設備投資を最小限に抑えて実行できる利点があり、対応し易い有効な方法として認識され、実証試験に留まるものを含め、全電力会社で取り組まれている。2012年7月に「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が施行されたことに伴い、RPS法は廃止されたが、CO₂低減の観点から、バイオマス混焼は現在も継続されている場合が多い。

現在、木質バイオマスの石炭への混合割合は、投入熱量比で1～3%程度と低く運用されている。この主たる理由は、ミルでの粉碎性によるものであり、木質バイオマスの混合量が多いとミル内の保有量が高まり、ミル差圧が上昇するなどの影響があるためである。一方、この程度の混焼率であれば、NO_x濃度や灰中未燃分濃度などの燃焼特性に及ぼす影響は少ない。

今後、石炭火力からのCO₂排出量の一層の低減が求められる可能性は高く、その場合には混焼率を増大させることが必要になる。粉碎性を改善する有効な方法としては、①木質バイオマス専用ミルで粉碎し、石炭とは別に供給する方法、②木質バイオマスを粉碎しやすい状態に改質する方法、が挙げられる。

木質バイオマスを専用ミルで粉碎して供給することを考えた場合、微粉炭バーナ単体での燃焼性の可否が重要となる。当研究所の横置円筒型試験炉（単一バーナ炉）を用いた実験においては、微粉炭バーナでの木質バイオマスの専焼が可能である。空気比1.24、二段燃焼率30%の燃焼条件にて取得した杉専焼時の火炉内でのガス濃度分布について、NL炭との比較を図3-2-3-2に示す⁽⁸⁾。杉はNL炭に比べて、バーナ近傍でのNO_xの発生量が少なく、また、高濃度のCOが発生した後に速やかに消失するなど、石炭との燃焼過程とは大きく異なっている。

火炉出口NO_x濃度、灰中未燃分濃度および可燃分の燃焼効率の比較を図3-2-3-3に示す。

NL炭が約180ppmであるのに対し、杉は77ppmと極めて低い濃度となった。灰中未燃分濃度は、NL炭が12.6%であるのに対し、杉は16.8%と高い値を示すが、灰中未燃分濃度は、燃料中の灰分含有率に影響されるため、その影響を排除し、可燃分の燃焼効率で比較すると、

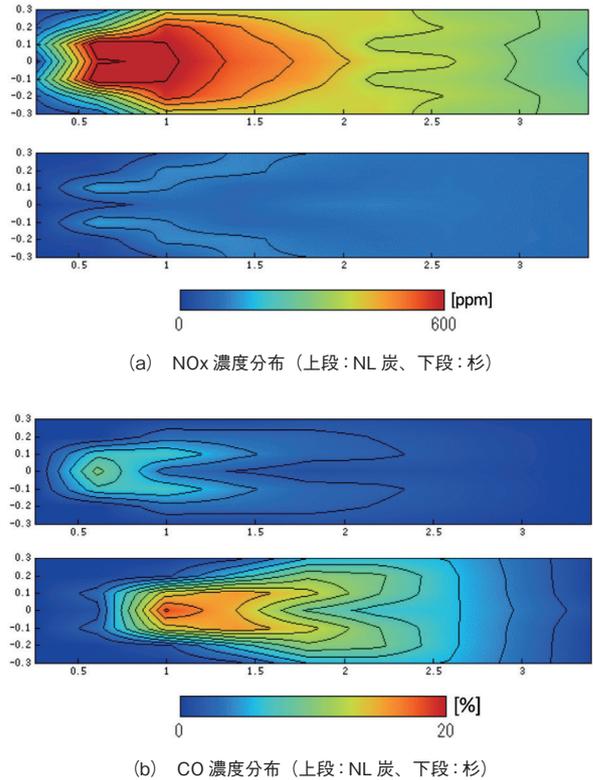


図 3-2-3-2 火炉内でのガス濃度分布の比較

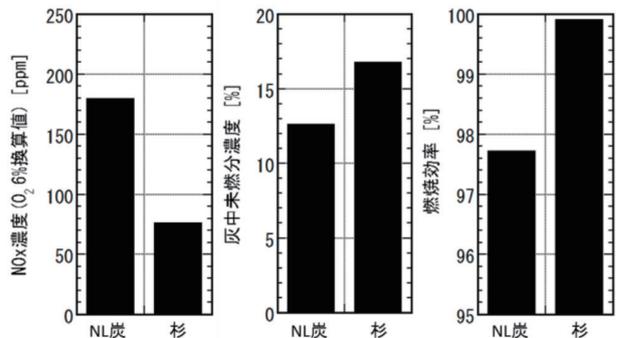


図 3-2-3-3 火炉出口 NO_x 濃度、灰中未燃分、燃焼効率

NL炭の97.7%に対し、杉は99.9%と著しく高い値を示した。これらのことから、木質バイオマスの燃焼性は石炭よりも優れることから、木質バイオマス混合時の可燃分の見掛けの燃焼性は石炭単味よりも高い反面、木質バイオマスの灰分含有率が少ないことにより、結果として、木質バイオマス燃焼時の灰中未燃分濃度は、石炭単味燃焼時よりも高くなる。ちなみに、木質バイオマスの優れた燃焼性は、微粉炭バーナでのコールド着火も可能とする。コールドスタート実験を行った結果、点火源のみあれば、火炉の予熱や助燃がない状態でも着火可能であることが判っている。

次に、微粉炭バーナを堅型に三段配置した試験炉を用い、木質バイオマスを炉内混焼した場合の結果を紹介する。ここで、炉内混焼とは、上段バーナからパウダー状に粉碎した杉を、中段バーナおよび下段バーナからは微粉炭を各々単独供給する方式を意味する。また、石炭単味燃焼時および事前に石炭にパウダー状の杉を熱量基準で33.3%の割合で混合した後にミルで粉碎して供給するラインブレンド方式を比較対象とした⁽⁹⁾。図3-2-3-4に示すNO_x濃度については、石炭単味燃焼時が約165ppmであるのに対し、ラインブレンド時と炉内混焼時のいずれも約130ppmと低濃度となった。一方、灰中未燃分濃度は石炭単味燃焼時に約5%であるのに対し、ラインブレンド時と炉内混焼時の灰中未燃分濃度はいずれも約7.5%前後となった。

項目	NL炭	杉パウダー
燃料比[-]	1.92	0.14
N含有率(無水)[%]	1.52	0.11
灰含有率(無水)[%]	13.7	0.4
200mesh/パス率[%]	81	13

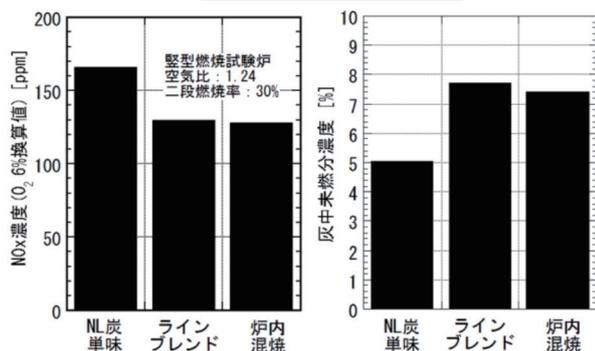


図3-2-3-4 火炉出口NO_x濃度、灰中未燃分

石炭同士の炉内混焼においては、揮発分の多い石炭を上段バーナから投入した場合、ラインブレンドする場合よりもNO_x濃度は低減するが、木質バイオマスである杉による炉内混焼においては、その効果は示されなかった。杉は石炭に比べて、NO_x発生の起因となる燃料中窒素分が少ないためにNO_x濃度は低濃度になると考えられるが、NO_xの還元分解に作用するNH₃やHCNの発生も少ないために、炉内脱硝の効果が得られなかったと考えている。

(3) バイオマス炭化燃料

木質バイオマスの炭化処理は、前述の木質バイオマスを粉碎しやすい状態に改質する方法のひとつであり、粉碎性の向上に加え、発熱量の向上、燃料性状の均一化、

撥水性の発現、といった改質効果が期待される。当研究所では、図3-2-3-5に示す炭化燃料化実験設備（外熱式ロータリーキルン炭化炉、最大原料供給量200kg/h、炭化温度250～600℃、滞留時間15～40分）を導入し、国内針葉樹、海外広葉樹を原料とする木質炭化燃料の製造試験を実施することにより、炭化燃料製造プロセスの熱物質収支や炭化性能を明らかにするとともに、石炭との混合粉碎試験や混焼特性試験に必要な木質炭化燃料を供給してきた。炭化試験の例として、メラルーカ（東南アジア産広葉樹）と杉（国内産針葉樹）の破碎チップを原料とした炭化試験結果を紹介する⁽¹⁰⁾。原料の写真を図3-2-3-6に、原料の燃料性状を次ページの表3-2-3-1に示す。また、試験条件と試験結果を表3-2-3-2に取りまとめる。原料のメラルーカと杉を比べると、工業元素分析や発熱量の差異は小さいが、メラルーカのNaとClが杉のそれよりも高いことがわかる。

炭化燃料製造プロセスの性能指標として炭化燃料熱量残留率と炭化温度の関係は次ページの図3-2-3-7に示す。熱量残留率は、出熱（製造炭化燃料の熱量）と入熱（投入原料の熱量）の比から求められる性能指標である。炭化温度の上昇とともに熱量残留率は減少し、炭化燃料の熱量は低下することになる。一方、この熱量低下分は、



図3-2-3-5 炭化燃料化実験設備



図3-2-3-6 原料写真（メラルーカ（左）と杉（右））

プロセスの炭化熱源となることから、プロセスの熱的自立の条件は、熱量低下分>外部入熱（LPG入熱）となる（図3-2-3-8）。

商用規模のプロセスでは、排熱による原料乾燥やスケールアップ効果により、外部入熱の低減が期待されるが、熱的自立を可能とする炭化温度域は400℃以上（炭化度で中炭化以上）となることが推定される。

表 3-2-3-1 原料の燃料性状

分析項目		単位	メラルーカ	杉
工業分析	灰分	wt%	1.0	0.4
	揮発分	wt%	84.4	82.2
	固定炭素	wt%	14.6	17.4
元素分析	C	wt%	49.4	50.8
	H	wt%	6.40	6.31
	N	wt%	0.15	0.09
	O	wt%	43.1	42.4
	S	wt%	0.02	<0.01
高位発熱量		MJ/kg	19.84	20.76
	Na	mg/kg	727	20
	K	mg/kg	660	260
	Cl	mg/kg	1620	40

※単位は全て無水基準

表 3-2-3-2 炭化燃料化試験条件と試験結果

項目	単位	試験番号(1~7) / 炭化度(高・中・低)						
		1 低	2 中	3 中	4 高	5 低	6 中	7 高
原料	—	メラルーカ				杉		
原料水分	wt%	38	42	46	46	39	37	37
原料供給量	kg/h	120	126	126	126	138	138	138
LPG消費量	m ³ /h	4.6	5.2	5.2	5.5	5.1	5.2	5.4
炭化温度	℃	371	408	416	432	396	421	437
炭化物収率	%	90.5	75.4	74.8	49.3	90.5	71.0	60.1

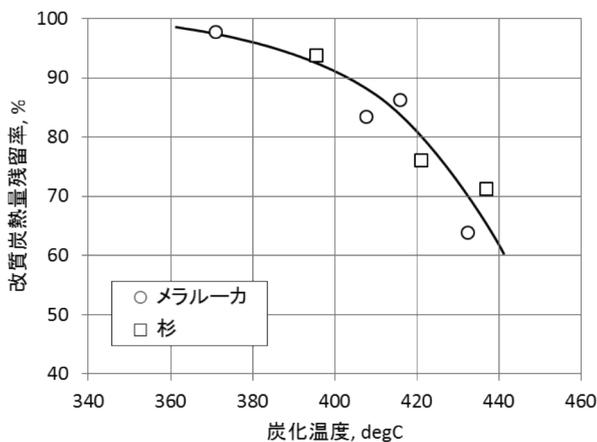


図 3-2-3-7 熱量残留率と炭化温度の関係

原料中塩素分の高いメラルーカについて、炭化燃料の塩素残留率と固定炭素（炭化度）の関係を図3-2-3-9に示す。炭化の進行とともに炭化燃料の塩素残留率が低下しており、炭化燃料化による脱塩効果が確認された。但し、この効果は、塩素の形態に依存すると推定されることから、必ずしも脱塩効果が発現するとは限らない。

炭化燃料製造プロセスの運転において、安定した燃料性状の炭化燃料を得るには、その変動を短時間に把握し、運転条件に反映する必要がある。しかし、通常の燃料性状分析には長い時間を要する。そこで、炭化燃料の収率（炭化燃料製造量と原料供給量の比）と燃料性状の関係に注目したところ、両者に強い相関を確認した。図3-2-3-10に炭化燃料の固定炭素と収率の関係を示す。炭化燃料の収率は、運転時の連続測定データから容易に計算できることから、これを運転指標とすることで、安定した燃料性状の炭化燃料製造が可能となる⁽¹¹⁾。

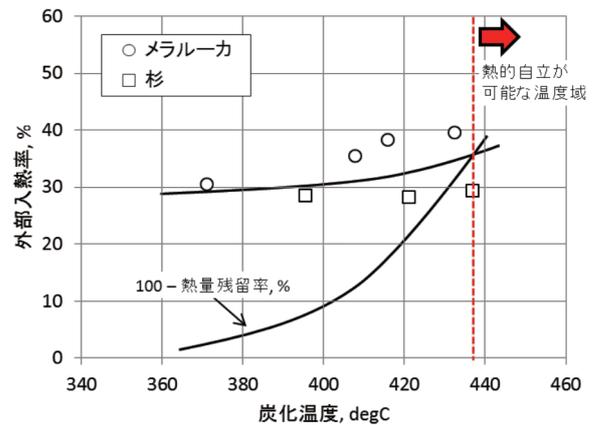


図 3-2-3-8 熱的自立が可能な炭化温度域

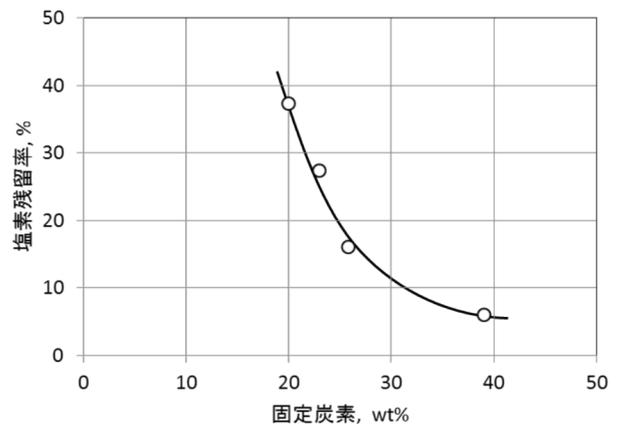


図 3-2-3-9 塩素残留率と固定炭素の関係

次に、木質炭化物とそのペレット成形物（木質炭化ペレット）の粉碎性について紹介する。木質炭化物の成形は、エネルギー密度の向上、輸送コストの削減、ハンドリングの改善などが期待され、炭化処理の重要な後処理技術に位置づけられる。

松の破碎チップを原料とし、炭化度（固定炭素）の異なる3種の木質炭化物を製造し、その一部を木質炭化ペレットに成形した。原料およびこれらの炭化物を石炭（CL炭）と混合した場合の粉碎性について、当研究所の試験用ローラミル（図3-2-3-11）を用いて評価した結果として、混合率と粉碎操作に係る動力原単位の関係を図3-2-3-12に示す⁽¹²⁾。原料の場合、混合率の増加に伴う

動力原単位の増加は顕著であるが、低炭化物を混合した場合、その増加傾向は抑制され、炭化度が高くなるほど、動力原単位の増加抑制効果は強くなる。これらの結果から、炭化度の低い炭化処理でも、木質バイオマス混合時の粉碎性は大きく改善され、炭化度を高めることにより、粉碎動力を大幅に削減することができる。さらに、木質炭化ペレットでは、粉碎物の微粉粒度の改善に効果を発揮する。

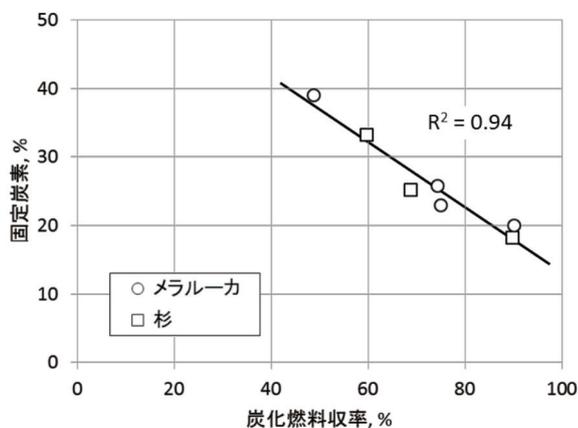


図 3-2-3-10 固定炭素と収率の関係

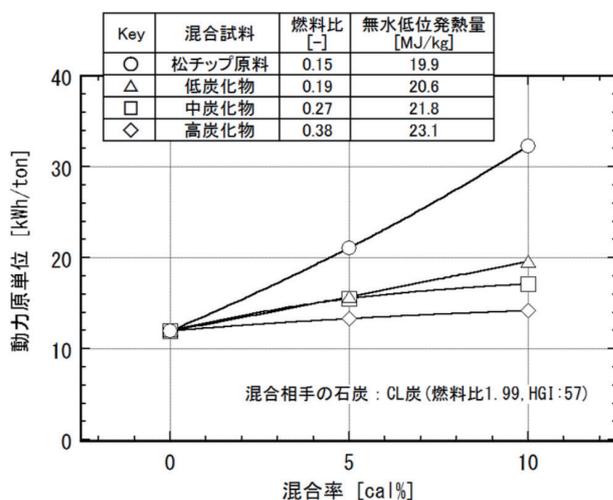


図 3-2-3-12 ローラミル粉碎試験結果

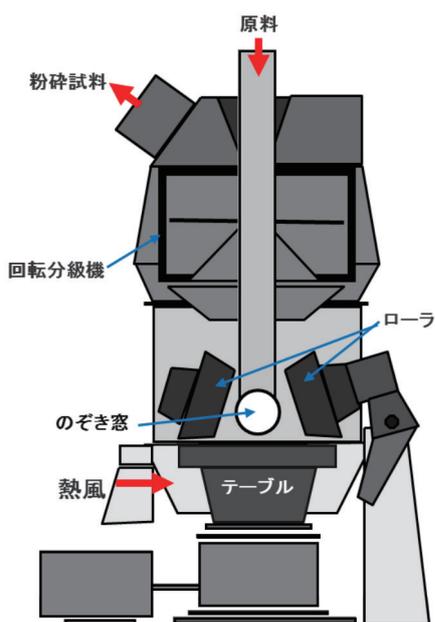


図 3-2-3-11 試験用ローラミル

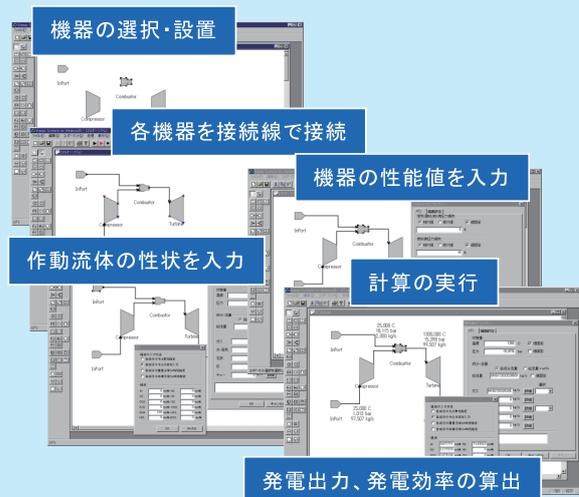
火力発電システムに対する熱効率解析は、質量およびエネルギー保存則による熱物質収支解析を基本とする。熱物質収支解析を行うためには熱力学の専門知識が必要であり、また、複雑な火力発電システムについて、個々に計算コードを開発していたのでは、労力が多く効率的な検討が困難である。

そこで当所では、様々なシステム構成や条件設定における静特性解析つまり定常状態での熱物質収支解析を柔軟に行うことが可能なアルゴリズムを開発し、また、それを用いた汎用性の高い解析ツール「EnergyWin™」を開発している⁽¹⁾。その実行画面、実行手順および主な特徴を図1に示す。このツールは、グラフィックユーザインターフェースを用いてシステムシステムの作成や条件の設定を容易に行えるため操作性が高く、視覚的に理解しやすいものである。また、計算方法について、機器入口の状態量および機器性能値の設定条件から出口状態量を順次算出することで全体のバランスを計算する方法や、機器入口および出口状態量の設定条件から全体の熱物質バランスを計算すると共に各機器の性能値の算出する方法など、条件設定項目や算出項目の選択に柔軟性が高い。

このツールを活用して、本節で示したCO₂回収型高効率IGCC、AHAT等と言った将来型高効率火力発電システムについて、各種システム構成や条件での熱効率の算出、競合システムとの同一条件下での熱効率の比較や特性解析等を行ってきた。

既設火力発電プラントに対しても多くの実績を上げている。ひとつは、運転条件の変更や機器性能を向上させた場合の熱効率への効果を算出し、熱効率向上検討に活用してきた。また、もうひとつは、図2に示すように、運転データを用いた熱物質収支解析によりプラント構成各機器の経年的な性能変化等を算出し、これら個々の変化が熱効率変化に与える影響を定量化することで熱効率低下の主要因を特定することで、効果的な保守・運用の検討を支援してきた⁽²⁾。

今後も、本技術により火力発電の熱効率の維持・向上に貢献していきたい。



主な特徴

- 容易な操作性
Windows アプリケーション
- 高い計算能力
柔軟な計算条件設定
高速な計算
- 高い拡張性
オブジェクト指向プログラムによる
当所オリジナル開発

図1 EnergyWin 実行画面、計算実行手順および主な特徴

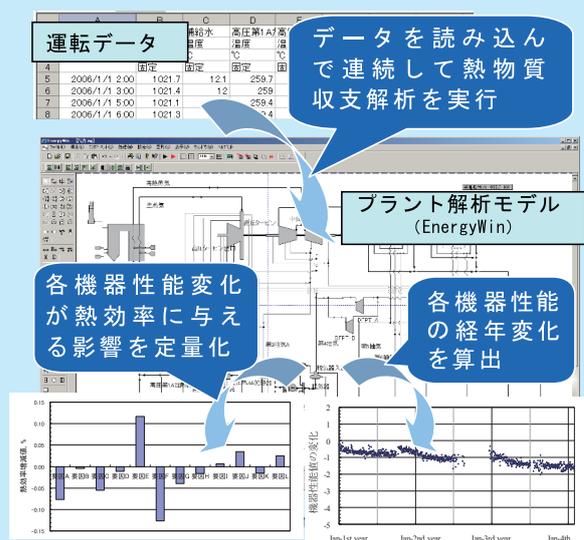


図2 EnergyWinによる熱効率低下要因説明

3-3 発電所における CO₂ 回収・貯留技術 (CCS)

産業革命以降の化石燃料の大量消費による大気中 CO₂ 濃度の上昇が地球温暖化の主な原因とされている。1994年に発効した国連気候変動枠組条約は、“気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととしない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化する”ことを究極の目的としている。安定化については、国際的な大方の認識として、産業革命以前からの全球平均気温上昇を 2℃ 以内に抑える程度とされている。IEA（国際エネルギー機関）は、引き続き化石燃料の需要増加を予想するとともに、この目標を達成するためには 2050 年時点における CO₂ の排出量を現状からおよそ 50% 削減する必要があるとあり、全削減量の 14% に CCS（Carbon Capture and Storage、以下、CCS）の貢献が必要としている⁽¹⁾。CCS は温室効果ガスである CO₂ の排出を大幅に削減するとともに、中・長期的に化石燃料を利用可能とする技術オプションとして位置付けられている。

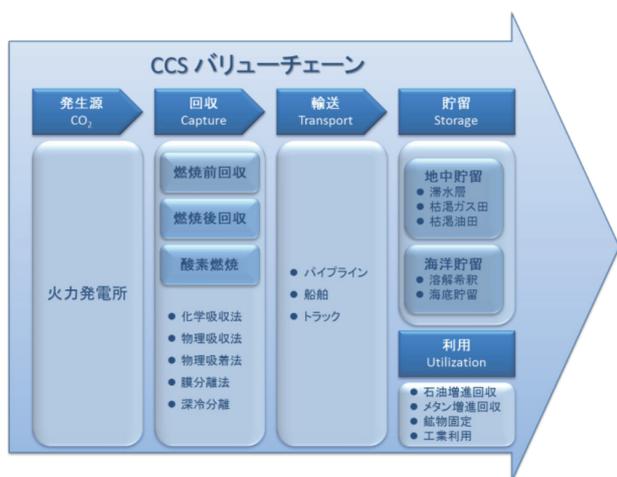


図 3-3-1 発電所における CCS のバリューチェーン

CCS は、石炭や天然ガス等の化石燃料燃焼を利用した発電や鉄鋼生産、アンモニア製造等の化学工業、天然ガス精製、等で発生する CO₂ を回収し、パイプライン等を用いて輸送し、貯留場所に恒久的に隔離する一連のシステムである。図 3-3-1 に発電部門を対象とする CCS における CO₂ のバリューチェーンを示す。燃焼排ガス等から CO₂ を分離する方法については化学工業プロセスで既に商用利用されている化学吸収法、物理吸着法、あるいは開発段階にある膜分離法等がある。また、回収

プロセスとしては大きく、燃焼前回収 (Pre-combustion)、燃焼後回収 (Post-combustion)、酸素燃焼 (Oxy-fuel combustion) に分類される。

回収された CO₂ は、一般的には液化されてパイプラインあるいは船舶等によって貯留サイトまで輸送され地中に圧入されることになる。貯留のオプションとしては、帯水層や枯渇油ガス田への圧入、EOR (Enhanced Oil Recovery: 石油生産増進のための石油層への CO₂ 圧入、以下、EOR)、等がある。貯留とは別に、回収 CO₂ の工業部門等への有効利用もあるが、EOR も CO₂ 有効利用の側面を持つ。温暖化対策として CCS を導入するモチベーションやインセンティブが不十分な現状において、短期的な CCS 普及のドライバーとして EOR の重要性が高まってきている。最近では CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) を CCS とほぼ同義として使用している例も多く見られる。

3-3-1 CCS の国内外動向

(1) 発電部門における技術開発

石炭火力発電所においては年間 80 万トン、天然ガス火力発電所や産業部門（ガス精製や化学工業等）では年間 40 万トン程度の CO₂ の回収、輸送、貯留を伴う CCS を定義とする大規模統合プロジェクトは、世界全体で 59 件（2014 年時点、計画段階も含む）が存在している。地域別には、北米 26 件（米国 19 件、カナダ 7 件）、中国 13 件、欧州 10 件、およびその他 10 件となっている⁽²⁾。プロジェクト数の推移は、相対的に経済状況の悪い欧州以外では増加傾向にある。

59 件の中で、投資が決定されている段階（建設段階、運用段階）のプロジェクト 22 件を次ページの表 3-3-1 に示す。運用段階のほとんどは天然ガス精製に関連したものであり、さらに貯留方式として回収した CO₂ を EOR に利用しているものが多い。これは、現状で CCS がビジネスモデルとして成立するオプションの少なさを表している。発電部門におけるプロジェクトは、運用段階が 1 件 (Boundary Dam) と、建設段階が 2 件 (Kemper、Petra Nova) のみとなっている。

2014 年 10 月にカナダのサスカチュワン州にある Sask Power 社の Boundary Dam 石炭火力発電所において、世界で初めて CCS の商用運転が開始された。この発電

表 3-3-1 世界の CCS 大規模統合プロジェクト

実施段階	地 域	プロジェクト名	回収方式	貯留方式	運用開始
運用段階	米 国	Val Verde Natural Gas Plants	天然ガス精製	EOR	1972
		Enid Fertilizer	工業的分離(化学肥料)	EOR	1982
		Shute Creek	天然ガス精製	EOR	1986
		Century Plant	天然ガス精製	EOR	2010
		Air Products Steam Methane Reformer	ガス化(水素製造)	EOR	2013
		Coffeyville Gasification Plant	工業的分離(化学肥料)	EOR	2013
		Lost Cabin Gas Plant	天然ガス精製	EOR	2013
	カナダ	Great Plains Synfuel Plant and Weyburn Midale	ガス化(合成ガス)	EOR	2000
		Boundary Dam	燃焼後(発電)	EOR	2014
	ブラジル	Petrobras Lula Oil Field	天然ガス精製	EOR	2013
	ノルウェー	Sleipner	天然ガス精製	滞水層	1996
		Snohvit	天然ガス精製	滞水層	2008
アルジェリア	In Salah	天然ガス精製	滞水層	2004	
建設段階	米 国	Illinois Industrial Carbon Capture and Sequestration	工業的分離(エタノール)	滞水層	2015
		Kemper County IGCC	燃焼前(発電)	EOR	2016
		Petra Nova (NRG Energy Parish)	燃焼後(発電)	EOR	2016
	カナダ	Quest	ガス化(水素製造)	滞水層	2015
		Alberta Carbon Trunk Line with Agrium CO ₂ Stream	工業的分離(化学肥料)	EOR	2015
		Alberta Carbon Trunk Line with North West Sturgeon Refinery	石油精製	EOR	2017
	豪州	Gorgon	天然ガス精製	滞水層	2016
	サウジアラビア	Uthmaniyah CO ₂ -EOR	天然ガス精製	EOR	2015
アラブ首長国	Abu Dhabi	鉄鋼	EOR	2017	

所は、褐炭を燃料とする発電所で6ユニットのうちの第3ユニットにCO₂の回収設備が追設されている。回収方式は排ガスからCO₂を回収する燃焼後回収であり、アミン吸収液を用いた化学吸収法が採用されている。燃焼後の排ガス（排ガス中CO₂濃度12%）は、アミン吸収液でSO₂を回収した後、CO₂が回収される。アミン吸収液と排ガスを混合させる吸収塔の高さは約55mである。第3ユニットの発電端出力は139MWで送電端出力は110MWである。出力の低下は、SO₂およびCO₂の回収、CO₂圧縮、および補器類でのエネルギー消費による。回収されるCO₂の量は年間約100万トンが予定されているが、大部分は近隣のWeyburnにある油田地区におよそ60kmのパイプラインで輸送されEORに利用される⁽³⁾。

- Boundary Damプロジェクトが世界に先駆けて商用運用が可能となった要因としては、以下が考えられる。
- ・老朽化によるプラントの更新・廃止の判断時期
 - ・サスカチュワン州における電力需要（廃止判断は困難）
 - ・カナダにおける火力発電所へのCO₂排出規制の実施（420gCO₂/kWh；2015年7月発効）
 - ・天然ガス関連インフラの未整備（天然ガス火力へのシ

- フトを選択した場合）
- ・褐炭の安定供給（山元発電）
 - ・政府の財政支援(事業費13億ドル、うち連邦政府支援2.4億ドル)
 - ・回収CO₂の利用（EOR）、回収SO₂の利用（硫酸）、石炭灰利用、等の副次収入の確保。

建設段階のプロジェクトについては、米国のKemper Countyプロジェクト（燃焼前回収；IGCC）とPetra Novaプロジェクト（燃焼後回収）が2016年の運用を目指している。

日本での回収から貯留までの一貫したプロジェクトとしては、電力各社も出資している日本CCS調査(株)が経済産業省から受託している「二酸化炭素削減技術実証試験事業」がある。この実証試験は、製油所の水素製造装置からCO₂を分離・回収し、年間15～25万トン程度を苫小牧沖の貯留層に圧入するとともに、貯留層や海洋系のモニタリングも実施する予定となっている⁽⁴⁾。

日本において発電部門をCO₂の発生源としたCCSの一貫したプロジェクトは現状では存在しない。一方で、ベンチスケール、パイロットスケールおよび実証スケールでの回収技術の開発に特化したプロジェクトは複数存

在している。例えば、中国電力と電源開発が共同で実施して大崎ケールジェンプロジェクトは、出力規模 17 万 kW 級の実証プラントを用いたプロジェクトである（経済産業省の補助事業；2012 年開始）。第一段階では酸素吹き IGCC、第二段階では CO₂ 分離回収型 IGCC、第三段階では CO₂ 分離回収型 IGFC、の実証を目的としている。平成 28 年度から第一段階の実証運転が開始される予定である⁽⁵⁾。

(2) CCS の関連法規制・政策

CCS の普及促進を目指した各国の法規制あるいは政策は大きく 4 つに分類できる。

- ① 化石燃料燃焼発電プラントを新設することにより CO₂ の大規模発生源が固定されることを回避するための「CCS Ready」
- ② CO₂ の排出を直接的に抑制する排出基準の設定
- ③ CCS への投資誘導
- ④ CCS 実施のための法規制整備

である。

CCS Ready は、将来の技術的、経済的な見通しが得られた時点で CCS 機能が追設可能なプラントのみを建設許可の対象とする政策である。EU（欧州連合）における CCS の法的枠組みを規定した EU-CCS 指令（2009 年 4 月公布）は、CCS Ready に関する条項を含んでいる（第 33 条）。具体的には、30 万 kW 以上の燃焼プラントの建設許可あるいは運用許可の発行に際して事業者に対し以下の評価を要求するものとなっている。

- ・回収 CO₂ の貯留サイトの利用可能性
- ・輸送施設の技術的・経済的な利用可能性
- ・CO₂ 回収装置の燃焼プラントへの追設の技術的かつ経済的な実行可能性。

英国政府は、EU-CCS 指令への対応として、電気法 36 条のプラント設置手続きに以下に示す CCS Ready の要求を追加している。

- ・将来的な CCS 機能追設のために必要なスペースが確保できることの提示
- ・CCS 追設の技術的・経済的な実行可能性の評価
- ・回収 CO₂ の海底下貯留候補地の提示
- ・貯留候補地への回収 CO₂ 輸送に関する技術的な実行可能性の評価
- ・CCS Ready 状態維持に関する報告書の主管当局への

提出、等々

英国では、2009 年の法制化以降に複数件の天然ガス複合発電（NGCC）プラントが上記条件を満足し認可を受けている。CCS Ready 政策は将来的な CCS 実施を想定したものであることから、導入においては、事業者側の投資判断のためにも国の明確な温暖化政策あるいは CCS 政策の構築が必要である。将来的な温暖化政策や CCS の実行可能性が不透明である限り、CCS Ready における要求事項は最小限度に抑えることが合理的である⁽⁶⁾。

カナダでは 2012 年 8 月に、新設および耐用年数に達する石炭火力発電ユニットへの CO₂ 排出基準値の適用が規制化された⁽⁷⁾。排出基準値は 420gCO₂/kWh であり、NGCC の排出性能と同程度であり、石炭火力あるいは老朽火力を、ガス火力、再生可能エネルギー、あるいは、CCS へ移行させる狙いがある。本規制は、2015 年 7 月 1 日からの施行であるが、2015 年までに CCS を導入する予定の新設火力発電ユニットについては、2025 年まで排出基準適用の対象外となる。適用除外申請に際しては、将来的な CCS 実施の見通しを示した経済的な実行可能性の評価として、以下の要求事項が設定してある。

- ・建設コスト、建設資金の調達方法、等の提示
- ・排出基準を満足し得る回収規模、地質学的に適当な貯留サイトへの輸送、および貯留、等の提示

上記は、新設の火力発電ユニットに対して、排出基準の適用除外を選択した場合に CCS Ready が要求されると解釈できる。

米国でも、2015 年 8 月に環境保護局（EPA）がオバマ大統領の気候変動に関するアクションプランに対応して、新設^(註1)、改修（modified）^(註2) および更新（reconstructed）^(註3) の発電施設に対する CO₂ 排出基準を最終決定している⁽⁸⁾。排出基準の対象は、①設置型燃焼タービン（天然ガス燃焼）と②発電用蒸気発生ユニット（石炭燃焼）の 2 種類である。EPA は排出基準を実証済みの技術である最適排出低減技術（BSER; Best System of Emission Reduction、以下、BSER）で達成可能な程度の値として設定している。具体的な排出基準は以下の通りである。

- ① 設置型燃焼タービン（天然ガス燃焼）

【新設および更新】

- ・当該対象のBSERを天然ガス複合サイクル（NGCC）技術とし、すべての容量のベースロードユニットに対して排出基準を1,000 lb CO₂/MWh^(注4)（発電端ベース）とする。

【改修】

- ・パブリックコメント等の意見を参考に、現段階では設定せず。

② 電力用蒸気発生ユニット（石炭燃焼）

【新設】

- ・BSERを最新型の超々臨界圧微粉炭火力ユニットと部分的なCCSの組合せとし、排出基準を1,400 lb CO₂/MWh（発電端ベース）とする。

【改修】

- ・BSERを当該対象の最大性能とし、過去5年間で最大の1時間排出量より10%以上排出が増加する改修に対して、排出基準を2002年から改修までの期間の年間最大性能値とする。10%以下の排出増加に対しては、排出基準を設定しない。

【更新】

- ・BSERを当該対象と同種のユニットの最高効率発電技術とし、排出基準として、熱入力2,000MMBtu^(注5)以上は1,800lbCO₂/MWh（発電端ベース）、未満の場合は2,000 CO₂/MWh（発電端ベース）とする。

EPAは、上記の石炭燃焼発電ユニットの新設に対する排出基準は、超々臨界圧微粉炭火力ユニットからの全CO₂排出量の20%を回収することで達成可能としている。

英国では2011年にエネルギー・気候変動省から電力市場改革（EMR：Electricity Market Reform）の方針が発表された。EMRの目的は、英国のCO₂排出削減目標（2050年80%削減）達成を図りつつ、電力の安定供給確保（再生可能エネルギー、原子力、CCS等を含む）、持続可能な低炭素技術への投資促進、英国経済や国民へのコスト最小・利益最大化、を達成することである。改革達成のメカニズムの一つに差益決済方式（CfD：Contract for Difference）がある。CfDは、電力の平均的な市場価格とCO₂排出の少ない発電設備にあらかじめ設定された電力価格（strike price）との差額を発電事業者を支払うことでCCSを含む低炭素発電技術への投資を誘導するものである⁽⁹⁾。

前出のEU-CCS指令は、世界に先駆けてCO₂を地下に貯留するための法的枠組みを規定したものである。具体的には、安全かつ環境に健全な貯留を行うことを目的に、①CO₂貯留サイトの選定、②事前探査許可、③貯留許可、④運用、閉鎖及び閉鎖後の義務、等を規定している。例えば、貯留サイトの「運用、閉鎖及び閉鎖後の義務」については、貯留CO₂の許容基準・測定・モニタリングおよび検証の実施、事業者による報告と当局の査察、漏洩の場合のリスクアセスメント、閉鎖後の責任及び責任委譲、貯留サイト管理のための財源保障と財源メカニズム、等々の内容を含んでいる。

日本においては、「Cool Earth－エネルギー革新技術計画－」（平成20年経済産業省）が発表され、CCSの実用化に向けて早期に大規模実証試験を実施する方針が示された。平成22年閣議決定の「エネルギー基本計画」の改定では、CCS技術の確立や今後計画される石炭火力の新増設の際のCCS Ready導入の検討が明示されている。これらの事項は、平成26年の「エネルギー基本計画」の改定でも引き継がれている。

日本のCCSに関する法整備については、陸上で発生した廃棄物等の船舶からの投棄による海洋汚染の防止を定めたロンドン条約96年議定書（2006年発効）の改定に伴う国内担保措置である「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（海洋汚染防止法）の一部改正に関する法律」（2007年公布）が唯一である。ロンドン条約96年議定書の改定では、投棄可能な廃棄物等として「二酸化炭素を隔離するための二酸化炭素の回収過程から生ずる二酸化炭素を含んだガス」が追加された。これに従って、日本でも海洋汚染防止法の改正により、二酸化炭素の海底下廃棄に関わる許可制度が創設され、許可を受けた場合には二酸化炭素の海底下貯留が可能となった。改正法の骨子は以下の通り、

- ・廃棄物の海底下廃棄の原則禁止
- ・CO₂の海底下廃棄に係る許可制度の創設

注1）新設：2014年1月8日以降に建設が開始されたプラント

注2）改修：既設プラントに対する大気汚染物質の時間当たりの最大排出量の増加を伴い物理的あるいは運用上の変更が行われるプラント。2014年6月18日以降の改修に適用。

注3）更新：更新部分が、最終的な施設全体の新規相当の資本コストの50%を超えるプラント。2014年6月18日以降の更新に適用。

注4）lb：ポンド。1lb ≒ 0.453kg

注5）MMBtu：百万Btu

- ・許可の申請主体は CCS 及びその監視を的確に実施できる事業者
- ・許可発給に当たって国民の意見提出の機会確保
- ・CO₂ 貯留地点の適切な選択
- ・海洋環境への影響の恐れが生じた場合の適切な措置実施等である⁽¹⁰⁾。

3-3-2 CO₂ 回収技術

(1) 回収技術の概要

発電プラントから CO₂ を回収するための手法は大きく、燃焼前回収、燃焼後回収、酸素燃焼、の3種類に分類される。それぞれのシステムの概要については、3-2-2(2)節を参照されたい。

(2) 電中研における研究開発

電中研では、1991年から1995年まで CO₂ の回収規模 3t-CO₂/日のパイロットプラントを設置し(図 3-3-2-1)、運転特性、吸収液の劣化、所要エネルギー、等々の評価を実施している⁽¹⁾。回収方式にはアミン吸収液(MEA)を用いた化学吸収法が採用されていた。

現在は、排ガスを石炭ガス化炉およびガスタービンでリサイクルする新しいコンセプトの CO₂ 回収型高効率 IGCC の開発を進めている。CO₂ が排ガスの主成分となり、CO₂ 分離装置が不要で効率低下を抑えることが期待できるものである。詳細については、3-2-2(2)節を参照されたい。

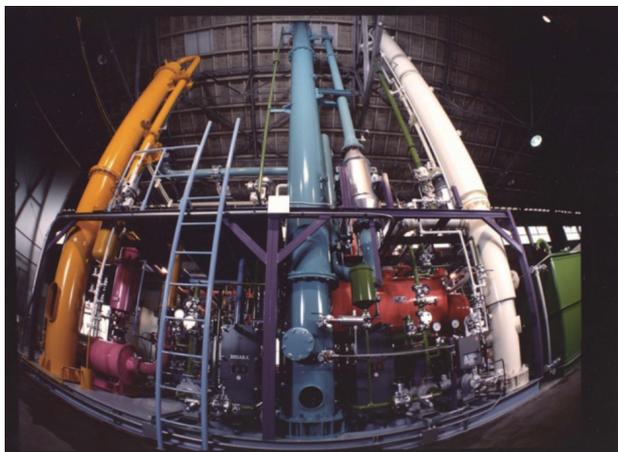


図 3-3-2-1 電中研の CO₂ 回収実験装置の外観

3-3-3 CO₂ 貯留技術

(1) 貯留技術の概要

CO₂ の大気への放出を削減するには、排出源などから回収された CO₂ を地中に貯留したり海洋中に隔離する必要がある。

海洋中への CO₂ の隔離については、当研究所では 1989 年頃から研究に着手し、1991 年からは資源エネルギー庁からの受託研究や研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究機構(NEDO)の「CO₂ 海洋隔離環境影響予測技術開発」における CO₂ の海域注入実験への参加を行ったほか、溶解型海洋隔離の技術的方策として船による希釈放流方式の提案などを行ってきた⁽¹⁾。しかし、2006 年 3 月に発効したロンドン条約 96 年議定書で、海洋投棄しても良いものに CO₂ が含まれなかったため、海洋中は CO₂ の隔離場所として選べなくなり、現状では CO₂ の地中への貯留が主体となっている。

CO₂ は常温常圧では気体であるが、圧力や温度条件により液体や超臨界状態(温度約 31℃ 以上、圧力 7.4MPa 以上)になり、容積が数十分の 1 になる。地下約 800m 以深(水圧 8MPa 以上)に CO₂ を圧入すると、温度は 31℃ 以上になることが想定され、CO₂ は超臨界状態になり、貯留する CO₂ の容積を小さくすることができる。超臨界状態の CO₂ は水より密度が小さく、粘性が小さいため、地下に圧入された CO₂ は浮力が働き、地表へ向けて移動する可能性がある。したがって、地下に貯留した CO₂ が数百～数千年という長期間にわたり地表に漏れ出さないように、封じ込める仕組みが必要となる。

CO₂ を地下に封じ込める仕組みとして、石油や天然ガスを蓄えている地層の例がある。この地層構造は、背斜構造と呼ばれるお椀を伏せたような構造であり、石油や天然ガスを蓄える空隙の大きな地層(貯留層)の上に石油や天然ガスが地上に漏れ出さないように閉じこめるための地層(遮蔽層)があり、水より軽い石油成分や天然ガスが地上に漏れ出さずに何億年も地下に蓄えられている。その他、地下深部の帯水層と呼ばれる水を蓄えた空隙の大きな地層や、石炭層なども上部に水やメタンが漏れ出さないような構造を有しており、封じ込めの効果が期待できる⁽²⁾。

欧米などの石油や天然ガス開発地域では、生産が終わったこれらの貯留層に CO₂ を貯留したり、生産が

弱くなった石油や天然ガス貯留層に CO₂ を圧入したりすることにより生産量を増やす石油増進回収技術 (Enhanced Oil Recovery, EOR) として CO₂ の地中貯留が事業として実施されている⁽²⁾。

例えば、カナダのサスカチュワン州のワイバーンでは、2000 年より米国ノースダコタ州の石炭ガス化炉で回収された CO₂ を、年間 100 万トン規模で石油の生産層に圧入し、石油の増産に活用しているほか、石油層に残された CO₂ は貯留されたものと評価している⁽³⁾。最近では、2014 年にカナダの Boundary Dam 石炭火力発電所で回収された CO₂ をワイバーンの石油層に圧入し、世界で初めての火力発電所からの CO₂ 放出削減の商業化プラントとなっている⁽⁴⁾。

一方、ノルウェーでは北海油田において、石油に随伴してくる CO₂ を分離回収して、油田の上部にある帯水層へ圧入している。このプロジェクトは 1996 年から開始され、年間 100 万トン規模の圧入を既に 20 年近くも継続している。驚くことに、年間 100 万トンの CO₂ 圧入を 1 本の坑井で行っている。また、このプロジェクトでは帯水層中に圧入した CO₂ の挙動を弾性波反射法などによりモニタリングしており、圧入により CO₂ の分布範囲が広がっている様子などが確認されている⁽⁵⁾。

我が国においては、公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) により、CO₂ を地中に長期的に安定かつ安全に貯留する技術を確立することを目的とした実験が経済産業省の補助事業として実施された⁽⁶⁾。この実験では 2003 年 7 月から 2005 年 1 月にかけて新潟県長岡市岩野原で、深度約 1,100m の帯水層に合計約 1 万トンの CO₂ が圧入された。この圧入試験は陸域にある既存の天然ガス生産基地で実施され、圧入井とともにその周囲に 3 本の観測井が掘削された。これらの観測井を利用して、物理検層および坑井間の弾性波トモグラフィーによる地下の物性データの取得が行われ、帯水層での CO₂ の挙動の把握が試みられた。また、日本の地質構造の特性を考慮した CO₂ 長期予測シミュレータが開発され、それにより圧入された CO₂ が 1000 年にわたり安全に貯留できると評価されている。CO₂ の圧入停止後も継続してモニタリングが続けられ、貯留した CO₂ がほとんど動かずにいることや地下深部の圧入箇所周辺での地下水の変化などが観測されている⁽⁶⁾。

その後、2008 年から経済産業省の委託事業・補助事

業として、日本 CCS 調査(株)が国内における CCS 実証試験の実施に向けた国内候補地点の地質調査等を実施し、候補地点として苫小牧沖地点、勿来・いわき沖地点、北九州地点の 3 地点の調査が行われた結果、苫小牧沖における実証試験が進められることとなった。苫小牧地区の商業運転中の 2 箇所の製油所で分離回収された CO₂ を、年間 10 万トン以上の規模で圧入基地から深度 1,100m ~ 1,200m および 2,400 ~ 3,000m の 2 層に傾斜抗井により圧入される計画である。この計画では、2016 年から 3 年間 CO₂ を圧入し、圧入終了後のモニタリングを 2 年間行う予定である⁽⁷⁾。

北米の大陸での CO₂ 地中貯留に対して、わが国や英国では海域の地下への CO₂ 貯留の実施の可能性が高い。海域の地下に CO₂ を圧入した場合、圧入作業中や圧入後に万一 CO₂ が海域に漏れ出した場合の環境への影響について事前に検討しておく必要がある。英国ではわが国も協力して、浅海域での CO₂ 放出実験 (QICS プロジェクト) が行われた。この実験では、水深 10m 程度の海底の地下 12m の深さから CO₂ を 60 日間で 4.2 トン放出させ、これによる海底面や海洋中の環境への影響を調べた。この結果によると、CO₂ による影響は CO₂ が海底面に漏れ出している極一部の浅い地中 (数 cm) に限られ、CO₂ 放出停止後 1 週間ほどでその影響はなくなったと報告されている⁽⁸⁾。より大量の CO₂ がより長期にわたり放出されると影響も大きくなる可能性もあるが、万一 CO₂ の漏洩が生じても早めに対策を取れば影響を少なくすることが可能なことを示していると思われる。

(2) 電中研における研究開発

CO₂ の地中貯留に関しては既に欧米などでは石油や天然ガスの増産回収 (EOR) において、CO₂ の貯留が商業化されているところもあるが、わが国においてはこのような地点が少ない。そこで、当研究所ではわが国の地質構造の特徴を考慮した CO₂ 貯留可能性について検討および必要な技術開発を進めている (図 3-3-3-1)^{(9),(10)}。

我が国では火力発電所、製鉄所、石油精製プラントなど CO₂ 排出源の多くが沿岸域に位置しており、輸送コストを考慮すると、貯留する場所はこれらのプラントの近くが望ましい。しかし、このような地域の近傍では背斜構造はあまり見られず、海へ向かって緩く傾斜した地層が多い。このような地域の地質が水を蓄えている間隙

の大きな地層（帯水層）と、その上部の水を通しにくい地層（遮蔽層）で構成されていれば、CO₂の貯留が可能と考えられる。

当研究所では我が国のこのようなCO₂排出源の分布や地質的特徴を踏まえて、CO₂の地中貯留に関する課題の抽出と、貯留に関わる基礎的な現象の把握および技術開発を進めている。そして、これまで我が国のCO₂排出源近傍の地質構造の評価や、CO₂貯留の可能性および貯留可能量の評価を行うための①サイト評価技術、地下に圧入したCO₂の挙動や分布範囲の予測を行う②挙動評価・予測技術、CO₂の圧入前後および圧入中の分布範囲を地上から計測し経時変化を評価する③モニタリング技術、長期間にわたって安全な貯留法と考えられる④CO₂の鉱物化に関する現象の解明、海底付近でのCO₂による⑤環境影響評価技術の開発、わが国のCO₂排出源の分布などを基に海外のパイプラインに替わるCO₂輸送手段として⑥船舶輸送の検討などを実施してきた。

① サイト評価技術

サイト評価技術に関しては、これまで火力発電所などの近傍における地質構造の概略や、貯留候補地選定および貯留可能量の評価フローの提案を行った。国内外のCO₂貯留候補地の特徴の比較検討から、我が国のCO₂貯留候補地を評価した。また、オーストラリアのCO₂

貯留プロジェクトである ZeroGen との共同研究により、ZeroGen の貯留候補地における地質モデルの構築に貯留候補地選定の評価フローを適用した。さらに、最近では台湾電力総合研究所（TPRI）との共同研究により、台湾での大規模CO₂地中貯留実証実験に参加し、現地で掘削された深さ3,000mの坑井から得られたコア試料をはじめ検層結果や実験場周辺の物理探査結果などを総合評価し、地下モデルの構築を図っている⁽¹¹⁾。

② 挙動予測

CO₂の地中での挙動予測技術については、これまで挙動予測のための数値シミュレーションコードの導入を図り、室内実験装置を用いたCO₂の流動特性評価のためのコア試料の相対浸透率の評価技術を開発した。開発した手法の実用性の確認や高度化を図るために、米国 Battel Memorial 研究所との共同研究により、オハイオ州マウンテンア石炭火力発電所で計画された大規模CO₂地中貯留実証実験の候補地⁽¹²⁾や、オーストラリアのクイーンズランド州で計画された ZeroGen プロジェクト⁽¹³⁾によるCO₂貯留候補地（次ページの図3-3-3-2、図3-3-3-3）を対象として、大規模にCO₂を貯留した場合（年間200万トンを20年）のCO₂の浸透範囲の予測を行った（次ページの図3-3-3-4）⁽¹⁴⁾。残念ながら、いずれのプロジェクトも計画見直しによりCO₂の圧入には至らなかった。

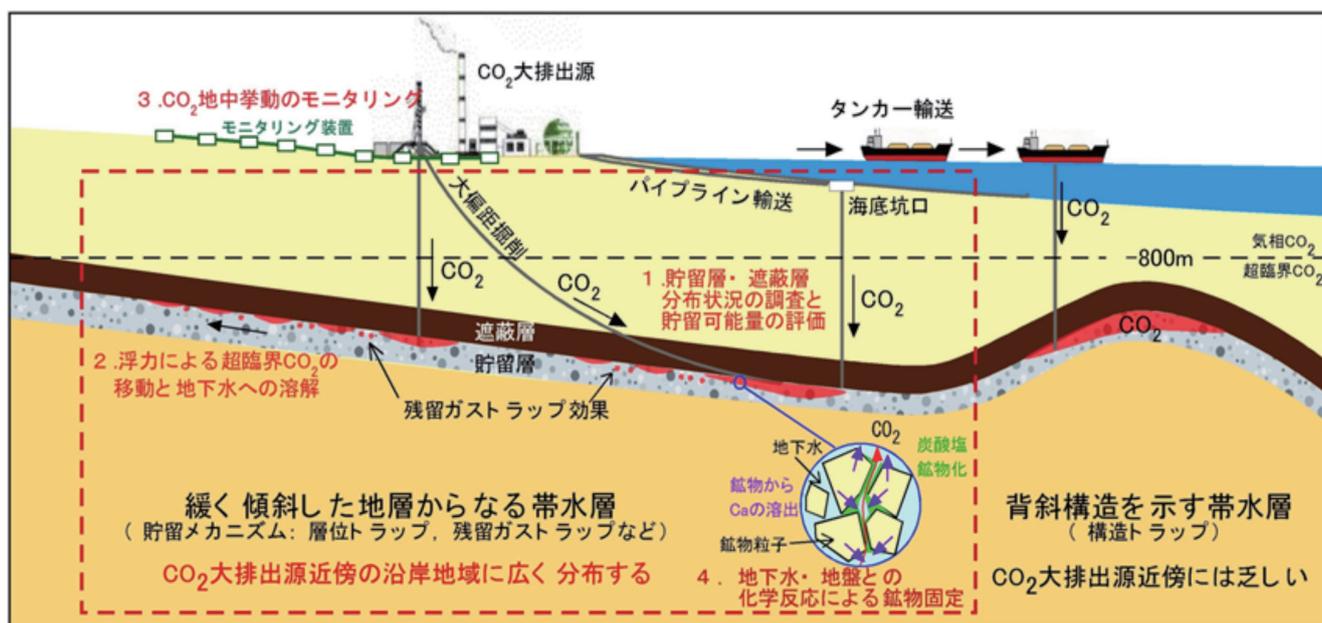


図 3-3-3-1 CO₂地中貯留の概念と当所の研究課題

そこで、最近台湾における大規模 CO₂ 地中貯留実験において、①で構築した地下の水理・地質構造モデルを用いた数値シミュレーションにより、年間 100 万トン規模の CO₂ 圧入時の挙動や貯留範囲の予測を行い、現地計測結果との比較から手法の高度化を図っている⁽¹⁵⁾。

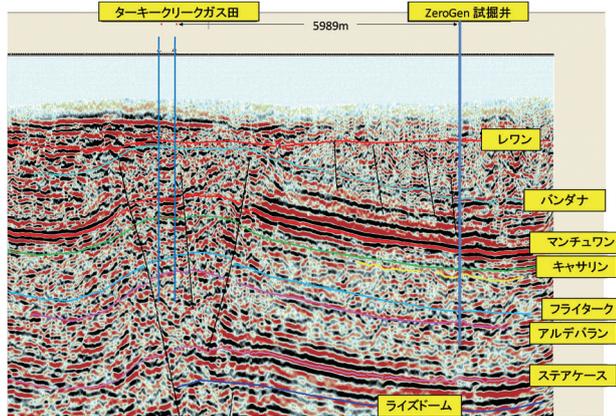


図 3-3-3-2 オーストラリア ZeroGen プロジェクトにおける弾性波反射法による地下構造の評価結果

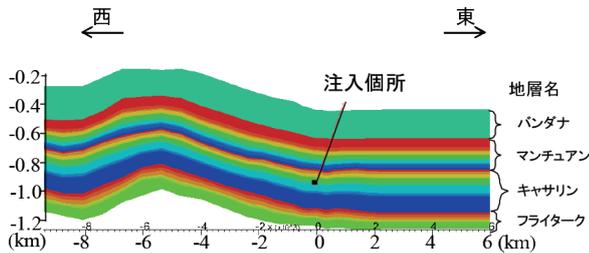


図 3-3-3-3 ZeroGen プロジェクトにおける弾性波反射法結果や調査坑井の検層結果などを基に構築した貯留層および遮蔽層の地下モデル

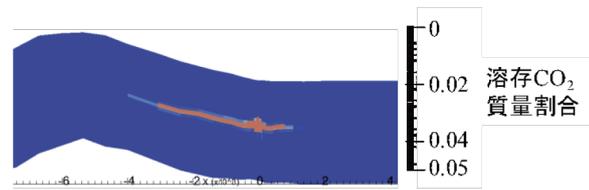


図 3-3-3-4 ZeroGen プロジェクトで CO₂ を年間 100 万トンで 30 年間圧入したときの CO₂ の分布範囲の予測結果

③ モニタリング

CO₂ のモニタリングについては、弾性波探査をはじめ電気探査、電磁探査、重力探査等各種の探査法の適用性について検討し、室内実験装置を用いてコア試料に液相、気相、超臨界の CO₂ を圧入した場合の物性値（電気比抵抗、弾性波速度・振幅など）の変化の基本的な現

象を把握した。また、これらの基本的な現象の汎用性を確認するため、透水性や化学成分の異なる種々の岩石サンプルを利用して、物性値の変化を調べた。これらの調査の結果、本格的な現場での CO₂ 圧入時における簡便で低コストなモニタリング手法として電磁探査法の適用について検討を進め⁽¹⁶⁾、台湾での大規模 CO₂ 地中貯留実証実験サイトにおいて電磁探査（CSAMT 法）による深さ 1,000m 程度までの地下比抵抗構造の計測に関する予備計測を実施し、今後深さ 3,000m を目標とした電磁探査法の適用を進める予定である。さらに、CO₂ の貯留作業中や貯留後に、万一海洋中に CO₂ が漏出した場合の検出のための観測システムを提案した⁽¹⁷⁾。これに関しては、英国スコットランドの西海岸で実施された浅海域での CO₂ 放出実験（QICS プロジェクト）に参加し、海底下での CO₂ 放出時の挙動予測と、海底面に電極を設置した電気探査（自然電位法と比抵抗法）を実施し、電気探査による CO₂ モニタリングの可能性を検討中である。

④ CO₂ の鉱物固定に関する検討

安全な CO₂ の貯留技術として、地下に圧入した CO₂ が地層水に溶解し、岩石と化学反応することにより、安定した炭酸塩鉱物として貯留される可能性について、CO₂ 溶解水と岩石との反応、および CO₂ の鉱物化による地層の透水性への影響に関する現場実験を実施した。一般には地下に圧入した CO₂ の鉱物化には数百年から数千年のオーダーの時間が掛かると想定されているが、圧入する地層の温度が高ければ岩盤との反応が加速されることが知られている。当研究所では、秋田県湯沢市に設けた実験場にある深さ 1,000m で温度 230℃ の岩盤に CO₂ を溶解させた水を圧入し、CO₂ 溶解水と岩盤との反応について調べた。その結果、CO₂ 溶解水の圧入によりカルシウム濃度が一時的に高まり、その後減少すると共に、CO₂ 溶解水と共に坑井内に降下させた方解石サンプルの表面の炭酸カルシウムの結晶が 1 時間で数 μm 成長することが確認された⁽¹⁸⁾。

⑤ 海洋中環境影響評価

我が国では大規模 CO₂ 排出源が沿岸域に多く位置することから、CO₂ の貯留候補地も海域の地中となる可能性が高い。この場合、CO₂ の輸送、貯留作業中、およ

び貯留後に万一 CO₂ が海洋中に漏出した場合の環境への影響評価手法を開発しておく必要がある。当所では IPCC の報告を参考に CO₂ の漏洩シナリオを検討し、海洋中での挙動評価技術として開発し、前述の QICS プロジェクトへの参加などを通して、開発した技術の実用化を進めている。

⑥ CO₂ の船舶輸送の検討

回収した CO₂ を貯留する場所まで輸送する手段としては、欧米ではパイプラインによる輸送が実用化しているが、我が国においては土地の価格や、輸送ルート周辺の住民の了解など実施においては課題が多い。そこで、当研究所では東京大学との共同研究により、船舶による輸送について検討し、CO₂ 圧入設備を搭載したタンカーによる輸送を提案した⁽¹⁹⁾。この案では、沿岸域で回収された CO₂ はタンカーで沖合まで輸送され、特殊なパイプにより海底下に掘削された坑井を通して地中の石油層や帯水層に圧入される。このパイプは CO₂ の圧入時以外は海底面に横たわっており、CO₂ タンカーが到着したとき、海上に引き上げられる。これにより海洋上での作業の安全性が図られる。

3-3-4 CCS 導入に係る諸リスク

(1) CCS 導入コストの概要

温暖化対策技術としての CCS に対する期待の一方で、実際の普及については期待通りに進んでいないのが現状である。CCS 機能を付加することによるコスト増加は主要な普及障壁の一つである。近年、大規模実証プロジェクトへの展開に進展がみられなかった欧州では、コスト削減のために、輸送パイプラインと貯留サイトを共有する CCS のハブクラスター化や回収 CO₂ を EOR に利用する事業スキームが指向されている。当初、普及ドライバーとして期待されていた EU 排出枠取引は CO₂ 価格が低迷しており経済的なインセンティブとしては機能していない。これまでに、CCS の経済性に関して多くの報告がなされているが、一例として、豪州の GCCSI (Global CCS Institute) が実施したコスト評価結果^{(1),(2)} を紹介する。

GCCSI は、可能な限り公開されたデータを利用し、より一般性があり技術間の比較が可能な方法で評価を

行っている。評価対象の発電技術としては燃焼前回収として IGCC、燃焼後回収として超臨界圧(微粉炭燃焼(PC: Pluverised Combustion))、超々臨界圧 (USC)、天然ガス複合発電 (NGCC)、および酸素燃焼 (Oxy-USC) である。それぞれの発電プラントの正味出力は 55 万 kW 程度 (稼働率 85%)、CO₂ の回収率は 90% で、年間約 300 万トンの回収 CO₂ が陸域パイプラインで 100km 輸送され、陸域の深度 1,700m の帯水層に貯留されるとの想定である。運用期間を 30 年とした場合の各発電技術の平準化発電コスト^(注1) の評価結果を図 3-3-4-1 (a) に示す。CCS を付加しない想定とともに示してある。ちなみに、酸素燃焼 (Oxy-USC) については CO₂ 回収を前提とした技術のため、付加しない想定の結果は示されていない。CCS を付加しない場合は、USC のコストが最も低く、次に PC となっている。CCS を付加した場合は Oxy-USC が最も低い値を示しているが、酸素燃焼発電についてはこれまでに商用規模での運用例はない。CCS を付加した場合にコストの増加率については、IGCC が最も低くなっている。これは、CO₂ 回収に必要な付加プロセスが他に比較して少ないためである。図 3-3-4-1 (b) には、平準化発電コストの増分における回収、輸送、貯

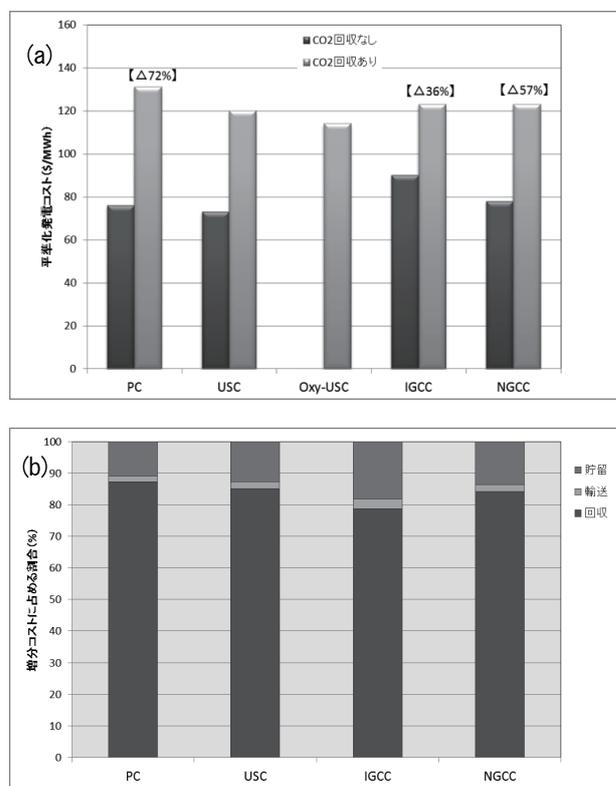


図 3-3-4-1 (a) 発電技術毎の発電コストと (b) 増分コストの割合

留の各プロセスの寄与割合を示す。8割以上が回収に伴う増加となっている。

表 3-3-4-1 には、CCS のコスト評価の際に各プロセスおよび全プロセス（クロスカッティング）において考慮すべき不確定要素を示す。回収プロセスについては、それぞれの発電技術の成熟度に応じたコスト増分のリスクを想定する必要がある。輸送プロセスについては、輸送方法や輸送場所等によってコストが大きく変わる可能性がある。例えば、日本での CCS を想定した場合、貯留に適した地層の多くは海域に存在するため、海域におけるパイプライン輸送が有力なオプションとなる。海域パイプラインの資本コストは陸域パイプラインと比較して2倍程度となり、運用コストは1.5倍程度になるとの試算もある⁽³⁾。貯留プロセスについては、貯留方法や貯留場所とともに、貯留サイトの選定および評価に係るコスト（finding cost）の不確実性が大きいとされる。貯留サイトの選定は、事業実施判断の最も重要なプロセスであることから、係るコストと将来的なリスクはトレードオフの関係にある。将来的リスク低減のためには、候補サイト数を増やすことが必要になるが、その分、評価に掛かるコストが上昇することになる。

CCS 導入の議論においては、さまざまな不確実性があることを認識した上で、他の低炭素電源との比較等を

注1) 平準化発電コスト：発電プラントの運用期間中に掛かる設備費や運用費等の全コストを運用期間中の発電電力量で割ったもの。

表 3-3-4-1 CCS に係るコストの不確実

プロセス	不確定要素
回収	<ul style="list-style-type: none"> 採用発電(回収)技術 技術の成熟度 燃料費
輸送	<ul style="list-style-type: none"> 輸送方法 輸送場所 輸送距離 輸送量
貯留	<ul style="list-style-type: none"> サイト選定・評価 貯留方法 貯留場所(陸域・海域) 貯留層特性 サイト閉鎖後の義務
クロスカッティング	<ul style="list-style-type: none"> 実施地域(材料費、設備費) 労働費 政策支援 CO₂価格

解釈することが重要である。

(2) 温暖化対策技術としての CCS の評価^{(4),(5)}

CCS は CO₂ 大幅削減技術として注目されているが、CCS 技術導入可否を議論する際には、温暖化対策だけでなく、それ以外の様々な環境・健康リスクとのトレードオフを予め考慮しておく必要がある。また、実施意義の妥当性判断には、他の低炭素技術とも比較検討し、CCS 技術の相対的な位置づけを把握する知見が重要である。そこで、将来的に我が国の火力発電に CCS 技術導入することを想定した条件にて、CCS 導入によるライフサイクル環境影響を網羅的に評価し、他の技術とも比較した。

評価シナリオは、超々臨界圧微粉炭火力発電を基準技術とし、それに CCS を付加した2つのシナリオを設定した（CO₂ 輸送方法：海底パイプラインまたは船舶の2通り）（図 3-3-4-2）。CO₂ 回収方法はアミン系吸収液（MEA）を用いた燃焼後回収、MEA 劣化に伴う NH₃ 排出と MEA 製造時排出される有害化学物質は理論最大値を使用した。貯留段階での CO₂ 漏洩による影響は評価対象外とした。

評価方法は、LCA（Life Cycle Assessment）ソフトウェア（MiLCA ver.1.1.110）を用いたインベントリ分析、および LIME2 手法を用い、11 影響領域（地球温暖化、鉱物資源消費、酸性化、廃棄物、光化学オキシダント、富栄養化、人間毒性、生態毒性、化石資源消費、都市域大気汚染、土地改変）別に特性化評価を行った。機能単位は送電端 1kWh の発電とした。

インベントリ分析の結果、CCS シナリオにおける CO₂ 排出量は、CO₂ 回収段階で 90% 減少するが、他のプロセスでのエネルギー使用量が増加するため、全体としては基準技術に比べて 71～80% 減であった。CCS 付加により生じる環境負荷物質として、MEA 製造時の酸化エチレンと NH₃ の大気排出、COD と全窒素の水系排出が増加した。CO₂ 回収段階では、吸収塔からの NH₃ と微量の MEA、MEA 廃棄物の焼却に伴う NO_x、SO₂ などの大気排出量も増加した。

以上のデータに基づき特性化評価を行った結果、CCS 導入により地球温暖化への影響は軽減するが、他の環境・健康影響カテゴリは増加した。プロセス別で見ると、CO₂ 回収段階と MEA 製造段階の寄与が大きかった（図

3-3-4-3)。これは、前者の場合、MEA 劣化由来の NH₃ による土壤酸性化および富栄養化、後者の場合、酸化エチレンによる人間毒性と水系廃棄物由来の富栄養化への寄与が大きいためである。

次に、単位発電量当たりの特性化影響量を、他の低炭素技術間の基準技術と相対比較した結果、今回のシナリオ条件では、地球温暖化以外の影響領域で増減の両面が見られ、その程度は技術間で異なることが明らかとなった。例えば、太陽光発電では、土地改変面積・鉱物資源消費・富栄養化・廃棄物の特性化影響量が相対的に大きく、それ以外の影響量は小さかった。地熱発電は、影響領域全般において小さいことが示された（図 3-3-4-4）。

以上より、CCS 技術のライフサイクルという視点では、地球温暖化以外の国内の環境リスクが増加するため、CO₂ 回収方法など要素技術の改善や最適化の必要性が示唆された。今後、環境面以外の指標についても分析した上で、総合的に評価していく必要がある。

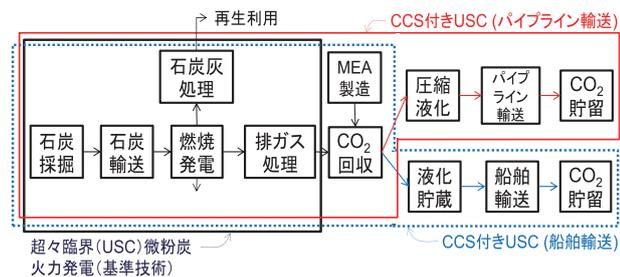


図 3-3-4-2 超々臨界圧 (USC) 微粉炭火力発電および CCS シナリオの評価範囲⁽⁴⁾

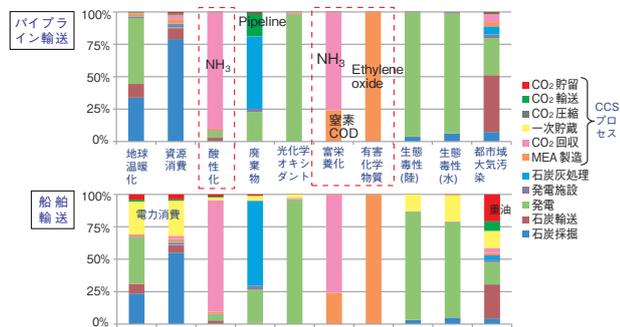


図 3-3-4-3 CCS シナリオにおける特性化評価結果⁽⁴⁾

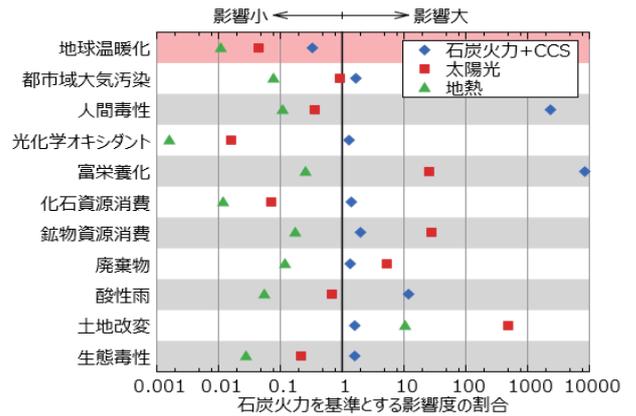


図 3-3-4-4 CCS、太陽光発電、地熱発電における特性化評価の相対比較⁽⁴⁾

(3) 社会的受容性の現状

今後、我が国において CCS 事業を実施することになる場合、CO₂ 輸送ルート、貯留地周辺に関わる利害調整、貯留後の CO₂ 漏洩リスク対策・管理など、社会的受容性が大きな課題となりうる。

これまで海外で先行する CCS プロジェクトでは、地元住民など利害関係者の反対により中止・遅延した例が複数見受けられる。例えばオランダの Barendrecht プロジェクトは小規模の CCS 実証プロジェクトであったが、自治体と貯留予定地域住民の強い反対により中止に至った⁽⁶⁾。その主な要因は、早い段階からの住民参加プロセスがなく、関係者間の信頼関係が構築されなかったこと、CCS 要素技術の多様性がなく、居住地に近い貯留候補地が決定済みで変更余地がない上に、貯留に関する科学的な情報も信頼されず住民のリスク認知が高かったこと、地元便益がなかったこと等であった。

豪州の場合、環境影響評価 (EIA) 手続きにおいて、事業計画の早い段階からの情報公開や住民意見の反映など住民参加プロセスが定着している。EIA の評価項目には、環境・社会・経済影響、リスク分析など広範囲な科学的知見が要求されており、我が国と比べると地元の理解向上や事業者との信頼関係構築に資する仕組みが整っている（次ページの図 3-3-4-5）。例えば ZeroGen プロジェクトの場合、経済的理由で中止となってしまったが、受容性という点で見ると、利害関係者とのコミュニケーションを事業戦略の一環として重要な位置づけとし、事業者が自発的に地元との信頼関係を継続的に構築した成功事例といえる⁽⁷⁾。

一方、我が国では、CCS に対する認知度自体が極め

で低い状況にある。これまで当研究所が実施した一般市民を対象としたアンケート調査（2010年3月、2011年3月、2013年2-3月、2015年3月）において、CCSに対する認知度（「知っている」「良く知っている人に説明できる」と回答した人）はいずれも10%未満であり^{(8),(9)}、東日本大震災前後における認知度の変化は見られなかった。その保有知識を調べてみると、例えば「安全な容器に入れて地下深くに埋める（誤答）」を選択した人が2割程度おり、必ずしも正しい情報を理解しているとは限らなかった⁽⁹⁾。従って、現状ではCCSに関する情報は殆ど普及しておらず、具体的なイメージを保持している人は少ない状況にある。このため、CCSを実施する場合は、誤解や過剰な不安・期待が生じないよう、慎重な情報提供の戦略による理解向上が重要である。

東日本大震災後、原子力発電だけでなく、火力発電に対する人々の意識に変化が見られた^{(8),(9)}。火力発電の認知度に関わらず、今後の導入意向は「どちらともいえない」人が増え、賛否が分かれた（図3-3-4-6）。加えて、我が国の電源構成の現状に対する認知度も低く、現在、原子力発電の割合が0%、火力が約90%であることを認識している人は少ない。

従って、火力発電へのCCS付加を議論する際、温暖化対策としてのCCSの導入意義やリスク管理だけでなく、我が国における電源構成の現状、火力発電の意義情報に対する理解向上が必須である。再生可能エネルギー技術に対する人々の受容性はいずれも高いため、温暖化対策技術としての選択肢の中でのCCSの優先度や重要度、費用対効果など十分な説明が重要と考えられる。

評価項目	豪州	日本
主な関連法	EPBC Act (1999～連邦政府)と各州政府の法律だが、主に州政府の法律に従う(クイーンズランド州の場合 SDPWO Act (1974～))	環境影響評価法 (1999～)
環境影響評価の目的	事業の環境・社会経済に関する潜在的な悪影響・便益評価/事業内容とその影響の公衆への周知/悪影響の最小化等	事業の環境保全への配慮、公害の未然防止、持続可能な社会の構築
スクリーニング(対象事業の判定)	事業内容に応じて連邦政府・州政府により判定	対象13業種のうち、規模・内容により許認可権者が判定
評価項目	環境影響、社会的影響	環境影響
スコーピング	事業内容によりプロセスが異なる。方法書案は担当局が作成 → 公表、縦覧 → 国民、諮問機関の意見を踏まえ決定し、事業者に要求	事業者が方法書案の作成 → 公表、縦覧 → 国民・知事意見を踏まえ決定
住民参加	方法書、準備書、評価書、それに対する意見、その他の関連文書を住民に公開しなければならない。住民は、スクリーニング、方法書、準備書、評価書に対する各意見提出期間など、あらゆる機会に意見提出が可能	方法書、準備書、評価書を住民が縦覧できるように規定する。住民は方法書、準備書には意見書を提出し、準備書の記載事項を周知させるための説明会に参加することができる
パブリックコメントの期間	プロセスにより異なるが、各10-40営業日	公告・縦覧・説明会・パブリックコメント等の期間は各1.5ヶ月

注記: * 許認可をする者の他、補助金交付の決定者、独立行政法人の監督をする府省、直轄事業を行う府省が含まれる。

図 3-3-4-5 日豪における EIA 手続きの比較⁽⁷⁾

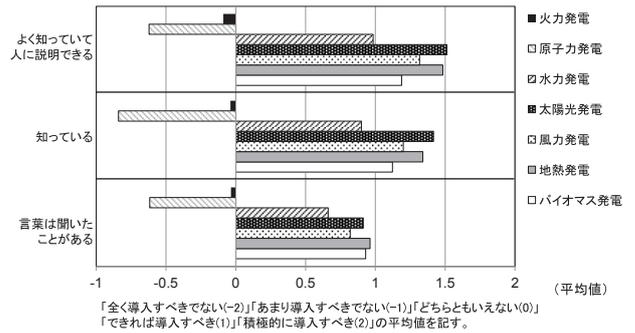


図 3-3-4-6 各発電技術に対する今後の導入意向（自己評価の認知度別）⁽⁹⁾

3-4 再生可能エネルギー利用技術

3-4-1 太陽光発電大量導入に対応する電力系統運用技術

地球温暖化対策の一環として、2003年から再生可能エネルギー（再エネ）の導入が推進され、東日本大震災以降、さらなる再エネの普及拡大を目的として2012年に固定価格買取制度（FIT）が導入された。これにより、太陽光発電（PV）の導入量が急増している。国では2030年までに6400万kWを導入し、電源構成として、7%を賄うことを目標にしている。

PVは気象条件に影響を受けやすく発電出力が不安定であるとともに、配電系統や送電系統に分散して連系される。これらにより、配電系統では電圧管理や事故時復旧に影響を与える可能性がある。また、系統全体で余剰電力が発生したり、需給・周波数調整力に影響を与える可能性がある。さらに、同期化力や慣性力をもたないパワーコンディショナーを介して連系されるため、系統事故時における系統の安定性に影響を与える可能性もある。

このため、将来にわたり、電力系統と調和の取れた円滑な導入を図って行くため、このような各種の問題を抑制・回避するための系統運用・制御技術について研究開発を行っている。

(1) センサ情報による配電線の太陽光発電出力推定手法 a. 配電線事故復旧への影響

事故で配電線への供給が停止した場合、安全確保のためPVも停止する。その後健全区間に送電するため供給

停止直前のPV出力を含んだ配電線潮流を基に系統切替し、他回線から融通すると、融通後、PVは直ぐには起動しないため、大量連系している場合は過負荷や電圧低下といった問題の生じるおそれがある。この問題を回避するためには、配電線に連系したPVの出力をリアルタイムで推定・把握することが必要となる。

b. センサ情報を利用した太陽光発電出力推定手法

現状で電力会社が取得可能な配電線センサ情報、およびPV力率情報を使用した区間単位でのリアルタイムPV出力推定手法を開発した⁽¹⁾。

PVが連系した実配電線の実測データを分析した結果、①配電線から見た負荷の有効電力-無効電力(PQ)平面上の動きは概ね直線状となる、②力率改善コンデンサ(SC)の入切の影響と考えられるもので、同一配電線においてPQ平面上での同直線は複数存在する場合があるが、傾きは概ね一致する傾向にある、③PVも力率一定制御されていれば、PQ平面で直線上を移動する、ことを確認した。以上の特性を勘案し、リアルタイムPV出力推定手法として、以下の方式を考案した。

負荷変動の有効電力成分に対する無効電力成分の比率は、SC容量に依らず概ね一定となる特性に着目し、計測時刻毎に配電線センサから得られる潮流変動ベクトルを負荷変動ベクトルとPV出力変動ベクトルに分解して、PV出力変動の有効電力成分 ΔP_V を推定する(図3-4-1-1)。次いでこれらの推定値を計測時刻毎に積算し、その積算値を最新の計測時刻でのPV出力値とする。

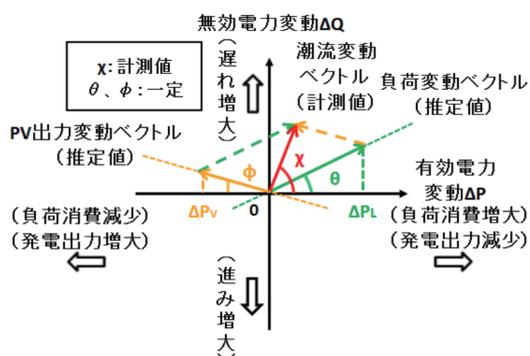


図 3-4-1-1 ベクトル分解の概要 (ΔPΔQ平面)

考案した手法の精度を実測値との比較により検証した結果、計測した10日間での容量誤差率(=|PV出力推定値-PV出力実測値|/PV定格容量×100[%])の

平均は10%であり、累積度数分布90%値で22%となった。PV出力変動の比較的大きな日の例では、計測誤差の影響が小さくなり、容量誤差率は平均で7%、90%値で13%と精度が向上した(図3-4-1-2)。また、PV力率を90~100%に変化させて確認した結果、容量誤差率はPV力率に依らず概ね一定となった。以上により、提案手法の妥当性を確認した。

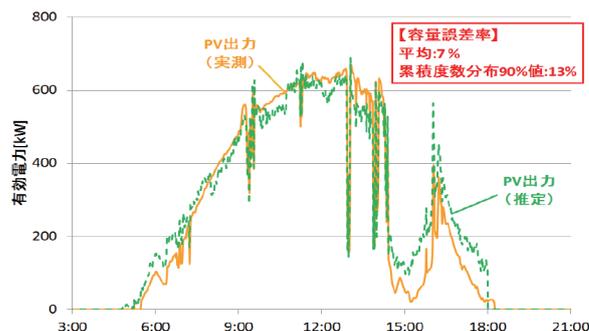


図 3-4-1-2 PV出力推定例 (PV力率90%)

(2) 逆潮流を抑制する需要家機器運転方式

逆潮流に伴う電力系統への様々な影響を回避するための技術として、PVによる需要家からの逆潮流値(もしくはPV出力値)に制限がかかった場合に、需要家所有のヒートポンプ(HP)式給湯機や蓄電池などを運転し、PVの機会損失(出力抑制により失われる電力)を極力低減させる需要家機器運転計画手法を開発した⁽²⁾。本手法は、系統から送られてくる逆潮流制約情報、翌日のPV出力や電力需要パターンの予測に基づき、需要家の利便性に影響を与えないことを条件に、各機器の翌日の運転計画を作成する。また、PV出力、電力・給湯需要各予測の不確実性に対応するため、統計的手法を取り入れて、それぞれ可能性のある複数の予測パターンを作成し、これにより利便性や電気料金に対する予測誤差の影響を最小限に抑えている。

HP式給湯機を用いた本手法の実証試験結果例を次ページの図3-4-1-3に示す。開発方式を太陽すると、HP式給湯機が日中に運転され、逆潮流制約条件(1.5kW)により本来損失となってしまうPV出力電力の一部が有効利用されている。年間を通じて同様の逆潮流制約条件が与えられた場合、発電機会損失を30%程度低減できる見通しを得た。また、予測はずれに伴う利便性、電気料金への影響をさらに抑える蓄電池による予測誤差のり

アルタイム補償方式も開発し、実験とシミュレーションによりその有効性を検証した⁽³⁾。

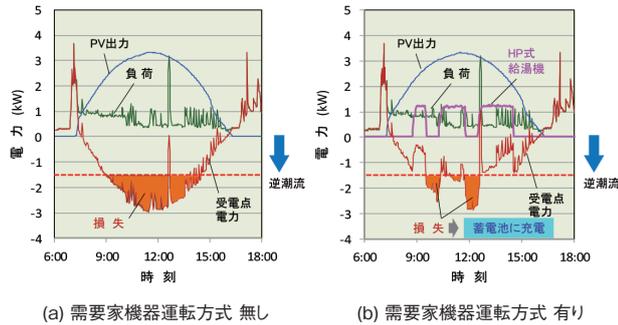


図 3-4-1-3 需要家機器運転方式の実証試験結果

・PV:4kW 級、HP 式給湯機:定格 1.5kW、貯湯槽:370L (沸きあげ:約 3 時間)

(3) 系統周波数維持のための電力貯蔵活用技術

a. 系統周波数維持に関わる課題

PV の大量導入により、真の需要から PV 出力を除いた見かけの需要は、昼間の PV 発電電力の急増により減少するとともに日没後に急増する傾向となる。火力発電機は出力可能な上下限界が決まっているため、昼間の見かけの需要が想定よりも低すぎると、発電機の安定運転に支障が生じる可能性がある。このため、従来以上に、精度の高い需要予測と再エネ出力予測が重要となる。また、PV の出力変動が需要の変動に重畳し変動量が増大することにより、既存の火力発電機等による負荷周波数制御 (LFC: 瞬時瞬時の需給のアンバランス量を解消させる制御) では、系統周波数を適正範囲に維持出来なくなるおそれがある。

b. 電力貯蔵装置を活用した周波数変動抑制制御技術

このような系統周波数の乱れを抑制するためには、既存の火力発電機だけでなく電力貯蔵装置を効果的に活用する方策が考えられる。これに関し当研究所では、沖縄電力が経済産業省の離島独立型系統新エネルギー事業により導入した PV4000kW と電力貯蔵装置としてナトリウム硫黄電池 (NaS) 4000kW を併設した宮古島の実系統 (電源構成: ディーゼル発電 (DG)、ガスタービン発電機 (GT)、合計 80,000kW) を対象に、LFC に蓄電池を活用した効果等の実証試験を沖縄電力の協力を得て実施した。この中で、少ない蓄電池容量で高い周波数変動抑制効果が期待できる方式として、周波数変動を生じさせる需給アンバランス量の変動を長周期成分と短周期成分

分に分割し、既存電源には追従可能な範囲の長周期の変動を分担させ、蓄電池には残りの短周期の変動を分担させる技術を開発・提案した⁽⁴⁾ (図 3-4-1-4)。実証試験では、DG のみによる LFC 方式 (A 方式)、応答速度の速い NaS のみによる LFC 方式 (B 方式)、DG と NaS の協調 LFC 方式 (提案方式) の 3 方式を対象に実系統において LFC 制御を行い、周波数変動抑制効果と蓄電池所要容量を分析した。制御定数として、A 方式は可能な限り周波数変動を抑制できる設定とし、B 方式と提案方式では周波数変動の約 99.7% (3σ 相当値) が管理目標値である $60 \pm 0.3\text{Hz}$ 以内に収まる範囲で NaS の所要容量が可能な限り小さくなる設定とした。

図 3-4-1-5 は、LFC の制御対象量 (見かけの需要のうち、数分~数十分程度の比較的周期の短い需要変動量) に対する周波数変動、および DG や NaS の LFC 出力変動についての比較結果を示す。これにより、A 方式は、他の 2 方式に比べて周波数変動抑制効果が小さく、周波数変動の 3σ 相当値を今回の試験での目標値である $60 \pm 0.3\text{Hz}$ 以内に抑制できないおそれがあることを確認した。一方、B 方式と提案方式は、試験期間中の最大の LFC 制御対象量を想定しても周波数変動の 3σ 相当値を $60 \pm 0.3\text{Hz}$ 以内に抑制でき、さらに、提案方式は B 方式よりも NaS の LFC 出力変動の 3σ 相当値が小さく、周波数変動の抑制に必要な蓄電池容量を低減できることを明らかにした。

本 LFC 方式は本土系統への展開も期待されるものである。なお、系統の既存電源の応答速度により蓄電池の所要容量が異なることを試験で確認しており、留意する必要がある。

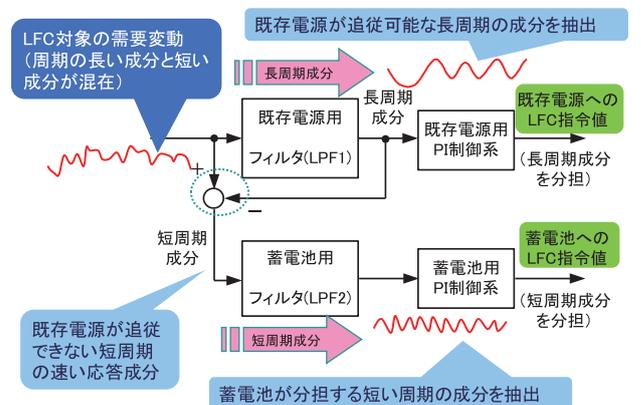


図 3-4-1-4 既存電源と蓄電池を協調させた LFC 方式

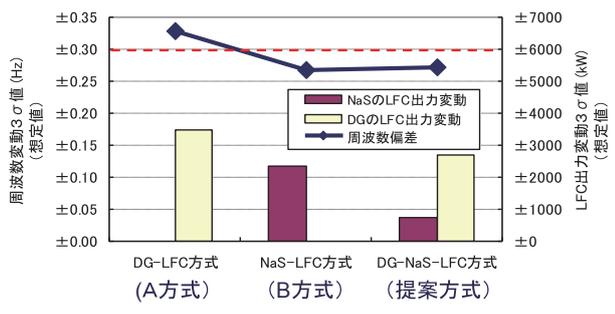


図 3-4-1-5 LFC 実証試験結果 (3方式の比較)

(4) 経済的な需給運用のための日射量予測技術

翌日の需給バランスを決める需給計画において、既存電源のコスト（燃料費や起動費）を抑えつつ、限りある容量の蓄電池を有効活用するためには、PV出力が不安定に変動する最大の要因である日射量を前日計画の段階で精度よく予測することが重要となる。日射量の予測のうち、翌日以降を対象としたやや長期の予測を高い精度で行うには雲の複雑な動きを考慮することが重要となり、それに適した手法として数値気象モデルがある。

a. 数値気象モデルで日射量を予測する技術

これまで、電力施設を雨、風、雪などによる気象災害から守ることを目的として、数値気象モデルを中核とする「気象予測・解析システム (NuWFAS)」(図 3-4-1-6) を開発した。この NuWFAS を関東地方の翌日の日射量予測に適用して精度検証を行ったところ、特に夏季に予測誤差が大きく、改良の余地があることがわかった。そこで、日射量をより高い精度で予測できるように、日射変動の主因である雲の予測条件を改良した結果、夏季の日射量の予測誤差を約 20% 低下させることができた⁽⁵⁾。さらに、雲の凝結に関わる物理モデルを詳細に改良し、夏季に日射量が実際よりも非常に大きく予測された日の予測精度が大きく改善された⁽⁶⁾。

b. 予測結果の信頼性を評価する技術

気象を完全に予測することは非常に困難であるため、予測精度を向上させる取り組みに加えて、日々の予測結果の信頼性に関する情報を事前に把握する手法を考案した⁽⁷⁾。この手法は、気象庁の週間アンサンブル予測で得られた雲量の予測結果のバラツキの程度をもとに、日々の日射量予測結果の信頼性指標を算出する。この信頼性指標と、NuWFAS の日射量予測誤差とを比較し

た結果、信頼性が低いと判定された日に誤差が大きくなる傾向が見られ (図 3-4-1-7)、本指標が予測誤差の大きさを事前に推定する有益な付加情報となりうることを確認した。ただし、週間アンサンブル予測の時空間解像度が低く、目的によっては実務への活用が難しい。そこで、NuWFAS を用いた領域アンサンブル予測の開発により時空間解像度が高い予測の信頼性指標の研究を進めている⁽⁸⁾。

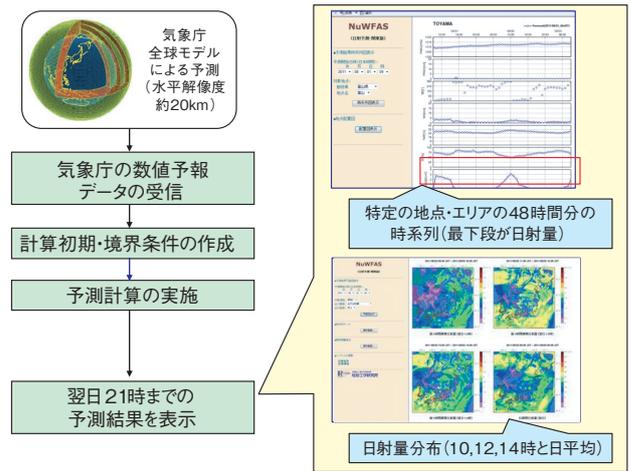


図 3-4-1-6 NuWFAS による日射量予測の概要

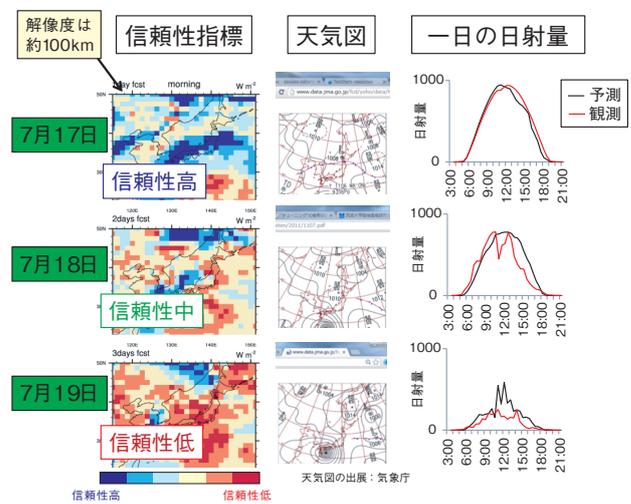


図 3-4-1-7 日射量の信頼性を評価した事例

・7月19日は、気圧配置が複雑、台風の影響、および台風の進路が不確実であり、信頼性が低いと判定。

(5) 基幹システム事故に対する系統セキュリティ評価

現在、再エネ導入可能量は平常時の需給バランスのみを考慮して決定されているが、多くの大規模停電は、落雷などにより基幹系統の送電線が一時的に使えなくなった場合に発生している。このため、再エネ大量導入が基

幹系統事故時の電力システムの安定性（周波数、電圧、系統安定度など）に与える影響の評価、および安定性を保つための対策の開発が早急な課題となっている。

電力システムを安定に運用するために必要な条件として、①周波数を一定に保つ、②電圧を一定に保つ、③系統安定度を維持する、の3つが挙げられる。基幹系統の事故時にこれらの3条件を保つことを「系統セキュリティ」と言う。この系統セキュリティは、主に電力システムに並列されている大容量発電機によって維持されている。

a. 系統安定度への影響に関わる実験検証

従来の大容量発電機と異なるPVが大量導入された場合の系統事故時の安定度への基本的影響を当研究所の大形アナログシミュレータである電力システムシミュレータを用いて検証した（図3-4-1-8）。

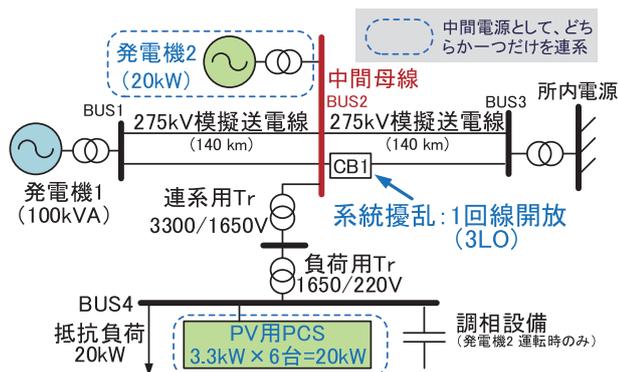


図 3-4-1-8 発電機をPVに置き換えた場合の系統安定度への影響を検証するための実験系統

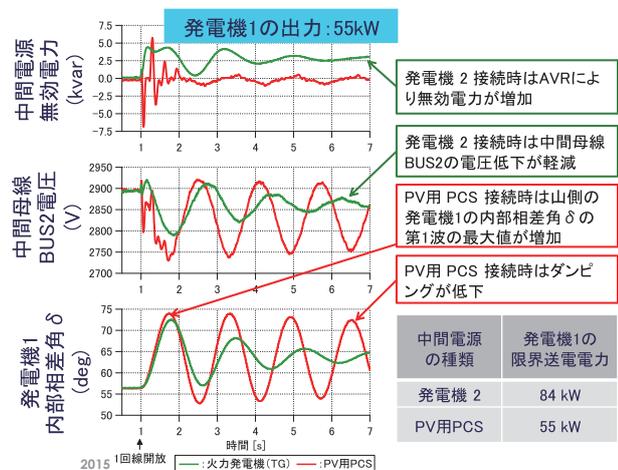


図 3-4-1-9 系統の中間母線接続の発電機2と下位系接続のPV用PCSの置き換えによる系統安定度への影響比較

図3-4-1-8中の遮断器CB1を開放させた場合の、発電機1が安定に送電できる電力（限界送電電力）は、発電機1と発電機2が連系された場合は84kWであるが、発電機2と同出力のPVが導入されると約2/3の55kWまで低下する結果となり（図3-4-1-9）。系統安定度が低下することが示された。

b. 再エネ大量導入時の系統安定度への基本的影響⁽⁹⁾

再エネ大量導入が基幹系統の安定度に及ぼす影響は、発電機や再エネの運転状態、導入地点などの系統条件によって大きく異なるため、その影響把握が困難となっている。そのため、これまでの実系統データを用いた解析結果から得た知見を活用し、再エネ大量導入時の個々の系統条件が系統安定度に及ぼす基本的な影響を図3-4-1-10の通り整理し取りまとめた。系統安定度への影響は、系統事発電機の運転状態、再エネ導入地点の偏在性などの条件により種々異なるものとなり、向上することも低下することも起こりえることを示した。

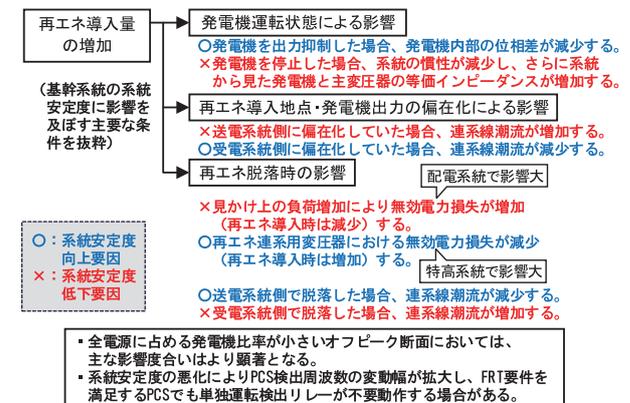


図 3-4-1-10 再エネ大量導入時の系統安定度への基本的影響の評価結果

再エネ大量導入時の定常時のみならず、落雷などによる系統事故発生時に基幹系統の安定性を保つため、以下の種々の対策が検討されている。

- ① 電力システムに連系する大容量火力発電機の台数の確保（周波数・電圧・系統安定度の維持に貢献）
- ② 無効電力の供給・消費が可能な電圧制御機器 (STATCOM, SVC など) の設置（電圧の維持に貢献）
- ③ 蓄電池の設置（周波数の維持に貢献）
- ④ 再エネによる系統事故時の運転継続および事故除去後の速やかな有効・無効電力制御（周波数・電圧の

維持に貢献)

当研究所では、電力系統シミュレータを用いた実験およびPV用PCS数値計算モデルを用いた計算機シミュレーションにより得られた研究成果を活用して、上記の各種対策の組み合わせを含め、経済的で現実的な対策を検討する予定である。

(1) 加速する太陽光発電システムの普及

この10年で太陽光発電業界を取り巻く環境は大きく変わった。2004年の太陽光発電システムの世界全体での年間導入量は1GWだったが、2014年は38.7GWであり、10年で約40倍に拡大した。世界における累積導入量は177GWと推定されており、世界における電力需要の1%を太陽光発電システムが供給していることになる。

地域別の導入量にも大きな変化が起こった。2011年に22GW導入されていたヨーロッパにおける2014年の年間導入量は7GWであった。一方、2014年に導入量が多かったのは、中国、日本、アメリカである。この三か国だけで導入量のおよそ27GW(70%)を占めており、日本の導入量の急増は世界的に見ても顕著である。

日本において短期間に大量に電力系統に連系されたこれらの太陽光発電システムは、性能低下が同時期に顕著になることが予想され、電力系統の運用に大きな影響を与えることが懸念される。

(2) 高効率化する太陽電池モジュール

2010年頃に販売されていた太陽電池モジュールに使用されている太陽電池セルは、p型シリコンを基板に用いたセルがほとんどであった。モジュール変換効率は多くのモジュールメーカーで差が無く、単結晶太陽電池モジュールの変換効率は約15%、多結晶太陽電池モジュールの変換効率は約14%であった。

しかし、2015年の変換効率は、n型シリコン基板を採用しているSunPower社のバックコンタクト太陽電池モジュールで20.1%、Panasonic社のヘテロ接合型太陽電池モジュールで19.5%に達している。さらに、p型シリコン基板セルを採用した単結晶・多結晶太陽電池モジュールにおいても、太陽電池セルの表面に形成する光反射防止膜の改良、銀電極の細線化による電極の光遮蔽の低減、発電した電気の集電電極数の増加による電流の収集効率の向上、セル裏面の不活性化膜の形成による裏面の電流損失の低減など、様々な高効率化技術が用いられ、17%を超えるものが市販されるようになってきた。

しかし、これらの高効率化技術の実使用時の安定性は不明であり、中長期的な性能低下に与える影響を明らかにすることが重要である。

(3) 赤城試験センターでのモジュール信頼性評価

当研究所では、赤城試験センターにおいて、太陽電池モジュールの実使用状態での発電性能データを収集している(図1)。併せて、各種の日射・気象データも収集して、設置環境が太陽電池の性能低下に与える影響の分析を可能にしている。これらの設備は2010年8月よりデータ収集を開始し、高効率太陽電池を含めた国内外の代表的な太陽電池モジュールの市販品の設置を進め、国内でも有数な屋外評価サイトになっている。

今後とも、高効率太陽電池を始めとする太陽電池モジュールの発電性能と長期信頼性の評価を継続し、電力系統に大量連系された太陽光発電システムの性能低下特性を明らかにして、中長期的に電力の系統運用に貢献していく予定である。



(a) 日射・気象観測とモジュール単体の評価



(b) 系統連系された太陽光発電システムの評価

図1 赤城試験センターの屋外評価設備

3-4-2 風力発電—出力予測と有効利用に向けた課題—

風力発電は、温暖化抑制対策として、太陽光発電と並んで大量導入のポテンシャルを有しており、我が国の導入量は2014年現在で、300万kW弱となっている（図3-4-2-1）。一方で、太陽光発電と同様に自然変動性をもつ電源であり、系統の安定性への影響が懸念される。

本節では、このような系統への影響を抑制するための、風力発電出力予測システム、および蓄電池による出力変動低減技術について述べる。また、将来的に期待されている洋上風力発電の導入に向けた課題について示す。



図 3-4-2-1 日本の風力発電導入量 (出典: 風力発電協会)

(1) 風力発電出力予測システム

風力発電は太陽光発電と同様、気象条件により発電出力が大幅に変化する（自然変動性）。このような電源の占める割合が増えると、電力系統の安定性への影響が懸念される。そのため、気象予測や数理的な手法を用いて、風力の発電出力を予測し、その変動に対応した電力の需給運用計画を立てることで系統の安定化をはかる研究が行われるようになった^{(1),(2)}。

当研究所では、欧州に比べて複雑な地形内に設置されることの多い日本のウィンドファームの発電出力を的確に予測するためのシステム NuWFAS-WinP を開発した。次いで、2006～2008年度のNEDO事業において、同予測システムにおける発電量予測精度の定量評価や国内モデルとの相互比較を行った⁽³⁾。さらに2014年度からの5ヶ年計画で進めている新たなNEDO事業においては、大きな予測誤差につながりやすい風力発電急変化現象（ランプ）に対応するための高度化を目指して研究開発を行っている。

本項目では、NuWFAS-WinPの概要とその評価結果、

および、新NEDO事業に基づく当所の開発計画の概要を示す。

a. NuWFAS-WinP 概要

次ページの図3-4-2-2に、本システムの構成を示す。

① 気象モデル

気象庁では一日に03、09、15、21時の4回の初期時刻に対して、84時間（21時については264時間）先までの全球数値予測を行っている。このデータは空間分解能20km程度であるが、これを受信して初期値・境界値を設定し、気象モデルNuWFAS^{(4),(5)}を用いて、9kmおよび3kmの格子で順次領域を狭めて、日本付近のみを対象とした計算を行う（ダウンスケーリング）。

② 局所風況予測モデル

NuWFASの計算で得られた風場を入力として、数値流体モデルNuWiCC⁽⁶⁾によりウィンドファーム内の風系を100m程度の格子で詳細に計算し、各風車位置における風速を得る。その際、風車の風上に別の風車がある場合その前面の風車による減速の影響を受けるため（風車後流、Wake）、過去の実験結果等に基づくWakeモデルを用いて補正も行う。

③ 統計モデル

過去における局所風況予測モデルの出力値と風車の観測データ（風速、発電出力）を用いて学習させた統計モデルにより、発電出力予測値を得る⁽⁷⁾。

④ 稼働予測モデル

各風車のモニタリングデータ（SCADAデータ）に含まれる発電出力の欠測、異常値、風速データの欠測、異常値、不整合などの判定条件から、風車の現時点での稼働状況を推定する。予測開始時の稼働状況がそのまま持続する扱いを、稼働予測とする。

⑤ ウィンドファーム発電出力予測

統計モデルによる発電予測出力結果と稼働予測の結果に基づき風車毎の正味の発電出力予測を行い、それを合計することでウィンドファームの予測値を得る。

b. 予測の評価結果

次ページの図3-4-2-3に東北地方に設置されたウィンドファーム（サイトA）の合計発電出力の1時間毎の予測値（赤点）と観測値（緑点）の比較例を示す。NuWFASは数時間スケールの速い出力変動成分を再現、

局所風況モデルは風車毎の違いの表現によりより現実的な変化を再現、統計モデルはバイアスや誤差を打ち消す、といったそれぞれ異なる特徴・役割をもつ各モデルを連係させることで予測再現性の向上がなされている。

表 3-4-2-1 に、翌日予測（予測時間 18～42 時間）の平均絶対誤差（MAE）とその改善率を示す。検証の対象としたのは、東北地方の A、B、H サイト、関東地方の J サイト、および九州地方の M サイトである。ここで、MAE は総発電出力の定格出力に対する比を % 単位であらわした。また、改善率とは、現在の発電出力が今後もそのまま継続するとする「持続モデル」を基準とした、誤差の改善の程度を表すもので、下記の式で定義する。

$$\text{改善率} = 1 - \frac{\text{MAE(本手法)}}{\text{MAE(持続モデル)}}$$

いずれのサイトも誤差は 20% 未満でありその平均は 17% を下回る。また、改善率はいずれのサイトにおいても 30% 以上で、その平均は 35% を上回る。

表 3-4-2-1 翌日予測のサイト別誤差 (MAE, %) と改善率 (%)

サイト	A	B	H	J	M	平均
誤差	17	17	18	15	17	16.7
改善率	41	36	34	39	33	36.6

c. 今後の開発計画

NuWFAS-WinP は、平均的予測誤差に関しては従来の予測手法に比べて改善していることが示された。しかしその一方で、国内他機関の風力発電予測システム同様、「大外し」と呼ばれる大きな誤差が稀に生じることが分かっており、改善に向けた課題となっている。現在当研究所では、大外しの原因の一つと考えられる発電出力急変化（ランプ）現象に着目し、振幅の誤差や発生時刻の誤差（位相誤差）を改善するため、NuWFAS-WinP をベースシステムとして、以下を開発・改良を行っている。

① 領域アンサンブル手法

当研究所では、予測の信頼区間を評価する目的で、NuWFAS を用いた領域アンサンブル予測を開発している⁽⁸⁾。アンサンブル予測とは、少しずつ異なる複数の初期値を用いて気象モデルにより、複数の結果を計算することである。アンサンブル予測の結果の広がり方、風力発電予測の信頼性情報を抽出する。

② 経験的手法の改良

統計モデルではポイントの風速のみを説明変数としていたが、500～1000km 程度の範囲の気象場を分類して、予測の説明変数として利用することで、予測精度の改善をはかる。また、発電出力の確率的予測や、ランプ現象の発生確率予測なども行う。

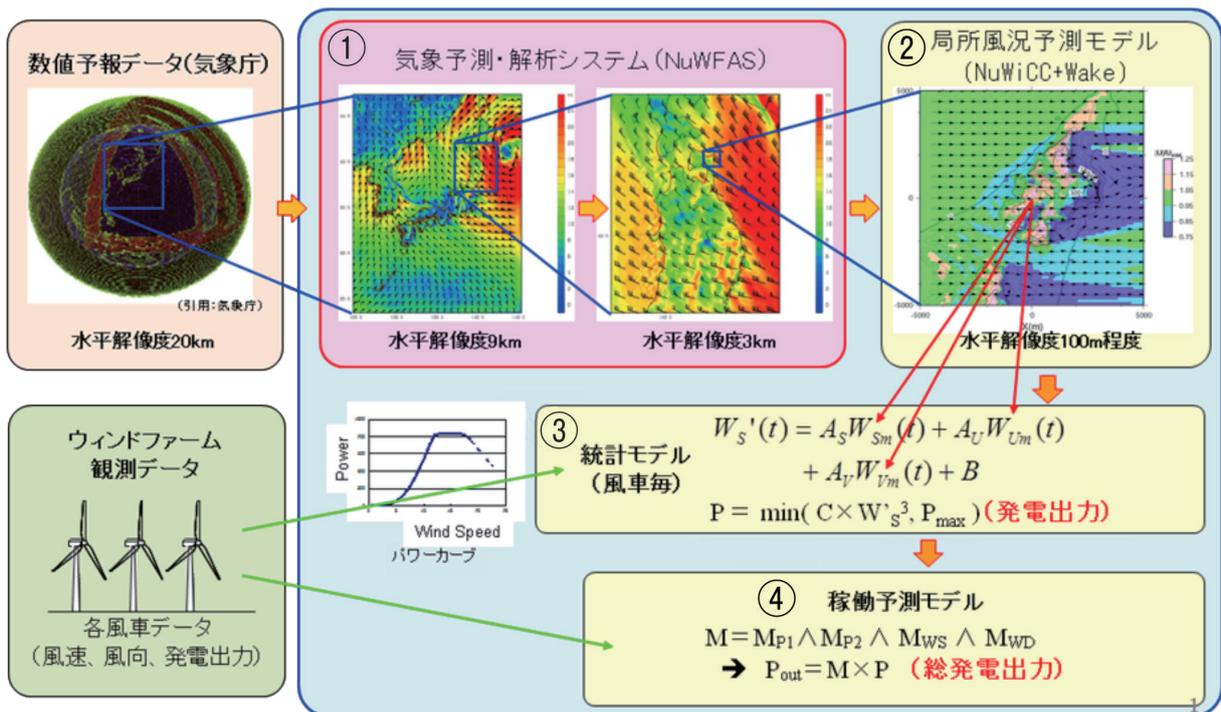


図 3-4-2-2 NuWFAS-WinP の概要（フロー図）

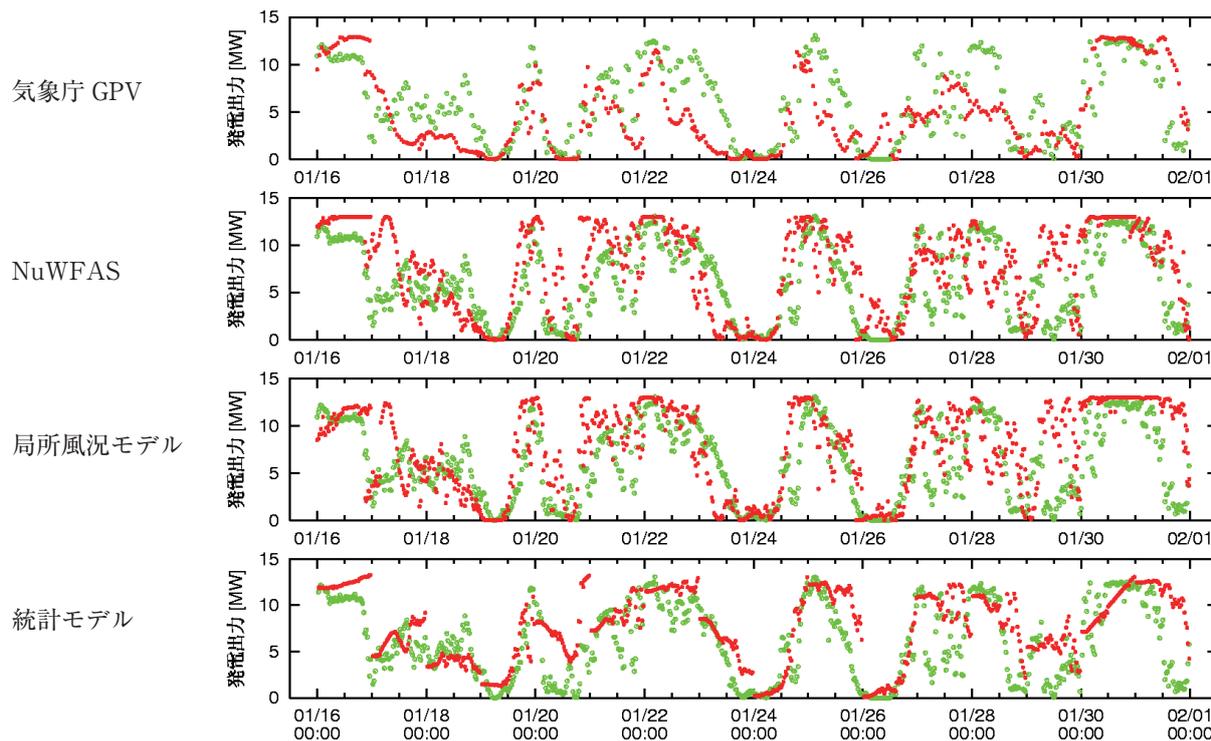


図 3-4-2-3 発電出力予測の比較。A ウィンドファームの合計出力で、赤点は予測値、緑点は観測値を示す。上から順にそれぞれ、気象庁 GPV、NuWFAS まで、局所風況モデルまで、統計モデルまでに基づく発電出力予測結果。

③ 局所風況モデルの改良

現状考慮されていない短い時間スケールの乱れの効果を考慮することで、強風時の安全対策としての風車停止（カットアウト）の発生確率の予測精度等を改善する。

④ ランプ現象の要因分析

長期再解析の高解像度（5km 格子）ダウンスケーリングデータを用いて、ランプ現象の発生しやすい広域気象場の条件などを分析し、予測精度改善を図る。

(2) 風力発電を大量連系する際の技術課題と対策

a. 風力発電出力の変動特性分析

風力発電の出力変動が電力系統に及ぼす影響の評価のためには、まずはその出力変動特性を明らかにする必要がある。特に、多数基の風力発電出力の合計による出力変動の平滑化効果については、影響を正確に評価する上で重要となる。このため当研究所では、風力発電機単位やウィンドファーム（以下、WF）単位での出力変動特性の分析に加え、出力変動の平滑化効果についても実測データに基づき分析を行ってきた。

例えば、NEDO 事業において北海道全域の 16 サイトに設置した約 30 本の観測ポストで風況観測を 1 年間実施し、風速の変動特性を分析した結果、2 地点間の離隔

が増すほど相関が低くなり、平滑化効果が高くなることを示した⁽⁹⁾。また、WF 内（2 地点間の離隔が数 km 以下）での平滑化効果は、変動周期 10 分以下の領域で見られ、周期 1 分以下では変動が独立で $1/\sqrt{N}$ 則が成立することを明らかにした⁽⁹⁾。

b. ウィンドファーム出力安定化用蓄電池の制御法

風力発電の出力変動対策の一つとして、蓄電池による出力安定化が期待されている。出力安定化の方法には、出力変動を平滑化する短周期変動緩和型と一定出力にする長周期フラット運転型とがある。当所では、WF 出力の短周期変動（変動周期 20 分以下）を WF に併設した蓄電池を用い平滑化する技術開発を行った⁽¹⁰⁾。次ページの図 3-4-2-4 にその概要を示す。同図の合成出力と蓄電池システム出力は、下式の合成出力目標値と蓄電池出力要求値に基づく。これを平滑化の基本制御と呼び、一次遅れフィルタの時定数 T を平滑化時定数と呼んでいる。

$$O(s) = \frac{1}{1+sT} G(s) \tag{3-4-2-1}$$

$$H_0(s) = \frac{1}{1+sT} G(s) - G(s) = \frac{-sT}{1+sT} G(s) \tag{3-4-2-2}$$

$$P(s) = G(s) + H(s) \quad (3-4-2-3)$$

ここで、 $G(s)$: WF 出力、 $O(s)$: 合成出力目標値、 T : 平滑化時定数、 $H_0(s)$: 蓄電池出力要求値、 $H(s)$: 蓄電池システム出力、 $P(s)$: 合成出力

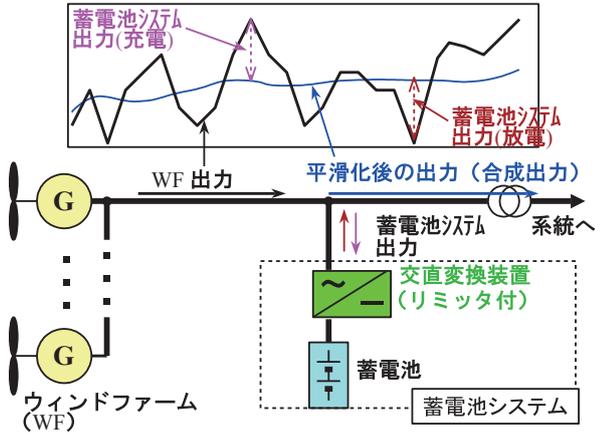


図 3-4-2-4 蓄電池併設ウィンドファームの概念図

蓄電池システムの運用時に最も重要な要件の一つに、蓄電池の充電レベルを運転可能な適正範囲に常に維持することが挙げられる。もしも適正範囲を逸脱すると蓄電池の運用に支障をきたすので、充電レベルが適正範囲の限界に近付いた場合には運転を停止しなくてはならない。このため当研究所では、充電レベルを維持するための残存容量フィードバック制御（以下、容量 FB 制御）を基本制御に組み込むことを提案した。また、容量 FB 制御の動作原理及び制御パラメータについての理論検討を行い、実測の WF 出力を用いたシミュレーションより容量 FB 制御の有効性を検証した。

以下にシミュレーションについて概説する⁽¹⁰⁾。図 3-4-2-5 の実測の WF 出力と、表 3-4-2-2 の三ケースの蓄電池システムのモデルを用い、WF 出力の平滑化を行った結果を図 3-4-2-6 に示す。なお、平滑化時定数は 30 分とし、蓄電池システムの出力範囲はどのケースも ± 6,000kW である。

容量 FB 制御を採用しない場合、定格 kWh 容量が小さい Basic (1h) ケースでは、残存容量が適正範囲を逸脱し、蓄電池システムの運転が停止した。定格 kWh 容量が大きい Basic (10h) ケースでは、残存容量は適正範囲内だが徐々に低下した。一方、容量 FB 制御を採用した SOC-FB (1h) ケースでは、定格 kWh 容量が小さ

表 3-4-2-2 シミュレーションケース

ケース	蓄電池システムの制御	蓄電池の定格 kWh 容量
Basic (1h)	基本制御	6,000kWh
Basic (10h)	基本制御	60,000kWh
SOC-FB (1h)	基本制御 + 容量 FB 制御	6,000kWh

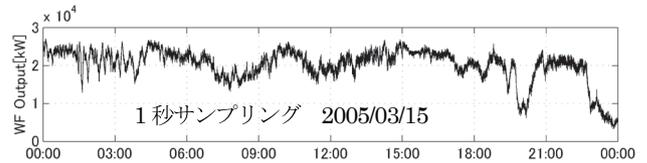
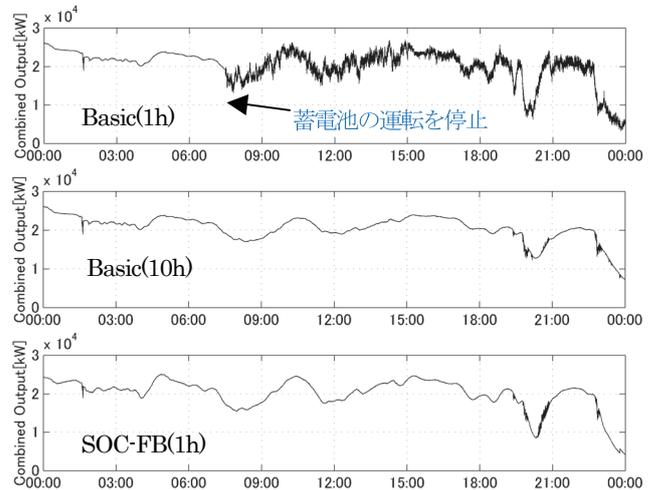
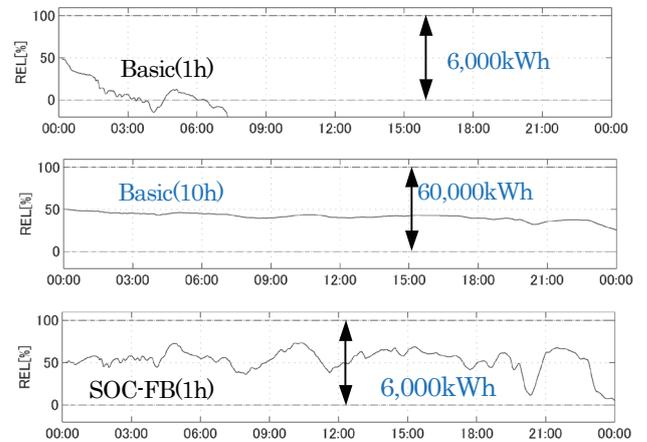


図 3-4-2-5 シミュレーションで用いた WF 出力



(a) 合成出力



(b) 充電レベル

図 3-4-2-6 シミュレーション結果

(注) REL: Remained Energy Level (残存容量)

くても残存容量は適正範囲を常に維持できている。

WF 出力および三ケースの合成出力のパワースペクトルを図 3-4-2-7 に示す。同図より、容量 FB 制御を基本制御に組み込んでも、平滑化の対象領域である変動周期が約 30 分以下（千数百秒）の領域では、定格 kWh 容量が 10 倍の基本制御のケースと同等の平滑化性能を有していることが分かる。

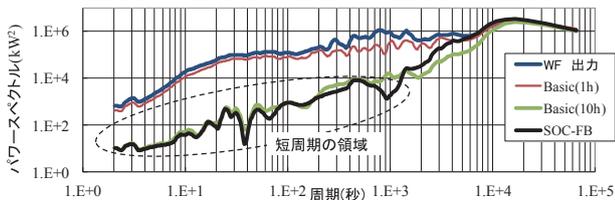


図 3-4-2-7 WF 出力と合成出力のパワースペクトル

c. ウィンドファーム出力安定化用の蓄電池の所要容量

蓄電池システムの設置には追加コストを要するため、併設する蓄電池の容量を最小限に留める必要がある。このため、蓄電池の所要容量についても検討を行った。

① 短周期変動緩和型蓄電池の所要容量⁽¹⁰⁾

短周期変動緩和型の蓄電池の所要容量を得るため、6 サイトの WF を対象にシミュレーション検討を行い、所期の平滑化性能を得るのに必要な蓄電池容量を見積もった。具体的には、1 年間分の WF 出力を用いて蓄電池システムの運用シミュレーションを行い、一ヶ月単位で結果を分析した。なお、6 サイトの WF による結果の違いは、蓄電池の所要容量が取り得る範囲となる。

平滑化時定数を 30 分、60 分、120 分とした結果を図 3-4-2-8 と図 3-4-2-9 に示す。なお、WF の定格出力を 1pu、WF の定格出力で 1 時間分の電力量を 1puh としている。

図 3-4-2-8 は平滑化時定数と蓄電池の kW 容量の各組合せで得られた合成出力の変動の大きさを示す。同図では、変動の大きさの指標として、出力変動幅（時間窓:20 分）の月間 99.7 パーセント値の年間最大値（最大出力変動幅）を用いた。同図から、所望の平滑化性能を得るための所要 kW 容量が分かる。

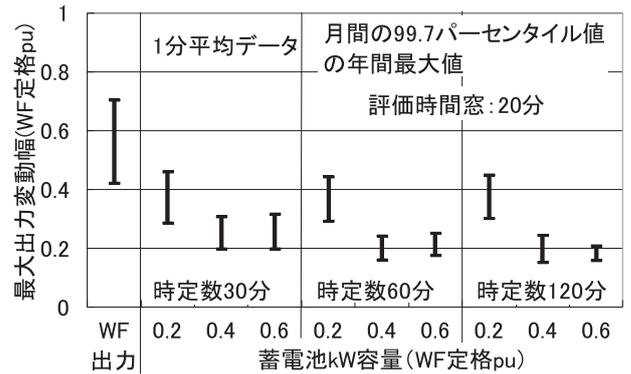


図 3-4-2-8 各蓄電池 kW 容量での合成出力の最大出力変動幅

図 3-4-2-9 は平滑化時定数と蓄電池 kW 容量の各組合せに対する所要 kWh 容量を示す。所要 kWh 容量は一ヶ月内での充電レベルの最大値と最小値の差分の年間最大値とした。容量 FB 制御を採用したことにより、所要 kWh 容量を理論上の最大値よりも小さくすることができた。

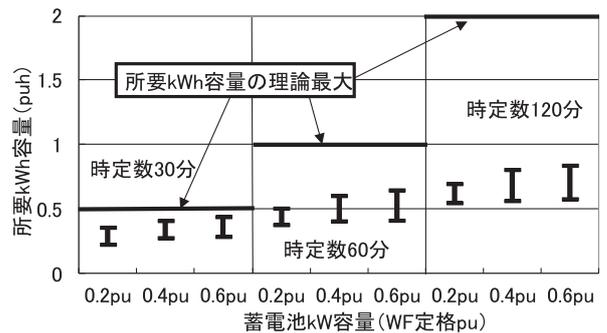


図 3-4-2-9 蓄電池の所要 kWh 容量の範囲

② 長周期フラット運転型蓄電池の所要容量⁽¹¹⁾

長周期フラット運転型の蓄電池については、WF 出力の予測値を合成出力と仮定し、実際の WF 出力との差分を蓄電池で補償するための所要 kWh 容量を評価する手法を提案した。具体的には、WF 出力の予測誤差の自己共分散関数を用いて評価した予測の累積誤差の標準偏差をもとに、充電レベルの近似関数式を作成した。

ドイツにおけるある送電系統運用者の制御エリア内の総風力発電出力の予測誤差の統計的性質について分析を行った結果、出力予測の精度が比較的高い場合には、充電レベルの最大に近い変動量、すなわち所要 kWh 容量は 9.6puh 程度、予測誤差が多少大きい場合の所要 kWh 容量は約 16.2puh と見込まれることを示した。

d. 小規模離島における風力発電導入対策⁽¹²⁾

小規模離島を対象とした風力発電導入対策を目的として、風力発電による系統周波数変動への影響をフライホイール（以下、FW）で緩和するためのFWの制御方式を、実測データを基に開発した。

小規模系統に風力発電を導入した場合の大きな特徴は、風力導入比率が極めて高い値になりえること、風力発電が近接することにより、平滑化効果があまり見られないこと、秒～数十秒オーダーの風力発電の出力変動が周波数変動に大きな影響を与えること、である。FWの有無による違いをシミュレーションで検討した結果、FWが無い場合には風力発電出力の急上昇に伴い内燃力発電機がモータリング運転を行わざるをえない場合があったが、風力発電出力の短周期成分の補償に特化した制御を採用したFWにより、周波数変動抑制以外に、内燃力発電機のモータリングの阻止にも貢献でき、高い風力導入比率を達成できることを示した。

(3) 洋上風力導入に向けての課題

2014年現在、世界の洋上風力設備容量は8GWを超えており、大規模な開発が続く欧州では、毎年1GW程度が新設されている。欧州風力エネルギー協会（EWEA）では、2020年までに19.5～27.8GWを導入目標としており、これは欧州の電力需要の2.4～3.5%に相当する。

一方、わが国の場合、陸側からアクセス可能な防波堤・護岸の前面海域に小規模な発電所が建設されてきた。2014年度、わが国のFITに洋上風力の区分が新設され、洋上風力は「建設及び運転保守のいずれの場合にも船舶等によるアクセスを必要とするもの」と定義された。一部の実証研究用発電風車を除き、FITに適合するような本格的な洋上風力発電所は、わが国ではまだ事業化されておらず、計画段階のものが2、3ヶ所あるのみである。

環境省^{(13),(14)}や経済産業省⁽¹⁵⁾では風力エネルギーの「賦存量」、「導入ポテンシャル」、「導入可能量」をそれぞれ調査している。導入ポテンシャルとは、「自然要因や法規制による制約を受ける開発不能地域を除いて算出したエネルギー量」と定義され、自然要因の導入不可条件として、風速6.5m/s以下、水深200m以上、離岸距離30km以上が用いられる。導入可能量とは「経済性を考慮して、導入ポテンシャルから絞り込んだエネルギー量」である。一方、賦存量とは、上記のような制約を考

慮せずに、風況等から理論的に算出されるエネルギー量である。以下では、導入ポテンシャルや導入可能量に関する考察から、わが国における洋上風力発電の課題について述べる。

図3-4-2-10は、2-2節のコラム4で述べた気象・気候データベースを基に、100m高度での年平均風速を算出した一例である。太平洋側の一部には10m/sを超える海域も見られるが、多くの海域では8m/s前後である。例えば北海の場合、年平均風速が7～8m/sの海域での風車設備利用率は約28%であるが、9.5m/sの海域では40%と大きく改善することが報告されている。このことを考慮すると、わが国周辺海域は、必ずしも風況に恵まれているとは言えない。

欧州の洋上風力発電所は、北海とバルト海に多く建設されており、それぞれの海域の広さは約75万km²、38万km²、平均水深は約90m、55mと非常に浅い。一方、日本海の面積（約100万km²）は、北海とバルト海を合わせた面積に匹敵するが、平均水深は約1700mと深く、ほとんどの海域が水深200m以上の開発不能海域である。太平洋側でも建設可能な地域は沿岸部に限られる。更に太平洋側では、波浪にうねり成分が多く含まれるため、建設や維持管理のコストが増加する。

導入ポテンシャルに関係する法規制にも課題がある。わが国の海には「区域指定海域」と「一般海域」があり、前者は様々な法律により管理者が定まっており、その者が海域の使用に対する許可を与えることになっている。一方、後者は、誰が海域を管理し、誰の許しを得れば海域を使用できるのかということが明確になっていない。沖合だけでなく、陸地に近い海域にも一般海域は存在するため、漁業権等を巡る利害調整などについて困難な事態が発生することも予想される。洋上風力の推進には、海の管理に関する制度の整備が不可欠である。

わが国の場合、実証研究用発電風車の建設事例やフィージビリティ研究による経済性の試算しかないため、経済性を考慮した導入可能量の評価は難しい。英国の洋上風力発電所の場合、資本費に占める工事費の割合は26%程度であるが、わが国の試算結果では50～60%、発電所規模が大きな場合でも40%程度と大きい。

欧州の場合、洋上風車設置のための設置船やアクセス船が多数あり、大型風車の荷役が可能な港湾インフラも整備されている。これらは、北海でのオフショア石油・

ガス事業をベースに、長年かけて整備されてきたインフラを活用・転用したものであり、コスト低減に寄与している。いずれにしても、工事費の削減がわが国での事業成立性のポイントとなる。

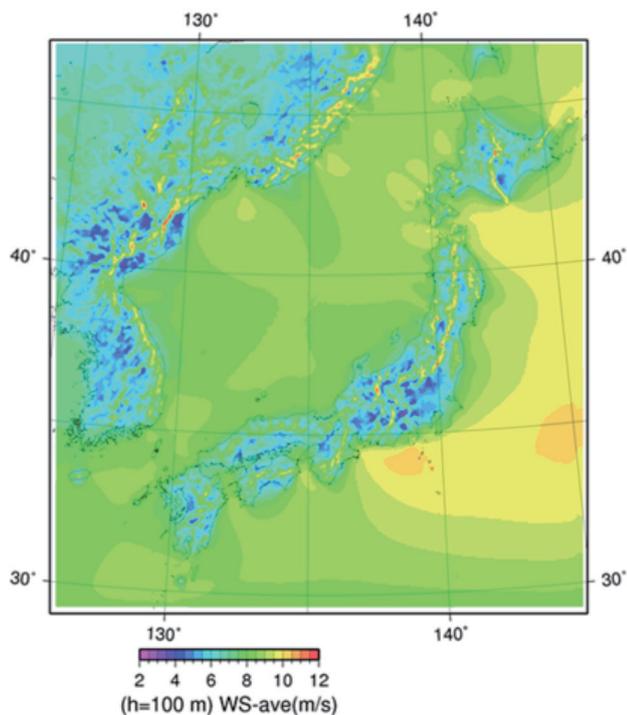


図 3-4-2-10 高度 100m での年平均風速 (1989 ~ 2010 年)

3-4-3 地熱発電

(1) 地熱開発の動向

地熱発電は 1913 年に世界で初めてイタリアのラルデレロで発電所が建設されて以来、世界各国で発電所の建設が進められた。特に 1970 年代の 2 度にわたる石油危機により国産エネルギー開発および自然エネルギー開発として地熱開発も注目され、米国はじめニュージーランドや日本で積極的に開発が進められた。米国では 1990 年代初めには 3GW 程度までの発電所が建設され、将来の大規模地熱開発として高温岩体発電技術やマグマ発電技術の研究開発も進められた。しかし、1990 年代後半から石油価格の安定化や景気の低迷などにより、地熱開発も低迷した。一方、アイスランド、インドネシア、フィリピン、メキシコなどでは 1990 年代に急速に地熱開発が進み、1995 年から 2010 年にインドネシアでは 887MW、フィリピンでは 677MW の地熱発電所が建設され、2015 年の世界全体の設備容量は約 12.6GW となっ

ている⁽¹⁾。

わが国では岩手県の松川地熱発電所が 1966 年に運転が開始されたのをはじめ、1970 年代には国の大規模プロジェクトであるサンシャイン計画で研究開発が進められ、当時の新エネルギー総合開発機構 (旧 NEDO) を実施主体として国内の地熱資源調査をはじめ、企業の開発リスク低減のための地熱開発促進調査や、将来の地熱開発技術としての高温岩体発電技術、大規模深部地熱資源開発、可採量増大技術、バイナリー発電技術など国を挙げて開発が進められた⁽²⁾。その結果、1996 年には国内の地熱発電設備容量が 500 MW を超えるに至った。しかし、その後 1997 年の「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法 (新エネ法)」で新エネルギーの枠から地熱が外されたり、2003 年の「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法 (RPS 法)」では対象がバイナリー発電に限られるなど、国の地熱開発への支援が低下した。また、景気の低迷や石油需給の安定により発電コストが重視されたこともあり、民間企業の投資も進まず 1990 年代後半から 2000 年代は地熱開発が停滞した。その上、既設発電設備の老朽化や蒸気生産量の減衰などもあり、1997 年をピークに年間の発電電力量は低下している (次ページの図 3-4-3-1 参照)⁽³⁾。さらに、2010 年の行政事業レビューでは地熱開発促進調査と地熱発電開発補助金が「廃止または抜本的見直し」とされた。

ところが、2000 年代後半になって、地球温暖化対策として再生可能エネルギーの開発が注目されるようになった。特に米国では 2006 年にマサチューセッツ工科大学 (MIT) の J. Tester 教授が中心となってまとめた「The Future of Geothermal Energy」⁽⁴⁾ が米国議会などで関心を集め、2009 年にはオバマ政権が US\$300M の予算を地熱開発に付け、再び地熱開発が進められるようになった。ネバダ州では地下 500 ~ 1,000m 程度に大量の熱水が流れていることがわかり、これをポンプでくみ上げてバイナリー方式による大規模な発電所の建設が進められた。また、既存地熱発電所では The Geysers (カリフォルニア州ガイザース地熱発電所) において上記の生産量が減衰する現象が顕著となり、この対策として貯留層に地表から水を補充するためのプロジェクトが後述する EGS として進められるようになった⁽⁵⁾。

一方、ヨーロッパでもイタリアやアイスランドのよう

に火山に起因した天然の地熱貯留層を利用した発電所に限らず、ドイツやフランスあるいはオーストラリアのように高温岩体発電技術やEGS技術により、高温の岩盤からの熱抽出による発電所の建設が進められている。

我が国においても、2010年頃から地球温暖化対策として再生可能エネルギー開発への関心が高まり、RPS法の見直しも進められた結果、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（FIT）」が2011年8月に成立し、2012年7月から実施された。FITにおいて地熱発電は、15 MW以上の調達価格は1 kWh当たり27.3円で、15 MW未満は同42円（いずれも税込みで調達期間は15年間）と高い価格が設定された。

また、2011年3月の東日本大震災とこれによる福島第一原子力発電所の事故により、エネルギー政策の見直しが行われた結果、国の地熱開発関連の予算も2011年度の4.89億円から2012年度は90.5億円（出資、債務保証は含まず）と一気に増え⁽²⁾、2015年度の経済産業省の資源・エネルギー関係の予算は総額167億円となっている。特に注目されるのは、地熱開発理解促進関連事業支援補助金として、地熱の有効利用などを通じて地域住

民への開発に対する理解を促進することを目的として行う事業に対する補助のため28億円が付けられている。

さらに、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の事業の内、地下開発に関わる補助金、出資金、債務保証、技術開発は、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）に移り、NEDOは地上設備などを担当することになったが、最近では新たな技術開発などイノベーション事業としてNEDOより研究開発の公募がなされている⁽²⁾。

一方、環境省では地球環境局地球温暖化対策課により、2010年度に再生可能エネルギーの導入ポテンシャル評価が行われ、その後もその精度を高める検討が行われている。また、「地球温暖化対策技術開発等事業（競争的資金）」では、温泉発電などの開発事業を行っている。自然環境局では2012年に都道府県知事への通知の中で、国立・国定公園内における地熱開発の取り扱いとして、第2種及び第3種特別地域については原則として地熱開発を認めないが、地熱開発の行為が小規模で風景観等への影響が小さいものや既存の温泉水を用いるバイナリー発電などで、主として地域のエネルギーの地産地消のために計画されるもの等については、普通地域、

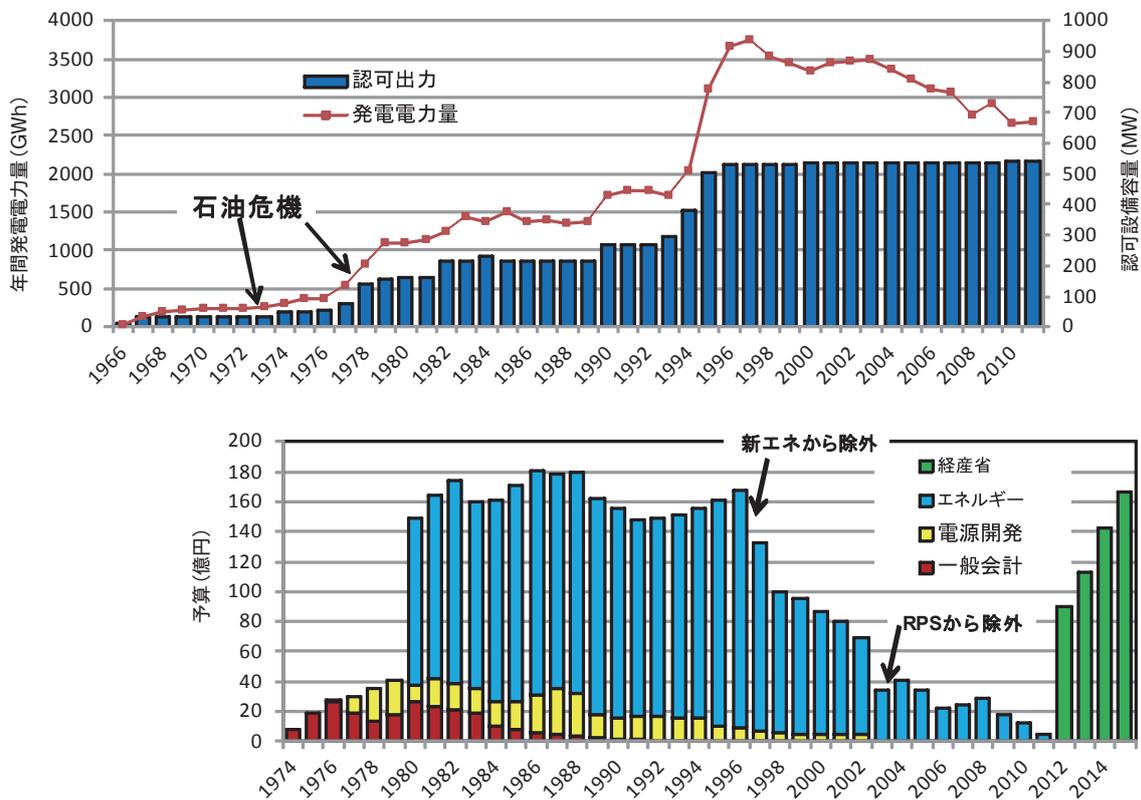


図 3-4-3-1 我が国の地熱発電認可設備容量と発電電力量（上図）、国の地熱関連予算の推移（下図）

第2種及び第3種特別地域においても、自然環境の保全や公園利用への支障がないものは認めるとした。そして、2015年7月には第1種特別地域の地下へも傾斜堀などでのアクセスを認めることになった。さらに、自然環境局は2012年に「温泉資源の保護に関するガイドライン（地熱発電関係）」を出し、坑井掘削申請に対する温泉審議会での検討の目安を示し、構造試錐井や還元井の掘削は温泉審議会での許可を不要とした。

業界としては、2012年12月に日本地熱協会が発足し、①地熱発電全般に関する調査研究、②政府その他関係機関に対する提言と陳情、③地熱発電全般に係る会員相互の情報交換、④地熱発電に対する理解の促進と広報、を主たる事業としている。このような背景のもと、新たな地熱開発が各地で進められており、2015年に大分県九重町で5 MWのバイナリー発電所が運転を開始し、秋田県湯沢市では42 MWの地熱発電所が2019年の運転開始を目指して建設が進められている。

また、温泉水などを利用した数kWから数百kWの小規模なバイナリー発電を利用した小規模地熱開発は、発電所の建設期間も短くFIT価格も高いことから、温泉事業者をはじめいろいろな企業により開発が進められている⁽⁶⁾。国内のメーカー各社も工場の廃熱利用などの目的からバイナリー発電の機器開発を進め、10 kWから数千kWまでの各種発電機が開発されている。なお、300 kW以下の小規模地熱発電については、ボイラー・タービン主任技術者の専任の規制緩和により、発電コストの削減が図られている。

(2) 地熱発電の社会的受容性

地熱発電の普及拡大には、利害関係者の理解や協力が重要であり、社会的受容性が大きな影響を及ぼす。これまでの調査結果から、地熱発電に対する受容性は、開発規模により異なることを明らかにしてきた（次ページの図3-4-3-2）。

小規模（概ね2 kW以下）の場合、受容性は比較的高い⁽⁷⁾。地元の温泉事業者や自治体が発電事業者になればFIT収益を享受でき、新規掘削がなければ投資回収も短く、省エネ・経費削減効果もあるためである。一方、発電だけでは経済性の確保が難しい場合も多い⁽⁸⁾。このため、発電後の熱水利用（浴用、プール、農水産業、暖房、融雪、木材乾燥、足湯、調理等）による事業性向上

や観光資源としての役割など地域活性化も期待されている。むしろFIT収益や地域活性化への期待が過剰に高い地域や、温泉地に複数の開発事業者が参入して既存温泉井との相互干渉や利害調整が懸念される地域もある。地熱発電事業に詳しくない温泉事業者や企業の開発事例も増加中のため、JOGMECではガイドラインを策定し、地域と共生した発電事業を推進している⁽⁹⁾。また、乱開発を懸念して複数の自治体が条例や要綱を制定し慎重な開発を求めている。深度の浅い温泉井を用いる場合、還元井を設けない場合が多く、環境アセスメントも必要ないため、地下資源の収支バランスを崩さないことや周辺環境への配慮が一層重要である。地元の期待が大きいために、今後、失敗・中止事例が増えれば受容性にも影響を及ぼしかねないため、開発には重々留意が必要である。

一方、大規模（15万kW以上）の場合、発電事業者は主に電力会社や大企業である。既設発電所では、自治体や温泉事業と地域共生実績があるものの、周辺環境の影響を懸念する一部の温泉事業者、自然保護団体、自治体等の反対により計画通りに進んでいない事例も複数存在する。受容性が低い要因は複数あるが（次ページの図3-4-3-3）、温泉に悪影響が起きた場合の可逆性や将来的な温泉影響の不確実性に対する懸念・不安が大きい^{(10),(11)}。従って、リスク評価結果など科学的な情報共有だけでなく、万一、温泉や自然環境に影響があった場合に備えたりリスク対策オプション（低減・回避・保険等）、地熱開発の意義や地域便益についても予め十分協議することが重要である。

一方、開発規模に関わらず、井戸の掘削手続きは温泉法に従うため、都道府県知事の許認可が必要である。地熱発電開発に係る国の補助金を得る際にも自治体の賛成・協力が必要条件にある。自治体にとっても温泉は重要な観光資源であるため、地熱資源ポテンシャルが高くても自治体が反対すれば開発は進まず、資源量と受容性は相関関係にない。開発事業者と地元関係者との対話の場の設置は自治事務の範疇とされており、地熱開発の意思決定には自治体の受容性や協力が鍵となる。当研究所にて地熱エネルギー利用に対する全国自治体の意識を調査した結果⁽¹²⁾、新たな温泉や地熱発電所の開発に対しては賛否両論であった。推進派も反対派と同様に温泉に対する懸念はあったが、反対派に比べ地熱発電の特性を高く評価していた。従って、立地地域の具体的な便益や

成功事例等の情報提供による理解促進が重要と考えられる。経産省では2014年度から「自治体連絡会議」を設置しているため、今後の情報共有・交換の推進が期待される。

一般市民に関しては、東日本大震災前と比べて地熱発電に対する認知度や受容性は増加傾向にあるが、技術特性等の情報を得る機会が十分ではない^{(13),(14)}。温泉事業者や自治体にとって、温泉利用客は最も重要な顧客である。また、今後地熱発電と温泉事業との地域共生を目指す上で観光客増加による地域活性化は重要である。一般市民を対象としたアンケート調査の結果、温泉顧客層（旅行先として温泉を好む層）の方がそうでない顧客層よりも地熱発電に対する受容性は高い傾向にあったため^{(13),(14)}、温泉客などを対象とした効果的な情報提供など、認知度を更に高める工夫が望まれる。

以上のように、地域の価値観・懸念等も含め、十分に情報や意見を交換しながら継続的に関係者間の相互理解と信頼関係を向上していくことが重要である。地域の地熱資源の有効活用という点から、発電だけでなく熱の直接利用も鑑み、資源量と地域事情に見合った持続可能な事業戦略を考え、成功事例を増やしていく必要がある。

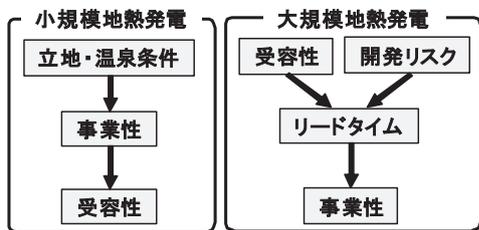


図 3-4-3-2 地熱発電開発の各障壁に関する規模別の相違点⁽⁷⁾

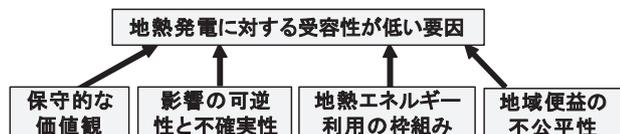


図 3-4-3-3 地熱発電開発に対する温泉事業者の受容性規定要因⁽¹⁰⁾

(3) 地熱増産システム (EGS) 技術

従来の地熱発電では、断層や破碎帯など天然の亀裂を通して地下 1,000 m ~ 3,000 m に浸透した雨水が、マグマの熱で加熱され熱水や蒸気のたまり場（貯留層）として存在する、いわゆる熱水系地熱資源を開発の対象としている。この雨水を起源とする熱水の貯留層への供給

と蒸気や熱水の生産量がバランスすれば、気象の変化に影響されず安定した出力の発電ができる。しかし、地下深部の貯留層の探査は容易でないため探査リスクが大きく、蒸気を取り出すための坑井掘削も 1 本で数億円掛かることから開発コストも大きい。また、地域によっては熱水や蒸気に含まれる化学成分により、坑井や配管などの腐食およびスケールによる目詰まりによるトラブルが生じたり、貯留層内への天然の熱水供給量と蒸気生産量のバランスが取れずに蒸気の生産が減り、発電量が減衰したりする場合もある。

近年、①蒸気生産量が減り発電量が低下した発電所において人為的に貯留層に水を供給したり、②透水性が低く蒸気生産性が悪い貯留層の周辺に人為的に亀裂を造成して透水性を改善させたり、さらには③人為的に貯留層を造成したりすることにより、地熱開発のリスク低減および開発規模の拡大を図る試みがなされている。これは、石油開発において生産が低下した貯留層に水蒸気や二酸化炭素を注入して石油を増産させる石油増進回収 (EOR: Enhance Oil Recovery、以下、EOR) と同様な概念であることから、地熱増産システム (EGS: Enhance Geothermal System、以下、EGS) と呼ばれている⁽¹⁾。ここでは、EGS を 3 つのタイプに分けて開発の現状と技術的な課題について、適用事例も含めて概説する⁽¹⁵⁾。

a. 貯留層涵養 EGS

米国カリフォルニア州のガイザース地熱発電所では 1987 年までに約 2,000 MW の設備が建設され、約 1,500 MW の発電が行われていたが、その後蒸気生産量が減衰し、1990 年には 900 MW 程度まで発電量が低下した。この原因について検討した結果、貯留層内の温度や蒸気の乾き度が増加したほか、熱水の酸性化が生じたりしていることから、貯留層内の熱水量の減少によるものと判断された。そこで、地表から貯留層に水を注入し、貯留層内の熱水量を補充（涵養）するプロジェクトが米国エネルギー省 (DOE) の補助も受けて EGS として進められている。貯留層へ注入する水は発電所近傍の都市の排水で、約 60 km パイプラインで輸送して 1 日あたり約 5 万トン注入することにより、蒸気生産量の低下が収まりつつある。また、地表水の注入により地下の溶存成分の濃度低下も認められ、酸性化による生産域の減少対策にも効果が期待されている。この貯留層への水の

注入の概念を図3-4-3-4に示す⁽⁵⁾。このように天然の貯留層内の熱水量を人為的に涵養する技術を、ここでは貯留層涵養 EGS と呼ぶ。イタリアのラルデレロ地熱発電所でも生産蒸気量の減衰対策にこの技術が適用され、効果が認められている⁽¹⁶⁾。また、わが国においても、この実証実験が2014年度より福島県柳津西山地熱発電所で開始された⁽¹⁷⁾。

この技術では、貯留層内外の熱水の流動状況を精度良く把握して、注水箇所および流量を設計する必要がある、注水の仕方を誤ると貯留層や生産蒸気が急速に冷えてしまう危険がある。貯留層を貫く坑井の検層による物性値評価、坑井間の透水試験やトレーサ試験結果に基づく貯留層のモデル化、数値シミュレーションによる現状評価と注水した場合の予測技術などの確立が課題である。

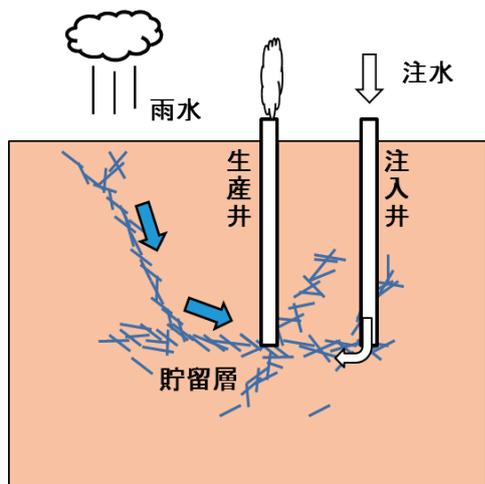


図3-4-3-4 貯留層涵養 EGS の概念

b. 透水性改善 EGS

フランスのライン川沿いにあるソルツでは、地下5,000 m程度で約200℃の岩盤内にある既存の亀裂を人為的に拡大させて岩盤の透水性を高め、生産井内に設置したポンプで熱水を汲み上げて発電を行い、発電後の水は別の坑井（注入井）で地下に戻すシステムの構築を EGS として実施している⁽¹⁸⁾。また、米国コソ地熱発電所では、既存の貯留層より深部の岩盤に亀裂を造成し、貯留層を拡大させる試みも EGS として実施された⁽¹⁹⁾。このように貯留層の内外の岩盤の透水性を改善させることにより、蒸気や熱水の生産量を増大させる技術を、ここでは透水性改善 EGS と呼び、その概念を図3-4-3-5に示す。図中の黄色の亀裂が新たに造成したものである。ドイツ

ではこの方法によりランダウ、ウンテルハヒン、インスハイムなどでそれぞれ3 MW、3.36 MW、5 MWの発電所が運転されている⁽¹⁵⁾。また、オーストラリアのクーパーベイズンでもこの方法により深さ4,400 m級の坑井を用いて1 MWの発電実験が行われた⁽²⁰⁾。

この技術では、天然亀裂の透水性を高めるために効果的な水圧破碎などの亀裂拡大、亀裂の進展状況を精度良く把握するための AE 観測などの亀裂評価、透水性改善効果の評価などの技術の確立が課題である。

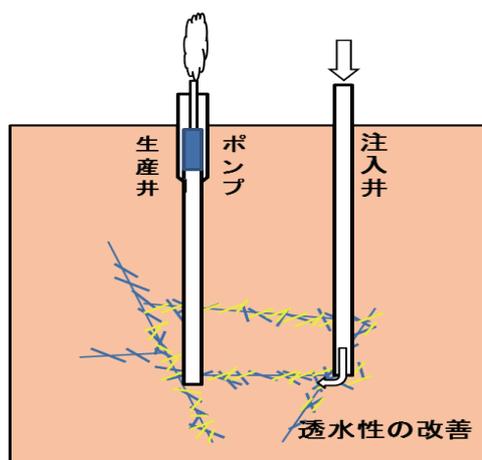


図3-4-3-5 透水性改善 EGS の概念

c. 貯留層造成 EGS

米国オレゴン州のニューベリーでは、火山近傍において高温ではあるが透水性が低く、熱水や蒸気が存在しない岩体からの熱抽出を EGS プロジェクトとして、米国 DOE の補助を受けて開発を進めている⁽²¹⁾。この技術をここでは貯留層造成 EGS と呼び、その概念を次ページの図3-4-3-6に示す。これは従来高温岩体発電（HDR: Hot Dry Rock）と呼ばれた技術と同様の概念である。温度は高いが天然の開口亀裂や熱水がほとんどない結晶質の岩盤（高温岩体）に注入井を掘削し、この坑井から水圧破碎などにより人工的に貯留層を造成する。この貯留層を貫くように生産井を掘削すれば、地表から貯留層に圧入した水が、岩盤の熱で加熱され蒸気や熱水となって生産井から回収され、水の循環による熱抽出のシステムができる。米国のニューメキシコ州フェントンヒルなどでもこの方法により熱抽出が可能なが示されている⁽²²⁾。

この技術では、大規模な貯留層を造るための多段貯留層造成、水の循環中の貯留層の広がりや透水性の変化、

10年～20年程度の長期にわたる熱抽出の安定性の確保、建設・維持コストの低減が課題となっている。

最近、我が国では地熱開発が安定した発電が可能な再生可能エネルギーとして、FITをはじめ国の支援を得て開発が進められているが、地下深部の評価は依然容易でなく、そのための開発リスクやコストが大きい。これらを低減するため、上述したように天然の貯留層に人為的に水を注入したり亀裂を造成したりすることにより開発の不確実性を低減させるための技術開発が進められている。これらの技術の確立により、地熱開発のリスクやコストの低減がはかれ、今後FITが見直されても地熱開発が進むことを期待したい。

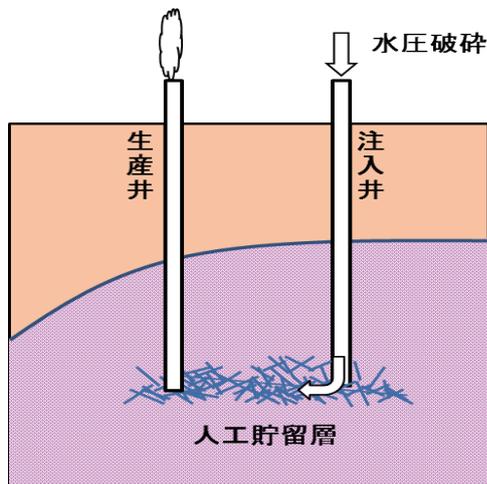


図 3-4-3-6 貯留層造成 EGS の概念

(4) ハイブリッド熱源地熱発電技術^{(23), (24)}

本技術は、NEDO との共同研究事業として開発を進めている。

NEDO では、2011 年の東日本大震災以降、再生可能エネルギー導入拡大が望まれる中、世界第3位となる地熱資源を有する我が国では、ベース電源として活用可能な地熱発電が大きな注目を集めている⁽²⁵⁾。そのため、地熱資源の有効活用のための、環境配慮型高機能地熱発電システムに係る機器開発、現状未利用である低温域でのバイナリー発電システム開発、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する技術開発等により、我が国の地熱発電の導入拡大を促進するための事業（平成25年度～29年度[平成26年度予算14億円]）を掲げている⁽²⁶⁾。

a. 地熱発電の課題

一般的な地熱発電では、貯留層より汲み出した地熱蒸気をタービンにて仕事をさせ、電気出力を得る。地熱蒸気は日本国内においては概ね 0.5MPa 前後の飽和蒸気であるため、地熱発電では高い熱効率は望めず、汽力発電の熱効率（タービン効率）が約 46% であるのに対し、地熱発電の熱効率は 17% 程度^(注1) と効率の低いシステムとなっている。また、地熱発電システムのタービンは飽和蒸気タービンであることから、タービン入口のノズル部において、特にシリカスケールの析出が、タービン後段においては湿度が増加し、水滴が発生することによるエロージョンが大きな問題となる。近年では、地熱井の探査技術や掘削技術などが発達したため、比較的深部にある地熱資源が開発されるようになり、地熱蒸気圧力が 2MPa 程度まで増加する傾向にある。タービン入口の蒸気圧力が上昇すると、タービン最終段における湿度は益々増加し、前述のエロージョンは益々厳しいものとなるため、ドレンポケットやエロージョンシールドなどの対策を強化する必要がある。

注1) 蒸気井より 0.5MPa 飽和蒸気のみが生産されるものとし、タービン断熱効率は 80%、真空度は 700mmHg（冬期）と仮定した場合における熱効率。ここで、熱効率は以下の式で定義した。

$$\text{熱効率（発電効率）} = \text{発電端出力} / \text{地熱蒸気の総熱量}$$

b. ハイブリッド熱源地熱発電システム

本事業で技術開発するハイブリッド熱源高効率発電システムは、地熱エネルギーと、バイオマスを始めとする他の未利用エネルギーとを効果的に組み合わせることによって、従来の地熱発電システム以上の高効率化を期待するものである（図 3-4-3-7）。具体的には、バイオマス燃焼熱などを外部熱源として利用し、タービンに流入する地熱飽和蒸気を過熱することによって、熱効率 20% 超を狙う。本システムでは、タービンを通過する蒸気が過熱蒸気となることから、従来システムで問題となっているタービンにおけるエロージョンの抑制が期待できるとともに、バイオマス利用の場合、バイオマス発電設備と、地熱発電設備とを別々に建設した場合に比べ、タービン、復水器、冷却塔などの設備を共用できることから経済性に優れる、などの利点を有する。

3-5 省エネルギー技術

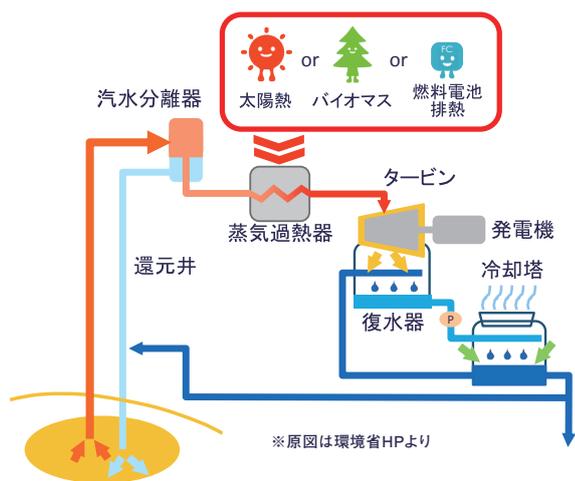


図 3-4-3-7 ハイブリッド熱源地熱発電システム

c. システムの成立性評価

地熱とバイオマスとのハイブリッド熱源発電システムについて、新設ベースで性能、立地優位性などの観点からシステムの成立性を評価するため、3,000kW 級地熱発電プラントを対象として、システム性能および発電原価の試算を行った。その結果、バイオマス投入熱量に対する発電システムの増出力量（送電端）で定義される発電効率は、同規模のバイオマス専焼発電システムの送電端効率よりも高く、発電原価は間伐材由来の木質バイオマスのFIT 価格42円/kWhを下回りうることが分かった。今後は、電気事業への理解促進を目的としたヒアリングを継続して実施し、ハイブリッド熱源発電システムの電気事業における商用化を目指す。

エネルギー使用に伴う化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素 (CO₂) は、人為起源の温室効果ガス (GHG) 総排出量の過半を占め、地球温暖化の最大要因である。

よって、エネルギー使用の合理化 (= 省エネルギー、以下「省エネ」と略す) は、地球温暖化抑制策として極めて重要な意味を持つ。その一方、省エネは不特定多数の消費者による実践に立脚するため、その確実性を担保することが難しい。

省エネを確実に推進するためには、「エネルギーの使用の合理化等に関する法律 (省エネ法)」をはじめとする法制度とあいまって、エネルギー使用機器の高効率化や合理的なエネルギーの使用へ誘導する手法など、ハード・ソフト両面での技術開発が必要となる。

当所においては、電気の有効利用の観点から、長年にわたり省エネルギー技術に関する研究に取り組んでいる。表 3-5-1 に、当所で取り組んでいる省エネルギー技術を示す。

ハード面の技術開発は、ヒートポンプが主な対象である。GWP(地球温暖化係数)の低い冷媒の使用や COP(成績係数 = 機器効率)の向上などを通じた、省エネ、地球温暖化抑制を目指して、機器開発に取り組んでいる。

一方、その他の分野については、各種設備の性能評価、省エネ評価ツールや省エネ技術普及支援ツールの開発、情報提供による省エネ推進など、ソフト面の技術開発が

表 3-5-1 電力中央研究所が取り組む省エネルギー技術

分野	省エネルギー技術	技術の概要	主な成果
ヒートポンプ	低 GWP・高効率 ヒートポンプの開発	無着霜技術の実用化による効率向上や CO ₂ 冷媒ヒートポンプの用途拡大を図る	・家庭用 CO ₂ 冷媒ヒートポンプ給湯機 (エコキュート)の開発
	各種ヒートポンプの性能評価技術	各種用途におけるヒートポンプの実用性能を評価し、 技術開発と普及促進に繋げる	・省エネ法 住宅事業建築主の判断基準への適用
農業電化	食料生産・貯蔵等における ヒートポンプ有効利用技術	ヒートポンプ利用の効用を定量的に評価し、 併せて適正な使用方法を支援する	・温室におけるヒートポンプの最適配置法・運転法 の開発
電化厨房	業務用電化厨房の換気合理化	実験によって電化厨房における換気目的に 即した適正風量を求める	・国土交通省 建築設備設計基準への反映を目指す
電気自動車	電気自動車普及支援技術	電気自動車普及のため、電池性能、 充電設備整備、非接触給電等に 関わる情報提供、ツール整備を行う	・次世代自動車交通シミュレータ (EV-OLYENTOR)の開発
エネルギー消費解析	住宅・ビル・工場等を対象とした エネルギー消費解析	各種エネルギーシステムの省エネ性等を 評価し、施設計画・運用改善に活用する	・エネルギー消費解析ソフトウェア(ECEP)の開発
	職住環境空調の顧客便益と エネルギー消費評価	省エネと快適性、知的生産性など顧客便益との両立を可能 にする評価手法を確立し電気利用の有効性を定量化する	・住宅用温熱環境設計ツール(CADIEE)の開発 ・エアコン選定支援ツールの開発
DR (EMS) (注1)	情報提供による省エネルギー 推進技術	情報提供による行動変容 DR 手法を確立する	・省エネアドバイス自動生成技術開発と 高圧一括受電マンションでの実証

(注1) DR: デマンド・レスポンス EMS: エネルギー・マネジメント・システム

中心である。

なお、ヒートポンプの性能評価は、機器開発においても活用され重要な役割を果たしている。

本節では、以下に当所が取り組む省エネルギー技術のうち主なものについて解説する。

3-5-1 ヒートポンプ活用による地球温暖化抑制

ヒートポンプは、電気等の質の高いエネルギーを利用して、熱を温度の低いところから高いところへ汲み上げる（熱を温度の低いところから奪って温度の高いところへ与える）機器である（図 3-5-1-1）。

熱を与える高温側（放熱側）が加熱用途に利用できるのはもちろん、熱を奪う低温側（採熱側）は加熱のための採熱源であると同時に、冷却用途にも利用できることから、現在では様々なヒートポンプ（エアコン、冷蔵庫、ヒートポンプ給湯機、ヒートポンプ洗濯乾燥機、冷凍冷蔵ショーケース、カークーラー等）によって私たちの生活は支えられている。

また、ヒートポンプの加熱量（ Q_h ）は、外気や工場排温水等からの採熱量（ Q_c ）と投入電気量（ E ）との和（ $Q_h=Q_c+E$ ）となるため、ヒートポンプの効率（ $COP=Coefficient\ of\ Performance$ 、加熱時： $COP \equiv Q_h \div E$ 、冷却時： $COP \equiv Q_c \div E$ ）が高くなるほど、少ない電気で多くの熱を利用することが可能となる。これが、省エネルギー（一次エネルギー消費量削減）・省 CO_2 （ CO_2 排出量削減）技術として、ヒートポンプが国内外で大きな注目を集めている所以である。

今後、ヒートポンプを活用して更なる地球温暖化抑制を図るためには、①低 GWP（地球温暖化係数）冷媒の利用、②ヒートポンプの一層の高効率化、③燃料直焚機器（ボイラー等）から高効率ヒートポンプへの熱源転換、が重要なポイントとなる。

以下、それぞれについて、当研究所の研究紹介を交えながら、もう少し詳しく述べていきたい。

(1) 低 GWP（地球温暖化係数）冷媒の利用

「GWP」（Global Warming Potential, 地球温暖化係数）とは、大気中に放出された場合の冷媒自身の温室効果（地球温暖化に与える影響）を、 CO_2 を基準（ $GWP=1$ ）と

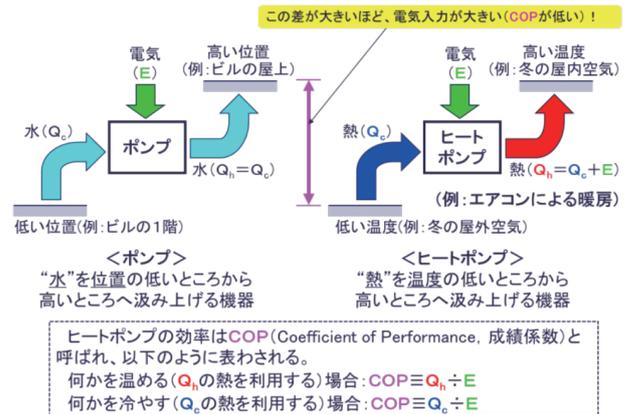


図 3-5-1-1 ヒートポンプの原理

して表す値である。また、「冷媒」とは、ヒートポンプの内部に密封された物質で、低温側（採熱側）から高温側（放熱側）へ熱を運ぶ流体である。

現在使われている主な冷媒は、「フロン系冷媒」と「自然冷媒」の二つに大別され、前者は自然界に元々は存在しない人工合成物質（人が新たに作り出した物質）、後者は自然界に太古から存在する物質である。

この内、フロン系冷媒については、地球温暖化係数が高くかつオゾン層を破壊する CFC (Chloro Fluoro Carbon) と HCFC (Hydro Chloro Fluoro Carbon)、地球温暖化係数は高いがオゾン層は破壊しない HFC (Hydro Fluoro Carbon)、地球温暖化係数が低くオゾン層も破壊しない HFO (Hydro Fluoro Olefin) の四つに大別され、それぞれに物性（分子量や沸点や蒸発潜熱等）の異なる様々な物質（R11, R12, R22, R134a, R32, R404A, R407C, R410A, R1234yf 等）が存在する。

一方、自然冷媒は、地球温暖化係数が低くオゾン層も破壊しない物質で、二酸化炭素（ CO_2 ）、炭化水素（プロパンやイソブタン等）、アンモニア、水、空気等がある。ただし冷媒ごとに、可燃性が強い、毒性がある、銅系材料を腐食する、圧力がフロン系冷媒の数倍高い、機器の効率が低い、機器のコンパクト化が難しい等の欠点がある。それら欠点を克服する工夫が施された機器（ CO_2 冷媒のヒートポンプ給湯機 = エコキュート、イソブタン冷媒の家庭用冷凍冷蔵庫、アンモニア冷媒の冷凍機等）が商品化され、既に市場に投入されているものの、適用先や市場シェアが限られるなど、現状では自然冷媒が完全にフロン系冷媒と置き換わるような状況には至っていない。

よって、現在使われている冷媒は様々なHFC（GWPが3桁台から4桁台=CO₂の数百～数千倍）が主流だが、地球温暖化防止の観点から、GWPがともに1桁台のHFOと自然冷媒、それらとHFCとの混合冷媒の利用を進める動きが加速しつつある。また、同じく地球温暖化抑制の観点から、機器の使用・廃棄時にHFC等のGWPの高いフロン系冷媒を大気へ放出しないように、技術的な工夫や法による規制（フロン排出抑制法等）もなされてきている。

当研究所ではこれまでに、地球温暖化係数が低く（GWP=1）、オゾン層も破壊しないCO₂に着目して基礎実験と性能予測シミュレーションを行い、CO₂が給湯用のヒートポンプに非常に適した冷媒であることを明らかにした。そして、これら基礎的な研究の成果をもとに、東京電力（株）と（株）デンソーと共同で、「家庭用CO₂冷媒ヒートポンプ給湯機：エコキュート」を平成13（2001）年5月に世界で初めて商品化した（図3-5-1-2、図3-5-1-3）。今後も、CO₂等の地球温暖化係数の低い冷媒の各種ヒートポンプへの適用を目指し、技術開発や機器性能評価等を進めていく。

(2) ヒートポンプの一層の高効率化

前述したように、ヒートポンプの加熱量は、外気や工場排温水等からの採熱量と投入電力量との和となるため、ヒートポンプの効率が高くなるほど、少ない電気でも多くの熱を得ることができる。

よって、ヒートポンプの高効率化が進むほど、加熱・冷却に必要な電気が更に少なくなるため、電気の製造・輸送・利用に伴うCO₂排出量が減り、地球温暖化抑制に繋がることになる。

そこで当研究所は、家庭用給湯分野等でのヒートポン

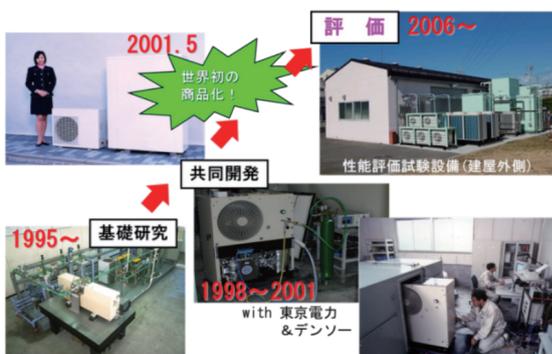


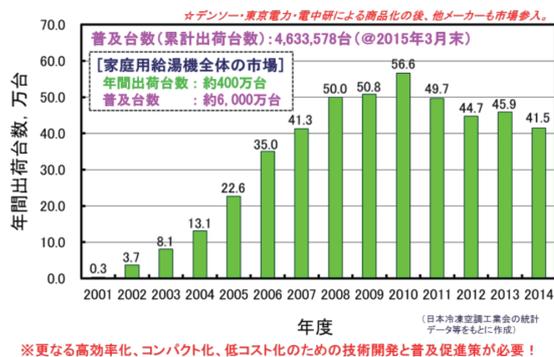
図 3-5-1-2 電中研エコキュート研究のあゆみ

プの高効率化による省エネルギー・省CO₂を図るため、当研究所の横須賀地区に設置した「ヒートポンプ性能評価試験設備」等を用いて、エコキュート等を対象に、外気温度や給湯負荷等をパラメータとした評価試験⁽¹⁾を実施中である（図3-5-1-4）。また、効率向上に繋がる様々な基礎研究^{(2),(3)}にも挑戦しており、これらによって得られた知見を、各種ヒートポンプの更なる高効率化と普及促進に繋げていく。

(3) 燃料直焚機器（ボイラー等）から高効率ヒートポンプへの熱源転換

冷房や冷凍・冷蔵を行う機器のほぼ100%にヒートポンプの原理が使われているのとは異なり、暖房、給湯、プロセス加熱（工場の生産工程における殺菌、乾燥、溶融、蒸留等）では、燃料直焚機器（油焚きあるいはガス焚きの蒸気ボイラーや熱風乾燥器等）が主流である。

これは、図3-5-1-1に示したように、採熱側と放熱側の温度差が広がるほどヒートポンプの効率が低下する（ランニングコストの増加に繋がる）ことに加え、ヒー



※更なる高効率化、コンパクト化、低コスト化のための技術開発と普及促進策が必要!

図 3-5-1-3 家庭用エコキュートの国内普及状況

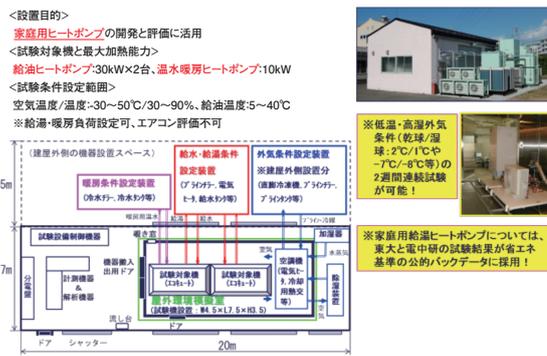


図 3-5-1-4 ヒートポンプ性能評価試験設備の概要

トポンプのインシヤルコストもユーザーの望む価格まで安くない場合もあることから、現状では主に経済性の観点から燃料直焚機器に勝てない分野が存在するためである。

しかし、「外気温が低くなるほどエアコンの暖房効率も低くなる」、「夏季よりも外気温の低い冬季の方が給湯ヒートポンプの効率は低くなる」、「暖房・給湯より高い温度を必要とするプロセス加熱ではヒートポンプの効率は低くなる」といった原理的欠点を技術的工夫によって克服できれば、暖房・給湯・プロセス加熱分野においても燃料直焚機器のヒートポンプへの変更（熱源転換）が促進され、省エネ・省CO₂に寄与できることになる（図3-5-1-5）。

なお、図3-5-1-5はあくまで試算例であり、ヒートポンプによる省CO₂効果は、ヒートポンプの効率と系統電源のCO₂排出係数（発電燃料種別、発電効率、送・変電ロス等に依存）、燃料直焚機器の効率と燃料のCO₂排出係数によって大きく変化することがわかる。

そこで当研究所では、産業用プロセス加熱分野等での熱源転換による省エネルギー・省CO₂を図るため、当研究所の横須賀地区に設置した「ヒートポンプ開発試験設備^{(4),(5)}」等を用いて、産業用の大型蒸気生成ヒートポンプ（SGH165）等を対象に、採熱源（工場排温水等）の温度や生成蒸気の温度等をパラメータとした評価試験⁽⁶⁾を実施中である（図3-5-1-6、図3-5-1-7）。

これらによって得られた知見を、熱源転換メリットが大きくなる高効率ヒートポンプの開発等に活かしていく。

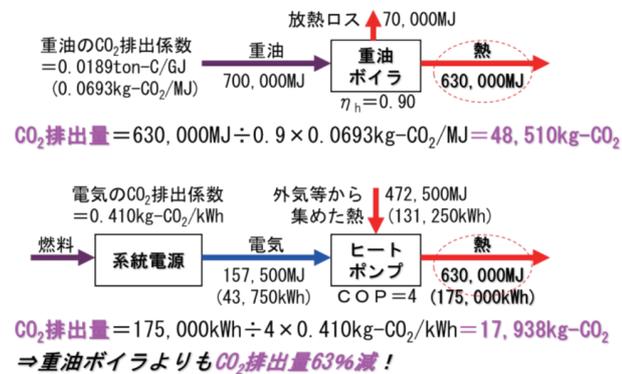


図3-5-1-5 ヒートポンプによる省CO₂効果の試算例

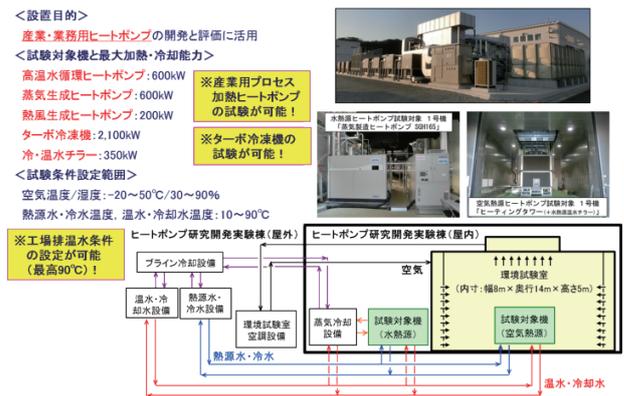


図3-5-1-6 ヒートポンプ開発試験設備の概要

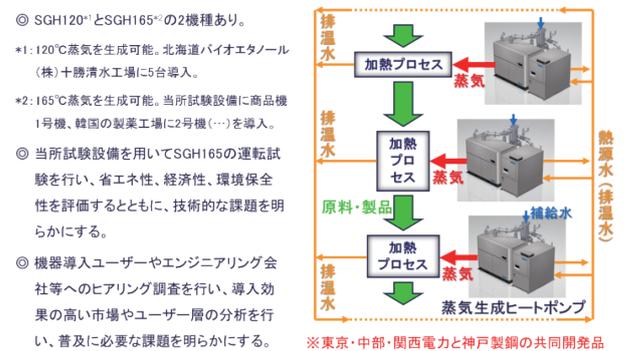


図3-5-1-7 蒸気生成ヒートポンプの性能評価

3-5-2 エネルギー消費解析による省エネ検討支援

(1) エネルギー消費解析

省エネや省CO₂を推進するためには、発電分野だけではなく、一般家庭や業務ビル、工場といったエネルギーを消費する需要家サイドも含めたエネルギーシステム全体での一次エネルギー消費の削減が必要である。

そのためには、室内を好みの温度に保つエネルギーや、所定の明るさにするエネルギー、給湯に必要なエネルギーといった「最終エネルギー負荷」の低減や、最終エネルギー負荷を賄うエネルギー変換機器の高効率化による消費電力・燃料等の「最終エネルギー消費」の削減が挙げられる。なお、最終エネルギー消費は、個別機器の性能だけでなく、システム構成や運用方法等によっても変化する。さらに、最終エネルギー消費を賄うための一次エネルギー消費は、電力システム全体の効率や使用する燃料の種類などによって異なってくる。

したがって、省エネや省CO₂を検討するためには、最終的に電気や熱等として利用される最終エネルギー負

荷から機器が消費する最終エネルギー消費、さらには一次エネルギー消費まで、エネルギー消費システム全体について解析を行い、評価することが重要であると考えます。

そのエネルギー消費解析の基本的なアルゴリズムを以下に示す。

最終エネルギー負荷を $E_{end-demand}$ 、エネルギー変換機器の効率を η_{mech} 、その最終エネルギー消費を $E_{end-use}$ とすると、最終エネルギー負荷と最終エネルギー消費は次のような関係で表される。

$$E_{end-use} = E_{end-demand} / \eta_{mech} \quad (3-5-2-1)$$

また、一次エネルギー消費を $E_{pri-energy}$ 、一次エネルギー源単位（または燃料発熱量）を $\eta_{unit-energy}$ とすると、一次エネルギー消費と最終エネルギー消費 $E_{end-use}$ の関係は次式で表される。

$$E_{pri-energy} = E_{end-use} / \eta_{unit-energy} \quad (3-5-2-2)$$

エネルギー消費解析では、最終エネルギー負荷、エネルギー変換機器の効率、一次エネルギー源単位（または燃料発熱量）を条件として、単位時間ごとに各負荷、各機器について式(3-5-2-1)、式(3-5-2-2)を繰り返し計算し、それらを足し合わせることで、日間、月間、年間の一次エネルギー消費を算出することができる。

(2) 解析支援ツール (ECEP) の概要と省エネ検討事例

需要家サイドのエネルギーシステムは、その構成や運用方法、さらに負荷特性は多種多様であるため、エネルギー消費解析を迅速かつ効果的に行うためには、汎用的に利用できる解析ツールが必要である。そこで当研究所では、その解析を汎用的に行うことができる「需要家サイドエネルギー消費解析汎用プログラム (ECEP)」を開発した⁽¹⁾。以下にその概要を示す。

本ツールの計算実行画面および主な機能の概要を図3-5-2-1に示す。様々なエネルギーシステムを描画ソフトのようにパソコン上のマウス操作でシステム構成を作図でき、諸条件を入力することでそのシステムの電力や燃料消費量を算出し、さらに一次エネルギー消費やCO₂排出量等を算出できる。多くの機器モデルを有し、貯湯槽や蓄熱槽などのエネルギーの入出力に時間差がある機

器や、コジェネレーション機のように2種類のエネルギーを出力する機器を含むシステムについても解析可能である。また、システム構成や機器の運用方法などの条件が柔軟に変更でき、負荷特性や機器特性の入力または変更が可能である。幅広いシステム・条件に対して省エネや省CO₂の検討・評価を柔軟に行うことができる。

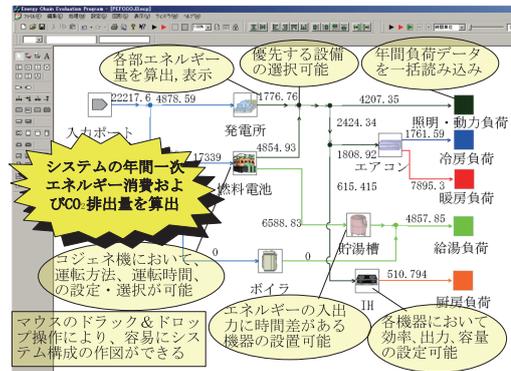


図 3-5-2-1 ECEP 実行画面と主な機能

解析事例を以下に示す。まず、一般家庭用エネルギーシステムについて、同じ最終エネルギー負荷を賄うための二つの異なるシステムを比較した。図3-5-2-2に示すヒートポンプ給湯機を備えた全電化システム、また、次ページの図3-5-2-3に示す燃料電池で電力の一部と熱回収により給湯を賄うコジェネシステムを想定し、一次エネルギー消費量、CO₂排出量を算出した⁽²⁾。その結果、各設定条件によって異なるが、一次エネルギー消費について、全電化システム、コジェネシステムとも、従来システム（給湯負荷にガス給湯器、厨房負荷にガスレンジを利用）よりも20%程度省エネが図れ、さらに、CO₂排出量については、全電化システムにおいて20%以上低減できることが分かった。

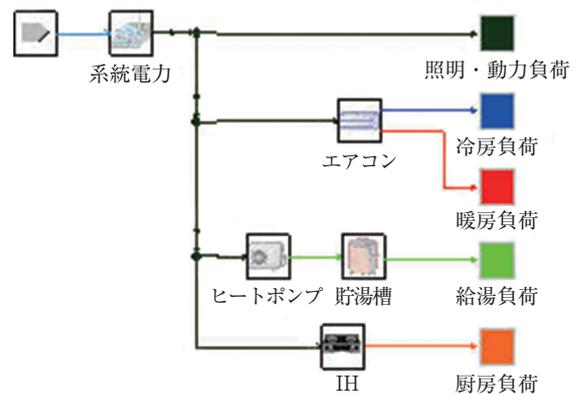


図 3-5-2-2 ヒートポンプ給湯機全電化システム

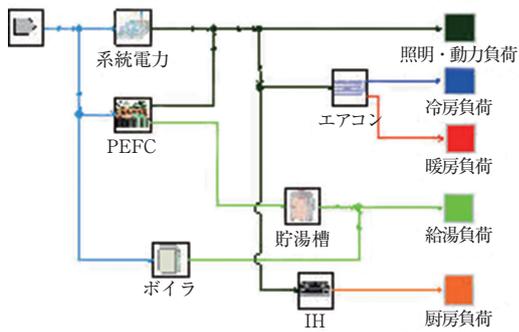


図 3-5-2-3 燃料電池コジェネシステム

産業向けの解析事例として、図 3-5-2-4 に示す自家発電コジェネシステム (CGS) を導入している工場における運転モードの変更前後の比較を行った事例を示す。

CGS の場合、同一のシステム構成でも、電力の需要に合わせて運転を行う電主熱従運転、熱の需要に合わせて運転を行う熱主電従運転の運転パターンが考えられる。それぞれの運転モードでの算出結果およびその比較を表 3-5-2-1 に示す。電主熱従運転の際には、熱の需要より CGS からの熱の供給量の方が多かったため熱を廃棄していたが、熱主電従運転を行うことにより、熱の廃棄をなくすことができ、CGS を効率よく運転できるため、エネルギー利用率が向上したことがわかる。

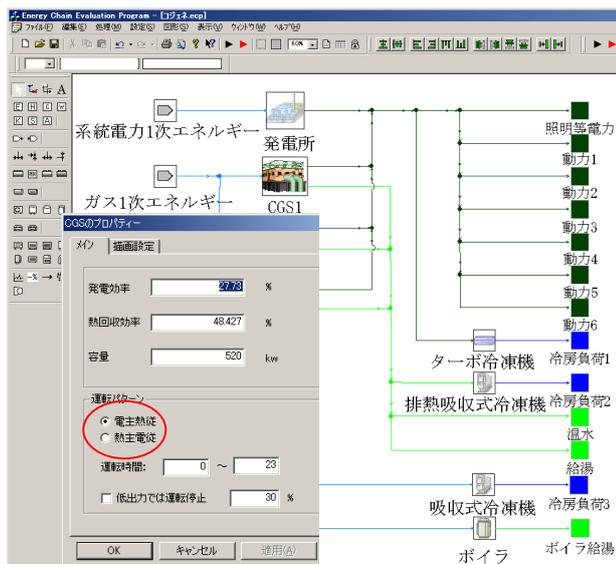


図 3-5-2-4 CGS システム

また、図 3-5-2-5 に示すように、大規模工場において使用されている圧縮機の性能変化を解析し、その性能を改善した場合の工場全体のエネルギー消費および CO₂ 排出量の削減効果を示した。また、ボイラや吸収式冷凍機を高効率機器に変更した場合の効果を定量的に示すことができた。

今後、多様化するエネルギーシステムに対し、適切な解析・評価を支援することで、省エネ・省 CO₂ の推進に貢献していきたい。

表 3-5-2-1 解析結果

	電主熱従運転	熱主電従運転
エネルギー利用率 (%)	75.5	80.2
CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /year)	635.0	615.1

エネルギー利用率 = (全最終エネルギー負荷) / (一次エネルギー消費)

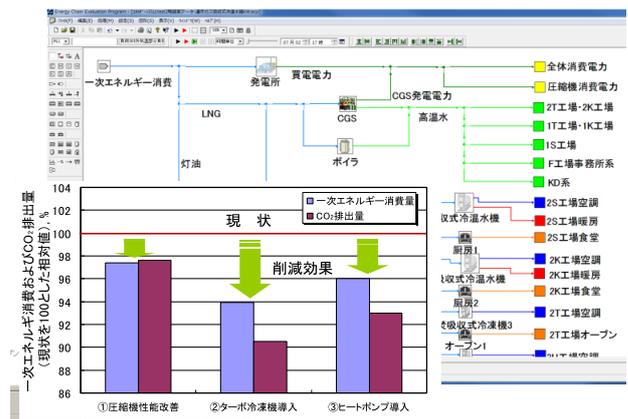


図 3-5-2-5 大規模工場の解析結果

3-5-3 エアコン選定ツール (エアコンの選定による省エネ)

(1) エアコンの消費実態と消費電力シミュレーション

家庭で使われる全電力のうち、エアコンの占める割合は 7.4% であり⁽¹⁾、また夏期の最大需要発生日には、ピーク時の在宅世帯の消費電力の 58% をエアコンが占めると報告されている⁽²⁾。今後、更なるエアコンの普及率拡大、また住宅の高気密化を背景とした暖房への利用増加の可能性を考えると、エアコンの合理的な利用による省エネ対策が重要である。

エアコンの省エネ対策は大きく分けて、①利用時間の削減や利用時の温度緩和といった運用変更によるもの、

②建物の断熱性・気密性の向上やすだれの利用等によって、室の熱負荷自体を削減するもの、③負荷特性に応じた機種を選択や高効率機種の導入によって、処理熱量あたりの消費電力を削減するものがある。

上記のいずれの方策についても、方策実施時の省エネ量や、室内の温熱快適性への影響を評価・推定するためには、環境試験室や模擬住宅等を用いた実験、またはコンピュータによる計算（シミュレーション）を行う必要がある。実験には多くのコストと労力がかかるため、シミュレーションが補完する技術として有効であるが、その際には、様々な室条件・利用条件でのエアコンの消費電力や冷暖房能力を算出する必要がある。

しかしながら、エアコンの消費電力は、室内外の温湿度や室内の発熱等の利用条件によって、カタログに示されている値から大きくかい離する。また、同様の利用条件下でも、機種によって、その消費電力は異なる。

そこで当研究所では、様々な機種について、室内外の熱的な条件が変動する冷房・暖房運転時の消費電力・COPを推定するための「エアコン熱源特性モデル」を開発した。本モデルは、冷凍サイクルによる熱移動と、コンプレッサーやファンなどが消費する電力量の関係を定式化し、この式を任意のエアコン運転条件下で解くことによりエアコンの消費電力などの定常時特性を模擬するものである。本モデルでは、特定機種の実測データから入出力特性を模擬するものではなく、メーカー公表値（技術資料である仕様書に掲載のデータ）を用いて熱源特性のモデル化を行う。これによって、機種特性の公表されている任意の機種モデル化を行うことができ、またモデル化を行った機種に対して、任意の運転条件下でのエネルギー消費効率を算出できる特徴を有している。

本モデルを、非定常の熱負荷計算プログラム（CADIEE: コラム9参照）に組み込むことによって、任意の気象条件・住宅条件・利用条件下におけるエアコンの消費電力と室内の温熱環境を推定できる。

(2) エアコン選定の現状と課題

前節にて、省エネ方策として③負荷特性に応じた機種を選択を挙げた。生活者がエアコンを購入する際、一般的に用いられる畳数めやす（設置する部屋の広さ）による選定では、部屋の熱負荷から求められる冷暖房能力よりも過大な機種が選定され、消費電力量、CO₂排出量の

増大につながる事が指摘されている^{(3),(4)}。また一般に、冷暖房能力の大きい機種は販売価格が高く、必要以上に大きな機種を選定することは合理的ではないと考えられる。

そこで当研究所ではこれまでに、エアコン選定方法の現状に関する調査を行い、以下の課題を抽出した（次ページの図3-5-3-1）。

- ① 生活者がエアコンを購入する際に一般的に用いられている畳数めやす（設置部屋の広さ）は、1964年に、当時の住宅の断熱仕様を元に決められており、その後は改正されていない。そのため近年の高気密・高断熱の住宅において畳数めやすを用いると、過大な冷暖房能力を持つ機種が選定され、消費電力量、CO₂排出量の増大につながる可能性がある。
- ② 従来の選定方法には、生活者のライフスタイルや、環境性、経済性、快適性といった生活者が重視する項目（以下、選好と記す）の度合いを考慮できる選定基準がない。
- ③ 市販機種の中から生活者が合理的かつ簡単に選定できる仕組みがない。
- ④ メーカーや家電量販店は、冷えない、暖まらないリスクを避けるために冷暖房能力が大きい目の機種を勧める傾向にある。

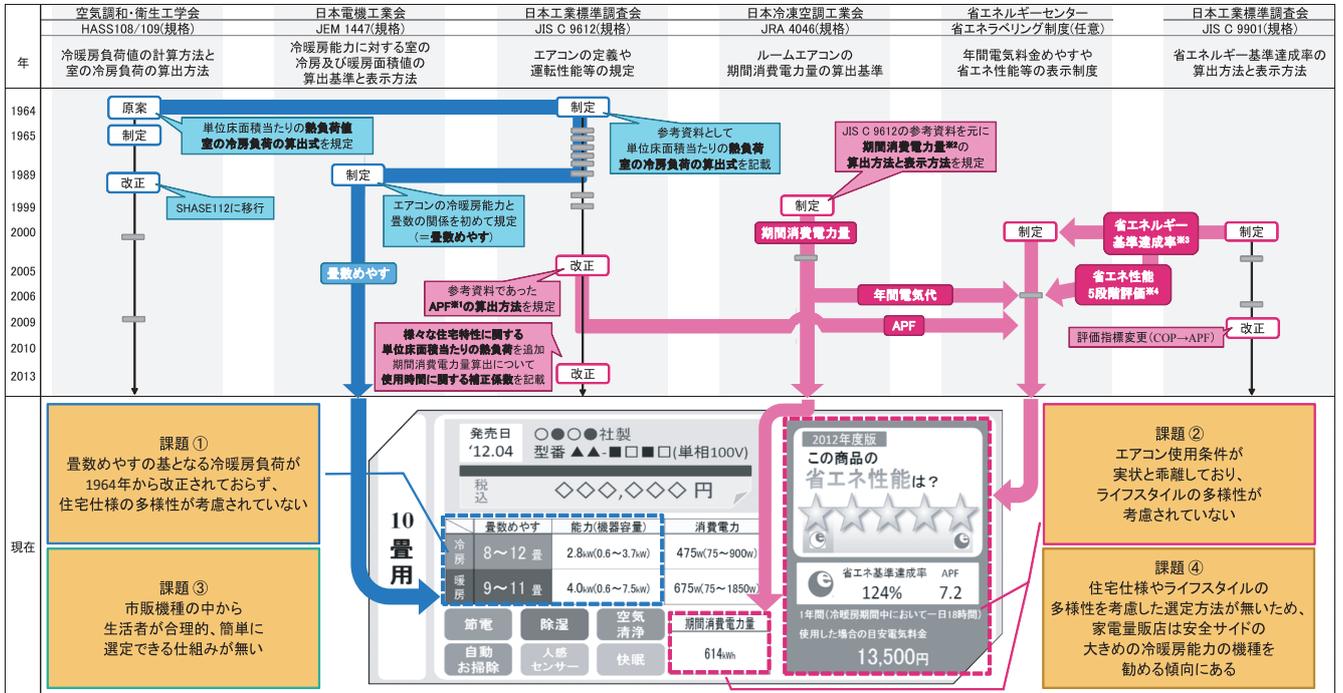
(3) エアコン選定支援ツールの開発

前述の課題に対して、生活者の多様な住まい方を考慮した適切なエアコンを選定するための支援を行うツールを開発した。

本ツールでは、地域やエアコンを利用する部屋の断熱性能、畳数、方位、階といった住宅特性、またエアコンの設定温度や使用時間帯といったライフスタイルに対し、冷暖房能力や価格帯（普及機と高機能機）の異なる様々なエアコンを利用して冷暖房を行った際の消費電力、室温を詳細に計算する。その結果を予めデータベースとして蓄えた上で、利用時に入力された条件にあった機種を推薦するものである。入力条件として、上記に示した住宅特性、ライフスタイルのほか、消費者の選好を入力可能としている。消費者の選好は、環境性（排出するCO₂の量をいかに少なくするか）、経済性（エアコン購入費と電気代の総和をいかに少なくするか）、快適性（設定温度までの立ち上がり時間をいかに短くするか）

の3点で評価しており、意思決定手法の一つである階層分析法を用いて三つの評価指標の重要度を点数化し、どの機種が良いかを算出している。

ツールはタブレット型PC上で動作するように設計されており、簡易かつ短時間の入力で解を得られるようになっている(図3-5-3-2)。



※1 AFP= 期間総合負荷 / 期間消費電力量⇒ 年間エネルギー消費効率のこと。 ※2 冷房期間消費電力量と暖房期間消費電力量との和⇒「一日18時間(6~24時)、東京を対象」をエアコン稼働条件として求める。 ※3 省エネ基準達成率(%)=(AFP/目標AFP)×100⇒2000~2009年はCOPを使用。 ※4 省エネ基準達成率に基づいて表記される。 ※5 表示と関連のない事柄の訂正

図3-5-3-1 生活者がエアコンを選ぶ際の主の判断材料と従来の選定方法の課題

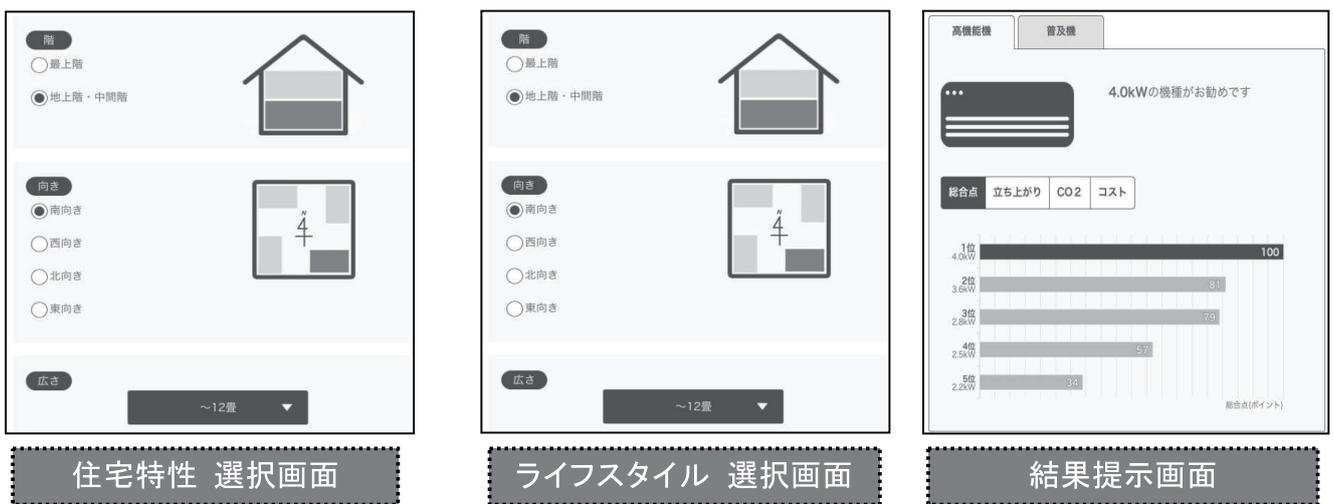
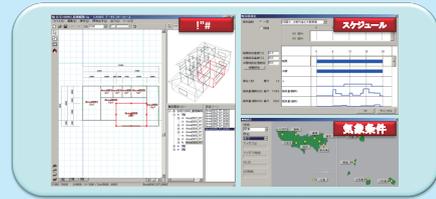


図3-5-3-2 エアコン選定支援ツールの表示画面例

家庭部門における最終エネルギー消費の約3割は冷暖房によるものであり、居住空間の温熱快適性の良否とも密接に関わっている。温熱快適性と省エネルギーの両立を図るためには、住宅性能、空調機器性能、居住者の住まい方の視点から同時並行的に検討を進める必要があるが、このための検討ツールは十分に整備されていなかった。このため、当研究所は住宅用室内温熱環境設計ツール CADIEE を開発した。住宅内の室の配置、使われ方は様々で、相互に熱影響を及ぼし合う。そこで、多数室の伝熱を一度に計算できるように建物をモデル化する必要がある。多数室における熱的な変化を長期（例えば1年間）で計算するため、CADIEE では、網目のように配置され、かつ隣り合う同士接続された質点の集合体の熱的振る舞いとして捉え、熱的な変化を数値的に解析する。本ツールの特長は以下のとおりである。

- ① ウィンドウズ OS を搭載したパソコンで使用でき、シミュレーションのための GUI が整備されているため、実用性が高い（図1）。
- ② 住宅の年間暖冷房負荷を正確に計算できる方法として、国土交通大臣の特別認定を取得している（図2）。このため、本ツールで評価した住宅の熱的性能を公式な評価結果として公表することができる。
- ③ 住宅の設計段階において、建築後の年間の温熱快適性やエネルギー消費をシミュレートできる。このため、温熱快適性、省エネルギーの両面において性能の高い住宅の普及に寄与できる。
- ④ 温熱快適性に及ぼす影響が大きいにもかかわらず、従来軽視されてきた放射伝熱現象を精度よく扱える。このため、低放射ガラスなどの窓性能や床暖房の効果など、新しい住宅技術に対応できる。
- ⑤ 詳細な気流解析機能を持ち、エアコンなどからの吹き出し気流を精緻にシミュレートでき、吹き抜けのある住宅の空調・換気などに対応できる（図3）。

データ入力画面



データ出力画面

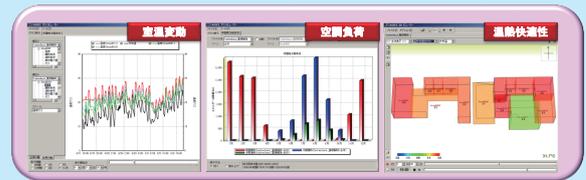


図1 Windows用GUIの概要



図2 負荷計算に関する大臣認定書

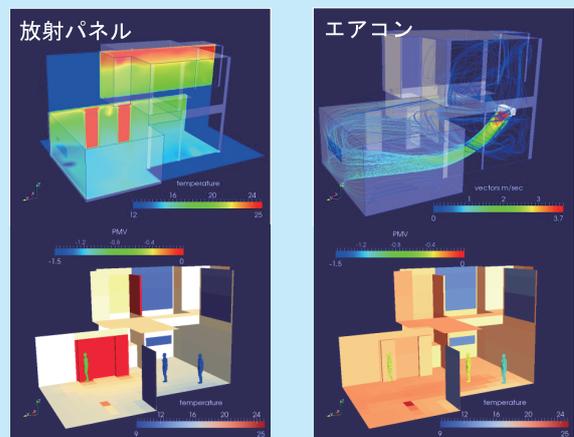


図3 気流解析結果の可視化例

3-5-4 電気自動車（環境にやさしい電気自動車）

(1) 電気自動車導入による低炭素化、省エネ化

我が国の運輸部門からの二酸化炭素（CO₂）排出量は、経済成長とともに徐々に増え、2001年をピークに、約2億トン、全体の20%を維持している。そのうち、90%程度が自動車からで、高効率化とゼロエミッション燃料の利用で大幅なCO₂排出削減が期待できる。技術進展により自動車の高効率化が進んでいるが、車両が大きくなるなど、全体的には低減は進まない。世界的には、年間の販売量で、中国が米国を抜き、インドなどの発展途上国での自動車販売量が増加している。今後、先進国以外での車両台数の大幅な増加も見込まれる。

内燃機関と電動のハイブリッド化技術が進展し、電気自動車（EV）の市販も進んでいる。普及拡大には、先進国が率先して、ゼロエミッション自動車の導入することが重要である。

EVは電動駆動のため、ガソリン自動車などの内燃機関駆動のような排熱はなく、効率も高い。電動駆動では、回生制動によるエネルギー回収もあり、高い燃料消費率で走行する。そのため、CO₂排出量の抑制にも効果的である一方、充電を行う電源の排出原単位に大きく依存する（図3-5-4-1）⁽¹⁾。

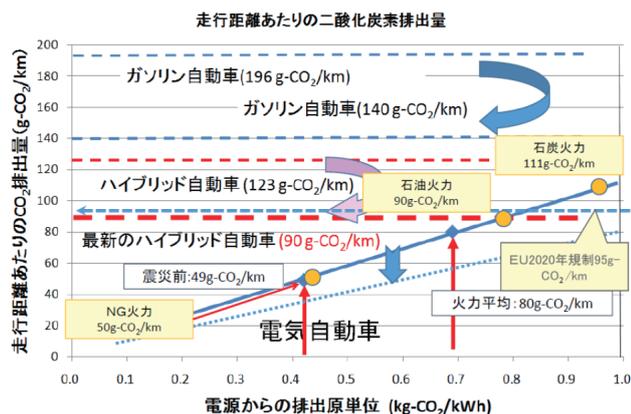


図 3-5-4-1 電源からの排出原単位に依存した車両のCO₂排出量

原子力や水力、再生可能エネルギーによる発電では排出ゼロになるが、石炭火力発電では、ハイブリッド自動車（HEV）よりも悪くなる可能性がある。一方、欧州では2018年には、95g-CO₂/kmの排出量規制導入が決まっている。ハイブリッド自動車でも厳しい値である。また、

米国カリフォルニア州でも、ZEV（ゼロエミッション自動車）規制で、数万台を販売する自動車メーカーが排出抑制規制の対象となる。全米にも展開される可能性もある。一方、EV性能が向上すれば、図3-5-4-1の直線の傾きは小さくなり、走行時の排出量は低減できる。更なる充電効率・回生制動の向上、電池重量の軽減、冷暖房機能などの車両性能向上が期待される。

EVは、走行時に排熱、排ガスが全くなく、走行する街のエネルギー消費の低減も期待できる。夏の暑い日には、住宅やビルに加えて、自動車の排熱による、都市のヒートアイランドが起きる。23区内を走行する乗用車や軽自動車のEV代替で、排熱がなくなり、昼間の時間帯に約0.6度の低減が期待できるとの試算がある（図3-5-4-2）⁽²⁾。これにより、昼間の冷房使用負荷が3万kW相当を削減できる。また、CO₂のみならず、NO_xやPM（粒子状物質）の排出もなくなり、トンネルや地下駐車場の換気による電力負荷の低減も期待でき、都市の省エネ化に相乗効果もある。

2015年末に燃料電池自動車（FCV）が市販された。水素充填スタンドの整備が進められている。しかし、CO₂削減では、燃料である水素の天然ガスなどの化石燃料を原料とした製造時は、水素充填のための80MPa以上の高圧化、水素タンク保護のためのプレクール（-20℃以下の冷却）、さらに輸送・貯蔵には、エネルギー消費にCO₂排出が伴うことも考慮すべきである。

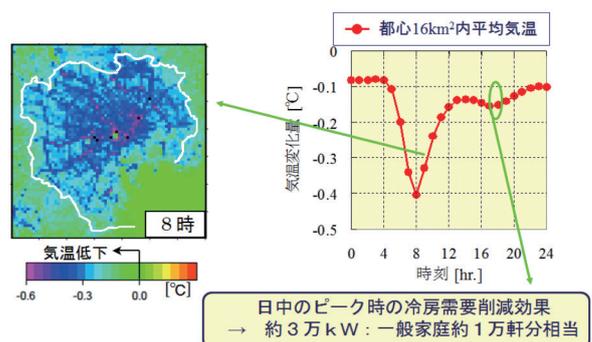


図 3-5-4-2 夏季晴天弱風日を対象とした効果の試算例

(2) 電気自動車の普及拡大に向けた課題

a. 導入の阻害要因

EV普及の阻害要因を購買対象者への調査したところ、一充電走行距離が実質100km程度と短い、それを補う充電インフラ整備が不十分、従来の車両コストより

割高が挙げられた⁽³⁾。また、現状のコスト格差60万円以上、一充電走行距離100km程度では、0.1%の導入しか期待できないが、コストが同等、走行距離300km程度までの延伸で、4.8%まで期待値は上がった。一充電走行距離の短さを補う充電インフラの整備の不足も不満である。一般家庭や駐車場での普通充電では、充電ケーブルの汚れ、重さ、充電箇所の照明不足なども不満要因になる。

プラグ接続の不要な非接触充電は、携帯機器などの小さな出力では実用化が進むが、EVのように数kWと大きな出力では、電磁界、効率向上、熱損失対策等の課題があり、安全性の基準作りの段階にある。前述のように、EVの分散型電源としての利用への期待⁽⁴⁾もあり、当研究所では、双方向での非接触充電給電技術の開発も進んでいる⁽⁵⁾。

b. 搭載電池の劣化評価

EV性能向上は、二次電池技術である。一充電走行距離の延伸には、軽量・コンパクトな二次電池の実用化が必要である。国では、EV用二次電池の研究開発シナリオ⁽⁶⁾を設定し、国家プロジェクトで「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」(2009年から7ヵ年)にて、従来のリチウムイオン電池を凌駕する高エネルギー密度の高性能電池開発を進めている。高エネルギー密度ではリチウム硫黄電池や空気電池が、また、安全性向上では固体電解質電池などの研究開発が進められている。

EV運用では、走行距離の短縮に繋がる二次電池性能劣化が一番の懸念事項である。走行距離短縮でEVが使用されなくなった経験が実証事業である。当研究所では、補助コンビネーションメータ(図3-5-4-3)を使い、実使用しているEVを定期的に性能計測している。走行距離のみではなく、納入時からの経過日数の影響も検討している。さらに、電池劣化傾向から簡易な評価手法を提案している^{(7),(8)}。

c. 充電インフラ整備

前述のように一充電走行距離の短さを補うためには充電インフラ整備が重要である。充電インフラとして普通充電と急速充電の2種類が整備されている。普通充電は、交流3kWで車両に供給し、インフラ整備費は低コストで、一般の家庭や駐車場にも用意に設置ができるが、

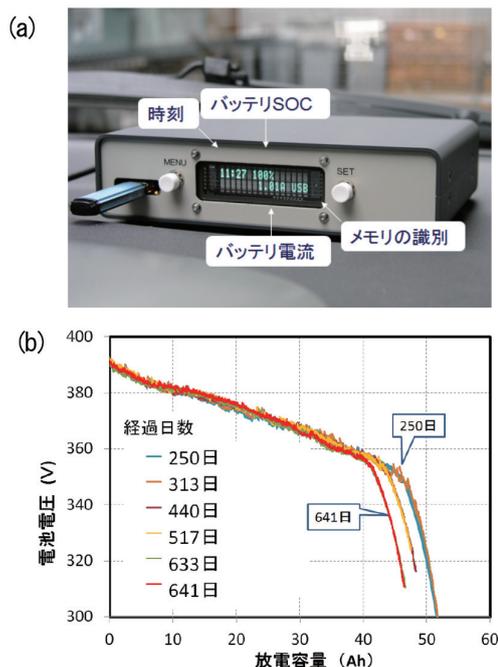


図3-5-4-3 EV搭載の(a)補助コンビネーションメータとその結果から算出した(b)二次電池の容量低下傾向

100%までの充電には数時間と長い時間を要する。一方、急速充電は、20～50kWで供給し、高電圧受電となり、コスト高になるが、70～80%まで十数分の短時間に充電できる。

EVの一般市販に合わせて、一般家庭や商業施設の駐車場などに普通充電設備の設置に関するガイドブックが、経済産業省と国土交通省での検討会でとりまとめられた^{(9),(10)}。一方で、国は急速充電スタンド整備の推進のために、当研究所で開発した交通シミュレータ⁽¹¹⁾で全国の道路、地形を考慮した検討結果を基に、2014年に国が設置モデルプランを作成・発表した。自治体と協力して、補助金を活用して整備を加速させている。都市圏を中心に充電インフラは整いつつある。

(3) 今後の課題

運輸部門での電化によるCO₂排出量削減のポテンシャルは大きい。充電に使う電源の排出原単位が改善されれば、さらにその効果は大きくなる。一方、災害時の分散型電源として価値も評価されているが、さらに、再生可能エネルギーのより不安定な電源の太陽光・風力発電からの余剰電力吸収への活用も考えられている⁽¹²⁾。車両性能向上、二次電池技術の向上、充電インフラ整備を進め、百万台まで普及を進める必要がある。

3-6 温暖化抑制のための政策の研究

当研究所では、地球温暖化の科学的知見・技術的な対策の検討に加えて、温暖化対策のための政策のあり方についての研究を実施してきた。望ましい政策のあり方としては、科学的知見を適切に踏まえ、技術開発を促進し、費用対効果の高い方法で温暖化防止という効果を挙げ、といったことが求められる。しかし現実には、政治的利害など、様々な社会的な制約があるために、政策は必ずしも所期の効果を上げることができない。このため、政策の効果について分析し、その改善策を検討・提案していくことが必要となる。以下本項では、まず IPCC のシナリオと政策評価に触れた後、個別の課題として、産業界の自主的取り組み、原子力政策、省エネ・節電、再生可能エネルギー、国際的な枠組みの研究について紹介する。なお、ここで述べるシナリオは 2-1-2 (2) 節で示したものと同じものである。

3-6-1 IPCC のシナリオと政策評価

当研究所は、IPCC 発足以来、継続的に寄与を行ってきた。特に、第五次評価においては、杉山大志上席研究員が第三部会において、日本からただ一人の統括執筆責任者として、2つの要約（政策決定者向け要約 (1)、技術的要約 (2)）、および「国および自治体の政策 (15 章) (3)」の取り纏めを行った。同報告書の解説は文献 (4) に詳しくまとめている。本項ではその中から、特に IPCC のシナリオと政策評価について概説する。

今回の IPCC 報告書は、「地球温暖化を 2 度以下に抑制するシナリオ」（以下、2 度シナリオ）について詳しく報告している。

一部報道では、「IPCC は、2 度シナリオは実現可能であり、世界はそれを目指すべきであると提言した」というものがある。だがこれは間違いである。IPCC は「提言」はしていない。そもそも提言することは禁じられているからである。IPCC は、2 度シナリオとは、どのような技術的対応を意味するかということ、および、その実現のための前提条件について記述している。

あるいは、「IPCC は、2 度シナリオは安いコストで済むことを示した」という報道もあるが、これも誤りである。2 度シナリオの実現のためには、現状からみると、

技術と政治の両面で奇跡的ともいえる変化が必要である。これは不可能ではないが、決して容易ではない。

- いわゆる「2 度シナリオ」の骨子は以下のとおりである。
- ・地球温暖化を産業革命前に比べて 2 度以下に抑制することは、概ね、2050 年までに世界全体で 10 年に比べて 40～70% の排出量を削減することを意味する。このとき、再生可能エネルギー、原子力、CCS（発電所等から排出される CO₂ を地中に埋める技術、Carbon Capture and Storage）の合計による低排出エネルギー供給は、10 年時点の 3 倍から 4 倍に達する。
- ・2 度シナリオが実現するための条件は、世界の国々が一致協力して排出削減に取り組むこと、および、多くの温暖化対策技術が進歩し普及することである。つまり国際協調と技術革新の両者が条件となる。

(1) 2 度シナリオの 2 つの前提条件

さて上記の 1 点目は分かり易いが、2 点目については説明がある。「国際協調と技術革新の両者」とは、どういうことか？ IPCC はこれを詳しく説明している。

まず、国際協調について。2 度シナリオは、現実を大幅に単純化した数値モデルに依存している。そこでは、資源量や技術の効率・コスト等は考慮されている。だが安全保障と国際競争の懸念については一切考慮されていない。これは極めて重要な限界である。なぜなら現在、世界諸国のエネルギー選択において、この両者は最も重要な要因だからだ。

IPCC が示唆しているのは、2 度シナリオが実現するためには、諸国が、安全保障や国際競争の懸念なしに、専ら温室効果ガス排出削減に励むことが条件になる、ということである。2 度シナリオでは、例えば中国が、自国産の石炭利用を極端に減らしてロシア等の外国から天然ガスを大規模に輸入し、さらには、高価な CCS や太陽光発電を、産業の国際競争力についての懸念をすることなく、大規模に導入する、と想定する。残念ながら、今の世界情勢はこれとはかけ離れている。

では技術革新はどうか。これも、2 度シナリオには、首を傾げざるを得ない条件がつく。それは、バイオエネルギーと CCS を現在の石炭や石油に匹敵する規模で導入することで、21 世紀末には世界全体の発電による CO₂ 排出を「マイナス」にする、という想定である。

だが IPCC はこの問題点も説明している。バイオエネ

ルギーは生態系保全や食料安全保障を妨げる懸念がある。CCSは未だ商用化されていない。コストや社会受容性の壁を越えられるかは、全く未知である。

こうしてみると、2度シナリオの実現には現状から見ると奇跡的な変化が必要である。このことを、報告書のとりまとめにあたった Ottmar Edenhofer 共同議長はプレスリリースで「the challenge is huge, huge, huge」と表現した。

IPCC では2度シナリオのコストも報告した。国際協調と技術革新が理想通り進む場合でも、温暖化対策のために、30年において世界のGDPの1～4%が失われるとした。例えば現在の日本のGDPの1～4%といえは5兆円から20兆円だから、これは相当な金額である。

のみならず、技術革新が停滞したり、国際協調が不完全な場合には、このコストはさらに跳ね上がる。コストは容易にこの数倍になるし、コストが無限大、すなわち「解なし」となる場合もある。以上の検討を踏まえて、2度シナリオの実現は極めて難しいのではないかと、この見解があることも記載されている。

(2) 「2度」の科学と政治

何やら現実味が薄いようだが、ではなぜIPCCは2度シナリオについて特に詳しく報告したのか？

これは政治的な要請に答えるためだった。「2度」は古くは1979年の文献に既に言及されているが、さほど根拠があったわけではない。いまでも温暖化の悪影響はよく分かっていないが、当時はもっと分かっていなかった。何となく、産業革命前の2倍程度が温室効果ガスの抑制目標として適切と考えられ、それは当時のモデルでは2度程度の温度上昇を意味する、といった程度の認識に基づく数字の選択だった。

だが環境問題においては、しばしば、この手の数字はマジックナンバーとなる。「2度」は温暖化防止の象徴とされるようになった。政治においても、まず欧州連合の目標になり、次いでG8や国連の目標とされるに至る。これを受けて、研究者は2度シナリオを集中的に研究するようになった。各国、とくに欧州政府は、それを奨励した。

このため、IPCCの文献調査対象も、2度シナリオが極めて多くなった。もちろん、研究者たちは、2度だけではなく、3度や4度のシナリオも検討している。だが、

IPCCの取り纏め過程においては、徐々に政治的な影響が強くなり、とくに諸国政府がベルリン総会でその文言を一言一句交渉する「政策決定者向け要約 (Summary for Policy Makers=SPM)」に至ると、イギリス・ドイツなどからの強い意見もあり、専ら2度シナリオだけが議論されるようになった。

だがこれはシナリオ分析としては落第であると筆者は思う。本来はシナリオ分析というのは、さまざまな将来像を政策決定者に示し、意思決定の材料にするためである。今回のIPCCのシナリオ分析では、選択肢はただ1つ、2度シナリオに絞られており、それを実施するか否かしか議論の余地がない。

結局のところ、2度シナリオは、実現可能性の乏しいものになったと言わざるを得ないが、その一方で、他のシナリオは詳しく分析されていない。これでは、残念ながら、現実的な政策決定の参考にはならない。

(3) 京都議定書と排出量取引に厳しい評価

さて、とかくシナリオばかりが目される傾向にあるが、今回のIPCC報告では、これまでの政策の実証的な評価が行われている。

温暖化対策について、環境経済学は、排出量取引や環境税などの形で「炭素価格を設定する」ことを重要としてきた。これを受けて、鳴り物入りで導入されたのが、京都議定書やEU排出量取引制度 (Emission Trading Systems=ETS) である。だがいずれもIPCC報告では厳しい評価となっている。

“京都議定書は、気候変動枠組条約 (UNFCCC) が提供する目標を実現するための、最初の法的拘束力ある段階であった。だが、それは意図されたように成功しなかった。理由は、不完全な参加と遵守、京都議定書が存在しない場合にあっては発生したであろう先進国の排出削減に排出権を与えたこと (訳注: ロシアなどに過剰な排出権が割り当てられたことを指している)、過去10年間で急速に成長している途上国の排出量を規制しなかったことによる (「技術的要約」より)”

EUでは、大がかりなETSが導入されたが、「効果は限定的」で、排出権の低価格は「構造的なものであり、対処することは政治的に難しいことが証明された」としている。

“ETSは、排出権が緩かったり、拘束力がなかったり

したために、期間中の排出削減の効果は限定的だった（「政策決定者向け要約」より）”

“ETSは意図されたほどに成功しなかった。ETSは国境を越えた排出量取引が機能しうることを示したものの、近年の恒久的な低価格は、追加的な排出削減についてのインセンティブを与えることがなかった。……13年末の執筆時点において、過剰な排出権を取り除くことによって低価格の問題に対処することは、政治的に難しいことが証明された。……ETSは、政治的に実施可能にするために、排出削減の効果を犠牲にする形で実施された（技術的要約及び本文14章より）”

IPCCは、低価格の問題に対処するために当局がとった様々な対応や、学界の提案についても詳しく言及している。だが、多くの方法は考案できるものの、排出枠を厳しく設定し直すことには、政治的な困難がつきまとうという現実が突き付けられた。

なお、筆者が欧州の研究者と議論をすると、「諸問題はあるが、“制度的な慣性”、つまり官僚組織の肥大化や既得権益があるために、欧州からETSが消えてなくなることは絶対はないだろう」との意見がほとんどである。これは日本にとっても重要な教訓であろう。

3-6-2 自主的取り組みの研究

政府と企業間の合意に基づき、各々の業種や企業の特性にあったきめ細かな対策を立て、省エネや温室効果ガス排出削減の目標に向かって行動することを「自主的取り組み」という。これまで、多くの国で、環境対策のために様々な形の自主的取り組みが取り入れられてきた。IPCC（2014）は、自主的取り組みは1）プログラム型、2）協定型、3）政策パッケージ一体型の3つに大別できるとした⁽¹⁾。

プログラム型は参加意思を示した企業のみが取り組むもので、米国やオーストラリアでは公的な自主参加型プログラムが多用されてきた。プログラム型の自主的取り組みでは、企業が個別に参加意思を決定することから、いかに多くの企業に参加を促すかがプログラムの成否を左右する。また、多くのプログラムが目標未達時の罰則を設けていないことから、環境影響を疑問視する意見⁽²⁾もある。

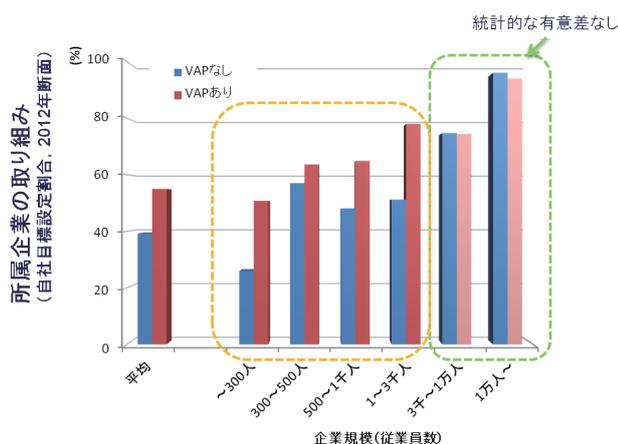
他方、協定型は1990年台の欧州で幅広く活用された。

政府と企業あるいは企業グループとの間での協定に基づき、企業が法規制にない環境配慮行動をとる代償として、政府が税負担の軽減や規制の優遇などの便宜を図る。このため、協定型の自主的取り組みは従来の政策措置を補う性質を持つ。2005年にEUで排出量取引制度（EU ETS）が導入されると、西欧諸国での自主協定は重要度を失ったが、オランダ、ベルギー、スウェーデンなどでは、今でもEU ETSではカバーされない小規模企業あるいは非エネルギー集約型企業を対象とする自主協定が存続する。政府が具体的な参加インセンティブを提示し、かつ目標不遵守時のペナルティを設定することから、協定型の自主的取り組みの企業参加率・遵守率は共に高い。しかしその環境効果については、企業意識や行動変化に有効とする肯定的な見解^{(3),(4)}と、企業活動の現状追認に過ぎず、追加的な効果に乏しいとする否定的な見解^{(5),(6)}とで分かれる。

これに対し、日本の産業界が実践する自主的取り組みは第3のタイプに属する。「政策パッケージ一体型」とは、規制やそれに代わる経済的措置と呼ばれる従来の政策措置のみでは必ずしも適切に政策目標を達成できないことから、それを補うために、自主的取り組みを通じて企業の合理的な対策を促すことを意味する。

企業的意思決定が、必ずしも経済合理性だけに基かないことはよく知られる。組織内の分権構造や情報の非対称性に基づく限定合理性や、経営戦略上の優先度などのために、経済性のある省エネ・温暖化対策が実施されていない事例は数多く存在する⁽⁷⁾。日本の産業界が取り組んできた環境自主行動計画（VAP）は、このような現状において、業界団体を中心とした省エネルギー技術やエネルギー管理体制のノウハウの共有を通じ、それぞれの業種に応じた適切な方法で、経済性のある省エネ・温暖化対策を促してきた^{(8),(9)}。

当研究所では、業界団体が中心となって進めた日本のVAPが企業行動に与えた具体的な影響として、企業の温暖化対策目標設定に着目して定量評価を試みた。その結果、特に中小企業において、目標設定に有意な効果があったことを示した（図3-6-2-1）。



(電力中央研究所による分析結果。
2014「自主行動計画の総括的な評価に係る検討会とりまとめ」所収)

図 3-6-2-1 中小企業に対する自主行動計画の役割

中小企業には未実施の経済合理的な省エネルギー対策が多く残されているにもかかわらず、政策介入のコストがかかりすぎるために、従来の政策措置では対象外とされてきた。業界団体を中心とする VAP の取り組みは、このギャップを埋めることに成功した。当研究所が実施したインタビュー調査からも、日頃、生産活動や規制動向に関する業界内での情報伝達機能を担い、業界内の企業の実情を熟知する業界団体の存在が、効果的な VAP の実施を可能にしていたことが確認できる⁽¹⁰⁾。

3-6-3 原子力政策の研究

発電の過程で CO₂ を排出しない原子力発電の活用は、地球温暖化対策の有効な手段の一つである。しかし、2011 年 3 月の福島原子力事故の発生は、我が国の原子力利用を取り巻く社会情勢と政策に大きな変化をもたらした。

当研究所は、これらの変化が我が国の今後の原子力利用にどのような課題を生じさせ、それがどのような帰結を社会にもたらし得るか、について、世論調査、モデル分析、比較制度分析等の手法やアプローチを用いることによって、変化の背景にある社会意識の分析や、課題克服策の検討も含め、研究している。

以下、それぞれの研究内容を概観した上で、成果の一例として、長期エネルギー需給見通しにおける原子力の位置づけに関する分析結果を紹介する。

(1) 原子力政策研究の概要

a. 震災後の環境・エネルギー問題に関する世論の変化

東日本大震災と福島原子力事故を経験し、人々の環境やエネルギーに対する考え方は大きく変化した。当研究所は、この変化を把握するため、それが日常生活のエネルギー消費行動にも定着したと考えられる、震災後 3 年後の 2014 年 3 月に、全国 11 都市（札幌、仙台、新潟、東京、富山、名古屋、大阪、広島、松江、高松、福岡）の成人男女 3,600 名を対象に訪問留め置き法に拠る世論調査を実施し、2008 年 8 月に実施した調査との比較を行った。

2014 年調査では、今後のエネルギー政策に関して、自然エネルギーや新エネルギーの利用への期待が高い一方、原子力発電の再稼働を重要であると考えている人が少ないこと等が明らかとなった。また、2008 年調査と比較して、化石燃料資源利用による環境影響や資源枯渇等といった、原子力利用の意義を示すエネルギー問題への関心の低下が見られるとともに、原子力利用については、国や事業者にリスク管理能力があるかどうかで評価するのではなく、子孫や環境への影響があるかどうかで評価する層が増大していること等が明らかとなった⁽¹⁾。

これらの結果から、原子力利用に対する国民の理解を得るためには、エネルギー問題全般への関心を喚起するとともに、子孫や環境への影響に対する不安を理解し、共に考えるという姿勢を示すことが必要であるとの示唆を得た。

b. 立地地域のステークホルダーとのコミュニケーション

原子力利用においては、施設の立地自治体や住民等の協力・信頼関係維持が不可欠である。2014 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、これを促進する一施策として、欧州諸国で採用されている原子力施設立地地域会議体を参考とした、地域における情報共有の強化をあげている。

当研究所は、フランスの地域情報委員会 (CLI) 及び英国のサイトステークホルダーグループ (SSG) について、現地インタビュー調査を基に、その特色及び異同を明らかにし、我が国への示唆を得た。すなわち、①フランスの CLI が、合意形成を必ずしも目的とせず専ら透明性の確保のために、法令に基づいて設置される“フォーマルな”会議体であるのに対して、英国の SSG

は、事業者の意思決定の過程でのステークホルダーからの情報インプットを重視した、“柔軟性のある”会議体であること、②英国型の会議体は、我が国の既存会議体や従来の事業者の取組みを、地域ステークホルダーとの協働を通じて事業遂行をより双方の納得のいくものとするための「知恵」を集約する仕組みとして再構成するのに参考例となり得ること、を明らかにした⁽²⁾。

c. 原子力安全規制の課題

福島原子力事故の発生を契機に、原子力推進と規制との行政機能の分離を目的として2012年9月に原子力規制委員会が創設される等、我が国の原子力安全法制は大きく変化した。

当所は、これらの法制度の変化が、実際に、原子力発電利用に関してどのような課題を生じさせ、その原因はどこにあるかについて、原子力規制委員会による敦賀発電所敷地内破砕帯評価を例に分析を行った。その結果、同破砕帯評価では、関連する科学的知見を規制に反映させるための手続の不備、原子力規制委員会内部におけるリスク評価とリスク管理の機能的未分離、等といった課題が提起され、その背景には、「安全性評価に関して科学的不確実性を内包する事象と規制との間の結節点となる手続やフレームワークが構築され、その下で各当事者間の適正なコミュニケーションと役割分担が行われ、当事者や利害関係者にとって一定の説得力を持つ規制判断へと結実する」という仕組みが、その規制運用において確立されていなかった点があることを明らかにした⁽³⁾。

d. 原子力事業環境整備

「エネルギー基本計画」において原子力は「重要なベースロード電源」と位置づけられた(後掲(2)参照)ものの、電力システム改革の下、その担い手である電力会社を取り巻く事業環境は不確実性を増しており、政策の実現が課題となっている。

当研究所は、電力自由化後に、欧州諸国が原子力発電を維持・利用するために、どのような経済的手法を採用しているか、について調査し、その評価を行った。その結果、欧州では、①資本集約的な原子力発電の新増設を促すために、差額精算方式による政府による固定価格買取制度(FIT-CfD)を導入する例(英国)、②大口需要家と長期契約や共同投資契約を結んで原子力発電の資金

調達に活用している例(フィンランド、フランス、ベルギー等)等が採用されていることがわかった。その一方で、これらの施策に関しては、欧州内で、市場を歪め、競争を制限するものである等といった批判がなされていることも明らかとなった⁽⁴⁾。

(2) 長期エネルギー需給見通しにおける原子力の位置づけ

2015年7月に「エネルギー基本計画」の定量的な姿である長期エネルギー需給見通し(以下、需給見通し)が決定した。以下では、当研究所で行った「2030年までの経済・エネルギー需給展望」(以下、「展望」)結果を踏まえつつ、原子力の位置づけを中心に、その概要をみていく。

需給見通しに先だって定められた「エネルギー基本計画」で、原子力は以下のように位置づけられている。『燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きく、数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる低炭素の準国産エネルギー源として、優れた安定供給性と効率性を有しており、運転コストが低廉で変動も少なく、運転時には温室効果ガスの排出もないことから、安全性の確保を大前提に、エネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源である。(エネルギー基本計画第2章第2節(2)原子力より抜粋)』

需給見通しの策定にあたっては、①自給率は震災前を上回る水準(概ね25%)に、②電力コストは現状よりも引き下げ、③温室効果ガス削減目標は欧米に遜色ない水準に、の3つの基本方針があげられた。前提とする2030年までの経済成長率については、内閣府の経済再生ケースを基に年率1.7%とされた。これは潜在成長力をもとに当所「展望」で試算した結果(標準ケースで同1.0%、低成長ケースで同0.5%、高成長ケースで同1.5%)と比べて、かなり高めの成長率である。この高い経済成長率と、先述した3つの基本方針を同時に達成するには、野心的な省エネ(節電)の想定に頼らざるを得なかった、というのが今回の需給見通しの最大のポイントである。さらに、再エネ比率を越えない範囲で最大限の原子力利用も前提としつつ、最終的に電源構成を決めたのは、「電力コストを現状よりも低下させる」という条件であった。最終的な2030年の電源構成における各電源の比率は、原子力20~22%、再エネ22~24%、LNG27%、石炭26%、石油3%程度となった。多くの条件を全て満た

す需給構成の定量的な提示は、まさに針の穴に糸を通すような作業の帰結であったと言える。

図 3-6-3-1 は、当研究所の代替シナリオを、2030 年時点での日本全体の電気料金負担の対名目 GDP 比を横軸に、CO₂ 排出量の対 2005 年比を縦軸に比較したものである。経済成長率が異なるケース間では、名目 GDP も変化することから、電気料金負担の対名目 GDP 比に大きな変化は見られない一方で、CO₂ 排出量は、2005 年比で 10% 以上の開きが生じており、排出量の削減目標達成には、大きな不確実性が伴うことを確認することができる。また、標準ケースでの経済シナリオを前提としながらも、原子力発電量を 0% にしたケースでは、同じくゼロエミッション電源である再エネ発電量を 30% にまで上昇させたとしても、標準ケースに比べて CO₂ 排出量は増加している^{(5),(6)}。

長期エネルギー需給見通しでは、大幅な省エネが見込まれており、それが実現しない場合に、国民負担の増加を抑えつつ、CO₂ 排出量の削減を行うためには、原子力発電の果たす役割は大きい。

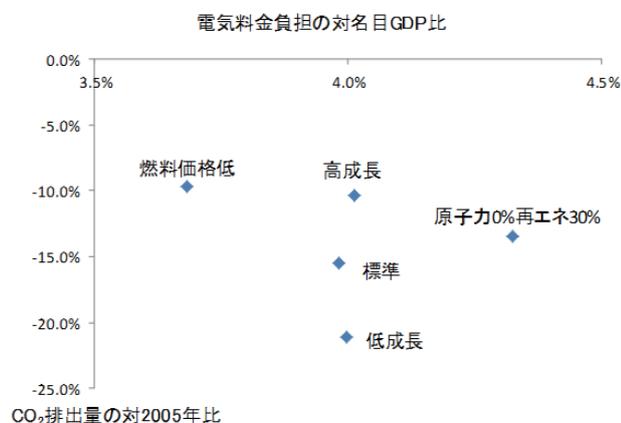


図 3-6-3-1 電力中央研究所の代替シナリオによるケース間の感度分析 CO₂ 排出量と電気料金負担の対名目 GDP 比

3-6-4 省エネ・節電政策の研究

(1) 省エネルギー政策と市場バリア

さまざまな温暖化抑制策の中で、需要側の省エネルギー推進は最も重要な対策の一つである。省エネルギーの推進には、3-5 節で述べたような省エネルギー技術の研究開発だけでなく、その普及や効率的利用も併せて進める必要がある。それらを促すための政策措置は、大

きく以下の3つに分類できる。

一つ目は、3-5 節で述べたような省エネルギー技術の研究開発を支援する政策である。具体的には国家プロジェクトや NEDO を通じた企業・大学への研究開発支援などが当てはまる。二つ目は、エネルギー価格への課税やキャップ・アンド・トレード制度など、エネルギー価格を上昇させることで需要を抑制する政策である。そして三つ目は、市場にはさまざまな「市場バリア」が存在し、それが費用効果的な省エネルギーの実現を妨げていると考えられることから、情報提供や規制措置を通じて市場バリアの解消を図る政策である。

ここで、省エネルギーの市場バリアとは、経済合理的であるはずの省エネルギー対策の実施を妨げる要因の総称であり、具体的には表 3-6-4-1 のようなものが含まれる^{(1),(2)}。不完全情報により省エネルギーが阻害されている例として、エアコン暖房が挙げられる。エアコンによる暖房はガス暖房や電気ヒーターよりも高効率であり、かつ熱単価も安いと、効果的な省エネ対策といえる。しかし、当研究所の調査によると、エアコン暖房の方が高いと誤解しているがために、他の暖房手段を選択している世帯が多く存在しており、適切な情報提供が求められる⁽³⁾。また、ビルにおけるオーナー・テナント問題は動機の不一致の典型例である。テナントが光熱費を負担する場合、省エネルギーを進めてもオーナーは得をしないため、通常の設定より大きな初期投資を要する高効率設備の導入には消極的になってしまう⁽⁴⁾。需要家の省エネルギー行動を効果的に促すためには、このようなさまざまな市場バリアを把握した上で、その解消が図られるように政策を設計・運用する必要がある。

表 3-6-4-1 省エネルギーに対する主な市場バリア

バリア	内容
不完全情報	省エネ対策についての情報・ノウハウがない
動機の不一致	オーナー・テナント問題など、関係するアクター間の思惑が一致せず、取り組みが進まない
取引費用	対策の検討や関係者との調整に要する手間・労力
限定合理性	時間や気持ちの余裕がなく、検討能力にも限界がある
惰性	従来からのやり方を変えることへの抵抗
組織構造	組織の縦割り構造などのために対策が進みにくい

(2) 国内政策の評価

わが国では、石油危機を契機として省エネルギー法が施行され、諸外国と比べてもより積極的な政策が展開さ

れてきたといえる。現在の主な省エネルギー政策としては、次のようなものがある。

- ・家電機器や業務用機器に対するトップランナー基準
- ・省エネルギー法による工場やビルに対するエネルギー管理規制
- ・省エネルギー設備導入に対する補助金
- ・省エネルギー診断事業による情報提供

これらの政策は重要な成果を上げてきた一方で、さまざまな改善余地があることも明らかになっている。例えば、1997年に開始されたトップランナー基準は、市場に存在する最も高効率な製品（トップランナー）の水準の達成を求める厳しい規制であり、これまでのエアコン効率や自動車燃費の向上に大きな寄与があった。その一方で、既に多くの製品で安価な効率改善余地が小さくなり、消費者にとって投資回収まで長期間を要する場合は生じつつある⁽⁵⁾。また、省エネルギー法は、一定量以上のエネルギーを消費する企業に対して、エネルギー管理者の選任、エネルギー使用状況の報告、エネルギー消費原単位の改善（年平均1%改善を目標とする）、省エネルギー設備投資の計画提出などを求めている。当研究所の調査によると、これは自主的なエネルギー管理体制の構築に重要な効果があったものの、形式的な遵守に留まる企業も多いと考えられ、専門家による省エネルギー診断の活用などを通じて実質的な対策を促すような改善が求められる⁽¹⁾。

さらに、省エネルギー補助金も設備投資を促す上で重要な政策であるが、近年の予算は約2,000億円程度と多額に上っていることから、その必要性や費用対効果の確保が極めて重要となる。当研究所が実施した過去の補助事業の評価や他の評価事例を踏まえると、費用対効果（削減費用）が回避可能原価と同程度であることから妥当といえる事業があった一方で⁽⁶⁾、かなり費用対効果が悪い事業が一部存在することもわかった（図3-6-4-1）。

(3) 東日本大震災後の節電実態

東日本大震災以降、原子力発電所の停止等によって生じた電力不足を背景に、大幅な節電対策が進められてきた。次第に節電意識は緩和しつつあるが、2014年夏時点においても依然、電力需要は2010年比5～10%程度抑制されている。

このような大幅な需要抑制が実現したことは今後の省

エネルギー推進にも重要な示唆があることから、その実態を把握しておくことが重要である。そこで当研究所では、2011年～2014年の4年間にわたって、震災後の事業所・家庭における節電実態を定点観測してきた^{(7),(8)}。

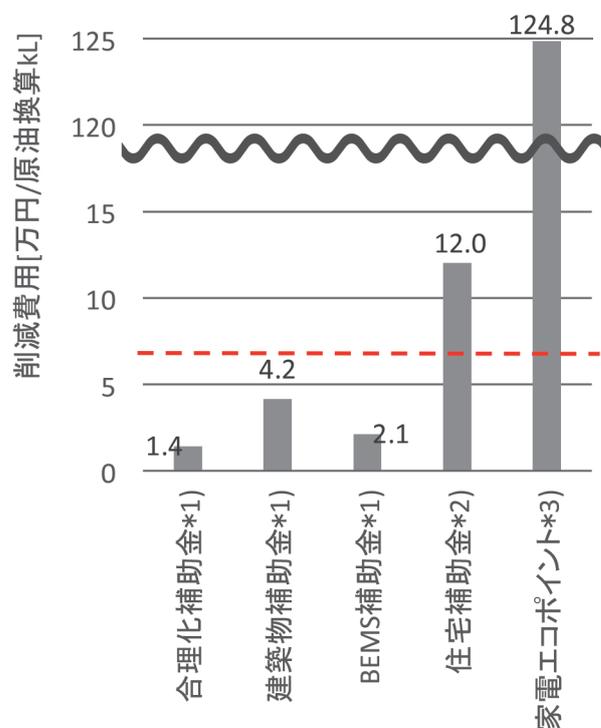


図 3-6-4-1 省エネ補助金の費用対効果の評価事例

*1)文献⁽⁶⁾、*2)筆者試算、*3)文献⁽⁸⁾にそれぞれ基づく
破線は2000年代の回避可能原価を示す。

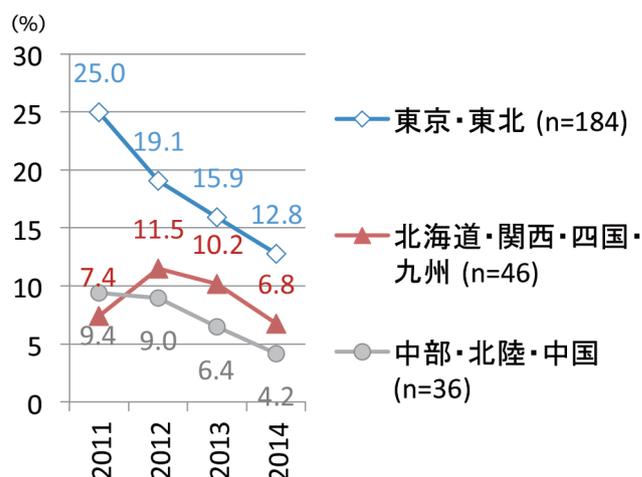


図 3-6-4-2 夏期の業務系事業所(オフィス他)における照明の間引き率の推移

まず事業所に関しては、節電の取り組みレベルは年々低下してきたが、2014年においても、照明の間引き率は平均10%程度であることや、冷房設定温度が2010年

と比べ約1℃高いことが明らかとなり（図3-6-4-2）、依然として震災前よりは高い水準にある。設備の効率化に関する対策では、工場ではLED照明の導入とデマンド管理対策、オフィス等業務系事務所ではLED照明の導入と空調機の効率化による寄与が比較的大きいと推定される。

また、家庭の節電継続状況も、総じていえば事業所に似ている。気温影響を取り除いた後の2014年夏季の電気使用量は、調査対象の東電・関電利用世帯で共に、2010年水準より約1割少なかった。期間の後半ほど、家電機器の購入や更新による効果（2014年夏には約4%と推定される）に加え、電気料金の上昇が節電行動に影響を及ぼしている。その一方、各種機器の節電意識や節電対策の実施率は、引き続き低下傾向にあり（図3-6-4-3）、テレビや冷蔵庫についての節電意識は震災前水準に近付きつつある。機器更新影響は逡減することが予想されるため、電気料金の上昇が落ち着けば、震災前と比べた現在の需要減少水準が維持されなくなる恐れがある点に注意が必要である。

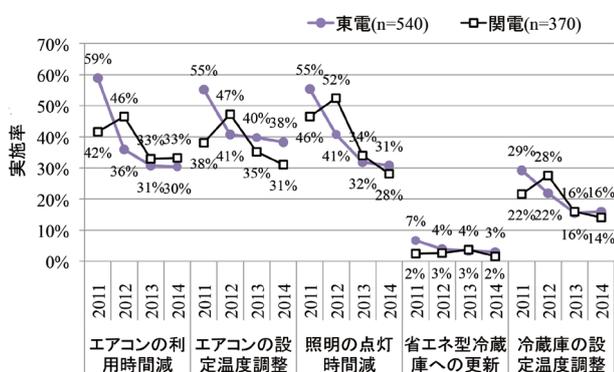


図3-6-4-3 家庭部門における主な用途の節電意識

3-6-5 再生可能エネルギー政策の現状と課題

2015年7月15日、新しい長期エネルギー需給見通し（案）（以下、「見通し」）が決定した。本稿では、再エネ比率を達成するために必要な費用負担と実現可能性を検証する。

「見通し」では、2030年時点で再エネ比率を22～24%とした。最大の論点の一つは、どのように太陽光発電（PV）の導入と費用負担のバランスをとるのか、より端的に言えば、想定した導入見通しを大幅に超過し設

置が進む「PVバブル」をいかに収束させるのかである。

そこで「見通し」では、火力・原子力の燃料費と再エネ買取総額を合わせた「電力コスト」を、2013年9.7兆円から約5%削減し、9.1～9.5兆円にするとした（図3-6-5-1①）。

これは、PVバブルを収束させるために決定的な役割を果たす。再エネの年間買取総額は2030年段階で3.7～4兆円とし、その内訳はまず地熱・水力・バイオマスの買取総額（約1～1.3兆円）を決め、残り2.7兆円がPV（2.3兆円）、風力（4,200億円）に配分されるとしている。

このように、我が国が再エネに支払える総額と、その内訳としてのPVの買取総額の上限を示したことは評価できる。

(1) 費用負担はPV既認定分の動向に依存

しかし、現状の固定価格買取制度(FIT)による買取総額は今年度既に1.8兆円を超えており、3.7～4兆円で落ち着く制度的な担保は何もない。事業用PVの設備認定は、今年3月末までに累計7,884万kWに達している。前述の買取総額以下に抑えるためには、既認定分のうち運転開始する設備を65%まで抑える必要がある。

他方、運転開始が既認定の6割に留まり、かつまだ運転開始していない設備に対する買取価格を25円/kW時に切り下げれば、PV買取総額は1.7兆円となる。再エネ買取総額の上限3.7兆円から、0.6兆円を支出せずに済む（図3-6-5-1②）。

(2) 最大限導入にも合致

これには「政府の再エネ最大限導入に逆行する」という反論があるかもしれない。しかし実際には、莫大なPV既認定分は、再エネの中でも極めて割高であり、その抑制によって、他の再エネの費用負担を効率的に再配分できるという意味で、むしろ再エネ全体の導入を促進するといえる。

前述の節約可能な0.6兆円を、再エネの中で買取価格が相対的に安価であり、かつ安定的な発電が見込まれる地熱発電等に回せば、再エネ比率を2%弱上積みできる。

つまり、莫大なPV既認定分に投じる国民負担を、他の再エネに振り向けるほうが、最大限導入に合致するのである。

(3) 効率性を重視した負担と普及のバランス

もちろん、運転開始していないことを理由に、一度認定したPV設備の買取価格を切り下げるといふ制度運用には、大きな困難が予想される。

しかし、既認定分のうち運転開始が僅か2割という現状を踏まえれば、今回の「見直し」は買取総額という概念によって、負担と普及のバランスを提示しているのだから、改めて既認定分に対する負担の削減方策を真剣に検討すべきである。

具体的には、既認定・未運開分に対して、買取価格を切り下げることに加えて、年間導入量に上限を設け入札等の競争原理を導入する、あるいは一定期間内に運転開始に至らない設備への認定取消等も考えられる。「見直し」を契機に、再エネを最小の費用で最大量の導入を図る効率性の観点に立ち返るべきである。

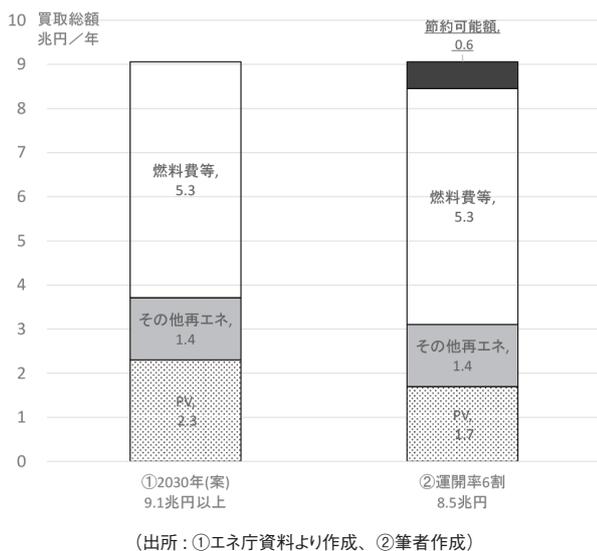


図 3-6-5-1 2030年電力コスト

図 3-6-5-1 に示すように、2030年「電力コスト」は莫大なPV既認定・未運開の動向に左右される。

3-6-6 国際枠組みの研究

地球温暖化問題は日本一国だけで解決できるものではなく、グローバルな協調の下に進めていく必要がある。そのため、1990年代から25年近くにわたって国際交渉が行われ、国際枠組みが定められてきた。

当研究所は、長年、国際枠組みのあり方に関する研究

を積み重ねてきており、以下では、国際交渉の動向を交えつつ、当所の分析結果の概要を紹介する。

(1) これまでの国際交渉の経緯

1997年に合意された京都議定書に基づき、2008年から2012年までを第1約束期間として、先進国(米国・カナダ等を除く)が排出削減の義務を負っていた。しかし、米国が議定書から離脱し、中国はもともと義務対象外であるため、京都議定書だけではこれらの大排出国の排出を抑制できず、温暖化を防止するのに不十分であった。

そのため、2007年に行われた気候変動枠組条約(UNFCCC)の第13回締約国会議(COP13)以降、2013年からの「ポスト京都議定書」の枠組みが交渉されてきた。

その結果、COP16(2010年、開催地はメキシコのカンクン)とCOP17(2011年、開催地は南アフリカのダーバン)、及びCOP18(2012年)の合意によって、2020年までの枠組みが決まった。欧州連合(EU)等は、京都議定書の下で、2013年から2020年までを第2約束期間として、引き続き、削減義務を負う。一方、ボトムアップ型の枠組み(カンクン合意という)の下で、米国を含むすべての先進国が自主的な総量目標を、中国とインドを含む途上国が自主取組(GDP原単位目標など)を掲げ、その実施状況に対して国際的なレビューを行うことになった。また、カンクン合意は、温暖化影響への適応、資金支援、技術移転など途上国支援の強化も定めた。

同時に、COP17では、2020年以降の「ポスト京都議定書の次」の枠組みについて、2015年のCOP21を交渉期限として、2012年から検討を開始することが合意された。この合意は「ダーバンプラットフォーム」と呼ばれ、新枠組みの検討は、新設の「ダーバンプラットフォーム特別作業部会」(Ad-hoc Working Group on Durban Platform for Enhanced Action: ADP)で行われることになった。

ADPは、全ての国に適用される法的枠組みへの合意を目指しており、2015年11月30日に開始するCOP21に向けて交渉の最終局面に差し掛かっている。

(2) 国際枠組みの研究の概要と最近の交渉動向

当研究所では、国際枠組みについて、特に各国の削減目標の決め方に着目して研究を行ってきた。

a. 京都議定書とカンクン合意の対比

京都議定書では、先進各国の削減目標（たとえば日本は1990年比で2008年から2012年に6%減）が国際交渉における合意として定められ、各国はその目標を達成するために、国内の計画・政策を決めていくという手順がとられた。この方式はトップダウンアプローチと呼ばれている。国際レベルを上側（トップ）、国内レベルを下側（ボトム）とすると、上側で各国の目標に合意して、下側に落としていくためである。

一方、2010年のCOP16で決められたカンクン合意は、この順序を逆にした方式に基づいている。つまり、各国は2020年までの自国の排出削減の目標や取組を自国で決定してから、その内容を国際的な場に報告し、その実施状況に対して、国際的なレビューを受けることになる。下側で先に目標・対策を決めて、それを上側にあげることから、ボトムアップアプローチと呼ばれている。ボトムアップアプローチでは、各国の目標・対策についての国際交渉は行われない⁽¹⁾（図3-6-6-1）。

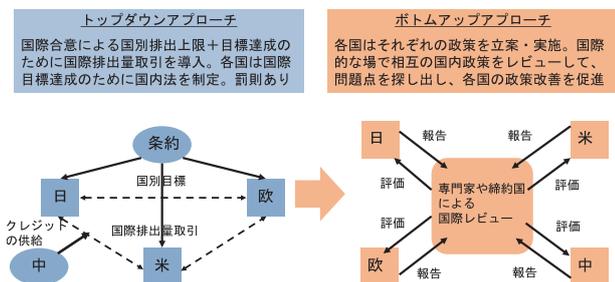


図 3-6-6-1 トップダウンアプローチとボトムアップアプローチの比較

2013年からはボトムアップ型のカンクン合意が主たる国際枠組みとなっている。この合意の下で、先進国だけではなく、中国・インドといった新興国も2020年までの対策を掲げており、一部の先進国の削減義務だけを定めた京都議定書よりもカバー率が大幅に改善した。

一方、各国が提示した目標・対策を積み上げていっても、2℃以内に温度上昇を抑制するという理念目標に届かないと指摘されている。この点は、2℃以内という長期の目標を2020年という短期の排出量にどのような考え方をもちて転換するのかにも関わっており、簡単には結論は出ない問題である。ただ、国連環境計画（UNEP）は2010年以降、各国の目標・対策を積み上げても2℃以内を満たせないという分析を毎年発表しており、この

分析が広く引用されるなかで、現在の努力水準では2℃以内を満たせないという理解が定着した。

b. 2020年以降の新枠組み

このような中、2020年以降の新枠組みの有力案として、ボトムアップとトップダウンを組み合わせた「ハイブリッドアプローチ」を全ての国に適用するという考え方が浮上している。両者の組み合わせ方は様々であるが、ADPで浮上したのは、「自国の排出削減に関する目標・取組を自国決定する。ただし、決定の前に、目標・取組の草案をその理解に必要な情報とともに提示し、草案に対する国際的な事前協議を行う期間を設ける」という考え方である。自国決定というボトムアップアプローチの根幹を維持しつつ、草案提示と事前協議によってトップダウン的な側面を盛り込むものである。米国が2013年3月に提示し、賛否両論があるものの、この考え方を軸に交渉が進んできた。

図3-6-6-2に、カンクン合意、ハイブリッドアプローチ、京都議定書第1約束期間の対比を示した。ADPで浮上したハイブリッドアプローチは、「(1) 目標・取組の草案の事前提示」、「(2) 各国草案に対する協議・評価」、「(3) 目標・取組の最終的な自国決定」、「(4) 実施段階の透明性確保」、「(5) 世界全体の努力水準の事後レビュー」という5段階からなる。図に示したように既存のカンクン合意に対して、第1段階と第2段階を追加したものと言える⁽²⁾。

2013年11月のCOP19では、「COP21よりも十分に先立って（準備ができた国は2015年3月までに）約束草案を提示するように全ての国に招請」することに合意した。「約束草案」とは、交渉上の用語で概ね、草案段階の目標を意味する。COP21という合意期限の前の事



図 3-6-6-2 3つのアプローチの対比

前提示であり、ここまでは米国の提案に沿って進んだ。しかし、2014年12月のCOP20では、草案提示後の事前協議を2015年にCOP21に先立って実施することに合意しようとしたが、中国やインドなど一部の新興国・途上国が強く反対し、合意できなかった。この点では、米国提案から逸れることになった。

新枠組みに大きな方向性は見えつつあるものの、詳細な制度設計については、各国間の意見の相違は現時点(2015年9月)でも依然として大きい。制度設計上の論点には、①約束のタイプ、②目標年・周期、③約束に付す情報の項目、④事前協議・評価の方法、⑤約束の登録方法、⑥約束の法的拘束性、⑦透明性確保のルール、⑧事後レビューの役割とプロセス、⑨遵守メカニズムの採否と役割などがあるが、表3-6-6-1はこのうち、②、⑤、⑥、⑦、⑧について、2014年時点に各国が示した見解を整理したものである⁽³⁾。現時点では、もう少し意見が収斂

しているが、COP21に向けて詰めるべき論点がまだ多数残っている。

また、COP19での合意に従って、各国は順次、約束草案を提出しているが、カンクン合意の時と同様に、約束草案を世界全体で積算して、2℃目標と整合するかどうか、大きな論点になると見込まれている。COP20では、気候変動枠組条約の事務局に対して、「約束草案の積上げ効果」に関するレポートを11月1日までに取りまとめるように要請しており、同月末に開始するCOP21で整合性確保が課題となりうる。これ以外にも、途上国支援のあり方や米国参加の確保も課題として残っており、これらに応える方法として、当研究所では「取組を継続強化するための新たなプロセスの常設」を示した⁽³⁾。

COP21がどのような帰結を迎えるかは今後も予断できないが、日本の温暖化対策は国際枠組みに左右されるため、今後もその動向を注視していく必要がある。

表 3-6-6-1 ハイブリッドアプローチの制度設計に関する各国の見解 (2014 年時点)

論点	各国の見解
目標年・周期	① 2030年(10年サイクル)(+中間レビュー)(日本、EU、カナダ、韓国、インド等) ② 2025年(5年サイクル)(米国) ③ 2025年(5年サイクル)を支持するが、5年間の約束+その後の5年間の示唆的約束も可(後発開発途上国等) ④ 5年間の約束+その後の5年間の示唆的約束(ブラジル、南アフリカ等) ⑤ 全ての国に2030年/2025年、または先進国は2030年/2025年、途上国には多様性(※サイクルではなく年限のみ提示)(中国)
約束の登録方法	① 新合意に刻み込む(inscribe)(EU、後発開発途上国、小島嶼国等) ② 合意の補足文書である国別の行程表(schedule)に含める(米、豪等) ③ 法的文書の附属書や行程表に書き込む(南アフリカ) ④ 新合意の添付書に含める(中国)
約束の法的拘束性	① 約束に法的拘束力をもたせる(EU、後発開発途上国等) ② 約束そのものではなく、約束の提出、その達成のための措置の実施、実施へのレビューを受けることに法的拘束力をもたせる(日本) ③ 約束そのものではなく、約束の提示や透明性確保に拘束力をもたせる。また、国内法で拘束力をもたせる(ニュージーランド)または約束実施を下支えする国内の既存措置・予見される措置(そのうちの一部は法的効力を持つ)についての情報を提示(米国) ④ 2020・30年における排出削減・抑制のプログラム・措置を策定し実施することに拘束力(中国)
透明性確保のルール	① 共通の計測・報告・検証システムとアカウンティングルールが必要(先進国等) ② 最終的には共通システムを目指すべきだが、途上国は当面はオプションの中から自由選択できるようにすべき(南アフリカ) ③ 全ての国に適用される共通ルールは不要であり、先進国・途上国の二分法に基づく既存システムを活用すべき(中国・インド等)
遵守メカニズム	① 遵守促進機能を中心とするメカニズムが必要(米、豪、南アフリカ、メキシコ等) ② 罰則も含む遵守メカニズムが必要(スイス、後発開発途上国等) ③ 遵守のメカニズムが必要だが、内容は明言せず(EU、ニュージーランド等)

参考文献・資料等

第1章

- (1) 地球温暖化対策推進本部：第29回地球温暖化対策推進本部 議事要旨、2015。
- (2) 電気事業連合会ホームページ：「電気事業における低炭素社会実行計画」の策定について、2015。

第2章

2-1 節

- (1) 筒井純一：IPCC 第1作業部会の第5次評価報告書の要点と地球温暖化対策への示唆、電力中央研究所 調査報告、V13013、2014。
- (2) 筒井純一、大庭雅道、門倉真二、西澤慶一、野原大輔：IPCC 第5次評価報告書のアンバーダイアグラムによるリスク評価について、電力中央研究所 調査報告、V14012、2015。
- (3) Myhre, G., E.J. Highwood, K.P. Shine, and F. Stordal, New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 25, 2715-2718, 1998.
- (4) IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker, T.F., et al. (eds), Cambridge University Press, 1535p, 2013.
- (5) Le Quéré, C., et al., Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, 7, 47-85, 2015.
- (6) 温室効果ガス世界資料センター：Global mean mole fractions. 2014 2014/09/09; Available from: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/pub/global/globalmean.html>.
- (7) IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., et al. (eds), Cambridge University Press, 996p, 2007.
- (8) 筒井純一、西澤慶一、野原大輔、大庭雅道：気候感度の不確実性に関する科学的知見と地球温暖化緩和策の考え方、電力中央研究所 調査報告、V11019、2012。
- (9) Otto, A., et al., Energy budget constraints on climate response. *Nature Geoscience*, 6, 415-416, 2013.
- (10) 渡部雅浩：ハイエイトス、天気、61、277-279、2014。
- (11) Trenberth, K.E. and J.T. Fasullo, An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 1, 19-32, 2013.
- (12) 気象庁 地球環境・海洋部：2015年6月の実況と2015年7月～2016年1月の見通し、エルニーニョ監視速報、274、2015。
- (13) 気象庁：2014年（平成26年）の世界と日本の年平均気温（速報）～世界の年平均気温が1891年以降最高に～、報道発表資料、<http://www.jma.go.jp/jma/press/1412/22c/worldtemp2014.pdf>, 2014
- (14) 筒井純一：近年の気温上昇の停滞（ハイエイトス）と地球温暖化対策への示唆、エネルギーと動力、64、80-86、2014。
- (15) Meehl, G.A., et al., The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383-1394, 2007.
- (16) Taylor, K.E., R.J. Stouffer, and G.A. Meehl, An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485-498, 2012.
- (17) Meehl, G.A., R. Moss, K.E. Taylor, V. Eyring, R.J. Stouffer, S. Bony, and B. Stevens, Climate Model Intercomparisons: Preparing for the Next Phase. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95, 77-78, 2014.
- (18) Tsutsui, J., Y. Yoshida, D.-H. Kim, H. Kitabata, K. Nishizawa, N. Nakashiki, and K. Maruyama, Long-term climate response to stabilized and overshoot anthropogenic forcings beyond the twenty-first century. *Climate Dynamics*, 28, 199-214, 2007.
- (19) Nakicenovic, N. and R. Swart, eds. *Emissions scenarios. A special report of Working III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 2000.
- (20) Moss, R.H., et al., The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756, 2010.
- (21) Friedlingstein, P., et al., Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets. *Nature Geoscience*, 7, 709-715, 2014.
- (22) Raupach, M.R., et al., Sharing a quota on cumulative carbon emissions. *Nature Climate Change*, 4, 873-879, 2014.
- (23) Nohara, D., J. Tsutsui, S. Watanabe, K. Tachiiri, T. Hajima, H. Okajima, and T. Matsuno, Examination of a climate stabilization pathway via zero-emissions using Earth system models. *Environmental Research Letters*, 10, 095005, 2015.
- (24) IPCC, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Field, C.B., et al. (eds), Cambridge University Press, 1132p, 2014.
- (25) IPCC, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry, M.L., et al. (eds), Cambridge University Press, 976p, 2007.
- (26) Lenton, T.M., H. Held, E. Kriegler, J.W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, and H.J. Schellnhuber, Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 1786-1793, 2008.
- (27) Smith, J.B., et al., Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "reasons for concern". *Proceedings*

- of the National Academy of Sciences, 106, 4133–4137, 2009.
- (28) IPCC, Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Edenhofer, O., et al. (eds), Cambridge University Press, 2014.
- (29) Kriegler, E., B.C. O'Neill, S. Hallegatte, T. Kram, R.J. Lempert, R.H. Moss, and T. Wilbanks, The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis : A new approach based on shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 22, 807–822, 2012.
- (30) Meinshausen, M., S.C.B. Raper, and T.M.L. Wigley, Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, *MAGICC6 – Part 1 : Model description and calibration. Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 1417–1456, 2011.
- (31) IPCC, Climate Change 2007 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Metz, B., et al. (eds) , Cambridge University Press, 851p, 2007.
- (32) 星野優子、杉山大志、上野貴弘 : IPCC 第4次評価報告書の低排出シナリオについての分析、電力中央研究所調査報告、Y08008、2009.
- (33) Rogelj, J., D.L. McCollum, A. Reisinger, M. Meinshausen, and K. Riahi, Probabilistic cost estimates for climate change mitigation. *Nature*, 493, 79–83, 2013.
- (34) IPCC, Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, R.K. Pachauri, and L.A. Meyer (eds), IPCC, 151p, 2014.
- (35) 筒井純一 : インパルス応答モデルに基づく簡易的な気候変化予測手法の構築、電力中央研究所 研究報告、V08022、2009.
- (36) Matsuno, T., K. Maruyama, and J. Tsutsui, Stabilization of atmospheric carbon dioxide via zero emissions—An alternative way to a stable global environment. Part 1 : Examination of the traditional stabilization concept. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 88, 368–384, 2012.
- (37) Matsuno, T., K. Maruyama, and J. Tsutsui, Stabilization of atmospheric carbon dioxide via zero emissions—An alternative way to a stable global environment. Part 2 : A practical zero-emissions scenario. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 88, 385–395, 2012.
- (38) 筒井純一 : 新しい気候安定化の概念に基づく現実的なCO₂排出削減の道筋、電力中央研究所 研究報告、V12007、2013.
- (39) Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres, Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy : Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 2013.
- (40) Houghton, R.A., et al, Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*, 9, 5125–5142, 2012.
- (41) 温室効果ガスインベントリオフィス : 日本の温室効果ガス排出量データ (1990 ~ 2013 年度) 確報値、<http://www.gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>, 2015.
- (42) 湯原哲夫、氏田博士 編 : エネルギービジョン —地球温暖化抑制のシナリオ、海文堂出版、204p、2014.
- (43) 秋元圭吾、和田謙一、佐野史典 : 統合評価モデルの話題、*日本エネルギー学会誌*、92、224–231、2013.
- (44) 山本博巳、杉山昌広、筒井純一 : エンドユース技術を組み込んだ世界統合評価モデル (BET モデル) の開発、電力中央研究所 研究報告、Y11005、2012.
- (45) Kriegler, E., et al, The role of technology for achieving climate policy objectives : overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies. *Climatic Change*, 123, 353–367, 2014.
- (46) Sugiyama, M., Climate change mitigation and electrification. *Energy Policy*, 44, 464–468, 2012.
- (47) Yamamoto, H., M. Sugiyama, and J. Tsutsui, Role of end-use technologies in long-term GHG reduction scenarios developed with the BET model. *Climatic Change*, 123, 583–596, 2014.
- (48) Sugiyama, M., O. Akashi, K. Wada, A. Kanudia, J. Li, and J. Weyant, Energy efficiency potentials for global climate change mitigation. *Climatic Change*, 123, 397–411, 2014.
- (49) 黒沢厚志、森山亮、村上嘉孝 : バイオエネルギー CCS、*日本エネルギー学会誌*、92、211–215、2013.
- (50) 杉山昌広 : 気候工学入門 新たな温暖化対策ジオエンジニアリング、日刊工業新聞社、197p、2011.
- (51) 杉山昌広 : 気候工学 (ジオエンジニアリング) の研究開発とガバナンスに関する海外動向の分析、電力中央研究所 調査報告、2012.
- (52) 杉山昌広、山本博巳、筒井純一 : 長期の地球温暖化対策における二酸化炭素除去技術の役割、電力中央研究所 研究報告、Y13015、2014.
- (53) Fuss, S., et al, Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, 4, 850–853, 2014.

2-2 節

- (1) 加藤央之 : 地球温暖化問題とエネルギー利用との調和、地球温暖化による影響と適応対策、*化学技術誌*、28-3、52–58、1990.
- (2) 電力中央研究所 : 地球温暖化に挑む、*電中研レビュー*、28、1992.
- (3) 電力中央研究所 地球温暖化グループ 編 : 電気のチカラ 低炭素社会を実現する技術、*エネルギーフォーラム*、255p、2010.
- (4) 幸田栄一、高橋徹、三巻利夫 : 発電システム熱効率解析汎用プログラムの開発、電力中央研究所 研究報告、W99034、2000.

- (5) Giorgi, F. and L.O. Mearns, Approaches to the simulation of regional climate change : A review. *Reviews of Geophysics*, 29, 191–216, 1991.
- (6) Kato, H., K. Nishizawa, H. Hirakuchi, S. Kadokura, N. Oshima, and F. Giorgi, Performance of RegCM2.5/NCAR-CSM nested system for the simulation of climate change in East Asia caused by global warming. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 79, 99–121, 2001.
- (7) Oshima, N., H. Kato, and S. Kadokura, An application of statistical downscaling to estimate surface air temperature in Japan. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 107, D10, ACL 14-11-ACL 14-10, 2002.
- (8) Wigley, T.M.L., P.D. Jones, K.R. Briffa, and G. Smith, Obtaining sub-grid-scale information from coarse-resolution general circulation model output. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 95, D2, 1943–1953, 1990.
- (9) 門倉真二：統計的ダウンスケーリングを用いた気象要素の確率密度推定手法、電力中央研究所 研究報告、V08037、2009.
- (10) 門倉真二、豊田康嗣、筒井純一：河川流域降水量の気候的確率密度関数—推定手法の評価—、電力中央研究所 研究報告、V11058、2012.
- (11) 筒井純一、初鹿宏壮、門倉真二、和田浩治：全球気象データの長期再解析 —JRA-25 再解析データの仕様、品質、および気候変化研究への応用—、電力中央研究所 研究報告、V05024、2006.
- (12) Onogi, K., et al., The JRA-25 Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 85, 369–432, 2007.
- (13) 露木義、川畑拓矢 編：気象学におけるデータ同化、気象研究ノート第 217 号、日本気象学会、277p、2008.
- (14) Yukimoto, S., et al., A new global climate model of the Meteorological Research Institute : MRI-CGCM3—Model description and basic performance—. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 90A, 23–64, 2012.
- (15) 門倉真二、豊田康嗣、筒井純一：河川流域降水量の気候的確率密度関数（その 2）—気候変化による影響の推定—、電力中央研究所 研究報告、V12016、2013.
- (16) Ohba, M., S. Kadokura, Y. Yoshida, D. Nohara, and Y. Toyoda, Anomalous weather patterns in relation to heavy precipitation events in Japan during the Baiu season. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 688–701, 2015.
- (17) 大庭雅道、豊田康嗣、野原大輔、門倉真二、吉田義勝：梅雨期の豪雨イベントに関連した広域気象パターンの抽出、電力中央研究所 研究報告、V12017 2013.
- (18) Kobayashi, S., et al., The JRA-55 reanalysis : General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 93, 5–48, 2015.
- (19) Kamiguchi, K., O. Arakawa, A. Kitoh, A. Yatagai, A. Hamada, and N. Yasutomi, Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years. *Hydrological Research Letters*, 4, 60–64, 2010.
- (20) Tsutsui, J., Changes in potential intensity of tropical cyclones approaching Japan due to anthropogenic warming in sea surface and upper-air temperatures. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 88, 263–284, 2010.
- (21) 筒井純一：台風に起因する暴風雨に関する地球温暖化影響の評価、電力中央研究所 研究報告、V10014、2011.
- (22) Emanuel, K.A., The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, 326, 483–485, 1987.
- (23) Emanuel, K.A., Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52, 3969–3976, 1995.
- (24) Holland, G.J., The maximum potential intensity of tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54, 2519–2541, 1997.
- (25) Knutson, T.R., et al., Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience*, 3, 157–163, 2010.
- (26) Meehl, G.A., et al., The WCRP CMIP3 multimodel dataset : A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383–1394, 2007.
- (27) O’Gorman, P.A. and T. Schneider, The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 14773–14777, 2009.
- (28) 社会資本整備審議会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～ 中間とりまとめ、河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会 2015.
- (29) 石川智己：送電用鉄塔の耐風信頼性設計法に関する検討（その 1）—耐風信頼性解析コードの開発と風向を考慮した設計風速の設定方法の提案—、電力中央研究所 研究報告、N07032、2008.
- (30) 石川智己、小野秀治、朱牟田善治、吾郷誠二：配電設備における強風災害低減への取り組み、*日本風工学会誌*、2008、114、30–35、2008.
- (31) 土木学会、強くしなやかな社会を実現するための防災・減災等に関する研究委員会編：自然に災害に強いしなやかな国土創出のために—行動宣言と行動計画—、気候変動と緩和策、2015.
- (32) 日本大ダム会議：技術委員会 地球気候変動とダム分科会報告：地球温暖化とダム —第 2 フェーズ ダムの機能（治水、利水）—、大ダム、232、5–109、2015.
- (33) IPCC, *Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry, M.L., et al. (eds) , Cambridge University Press, 976p, 2007.

- (34) IPCC, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Field, C.B., et al. (eds), Cambridge University Press, 1132p, 2014.
- (35) 温暖化影響総合予測プロジェクトチーム：地球温暖化「日本への影響」—最新の科学的知見—、環境省 地球環境研究総合推進費 戦略的研究開発プロジェクト S-4 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究、2008.
- (36) 文部科学省、気象庁、環境省：日本の気候変動とその影響（2012年度版）、気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート、2013.
- (37) 中央環境審議会 地球環境部会 気候変動影響評価等小委員会：日本における気候変動による影響に関する評価報告書、2015.
- (38) 小林卓也：地球温暖化問題の現状と課題（第3回）：温暖化による環境影響、電力土木、345、111-114、2010.
- (39) 小林卓也、中野大助、坂口勇、青井亜紀子：我が国のダム・湖沼におけるカワヒバリガイの生息の可能性、電力中央研究所 研究報告、V11025、2012.
- (40) Takeuchi, T., T. Kobayashi, and M. Nashimoto, Altitudinal differences in bark stripping by sika deer in the subalpine coniferous forest of Mt. Fuji. Forest Ecology and Management, 261, 2089-2095, 2011.
- (41) 小林卓也、梨本真、竹内亨、中野隆志：富士山西斜面の大沢右岸の異なる標高におけるカラマツの樹齢と分布様式、富士山研究、6、55-60、2012.
- (42) 中屋耕、若松孝志、池田英史、阿部聖哉、豊田康嗣：森林における土壌侵食量評価のための林内雨運動エネルギーモデルの開発、電力中央研究所 研究報告、V11001、2011.
- (43) 若松孝志、池田英史、中屋耕、阿部聖哉：林床被覆が森林斜面における土壌流出プロセスにおよぼす影響、電力中央研究所 研究報告、V11030、2012.
- (44) 池田英史、若松孝志、中屋耕、阿部聖哉：森林からの土壌流出予測における EUROSEM の適用性の検討、電力中央研究所 研究報告、V13001、2013.

第3章

3-1 節

- (1) 今村栄一、長野浩司：日本の発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量評価—2009年に得られたデータを用いた再推計—、電力中央研究所 研究報告 Y09027、2010.
- (2) 今村栄一：メガソーラー発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量評価、電力中央研究所 研究報告 Y12031、2013.
- (3) 今村栄一：洋上・陸上ウィンドファームのライフサイクル CO₂ 排出量評価、電力中央研究所 研究報告 Y14018、2015.

3-2-1 節

- (1) 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会：“次世代

火力発電に係る技術ロードマップ技術参考集”、http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/report_001.html, 2015.

- (2) 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会：“次世代火力発電に係る技術ロードマップ 中間とりまとめ”、http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/report_001.html, 2015.
- (3) 福田雅文：A-USC、火力原子力発電、65 (10)、742-748、2014.
- (4) 張聖徳、高橋由紀夫：Ni 基合金 Alloy617 の母材および溶接継手の高温引張および疲労特性評価、電力中央研究所 研究報告 Q13001、2014.
- (5) 幡宮重雄：高湿分空気を利用したガスタービン発電技術、火力原子力発電、2002.
- (6) 幡宮重雄：ガスタービンを利用した新型発電システム 高湿ガスタービン、日本ガスタービン学会誌、34 (2)、100-105、2006.
- (7) 後藤仁一郎、江田隆志、高橋徹：高湿分空気利用ガスタービン (AHAT) の開発、日本ガスタービン学会誌、40 (3)、16-22、2012.
- (8) 高橋徹、幡宮重雄、江田隆志：アドバンスト高湿分空気利用ガスタービン (AHAT) の研究開発、電力中央研究所 研究報告 M07023、2008.
- (9) 高橋徹、渡邊泰、荒木秀文、江田隆志：アドバンスト高湿分空気利用ガスタービン (AHAT) システムの研究開発、電力中央研究所 研究報告 M10004、2011.
- (10) 高橋徹、渡邊泰、後藤仁一郎、荒木秀文、江田隆志：アドバンスト高湿分空気利用ガスタービン (AHAT) システムの研究開発、電力中央研究所 研究報告 M13001、2013.
- (11) 荒木秀文、秋山陵、麻尾孝志、高橋徹、江田隆志：高湿分空気利用ガスタービンシステムの40MW級総合試験、第18回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 C204、301-304、2013.

3-2-2 節

- (1) 石橋喜孝：石炭ガス化複合発電 (IGCC) 実証機の実証試験終了と商用転用、エネルギーと動力、63 (280)、1-9、2013.
- (2) 荒木 雅：大崎クールジェンプロジェクトの進捗状況、火力原子力発電、66 (4)、225-230、2015.
- (3) 大崎クールジェン株式会社ホームページ：<http://www.osaki-coolgen.jp/eagle/> (2015年8月確認)
- (4) IPCC, Carbon dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press (2005)
- (5) DOE/NETL-2010/1397, rev2, Nov.2010.
- (6) 白井裕三ほか：電力中央研究所 研究報告 M07003 (2007)

3-2-3 節

- (1) 井内正直：バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発、電力中央研究所 研究報告 Y03023、2003.
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)：バイオマス賦存量及び利用可能量の全国市町村別推計と

マッピングに関する調査、事業成果報告書、2010。

- (3) 経済産業省資源エネルギー庁：平成 26 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2015）、2015。
- (4) 林野庁：平成 25 年度森林及び林業の動向、2014。
- (5) 林野庁：平成 26 年度森林及び林業の動向、2015。
- (6) 国土交通省：下水道バイオマスのエネルギーポテンシャルの推計（2012 年度データによる）、2015。
<http://www.mlit.go.jp/common/001057098.pdf>
- (7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：バイオマスエネルギー導入ガイドブック（第 3 版）、2010。
- (8) 木本政義、白井裕三：第 51 回石炭科学会議予稿集、46、2014。
- (9) 木本政義、白井裕三：第 50 回石炭科学会議予稿集、36、2013。
- (10) 環境省：石炭火力における混焼率 30% を実現する木質バイオマスの改質プロセスの実用化開発、委託業務成果報告書、2014。
- (11) 庄司哲也、他 3 名：4t/d 炭化燃料化実験設備の運転条件が炭化燃料性状に及ぼす影響の評価、電力中央研究所研究報告 M14012、2015。
- (12) 木本政義、中嶋朗、白井裕三：第 9 回バイオマス科学会議予稿集、O-101、2014。

3-3-1 節

- (1) IEA：Energy Technology Perspective 2014、2014。
- (2) Global CCS Institute：The Global Status of CCS 2014。
- (3) Aquistore project：<http://ptrc.ca/projects/aquistore>。
- (4) 経済産業省：苫小牧支店における実証試験計画、経済産業省産業技術環境局地球環境連携・技術室、2012。
- (5) 大崎クールジェンプロジェクト：<http://www.osaki-coolgen.jp/project/>。
- (6) 下田昭郎、横山隆壽、窪田ひろみ：CCS-Ready の技術的・政策的な含意、電力中央研究所 研究報告 V10011、2010。
- (7) Government of Canada：SOR/2012-167, Reduction of Carbon Dioxide Emissions from Coal-fired Generation of Electricity Regulations, P.C. 2012-1060, August 30, 2012。
- (8) USEPA：Carbon Pollution Standards for New, Modified and Reconstructed Power Plants, 3 August, 2015。
- (9) UK-DECC：Policy Paper, 2010 to 2015 government policy：UK energy security, 8 May, 2015。
- (10) 下田昭郎：総論—国内外における CCS の技術開発と政策の動向、エネルギー・資源、Vol.33、No.5、237-241、2012。

3-3-2 節

- (1) 横山隆壽、工藤聡：化学吸収式 CO₂ 回収技術の評価—モノエタノールアミンプロセスの運転特性及び LNG 焚き火力プラントへの適用に関するフィージビリティスタディ、電力中央研究所 研究報告 T04057、1995。

3-3-3 節

- (1) 電中研レビュー No.45、2011。
- (2) IPCC, 2005, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, U.S.A., 442 pp.
- (3) <http://www.saskpowerccs.com/ccs-projects/carbon-storage-and-research-centre/Weyburn>
- (4) <http://www.saskpowerccs.com/ccs-projects/boundary-dam-carbon-capture-project/>
- (5) <http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/Co2CaptureStorage/Pages/SleipnerVest.aspx>
- (6) 地球環境産業技術研究機構：平成 23 年度二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 成果報告書 2012。
- (7) <http://www.japanccs.com/business/demonstration/>
- (8) Blackford, J., Stahl, H., Bull, J., Bergès, B., Cevatoglu, M., Lichtschlag, A., Connelly, D., James, R., Kita, J., Long, D., Naylor, M., Shitashima, K., Smith, D., Taylor, P., Wright, I., Akhurst, M., Chen, B., Gernon, T., Hauton, C., Hayashi, M., Kaieda, H., Leighton, T., Sato, T., Sayer, M., Suzumura, M., Tait, K., Vardy, M., White, P., Widdicombe, S., 2014, Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage, Nature Climate Change 4, 1011-1016. Doi: 10.1038/NCLIMATE2381
- (9) 海江田秀志、末永弘、下田昭郎、田中姿郎、窪田健二、津旨大輔、伊藤久敏、鈴木浩一、下島公紀、窪田ひろみ、坪野孝樹、仲敷憲和、横山隆壽、大隅多加志：CO₂ 地中貯留に関わる基礎技術の開発、電力中央研究所 総合報告 N16、2012。
- (10) 田中姿郎、末永弘、伊藤由紀、窪田健二、志田原巧、伊藤久敏、中川加明一郎、鈴木浩一、大隅多加志、駒田広也：大規模排出源近傍における CO₂ 地中貯留可能性評価法—深部帯水層貯留に向けた研究開発—、電力中央研究所 総合報告 N07、2009。
- (11) 末永弘・中川加明一郎・志田原巧：CO₂ 地中貯留における移行挙動モデルの提案と現場への適用、電力中央研究所 研究報告 N06023、2007。
- (12) Shidahara, T., Gupta, N., Iwasaki, S., Suenaga, H., and Ito, Y., 2006, A case study on the environmental impact assessment on groundwater in Ohio River Valley region for CO₂ geological sequestration, Proc. of GHGT-8, IEA Greenhouse Gas Programme, Trondheim, Norway.
- (13) Garnett, A., Grieg, C. and Wheeler, C., The ZeroGen Project—Managing Risk and Uncertainty, GHGT-10, Energy Procedia, 4, pp.5631-5638, 2011.
- (14) Suenaga, H., S. Tanaka and H. Kaieda, Prediction of CO₂ migration in the proposed CO₂ storage site of ZeroGen, Australia, CRIEPI Report, N11003, 2011.

- (15) 末永弘、田中姿郎、窪田健二、鈴木浩一、海江田秀志：台湾電力総合研究所による CO₂ 地中貯留実証実験における注入 CO₂ の移行事前予測評価、電力中央研究所 調査報告 N14015、2015.
- (16) 窪田健二：CO₂ 地中挙動モニタリングのための物理探査手法の適用性評価、電力中央研究所 調査報告 N06010、2007.
- (17) 下島公紀：海底地層貯留における貯留 CO₂ 漏洩の検知・モニタリング技術の提案 電力中央研究所 研究報告 V09034、2009.
- (18) 海江田秀志、窪田健二、伊藤久敏、大隅多加志、若浜洋、三戸彩絵子：雄勝高温岩体への二酸化炭素注入による鉱物化固定に関する原位置実験、電力中央研究所 研究報告 N08051、2009.
- (19) Chiyoda corporation, supported by GCCSI, Final report "Preliminary Feasibility Study on CO₂ Carrier for Ship-based CCS", <http://www.globalccsinstitute.com/publications/preliminary-feasibility-study-co2-carrier-ship-based-ccs>, October 2011

3-3-4 節

- (1) Global CCS Institute : Strategic Analysis of the Global Status of Carbon Capture and Storage, Report2 : Economic Analysis of Carbon Capture and Storage Technology, 2009.
- (2) Global CCS Institute : Economic Assessment of Carbon Capture and Storage Technology, 2011 update, 2011.
- (3) The U.K. Carbon Capture and Storage Cost Reduction Task Force : The Potential for Reducing the Costs of CCS in the U.K., Final Report, 2013.
- (4) 湯龍龍、横山隆壽、窪田ひろみ、下田昭郎：日本における CCS 付き石炭火力発電のライフサイクルアセスメント（その 2）—太陽光発電、地熱発電との環境影響比較評価—、電力中央研究所 研究報告 V13021、2014.
- (5) Tan, L., Takahisa, Y., Kubota, H., and Shimota, A. : Life cycle assessment of a pulverized coal-fired power plant with CCS technology in Japan, Energy Procedia, 63, 7437-7443, 2014.
- (6) 下田昭郎、窪田ひろみ、横山隆壽：CCS の普及障壁に係る不確実性の事例調査、電力中央研究所 研究報告 V10012、2011.
- (7) 窪田ひろみ、横山隆壽、下田昭郎：豪州における CCS 技術の社会的受容性と我が国への示唆—ZeroGen プロジェクトに関する事例調査—、電力中央研究所 研究報告 V09004、2009.
- (8) 窪田ひろみ、馬場健司：気候変動緩和策としての低炭素発電技術および適応策に対する人々の意識と受容性、電力中央研究所 研究報告 V10023、2010.
- (9) 窪田ひろみ：発電技術に対する社会的受容性の現状と課題—CCS と地熱発電を事例とした意識調査—、電力中央研究所 研究報告 V13022、2014.

3-4-1 節

- (1) 坂口潤一、上村 敏、松田勝弘：配電線センサー情報による区間単位での太陽光発電出力推定手法の開発、電力中央研究所 研究報告 R14012、2015.
- (2) 浅利真宏：需要家機器との連携制御を用いた太陽光発電逆潮流制御方式—ヒートポンプ式給湯機翌日運転計画手法の実証試験と改良—、電力中央研究所 研究報告 R10042、2011.
- (3) 大嶺英太郎、浅利真宏：需要家機器による太陽光発電余剰電力有効利用手法の改良—当日補正機能の追加と検証—、電力中央研究所 研究報告 R13022、2014.
- (4) 天野、島、川上、井上、上原、仲間、大城、渡久地：既存電源と蓄電池を協調させた LFC 方式の制御効果の実証、平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会、1-103.
- (5) 田村、平口、橋本、西澤、和田：太陽光発電のための日射量予測手法の開発（その 1）—気象予測・解析システム NuWFAS による翌日の予測精度の評価—、電力中央研究所 研究報告 N10029、2011.
- (6) 田村、平口、西澤、小林：太陽光発電のための日射量予測手法の開発（その 2）—予測誤差の分析と精度改善法の検討—、電力中央研究所 研究報告 N13013、2014.
- (7) 野原、田村：太陽光発電のための日射量予測の信頼性指標、電力中央研究所 研究報告 V12015、2013.
- (8) 野原、田村、平口：確率気象予測のための領域アンサンブル予測手法の開発、電力中央研究所 研究報告 V14013、2015.
- (9) 白崎、北内：再生可能エネルギー大量導入時の各種系統条件が基幹系統の系統安定度に及ぼす基本的な影響、電力中央研究所 研究報告 R14013、2015.

3-4-2 節

- (1) A. Joensen : Short-Term Wind Power Prediction, Department of Mathematical Modeling, Technical University of Denmark Ph.D. Thesis No. 108, 2002.
- (2) L. Landberg : Short-term prediction of the power production from wind farms, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80, 207-220, 1999.
- (3) 門倉真二、橋本篤、服部康男、杉本聡一郎、和田浩治、平口博丸、田中伸和、七原俊也：電中研ウィンドファーム風力発電出力予測システムの開発、電力中央研究所 研究報告 V08065、2009.
- (4) 和田浩治、杉本聡一郎、豊田康嗣、平口博丸：電中研地域気象解析・予測システムの開発、電力中央研究所 研究報告 N06016、2006.
- (5) 橋本篤、服部康男、杉本聡一郎、門倉真二、和田浩治、平口博丸、田中伸和、七原俊也：風力発電出力予測への気象モデル適用性評価 N08027、2009.
- (6) 須藤仁、服部康男、平口博丸：海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究、電力中央研究所 研究報告 N07028、2008.
- (7) 門倉真二、加藤央之：非静力学気象モデルと統計的手法を用いた風速予測手法の評価、電力中央研究所 研究報告 V04032、2005.

- (8) 野原、田村、平口：確率気象予測のための領域アンサンブル予測手法の開発、電力中央研究所 研究報告 V14013、2015.
- (9) 電力中央研究所：風力発電電力系統安定化等調査、平成 13 年度新エネルギー・産業技術開発機構報告書、2002.
- (10) 電源開発、電力中央研究所、エネルギー総合工学研究所：風力発電電力系統安定化等技術開発、平成 19 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構報告書、2005.
- (11) 七原：風力発電に併設する蓄電池の所要容量に関する検討—長周期フラット運転を行う際の所要 kWh 容量—、電気学会論文誌 B、Vol. 129、No. 5、2009.
- (12) 山下、坂本、北内、七原、井上、塩浜、福田：小規模離島への風力発電導入時の系統周波数安定化方式の開発、電気学会論文誌 B、Vol. 131、No. 5、2011.
- (13) 環境省：平成 21 年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書、2010.
- (14) 環境省：平成 22 年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書、2011.
- (15) 経済産業省：平成 22 年度 新エネルギー等導入促進基礎調査事業（風力エネルギーの導入可能量に関する調査）調査報告書、2011.
- (16) JOGMEC：小規模地熱発電プラント設計ガイドライン、<http://geothermal.jogmec.go.jp/data/file/027.pdf>、2015.
- (17) Kubota, H., Hondo, H., Hienuki, S., and Kaieda H. : Determining barriers to developing geothermal power generation in Japan : Societal acceptance by stakeholders involved in hot springs, Energy Policy, 61, 1079-1087, 2013.
- (18) 窪田ひろみ：地熱発電開発と温泉事業との相互理解と地域共生に向けた方策、電力中央研究所 研究報告 V11033、2012.
- (19) Kubota H. : Social Acceptance of Geothermal Power Generation in Japan, Proceedings of World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- (20) 窪田ひろみ：発電技術に対する社会的受容性の現状と課題— CCS と地熱発電を事例とした意識調査—、電力中央研究所 研究報告 V13022、2014.
- (21) 海江田秀志：地熱増産システム (EGS) 技術開発の現状と課題、電力中央研究所 調査報告 N14017、2015.
- (22) Cappetti, G., Parisi, L., Ridolfi, R., and Stefani, G., 1995, Fifteen years of reinjection in the Larderello-Valle Secolo area : Analysis of the production data, Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, May 18-31 1995, Vol. 3, 2000.
- (23) Okabe, T., Sato, T., Osato, K., Saeki, K., Sakaguchi, K., Fujimoto, K., Shimada, T., and Tohsa, T., 2015, Current Status of Technology Development for Geothermal Reservoir Evaluation and Management, Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- (24) Genter A., Nicolas, C., Xavier, G., Bernd, M., Bernard, S., and Julia, S., 2012, Status of the Soultz Geothermal Project during Exploration between 2010 and 2012, Proceedings of the 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, SGP-TR-194, 2012.
- (25) Rose, P., Mella, M., and McCullough, J., Proceedings of the 21th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1 2006, 2013, SGP-TR-179, 2006.
- (26) Hogarth, R. A., and Bour, D., 2015, Flow Performance of the Habanero EGS Closed Loop, Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- (27) Petty, S., Nordin, Y., Glassley, W., Cladouhos, T. T., and Swyer, M., Improving Geothermal Project Economics with Multi-Zone Stimulation : Results from the Newberry Volcano EGS Demonstration, Proceedings of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 11-13, SGP-TR-198, 2013.
- (28) Duchane, D., 1995, Hot Dry Rock Geothermal Energy in the US - Moving Toward Practical Use, Proceedings of the World Geothermal Congress,

3-4-3 節

- (1) Bertani R. : Geothermal Power Generation in the world, 2010-2015 Update Report, Proceedings of World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25, April 2015.
- (2) 海江田秀志：地熱開発の政策動向、電力土木、No.376、pp3-8、2015.
- (3) 火力原子力発電技術協会：地熱発電の現状と動向、2015.
- (4) Tester, J. W., et al., The Future of Geothermal Energy Impact of Enhanced Geothermal System (EGS) on the United States in the 21th Century, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A., 359p, 2006.
- (5) Stark, M. A., Box Jr., T., Beall, J. J., Goyal, K. P., and Pingol, A. S., The Santa Rosa - Geysers Recharge Project, Geysers Geothermal Field, California, U.S.A., Proceedings of World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 2005.
- (6) 奥村忠彦：国内情報 温泉発電導入促進手引き書の解説及び小規模地熱発電と熱水・蒸気活用の事例紹介、地熱技術、Vol.39、Nos. 3&4、pp.29-40、2014.
- (7) 窪田ひろみ：持続可能な地熱エネルギー利用に向けた社会的受容性、日本エネルギー学会誌、94、pp.663-670、2015.
- (8) 窪田ひろみ、青島矢一：温泉熱を利用した小規模地熱発電の社会的受容性、第 23 回日本エネルギー学会大会要旨、8-5-4、2014.
- (9) 青島矢一、窪田ひろみ：温泉熱を利用した小規模地熱発電の事業性、第 23 回日本エネルギー学会大会、8-5-3、2014.

Florence, Italy, 4, pp. 2613–2617, 1995.

- (23) 中尾吉伸：平成 25 年度 NEDO 中間年報 地熱発電技術研究開発 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発 地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発、2013.
- (24) 中尾吉伸：平成 26 年度 NEDO 中間年報 地熱発電技術研究開発 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発 地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発、2014.
- (25) NEDO：「地熱発電技術研究開発」基本計画、<http://www.nedo.go.jp/content/100561270.pdf>、2015.8.10.
- (26) NEDO：地熱発電技術研究開発 事業・プロジェクト概要、http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100066.html、2015.8.10.

3-5-1 節

- (1) 藤縄剛史ほか：多機能型 CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯機の性能評価—給湯および暖房を含む性能評価手法の検討—、2012 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、2012.
- (2) 張莉ほか：無着霜ヒートポンプ給湯システムに関する研究開発—第 1 報：システムの考案とサイクルシミュレーション—、電力中央研究所報告 M11001、2011.
- (3) 張莉ほか：無着霜ヒートポンプ給湯システムに関する研究開発—第 2 報：吸着剤塗布熱交の熱・物質移動特性の把握及びシステムの試設計—、電力中央研究所報告 M14004、2014.
- (4) 橋本克巳ほか：各種大型ヒートポンプ性能評価試験設備の開発—第 1 報：試験設備仕様の検討—、2013 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、2013.
- (5) 甲斐田武延ほか：各種大型ヒートポンプ性能評価試験設備の開発—第 2 報：試験設備の健全性の検証—、2013 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、2013.
- (6) T Kaida et al.：Experimental performance evaluation of heat pump-based steam supply system, Proceeding of 9th International Conference on Compressors and their Systems, 2015.

3-5-2 節

- (1) 高橋徹、幸田栄一、橋本克巳、中尾吉伸：需要家サイドエネルギー需給解析汎用プログラムの開発、電力中央研究所 研究報告 M10009、2011.
- (2) 池谷智彦、高橋徹、西尾健一郎、浅野浩志：需要特性および系統電力の CO₂ 排出原単位を考慮した家庭用高効率給湯システムの CO₂ 排出削減効果の評価、電力中央研究所 研究報告 Q09019、2010.

3-5-3 節

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁：家庭の省エネ徹底ガイド、2013.
- (2) 経済産業省：夏の節電メニュー（ご家庭の皆様）、2014.
- (3) 荻野登司、石婷、三浦尚志：エアコンの運転スケジュールと暖房能力がエネルギー消費量に与える影響（第一報）集合住宅における暖房実験結果、空気調和・衛生

工学会大会学術講演論文集、2023-2026、2010.

- (4) 下田朋彦、浅田秀男、福田秀朗、櫻井良一、井田浩文：集合住宅の居室を用いたルームエアコンディショナの機器容量と負荷率・COP に関する実測（その 1 実験概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集、975-976、2010.

3-5-4 節

- (1) 池谷知彦：電気学会誌 Vol.134, No.11, pp.762-763、2014.
- (2) 池谷知彦、田村英寿、佐藤歩、馬場健二、田頭直人：電気自動車導入による都市環境負荷低減効果の評価、電力中央研究所 研究報告書 Q08030、2009.
- (3) 土屋依子、馬場健二、田頭直人：電気自動車の家庭への普及ポテンシャル—航続距離・費用・充電設備からみた移動可能性—、電力中央研究所 研究報告書 Y11032、2012.
- (4) 田頭直人、池谷知彦：電気自動車の蓄電機能と家庭用蓄電池に対する一般消費者の意向、電力中央研究所 研究報告書 Y11021、2012.
- (5) 経済産業省：「新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会」の報告書：「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」、2006.8.
- (6) 名雪琢弥、池谷知彦：双方向非接触給電システムの提案と基本性能の実証、電力中央研究所 研究報告書 H10007、2011.
- (7) 経済産業省・国土交通省：「電気自動車等充電設備ガイドブック」、2012.12.
- (8) 岩坪哲四郎、根本孝七、池谷知彦：EV/PHV 充電設備設置に関する検討、電力中央研究所 研究報告書 M09006、2010.
- (9) 岩坪哲四郎、紀平庸男、名雪琢弥、池谷知彦：実走行データを活用した EV 搭載電池の容量低下推定手法の提案、電力中央研究所 研究報告書 M15001、2015.
- (10) 紀平庸男、岩坪哲四郎、名雪琢弥、池谷知彦：“EV 用電池の実運用における劣化評価”、第 55 回電池討論会 1M26、2014.
- (11) 日渡良爾、池谷知彦：充電インフラ検討用次世代自動車交通シミュレータの開発、電力中央研究所 研究報告書 L09009、2010.
- (12) 高木雅昭、山本博巳、山地憲治、岡野邦彦、日渡良爾、池谷知彦：電気学会 B 論文タイトル「LFC 信号を用いたプラグ印ハイブリッド車の充電制御による付加周波数制御手法」、Vol.129, No.11, pp.1342-1348、2010.

3-6-1 節

- (1) IPCC, 2014：Summary for Policymakers. In：Climate Change 2014：Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, U.S.A.

- (2) Edenhofer O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, S. Kadner, J. C. Minx, S. Brunner, S. Agrawala, G. Baiocchi, I. A. Bashmakov, G. Blanco, J. Broome, T. Bruckner, M. Bustamante, L. Clarke, M. Conte Grand, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, S. Dhakal, N. K. Dubash, P. Eickemeier, E. Farahani, M. Fischedick, M. Fleurbaey, R. Gerlagh, L. Gómez-Echeverri, S. Gupta, J. Harnisch, K. Jiang, F. Jotzo, S. Kartha, S. Klasen, C. Kolstad, V. Krey, H. Kunreuther, O. Lucon, O. Masera, Y. Mulugetta, R. B. Norgaard, A. Patt, N. H. Ravindranath, K. Riahi, J. Roy, A. Sagar, R. Schaeffer, S. Schlömer, K. C. Seto, K. Seyboth, R. Sims, P. Smith, E. Somanathan, R. Stavins, C. von Stechow, T. Sterner, T. Sugiyama, S. Suh, D. Ürge-Vorsatz, K. Urama, A. Venables, D. G. Victor, E. Weber, D. Zhou, J. Zou, and T. Zwickel, 2014 : Technical Summary. In : Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J. C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, U.S.A.
- (3) Somanathan E., T. Sterner, T. Sugiyama, D. Chimankire, N. K. Dubash, J. Essandoh-Yeddu, S. Fifita, L. Goulder, A. Jaffe, X. Labandeira, S. Managi, C. Mitchell, J. P. Montero, F. Teng, and T. Zyllicz : National and Sub-national Policies and Institutions, 2014. In : Climate Change : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, U.S.A., 2014.
- (4) 杉山大志 : 地球温暖化とのつきあいかた (単行本)、ウェッジ社、2014.

3-6-2 節

- (1) IPCC WGIII : Mitigation of Climate Change Chapter 15 National and Sub-national Policies and Institutions 5.7 Voluntary Actions, 2014.
- (2) Lyon and Maxwell : Corporate environmentalism and public policy, Cambridge university press, Cambridge, UK. 2004.
- (3) Bressers et al. : Environmental negotiated agreements in the Netherlands, Environmental Politics, 18, 58-77, 2009.
- (4) Ekins and Etheridge: The environmental and economic impacts of the U.K. climate change agreements, Energy Policy, 34, 2071-2086, 2006.
- (5) Bohringer and Frondel : Assessing voluntary commitments in the German cement industry : The importance of baselines. RFF press, Washington D.C., 105-117, 2007.
- (6) Martin et al.: The impacts of the climate change levy on manufacturing: evidence from microdata, NBER Working Paper No. 17446, 2011.
- (7) 若林雅代、木村宰 : 省エネルギー政策理論のレビュー、電力中央研究所 研究報告 Y08046、2009.
- (8) 若林雅代 : 日本の環境自主行動計画、杉山大志・若林雅代編著『温暖化対策の自主的取り組み—日本企業はどう行動したか—』、エネルギーフォーラム社、87-139、2013.
- (9) Masayo Wakabayashi : Voluntary business activities to mitigate climate change : Case studies in Japan, Energy Policy, 63, 1086-1090, 2013.
- (10) 若林雅代 : 事例研究のまとめ、杉山大志・若林雅代編著『温暖化対策の自主的取り組み—日本企業はどう行動したか—』、エネルギーフォーラム社、141-153、2013.

3-6-3 節

- (1) 小杉素子 : 環境・エネルギー問題に関する世論調査—東日本大震災から3年後の人々の意識—、電力中央研究所 研究報告 Y14004、2014.
- (2) 菅原慎悦 : 原子力事業と立地地域との関係再構築に向けた提案—英国事例からの示唆—、電力中央研究所 研究報告 Y13025、2014.
- (3) 田邊朋行 : 原子力規制体制の制度的課題とその解決策—敦賀発電所敷地内破碎帯問題—、電力中央研究所 研究報告 Y13024、2014.
- (4) 服部徹 : 欧州における競争環境下の原子力発電の維持に資する経済的手法の有効性と課題、電力中央研究所 調査報告 Y14007、2015.
- (5) 浜潟純大 : 2030年までのマクロ経済・産業構造展望—エネルギー需給展望に向けた日本経済の成長力の見方—、電力中央研究所 研究報告 Y14017、2015.
- (6) 星野優子、永田豊、浜潟純大 : 2030年までのエネルギー需給展望の見直し—2010年度改訂版総合エネルギー統計に準拠した試算結果の概要—、電力中央研究所 社会経済研究所ディスカッションペーパー、SERC15001、2015.

3-6-4 節

- (1) 杉山大志、木村宰、野田冬彦 : 省エネルギー政策論、エネルギーフォーラム、
- (2) 若林雅代、木村宰 : 省エネルギー政策理論のレビュー—省エネルギーのギャップとバリア—、電力中央研究所 研究報告 Y08046、2009.
- (3) 西尾健一郎、岩船由美子 : エアコンによるCO₂削減に向けた方策—アンケート調査による実態把握と省エネルギーバリアの分析—、電力中央研究所 研究報告 Y08026、2009.

- (4) 木村宰：業務部門の省エネルギー—運用対策による省エネ余地とその推進策について—、日本エネルギー学会誌、92 (1)、9-17、2013。
- (5) Kimura, O. : The Role of Standards : The Japanese Top Runner Program for End-Use Efficiency. Historical Case Studies of Energy Technology Innovation in : Chapter 24, The Global Energy Assessment. Cambridge University Press, 2012.
- (6) 木村宰、大藤建太：省エネ補助金の追加性と費用対効果の評価—NEDO 補助事業の事例分析—、電力中央研究所 研究報告 Y13028、2014。
- (7) 木村宰、大藤建太：事業所における 2011～14 年夏の節電の実態—東日本大震災以降の定点調査—、電力中央研究所 研究報告 Y14013、2015。
- (8) 西尾健一郎：家庭における 2011～14 年夏の節電の実態—東日本大震災以降の定点調査—、電力中央研究所 研究報告 Y14014、2015。

3-6-6 節

- (1) 上野貴弘：ボトムアップアプローチによるポスト京都議定書の国際枠組み、電力中央研究所 調査報告 Y09007、2010。
- (2) 上野貴弘：ハイブリッドアプローチに基づく 2020 年以降の温暖化対策の国際枠組み—2013 年の交渉動向と 2015 年の合意期限に向けた課題—、電力中央研究所 調査報告 Y13020、2014。
- (3) 上野貴弘：2020 年以降の温暖化対策の国際枠組みに関する交渉動向—COP20 の結果と 2015 年合意に向けた課題—、電力中央研究所 研究報告 Y14020、2015。

コラム

コラム 1

- (1) Cox, P.M., R.A. Betts, C.D. Jones, S.A. Spall, and I.J. Totterdell, Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184-187, 2000.
- (2) IPCC, Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Stocker, T.F., et al. (eds), Cambridge University Press, 1535p, 2013.
- (3) 野原大輔、吉田義勝、大庭雅道、三角和弘、仲敷憲和：地球システムモデル CESM1 を用いた気候安定化シナリオに基づく気候と炭素循環の長期変化予測、電力中央研究所 研究報告、V11057、2012。
- (4) Nohara, D., J. Tsutsui, S. Watanabe, K. Tachiiri, T. Hajima, H. Okajima, and T. Matsuno, Examination of a climate stabilization pathway via zero-emissions using Earth System models. *Environmental Research Letters*, 10, 095005, 2015.
- (5) Nohara, D., Y. Yoshida, K. Misumi, and M. Ohba, Dependency of climate change and carbon cycle on CO₂ emission pathways. *Environmental Research Letters*, 8, 014047, 2013.

コラム 2

- (1) IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Stocker, T.F., et al. (eds), Cambridge University Press, 1535p, 2013.
- (2) Misumi, K., K. Lindsay, J.K. Moore, S.C. Doney, F.O. Bryan, D. Tsumune, and Y. Yoshida, The iron budget in ocean surface waters in the 20th and 21st centuries: projections by the Community Earth System Model version 1. *Biogeosciences*, 11, 33-55, 2014.
- (3) Moore, J.K., K. Lindsay, S.C. Doney, M.C. Long, and K. Misumi, Marine ecosystem dynamics and biogeochemical cycling in the Community Earth System Model [CESM1 (BGC)] : Comparison of the 1990s with the 2090s under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. *Journal of Climate*, 26, 9291-9312, 2013.
- (4) Steinacher, M., et al., Projected 21st century decrease in marine productivity: a multi-model analysis. *Biogeosciences*, 7, 979-1005, 2010.

コラム 3

- (1) 芳村毅、杉江恒二：海洋酸性化に対する生物応答の解明（その 3）—複数種の植物プランクトン単離株による培養実験—、電力中央研究所 研究報告、V13017、2014。
- (2) 芳村毅、杉江恒二、西岡純、鈴木光次：海洋酸性化に対する生物応答の解明（その 4）—複数地点の外洋域プランクトン群集による培養実験—、電力中央研究所 研究報告、V13018、2014。
- (3) IPCC, Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Field, C.B., et al. (eds), Cambridge University Press, 1132p, 2014.

コラム 4

- (1) 橋本篤、平口博丸、豊田康嗣、中屋耕：温暖化に伴う日本の気候変化予測（その 1）—気象予測・解析システム NuWFAS の長期気候予測への適用性評価—、電力中央研究所 研究報告、N10044、2011。
- (2) 橋本篤、平口博丸：気象予測・解析システム (NuWFAS) の高度化と北海道を対象とした予測精度評価、電力中央研究所 研究報告、N09024、2010。
- (3) 田村英寿、平口博丸、橋本篤、松梨史郎：局地気象予測のための湖面温度推定法の開発、電力中央研究所 研究報告、N11009、2012。
- (4) 橋本篤、平口博丸、田村英寿、服部康男、松梨史郎：領域気候モデルを用いた過去 53 年間の気象・気候再現、電力中央研究所 研究報告、N13004、2013。

コラム 5

- (1) CBD : Decision X/2, 2010.
- (2) IISD : Summary of Ninth Conference of the Parties

to the Convention on Biological Diversity, Earth Negotiations Bulletin, 9, 452, 2008.

- (3) CBD : Decision X/33, 2010.
- (4) CBD : Decision XI/19, 2012.
- (5) CBD : Decision XII/20, 2014.
- (6) UNFCCC : Decision 1/CP.16, Appendix I, 2010.
- (7) CBD : Decision IX/16, 2008.
- (8) LC-LP : Resolution LP.4 (8) ,2013.

コラム 6

- (1) 立田穰、坂口勇、濱田稔、杉本正昭、津野雅俊：水温上昇による付着生物生息文応の変化 ―現場分布調査と文献情報による検討―、電力中央研究所 研究報告 V13003、2013.
- (2) Tateda, Y., I. Sakaguchi, and G. Itani, Scope for growth of *Mytilus galloprovincialis* and *Perna viridis* as a thermal stress index in the coastal waters of Japan: Field studies at the Uranouchi inlet and Yokohama. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 470, 55-63, 2015.

コラム 7

- (1) 幸田栄一、高橋徹、三巻利夫：発電システム熱効率解析汎用プログラムの開発、電力中央研究所 研究報告 W99034、2000.
- (2) 高橋徹、幸田栄一、中尾吉伸：発電システム熱効率解析汎用プログラムを用いた火力発電プラントの熱効率低下要因解明方法の開発、電力中央研究所 研究報告 M09013、2010.

執筆分担

はじめに：理事 水島 雅文

1章：杉山 大志

2章：筒井 純一、野原 大輔、三角 和弘、
芳村 毅、山本 博巳、石井 孝、
門倉 真二、平口 博丸、大庭 雅道、
石川 智巳、朱牟田 善治、豊田 康嗣、
小林 卓也、富田 基史、立田 穰

3章：

3-1節：今村 栄一

3-2節：松田 裕光、屋口 正次、高橋 徹、
原 三郎、梶谷 史朗、沖 裕壮、
井内 正直、木本 政義、大高 円

3-3節：下田 昭郎、海江田 秀志、窪田 ひろみ

3-4節：小林 広武、吉村 健司、田村 英寿、
北内 義弘、宇佐美 章、門倉 真二、
由本 勝久、平口 博丸、海江田 秀志、
窪田 ひろみ、中尾 吉伸

3-5節：池谷 知彦、黒本 英智、長谷川 浩巳、
高橋 徹、上野 剛、宮永 俊之

3-6節：杉山 大志、若林 雅代、田邊 朋行、
星野 優子、木村 宰、西尾 健一郎、
朝野 賢司、山本 博巳、上野 貴弘

第1章



杉山 大志

社会経済研究所 上席研究員
エネルギーシステム分析領域

専門分野：温暖化防止政策

第2章



筒井 純一

環境科学研究所 副研究参事
大気・海洋環境領域

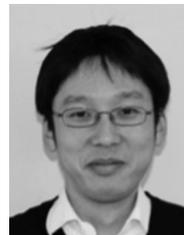
専門分野：気候予測、排出シナリオ、台風



野原 大輔

環境科学研究所 主任研究員
大気・海洋環境領域

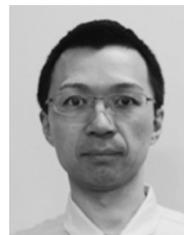
専門分野：気候変動、気象予測、大気力学



三角 和弘

環境科学研究所 主任研究員
大気・海洋環境領域

専門分野：海洋環境、海洋物質循環



芳村 毅

環境科学研究所 主任研究員
大気・海洋環境領域

専門分野：海洋生物地球化学、海洋物質
循環



山本 博巳

社会経済研究所 上席研究員
エネルギーシステム分析領域

専門分野：エネルギー環境システム分析、
新エネルギー評価、バイオマス
評価



朱牟田 善治

地球工学研究所 上席研究員
地震工学領域

専門分野：地震工学、信頼性工学、災害
復旧



石井 孝

環境科学研究所 上席研究員
水域環境領域

専門分野：水文・水資源、陸域環境、森
林遠隔計測



豊田 康嗣

地球工学研究所 上席研究員
流体科学領域

専門分野：水理・水文、洪水解析、出水
予測



門倉 真二

環境科学研究所
特別嘱託

専門分野：気候変動、気象予測、大気環境



小林 卓也

環境科学研究所 上席研究員
生物環境領域

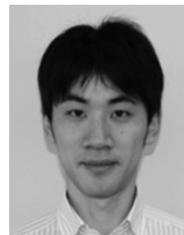
専門分野：生態系、安定同位体生態学、
農業気象学、陸域環境



平口 博丸

地球工学研究所 研究参事
流体科学領域

専門分野：気象予測、気象変動、海岸工
学、耐波浪設計



富田 基史

環境科学研究所 主任研究員
生物環境領域

専門分野：生物多様性、森林生態、陸域
環境、統計数理



大庭 雅道

環境科学研究所 主任研究員
大気・海洋環境領域

専門分野：気候変動、大気海洋相互作用



立田 穰

環境科学研究所 上席研究員
水域環境領域

専門分野：海域環境、海洋放射生態学、
沿岸生態系物質挙動予測、生
態系



石川 智巳

地球工学研究所 上席研究員
構造工学領域

専門分野：鋼構造、耐風・耐震設計

第3章

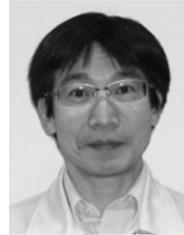
3-1 節



今村 栄一

社会経済研究所 主任研究員
エネルギーシステム分析領域

専門分野：新技術の市場性と普及施策評価、エネルギーシステム分析評価



梶谷 史朗

エネルギー技術研究所 上席研究員
高効率発電領域

専門分野：反応工学、燃焼

3-2 節



松田 裕光

エネルギー技術研究所
上席研究員

専門分野：反応工学



井内 正直

社会経済研究所 上席研究員
エネルギーシステム分析領域

専門分野：バイオマスエネルギー評価、環境（景観）アセスメント、ライフサイクルアセスメント（LCA）評価



屋口 正次

材料科学研究所 上席研究員
構造材料領域

専門分野：高温強度学



木本 政義

エネルギー技術研究所 上席研究員
燃料高度利用領域

専門分野：燃焼、粉体工学



高橋 徹

エネルギー技術研究所 上席研究員
エネルギー変換領域

専門分野：プラントシステム、熱エネルギー利用



大高 円

エネルギー技術研究所 上席研究員
燃料高度利用領域

専門分野：反応工学、伝熱流動、プラントシステム



原 三郎

エネルギー技術研究所 副研究参事
高効率発電領域

専門分野：反応工学、伝熱流動、プラントシステム

3-3 節



下田 昭郎

環境科学研究所 上席研究員
大気・海洋環境領域

専門分野：大気環境、リモートセンシング、
大気環境計測、CO₂回収貯留



田村 英寿

地球工学研究所 上席研究員
流体科学領域

専門分野：気象予測、気象観測、都市熱
環境評価



海江田 秀志

地球工学研究所 研究参事
地圏科学領域

専門分野：地熱工学、物理探査学、微小
地震観測



北内 義弘

システム技術研究所
副研究参事

専門分野：電力系統、系統運用・制御、
発電機励磁制御



窪田 ひろみ

環境科学研究所 主任研究員
環境化学領域

専門分野：環境リスク評価、リスクコミュニ
ケーション



宇佐美 章

材料科学研究所 上席研究員
電気材料領域

専門分野：太陽光発電、発電予測技術



由本 勝久

システム技術研究所 上席研究員
需要家システム領域

専門分野：エネルギーシステム、自然変動
電源の系統影響評価・分析

3-4 節



小林 広武

システム技術研究所 研究参事
需要家システム領域

専門分野：電子工学、分散形電源連系制
御・保護、配電システム



中尾 吉伸

エネルギー技術研究所 主任研究員
エネルギー変換領域

専門分野：プラントシステム



吉村 健司

システム技術研究所
上席研究員

専門分野：電力系統、系統計画・運用、
定態安定度解析

- ・門倉 真二 (131頁に掲載)
- ・平口 博丸 (131頁に掲載)
- ・海江田 秀志 (前掲)
- ・窪田 ひろみ (前掲)

3-5 節



池谷 知彦

材料科学研究所
副研究参事

専門分野：二次電池、電気自動車、電力
貯蔵



黒本 英智

次世代電力需給マネジメント特別研究
チーム 上席
電力・エネルギー価値創造グループ

専門分野：建築環境工学、省エネルギー



長谷川 浩巳

エネルギー技術研究所 上席研究員
ヒートポンプ・蓄熱領域

専門分野：熱エネルギー利用、伝熱流、
プラントシステム



上野 剛

システム技術研究所 主任研究員
需要家システム領域

専門分野：家庭・ビルの省エネルギー

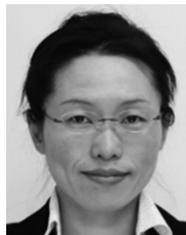


宮永 俊之

システム技術研究所 上席研究員
需要家システム領域

専門分野：温熱環境解析、温熱快適性評価

3-6 節



若林 雅代

社会経済研究所 主任研究員
事業制度・経済分析領域

専門分野：環境経済学、政策評価（温暖
化防止、省エネルギー）



田邊 朋行

社会経済研究所 副研究参事
事業制度・経済分析領域

専門分野：原子力法、核セキュリティ、企
業倫理



星野 優子

社会経済研究所 上席研究員
事業制度・経済分析領域

専門分野：国際経済、エネルギー経済、
温暖化防止政策と世界経済・
エネルギー需給



木村 宰

社会経済研究所 主任研究員
エネルギーシステム分析領域

専門分野：温暖化防止政策、エネルギー
技術政策、および省エネルギー
政策に関する政策評価



西尾 健一郎

社会経済研究所 主任研究員
エネルギーシステム分析領域

専門分野：エネルギー技術・政策評価、シ
ステム分析

・高橋 徹（132頁に掲載）



朝野 賢司

社会経済研究所 主任研究員
エネルギーシステム分析領域

専門分野：バイオマス、再生可能エネルギー



上野 貴弘

社会経済研究所 主任研究員
エネルギーシステム分析領域

専門分野：温暖化防止対策、国際技術移
転、国際関係論、アジアの発
電事情

- ・杉山 大志（130頁に掲載）
- ・山本 博巳（131頁に掲載）

編集後記

電中研レビュー第 56 号「地球温暖化の科学的知見と対策技術」をお届けいたします。

本分野の電中研レビューは、1992 年に第 28 号「地球温暖化に挑む」、2001 年に第 45 号「地球温暖化の解明と抑制」が発刊されています。本年（2015 年）11 月末から、2020 年以降の地球温暖化対策の国際枠組みの合意を目標とする COP21 がパリで開催されることになっており、国内外で大変注目されています。これを機に、およそ 15 年ぶりに 3 回目の電中研レビューを発刊することといたしました。

本レビューは、地球温暖化の予測に関わる気象・気候分野のみならず、温暖化抑制のための先進火力、CO₂の回収・貯留、再生可能エネルギー、省エネルギー、政策の各分野を網羅しており、地球温暖化の予測と対策に関する当研究所の研究の現状を鳥瞰できる一冊となっております。

本レビューが、電気事業をはじめ広く社会の方々に少しでもお役に立てば幸いです。

また、本冊子についてのご意見等をお待ちしております。



発行：一般財団法人 電力中央研究所 広報グループ

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 (大手町ビル7階)

TEL：03-3201-6601 FAX：03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>