

# 地球科学試料中の水素分析のためのマイクロビーム制御システム 及び照射試料駆動制御システムの開発

筑波大学 加速器センター 大和良広  
<http://www.tac.tsukuba.ac.jp/>

## 1. はじめに

筑波大学加速器センターでは、陽子及び重イオンのマイクロビームによる地球科学試料中の水素・軽元素分析システムを開発した。このシステムにおけるビーム輸送並びにマイクロビーム形成に Windows2000 ベースの PC と YOKOGAWA WE7000 シリーズを用いた制御システム及び照射試料駆動制御システムを開発し、良好な結果が得られたので報告する。ビームライン上の各光学要素及び照射試料駆動制御システムに対する計測・制御の通信は 100BASE-TX のイーサネットを用い、コントロールソフトウェアの開発は、Visual C++ で行った。

## 2. 地球科学試料の水素分析

火山はその活動の過程でマグマから火山ガスなどの揮発性物質を放出する。このマグマ中の揮発性成分は、噴火の過程で地表に放出されてしまうので噴火以前のマグマの揮発性成分を調べることは容易ではない。しかし、ガラス包有物(メルトインクルージョン)(図1・2)という酸性火山岩(鉱物試料)の石英斑晶中に取り込まれた初期のマグマ物質を分析することによってそれが可能になる。火山岩の包有物の揮発性物質(本研究では含水量)の分析によって、島弧マグマの発生と揮発性成分の関係、地殻内部での水(H<sub>2</sub>O)の挙動などの解明、ひいては火山噴火予知への貢献も期待される。

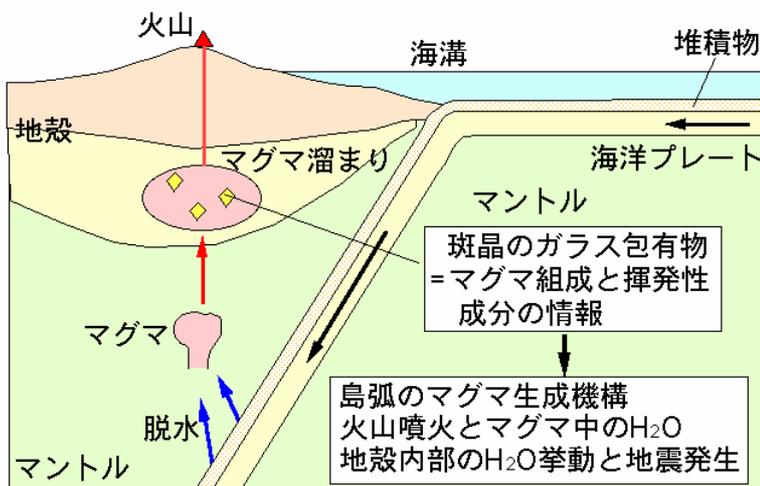
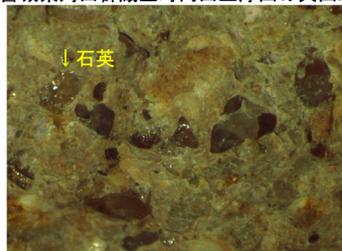
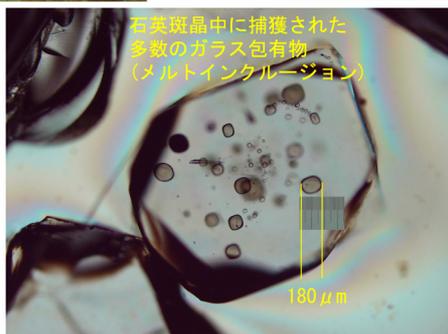
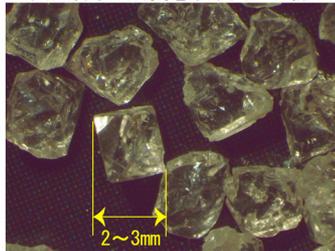


図1 分析対象の説明

宮城県荊田群蔵王町円田土浮山の火山岩



火山岩中の石英を取り出した物



薄片にした火山岩中の石英

図2 ガラス包有物

期待される。

鉱物試料などに含まれる水(水素)の分析は、これまで灼熱減量法や2次イオン質量分析(SIMS: Secondary Ion Mass Spectroscopy)、赤外吸光分析(FTIR)などで行われてきた。また、2MeVの<sup>4</sup>Heイオンによる弾性散乱分析法(ERDA: Elastic Recoil Detection Analysis)も水素を検出できるが、検出できる領域は表面から数μm程度である。

筑波大学加速器センターでは 20MeV の陽子マイクロビームを用いて弾性散乱同時測定法 (ERCS: Proton-proton **E**lastic **R**ecoil **C**oincidence **S**pectroscopy)により、0.2mm の厚い試料中の水(水素)濃度の測定に成功した。この手法によりこれまで全く不可能であった、鉱物中の包有物の水素分析も非破壊で可能になった。図3に示す様に、左右 45 度に 2 台の Si 検出器 (SSD) を設置し同時測定を行う事により効率よく短時間に試料中の水(水素)濃度を測定できる。この様な分析システムは現在国内唯一である。図3の写真円田5は、宮城県荊田群蔵王町円田の火山岩中の石英斑晶に入っていたガラス包有物の顕微鏡写真である。図3の中央オレンジの部分がこのガラス包有物であり、実際に測定して得られた (4) の波形より、含水量は 4.0wt.%と算出された。

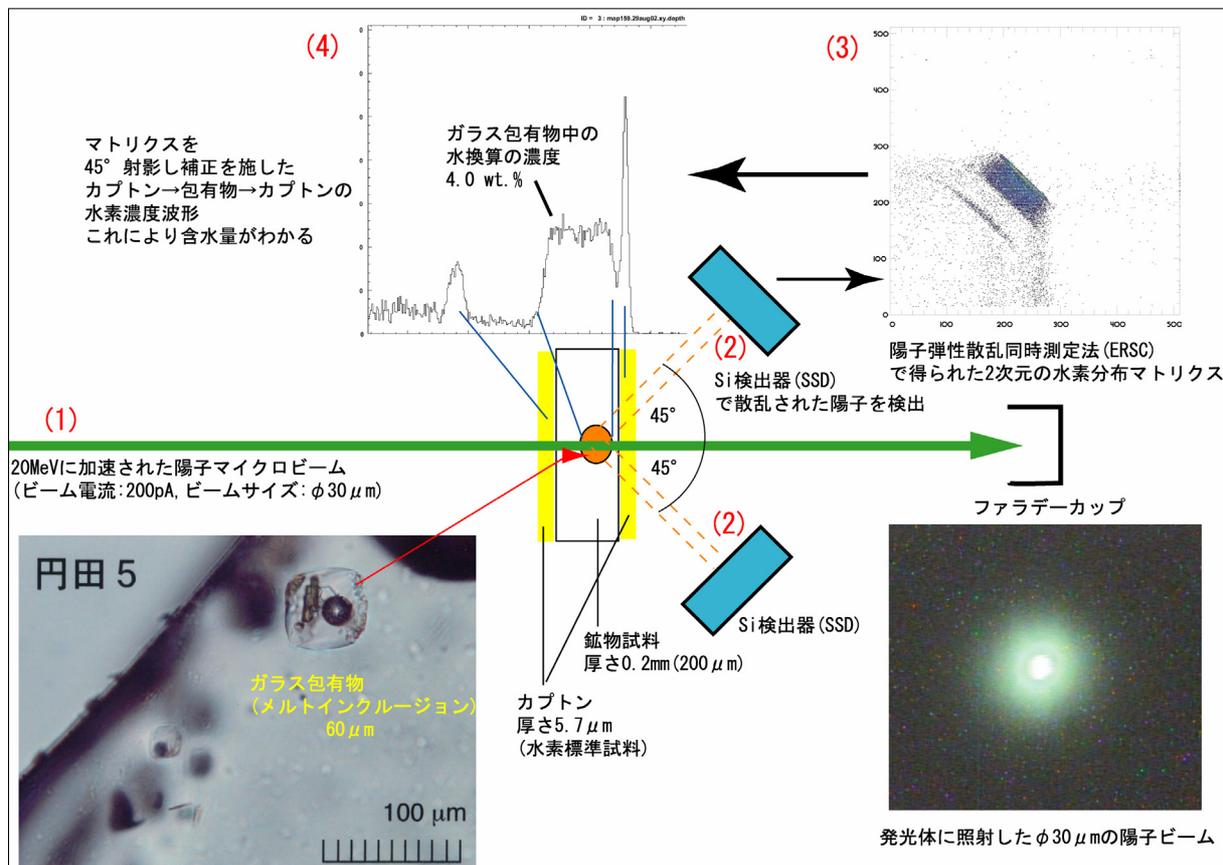


図3 ガラス包有物へのマイクロビーム照射による含水量の測定方法

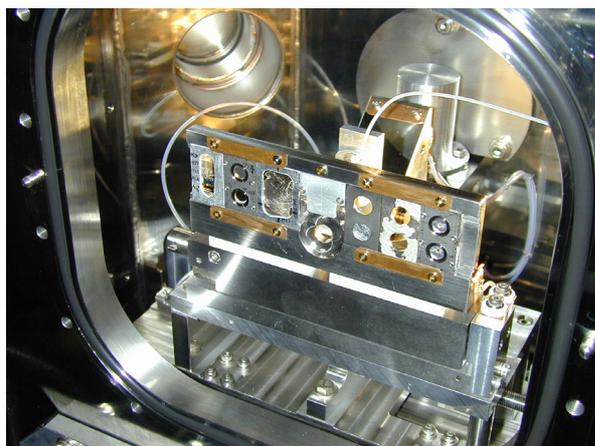


図4 試料を付けたターゲットステージ

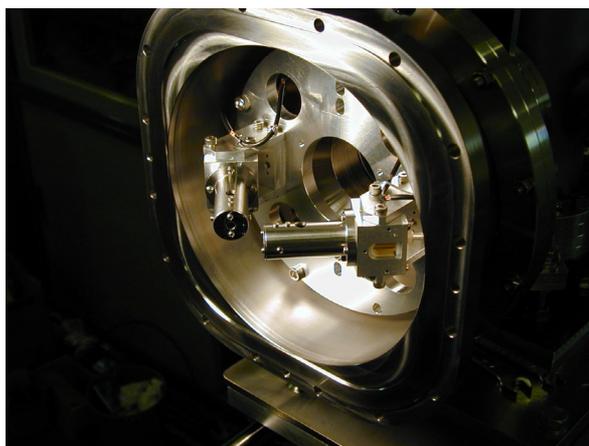


図5 45° に傾けた同時計測用 SSD

図4は、薄片にしたガラス包有物を含む石英斑晶の小片をカプトンシートで挟んだ物をセッティングしたターゲットステージの写真。図5は、陽子弾性散乱同時測定用の Si 検出器の写真である。

### 3. 制御システムの開発目標

短時間で所定エネルギーのビームをターゲットに輸送し、マニュアル制御は極めてリアルタイム制御(アナログメタルワイヤー制御)に近い状態に最適化する。試料の位置制御は、 $1\mu\text{m}$  程度の精度で照射データの基準となる再現性を有する。

### 4. マイクロビーム制御システム

筑波大学加速器センターでは、従来からアナログメタルワイヤーによる計測・制御を行っており、そのため膨大な量のケーブルがケーブルラックに張り巡らされている。現在ケーブルラックにはほとんど空きが無く、新規に機器の計測・制御を行う場合に、新しく多数のアナログメタルワイヤーを引くことは物理的に不可能である。そこで信号の多重化が必要になるが、安定動作の実績があり、規格として寿命が長いと思われる通信手段の 100BASE-TX のイーサネットを用いた。マイクロビームシステムの開発が始まってまもなく高速キャンパスネットワーク工事により当センターの各フロアに 100BASE-TX コンセントが設置された事も通信手段の選択に寄与した。図6に制御系統図を示す。

#### 水素分析用マイクロビーム制御システム 制御系統図

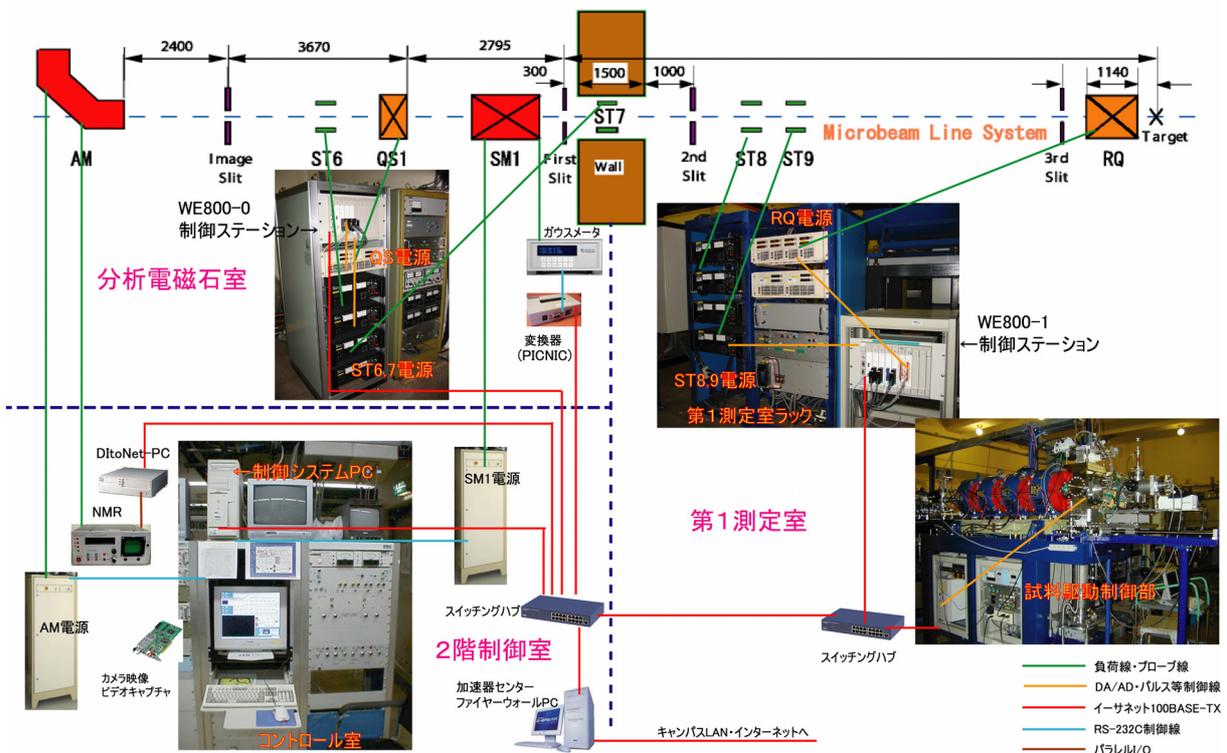


図6 マイクロビーム制御系統図

2階制御室に置かれた PC により2台の YOKOGAWA 計測ステーション WE-800<sup>1)</sup> を介して各電源装置の入出力の AD/DA を行っている。モジュールは、PSI モジュール WE7035(12bitAD/DA)及びロシアン Q(RQ)マグネット用には高分解能・高安定度が要求されるため 4ch100kS-デジタイザモジュール WE7271(16bitAD)と 4ch100kS-DA モジュール WE7281(16bitDA)を用いている。電源装置には、マグネティックステアラー用に高砂製作所のバイポーラ電源 BWS40-7.5 を使い、Q マグネットには同社のスイッチング電源の EX シリーズを用いた。この EX 電源のリップルがビーム径を拡大するので、リップルを最小限にするため電源装置の出力の負極を太い導線でアース接地し、負荷端に  $330\mu\text{F}$  の電解コンデンサと  $2.2\mu\text{F}$  のポリエステルフィルムコンデンサを並列に取り付けた。分析電磁石(AM)磁場の測定はエコー電子 NMR の BCD 出力を PC により変換し UDP で読みに行き、振り分け電磁石(SM1)の磁場は Lake Shore のガウスメータの RS-232C 出力を LAN アダプター PICNIC<sup>2)</sup> を用いて読み出している。AM, SM1 の DANFYSIK の電源は RS-232C で制御する。

<sup>1)</sup> <http://www.yokogawa.co.jp/Measurement/Bu/WE7000/>

<sup>2)</sup> <http://www.tristate.ne.jp/picnic.htm>

図7にマイクロビーム制御システム(ビーム輸送系)の制御画面を示す。制御ソフトウェアは Windows の特徴を生かした設計をした。ファイル選択などコモンダイアログを用いており誰でもマニュアル無しで使えるように心がけた。データの保存形式は CSV(Comma Separated Value)を用い、ビーム輸送パラメータ復帰用データとログ収集・保存用 Excel データを同時に保存するようになっている。手動制御方法は、マウスにより画面の制御対象を左クリックで選択後、マウスホイールを上下に回して電源の出力をリアルタイムに調整する。これによって発光体ビームモニターを用いたビーム収束状況の観察やメータによるビーム電流変化の観測に集中することができる。分解能の切換や出力のリセットなどは右クリックメニューで選択する。ショートカットキーによる俊敏な動作も可能である。

コントロールソフトウェアのプログラム開発は、実行形の最高速度を得るために Visual C++ 6.0J

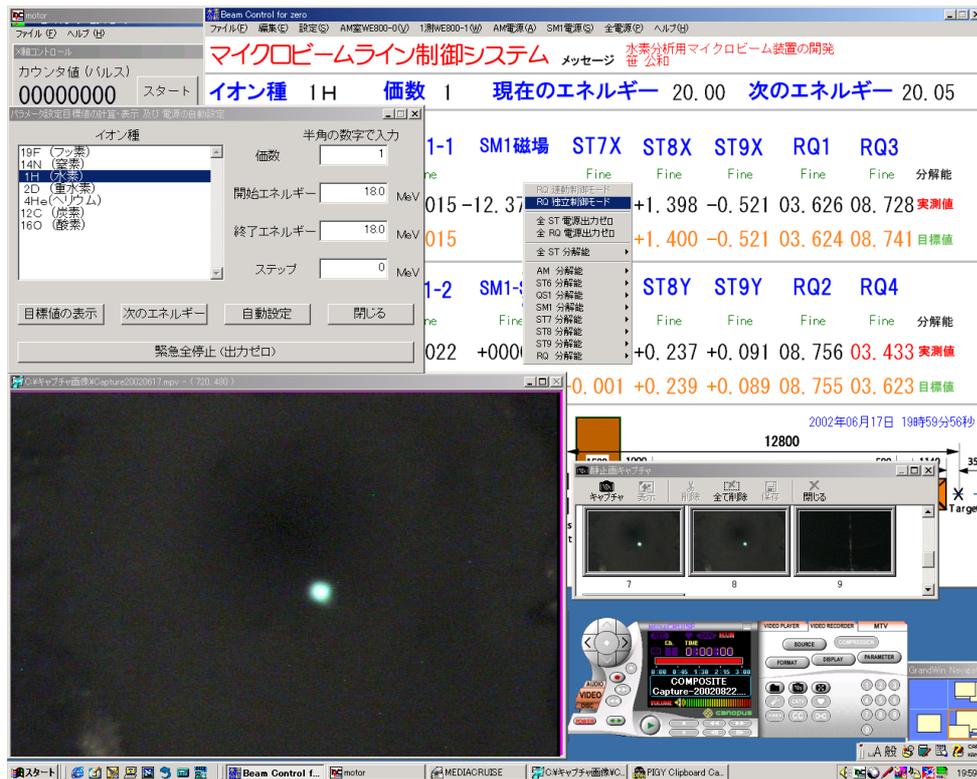


図7 ビーム制御画面

SP5 を用いて C 言語で行い、図8の様に4つ以上のスレッドを並行して走らせるマルチスレッド及び投棄的命発効によりディレイのある機器を体感させない工夫を施した。ただし、PSI モジュールのスループットが非常に低く、チャンネル数が多くなるとこの遅延により結局、WE7000 の操作は処理終了まで待たなければならぬ。

マイクロビーム制御システムソフトウェアのソースコードの量は、コメント等も合わせ合計約 4,800 行である。

### 5. WE7000 を使った場合のメリット・デメリット

計測・制御に関する API が全て揃っており機器を直接コントロールするような低レベルでのソース編集の必要が無い点は大変メリットである。しかし、トータルスループットがかなり低かったり、不具合がある場合にその部分がブラックボックス(ソースプログラムやファームウェアを公開してもらえない)であるためハード的にもソフト的にもこちらで修正できない点が開発の機動性が悪い点でデメリットである。ただし、YOKOGAWA のサポートは大変しっかりしており問題解決はほぼ可能であった。

### マルチスレッド化による低速機器の 感覚上のディレイ吸収

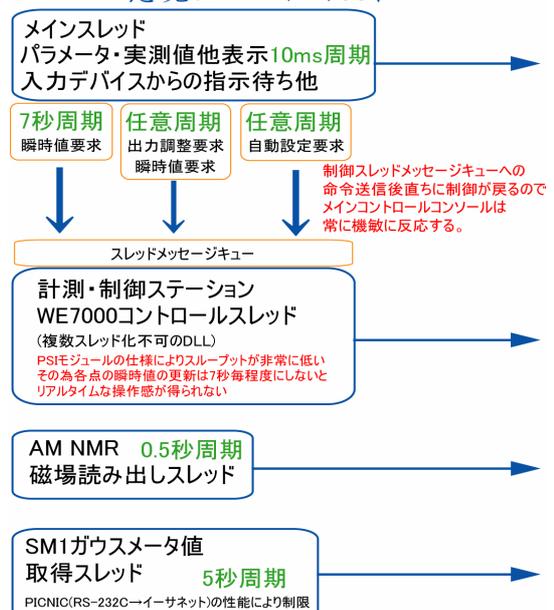


図8 マルチスレッド概念図

## 6. 照射試料駆動制御システム

X, Y, Z ターゲットステージ及び顕微鏡ズームのモーターコントロールはビームライン最後部(図9)の PC で行っており、測定室での現場操作及び VNC による2階制御室でのリモートコントロールができる。ターゲットステージの移動はステージの各軸に接続された高精度ボールネジとマグネットカップルを介して直結されたオリエンタルモーターの  $\alpha$  ステッピングモーター AS シリーズ (AS911AB, AS69AB) の超高分解能(0.0036° /パルス)な回転により行われている。ギヤを使わずステージを直動しているためモーターの性能を十分に活かしており 100mm 程度の長距離移動を繰り返した後の位置の再現精度も  $2\mu\text{m}$  以内である。PC との各インタフェースは、Interface 社の PCI ボードを用いた。ステッピングモーターコントロールに、4 軸同期制御ステッピングモーターコントローラ PCI-7208。省配線化の為に CCD カメラ・照明等の AC100V 負荷のリモートスイッチ用に、8 点制御リレー出力ボード PCI-2503。ターゲットステージのシーケンス動作とラボラトリ・イクイップメント社のネットワーク MCA LN-6400 の MCS 動作との連動の為に、32 点デジタル入出力共用ボード PCI-2703A。顕微鏡ズーム倍率絶対値取得の為に、12 ビット S8 点 10V 単一レンジ AD 変換ボード PCI-3172A を使用した。これらはソフトで、Interface 社のドライバを介して API で制御している。

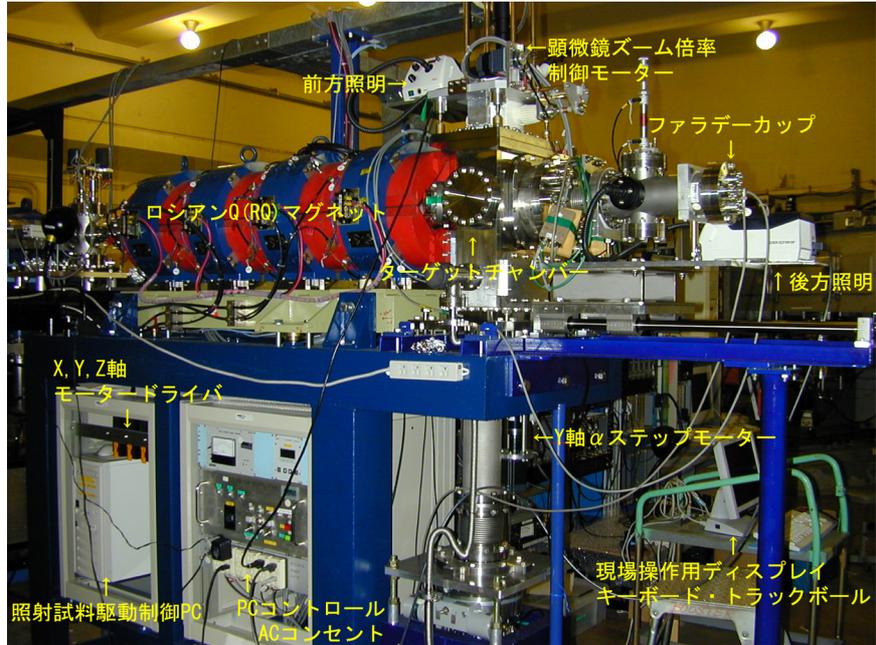


図9 照射試料駆動制御部

照射試料駆動制御ソフトウェアの動作仕様は、1パルス=1 $\mu\text{m}$  の設計で移動距離の入力後 S 字加減速動作を行い、ステージボールねじなどへの負担を軽減する様にした。試料の位置は 40 カ所メモリーでき、ある照射点から別の照射点への移動がワンボタンで簡単に出来るようにした。また、1mm

以上の長距離の移動は加速後の最高速が 20kHz(2mm/s)となり、1mm 以下の短い距離の移動は 1kHz(0.1mm/s)の低速で移動させている。メモリーされた位置情報はリストア用のファイルと実験に使用する Excel ファイルに保存できる。保存したファイルは再びメモリーに読み込んで以前のデータを再現できる。X, Y 軸の微調はカーソルキーで行い、Z 軸、ZOOM の調整はファンクションキーで行う。カメラ・照明等のコントロールもリモートで簡単に行える。図10はカメラ・ライトを ON している所。誤操作を防ぐために操作 Window を閉じないと他の操作ができないようになっている。

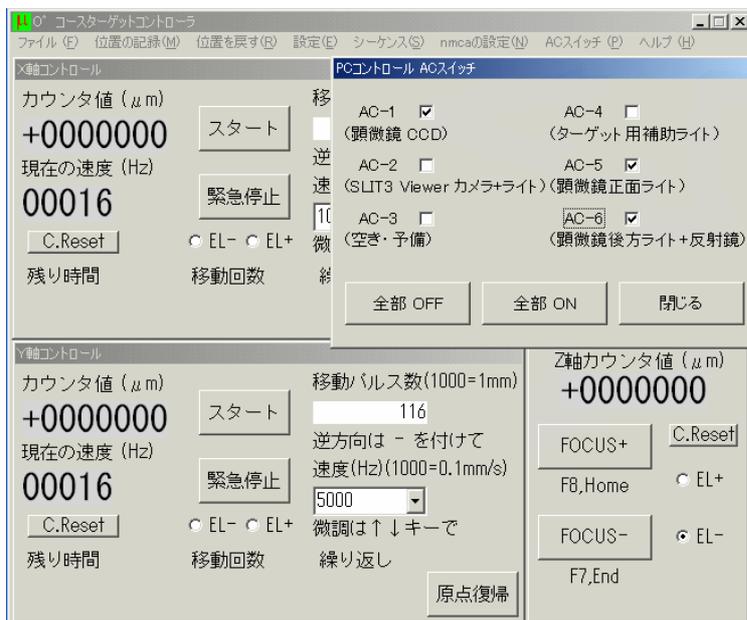


図10 顕微鏡のカメラと照明のスイッチを ON している例

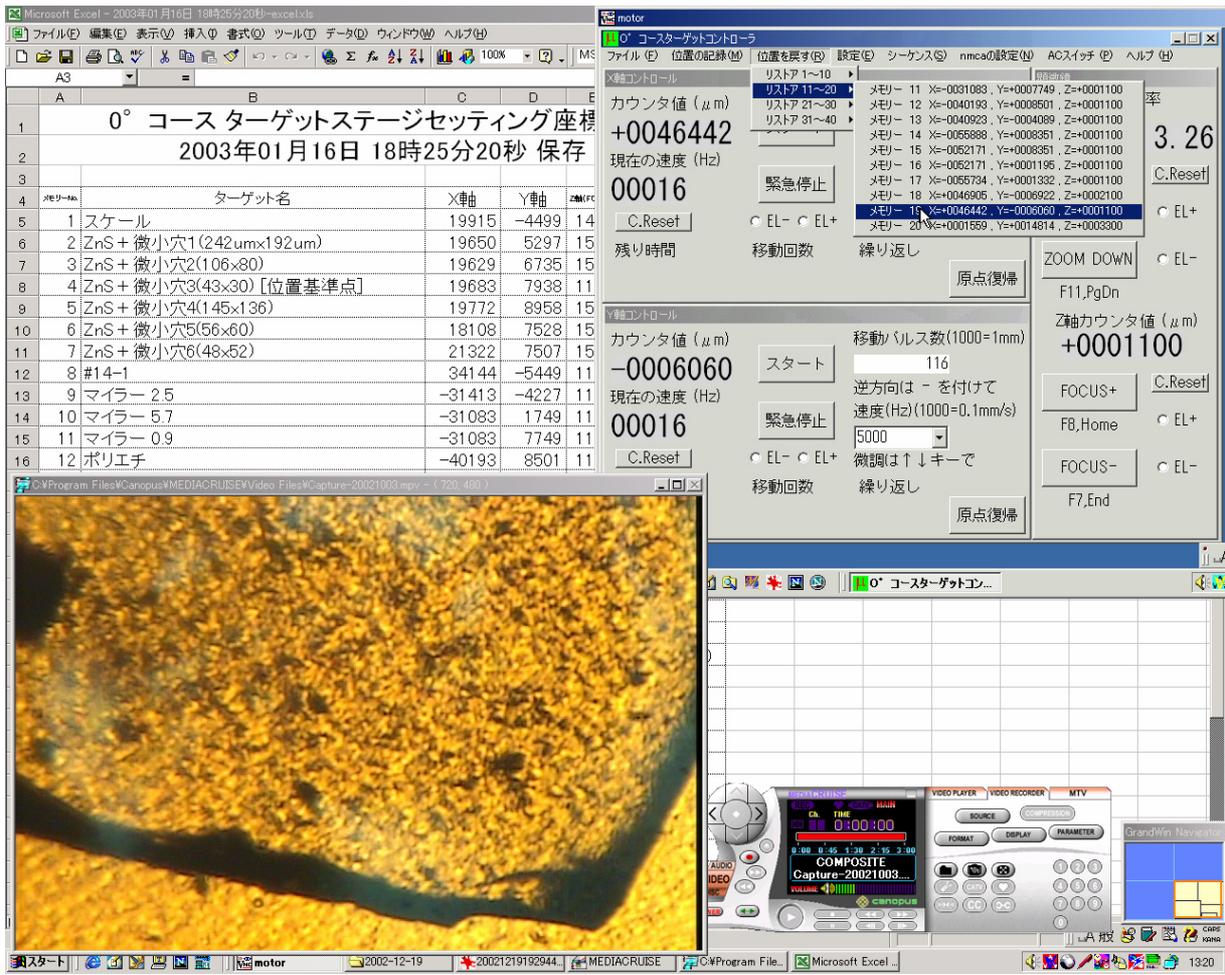


図11 照射試料駆動制御画面

図11は、ターゲットステージ制御画面と顕微鏡キャプチャ映像である。後ろに一部見えているExcelの表は本ソフトウェアが作成した試料座標データである。マイクロビーム制御システムソフトウェアと照射試料駆動制御ソフトウェアを同時に使うと表示面積が足りないため仮想画面ソフトウェアを使い、用途に応じて切り換えて使っている。

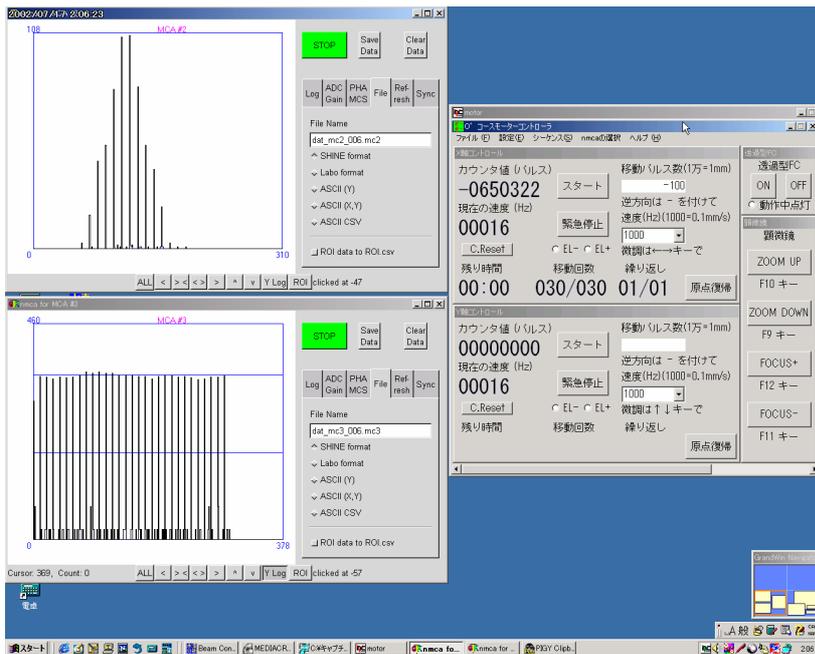


図12 ビーム径測定シーケンスモード

図12はビーム径を測定するため25μmのタンタルワイヤーを10μm移動し20秒間測定してまた10μm移動を繰り返しMCAデータを自動収集するシーケンスモード動作が終了した時の図である。

照射試料駆動制御ソフトウェアのソースコードの量は、コメント等も合わせ合計約5,200行である。

## 7. 本システムの主な機能

- ・ ビーム輸送データの実測値表示・保存・読み出し・目標値表示・自動設定
- ・ ロシアン Q-Mag.(RQ) RQ1,4,RQ2,3 連動制御モード・独立制御モード
- ・ 別 Window での分析電磁石磁場計算によるスケールリング・目標値表示・自動設定
- ・ ビデオキャプチャーによるビームモニター・動画・静止画記録
- ・ ビーム輸送パラメータの自動保存 (csv 個別データ・まとめデータ)
- ・ ターゲットステージのモーションコントロール(X,Y,Z,ZOOM の4軸ステップモーター)
- ・ ターゲットステージのシーケンス動作とネットワーク MCA の MCS 動作との連動
- ・ ターゲットステージの位置メモリー40 カ所+ファイルへの保存・読み込み
- ・ CCD カメラ、照明等の AC スイッチコントロール

## 8. トラブル・対処・苦労話

- ・ WE7000-PSI(電源 I/O)モジュールから不正電圧が出て電源装置の OVP(Over Voltage Protector)が点いてしまい操作不能になった。→ YOKOGAWA でファームウェアの書き換えと回路修正で対応。更に電源装置の OVP 反応速度を鈍らせるためにコンデンサを付加
- ・ WE7000 が仕様通りに動作しない部分があった
- ・ AM NMR のパラレル読み出しで 5V 電源容量が足りなかった→レギュレータ交換
- ・ ガウスメータ(7bit パリティ奇数)と PICNIC(8bit パリティ無し)の仕様の違いによるデータ読み出しの細工が面倒だった。また PICNIC が非力なため更新周期も 1 秒以上上げられない
- ・ VC++は画面設計のサポートが十分ではないので GUI の設計・製作に苦労した
- ・ 高精度モーターの選定とそのコントローラの選択にテストを含め時間を要した
- ・ ネットワーク MCA の制御部に非常な試行錯誤が必要だった
- ・ モーターコントロールボードのドライバ不良によりリミットスイッチを破損した

## 9. 経験からの教訓

私がゼロから作り上げた Windows アプリケーションソフトウェア開発は今回がはじめてである。初歩の講習と独学で製作したが、ソフトウェア開発で不具合が発生した場合、8割は自分のミスであり、2割程度がメーカーのドライバや API による不具合であった。幸いにも Windows2000 の OS による不具合は一切経験せずに開発できた。もちろん、最新のサービスパックと Hotfix は全て当ててあり、余計な常駐ソフトは入れていない。開発中は、不具合が発生したときにまず自分のミスだと思ってハードウェア・配線チェックやソフトウェアデバッグをするのは当然である。しかし、今回の開発でハードウェアを沢山使うソフトウェア開発では自分以外の原因による物もかなりの頻度であった。開発に行き詰まった場合早めにメーカーに問い合わせるべきであることを学んだ。

## 10. まとめ

ERCS に用いる 20MeV 陽子ビーム及び共鳴核反応に必要な 16~25MeV の  $^{19}\text{F}$  ビームを約 30  $\mu\text{m}$  程度に絞るマイクロビーム収束系、並びに照射試料の駆動を PC で制御するシステムを完成させた。手動制御の感覚はアナログメタルワイヤーとほぼ同程度の反応である。電源装置の出力設定を前回のビーム輸送データに約 30 秒で自動設定でき、ビームの再現性も良好である。ステージモーターコントロールは位置決め精度 1  $\mu\text{m}$ (モーターの精度は 100nm)で4軸同時動作可能であり、位置の再現性も極めて良好である。

このシステムにより今まで不可能であった高精度で高い再現性のあるマイクロビーム輸送及び照射試料の位置決めができるようになった。今後、2次元データ収集システムとの連携によるターゲット自動移動及び自動解析、定量データの即時提示を実現していく予定である。この技術の進展と共に「日本列島の東西南北方向により詳細にマグマ中の水濃度を明らかにする」「マグマ中の水濃度の時代変化との関係を明らかにする」などのテーマでデータ収集を進めていく。

最後に、このような機会を与えてくださった古野興平加速器センター長、ご協力頂いた加速器センター全教職員、地球科学系 黒澤正紀 講師に感謝いたします。

## 11. 参考・引用文献

- [1] 第15回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会講演集
- 1.水素分析用マイクロビーム制御システムの開発  
○大和良広、笹公和、大島弘行、木村博美、古野興平
  - 2.陽子ビーム ERCS による水素分析  
○小松原哲郎、笹公和、島邦博、古野興平、大島弘行、木村博美、田島義一、高橋努、石井聡、大和良広、黒澤正紀\*  
筑波大学加速器センター  
\*筑波大学地球科学系
- [2] 21 世紀連合シンポジウム -科学技術と人間- 講演集  
高エネルギーマイクロビームによる水素分析法の開発 - 地球科学への応用 -  
○笹公和、古野興平、小松原哲郎、大島弘行、大和良広、黒澤正紀
- [3] 石英斑晶中のガラス包有物の水素分析 (2002.12.18)  
黒澤正紀 筑波大学地球科学系
- [4] SIMS でみる火山噴火  
宮城磯治 地質調査所 環境地質部 他

## 12. 開発に役立った web ページ

- [1] 猫でもわかるプログラミング  
[http://www.kumei.ne.jp/c\\_lang/](http://www.kumei.ne.jp/c_lang/)
- [2] VC++ Programming Tips  
<http://win32lab.com/tips/index.html>
- [3] C言語で始めるWindowsプログラミング  
<http://web.kyoto-inet.or.jp/people/ysskondo/index.html>
- [4] Microsoft Win32 API の関数と概要  
<http://www.topposystem.co.jp/DL/Win32API/>
- [5] API 別 Win32 サンプル集  
[http://tokyo.cool.ne.jp/masapico/api\\_index.html](http://tokyo.cool.ne.jp/masapico/api_index.html)
- [6] カテゴリ別ランタイム ルーチン  
[http://www.microsoft.com/japan/developer/library/vccore/\\_crt\\_run.2d.time\\_routines\\_by\\_category.htm](http://www.microsoft.com/japan/developer/library/vccore/_crt_run.2d.time_routines_by_category.htm)
- [7] ASCII コード表  
<http://www.notredame.ac.jp/~th96s016/ASCIIcode.htm>
- [8] マウスホイールの使用方法 Using Mouse Input (MSDN)  
<http://msdn.microsoft.com/library/default.asp?url=/library/en-us/winui/winui/windowsuserinterface/userinput/mouseinput/usingmouseinput.asp>