

カナダ・アクイストアにおける ACROSS 震源の 制御系刷新と復旧

○小池遥之^{A)}、渡辺俊樹^{B)}、山岡耕春^{C)}、坂井優斗^{D)}

^{A)} 計測・制御技術系支援室(理学)、地震火山研究センター配属

^{B)} 環境学研究科教授

^{C)} 名古屋大学名誉教授

^{D)} 装置開発技術支援室 研究機器開発技術グループ

1. 概要

カナダ・アクイストアの CCS 実証試験地では、CO₂ 地中貯蔵に伴う貯留層モニタリングを目的として、名古屋大学の技術を基に NTT データシステムが製造した ACROSS 装置が設置されている（図 1, 2）。しかし近年、インバーター故障や GPS 週数ロールオーバー問題に加え、既設制御盤のブラックボックス化により、長期間の稼働不能状態にあった。

本報告では、2022 年より開始された復旧支援の経緯と、2025 年 9 月に完遂した制御系刷新の全容を述べる。過去の試みは、詳細不明な配線仕様や機器の故障、さらに現地の厳しい作業環境に阻まれ難航した。そこで今回は、ブラックボックスとなっていた制御基板の回路図を新規作成し、交換機器の準備や作業環境の改善を徹底した。その上で、旧型インバーターを最新モデルへ更新し、制御中枢を名古屋大学で開発した FPGA へ換装した。併せて現地の基板内に設置されている PLC コードを新システム仕様に最適化することで全体の整合性を確保し、3 年越しの課題を克服して通常の運転に復旧させることに成功した。本発表では、その技術的な詳細と解決プロセスについて報告する。

2. 背景：アクイストアにおける CCS と ACROSS の役割

アクイストア・プロジェクトは、火力発電所などの排出源施設から排出ガス中の CO₂ を分離・回収し、地下の貯留層に圧入して封じ込める CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) の実証サイトである。現地では 7.5 MPa (75 気圧) の超臨界状態にて CO₂ が圧入されている。

この地下約 3000m に圧入された CO₂ の空間的な分布状態や、それに伴う地下構造の時間変化を常時監視（モニタリング）するための要として導入されているのが、名古屋大学で発案・開発された ACROSS 震源装置である。ACROSS は、精密制御された回転型振動発生装置であり、偏心した錘をモーターで回転させることで加振力を地盤に与える。

最大の特徴は、GNSS 等で得られる正確な時刻に同期して、指定の波形（周波数変調された信号など）を正確な一定時間間隔で繰り返し発出できる点にある。これにより、長時間分の信号をスタック（重ね合わせ）してノイズを抑制し、地中で反射・屈折した波を地震計で観測することで、微小な地震波速度の変化を高精度に連続監視することが可能となる。

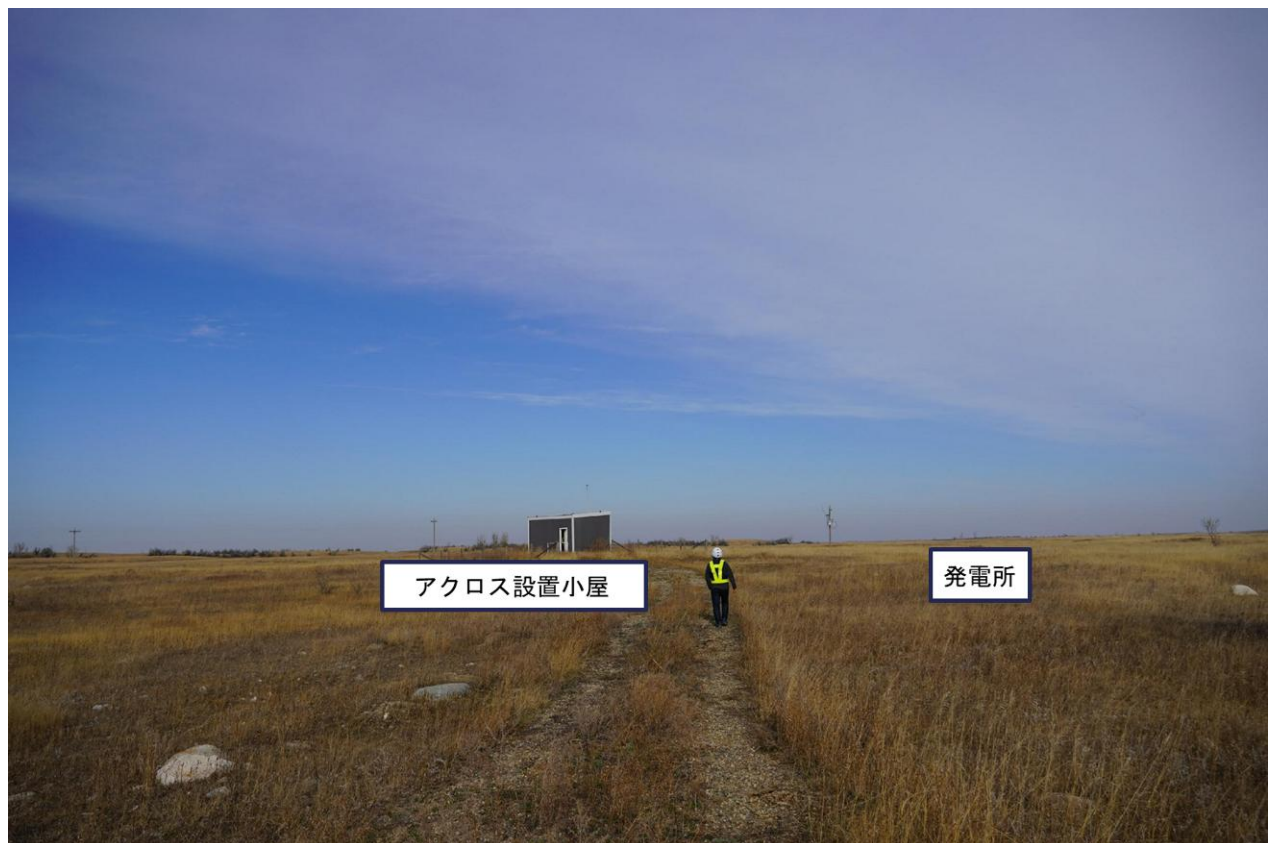


図1 カナダアクリストア、アクロス設置小屋の様子



図2 現地に設置されているアクロス（左）回転部分（右）既存制御装置

3. 課題の顕在化と初期対応（2021 年～2023 年）

アクイストアに設置されている ACROSS は、2011 年に開発された「JOGMEC 型（横置き標準化・高速化モデル）」をベースに、一般の株式会社（NTT データシステム）によって設計・製作された商用機である。そのため、設計・製作段階において名古屋大学が直接関与しておらず、運用を引き継ぐ際の資料も文字のみによる限定的なものであった。特に、ソフトウェアや配線などの電気・制御関係に関する引継ぎ資料は皆無であった。

同装置は 2021 年より稼働停止状態に陥っていた。システムの老朽化と、小屋の内部へのネズミの侵入による物理的な基盤破損が主な原因であると判明し、2022 年以降に名古屋大学のチームが技術支援として介入することとなった。

2023 年度より現地での修理作業を開始した。当時は、ネズミの侵入によってインバーターが故障していることが目視等で確認された。また、動作確認の際に時刻がずれるという現象が発生しており、調査の結果、2001 年製の旧型 GPS 機器が故障していることが判明した。この年の対応として、旧型のインバーターを同仕様の旧型へ交換し、あわせて GPS 機器の交換、および野生動物の侵入を防ぐための小屋のドアの修理を実施した。しかし、これらの物理的な補修だけでは、根本的なシステムの稼働には至らなかった。

4. 課題解決の難航と原因究明（2024 年）

翌 2024 年には、システムの制御において致命的となる「GPS のロールバック問題（週数設定のオーバーフロー）」が顕在化した。さらに、前年に交換したはずのインバーターが再び故障して停止してしまう事態が発生した。

この時点で最大の障害となったのが、既設制御盤の完全なブラックボックス化である。インバーターが停止する原因が、物理的な配線の不具合によるものなのか、それとも PLC 内部のプログラムによる論理的なエラーなのかを切り分けることすら極めて困難な状態であった。

事態の打開を図るため、名古屋大学で開発した独自の制御装置を現地に持ち込み、PLC プログラムの書き換えと故障原因の根本的な調査を試みた。しかしながら、図面が存在しない複雑な配線仕様の解読には限界があり、加えて時差や寒冷な作業環境による疲労などの制約も重なり、この年はシステムを期待通りに動作させることはできず、無念の帰国を余儀なくされた。

5. 抜本的なシステム刷新と定常運転の復旧（2025 年）

これまでの稼働ログや現地での症状を踏まえ、2025 年の段階で「インバーターの故障」がシステム停止の主要因である可能性が極めて高いと推測されていた。そのため、本年度の渡航は初めから「インバーターの最新機への交換」および「名大製制御装置への換装」を主目的として周到に計画された。

複雑な配線作業やプログラム改修における確認ミスを実質になくすため、小池と坂井の 2 名体制によるダブルチェック体制を敷き、9 月 25 日から 10 月 9 日にかけて現地での作業を実施した。

5.1 現地での状況確認と障害の切り分け

現地到着後、持参した交換機器を組み込む前に、詳細な症状の最終確認を行った。システムを起動すると、事前の推測通りインバーターの周波数表示が「0.3Hz」または「46Hz」のみで点滅し、エラーを起こしてシステムが停止する状態であった。モーターへの正転・反転の指令も一切通らないことが実証された。

また、インバーター以外にも、現地の制御盤に組み込まれていた FPGA ボード自体の故障、PLC の I/O（入出力）割付の不整合、ACROSS 本体の回転錘の位置未調整といった複数の不具合が確認された。そして何より、これらの機器を繋ぐ配線が依然としてブラックボックスであった。

5.2 リバースエンジニアリングと回路図の新規作成

用意した新しいインバーターや制御装置を安全かつ確実に組み込むためには、ブラックボックスとなっている既存配線の全容解明が不可欠であった。我々は、柏崎テストフィールドにある同型機およびアクイストアの機器から実際の配線を一本一本辿り、回路図とプログラムの再解釈を行った。この地道なリバースエンジニアリングにより、長年詳細不明であった配線の完全な図面化に成功し、同時に過去の作業で生じていた配線間違いを特定・修正することができた。

5.3 制御システムのハードウェア置換と最適化

配線の全容が明らかにするとともに、以下の抜本的な改修を実施した。

- I. インバーターの最新モデルへの更新：不具合を繰り返していた旧型インバーターを、最新モデルのインバーターへと更新した。（図 3）
- II. パルス変換ボードの作成と設置：新型インバーターを組み込む過程で、周波数出力がパルス仕様に変更されていることが判明したため、現地にて急遽パルス変換ボードを作成・設置し、信号の整合性を確保した。
- III. 制御中枢の刷新（名大製 FPGA の導入）：故障が発覚した旧制御装置をシステムから切り離し、名古屋大学で独自に開発した FPGA 搭載型の新型制御装置へと置き換えた。
- IV. PLC プログラムの改良：既存基板側の PLC に残されたコードを解析し、新システム（名大製 FPGA および新型インバーター）の仕様に合わせて I/O の再割り付けとプログラムの最適化を実施した。
- V. 錘の位置調整：ハードウェアとソフトウェアの通信が確立した後、モーターの回転と回転錘の物理的な位置関係の再調整を行った。

5.4 精密制御シーケンスの確立

ACROSS の定常運転において最も重要なのは、発出する信号の位相と時刻の精密な同期である。今回、操作用 PC から TCP/IP で運転設定情報を FPGA へ送り、FPGA と PLC が連携してインバーターを制御するシステムを再構築した。

具体的には、GPS 時計からの 1PPS 信号と、モーターのエンコーダーからの位置パルスを、PLC の高速カウンタユニットを用いた「ラッチカウント機能」によって高精度に計測・同期させた。さらに、従来のシステムでは回転中に位相調整を行っていたが、今回のシステム刷新に合わせて「回転開始前」および「反転スタート時」に位相調整と時刻合わせを行うシーケンスへと改良を加えた。これにより、装置の立ち上げ時や反転時の物理的な負荷を軽減しつつ、より精度の高い定常信号の連続発出が可能となった。



図 3 接地した新型制御装置（左）とインバーターを置き換えた既存制御盤（右）

6. おわりに

これらの全面的なハードウェア刷新およびソフトウェア改修を経た結果、3 年越しに ACROSS を想定通りに動作させることに成功した。その後、2025 年 12 月には本装置を使用した地下構造探査が無事に実施され、CCS モニタリングのための有意義なデータが取得されたとの報告を受けている。

開発元である大学の手を離れ、製品化の過程でブラックボックス化してしまった商用システムを前に、我々も最初は手探りの状態からのスタートであった。3 年間にわたり、遠方での限られた作業時間、厳しい自然環境、そして見えない不具合という困難の中で失敗を重ねることとなった。しかし、諦めることなく回路の一本一本を解析し、大学で培った計測制御技術（FPGA/PLC 制御）へと制御装置を交換できたことが、今回の定常運転復旧に繋がったと考えている。

本プロジェクトの遂行にあたり、多大なるご支援とご協力をいただいた JOGMEC 様、PTRC 様、そして名古屋大学の共同研究者の皆様に深く感謝の意を表する。今後も本装置が安定して稼働し、世界の CCS 技術の発展と環境保全に向けた研究に末長く貢献していくことを願って結びとする。

7. 参考文献

White, D. J., et al. (2023). "Continuous seismic monitoring of CO₂ injection at the Aquistore site using ACROSS." International Journal of Greenhouse Gas Control.