

# 環境修復

## ファーナルドのエコロジストとエンジニア、修復と浄化を一本化



土壌中の豊富な粘土と土壌掘削に伴う凹地は、新たな湿地の形成に最適な条件を提供する。写真は、0.5エーカーの区域を改良後に造成された湿地を調査する、フルーア・ファーナルド社の修復担当エコロジストであるジョン・ホームー氏。

エリック・ウッズ／ジョン・ホームー（Eric Woods and John Homer）

米エネルギー省ファーナルド・オフィス（DOE-FN）と浄化作業請負業者のフルーア・ファーナルド社は、1998年に、ファーナルド・サイト外辺部（ウラン加工や廃棄物管理の影響を受けない区域など）でいくつかの生態修復プロジェクトを開始した。これらのプロジェクトは、1,050エーカーの同サイトのうち904エーカーの自然資源を修復する最終土地利用計画の一環である。DOE-FNとフルーア・ファーナルド社は、オハイオ州がDOEに対して自然資源の損害を1986年に告発した事件の解決を担当する監督委員会、ファーナルド自然資源トラスティ（受託者）と協力して、自然資源修復計画を策定した。この計画では、損害を受けた同サイトの自然資

源を修復する6つの主要プロジェクトを定めた。同計画には、湿地や氾濫原の形成を促す整地、掘削時に表土が剥ぎ取られた土壌の改良、さらにサイト全体における自生植生の定着が含まれる。

このサイトは、サイト閉鎖目標が2006年に設定されているが、現在、浄化作業の35%が完了し、大がかりな改良を伴う新たな修復段階に入っている。サイトのエコロジストは、エンジニアや浄化作業員と緊密に作業しながら、現地作業（掘削された凹地の湿地への転換など）の利点を生かし、不要なコストと重複作業を避けている。この協力作業を通じて、比較的簡単かつ安価に修復できる区域を見いだすことができた。

大きな擾乱を受けた土壤中の植物の生存を保証するために、ファーナルドでは、大規模な土壤改良、排水路の変更、特別に混成された植物種などの手法を用いる。これらの手法は、同サイトの初期段階の修復に有用であったが、大がかりな改良が行われた区域の修復を長期にわたり成功させるためにも非常に重要な要素となる。

## 初期修復

1998年に、ファーナルド・サイト外辺部の乱されていない区域で、生態修復作業が始まった。この区域が選ばれたのは、すぐにアクセスでき、米環境保護庁（EPA）とオハイオ州環境保護局の浄化基準を満たし、サイト浄化作業に影響を与えないためであった。ファーナルド自然資源トラスティのDOE-FN代表者であるピート・イエレス氏によると、乱されていない区域から着手するので、エコロジストたちは、より困難な区域の改良に先立って、修復手法を試用し、生育状況を監視し、現場で貴重な体験を積むことができたという。同氏によると、「過去4年間にサイトで4つの修復プロジェクトを行い、多くの監視データを収集した。このデータは、今後のより複雑な修復プロジェクトの準備に役立つ」という。

## 湿地

ファーナルド・サイト北東縁にある8つの低地からなる12エーカーの湿地は、サイト周辺住民から見てもっとも目に見える修復プロジェクトである。1999年の湿地造成時に、ファーナルド作業員は、3,327本の樹木と、オハイオ州南西部に自生する30種の草と野生の花を植えた。このプロジェクトは、浄化作業時に破壊された湿地の埋め合わせとして新たに造成される16.5エーカーの湿地のうち、7エーカーを提供する。

ファーナルド・サイトでは過去2年間に、湿地の機能を改善または向上させ、埋め合わせとして要求される湿地面積を確保するために、湿地系の総合的な健全性を監視してきた。エコロジストは、水位、水質、樹木・草本種、土壌、基盤、保守作業を監視している。また、気候条件と野生動植物の状況を観察し、調査結果、問題点、教訓を整理している。1999年の深刻な干ばつにより、全植物の約29%が失われた。樹

木について80%の生存要件を維持するために、2000年と2001年に高・低木を植え直し、植物被覆の不足を補うために、2つの低地に湿地性草木のプラグ苗を植えた。湿地は全般に保水性が高く、水質と野生動植物の状況は健全であり、生態系のバランスがとれていることがわかった。

土壌中の多量の粘土と、土壌掘削と建屋解体後に残された多数の凹地は、湿地の形成にとって最適な条件であることをエコロジストは見いだした。サイトの2つの改良区域に新たな湿地を造成するために、エコロジストと浄化作業員は協力した。

2000年の小規模な土壌改良プロジェクトの後、0.5エーカーの区域を新たな湿地に転換する機会に恵まれた。保水性を高めるために、掘削区域の南部に犬走り（土盛り）を設けた。同区域に自生の草と広葉草本の種が再びまかれ、水はけ口の浸食を抑えるためにコイア（ココナツ繊維）のマットが敷かれるとともに、ヤナギの挿し木が植えられた。2002年春に、同区域全体に約2,100本の低木が植えられた。ほとんどの植物は、休眠枝挿しによって植えられた。今後、ファーナルド修復プロジェクトでは、枝挿しに熟枝を用いる予定である。

2001年初めに、2エーカーのサイト区域から汚染された岩屑を取り除き、その際に新たな湿地を造成した。岩屑除去後の低地の保水性を最大にするため



浄化作業時に破壊された湿地を埋め合わせるために、サイト北東隅付近に8つの低地からなる12エーカーの湿地を造成した。この湿地には、3,000本以上の高・低木と30種の草および野生の花が繁茂している。





犬走り（土盛り）を計画的に配置し、自生植物種の種をまくことは、湿地造成の基本要素である。写真の湿地は、2エーカーの区域を改良後に造成された。

に、整地した浅い低地の中央に灌木の大きな茂みを設けた。そして、同区域に湿地性の自生の草と広葉草本の種をまいた。やはり岩屑が除去された隣接の小川であるパディーズ・ラン沿いの河岸を安定させるために、枝挿しと捨石の組み合わせなどによる浸食抑止策が講じられた。

これらは、湿地修復プロジェクトとして計画されたわけではないが、浄化作業員とエコロジストは現場で迅速に対応し、浄化作業を中断せずに、最低限の資金で新たな湿地環境を作り上げた。

### 森林生態系

DOEが修復を宣言した904エーカーのうち18エーカーを完成させる、2番目の主要な修復プロジェクトは、「森林実証プロジェクト」である。2000年に、ファーナルド・サイト北西縁沿いの18エーカーの旧牧草地がオハイオ州固有の森林に転換され、2,000本以上の高・低木が植えられた。また、いくつかの沼と湿地を造成した。そのなかには、春季は湿地として両生類の生息場所を提供し、夏季は干上がるバーナルプールがある。また、同プロジェクトにおける約2エーカーが、自生の草と広葉草本を用いてトールグラスサバンナに転換された。

2回の生長期を経た現在、監視と野外観察の結果は、種まきされた区域が計画通り進展していること

を示している。樹木は80%の生存率を達成した。しかし、シカの害を受けたため、2002年にいくつかの区域で90本の植物を植え直した。草本の被覆率を評価するために、無作為サンプリング区画を設定した。16区画のうち14区画は、被覆率90%の基準を満たした。いくつかの侵入種が認められたが、修復区域で進行中の保全作業により、侵入種の影響が徐々に低減している。新しい森林の生長と発展を保証するために、この区域を2003年まで3年間監視する必要がある。

サイトの70エーカーの区域には、操業の目隠しとしてストロブマツとオウシュウクロマツが列状に植えられていたが、ここに新たに高・低木を植えて、初期段階の森林生態系を構成する予定である。この修復プロジェクトの第一段階は、19エーカーの区域において、病気および過密な木を取り除くことであった。伐採した木を細片し、後に他のサイト修復作業における土壌改良や根囲いに使用するために、切りくずを貯蔵した。木の伐採が終わり、今後、2,970本の苗木、1,656本の低木、7,200本の実生苗を植え、50エーカーの区域に自生の草の種をまく予定である。この修復計画では、バーナルプールの掘削とプレーリーグラスの植え付けのために、2カ所の空き地を利用する。可能であれば、排水路を付け替えて湿地とバーナルプールを追加する。





ファーナルド・サイト北西縁沿いの18エーカーの旧牧草地在、初期段階の森林群集に転換された。運転員のマーク・フリッツ氏と作業員のショー・ウェルト氏は、2,000本以上の高・低木を植え、沼、湿地、バーナルプールを造成する作業に従事した。

### 生物工学的護岸工

1950年代初めのファーナルド・サイト建設時に、排水パターンを変更し、サイト西縁沿いのパディー・ランの流れを直線状にしたため、河岸が浸食された。場所によっては、堤防が深さ50フィートまで浸食されて氷河成表土に達し、小川の氾濫原と河岸緩衝地帯が狭められた。浸食によって、サイトの堆積盆も脅かされた。

浸食された堤防の一部分を修繕するために、1998年に、工学と生物学を融合させた技術分野である生物工学を用いたプロジェクトを実施し、浸食と土地安定性の問題への解決策を練った。浸食された斜面を整地し直して緩傾斜の氾濫原を修復し、堤防の斜面先にコイアログを置いて安定性を高めた。さらに、整地された堤防に沿ってコイアマットを敷き、マット下の土壤に自生のプレーリーグラス混成種の種をまいた。また、コイアマットを突き通してヤナギの挿し木を植え、マットを地面に固定した。これらの生物工学的手法により、小川の堤防は、浸食されずに断続的な高水位に耐えることができる。コイアマットの分解とともに

に、自生植物の生長と分散が進み、堤防が自然と安定する。

### 生態学的研究

DOEは、ファーナルド浄化プロジェクトの1つ



ファーナルド・サイトを流れる小川沿いの浸食防止と河岸安定処理のために生物工学的手法を用いる、フルーア・ファーナルド社の作業員であるハーブ・チャフィン氏。





7セルからなるオンサイト処分施設の土層を構築するために、土取場の土壌、岩石、粘土が掘削された。土取場は、セル建設後に修復される。

において強制力のある達成段階が定められていないという紛争を処理する、米EPAとの合意に基づいて、補助的な生物学的修復・研究プロジェクトを実施することにした。ファーナルド・サイトの生物学的修復について周辺住民に知識を提供し、紛争処理合意を果たすために、サイト西縁沿いに1エーカーの公園が整備された。このファーナルド生態修復公園は、夜明けから夕暮れまで一般公開され、小さな駐車場、説明板のついた散策コース、2つの見晴らし台が設けられている。ファーナルドの作業員は、自生の高・低木、草、野生の花を植え、トールグラスプレーリー、地味はやせた元耕地、硬材林、高地森林、湿地植生などの新たな生育環境を提供した。教育者と学生は、見学のためにこの公園を訪れ、生態学と修復技術を学んでいる。

DOEは1999年に、可能なサイト修復戦略に関する下記の予備的な生態学研究プロジェクトを実施した。

- さまざまな大きさと密度の植物を用いた種々の森林修復法の評価
- 表土が削剥された地域にプレーリーグラスを再び生長させる最適戦略の評価
- 焼け枯れに強いアメリカグリ個体群の再生
- 侵入植物種の特定と修復時に使用する制御法の評価
- エコロジスト、科学者、学生向けの生物学的修復に関する文献の整理

エコロジストは、データから、侵入種の制御、自生植物の加入速度と最適な植え付け密度、改良地域

におけるプレーリーの形成法について学んだ。また、教訓を取り入れ、最終的なサイト修復計画を練り上げた。

## 土取場

ファーナルド浄化計画の主要部は、低レベルに汚染された最大250万立方ヤードの解体破片と土壌を貯蔵するように設計された、7セルからなる廃棄物処分施設の建設である。セルの土層を構築するために、土壌、粘土、岩石の多くを付近のオンサイト区域で掘削しているので、サイトへの主ア

クセス道付近に深い凹地ができている。904エーカーの修復区域うち、190エーカーの土取場およびオンサイト処分施設外辺部に、自生のプレーリーグラスを植える予定である。また、選択された区域に165本の苗木と1,530本の低木を植え、開水面周縁部に湿地性植物のプラグ苗を植える。浸食を抑えるために、排水路の下位斜面にコイアまたはジュートのマットを敷き、流路に隣接するマット部分にヤナギの休眠枝を挿す。処分セルの建設期間中に、土取場は段階的に修復される。

## 改良区域の修復

ファーナルドでは今年、南部廃棄物ユニットと呼ばれる26エーカーの区域の修復が始まった。これは、改良区域における初めての大規模な修復プロジェクトである。ファーナルドでは、金属ウラン製造時に、新たな構造物用の空間を作るために、汚染された建設廃物、ボイラープラントのフライアッシュ、さらに土壌を、サイト南部の隔離された区域に投棄した。また、ファーナルドの警備員は、体力トレーニングと射撃訓練のために隣接区域を使用した。2001年11月に掘削が終了し、南部廃棄物ユニットで発生した40万立方ヤードを超える汚染された土壌と岩屑が処分され、下層のグレート・マイアミ帯水層への汚染源が取り除かれた。

南部廃棄物ユニットの修復時に掘削された凹地を利用して、パディーズ・ラン沿いに湿地性の氾濫原を造成し、この小川付近の細長い林を広げる予定である。残存する下層土を、木の切りくずと貯蔵された表土を用いて改良し、2,805本の苗木、1,564本の

低木、6,800本の実生苗を植え、根囲いを施し、自生の草と野生の花を定植および播種する。南部廃棄物ユニットの修復は、2003年に完了する予定である。

もっとも汚染された200エーカー近い区域の改良が終わり、ファーナルド・サイトの修復はこれからが本番である。このうち136エーカーは、冷戦時代の国防計画のために金属ウランが製造された区域、37エーカーは、100万トンの固体・液体廃棄物が入った6つのピットからなる廃棄物ピット区域、そして10エーカーは、4つのコンクリート製サイロが立地する区域である。このうち3つのサイロには、低レベル放射性廃棄物が入っている。各プロジェクトの浄化計画では、施設、ピット、またはサイロの下に横たわる汚染された土



整地と種まきが行われた区域を評価する、フルーア・ファーナルド社の修復担当エコロジストであるジョン・ホーマー氏とワイズ・コンストラクション社のソニー・ヤングブラッド氏。南部廃棄物ユニットと呼ばれるこの26エーカーの区域の修復は、改良区域における初めての大規模な修復プロジェクトである。



シカによる食害とこすりつけは、深刻な被害をもたらし、新たに植えた植生が破壊される恐れがある。こすりつけ防止のために、木に保護帯を巻き、シカよけ剤を塗った。

壤を掘削し、規制限度を超える物質をすべて取り除く。イエレス氏によると、「修復における一番の課題は、掘削作業完了後に残される傾斜した深い凹地である。凹地の多くは深さ20～30フィートで、土壌条件は非常に悪い。計画段階でプロジェクト責任者と共同作業することにより、修復計画を現行の改良作業と統合し、待っていたのでは実現しないような解決策を生み出すことができる」という。

2006年に、製造・廃棄物ピット区域修復プロジェクトとサイロ区域修復プロジェクトを開始する。前者は、ファーナルド・サイト中部の約190エーカーの区域を対象とし、825本の苗木、2,081本の低木、および2,000本の実生苗を植える。後者のプロジェクトでは、乱された5エーカーの区域を整地し、自生のプレーリーグラスの種をまき、825本の苗木、450本の低木、さらに2,000本の実生苗を植える。整地と排水路の整形によって傾斜比5対1の深い凹地を造り、安全と安定を図る。多様な湿地系を構成するために、浅い凹地と低湿地を統合して最終的な地形を形成する。

## 監視

サイト修復プロジェクトが、重要な初期段階で健全に、大々的に実施されることを保証するために、すべての修復区域を、事前に定めた期間にわたって毎年監視する。監視は、実施段階と機能段階の2段階で行われる。ファーナルド自然資源修復計画に従ってこのプロジェクトを完了させる上で、実施段階



の監視は2年間行われる。DOEは、自然資源トラスティーとの協議において、ファーナルドで植えられたすべての植物について80%の生存率を達成し、播種された区域の90%が植物で被覆されるという目標に同意した。植生生存率を評価するために、2回の生長期に死亡数を計数し、植生に対して生、再発芽、死という3区分を割り当てた。

湿地修復プロジェクトでは、3～5回の生長期を監視・評価する必要がある。プロジェクトによっては、特別に策定した計画において、水位や水性土壌の形成などの要因について、実施段階で新たな監視要件が課せられるかもしれない。

機能段階の監視時には、サイトの生態学的群集に対する各プロジェクトのシステムごとの役割を見直す。機能段階の監視では、実施段階の監視のように合否を判定するのではなく、修復前の基本条件と理想的な基準サイトに対して、修復された群集の進展状況进行评估する。機能段階の監視では、湿地と開水面、プレーリー、森林という3つに大別された群集に注目する。植物品質保証指標や、他のいくつかの植生と野生動物の指標を用いて、最後の修復プロジェクトが完了するまで、繰り返し方式の年間スケジュールに基づいて、の群集を1つ1つ評価する。

## 修復手法

新たに植えた高・低木に対するオジロジカの影響を制御することは、ファーナルド・サイトの課題の1つである。シカによる食害とこすりつけは、深刻な被害をもたらし、新たに植えた植生が破壊される恐れがある。このようなシカによるこすりつけを防ぐために、サイトに植えたすべての苗木に保護帯を巻き、若葉を食べられそうなすべての高・低木にシカよけ剤を塗った。この2つの方法により、ある程度被害を防げた。それでも、シカが木の保護帯をはぎ取ったり、保護帯の上の枝を折ったりして、植物の生存率が顕著に低下した。そこで、シカの専門家を雇用し、今後の修復プロジェクトにおいてシカの害を減らす方法を提案してもらうことにした。

もう1つの課題は、侵入種を排除または抑制することである。2000年と2001年に修復区域全体で何度か「侵入種の掃討」を行い、ハナヒョウタンボクやノイバラなどの侵入種がないか調査した。植物を引き抜くか、または毎年春と秋に除草剤をかけることによって対処した。除草剤のかけ方としては、葉へ



DOEとフルーア・ファーナルド社は、2006年末までにサイトの改良と閉鎖を完了し、2007年までに自然資源の修復を完了する予定である。今日、浄化作業の進捗度は35%を超えている。

の直接噴霧、EZ-Ject Lanceを用いた注入、さらに切断直後の切り株に除草剤をつける「切断注入法」などを用いた。侵入種を制御するもっとも効果的な手段について、今後も評価を続ける予定である。

エコロジストと土木技師が初期に協力したことにより、土壌改良後の最終整地を効果的に行うことができ、時間とコストを大幅に節減できた。改良作業によって、大きな凹地ができ、排水路のパターンが変わることがよくある。ファーナルドでは、埋め戻しと排水用の整地を行う代わりに、可能な場合は改良後の地形を「修復レベル」に転換している。建設ピットと堆積盆は、わずかな変更によって開水面、新生湿地、バーナルプールになる。

土壌掘削後に起きる別の問題は、表土を完全に剥ぎ取ると、有機物や多量養素が特に欠乏する固結した粘土、砂岩、砂礫が露出することである。エコロジストは、植物の生長に適するように土壌を改良するために、いくつかの手法を用いている。サイトで発生した木の切りくずを堆肥化し、修復作業に先立って、切りくず、貯蔵された表土、または運び込まれた堆肥を既存の下層土に混ぜている。また、すべての高・低木は、水と必要な栄養素を吸収しやすくするために、適切な菌根を植え付けてから定植されている。

サイトでの種まきには、ほとんど自生の草と広葉草本のみが使われた。改良後の下層土の条件によって雑草の生長が抑制されるので、プレーリー種が卓

越しやすくなることをエコロジストは確認した。自生種は生長が遅いが、被覆作物を用いて斜面の防護と浸食防止を図っている。

## 浄化・閉鎖後

DOEとフルーア・ファーナルド社は、2006年末までにサイトの浄化と閉鎖を完了し、2007年までに自然資源の修復を完了する目標を持っている。サイトの閉鎖に備え、DOE、フルーア・ファーナルド社、規制当局、利害関係者は、サイトの将来に影響を与える重要問題を1990年代初めから検討し、最終的な土地利用と公共の利用・アクセスについて合意に基づく決定を行ってきた。

1999年にDOEが最終土地利用について承認したことを受け、利害関係者による土地利用を認めるべきか、またその場合どのようなアクセスがサイトに適合するかが検討された。利害関係者は、浄化・閉鎖後にサイトを多目的（主に教育と娯楽）に利用することに強い関心を示した。

今年初め、規制当局と利害関係者は、DOEが提案した将来のファーナルド・サイトの公共利用計画を受け入れた。この計画は、同サイトの長期管理計画の基本要素である教育目的で、一般のアクセスを限定的に受け入れるものである。完了した改良区域と修復プロジェクトを公開展示するために、DOEとフルーア・ファーナルド社は、一連の散策路や見晴らし台、冷戦時にサイトが果たした役割や文化・生態学的な関心事を記した説明板を設置する。見学者は、アメリカインディアンの改葬地や、ウラン製造および浄化作業時にサイトに貢献した作業員、地元住民等を記念したファーナルド冷戦庭園を見ることができる。

2002年末に、DOEは、総合管理計画案を公開の予定である。同計画は、オンサイト処分施設や公共設備、修復区域に関する監視・保守要件を特定し、閉鎖後のサイト管理責任者の役割と責任を規定する。DOEは、多目的教育施設を建設することについて、住民から大きな支持を得た。総合管理計画は、そのような施設が承認された場合の管理・保守要件を示す。地域団体は、そのような施設の資金調達法、利用、空間的要件、設計を現在評価しており、DOEに勧告して検討を求める予定である。

エリック・ウッズ氏は、ファーナルド・サイトの修復作業管理者、ジョン・ホーマー氏は、修復担当エコロジストである。本記事は、契約番号DE-AC24-01OH20115を受けた米政府請負業者、フルーア・ファーナルド社の許可を得ている。