

アーネスト・オーランド・ローレンス

バークレー国立研究所

発電及び効率改善プロジェクトによる炭素 排出削減の評価：標準化方式 (MAGPWR)

S. マイヤーズ、C. マーネイ、K. シューマッハー、J. サタエ

環境エネルギー技術部門

2000年7月

本研究は、米国エネルギー省のエネルギー効率・再生可能エネルギー担当次官補の支援により実施されたものである。また、米国エネルギー省との契約 **DE-AC03-76SF00098** により、米国環境保護局の大気・放射線局、気候保全部からの支援も受けている。

免責条項

本文書は、米国政府の後援による研究の成果として作成されたものである。関係者は本書の内容の適切性を確信しているが、米国政府、そのすべての省庁、カリフォルニア大学のすべての管理教授ならびに従業員は、本書に開示されているいかなる情報、機器、製品、プロセスなどの正確性、完全性、利便性に関しても、暗黙的あるいは明示的を問わず一切の保証をせず、また一切の法的責任を負わない。また、本書の使用によって私的権利が侵害されないことを約束するものではない。本書中に何らかの商標名、商品名、メーカー名、その他の商業製品、プロセス、あるいはサービスの言及があっても、米国政府、そのいずれかの省庁、またはカリフォルニア大学の管理教授陣がその製品やプロセス、サービス類の効用を承認・推奨・もしくは優先採用していることを明示もしくは示唆しているとは限らない。本書に記された各著者の意見・見解は、米国政府、そのいずれかの省庁、カリフォルニア大学の管理教授陣の意見・見解と合致もしくは反映しているとは限らない。

アーネスト・オーランド・ローレンス・バークレー国立研究所では、機会の平等に基づく雇用に努めている。

発電及び効率改善プロジェクトによる炭素排出削減の評価：
標準化方式 (MAGPWR)

S. マイヤーズ、C. マーネイ、K. シューマツハー、J. サタエ

94720 米国カリフォルニア州バークレー
ローレンス・バークレー国立研究所
環境エネルギー技術部門
エネルギー分析部

2000年7月

米国環境保護局の 気候関連政策プログラム部
経済・環境局
政策・企画・評価局
からの委託研究

本研究は、米国エネルギー省との契約 DE-AC03-76SF00098 により、米国環境保護局からの支援のもと実施されたものである。

本研究の主旨

本書は、電力システムでのマルチプロジェクトのベースラインを設定するための標準化方式について述べる。この方式により、任意の電力システムで、今後予備的に作動するものと見られる各種発電装置を概略的に評価できる。小規模の発電や電力効率改善プロジェクトに適する。こうしたプロジェクトにより炭素排出がどれだけ削減されるのかを、単一もしくは複数の炭素排出係数について推定できる。この方式は、カーボン・クレジット（炭素排出削減への貢献度）の認定において求められる利用しやすさと正確さとのバランスを良く保ったものである。

はじめに

送電網への電力供給や効率の改善によって電力需要を軽減しようとするプロジェクトによって、CO₂ 排出量がどれだけ削減されるのかを推定するには、そのプロジェクトがなければどの程度の CO₂ が排出されるのかを示す、ベースラインとなる排出率を算定しなければならない。こうしたプロジェクトにどれほどの効果があるのかを見定めるには、そのプロジェクトの採用によってどのような発電施設の建設・利用が不要となるのかを明らかにする必要がある。また、そうした発電施設の不要化によってどれだけの炭素排出が削減できるのかを算定することが求められる。

共同で実施されるプロジェクトでは、このベースラインの設定ならびに追加性の判定は、その場限りのケース・バイ・ケース方式で行なわれてきた。こうしたアプローチでは、プロジェクト開発者はプロジェクトの準備と検討プロセスの実施のために、相当な時間とリソースを割かねばならなかった。こうした状況に対処すべく、産業分野と国が決まればそのすべてのプロジェクトに適用できるベースラインを定めるための標準化方式を求める声が高まっている。

電力システム関連のマルチプロジェクトのベースラインを策定すれば、プロジェクト開発者はその基準の要素を活用して、あるプロジェクトによって削減できる炭素化合物排出量ならびにそのプロジェクトによって得られるカーボン・クレジット数を算出できる。マルチプロジェクトのベースラインは、回避された発電量 1 キロワット時あたりの炭素重量、つまり **kg C/kWh** で表現できる。ある国家あるいはその特定地域内の電力システムに関するプロジェクトである限り、どのプロジェクトにも同じ基準値を適用できる。これにより、プロジェクト開発者は独自の算出を行なう必要がなくなる。

あるプロジェクトによって電力システムにどれだけの影響があるのかを検討するうえでは、2つの場合に分けて考えねばならない。電力システムに対する影響が比較的小さいプロジェクトは、システムの稼動に補助的な影響を与えるものと見なすことができる。つまり、効率を改善することで電力需要を軽減するもので、主な効果は電力システムにかかる負荷を軽くすることにある。

これに対して大量の電力を供給する目的のプロジェクトでは、それによって他の発電設備の建設を不要にする場合がある。こうした大型プロジェクトでのベースラインは、個々のプロジェクトごとによって異なる場合があるとともに、計画されている新発電容量や主な新発電設備のタイプ¹を考え合わせたうえで、マルチプロジェクトのベースラインを利用できることもある。

本報告書で解説する方式は、基本的には電力システムの稼動を補佐する中小規模のプロジェクトを対象としている。ただし、その基本的なアプローチは、電力システムに新たな発電所を建設する必要がなくなるような大規模プロジェクトでもモデルとして利用できるものである。

電力という分野は確かに複雑なものではあるが、国家・地域規模の電力システムの稼動状況予想に合わせてマルチプロジェクトのベースラインを策定することは、現実的に可能である。1つの方法として、シミュレーション・モデルを利用するものがある。これは、電力会社が将来の発電量の拡大計画を策定するために日常的に利用しているものである。発電計画の策定には **WASP** など各種のモデルが利用されるが、それにより将来稼動させる発電所の必要を具体的に推定できる。さらに、その電力システムで最大の経済性を実現するための稼動方法も推察できる。ところがマルチプロジェクトのベースラインを定めるという目的に関しては、こうしたモデルでは膨大なデータとそれを活用できるだけの専門知識が必要となるという欠点がある。また、透明性に乏しく再検討も容易ではない。さらに、電力会社自体が自社プロジェクトに対してカーボン・クレジットの獲得を求める場合がある以上、電力会社はこうしたマルチプロジェクトのベースライン策定に関しては、中立的な第三者とはいえないことがありえる。

本報告書で解説する方式は **MAGPWR (Marginal Avoided GHG - Power)** というもので、電力システムでのマルチプロジェクトのベースラインを策定するための方式としては、利用のしやすさと正確さへの要求との間のバランスが取れており、カーボン・クレジットの獲得に役立つ。必要となるデータも比較的少量で済み、各関係者が簡単に理解できる。国

¹ 電力分野におけるベースライン策定のための他のアプローチに関する詳細な議論は、**Lazarus, M., S. Kartha, S. Bernow, 「Key Issues in Benchmark Baselines for the CDM」 Tellus Institute, Boston, 2000** 年を参照。

家のエネルギー担当省庁が利用することもできるし、CDM や JI 関連のプロジェクトに特に任務を負う機関にも役立つ。

本方式の概要

小規模発電や電力効率改善のプロジェクトは、どちらも、電力システムが対応しなければならない負荷の軽減を目的とする。ここで取り上げるアプローチは、ある期間内に利用の必要性が希薄になる発電方法はどのようなものを推定するための方式である。こうしたプロジェクトによって負荷が軽減されることでどの発電設備の利用を軽減できるのか、根拠のある推定を行なうことができる。

ある期間内での発電システムの負荷の様子は、そのシステムからの出力を時間の関数としてプロットしたダイアグラムによって表すことができる（図1参照）。負荷に対応するために各種の発電源に求められる発電量を明確にするためには、時系列の負荷データを負荷継続曲線（LDC）に変換しても良い。負荷継続曲線とは、時系列のデータを図2のような形態に形成したもので、**X**軸の数値は負荷が**Y**軸の出力レベル以上に達した時間が何時間あったかを示している。こうした時間においては、増大した電力需要に対応するために特定の発電設備から給電²してコスト削減に努めている。本報告書の提唱する方式の基本的な目的は、この給電の状況を概略的に求めることにある。そのために、エネルギー需要合計を表す負荷継続曲線の下部の発電状況を知ること、どのような発電設備を何時間、限界的に利用すればよいのかを推定できる。

電力システムの給電状況を概算するには、何らかの判断が必要となる。通常の稼働では、限界費用の最も小さい発電設備を可能な限り利用することになる。それよりも費用のかさむ発電設備は、必要に応じて利用する。現実の稼働においては、給電はこうした単純な経済原則に則って行なわれるわけではないが、概算という目的のためにはこの単純な基準を採用しても差し障りあるまい。システムの稼働に関して、もっと役に立つ情報が得られた場合には、それを活用すると良い。システムの稼働を担当する事業者との協力が望まれる。

² 「給電」とは、発電システムの事業者が個別の発電設備を利用する方法のことを言う。

本報告書の方式では、個々の発電設備を単一で均質のユニットとして扱う。個別のユニットの給電との関連で、システムの稼動状況の変化を記述するという作業は行っていない³。発電設備のタイプごとに炭素の排出係数（EF）を用いるが、平均値以外の値を採用すべき十分な理由がない限り、通常この係数は平均値である。

ある期間内の LDC を求めてしまえば、炭素排出の削減量を求めるのは単純である。その期間全体で限界的に利用する発電設備が 1 つだけであれば、その設備の排出係数を採用すればよい。限界的に利用する発電設備が 2 つ以上ある場合には、各設備の排出係数の平均を採用する。この平均は、その期間内に各設備を限界的に利用する時間数をパーセンテージに直し、そのパーセンテージを加重値としてかけた加重平均である。この手法については、以下に紹介する各例において明らかとなろう。

前年度の実績を LDC で表現するよりは、稼動状況予想に基づいて LDC を形成するほうが単純である。前年度の実績データを振り返るという手法を採用すると、その結果が電力システムの実際の稼動状況をどれだけ忠実に再現しているか、という問題が関与してしまう。その一方、あまり遠い未来を対象にすればするほど、システムの稼動状況を推定するのが困難になる。毎年、EF を算出するのが、ベストのアプローチであろう。

次のセクションで登場する数値は、Excel をベースにしたスプレッドシートで算出したものである。そのプロセスで用いるステップと必要となるデータについては、「付録」で解説する。

システムの複雑性レベルの例

大きな季節変動のない電力システム

図 3 に、発電設備が 2 つだけの仮想電力システムの稼動状況を示す。2 つの発電設備とは、水力とガス・タービンである⁴。稼動状況には季節変動があまりないので、1 つの曲線で 1

³ 炭素化合物の排出特性は、各種燃料によって大幅に異なる。その一方、同じ燃料を利用していれば、発電設備間の差は大したものではない。

⁴ 本報告書の計算においては、水源でのメタンの発生の可能性については考慮していない。

つの年全体を表して差し障りない。このシステムの水力発電設備は流れ込み式で、ベースロードに対応するために年間を通じてこの水力発電設備を利用しているものとする。水力だけでは負荷に対応できない場合には、ガス・タービンから給電する。常に水力資源のほうを優先的に利用しているのは、変動はするものの運転コストが大変低いためであることは明らかである。これに対して、ガス・タービンは運転コストが高い。換言すれば、水力という「燃料」はほぼ無料に近い。このシステムの場合では、水力が限界的な発電設備となる時は、年間を通じて1時間もない。負荷が最低レベルのときでさえ、ガス・タービンは限界的な発電手段である。

図4に示すのは、発電設備を7カ所備えたより複雑な電力システムである。(図4、7、8のデータは、タイにおける最近の発電統計に基づく。) 各種発電設備からの電力を積み重ねた層のように示してあるが、これは発電の限界費用による。主な限界的発電設備は、複合サイクルと燃料油による火力発電である。このシステムの炭素排出係数は、それぞれの発電設備の **EF** の加重平均であり、各発電設備が限界的に利用される時間数のパーセンテージが加重値となっている。(この **EF** の算出根拠については、図の下にある表を参照。)

季節変動の大きい電力システム

水力発電の比重が高い場合には、利用できる水力エネルギーの量には季節変動があることが多い。こうした電力システムでは、「雨季」と「乾季」に分けて別々の負荷継続曲線を設定することが望ましい。図5には、2カ所の発電設備を有する電力システムの場合での、雨季(ここでは、4カ月)の稼動状況を示す。雨季には、水力を利用しやすい。年間で一部の時間だけ、水力は限界的な発電源となる。こうした場合、雨季の炭素排出係数は、各 **EF** に各発電設備が限界的となる時間数のパーセンテージを加重値としてかけた、加重平均となる。

図6には、乾季(ここでは、8カ月と想定)の稼動状況を示す。乾季には、利用できる水力が減少する。この期間には、水力が限界的な発電源となることはない。したがって、**EF** としては単純にガス・タービンの **EF** を採用すればよい。

図7と8には、複数の発電設備のある電力システムで雨季と乾季により稼動状況が異なる

場合を示す。雨季には水力発電量が乾季よりも増大するので、各種補助的発電設備のミックス状況が微妙に異なる。したがって、**EF** も変化する。

ピーク時と非ピーク時の影響の算入

ピーク時と非ピーク時で電力システムに対する影響に大きな差がでるものと見られるプロジェクト⁵では、1日のなかでもピーク時間帯と非ピーク時間帯に分けて、通年もしくは特定の季節の **LDC** を推定することが望まれる。このアプローチは本質的には、季節変動を算入する場合のアプローチに類似する。ある期間内でのピーク時と非ピーク時を代表する適切な時間帯を選び、それぞれの時間帯において各種の発電設備をどのように給電するのか推定することになる。

電力システムでの発電量不足の発生

電力システムの発電容量の不足から需要に応じられないことが予想される場合には、**EF** の計算手順にも調整が必要となる。話を単純にするために、この電力不足はシステムの負荷ピーク時（負荷継続曲線の左側）あるいはその前後に発生するものとする。こうした時間帯には、発電プロジェクトに対する電力需要が軽減されても発電所の稼働率を落とせるわけではない。もともと、需要に対応できていないからである。**EF** の計算の対象となる時間帯は、システムが需要を満たしている時間帯である。このような場合には、可能な限りのおおよその概算を行うことがベストであろう。負荷継続曲線を更新することになるが、それに応じて発電設備の給電状況の予測も調整する必要が生じる。

炭素排出係数の使用法

各種の期間（季節や1日の中での変動）に合わせて異なる **EF** を設定することで複雑な現実に対応するためには、発電量や電力プロジェクトによる排出量削減に関する詳細なデータをそのプロジェクトのスポンサーが提供してくれることが不可欠である。

⁵ この例としては、照明効率関係のプロジェクトがある。これは主に、ピーク時に影響がある。

電力システムの **EF** には、2つのタイプがありうる。短期的推定値（1年）は、ある1年間にプロジェクトの結果として要求できるカーボン・クレジット数を算出するために利用できる。例として、そのプロジェクトのホストである国家の政府が、毎年度の初めにそのシステムの稼動状況予想に基づいて **EF** を判定・発表する場合などである。この **EF** を、その年度にそのプロジェクトが実際に達成した発電量あるいは電力需要削減実績に適用するのである。

長期的推定値（10~15年）は、プロジェクトのスポンサーがそのプロジェクトの全期間に渡って削減される炭素化合物排出量を推定するために利用できる。この種の数値は、公式な「ベストの推定」とでも言うべきもので、可能であれば公式な計画に基づいて推定される。この推定を利用して、プロジェクトのスポンサーはカーボン・クレジットから発生しえる収益を予想するのである。

ある1年間に対して1つの **EF** しか得られていないシステムの場合には、その使用法は単純である。そのプロジェクトのスポンサーは単純に、測定した発電量あるいはモニター測定した電力使用量の削減（**T&D** 損失の軽減を含む）にその **EF** をかければよい。

季節に応じていくつかの **EF** が定められているプロジェクトの場合には、そのスポンサーは各季節ごとの発電量あるいは電力需要削減を判定または推定する必要がある。これを、下の表に示す。

本報告書の方式では、電力システムからの炭素排出の削減しか考慮していないことに注意されたい。発電プロジェクト自体が炭素排出する場合には、電力システムからの排出量の削減分からそのプロジェクトによる排出量を引いて、そのプロジェクトによる炭素排出の純削減量を求めなければならない。

| 季節 | 当該期間における発電量あるいは電力需要の削減 (MWh) | 炭素排出係数 (kgC/MWh) * | 炭素排出量の削減 (tC) |
|--------------|------------------------------|--------------------|---------------|
| 乾季 (11月から2月) | 20,000 | 257 | 5,140 |
| 雨季 (3月から10月) | 50,000 | 200 | 10,000 |
| 年間合計 | — | — | 15,240 |

* 2カ所の発電設備のあるシステムの場合を想定 (図5および6を参照)

ピーク時と非ピーク時に応じて別々の **EF** を設定した (季節変動なし) システムの場合には、そのプロジェクトのスポンサーはピーク時ならびに非ピーク時における年間での発電量あるいは需要削減量を、判定もしくは推定する必要がある。

季節変動とピーク時ならびに非ピーク時の変動をすべて考慮して別々の **EF** を設定したシステムでは、スポンサーは各季節ごとのピーク時ならびに非ピーク時の年間での発電量あるいは需要削減量を、判定もしくは推定する必要がある。ここまでの詳細なデータを提供することは、プロジェクトのスポンサーにとって困難である場合がある。多様な発電資産を有するうえで稼働状況が大きく変動するシステムでは、炭素排出の削減量を正確に把握するために、こうした詳細なデータが重要となる場合もある。

電力関係プロジェクトでの、その他のベースライン

電力消費削減プロジェクトにおいては、本報告書で提唱しているマルチプロジェクトのベースラインを利用しても、最終消費に関するベースラインを定める必要がなくなるわけではない。例として、工場における電動モーターの効率を向上させるプロジェクトであれば、モーターを使用する現場でのベースラインも必要となる。この種のベースラインには、マルチプロジェクトに共通のものもあれば、個別プロジェクトに固有のものもある。

エネルギー効率に関するマルチプロジェクトに共通に適用する基準値がうまく作用するには、電力システム関連のマルチプロジェクトのベースラインと適切に連動させる必要がある。最終消費レベルでのベースラインがあれば、カーボン・クレジットの獲得根拠となる電力需要軽減の算出の手引きとなる。これにより、電力システムの **EF** を利用して削減電力を炭素排出量の単位に変換することが可能となる。電力効率改善プロジェクトの大半は限られた影響力しかないので、本報告書に提示する方式はマルチプロジェクトのベースラインを策定するうえで適切である。

マルチプロジェクトベースラインの **EF** があれば、特定の送電網にも適用できる。遠隔にある発電設備 (通常は、ディーゼル発電機) の使用を不要にする 送電網に連系しないプロジェクト の場合には、その国にある既存あるいは新規のディーゼル発電機の平均値に合わせ

たデフォルトの排出係数を設定することが可能になる。電力システムのベースラインの場合と同様、ディーゼル発電機の排出係数も必要に応じて更新する。

結論

電力システムのマルチプロジェクトのベースラインを設定するために本報告書に紹介した方式を利用すれば、負荷に中小規模のインパクトを与えるプロジェクトのシステムに与える影響を、ある程度の正確性をもって推定できる。必要となるデータや計算も、比較的現実的な程度のものである。この方式ではシステムの稼動状況に関してある程度の主観的な判断が要求されるものの、そうした判断が適切かどうかは、独立した専門家が容易に判断できる。

付録：本方式の手順

ステップ1：負荷継続曲線を描く

- 必要となるデータ： 年間（あるいは、他の期間）の各時間ごとの時系列の負荷データ（通常、単位は **MW**）が必要である。スプレッドシートで利用するためには、負荷データを1つの欄にまとめることが求められる。負荷データがこの形式になっていない場合でも、単純な計算法によってデータを組織化できる。こうした負荷データは通常、電力システムの事業者から入手できる。
- 負荷データ（のみ）を、**MW** レベルの高いものから低いものへとソートする。時間データは、そのままにしておく。その期間内の各時間ごとの負荷データを曲線で描く。これは、**LBNL** のスプレッドシート・モデルにより自動的に行うことができる。

ステップ2：発電設備ごとにデータをまとめる

- 必要となるデータ： 各発電設備ごとに、年間（あるいは、他の期間）の利用できる発電容量もしくは予想発電量。

ステップ3：負荷に応えるため、各発電設備の発電量をグラフ上に重ねる（「給電」）

- これは、**LBNL** のスプレッドシート・モデルにより自動的に行うことができる。このモデルは、平均発電容量を **xy MW** とした場合に、各発電設備が年間（あるいは、他の期間）何時間稼動しているかを算出する。また、このモデルは、ベースロード以外の発電設備を限界的に利用した年間（あるいは、他の期間）の時間数を算定する。⁶

⁶ このモデルの計算法は、その期間の最後の時間から初めて、不連続なステップで時間単位に計算を進める。負荷曲線に沿って時間を逆向きに進むことにより、各ステップにおいて各発電設備が総発電量のなかで占める発電量を表す負荷曲線の下の部分の面積を算定するとともに、利用できる発電容量の制約も算定する。発電容量の限界に到達するとその時間で停止するので、利用できる容量を越えることはない。ベースロードの発電設備に関しては、この計算法はそうした設備の総発電量に基づいて平均の発電容量利用率を算出するのみである。

ステップ4：該当する期間におけるシステムの炭素排出係数を算出する

- 必要となるデータ： 各発電設備について、使用燃料のタイプ、エネルギー変換効率（%単位）、使用燃料の炭素含有量（tC/TJ 単位）、ならびに燃料の燃焼効率（%単位）が必要となる。
- **LBNL** のスプレッドシート・モデルでは、限界炭素排出係数を各発電設備の排出係数の加重平均値として算出する。これは、各設備を限界的に利用する時間数のパーセンテージを加重値として用いる加重平均である。