

加速器質量分析法でのデータ収集統合システム（AMS_DAC）の開発

大和 良広

筑波大学研究基盤総合センター技術室（応用加速器部門）

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門では、大型タンデム静電加速器による加速器質量分析（Accelerator Mass Spectrometry 以下、AMS）を行っている。この AMS システムのうち、実験における様々な操作を統括的に行うソフトウェアを開発し、AMS Data Acquisition Conductor（以下、AMS_DAC）と命名した。同システムは、良好に稼働しており AMS 実験の効率的な遂行に貢献している。

キーワード：AMS、電流積分計、自動化、C#

1. はじめに

AMS は、目的元素を 1 個単位で直接計数する超高感度測定手法である ($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比で $\sim 10^{-14}$)。また、少ない試料 ($\sim 2 \text{ mg}$) で比較的短時間 (数分から数十分程度) に計測できる特徴がある。

この AMS システムのうち、同位元素比を正確に知るための 2 系統の電流積分計とリアルタイム電流表示、トレンドグラフ、測定の開始/終了のためのイオンビームの ON/OFF 制御、データ収集システムの遠隔制御、収集データの Excel とのリアルタイム連動、タイマーによる自動終了、開始/終了の音声アナウンス、逐次データの csv ファイル保存などの統括的な動作を行うソフトウェアを開発し、AMS Data Acquisition Conductor (AMS_DAC) と命名した。図 1 に AMS_DAC の稼働画面を示す。

2. 筑波大学 AMS システム

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門の AMS システムは、日本最大の質量分析装置であり、極微量放射性核種 ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{129}I の超高感度分析 (同位体比 $\sim 10^{-14}$) が可能である。目的元素をイオン化し加速器と粒子識別技術を駆使して、元素 1 個 1 個を測定でき、筑波大学独自の“マルチ分子パイロットビーム法”により実現されている。

存在量が極めて少ない長寿命放射性同位元素の測定を最も得意としており、 ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{129}I 等の測定が可能である。特に、 ^{36}Cl 測定では、大型タンデム静電加速器の性能を生かし ^{36}S との分離識別ができ、繰り返し測定精度 $\pm 3\%$ 、検出限界として $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = \sim 10^{-15}$ を得ており、世界最高レベルの測定性能を達成している。[1][2][3][4][5]

図 2 にイオン源から検出器までの全体図を示す。このシステムを用いて、

- 長寿命放射性同位元素をトレーサーとした地球環境科学研究
 - 南極氷床コア中の長寿命放射性同位元素分析による地球環境変動研究
 - 中性子生成核種分析による原子力施設環境モニタリングや被ばく線量計測
- 等、多くの環境・エネルギー問題に対応した研究が行われている。図 3 に測定対象試料例を示す。

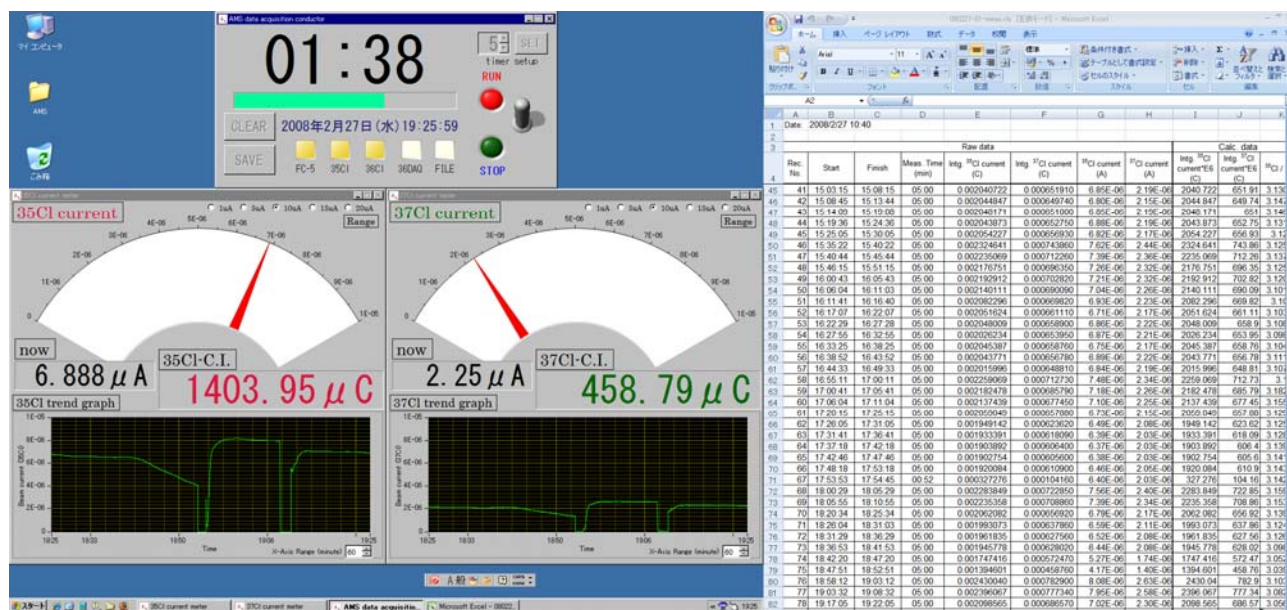


図 1. AMS_DAC 使用中の表示

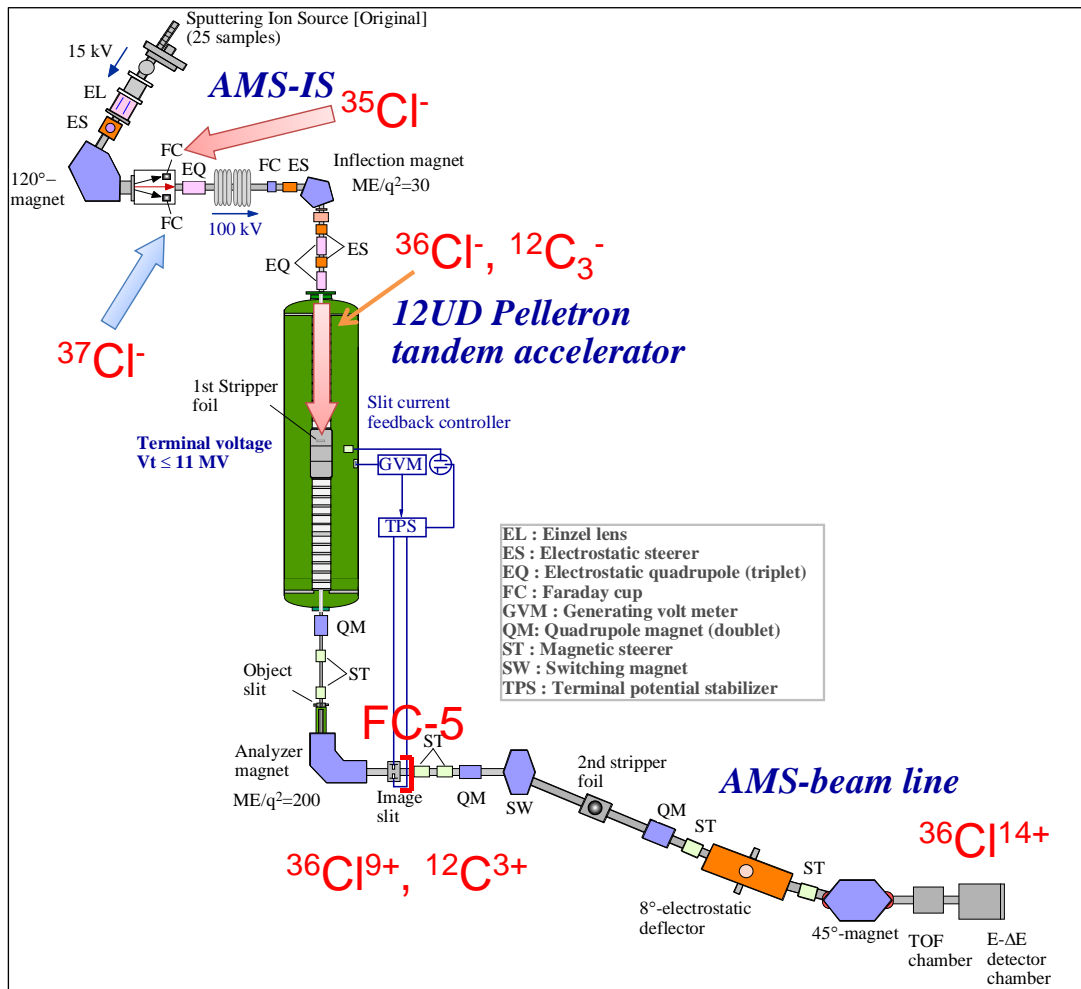


図 2. 筑波大学 AMS システム全体図



図 3. AMS 測定対象試料の例

3. 電流積分計

^{36}Cl と ^{35}Cl の比を正確に求めるためには高精度・高分解能なイオン電流の計測が必要である。図2の左上に示すように ^{35}Cl , ^{37}Cl の電流計測はファラデーカップ (以下、FC) により行っている。また、 ^{35}Cl , ^{37}Cl の FC は図2左上の AMS-IS (AMS イオン源) の 100 kV 高電圧架台上に設置されている。

^{35}Cl 用の旧電流積分計 (Current Integrator) は図4の様な装置で1秒間に電荷が貯まった分を機械的に計数器がカウントアップするものであった。部品の劣化や温度変化による変動等で積分値の信頼性が低下していたため新しい物への置き換えが検討された。

まず、本部門で一般的に使われているハードウェアの電流積分計 (ORTEC 社 439 Digital Current Integrator、以下 ORTEC439) を設置してテストしたところ、前段加速電圧、引き出しレンズ等が何らかの理由で放電し、そのショックで故障や動作不良が起こってしまった。そのため、図5左下の様なエレクトロメータ (以下、ピコアンメータ) を利用して、このアナログ電圧出力を E/O, O/E 変換の後、BNC ケーブルで9階イオン源室から2階制御室まで持って行き、2階制御室に設置した ORTEC439 に入力しカウンターとペアにして ^{35}Cl の電流積分計として利用してきた。しかし、ピコアンメータのアナログ電圧出力の精度の問題、アナログ信号の長距離配線によるノイズの問題などがあった。また、ORTEC439 の積分値の記録、カウンターリセットやスタート/ストップは人間がやらなければならない全システムのスタート/ストップの同期、自動記録による省力化が望まれた。

そこで、図5中央のピコアンメータ ADVANTEST R8340A が ^{35}Cl を、図5左下のピコアンメータ ADVANTEST R8240 が ^{37}Cl の電流計測をするようにアサインし直し 100 kV 高電圧架台上でデジタル変換して2階制御室で利用できるように方法を検討した。ピコアンメータは、共に分解能は5桁 ($20\mu\text{A}$ レンジで 1nA) で R8340A が 100 サンプル/秒、R8240 が 25 サンプル/秒の違いがある。

この2台のピコアンメータには GP-IB I/F が付いており、これを LAN から読み出す安価な方法として図6の右端の CONTEC 社 GPIB 通信メディアコンバータ RP-GPIB(FIT)GY¹ を使用して Ethernet に変換することにした。さらにイオン源の高電圧絶縁のため劣悪環境での信頼性が高い SIXNET 社 工業用スイッチングハブ・メディアコンバータ ET-GT-9ES-2SC² を使用して Ethernet - 光 - Ethernet 変換して LAN 接続している。

LAN に接続した PC のソフトウェアにより ^{35}Cl , ^{37}Cl のリアルタイム電流計測を行い、平均電流値を1秒ごとに加算しソフトウェア電流積分計とした。



図4. 旧電流積分計



図5. 電流積分のためのピコアンメータ

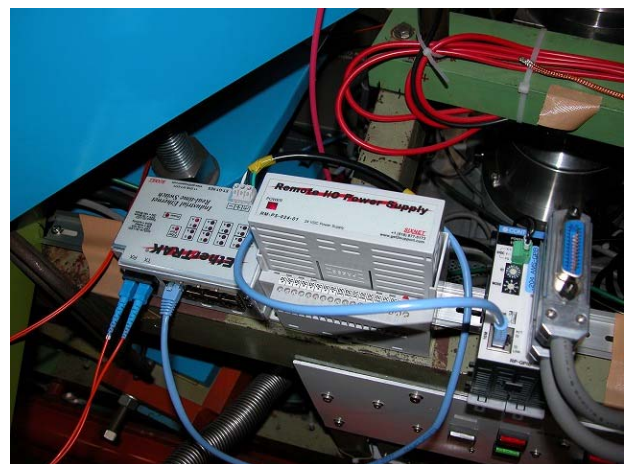


図6. GP-IB/Ethernet/光/Ethernet 変換

¹ <http://www.contec.co.jp/product/device/fit/page12.htm>

² <http://mtlkk.com/sixnet1.htm>

4. ソフトウェア開発

AMS システム全体の指揮者のようなソフトウェアとなったので AMS data acquisition conductor (AMS_DAC)と命名した。

4.1 開発環境

- [PC] Dell PC ワークステーション Precision 390 (Intel Core 2 Duo E6700 2.66GHz、3GB メモリ、250GB SATA RAID1、NVIDIA Quadro FX 3450)
- [OS] Microsoft Windows XP Professional Service Pack 3
- [開発言語] Microsoft Visual C# (Microsoft Visual Studio 2005 Service Pack 1)
- [メータ・トレンドグラフ・スイッチ類の GUI] National Instruments Measurement Studio 8.1.2 for Visual Studio 2005

を用いて開発した。筆者はこれまで Win32API を使用したプログラムを C 言語で作成した際には GUI の作成に苦労してきたが、この環境では非常に簡単に GUI の作成ができて効率良く開発が進められた。また、ハイスペックなハードウェアのおかげでプログラムのビルド速度も速く、出来上がったソフトウェアの実行速度もリアルタイム OS を用いなくても問題なく実利用可能であった。

4.2 AMS_DAC の概要

ダブルクリックによる起動と同時に図 1 左側の様な 3 枚の Window を表示し、図 1 右側の様に Excel2007 をデータ挿入用テンプレートファイル (Template_of_AMS_DAC.xlt) を読み込んだ状態で起動する。実際の画面は、図 7 左側の様に液晶モニター 2 枚で運用しており、19 インチ横置きにコントロール部を 19 インチワイド縦置きの方に Excel2007 を表示させている。

^{35}Cl と ^{37}Cl の電流平均値はピコアンメータの GP-IB I/F より RP-GPIB(FIT)GY を介して、PC に読み込んでいる。電流値の読み込みに関しては、.NET Framework 2.0 以降に実装された BackgroundWorker コンポーネントを用いた別スレッドで実行している。これは [RUN] [STOP] スイッチなどユーザーインタフェースのレスポンスを上げるためである。

読み込んだ電流値をアナログメータとデジタルメータに 100 ms 毎に表示し、トレンドグラフに変動を 1 s 毎にプロットする。Visual Studio 2005 の Timer コンポーネントの精度は 55ms^3 であるが、必要な時間精度が 1 s 以内程度なので本ソフトウェアでは Timer コンポーネントを多用している。

[RUN] スイッチを押すことにより、データ収集システムのスタート、FC-5 (図 2 下部) を OPEN し、ビームを測定室に出し、 ^{35}Cl , ^{37}Cl の電流積分の開始を同時に行う。その後は計測を続け減算タイマーとプログレスバーを表示して、設定時間になると自動停止する。

データは Excel2007 とリアルタイムに連動し、[RUN] [STOP] スイッチによってセルに自動挿入される。

また、1 秒毎の ^{35}Cl , ^{37}Cl の瞬時値、積分値も 1RUN ずつ csv ファイル 1 ファイルに別途保存している。

[RUN] 時、[STOP] 時に美しいサウンドを発生し、自動停止 5 秒前から日本語音声でカウントダウンを読み上げる機能も本システムの特徴である。



図 7. AMS_DAC を使用した実験風景

4.3 画面設計

図 1 左側の様に極力シンプルなデザインで必要最小限の表示を心掛けて設計した。Measurement Studio のおかげで非常に簡単にアナログメータやトレンドグラフの実装ができた。トグルスイッチに影まで付いている点にユーザーが感心していた。

4.4 ピコアンメータのデータ取得

「3. 電流積分計」で示したようにピコアンメータの電流値は CONTEC 社の RP-GPIB(FIT)GY を用いて LAN 経由で PC に取り込んでいる。しかし、RP-GPIB(FIT)用ドライバは、API-RPGPIB(W32)という API 関数ライブラリから利用するが、C#用のサンプルファイル等が提供されておらず、アンマネージ DLL(rpgpib1.DLL)のインポート等のための.cs は自作した。RP-GPIB(FIT)GY の C#からの利用に苦労したが、試行錯誤で R8340A, R8240 からのデータ取得に成功した。

テストを開始すると、単に電流を読み取り表示しているだけで 30 分くらいたつとフリーズするという現象が出た。これは CONTEC 社により 2008 年 8 月 19 日付けでリリースされた RP-GPIB(FIT)GY の Firmware Ver.1.11 で修正されるまでの不具合「受信コマンドでタイムアウト発生すると、初期化を行うまで正常受信できなくなる問題」のせいだった様であるが当時は Firmware のバグを知らなかったため応答が無くなったら強制的に初期化する様にして実運用した。

³ [http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/xy0zeach\(VS.80\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/xy0zeach(VS.80).aspx)

4.5 FC のリレー制御

FC-5 (図 2 下部) の開閉によって測定室へのビームの ON/OFF を行っている。[RUN]スイッチによって FC-5 が OPEN しビームが測定室に出る。設定収集時間になって自動終了した時、または手動で [STOP]スイッチを押した時には、FC-5 が CLOSE しビームが停止する。

この制御には、Interface社のDIO4/4 点メカニカルリレー(1c接点)/独立絶縁 12V-24V Low Profile PCIボード LPC-251100⁴ を使用した。こちらは、C#からの利用もすぐにできるようにドライバやサンプルが揃っていた。

安全のため接点を二重化し、緊急遮断スイッチもシリーズに設置した。

4.6 データ収集システムの遠隔制御

BASS データ収集システム⁵、新データ収集システム (UTTAC- DAQ)⁶ の遠隔制御は、UDPパケットを送る事で実現している。データ収集システムの [RUN] [STOP] [SAVE] [CLEAR] に対応するコマンド文字列をAMS_DACの対応ボタンを押すことで送信され、全システムと同期している。

4.7 Excel への自動データ入力

最終的に人が Excel にデータ入力してデータ処理をするのであれば最初から Excel にリアルタイムでデータを入力してしまった方が単純な計算等もすぐ出来るし手っ取り早いであろうという発想から Excel をコントロールする仕様にした。

Visual StudioからExcelを制御するには、[Microsoft Excel Object Library]への参照を追加⁷する必要がある。これを行った後、usingディレクティブに

```
using System.Reflection;
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel; // Excel コントロール
```

を追加して Excel を自在にコントロールできる。

AMS_DAC では、データ挿入用テンプレートファイル (Template_of_AMS_DAC.xlt) を読み込んだ状態で Excel2007 を起動し、シートの作成日時を B1セルに挿入する。[RUN]スイッチによって記録 No.、開始時刻を各セルに挿入する。設定収集時間になって自動終了した時、または手動で[STOP]スイッチを押した時に、終了時刻、計測時間、³⁵Cl 積分値、³⁷Cl 積分値、³⁵Cl 瞬時値、³⁷Cl 瞬時値が各セルに自動挿入され、あらかじめ ³⁵Cl/³⁷Cl 等の計算式が入力されたセルにも結果が瞬時に表示される。領域を指定しグラフを表示しておけば比の変動もリアルタイムに確認できる。

ユーザーの利用時に起きた問題がある。AMS_DAC によりコントロールされている Excel のブックに RUN No.やターゲット No.、コメント等をユーザーが手入力している時に (すなわちセル内で

編集状態のカーソル時) 自動測定が終了してもデータが自動挿入できないという現象である。セル内編集していない時は、Form1.ActiveForm.Activate(); 等により Excel ヘデータ出力時に AMS_DAC Form1へ強制フォーカスすることが出来たが、セル内編集でだと未だにエラーになりこの点は解決できていない。現状、ユーザーに「終了間際には、セル内編集をしない」という嬉しくない制限付きでの運用をお願いしている。

4.8 raw データの csv ファイル保存

ユーザーから 1 秒毎の raw データも保存して欲しいとのリクエストで追加した。後で詳細解析する時にビーム変動等による統計誤差を正確に知る事が出来る様である。

1RUN 1 ファイル作成し、データの中身は「日にち,時刻,³⁵Cl 電流値,³⁵Cl 積分値,³⁷Cl 電流値,³⁷Cl 積分値」を 1 秒毎に追記して、1RUN 終了時に閉じている。(例: 20081212_173015(35,37Cl_rd).csv)

記録するデータ量が少ない上、バッファもあり、HDD も高速なため書き込み遅延等による問題は全く起きていない。

4.9 音声によるユーザー支援

著作権フリーの wav ファイルを使用し、実験開始時にベル音、終了 5 秒前から「ご、よん、さん、に、いち」と女声アナウンスがありゼロ時に終了サウンドを流すようにした。これは、実験グループが開始時、終了時以外に効率的に他の仕事出来るようにとの配慮と夜中に眠気を多少でも払拭できればとの配慮からの機能である。

4.10 フリーソフトウェアによる高速化

以下の 2 種類のフリーソフトウェアを用いて起動の高速化と定常動作の安定化に役立てた。

- .NET R-Tune⁸
.NET Framework 対応アプリケーションの起動を高速化する。
- PriorityShortcut⁹
プロセス優先度を設定しプログラムを実行するショートカットを作成する。Administrator アカウントであれば「リアルタイム」プロセスにも設定できる。

⁴ <http://www.interface.co.jp/catalog/prdc.asp?name=lpc-251100>

⁵ <http://www.tac.tsukuba.ac.jp/~hiromi/index.php?BASS>

⁶ <http://web.tac.tsukuba.ac.jp/~hiromi/index.php?UTTAC>

⁷ <http://support.microsoft.com/kb/302084/ja>

⁸ <http://software.hi-gain.org/software/netrtune/index.html>

⁹ <http://www.vector.co.jp/soft/win95/util/se411836.html>

5. まとめ

AMS_DAC が稼働するまでは、測定時に多くの人手が必要で長時間の実験での負担が大きかった。人手による操作は、それぞれの機器の測定開始動作をかけ声で始め、タイマーアラームの終了合図とともに停止、カメラによる現場計器の数値読み取り、データの記録などを行っていた。このため、時間的な誤差や入力ミスなどのヒューマンエラーもあったと思われる。さらに、旧型の電流積分計の動作不良などがあり、信頼できる電流積分値の収集が望まれていた。これらを全て解決し、全測定系の指揮者の存在となるソフトウェア AMS_DAC を開発し良好に稼働している。

AMS_DAC 導入により、なした事や従前の実験手法からの改良・改善点を以下に列記する。

- 時間を区切って測定できる機能により、同位体希釈法（量が既知の ^{35}Cl をエンリッチしたものをわざとキャリアーとして試料に加えて、 $^{35}\text{C}/^{37}\text{Cl}$ 比から元の塩素濃度を出す手法）による試料の天然 Cl 濃度定量が可能となった。
- サンプルの状態が悪かった場合でも、すべて連動している為、途中停止が可能。
- 人手が少なく済み、ヒューマンエラーが軽減。
- 電流積分値が電子情報として自動記録できる。
- トレンドグラフによるビームカレントログ機能によりこれまでペンレコーダーで記録していたものが不要となった。
- ソフトウェアスイッチで全計測システムが動作する為、誤差が少なくなった。
- 測定データの信頼性が向上した。
- 効率化による総実験時間の短縮。

謝辞

報告書執筆に当たりご助言、ご協力を頂きました数理物質科学研究科 物理学専攻 笹公和 講師、データ収集システムを遠隔制御対応にくださった応用加速器部門技術専門職員 木村博美氏に感謝いたします。

参考文献・参考 Web site

- [1] 高橋努, 塩素 36-AMS システムの改良 "硫黄 36 妨害粒子の除去について", 第 2 回技術発表会報告集 (2007) 74-79.
- [2] 笹公和, 加速器質量分析法 (AMS) による元素分析, 文部科学省-筑波大学先端研究施設共用イノベーション創出事業【産業戦略利用】セミナー講演資料 (2008).
<http://web2.tac.tsukuba.ac.jp/innovation/files/05p.pdf>
- [3] 笹公和ほか, 筑波大学 AMS システムの現状と利用研究 (2007 年度), 第 10 回 AMS シンポジウム - AMS 次の 10 年 - プロシーディングス, 東京大学, (2008) 21.
- [4] 笹公和, 加速器を利用した学際研究の展開, 筑波フォーラム 第 79 号
<http://www.tsukuba.ac.jp/public/booklets/forum/forum79/forum79.html>
- [5] 長島泰夫, 関李紀, 笹公和, 高橋努, 大型タンデム静電加速器による加速器質量分析, 真空, 50 (2007) 475 .
http://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj/50/7/50_475/_article/-char/ja

Development of AMS Data Acquisition Conductor

Yoshihiro Yamato

Tandem Accelerator Complex, Research Facility Center for Science and Technology,
University of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577 Japan

Software called the "Accelerator Mass Spectrometry Data Acquisition Conductor (AMS_DAC)" was developed.

This resulted in the following improvements: reduction in necessary manpower, reduction of human error, improved reliability of measurement data and reduction in total experiment time due to increased efficiency. Experiments have progressed smoothly using this system.

Keywords: AMS; automatic control; current integrator; C#